

زیلیک و اسمیت

دانشگاه امام رضا  
استان قزوین

# نجوم و اختر فیزیک مقدماتی

جلد اول

ترجمه

دکتر جمشید قنبری - دکتر تقی عدالتی

ویراسته دکتر محسن سریشہ ای

زلیک و اسمیت

# نجوم و اختر فیزیک مقدماتی

جلد اول

فیزیک فضا

ترجمہ

دکتر جمشید قنبری۔ دکتر تقی عدالتی

Zeilik, Michael

زیلیک، میشل.

نجوم و اختر فیزیک مقدماتی / زیلیک، اسمیت؛ ترجمه جمشید قنبری، تقی عدالتی. - مشهد: آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا(ع)، ۱۳۷۶.

ج. ۱: مصور، نمودار، جدول - (آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا(ع)؛ ۵۹).

عنوان اصلی: Introductory, Astronomy & Astrophysics

واژه نامه.

کتابنامه.

۱. نجوم. ۲. فیزیک نجومی. الف. اسمیت، السک. Smith, Elske V. p.

ب. قنبری، جمشید، مترجم. ج. عدالتی، تقی، مترجم همکار. د. عنوان.

QB۴۳/۲

۵۲۰

ن ۸۸ ز

فهرست نویسی پیش از انتشار : مؤسسه چاپ و انتشارات با همکاری کتابخانه مرکزی آستان قدس رضوی



دانشگاه امام رضا

نجوم و اختر فیزیک مقدماتی ج ۱ (فیزیک فضا)

نام کتاب:

زیلیک و اسمیت

مؤلفان:

دکتر جمشید قنبری - دکتر تقی عدالتی

مترجمان:

دکتر محسن سریشی

ویراستار:

مریم افخمی

حروفچینی و صفحه آرایی:

دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۳۵/۵۵۳

ناشر:

۳۰۰۰ نسخه، وزیری

تیراژ:

چاپ اول ۱۳۷۶

تاریخ انتشار:

مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی

امور فنی و چاپ:

حق چاپ محفوظ است

توزیع: شرکت به نشر

دفتر مرکزی، مشهد: تلفن ۴۹۲۹۲، تهران: تلفن ۶۵۵۹۸۲

اصفهان: « ۶۷۳۶۷۶ »، تبریز: « ۶۷۳۰۸ »

## فهرست مندرجات

### قسمت اول: منظومه شمسی

۹	پیشگفتار مؤلف
	فصل اول: مکانیک سماوی و منظومه شمسی
۱۶	۱-۱ مبنای تاریخی
۲۴	۲-۱ مدارهای سیاره‌ای
۲۹	۳-۱ مکانیک نیوتونی
۳۶	۴-۱ قانون جهانی گرانش نیوتونی
۴۰	۵-۱ تعابیر فیزیکی قوانین کپلر
۴۸	۶-۱ کاربردهایی برای منظومه شمسی
۵۳	مسائل

### فصل دوم: منظومه شمسی در مریا

۵۶	۱-۲ محتویات منظومه شمسی
۸۰	۲-۲ سئوالات بدون پاسخ
۸۲	مسائل

### فصل سوم: دینامیک زمین

۸۵	۱-۳ زمان و فصول
----	-----------------

۹۴	۲-۳ دلائل چرخش زمین .....
۱۰۲	۳-۳ دلائل گردش زمین به دور خورشید .....
۱۰۸	۴-۳ نیروهای گرانشی جزئی .....
۱۲۰	مسائل .....

#### فصل چهارم: سیستم زمین - ماه

۱۲۴	۱-۴ ابعاد .....
۱۲۷	۲-۴ دینامیک .....
۱۳۳	۳-۴ درونها .....
۱۳۶	۴-۴ اشکال سطحی .....
۱۵۰	۵-۴ جوها .....
۱۵۸	۶-۴ میدانهای مغناطیسی .....
۱۶۶	۷-۴ تحول سیستم زمین - ماه .....
۱۷۰	مسائل .....

#### فصل پنجم: سیارات خاکی: عطارد، زهره و مریخ

۱۷۳	۱-۵ سیاره شناسی جدید .....
۱۷۴	۲-۵ عطارد .....
۱۸۵	۳-۵ زهره .....
۱۹۷	۴-۵ مریخ .....
۲۱۰	۵-۵ تحول مقایسه‌ای سیارات خاکی .....
۲۱۳	مسائل .....

#### فصل ششم: سیارات مشتری گون

۲۱	۱-۶ مشتری .....
۲۲۸	۲-۶ زحل .....
۲۳۴	۳-۶ اورانوس .....
۲۳۹	۴-۶ نپتون .....

۲۴۱	..... ۵-۶ پلوتو و چارون
۲۴۶	..... مسائل

### فصل هفتم: اجرام سماوی کوچک و منشاء منظومه شمسی

۲۴۸	..... ۱-۷ اتمار و حلقه‌ها
۲۷۷	..... ۲-۷ سیارکها
۲۸۰	..... ۳-۷ ستاره‌های دنباله‌دار
۲۸۶	..... ۴-۷ شهابهای آسمانی و شهاب‌سنگها
۲۹۲	..... ۵-۷ گاز و گرد و غبار بین سیاره‌ای
۲۹۵	..... ۶-۷ شکل‌گیری منظومه شمسی
۳۰۸	..... مسائل

### قسمت دوم: ستارگان

#### فصل هشتم: تابش الکترومغناطیسی و ماده

۳۱۶	..... ۱-۸ تابش الکترومغناطیسی
۳۲۸	..... ۲-۸ ساختار اتمی
۳۴۰	..... ۳-۸ طیفهای اتمها، یونها و ملکولها
۳۴۳	..... ۴-۸ شدتهای خط طیفی
۳۵۰	..... ۵-۸ پهن‌شدگی خط طیفی
۳۵۳	..... ۶-۸ تابش جسم سیاه
۳۵۹	..... مسائل

#### فصل نهم: تلسکوپها و آشکار سازها

۳۶۲	..... ۱-۹ تلسکوپهای نوری
۳۶۷	..... ۲-۹ ستاره‌شناسی نامرئی
۳۷۸	..... ۳-۹ آشکار سازها و فرآیند تصویر
۳۸۴	..... مسائل

فصل دهم: خورشید یک ستاره مدل

۳۸۷	.....	۱-۱۰ ساختار خورشید
۳۹۱	.....	۲-۱۰ شید سپهر
۳۹۹	.....	۳-۱۰ رنگین سپهر
۴۰۵	.....	۴-۱۰ تاج
۴۱۳	.....	۵-۱۰ باد خورشیدی
۴۱۵	.....	۶-۱۰ فعالیت خورشیدی
۴۲۳	.....	مسائل
۴۳۴	.....	اطلاعات جدید در مورد ستاره دنباله دار هالی
۴۳۸	.....	ضمیمه ها
۴۹۴	.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۵۱۷	.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۵۴۱	.....	فهرست راهنما

## پیشگفتار مؤلف

ستاره‌شناسی می‌تواند به دو روش مورد بررسی قرار گیرد: یکی به عنوان قدیمی‌ترین دانش مشاهده‌ای که درباره آسمان پرستاره بحث می‌کند؛ دیگری به عنوان جوانترین علم هنگامی که با اختر فیزیک نظری ترکیب می‌شود. ستاره‌شناسی و اختر فیزیک پهنه کیهان را می‌پوشاند - از سیارات نزدیک تا اختروش‌های دور قابل دسترس. در حقیقت، ستاره‌شناسی و اختر فیزیک در تمام ازمنه از آغاز جهان تا پایان ممکن را در بر می‌گیرد. بنابراین، ستاره‌شناسی هم کیهان و هم بشر را در زمان و همچنین در فضا در نظر می‌گیرد.

ما این کتاب را بدین منظور نوشته‌ایم که فهرست و دور نمایی از ستاره‌شناسی و اختر فیزیک جدید برای دانشجویان جدی علوم، باشد. منظور ما این است که با توجه به مطالب این کتاب یک دانشجوی کارشناسی علاقمند بتواند مهارت‌های ریاضی اساسی (مثلثات، جبر و حساب) را با دانش ابتدایی فیزیک، ترکیب کند. (فرض می‌کنیم، که این زمینه فیزیک مشتمل بر الکترومغناطیس و همچنین مکانیک باشد.) هدف دانشجوی ایده‌آل ما این است که با کاربرد ابزار فکری برای توسعه درک خود از محتویات و ساختار جهان استفاده کند. هدف ما از نوشتن کتاب حاضر این بوده است که برای این دانشجوی دانشجو عمیقی از ستاره‌شناسی جدید با پایه‌ای محکم در اختر فیزیک ایجاد نماییم. این تمایل نیاز به استفاده مداوم از مفاهیم فیزیکی که عناوین و موقعیت‌های نجومی را به دست می‌دهد، دارد.

این کتاب دستیابی سنتی خارج از زمین را دنبال می‌کند و دارای این فایده است که با مطالب آشنایی شروع می‌شود و به طرف موضوعات جالب توجه پیش می‌رود. این مطالب در کتاب حاضر به چهار قسمت تقسیم می‌شود: قسمت اول، منظومه شمسی؛ قسمت دوم، ستارگان؛ قسمت سوم، کهکشان راه شیری؛ و قسمت چهارم، جهان. محتویات قسمت اول شامل، معرفی بسیاری از مفاهیم فیزیکی اساسی بخصوص مکانیک که در سراسر کتاب به کار رفته است،



می‌باشد. همچنین، سیارات را به عنوان مکانهایی که از منشاء منظومه شمسی تحول یافته‌اند، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در قسمت دوم، مفاهیم اساسی مربوط به نور و احساس از راه دور درباره آن را توسط ستاره‌شناسان، معرفی می‌کنیم. سپس نور یک ستاره بخصوص، خورشید، که به عنوان مدلی برای ستارگان دیگر به کار می‌رود، را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در قسمت سوم، توده‌های موضعی ستارگانی را بررسی می‌کنیم - کهکشان راه شیری - که ساختار و تحول آن بر ستارگانی که کهکشان را می‌سازند، بسیار شدید است. کهکشان راه شیری نیز به عنوان مدلی برای سایر کهکشانها به کار می‌رود. سپس قسمت چهارم، به جهان دور دست برای بررسی محتویات و تحول آن در یک مقیاس بزرگ، بر می‌گردد.

به موازات به روز در آوردن مطالب برای مفیدتر ساختن آن به عنوان یک کتاب آموزشی، تغییرات اساسی در این چاپ اعمال شده است. بعضی از این تغییرات حاصل نتایج جدیدی است که در توسعه‌های اخیر در علوم حاصل شده است. در قسمت اول، تکنیک سیاره شناسی مقایسه‌ای را به عنوان تکنیکی برای رسیدن به تحول سیارات، مورد تأکید قرار می‌دهیم. هم چنین به طور آشکار سیارات را از نظر فیزیکی به گروههای سیارات خاکی و مشتری‌گون تقسیم کرده‌ایم. مواد اصلی منظومه شمسی به تعداد زیادی اجسام کوچک تقسیم شده‌اند، که این موضوع سررشته‌ای برای درک چگونگی تشکیل منظومه شمسی است. اکنون، قسمت دوم شامل یک فصل مختصری در مورد تلسکوپ و آشکار سازها می‌باشد، ولی از نظر تکنیکی بحثی نمی‌شود، و تأکید ما روی مقاصد مشاهدات است. همچنین سایر ستارگان را مستقیماً با خورشید مقایسه کرده‌ایم. قسمت سوم شامل فصل جدیدی است که تولد ستارگان را به محیط بین ستاره‌ای در موضوع تحول ستاره‌ای و ساختار کهکشان راه شیری بهم پیوند می‌دهد. قسمت چهارم، عمدتاً مواد جدیدی است که منعکس کننده رشد انفجار گونه نجوم برون کهکشانی در دهه گذشته می‌باشد.

سعی کرده‌ایم که مطالب این کتاب را بجای مباحث نجومی محض، به طور سازگاری بر اساس استدلالهای فیزیکی بسط دهیم. در پایان، تعداد و گستره مسائل انتهای هر فصل را زیاد کرده‌ایم. انتظار داریم که این مسائل، دانشجویان را به مبارزه طلبیده و درک آنها از مطالب هر فصل عمیق تر کند. بعضی از مسائل توسط آلان پی. مارشر<sup>۱</sup> از دانشگاه بوستون<sup>۲</sup> تهیه شده است. جزوه کمک

آموزشی این کتاب حل کاملی از مسائل انتهای هر فصل را ارائه می‌دهد.

کلامی راجع به واحدها. پس از بحث بین خودمان و همکاران، تصمیم گرفتیم که سنت نجومی را بشکنیم و از سیستم واحدهای SI به جای CGS استفاده کنیم. چرا؟ نخست، واحدهای SI، علی‌رغم چند مشکل، استاندارد بین‌المللی هستند؛ ما به عنوان معلمین این رشته باید آن را دنبال کنیم. دوم، بسیاری از دانشجویان یک دوره فیزیک گرفته یا خواهند گرفت که چنین واحدهایی برای آنها استاندارد هستند. امیدواریم که دنبال کردن این واحدها سبب سردرگمی کمتری شود. سوم، بعضی از معادلات - به طور مشخص در الکترومغناطیس - در فرمول بندی SI ساده‌تر هستند. مع‌ذالک، اقرار می‌کنیم که در بعضی از قسمت‌ها بجای واحدهای SI از واحدهایی که راحت‌تر بوده‌اند استفاده کرده‌ایم - نظیر جو برای فشار جوی - و از به کار بردن پارسک نمی‌توانیم اجتناب کنیم! ضمیمه ۶ اطلاعاتی برای کمک جهت تبدیلات بین واحدهای SI و CGS تهیه می‌کند. انتظار داریم که معلمین، این کتاب را برای یک دوره یکساله (دو ترم) و شاید با بعضی مطالب اضافی به کار ببرند. برای یک ترم، بهتر است انتخاب به عهده معلم گذاشته شود. گرچه، پیشنهاد می‌کنیم که فصول ۱ و ۸ به آن اضافه شود، زیرا آنها بسیاری از مفاهیم اساسی فیزیکی را در بر می‌گیرند. می‌خواهیم به طور مختصر ستاره‌شناسی و اختر فیزیک را تعریف کرده و اختلاف آنها را شرح دهیم. این مفاهیم، نظم‌های علمی‌ای هستند که ما در آنها داده‌های جهان قابل مشاهده را جمع‌آوری کرده و بهم ربط داده و تحلیل می‌کنیم. اساس ستاره‌شناسی بر مشاهدات آسمان بنا نهاده می‌شود، در صورتی که اختر فیزیک بیشتر نظری است و دانش به دست آمده در آزمایشگاه فیزیک را به پدیده‌های نجومی اعمال کرده و آنها را برون‌یابی می‌کند. اکثر ستاره‌شناسان اختر فیزیکدان نیز هستند و بالعکس. این دو رشته متفاوتند ولی هر دو درک عمیقی از جهان فیزیکی را ارائه می‌دهند. ستاره‌شناسی از مشاهدات شروع شده و به تعبیر این مشاهدات ختم می‌شود، در صورتی که اختر فیزیک یک چارچوب فیزیکی برای درک مشاهدات توسط طرح مدل‌های نظری، را تدارک می‌بیند. جایی که این دو رشته بهم می‌رسند بر پایه معلومات ما از کیهانی وسیع و جالب در دیده و افکارمان، اثر می‌گذارد.

همکاران ذیل ما را در تهیه کتاب حاضر کمک کرده‌اند: جک برنز<sup>۱</sup> از دانشگاه نیومکزیکو؛ تام

بالونک<sup>۱</sup> از دانشگاه کالگیت<sup>۲</sup>؛ ریچار دتسک<sup>۳</sup> از دانشگاه میشیگان؛ آمازوک<sup>۴</sup> از کالج پومونا<sup>۵</sup>؛ آلن مارشر، دانشگاه بوستون؛ جان کاون<sup>۶</sup>، دانشگاه اکلاهما<sup>۷</sup>؛ آلن بنتلی<sup>۸</sup>، کالج ایسترن مونتانتا<sup>۹</sup>؛ راجر شولیر<sup>۱۰</sup>، دانشگاه ویرجینیا<sup>۱۱</sup>؛ ویبل تیفت<sup>۱۲</sup>، دانشگاه آریزونا. به ویژه از همکاری دکتر کن سی. جاکبز<sup>۱۳</sup>، کالج هالیز<sup>۱۴</sup> که در چاپ اول کتاب و شرکت نامبرده در این چاپ که دیده خواهد شد تشکر می شود. از تایپ اونابیلی<sup>۱۵</sup> که مایه سرافرازی است، قدردانی می شود.

مؤلفین، مسئول هر گونه خطای احتمالی می باشند. لطفاً هر گونه نظری را که دارید به آدرس ذیل برای زیلیک ارسال کنید - با تشکر فراوان! تغییرات کوچکی می تواند در نشر بعدی صورت گیرد.

Michael Zeilik  
Dept. of physics & Astronomy  
University of New Mexico.  
Albuquerque, New Mexico 871131  
Elske V. p. Smith  
Virginia commonwealth University  
900 Park Avenue,  
Richmond, Virginia 23284

توجه کنید در زمانی که کتاب زیر چاپ بود، تصمیم گرفتیم که مطالب جدید مربوط به ستاره دنباله دار هالی را در انتهای فصول و قبل از ضمائم اضافه کنیم.

- |                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| 1. Tom Balonek.              | 2. Colgate Univ.     |
| 3. Richard Teske.            | 4. Alma Zook.        |
| 5. Pomona College.           | 6. John Cowan.       |
| 7. Univ. of Oklahoma.        | 8. Alan Bentley.     |
| 9. Eastern Montanta College. | 10. Roger Chevalier. |
| 11. Univ. of Virginia.       | 12. Bill Tifft.      |
| 13. Ken C. Jacobs.           | 14. Hollins College. |
| 15. Ona Bailey.              |                      |

قسمت اوّل

---

منظومہ شمسى

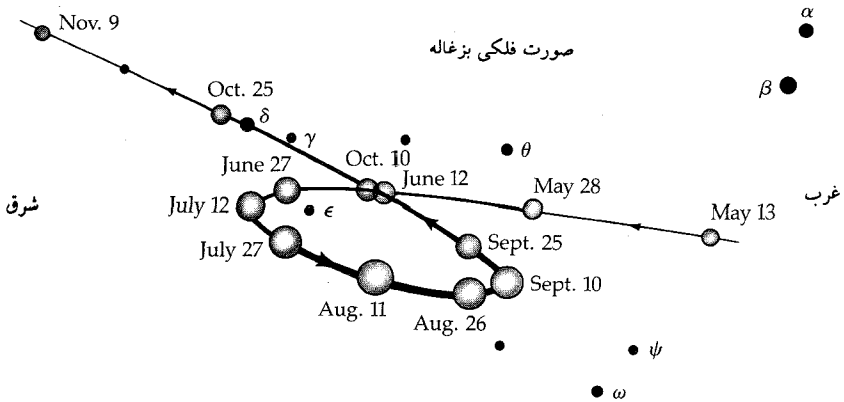
---

## مکانیک سماوی و منظومه شمسی

اگر از زمین نگاه کنیم، خورشید نسبت به ستارگان منطقه البروج<sup>۱</sup> در مدت زمانی که سیارات گردش تناوبی خود را در منطقه البروج انجام می‌دهند، در طی سفر سالانه خود به طرف مشرق حرکت می‌کند. سیارات، بر اساس حرکات مشاهده شده‌شان به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، شامل عطارد و زهره، می‌توانند به سمت شرق خورشید حرکت کنند و با بالا و بالاتر ظاهر شدن در قسمت غربی آسمان در هنگام غروب خورشید به عنوان ستاره شامگاهی شناخته می‌شوند. در بزرگترین زاویه کشیدگی<sup>۲</sup> شرقی، سیاره بیشترین فاصله زاویه‌ای در شرق خورشید را داراست و سپس همچنانکه به سمت خورشید می‌رود، در هنگام غروب آفتاب به افق غربی نزدیکتر می‌شود. سیاره با حرکت به طرف غرب خورشید به عنوان ستاره صبحگاهی در غرب آسمان طلوع می‌کند.

گروه دوم که با چشم غیر مسلح قابل رؤیت هستند شامل مریخ، مشتری و زحل

می‌باشد. این سیارات نسبت به ستارگان مرتباً رو به شرق حرکت می‌کنند تا این که به حالت مقابله<sup>۱</sup> -  $180^\circ$  نسبت به خورشید برسند. سپس در یک توقف کوتاه یک حلقه برگشتی را بسمت غرب طی می‌کنند و سرانجام مسیر رو به شرق خود را دنبال می‌نمایند (شکل ۱-۱). این نوع پدیده‌ها، ستاره‌شناسان قدیم را مجذوب و در عین حال ناامید نمود. در این فصل به اختصار کوششهای تاریخی که برای تشریح این حرکت‌های سیاره‌ای انجام شده است، مورد بحث قرار می‌گیرد. تلاشهایی که فیزیک و اخترفیزیک را بوجود آورد و در ایجاد مکانیک سماوی توسط ایزاک نیوتون<sup>۲</sup> در قرن هفدهم به حد اعلیٰ خود رسید.



شکل ۱-۱. حرکت برگشتی مریخ. مسیر سیاره نسبت به ستارگان صورت فلکی بزغاله<sup>۳</sup> نشان داده شده است. ستارگان به ترتیب روشنایی‌شان توسط حروف یونانی علامت‌گذاری شده‌اند. دایره‌های توخالی، روشنایی نسبی سیاره را نشان می‌دهند؛ توجه کنید که سیاره مریخ در ۱۱ آگوست ۱۹۸۷ میلادی روشن‌ترین حالت را داشته است.

## ۱-۱ مبنای تاریخی

(الف) مدل خورشید مرکزی کپرنیک

در قرن شانزدهم، نیکولا کپرنیک<sup>۴</sup> ستاره‌شناس لهستانی با مدل زمین مرکزی منظومه شمسی که در آن زمان رایج بود، مخالفت کرد و مدل نوینی بنام مدل خورشید

1. Opposition  
3. capricornus

2. Isacc Newton  
4. Nicholas copernic

مرکزی را مطرح نمود. این مدل پایه و اساس آنچه را که امروزه مورد استفاده قرار می‌دهیم، تشکیل می‌دهد. کپرنیک خورشید را در مرکز منظومه شمسی و سیارات (شامل زمین) را بر روی دایره‌ای در حال گردش به دور آن در نظر گرفت. پذیرفتن مدل خورشید مرکزی به کندی صورت گرفت، زیرا پیشگوییهای آن از مدل زمین مرکزی چندان بهتر نبود، اما مآلاً به دلیل سادگی و هماهنگی مورد پذیرش قرار گرفت.

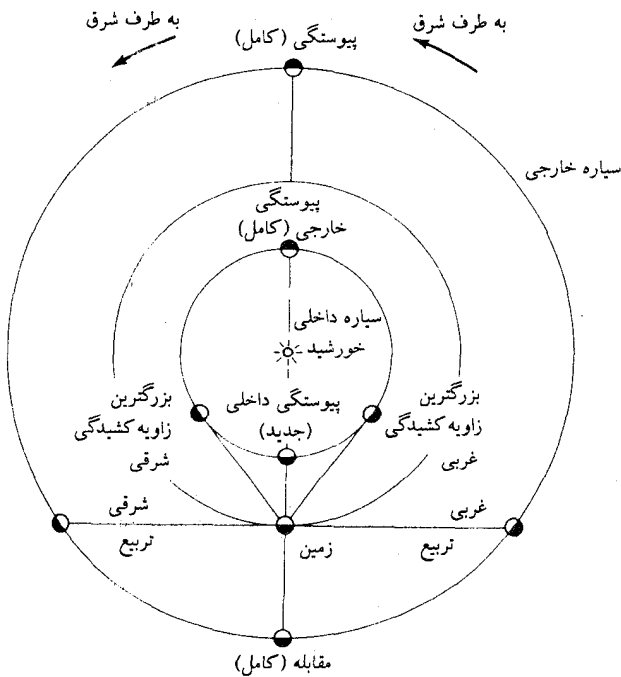
برای درک بهتر اهداف مدل کپرنیک، ابتدا به سابقه کمی در زمینه رصد خورشید، ماه و سیارات با چشم غیر مسلح احتیاج است. این زمینه قبلی با وجودی که معمولاً بر اساس مرکزیت زمین می‌باشد، در عین حال سودمند است. روزانه آسمان نسبت به افق به طرف غرب می‌چرخد. به نظر می‌رسد که خورشید نسبت به ستارگان به سمت مشرق حرکت می‌کند و در یکسال آسمان را دور می‌زند. مسیر مجازی طی شده توسط خورشید دایره البروج<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که در پشت سر آن، رشته مخصوص صورتهای فلکی دوازده‌گانه منطقه البروج قرار دارند. سیارات (و خورشید و ماه) نسبت به ستارگان در داخل نوار منطقه البروج حرکت می‌کنند. در مدل خورشید مرکزی در فاصله‌ای از خورشید، سیارات به ترتیب از عطارد (نزدیکترین) تا زهره، زمین، مریخ، مشتری، زحل، اورانوس، نپتون و نهایتاً پلوتو (دورترین) واقع شده‌اند. سیاراتی که از زمین به خورشید نزدیکترند سیارات داخلی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. عطارد و زهره در این دسته از سیارات قرار دارند. سیاراتی که از خورشید نسبت به زمین در فاصله دورتری واقع‌اند، سیارات خارجی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. این سیارات، سیارات مریخ تا پلوتو می‌باشند. حرکات سیارات داخلی آنگونه که در آسمان شب مشاهده می‌شوند با حرکات سیارات خارجی کاملاً متفاوت هستند.

زاویه دید بین راستای زمین تا مرکز خورشید و راستای زمین تا سیاره از نظر ناظر زمینی را زاویه کشیدگی تعریف می‌کنیم. بر حسب اینکه سیاره از نظر ناظر زمینی در شرق یا غرب خورشید واقع شده باشد زاویه کشیدگی شرقی یا غربی نامیده می‌شود. به زوایای کشیدگی ویژه زمین مرکزی، نامهای بخصوصی داده می‌شود: زاویه کشیدگی

1. ecliptic  
3. superior planets

2. inferior planets

صفر درجه را اتصال یا پیوستگی می نامند (پیوستگی داخلی موقعی رخ می دهد که سیاره بین زمین و خورشید قرار گیرد و پیوستگی خارجی وقتی است که سیاره در طرف مخالف خورشید نسبت به زمین واقع شود). زاویه کشیدگی  $180^\circ$  را مقابله و یکی



شکل ۱-۲. اشکال سیاره‌ای خورشید مرکزی. پیکانها جهت حرکت مداری و همچنین جهت چرخش زمین را مشخص می کنند.

از  $90^\circ$  ها را تربیع<sup>۱</sup> می نامند. هنگامی که یک سیاره داخلی حداکثر زاویه کشیدگی را پیدا کند، آن را بزرگترین زاویه کشیدگی می نامیم. تنها سیارات داخلی ممکن است در موقعیت پیوستگی داخلی یا بزرگترین زاویه کشیدگی ( $28^\circ$  برای عطارد و  $48^\circ$  برای زهره) قرار گیرند، اما هیچگاه در موقعیت تربیع یا مقابله واقع نمی شوند. برای سیارات خارجی، پیوستگی داخلی هرگز رخ نمی دهد و بزرگترین زاویه کشیدگی آنها  $180^\circ$



می باشد (هنگامی که آنها در حالت مقابله هستند). توجه داشته باشید که ماه به علت این که قمر زمین است امکان عبور از پیوستگی داخلی، تریب و مقابله (بزرگترین زاویه کشیدگی) را دارد. کپرنیک به طرز صحیحی توضیح داد، هر چه سیاره در فاصله دورتری از خورشید قرار داشته باشد آهسته تر به دور خورشید حرکت می کند. هنگامی که زمین و سیاره ای دیگر در یک طرف خورشید از یکدیگر عبور می کنند، حلقه برگشتی ظاهری (شکل (۱-۳)) به علت حرکات نسبی سیاره دیگر و زمین رخ می دهد. همان طور که سیاره در حال حرکت را از زمین نگاه می کنیم، خط دید ما حرکت زاویه ای آن را معکوس می گرداند و چون مدارهای دو سیاره در یک صفحه قرار ندارند، حلقه مسدود می شود.

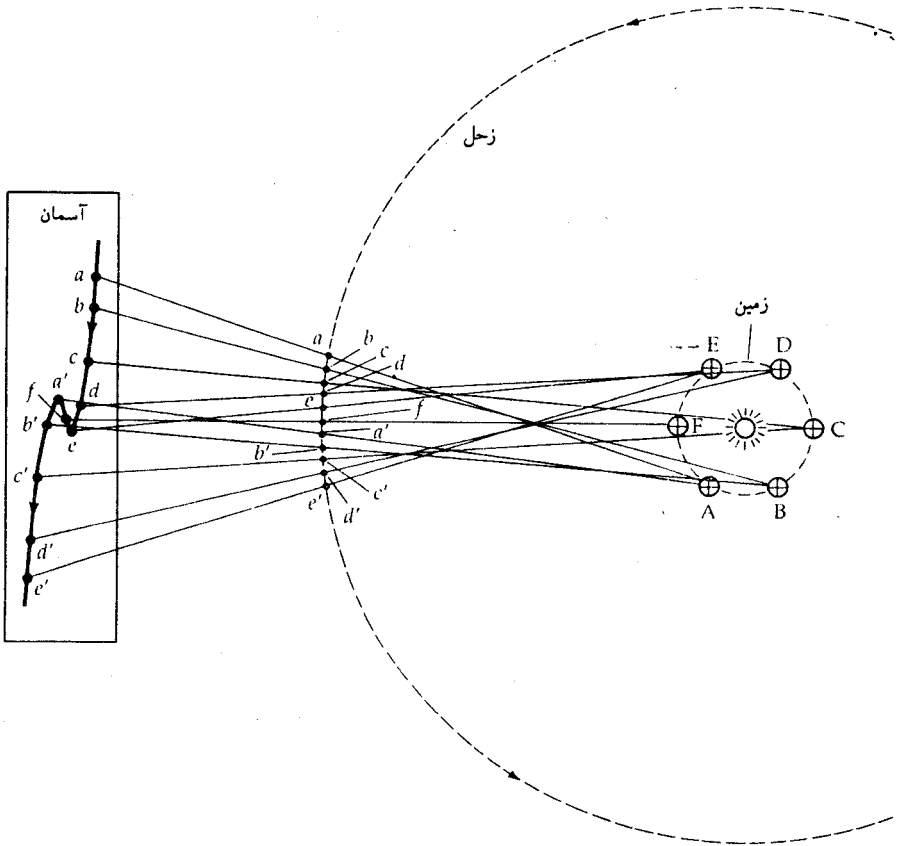
کپرنیک در مدل خورشید مرکزی خود رابطه ای بین دوره های تناوب هلالی و نجومی یک سیاره بدست آورد. دوره تناوب هلالی  $S$ ، مدت زمانی است که از نظر ناظر روی زمین سیاره به موضع اولیه اش در آسمان نسبت به خورشید بر می گردد. برای سیارات داخلی، عطارد و زهره، این زمان مدت بین دو عبور متوالی سیاره از نقاط پیوستگی داخلی می باشد. برای سیارات خارجی، دوره تناوب هلالی زمان بین دو عبور متوالی از مقابله است. دوره تناوب نجومی  $P$ ، مدت زمانی است که سیاره مداری را به دور خورشید نسبت به ستارگان طی می کند (شکل (۱-۴)). دوره تناوب نجومی زمین،  $E$ ، برابر  $365/26$  روز است. زمین با آهنگ  $\frac{360}{E}$  در روز در مدارش حرکت می کند، در صورتی که آهنگ حرکت زاویه ای یک سیاره همان طور که از زمین رؤیت می شود مساوی  $\frac{360}{P}$  می باشد. برای یک سیاره خارجی، زمین یک دور کامل را طی می کند و به علاوه باید زاویه  $S(\frac{360}{P})$  را در مدت  $S - E$  برای بازگشت سیاره خارجی به حالت مقابله ببیند. بنابراین

$$(S-E) \left( \frac{360}{E} \right) = S \left( \frac{360}{P} \right)$$

یا

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{P}$$

برای یک سیاره داخلی، زمین یک سیاره خارجی است. بنابراین، برای رسیدن به نتیجه کپرنیک  $E$  و  $P$  را با یکدیگر تعویض می کنیم



شکل ۱-۳. حرکت برگشتی در مدل خورشید مرکزی. همانطور که زمین از یک سیاره خارجی عبور می‌کند، به نظر می‌رسد که سیاره در سمت مخالف جهت عادی شرقی‌اش نسبت به ستارگان در حال حرکت است. در اینجا، زمین از زحل، در نقطه f که وسط حرکت برگشتی را نشان می‌دهد، عبور می‌کند.

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{E} \quad \text{سیارات داخلی}$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{P} \quad \text{سیارات خارجی}$$

به عنوان مثال، زهره را که یک سیاره داخلی با دوره تناوب هلالی  $S = 583/92$  روز است، در نظر بگیرید. رابطه مناسب عبارت است از:

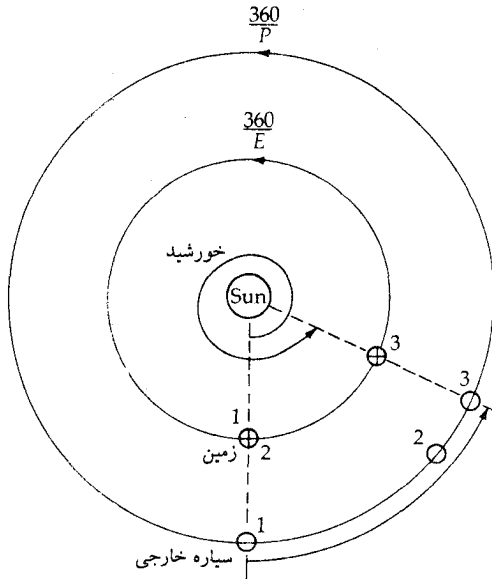
$$\frac{1}{583/92} = \frac{1}{P} - \frac{1}{365/26}$$

$$\frac{1}{P} = 0/0171 + 0/00274 = 0/00445$$

$$P = 224/7 \text{ روز}$$

مشاهدات تلسکوپی گزارش شده توسط گالیله<sup>۱</sup> در سال ۱۶۱۰ میلادی قویاً مدل خورشید مرکزی را برای منظومه شمسی تأیید کرد. ترسیم‌های وی از سطح چین خورده ماه و لکه‌های خورشیدی متحرک بر روی سطح خورشید، اعتقاد قدیمی بی‌عیب بودن و تغییر ناپذیری آسمانها را سست نمود. گالیله همچنین چهار قمر از بزرگترین اقمار مشتری را کشف کرد و نشان داد که آنها به دور مشتری می‌گردند نه به دور زمین. این شکاف در نظریه زمین مرکزی، با کشف اهله زهره توسط گالیله تبدیل به رخنه جبران ناپذیری شد.

نورافشانی ماه و سیارات تنها به دلیل انعکاس نور خورشید از روی آنهاست. همواره نیمی از سیاره که در معرض نور خورشید قرار دارد روشن است در حالیکه نیمه دیگر آن تاریک می‌باشد. بخشی از نیم‌کره که توسط نور خورشید روشن گردیده است با تغییراتی در هیأت و شکل آن از زمین قابل رؤیت است. بنابراین، شکل جدید برای سیاره موقعی پیش می‌آید که ما تنها نیم‌کره تاریک را مشاهده کنیم (در پیوستگی داخلی برای ماه، عطارد و زهره)، و موقعی که نیم‌کره روشن از نور خورشید در چشم‌انداز ما وارد شود، شکل کامل در نقطه مقابل قرار می‌گیرد. سیارات خارجی هرگز نمی‌توانند هلالی شکل دیده شوند (هنگامی که کمتر از نیمی از نیم‌کره قابل مشاهده از نور خورشید روشن گردیده باشد) و تقریباً همیشه محدب<sup>۲</sup> شکل می‌باشند (موقعی که بیشتر از نصف سیاره به توسط نور خورشید روشن شده باشد). گالیله مشاهده کرد که سیاره زهره همه اشکال را از خود نشان می‌دهد - بنابراین، نتیجه‌گیری کرد که، زهره باید به دور خورشید به گردد. این مشاهده مستقیماً مدل کپرنیک را تأیید کرد.



شکل ۱-۴. دوره‌های تناوب هلالی و نجومی در مدل خورشید مرکزی. همچنانکه زمین خورشید را با تندی زاویه‌ای  $\frac{360}{E}$  درجه در هر روز دور می‌زند، یک سیاره خارجی  $\frac{360}{P}$  درجه در روز طی می‌کند (اگر از خورشید مشاهده شود). زمین پس از یک دور حرکت از موضع ۱ به موضع ۲ می‌رود و S-E روز طول می‌کشد تا به حالت مقابله بعدی برسد (در موضع ۳). در خلال این مدت سیاره خارجی از موضع ۱ به موضع ۳ حرکت کرده است.

### (ب) روشهای کپلری

یوهانس کپلر<sup>۱</sup> با استفاده از مدل خورشید مرکزی کپرنیک و مشاهدات توأم با رنج و زحمت تیکو براهه<sup>۲</sup> که حدود ۲۰ سال به طول انجامیده بود به ضرورت وجود مدارهای سیاره‌ای بیضی شکل پی برد (بخش (۱-۲)). وی در سالهای ۱۶۰۹ و ۱۶۱۹ میلادی سه قانون تجربی خود را پیرامون حرکت سیاره‌ای چاپ کرد. این قوانین زمینه را برای نقشه عظیم نیوتون تحت عنوان گرانش، آماده نمود.

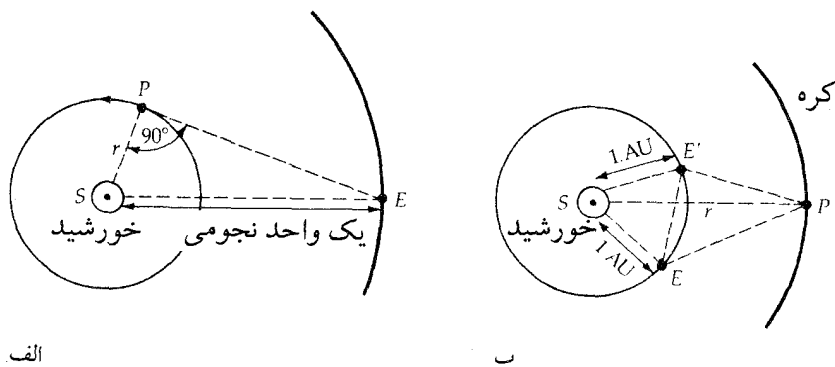
حال روشهای کپلری برای تعیین فواصل سیارات را بررسی می‌کنیم. فاصله خورشید

1. Yohannes Kepler.

2. Ticho Brahe

تا زمین - واحد نجومی (AU)<sup>۱</sup> - را به عنوان واحد فاصله به کار می‌بریم.

فاصله خورشید - سیاره  $r$  (به واحد نجومی) ممکن است موقعی که یک سیاره داخلی به بزرگترین کشیدگی (شکل (۱-۵) الف)) می‌رسد، پیدا گردد. زاویه SEP (آن را  $\alpha$  بنامید) مشاهده شده است و زاویه EPS،  $90^\circ$  می‌باشد، بنابراین طبق روابط مثلثاتی



شکل ۱-۵. تعیین فاصله در یک مدل خورشید مرکزی. (الف) هنگامی که یک سیاره داخلی به بزرگترین کشیدگی (P) می‌رسد، زاویه SEP را می‌دانیم و می‌توانیم  $r$  را پیدا کنیم، زیرا زاویه SPE یک زاویه قائمه است. (ب) یک سیاره خارجی در آغاز و پایان یک دوره تناوب نجومی در نقطه P، و زمین در این دو زمان در نقاط E و E' قرار گرفته است. زوایای PES و PÉS که کشیدگیهای سیاره از خورشید می‌باشند، مشاهده شده‌اند.

داریم  $r = \sin \alpha$ . (این روش اولین بار توسط کپرنیک به کار برده شد.)

روش کپلری برای یافتن فاصله یک سیاره خارجی از روش اول پیچیده‌تر است (شکل (۱-۵) ب)). سیاره در آغاز و انتهای یک دوره تناوب نجومی در P است، و زمین در این دو زمان در E و E' می‌باشد. دقت کنید که کافی است نقطه اختیاری P روی مدار سیاره قرار داشته باشد. چون دوره تناوب نجومی سیاره و همچنین زاویه ESÉ را می‌دانیم، باید زوایای PES و PÉS را مشاهده کنیم. مثلث ESÉ را می‌توان با استفاده از قانون کسینوسها و مثلثات حل کرد (ریاضیات ضمیمه) و به این ترتیب EE' و زوایای SEÉ و SÉE را به دست آورد. بنابراین، از تفاضل آنها، زوایای PEÉ و PÉE معلوم می‌شوند و در نتیجه قادر به حل مثلث EPÉ خواهیم بود. حال می‌توان با در

نظر گرفتن مثلث SEP یا SEP، r را به دست آورد. این فرآیند، روشی بود که اولین بار توسط کپلر برای مدار مریخ، جهت درک بیضی گون بودن مدار مزبور پی گیری شد. این مسأله شکست مهمی برای عقیده رایج مدارات دایره‌ای از دیدگاه علم نجوم بود.

## ۱-۲ مدارهای سیاره‌ای

(الف) سه قانون تجربی کپلر

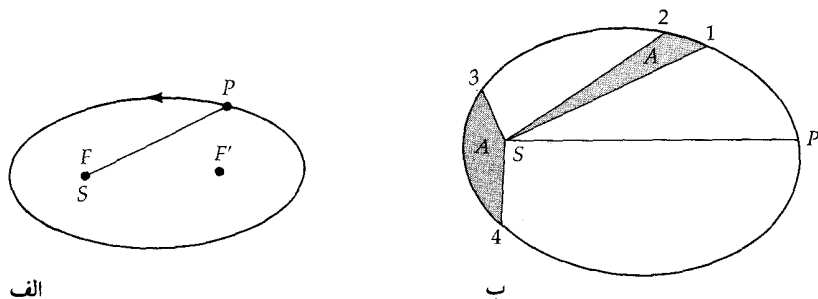
کپلر بیش از ۲۰ سال برای درک چگونگی مدارات سیاره‌ها زحمت کشید. او مدلهای زیادی برای شکل‌های مداری را - حتی بیضی شکل - امتحان نمود، ولی از همه آنها دست کشید. کپلر سرانجام نشان داد که صفحه مداری سیاره‌ها از خورشید می‌گذرد و کشف کرد که شکل مداری سیارات، به صورت بیضی است (بخش (۱-۲ ب)). این یافته‌ها تحت عنوان قانون اول کپلر در سال ۱۶۰۹ میلادی انتشار یافت - قانون بیضی‌ها: مدار هر سیاره به شکل یک بیضی است که خورشید در یکی از کانونهای آن قرار دارد (شکل (۱-۶ الف)).

وی روی سرعت‌های سیارات نیز تحقیق کرد و دریافت که هر چه سیاره در مدارش به خورشید نزدیکتر باشد، سریعتر حرکت می‌کند. با رسم یک خط مستقیم که خورشید و سیاره را به هم وصل می‌کند (شعاع حامل)، او توانست این واقعیت را در قانون دوم خود بیان کند - قانون مساحتها: شعاع حامل یک سیاره مساحت‌های مساوی را در زمانهای مساوی جاروب می‌کند (شکل (۱-۶ ب)).

کپلر ده سال دیگر برای جستجو و کاوش جهت هماهنگی بیشتر در حرکات سیارات متحمل زحمت گردید و در سال ۱۶۱۹ میلادی قانون سوم خود را ارائه داد - قانون دوره تناوب: مربع زمان تناوب حرکت سیارات با مکعب نصف قطر اطول (شعاع متوسط) مدار آنها متناسب است (شکل (۱-۶ ج)).

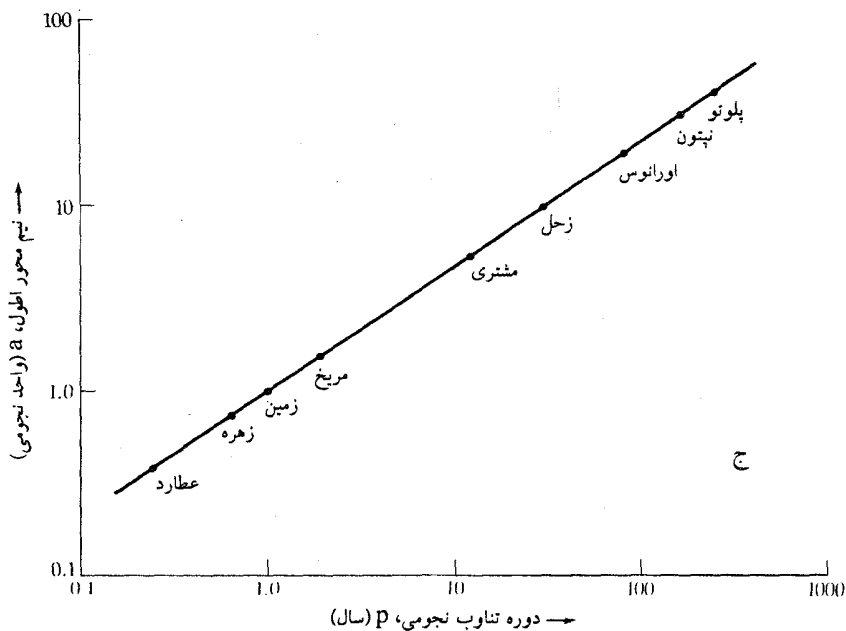
قانون سوم به شکل جبری  $P^2 = Ka^3$  نوشته می‌شود، که در آن P دوره تناوب نجومی سیاره و a فاصله متوسط آن از خورشید است (نصف قطر بزرگ یک مدار بیضی شکل)، ثابت K برای تمام اجرام در حال گردش به دور خورشید یکی است. در سال ۱۶۲۱ میلادی کپلر نشان داد چهار قمر مشتری که توسط گالیله کشف شده بودند از قانون

سوم (با مقدار متفاوتی از  $K$ ) تبعیت می‌کنند که تأییدی بر کاربرد وسیع آن می‌باشد.



الف

ب



ج

شکل ۱-۶. قوانین کپلری حرکت سیاره‌ای. (الف) هر سیاره (P) مداری بیضی شکل (E) را حول خورشید، که در یک کانون بیضی قرار دارد (F) طی می‌کند. (ب) دو فاصله زمانی مساوی ۱ تا ۲ و ۳ تا ۴ را در نظر می‌گیریم. شعاع حامل سیاره‌ای (SP) سطوح مشابه (A) را در خلال این زمانها جاروب می‌کند. (ج) برای تمام سیارات بزرگ، نمودار  $\log - \log$  نیم محور اطول (a) در مقابل دوره‌های تناوب نجومی (P) خیلی نزدیک به خط مستقیمی با شیب  $\frac{3}{2}$  می‌باشد که تأییدی بر قانون سوم کپلر است.

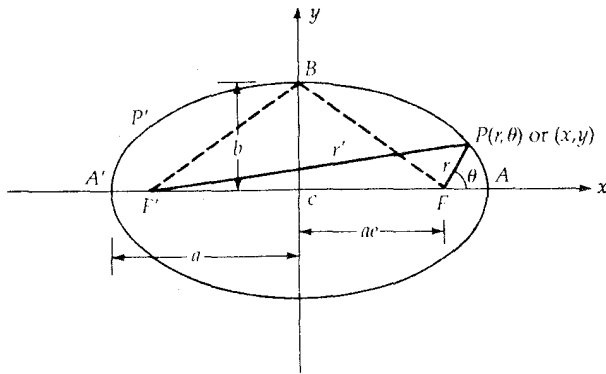
(ب) خواص هندسی مدارهای بیضی شکل

در ریاضیات بیضی مکان هندسی نقاطی است که مجموع فواصل هر نقطه از آن از دو نقطه ثابت به نام کانون مقداری ثابت باشد (شکل (۷-۱))، بنابراین

$$r + r' = 2a = \text{مقدار ثابت} \quad (1-1)$$

خط واصل بین دو کانون  $F$  و  $F'$  بیضی را در دو رأس  $A$  و  $A'$  قطع می‌کند. وقتی که  $r$  و  $r'$  در امتداد این خط واقع شوند  $a$  نصف فاصله بین دو رأس است و  $a$  نیم محور اطول بیضی نامیده می‌شود. شکل یک بیضی توسط خروج از مرکز آن  $e$  تعیین می‌شود، به این ترتیب که فاصله هر یک از کانونها تا مرکز بیضی  $ae$  می‌باشد. وقتی که  $e=0$  بیضی تبدیل به دایره می‌شود. نصف نیمساز عمودی محور اطول، نیم محور اقصی  $b$  است. با استفاده از خطوط خط‌چین ( $r = r' = a$ ) در شکل (۷-۱) و قضیه فیثاغورث داریم:

$$b^2 = a^2 - a^2 e^2 = a^2 (1 - e^2) \quad (2-1)$$



شکل ۷-۱. یک بیضی. ویژگیهای مهمی که در اینجا مشخص شده‌اند عبارتند از  $AF$  فاصله حضیض،  $A'F$  فاصله اوج،  $a$  نیم محور اطول،  $b$  نیم محور اقصی و  $C$  مرکز.



قانون اول کپلر خورشید را در کانون F قرار می دهد. رأس A، نقطه حقیض<sup>۱</sup> مدار (نزدیکترین نقطه به خورشید) و رأس A'، نقطه اوج<sup>۲</sup> (دورترین نقطه از خورشید) نامیده می شوند. فاصله نقطه حقیض AF، برابر است با  $a(1 - e)$  و فاصله نقطه اوج A'F، مساوی  $a(1 + e)$  می باشد. در مدار بیضی شکل، متوسط فاصله یک سیاره از خورشید همان نیم محور اطول a است. این واقعیت را با توجه به این که برای هر نقطه P واقع بر بیضی در فاصله r از کانون F، یک نقطه متقارن P' در فاصله r' از کانون F وجود دارد، ثابت می کنیم، میانگین این فواصل  $a = \frac{r+r'}{2}$  می باشد. این نتیجه برای هر دو نقطه دلخواه، اما متقارن نیز صادق است.

خیلی خوب است که فاصله هر نقطه روی بیضی را از یک کانون (مانند فاصله خورشید تا سیاره یا سیاره تا ماهواره) به صورت تابعی از موقعیت آن نقطه بدانیم. مبدأ یک سیستم مختصات قطبی  $(r, \theta)$  در F قرار می دهیم و خط FA را به عنوان  $\theta = 0$  انتخاب می کنیم. در این صورت r فاصله FP و  $\theta$  - انومالی حقیقی - زاویه AFP در خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت را اندازه می گیرند. با استفاده از  $\cos(\pi - \theta) = -\cos \theta$  و قانون کسینوسها، داریم

$$r'^2 = r^2 + (2ae)^2 + 2r(2ae) \cos \theta$$

با جایگزاری r از معادله (۱-۱) خواهیم داشت

$$r = a(1 - e^2) / (1 + e \cos \theta) \quad (۳-۱)$$

رابطه (۳-۱) معادله بیضی در مختصات قطبی برای  $0 \leq e < 1$  می باشد.

برای بدست آوردن مساحت بیضی، معادله مشابه با (۳-۱) در مختصات کارتزین  $(x, y)$  را که در مرکز بیضی واقع گردیده است، پیدا می کنیم. از شکل (۱-۶) و قضیه فیثاغورث نتیجه می شود که

$$r'^2 = (x + ae)^2 + y^2$$

$$r^2 = (x - ae)^2 + y^2$$

با کم کردن این دو معادله از یکدیگر و استفاده از معادله (۱-۱)، رابطه  $r' = a + ex$  را پیدا می کنیم. با جایگذاری در اولین معادله از دو معادله قبل و استفاده از معادله (۱-۲)،

داریم

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (4-1)$$

که معادله یک بیضی در مختصات کارتزین است. مساحت بیضی توسط انتگرال دوگانه زیر داده می شود

$$A = 4 \int^b dy \int^x dx$$

که از معادله (۴-۱)، داریم:

$$x = a \left[ 1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

با قرار دادن  $y = b \sin z$  ( $dy = b \cos z dz$ )، انتگرال گیری آسان می شود و با در نظر گرفتن  $\sin^2 z + \cos^2 z = 1$  جواب نهائی برابر خواهد شد با

$$A = \pi a b \quad (5-1)$$

بیضی، مثالی از دسته ای از منحنیهایی است که مقاطع مخروطی<sup>۱</sup> نامیده می شوند. این خانواده منحنیها که نتیجه ای از برش یک مخروط توسط یک صفحه در زوایای مختلف می باشند، در برگیرنده دایره، بیضی، سهمی و هذلولی هستند (شکل (۸-۱)). از معادله (۳-۱) ملاحظه می کنیم که، هنگامی که  $e = 0$ ، بیضی به یک دایره تبدیل می گردد ( $r = a$ ). اگر  $e$  افزایش یابد کانون جدا می شود. وقتی که  $e = 1$  یکی از کانونها در بی نهایت قرار می گیرد و سهمی مشخص شده را توسط رابطه زیر خواهیم داشت

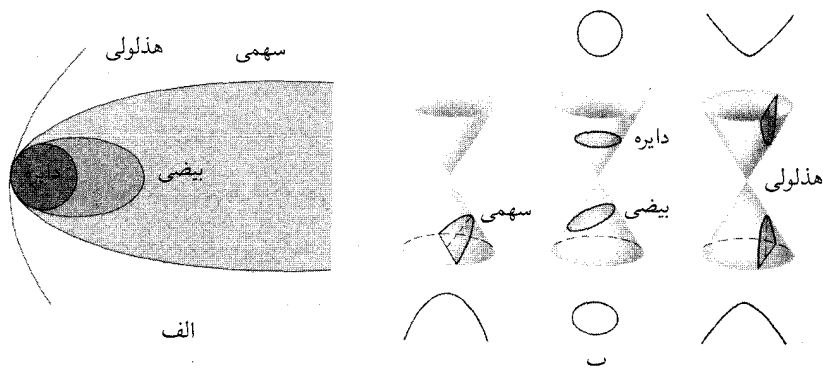
$$r = \frac{2p}{(1 - \cos\theta)} \quad (6-1)$$

که در آن  $p$  حداقل فاصله (در  $\theta = 0$ ) تا کانون باقیمانده می باشد. موقعی که خروج از مرکز از واحد بزرگتر باشد، هذلولی باز حاصل می گردد

$$r = a (e^2 - 1) / (1 + \cos\theta) \quad (7-1)$$

نزدیکترین فاصله آن تا کانون برابر  $(e - 1)a$  می باشد.

هنگامی که جسمی تحت تأثیر نیروی گرانش جسم دیگری حرکت می کند، مدار نسبی جسم در حال حرکت باید یک مقطع مخروطی باشد. (مدار نسبی، عبارت است از مدار مشاهده شده توسط ناظر روی جسم بزرگتر) سیارات، اقمار و سیارکها دارای



شکل ۱-۸. مقاطع مخروطی. (الف) خانواده منحنی‌های مقاطع مخروطی شامل دایره ( $e=0$ )، بیضی ( $0 < e < 1$ )، سهمی ( $e=1$ ) و هذلولی ( $e > 1$ ) می‌باشد. (ب) مقاطع مخروطی از تقاطع یک صفحه با یک مخروط بوجود می‌آیند. هنگامی که صفحه عمود بر محور مخروط باشد مقطع حاصل دایره است و هنگامی که صفحه با یک طرف یال موازی باشد، سهمی بدست می‌آید و هنگامی که زوایای بین را بسازد نتیجه بیضی است. هنگامی که صفحه با یک طرف مخروط زاویه‌ای بسازد که بزرگتر از زاویه باز مخروط باشد، حاصل یک هذلولی می‌شود.

مدارهای بیضی شکل هستند؛ تعدادی از دنباله‌دارها دارای خروج از مرکز نزدیک به یک می‌باشند که ضرورتاً از مدارات سهمی شکل تبعیت می‌کنند. تعداد کمی از دنباله‌دارها دارای مدارهای هذلولی غیر تناوبی هستند. این دنباله‌دارها پس از این که یکبار از نزدیکی خورشید عبور کردند، منظومه شمسی را برای همیشه ترک می‌کنند. وسایل نقلیه فضائی در مدارهای هذلولی شکل نسبت به زمین پرتاب شده‌اند، اما این وسایل تقریباً همیشه، اسیر مدارهای بیضی شکل به دور خورشید گشته‌اند. پیش‌تاز ۱۰۱ اولین سفینه فضائی با یک مدار بود که - موقعی که توسط سیاره مشتری از مسیر خود منحرف گردید - از منظومه شمسی خارج شد.

### ۳-۱ مکانیک نیوتونی

ایزاک نیوتون با استفاده از نتایج تجربی کپلر درباره مدارهای سیاره‌ای، قانون هماهنگی

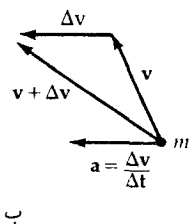
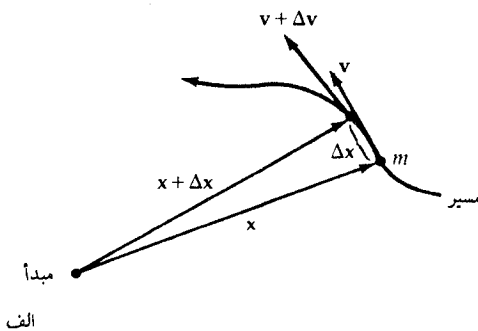
را در دینامیک و گرانش بیان نمود که آنرا در سال ۱۶۸۷ میلادی در کتاب اصول<sup>۱</sup> خود چاپ کرد. نیوتون با بینش درخشان و فرمولبندی مفیدش شالوده آنچه را که امروزه بنام فیزیک نیوتونی می شناسیم بنا نهاد. این بخش اولین قسمت از ساختار یکپارچه مکانیک نیوتونی را ارائه می دهد.

نیوتون فرض کرد فضائی که هر حرکت در آن رخ می دهد یک فضای اقلیدسی - فضای مطلق - سه بعدی می باشد. این حرکات در یک زمان مطلق رخ می دهند که به آرامی می گذرد و متأثر از هیچ پدیده ای در جهان نیست. ماهیت اصلی در این طرح، ذره نقطه ای است که دارای جرم بوده ولی بُعد ندارد (شکل (۱-۹ الف)). موقعیت ذره در لحظه  $t$  نسبت به یک مبدأ توسط بردار  $x(t)$  مشخص می شود؛ طول این بردار بر حسب واحدهایی نظیر متر اندازه گیری می شود. اندکی بعد در زمان  $t + \Delta t$ ، ذره به موقعیت  $\vec{x} + \Delta \vec{x}$  با سرعت تقریبی

$$\vec{V} = [(\vec{x} + \Delta \vec{x}) - \vec{x}] / [(t + \Delta t) - t] = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$$

جابجا شده است. وقتی که  $\Delta t \rightarrow 0$  در نقطه  $\vec{x}$  بردار سرعت با مسیر ذره موازی شده و از عمل مشتق گیری نتیجه می شود

$$\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (۸-۱)$$



شکل ۹-۱. حرکت یک ذره. (الف) جرم  $m$  در زمان  $t$  در نقطه  $x$  از مسیرش می باشد. در زمان  $t + \Delta t$  موضع آن در  $x + \Delta x$  است. سرعت لحظه ای در  $x + \Delta x$  برابر است با  $v + \Delta v$ . (ب) تغییر سرعت بین زمانهای  $t$  و  $t + \Delta t$  مقدار  $\Delta v$  است و از آن شتاب لحظه ای  $a$  تعریف می شود.

بزرگی بردار سرعت، تندی نامیده می شود که بصورت  $\frac{\text{فاصله}}{\text{زمان}}$  بر حسب متر بر ثانیه (m/s) و کیلومتر بر ثانیه (km/s) بیان می گردد. توجه داشته باشید که سرعت ذره در زمان  $t$  برابر  $\vec{v}$  می باشد، حال آنکه در  $t + \Delta t$  برابر  $\vec{v} + \Delta \vec{v}$  است. امکان دارد که تغییرات سرعت را توسط بردار شتاب بیان کنیم (شکل (۱-۹)):

$$\vec{a} = [(\vec{v} + \Delta \vec{v}) - \vec{v}] / [(t + \Delta t) - t] = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (\Delta t \rightarrow 0 \text{ وقتی که}) \quad (9-1)$$

واحدهای شتاب سرعت می باشد که همان  $\frac{\text{فاصله}}{\text{زمان}}$  است و بر حسب  $\frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$  یا  $\frac{\text{کیلومتر}}{\text{ثانیه}}$  بیان می گردد. نیوتون همچنین بردار اندازه حرکت خطی (با واحد، جرم ضربدر سرعت، مثلاً kg.m/s) ذره را در نظر گرفت و آنرا توسط حاصل ضرب زیر تعریف کرد

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (10-1)$$

که در آن  $m$  جرم ذره و  $\vec{v}$  سرعت لحظه ای آن می باشد. اکنون به بررسی قوانین حرکت نیوتون باز می گردیم.

### الف) قانون لختی<sup>۱</sup>

ارسطو<sup>۲</sup> در فیزیک خود کوشید تا نشان دهد، حالت طبیعی یک جسم، حالت سکون آن است. تجربه روزمره ما، برای تعیین صحت و سقم مطالعات ارسطو مبنی بر اینکه همه اجسام در حال حرکت سرانجام کند می شوند تا متوقف گردند، مناسب به نظر می رسد. در واقع، ارسطو برای تشریح حرکت یک پیکان در فضا، این عقیده را بیان کرد که وقتی پیکان هوا را می شکافد و بجلو می رود، هوا در قسمت عقب پیکان منحرف شده و آن را بجلو می راند.

گالیله به نتیجه کاملاً متفاوتی دست یافت. او گلوله هایی را بر روی سطوح شیبدار بگونه ای رها کرد که به آرامی به پایین می غلتیدند و مشاهده کرد که گلوله ها در سطح شیبدار مقابل تقریباً به اندازه همان ارتفاعی که از آن رها شده اند می رسند. هنگامی که گالیله سطوح را صاف تر و شیب سطح دوم را نسبت به افق کمتر کرد به این نتیجه رسید که گلوله ها تا فاصله دورتری می غلتند. گالیله عامل کند شدن حرکت گلوله ها را به

اصطکاک نسبت داد و گفت که یک گلوله صاف بر روی یک سطح افقی برای همیشه تحت سرعت ثابتی خواهد غلتید.

اندکی بعد رنه دکارت<sup>۱</sup> این اصل را به شکلی که نیوتون به عنوان اولین قانون حرکتش (قانون لختی) بیان کرده بود، فرمولبندی کرد: هنگامی که نیرو بر جسمی اعمال نشود، سرعت یک جسم ثابت می ماند (هم از نظر اندازه و هم از نظر جهت). برای جسم متحرک آزادی که نیرو بر آن اعمال نمی شود قانون اول ممکن است بصورت،  $\vec{V}$  برابر مقدار ثابت نوشته شود؛ زمانی که این مقدار ثابت صفر باشد جسمی که در ابتدا ساکن است، ساکن باقی خواهد ماند، مگر این که نیرویی بر آن وارد شود.

قانون اول نیوتون، در شکل جدید خود به عنوان قانون بقاء اندازه حرکت خطی شناخته می شود. برای جسمی به جرم  $m$  ممکن است بنویسیم، ثابت  $\vec{P} = m\vec{v}$ ، که معادل است با

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad (1-11)$$

توجه داشته باشید که این معادله حتی در حالت متغیر بودن جرم جسم، مثل یک سفینه فضایی نیز صادق می باشد. در مورد یک جرم ثابت داریم

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = 0$$

و

$$m\vec{a} = 0 \quad (\text{بدون نیرو، جرم ثابت})$$

### (ب) تعریف نیرو

قانون دوم نیوتون در مورد نیرویی که سرعت را تغییر دهد به طور ضمنی بوسیله این شرط که " مگر اینکه نیرویی بر جسم عمل کند" در قانون اول مورد اشاره قرار گرفته است. یک چنین تغییری در سرعت (در تندی یا جهت یا هر دو) توسط بردار شتاب (معادله ۱-۹)) نشان داده می شود. یک حالت خاص مهم حرکت شتابدار، حرکت دایره ای است. در این نوع حرکت با وجودی که جهت حرکت تغییر می کند تندی ثابت باقی می ماند.

مفهوم نیرو در دومین قانون حرکت نیوتون (قانون نیرو) تعریف شده است: شتاب اعمال شده بر یک جسم با نیرو نسبت مستقیم داشته و با جرم به طور معکوس متناسب است. بنابراین، می توان نوشت

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

و یا، به طور معمول تر

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1-12)$$

توجه کنید که نیرو یک بردار با واحدهای جرم در شتاب بر حسب  $\text{kg m/s}^2$  می باشد. اگر چندین نیرو بر جسم منفردی اعمال شود، شتاب حاصل توسط معادله (1-12) و با استفاده از نیرویی که از جمع برداری تک تک نیروها می باشد، تعیین می گردد. این قانون بر هم نهی است. دو نیروی  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  برای بدست آوردن نیروی منتج  $F$  با هم جمع می گردند (شکل (1-10))؛ می توانیم این روش را بر عکس کرده و نیروی  $F$  را به دو یا چند مؤلفه تجزیه کنیم؛ این دو نیرو در اینجا توسط نمادهای  $F_x$  و  $F_y$  نمایش داده می شوند.

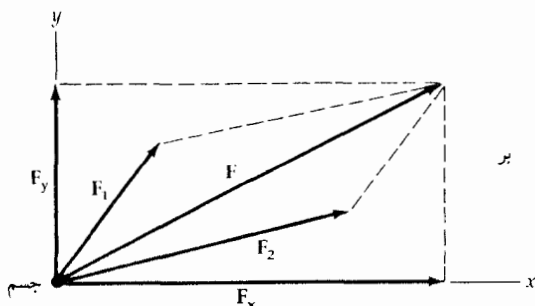
در معادله (1-12) باید جرم جسم ثابت باقی بماند. در تعریف جدید قانون دوم که استفاده از اندازه حرکت خطی فرمولبندی شده است، این محدودیت از بین می رود

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1-13)$$

هنگامی که جرم مقدار ثابتی را دارد می توان قانون دوم نیوتون را با استفاده از معادلات (1-9)، (1-10) و (1-13) فرمولبندی کرد. اکنون توجه داشته باشید که قانون اول حرکت (معادله (1-11)) به عنوان نتیجه ای از قانون دوم می باشد.

مفهوم جرم در اینجا چیست؟ در مبحث دینامیک، جرم نماینده لختی یک جسم است یعنی، مقاومت جسم در مقابل هر تغییری از حالت حرکت جسم. اگر نیروی یکسانی به دو جسم وارد کنیم، سرعت جسم سنگین تر با آهنگ کمتری نسبت به جسم سبکتر تغییر خواهد کرد. به زبان امروزی، جرم را مقدار ماده موجود در جسم تصور کنید. بنابراین، دو گلوله سربی همانند، دو برابر جرم یکی از گلوله ها را تشکیل می دهند.

جرم کمیتی اسکالر است که جسم را توصیف می‌کند و به موقعیت یا وضعیت حرکت جسم بستگی ندارد [بخش (۱-۴) ب].



شکل ۱-۱۰. بر هم نهی نیروها. دو نیروی  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  به یک جسم وارد می‌شوند. حرکت حاصل، به  $\vec{F}$  جمع برداری  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  بستگی دارد. مؤلفه‌های متعامد  $\vec{F}_x$  و  $\vec{F}_y$  حرکت مشابهی را نتیجه می‌دهند، زیرا جمع آنها برابر  $\vec{F}$  است.

### (ج) عمل و عکس‌العمل

نیوتون برای تکمیل نظریه دینامیک و اعمال آن برای مجموعه‌ای از ذرات نقطه‌ای، سومین قانون حرکت خود را بسط و گسترش داد (قانون عمل و عکس‌العمل): برای هر نیروی وارد شده بر یک جسم (در یک سیستم بسته)، نیرویی مساوی و مخالف که از طرف آن جسم اعمال می‌گردد، وجود دارد. حداقل یک مثال ساده نشان خواهد داد که چرا قانون سوم الزامی است. وزن (نیرو) یک کتاب که روی میزی قرار گرفته است باید دقیقاً با نیرویی که از میز بر کتاب اعمال می‌شود، برابر باشد؛ در غیر اینصورت، مطابق قانون دوم کتاب به طرف یا از میان میز شتاب خواهد گرفت. قانون سوم وضعیت سکون نیروهای موازنه شده را توصیف می‌کند.

بیان جدیدی از قانون سوم، قانون بقاء مجموع اندازه حرکت خطی است. با وجود اینکه، ممکن است با چندین جسم سر و کار داشته باشیم، ولی در اینجا تنها دو جسم را در نظر بگیریم. موقعی که هیچ نیروی خارجی بر سیستم اعمال نگردد [قانون اول] مجموع اندازه حرکت خطی سیستم توسط، مقدار ثابت  $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$ ، بدست می‌آید. با در نظر گرفتن دو لحظه از زمان (لحظه بعدی توسط علامت پریم) نشان داده



می شود) داریم

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{P}'_1 + \vec{P}'_2$$

اگر فاصله زمانی  $\Delta t$  باشد و چنانچه  $\Delta \vec{P}_1 = \vec{P}'_1 - \vec{P}_1$  و  $\Delta \vec{P}_2 = \vec{P}'_2 - \vec{P}_2$  را بنامیم، می توانیم با مرتب کردن رابطه بالا داشته باشیم

$$\frac{\Delta \vec{P}_1}{\Delta t} = - \frac{\Delta \vec{P}_2}{\Delta t}$$

به ازای  $\Delta t$  کوچک دلخواه، دلتاها به دیفرانسیل تبدیل می شوند و معادله (۱-۱۳) قانون سوم را نتیجه می دهد

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

(د) خلاصه: قوانین حرکت نیوتون

در اینجا شکل امروزی سه قانون مکانیک نیوتونی را بیان می کنیم. بیاد آورید که مبنای قوانین نیوتون فضا و زمان مطلق است، و در آن یک ذره نقطه ای به جرم  $m$ ، که مسیر  $\vec{x}(t)$  را طی می کند با سرعت لحظه ای  $\vec{v}(t)$ ، اندازه حرکت خطی  $\vec{p} = m\vec{v}$  و شتاب  $\vec{a}(t)$  توصیف می شود.

قانون اول (لختی):

سرعت و اندازه حرکت خطی یک جسم ثابت باقی می ماند (از نظر اندازه و جهت)، مگر این که بر آن نیرویی وارد شود.

$$\vec{v} \text{ و } \vec{p} = \text{ثابت}$$

قانون دوم (نیرو):

آهنگ زمانی تغییرات اندازه حرکت خطی یک جسم (یا سیستمی از اجسام) با نیروی وارد بر جسم (یا سیستم) برابر است.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

قانون سوم (عمل و عکس العمل):

در یک سیستم بسته، نیرویی که بوسیله یک جسم وارد می شود مساوی و مخالف نیروی وارد شده بر آن جسم است، یا مجموع اندازه حرکت خطی یک سیستم بسته از اجسام نسبت به زمان مقداری ثابت است.

عکس العمل  $\vec{F} = -\vec{F}$

$\vec{P}$  = ثابت

## ۱-۴ قانون جهانی گرانش نیوتونی

قبل از نیوتون، کپلر تصور می کرد که نیروهایی برای نگهداری سیارات در مدار به دور خورشید بر آنها وارد می شوند؛ او مدارهای بیضی شکل را به نیروی کشش مغناطیسی نسبت داد. نیوتون با تعقیب یک سلسله از آموخته ها نظیر استنتاجات ساده و مختصری که به دنبال می آید، قانون جهانی گرانش را کشف کرد و آنرا بر روی حرکت ماه آزمایش نمود و سپس حرکات سیارات را به تفصیل شرح داد.

### (الف) نیروی جانب مرکز و گرانش

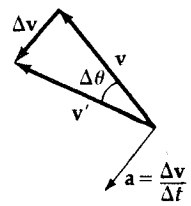
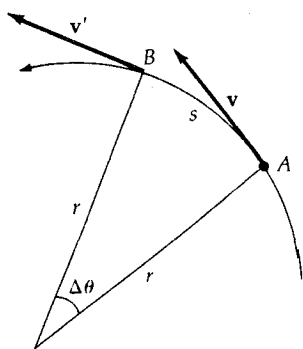
جسمی را در نظر بگیرید که در یک مدار دایره ای به شعاع  $r$  حول یک مرکز نیرو حرکت می کند (شکل (۱-۱۱ الف)). برای حفظ تقارن، باید تندی  $v$  جسم مقدار ثابتی داشته باشد، اما جهت بردار سرعت به طور ثابت تغییر کند. سرعتی با این تغییرات نمایانگر یک شتاب است - شتاب جانب مرکز که مدار دایره ای را حفظ می کند؛ از شکل هندسی قادر به بدست آوردن شتاب هستیم. در لحظه  $t$ ، جسم در نقطه  $A$  می باشد و سرعت آن  $\vec{v}$  است. در فاصله زمانی بسیار کوتاه بعدی  $\Delta t$ ، جسم زاویه  $\Delta\theta$  را به طرف  $B$  طی می کند، که در آنجا سرعت  $\vec{v}'$  خواهد بود. در شکل (۱-۱۱ ب) تغییر در سرعت،  $\vec{v}' - \vec{v}$  را از متصل کردن انتهای دو بردار سرعت نشان می دهیم. واضح است که زاویه بین  $\vec{v}$  و  $\vec{v}'$ ،  $\Delta\theta$  می باشد. به خاطر آورید که بزرگی هر دو بردار  $\vec{v}$  و  $\vec{v}'$ ، تندی  $v$  است، برای مقادیر کوچک  $\Delta\theta$  از مثلثات استفاده می کنیم (شکل (۱-۱۱ الف))،

$$\Delta\theta = \frac{s}{r} = v \frac{\Delta t}{r}$$

و (شکل (۱-۱۱ ب))

$$\Delta\theta = \frac{\Delta v}{v}$$

که در آن طول قوس  $s$  به اندازه تری که نقاط  $A$  و  $B$  را به هم وصل می کند نزدیک است. بنابراین، شتاب جانب مرکز دارای مقدار



الف

ب

شکل ۱-۱۱. شتاب جانب مرکز. (الف) جسمی در مدار دایره‌ای به شعاع  $r$  و تندی  $V$  در امتداد قوس کوتاه  $s$  در خلال فاصله زمانی  $\Delta t$  حرکت می‌کند. (ب) شتاب جانب مرکز،  $\vec{a}$ ، نتیجه‌ای از تغییر در جهت سرعت در خلال زمان  $\Delta t$  است.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{V^2}{r}$$

است و در زمان  $\Delta t$  مستقیماً به سمت مرکز دوران می‌باشد. اگر  $m$  جرم جسم در حال دوران باشد، قانون دوم نیوتون اندازه و نیروی جانب مرکز را می‌دهد.

$$F \text{ جانب مرکز} = ma = m \frac{V^2}{r} \quad (1-14)$$

اگر  $P$  دوره تناوب مداری جسم باشد، در این صورت تندی آن عبارت است از

$$V = \frac{2\pi r}{P}$$

اما، قانون سوم کپلر دوره تناوب و شعاع مداری را توسط رابطه زیر به یکدیگر مربوط می‌کند

$$P^2 = Kr^3$$

که در آن  $K$  ثابت تناسب است. با جایگزینی این دو نتیجه در معادله (۱-۱۴) داریم

$$F = \frac{4\pi^2 m}{Kr^3}$$

یعنی نیرویی که مدار را حفظ می‌کند با عکس مربع شعاع متناسب است. بر اساس قانون سوم نیوتون، جسمی به جرم  $M$  که در مرکز مداری واقع شده است، نیرویی مساوی ولی در خلاف جهت را احساس می‌کند. چون نیروی جانب مرکز که بر جسم مرکزی وارد

می شود باید با  $M$  متناسب باشد، لذا نیروی گرانشی متقابل با حاصل ضرب دو جرم متناسب است؛ با تعریف مجدد ثابت تناسب، داریم

$$F_{\text{گرانش}} = \frac{G M m}{r^2} \quad (1-15)$$

که همان قانون جهانی گرانش نیوتونی است. جهت نیروی گرانش در امتداد خطی است که دو جسم را به یکدیگر متصل می سازد (از قانون سوم حرکت). مقدار ثابت جاذبه  $G$  در دستگاه SI عبارت است از  $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg.s}^2$ .

معادله (1-15) نیروی گرانشی جاذبه بین دو جرم نقطه ای را بیان می کند. برای یافتن جاذبه گرانشی یک جسم گسترده، باید حاصل جمع برداری مربوط به هر قطعه کوچک جسم را بیاییم. غالباً، این فرآیند نسبتاً مشکل است، مباحث تقارن برای یک جسم با تقارن کروی که بر روی جرم نقطه ای در حال اثر است، به تنهایی میباید این است که نیروی گرانشی باید در امتداد خط واصل بین مراکز دو جسم عمل نماید. برای افزودن آثار تمام قسمتهای یک جسم کروی می توانیم نشان دهیم که از نظر گرانشی مانند وضعیتی است که تمام جرم آن در مرکزش متمرکز شده باشد.

(ب) وزن و شتاب گرانشی

در نزدیکی سطح زمین، اجسام دارای شتاب گرانشی رو به پائین با بزرگی ثابتی هستند (از معادله (1-15))

$$g = GM_{\oplus} / R_{\oplus}^2 \approx 9.8 \text{ m/s}^2$$

که در آن  $M_{\oplus}$  جرم زمین و  $R_{\oplus}$  شعاع آن می باشد. سطح پهن شده در قطبین و چرخش سریع موجب بروز تغییراتی در مقدار اندازه گیری شده  $g$  از  $9.781 \text{ m/s}^2$  در استوا تا  $9.832 \text{ m/s}^2$  در قطبین می شود.

وزن یک جسم عبارت است از نیروی لازم برای بی حرکت نگهداشتن جسم در میدان گرانشی. اگر جرم جسم  $m$  باشد، با توزین جسم توسط یک ترازوی فنری در سطح زمین، خواهیم داشت

$$\text{وزن} = mg$$

بر خلاف ثاب بودن جرم جسم، وزن آن به موقعیت جسم بستگی دارد. یک فضانورد بر

روی سطح ماه وزنش تقریباً  $\frac{1}{6}$  وزن طبیعی او بر روی سطح زمین می باشد، در مدار ماهواره ها بدلیل اینکه فضاورد در حال سقوط آزاد در میدان گرانشی است، وزنش صفر خواهد بود. وزن و نیرو واحدهای یکسانی دارند و واحد مرسوم در دستگاه SI (ضمیمه ۶) نیوتون است، که

$$1 \text{ kg m/s}^2 = 1 \text{ نیوتون}$$

به خاطر داشته باشید که وزن یک نیرو است.

### (ج) تعیین $G$ و $M_{\oplus}$

در سال ۱۷۹۸ میلادی هانری کاوندیش<sup>۱</sup> ثابت گرانشی  $G$  و در سال ۱۸۸۱ میلادی فیلیپ وان جولی<sup>۲</sup> جرم زمین  $M_{\oplus}$  را تعیین کردند. این دو روش شیوه های اولیه برای تعیین این ثابتهای مهم می باشند.

کاوندیش برای یافتن  $G$ ، از یک دستگاه شامل دو گلوله کوچک با جرم های  $m$  که از یک میله پیچشی آویزان شده بودند و دو گلوله بزرگتر با جرم برابر  $M$  که مستقلاً به میله هم محور میله قبلی اتصال داشتند، استفاده کرد (۱-۱۲ الف). هر جفت جرم مجاور  $Mm$  را ابتدا به فاصله  $D$  از یکدیگر قرار می دهیم، اما نیروی گرانشی بین آنها سبب پیچش به میله های پیچشی می شود و در حال تعادل استاتیکی فاصله بین جرمهای  $M - m$  برابر می شود. با توجه به تقارن، نیروی گرانشی که سبب این انحراف می شود برابر است با  $F = 2GMm/d^2$ ؛ کاوندیش با اندازه گیری مستقیم  $F$ ،  $d$ ،  $m$ ،  $M$  مقدار  $G$  را پیدا کرد.

دستگاه وان جولی (شکل (۱-۱۲ ب)) تشکیل شده بود از یک ترازو با دو جرم کوچک  $m$  با محوری قابل دوران و شاخص ترازویی سبک در سطح افقی. هنگامی که وان جولی جرم بزرگ  $M$  را در زیر یکی از این جرمهای کوچک قرار داد ترازو کج شد، برای اینکه ترازو به وضع اصلی و اولیه خود بازگردد او یک جرم کوچک  $n$  را در کفه دیگر جرم  $m$  قرار داد. اگر فاصله تعادل جرم  $Mm$ ،  $d$  باشد، نیروهایی که بر هر طرف شاهین ترازو عمل می کنند، عبارتند از

1. Henry Cavendish.

2. Philip Von Jolly.

$$F_1 = GM m/d^2 + GM_{\oplus} m/R_{\oplus}^2$$

$$F_2 = GM_{\oplus} n/R_{\oplus}^2 + GM_{\oplus} m/R_{\oplus}^2$$

هنگامی که  $F_1 = F_2$  شاهین ترازو مجدداً افقی خواهد شد،

$$M_{\oplus} = (Mm/n) (R_{\oplus} / d^2) = 5/97 \times 10^{22} \text{ kg}$$

## ۱-۵ تعابیر فیزیکی قوانین کپلر

نیوتون به منظور به دست آوردن سه قانون تجربی کپلر، قوانین حرکت و گرانشی اش را با یکدیگر تلفیق کرد. می توان مدارهای بیضی شکل را نیز از معادله (۱-۳) نتیجه گرفت، اما نظر به اینکه استفاده از روابط (۱-۱۳) و (۱-۱۵) مستلزم وقوف به معادلات دیفرانسیلی برداری است، لذا ما این کار را نمی کنیم. قانون اول کپلر را می پذیریم و با روش نیوتون قوانین دوم و سوم کپلر را به دست می آوریم.

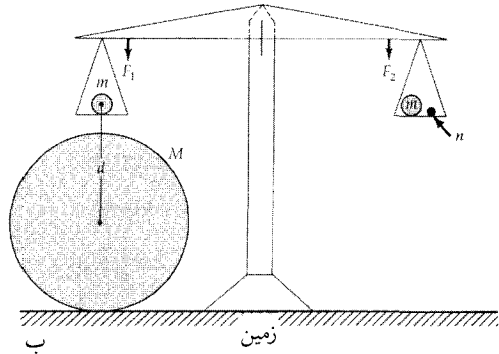
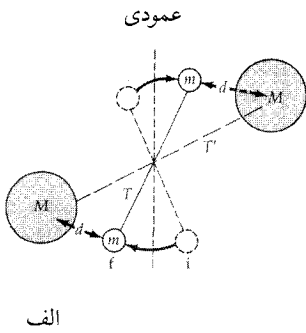
(الف) قانون مساحتها و اندازه حرکت زاویه ای

ابتدا قانون مساحتهای کپلر را برای یک مدار بیضی شکل (شکل (۱-۱۳)) نشان می دهیم. یک جسم، کانون  $F$  را در موقعیت  $r$  با سرعت  $\vec{v}$  دور می زند. در خلال فاصله زمانی کوچک  $\Delta t$ ، جسم از نقطه  $P$  به طرف  $Q$  حرکت می کند و بردار شعاعی زاویه  $\Delta\theta$  را جاروب می کند. این زاویه کوچک برابر است با  $\Delta\theta \approx v_t \frac{\Delta t}{r}$ ، که در آن  $v_t$  مؤلفه عمود بر  $r$  سرعت  $\vec{v}$  است. در طول این زمان، بردار شعاعی مثلث  $FPQ$  را که مساحت آن عبارت است از  $\frac{1}{2} r v_t \Delta t$ ، جاروب می کند. بنابراین، برای  $\Delta t \rightarrow 0$

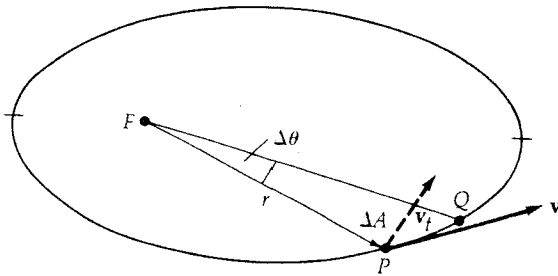
$$\frac{dA}{dt} = r \frac{v_t}{r} = r^2 \left( \frac{d\theta}{dt} \right) / 2 = H / 2 \quad (1-16)$$

که در آن مقدار ثابت  $H$  (اندازه حرکت زاویه ای به ازاء واحد جرم) به این دلیل ظاهر می شود، که بر طبق قانون دوم کپلر آهنگ تغییر مساحت با زمان مقدار ثابتی است.

توجه داشته باشید  $\frac{A}{P} = \frac{H}{\gamma}$ ، که در آن  $A = \pi ab$  سطح کل بیضی و  $P$  دوره تناوب می باشد؛ این رابطه توسط انتگرال گیری از معادله (۱-۱۶) بدست می آید. با ترکیب این نتیجه با معادله (۱-۱۶) و با توجه به اینکه  $v_t$  تندی کل در نقطه حضیض یا اوج می باشد،



شکل ۱-۱۲. اندازه گیری ثابت گرانشی نیوتون  $G$ . (الف) در آزمایش کاوندیش از دو وسیله  $T'$ ،  $T$  که آزادانه به دور یک محور عمودی می چرخند، استفاده می شود. نیروی گرانشی بین کره های مجاور  $M$  و  $m$  میله ها را حول موقعیت تعادلشان می چرخاند (به موضع  $f$  از موضع  $i$ )، به طوری که فاصله بین  $m$  و  $M$  می شود. (ب) آزمایش وان جولی دربرگیرنده یک ترازوی افقی است و هنگامی که جرمهای  $m$ ،  $M$  وجود نداشته باشند در یک وضعیت تعادل افقی قرار می گیرند. موقعی که جرم  $M$  زیر جرم  $m$  در طرف چپ قرار گیرد، برای حفظ تعادل باید جرم  $n$  به جرم  $m$  طرف راست اضافه شود.



شکل ۱-۱۳. قانون مساحتها برای یک مدار بیضی شکل. جسمی در فاصله  $r$  در یک مدار بیضی شکل با سرعت  $\vec{V}$  حول کانون  $F$  می گردد و در مدت  $\Delta t$  از  $P$  به  $Q$  می رود. مؤلفه عمود بر  $r$  سرعت  $V_t$ ،  $V$  است.

می توانیم تندیه های حضيض و اوج یک سیاره در حال چرخش به دور خورشید را به دست آوریم. برای مثال، در نقطه حضيض داریم

$$V = \frac{H}{r} = \frac{\gamma A}{Pr} = \gamma \pi ab / Pa(1-e)$$

که در آخرین تساوی از معادله (۳-۱) با  $\theta = 0$  استفاده کرده ایم. با ادامه محاسبات در نقطه اوج و استفاده از معادله (۲-۱)، داریم

$$V = \begin{cases} (\gamma \pi \frac{a}{p}) [(1+e) / (1-e)]^{\frac{1}{2}} & \text{نقطه حضیض} \\ (\gamma \pi \frac{a}{p}) [(1-e) / (1+e)]^{\frac{1}{2}} & \text{نقطه اوج} \end{cases} \quad (17-1)$$

برای زمین،  $a$  برابر  $(1/496 \times 10^8 \text{ km})$ ،  $1 \text{ AU}$ ،  $P$  یکسال  $(3/156 \times 10^7 \text{ s})$  و خروج از مرکز  $e = 0/0167$  می باشند. بنابراین، تندی مداری از  $30/3 \text{ km/s}$  در نقطه حضیض تا  $29/3 \text{ km/s}$  در نقطه اوج تغییر می کند.

روش بهتر برای به دست آوردن قانون دوم کپلر نیازمند مفهوم اندازه حرکت زاویه ای جسم در حال چرخش می باشد.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m (\vec{r} \times \vec{v}) \quad (18-1)$$

که در آن  $m$  جرم جسم،  $\vec{r}$  بردار مکان و  $\vec{p}$  اندازه حرکت خطی آن است (معادله (۱۰-۱)). حاصل ضرب خارجی برداری در معادله (۱۸-۱) عملی است که نتیجه آن ضرب مؤلفه های عمودی دو بردار تحت بررسی را بدست می دهد (ضمیمه ریاضی). بنابراین، اگر  $\vec{r}$  و  $\vec{p}$  موازی باشند، در این صورت  $\vec{r} \times \vec{p} = 0$  خواهد شد. اندازه حرکت زاویه ای  $\vec{L}$ ، کمیتی برداری و با واحد  $\text{kg.m}^2/\text{s}$  است. با مشتق گیری از رابطه (۱۸-۱)، داریم

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{v} \times \vec{p} + \vec{r} \times \left(\frac{d\vec{p}}{dt}\right) = \vec{r} \times \vec{F} \quad (19-1)$$

که در آن  $\vec{v}$  موازی  $\vec{p}$  است و  $\frac{d\vec{p}}{dt}$  نیرو را توصیف می کند. راگشتاور نیرو می نامیم (با واحد  $\text{kg.m}^2/\text{s}^2$ ) و مشاهده می کنیم هنگامی که  $\vec{r}$  با  $\vec{F}$  همخط باشند - یک نیروی مرکزی، نظیر گرانش - این گشتاور نیرو صفر می شود. بنابراین،  $\vec{L}$  بر حسب زمان مقداری ثابت است. در نتیجه اندازه حرکت زاویه ای برای همه نیروهای مرکزی ثابت باقی می ماند. با بکار بردن معادله (۱۸-۱) برای وضعیت شکل (۱۲-۱) نتیجه می گیریم



$$\frac{L}{m} = rV_t = H = \text{مقدار ثابت}$$

که همان قانون دوم کپلر است.

(ب) شکل نیوتونی قانون سوم کپلر

نیروهای خارجی که بر منظومه شمسی وارد می‌شوند، اساساً قابل اغماض می‌باشند، بنابراین اندازه حرکت خطی کل منظومه شمسی مقدار ثابتی است. اگر خورشید در مقابل سیارات در حال گردش حرکت نمی‌کرد، چنین نمی‌بود. لذا، خورشید باید حول مرکز جرم منظومه شمسی حرکت کند. این عقیده را برای یک سیستم منزوی متشکل از دو جسم متحرک که تحت تأثیر جاذبه گرانشی متقابلشان در مدارهای دایره‌ای حرکت می‌کنند، به کار می‌بریم؛ نتیجه نهایی، شکل نیوتونی قانون سوم کپلر است که برای مدارهای بیضی شکل نیز قابل اعمال است.

دو جسم به جرمهای  $m_1$  و  $m_2$  را در نظر بگیرید که به دور مرکز جرم ثابتشان در فواصل  $r_1$  و  $r_2$  می‌گردند (شکل (۱-۱۴)). چون نیروی گرانش تنها در امتداد خط واصل مراکز اجسام عمل می‌کند، لذا باید هر دو جسم با دوره تناوب یکسان  $P$ ، حرکت کنند (گرچه تندیهای آنها متفاوت است ( $V_1$  و  $V_2$ )). بنابراین، نیروهای مرکز گرای مدارای عبارتند از:

$$F_1 = \frac{m_1 v_1^2}{r_1} = 4\pi^2 m_1 r_1 / P^2 \quad (1-20 \text{ الف})$$

$$F_2 = \frac{m_2 v_2^2}{r_2} = 4\pi^2 m_2 r_2 / P^2 \quad (1-20 \text{ ب})$$

قانون سوم نیوتون نتیجه می‌دهد که  $F_1 = F_2$  و بنابراین داریم

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (1-21)$$

جسم سنگین‌تر نسبت به جسم سبکتر در فاصله نزدیکتری به دور مرکز جرم می‌گردد؛ معادله (۱-۲۱) موقعیت مرکز جرم را توصیف می‌کند.

فاصله کل دو جسم،  $a = r_1 + r_2$ ، شعاع مدارهای نسبی آنها نیز می‌باشد. اکنون می‌توان معادله (۱-۲۱) را به شکل زیر نوشت،

$$r_1 = m_2 a / (m_1 + m_2) \quad (1-22)$$

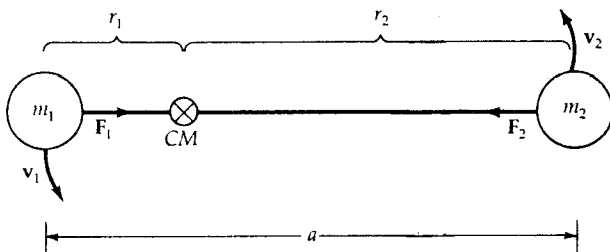
اما، نیروی گرانشی متقابل  $F_1 = F_2 = F$  گرانشی عبارت است از

$$F_{\text{گرانشی}} = G m_1 m_2 / a^2 \quad (23-1)$$

بنابراین، ترکیب معادلات (۱-۲۰الف)، (۱-۲۲) و (۱-۲۳) شکل نیوتونی قانون سوم کپلر را به دست می دهد.

$$P^2 = 4\pi^2 a^3 / G (m_1 + m_2) \quad (24-1)$$

اگر جسم ۱ خورشید و جسم ۲ یک سیاره باشد، در این صورت  $m_1 \gg m_2$  بوده و لذا  $K = 4\pi^2 / GM$  ثابت تناسب (با تقریب خوبی) در قانون سوم کپلر می باشد. توجه داشته باشید که قانون سوم راهی برای توصیف آثار گرانشی، بدون مطرح کردن نیروها، ارائه می دهد.



شکل ۱-۱۴. دو جرم  $m_1$  و  $m_2$  به دور مرکز جرم مشترک CM با فاصله کلی  $a$  می گردند.

### (ج) سرعت مداری

برای درک بهتر مدارهای بیضی شکل، سرعت مداری  $\vec{v}$  را در نظر بگیرید. ممکن است سرعت مزبور را به دو مؤلفه عمود بر هم تجزیه کنیم (شکل (۱-۱۵)):  $v_r$  تندی شعاعی و  $v_\theta$  تندی «زاویه‌ای». از معادله (۱-۱۶) و بحثی که در دنباله آن آمده است، داریم

$$\frac{d\theta}{dt} = (2\pi/p) (a/r)^2 (1-e^2)^{\frac{1}{2}} \quad (25-1)$$

با استفاده از معادله (۱-۳)، که معادله قطبی یک بیضی است، و معادله (۱-۲۵)

مشتقات نسبت به زمان زیر را به دست می آوریم

$$V_r = \frac{dr}{dt} = (\gamma\pi a/p) (e \sin \theta) (1 - e^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (1-26 \text{ الف})$$

$$V_\theta = r \left( \frac{d\theta}{dt} \right) = (\gamma\pi a/p) (1 + e \cos \theta) (1 - e^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (1-26 \text{ ب})$$

توجه داشته باشید که معادله (۱-۲۶ب) در نقاط حضیض و اوج به معادله (۱-۱۷) تبدیل می گردد. اکنون تندی مداری کل از رابطه (۱-۲۶) پیروی می کند

$$V^2 = v_r^2 + v_\theta^2 = (\gamma\pi a/p)^2 (1 + 2e \cos \theta + e^2) (1 - e^2) \quad (1-27)$$

با مرتب سازی مجدد معادله قطبی برای یک بیضی داریم

$$e \cos \theta = [a(1 - e^2) - r] / r$$

و با جانشینی این نتیجه در معادله (۱-۲۷)، سرانجام [با کمک رابطه (۱-۲۴)] نتیجه می گیریم

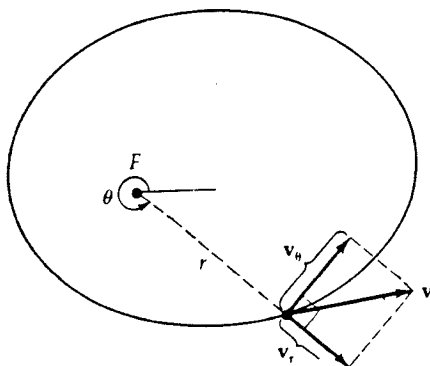
$$V^2 = G (m_1 + m_2) \left[ \left( \frac{2}{r} \right) - \left( \frac{1}{a} \right) \right] \quad (1-28)$$

بنابراین، برای جرمهای معلوم، سرعت مداری کل تنها به فاصله آنها و نیم محور اطول مدارشان وابسته است. این نتیجه مفید مکرراً در این کتاب ظاهر خواهد شد.

#### (د) بقاء انرژی کل

مفهوم انرژی راه دیگری را برای نیل به نیروها و مکانیک نیوتونی در مورد مسائل مربوط به مدارها مطرح می سازد. انرژی اغلب روش قدرتمندتری برای دستیابی به یک بینش در مورد مسائل مداری ارائه می دهد.

انرژی کمیتی منتسب به یک جسم است که توانایی جسم را برای بوجود آوردن تغییر حالت در جسم دیگری نشان می دهد. گرما صورتی از انرژی است، اگر دو جسم با هم تماس حاصل کنند جسم داغ جسم سرد را گرم خواهد کرد. انرژی الکتریکی موجب می شود که رشته یک لامپ چراغ برق برافروخته گردد (داغ شود). بدین ترتیب، نشان داده می شود که یک نوع انرژی به نوع دیگری تبدیل شده است. انرژی جنبشی (KE) انرژی حرکتی یک جسم است، اما اگر تصمیم بگیریم که همراه جسم حرکت کنیم، آن



شکل ۱-۱۵. مؤلفه‌های سرعت مداری. در هر نقطه از مدار بیضی، سرعت مداری  $v$  ممکن است به دو مؤلفه عمود بر هم تندی شعاعی موازی با بردار شعاع و تندی زاویه‌ای عمود بر آن تجزیه شود.

جسم ساکن و فاقد انرژی جنبشی خواهد بود. انرژی پتانسیل مربوط به مکان جسم است (PE)؛ اگر جسم بتواند آزاد حرکت کند، این انرژی ممکن است به انرژی جنبشی تبدیل شود. در مکانیک سماوی، برای بدست آوردن انرژی کل، انرژی‌های جنبشی و پتانسیل را با یکدیگر جمع می‌کنیم:

$$TE = KE + PE$$

فرض کنید که نیروی  $\vec{F}$  بر جسمی به جرم  $m$  که در حال حرکت در مسیر  $\vec{x}(t)$  حول یک نیروی مرکزی است، اثر می‌کند. در زمان بسیار کوچک  $dt$ ، جسم در امتداد بردار مکانی  $d\vec{x}$  حرکت می‌نماید. وقتی جسم از موضع  $A$  به طرف موضع  $B$  می‌رود، کار (در دستگاه SI واحد آن  $\text{kgm}^2/\text{s}^2 = \text{Joule}$ ؛ به ضمیمه ۶ مراجعه شود) انجام شده  $W$  توسط نیرو بر روی جسم عبارت است از

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{x} \quad (29-1)$$

عمل ضرب نقطه‌ای برداری در معادله (۲۹-۱) از ضرب مؤلفه‌های موازی  $\vec{F}$  و  $d\vec{x}$  (ضمیمه ریاضی) بوجود می‌آید؛ هنگامی که  $\vec{F}$  و  $d\vec{x}$  بر یکدیگر عمود باشند، ضرب نقطه‌ای آنها صفر می‌شود. برای ارزیابی معادله (۲۹-۱) توجه می‌کنیم

$$\vec{F} \cdot d\vec{x} = m \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right) \cdot \vec{v} dt = m (\vec{v} \cdot d\vec{v}) = d \left( \frac{m\vec{v}^2}{2} \right)$$

که در آن از قانون دوم نیوتون و تعاریف سرعت و تندی استفاده شده است. بدینگونه با انتگرالگیری مستقیم از معادله (۱-۲۹) نتیجه می شود

$$W = \left(\frac{mv^2}{2}\right)_B - \left(\frac{mv^2}{2}\right)_A = KE_B - KE_A \quad (۱-۳۰)$$

که انرژی جنبشی بوسیله  $KE = \frac{mv^2}{2}$  مشخص می گردد. بنابراین، کار انجام شده توسط نیرو بر روی جسم، انرژی جنبشی آن را تغییر می دهد. در یک سیستم دو جسمی به جرمهای  $m_1$  و  $m_2$ ، انرژی جنبشی برابر  $KE = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right)$  است. اگر نیرو، نیروی گرانشی بین دو جسم باشد، داریم

$$\vec{F} \cdot d\vec{x} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} dr = d \left( G \frac{m_1 m_2}{r} \right)$$

در اینجا  $r$  فاصله شعاعی دو جسم است. از معادله (۱-۲۹) مجدداً انتگرالگیری می شود

$$W = \left( G \frac{m_1 m_2}{r} \right)_B - \left( G \frac{m_1 m_2}{r} \right)_A = PE_A - PE_B \quad (۱-۳۱)$$

که در اینجا از تعریف انرژی پتانسیل گرانشی متقابل  $PE = -G \frac{m_1 m_2}{r}$  استفاده کرده ایم. بنابراین، انرژی پتانسیل عبارتست از منفی کار انجام شده توسط نیروی گرانشی برای آوردن  $m_1$  از  $r = \infty$  به  $r$  به طوری که  $m_2$  ثابت بماند. توجه داشته باشید که انرژی پتانسیل گرانشی بین دو جسم هنگامی که بسیار دور از هم قرار گیرند، صفر می شود.

چون هر دو انرژی جنبشی و پتانسیل واحدهای مشابهی (ژول) مانند کار دارند، معادله های (۱-۳۰) و (۱-۳۱) را ترکیب می کنیم تا عبارت زیر حاصل گردد

$$(KE + PE)_B = (KE + PE)_A$$

یا بر حسب انرژی کل سیستم دو جسمی

$$TE_B = TE_A = \text{مقدار ثابت}$$

بنابراین، انرژی کل سیستم گرانشی دارای بقاء است.

$$TE = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2}\right) + \left(\frac{m_2 v_2^2}{2}\right) - \left(G \frac{m_1 m_2}{r}\right) = \text{مقدار ثابت} \quad (۱-۳۲)$$

هنگامی که اجسام حرکت می‌کنند، امکان دارد که انرژی جنبشی و پتانسیل به هم تبدیل شوند، ولی انرژی کل دستگاه ثابت باقی می‌ماند.

اکنون مقدار ثابت TE در معادله (۱-۳۲) را برای مدارهای بیضی شکل به دست می‌آوریم. با ارجاع به بخش (۱-۳ج) و یادآوری این نکته که اندازه حرکت خطی کل سیستم منزوی ثابت است؛ این مقدار ثابت را صفر انتخاب می‌کنیم، لذا  $m_1 v_1 = m_2 v_2$  و بر حسب تندیه‌های اجسام

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

از آنجائی که  $\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$  سرعت نسبی هر جسم نسبت به دیگری است، داریم

$$v_1 = m_2 v / (m_1 + m_2)$$

$$v_2 = m_1 v / (m_1 + m_2)$$

با جایگذاری این نتیجه در معادله (۱-۳۲)، نتیجه می‌شود

$$TE = m_1 m_2 \left[ \frac{v^2}{r} (m_1 + m_2) - \left( \frac{G}{r^2} \right) \right] \quad (1-33)$$

با استفاده از معادله (۱-۲۴)، معادله (۱-۳۳) را در نقطه حضیض مدار، جائی که  $r = a(1-e)$  و تندی حضیض که توسط معادله (۱-۱۷) داده می‌شود، ارزیابی می‌کنیم. نتیجه،  $TE = -G \frac{m_1 m_2}{r_a}$ ، نشان می‌دهد که انرژی کل منفی است - مدار بسته است. اکنون معادله (۱-۳۳) به صورت شکل نهایی خود در می‌آید

$$v^2 = G (m_1 + m_2) \left[ \left( \frac{2}{r} \right) - \left( \frac{1}{a} \right) \right] \quad (1-34)$$

که دقیقاً همان شکل به دست آمده در معادله (۱-۲۸) است. این نتیجه سودمند و کلاسیک که بیان بقاء انرژی کل می‌باشد، گاهی معادله ویزویوا<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

## ۱-۶ کاربردهایی برای منظومه شمسی

برای فهم و درک بیشتر فرمولبندهای بالا، باید از نتایج بدست آمده، برای حل چند مسأله فیزیکی استفاده کرد. این نکته را با در نظر گرفتن مثالهای مختلف ساده‌ای از کاربرد شکل نیوتونی قانون سوم کپلر، نمایش می‌دهیم.

(الف) کاربرد قانون سوم کپلر

شکل جدیدی از قانون همابستگی، معادله (۱-۲۴) است

$$P^2 = 4\pi^2 a^3 / G (m_1 + m_2) \quad (1-35)$$

با اعمال این رابطه به خورشید ( $M_\odot$ ) و سیارات ( $m_p$ )، اگر زمان تناوب نجومی  $P$  را بر حسب سال و نیم محور اطول  $a$  را بر حسب  $AU$  اندازه بگیریم، ساده‌سازی قابل ملاحظه‌ای بوقوع می‌پیوندد، زیرا در این صورت

$$\frac{a^3}{P^2} = 1 + \left(\frac{m_p}{M_\odot}\right)$$

توجه داشته باشید که عمل ساده‌سازی را با استفاده از واحدهای زمینی انجام داده‌ایم؛ این مطلب بیان می‌کند که همواره باید برای دستگاه در نظر گرفته شده، مناسبترین واحدها را بکار برد. اجرای این عقیده با تشکیل نسبت‌های معادله (۱-۲۴) به صورت زیر در می‌آید

$$[(m_1 + m_2) / (m'_1 + m'_2)] \left(\frac{P}{P'}\right)^2 = \left(\frac{a}{a'}\right)^3$$

در اینجا سیستم  $m_1$  و  $m_2$  (با دوره تناوب  $P$  و نیم محور اطول  $a$ ) با سیستم استاندارد  $m'_1$  و  $m'_2$  (با  $P'$  و  $a'$ ) سنجیده می‌شود. برای اجسامی که خورشید را دور می‌زنند یا برای ستارگان دوتایی (فصل ۱۲)، دستگاه استاندارد سیستم خورشید-زمین است:  $P$  بر حسب سال،  $a$  بر حسب  $AU$  و همه اجرام بر حسب جرم خورشیدی بیان می‌شوند ( $M_\odot$ ). بر حسب این واحدها،  $P^2 = a^3$ ، یعنی  $K = 1$ ، بنابراین  $G = 4\pi^2$ . برای اقمار سیاره‌ای (اقمار طبیعی یا ماهواره‌های مصنوعی)، از سیستم زمین-ماه استفاده می‌کنیم:  $P' = 27/3$  روز،  $a' = 3/84 \times 10^5$  کیلومتر و  $(m'_1 + m'_2) = M_\odot$  (یا  $10^{33} \text{ kg}$ ) را بر حسب جرم زمین؛ سپس  $P$  را بر حسب روز،  $a$  را بر حسب کیلومتر و جرم  $m$  را بر حسب جرم زمینی (یا کیلوگرم) بدست می‌آورید.

به عنوان مثال، ستاره دنباله‌داری را در نظر بگیرید که دارای مدار بیضی شکل با زمان تناوب  $P$  سال می‌باشد و می‌خواهیم نیم محور اطول مدارش را بیابیم. از آنجائی که  $M_\odot \approx M_\odot + m$  دنباله‌دار، از معادله (۱-۳۵) نتیجه می‌شود  $a = P^{2/3} = 3/VAU$  مثال دیگر، پیدا کردن جرم اورانوس ( $M_U$ ) بر حسب جرم زمین می‌باشد. مشاهده می‌کنیم که

میراندا<sup>۱</sup>، قمر اورانوس (که جرمش  $M_m$  است) در مدت  $1/4$  روز در فاصله متوسط  $128000 \text{ km}$  سیاره را دور می‌زند. با استفاده از سیستم استاندارد زمین - ماه، داریم

$$[(M_a + M_m) / (M_{\oplus} + M_m)] \left(\frac{P_m}{P}\right)^2 = \left(\frac{M_u}{M_{\oplus}}\right) \left(\frac{P_m}{P}\right)^2 = \left(\frac{a_m}{a}\right)^3$$

در اینجا از جرمهای میراندا و ماه نسبت به جرمهای بزرگتر سیارات اصلیشان یعنی اورانوس و زمین، صرف نظر کرده ایم. با جانشین کردن داده‌های مناسب، خواهیم داشت

$$M_u \approx \left(\frac{27/3}{1/4}\right)^2 \left(\frac{128000}{384000}\right)^3 M_{\oplus} \approx 14 M_{\oplus}$$

### (ب) پرتاب موشکها

پرتابه‌هایی را تصور کنید که از سطح زمین به صورت قائم به طرف بالا پرتاب شده‌اند. با صرف نظر از اصطکاک جوئی که به صورت مداوم باعث کاهش تندی پرتابه می‌گردد، می‌توانیم از اصل بقاء انرژی کل برای یافتن ارتفاعی که پرتابه در نهایت صعود می‌نماید، استفاده کنیم.

در نزدیکی سطح زمین، جاذبه متمایل به پایین نیروی گرانشی  $F = mg$  است که در آن  $m$  جرم پرتابه می‌باشد. بنابراین، انرژی ذخیره شده در بالاترین ارتفاع  $h$  عبارتست از  $PE = mgh$ . اگر تندی جسمی در سطح زمین  $v$  باشد، انرژی جنبشی آن  $KE = \frac{mv^2}{2}$  خواهد بود. بر طبق بقاء انرژی کل:

$$TE = (KE + PE)_{\text{زمین}} = \text{مقدار ثابت} = (KE + PE)_h$$

در نتیجه با تعیین  $TE$  در  $h=0$  و در بیشترین ارتفاع  $h$ ، درمی‌یابیم که  $mgh = \frac{mv^2}{2}$  یا

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (36-1)$$

به ازای  $g = 9/8 \text{ m/s}^2$ ، قطعه سنگی که با تندی  $v = 14 \text{ m/s}$  به طرف بالا پرتاب شود، قبل از برگشتن به زمین تا ارتفاع ۱۰ متری صعود خواهد کرد.

هنگامی که ارتفاعات بزرگتر از شعاع زمین را ( $h \geq R_{\oplus}$ ) در نظر بگیریم، تقریب قبلی از بین می‌رود و باید از فرمول‌بندی صحیح معادله (۱-۳۲) استفاده کنیم. با ارزیابی این



عبارت در سطح زمین ( $R_{\oplus}$ ) و در بیشترین ارتفاع ( $R_{\oplus} + h$ )، داریم

$$\left(\frac{mv^2}{r}\right) - (GM_{\oplus} m/R_{\oplus}) = -GM_{\oplus} m/(R_{\oplus} + h)$$

یا

$$h = R_{\oplus} \left\{ (v^2 R_{\oplus} / 2GM_{\oplus}) / [1 - (v^2 R_{\oplus} / 2GM_{\oplus})] \right\}$$

$$= \left(\frac{v^2}{2g}\right) \left\{ R_{\oplus} / [R_{\oplus} - (\frac{v^2}{2g})] \right\} \quad (37-1)$$

معادله (۳۶-۱) در گستره  $\frac{v^2}{2g} \leq R_{\oplus}$ ، یعنی  $h \ll R_{\oplus}$  از معادله (۳۷-۱) پیروی می‌کند. توجه داشته باشید، هنگامی که  $\frac{v^2}{2g} = R_{\oplus}$ ، در تندی  $v = \sqrt{2gR_{\oplus}} = 11/2 \text{ km/s}$ ، پرتابه به  $h = \infty$  فرار می‌کند. این تندی بحرانی، تندی فرار نامیده می‌شود.

### (ج) مدارهای اقمار مصنوعی و سفینه‌های فضایی

بیشترین وسایل نقلیه فضایی در داخل مدار زمین قرار گرفته‌اند. یک مدار توقف که از آن وسایل در عمق فضا به طرف ماه و سیارات شتاب داده می‌شوند. موشکهای چند مرحله‌ای وسایل نقلیه را به آن طرف جو زمین انتقال می‌دهند، جایی که در مراحل آخر به طور افقی به وسیله نقلیه شتاب می‌دهد تا به سرعت مداری مورد نیاز برسد. تندی دورانی زمین ( $0/42 \text{ km/s}$  در استوا) به پرتاب شدن به طرف شرق جهت می‌دهد. برای یک مدار دایره‌ای که در فاصله  $r$  از مرکز زمین واقع شده است ( $r = R_{\oplus} + h$ )، اگر  $h$  ارتفاع مدار باشد، تندی دایره‌ای  $v_c$  می‌تواند از مساوی قرار دادن نیروهای جانب مرکز و گرانشی حاصل شود

$$v_c = (GM_{\oplus} / r)^{1/2} R_{\oplus}^{1/2} = v_c (1 + h/R_{\oplus})^{-1/2} \quad (38-1)$$

در اینجا  $v_c = (GM_{\oplus} / R_{\oplus})^{1/2} = 7/86 \text{ km/s}$  تندی دایره‌ای در سطح زمین (با صرف نظر از اصطکاک جوی) می‌باشد. با ترتیب مجدد معادله (۳۷-۱)، داریم

$$v_{\text{فرار}} = \sqrt{2} v_c \left[ \left(\frac{R_{\oplus}}{h} + 1\right) \right]^{1/2}$$

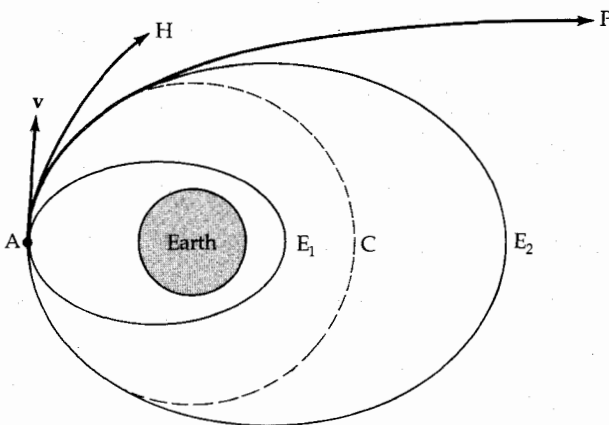
چنانچه  $\infty \rightarrow h$  تندی فرار عبارت خواهد بود از  $v = \sqrt{2}v_c$ ؛ توجه داشته باشید که این تندی فرار از سطح زمین است، نه از یک ماهواره.

مدار یک سفینه فضایی به طور مؤثری به سرعت در انتهای سوخت بستگی دارد. حالت ساده‌ای از یک پرتابه در حال حرکت به طور موازی با سطح زمین را در نظر بگیرید (نقطه A در شکل (۱-۱۶)). در صورتی که تندی در انتهای سوخت  $v$  را بدانیم، معادله انرژی (معادله (۱-۲۸))، نصف قطر اطول مدار را به دست می‌دهد

$$a = r / [2 - (\frac{v}{v_c})^2] \quad (1-39 \text{ الف})$$

که  $r$  فاصله مرکز زمین تا نقطه A است. اکنون سرعت پرتاب مورد نیاز برای نگه داشتن پرتابه در مداری با نصف قطر اطول  $a$ ، از معادله (۱-۳۹ الف) به دست می‌آید

$$v = v_c \left( 2 - \frac{r}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-39 \text{ ب})$$



شکل ۱-۱۶. مدارهای دور زمین. در A یک سفینه فضایی دارای سرعت انتهای سوخت،  $\vec{v}$  می‌باشد. اگر این سرعت با سرعت یک مدار دایره‌ای در فاصله‌ای از مرکز زمین برابر باشد، مدار دایره‌ای C حاصل می‌شود. هنگامی که  $v = \sqrt{2}v_c$  است یک مدار سهمی شکل P حاصل می‌شود؛ برای سرعتی بیشتر، مدار هذلولی فرار، هذلولی H می‌باشد. هنگامی که  $\vec{v} > \sqrt{2}v_c$  بین این دو حد قرار گیرد، A حضیض مدار بیضی  $E_1$  است؛ و هنگامیکه  $\vec{v} < \sqrt{2}v_c$  باشد، A اوج مدار بیضی شکل  $E_1$  خواهد بود.

انتظار می رود هنگامی که  $v = v_c$  باشد، مداری دایره‌ای به شعاع  $r = a$  نتیجه شود. وقتی که رابطه  $v = \sqrt{2}v_c$  برقرار باشد، نصف قطر اطول بسی نهایت می شود و پرتابه در امتداد مداری سهمی شکل فرار می کند؛ بنابراین، این تندی فرار مربوط به شعاع  $r$  است. وقتی که  $v > \sqrt{2}v_c$  باشد، سفینه فضایی روی یک مسیر هذلولی فرار می کند. اگر  $v < \sqrt{2}v_c$  باشد، پرتابه به مداری بیضی شکل وارد می شود و نقطه A آشکارا باید نقطه حضیض (نزدیکترین نقطه به زمین) یا نقطه اوج (دورترین نقطه از زمین) مدار باشد، زیرا در نقطه A سرعت عمود بر بردار شعاعی است. معادله (۱-۳۹ الف) برای  $v_c < v < \sqrt{2}v_c$  بیان می کند که در نقطه A،  $a > r$  است، لذا به حضیض وارد می شویم و مدار هرگز از A به زمین نزدیکتر نخواهد شد. برای  $v_c < v < v_0$  داریم  $a < r$  بنابراین A نقطه اوج است. اگر فاصله حضیض از شعاع زمین  $R_{\oplus}$  کمتر باشد، ماهواره با زمین تصادم خواهد کرد.

## مسائل

- ۱- فرض کنید صفحه مداری یک سیاره خارجی به اندازه  $10^\circ$  به طرف دایرة البروج انحنا پیدا کرده است و آن سیاره در حین حرکت خود به طرف شمال، دایرة البروج را در مقابله قطع کند. نموداری شبیه به شکل (۱-۳) رسم کنید که مسیر برگشتی این سیاره خارجی را نشان دهد.
  - ۲- تصور کنید که در حال مشاهده زمین از سیاره مشتری هستید. چگونه دوره تناوب مداری قمری زمین را مشاهده خواهید کرد؟ همین مطلب از سطح سیاره زهره چگونه خواهد بود؟
  - ۳- الف) به طور صریح طرز بدست آوردن معادله (۱-۴) را توضیح دهید، تمامی مراحل مقتضی را نشان بدهید. ب) روی کاغذ نمودار، روابط قطبی زیر را بکشید: معادله (۱-۳) برای یک بیضی، معادله (۱-۶) برای یک سهمی و معادله (۱-۷) برای یک هذلولی.
  - ۴- شتاب گرانشی در سطح اجرام سماوی زیر را بر حسب شتاب گرانشی  $g$  در سطح زمین به دست آورید
- الف) ماه
- $(M_m = 0.1223 M_{\oplus}, R_m = 1733 \text{ km})$

(ب) خورشید  $(M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}, R_{\odot} = 7 \times 10^8 \text{ m})$  و

(ج) سیاره مشتری  $(M_J = 318 M_{\oplus}, R_J = 11/2 R_{\oplus})$

۵- تندبهای حضيض و اوج عطارد چه اندازه است؟ فواصل حضيض و اوج این سیاره تا خورشید چگونه است؟ در هر یک از این نقاط حاصل ضرب  $v r$  (تندی ضربدر فاصله) را حساب کنید و نتیجه خود را به صورت فیزیکی تفسیر نمایید.

۶- موضع نسبی مرکز جرم را برای (الف) سیستم خورشید - مشتری (ب) سیستم زمین - ماه پیدا کنید.

۷- یک ماهواره تلویزیونی، با زمان تناوب نجومی دقیقاً ۲۴ ساعت، در مدار دایره‌ای در اطراف زمین قرار داد. فاصله چنین ماهواره‌ای از سطح زمین چقدر است؟ (راهنمایی: از قوانین کپلر استفاده کنید). اگر این ماهواره از دید ناظر زمینی ساکن به نظر برسد، جهت‌گیری صفحه مداری آن چگونه است؟

۸- با استفاده از مفروضات مداری برای تیتان (ضمیمه ۳) جرم سیاره زحل را بدست آورید.

۹- سنگی در مدار ماه از وضعیت سکون رها می‌گردد و به طرف زمین سقوط می‌کند. تندی سنگ هنگامی که به فاصله ۱۹۲۰۰۰ کیلومتری از مرکز زمین می‌رسد، چه اندازه است؟

۱۰- (الف) نیم محور اطول مدار بیضی شکل یک سفینه فضایی با حداقل انرژی از زمین تا زهره چگونه است؟ (ب) سرعت همان سفینه فضایی نسبت به زمین، در مدار زمین چگونه است؟ (ج) موقعی که سفینه به سیاره زهره می‌رسد، سرعت آن نسبت به سیاره چگونه است؟

۱۱- فرض کنید که یک پرتابه در فاصله  $r$  از مرکز زمین ( $r > R_{\oplus}$ ) دارای تندی انتهای سوخت  $\sqrt{2v}$  (جائی که  $v_c < v < v_e$ ) می‌باشد. اگر بردار سرعت بصورت موازی با سطح زمین به اندازه  $45^\circ$  بالای آن نشان داده شده باشد، نیم محور اطول  $a$ ، دوره تناوب نجومی  $P$  و خروج از مرکز  $e$  بیضی را با نتیجه‌گیری از مدار بیضی شکل بر حسب  $r, v$  و مقادیر ثابت پیدا کنید. همچنین آیا می‌توانید  $\theta$  را که زاویه انتهای سوخت در حضيض مدار است، پیدا کنید؟ (راهنمایی: بخش (۱-۵) ج) بسیار

سودمند است.)

۱۲- سرعت فرار یک موشک پرتاب شده از سطح زمین را با موشکی که در فاصله ۱AU از خورشید واقع گردیده است، مقایسه کنید (یعنی سرعت فرار از منظومه شمسی در فاصله زمین تا خورشید می باشد).

## فصل دوم

# منظومه شمسی در مریا

زمین ما عضوی از خانواده خورشید است - منظومه شمسی، نه سیاره اصلی، تعداد زیادی قمر طبیعی (اقمار)، تعداد زیادی سیارکها، تعداد نامعلومی ستاره‌های دنباله‌دار به همراه شهابها و شهاب‌سنگها، به دور خورشید در حال گردش هستند. هر دسته از اجرام دارای خصوصیات مشخصه (این فصل) و رفتار ویژه مجزا (فصول ۳ الی ۶) مانند رفتار منظمی که نیاز به توصیف بر حسب منشأ منظومه شمسی دارند، می‌باشد (فصل ۷). در اینجا جنبه‌های فیزیکی منظومه شمسی را مورد بررسی قرار می‌دهیم؛ سپس به جزئیات این جنبه‌ها می‌پردازیم. مبنای فیزیکی این دورنما، مکانیک سماوی می‌باشد که برای اجرام منظومه شمسی به کار رفته است.

## ۱-۲ محتویات منظومه شمسی

تمامی اجرامی که تحت نیروی گرانشی خورشید در مدارها در گردشند، منظومه شمسی را تشکیل می‌دهند. این اجرام بر اساس جرمشان در سلسله مراتب مشخصی

قرار دارند: در رأس آنها خورشید واقع است، سپس سیارات، اقمار و حلقه‌های آنها، خرده‌های بین سیاره‌ای (ستاره‌های دنباله‌دار، سیارکها و شهابها) و در آخرین مرتبه گازها و گرد و غبار بین سیاره‌ای قرار دارند. (برای خلاصه‌ای از داده‌های منظومه شمسی به ضمیمه ۳ نگاه کنید.)

### (الف) سیارات

امروزه خورشید را در مرکز سیستمی شامل نه سیاره که به دور آن در حال گردشند، قرار می‌دهیم. این نه سیاره بر حسب فاصله متوسط از خورشید به ترتیب عبارتند از: عطارد، زهره، زمین، مریخ، مشتری، زحل، اورانوس، نپتون و پلوتو. جرم کل این سیارات جمعاً  $0.146 M_{\odot}$  است و فقط توسط نور منعکس شده خورشید می‌درخشند. بخش عمده جرم منظومه شمسی مربوط به خورشید است (شکل (۱-۲)).

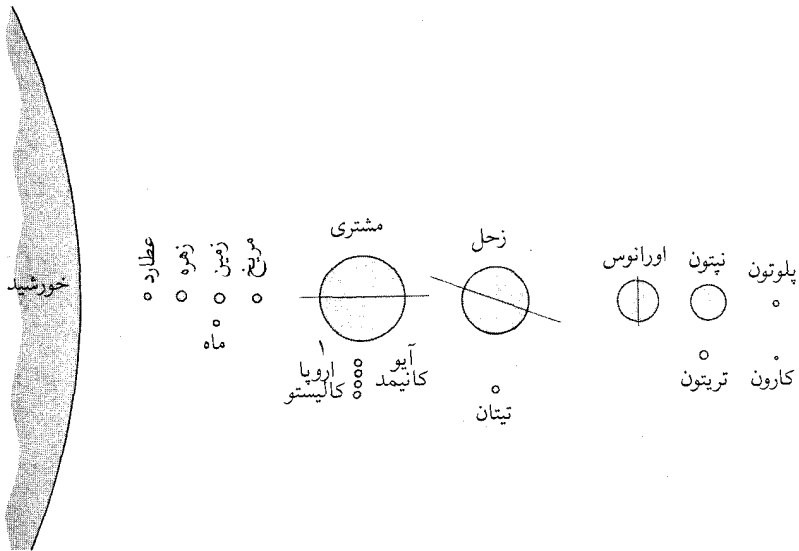
### حرکات

سیارات در حرکت خود به دور خورشید در مدارهای بیضی شکل از قوانین کپلر و نیوتون پیروی می‌کنند. محورهای نیمه اطول مداری آنها در یک الگوی نسبتاً منظم قرار دارند. در سال ۱۷۶۶ میلادی (قبل از آنکه اورانوس، نپتون و پلوتو کشف شوند)، «تیتوس<sup>۱</sup>» اهل وینتبرگ یک قاعده تجربی تقریبی در ارتباط با فواصل متوسط خورشید - سیاره را پیدا کرد؛ در سال ۱۷۷۲ میلادی یوهان بُد<sup>۲</sup> این رابطه را منتشر کرد و امروزه بنام قانون بُد یا قاعده تیتوس - بُد موسوم است. این قاعده به شکل رشته‌ای از اعداد به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$0.000 \text{ و } (3 \times 2^3) + 4 \text{ و } (3 \times 2^2) + 4 \text{ و } (3 \times 2^1) + 4 \text{ و } (3 \times 2^0) + 4 \text{ و } 4$$

از تقسیم حاصل هر یک از عبارات رشته فوق بر عدد ده، رشته زیر بدست می‌آید

$$0.000 \text{ و } 38/8 \text{ و } 19/6 \text{ و } 10 \text{ و } 5/2 \text{ و } 2/8 \text{ و } 1/6 \text{ و } 1/0 \text{ و } 0/7 \text{ و } 0/4$$



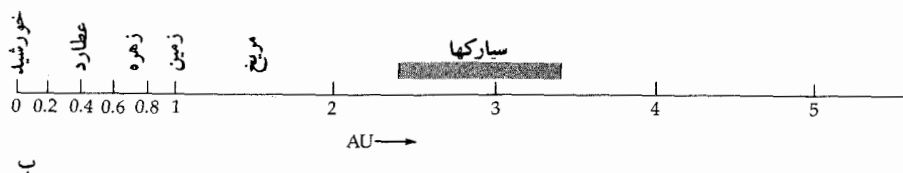
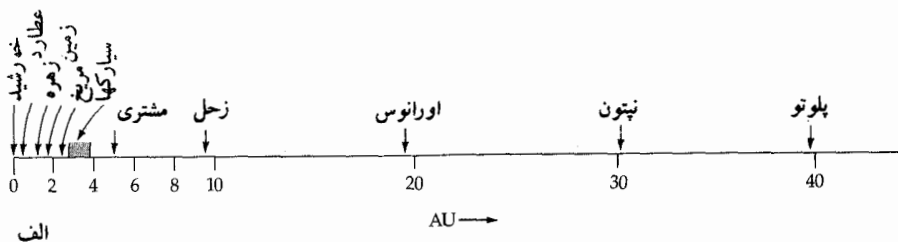
شکل ۱-۲. اندازه‌های نسبی سیارات. در این مقیاس فقط بخشی از لبه خورشید قابل مشاهده است. علاوه بر سیارات، بزرگترین هشت قمر آنها نیز مشاهده می‌شوند

اگر فاصله خورشید تا زمین را به عنوان واحد طول (۱AU) در نظر بگیریم، متوسط فواصل خورشید - سیاره (جدول (۲-۳) ضمیمه) به قرار زیر خواهد بود

عطارد	زهره	زمین	مریخ	مشتری	زحل	اورانوس	نپتون	پلوتو
۰/۳۹	۰/۷۲	۱/۰۰	۱/۵۲	۵/۲۰	۹/۵۴	۱۹/۲	۳/۰۱	۳۹/۵

به استثناء شکاف در ۲/۸AU (جایی که سیارکها قرار دارند)، قانون بُد به طور شگفت‌انگیزی در مورد هفت سیاره داخلی مورد قبول است - این یک قاعده منظم است که به طور ضمنی به یک فرایند فیزیکی دلالت می‌کند. به فاصله‌های نزدیک و فشرده از خورشید تا مریخ (شکل (۲-۲)) و توزیع بازتر و منظم‌تر از مشتری به بعد توجه کنید.



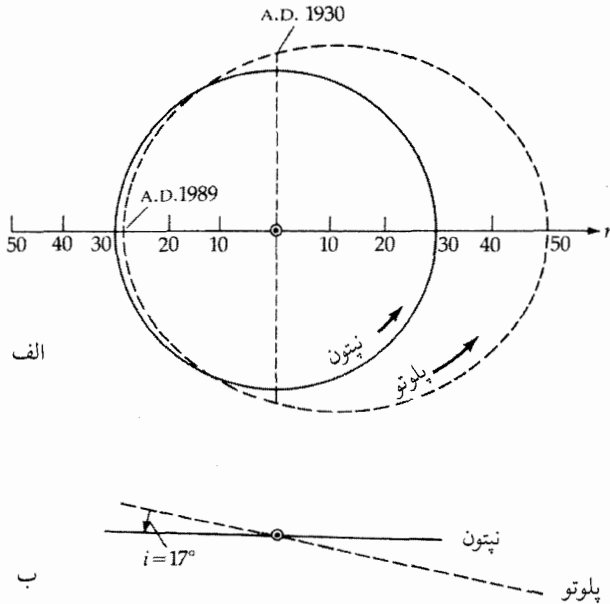


شکل ۲-۲. فواصل مداری نسبی سیارات. (الف) مقیاس فاصله بر حسب AU از خورشید تا پلوتو. (ب) وسعت مقیاس داخل منظومه شمسی را نشان می‌دهد.

مدارها سه خصوصیت برجسته حرکت سیاره‌ای را نمایش می‌دهند (جدول ۱-۳)

ضمیمه). اولاً همه سیارات از دید ناظر واقع در بالای صفحه حرکت مداری زمین، دارای حرکتی در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت به دور خورشید می‌باشند - مدارها مستقیم هستند. ثانیاً، صفحات مداری سیارات بسیار نزدیک به صفحه دایرة البروج (صفحه مدار زمین) است، بنابراین هنگامی که از زمین نگاه می‌کنیم همه سیارات غیر از پلوتو همیشه در عرض نوار  $16^\circ$  منطقه البروج<sup>۱</sup> قرار دارند (تمایل پلوتو  $17^\circ$  است). ثالثاً، خروج از مرکز مداری بجز در مورد نزدیکترین سیاره به خورشید و دورترین سیاره به آن یعنی عطارد و پلوتو، کمتر از  $0/1$  است. مدار پلوتو به علت داشتن خروج از مرکز بزرگ ( $e = 0/249$ ) به گونه‌ای است که فاصله پلوتو در قرین خورشید (نزدیکترین فاصله تا

خورشید)  $29/68 \text{ AU}$  و در بعید خورشید<sup>۱</sup> (دورترین نقطه نسبت به خورشید)  $49/36 \text{ AU}$  می باشد. پلوتو در حرکت مداری اش نسبت به نپتون به خورشید نزدیکتر می شود (شکل (۳-۲)). لذا، بر این اساس دانشمندان گمان می کنند که پلوتو قمر دور شده ای از نپتون است.



**شکل ۳-۲.** مدارهای نپتون و پلوتو. (الف) منظره از بالای مدارها، با مقیاس AU. دقت کنید که در قرین خورشید (۱۹۸۹ میلادی)، پلوتو داخل مدار نپتون قرار دارد. (ب) در نگاه جانبی مدارها، تمایلهای نسبی آنها نشان داده شده اند.

زمان تناوب چرخش نجومی یک سیاره، زمان چرخش آن نسبت به ستارگان است؛ این زمانهای تناوب به روشهای گوناگونی تعیین می شوند (جدول (۳-۲) ضمیمه). یک روش اصلی، در ارتباط با اثر دوپلری است که به طور مفصل در بخش (۱-۸) (الف) توضیح داده خواهد شد. ماهیت جابجائی دوپلر این است که وقتی نور بوسیله یک جسم گسیل می شود (یا امواج رادیویی پخش می گردند)، مؤلفه شعاعی سرعت بر حسب

طول موج (یا فرکانس) نسبت به طول موج در حال سکون انتقال می‌یابد: یک انتقال به قرمز برای دور شدن و یک انتقال به آبی برای نزدیک شدن. مقدار انتقال به مقدار سرعت شعاعی بستگی دارد (برای تندیه‌های غیر نسبیستی):

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$$

در اینجا  $\Delta \lambda$  تغییر طول موج،  $\lambda$  طول موج ساکن،  $v_r$  قسمت شعاعی سرعت و  $c$  تندی نور است.

قبلاً فرض شده بود که چرخش زهره و عطارد به دور خورشید همزمان است (به عبارت دیگر، یعنی اعتقاد بر این بود که دوره‌های تناوب چرخشی نجومی آنها با دوره‌های تناوب مداری نجومی شان برابر است). تا این که سرانجام در اواسط ۱۹۶۰ میلادی اندازه‌گیری‌های رادار دوپلری، دوره‌های تناوب آنها را ثبت کرد. در مورد ماه و مریخ با توجه به علامتها و لگه‌های فراوان و مشخصی که در سطح آنها قرار دارند، می‌توانیم به آهنگ چرخش آنها پی ببریم. سیارات غول‌پیکر مشتری، زحل، اورانوس و نپتون فقط جوهای فوقانی خود را نشان می‌دهند، بطوری که می‌توان از بررسی خصوصیات جوی و یا با مشاهده تابش انتقال یافته دوپلری از لبه آن سیارات به چرخش آنها پی برد. جو این سیارات بزرگ در استوا کمی سریعتر از قطبین آنها می‌چرخد، پس هیچگونه آهنگ چرخش واضحی وجود ندارد. گاهی اوقات، میدان مغناطیسی داده می‌شود. سطح پلوتو به طور یکنواخت منعکس کننده نیست؛ مقدار نور خورشید که این سیاره منعکس می‌کند، در ضمن چرخش تغییر می‌کند. با مشاهده این تغییرات روشنایی، دوره تناوب چرخش پلوتو را بدست می‌آوریم.

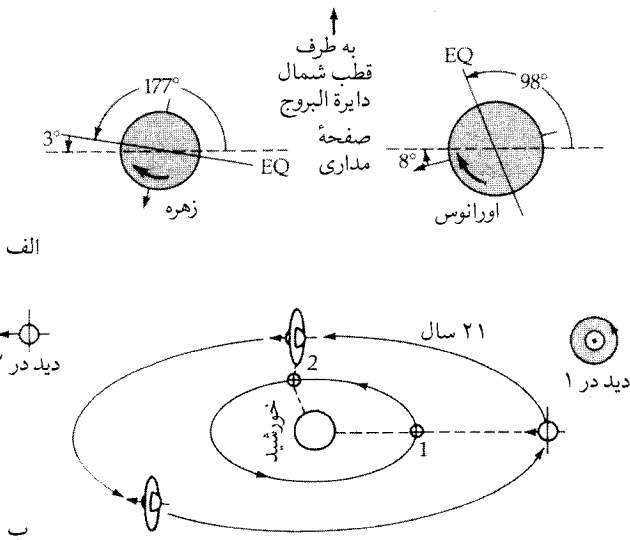
پخی سیاره  $\mathcal{E}$  را با رابطه زیر تعریف می‌کنیم

$$\mathcal{E} = (r_e - r_p) / r_e$$

که  $r_e$  شعاع استوائی و  $r_p$  شعاع قطبی آن است. کره کامل دارای  $\mathcal{E} = 0$  می‌باشد. اگر تمام سیارات دارای شکل سیال متعادل باشند، انتظار داریم که  $\mathcal{E}$ ، با افزایش آهنگ چرخش، افزایش یابد؛ نظریات علمی حاضر با این عقیده در توافق است (جدول (۲-۳) ضمیمه). اندازه‌گیری‌های دقیق زمین یک پخی به مقدار  $\frac{1}{298/3}$  را نشان می‌دهد. برای سایر سیارات، پخی را می‌توان با اندازه‌گیری قرص قابل رؤیت سیاره و یا با تجزیه و

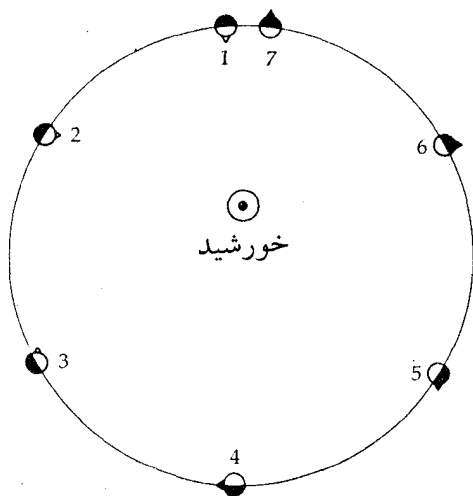
تحلیل آشفته گیهای حاصل در مدارهای قمرهای سیاره تعیین کرد. سیارات مایع و بزرگ بسیار پخ هستند تا حدی که سیاره های مشتری و زحل در تلسکوپ بسیار شبیه به بیضی گون به نظر می رسند.

استوهای سیارات نسبت به صفحات مداری شان به مقادیر متفاوتی اریب هستند. محورهای چرخشی عطارد، ماه و مشتری تقریباً با محورهای گردش آنها هم راستا می باشند، در صورتی که در مورد زمین، مریخ، زحل و نپتون زاویه بین این محورها تقریباً  $25^\circ$  است. میل استوایی این سیارات کمتر از  $90^\circ$  است، به طوریکه آنها تماماً از غرب به شرق یا به طور مستقیم (در همان جهتی که تمام سیارات به دور خورشید می گردند) می چرخند. زهره و اورانوس از شرق به غرب یا به طور برگشتی می گردند (شکل ۲-۴) (الف). محور چرخشی اورانوس لزوماً در صفحه مداریش قرار دارد، به طوریکه اگر قطب اورانوس در حال حاضر به طرف ما باشد در ظرف ۲۱ سال ما در صفحه استوایی آن قرار خواهیم گرفت (شکل ۲-۴) (ب).



**شکل ۲-۴.** میلیهای استوایی. (الف) زهره و اورانوس به طور برگشتی می چرخند، زیرا تمایل استوایی آنها (EQ) نسبت به صفحات مداری شان بیش از  $90^\circ$  است. (ب) محور چرخش اورانوس و صفحه مداری آن تقریباً هم جهت اند. در مکان ۱، سیاره را در بالای قطب می بینیم، در صورتی که ۲۱ سال بعد در مکان ۲ صفحه استوایی آن را در نیمرخ مشاهده می کنیم. مدارهای اقمار در ۱ تمام رخ و در مکان ۲ به پهلو هستند.

عطارد و زهره دارای آهنگهای چرخشی کندی هستند که ممکن است بویسله پیوند اسپین - مدار و تشدید توضیح داده شود. دوره تناوب چرخش هلالی زهره (دوره تناوب چرخش آن نسبت به زمین) ۱۴۶ روز می باشد که برابر با یک چهارم دوره مداری هلالی آن است. دوره تناوب چرخش نجومی عطارد دقیقاً  $\frac{2}{3}$  دوره تناوب مداری نجومی آن است (جدول (۲-۳) ضمیمه). از این رو، به نظر می رسد که تشدید هلالی سیاره زهره نسبت به زمین تقریباً چهار به یک است، و در مورد عطارد نیز به نظر می رسد که قفل نجومی<sup>۱</sup> آن روی خورشید سه به دو باشد. هر دو سیاره تا حدی مورب هستند (سیگار شکل). نیروهای جذر و مدی خورشیدی با این تغییر شکلها بر هم کنش دارند و حرکت چرخشی مستقیم سیاره را کند می کنند، تا زمانی که یک تشدید به وجود آید. خروج از مرکز زیاد مدار عطارد سبب ایجاد تشدید خورشید - عطارد می گردد (شکل (۲-۵)). هر یک از دو انتهای قطر اطول سیاره عطارد در یکی از نقاط قرین خورشید به طرف خورشید قرار می گیرد و عطارد در دو زمان تناوب مداری نجومی سه بار می چرخد.



شکل ۲-۵، مدار عطارد. چون آهنگ چرخش این سیاره دو سوم دوره تناوب مداری اش است، سه چرخش نجومی را در دو گردش کامل انجام می دهد.

## درونها

بطور طبیعی سیارات به دو دسته تقسیم می‌شوند. (جدول ۳-۳ ضمیمه): (۱) سیارات کوچک جامد زمینی (عطارد، زهره، زمین، ماه و مریخ)، که جرم‌های آنها بزرگتر از زمین نیست و (۲) سیارات بزرگ، سیال و مشتری گونه (مشتری، زحل، اورانوس و نپتون) که از نظر جرمی بین  $15M_{\oplus}$  تا  $318M_{\oplus}$  قرار دارند، پلوتو سیاره دوگانه‌ای است که در هیچ یک از دسته‌بندیهای فوق جای نمی‌گیرد.

جرم سیاره‌ای (۱) با اعمال قانون سوم کپلر به مدارات قمرها اندازه‌گیری می‌شود و یا (۲) مدارات قمرها هنگامی که هیچ قمر طبیعی وجود نداشته باشد با مشاهده اختلالات حاصل از گرانش یک سیاره در مدارهای دیگر سیارات، سیارکها، ستاره‌های دنباله‌دار و یا فضاپیماهای مصنوعی. شعاع سیاره‌ای نیز به طریق زیر قابل اندازه‌گیری است: (۱) بوسیله اندازه‌گیری ظاهری قرص سیارات، (۲) با پیدا کردن زمان کامل پوشیدگی (زمانی که یک سیاره از جلوی یک شیء عبور می‌کند) ستاره‌ها، اقمار سیاره‌ها و فضاپیماها و (۳) همچنین شعاع سیارات نزدیک را می‌توان با اندازه‌گیری دقیق زمان تپشهای رادار که از نقاط مختلف سطح یک سیاره منعکس می‌شوند، بدست آورد. با تقسیم جرم سیاره ( $M$ ) بر حجم آن ( $\frac{4}{3}\pi R^3$ ) می‌توانیم چگالی متوسط  $\rho$  آن را حساب کنیم (در واحدهای SI، کیلوگرم بر متر مکعب):

$$\bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad (1-2)$$

چگالی آب خالص  $1000 \text{ kg/m}^3$  است. چگالی بالای سیارات زمینی، در گستره  $3400$  تا  $5500$  کیلوگرم بر متر مکعب، گواه بر این حقیقت است که این سیارات از مواد سنگین و سختی همچون آهن، سیلیس و منیزیم تشکیل شده‌اند. چگالی پایین سیارات مشتری گونه (زحل می‌تواند بر آب شناور بماند!) نشان دهنده آن است که این سیارات از ترکیباتی شبیه ترکیبات خورشید تشکیل شده، در حالی که عناصر هیدروژن و هلیوم نسبت به عناصر دیگر از درصد بالاتری برخوردارند.

ساختار درونی یک سیاره بستگی به ترکیبات شیمیایی، چگالی، دما و فشار آن دارد. عموماً فشار در نواحی نزدیک‌تر به مرکز یک سیاره افزایش می‌یابد و همچنین دما در

نتیجه فشار بیشتر و گرمائی که بوسیله تجزیه مواد رادیواکتیو آزاد می شود، زیاد می گردد. مواد گوناگون تحت شرایط مختلف به طور پایدار باقی می مانند، بطوری که ترکیب شیمیایی به طور شعاعی لایه لایه است. زمین دارای یک هسته مذاب فلزی است که در روی آن سیلیکاتهای سبک تر شناورند؛ انتظار داریم که قسمت درونی زهره نیز چنین باشد، زیرا زهره نیز جرم و ترکیباتی شبیه زمین دارد. سیارات مشتری گونه دارای درون متراکم تری هستند که عمدتاً از هیدروژن و هلیوم که احتمالاً به شکل گِل شُل می باشند، تشکیل شده اند.

با استفاده از چگالی متوسط، ترکیب و پخی مشاهده شده یک سیاره، می توانیم الگوهای فیزیکی ثابتی از بخش مرکزی آن بسازیم (درست همان طور که در مورد ستارگان در فصل ۱۶ انجام خواهیم داد). معمولاً گستره ای از مدلها با داده های ما مطابقت دارند، بنابراین فقط مشاهده و نظریه پیشرفته می تواند ما را به یک تصویر واحد رهنمون سازد.

از آنجائی که نمی توانیم بخش های مرکزی سیارات را به طور مستقیم مورد بررسی و مطالعه قرار دهیم، بوسیله استنتاج و قیاس به مطالعه می پردازیم.

### سطوح

در سیارات مشتری گون و زهره فقط جوهای ابری فوقانی آنها قابل رؤیت است، ولی در سیارات زمینی و ماههای بزرگ علائم سطحی آنها نیز نمایان هستند. مهمترین داده های واقعی که از سطح سیارات می توان کسب کرد، عبارتند از: رنگ، آلبدو<sup>۱</sup> و دما. رنگ یک سیاره به ترکیبات سطح و جو آن بستگی دارد. اقیانوسها و قاره ها به زمین رنگ آبی مخلوط با سبز، قهوه ای و نارنجی می دهند؛ و مناطق وسیع در زمین که از ابر یا برف پوشیده شده است به رنگ سفید به نظر می رسد. سطح بازالتی<sup>۲</sup> ماه به رنگ خاکستری تیره با رگه های سفید رنگ به نظر می رسد، در صورتی که بیابانهای مریخ به رنگ قهوه ای - نارنجی مشاهده می شوند. در سطح آیو<sup>۳</sup> (بزرگترین قمر مشتری) یک پرده زرد رنگ دیده می شود که نتیجه گرد و غبارهای گوگردی آتشفشانهای فعال آن

است.

آلبدوی هر شیء کسری از نور خورشید است که توسط آن منعکس می شود. در سیارات بدون جو یا دارای جو کم (عطارد، ماه و مریخ)، آلدو خیلی کم است، زیرا صخره ها منعکس کننده های ضعیفی می باشند. سطوح یخ زده، نظیر بیشتر اقمار زحل، به طور نسبی دارای آلدوی بالا هستند. خاصیت انعکاس بالای ابرها منجر به آلدوهای زیاد سیارات مشتری گون و زهره می شوند. آلدوی زمین متغیر است چون به عواملی مانند فصل، برف و ابر بستگی دارد و دارای میانگین  $0.۳۵$  می باشد.

یک مشخصه مهم سطوح سیاره ای «دمای سطحی» است. حال ببینیم چگونه دماهای سطحی تابش کننده های جسم سیاه، مشاهده و محاسبه می شوند. فصل هشتم شامل بحث کاملی درباره اجسام سیاه تابشگر می باشد. در اینجا خواص اصلی این جسم فرضی را به شما معرفی می کنیم. می توانید به دو گونه اجسام سیاه را تصور کنید: به وسیله خواص جذبی و یا خواص نشری آنها. همانگونه که از این نام پیداست، یک جسم سیاه تمام تابشهای الکترومغناطیسی ای را که به آن برخورد می کند، جذب می کند و هیچ بخشی از آن را منعکس نمی کند. از این رو، آلدوی جسم سیاه «صفر» است. وقتی یک جسم سیاه تا دمای معینی گرم شود، طیف نور گسیل شده از آن (شکل (۲-۶)) شکل مشخصی دارد که «منحنی پلانک» نامیده می شود و دارای یک بیشینه است. یک جسم سیاه بیشترین انرژی خود را در طول موجهای نزدیک به

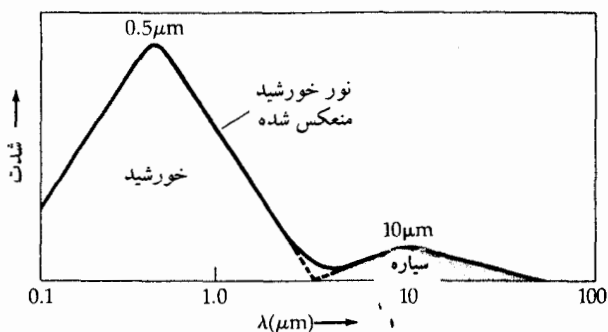
$$\lambda_{\max} = (0.002898 \text{ m}) / T = (2898 \mu\text{m}) / T \quad (2-2)$$

گسیل می دارد که در آن  $T$  دمای مطلق جسم سیاه؛ یک میکرومتر برابر  $10^{-6}$  متر است. این رابطه «قانون وین»<sup>۱</sup> است که بر طبق آن تابش خورشیدی در نیم میکرومتر (نور سبز)؛ یک قله دارد. در دمای معمولی اتاق ( $T = 290^\circ \text{K}$ ) قله منحنی در طول موج بلندتر مادون قرمز  $10 \mu\text{m}$  ( $\lambda_{\max}$ ) (شکل (۲-۶)) واقع است. از این رو، می توانیم دمای سطح سیاره را به وسیله مشاهده تابش آن در ناحیه مادون قرمز تعیین کنیم.

از جو و قسمتهای مختلف سطح سیاره، طول موجهای مختلفی تابش می شوند. برای مثال، امواج رادیویی ساتیمتری از سطح جامد زهره سرچشمه می گیرند، امواج میلیمتری



فقط می‌توانند از جو پائینی آن فرار کنند و امواج مادون قرمز از جو بالائی آن می‌آیند. بنابراین، می‌توانیم دمای سیاره و ترکیب سطوح مختلف سیاره و جو آنرا به وسیله مشاهده مقدار تابشی که در طول موجهای مختلف گسیل می‌شود، به دقت تعیین کنیم. از آنجا که ماه جو ندارد، پرتوهای مادون قرمز مستقیماً از سطح قابل رؤیت آن می‌آیند و تابش با طول موج بلندتر از چندین سانتیمتر از زیر سطح ماه ناشی می‌شود. با استفاده از این مطلب می‌توان شرایط زیر سطحی را به دقت مطالعه کرد. سیاره‌ای که انرژی بیشتری در ثانیه از آنچه که از خورشید دریافت می‌دارد، تابش



شکل ۲-۶. گسیل پیوسته خورشید و یک سیاره. در حالی که خورشید مانند جسم سیاه تابش می‌کند، تابش آن در نزدیکی  $0.5 \mu\text{m}$  دارای یک قله است. برای سیاره‌ای بادمای سطحی  $290^\circ\text{K}$ ، قله در  $10 \mu\text{m}$  واقع است.

می‌کند باید یک منبع گرمای داخلی داشته باشد. اندازه‌گیریهای دقیق در سطح زمین، یک جریان گرمایی را از درون داغ زمین نشان می‌دهد؛ همین واقعه برای ماه نیز اتفاق می‌افتد. معلوم شده است (از مشاهدات مادون قرمز) که سیارات دیگر نظیر مشتری، زحل و نپتون گرمای بیشتر تولید می‌کنند.

اکنون نشان می‌دهیم که چگونه دماهای نظری جسم سیاه پیدا می‌شوند (جدول ۳-۳) ضمیمه). ایده اساسی این است که دریایم در چه دمایی، یک جسم سیاه کوچک (یک سیاره) باید تابش کند تا با انرژی دریافتی از خورشید در تعادل باشد. از «قانون

استفان<sup>۱</sup>» برای تابش جسم سیاه (فصل ۸) استفاده می‌کنیم. این قانون شار انرژی E (انرژی گسیل شده از واحد سطح در واحد زمان یا  $\frac{W}{m^2}$ ) را به دمای T جسم سیاه مربوط می‌کند.

$$E = \sigma T^4 \quad (۳-۲)$$

که در آن ثابت تناسب  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  از آنجائی که مساحت یک سطح کروی به شعاع R برابر  $4\pi R^2$  است، خورشید ( $T_{\odot} = 5800 \text{ K}$ ) مثل یک جسم سیاه با آهنگ

$$4\pi R_{\odot}^2 E_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4 = 3/8 \times 10^{26} \text{ W}$$

انرژی گسیل می‌دارد که ( $L_{\odot}$ ) تابندگی خورشید است - توان تابشی کل آن. همین مقدار انرژی از میان کره‌ای به مساحت  $4\pi r_p^2$  جریان می‌یابد که  $r_p$  فاصله سیاره تا خورشید می‌باشد و شار انرژی روی سیاره عبارت است از

$$E_p = 4\pi R_{\odot}^2 / 4\pi r_p^2 = (R_{\odot} / r_p)^2 E_{\odot}$$

اگر یک متر مربع از ماده جسم سیاه در مقابل این انرژی قرار گیرد، به دمای تحت خورشیدی می‌رسد:

$$T_{ss} = (R_{\odot} / r_p)^{1/2} T_{\odot} \approx 395 (r_p)^{-1/2} \text{ K} \quad (۴-۲)$$

که در آن  $E_p = \sigma T_{ss}^4$  در تساوی آخر، مقادیر خورشیدی مناسب را وارد کرده و  $r_p$  را بر حسب AU بیان داشته‌ایم. دماهای تحت خورشیدی اساساً همان دماهای تعادل «هنگام ظهر» هستند.

اگر چه دماهای تحت خورشیدی برای ظهر محلی در سطوح سیاراتی که به کندی می‌چرخند (عطارد، ماه و پلوتو) بکار می‌روند، اما این دماها برای سیارات جو دار یا برای سیاراتی که چرخش سریع دارند، مناسب نمی‌باشند. برای این گونه سیارات، فرض کنید که سطح جذب کننده مؤثر، مقطع عرضی  $\pi R_p^2$  است و سطح تابش کننده مؤثر، مساحت سطح کل  $4\pi R_p^2$  می‌باشد که در آن شعاع سیاره است. آلدوی A کسری از تشعشع تابش خورشیدی است که منعکس می‌شود، بطوری که فقط کسر

(۱-۸) جذب شده است.

بنابراین، انرژی جذب شده در ثانیه عبارت است از

$$(1 - A) \pi R_p^2 E_p = (1 - A) \pi R_p^2 \left(\frac{R_\odot}{r_p}\right)^2 \sigma T_\odot^4$$

در حالیکه سیاره توان  $\pi R_p^2 \sigma T_p^4$  را تابش می‌کند. مجدداً از مفهوم تعادل استفاده می‌کنیم؛ هرگاه آهنگ جذب انرژی با آهنگ گسیل انرژی برابر باشد، یک دمای تعادلی بدست می‌آید. (در غیر این صورت دما می‌بایست یا بالا رود یا پائین بیاید.) با برابر قرار دادن این مقادیر و حل معادله دما به دست می‌آید:

$$T_p = (1 - A)^{\frac{1}{4}} (R_\odot / 2r_p)^{\frac{1}{2}} T_\odot$$

$$\approx 277 (1 - A)^{\frac{1}{4}} (r_p)^{-\frac{1}{2}} K \quad (5-2)$$

که در آن  $r_p$  بر حسب AU بیان می‌شود. دماهای تعادلی جسم سیاه (جدول (۳-۳) ضمیمه) هنگامی که  $A = 0$  باشد، بدست می‌آید. با در نظر گرفتن اثر آلبدو، می‌توانیم دماهای سیاره‌ای مشاهده شده را با تقریب بهتری بدست آوریم. اما، به خاطر داشته باشید که در این تخمینهای اولیه از پیچیدگیهای مهم مثل چرخش جو سیاره و نگه‌داری گرمایی آن، چشم‌پوشی شده است.

## جو

از میان سیارات زمینی، عطارد و ماه اساساً دارای جو نیستند، زهره و مریخ دارای جو متشکل از دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) هستند و جو زمین عمدتاً از نیتروژن ( $N_2$ ) و اکسیژن مولکولی ( $O_2$ ) تشکیل شده است. مواد اصلی تشکیل دهنده جو سیارات مشتری گونه عبارتند از هیدروژن مولکولی ( $H_2$ ) و هلیوم (He). به طور کلی، جو سیارات در نزدیکی سطح آنها بیشترین مقدار چگالی را دارد و با افزایش ارتفاع به سرعت رقیق می‌شود. ترکیب یک جو ممکن است لایه‌ای باشد، که گازهای سنگین‌تر نزدیک به سطح سیاره‌اند، اما اختلاط آشفته و بادهای می‌توانند منجر به یک ناحیه با ترکیب یکنواخت شوند. در فاصله دوری از سطح سیاره، پرتوهای ماورای بنفش و ایکس خورشیدی اتمهای جو را معمولاً یونیزه می‌کنند و یا این که مولکولها را می‌شکنند

و لایه یون سپهر<sup>۱</sup> (فصل ۴) را بوجود می آورند.

برای کسب اطلاعات در مورد جو سیاره ای، ساده ترین مدل را برای آن در نظر می گیریم. با تقریب مرتبه اول، یک جو، مشابه یک «گاز کامل» رفتار می کند، یعنی مانند ذراتی که فقط از طریق برخوردهای کشسان با یکدیگر بر هم کنش می کنند. چنین گازی از رابطه خاصی بین فشار، دما و چگالی تبعیت می کند.

$$P = nKT$$

که در آن  $P$  فشار (آهنگ تغییر اندازه حرکت ذرات در اثر برخورد) و واحد آن نیرو بر واحد سطح  $\frac{N}{m^2}$ ، چگالی ذرات (تعداد بر  $m^3$ )،  $T$  دمای مطلق کلونین ( $^{\circ}K$ ) و  $K$  ثابت بولتزمن که برابر  $1.38 \times 10^{-23} J/k$  است. در اثر برخوردهای مداوم ذرات گاز، در یک دمای معین، توزیع تعادلی سرعت ها به صورت

$$F(v) dv \propto \exp(-\frac{1}{2}mv^2/KT) v^2 dv$$

است که به «توزیع ماکسولی» سرعتها در یک گاز موسوم است (شکل (۲-۷)). توجه داشته باشید که به دلیل داشتن کاهش نمایی، توزیع، یک دنباله طولانی در سرعت های بالا دارد. به این معنی که تعدادی از ذرات در اثر برخورد به سرعت های خیلی بالا رسیده اند. قله این توزیع «محتمل ترین سرعت» را به صورت

$$v_p = (\frac{2KT}{m})^{\frac{1}{2}}$$

بدست می دهد که در آن  $m$  جرم یکی از ذرات گاز است. در حالی که سرعت این ذرات (اتماها یا مولکولها) در یک گستره وسیع توزیع شده اند و پس از هر برخورد به شدت تغییر می کنند، انرژی جنبشی متوسط به ازای هر ذره برابر است با

$$\overline{KE} = (m/2) \overline{v^2} = 3KT/2 \quad (2-6)$$

که در آن  $m$  جرم ذره و  $T$  دمای مطلق گاز است. از معادله (۲-۶) جذر میانگین مربع سرعت  $v_{rms}$  را به صورت زیر بدست می آوریم

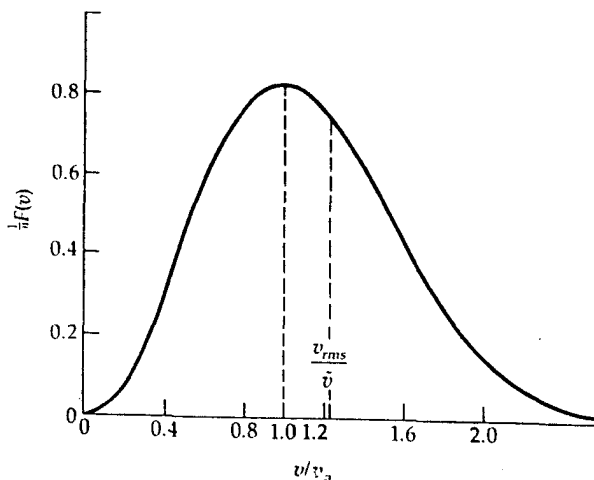
$$v_{rms} = (\overline{v^2})^{\frac{1}{2}} = (\frac{3KT}{m})^{\frac{1}{2}} \quad (2-7)$$

که بر طبق آن سرعت متوسط ذرات با دما بالا می رود و با جرم کاهش می یابد. در نواحی رقیق بالای جو، ذره ای که با سرعت فرار  $v_e$  به سمت خارج حرکت می کند، شانس بسیار

خوبی برای ترک جو دارد و  $V_e$  عبارت است از

$$V_e = (\gamma GM / R)^{\frac{1}{2}} \quad (۸-۲)$$

که در آن  $M$  جرم سیاره و  $R$  شعاع آن است. برای یک نوع مشخصی از ذرات، اگر



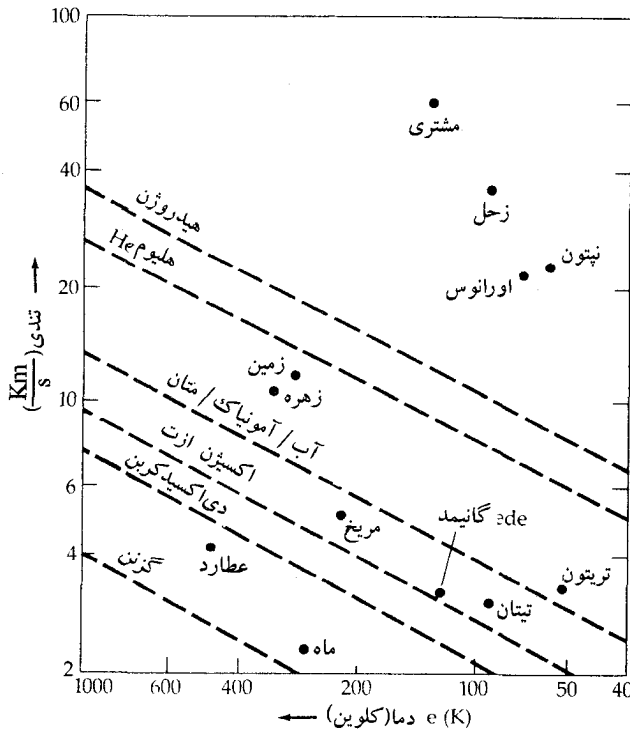
شکل ۲-۷. توزیع ماکسول برای ذرات یک گاز. سرعت‌های ذرات در حوالی محتمل‌ترین سرعت  $V_p$  که قله منحنی را نشان می‌دهد، پراکنده‌اند. اعداد روی محور عمودی به تعداد کل  $n$  در گاز بهنجار شده‌اند.

$V_{rms} = V_e$  باشد، در آن صورت آن نوع گاز، در عرض فقط چند روز جو را ترک خواهد کرد. برای نگه داشتن یک جو به مدت چندین بیلیون سال (تقریباً به اندازه عمر منظومه شمسی)، در یک سیاره باید  $V_e \geq 10 V_{rms}$  باشد. (ضریب ۱۰، دنباله تندی بالای توزیع ماکسولی تندیها را به حساب می‌آورد.) بنابراین، نوع مشخصی از مولکول به طور نامحدودی حفظ می‌شود تا این که (معادلات (۷-۲) و (۸-۲))

$$T \leq GMm / 100KR \quad (۹-۲)$$

شکل (۸-۲) نقاط مربوط به دمای تعادلی جسم سیاه (جدول (۳-۳) ضمیمه) و  $V_e$  را برای سیارات و تعدادی از قمرها نشان می‌دهد؛ خطوط و نقطه چین  $10 V_{rms}$  را برای انواع مولکولی مختلف، نمایش می‌دهند. بر اساس این مدل خام، یک سیاره تمام گازهایی را که در بالای این خطوط قرار دارند، حفظ کرده و بقیه گازها فرار می‌کنند. این

مدل به طور منطقی با مشاهداتی مبنی بر این که سیارات مشتری گونه تمام گازهای خود را نگه داشته‌اند؛ زمین و زهره و مریخ، هیدروژن و هلیوم خود را از دست داده‌اند ولی ازت و دی‌اکسید کربن را حفظ کرده‌اند؛ عطارد و ماه جو ندارند و اینکه بزرگترین قمرها دارای جو هستند را توجیه می‌کند. (در واقع، تیتان جو غلیظی دارد که عمدتاً از ازت تشکیل شده، اما به دلیل واکنش شیمیایی بر روی متان و سایر ترکیبات به صورت مه درآمد است.)



شکل ۲-۸. نگه‌داری گازهای جوی. تندبهای مولکولی متوسط به صورت تابعی از دما به همراه تندبهای فرار برای اجرام معین، داده شده‌اند. خطوط منفصل ده برابر تندبهای مولکولی متوسط را که نشانگر طول عمر بی نهایت است، نشان می‌دهند.

## (ب) قمرها و حلقه‌ها

تعداد اقمار سیاره‌ای طبیعی، یا ماه‌ها، در منظومه شمسی زیاد است. اما، جرم آنهارویمم رفته جرمی به اندازه  $10^{-4} M_{\oplus}$  می‌باشد. هشت قمر تقریباً به ابعاد ماه هستند، در حالی که بقیه آنها خیلی کوچکتند و شبیه سیارکهای بزرگ‌اند. ماه زمین، دو قمر مریخ، پنج قمر داخلی مشتری، هشت قمر داخلی زحل و پنج قمر اورانوس مدارات تقریباً دایره‌ای دارند که عمدتاً در صفحه استوایی سیارات واقع‌اند. مشاهدات نشان می‌دهد که این بیست و یک قمر، یک چرخش همزمان ناشی از اصطکاک جذر و مدی از خود نشان می‌دهند (همانگونه که ماه خودمان این کار را انجام می‌دهد).

تنها سه قمر به دور سیارات خاکی می‌چرخند، در حالیکه سیارات مشتری گونه حداقل ۵۱ قمر دارند. هر چه جرم سیاره بیشتر باشد گستره تأثیر گرانشی آن بیشتر خواهد بود. این مطلب به همراه این موضوع که سیارات مشتری گونه به کمربند سیارکی نزدیک هستند، به این معنی است که آنها می‌توانند سیارکها را از طریق گرانش به دام اندازند. اقمار سیارات مشتری گونه با اجرام کوچک، خروج از مرکز زیاد، مدارات ارب و حرکت برگشتی، احتمالاً توسط سیارکها به دام افتاده‌اند، همانند اقمار مریخ.

می‌دانیم که سه تا از چهار سیاره مشتری گونه، دارای حلقه هستند و چهارمی یعنی نپتون نیز ممکن است دارای حلقه باشد. البته در میان این سیستم حلقه‌ها، زحل زیباترین حلقه‌ها را داراست. در هر حال، این سیستم حلقه درون حدّ روچ<sup>۱</sup> است (بخش (۳-۵۴)). تعدادی از حلقه‌ها ظاهراً به نظر می‌رسد که در امتداد اقمار کوچک، درست در خارج و داخل مرزهایشان قرار داشته باشند.

## (ج) ستارکها

قانون بُد<sup>۲</sup>، وجود سیاره‌ای در فاصله  $2/8AU$ ، بین مریخ و مشتری را «پیش بینی می‌کرد». اما، تا سال ۱۸۰۱ میلادی طول کشید تا گیوسپ پیازی<sup>۳</sup> یک سیاره کوچک بنام سرس<sup>۴</sup> را در این منطقه کشف کرد. تا سال ۱۸۹۰ میلادی بیش از ۳۰۰ سیارک با نیم‌محور اطول مداری بین  $2/3$  تا  $3/3AU$  پیدا شده بودند - آنها کمربند سیارکی را

1. Roche  
3. Giusuppe Piazzi

2. Bode  
4. Ceres

تشکیل می‌دهند. امروزه عناصر مداری بیش از ۳۰۰۰ سیارک - شناخته شده‌اند و هر سیارکی بر اساس یک نام و مشخصات مداری شماره‌گذاری می‌شود، مثلاً مانند سیارک ۱۰۰۰ پیازی.

سیارکها کوچکتر از آن هستند که دارای جو باشند، چون قطرهای مشاهده شده آنها در گستره‌ای از مقادیر تقریباً بزرگ (سرس، ۱۰۲۰ Km؛ پالاس<sup>۱</sup>، ۵۳۸ Km؛ وستا<sup>۲</sup>، ۵۴۹ Km) تا مقادیر کوچک فراوان (با قطر حدود ۱ Km)؛ قرار می‌گیرند، مطمئناً تعداد بسیار زیادی صخره کوچک نیز در کمربند سیارکی وجود دارد. جرم کل سیارکها احتمالاً حدود ۴ درصد جرم ماه است. بزرگترین سیارکها تمایل دارند که به فاصله دورتری و کوچکترین آنها در فاصله نزدیکتری از خورشید قرار گیرند؛ مدار تمام سیارکها مستقیماً به دور خورشید است. سیارکها دارای خروج از مرکزهای مداری تا حداکثر ۰/۸۳ هستند که بیشتر آنها در گستره ۰/۱ تا ۰/۳ قرار می‌گیرند و دارای میلیهای مداری تا ۶۸° می‌باشند، اما میل بیشتر آنها کمتر از ۳۰° است. کمربند سیارکی دارای نواحی خالی است که آنها را شکافهای کِرک وود<sup>۳</sup> می‌نامند، و این شکافها در جاهایی که نیم محور اطول مداری دارای دوره تناوبی با کسر ساده‌ای از دوره تناوب مداری مشتری باشد (مانند  $\frac{1}{4}$ ،  $\frac{1}{3}$ ،  $\frac{1}{4}$ ،  $\frac{2}{5}$ ،  $\frac{3}{7}$ )، قرار می‌گیرند. آشفستگی‌های گرانشی دوره‌ای ناشی از مشتری، تمام سیارکها را از این شکافها خارج کرده است.

در جاهایی که نسبت دوره‌های تناوب  $\frac{2}{3}$  و  $\frac{1}{1}$  باشند، سیارکها به صورت گروه‌ها و یا خانواده‌هایی تجمع می‌کنند؛ مثلاً گروه پانزده عضوی تراژون<sup>۴</sup> در مدار مشتری قرار دارند به طوری که خورشید و مشتری در دو رأس مثلث‌های متساوی الاضلاع و اعضای این خانواده در رأس سوم آن واقع‌اند. اعضای خانواده تراژون در این نواحی که در مقابل آشفستگیها پدیدارند، در مواضع تعادلی مقید شده‌اند. بعضی از سیارکها که به نام گروه آپولو<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند و شامل دِدالوس<sup>۶</sup>، ایکاروس<sup>۷</sup> و ژئوگرافوس<sup>۸</sup> هستند، دارای قرین خورشیدهای مداری‌ای می‌باشند که در داخل مدار زمین واقع می‌شوند، به طوری

1. Pallas.  
3. Kirk Wood.  
5. Apollo.  
7. Icarus

2. Vesta  
4. Trojan.  
6. Daedalus.  
8. Geographos



که ممکن است گاهی از نزدیک زمین عبور کنند. در پانزدهم ژوئن ۱۹۶۸ میلادی، ایکاروس از فاصله  $۱۰^۶ \times ۶/۴$  Km نزدیک زمین عبور کرد. بعضی از مردم از یک برخورد بیم داشتند و پیش‌بینی می‌کردند که جهان پایان می‌پذیرد، اما این‌طور نشد. درست مشابه پلوتو، دوره تناوب چرخش سیارکها از طریق حرکت‌های نامنظم نور منعکس شده خورشید از آنها، اندازه‌گیری می‌شود. بعضی از منحنی‌های نوری مشاهده شده دارای دو بیشینه و دو کمینه در هر دوره هستند که با اجسام دوکی شکلی که در هر ۲۰-۳ ساعت یکبار می‌چرخند، مطابقت دارند (دوره تناوب چرخشی متوسط سیارکها، ۷ ساعت است). بنابراین، تکه‌های نامنظمی از سنگها را تجسم می‌کنیم. که قطر آنها چندین کیلومتر است و در عرض چند ساعت به دور خود می‌چرخند و احتمال برخورد میان آنها حداقل یک میلیون سال طول می‌کشد.

#### (د) ستارگان دنباله‌دار

ستاره‌های دنباله‌دار اجرام مزاحم کوچکی می‌باشند که هر چند یکبار در داخل منظومه شمسی ظاهر می‌شوند (شکل (۲-۹)). ستاره‌های دنباله‌دار روشن مرئی، دارای دنباله‌هایی هستند که می‌توانند تا  $۹۰^\circ$  در آسمان امتداد داشته باشند. هر ستاره دنباله‌دار به یادبود کاشف آن (دنباله‌دار اوترما<sup>۱</sup>) یا دیگر همکارانش (دنباله‌دار ایکیا - سکی<sup>۲</sup>) و نیز بر اساس سال کشفشان نام‌گذاری شده‌اند (مثلاً ۱۹۷۱a اولین ستاره دنباله‌داری بود که در سال ۱۹۷۱ میلادی کشف شد و همین‌طور ۱۹۷۱b بعدی بود و غیره). پس از آن‌که مداری برای آنها محاسبه شود، شماره‌گذاری بر اساس عبور از نقطه قرین خورشیدی انجام می‌گردد (مثلاً ستاره دنباله‌دار ۱۹۷۱I اولین ستاره دنباله‌داری بود که در سال ۱۹۷۱ میلادی از نقطه قرین خورشیدی گذشت). تمام ستاره‌های دنباله‌دار در مدارهای بیضی شکل به دور خورشید حرکت می‌کنند (برخی مسیر برگشتی دارند) و تمام آن‌ها اعضای منظومه شمسی می‌باشند. می‌توان آنها را به دو دسته متمایز تقسیم کرد: (۱) ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب طولانی که شامل اکثریت ستاره‌های دنباله‌دار می‌شوند و دارای خروج از مرکز مداری خیلی نزدیک به واحد

(تقریباً سهمی گون) هستند. و (۲) گروه خیلی کوچکتر از ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب کوتاه که بازگشت آنها تناوبی است. بیشتر ستاره‌های دنباله‌دار مشاهده شده در فاصله ۲-۱ AU از خورشید به نقطه قرین خورشیدی می‌رسند و میل مدار آنها تمام مقادیر را شامل می‌شوند. بنابراین، ستاره‌های دنباله‌دار در یک حجم کروی به مرکز خورشید حرکت می‌کنند، در حالی که سیارات در نزدیکی دایرة البروج حرکت می‌نمایند. بعید خورشیدی<sup>۱</sup>های ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب طولانی، ممکن است تا ۵۰۰۰۰ AU باشد و دوره تناوب مداری آنها به یک میلیون سال و حتی بیشتر بالغ شود؛ این ستاره‌های دنباله‌دار فقط یکبار که از نقطه قرین خورشیدی عبور می‌کنند دیده می‌شوند. در بعضی موارد آشفته‌گیهای گرانشی سیاره‌ای باعث می‌شود مدار ستاره دنباله‌دار هذلولی شود (e > ۱) به طوریکه از منظومه شمسی فرار می‌کنند، حال آنکه در موارد دیگر مدارها به صورت بیضی‌های کوچک در می‌آیند. به این ترتیب، مشتری یک گروه چهل و پنج عضوی از ستارگان دنباله‌دار را به دام انداخته است که اینک به دور خورشید می‌چرخند و بعید خورشیدی آنها نزدیک مدار مشتری است. ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب کوتاه در میان سیستم سیاره‌ای حرکت می‌کنند: مثلاً، ستاره دنباله‌دار آنکه<sup>۲</sup> کوتاهترین دوره تناوب ۳/۳ سال را دارا می‌باشد (a ≈ ۲/۲ AU). مشهورترین ستاره دنباله‌دار با دوره تناوب کوتاه، ستاره دنباله‌دار هالی<sup>۳</sup> است که هر ۷۶ سال یکبار به قرین خورشیدی باز می‌گردد.

ستاره دنباله‌دار با هر بار عبور از نقطه قرین خورشیدی مقداری از مواد خود را در اثر گرمای خورشید و نیروهای جذر و مدی از دست می‌دهد، تا بالاخره، ستاره دنباله‌دار از بین می‌رود. مشاهده شده است که برخی از ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب کوتاه به چندین تکه تقسیم شده و یا حتی از هم پاشیده‌اند.

چون ستاره‌های دنباله‌دار از بین می‌روند، اگر قرار باشد ما امروزه آنها را مشاهده کنیم باید به طور مداوم به آنها مواد افزوده شود. فرض می‌کنیم که هسته ستارگان دنباله‌دار، به همراه منظومه شمسی، حدود ۵ بیلیون سال پیش بوجود آمده باشند. برای



شکل ۲-۹. ستاره دنباله دار آرند - رولاند<sup>۱</sup>. به دنباله باریک ستاره که متوجه به طرف خورشید است، توجه کنید (رصدخانه لیک<sup>۲</sup>).

توضیح ادامه وجود آنها، جان اوورت<sup>۳</sup> فرض کرد که یک ابر ستاره دنباله دار کروی تا فاصله ۵۰۰۰۰ AU از خورشید وجود دارد که شامل  $10^{11}$  جسم ستاره دنباله دار است. این مجموعه در اثر آشفتگی های حاصل از عبور ستاره ها در مرز خارجی، هسته ها را از دست می دهد. در لبه داخلی، آشفتگی های سیارات باعث انحراف هسته ها به سمت خورشید می شوند. آشفتگی های دیگر ممکن است باعث شوند که ستاره دنباله دار یا از خورشید فرار کند و یا وارد یک مدار تناوبی شود و در آنجا به آرامی از میان برود. تخمینهای اخیر پیشنهاد می کنند که  $10^{14}$  ستاره دنباله دار وجود داشته باشد که تعداد بسیار زیادی از آنها در مدارهای کم و بیش دائمی به فاصله ۲۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰ AU حرکت می کنند.

1. Arend - Roland.  
3. Jan Oort

2. Lick

## (۵) سنگهای آسمانی

اگر در منظومه شمسی به حرکت درآئیم، در تمام زوایای میل، سنگهای آسمانی را خواهیم یافت. این سنگهای آسمانی از سیارکها (با قطر ۱۰km) تا میکرو شهابسنگها (کوچکتر از ۱mm) و غبار میان سیاره‌ای (تقریباً ۱ $\mu$ m) را در بر می‌گیرند. قطعات حاصل از برخورد سیارکها، سنگها را تولید می‌کنند درحالی که قطعات کوچکتر از پاشیدن ستاره‌های دنباله‌دار ناشی می‌شوند. هنگامی که یک سنگ آسمانی وارد جو زمین می‌شود، اصطکاک آنرا تا حد درخشش گرم و قابل رؤیت می‌کند. این عمل در ارتفاع حدود ۱۲۰km اتفاق می‌افتد - یک شهابسنگ. از درخشش شهابها به این نتیجه می‌رسیم که چگالی متوسط آنها از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است (مشابه ماده مرکزی یک ستاره دنباله‌دار!). یک سنگ آسمانی در اثر تبخیر، ذوب و تکه تکه شدن، کاهش جرم پیدا کرده و هوایی را که از میان آن عبور می‌کند یونیزه می‌نماید. برخی از شهابها آنقدر روشن هستند که سایه ایجاد می‌کنند - اینها را گویهای آتشین می‌نامند. یک ذره شهاب نوعی، به اندازه یک دانه شن است و یک گوی آتشین به اندازه یک قلوه سنگ.

سنگهای آسمانی‌ای که به طور کامل در جو از بین نرفته باشند، به عنوان شهابسنگ‌ها به زمین برخورد می‌کنند. شهابسنگ‌های بزرگ در اثر برخورد حفره‌هایی مانند حفره‌های سطح ماه و یا حفره‌ای که در آریزونا<sup>۱</sup> با عرض یک کیلومتر بوجود آمده، ایجاد می‌کنند (شکل (۲-۱۰)). شهابسنگهای کوچکتر به هنگام رسیدن به زمین نابود نمی‌شوند و میکرو شهابسنگها (که قطری از ۵/۰ تا ۲۰۰ میکرومتر دارند) از میان جو به حرکت خود ادامه می‌دهند و روزانه جرمی معادل  $10^6$  kg را بر سطح زمین فرو می‌ریزند. زمین گاهگاهی از میان یک گروه سنگهای آسمانی عبور می‌کند - یعنی قطعاتی از ماده جامد حاصل از یک ستاره دنباله‌دار. وقتی این حادثه اتفاق می‌افتد ما شاهد یک بارش شهابی در آسمان خواهیم بود. در طی چنین بارشی، به نظر می‌رسد که شهابها از نقطه بخصوصی از آسمان فرو می‌ریزند، که آن نقطه را تابان<sup>۲</sup> می‌نامند. این بارشها معمولاً متناسب با صورت فلکی‌ای که نقطه تابان در آن قرار دارد، نام‌گذاری

1. Arizona.

2. radiant



شکل ۲-۱۰. حفره شهابی بارینگر<sup>۱</sup>. این حفره که در آریزونا و در نزدیکی فلاگستاف<sup>۲</sup> قرار دارد حدود ۴۰۰۰۰ سال پیش بوسیله ضربه‌ای بوجود آمده است (نیروی هوایی ایالات متحده).

می شوند. برای مثال، بارش شهابی پرسید<sup>۳</sup> که در ماه اوت ظاهر می شود، به نظر می رسد که از صورت فلکی برساووش<sup>۴</sup> می آید. خرده‌های یک بارش شهابی از یک ستاره دنباله دار ناشی می شوند. برای مثال، خرده‌های بارش پرسید به ستاره دنباله داری به نام III ۱۸۶۲ منتسب هستند.

(و) غبار و گاز میان سیاره‌ای

سرانجام به غبار میان سیاره‌ای می رسیم (با اندازه‌ای از یک تا صد میکرومتر) که احتمالاً از دنباله غبارین ستاره‌های دنباله دار ناشی می شوند. سفینه‌های

1. Baringer.  
3. Perseid

2. Flagstaff  
4. Perseus

فضایی مارینر<sup>۱</sup> ابرهای متشکل از غباری را در اطراف زمین - مریخ آشکار کردند. احتمالاً تمام سیارات به دلیل داشتن جاذبه گرانشی، ابرهای غباری را در اطراف خود به دام می‌اندازند. نوار کم رنگ نور منطقه البروجی که قبل از سپیده دم به خوبی قابل مشاهده است، در اثر انعکاس نور خورشید از یک تجمع قابل ملاحظه گرد و غبار در صفحه دایرة البروجی بوجود می‌آید. شدت این نور پراکنده شده، با دور شدن از خورشید کمتر می‌شود (شکل (۲-۱۱)).

## ۲-۲ سؤالات بدون پاسخ

بررسی اجمالی ما، ساختار و محتویات منظومه شمسی را آشکار ساخت، اما داستان به همین جا خاتمه نمی‌یابد. بسیاری از جنبه‌های مشاهده شده، مانند منابع شهابسنگها را می‌توانیم با موفقیت توجیه کنیم. با این وجود، بسیاری از سؤالات در رابطه با منشأ این جنبه‌ها بدون پاسخ باقی می‌مانند. این سؤالات لاینحل، جوابهای آزمایشی را موجب می‌شوند (فصل ۷).



شکل ۲-۱۱. نور منطقه البروجی. این عکس که با زمان نوردهی کوتاه گرفته شده است (توجه کنید که ستارگان، دنباله‌دار دیده می‌شوند)، نور بالای کوه هالیکالا<sup>۲</sup> در هاوایی<sup>۳</sup> را نشان می‌دهد. (ا. پیترسون<sup>۴</sup> و ایل. کیفابر<sup>۵</sup>).

1. Mariner
3. Hawaii
5. L. Kieffaber

2. Halikala
4. A. Peterson

سؤال اساسی در اینجاست که منظومه شمسی چرا و چگونه به وجود آمده است. چرا پنج سیاره کوچک خاکی و چهار سیاره مشتری گون وجود دارند؟ چه چیزی توزیع مدار سیارات را موجب شد؛ آیا قانون بُدی یک قانون بنیادی است؟ چرا سیارات در مدارهایی نزدیک به دایرة البروج حرکت می‌کنند؟

همچنین توزیع اندازه حرکت زاویه‌ای منظومه شمسی به صورت یک معماست. اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی خورشید عبارت است از

$$2M_{\odot} R_{\odot}^2 \omega_{\odot} / 5 \approx 10^{42} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

در حالی که هر سیاره دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری  $p / 2\pi m a^2$  است که در آن  $m$  جرم سیاره،  $a$  نیم محور اطول مداری آن و  $p$  دوره تناوب مداری نجومی را نشان می‌دهد؛ جمع کل اندازه حرکت زاویه‌ای سیارات برابر است با:  $10^{42} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 33$ . بنابراین، سیارات ۹۷ درصد اندازه حرکت زاویه‌ای سیستم را تشکیل می‌دهند. چرا خورشید که سنگین‌تر است سهم بیشتری ندارد؟

آیا یک آهننگ چرخش اولیه وجود داشته است و اگر چنین است چرا سیارات خاکی خیلی کندتر از سیارات مشتری گون می‌چرخند؟ چه چیزی باعث شد که محور چرخش اورانوس در صفحه مداری آن قرار گیرد؟ آیا هیچ جو سیاره‌ای نخستینی وجود داشته است؟ چرا زهره و تیتان و سیارات مشتری گون، چنین جوهای فشرده‌ای دارند؟ چه چیزی سطح سیارات و اقمار را به شکل کنونی درآورده است؟ اقمار سیارات با تعداد، اجرام و توزیع مداری مشاهده شده از کجا منشأ گرفته‌اند؟ چرا حلقه‌های زحل، مشتری و اورانوس چنین با هم متفاوتند؟ چه چیزی کمربند سیارکی را بوجود آورد؟ ستارگان دنباله‌دار چگونه شکل گرفته‌اند، و تعدادشان چقدر است؟ چه چیزی ترکیبات شهابسنگی را که ما مشاهده می‌کنیم، تولید کرده است؟

بسیاری از سؤالات مقدماتی بایستی توسط مدلی که قرار است منظومه شمسی ما را توجیه کند، پاسخ داده شود. تا وقتی که چنین مدلی به وجود آید، تنها می‌توانیم آنچه را که می‌بینیم بپذیریم و سعی کنیم که اسرار پیش رویمان را بگشائیم.

## مسائل

- ۱- (الف) مسیر ظاهری خورشید در عرض آسمان زهره را در طول یک روز خورشیدی از دید ناظری بر روی استوای سیاره توصیف کنید. (ب) فصول اورانوس را توصیف کنید، و دوره‌های تناوب آن‌ها را در جاهایی که مناسب می‌بینید، مشخص کنید.
- ۲- سیارات اورانوس، نپتون و پلوتو را در نظر بگیرید. (الف) با رسم نمودار، نیم محور اطول مداری و فواصل پیش‌بینی شده توسط قانون کپلر را برای آنها مقایسه کنید. (ب) نشان دهید که نسبت‌های دوره‌های تناوب مداری آنها تقریباً تناسبی، یعنی تقریباً  $\frac{3}{2}$  کسرهایی مانند  $\frac{3}{2}$ ، است.
- ۳- نشان دهید که دو قمر مریخ یعنی فوبوس<sup>۱</sup> و دیמוש<sup>۲</sup> از قانون سوم کپلر تبعیت می‌کنند. به کمک مدارهای این دو قمر، جرم مریخ را بدست آورید.
- ۴- (الف) سفینه‌ای به جرم  $10^3 \text{ kg}$  در استوای زمین چقدر وزن دارد؟ در قطبین چقدر؟ (راهنمایی: از نیروی گریز از مرکز استفاده کنید). (ب) با به خاطر آوردن چرخش سریع مشتری، این سفینه بر روی استوای مشتری چقدر وزن خواهد داشت؟ در قطبین چقدر؟
- ۵- رابطه‌ای که دوره تناوب هلالی چرخش زهره (روز خورشیدی) را نسبت به زمین بیان می‌کند، بدست آورید و عدد حاصل را با آنچه در متن آمده است مقایسه کنید.
- ۶- در قرن هفدهم، اوله رومر<sup>۳</sup> با مشاهده این که پوشانده شدن قمر مشتری I (یا آیو) توسط خود سیاره، وقتی مشتری در موقعیت مقابله بود تقریباً  $16/7$  دقیقه زودتر از هنگامی که سیاره در موقعیت مقارنه بالا قرار داشت اتفاق افتاد، به این نتیجه رسید که سرعت نور محدود است. از این اطلاعات استفاده کنید تا نموداری مناسب رسم و مقدار تقریبی‌ای برای سرعت نور بدست آورید (یعنی همان کاری را انجام دهید که رومر انجام نداد!).
- ۷- در چه فاصله‌ای از یک ستاره باید قرار بگیریم (بر حسب AU) تا در حالات زیر یک

1. Phobos

2. Deimos

3. Ole Romer



دمای تحت ستاره‌ای، قابل مقایسه با دمای زمین داشته باشیم:

(الف) ستاره ابطالجوزاء<sup>۱</sup> (با دمای سطحی  $T = ۱۲۰۰۰\text{K}$  و شعاع  $R = ۳۳R_{\odot}$ )؟

(ب) ستاره بانارد<sup>۲</sup> ( $T = ۳۰۰۰\text{K}$  و  $R = ۰/۵R_{\odot}$ )؟

۸- در فضای میان ستاره‌ای، فرمالدئید ( $\text{H}_2\text{CO}$ ) کشف شده است.

(الف) تندی مولکولی متوسط را برای  $T = ۲۸۰\text{K}$ ، محاسبه کنید. آیا ماه این گاز را به

مدت بیلیونها سال نگه می‌دارد؟

(ب) آیا قمر زحل، تیتان، فرمالدئید را حفظ خواهد کرد؟ (برای تیتان شعاع تقریباً

۲۶۰۰ کیلومتر و جرم تقریباً  $۱۰^{۲۲}\text{kg}$  است).

۹- ستاره دنباله‌داری با فاصله قرین خورشیدی  $۱۰^4\text{AU} \times ۵$  و خروج از مرکز مداری

۰/۹۹۵ را در نظر بگیرید.

(الف) فاصله قرین خورشیدی و دوره تناوب مداری آن چقدر است؟

(ب) تندی ستاره دنباله‌دار در بعید خورشیدی و قرین خورشیدی چقدر است؟

(ج) تندی فرار از منظومه شمسی در بعید خورشیدی ستاره دنباله‌دار چقدر است و

از این نتیجه چه چیزی استنتاج می‌کنید؟

۱۰- نموداری رسم کنید تا نشان دهد چرا گاه یک بارش شهابی در تمام طول سال ادامه

دارد، در صورتی که برخی دیگر در اوقاتی از سال نمود بیشتری دارند و در زمانهای

دیگر ضعیف‌اند (مثل بارش شهابی پرسید در سال ۱۹۸۵ میلادی).

۱۱- آلدوی زهره حدود ۰/۷۷ است و این به دلیل جو ابری آن می‌باشد. دمای ظهر

سیاره چقدر است؟ (دمای اندازه‌گیری شده  $۷۵۰\text{K}$  می‌باشد).

۱۲- (الف) دمای سطحی عطارد در ظهر تقریباً  $۷۰۰\text{K}$  و در نیمه شب  $۱۲۵\text{K}$  است. طول

موجهایی را که سطح سیاره به ازای آنها بیشترین انرژی را در ظهر و نیمه شب گسیل

می‌دارد، محاسبه کنید.

(ب) خروج انرژی را به ازای واحد سطح برای نیمه شب و ظهر حساب کنید.

۱۳- زمین، زهره و مریخ همگی در جوشان دی‌اکسیدکربن دارند. نسبت جذر متوسط

مربع تندی به سرعت فرار را برای هر کدام محاسبه کنید و در مورد نگه داری

دی اکسید کربن برای هر کدام توضیح دهید.

۱۴- دوره تناوب مداری تقریبی برای یک هسته ستاره دنباله دار گونه در ابر اوورت چقدر است؟

۱۵- دمای تعادل جسم سیاه را برای یک سیارک در حال چرخش سریع به شعاع  $100 \text{ km}$  و آلبدوی  $0.5$  محاسبه کنید.

۱۶- به طور تقریبی می توان گفت که اندازه حرکت زاویه ای چرخشی یک کره MVR است که در آن  $V$  سرعت استوایی است. با یک محاسبه تقریبی، اندازه حرکت زاویه ای مداری و چرخشی مشتری را بدست آورید و آنها را با اندازه حرکت زاویه ای چرخشی خورشید، مقایسه کنید.

## دینامیک زمین

قبل از بررسی دقیق منظومه شمسی، دینامیک زمین خودمان را ارائه می‌کنیم. در فصل چهارم به خصوصیات فیزیکی زمین و ماه می‌پردازیم. دینامیک و فیزیک زمین هر دو، زمینه‌ای برای بررسی سایر سیارات خاکی ایجاد می‌کنند، زیرا زمین را بهتر از هر سیاره دیگری می‌شناسیم.

### ۱-۳ زمان و فصول

شما به کلمات ثانیه، دقیقه، ساعت، روز، هفته، ماه و سال آشنایی دارید، اما آنها دقیقاً به چه معنی هستند؟ اندازه‌گیری زمان به طور دلخواه و قراردادی صورت می‌گیرد. ستاره‌شناسان ثانیه، دقیقه، ساعت و روز را بر حسب چرخش زمین، هفته و ماه را بر حسب حرکت مداری ماه، و سال را بر حسب گردش زمین به دور خورشید تعریف می‌کنند. (توصیه می‌کنیم که قبل از ارائه این بحث ضمیمه ۱۰ را مرور کنید.)

## (الف) سیستمهای زمان زمینی

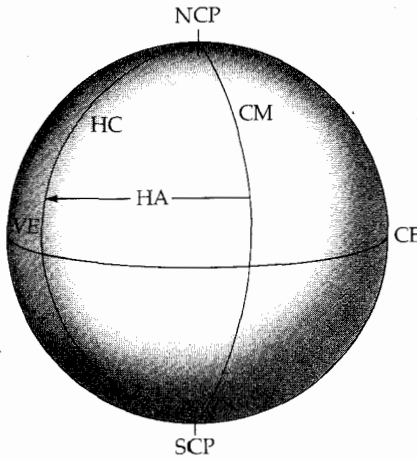
یک روز عبارت است از فاصله زمانی بین دو گذار بالایی متوالی یک نقطه مرجع سماوی. یک گذار بالایی وقتی اتفاق می‌افتد که یک نقطه مرجع سماوی یا یک جرم در حال عبور به طرف غرب، نصف‌النهار سماوی را قطع کند؛ نصف‌النهار سماوی عبارتست از یک خط فرضی که از نقطه شمالی افق، بنام سمت الرأس<sup>۱</sup>، به نقطه جنوبی افق رسم می‌شود. اعتدال بهاری نقطه صفر برای زمان نجومی است، و روز نجومی به طور دلخواه به ۲۴ ساعت نجومی به فواصل مساوی تقسیم شده است که هر کدام از آنها شامل ۶۰ دقیقه نجومی و ۶۰ ثانیه نجومی در دقیقه هستند. حال، ۱ ساعت متناظر است با  $15^\circ$  چرخش زمین نسبت به ستارگان، بطوری که وقتی نقطه اعتدال بهاری روی نصف‌النهار سماوی ما قرار می‌گیرد زمان نجومی محلی صفر ساعت و صفر دقیقه و صفر ثانیه است، و وقتی که نقطه اعتدال بهاری به اندازه  $30^\circ - 2$  ساعت - در غرب نصف‌النهار سماوی محل قرار گیرد، ساعت ۲ است. زاویه ساعتی نقطه اعتدال بهاری را به عنوان زمان نجومی محلی تعریف می‌کنیم (شکل (۳-۱)). زاویه ساعتی عبارتست از این که یک جسم سماوی به چه فاصله‌ای به طرف غرب (مثبت) و یا شرق (منفی) از نصف‌النهار قرار گیرد. نقطه اعتدال بهاری در هر سال تقریباً به اندازه  $50''$  در طول استوای سماوی به طرف غرب پیش می‌رود (بخش (۳-۴))، و بنابراین دوره تناوب واقعی چرخش زمین (که نسبت به ستارگان اندازه‌گیری می‌شود)  $0/008$  ثانیه طولانی‌تر از یک روز نجومی است.

اندازه‌گیری زمان در روی زمین به طور پیچیده‌ای به مکان خورشید در آسمان بستگی دارد. زمان خورشیدی ظاهری عبارتست از زاویه ساعتی خورشید واقعی به علاوه ۱۲ ساعت، بطوری که نقطه صفر در نیمه شب در ساعت صفر و ظهر ظاهری محلی همواره در ساعت ۱۲ اتفاق می‌افتد. در هر حال، طول روز خورشیدی ظاهری حتی برای یک ناظر مشخص، در طول سال ثابت نیست. این تغییرات در اثر خروج از مرکز زمین و تمایل صفحه استوایی زمین نسبت به دایرة البروج یعنی صفحه مدار آن می‌باشد (شکل (۳-۲)). سرعت مداری زمین در نقطه قرین خورشیدی (حدود دوم

ژانویه) به یک بیشینه و در نقطه بعید خورشیدی (حدود سوم ژوئیه) به یک کمینه می‌رسد که با قانون دوم کپلر مطابقت دارد. خورشید این حرکت متغیر را به این ترتیب منعکس می‌کند که در طول دایرة البروج در نقطه قرین خورشیدی سریعتر از نقطه بعید خورشیدی به طرف شرق حرکت می‌کند. برای بازگرداندن خورشید به ظهر، زمین می‌بایست زاویه بیشتری بچرخد و بنابراین روز خورشیدی ظاهری در قرین خورشیدی طولانی‌تر از بعید خورشیدی است.

عامل دیگر این است که خورشید در روی دایرة البروج حرکت می‌کند، اما زمان خورشیدی ظاهری در طول استوای سماوی اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، فقط آن مؤلفه از حرکت به طرف شرق خورشید که موازی با استوای سماوی است بر زمان خورشیدی ظاهری اثر می‌گذارد. برای پرهیز از ناسازگاری‌های این زمان متغیر خورشیدی، زمان متوسط خورشیدی را به صورت زاویه ساعتی یک نقطه فرضی (خورشید متوسط) که در طول استوای سماوی و به طرف شرق با آهنگ زاویه‌ای متوسط خورشید واقعی حرکت می‌کند، تعریف می‌کنیم. روز متوسط خورشیدی در نیمه شب شروع می‌شود (نسبت به این نقطه) و طول آن عبارتست از  $\frac{365}{365/2564}$  سال. تفاوت میان زمان خورشیدی ظاهری و زمان متوسط خورشیدی تعدیل زمان<sup>۱</sup> نامیده شده است، زیرا اثرات جمع شدنی هستند و خورشید متوسط ممکن است تا ۱۶ دقیقه با خورشید حقیقی متفاوت باشد.

اکنون زمانی نجومی را با زمان متوسط خورشیدی (شکل (۳-۳)) مقایسه می‌کنیم. همین طور که زمین در مدار خود مسافت A را طی می‌کند، چرخش زمین باعث می‌شود که نقطه اعتدال بهاری به گذار بالایی بازگردد - یک روز نجومی گذشته است. از آنجا که زمین در حدود  $1^\circ \approx \frac{360}{365}$  در مدار خود حرکت کرده است، قبل از اینکه خورشید به نصف النهار محل برگردد و یک روز خورشیدی متوسط بگذرد (B) باید به اندازه این یک درجه، چرخش اضافی داشته باشد. به هر حال،  $1^\circ$  با چهار دقیقه نجومی مطابق است و بنابراین، روز متوسط خورشیدی ۴ دقیقه طولانی‌تر از روز نجومی است. طول روز نجومی با واحدهای زمان متوسط خورشیدی عبارتست از  $4/09^s$  و  $56^m$  و  $23^h$ .



شکل ۳-۱. دایره‌های مرجع در آسمان. در روی شکل نصف‌النهار سماوی ناظر (CM)، استوای سماوی (CE)، قطبهای شمال و جنوب سماوی NCP و Scp) و زاویه ساعتی (HA) اعتدال بهاری (VE) در طول دایره ساعتی (HC) آن، نشان داده شده‌اند.

بنابراین، بر حسب زمان متوسط خورشیدی، به نظر می‌رسد که ستارگان هر شب به اندازه حدود ۴ دقیقه زودتر از شب قبل طلوع می‌کنند. ستاره‌ای که امشب در گذار بالایی قرار دارد، یک ماه بعد در ساعت ۱۰ شب به نصف‌النهار خواهد رسید ( $2^h = 30 \times 4^m$ ).

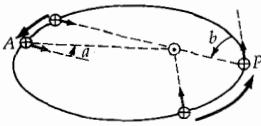
زمان متوسط خورشیدی در هر طول جغرافیایی بر روی زمین متفاوت است، زیرا زاویه ساعتی خورشید ظاهری به مکان ناظر بستگی دارد. برای اجتناب از مشکلات عملی چنین سیستم زمان‌بندی، در اطراف جهان ۲۴ منطقه زمانی در نظر می‌گیریم.

تمام نقاط واقع در هر منطقه زمانی طولی، که هر کدام حدود  $15^\circ$  (۱h) پهنا دارند، دارای یک زمان استاندارد هستند؛ مرزهای هر منطقه به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بیشترین تسهیلات را برای کار با آنها ایجاد کنند (مثلاً، یک شهر معمولاً به طور کامل در میان یک منطقه جا داده می‌شود). منطقه مرجع در گرینویچ انگلستان و در طول جغرافیایی صفر درجه قرار دارد. زمان استاندارد در گرینویچ را زمان متوسط گرینویچ و یا زمان جهانی می‌گویند (که علامت اختصاری آن U. T. است)؛ وقایع نجومی مثل

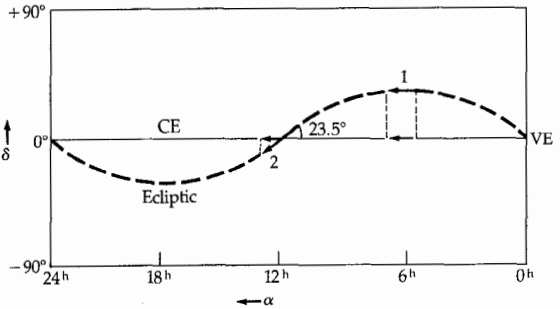
خسوف یا کسوف کامل معمولاً بر حسب زمان جهانی داده می‌شوند. شهر نیویورک در ۵ ساعت غرب گرینویچ و در منطقه زمانی استاندارد شرقی (E. S. T) قرار دارد و بنابراین، برای بدست آوردن زمان چنین وقایعی برای نیویورک، از ساعت جهانی ۵ ساعت کم می‌کنیم. به منظور بهره‌گیری از ساعات اضافی روز در طول تابستان (بخش ۳-۱ ب)) از وسط بهار تا وسط پاییز، در بسیاری از نقاط جهان، یک ساعت به زمان استاندارد محلی اضافه می‌شود. بنابراین، ساعت ۱۱ بعد از ظهر به وقت زمان قابل استفاده روز پاسیفیک<sup>۱</sup> (P. D. T) در سانفرانسیسکو<sup>۲</sup> مطابق است با زمان ۱۰ PM استاندارد پاسیفیک (P.S.T) و برای بدست آوردن زمان جهانی ۸ ساعت به زمان استاندارد پاسیفیک اضافه می‌کنیم، زیرا سانفرانسیسکو به اندازه ۸ منطقه زمانی در غرب گرینویچ قرار دارد (زمان جهانی برابر است با زمان قابل استفاده روز پاسیفیک به علاوه ۷ ساعت).

آهنگ چرخش زمین در معرض تغییرات کوچک ولی غیر قابل پیش‌بینی قرار دارد (بخش ۳-۴)). به منظور پیش‌بینی دقیق مکان اجسام در منظومه شمسی، به یک زمان استاندارد ثابت نیاز داریم و بنابراین، در مکانیک سماوی، زمان تقویمی (E. T.) جایگزین زمان جهانی می‌شود. در آغاز سال ۱۹۰۰ پس از میلاد مسیح، یک ثانیه تقویمی به صورت  $\frac{1}{31,556,925/97474}$  تعریف شد. طول سال ۱۹۰۰ برجی و زمان جهانی و تقویمی با هم توافق داشتند. امروزه، این دو زمان به اندازه ۴۰ ثانیه با هم اختلاف دارند.

هفته و ماه منشأ باستانی دارند و از دوره تناوب مداری ۲۹/۵۳ روزه هلالی ماه به دست می‌آیند. برای این که در یک سال تعداد کاملی ماه جای گیرد، به آنها طولهای قراردادی ۲۸، ۳۰ و ۳۱ روزه نسبت داده شده‌اند. هفته شامل هفت روز (که هر کدام آنها به نام سیاره‌ای نامیده شده‌اند) احتمالاً بر پایه اهلۀ تریعی ماه است (روز  $7/38 \approx 29/5 \times \frac{3}{4}$ ).

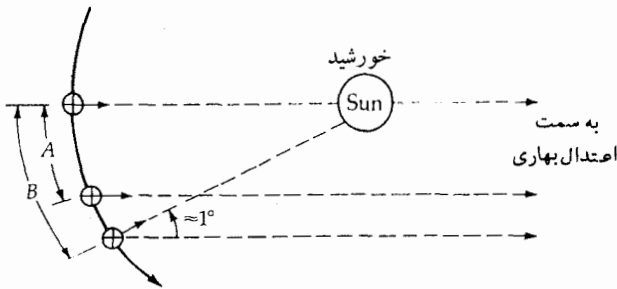


الف



ب

شکل ۳-۲. تغییرات در زمان خورشیدی ظاهری. (الف) تصویری شماتیک از حرکت مداری زمین در یک روز. در نزدیکی بعید خورشیدی (نقطه A)، زمین به اندازه  $360^\circ$  به علاوه  $a$  می‌چرخد تا یک روز خورشیدی ظاهری را کامل کند. نزدیک قرین خورشیدی (نقطه P)، زمین یک روز خورشیدی ظاهری را با چرخش خود به اندازه  $360^\circ$  به علاوه زاویه  $b$  کامل می‌کند. از این رو، روز خورشیدی در قرین خورشیدی طولانی‌تر از بعید خورشیدی است، زیرا  $b > a$ . (ب) یک نقشه مستطیل شکل از آسمان نشان می‌دهد که دایرة البروج به اندازه  $23/5^\circ$  نسبت به استوای سماوی (CE) تمایل دارد. حرکت به طرف شرق خورشید در دو نقطه (۱ و ۲) نشان داده شده است. فقط مؤلفه‌هایی از این حرکت که به موازات (CE) هستند باعث می‌شوند که زمان خورشیدی ظاهری تغییر کند.



شکل ۳-۳. روزهای نجومی و خورشیدی. همین طور که زمین نسبت به نقطه اعتدال بهاری یک دور می‌چرخد، مسافت  $A$  را در روی مدار خود طی می‌کند. برای کامل کردن یک روز متوسط خورشیدی، زمین به اندازه  $1^\circ$  بیشتر می‌چرخد تا خورشید را به عقب و به روی نصف‌النهار برگرداند. زمین به اندازه مسیر  $B$  حرکت کرده است.



سال عبارتست از زمانی که طول می‌کشد تا زمین یک دور به دور خورشید بگردد، اما تعاریف مختلف منجر به سه نوع سال می‌شوند. گردش زمین نسبت به ستارگان به اندازه  $365/2564$  روز متوسط خورشیدی یا یک سال نجومی طول می‌کشد (ثانیه ۱۰ دقیقه ۹ ساعت ۶ روز  $365$ )، در حالی که سال برجی که  $365/2422$  روز متوسط خورشیدی (ثانیه ۴۶ دقیقه ۴۸ ساعت ۵ روز  $365$ ) طول می‌کشد، عبارتست از دوره تناوب نسبت به نقطه اعتدال بهاری که هر سال به اندازه  $50^{\circ}$  در طول دایرة البروج به طرف غرب پیشروی می‌کند. سرانجام، از آنجا که آشفتگی‌های سیاره‌ای باعث می‌شوند قرین خورشیدی زمین در جهت حرکت مداری جلو بیافتد، زمان بین دو گذار متوالی قرین خورشیدی را سال آنومالی<sup>۱</sup> می‌نامیم که  $365/2596$  روز متوسط خورشیدی است (ثانیه ۵۳ دقیقه ۱۳ ساعت ۶ روز  $365$ ).

تقویم گریگوری<sup>۲</sup> که سعی در تقریب زدن سال فصول (سال برجی) دارد، شامل  $365$  روز در هر سال معمولی و  $366$  روز در سالهایی که به چهار قابل قسمت هستند (سالهای کیسه<sup>۳</sup>) می‌باشد. برای دست یابی به یک دقت یک روز در  $20000$  سال، فقط آن سالهایی که بر  $400$  قابل قسمت‌اند سالهای کیسه هستند ( $2000$  سال پس از میلاد مسیح)؛ سالهای قابل قسمت بر  $4000$  همان سالهای معمولی باقی می‌مانند ( $8000$  سال پس از میلاد مسیح).

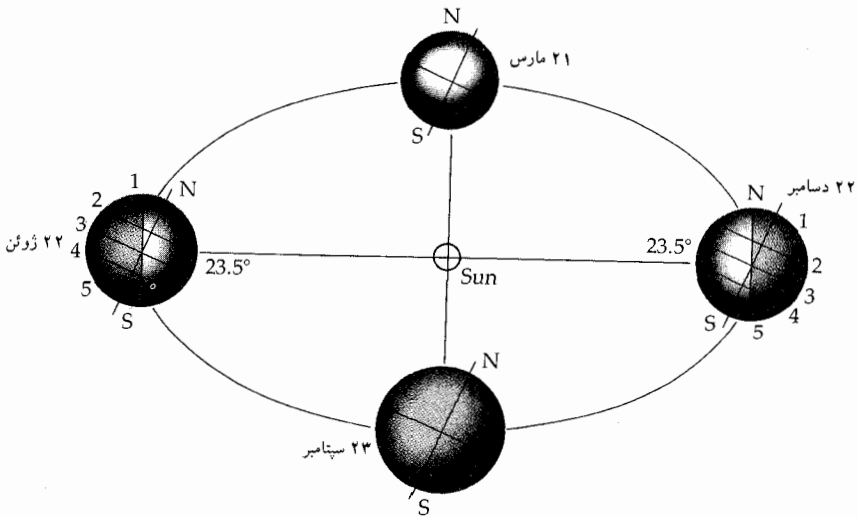
### (ب) فصول

فصلهای زمین - بهار، تابستان، پاییز و زمستان - به علت این که صفحه استوایی آن  $23/5^{\circ}$  نسبت به صفحه دایرة البروج میل دارد (شکل  $(3-4)$ )، بوجود می‌آیند. خروج از مرکز مدار زمین کوچکتر از آن است ( $e = 0/017$ ) که بتواند اثری بر فصلها داشته باشد؛ توجه کنید که قرین خورشیدی در ضمن زمستان شمالی (دوم ژانویه) اتفاق می‌افتد. تعداد ساعتهای روز و ارتفاع ظهر خورشید به دماهای مشخصه فصلها منجر می‌شوند، هر دوی آنها به عرض جغرافیایی ناظر و به موقعیت خورشید در روی دایرة البروج بستگی دارند. این دو علت را به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

1. anomalistic year  
3. leap year

2. Grigory.

هنگامی که خورشید در نقطه اعتدال بهاری (حدود ۲۱ مارس) و یا در نقطه اعتدال پاییزی (حدود ۲۳ سپتامبر) در روی مدارش قرار دارد، میل آن صفر درجه می باشد و در آن هنگام در تمام نقاط روی سطوح زمین طول روز ۱۲ ساعت و طول شب نیز ۱۲ ساعت است. ارتفاع ظهر خورشید (سمت الرأس) در استوا  $90^\circ$  است و در روی قطبها به صفر درجه تقلیل می یابد. در انقلاب تابستانی<sup>۱</sup> (در حدود ۲۲ ژوئن) خورشید به



شکل ۳-۴. میل استوایی زمین و فصول. استوای زمین به اندازه  $23/5^\circ$  نسبت به دایرة البروج میل دارد. روز و شب برای نقاط انقلاب و اعتدال نشان داده شده اند. عرضهای جغرافیایی علامت گذاری شده عبارتند از (۱) دایرة قطب شمال<sup>۲</sup> ( $66/5^\circ N$ )، (۲) مدار رأس السرطان<sup>۳</sup> ( $23/5^\circ N$ )، (۳) استوا ( $0^\circ$ )، (۴) مدار رأس<sup>۴</sup> الجدی ( $66/5^\circ S$ ) و (۵) دایرة قطب جنوبی<sup>۵</sup> ( $66/5^\circ S$ )

بیشترین میل خود یعنی  $23/5^\circ +$  می رسد و در عرض جغرافیایی  $23/5^\circ$  شمالی خورشید در ظهر درست از بالای سر ناظرهای روی این مدار عبور می کند - این مدار رأس السرطان است. (حدود ۳۰۰۰ سال پیش، در انقلاب تابستانی، خورشید در

1. Summer Solstice
3. Tropic of Cancer.
5. Antarctic Circle.

2. Arctic Circle.
4. Tropic of Capricorn.

صورت فلکی سرطان بوده است). در این تاریخ در نیمکره شمالی روزها حداکثر طول خود را دارند و در آنجا تابستان شروع می‌شود، و همزمان با آن در نیمکره جنوبی زمستان آغاز می‌شود و روزها کوتاه‌ترین طول خود را دارند.

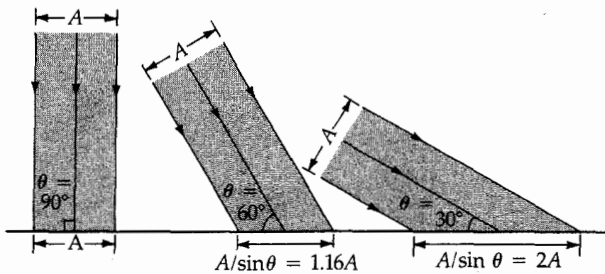
در انقلاب زمستانی<sup>۱</sup> (حدود ۲۲ دسامبر) وضعیت درست برعکس است و این هنگامی است که میل خورشید  $23/5^\circ$  - می‌باشد. در آن هنگام از نظر ناظرهای روی مدار عرض جغرافیایی  $23/5^\circ$  جنوبی، خورشید درست از بالای سر آنها عبور می‌کند - این مدار رأس‌الجدی است (انقلاب زمستانی در ۳۰۰۰ سال پیش، در صورت فلکی جدی بوده است)، و در نیمکره شمالی زمستان و در نیکره جنوبی تابستان است.

مدار عرض جغرافیایی  $66/5^\circ$  شمالی دایره شمالگان نام دارد. همین طور که در آنجا تا اول انقلاب تابستانی بهار به تابستان تبدیل می‌شود، طول روزها بلندتر می‌شوند و در آن هنگام خورشید به مدت ۲۴ ساعت غروب نمی‌کند. از پائیز تا زمستان، روزها کوتاه می‌شوند تا هنگامی که در انقلاب زمستانی یک شب ۲۴ ساعته داریم. در شمال دایره شمالی، در تابستان خورشید به مدت چندین روز غروب نمی‌کند (خورشید نیمه شب) و در زمستان به مدت چندین روز خورشید طلوع نمی‌کند. در قطب شمال، در نقطه اعتدال بهاری یک «روز» شش ماهه آغاز می‌شود و در اعتدال پاییزی یک «شب» شش ماهه شروع خواهد شد. در جنوب دایره جنوبگان (عرض جغرافیایی  $66/5^\circ$  جنوبی) همان اتفاقاتی که در شمال رخ داده‌اند، درست شش ماه بعد در این منطقه صورت می‌گیرند.

مقدار کل انرژی خورشیدی دریافتی توسط زمین از یک روز تا روز دیگر ثابت باقی می‌ماند، اما تأثیر گرمایی این انرژی - آفتاب زدگی<sup>۲</sup> - هم به عرض جغرافیایی و هم به زمان بستگی دارد. ارتفاع خورشید معین می‌کند که یک مقدار مشخص تابش بر روی چه سطحی گسترده شده است (شکل (۳-۵)). در نظر بگیرید که وقتی خورشید در سمت الرأس واقع است، یک واحد انرژی بر روی مساحت A می‌تابد. وقتی که ارتفاع خورشید  $\theta$  باشد، همین مقدار انرژی بر روی سطح  $\frac{A}{\sin\theta}$  گسترده می‌شود. قابلیت گرم‌کنندگی با کم شدن  $\theta$  کم می‌شود. بنابراین، تابستان گرمتر از زمستان است، زیرا در تابستان خورشید

ساعت‌های بیشتری در آسمان است. مناطق استوایی زمین به خاطر این که خورشید ظهر هرگز دور از نقطه سمت الرأس عبور نمی‌کند، همواره گرم هستند. قطبها به این دلیل دارای کلاهکهای یخی هستند که خورشید ماههای بسیاری را در زیر افق بسر می‌برد و وقتی هم طلوع می‌کند در یک ارتفاع کم قرار می‌گیرد.

سطح زمین (به خصوص اقیانوسها به دلیل ظرفیت گرمایی بالای آب) و جو مخازن گرمایی خوبی هستند و به کندی به گرمای خورشیدی پاسخ می‌دهند. در نتیجه، تغییرات دما با تأخیر زمانی روزانه و فصلی بین آخرین حد آفتاب‌زدگی خورشید و آخرین حد دما تنظیم می‌شوند. برای مثال، با وجودی که گرم‌زدگی خورشید در ظهر به حداکثر می‌رسد، ولی اوایل بعد از ظهر معمولاً گرمترین قسمت روز است. فوریه سردترین ماه زمستان شمالی است، اما دسامبر ماه کمترین آفتاب‌زدگی خورشید است.



شکل ۳-۵. آفتاب‌زدگی خورشیدی. یک واحد انرژی خورشیدی به هنگامی که خورشید در سمت الرأس قرار دارد بر مساحت  $A$  روی زمین برخورد می‌کند. برای سایر ارتفاعات  $\theta$ ، نور خورشیدی روی مساحتی به اندازه  $\frac{A}{\sin\theta}$  گسترده می‌شود.

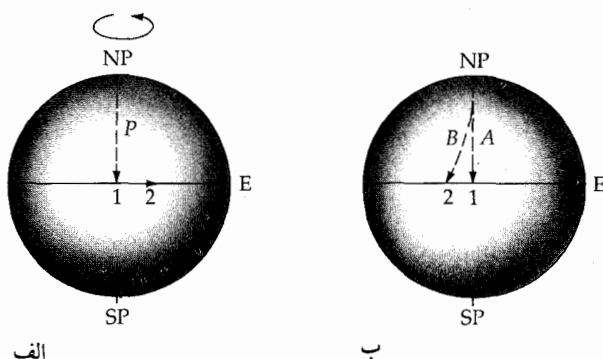
### ۳-۲ دلائل چرخش زمین

چگونه ثابت کنیم که زمین می‌چرخد؟ دور زدن به طرف غرب کره سماوی می‌تواند در اثر چرخش به طرف شرق روزانه زمین باشد، اما این دلیل خوبی نیست چرا که به طور هم ارز با این مطلب، می‌توانیم ایده یک کره سماوی چرخان به مرکز زمین ساکن را

بپذیریم. چرخش زمین را تنها می توان به این ترتیب ثابت کرد که بحثهای خود را بر پایه قوانین دینامیکی کاملاً تأیید شده نیوتن بنا کنیم.

### (الف) اثر کوریولیس<sup>۱</sup>

مسیر ظاهری موشکها و اقمار مصنوعی زمین وقتی قابل درک هستند که زمین را در حال چرخش فرض کنیم. پرتابه ای را در نظر بگیرید که از قطب شمال پرتاب می شود تا در استوا فرود آید (شکل ۳-۶)). روی زمینی که در حال چرخش نباشد، پرتابه در تمام مدت پرواز خود دقیقاً بر روی یک نصف النهار طول جغرافیایی قرار می گیرد. اما، بر روی زمینی که در حال چرخش باشد، هدف روی استوا به اندازه  $0.46 \text{ km/sec}$  به طرف شرق حرکت می کند و پرتابه در غرب هدف فرود خواهد آمد. اگر چه قرار است حرکت پرتابه به طرف جنوب باشد ولی مسیر حرکت آن نسبت به زمین به طرف راست منحرف می شود. شتاب فرضی که این اثر را موجب می شود - اثر کوریولیس - در سال ۱۸۳۵ میلادی توسط گاسپار گوستا و دوکوریولیس<sup>۲</sup> استنتاج شد (۱۸۴۳-۱۷۹۲ میلادی).



شکل ۳-۶. مسیرهای پرتابه در روی زمین. (الف) بر روی یک زمین چرخان موشکی که از قطب شمال (NP) به طرف هدفی در نقطه ۱ نشانه گیری شده است، پرتاب می شود. در طول زمان پرواز، زمین (و هدف) از نقطه ۱ به نقطه ۲ می چرخند. (ب) ناظر سطح زمین مسیر حرکت موشک را در صورتی که زمین نمی چرخید به صورت (الف) می دید در حالی که در واقع به صورت (ب) می بیند.

همواره به نظر می‌رسد که اجسام متحرک در نیمکره شمالی به طرف راست و در نیمکره جنوبی به طرف چپ منحرف می‌شوند. اگر سرعت پرتابه  $\vec{V}$  و سرعت زاویه‌ای برداری زمین  $\vec{\omega}$  باشد (جهت آن به طرف قطب شمال سماوی است و مقدار آن اسپین زمین را بر حسب واحد  $\frac{\text{رادیان}}{\text{ثانیه}}$  اندازه می‌گیرد)، در آن صورت این مشاهدات بر حسب شتاب کوریولیس به صورت زیر خلاصه می‌شوند

$$\vec{a}_{\text{کوریولیس}} = 2 (\vec{V} \times \vec{\omega}) \quad (1-3)$$

حاصلضرب خارجی منجر به حاصلضرب مؤلفه‌های قائم  $\vec{V}$ ،  $\vec{\omega}$  می‌شود و جهت کوریولیس  $\vec{a}$  در جهتی است که انگشت شست شما موقعی که اگر انگشتان دست راست را در جهت  $\vec{V}$  قرار دهید و آنها را از طریق کوچکترین زاویه به طرف  $\vec{\omega}$  بچرخانید (قانون دست راست)، نشان خواهد داد.

حال معادله (۱-۳) را بدست می‌آوریم. یک جسم با سرعت ثابت شعاعی  $\vec{V}$  در بالای یک میز چرخان با سرعت زاویه‌ای  $\vec{\omega}$  می‌چرخد (شکل (۳-۷)). در زمان  $t$  جسم مبدأ (A) را ترک می‌کند و فاصله  $dr$  را در زمان بینهایت کوچک  $dt$  طی می‌کند تا به نقطه B برسد. در همان زمان، نقطه B به اندازه زاویه

$$d\theta = \omega dt$$

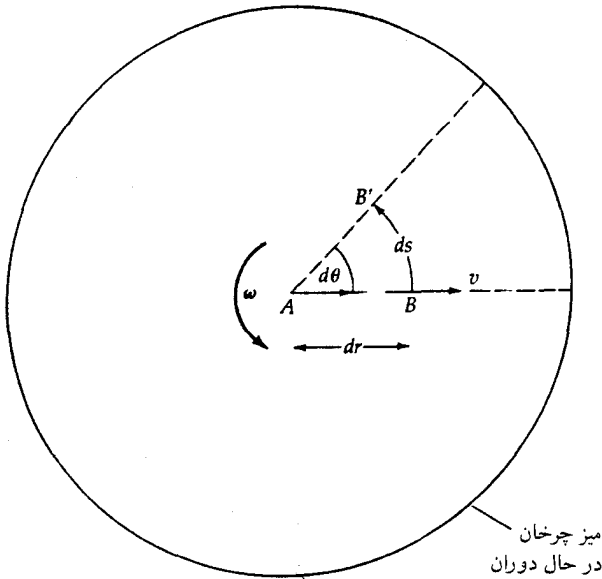
حرکت کرده و به نقطه B' رسیده است. از هندسه مسئله داریم:

$$dr = V dt \quad \text{و} \quad ds = dr d\theta$$

بنابراین،

$$ds = (V dt) (\omega dt) = V\omega (dt)^2$$

اما، بر طبق قانون دوم نیوتون، این جسم وقتی تحت تأثیر شتاب ثابت  $2V\omega$  کوریولیس  $\vec{a}$  قرار داشته باشد، در زمان  $dt$  مسافت  $ds = \frac{a (dt)^2}{2}$  را طی می‌کند. به علاوه، همان طوری که معادله (۱-۳) نشان می‌دهد، جهت انحراف ظاهری به طرف راست است.



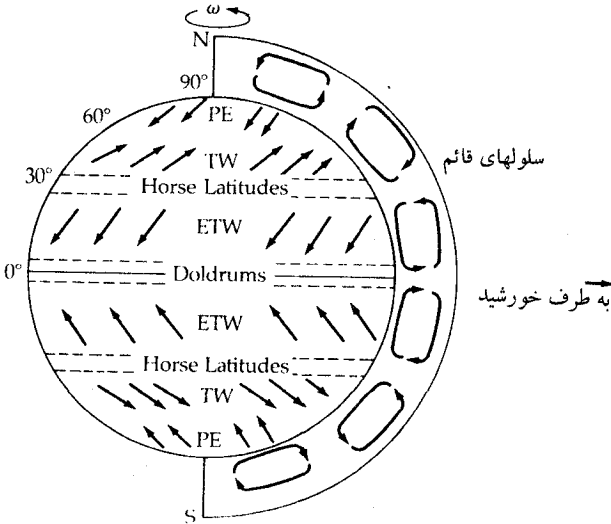
شکل ۳-۷. اثر کوریولیس. در حالی که جسم بر روی میز چرخان فاصله  $dr$  را از  $A$  به  $B$  و در زمان  $dt$  طی می‌کند، میز چرخان به اندازه زاویه  $d\theta$  چرخیده است. در همان زمان،  $B$  از طریق مسیر  $ds$  چرخیده و به  $B'$  می‌رسد. به نظر می‌رسد که جسم نسبت به میز چرخان به طرف راست منحرف شده است.

اثر کوریولیس مشخصات الگوهای باد در مقیاس بزرگ جو زمین (و نیز جریانات اقیانوسها) را کنترل می‌کند. سیکلون<sup>۱</sup> عبارتست از یک چرخش هوای محلی در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت در نیمکره شمالی (و یا در جهت حرکت عقربه‌های ساعت در نیمکره جنوبی) که توسط انحراف به راست کوریولیسِ هوایی که به سمت مرکز ناحیه کم فشار جریان می‌یابد، ایجاد می‌شود. یک پادسیکلون هنگامی بوجود می‌آید که هوای در حال گریز از مرکز یک ناحیه با فشار بالا در نیمکره شمالی، در جهت حرکت عقربه‌های ساعت در محل به چرخش در آید (و در نیمکره جنوبی در جهت عکس عقربه‌های ساعت). گرمای خورشیدی سلولهای قائم بزرگی از حرکت باد را که

1. cyclone.

سلول‌های هادلی<sup>۱</sup> نام دارند، ایجاد می‌کند (شکل ۳-۸). در سطح زمین، اثر کوریولیس باعث می‌شود که این بادهای در جهات معین مثل بادهای تجارتی شرقی (۵ تا ۳۰° شمالی و جنوبی)، بادهای حرارتی غربی (۳۵ تا ۵۰° شمالی و جنوبی) و بادهای قطبی شرقی (۶۰ تا ۹۰° شمالی و جنوبی) حرکت کنند. در عرضهای جغرافیایی کم، نوارهای هوای نسبتاً آرام به عنوان مناطق آرام استوایی (از صفر تا ۵° شمالی و جنوبی) و عرضهای جغرافیایی آرام (۳۰ تا ۳۵° شمالی و جنوبی) شناخته می‌شوند.

توجه کنید که اثر کوریولیس در ترکیب با همرفت<sup>۲</sup> الگوی کلی جریانهای جوئی را بوجود می‌آورد. همرفت یکی از طرق انتقال انرژی حرارتی از یک نقطه به نقطه دیگر است. (دو فرآیند دیگر برای انجام این عمل عبارتند از تابش و هدایت) در جو زمین جریان همرفت هنگامی صورت می‌گیرد که تابش خورشید، زمین و هوایی که با زمین در تماس است را گرم کند. هوا منبسط می‌شود و چگالی آن کم می‌گردد. هوای خنک‌تر



شکل ۳-۸. الگوهای کلی باد در سطح زمین. گرمای خورشیدی، سلولهای عمودی از هوای در حال همرفت را ایجاد می‌نماید و اثر کوریولیس این حرکت را (در نیمکره شمالی) به راست و یا (در نیمکره جنوبی) به چپ منحرف می‌کند، تا بادهای تجارتی شرقی (ETW)، بادهای حرارتی غربی (TW) و بادهای قطبی شرقی (PE) را برقرار سازد.



و چگال‌تر به پایین می‌آید تا جایگزین هوای گرم‌تر شود و در عین حال هوای گرمی که به بالا می‌رود خنک می‌گردد. هوایی که در حال پائین آمدن است در موقع رسیدن به زمین گرم می‌شود و بالاخره مجدداً به بالا بر می‌گردد. این مدار هوای بالارونده و پائین رونده گرما را از زمین به جو انتقال می‌دهد و همین‌طور جریان بالا به پائین را برقرار می‌سازد.

### (ب) آونگ فوکو

در سال ۱۸۵۱ میلادی برنارد لئون فوکو<sup>۱</sup> (۱۸۶۸-۱۸۱۹ میلادی) یک آونگ را (یک توپ سنگین که به انتهای یک سیم ۶۰ متری بسته شده بود) از سقف یک معبد در پاریس آویخت و با توجه به این نکته که صفحه نوسان آونگ در طول روز می‌چرخید، چرخش زمین را اثبات کرد. اگر زمین نمی‌چرخید، این چرخش صفحه نوسان اتفاق نمی‌افتاد، به این دلیل که تمام نیروهای وارد بر توپ (یعنی گرانش زمین و کشش سیم) در صفحه نوسان می‌بودند.

از زمین دور می‌شویم و تاب خوردن آونگ در حین چرخش زمین را مشاهده می‌کنیم. در قطب شمال، در حالی که زمین زیر پاندول هر ۲۴ ساعت نجومی یک دور می‌چرخد، به نظر می‌رسد که آونگ با دوره تناوب، ساعت  $P=24$ ، به طرف غرب می‌چرخد. آونگی که در صفحه استوایی در استوای زمین نوسان می‌کند، هیچگونه نیروی عمودی بر صفحه نوسانش احساس نمی‌کند و بنابراین اصلاً نمی‌چرخد ( $P=\infty$ ). در یک عرض جغرافیایی میانی،  $\phi$ ، (شکل (۳-۹)) مؤلفه عمودی تندی زاویه زمین،  $\omega$  عبارتست از  $\omega \sin \phi$ . به هر حال، تندی زاویه‌ای بطور معکوس با دوره تناوب چرخش متناسب است ( $\omega = \frac{2\pi}{P}$ ) بطوری که به نظر می‌رسد آونگ با دوره تناوب  $P = \frac{24}{\sin \phi}$  ساعت به طرف غرب می‌چرخد. اندازه‌گیری‌های دقیق آونگهای فوکو این رابطه را دقیقاً تأیید می‌کنند و به ما امکان می‌دهند تا دوره تناوب چرخش زمین را به طریق کاملاً دینامیکی تعیین کنیم.

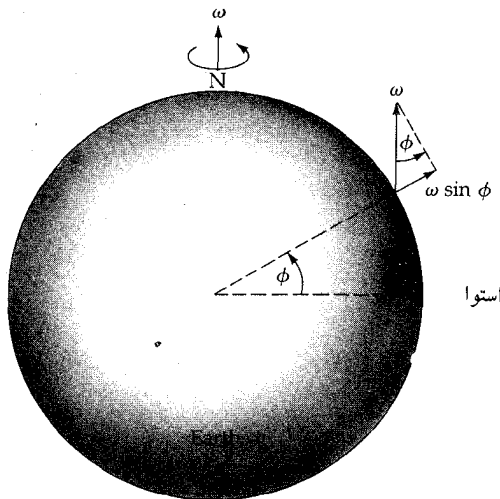
(ج) زمین پخ<sup>۱</sup>

شکل سطح زمین به صورت یک کره پخ است. شعاع قطبی  $(r_p = 6356/8 \text{ km})$  به اندازه  $21/4 \text{ km}$  از شعاع استوایی  $(r_e = 6378/2 \text{ km})$  کمتر است. چنانکه پخی عبارتست از

$$\mathcal{E} = \frac{(r_e - r_p)}{r_e} = \frac{21.4}{6378.2} = \frac{1}{298.3}$$

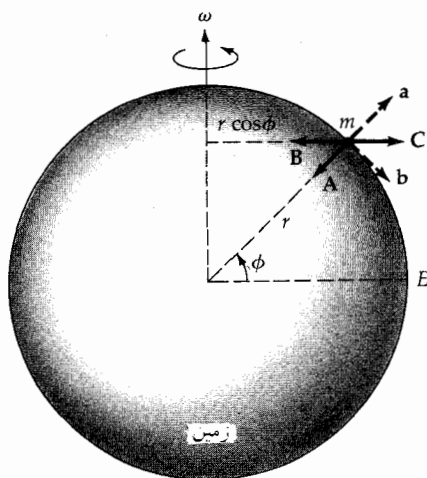
این پخی نشان می‌دهد که زمین در حال چرخش است. اگر زمین جسمی به حالت سیال می‌بود شکل آن چرخشش را اثبات می‌کرد، چرا که یک سیال می‌بایست شکل خود را با نیروهای خارجی تنظیم نماید. یک جسم سیال غیر چرخان به صورت کروی است. ولی، زمین از موادی تشکیل شده است که حتی اگر هیچ چرخشی هم در کار نباشد شکل پخ آنرا حفظ خواهد کرد.

امروزه می‌دانیم موادی که زمین از آنها تشکیل شده است سختی متوسطی تقریباً به اندازه سختی فولاد دارند. اما، این مواد به صورت پلاستیک هستند و شکل حالت تعادل



شکل ۳-۹. آونگ فوکو. در عرض جغرافیایی  $\phi$ ، مؤلفه عمودی تندی زاویه‌ای زمین  $W \sin \phi$  می‌باشد، و بنابراین زمین در زیر آونگ با دوره تناوبی متناسب با  $\frac{1}{\sin \phi}$  می‌چرخد.

جسم سیال دوار را حفظ می‌کنند. جرم  $m$  که بر روی یک زمین کروی چرخان و در عرض جغرافیایی  $\phi$  قرار دارد (شکل (۳-۱۰)) تحت تأثیر دو شتاب قرار می‌گیرد (بخش (۱-۴ الف)): (۱) شتاب گرانشی  $\frac{GM_{\oplus}}{r^2}$  که به سمت مرکز زمین است و (۲) شتاب جانب مرکز  $\omega^2 r \cos\phi$  در مدار دایره‌ای به شعاع  $r \cos\phi$ . اگر جرمی آزاد باشد که حرکت کند (یک جرم به صورت سیال)، شتاب جانب مرکز بر آن اثر می‌گذارد. مؤلفه عمودی این شتاب جانب مرکز،  $a = \omega^2 r \cos^2\phi$  از وزن آن جرم می‌کاهد در حالی که مؤلفه افقی شتاب،  $b = \omega^2 r \sin\phi \cos\phi$ ، باعث می‌شود که جرم به سمت استوا حرکت کند. با در نظر گرفتن تعداد زیادی از چنین جرمهای سیال (در واقع، کل زمین)، مشاهده می‌کنیم که در استوای زمین یک برآمدگی بوجود می‌آید و آنقدر رشد می‌کند تا جرمهای سیال نتوانند از این «تپه» استوایی بالا بروند - شکل پخی حالت تعادل بوجود می‌آید.



شکل ۳-۱۰. پخی زمین. جرم  $m$  در عرض جغرافیایی  $\phi$  دارای شتاب گرانشی  $\vec{A}$  و شتاب جانب مرکز  $\vec{B}$  (از محل چرخش حول محور زمین) می‌باشد. مجموع برداری این دو نیرو سبب مؤلفه قائم  $\vec{a}$  می‌شود که وزن را کاهش می‌دهد و مؤلفه افقی  $\vec{b}$  سبب لغزش جسم به طرف استوا ( $E$ ) می‌گردد.

## ۳-۳ دلائل گردش زمین به دور خورشید

همانند چرخش زمین، باید دقت کنیم که گردش زمین به دور خورشید را هم اثبات کنیم. سه دلیلی که در زیر خواهیم آورد در زمان کوپرنیک و کپلر در دسترس نبودند، از این رو به نظریات این دو دانشمند به صورت حدس و گمان نگاه می شد و این نظریات استحکام کامل نداشتند تا مورد قبول واقع شوند. امروزه این دلایل نمود غیر قابل بحث الگوی خورشید مرکزی منظومه شمسی هستند.

## (الف) ابیراهی نور ستارگان

در سال ۱۷۲۹ میلادی، ستاره شناس انگلیسی جیمز برادلی<sup>۱</sup> (۱۷۶۲-۱۶۹۳ میلادی) انحراف نور ستارگان را کشف کرد و با استفاده از تندی محدود نور  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ km/sec}$  چنین توضیح داد که این پدیده در اثر حرکت مداری زمین بوجود می آید. تصور کنید که شما در حالی که یک چتر بالای سر خود گرفته اید، زیر بارانی که به طور قائم فرود می آید قدم می زنید. هر چه قدر سریعتر راه بروید، مجبور خواهید بود، برای این که باران به صورت شما نخورد، چتر را بیشتر به سمت جلو پائین بیاورید. هنگامی که نور ستاره ای وارد تلسکوپ می شود، اتفاق مشابهی می افتد (شکل (۳-۱۱)). اگر زمین در حال سکون می بود، می توانستیم تلسکوپ خود را به سوی نقطه سمت الرأس نشانه برویم تا ستاره ای را که در آنجا قرار دارد ببینیم. اما، اگر زمین با تندی  $v$  در حال حرکت باشد، بایستی تلسکوپ را در جهت حرکت به اندازه زاویه  $\theta$  (که  $\theta$  بر حسب رادیان است) کج کنیم.

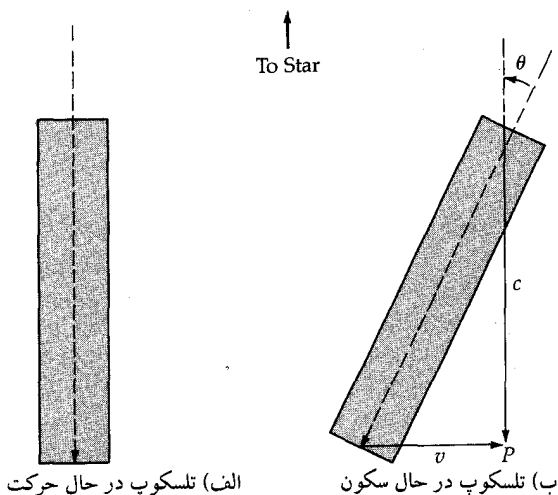
$$\theta \approx \tan \sigma = \frac{v}{c} \quad (2-3)$$

بنابراین، پائین تلسکوپ می تواند پرتو نوری را که به بالای تلسکوپ وارد می شود، دریافت کند. برادلی این زاویه چرخشی بسیار کوچک را مشاهده کرد،  $\theta = 20/49''$ ، با استفاده از معادله (۳-۲)، تندی مداری زمین را به صورت

$$v = \theta c = (9/934 \times 10^{-5} \text{ rad}) (3/0 \times 10^8 \text{ km/s}) = 29/80 \text{ km/sec}$$

استنتاج می‌کنیم.

همین‌طور که زمین به دور خورشید می‌گردد جهتی که تلسکوپ خود را در آن جهت منحرف می‌کنیم، تغییر می‌کند. از آنجا که مدار زمین اساساً دایره‌ای است، به نظر می‌رسد که ستارگان بر روی کرهٔ سماوی مدارهای انحراف سالانه طی می‌کنند (شکل ۳-۱۲). ستاره‌ای که بر روی قطب مدار دایرة البروج قرار گرفته باشد، مشاهده می‌شود که سالی یک بار حول دایره‌ای به شعاع زاویه‌ای  $20/49''$  حرکت می‌کند.



(الف) تلسکوپ در حال حرکت

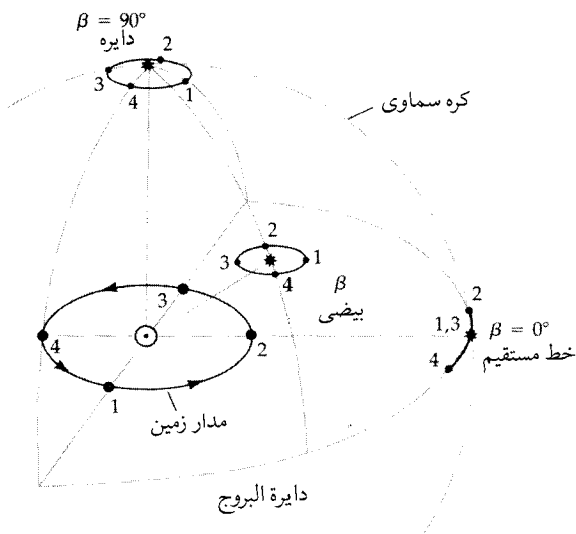
(ب) تلسکوپ در حال سکون

شکل ۳-۱۱. انحراف نور ستاره. (الف) تلسکوپ در حال سکون است و برای دیدن نوری که از ستاره‌ای می‌آید به سمت بالا نشانه روی شده است. (ب) وقتی که تلسکوپ با تندى  $v$  حرکت کند (در اثر گردش زمین)، به اندازه زاویه  $\theta$  کج می‌شود، تا نور ستاره و انتهای تلسکوپ به طور همزمان به نقطه P برسند.

ستارگانی که روی دایرة البروج واقع باشند در طول خطوطی با نیم طول زاویه‌ای  $20/49''$  به جلو و عقب حرکت نوسانی انجام می‌دهند. در یک عرض سماوی میانی  $\beta$  (زاویه نسبت به دایرة البروج)، مدار انحراف یک بیضی با نیم قطر اطول  $20/49''$  و نیم قطر اقصر  $\sin\beta (20/49'')$  حرکت می‌کند. اگر زمین به دور خورشید نمی‌گردید، این رفتار مشاهده شده در مورد مدارات، انحراف غیر قابل توضیح می‌بود.

(ب) اختلاف منظر ستاره‌ای<sup>۱</sup>

در حالی که سوار بر اتومبیل خود در یک بزرگراه در حال حرکت هستید توجه کنید که به نظر می‌رسد اشیاء نزدیک به شما، نسبت به اشیاء دورتر به سمت عقب



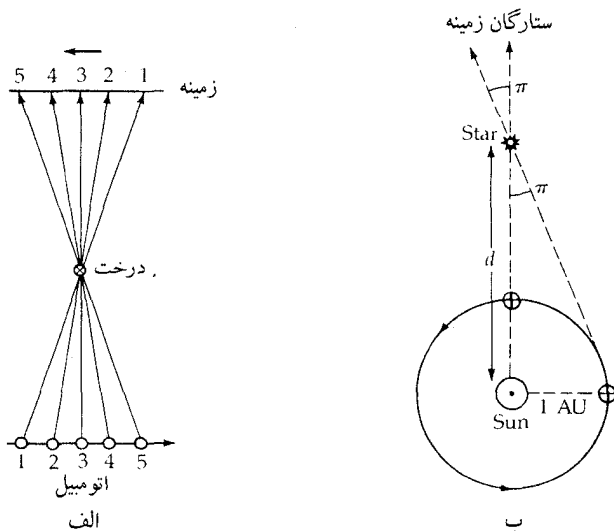
شکل ۳-۱۲. مدارهای ستاره‌ای ظاهری که بر اثر انحراف نور ستاره ایجاد می‌شوند. زمین در چهار موقعیت از مدارش به دور خورشید نشان داده شده است (۱ تا ۴). به دلیل تغییر در جهت انحراف در طول سال، مسیرهای ترسیم شده توسط ستارگان برای آنهایی که درست در بالای صفحه مدار (قطب دایرة البروج)، دو صفحه مدار (دایرة البروج)، و نیز برای آن ستارگانی که در موقعیت میان دو حالت فوق قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.

حرکت می‌کنند (شکل ۳-۱۳ الف)). این اثر نمایی خط دید ما، اختلاف منظر نامیده می‌شود. بر طبق الگوی خورشید مرکزی منظومه شمسی، از آنجا که زمین در حال گردش بدور خورشید است، ستارگان نزدیک که روی کره سماوی قرار دارند می‌بایست

اثر اختلاف منظر را از خود نشان دهند (شکل ۳-۱۳ ب)). اگر زاویه اختلاف منظر مشاهده شده برای یک ستاره  $\pi''$  (بر حسب ثانیه قوسی) باشد، فاصله آن ستاره مطابق شکل (۳-۱۳ ب) عبارتست از:

$$d = (206265/\pi'') \text{ AU} \quad (3-3)$$

توجه کنید که عدد ۲۰۶۲۶۵ عبارتست از تعداد ثانیه‌های قوسی موجود در ۱ رادیان. (برای یک بحث کامل راجع به اختلاف منظرها و فواصل ستاره‌ای به فصل یازدهم مراجعه کنید.)



شکل ۳-۱۳. اختلاف منظر. (الف) حرکت یک جسم نزدیک، در مقایسه با زمین، وقتی موقعیت ماروی خط پائینی از ۱ تا ۵ تغییر می‌کند. (ب) در اثر حرکت زمین به دور خورشید یک اختلاف منظر ستاره‌ای (زاویه  $\pi$ ) رخ می‌دهد. تغییر در موقعیت خط پائینی سبب ایجاد یک جابجایی ظاهری ستاره نسبت به ستاره‌های زمین می‌شود.

الگوی خورشید مرکزی کوپرنیک، تا موقعی که اولین اختلاف منظر ستاره‌ای در قرن نوزدهم مشاهده شد، متزلزل بود. در سال ۱۸۳۸ میلادی، فردریک ویلهلم بسل<sup>۱</sup>

(۱۸۴۶-۱۷۸۴ میلادی) اولین اختلاف منظر ستاره‌ای را به چاپ رسانید: "۲۹۴/۰ برای ستاره سیگنی ۱۶۱، در حدود همان زمان اف. جی. دبلیو استرو<sup>۲</sup> اختلاف منظر ستارهٔ نسر واقع<sup>۳</sup> وتی. هندرسون<sup>۴</sup> اختلاف منظر آلفا قنطورس<sup>۵</sup> را پیدا کردند. امروزه می‌دانیم که نزدیکترین ستاره به زمین پروکسیما قنطورس<sup>۶</sup> می‌باشد که اختلاف منظر آن "۰/۷۴۶ و فاصله آن ۲۷۰,۰۰۰ AU (حدود  $4 \times 10^{13}$  km یا ۴ سال نوری) است. اختلاف منظر برای تمام ستارگان کوچکتر از "۱/۰ است.

همچنانکه زمین بر روی مدار خود به دور خورشید می‌گردد، هر ستاره بر روی کرهٔ سماوی یک مدار اختلاف منظری سالیانه ترسیم می‌کند (شکل (۳-۱۴)). ستاره‌های واقع بر قطبهای دایره البروج بر روی دایره‌ای که شعاع آنها به فاصله ستاره از خورشید بستگی دارد، حرکت می‌کنند و ستاره‌های واقع بر دایره البروج در طول خطوطی نوسان می‌کنند. برای بیضی‌های اختلاف منظری کلی، نسبت نیم قطر اقصی به نیم قطر اطول برابر است با  $\sin \beta$ ، که در آن  $\beta$  عرض سماوی ستاره می‌باشد، درست مشابه مدارهای انحراف. با این وجود، توجه داشته باشید که برای یک جهت مشخص  $\beta$ ، مدار انحراف همواره ثابت می‌ماند ولی مدار اختلاف منظری به فاصله ستاره بستگی دارد. همچنین مدار انحراف یک ستاره به اندازه  $90^\circ$  با مدار اختلاف منظری آن اختلاف فاز دارد.

### (ج) اثر دوپلری

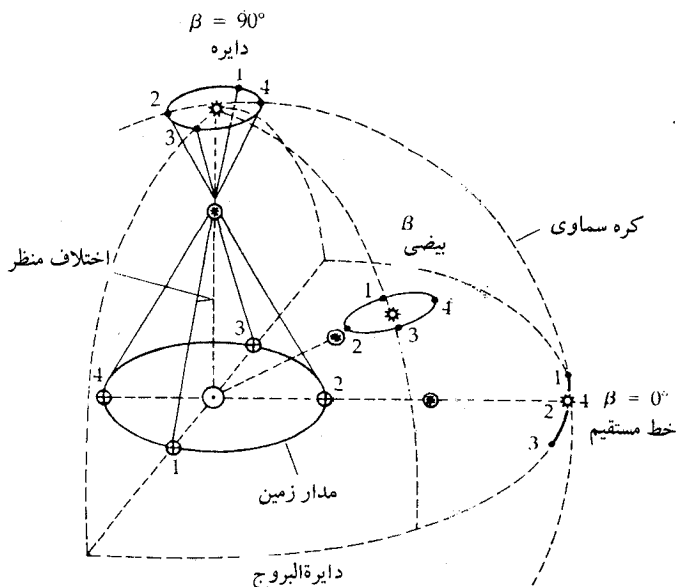
برای آخرین اثبات گردش زمین از اثر دوپلری استفاده می‌کنیم. در فصل هشتم این حقیقت را که طول موج تابش الکترومغناطیسی (نور) متناسب با سرعت نسبی در امتداد خط دید شیئی مورد نظر جابجا می‌شود، بدست می‌آوریم. اگر یک ستاره تابشی با طول موج  $\lambda$  صادر کند و ما این تابش را با طول موج  $\lambda_0$  مشاهده کنیم، فرمول دوپلر برای سرعت‌های خیلی کمتر از سرعت نور عبارت است از

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \quad (4-3)$$

1. Cygni 61.
3. Vega.
5.  $\alpha$  Centuari.

2. F. W. Struve.
4. T. Henderson.
6. Proxima Centauri.





شکل ۳-۱۴. مدارهای اختلاف منظری. تغییر مداری زمین باعث حرکت تناوبی موقعیت‌های ستاره‌ای می‌شود. توجه کنید که اینها به اندازه  $90^\circ$  با مدارهای انحراف اختلاف فاز دارند و اندازه زاویه‌ای آنها به فاصله از ستاره بستگی دارد.

که در آن  $v_r$  تندی نسبی در امتداد خط دید (برای حالت دور شدن مثبت و برای حالت نزدیک شدن منفی) بین مشاهده کننده و مشاهده شونده و  $C$  تندی نور است.

در مورد ستارگانی که در قطب دایرة البروج قرار گرفته‌اند، هیچ انتقال دوپلری اتفاق نمی‌افتد. بر روی یک عرض سماوی میانی  $\beta$ ، انتقال به صورت سینوسی و با دوره تناوب یک سال است و دامنه  $\Delta \lambda$  به صورت  $\cos \beta$  تغییر می‌کند. حداکثر دامنه این انتقال دوپلری برای ستارگانی که روی دایرة البروج هستند اتفاق می‌افتد که در مورد آنها مقدار کل سرعت مداری زمین نقش دارد. یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری تندی گردشی زمین این است که این انتقال بیشینه را اندازه بگیریم و سپس به کمک معادله (۳-۴)، انتقال دوپلری ثابت به انتقال دوپلری‌ای که با زمان تغییر می‌کند و در اثر گردش زمین

بوجود آمده است، اضافه می شود. این دو اثر به سادگی از هم قابل تمیز هستند. چرخش زمین یک اثر دوپلری روزانه بوجود می آورد که دامنه آن با  $\cos\phi \cos\delta$  متناسب است که  $\phi$  عرض جغرافیایی زمینی ناظر و  $\delta$  زاویه میل منبع دیده شده می باشد.

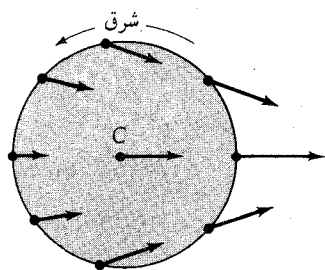
### ۳-۴ نیروهای گرانشی جزئی

دو شئی کروی از نظر گرانشی مانند دو جرم نقطه‌ای رفتار می کنند. اگر اجسام کشسان یا غیر کروی باشند و یا اگر تعداد زیادی اجسام دیگر نیز حضور داشته باشند، نیروهای گرانشی جزئی ممکن است اهمیت پیدا کنند. این اثر از آنجائشی می شود که گرانش به فاصله بین اجسام بستگی دارد و بنابراین قسمت‌های مختلف یک جسم گسترده (یا سیستم) تحت تأثیر شتابهای گرانشی متفاوتی واقع خواهد شد.

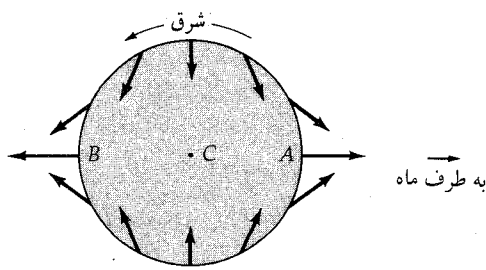
#### (الف) جزر و مد

اگر مدتی را در کنار یک جسم بزرگ تشکیل شده از آب گذرانده باشید، می دانید که سطح آب روزانه دوبار در جزر و مد پائین و بالا می رود و نیز می دانید که یک جزر یا مد مشخص، هر روز یک ساعت دیرتر اتفاق می افتد. ماه دلیل اصلی جزر و مد است چراکه هر روز به اندازه ۵۳ دقیقه دیرتر از روز پیش به نقطه عبور بالایی باز می گردد - تقریباً همزمان با مدّ. قسمت جامد زمین که چسبندگی آن خیلی بیشتر از آب است نیز سریعاً به نیروهای جزر و مدّی ماه پاسخ می دهد. آلبرت. آ. مایکلسن<sup>۱</sup> (۱۹۳۱-۱۸۵۲ میلادی) در سال ۱۹۱۳ میلادی برای اولین بار، با مشاهده جزر و مدّ آب در لوله‌های بلند افقی، آن را اندازه گیری کرد. او فرض کرد که زمین بی نهایت صلب است و قوانین نیوتون را بکار گرفت تا جزر و مدّهایی را که انتظار آنها می رفت، محاسبه کند. جزر و مدّهای مشاهده شده فقط ۶۹ درصد مقداری بودند که نظریه پیش بینی می کرد. این تفاوت را می شد چنین توضیح داد که به زمین سختی بیش از فولاد نسبت داده است، به طوری که پاسخ زمین در مقابل نیروهای جزر و مدّی ماه به صورت جزر و مدّهایی تا ارتفاع چندین سانتیمتر باشد.

1. Albert. A. Michelson.



الف - زمین



ب - زمین

شکل ۳-۱۵. نیروهای جزر و مدی وارد بر زمین. (الف) جاذبه گرانشی ماه بر روی زمین توسط چند بردار نیرو نشان داده شده است. (ب) شتاب برداری مرکز زمین (C) از شتابهای سطحی کسر می‌گردد. بردارهای باقیمانده نیروهای جزر و مدی را نشان می‌دهند.

حال از قوانین نیوتون استفاده می‌کنیم تا جزر و مد را با یک روش کلی توضیح دهیم. فرض می‌کنیم زمین شکل حالت تعادل چرخشی خود (یک شبه کره پخ) را که اساساً کروی است دارا باشد. این کره را با عمق یکنواختی از آب می‌پوشانیم و سؤال می‌کنیم که نیروی گرانشی ماه بر این آب چه اثری دارد (شکل ۳-۱۵ الف)). با تفریق شتاب برداری در مرکز زمین (C) از هر کدام از شتابهای برداری سطحی، شتابهای جزر و مدی جزئی (شکل ۳-۱۵ ب)) را بدست می‌آوریم. این نیروهای جزر و مدی، برای آب مدهایی حدود یک متر ارتفاع در نقاط A, B و در امتداد خط‌المركزین ایجاد می‌کنند، در حالی که زمین با همین شکل هر روز یک دور به دور خود می‌چرخد.

جزر و مدهای واقعی از نوسانات واداشته در اقیانوسهای زمین ناشی می‌شوند، بطوری که ارتفاع و زمان جزر و مد، ممکن است به مقدار قابل توجهی با آنچه که نظریه پیش‌بینی می‌کند، متفاوت باشند. در بعضی از خلیج‌ها و دهانه رودخانه‌ها، آبهای جزر و مدی ممکن است تا ارتفاع بیش از ۱۰ متر جمع شوند.

حال می‌خواهیم در مورد بدست آوردن شتابهای جزر و مدی کمی بیشتر به جنبه‌های کمی مسئله بپردازیم. به عنوان اولین تقریب، از شتاب جانب مرکز کوچکی که در اثر حرکت مداری زمین و ماه به دور مرکز ثقلشان در هر ماه نجومی (۲۷/۳۲ روز) ایجاد می‌شود، صرف‌نظر می‌کنیم. مراکز زمین و ماه مطابق شکل (۳-۱۶) به اندازه d از

هم فاصله دارند و یک ذره کوچک در سطح زمین، تحت زاویه  $\phi$  نسبت به خط‌المركزین

قرار دارد. بزرگی شتاب گرانشی مرکز زمین در اثر ماه  $A = \frac{GM_m}{d^2}$  و شتاب ذره  $B = \frac{GM_m}{r^2}$  است.  $A$  را به طریق برداری از  $B$  کسر می‌کنیم. این تفریق بر مؤلفه‌ای از  $\vec{B}$  که بر

خط‌المركزین عمود است تأثیری نمی‌گذارد و بزرگی آن عبارت است از

$$a = B \sin\theta = GM_m R_\oplus \sin\phi / r^3 \quad (5-3)$$

مؤلفه  $\vec{B}$  موازی با خط‌المركزین به‌دین صورت است

$$b = B \cos\theta = GM_m (d - R_\oplus \cos\phi) / r^3$$

باقیمانده پس از تفریق  $\vec{A}$  عبارت است از نیروی جزئی

$$b' = \left(\frac{GM_m}{r^3}\right) \left[ (d - R_\oplus \cos\phi) - \left(\frac{r^3}{d}\right) \right] \quad (6-3)$$

با استفاده از قانون کسینوسها و این حقیقت که  $\frac{R_\oplus}{d} \ll 1$ ، داریم

$$r^3 = d^3 \left[ 1 - 3\left(\frac{R_\oplus}{d}\right) \cos\phi + R_\oplus / d^2 \right]^{\frac{1}{3}} \approx d^3$$

بنابراین، معادله (۵-۳) نهایتاً (تا پائین‌ترین رتبه) به صورت زیر درمی‌آید.

$$a \approx GM_m R_\oplus \sin\phi / d^3 \quad (7-3 \text{ الف})$$

معادله (۶-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$b' \approx (GM_m / d^3) \left[ 1 - (R_\oplus / d) \cos\phi - \left(\frac{r}{d}\right)^3 \right]$$

و با بسط دادن نتیجه نسبت به  $r^3$  به کمک قضیه دو جمله‌ای (در ضمیمه ریاضی آورده شده است)، بدست می‌آوریم

$$b' \approx 2GM_m R_\oplus \cos\phi / d^3 \quad (7-3 \text{ ب})$$

دو معادله (۷-۳) تصویر کیفی ما را از مسئله تأیید می‌کنند (شکل (۳-۱۵ ب)) و نشان

می‌دهند که نیروهای گرانشی جزر و مدی به صورت  $\frac{MR}{d^3}$  تغییر می‌کنند که در آن  $M$  جرم منبع نیروی جزر و مدی،  $R$  بعد جسمی که تحت تأثیر نیروهای جزر و مدی قرار می‌گیرد و  $d$  فاصله بین دو جسم است.

می‌توان نشان داد که عموماً این رابطه برای نیروهای جزر و مدی با مشتق‌گیری از

قانون گرانش نیوتون نسبت به  $R$ ، نتیجه می‌شود

$$\frac{dF}{dR} = -2GM_m / R^3$$

و با بردن  $dR$  به سمت راست معادله داریم

$$dF = -(\gamma GM_m / R^3) dR \quad (۸-۳)$$

که در آن  $dF$  نیروی گرانشی جزئی در جهت  $R$  است. در این صورت  $dR$  عبارت است از قطر یک جسم صلب و یا فاصله بین دو جسم نزدیک به هم که تحت تأثیر نیروهای جزر و مدی قرار می‌گیرد.

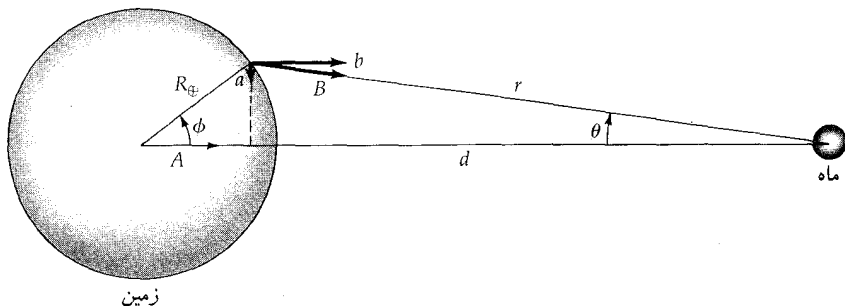
خورشید نیز بر روی زمین اثرات جزر و مدی ایجاد می‌کند. از آنجا که شتابهای جزئی به صورت  $\frac{MR}{d^3}$  تغییر می‌کند و نیز برای هر دو مورد  $R = R_{\oplus}$ ، نیروی بالابرنده جزر و مدی خورشید، نسبت به ماه عبارت است از

$$\begin{aligned} (M_{\odot} / M_m) (r_m / r_{\odot})^3 &= (1/99 \times 10^3 \text{ kg}) / (7/36 \times 10^{22} \text{ kg}) \\ &\times (3/84 \times 10^5 \text{ km})^3 / (1/50 \times 10^8 \text{ km})^3 \approx 5/11 \end{aligned}$$

اثرات جزر و مدی خورشید و ماه به صورت برداری با هم جمع می‌شوند، بطوری که جزر و مدّ متوجه به کشیدگی ماه بستگی دارد. زمانی که ماه در حالت مقابله یا مقارنه قرار می‌گیرد، این دو نیرو با هم جمع می‌شوند تا جزر و مدّهای بهاری خیلی بلند را ایجاد کنند؛ وقتی ماه در حالت تربیع‌ها قرار می‌گیرد، دو نیروی جزر و مدی قسمتی از یکدیگر را حذف می‌کنند و نتیجه، جزر و مدّهای خفیف و معمولاً کم است.

(ب) نتایج اصطکاک جزر و مدی

وقتی که زمین و اقیانوسها تحت تأثیر نیروهای بالابرنده جزر و مدی قرار می‌گیرند،



شکل ۳-۱۶. هندسه نیروهای جزر و مدی وارده از طرف ماه بر زمین.

در اثر اصطکاک، انرژی (به صورت گرما) تلف می‌شود. قسمت اعظم این انرژی در دریا‌های کم عمق و خطوط ساحلی که در آنجا در اثر جزر و مدّ اقیانوسها آب با قاره‌ها تماس می‌گیرد، از دست می‌رود. این اصطکاک جزر و مدّی از انرژی چرخشی زمین می‌کاهد بطوری که طول روز با آهنگ قابل اندازه‌گیری  $2s/0.000$  در هر قرن افزایش می‌یابد. اصطکاک جزر و مدّی دو پدیدهٔ جالب در سیستم زمین - ماه را سبب می‌شود: چرخش همزمان ماه و تحول جزر و مدّی.

زمین نیز بر ماه نیروهای جزر و مدّی که حدود  $20 \approx \frac{M_{\oplus} R_m}{M_m R_{\oplus}}$  برابر بیش از نیروهای جزر و مدّی ماه بر زمین است، وارد می‌کند. اتلاف انرژی زیادی که به این ترتیب حاصل می‌شود، باعث کاهش چرخش ماه می‌گردد تا زمانی که ماه مجبور شود چرخش همزمان انجام دهد، بطوری که دوره تناوب چرخش نجومی آن با دوره تناوب نجومی گردش آن حول زمین دقیقاً برابر گردد.

متوسط گشتاورهای خارجی وارد بر سیستم زمین - ماه قابل صرف نظر کردن است، بطوری که اندازه حرکت زاویه‌ای کل سیستم (بخش (۱-۵)) باید ثابت بماند. اندازه حرکت زاویه‌ای زمین رو به کاهش است، زیرا اصطکاک جزر و مدّی چرخش آنرا کند می‌کند، از این رو، ماه می‌بایست با دور شدن خود از زمین، اندازه حرکت زاویه‌ای خود را افزایش دهد. در این صورت قانون سوم کپلر ایجاب می‌کند که طول هر ماه بیشتر گردد. در آینده دور «روز» و «ماه» یکی خواهند شد و هر دو تقریباً  $50$  برابر روز فعلی می‌شوند. نیروهای جزر و مدّی به آنها شتاب می‌دهند، اما اقیانوس به طور آنی به نیروهای جزر و مدّی ماه پاسخ نمی‌دهد (شکل (۳-۱۷)). هم چنان که زمین در زیر ماه می‌چرخد برآمدگیهای جزر و مدّی کمی در طرف شرق خط‌المركزین زمین و ماه تشکیل می‌شوند. برآمدگی A به ماه نزدیکتر است تا برآمدگی B و بنابراین، برآمدگی A کمی بیشتر به ماه نیرو وارد می‌سازد. نیروی غیر مرکزی حاصل ماه را شتاب می‌دهد و باعث می‌شود که به صورت مارپیچی از زمین دور شود. همزمان با این عمل نیروی وارد شده از طرف ماه بر برآمدگیها به چرخش زمین شتاب منفی می‌دهد (قانون سوم نیوتون). اگر از لحاظ زمانی به عقب برگردیم، می‌بینیم که در آن موقع زمین می‌بایستی سریعتر از امروز می‌چرخید و طول ماه می‌بایست کوتاه‌تر می‌بود. در واقع، مطالعات

دیرین‌شناسی بر روی مرجان‌های فسیل شده‌ای که حدود ۱۰<sup>۸</sup> سال پیش از این زندگی می‌کرده‌اند، نشان می‌دهد که در آن زمان هر سال شامل ۴۰۰ «روز» بوده است و جزر و مدّهای اقیانوسی قویتر از امروزه بوده‌اند - زمین در گذشته سریعتر می‌چرخیده و ماه نزدیکتر بوده است.

حال به‌طور صریح‌تری نشان می‌دهیم که ماه برای بدست آوردن سرعت زاویه‌ای بیشتر، می‌بایست شعاع مداری خود را افزایش دهد. قوانین کپلر ایجاب می‌کنند که هر چه یک مدار بزرگتر باشد، دوره تناوب آن بیشتر خواهد بود. بنابراین، آیا اگر جسمی به یک مدار بزرگتر برود، اندازه حرکت زاویه‌ای آن (= جرم × شعاع مداری × تندی مداری) بیشتر می‌شود یا کمتر؟ پاسخ این است که اندازه حرکت زاویه‌ای متناسب با جذر فاصله افزایش می‌یابد.

اکنون ببینیم چگونه می‌توان این مطلب را دید. فرض کنید یک مدار دایره‌ای به شعاع R داریم. در آن صورت

$$L \propto RV$$

که در آن

$$V = \frac{2\pi R}{P}$$

بنابراین،

$$V^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{P^2}$$

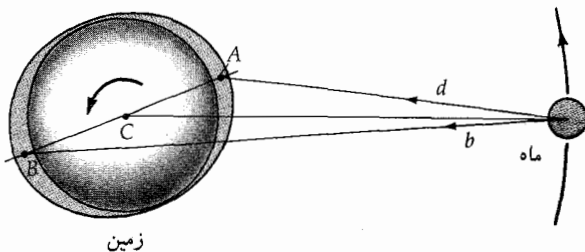
اما، قانون سوم کپلر ایجاب می‌کند که

$$P^2 \propto R^3$$

$$\frac{1}{V^2} \propto R$$

یا همان چیزی است که بیان کردیم.

$$V \propto \frac{1}{R^{1/2}}$$



شکل ۳-۱۷. تحوّل جزر و مدّی. برآمدگیهای جزر و مدّی زمین (A, B) توسط اصطکاک به سمتی رانده می‌شوند که جلوتر از موقعیت مداری ماه باشند. اصطکاک از چرخش زمین می‌کاهد و برآمدگیها، ماه را در مدار خود شتاب می‌دهند.

### (ج) حرکت تقدیمی<sup>۱</sup> و حرکت رقص محوری<sup>۲</sup>

احتمالاً با رفتار یک فرفره در حال چرخش و یا یک ژيروسکوپ آشنا هستید. زمانی که محور دوران فرفره بر خط قائم منطبق نباشد، انتظار داریم فرفره به یک طرف خود به زمین بیفتد، در حالی که محور دوران زاویه خود با خط قائم را حفظ می‌کند و فقط به آرامی حول خط قائم می‌چرخد. این حرکت تقدیمی فرفره توسط قوانین حرکت نیوتون پیش‌بینی می‌شود.

جاذبه گرانشی زمین  $\vec{F}$  که بر فرفره وارد می‌شود، گشتاور افقی  $\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$  را تولید می‌کند (بخش (۱-۵ الف)). از آنجا که گشتاور درست همان آهنگ تغییرات زمانی اندازه حرکت زاویه‌ای فرفره  $\vec{L}$  است ( $\vec{N} = \frac{d\vec{L}}{dt}$ )، هیچگونه مؤلفه قائم وجود ندارد تا فرفره را بیندازد و بنابراین، فرفره فقط می‌تواند بچرخد، یا حول محور قائم حرکت تقدیمی انجام دهد. نیرهای گرانشی جزئی که بر روی برآمدگی استوایی (در اثر چرخش) زمین پخ وارد می‌شوند، گشتاورهایی تولید می‌کنند که به پدیده مشابهی برای زمین - حرکت تقدیمی زمین - منجر می‌شود.

ماه و خورشید باعث حرکت تقدیمی ماه - خورشیدی زمین می‌شوند، که اثر ماه



غالب است. مدار ماه دارای میلی به اندازه  $5^\circ$  با دایرة البروج است، اما نیروی متوسط آن بطرف مرکز دایرة البروج می باشد. صفحه استوایی زمین نسبت به دایرة البروج زاویه  $23/5^\circ$  دارد (شکل (۳-۱۸)) که برآمدگیهای استوایی آن در A, B هستند. برآمدگی A توسط ماه قویتر جذب می گردد تا برآمدگی B، و نیرهای جزئی نشان داده شده اند. گشتاور حاصل به سمت داخل صفحه است، بطوری که بردار اندازه حرکت زاویه ای زمین  $\vec{L}$  به سمت غرب، حرکت تقدیمی انجام می دهد. خورشید هم یک اثر مشابه ولی کمی ضعیف تر ایجاد می کند، و گشتاورهای اختلالی که سایر سیارات ایجاد می کنند نیز یک حرکت تقدیمی سیاره ای بوجود می آورند که تا ۲ درصد حرکت تقدیمی کل را تشکیل می دهند. بر اثر این گشتاورها، قطبهای سماوی با زاویه میلی به اندازه  $23/5^\circ$  نسبت به قطب دایرة البروج باقی می مانند، ولی هر ۲۶۰۰۰ سال یک بار حرکت دایره ای حول قطب دایرة البروج انجام می دهند. در حال حاضر ستاره نسبتاً روشن قطبی<sup>۱</sup> (آلفای دب اصغر<sup>۲</sup>) تقریباً موقعیت قطب شمال سماوی را نشان می دهد، اما حدود ۱۴،۰۰۰ سال پس از میلاد مسیح، ستاره قطبی ستاره نسر واقع<sup>۳</sup> (آلفای شلیاق<sup>۴</sup>) خواهد بود.

در حالی که قطبهای سماوی حرکت تقدیمی انجام می دهند، محل تلاقی استوای سماوی و دایرة البروج (نقاط اعتدال بهاری و پاییزی) با آهنگ  $\frac{360}{26000}$  یعنی تقریباً  $50''$  در سال در امتداد دایرة البروج به سمت غرب پیش می رود (که این مقدار برابر خواهد بود با  $50'' \cos 23/5^\circ \approx 46''$  در هر سال در طول استوای سماوی). این پدیده حرکت تقدیمی نقاط اعتدالین نتایج مهم بسیاری در بر دارد: این پدیده از طریق تعریفی که برای روز و سال کرده ایم بر سیستمهای زمانی روی زمین اثر خواهد گذاشت؛ ستاره هایی که یک ناظر ستاره حول قطبی می بیند را تغییر می دهد، و به طور قابل توجهی مختصات موقعیت سماوی تمام اجسام آسمانی را تحت تأثیر قرار می دهد (ضمیمه ۱۰) از آنجا که اثر حرکت تقدیمی به سهولت قابل رؤیت است، موقعیتهای اجسام در سیستم مختصات استوایی سماوی (ضمیمه ۱۰) می بایست به طور مداوم نسبت به سیستم زمان بندی فعلی تغییر داده شود.

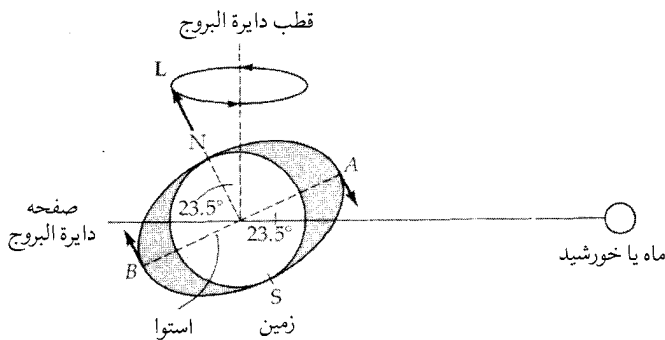
1. Polaris  
3. Vega.

2. Alpha Ursae Minoris.  
4. Alpha Lyrae.

به دلیل اینکه ماه و خورشید در بالا و زیر صفحه استوایی زمین حرکت می‌کنند، در گشتاورهایی که بر روی برآمدگی استوایی زمین عمل می‌کنند تغییرات تناوبی صورت می‌گیرد. این تغییرات به یک حرکت رقص محوری یا لنگ زدن محور چرخش زمین می‌انجامند. دوره‌های تناوب ماهانه و سالانه در رقص عمودی سهم کوچکی دارند، اما سهم عمده (توسط جیمز برادلی که به مسئله انحراف مشهور است، کشف شده است) که دامنه آن ۹" و دوره تناوب آن ۱۸/۶ سال است، از حرکت برگشتی گره‌های مدار ماه ناشی می‌شود (فصل ۴).

#### (د) حد روچ<sup>۱</sup> و حد ناپایداری

تاکنون مدارهای نسبی دو جرم کروی (سخت) را که به یکدیگر نیروی گرانشی وارد می‌کنند، مورد بحث قرار داده و قوانین کپلر را بدست آورده‌ایم. اکنون به تأثیر نیروهای گرانشی جزئی بر اجسام غیر صلب و نیز بر سیستمهای شامل بیش از دو جسم می‌پردازیم. بطور کلی یک قمر مصنوعی نمی‌تواند به سیاره مادر خود خیلی نزدیک شود (حد روچ) و یا از آن خیلی دور گردد (حد ناپایداری)، بدون اینکه نتایج دینامیکی وحشتناکی ببار آید.



شکل ۳-۱۸. حرکت تقدیمی محور زمین. نیروهای جزر و مدی جزئی وارده بر برآمدگیهای استوایی زمین (A, B) منجر به یک گشتاور می‌شوند (جهت آن به سمت داخل صفحه است) که موجب می‌گردد بردار اندازه حرکت زاویه‌ای زمین ( $\vec{L}$ ) به سمت غرب حرکت تقدیمی انجام دهد.

یک قمر مصنوعی کروی شکل به جرم  $m$  را در نظر بگیرید که شعاع آن  $r$  است و در فاصله  $d$  به دور سیاره مادر خود که جرم آن  $M$  و شعاع آن  $R$  است می‌گردد ( $M \gg m$ ) (شکل (۳-۱۹ الف)). اگر قمر مصنوعی به حد کافی بزرگ باشد ( $r \geq 500 \text{ km}$ )، خودگرانشی آن بر تمام نیروهایی که آنرا به هم پیوسته نگه می‌دارند، غلبه می‌کند و این نیرو قدرت و شکل قمر را معین می‌سازد. در سال ۱۸۵۰ میلادی ادوارد. روچ (۱۸۸۳-۱۸۲۰ میلادی) نشان داد که چنین قمری اگر به فاصله‌ای کمتر از

$$d = 2/44 (\rho_M / \rho_m)^{1/3} R \quad (9-3)$$

به سیاره مادر خود نزدیک شود، تکه تکه خواهد شد. در رابطه بالا  $\rho_M$  چگالی متوسط (بر حسب واحدهای SI،  $\text{kg/m}^3$ ) سیاره مادر و  $\rho_m$  چگالی متوسط قمر است. این حد روچ است. مثلاً، اگر قرار بود ماه به اندازه بیش از  $d = 2/9 R_{\oplus} \approx 18500 \text{ km}$  به مرکز زمین نزدیک شود، از هم می‌گسیخت و به قطعات کوچکی تبدیل می‌شد.

معادله (۳-۹) برای یک قمر سیال بدست آمده است که در اثر نیروهای جزر و مدی سیاره مادر به یک شبه کره دوکی شکل (به شکل توپ فوتبال آمریکایی) در آمده باشد. اکنون یک قمر کروی سخت را در نظر می‌گیریم تا به طور تقریبی نتیجه بالا را بدست آوریم (شکل (۳-۱۹ الف)). از آنجا که شتاب جانب مرکز مداری قمر  $\omega^2 d$  بوسیله جاذبه گرانشی  $\frac{GM}{d^2}$  سیاره مادر بوجود آمده است، تندی زاویه‌ای قمر حول سیاره مادر سنگین خود عبارت است از (طبق قانون سوم کپلر)

$$\omega = \left( \frac{GM}{d^3} \right)^{1/3}$$

شتاب گرانشی جزئی بین مرکز قمر (نقطه ۱) و لبه خارجی (نقطه ۲) در اثر سیاره مادر عبارت است از

$$A = (GM / d^2) - GM / (d + r)^2 \approx 2GMr / d^3$$

و شتاب جانب مرکزی جزئی بین این دو نقطه به صورت زیر است

$$B = \omega^2 (d + r) - \omega^2 d = \omega^2 r = \frac{GM_r}{d^3}$$

اگر قرار باشد قمر از هم نباشد باید ترکیب  $A+B = 3GMr / d^3$  با شتاب خودگرانشی قمر

جبران شود، بطوری که از هم پاشیدگی وقتی صورت می‌گیرد که

$$d = r \left( \frac{3M}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10-3)$$

از آنجا که چگالی متوسط به صورت نسبت جرم کل به حجم تعریف می‌شود، داریم

$$\rho_M = \frac{3M}{4\pi R^3} \quad \text{و} \quad \rho_m = \frac{3m}{4\pi r^3}$$

با جایگذاری این مقادیر در معادله (۱۰-۳) داریم

$$d = R \left( \frac{3\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 1/44 \left( \rho_M / \rho_m \right)^{\frac{1}{3}} R \quad (11-3)$$

اختلاف عددی بین معادلات (۳-۹) و (۳-۱۱) از فرض ما مبنی بر صلب بودن (غیر سیال) قمر ناشی می‌شود.

با در نظر گرفتن شکل جزئی نیروهای جزر و مدی (معادله (۳-۸)) برای دو جسم با اندازه‌ها و جرمهای مساوی که با هم درست مماس هستند، می‌توانیم نتایج بالا را به صورت بهتری ببینیم. نیروی جاذبه آنها عبارت است از

$$F = Gmm / (dr)^2$$

و این مقدار را با نیروی جزر و مدی برابر قرار می‌دهیم تا حد روچ  $d$  را از جرم  $M$  بدست آوریم

$$Gmm / (dr)^2 = 2GMm dr / d^3$$

بنابراین

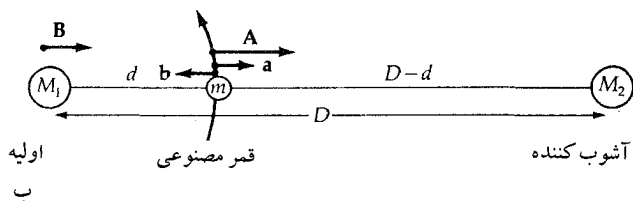
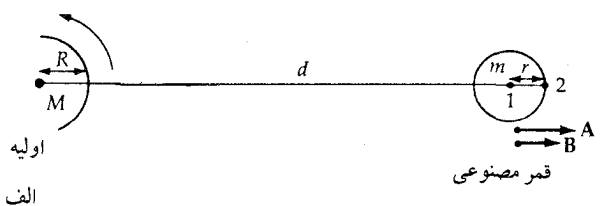
$$d = \left( \frac{2M}{m} \right)^{\frac{1}{3}} dr$$

که برای اجسامی با چگالیهای یکنواخت به صورت زیر درمی‌آید

$$d \approx 2/5 \left( \rho_M / \rho_m \right)^{\frac{1}{3}} R \quad (12-3)$$

در مورد اجسام یخی یا سنگی با قطرهای بیش از ۴۰ Km، ضریب عددی ۱/۳۸ است، و برای جسمی که مستقیماً به داخل سیاره سقوط می‌کند، ضریب ۱/۱۹ می‌باشد.

اقمار طبیعی موجود در منظومه شمسی که اندازه مدار آنها بزرگ است در بالاتر از حد روچ سیارات مادرشان می‌گردند، اگر چه تعدادی از قمرهای کوچک زحل در واقع در حد روچ قرار دارند. سیستم حلقه‌های زیبای زحل در حدود ۸۰۰۰۰ الی ۱۳۶۰۰۰ Km دورتر از مرکز سیاره واقع‌اند و بنابراین، کلاً در داخل حد روچ آن که ۱۵۰۰۰۰ km است، قرار دارند. سیستم حلقه‌های مشتری و اورانوس نیز در پایین‌تر از حد روچ آن سیارات واقعند. هیچ قمر سنگی یا یخی با قطری بیش از ۴۰ km نمی‌تواند بدون این که از هم پاشد، وجود داشته و یا تشکیل شده باشد. این مطلب که این حلقه‌ها از تعداد زیادی ذرات جامد تشکیل شده‌اند به این معنی است که قدرت پیوستگی آنها بیش از نیروهای جزر و مدی از هم پاشنده است. اقمار مصنوعی مطمئناً پایین‌تر از حد روچ زمین قرار دارند، ولی توسط استحکام کشسان موادی که از آنها ساخته شده‌اند، به هم نگه داشته می‌شوند. یک کره صُلب فولادی به قطر یک متر قبل از این که نیروهای جزر و مدی، بر استحکام کشسان داخلی آن غلبه کنند، می‌تواند به اندازه ۱۰۰ متر به یک جرم نقطه‌ای به جرم  $M_{\oplus}$  نزدیک شود!



شکل ۳-۱۹. حد روچ و حد ناپایداری. (الف) هندسه در مورد حد روچ، هنگامی که نیروی گرانشی جزئی  $\vec{A}$  و شتاب جانب مرکز جزئی  $\vec{B}$  ما بین نقاط ۱ و ۲ از خود گرانشی جسم تجاوز نماید. (ب) یک قمر  $m$ ، در اثر اختلالات جزئی  $\vec{a} = \vec{A} - \vec{B}$  که توسط یک عامل پربشندگی به جرم  $m_p$  ایجاد شده‌اند، هنگامی که  $d$  از حد ناپایداری تجاوز کند از سیاره مادر خود می‌گریزد.

هر چه یک جسم در فواصل دورتر و دورتری از سیاره مادر خود به دور آن گردش کند، پیریشندگی جزئی از جانب سایر اجسام، مهمتر می‌گردند (شکل (۳-۱۹ ب)). در بالای حد ناپایداری، جسم از سیاره مادر خود می‌گریزد. عامل پیریشندگی  $M_2$ ، شتاب جزئی

$$a = A - B = [GM_p / (D - d)^2] - GM_p / D^2 \approx 2GM_p d / D^3$$

را بین جسم دوران‌کننده و سیاره مادر آن بوجود می‌آورد (در صورتی که  $d \ll D$ ). هنگامی که این شتاب با شتاب گرانشی سیاره مادر یعنی  $b = GM_1 / d^2$  برابر باشد، جسم چرخان در حد ناپایداری قرار می‌گیرد:

$$d = (M_1 / 2M_p)^{1/3} D \quad (3-13)$$

توجه داشته باشید که معادله (۳-۱۳) فقط در صورتی معتبر است که  $M_1 \ll M_p$ . در صورتی که  $M_1 \geq M_p$ ، می‌بایست از رابطه دقیق‌تر برای یافتن  $d$  بر حسب  $D$  استفاده کنیم

$$d^3 (D - d) = (M_1 / M_p) D^2 (D - d)^2 \quad (3-14)$$

از معادله (۳-۱۳)، حد ناپایداری برای ماه - با خورشید به عنوان یک عامل اختلالی  $1/\sqrt{7} \times 10^6 \text{ km}$  است؛ این مسافت چهار برابر فاصله فعلی زمین تا ماه می‌باشد، و بنابراین ماه در مقابل‌گریز پایدار است. ستاره‌های دنباله‌دار ممکن است در اثر پیریشندگی حاصل از سایر ستارگان ( $M_1 \approx M_p$ ) هنگامی که حضیض ستاره‌ای دنباله‌دار در فواصلی بیشتر از  $10^5 \text{ AU}$  قرار گیرند، از منظومه شمسی بگریزند (زیرا معادله (۳-۱۴) به این معنی است که  $d \approx \frac{D}{2}$  و  $D \approx 2 \times 10^5 \text{ AU}$ ).

## مسائل

- ۱- الف) یک ساعت نجومی در مدت ۵ ساعت خورشیدی متوسط چه مقدار از یک ساعت دیواری خورشیدی متوسط جلو (یا عقب) می‌افتد؟
- ب) وقتی که زمان خورشید ظاهری ظهر را نشان می‌دهد، زمان نجومی تقریبی در

روزهای زیر چه مقداری را نشان خواهد داد: (i) اولین روز بهار، (ii) اولین روز تابستان، (iii) ۲۱ آوریل و (iv) ۲ ژانویه؟

۲- مسیر خورشید در آسمان برای هر فصلی از سال را بر حسب ارتفاع زاویه سمت (ضمیمه ۱۰) در:

(الف) استوا

(ب) عرض جغرافیایی  $35^\circ$  شمالی

(ج) قطب شمال

توصیف کنید. از اصطلاحات توصیفی مانند: ارتفاع ظهر، زاویه سمت طلوع آفتاب، زاویه سمت غروب آفتاب، و زاویه‌ای که در آن خورشید با افق تماس پیدا می‌کند، استفاده کنید.

۳- کیپ کاناورال<sup>۱</sup> در طول جغرافیایی  $23^\circ 8'$  غربی و عرض جغرافیایی  $28^\circ 30'$  شمالی واقع است. موشکی از آنجا به طرف جنوب پرتاب می‌گردد و ۱۰ دقیقه بعد در استوا

فرود می‌آید. طول جغرافیایی محل برخورد موشک با زمین چیست؟

۴- در بررسی اثر کوریولیس متذکر شدیم، جسمی که تحت شتاب ثابت  $a$  قرار گیرد،

مسافت  $s = \frac{at^2}{2}$  را در زمان  $t$  طی خواهیم کرد. نشان دهید که تبدی جسم با زمان

متناسب است و در واقع شتاب جسم نیز  $a$  است.

۵- چرخش زمین نیز انحرافی در نور ستارگان ایجاد می‌کند.

(الف) حداکثر مقدار این انحراف روزانه چقدر است؟

(ب) در چه مکانی از زمین این اثر بیشترین مقدار خود را دارد؟

(ج) برای چه ستارگانی (مکان ستاره زوی کرهٔ سماوی است) این اثر بیشینه است؟

۶- (الف) اگر شتاب جانب مرکز زمین در اثر چرخش زمین، در استوا برابر  $\omega^2 R_{\oplus}$

باشد، و  $\omega = \frac{2\pi}{p}$ ، که در آن  $p$  برابر است با یک روز، در آنصورت وزن شخصی که از

قطب شمال به استوا می‌رود چند درصد کم می‌شود؟ از پخی زمین صرف‌نظر کنید.

(ب) اکنون چرخش زمین را نادیده بگیرید و درصد افزایش وزن شخصی که از استوا

به قطب می‌رود و بر روی زمین پخ حرکت می‌کند را بیابید.

(ج) نتایجی را که از (الف) و (ب) بدست آورده‌اید با هم ترکیب کنید و از آنجا نتیجه بگیرید که  $g$  مؤثر چگونه از قطبهای زمین تا استوا تغییر می‌کند.

۷- تندی مداری زمین تقریباً  $30 \text{ km/s}$  است. ستاره‌ای در طول موج  $\lambda_e = 517/3 \text{ nm}$  یک خط طیفی گسیل می‌دارد ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). وقتی که ستاره در روی دایرة البروج (عرض سماوی  $\beta = 0$ ) قرار دارد و زمین به دور خورشید در حال گردش است، این طول موج با چه دامنه‌ای نوسان می‌کند؟

۸- در بخش (۳-۴الف)، نیروهای جزر و مدی جزئی ماه بر سطح زمین را در صورتی از حرکت سیستم زمین - ماه به دور مرکز جرمشان در مدت هر ماه صرف‌نظر شد، محاسبه کردیم. سیستم مختصاتی انتخاب کنید که مبدأ آن بر روی مرکز جرم قرار داشته باشد و با تندی زاویه‌ای  $\omega$  (به دلیل این حرکت ماهانه نجومی) به سمت شرق در حال چرخش باشد، و شتاب جانب مرکز زمین را در سطح زمین به حساب آورید تا رابطه‌ای صحیح برای شتاب جزر و مدی کل در سطح زمین بدست آید. از چرخش روزانه زمین چشم پوشی کنید. (راهنمایی: مرکز جرم زمین - ماه در داخل کره زمین قرار دارد.)

۹- بر روی یک کاغذ میلیمتری بزرگ با در نظر گرفتن مقیاس، فواصل حد روچ و مدارهای داخلی‌ترین اقمار سیاره‌ای و نیز حلقه‌های سیاره‌ای را برای (i) زمین، (ii) مریخ، (iii) مشتری، (iv) زحل و (v) اورانوس رسم کنید. فرض کنید که در تمام حالات  $\rho_M = \rho_m$  با یک جمله کوتاه نتایج کار خود را خلاصه کنید.

۱۰- نیروهای جزر و مدی را که ماه (در نقطه حضيض) به زمین وارد می‌کند و آنهایی (نیروها) را که خورشید (در قرین خورشیدی) به زمین وارد می‌سازد و نیز نیروهایی که سیاره زهره (در نزدیکترین فاصله) به زمین وارد می‌سازد را با هم مقایسه کنید.

۱۱- فرض کنید که زمین و ماه کروی هستند و ماه بر روی یک مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی زمین و ماه را محاسبه کرده و با اندازه حرکت زاویه‌ای مداری مقایسه کنید. جرم کروی با چگالی یکنواخت دارای اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی  $MVR \left(\frac{2}{5}\right)$  است، که در آن  $V$  سرعت استوایی و  $R$  شعاع است. مجموع این اندازه حرکت‌های زاویه‌ای برای سیستم زمین - ماه باید مقدار ثابتی



باشد (از گشتاورهای خارجی صرفنظر می‌کنیم). از طریق محاسبه آهنگ کاهش اندازه حرکت زاویه‌ای چرخش زمین در اثر اصطکاک جزر و مدی، آهنگی که ماه به‌طور شعاعی از زمین دور می‌شود را تخمین بزنید.

۱۲- ماه تا زمانی که از برآمدگیهای جزر و مدی عقب نماند و انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای متوقف شود، به دور شدن خود از زمین ادامه خواهد داد. محاسبات کامپیوتری نشان می‌دهند که این اتفاق وقتی روی خواهد داد که فاصله بین زمین و ماه  $6/45 \times 10^5$  km گردد. دوره تناوب مداری ماه در آن هنگام را محاسبه کنید.

۱۳- تابش خورشید را در شهر آلبکرکی<sup>۱</sup>، نیومکزیکو<sup>۲</sup> (عرض جغرافیایی حدود  $35^\circ$  شمالی) در ظهر برای روز انقلاب تابستانی و روز انقلاب زمستانی با هم مقایسه کنید.

## فصل چهارم

# سیستم زمین - ماه

بررسی مفصل منظومه شمسی با سیاره مسکونی ما زمین و قمرش ماه شروع می شود. قرنها بررسی بر روی زمین منجر به فهم خوبی از این سیاره شده است و مطالعه ماه در عصر فضا از سال ۱۹۵۷ میلادی با فرود آمدن انسان در آن تغییر اساسی کرده است. این فصل مختصراً دانش ما را در محدوده زمین برای یافتن اینکه زمین به عنوان توسعه یافته ترین سیاره و ماه همانند یک دنیای فسیلی می باشد، بالا می برد.

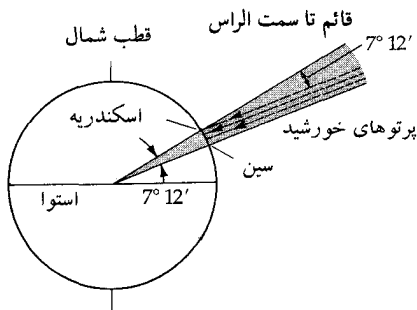
### ۴-۱ ابعاد

ابتدا اندازه زمین به وسیله یک منجم یونانی به نام اراتوستن<sup>۱</sup> (۲۷۶-۱۹۵ قبل از میلاد) تعیین شده است، کسی که توجه کرد در تحویل تابستان ارتفاع ظهر خورشید در شهر سین<sup>۲</sup> حدود ۱۲' و ۷° با ارتفاع آن در شهر اسکندریه<sup>۳</sup> (شکل (۴-۱)) اختلاف دارد.

1. Eratosthenes.  
3. Alexandria.

2. Syene.

وی با فرض اینکه زمین کروی بوده و اسکندریه ۵۰۰۰ استادیای<sup>۱</sup> (۰/۱۶km = استادیوم) در شمال سین قرار دارد، محیط دایره زمین را به صورت زیر بدست آورد



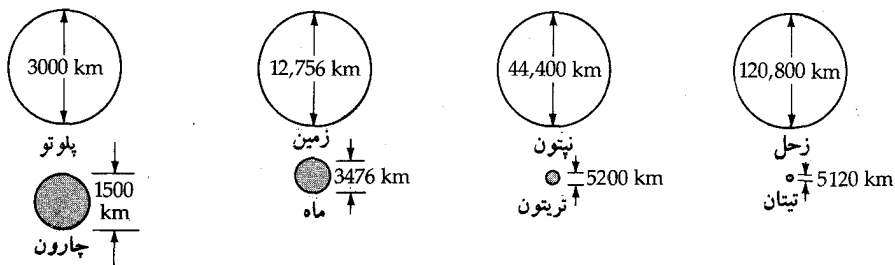
شکل ۴-۱. هندسه برای روش اراتوستن جهت تعیین اندازه زمین.

$$۴۰۰۰۰ \text{ km} \approx \text{استادیا} \approx ۲۵۰۰۰۰ = ۵۰۰۰ \left( \frac{۳۶۰^\circ}{۷/۲^\circ} \right)$$

مقدار فوق شعاعی حدود ۱٪ شعاع استوائی زمین  $R_{\oplus} = ۶۳۷۸/۲ \text{ km}$  را می دهد، اما حقیقتاً مقدار صحیح استادیوم را نمی دانیم و بنابراین، توافق با مقدار جدید ممکن است یک اتفاق باشد. اراتوستن محققاً ایده درستی در به کارگیری این روش داشته است. امروزه اندازه گیریها شامل فن هایی مانند اقمار زمین پیمایی و رادار می شوند.

زمین عضو اصلی در سیستم ماه - زمین است. ماه یکی از بزرگترین و سنگین ترین اقمار در منظومه شمسی نسبت به سیاره اصلی خودش است (شکل ۴-۲)). اکنون پلوتو<sup>۲</sup> و کارن<sup>۳</sup> از این نظر اولین اند زیرا شعاع کارن نصف شعاع پلوتو و جرم آن ۰/۱ جرم پلوتو است (فصل ۶). شعاع ماه  $(۰/۲۷۲R_{\oplus})$  ۱۷۳۸km و جرمش  $(۰/۰۱۲۳M_{\oplus})$   $۱۰^{۲۲} \times ۷/۳۵$  است و قمر تریتون<sup>۴</sup> متعلق به نپتون<sup>۵</sup>  $(۰/۰۰۱۳M_N)$  و  $(۰/۰۹R_N)$  و تیتان<sup>۶</sup> متعلق به زحل<sup>۷</sup>  $(۰/۰۰۰۲۵M_S)$  و  $(۰/۰۴۰R_S)$  می باشند. فاصله متوسط بین مراکز زمین و ماه ۳۸۴۴۰۵km یا حدود  $۶۰/۳R_{\oplus}$  (شکل ۴-۳ الف)) است. همچنین، مرکز

- |             |            |
|-------------|------------|
| 1. stadia.  | 2. Poluto. |
| 3. Charon.  | 4. Triton  |
| 5. Neptune. | 6. Titan.  |
| 7. Saturn.  |            |



شکل ۴-۲. اندازه‌های قمرها. بزرگترین اعمار نسبت به اندازه‌های سیارات مادرشان با مقیاس نشان داده شده‌اند.

جرم سیستم به فاصله

$$\frac{M_m a_m}{M_{\oplus} + M_m} = \frac{(0/0.123)(384405)}{1/0.123} = 4671 \text{ km}$$

از مرکز زمین قرار دارد، زمین و ماه این نقطه را که  $1707 \text{ km}$  زیر سطح زمین می‌باشد، در هر ماه یک دور می‌زند (شکل ۴-۳ ب).

اگر فرض کنیم که جرم ماه نسبت به زمین کوچک است، می‌توانیم جرم زمین را تخمین بزنیم و با استفاده از قانون سوم کپلر داریم  $M_{\oplus} = \frac{4\pi^2 a_m^3}{GP_m^2}$ ، این قانون را می‌توان برای مدارهای قمر مصنوعی نیز بکار برد. نتیجه چنین است

$$M_{\oplus} = 5/98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

(همانطور که در زیر نشان داده شده است، جرم ماه حدود ۱٪ جرم زمین می‌باشد و بنابراین، نتایج تقریبی ما خطائی به این اندازه دارند.) جرم ماه ممکن است به وسیله مشاهده حرکت زمین بدور مرکز جرم با دانستن جرم زمین و محل مرکز جرم، محاسبه شود

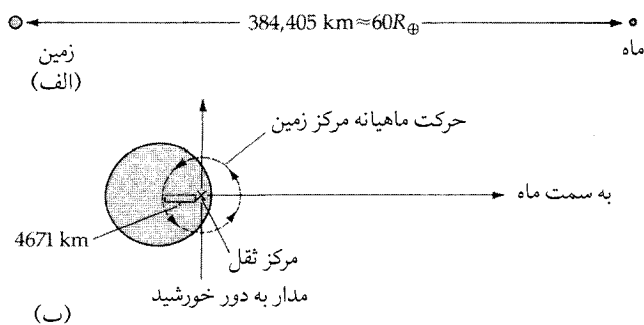
$$M_m = \left(\frac{d_{\oplus}}{d_m}\right) M_{\oplus} = 7/35 \times 10^{22} \text{ kg} = \left(\frac{1}{81/3}\right) M_{\oplus}$$

که در آن  $d_{\oplus}$  فاصله مرکز جرم تا مرکز زمین و  $d_m$  فاصله از مرکز جرم تا مرکز ماه است. امروزه مدارهای قمری فضاییما برای تعیین دقیق  $M_m$  و همچنین تعیین توزیع جرم داخلی ماه به کار می‌رود. پِخی ماه  $0/006$  است و ماه به طور جزئی در امتداد محور اطولش

(برآمدگی جزر و مدی!) به سمت زمین کشیده شده است.

امروزه فاصله زمین - ماه از انعکاس تپ‌های رادار از سطح قمری (با دقتی حدود چند متر) یا تپ‌های نوری لیزر از آینه‌های نصب شده توسط فضانوردهای آپولو<sup>۱</sup> (با دقتی حدود یک سانتی‌متر)، تعیین می‌شود. حال می‌توان با استفاده از فاصله تا ماه اندازه ماه را به طرق زیر پیدا کرد:

(۱) تعیین زمان پوشیدگی ستارگان و سیارات یا از گرفتگی‌های خورشیدی، (۲) اندازه‌گیری اندازه زاویه ظاهری ماه در آسمان. از قطر ظاهری ماه که ۳۱ دقیقه قوسی (حدود ۰/۵ درجه) است و فاصله ماه - زمین (۳۸۴۰۰۰km) می‌توانیم قطر آن را حساب کنیم که مقدار آن ۳۴۷۶km (شعاع ۱۷۳۸km) می‌گردد.



شکل ۳-۴ (الف). سیستم زمین - ماه با مقیاس ترسیم شده است. (ب) محل مرکز ثقل (مرکز جرم) سیستم زمین - ماه.

## ۲-۴ دینامیک

### الف - حرکات

اجازه دهید که حرکات اصلی زمین را خلاصه کنیم (فصل سوم). مرکز جرم سیستم زمین - ماه، خورشید را در فاصله یک AU و در یک سال نجومی که برابر ۳۶۵/۲۵۶۴ روز متوسط خورشیدی است، دور می‌زند. زمین هر ۲۴ ساعت نجومی یک بار

می چرخد و مرکزش در یک ماه نجومی<sup>۱</sup>  $27/322$  روز به دور مرکز جرم می‌گردد. محور چرخش زمین حول قطب دایرة البروج تقریباً در  $26000$  سال حرکت تقدیمی انجام می‌دهد و محور آن کمی به دور محور چرخش لنگش دارد. بالاخره، اصطکاک جزر و مدی، زمان چرخش زمین را حدود  $0/002$  ثانیه در قرن کاهش می‌دهد.

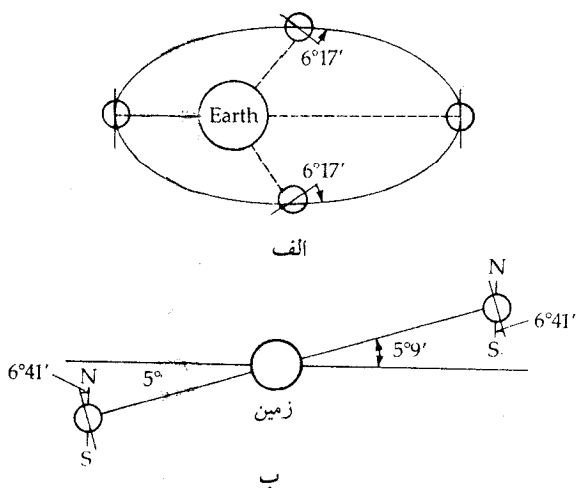
حرکات ماه خیلی پیچیده‌تر است. ماه نسبت به ستارگان، مرکز جرم را در یک ماه نجومی ( $27/322$  روز) دور می‌زند و نسبت به خورشید این مسیر یک ماه هلالی<sup>۲</sup> می‌شود (اهله‌های ماه  $29/531$  روز). نسبت به خط‌گره‌ای<sup>۳</sup> ماه (به زیر مراجعه شود)، دوره تناوب مداری، یک ماه‌گره‌ای یا اژدهائی<sup>۴</sup> ( $27/212$  روز) است و نسبت به حضیض آن، دوره تناوب یک ماه آنومالی<sup>۵</sup> ( $27/555$  روز) می‌باشد. دوره تناوب چرخشی همزمان ماه یک ماه نجومی است، بنابراین ما فقط یک نیم‌کره ماه را می‌بینیم. از پشت ماه که هنوز دیده نشده است توسط فضایی‌های لونا ی ۳ روسیه در اکتبر ۱۹۵۹ میلادی عکس گرفته شده است.

در واقع، می‌توانیم حدود ۵۹ درصد کل سطح ماه را به علت حرکت رخگرد<sup>۶</sup> آن مشاهده کنیم (این مطلب نخستین بار توسط گالیله شناخته و تفسیر شده است). رخگردهای قمری، حاصل اثرات هندسی میل مدار ماه و استوا می‌باشند. ماه با یک آهنگ نسبتاً یکنواخت می‌چرخد ولی با تندهای مختلف در مدار غیر دایره‌ای حرکت می‌کند. این اختلاف به یک جنبندگی شرقی - غربی ظاهری ماه در حدود  $17'$  و  $6^\circ$  منجر می‌شود - حرکت رخگردی در طول جغرافیائی - (شکل ۴-۴ الف)). گرچه ضرورتاً استوای ماه با سطح دایرة البروج به طور موازی قرار می‌گیرد، ولی مدار  $9'$  و  $5^\circ$  نسبت به دایرة البروج منحرف شده و بنابراین، یک «خط‌گره‌ای» شمال - جنوب ظاهری با حرکتی حدود  $41'$  و  $6^\circ$  می‌بینیم - حرکت رخگردی در عرض جغرافیایی - (شکل ۴-۴ ب)).

نیروهای گرانشی جزئی خورشیدی روی سیستم زمین - ماه سه اثر مهم ایجاد می‌کنند: (۱) مدار ماه را در تربیع کشیده می‌سازند، (۲) باعث می‌شوند که حضیض

1. sidereal month  
3. line of nodes  
5. anomalistic.

2. synodic month.  
4. draconic month  
6. libration

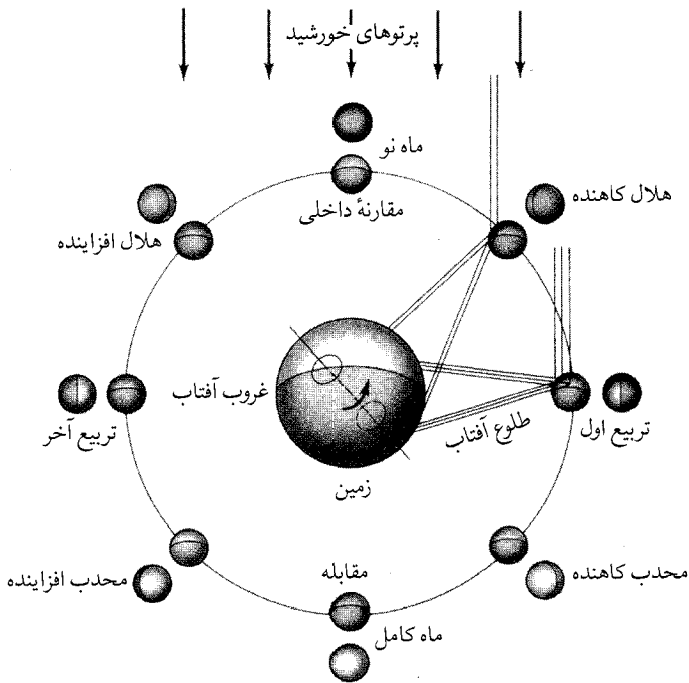


شکل ۴-۴. رخگردهای قمری. (الف) رخگردی در طول جغرافیایی به عنوان نتیجه‌ای از چرخش ثابت ماه در جایی که تندی مداری در یک مدار بیضی شکل تغییر می‌کند، رخ می‌دهد. (ب) رخگرد در عرض جغرافیایی، حاصل ترکیب میل مدار ماه با دایرة البروج و میل استوایی آن با صفحه مدارش می‌باشد.

مدار ماه به سمت شرق (مستقیم) با دوره تناوب  $8/85$  سال حرکت تقدیمی انجام دهد و (۳) گشتاوری را روی مدار متمایل شده تولید می‌کنند که باعث می‌شود خط گرہها (تقاطع صفحه مدار ماه و صفحه دایرة البروج) دائماً به طرف غرب دایرة البروج با دوره تناوبی برابر  $18/6$  سال برگردد. به خاطر خروج از مرکز آن ( $e = 0/055$ ) فاصله مداری ماه از  $363263 \text{ km}$  در حضيض به  $405547 \text{ km}$  در اوج تغییر می‌یابد. قطر زاویه‌ای ماه از  $32/9$  تا  $29/5$  متغیر است.

#### (ب) اهله‌ها

خورشید همیشه یک نیم کره ماه را روشن می‌کند، اما از زمین، کسرهای مختلفی از نیم کره روشن را می‌بینیم که به زاویه کشیدگی<sup>۱</sup> ماه بستگی دارد. چرخه اهله‌های زمین



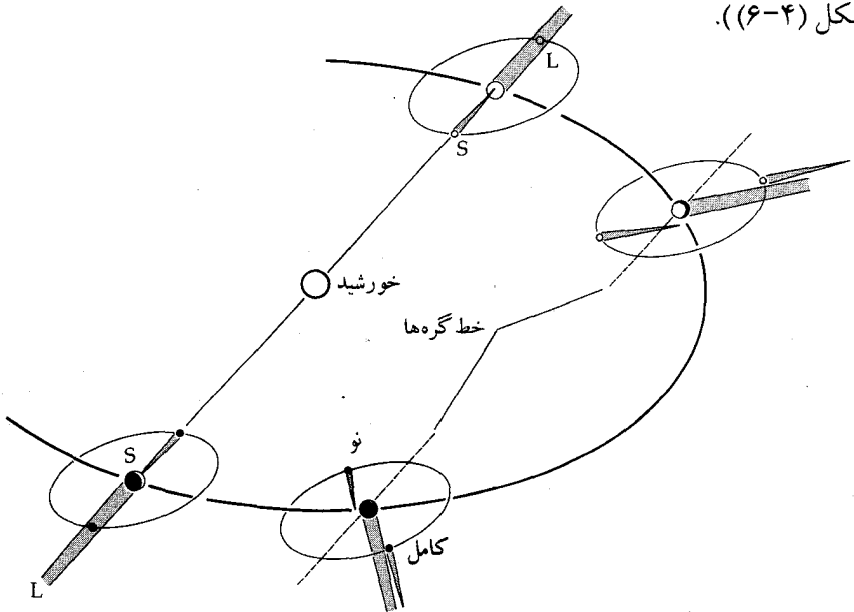
شکل ۴-۵. اهله‌های قمری. ماه در اینجا در هشت موضع برای چرخه اهله هلالی‌اش همانطور که زمین را دور می‌زند، نشان داده شده است. قسمت سایه‌دار، نیمه تاریک غیر تابان ماه است.

مرکزی ماه، یک ماه هلالی طول می‌کشد (شکل ۴-۵). این اهله‌ها به ترتیب زیر اتفاق می‌افتند: ماه نو (مقارنه داخلی)، هلال افزایشنده، ربع اول (تربیع)، محدب افزایشنده، ماه کامل (مقابله)، محدب کاهنده، ربع سوم (تربیع)، هلال کاهنده، و برگشت به ماه نو. موقعیت ماه در آسمان به اهله‌اش مربوط شده است. تربیع اول ماه در شرق و در ظهر نمودار می‌شود، در غروب آفتاب از مدار نصف النهار محل عبور کرده و در نیمه شب در غرب غروب می‌کند. همان طور که از ماه دیده می‌شود، زمین به صورت اهله‌های مشابه‌ای در یک چرخه معکوس جلوه می‌کند (ماه نو در زمان زمین کامل اتفاق می‌افتد)، و نسبت به افق ماه، زمین تقریباً در همان مکان در آسمان باقی می‌ماند.



## (ج) گرفتگی‌ها

به طور کلی گرفتگی وقتی رخ می‌دهد که سایه یک جسم آسمانی روی جسم دیگر می‌افتد؛ در فصل ششم گرفتگی‌های اقمار مشتری توسط سیاره مادر ذکر شده است. گرفتگی‌ها در سیستم زمین - ماه به تغییر جهت خط‌گره‌های مدار مایل ماه بستگی دارد، زیرا ماه باید نزدیک سطح دایرة البروج باشد تا مستقیماً بین خورشید و زمین در یک حادثه خورشید گرفتگی قرار گیرد و از میان سایه زمین در یک ماه گرفتگی عبور کند (شکل (۴-۶)).



شکل ۴-۶. گرہ‌ها و گرفتگیهای قمری. امتدادهای خورشید، زمین و ماه برای مدت یکسال نشان داده شده‌اند. سایه‌های ایجاد شده توسط زمین و ماه نواحی هاشور خورده هستند. خط‌گره‌ها (خط بریده) بایستی برای این که هر گرفتگی رخ دهد به طرف خورشید قرار گیرد. گرفتگیهای قمری (L) و خورشیدی (S) مشخص شده‌اند.

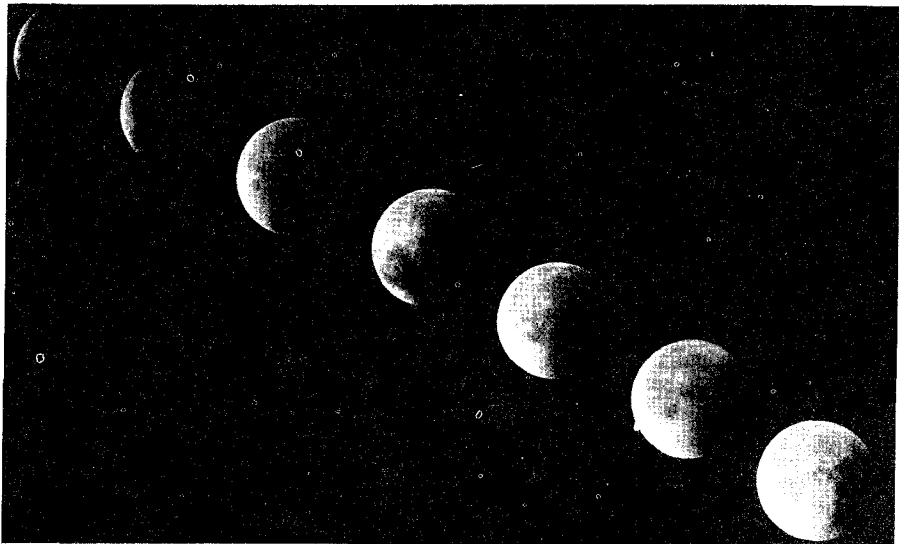
## خورشید گرفتگی‌ها

قطر زاویه‌ای خورشید تقریباً مساوی زاویه دیده ماه یعنی  $32'$  می‌باشد! خط‌گره‌های مدار ماه دو بار در هر سال به سمت خورشید متوجه می‌شود، بنابراین ماه نو می‌تواند حالتی باشد که به اندازه کافی به دایرة البروج نزدیک بوده و خورشید را بپوشاند - یک

خورشید گرفتگی. هنگامی که ماه از یک طرف مرکز خورشید عبور می‌کند، ما یک خورشید گرفتگی جزئی را می‌بینیم. اگر ماه در مدارش نزدیک حوضیض نباشد، اندازه زاویه‌ای آن کمی کوچکتر از خورشید است و یک خورشید گرفتگی حلقوی با حلقه‌ای از قرص قابل رؤیت خورشید می‌تواند جایگزین شود. در نزدیکی حوضیض هنگامی که مرکز ماه از مرکز خورشید عبور می‌کند یک خورشید گرفتگی کامل جالب صورت می‌گیرد.

### ماه گرفتگی

در مدار ماه عرض سایه زمین (جائی که خورشید تماماً پنهان شده است)  $9212\text{km}$  است که وقتی از ماه نگاه شود، معادل قطر زاویه‌ای  $22/4'$  و  $1^\circ$  می‌باشد. وقتی خط گره‌ها پائین این سایه قرار می‌گیرد یک ماه گرفتگی می‌تواند در ماه کامل واقع شود (شکل ۴-۷). هم ماه گرفتگی کامل و هم ماه گرفتگی جزئی ممکن است اتفاق بیافتد



شکل ۴-۷. یک رشته زمانی از صحنه‌های یک گرفتگی کامل قمری در ژوئیه ۱۹۸۲ میلادی. از چپ به راست، رشته‌های زمانی عکسبرداری بر روی فیلم منفی یکسان، بیرون آمدن ماه را از سایه زمین نشان می‌دهند. (بی. والسکی<sup>۱</sup>).

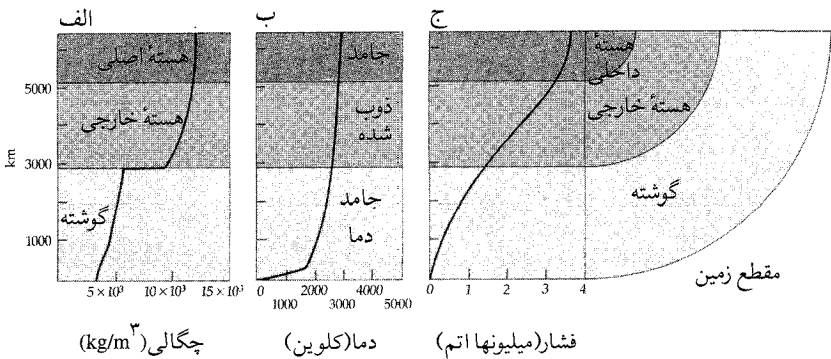
و ماه در یک ماه گرفتگی کامل مرکزی تا  $40^m 1^h$  تاریک باقی می ماند.

مِتن<sup>۱</sup> منجم یونانی (۴۰۰ قبل از میلاد) متوجه شد که ماه اهل‌های یکسانی را در همان روز ماه (مانند ماه کامل در ۱۳ آوریل در سال ۱۹۸۷ میلادی) در فواصل زمانی ۱۸/۶ سال ارائه می دهد - این به عنوان چرخه متونیک<sup>۲</sup> شناخته شده است. همچنین یک پدیده کاملاً مشابه برای برگشت‌گره‌های مدار ماه، چرخه ساروس<sup>۳</sup> است. خورشید گرفتگی‌ها و ماه گرفتگی‌های مشابه در فواصل زمانی ۲۲۳ ماه هلالی تکرار می شوند (۱۸ سال و ۱۰ روز) و چون مدت ساروس ۶۵۸۵/۳۲ روز است باید انتظار داشته باشیم که در سه چرخه ساروس یک گرفتگی تکراری را در یک مکان روی زمین مشاهده کنیم. چرخه ساروس تقریباً مساوی ۲۲۳ ماه هلالی، ۲۴۳ ماه گره‌ای و ۲۳۹ ماه آنومالی است.

## ۴-۳ درونها

(الف) زمین

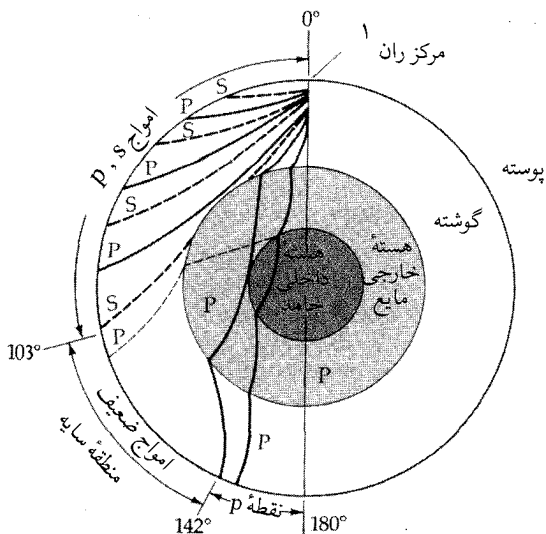
چگالی متوسط زمین برابر است با  $\bar{\rho} = \frac{3M_{\oplus}}{4\pi R_{\oplus}^3} = 5520 \text{ kg/m}^3$  (چگالی آب خالص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است). چون چگال صخره‌ای سطح زمین در حدود  $3000 \text{ kg/m}^3$  است، درون زمین باید خیلی چگالی باشد. درون زمین چنین طبقه‌بندی شده است: یک لایه سطحی ضخیم ۳۵ کیلومتری به نام پوسته با چگالی  $3300 \text{ kg/m}^3$ ، سپس گوشته (غشاء) جامد از سیلیکات‌هایی مانند اولیوین<sup>۴</sup> با چگالی ای تقریباً از ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تا عمق ۲۹۰۰ کیلومتری، و هسته خارجی مایع با ضخامت ۲۲۰۰ کیلومتر با چگالی حدود ۹۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرانجام هسته داخلی جامد با چگالی حدود ۱۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در شعاع  $1300 \text{ km}$ .



شکل ۴-۸. درون زمین. این الگو از مشاهدات موج زمین لرزه استخراج شده است. (الف) تغییر چگالی از سطح به مرکز. (ب) تغییر دما که به سرعت بالا می‌رود و سپس لایه به لایه کاهش می‌یابد. (ج) تغییرات فشار.

این تصویر درونی زمین از مطالعه گسیل امواج زمین لرزه استنباط شده است (زلزله شناسی). زمین لرزه‌ها هم امواج تراکمی طولی (P) و هم امواج اغتشاشی عرضی (S) را تولید می‌کنند که بر روی مسیرهایی که توسط چگالی و ترکیب مواد داخلی تعیین شده‌اند، حرکت می‌کنند (شکل ۴-۹). این دو موج توسط تغییرات در چگالی محیطی که در میان آن حرکت می‌کنند، شکسته شده و توسط چگالی انفصال منعکس می‌شوند، لذا تنها امواج P می‌توانند در ناحیه مایع انتشار یابند. با اندازه‌گیری موج دارای مشخصات حالت تراکمی (P) یا بالا-پائین (S) و زمان سیر از مرکز یک زمین لرزه است، مسیر عبور موج در درون زمین را تعیین می‌کنیم. هیچکدام از امواج S در میان هسته دیده نمی‌شوند (این امواج توسط هسته خارجی مایع جذب می‌شوند)؛ امواج P در فصل مشترک هسته - گوشته منعکس می‌شوند، و امواج ضعیف P منعکس شده توسط هسته جامد، مشاهده شده‌اند.

می‌دانیم که قسمتی از هسته زمین مایع می‌باشد، اما ترکیب دقیق آن واقعاً ناشناخته است. اغلب ژئوفیزیک دانان جهش چگالی را به تغییر سیلیکاتها در گوشته به آهن - نیکل یا بعضی آلیاژ آهن در هسته نسبت می‌دهند، به هر حال ترکیب دقیق آن در مقایسه با گوشته صخره‌ای، هسته فلزی است.

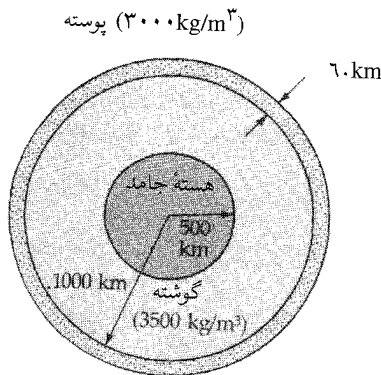


شکل ۴-۹. امواج زمین لرزه. امواج S (خط بریده) و هم P (خط پر) نشان داده شده‌اند. امواج S توسط هسته مایع خارجی جذب شده، و امواج P توسط هسته داخلی منعکس می‌شوند. (خط بریده روشن).

### (ب) ماه

از جرم و شعاع ماه متوجه می‌شویم که چگالی متوسط آن ۳۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که شبیه به چگالی پوسته زمین می‌باشد. آپولوها نمونه‌هایی از سطح ماه را با چگالی‌های نزدیک به ۳۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش داده‌اند. ترکیب این نمونه‌ها شبیه سیلیکاتهای بازالت است و بنابراین، در جهت مرکز ماه چگالی نمی‌تواند افزایش یابد. ایستگاه‌های زلزله‌شناسی که توسط فضانوردهای آپولو نصب شده‌اند، آشکار کرده‌اند که ماه از نظر زلزله‌شناسی آرام است و ماه لرزه‌هایی کمتر از مقیاس ۲ ریشتر، در مقایسه با زمین لرزه‌های عمده ۷ یا ۸ ریشتر اندازه‌گیری شده است. بعضی لرزه‌های قمری به برخوردهای سنگ‌های آسمانی نسبت داده می‌شوند. تعدادی نوسانات ضعیف که از حوض ماه سرچشمه می‌گیرند، و وقوع گروه‌های ماه لرزه‌ها،

مرکب از یک رشته لرزه‌هائی که چندین روز طول می‌کشند، دیده شده‌اند. به هر حال منشاء این گروه‌های لرزه ناشناخته است و ظاهراً به اثرهای جزر و مدی مربوط نمی‌باشند. ارتعاشات ایجاد شده بوسیله برخورد های اجزاء آپولو روی سطح قمری خیلی آهسته میرا می‌شوند (تقریباً ماه به مدت یک ساعت طنین می‌اندازد). یک الگوی رایج از داخل ماه بر اساس این زلزله شناسی قمری شامل یک هسته غیر فعال جامد، بنانهاده شده است؛ یک گوشته با قسمت جزئی مذاب؛ و پوسته‌ای با عمق حداقل ۶۰ تا ۷۰ کیلومتر در بعضی جاها رخ داده است (شکل ۴-۱۰)). بنابراین، نواحی خارجی داخل ماه به نظر می‌آید که طبقه طبقه و مختلف باشند. همان طور که از چگالی حجمی کم انتظار می‌رود، هسته فلزی نیست.



شکل ۴-۱۰. درون ماه. این الگو بر مبنای نتایج فرود آپولو پایه گذاری شده است؛ و مقادیر نمونه‌ای را برای اندازه‌ها و چگالیها نشان می‌دهد.

#### ۴-۴ اشکال سطحی

اساساً سطوح ماه و زمین با هم متفاوت هستند. سطح زمین سیر تکاملی جامع و سریعی را به عنوان نتیجه‌ای از داخل گرم و جو فرسایشی ضخیم، طی می‌کند. چون داخل ماه سرد است و ماه هیچ جو ندارد، سطح آن توسعه ابتدائی خودش را حفظ کرده

است. اجازه دهید به طور خلاصه مشخصات سطح زمین را مطرح کنیم و سپس سطح ماه را در مقایسه با آن مورد بررسی قرار دهیم.

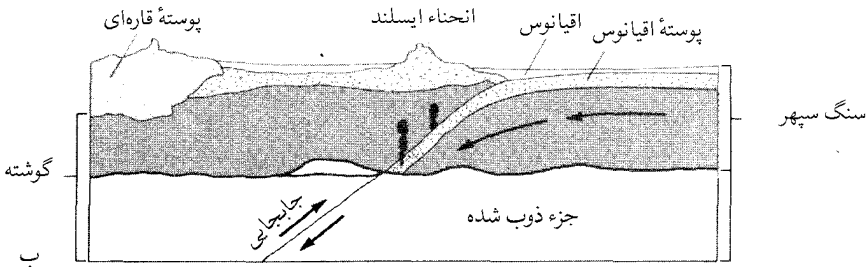
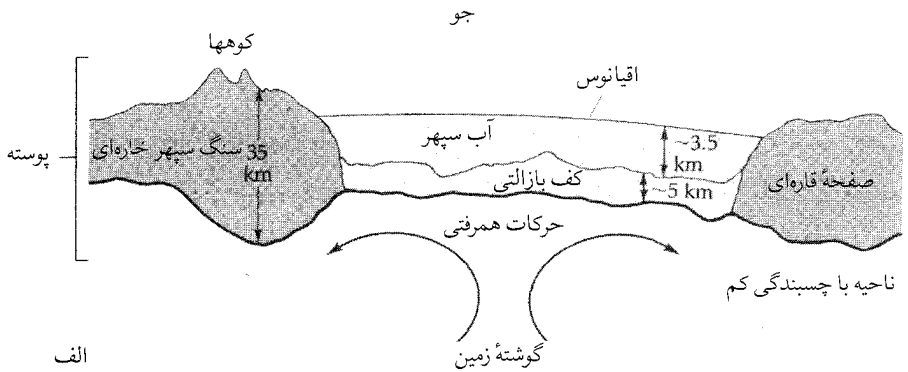
### (الف) سطح و عمر زمین

سطح زمین حد فاصل بین پوسته کم چگالی و جو است. پوسته ترکیب شده است از: (۱) سنگ سپهر<sup>۱</sup> جامد با چگالی متوسط  $3300 \text{ kg/m}^3$ ، با تکه‌های قاره‌ای خارهای<sup>۲</sup> سبک که به عمق ۳۵ کیلومتر می‌رسند و کف‌های اقیانوس بازالیت با چگالی بیشتر که فقط تا عمق ۵ کیلومتر ادامه می‌یابند و (۲) آب سپهر<sup>۳</sup> آب - مایع که تقریباً ۷۰ درصد مساحت سطح زمین را تا عمق متوسط  $3/5$  کیلومتری می‌پوشاند (شکل (۴-۱۱ الف)). پوسته روی گاشته در تعادل شناوری است. حرکات آهسته گاشته بالاتر، انتقال قاره‌ای، ساختمان کوه و زمین لرزه‌ها را می‌راند. سطح زمین شامل تعدادی قاره جدا و صفحات اقیانوسی است. در طول مرزها در صفحات اقیانوسی گدازه‌های پوسته پائین‌تر به صفحات کناری فشار می‌آورند و قاره‌ها را به طرف سطح حرکت می‌دهند (شکل (۴-۱۱ ب))؛ این فرایند تحولی برای پوسته، صفحه زمین ساختی نامیده می‌شود.

ساختمان صفحه‌ای به طور نسبتاً زیادی سطح زمین را بیشتر اوقات در مقیاس زمانی، طوری تغییر می‌دهد که از نظر ستاره‌شناسی کوتاه است. برای مثال، قاره‌های کنونی به طور قابل ملاحظه‌ای از زمان خورد شدن از یک جرم زمینی منفرد در ۲۰۰ میلیون سال پیش حرکت کرده‌اند. مدارک زمین شناسی نشان می‌دهند که آهنگ شناوری قاره‌ای، اکنون فقط به اندازه چندین سانتی متر در سال است، که این تخمین توسط خط پایه طویل تداخل سنجی (فصل ۹) تأیید شده، و انتقال یک جسم را از ۱ تا ۲ سانتی متر در سال در زمان واقعی آشکار کرده است. صفحه زمین ساختی مطمئن می‌سازد که حوزه‌های رودخانه‌ای اقیانوس، جوان‌ترین قسمت پوسته زمین هستند، زیرا آن جایی است که گدازه جدید از گاشته جاری می‌شود.

سطح سنگ سپهر با گستره‌ای در دمای مشاهده شده از ۲۰۰ تا ۳۴۰ درجه کلوین محل زندگی ابناء بشر است. پوشش ابر زمین از فضا دیده شده و قطب‌های یخی

درخشانی به نظر می آیند (با آلبدو زیاد) و قاره‌ها سبز روشن و خرمائی دیده می شوند. اقیانوسها آبی خیلی تیره هستند. خانه ما زیبا، اما به صورت یک کشتی پیچیده در فضا است.



شکل ۴-۱۱. پوسته زمین. (الف) گوشته بالایی، پوسته (سنگ سپهر و آب سپهر)، و صفحات، با حرکات همرفت در گوشته، صفحات را به حرکت وامی دارند. (ب) برخوردی بین پوسته‌ای و صفحات اقیانوسی سبب تحول ساختار سطح می شوند.

عمر زمین چقدر است؟ حوزه‌های اقیانوس جوانترین قسمت پوسته را می سازند، قسمت‌هایی از توده‌های قاره‌ای مسن‌ترین هستند. ما می توانیم عمر این صخره‌ها را از روی واپاشی رادیواکتیو حدس بزنیم و از آن، به عمر زمین پی ببریم. به خاطر ناپایداری طبیعی هسته‌های عناصر رادیواکتیو، فن تاریخ‌گذاردن رادیواکتیو مؤثر واقع می شود. وقتی این هسته‌ها واپاشی می کنند، به هسته‌های ساده‌تر تجزیه می شوند.



ایزوتوپهای اولیه مادر نامیده می‌شوند و فراورده‌های حاصل اتم‌های دختر هستند. توسط گروه بزرگی از اتم‌های رادیواکتیو می‌توانید آهنگ عمده‌ای از تجزیه را تعیین کنید. نصف یک قطعه اورانیم ۲۳۸ (U) در مدت ۴/۵ بیلیون سال متلاشی می‌شود، نیمه باقیمانده نیز در ۴/۵ بیلیون سال بعد و غیره (شکل (۴-۱۲)). شما در هر زمانی می‌توانید مقدار اورانیم باقیمانده را محاسبه کنید، گرچه زمان واپاشی برای هر اتم اورانیم نمی‌تواند تعیین شده باشد، بر عکس با دادن یک نمونه سنگ شامل  $^{238}\text{U}$  و داشتن نیمه عمر اورانیم می‌توانید عمر نمونه را بدست آورید. علاوه بر اورانیم عناصری که می‌توانند به عنوان سنگ‌های رادیواکتیو عمل کنند عبارتند از: ریدیم ( $^{87}\text{Rb}$ ) که به استرنسیم ( $^{87}\text{Sr}$ ) با یک نیمه عمر ۴۷ بیلیون سال واپاشی می‌شود، و پتاسیم ( $^{40}\text{K}$ ) که به گاز بی اثر آرگون ( $^{40}\text{Ar}$ ) با یک نیمه عمر ۱/۳ بیلیون سال تبدیل می‌گردد. تاریخ حاصله عبارت است از زمان سپری شده از موقعی که سنگها جامد گردیده و اتم‌های مادر و اتم‌های دختر محبوس بوده‌اند. آهنگ نرمی و سختی صخره‌ها بعد از منشأ آنها می‌توانند به ساعت‌های تاریخ‌گذاریشان برگردد.

اجازه دهید شکل تابعی واپاشی رادیواکتیو را بررسی کنیم. فرض کنید  $n$  که عدد بزرگی است معرف تعداد اتم‌های رادیواکتیو می‌باشد، تعداد متوسط واپاشی‌ها در فاصله زمانی  $dt$  برابر  $dn$  خواهد بود که این با شماره باقیمانده در زمان  $t$  متناسب است، بنابراین

$$-dn = \lambda n dt$$

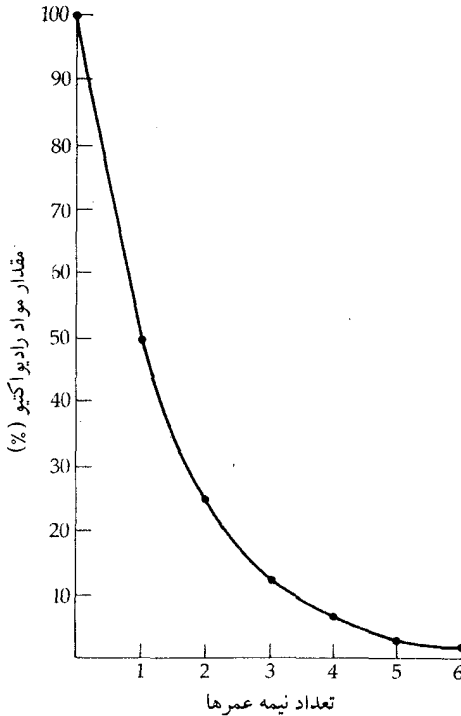
$$\frac{dn}{n} = -\lambda dt$$

که  $\lambda$  ثابت واپاشی است. از این معادله انتگرال می‌گیریم ثابت  $-\lambda t + I_n(n)$  در  $t=0$ ، لذا  $n = n_0$ .

$$I_n(n) = -\lambda t + I_n(n_0)$$

$$I_n(n) - I_n(n_0) = -\lambda t$$

$$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -\lambda t$$



شکل ۴-۱۲. واپاشی رادیواکتیو. در خلال هر نیمه عمر، نصف ایزوتوپ مادر واپاشی می‌شود. شکل این منحنی به صورت کاهش نمائی است.

و سرانجام

$$\frac{n}{n_0} = \exp(-\lambda t) \quad (1-4)$$

نیمه عمر ( $\tau$ ) هنگامی رخ می‌دهد که  $n = \frac{n_0}{2}$  باشد، بنابراین

$$\tau = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

سپس

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{0.693t}{\tau}\right) \quad (2-4)$$

برای مثال، در نظر بگیرید که یک سنگ دارای  ${}^4\text{Ar}$  با  ${}^4\text{K}$  به نسبت  $\frac{1}{4}$  است. عمر این سنگ چقدر است (فرض کنید که کسر اولیه  ${}^4\text{Ar}$  ناچیز بوده و هیچ آرگونی فرار نکرده

$$\frac{1}{4} = \exp\left(-\frac{0.693t}{\tau}\right)$$

$$\ln(0.25) = -\frac{0.693t}{\tau}$$

$$-1/39 = -\frac{0.693t}{\tau}$$

$$\tau = \frac{t}{39} \Rightarrow t = 39\tau$$

$$t = 2 \times 1/3 \times 10^9 \text{ سال}$$

$$t = 2/6 \times 10^9 \text{ سال}$$

## (ب) سطح ماه

با استفاده از بررسی از راه دور و فرودها بر روی ماه، سطح مرئی و چند متر اولیه از عمق خاک ماه به دقت مطالعه شده است. سطح از مواد خرمائی - خاکستری بازالتیک با آلبدو متوسطه بسیار کم (۰/۰۷) ساخته شده است. چون پایانه<sup>۱</sup> ماه (خط جدا کننده تاریکی و روشنائی نیم کره ها) در طول استوای قمری با ۱۵/۴ کیلومتر بر ساعت حرکت می کند، دمای سطح به سرعت از یک بیشینه  $390^\circ\text{K}$  به کمینه  $110^\circ\text{K}$  کاهش پیدا می کند. دمای تحت خورشیدی را می توان به صورت زیر حساب کرد (بخش (۲-۱۱ الف))

$$T = 394 \left[ (1 - A) / D^2 \right]^{1/4}$$

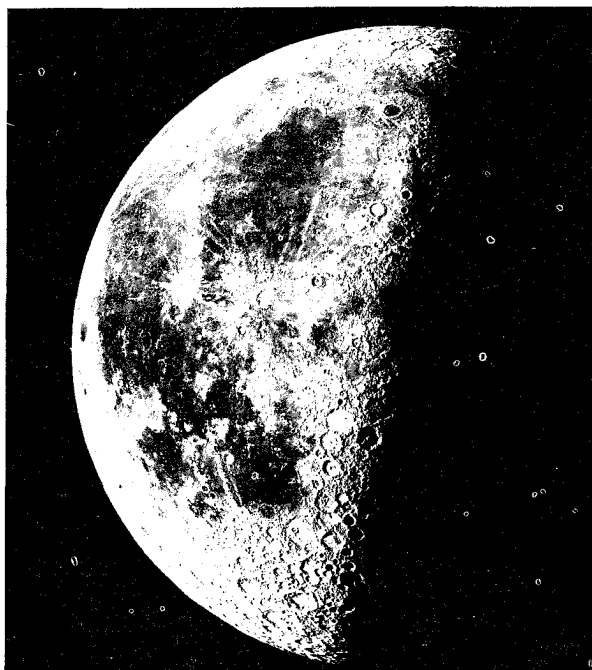
که A آلبدو ماه و D فاصله اش از خورشید (بر حسب AU) است. بنابراین

$$T = 394 \left[ (1 - 0.07) / (0.1)^2 \right]^{1/4} = 384^\circ\text{K}$$

که تقریباً مطابق آنچه مشاهده شده است، می باشد. (توجه کنید که برای این محاسبه یک وضعیت تعادلی برای جسم سیاه در نظر گرفته شده است.)

## ساختار مرئی

گاليله در سال ۱۶۰۹ میلادی برای اولین بار (شکل (۴-۱۳)) ماریای<sup>۱</sup> قمری تاریک یا «دریاها» (اسامی لاتین در سال ۱۶۵۱ میلادی توسط ریچولی<sup>۲</sup> داده شد)، زمین های مرتفع قمری نورانی با دهانه های آتش فشان فراوانشان و کوهستانهای قمری را با تلسکوپ ناقص اش مشاهده کرد. سفینه های فضائی با سرنشین و بدون سرنشین، اطلاعات زیادی درباره سطح ماه بدست آورده اند.



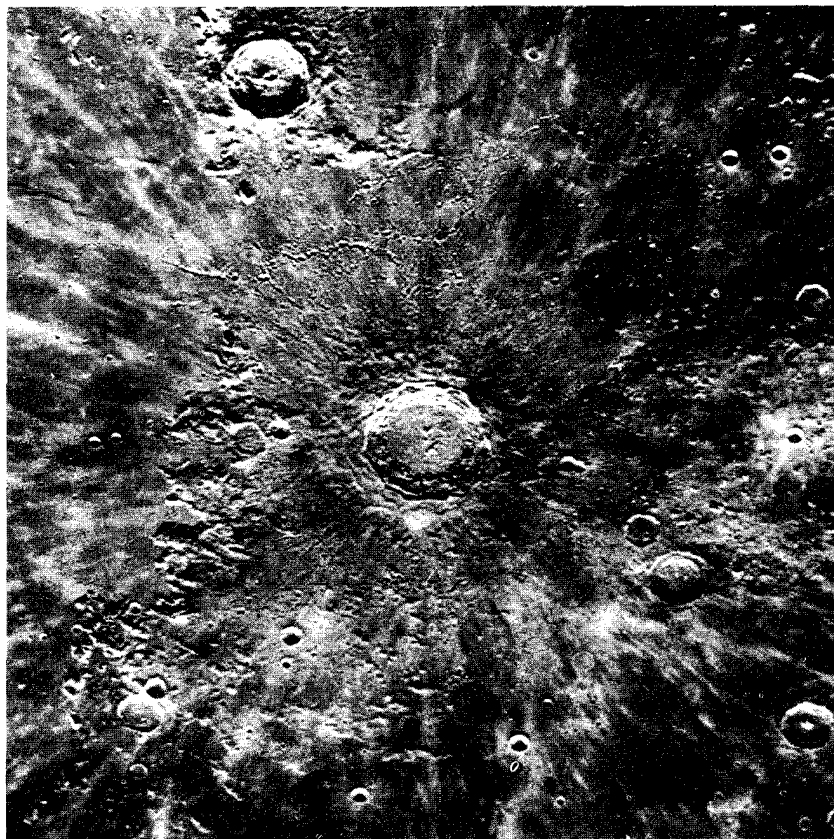
شکل ۴-۱۳. ماه در آخرین ربع. خط پایانه، نواحی روشن و تاریک را در طرفهای غربی (روز) و شرقی (شب) ماه را جدا می کند (در رصدخانه لیک<sup>۳</sup>).

دهانه های آتش فشان. تمام سطح ماه بر اثر دهانه های آتش فشان آبله مانند شده است: گودیهای مقعر با حاشیه های مرتفع بلند یکنواخت خارجی، بعضی وقتها با یک

1. Maria  
3. Lick

2. Riccioli

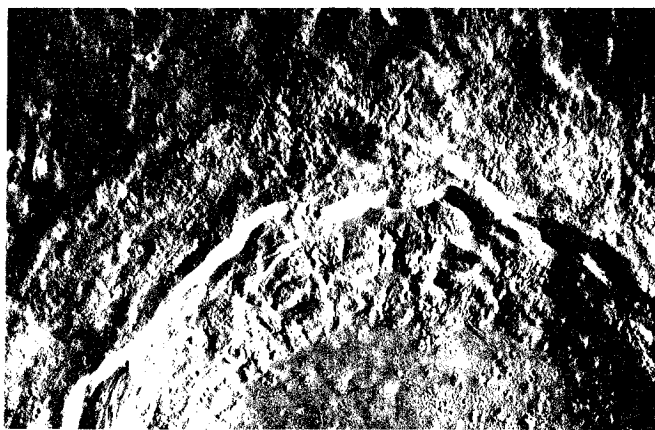
قله در مرکز سطح. دهانه‌های آتش‌فشان در اندازه‌هایی از گودالهای میکروسکوپی تا بزرگترین آنها (بایلی<sup>۱</sup>) با قطر ۲۹۵ کیلومتر، تغییر می‌کنند. دهانه آتش‌فشان بزرگ کپرنیک (شکل (۴-۱۴)) در اقیانوسی از طوفانها محاط شده است. نزدیک سازی خواص مختلف به ما اجازه می‌دهد که سن نسبی را از موقعی که دهانه‌های آتش‌فشان جوان به طور آشکار از دهانه‌های آتش‌فشان پیرتر فزونی می‌گیرند، تعیین کنیم. ماریای قمری دارای تعداد کمی دهانه آتش‌فشان دورتر نسبت به زمینهای مرتفع قمری



شکل ۴-۱۴. دهانه آتش‌فشان کپرنیک. به سیستم پرتو خارج شونده از دهانه آتش‌فشان و زمین ناهموار در خارج لبه توجه کنید. (رصدخانه لیک)

می‌باشد و بنابراین ماریا باید جوانتر از ارتفاعات باشد. خیلی از دهانه‌های آتش‌فشانه‌ها مخصوصاً تیکو و کپرنیک (شکل (۴-۱۴)) الگوهائی از پرتوها را ارائه می‌دهند که در برگیرنده دهانه‌های آتش‌فشانه‌های ثانوی از آوار خاموش شده، هستند.

دهانه‌های آتش‌فشان تحول می‌یابند و هنگامی که مواد دیواره‌های آنها فرو ریخته و آهسته ناپدید شوند و همان‌طور که دیواره‌ها خود به خود افت پیدا کنند (شکل (۴-۱۵))؛ سنگ‌های آسمانی با بمباردمان، حفره‌های جدیدی را تولید کرده و دهانه‌های آتش‌فشان‌های قدیمی‌تر را پر می‌کنند. در مقابل چنین فرسایشی برای دهانه‌های آتش‌فشان با قطر یک سانی متر عمری معادل چندین میلیون سال تخمین زده شده است که این زمان برای دهانه‌های آتش‌فشان بزرگ‌تر طولانی‌تر است (به قطر دهها کیلومتر). اگر چه دهانه‌های آتش‌فشان بزرگ ناپدید نمی‌شوند، ولی دیواره‌های آنها در اثر برخورد سنگ‌های آسمانی و تغییرات دما و ماه لرزه‌ها فرسوده می‌شوند.



شکل ۴-۱۵. ریزش و پوشش پرتابه. این منظره از دیواره شمالی کپرنیک، چند برآمدگی شکل گرفته از ریزش و حرکت به سمت پائین مواد لبه‌ای را نشان می‌دهد. به پرتابه در خارج از لبه توجه شود. (ناسا)<sup>۱</sup>

الگوی پذیرفته شده برای منشاء دهانه آتش‌فشان، برخورد سنگ آسمانی است. بزرگترین دهانه‌های آتش‌فشان ناشی از برخورد سیارک‌های کوچک به ماه می‌باشند.

بعضی از صورتهای قمری شامل تعدادی از دهانه‌های آتش‌فشان مانند آلفونسوس<sup>۱</sup>، دلیلی بر جریان‌های گدازه یا منشاء آتش‌فشانی می‌باشند، اما تعداد کمی از دهانه‌های آتش‌فشان در اثر برخورد به وجود نیامده‌اند.

هنگامی یک دهانه آتش‌فشان برخوردی تولید می‌شود که یک سنگ آسمانی در حال سقوط به سطح برخورد کند و بیشتر انرژی جنبشی‌اش را به انرژی حرارتی انفجاری تبدیل نماید؛ باقیمانده انرژی جنبشی برای شکستن مواد سطحی و خلق امواج زلزله‌ای مصرف می‌شود. مواد قمری مشابه با انفجارهای شیمیایی (TNT) یا هسته‌ای به اطراف پراکنده می‌شوند. همان‌طور که سنگ آسمانی به سطح برخورد می‌کند یک موج ضربه‌ای شکل می‌گیرد، سنگها را آنقدر متراکم می‌کند که بعضی نرم شده و به صورت سیال در می‌آیند. این مواد سنگی به طور انفجاری پراکنده می‌شوند و حفره‌ای را برای تشکیل یک دهانه آتش‌فشان ایجاد کرده و برای به وجود آوردن یک لبه بلند روی هم قرار می‌گیرند. بعضی‌ها به عنوان یک پوشش پرتابه<sup>۲</sup> از قطعات و رای لبه پرت می‌شوند (شکل (۴-۱۵)). پراکندگی‌های ذرات با سرعت زیاد دورتر فرود می‌آیند تا پرتوهای دهانه‌های آتش‌فشان ثانویه را ایجاد کنند و از جهش ضربه اولیه یک قله مرکزی فراهم می‌سازد (مانند جهش به هنگامی که شیئی به داخل مایع می‌افتد). سنگ‌های آسمانی در این فرآیند نابود می‌شوند. یک سیارک با شعاعی حدود ۱ km در حدود  $2 \times 10^{13}$  kg سنگ را شامل می‌شود و هنگامی که با سرعت ۴۵ km/sec به ماه برخورد می‌کند، انرژی جنبشی  $10^{22} \approx \frac{mv^2}{2}$ ، سنگ را تبخیر کرده و یک دهانه آتش‌فشان به اندازه دهانه کپرنیک ایجاد می‌کند. (توجه کنید که ۴۵ km/sec سرعت فرار از ماه است که از خورشید ۱ AU فاصله دارد. این مجموع حداقل تندی‌ای است که یک شیء می‌تواند از بی‌نهایت به سطح ماه برخورد کند.) برای حفاری گودال دهانه‌های آتش‌فشان بزرگ مانند تیکو<sup>۳</sup>، کلاویوس<sup>۴</sup>، دریای اورین تیل<sup>۵</sup> به انرژی‌ای در گستره  $10^{21}$  تا  $10^{26}$  ژول نیاز است

ارتفاعات. اکثر سطح ماه در برگیرنده نور رنگی، ارتفاعات قمری حفره‌ای سنگین،

1. Alphonsus.

3. Tycho

5. Mare Orientale

2. ejecta blanket.

4. Clavius

مخصوصاً اطراف ماه (شکل (۴-۱۱ الف)) می باشد. عمر ارتفاعات تا  $4 \times 10^9$  سال تخمین زده شده اند. این قدیمی ترین بخش سطح قمری را نشان می دهد. به طور کلی، ارتفاعات با یک اختلاف متوسط ۳ کیلومتر بلندتر از ماریا هستند.

سرزمین های پست (ماریا<sup>۱</sup>). سطوح تاریک بزرگی از سطح ماه ماریا یا «دریاها» نامیده می شوند (مفرد میر<sup>۲</sup> است)، هر چند واقعاً دشت های مسطحی از گدازه بازالتیک تیره هستند. از ۳۰ ماریای شناخته شده فقط ۴ تا در طرف دور ماه پیدا شده اند. تعدادی از آنها تقریباً مدور هستند و قطر آنها از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر متغیر است. عقیده بر این است که این حوزه های میر دایره ای طرح های برخوردی باشند که بعداً با گدازه مذاب پر شده اند (شکل (۴-۱۶ ب)). وجود دهانه های آتش فشانی طغیان کرده و پیر دلالت بر آن دارند که بعضی از آتش فشانیها بین زمان تشکیل حوزه میر و خروج گدازه صورت گرفته اند. الگوی برخوردی حوزه های میر توسط شکل منحنی بعضی از رشته کوهها (مانند آپنیز<sup>۳</sup>) که در مرز ماریا و در بالای آن قرار دارند و توسط مشاهده پرتاب مواد از نزدیک ارتفاعات، تأیید شده است. کوههای آپنین از بالا آمدن پوسته در زمان برخورد که دریای ایمبریوم<sup>۴</sup> ایجاد شده، حاصل گردیده اند.

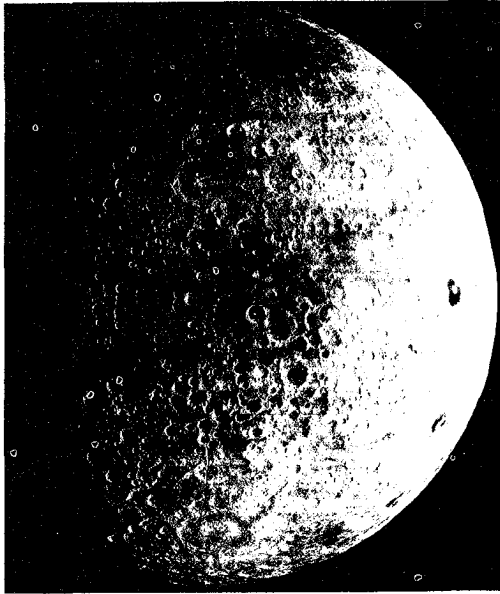
ماریا دهانه های آتش فشانی کمتری نسبت به ارتفاعات قمری دارد (شکل (۴-۱۶ ج))، این چگالی کمتر دهانه آتش فشان اشاره به عمر کم آنها می کند - این ایده از تاریخ گذاردن نمونه های قمری که حدود  $3/2 \times 10^9$  سال عمر دارند، تأیید شده است. دهانه های آتش فشان جوان و تازه مانند کپرنیک (شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴))، بر روی ماریا دیده شده اند. به علاوه، ماریا چین خوردگیهای برافراشته، گنبدها، تپه ها، درّه ها و خیلی از آن چیزهایی که دال بر بعضی از نمونه های فعالیت آتش فشانی است را ارائه می دهد.

اختلالهای گرانشی مداری سفینه های فضائی قمری دلالت بر این دارند که حوزه های رودخانه ای اطراف میر با مواد چگال پر شده اند - این خلاف قاعده های گرانشی، جرم تجمعی (تجمعات جرم)<sup>۵</sup> نامیده می شود. این حوادث به گدازه هایی که حفره ها را

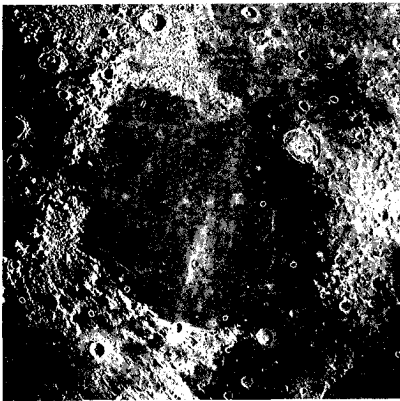
1. Maria  
3. Apennines.  
5. mascons.

2. Mare  
4. Imbrium.

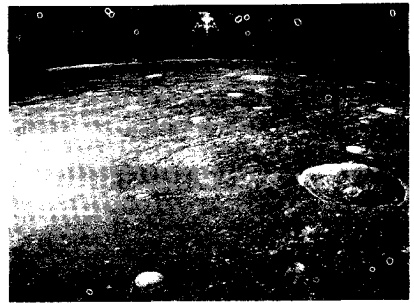




الف



ب



ج

شکل ۴-۱۶. سطح ماه. (الف) این عکس طرف دور نواحی ارتفاعات دهانه‌ای شکل ماه را نشان می‌دهد. دهانه آتشفشانی تاریک مسطح در طرف شرق (راست) تسیولکوسکی<sup>۱</sup> است. (ناسا) (ب) یک حوضچه قمری میر؛ به شکل دایره‌ای آن توجه کنید. (رصدخانه لیک) (ج) منظره نزدیک تری از سطح یک میر همان‌گونه که آپولو قمری بر روی سطح فرود می‌آید.

پر می‌کنند و دارای چگالی زیاد و ترکیبات مختلف نسبت به بقیه سطح قمر هستند، صورت می‌گیرند. وجود اینها دلالت بر این دارد که پوسته ماه آنقدر سخت و عمیق است که اجرام تجمعی نمی‌توانند در آن فرو روند.

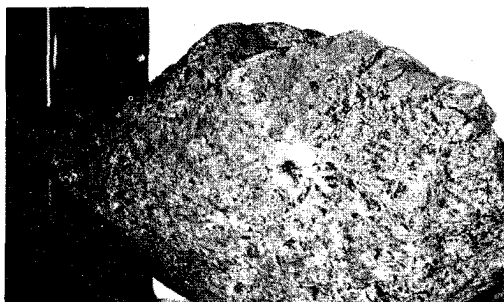
### ترکیب مواد سطحی

زمین‌شناسان روسی و آمریکائی سطح ماه را بخوبی بررسی و تجزیه و تحلیل کرده‌اند و مأمورین آپولوهای بشری، صدها کیلوگرم از خاک و سنگهای آن را آوردند. اساس سطح ماه پوشیده از یک لایه نازک مخلوط شده خوبی از سنگ‌ها و خاک سُست است. خاک سُست در اثر برخورد سنگهای آسمانی که خرد و پخش شده‌اند، تولید می‌شود و خاک را تا ابعاد ذره‌ای خرد می‌کنند. این خاک عمقش از ۲ تا ۱۰ متر در ماریا تغییر می‌کند و تخمین زده می‌شود که عمق آن در ارتفاعات به علت دهانه‌های آتش‌فشان وسیع ۱۰ متر است؛ پاره‌های<sup>۱</sup> بزرگ خارۀ ریز زیادی مانند سنگهای ساییده شده در ته و نزدیک عمق دهانه‌های آتش‌فشان بر خوردی دیده شده‌اند. خاک ماه، ترکیب و قدرت چسبندگی شن و ماسه را دارد و رنگ آن خاکستری تیره با سایه‌ی خرمایی است. بهم زدن حاصل از برخورد سنگ‌های آسمانی، خاک سُست را در طول ۵۰ میلیون سال کاملاً مخلوط می‌کند.

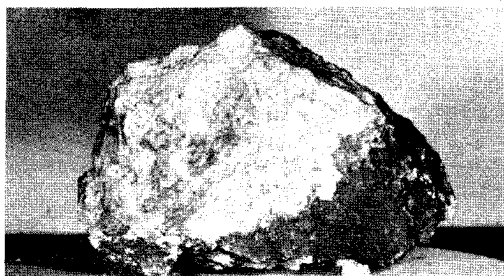
مواد آورده شده از ماه (شکل (۴-۱۷)) عبارتند از: (۱) نمونه‌های چسبنده، خاک دانه‌های ریز شامل ذرات متوسط با اندازه  $10\mu\text{m}$  با ناخالصی کوچک ( $50\mu\text{m}$ ) شیشه یا کره‌های اُبسیدیان<sup>۲</sup>؛ (۲) سنگهای آذرین کوچک از ماریا که گواهی بر گداختگی، بلوری شدن مجدد و شکستگی ضربه‌ای؛ (۳) پاره‌های کوچکی از مرکب خمیره‌ای خشن بریسیاس<sup>۳</sup> که اتصال تراکمی مواد زیادی را نشان می‌دهد؛ و (۴) سنگ‌های آذرین رنگی نورانی از ارتفاعات که آنورتوزاتیز<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. توجه کنید که هم صخره‌های ارتفاعات و هم صخره‌های سرزمینهای پست، آذرین هستند و بنابراین از گدازه‌های جامد تشکیل شده‌اند. مع‌ذالک، به طور قابل ملاحظه‌ای از نظر ترکیب متفاوتند. آنورتوزایت‌ها، آلومی‌نیم و سیلیکاتهای کلسیم با چگالی کم و بازالت‌های میر، سلیکاتهای

1. chunk.  
3. Breccias.

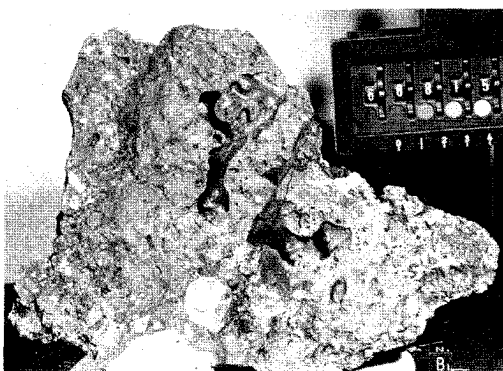
2. Obsidian.  
4. Anorthosits.



الف



ب



ج

شکل ۴-۱۷. نمونه‌های سطح ماه. (الف) یک بازالت میرحفره‌هایی از حباب‌های گاز در گدازه را نشان می‌دهد. سوراخ در مرکز، نتیجه برخورد یک شهابسنگ کوچک است. (ب) یک صخره ارتفاعات شامل آنورتوزایت (سطوح سفید). این نمونه از آپولوی ۱۵ می‌باشد که به عنوان صخره جنسیس<sup>۱</sup> شناخته شده است. (ج) یک بریسیا، به طوری که قطعات بزرگ صخره‌های دیگر در مواد کدرتر که از یک برخورد ذوب شده‌اند، در هم فرو رفته‌اند. (ناسا)

آهن و منیزیم با چگالی زیاد هستند. آنورتوزایت‌ها بلورهای بزرگی را نشان می‌دهند که دلالت بر این دارد که خیلی آهسته‌تر از بازالت‌های میر سرد شده‌اند. سنگهای آذرین، باقیمانده‌هایی از خاره زیرین ماه هستند که به وسیله آتش‌فشان به سطح آورده شده و بریسیاس‌ها وقتی تولید شده‌اند که طبقات رسوبی از برخورد سنگهای آسمانی متراکم، تحت فشار قرار گرفته‌اند. اغلب نمونه‌های آورده شده از ماریا دارای عمری برابر  $3/2$  بیلیون سال می‌باشند و در ضمن بعضی خرده‌ها یا باقیمانده‌ها در ارتفاعات، عمری به بلندی  $4/6$  بیلیون سال دارند. به طور کلی صخره‌های ارتفاعات عمری بین  $3/8$  تا  $4$  بیلیون سال دارا می‌باشند. نتیجه مهمی که از این عمرها گرفته می‌شود، این است که قسمت عمده‌ای از تحول تدریجی سطح ماه باید در طول زمان خیلی کوتاهی در اولین بیلیون سال بعد از منشاء پیدایش خود ماه، اتفاق افتاده باشد. حوضچه‌های میر بعد از ارتفاعات تشکیل شده و بعداً به وسیله گدازه‌ها به صورت سیل جاری شده‌اند. تاریخ مواد ماریا، عمر  $3/2$  بیلیون سال به آن می‌دهد.

ترکیب شیمیایی سطح ماه اساساً بازالت است که با خواص زیر مشخص می‌گردد: (۱) ماریاگدازه‌هایی از ریشه آذرین (مذاب) است؛ (۲) با محتویات آهن آزاد کم، ماریا شامل آهن، کبالت و نیکل بیشتری از ارتفاعات است؛ (۳) اغلب عناصر فرّار دارای فراوانی کم هستند و در بعضی تغییرات شیمیایی ظاهراً جایگزین شده‌اند؛ (۴) گدازه‌های ماه در مواد معدنی محتوی نوار آهن و تیتانیوم بالاتری از بازالت‌های زمینی می‌باشند؛ (۵) مواد ماه بدون آب هستند، یعنی در حضور آب یا بخار آب تشکیل نشده‌اند. نواحی نمونه‌گیری شده دلالت بر این دارند که ماریا به طور شیمیایی همگن است، ولی به علت دارا بودن مقدار نسبتاً کم آلومی‌نیم، با ارتفاعات متفاوت است.

## ۴-۵ جوها

(الف) ماه

تا به حال هیچ‌گونه جوی در ماه تشخیص داده نشده است. در واقع جرم ماه آنقدر کم است که نمی‌تواند حرارت داخلی زیادی را تحمل کند، گرچه نمونه‌های کمیابی از گازهای خروجی (شبیبه بخارات آتش‌فشانی) مشاهده شده‌اند. از گدازه‌هایی که از ماریا

جریان پیدا می‌کنند هیچ جوی تولید نمی‌شود و در طی همین زمان به علت گرانش سطحی کم و دمای سطحی زیاد ماه، فرار می‌کنند. به علاوه، بادهای خورشیدی در جاروب کردن هر ردپائی از گازهاییکه ممکن است از سطح بیرون بیایند، بسیار مؤثر هستند. حتی گازهای حاصل از سوخت پایگاههای آپولو برای مدت زیادی دوام نیاورد. مثال زیر این نکته را نشان می‌دهد. آبی را که توسط فضاورد های آپولو بر روی سطح ماه ریخته شده است را مد نظر قرار دهید. در ظهر قمری ( $T \approx 400\text{K}$ ) ریشه متوسط مربع سرعت مولکولهای آب برابر است با (معادله (۲-۷))

$$v_{\text{rms}} = \left( \frac{3KT}{m} \right)^{\frac{1}{2}} = [3(1/4 \times 10^{-23})(400) / (18)(1/7 \times 10^{-27})]^{-1/2} \approx 740\text{ m/s}$$

بنابراین،  $\frac{v_{\text{esc}}}{v_{\text{rms}}} \approx 3$ . این بدین معنی است که هنگامی که مولکولها با سرعت زیادی فرار می‌کنند و از توزیع سرعت ماکسول نیز پیروی دارند، زمان عمر آنها فقط چند سال است. (یادآوری می‌شود که در فصل ۲ ما از معیاری استفاده کردیم که  $\frac{v_{\text{esc}}}{v_{\text{rms}}} \geq 10$  بود.)

### (ب) زمین

زمین جو اولیه خود را از دست داده است ( $H$ ,  $H_e$  و ترکیبات  $H$ )، اما یک جو ثانوی در نتیجه انفجار و خروج گاز ایجاد شده است. جرم زیاد و گرانش جاذبه‌ای زمین موجب شده است که جو خود را نگه دارد و به صورت جوی که ما امروز تنفس می‌کنیم تغییر کند (جدول (۴-۱)).

### ساختار جوی

جو زمین لایه‌لایه شده است (شکل ۴-۱۸). تروپوسفر<sup>۱</sup> با چگالی زیاد و شکل کاملاً مرکب، جو نزدیک سطح زمین است که بیشترین هوا در آن قرار دارد. همان‌طوری که کوههای بلند با قله برفی نشان می‌دهند، دما به طور یکنواخت با ارتفاع کاهش می‌یابد تا اینکه در ۱۵ کیلومتری به تروپوپاز<sup>۲</sup> می‌رسیم. سپس، دما اندکی در استراتوسفر<sup>۳</sup> رقیق و آرام، زیاد می‌شود که تا لایه ۴۰ کیلومتری در مزوسفر<sup>۴</sup> ادامه دارد. دومین دمای کمینه نزدیک ۹۰ کیلومتری (حدود ۱۹۰k) اتفاق می‌افتد و سپس دما به‌طور یکنواخت از دما

1. Troposphere.  
3. Stratosphere.

2. Tropopause.  
4. Mesosphere.

سپهر<sup>۱</sup> (۹۰ تا ۲۵۰ کیلومتر) تا نزدیک ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه کلون در مرکز اگزوسفر<sup>۲</sup> افزایش می یابد.

جدول ۴-۱. ترکیب شیمیایی جو زمین در نزدیک سطح (توسط حجم)

درصد	گاز
۷۸/۰۸	ازت (N <sup>۲</sup> )
۲۰/۹۵	اکسیژن (O <sup>۲</sup> )
۰/۹۳۴	آرگون (Ar)
۰/۰۳۳	دی اکسید کربن (CO <sup>۲</sup> )
۰/۰۰۱۸	نئون (Ne)
۰/۰۰۰۵۲	هلیوم (He)
۰/۰۰۰۱۵	متان (CH <sup>۴</sup> )
۰/۰۰۰۱۱	کریپتون (Kr)
۲۰/۰۰۰۱	هیدروژن (H <sup>۲</sup> )، منواکسید کربن (CO)، گزنن (Xe)
متغیر (۴-۰)	اوزون (O <sup>۳</sup> )، رادون (Rn) و غیره

توجه کنید که چگالی جوی مرتباً در تراپوسفر کاهش می یابد و سپس بیشتر در ارتفاعات مرتفع کم می شود، نوع کاهش به صورت یک تابع نمایی است. این خصوصیات را می توان به صورت زیر توصیف کرد: توجه کنید که جو زمین به طور ناگهانی به طرف بالا از سطح زیاد یا به طرف زمین کم نمی شود. نیروی رو به پائین گرانی با فشار رو به بالای هر لایه در تعادل است - شرطی که تعادل هیدرواستاتیک<sup>۳</sup> نامیده می شود. قطعه ضخیمی از جو به ضخامت  $\Delta r$  و سطح  $A$  را در نظر بگیرید. نیروی گرانشی که قطعه ضخیم را پائین می کشد عبارت است از

$$F_g = ma = \rho_{(r)} A \Delta r \left( \frac{GM}{r^2} \right)$$

که  $\rho_{(r)}$  چگالی هوا در قطعه ضخیم است؛ توجه کنید جرم این هوا را از ضرب چگالی آن در حجم قطعه ضخیم  $A \Delta r$ ، بدست می آوریم. نیروی خالص به طرف بالا بر روی

1. Thermosphere.  
3. Hydrostatic.

2. Exosphere.

قطعه ضخیم  $A \Delta r$  است که  $\Delta P$  اختلاف فشار بین بالا و پائین قطعه می باشد. در حالت تعادل، این نیروها به صورتی متعادل برمی گردند که

$$A \Delta P = -\rho(r) A \Delta r \left( \frac{GM}{r^2} \right)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = -\rho(r) \left( \frac{GM}{r^2} \right)$$

در حدی که  $\Delta r$  به سمت صفر میل می کند:

$$\frac{dp}{dr} = -\rho(r) \left( \frac{GM}{r^2} \right) \quad (3-4)$$

این معادله تعادل هیدروستاتیکی است. این معادله برای هر وضعیتی از تعادل فشار - گرانی به کار می رود.

فرض کنید که جو، یک گاز ایده آل است، بنابراین از معادله حالت  $P = nKT$  پیروی می کند که در آن  $n = \frac{\rho}{m}$ . در اینجا  $n$  چگالی عددی ( $\# / m^3$ )،  $\rho$  چگالی جرمی ( $kg/m^3$ ) و  $m$  جرم مولکولی متوسط گاز جو (در واحدهای جرمهای هیدروژنی) است، بنابراین

$$P = \frac{\rho KT}{m}$$

یا

$$\rho = \frac{mP}{KT}$$

عبارت فوق را به جای  $\rho$  در معادله (۳-۴) جایگزین می کنیم.

$$\frac{dP}{dr} = -P \left( \frac{m}{KT} \right) \left( \frac{GM}{r^2} \right)$$

یا

$$\frac{dP}{P} = -\left( \frac{m}{KT} \right) \left( \frac{GM}{r^2} \right) dr$$

حال یادآور می شویم که

$$g(r) = \frac{GM}{r^2}$$

که  $g$  شتاب گرانی در فاصله  $r$  از مرکز زمین و  $M$  جرم زمین است. پس

$$\frac{dP}{P} = -g(r) \left( \frac{m}{KT} \right) dr$$

و اگر از این معادله از  $r_0$  تا  $r$  انتگرال بگیریم، داریم

$$\frac{P(r)}{P(r_0)} = \exp \left[ -g \left( \frac{m}{KT} \right) (r - r_0) \right]$$

که در آن  $T, g$  و  $m$  تقریباً در گستره  $r$  تا  $r_0$  ثابت هستند. اکنون تعریف می‌کنیم  $r - r_0 = h$  که ارتفاع بالای سطح و ثابت  $H = \frac{KT}{g_m} \approx$  به عنوان مقیاس ارتفاع است، در این صورت

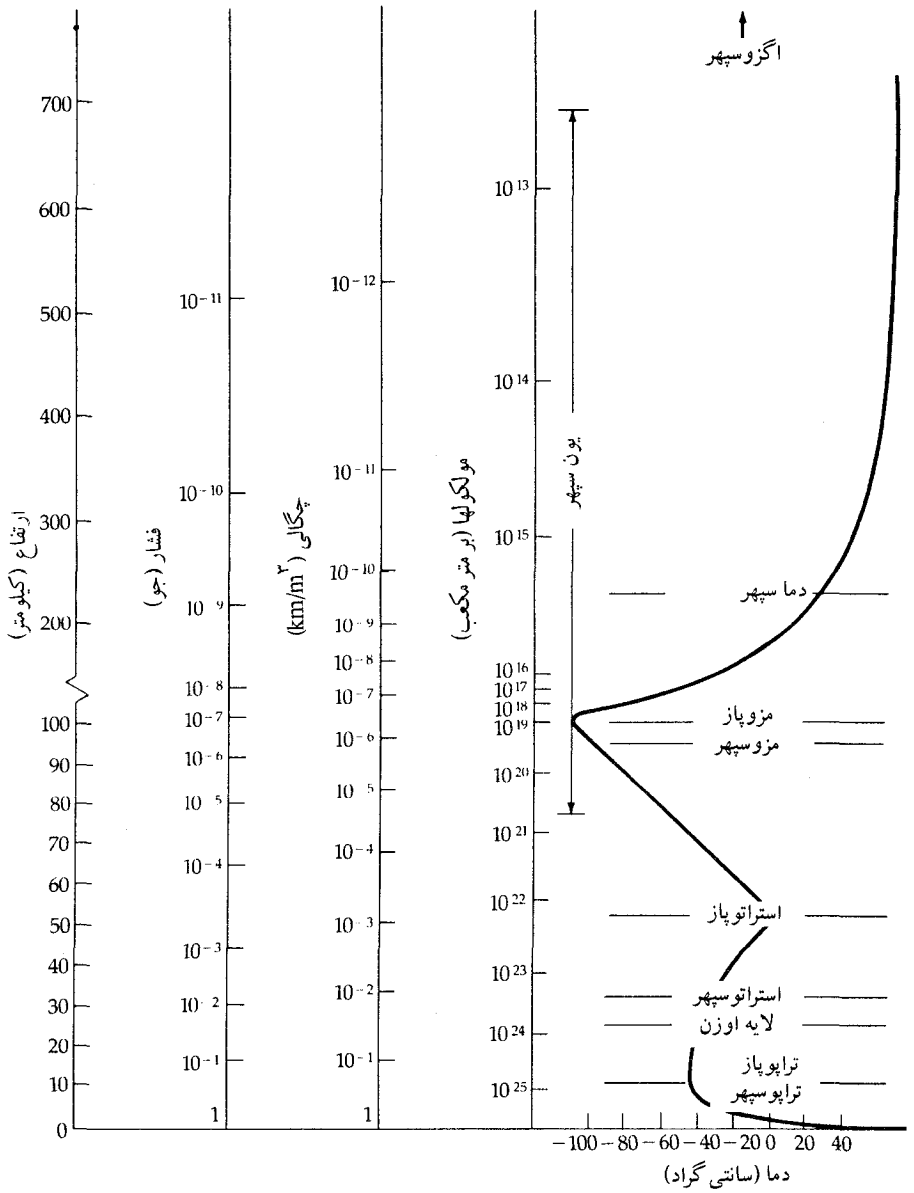
$$P(h) = P(h_0) \exp\left(\frac{-h}{H}\right)$$

که  $h$  هر ارتفاعی بالای سطح مرجع  $h_0$  است. این رابطه معادله فشارسنجی نامیده شده است. این معادله برای نواحی جو سیاره‌ای که دما و وزن مولکولی متوسط سریعاً تغییر نکنند، به کار می‌رود. توجه کنید که  $H$ ، مقیاس ارتفاع، واحد طول را دارد و آن فاصله‌ای در جو در جهت حرکت رو به بالا است که فشار با نسبت  $\frac{1}{e}$  کاهش می‌یابد. در سطح زمین  $H \approx 8 \text{ km}$  و بنابراین فشار (و چگالی) در ارتفاع ۸ کیلومتری تقریباً  $\frac{1}{e}$ ، یعنی  $\frac{2}{7}$  مرتبه کمتر از سطح است. فشار در سطح زمین یک جو و معادل  $\frac{1}{10} \times 10^5$  نیوتون  $\frac{\text{متر مربع}}{\text{متر مربع}}$  می‌باشد. در حالی که چگالی جو به طور یکنواخت با ارتفاع کاهش می‌یابد، نمودار دو کمینه و سه بیشینه را نشان می‌دهد. پرتو ماوراء بنفش و پرتوهای ایکس خورشیدی با جو مرکب طبقه طبقه شده بر هم کنش می‌کنند تا مولکولهای اکسیژن و ازت جدا شوند و یونیدگی بعضی اتم‌ها برای تولید چگالی لایه‌ای از الکترونهای آزاد در یون سپهر<sup>۱</sup> صورت گیرد (حدود ۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر). تعادل یونیدگی یون سپهر خودش خود را تنظیم می‌کند، زیرا هر چه الکترون و یون بیشتری موجود باشد الکترونهای آزاد سریعتر با یونها ترکیب می‌شوند و بدین ترتیب حالت تعادل پایدار برقرار می‌شود. غلظت اکسیژن اتمی ( $O$ )، ازت اتمی ( $N$ )، اوزون ( $O_3$ ) و اکسید نیتریک ( $NO, NO^+$ ) در ترازهای مختلفی از یون سپهر پیدا می‌شوند و تمام سیستم به عنوان یک سپر عمل می‌کند که اکثر تابش خطرناک خورشیدی برای ادامه حیات را جذب می‌کند.

#### اثرات مشاهده شده جو

تابش الکترومغناطیسی به وسیله جو زمین جذب، پخش و منکسر می‌شود و تمام این پدیده‌ها به طول موج تابش فرودی بستگی دارند. جو برای اغلب طول موجها کدر است، ولی (۱) امواج رادیویی با طول موجی در گستره  $1 \text{ mm}$  تا  $20 \text{ m}$  (که به وسیله تلسکوپهای رادیویی آشکار شده‌اند) و (۲) نور مرئی از  $290 \text{ nm}$  (نزدیک ماوراء بنفش)





شکل ۴-۱۸. تغییر فشار، چگالی و دما با ارتفاع در هر یک از لایه‌های جو زمین.

تا حدود  $1\mu\text{m}$  (نزدیک مادون قرمز) را عبور می دهد - "پنجره ای" که از میان آن می توانیم جهان را با چشممان و تلسکوپ ها ببینیم. تابش با طول موج کوتاه (کمتر از  $290\text{nm}$ ) جو را تجزیه و یونیزه می کند و در این فرآیند جذب می شود. برای مثال، لایه اوزون ( $10-40$  کیلومتر) تابشی از  $300$  تا  $210$  نانومتر را جذب می کند. تابش در ناحیه مادون قرمز (حدود  $1$  میکرومتر تا  $1$  میلی متر) وقتی که مولکولهای مانند  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  و به خصوص  $\text{H}_2\text{O}$  را تحریک کند، جذب می شود. در طول موجهای بلندتر از حدود  $20$  متر، یون سپهر مانند یک سپر هادی که تابش فرودی را جذب و منعکس می کند، عمل می نماید.

این که چگونه جو بر روی نور مرئی اثر می کند از بنفش ( $410\text{nm}$ ) تا قرمز ( $650\text{nm}$ ) تأثیرات مستقیمی بر روی دید ما از جهان دارد. مهمترین این آثار عبارتند از: پراکندگی، خاموشی، انکسار (و دید) و پخش. نور وقتی با یک ذره بر هم کنش می کند، پراکنده می شود و چگونگی پراکندگی آن به طول موج و ابعاد پراکننده بستگی دارد. وقتی نور بوسیله مولکولهای جو پراکنده شود ( $L \ll \lambda$ ) شدت تابش پراکنده شده از قانون پراکندگی رایله<sup>۱</sup> پیروی می کند

$$I_{\text{پراکندگی}} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

بنابراین، نور آبی بیشتر از نور قرمز پراکنده می شود و ما آسمان را آبی می بینیم. این اختلاف در پراکندگی باعث می شود که خورشید (یا هر ستاره دیگر) وقتی از میان یک ضخامت قابل ملاحظه ای از جو دیده شود، مانند هنگام غروب آفتاب، قرمز رنگ به نظر می رسد. این پراکندگی باعث می شود که نور آبی در امتداد خط دید حذف شود. بعضی تابشها در هر طول موجی حتی قرمز پراکنده می شوند و بنابراین، روشنی ستارگان در جو ضعیف می شود - این پدیده را خاموشی<sup>۲</sup> نور می گوئیم. مشاهدات نجومی باید برای به حساب آوردن قرمزی و خاموشی تصحیح شوند، گرچه اشتباهات می توانند با نگاه کردن به نزدیک سمت الرأس یا از یک قلّه کوه کاهش داده شوند. وقتی  $L \approx \lambda$  باشد، مانند ذرات غبار با ابعاد  $1\mu\text{m}$  که نور قرمز را پراکنده می کنند، و در نتیجه قانون پراکندگی به صورت زیر در می آید

1. Rayleigh.

2. extinction.

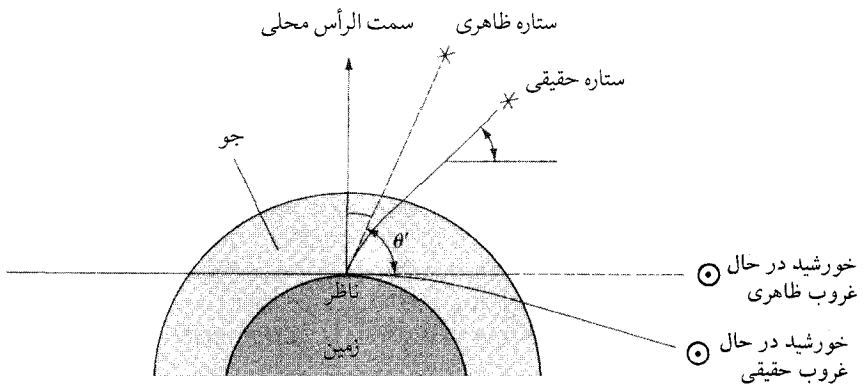
$$I \propto \frac{1}{\lambda}$$

پراکندگی I

سرانجام، وقتی  $\lambda \gg L$  باشد مانند قطرات کوچک آب در ابرها، اساساً پراکندگی مستقل از طول موج است - ابرها نور خورشید را به این طریق متفرق می‌کنند، لذا سفید دیده می‌شوند.

هنگامی که نور از یک محیط به محیط دیگر عبور می‌کند، شکسته یا خم می‌شود. محیط را توسط ضریب شکست آن مشخص می‌کنیم. ضریب شکست هوا با چگالی اش افزایش می‌یابد، بنابراین نور ستاره‌ای که از یک ستاره در ارتفاع حقیقی  $\theta$  می‌آید به سمت پائین و به طرف زمین منکسر شده و به ارتفاع  $\theta' > \theta$  می‌رسد (شکل ۴-۱۹). این اثر در سمت الرأس به صفر می‌رسد و همان‌گونه که به طرف افق می‌رویم بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. در افق یک شیء آسمانی حدود  $35^\circ$  بالاتر از موقعیت واقعی اش قرار می‌گیرد، بنابراین در غروب هنگامی که پائین خورشید را روی افق می‌بینیم واقعاً زیر افق قرار دارد. غیر همگنی‌های چگالی در جو باعث بالا و پائین رفتن اتفاقی مقادیر انکسار برای نور ورودی می‌شود، بنابراین ستارگان به نظر می‌آیند که در آسمان می‌رقصند (چشمک می‌زنند). این اثر تفکیک زاویه‌ای، تلسکوپ‌ها را در حدود  $1''$  ( $25''/0$ ) در حالت‌های استثنائی) محدود می‌کند و ما این را دید نجومی می‌نامیم. وقتی جو ثابت و چشمک‌زدن کوچک است، دید خوب می‌باشد. سیارات و قمرها با قطرهای زاویه‌ای بیش از حد دید به طور پایدار درخشان دیده می‌شوند، زیرا فقط لبه‌هایشان چشمک می‌زنند.

با تمام این اثرات مزاحم و با نوری که از فضا می‌آید (مخصوصاً با کدوری جو زمین برای اغلب طول موجهای تابشی تعجب نخواهید کرد که مشاهده کنندگان، وسایل خود را روی قله‌های کوه قرار می‌دهند یا این که برای دیدن جهان در اقمار مصنوعی مداری رقابت می‌کنند. به طور واضح رصد خانه ایده‌آل باید در یک مکانی بالای محوکنندگی جو قرار داشته باشد.



شکل ۴-۱۹. شکست جوی. پرتوهای نور از اجرام سماوی مثل خورشید یا هر ستاره دیگر توسط جو خم شده‌اند، به طوری که بلندتر از آنچه که واقعاً هستند بنظر می‌رسند.

## ۴-۶ میدانهای مغناطیسی

### (الف) آهن ربائی قمری

در حالی که میدان مغناطیسی زمین با قدرتی حدود  $T \times 10^{-4} \times 0.4$  در سطح آن برای چند صد سال مطالعه شده است، خواص مغناطیسی قمری را فقط با بررسی فضائی سطح ماه، می‌توان بدست آورد. مغناطیس سنج‌هایی توسط فضانوردهای آپولو در سطح ماه قرار داده شده‌اند، میدان مغناطیسی قمری ذاتی را کمتر از  $T \times 10^{-9}$  نشان می‌دهند، اما چشمه‌های متمرکز شده مغناطیسی در روی سطح ماه با قدرتی حدود  $T \times 10^{-8}$  وجود دارند. به هر حال، مغناطیس کلی ماه فوق‌العاده کوچک بوده و قابل صرف نظر کردن است. اگر مدل دینامو (بخش ۴-۶ب) برای منشاء میدان مغناطیسی یک سیاره درست باشد، در این صورت هسته ماه اساساً نمی‌تواند از آهن و نیکل گداخته ترکیب شده باشد. (همچنین چگالی ماه آنقدر کم است که نمی‌تواند هسته فلزی داشته باشد.) از طرف دیگر، بعضی نمونه‌های سنگ سطحی خیلی بیشتر از این که از یک چنین میدان مغناطیسی ضعیفی انتظار داشته باشیم، مغناطیس شده‌اند. معدنهای آهن در یک سنگ

آذرين در زمان جامد بودنشان ميدان مغناطیسی خود را نگه می‌دارند. بنابراین، در گذشته ميدان مغناطیسی ماه باید قویتر از آنچه امروز است، بوده باشد.

### (ب) مغناطیس سپهر<sup>۱</sup>

زمین یک میدان دو قطبی مغناطیسی دارد که محور آن نسبت به محور چرخش زمین به اندازه  $12^\circ$  میل دارد و خطوط میدان از قطب شمال مغناطیسی بیرون آمده و در قطب جنوب مغناطیسی وارد می‌شوند. هم جهت بودن محورهای مغناطیسی و چرخشی زمین دلالت بر این دارند که دوران زمین به ایجاد خاصیت آهن‌ربائی کمک می‌کند. عقیده بر این است که حرکات سیالی در هسته بیرونی فلزی مسئول میدان مغناطیسی نظیر نمونه‌ای از الگوی دینامو می‌باشند (بارهای الکتریکی متحرک یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند). بررسی‌های پالئو مغناطیسی<sup>۲</sup> نشان داده‌اند که میدان به طور اتفاقی با دوره تناوب متوسطی حدود  $10^4$  تا  $10^5$  سال تغییر جهت می‌دهد و امروزه ما مشاهده می‌کنیم که شدت میدان به طور آهسته در حال کاهش است.

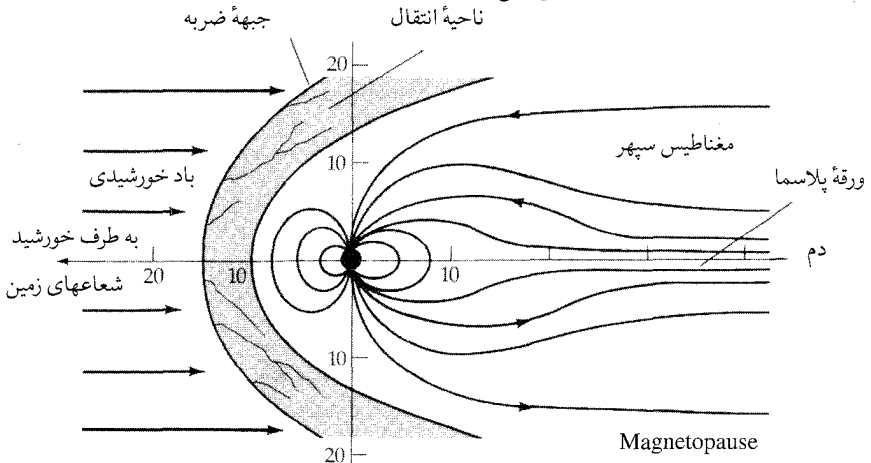
شدت دو قطبی مغناطیسی تقریباً به صورت  $\frac{1}{r^2}$  با فاصله  $r$  از زمین کم می‌شود، در صورتی که چگالی جو به صورت نمائی کاهش می‌یابد. میدان مغناطیسی آنسوی جو نیز مهم است. حوزه میدان مغناطیسی زمین مغناطیسی سپهر است که در مرز مگنتوپاوز<sup>۳</sup> جایی که آن با باد خورشیدی تلاقی کرده بر هم کنش می‌کند، پایان می‌یابد (شکل (۴-۲۰)). مغناطیس سپهر ساختاری شبیه ستاره دنباله‌دار داشته و به وسیله فشار بادهای خورشیدی روی میدان مغناطیسی زمین دور از خورشید ایجاد می‌شود. در فاصله بین  $10R_{\oplus}$  تا  $8R_{\oplus}$  از زمین، میدان دو قطبی واضح است و در ورای آن یک ناحیه انتقال و ضربه‌ای شدید وجود دارد که به طرف خورشید است و دنباله مغناطیسی آن طویل‌تر از  $1000R_{\oplus}$  به سمت دور از خورشید امتداد دارد.

مغناطیس سپهر زمین شامل فرآیندهای فیزیکی پیچیده‌ای از پلاسما و میدانهای مغناطیسی است که در حال حاضر شروع به درک آن کرده‌ایم. خوشبختانه این مغناطیس سپهر نزدیکترین حوزه مغناطیسی به ما است و به طور کامل از زمان شروع اکتشاف فضا

1. Magnetosphere.  
3. Magnetopause.

2. Paleomagnetic.

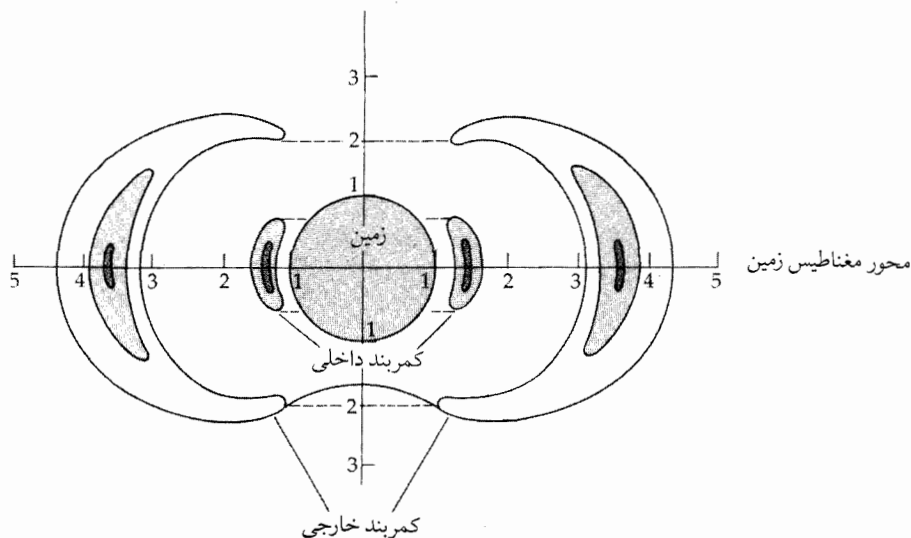
مطالعه شده است. این حوزه به عنوان مدلی برای دیگر مغناطیس سپهرها در منظومه شمسی که در اطراف دیگر سیارات با ستاره‌های دنباله‌دار پیدا شده‌اند، به کار می‌رود. نکته اصلی این است که: بر هم کنش باد خورشیدی و مغناطیس سپهر یک مولد الکترومغناطیسی سیاره‌ای ایجاد می‌کند که با آهنگ  $10^6$  مگاوات انرژی جنبشی باد خورشیدی را به الکتریسته تبدیل می‌کنند.



شکل ۴-۲۰. مغناطیس سپهر زمین. باد خورشیدی با میدان دو قطبی مغناطیسی زمین برخورد کرده و یک موج ضربه‌ای در پشت ایجاد می‌کند که در مغناطیس سپهر قرار دارد. واحدها بر حسب شعاع زمین هستند.

### (ج) کمربندهای تابشی وان آلن<sup>۱</sup>

مگنتوپاوز، باد خورشیدی را به دور از زمین منحرف می‌کند، اما خیلی از پرتوها و الکترونها در مغناطیس سپهر نفوذ می‌کنند. در آنجا به وسیله میدان مغناطیسی دو قطبی زمین در کمربندهای تابشی چنبره‌ای هم مرکز با محور مغناطیسی بدام می‌افتند (شکل ۴-۲۱)). کشف این کمربندها (کمربندهای تابشی وان آلن) به وسیله گروهی که توسط جیمز ا. وان آلن سرپرستی می‌شد از مشاهدات قمرها تا سال ۱۹۵۸ میلادی انجام گرفت.

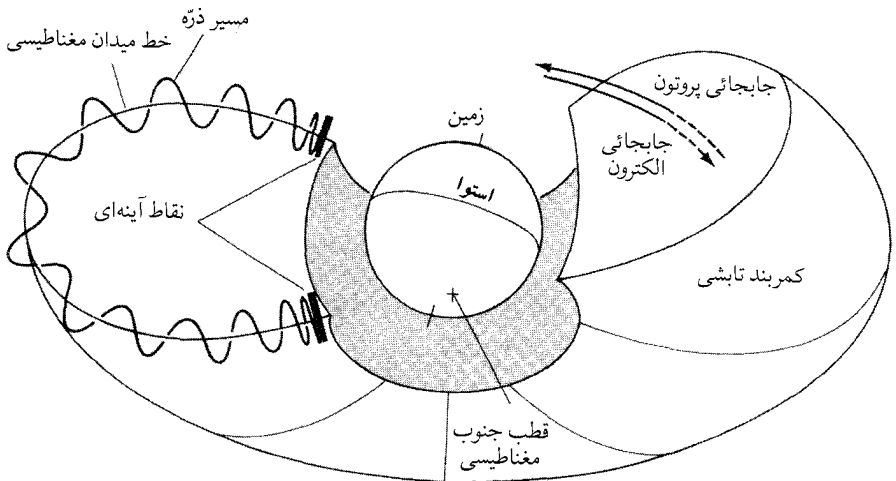


شکل ۴-۲۱. کمربندهای تابشی وان آلن. ابعاد کمربند خارجی بر حسب شعاع زمین هستند. مرزهای سایه‌دار، چگالیهای نسبی ذرات را نمایش می‌دهند.

در حال حاضر، اقمار مصنوعی حامل نوعی آشکار سازها، جزئیات کمربندهای تابشی را ثبت کرده‌اند. گرچه همه پروتونها و الکترونها در سرتاسر مغناطیس سپهر پیدا شده‌اند، اما دو کمربند متمایز وجود دارد: (۱) کمربند داخلی کوچک بین  $1R_{\oplus}$  و  $2R_{\oplus}$ ، جایی که پروتونهای با انرژی  $50 \text{ MeV}$  و الکترونهای با انرژی بیشتر از  $30 \text{ MeV}$  قرار دارند، و یک شکاف مشخص و (۲) کمربند خارجی بزرگ از  $3R_{\oplus}$  تا  $4R_{\oplus}$ ، جایی که پروتونها و الکترونهای کم انرژی جمع شده‌اند. (الکترون ولت،  $eV$ ، واحد انرژی مناسب در فیزیک ذرات و فیزیک اتمی است  $1 \text{ eV} = 1/60.21 \times 10^{-19} \text{ J}$ ،  $1 \text{ eV} = 10^3 \text{ eV} = 1 \text{ KeV}$ )،  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$  و آن انرژی به دست آمده به وسیله یک الکترون است که بین دو صفحه با فاصله ۱ متر و اختلاف پتانسیل ۱ ولت شتاب می‌گیرد.) کمربند داخلی نسبتاً پایدار است، اما تعداد ذرات در کمربند خارجی با سازه ۱۰۰ تغییر می‌کند. ذرات بدام افتاده در کمربندها از باد خورشیدی و از پرتوهای کیهانی که در بالای جو زمین بر هم کنش می‌کنند، می‌آیند.

ذرات باردار که در کمربندها به دام افتاده‌اند در امتداد خطوط نیروی مغناطیسی

حرکت مارپیچی انجام می دهند (با دوره تناوبهای از ۰/۱ تا ۳ ثانیه) و بین نقاط آینه‌ای شمالی و جنوبی رفت و برگشت می کند (شکل (۴-۲۲)). ذرات در کمربند داخلی ممکن است با جو بالائی رقیق در این نقاط آینه‌ای برای ایجاد نور قطبی بر هم کنش انجام دهند (بخش (۴-۵۶))؛ چنین ذراتی از کمربند خارج می شوند. علاوه بر حرکت مارپیچی و نوسانی شمال - جنوب ذرات آنها در طول جغرافیائی به دلیل کاهش شدت میدانهای مغناطیسی و گرانشی با افزایش فاصله از زمین، انتقال می یابند. پروتونهای پر انرژی به طرف غرب اطراف زمین در حدود ۰/۱ ثانیه حرکت می کنند و الکترونهای کم انرژی به طرف شرق در حدود ۱ تا ۱۰ ساعت جا به جا می شوند. این جابجایی به یکنواختی طول جغرافیائی کمربندهای تابشی منجر می شود.



شکل ۴-۲۲. حرکت ذره در کمربندهای وان آلن. ذرات بارداری که از خورشید می رسند در امتداد خطوط میدان مغناطیسی حرکت مارپیچ انجام می دهند و بین نقاط آینه‌ای شمال و جنوب رفت و آمد می کنند. پروتونها و الکترونها به علت بارهای مخالفشان در جهات مخالف جابه جا می شوند.

حال این حرکات ذره باردار را به طور کمی بررسی می کنیم. بر طبق قانون



$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (۴-۴)$$

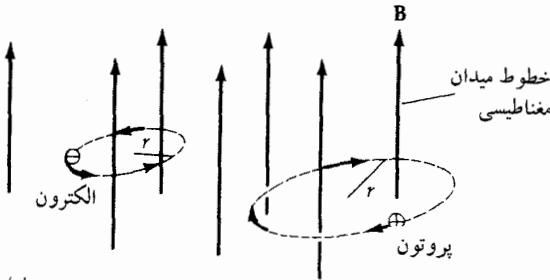
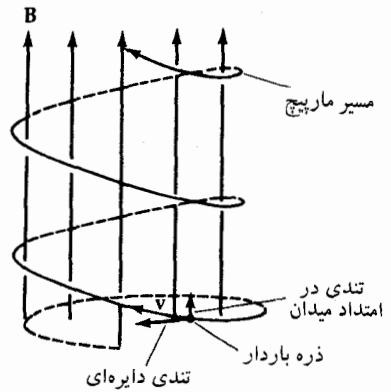
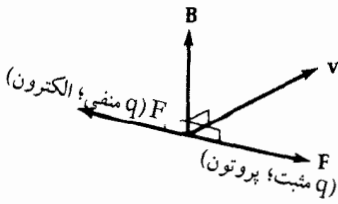
وقتی یک ذره باردار با بار  $q$  که با سرعت  $V$  (بر حسب متر بر ثانیه) در یک میدان مغناطیسی حرکت کند نیروی  $F$  (بر حسب نیوتون) بر آن وارد می شود. توجه کنید که میدان مغناطیسی بر طبق قانون دست راست توسط بردار  $B$  نشان داده می شود به طوری که  $F$  بر  $V$  و  $B$  عمود است (شکل (۴-۲۳ الف)). گرچه جرم پروتون  $(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})$  خیلی بیشتر از جرم الکترون  $(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$  است، اما بار پروتون با بار الکترون مساوی و مختلف علامت می باشد. از آنجائی که  $(\vec{F} \cdot \vec{V}) dt = 0$  عمود بر  $V$  است)، بنابراین انرژی جنبشی ذره به وسیله یک میدان مغناطیسی، تغییر داده نمی شود (تندی کل  $V$  ثابت باقی می ماند). ذره در میدان مغناطیسی یکنواخت در یک مسیر دایره ای حرکت می کند (شکل (۴-۲۳ ب)). نیروی لورنتز (معادله (۴-۴))، نیروی جانب مرکزی برای مداری به شعاع  $r$  ایجاد می کند، بنابراین

$$\frac{mV^2}{r} = qVB$$

$$r = \frac{mV}{qB} \quad (۴-۵)$$

برای مثال، یک پروتون با تندی  $V = 10^6 \text{ m/s}$  وقتی  $B = 10^{-2} \text{ T}$  باشد، خطوط میدان مغناطیسی را با شعاع  $r = 10 \text{ km}$  دور می زند.

اگر ذره در امتداد یک خط میدان مغناطیسی حرکت کند، یک مسیر مارپیچ طی خواهد کرد (شکل (۴-۲۳ ج)). وقتی ذره در حوزه شدت میدان بالاتر ( $B$  افزایش می یابد) حرکت کند، مدار دایره ای کوچک شده در حالی که تندی دایره ای آن افزایش می یابد. از آنجائی که انرژی جنبشی کل ذره نمی تواند تغییر کند، حرکت آن در طول خط میدان باید آهسته شود؛ سرانجام اگر یک ذره به شدت به ذره دیگری برخورد کند، جهت حرکت معکوس می شود. توجه کنید، ذرات باردار که در ناحیه ای از خطوط میدان مغناطیسی باریک حرکت می کنند به طور مؤثر تا سرعت های خیلی بالا شتاب می گیرند. این فرآیند در گروهی از وضعیت های اختریفیزیکی مانند فجر در



شکل ۴-۲۳. حرکات ذرات باردار در یک میدان مغناطیسی. (الف) نمودار برداری برای جهت نیروی لورنتز. (ب) مدارهای دایره‌ای الکترونها و پروتونها در یک میدان مغناطیسی یکنواخت. (ج) مدار مارپیچی یک ذره باردار با مؤلفه‌ای از سرعت در امتداد خطوط میدان یکنواخت.

نقطه آینه‌ای، اتفاق می‌افتد.

### (د) فجراها<sup>۱</sup>

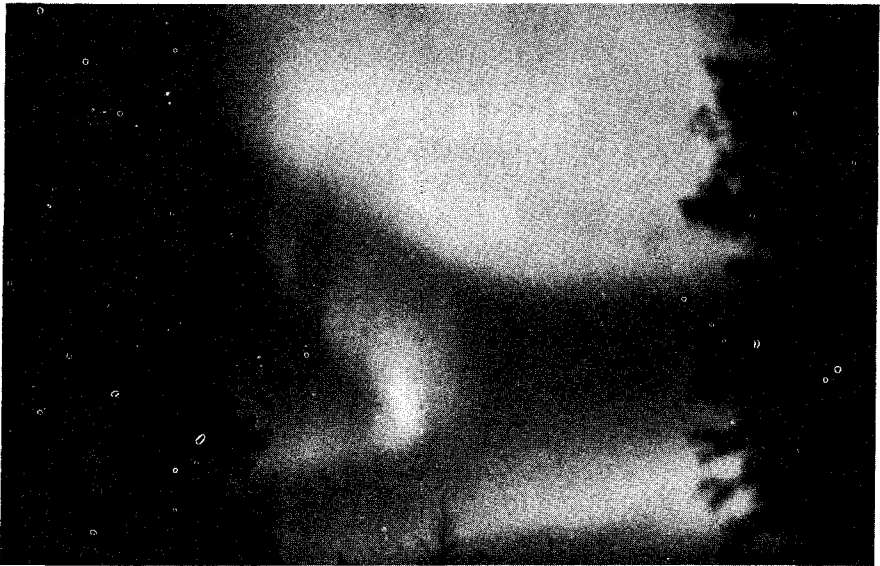
کمریند تابشی داخلی با جو بالای زمین بر هم کنش کرده و فجربهای رنگی را تولید می‌کند: فجر شمالی با نورهای شمالی در عرضهای جغرافیایی شمالی بالا و فجر جنوبی در عرضهای جغرافیایی جنوبی بالا. پراکندگی تابان روی سطوح بزرگی از آسمان از زمانهای باستان در نواحی شمالی بین ۱۵ تا ۳۰° از قطب مغناطیسی مشاهده شده‌اند. نمایش‌های فجری ممکن است سوسوزدن باریکه‌هایی یا پرده‌های نوری یا

1. Aurorae.

کمر بند پیوسته‌ای که شدت و رنگ آن (مثل صورتی، آبی و سبز) در دوره‌ای از ساعات تغییر می‌کند، باشد (شکل (۴-۲۴)). اندازه‌گیری‌های مثلثاتی ارتفاعات فجرها نشان می‌دهند که بیشتر بین ۸۰ و ۱۶۰ کیلومتر با چندتایی به بلندی ۱۰۰۰ کیلومتر رخ می‌دهند.

گسیلهای فجری هنگامی که الکترونها با انرژی کم از منطقه تابش داخلی خارج می‌شوند و در اثر برخورد گازهای جوی را برانگیخته و یونیزه می‌نمایند، نتیجه می‌شوند. همان طور که این گازهای برانگیخته، اساساً اکسیژن و ازت، به اشکال پایدار خود بر می‌گردند، نور مرئی با رنگهای ویژه‌ای منتشر می‌شود. باد خورشیدی نقش مهمی را در فجر بازی می‌کند، هم در فراهم کردن الکترونهاى لازم و هم به وسیله برآشفتن مغناطیس سپهر به طوری که ذرات در کمر بندهای تابشی محصور در داخل جو نزدیک نقاط آینه، به تله می‌افتند. فعالیت خورشیدی موجب پیدایش فجر می‌شود که قویاً به اتفاقاتی که جلوه‌گر فجر هستند، مرتبط می‌شود.

بر اساس مدل‌های اخیر، فجر نتیجه رها شدن انرژی از مدار مغناطیسی بوسیله فرآیندی که ارتباط مجدد مغناطیسی نامیده شده است، می‌باشد. این زمانی انجام می‌شود که نواحی میدانهای مغناطیسی مخالف، یکدیگر را جذب کنند و خطوط میدان مغناطیسی بتوانند بشکنند و در ترکیباتی جدید مجدداً ترکیب شوند. یک محل از این ارتباطات مجدد ورقه پلاسما در دم مغناطیسی است؛ نقطه ارتباط مجدد معمولاً حدود  $100R_{\oplus}$  پائین‌تر از زمین قرار دارد. میدان مغناطیسی خالص در این نقطه صفر است. باد خورشیدی به طور اتفاقی انرژی‌های مغناطیسی کافی را به سوی مغناطیس سپهر جمع می‌کند، همچنان که خطوط میدان به آنجا کشیده می‌شود و ارتباط مجدد جدیدی در  $15R_{\oplus}$  از زمین انجام می‌گیرد. میدان در یک طرف زمین حذف می‌شود و الکترونها را به سوی جو سوق می‌دهد تا گسیلهای فجری را ایجاد کند. در این هنگام، یک حباب پلاسما که در برگیرنده خطوط میدان حلقوی می‌باشد از میدان مغناطیسی متصل به زمین آزاد شده و به سمت پائین حرکت می‌کند. به این ترتیب، تعادل مغناطیس سپهر پایه‌گذاری می‌شود. فرآیند ارتباط مجدد مغناطیسی در یک پلاسما برای محیط ستارگان دنباله‌دار (بخش (۷-۳)) و دیگر موقعیتهای اختر فیزیک به کار رفته است.



شکل ۴-۲۴. فجر شمالی. به ساختار شبه پوششی در این زمان عکسبرداری توجه کنید. (انجمن تحقیقات ملی کانادا).

#### ۴-۷ تحول سیستم زمین - ماه

اکنون ما در موقعیتی هستیم که با اتکاء بر خواص فیزیکی زمین و ماه - به خصوص با تعیین عمر تخت سنگها از طریق مطالعات رادیواکتیویته‌ای - تحول آنها را بفهمیم. این مقایسه، زمین را به عنوان سیاره‌ای که حاوی متحول‌ترین سیاره خاکی - و هنوز در حال تحول - و ماه را به عنوان یک دنیای فسیل که شواهد مراحل اولیه را در تحول سیاره‌ای خاکی حفظ می‌کند، متمایز خواهد کرد. (برای استنباط منشاء زمین و ماه به بخش (۶-۷) مراجعه کنید.)

الف - تاریخچه ماه

در حدود ۴/۶ بیلیون سال قبل، ماه تشکیل شده است. این که ماه نزدیک زمین تشکیل شده یا نه مشخص نیست، ولی احتمالاً از به هم پوشی تکه‌های ماده تشکیل شده است. بعد از این که قسمت اعظم جرم ماه تشکیل گردید، فرود این تکه‌ها به داخل

ماه ادامه یافت. در خلال ۲۰۰ میلیون سال بعد از تشکیل ماه، این گلوله‌های پرتابی از فضا، سطح ماه را بمباران می‌کردند و همزمان با تلاشی رادیواکتیو ماه را آنقدر گرم کردند که ذوب شد. مواد با چگالی کمتر به طرف سطح لایه ذوب شده جاری شدند و مواد فرّار به فضا دفع گردیدند. پوسته این لایه ذوب شده در حدود ۴/۴ بیلیون سال قبل شروع به سخت شدن کرد. از ۴/۱ تا ۴/۴ بیلیون سال قبل پوسته به آهستگی سرد شد. بمباران فضایی سطح ماه ادامه یافت ولی به تدریج کم شد. سقوط این ذرات سبب ایجاد دهانه‌های آتش‌فشانی شدند که اکنون در نواحی مرتفع یافت می‌شوند.

زیر این سطح، ماده ماه ذوب شده باقی می‌ماند. در حدود ۳/۹ تا ۴/۱ بیلیون سال قبل تکه‌های عظیمی پوسته را شکافت و تولید دهانه‌هایی کرد که بعداً به دریا‌های سطح ماه تبدیل شدند. برای مثال، دهانه دریای شرقی ماه ۴ بیلیون سال قبل زمانی که یک شیء شکافی به عرض حدود ۲۵ کیلومتر در سطح ماه ایجاد کرد، تشکیل شد. بعد از این که این دهانه‌ها شکل گرفتند، با مواد مذاب پر شدند. علی‌رغم این که پوسته ماه حرارت اولیه‌اش را که به تدریج بازیافته بود، از دست داد، عناصر رادیواکتیو با نیمه عمر کوتاه که متلاشی می‌شدند سریعاً بخش‌هایی از آن را دوباره گرم کردند. از ۳ تا ۳/۹ بیلیون سال قبل مواد مذابی که دوباره با گرم شدن رادیواکتیو تشکیل یافتند با شکافتن پوسته نازک زیر حفره‌ها به داخل آنها جاری شدند و دریا‌های ماه را به وجود آوردند.

در ۳ بیلیون سال گذشته، پوسته ماه غیر فعال باقی مانده است. مع ذالک، تکه‌های کوچک از فضا از زمانی که این پوسته منجمد شده، بدون انقطاع سطح آن را زیر و رو کرده‌اند. این دانه‌های شن مانند، سطح ماه را صاف کرده و آن را پودر نمودند. بمباران مداوم به وسیله اجسام بزرگ سطح تکه تکه شده آن را به هم زده است. برخوردها خاک را ذوب کرده و با سرد شدن سریع برسیاها و شیشه‌های کروی را تشکیل داده‌اند.

توجه کنید که در این تاریخ تحول (جدول (۴-۲))، نواحی مرتفع قدیمی‌ترین بخش‌های پوسته ماه و نواحی پست (دریاها) جوان‌ترین بخشها را می‌سازند. زمانی که دریاها تشکیل شدند تحول بخش داخلی ماه و پوسته به دلیل این که بیشتر حرارت اولیه‌اش را در یک بیلیون سال از دست داد، دچار وقفه گردید. این حرارت داخلی ناشی از مجتمع شدن اولیه و تلاشی رادیواکتیو، تحول یک سیاره خاکی را به پیش می‌برد. به

طور کلی آهنگ کاهش حرارت متناسب با مساحت سطح سیاره است؛ مقدار حرارت ذخیره شده متناسب با جرم آن می باشد. بنابراین، عمر تحول یک سیاره خاکی تقریباً متناسب است با مجموع مقدار انرژی در دسترس تقسیم بر آهنگ کاهش انرژی، یا به عبارت دیگر  $t \propto \frac{R_p^3}{R} \propto R$ . بنابراین، سیارات خاکی بزرگتر، از جهت این که فرآیندهایی که به وسیله حرارت داخلی به جلو رانده می شود مدت زمان بیشتری طول می کشد، متحول تر خواهند شد. همچنین، سیاره حجیم تر جو را طولانی تر نگه می دارد که منجر به فرسایش سطح آن توسط باد و باران خواهد گردید. حال با در نظر گرفتن این موضوع، زمین را مورد بررسی قرار می دهیم.

### (ب) تاریخچه زمین

فرآیندهای تحولی که تحت تأثیر حرارت داخلی ایجاد شده اند، زمین را از ۶ مرحله تحول عبور داده اند. اولین مرحله ۴/۶ بیلیون سال قبل شروع شد، زمانی که زمین از اجتماع اجسام کوچک تخته سنگی در طی فقط چند میلیون سال تشکیل می شد. در نتیجه آن، یک سیاره ناهموار با ترکیبی کم و بیش یکنواخت ایجاد شد که تمام قطعات آن تقریباً مخلوط یکسانی از مواد ساخته شده بود. جو آن در زمان تشکیل مملو از هیدروژن و گازهای بی اثر بود. تجمع و تلاشی رادیواکتیو موجب داغ شدن داخلی سریع شد. گازهای با چکا کم به داخل فضا گریختند.

در دومین مرحله که در حدود ۴/۵ بیلیون سال قبل شروع شد، داغ شدن رادیواکتیو (و شاید از انقباض گرانشی) بخش داخلی را ذوب کرد. نتیجه اشتقاق، شکل گیری هسته ای از مواد متراکم و پوسته ای از مواد سبک بود. در مراحل سوم و چهارم فعالیت آتش فشانی حاصل از حرارت درونی سبب جو ثانوی شد که حاوی بخار آب، متان، آمونیوم، دی اکسید سولفور و دی کسید کربن بود. در ادامه فرو افتادن اجسام بزرگ پوسته شکافته می شد. گودال های اقیانوسی شکل گرفتند و سطح زمین به اندازه کافی برای سقوط باران سرد شد و گودال ها شروع به پر شدن کردند.

در مرحله پنجم، در حدود ۳/۷ بیلیون سال قبل، اولین قاره ظاهر شد، و صفحه زمین ساختی شروع شد، و کوه ها رشد کردند و تنها تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی ناشی از باد و باران قرار گرفتند. به آهستگی جو متحول شد و تا اندازه ای تحت تأثیر حیات قرار

گرفت. به طور تقریب ۲/۲ بیلیون سال قبل سرد شدن پوسته‌ای، پوسته را تا حد کافی ضخیم کرد تا فعالیت صفحه‌ای زمین به صورتی که امروز می‌بینیم، در آید. در حدود ۶۰۰ میلیون سال قبل، این سیاره وارد ششمین مرحله تحوّل خود شد. فرآیندهایی که در مرحله پنجم شروع شدند با آهنگ آهسته‌تری ادامه یافتند تا زمین به شکلی که خیلی شبیه به امروز است، در آید.

تحول سیارات خاکی تغییر در درون، سطح و جو آنها را شامل می‌شود. این تغییرات عمدتاً به وسیله حرارت درونی سیاره به پیش می‌رود: در نتیجه، هر چه سیاره سنگین‌تر باشد حرارت داخلی بیشتری را تولید می‌کند (از تلاشی رادیواکتیو)، حرارت را به مدت طولانی‌تری حفظ می‌کند و به درجه بالاتری تحول می‌یابد.

سطوح توسط چندین فرآیند تصحیح شده‌اند: برخورد با خرده‌های داخل سیارات؛ جریان حرارت داخلی به خارج، آتش‌فشان، فرسایش به وسیله باد و آب و حرکات پوسته‌ای (اگر گوشته داغ باشد). جوها در نتیجه بر هم کنش با نور خورشید، فرار به داخل فضا، تبخیر شدن (ناشی از حرارت داخلی) و حیات (در صورت وجود) تغییر می‌کنند. به خصوص، زندگی بر روی زمین دومین جوش را (که از خروج گاز تولید شد) به جو مملو از اکسیژن تبدیل کرد که ما اکنون از آن لذت می‌بریم.

جدول ۴-۲. تحول ماه: یک مدل مدرن

فرآیندها	زمان (بیلیونها سال پیش)	حادثه
تجمع قطعات کوچک مواد	۴/۶	تشکیل
ذوب لایه خارجی توسط حرارت حاصل از سقوط مواد و با تلاشی رادیواکتیو؛ عناصر فرّار گم شده	۴/۴ - ۴/۶	پوسته ذوب شده
جامد شدن پوسته مادامی که ذرات برای تشکیل دهانه‌های آتشفشان سقوط می‌کنند	۴/۴ - ۴/۱	دهانه‌های ارتفاعات
سقوط کاهش یافته، ولی تشکیل حوضچه‌ها از برخورد چند قطعه بزرگ؛ خروج بازالتها از آتشفشان زیر پوسته جامد	۴/۱ - ۳/۹	حوضچه‌های بزرگ

سیل حوضچه‌ها توسط مواد گداخته به وسیله تلاشی رادیواکتیو تولید شد	۳ - ۳/۹	سیل دریا
بمباردمان توسط ذرات کوچک برای پودر کردن و فرسودن سطح	۳ - تا به حال	پوسته آرام

## مسائل

۱. (الف) یک کشتی فضایی آپولو به سمت ماه پرتاب می‌شود. در چه نقطه‌ای بین زمین و ماه شتاب گرانشی خالص نخواهد داشت؟

(ب) چه مدت طول می‌کشد تا سفینه در یک مدار دایره‌ای در ۵۰ کیلومتری بالای سطح ماه، ماه را یک دور بزند؟

۲. با استفاده از طول ماه نجومی (۲۷/۳۲۲ شبانه‌روز) و دوره‌های تناوب دوران زمین (۳۶۵/۲۶ شبانه‌روز)، عقب افتادن نقاط گره‌ای (۱۸/۶ سال) و جلوافتادن قرین خورشیدی ماه (۸/۸۵ سال)، طول کمیت‌های زیر را محاسبه کنید

(الف) ماه هلالی

(ب) ماه گره‌ای

(ج) ماه آنومالی

۳. فرض کنید که مدار ماه دایره‌ای است و در صفحه دایرة البروج قرار دارد. تفاوت در جاذبه خورشیدی بر روی مدار ماه را در مقابله و مقارنه به دست آورید، و آن را با جاذبه گرانشی زمین مقایسه کنید. آیا اکنون می‌توانید بفهمید که چرا مدار ماه یک بیضی ساده نیست؟

۴. (الف) در صورتی که شعاع هسته ماه  $R_{\text{M}}$  و باقیمانده بخش داخلی‌اش را چگالی یکنواخت  $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$  پر کرده باشد، چگالی یکنواخت این هسته چقدر است؟  
(ب) نیروهای جذر و مدی زمین بر ماه را در نقاط اوج و حضیض مدار ماه حساب کنید؛ نتایج حاصله را تفسیر کنید.

۵. انرژی جنبشی متوسط به ازاء هر ملکول گاز در دمای T برابر است با  $\frac{3KT}{2}$  که  $\frac{mv^2}{2}$



در آن  $K = 1/380 \times 10^{-22} \text{ J/k}$ . یک ذره با سرعت قائم  $V$  در سطح زمین، قبل از این که به طرف زمین برگردد تا ارتفاع  $h = \frac{V^2}{2g}$  بالا می‌رود.

(الف) نشان دهید ارتفاع مشخصه برای مولکولی به جرم  $m$  در دمای  $T$  برابر است با  $h = \frac{V^2}{2g}$ .

(ب) در  $T = 250 \text{ K}$ ، ارتفاعات مشخصه را برای ازت ( $N_2$ )، اکسیژن ( $O_2$ )، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) و هیدروژن ( $H_2$ ) محاسبه کنید. این موضوع درباره ساختار

ترکیبی جو زمین به شما چه می‌گوید؟

(ج) چگونه این محاسبه با مقیاس ارتفاع محاسبه شده در این فصل اختلاف دارد؟

۶. (الف) اگر یک ستاره شدت تابش یکسانی را در تمام طول موج‌های مرئی منتشر کند،

رنگ ظاهری آن در سطح زمین چه خواهد بود؟

(ب) توضیح دهید چرا در موقع غروب، خورشید (شبهه یک بیضی) تخت به نظر

می‌رسد؟

۷. نشان دهید که دوره تناوب دایره‌ای  $P$  (بر حسب ثانیه) برای یک بار در میدان

مغناطیسی یکنواخت  $B$  به شعاع بستگی ندارد، این دوره تناوب را برای پروتون

متحرکی در سرعت  $V = 10^7 \text{ m/s}$  در یک میدان مغناطیسی  $10^{-4} \text{ T}$  ارزیابی کنید.

۸. نموداری ترسیم کنید و با استفاده از قانون نیروی لورنتز توضیح دهید که چرا

الکترونها در کمربندهای تابشی به علت کاهش شدت میدان مغناطیسی با فاصله از

سطح زمین، به طرف شرق انتقال می‌یابند.

۹. شعاع هسته زمین را نسبت به شعاع کل آن، طوری به دست آورید که چگالی هسته

$1000 \text{ kg/m}^3$ ، چگالی گوشته  $2500 \text{ kg/m}^3$  و چگالی متوسط  $5500 \text{ kg/m}^3$  باشد.

۱۰. در اگزوسپهر زمین، دما ممکن است به  $2000 \text{ K}$  برسد. طول عمر متوسط بخار آب را

در اینجا از مقایسه سرعت متوسط آن با سرعت فرار از زمین، تخمین بزنید.

۱۱. معادله تعادل هیدرواستاتیک در قسمت‌های درونی سیاره‌ای می‌تواند به کار برده

شود، زیرا منقبض یا منبسط نمی‌شوند. این معادله را با تقریب‌های مناسب برای

تخمین فشارهای مرکزی ماه و زمین به کار ببرید. راهنمایی‌ها: از معادله

(۳-۴) با  $\Delta p \approx dp = p_c - p_s$  که  $p_c$  فشار مرکزی و  $p_s$  فشار سطحی است، استفاده

کنید. فرض کنید  $p_s = 0$ . برای  $\rho(r)$  چگالی متوسط و برای  $r$  شعاع سیاره را به کار ببرید.

۱۲. (الف) با استفاده از شدت میدان مغناطیسی در سطح زمین، شدت را در کمربندهای وان آلن تخمین بزنید.

(ب) با استفاده از این تخمین شعاع انحناء یک پروتون  $5.0 \text{ MeV}$  را در کمربندها محاسبه کنید.

۱۳. ثابت کنید که میدان دو قطبی با  $\frac{1}{r^3}$  کاهش می یابد و چگالی جوی به صورت نمایی سقوط می کند.

## فصل پنجم

# سیارات خاکی:

عطارد، زهره و مریخ

تاکنون خواص عمومی منظومه شمسی (فصلهای اول و دوم) و اساس دو سیاره خاص زمین و ماه را ارائه دادیم (فصول سوم و چهارم). از این دو جهان آشنا به عنوان پایه‌هایی برای سیاره شناسی مقایسه‌ای دیگر سیارات خاکی: عطارد، زهره و مریخ استفاده می‌کنیم. سعی خواهیم کرد به تاریخ‌های تحولی این اجرام با طرح شباهتهای زمین و ماه پی ببریم.

### ۵-۱ سیاره شناسی جدید

چون چشم بشر به‌تنهایی قادر نبود جزئیات کوچکتر از یک درجه قوسی را تمیز بدهد، اختراع تلسکوپ در قرن هفدهم جرعه‌ای برای تشخیص ماهیت سیارات بود. سیاره‌شناسی. در سال ۱۶۱۰ میلادی گالیله، مشاهدات تلسکوپی چهار تا از بزرگترین اقمار مشتری (گالیله‌ای)، اهل زهره، حفره‌های سطح ماه، لکه‌های تاریک خورشید و شکلهای عجیب غیر کروی زحل (حلقه‌های آن) را توصیف کرد. جو زمین، تفکیک نور

قابل رؤیت تلسکوپ برای حدود ۱" را محدود می‌کند، بنابراین، علائم سطحی و جو فقط اجرامی که دارای اندازه زاویه‌ای بیشتری هستند، می‌توانند به طور کامل مطالعه شوند. قطر زاویه‌ای بیشینه عطارد از زمین تنها ۱۲" و برای اورانوس در حدود ۴" است، در یک چنین حالاتی دید اپتیکی لبه‌ای بهترین است.

فن آوری و متدهای جدید، مشخصه سیاره شناسی مدرن است. پنجره اپتیکی تا نزدیکی ماوراءبنفش (عکسبرداری) و تا نزدیکی مادون قرمز (آشکار سازهای حالت جامد) گسترش یافته است. اکنون تلسکوپهای رادیویی و رادار هم‌تای پنجره رادیویی شده‌اند. بالونهای با ارتفاع زیاد، راکتها، قمرهای مصنوعی و سفاین فضایی که به بالای جو زمین پرواز می‌کنند دیدگاه وسیعتر و واقعی تری از منظومه شمسی به ما می‌دهند. فضاپیماهایی که به ماه و سیارت فرستاده می‌شوند به طور مهبجی تصویر ما را از این اجرام توسعه می‌دهند. نکته اصلی در اینجا آن است که یک فضاپیمای کوتاه عمر قدرت تحلیل ما را به طور زیادی افزایش می‌دهند - در مورد پروازهای ویجر به مشتری و زحل با ضریب ۱۰<sup>۴</sup>.

## ۵-۲ عطارد

عطارد نزدیکترین سیاره به خورشید و نیز کوچکترین سیاره خاکی است. هر سال در حدود سه بار به عنوان ستاره درخشان شامگاهی در نزدیکی افق غروب خورشید و نیز به عنوان یک ستاره صبحگاهی ظاهر می‌شود. به خاطر سرعت کم آن نسبت به زمین از لحاظ افسانه‌ای، خدای روشنی نامیده شده است. در مواقعی، عطارد در درخشندگی شبیه زحل می‌شود، اما معمولاً به واسطه درخشندگی همسایه‌اش، خورشید ناپدید می‌گردد.

### (الف) حرکتها

عطارد در یک مدار با ثابت خروج از مرکز ( $e = 0.2056$ ) و میل (۷ درجه نسبت به دایرة البروج) زیاد با نیم قطر اطول ۰/۳۸۷۱ AU و یک دوره تناوب مداری نجومی ۸۷/۹۶ روز به دور خورشید می‌گردد. بزرگترین زاویه کشیدگی این سیاره که از زمین

مشاهده شده است در بازه‌ای از  $18^\circ$  (قرین خورشیدی) تا  $28^\circ$  (بعید خورشیدی)، با متوسط  $23^\circ$ ، قرار دارد.

تصور می‌شد که دوره تناوب چرخشی نجومی عطارد یا (مانند زمین) ۲۴ ساعت یا به طور همزمان ۸۸ روز باشد. اما، در اوایل سال ۱۹۶۰ میلادی برای اولین بار تپشهای راداری منعکس شده از سطح عطارد دریافت شدند و در سال ۱۹۶۵ میلادی جی. اچ. پتنگیل<sup>۱</sup> و آر. ب. دایس<sup>۲</sup> مستقیماً با استفاده از فن‌های راداری دوپلری نشان داده‌اند که دوره تناوب چرخشی در حدود ۵۹ روز است. در یک تحلیل مجدد که از داده‌های قدیمی و داده‌های جدید قابل مشاهده در رصدخانه پیک - دو - میدی<sup>۳</sup> در فرانسه بدست آمد، دوره تناوب رادار را معلوم کرد و در یک اندازه‌گیری، دوره تناوب  $0.1 \pm 58/65$  روزی با استوای سیاره که ضرورتاً با صفحه مدار آن موازی است، نتیجه شد. عطارد در یک تشدید چرخش - مدار با خورشید است [بخش (۲-۱ الف)]، شکل (۲-۵)؛ دوره تناوب چرخشی نجومی آن  $58/64$  شبانه‌روز است که دو سوم دوره تناوب مداری نجومی آن می‌باشد. دوره‌های تناوب قبلی آن احتمالاً اشتباه بوده‌اند، چون اشکال سطحی در عطارد معمولاً تنها در بزرگترین زاویه کشیدگی می‌توانند مشاهده شوند که در دوره تناوب مداری هلالی  $115/88$  شبانه‌روزی اتفاق می‌افتد - ضرورتاً دو برابر دوره تناوب چرخشی نجومی.

ستاره‌شناسی راداری به ما امکان می‌دهد تا فاصله، اندازه، چرخش و شکل‌های سطحی با مقیاس بزرگ یک سیاره را با تحلیل تپشهای راداری (با طول موجهای  $\approx 1$  تا ۱۰ سانتی متر) منعکس شده از سطح سیاره بفهمیم. در حالی که اشکال سطحی قمری همانند حفره‌ها و کوهستانها به سادگی قابل تفکیک‌اند، یک تپ راداری فرستاده شده به یک سطح سیاره خاکی معمولاً زاویه‌اش از خود سیاره پهن‌تر است. بنابراین، باید تپ برگشتی را به مؤلفه‌های تأخیر زمانی و انتقال دوپلری تجزیه کنیم (شکل (۵-۱)). کوتاهترین تأخیر زمانی در نقطه تحت زمین در روی سیاره اتفاق می‌افتد که فاصله سیاره

1. G. H. Pettengill

2. R. B. Dyce.

3. Pic - du - Midi.

از زمین را بدست می دهد. تأخیرهای زمانی طولانی تر متوالیاً از حلقه های هم مرکز حول نقطه تحت زمین در فاصله های ثابت سرچشمه می گیرند که طولانی ترین تأخیر در لبه سیاره و در نتیجه شعاع آن تعریف می شود. همان طور که سیاره می چرد بسامد امواج منعکس شده رادار انتقال دوپلری پیدا می کنند (فصل ۸)، به طوری که بسامدهای بالاتر از بسامد بازگشتی اصلی از لبه نزدیک شونده و بسامدهای پایین تر از لبه دور شونده، سرعت چرخشی سیاره را آشکار می کنند. انتقالها در لبه ها بیشینه و در نقطه تحت زمین صفر است. نقشه برداری راداری سطح سیاره ای تنها توسط عدم قطعیت ها در شدت علامت، تأخیر زمان و انتقال بسامد محدود می شود؛ به علاوه، یک ابهام دو گانه مکانی نیز وجود دارد (شکل (۵-۱))، اما، این را می توان، همان طور که جهت سیاره - زمین تغییر می کند بر طرف کرد.

رابطه بین انتقال دوپلری و دوره تناوب چرخشی را می توانیم به صورت زیر بینیم. انتقال در طول موج، اختلاف بین موجی که بیرون فرستاده می شود و آن که دریافت می گردد

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

می باشد که در آن  $\lambda_0$  طول موج منتشر شده،  $v$  سرعت شعاعی و  $c$  تندی نور است. برای یک سیاره کروی آهنگ چرخش خطی بیشینه در استوا اتفاق می افتد:

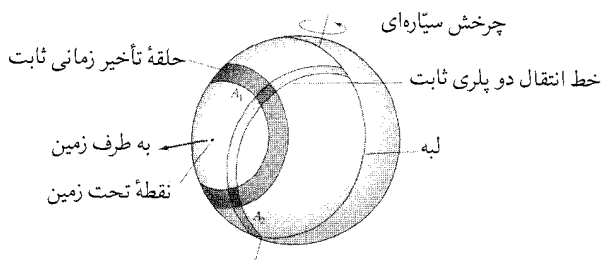
$$v_{\text{استوا}} = 2\pi R / P$$

چون هر لبه در انتقال مشارکت دارد،

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = 2v_{\text{استوا}} / c$$

$$= \frac{4\pi R}{Pc}$$

که از آن با داشتن شعاع سیاره و انتقال اندازه گیری شده، آهنگ چرخش سیاره را محاسبه می کنیم.



شکل ۵-۱. نقشه برداری راداری. یک تپ راداری منعکس شونده از نیمکره سیاره‌ای مقابل به زمین را در نظر بگیرید. تأخیرهای زمانی متفاوت، تشکیل یک رشته از حلقه‌های هم مرکز را می‌دهند. آنها خطوط انتقال دوپلری ثابت را در دو نقطه ( $A_1$  و  $A_2$ ) قطع می‌کنند، به طوری که یک شکل در  $A_1$  یا  $A_2$  دارای ابهامی در موقعیت است.

شبانه‌روز خورشیدی در عطارد چقدر طول می‌کشد؟ با یک رابطه خیلی شبیه به ارتباط بین دوره تناوب مداری قمری و نجومی سیارات، رابطه بین شبانه‌روز خورشیدی و نجومی را می‌توان به دست آورد. فرض کنید که روی عطارد بودید و خورشید نیز در بالای سر شما قرار داشت (شکل (۵-۲)). فرض کنید  $T$  دوره تناوب گردش عطارد به دور خورشید (۸۸ روز)،  $P$  دوره تناوب چرخشی نجومی ( $58/7$  شبانه‌روز) و  $S$  دوره تناوب چرخشی هلالی (شبانه‌روز خورشیدی) باشد. بعد از یک شبانه‌روز زمینی، عطارد نسبت به ستاره‌ها  $360^\circ/P$  (زاویه  $A$ ) و نسبت به خورشید صرفاً  $360^\circ/S$  (زاویه  $B$ ) می‌چرخد. اختلاف بین این دو زاویه (زاویه  $C$ ) برابر است با فاصله زاویه‌ای  $360^\circ/T$  (زاویه  $D$ ) که عطارد در مدارش حرکت کرده است. بنابراین

$$\frac{360^\circ}{P} - \frac{360^\circ}{S} = \frac{360^\circ}{T}$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} = \frac{1}{T}$$

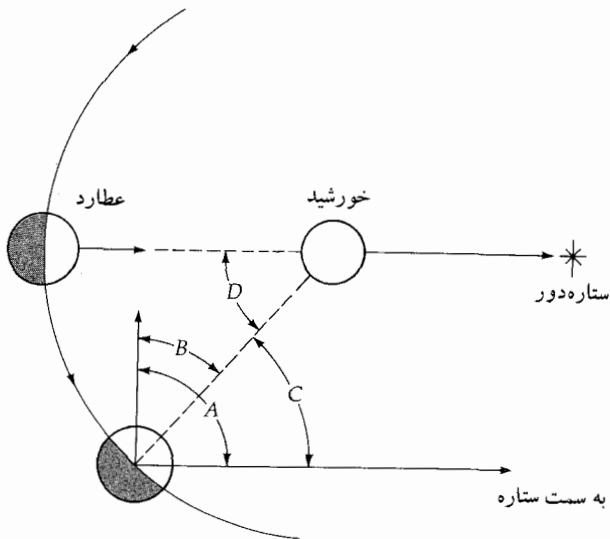
با عددگذاری خواهیم داشت

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{58/7} - \frac{1}{88} = 0/00567$$

S = ۱۷۶

شبانه روز

شبانه روز خورشیدی عطارد درست دو برابر طول سال آن است.



شکل ۵-۲. هندسه برای شبانه روز خورشیدی در عطارد

### (ب) مشخصه های فیزیکی

شعاع عطارد ۲۴۴۰ کیلومتر است. جرم آن  $0.055 M_{\oplus}$  ( $3/3 \times 10^{23} \text{ kg}$ ) می باشد که از اختلالات گرانشی بر روی فضاپیما محاسبه شده است (عطارد هیچ قمر طبیعی ندارد). چگالی متوسط آن  $5420 \text{ kg/m}^3$  می باشد که نظیر یک سیاره خاکی است، اما برای اندازه عطارد زیاد است. چون گرانی کلی عطارد کمتر از زمین است (فشردگی آن کمتر است)، اما چگالی حجمی آن در حدود چگالی حجمی زمین می باشد، لذا باید در برگیرنده مقدار بیشتری از فلزات باشد. حدس میزنیم که در داخل عطارد یک گوشته صخره ای و یک هسته بزرگ فلزی (شاید نیکل و آهن) وجود داشته باشد (شکل (۵-۳)).

آلبدوی سطحی آن خیلی کم است (۰/۰۵۶) در طول موجهای قابل مشاهده) که بر



عناصر صخره‌ای حتی تاریکتر از سطح ماه دلالت می‌کند. دمای سطحی از حدود  $700^{\circ}\text{K}$  در نقطه قرین خورشیدی تحت خورشیدی تا حدود  $100^{\circ}\text{K}$  در طرف تاریک تغییر می‌کند. روز خورشیدی گرم و طولانی و سرعت فرار کم ( $4/2\text{ km/sec}$ ) وجود جو در عطارد را غیر ممکن می‌سازد. مولکولهای گاز حتی آنهایی که سنگین‌تر هستند به آسانی به سرعت فرار خواهند رسید و بنابراین، نمی‌توان انتظار داشت که هیچ جوی در آن دوام بیاورد. سفینه فضایی مارینر ۱۰ یک طیف سنج ماوراءبنفش را برای جستجوی جو حمل می‌کرد. این وسیله یک جو رفیق از هلیوم و هیدروژن را آشکار کرد، اما فشار سطحی جو خیلی کم بود، اندکی کمتر از  $10^{-10}$  جو. اکنون محاسبات فرار جوی به‌دین صورت است. برای هلیوم در ظهر،

$$\begin{aligned} V_{\text{rms}} &= \left( 3kT / m \right)^{1/2} \\ &= \left[ 3 \frac{(1/4 \times 10^{23}) (700)}{(4) (1/7 \times 10^{-27})} \right]^{1/2} \\ &= 2/1 \text{ km/sec} \end{aligned}$$

به طوری که،

$$\frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{esc}}} = \frac{2/1}{4/2} = 0/5$$

و طول عمر چند ساعت است.

نداشتن جو قابل ملاحظه به معنی نداشتن پوشش فضایی است. این دال بر این است که در عطارد گستره دما از ظهر تا نصف شب بسیار شدید است. اکنون آنها را با ماه مقایسه می‌کنیم. شب در ماه و عطارد ضرورتاً یکسان است: هیچ پوششی آن را در بر نگرفته و بنابراین از طرف تاریک آن تابش مادون قرمز در خلال شب طولانی مستقیماً به فضا فرار می‌کند. لذا، هر دو جسم تقریباً در نیمه شب دارای یک دما می‌باشند: حدود  $100^{\circ}\text{K}$ . در ظهر دمای سطحی به آلبدوی سطحی و فاصله از خورشید بستگی پیدا می‌کند. ماه و عطارد یک آلبدو دارند، اما عطارد  $2/5$  مرتبه نسبت به ماه به خورشید نزدیکتر است. بنابراین، در ظهر خیلی گرمتر می‌باشد، زیرا شار خورشیدی  $6/25$  برابر بزرگتر است. اصلاً چرا عطارد با چنین گرمی روز و سرعت فرار پائین باید دارای جو باشد؟ یک جواب باد خورشیدی است. ریزش مواد از باد خورشیدی که شامل  $10\%$  هلیوم است قادرند اتلاف را دوباره جبران کنند. حداقل برای هلیوم، منبع ممکن دیگر

تلاشی رادیواکتیو عناصر داخلی عطارد است.

### (ج) اشکال سطحی

دوربین‌های تلویزیونی مارنیر ۱۰ پنجاه درصد سطح عطارد را به طور اجمال بررسی کرد و تفکیک ما از جزئیات آن را پنج هزار برابر افزایش داد. عکسها، سطحی مانند سطح ماه خودمان را آشکار کردند. چند تفاوت عمده وجود دارد که عبارتند از حفره‌های کمتری با اندازه متوسط، نبودن رشته کوهها، تعدادی صخره‌های به شکل گوش ماهی کم عمق که پرتگاه<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند، آبگیرهای کمتر و جریانهای بزرگ گدازه آتش‌فشانی و نسبتاً دشت‌های فاقد حفره بیشتر در میان نواحی با حفره‌های زیاد. این تفاوتها مهم هستند ولی هنوز سطح عطارد از دور به وضوح شبیه سطح ماه می‌باشد. سرزمینهای بلند عطارد با حفره‌ها سوراخ شده‌اند، مانند نواحی بلند و بی حفاظ ماه (شکل ۴-۵)). پرتوهای نور رنگی از بعضی از دهانه‌ها بیرون می‌جهد و آشکار است که اینها با فشرده‌گیهای شدید در طول دوران گذشته طوفانی عطارد تشکیل شده‌اند. بعضی از حفره‌ها قطرشان بیش از ۲۰۰ کیلومتر که در حدود بزرگترین حفره‌های ماه است. مارنیر ۱۰ در قسمت شمالی غربی سیاره یک حوزه دریایی را پیدا کرد - حوضچه کالوریس<sup>۲</sup> («داغ»)- (شکل ۵-۵)). قطر آن احتمالاً ۱۳۰۰ کیلومتر است. حوزه توسط حلقه‌هایی که از کوهستانهای با ۲ کیلومتر ارتفاع محدود شده است. حوضچه کالوریس از نظر اندازه و ساختمان قویاً شبیه حوزه‌های خاوری ماه است.

همه این شباهتها به این معنی نیست که ماه و عطارد عیناً یکسان هستند. سطح آنها حداقل از سه جهت با یکدیگر اختلاف دارد: (۱) سطح عطارد پرتگاههایی دارد که صدها کیلومتر طول دارند. (۲) حتی نواحی پر حفره عطارد کاملاً با حفره‌ها پوشانده نشده‌اند بلکه با دشتهای داخل حفره‌ها متفرق گردیده‌اند و (۳) عطارد دارای حفره‌های کوچک کمتری از آنچه که انتظار می‌رفت، در صورتی که حفره‌های با همان آهنگی که روی ماه شکل گرفته‌اند به وجود آمده باشند، می‌باشد. از این دو اختلاف آخر می‌توان حدس زد، مواد حاصل از آتش‌فشان دارای گستره متفاوتی از ابعاد برای عطارد نسبت به

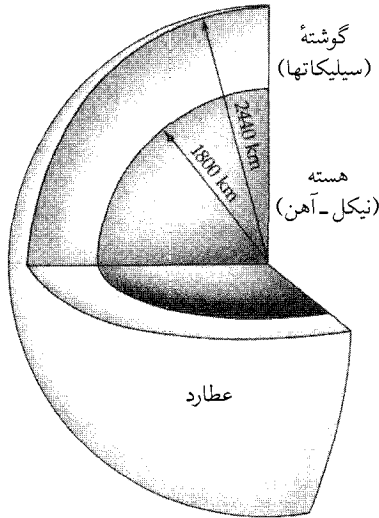
ماه بوده‌اند یا بعضی از فرآیندها بعد از آتش‌فشان سطح را تغییر داده‌اند.

طول پرتگاههای عطارد (شکل (۵-۶)) از ۲۰ تا ۵۰۰ کیلومتر و ارتفاعات آنها از چند صد متر تا ۲ کیلومتر تغییر می‌کنند. پرتگاههای منفرد اغلب انواع مختلفی از عوارض سطح را قطع می‌کنند. اگر نواحی عکسبرداری شده توسط مارینر ۱۰ معرف سطح کلی عطارد باشد، ماهیت پرتگاهها به این معنی است که شعاع عطارد یا به خاطر سرد شدن پوسته، هسته یا هر دو، یک تا سه کیلومتر کوچک شده است و به موجب آن گسله‌هایی با فشار شکل گرفته‌اند و پرتگاهها را ایجاد کرده‌اند.

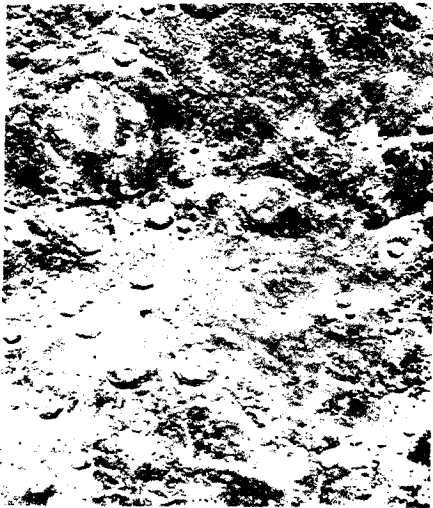
#### (د) میدان مغناطیسی

مارینر ۱۰ یک میدان مغناطیسی ضعیف سیاره‌ای را با شدتی در حدود  $220 \text{ nT}$  آشکار کرد. اگر چه این مقدار کوچک است ولی برای قطع مغناطیس سپهر<sup>۱</sup> در بادهای خورشیدی کافی است. در اینجا میدان مغناطیسی ذرات باردار (اکثراً پرتون‌ها) را از باد خورشیدی اطراف سیاره منحرف می‌کند.

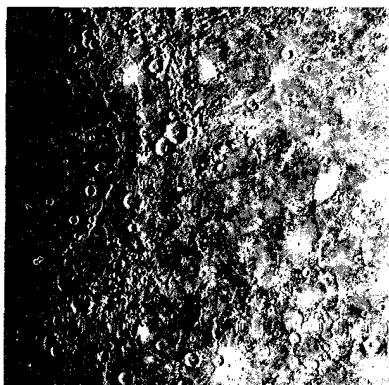
به نظر می‌رسد که میدان عطارد یک دو قطبی باشد که کم و بیش با محور چرخش سیاره در یک امتداد قرار گرفته است. در این صورت به طور کلی میدان مغناطیسی عطارد شبیه میدان مغناطیسی زمین ولی ضعیفتر از آن است. حضور یک میدان مغناطیسی و همچنین چگالی زیاد سیاره دلالت بر آن دارد که عطارد مانند زمین دارای یک هسته فلزی است که عمدتاً از آهن و نیکل تشکیل شده است. فرض می‌شود که اکنون این هسته نسبتاً سرد و جامد باشد، زیرا یک سیاره کوچک سریعاً گرما را از دست می‌دهد. یادآوری می‌کنیم که میدان مغناطیسی زمین فرضاً از یک دیناموی داخلی نتیجه می‌شود که حرکات چرخشی اش را توسط حرکت دورانی زمین بدست آورده است. چون عطارد خیل آهسته‌تر از زمین می‌چرخد یک میدان مغناطیسی برای پهنه سیاره واقعاً قابل انتظار نبوده و منشاء آن روشن نیست. شاید هسته عطارد هنوز به طور جزئی مذاب باشد.



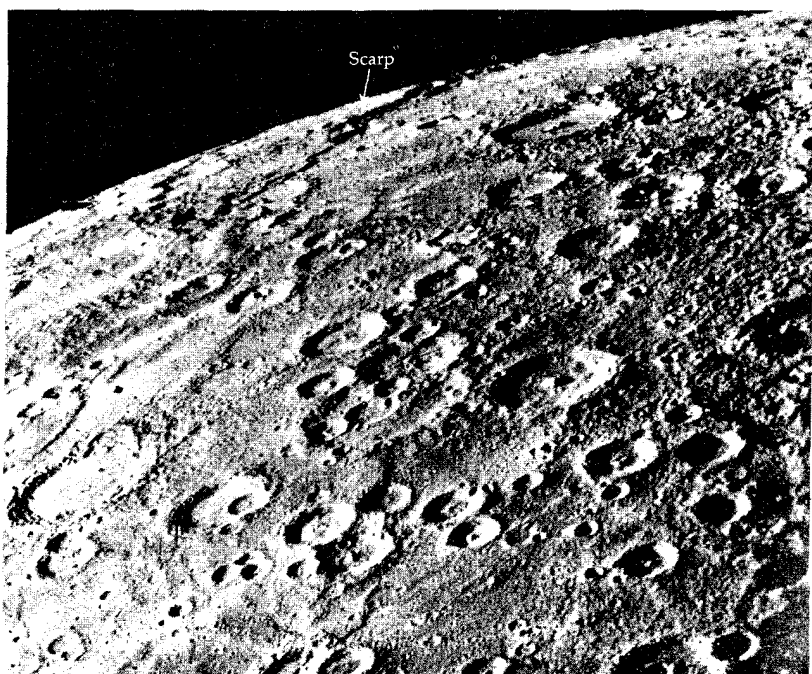
شکل ۳-۵. الگوی داخلی عطارد. به کسر بزرگی از داخل که توسط هسته فلزی در برگرفته شده است، توجه کنید.



شکل ۴-۵. سرزمینهای بلند حفره دار عطارد. به حفره روشن تابان (سمت چپ پایین) و به حفره حلقه‌ای دوتایی در بالای آن توجه کنید. محیط حلقه بیرونی حدود ۱۷۰ کیلومتر می‌باشد. (ناسا)



شکل ۵-۵. حوضچه کالوریس. نصف این قطر ۱۳۰۰ کیلومتری حوضچه حلقوی در خط پایانی، یعنی خط بین شب و روز در طرف چپ، قابل مشاهده است. مرزهای چین خورده و زمین‌های کم ارتفاع سیل گرفته در طرف چپ قابل رؤیت‌اند. (ناسا)



شکل ۵-۶. یک پرتگاه در عطارد. این لبه (پیکان) تا چند صد کیلومتر امتداد می‌یابد. (ناسا)

## (ه) تحول سطح

چون ماه و عطارد هر دو فاقد جوهای قابل توجهی هستند، آب و هوا سطوحشان را فرسوده نمی‌کند. هر دو جهانهای کوچکی با ناحیه داخلی سردتر از ناحیه داخلی زمین هستند. اکنون نه آتش‌فشانهای فعال زیادی دارند و نه دستخوش تحول سطحی دائمی می‌شوند که زمین از انتقال یافتن صفحات پوسته‌ای تجربه کرده است.

فقدان جو و کوتاه بودن زمان تحول پوسته‌ای هر دو به جرمهای کوچک ماه و عطارد بر می‌گردند. گرانشهای سطحی آنها آنقدر کم است که اکثر گازها به سرعت فرار می‌رسند و جوشان برای مدت طولانی حفظ نمی‌شود. همچنین جرمهای کوچک دلالت بر این دارند که حرارت داخلیشان از تلاشی مواد رادیواکتیو نسبت به مقدار مشابه برای زمین کمتر است و جریان گرمایشان به طرف بیرون چنان سریع می‌باشد که هر دو جسم به سرعت سرد خواهند شد. داخل زمین داغ است و شارش گرمایی به طرف بیرون آن جریان‌هایی در گوشته پلاستیکی ایجاد می‌کند و اینها تحول پوسته زمین را نیرو می‌بخشند. ماه و عطارد هر دو فاقد این ترکیب درونی داغ و گوشته پلاستیکی هستند.

با استفاده از شباهتهای قمری می‌توانیم یک الگوی کار برای تحول عطارد با مراحل کلی‌ای که در زیر می‌آیند ترتیب بدهیم: (۱) گرم شدن سطح (به وسیله تراکم یا تلاشی رادیواکتیو) و شکل‌گیری پوسته جامد، (۲) آتش‌فشانی سنگین، (۳) شکل‌گیری حوضچه‌های به هم فشرده، (۴) پر کردن حوضچه‌ها با شارشهای گدازه‌ای آتش‌فشانی و (۵) آتش‌فشانی کم شدت.

یک مقایسه قمری پیشنهاد می‌کند که منقوش شدن سطح عطارد به ۴ بیلیون سال قبل یعنی، نه مدت طولانی بعد از آن که سیاره شکل گرفت، بر می‌گردد (مرحله ۱). اولین فاز آتش‌فشانی توسط آتش‌فشانی بعدی زدوده شده است (مرحله ۲). به این نتیجه می‌رسیم که به نظر می‌رسد صفحات داخل حفره‌ها هر شکاف به هم پیوسته قدیمی را پوشانده‌اند. در حدود همان زمان، پرتگاهها از جمع شدگی پوسته، داخل، یا هر دو گسترش یافتند.

شکل‌گیری حوضچه‌ها (مرحله ۳) بایستی در انتهای بمباردمان سنگین سطح اتفاق افتاده باشد. چندین قطعه بزرگ در سطح خرد شده و یکی از آنها حوضچه کالوریس را

درست کرده است. کمی بعد از آن شارش مواد مذاب آتش فشانی گسترده شده (مانند آنچه که قسمت دریا‌های ماه را درست کرده است) و دشتهای وسیع و صاف مانند دشتهای مجاور حوضچه کالوریس را ایجاد کرده است، (مرحله ۴). از آن به بعد به هم فشرده‌گیهای اندک، حفره‌های تابان تازه‌ای را به وجود آورده است، (مرحله ۵).

### ۳-۵ زهره

زهره دومین سیاره خاکی از طرف خورشید و نزدیکترین سیاره به زمین است. زهره به عنوان ستاره صبحگاهی و شامگاهی به بیشترین زاویه کشیدگی اش  $48^\circ$  می‌رسد. بیشینه درخشندگی آن تنها به وسیله خورشید و ماه افزایش می‌یابد. زهره الهه عشق نامیده می‌شود و شباهت زیادی در اندازه و جرم به زمین دارد، اما در سایر جهات به مقدار زیادی متفاوت است.

#### (الف) حرکتها

تقریباً چرخش دایره‌ای ( $e = 0.0068$ ) مدار زهره نسبت به دایرة البروج  $3/39^\circ$  شیب دارد و دارای نیم قطر اطول  $0.7233 \text{ AU}$  و دوره تناوب مداری نجومی  $224/70$  شبانه‌روزی باشد. در مدار زهره، عطارد و زمین سیاره‌های فوق‌العاده درخشانی هستند. مطالعات انتقال دوپلری راداری نشان می‌دهند که سیاره با یک دوره تناوب نجومی  $243/01$  شبانه‌روز با حرکت برگشتی می‌چرخد و شیب صفحه مدار نسبت به استوایش فقط  $3^\circ$  است (و طبق رسوم سنتی این شیب به صورت  $177^\circ +$  یا  $87^\circ -$  برای نشان دادن حرکت برگشتی آن نوشته شده است).

#### (ب) مشخصه‌های فیزیکی

فاصله زمین تا زهره را می‌توان مستقیماً توسط رادار اندازه گرفت؛ سپس شعاع فیزیکی آن از روی قطر زاویه‌ای اش بدست می‌آید.

زهره دارای شعاع  $6052 \text{ km}$  است که فقط ۵ درصد از شعاع زمین کوچکتر می‌باشد. زهره مانند عطارد هیچ قمر طبیعی شناخته شده‌ای ندارد و بنابراین تنها وقتی که یک فضاپیما از آن می‌گذرد یا آنرا دور می‌زند می‌توان بدقت جرم آنرا محاسبه کرد. اگر

فضاییما در مدار باشد بسادگی از قانون سوم کپلر استفاده می شود. در طول یک گذر آنی (از انتقال دوپلری علائم رادیویی) شتاب فضایما را اندازه گرفته و از قانون گرانش نیوتون استفاده می کنیم. جرم زهره  $10^{24} \times 4/86$  بر آورد می شود (۸۲ درصد جرم زمین). چگالی حجمی بدست آمده  $5200 \text{ kg/m}^3$  است که تقریباً همانند زمین می باشد. حدس می زنیم که داخل زهره مانند داخل زمین شکل (۵-۷): یک پوسته صخره ای (که خاک نشین<sup>۱</sup> های زهره تأیید کرده اند)، یک گوشته و یک هسته فلزی باشد. چون زهره چگالی کمتری از زمین دارد، تصور می کنیم که تا حدی هسته کوچکتری را دارا باشد.

وسایل فضایی بین سیاره ای پرتاب شده هم بوسیله آمریکا و هم بوسیله شوروی آشکار کردند که جو زهره شامل حدود ۹۶ درصد دی اکسید کربن، ۳ درصد ازت، و مقدار ناچیزی (۴/۱-۰/۱ درصد) بخار آب، اکسیژن، کلروئیدروژن، آرگون، فلورورئیدروژن، سولفورئیدروژن، دی اکسید سولفور، هلیوم و منواکسید کربن می باشد. خاک نشین های زهره ای روسها کشف کردند که فشار سطحی جو ۹۵ جو، و دمای سطحی به علت تابش خورشید در حدود  $740 \text{ k}$  می باشد.

این دمای زیاد شاید از بدام افتادنهای مؤثر حرارت سطحی نتیجه شده باشد، زیرا دی اکسید کربن تابش مادون قرمز را خوب جذب می کند (پدیده گلخانه ای). بادهای جوی در زهره از روز به طرف شب، و از استوا به طرف نواحی قطبی می وزد و شارش باد حرارت را حمل می کند. در طول اثر گلخانه ای خیلی مؤثر، این حمل و نقل جوی گرما، دمای سطحی را بر روی سطح زهره نسبتاً ثابت نگه می دارد و دماها  $10 \text{ k}$  یا کمتر تغییر می کنند.

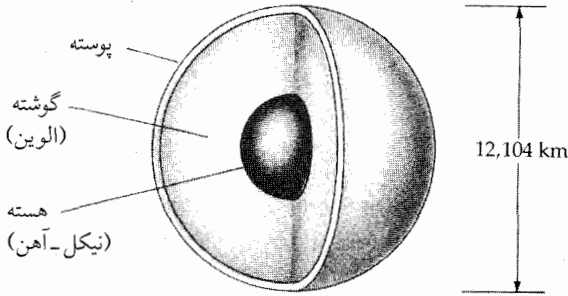
درخشندگی نوری زهره از آلدوی زیاد (۷۶/۰) از ابرها و جو ضخیمش نتیجه می شود. ساختار و حرکت ابرهایش در عکسبرداریهای ماوراء بنفش (شکل ۵-۸)) می توانند مشاهده شوند. وسایل فضایی پیشتاز<sup>۲</sup> زهره دریافتند که ابرها در دو لایه وسیع شناوراند (شکل ۵-۹)). لایه های بالایی ابر در ارتفاع تقریبی ۶۵ کیلومتری قرار داشته و ضخامتی در حدود ۵ کیلومتر را دارا می باشند. قطرات ریز مایع در ابرها قطری حدود



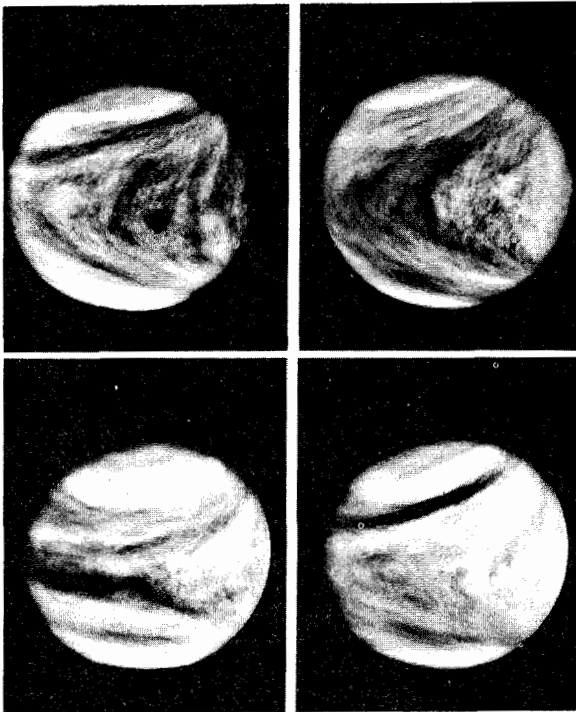
یک میکرون را در بر می گیرند. در زیر سطح بالایی شناور در هوا یک لایه نازک مه وجود دارد. در زیر آن، در ارتفاع ۵۰ km لایه ابر پایینی با غلظت زیاد، وجود دارد. در اینجا ذرات ابرها هم جامد و هم مایع اند و برخی از آنها  $10 \mu$  قطر دارند. در زیر ارتفاع ۵۰ کیلومتری، ابرها به تدریج رقیق تر می شوند؛ در زیر ۳۳ کیلومتری تا روی سطح، جو خالی از هر ذره ای می باشد. مدلهای ابرها همان طور که از عکس های وابسته به پرتو مادون قرمز مشاهده می شوند دلالت بر این دارند که شامل یک محلول ۹۰ درصدی اسید سولفوریک مخلوط با آب می باشند. اگر چه جو و ابرهای زهره حاوی مقداری بخار آب هستند، اما اگر همه آنها به طور یکنواخت روی سطح منقبض شوند تنها ۳۰ سانتی متر ضخامت خواهند داشت.

عکسبرداری با نور ماوراءبنفش به وسیله مارنیر ۱۰ آشکار کرد که قله این ابرها در مدلهایی شبیه به تند بادهای زمین به بالای جو جریان می یابند (شکل (۵-۸)). ابرهایی که مانند یک فرفره با سرعت تقریبی  $300 \frac{km}{h}$  می چرخند استوا را احاطه کرده اند. این سرعت برای دور زدن سیاره در چهار روز کافی است. همچنین به خاطر چرخش این سیاره پهن، بادهای بزرگی که ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر قطر دارند از استوا به طرف قطبها می وزند. آنها در دو ابر غول پیکر بادی نواحی قطبی را می پوشانند.

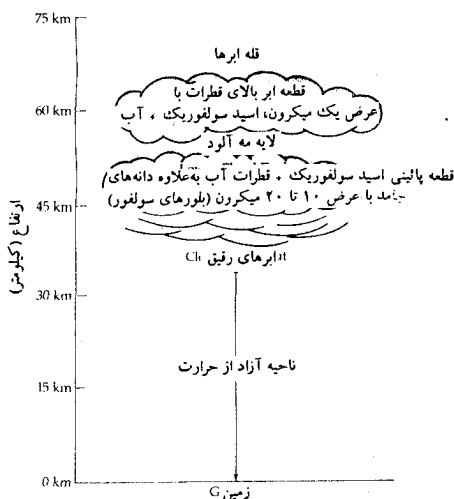
مدل چرخش جو زهره در مقیاس بزرگ بر حسب حفره های هادلی<sup>۱</sup> توضیح داده شده است. هوا از روی نواحی گرم - استوا - بر می خیزد و به قله های هوای سردتر در عرض های جغرافیایی بالاتر جریان می یابد. سپس، هوای سرد با هوای گرم بر خاسته از سطح عوض می شود. تزلزلهایی که به وسیله چرخش سریع ایجاد شده اند، در زمین چرخش های هادلی را به سه حفره در هر نیمکره می شکنند. در زهره یک مدل با حفره منفرد در جو پایینی تقریب معقولانه ای است. هوای گرم برخاسته را می توان بر اساس ارتباط مقیاس ارتفاع H با دما فهمید (بخش (۴-۵) ب)).



شکل ۵-۷. داخل زهره. این مدل بر اساس چگالی حجمی و بر مبنای این فرض است که درون آن شبیه داخل زمین می‌باشد.



شکل ۵-۸. اشکال جو زهره. شکل "Y" که ترکیبی از ابرهای چرخان می‌باشد در این چهار شکل تغییر کرده است و با فاصله یک شبانه‌روز از هم گرفته شده‌اند. به کلاهک ابرها در هر قطب توجه کنید. (ناسا)



شکل ۵-۹. ساختار ابرهای زهره که در دو لایه مرتفع واقع شده‌اند یک لایه مه بین آنها را پر کرده است. در زیر ابرها جو صاف می‌باشد.

### (ج) اشکال سطحی

سطح زهره را با ارسال خاک نشین‌هایی برای عکسبرداری یا انتشار علامتهای راداری برای نقشه برداری از عوارض سطح آن، مورد بررسی قرار می‌دهیم. این کار اخیر فلات بلند، آتش‌فشانهای گول پیکر، حفره‌های بهم فشرده و شکافهای طولانی دره‌ها را آشکار کرده است. سرتاسر زهره کاملاً مسطح به نظر می‌رسد. اختلاف ارتفاعات سطحی کوچکنند و به استثناء تعداد کمی نواحی مرتفع، تنها ۲ تا ۳ کیلومتر ارتفاع دارند. در اینجا در سطح زهره اختلاف سطح بلند و پست تا ۱۲ کیلومتر است در حالی که این اختلاف برای ماه و عطارد ۴ کیلومتر و برای مریخ ۲۵ کیلومتر و برای زمین ۹ تا ۲۰ کیلومتر (قله اورست ۸/۸۵ کیلومتر ارتفاع و گودال ماریانا ۱۱/۰۳ کیلومتر عمق دارد) است.

سیمای نقشه برداری شده زهره در دو نیمه جنوبی و شمالی به طور قابل توجهی با یکدیگر اختلاف دارند. ناحیه شمال کوهستانی با فلاتهای مرتفع بدون آتش‌فشان است، در مقابل، قسمت جنوبی شامل سطح نسبتاً تخت آتش‌فشانی زمینی می‌باشد. فلات

بزرگ شمالی (۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلومتر) اشتار ترا<sup>۱</sup> نامیده می شود که از بزرگترین فلات بالا آمده در زمین (فلات هیمالایا) بزرگتر است. سه رشته کوه در حاشیه غربی، شمالی و شرقی اشتار وجود دارند. رشته شرقی کوههای ماکسول<sup>۲</sup> نامیده می شود (شکل (۵-۱۰)) که شامل بلندترین ارتفاعات دیده شده تا امروز در زهره است: ۱۲ km. رادار، یک ناحیه صاف را بطوری که از یک شارش گدازه ای و مخروطی آتش فشانی نزدیک مرکز ماکسول انتظار می رود، نشان می دهد. رشته کوه شمالی سه کیلومتر بالاتر از اشتار قرار گرفته است. رشته غربی تنها ۲ کیلومتر از فلات بالا آمده است. این سه رشته کوه ممکن است چین خورده بوده و از صفحات متحرک پوسته زهره برخاسته باشند و نیز ممکن است شبیه به کوهستانهای ساخته شده از صفحات زمین ساختی زمین باشند.

نیمه جنوبی سطح زهره شامل دشتهای پست، لوله شده که (شکل (۵-۱۱)) توسط هم حفره های بزرگ (تا ۸۰۰ km قطر) و هم حفره های کوچکتر (کمتر از یک کیلومتر عرض از هم جدا شده می باشد. حفره های کوچکتر از این در زهره تشکیل نمی شوند، زیرا جو غلیظ آن، هر شیء را قبل از این که آنها به سطح برسند کاملاً می سوزاند. حفره های زهره شبیه حفره های ماه، عطارد و مریخ هستند و لذا به احتمال زیاد منشاء برخوردی دارند. ونرای<sup>۳</sup> ۸ در وسط ناحیه جنوبی سیاره فرود آمد. ابزار و تجهیزات آن آشکار کردند که صخره های زهره بیشتر سنگ خارایی است تا سنگ چخماقی - حداقل یک نتیجه به ما می دهد که قسمتی از سطح اینجا قدیمی است. شارشهای گدازه ای بعدی توانسته است صخره های سنگ چخماقی را بیرون بریزد. گرچه آتش فشانها در اینجا دلالت می کنند که سطح باید قدیمی باشد؛ از طرف دیگر، آتش فشانها و ساختار کوهستانی حفره های آتش فشانی را از بین برده اند.

به نظر می رسد که بتا رجیو<sup>۴</sup> حداقل از دو آتش فشان مجزا تشکیل شده است، و همچنین به نظر می آید که از یک آتش فشان پیچیده عظیم الجثه در یک ناحیه شکستگی بزرگ شمال جنوب (شکل (۵-۱۲)) تشکیل شده است. در اینجا آتش فشانها شبیه

1. Ishtar Terra.

2. Maxwell.

3. Venera 8.

4. Beta Regio.

ملایمی دارند. این آتش‌فشانها، آتش‌فشانهای سپر نامیده می‌شوند. (مایونالوا<sup>۱</sup> و مایوناکیا<sup>۲</sup> در هاوایی<sup>۳</sup> آتش‌فشانهای سپری هستند که نسبتاً مسطح‌اند. اغلب آتش‌فشانهای سپری دارای یک دهانه مرکزی فرورفته - یک کالدر<sup>۴</sup> - در قلّه‌هایشان می‌باشند.) یک آتش‌فشان در بتا رجیو دارای ۸۲۰ کیلومتر قطر، ۵ کیلومتر ارتفاع و ۶۰ تا ۹۰ کیلومتر قطر دهانه در قله‌اش می‌باشد. در مقابل، جزیره هاوایی (یک جزیره آتش‌فشانی) با عرض ۲۰۰ کیلومتر ارتفاعی برابر ۹ کیلومتر دارد. (اولیمپوس مونس<sup>۵</sup> بزرگترین آتش‌فشان در مریخ ۵۵۰ کیلومتر قطر و ۲۰ کیلومتر ارتفاع دارد.)

لازم به تذکر است که در حال حاضر ممکن است برخی از آتش‌فشانهای زهره فعال باشند. مع‌ذالک، این شواهد خیلی روشن نیست. اولاً سطوح دی‌اکسید سولفور (SO<sub>2</sub>) که با طیف سنج ماوراءبنفش پایونیر زهره آشکار شدند یک شیب ثابت با انفجارهای اتفاقی به مقادیر بیشتر نشان داده‌اند. از آتش‌فشانهای خاکی، دی‌اکسید سولفور (و علاوه بر آن، کلرور تی‌دیروژن و فلورور تی‌دیروژن که به مقدار کمتری در ترکیب جو زهره شرکت دارند) به بیرون فوران می‌کند. توضیحی بر این نتایج، تزریق چند مرتبه‌ای دی‌اکسید سولفور به وسیله فورانهای چند مرتبه‌ای آتش‌فشانی است. همچنین غبار بالای ابرها ممکن است توسط تزریق آتش‌فشانی در سطوح معادل با بزرگترین فورانهای در سطح زمین (برای مثال کراکاتوا<sup>۶</sup> در ۱۹۸۳ میلادی) تأمین شده باشد. ثانیاً پایونیر زهره نیز بسامدهای رادیویی پایین منتشر شده از انفجارها را ثبت کرده است که به نظر می‌رسد به وسیله آذرخش‌های درخشان گسیل شده‌اند. در زمین، اغلب برق تخلیه بارها از میان تل آتش‌فشانهای در حال فوران می‌جهند. انفجارهای زهره شامل بتا رجیو که عقیده بر این است آتش‌فشانی باشند، بر روی سه ناحیه دسته بندی شده‌اند.

اگر اندازه و جرم یک سیاره معلوم باشند، زمین شناسان قادرند که رابطه ارتفاع کوه آتش‌فشان با ضخامت پوسته زیر آن را تعیین کنند. اساساً، یک کوه آتش‌فشان بزرگ به

1. Mauna Loa.

2. Mauna Kea.

3. Hawaii.

4. Caldra.

5. Olympus Mons.

6. Krakatoa.

پوسته ضخیم‌تری برای نگه‌داری خود نیاز دارد. در زمین کوه آتشفشان مایونالوا در هاوایی ۹ کیلومتر ارتفاع و یک پوستهٔ زیری به ضخامت ۵۷ کیلومتر دارد. چون زمین و زهره در جرم و اندازه خیلی شبیه‌اند، کوه آتشفشان ۱۰ کیلومتری در زهره باید یک پوستهٔ زیرینی به ضخامت ۶۰ تا ۶۵ کیلومتر داشته باشد.

در طرفی از زهره که رو به زمین است، یک درهٔ گود به طول بیش از ۱۳۰۰ کیلومتر امتداد یافته است که در حدود ۱۵۰ کیلومتر عرض و ۲ کیلومتر عمق دارد. در طرف دیگر زهره، حتی دره‌ای بزرگتر چشم انداز سطح را می‌شکافد: ۵ کیلومتر عمق، ۳۲۰ کیلومتر پهنا و حداقل ۱۴۰۰ کیلومتر طول دارد. این دره‌های گود به نظر می‌رسد شکاف دره‌هایی باشند که بیشتر به علت جابجائی مناطق تفکیک شده‌اند تا به علت فرسایش آب دره‌های گود در زمین در محللهایی ظاهر می‌شوند که پوسته به طور وسیعی پخش شده است.

به طور کلی سطح زهره بسیار هموارتر از سطح زمین است: تنها ۱۸ درصد سطح نقشه برداری شده بالای ۷ کیلومتر و ۱۹ درصد بالای ۱۰ کیلومتر می‌باشند و در مقابل در حدود ۳۰ درصد سطح زمین به بالای ۱۰ کیلومتر میرسد. به نظر نمی‌رسد که زهره حوضچه‌هایی از نوع قمری، زمینهای پستی که به وسیلهٔ شارش گدازه‌ها پر شده‌اند، داشته باشد. به طوری که حضور حفره‌ها نشان داده است، زمینهای پست زهره بایستی قدیمی‌تر از بقیه پوسته باشند. زمینهای بلند بیشتر تحول یافته‌اند و این دقیقاً مخالف چیزی است که در زمین می‌یابیم، به طوری که زمینهای پست (حوضچه‌های اقیانوسی) جوانترین قسمت پوسته را تشکیل می‌دهند.

اتحاد جماهیر شوروی سابق ۴ سفینهٔ فضایی (ونرای ۱ - ۹، ۱۰، ۱۳ و ۱۴) را به سطح سیاره فرستاده است. تصاویر ونرای ۹ و ۱۰ صخره‌های سنگی با ۶۰ سانتی‌متر طول و ۲۰ سانتی‌متر عرض را نشان می‌دهند. چندین صخره حفره‌دار هستند که بر یک منشاء آتشفشانی دلالت می‌کنند. بعضی از صخره‌ها با لبه‌های دندانمانند بر فرسایش کم دلالت دارند و بقیه با لبه‌های ضخیم و گرد شده، نشان داده شده‌اند که دال بر

فرسایش زیاد هستند. صخره‌ها بر روی خاک دانه‌ای زبر و شل قرار دارند. اندازه‌گیریهای خاک‌نشین از پرتوهای گامای تلاشی شده توسط پتاسیم، اورانیوم و توریم رادیواکتیو موجود در صخره‌ها دلالت بر این دارد که در یک محل خاک‌نشین، بازالتی<sup>۱</sup> اند، مانند سنگهایی که حوضچه اقیانوسهای زمین را بهم پیوسته‌اند، اما در جای دیگر مانند کوهستانهای زمین، گرانیتی<sup>۲</sup> هستند. هر دو صخره آذرینی هستند که از گدازه آتش‌فشانی تشکیل شده‌اند.

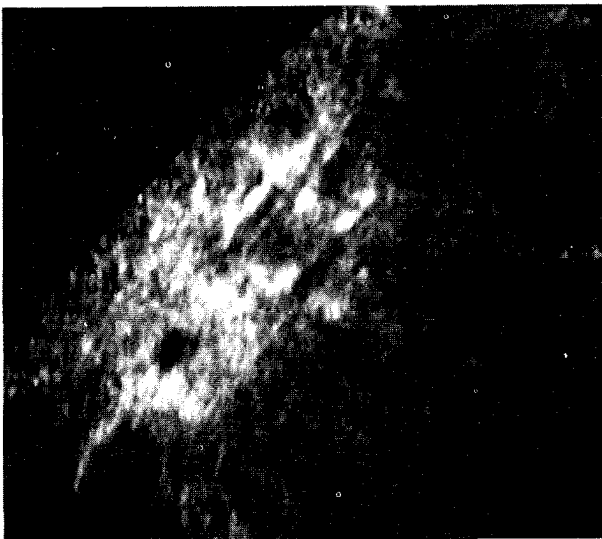
عکس‌هایی از ونرای ۱۳ و ۱۴ مناظر کاملاً مختلفی را نشان می‌دهند (شکل ۵-۱۳)). عکس‌هایی که توسط ونرای ۱۳ گرفته شده‌اند یک دشت صخره‌ای خوشه‌مانند را نشان می‌دهند که مانند صخره‌های اطراف قاره‌های زمین بازالتی هستند. در مقابل، تصاویر ونرای ۱۴ حتی لایه‌های صفحات صخره‌ای شکسته شده را نشان می‌دهند که مانند بازالت کف اقیانوسها نزدیک لبه‌های میان اقیانوسی، اساساً آتش‌فشانی هستند. بنابراین، به نظر می‌رسد در هر دو جا (با جدایی ۹۰۰ کیلومتر) صخره‌ها نسبتاً جوان باشند.



شکل ۵-۱۰. نقشه رادار از کوههای ماکسول. این کوهستانهای بلند به نظر می‌رسد که آتش‌فشان باشند. به دماغه‌اش در قله و نامنظمی سطح در کناره‌ها دقت کنید. (رصدخانه آرسیبو)

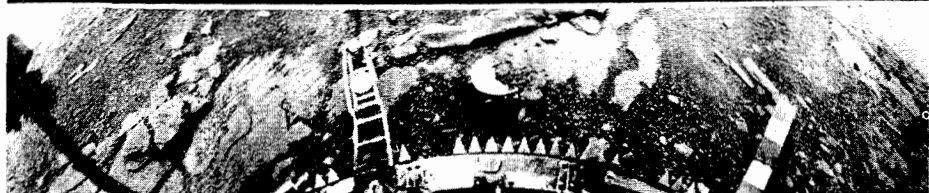


شکل ۵-۱۱. سطح زهره. این نقشه راداری یک قسمت از نیمکره جنوبی را نشان می‌دهد. به حفره‌های طرف راست در بالا و ساختار موجی در بالا و در طرف چپ توجه کنید. (رصد خانه آرسیبو)



شکل ۵-۱۲. بتارجیو. این نقشه راداری تفکیکی از مسافت ۱۰ کیلومتر دارد و دو آتش‌فشان سپری بزرگ را با شارشهای تابشی در قسمت بالا و در سمت راست نشان می‌دهد. (رصد خانه آرسیبو)





ВЕНЕРА-14 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР И ЦДКС



ВЕНЕРА-14 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР И ЦДКС

شکل ۵-۱۳. سطح برجسته زهره. دو تصویر بالایی بوسیله خاک نشین و برای ۱۳ برداشته شده است. به تخته سنگها، قطعه زمینهای با خاک تیره و سنگ ریزه‌های نزدیک لبه خاک نشین توجه کنید. منظره توسط یک عدسی با زاویه پهن از حالت طبیعی خارج شده است. دو تصویر پایینی بوسیله و برای ۱۴ برداشته شده‌اند. در اینجا پهنه پوشیده از صخره مسطح بوسیله خاک یا سنگ ریزه شکسته نشده است.

#### (د) میدان مغناطیسی

یک هسته آهن-نیکل با قسمتی مایع در مقایسه با زمین دلالت بر این دارد که بایستی زهره یک میدان مغناطیسی سیاره‌ای داشته باشد. چون زهره ۲۴۳ مرتبه آهسته‌تر از

زمین می چرخد، انتظار داریم که دیناموی ذاتی آن ضعیف تر و شدت میدان مغناطیسی آن کمتر از زمین باشد. اما، تا به امروز هیچ وسیله‌ای هیچگونه میدان مغناطیسی‌ای را آشکار نکرده است. اگر میدان مغناطیسی وجود داشته باشد، اندازه‌گیریها دلالت می‌کنند که بایستی حداقل  $10^{-4}$  برابر میدان مغناطیسی زمین باشد! اما خیلی ضعیفتر از میدان مغناطیسی است که از یک مدل دیناموی ساده انتظار می‌رود. یک توضیح ممکن آن است که: می‌دانیم که میدان مغناطیسی زمین قطبیدگی خود را عوض می‌کند؛ در نیمه راه معکوس شدن، میدان مغناطیسی ضرورتاً صفر است. بنابراین، ممکن است وضعیت کنونی زهره نیز چنین باشد. (معکوس شدن اخیر قطبهای زمین تقریباً هر یک میلیون سال یا در آن حدود اتفاق افتاده است.)

#### (ه) تحول سطح

پوسته زهره همان طور که تحت تأثیر ظهور دره‌های تنگ و عمیق، جایی که صفحات کمی جدا شده‌اند و نیز جلگه‌های کوهستانی مرتفع، محلی که صفحات با هم تصادم کرده‌اند، قرار گرفته است، مقداری جابه‌جایی‌های سطحی نیز دارد. ناحیه حفره‌ای پراکنده شده زمینی بر این مطلب دلالت دارد که حرکات صفحات سطحی یک فرآیند گسترده سیاره‌ای نبوده‌اند، در صورتی که بر روی زمین این چنین بوده است.

این مشاهدات در مورد تاریخ زمین شناسی زهره بر چه چیزی دلالت می‌کنند؟ تاریخ اولیه آن (دیرتر از چهار بیلیون سال قبل) بایستی از تاریخ اولیه زمین پیروی کرده باشد، زیرا که دو سیاره، چگالی، جرم و اندازه‌های مشابهی دارند. حدس می‌زنیم که زهره در حدود  $4/6$  بیلیون سال قبل با سایر سیارات خاکی شکل گرفته باشد. لایه‌های داخلی زهره همان طور که برای زمین اتفاق افتاده است به سبب گرمای داخلی تشکیل شده‌اند. در طول ۵۰۰ میلیون سال اولیه یک قسمت پوسته - قسمتی بازالتی و قسمتی گرانیتی - تشکیل و جامد گشته است. از حدود ۳ تا ۴ بیلیون سال قبل اجرام بزرگی سطح را بمبارد مان کرده و آن را شکسته‌اند. آتش فشانها فوران کرده‌اند. بمبارد مان اجرام کوچکتر فضائی سطح را حفره حفره کرده و در حدود ۴ بیلیون سال قبل این بمبارد مانهای شدید پایان یافته و فرسایش تا حدی سطح اولیه را تغییر داده است. از آن به بعد، حرکت صفحات به بالا راندن نواحی بلند کمک کرده است. دره‌های باریک و عمیق پدید

آمده‌اند. آتش‌فشانهای عظیم از درون شکافهای سطح بیرون رانده شدند و مخروطهای آنها پوشش محافظ آتش‌فشانهای امروزه را تشکیل داده‌اند.

به نظر می‌رسد زهره در تسلسلی شبیه به ترتیب تحول زمین، اما خیلی کندتر و نه به زیادی مراحل بعدی تحول زمین یعنی وقتی که زمین بساختی طبقات زمین به طور مصنوعی سطوح زمین را تغییر می‌دهند، تحول یافته باشد.

## ۴-۵ مریخ

مریخ به رنگ قرمز متمایل به نارنجی دیده می‌شود که آنرا به خدای جنگ یونانیها مربوط می‌کند. این چهارمین سیاره از طرف خورشید است که در مداری نزدیک به مدار زمین، به دور خورشید می‌گردد، به طوری که قابل توجه‌ترین حرکت برگشتی را در نقطهٔ مقابله‌اش به نمایش می‌گذارد. مقابله با یک دوره تناوب نجومی  $۷۷۹/۹$  شبانه‌روز یا در حدود ۲۶ ماه اتفاق می‌افتد و در این موقع سیاره یک اندازهٔ زاویه‌ای ظاهری به مقدار ۱۸" دارد و ممکن است شکل کاملش در تمام شب دیده شود.

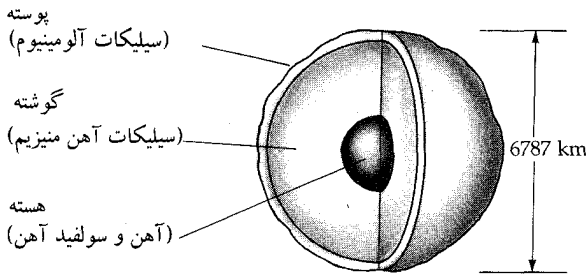
### (الف) حرکتها

نیم قطر طول مدار مریخ  $۱/۵۲۳۷\text{AU}$  است که تنها  $۱/۸۵^\circ$  نسبت به دایرة البروج شیب دارد. خروج از مرکز مداری  $e = 0.0934$  دلالت بر این دارد که در نقطهٔ مقابله، فاصله زمین - مریخ ممکن است از حدود  $۱۰^8$  کیلومتر (در موقعی که مریخ یک قطر زاویه‌ای "۱۴ نشان می‌دهد) تا  $۵/۵ \times ۱۰^7$  کیلومتر ("۲۵) تغییر کند. جو رقیق مریخ امکان می‌دهد که علائم سطحی آن بخوبی فهمیده شوند. دوره تناوب چرخشی نجومی مریخ ۲۴ ساعت و ۳۷ دقیقه و  $۲۲/۶$  ثانیه و محور چرخش آن نسبت به صفحه مدارش ۲۵ درجه و ۱۲ دقیقه میل دارد. این توافق نزدیک با خصوصیات چرخشی زمین ( $۴/۰۹^s$ ،  $۵۶^m$ ،  $۲۳^h$  و  $۲۷'$ ،  $۲۳^\circ$ ) بر این مطلب دلالت می‌کند که اگر در مریخ باشید، این انتظار که فصلهای مریخی دو برابر فصلهای زمین طول بکشد را کاملاً احساس کنید.

## (ب) مشخصات فیزیکی

شعاع مریخ ۳۳۹۴ کیلومتر است که تنها ۵۳ درصد شعاع زمین می باشد. مریخ ۲ قمر دارد و بنابراین برای پی بردن به جرم مریخ می توانیم از شکل نیوتونی قانون سوم کپلر و مدارهای این اقمار استفاده کنیم. جرم مریخ تنها  $10^{23} \times 6/4$  کیلوگرم، در حدود ۱۱ درصد جرم زمین است. چگالی آن ۳۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنها اندکی بیشتر از چگالی ماه (۳۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و خیلی کمتر از چگالی زمین (۵۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) است.

این چگالی کم نسبی دلالت بر این دارد که ناحیه داخلی مریخ (شکل (۵-۱۴)) بایستی با ناحیه داخلی زمین متفاوت باشد. به ویژه، هسته آن باید کوچکتر و احتمالاً شامل مخلوطی از آهن و سولفور آهن که چگالی کمتری از مواد هسته زمین دارد، باشد. شاید قسمت گوشته مریخ همان چگالی پوخته زمین را دارا باشد. ترکیب دقیق گوشته معلوم نشده است، یک مدل گوشته ای با اولیوین (سیلیکات منیزیم - آهن)، اکسید آهن و مقداری آب (۳/۰ درصد) را مطرح کرده است.



شکل ۵-۱۴. داخل مریخ. به ابعاد نسبتاً کوچک هسته توجه کنید.

مدت زیادی است که ستاره شناسان به وجود جو مریخ پی برده اند. خاک نشین های وایکینگ<sup>۱</sup> دریافتند که فشار سطحی متوسط به طور تقریبی ۰/۰۲ جو است. در جو زمین فشار در ارتفاع ۴۰ کیلومتری به این مقدار اندک می رسد. این جو رقیق شامل ۹۵

درصد دی اکسید کربن، ۰/۱ تا ۰/۴ درصد اکسیژن مولکولی، ۲ تا ۳ درصد ازت مولکولی و حدود ۱ تا ۲ درصد آرگون می باشد که ترکیبی خیلی شبیه به جو زهره است. مدارگردهای وایکینگ مقدار بخار آب جو را اندازه گرفتند و بیشترین مقدار را در شمالی ترین عرضهای جغرافیایی یافتند. حداکثر مقدار غلظت ها در حدود ۰/۰۱ میلی متر آب تعلیق پذیر (ضخامت لایه های آب، اگر همه آب به بیرون از جو برده شده و روی سطح گسترده گردد) بود. در زمین بخار آب جوی نوعاً چند سانتی متر از آب تعلیق پذیر است و البته اقیانوسها چندین کیلومتر ضخامت دارند. سیاره مریخ نسبت به زمین خیلی خشک تر است. به خاطر فشار سطحی کم امروزه آب مایع نمی تواند در مریخ وجود داشته باشد. فقط در عمیق ترین دره های تنگ و باریک جایی که فشار جو زیادتر است، آب می تواند روی سطح به صورت مایع وجود داشته باشد. اما، معمولی است که در سطح یا در ابرهای مریخ یخ آب وجود داشته باشد. بعضی شواهد پیشنهاد می کنند که آب به صورت شبنم منجمد پایدار در لایه های زیر سطح موجود است.

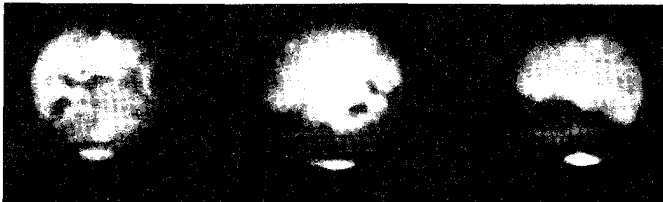
اگر چه جو بیشتر شامل دی اکسید کربن است، اما چگالی کم آن، قسمت عمده یک اثر گلخانه ای را در مقابل دمای فوق العاده زیاد ایجاد نمی کند. در استوای مریخ اختلاف بین مقادیر دما در ظهر و نیمه شب به ۱۰۰k در هنگامی که مریخ در نزدیکترین وضعیت به خورشید است، می رسد. دمای بالای ۳۱۰ درجه کلون تابستان حاره ای استثنائی است. برای یک دوره تناوب ۲ ماهه مریخی، دمای سطح در سراسر سطح مریخ در طول شبانه روز زیر دمای انجماد آب باقی می ماند. در محل سفینه فضایی وایکینگ ۱، عرض جغرافیایی شمالی ۲۳ درجه، دمای هوا نزدیک زمین در گستره ای از ۸۵- تا ۲۹- درجه سانتی گراد بود. در محل سفینه فضایی وایکینگ ۲ در نقطه ای شمالی تر، دما حتی کمتر هم می شود و آب به صورت شبنم منجمد در سطح متراکم می گردد. لایه های یخ آب که صخره ها و خاکها را پوشانده اند بینهایت نازک است، کمتر از یک میلی متر.

### (ج) اشکال سطحی از دور

چون یک ستاره شناس بایستی از میان دو جو سیمای مریخ را نظاره کند، معمولاً سیمای مذکور به وضوح دیده نمی شود. یک تلسکوپ کوچک، ویژگیهای اصلی سطح: کلاهک های قطبی سفید، نواحی نارنجی متمایل به قرمز و سطوح تاریکتر را نشان

می دهد. دیدارهای سفینه فضایی، تصویر ما از مریخ را به نحو قابل توجهی تصحیح کرده اند.

اشکال سطحی قابل رؤیت روی مریخ، در مقابل با رنگ نارنجی متمایل به قرمز بقیه سطح، ظاهراً سطوح خاکستری متمایل به سبز تیره هستند (شکل ۵-۱۵)). این سبزی تولید شده ناشی از خطای باصره است که تباین بین سطوح نورانی و تاریک منشاء آن هستند. نواحی تاریک واقعاً سبز نیستند؛ آنها در واقع قرمز با شدت خیلی زیاد در ناحیه قرمز طیف می باشند.



شکل ۵-۱۵. مریخ در سال ۱۹۷۱ میلادی. این عکس ها در خلال مقابله در سال ۱۹۷۱ میلادی گرفته شده اند، هنگامی که زمین و مریخ خیلی به یکدیگر نزدیک بودند. به کلاهکهای قطبی و نواحی تیره توجه کنید. (آر. مینتون<sup>۱</sup> و اس. لارسون<sup>۲</sup>، آزمایشگاه قمری و سیاره ای دانشگاه آریزونا)

نواحی نارنجی و زرد قهوه ای تقریباً ۷۰ درصد سطح مریخ را تشکیل می دهند. آنها ظاهر متمایل به قرمزی را به مریخ می دهند. در سال ۱۹۳۴ میلادی ستاره شناس آمریکائی راپرت و ایلد<sup>۳</sup> حدس زد که این سطوح حاوی اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ ) باشند. اکسیدهای آهن به شکل های مختلفی در زمین وجود دارند؛ همه آنها ماهیتاً قهوه ای، زرد و نارنجی اند. اندازه گیری های خاک نشین های وایکینگ دلالت بر این دارند که ترکیب سطحی در حدود ۱۹ درصد اکسید آهن است. به علاوه، خاک نشین ها در حدود ۴۴ درصد سیلیس را اندازه گرفتند که به این استنتاج منتهی می شود: مواد معدنی سیلیکاتی

1. R. Minton.

2. S. Larson.

3. Rupert Wildt

قسمت بزرگی از سطح را تشکیل داده‌اند.

شنهای زنگ زده که بسیاری از آنها خیلی صافتر از شنهای سواحل زمین هستند، به وسیله بادهای سهمگین (که تندی شان بیش از ۱۰۰ km/h است) که طوفانهای گرد و غباری پهنه سیاره را تولید کرده‌اند، وزیده‌اند. این طوفانهای خیلی شدید در هنگامی که مریخ در نزدیکترین فاصله به خورشید است، اتفاق می‌افتد. سپس، ابرهای گرد و غباری که به سرعت به ارتفاعات ۵۰ کیلومتری می‌رسند، همه سیاره را با یک مه زرد رنگ برای مدتی حدود یک ماه می‌پوشانند. ماهها طول می‌کشد تا این که گرد و غبار ریز کاملاً روی سطح ته‌نشین شود. این طوفانهای همه‌جاگیر سطح را با پاشیدن ماسه‌شن شویی می‌کنند و به مقدار زیادی آن را مخلوط می‌کنند، به طوری که ترکیبات سطح سیاره ضرورتاً یکنواخت می‌شود. اکنون ما می‌دانیم که این گرد و غبارهای رانده شده توسط باد، بیشتر تغییرات در اشکال سطح مریخ را که در گذشته دیده شده‌اند، باعث می‌شود. مثلاً، طوفانهای باد گرد و غبار را به صورت دانه‌های خرما در می‌آورد و آنرا به صورت رگه‌هایی اطراف کوهستانها و دهانه‌ها ذخیره می‌کند.

در سال ۱۸۷۷ میلادی شیاپاریلی<sup>۱</sup> اشکال سطح مریخ را با جزئیات زیاد ثبت کرد. او تعدادی از اشکال تقریباً سر راست تیره را با نقشه نشان داد و آنها را کانالی<sup>۲</sup>، کلمه ایتالیایی برای «چانالها»<sup>۳</sup> نامید. این کلمه در انگلیسی تحت عنوان «کانالها»<sup>۴</sup> ترجمه شده که به بعضی از مردمی اطلاق می‌شود که ظاهری مصنوعی دارند. این به اصطلاح کانالها حس کنجکاوی ستاره شناس امریکایی پرسیوال لوئل<sup>۵</sup> را برانگیخت (۱۸۵۵-۱۹۱۵ میلادی). برای تعقیب علاقه‌اش به مریخ، لوئل در سال ۱۸۹۴ میلادی، در نزدیکی فلاگستاف آریزونا<sup>۶</sup> برای نتیجه گرفتن از بهترین شرایط مشاهده‌ای، رصدخانه‌ای را بنا نهاد. مدت کوتاهی بعد از آن، نقشه‌هایی از مریخ چاپ کرد که از قطعاتی بیش از ۵۰۰ کانال تشکیل شده بود. در یک رشته از کتابهای عامه‌پسند، او استدلال کرد که کانالها

1. Schiaparelli.

2. Canali.

3. Channels.

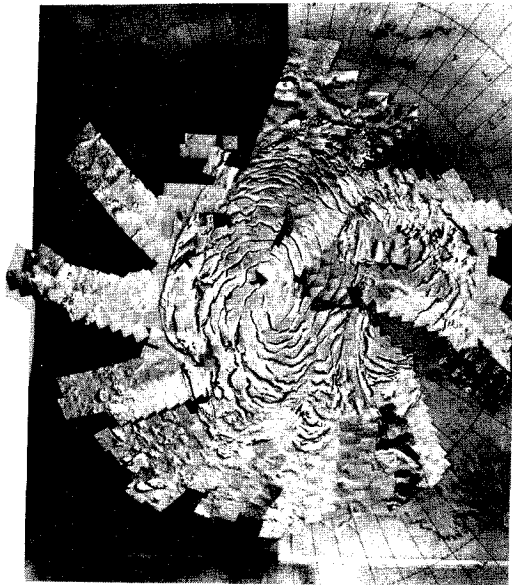
4. Canals.

5. Percival Lowell.

6. Flagstaff Arizona.

راههای آبی مصنوعی می‌باشند که توسط مریخیها جهت حمل آب از کلاهکهای قطبی برای آبیاری نواحی خشک، جهت کشاورزی ایجاد شده‌اند.

اکنون می‌دانیم که کلاهکهای قطبی در حقیقت حاوی مقدار زیادی یخ آب هستند، به ویژه کلاهک باقیمانده در تابستان که ضخامتش از یک متر تا یک کیلومتر متغیر است (شکل ۵-۱۶). در زمستان برجستگیهای کلاهکها که شامل یخ دی‌اکسیدکربن هستند در دمای پائین‌تر از یخ آب منجمد می‌شوند و به نواحی دورتری می‌رسند. (در فشارهای سطحی مریخ، یخ آب در حدود  $190\text{ k}$  و یخ دی‌اکسیدکربن در  $150\text{ k}$  منجمد می‌شوند.) تمام مقدار آب موجود در کلاهک‌های قطبی تنها در حدود ۱۰ متر مایع تعلیق پذیر هستند.



شکل ۵-۱۶. یک کلاهک قطبی تابستانی. کلاهک باقیمانده از یخ آب در تابستان ساختار لایه‌ای ناحیه قطبی را نشان می‌دهد. (ناسا)

لوئل در مورد کانالها اشتباه کرده بود. اما، ستاره‌شناسان سیاره‌ای اکنون بر این باورند که ذخائر گرد و غباری رانده شده به وسیله باد ممکن است شکل‌های زودگذری

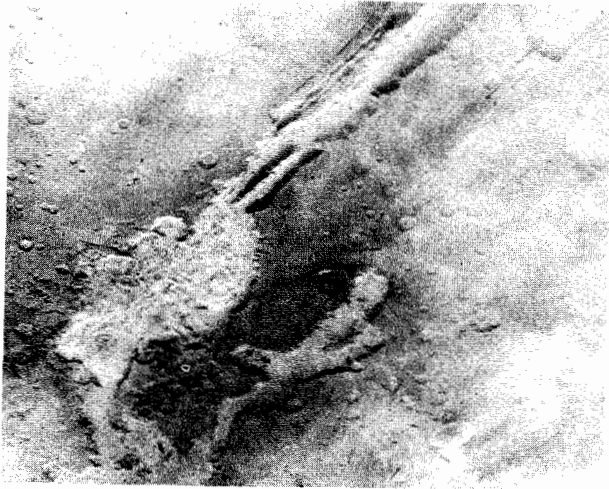


ایجاد کرده باشند که به عنوان بزرگترین و پرزدارترین کانالها دیده شده‌اند. مقایسه‌ای بین نقشه‌های لوئل از کانالها با عکس‌های مداری دلالت بر این دارد که تنها یک سیمای واقعی (قسمتی از والس مارینرس<sup>۱</sup>) با هر یک از این به اصطلاح کانالها مطابقت می‌کند.

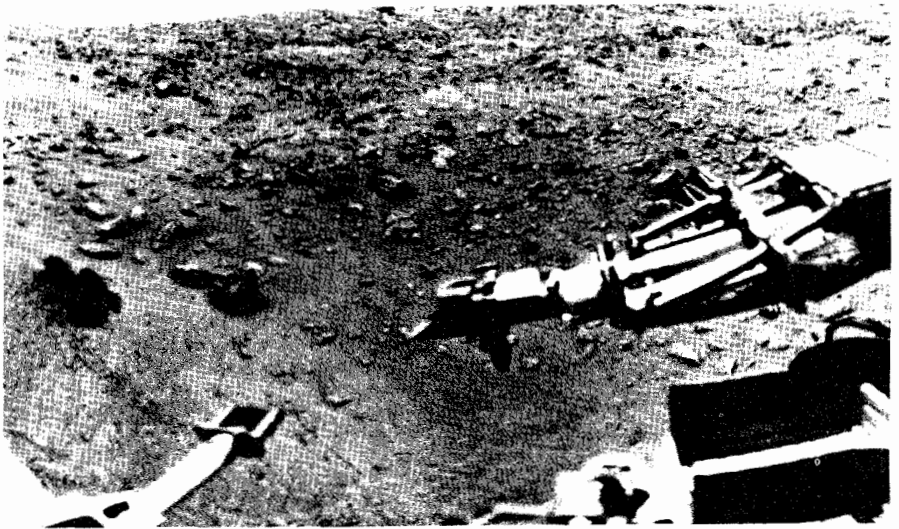
#### (د) اشکال سطحی از نزدیک

در سال ۱۹۶۹ میلادی داده‌های مارینر ۶ و ۷ این دیدگاه که قسمتهایی از سطح مریخ شبیه به ماه است را تأیید کرد (ابتدا از مارینر ۴ تصاویر سال ۱۹۶۵ میلادی چاپ شد). این سفینه‌ها از حفره‌های قابل مشاهده مریخ و حتی زیر نواحی نازکتر کلاهک‌های قطبی به وفور عکسبرداری کردند. حفره‌های مریخ شبیه حفره‌های بهم فشرده هستند، اما عمق کمتری از حفره‌های ماه دارند. کف بر آمده و لبه کوتاه آنها دلالت بر آن دارد که به شدت فرسایش یافته‌اند - مهمترین سرنخ برای شرایط گذشته.

در عوض، عکسهای گرفته شده توسط مارینر ۹ (۱۹۷۱ میلادی) همچنین اشکال به خصوصی از یک سیاره یک بار فعال زمینی را نشان دادند. دو نیمکره مریخ صفات اختصاصی مکانی مختلفی دارند: نیمکره جنوبی نسبتاً مسطح، قدیمتر و عمدتاً حفره‌دار می‌باشد؛ نیمکره شمالی جوانتر با شارشهای گدازه‌ای، تورفتگی‌های متلاشی شده و آتش‌فشانه‌های مهیب است. در نزدیکی جدائی استوایی دو نیمکره یک تنگه بزرگ که والس مارینرس نامیده می‌شود، قرار دارد (شکل (۵-۱۷)). این پرتگاه عظیم در طول ۵۰۰۰ کیلومتر (در حدود طول ایالات متحده) و در عرض ۵۰۰ کیلومتر واقع شده است. خاک نشین‌های وایکینگ در سال ۱۹۷۶ میلادی در مریخ فرود آمدند. آنها از یک سطح خشک و متروکه با تخته سنگهای صخره‌ای بزرگ که در میان شن، ماسه و لجن واقع شده بودند، عکس گرفتند. سنگها بازالتی هستند. بعضی‌ها حاوی حفره‌های کوچک بودند که از آنها ظاهراً گاز رها شده است (شکل (۵-۱۸)). در زمین چنین بازالتی‌هایی از گدازه‌های آتش‌فشانی پر از گاز کف‌دار منشاء می‌گیرند؛ صخره‌های مریخ نیز احتمالاً چنین سرچشمه‌ای داشته‌اند.



شکل ۵-۱۷. والس مارینرس. این شکل، ناحیه‌ای به مساحت ۱۵۰۰ در ۲۰۰۰ کیلومتر را نشان می‌دهد؛ طول کل ۵۰۰۰ کیلومتر است. (ناسا)



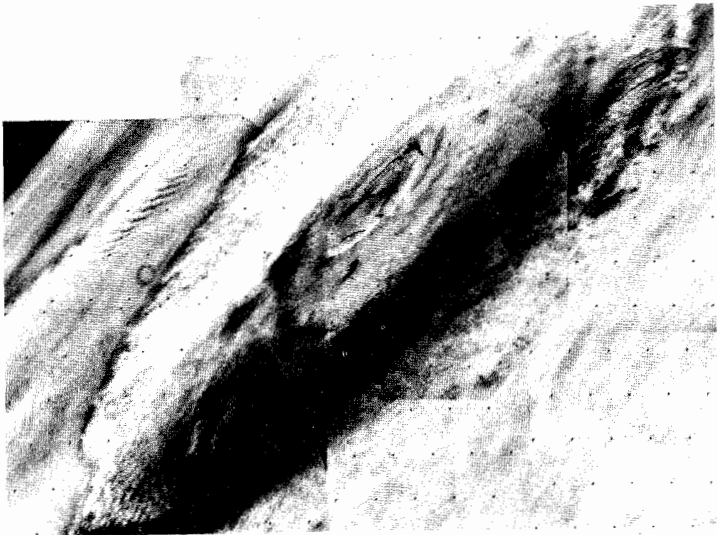
شکل ۵-۱۸. جای وایکینگ ۱. صخره‌ها دهها سانتی‌متر قطر دارند. به صخره تیره باگودال‌ها در طرف چپ خاک انداز توجه کنید؛ این صخره یک صخره آتش‌فشانی است. خاک انداز از خاک طرف چپ این صخره نمونه‌برداری کرده است. (ناسا)

هر دو خاک‌نشین گواه غیر مستقیمی بر این هستند که زمانی آب سطحی در مریخ شارش یافته است. ناحیه اطراف وایکینگ ۱ به نظر می‌رسد یک دشت سیل گرفته باشد که آب صخره‌های کوچکتر را به شن، ماسه و لجن دسته‌بندی کرده است. همچنین خاک آنجا شبیه خاک سفت شده بیابانهای زمین است. چنین خاکی وقتی تشکیل می‌شود که آبهای زیرزمینی به بالا تراوش کرده و در سطح تبخیر شوند. مواد معدنی به جا مانده هنگامی که آب تبخیر می‌شود، خاک را سخت می‌کنند.

مأموریت مارینر ۹ کشف یک تعداد از مجراهای ماریچی بود که به نظر می‌رسد بریدگیهای سطحی باشند که بوسیله آبهای با سرعت زیاد ایجاد شده‌اند و مدارگردهای وایکینگ آنها را تأیید کردند (شکل (۵-۱۹)). بزرگترین آنها طولی تا ۱۵۰۰ کیلومتر و عرضی تا ۱۰۰ کیلومتر دارند. (این کانالها آنهایی نیستند که توسط لوتل و دیگران دیده شده‌اند؛ آنها پیچ و خم دارند و چنان کوچکند که از زمین دیده نمی‌شوند.) آنها شبیه به آرویهایی<sup>۱</sup> هستند که عموماً در جنوب غربی آمریکا پیدا می‌شوند. یک آرويو کانالی است که گهگاهی آب در آن جریان می‌یابد. مدرک قوی وجود دارد که کانالهای مریخ توسط شارش آب قطع شده‌اند: (۱) جهت شارش سرایشی است؛ (۲) مدلهای شارش مسیر پرپیچ و خم‌داری را طی کرده‌اند؛ (۳) ساختارهای رود فرعی دلالت می‌کند که آنجا چند شارش برای تشکیل یک شارش بزرگتر بهم می‌پیوندند؛ (۴) دیوارهای شنی به وسیله کانالهای جریان کوچکتر آب قطع شده‌اند، به طوری که معمولاً در آرویهای زمین پیدا می‌شوند. حضور آرویهای مریخی، آبهای جاری وسیع و شدید برای حداقل یک دوره زمانی کوتاه را ایجاب می‌کند. چون مریخ اکنون آب مایع سطحی ندارد، بنابراین شرایط حضور آن بایستی در گذشته اتفاق افتاده باشد و به یک جو گرم و غلیظتر احتیاج داشته است.



شکل ۵-۱۹. آرویوها و حفره‌های مریخ. (ناسا)



شکل ۵-۲۰. اولیمپوس مونس. (ناسا)

در گذشته دور قابل توجه‌ترین اشکال سطحی مریخ، آتش‌فشانهای سپر خوشه شده در داخل یا نزدیکی لبه «تارسیس»<sup>۱</sup> بوده است. بزرگترین آنها الیمپیوس مونس<sup>۲</sup> به عرض ۵۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر در پایه آن است (شکل (۵-۲۰)). سطح مخروط بافت موجی شکلی را نشان می‌دهد که نتیجه شارشهای گدازه‌ای است. ارتفاع مخروط به ۲۵ کیلومتر در لابه‌لای دشتی که آن را احاطه می‌کند، می‌رسد و پایه آن به اندازه پایه‌های جزایر هاوایی است که از چند آتش‌فشان ساخته شده است. بلندی اولیمپیوس مونس بیش از ۲/۵ برابر ارتفاع قله اورست از سطح دریا است. مدارک غیر مستقیم از شارشهای آتش‌فشانی دلالت بر این دارند که آتش‌فشانهای مریخ بیش از یک بیلیون سال قدمت دارند. جرم عظیم اولیمپیوس مونس علی‌رغم گرانی سطحی کمتر مریخ ایجاب می‌کند که لایه‌های زیرین آن ۱۲۰ تا ۱۳۰ کیلومتر یعنی در حدود ۲ برابر ضخامت پوسته زمین، ضخامت داشته باشند.

اولیمپیوس مونس یک رشته از آتش‌فشانهای واقع در لبه تارسیس را می‌پوشاند. بعضی اوقات دیده شده که ابرهای نازکی از یخ قله‌های آتش‌فشانی آنجا را آذین کرده‌اند. این ابرها ممکن است از خروج ناگهانی و نامنظم گازهای فوران‌کننده نتیجه شده باشند. در زمین فعالیتهای آتش‌فشانی باعث فوران‌گاز (شامل بخار آب) از داخل زمین می‌شود، این چنین گازهای فوران‌کننده‌ای ممکن است به وسیله آتشفشانهای گول‌پیکر مریخ در گذشته به طور قابل ملاحظه‌ای در جو مریخ توزیع شده باشند.

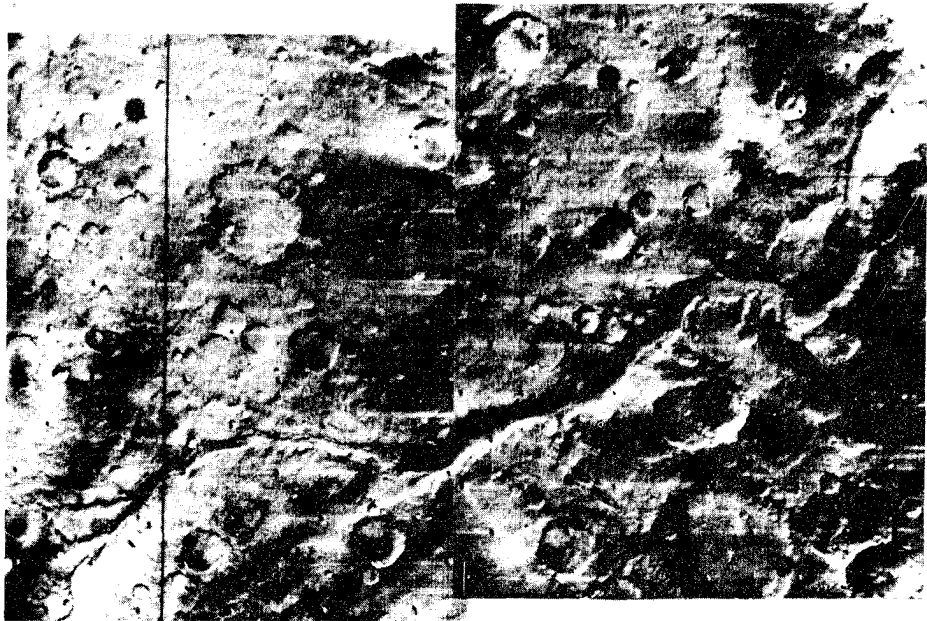
لبه تارسیس علامتی از نیمکره شمالی مریخ است که به طور عمده‌ای آن را از نیمکره جنوبی متفاوت می‌سازد. لبه حدود ۱۰ کیلومتر از ارتفاع سطحی متوسط سیاره، بالاتر آمده است و شامل ساختارهای آتش‌فشانی بیشماری می‌باشد. حفره‌های بهم فشرده خیلی کمی قابل مشاهده‌اند. در عوض، نیمکره جنوبی به طور اساسی بیابانی، آبله‌گون شده توسط حفره‌های قدیمی فرسایش یافته می‌باشد. استنتاج زمین‌شناسی از این اختلاف آن است که در سه بیلیون سال قبل جرم عظیمی از گدازه که در نیمکره شمالی به طور آهسته از زیر سطح به بیرون جریان یافته است، در یک دوره طولانی آتش‌فشانها و

1. Tharsis.

2. Olympus Mons.

دشتهای آتش فشانی را ایجاد کرد. این شارش، حفره‌ها و بیابانهای قدیمی را از میان برد. شارشهای دیگری تاکنون در این ناحیه اتفاق افتاده‌اند.

نیمکره جنوبی مریخ یک زمینه حفره حفره دارد (شکل (۵-۲۱)) که شبیه نواحی مرتفع ماه یا دشتهای میان حفره‌ای عطارد است. چشم انداز سطح شامل حفره‌های بهم فشرده‌ای است که گستره اندازه آنها از حوضچه‌های عظیم پر از گدازه تا بعضی حوضچه‌ها با چند متر عرض قرار دارند. حفره‌های مریخ در رده همان تغییرات وابسته به ماه و عطارد است، بعضی حفره‌ها با قتل مرکزی نشانه منشاء برخوردی آنها هستند. عموماً، حفره‌های مریخ به خاطر فرسایش باد، کم عمقتر از حفره‌های ماه و عطارد هستند.



شکل ۵-۲۱. حوضچه‌های حفره‌های جنوبی. یک آروبو به طول ۷۰۰ کیلومتر در نیمکره جنوبی مریخ توسط ناحیه حفره‌ای قدیمی احاطه شده است. (ناسا)

## (ه) میدان مغناطیسی

مریخ یک میدان مغناطیسی عرض سیاره‌ای فوق‌العاده ضعیف دارد که اندازه‌اش صرفاً  $60 \text{ nT}$  در سطح است. اگر که مدل دینامو به درستی منشاء میدان‌های مغناطیسی سیاره‌ای را توصیف کند، این اندازه کوچک معمایی ایجاد می‌کند. مریخ به تندی زمین می‌چرخد. گرچه هسته مریخ کوچکتر است، ولی بایستی شامل مقدار قابل توجهی آهن یا آهن - نیکل باشد. هیچ دلیل مستقیمی که نشان دهد هسته مریخ مایع است در دست نداریم، اما شواهد فعالیت‌های آتش‌فشانی گذشته بر یک گوشته داغ و بنابراین یک هسته داغ و احتمالاً مایع دلالت می‌کند. لذا، بایستی مریخ یک میدان نسبتاً قوی داشته باشد، اما این چنین نیست. شاید ما مریخ را نظیر سیاره زهره در میانه معکوس شدن میدان مغناطیسی نظاره می‌کنیم، ولی این که هر دو سیاره را در فرایند تغییر قطبش بینیم نا محتمل است.

## (و) تحول سطحی

تحول مریخ به نیمه راه تحول ماه و زمین رسیده است. بعد از شکل‌گیری مریخ توسط تجمع، دهانه‌های برخوردی سطح آنرا پوشاندند. سپس، به زودی سیاره پوسته، گوشته و هسته‌اش را متمایز ساخت. نواحی ضخیم‌تر پوسته به ارتفاعات بیشتری صعود کردند. در مرحله دوم، نواحی نازک پوسته شکسته و لبه تارسیس مرتفع شد و در سطوح اطراف تَرَک ایجاد کرد. در خلال این مدت، جو اولیه که چگالتر و گرمتر از جو کنونی بود مقدار زیادی از بخار آب گازهای بیرون آمده آتش‌فشانی را ننگه داشت. ممکن است که بارش با شیاردار کردن، سطح را فرسایش داده و سپس به عمق چند کیلومتری نفوذ کرده باشد. کاهش دما در عمق‌های کم، یخ تشکیل داد. وقتی این یخهای آب شده گرم شد (شاید به وسیله فعالیت آتش‌فشانی)، به شکل‌گیری آوار و اشکال شارش هدایت شد. فرسایش عرض سیاره‌ای توسط آب، سطح سیاره را حکاکی کرد.

در مرحله بعدی، فعالیت وسیع آتش‌فشانی به خصوص در نیمکره شمالی رخ داد. ناحیه تارسیس به بالا آمدن ادامه داد و جابه‌جا شدگی بیشتری را سبب شد. در این موقع، والس مارینرس شکل گرفت. سرانجام، حالت آتش‌فشانی کنونی - بیشتر آن

متمرکز در لبه تارسیس است - سطح را شکست و شارش‌های بزرگی از گدازه آتش فشانی به راه افتاد. بعد از فورانهای بزرگ صرفاً فرسایش باد، سطح مریخ را حجاری کرده است. احتمالاً تعدادی حفره گاه و بیگاه تشکیل شده باشند.

## ۵-۵ تحول مقایسه‌ای سیارات خاکی

حرارت داخلی تولید شده توسط تلاشی رادیواکتیو در حال حاضر یا باقیمانده از تشکیل سیاره، فرآیندهای تحولی سیارات زمین مانند را جلو می‌برد. همان طور که در فصل ۴ استدلال کردیم مدت عمر این فرایندها تقریباً متناسب با شعاع سیاره است، بنابراین همان طوری که انتظار داریم - و فهمیدیم - زمین در بین سیارات خاکی بیشترین تحول را پیدا کرده است (و هنوز هم در حال تحول است!).

ما می‌توانیم رشته تحولی سیارات خاکی را به پنج مرحله اصلی تقسیم کنیم:

- I. تشکیل حرارت پوسته و قسمت داخلی.
- II. جامد شدن پوسته و زیاد شدن حفره.
- III. تشکیل آبگیرها و طغیان کردن آنها.
- IV. حفره دار شدن با شدت کم، توسط خروج گاز جو.
- V. حرکات پوسته‌ای قاره‌ها و آتش‌فشانشانها.

با این روش می‌توانیم همه وضعیت‌های تحولی سیارات خاکی را مقایسه و متمایز کنیم. هم عطارد و هم ماه تا انتهای مرحله III تحول یافتند؛ آنها سنگواره‌های ثبت شده تاریخ ادوار گذشته تمام سیارات خاکی را فراهم می‌کنند. به ویژه، نشان می‌دهند که بمباردمان سنگین و شدید در ۴ بیلیون سال قبل سطح‌ها را حفره دار کرده است. در مریخ بعضی از آن حفره‌های بهم فشرده شده با تغییرات زیاد هنوز قابل مشاهده‌اند. در زمین و زهره تحولهای بعدی شواهد آن عصر را محو کرده‌اند. مریخ در واقع به نظر می‌آید که به یک وضعیت تحولی ما بین وضعیت‌های تحولی ماه، عطارد، زهره و زمین رسیده باشد؛ این سیاره به ابتدای مرحله V رسیده است. زهره به مرحله پنج وارد شده و زمین در این مرحله پیش رفته است.

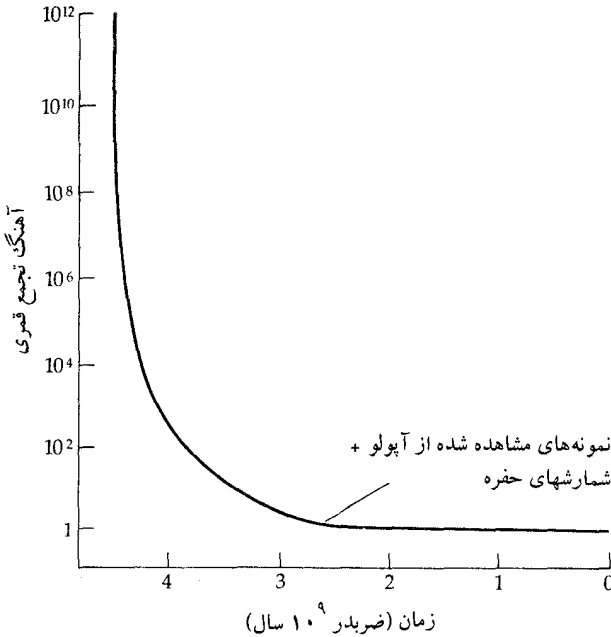
توجه کنید که اختلاف ساختار داخلی سیارات خاکی دلالت بر این دارد که نواحی



داخلی همه آنها به اندازه کافی برای ذوب کردن مواد آنجا یا حداقل پلاستیک کردن آنها گرم شدند. سپس مخلوط اولیه آنها بر اساس چگالیها به لایه‌های مختلف جدا شد. چرا اکنون زمین و زهره با این که جرمهایشان تقریباً برابر است به طور عمده‌ای با یکدیگر اختلاف دارند؟ به ویژه، چرا زهره جوی دارد که تقریباً همه‌اش دی‌اکسیدکربن است و چرا هرگز اقیانوسها در سطح این سیاره به راه نمی‌افتند؟ پاسخ احتمالاً به این حقیقت بر می‌گردد که زهره از زمین به خورشید نزدیکتر است. دی‌اکسیدکربن جوی را در نظر بگیرید. اگر دی‌اکسیدکربن در اقیانوسها و پوسته زمین به جو آن اضافه شود، کل آن در حدود همان مقداری است که در جو زهره وجود دارد. دی‌اکسیدکربن در زهره به علت فقدان آب، در پوسته خاتمه نمی‌یابد. (دی‌اکسیدکربن محلول در آب اقیانوسها با سیلیکاتها برای تشکیل کربناتها واکنش انجام می‌دهد و همچنین صدفهای موجودات زنده دریایی شامل کربناتها هستند.) اشاره می‌کنیم که زهره چنان به خورشید نزدیک است که اثر گلخانه‌ای، همیشه دمای سطحی را آنچنان بالا نگه می‌دارد که آب بتواند به صورت مایع وجود داشته باشد. همچنین احتمالاً بخار آب از سطح زهره به داخل فضا فرار می‌کند. نور ماوراءبنفش خورشید انرژی کافی برای تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن را دارد؛ هیدروژن همان طور که با سرعت زیادی به فضا می‌گریزد پس از آن ناپدید می‌شود.

سرانجام یک تذکر در مورد حفره دار شدن این است که آن آشکارا به تحول اولیه تمام سیارات خاکی کمک کرد. همان طور که در دو فصل آینده خواهید دید، تقریباً هر سطح جامدی در منظومه شمسی حفره‌دار است. تعداد حفره‌ها در اندازه‌های مختلف در یک سطح به ما اجازه می‌دهد تا با بعضی فرضیات، گستره اندازه‌ها و آهنگهای سقوط اجرام اصابت کننده و سن سطوح حفره‌دار را حدس بزنیم.

اصولاً قطر یک حفره به انرژی جنبشی شیء اصابت کننده که تابع قویتری از سرعت سقوط است تا جرم آن بستگی دارد. بنابراین، این حقیقت که در اکثر سطوح سیارات حفره‌های کوچکتر بیشتر از حفره‌های بزرگترند دلالت می‌کند که اشیاء کوچکتر فراوانتر بوده‌اند. بزرگترین حفره‌ها و حوضچه‌ها توسط اشیاء با اندازه‌های بیش از ۱۰۰ کیلومتر تشکیل شده‌اند. توجه کنید که حفره‌هایی که قبلاً تشکیل شده بودند به وسیله اصابت‌های



شکل ۵-۲۲. نمایش ساختار مجدد آهنگ نسبی حفرة‌ای شدن ماه. آهنگ‌های حاضر برای ماه مشاهده شده‌اند؛ آهنگ‌های از ۴ تا ۴/۵ بیلیون سال خیلی نامطمئن هستند و ممکن است به اندازه یک سازه ۱۰۰ پائینتر از مقداری که در اینجا نشان داده شده‌اند، باشند. (اقتباس شده از شکلی توسط دبلیو. ک. هارتمن<sup>۱</sup>)

بعدی، شارشهای گدازه‌ای و فرسایش اصلاح شدند. (برای یک سیاره با جو قابل توجه).

ماه تکیه‌گاه اصلی برای تخمین زدن آهنگ‌های حفرة‌دار شدن به صورت تابعی از زمان فراهم می‌کند، زیرا می‌توانیم نواحی سطح را تاریخ‌گذاری کنیم. تعبیری از داده‌ها کاهشی تیز، اما یکنواخت را با آهنگی در خلال ۴/۵ بیلیون سال گذشته نشان می‌دهد (شکل ۵-۲۲). آهنگ فعلی ممکن است به اندازه یک میلیون برابر کمتر از آن در طول دوران تشکیل سیارات باشد - یعنی به وسیله بمباردمان شدید ابتدایی سطوح عاید شده

1. W. K. Hartman.

است. آهنگ اصابتها از سیاره‌ای به سیاره دیگر متغیر است، اما می‌بایستی حداقل برای سیارات خاکی (با یک سازه ۲) یکسان باشد. احتمال دارد که تحول آهنگ حفره‌دار شدن برای کلیه سیارات و قمرها کم و بیش یکسان بوده باشد (به طور نسبی).

برای سیارات خاکی می‌توانیم از طیف اندازه حفره‌ها و چگالی سطحی برای تخمین اختلاف درجات تحول سطح استفاده کنیم. ماه خودمان در ردیف حداقل تغییرات (همراه دیموس<sup>۱</sup> و فوبوس<sup>۲</sup>، قمرهای مریخ؛ بخش (۷-۱) را ملاحظه کنید) اصلاح شده و بعد از آن عطارد، مریخ، زهره و زمین قرار می‌گیرد.

## مسائل

۱. (الف) دمای سطحی عطارد را در هنگام ظهر در نقاط بعید خورشیدی و قرین خورشیدی محاسبه کنید.

(ب) عطارد در طرف‌های روز و شب خود در چه طول موجی بیشترین تابش را انجام می‌دهد؟

۲. در یک بسامد ۱۰ گیگاهرتز، اختلاف (مربوط به چرخش) بین انتقال دوپلری یک علامت رادیویی برگشت شده از یک طرف عطارد و طرف دیگرش را محاسبه کنید.

۳. فرض کنید که عطارد قمری داشت که ترکیبش همانند عطارد و جرمش یک درصد جرم آن بود. چگونه بایستی مدار آن به دور عطارد مسدود می‌شد تا علی‌رغم نیروی

جزر و مدی خورشید در مدار باقی بماند؟

۴. طول روز خورشیدی در زهره را حساب کنید. چرخش برگشتی را در نظر داشته باشید.

۵. (الف) حداکثر انتقال دوپلری راداری اعمال شده حاصل از چرخش زهره و مریخ حول محورشان را (در بسامد ۱۰ GHz) حساب کنید.

(ب) چه دقتی در تنظیم علائم رادیویی به منظور آشکار کردن حداقل اختلاف ارتفاع در زهره بایستی به دست آید؟

۶. در چه فاصله‌ای از مرکز زهره یک میدان مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی کمر بند وان والن زمین، انتظار خواهید داشت؟ همان محاسبات را برای مریخ انجام دهید. چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟
۷. سیستم زمین - ماه را هنگامی که از مریخ دیده می‌شود با آنچه از عطارد دیده می‌شود، مقایسه کنید.
۸. حد روج را برای مریخ (با چگالی قمری و سیاره‌ای برابر) حساب کنید و نتایجتان را با مدارهای فوبوس و دیموس، قمرهای مریخ مقایسه کنید.
۹. مدت عمر  $\text{CO}_2$  در جوهای مریخ و زهره را تخمین بزنید.
۱۰. مقیاس ارتفاع‌های  $\text{CO}_2$  در جوهای مریخ و زهره را مقایسه کنید. در چه ارتفاعی در زهره فشار جو به  $10^5$  پاسکال تقلیل می‌یابد.
۱۱. برای یک دو قطبی مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی در فاصله دور از دو قطبی با نسبت  $\frac{1}{R^3}$  تغییر می‌کند. در چه فاصله‌ای از مرکز عطارد، میدان مغناطیسی سیاره شدتی برابر شدت میدان مغناطیسی در کمر بندهای وان والن زمین دارد؟
۱۲. از معادله تعادل هیدرواستاتیک برای تخمین فشار مرکزی عطارد، زهره و مریخ استفاده کنید. (راهنمایی: فشار سطحی را صفر قرار دهید و از چگالی متوسط استفاده کنید.)

## سیارات مشتری گون

بر اساس خواص فیزیکی، سیارات منظومه شمسی در دو دسته قرار می‌گیرند: خاکی و مشتری گون. در فصل گذشته، در مورد سیارات صخره‌ای مشابه زمین صحبت شد. این فصل به اجرام مایع خیلی بزرگ که سیارات مشتری گون را تشکیل می‌دهند، بازمی‌گردد. جاهایی که کاملاً با سیارات خاکی متفاوت هستند. نکته اصلی قابل قیاس بین این دو این است: سیارات مشتری گون جهانهای ابتدایی هستند که از زمانی که تشکیل شده‌اند نسبت به سیارات خاکی فعال (زمین، زهره و مریخ)، کمتر تحول پیدا کرده‌اند.

### ۶-۱ مشتری

آن سوی مریخ، از کمربند سیارکی (بخش ۷-۲) به اندازه تقریباً  $3\text{AU}$  عبور می‌کنیم و بالاخره به بزرگترین سیاره مشتری گون یعنی مشتری که به خاطر نام سلطان خدایان اولمپیا<sup>۱</sup> نام گذاری شده است، می‌رسیم. به دلیل اندازه بسیار بزرگ و آبدوی

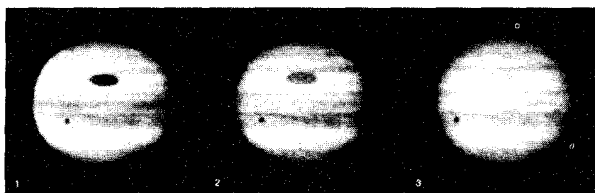
1. Olympian.

زیاد آن (۰/۵۱)، مشتری در آسمان شبهای زمین به خصوص در نقطه مقابله یک سیاره خیلی روشن است.

### (الف) حرکتها

مدار مشتری حول خورشید خروج از مرکز کمی دارد (۰/۰۴۸۴) و تنها به اندازه  $1/31^\circ$  نسبت به دایرة البروج میل دارد؛ نیم قطر اطول مدار آن  $5/2028 \text{ AU}$  است، این سیاره یک مدار نجومی را در  $11/862$  سال زمینی طی می‌کند. دوره تناوب مداری هلالی  $398/88$  روزه آن دلالت بر این دارد که مشتری (با شکل کامل) هر سال حدود یک ماه دیرتر به نقطه مقابله بر می‌گردد.

از آنجائی که فقط می‌توانیم جو غلیظ مشتری را ببینیم (شکل (۶-۱))، دوره تناوب



شکل ۶-۱. مشتری. این عکسها که در سال ۱۹۶۹ میلادی گرفته شده‌اند مشتری را از میان صافیهای آبی (۱) سبز (۲) و قرمز (۳) نشان می‌دهند. لکه کدر سایه آبیو است. (رصد خانه دانشگاه ایالتی نیومکزیکو)<sup>۱</sup>

چرخش سیاره به وسیله دوره تناوب چرخش اشکال جوی آن، نظیر لکه قرمز بزرگ، با اندازه‌گیری انتقال دوپلری نور از لبه‌های نزدیک و دور شونده و با مطالعه چرخش ساختار میدان مغناطیسی، تعیین می‌شود. در می‌باییم که محور چرخشی مشتری  $7^\circ$ ، نسبت به محور مداری آن میل دارد، اما دوره تناوب چرخشی نجومی آن از  $9^h 50^m$  در استوا تا  $9^h 55^m$  در عرضهای جغرافیایی بالاتر تغییر می‌کند. از این رو، جوگازی شکل مشتری یک چرخش جزئی نشان می‌دهد: در استوا سریعترین و در قطبین آهسته‌ترین. (خورشید نیز به طور جزئی می‌چرخد، زیرا آن هم یک سیال است.) ساختار چرخشی جو مشتری مشابه سلولهای هادلی و بادهای تجارتی ویژه، در جو

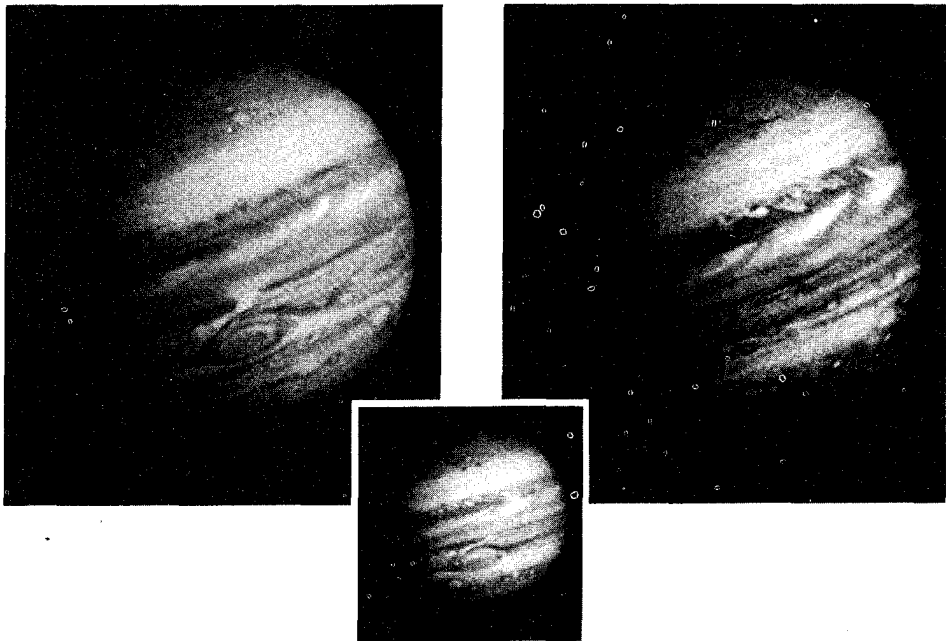
زمین است (بخش (۳-۲ الف)). چرخش بسیار سریع مشتری در اثر پخی زیاد آن نتیجه می‌شود (۰/۰۶۲).

### (ب) مشخصات فیزیکی

شعاع استوایی ( $11/19R_{\oplus}$ ) و جرم ( $318M_{\oplus}$ ) مشتری توسط مشاهدات مدارای و پنهان شدگیهای اقمارش و به وسیله اختلالات جاذبه‌ای آن در مدارات ستاره‌های دنباله‌دار و سیارکها و به وسیله اندازه‌گیری قطر زاویه‌ای قرص قابل رؤیت آن ( $47''$  در نقطه مقابله) و به وسیله اندازه‌گیریهای مسافرا<sup>۱</sup> که از کنار آن در حال عبور است، به طور دقیق معین شده است. این مدل خیلی بزرگ سیارات مشتری‌گون، دارای چگالی متوسط  $1330 \text{ kg/m}^3$  است. این چگالی کم دلالت بر این دارد که ترکیبات مشتری شبیه خورشید با فراوانی حدود ۷۵ درصد هیدورژن، ۲۴ درصد هلیوم و ۱ درصد تمام عناصر سنگینتر (از لحاظ جرمی) است.

قرص مشتری نوارهایی از ابر به رنگهای سفید، آبی، قرمز و زرد را نشان می‌دهد (شکل (۶-۲)). رنگها ناشی از ترکیبات شیمیایی مختلف تشکیل شده در آنجا هستند. این نوارها ساختارشان را با زمان تغییر می‌دهند، اما لکه قرمز بزرگ که نسبتاً پایدار است از سال ۱۸۳۱ میلادی به طور ثابت مشاهده شده است. این شکل جوی خیلی بزرگ در حدود  $20000 \text{ km}$  در  $50000 \text{ km}$  بعد دارد و شدت، موقعیت و شکل آن در حال تغییر است. جو ابری مشتری نور را بخوبی منعکس می‌کند و منجر به آلبدوی بالای سیاره می‌شود.

نوارهای روشن و نواحی تاریک متناوب که به موازات استوا قرار دارند، مناطق و کمربندها نام دارند. مشاهدات مادون قرمزی نشان داده‌اند که مناطق، دمای کمتری نسبت به کمربندها دارند. از آنجا که دما در عرضهای جغرافیایی بالاتر کم می‌شود، مناطق بالاتر از کمربندها هستند. این تفاوتها در دما دلالت بر این دارد که مناطق نشانگر قله‌های نواحی برجسته با فشار بالا و کمربندها نواحی فرورفته با فشار پائین می‌باشند. (اثر کوریولیس<sup>۲</sup>، این مناطق همرفتی را به موازات استوا کشیده‌تر می‌کند).



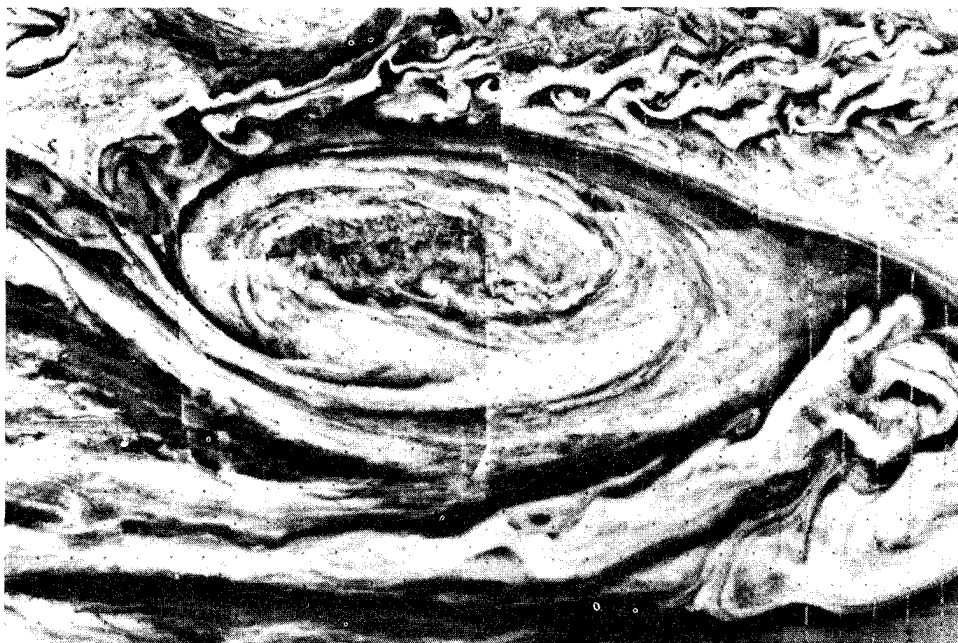
شکل ۲-۶. مشتری مسافر ۱ و ۲. دو عکس بالایی، گرفته شده توسط مسافر ۲، تغییراتی را که در جو اتفاق افتاده‌اند بعد از عکس وسطی کوچک که چهار ماه زودتر توسط مسافر ۱ گرفته شده است، نشان می‌دهند.

شارش جوی همرفتی، گرما را از داخل سیاره به فضا منتقل می‌کند. مأموریت‌های ویجر بررسی دقیق از جریان‌ات و گرداب‌های پیچیده لایه ابر بالای مشتری را بدست داد. تصاویر جالب شکل (۶-۲) شارش جوی آشفته‌ای را نشان می‌دهد. تلسکوپ‌هایی که روی زمین قرار دارند تغییرت پیچیده‌ای در مناطق و کمربندها را آشکار کرده‌اند. هر چند گاه بیضیهایی به رنگ‌های آبی تیره، قرمز، قهوه‌ای و سفید در زمینه پیدا می‌شوند. این لکه‌های بیضی شکل کوچک تا یک یا دو سال دوام می‌یابند.

از مشاهدات مختلف دریافته‌ایم که لکه قرمز چند درجه خنک‌تر از منطقه اطراف آن است و حدود ۸km در بالای منطقه اطراف امتداد دارد؛ آن منطقه بالا رونده‌ای با فشار زیاد است. همچنین، لکه قرمز در جهت خلاف عقربه‌های ساعت مانند یک گرداب می‌چرخد، درست همان طور که از منطقه با فشار بالا در نیمکره جنوبی مشتری انتظار می‌رود. مدلی وجود دارد که بر اساس آن لکه قرمز مانند یک چرخ بزرگ که به وسیله



شارش جوی اطراف تحت فشار قرار گرفته است، می‌چرخد و به نوبه خود ابرهای نزدیک را منحرف می‌سازد و آنها را مجبور می‌کند که در اطرافش قرار گیرند. بنابراین، لکه قرمز یک گرداب جوی با عمر زیاد و با ناحیه آشفته شارشی که از اطراف آن می‌گذرد، می‌باشد (شکل (۳-۶)).



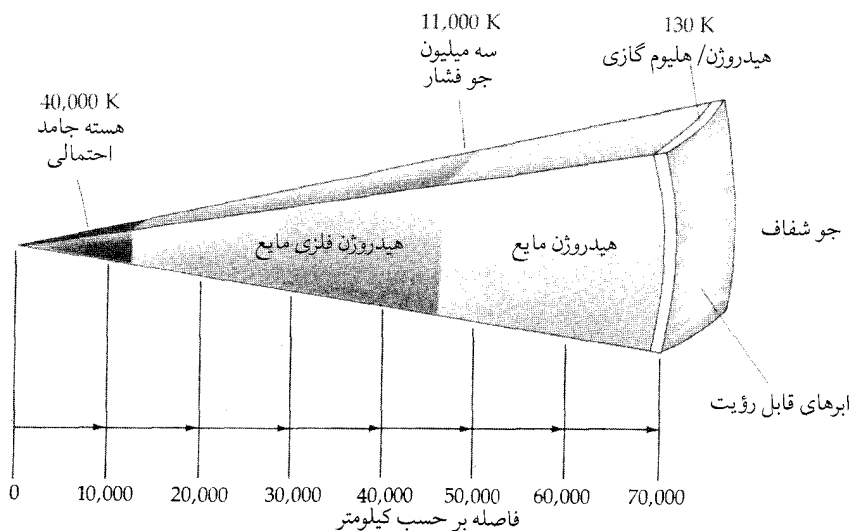
شکل ۳-۶. لکه قرمز. این تصویر کامپیوتری بر شارشهای اطراف لکه قرمز تأکید دارد. کوچکترین جزئیات این تصویر ۳۰ km عرض دارند. (ناسا)

طیف‌سنجی مادون قرمز، ترکیبات جوی در بالای ابرها را نشان می‌دهد. در سال ۱۹۳۴ میلادی متان ( $\text{CH}_4$ ) کشف شد که اولین مولکولی بود که به طور قطعی شناسایی شد. بعداً آمونیاک ( $\text{NH}_3$ )، تیدروژن مولکولی ( $\text{H}_2$ ) و هلیوم جوی ( $\text{He}$ ) پیدا شدند. ویجر همچنین استیلن ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )، اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )، فسفین ( $\text{PH}_3$ )، آب ( $\text{H}_2\text{O}$ ) و ژرمان ( $\text{GeH}_4$ ) را مشاهده کرد. تعدادی از این مولکولها نظیر  $\text{CO}$  و  $\text{HCN}$  از قبل از طیفهایی که در روی زمین گرفته شده بودند آشکار شدند. وجود تعدادی از مولکولها شامل دو تریوم نیز شناخته شده‌اند. تجزیه و تحلیل اطلاعات طیف نگاری ویجر نشان می‌دهد که جو بالای

مشتری شامل حدود ۷۸ درصد یدروژن، ۲۰ درصد هلیوم و ۲ درصد از بقیه عناصر است که اساساً ترکیبی مشابه خورشید می باشد. بیشتر این مواد به صورت مولکولی وجود دارند. ابرهای قابل رؤیت در بالای مناطق با بیشترین احتمال عبارتند از بلورهای یخی آمونیاک، زیرا دمای آنجا حدود  $130^{\circ}\text{K}$  است. در زیر آنها بر طبق یک مدل، یک لایه از ابرهای هیدروسولفید آمونیاک ( $\text{NH}_3$  Hs) قرار دارد. در زیر این قسمتها بخار آمونیاک و ابرهای یخی آب شناورند. این مدل سه لایه جداگانه ای که جو بالایی را تشکیل می دهند، توصیف می کند. بالاترین لایه، آمونیاک است. در زیر آن آمونیاک و سولفید یدروژن و پائین ترین لایه یخ آب می باشد. رنگهای لکه قرمز و اشکال جوی دیگر احتمالاً به دلیل اندرکنشهای شیمیایی مولکولهای عمده و مولکولهای خاص، با یونیزاسیون نوری و تجزیه ای که فعل و انفعالات را سبب می گردند، می باشد.

ما به ساختار داخلی مشتری توسط مدلهای فیزیکی که دو دسته اطلاعات کلیدی را شامل می شوند، پی می بریم: (۱) چگالی کم مشتری و ترکیب جوی آن نشانگر مخلوطی از مواد خورشیدی در سرتاسر آن است و (۲) مشتری انرژی بیشتری از آنچه که از خورشید دریافت می کند به فضا تشعشع می کند (تقریباً به اندازه ۲ برابر) زیرا دمای آن بیشتر از دمای یک جسم سیاه است که به همان فاصله از خورشید قرار گرفته و دارای همان آلبدو باشد. احتمالاً حرارت داخلی در اثر شکل گیری مشتری بجا مانده است.

مدلهای اخیر مشتری تصویر زیر را ارائه می دهند (شکل ۶-۴). جو، سیاره را مانند یک پوسته نازک می پوشاند و عمدتاً شامل یدروژن مولکولی است. همین طور که به داخل سیاره پیش می رویم چگالی، دما و فشار افزایش می یابند (همان طور که از تعادل هیدروستاتیکی انتظار می رود) و بنابراین یدروژن در حالت مایع وجود دارد. در فشاری حدود ۲ تا ۳ میلیون جو، هیدروژن چنان سخت بهم فشرده می شود که مولکولهایش به پروتونها و الکترونهایی که به راحتی در اطراف حرکت می کنند و می توانند الکتریسته را هدایت کنند، تجزیه می شوند. این حالت، هیدروژن فلزی نامیده می شود، و اگر چه بر روی زمین در آزمایشگاه، هرگز مشاهده نشده است، وجود آن توسط فیزیک کوانتومی پیش بینی می شود. این حالت عجیب تا حدود  $14000\text{ km}$  از مرکز سیاره ادامه می یابد. در اینجا احتمالاً اگر مشتری یک ترکیب خورشیدی داشته باشد به صورت یک هسته



شکل ۶-۴. درون مشتری. به منطقه بزرگ هیدروژن فلزی مایع توجه کنید.

جامد (؟) از عناصر سنگین است.

توجه کنید که معادله تعادل هیدرواستاتیکی (معادله ۴-۳) را می‌توان در مورد قسمت‌های پایدار داخلی سیاره که نه منبسط و نه منقبض می‌شوند، بکار برد. این شرط ایجاب می‌کند که همین‌طور که به داخل سیاره و قسمت‌های عمیق آن می‌رویم فشار داخلی زیاد شود (به این دلیل که یک وزن بیشتری می‌بایست تحمل شود). همچنین می‌توانیم معادله هیدرواستاتیکی را برای تخمین تقریبی فشار مرکزی سیاره به کار ببریم. معادله به شکل دیفرانسیلی عبارت است از

$$dp = -\rho(r) \left( \frac{GM}{r} \right) dr$$

که در آن  $M$  جرم محصور در شعاع  $r$

$$M = \left( \frac{4}{3} \right) \pi r^3 \bar{\rho}$$

و  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط درون شعاع  $r$  است. برای آسان کردن محاسبه فرض کنید که چگالی در کل سیاره یک مقدار ثابت و برابر با  $\bar{\rho}$  یعنی چگالی متوسط می‌باشد و اساساً فشار سطحی در مقایسه با فشار مرکزی، صفر است. در این صورت

$$dp = -\bar{\rho}G \left(\frac{4}{3}\right) \pi \bar{\rho} r dr$$

سپس از مرکز تا سطح انتگرال گیری می‌کنیم:

$$\int_{p_c}^0 dp = -\bar{\rho}^2 \left(\frac{4}{3}\right) \pi G \int_0^R r dr$$

بنابراین،

$$\begin{aligned} p_c &= \left(\frac{4}{3}\right) \pi G \bar{\rho}^2 R^2 \\ &= (1/4 \times 10^{-11}) \bar{\rho}^2 R^2 \end{aligned}$$

در واحدهای SI ( $N/m^2$  برای فشار). در این صورت برای مشتری شعاعی حدود  $70000 \text{ km}$  و چگالی متوسطی تقریباً برابر  $1300 \text{ kg/m}^3$  داریم، بنابراین

$$\begin{aligned} p_c &\approx (1/4 \times 10^{-11}) (1300)^2 (7 \times 10^7)^2 \\ &= (1/4 \times 10^{-11}) (8/3 \times 10^{21}) = 1/2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \\ &\approx 1/2 \times 10^6 \text{ atm.} \end{aligned}$$

همان طور که در بالا ذکر کردیم، مشتری (و همچنین زحل و نپتون، جدول (۶-۱)) مقدار انرژی مادون قرمز بیشتری از آنچه که از نور خورشید جذب کرده است، تابش می‌کند. کل توان اضافی داخلی بالغ بر  $4 \times 10^{17} \text{ W}$  است. چگونه می‌توانیم نتیجه‌گیری کنیم که منبع این انرژی اضافی از زمان شکل‌گیری مشتری بوده است؟ یک فرض دیگر را در نظر بگیرید: گرما ممکن است از یک انقباض گرانشی خیلی کند همین طور که لایه فلزی مرکزی، با آهنگ ماده با چگالی کمتر رشد می‌کند، سرچشمه بگیرد. چه مقدار جمع‌شدگی لازم است؟ انرژی پتانسیل گرانشی یک جرم کروی تقریباً برابر است با

$$PE \approx GM^2 / R$$

به طوری که

$$\begin{aligned} \text{اتلاف انرژی} &= \frac{d(PE)}{dt} \approx \left(\frac{-GM^2}{R}\right) \frac{dR}{dt} \\ (4 \times 10^{17} \text{ W}) (3 \times 10^7 \text{ s/year}) &\approx 10^{25} \text{ J/year} \approx \\ &= \left[ \frac{(7 \times 10^7)^2 (1/9 \times 10^{27})^2}{(7/1 \times 10^6)^2} \right] \left(\frac{dR}{dt}\right) \end{aligned}$$

که این مطلب دلالت بر آن دارد که

سیاره	$T_B$ (K) دمای جسم سیاره	توان کلی	توان داخلی	
			$W/m^2$	$W$
مشتری	$127 \pm 3$	$(2.0 \pm 0.2) \times$ توان ورودی خورشید	7	$4 \times 10^{17}$
زحل	$97 \pm 3$	$(2.8 \pm 0.4) \times$ توان ورودی خورشید	3.5	$2 \times 10^{17}$
اورانوس	$58 \pm 3$	$\approx 1 \times$ توان ورودی خورشید	$< 0.1$	$10^{15}$
نپتون	$56 \pm 3$	$(2.5 \pm 0.5) \times$ توان ورودی خورشید	0.4	$3 \times 10^{15}$

جدول ۶-۱. منابع گرمایی داخلی سیارات مشتری‌گون.

$$\frac{dR}{dt} \approx 10^{-4} \text{ m / year}$$

این مقدار جمع شدگی غیر قابل آشکار سازی است. به هر حال مشکل این نظریه این است که قسمت داخلی مایع مشتری غیر قابل تراکم است، و بنابراین، این جمع شدگی اگر چه کم است برای مدت طولانی نمی‌تواند اتفاق بیافتد. بر عکس، اگر هدایت گرمایی هیدروژن فلزی بالا نباشد در آن صورت مشتری به راحتی می‌توانست انرژی داخلی اولیه خود را تا بیلیونها سال حفظ کند. پس دوره تناوب، زمان انقباض گرانشی آن می‌توانست در آغاز پیدایش سیاره اتفاق افتاده باشد تا زمانی که دیگر نتواند به انقباض ادامه دهد.

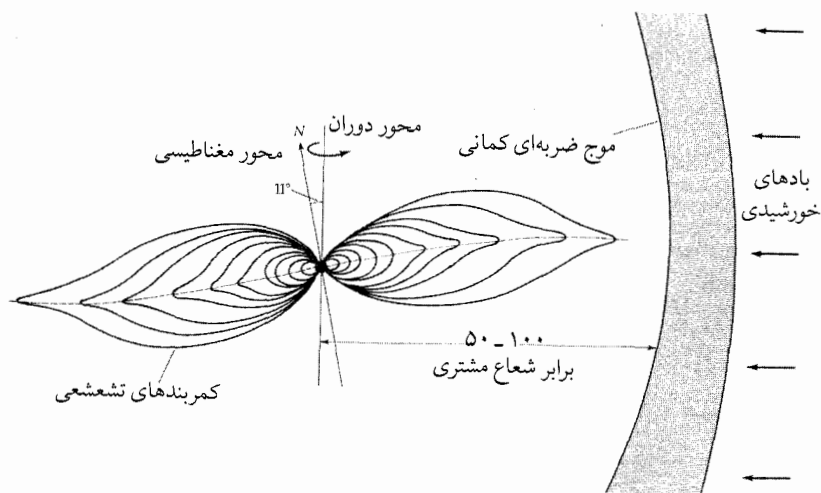
قسمت اعظم مشتری از هیدروژن تشکیل شده است و بیشتر آن به صورت مایع است - کاملاً بر خلاف درون زمین و سایر سیارات خاکی. دمای هسته ممکن است حدود ۱۰ برابر داغتر از مرکز زمین باشد - بالغ بر  $40000^\circ \text{K}$ . عامل چرخش همرفتی جو، شارش گرما از هسته به بیرون است. چرخش سریع سیاره شتاب کوریولیس بزرگی ایجاد می‌کند که جو لایه‌های زیبایی به وجود می‌آورد.

### (ج) میدان مغناطیسی

مشتری از خود گسیلهای رادیویی نشان می‌دهد که به میدان مغناطیسی مشتری‌گون در حدود  $10^{-4} T$  در سطح سیاره ربط داده شده است. این میدان مغناطیسی شدید در اثر یک ساز و کار دینامو در هسته مایع هیدروژن فلزی در حال چرخش سریع به وجود می‌آید. در طول موجهای ۳ تا ۷۵ سانتیمتر مشاهده شده است که سیاره به

صورت غیر حرارتی تشعشع می‌کند. این تابش دسیمتری و یا DIM، ( $10^{-11}$  دسی متر) عبارت است از تابش همزمانی در اثر الکترونهاى نسبیتی که با تندی خیلی نزدیک به تندی نور در کمربندهای تابشی مشتری‌گون که به وسیله میدان مغناطیسی مشتری به دام افتاده‌اند به صورت ماریچی حرکت می‌کنند. اندازه‌گیریهای تداخل سنج رادیویی و مأموریت‌های ویجر کمربندهای تابشی مشابه با کمربندهای وان آلن زمین (شکل ۶-۵)) را آشکار می‌سازند که در وراء ۳ برابر شعاع مشتری در استوای مغناطیسی ادامه می‌یابد؛ محور مغناطیسی با محور چرخش مشتری زاویه‌ای حدود  $10^\circ$  می‌سازد. این میدان مغناطیسی شدید یک مغناطیس سپهر عظیم در اطراف مشتری به وجود می‌آورد که باد خورشیدی را دور نگه می‌دارد.

در سال ۱۹۵۵ میلادی دانشمندان در مؤسسه کارنگی<sup>۱</sup> انفجارهای رادیویی که گهگاهی اتفاق می‌افتاد در محدوده طول موجهای دکامتر، یا DAM، مشاهده کردند (متر  $10 = 1$  دکامتر)؛ این انفجارها با عبور مشتری مربوط‌اند. در سال ۱۹۶۴ میلادی فهمیده شد که مقدار تابش DAM به موقعیت قمر مشتری آیو نسبت به محور مغناطیسی مشتری، مربوط است. احتمال انفجارهای رادیویی هنگامی که آیو در یکی از دو موقعیتش نسبت به مشتری و زمین یعنی  $90^\circ$  یا  $240^\circ$  از جهت مقارنه بالایی قرار می‌گیرد، به شدت تقویت می‌شود. اگر چه جزئیات موضوع هنوز روشن نشده است، این تابش DAM احتمالاً در داخل یا بالای یون سپهر مشتری و روی خطوط میدان مغناطیسی که از آیو می‌گذرند، (بخش (۷-۱ب)) و در طول لوله‌ای از شار مغناطیسی، ایجاد می‌شوند. سایر تابش‌های DAM به صورت انفجارهایی که به فواصل زمانی حدود یک ثانیه طول می‌کشند، اتفاق می‌افتند. یک انفجار قوی تقریباً  $10^{11}$  ژول انرژی تولید می‌کند؛ برای مقایسه، یک صاعقه شدید در روی زمین حدود  $10^5$  ژول انرژی تخلیه می‌کند. این انفجارهای رادیویی احتمالاً توسط صاعقه خیلی شدیدی ایجاد می‌شوند. تعدادی از عکسهایی که ویجر ارسال داشته است مناطق روشنی را در سمت شب سیاره نشان می‌دهند که ممکن است صاعقه باشند. کورانهای<sup>۲</sup> شدید و آشفستگی در جو مشتری احتمالاً این صاعقه را ایجاد می‌کنند، همان طوری که به طور مشابه رعد و برقهای



شکل ۶-۵. مغناطیس سپهر مشتری بر اساس اطلاعات ماهواره‌ای. اندازه و شکل بسته به قدرت بادهای خورشیدی تغییر می‌کند.

روی زمین همین کار را انجام می‌دهند.

مشاهدات رادیویی که از سطح زمین انجام می‌شود، و نیز پروازهای قمرهای مصنوعی از نزدیک سیاره مشتری نشان می‌دهند که مغناطیس سپهر این سیاره ساختار پیچیده‌ای دارد. اگر می‌توانستیم از طریق اپتیکی مغناطیس سپهر مشتری را از رو به رو بینیم به اندازه ۲ درجه نسبت به ما انحراف می‌داشت - این مقدار چهار برابر اندازه زاویه‌ای ماه یا خورشید است (شکل ۶-۶) ! مغناطیس سپهر مشتری به سه ناحیه مشخص تقسیم می‌شود. مغناطیس سپهر داخلی ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریانهای داخل سیاره در آنجا حکمفرما هستند، این ناحیه تا حدود  $6R_J$  ادامه می‌یابد. از آنجا تا  $30R_J$  الی  $50R_J$ ، مغناطیس سپهر میانی قرار دارد که در این ناحیه جریانهای استوایی سمتی حول محوری، شکل میدان را کنترل می‌کند. بالاتر از  $50R_J$  هندسه مغناطیس سپهر خارجی به جهت سمت شب یا سمت آفتاب بستگی دارد. میدانهای سمت خورشید مانند یک منطقه کاهنده عمل می‌کنند و با تغییرات شدت باد خورشیدی منقبض می‌شوند. سمت شب سیاره یک دنباله مغناطیسی بلند دارد که قطر آن حدود  $400R_J$  و طول آن چندین AU است.



شکل ۶-۶. نقشه رادیویی مشتری. این نقشه رادیویی در  $1/5 \text{ GHz}$ ، نشر همزمانی را از الکترونهاي نسبيتي در کمر بندهای تابشی نشان می دهد. (جی. ا. رابرتس<sup>۱</sup>، جی. ال. برگ<sup>۲</sup>، آر. سی. بیگنل<sup>۳</sup>، رصدخانه نجومی رادیویی ملی)

میدان دو قطبی سیاره، مغناطیس سپهر داخلی را کنترل می کند. این میدان را اغلب با یک الگویی نشان می دهند که در آن یک دو قطبی به اندازه  $10^\circ$  نسبت به محور دوران مشتری و خارج از مرکز آن متمایل باشد. شدت این میدان مغناطیسی  $4/2 \times 10^{-4} \text{ T}$  در  $R_J = 1$  است. در حالی که این میدان می چرخد الکترونها را تا سرعتهاي نسبيتي شتاب می دهد - تا ده ها  $\text{MeV}$ . الکترونهايي که در ناحیه  $1/3 R_J$  تا  $3 R_J$  قرار دارند نشر همزمانی DIM، ایجاد می کنند.

بر اساس مباحث گذشته (بخش (۴-۶ج))، در مورد حرکت ذرات باردار در میدان مغناطیسی زمین، می دانید که ذرات با شعاعی به اندازه  $r = \frac{mV}{qB}$  به دور خطوط میدان مغناطیسی خواهند چرخید که در آن،  $m$  جرم ذره،  $V$  سرعت و  $q$  بار (بر حسب کولن) و  $B$  شدت میدان مغناطیسی (بر حسب تسلا) است. بسامد این حرکت عبارت است از:



$$f = \frac{V}{2\pi r}$$

$$= \frac{V}{2\pi \left(\frac{mV}{qB}\right)}$$

$$= \frac{qB}{2\pi m}$$

اغلب این بسامد سیکلوترونی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، که آن بسامدی است که ذرات باردار حول یک سیکلوترون که یک میدان مغناطیسی یکنواختی برای نگهداشتن آن به کار می‌رود، می‌چرخند. برای الکترونها بسامد سیکلوترونی برابر است با

$$f_c = \frac{Bc}{2\pi m} \approx (2/18 \times 10^4) B \quad (\text{MHZ})$$

که در آن B بر حسب تسلا است. این ذرات شتاب‌دار تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌دارند. چنین تابشی که با تندیهایی غیر نسبیتی حرکت می‌کند در تمام جهات گسیل می‌شود. برای الکترونهايي که با تندیهایی نسبیتی حرکت می‌کنند، گسیل در جهت جلو و در باریکه‌ای با زاویه بازکننده زیر متمرکز می‌شود

$$\theta = \left(1 - \frac{V^2}{C^2}\right)^{1/2} \quad (\text{رادبان})$$

یا

$$\theta = \frac{56}{E} \quad (\text{درجه})$$

که در آن E بر حسب MeV است. ناظری که در صفحه چرخش الکترون قرار دارد به ازاء هر دور دوران الکترون با بسامد  $f_c$ ، یک علامت خواهد دید، و این گسیل، قطبیدگی خطی دارد. این تابش قطبیده، تابش همزمان نام دارد.

گسیل همزمانی واقعی مجموعه‌ای از الکترونها با انرژیهای متفاوت شامل پوش گسترده‌ای است که با گستردگی  $f_c$  مشخص می‌شود. اگر سرعت‌های آنها بر میدان مغناطیسی عمود نباشند، مسیرهای ذره به صورت مارپیچ‌هایی با زاویه شیب  $\alpha$  (وقتی که الکترون عمود بر میدان مغناطیسی حرکت کند زاویه  $\alpha$  برابر  $90^\circ$  است) هستند. در این صورت، قله طیف گسیل همزمانی تقریباً در

$$f_{\max} \approx (4/8 \times 10^{-4}) E^2 B \sin \alpha \quad (\text{MHZ})$$

اتفاق می افتد که در آن  $E$  بر حسب MeV و  $B$  بر حسب تسلا است. قلّه تخت موجود در گسیلی که از مشتری به ما می رسد تقریباً در ۱ GHz ( $1 \text{ GHz} = 1000 \text{ MHz}$ ) رخ می دهد. برای زاویه شیب  $90^\circ$ ، این دلالت بر این دارد که در یک میدان به شدت  $10^{-4} \text{ T}$

$$E^2 \approx \frac{f_{\max}}{(4/8 \times 10^{-4}) B \sin \alpha}$$

انرژی های الکترون عبارت است از

$$= \frac{(1000)}{(10^{-4})(1)(4/8 \times 10^{-4})}$$

$$E \approx 140 \text{ MeV}$$

و گسیل درون مخروطی به زاویه رأس  $0/4$  درجه متمرکز می شود.

تصاویر و یجر از سمت شب مشتری برای اولین بار فجرهای قطبی را نشان می دهد. عکسها بیان می کنند که فجرها حداقل در ۳ لایه اتفاق می افتند: ۷۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۳۰۰ کیلومتر بالای قله های ابر. فرض می کنیم که این فجرها به همان دلیل که روی زمین اتفاق می افتند در مشتری نیز واقع می گردند: یعنی به دلیل تهیج جو فوقانی توسط ذرات باردار پر انرژی که در نزدیکی قطبهای شمال و جنوب مغناطیسی به داخل سرازیر می شوند. تعدادی از این ذرات از قمر آیو شارش می یابند و در میدان مغناطیسی مشتری به دام می افتند.

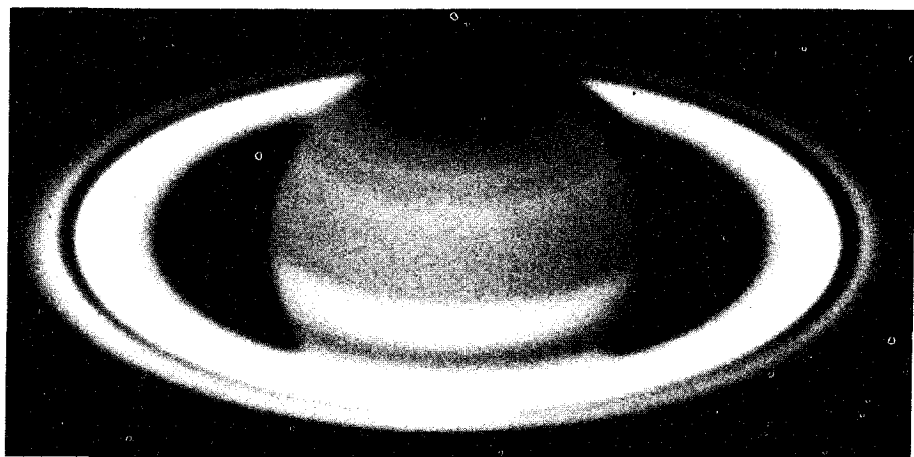
## ۶-۲ زحل

در ورای مدار مشتری آخرین سیاره از هفت سیاره ای که برای پیشینیان ما شناخته شده بود، یعنی زحل، قرار دارد که به عنوان پدر مشتری نامگذاری شده است. زحل دومین سیاره بزرگ مشتری گون منظومه شمسی است و توسط یک رشته از حلقه های بسیار زیبا که به دور آن حلقه زده اند، احاطه شده است (شکل ۶-۷). در آسمان شب زمین، زحل به دلیل اندازه بزرگ و آلبو بالای  $(0/50)$  جوّش به روشنی می درخشد. زیبایی آسمان زحل به خاطر نوارهای روشن حلقه های اطراف آن و نیز به خاطر قمرهای زیادش می باشد.

## (الف) حرکتها

زحل با نیم قطر اطول  $9/539 \text{ AU}$  و دوره تناوب گردش نجومی  $29/458$  سال در مداری با خروج از مرکز  $(0/0557)$  که با دایرة البروج زاویه  $2/49^\circ$  می‌سازد، می‌گردد. از روی زمین قطر زاویه‌ای زحل در نقطهٔ مقابله حدود  $20''$  است.

مانند مشتری، زحل دارای جو غلیظ پر از ابری است که به صورت جزئی می‌چرخد. از مشاهدهٔ انتقالات دوپلری در عرض سیاره و با زمان بندی دقیقِ علامتهای جوی، دوره تناوب چرخشی نجومی آن، در نزدیک استوایش  $10^h 14^m$  و در عرضهای جغرافیایی بالا  $10^h 38^m$  محاسبه شده است. در اینجا هم مجدداً چرخش جزئی مشابه مشتری داریم. استوای زحل به اندازه  $26^\circ 45'$  با صفحهٔ مداری آن زاویه می‌سازد، به طوری که قطبهای سیاره در فاصله‌های زمانی حدود ۱۵ سال یک بار به سمت زمین متمایل می‌شوند. چرخش باعث پخی زیاد  $(0/096)$  زحل می‌گردد؛ به طوری که شعاعهای قطبی و استوایی به نسبت  $\frac{9}{10}$  می‌باشند.



شکل ۶-۷. زحل. به ساختار نواری جو توجه کنید. (رصدخانهٔ پالومار، مؤسسه تکنولوژی کالیفرنیا)

## (ب) مشخصات فیزیکی

زحل شباهت قابل توجهی با مشتری دارد ولی کمی کوچکتر است  $(9/0 R_{\oplus})$  و جرم

آن کمتر از جرم مشتری است ( $95M_{\oplus}$ ). زحل کمترین چگالی حجمی را نسبت به سایر سیارات دارد - فقط  $680 \text{ kg/m}^3$ ، حتی کمتر از آب!

ساختار جو زحل با کمربندهایی که به موازات استوا امتداد دارند، مشابه مشتری است (شکل (۶-۸)). آشفتگیهای کمربندهای زحل خیلی کمتر (تا کنون از روی زمین فقط ۱۰ لکه مشاهده شده‌اند) از مشتری است. ویجر ۱ یک لکه قرمز رنگ را کشف کرد، اما این لکه، از لکه قرمز بزرگ مشتری خیلی کوچکتر است؛ ابرهایی با عرض تنها چند صد کیلومتر در عرض‌های جغرافیایی بالا آشکار شده‌اند. یک لایه بزرگ مه جلوی دید ما را از جو زحل می‌گیرد.

جو زحل احتمالاً ترکیب خیلی مشابه‌ای با جو مشتری دارد. تا کنون متان ( $\text{CH}_4$ )، آمونیاک ( $\text{NH}_3$ )، اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )، فسفین ( $\text{PH}_3$ )، استیلن ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )، متیل استیلن ( $\text{C}_3\text{H}_4$ )، پروپان ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) و هیدروژن مولکولی ( $\text{H}_2$ ) آشکار شده است. درصد آمونیاک در زحل از آنچه در مشتری پیدا شده است، کمتر است؛ احتمالاً به همان مقداری که در مشتری داریم در زحل نیز موجود است، ولی در دمای پائینتر زحل ( $100 \text{ K}$ )، این آمونیاک منجمد شده و از جو فوقانی به صورت برف آمونیاکی فرو می‌ریزد. طیف نگاری مادون قرمز، هیدروژن مولکولی فراوان و نیز درصد بالایی از هلیوم را نشان داده است. به هر حال، طیف نگارهای ویجر فقط ۱۱٪ هلیوم از لحاظ جرمی در مقایسه با ۲۰ درصد برای مشتری را اندازه‌گیری کرده‌اند. قسمتی از هلیوم ممکن است متراکم شده و به داخل رفته باشد.

ابره‌های زحل خیلی کم‌رنگ‌تر از ابرهای مشتری به نظر می‌رسند - ابرهای مشتری اغلب به رنگ زرد کم‌رنگ - نارنجی هستند. به این دلیل که دما در زحل کمتر از مشتری است، ابرهای زحل در لایه پائینتر جوش قرار می‌گیرند. عکسهای ویجر بسیاری از پیچیدگیهای مدل ابری دیده شده در مشتری را در زحل، همراه با تندیه‌های بادی خیلی بالاتر (بیش از  $500 \text{ m/s}$  نزدیک استوای زحل) نشان می‌دهند. عکسهای ویجر ۲ نشان می‌دهند که آب و هوای زحل در زمانی حدود یک هفته زمینی می‌تواند به اندازه خیلی زیادی تغییر کند. سیستمهای طوفانی شدید تغییر شکل داده‌اند، اما هنوز قابل رؤیت‌اند - این مطلب اشاره بر آن دارد که طوفانهای زحل مثل مشتری عمر بیشتری



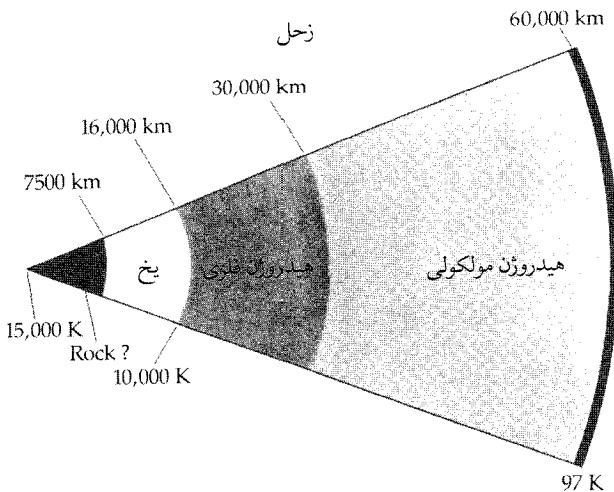
شکل ۶-۸. جو زحل. این عکس ویجر جویبارهای با فشار زیاد و اغتشاش در جو فوقانی را نشان می‌دهد. (ناسا)

از طوفانهای زمینی دارند.

همچنین عکسهای ویجر نشان می‌دهند که شارش بادِ جو فوقانی زحل با مشتری متفاوت است. در نزدیک استوا تمام بادهای با تندیهایی ۴ برابر بادهایی که در مشتری یافت می‌شوند به سمت شرق می‌وزند. در عرضهای جغرافیایی بالاتر همین‌طور که بر روی مشتری مشاهده می‌شود، این الگوی تناوب شارش شرقی - غربی را دنبال می‌کند. سرعتهای باد هر دو سیاره در حرکت به طرف استوا خیلی سریع کم می‌شوند، اما نوارهای جوی زحل شارشهای جویباری با تندی زیاد، مانند مشتری، از خود نشان نمی‌دهند.

زحل از یک نقطه نظر مهم دیگر هم مشابه مشتری است: مشاهدات مادون قرمز نشان می‌دهند که زحل انرژی بیشتری در تابش مادون قرمز از آنچه که از خورشید می‌گیرد، گسیل می‌دارد. مازاد انرژی (حدود  $10^{17} \times 2$ ) در حدود ۳ برابر انرژی دریافتی از خورشید است. به عبارت دیگر، دمای جسم سیاه مادون قرمز حدود  $97^{\circ}k$  است، اما از مقدار نور خورشیدی ورودی و آلدوی زحل، انتظار می‌رود که این دما فقط  $82^{\circ}k$  باشد. گرمای اضافی زحل یک معماست. در مورد مشتری این گسیل را می‌توان به یک دوره تناوب انقباض گرانشی در خلال شکل‌گیری آن نسبت داد؛ الگوی مشابهی برای زحل از توضیح پرتو مادون قرمز اضافی باز می‌ماند.

درون زحل (شکل ۶-۹) احتمالاً ترکیب مشتری را دارد. تخمینهای نظری مقادیر حدود  $74\%$  هیدروژن،  $24\%$  هلیوم و  $2\%$  عناصر سنگینتر را پیشنهاد می‌کند. این ترکیب همچنین تقریباً مشابه ترکیبات خورشید است. زحل ممکن است یک هسته سنگی کوچک به قطر ۲۰ هزار کیلومتر و جرمی معادل  $20 M_{\oplus}$  ( $25\%$  جرم کل) را داشته



شکل ۶-۹. درون زحل. توجه کنید که منطقه هیدروژن فلزی مایع کوچکتر از منطقه مربوط به مشتری است.

باشد. الگوهای دیگر ناحیه هیدروژن فلزی را دقیقاً تا مرکز توسعه می‌دهند. سطحی که در آن هیدروژن فلزی می‌شود، در زحل بسیار عمیق‌تر از مشتری است. تغییر حالت در فشار ۳ میلیون جو اتفاق می‌افتد. این سطح در زحل در مقایسه با مشتری به عمق بیشتری می‌رسد، زیرا زحل جرم و چگالی کمتری دارد و بنابراین فشار درون آن به سرعت مشتری افزایش نمی‌یابد.

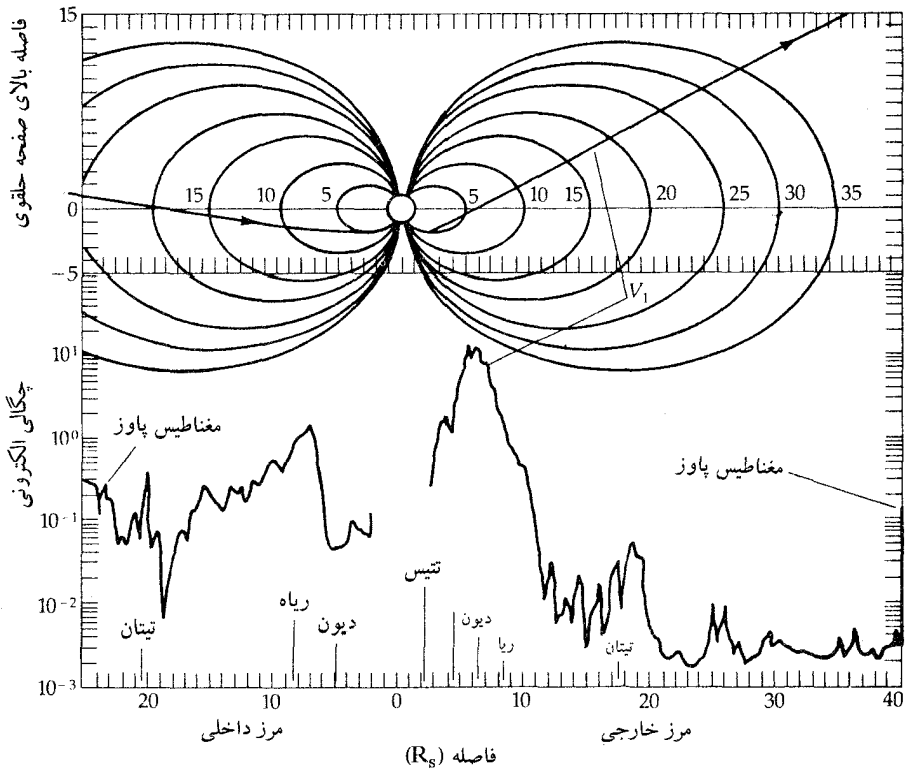
### (ج) میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی زحل دارای یک گشتاور کلی برابر با  $\frac{1}{35}$  گشتاور مشتری است، اما این مقدار به حد کافی قوی است که یک مغناطیس سپهر مشتری‌گون با کمربندهای تابشی مشابه زمین ایجاد کند. گشتاور دو قطبی مغناطیسی با میل یک درجه نسبت به محور چرخش زحل قرار می‌گیرد، که این مقدار با انحراف مشخص محورهای مغناطیسی مشتری و زمین تفاوت آشکار دارد.

مغناطیس سپهر زحل ذرات بسیار کمتری از مغناطیس سپهر مشتری را در خود جای می‌دهد. دو دلیل برای این تفاوت وجود دارند: (۱) کمبود یک منبع محلی ذرات باردار که در مورد مشتری توسط فورانهای آیو تولید می‌شوند و (۲) حلقه‌های قابل رؤیت زحل که به‌طور مؤثری ذرات باردار را جذب و بنابراین مغناطیس سپهر داخلی را از ذرات باردار خالی می‌کنند. در خارج لبه حلقه‌ها (شکل (۶-۱۰)) چگالی ذرات باردار به سرعت افزایش می‌یابد؛ و در حدود  $5R_s$  تا  $10R_s$  به یک قله می‌رسد. در اینجا، ذرات باردار به‌طور محکم به میدان مغناطیسی در حال دوران سریع جفت می‌شوند؛ این بر هم‌کنش، لایه‌ای از پلاسما به ضخامت تقریباً  $2R_s$  ایجاد می‌کند که تا حدود  $15R_s$  ادامه می‌یابد. در ورای این مقدار، مغناطیس سپهر شکل خود را از دست می‌دهد؛ اندازه آن با بادهای خورشیدی تغییر می‌یابد. در فشارهای باد خورشیدی زیاد، مغناطیس سپهر می‌تواند تا شعاع  $20R_s$  جمع شود؛ در فشارهای پائین، آن تا  $30R_s$  و بیشتر بزرگ می‌شود.

## ۳-۶ اورانوس

اورانوس (شکل ۱۱-۶) به یادبود جدتایتان و به یادبود پدر زحل به این نام نامگذاری شده است؛ این سیاره هفتمین سیاره از خورشید و سومین سیاره مشتری گون است. ویلیام هرشل<sup>۱</sup> آن را در سال ۱۷۸۱ میلادی کشف کرد؛ در ابتدا او تصور کرد که یک ستاره دنباله دار است، اما مشاهداتش بر یک مدار بیضی شکل با خروج از مرکز کمی حول خورشید دلالت داشت - مدار سیاره ای. اورانوس درست در حد بینایی



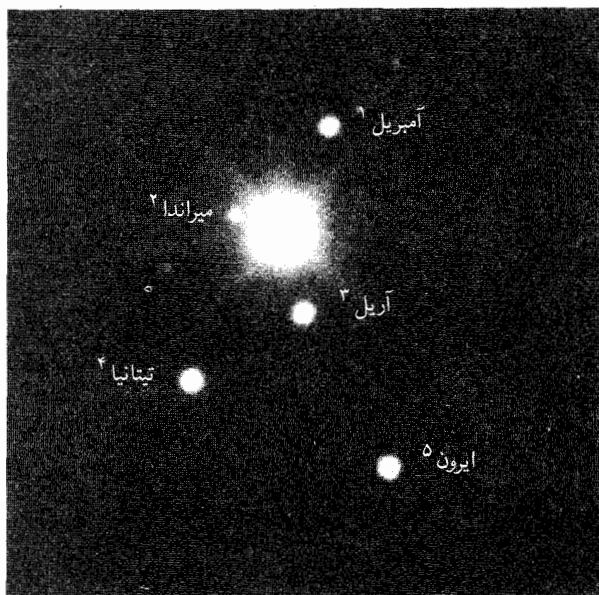
شکل ۱۰-۶. مغناطیس سپهر زحل، مسیر ویجرا را از میان مغناطیس سپهر و چگالی پلاسمای اندازه گیری شده توسط آن، نشان می دهد. واحدها بر حسب شعاع زحل هستند. توجه کنید که اقمار ممکن است منابع ذرات باردار باشند. (ناسا)



چشم غیر مسلح از زمین قرار دارد و قطر زاویه‌ای آن در نقطهٔ مقابله فقط  $3/6''$  است.

### (الف) حرکتها

مدار اورانوس نیم قطر اطولی به اندازه  $19/182 \text{ AU}$ ، خروج از مرکز  $0/0742$  و میل  $0/77^\circ$  نسبت به دایره البروج دارد؛ دوره تناوب مداری نجومی آن  $84/013$  سال است. در فصل دوم رفتار چرخشی عجیب اورانوس را مورد بحث قرار دادیم؛ اورانوس که صفحهٔ استوایش متناسب به صفحهٔ مداریش  $98^\circ$  انحراف دارد در مدت  $17\text{h}$  چرخش برگشتی انجام می‌دهد. از آنجایی که محور چرخش الزاماً در صفحهٔ دایره البروج قرار دارد ما پدیدهٔ زیر را مشاهده می‌کنیم: اگر اکنون یکی از قطبهای سیاره را ببینیم،



شکل ۶-۱۱. اورانوس و قمرهایش. (رصد خانه‌های نجومی نوری ملی دبل یو، لیلر<sup>۱</sup>)

1. Ambriel.
3. Ariel.
5. Oberon.

2. Miranda.
4. Titania.
6. W. Liller.

۲۱ سال بعد درست لبهٔ صفحهٔ استوایی را خواهیم دید و ۴۲ سال بعد قطب مخالف به سمت زمین خواهد بود.

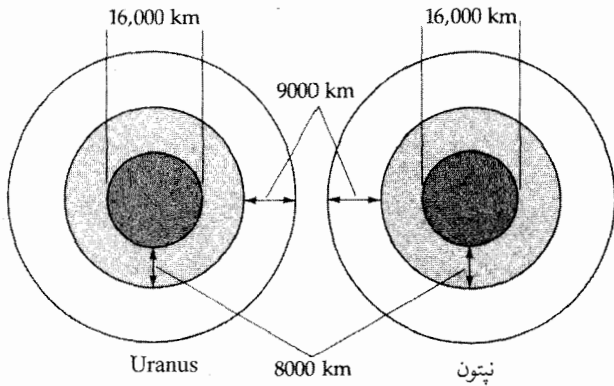
### (ب) مشخصات فیزیکی

جو اورانوس به دلیل این که از خورشید بسیار دور است باید خیلی سرد باشد. مشاهدات مادون قرمز مقدار  $58^{\circ}\text{K}$  را برای دمای آن پیشنهاد می‌کند. در چنین یخبندان شدیداً تمامی آمونیاک منجمد شده از جو خارج می‌گردد و نمی‌توان آن را به طریق طیفسنجی آشکار کرد. متان و هیدروژن در طیف ظاهر می‌شوند. هلیوم نیز احتمال دارد آشکار شده باشد، اما این نتیجه تأیید نشده است.

هنگامی که اورانوس را از درون یک تلسکوپ نگاه کنیم آن را به رنگ سبز کم رنگ مشخصی خواهیم دید که حاصل از نور خورشیدی که به عمق جو سیاره نفوذ کرده است می‌باشد؛ قسمتی از نور قرمز در جو جذب می‌شود و بیشتر نور سبز به فضا منعکس می‌گردد. این جذب و انعکاس انتخابی به این دلیل اتفاق می‌افتد که نوارهای جذبی متان بر طیف جو غلبه دارند.

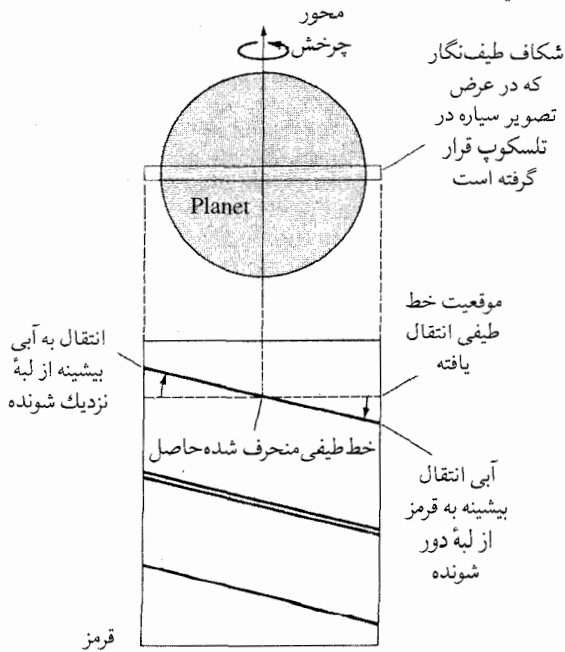
چگالی حجمی کم اورانوس،  $1600\text{ kg/m}^3$ ، دلالت بر این دارد که سیاره عمدتاً از عناصر سبک تشکیل شده است. عقیده بر این است که جرم اورانوس (شکل ۶-۱۲) شامل تقریباً ۱۵٪ هیدروژن و هلیوم، ۶۰٪ مواد یخی ( $\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{CH}_4$ ،  $\text{NH}_3$ )، و ۲۵٪ مواد خاکی (سیلیکاتها) می‌باشد.

اندازه‌گیری آهنگ چرخش اورانوس سالهاست که باعث سردرگمی منجمین گردیده است، زیرا که انحراف محوری، مفید بودن مطالعات دوپلری مشاهدات گزارش شده از آهنگهای چرخش  $10/8$ ،  $15$ ،  $15/6$ ،  $23$  و  $24$  ساعت را محدود می‌کند. مشاهدات مادون قرمزی اخیر دوره تناوبی نزدیک به  $15$  یا  $17$  ساعت را پیش‌بینی می‌کند. فن بکار رفته در اینجا یک فن مستقیم است (شکل ۶-۱۳): شکاف یک طیف نگار را عمود بر محور دوران قرار دهید. در این صورت، خطوط جذبی به طور جزئی منحرف خواهند شد و قسمتی از آنها انتقال قرمز دوپلری و قسمتی انتقال دوپلری آبی خواهند داشت. مقدار انحراف خطوط به آهنگ چرخش مربوط است. متأسفانه خیلی مشکل است که چنین مشاهدات دقیقی را در مورد اورانوس انجام دهیم.



هسته سنگی
  یخ
  تیدروژن مولکولی

شکل ۶-۱۲. درون اورانوس و نپتون. توجه کنید که ساختارهای داخلی آنها اساساً یکسان است.



شکل ۶-۱۳. انتقال‌های دوپلری و چرخشی. تغییر انتقال دوپلری در عرض‌گرده یک سیاره در حال چرخش، انحرافی در خطوط طیفی نوری ایجاد می‌کند.

## (ج) نتایج مسافر

عبور مسافر ۲ از نزدیک اورانوس در ژانویه ۱۹۸۶ میلادی بعضی از عقاید ما درباره این سیاره را تأیید کرد و همچنین ایده‌های جدیدی به ما داد. اکنون آهنگ چرخش سیاره از مشاهدات میدان مغناطیسی حدود ۱۷h شناخته شده است. اگر به صورت کنجکاوانه به مسئله نگاه کنیم، این میدان مغناطیسی، ۵۵° نسبت به محور دوران انحراف داشته و قطب شمال مغناطیسی به قطب جنوب جغرافیایی نزدیکترین فاصله را دارد. (این ویژگی تعدادی از ستاره‌شناسان را بر آن داشته است که تصور کنند در حالی که اورانوس را مشاهده می‌کنیم در وسط فرآیند معکوس شدن قطب مغناطیسی است.) سفینه فضایی در ارتفاعات بالا بادهایی با تندیهایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ m/s و نیز ۱۰ تا ۱۵ درصد هلیوم (تعداد) در جو سیاره را اندازه‌گیری کرد. با مقادیر مربوط به مشتری و زحل سازگار است. همچنین مسافر متوجه نشرهایی از طرف آفتاب‌گیر جو شد که خیلی گیج کننده هستند، زیرا طبیعت فجری ندارند. به نظر می‌رسد که این گسیل‌ها در اثر مولکولهایی که توسط الکترونهای کم انرژی تحریک شده‌اند به وجود می‌آیند، اما منبع این الکترونها مشخص نیست. به طور کلی، این مشاهدات الگویی از سیاره با هسته‌ای سنگی و مایع که توسط اقیانوسی از آب و آمونیاک محلول احاطه شده است تأیید می‌کنند.

تصاویر کامپیوتری نشان داده‌اند که ابرهای آمونیاکی در زیر جو اورانوس و در پائین لایه‌های عمیقی از مه قرار دارند. تصاویر گرفته شده از میان صافیهای مخصوص یک ساختار نواری برای ابرها را نشان می‌دهند؛ ابرهای نزدیک استوا هر ۱۷h یک بار و آنهایی که نزدیک قطبین هستند هر ۱۵h یک بار می‌چرخند. تفکیکی بر اندازه‌گیریهایی زمینی آهنگ چرخش هر دو دوره تناوب. بادهای جوی عمدتاً ابرها را در همان جهتی که سیاره می‌چرخد به حرکت در می‌آورند. اجسام بزرگی به شکل پَر در جو بالایی دیده شده‌اند که احتمالاً از سقوط همرفتی خیلی شدید ایجاد شده‌اند.

آشکار سازهای ذره باردار سوار بر سفینه تأیید کردند که یک مغناطیس سپهر قابل توجهی سیاره را احاطه کرده است. حضور مغناطیس سپهر برای اولین بار از گسیل همزمانی در جهت پرواز سفینه اندازه‌گیری شد. به طور کلی، شدت میدان مغناطیسی

کل حدود ۰/۱ مقداری است که برای زحل اندازه‌گیری شده است، اما در اینجا مغناطیس سپهر شامل ذرات پر انرژی تری است که بسیاری از آنها بیش از ۱ MeV انرژی دارند. همان طور که از یک سیاره با مغناطیس سپهر قوی انتظار می‌رفت، واقعاً فجرهایی در طرف تاریک اورانوس مشاهده شدند.

## ۶-۴ نپتون

آخرین سیاره مشتری‌گون و هشتمین سیاره از خورشید نپتون است. این همزاد نزدیک اورانوس به عنوان خدای دریا نامگذاری شده است. بین سالهای ۱۷۹۰ و ۱۸۴۰ میلادی در مدار اورانوس آشفتگیهایی که از یک منبع ناشناخته مشاهده شد و موجب حدس وجود یک سیارهٔ دورتر شد. جی. سی. آدامز<sup>۱</sup> (در سال ۱۸۴۳ میلادی) و یو. جی. لوریر<sup>۲</sup> (در سال ۱۸۴۶ میلادی) مستقلاً مکانیک سماوی نیوتونی را به کار بردند تا جرم و مدار این هشتمین سیاره را از آشفتگیهای اورانوس نتیجه بگیرند. در سال ۱۸۴۶ میلادی جان. جی. گاله<sup>۳</sup> در رصدخانهٔ برلین نپتون را با  $1^\circ$  اختلاف با موقعیت پیش‌بینی شده، پیدا کرد! با وجود این ۲۳۴ سال زودتر احتمالاً برای اولین بار کسی جز گاليله سیاره نپتون را مشاهده نکرده بود. محاسبات مدار نپتون نشان می‌دهند که باید در ژانویهٔ ۱۶۱۳ میلادی خیلی نزدیک به مشتری بوده باشد. مجله‌های گاليله، نوشته‌هایی دارند که نشان می‌دهند او در ۲۷ دسامبر ۱۶۱۲ میلادی و ۲۸ ژانویهٔ ۱۶۱۳ میلادی جسمی را در نزدیکی مشتری و در نزدیکی موقعیت پیش‌بینی شدهٔ نپتون مشاهده کرد و این در حالی بود که او یک حرکت کوچک نپتون را نسبت به یک ستارهٔ نزدیک آشکار کرد. به‌طور غیر قابل توضیحی گاليله هرگز دنبالهٔ این کشف خود را نگرفت و بنابراین نتوانست آن شیء را به عنوان یک سیارهٔ جدید شناسایی کند.

### (الف) حرکتها

نپتون با خروج از مرکز (۰/۰۰۸۶) و زاویهٔ میل کم ( $1/77^\circ$ ) با نیم قطر اطول ۳۰/۰۶ AU با یک دوره تناوب نجومی ۱۶۴/۷۹ سال در مدار خود می‌گردد. از زمان

1. J. C. Adams.  
3. Johann G.Galle.

2. U. J. Leverrier.

کشف آن، نپتون فقط  $\frac{3}{4}$  مدار خود را طی کرده است. فاصله متوسط آن از خورشید کمتر از پلوتو است، اما پلوتو یک مدار با خروج از مرکز زیاد دارد و می تواند به داخل مدار نپتون وارد شود. این کار را نیز انجام داده است. این اتفاق در ژانویه سال ۱۹۷۹ میلادی روی داد و تا مارس ۱۹۹۹ میلادی نپتون خارجی ترین سیاره منظومه شمسی خواهد بود!

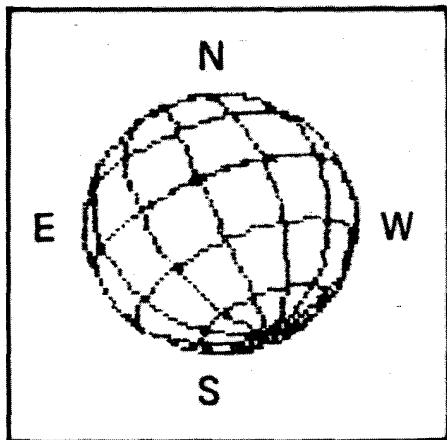
اندازه گیری دوره تناوب چرخشی نپتون به سختی انجام شده است. تصاویر اخیر که با نور نزدیک به مادون قرمز گرفته شده اند (شکل (۶-۱۴)) اشکال جوی ای را نشان می دهند که در هر  $17^h 50^m (\pm 5 \text{ دقیقه})$  می چرخند که تغییرات چرخشی نورسنجی مادون قرمز با دوره تناوب  $17^h 43^m$  توافق خوبی دارد.

### (ب) مشخصات فیزیکی

به دلایل زیادی نپتون دوقلوی اورانوس است. مشابه اورانوس، نپتون رنگ سبز روشنی ناشی از جذب انتخابی متان دارد. جو بالایی، ابرهای نواری کم رنگی از خود نشان می دهد. احتمالاً این جو سرد (تقریباً  $55^{\circ}\text{K}$ ) شامل آب به صورت یخ و آمونیاک به صورت یخ مخلوط با متان، هیدروژن و هلیوم گازی است. یک تفاوت عبارت است از: در جو نپتون اتان ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) آشکار شده است، اما در اورانوس چنین نیست. ساختار داخلی نپتون (شکل (۶-۱۲)) احتمالاً خیلی شبیه اورانوس است، زیر چگالیهای حجمی و جرمشان مشابه اند.

مشاهدات مادون قرمزی اخیر نشان می دهند که دمای نپتون حدود  $56^{\circ}\text{K}$  است؛ اگر فقط نپتون توسط خورشید گرم شود، دمای مورد انتظار جسم سیاه  $44^{\circ}\text{K}$  خواهد بود. بنابراین، نپتون بر خلاف اورانوس دارای گرمای داخلی است. نپتون  $3 \times 10^{15} \text{ W}$  انرژی پس می دهد که  $2/5$  برابر انرژی است که از خورشید دریافت می کند. این به احتمال قوی گرمایی است که از شکل گیری سیاره بجا مانده است.

نپتون ممکن است دارای آب و هوا باشد به این معنی که شرایط هواشناسی در لایه های ابری بالای آن تغییر می کنند. مشاهدات مادون قرمزی نشان می دهند که قابلیت انعکاس جو آن در یک دوره تناوب یک ساله به طور زیادی از  $1$  تا  $4 \mu\text{m}$  افزوده شده است. توضیحی برای این مطلب، شکل گیری یک پوشش ابری وسیع



شکل ۶-۱۴. تصویر مادون قرمزى نپتون که در طول موج ۸۹۰nm گرفته شده است. به سه شکل ابرى روشن (که هر کدام به اندازه زمین هستند!) در جو توجه کنید. (آر. جی. تریل<sup>۱</sup> و بی. ا. اسمیت<sup>۲</sup>، رصدخانه لاس کامپاناس<sup>۳</sup>، مؤسسه کارنگی<sup>۴</sup> و آزمایشگاه جت پراپولشن<sup>۵</sup> و ناسا)

است که بعداً قسمتی از آن از بین رفت.

## ۵-۶ پلوتو و چارون

پلوتو نهمین سیاره از خورشید (بعضی وقتها!) به خاطر خدای زیر جهان (هیدز<sup>۱</sup>) نامگذاری شده است. از روی زمین پلوتو فقط یک تصویر ستاره مانند ضعیف در تلسکوپ ایجاد می‌کند؛ اگر از پلوتو نگاه کنیم مابقی منظومه شمسی دور و به خورشید نزدیک هستند، از این سیاره خورشید نیز فقط به صورت یک ستاره خیلی روشن در آسمان به نظر می‌رسد.

بعد از کشف نپتون اخلاطات کوچک غیر قابل توضیحی در مدار اورانوس به وجود آمد. از آنجا که موقعیت پیش‌بینی شده نهمین سیاره که باعث این اختلالات می‌شد، غیر قطعی بود، کوششهای اولیه برای یافتن آن ناموفق ماند. تا مارس ۱۹۳۰ میلادی طول

1. R. J. Terrile.  
3. Las Campanas.  
5. Jet Propulsion.

2. B. A. Smith.  
4. Carnegie.  
6. Hades.

کشید که کلاید. دبل.یو. تومبو<sup>۱</sup> پلوتو را نزدیک موقعیت پیش‌بینی شده توسط پرس‌یوال لول<sup>۲</sup> پیدا کرد. امروزه می‌دانیم که این کشف یک اتفاق بوده است، زیرا جرم کم پلوتو نمی‌توانست باعث اختلالات ظاهری اورانوس شود. اگر پلوتو در سال ۱۹۳۰ میلادی نزدیک دایرة البروج نمی‌بود هرگز توسط تومبو مشاهده نمی‌شد. (پلوتو در این فصل بیشتر به خاطر موقعیت آن که درست خارج مدار سیارات مشتری گون قرار دارد، آورده شده است. پلوتو خیلی کوچکتر از سیارات مشتری گون است، اما ممکن است چگالی مشابه‌ای داشته باشد. در واقع، شبیه به اقماریخی سیارات مشتری گون است - فصل ۷.)

فاصله متوسط پلوتو از خورشید  $39/44 \text{ AU}$  است. از آنجا که مداری با خروج از مرکز زیاد دارد ( $e = 0/25$ )، در گستره‌ای از  $29/7$  تا  $49/3 \text{ AU}$  از خورشید قرار می‌گیرد و بنابراین فاصله آن تا زمین در نقطه مقابله هرگز کمتر از  $28/7 \text{ AU}$  نمی‌شود. به دلیل فاصله زیاد آن و قطر کوچکش، پلوتو به صورت شیء است که به سختی قابل مشاهده است. کوششهایی که برای اندازه‌گیری قطر آن انجام گرفته‌گیچ‌کننده است. گرفتگی اخیر دلالت بر این دارد که قطر پلوتو کمتر از  $6800 \text{ km}$  است؛ مشاهدات تداخل‌سنجی با تلسکوپ پنج‌متری هیل<sup>۳</sup> نشان می‌دهند که قطر سیاره حدود  $3000$  تا  $3600 \text{ km}$  می‌باشد.

مشاهدات طیفی مادون قرمز نشان می‌دهند که متان یخی قسمتی از سطح پلوتو را می‌پوشاند. وجود متان یخی در آنجا به این معنی است که دمای سطح سیاره بیش از  $40^\circ \text{ K}$  نیست. همچنین این کشف منجر به وسیله‌ای برای تخمین اندازه پلوتو با استفاده از روشنایی آن می‌شود که به فاصله آن از زمین، قطر آن و این‌که چه کسری از سطح آن از یخ پوشیده شده است و آلبدو یخ و سنگ بستگی دارد. اگر سطح آن کاملاً از یخ با ضریب انعکاس بالا پوشیده شده باشد، قطر پلوتو تقریباً  $3000 \text{ km}$  است - حد پائین.

مشاهدات روشنایی پلوتو تغییرات دوره‌ای  $6/4$  روزی را نشان داده است. این مطلب تنها گواه بر چرخش سیاره است و  $6/4$  روز به طور کلی به عنوان دوره تناوب چرخشی پلوتو پذیرفته شده است. محور چرخش پلوتو نظیر اورانوس نزدیک دایرة البروج قرار دارد.

1. Clyde. W. Tombaugh.  
3. Hale.

2. Percival Lowell.



در ژوئن سال ۱۹۷۸ میلادی جیمز کریستی<sup>۱</sup> از رصد خانه نیروی دریایی ایالات متحده در فلاگستاف آریزونا متوجه چیزی شد که در عکس پلوتو به صورت یک برآمدگی دیده می شود (شکل (۶-۱۵)). با بررسی عکسهای قبلی، کریستی هفت عکس پیدا کرد که همان برآمدگی را که همیشه تقریباً در جهت شمال به جنوب قرار می گرفت، نشان می دادند. او پیشنهاد کرد که این برآمدگی تصویر ضعیف قمر پلوتو می باشد که قسمتی از آن از تصویر سیاره بیرون زده است. کریستی این قمر را به یادبود مرد قایق سواری که ارواح را از عرض رودخانه استیکس<sup>۲</sup> به خدای زیر جهان پلوتو می برد، چارون نامید.

با دانستن خصوصیات مداری سیستم پلوتو - چارون می توانیم جرم پلوتو را به کمک قانون سوم کپلر بدست آوریم. دوره تناوب مداری ۶/۴ روز است (به اندازه دوره تناوب چرخشی پلوتو؛ این دو دوره تناوب به صورت جزر و مدی با هم جفت شده اند). فاصله بین آن دو ۱۷۵۰۰ km است (شکل (۶-۱۶)). حال سیستم زمین - ماه را با سیستم پلوتو - چارون مقایسه می کنیم. برای زمین و ماه،

$$M_E + M_M = \left( \frac{4\pi^2}{G} \right) \left( \frac{a_{EM}^3}{P_{EM}^2} \right)$$

و برای پلوتو و چارون،

$$M_P + M_C = \left( \frac{4\pi^2}{G} \right) \left( \frac{a_{PC}^3}{P_{PC}^2} \right)$$

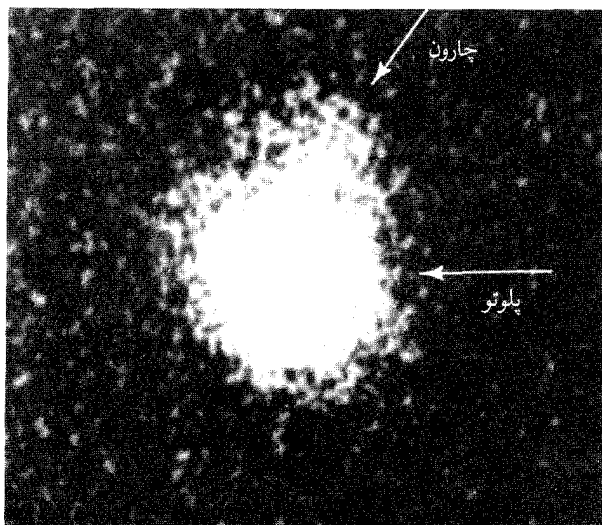
از تقسیم رابطه دوم بر رابطه اول نتیجه می شود،

$$\frac{(M_P + M_C)}{(M_E + M_M)} = \left( \frac{a_{PC}}{a_{EM}} \right)^3 \left( \frac{P_{EM}}{P_{PC}} \right)^2$$

فرض کنید که جرم قمرها در مقایسه با سیاره مادر کوچک باشد به طوری که بتوان  $M_E + M_M$  را برابر  $M_E$  و  $M_P + M_C$  را برابر  $M_P$  قرار داد. در این صورت

$$\frac{M_P}{M_E} = \left[ \frac{(1/75 \times 10^3 \text{ km})^3}{(\frac{3}{8 \times 10^4} \text{ km})} \right]^3 \left[ \frac{((\text{شبانهره روز } 6/4) / (\text{شبانهره روز } 27/3))}{1} \right]^2$$

$$= (1 \times 10^{-4}) (18/2) = 1/8 \times 10^{-3}$$



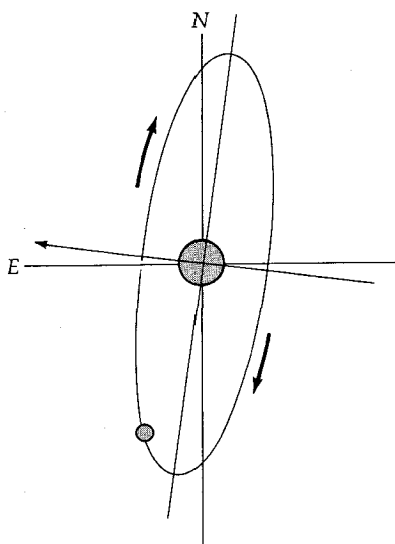
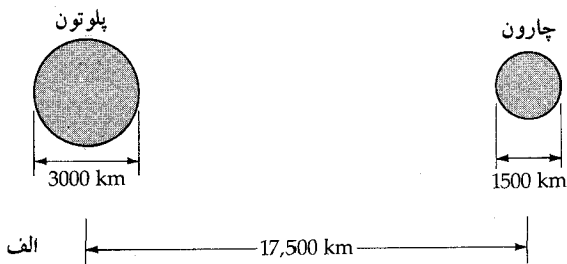
شکل ۶-۱۵. پلوتو و چارون. دو جسم آنقدر به هم نزدیکند که تصاویر آنها با هم مخلوط شده است؛ چارون یک برآمدگی است که از پلوتو بیرون زده است (فلش). (ج. کریستی رصدخانه نیروی دریایی ایالات متحده)

جرم زمین  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$  است و بنابراین،

$$M_p = (6 \times 10^{24} \text{ kg}) (1/8 \times 10^{-3}) = 1/1 \times 10^{22} \text{ kg}$$

با جرم و قطر پلوتو می توانیم چگالی آن را (در گستره عدم قطعیت شعاع) بدست آوریم. نتیجه ۵۰۰ الی  $800 \text{ kg/m}^3$  است و بر این موضوع اشاره دارد که پلوتو عمدتاً شامل یخ و گازهای منجمد دیگر است.

توجه کنید که نمی توانیم با به کار بردن قانون سوم کپلر با تقریب معمولی مقدار دقیقی برای جرم پلوتو به دست آوریم، زیرا جرم چارون حدود ۱۰ درصد جرم پلوتو است. ما این نسبت جرمها را از مشاهدات مرکز جرم سیستم پلوتو - چارون به دست می آوریم و از قانون سوم کپلر مجموع جرمها نتیجه می شود. بنابراین، اگر چارون چگالی ای تقریباً برابر چگالی پلوتو داشته باشد (تقریباً  $800 \text{ kg/m}^3$ ) قطر آن حدود  $1300 \text{ km}$  یعنی نصف قطر پلوتو می شود.



ب

شکل ۶-۱۶. پلوتو و چارون. (الف) اندازه‌های نسبی. (ب) مدار چارون به دور پلوتو به گونه‌ای که در سال ۱۹۸۰ میلادی از روی زمین مشاهده شد.

تحقیق در رصد خانه لاول برای سیارات دیگری در ورای نپتون بدون حصول نتایج مثبت بیشتری در سال ۱۹۴۵ میلادی به پایان رسید. سیاره‌ای با همان مشخصات پلوتو، اما در فاصله دورتری از خورشید شانس بسیار کمی برای کشف شدن دارد. بعضی از ستاره‌شناسان سیاره دهمی هم فرض کرده‌اند که به صورت برگشتی در ورای پلوتو در حال گردش است (این فرض از آشفتگیهای مشاهده شده برای ستاره‌های دنباله‌دار ناشی شده است)، اما تاکنون هیچ چیزی مشاهده نگردیده است. در غیر این صورت

تحقیق تومبو که ۱۳ سال طول کشید باید ستاره‌ای مانند نپتون را که به اندازه  $100 \text{ AU}$  از خورشید فاصله دارد، آشکار می‌کرد.

## مسائل

- دوره‌های تناوبی مدارِ ذراتی را که در لبه‌های داخلی و خارجی حلقه‌های زحل قرار دارند، تعیین کنید. در چه فاصله‌ای از مرکز زحل ذره در مدت  $14^m 10^h$  به دور سیاره خواهد چرخید؟ نشان دهید که ذرات داخلی حلقه‌ها از مغرب آسمان زحل طلوع و در مشرق غروب می‌کنند و ذرات خارجی از مشرق طلوع و در مغرب غروب می‌کنند. آیا این نتیجه یک معما است؟ توضیح دهید.
- نشان دهید که مدارهای اقمار اورانوس در یک دوره ۱۰۰ ساله از روی زمین به نظر می‌رسند.
- نشان دهید که اقمار نپتون از قانون (هماهنگ) سوم کپلر پیروی می‌کنند و جرم نپتون را نتیجه بگیرید. (راهنمایی: از واحدها یا نسبت‌های مناسب استفاده کنید.)
- اگر شعاع پلوتو  $1500 \text{ km}$  باشد جرم آن چقدر باید باشد تا به سیاره، یک چگالی به اندازه یکی از قمرهای یخی زحل بدهد؟
- مشتری یک میدان مغناطیسی قوی در حدود  $10^{-5} \text{ T}$  در فاصله  $10^4 \times 2/5$  کیلومتری از سطح سیاره دارد (بیشتر از (۱)). اندازه مغناطیس سپهر مشتری را تخمین بزنید و آن را با مغناطیس سپهر زمین مقایسه کنید. فرض کنید که میدان، یک دو قطبی است و فشار باد خورشیدی در فاصله  $R$  از خورشید به صورت  $\frac{1}{R^2}$  کاهش می‌یابد. (راهنمایی: فشار میدان مغناطیسی با مربع شدت میدان متناسب است.)
- مشاهدات مادون قرمز نشان می‌دهند که زحل  $2/8$  برابر انرژی را که از خورشید برای یک کاهش قدرت داخلی کل  $2 \times 10^{17}$  وات می‌گیرد، پس می‌دهد. فرض کنید که انقباض گرانشی این انرژی حرارتی را آزاد می‌سازد. در هر سال، زحل چه مقدار باید انقباض پیدا کند که این مقدار انرژی خروجی را تأمین نماید؟
- فرض کنید که گرمای داخلی زحل از زمان به وجود آمدن انقباض سیاره بر جای مانده باشد. بیشینه هدایت گرمایی حجمی مورد نیاز که سیاره برای نگه‌داری انرژی

داخلی کافی جهت حفظ تابندگی فعلی‌اش را لازم دارد، حساب کنید. محاسبات نظری نشان می‌دهند که تابندگی بیشینه زحل در  $4/5$  بیلیون سال پیش حدود  $10^{20}$  بوده است. هدایت گرمایی  $K$  عبارت است از شارش انرژی گرمایی در واحد زمان بر واحد سطح به ازای واحد گرادین دما (واحدها عبارتند از  $J/s \cdot m \cdot K$ )، بنابراین

$$k = -\frac{H}{A} \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$$

که در آن  $H$  شارش انرژی گرمایی ( $J/s$ )،  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  شیب دما ( $k/m$ ) و  $A$  مساحت ( $A^2$ ) سطح است.

۸. مشاهدات طیف نگاری پیشنهاد می‌کنند که پلوتو از ذرات یخی پوشیده شده است و بنابراین دارای آلبدو بالایی است ( $0/5$ ). روشنایی پلوتو در نقطه مقابله ( $38AU$ ) از زمین ( $10^{-17} \times 2$ ) برابر روشنایی خورشید است ( $1AU$  تا زمین). از این دو مشاهده شعاع پلوتو را محاسبه کنید.

۹. تصور کنید که شما در حال مشاهده‌گرفتی چارون به وسیله پلوتو هستید.

(الف) چگونه می‌توانید از مشاهداتتان استفاده کنید که قطری برای پلوتو بدست آورید؟

(ب) روشنایی کلی سیستم در نیمه‌گرفتی تا چه درصدی کاهش پیدا می‌کند؟

۱۰. عمر متان را در جوهای مشتری و اورانوس تخمین بزنید.

۱۱. با استفاده از معادله تعادل هیدرواستاتیکی، فشارهای مرکزی زحل و اورانوس را تخمین بزنید.

۱۲. دماهای تعادلی جسم سیاه اورانوس و نپتون را محاسبه و مقادیر بدست آمده خود را با دماهای اندازه‌گیری شده که در متن داده شده‌اند، مقایسه کنید.

## اجرام کوچک و منشاء منظومه شمسی

چهار فصل قبلی درک جاری ما را از سیارات بیان کرد. تا اینجا توجه خود را به تحول این اجرام بزرگ در منظومه شمسی معطوف کرده‌ایم، و تنها به شکل‌گیری آنها اشاره مختصری نموده‌ایم. کلید درک منشاء منظومه شمسی در اجرام سماوی کوچک آن نهفته است: اقمار، حلقه‌ها، سیارکها<sup>۱</sup>، شهاب‌ها، ستاره‌های دنباله‌دار و گرد و غبار بین سیاره‌ای. این فصل درباره خواص این ذرات بین سیاره‌ای بحث می‌نماید و آنها را به یک الگوی جدید از شکل‌گیری منظومه شمسی که ۴/۶ بیلیون سال پیش اتفاق افتاده است، مرتبط می‌سازد.

### ۷-۱ اقمار و حلقه‌ها

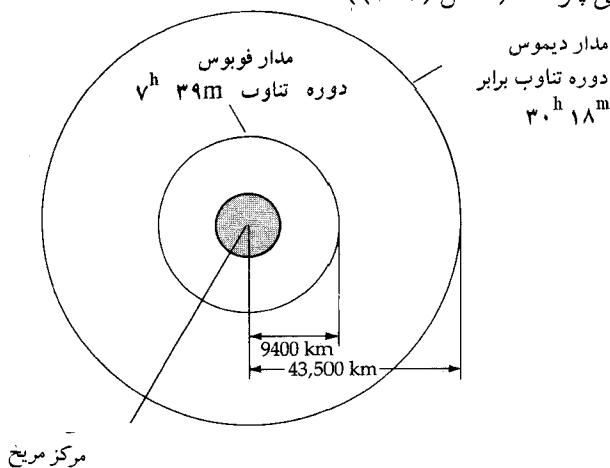
فقط سه قمر در اطراف تمامی سیارات خاکی در چرخش هستند (ماه، مایا، دیموس و

1. asteroid.

فوبوس<sup>۱</sup> (از مریخ). در مقابل، سیارات مشتری گون دارای حداقل پنجاه قمر (بدون در نظر گرفتن چارون) و همچنین چندین حلقه هستند که شامل تعداد زیادی قمر کوچک می‌باشند. در این بخش، این اجرام که از صخره‌های کوچک تا اجرامی به اندازه‌های سیاره‌ای را در بر می‌گیرد بررسی می‌شوند.

### (الف) اقمار مریخ

دو قمر در اطراف سیاره مریخ می‌چرخند؛ بر حسب اقتضا پس از دوستی اساطیری با خدای جنگ آنها را فوبوس و دیموس («ترس» و «هراس») نامگذاری کرده‌اند. آساف هال<sup>۲</sup> (۱۸۲۹-۱۹۰۷ میلادی) در رصدخانه نیروی دریایی آمریکا این دو قمر را در سال ۱۸۷۷ میلادی کشف کرد، هر دوی آنها در نزدیکی مریخ قرار دارند و به سرعت در اطراف آن می‌چرخند (شکل (۷-۱)).



شکل ۷-۱. مدارهای فوبوس و دیموس.

دیموس، قمر بیرونی، در مدت ۳/۳۰ ساعت به دور مریخ می‌چرخد؛ فوبوس، قمر درونی، فقط در ۷/۶۷ ساعت این عمل را انجام می‌دهد. در حقیقت، فوبوس یکی از دو قمری است (قمر دیگر، درونی‌ترین قمر مشتری است که، J1 ۱۹۷۹، توسط ویجر کشف شد) که سریعتر از چرخش سیاره مادر، به دور آن می‌چرخد. لذا، آن طوری که در سطح

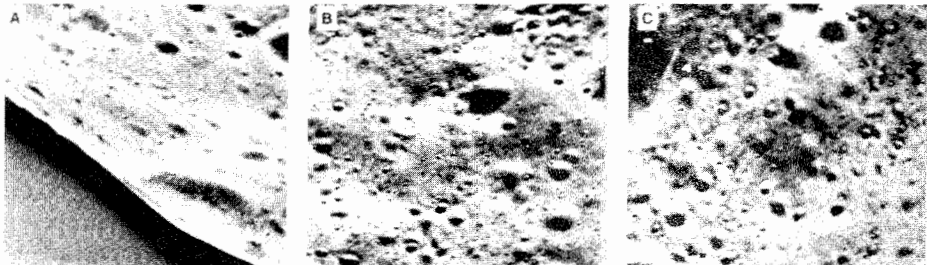
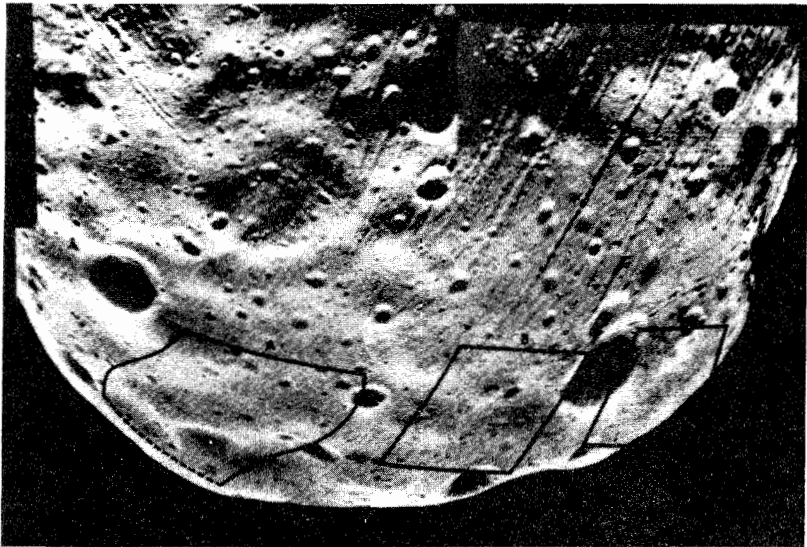
1. Phobos.

2. Asaph Hall.

مریخ دیده شده است فوبوس از غرب طلوع کرده و در شرق غروب می‌نماید! مانند قمر زمین، قمرهای مریخ نیز یک جهت را در چرخش همزمان به طرف سیاره حفظ می‌کنند. مشاهدات سفینه فضایی نشان داده است که دیموس و فوبوس اشکال بیضی‌گون با سه محور دارند. فوبوس، قمر بزرگتر، محورهایی به طول ۲۷، ۲۱ و ۱۹ کیلومتر دارد؛ محورهای دیموس فقط ۱۵، ۱۲ و ۱۱ کیلومتر هستند. عکس‌ها همچنین نشان می‌دهند که فوبوس (شکل (۷-۲)) و دیموس سطحی مانند دهانه‌های آتش‌فشانی دارند. اندازه‌ها و تعداد این دهانه‌های آتش‌فشانی خاطر نشان می‌سازند که سطح این اقمار حداقل ۴ بیلیون سال عمر دارند و از زمان آتش‌فشانی به میزان کمی تغییر کرده‌اند.

منشاء این اقمار کوچک چیست؟ یک نشانه از آلدوها بدست می‌آید: ۰/۰۲۲ برای دیموس و ۰/۰۱۸ برای فوبوس در طیف مرئی - بسیار کمتر از انعکاس ماه ما. این سطوح تاریک به دسته معینی از شهاب سنگها شباهت دارند (کندرایت‌های کربنی، بخش (۷-۴)) و سیارکها (مانند سرس، بخش (۷-۲)). همچنین، خاطر نشان می‌شود که مریخ نزدیکترین سیاره خاکی به کمر بند سیارکی است (فاصله متوسط بین مریخ و سیارکها ۱/۳ AU است). بنابراین، مریخ احتمالاً هر دو قمر را از سیارکهای با خروج از مرکز بسیار زیاد که از نزدیک آن عبور می‌کردند، جذب کرده است. محاسبات نظری خاطر نشان می‌سازد که این گونه جذب امکان پذیر می‌باشد. (و شما خواهید دید که مشتری مجموعه‌ای از اقمار سیارکی دارد.)





شکل ۷-۲. فوبوس. این عکس‌های برجسته دهانه‌های آتشفشانی را با قطری به کوچکی ۱۰ متر نشان می‌دهند. انتهای مسطح آنها یک سطح خاکی با صدها متر عمق را نشان می‌دهند. (ناسا)

### (ب) اقمار و حلقه‌های مشتری

مشتری حداقل دارای ۱۶ قمر است. بزرگترین و درخشان‌ترین آنها اولین بار توسط گالیله با یک تلسکوپ کشف شد. مدارهای آنها درون زاویه  $3^\circ$  نسبت به صفحه استوایی مشتری نزدیک خط دید ما قرار دارند. این اقمار عظیم در فاصله  $10^6 \times 2$  کیلومتر از مشتری به ترتیبی که ذکر می‌شود، می‌چرخند: آیو، اروپا، گانیمد<sup>۲</sup> و

1. Europa.

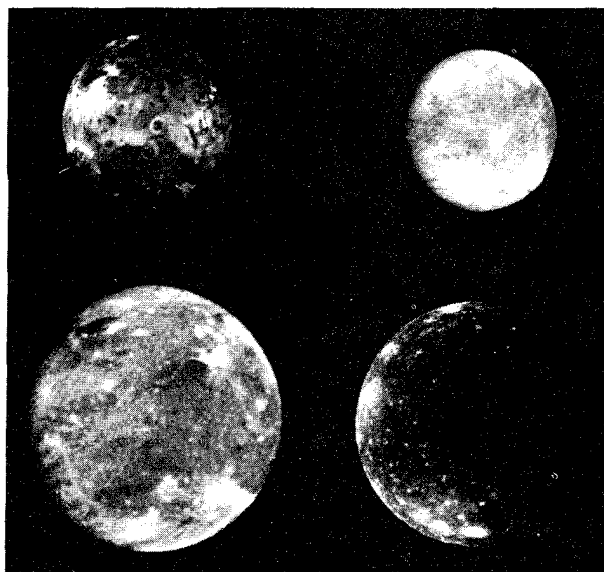
2. Ganymede.

کالیستو<sup>۱</sup>. نظیر قمر زمین، همواره یک طرف اقمار فوق به سمت مشتری قرار دارد. اقمار گالیله نسبتاً بزرگ هستند (جدول (۷-۱)): گانیمد و کالیستو هر دو بزرگتر از عطارد هستند، و آیو قدری بزرگتر و اروپا قدری کوچکتر از ماه ما است.

جدول ۷-۱. خصوصیات اقمار گالیله.

اسم	قطر	فاصله متوسط از مشتری	دوره تناوب مداری	چگالی حجمی	جرم
آیو	۳۶۳۸	$4/22 \times 10^5$	۱/۷۷	۳۵۳۰	۱/۲۱
اروپا	۳۱۲۶	$6/71 \times 10^5$	۳/۵۵	۳۰۳۰	۰/۶۶
گانیمد	۵۲۷۶	$1/07 \times 10^6$	۷/۱۶	۱۹۳۰	۲/۰۳
کالیستو	۴۸۴۸	$1/883 \times 10^6$	۱۶/۶۹	۱۷۹۰	۱/۴۵

هر یک از اقمار گالیله دنیایی متفاوت از سایرین و مختص به خود دارد (شکل (۷-۳)). این تفاوتها از چگالیهای حجمی متفاوت آنها نتیجه می شود: آیو،  $3500 \text{ kg/m}^3$ ؛ اروپا  $3000 \text{ kg/m}^3$ ؛ گانیمد  $1900 \text{ kg/m}^3$ ؛ و کالیستو  $1800 \text{ kg/m}^3$ . این سیاهه بر طبق افزایش فاصله از مشتری است. به نقشه توجه کنید: چگالی با افزایش فاصله از مشتری کاهش می یابد. این تفاوتهای چگالی نشان می دهد که ترکیبات آیو و اروپا با ماه ما شباهت دارد - اکثراً صخره، شاید به همراه کمی مواد یخی. در مقابل، گانیمد و کالیستو باید مقادیر قابل ملاحظه ای یخ آب یا سایر مواد یخی با چگالی کم داشته باشند و متناسباً مقادیر خیلی کمتری از صخره را نسبت به اقمار داخلی تر شامل باشند.



شکل ۷-۳. اقمار گالیله‌ای مشتری در اندازه‌های نسبی صحیحشان: آیو (سمت چپ بالا)، اروپا (سمت راست بالا)، گانیمد (سمت چپ پایین) و کالیستو (سمت راست پایین). (ناسا)

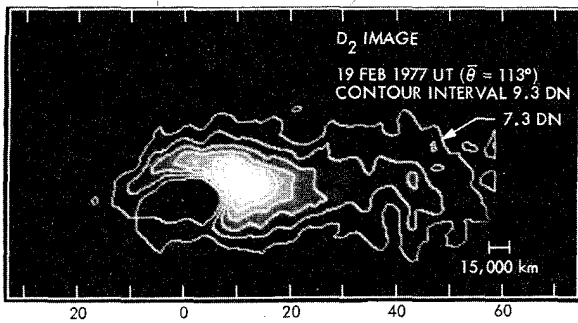
## آیو

یکی از جذابترین اجرام در منظومه شمسی، آیو است که دارای جهانی مختص خود می‌باشد. سه چهارم اندازه عطارد! آیو به طور قابل ملاحظه‌ای جو رقیقی دارد. (تنها دو قمر دیگر، تیتان<sup>۱</sup> از زحل<sup>۲</sup> و تریتون<sup>۳</sup> از نپتون<sup>۴</sup>، دارای جو می‌باشند.) فشار جو در سطح آیو حدود  $10^{-10}$  جو است.

جو آیو خصوصیت ویژه‌ای دارد: نور زرد تابش می‌کند که توسط اتمهای سدیم گسیل می‌شود. این تابش سدیم آیو را مانند یک هاله زرد تا فاصله‌ای حدود ۳۰۰۰۰ km در بر می‌گیرد (شکل (۷-۴)) و سپس تا حدود ۳۰۰۰۰۰ km در امتداد مدار آیو گسترش می‌یابد و یک حلقه جزئی از گاز را در اطراف مشتری تشکیل می‌دهد. انفجارهای آتش‌فشانی، حداقل در یک قسمت، ابر سدیم آیو را تولید می‌کنند. بر طبق عکس‌های

1. Titan.  
3. Triton.

2. Saturn.  
4. Neptune.



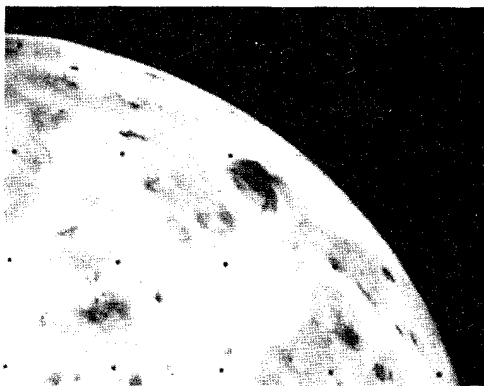
شکل ۷-۴. ابر سدیم آیو. خطوط پیریند نمایانگر گسیل از سدیم محاصره کننده آیو می باشد. (آزمایشگاه جهت پراپولشن، ناسا)

ویجر، آیو حداقل یازده آتش فشان فعال دارد. در حقیقت، آیو فعالترین جرم سماوی آتش فشانی در منظومه شمسی است؛ آتشفشانهای فوران کننده و دریاچه های گدازه بخارآلود آن دلالت می کند که درون آن داغ است. آتش فشانها ستونهایی از گاز و گرد و غبار را تا ارتفاعات ۲۵۰ کیلومتری با سرعتهایی تا  $1000 \text{ m/s}$  پرتاب می کنند. (در مقایسه با آتش فشانهای بزرگ زمین که مواد را با سرعت حدود  $50 \text{ m/s}$  خارج می سازد.) در یک جسم سماوی تقریباً بدون هوا همانند آیو، گاز و گرد و غبار آتش فشانی در چند دقیقه آرایشی شبیه کوه دارند و سپس در یک شکل گنبدی پخش شده و بر روی آن می ریزند (شکل ۷-۵)).

آتش فشانهای آیو دارای شکل متفاوتی از آنچه معمولاً در روی زمین، زهره و مریخ یافت می شود، دارند. تعداد کمی به شکل مخروط یا سپر ظاهر می گردند. در عوض، آنها شبیه دهانه های آتش فشانی فرو ریخته هستند که گدازه به سادگی از سوراخ یک دهانه آتش فشان بیرون ریخته و تا شعاع صدها کیلومتری در اطراف پخش می شود. بنابراین، دریاچه های گدازه چند رنگ، بسیاری از آتش فشانهای آیو را محاصره کرده اند؛ دما در این دریاچه های گدازه حدود  $330$  درجه کلوین است. رنگ آمیزی قرمز، سیاه، زرد، نارنجی و سفید که بیشتر آنها را می توان به وجود گوگرد و ترکیبات گوگردی نسبت داد، آیو را به طرز تماشایی رنگین می کنند. از آنجائی که فعالیت آتش فشانی به طور پیوسته سطح آیو را تغییر می دهد، آیو باید بسیار جوان باشد. هیچ دهانه آتش فشانی



الف



ب

شکل ۷-۵. آتش‌فشانه‌های روی آیو. (الف) دو انفجار در بالا قابل مشاهده هستند. ارتفاع آنها حدود ۱۰۰ km است. (ب) سطح آیو با یک آتش‌فشان فعال. (ناسا)

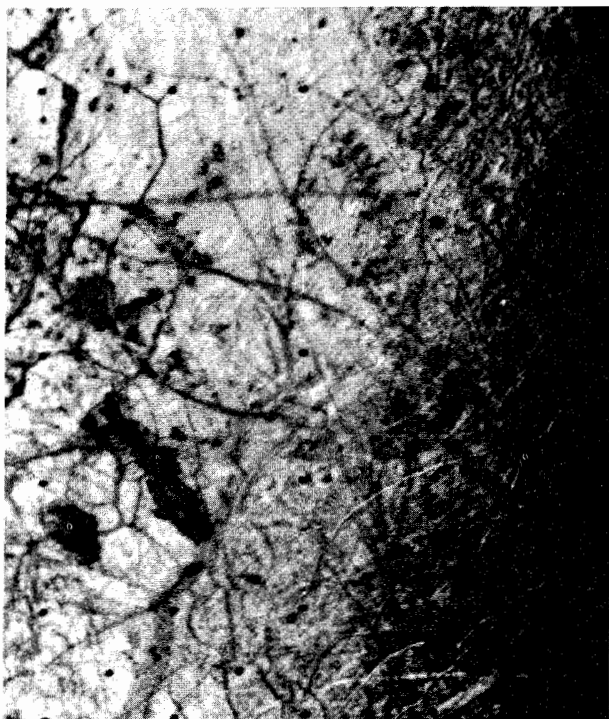
بر خوردی بر روی آیو ظاهر نمی شود؛ شارشهای آتش فشانی همه آنها را پوشانده است. سطح آن در منظومه شمسی جواترین می باشد، احتمالاً کمتر از یک میلیون سال عمر. چرا درون آیو داغ است؟ گرانش حاصل از سایر اقمار گالیله باعث می شود آیو در مداری با خروج از مرکز قرار داشته باشد و لذا فاصله اش از مشتری به طور قابل ملاحظه ای تغییر می کند. این تغییرات فاصله سبب می شود نیروهای بزرگ و متغیر جزر و مدی از سوی مشتری روی آیو عمل کرده و دمای درونش را از فشار پیوسته حاصل از نیروهای جزر و مدی بالا ببرد.

### اروپا

سیمای سطحی اروپا از ناحیه های روشن یخی آب در میان نواحی تاریکتر نارنجی - قهوه ای تشکیل شده است. سطح اروپا توسط نوارها و تسمه هایی که احتمالاً با شکستگی هایی در پوسته یخ پر شده اند، مشبک شده است.

جذاب ترین اشکال در روی اروپا علائم تاریکی هستند که چهره آن را مشبک کرده اند، و باعث گشته اند که شبیه یک پوسته تخم مرغ ترک خورده بنظر برسد (شکل ۷-۶). برخی از این ترک ها در حدود هزاران کیلومتر امتداد می یابند، و به پهنای ۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر شکافته می شوند، اما فقط به عمق ۱۰۰ متری یا در حدود آن می رسند. سطح اروپا تقریباً عاری از دهانه های آتش فشانی برخوردار است و لذا نمی تواند قدیمی باشد؛ باید از زمان شکل گیری اش تحول یافته باشد. پوسته آن پس از شکل گیری برای از بین بردن شواهد بمبارد مان شدید اولیه باید گرم و در بعضی موارد نرم بوده باشد.

سطح ترک خورده اروپا دلالت بر این دارد که پوسته یخی جامد آن نازک است و درونش داغ و در ابتدا مذاب بوده است. چگونه اروپا به این مسیر کشیده شد؟ یک الگوی آزمایشی پیشنهاد می کند که پوسته آن مدت ها پیش گِل مانند بوده است که توسط یک درون داغ به طور جزئی مذاب نگه داشته شده بود. به تدریج که اروپا سرد شد، پوسته آن به شکل صیقلی و یخ آینه ای تغییر کرد که بعدها ترک خورد.



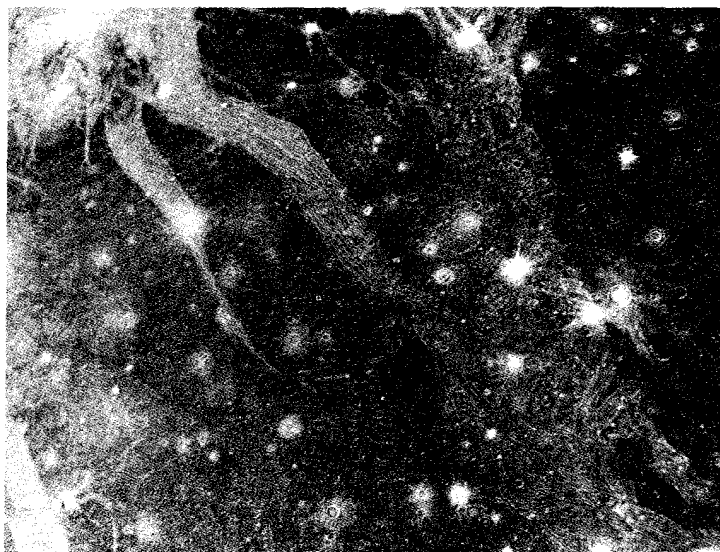
شکل ۶-۷. سطح اروپا. این منظره نزدیک، مساحتی به ابعاد ۶۰۰ در ۸۰۰ کیلومتر را نشان می‌دهد. لبه‌های روشن به عرض ۵ تا ۱۰ کیلومتر و نوارهای تاریک به عرض ۲۰ تا ۴۰ کیلومتر هستند. (ناسا)

### گانیمد

بزرگترین قمر مشتری (شعاع ۲۶۴۰ کیلومتر) گانیمد است که به عنوان بزرگترین قمر در منظومه شمسی به حساب می‌آید. (تیتان زحل، دومین است.) سطح آن به طور مبهمی با نواحی تاریک و شبه دریا، مانند قمر ما بنظر می‌رسد. گانیمد همانند اروپا دارای خطوط عظیم جابجا شده‌ای در طول سطحش می‌باشد.

گانیمد دو نوع ناحیه اساسی خاکی دارد (شکل ۷-۷): دهانه‌دار و شیاردار. دهانه‌های آتش‌فشانی تا قطر ۱۵۰ کیلومتر به میزان زیادی ناحیه دهانه‌دار را مشخص می‌کنند. فراوانی آنها نشان می‌دهد که قسمت دهانه‌دار خاکی حدود ۴ بیلیون سال عمر

دارد. در مقایسه با موارد مشابه روی ماه و عطارد، دهانه‌ها به نسبت اندازه‌شان کم عمق هستند، و برخی دارای بستر محدب، به جای مقعر می‌باشند. دهانه‌های گانیمد همچنین از این لحاظ با دهانه‌های ماه و عطارد تفاوت دارند که به جای قله‌های مرکزی دارای حفره‌های مرکزی هستند. بسیاری از دهانه‌های روی گانیمد دارای پرتوهای بسیار روشن هستند که از آنها امتداد می‌یابد (شکل ۷-۷) و شکل‌گیری آنها را توسط برخوردهایی روی یک سطح یخ زده تأیید می‌کند.



شکل ۷-۷. سطح گانیمد. این عکس قسمتهایی به کوچکی ۵ کیلومتر را نشان می‌دهد. به آثار دهانه‌های برخوردی تازه با پرتوهای روشن دقت کنید. نواحی تاریک، قدیمی‌ترین قسمت سطح هستند. (ناسا)

ناحیه شیاردار خاکی، ناحیه خاکی دهانه‌دار را به قسمتهای چند ضلعی مانند تجزیه می‌کند. ناحیه شیاردار در محلی که زمین لیز، بریده و شکافته شده است از موزائیک رشته‌های روشن و شیارهای تاریکتر تشکیل یافته است. ترک‌های طویل، در محلی که سطح حدود صدها کیلومتر به یک طرف حرکت کرده است نیز زیاد می‌باشد.

نواحی کوههای بزرگ و یا بسترهای بزرگ رود در گانیمد وجود ندارند؛ در هیچ محلی مقدار برجستگی از حدود یک کیلومتر تجاوز نمی‌کند. در بعضی نواحی،

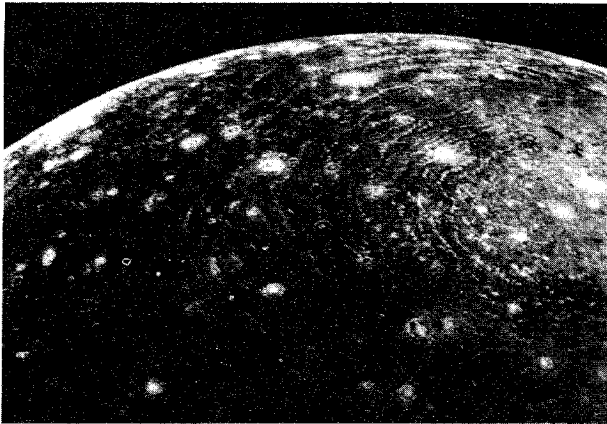


زمین‌هایی کوچک و روشن به همراه فقط مقدار کمی دیواره در اطراف مانند فرورفتگی یک دهانه در سطح نرم بنظر می‌رسد. وجود این قسمت‌ها پیشنهاد می‌کند که پوسته گانیمد تا حدودی تغییر پذیر است. حاشیه‌های دهانه‌ها و کوهها به آهستگی در سطح فرو می‌روند؛ بستر دهانه‌ها به تدریج پر می‌شوند. این سیال تغییر پذیر احتمالاً نتیجه وجود مقادیر زیادی یخ آب در پوسته گانیمد می‌باشد. چگالی حجمی گانیمد تأکید می‌کند که درون آن نیمی آب و نیمی صخره است. فشارهای اتفاقی روی پوسته صخره آب طرح شکستگی‌ها را خلق کرده است. برخی رشته‌ها و شیارها روی سایرین قرار می‌گیرند و این دلالت بر وجود چندین فقره از تغییر شکل پوسته‌ای دارد.

### کالیستو

دورترین قمر گالیله، کالیستو (شکل ۷-۸) دارای سطحی است که بیشترین شباهت را به ماه ما و عطارد دارد. سطح آن غربال‌مانند با دهانه‌هایی در گستره وسیعی از اندازه‌ها است. برخی پرتوهای روشن یخ دارند؛ سایرین با یخ پر شده‌اند. دهانه‌های کالیستو کم عمق هستند، کمتر از چند صد متر عمق، زیرا سطح آن مخروطی از یخ و صخره است. سطح به آرامی حرکت دارد و هرگونه برجستگی را تسطیح می‌کند.

کالیستو یک طرح عظیم و زیبای چند حلقه‌ای دارد (شکل ۷-۸). طبقه مرکزی این طرح ۶۰۰ کیلومتر قطر داشته و توسط ۲۰ تا ۳۰ حلقه کوه با قطرهایی تا ۳۰۰۰ کیلومتر محاصره شده است. حلقه‌ها مانند یک رشته از امواج منجمد بنظر می‌رسند که ممکن است در یک برخورد شگفت‌انگیز که سطح یخ را ذوب کرده است تشکیل یافته باشند، سپس باعث شدند که آب در موج‌ها پراکنده شده و به سرعت در دمای سطحی  $100^{\circ}\text{K}$  سطح سیاره یخ بزند. نشانه‌های چین و شکن‌ها به عنوان حلقه‌ها حفظ شده‌اند: امواج وزشی منجمد. طبقه مرکزی این شکل حلقه‌ای دارای دهانه‌های کمتری از بقیه نواحی است. این اختلاف دلالت بر این دارد که برخوردهایی که حلقه را تشکیل داده‌اند اغلب پس از دهانه‌دار شدن سطح احتمالاً  $3/5$  تا ۴ بیلیون سال پیش اتفاق افتاده‌اند.



شکل ۷-۸. سطح کالیستو. حلقه بیرونی حوضچه برخورد بزرگ در حدود ۲۶۰۰ کیلومتر عرض دارد. به دهانه‌های برخوردی تازه در سطح تاریک و یخ زده توجه کنید. (ناسا)

### اقمار سیارکی

سایر اقمار مشتری اجرام شبه سیارکی هستند و ما انتظار داریم که آنها واقعاً از سیارکها جذب شده باشند. (یادآوری می‌شود که مشتری درست در خارج کمربند سیارکها قرار دارد.) دو گروه هر یک با چهار قمر وجود دارند یک گروه در فاصله‌ای حدود  $1/2 \times 10^7$  کیلومتر که در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت (مستقیم) و گروه دیگر در فاصله حدود  $2/3 \times 10^7$  کیلومتر در جهت حرکت عقربه‌های ساعت (برگشتی) می‌چرخند.

ما از نزدیک یک قمر سیارکی دیگر را مشاهده کرده‌ایم - آمالتی<sup>۱</sup> - فقط ۱۸۱۰۰۰ کیلومتر دور از مشتری است، و هر ۱۲ ساعت یک بار به دور آن می‌چرخد. این قمر به اندازه ۲۷۰ کیلومتر در ۱۵۵ کیلومتر امتداد یافته است؛ سطح آن دهانه‌دار بوده و رنگ قرمز تیره دارد. این شکل ناموزون، اندازه کوچک و سطح تاریک و دهانه‌دار قمر، بر ماهیت شبه سیارکی آن تأکید می‌کند (اطلاعات بیشتر درباره سیارکها در بخش (۷-۲)). به نظر می‌رسد که این قمر به دیموس و فوبوس شباهت داشته باشد (به جز این که این

قمر بزرگتر است).

### حلقه‌ها

ویجر ۱ سیستم حلقوی مشتری را کشف کرد. حلقه‌ها به قدری نازک هستند (ضخامت کمتر از ۳۰ کیلومتر) که اساساً شفاف می‌باشند. وقتی به لبه‌ها بنگریم آنها در بهترین موضع دید قرار دارند؛ سپس ذرات نور را بخوبی پراکنده می‌سازند که دلالت بر این دارد که ذرات باید ریز باشند، با قطری در حدود  $3\mu\text{m}$ . ما هنوز نمی‌دانیم که آنها از چه ساخته شده‌اند، اما بر اساس خواص مادون قرمز آنها، به نظر می‌رسد که جنس آنها از یک ماده صخره‌ای است.

عکس‌های هنری از حلقه‌های زمینه روشن (شکل (۷-۹)) نشان می‌دهد که یک ساختار معین دارند. روشن‌ترین قسمت لبه خارجی ۸۰۰ کیلومتر عرض داشته و در حدود ۱۲۸,۵۰۰ کیلومتری مرکز مشتری قرار دارد. در این بین یک حلقه عریض‌تر به پهنای ۶۰۰۰ کیلومتر وجود دارد و درون آن حلقه یک ورقه نازک از مواد است که به فاصله ۱۱۹,۰۰۰ کیلومتری خارج از مرکز مشتری به طرف پائین تا قتل ابرها امتداد می‌یابد. توجه کنید که حلقه اصلی از  $1/72R_j$  تا  $1/81R_j$  امتداد دارد که کل سیستم حلقوی را بخوبی درون محدوده روچ<sup>۱</sup> (معادله (۳-۹)) برای یک قمر سیال قرار می‌دهد.

عکس‌های زاویه باز پیشرفته کامپیوتری ویجر از حلقه‌ها نشان می‌دهد که یک حلقه ضعیف خارجی سیستم را احاطه کرده است. این حلقه، حلقه تارنکیوت نامیده می‌شود، و تقریباً درون مسیر چرخش آملتی قرار دارد، اگر چه برخی از مواد آن تا ۲۱۰,۰۰۰ کیلومتری به خارج امتداد یافته‌اند. ضخامت حلقه کمتر از ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد، و از ذرات با اندازه میکرومتری ساخته شده است. این ذرات با پلاسما در مغناطیس سپهر برخورد کرده و در اثر این برخوردها در مدتی حدود فقط ۱۰۰۰ سال به خارج جاروب می‌شوند. بنابراین، ذرات آن باید از اعمار نزدیک آن دوباره پر شوند مگر این که حلقه تارنکیوت بسیار جوان باشد.



شکل ۷-۹. حلقه‌های مشتری. این منظره نشان می‌دهد که لبه خارجی حلقه‌ها ضخیم‌تر از لبه داخلی است و دیگر این که ورقه‌ای از ذرات بین دو لبه وجود دارد. (ناسا)

### (ج) اقمار و حلقه‌های زحل

تعداد اقمار زحل حداقل ۱۷ تا است. به استثنای دو عدد از آنها (فوئب<sup>۱</sup> و ایاپتوس<sup>۲</sup>)، همه قمرها نزدیک به صفحه استوایی زحل چسبیده‌اند. جرم برخی از آنها از نیروی جاذبه گرانشی آنها بر روی سفینه فضایی تعیین شده است. چگالیها در گستره‌ای از  $1200 \text{ kg/m}^3$  برای تیتیس<sup>۳</sup> تا  $1400 \text{ kg/m}^3$  برای دایون<sup>۴</sup>، شبیه چگالیهای اقمار گالیله‌ای خارجی مشتری قرار دارند.

اقمار زحل در سه گروه قرار می‌گیرند: تیتان به تنهایی، شش قمر بزرگ یخی (میماس<sup>۵</sup>، انکلادوس<sup>۶</sup>، تیتیس، دایون، ری<sup>۷</sup> و ایاپتوس به ترتیب دور شدن از زحل)، و ده قمر کوچک دیگر (فوئب، هایپریون<sup>۸</sup> و سایرین) رویهمرفته چگالی آنها کمتر از  $2000 \text{ kg/m}^3$  است که دلالت بر این دارد که عمدتاً از یخ (۶۰ تا ۷۰ درصد) به همراه

1. Phoebe
3. Tethys.
5. Mimas.
7. Rhea.

2. Iapetus.
4. Dione.
6. Enceladus.
8. Hyperion.

مقداری صخره (۳۰ تا ۴۰ درصد) تشکیل شده‌اند. بر خلاف اقمار گالیله ترتیب چگالی یا فاصله از زحل رعایت نشده است. همانند اقمار مشتری، همه قمرهای زحل به جزء یکی (فوب) همواره یک طرفشان به سمت سیاره می‌باشد؛ آنها چرخش همزمان دارند. اغلب اقمار حفره‌دار هستند. برخی نواحی حفره‌دار در قمرهای بزرگتر تغییر یافته‌اند که نشان می‌دهد گرمای درونی سیاره قسمتهای سطوح یخی را ذوب می‌کند. در مقابل، قمرهای کوچک که آنها نیز حفره‌دار هستند، هیچ تغییری را نشان نمی‌دهند - آنها هنوز سطح اصلی اولیه خود را دارا هستند. آنها ممکن است قطعاتی از یک جرم بزرگتر اولیه باشند. دقت کنید که حفره‌هایی که اینجا می‌بینیم تأکید می‌کنند که بمباردمان شدید سطح سیاره‌ای ۴ بیلیون سال پیش در سراسر منظومه شمسی اتفاق افتاده است.

#### تیتان

تیتان، بزرگترین قمر، جرم  $10^{23} \times 1/37$  و شعاع  $2560 \text{ km}$  دارد. چگالی آن  $1900 \text{ kg/m}^3$  است که دلالت بر ترکیب نیمی یخ و نیمی صخره می‌کند. تیتان اولین قمر کشف شده دارای جو بود. طیفسنجی ماوراءبنفش روی ویجر نشان داد که این جو عمدتاً از ازت (۹۹ درصد) به همراه حدود یک درصد متان تشکیل شده است. چند هیدروکربور نیز شناسایی شده‌اند، منجمله اتان، استیلن، اتیلن و سیانید هیدروژن. فشار جو در سطح حدود  $1/5$  جو و دمای آن حدود  $94$  درجه کلوین است.

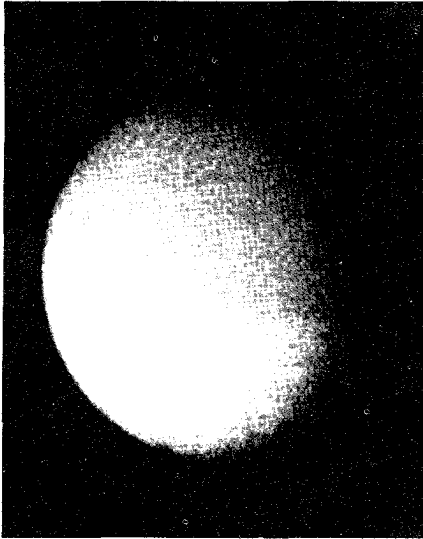
عکس‌های رنگی یک لایه استراتوسفری از بخار نارنجی را نشان می‌دهد که در طول لبه تیتان به رنگ آبی تغییر می‌کند. این تغییر خاطر نشان می‌سازد که ترکیبات جو تغییر می‌کنند. هیچ اشکال سطحی مشاهده نشده است (شکل (۷-۱۰ الف)). داده‌های دما و فشار ویجر، همراه یافته‌های طیف‌نگاری ازت و هیدروکربورها، ما را به الگوهایی از سطح پوشیده شده با اقیانوس منجمدی از ازت، متان و اتان تا عمق یک کیلومتر رهنمون شده‌اند.

#### اقمار دیگر

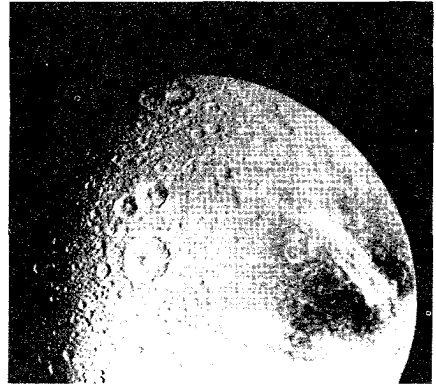
پس از تیتان، چهار قمر بزرگتر زحل عبارتند از: ایاپتوس، ری، دایون و تیتیس با قطرهایی از  $1020$  تا  $1530$  کیلومتر. این اقمار بشدت دهانه‌دار به نظر می‌رسند (شکل

(۷-۱۰ب)). در برخی موارد نادر، دسته رگه‌های سفید، طرح‌های پرتوئی را در اطراف دهانه‌های برخوردی تشکیل می‌دهند. این رگه‌ها احتمالاً ذخایر یخ منجمد هستند، اما این که از مواد صادر شده از دورن سیاره یا از ذخایر ریزی در اثر برخورد اجرام سماوی حاصل شده‌اند بر ما ناشناخته است. ایاپتوس (شکل (۷-۱۰ج)) بیشترین دماهای پوشش سطحی را دارد. نیمکره جلویی در چرخش آن فقط  $\frac{1}{15}$  به روشنی نیمکره عقبی است. به نظر می‌رسد که سطح جلویی با خورده‌های تاریک که در طول سفر آن به دور سیاره جمع‌آوری شده‌اند، پوشیده شده است. فقط انکلادوس دارای سطح ضخیم حفره‌دار نیست و این دلیل مطمئنی است که اخیراً در سطح این قمر تغییراتی حاصل شده است. یک درون داغ می‌تواند سطح یخ زده را ذوب کند؛ یک عکس آتش‌فشان احتمالی را نشان می‌دهد که به وضوح بر یک درون داغ دلالت دارد.

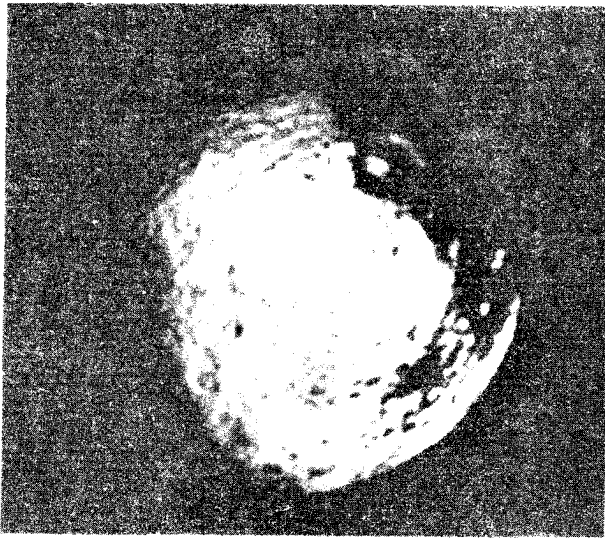
سایر اقمار باقیمانده همگی اجرام کوچک سماوی با قطر چند صد کیلومتر یا کمتر می‌باشند. بزرگترین آنها هایپیرون با ۳۰۰ کیلومتر قطر است. این قمر شکل عجیبی دارد، شبیه یک همبرگر ضخیم، و یک سطح حفره‌دار. سایر اقمار نیز حفره دارند، اما بسیار کوچکتر با قطری کمتر از ۳۰ کیلومتر (شکل (۷-۱۱)). احتمال می‌دهیم که همه این اجرام اساساً یخ باشند، همان‌طوری که اقمار بزرگتر هستند.



الف

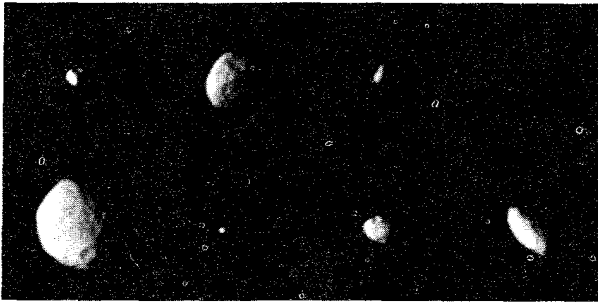


ب



ج

شکل ۷-۱۰. اقمار زحل. (الف) تیتان، نمایش جو مه آلود آن. (ب) دایون، نمایش سطح حفره دار یخی آن. (ج) ایاپتوس، نمایش لایه‌ای سیاه در یک طرف که از پوسته یخی پوشیده شده است. (ناسا)



شکل ۷-۱۱. اقمار کوچک زحل. این عکس مرکب، سطوح شدیداً  
 حفره‌دار این اقمار نامنظم شکل یافته را نشان می‌دهد. (ناسا)

### سیستم حلقه‌ای

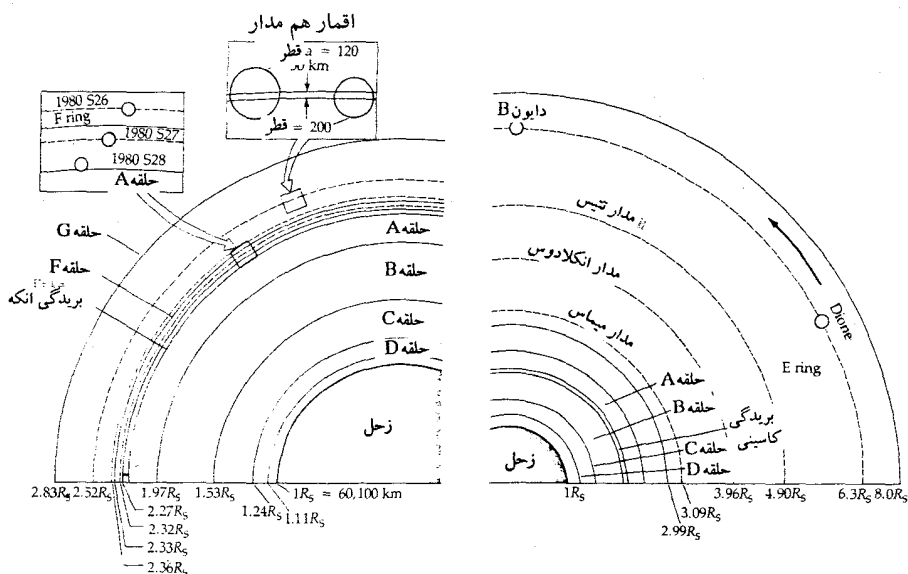
در سال ۱۶۵۹ میلادی، کریستین هیوگنز<sup>۱</sup> مشاهده کرد زحل «به وسیله یک حلقه مسطح نازک احاطه شده است» که با بدنه سیاره تماس ندارد. مشاهدات بعدی توسط کاسینی<sup>۲</sup> شکافی را در حلقه واحد هیوگنز آشکار ساخت؛ این شکاف به نام بریدگی کاسینی نامیده می‌شود. حلقه‌ها در سطح استوایی سیاره قرار دارند و لذا در حدود  $26^\circ$  به طرف صفحه مداری کج شده‌اند، به دلیل این میل، در طول دوره گردش زحل به دور خورشید، ظاهرشان از زمین متفاوت به نظر می‌رسد. عدم ظهور تقریبی نیمرخ حلقه‌ها نشان می‌دهد که خیلی نازک هستند با ضخامتی کمتر از ۲ تا ۵ کیلومتر. حلقه‌ها اگر چه نازکند، اما عریض می‌باشند؛ سه نمونه اصلی آنها از روی زمین مشاهده می‌گردند که در فاصله ۷۱,۰۰۰ تا ۱۴۰,۰۰۰ کیلومتری از مرکز زحل می‌رسند (شکل ۷-۱۲).

عکس‌های ویجر جزئیات مشخصی را در سیستم حلقه‌ای آشکار می‌سازند. اگر چه حلقه A نسبتاً صاف است، اما حلقه‌های B و C به تعداد زیادی حلقه‌های کوچکتر تقسیم می‌شوند (شکل ۷-۱۳). با بهترین تفکیک دوربین‌های ویجر چند صد، شاید یک هزار، حلقه کوچک تاریک و روشن با عرضهایی به کوچکی ۲ کیلومتر، سیاره را احاطه کرده‌اند. برخی (در حلقه C) بیشتر بیضی شکل به نظر می‌رسند تا دایره‌ای. حتی بریدگی

1. Christian Huygens

2. Cassini.

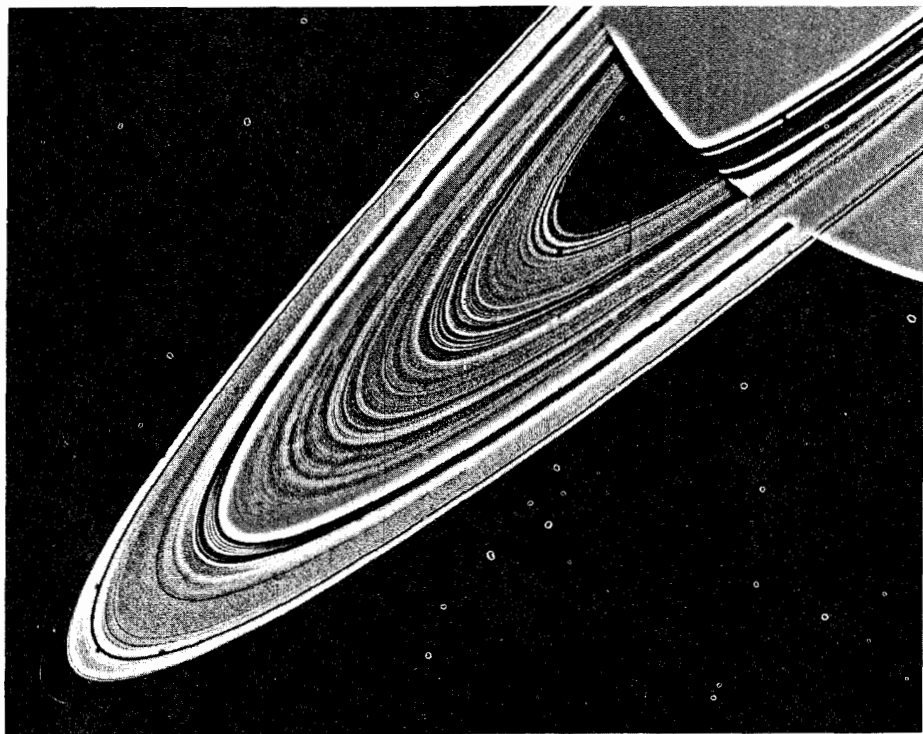




شکل ۷-۱۲. حلقه‌های زحل. این نمودارها سیستم حلقه‌ای و بعضی از مدارهای اقمار را بطوری که از بالای قطب شمال زحل دیده می‌شوند، نشان می‌دهند. واحدها بر حسب شعاع زحل هستند.

کاسینی، آن طوری که ظاهراً از روی زمین، خالی به نظر می‌رسید، کشف شده که حداقل ۲۰ حلقه کوچک پرگردیده است.

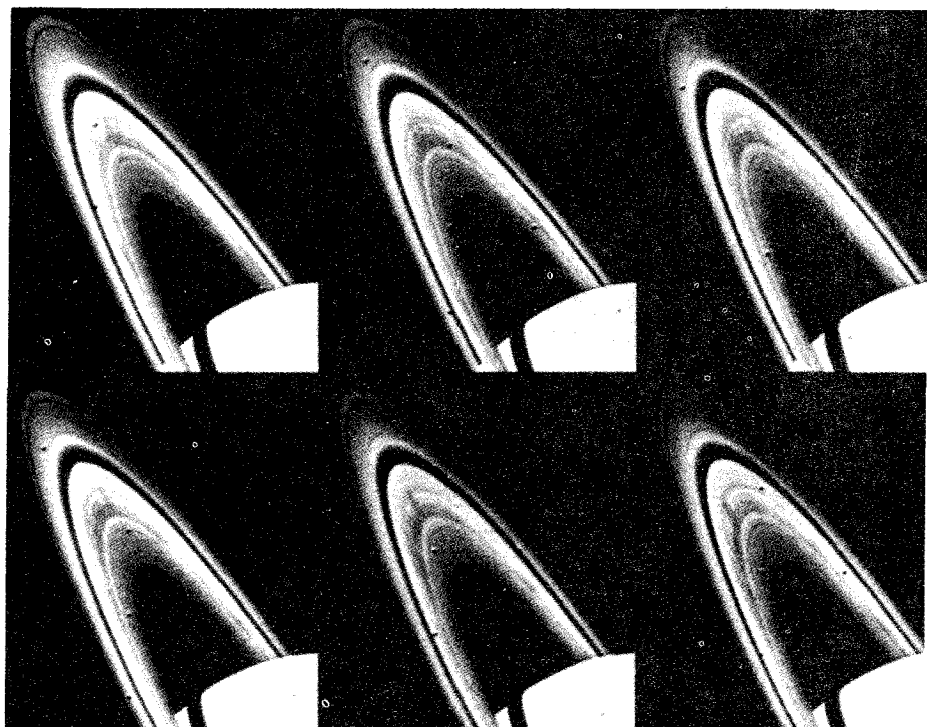
قسمت‌های تاریک نردبانی مانند در حلقه B وجود دارند (شکل ۷-۱۴). به طور نمونه، نردبان‌ها ۱۰۰۰۰ کیلومتر طول و ۱۰۰۰ کیلومتر عرض دارند. آنها از ذرات بسیار ریز کوچکتر از ذره متوسط در حلقه‌ها تشکیل شده‌اند. از آنجائی که ذرات داخلی سریعتر از ذرات خارجی می‌چرخند، نردبان‌ها فقط چندین ساعت دوام می‌آورند. آنها ممکن است ذرات تاریکتر کوچک با بارهای الکتریکی باشند که توسط میدان مغناطیسی زحل از سطح حلقه اصلی بیرون کشیده شده‌اند. توجه کنید که این پله‌های نردبان از قوانین کپلر تبعیت نمی‌کنند، زیرا دوره‌های تناوب مدارهای مختلف، نردبان‌ها را به یک یا دو حرکت انتقالی تجزیه خواهند کرد. بنابراین، ذرات تولید کننده نردبان‌ها نمی‌توانند جذب ذرات حلقه شوند.



شکل ۷-۱۳. حلقه‌های کوچک. حلقه‌های زحل شامل تعداد زیادی حلقه‌های کوچکتر در درون آنها می‌باشد. (ناسا)

پیش‌تاز<sup>۱</sup> ۱۱ یک حلقه جدید در خارج از پشت حلقه‌های شناخته شده قبلی کشف کرد، که حلقه F نامیده شد، و ۳۵۰۰ کیلومتر خارج از لبه حلقه‌های قابل مشاهده از روی زمین قرار دارد. حلقه F به نظر می‌رسد ۳۲۰ کیلومتر عرض و تنها ۳ تا ۴ کیلومتر ضخامت داشته باشد. عکس‌های ویجر ۱ این حلقه را به یک سیستم پیچیده از گره‌ها و یک ساختار بافته شده از حداقل سه رشته تجزیه می‌کند؛ عکس‌های ویجر ۲ که ۲ ماه بعد گرفته شده نشان می‌دهد که رشته‌ها ناپدید گشته‌اند. ظاهراً نوار بافته یک وضعیت ناپایدار دینامیکی بود. یک چنین حلقه بسیار باریک دیگری (حلقه G) ۱۰۰۰۰

کیلومتر دورتر است. دو حلقه بسیار کم نور دیگر نیز شناخته شده‌اند. حلقه E در ورای حلقه F تا حداقل ۶/۵ برابر شعاع زحل (۴۰۰,۰۰۰ کیلومتر) به خارج امتداد می‌یابد. یک حلقه درون حلقه C، به نام حلقه D، حداقل تا نیمه راه سطح زحل ادامه می‌یابد.



شکل ۷-۱۴. اشکال نردبانی مانند در حلقه‌ها. این رشته در مدت ۱۵ دقیقه گرفته شده است. (ناسا)

آثار گرانشی قمر درست در خارج حلقه A (S28) (۱۹۸۰) و دوتای دیگر که در میان حلقه F قرار دارند (S26 و S27) (۱۹۸۰) نقش‌های مهمی را در دینامیک حلقه‌ها ایفا می‌کنند. قمرهای حلقه F، به ویژه، اقمار سفرد<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند، زیرا ذرات حلقه را در محدوده باریکی از مدارهانگه می‌دارند. قمر داخلی، ذرات حلقه داخلی را در حینی که از آن‌ها می‌گذرد شتاب می‌دهد (آن طوری که از قانون سوم کپلر انتظار داریم، دوره تناوب

مداری آن کوتاه‌تر است). این ذرات به طور ماریپیج به طرف بیرون و به مدارهای بزرگتر می‌روند، درست به همان گونه که نیروی جزر و مدی زمین بر روی ماه، آن را به مدار بزرگتری می‌راند [بخش (۳-۴) ب]. به طریق فیزیکی مشابه، قمر خارجی که آهسته حرکت می‌کند، حرکت ذرات حلقه خارجی را در حین عبور از آنها کند می‌کند، به طوری که به صورت ماریپیج به داخل می‌روند. توازن این بر هم کنش‌ها، حرکت ذرات را مقید کرده و باریکی حلقه F را حفظ می‌کند. به طریق مشابه، حلقه A شفرده سبب تیز شدن لبه خارجی حلقه A می‌شود.

آهنگ چرخش حلقه‌ها بر طبق اطلاعات انتقال دوپلری تغییر می‌کند. سرعت‌ها در گستره  $16 \text{ km/s}$  در مرز خارجی حلقه A تا  $20 \text{ km/s}$  در مرز داخلی حلقه B قرار دارند. سرعت‌های اندازه‌گیری شده با آنچه از قانون سوم کپلر برای جرم‌های جداگانه که در همان فواصل حلقه از زحل قرار گرفته‌اند، توافق دارد؛ این توافق خاطر نشان می‌سازد که حلقه‌ها را ذرات مجزا می‌سازند.

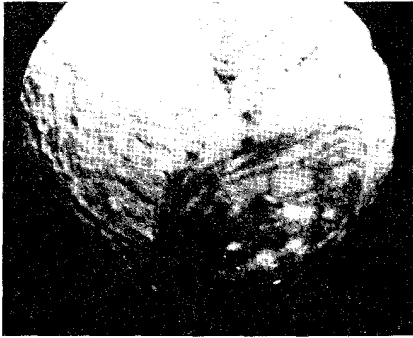
مشاهدات مادون قرمز حلقه‌های زحل نشان می‌دهد که این حلقه‌ها از ذرات آب یا یخ یا ذرات صخره‌ای پوشیده از یخ آب ساخته شده‌اند. یخ تبخیر نمی‌شود، زیرا دمای سطحی ذرات فقط در حدود  $70$  درجه کلوین است. در این دمای تعادلی، مواد یخی حلقه‌ها فشار بخار خیلی کمی دارند، و لذا یخ در حالت جامد می‌ماند. علائم رادیویی و بجر که توسط حلقه‌ها منعکس شدند خاطر نشان می‌سازد که قطر ذرات حدود یک متر است، اما گستره اندازه‌ها احتمالاً از سانتیمتر تا دهها متر وجود دارد. اگر چه حلقه‌ها سطح وسیعی از فضا را در بر می‌گیرند، اما جرم کل تخمین زده شده آنها فقط  $10^{16} \text{ kg}$  است، حدود  $10^{-10}$  برابر جرم زحل.

#### (د) اقمار و حلقه‌های اورانوس

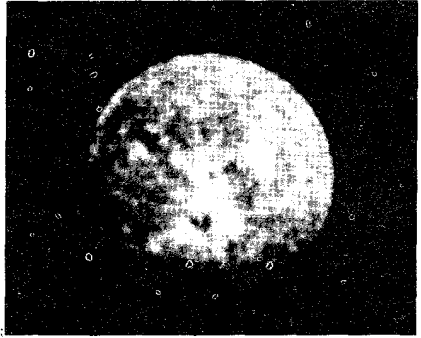
پنج قمر اصلی اورانوس (شکل (۶-۱۱)) در سطح استوایی سیاره حرکت کرده و در همان جهت چرخش سیاره می‌گردند. از آنجائی که قمرها در صفحه استوای اورانوس قرار دارند، مدارهای آنها به طوری که از زمین دیده می‌شوند متناوباً نیمرخ هستند و هر  $21$  سال یکبار به طور کامل باز می‌شوند؛ در سال  $1966$  میلادی آنها به صورت نیمرخ ظاهر شدند، اما در  $1987$  میلادی آنها به صورت دایره پدیدار گشتند.

پنج قمر میراندا<sup>۱</sup>، آریل<sup>۲</sup>، آمبریل<sup>۳</sup>، تیتانیا<sup>۴</sup> و اوبرون<sup>۵</sup> نامیده شده‌اند. میراندا کوچکترین (قطر کمتر از ۳۲۰ کیلومتر) و نزدیکترین قمر به اورانوس است. سایر اقمار در گستره قطری از ۱۱۱۰ کیلومتر (آمبریل) تا ۱۶۳۰ کیلومتر (اوبرون) قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد سطح آنها از یخ کثیف تشکیل شده باشد، بسیار شبیه آنچه در هایپریون زحل وجود دارد. اخیراً جرم این قمرها تخمین زده شده‌اند، و گستره چگالی حجمی از ۱۳۰۰ تا  $2700 \text{ kg/m}^3$  بدست آمده است، که تأکید می‌کند این اجرام از صخره و یخ ساخته شده‌اند.

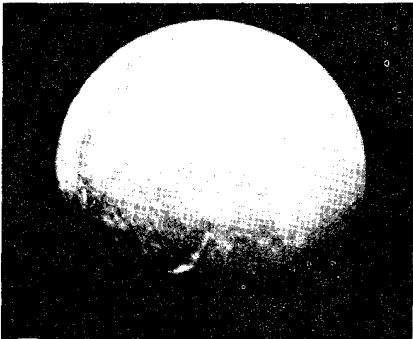
ویجر ۲ دید ما را نسبت به اقمار اورانوس بیشتر از دید ما نسبت به اقمار مشتری و زحل تغییر داد. اولاً، سفینه فضایی ۱۰ قمر دیگر را کشف کرد، در کل حداقل ۱۵ قمر. اولین قمر کشف شده توسط ویجر را ۱۹۸۵U1 نامیده‌اند؛ که قطرش فقط ۱۰۰ کیلومتر است و نسبت به پنج قمر دیگر در مداری نزدیکتر به اورانوس می‌چرخد. شش قمر دیگر، که ۱۹۸۶U1 تا ۱۹۸۶U۶ نامگذاری شدند، در بین اورانوس و ۱۹۸۵U1 می‌چرخند. این اقمار داخلی قطری بین ۳۰ تا ۵۰ کیلومتر دارند. ثانیاً، سفینه فضایی مناظر نزدیکی از بزرگترین قمر تهیه کرد (شکل (۷-۱۵) الف تا ه). میراندا (شکل (۷-۱۵) الف)) با ده ناحیه خاکی که به نظر می‌رسد طبقات آن به طور زمین ساختی جابجا شده‌اند (شاید به توسط نیروهای جزر و مدّ اورانوس)، پیچیده‌ترین سطح را دارد. اوبرون (شکل (۷-۱۵) ب)) به طور فشرده‌ای پوشیده از دهانه‌های برخوردی است و حداقل یک قله کوهستانی با ارتفاع حدود ۵ کیلومتر دارد که احتمالاً آتشفشانی است. تیتانیا (شکل (۷-۱۵) ج)) دارای سطحی پوشیده از حفره‌های برخوردی و دره‌هایی به عرض ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر و طول صدها کیلومتر (یکی از آنها سراسر کل سطح را قطع می‌کند) است. آریل نیز دارای دهانه‌های برخوردی، بریدگیهای بزرگ و دره‌ها می‌باشد (شکل (۷-۱۵) د)). سرانجام، آمبریل کمترین برجستگی‌های سطحی را نشان می‌دهد، به همراه دهانه‌های برخوردی در هم رفته، اما بدون هیچ شکل به‌خصوص (شکل (۷-۱۵) ه)). ما در اینجا مجدداً قرائنی دال بر وجود دوران برخوردهای سیل آسا در ابتدا



الف



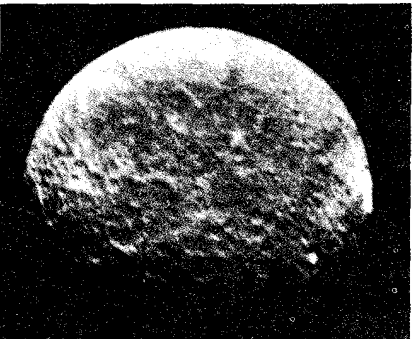
ب



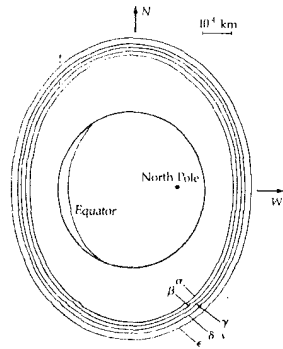
ج



د



ه



و

شکل ۷-۱۵. الف) میراندا، (ناسا) ب) اوبرون، (ناسا) ج) تیتانیا، (ناسا) د) آریل، (ناسا) ه) آمبریل، (ناسا) و) حلقه‌های اورانوس. از مجموع نه حلقه، پنج حلقه اصلی در اینجا نشان داده شده‌اند.

تاریخ منظومه شمسی را پیدا می‌کنیم.

اورانوس حلقه‌هایی دارد که به طور تصادفی در مارس ۱۹۷۷ میلادی توسط سه گروه از ستاره‌شناسان کشف شده است. از رصد خانه‌های کورنل<sup>۱</sup>، لاول<sup>۲</sup> و پرت<sup>۳</sup> و انستیتوی اختر فیزیک هند<sup>۴</sup>. آنها مشاهده کردند که اورانوس ستاره کم نوری را پوشانده و از دیدن این که ستاره به طور لحظه‌ای چندین بار قبل و بعد از آن که اورانوس روی آن را بپوشاند تاریک شد، بسیار تعجب کردند. مشاهدات بعدی عبور اورانوس از مقابل ستاره دیگر در سال ۱۹۷۸ میلادی<sup>۵</sup> حلقه را نشان داد. ویجر ۲ دو حلقه دیگر را کشف کرد و در مجموع حداقل ۱۱ حلقه وجود دارد.

این مشاهدات تصویری از یک سیستم حلقه‌ای کاملاً متفاوت از سیستم زحل را ترسیم می‌کند. این یازده حلقه تقریباً در سه گروه سیاره را دور می‌زنند (شکل (۷-۱۵)): حلقه‌های ۶، ۵ و ۴ در فاصله حدود ۴۲,۵۰۰ کیلومتری؛  $\alpha$  و  $\beta$  در حدود ۴۵,۰۰۰ کیلومتری؛  $Z, \gamma, \delta$  در ۴۸,۰۰۰ کیلومتری؛ و حلقه  $\epsilon$  و دو تایی دیگر در ۵۱,۰۰۰ کیلومتری از مرکز اورانوس. باریکترین حلقه‌ها پهنایی در حدود فقط ۵ کیلومتر دارند؛ پهنای حلقه  $\epsilon$  حدود ۱۰۰ کیلومتر است.

تصاویر ویجر خاطر نشان می‌سازد که یک حلقه جدید، به نام  $U1R$  ۱۹۸۶، در وسط راه بین حلقه‌های  $\delta$ ،  $\epsilon$  قرار دارد و دیگر اینکه حلقه  $\epsilon$  به حداقل دو حلقه کوچک شکافته می‌شود. توزیع پیوسته‌ای از ذرات گرد و غبار تمام صفحه حلقه را پر می‌کند، و خارجی‌ترین قسمت حلقه  $\epsilon$  توسط دو قمر شفرد (به نام‌های  $U7$  ۱۹۸۶ و  $U8$  ۱۹۸۶؛ هر یک فقط در حدود ۱۵ کیلومتر قطر دارد) احاطه شده است که حلقه را پایدار و بی نقص نگه می‌دارد.

ما تا این اواخر حلقه‌های اورانوس را مشخص نکردیم، زیرا آنها تاریک بوده و خیلی عریض نمی‌باشند. موادی که حلقه‌ها از آنها ساخته شده‌اند اغلب سیاه هستند (آلبدوی مرئی کمتر از ۰.۳/۱۰!) در مقابل، ذرات در حلقه‌های زحل بیش از ۸۰ درصد نور تابیده شده به آنها را منعکس می‌سازند، زیرا آنها با یخ آب، یوشیده شده‌اند. مشاهدات راداری

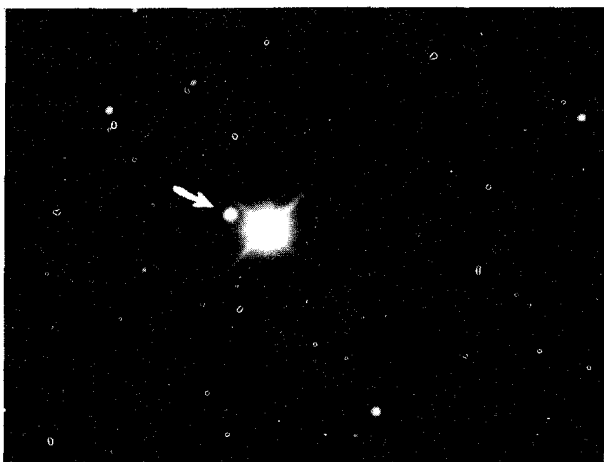
1. Cornell.  
3. Perth.

2. Lowell.  
4. Indian Institute of Astrophysics.

مسافر ۲ نشان داد که ذرات موجود در حلقه‌های اورانوس یخ تیره هستند و اندازه‌ای حدود یک متر و دوره تناوب مداری ۸ ساعت دارند.

(ه) اقمار و حلقه‌های (۴) نپتون<sup>۱</sup>

نپتون دو قمر شناخته شده دارد، تریتون<sup>۲</sup> و نرید<sup>۳</sup> (شکل (۷-۱۶)). تریتون قطری حدود ۵۲۰۰ کیلومتر دارد که آن را یکی از بزرگترین اقمار منظومه شمسی می‌سازد. نرید ۹۰۰ کیلومتر و یا چیزی در این حدود قطر دارد.



شکل ۷-۱۶. نپتون و تریتون (پیکان). (رصدخانه لیک)

تریتون با دوره تناوب حدود ۵ روز در یک مدار برگشتی (شرق به غرب) که  $20^\circ$  به طرف صفحه استوایی نپتون متمایل شده است، می‌گردد. هیچ سیاره دیگری چنین قمر نزدیک با حرکت برگشتی و تمایل زیادی را ندارد. این مدار عجیب را شاید بتوان به این تحقیقات نظری نسبت داد که پلوتو<sup>۴</sup> و چارون<sup>۵</sup> اقمار رها شده نپتون هستند. نرید، قمر بیرونی، دارای خروج از مرکز مداری  $0/75$  است - دو مرتبه بزرگتر از هر قمر دیگر در منظومه شمسی؛ فاصله آن از نپتون در گستره ۳km است که فقط ۱km تا ۱۰ میلیون

1. Neptune.  
3. Nereid.  
5. Charon.

2. Triton.  
4. Pluto.



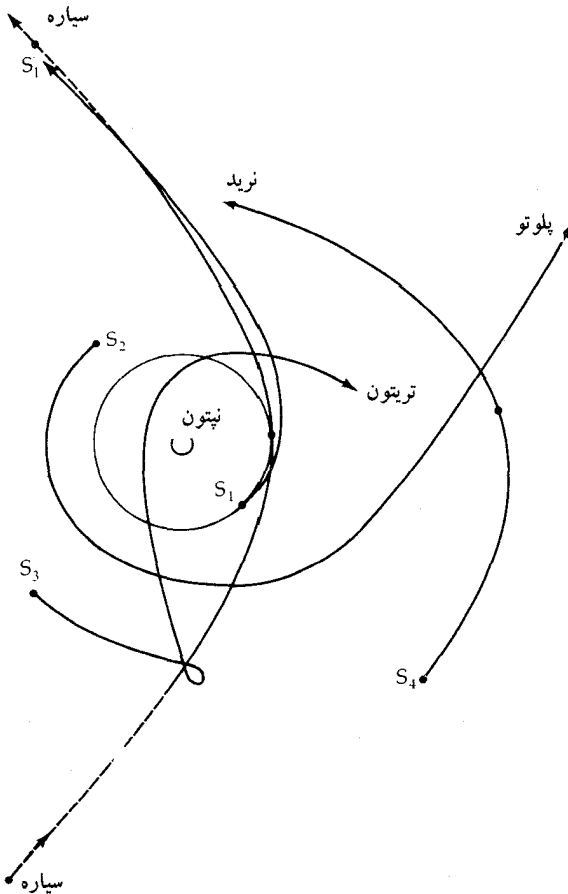
کیلومتر قرار دارد. سرعت مداری نرید در نزدیکترین فاصله از نپتون  $3 \text{ km/s}$  است که فقط  $0.2 \text{ km/s}$  از سرعت فرار کمتر است. ویژگیهای مداری غیر عادی تریتون و نرید به دین صورت می تواند توضیح داده شود که سیستم توسط یک شیء خارجی که جرم بیشتری از اقمار فعلی داشته است، از هم گسیخته است.

حال یک سناریو را امتحان می نمائیم. فرض کنید که اقمار نپتون (چهار قمر عمده در کل) از ابتدا مدارهای استوایی دایره ای داشته که پس از اقمار گالیله ای مشتری الگوبندی شده باشند. یک جرم سماوی فرضی با جرمی که در گستره معینی قرار دارد از بین سیستم قمری عبور کند. محاسبات نظری روی برخوردهایی تمرکز کرده اند که بسامد نتایج جالب برای جرمی بین  $0.2 M_N$  و  $1.2 M_N$  به حداکثر می رساند. یک مسیر نتایج عجیب و به خصوص دارد (شکل (۷-۱۷)). در اینجا سیاره جرمی معادل  $3 M_{\oplus}$  دارد که در یک زاویه میل  $30^\circ$  بالا آمده و در داخل سیستم متشکل از چهار قمر قرار دارد. قمر ۱ بوسیله سیاره اختلال گر به دام افتاده و در جنب نپتون قرار می گیرد. قمر ۲ نیز فرار کرده و در مداری شبیه پلوتو ختم می شود. قمر ۳ مدار خودش را دارد که آهسته بر می گردد و به تریتون تبدیل می شود. قمر ۴، خارجی ترین، در یک مدار شبیه نرید قرار می گیرد. سیاره از هم گسیخته و به یک مدار بیضی شکل با نیم محور اطول کمتر از  $100 \text{ AU}$  و خروج از مرکز کمتر از  $0.6$  ختم می شود - سیاره دیگری در ورای مدار نپتون.

تریتون دارای جو است؛ مشاهدات مادون قرمز یک نوار جذبی در  $2.3 \mu\text{m}$  را نشان داده اند که به متان گازی شکل نسبت داده می شود. به دلیل وجود متان در سطح تریتون فشار در حدود  $10^{-7}$  جو است. سایر مشاهدات خاطر نشان می سازند که جو همچنین ممکن است شامل ازت مولکولی باشد. اگر چنین باشد، ازت در چنان فشار زیادی قرار دارد که ممکن است استخرهایی از ازت مایع در سطح نپتون موجود باشند، به همان صورت که تکه هایی از متان یخ زده وجود دارند.

همچنین نپتون ممکن است یک سیستم حلقه ای بسیار نازک به خودش داشته باشد. در یک تشریح مساعی بین المللی از ستاره شناسان، دو گرفت ستاره ای به وسیله نپتون در ماه مه ۱۹۸۱ میلادی مشاهده گردید و هیچ حلقه ای دیده نشد. با این وجود، داده های منتشر نشده درباره گرفتهی که در سال ۱۹۶۸ میلادی رخ داد، اخیراً چاپ

شده‌اند و کاهشی در روشنایی را ۳ دقیقه پس از عبور ستاره از پشت سیاره نشان می‌دهد که به مدت ۲/۵ دقیقه طول کشید. اگر این کاهش توسط یک حلقه ایجاد شده باشد، در این صورت شعاع حلقه ۲۸۶۰۰ km ( $1,14R_N$ ) و پهنای آن ۴۳۰۰ km است.



شکل ۷-۱۷. یک سناریوی محتمل برای از هم گسیختگی سیستم نپتون توسط یک سیاره عبوری.

## ۲-۷ سیارکها

در فصل دوم خواص عمومی مداری سیارکها را ارائه دادیم. در اینجا به بررسی مشخصه‌های فیزیکی آنها خواهیم پرداخت، زیرا اینها ما را از شرایط ماده جامد در ابتدای تاریخ منظومه شمسی آگاه می‌سازند. اساساً، یک سیارک یک جرم سماوی نامنظم و صخره‌ای است که کوچکتر و کم جرم‌تر از یک سیاره می‌باشد. (فقط حدود ۲۰۰ سیارک قطره‌ای بیش از ۱۰۰ کیلومتر دارند؛ تصور می‌شود تعداد ۱۰<sup>۶</sup> سیارک در کمربند سیارکی باشند). سرس<sup>۱</sup>، بزرگترین سیارک شناخته شده، قطری در حدود ۱۰۰۰ km دارد. اندازه‌های سیارکی مستقیماً به هنگام پوشیده شدن یک ستاره توسط یک سیارک می‌تواند به طور مستقیم اندازه‌گیری شود. همچنین می‌توانیم انعکاس نور مرئی و نشر مادون قرمز (مشخصاً در ۱۰ μm) یک سیارک را هنگامی که فاصله آن از خورشید معلوم است، اندازه بگیریم. این دو اندازه‌گیری در یک حالت تعادلی یک برآورد غیر مستقیم از اندازه سیارک را امکان‌پذیر می‌سازند.

مقدار انرژی خورشیدی که روی یک سیارک فرود می‌آید برابر است با

$$(L_{\odot} / 4\pi D^2) \pi R^2$$

که  $L_{\odot}$  تابندگی خورشید،  $D$  فاصله از خورشید و  $R$  شعاع سیارک است. کسر  $A$  (آلبدو) به فضا منعکس می‌شود. اگر زمین در فاصله  $d$  از سیارک باشد، شار نور انعکاسی به زمین عبارت است از

$$F_{vis} = (L_{\odot} / 4\pi D^2) \pi R^2 (A / 4\pi d^2)$$

این شار را می‌توانیم اندازه بگیریم و لذا مقدار  $R^2 A$  را تعیین کنیم. کسر انرژی جذب شده  $(1-A)$ ، سیارک را گرم می‌کند و به شکل تابش مادون قرمز دوباره در فضا منتشر می‌شود. این شار مادون قرمز را می‌توانیم روی زمین مشاهده کنیم. نسبت شار مرئی به مادون قرمز عبارت است از

$$F_{vis} / F_{IR} = A / (1-A)$$

از این اندازه‌گیری، می‌توانیم  $A$  را تعیین کرده و سپس با استفاده از تعیین قبلی  $R^2 A$ ،  $R$  را

محاسبه کنیم.

مشاهدات اخیر انعکاس سطحی سیارکهای بزرگتر راهنمائیهای جدیدی راجع به ترکیبات آنها ارائه کرده است. سیارکها گستره وسیعی از قابلیت انعکاس را دارا هستند؛ از نِیسا<sup>۱</sup> (قطر ۸۲ کیلومتر) که آلدوی آن ۳۵ درصد است تا سیبل<sup>۲</sup> (قطر ۳۰۹ کیلومتر) که فقط دو درصد از نور مرئی تاییده شده به آن را منعکس می سازد. سطح نِیسا نور خورشید را تقریباً به همان خوبیِ قمرهای یخزدهٔ مشتری و زحل منعکس می سازد؛ سیبل دارای آلدویی شبیه حلقه های اورانوس است.

قابلیت های انعکاس دلالت بر این دارد که اکثر سیارکها در دو طبقه مهم ترکیبی قرار می گیرند. برخی نسبتاً روشن هستند با آلدویی حدود ۱۵ درصد و سایرین بسیار تیره تر با آلدوی ۲ تا ۵ درصد، که حاکی از این است که ذاتاً شامل درصد قابل ملاحظه ای از ترکیبات کدر مانند کربن یا مگنتیت معدنی سیاه ( $Fe_3O_4$ ) می باشند. این سیارکهای تاریک به یک طبقه از شهاب سنگها شباهت دارند (بخش (۷-۴))، کندرایت های کربنی، که به علت داشتن ترکیبات کربنی کدر هستند (حدود ۱ تا ۵ درصد کربن). طبقه روشن تر سیارکهای نوع -S و نمونه های کدرتر سیارکهای نوع -C نامگذاری شده است. نوع -S، علاوه بر دارا بودن آلدوی بیشتر، همچنین نوارهای جذبی طیفی را نشان می دهد که دلالت بر مواد سیلیکاتی است. سومین طبقه، به نام سیارکهای نوع -M مشخصه هایی دارد که حاکی از مواد فلزی است. آنها آلدویی حدود ۱۰ درصد دارند، تنها ۵ درصد از همه سیارکها به این آخرین طبقه تعلق دارند.

تحقیقات اخیر نشان می دهد که، بر اساس آلدوها، ترکیبات در کمربند سیارکی با فاصله از خورشید تغییر می کند. در نزدیکی مدار مریخ، تقریباً همه سیارکها مشخصه های نوع -S را دارند. در فواصل دورتر تعداد کمی با آلدوی زیاد و تعداد بیشتری از انواع کدر وجود دارد. در لبه خارجی تر کمربند، ۳AU از خورشید، ۸۰ درصد سیارکها از نوع -C هستند.

قبلاً [در بخش (۲-۱ ج)] خاطر نشان ساختیم که آن طور که از کم و زیاد نشر نور سیارکها بر می آید، بسیاری از آنها دارای اشکال نامنظمی هستند. برخی از اقمار کوچکتر

طبیعی، مثل فوبوس و دیموس مریخ نیز شکل نامنظم دارند. این اشیاء همگی به قدر کافی کوچک هستند به طوری که فشارهای داخلی آنها کمتر از آن حدی است که بتوانند برکشش موادی که از آنها تشکیل شده‌اند، فائق آیند. سِرِس، با قطر حدود  $1000 \text{ km}$  از این محدوده خارج است و لذا کروی می‌باشد.

آیا سیارکها قمر دارند؟ این به پایداری سیستم سیارکی دوتایی (دوگانه) در مقابل نیروهای جزر و مدی بستگی دارد. سیارکها جرم‌های بسیار کمی دارند؛ به عنوان مثال، سِرِس، اگر تماماً صخره‌ای بود، جرمی فقط در حدود  $10^{21} \text{ kg}$  می‌داشت. یک سیارک نمونه حدود  $10$  مرتبه کوچکتر از سِرِس بوده و لذا جرمی حدود  $10^{-3}$  برابر سِرِس دارد. این جرم کوچک بدان معنی است که نیروی گرانشی بین اجسام چنان ضعیف است که نیروی جزر و مدی خورشید یا مشتری به سهولت ممکن است سیستم دوگانه را از هم بگسلد. هر سیستم موجود شانس این را دارد که تفاوت خیلی کوچکی بین قمر و سیارک را دارا باشد و لذا دیدن این دو شیء مجزا به وسیله تلسکوپ خیلی مشکل خواهد بود. گاهیگاهی، به طوری که از زمین مشاهده می‌شود، یک سیارک روی یک ستاره را می‌پوشاند. سیارک نور ستاره را برای چند ثانیه قطع خواهد کرد؛ یک قمر حتی نور را برای زمان کمتری قطع می‌کند. چند مورد از چنین ماه‌گرفتی‌هایی گزارش شده‌اند. جالب‌ترین مورد آنها توسط سیارک هرکولینا<sup>۱</sup> (قطر  $220 \text{ km}$ ) در سال ۱۹۷۸ میلادی اتفاق افتاد؛ قمری که احتمالاً به سیارک مربوط است  $975 \text{ km}$  دورتر بود و فقط  $50 \text{ km}$  بزرگی داشت. تنها یک رصد دیگر بخوبی مورد مشابه برای هرکولینا به نظر می‌رسد (برای سیارک پالاس<sup>۲</sup>)؛ حدود بیست مشاهده دیگر مربوط به همدماها. (این مشاهدات ممکن است هنوز مدرک معتبری برای همدم سیارکی نباشند. به عنوان نمونه، هیچ یک تاکنون تکرار نشده‌اند.)

اگر هرکولینا یک قمر داشته باشد، عمر سیستم، قبل از این که نیروهای جزر و مدی آن را از هم بپاشند، فقط در حدود  $10^7$  سال است. این زمان کوتاه تأکید می‌کند که اعمار سیارکی احتمالاً زمانی تشکیل شده‌اند که برخوردهای بین سیارکها آنها را خرد کرده است؛ برخی از قطعات کوچک حاصل از خرد شدن ممکن است برای مدت زمان

1. Herculina.

2. Pallas.

کوتاهی به صورت اقمار و به صورت بسته باقی بمانند.

### ۷-۳ ستاره‌های دنباله‌دار

وقتی که برای اولین بار، ستاره دنباله‌داری در تلسکوپ دیده شد، اساساً یک نقطه کوچک مه‌آلود به نظر می‌رسید. سر روشن ستاره دنباله‌دار گیسو<sup>۱</sup> نامیده می‌شود [شکل (۷-۱۸ الف)]. برخی اوقات گیسو شامل یک نقطه کوچک و ستاره مانند است که هسته<sup>۲</sup> نامیده می‌شود [شکل (۷-۱۸ ب)]. هسته‌های ستاره‌های دنباله‌دار خیلی کوچک هستند، شاید نه چندان بزرگتر از ۱ یا ۲ کیلومتر، و قطعاً کمتر از ۵۰ کیلومتر؛ تاکنون هیچ یک به عنوان چیزی بیشتر از یک نقطه نورانی مشاهده نشده‌اند. همچنان که ستاره دنباله‌دار به طرف نزدیکترین نقطه به خورشید در مسیرش پیش می‌رود، روشن‌تر شده و یک دنباله<sup>۳</sup> از آن می‌روید [شکل (۷-۱۸ ج)]. دنباله یک ستاره دنباله‌دار ممکن است میلیون‌ها کیلومتر امتداد یابد و همیشه از خورشید دور می‌شود. وقتی تمامی ستاره دنباله‌دار در قسمت داخلی منظومه شمسی قرار دارد یک هاله عظیم از گاز هیدروژن آنرا احاطه می‌کند، که میلیون‌ها کیلومتر وسعت دارد. این هاله، که فقط در ناحیه ماوراءبنفش از سفینه فضایی قابل تشخیص است، نتیجه‌ای است از تفکیک رادیکال‌های هیدروکسیل ( $\text{OH}^+$ ) در گیسو توسط نور خورشید (تجزیه نوری).

ستاره‌های دنباله‌دار ممکن است دو نوع دنباله داشته باشند. گاز یونیزه شده و گردوغبار [شکل (۷-۱۸ ب)]. تفاوت فیزیکی بین این دو در طیف‌هایشان نمایان است. طیف دنباله یونی دارای خطوط نشری است. طیف مربوط به دنباله گرد و غباری عبارت است از همان طیف نور خورشید انعکاس یافته از گرد و غبار که از گیسو بیرون رانده شده است. فشار حاصل از نور خورشید، غبار را از گیسو خارج کرده و آن را به بیرون می‌راند تا یک دنباله را تشکیل دهد.

در طیف حاصل از دنباله یونی، واضح‌ترین خطوط طیفی آنهایی هستند که به توسط منواکسیدکربن ( $\text{CO}$ )، دی‌اکسیدکربن ( $\text{CO}_2$ )، ازت ( $\text{N}_2$ ) و رادیکال‌های آمونیاک ( $\text{NH}_2$ )

و متان ( $CH_4$ ) تولید شده‌اند. گاهی اوقات توده‌های گاز به طرف دنباله پرتاب می‌شوند. فشار تابشی حاصل از نور خورشید نمی‌تواند جوابگوی این حقیقت باشد که چرا این دنباله‌های یونی به طور مستقیم از نور خورشید دور می‌شوند. لودویگ بیرمن<sup>۱</sup> ستاره‌شناس آلمانی در سال ۱۹۵۱ میلادی پیشنهاد کرد که باد خورشیدی تأثیر عمده‌ای روی دنباله‌های یونیزه شده دارد. اندازه‌گیریهای باد خورشیدی تأیید کردند که میدان‌های مغناطیسی حاصل از ذرات باد مطمئناً می‌توانند یون‌ها را از گیسوی ستاره دنباله‌دار بکشند.

قطع مسیر ستاره دنباله‌دار جیاکوبینی زینر<sup>۲</sup> در سپتامبر ۱۹۸۵ میلادی توسط ICE (International Cometary Explorer) پیچیدگی واقعی تأثیر متقابل بین ستاره‌های دنباله‌دار و باد خورشیدی را آشکار ساخت. عبور ICE از میان دنباله ستاره دنباله‌دار ثابت کرد که این اثر متقابل، تعداد زیادی یون‌های پر انرژی را در اطراف ستاره دنباله‌دار تولید می‌کند. این یون‌ها توسط باد دستچین می‌شوند؛ جرم اضافی جریان پشت ستاره دنباله‌دار را آهسته کرده و دنباله یونی رشته‌ای را تولید می‌کند. دنباله جیاکوبینی - زینر در محلی که توسط ICE قطع گردید  $25,000 \text{ km}$  ضخامت داشت ( $7-18 \text{ د}$ ). چگالیهای جریان از طرف هسته) و یک دنباله مغناطیسی دو قطبی القایی شکافته شده توسط یک ورقه خنثی بین جهت مخالف جریان‌ها را شامل می‌شد (شکل (۷-۱۸ د)). چگالیهای الکترونی در قلب دنباله متجاوز از  $10^9 / \text{m}^3$  است. در اینجا فرض شده است که میدان مغناطیسی از میدان حاصل از باد خورشیدی نتیجه می‌شود. بنابراین، ما در نهایت اطلاعات خوبی در مورد اثرات متقابل میدان مغناطیسی - پلازما داریم که شکل یک ستاره دنباله‌دار قابل رؤیت را مشخص می‌کند.

در فواصل زیاد از خورشید، گیسو یک طیف انعکاسی خورشیدی را نشان می‌دهد، و لذا سر ستاره دنباله‌دار نیز باید شامل ذرات جامدی باشد که نور خورشید را منعکس می‌سازد. در فاصله حدود 1 AU از خورشید، سر ستاره دنباله‌دار نوارهای نشری مولکولی از کربن ( $C_2$ )، سیانوژن (CN)، اکسیژن ( $O_2$ )، هیدروکسیل (OH) و هیدریدهای ازت ( $NH_3$  و  $NH$ ) را نشان می‌دهد. همچنان که ستاره دنباله‌دار به خورشید نزدیک

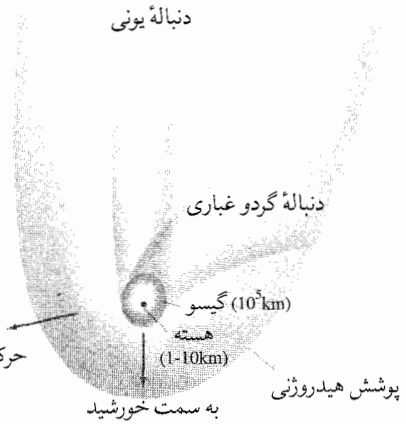
1. Ludwig Biermann.

2. Giacobini - Zinner.

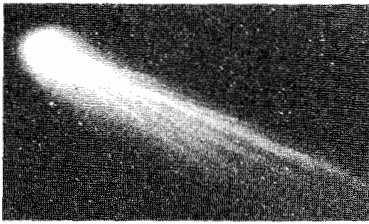


الف

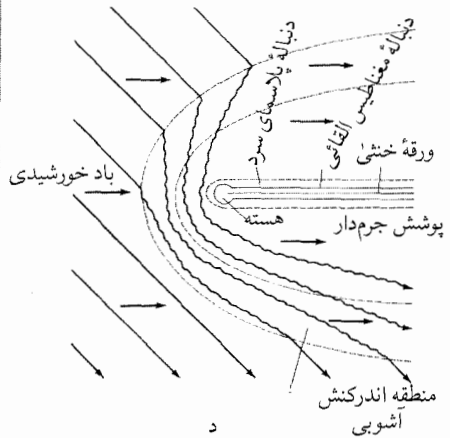
حرکت مداری



ب



ج



د

شکل ۷-۱۸. الف) سرستاره دنباله دار هالی، ۱۶ نوامبر سال ۱۹۸۵ میلادی. ب) لابشور<sup>۱</sup>، رصدخانه کاپیلاپیک<sup>۲</sup>، دانشگاه نیومکزیکو (ب) قسمت‌های اصلی یک ستاره دنباله دار. ج) سر و دنباله ستاره دنباله دار کوهوتک<sup>۳</sup> در ژانویه سال ۱۹۷۴ میلادی. (رصدخانه هیل<sup>۴</sup>، انستیتو فن آوری کالیفرنیا) د) نمودار شماتیک از ساختار برخورد ستاره دنباله دار جیاکوبینی - زینر<sup>۵</sup> با باد خورشیدی. (ناسا)

1. Laubscher.
3. Kohoutek
5. Giacobini Zinner.

2. Capilla peak.
4. Hale.



می شود می رسد، خطوط نشری سیلیسیم (Si)، کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، پتاسیم (K) و نیکل (Ni) ظاهر می شوند. جدول (۷-۲) موادی را که تا کنون در سر و دنباله ستاره های دنباله دار مشاهده شده اند، نشان می دهد. به این دو نکته در مورد ترکیبات توجه کنید. اولاً، سر شامل برخی از مولکول های مشابه یافت شده در فضای بین ستاره ای، مانند هیدروژن سیانید (HCN) و متیل سیانید (CH<sub>3</sub>CN) می باشد ثانیاً، طیف های مادون قرمز برخی ستاره های دنباله دار، نوارهای ۱۰-μm و ۱۸-μm را که از مشخصه های گرد و غبار سیلیکات می باشد، ظاهر می کنند.

جدول (۷-۲). ترکیبات مشاهده شده ستارگان دنباله دار

سر	دنباله
H, C, C <sub>v</sub> , C <sub>v</sub> , CH, CN,	CH <sup>+</sup> , CO <sup>+</sup> , CO <sub>v</sub> <sup>+</sup> , N <sub>v</sub> <sup>+</sup> ,
HCN, CH <sub>v</sub> , CN, NH,	OH <sup>+</sup> , H <sub>v</sub> O <sup>+</sup> , Ca <sup>+</sup>
NH <sub>v</sub> , O, OH, H <sub>v</sub> O, Na, K,	
Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu	به اضافه ذرات گرد و غبار با سیلیکاتها
به اضافه ذرات گرد و غبار با سیلیکاتها	

مرجع:

Annual Review of Astronomy and Astrophysics 14: 143 (1976), W. Huebner, F. Whipple

روشنی مشاهده شده B از یک ستاره دنباله دار، به فاصله اش از خورشید R (که فلورسانس آن و مقدار نور خورشید منعکس شده را تعیین می کند) و فاصله اش از زمین r (که شار تابشی را که ما دریافت می نمایم، تعیین می کند) بستگی دارد:

$$B \propto R^{-n} r^{-2} \quad (۷-۱)$$

در فواصل دور از خورشید فلورسانس صورت نمی گیرد، و بنابراین  $n = ۲$  است. با این وجود، در نزدیکی خورشید،  $n \approx ۴$  است و بسته به ستاره دنباله دار به خصوص ممکن است در گستره ۲ تا ۶ تغییر نماید؛ برای ستاره دنباله دار هالی، در فواصل نزدیکتر از

۶، ۵  $\approx \pi$  است. این که چه اندازه ستاره دنباله‌دار مشتعل می‌شود (ابتداءً در گیسوی آن) به ترکیب و مقدار گازهای آزاد شده توسط هسته، بستگی دارد.

ستاره‌های دنباله‌دار علی‌رغم طول مبهوت‌کننده‌شان در آسمان، جرم‌های خیلی کوچکی دارند. جرم ستاره‌های دنباله‌دار را فقط به طور تقریبی می‌توان تخمین زد، زیرا به قدری کوچک هستند که تأثیر چندانی بر مدارهای سایر اجرام سماوی نمی‌گذارند. ستاره دنباله‌دار هالی، یکی از بزرگترین ستاره‌های دنباله‌دار، دارای جرم تقریبی حدود  $10^{16}$  kg می‌باشد، و در طول هر بار عبور از نزدیکترین نقطه مسیرش تا خورشید در حدود  $10^{11}$  kg از جرمش را از دست می‌دهد. در سال ۱۹۱۰ میلادی، دنباله‌دار دنباله‌دار هالی حدود  $100^\circ$  کشیده شد، رسیدن از افق به افق؛ فقدان هر گونه اثرات قابل توجه در حین عبور زمین از میان دنباله‌دار خاطر نشان می‌سازد که گاز کاملاً رقیق شده بود، کمتر از حدود  $10^{-17}$  kg/m<sup>۳</sup>. چگالی گیسو حدود  $10^{-۷}$  kg/m<sup>۳</sup> تخمین زده شده است که بسیار بیشتر از چگالی دنباله‌دار است، با وجود این هنوز خلأ خوبی است.

جرم خارج شده از یک ستاره دنباله‌دار، که عمدتاً به صورت گاز است، از هسته می‌آید. فرد. ال. وپیل<sup>۱</sup> یک الگوی ستاره دنباله‌دار کوه یخی کثیف را توسعه داده است که در آن هسته‌های ستاره دنباله‌دار فشرده هستند، اجرام سماوی جامد ساخته شده از گازهای منجمد (یخ‌ها) از آب، دی‌اکسیدکربن، آمونیاک و متان تنگاتنگ با مواد صخره‌ای قرار دارند. در ورای مشتری، دماهای پائین امکان می‌دهد که ریزه‌های یخ، گلوله شده و برای دوره‌های طولانی زمانی بدون تغییر باقی بمانند. به محض این که ستاره دنباله‌دار به خورشید نزدیک می‌شود، مواد یخی تبخیر می‌گردند. این مواد آزاد شده گیسو را بزرگ کرده و دنباله را بوجود می‌آورند. همزمان با اینکه یخ تبخیر می‌شود، یک پوشش نازک از مواد صخره‌ای باقی می‌مانند تا پوسته‌ای جامد، اما شکننده را روی هسته تشکیل دهند. گرمای مواد تحت سطحی فواره‌های گاز را خلق می‌کند که توده‌های گاز را از جا کنده و مانند صخره‌های کوچک عمل می‌کند که به طور جزئی مدار ستاره دنباله‌دار را اندکی عوض می‌کنند.

همان طور که ستاره دنباله‌دار خورشید را دور می‌زند، هسته نیمه جامد غالباً می‌تواند

دمای خورشیدی را تحمل نماید. ستاره دنباله‌دار ایکیاسکی<sup>۱</sup>، ستاره دنباله‌دار بزرگ و خراشنده خورشید<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۵ میلادی، از درون ۴۷۰,۰۰۰ کیلومتری سطح خورشید عبور کرد و از بین نرفت. سایر ستاره‌های دنباله‌دار که از نزدیکی خورشید عبور می‌کنند چنین خوش شانس نیستند؛ ستاره دنباله‌دار وست<sup>۳</sup> (۱۹۷۶ میلادی) پس از عبور از نزدیکترین نقطه مسیرش تا خورشید حداقل به چهار قسمت تجزیه شد (شکل (۷-۱۹)).

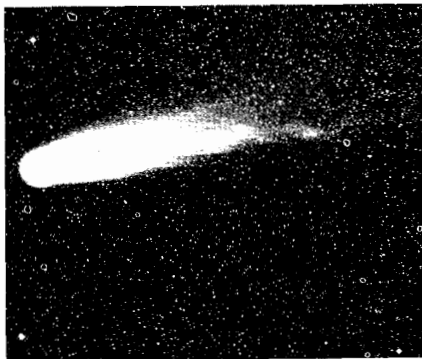
ستاره‌های دنباله‌دار دوره‌ای هر دفعه از خورشید عبور می‌کنند مقدار کمی ماده از دست می‌دهند و سرانجام باید به طور کامل گازهایشان را از دست بدهند. بنابراین، ما چگونه می‌توانیم فراوانی آنها را توضیح دهیم؟ همه ستاره‌های دنباله‌دار به طور گرانشی متصل به خورشیداند. اکثر ستاره‌های دنباله‌دار دوره‌های تناوبی مداری طولانی دارند. از مدارهای مشاهده شده، استنباط می‌کنیم که مقدار متوسط نیم قطر اطول حدود ۵۰,۰۰۰ AU است و دوره تناوب مداری مربوطه حدود ۱۰<sup>۷</sup> سال می‌باشد. مدارها شدیداً بیضی شکل هستند؛ بر اساس قانون دوم کپلر، ستاره‌های دنباله‌دار در قسمت‌هایی از مسیرشان که بیشترین فاصله را با خورشید دارند بسیار آهسته حرکت می‌کنند، فقط چند کیلومتر در طول یک روز، و لذا چنین ستاره‌های دنباله‌داری اکثر وقتشان را دور از خورشید بسر می‌برند.

یک ابر ناشی از ستاره دنباله‌دار، که در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط بیان اورت<sup>۴</sup> ستاره‌شناس هلندی پیشنهاد شده است، گاهی اوقات ابر اورت نامیده می‌شود، که ابری از ستاره‌های دنباله‌دار منظومه شمسی را می‌سازد. بر طبق الگوی اورت، اکثر ستاره‌های دنباله‌دار هرگز به خورشید بسیار نزدیک نمی‌گردند و ما هرگز آنها را نمی‌بینیم. با این وجود، گاهی اوقات اثر گرانشی ستاره‌های عبوری، یک ستاره دنباله‌دار را به یک مدار می‌راند (یا می‌کشد) که آن را نزدیکتر می‌آورد. ستاره‌های دنباله‌دار عاقبت یا به توسط تبخیر هسته و یا اغتشاش مشتری در مدارشان از بین می‌روند. لذا، ذخیره ستاره‌های دنباله‌دار نزدیک شونده به خورشید باید با ستاره‌های دنباله‌دار جدید مجدداً از ابر

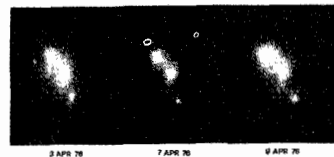
1. Comet Ikeya Seki.  
3. Comet West.

2. Sun - grazing.  
4. Jan Oort.

تأمین شود. برای اطمینان از کافی بودن ورودی برای تأمین از دست رفته‌ها، تصویر اورت حداقل نیازمند  $10^{11}$  (و شاید به تعداد  $10^{14}$ ) ستاره دنباله‌دار مجتمع شده در ابر می‌باشد.



الف



ب

شکل ۷-۱۹. ستاره دنباله‌دار وست. (الف) چند روز قبل از متلاشی شدن، ستاره دنباله‌دار وست دنباله‌ای گره‌دار داشت. (رصدخانه سلطنتی ادینبورگ) (ب) شکستن هسته ستاره دنباله‌دار وست در آوریل ۱۹۷۶ میلادی. (رصدخانه دانشگاه ایالتی نیومکزیکو، سی. اف. ناکلز<sup>۱</sup> و آ. اس. مورل<sup>۲</sup>)

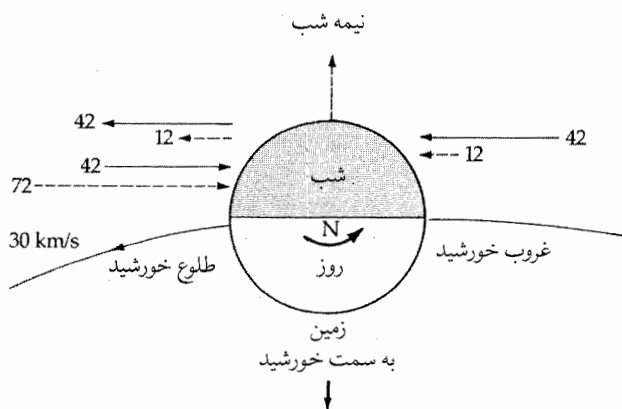
## ۷-۴ شهابواره‌ها<sup>۳</sup> و شهاب سنگها<sup>۴</sup>

وقتی یک شهاب آسمانی - ریزه‌های بین سیاره‌ای - به جو زمین وارد می‌شود، خطی از نور در آسمان تولید می‌کند که شهاب<sup>۵</sup> نام دارد. اگر هر ماده‌ای در هوا غوطه‌ور باقی بماند، به صورت یک شهابسنگ با زمین تصادم خواهد کرد. شهاب‌های آسمانی با سرعتهایی در محدوده ۱۲ تا ۷۲ km/s به جو برخورد می‌کنند، و پس از نیمه شب نسبت به قبل از آن شهاب‌های بیشتری دیده می‌شوند (شکل (۷-۲۰)). شهاب‌ها به منظومه شمسی تعلق دارند، به طوری که تندی آنها در مدار زمین نمی‌تواند از ۴۲ km/s که تندی فرار منظومه است، تجاوز نماید. قبل از نیمه شب، فقط آن شهاب‌های آسمانی که سریعتر از زمین حرکت می‌کنند (۳۰ km/s) می‌توانند از پشت به آن برسند؛ تندی نسبی

1. C. F. Knuckles.  
3. meteoroid.  
5. meteor.

2. A. S. Murrel.  
4. meteorite.

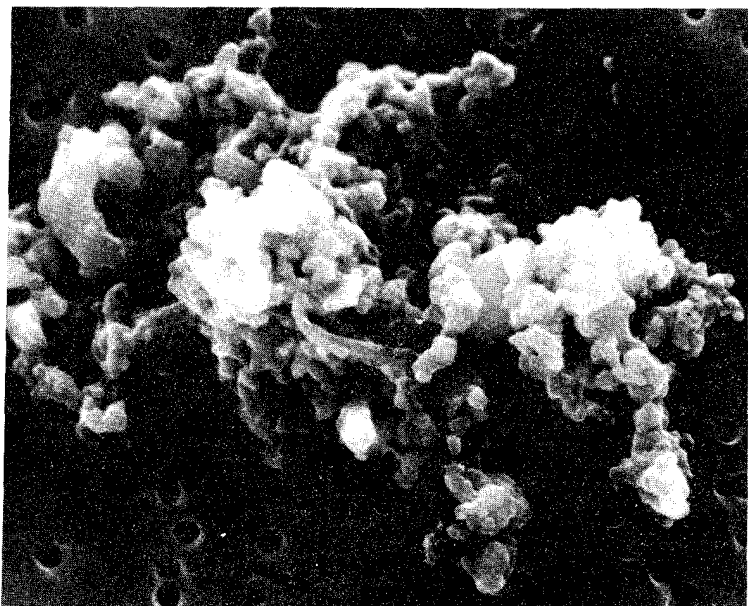
سریعترین این گونه شهاب  $12 \text{ km/s}$  است. پس از نیمه شب، همه شهاب‌های آسمانی به جز آنهایی که از زمین در امتداد مدارشان سریعتر حرکت می‌کنند، دیده خواهند شد؛ در این صورت، سرعتها با هم جمع می‌شوند و یک سرعت نسبی ماکزیمم  $72 \text{ km/s}$  می‌دهند.



**شکل ۷-۲۰.** تندی شهاب. سرعت قرار از منظومه شمسی در مدار زمین  $42 \text{ km/s}$  است؛ شهاب‌های آسمانی نمی‌توانند سریعتر از این تندی حرکت کنند. در ابتدای غروب شهاب‌ها به زمین می‌رسند. پس از نیمه شب، زمین (تندی مداری  $30 \text{ km/s}$ ) به تمام آنها می‌رسد، اما سریعترین شهاب آسمانی در طول مدار آن حرکت می‌کند.

چون مسیر یک شهاب ثبت مختصری از تلاشی جسم را فراهم می‌آورد، ستاره‌شناسان قادر بوده‌اند که مدار و مشخصه‌های کلی فیزیکی شهاب‌های آسمانی را تعیین کنند. اکثر شهاب‌های آسمانی ذرات شکننده‌ای هستند که به هنگام تماس با هوا به سرعت خرد می‌شوند (شکل (۷-۲۱)). یک قطعه از ماده شهاب آسمانی به حجم  $1 \text{ m}^3$  در اثر وزن خودش خرد خواهد شد، زیرا از خاکستر یک سیگار قویتر نیست.

منبع این ماده شهاب آسمانی کم‌چگال چیست؟ ستاره‌های دنباله‌دار. در خلال عبور موفقیت آمیز یک ستاره دنباله‌دار از نزدیک خورشید، گرمای خورشیدی سبب کاهش پیوسته مواد یخی از هسته ستاره دنباله‌دار می‌شود. گرد و غبار و ذرات جامد پاشیده شده در یخ ورقه ورقه شده و در یک صف در اطراف ستاره دنباله‌دار پخش می‌شوند.



شکل ۷-۲۱. یک شهاب آسمانی. این ذره گرد و غبار بین سیاره‌ای حدود  $10\mu\text{m}$  عرض دارد. به ساختار گلوله‌ای آن توجه کنید. (د. براونلی<sup>۱</sup>، دانشگاه واشینگتن).

این قطعه کوچک جامد بسیار شکننده است و چگالی کمی دارد. ستاره دنباله‌دار هر چه مسن‌تر و تعداد دفعات عبورش از نزدیکی خورشید بیشتر باشد، کاهش بیشتری در کل مواد یخی و آزاد شدن مواد شهاب آسمانی وجود دارد. حدود ۹۹ درصد از کل شهاب‌ها از ستاره دنباله‌دار سرچشمه گرفته‌اند.

احتمالاً باقیمانده‌ها به سیارکها مربوط‌اند. فقط آن شهاب‌های بزرگتر از یک اندازه مشخص می‌توانند در برابر تبخیر در جو نجات پیدا کنند و به عنوان شهاب سنگ‌ها به زمین برخورد کنند. بر حسب ترکیبات شیمیایی و فیزیکی، ستاره‌شناسان شهاب سنگ‌ها را به سه طبقه بزرگ تقسیم می‌کنند: آهنی‌ها<sup>۲</sup>، سنگی‌ها<sup>۳</sup> و آهنی‌های سنگی<sup>۴</sup>. آهنی‌ها که عموماً حدود ۹۰ درصد آهن و ۹ درصد نیکل با مقدار کمی از سایر عناصر هستند، معمول‌ترین یافته‌ها می‌باشند. سنگی‌ها از مواد سبک سیلیکاتی مشابه

1. D. Brownlee.  
3. stones

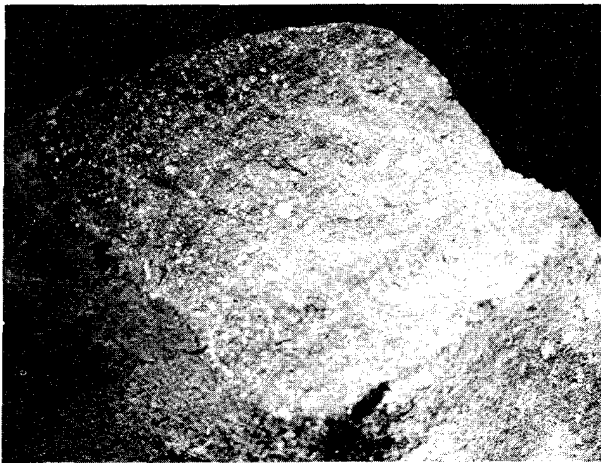
2. irons.  
4. stony irons

صخره‌های پوسته‌ای زمین تشکیل شده‌اند. اگر چه حقیقتاً معمول‌ترین نوع شهاب سنگی دیده شده در حال سقوط هستند، اما تشخیص دادن آنها از سنگ‌های معمولی زمینی مشکل است و لذا بخش کوچکی از یافته‌ها را تشکیل می‌دهند (شکل ۷-۲۲). وقتی در زیر یک میکروسکوپ آزمایش شد، دیده شده است که بسیاری از سنگها حاوی کره‌های سیلیکات به نام کندرول<sup>۱</sup> هستند که در یک زمینه هموار کار گذاشته شده‌اند. این سنگ‌ها تحت عنوان کندرایت<sup>۲</sup> ها شناخته شده‌اند. آهنی‌های سنگی پیوندی را میان آهنی‌ها و سنگی‌ها نشان می‌دهند و عموماً تکه‌های کوچک سنگ چیده شده در آهن را به معرض نمایش می‌گذارند. آهنی‌ها با چگالیهایی در گستره ۷۵۰۰ تا  $8000 \text{ kg/m}^3$  تراکم‌ترین شهاب سنگ‌ها هستند. سنگی‌ها با چگالی متوسطی از ۳۰۰۰ تا  $3500 \text{ kg/m}^3$ ، کم‌تراکم‌ترین هستند. از آنجائی که آهنی‌های سنگی ترکیبی از سنگی‌ها و آهنی‌ها هستند، دارای چگالی میانه‌ای از ۵۵۰۰ تا  $6000 \text{ kg/m}^3$  می‌باشند.

یکی از عجیب‌ترین انواع کندرایت‌ها، کندرایت‌های کربنی هستند. کندرول‌ها در این شهاب سنگ‌ها در ماده‌ای کار گذاشته شده‌اند که نسبت به سایر کندرایت‌های سنگی حاوی کربن بیشتری است - به طور نمونه از نظر جرم از یک تا چهار درصد کربن. محتوی کربنی آنها به این شهاب سنگ‌ها ظاهری تیره می‌بخشد. کندرایت‌های کربنی همچنین حاوی آب (در گستره‌ای از ۳ تا ۲۰ درصد) و مواد فرّار می‌باشند. به علاوه، فراوانی نسبی عناصر قابل تراکم در کندرایت‌های کربنی به آنچه در شید سپهر خورشید یافت شده نزدیکتر است تا به آنچه در پوسته زمین یافت می‌شود. یعنی اگر مقداری گاز از خورشید خارج می‌شد و تا زیر نقطه انجماد آب سرد می‌گردید، عناصر متراکم شده فراوانی‌های شیمیایی نسبی کاملاً متفاوتی با زمین، اما بسیار مشابه با کندرایت‌های کربنی می‌داشت. این شباهت دلالت بر این دارد که کندرایت‌های کربنی از همان ماده اولیه‌ای ساخته شده‌اند که خورشید از آن شکل گرفته است و از آن زمان هیچ گونه توده گرمائی عظیمی و یا تغییراتی را متحمل نشده است.

یک سر نخ مهم دربارهٔ منشاء شهاب سنگ‌های آهنی از اثر اسید بر سطوح صیقلی و

سیاه شدن آنها بدست می آید و طرحهای بلوری بزرگ به نام اشکال ویدمنستاتن<sup>۱</sup> مرئی می گردد (شکل (۷-۲۳)). وقتی اسید بر آهن زمینی اثر داده می شود قادر به ایجاد چنین طرحهایی نیستند. اشکال ویدمنستاتن به وضوح یک شهاب سنگ را از آهن زمینی مشخص می سازند و همچنین در مورد تاریخچه ماده شهاب سنگ سر نخ به دست می دهند. یک مخلوط آهن - نیکل هنگامی که به آهستگی تحت فشارهای کم از دمای ذوب حدود  $1600^{\circ}\text{K}$  سرد شود، بلورهای بزرگی را تشکیل می دهد. سرد کردن باید بسیار تدریجی باشد (حدود ۱ درجه کلوین در هر  $10^6$  سال). با وجود این که فلزات گرما را بخوبی هدایت می کنند، در سرمای فضا یک جرم مذاب از نیکل و آهن به سرعت



شکل ۷-۲۲. یک شهاب سنگ سنگی. یک تکه از سنگی که در آلوده<sup>۲</sup> مکزیکو سقوط کرده است. به مداخل رنگ روشن توجه نمائید. (م. زیلیک<sup>۳</sup> انستیتوی شهابسنگی، دانشگاه نیومکزیکو).

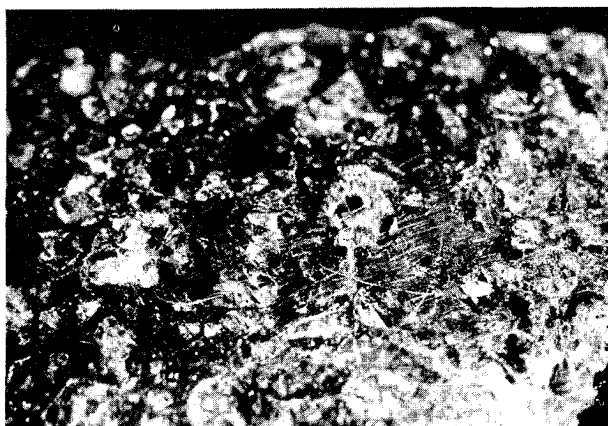
سرد خواهد شد و بلورهای بزرگ شکل نمی گیرد. تنها اگر شهاب سنگ های نیکل - آهن محافظی در مقابل سرما داشتند می توانستند اشکال ویدمنستاتن را تولید کنند و لذا شبیه این است که مواد شهاب سنگ نیکل - آهن درون اجرام سماوی کوچک جامد گردیده و به اجسام شهاب سنگی مادر<sup>۴</sup> مصطلح شده اند. برای سرد شدن به مقدار فقط  $1^{\circ}\text{K}$  در

1. Widmanstätten figures.  
3. M. Zeilik.

2. Allende.  
4. Parent meteorite bodies.



۱۰<sup>۶</sup> سال، این اجرام سماوی باید حداقل ۱۰ km قطر داشته باشند.



شکل ۷-۲۳. یک شهاب سنگ آهنی. ساختار کریستالی در بخش مسطح و صیقل خورده این شهاب سنگ، که در درای<sup>۱</sup> نیومکزیکو سقوط کرده، قابل مشاهده است. (ام. زیلیک، انستیتوی شهابسنگی، دانشگاه نیومکزیکو).

این چنین اجرام سماوی احتمالاً با تشکیل منظومه شمسی شکل گرفته‌اند. تصور می‌شود که اجرام سماوی شهاب سنگ مادر فقط چند صد کیلومتر عرض داشته‌اند. به محض تشکیل، می‌توانسته‌اند به وسیله تلاشی رادیواکتیو از ایزوتوپهایی با عمر کوتاه مانند  $^{26}\text{Al}$  گرم شوند. یک جرم سماوی شهاب سنگ مادر وقتی که برای ذوب شدن، گرم شود، لایه لایه می‌شود؛ چگال‌ترین ماده در مرکز قرار می‌گیرد و کم چگال‌ترین به سطح می‌آید. بنابراین، شیء با هسته‌ای از فلزات و پوششی از مواد صخره‌ای شکل می‌گیرد که برای تشکیل یک پوسته سرد می‌شود. این پوسته، فلزات مذاب را عایق کرده و اجازه می‌دهد که آنها به آهستگی سرد شوند و در نتیجه بلورهای بزرگ را تشکیل دهند. مدتی بعد، اجرام سماوی شهاب سنگ مادر را با یکدیگر تصادم کرده و تکه تکه می‌شوند. تکه‌های حاصل از پوسته خارجی، شهاب سنگ‌های سنگی را می‌سازند و تکه‌های حاصل از قسمت‌های درونی‌تر، شهاب سنگ‌های سنگی - آهنی می‌شوند و

بالاخره هسته شهاب سنگ‌های آهنی را تولید می‌کنند.

توضیح فوق مستلزم آن است که اجرام سماوی شهاب سنگ مادر از اولین مواد جامدی بوده‌اند که منظومه شمسی جوان را تشکیل داده‌اند. اطلاعات رادیو سنجی این ایده را حمایت می‌کنند که تمامی عمرها در حدود  $4/6$  بیلیون سال می‌باشد. بنابراین، شهاب سنگ‌ها مستقیم‌ترین شواهد را از جامدات اولیه برای ما تهیه می‌کنند - شیمیایی، ایزوتوپی و ساختاری. در مجموع، بینشی از تحول اجرام سماوی مادرشان را به دست می‌دهند.

همه شهاب سنگ‌ها از سیارکها منشاء نمی‌گیرند. برخی (تعداد خیلی قلیل) از ستاره‌های دنباله‌دار می‌آیند - شاید کندرایت‌های کربنی منتخب. با این وجود، ما چهار شهاب سنگ داریم که به احتمال قوی از ماه آمده‌اند! از سال ۱۹۸۱ میلادی دانشمندان ایالات متحده و ژاپن هزاران شهاب سنگ مدفون در یخ قدیمی قطب جنوب را کشف کرده‌اند. چهار عدد از اینها - هر کدام فقط چند سانتیمتر عرض دارند - برسیا<sup>۱</sup>هایی با سوراخ‌های رنگی روشن هستند. این شهاب سنگ‌ها ساختاری مشابه برسیاهای قمری دارند؛ ترکیب شیمیایی آنها مشابه صخره‌های ماه است (به خصوص در گازهای بی اثر، پتاسیم، منیزیم و آهن) و فراوانی ایزوتوپی اکسیژن آنها نیز مشابه با ماه می‌باشد. بنابراین، برخی از تصادم‌های ماه انرژی کافی برای پرتاب تکه‌هایی با سرعت بیشتر از سرعت فرار ماه ( $2/4 \text{ km/s}$ ) فراهم می‌آورد، و آنگاه این تکه‌ها به طرف زمین حرکت می‌کنند. آنهایی که در یخ قطب جنوب به دام افتادند بخوبی برای آزمایشات نگه‌داری شده‌اند. شگفت‌آور این که این صخره‌ها در خلال خروج‌شان از ماه ذوب نشده‌اند!

## ۷-۵ گاز و گرد و غبار بین سیاره‌ای

گاز بین سیاره‌ای از منابع مختلفی می‌آید. برخی از جوهای سیاره‌ای فرار کرده‌اند و برخی به دنبال نابودی ستاره‌های دنباله‌دار آزاد شده‌اند. با این وجود، بیشتر آنها از خورشید می‌آیند. اساساً، باد خورشیدی که تاج خورشیدی را منبسط می‌کند (فصل ۱۰)، با سرعت حدود  $500 \text{ km/s}$  به سرعت از زمین می‌گذرد. گاز یونیزه شده در آنجا

متوقف نمی شود و تا وراى مدار پلوتو را جاروب می کند، تا وقتى که کند شده و در فضای بین ستاره‌ای پراکنده گردد.

با این وجود، باد خورشیدی فقط اثر کوچکی روی ذرات گرد و غبار سنگین تر در منظومه شمسی دارد. این ذرات که به طور تقریبی در صفحه دایرة البروج می گردند، پدیده‌ای را تولید می کنند که به نام نور منطقه البروجی<sup>۱</sup> شناخته شده است. این پدیده ابر ضعیفی از نور است که در یک شکل تقریباً سه گوش در بالای افق قبل از طلوع و پس از غروب آفتاب امتداد می یابد. نور منطقه البروجی چنان ضعیف است که حتی چراغ‌های یک شهر کوچک می تواند آن را کاملاً محو سازد.

طیف نور منطقه البروجی به طیف حاصل از نور خورشید انعکاس یافته شباهت دارد، و این حقیقت نشان دهنده این است که منشاء نور منعکس شده گرد و غبار است و نه گاز. مشاهدات ماهواره نشان می دهد که ذرات گرد و غباری منطقه البروجی در همسایگی زمین دارای غلظتی در حدود  $10^{-8} \text{ m}^{-3}$  هستند و دیگر اینکه آنها غالباً از سیلیکات‌ها، آهن و نیکل ساخته شده‌اند. وقتى این گرد و غبار کیهانى به زمین می ریزد، به همان اندازه میکرو شهاب سنگ‌های ریز ظاهر می شود، که شاید هر ساله چند میلیون تن به جرم زمین اضافه کند. جرم کل ابر منطقه البروجی در حدود  $10^{16} \text{ kg}$  است.

اگر چه گرد و غبار حاصل از متلاشی شدن ستاره‌های دنباله دار به طور ثابت منظومه شمسی را تغذیه می کند (و شاید تصادم‌های سیارکی)، اما دو فرآیند فیزیکی به طور مؤثری آن را می زدایند: فشار تابشی<sup>۲</sup> و اثر پوینتینگ - رابرتسون<sup>۳</sup>. فشار تابشی به این دلیل وقوع می یابد که تابش الکترومغناطیسی اندازه حرکت را با تندی نور حمل می کند. شار انرژی تابش  $E$  ( $\text{J} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) با یک شار اندازه حرکت  $P = \frac{E}{c}$  ( $\text{j} / \text{m}^2$ ) متنظر است که در آن  $c$  تندی نور می باشد (فصل ۸). شار اندازه حرکت، فشار نور روی ذره است. وقتى که تابش خورشیدی با یک ذره گرد و غبار به سطح مؤثر یا مقطع عرضی  $A$  برخورد می کند، آهنگ تغییر اندازه حرکت ذره همان نیروی تابشی است:

$$F_R = PA = AE / c$$

1. Zodiacal light.  
3. Poynting - Robertson effect.

2. radiation pressure.

از بحث در مورد دماهای سیاره‌ای داریم،  $E = (R_{\odot} / d)^2 \sigma T_{\odot}^4$  که در آن  $d$  فاصله از خورشید است. اگر فرض کنیم که  $A = \pi r^2$ ، که  $r$  شعاع ذره است، در این صورت نیروی تابشی که ذره به بیرون از خورشید می‌راند عبارت است از

$$F_R = (\pi \sigma r^2 R_{\odot}^2 T_{\odot}^4 / c) / d^2 \quad (2-7)$$

اما، نیروی جاذبه گرانشی خورشید روی ذره برابر است با

$$F_G = GM_{\odot} (\frac{4}{3} \pi r^3 \rho) / d^2 \quad (3-7)$$

که در آن  $\rho$  چگالی ذره می‌باشد. وقتی که نسبت معادلات (۲-۷) و (۳-۷) را تشکیل داده و اعداد تقریبی را جایگذاری کنیم، داریم:

$$\begin{aligned} F_R / F_G &= \frac{3 \sigma R_{\odot}^2 T_{\odot}^4}{4 c G M_{\odot} \rho r} \\ &= 5 / 78 \times 10^{-5} / \rho r \end{aligned} \quad (4-7)$$

که اگر  $r$  را بر حسب متر و  $\rho$  را بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب بیان کنیم، این نسبت بدون بعد است. توجه کنید که فاصله ذره  $d$  از خورشید حذف شده است. می‌بینیم که برای چگالی‌های قابل قبول ( $6000 \text{ kg/m}^3$  تا  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) وقتی که  $r$  مساوی  $0.1$  تا  $1 \mu\text{m}$  است  $F_R = F_G$  می‌گردد، بنابراین ذرات گرد و غبار کوچکتر از  $1 \mu\text{m}$  به خارج از منظومه شمسی پرتاب می‌شوند. باد خورشیدی (فصل ۱۰) تابش را در این عمل تمیز کردن، کمک می‌کند.

برای ذرات بزرگتر که  $F_G \gg F_R$  عملاً اثر پوینتینگ - رابرتسون مهم می‌شود. همان طوری که حرکت مداری زمین نور خورشید را منحرف می‌سازد، به همین صورت نیز مدار کپلری یک ذره سبب خواهد شد که به نظر برسد تابش خورشیدی اندکی جلوتر از ذره می‌آید. اگر  $V$  تندی ذره در مدار دایره‌ای خورشیدی باشد، زاویه بین تابش فرودی و بردار شعاعی به خورشید برابر  $\theta = \frac{V}{c}$  است، بنابراین، مؤلفه  $(V/c) F_R$  نیروی تابش مانع حرکت ذره می‌شود. لذا، یک ذره به طور ماریپچی درون خورشید خواهد افتاد. محاسبات نشان می‌دهند ذره‌ای که از ابتدا در فاصله  $d$  (AU) به دور خورشید می‌گردد در زمانی برابر مقدار زیر به درون خورشید سقوط خواهد کرد.

$$t = (V \times 10^5) \rho r d^2 \text{ سال}$$

به عنوان مثال، ذره‌ای با اندازه  $r = 1 \mu\text{m}$  و چگالی  $\rho = 4300 \text{ kg/m}^3$  فقط  $3 \times 10^3$  سال

طول می‌کشد تا از فاصله ۱ AU به طور ماریپج به درون خورشید سقوط کند و از فاصله ۴۰ AU حدود  $5 \times 10^6$  سال. در این روش، منظومه شمسی از گرد و غبارهای کوچکش پاک می‌شود، اما جای این مواد از خرد شدن اجرام سماوی بزرگتر مانند ستاره‌های دنباله‌دار، مجدداً پر می‌شود.

## ۷-۶ شکل‌گیری منظومه شمسی

ما این فصل را با یک طرح مرکب از توسعه احتمالی منظومه شمسی بر اساس بهترین الگوهایی که امروزه داریم، پایان می‌دهیم. این الگوها اساساً الگوهای سحابی‌گونه<sup>۱</sup> هستند که یک ابر از گاز و گرد و غبار بین سیاره‌ای برای تشکیل خورشید و سیارات با هم همراهی می‌کنند. سیمای کلی این تصویر احتمالاً به طور قابل قبولی صحیح هستند حتی اگر چه جزئیات هنوز مبهم و نامطمئن باشند. ما روی دو جنبه مهم این الگوها تأکید خواهیم کرد: دینامیک و شیمی.

### (الف) دینامیک

منظومه شمسی یک ساختار منظم را بر حسب خواص دینامیکی‌اش نشان می‌دهد، به طوری که اگر از بالای قطب شمال خورشید دیده شود، منظومه شمسی قواعد زیر را نشان می‌دهد:

- ۱- سیارات در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در اطراف خورشید می‌گردند؛ خورشید نیز در همان جهت به دور خود می‌چرخد.
- ۲- به استثنای عطارد و پلوتو، اکثر سیارات دارای صفحات مداری هستند که فقط به طور جزئی با صفحه دایرة البروج شیب دارند؛ مدارها تقریباً هم‌صفحه هستند.
- ۳- به استثنای عطارد و پلوتو، سیارات در مدارهایی می‌گردند که خیلی به دایره نزدیک هستند.
- ۴- به استثنای زهره و اورانوس، سیارات در خلاف جهت عقربه‌های ساعت (یعنی در همان جهت حرکت مداری‌شان) به دور خود می‌چرخند.

۵- فواصل مداری سیارات از خورشید دارای نظم خاصی است؛ به طور تقریبی، هر سیاره در فاصله‌ای دو برابر فاصله سیاره قبلی تا خورشید قرار می‌گیرد.

۶- اکثر قمرها در همان جهتی می‌گردند که سیارات مادرشان به دور خود می‌چرخند و در نزدیکی صفحات استوایی سیارات قرار دارند.

۷- فواصل مدارهای برخی قمرها دارای یک قاعده منظم می‌باشد.

۸- مجموع اندازه حرکت زاویه‌ای سیارات از اندازه حرکت زاویه‌ای خورشید بیشتر است.

۹- ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب طولانی مدارهایی دارند که از همه جهات و زوایا می‌آیند، بر خلاف مدارهای هم صفحه سیارات، اقمار، سیارکها و ستاره‌های دنباله‌دار با دوره تناوب کوتاه.

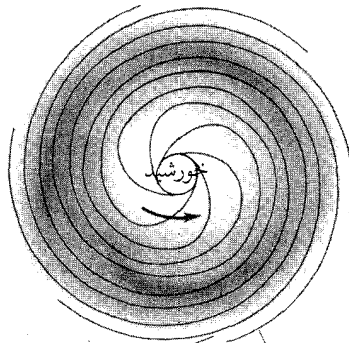
۱۰- سه عدد از سیارات مشتری گون شناخته شده‌اند که دارای حقله هستند.

اساس الگوهای سحابی گون این است که در آنها خورشید و سپس سیارات از یک ابر ناشی از مواد بین سیاره‌ای شکل گرفته‌اند. شکل‌گیری خورشید در مرکز یک ابر مسطح روی می‌دهد. سیارات از قرص ابر بوجود می‌آیند. لذا، مسئله دو قسمت اساسی دارد: (۱) چگونه یک منظومه شمسی مسطح بسازیم و (۲) چگونه سیارات را واداریم که از ابر بوجود آیند.

برای حل اولین قسمت، بقای اندازه حرکت زاویه‌ای را در نظر بگیرید. نکته اساسی این است: وقتی یک جسم شروع به چرخش به دور خود می‌کند، تا زمانی که هیچ گشتاوری بر آن وارد نشود به چرخش خود ادامه می‌دهد. مقدار اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی به جرم و ابعاد جسم بستگی دارد. اگر اندازه جسم به خودی خود تغییر کند - به عنوان مثال، اگر توسط نیروی گرانشی منقبض شود - طبیعتاً سریعتر به دور خود خواهد چرخید تا اندازه حرکت زاویه‌ای اش را ثابت نگه دارد و همان طوری که در طول محور چرخشی فرو می‌ریزد، مسطح خواهد شد، جایی که اندازه حرکت زاویه‌ای چرخشی در واحد جرم کمترین مقدار را دارد. به عنوان نتیجه‌ای طبیعی از انقباض با چرخش، مدارهای سیارات را به طور مرتب در یک قرص نازک و چرخش خورشید به دور خود را نیز در همان جهت گردش سیارات می‌گیریم.

به همراه این راه حل شسته و رفته برای جنبه‌های کلیدی، دینامیک منظومه شمسی با یک مشکل جدی روبرو می‌شود: توزیع فعلی اندازه حرکت زاویه‌ای، با وجودی که جرم خورشید ۹۹ درصد جرم سیستم است ولی مشارکت آن در اندازه حرکت زاویه‌ای فقط یک درصد است. سیارات مشتری گون بیشترین مقدار یعنی ۹۹ درصد کل را دارند. برای پذیرفتن یک الگوی سحابی گون نیازمند فرآیندی برای توجیه توزیع فعلی اندازه حرکت زاویه‌ای می‌باشیم. یک ایده که در برخی جزئیات روی آن کار شده است، بر هم کنش میدان‌های مغناطیسی و ذرات باردار را برای تجدید شکل توزیع اندازه حرکت زاویه‌ای ارائه می‌دهد. راه حل اساسی نیاز دارد که چرخش قسمت مرکزی سحابی کاهش داده شود و به نواحی بیرونی‌تر منتقل گردد.

بر هم کنش ذرات باردار و میدان‌های مغناطیسی بگونه‌ای است که ذرات در طول خطوط مغناطیسی نیرو دارای حرکت مارپیچی می‌شوند. وقتی خورشید تشکیل شد، دمای نواحی درونی‌تر سحابی را بالا می‌برد. در اینجا گاز یونیزه شده است و خطوط میدان مغناطیسی ذرات باردار را به دام می‌اندازد. وقتی خورشید به دور خود می‌چرخد، خطوط میدان مغناطیسی را همراه خود دارد، اینها در امتداد ذرات باردار کشیده می‌شوند، که متوالیاً با گاز و گرد و غبار بر هم کنش کرده و در امتداد باقیمانده آنها کشیده می‌شود. بنابراین، میدان مغناطیسی در اطراف مواد درون سحابی نزدیک خورشید حرکت مارپیچی دارد. در همان زمان، لختی سحابی در مقابل چرخش به دور خود مقاومت می‌کند. این کشش روی خطوط میدان مغناطیسی، آنها را به یک شکل مارپیچ می‌کشد (شکل ۷-۲۴). میدان مغناطیسی، مواد موجود در سحابی را در جهت چرخش خورشید به دور خود مرتبط می‌سازد، و لذا مواد سحابی دارای چرخش می‌شوند (و اندازه حرکت زاویه‌ای) و در طی این فرآیند، کششی در امتداد چرخش خورشید سبب می‌شود که آن را آهسته می‌سازد.



خطوط مغناطیسی نیرو قرص گاز

شکل ۷-۲۴. میدان‌های مغناطیسی در سحابی خورشیدی. یک وضعیت ممکن از چرخش خطوط میدان مغناطیسی از خورشید که توسط گاز یونیزه شده در سحابی خورشیدی به تله افتاده‌اند.

### (ب) شیمی

تشکیل یک سیاره مستلزم یک فرآیند چند مرحله‌ای است، اولاً، دانه‌های جامد متعلق به سحابی خورشیدی متراکم می‌شوند. ثانیاً، این ذرات با هم یکی شده و اجرام سماوی بزرگ به نام ریز سیارات<sup>۱</sup> را شکل می‌دهند که سپس تصادم کرده و برای تشکیل پیش سیارات<sup>۲</sup> با هم یکی می‌شوند و به سیارات امروزی متحول می‌گردند. ترکیبات شیمیایی سیارات به وسیله فرآیندی به نام تسلسل تراکم<sup>۳</sup> از روی تراکم دانه‌ها تعیین می‌شوند.

ایده اولیه تسلسل تراکم این است: مرکز سحابی باید در دمایی برابر چندین هزار درجه کلوین بوده باشد. در اینجا دانه‌های جامد، حتی ترکیبات آهن و سیلیکات‌ها، نمی‌توانستند متراکم شوند. در جای دیگری که مواد می‌توانستند به عنوان دانه‌های جدید متراکم شوند به دما بستگی داشت. پائین‌تر از  $2000^{\circ}\text{K}$ ، دانه‌های ساخته شده از مواد خاکی متراکم شدند؛ زیر  $273^{\circ}\text{K}$  دانه‌های مواد خاکی و یخی هر دو می‌توانستند

1. Planetesimal.

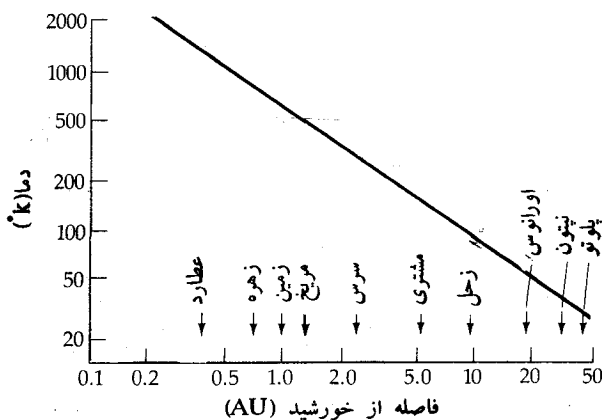
2. Protoplanet.

3. Condensation sequence.



شکل بگیرند. در دماهای متفاوت، گازهای موجود و جامدات حاضر به طور شیمیایی بر هم کنش کرده و ترکیبات متنوعی را تولید می‌کنند. اگر دمای سحابی به سرعت از مرکز به طرف بیرون کاهش یابد، چگالیها و ترکیبات سیارات می‌توانند بخوبی با تسلسل تراکم توضیح داده شوند. سپس در فواصل مختلف از خورشید، دماهای متفاوت اجازه می‌دهند که ترکیبات شیمیایی مختلف متراکم شوند و دانه‌هایی را تشکیل دهند که در نهایت پیش سیارات را بسازند (شکل ۷-۲۵). اگر ماده به دلیل بالا بودن دما نتوانست متراکم شود، آن ماده در پیش سیاره موجود نخواهد بود.

عموماً، تسلسل تراکم مستلزم آن است که به یک دمای کمیته دست یافته شود تا دلیل موجهی برای ترکیبات شیمیایی شناخته شده در سیارات ارائه شود. به طور تقریبی، این دماها عبارتند از  $1400^{\circ}\text{K}$  برای عطارد،  $900^{\circ}\text{K}$  برای زهره،  $600^{\circ}\text{K}$  برای زمین،  $400^{\circ}\text{K}$



شکل ۷-۲۵. دما و تسلسل تراکم. برای حصول به تفاوت‌ها در ترکیبات از یک سیاره به سیاره دیگر، دما در سحابی خورشیدی از روند نشان داده شده در اینجا تبعیت نموده است.

برای مریخ و  $200\text{ k}$  برای مشتری. دقت کنید که در یک فاصله معین از خورشید، دما با زمان تغییر می‌کند و لذا این مقادیر کمینه‌هایی است که در خلال شکل‌گیری سیاره‌ای حاصل می‌شود.

### (ج) نمو

وقتی دانه‌ها متراکم شدند برای تشکیل جرم‌های بزرگتر به هم می‌چسبند. فرآیندهای نمو در دو دسته فیزیکی مجزا قرار می‌گیرند: (۱) رشد به وسیله برخورد و چسبیدن ناشی از سطح مقطع هندسی و (۲) رشد توسط برخورد به علت جاذبه گرانشی، با یک سطح مقطع گرانشی.

سطح مقطع هندسی برای یک دانه کروی به شعاع  $R$  به سادگی عبارت است از  $\pi R^2$ . می‌توانیم سطح مقطع گرانشی (یا پارامتر برخورد) را به صورت زیر تعریف کنیم. یک ذره آزمایشی را که با سرعت  $V$  به دانه‌ای با شعاع  $R$  نزدیک می‌شود، در نظر بگیرید. وقتی که ذره آزمایشی به دانه ضربه می‌زند، دارای سرعت  $V$  است. فرض کنید  $S$  فاصله عرضی بیشینه از مرکز دانه باشد که یک ذره آزمایشی می‌تواند دارا بوده تا به دانه اصابت کند (شکل (۷-۲۶)). ذره آزمایشی از موقعیت  $R \gg S$  شروع به حرکت می‌کند به طوری که انرژی پتانسیل در  $S$  صفر است. بر طبق بقای اندازه حرکت زاویه‌ای داریم

$$VR = V_0 S$$

بقای انرژی ایجاب می‌کند که:

$$\frac{mV_0^2}{2} = \frac{mV^2}{2} - \frac{GmM}{R}$$

که در آن  $m$  جرم ذره آزمایشی و  $M$  جرم دانه است. سپس

$$\frac{V^2}{2} = \frac{V_0^2}{2} + \frac{GM}{R}$$

$$V = (V_0^2 + \frac{2GM}{R})^{\frac{1}{2}}$$

با جانشین کردن این عبارت برای  $V$  و با رجوع به معادله بقای اندازه حرکت زاویه‌ای داریم:

$$V_0 S = (V_0^2 + \frac{2GM}{R})^{\frac{1}{2}}$$

به طوری که

$$S = \left(\frac{R}{V_0}\right) \left(V_0^2 + \frac{2GM}{R}\right)^{\frac{1}{2}}$$

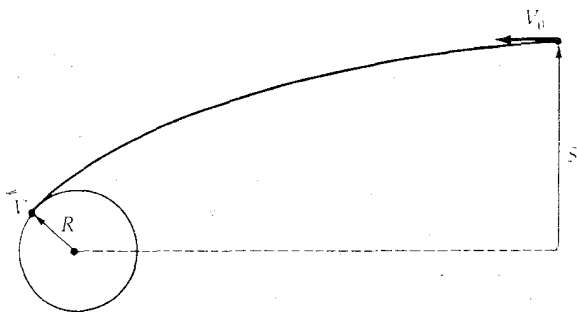
$$= \left(R^2 + \frac{2GMR}{V_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

این، معادله پارامتر برخورد گرانشی است؛ توجه کنید که مجموع یک جمله هندسی و یک جمله گرانشی است.

فرض کنید که ذرات با افزودن موادی با چگالی یکسان رشد کنند به طوری که چگالی ذرات ثابت بماند. در این صورت

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \left(\frac{4}{3}\right) \pi \rho R^3 \right]$$

$$= 4\pi \rho R^2 \left(\frac{dR}{dt}\right)$$



شکل ۷-۲۶. هندسه برخوردهای ذره

برای اینکه جرم ذرات افزایش یابد، اندازه‌شان افزایش می‌یابد. فرض کنید که گرانش بر رشد غلبه کند. اکنون ملاحظه کنید چگونه یک ذره در حین حرکت در میان گروهی از سایر ذرات رشد می‌کند. آهنگ برخورد به سرعت (سرعت بیشتر، برخوردهای بیشتر در یک زمان معین)، سطح مقطع (سطح مقطع بزرگتر، تعداد زیادتری برخوردها در یک زمان معین) و چگالی عددی سایر ذرات (چگالی بزرگتر به معنای برخوردهای بیشتر در یک زمان معین است) بستگی دارد. لذا،

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= \text{چگالی ذره} \times \text{سرعت} \\ &\quad \times \text{مقطع عرضی} \\ &= V_0 \rho_0 \pi S^2 \\ &= V_0 \rho_0 \pi \left( R^2 + \frac{\gamma GMR}{V_0} \right) \\ &= V_0 \rho_0 \pi R^2 + \frac{\gamma \pi \rho_0 GMR}{V_0} \end{aligned}$$

اولین عبارت (هندسی) را برای حالتی که سطح مقطع گرانشی غالب است، حذف کنید.  
سپس،

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &\approx \left( \frac{\gamma \pi G \rho_0}{V_0} \right) MR \\ &= \left( \frac{\gamma \pi G \rho_0}{V_0} \right) \left[ \left( \frac{4}{3} \right) \pi R^3 \right] R \\ \frac{dM}{dt} &\propto R^4 \end{aligned}$$

همزمان با این که ذرات رشد می‌کنند، مواد را با یک آهنگ بسیار زیاد و شتابدار افزایش می‌دهند.

در چه اندازه‌ای از ذره سطح مقطع گرانشی غلبه می‌کند؟ اجازه دهید بگوئیم که این امر زمانی اتفاق می‌افتد که  $S^2 = \gamma R^2$  باشد، یعنی دو برابر سطح هندسی. در این صورت

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\gamma} R = \left( R^2 + \frac{\gamma GMR}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \gamma R^2 &= R^2 + \frac{\gamma GMR}{V_0} \end{aligned}$$

بنابراین،

$$R^2 = \frac{\gamma GMR}{V_0}$$

و

$$\begin{aligned} R &= \frac{\gamma GM}{V_0} \\ &= \left( \frac{\gamma G}{V_0} \right) \left( \frac{4}{3} \right) (\pi \rho R^3) \end{aligned}$$

یا

$$R = \left( \frac{3V^2}{8\pi G\rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

دقت کنید که  $V_0$  سرعت نسبی و  $\rho$  چگالی ذرات است. به ازای  $V_0 = 1 \text{ km/s}$  و  $\rho \approx 3000 \text{ kg/m}^3$  داریم،

$$R \approx 1000 \text{ km}$$

به عنوان اندازه انتقالی. یک شیء بزرگتر از این اندازه احتمالاً یک ریز سیاره است.

#### (د) شکل‌گیری مشتری و زحل

مشتری و زحل ممکن است با روشی به غیر از آنچه که توسط الگوی نموریز سیاره توضیح داده شد، شکل گرفته باشند. در قیاس با تولد یک ستاره، مشتری و زحل ممکن است به جای نموریز سیارات از گلوله‌های ماده منفرد بزرگ درون سحابی به طور گرانشی متراکم شده باشند. اگر چنین باشد، تحولات یک پیش - مشتری و یک پیش - زحل با تحول پیش - ستاره‌ها ارتباط دارد (فصل ۱۹). در حقیقت، ترکیبات شیمیایی مشتری و زحل با ترکیبات ستارگان به طور خوب و نزدیکی هماهنگی دارد. تفاوت اصلی از این حقیقت ناشی می‌شود که مشتری و زحل جرم کافی ندارند تا دمای لازم برای مشتعل ساختن برهم کنش‌های جوش بدست آورند. گرمایی که آنها کسب می‌کنند از تبدیل انرژی پتانسیل گرانشی به گرما در خلال انقباض گرانشی حاصل می‌شود.

هارولد گرابوسک<sup>۱</sup> و همکارانش در مورد تحول مشتری از یک آغاز داغ، پس از آن که پیش - مشتری به هم آمده بود، محاسبات نظری را انجام داده‌اند. آنها یک مخلوط خورشیدی از مواد فرض کرده (۷۴ درصد هیدروژن، ۲۴ درصد هلیوم و ۲ درصد از هر چیز دیگر به نسبت جرمی) و محاسبات را با یک پیش - مشتری ۱۶ برابر اندازه مشتری فعلی، دمای مرکزی  $16000 \text{ K}$ ، دمای سطحی  $1000 \text{ K}$  و تابندگی‌ای تقریباً  $10^{-2}$  برابر تابندگی فعلی خورشید آغاز می‌کنند. در ابتدا گرانش به سرعت سبب فروریزش پیش - مشتری می‌شود. وقتی که دزون سیاره مایع است و مایعات به سختی بهم فشرده می‌شوند، جمع شدن کند می‌شود. در  $4/5$  بیلیون سال آینده، مشتری تا اندازه فعلی اش منقبض می‌شود و چون گرمای تشکیل‌اش را با آهنگی معادل  $L_{\oplus} (10^{-9} \times 1/8)$  به فضا

می دهد، دمای مرکزی اش تا  $30,000^{\circ}\text{K}$  پائین می آید.

این مدلها خاطر نشان می سازند که اندکی پس از شکل گیری، پیش مشتری از یک مرحله کوتاه با تابندگی زیاد عبور کرده است. این تابندگی زیاد اولیه ممکن است توضیح دهد که در مفهومی از یک تسلسل تراکم، چرا اعمار گالیله ای با دور شدن از مشتری کاهش در چگالی دارند. این کاهش مثلاً، چگالی تأکید می کند که کالیستو نسبتاً مواد یخی بیشتری از آیو دارد. در فاصله نزدیکتر به آیو، یخ کمتری از فاصله کالیستو متراکم گردیده است. اگر مشتری در زمان تشکیل اعمار داغ بود، اعمار داخلی تر به زیادی مواد یخی اعمار خارجی تر جمع آوری نمی شدند. لذا، ممکن است اعمار گالیله ای تراکم و نمو سیارات خاکی را تقلیل دهند.

جیمز پولاک<sup>۱</sup> و همکارانش مدلهای مشابهی را برای تحول ابتدایی زحل توسعه داده اند. تسلسل به آنچه برای مشتری بود شباهت دارد. مدلهای آنها  $4/5$  بیلیون سال پیش با سیاره ای ده برابر اندازه فعلی، با ترکیب خورشیدی و بدون هسته صخره ای شروع شد. گرانش به سرعت، سیاره را می فشارد. زحل در حدود یک میلیون سال حدود دو برابر اندازه فعلی اش خواهد بود و دمای مرکزی آن برابر  $21000^{\circ}\text{K}$  می باشد. این دمای زیاد فشار داخلی را بالا برده و انقباض گرانشی را پائین می آورد. سپس  $4/5$  بیلیون سال برای زحل طول می کشد تا به اندازه فعلی اش منقبض شود.

#### (ه) سیارکها، شهاب سنگها و ستاره های دنباله دار

تحقق معاصر روی سیارکها تأکید می کند که آنها ریز سیاراتی هستند که فقط جمع نشده اند تا یک سیاره را بسازند. تغییر ترکیبی را در سراسر کمربند سیارکی به خاطر آورد. در لبه داخلی تر، غالباً شامل سیارکهای نوع S است؛ و در لبه خارجی تر، غالباً انواع C می باشد. این تفاوت های آلبدو اگر انواع C کربن بیشتری از انواع S دارا باشند، به خوبی با رشته متراکم انطباق دارند. در درون کمربند، دماها به اندازه کافی کم بودند تا مواد سیلیکاتی متراکم شوند، اما برای انجام چنین عملی از طرف مواد در بر دارنده کربن، دما بیش از اندازه بالا بود. به علاوه، هر دو نوع مواد متراکم شدند تا به زیر

سیارات منجر شوند. چرا آنها یک سیاره را تشکیل ندادند؟ احتمالاً به دلیل اثر جزر و مدی پیش-مشتري. نیروهای جزر و مد خورشیدی همچنین به تغییر دادن مدارهای ریز سیارات از دایره به بیضی کمک کردند. برخی بر روی دیگران سقوط کردند، و آنها را به قطعات کوچکتر خرد نمودند. برخی از این تکه‌ها به درون قسمت داخلی منظومه شمسی جهیدند و نهایتاً بر روی سطوح عطارد، زهره، ماه، زمین و مریخ باریدند و دهانه‌ها شکل گرفتند. دوره بمباردمان سیاره‌ای در ۴ بیلیون سال پیش.

چگونه شهاب‌سنگ‌ها درون الگوی سحابی گون جای می‌گیرند؟ مشخصه‌های شهاب‌سنگ‌های کندرایتی تصویر تراکم را تأیید می‌کنند. ترکیب شیمیایی (مشابه با خورشید) و ساختار مخلوط نشده آنها پیشنهاد می‌کند که آنها منشاء مواد متراکم در سحابی هستند.

آشفته‌گی درون سحابی ممکن است امواج ضربه‌ای خلق کرده باشد که به سرعت دانه‌ها را ذوب کند. پس از عبور این امواج، قطرات منجمد گردیدند و تبدیل به جامد شدند تا کندرول‌ها را تشکیل دهند. کره‌های بلورین حاصله در ریز سیارات جمع شدند. کندرول‌ها پیشنهاد می‌کنند که اکثریت تراکم آنها در دماهای حدود  $600\text{ K}$  رخ داده است. (بر طبق تسلسل تراکم، این گستره موادی مشابه آنچه که زمین را می‌سازند، تولید می‌کند.) حدود یک میلیون سال پس از شکل‌گیری، تلاشی رادیواکتیو برخی از ریز سیارات را مجدداً گرم کرد، آنها را تا حدودی ذوب نمود و اجازه داد تا به هسته‌های آهنی و گوشته‌های سنگی لایه لایه شوند. ریز سیاراتی که به شکل یک پیش سیاره جمع نشدند، احتمالاً به اجرام سماوی منشاء شهاب‌سنگ تبدیل شدند. این اجرام سماوی بعداً تصادم کرده و قطعه قطعه شدند.

برای سایر ریز سیارات چه اتفاقی افتاد؟ برخی ممکن است در سرعتهای بالا با سایرین برخورد کرده و به قطعات کوچکتر شکسته شده باشند. تعداد کمی ممکن است به اندازه کافی از نزدیکی یک پیش سیاره عبور کرده باشند تا در یک مدار به عنوان یک قمر قرار گیرند. سایرین ممکن است فواصل دور را تجربه کرده باشند. مدار آنها ممکن است به اندازه کافی تغییر کرده باشد تا آنها را از منظومه شمسی به خارج پرتاب کند. نزدیک سیارات مشتري گون، ریز سیارات اغلب به صورت مواد یخی خواهند بود؛

اینها ممکن است هسته ستاره‌های دنباله‌دار را تشکیل داده باشند. این اجرام سماوی یخ‌زده ممکن است سپس به توسط نیروی گرانشی به درون ابر اورت<sup>۱</sup> هدایت شده باشند. ما بر طبق تسلسل تراکم انتظار داریم که اجرام سماوی شکل گرفته در نزدیکی سیارات مشتری گون یک ترکیب یخی داشته باشند. تخمین‌ها برای ترکیبات واقعی اورانوس و نپتون عبارتند از ۱۰ تا ۱۵ درصد مواد خورشیدی، ۲۰ تا ۲۵ درصد مواد خاکی، و ۶۰ تا ۷۰ درصد مواد یخی. بر این اعتقاد هستیم که ستاره‌های دنباله‌دار نیز تقریباً همین درصدهای نسبی را دارا می‌باشند (شاید در مواد خورشیدی و خاکی اندکی کمتر). استنتاج: این دو سیاره از یکی شدن ریز سیارات یخی رشد کردند. ریز سیارات باقیمانده مدار خودشان را دارند که به توسط سیارات مشتری گون مختل شده و به مدار (۲۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ AU) شاخص ابر اورت رانده می‌شوند. اورانوس و نپتون مؤثرترین اثرات گرانشی را دارند و حدود ۷۵ درصد اشیاء موجود در ابر ستاره دنباله‌دار را توجیه می‌کنند. لذا، ابر اورت یک محصول جانبی از نمو سیاره‌ای در قسمت بیرونی منظومه شمسی است.

### (و) شکل‌گیری زمین و ماه

از آنجایی که ماه یک جرم سماوی ساده‌تر از زمین است، ایده بهتری از تاریخ آن داریم - اما از شکل‌گیری آن خیر! کوشش در مورد توضیح شکل‌گیری ماه معمولاً در قالب یکی از سه مدل زیر انجام می‌شود: تسخیر، شکافت یا نمو دوتایی. در مدل تسخیر، ماه توسط نمو در فاصله‌ای از زمین شکل می‌گیرد و سپس به طور گرانشی توسط زمین تسخیر می‌شود. در مدل شکافت ساده، یک زمین موم‌سان چرخان سریع، قسمت بزرگی از گوشته خود را به بیرون پرتاب می‌کند (درست پس از شکل‌گیری هسته آن)؛ این تکه سرد شده و به ماه تبدیل می‌شود. مدل نمو دوتایی شکل‌گیری زمین و ماه را به عنوان واقعه‌ای کمابیش هم‌زمان از قسمت مشابه سحابی خورشیدی به نمایش در می‌آورد. هر مدل نقاط ضعف و قوت متفاوتی دارد و دانشمندان سیاره‌شناس اکنون احساس می‌کنند که هر مدل به جای ارائه یک جمله یا این - یا آن در مورد تسلسل



شکل‌گیری، بر روی جنبه‌ای از بسیاری از فرآیندها که حقیقتاً شکل می‌گرفتند، تأکید می‌کند.

مدل تسخیر به مقدار زیادی از نظر افتاده است. این مدل بر روی تفاوت‌های ترکیبات شیمیایی زمین و ماه دقت می‌کند (کبود آب و آهن در ماه و فراوانی بیشتر اورانیوم و عناصر نادر خاکی در آن). اما، هر دو جرم سماوی دارای فراوانی‌های ایزوتوپی یکسانی از اکسیژن هستند (همان طوری که برخی انواع شهاب سنگ‌ها می‌باشند) به طوری که آنها احتمالاً در نزدیکی سحابی خورشیدی شکل گرفتند. همچنین، دینامیک تسخیر مستلزم شرایط بسیار ویژه‌ای است که ترتیب دادن آنها مشکل می‌باشد - به ویژه، یک جرم سماوی سوم سنگینی در حین تسخیر در آن محدوده لازم است تا بقای اندازه حرکت را تضمین کند.

در مقابل، مدل شکافت بر روی شباهت‌های بین زمین و ماه تکیه می‌کند (به ویژه، ترکیب شیمیایی گوشته زمین). اما، برای مواد فرّار و عناصر اصلی، تفاوت‌های اساسی وجود دارد. به خصوص، نسبت  $\frac{Mg}{Si}$  برای ماه در خارج از گستره مقادیر ممکن برای گوشته زمین قرار دارد؛ عناصر مقاوم (مانند آلومینیم و کلسیم) در ماه با سازه ۲ غنی شده‌اند؛ عناصر فرّار تهی شده‌اند؛ و نسبت  $\frac{Ni}{Fe}$  کمتر از آن است که از گوشته زمین نتیجه شده است.

مدلهای نموّ دوتایی بسیاری از این مسائل را توجیه می‌کنند. زمین و ماه به توسط نموّ در ناحیه یکسانی از سحابی خورشیدی از مواد اطراف رشد می‌کنند. برخی مواد به توسط برخوردهای غیر عادی از جرم سماوی نموّ یافته و به بیرون پرتاب شده‌اند، و نخاله‌ها را در ناحیه افزایش می‌دهند. زمین آهن بیشتری را جمع می‌کند و به درون هسته سقوط داده و در ابتدای تسلسل شکل می‌گیرد. برخوردهای بزرگ سپس مواد گوشته مانند را پرتاب می‌کنند. به محض شکل‌گیری ماه، تلاشی رادیواکتیویته (از ۲۶ - Al) آن را به اندازه کافی گرم می‌کند تا عاری از مواد فرّار گردد. نتیجه نهایی این است که زمین و ماه با برخی تفاوت‌های قابل توجه در بسیاری از همگونی‌های شیمیایی شریکند.

اخیراً یک مدل مختلط برای منشاء زمین و ماه توسعه داده شده است، که در آن برخورد یک جرم سماوی به اندازه مریخ با زمین جوان فرض می‌شود. انرژی این

برخورد عظیم بخش بزرگی از جرم زمین و جرم سماوی برخورد کننده را به درون گرده‌ای از مواد در اطراف زمین تزریق می‌نماید که ماه از آن نمو یافته است. به منظور توجیه اندازه حرکت زاویه‌ای برای سیستم زمین - ماه، جرم سماوی وارد شونده مجبور است با سرعتی حدود  $10 \text{ km/s}$  به طور مماس با زمین برخورد نماید. این مدل، مدل برخورد عظیم<sup>۱</sup> نامیده شده و می‌تواند مانند یک دگرگونی در تصویر نمو دو گانه در نظر گرفته شود. این ایده تاکنون با هیچ اشکال جدی مواجه نگردیده و هنوز نیازمند آن است که بسیاری از جزئیات آن حل شود. این مدل بسیار امیدوار کننده به نظر می‌رسد.

اکنون مشخصاً به زمین بر می‌گردیم. پس از دوران نمو (که ممکن است فقط چند میلیون سال طول کشیده باشد)، زمین یک سیاره آبله‌گون (یک سطح با حفره‌هایی نظیر بلندی‌های ماه) از مواد تقریباً یکسان بود؛ جو آن عمدتاً هیدروژن بوده است. سپس گرمای پرتوزا قسمت‌های درونی را گرم کرد و هسته شکل یافت. این گرما گاززدایی از قسمت‌های درونی را باعث شد تا جوئی ثانوی و غنی از آب، دی‌اکسیدکربن، متان و آمونیاک خلق نماید. وقتی سطح زمین به اندازه کافی خنک شده بود، باران‌های شدید فرو ریختند تا تشکیل اقیانوس‌ها را آغاز نمایند. شاید یک بلیون سال پس از شکل‌گیری، طبقات زمین ساختی شروع کردند تا پوسته را که سرد و نازک شده بود، اصلاح کنند. بستر اقیانوس‌ها اکثراً پر شده بود. حیات توسعه یافت و جو را به آنچه که امروز داریم تغییر داد. حدود ۲۰۰ میلیون سال پیش، قاره‌ها تجزیه شدند و توسط طبقات زمین ساختی به موقعیتهایی که اکنون می‌بینیم رانده شدند.

## مسائل

۱. فشار تابشی و اثر پوینتینگ - رابرتسون بر روی یک فضاییمای مصنوعی تحقیقاتی با چگالی متوسط  $1000 \text{ kg/m}^3$  و شعاع  $1 \text{ m}$  چه تأثیراتی دارند؟ جوابتان را به طور کمی توجیه نمائید و فرضیات خود را بیان کنید.
۲. در ابتدای منظومه شمسی، نیروهای جزر و مدی خورشید و حد روچ ممکن است

نقش مهمی را ایفا کرده باشند. برای اجتناب از گسیختگی جزر و مدی، چه کمینه چگالی یک پیش سیاره در فاصله  $d$  (بر حسب AU) از خورشید باید داشته باشد؟ بر روی نتیجه‌تان بحث نمایید.

۳. بر طبق مدل‌های نظری، ممکن است که تابندگی مشتری در ۴ بیلیون سال پیش به بزرگی  $10^{-2} L_{\odot}$  و دمای سطحی  $1000^{\circ}K$  بوده باشد.

(الف) اگر مشتری مانند یک جسم سیاه تابش می‌کرد، شعاع آن چه بود؟

(ب) تحت این شرایط، جسم سیاهی در فاصله آیو از مشتری چقدر داغ می‌شد؟

۴. (الف) آهنگ فعلی را که تحت آن زمین گرد و غبار بین سیاره‌ای را جمع می‌کند تخمین بزنید.

(ب) محاسبه کنید چه مدت طول خواهد کشید تا زمین با این آهنگ جرمش را به مقدار ۵۰ درصد افزایش دهد.

۵. اگر همه اندازه حرکت زاویه‌ای سیارات به خورشید اضافه می‌شد، با چه سرعتی می‌چرخید؟

۶. پارامترهای برخورد گرانشی برای زمین (سطح) و مشتری (بالای جو) را برای اجرام سماوی که در سرعت‌های فرار بر روی آنها سقوط می‌کنند، مقایسه کنید.

۷. سرعت‌های فرار از تیتان، دایون و هایپریون را مقایسه کنید. طول عمر متان را در هر یک تخمین بزنید.

۸. (الف) اگر شار مادون قرمز سیارکی (در  $10 \mu m$ ) برابر  $\frac{1}{4}$  شار مرئی آن باشد، آلبدوی آن چقدر است؟

(ب) شعاع آن چقدر است؟

۹. فرض کنید سیارک هرکولینا قمری به شعاع  $100 km$  دارد که در فاصله  $1000$  کیلومتری آن را دور می‌زند. هر دو جرم سماوی را صخره‌ای در نظر بگیرید.

(الف) دوره‌های تناوبی مداری قمر را محاسبه کنید.

(ب) نیروی جزر و مدی خورشید که اجرام سماوی را به طرفین می‌کشد با نیروهای گرانشی متقابل که آنها را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد، مقایسه کنید.

۱۰. در یک شب صاف، اگر دور از روشنایی‌های شهر باشید، می‌توانید در حدود ۱۰

شهاب را در یک ساعت مشاهده کنید. شهاب آسمانی که یک شهاب را خلق می کند جرمی حدود ۱ گرم دارد و در حدود ۱۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین می سوزد. مقدار جرم شهاب های آسمانی را که در یک سال به جو زمین وارد می شوند، تخمین بزنید. اگر این شار ورودی ثابت بوده باشد، از زمانی که زمین شکل گرفته است چه مقدار جرم به آن افزوده شده است؟

۱۱. ستاره دنباله دار ایکیا - سکی (ستاره دنباله دار بزرگ و خراشنده خورشید در سال ۱۹۶۵ میلادی) مداری بیضی شکل با دوره تناوب حدود ۷۰۰ سال داشت. وقتی ستاره دنباله دار خورشید را دور می زد، در قرین خورشیدی دارای فاصله  $0.08 \text{ AU}$  بوده است.

(الف) ستاره دنباله دار در بعید خورشیدی چه مقدار از خورشید دور است (بر حسب AU)؟

(ب) اگر سرعت آن در قرین خورشیدی اش  $500 \text{ km/s}$  می بود، سرعت مداری آن در بعید خورشیدی چقدر خواهد بود؟

(ج) بعضی از فرضیات قابل قبول در مورد چگالی متوسط هسته ستاره دنباله دار را ارائه کنید. آیا ستاره دنباله دار بقدر کافی از نزدیکی خورشید عبور می کند تا به وسیله نیروهای گرانشی جزر و مدی شکافته شود؟ (راهنمایی: بر روی حد روچ برای خورشید تحقیق کنید.)

۱۲. شدت له شدن (فشار برای تغییر شکل مواد) برای شهاب سنگ های آهنی حدود  $4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  است. یک سیارک آهنی این فشار مرکزی را در چه اندازه ای دارا است؟ اگر آن به این اندازه یا بزرگتر بود چه اتفاقی می افتاد؟ (راهنمایی: از معادله تعادل هیدرواستاتیک استفاده کنید.)

۱۳. فرض کنید که ذرات در حلقه های زحل مدارهای دایره ای در گستره  $78 \times 10^3$  تا  $137 \times 10^3$  کیلومتر از مرکز زحل را دارا باشند.

(الف) سرعت های مداری در لبه های داخلی و خارجی حلقه ها را محاسبه کنید. فرض کنید این حلقه ها از ذرات منفردی ساخته شده اند که از قوانین کپلر تبعیت می کنند.

(ب) چه تفکیکی (چه دقتی در اندازه‌گیری طول موج) را یک طیف‌نما به منظور تمایز بین تندی‌های لبه خارجی و داخلی حلقه‌ها باید دارا باشد؟

قسمت دوم

---

ستارگان

---

## تابش الکترومغناطیسی و ماده

اکنون از سیارات به ستارگان بر می‌گردیم. نزدیکترین ستاره به ما خورشید است، که یک قرص مرئی به نظر می‌رسد. سایر ستارگان به صورت نقاط روشنی که در شب بر پهنای آسمان پراکنده‌اند، دیده می‌شوند. چنین اشیایی را چگونه می‌توان مطالعه کرد؟ ستارگان به وسیله نوری که از آنها گسیل می‌شود رؤیت می‌شوند و مافقط از طریق دریافت و توصیف این تابشها می‌توانیم به خواص آنها پی ببریم.

در این فصل به مشخصات تابش الکترومغناطیسی (که بیشتر به صورت نور مرئی با آن آشنائیم)، ساختار اتمی ماده و همه بر هم کنشهای مهم بین ماده و تابش می‌پردازیم. ستاره‌شناسان نور را به دو طریق مطالعه می‌کنند: به وسیله اندازه‌گیری شدت کل (در محدوده بخصوصی از طول موجها) و توسط تجزیه نور به یک طیف و بررسی جزئیات آن. هر دو روش، مسأله ستاره‌شناس را که چگونه به خصوصیات فیزیکی ستارگان بسیار دور پی ببرد، حل می‌کند.

## ۱-۸ تابش الکترومغناطیسی

با در نظر داشتن هدف نهائی از فهم ستارگان، طبیعت نور را به صورت امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

### (الف) طبیعت موجی نور

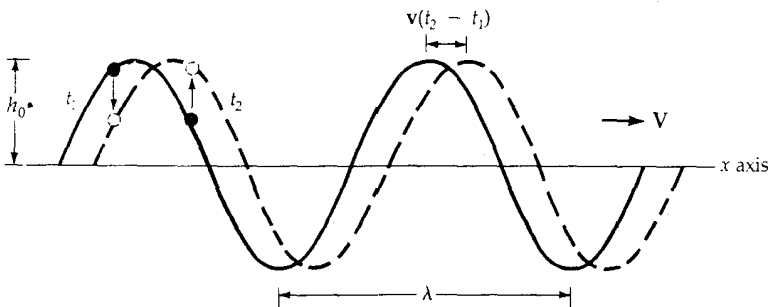
موج چیست؟ شما با امواج آب که اغتشاشات نوسانی متحرک در امتداد سطح مایع هستند، آشنائید. چند چوب‌پنبه را در امتداد خط حرکت موج قرار دهید و در این صورت می‌توانید چنین موجی را (یک موج عرضی یا بالا-پائین) توسط ارتفاع  $h$  چوب‌پنبه‌ها از سطح متوسط (شکل (۱-۸)) به شکل ریاضی زیر مشخص کنید.

$$h = h_0 \sin \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) (x - vt) \right] \quad (1-8)$$

توجه داشته باشید که در یک موج عرضی اغتشاش محیطی که موج از آن عبور می‌کند بر جهت حرکت موج عمود است. در مقابل یک موج طولی شامل اغتشاشاتی است که در امتداد جهت حرکت قرار می‌گیرد، نظیر فشردگی یک فنر.

معادله (۱-۸) یک موج سینوسی با دامنه  $h_0$  را نمایش می‌دهد که در زمان  $t$  در امتداد محور  $x$ ‌های مثبت با سرعت  $v$  پیش می‌رود؛ فاصله بین دو قله متوالی موج، طول موج  $\lambda$  نامیده می‌شود. چوب‌پنبه‌ها در یک زمان معلوم مثلاً ( $t = 0$ ) مدل ارتعاشی را نشان می‌دهند.

$$h = h_0 \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (2-8)$$



شکل ۱-۸. یک موج در حال حرکت. یک موج آب در حال حرکت با سرعت  $v$  به طرف راست در دو لحظه  $t_1$ ،  $t_2$  نشان داده شده است. چوب‌پنبه‌های شناور سطح در حال نوسان را مشخص می‌کنند.



اگر چوب‌پنبه را در  $x = 0$  مشاهده کنیم، به طور تناوب بالا و پائین می‌رود. توجه کنید که یک چوب‌پنبه مفروض در مدت  $\frac{1}{v}$  ثانیه یک نوسان کامل می‌کند؛ در یک ثانیه، تعداد  $\frac{v}{\lambda}$  //قله‌های موج از یک نقطه معین عبور خواهد کرد و بنابراین بسامد ( $\nu$ ) نوسان درست برابر  $\frac{v}{\lambda} = \nu$  بر ثانیه می‌باشد. بنابراین، ممکن است چنین موجی را توسط رابطهٔ اساسی زیر کاملاً مشخص کنیم،

$$\lambda \nu = v \quad (3-8)$$

مثلاً امواج آب با طول موج  $\lambda = 5 \text{ cm}$  با تندی  $v = 10 \text{ cm/sec}$  حرکت کرده و با بسامد  $\nu = 2/\text{sec}$  از نقطهٔ معلومی عبور می‌کنند (دوبار در ثانیه). واحد SI برای بسامد، هرتز (Hz) است، یک Hz معادل با یک دور بر ثانیه است.

از معادلهٔ (۳-۸) می‌بینیم که رابطه:

$$\lambda \nu = c \quad (4-8)$$

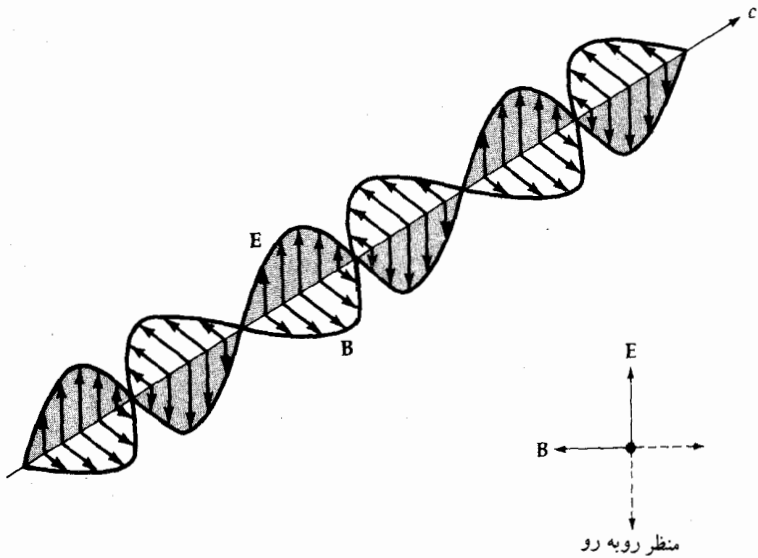
رابطهٔ اساسی بین طول موج و بسامد یک موج الکترومغناطیسی می‌باشد (در خلاء)، که در آن  $c$  برابر  $299793$  کیلومتر بر ثانیه است - تندی نور.

اکثر امواج برای انتشار نیازمند به محیط مادی می‌باشند: امواج آب در امتداد سطح آب حرکت می‌کنند، امواج صوتی از میان هوا حرکت می‌کنند و امواج زلزله، عرضی و طولی، در میان زمین جامد منتشر می‌شوند. لیکن، امواج الکترومغناطیسی ممکن است در خلاء با تندی  $c$  منتشر شوند. در این صورت، چه چیزی است که انتشار می‌یابد؟ فضای اطراف یک بار الکتریکی ممکن است توسط یک میدان برداری الکتریکی  $\vec{E}$  مشخص شود که خود را به صورت نیرویی بر روی یک بار آزمایشی که در فواصل نزدیک قرار گرفته نشان می‌دهد. اگر یک موج الکترومغناطیسی با چنین بار آزمایشی برخورد کند، آن بار نوسان خواهد کرد. بنابراین، ممکن است میدان الکتریکی سینوسی

$$E = E_0 \sin \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) (x - ct) \right] \quad (5-8)$$

را به یک موج مغناطیسی در حال حرکت در جهت مثبت محور  $x$  نسبت دهیم. معادلات ماکسول بیان می‌کنند که یک میدان الکتریکی متغیر با زمان یک میدان مغناطیسی،  $\vec{B}$ ، متغیر با زمان و عمود بر آن تولید می‌کنند و بنابراین، یک موج

الکترومغناطیسی یک اغتشاش خود انتشاری میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در خلاء می باشد (شکل ۸-۲). اگر میدان الکتریکی همیشه در یک صفحه منفرد نوسان کند، موج قطبیده تخت است؛ در غیر این صورت، آن قطبیده بیضی شکل می باشد (یک حالت ویژه قطبیدگی دایره ای است).



شکل ۸-۲. یک موج الکترومغناطیسی. میدان الکتریکی  $\vec{E}$  و میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  با تندی  $c$  در خلاء منتشر می شوند. دو میدان به طور عمود بر یکدیگر نوسان می کنند. منظر روبه رو این را برای یک موج قطبیده خطی نشان می دهد.

قطبیدگی نقش مهمی را در مشاهدات نجومی بازی می کند و بنابراین راجع به آن در اینجا بیشتر بحث می کنیم. چون نور یک موج عرضی است. جهت های دامنه موج عمود بر جهت حرکت، جهت های ممکن قطبیدگی هستند. بیشتر منابع نوری غیر قطبی هستند، این بدان معنی است که بردار میدان الکتریکی در یک جهت اتفاقی در صفحه عمود بر جهت انتشار، ارتعاش می کند.

اگر در نظر بگیریم که میدان الکتریکی دارای دو مؤلفه در این صفحه است ( $E_y$  و  $E_x$ )، در این صورت اختلاف های فاز بین آنها نوع قطبیدگی موج را تعیین می کند. اگر همفاز

باشند، موج قطبیده تخت است؛ اگر در فاز مخالف باشند، موج یک قطبیدگی بیضی شکل دارد؛ اگر  $90^\circ$  اختلاف فاز داشته باشند، موج قطبیدگی دایره‌ای دارد.

### طیف الکترومغناطیسی

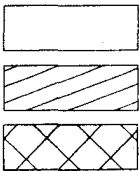
نور بخشی از تابش الکترومغناطیسی است که گستره طول موج  $390 \text{ nm} \approx \lambda$  (بنفش) تا  $720 \text{ nm}$  (مادون قرمز) را اشغال می‌کند - طیف مرئی. طول موج  $\lambda$  طولی است با واحدهای سانتی‌متر یا متر (یا کیلومتر یا مایل)؛ سه واحد مناسب طول در نجوم میکرومتر (گاهی اوقات میکرون نامیده می‌شود)،  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ؛ نانومتر،  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$  و آنگستروم،  $10^{-10} \text{ m} = 10^{-2} \mu\text{m} = 1 \text{ \AA}$  (ضمیمه ۷) هستند. امواج الکترومغناطیسی با طول موجهای مختلف به طرق گوناگون آشکار شده‌اند (جدول ۸-۱)، بنابراین، اسامی خاصی را به قسمتهای مختلف طیف الکترومغناطیسی می‌دهیم: پرتوهای گاما، ( $\lambda \leq 10^{-12} \text{ \AA}$ )، پرتوهای ایکس ( $10^{-3}$  تا  $10^3$  نانومتر)، ماوراء بنفش ( $10$  تا  $300$  نانومتر)، نور مرئی ( $400$  تا  $800$  نانومتر)، مادون قرمز ( $1$  تا  $10^3$  میکرومتر)، میکروموج ( $1$  میلی‌متر تا  $10$  سانتی‌متر) و امواج رادیویی ( $\lambda \geq 1 \text{ cm}$ ). نور مرئی کمتر از یک دهه از  $21$  دهه نشان داده شده در جدول (۸-۱) را اشغال می‌کند و هنوز نور مرئی اهمیت ویژه‌ای برای ستاره‌شناسی دارد، زیرا به سادگی به جو زمین نفوذ می‌کند و به سهولت توسط چشم انسان مشاهده می‌شود.

### انعکاس و انکسار

اکنون به بررسی بعضی از ویژگیهای نور که آنرا برای دسترسی ممکن می‌سازد، می‌پردازیم - هدف اپتیک. پرتوی (یا باریکه یا امتدادی) از نور که به یک آینه می‌تابد، بر طبق قاعده انعکاس طوری منعکس می‌شود که (شکل ۸-۳) "زاویه انعکاس  $r$  مساوی زاویه تابش  $i$ " باشد. توجه کنید که این زوایا نسبت به خط عمود بر سطح آینه تعریف می‌شوند. در تلسکوپهای انعکاسی از قانون انعکاس برای جمع‌آوری، جهت دادن و متمرکز کردن نور استفاده می‌شود.

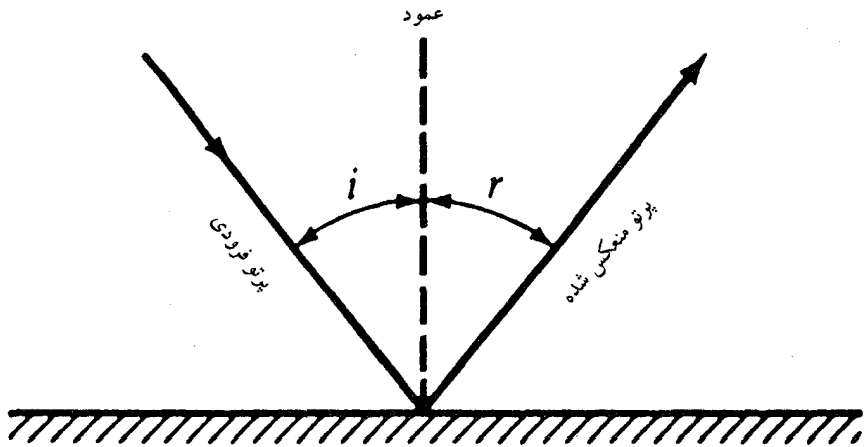
جدول ۸-۱. طیف الکترومغناطیسی

$\lambda$	$h\nu$ یا $\nu$	Type of e. m. نمونه تابش	آشکارکننده‌ها
$10^{-5} \text{ \AA}$ $10^{-4} \text{ \AA}$ $10^{-3} \text{ \AA}$ $10^{-2} \text{ \AA}$ $10^{-1} \text{ \AA}$	1240 MeV 12.4 MeV	پرتوهای گاما	شمارنده‌های گایگر نوسان ساز جرقه‌زنها امولسیونهای هسته‌ای شمارنده‌های نسبی
$1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ 1 nm 10 nm 100 nm	12.4 keV 124 eV	پرتوهای ایکس مابراه بنفش	آشکار سازهای عکاسی و فتوالکتریکی تلسکوپهای شکل دهنده تصویر و طیف نگارها و طیف سنسورها
1000 nm = $1 \mu\text{m}$ 10 $\mu\text{m}$ 100 $\mu\text{m}$	1.24 eV 0.012 eV	مرئی مادون قرمز	آشکار سازهای هادی فوتون رادیوسنجهای آشکار سازی حرارتی
1000 $\mu\text{m} = 1 \text{ mm}$ 10 mm = 1 cm 10 cm 100 cm = 1 m	30,000 MHz 300 MHz	رادار UHF FM	رادیو تلویزیون گیرنده‌های رادیویی
10 m 100 m 1000 m = 1 km	3 MHz 300 kHz	موج کوتاه پخش موج بلند	
10 km 100 km 1000 km	3 kHz		



الکترون ولت = eV  
هرتز = دور بر ثانیه = Hz  
M برای مگا =  $10^6$   
k برای کیلو = هزار =  $10^3$   
آنگستروم =  $\text{\AA}$   
 $\mu\text{m}$  = میکرومتر  
nm = نانومتر

هنگامی که نور منعکس می‌شود، هر دو موج تابشی و انعکاسی در یک محیط و با یک تندی حرکت می‌کنند، اما هنگامی که نور از یک محیط به محیط دیگر عبور می‌کند، چه اتفاقی می‌افتد؟ تندی نور  $\nu$  در یک محیط عموماً با تندی نور  $c$  در خلاء متفاوت است. می‌توانیم یک محیط معین را با ضریب شکست آن مشخص کنیم:  $n = c/\nu$ . ضریب



شکل ۸-۳. انعکاس نور. زاویه تابش  $i$  با زاویه انعکاس  $r$  برابر است.

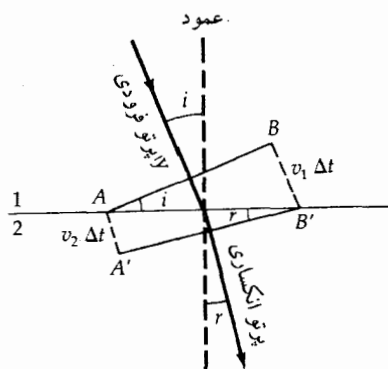
شکست هوا برابر است با  $n = 1/0.0003$ ، که عملاً برابر با ضریب شکست خلاء است ( $n = 1$ )، در صورتی که شیشه کراون دارای  $n = 1/5$  می باشد و بنابراین در این محیط نور با عبور از یک محیط با ضریب شکست  $n_1$  به محیطی با ضریب شکست  $n_2$  بر طبق قانون اسنل<sup>۱</sup> انحراف پیدا می کند، یا شکسته می شود، (شکل ۸-۴):

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (8-6)$$

که در آن  $i$  زاویه تابش در محیط ۱ و  $r$  زاویه انکسار در محیط ۲ است (هر دو نسبت به خط عمود بر فصل مشترک بین دو محیط تعریف شده اند). یک تلسکوپ انکساری از شکست برای ایجاد تصاویر استفاده می کند.

عموماً ضریب شکست یک محیط به طول موج بستگی دارد -  $n = n(\lambda)$ . یعنی اگر،

نور با طول موجهای (یا رنگهای) متفاوت، تحت یک زاویه تابش بتابند، با زوایای مختلف  $r$  می‌شکنند. بنابراین، یک باریکه مرکب تابشی (سفید) به باریکه‌ای از رنگهای خالص تجزیه می‌شود، همانگونه که نیوتن نشان داد. پدیده پاشندگی ما را قادر می‌سازد که نور را به رنگهای مؤلفه‌اش تجزیه کنیم - به شکل یک طیف - و این اساس طیف‌سنجی است.



شکل ۸-۴. انکسار نور. خط  $AB$  یک صفحه جبهه موج تابشی بر روی فصل مشترک بین محیط‌های ۱ و ۲ با زاویه تابش  $i$  را نمایش می‌دهد. نقطه  $A$  در مدت  $\Delta t$  با طی فاصله  $v_1 \Delta t$  به  $A'$  منتقل می‌شود. نقطه  $B$  مسافت  $v_2 \Delta t$  را طی می‌کند. پرتو نور در امتداد  $A'B'$  انحنای پیدا می‌کند.

### پراش و تداخل

موقعی که امواج آب به یک جزیره برخورد می‌کنند در اطراف جزیره پراکنده می‌شوند تا همگرا گردند و هنگامی که این امواج همگرا به یکدیگر برسند، تداخل می‌کنند. در مورد امواج صوتی، نیز با پدیده‌های پراش (انحرافات صوتی در گوشه‌های تیز) و تداخل (نواحی ساکت در یک تالار بزرگ سخنرانی را به خاطر آورید) آشنا هستیم. نور مانند این پدیده‌ها که بر حسب یک الگوی موجی قابل درک هستند، رفتار می‌کند. وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن امواج نوری به یک دیوار کدر که شامل یک

یا دو روزنه است، برخورد می‌کند و در پشت دیوار یک پرده قرار دارد (شکل ۸-۵). تصاویر تیز روزنه‌ها که انتظار داریم روی پرده نمایش بینیم (الف) توسط پراش و پخش امواج نوری و (ب) توسط تداخل سازنده و مخرب امواج نوری مختلف، آشفته می‌شوند. می‌توان هر دو فرآیند را از بررسی چگونگی الگوهای شدت که روی پرده نمایش بوجود آمده‌اند بفهمیم. شدت I نور با مربع میدان الکتریکی متناسب است:

$$I \propto |\vec{E}|^2 \quad (7-8)$$

در یک نقطه اختیاری بر روی پرده نمایش (شکل ۸-۵ ب))، میدان الکتریکی موج توسط معادله (۸-۵) داده شده است:

$$E = E_0 [\sin a + \sin(a + b)] \quad (8-8)$$

که در آن a به موج حاصل از یک روزنه و a + b به موج مربوط به روزنه دیگر ارجاع داده می‌شود. انتقال فاز b به اختلاف در طول مسیر از روزنه‌ها به نقطه واقع بر پرده نمایش مربوط می‌گردد. از معادله (۸-۸)، شدت برابر است با

$$I \propto E_0^2 [\sin^2 a + \sin^2(a + b) + 2\sin a \sin(a + b)] \quad (9-8)$$

دو جمله اول در طرف راست درست برابر شدتهایی است که به روزنه‌ها مجزا نسبت داده می‌شود؛ جمله سوم مسؤل الگوی تداخل نوسانی بر روی پرده می‌باشد (همان‌طور که b با مکان تغییر می‌کند).

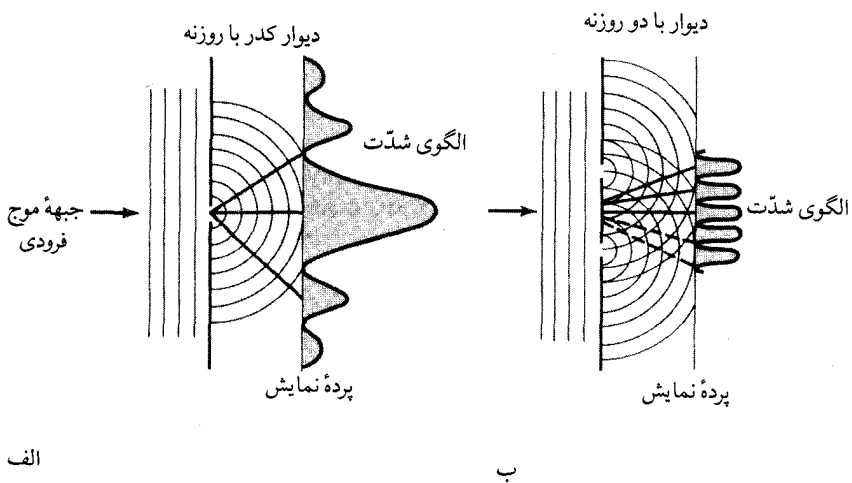
هر نقطه در داخل روزنه منفرد (شکل ۸-۵ الف)) در الگوی پراش بر روی پرده نمایش مشارکت می‌کند. کاربرد معادلات (۷-۸) و (۸-۸) نشان می‌دهد که پهنای زاویه‌ای  $\theta$  از تصویر اصلی پراش برابر است با

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d} \quad (10-8)$$

که  $\theta$  بر حسب رادیان،  $\lambda$  طول موج نور و d اندازه شکاف است. هیچ تصویر نوری نمی‌تواند کوچکتر از حد پراش معادله (۱۰-۸) باشد و بنابراین، می‌گوئیم که این کمیت تفکیک زاویه‌ای بهینه سیستم است. مثلاً تفکیک یک تلسکوپ با شکاف  $d = 1\text{m}$  و نور مشاهده‌ای با طول موج  $500\text{nm}$  برابر است با،

$$\theta = (500\text{nm}) / (10^9\text{nm}) = 5 \times 10^{-7} = 0.1 \text{ رادیان} = 5.7 \times 10^{-6} \text{ درجه}$$

به علت وجود اغتشاش در جو زمین، نمی توان با یک تلسکوپ نصب شده بر روی زمین به این قدرت تفکیک نظری رسید.



الف

ب

شکل ۸-۵. پراش و تداخل. (الف) پراش امواج نوری با یک شکاف منفرد. (ب) تداخل امواج نوری با دو شکاف

### پدیده دوپلر

تا اینجا امواجی را بررسی کردیم که منبع و ناظر هر دو نسبت به هم در حال سکون بودند. هنگامی که هر یک در امتداد خط واصل بین آنها در حرکت باشد، طول موج و بسامد موج هر دو توسط پدیده دوپلر تغییر می کنند، که به پاس خدمات فیزیکدان اطریشی سی. جی. دوپلر<sup>۱</sup> (۱۸۵۳-۱۸۰۳ میلادی) به نام وی نامگذاری شده است. با پدیده دوپلر امواج در آب و هوا آشنا هستید؛ مثلاً، هنگامی که یک ماشین پلیس با سیرن خود آژیرکشان نزدیک می شود، ارتفاع صوت (بسامد) بالا است، اما وقتی که ماشین از شما می گذرد و دور می شود، بسامد به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

بیشتر حرکات موجی آشنا به یک محیط مادی مربوط اند که اگر خود محیط نیز حرکت داشته باشد مسأله را پیچیده می سازد. اجازه دهید انتشار امواج الکترومغناطیسی



در خلاء را بررسی کنیم. آرماند فیزو<sup>۱</sup> اثر دوپلر کلاسیکی نور را به درستی در سال ۱۸۴۸ میلادی توضیح داد و آلبرت اینشتین توضیح نسبیته را در سال ۱۹۰۵ میلادی ارائه کرد.

تصور کنید یک منبع نور E (شکل (۸-۶)) در حال گسیل تابشی با طول موج  $\lambda_0$  و بسامد  $\nu_0$ ، با تندی  $v$  از ناظر O در حال دور شدن است. در زمان  $t = 1/\nu_0$ ، طول موج ( $\lambda$ ) از منبع خارج می‌شود. اما همان‌طور که توسط ناظر رؤیت می‌شود، آن موج دارای طول زیر است

$$\lambda = (c + v)t = c [1 + (v/c)] / \nu_0 \quad (۸-۱۱)$$

$$= \lambda_0 [1 + (v/c)]$$

زیرا منبع فاصله  $vt$  را به طرف راست طی کرده است. توجه کنید که معادله اساسی

(۸-۴) در آخرین تساوی بکار رفته است. بسامد مشاهده شده برابر است با

$$\nu = c/\lambda = \nu_0 / [1 + (v/c)] \quad (۸-۱۲)$$

بنابراین  $\lambda > \lambda_0$  و  $\nu < \nu_0$  و نور به طرف قرمز انتقال یافته است (یعنی به طرف طول موجهای بلندتر یا به طرف قرمز انتقال یافته است). هنگامی که منبع به ناظر نزدیک می‌شود علامت  $v$  تغییر می‌کند و لذا  $\lambda < \lambda_0$  و  $\nu > \nu_0$  را نتیجه می‌دهد و تابش به طرف آبی انتقال می‌یابد.

از معادله (۸-۱۱) می‌توان انتقال طول موج را به دست آورد.

$$\Delta\lambda / \lambda_0 = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = v/c \quad (۸-۱۳)$$

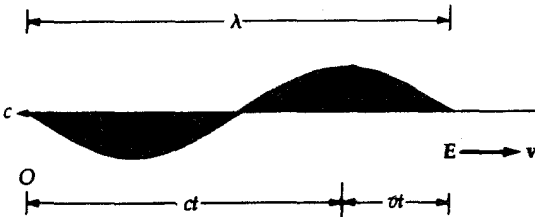
به یاد آورید که علامت  $v$  برای نزدیک شدن منفی و برای دور شدن مثبت است.

هنگامی که  $v$  به  $c$  نزدیک می‌شود، نظریه نسبیت خاص اینشتین بایستی به کار رود. دو فرض اساسی این نظریه عبارتند از (۱) تندی نور مستقل از حرکت منبع یا ناظر است و (۲) تنها حرکات نسبی قابل مشاهده هستند. بنابراین،  $v$  تندی نسبی منبع و ناظر است و هیچ تندی نسبی بیشتر از تندی نور ممکن نیست ( $v \leq c$ ). آنگاه معادلات (۸-۱۱) و (۸-۱۲) الزاماً اشکال تقارنی زیر را می‌گیرند.

$$\lambda = \lambda_0 \left[ \frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸-۱۴ \text{ الف})$$

$$\nu = \nu_0 \left[ \frac{1 - v/c}{1 + v/c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸-۱۴ \text{ ب})$$

انتقال غیر نسبیتی در طول موج (معادله ۸-۱۳) از معادله (۸-۱۴ الف) در حد  $v \ll c$  نتیجه می شود.



شکل ۸-۶ اثر دوپلر. ناظری در O موج منتشره توسط منبع متحرک E با سرعت v به طرف راست را ملاحظه می کند.

(ب) طبیعت کوانتومی نور: فوتونها

در آغاز قرن هیجدهم، نیوتن نظریه ذره ای نور را ارائه داد، اما، در انتهای قرن نوزدهم بود که جنبه ذره ماندنی نور در تجربه آشکار شد.

نور نه ذره است و نه موج، اما می تواند به یکی از دو صورت تجلی پیدا کند! این رفتار ظاهراً معماگونه، پدیده هایی نظیر اثر فتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تابش جسم سیاه را توضیح می دهد (شکل ۸-۷ الف). بعلاوه، بر هم کنش نور با اتمها و مولکولها فقط در صورتی قابل فهم است که انرژی الکترومغناطیسی به شکل بسته های مجزا پخش شده باشد که آنها را فوتون یا کوانتا می نامیم. انرژی یک کوانتوم نور (E) با بسامد مشخص کننده موج نور، متناسب است:

$$E = h\nu \quad (۸-۱۵)$$

که در آن  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$  به عنوان ثابت پلانک مشهور است. ممکن است تصویر ناقصی از یک موج نوری با طول موج  $\lambda$  و بسامد  $\nu$  در نظر بگیریم که از کوانتاهای بسیاری تشکیل شده است و انرژی هر کدام توسط معادله (۸-۱۵) داده می شود.

## (ج) شدت در مقابل شار

در آشکار سازی انرژی (یا شمارش فوتونها) حاصله از یک منبع نوری دور بایستی به اختلاف بین شدت و شار توجه کنیم. شدت به جهت بستگی دارد، به این مفهوم که شدت I یک منبع برابر با مقدار انرژی گسیل شده در واحد زمان  $\Delta t$ ، در واحد سطح منبع  $\Delta A$ ، در واحد فاصله بسامد  $\Delta \nu$ ، در واحد زاویه حجمی  $\Delta \Omega$  و در جهت معلوم، می باشد. زاویه حجمی (شکل (۸-۷الف)) یک باریکه به سطح  $\Delta a$  قطع شده توسط باریکه در سطحی کروی به شعاع r، توسط رابطه زیر بیان می شود

$$\Delta \Omega = \Delta a / r^2 \quad (8-16)$$

واحد زاویه حجمی استرادیان (ster) است، سطح یک کره  $4\pi$  استرادیان را در بر می گیرد - زیرا مساحت یک کره  $4\pi r^2 = \Delta a$  است. (یک استرادیان اساساً برابر با  $\text{rad}^2$  است؛ چون  $1 \text{ rad} = 57/3^\circ$ ، درجه مربع قوسی  $1 \text{ ster} = 3283$ ). واحدهای معمول شدت  $\text{W/m}^2 \cdot \text{Hz} \cdot \text{ster}$  است. مثلاً، شارش انرژی کل در ستاره ای کروی با مساحت سطح A درست برابر است با

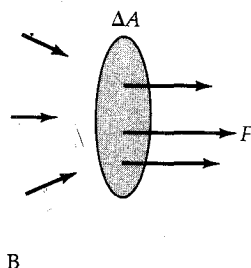
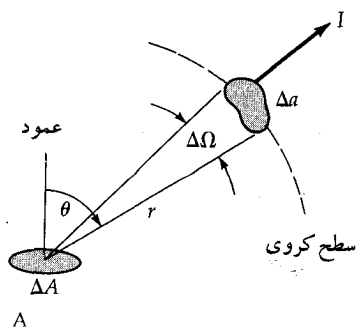
$$E = 4\pi A \int_0^\infty I(\nu) d\nu$$

که در آن  $I(\nu)$  شدت تکرنگی، شدت در یک بسامد خاص، نامیده می شود. شار F مستقیماً به آنچه که ما اندازه می گیریم مربوط می شود. شار انرژی از میان یک سطح (یا از درون یک آشکارساز) برابر با مقدار انرژی عبوری از واحد مساحت سطح در واحد زمان و در واحد فاصله بسامد است:  $\Delta \nu \cdot \Delta t \cdot \Delta A$  انرژی /  $F(\nu)$  (شکل (۸-۷ب)). از این رو، واحد شار تکرنگی  $F(\nu)$  برابر است با  $\text{W/s} \cdot \text{Hz}$ . مثلاً اگر ستاره ای انرژی را با آهنگ E (بر حسب وات) گسیل کند، آنگاه شار انرژی از مرکز سطحی کروی به شعاع R برابر است با

$$F = E / 4\pi R^2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (8-17)$$

معادله (۸-۱۷) شکل کاملاً مشهور قانون عکس مربع برای کاهش شار تابشی با فاصله است.

توجه کنید که یک باریکه یک بعدی دارای شار است، اما شدت ندارد (چون  $\Delta \Omega = 0$ ). ممکن است شدت و شار را با توجه به این که انرژی عبوری از یک مساحت معین مرکب



شکل ۸-۷. شدت و شار. (الف) شدت نور به جهت  $\theta$  و زاویه حجمی  $\Omega$  بستگی دارد. (ب) شار تنها به انرژی عبوری از مساحت  $\Delta A$  در واحد زمان وابسته است.

از باریکه‌های ورودی تحت زوایای متفاوت نسبت به عمود بر سطح است، مربوط کنیم؛ برای یک باریکه که تحت زاویه  $\theta$  می‌تابد، مساحت سطح به نظر می‌رسد که با ضریب  $\cos \theta$  کاهش یافته است، بنابراین

$$F(\nu) = \int I(\nu, \theta) \cos \theta \, d\Omega$$

## ۸-۲ ساختار اتمی

اگر ماده را به قطعات کوچکتر و کوچکتر تقسیم کنیم، درمی‌یابیم که در مقیاسهایی نزدیک  $10^{-10}$  متر تمام اشکال ماده مرکب از اتمها هستند (و مولکولها، که از تجمع اتمها پیوند داده شده‌اند). عنصری از یک ماده نظیر طلا تنها از اتمهای عنصر طلا تشکیل شده است؛ ۹۲ عنصر طبیعی وجود دارد (هیدروژن تا اورانیوم؛ ضمیمه ۵)، اما این سیاهه با افزودن عناصر مصنوعی فوق اورانیومی تا ۱۰۹ توسعه یافته است.

### (الف) قطعات ساختمان اتمی

یک اتم چیست و چگونه ممکن است عناصر را مشخص کنیم؟ یک اتم مرکب از یک هسته کوچک می‌باشد که اکثر جرم اتم را شامل می‌شود و ابعاد آن از مرتبه  $10^{-14}$  متر می‌باشد و توسط یک ابر پراکنده از الکترونها تا  $10^{-10}$  متر احاطه شده است. هسته اتمی مرکب از پروتونها و نوترونها می‌باشد که توسط برهم‌کنش قوی به یکدیگر پیوند دارند.

این سه ذره بنیادی - پروتون، نوترون و الکترون - اجزاء اصلی ساختمان یک اتم می باشند. جدول (۸-۲) پارامترهای مهم هر یک را نشان می دهد. پروتون و نوترون هر دو در حدود ۲۰۰۰ بار سنگینتر از الکترون هستند.

جدول ۸-۲. پارامترهای ذرات بنیادی.

نام	جرم (کیلوگرم)	جرم الکترون	بارالکتریکی
پروتون	$1/6725 \times 10^{-27}$	۱۸۳۶	+e
نوترون	$1/6748 \times 10^{-27}$	۱۸۳۸	۰
الکترون	$9/1091 \times 10^{-31}$	۱	-e

نوترون بدون بار است و پروتون (مثبت) و الکترون (منفی) دارای بارهای الکتریکی مختلف علامه و مقدار مساوی  $e = 1/602 \times 10^{-19}$  کولمب (c) می باشند. در یک اتم خنثی معمولی مرکب از تعداد مساوی پروتون و الکترون است و تعداد نوترونها تقریباً با تعداد پروتونها برابر است (برای عناصر سبکتر)؛ بنابراین، یک عنصر با تعداد پروتونهایش در هسته اتمی مشخص می شود که آن را با Z نمایش می دهیم و عدد اتمی نامیده می شود. عناصر سنگینتر دارای نسبت بیشتری از نوترونها هستند. مثلاً هیدروژن ( $Z=1$ ) دارای یک الکترون در حال گردش حول یک پروتون است؛ اورانیوم ( $Z=92$ ) دارای ۹۲ الکترون و ۹۲ پروتون و حدود ۱۴۶ نوترون در هسته اش می باشد.

یک عنصر معلوم ممکن است به چند شکل متفاوت که ایزوتوپ نامیده می شوند، وجود داشته باشد. تمام ایزوتوپهای یک عنصر عدد اتمی یکسان دارند، اما تعداد نوترونها (N) متفاوتند. هسته های ایزوتوپی مختلف را هسته واره ها نامگذاری می کنیم. برای مشخص کردن یک هسته واره، نماد  ${}^Z X$  یا  ${}^Z X^{Z+N}$  به کار می رود که X علامت عنصر، Z تعداد پروتونها و  $A = Z + N$  جرم اتمی است (تعداد پروتونها به اضافه نوترونها). مثلاً، سه ایزوتوپ از هیدروژن شناخته شده اند: هیدروژن معمولی  ${}^1_1\text{H}$ ؛ دوتریم  ${}^2_1\text{H}$ ؛ و تریتیوم،  ${}^3_1\text{H}$ . توجه کنید که X و اندیس Z زائد هستند، زیرا ناقل اطلاعات یکسانی می باشند. جرم یک اتم به طور مناسبی بر حسب واحدهای جرم اتمی (amu)

داده می‌شود؛ استاندارد  $^{12}\text{C}$  است که دارای دقیقاً جرمی برابر  $12\text{amu}$  است. چون اساساً یک  $\text{amu}$  جرم یک پروتون است، جرم یک اتم برابر  $A\text{ amu}$  می‌باشد. هنگامی که اجرام اتمی جدول بندی شوند (ضمیمه ۵)، به ندرت عدد صحیح هستند، زیرا جرم متوسط ایزوتوپهایی است که به طور طبیعی سیاهه بندی شده‌اند.

### (ب) اتم بوهر<sup>۱</sup>

چه آرایش دینامیکی از الکترون‌ها حول یک هسته منجر به اتمی پایدار می‌شود؟ بعلمت اینکه نیروی جاذبه الکتریکی بین یک پروتون و یک الکترون (قانون کولمب) از قانون عکس مربع پیروی می‌کند، دانشمندان فرض می‌کنند که الکترون‌ها حول هسته می‌چرخند. مع‌ذالک، الکترون‌ها ذرات باردار هستند، و ذرات باردار هنگامی که شتاب‌دار می‌شوند (در مدار دایره‌ای) انرژی تابش می‌کنند. بنابراین، همان خاصیتی که اجازه می‌دهد یک اتم مقید وجود داشته باشد، باعث می‌شود که بلافاصله فرو ریزد، زیرا مدار الکترون در اثر کاهش انرژی کاهش می‌یابد! در سال ۱۹۱۳ میلادی نیلز بوهر (۱۸۸۵-۱۹۶۲ میلادی) یک نظریه ساده ارائه داد که راهی برای خروج از این مسأله بود؛ که به نظریه جدید مکانیک کوانتومی در دهه ۱۹۲۰ میلادی منجر شد. حال نظریه اتمی بوهر و کاربرد آن در مورد اتم هیدروژن (که به خوبی برای آن بکار می‌رود) را مورد بحث قرار می‌دهیم.

### مدارهای کوانتومی

در سال ۱۹۱۱ میلادی سر ارنست راترفورد<sup>۲</sup> (۱۸۷۱-۱۹۳۷ میلادی) الگوی هسته‌ای اتم را ارائه کرد. بوهر یکسال پس از آن، دو فرض متحیرکننده بیان داشت که به نظریه اتمی زندگی بخشید. بوهر ابتدا فرض کرد که از تعداد نامعین مدارهای الکترونی ممکن در الگوی راترفورد، تنها تعداد مجزایی از مدارها برای الکترون مجاز هستند و الکترون در آن مدارها نمی‌تواند تابش کند. مدارهای مجاز آنهایی هستند که تکانه زاویه‌ای مدار الکترون مضرب صحیحی از  $\frac{h}{2\pi}$  باشد که در آن  $h$  ثابت پلانک است. حال فرض مدارهای کوانتومی بوهر را برای یک الکترون در یک مدار دایره‌ای به

1. Bohr

2. Sir Ernest Rutherford.

شعاع  $r$  حول هسته‌ای به بار  $Ze$  به کار می‌بریم. نیروی جانب مرکز که مدار را نگه می‌دارد (که  $m$  جرم الکترون است)،

$$\frac{mv^2}{r}$$

توسط نیروی جاذبه کولمبی بین الکترون و هسته تأمین می‌شود:

$$\frac{(Ze)e}{r^2}$$

اما فرض بوهر دلالت بر قیدی اضافه دارد

$$mvr = n \left( \frac{h}{2\pi} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (18-8)$$

با ترکیب این معادلات، معادلات زیر بدست می‌آیند.

$$r = \frac{Ze^2}{mv^2} = \frac{nh}{2\pi mv}$$

یا

$$r = n^2 \left( \frac{h^2}{4\pi^2 me^2 Z} \right) \quad (19-8)$$

بنابراین، مدارهای مجزای مجاز در فواصل افزایشی هندسی ( $n^2$ ) اتفاق می‌افتند، کوچکترین مدار بوهر هنگامی رخ می‌دهد که عدد کوانتومی اصلی  $n$  برابر یک باشد. اکنون ممکن است انرژی کل  $E$  این مدارها را پیدا کنیم. اگر  $E$  منفی باشد سیستم مقید است و یک اتم داریم. می‌دانیم که انرژی کل مساوی با مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی است.

$$E = \left( \frac{mV^2}{2} \right) - \left( \frac{Ze^2}{r} \right) \quad (20-8)$$

با استفاده از معادلات (۱۸-۸) و (۱۹-۸) برای محاسبه معادله (۲۰-۸)، پیدا

می‌کنیم

$$E = - \left( \frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{n^2 h^2} \right) \quad (21-8)$$

(که این انرژیها منفی بوده و مشخص می‌کند که مدارها مقید هستند). کوچکترین مدار بوهر ( $n=1$ ) بیشترین قید را دارد و تمام مدارها تا  $n \rightarrow \infty$  که در آن  $E \rightarrow 0$ ، مقید هستند. برای  $E > 0$ ، مدارهای غیر مقید پیوسته‌ای برای الکترون موجود است.

## تابش کوانتومی

دومین فرض بوهر به جذب و گسیل تابش یک اتم مربوط می شود. بر هم کنش اساسی بین ماده و تابش. بر طبق اولین فرض، الکترون نمی تواند مادامی که در یکی از مدارهای مجزای مجاز قرار دارد، تابش کند و بنابراین فرض دوّم بیان می کند که (الف) وقتی الکترون از یک مدار به مدار دیگر می جهد، و تابش به شکل یک کوانتوم مجزای منفرد گسیل یا جذب می شود و (ب) انرژی این تابش با اختلاف انرژی بین مدارها برابر است.

هنگامی که یک الکترون از یک مدار بالاتر ( $n_a$ ) به یک مدار پایین تر ( $n_b$ ) انتقال می یابد، یک فوتون گسیل می شود. انرژیهای این فرآیند ممکن است به صورت زیر مشخص شوند:

$$E(n_a) = E(n_b) + h\nu \quad (\text{گسیل}) \quad (۲۲-۸) \text{ (الف)}$$

که در آن  $n_a > n_b$ . برای اینکه الکترون از مدار پایین تر به مدار بالاتر انتقال یابد، اتم بایستی دقیقاً فوتونی با انرژی صحیح جذب کند:

$$E(n_b) + h\nu = E(n_a) \quad (\text{جذب}) \quad (۲۲-۸) \text{ (ب)}$$

در هر دو حالت، بسامد فوتون شرکت کننده برابر است با (معادلات (۸-۱۵) و (۸-۲۱))

$$\nu_{ab} = \frac{[E(n_a) - E(n_b)]}{h} \quad (۲۳-۸)$$

$$= \left( \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \right) Z^2 \left[ \left( \frac{1}{n_b} \right) - \left( \frac{1}{n_a} \right) \right]$$

توجه کنید که تنها یک کوانتوم گسیل یا جذب می شود، حتی اگر  $n_a > n_b + 1$ ؛ الکترون ممکن است از چندین مدار میانی جهش کند. از طرف دیگر، الکترون ممکن است به پایین ترین مدار سرازیر شود، همان طور که به رشته ای از مدارهای مجاور می جهد، چندین فوتون با انرژی متفاوت گسیل می دارد. پایین ترین مدار به  $n = 1$  مربوط شده و حالت پایه نامیده می شود.

## (ج) مدل بوهر برای اتم هیدروژن

اکنون تصویر بوهر را به ساده ترین اتم، هیدروژن ( $Z = 1$ ) با الکترون منفردش، به کار



می‌بریم. انرژیهای مداری مجاز الکترون از معادله (۸-۲۱) عبارتند از

$$E(n) = -\left(\frac{2\pi^2 me^4}{h^2}\right) \left(\frac{1}{n}\right) = -R' \left(\frac{1}{n}\right) \quad (۸-۲۴)$$

که در آن  $R' = 2/18 \times 10^{-18}$ ، تمام ثابتهای دیگر را در بر می‌گیرد.

بهتر است معادله (۸-۲۳) بر حسب عدد موجی (عکس طول موج) بیان شود:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_{ab}} &= \nu_{ab} / c = \left(\frac{R'}{ch}\right) \left(\frac{1}{n_b} - \frac{1}{n_a}\right) \\ &= R \left(\frac{1}{n_b} - \frac{1}{n_a}\right) \end{aligned} \quad (۸-۲۵)$$

ثابت رید برگ  $R^1$  برای هیدروژن مقدار  $10/96776 \mu\text{m}^{-1}$  را دارد.

معادله (۸-۲۵) بیان می‌کند که وقتی یک سری از مقادیر  $n_a$  را که با  $n_b + 1$  شروع می‌شود در نظر بگیریم، برای هر مقدار  $n_b$  یک رشته طول موج خواهیم داشت (شکل (۸-۸)). گذارهای رشته لیمن<sup>۲</sup> (در ماوراء بنفش) تماماً دارای حالت پایه ( $n_b=1$ )، به عنوان پایین‌ترین مدارشان را دارند، با  $n_a \geq 2$ . خطوط طیفی مرئی رشته بالمر<sup>۳</sup> دارای  $n_b=2$  و  $n_a \geq 3$  است. رشته‌های مهم دیگر عبارتند از پاشن<sup>۴</sup>، براکت<sup>۵</sup>، پفوند<sup>۶</sup> به ترتیب با  $n_b=3$  و  $4$  و  $5$  و تمام این رشته‌ها به نام فیزیکدانهایی که اولین بار خطوط طیفی مربوط به گذارهای مشخص شده را مشاهده کردند، نامگذاری شده‌اند.

اولین خطوط کشف شده از هیدروژن، رشته بالمر بوده که توسط  $H_\alpha$  برای  $n_a=3$ ،  $H_\beta$  برای  $n_a=4$ ،  $H_\gamma$  برای  $n_a=5$  والی آخر، مشخص شده‌اند. معادله (۸-۲۵) را برای محاسبه طول موج خط  $H_\alpha$  که مربوط به  $n_b=2$  و  $n_a=3$  است، به کار می‌بریم:

$$\begin{aligned} 1/\lambda_{H_\alpha} &= 10/96776 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right) \mu\text{m}^{-1} \\ &= 1/52330 \mu\text{m}^{-1} \\ \lambda_{H_\alpha} &= 656/3 \text{ nm} \end{aligned}$$

به طور مشابه، خط لیمن  $\alpha$  ( $n_a=2$ ،  $n_b=1$ ) دارای طول موج  $\lambda_{L_\alpha} = 121/6 \text{ nm}$  در

1. Rydberg
3. Balmer
5. Brackett

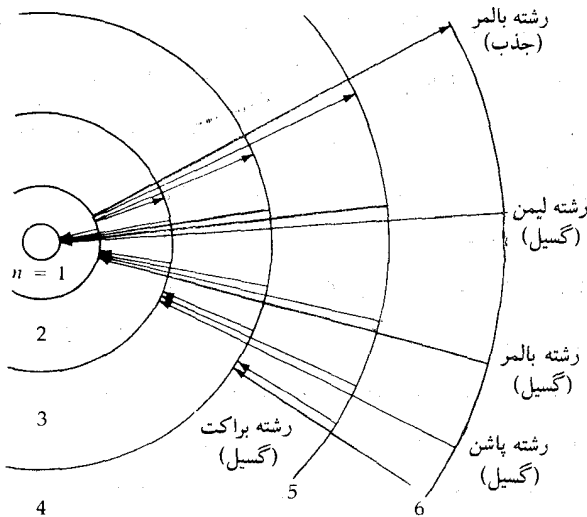
2. Lyman
4. Paschen
6. Pfund

ماوراء بنفش) است.

#### (د) نمودارهای تراز انرژی

باید خاطر نشان سازیم که نظریه ساده بوهر یک تقریب برای دینامیک واقعی پدیده‌های اتمی می‌باشد. این نظریه، وقتی به اتمهای پیچیده‌تر از هیدروژن اعمال شود، با مشکلات غیر قابل حلی برخورد می‌کند و مکانیک کوانتومی کاملاً ریاضی برای درک جزئیات اتم ضروری است.

ذرات اتمی (نظیر الکترونها) نیز مانند فوتونها طبیعت موجی از خود نشان می‌دهند؛



شکل ۸-۸. مدل بوهر برای هیدروژن. اوربیتال‌ها، ترازهای انرژی پایدار الکترون هستند.

بنابراین یک عدم قطعیت ذاتی در مکان و سرعت یک الکترون وجود دارد (اصل عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۱</sup>). الکترون در اتم هیدروژن ممکن است نظیر ابری که پروتون را احاطه کرده تصویر شود، با محتمل‌ترین موقعیت الکترون به عنوان یکی از مدارهای بوهر. یک اتم چند الکترونی دارای چندین ابر این چنینی است، با الکترونهايي که

1. Heisenberg.

لایه‌های ابری حول هسته را اشغال کنند. ساده‌ترین پوسته‌ها کروی هستند، اما عموماً در اشکال پیچیده‌تر رخ می‌دهند.

در این کتاب، با کنار گذاشتن مدل‌های فضائی اتم از بحث پیچیده مکانیک کوانتومی احتراز می‌کنیم. در عوض، اتمها را به طور خلاصه با یک نمودار تراز انرژی نمایش می‌دهیم (شکل (۸-۹)). چنین نموداری مستقیماً به گذارهای اتمی بستگی دارد و بنابراین می‌تواند حتی برای اتمهای پیچیده‌تر ساخته شود. به عنوان مثال، نمودار تراز انرژی برای هیدروژن را در نظر بگیرید. انرژیهای مجاز یک الکترون مقید در اتم هیدروژن (معادله (۸-۲۴)) منفی هستند. چون مشاهده می‌کنیم فوتونهای با انرژی مثبت به گذارهای الکترونی مربوطند. با کم کردن انرژی حالت پایه  $E(1)$  از کلیه انرژیها  $E(n)$  مقیاس انرژی را مثبت اختیار می‌کنیم. در این صورت داریم

$$E(n) = R' \left[ 1 - \left( \frac{1}{n} \right) \right]$$

توجه کنید که اکنون  $E_1$  برابر با صفر است. سرانجام، واحدهای انرژی را به الکترون‌ولت تغییر می‌دهیم

$$1 \text{ ev} = 1/6.2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

الکترون‌ولت انرژی کسب شده توسط الکترون است (یا هر ذره به بار  $e$ ) هنگامی که در اختلاف پتانسیل یک ولت شتابدار شود؛ این واحد در فیزیک اتمی و ذرات مناسب است. توجه کنید که

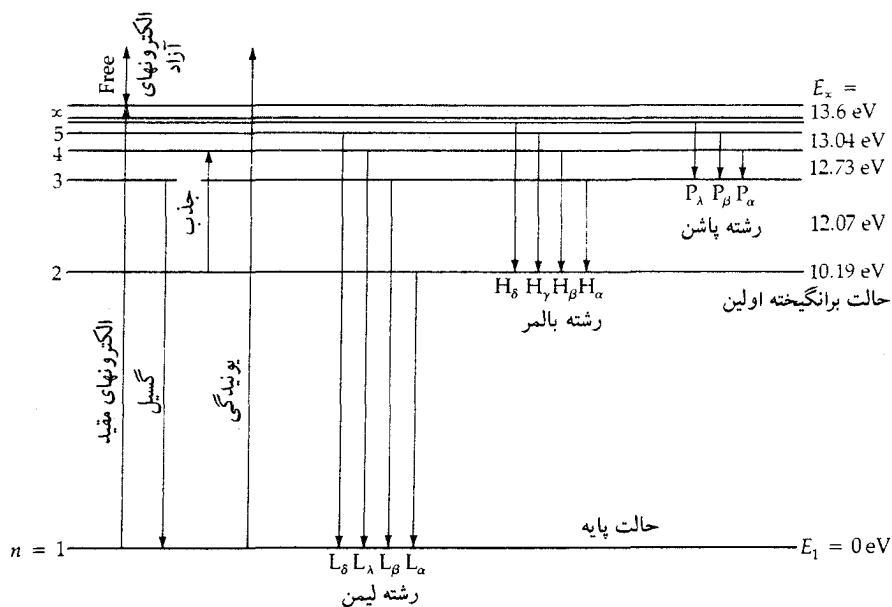
$$E(\infty) = R' = 2/18 \times 10^{-18} \text{ J} = 13/6 \text{ ev}$$

ترازهای انرژی برای چند مقدار  $n$  در شکل (۸-۹) نشان داده شده‌اند. [ ... ,  $E(3) = 12/1 \text{ ev}$  ,  $E(2) = 10/2 \text{ ev}$  ,  $E(1) = 0$  ]. هنگامی که اتم در هر یک از ترازهای بالای حالت پایه است، در یک حالت برانگیخته شده می‌باشد و انرژی چنین تراز پتانسیل برانگیختگی آن نامیده می‌شود. برای رسیدن به یک تراز بالاتر، اتم بایستی برانگیخته شود - انرژی برانگیختگی فوق‌العاده زیاد منجر به یونیدگی می‌شود - و در برگشت به حالت پایه، اتم وانگیخته می‌شود.

### برانگیختگی

یک اتم ممکن است به دو روش به تراز انرژی بالاتر برانگیخته شود: تابشی یا برخوردی. برانگیختگی تابشی هنگامی که یک فوتون توسط اتم جذب می‌شود، اتفاق می‌افتد؛ انرژی فوتون بایستی دقیقاً برابر با اختلاف انرژی بین دو تراز انرژی اتم باشد. این فرآیند خطوط جذبی را که بر روی یک طیف پیوسته زمینه قرار گرفته است، تولید می‌کند (بخش (۸-۶)).

عموماً یک اتم فقط در یک زمان بسیار کوتاهی (حدود  $10^{-8}$  ثانیه) در یک حالت

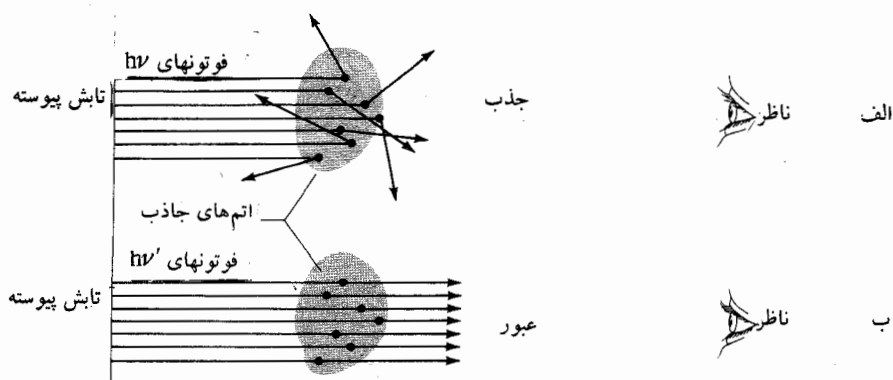


شکل ۸-۹. نمودار تراز انرژی هیدروژن. گذارها برای اولین سه رشته هیدروژن به صورت گسیل، نشان داده شده‌اند. انواع عمومی گذارها برای جذب، یونیدگی و گسیل در طرف چپ نشان داده شده است.

برانگیخته شده قبل از گسیل مجدد یک فوتون، باقی می‌ماند. پس چگونه یک خط جذبی می‌تواند تولید شود؟ به خاطر بیاورید که الکترون ممکن است در خلال چند تراز انرژی در مسیرش متوالیاً به حالت پایه برسد، و بنابراین ممکن است چندین فوتون با انرژی پایین‌تر به ازای هر فوتون جذب شده، گسیل کند. طول موج ورودی به طول

موجهای بلندتر تبدیل می‌شود، تهی کردن طیف از طول موج ورودی. همچنین (شکل ۸-۱۰)، فوتونهای جذب شده اغلب از یک جهت می‌آیند، جهت منبعشان، در صورتی که فوتونهای گسیل شده می‌توانند در هر جهتی حرکت کنند. بنابراین فوتونهای کمتری در طول موج جذبی از فوتونهای دیگر طول موج‌ها به ناظر می‌رسد. یک خط جذبی از یک ناحیه پیوسته جذب نشده تاریکتر است، اما کاملاً سیاه نیست، چون هنوز بعضی از فوتونهای طول موج آستانه به ناظر می‌رسند.

برانگیختگی برخوردی هنگامی رخ می‌دهد که یک ذره آزاد (یک الکترون یا اتم دیگر) با یک اتم برخورد کند، و قسمتی از انرژی جنبشی‌اش را به اتم بدهد. چنین برخورد غیر کشسانی در برگیرنده هیچ فوتونی نخواهد بود. ذره‌ای که با تندی  $v_i$  به اتم نزدیک می‌شود و آن را با تندی  $v_f$  ترک می‌کند، انرژی  $E = \frac{m}{2}(v_i^2 - v_f^2)$  در اتم ذخیره کرده است؛ اگر  $E$  به انرژی یک گذار الکترونی مربوط باشد، اتم به طور برخوردی به یک حالت بالاتر برانگیخته می‌شود. چنین اتم برانگیخته شده‌ای وقتی به حالت پایه‌اش با گسیل کردن فوتونها بر می‌گردد، یک طیف خط نشری در فرآیند را تولید می‌کند.



شکل ۸-۱۰. جذب نور. (الف) اگر  $E$  انرژی برانگیخته یک اتم باشد، در این صورت تنها فوتونها با این انرژی ( $h\nu$ ) می‌توانند جذب شوند. (ب) فوتونها با انرژی  $E$  نمی‌توانند جذب شوند و از میان یک ابر به ناظر می‌رسند.

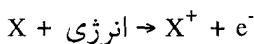
## واانگیختگی

اتمها همیشه با میدان الکترومغناطیسی در حال اندرکنش هستند. این اندرکنش سبب می شود که یک اتم برانگیخته شده به طور آتی به یک تراز انرژی پایین تر (واانگیخته) در زمان مشخصه‌ای از مرتبه  $10^{-8}$  ثانیه جهش کند. چون یک فوتون گسیل می شود، فرآیند را واانگیختگی تابشی می نامیم. شکل دیگر واانگیختگی، که پدیده توسط یک فوتون اطلاع داده نمی شود، واانگیختگی برخوردی است؛ این دقیقاً عکس برانگیختگی برخوردی است. ذره برخورد کننده انرژی جنبشی را در مبادله دریافت می کند (یک برخورد ابرکشسان). در وضعیت های اختر فیزیکی، این دو مُد واانگیختگی در یک حد رخ می دهند.

اگر چه بیشتر گذارهای خودبخود به پایین در مقیاسهای زمانی کوتاه رخ می دهند، بعضی گذارها - به علت قاعده های کوانتم مکانیکی - بسیار آهسته تر رخ می دهند. این گذارها، گذارهای ممنوع نامیده شده و خطوط ممنوع نتیجه می شوند. معمولاً آنها مشتمل بر جهشهایی از حالت های شبه پایدار برانگیخته شده به حالت پایه یک اتم می باشند. تحت بیشتر شرایط، حالت های شبه پایدار، قبل از این که انرژی خود را با فرآیند تابشی از دست بدهند، برخوردها آنها را واانگیخته می کنند. بنابراین، خطوط ممنوع معمولاً هنگامی که چگالی های گاز کم هستند، تولید می شوند، لذا شانسهای برخورد در خلال فاصله زمانی بین برانگیختگی و واانگیختگی تابشی کوچک هستند.

## یونیدگی

با دادن انرژی کافی (تابشی یا برخوردی) به یک اتم خنثی به طوری که الکترون آزاد شود، اتم یونیده می شود. به طور نمایشی این واکنش بدین صورت است



که X اتم را نمایش می دهد. برای نمایش هیدروژن خنثی (بدون هیچ الکترون کنده شده)، می نویسیم H یا HI، که عدد رومی I بیانگر حالت خنثی است. مشابهاً، برای هلیوم خنثی، He یا HeI. اتم یک بار یونیده (یک الکترون کنده شده) در اولین حالت یونیدگی می باشد، نظیر  $H^+ = HII$  یا  $He^+ = HeII$ . هیدروژن شامل یک الکترون است

و بنابراین ممکن نیست بیش از HII یونیده شود، اما می‌توانیم داشته باشیم  $O^{++} = OIII$  (اکسیژن دوبار یونیده) و  $O^{+++} = OIV$  (اکسیژن سه الکترون کنده شده). برای مراحل یونیدگی بالا (نظیر Fe XIV)، سیستم عدد رومی در ستاره شناسی بسیار معمولی‌تر از قرار داد چند علامتی است.

انرژی لازم برای یونیده کردن اتم به حالت یونیدگی اتم، الکترون به‌خصوصی که آزاد شود، و ترازهای برانگیختگی آن الکترون بستگی دارد. برای سهولت، اتم هیدروژن با تنها الکترونش را در نظر می‌گیریم. یک الکترون در حالت پایه ( $n=1$ ؛ شکل (۸-۹)) از اتم هنگامی که به آن انرژی  $E \geq 13/6 \text{ eV}$  (پتانسیل یونیدگی) اعمال شود، جدا می‌شود؛ توجه کنید که پیوستگی حالت‌های انرژی برای الکترون آزاد در بالای  $E(n = \infty)$  موجود است. اگر الکترون در اولین حالت برانگیخته شده ( $n=2$ ) باشد، موقعی که انرژی  $E(2) = 13/6 - 10/2 = 3/4 \text{ eV}$  به آن داده شود، آزاد خواهد شد. عموماً (برای هیدروژن)، پتانسیل یونیدگی برای یک الکترون در تراز برانگیختگی  $n$  برابر است با

$$IP(n) = E(\infty) - E(n) = \frac{13/6}{n^2} \text{ eV} \quad (8-26)$$

انرژی جنبشی موجود برای کندن الکترون برابر است با اختلاف بین انرژی آماده و پتانسیل یونیدگی ( $E - IP$ ).

یونیدگی تابشی (توسط فوتونها) منجر به جذب طیفی پیوسته می‌شود، زیرا تعداد نامحدودی حالت در بالاتر از یونیدگی وجود دارد. مثلاً، اتم‌های هیدروژن در حالت پایه فوتونهای با طول موج مجزا را جذب می‌کنند تا رشته جذبی لیمن را تولید کند، اما این رشته در حد رشته  $\lambda = 91/2 \text{ nm}$  به انتها می‌رسد. برای طول موجهای کمتر از حد رشته، جذب پیوسته لیمن را مشاهده می‌کنیم که به فوتونهایی که می‌توانند هیدروژن را از حالت پایه‌اش یونیده کنند، مربوط است. به طور مشابه، حدهای رشته بالمر، پاشن، براکت و پفوند و جذب پیوسته وابسته به آنها برای یونیدگی از ترازهای  $n = 2, 3, 4, \dots$  وجود می‌آیند.

الکترونهای آزاد می‌توانند با یونها توسط گسیل یک فوتون با انرژی معین باز ترکیب

شوند. چون این فرآیند درست عکس یونیدگی است، رشته‌های گوناگون نشری هیدروژن ممکن است در یک گسیل پیوسته چنانچه شرایط درست باشند، تمام شود.

## ۸-۳ طیفهای اتمها، یونها و مولکولها

### (الف) طیفهای اتمی

در اتمهای چند الکترونی، بر طبق مکانیک کوانتومی و اصل انحصار پاولی داخلی‌ترین لایه با دو الکترون، لایه‌های بعدی به ترتیب با هشت، هیجده و الی آخر اشغال می‌شوند. هنگامی که یک لایه حداکثر تعداد مجاز الکترونها را داشته باشد، پر شده است؛ در این حالت، اتم کاملاً پایدار است و برانگیختگی آن مشکل است (هلیوم، نئون، آرگن،...). ابتدا داخلی‌ترین لایه‌ها پر می‌شوند و هر الکترون اضافی (الکترونها ظرفیت) در برهم‌کنش‌های شیمیایی شرکت می‌کند. مثلاً، کلسیم (با بیست الکترون) آنچنان عمل می‌کند که گویی تنها دو الکترون در بیرونی‌ترین لایه‌اش وجود دارد، چون دو لایه داخلی (۲+۸) بسته‌اند و ۸ تا از الکترونها در سومین لایه تشکیل دو زیر لایه (۲+۶) را می‌دهند.

لایه‌ها و زیر لایه‌های پر شده به سختی مقید هستند و هسته را از الکترونها بیرونی محافظت می‌کنند و بنابراین این الکترونها به صورت ضعیف مقید هستند (به سهولت برانگیخته و یونیده می‌شوند). طیفهای اتم‌های با یک الکترون بیرونی، نظیر لیتیم و سدیم، شبیه هیدروژن هستند، اما آثار لایه‌های بسته داخلی را نشان می‌دهند. اتمهای با بیش از یک الکترون خارجی به طور افزاینده‌ای دارای طیفهای پیچیده هستند. برای نشان دادن امکانات مختلف در جدول تناوبی، جدول (۸-۳)، برای چند اتم نمونه، (۱) پتانسیل برانگیختگی اولین حالت برانگیخته، (۲) پتانسیل یونیدگی از حالت پایه و (۳) طول موجهای مربوط به این گذارها، سیاه‌بندی می‌کند.

### (ب) طیفهای یونی

یونهایی که حداقل دارای یک الکترون مقید هستند به طور طیفی درست نظیر اتمهای خنثی عمل می‌کنند: ممکن است برانگیخته، و انگیخته و به‌علاوه یونیده شوند. به استثنای اصلاحات طول موجی کلی اعمال شده به‌خاطر بار بیشتر هسته‌ها،



جدول ۸-۳. پتانسیلهای برانگیختگی و یونیدگی برای اتمهای منتخب.

	* پتانسیل برانگیختگی	λ (نانومتر)	+ پتانسیل یونیدگی	λ (نانومتر) حدرشته‌ها
هیدروژن (۱ الکترون)	10.2	121.6	13.6	91.2
هلیوم (۱ لایه بسته)	20.9	58.4	24.5	48.8
لیتیوم (۱ لایه پر شده، یک الکترون بیرونی)	1.8	670.8	5.4	225.0
نئون (۲ لایه پر شده)	16.6	73.5	21.5	57.6
سدیم (۲ لایه پر شده، یک الکترون بیرونی)	2.1	589.0	5.1	243.0
منیزیم (۲ لایه پر شده، ۲ الکترون بیرونی)	2.7	457.1	7.6	163.0
کلسیم (۲ لایه پر شده، ۲ زیر پوسته پر شده، ۲ الکترون بیرونی)	1.9	657.3	6.1	203.0

\* از حالت پایه به اولین حالت برانگیخته شده.

+ از حالت پایه اتم خشی.

طیف یک یون شباهت زیادی به طیف اتم خنثایی با همان تعداد الکترون بیرونی دارد. یونهایی با یک الکترون باقی مانده، نظیر HeII، LiIII، OVIII و حتی Fe XXVI را در نظر بگیرید. رابطه عدد موجی بوهر برای این حالات عبارتست از

$$\frac{1}{\lambda_{ab}} = RZ^2 \left( \frac{1}{n_b^2} - \frac{1}{n_a^2} \right) \quad (۲۷-۸)$$

که در آن Z برابر با مقدار حالت یونیدگی است. با تشابه، هر چنین یونی به صورت رشته لیمن، بالمر و دیگر رشته‌ها رفتار می‌کند، اما طول موج‌ها با طول موجهای خطوط طیفی هیدروژن با سازه  $Z^{-2}$  فرق دارد. بنابراین، خط HeII لیمن  $\alpha$  به جای  $121/6\text{mm}$  در  $30/4\text{nm}$  (چون  $Z=2$ ) قرار می‌گیرد.

(ج) طیفهای مولکولی

مولکوها هنگامی شکل می‌گیرند که اتمها با یکدیگر پیوند داشته باشند (پیوند شیمیایی). مکانیک کوانتومی به یک چنین واحدی اعمال می‌شود و مولکولها سه نوع تراز انرژی مجزا دارند. (۱) حالات انرژی الکترونی به صورت ابر الکترونی مرکب احاطه کننده هسته‌ها هستند. گذارهای الکترونی شبیه به گذارها در یک اتم می‌تواند بین این حالات رخ دهند و منجر به برانگیختگی، و انگیختگی و یونیدگی مولکول شوند (نظیر  $H_2 \rightarrow H_2^+ + e^-$ ). (۲) فواصل بین هسته‌ای به صورت حالات انرژی ارتعاشی مجزا با گذارهای ارتعاشی حاصل کوانتیزه می‌شوند. هنگامی که جدایی آن قدر بزرگ می‌شود که اتمها دیگر در قید یکدیگر نیستند، می‌گوئیم که مولکول تجزیه شده است. (۳) یک مولکول ممکن است حول محورهای مختلفی در فضا بچرخد و حالات انرژی چرخشی مجزا را نتیجه دهد.

پدیده طیفهای مولکولی چرخشی را با مثال مولکول منواکسید کربن ( $CO$ )، یکی از معمولی‌ترین مولکولها در فضای بین ستاره‌ای، نمایش خواهیم داد. یک دو جرمی چرخنده با جرمهای  $m, M$  که با فاصله  $r$  از هم جدا شده‌اند، و با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  و گشتاور ماند  $I$  می‌چرخند را در نظر بگیرید. انرژی چرخشی برابر است با

$$E = \frac{I \omega^2}{2} = \frac{\mu r^2 \omega^2}{2}$$

که در آن  $\mu$  جرم کاهش یافته سیستم است

$$\mu = \frac{mM}{(m + M)}$$

حالات چرخشی مولکولها طوری کوانتیزه هستند که تکانه زاویه‌ای می‌تواند فقط دارای مقادیر گسسته داده شده توسط

$$I\omega = \left(\frac{h}{2\pi}\right) J$$

باشد که در آن  $J$  عدد کوانتومی تکانه زاویه‌ای کل است. بنابراین حالات انرژی مربوط به حالات ممکن  $J$  عبارتند از:

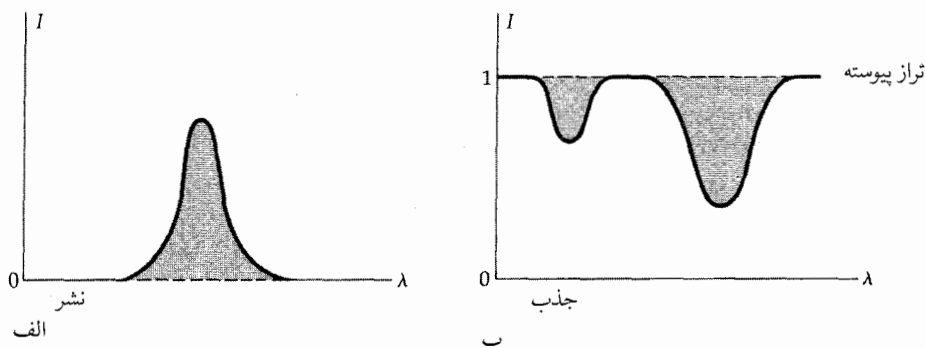
$$E = \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{J(J+1)}{2\mu r^2}$$

بنابراین، برای یک مولکول دو اتمی، ترازهای انرژی متساوی الفاصله هستند، زیرا  $J$  بایستی با فواصل عدد صحیح تغییر کند. برای CO، گذارهای مهم از  $J=1$  به  $0$  و از  $2$  به  $1$  هستند. اولی به بسامد  $115/2712\text{GHz}$  و دومی به  $230/5424\text{GHz}$  مربوط است.

این سه دسته گذار مولکولی منجر به خطوط طیفی بیشماری می شوند که رویهم قرار گرفته اند. چون گذارهای چرخشی و ارتعاشی از نظر انرژی اختلافهای کوچکی دارند (معمولاً خیلی کمتر از یک الکترون ولت)، خطوط طیفی آنها از نظر طول موج خیلی نزدیک به هم است و به صورت نوارها ظاهر می شوند. طیفهای مولکولی بسیار پیچیده تر از طیفهای اتمی هستند، ولی به سادگی توسط ساختار نواری شان تشخیص داده می شوند.

## ۸-۴ شدتهای خط طیفی

اکنون درباره شدتهای نشری و جذبی خطوط طیفی بحث می کنیم (شکل (۸-۱۱)). شدت یک خط نشری با تعداد فوتونهای گسیل شده در آن گذار به خصوص متناسب است. به طور مشابه، شدت یک خط جذبی نسبت به طیف پیوسته مجاورش به تعداد فوتونهای جذب شده بستگی دارد. چون قسمت عمده طیفهای نجومی، طیفهای جذبی هستند، لذا حالت جذبی را مورد بررسی قرار خواهیم داد؛ بحثهای بسیار مشابهی برای طیفهای نشری نتیجه می شوند.



شکل ۸-۱۱. نمایشی از خطوط طیفی. (الف) یک خط نشری. (ب) یک خط جذبی.

یک خط جذبی و یک نمایه را نمایش می‌دهد. هرگز بینهایت تیز نیست. شدت این خط جذبی (تابش باقیمانده بر حسب تابش پیوستار به عنوان واحد) با طول موج تغییر می‌کند (شکل (۸-۱۱)). یک خط طیفی هیچ مساحتی ندارد، اما اگر توزیع انرژی را بر حسب طول موج روی یک نمودار دو بعدی (نظیر شکل (۸-۱۱)) نمایش دهیم، ممکن است سطحی را در صفحه اول اندازه بگیریم. شدت کل یک خط با چنین مساحتی متناسب است که امکان دارد با خط پهنای هم ارز نمایش داده شود (شکل (۸-۱۲)). مساحت نمایه خط را با سطح مساوی یک راستگوشه طوری جایگزین می‌کنیم که یک بعد راستگوشه با ارتفاع پیوستار و بعد دیگر با پهنای آن هم ارز برابر باشد (بر حسب آنگستروم یا میلی آنگستروم در نجوم). توجه کنید که پهنای هم ارز با شدت خط زیاد می‌شود. هنگامی که مرکز نمایه خط به شدت صفر می‌رسد، گوئیم که خط اشباع شده است؛ هر افزایش اضافی در شدت فقط از اطراف خط می‌آید.

(الف) تعادل برانگیختگی: معادله بولتزمن<sup>۱</sup>

شدت خط طیفی مستقیماً به تعداد اتمها در حالت انرژی‌ای که گذار رخ می‌دهد، بستگی دارد. بنابراین، می‌خواهیم کسر تمام اتمهای معلومی را که به آن حالت انرژی برانگیخته شده‌اند، بدانیم. به خاطر بیاورید که برانگیختگی و واانگیختگی ممکن است به صورت برخوردی و یا تابشی (یک واانگیختگی تابشی یک گذارانی نیز نامگذاری می‌شود) رخ دهد. هر دو فرآیند به دما بستگی دارند. چون انرژی جنبشی متوسط یک ذره گاز به صورت زیر است.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3KT}{2} \quad (8-28)$$

که در آن  $m$  جرم ذره،  $v$  سرعت آن،  $k = 1/38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  ثابت بولتزمن و  $T$  دمای گاز بر حسب کلوین است. تعداد فوتونهای یک انرژی معلوم با افزایش دما به سرعت زیاد می‌شود. بنابراین، خطوط جذبی سرچشمه گرفته از ترازهای برانگیخته تمایل دارند تا در گازهای داغ از گازهای سرد قوی‌تر باشند.

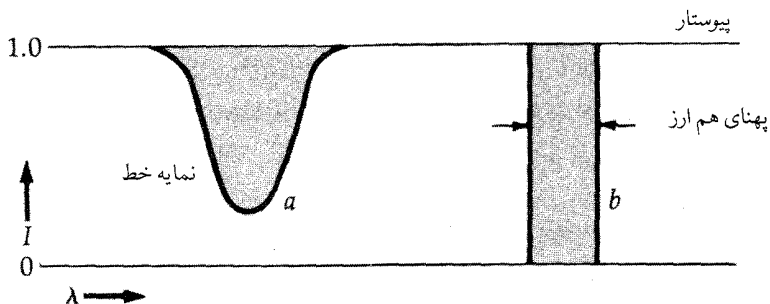
برای سهولت، وضعیتی را در نظر بگیرید که تعادل گرمایی حاکم باشد و تعداد

متوسط اتمها در حالت معلوم نسبت به زمان ثابت بمانند (حالت پایدار). به طور متوسط هر برانگیختگی با یک واانگیختگی در تعادل است. در این حالت، مکانیک آماری نشان می دهد که چگالی عددی (تعداد در واحد حجم) اتمها در حالت B به چگالی عددی در حالت A ( $B > A$ ) توسط معادله بولتزمن [بعد از فیزیکیان اطریشی لودویک بولتزمن (۱۹۰۶-۱۸۴۴ میلادی) که رابطه را کشف کرد، نامگذاری شد] مربوط است:

$$N_B / N_A = (g_B / g_A) \exp [(E_A - E_B) / kT] \quad (29-8)$$

که در آن چگالی عددی تراز،  $g$  چندگانگی تراز (یک خصوصیت ذاتی) و  $E$  انرژی تراز است. جمله  $\exp(\dots)$  یعنی مقدار  $\dots = 2/71828$   $e$  (مبنای لگاریتم طبیعی) به توان  $(\dots)$  (ضمیمه ریاضی). به علت این که  $E_B > E_A$ ، کمیت داخل کروشه در معادله (۸-۲۹) همیشه منفی است، بنابراین نسبت  $N_B / N_A$  با دما افزایش می یابد (وقتی  $T$  به سمت بینهایت میل می کند،  $N_B / N_A$  به سمت  $g_B / g_A$  میل خواهد کرد). برای دمای معلوم، نسبت برانگیختگی  $N_B / N_A$  با کاهش پتانسیل برانگیختگی  $E_B - E_A$  بین دو تراز انرژی افزایش می یابد.

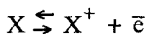
به علت اینکه  $\exp(\infty) = 0$ ،  $\exp(-1) = 0/368$ ، و  $\exp(0) = 1$ ، وقتی  $T \approx \frac{E_B - E_A}{K}$  باشد، تجمع قابل ملاحظه ای در تراز بالاتر رخ می دهد؛ پتانسیل برانگیختگی یک الکترون ولت به دمای  $11600 \text{ K}$  مربوط می شود. به عنوان مثال، حجم گازی را در نظر بگیرید که شامل تعداد یکسانی از اتمهای هیدروژن و هلیوم در یک دما باشد به طوری که تعداد اتمهای هیدروژن در اولین حالت برانگیختگی ( $N_2$ ) برابر با یک دهم تعداد در حالت پایه ( $N_1$ ) باشد، یا  $N_2 / N_1 = 0/1$ . از طرف دیگر، نسبت  $N_2 / N_1$  برای هلیوم خیلی کم خواهد بود. بنابراین، در یک دمای معلوم، کسر اتمها در تراز دوم نسبت به پتانسیل برانگیختگی به طور وسیعی از یک عنصر به عنصر دیگر تفاوت دارد. در این حالت خطوط جذبی حاصل از گذارهای  $n=2$  تا  $n=3$  برای هیدروژن قوی و برای هلیوم خیلی ضعیف خواهد بود. شدت خط تابعی از فراوانی عنصر به خصوص و دما می باشد. در این مثال، به طور غیر واقعی از یونیدگی اتمها صرف نظر کرده ایم؛ برای یک تصویر کامل، بایستی هر دو یونیدگی و برانگیختگی به ترازهای دیگر را بحساب آوریم.



شکل ۸-۱۲. پهنای هم ارز. سطح راستگوشه b معادل سطح نمایه خط a است. پیوستار به طور دلخواه برابر با تراز ۱ قرار داده شده است.

(ب) تعادل یونیدگی: معادله ساها<sup>۱</sup>

همان طور که دمای یک گاز زیاد می شود، انرژی بیشتر و بیشتر (تابشی یا برخوردی) برای یونیده کردن اتمها فراهم می شود. عموماً گاز داغ از اتمهای خنثی، یونها و الکترونهاى آزاد تشکیل می شود. افزایش چگالی الکترون ( $N_e$ ) برابر است با تعداد الکترونها در واحد حجم، سبب افزایش احتمال جذب یک الکترون توسط یون و تبدیل به یک اتم خنثی می شود. این دو فرآیند رقیب - یونیدگی ( $\rightarrow$ ) و ترکیب مجدد ( $\leftarrow$ ) - به دین صورت نوشته می شوند



یک شرط حالت پایدار از تعادل یونیدگی در گاز هنگامی که آهنگ یونیدگی با آهنگ ترکیب مجدد برابر می شود، بدست می آید. یک عبارت کمی از این تعادل یونیدگی توسط معادله ساها [که به نام فیزیکیان هندی، مگنادر. ان. ساها (۱۹۵۶-۱۸۹۳ میلادی) نام گذاری شده است] داده می شود:

$$\frac{N^+}{N_0} = \left[ \frac{A(KT)^{\frac{3}{2}}}{N_e} \right] \exp \left( \frac{-X_0}{KT} \right) \quad (۳۰-۸)$$

که در آن  $N_+$  چگالی عددی یونها،  $N_e$  چگالی عددی اتمهای خنثی در حالت پایه می باشد و ثابت  $A$  شامل چند ثابت اتمی است و مشتمل بر احتمال حالات متفاوت یونیدگی است،  $T$  دمای مطلق،  $N_e$  چگالی الکترون و  $X_e$  پتانسیل یونیدگی (بر حسب الکترون ولت) از حالت پایه اتم خنثی می باشد. معادله (۸-۳۰) بسیار شبیه به معادله بولتزمن (۸-۲۹) می باشد به استثناء وابستگی به  $N_e$  و ضریب اضافی  $T^{3/2}$ ، که به علت پیوستگی انرژیهای بالای  $\chi$  ظاهر می شود که بسبب یونیدگی اتم گردیده و الکترون آزاد شده برای فرار از آن همان طور که انرژی جنبشی اش افزایش می یابد محتمل تر است. توجه کنید که برای گاز هیدرون خالص،  $N_e = N_+$ .

معادله برانگیختگی بولتزمن (۸-۲۹) برای هر دو تراز برانگیختگی به کار می رود، هم برای یک یون و هم برای یک اتم خنثی. به طور مشابه معادله یونیدگی ساها (۸-۳۰) می تواند برای بدست آوردن نسبت  $\frac{N_{i+1}}{N_i}$  برای هر معادله یونیدگی  $i + 1$  و مرحله پایین تر  $i$  تعمیم داده شود. شکل مناسب معادله ساها بدین صورت است،

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \left[ \frac{A(kT)^{3/2}}{N_e} \right] \exp(-\chi_i / kT) \quad (۸-۳۱)$$

که در آن  $\chi_i$  پتانسیل یونیدگی مرحله پایین تر (انرژی لازم برای یونیده کردن ذره از حالت  $i$  به حالت  $i + 1$ ) است. مثلاً، معادله (۸-۳۱) برای تعادل یونیدگی بین  $\text{CaIII}(i+1=3)$  و  $\text{CaII}(i=2)$  به کار می رود. تجمع نسبی مرحله یونیدگی بالاتر به سرعت با ازدیاد دما یا مقادیر کوچکتر  $\chi$  زیاد می شود.

### (ج) ترکیب معادلات بولتزمن و ساها

معادله بولتزمن تعداد اتمها در یک حالت برانگیخته را نسبت به تعداد آن در حالت پایه می دهد؛ این نتیجه برای هر دو اتمهای یونیده و خنثی به کار می رود. معادله ساها تجمعات نسبی دو مرحله یونیدگی مجاور را بیان می دارد. این دو معادله را ترکیب می کنیم تا تعداد اتمهای لازم برای ساختن یک گذار خاص و سرانجام یک خط طیفی معلوم را محاسبه کنیم.

خطوط جذبی بالمر هیدروژن خنثی را در نظر بگیرید. شدت آنها با تعداد اتمها در اولین حالت برانگیخته ( $N_+$ ) اتم خنثی نسبت به تعداد کل اتمهای هیدروژن در تمام

مراحل یونیدگی (N) متناسب است. اما هیدروژن تنها دو مرحله یونیدگی دارد: خنثی ( $N_0$ ) و یکبار یونیده ( $N_+$ )؛ بنابراین، می دانیم که  $N = N_0 + N_+$ . کسر  $\frac{N_+}{N}$  برابر است با

$$\frac{N_+}{N} = \frac{N_+}{(N_0 + N_+)} \approx \frac{\frac{N_+}{N_0}}{1 + \left[\left(\frac{N_+}{N_0}\right)\right]} \quad (۳۲-۸)$$

که از تقریب معقول  $N_0 \approx N_+$  در تساوی آخر استفاده کرده ایم. معادله بولتزمن نسبت اتمهای خنثی در اولین حالت برانگیخته به اتمها در حالت پایه  $\frac{N_+}{N_0}$  را نتیجه می دهد؛ معادله ساها نسبت اتمهای یونیده به خنثی  $\frac{N_+}{N_0}$  را نتیجه می دهد. شکل تقریبی معادله (۳۲-۸) به اندازه کافی برای مقاصد فعلی ما دقیق است.

نمودار  $\frac{N_+}{N_0}$  به صورت تابعی از دما (شکل (۸-۱۳)) نشان می دهد که بیشتر هیدروژن در دمای زیر ۷۰۰۰ درجه کلون خنثی است، اما در دماهای بالاتر، یونیدگی تا نقطه ای افزایش می یابد که تعداد اتمهای خنثی ناچیز می شود. بنابراین، افزایش نمائی  $\frac{N_+}{N_0}$  با ازدیاد دما با فقدان اتمهای خنثی در دماهای بالا مخالفت می کند. در نتیجه، منحنی  $\frac{N_+}{N_0}$  در حوالی  $k \cdot 10000$  دارای یک بیشینه است. شدت خطوط جذبی بالمر هیدروژن نزدیک به  $k \cdot 10000$ ، بیشترین مقدار است و در دماهای بالاتر و پایین تر کاهش می یابد. در  $k \cdot 6000$  - دمای تقریبی سطح خورشید - نسبت  $\frac{N_+}{N_0}$  حدود  $10^{-8}$  است، اما خطوط جذبی بالمر قوی به طور قابل قبولی به عنوان نتیجه فراوانی زیاد هیدروژن در خورشید دیده می شود. در  $k \cdot 20000$  - دمای ستارگان بسیار داغ - این نسبت حدود  $10^{-2}$  است، اما خطوط بالمر در شدت با خطوط خورشید شبیه هستند، زیرا اکنون اکثر اتمهای هیدروژن یونیده هستند!

معادلات بولتزمن و ساها کاربرد وسیعی در اختر فیزیک دارند. با استفاده از آنها می توانیم طیفهای جذبی (و نشری) ستاره ای را برای استنتاج دماها و فشارهای سطحی ستارگان تفسیر کنیم. مثلاً در دماهای بین گستره ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ درجه کلون، کلسیم بایستی به طور غالب به شکل CaII (یک بار یونیده) باشد. ستارگان با خطوط CaII قوی اما خطوط CaI ضعیف (مثلاً خورشید ما) بایستی دارای دماهایی از این مرتبه باشند. از



طرف دیگر، ستاره‌ای که دارای چگالی بسیار کمتری از خورشید ماست، اما خطوط CaII قوی یکسانی تولید می‌کند بایستی در واقع دارای دمای کمتری برای جبران چگالی الکترون کمتر  $N_e$  داشته باشد (معادله (۸-۳۱)).

اکنون فرمول قبلی را برای بدست آوردن  $N_{i,s}$ ، تعداد نسبی اتمها در هر حالت برانگیختگی  $s$  از یک مرحله یونیدگی  $i$  تعمیم می‌دهیم. نسبت مورد نظر برابر است با  $\frac{N_{i,s}}{N}$ ، که در آن  $N$  روی تمام مراحل یونیدگی جمع بندی شده است:

$$N = N_0 + N_1 + N_2 + \dots + N_n = \sum_{i=0}^n N_i$$

عموماً،  $n$  تعداد الکترونها در اتم خنثی است، اما در عمل، تنها ۲ یا ۳ مرحله یونیدگی برای بررسی مورد نیاز است، تعداد یونها در مراحل دیگر در یک دمای معلوم قابل صرف نظر کردن است. با اولین تقریب قابل قبول،

$$\begin{aligned} \frac{N_{i,s}}{N} &\approx \frac{N_{i,s}}{(N_{i-1} + N_i + N_{i+1})} \\ &= \frac{\left(\frac{N_{i,s}}{N_i}\right)}{\left[\left(\frac{N_{i-1}}{N_i}\right) + 1 + \left(\frac{N_{i+1}}{N_i}\right)\right]} \end{aligned} \quad (8-33)$$

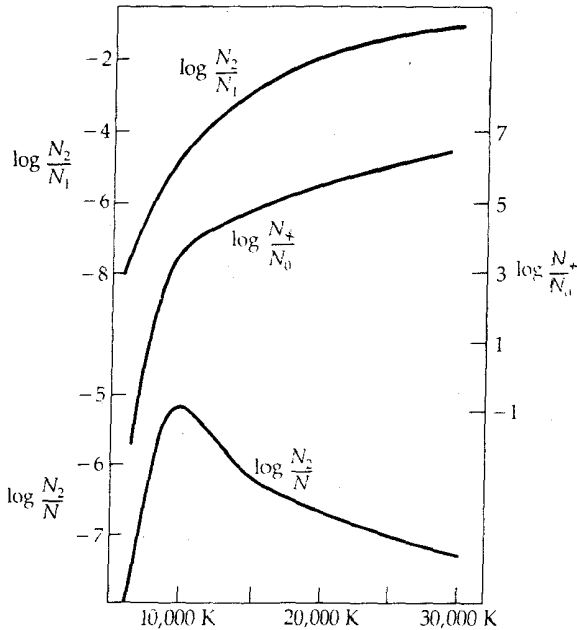
صورت آخرین عبارت توسط معادله بولتزمن داده می‌شود:

$$N_{i,s} / N_i \propto \exp\left(\frac{-\chi_s}{kT}\right)$$

و مخرج می‌تواند از معادله ساها حاصل گردد:

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} \propto \left[\frac{(kT)^{3/2}}{N_e}\right] \exp\left(\frac{-\chi_i}{kT}\right)$$

اگر چه معادله (۸-۳۳) برای قویترین خطوط طیفی یک گاز مفید است، اما در حالت عمومی محاسبات عددی وسیع برای تولید مجدد دقیق شدتهای خط طیفی لازم است. تقریب ما تنها وقتی بر قرار است که  $i$  مرحله غالب یونیدگی برای دمای متداول باشد.



شکل ۸-۱۳. منحنی‌های برانگیختگی و یونیدگی برای خطوط بالمر هیدروژن. تجمعات نسبی ترازهای انرژی ( $\frac{N_2}{N_1}$ ) از معادله بولتزمن و مراحل یونیدگی ( $\frac{N_+}{N_0}$ ) از معادله ساها برای تعادل در دماهای مشخص شده محاسبه شده‌اند. منحنی پائینی ترکیب دو منحنی بالاتر را با  $N = N_0 + N_+$  نشان می‌دهد.

## ۵-۸ پهن شدگی خط طیفی

خطوط طیفی هرگز کاملاً تیز نیستند؛ نمایه‌های آنها همیشه دارای عرض محدود هستند. اصول مقدماتی مکانیک کوانتومی برای عرض کمینه (پهن شدگی طبیعی) یک شکل طیفی بحساب می‌آید و فرآیندهای فیزیکی گوناگون باعث پهن شدن نمایه خط می‌شود. با تغییر نمایه مشاهده شده از یک خط طیفی بر حسب این ساز و کارهای پهن شدگی، می‌توانیم بعضی از خصوصیات تابش یک ستاره را استنتاج کنیم.

## (الف) پهن‌شدگی طبیعی

مکانیک کوانتومی برای تمام ذرات اتمی طبیعت موجی نسبت می‌دهد؛ یک الکترون در یک تراز انرژی اتمی نظیر یک ذره است. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ دلالت بر این دارد که انرژی یک حالت معلوم ممکن نیست دقیق‌تر از

$$\Delta E = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{h}{\Delta t}\right) \quad (۳۴-۸)$$

تعیین شود که در آن  $h$  ثابت پلانک و  $\Delta t$  عمر حالت است. بنابراین، یک مجموعه از اتمها یک خط جذبی یا نشری با یک پخش کمینه‌ای در بسامدهای فوتون - عرض طبیعی - از مرتبه  $\Delta \nu = \frac{\Delta E}{h} \approx \frac{1}{\Delta t}$  تولید می‌کند. حالات برانگیخته نمونه حدود  $10^8$  ثانیه قبل از تلاشی عمر می‌کند (در مقابل یک حالت پایه ممکن است برای همیشه به طول بینجامد)، بنابراین یک عرض طبیعی بهنجار برای نور مرئی نزدیک  $0.5$  نانومتر می‌باشد. عرضهای طبیعی بسیار کوچکتر برای حالت‌های شبه پایدار رخ می‌دهد، بعضی از آنها بیش از یک ثانیه ( $\Delta t \geq 1 \text{ sec}$ ) طول می‌کشد.

## (ب) پهن‌شدگی دوپلری گرمایی

اگر چه پهن‌شدگی طبیعی تنها به عمر ذاتی یک تراز انرژی بستگی دارد، پهن‌شدگی دوپلری گرمایی به دما و ترکیب یک گاز بستگی دارد. هنگامی که یک گاز در دمای معین  $T$  است، ذرات گاز (هر یک به جرم  $m$ ) تقریباً با توزیع ماکسولی سرعت‌ها که توسط معادله انرژی جنبشی متوسط (۲۸-۸) مشخص شده است، حرکت می‌کند

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3kT}{2}$$

حرکات اتمی در امتداد خط دید ما دلالت بر انتقالات دوپلری در تابش جذب شده یا نشر یافته در گذار اتمی دارد. در یک دمای معین، خطوط طیفی عناصر سنگین باریکتر از عناصر سبک هستند، چون، به طور متوسط ذرات سنگین بسیار آهسته‌تر از ذرات سبک حرکت می‌کنند. مثلاً، هیدروژن خنثی در  $6000^\circ \text{K}$  با تندی متوسط  $v = 12 \text{ km/sec}$  حرکت می‌کند که به کسر پهن‌شدگی دوپلری  $\approx 4 \times 10^{-5} = \frac{v}{c}$  مربوط می‌باشد؛ بنابراین، پهن‌شدگی دوپلری گرمایی خط بالمر آلفا ( $656/3$  نانومتر) تقریباً برابر است با

## (ج) پهن شدگی بر خوردی

ترازهای انرژی یک اتم توسط ذرات مجاور به ویژه ذرات باردار، نظیر یونها و الکترونها جابه جا می شوند (اثر استارک<sup>۱</sup> نامیده می شود). در یک گاز، این آشفتگی ها اتفاقی هستند و سبب پهن شدگی خطوط طیفی می شوند. به علت اینکه آشفتگیها برای ذره آشفته نزدیکتر بزرگتر است، این پهن شدگی بر خوردی (یا فشار) مستقیماً به چگالی ذره بستگی دارد. چگالی بیشتر (و بنابراین فشار) گاز، عرض خطوط طیفی بیشتر را سبب می شود.

(د) پدیده زمین<sup>۲</sup>

هنگامی که یک اتم در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد، ترازهای انرژی اتمی هر یک به سه زیرتراز یا بیشتر تجزیه می شوند - این پدیده را به نام پیتر زیمن هلندی (۱۸۶۵-۱۹۴۲ میلادی) اثر زیمن می نامند. به جای یک گذار اتمی و یک شکل طیفی منفرد، اکنون سه خط یا خطوط بسیار نزدیکتری داریم (فاصله متناسب با شدت میدان مغناطیسی است). اگر مؤلفه های زمین تفکیک نشوند، تنها یک خط طیفی پهن شده را می بینیم. در حالاتی که میدان مغناطیسی بسیار قوی و یکنواخت است (نظیر لکه های خورشیدی و ستارگان مغناطیسی)، می توانیم شکافتگی زیمن را تفکیک کرده و شدت میدان مغناطیسی و جهت منبع را تشخیص دهیم.

## (ه) ساز و کارهای دیگر پهن شدگی

سرانجام، ما سه ساز و کار پهن شدگی ماکروسکوپی را که بر اثر دوپلری استوار است، یادآوری می کنیم. یک نمونه ستاره را در نظر بگیرید که تصویر آن نمی تواند تفکیک شود. حرکات اتفاقی مقیاس بزرگ در سطح چنین ستاره ای دلالت بر انتقالات دوپلری دارد که به صورت پهن شدگی آشفته خطوط طیفی ظاهر می شود. اگر جو ستاره منبسط شود، به طور همزمان می بینیم که گاز در تمام جهات در حال حرکت است؛ اثر جمع شده

تمام انتقالات دوپلری برابر با پهن شدگی انبساطی خطوط طیفی مشاهده شده است. یک ستاره چرخان سریع (که از بالای قطب دیده نمی شود) دارای خطوط پهن شده چرخشی خواهد بود، چون یک لبه ستاره به سمت ما می آید در صورتی که لبه دیگر دور می شود. به علت این که تمام اشکال طیفی رفتار پهن شدگی چرخشی یکسانی دارند، ممکن است چرخش ستاره ای را تعیین کرده و آهنگ (یا دوره تناوب) آن را مشخص کنیم.

## ۸-۶ تابش جسم سیاه

تا کنون به گذار اتمی جداگانه و خطوط طیفی که آنها را تولید می کنند، پرداخته ایم. اما، یک طیف پیوسته از کجا سرچشمه می گیرد؟ (به خاطر بیاورید که خطوط جذبی طیفی هنگامی نتیجه می شوند که فوتونها به طور انتخابی از چنین پیوستاری جذب می شوند.) یادآوری کرده ایم که پیوستارهای جذبی و نشری می توانند از اتمهای مجزا سرچشمه بگیرند و اشکال طیفی با شدیدتر شدن بر هم کنش اتمها، پهن تر می شوند. هنگامی که تجمعی از اتمها آن قدر قوی اندرکنش کنند (نظیر یک جامد، یک مایع، یا یک گاز کدر) که تمام اشکال کامل طیفی محو شوند، یک پیوستار گرمایی نتیجه می شود.

چنین طیف پیوسته ای از یک جسم سیاه نتیجه می شود که طیف آن تنها به دمای مطلق بستگی دارد. علت نام گذاری جسم سیاه این است که تمام انرژی الکترومغناطیسی تابیده به خود را جذب می کند - کاملاً سیاه است. مع ذالک، برای قرار گرفتن در تعادل گرمایی کامل، چنین جسمی بایستی انرژی را دقیقاً با همان آهنگ که جذب کرده است، تابش نماید؛ در غیر این صورت، جسم گرم یا سرد می شود (دمای آن تغییر خواهد کرد). به طور ایده آل، یک جسم سیاه یک حصار کاملاً عایق است که درون آن تابش با دیواره های حصار به تعادل گرمایی رسیده است. به طور عملی، تابش جسم سیاه، ممکن است با مشاهده حصار از میان یک حفره کوچک در یکی از دیواره ها مشاهده شود. گازها در درون یک ستاره (بسیار جذب کننده) نسبت به تمام تابشها کدر هستند (در غیر این صورت، ما درون ستاره را در بعضی از طول موجها می دیدیم!)؛ بنابراین، تابش خصوصیت جسم سیاه را دارد. ما این تابش را همانگونه که به طور آهسته

از سطح ستاره نشر می‌کند، نمونه برداری می‌کنیم - با تقریب خوبی، تابش پیوسته از ستارگان دارای طبیعت جسم سیاه است.

(الف) قانون تابش پلانک

بعد از نظریه ماکسول در مورد الکترومغناطیس که در سال ۱۸۶۴ میلادی ارائه شد، کوششهای بسیاری برای درک تابش جسم سیاه به طور نظری انجام شد. هیچیک تا سال ۱۹۰۰ میلادی موفق نبود، ماکس ک. ای. ال. پلانک<sup>۱</sup> (۱۸۵۸-۱۹۴۷ میلادی) فرض کرد که انرژی الکترومغناطیسی می‌تواند فقط به صورت پیمانه‌های مجزا، یا فوتونها، هر یک به انرژی  $E = h\nu$  منتشر شود. این فیزیکدان برجسته آلمانی آنگاه رابطه شدت طیفی یا قانون تابش جسم سیاه پلانک را بدست آورد:

$$I_\nu \Delta\nu = \left( \frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \left[ \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \right] \Delta\nu \quad (الف-۳۵-۸)$$

که در آن  $I_\nu \Delta\nu$  شدت تابش یک جسم سیاه در دمای  $T$  در گستره بسامد  $\nu$  و  $\nu + \Delta\nu$  ثابت پلانک،  $c$  تندی نور و  $k$  ثابت بولتزمن است. به قسمت نمایی در مخرج توجه کنید.

چون بسامد  $\nu$  و طول موج  $\lambda$  تابش الکترومغناطیسی توسط  $\lambda\nu = c$  بهم مربوط هستند، می‌توانیم فرمول پلانک را (معادله (الف-۳۵-۸)) بر حسب شدت گسیل شده در واحد فاصله طول موج نیز بیان کنیم:

$$I_\lambda \Delta\lambda = \left( \frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \left[ \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \right] \Delta\lambda \quad (ب-۳۵-۸)$$

معادله (ب-۳۵-۸) به این دلیل نتیجه می‌شود که شدت  $I_\nu \Delta\nu$  با شدت  $I_\lambda \Delta\lambda$  در فاصله طول موجی مربوطه برابر است با

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \rightarrow |\Delta\nu| = \left| \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} \right|$$

عبارت فوق با دیفرانسیل‌گیری یا توجه به

$$\lambda\nu = (\lambda + \Delta\lambda)(\nu + \Delta\nu) = c$$

نتیجه می شود که  $\Delta\lambda$ ،  $\Delta\nu$  قابل صرف نظر کردن است.

معادله (۸-۳۵) ب) در شکل (۸-۱۴) برای چند مقدار از T نشان داده شده است. توجه کنید که  $I_{\nu}$ ،  $I_{\lambda}$  با افزایش دمای جسم سیاه، افزایش می یابند - جسم سیاه روشن تر می شود. این اثر به سادگی بر حسب معادله (۸-۳۵ الف) که  $\Delta\nu$   $I_{\lambda}$  مستقیماً با تعداد فوتونهای منتشر شده در ثانیه نزدیک به انرژی  $h\nu$  متناسب است، توصیف می شود.

برای درک بهتر فرمولهای جسم سیاه پلانک (معادلات ۸-۳۵، اجازه دهید نتیجه‌ای توسط آلبرت انیشتین را خلاصه کنیم. در یک بسامد معلوم  $\nu$ ، تابش در تعادل حرارتی با اتمهایی که دیواره‌های حفره جسم سیاه را تشکیل می دهند، خواهد بود. به علت اندرکنش‌های اتمی قوی در دیواره‌ها تمام حالات ممکن انرژی در آنجا موجود است. حالات انرژی بالا (U) و پائین (L) مربوط به کوانتای انرژی  $h\nu = E_L - E_U$  را در نظر بگیرید. معادله بولتزمن تعداد اتمها در هر حالت را از طریق زیر به هم مربوط می سازد

$$N_U = (g_U / g_L) N_L e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

اگر احتمال به ازای هر اتم برای یک گذار پایین رونده ( $U \rightarrow L$ )،  $a_{UL}$  و از آن یک گذار بالا رونده ( $L \rightarrow U$ )،  $a_{LU}$  باشد، آنگاه یک تعادل حالت پایدار هنگامی بدست می آید که داشته باشیم

$$N_L a_{LU} = N_U a_{UL}$$

اما،  $a_{LU}$  - «برانگیختگی تابشی» - به چگالی انرژی تابش  $\rho_{\nu}$  در بسامد  $\nu$  و به پارامتر اتمی  $B_{LU}$  (ضریب جذب انیشتین) بستگی دارد:  $a_{LU} = B_{LU} \rho_{\nu}$ . و انگیختگی ( $a_{UL}$ ) می تواند به دو طریق رخ دهد: خود به خود ( $A_{UL}$ ) یا در خلال تأثیر القائی میدان تابشی ( $B_{UL} \rho_{\nu}$ )؛ از این رو، داریم  $a_{UL} = A_{UL} + B_{UL} \rho_{\nu}$  با ترکیب این دو نتیجه گوناگون و حل برای  $\rho_{\nu}$ ، نتیجه می گیریم

$$\rho_{\nu} = \frac{(A_{UL})}{B_{UL}} / \left[ \left( \frac{B_{LU} g_L}{B_{UL} g_U} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right) \right]$$

نتیجه، مستقل از تعداد اتمهای موجود است. آنگاه انیشتین عبارات مناسبی برای ضرایب اتمی  $B_{LU}$ ,  $B_{UL}$ ,  $A_{UL}$  جایگزین کرد تا قانون شدت تابش جسم سیاه پلانک را بدست آورد:

$$\rho\nu \Delta\nu = \left( \frac{\Lambda\pi h\nu^3}{c^3} \right) \left[ \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \right] \Delta\nu \quad (۳۶-۸)$$

که در آن  $\rho\nu \Delta\nu$  چگالی انرژی (ژول بر متر مکعب) است. برای تبدیل به شدت تابش شده از جسم سیاه ( $I_\nu$ ) ضریب  $\frac{c}{4\pi}$  معرفی شده است (معادله (۳۵-۸) الف)). قبل از ترک موضوع تابش جسم سیاه، که در اختر فیزیک بسیار مفید است، چند تقریب مفید را مورد نظر قرار می دهیم. تا کنون فرمولهایی برای شدتهای تک رنگ را مورد بررسی قرار داده ایم (معادلات (۳۵-۸)). اگر اینها را در حالتی که قسمتهای نمایی بسیار بزرگ شود، (بسیار بزرگتر از واحد) ارزیابی کنیم، آنگاه در می یابیم

$$I_\nu(T) = \left( \frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right) \quad (۳۷-۸) \text{ الف}$$

$$I_\nu(T) = \left( \frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \exp\left(\frac{-hc}{\lambda kT}\right) \quad (۳۷-۸) \text{ ب}$$

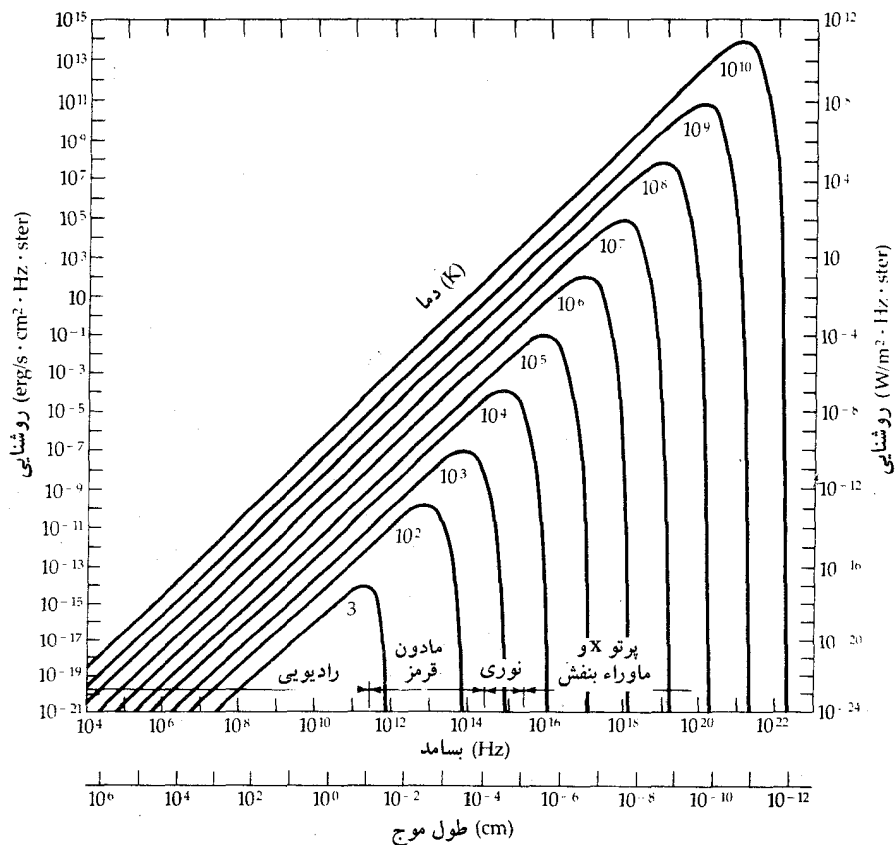
که برای هنگامی که دما کم و طول موجها کوتاه هستند، تقریبی مناسب است. گاهی اوقات توزیع وین<sup>۱</sup> نامیده می شود. در حالت مخالف، هنگامی که مقدار نما بسیار کوچک (بسیار کوچکتر از واحد) است، از بسط تابع نمائی استفاده می کنیم. توجه کنید که  $e^x - 1 \approx x$  و

$$I_\nu(T) = \frac{2\nu^3 kT}{c^2} \quad (۳۸-۸) \text{ الف}$$

$$I_\nu(T) = \frac{2c kT}{\lambda^4} \quad (۳۸-۸) \text{ ب}$$

که توزیع رایله - جینز<sup>۲</sup> نامیده می شود و در دماهای بالا و طول موجهای بلند (سامدهای پایین) کاربرد دارد.





شکل ۸-۱۴. تابش جسم سیاه. یک طرح لگاریتمی - لگاریتمی از منحنی‌های پلانک برای گستره وسیعی از دما. توجه کنید که طول موج‌ها از بلند به کوتاه کشیده شده است.

### (ب) قانون وین

وقتی دمای یک جسم سیاه بالا می‌رود آبی‌تر می‌شود. این پدیده به حجم تابش گسیل یافته در طول موج‌های کوتاه‌تر (شکل ۸-۱۴)) همان طور که  $T$  بزرگتر می‌شود، مربوط می‌گردد. دیلهلم وین (۱۸۶۴-۱۹۲۸ میلادی) طول موج  $\lambda_{\max}$  که در آن بیشترین شدت تابش جسم سیاه صادر می‌شود - قله (طول موجی که در آن  $\frac{dI_{\lambda}}{d\lambda} = 0$ ) منحنی

پلانک (از اولین مشتق قانون پلانک بدست آمده است) - را توسط قانون جابه جایی وین بیان کرد:

$$\lambda_{\max} = \frac{2/898 \times 10^{-2}}{T} \quad (39-8)$$

هنگامی که  $T$  بر حسب کلوین باشد،  $\lambda_{\max}$  بر حسب متر خواهد بود. مثلاً، طیف پیوسته‌ای از خورشید ما تقریباً جسم سیاه است که در  $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$  قله دارد؛ بنابراین، دمای سطحی بایستی نزدیک  $5800^\circ \text{K}$  باشد. توجه کنید که به علت، ثابت  $\lambda_{\max} T =$ ، با افزایش یک ضریب، دیگری کاهش می‌یابد.

### (ج) قانون استفان<sup>۱</sup> و بولتزمن<sup>۲</sup>

سطح زیر منحنی پلانک (با انتگرال‌گیری تابع پلانک) شار انرژی کل  $F$  ( $\frac{W}{m^2}$ ) گسیل شده توسط یک جسم سیاه را هنگامی که روی تمام طول موجها و زوایای حجمی جمع می‌بندیم، نمایش می‌دهد:

$$F = \sigma T^4 \quad (40-8)$$

که در آن  $\sigma = 5/669 \times 10^{-8} \text{ W/s} \cdot \text{K}^4$ . وابستگی قوی دما در معادله (۴۰-۸) اولین بار از ترمودینامیک در سال ۱۸۷۹ میلادی توسط ژوزف استفان (۱۸۹۳-۱۸۳۵ میلادی) استنتاج شد و از مکانیک آماری در ۱۸۸۴ میلادی توسط بولتزمن نتیجه‌گیری شد؛ لذا این عبارت را قانون استفان - بولتزمن می‌نامیم. روشنایی یک جسم سیاه به صورت توان چهارم دمای آن زیاد می‌شود. اگر تقریباً یک ستاره را به صورت یک جسم سیاه در نظر بگیریم، انرژی خروجی ستاره (بر حسب وات) درست  $E = 4\pi R^2 \sigma T^4$  است، چون مساحت سطح یک کره به شعاع  $R$  برابر  $4\pi R^2$  می‌باشد.

### (د) دما

این بحث را با ذکر این اخطار راجع به دما به پایان می‌بریم. اگر با یک جسم سیاه واقعی سر و کار داشته باشیم، ممکن است دمای آن را با استفاده از (۱) شکل منحنی پلانک یا حداقل دو نقطه بر منحنی، (۲) قانون وین یا (۳) قانون استفان بولتزمن تعیین

1. Stefan.

2. Boltzman.

کنیم. چون هیچ شیئی اختر فیزیکی یک جسم سیاه کامل نیست، دماهایی را که با هر یک از این سه روش بدست می آوریم با یکدیگر اندکی اختلاف دارند. به علاوه، دماها که بر چنین طیف‌های پیوسته‌ای استوار است، ممکن است، از دماهای بدست آمده از شدت‌های نسبی خطوط طیفی با استفاده از معادلات ساها و بولتزمن اختلاف داشته باشد. بنابراین، برای مقید کردن این که کدام نوع دما را یک فرد به کار ببرد (مثالهای جدول (۴-۸) را ملاحظه کنید)، یک تمرین خوبی است.

جدول ۴-۸. تغییرات دماها

نوع دما	قانون اساسی یا معادله	مشاهدات ضروری
رنگ	منحنی پلانک	روشنایی در دو یا چند طول موج
مؤثر یا تابشی	قانون استفان بولتزمن	قدر تابش سنجی و شعاع
برانگیختگی	معادله بولتزمن	شدت‌های نسبی خطوط طیفی همان عنصر
یونیدگی	معادله ساها	شدت‌های نسبی خطوط طیفی در مراحل یونیدگی مجاور
جنبشی	پهن‌شدگی دوپلری گرمایی	عرضها و شکلهای خطوط طیفی

## مسائل

- الف) نشان دهید که یک دسته نور که به طور مورب وارد شده و از میان یک قطعه شیشه با صفحات موازی عبور می‌کند، هنگامی که از شیشه خارج می‌گردد، بدون تغییر جهت جابه‌جا می‌شود. (ب) اگر شیشه دارای ضخامت  $d$  و ضریب انکسار  $n$  باشد، جابجایی خطی دسته نور به صورت تابعی از  $n$  و  $\theta$  چگونه است؟
- چه شکافی لازم است تا تفکیک یک ثانیه قوسی برای طول موجهای زیر بدست آید: الف)  $500 \text{ nm}$  (مرئی) (ب)  $21 \text{ cm}$  (رادئویی) آیا می‌توانید از نتایج بدست آمده یک شکل عمومی بسازید؟
- الف) در چه طول موجهایی خطوط طیفی زیر مشاهده می‌شوند:

(i) خط گسیل شده در  $500\text{nm}$  توسط ستاره متحرکی با سرعت  $100\text{km/sec}$  به طرف ما.

(ii) خط  $\text{CaII}$  (طول موج جابه‌جا نشده  $397\text{nm}$ ) گسیل شده توسط یک کهکشان که با سرعت  $600\text{km/sec}$  دور می‌شود.

(ب) یک ابر هیدروژن خنثی (HI) خط رادیویی  $21\text{cm}$  (بسامد در حال سکون  $1420/4$  مگاهرتز) را به هنگام دور شدن با سرعت  $200\text{km/sec}$  گسیل می‌دارد. در

چه بسامدی این خط را مشاهده خواهیم کرد؟  
۴. شکل ساده‌ای از قضیه دو جمله‌ای بیان می‌کند که

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)x^2}{2} + \frac{n(n-1)(n-2)x^3}{6} + \dots$$

هنگامی که  $x < 1$ . با شروع از عبارت نسبی، این قضیه را برای بدست آوردن معادله کلاسیکی انتقال دوپلری بر حسب طول موج در حالتی که  $v \ll c$  به کار برید.

۵. (الف) انرژی یک فوتون به طول موج  $\lambda = 300\text{nm}$  چقدر است؟ جوابتان را بر حسب ژول و الکترون ولت بیان کنید. (ب) اتمی در حالت برانگیخته دوم ( $n = 3$ ) هیدروژن بزحمت هنگامی که یک فوتون به اتم برخورد می‌کند، یونیده می‌شود. اگر تمام انرژی آن به اتم منتقل شود، طول موج فوتون چقدر است؟

۶. خط گسیلی  $\text{H}\alpha$  در  $656/3\text{nm}$  به چه گذار الکترونی مربوط می‌شود؟

۷. با کاربرد معادله بولتزمن برای اتم هیدروژن خنثی (یونیدگی حذف شود)، عبارتی برای تجمع تراز انرژی  $n$  ام نسبت به حالت پایه در دمای  $T$  بدست آورید. اکنون فرض کنید که چندگانگی هر تراز برابر واحد است ( $g_n = 1$ )، یک منحنی مناسب برای نمایش نتایج تان در  $T = 6000\text{K}$  بسازید.

۸. برای درک اهمیت نسبی پارامترهای مختلف در معادله ساها، آزمایش زیر را تدارک ببینید. فرض کنید که  $T = 5000\text{K}$ ،  $N_e = 10^{15}/\text{cm}^3$  و  $IP = 12\text{eV}$ . با چه ضریبی نسبت یونیدگی ( $\frac{N_+}{N}$ ) تغییر می‌کند هنگامی که به طور جداگانه (الف) دما را دو برابر کنیم (ب) چگالی الکترون را دو برابر کنیم (ج) پتانسیل یونش را دو برابر کنیم.

کدامیک از جملات نمایی یا  $T^{\frac{3}{2}}$  اهمیت بیشتری در خلال تغییر دما دارند؟

۹. فرض کنید  $N_2$  تعداد اتمهای هیدروژن در دومین تراز (اولین حالت برانگیخته) و  $N_1$

تعداد اتمها در حالت پایه باشند. با استفاده از شکل (۸-۱۳)، نسبت برانگیختگی

$(\frac{N_2}{N_1})$  و کسر برانگیخته شده  $(\frac{N_2}{N})$  را برای هر یک از ستارگان زیر پیدا کنید:

(الف) شعرای یمانی  $T = 10000 \text{ k}$  (ب) رجل الجبار  $T = 15000 \text{ k}$

(ج) خورشید  $T = 5700 \text{ k}$

کدام ستاره قویترین خطوط جذبی بالمر را دارا خواهد بود؟ دلالتان را برای رسیدن

به این پاسخ توضیح دهید.

۱۰. (الف) تندی یک الکترون با انرژی کافی برای یونیده کردن با برخورد به یک اتم

سدیم در حالت پایه چقدر است؟

(ب) تندی یک پروتون برای یونیده کردن این اتم چقدر است؟ (ج) دمای گاز مربوطه

چقدر است؟ (د) در این دما، پهن شدگی دوپلری گرمایی کسری  $(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})$  یک خط طیفی

سدیم چقدر است؟

۱۱. (الف) چه مقدار انرژی بیشتر توسط یک ستاره در  $20000 \text{ k}$  از ستاره‌ای در

$5000 \text{ k}$  گسیل می‌شود؟

(ب) رنگ قالب هر ستاره در قسمت (الف) چیست؟ قانون جابه‌جایی وین را به کار

ببرید و پاسخهایتان را بر حسب طول موج بنویسید.

۱۲. عبارت تقریبی برای قانون تابش پلانک را نتیجه بگیرید (معادله ۸-۳۵ الف).

(الف) در بسامدهای بالا  $(\frac{h\nu}{kT} \gg 1)$ ، توزیع وین

(ب) در بسامدهای پایین  $(\frac{h\nu}{kT} \ll 1)$  تقریب رایله - جین

ممکن است از تقریب  $1 + \frac{h\nu}{kT} \approx \frac{h\nu}{kT}$  وقتی  $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$  استفاده کنید. تساوی

$\frac{h\nu}{kT} = 1$  به چه طول موجی مربوط می‌شود؟

## تلسکوپها و آشکارسازها

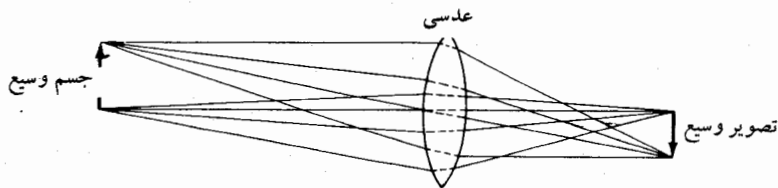
ما درباره طبیعت و خواص نور و اینکه چطور مفهوم این حقایق برای استنباط خواص فیزیکی اجرام نجومی استفاده می شود، بحث کرده ایم. به دنبال این فرآیند، در این فصل به اختصار توضیح می دهیم که چگونه ستاره شناسان نور را جمع و آشکار می کنند - اساس ستاره شناسی مشاهده ای، از جهات بسیاری، ستاره شناسی بیشتر یک علم مشاهده ای است تا یک علم تجربی (مانند فیزیک و شیمی).

### ۹-۱ تلسکوپهای نوری

برای گسترش بینایی چشم، قدرت آشکارسازی تلسکوپها تقویت شد بدون اینکه گستره طیف مرئی توسعه پیدا کند. امروزه ما می توانیم خیلی بیشتر از قسمت مرئی طیف الکترومغناطیسی را حس کنیم، اما بحث در این بخش را به تلسکوپهای نوری محدود می کنیم - آنهایی که نور جمع آوری شده را توسط چشم آشکار می کنند. به هر حال، آگاه باشید که نوری که به سطح زمین می رسد قبل از اینکه به ما برسد از بین

صافیهای زیادی عبور کرده است: از محیط بین کهکشانی و بین ستاره‌ای، جو زمین، و همیشه از تلسکوپ و سیستم آشکارساز.

مؤلفه‌های نوری، نظیر عدسیها و آینه‌ها، برای کنترل مسیرهای پرتوهای نوری استفاده می‌شوند. در یک تلسکوپ، چنین مؤلفه‌های نوری، نور را به کانون می‌آورند و معمولاً یک تصویر تشکیل می‌شود. نور با یک آینه خمیده (به کمک انعکاس) یا یک عدسی (به کمک شکست) روی کانون متمرکز می‌شود. یک عدسی پرتوها را از یک منبع نقطه‌ای به یک تصویر نقطه‌ای در کانون عدسی می‌آورد. عدسی از یک جسم به اندازه محدود به وسیله کانونی کردن پرتوها از هر نقطه جسم، یک نقطه مجزا روی تصویر تشکیل می‌دهد (شکل (۹-۱)). عموماً تصویر کوچکتر از جسم و معکوس می‌باشد. برای اجسام در فواصل دور، فاصله عدسی تا تصویر تقریباً برای همه اجسام یکسان است. این فاصله را اصطلاحاً فاصله کانونی می‌نامند. یک آینه خمیده صاف - برای مثال که سطحش منحنی یک سهمی را دنبال می‌کند - همه نور را روی کانون جمع می‌کند. این فاصله از سطح آینه تا کانون را فاصله کانونی می‌نامند.



شکل ۹-۱. تصاویر یک عدسی محدب از یک جسم گسترده تصویری می‌سازد که کوچکتر از جسم و معکوس آن است.

برای یک عدسی یا یک آینه، نسبت فاصله کانونی به قطر را نسبت  $f$  می‌نامند.

$$\text{نسبت } f = \frac{f}{d}$$

که  $f$  فاصله کانونی و  $d$  قطر است. اساساً نسبت  $f$  روشنی تصویر را می‌دهد. نسبت  $f$  کوچک، مثل  $\frac{f}{3}$ ، تصویر روشن‌تری از یک نسبت  $f$  بزرگ، نظیر  $\frac{f}{15}$  نتیجه می‌دهد. یعنی یک عدسی یا آینه  $\frac{f}{15}$  تصویر را بیش از  $\frac{f}{3}$  گسترده می‌کند و بنابراین روشنی کاهش

می‌یابد.

خاصیت دیگری که به فاصله کانونی مربوط است، اندازه خطی تصویر یک جسم گسترده می‌باشد. برای مثال، ماه که نیم درجه قوسی آسمان را در بر می‌گیرد؛ اگر تصویرش ۱۰ cm از سطح کانون عدسی را بپوشاند، در این صورت مقیاس  $0.05^\circ/\text{cm}$  یا ۲۰۰ cm به ازاء هر درجه است. برای اندازه تصویر  $s$  در کانون که مربوط به یک درجه در آسمان است  $s = 0.1745f$  می‌باشد که در آن  $f$  فاصله کانونی است؛ در این صورت  $s$  بر حسب واحد  $f$  بر درجه است؛ و معمولاً آن را مقیاس صفحه می‌نامند. یک مثال: رصدخانه کاپیلاپیک<sup>۱</sup> دانشگاه نیومکزیکو، تلسکوپ انعکاسی  $\frac{f}{13}$  با آینه‌ای به قطر ۶۰ cm دارد. فاصله کانونی آن برابر است با

$$\begin{aligned}\frac{f}{d} &= 13 \\ f &= 13 \times 60 \text{ cm} \\ &= 780 \text{ cm}\end{aligned}$$

مقیاس صفحه عبارت است از

$$\begin{aligned}s &= 0.1745 \times 780 \text{ cm} \\ &= 13/6 \text{ cm}/^\circ\end{aligned}$$

اساساً تلسکوپ وسیله‌ای است که نور را جمع می‌کند و یک تصویر روی کانون تشکیل می‌دهد. یک عدسی یا آینه، که شیئی نامیده می‌شود، نور را روی کانون جمع‌آوری می‌کند. عدسی روی کانون، چشمی نامیده می‌شود که بررسی واقعی یک تصویر را ممکن می‌سازد. دو نوع تلسکوپ اساسی که اختلافشان در شیئی‌هایشان است عبارتند از: تلسکوپ‌های شکستی (یا منکسر کننده‌ها) که از یک عدسی استفاده می‌کنند و تلسکوپ‌های انعکاسی (یا منعکس کننده‌ها) که در آن آینه بکار می‌رود.

اساساً یک تلسکوپ عبارت است از ظرفی برای جمع‌آوری فوتون‌ها. این دلیل اصلی است که ستاره‌شناسان تلسکوپ‌های بزرگ می‌خواهند. برای ظرفیت جمع‌کنندگی نور بیشترشان. قدرت جمع‌کنندگی نور در تلسکوپ مستقیماً با مربع قطرش متناسب است. مقدار نوری که یک عدسی یا آینه می‌گیرد به سطح آن بستگی دارد و سطح یک



آینه یا عدسی با قطر  $d$  برابر است با  $(\frac{\pi d^2}{4})$ . قدرت جمع‌کنندگی نور یک مقدار نسبی است نه مقدار مطلق. جمع‌کنندگی بیان می‌کند که چگونه دو وسیله با هم مقایسه می‌شوند نه اینکه چگونه چه مقدار نور جمع می‌شود. چون ضریب  $\frac{\pi}{4}$  ثابت است، تنها قطر وسایل را برای رسیدن به ارقام نسبی نیاز داریم. برای مثال، در مقایسه با چشم شما که دارای قطری حدود  $0.5\text{cm}$  است، یک تلسکوپ با شیئی  $50\text{cm}$  دارای قدرت جمع‌کنندگی نوری زیر است

$$\text{LGP} \left(\frac{50}{.5}\right)^2 = 100^2 = 10000$$

همینطور، تلسکوپ ۵ متری هیل<sup>۱</sup> در مونت پالومار<sup>۲</sup> از تلسکوپ  $0.6$  متری کایلاپیک به مقدار زیر پیش افتاده است.

$$\text{LGP} = \left(\frac{5}{.6}\right)^2 = \frac{25}{.36} = 69$$

دومین کار مهم تلسکوپ ایجاد تصویری از اشیاء نزدیک بهم در آسمان است که می‌تواند بوضوح جدا از هم دیده شوند. این توانائی را قدرت تفکیک می‌نامند و گاهی اوقات، به صورت حداقل زاویه‌ای که بایستی بین دو نقطه وجود داشته باشد تا به سهولت از هم جدا شوند، تعریف می‌شود:

$$\text{RP} = \frac{1}{\lambda} \text{ min}$$

توان تفکیک و زاویه کمینه با قطر شیئی و همچنین طول موج نور بستگی دارد. برای طول موج یکسان، توان تفکیک با قطر شیئی نسبت مستقیم دارد. حداقل زاویه قابل تفکیک هم به قطر شیئی تلسکوپ و هم به طول موج مشاهده شده بستگی دارد. عموماً

$$\theta_{\min} = \frac{2.06265\lambda}{d}$$

که در آن  $\theta_{\min}$  زاویه کمینه قابل تفکیک و یا تفکیک بر حسب ثانیه قوسی (عدد  $2.06265$  تعداد ثانیه‌های قوسی در یک رادیان است)،  $\lambda$  طول موج و  $d$  قطر شیئی بر حسب همان واحد طول است. به عنوان اندکی پیچیدگی، شکاف دایره‌ای یک تلسکوپ الگوی پراشی تولید می‌کند که تصاویر را گسترده می‌سازد. برای در نظر گرفتن این

پراش، حداقل در طول موجهای مرئی باید  $\theta_{\min}$  در  $1/22$  ضرب شود. برای مثال، تلسکوپ  $10\text{ cm}$  ( $0/1\text{ m}$ ) که با طول موج  $6 \times 10^{-7}\text{ m}$  کار می‌کند دارای یک زاویه قابل تفکیک کمینه

$$1/22\theta_{\min} = (1/22)(206/265) \left( \frac{6 \times 10^{-7}}{1} \right)$$

است. این نتیجه بدین معنی است که اگر این تلسکوپ به سوی دو ستاره که بیشتر از  $1/5$  از هم فاصله دارند نشانه رود، دو تصویر ستاره‌ای مجزا از هم را خواهید دید.

مثال بالا، توان تفکیک نظری یک تلسکوپ  $10\text{ cm}$  را می‌دهد، اما اگر به تلسکوپهای مستقر در روی زمین نور برسد، این نمایش به ندرت انجام می‌گیرد. توان تفکیکی یک تلسکوپ بزرگ نه تنها توسط نورش بلکه بوسیله جو زمین نیز محدود می‌شود. ستارگان به این دلیل چشمک می‌زنند که آشفتگی هوا سبب می‌شود جو نظیر یک عدسی ناقص تغییر شکل یافته، عمل نماید. حرکت توده‌های هوا، باعث انحناء و عدم وضوح تصاویر دیده شده از میان یک تلسکوپ می‌گردد؛ این اثری است که به عنوان دید از آن یاد می‌شود. حتی در بهترین شبها تلسکوپ  $5$  متری هیل بهتر از یک تلسکوپ  $10$  سانتی‌متری کار نمی‌کند؛ به ندرت شبی وجود دارد که تصاویر ستاره کمتر از  $1$  باشند. حد جو زمین که توان تفکیک تلسکوپهای بزرگ را تنظیم می‌کند، حالتی قوی برای قرار گرفتن یک تلسکوپ بزرگ در فضا پیش می‌آورد. در اینجا توان تفکیکی یک تلسکوپ توسط نور آن محدود می‌شود و نه جو.

سومین کار یک تلسکوپ نور مرئی درشتنمایی تصویر است. قدرت درشتنمایی، افزایش ظاهری اندازه یک شیئی در مقایسه با مشاهده مرئی چشم غیر مسلح می‌باشد برابر است با نسبت فاصله کانونی شیئی به فاصله کانونی چشمی

$$M_p = \frac{F}{f}$$

که  $F$  فاصله کانونی شیئی و  $f$  فاصله کانونی چشمی بر حسب واحدهای طول یکسان است. مثلاً، برای یک چشمی به فاصله کانونی  $5\text{ cm}$  و یک شیئی به فاصله کانونی  $780\text{ cm}$ ، قدرت درشتنمایی زیر نتیجه می‌شود

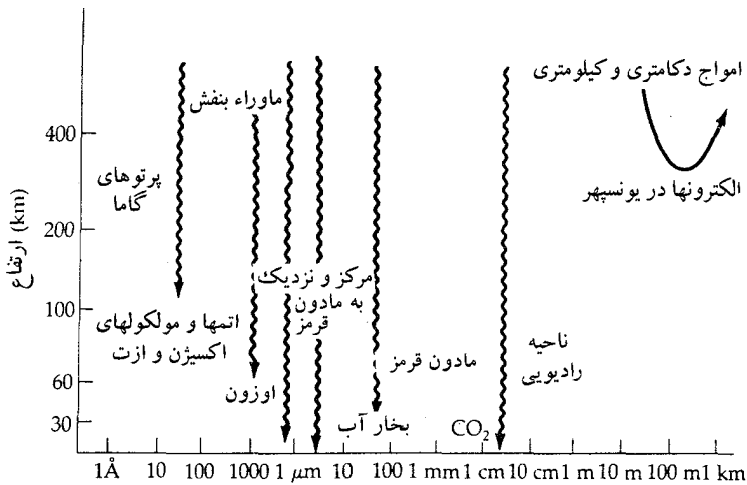
$$M_p = \frac{780}{5} = 156$$

اگر فاصله کانونی شیئی نصف شود قدرت درشتنمایی دو برابر می‌گردد. ممکن است چشمی‌هایی انتخاب کنید تا قدرت درشتنمایی بالایی را که مایلید، ایجاد کند. نکته کوچکی در استفاده از توان درشتنمایی بیش از آنچه برای واضح دیدن کوچکترین جزئیات تصویر لازم است، وجود دارد. درجه جزئیات با توان تفکیک و دید تعیین می‌شود. درشتنمایی فوق‌العاده زیاد یک تصویر تولید شده بوسیله یک تلسکوپ با توان تفکیک کم، تصویر بسیار مبهمی را بوجود می‌آورد.

## ۹-۲ ستاره‌شناسی نامرئی

چشم بشر تنها گستره امواج مرئی طیف الکترومغناطیسی را حس می‌کند. برای پوشاندن گستره کامل از پرتوهای رادیویی تا گاما آشکارسازهای گوناگونی حساس به طول موجهای مختلف لازم است. این جایی است که فن‌آوری جدید قادر است پیشرفتهای جدیدی در ستاره‌شناسی مشاهده‌ای بنماید. ستاره‌شناسی نامرئی مستلزم فن‌آوری‌هایی است که قادر است ما را به وراء محدوده‌های طول موج ستاره‌شناسی نوری ببرد.

تجربه ستاره‌شناسی نامرئی نیز به شفافیت زمین که به‌طور مؤثر قسمت‌های عمده‌ای از طیف الکترومغناطیسی به خصوص نور ماوراءبنفش، پرتوهای  $x$ ، بعضی از طول موجهای مادون قرمز و امواج رادیویی (میلیمتری) با طول موج کوتاه (۹-۲) و جدول (۸-۱)) جذب می‌کند، مربوط می‌شود. تابش مادون قرمز ابتدا توسط بخار آب که در قسمتهای پائین‌تر جو متمرکز است جذب می‌شود، پائین‌تر از ۲۰ کیلومتر. (دی‌اکسید کربن نیز مقدار کمتری را جذب می‌کند). تابشهای ماوراءبنفش و پرتو  $x$  ابتدا در ارتفاع بیش از ۱۰ کیلومتر در یون سپهر جذب می‌شوند، در سطوح بالاتر از سطحی که هواپیما و بالن می‌توانند پرواز کنند. روش مشخص برای برطرف کردن جذب جوی این است که به بالای جو برویم. این ستاره‌شناسی فضایی است که از راکت‌ها، بالن‌ها و هواپیماها، همچنین اقمار مصنوعی و فضاپیماها استفاده می‌کند. بنابراین، ستاره‌شناسی نامرئی به دو بخش طبیعی تقسیم می‌شود - آنهایی که در سطح زمین و آنهایی که باید در فضا کار انجام دهند.



شکل ۹-۲. انتقال جوی. جو زمین به نواحی محدودی از طیف الکترومغناطیسی شفاف است.

### (الف) ستاره‌شناسی رادیویی از روی زمین

ستاره‌شناسی رادیویی در سال ۱۹۳۰ میلادی زمانی که کارل جانسکی<sup>۱</sup> (۱۹۵۰-۱۹۰۵ میلادی) برای شرکت تلفن بل مشغول مطالعه تعیین منابع استاتیکی تأثیر ارتباطات رادیو - تلفنی انتقال اقیانوسی<sup>۲</sup> بود، به وجود آمد. جانسکی یکی از منابع اختلال را یک جسم سماوی تشخیص داد: راه شیری در صورت فلکی کمان<sup>۳</sup>. کشف جانسکی در ۱۹۳۲ میلادی انتشار یافت، اما تأثیر کمی بر ستاره‌شناسان آن زمان داشت. به هر حال، یک مهندس آمریکایی به نام گروت ربر<sup>۴</sup> کارل جانسکی را مطالعه کرد و تصمیم گرفت در اوقات اضافی اش درباره استاتیک رادیویی کیهانی تحقیق کند. در سال ۱۹۴۰ میلادی ربر نقشه‌هایی از جزئیات آسمان رادیویی را کشید. وی احساس کرد که ستاره‌شناسی جدیدی در شرف تکوین است و بنابراین یک دوره اختر فیزیک را در دانشگاه شیکاگو برای تعلیم بیشتر درباره نجوم انتخاب کرد و درباره کشفیات خود با ستاره‌شناسان بحث کرد - فقط تعداد کمی از آنها پذیرفتند. جنگ جهانی دوم پیشرفتهای

1. Karl Jansky.  
3. Sagittarus.

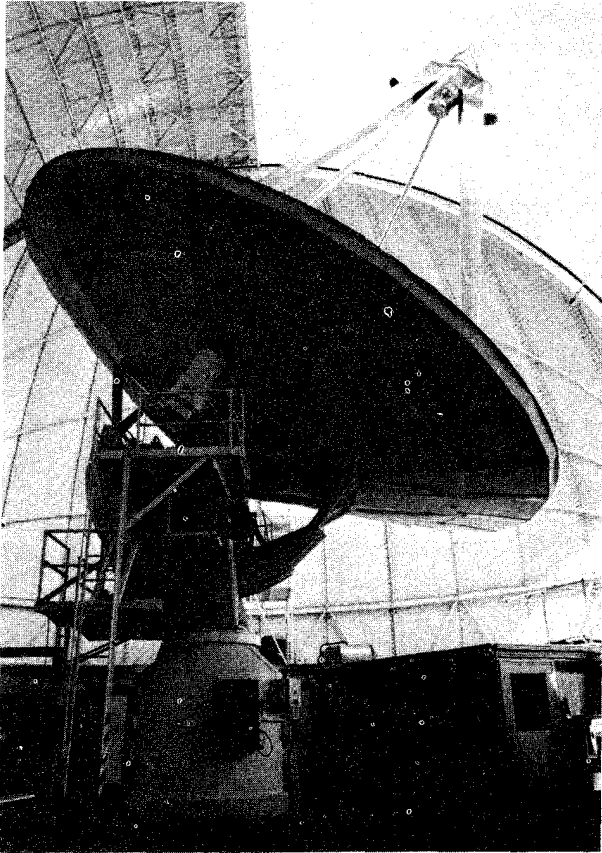
2. Shift Ocean.  
4. Groot Rober

فن آوری در زمینه کار رادیویی و راداری را توسعه داد. جان سی. هی<sup>۱</sup> انگلیسی به طور اتفاقی کشف کرد که خورشید قویاً امواج رادیویی منتشر می‌کند. بعد از جنگ، او حرفه نجومی‌اش درباره طول موجهای رادیویی را ادامه داد، گروههای دیگر در انگلستان، هلند و استرالیا نیز این کار را کردند.

نوع معمولی یک تلسکوپ رادیویی، بشقاب رادیویی است (شکل (۹-۳))، که مانند یک تلسکوپ انعکاسی عمل می‌کند. این تلسکوپ اساساً یک مخزن موج رادیویی با یک آشکار ساز (گیرنده رادیویی) در کانونش می‌باشد. این تلسکوپ بسیار شبیه یک آینه که در یک تلسکوپ انعکاسی عمل می‌کند، امواج رادیویی را منعکس کرده و متمرکز می‌سازد. گیرنده رادیویی امواج رادیویی ورودی را به یک ولتاژ تبدیل می‌کند که می‌تواند اندازه‌گیری شده و روی یک نوار مغناطیسی ثبت شود. سرانجام اندازه‌گیریها معمولاً به صورت یک نقشه پربندی یا یک نقشه شدت خطای رنگی در می‌آیند (شکل (۹-۴)).

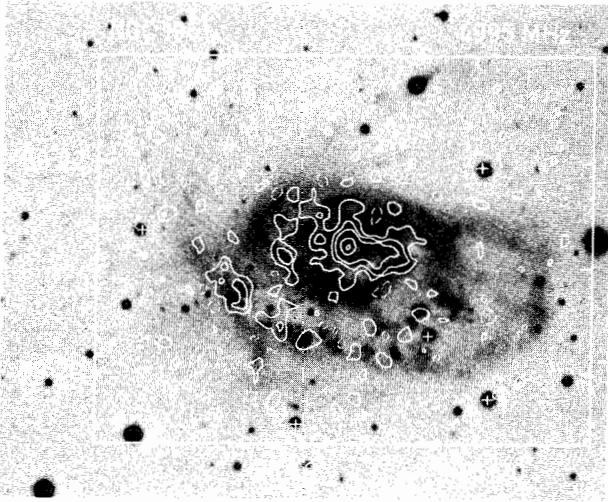
تلسکوپهای رادیویی یک کمبود عمده دارند: توان تفکیک پائین. توان تفکیک هم به اندازه شیئی و هم به طول موج تابش جمع شده بستگی دارد (به خاطر  $\alpha_{\min} \propto \frac{1}{D}$ ). امواج رادیویی خیلی بلندتر از طول موجهای نور مرئی هستند، به طور نمونه  $10^5$  مرتبه بلندتر. همچنین، اگر یک تلسکوپ نوری و یک تلسکوپ رادیویی دارای قطر یکسانی باشند، قدرت تفکیک موج رادیویی  $10^5$  برابر کمتر از نمونه نوری است. مثلاً، برای یک تلسکوپ رادیویی که دارای همان قدرت تفکیک تلسکوپ نوری ۵ متری هیل است، مستلزم این است که قطر آن  $10^5$  مرتبه بزرگتر باشد، یعنی حدود ۵۰۰ کیلومتر! بدیهی است که چنین بشقابی روی زمین نمی‌تواند ساخته شود.

ستاره‌شناسان رادیویی از فن تداخل سنجی برای ساختن تلسکوپهای رادیویی کوچک، که کار تلسکوپ بزرگ را می‌کنند، استفاده می‌کنند و بنابراین توان تفکیک حاصل می‌شود. تصور کنید دو تلسکوپ رادیویی، مثلاً در فاصله ۱۰ کیلومتری از هم قرار دارند. اگر علائم دریافت شده توسط هر دو همزمان باشند، دو دستگاه مجزا می‌توانند نظیر یک بشقاب منفرد، با قطر ۱۰ کیلومتر عمل کنند. اما، فقط برای یک



شکل ۹-۳. یک بشقاب رادیویی. نمائی از پشت تلسکوپ رادیویی با موج میلیمتری NRAO در کیت پیک. (ام. زیلیک<sup>۱</sup>)

نوار باریکی در عرض آسمان (این دو، نظیر دو قطعه کوچک در دو انتهای مقابل یک بشقاب بزرگ عمل می‌کنند.) اساس تداخل سنجی، بررسی فاز جبهه‌های موج رسیده از دو بشقاب یک تداخل سنج ساده می‌باشد. فرض کنید مستقیماً بالای سر است و امواج به هر دو تلسکوپ به‌طور هم‌فاز می‌رسند. وقتی که علامتها ترکیب شدند (با یک مخلوط‌کن الکترونیکی) یک علامت قوی حاصل می‌شود. اکنون فرض کنید که منبع اندکی به غرب بالای سر حرکت کرده است، به‌طوری که اختلاف طول مسیر تا دو



شکل ۹-۴. نقشه پربند رادیویی. گسیل ۲۱cm از اتمهای هیدروژن که توسط VLA<sup>۱</sup> ساخته شده است. پربندهای رادیویی روی یک چاپ نوری منفی بر هم نهی شده‌اند. (ای. هومل<sup>۲</sup>، دانشگاه نیومکزیکو و رصدخانه نجومی رادیویی ملی)

آنتن دقیقاً  $\frac{\lambda}{4}$  باشد. در اینصورت به اختلاف فاز  $180^\circ$  می‌رسند و تداخل کاهنده می‌کنند. بنابراین، دید دو تلسکوپ از آسمان و به صورت رشته‌ای از نوارهای روشن و تاریک تداخلی است - یک الگوی تداخل دقیقاً نظیر نوری که از بین دو شکاف عبور می‌کند، می‌باشد. جدائی زاویه‌ای قله‌ها در الگوی شدت، قدرت جداسازی تداخل سنج را برقرار می‌کند.

دو آنتن در نظر بگیرید که به فاصله  $L$  از یکدیگر قرار دارند (شکل ۹-۵)) به طوری که  $L$  مضرب صحیحی از طول موج مشاهده‌ای  $\lambda$  باشد، یعنی

$$L = n\lambda$$

که در آن  $n$  یک عدد صحیح است. اکنون فرض کنید که منبع تابش در نقطه  $P$  قرار دارد. موجها از این منبع در امتداد مسیرهای  $P_1$ ،  $P_2$ ،  $P_3$ ،  $P_4$  و  $P_5$  مقدار اضافی در امتداد  $P_1$  است، حرکت می‌کند. توجه کنید که

$$P' = L \sin \theta$$

و برای تداخل سازنده،  $P'$  باید مضرب صحیحی از طول موج باشد، بنابراین

$$L \sin \theta = m \lambda$$

یا

$$\sin \theta = \frac{m \lambda}{L}$$

که در آن  $m$  عددی صحیح است. با چرخش زمین،  $\theta$  تغییر می‌کند. فرانت‌ها به‌طور یکنواخت با زاویه‌ای که برای آن  $m = 1$  است، مجزا شده‌اند:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{L} = \frac{\lambda}{n \lambda} = \frac{1}{n}$$

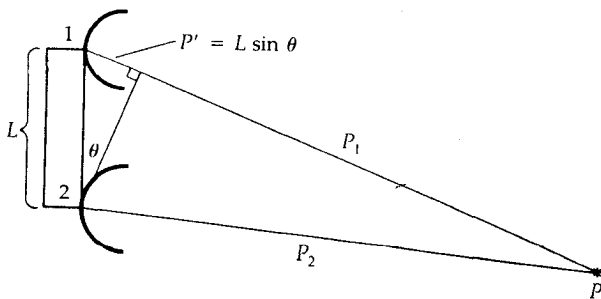
چون  $\theta_f$  کوچک است،  $\sin \theta_f = \theta_f$  و

$$\theta_f \approx \frac{1}{n} \text{ rad}$$

که  $n$  درست تعداد طول موجهای  $\lambda$  در خط پایه ( $L$ ) می‌باشد. برای  $L = 21 \text{ km}$  در طول موج قابل مشاهده  $21 \text{ cm}$ ،

$$\theta_f \approx \left(\frac{21}{21000}\right) \times 10^{-5} \approx 10^{-5} \text{ rad} \approx 2''$$

که قابل مقایسه با یک تلسکوپ نوری است. توجه کنید که فاصله فرانت‌ها اساساً توان تفکیک تداخل سنج را تعیین می‌کند.



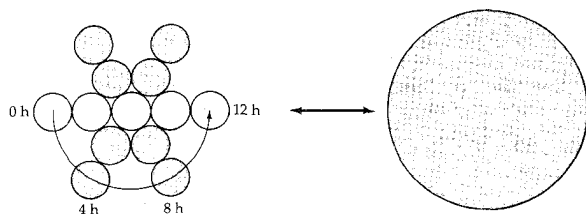
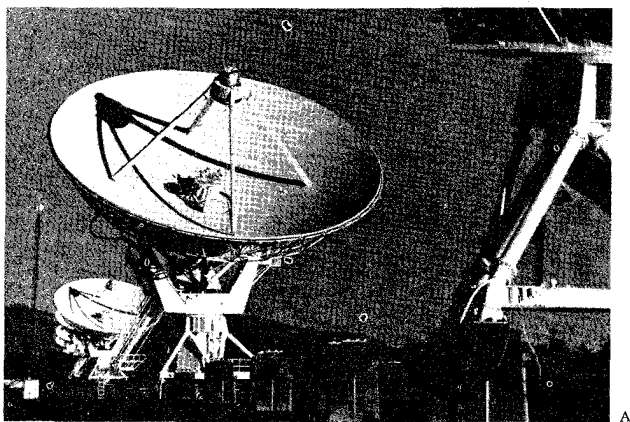
شکل ۹-۵. هندسه یک تداخل سنج.



یک تداخل سنج دو آنتنه فقط یک بخش از جدائی بین نقاط را در منبع تعیین می کند (در همان جهت خط پایه). برای نقشه برداری کامل بخشی از آسمان با توان تفکیکی یکنواخت نیاز به کار کمی است. روش کار: شیئی را نسبت به الگوی تداخل سنج بیچانید، روش موسوم به سنتز شکاف. این پیشش شیئی می تواند به طور طبیعی توسط مشاهده حرکت منبع در عرض آسمان انجام شود؛ حرکت آن جهتش را نسبت به خط پایه تداخل سنج می بیچانند. برای کمک به این فرآیند، خط پایه تداخل سنج نیز می تواند چرخانده شود یا آنتن به شکل  $\gamma$  مرتب شود [نظیر VLA در نیومکزیکو، (شکل (۹-۱۶ الف)]. چرخش زمین به طور مؤثر یک شکاف را به تفکیکی در حدود یک آنتن منفرد و قطری برابر با بزرگترین خط پایه بین بشقابها تجزیه می کند (شکل (۹-۶ ب)). سرانجام، مجموعه ای از نقشه های تداخلی توسط یک کامپیوتر برای بدست آمدن تصویر مرکبی از منبع با تفکیک بالا ترکیب می شوند. ساختن نقشه کاملی از یک منبع رادیویی با دو آنتن تداخل سنج کار کسل کننده ای است که ممکن است انجام آن چندین ماه به طول انجامد. VLA و دیگر آرایه های تداخل سنجی برای غلبه بر این مشکل طراحی شده اند. آنها اساساً از ردیف های دو آنتنه بسیاری در زوایای مختلف نسبت به یکدیگر تشکیل شده اند و روی منبع یکسانی در یک زمان عمل می کنند. یک تصویر رادیویی کامل می تواند در حدود یک روز یا کمتر ساخته شود که به قدرت لازم و مساحت پوشیده شده در آسمان بستگی دارد.

حتی تفکیک بالاتر می تواند توسط روشی موسوم به VLBI<sup>۱</sup> بدست آید. علائم VLBI دریافتی توسط آنتنهای بسیار دور (حتی قرار گرفته در قاره های مختلف) بر روی نوار مغناطیسی ثبت شده و بعداً در یک کامپیوتر ترکیب می شوند. حداکثر خط پایه برای چنین VLBI برابر با قطر کره زمین،  $L = 12000 \text{ km}$ ، می باشد و بنابراین (برای مثال بالا) قدرت تفکیک  $\theta_r = 3 \times 10^{-3}$  ثانیه قوسی در  $21 \text{ cm}$  ممکن است. در آینده، تلسکوپهای رادیویی در فضا با خطوط زمینی بزرگتری جدا شده و حتی تفکیک بهتری را نتیجه می دهند؛ در بعضی طرحها پیشنهاد می شود یک عضو از تداخل سنج در مدار زمین یا ماه با جدایی ۳۰ برابر بزرگتر از آنچه که روی زمین امکان دارد قرار گیرد. در آن صورت

تفکیک به حدود ۱۰۰ میکرو ثانیه می‌رسد و آنقدر بالا است که بتوان قرصهایی از ستارگان نزدیک مانند رده نوع خورشیدی را مشاهده کرد! به عنوان مصالحه‌ای برای این طرح بزرگ، بنیاد ملی علوم<sup>۱</sup> شروع به ساخت یک VLBA<sup>۲</sup> کرده است که نظیر VLA عمل خواهد کرد، اما فاصله آنتن‌ها بزرگتر خواهد بود (تا حدود چند صدکیلومتر). مقاصد کنونی معطوف به حدود ۱۰ آنتن ۲۵ متری که از پورتوریکو<sup>۳</sup> تا هاوایی<sup>۴</sup>



شکل ۹-۶. تداخل‌سنجی رادیویی. (الف) نمایی از یک بازوی VLA. هر آنتن دارای قطر ۲۵ متر است. (ام. زیلیک) (ب) برای سنتز شکاف، چرخش زمین یک بازوی شامل ۵ آنتن را می‌گرداند تا یک دایره کامل را در ۲۴ ساعت طی کند. (جی. برنز<sup>۵</sup>).

1. National Science Fundation.
3. Puerto - Rico.
5. J. Brans.

2. Very Large Base Line Arrey.
4. Hawaii.

پراکنده بوده و توسط ارتباطات تلفنی از یک مرکز عملیاتی کنترل می‌شوند، است. دریافت کننده توسط ساعتهای اتمی همزمان می‌شوند و نوارهای داده‌ها به یک کامپیوتر بزرگ در نیومکزیکو برای پردازش جهت تشکیل تصاویر از نمونه‌های تداخلی، انتقال می‌یابد.

### (ب) ستاره‌شناسی مادون قرمز متصل به زمین

دی‌اکسید کربن و بخار آب در جو زمین بیشتر تابش مادون قرمز ورودی را جذب می‌کنند. ستاره‌شناس مادون قرمز متصل به زمین می‌تواند تنها در چند گستره محدودی از طول موج را مشاهده کند: ۲ تا ۲۵، ۳۰ تا ۴۰ و ۳۵۰ تا ۴۵۰ میکرومتر. چنین مشاهداتی از مکانهایی در ارتفاعات در آب و هوای خشک بخوبی انجام می‌شود که در آنجا بخار آب در جو بالای تلسکوپ حداقل مقدار را دارد.

یک تلسکوپ مادون قرمز با یک تلسکوپ نوری در آشکارساز کانون تلسکوپ تفاوت دارد. به علت این که چشمان ما و فیلم عکاسی به تابش مادون قرمز به‌طور ضعیفی حساس‌اند، لذا آشکارسازهای مادون قرمز بخصوصی لازم است؛ نمونه‌های حساس مناسب برای کار ستاره‌شناسی فقط حدود ده سال است که ساخته شده‌اند. یک آشکارساز مادون قرمز معمولی یک تابش‌سنج است، یک قطعه نازک ژرمانیم (در حدود ابعاد سر یک ناخن بسیار کوچک) تا حدود ۲ درجه کلوین سرد شده است. هنگامی که تابش مادون قرمز به یک تابش‌سنج برخورد می‌کند، گرم شده و مقاومت آن در مقابل جریان الکتریکی تغییر می‌کند. چنین تغییراتی می‌تواند به‌طور الکترونیکی اندازه‌گیری شوند و مقدار تغییر دلالت بر این دارد که چه مقدار انرژی مادون قرمز را تابش‌سنج جذب می‌کند.

مشاهده مادون قرمز حداقل دو مزیت مشخص نسبت به مشاهده نوری دارد. اولاً تابش مادون قرمز کمتر توسط گرد و غبار بین ستاره‌ای محو می‌شود. ثانیاً، اجرام سماوی سرد ( $3000^{\circ}\text{K}$  و سردتر) بیشترین تابش خود را در مادون قرمز ساطع می‌کنند (همان‌طور که از قانون وین برای تابش جسم سیاه انتظار می‌رود). یک نتیجه تجربی دیگر آن است که بیشتر مشاهده مادون قرمز می‌تواند در خلال روز هنگامی که تلسکوپها توسط ستاره‌شناسان اپتیکی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، انجام شود. این

مزیت به این علت وجود دارد که نور خورشیدی بسیار کمتری در طول موجهای مادون قرمز توسط مولکولهای هوا پراکنده می شود و لذا آسمان مادون قرمز را در روز و شب تاریک باقی می گذارد (به استثناء نگاه کردن مستقیم به خورشید). مع ذالک، ستاره شناسی مادون قرمز دارای این مشکل است که یک تلسکوپ نظیر یک جسم سیاه در  $300^{\circ}\text{K}$  گسیل می دارد. بنابراین، همان طور که از قانون وین انتظار می رود، یک شار مادون قرمز فشرده ای در  $10\ \mu\text{m}$  تولید می کند. جو زمین نیز در یک شار زمینه قوی در این طول موج مشارکت می کند. روشهای ویژه ای برای جبران این شار محلی قوی توسعه یافته اند تا این که شار مادون قرمز بسیار کوچکتری از اجرام سماوی اندازه گیری شود.

### (ج) ستاره شناسی فضائی

قسمتهای طیف مادون قرمز، نور ماوراء بنفش و پرتوهای ایکس تنها در بالای جو زمین از هواپیماها، بالونها، راکت ها، اقمار مصنوعی یا فضاپیما می تواند تفکیک شوند. مثلاً بیشتر تابش مادون قرمز دور (طول موجهای حدوداً بزرگتر از ۴۰ میکرومتر) نمی توانند به زمین نفوذ کنند. با وجود این، در ارتفاعات ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر یا نظیر آن، مقدار کمتری از جو زمین در بالای سر ناظر باقی می ماند. مشاهدات مادون قرمز دور می توانند در این ارتفاعات از هواپیماها یا بالونها انجام شوند. وسیله لازم یک تلسکوپ انعکاسی مجهز به یک تابش سنج می باشد.

برای ستاره شناسی ماوراء بنفش روشهای جمع آوری و تفکیک نور مشابه با ستاره شناسی نوری است. صفحات عکاسی و لوله های تلویزیونی ویژه برای نور ماوراء بنفش بخوبی جواب می دهند و بنابراین، آشکارسازی هیچ مشکل جدی بروز نمی دهد. چون شیشه نور ماوراء بنفش را جذب می کند، لذا تلسکوپهای انعکاسی نمی توانند مورد استفاده واقع شوند، اما، متعکس کننده ها کاملاً خوب کار می کنند. ستاره شناسی ماوراء بنفش خوب، برای لایه جذب کننده جو (یون سپهر) بالاتر از ارتفاعی که بالونها یا هواپیما می تواند به آن برسد، باید انجام شود. احتمالاً، موفق ترین تلسکوپ ماوراء بنفش IUE<sup>۱</sup> بوده است که در سال ۱۹۷۸ میلادی پرتاب شده و هنوز

(اما، به زحمت) فعال است. این تلسکوپ، دارای یک تلسکوپ ۰/۴۵ متری است که با آشکارسازهایی از ۱۱۵ تا ۱۲۰ نانومتر کار می‌کنند.

برای قلمرو انرژی بالای پرتوهای ایکس، روشهای ویژه‌ای برای جمع‌آوری و کانونی کردن لازم هستند. در سالهای اخیر، در تلسکوپهای پرتو ایکس از این حقیقت استفاده می‌شود که پرتوهای ایکس اگر تحت زوایای بسیار کوچکی به سطوح معینی برخورد نمایند، تقریباً موازی با سطح منعکس‌کننده می‌توانند از آن سطوح منعکس شوند. چنین انعکاسهایی توسط یک رشته پیچیده از سطوح انعکاسی سهمی و هذلولی هم‌مرکز تصاویر معقولی ایجاد می‌کنند، که به آشکارسازهای الکترونیکی آشکار می‌شوند. احتمالاً، پرمحصول‌ترین تلسکوپ پرتو ایکس اخیر HEAO۲ است که رصدخانه انیشتین نامیده می‌شود و در سال ۱۹۷۸ میلادی پرتاب شد و تا سال ۱۹۸۱ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. تلسکوپ ۵۸ سانتی‌متری در قمر مصنوعی می‌تواند تصاویری با تفکیک بالا از منابع پرتو ایکس در گستره طول موج ۰/۳ تا ۵ نانومتر ایجاد کند.

پرتوهای گاما، به علت انرژیهای بالاترشان، حتی مشکل بیشتری را جهت مسأله آشکارسازی و کانونی کردن ایجاد می‌کنند. اساساً به علت وجود این مسائل و مشکلات (هیچ‌گونه تصاویری ساخته نمی‌شوند) تلسکوپ پرتو گاما وجود ندارد. بلورهایی که به هنگام جذب پرتوهای گاما نورانی می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس درخشش نور مرئی توسط لوله‌های فوتونی آشکار می‌شود. روشهای گوناگونی برای محدود کردن میدان دید به کار می‌روند که به طور نمونه چند درجه از آسمان را می‌پوشانند.

در حال حاضر، ایالات متحده آمریکا تلسکوپ فضائی هابل<sup>۱</sup> (توسط اتوبوس فضایی) را به فضا پرتاب کرده است. این تلسکوپ فضایی با یک آینه ۲/۴ متری، زمین را در ارتفاع حدود ۵۰۰ km دور می‌زند و عمدتاً در نواحی ماوراء‌ابن‌فش و مرئی کار می‌کند. تفکیک تلسکوپ بدون در نظر گرفتن جو فقط توسط نور آن محدود خواهد شد، چون می‌تواند توسط اتوبوس فضایی سرویس داده شود، ابزار جدیدی می‌تواند اضافه شود و جای ابزار قدیمی را بگیرد. بنابراین، تلسکوپ فضایی به عنوان یک وسیله

انعطاف پذیر می تواند مشاهدات ۱۹۸۰ میلادی و بعد از آن را تغییر دهد.

### ۹-۳ آشکار سازها و فرآیند تصویر

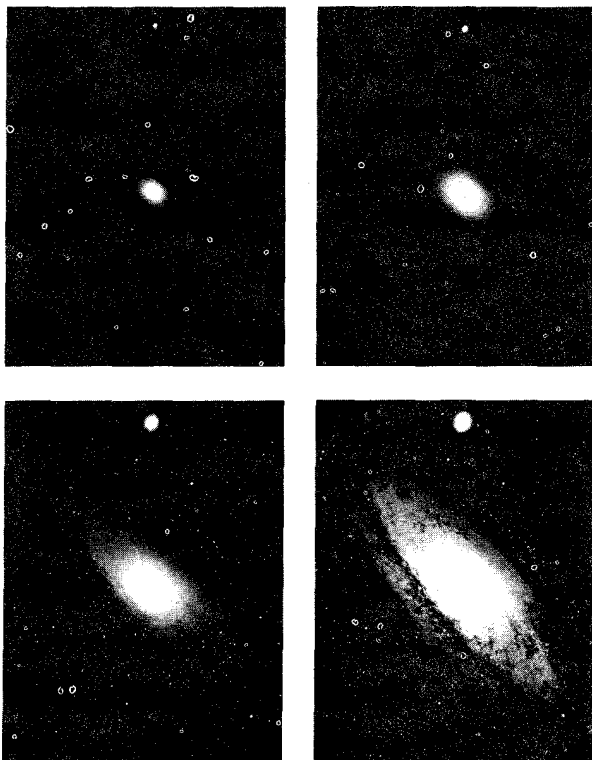
شما ممکن است مانند بسیاری از مردم تصویری خیالی از یک ستاره شناس داشته باشید که چسبیده به چشمی یک تلسکوپ در خلال یک شب صاف برای تولید عکسهای برجسته کار می کند. امروزه، اکثر ستاره شناسان مشاهدات خود را از میان تلسکوپ روی یک پرده تلویزیونی درون یک اتاق گرم انجام می دهند، و اکثر مشاهدات نوری (که گستره کمی از طیف الکترومغناطیسی را می پوشاند) دیگر شامل عکاسی مستقیم نمی شود. در اینجا تأثیر فن آوری جدید را بر ستاره شناسی به شما ارائه خواهیم داد.

#### (الف) عکاسی

اگر هدف جمع کردن مقدار زیادی اطلاعات قابل ذخیره در یک زمان کوتاه باشد هنوز روش قدیمی بهترین روش است. مواد شیمیائی ویژه عکاسی به کار برده شده توسط ستاره شناسان، معمولاً روی یک صفحه شیشه ای پوشانده می شود، که ابعاد آن بستگی به خصوصیات تلسکوپ بکار رفته دارد. (صفحه شیشه ای خمش پیدا نمی کند و می تواند به دقت اندازه گیری شود.) ماده شیمیایی می تواند نور برخوردی به آن را جمع کند و یک تصویر بسیار ضعیف از اجسام را در یک دوره طولانی از زمان - گاهی ساعات زیادی در طول چندین شب - بسازد (شکل (۹-۷)). غالباً صفحات را طوری آماده می کنند که حساسیتشان به نور افزایش یابد و در عین حال به ندرت دارای راندمانهای کوانتایی بیش از چند درصد می باشند. (بازده کوانتایی عبارت است از درصد فوتونهای برخورد کرده به آشکار ساز که آن را نسبت به فوتونهای کل فرودی فعال می کند).

اگر چه راندمان کوانتایی یک عکس نسبتاً کم است، اما سطح بزرگ آن اطلاعات را از ناحیه بزرگی از تمام میدان دید تلسکوپ جمع می کند. این تصویر می تواند بعداً به یک شکل عددی تبدیل شود که توسط کامپیوتر برای افزودن جنبه های ویژه ای از داده های

اولیه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۹-۸)). این فرآیند، فرآیند تصویرنامیده می‌شود، که یک نقش کلیدی در تمام انواع ستاره‌شناسی امروز، به ویژه ستاره‌شناسی نامرئی بازی می‌کند که تصویر فراهم شده بوسیله کامپیوتر به سرعت اطلاعات قابل ملاحظه‌ای را به مغز انسان منتقل می‌کند.



شکل ۹-۷. زمان‌های نوردهی. زمانهای طولانی نوردهی یک صفحه عکاسی (اطلاعات جزئی‌تر را آشکار می‌سازد. در اینجا زمانها ۱، ۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه می‌باشند). (رصدخانه‌های ستاره‌شناسی نوری ملی)

## (ب) لوله‌های فوتونی

طبیعت کوانتایی نور به صورت اعجاب‌انگیزی در پدیده فتوالکتریک نشان داده می‌شود. نور برخوردی به سطوح مواد بخصوصی می‌تواند جذب شده و یک الکترون جدا شود. فوتونها بایستی دارای یک انرژی حداقلی برای جدا کردن الکترونها باشند. الکترونها جدا شده می‌توانند به صورت جریانی شمارش یابند، یا می‌توانند به صورت جداگانه شمرده شوند. وسیله‌ای که این شمارش را انجام می‌دهد یک لوله فوتونی نامیده می‌شود. یک لوله فوتونی که می‌تواند یک الکترون را برای سهولت در



شکل ۸-۹. فرآیند تصویر. یک تصویر فرآیند یافته توسط کامپیوتر از عکس ۱۹۱۰ میلادی (در رصدخانه لوول گرفته شده است) ستاره دنباله دار هالی. کامپیوتر اختلافات روشنایی در دنباله ستاره را که در عکاسی اولیه آشکار نیستند افزایش می‌دهد. (رصدخانه‌های ستاره‌شناسی نوری ملی)



آشکارسازی به تعداد زیادی (تقریباً  $10^5$ ) تبدیل کند، یک تکثیرکننده فوتون نامیده می‌شود. لوله‌های فوتونی تصویر ایجاد نمی‌کنند؛ بسادگی شار فوتونها از میان صفحه کانونی یک تلسکوپ را اندازه می‌گیرند، معمولاً از میان یک شکاف کوچک که میدان دید را، مثلاً به یک ستاره منفرد یا کهکشان محدود می‌کنند. صافیها می‌توانند در مسیر نور در جلو لوله فوتون برای محدود کردن آشکارسازی به نوارهای طول موجی معینی قرار داده شوند. مواد فعال در لوله‌های فوتونی دارای رانده‌مانهای کوانتایی هستند که گاهی اوقات به بیست درصد می‌رسد، هر چند نوعاً ده درصد است. پاسخ یک تکثیرکننده فوتون بخوبی خطی است - دو برابر کردن شار به دو برابر شدن جریان منجر می‌شود. بنابراین، شدت نور می‌تواند با دقت زیادی توسط اندازه‌گیری یک جریان الکتریکی یا با شمارش آهنگ تولید فوتونهای مجزا، اندازه‌گیری شود.

یک دوربین تلویزیونی شامل یک لوله فوتونی می‌باشد که برای ایجاد تصاویر با روش کانونی کردن مغناطیسی طراحی شده است. مع‌ذالک، دوربینهای تلویزیونی تجارتي خیلی حساس نیستند، آنها نمی‌توانند تصاویر را برای زمانهای طولانی جمع کنند و از نظر پاسخ خطی نمی‌باشند. (خطی بودن مهم است، زیرا می‌خواهیم خروجی مستقیماً با تعداد فوتونهای جذب شده متناسب باشد.) ستاره‌شناسان سیستم‌های تلویزیونی را برای کاربردهای معینی اصلاح کرده‌اند - مثلاً برای تحصیل و هدایت.

### (ج) ابزار جفت شده بار

یک آشکارساز ایده‌آل، بخاطر نیاز به کاربردهای با نور کم، مطلوب ستاره‌شناسان است. این آشکارسازها دارای یک رانده‌مان کوانتایی بالا (برای استفاده خوب از چند فوتون)، توانائی برای جمع کردن، پاسخ خطی در گستره‌ای از شارهای فوتون، و توانائی برای پوشش میدان زاویه‌ای بزرگی از دید (همانگونه که یک صفحه عکاسی انجام می‌دهد) می‌باشند. پیشرفت‌های اخیر در ماکروالکترونیک حالت جامد سبب توسعه وسائل جفت شده بار (CCD)<sup>۱</sup> شده است، که ممکن است آشکارساز رویائی ستاره‌شناسان باشد. یک CCD وسیله کوچکی است، با اندازه چند تا ۱۰ میلیمتر و

ساخته شده از یک ویفر سیلیکون نازک. (از همان فن آوری ماکروالکترونیکی بکار رفته در مدارهای تجمعی استفاده می شود.) این چیپ شامل تعداد زیادی از نواحی کوچک است که هر یک عنصری از تصویر را بنام پیکسل<sup>۱</sup> می سازد. یک وسیله نمونه ممکن است شامل ۵۰۰ در ۵۰۰ پیکسل (کلاً ۲۵۰۰۰۰ عدد) مرتب شده در سطرها و ستونها باشد که می تواند به طور الکترونیکی کنترل شود. هر پیکسل می تواند، وقتی فوتونها جذب و الکترونها رها شدند، به طور مستقل یک بار را جمع کند. در این وضعیت هر پیکسل نظیر یک لوله فوتونی بسیار کوچک عمل می کند، اما یک CCD می تواند بار را در پیکسلها برای زمان طولانی جمع کند و سپس بارها را به طرف بیرون به صورت فوجی بحرکت در آورد تا الگوی فضائی شدت نور فرودی بر روی وسیله را به صورت عددی حفظ کند.

CCD ها نسبت به آشکارسازهای دیگر امتیازات زیر را دارند. اولاً، از نظر کواتتایی راندمان بسیار بالائی دارند - نزدیک به صددرصد در ناحیه قرمز طیف. این راندمان کواتتایی بالا بدین معنی است که یک تلسکوپ کوچک می تواند نظیر یک تلسکوپ بزرگ عمل کند. (این هدف اصلی توسعه یک دوربین CCD برای تلسکوپ کاپیلاپیک در دانشگاه نیومکزیکو بود.) ثانیاً، CCD ها بسیار خطی هستند و بنابراین بسادگی می توانند شدت نور را به دقت اندازه بگیرند. ثالثاً کم و بیش CCD ها آشکارکننده های سطحی هستند. و کسر خوبی از میدان دید تلسکوپ را می پوشانند (چنانکه گوئی تعدادی لوله های فوتونی کوچک به طور همزمان کار کنند، یک آشکارساز چند کاناله که اکثر نور ورودی به میان یک تلسکوپ در یک زمان معین را مورد استفاده قرار می دهد). رابعاً، تصویر به یک شکل عددی طبیعی درآمده و برای فرآیند در یک کامپیوتر آماده می شود (شکل (۹-۹)).

همراه با کامپیوترهای کوچک ارزان قیمت که قسمت کلیدی در عملیات هستند، CCD ها بهترین مثال فعلی از فن آوری می باشند که توان تلسکوپهای کوچکتر قدیمی را گسترش داده اند. آسمان زاویه حجمی بزرگی را می پوشانند، اما هر تلسکوپ تنها قسمت کوچکی از آن زاویه حجمی را در یک زمان می بیند و تعداد تلسکوپها بسیار محدودند؛ و

بسیار مورد تقاضا هستند. CCD ها قدرت تلسکوپهای کوچک را افزایش می دهند و ممکن است بخوبی مجدداً جایگاه رصدخانه کوچک را بالا ببرند. مثلاً، در توانایی برای آشکار ساختن اجرام کم نور، یک ساعت، نوردهی توسط تلسکوپ ۶۱ سانتی متری با یک CCD برابر با یکساعت نوردهی توسط یک تلسکوپ ۵۰۰ سانتی متری با یک صفحه عکاسی است.



شکل ۹-۹. یک تصویر CCD از خوشه کهکشانی در صورت فلکی تاج شمالی<sup>۱</sup> (جی. مودی<sup>۲</sup>، رصدخانه کاپیلایک، دانشگاه نیومکزیکو)

## مسائل

۱. قدرت تفکیک‌کنندگی و قدرت جمع‌آوری نوری چشم انسان را با

(الف) یک تلسکوپ ۱۰ cm

(ب) یک تلسکوپ ۴ متری

مقایسه کنید.

۲. برای چه مقاصد ستاره‌شناسی باید یک تلسکوپ با فاصله کانونی بزرگ و با نسبت بزرگ  $f$  را بکار برد.

۳. حداکثر جدائی ممکن VLA در تلسکوپ رادیویی ۴۰ کیلومتر است. قدرت تفکیک‌کنندگی آن به هنگام کار در  $1/5$  cm چقدر است؟ چرا جو زمین قدرت تفکیک‌کنندگی را محدود نمی‌کند؟

۴. انتقال جو زمین در  $3\mu$  حدود ده درصد است. ستاره‌شناسان عمق نوری  $\tau$  در طول موج  $\lambda$  را بدین صورت تعریف می‌کنند

$$I_{\tau} = I_0 \exp(-\tau)$$

که در آن  $I_0$  شدت اصلی در یک باریکه نور و  $I_{\tau}$  شدت بعد از عبور از میان ماده‌ای با عمق نوری  $\tau$  است. عمق نوری از میان جو زمین در ۳ میکرومتر چقدر است؟

۵. مقیاس ارتفاع برای بخار آب در جو زمین را حساب کنید. این اطلاعات را برای بیان این که آیا تلسکوپها در بالای موناکیا برای ستاره‌شناسی مادون قرمز بهتر از سطح دریا است به کار ببرید.

۶. کوتاهترین طول موجی که در آن VLBI به طور عادی انجام می‌شود برابر  $1/3$  سانتی‌متر است.

(الف) زاویه کمینه قابل تفکیک یک تداخل سنج که در  $1/3$  سانتی‌متر عمل می‌کند، در صورتی که خط پایه حدود قطر زمین باشد چقدر است؟

(ب) آزمایشهای VLBI هم اکنون در طول موج ۳ میلی‌متر انجام می‌شوند. قدرت تفکیک در این طول موج در مورد خط پایه قطر زمین چقدر است؟

۷. یکی از نقائص یک تداخل سنج آن است که به اجرام با اندازه‌های زاویه‌ای بزرگتر از زاویه قابل تفکیک کمینه از کوتاهترین خط پایه، حساس نمی‌باشد (اساساً به این

علت است که قسمت‌های مختلف منبع به طور مخرب با یکدیگر تداخل می‌کنند).  
 شار یک منبع به قطر زاویه‌ای  $\theta$  که توسط یک تداخل‌سنج با خط پایه  $L$  (بر حسب  
 کیلومتر) اندازه‌گیری شده است تقریباً برابر است با

$$F_{\text{واپسی}} \approx F_{\text{متوسط}} e^{-\theta^2 \left(\frac{LV}{\lambda}\right)^2}$$

که در آن  $\lambda$  بر حسب سانتی‌متر است. برای طول موج ۶ سانتی‌متر، بزرگترین اندازه  
 زاویه‌ای یک منبع که با تداخل‌سنج با خط پایه کمینه ۱۰۰۰ کیلومتر می‌تواند مشاهده  
 شود، چقدر است؟ در صورتی که کمترین شار قابل آشکار  $F_{\text{واپسی}} \approx 1/10$  باشد.  
 ویژگیهای منابعی که شخص نخواهد برای مشاهده از تداخل‌سنج استفاده کند، چه  
 خواهد بود؟

۸. (الف) تفکیک تلسکوپ فضایی (قطر شیئی ۲/۴ متر) در طول موجهای زیر چقدر  
 است؟

$$(I) \lambda = 500 \text{ nm (مرئی)}$$

$$(II) \lambda = 200 \text{ nm (ماوراءبنفش)}$$

$$(III) \lambda = 2000 \text{ nm (مادون قرمز)}$$

(ب) با در نظر گرفتن جوابتان در مورد (الف) چرا اصلاً برای مشاهده در مادون  
 قرمز، تلسکوپ فضایی ترجیح داده می‌شود.

۹. مشخصه‌های مشاهده‌ای یک شیئی که با تلسکوپ فضایی بهتر از یک تلسکوپ نوری  
 بسیار بزرگ بر روی زمین مطالعه می‌شود، چیست؟ مناسبترین مشخصه‌های یک  
 تلسکوپ نوری بسیار بزرگ نصب شده زمینی بزرگ چیست؟

۱۰. یکی از امتیازات عمده صفحات عکاسی یا CCD ها قدرت جمع‌آوری آنهاست،  
 یعنی جمع کردن نور در یک زمان بسیار طولانی‌تر از آنچه که چشم انسان می‌تواند  
 عمل کند. چشم انسان به‌طور مؤثر حدود ۰/۲ ثانیه جمع‌آوری می‌کند (این دلیلی  
 است که چرا ما کادراهای مجزای فیلمهای سینمایی را تشخیص نمی‌دهیم). شار کم  
 نورترین شیئی که بتواند تفکیک شود با  $\frac{1}{\sqrt{t}}$  متناسب است، که در آن  $t$  زمان جمع‌آوری  
 است. (ریشه دوم به این علت وجود دارد که شار آسمان زمینه در مقابل آنچه که شیئی  
 بایستی تنظیم شده باشد نیز با زمان جمع‌آوری افزایش می‌یابد). چه مقدار یک شیئی

می‌تواند کم نورتر باشد یا با استفاده از مدت یک ساعت جمع‌آوری توسط تلسکوپ ۵ متری پالومار نسبت به آنچه که با چشم غیر مسلح می‌تواند دیده شود، آشکار شود؟

۱۱. یکی از عمده‌ترین مشکلات در ستاره‌شناسی پرتوگاما قدرت تفکیک ناچیز است - زوایای کمتر از حدود ۲ درجه حتی برای بهترین وسایل قابل تفکیک نیست. مع‌ذالک، تصاویر پرتوگاما از کهکشان خودی با استفاده از داده‌های قمر مصنوعی تولید شده‌اند. این مشکل را در تفسیر این تصاویر در نور با قدرت تفکیک کنندگی کم مورد بحث قرار دهید.

## خورشید، یک ستاره مدل

خورشید، نزدیک‌ترین ستاره به ما است. خواص جالب و رخداد‌های لایه‌های سطحی خورشید به آسانی مشاهده و با تفصیل مطالعه شده‌اند. متأسفانه نمونه‌هایی که برای فهم پدیده‌های خورشیدی درست شده‌اند، نتوانسته‌اند همگام با این داده‌های جزئی و دقیق پیش بروند. از آنجایی که خورشید یکه ستاره نمونه است و چون تنها ستاره‌ای است که از زمین به صورت یک نقطه نورانی دیده نمی‌شود، این بحث می‌تواند به عنوان پایه و اساسی برای بررسی دیگر ستارگان مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱-۱۰ ساختار خورشید

خورشید در فاصله ۱ AU از زمین، انرژی لازم برای زندگی را فراهم می‌سازد. این کره غول‌پیکر گازی با شعاع  $(\approx 109R_{\oplus})$  و  $6/96 \times 10^6 \text{ km}$  و جرم  $(\approx 330M_{\oplus})$  دارای تابندگی یا آهنگ تابش انرژی معادل  $3/86 \times 10^{26} \text{ W}$  است. چگالی متوسط خورشید که عمدتاً ترکیبی از گازهای نئیدروژن و هلیوم می‌باشد

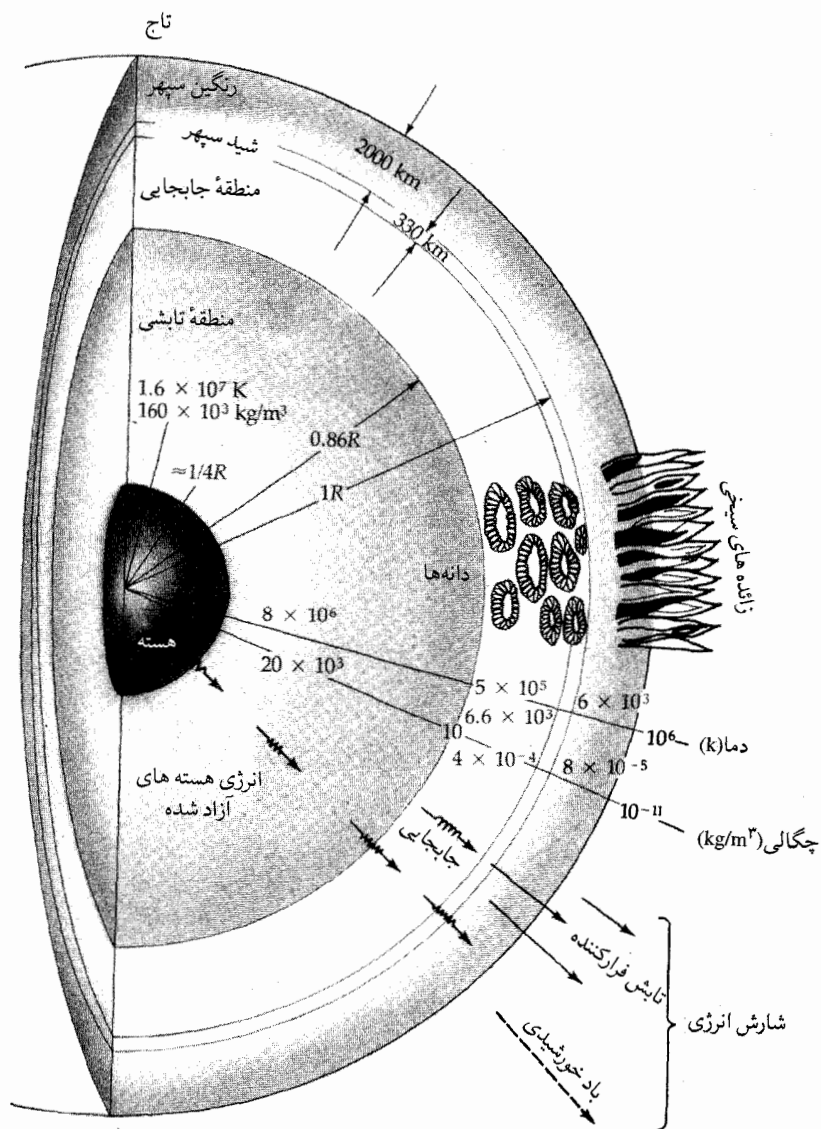
$140 \text{ kg/m}^3$  است.

فشار و همچنین دما در داخل خورشید بایستی آنقدر زیاد باشد تا بتواند وزن خورشید را تحمل کند. پیکره خورشید گازی و داغ است؛ در حقیقت گازها (عمدتاً هلیوم و یدروژن) تقریباً کاملاً یونیزه‌اند (یک پلاسما). دما، فشار و چگالی از سطح به مرکز خورشید در جایی که انرژی بوسیله واکنشهای هسته‌ای حرارت‌زا آزاد می‌شوند، افزایش می‌یابند. وقتی در هسته خورشید یدروژن به هلیوم تبدیل می‌شود، مقادیر زیادی از انرژی به صورت فوتون و حرکات گرمایی آزاد می‌شوند (شکل (۱۰-۱)). فوتون‌ها از میان منطقه بزرگ تابشی به طرف خارج پخش می‌شوند، تا این که به منطقه جابجایی بیرونی جائی که بیشتر انتقال انرژی توسط حرکات جوشان گاز صورت می‌گیرد، برسند. سطح قابل رؤیت خورشید (شید سپهر) در بالای لایه جابه‌جایی، محلی که جو پیچیده و وسیع خورشیدی آغاز می‌شود، رخ می‌دهد.

پایه جو خورشیدی شید سپهر است (شکل (۱۰-۱))؛ یک لایه نازک گاز که بیشترین عمقی که می‌توانیم آن را مشاهده کنیم و تابش قابل رؤیت از آن منتشر می‌شود. لکه‌های خورشیدی بر روی شید سپهر ظاهر می‌شوند. لایه خارجی بعدی رنگین سپهر است؛ از بالای رنگین سپهر زبانه‌های بسیار زیبا و زائده‌های سیخی تیز پدیدار می‌شوند. در آن سوی این ناحیه، تاج رقیق وسیعی با نوری لطیف قرار گرفته است که در بادهای خورشیدی جاری به سمت خارج و در محیط بین سیاره‌ای در هم می‌شود. از تمام خورشید فقط جو آن مستقیماً قابل مشاهده است، ناحیه‌ای که از نظر فعالیت بسیار غنی است.

اگر چه مستقیماً نمی‌توانیم داخل خورشید را ببینیم، ولی دو دسته مشاهدات وجود دارند که به ما اجازه می‌دهند حدسهای هوشیارانه‌ای دربارهٔ اعماق خورشید بزنیم. یکی مشاهدهٔ شار نوترینوی خورشیدی است. در بخش (۱۶-۵۱) خواهید دید که شار نوترینوی مشاهده شده فقط در حدود  $\frac{1}{3}$  مقداری است که بوسیله مدل‌های نظری پیش‌بینی می‌شود. این کمبود در شار نوترینو، فیزیکدانان و اختر فیزیکدانان را به پیشنهاد و تصحیحاتی در مورد توصیف مدل خورشیدی و نظریات جدیدی راجع به خصوصیات نوترینو می‌خواند.





شکل ۱۰-۱. ساختار خورشید. این نمونه، نواحی اصلی خورشید و مقادیر پارامترهای فیزیکی مهم را نشان می‌دهد. دانه‌ها و زبانه‌ها بدون رعایت مقیاس رسم شده‌اند.

وسیله دیگر، تجزیه و تحلیل حرکات گازهای سطح خورشید است که به صورت تپهایی از اطراف خورشید ساطع می‌شوند! این نوسانات همانند تغییرات تناوبی در انتقالات دوپلری خطوط طیفی در شید سپهر و رنگین سپهر مشاهده شده‌اند. این نوسانات زمان تناوبی بین ۵ دقیقه الی ۲ ساعت و ۴۰ دقیقه دارند. اولین چیزی که به طرق مختلف کشف شده بود و مهم‌ترین آنها هم هست، نوسانهای ۵ دقیقه‌ای است که به صورت حرکات عمودی سطوح خورشید، بسیار شبیه به قایقهای کوچک بر روی امواج اقیانوس، مشاهده می‌شوند. دامنه قله این نوسانات با سرعت  $0.4 \text{ km/s}$  حرکت می‌کند. این نوسانات به عنوان صداهای امواج از درون خورشید تفسیر شده‌اند، و مشخصات آن بعضی از خواص قسمتهای داخلی خورشید را می‌دهد. بنابراین، می‌توانیم بگوئیم که خورشید همانند یک زنگ بصدای در می‌آید یا به عبارت دقیق‌تر، جستجو در داخل خورشید، مانند جستجو بروشی است که با استفاده از امواج لرزشی برای مطالعه داخل زمین استفاده می‌کنیم. این شاخه از تحقیقات به نام زلزله شناختی خورشیدی<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. امواج صوتی درون خورشید همانند نوسانات روی سطح تخت قابل رؤیتند. الگو و دوره تناوب آنها سرنخهایی برای شناخت درون خورشید می‌باشند.

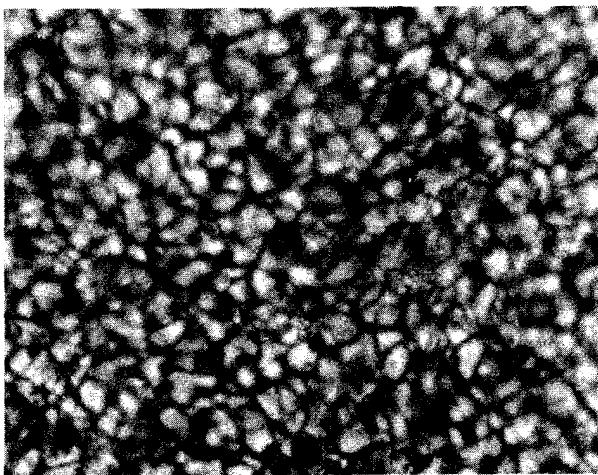
از مطالعات زلزله شناختی خورشیدی نتیجه‌هایی درباره جزئیات ساختار لایه جابه‌جائی، کدری گازها و همینطور فراوانی اتمی نسبی، مخصوصاً هلیوم و دینامیک داخلی خورشید بدست آمده است. علائمی وجود دارند که چرخش درونی بسیار سریعتر از سطحی است. هنوز مطالب ناشناخته بسیاری درباره منشأ امواج صوتی وجود دارد.

بقیه این فصل توضیح کاملی از پدیده‌های قابل مشاهده را به طور مستقیم‌تر در لایه‌های خورشیدمان ارائه می‌دهد.

## ۱۰-۲ شید سپهر

(الف) دانه دار شدن

ما از پای شید سپهر جایی که به عنوان لایه جو خورشیدی تعریف می شود و گازها نسبت به نور مرئی کدر می شوند عمیق تر را نمی توانیم بنگریم. در اینجا (شکل (۱۰-۲)) یک الگوی کوچک سرهم بندی شده (به قطر متوسط حدود ۷۰۰km)، دانه های گذرا (با عمر متوسط ۵ تا دهها دقیقه) را مشاهده می کنیم: شکل گیریهای روشن نامنظم که بوسیله رگه های تاریک احاطه شده اند.



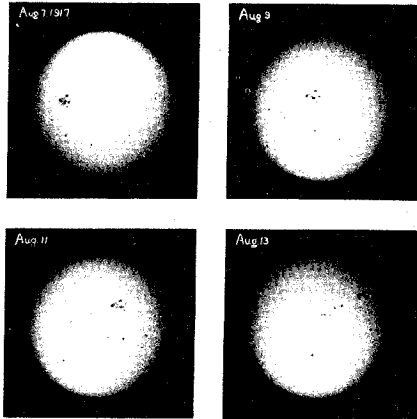
شکل ۱۰-۲. دانه دار شدن شید سپهری. مساحتی روشن در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر عرض دارند. دایره تاریک، یک لکه خورشیدی کوچک است. (رصدخانه های ستاره شناسی نوری ملی)

این دانه دار شدن خورشیدی لایه بالایی ناحیه جابه جایی خورشید است، لایه ای گازی به ضخامت حدود  $0.2R_{\odot}$  که درست زیر پایه شید سپهر قرار می گیرد. در این منطقه انرژی گرمایی توسط جابه جایی منتقل می شود؛ توده های گرم گاز (سلولهای جابه جایی) بالا می روند، و به صورت دانه های روشن ظاهر می شوند و انرژی شان را در شید سپهر تخلیه می کنند؛ گازهای سردتر پائین می آیند. نتیجه انتقال انرژی سبب رساندن حرکتی از مرتبه  $0.1$  کیلومتر بر ثانیه به لایه های پائین تر شید

سپهر می شود.

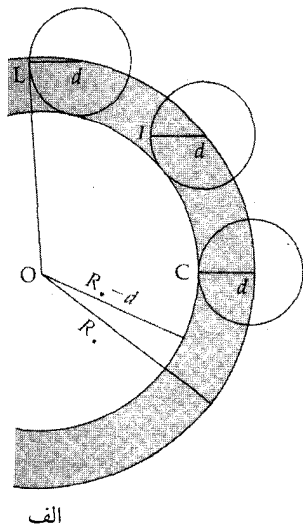
(ب) دماهای شید سپهری

طیف پیوستار سراسر قرص خورشیدی یک دمای مؤثر استفان - بولتزمن (جدول (۴-۸))  $5800\text{K}$  را برای شید سپهر تعریف می کند، اما دما در شید سپهر چگونه تغییر می کند؟ یک راه برای پیدا کردن جواب این سؤال، از هر عکس نور سفید خورشید آشکار است (شکل (۳-۱۰))، می بینیم که روشنایی قرص خورشیدی از مرکز به طرف لبه کم می شود - این حالت را تاریک شدن لبه می نامند.

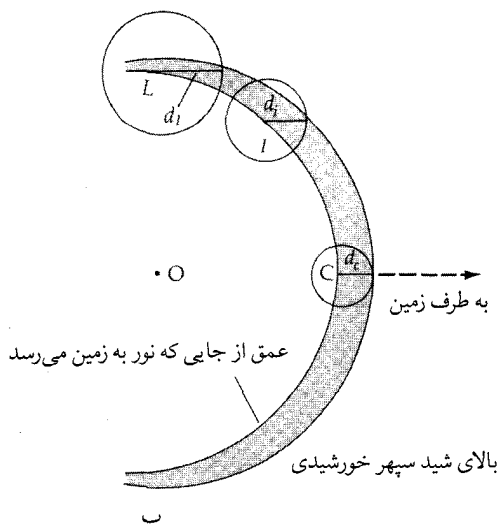


شکل ۳-۱۰. شید سپهر خورشیدی. این عکسها تاریک شدن لبه و چرخش خورشیدی را در یک دروه تناوب هفت روزه نشان می دهند. (رصدخانه یرکز<sup>۱</sup>).

علت تاریک شدن لبه این است که وقتی مستقیماً به مرکز قرص نگاه می کنیم، لایه های گاز عمیق تر و گرم تر را می بینیم، و وقتی نزدیک لبه را نگاه می کنیم، لایه های سردتر را می بینیم (شکل (۴-۱۰)). فرض کنید که بتوانیم تنها تا عمق ثابت  $d$  از درون جو خورشید را ببینیم. به علت کم شدن دما از پائین به بالای شید سپهر، لبه تاریک می شود و بر طبق قانون استفان - بولتزمن (فصل ۸)، گاز سرد انرژی کمتری از گاز داغ تابش می کند. بالای شید سپهر یا پائین رنگین سپهر، به صورت عنوان ارتفاع صفر تعریف



الف



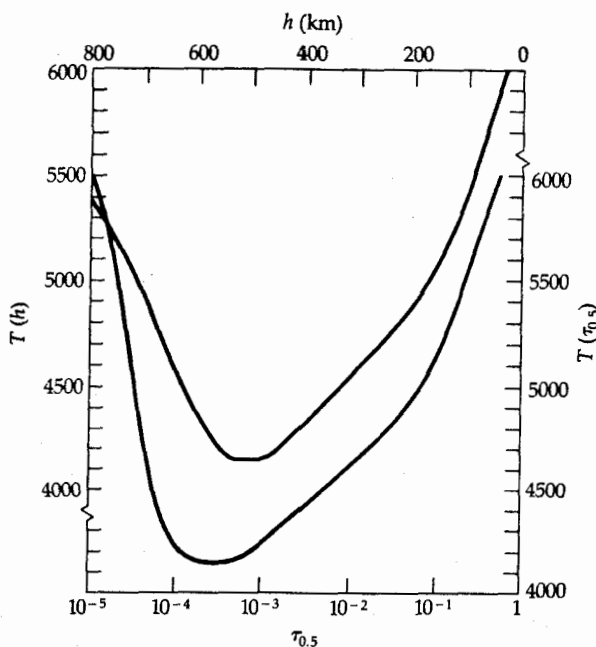
ب

**شکل ۱۰-۴.** هندسه برای تاریک شدن لبه. مرکز قرص با C، لبه بوسیله L و موقعیت میانی توسط I نمایش داده شده است. (الف) تمام دایره‌ها شعاع  $d$  یکسانی دارند، اما خط دید در ارتفاع بالاتری در جو از مرکز خاتمه می‌یابد. (ب) چگالی زیاد گاز در پائین جو بسیار کدرتر از گاز رقیق در ارتفاعات است؛ در اینجا هر دایره به همان عمق نوری مربوط می‌شود.

می‌شود. از میان شید سپهر به سمت بیرون (شکل (۱۰-۵)) دما با سرعت پائین می‌آید، و سپس مجدداً در حوالی ۵۰۰ کیلومتری داخل رنگین سپهر شروع به بالا رفتن می‌کند، تا این که به دماهای بسیار بالا در تاج می‌رسد.

در اینجا ممکن است تناقض آشکاری را تشخیص داده باشید: با وجودی که دما در منطقه رنگین سپهر با سرعت بالا می‌رود، پس چگونه سطح بالایی خورشید تاریک‌تر دیده می‌شود؟ جواب به این سؤال مستلزم درک مفاهیم کدوری و عمق نوری است. بسادگی مشخص است که رنگین سپهر تقریباً نسبت به شید سپهر از نظر نوری شفاف‌تر است. از این رو، با وجود ۳۰۰ کیلومتر قسمت بیرونی از شعاع  $700/000$  کیلومتری خورشید، خورشید در سطح شید سپهر تقریباً تمام شده بنظر می‌رسد.

خط دید ما در جو خورشیدی فقط تا جایی ادامه می‌یابد که تابش بتواند بدون مانعی فرار کند. (تا جایی که عمق نوری کوچک است.) درون این ناحیه تابش خورشیدی به‌طور



شکل ۱۰-۵. ساختار دمای شید سپهر و رنگین سپهر.

ثابت جذب شده و دوباره توسط اتمها و یونها منتشر می شود (و بنابراین پراکنده می شود). از کدری  $k_\lambda$  (بر حسب  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) گاز برای مشخص کردن این جذب در یک طول موج معین صحبت می کنیم. آسانترین راه درک کدری بررسی اتفاقی است که بهنگام برخورد تابش با شار  $F_\lambda$  با یک نوار گاز به ضخامت  $dx$  صورت می گیرد. فرض کنید این گاز با چگالی جرمی  $\rho$  (بر حسب  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) آن تعریف شود. قسمتی از این شار توسط نوار جذب می شود و بنابراین

$$dF_\lambda = -K_\lambda \rho F_\lambda dx \quad (1-10)$$

برای یک محیط یکنواخت، از معادله (۱-۱۰) انتگرال گیری می کنیم، نتیجه می شود:

$$F_\lambda(x) = F_\lambda(0) \exp(-k_\lambda \rho x) \quad (2-10)$$

بنابراین، شار با عمق نفوذ به صورت نمائی کاهش می یابد. برای راحتی ستاره شناسان

اندازه دیگری از این جذب را بوسیله عمق نوری،  $Z_{\lambda}$ ، مشخص می کنند به طوری که:

$$d\tau_{\lambda} = k_{\lambda} \rho dx \quad (3-10)$$

توجه کنید که  $\tau_{\lambda}$  بدون بعد است و معادله (۲-۱۰) به صورت زیر در می آید

$$F_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = F_{\lambda}(0) \exp(-\tau_{\lambda}) \quad (4-10)$$

برای  $\lambda < 1$   $K_{\lambda}$  شار ثابت است، بنابراین گفته می شود که گاز در این طول موج از نظر نوری رقیق است (شفاف). بطور کلی، گازی که از نظر نوری غلیظ (کدر) باشد دارای عمق نوری بسیار بزرگتر از یک می باشد؛ پایه شید سپهر به این حالت مربوط می شود. تاریک شدن لبه از کدری شید سپهر نتیجه می شود (شکل (۱۰-۴ب)) و  $K_{\lambda}$  نیز نسبتاً در رنگین سپهر پائین است.

### (ج) جذب پیوسته $\bar{H}$

شید سپهر یک طیف پیوسته جسم سیاه گسیل می دارد، لذا بایستی در طول موجهای مرئی کدر باشد، اما چگالیها در اینجا بسیار کمتر از مقداری است که گاز برای کدر بودن و تولید تابش پیوسته جسم سیاه لازم دارد. در این صورت تابش طیف پیوسته شید سپهر از کجا ناشی می شود؟

عامل اصلی در کدری پیوسته  $\bar{H}$  است، یون هیدروژن منفی. این یون به علت این که تنها الکترون اتم ئیدروژن خنثی نمی تواند به طور کامل پروتون مثبت را بپوشاند، بوجود می آید. از این رو، یک الکترون دیگر می تواند به طور ضعیف به اتم پیوند پیدا کند؛ پتانسیل یونیدگی فقط  $0.75\text{eV}$  است (که در مورد ئیدروژن عادی  $13.54\text{eV}$  می باشد). جذب توسط واکنش جداسازی  $\bar{H} \rightarrow H + e^{-}$  بوجود می آید، و هنگامی که یک الکترون توسط واکنش  $H + e^{-} \rightarrow \bar{H}$  به یک اتم ئیدروژن خنثی ملحق شود، گسیل صورت می گیرد. تابش پیوسته خورشیدی در نواحی مادون قرمز و نوری توسط واکنشهایی بوجود می آید که این واکنشها به علت چگالیهای نسبتاً زیاد الکترون و ئیدروژن در شید سپهر افزایش می یابند.

## (د) طیف جذبی فرانهور

خطوط طیفی

در سال ۱۸۱۴ میلادی یک فیزیکدان آلمانی بنام جوزف وان فرانهور<sup>۱</sup> (۱۸۲۶-۱۷۸۷ میلادی) اولین نمودار توصیفی خطوط جذبی دیده شده بر روی طیف پیوسته شید سپهر را که به طیف جذبی فرانهور موسوم است، تنظیم کرد. وی بدون شناخت و آگاهی از هویت صحیح این اشکال قوی‌ترین خطوط (شروع از قرمز) را با حروف بزرگ و خطوط ضعیف‌تر را با حروف کوچکتر مشخص کرد. (برای تعریف قدرت یک خط طیفی به بخش (۸-۴) مراجعه کنید.) امروزه ما هنوز از حرف D برای مشخص کردن خطوط دوگانه تجزیه شده سدیم و از خطوط b برای منیزیم و خطوط H و K برای CaII استفاده می‌کنیم. مشخصات اولین خط شامل رشته بالمر نیدروژن و خطوط جذب سدیم، کلسیم و منیزیم بودند.

تعداد بسیار زیادتری از خطوط طیفی خورشید، حاصل بررسی و طیف‌نمایی‌های راکت و ماهواره‌ای هستند. در حال حاضر، می‌توانیم قسمتی از طیف ماوراءبنفش خورشید را که معمولاً توسط جو زمین پوشانده می‌شود، مطالعه کنیم. طیف خط جذبی فرانهور در طول موجهای کوتاه تا حدود ۱۶۵nm ادامه می‌یابد. در طول موجهای کوتاه‌تر از نزدیک به ماوراءبنفش (کوچکتر از ۱۶۵nm)، قسمت غالب طیف خورشیدی توسط خطوط نشری تولید شده در رنگین سپهر و تاج حاصل می‌شود (بخشهای (۱۰-۳الف) و (۱۰-۴ج)).

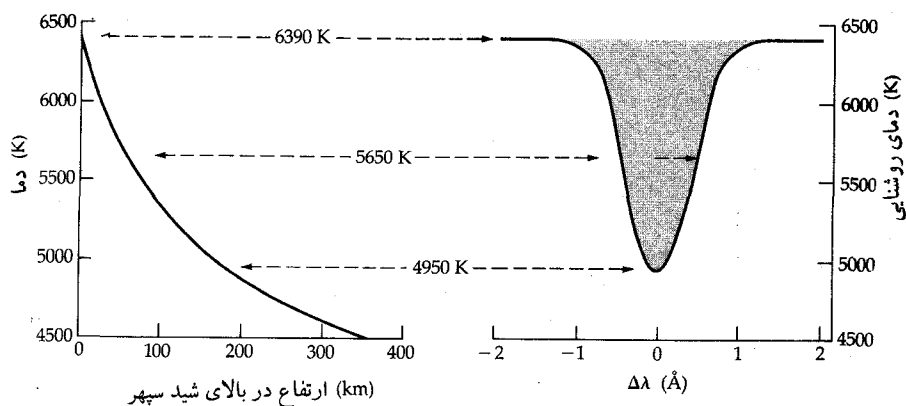
چون طیف پیوسته خورشید از یک لایه گاز رقیق یونهای H ناشی می‌شود، خطوط جذبی فرانهور همانند آنچه که در طیف پیوسته صورت می‌گیرد، در سطح جوی خورشید تشکیل می‌شوند. خطوط ضعیف‌تر از قسمت‌های پائین‌تر شید سپهر سرچشمه می‌گیرند و خطوط قوی‌تر عمدتاً در مناطق بالایی شیدسپهر شکل می‌گیرند؛ در حقیقت، قوی‌ترین خطوط (خطوط بالمر و خطوط K و H مربوط به CaII) ابتداءً در قسمت‌های پائینی رنگین سپهر تشکیل می‌شوند.

کدری برای بیشتر - طول موجها در رنگین سپهر کم است. بهر حال، در خطوط قوی،



کدوری حتی در ارتفاعات قابل ملاحظه جو خورشیدی به مقدار زیادی بالا می‌رود. دلایل آن شامل فراوانی عنصر، تعداد اتمها در سطح پائین‌تر گذار جهت تولید خط (که به نوبه خود به دما در معادله بولتزمن بستگی دارد؛ بخش (۸-۴)) و احتمال گذار (پارامتر ذاتی اتم که احتمال این که اتم یک گذار به خصوص را انجام دهد، معین می‌کند) می‌شود. عمق شکل‌گیری از خطی به خط دیگر و نیز در درون خط داده شده، متفاوت است. بنابراین، خطوط جذبی فرانوفر وسیله‌ی قدرتمندی را برای مطالعه دقیق ارتفاعات مختلف جو خورشید در اختیار ما قرار می‌دهد (شکل (۱۰-۶)).

طیف‌های با قدرت تفکیک بالا ساختار ریز بسیاری از خطوط فرانوفر را آشکار کرده‌اند. این نوسانات طول موج، انتقالات دوپلری هستند، که از حرکت‌های عمودی حدود  $0.4 \text{ km/s}$  در ساختارهایی با مقیاس کوچک (به قطر  $1000$  کیلومتر) در جو وجود می‌آیند. به نظر می‌رسد این نوسانات توسط حرکات گازی القاء شده توسط دانه‌ها در پائین و ادامه آن به بالا در داخل رنگین سپهر تولید می‌شوند، به علاوه، حرکت‌های افقی موازی با سطح خورشید در محدوده همین سرعتها نیز موجود است. این حرکتها در ساختارهای بزرگتر (به عرض  $30000$  کیلومتر) بوجود می‌آیند که ابر دانه‌ها نامیده می‌شوند. گاز به کندی از مرکز یک ابر دانه به کناره‌های آن جریان می‌یابد. ابر دانه‌ها



شکل ۱۰-۶. عمق شید سپهری و نیمرخ‌های خط. قسمت‌های مختلف یک خط جذبی در ارتفاعات مختلف تشکیل می‌شود، مرکز خط از سردترین و بالاترین قسمت شروع می‌شود. (بعد از آر. دبل‌یو. نویز)

به ساختارهای بالاتر رنگین سپهر مربوط می شوند، گرچه معمولاً در زیر منطقه دانه سازی بوجود می آیند. جریان گازها خطوط میدانهای مغناطیسی را به کناره های آنها متصل می سازد و بنابراین میدانهای مغناطیسی جایگزیده تر و متراکم تر می شوند. همانگونه که خواهید دید، فعالیت خورشیدی عموماً با میدانهای مغناطیسی محلی قوی، ارتباط دارد.

### فراوانیهای عنصری

با استفاده از نظریه های مشخص شده در بخش ۸ می توان خطوط فرانهورفر را تجزیه و تحلیل کرد، و خواص شیدسپهر را بیان نمود. اولین یافته ها، دماها و فشارهای مشخصه اند و سپس شدتهای نسبی خطوط (بخش ۸-۴)) ترکیب شیمیایی را برابمان مشخص می کند (جدول (۱۰-۱)). هیدروژن بیشترین فراوانی عنصری را داراست و دومین عنصر هلیوم است، و بقیه عناصر سنگین تر در حدود ۲٪ کل جرم خورشید را شامل می شوند.

جدول ۱۰-۱. فراوانیهای عناصر موجود در جو خورشید نسبت به هیدروژن از نظر عددی.

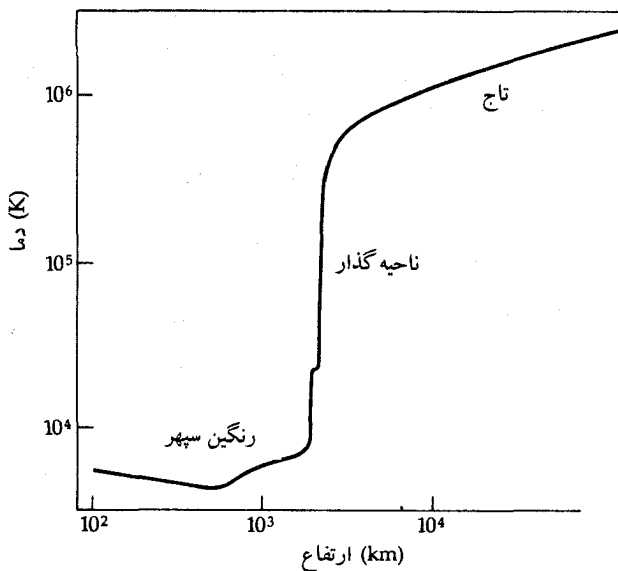
H	1/000/000
He	63/000
C	420
N	87
O	690
Ne	37
Na	1.7
Mg	40
Al	3
Si	45
P	0.27
S	16
K	0.11
Ca	2.1
Fe	32

رنگین سپهر خورشید تا ۱۰۰۰۰ کیلومتری بالای شیدسپهر ادامه دارد، و چگالی گاز در آن خیلی کمتر از شیدسپهر است. این لایه نازک که به رنگ قرمز است - نتیجه گسیل بالمر ( $H\alpha$ ) ئیدروژن می باشد - در هنگام کسوف کامل خورشیدی قابل رؤیت است.

### الف - طیف رنگین سپهر

طیف رنگین سپهر کاملاً بوسیله طیف شید سپهری پوشانده شده است، به جز هنگامی که نور شید سپهری بلوکه شده باشد. خطوط منتشره در رنگین سپهر قابل رؤیت است، مهم ترین آن هلیوم است که در حرارت های بالا برانگیخته می شود. طیف های رنگین سپهری تغییرات مشخصه وابسته به ارتفاع در رنگین سپهر را آشکار می سازند. گذارهای اتمی با پتانسیل برانگیختگی پائین، مانند گذارهای تعدادی از فلزات خنثی، فقط در قسمت پائین رنگین سپهر مشاهده می شود. خطوط آهن و کلسیم یونیزه شده کمی بیشتر از بقیه نمایان هستند. اشکال بالمر ئیدروژن و هلیوم خنثی تا هزاران کیلومتر بالای شیدسپهر مشاهده شده است. خطوط رنگین سپهری با زیاد شدن ارتفاع بتدریج محو می شوند، اما قویترین خط  $HeII$  ( $4686\text{nm}$ ) به کندی محو می شود. این کاهش در قدرت خطوط دو علت عمده دارد: (۱) چگالی گاز با افزایش ارتفاع به سرعت پائین می آید و (۲) دما با افزایش ارتفاع در بالای شیدسپهر بسرعت زیاد می شود (شکل ۱۰-۷). پتانسیل های بالای تهییج خطوط هلیوم در اثر دمای زیاد رنگین سپهر بالا باقی می ماند. هلیوم (گرفته شده از هلیوس<sup>۱</sup> یونانی به معنای خورشید) قبل از آن که در زمین کشف شود، در طیف های رنگین سپهری پیدا شد. بیشتر خطوط هلیوم در قسمت قابل رؤیت طیف خیلی ضعیف تر (از لحاظ اپتیکی رقیق) از آنند که در مقابل قرص خورشید مشاهده شوند.

با وجودی که، رنگین سپهر از شید سپهر گرمتر است، خطوط بالمر هیدروژن در رنگین سپهر تشکیل می شوند. توصیف این اثر آن است که تابش پیوسته شید سپهری (و دما در آنجا) به اندازه کافی دارای انرژی نیست تا اتمهای هیدروژن بسیاری را از



شکل ۱۰-۷. ساختار دما در رنگین سپهر و تاج

تراز پایه لیمن به اولین تراز برانگیخته، منتقل کنند. (بخاطر دارید که خطوط بالمر توسط اولین حالت برانگیختگی بوجود می آیند.) تنها در قسمتهای داغ تر رنگین سپهر، بر طبق معادله بولتزمن، تجمع اتمهای هیدروژن در دومین تراز به علت برانگیختگی برخوردی قابل ملاحظه می شود. بنابراین، تابش پیوسته رنگین سپهر برای شکل گیری خطوط جذبی بالمر (وقتی در مقابل شید سپهر دیده شود) به رنگ رنگین سپهر (وقتی که در مقابل فضای تاریک در لبه خورشید دیده شده)، جذب می شود.

#### (ب) ساختار ریز رنگین سپهر

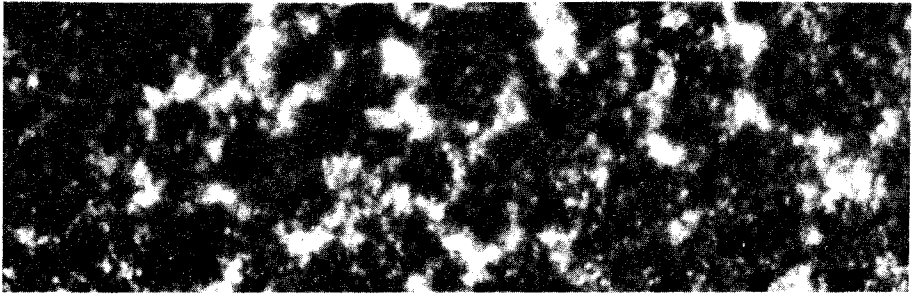
خطوط جذبی معین ( $H\alpha$  و خطوط H و K مربوط به CaII) در رنگین سپهر دارای یک عمق نوری بزرگی می باشند. تابش در این طول موجها، نمی تواند از شید سپهر بگریزد، زیرا رنگین سپهر ضرورتاً در اینجادر کدر است. به دلیل این که خطوط جذبی کاملاً سیاه نیستند، رنگین سپهر در این طول موجها می تواند مورد مطالعه قرار گیرد. مرکز هر خط از پیوستار مجاور تاریکتر است، اما بعضی فوتونها هنوز از رنگین سپهر ما گسیل شده اند.

عکسهای تک فام خورشید (شکل (۸-۱۰)) در  $H\alpha$  و  $CaIIK$  قسمتهای روشن و تاریک بزرگی را آشکار کرده‌اند. اینها پلاژها و فیلامانهای هماهنگ با فعالیتهای خورشیدی‌اند (بخش (۱۰-۶ب)). به علاوه ساختار مشخصی بر روی کل قرص

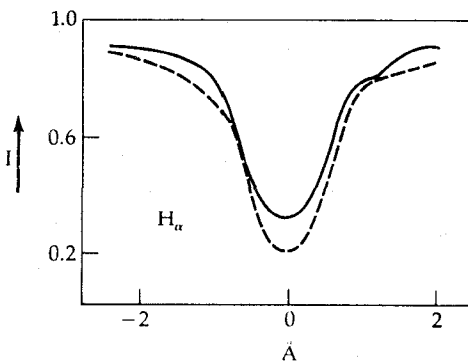


شکل ۸-۱۰. خورشید در  $H\alpha$ . این ناحیه نزدیک لبه ساختار حاصل از میدان مغناطیسی قوی محلی را نشان می‌دهد. (رصدخانه‌های نجومی نوری ملی آر. بی. دان<sup>۱</sup>)

خورشید ظاهر می‌شود: شبکه روشن (شکل (۱۰-۹)) مربوط به میدانهای مغناطیسی در مرزهای ابر دانه‌ها. خط روشن CaIIk با افزایش قدرت میدان مغناطیسی که گستره آن از  $10^{-3}T$  است ارتباط دارد. مقصود از کلمه روشن شدن چیست؟ روشنایی  $H\alpha$  (شکل (۱۰-۱۰)) به قسمتهای کم عمقتر منحنی بستگی دارد، (گیسیل بیشتر در مرکز خط است)، البته در ورای لبه،  $H\alpha$  یک خط گسیل حقیقی است.



شکل ۱۰-۹. شبکه رنگین سپهر. این عکس در خط CaIIk، شبکه روشن مربوط به میدانهای مغناطیسی در لبه‌های ابر دانه‌ها را نشان می‌دهد. (ان.آر.شی لی<sup>۱</sup> و اس. وای. لیو<sup>۲</sup>، رصدخانه‌های ستاره‌شناسی نوری ملی)



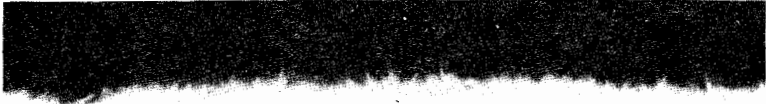
شکل ۱۰-۱۰. نمایی از خط  $H\alpha$ . خط چین نمای جذب خورشید آرام را نشان می‌دهد. خط پر نواحی روشن مانند شبکه یا پلاژها را نشان می‌دهد.

در لبه خورشید، فورانهای رقیق گاز تابان به عرض ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلومتر تا ارتفاع ۱۰۰۰۰ کیلومتر بالای رنگین سپهر ادامه دارد (شکل (۱۰-۱۱) الف). در زائده‌های سیخی<sup>۱</sup> که در تابش  $H\alpha$  بخوبی مشاهده شده‌اند، گازها تا حدود سرعت ۲۰ الی ۲۵ کیلومتر بر ثانیه سرعت می‌گیرند. گرچه زائده‌های سیخی کمتر از یک درصد از منطقه سطح خورشید را اشغال می‌کنند و طول عمر ۱۵ دقیقه یا کمتر را دارا هستند، ولی احتمالاً نقش مهمی را در تعادل توده رنگین سپهر، تاج و باد خورشیدی ایفاء می‌کنند. زائده‌های سیخی خورشیدی به صورت یکنواختی در سطح خورشید توزیع نمی‌گردند (شکل (۱۰-۱۱) ب)، بلکه تشکیل یک الگوی شبکه‌ای می‌دهند که قسمتی از شبکه رنگین سپهری در نواحی ابر دانه‌ها را تشکیل می‌دهند. بنابراین، زائده‌های سیخی فقط در نواحی میدانهای مغناطیسی قوی رخ می‌دهند.

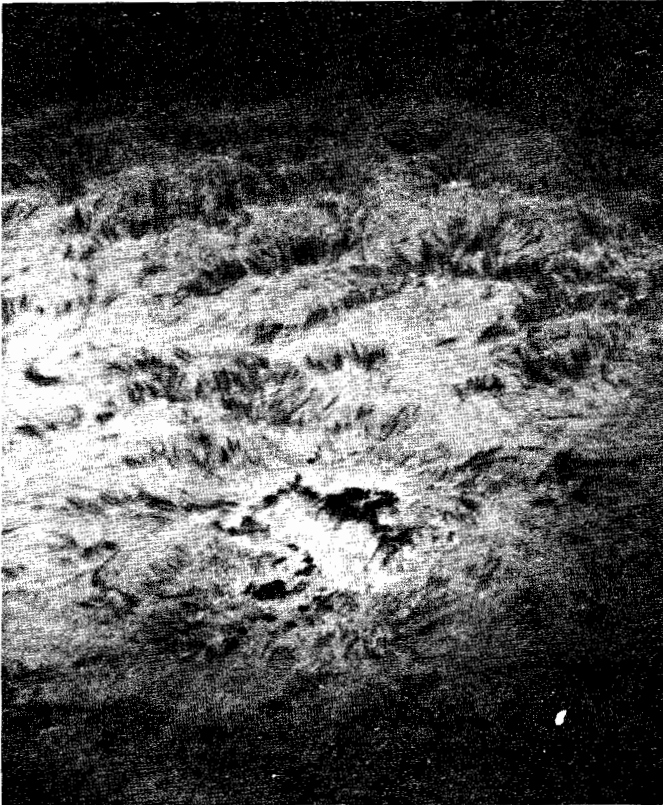
### ج. ناحیه‌گذار

نتیجه تحقیقات بسیاری که در قسمت‌های بالایی رنگین سپهر و ناحیه‌گذار رنگین سپهر - تاج صورت گرفته است، اشکال طیفی ماوراء بنفش خورشیدی را به دمای بالای رنگین سپهری نسبت می‌دهد. دما به شدت از حدود ۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ درجه کلوین در رنگین سپهر در خلال چند صد کیلومتر از منطقه‌گذار تا  $10^6$  درجه کلوین در تاج می‌رسد، (شکل (۱۰-۷)). طیف پیوسته شید سپهری در طول موجهای کوتاهتر از  $150\text{ nm}$  به‌طور غیر قابل آشکارسازی کوچک می‌شود (منحنی پلانک را در دمای  $6000$  درجه کلوین (شکل (۸-۱۴)) ملاحظه کنید). به‌خاطر ضعیف بودن طیف پیوسته شید سپهری در انتهای ناحیه ماوراء بنفش، برانگیختگی تابشی نمی‌تواند رخ دهد. لیکن در دماهای زیاد در قسمت‌های بالایی جو خورشید، اتمها و یونها به‌صورت برخوردی برانگیخته می‌شوند و در برگشت به حالت‌های پایه‌شان خطوط نشری تولید می‌کنند. به‌علاوه، می‌توانند در مقابل سطح خورشید مشاهده شوند، زیرا توسط زمینه شید سپهر پوشانده نمی‌شوند.

خط لیمن  $\alpha$  یکی از قویترین خطوط محدوده ماوراء بنفش است. یادآور می‌شویم



(الف)



(ب)

شکل ۱۰-۱۱. (الف) عکس  $H\alpha$  لبه بالای رنگین سپهر و زائده‌های سیخی موجود در آنجا را نشان می‌دهد. (ب) در این عکس  $H\alpha$ ، زائده‌های سیخی مانند اشکال تاریک کشیده شده در مقابل قرص مشاهده می‌شوند (رصدخانه‌های نجومی نوری ملی آر.بی.دان).



قوی بودن خطوط ئیدروژن بالمر به فراوانی اتمهای ئیدروژن در اولین حالت برانگیخته اشاره می‌کند ( $n=2$ ). عمل جذب از طیف پیوسته، این اتمها را به ترازهای بالاتر تحریک، ( $n=3, 4, \dots$ ) و تولید رشته‌های جذبی بالمر را می‌نماید [بخش (۱۰-۳ الف)]. با وجود این بیشتر اتمها بلافاصله با گیسل فوتونهای  $I_{\alpha}$  به حالت پایه ( $n=1$ ) بر می‌گردند. اتمهای ئیدروژن به خاطر نبودن پیوستار در این طول موج در شیدسپهر تنها بوسیله برخوردها و با جذب مجدد فوتونهای  $I_{\alpha}$  می‌توانند به  $n=2$  برانگیخته شوند. عکسها در  $I_{\alpha}$  اساساً همان شبکه رنگین سپهری مشاهده شده در CaII را نشان می‌دهند.

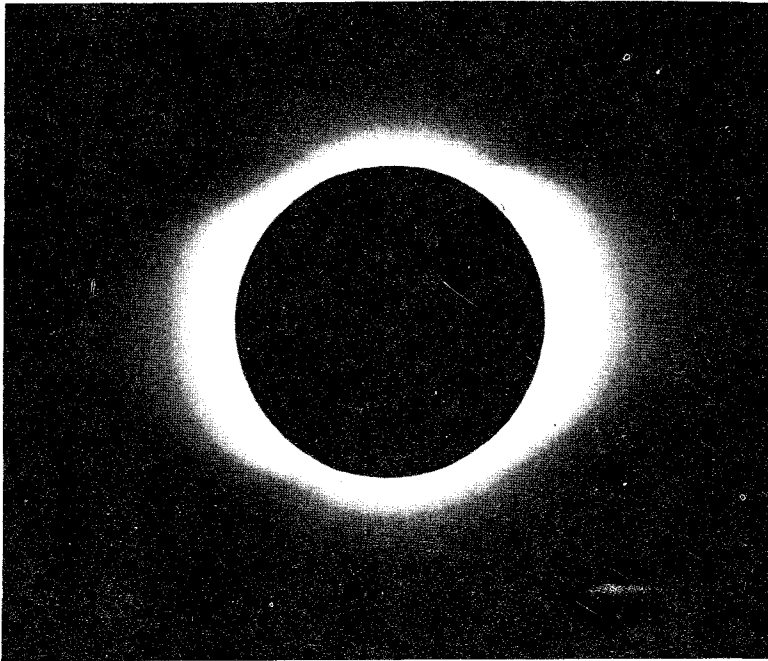
ساختار منطقه گذار را می‌توان توسط خطوط نشری CIII در بالاتر از  $70000$  درجه کلوین و NIII در  $100000$  درجه کلوین و OVI در  $300000$  درجه کلوین مطالعه کرد. شبکه ظاهراً از میان این ناحیه ادامه می‌یابد، ولی در تصاویر ساخته شده در MgX در محدوده  $60\text{nm}$  مربوط به  $1/6$  میلیون درجه کلوین بخوبی درون تاج ناپدید می‌شود.

## ۴-۱۰ تاج

درگرفتنی‌های خورشیدی، تاج در اطراف خورشید تا فاصله دوری از لبه خورشید به صورت هاله سفید صدفی امتداد دارد (شکل (۱۰-۱۲)). یک هاله داخلی روشنتر لبه خورشیدی را در بر می‌گیرد، و جریانهای تاجی تا فاصله دوری در فضا ادامه می‌یابد.

### الف - تاج قابل رؤیت

تابش پیوسته تاجی در طول موجهای نوری از دو قسمت تشکیل شده است. در واقع، خود تاج به دو بخش تاج  $k$  (نزدیک به سطح خورشید) و تاج  $F$  که تا چند برابر شعاع خورشیدی واضح است، تقسیم می‌شود. قسمتی از طیف پیوسته تاجی کم شدت با وابستگی طول موجی شید سپهر تطابق دارد. این امر به دلیل تفرق نور توسط الکترونها است، که بیش از نیمی از چگالی ذرات در تاج  $k$  را تشکیل می‌دهد. هیچ خطوط جذبی شید سپهری در این مؤلفه پراکنده شده دیده نمی‌شود، و این حقیقتی است که ما آن را به پهن شدگی دوپلری توسط الکترونها متحرک سریع نسبت می‌دهیم. از آنجا که خطوط جذبی به طور کلی از بین می‌روند، بایستی این الکترونها دماهای خیلی زیادی داشته



شکل ۱۰-۱۲. یک تاج آرام خورشیدی. به برآمدگیهای خطی و کشیدگی در استوا توجه کنید (جی. دی. بنگ<sup>۱</sup> و ک. ال. هلام<sup>۲</sup>).

باشند - به طور متوسط دماهای تاج (آرام) ۱ تا ۲ میلیون درجه کلوین هستند.

از برهم نهی تاج F بر طیف پیوسته الکترون پراکنده، خطوط جذبی فرانوفر نشان داده می شود. این مؤلفه از نور پراکنده شده توسط ذرات گرد و غباری، همانند ذراتی که در فضای بین سیاره ای پخش اند، نتیجه می شود. این غبار در صفحه دایرة البروج متمرکز است، که به این دلیل قسمت بیرونی تر تاج F را به صورت نور دایرة البروج می بینیم. ما می توانیم مؤلفه های K, F, تاج را جدا سازیم، زیرا که خطوط فرانوفر فقط در اولی ظاهر می شوند و این به دلیل آن است که الکترونها و گرد و غبار در پلاریزه کردن و پراکندن نور به طور متفاوتی عمل می کنند.

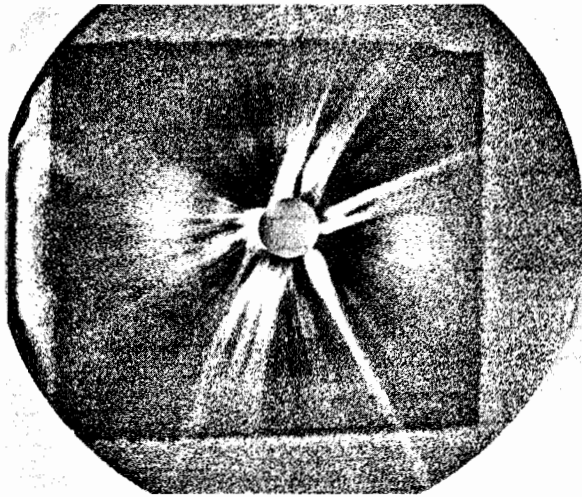
فعالیت خورشیدی، ظاهر تاج K را بشدت تحت تأثیر قرار می دهد (شکل (۱۰-۱۲)). در اوقاتی که لکه خورشیدی بیشینه است (شکل (۱۰-۱۶الف))، تاج بسیار روشن به طور یکنواخت در اطراف سطح خورشید نمایان می شود، و جریانهای تاجی روشن (شکل (۱۰-۱۳)) و تمرکزهای مربوطه دیگر با نواحی فعال بیشتر قابل رؤیت اند. در کمینه لکه خورشیدی، تاج در استوای خورشیدی نسبت به قطبها بیشتر امتداد می یابد. و جریانهای تاجی در استوا متمرکز می شوند.

### (ب) «تاج رادیویی»

بعداً در این فصل انفجارات رادیویی وابسته به فعالیت خورشیدی را توصیف خواهیم کرد، ولی در اینجا خواص رادیویی خورشید آرام مورد بحث قرار می گیرد. در گازهای یونیزه جو خورشیدی، الکترونهای آزاد، تابش رادیویی نثری و جذبی را فراهم می آورند. اندرکنشهای بوجود آمده را گذارهای آزاد - آزاد می نامند. یک الکترون به یک یون یا یک اتم برخورد سطحی می کند و در حالی که انرژی جنبشی آن کمی تغییر می کند، یک فوتون با انرژی کم صادر می کند. الکترون بدام نیفتاده است، در دو حالت قبل و بعد از برخورد آزاد است. هر چه الکترون نزدیک تر به پراکننده عبور کند، هم بسامد و هم شدت اندرکنش بیشتر افزایش می یابد. بنابراین، مشخصه فوتونهای آزاد - آزاد به چگالی گاز بستگی دارد. هر چه گاز چگال تر باشد، اندرکنش پراثری تر و فراوان تر می باشد؛ فوتونهای ایجاد شده در این حالت دارای انرژیهای بالاتری (یا طول موجهای کوتاهتر) هستند. این بیان توضیح می دهد که چرا تابش طول موج کوتاه (۱ تا ۲۰ cm)، رنگین سپهر و قسمت پائینی تاج را مشخص می کند و طول موجهای بلندتر از ۱۰ cm در قسمت های بیرونی تاج ظاهر می شوند.

در طول موجهای بلندتر از حدود ۲۰ cm به نظر می رسد که خورشید لبه روشنی داشته باشد (تا داخل تاج) و این تأییدی است بر این که وقتی در حال نگاه کردن به قسمت بالاتر تاج خورشیدی هستیم طول موجهای بلندتر مشاهده می شوند. بیاد آورید که در طول موجهای مرئی، خورشید با لبه تاریک می باشد (شکل (۱۰-۳)). در طول موجهای بلندتر از ۵۰ cm، با تغییرات رادیویی زیادی مواجه می شویم زیرا گسیل از گاز الکترونی رقیق به طور وسیعی همانطور که چگالی عددی ذرات تغییر می کند، بالا و پائین

می‌رود. همان طوری که یون  $H^-$  عامل تیرگی شدید سپهر بحساب می‌آید، چگالی الکترون نیز سبب کدری تاج در طول موجهای رادیویی می‌شود. وابستگی طول موج این کدری الکترونی به صورت زیر است. تاج در طول موجهای کوتاه از نظر نوری نازک (تقریباً ۱cm)، بنابراین چنین تابشی می‌تواند از طریق رنگین سپهر به ما برسد. در طول موجهای بلندتر، تاج خورشیدی از نظر نوری ضخیم‌تر و ضخیم‌تر می‌شود، بنابراین تاج در این طول موجها و در ارتفاعات بالاتر کدر است. به‌طور متوسط ما قادریم که داده‌های رادیویی با انرژی پائین را با انتهای توزیع جسم سیاه پلانک در دماهای حدود  $10^6 k$  منطبق کنیم.



شکل ۱۰-۱۳. جریانهای تاجی خورشید فعال، نشانگر پیکربندی میدان مغناطیسی و جریان باد خورشیدی بسیار دورتر از شید سپهر است. (سی. کلر<sup>۱</sup>. آزمایشگاه ملی لوس آلاموس<sup>۲</sup>).

## (ج) نشر خطی خطوط ممنوعه

بعضی از خطوط نشری بر روی طیف پیوسته مرئی تاج قرار گرفته است که تا حدود سال ۱۹۴۲ میلادی مشخص نشده بودند، و در آن سال دلیبو - گروتیان<sup>۱</sup> آلمانی و بی. ادلن<sup>۲</sup> سوئدی آنها را تعبیر کردند. (این خطوط مدت‌ها خطوط کرونیوم نامیده می‌شدند، زیرا این نامگذاری زمانی صورت گرفت که هیچ گذار شناخته شده‌ای با آنها تطبیق نمی‌کردند.) خط سبز (۵۳۰/۳nm) FeXIV و خط قرمز (۶۷۳/۴nm) FeX قویترین خطوط طیفی ممنوعه هستند (بخش (۸-۲)).

دو دلیل مهم که مانع ردّ نمودن هویت خطوط نشری تاج می‌شوند عبارتند از: (۱) گذارهای مسئول ممنوعه و (۲) دماهای تاج به‌طور غیر منتظره‌ای بالاست. در مکانیک کوانتومی بعضی از ترازهای انرژی یک اتم شبه پایدارند، زیرا گذارهای به طرف پائین از چنین ترازهایی قویاً توسط قواعد انتخاب ممنوع شده‌اند. در حالتی که یک گذار عادی مجاز در حدود  $10^{-8}$  s رخ می‌دهد، این سطوح شبه پایدار ممکن است چند ثانیه یا حتی چند روز به طول انجامند. اکثراً در شرایط آزمایشگاهی و اختر فیزیکی چگالی‌های گاز آنقدر زیاد هستند که وا انگیختگی برخوردی ترازهای شبه پایدار را به سرعت خالی می‌کنند - در این شرایط زمان کافی برای اتفاق افتادن یک گذار غیر مجاز موجود نیست، ولی در نزدیکی خلأ تاج، ترازهای شبه پایدار اشغال شده توسط تابش شدید سپهری یا برخوردها می‌توانند تجزیه شوند و اشکال نشر غیر مجاز شکل می‌گیرند.

برخوردهای بسیار پرانرژی لازم است تا آهن را یونیده کند، مثلاً ۹ و ۱۳ بار، بنابراین گاز تاجی بایستی بسیار داغ باشد. برای تولید FeX یک دمای  $10^6 \times 1/3$  k مورد نیاز است و Fe XIV نیازمند دمای حتی بالاتر از  $10^6 \times 2/3$  k می‌باشد. در زمان فعالیت شدید خورشیدی (همانند شراره‌ها) دماهای بسیار اتفاق می‌افتند و برای خطوط Ca XV دمای  $10^6 \times 3/6$  دیده شده است. گستره مشخصه دما  $10^6$  k (تاج آرام) تا  $10^6 \times 4$  k (تاج فعال) می‌باشد.

## خطوط ماوراءبنفش دور

اتم‌های بسیار یونیده شده، همانند آنهایی که در تاج خورشیدی وجود دارند، الکترونهاى بسيارى را که هسته اتمى را مى‌پوشانند از دست داده‌اند، و الکترونهاى باقیمانده به‌طور قوى جذب شده و به‌طور محکم به هسته پیوند دارند. گذارهای مجاز به پتانسیل‌های برانگیختگی بسیار بالا مربوط هستند و فوتونهاى طیفى حاصل بسیار پراثرى مى‌باشند - در طول موجهای ماوراءبنفش. در حقیقت در ناحیه طیفى ۵ تا ۵۰ نانومتر (که فقط در ناحیه بالای جو زمین قابل آشکارسازی است) توسط خطوط نشری مجاز از یونهاى تاجى FeVIII تا FeXVI، SiVII تا SiXII، MgVIII تا MgX، NeVIII تا NeIX و SXII تا SIII پوشیده شده است. این گذارهای بسیار زیاد بما اجازه می‌دهد تا فراوانی عنصرى نسبى در تاج را استنتاج کنیم. نتایج با فراوانیهای شید سپهرى سازگار است.

## حفره‌ها و حلقه‌های تاج خورشیدی

بدلیل داغ بودن تاج، پرتوهای ایکس با انرژی کم، از آن صادر شده که در عکسهای پرتو ایکس خورشید (شکل (۱۰-۱۴)) نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که گاز تاج یک توزیع نامنظمی در بالا و اطراف خورشید دارد. ساختارهای حلقه‌ای بزرگ دلالت بر این دارند که گاز یونیده در طول میدانهای مغناطیسی جریان دارد، که بسیار بالاتر از سطح خورشید کمانه کشیده و به آن باز می‌گردد. گاز مورد نظر در این حلقه مغناطیسی بدام می‌افتد. فیزیکدانان خورشیدی در حال حاضر عقیده دارند که تاج عملاً از چنین حلقه‌هایی تشکیل یافته است.

همچنین توجه کنید که بعضی از نواحی تاج تاریک به نظر می‌رسد (شکل (۱۰-۱۴)) به‌خصوص در قطب‌های بالا و پائین و قسمت میانی خورشید. در این مکانها گاز تاج بایستی دارای چگالی و دمای بسیار کمتر از معمول باشند، این را نواحی را حفره‌های تاج خورشیدی می‌نامند. حفره‌های خورشیدی در قطب‌ها تغییرات بسیار زیادی را نشان نمی‌دهند، اما آنهایی که در بالای نواحی دیگر هستند به نظر می‌آید که به فعالیت خورشیدی مربوط باشند. نقاط روشن پرتو ایکس، فقط چند ساعتی دوام یافته و در داخل این حفره‌های تاجی پراکنده می‌شوند. اینها به‌طور نمایان نواحی فعال با عمر

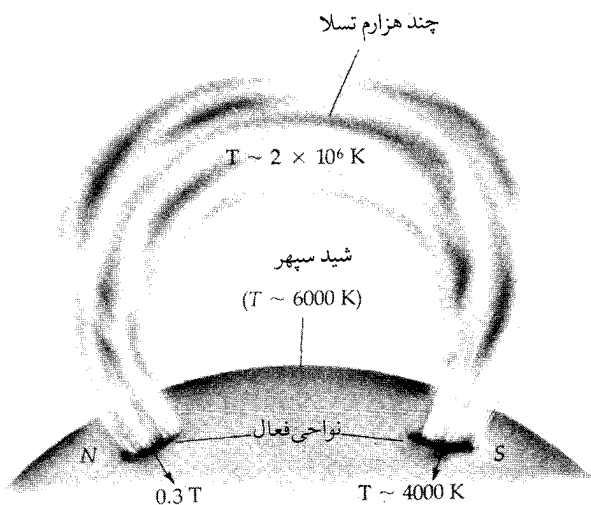


شکل ۱۰-۱۴. پرتو ایکس خورشید. پلاسمای داغ در تاج نمایان است؛ به حلقه‌ها که توسط میدانهای مغناطیسی شکل گرفته‌اند، توجه کنید. ناحیه تاریک در قسمت میانی یک حفره تاج خورشیدی است. (جی ویانا<sup>۱</sup>، رصدخانه کالج هاروارد)

کوتاه می‌باشند. همچنین اگرچه اینها بسیار کوچکند ولی حلقه‌ها را می‌سازند. یک حفره تاجی چگونه ایجاد می‌شود؟ ستاره‌شناسان خورشیدی معتقدند که حفره‌های تاجی سطوحی را مشخص می‌کنند که در آنجا میدانهای مغناطیسی از خورشید به طرف خارج به فضا ادامه می‌یابند و به صورت حلقه به خورشید بر نمی‌گردند. بنابراین، گاز تاجی در این نواحی پائین نرفته و می‌تواند از خورشید به طرف

خارج این حفره‌ها جریان یابد، این جریان باد خورشیدی را می‌سازد (بخش (۱۰-۵)). گاز تاجی چرخش جزئی شید سپهر را دنبال نمی‌کند. در عوض، در تمام عرضهای جغرافیایی بایک سرعت زاویه‌ای دوران می‌کند. (همان طور که زمین عمل می‌کند). این حقیقت ایجاب می‌کند که انتهای حلقه‌های مغناطیسی در عمقی پائین‌تر از شید سپهر بسته شوند، شاید بسیار پائین‌تر از منطقه هدایتی، که در اینجا چنین میدانهایی ممکن است بوسیله دیناموی خورشیدی عمومیت یابد.

حال برمی‌گردیم به این که چرا تاج خورشیدی (و رنگین سپهر) اینچنین داغ است. عقیده بر این است که حلقه‌های مغناطیسی (شکل (۱۰-۱۵)) بالا آمده از شید سپهر تا ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر در داخل تاج نقش کلیدی را بازی می‌کند. میدان مغناطیسی در یک حلقه بوسیله حرکات شید سپهری در پایه آن پیچ می‌خورد. اگر پیچ‌خوردگی رخ دهد، میدانهای الکتریکی توسط آن تولید می‌شود که در این صورت گاز تاجی را گرم می‌کند. این پدیده انرژی زیادی برای تکوین یافتن کسب نمی‌نماید، زیرا گاز تاجی بسیار رقیق است و بنابراین ظرفیت حرارتی اندکی دارد.



شکل ۱۰-۱۵. حلقه‌های تاج خورشیدی. یک مدل عمومی برای ساختار حلقه در نواحی پائین‌تر تاج.



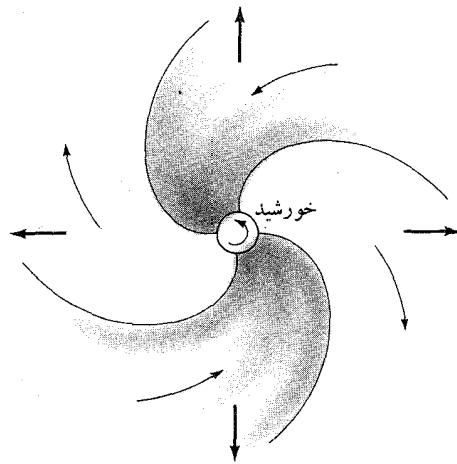
## ۱۰-۵ باد خورشیدی

دماهای بالای تاجی منجر به وزیدن و دور نمودن تاج از خورشید می شود. جاذبه گرانشی خورشید روی این گاز برای نگهداری آن کفایت نمی کند و بنابراین یک جریان پیوسته ای از باد خورشیدی سطح خورشید را ترک می کند. این جریان گاز به طور تقریبی از تعداد مساوی الکترون و پروتون تشکیل یافته که پلاسما نامیده می شود (در مقیاس بزرگ از نظر الکتریکی خنثی است). هدایت گرمایی پلاسما بسیار بالا است، لذا چنین دماهای بالایی تا فواصل زیادی از خورشید ادامه می یابد. بنابراین، همان طور که گاز منبسط می شود، شتاب می گیرد (در مقیاس بزرگ سرعت نزدیک  $300 \text{ km/sec}$  و  $400 \text{ km/s}$  به ترتیب در  $30R_{\odot}$  و  $1 \text{ AU}$  می باشد) و چگالی به یک مقدار متوسط چند میلیون الکترون و پروتون بر هر متر مکعب در  $1 \text{ AU}$  کاهش می یابد. این مشخصات باد خورشیدی مستقیماً بوسیله کاوش های فضای بین سیاره ای اندازه گیری می شوند.

یک پلاسما قویاً با خطوط نیروی مغناطیسی جفت می شود. در حقیقت اساساً میدان مغناطیسی در داخل گاز منجمد می شود. بنابراین، باد خورشیدی گسترده ای در میدانهای مغناطیسی خورشیدی را به داخل فضای بین سیاره ای می کشد. میدانهای مغناطیسی خورشیدی در مقیاس بزرگ مستقیماً با میدانهای بین سیاره ای توسط یک ساختار قطاع دایره ای نشان داده شده است (شکل (۱۰-۱۶)). نوار عرض جغرافیایی  $30^{\circ}$  استوای خورشید ممکن است بتدریج به داخل نواحی طول جغرافیایی وسیع از یک قطب مغناطیسی یا قطب دیگر تقسیم شده باشد. جریان شعاعی باد خورشیدی این میدانها را به دور از خورشید در قاعها هدایت می کند، مرزهای قطاع به صورت ماریجهایی تغییر شکل می دهند، زیرا خورشید به دور از گاز نزدیک شونده و میدان مغناطیسی می چرخد.

باد خورشیدی قابلیت تغییر و پیچیدگی قابل ملاحظه ای را از خود نشان می دهد. برای مثال، در مدار زمین، چگالی پروتون از  $8 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$  تا  $0.4$  و تندی از  $\frac{\text{Km}}{\text{s}}$  تا  $300$  بیش از  $700 \text{ km/s}$  تغییر می کند. این تغییر در ارتباط تنگاتنگ با حفره های تاجی می باشد که در آنجا هم چگالی و هم دما از مقدار طبیعی و تاج معمولی کمتر است، چگالی در این حالت ممکن است فقط  $7\%$  چگالی در حالت عادی باشد. مقداری از انرژی که معمولاً

صرف گرم کردن مواد تاجی بدام افتاده در حلقه‌های مغناطیسی می‌شود، برای شتاب دادن گاز به طرف خارج از خطوط میدان باز بکار می‌رود. بنابراین، انفجارات باد خورشیدی ممکن است به تندیهایی بیش از  $700 \text{ km/s}$  برسد.



شکل ۱۰-۱۶. میدانهای مغناطیسی و باد خورشیدی. میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای از خورشید امتداد می‌یابد. پیکانهای باریک جهت میدانهای مغناطیسی و پیکانهای ضخیم جهت باد خورشیدی را نشان می‌دهند. ناحیه سایه دارد و ساختار قطاع مانند را نشان می‌دهد.

فعالیت خورشیدی به‌ویژه شراره‌ها، ساختار میدان مغناطیسی را گاهی اوقات به‌طور برجسته‌ای تغییر می‌دهد. بعضی اوقات، باد خورشیدی معمولی مرکب از پروتونها و الکترونهای کم انرژی است ( $10^2 \text{ eV}$ )، و همچنین شراره‌های خورشیدی ابرهایی با پروتونهای پراانرژی را پرتاب می‌کنند ( $10^7$  تا  $10^8 \text{ eV}$ ). این ابرها از طریق باد خورشیدی در هجوم خود تندی و چگالی موضعی را تغییر داده و ساختار میدان مغناطیسی را بهم می‌زنند. این ابرها برای فضانوردان بدون حفاظ خطرناک‌اند و باعث می‌شوند، چند روز پس از آنکه خورشید را ترک کردند اغتشاشاتی در مغناطیس کره زمین ایجاد کنند.

## ۱۰-۶ فعالیت خورشیدی

## (الف) چرخه خورشیدی

خورشید آنقدر بماند که می‌توانیم به آسانی پدیده‌های زودگذر در جو آن را مشاهده کنیم. چنین پدیده‌هایی نمایان‌کننده فعالیت خورشیدی می‌باشند و آنها را می‌توان از طریق ارتباط چرخش خورشیدی با میدان مغناطیسی در چرخه خورشیدی بهم پیوند داد. در باقیمانده این فصل خورشید فعال را مورد بحث قرار می‌دهیم، لفظ ناحیه فعال را برای مشخص کردن یک سطح با لکه‌های خورشیدی، زیانه‌ها، پلاژها و شراره‌ها بکار می‌بریم (جدول ۱۰-۲) را برای خلاصه‌ای از فعالیت خورشیدی ملاحظه کنید).

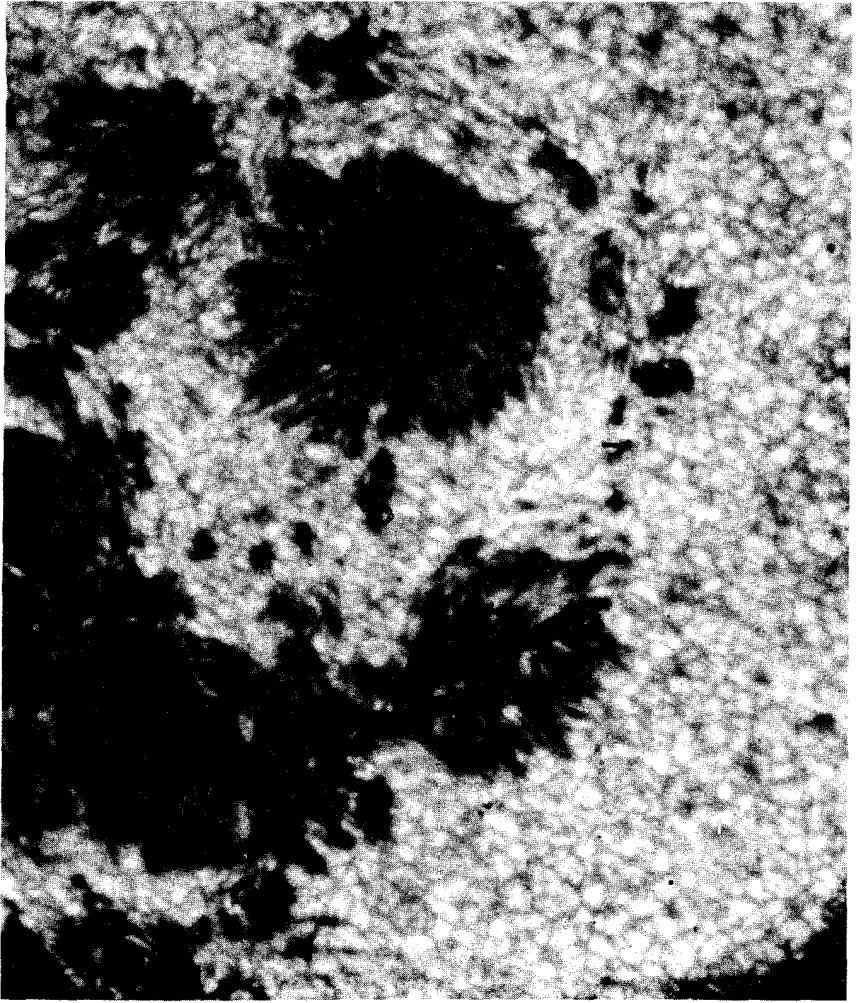
جدول ۱۰-۲. خلاصه فعالیت خورشیدی

شید سپهر	
میدانهای مغناطیسی قوی، دمای پائین تر از شیدسپهر داغ تر، چگال تر و روشن تر از شیدسپهر (در نور سفید) محیطی برای تضعیف میدانهای مغناطیسی	لکه‌های خورشیدی فکولاما* نواحی مغناطیسی دو قطبی
رنگین سپهر	
روشن تر از رنگین سپهر در خطوط $\text{CaII, H}\alpha$ چگال تر و داغ تر از رنگین سپهر مواد رنگین سپهری در تاج حرکات نمایشی مربوط به میدانهای مغناطیسی روشن شدگی‌های مختصر در پلاژها (در خطوط $\text{CaII, H}\alpha$ )	پلاژها* زیانه‌ها (رشته‌ها) شراره‌ها**
تاج	
اشکال نور سفید مربوط به افزایش چگالی الکترون، افزایش نشر در خطوط UV و ممنوعه مربوط به تغییر آرام گسیل رادیویی	تراکم‌ها*
	انفجارات رادیویی مربوط به الکترونهاى سریع بدام افتاده در قسمتهای بالای تاج** گسیل ذره (پرتوهای کیهانی خورشیدی) و باد خورشیدی افزایشی**

## لکه‌های خورشیدی

قبل از سال ۱۶۱۰ میلادی اروپائیان عقیده داشتند که خورشید باید یک کره کاملاً تابناک و بی لکه باشد، در آن سال گالیلئو گالیله‌ای پیک نجومی خود را چاپ کرد که در آن وجود لکه‌های تاریک - لکه‌های خورشیدی - در سطح خورشید را گزارش نمود. (ستاره‌شناسان شرقی قرن‌ها پیش به این مسئله پی برده بودند). لکه‌های خورشیدی پدیده‌های شید سپهری می‌باشند (شکل (۱۰-۳)) که تاریکتر از اطراف شید سپهر به نظر می‌رسند (در حدود دمای  $5800^{\circ}\text{K}$ )، زیرا این لکه‌ها سردترند (دماهای پیوستار لکه خورشیدی در حدود  $3800^{\circ}\text{K}$  است و دماهای برانگیختگی لکه خورشیدی حدود  $3900^{\circ}\text{K}$  می‌باشد). تاریکترین قسمت یعنی ناحیه مرکزی با دماهایی که در بالا اشاره شد تمام سایه را می‌سازد (شکل (۱۰-۱۷))، تمام سایه معمولاً بوسیله نواحی نیم سایه روشن‌تر با ساختار رشته‌ای شعاعی در برگرفته شده است. لکه‌های خورشیدی کوچک از روزنه‌هایی که بزرگتر از سطوح تاریک معمول بین دانه‌های روشن هستند گسترش می‌یابند. اگرچه بیشتر روزنه‌ها و لکه‌های کوچک خیلی زود تجزیه می‌شوند، اما بعضی از آنها به لکه‌های واقعی عظیم تبدیل می‌گردند. بزرگترین لکه تاریک دارای قطر تمام سایه  $30000\text{ km}$  و قطرهای ناحیه نیم سایه بیشتر از دو برابر این مقدار است.

مهمترین مشخصه یک لکه خورشیدی میدان مغناطیسی آن می‌باشد. قدرت میدانها نوعاً در حدود  $0/1\text{ T}$  می‌باشد، اما میدانهای قویتری در حدود  $0/4\text{ T}$  نیز اندازه‌گیری شده‌اند. (شدتهای میدان از مشاهده تجزیه زمین خطوط طیفی بدست می‌آیند). این میدانها ممکن است از انتقال انرژی به شید سپهر از طریق جابجائی، جلوگیری کند، از این رو لکه خورشیدی سردتر از محیط اطرافش می‌باشد. در ارتباط با میدان مغناطیسی یک جریان افقی از گازهای موجود در لکه خورشیدی نیم‌روشن وجود دارد: گازهایی که در طول پائین‌ترین رشته خارج می‌شوند و در طول بالاترین خط میدان به سمت داخل برمی‌گردند (تا تندیهایی بیشتر از  $6/1\text{ km/s}$ ).



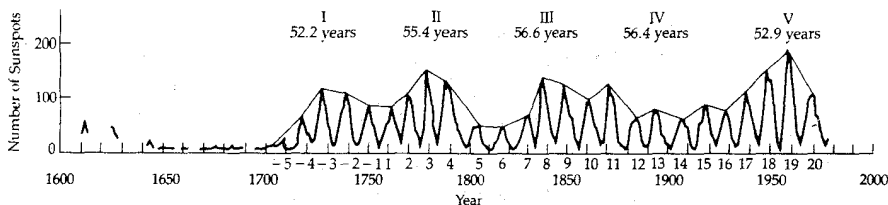
شکل ۱۰-۱۷. گروه لکه خورشیدی. یک لکه کلاسیک دارای تقریباً یک مرکز تمام سایه دایره‌ای و نیم‌سایه شعاعی است که توسط میدانهای مغناطیسی تعیین می‌شود. به لکه‌های پراکنده شده در سمت پائین توجه کنید. لکه‌های کوچک بدون نیم‌سایه‌ها، روزنه‌ها می‌باشند. (پروژه استراتسکوپ<sup>۱</sup>، دانشگاه پرینستون).

یک لکه خورشیدی دارای یک قطبش مغناطیسی می باشد. خطوط نیروی میدان مغناطیسی از قطب شمال مغناطیسی خارج شده و در قطب جنوب جمع می شوند؛ شما با این خصوصیت از میله های مغناطیسی زمین خودمان آشنا هستید. یک قطب مغناطیسی نمی تواند به طور منفرد وجود داشته باشد زیرا، خطوط نیروی مغناطیسی بایستی بسته باشند (بر طبق معادلات ماکسول). بنابراین، دو لکه خورشیدی با قطبیدگی های مکمل عموماً در یک گروه لکه ای دو قطبی با هم پیدا می شوند (پاراگرافهای بعدی را ملاحظه کنید). استثنائاتی بر این قاعده رخ می دهند. گاهی اوقات ناحیه مغناطیسی دوم آنقدر پراکنده است که فقط تنها یک لکه خورشیدی دیده می شود، در موارد دیگر، گروههای پیچیده بزرگ از تعدادی از لکه های خورشیدی ظاهر می شوند - چنین گروهی ممکن است هسته یک ناحیه فعال بزرگ بر روی قرص خورشید باشد (بخش (۱۰-۶ ب)).

#### تعداد لکه های خورشیدی

شمارش تعداد لکه های مرئی در هر زمان داده شده از دوران گاليله تاکنون ثبت شده است (شکل (۱۰-۱۸)). تعداد لکه های خورشیدی با زمان تغییر می کند. یک پدیده چرخه ای به طور متوسط هر ۱۱ سال یکبار برای بیشینه ها یا کمینه های متوالی رخ می دهد (ممکن است تغییری در حدود دو تا سه سال از یک چرخه دیگر وجود داشته باشد). یک چرخه جدید وقتی که تعداد به کمینه می رسد، آغاز می گردد.

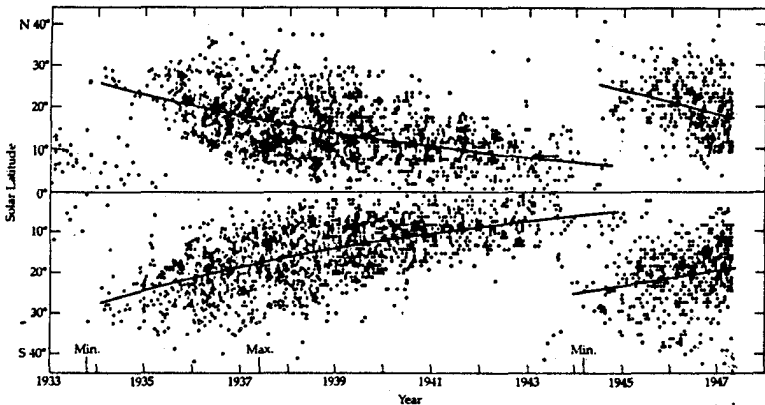
بررسی های اخیر، به خصوص بررسیهای فیزیکدان خورشید جان ادی<sup>۱</sup> دلالت بر این دارد که شواهدی تاریخی وجود دارد که یک غیبت ۱۱ ساله چرخه در فعالیت لکه خورشیدی قبل از سال ۱۷۰۰ میلادی را نشان می دهد - آرامش در فعالیت را کمینه مآندر<sup>۲</sup> می نامند. در دوره تناوب ۶۰ ساله از ۱۶۴۵ تا ۱۷۰۵ میلادی به ندرت لکه خورشید دیده شده است (شکل (۱۰-۱۸)). توافق نسبی چرخه در ادوار اخیر ممکن است فازی در تغییرات باشد که در طول زمانهای طولانی تر رخ می دهند.



شکل ۱۰-۱۸. چرخه‌های خورشیدی. نمودار ترسیم شده در اینجا تعداد لکه‌های خورشیدی مشاهده شده سالیانه را از سال ۱۶۰۰ تا ۱۹۷۰ میلادی نشان می‌دهد. توجه کنید که تعداد لکه‌های خورشیدی قبل از سال ۱۷۰۰ میلادی چقدر کم است. آن دوره زمان کمینه‌ماندر بود. اچ. یوشیمورا<sup>۱</sup> مجله اختر فیزیک ۲۳۰: ۹۰۵ (۱۹۷۹ میلادی)

### تغییر عرض جغرافیایی

توزیع لکه‌های خورشیدی در عرض جغرافیایی خورشید به طریق بخصوصی در خلال چرخه ۱۱ ساله تعداد لکه خورشیدی تغییر می‌کند. لکه‌های خورشیدی در آغاز یک چرخه در عرضهای جغرافیایی بالا ( $35^\circ \pm$ ) قرار می‌گیرند (شکل (۱۰-۱۹))، بیشتر لکه‌ها در نزدیکی عرض  $15^\circ \pm$  در حالت بیشینه خود و چند لکه در انتهای چرخه خوشه نزدیک  $8^\circ \pm$  واقع می‌شوند. تعداد کمی از لکه‌های خورشیدی راحتی می‌توان در عرض جغرافیایی بالاتر از  $45^\circ \pm$  مشاهده کرد. زمان حیات یک لکه خورشیدی از چند روز (لکه‌های کوچک) تا چند ماه (لکه‌های بزرگ) طول می‌کشد. در حقیقت یک لکه خورشیدی در همان عرض جغرافیایی که متولد شده از بین می‌رود (مشخصه‌ای که به ما امکان می‌دهد تا چرخش خورشیدی را تعیین کنیم). آنچه که اتفاق می‌افتد این چنین است: همان طور که چرخه پیشرفت می‌کند، لکه‌های جدید حتی در عرضهای جغرافیایی پائین تر ظاهر می‌شوند. توجه کنید که اولین لکه‌های عرض جغرافیایی بالا از یک چرخه حتی قبل از آخرین لکه‌های عرض جغرافیایی پائین از چرخه قبلی ظاهر می‌شوند.



شکل ۱۰-۱۹. نموداری که تغییر در عرض جغرافیایی لکه‌های خورشیدی را به صورت تابعی از فاز در چرخه فعالیت خورشیدی نشان می‌دهد. (جی. ابیتی<sup>۱</sup>، خورشید، فابروفا<sup>۲</sup> ۱۹۶۹ میلادی)

### قطبش لکه‌های خورشیدی

بدلیل اینکه بیشترین گروه‌های لکه‌های خورشید تمایل دارند به‌طور مغناطیسی دوقطبی باشند، بهتر است که آنها را لکه‌های جلو و عقب (نسبت به چرخش خورشیدی) بنامیم. خورشید به سمت شرق می‌چرخد (همانند زمین) بنابراین یک لکه جلو در غرب لکه عقب (آن‌طور که از زمین دیده می‌شود)، قرار می‌گیرد. بعد از این که جورج ای. هیل<sup>۳</sup> (۱۸۶۸-۱۹۳۸ میلادی) خاصیت مغناطیسی لکه‌های خورشیدی را در سال ۱۹۰۸ میلادی کشف نمود. همچنین مشخص شد که تمام دسته‌های دو قطبی در یک نیم‌کره خورشیدی دارای قطبش یکسان می‌باشند، و آنهایی که در نیم‌کره دیگر قرار دارند دارای قطبش مخالف هستند. برای مثال، در یک چرخه خورشیدی لکه‌های جلو، در شمالی‌ترین قسمت نیم‌کره خورشیدی دارای قطبش منفی هستند (جنوب) و قطبش لکه‌های جلوئی در جنوبی‌ترین قسمت نیم‌کره، دارای قطبش مثبت می‌باشند (شمال). به‌علاوه، جهت قطبش‌ها در هر چرخه تغییر می‌کند، بنابراین نیم‌کره شمالی لکه‌های خورشیدی عمده در چرخه بعدی مثبت خواهد بود. بنابراین، چرخه خورشیدی ۲۲

1. G. Abetti  
3. George E.Hill.

2. Faber and Faber



ساله، طول حقیقی فعالیت‌های مغناطیسی لکه خورشیدی است.

### چرخش خورشیدی

گالیه، با مشاهده لکه‌های خورشیدی تعیین کرد که سطح خورشید در طی حدود یکماه به طرف شرق می‌چرخد (به‌طور قمری). امروزه، همان روش در ناحیه لکه خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد (در عرضهای جغرافیایی  $\pm 40^\circ$  روشهای دیگری نظیر انتقالات دوپلری ضروری است)، و می‌دانیم که خورشید به‌طور جزئی می‌چرخد. یعنی، دوره تناوب چرخش در استوای خورشیدی کوتاه‌تر از (حدود ۲۵ روز) عرضهای جغرافیایی بلندتر (در حدود ۲۷ شبانه‌روز در  $40^\circ$  و ۳۰ شبانه‌روز در  $70^\circ$ ) می‌باشد؛ متوسط دوره تناوب نجومی بدست آمده در ناحیه لکه‌های خورشیدی دوره تناوب قمری انطباقی  $27/3$  روز (در بحث‌های وقایع خورشید - زمینی واضح است)، برابر  $25/4$  شبانه روز است.

به‌طور خلاصه، لکه‌های خورشیدی در یک مقیاس کوچک، پیچیدگی و تغییرپذیری پدیده مغناطیسی خورشیدی را مشخص می‌سازند. قسمتهای یک لکه خورشیدی همگی ساختارهای مغناطیسی گذرا هستند. اساساً یک دسته از لوله‌های شارهای مغناطیسی که تمام سایه و نیم سایه را پر کرده و از روی این نقاط به طرف خارج حرکت می‌کنند. راز لکه‌های خورشیدی تحول جزئیات ریز ساختار آنهاست - قدرت تفکیک فضایی  $0/1$  که به معنای یک قدرت تفکیک خطی  $70$  کیلومتر بر ثانیه است، توان تفکیکی که توسط تلسکوپ فضایی هابل بدست آمده است، می‌باشد.

### (ب) نواحی فعال

با افزایش تعداد لکه‌های خورشیدی، فعالیت‌های خورشیدی نیز افزایش می‌یابد. به هر دسته لکه خورشیدی یک ناحیه بزرگ فعال در طول چندین هزار کیلومتر وابسته است [جدول (۱۰-۲)]. فعالیت مغناطیسی خورشید در این نواحی، متمرکز می‌گردد.

### نواحی دو قطبی مغناطیسی و پلازما

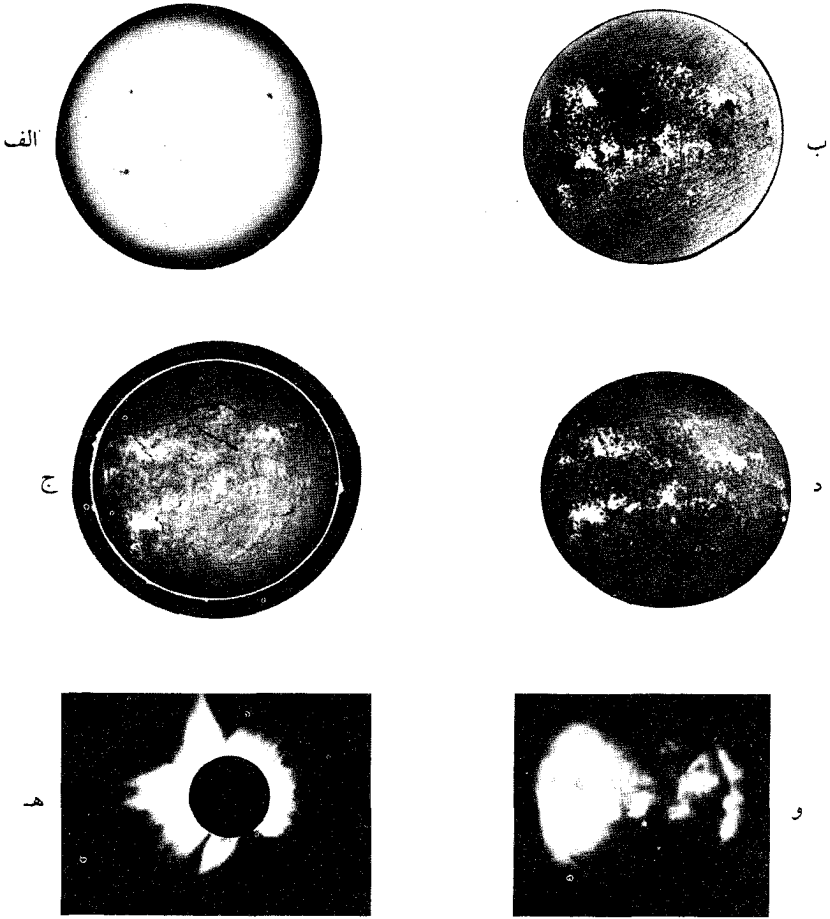
مهمترین خصوصیت نواحی فعال، میدانهای مغناطیسی آنها است:  $0/1T$  در لکه‌های خورشیدی و  $0/01T$  به‌طور کلی. حتی وقتی یک دسته لکه خورشیدی

قطبش‌های متفاوت و مغشوش دارد، ناحیه پوشش معمولاً دارای خصوصیت دو قطبی است و بنابراین آنها را به عنوان نواحی مغناطیسی دو قطبی (BMRs) در نظر می‌گیریم.

یک مغناطیس‌نگار، ساختار میدان مغناطیسی (BMRs) را (شکل (۱۰-۲۰)) ترسیم می‌کند. در یک میدان مغناطیسی، اثر زمین یک طرح طیفی را به چند مؤلفه تجزیه می‌کند، که هر کدام خصوصیت قطبش نوری خود را دارند، وقتی شکافت و شدت این مؤلفه‌ها با یک مغناطیس‌نگار که بر پایه تفاوت قطبیدگیها بنا نهاده شده است، مقایسه شود، یک نقشه از شدت و جهت میدان مغناطیسی نتیجه می‌شود. در نور سفید، فاکولهای شید سپهری روشن هستند که نواحی فعال را نشان می‌دهند. افزایش درخشندگی ناشی از دما و چگالی بالاتر از آنچه که در نواحی نزدیک شیدسپهر پیدا شده است، شبیه به پلاژهای رنگین‌سپهری که فاکولها به آنها مربوطاند می‌باشد. لبه تاریکی ایجاد شده فاکول در نزدیک لبه خورشید مرئی است. هر چند در نزدیکی مرکز قرص خورشید نامرئی می‌باشند.

در قسمت بالای نواحی فعال شیدسپهر پلاژهای درخشان در رنگین سپهر شناورند. پلاژها نواحی ای هستند که در آنجا چگالی و دما بسیار بالاتر از اطراف رنگین سپهر می‌باشد. آنها توسط میدانهای مغناطیسی فعال بوجود آمده‌اند. این اشکال در طیف نگارهای خورشیدی ایجاد شده از نور خط طیفی  $H\alpha$  و خطوط طیفی  $CaII$  ظاهر می‌گردد. از بسیاری جهات شبیه تجمعات و تراکم شبکه رنگین سپهری بنظر می‌آیند (شکل (۱۰-۲۰)).

البته در تاج خورشیدی، نواحی فعال، خودشان را مجدداً در چگالی و دمای بالاتر از جریانهای تاج خورشیدی و تراکم نور سفید تاج خورشیدی عیان می‌نمایند. خط نشری تاج خورشیدی در روی نواحی پلاژ قویتر از هر جای دیگر می‌باشد و افزایش نشر رادیویی از ازدیاد چگالی الکترون نتیجه می‌شود. این نشر رادیویی، نواحی فعال با طول عمر بلند را مشخص می‌کند.



شکل ۱۰-۲۰. خورشید در طول موجهای مختلف در مارس ۱۹۷۰ میلادی. (الف) عکاسی نور سفید. (رصدخانه خورشیدی کولگورا)<sup>۱</sup> (ب) مغناطیس نگاری نواحی دو قطبی مغناطیسی. (دبل یو. لیوینگستن<sup>۲</sup>، رصدخانه های نجومی نوری ملی) (ج) عکس در  $H\alpha$  (پی. اس. مک اینتاش<sup>۳</sup> آزمایشگاههای نجومی و اقیانوسی ملی) (د) طیف نگاری  $Ca^{II}$ . (رصدخانه های نجومی اپتیکی ملی) (ه) خرمن خورشید در خلال یک گرفتگی. (جی. نیوکرک<sup>۴</sup>، رصدخانه های ارتفاع زیاد) (و) پرتوهای X از خرمن خورشیدی. (علوم و مهندسی آمریکا)

1. Culgoora.  
3. P. S. McIntosh.

2. W. Livingston.  
4. G. Newkirk.

## برجستگیها و نمایشهای دیگر

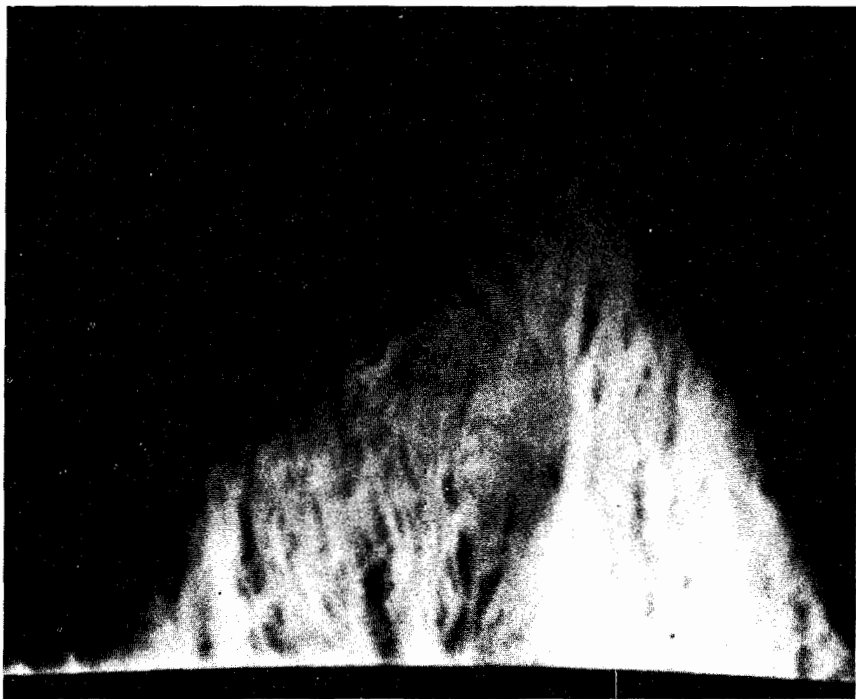
نشانه‌های بارز نواحی فعال، برجستگی‌هایی هستند که وقتی تصویر آنها بر قرص خورشید مشاهده شود مانند رشته‌های تاریک بلند ظاهر می‌گردند. با وجودی که در نور سفید به هنگام گرفتی کامل خورشیدی مرئی هستند، این نمایشها به بهترین وجهی در خطوط  $H\alpha$  یا  $CaII$  ثبت شده‌اند.

برجستگیها، جریانهای گاز رنگین سپهری هستند که نواحی تاج خورشیدی چند ده کیلومتری بالای رنگین سپهر را اشغال کرده‌اند. دو نمونه مشخص برجستگیها عبارتند از خاموش و فعال. برجستگیهای خاموش (شکل ۱۰-۲۱) برای هفته‌ها طول می‌کشد و شبیه پرده‌هایی با گاز هستند که به آرامی از تاج به داخل رنگین سپهر فرو می‌ریزند؛ این برجستگیها در امتداد خط خنثی که دو قطب یک BMR را از هم جدا می‌کند قرار دارند. اغلب برجستگیهای فعال فقط برای چند ساعتی ادامه می‌یابند. در میان فعالترین آنها، برجستگیهای حلقه‌ای هستند (شکل ۱۰-۲۲) که به‌طور نزدیکی وابسته به شراره‌های خورشیدی هستند و فقط یک ساعت یا کمی بیشتر دوام می‌یابند. در خلال این زمان، جریانهای گاز به‌طرف پائین خطوط میدان مغناطیسی که قطبهای BMR را بهم می‌پیوندند، پائین می‌آید. شراره‌های خورشیدی نیز گاهی به علت گسیختن گهگاهی برجستگیهای خاموش، سبب فوران آنها شده و با سرعتهای زیاد آنها را به داخل خرمن پرتاب می‌کنند.

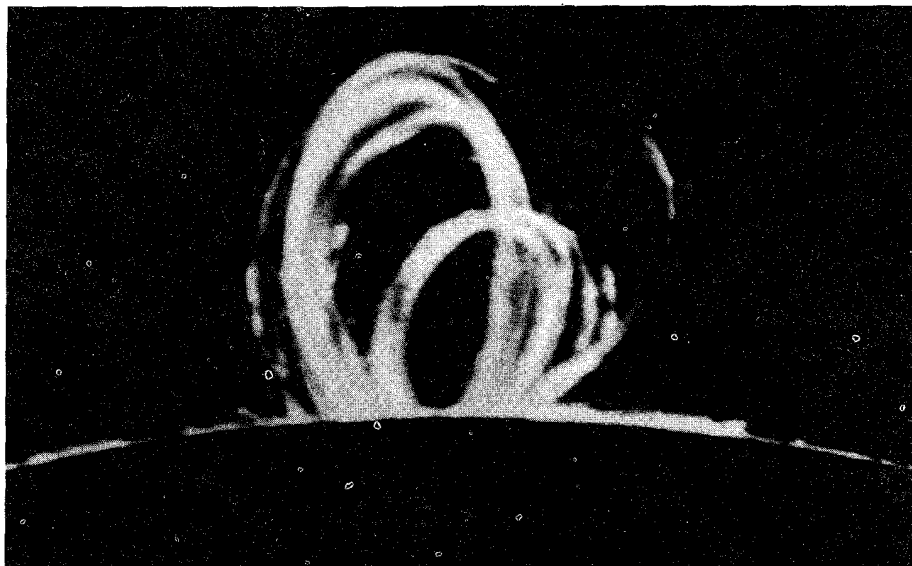
## (ج) شراره‌های خورشیدی

در میان معمائی‌ترین، دیدنی‌ترین و پرنرژی‌ترین پدیده‌های مربوط به نواحی فعال، شراره‌های خورشیدی هستند. با وجودی که این انفجارات گذرا مقدار فوق‌العاده‌ای از انرژی را آزاد می‌نمایند، هنوز بدرستی چگونگی منشاء آنها را نمی‌دانیم. شراره‌ها، فرکانسهای زیادی از پرتوهای X و گاما تا طول موجهای بلند امواج رادیویی را تابش می‌کنند. به‌علاوه، آنها ذرات با انرژی بالا را که پرتوهای کیهانی خورشیدی نامیده می‌شوند گسیل می‌دارند (پروتونها، الکترونها و هسته‌های اتمی، پرتوهای کیهانی خورشیدی در این بخش را ملاحظه کنید). پرتوهای X و ماوراءبنفش تابش شراره، ارتباطات رادیویی کرهٔ خاکی ما را بوسیله ایجاد اغتشاش در یون سپهر زمین مختل

می‌کنند. ابرهای ذرات با انرژی بالا، برای فضاوردانی که دارای حفاظ مناسب نیستند کشنده است، در مدت ۳۰ دقیقه به زمین می‌رسند؛ ابرهای ذرات با انرژی پائین و اغتشاشات در باد خورشیدی در مدت زمانی بین ۶ تا ۲۴ ساعت از خورشید به زمین می‌رسند.



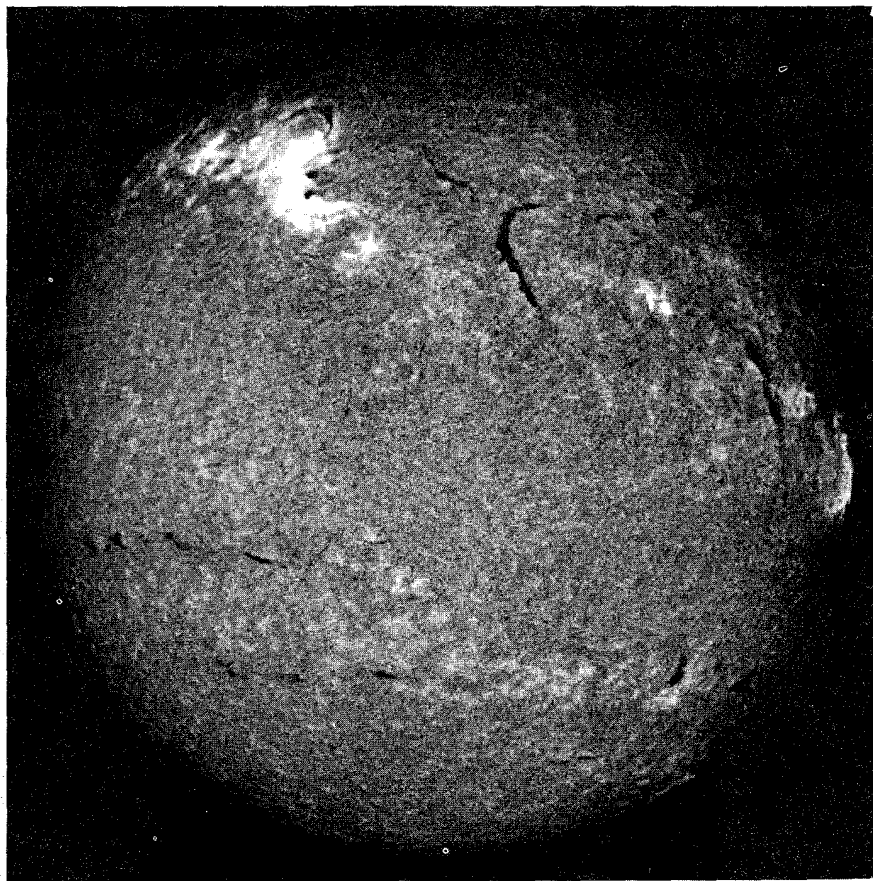
شکل ۱۰-۲۱. یک برجستگی خاموش. به ساختار آتش‌گونه آن توجه کنید. این عکس با زمان طولانی نشان می‌دهد که مواد جریانهای برجسته پائین می‌روند. (رصدخانه‌های نجومی نوری ملی).



شکل ۱۰-۲۲. یک حلقه برجسته. در اینجا حلقه‌های مغناطیسی در تاج، جریان گاز یونیده را کنترل می‌کنند (رصدخانه‌های نجومی نوری ملی)

### تجلیهای نوری

شراره‌ها معمولاً در پلازما همانند روشنی  $H\alpha$  (شکل (۱۰-۲۳)) ظاهر می‌شوند. در حقیقت، خط  $H\alpha$  به صورت یک خط نشری در می‌آید که در ظرف پنج دقیقه به بیشینه می‌رسد و در حدود ۲۰ دقیقه (۳ ساعت برای بزرگترین شراره) متلاشی می‌شود. اندازه شراره‌ها از ۱۰۰۰۰ km تا بیش از ۳۰۰۰۰۰ km متغیر است، عموماً شراره‌های بزرگتر، پراثری‌ترند و عمر طولانی‌تری دارند. در قله چرخه خورشیدی، متوسط وقوع شراره‌های کوچک در حدود ساعت و برای شراره‌های بزرگ در حدود ماه است. آنها در واقع در کمینه خورشیدی وجود ندارند. حتی در خلال بیشینه کوششهایی برای پیش‌بینی شراره‌های عمده هنوز تقریبی هستند.



شکل ۱۰-۲۳. یک شراره در  $H\alpha$ . این شراره قوی (سمت چپ بالا) به نظر می‌رسد که به‌طور روشنی در  $H\alpha$  می‌درخشد. به ارتباط بین دو لکه خورشیدی در یک BMR توجه کنید. برجستگی‌های رشته تاریک نیز در بالای شید سپهر مرئی هستند (رصدخانه‌های نجومی نوری ملی).

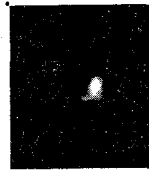
#### پرتو X و انفجارات رادیویی

در بعضی شراره‌ها پرتوهای X و امواج رادیویی سانتیمتری با یکدیگر رخ می‌دهند. این تشعشعات احتمالاً از قسمت بالایی رنگین سپهر یا تاج خورشیدی (شکل ۱۰-۲۴)) سرچشمه می‌گیرند. هر دو از دو مؤلفه تشکیل شده‌اند: (الف) یک مؤلفه

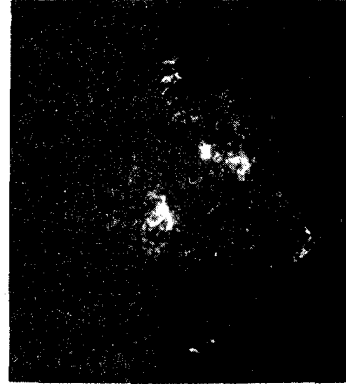
آهسته که حدود ۳۰ دقیقه‌ای طول می‌کشد و (ب) یک مؤلفه آنی یا انفجاری که چند دقیقه بطول می‌انجامد. قسمتی از پدیده انفجار غیر گرمائی (احتمالاً سینکروترون) می‌باشد، که به صورت پرتوهای X با انرژی بیش از ۲۰ keV و گسیل رادیویی متناظر با  $8 \times 10^7$  k صورت می‌گیرد و قسمتی گرمایی است که سبب یونیدگی فوق‌العاده می‌شود. مؤلفه‌های کند کم انرژی از گرم شدن تاج نتیجه می‌شوند و به دمای  $4 \times 10^6$  k می‌رسند؛ چگالیهای فشرده نیز گسیل در خطوط ماوراء بنفش و غیر مجاز را تقویت می‌کنند. در ارتفاعات بالاتر در تاج، یک شراره انفجارات رادیویی سینکروترونی را در طول موجهای متری تولید می‌کند. این اغتشاشات از میان خرمن با سرعتهایی تا ۰/۳c عبور می‌کنند. به نظر می‌رسد که الکترونهاي پارانرژی توسط میدانهای مغناطیسی تاج با شدت خطوط  $10^{-4}$  T بدام می‌افتند که منجر به گسیل رادیویی می‌شوند.



الف



ب



ج

شکل ۱۰-۲۴. نواحی فعال در پرتوهای X. (الف) نواحی فعال در این عکس پرتو X شامل یک شراره خورشیدی نزدیک به مرکز قرص است. (ب) تصویر نزدیکی از شراره در طول موجهای کوتاهتر پرتو X. (علوم و مهندسی آمریکا) (ج) یک عکس  $H\alpha$  برای مقایسه آورده شده است. توجه کنید که نواحی فعال روشن در پرتوهای X نشان داده شده‌اند. (ESSA).

### پرتوهای کیهانی خورشیدی

پرتوهای کیهانی که توسط شراره‌های خورشید شتابدار می‌شوند، خورشید را ترک می‌کنند. یک موج انفجاری از میان بادهای خورشیدی با سرعت  $1500$  km/s منتشر شده

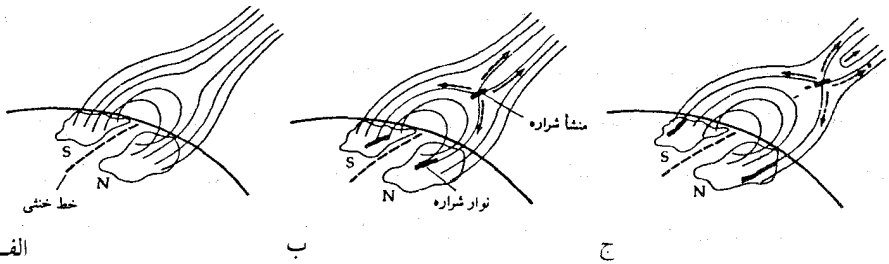


و باد خورشیدی را مغشوش کرده و به زمین جریان می‌یابد (بخش (۱۰-۵)). پروتونها، الکترونها و هسته‌های اتمی در شراره‌ها تا انرژی‌های بالا شتاب‌دار می‌شوند، اینها را پرتوهای کیهانی خورشیدی می‌نامیم. بیشتر ذرات مشاهده شده پروتونها هستند و الکترونها بیشترین مقدار انرژی‌شان را در تحریک انفجارات رادیویی در تاج از دست می‌دهند و فراوانی خورشیدی هسته‌های دیگر کم است. ذرات آلفا (هسته‌های هلیوم) فراوانترین هسته‌ها پس از پروتونها هستند. انرژیهای ذرات خورشیدی از  $keV (10^2 eV)$  تا  $20 GeV (10^9 eV = 1 GeV)$  تغییر می‌کند و بیشتر ذرات در گستره میلیون الکترون ولت تا  $10^6 eV$  قرار دارند. پرنرژی‌ترین ذرات در مدت ۳۰ دقیقه از بیشینه شراره‌های  $H\alpha$  به زمین می‌رسند و سپس بیشترین تعداد ذرات یکساعت بعد از آن و بالاخره پرتوهای کیهانی ذرات کم انرژی تا ساعتها پس از آن به زمین می‌رسند. در حدود نصف انرژی شراره‌ها ( $10^{25} J$ ) برای بزرگترین شراره‌ها!) به صورت گسیل  $H\alpha$  است، نصف دیگر راموج ضربه‌ای دربر می‌گیرد و تنها ۰.۱٪ از آن به صورت پرتوهای کیهانی خورشیدی است.

#### یک الگوی شراره

تفکر فعلی، تصویر زیر را از توسعه یک شراره پیشنهاد می‌کند (شکل (۱۰-۲۵)). حلقه‌های مغناطیسی از طریق تاج خورشیدی دو قسمت یک ناحیه فعال دو قطبی را بهم ارتباط می‌دهند، خطوط میدان از قسمت‌های خارجی ناحیه فعال تا بی‌نهایت ادامه دارد. یک برجستگی ممکن است یک خط خنثی در BMR را تعریف کند. یک تنش روی میدان مغناطیسی (در ناحیه همرفتی؟) سبب ناپایداری می‌شود. انرژی به‌طور آبی در قسمت بالایی حلقه‌ها به صورت خطوط میدان مغناطیسی با اتصال مجدد آزاد می‌شود. فرایندی مشابه با آنچه در مغناطیس سپهر زمین است (بخش (۴-۶)). بر طبق قانون لنز جریانهای الکتریکی که با این تغییر در میدان مغناطیسی مخالفت می‌کنند، ایجاد می‌گردند و ائتلاف اهمی جریانهای گاز را گرم می‌نماید. حرارت ناشی از آن ناحیه تاج خورشیدی باعث گسیل پرتوهای X، نشر ماوراءبنفش دور و انفجارات رادیویی سانتیمتری می‌گردد، در حالی که الکترونها و پروتونها به طرف پائین در طول حلقه‌ها بداخل رنگین سپهر شتاب پیدا می‌کنند و آن را گرم کرده تا پرتو  $H\alpha$  درخشان ایجاد کنند (شراره‌های عادی و دو باریکه‌ای کاملاً متداول بوده و متناظر با دو طرف حلقه هستند)،

پرتوهای X با انرژی بسیار کمتر و ناحیه گذار تابش ماوراء بنفش دور تولید می کنند. به طور همزمان سایر ذرات توسط الکترونیایی که انفجارات رادیویی در طول موج متریک و پروتونها و هسته های دیگری که از پرتوهای کیهانی خورشیدی می آیند، شتاب می گیرند. تنها شراره های عمده، تمام این تجلیات را تولید می کنند، پرانرژی ترین شراره ها حتی ممکن است پرتوهای گاما نشر کنند. بهرحال، اکثر شراره های خورشیدی بسیار معقول ترند.



شکل ۱۰-۲۵. مدل یک شراره. (الف) مرحله پیش شراره از یک BMR. به خطوط میدان مغناطیسی غیر متصل در بالای حلقه های تاج توجه کنید. (ب) شروع شراره به صورت خطوط میدان مجدداً متصل می شود و یک جریان به طرف پای BMR جاری می شود. (ج) محل شراره در داخل تاج خورشیدی به طرف بالا جابجا می شود. (آر. نویز<sup>۱</sup>)

#### (د) یک مدل چرخه خورشیدی

از سال ۱۹۶۰ میلادی تلاش برای ارائه یک مدل مغناطیسی چرخه خورشیدی که حداقل بعضی از مشاهدات را تأیید کند، وجود دارد. یک مدل (شکل ۱۰-۲۶)) با پیوند میدان های مغناطیسی خورشید به چرخش جزئیش یک چرخه خورشیدی ۲۲ ساله را ایجاد می کند.

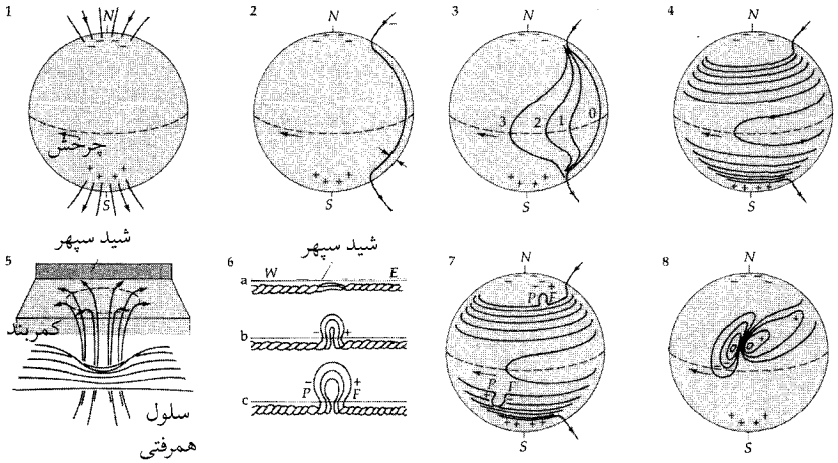
قبل از شروع فعالیت خورشیدی، خورشید یک میدان مغناطیسی دو قطبی ضعیف، با خطوط نیروی عبوری در امتداد نصف النهارها حدود  $R_{\odot} / 10$  زیر سطح خورشید دارد. هر خط با جمع شدن در نزدیک قطبها خود را کامل می کند. این آرایش یک میدان

قطبی وار<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. چرخش جزئی خورشید هر خط را در امتداد استوا به طرف بیرون کشیده و آن را چندین بار حول خورشید می‌پیچد. یک میدان چنبره‌ای تشکیل می‌شود. همچنانکه چگالی خطوط افزایش می‌یابد، فشار مغناطیسی وابسته نیز بالا می‌رود، در داخل لوله‌های شار که شامل خطوط میدان هستند، فشار گاز بایستی کاهش یابد (برای داشتن تعادل فشار)، اما در این صورت لوله‌ها از اطرافشان کم چگال‌ترند - شناوری مغناطیسی را احساس می‌کنند. وقتی حرکات گاز (همرفت) به دور خطوط می‌چرخند. شدت میدان باز هم افزایش می‌یابد.

تقویت میدان مغناطیسی در عرضهای جغرافیایی بالاتر (حدود  $\pm 35^\circ$ ) حداکثر است، بنابراین یک شدت میدان بحرانی در ابتدا در آنجا ایجاد می‌گردد. در این مکان یک حلقه شار از سطح خورشید برخاسته و همانند یک BMR قویترین میدان رادر لکه‌های خورشیدی نمایان می‌کند. ابر دانه‌ها احتمالاً خروج یک لوله شار را ساده می‌کنند، زیرا لکه‌ها عموماً از مرزهای ابر دانه‌ها سرچشمه می‌گیرند. قطبهای مخالف نتیجه‌ای از پیوستگی خطوط میدان از شمال به جنوب می‌باشند: به دلیل این که لکه بعدی هم از نظر عرض جغرافیایی و هم در امتداد لوله شار به قطبهای خورشیدی نزدیکتر است و قطبیدگی آنها مخالف قطبیدگی نزدیکترین قطب می‌باشد.

در عرضهای جغرافیایی پائین‌تر، شدت میدان بحرانی بعداً حاصل می‌شود. لکه خورشیدی بیشینه به زمان بیشترین شدت میدان در بزرگترین نوار عرض جغرافیایی مربوط می‌شود؛ سرانجام خطوط مخلوط شده و دوباره در نزدیکی استوا ترکیب می‌شوند بنابراین وقوع تعداد کمتری لکه کوچکتر در چرخه خورشیدی صورت می‌گیرد. ابر دانه‌ای لوله‌های شار را به اطراف می‌راند و میدانهای مغناطیسی را تلف می‌کند. چرخش جزئی سبب راندن نواحی مغناطیسی بعدی به طرف قطبها می‌شود، در صورتی که نواحی قبلی به طرف استوا حرکت می‌کنند. در استوا، نواحی قطبیدگی مخالف از نیمکره‌های متفاوت بهم رسیده و نابود می‌شوند. در نواحی بعدی در قطبین همگرا می‌شوند. در آنجا قطبیدگی مخالف آنها ابتدا خنثی شده و سپس میدانهای قطبی معکوس می‌شوند. پس از ۱۱ سال قطبیدگی میدان دو قطبی کلی خورشید بر عکس

شده و مرحله نیمه دوم چرخه ۲۲ ساله بنا می شود.



شکل ۱۰-۲۶. مدل چرخه خورشیدی. در شروع (۱) خورشید یک میدان دوقطبی ساده دارد که خطوط نیرو از عرضهای جغرافیایی  $60^\circ$  خارج می شوند و در پایه منطقه همرفتی قرار دارند. (۲) چرخش جزئی (۳) خطوط میدان را به طرف خارج و در امتداد استوا می کشد تا آنها به طور محکم بسته شوند. (۴) سلولهای همرفتی بالا آمده (۵) خطوط میدان را به شکل طناب می پیچند. (۶) گره ها طوری توسعه می یابند که فشار مغناطیسی افزایش یافته و سبب می شوند که گره ها به طرف سطح بالا بیایند تا نواحی دوقطبی همراه (۷) با میدانهای پیشین (P) و بعدی (F) شکل گیرند. میدانهای بعدی طوری به طرف قطبین پیش می روند (۸) که ابتدا خنثی شده و سپس میادین قطبی عوض می شوند.

به طور خلاصه، تجزیه و تحلیل چرخه خورشیدی بر توسعه مدلهای دیناموی مغناطیسی خورشیدی بنا می شود. اخیراً چنین مدلهایی بر اثر متقابل پیکربندیهای میدان چنبره ای و قطبی وار متمرکز شده اند. بُرش چرخش جزئی یک میدان چنبره ای از یک میدان قطبی وار تولید می شود. بدین ترتیب حرکات چرخه وار در ناحیه همرفتی ممکن است مجدداً یک میدان قطبی وار تولید کند. اگر چنین باشد، آنگاه تمام ستارگان با ناحیه همرفتی بیرونی و چرخش جزئی بایستی دارای چرخه های مغناطیسی باشند. اکنون مشاهدات جالبی داریم که چنین حالتی را دارد (بخش ۱۸-۳). بنابراین، می توانیم استنتاج کنیم که تا پایه های فیزیک پیش رفته ایم، حتی اگر تمام جزئیات را ندانیم.

## مسائل

۱. با محاسبه فاصله مرکز خورشید تا مرکز جرم سیستم خورشید - مشتری نشان دهید که خورشید در مرکز منظومه شمسی در حال سکون نیست.
۲. عرض دوپلری گرمایی یک خط طیفی در  $500\text{nm}$  را که در شیدسپهر خورشید شکل گرفته است ( $T=5400\text{K}$ ) پیدا کنید.
۳. (الف) دمای شیدسپهر  $6000\text{K}$  داده شده است. آیا انتظار دارید که کدام یک از برانگیختگی‌های برخوردی یا تابشی در برانگیختگی اتمهای یدروژن به سطح تراز دو ( $n=2$ ) بیشتر اهمیت داشته شد؟  
(ب) آیا انتظار دارید که خط لیمن آلفا در نشر یا جذب ظاهر شود؟
۴. دو خط زیر با پتانسیل برانگیختگی مشابه را در نظر بگیرید: FeI در  $414/4\text{nm}$  و FeII در  $417/3\text{nm}$ . به طور کلی توضیح دهید (با ارجاء به معادله ساها و یا بولتزمن) چرا خط  $414/4\text{nm}$  قوی‌ترین خط از دو خط در طیف شیدسپهری است و خط ضعیف‌تر در طیف رنگین سپهری خواهد بود.
۵. با توجه به توصیفی که از رنگین سپهر و کدری رادیوئی تاج ارائه کردیم، توضیح دهید که چگونه حرکت یک انفجار رادیویی خورشیدی را در جو خورشیدی تعیین می‌کنید.
۶. چگونه می‌توان ساختار دمای یک لکه خورشیدی را فقط با استفاده از طیف پیوسته‌اش تعیین کرد؟
۷. چگونه به وضوح یک لکه خورشیدی را نزدیک کمینه لکه خورشیدی در چرخه جدید یا قدیم مشخص می‌کنید؟
۸. بیان شده است که بعضی از شراره‌ها دارای تندیهایی بیش از تندی فرار از خورشید ر رنگین سپهر هستند. تندی بحرانی چقدر است؟
۹. با استفاده از داده‌های مربوط به باد خورشیدی در این فصل، آهنگ متوسط کاهش جرم خورشید ( $\frac{M_{\odot}}{\text{سال}}$ ) را (الف) از باد خورشیدی و (ب) از تولید انرژی حساب کنید.
۱۰. معادله تعادل هیدرواستاتیکی را برای تخمین فشار در مرکز خورشید به کار ببرید.
۱۱. مقیاس ارتفاعات برای هیدروژن را در شیدسپهر، رنگین سپهر و تاج خورشیدی حساب کرده و مقایسه کنید.

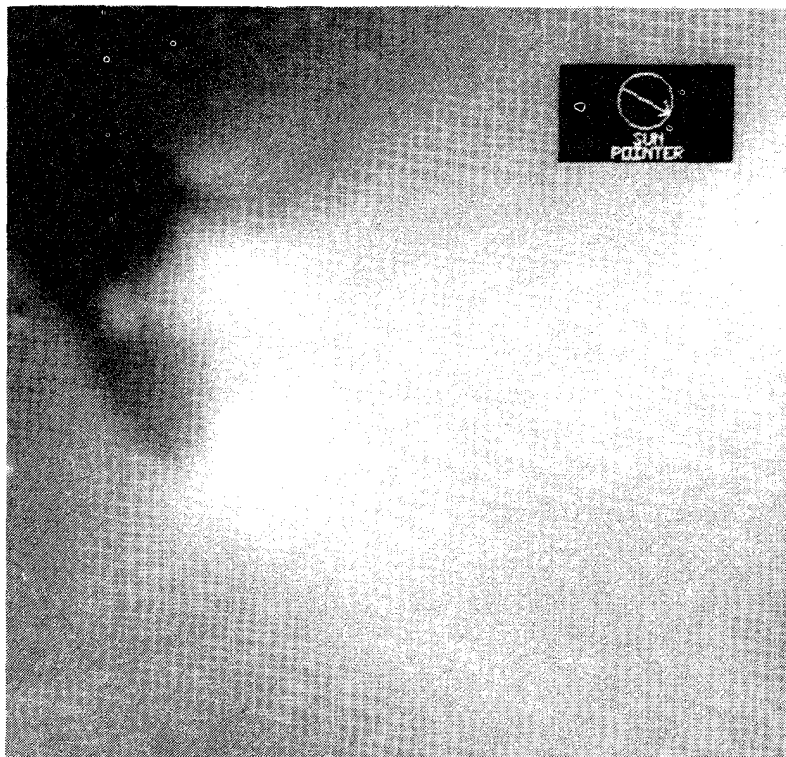
## اطلاعات جدید در مورد ستاره دنباله‌دار هالی

با یک شبکه بین‌المللی از تلسکوپها (تماشای بین‌المللی هالی) و با دسته‌ای از کشتی فضائی، ستاره‌شناسان ستاره دنباله‌دار هالی را متفاوت با سایر دنباله‌دارها مورد آزمایش قرار دادند. دسته‌بندی انبوه داده‌ها چند سال طول خواهد کشید؛ در اینجا ما بعضی از نتایج کلیدی را روشن می‌کنیم (همانند ژوئن ۱۹۸۶ میلادی).

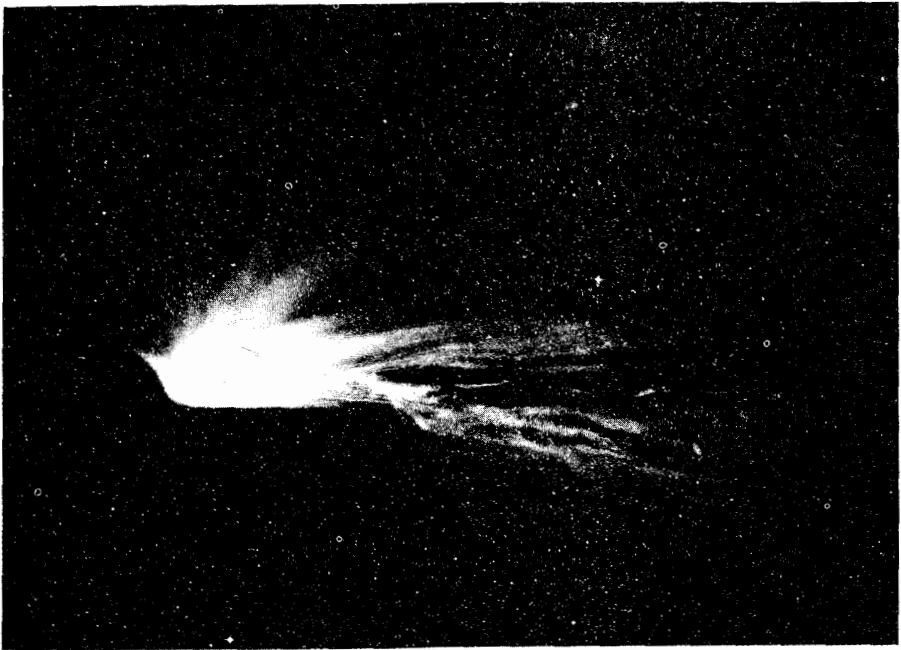
مأموریت‌های همزمان، به ویژه وگای<sup>۱</sup> و ۲ شوری و آژانس فضائی اروپا (ESA) جیوتو<sup>۲</sup> برای نفوذ به گیسوی دنباله‌دار هالی و اندازه‌گیریهای محیط فیزیکی آنجا و همچنین تصویر کردن هسته که قبلاً هرگز دیده نشده بود، هدف‌گیری کردند. برای همه ستاره‌های دنباله‌دار! یکی از شگفتیهای بزرگ، سیاهی سطح هسته بود؛ آلبدوی آن تنها در حدود ۰/۰۳ می‌باشد که آن را در ردیف یکی از تاریکترین اشیاء منظومه شمسی قرار می‌دهد. ذرات گرد و غبار در ناحیه هسته عمدتاً گربن (۹۰ درصد) می‌باشد و فقط قسمت کمی سیلیکون (۱۰ درصد) از آلبدوی بسیار کوچک انتظار می‌رود. در حقیقت، سطح هسته یک سیارک نمونه c را نشان می‌دهد (بخش (۷-۲)).

همچنان‌که از مدل کوه یخ کثیف و پیل انتظار می‌رود، طرف آفتابگیر هسته منبع تراوش مواد است (بخش (۷-۳)). عجیب این است که تراوش مواد در چند جت باریک بر طبق نتایج جیوتو در حدود ۹ جت متمرکز می‌شود که قسمت‌های چشمه آن بیش از چند کیلومتر قطر ندارند. این جتها، گرد و غبار (۲۰ درصد) و ترکیبات آب (۸۰ درصد) را با تندیهای حدود ۱ کیلومتر بر ثانیه از ده درصد سطح کل به بیرون گسیل می‌دارند. آنها

به صورت نواحی روشن در تصاویر CCD (شکل (۷-۱)) نشان داده می‌شوند و نور پراکنده از گرد و غبار جتها زمینه را برای دیدن هسته تاریک آماده می‌کند. ذرات گرد و غبار بسیار کوچک هستند که اغلب آنها دارای قطرهای در حدود ۱۰ نانومتر و کمتر می‌باشند. تقریباً شکلی شبیه یک سیب زمینی دارند و ابعاد هسته تقریباً  $15 \times 10$  کیلومتر می‌باشد که در هر ۵۲ ساعت یکبار می‌چرخد. هسته با چند شکل دهانه مانند به قطری حدود یک کیلومتر و یک تپه به ابعاد قاعده  $2 \times 1$  کیلومتر و حدود چند صد متر ارتفاع، سطحی شبیه به صدف دوکپه دارد.



شکل U-۱. هسته ستاره دنباله دار هالی. این عکس توسط دوربین چند رنگ فضاپیمای جیوتو گرفته شده که نواحی روشن پرتابه‌ها و یک سطح تاریک که سطح نامنظم شکل یافته هسته است را نشان می‌دهد. «پشتاز خورشید» در گوشه بالا توسط یک پیکان جهت خورشید را هنگامی که تصویر گرفته شده است، نشان می‌دهد. (انستیتو ماکس پلانک برای هواشناسی و آژانس فضائی اروپا)



شکل U-۲. دنباله ستاره دنباله دار هالی. این عکس توسط تلسکوپ اشمیت انگلستان در استرالیا گرفته شده است که گیسو و دنباله را در ۲۲ فوریه ۱۹۸۶ میلادی نشان می دهد. به شکل پنکه مانند دنباله گرد و غباری، و ساختار موجی پیچیده در دنباله یونی، توجه کنید. (رصد خانه سلطنتی ادین بورو<sup>۱</sup>)

وسایل کلیدی روی فضاپیما برای پی بردن به جزئیات بر هم کنش گازهای ستاره دنباله دار با باد خورشیدی طراحی شده اند. یک تاج هیدروژنی به طول ۱۰ کیلومتر به سمت خارج آشکار شده است. در فاصله ۱ میلیون کیلومتری یونهای سنگین اندازه گیری شده اند. در حدود همین فاصله، یک ضربه کمانی شکل ضخیم مشخص شده است. این ضربه بسیار متفاوت با ضربه کمان شکل زمینی است (بخش ۴-۶)، که یک گذار سریع از شارش ابر صوتی باد خورشیدی را مشخص می کند. ضربه ستاره دنباله دار هالی ضخیم است (تقریباً ۱۰۰۰۰ کیلومتر) و به تدریج باد خورشیدی را کند می کند. اساساً این شتاب کند شونده همان طور که باد خورشیدی یونهای سنگین را از



ستاره دنباله‌دار جدا می‌کند، رخ می‌دهد. در اعماق ستاره دنباله‌دار، یونها اکثراً اجزای آب ( $H_3O^+$ ,  $H_2O^+$  مخصوصاً فراوانند) با مقدار تعجب‌آور سولفور یک بار یونیده (منبع ناشناخته) و کربن (از گرد و غبار هسته) می‌باشند. جت‌ها به تنهایی عامل آهنگ تولید یون محسوب نمی‌شوند؛ بعضی از آنها به این علت سطح را ترک می‌کنند، که سرعت فرار در آنجا بسیار کم است.

مشاهده‌کنندگان زمینی نیز در رصدهای ترتیب داده شده‌ای که شانس بهتری از آنچه در قبل مربوط به درک فیزیکی دنباله‌دارها به دست می‌داد، مشارکت نزدیکی داشته‌اند. به ویژه، عکسهای دنباله‌دار یونی ستاره دنباله‌دار با زاویه عریض، جالب بود (شکل (۷-۲)). این عکسها پیچها و بازوهای را همان طور که پلاسمای ستاره دنباله‌دار با باد خورشیدی بر هم کنش کرده و در امتداد میدان مغناطیسی حمل می‌کند، نشان می‌دهند. حداقل یک سری از مشاهدات یک انفصال مغناطیسی را مشخص می‌کنند (نظیر میدان مغناطیسی باد خورشیدی که جهت خود را تغییر می‌دهد) و یک اتصال مجدد به همان طور که دنباله قدیمی با باد به طرف پائین جریان می‌یابد. (فرآیندهای فیزیکی مشابهی در مغناطیس سپهر زمین شفق قطبی را تولید می‌کنند (بخش (۴-۶)).

اکنون ستاره دنباله‌دار هالی قبل از آنکه به طرف خورشید برگشت دیگری داشته باشد، به سمت اوج مدارش پیش می‌رود. اما این دنباله‌دار میراث خود را برای علم باقی گذاشته است - اکنون نخستین تشخیص منظرو ستاره دنباله‌دار، کمتر مرموز است، اما بیش از گذشته نیز معما ساز می‌باشد.

## ضمیمه ۱

### کتابشناسی

ضمیمه ۱ - ۰۲ مجلات و نشریات ادواری

(الف) ستاره‌شناسی عمومی

(مناسب برای افراد علاقه‌مند)

- Astronomy*, monthly. AstroMedia Corp., Box 92788, Milwaukee, WI.
- The Irish Astronomical Journal*, quarterly. Observatories of Armagh and Dunsink, Armagh, Northern Ireland.
- Journal of the British Astronomical Association*, bimonthly. 303 Bath Road, Hounslow West, Middlesex, England.
- Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, bimonthly. 252 College St., Toronto, Ontario.
- Mercury*, bimonthly. Astronomical Society of the Pacific, 1240 24th Ave., San Francisco, CA.
- The Observatory*, monthly. Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux Castle, Hailsham, Sussex, England.
- Physics Today*, monthly. American Institute of Physics, 335 E. 45th St., New York, NY.
- Proceedings of the Astronomical Society of Australia*. Sydney University Press, Sydney, Australia.
- Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, bimonthly. Astronomical Society of the Pacific, 1240 24th St., San Francisco, CA.
- Scientific American*, monthly. 415 Madison Ave., New York, NY.
- Sky and Telescope*, monthly, Sky Publishing Corp., 49 Bay State Rd., Cambridge, MA.

(ب) انتشارات با طبیعت فنی بیشتر

- The Astronomical Journal*, monthly. American Institute of Physics, 335 E. 45th St., New York, NY.
- Astronomy and Astrophysics*, monthly. Springer-Verlag, 175 Fifth Ave., New York, NY.
- The Astrophysical Journal*, semimonthly. University of Chicago Press, 5750 Ellis Ave., Chicago, IL.
- Icarus*, *International Journal of Solar System Studies*, bimonthly. Academic Press, Orlando, FL.
- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, monthly. Blackwell Scientific, 5 Alfred St., Oxford, England.
- Space Science Reviews*, monthly. D. Reidel, Singel 419-421, Dordrecht, Holland.

ضمیمه ۱ - ۰۱ کتابهای ستاره‌شناسی عمومی

- Abell, George. *Exploration of the Universe*, 4th ed. Philadelphia: Saunders College, 1982.
- Aller, Lawrence H. *Atoms, Stars and Nebulae*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.
- Audouze, Jean, and Israel, Guy. *The Cambridge Atlas of Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- Beatty, J. Kelly, O'Leary, Brian, and Chaikin, Andrew. *The New Solar System*, 2d ed. Cambridge, MA: Sky, 1982.
- Bok, B. J., and Bok, P. F. *The Milky Way*, 5th ed. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1981.
- Dufay, Jean. *Introduction to Astrophysics: The Stars*. New York: Dover, 1964.
- Field, G., and Chaisson, E. *The Invisible Universe*. Boston: Birkhauser, 1985.
- Harrison, E. *Cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- Hartmann, William K. *Astronomy: The Cosmic Journey*. Belmont, CA: Wadsworth, 1978.
- Jastrow, Robert, and Thompson, M. H. *Astronomy: Fundamentals and Frontiers*, 4th ed. New York: Wiley, 1983.
- Minnaert, M. G. J. *Practical Work in Elementary Astronomy*. New York: Springer-Verlag, 1969.
- Noyes, R. *The Sun, Our Star*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1982.
- Pasachoff, Jay M. *Contemporary Astronomy*, 3d ed. Philadelphia: Saunders College, 1985.
- Pasachoff, J. M., and Kutner, M. L. *University Astronomy*. Philadelphia: Saunders College, 1978.
- Rose, W. K. *Introduction to Astrophysics*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973.
- Russell, H. N., Dugan, R. S., and Stewart, J. Q. *Astronomy*. Boston: Ginn, 1926. (a classic)
- Shu, Frank H. *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy*. Mill Valley, CA: University Science Books, 1982.
- Swihart, Thomas L. *Astrophysics and Stellar Astronomy*. New York: Wiley, 1968.
- Unsold, Albrecht. *The New Cosmos*, 3d ed. New York: Springer-Verlag, 1983.
- Zeilik, Michael. *Astronomy: The Evolving Universe*, 4th ed. New York: Harper and Row, 1985.
- Zeilik, Michael, and Gaustad, John. *Astronomy: The Cosmic Perspective*. New York: Harper and Row, 1983.

*Astrophysics and Space Science Library*. D. Reidel, Singel 419-421, Dordrecht, Holland.

*International Astronomical Union Symposia (and Colloquia)*. D. Reidel, Singel 419-421, Dordrecht, Holland.

(ج) سمپوزیومها و رشته انتشارات پیوسته

*Advances in Astronomy and Astrophysics*. Academic Press, Orlando, FL.

*Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Annual Review, 4139 El Camino Way, Palo Alto, CA.

## ضمیمه ۲

### صورت‌های فلکی

جدول ضمیمه ۲ - ۱ صورت‌های فلکی

موضع تقریبی				اختصار	نام جنسیت	نام
مختصات کیهلانی		مختصات استوایی				
b	l	$\delta$	$\alpha$			
°	°	°	h			
-۲۵	۱۳۵	+۴۰	۱	And	Andromedae	امراالمسلله
+۱۵	۲۷۰	-۳۵	۱۰	Ant	Antilae	تلمبه
-۱۵	۳۱۵	-۷۵	۱۶	Aps	Apodis	مرغ بهشتی
-۶۰	۵۰	-۱۵	۲۳	Aqr	Aquarii	دلو
-۱۵	۴۵	+۵	۲۰	Aql	Aquiliae	عقاب
-۱۰	۳۳۵	-۵۵	۱۷	Ara	Arae	مجمره
-۳۵	۱۶۰	+۲۰	۳	Ari	Arietis	بره
+۱۰	۱۷۵	+۴۵	۶	Aur	Aurigae	ارابه‌ران
+۶۵	۴۵	+۳۰	۱۵	Boo	Bootis	عوا
-۳۵	۲۴۵	-۴۰	۵	Cae	Caeli	قلم
+۲۰	۱۴۵	+۷۰	۶	Cam	Camelopardalis	زرافه
+۳۵	۲۱۰	+۲۰	۹	Cnc	Cancri	سرطان
+۸۰	۱۱۰	+۴۰	۱۳	CVn	Canum Venaticorum	سگ‌های تازی
-۱۰	۲۳۰	-۲۰	۷	CMa	Canis Majoris	کلب اکبر
+۲۰	۲۱۵	+۵	۸	CMi	Canis Minoris	کلب اصغر
-۴۰	۳۰	-۲۰	۲۱	Cap	Capricorni	بزغاله
-۱۰	۲۷۰	-۶۰	۹	Car	Carinae	شاه‌تخته
-۵	۱۲۵	+۶۰	۱	Cas	Cassiopeiae	ذات‌الکرسی
+۱۰	۳۰۵	-۵۰	۱۳	Cen	Centauri	قنطورس
+۱۰	۱۱۰	+۷۰	۲۲	Cep	Cephei	قیفاوس
-۶۵	۱۷۰	-۱۰	۲	Cet	Ceti	نهنگ
-۲۰	۳۰۰	-۸۰	۱۱	Cha	Chamaeleontis	آفتاب‌پرست
۰	۳۲۰	-۶۰	۱۵	Cir	Circini	پرگار
-۲۵	۲۴۰	-۳۵	۶	Col	Columbae	کبوتر

موضع تقریبی				اختصار	نام جنسیت	نام
مختصات کهنشانی		مختصات استوایی				
b	l	$\delta$	$\alpha$			
+۸۵	۳۲۰	+۲۰	۱۳	Com	Comae Berenices	گیسو
-۲۰	۳۵۵	-۴۰	۱۹	CrA	Coronae Australis	تاج جنوبی
+۵۰	۵۰	+۳۰	۱۶	CrB	Coronae Borealis	تاج شمالی
+۴۰	۲۹۰	-۲۰	۱۲	Crv	Corvi	غراب
+۴۰	۲۷۰	-۱۵	۱۱	Crt	Crateris	باطیه
.	۲۹۵	-۶۰	۱۲	Cru	Crucis	صلیب
-۵	۸۵	+۴۰	۲۱	Cyg	Cygni	دجاجه
-۲۵	۶۰	+۱۰	۲۱	Del	Delphini	دلفین
-۳۵	۲۷۵	-۶۵	۵	Dor	Doradus	ماهی طلایی
+۳۵	۹۵	+۶۵	۱۷	Dra	Draconis	ازدها
-۳۰	۵۵	+۵	۲۱	Equ	Equulei	قطعه الفرس
-۶۰	۲۰۵	-۲۰	۳	Eri	Eridani	نهر
-۶۰	۲۲۵	-۳۰	۳	For	Fornacis	کوره
+۱۰	۱۹۵	+۲۰	۷	Gem	Geminorum	دو پیکر
-۵۵	۳۵۵	-۲۵	۲۲	Gru	Gruis	درنا
+۳۵	۵۰	+۳۰	۱۷	Her	Herculis	هرکول
-۵۰	۳۸۰	-۶۰	۳	Hor	Horologii	ساعت
+۲۵	۲۶۰	-۲۰	۱۰	Hya	Hydrae	شجاع
-۴۰	۳۰۰	-۷۵	۲	Hyl	Hydri	نرمار
-۴۰	۳۴۰	-۵۵	۲۱	Ind	Indi	هندی
.	۱۰۰	+۴۵	۲۲	Lac	Lacertae	چلپاسه
+۶۰	۲۳۰	+۱۵	۱۱	Leo	Leonis	اسد
+۵۵	۱۹۰	+۳۵	۱۰	LMi	Leonis Minoris	اسد کوچک
-۲۰	۲۲۵	-۲۰	۶	Lep	Leporis	خرگوش
+۳۵	۳۴۵	-۱۵	۱۵	Lib	Librae	ترازو
+۱۰	۳۲۵	-۴۵	۱۵	Lup	Lupi	گورگ
+۳۰	۱۷۵	+۴۵	۸	Lyn	Lyncis	سیاه گوش
+۱۵	۷۰	+۴۰	۱۹	Lyr	Lyrae	شلیاق
-۳۰	۲۹۰	-۸۰	۵	Men	Mensae	میز
-۴۰	۱۰	-۳۵	۲۱	Mic	Microscopii	میکروسکپ
.	۲۱۰	-۵	۷	Mon	Monocerotis	نکشخ
-۱۰	۳۰۰	-۷۰	۱۲	Mus	Muscae	مگس
.	۳۳۰	-۵۰	۱۶	Nor	Normae	گونیا

موضع تقریبی				اختصار	نام جنسیت	نام
مختصات کهکشانی		مختصات استوایی				
b	l	$\delta$	$\alpha$			
-۳۰	۳۰۵	-۸۵	۲۲	Oct	Octantis	اوکتان
+۱۵	۳۰	۰	۱۷	Oph	Ophiuchi	حوا
-۱۵	۱۹۵	+۵	۵	Ori	Orionis	جبار
-۳۰	۳۳۰	-۶۵	۲۰	Pav	Pavonis	طاروس
-۲۵	۸۰	+۲۰	۲۲	Peg	Pegasi	اسب بالدار
-۱۰	۱۴۵	+۴۵	۳	Per	Persei	برساوش
-۷۰	۳۰۰	-۵۰	۱	Phe	Phoenicis	سیمرغ
-۳۰	۲۶۰	-۵۵	۶	Pic	Pictoris	نقاش
-۴۵	۱۲۵	+۱۵	۱	Psc	Piscium	ماهی
-۵۰	۲۰	-۳۰	۲۲	PsA	Piscis Austrini	ماهی جنوبی
-۵	۲۵۵	-۴۰	۸	Pup	Puppis	کشیدم
+۱۰	۲۵۵	-۳۰	۹	Pyx	Pyxidis	قطب نما
-۴۵	۲۷۰	-۶۰	۴	Ret	Reticuli	نور ماهیگیری
۰	۵۰	+۱۰	۲۰	Sge	Sagittae	تیر
-۱۵	۱۰	-۲۵	۱۹	Sgr	Sagittarii	قوس
۰	۳۴۵	-۴۰	۱۷	Sco	Scorpii	عقرب
-۸۰	۱۰	-۳۰	۰	Scl	Sculptoris	سنگتراش
-۵	۲۵	-۱۰	۱۹	Sct	Scuti	سهر
+۵	۲۰	۰	۱۷	Ser	Serpentis	مار
+۴۰	۲۴۰	۰	۱۰	Sex	Sextantis	سکستانت
-۳۰	۱۸۰	+۱۵	۴	Tau	Tauri	گاو نر
-۲۰	۳۵۰	-۵۰	۱۹	Tel	Telescopii	تلسکوپ
-۳۰	۱۴۰	+۳۰	۲	Tri	Trianguli	مثلث
-۱۰	۳۲۰	-۴۵	۱۶	TrA	Trianguli Australis	مثلث جنوبی
-۵۰	۳۱۰	-۶۵	۰	Tuc	Tucanae	توکان
+۶۰	۱۶۰	+۵۰	۱۱	UMa	Ursae Majoris	دب اکبر
+۴۵	۱۱۰	+۷۰	۱۵	UMi	Ursae Minoris	دب اصغر
۰	۲۶۰	-۵۰	۹	Vel	Velorum	بادبان
+۶۵	۳۱۰	۰	۱۳	Vir	Virginis	سنبله
-۲۰	۲۸۰	-۷۰	۸	Vol	Volantis	ماهی پرنده
-۵	۶۵	+۲۵	۲۰	Vul	Vulpeculae	روباه

### ضمیمه ۳

## داده‌های منظومه شمسی

جدول ضمیمه ۱-۳ مدارهای سیاره‌ای

سیاره	علامت	دوره تناوب قمری (روز)	دوره تناوب نجومی		نیم محور اصلی		خروج از مرکز	تماایل نسبت به دایره البروج
			سالهای برجی	روزها	AU	۱۰ <sup>۶</sup> km		
عطارد	☿	۱۱۵/۹	۰/۲۴۱	۸۷/۹۶	۰/۳۸۷	۵۷/۹	۰/۲۰۶	۷/۰۰۰
زهره	♀	۵۸۳/۹	۰/۶۱۵	۲۲۴/۷۰	۰/۷۲۳	۱۰۸/۲	۰/۰۰۷	۳/۳۹
زمین	♁	—	۱/۰۰۰	۳۶۵/۲۶	۱/۰۰۰	۱۴۹/۶	۰/۰۱۷	۰/۰۰
مریخ	♂	۷۷۹/۹	۱/۸۸	۶۸۶/۹۸	۱/۵۲۴	۲۲۸/۰	۰/۰۹۳	۱/۸۵
مشتری	♃	۳۹۸/۹	۱۱/۸۶	—	۵/۲۰۳	۷۷۸/۳	۰/۰۴۸	۱/۳۱
زحل	♄	۳۷۸/۱	۲۹/۴۶	—	۹/۵۴	۱۴۲۷	۰/۰۵۶	۲/۴۹
اورانوس	♅	۳۶۹/۷	۸۴/۰۱	—	۱۹/۱۸	۲۸۷۱	۰/۰۴۷	۰/۷۷
نپتون	♆	۳۶۷/۵	۱۶۴/۸	—	۳۰/۰۶	۴۴۹۷	۰/۰۰۹	۱/۷۷
پلوتو	♇	۳۶۶/۷	۲۴۸/۶	—	۳۹/۴۴	۵۹۱۳	۰/۲۴۹	۱۷/۱۵

جدول ضمیمه ۲-۳ چرخش سیاره‌ای

سیاره	دوره تناوب چرخشی نجومی	پنخی	کجی*
عطارد	روز ۵۸/۶	۰	۰/۰°
زهره	روز ۲۴۳	۰	۱۷۷/۴
زمین (ماه)	روز ۲۳ <sup>h</sup> ۵۶ <sup>m</sup> ۴/۱ <sup>s</sup>	۰/۰۰۳۴	۲۳/۵
مریخ	روز ۲۷/۳	۰/۰۰۰۶	۶/۷
	روز ۲۴ <sup>h</sup> ۳۷ <sup>m</sup> ۲۲/۶ <sup>s</sup>	۰/۰۰۵۲	۲۵/۲
مشتری	۹ <sup>h</sup> ۵۰ <sup>m</sup> - ۹ <sup>h</sup> ۵۵ <sup>m</sup>	۰/۰۶۲	۳/۱
زحل	۱۰ <sup>h</sup> ۱۴ <sup>m</sup> - ۱۰ <sup>h</sup> ۳۸ <sup>m</sup>	۰/۰۹۶	۲۶/۷
اورانوس	۱۷ <sup>h</sup>	۰/۰۶	۹۸
نپتون	۱۷ <sup>h</sup> ۵۰ <sup>m</sup>	۰/۰۲	۲۹
پلوتو	روز ۶/۴	؟	۶۵

\* کجی به عنوان تمایل استوا نسبت به صفحه مداری تعریف شده است.  
کجی بزرگتر از ۹۰°، چرخش معکوس را موجب می‌شود.



سیاره	جرم		شعاع استوایی		چگالی متوسط گرانی سطح ( $\oplus = 1$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	تندی فرار ( $\text{km/Sec}$ )	تعداد جسم سیاه	مشاهده شده جسم سیاه تحت خورشیدی	دمای (k)
	$\oplus = 1$	$10^{22}$ kg	$\oplus = 1$	km					
خاکی									
عطارد	۰/۳۳	۰/۰۵۵	۲۴۴۰	۰/۳۸	$5/4 \times 10^3$	۴/۲	۴۴۵	۱۰۰-۷۰۰	۶۳۳
زهره	۴/۸۷	۰/۸۱۵	۶۰۵۰	۰/۹۵	۵/۲	۱۰/۳	۳۲۵	۷۰۰	۴۶۴
زمین	۵/۹۸	۱/۰۰۰	۶۳۷۸	۱/۰۰	۵/۵۲	۱۱/۲	۲۷۷	۲۵۰-۳۰۰	۳۹۵
ماه	۰/۰۷	۰/۰۱۲	۱۷۳۸	۰/۲۷	۳/۳۴	۲/۴	۲۷۷	۱۲۰-۳۹۰	۳۹۵
مریخ	۰/۶۴	۰/۱۰۷	۳۳۹۴	۰/۵۳	۳/۹	۵/۱	۲۲۵	۲۱۰-۳۰۰	۳۱۹
پلوتو	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۱۷۰۰	۰/۲۷	۰/۵(?)	۱/۳	۴۴	۴۰	۶۳
مشتري گون									
مشتري	۱۹۰۰	۳۱۸	۶۸۷۰۰	۱۱/۱۹	۱/۴۰	۲/۷۴	۱۲۲	۱۱۰-۱۵۰	۱۷۳
زحل	۵۶۹	۹۵	۵۷۵۵۰	۹/۰۱	۰/۶۹	۱/۱۷	۹۰	۹۵	۱۲۷
اورانوس	۸۷	۱۴/۵	۲۵۰۵۰	۳/۹۳	۱/۱۹	۰/۹۴	۶۳	۵۸	۹۰
نپتون	۱۰۳	۱۷/۲	۲۴۷۰۰	۳/۸۷	۱/۶۶	۱/۱۵	۵۰	۵۶	۷۲

جدول ضمیمه ۴-۳ قمرهای سیارات خاکی

سیاره	ماه	فاصله از سیاره ( $10^3$ km)	دوره تناوب نجومی (روز)	خروج از مرکز مداری	تمايل مداری (درجه)	شعاع (km)	جرم (سیاره = ۱)	چگالی حجمی ( $\text{kg/m}^3$ )
زمین	ماه	۳۸۴	۲۷/۳۲	۰/۰۵۵	۵/۱	۱۷۳۸	۰/۰۱۲	۳۳۰۰
مریخ	فوبوس	۹	۰/۳۲	۰/۰۲۱	۱/۱	$14 \times 11 \times 9$	$1/5 \times 10^{-8}$	۱۹۰۰
	دیموس	۲۳	۱/۲۶	۰/۰۰۳	۱/۶	$8 \times 6 \times 5$	$3/1 \times 10^{-9}$	۲۱۰۰

جدول ضمیمه ۵.۳ اعمار مشتری

نام	تعداد	فاصله از مشتری		دوره تناوب مداری (روز)	شعاع (km)	جرم (سیاره = ۱)	چگالی حجمی (kg/m <sup>3</sup> )
		۱۰ <sup>۲۲</sup> km	شعاع مشتری				
منیس	۱۱۶	۱۲۸	۱/۷۹	-/۲۹	۲۰	-	-
آندراستا	۱۱۴	۱۲۹	۱/۸۰	-/۳۰	۲۰	-	-
آلماتی	۱۰۵	۱۸۱	۲/۵۵	۰/۴۹	۱۳۰ × ۸۰	۲ × ۱۰ <sup>-۹</sup>	۳۰۰۰
تب	۱۱۵	۲۲۲	۳/۱۱	۰/۶۸	۴۰	-	-
آیو	۱۰۱	۴۲۲	۵/۹۵	۱/۷۷	۱۸۲۰	۴/۷ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۳۵۳۰
اروپا	۱۰۲	۶۷۱	۹/۴۷	۳/۵۵	۱۵۰۰	۲/۶ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۳۰۳۰
گانیمد	۱۰۳	۱۰۷۰	۱۵/۱۰	۷/۱۵	۲۶۴۰	۷/۸ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۱۹۳۰
کالیستو	۱۰۴	۱۸۸۰	۲۶/۶۰	۱۶/۷۰	۲۵۰۰	۵/۶ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۱۷۹۰
لدا	۱۱۳	۱۱،۱۱۰	۱۵۶	۲۴۰	≈ ۴	۵ × ۱۰ <sup>-۱۳</sup>	-
هیمالیا	۱۰۶	۱۱،۴۷۰	۱۶۱	۲۵۱	۸۵	۸/۵ × ۱۰ <sup>-۱۰</sup>	۱۰۰۰
لیزیتی	۱۱۰	۱۱،۷۱۰	۱۶۴	۲۶۰	≈ ۱۰	۱ × ۱۰ <sup>-۱۲</sup>	-
الار	۱۰۷	۱۱،۷۴۰	۱۶۵	۲۶۰	≈ ۳۰	۴ × ۱۰ <sup>-۱۱</sup>	-
آنانک	۱۱۲	۲۰،۷۰۰	۲۹۱	۶۱۷	۸(?)	۷ × ۱۰ <sup>-۱۳</sup>	-
کارم	۱۱۱	۲۲،۳۵۰	۳۱۴	۶۹۲	۱۲(?)	۲ × ۱۰ <sup>-۱۲</sup>	-
پازی فا	۱۰۸	۲۳،۳۰۰	۳۲۷	۷۳۵	۱۴(?)	۸ × ۱۰ <sup>-۱۲</sup>	-
شینپ	۱۰۹	۲۳،۷۰۰	۳۳۳	۷۵۸	۱۰(?)	۲ × ۱۰ <sup>-۱۲</sup>	-

نام	فاصله از زحل		دوره تناوب مداری (روز)	شعاع (km)	جرم (سیاره = ۱)	چگالی حجمی (kg / m <sup>3</sup> )
	۱۰ <sup>۳</sup> km	شعاع زحل				
اطلس	۱۳۷/۶۷	۲/۲۸	۰/۶۰۲	۱۰ × ۲۰	-	-
۱۹۸۰ S۲۷	۱۳۹/۳۵	۲/۳۱	۰/۶۱۳	۷۰ × ۵۰ × ۴۰	-	-
۱۹۸۰ S۲۶	۱۴۱/۷۰	۲/۳۵	۰/۶۲۹	۵۵ × ۴۵ × ۳۵	-	-
اپی متیوس	۱۵۱/۴۲	۲/۵۱	۰/۶۹۴	۷۰ × ۶۰ × ۵۰	-	-
جانوس	۱۵۱/۴۷	۲/۵۱	۰/۶۹۵	۱۱۰ × ۱۰۰ × ۸۰	-	-
می ماس	۱۸۵/۵۴	۳/۰۸	۰/۹۴۲	۱۹۵	۶/۶ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۲۰۰
انگلادوس	۲۳۸/۰۴	۳/۹۵	۱/۳۷۰	۲۵۰	۱ × ۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۲۰۰
تنیز	۲۹۴/۶۷	۴/۸۸	۱/۸۸۸	۵۳۰	۱/۳ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۲۰۰
تلتو	۲۹۴/۸۷	۴/۸۸	۱/۸۸۸	۱۷ × ۱۴ × ۱۳	-	-
کالیپسو	۲۹۴/۸۷	۴/۸۸	۱/۸۸۸	۱۷ × ۱۱ × ۱۱	-	-
دیون	۳۷۷/۴۲	۶/۲۶	۲/۷۳۷	۵۶۰	۱/۸۵ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۴۰۰
۱۹۸۰ S۶	۳۷۷/۴۲	۶/۲۶	۲/۷۳۷	۱۸ × ۱۶ × ۱۵	-	-
ریا	۵۲۷/۰۷	۸/۷۴	۴/۵۱۸	۷۶۵	۴/۴ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۳۰۰
تیتان	۱۲۲۱/۸۶	۲۰/۲۵	۱۵/۹۴۵	۲۵۶۰	۲/۳۶ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۱۸۸۰
هیپریون	۱۴۸۱/۰۰	۲۴/۵۵	۲۱/۲۷۷	۲۰۵ × ۱۳۰ × ۱۱۰	-	-
یاپتوس	۳۵۶۰/۸۰	۵۹/۰۲	۷۹/۳۳	۷۳۰	۳۰۳ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۲۰۰
فوب	۱۲۹۵۴	۲۱۴/۷	۵۵۰/۴۵	≈ ۱۱۰	-	-

جدول ضمیمه ۲-۳ آقمار اورانوس، نپتون و پلوتو

سیاره	قمر	فاصله از سیاره ۱۰ <sup>۳</sup> km	دوره تناوی مداری (روز)	شعاع (km)	جرم (سیاره = ۱)	چگالی حجمی (kg / m <sup>۳</sup> )
اورانوس	آریل	۱۹۱/۸	۲/۵۲۰۳۸	۵۸۰	$1/5 \times 10^{-5}$	
	امریل	۲۶۷/۳	۴/۱۴۴۱۸	۵۹۵	$6 \times 10^{-6}$	
	تیتانیا	۴۳۸/۷	۸/۷۰۵۸۸	۸۰۵	$5 \times 10^{-5}$	
	اُبرن	۵۸۶/۶	۱۳/۴۶۳۲۶	۷۷۵	$3 \times 10^{-5}$	
	میراندا	۱۳۰/۱	۱/۴۱۴	۱۶۰	$10^{-6}$	
نپتون	تریٹون	۶۵۳/۶	۵/۸۷۶۸۳	۱۷۰۰	$3 \times 10^{-3}$	
	تریڈ	۵۵۷۰	۳۶۵	۴۷۰	$10^{-6}$ (?)	
پلوتو	چارون	۱۷/۵	۶/۳۹	۷۵۰	۰/۱	۵۰۰ (?)

# داده‌های ستاره‌ای

جدول ضمیمه ۱۰۴ نزدیکترین ستارگان (در داخل ۵ پارسک)

ستاره	$\alpha$ (۱۹۷۵)	$\delta$ (۱۹۷۵)	فاصله* (پارسک)	حرکت ویژه (سال / <sup>۳</sup> )	A			B			C			
					$M_V$	$m_V$	نوع طیفی	$M_V$	$m_V$	نوع طیفی	$M_V$	$m_V$	نوع طیفی	
آلفا قنطورس	۱۲ <sup>h</sup> ۳۸/۰	۰۴° ۶۰'	۱/۳۱	۳/۶۸	۰/۰۱	۴/۴	۲۲ V	۵/۸	۱/۴	K۵ V	۱۵	۱۰/۷	۱۵	م۵ eV
ستاره بارنارد	۱۷ ۵۶/۶	+۴۳۷	۱/۸۳	۱۰/۳۴	۹/۵۴	۱۳/۲	M۵ V	همدم دیده نشده						
گرگ ۳۵۹	۱۰ ۵۵/۳	+۷۱۰	۲/۳۲	۴/۷۱	۱۳/۶۶	۱۶/۸	M۶ eV							
BD+۳۶° ۲۱۴۷	۱۱ ۲/۰	+۳۶۸	۲/۴۹	۴/۷۸	۷/۴۷	۱۰/۵	M۲ V	همدم دیده نشده						
شعراى يمانى	۶ ۴۴/۰	-۱۶۴۱	۲/۶۵	۱/۳۲	-۱/۴۷	۱۱/۵	A۱ V	wd	۸/۷	۱۱/۵				
ليوتن ۸-۷۲۶	۱۳۷/۷	-۱۸۵	۲/۷۴	۳/۳۵	۱۲/۵	۱۵/۴	M۵/۵ eV	M۶ eV	۱۲/۹	۱۵/۸				
راس ۱۵۴	۱۸ ۴۸/۳	-۲۳۵۲	۲/۹۰	-۰/۷۲	۱۰/۶	۱۳/۳	M۴/۵ eV							
راس ۲۴۸	۲۳ ۴۰/۷	+۴۴۳	۳/۱۶	۱/۶۰	۱۲/۲۴	۱۴/۷	M۵/۵ eV							
ايسيلن نهر	۳ ۳۱/۸	-۹۳۳	۳/۲۸	-۰/۹۷	۳/۳۳	۶/۱	K۲ V							
ليوتن ۶-۷۸۹	۲۲ ۳۷/۲	-۱۵۲۷	۳/۳۱	۳/۲۵	۱۲/۵۸	۱۴/۹	M۵/۵ eV							
راس ۱۲۸	۱۱ ۴۶/۴	+۰۵۷	۳/۳۲	۱/۴۰	۱۱/۱۳	۱۳/۵	M۵ V							
دجاجه ۶۱	۲۱ ۵/۸	+۳۸۳۷	۳/۴۳	۵/۲۲	۵/۱۹	۷/۵	K۵ V	K۷ V	۸/۳	۶/۰۲				همدم دیده نشده
ايسيلن ايندى	۲۲ ۱/۴	-۵۶۵۳	۳/۴۴	۴/۶۹	۴/۷۳	۷/۰	K۵ V							
شعراى شامى	۷ ۳۸/۰	+۵۱۷	۳/۴۸	۱/۲۵	-۰/۳۴	۲/۷	F۵ IV - V	wd	۱۳/۰	۱۰/۷				
BD + ۵۹° ۱۹۱۵	۱۸ ۴۲/۵	+۵۹۳۵	۳/۵۲	۲/۲۹	۸/۹۰	۱۱/۱	M۵ V	M۵ V	۱۱/۹	۹/۶۹				
BD + ۴۳° ۴۴	۰ ۱۶/۹	+۴۳۵۳	۳/۵۵	۳/۹۱	۸/۰۷	۱۰/۳	M۲/۵ eV	M۴ eV	۱۳/۲	۱۱/۰۴				
CD - ۳۶° ۱۵۶۹۳	۲۳	۴/۲	۲۳	۳/۵۹	۶/۹۰	۷/۳۹	M۲ V							
تاو نهنگ	۱ ۴۲/۹	-۱۶۴	۳/۶۷	۱/۹۲	۳/۵۰	۵/۷	G۸ Vp	همدم دیده نشده						
BD + ۵° ۱۶۶۸	۷ ۲۶/۱	+۵۱۸	۳/۶۷	۳/۷۶	۹/۸۲	۱۱/۹	M۴ V							
CD - ۳۹° ۱۴۱۹۲	۲۱ ۱۵/۸	-۳۸۵۸	۳/۸۵	۳/۴۶	۶/۲۷	۸/۷	M۵ V							
CD - ۴۵° ۱۸۴۱	۵ ۱۰/۶	-۴۵۰	۳/۹۱	۸/۷۲	۸/۸۱	۱۰/۸	M۵							

C			B			A			حرکت ویژه (سال / °)	فاصله <sup>۴</sup> (پارسک)	$\delta$ (۱۹۷۵)	$\alpha$ (۱۹۷۵)	ستاره
نوع طیفی	$M_V$	$m_V$	نوع طیفی	$M_V$	$m_V$	نوع طیفی	$M_V$	$m_V$					
			M۴/۵ eV	۱۳/۴	۱۱/۴۳	M۳V	۱۱/۸	۹/۷۷	۰/۸۷	۳/۹۴	+۵۷ ۳۴	۲۲ ۲۷/۱	گروگر ۶۰
			?	۱۶/۸	۱۴/۸	M۴/۵ eV	۱۳/۱	۱۱/۱۳	۱/۰۰	۴/۰۲	-۲۴۸	۶ ۲۸/۱	راس ۶۱۴
						M۴/۵ eV	۱۲/۰	۱۰/۱۳	۱/۱۸	۴/۰۲	-۱۲ ۳۶	۱۶ ۲۸/۹	BD -۱۳° ۴۵۲۳
						wd	۱۴/۳	۱۲/۳۶	۲/۹۸	۴/۲۸	+۵ ۱۶	۰ ۴۷/۹	ستاره وی متن
			M۶ eV	۱۴/۴	۱۲/۷	M۵/۵ eV	۱۴/۴	۱۲/۷	۱/۷۸	۴/۳۷	+۹ ۱۰	۱۲ ۳۳/۱	گرگ ۴۲۴
						M۳V	۱۰/۳	۸/۵۹	۶/۱۱	۴/۴۵	-۳۷ ۲۹	۰ ۳/۹	CD -۳۷° ۱۵۴۹۲
						M۵V	۸/۳	۶/۵۹	۱/۴۵	۴/۶۱	+۴۹ ۳۵	۱۰ ۹/۹	BD +۵۰° ۱۷۲۵
						M۴V	۱۱/۳	۹/۴۳	۱/۰۶	۴/۶۳	-۴۶ ۵۲	۱۷ ۲۶/۸	CD -۴۶° ۱۱۵۴۰
						M eV	۱۱	۹	۰/۸۱	۴/۶۷	-۴۹ ۷	۲۱ ۳۱/۹	CD -۴۹° ۱۳۵۱۵
						M۵V	۱۲/۸	۱۱/۲	۱/۱۴	۴/۶۹	-۴۴ ۱۸	۱۷ ۳۵/۳	CD -۴۴° ۱۱۹۰۹
						Mv ?	۱۳/۹	۱۲/۳	۲/۰۸	۴/۷۲	-۱۲ ۵۸	۱ ۵۸/۷	۱۱۵۹ - ۱۶ لیوتن
						M۲V	۱۰/۲	۸/۶	۲/۳	۴/۸	+۱۵ ۲	۱۳ ۴۴/۵	BD +۱۵° ۲۶۲۰
			همدم دیده نشده			M۳V	۱۰/۷	۹/۱	۱/۳۱	۴/۸۳	+۶۸ ۲۲	۱۷ ۳۶/۶	BD +۶۸° ۹۴۹
						wd	۱۲/۵	۱۱	۲/۶۹	۴/۸۵	-۶۴ ۴۲	۱۱ ۴۴/۲	۱۴۵ - ۱۴۱ لیوتن
						M۵V	۱۱/۸	۱۰/۲	۱/۱۲	۴/۵۸	-۱۴ ۲۴	۲۲ ۵۱/۹	راس ۷۸۰
M۵ eV	۱۲/۵	۱۱/۰	wd	۱۰/۷	۹/۲	K۵V	۶/۰	۴/۵	۴/۰۸	۴/۸۷	-۷ ۴۲	۴ ۱۴/۲	NO <sup>۲</sup> نهر
			همدم دیده نشده			M۴/۵ V	۱۰/۹	۹/۴	۰/۴۹	۴/۹۵	+۲۰ ۰	۱۰ ۱۸/۲	BD +۲۰° ۲۴۶/۵

\* فواصل اقتباس از پی. وان دی کمپ<sup>۱</sup> است.  
 + حرکات ویژه اقتباس از دیل یو. گلایز<sup>۲</sup> است.  
 BD مربوط به بونر دورچ ماسترانگ<sup>۳</sup> می شود.  
 CD مربوط به کردوبا دورچ ماسترانگ<sup>۴</sup> می شود.

$M_V$	نوع طیفی	حرکت ویژه (سال/°)	فاصله (پارسک)	$M_V$	$\sigma$ (۱۹۷۵)	$\alpha$ (۱۹۷۵)	ستاره
+۱/۴	A۱ V	۱/۳۲	۲/۷	-۱/۵*	-۱۶° ۴۱	۶ <sup>h</sup> ۲۲/۰ <sup>m</sup>	شعرای یمانی، $\alpha$ CMA
-۳/۱	FO Ib	۰/۰۴	۵۵	-۰/۷	-۵۲ ۴۱	۶ ۲۳/۶	سهیل، $\alpha$ Car
+۴/۴	G۲ V	۳/۶۸	۱/۳	-۰/۳*	-۶۰ ۴۴	۱۴ ۳۸/۰	آلفا قنطورس
-۰/۳	K۲ III	۲/۲۸	۱۱	-۰/۱	+۱۹ ۱۹	۱۴ ۱۴/۵	آرکتورس، $\alpha$ Boo
+۰/۵	AO V	۰/۳۲	۸/۱	۰/۰	+۳۸ ۲۶	۱۸ ۳۶/۰	نسرواق، $\alpha$ Lyr
-۰/۷	G۲ III	۰/۲۴	۱۴	۰/۰*	+۳۵ ۵۲	۵ ۱۴/۸	عیوق، $\alpha$ Aur
-۶/۸	B۸ Ia	۰/۰۰	۲۵۰	۰/۲*	-۸ ۱۴	۵ ۱۳/۳	رجل الجبار، $\beta$ Ori
+۲/۷	F۵ IV-V	۱/۲۵	۳/۵	۰/۳*	+۵ ۱۷	۷ ۳۸/۰	شعرای شامی، $\alpha$ CMI
-۱/۰	B۵ V	۰/۱۰	۲۰	۰/۵	-۵۷ ۲۲	۱ ۳۷/۸	آرچرنار، $\alpha$ Eri
-۲/۱	B۱ III	۰/۰۴	۹۰	۰/۶*	-۶۰ ۱۵	۱۲ ۲/۱	بنا قنطورس
+۲/۲	A۷ IV-V	۰/۶۶	۵/۱	۰/۸	+۸ ۴۸	۱۹ ۲۹/۵	کرکس، $\alpha$ Aql
-۵/۵	MY Iab	۰/۰۳	۱۵۰	۰/۸ <sup>+</sup>	+۷ ۲۴	۵ ۵۳/۸	ابطالجرزاء، $\alpha$ Ori
-۰/۲	K۲ III	۰/۲۰	۱۶	۰/۹*	+۱۶ ۲۸	۴ ۳۴/۰	چشم گار، $\alpha$ Tau
-۴/۰	B۱ IV	۰/۰۴	۱۲۰	۰/۹*	-۶۳ ۰۰	۱۲ ۲۵/۲	آلفا صلیب
-۳/۶	B۱ V	۰/۰۵	۸۰	۱/۰ <sup>+</sup>	-۱۱ ۱	۱۳ ۲۳/۹	سماک اغزل، $\alpha$ Vir
-۲/۵	M۱ Ib	۰/۰۳	۱۲۰	۱/۰ <sup>+</sup>	-۲۶ ۲۲	۱۶ ۲۷/۸	عقرب، $\alpha$ Sco
+۰/۸	KO III	۰/۶۲	۱۲	۱/۲	+۲۸ ۵	۷ ۲۳/۸	پولوکس، $\beta$ Gem
+۲/۰	A۳ V	۰/۳۷	۷	۱/۲	-۲۹ ۲۵	۲۲ ۵۶/۲	فم الحوت، $\alpha$ PsA
-۶/۹	A۲ Ia	۰/۰۰	۲۳۰	۱/۳	+۴۵ ۱۱	۲۰ ۲۰/۶	دجاجه، $\alpha$ Cyg
-۲/۶	B ۰/۵ IV	۰/۰۵	۱۵۰	۱/۳	-۵۹ ۳۳	۱۲ ۴۶/۲	بنا صلیب
-۰/۶	B۷ V	۰/۲۵	۲۶	۱/۴*	-۱۲ ۵	۱۰ ۷/۰	$\alpha$ Leo
-۵/۲	B۲ II	۰/۰۰	۲۴۰	۱/۵	-۲۸ ۵۶	۶ ۵۷/۷	ایسپین کلب اکبر
+۰/۹	A۱ V	۰/۲۰	۱۴	۱/۶	+۳۱ ۵۶	۷ ۳۳/۰	کاستور، $\alpha$ Gem
-۳/۳	B۲ IV	۰/۰۳	۹۶	۱/۶	-۳۷ ۵	۱۷ ۳۱/۸	لاندا عقرب
-۳/۶	B۲ III	۰/۰۲	۲۱۰	۱/۶	+۶ ۲۰	۵ ۲۳/۸	بلاژیک، $\gamma$ Ori

\* قدر ظاهری ستاره چندانگانه، قدر جمع شده می‌باشد، سایر داده‌ها مربوط به روشن‌ترین همدم است.

+ ستاره یک متغیر است.

فواصل ستارگان دورتر از اختلاف منظر طیف سنجی نتیجه شده‌اند.

جدول ضمیمه ۴-۳ مشخصات ستاره‌ای با استفاده از نوع طیفی ورده تابندگی

M/M <sub>⊙</sub>			R/R <sub>⊙</sub>			BC	T <sub>eff</sub> (K)			B - V			M <sub>v</sub>			نوع طیفی
I	III	V	I	III	V	V	I	III	V	I	III	V	Ib *	III	V	
۱۰۰		۴۰			۱۸	-۴/۳۰			۵۰۰۰۰	-۰/۳۲	-۰/۳۲	-۰/۳۲			-۶/۰	O۵
۵۰		۱۷	۲۰	۱۶	۷/۶	-۳/۱۷			۲۷۰۰۰	-۰/۲۴	-۰/۳۰	-۰/۳۰	-۶/۲	-۵/۰	-۴/۱	B۰
۲۵		۷	۳۲	۱۰	۴/۰	-۱/۳۹			۱۶۰۰۰	-۰/۰۹	-۰/۱۶	-۰/۱۶	-۵/۷	-۲/۲	-۱/۱	B۵
۱۶		۳/۶	۴۰	۶/۳	۲/۶	-۰/۴۰			۱۰۴۰۰	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	-۴/۹	-۰/۶	+۰/۶	A۰
۱۳		۲/۲	۵۰		۱/۸	-۰/۱۵			۸۲۰۰	-۰/۰۷	۰/۱۵	+۰/۱۵	-۴/۵	+۰/۳	+۲/۱	A۵
۱۳		۱/۸	۶۳		۱/۳	-۰/۰۸			۷۲۰۰	+۰/۲۴	۰/۳۰	-۰/۳۰	-۴/۵	+۰/۶	+۲/۶	F۰
۱۰		۱/۴	۸۰	۴/۰	۱/۲	-۰/۰۴	۶۲۰۰	۶۵۰۰	۶۷۰۰	+۰/۴۵	+۰/۴۵	+۰/۴۵	-۴/۵	+۰/۷	+۳/۴	F۵
۱۰	۳/۵	۱/۱	۱۰۰	۶/۳	۱/۰۴	-۰/۰۶	۵۰۵۰	۵۵۰۰	۶۰۰۰	+۰/۷۶	+۰/۶۵	-۰/۵۰	-۴/۵	+۰/۶	+۴/۴	G۰
۰.۱۳	۳	۰/۹	۱۲۶	۱۰	۰/۹۳	-۰/۱۰	۴۵۰۰	۴۸۰۰	۵۵۰۰	+۱/۰۶	+۰/۸۶	+۰/۶۵	-۴/۵	+۰/۳	+۵/۲	G۵
۱۳	۴	۰/۸	۲۰۰	۱۶	۰/۸۵	-۰/۱۹	۴۱۰۰	۴۴۰۰	۵۱۰۰	+۱/۴۲	+۱/۰۱	+۰/۸۱	-۴/۵	+۰/۲	+۵/۹	k۰
۱۶	۵	۰/۷	۴۰۰	۲۵	۰/۷۴	-۰/۷۱	۳۵۰۰	۳۷۰۰	۴۳۰۰	+۱/۷۱	+۱/۵۲	+۱/۱۸	-۴/۵	-۰/۳	+۸/۰	k۵
۱۶	۶	۰/۵	۵۰۰		۰/۶۳	-۱/۲۰	۳۳۰۰	۳۵۰۰	۳۷۰۰	+۱/۹۴	+۱/۶۵	+۱/۳۹	-۴/۵	-۰/۴	+۹/۲	M۰
		۰/۲			۰/۳۲	-۲/۱۰			۲۷۰۰	+۲/۱۵	+۱/۸۵	+۱/۶۹	-۴/۵	-۰/۵	+۱۲/۳	M۵

\* تمام ستارگان رده Ia دارای یک قدر مرئی مطلق  $m_v$  می‌باشند.

BC تصحیح تابش سنجی است.



# ضمیمه ۵

## عناصر اتمی

جدول ضمیمه ۵ - ۱ جدول تناوبی

وزن اتمی*	عدد اتمی	علامت	عنصر
۱/۰۰۸	۱	H	هیدروژن
۴/۰۰۳	۲	He	هلیوم
۶/۹	۳	Li	لیتیوم
۹/۰	۴	Be	بریلیوم
۱۰/۸	۵	B	بور
۱۲/۰	۶	C	کربن
۱۴/۰	۷	N	ازت
۱۶/۰	۸	O	اکسیژن
۱۹/۰	۹	F	فلورین
۲۰/۲	۱۰	Ne	نئون
۲۳/۰	۱۱	Na	سدیم
۲۴/۳	۱۲	Mg	منیزیم
۲۷/۰	۱۳	Al	آلومینیوم
۲۸/۱	۱۴	Si	سیلیسیم
۳۱/۰	۱۵	P	فسفر
۳۲/۱	۱۶	S	سولفور
۳۵/۵	۱۷	Cl	کلر
۳۹/۹	۱۸	A	آرگون
۳۹/۱	۱۹	K	پتاسیم
۴۰/۱	۲۰	Ca	کلسیم
۴۵/۰	۲۱	Sc	اسکاندیم
۴۷/۹	۲۲	Ti	تیتانیوم
۵۱/۰	۲۳	V	وانادیم
۵۲/۰	۲۴	Cr	کرم
۵۴/۹	۲۵	Mn	منگنز
۵۵/۹	۲۶	Fe	آهن
۵۸/۹	۲۷	Co	کبالت
۵۸/۷	۲۸	Ni	نیکل
۶۳/۵	۲۹	Cu	مس
۶۵/۴	۳۰	Zn	روی
۶۹/۷	۳۱	Ga	گالیوم
۷۲/۶	۳۲	Ge	ژرمانیم

\* در جایی که اوزان اتمی متوسط بخوبی معین نشده باشند، اعداد جرم اتمی پایدارترین ایزوتوپها در پرانتز داده می شوند.

جدول ضمیمه ۵-۱ جدول تناوبی (ادامه)

وزن اتمی	عدد اتمی	علامت	عنصر
۷۴/۹	۳۳	As	آرسنیک
۷۹/۰	۳۴	Se	سلنیم
۷۹/۹	۳۵	Br	برم
۸۳/۳	۳۶	Kr	کریپتون
۸۵/۵	۳۷	Rb	ربیدیم
۸۷/۶	۳۸	Sr	استرونسیم
۸۸/۹	۳۹	Y	ایترویم
۹۱/۲	۴۰	Zr	زیرکونیم
۹۲/۹	۴۱	Nb	نیوبیم
۹۶/۰	۴۲	Mo	مولیبدن
(۹۹)	۴۳	Tc	تکنسیم
۱۰۱/۱	۴۴	Ru	روتینیم
۱۰۲/۹	۴۵	Rh	رودیم
۱۰۶/۴	۴۶	Pd	پالادیم
۱۰۷/۹	۴۷	Ag	نقره
۱۱۲/۴	۴۸	Cd	کادمیم
۱۱۴/۸	۴۹	In	ایندیم
۱۱۸/۷	۵۰	Sn	قلع
۱۲۱/۸	۵۱	Sb	آنتیموان
۱۲۷/۶	۵۲	Te	تلوریم
۱۲۶/۹	۵۳	I	ید
۱۳۱/۳	۵۴	Xe	گزن
۱۳۲/۹	۵۵	Cs	سزیم
۱۳۷/۴	۵۶	Ba	باریم
۱۳۸/۹	۵۷	La	لانتان
۱۴۰/۱	۵۸	Ce	سرم
۱۴۰/۹	۵۹	Pr	پرازئودیم
۱۴۴/۳	۶۰	Nd	نئودیم
(۱۴۷)	۶۱	Pm	پرومتیم
۱۵۰/۴	۶۲	Sm	ساماریم
۱۵۲/۰	۶۳	Eu	اروپیم
۱۵۷/۳	۶۴	Ga	گادولینیم
۱۵۸/۹	۶۵	Tb	تریم
۱۶۲/۵	۶۶	Dy	دیسپروزم
۱۶۴/۹	۶۷	Ho	هلمیم
۱۶۷/۳	۶۸	Er	اریم

جدول ضمیمہ ۵ - ۱ جدول تناوبی (ادامہ)

وزن اتمی	عدد اتمی	علامت	عنصر
۱۶۸/۹	۶۹	Tm	تولیم
۱۷۳/۰	۷۰	Yb	ایتریم
۱۷۵/۰	۷۱	Lu	لوتتیم
۱۷۸/۵	۷۲	Hf	ہافنیم
۱۸۱/۰	۷۳	Ta	ٹانٹالم
۱۸۳/۹	۷۴	W	ٹنگسٹن
۱۸۶/۲	۷۵	Re	رنیم
۱۹۰/۲	۷۶	Os	اسمیم
۱۹۲/۲	۷۷	Ir	ایریدیوم
۱۹۵/۱	۷۸	Pt	پلاتین
۱۹۷/۰	۷۹	Au	طلا
۲۰۰/۶	۸۰	Hg	جیوہ
۲۰۴/۴	۸۱	Tl	تالیوم
۲۰۷/۰	۸۲	Pb	سرب
۲۰۹/۰	۸۳	Bi	بیسموٹ
(۲۰۹)	۸۴	Po	پولونیم
(۲۱۰)	۸۵	At	اسٹاتین
(۲۲۲)	۸۶	Rn	رادون
(۲۲۳)	۸۷	Fr	فرانسیم
۲۲۶/۱	۸۸	Ra	رادیوم
(۲۲۷)	۸۹	Ac	اکٹیئم
۲۳۲/۰	۹۰	Th	توریم
(۲۳۱)	۹۱	Pa	پروٹاکتینیم
۲۳۸/۱	۹۲	U	اورانیوم
(۲۳۷)	۹۳	Np	نپٹونیم
(۲۴۴)	۹۴	Pu	پلوٹونیم
(۲۴۳)	۹۵	Am	آمریکیم
(۲۴۸)	۹۶	Cm	کوریوم
(۲۴۷)	۹۷	Bk	برکلیم
(۲۵۱)	۹۸	Cf	کالیفرنیم
(۲۵۴)	۹۹	E	ایشٹینیم
(۲۵۳)	۱۰۰	Fm	فرمیم
(۲۵۶)	۱۰۱	Md	منڈلیوم
(۲۵۳)	۱۰۲	No	نوبلیوم
(۲۵۶)	۱۰۳	Lw	لارنسیم
(۲۶۱)	۱۰۴	Rf	رائرفورڈیم
(۲۶۰)	۱۰۵	Ha	ہانیوم

## ضمیمه ۶

### تبدیل واحدها

#### مساحت

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2 &= 10^4 \text{ cm}^2 \\ 1 \text{ km}^2 &= 0.3861 \text{ mi}^2 \\ 1 \text{ in.}^2 &= 6.4516 \text{ cm}^2 \\ 1 \text{ ft}^2 &= 9.29 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \\ 1 \text{ m}^2 &= 10.76 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

#### حجم

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^3 &= 10^6 \text{ cm}^3 \\ 1 \text{ L} &= 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ gal} &= 3.786 \text{ L} = 231 \text{ in.}^3 \end{aligned}$$

#### زمان

$$\begin{aligned} 1 \text{ h} &= 60 \text{ min} = 3.6 \text{ ks} \\ 1 \text{ day} &= 24 \text{ h} = 1440 \text{ min} = 86.4 \text{ ks} \\ 1 \text{ year} &= 365.24 \text{ day} = 31.56 \text{ Ms} \end{aligned}$$

#### تندی

$$\begin{aligned} 1 \text{ km/h} &= 0.2778 \text{ m/s} = 0.6215 \text{ mi/h} \\ 1 \text{ mi/h} &= 0.4470 \text{ m/s} = 1.609 \text{ km/h} \end{aligned}$$

#### زاویه و تندی زاویه‌ای

$$\begin{aligned} \pi \text{ rad} &= 180^\circ \\ 1 \text{ rad} &= 57.30^\circ \\ 1^\circ &= 1.745 \times 10^{-2} \text{ rad} \\ 1 \text{ rev/min} &= 0.1047 \text{ rad/s} \\ 1 \text{ rad/s} &= 9.549 \text{ rev/min} \end{aligned}$$

#### جرم

$$\begin{aligned} 1 \text{ g} &= 0.035 \text{ oz} \\ 1 \text{ kg} &= 1000 \text{ g} \\ 1 \text{ tonne} &= 1000 \text{ kg} = 1 \text{ Mg} \end{aligned}$$

#### چگالی

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/L}$$

#### نیرو

$$\begin{aligned} 1 \text{ N} &= 0.2248 \text{ lb} = 10^5 \text{ dyn} \\ 1 \text{ lb} &= 4.4482 \text{ N} \end{aligned}$$

#### فشار

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 \\ 1 \text{ atm} &= 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars} \\ 1 \text{ atm} &= 14.7 \text{ lb/in.}^2 = 760 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

ستاره‌شناسان به طور سنتی از سیستم واحدهای cgs استفاده می‌کنند، در صورتی که فیزیکدانها بخوبی واحدهای SI را بکار می‌برند (بدون هیچ اشکالی!) در اینجا ما واحدهای SI اصلی و بعضی از تبدیلات مفید به واحدهای cgs و انگلیسی را ارائه می‌دهیم. SI برای واحدهای سیستم بین‌المللی قرار می‌گیرد (The International System of Units)

#### واحدهای اصلی SI

---

طول: متر (m)
زمان: ثانیه (s)
جرم: کیلوگرم (kg)
جریان: آمپر (A)
دما: کلوین (K)
شدت تابندگی: شمع (cd)

---

#### واحدهای فرعی SI

---

نیرو: نیوتون (N)	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
کار و انرژی: ژول (J)	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
توان: وات (W)	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
فرکانس: هرتز (Hz)	$1 \text{ Hz} = \text{s}^{-1}$
بار: کولمب (C)	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
الفاه مغناطیسی: تسلا (T)	$1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$
فشار: پاسکال (Pa)	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

---

#### تبدیل

##### طول

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} &= 0.6215 \text{ mi} \\ 1 \text{ mi} &= 1.609 \text{ km} \\ 1 \text{ m} &= 1.0936 \text{ yd} = 3.281 \text{ ft} = 39.37 \text{ in.} \\ 1 \text{ in.} &= 2.54 \text{ cm} \\ 1 \text{ ft} &= 12 \text{ in.} = 30.48 \text{ cm} \\ 1 \text{ yd} &= 3 \text{ ft} = 91.44 \text{ cm} \\ 1 \text{ lightyear} &= 9.461 \times 10^{15} \text{ m} \\ 1 \text{ \AA} &= 0.1 \text{ nm} \end{aligned}$$

## ضمیمہ ۴۵۷ /

توان

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s} = 745.7 \text{ W}$$

$$1 \text{ Btu/min} = 17.58 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} = 1.341 \times 10^{-3} \text{ hp}$$

القائم مغناطیسی

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

---

$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = 133.32 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

انرژی

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 252 \text{ cal} = 1054.35 \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

## ضمیمه ۷

### ثابت و واحدها

جدول ضمیمه ۷-۱ ثابتهای نجومی

$Au = 1/496 \times 10^{11} m$	واحد نجومی
$Pc = 2.06265 Au$	پارسک
$= 3/26 ly$	
$= 3/0.86 \times 10^{16} m$	
$Ly = 6/324 \times 10^7 AU$	سال نوری
$= 0.307 Pc$	
$= 9/46 \times 10^{15} m$	
$1 yr = 356/26 days$	سال نجومی
$= 3/16 \times 10^7 s$	
$M_{\oplus} = 5/98 \times 10^{24} kg$	جرم زمین
$R_{\oplus} = 6378 km$	شعاع زمین در استوا
$V_{\oplus} = 30 km/s$	سرعت مداری زمین
$M_{\odot} = 1/99 \times 10^{30} kg$	جرم خورشید
$R_{\odot} = 6/96 \times 10^5 km$	شعاع خورشید
$L_{\odot} = 3/90 \times 10^{26} W$	تابندگی خورشید
$T_{eff} = 5800 K$	دمای مؤثر خورشید
$M_{J}) = 7/3 \times 10^{27} kg = 0.1022 M_{\oplus}$	جرم ماه
$R_{J}) = 1738 km = 0.272 R_{\oplus}$	شعاع ماه
$D_{J}) = 3/84 \times 10^5 km$	شعاع مدار ماه
$P_{J}) = 27/3 days$	ماه نجومی
$= 29/5 days$	ماه قمری
$d_{\odot} = 8/5 kpc$	فاصله خورشید از مرکز کهکشان خودی
$V_{\odot} = 220 km/s$	سرعت خورشید حول مرکز کهکشان
$D = 120 kpc$	قطر کهکشان خودی
$M = (3/4 \times 10^{11}) M_{\odot}$	جرم کهکشان خودی

جدول ضمیمه ۷-۲ ثابت‌های فیزیکی و ریاضی

$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$	سرعت نور
$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$	ثابت گرانش
$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ joule} \cdot \text{s}$	ثابت پلانک
$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ joule/K}$	ثابت بولتزمن
$R = 1.097 \times 10^7/\text{m}$	ثابت ریذبرگ
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-2}$	ثابت استفان بولتزمن
$\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ } \AA \cdot \text{K}$	ثابت قانون وین
$m_{\text{H}} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	جرم اتم هیدروژن
$m_{\text{e}} = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$	جرم الکترون
$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	بار الکترون
$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$	الکترون ولت
$1 \text{ eV} \rightarrow 1.24 \times 10^{-8} \text{ } \AA$	طول موج معادل eV
	$\pi = 3.1416$
	$e = 2.7183 ; \log_{10} e = 0.4343$

جدول ضمیمه ۷-۳ واحدها و تبدیلات

$10^9 =$ جیگا
$10^6 =$ مگا
$10^3 =$ کیلو
$10^{-2} =$ سانتی
$10^{-3} =$ میلی
$10^{-6} =$ میکرو
$10^{-9} =$ نانو
$10^{-12} =$ پیکو
دما
$K = C + 273$
$^{\circ}F = (5/9)C + 32$
اندازه زاویه‌ای؛ درجه و زمان
$360^{\circ} = 2\pi \text{ rad}; 1 \text{ rad} = 57^{\circ} 17' 45'' = 2.06265/180^{\circ}$
$1^{\circ} = 60' = 3600'' \quad 1^{\circ} = 0.1745 \text{ rad}$
$= 2^m \quad 1'' = 4.848 \times 10^{-6} \text{ rad}$
$15^{\circ} = 1^h \quad 4\pi \text{ sr} =$ کره

## ضمیمہ ۸

### الفبای یونانی

$\nu$	N	نو	$\alpha$	A	آلفا
$\xi$	$\Xi$	کسی	$\beta$	B	بتا
$\omicron$	O	امیکرون	$\gamma$	$\Gamma$	گاما
$\pi$	$\Pi$	پای	$\delta$	$\Delta$	دلٹا
$\rho$	P	رو	$\epsilon$	E	اپسیلون
$\Sigma$	$\Sigma$	زیگما	$\zeta$	Z	زتا
$\tau$	T	تاو	$\eta$	H	اتا
$\upsilon$	$\Upsilon$	اُپسیلون	$\theta$	$\Theta$	تتا
$\phi$	$\Phi$	فی	$\iota$	I	یوتا
$\chi$	X	چی	$\kappa$	K	کاپا
$\psi$	$\Psi$	پسی	$\lambda$	$\Lambda$	لامدا
$\omega$	$\Omega$	اومگا	$\mu$	M	مو



## ضمیمه ۹

### عملگرهای ریاضی

در هفت بخش بعد، به طور خلاصه روشهای ریاضی نجومی و اختریفی یکی پایه را مرور می‌کنیم: مثلثات، نماد نمائی، هندسه تحلیلی، آنالیز برداری، رشته‌ها، حساب و فرمولهای اندازه‌گیری. برای سهولت در مراجعات مفیدترین نتایج در چهارگوشه‌ها و جداول قرار داده شده‌اند.

#### ضمیمه ۹ - ۱ مثلثات

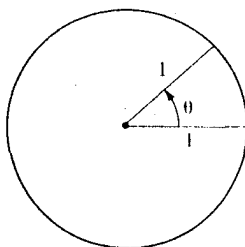
##### (الف) اندازه زاویه‌ای

شکل (ضمیمه ۱) دایره‌ای به شعاع واحد را نشان می‌دهد. اندازه زاویه‌ای  $\sigma$  ممکن است به سه طریق مشخص شود. قدیمی‌ترین و آشناترین روش این است که محیط دایره را به ۳۶۰ قسمت مساوی تقسیم کنند و  $\sigma$  را به یکی از این قسمتها مربوط کرده و آن را یک درجه قوسی ( $^{\circ}$ ) بنامند. هر درجه قوسی به ۶۰ دقیقه قوسی ( $'$ ) و هر دقیقه قوسی به ۶۰ ثانیه قوسی ( $''$ ) تقسیم می‌شود. بنابراین،  $1^{\circ} = 60' = 3600''$  در کل دایره وجود دارد.

به طور نجومی، یک چرخش زمین ۲۴ ساعت ( $^h$ ) طول می‌کشد؛ ما عادت داریم که ساعت را به ۶۰ دقیقه ( $^m$ ) و هر دقیقه را به ۶۰ ثانیه ( $^s$ ) تقسیم کنیم. بنابراین،  $1^h = 24 \times 60 \times 60 = 86400^s$  در هر چرخش وجود دارد. یک چرخش کامل ( $24^h$ ) به دایره کامل ( $360^{\circ}$ ) مربوط می‌شود. لذا ممکن است بیان کنیم که  $1^h = 15^{\circ}$ ،  $1^m = 15'$ ،  $1^s = 15''$ .

سرانجام، ممکن است یک رادیان (rad) را به عنوان زاویه  $\sigma$  مربوط به طول واحد در

امتداد دایره‌ای به شعاع واحد مربوط کنیم. چون تمام محیط  $2\pi$  واحد طول است  $(\pi \equiv 3/1415930000)$ ، لذا  $2\pi$  رادیان در تمام  $360^\circ$  وجود دارد. بنابراین:  $1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57/2958 = 206264/81''$  [اندازه رادیان به سطوح زاویه‌ای با توجه به این که سطح یک کره با شعاع واحد  $4\pi$  برابر مربع واحد است، یعنی  $4\pi$  استرادیان (Sr)، توسعه داده می‌شود. چون یک استرادیان یک مربع رادیان است، لذا  $41252/96$  مربع درجه قوسی روی کره وجود دارد.]



شکل ضمیمه ۱

(ب) مثلث قائم‌الزاویه

مثلث OHA در شکل (ضمیمه ۲) یک مثلث قائم‌الزاویه است، چون زاویه رأس H مساوی  $90^\circ$  می‌باشد. نسبت به زاویه  $\sigma$ ، سه ضلع این مثلث a (مجاور)، O (مخالف) و h (وتر) نامگذاری می‌شوند. توابع مثلثاتی اساسی، سینوس (sin) و کسینوس (cos) به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$\sin \theta = \frac{O}{h} \quad \cos \theta = \frac{a}{h}$$

یک تابع وابسته، تانژانت (tan)، به صورت زیر دنبال می‌شود

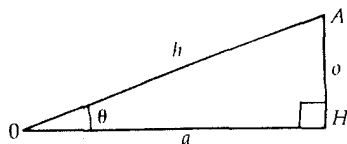
$$\tan \theta = \frac{O}{a} = \left(\frac{O}{h}\right) \left(\frac{h}{a}\right) = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

همچنین به ندرت با سه تابع معکوس مواجه می‌شویم

$$\text{cosecant} \longrightarrow \csc \theta = h/o = 1/\sin \theta$$

$$\text{secant} \longrightarrow \sec \theta = h/a = 1/\cos \theta$$

$$\text{cotangent} \longrightarrow \cot \theta = a/o = 1/\tan \theta$$



شکل ضمیمه ۲

اتحادهای مثلثاتی زیر بسیار مفید هستند:

فیثاغورث

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad 1 + \tan^2 \theta = \sec^2 \theta$$

مجموع و تفاضل

$$\sin(\theta \pm \phi) = \sin \theta \cos \phi \pm \cos \theta \sin \phi$$

$$\cos(\theta \pm \phi) = \cos \theta \cos \phi \mp \sin \theta \sin \phi$$

زاویه دو برابر

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\sin^2 \theta = (1/2)(1 - \cos 2\theta) \quad \cos^2 \theta = (1/2)(1 + \cos 2\theta)$$

این توابع مثلثاتی ممکن است با استفاده از علائم داده شده در جدول (ضمیمه (۹-۱))، مقادیر ویژه لیست شده در جدول (ضمیمه (۹-۲)) و مقادیر هر درجه قوسی از  $0^\circ$  تا  $90^\circ$  برای دایره کامل ( $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ) توسعه داده شود. اتحادهای عملی زیر در این ارتباط مورد نیاز می‌باشند.

$$\sin \theta = +\cos(\theta - 90^\circ) = -\sin(\theta - 180^\circ) = -\cos(\theta - 270^\circ)$$

$$\cos \theta = -\sin(\theta - 90^\circ) = -\cos(\theta - 180^\circ) = +\sin(\theta - 270^\circ)$$

$$\tan \theta = -\cot(\theta - 90^\circ) = +\tan(\theta - 180^\circ) = -\cot(\theta - 270^\circ)$$

جدول ضمیمه ۱-۹

tan	Cos	Sin	ناحیه
+	+	+	$0^\circ - 90^\circ$
-	-	+	$90^\circ - 180^\circ$
+	-	-	$180^\circ - 270^\circ$
-	+	-	$270^\circ - 360^\circ$

جدول ضمیمه ۲-۹

Cot	tan	Cos	Sin	Rad	زاویه
					درجه قوسی
$\infty$	۰	۱	۰	۰	۰
$\sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\pi/6$	۳۰
۱	۱	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\pi/4$	۴۵
$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\pi/3$	۶۰
۰	$\infty$	۰	۱	$\pi/2$	۹۰

(ج) مثلث مسطح

شکل (ضمیمه ۳) مثلث مسطح عمومی ABC را با رئوس A, B, C و اضلاع مقابل مربوطه a, b, c نشان می‌دهد. برای چنین مثلثی فرمولهای زیر بدست می‌آیند:

$$\text{مساحت} = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}, \quad \text{که } s = (1/2)(a+b+c)$$

$$\begin{cases} \text{قانون سینوسها} & \left\{ \begin{aligned} \frac{a}{\sin A} &= \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} \\ a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc \cos A \\ b^2 &= c^2 + a^2 - 2ca \cos B \\ c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos C \end{aligned} \right. \\ \text{قانون کسینوسها} & \end{cases}$$

## ضمیمه ۹ - ۲ نمادنمائی

## الف) توانها و ریشه‌ها

هنگامی که یک عدد مثبت  $a$  در خودش  $m$  بار ضرب شود، نتیجه برابر توان  $m$  ام  $a$  است:

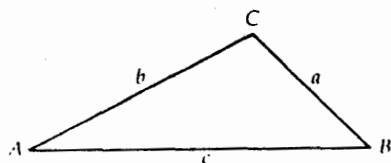
$$a \times a \times a \times a \dots (m \text{ بار}) \dots \times a = a^m$$

وقتی که چند توان مشابه از یک عدد در هم ضرب شوند، توانهای آنها با هم جمع می‌شوند:  $a^m a^n = a^{m+n}$ . اگر  $a^0 \equiv 1$  تعریف شود، سپس توانهای منفی مجاز بوده و معکوس نامیده می‌شوند:

$$a^{-m} = \frac{1}{a^m} \rightarrow a^m a^{-m} = a^{m-m} = a^0 = 1$$

به طور مشابه، جمله  $a^{1/m}$  را ریشه  $m$  ام  $a$  می‌نامیم، زیرا  $a$  را هنگامی که ریشه آن به توان  $m$  رسیده باشد،  $a^1 = a = \frac{m}{a^{1/m}} = (a^{1/m})^m$ . توجه کنید که یک توان یا ریشه که به توان جدیدی برسد، دو نما در هم ضرب می‌شوند. این نتایج به سهولت برای هر نمای حقیقی (نه الزاماً یک عدد صحیح یا یک کسر گویا) توسط فرمولهای زیر تعمیم داده می‌شود.

$a^0 = 1$	$a^{-m} = 1/a^m$
$(ab)^m = a^m b^m$	
$a^m a^n = a^{m+n}$	$(a^m)^n = a^{mn}$



شکل ضمیمه ۳

فاکتوریل عدد صحیح  $n$  را به صورت حاصلضرب  $n$  با کلیه اعداد صحیح کوچکتر از خود (تا یک) تعریف می‌کنیم:  $n! = n(n-1)(n-2) \dots (3)(2)(1)$ . واضح است که  $0! = 1$  تعریف کنیم.

مثالهای ساده‌تر این تردستی‌ها را نشان می‌دهند:

$$3^4 = 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$$

$$2^{-3} = 1/2^3 = 1/(2 \times 2 \times 2) = 1/8$$

$$15^2 = (3 \times 5)^2 = 3^2 \times 5^2 = 9 \times 25 = 225$$

$$6^2 \times 6^3 = 6^{2+3} = 6^5$$

$$(\sqrt{2})^3 = (2^{1/2})^3 = 2^{3/2}$$

$$4! = 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 24$$

(ب) نماها و لگاریتم‌ها

وقتی که پایه  $a$  داده شود، فرمول نمایی

$$y = a^x = \text{پایه } a \text{ به توان } x$$

مقدار  $y$  را برای هر مقدار انتخابی  $x$  (نما) بدست می‌دهد. معذالک، اگر  $a$  و  $y$  را داشته باشیم و بخواهیم  $x$  را پیدا کنیم، بایستی این رابطه را برای بدست آوردن فرمول لگاریتم تبدیل نمائیم.

$$x = \log_a y = \text{نمای } a \text{ که } y \text{ را بدست می‌دهد}$$

مثلاً،  $8 = 2^x$  داده شده است، می‌دانیم که  $x = 3$ ، زیرا  $8 = 2 \times 2 \times 2 = 2^3$ ؛ بنابراین،  $\log^8 = 3$ .

خصوصیات عمومی توانها و ریشه‌ها به روابط مفید زیر برای لگاریتم منجر می‌شوند:

ضرب	$\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$
خارج قسمت	$\log_a(x/y) = \log_a x - \log_a y$
توان	$\log_a(y^n) = n \log_a y$
تغییر پایه	$\log_a y = (\log_a b)(\log_b y)$

در این کتاب، اغلب پایه ده‌دهی،  $a = 10$ ، را وارد می‌کنیم؛ لگاریتم‌ها نسبت به این پایه لگاریتم، معمولی (به صورت "log" نوشته می‌شود) نامیده می‌شود. هر لگاریتم

معمولی از دو قسمت تشکیل می‌شود: یک قسمت صحیح (مفسر) و یک قسمت اعشاری «نامحدود» (مانتیس). مثلاً،

$$\log 33/7 = \log 10^{1/5276} = 1/5276$$

مانتیس      مفسر

هنگامی که از نماد توان ده استفاده می‌کنیم،  $33/7 = 3/27 \times 10$ ، مفسر ۱ بلافاصله ظاهر می‌شود.

مهم این که در حساب (بخش ضمیمه ۹ - ۶)، گرچه به ندرت در این کتاب آمده است، نماها در پایه  $e = 2/7182800000$  آورده می‌شود. لگاریتم طبیعی یا نپری به صورت "ln" مشخص می‌شود. در کلیه محاسبات عملی، تغییری در پایه به سیستم ده‌دهی (لگاریتم معمولی) برای استفاده از روابط می‌دهیم:

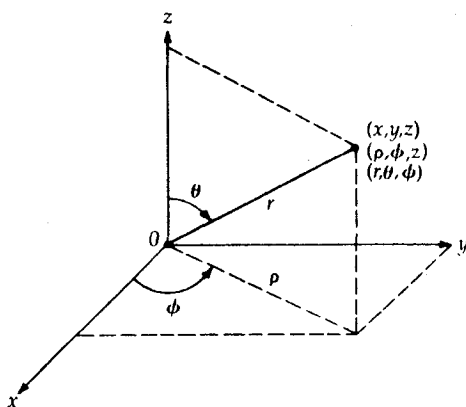
$$e^x = 10^{0.43429x}$$

$$\ln x = (2/3026) \log x$$

### ضمیمه ۹ - ۳ هندسه تحلیلی

#### (الف) سیستم مختصات

برای قرار دادن نقطه‌ای در فضای سه بعدی، سه سیستم مختصات معمولی وجود دارد. آشناترین سیستم، مختصات کارتزین متعامد  $(x, y, z)$  است. با شروع از مبدا  $O$  ( $x = 0, y = 0, z = 0$ )، محور  $x$  را  $x$  واحد و سپس به موازات محور  $y$ ،  $y$  واحد و به طرف بالا و به موازات محور  $z$ ،  $z$  واحد (شکل (ضمیمه ۴)) امتداد می‌دهیم.



شکل ضمیمه ۴

در مختصات قطبی استوانه‌ای  $(\rho, \phi, z)$ ، نقطه با حرکت از مبدا در صفحه  $xy$  به طرف خارج به اندازه  $\rho$  در زاویه  $\phi$  نسبت به محور  $x$  و سپس به طرف بالا و به موازات محور  $z$  و به اندازه  $z$  واحد تعیین می‌شود (شکل ضمیمه ۴). این مختصات به وضوح به مختصات کارتزین توسط روابط زیر مربوط می‌شوند

$$x = \rho \cos \phi, \quad y = \rho \sin \phi, \quad z = z$$

سرانجام، در مختصات کروی  $(r, \theta, \phi)$ ، به اندازه فاصله  $r$  در زاویه  $\theta$  نسبت به محور  $z$  حرکت می‌کنیم؛ تصویر این حرکت بر صفحه  $xy$  به اندازه زاویه  $\phi$  نسبت به محور  $x$  متمایل می‌شود و دارای طول  $\rho = r \sin \theta$  (شکل ضمیمه ۴) می‌باشد. بنابراین، ارتباط با مختصات کارتزین توسط روابط زیر داده می‌شود

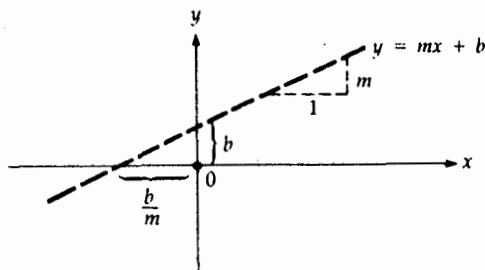
$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta$$

(ب) نمودارها

$y$  را به صورت تابعی از  $x$  توسط معادله جبری  $y = y(x)$  تعریف می‌کنیم. بنابراین، به ازاء هر مقدار  $x$  تابع یک مقدار از  $y$  بدست می‌دهد و در نتیجه یک جفت  $(x, y)$  داریم. برای نمایش بهتر خواص تابع، هر جفت  $(x, y)$  را به عنوان نقطه‌ای در سیستم مختصات کارتزین دوبعدی رسم می‌کنیم؛ نتیجه یک منحنی است.



معادله خط  $y = mx + b$  را در نظر می‌گیریم که  $m$  و  $b$  ثابت هستند. هنگامی که  $y = b$   $x = 0$  می‌شود. موقعی که  $x = \frac{-b}{m}$ ،  $y = 0$  می‌گردد. به ازاء هر واحد افزایش در  $y$ ،  $x$  به اندازه  $m$  واحد زیاد می‌شود؛ بیان می‌کنیم که شیب برابر  $m$  است. نمودار این تابع یک خط راست می‌باشد که در شکل (ضمیمه ۵) نشان داده شده است.

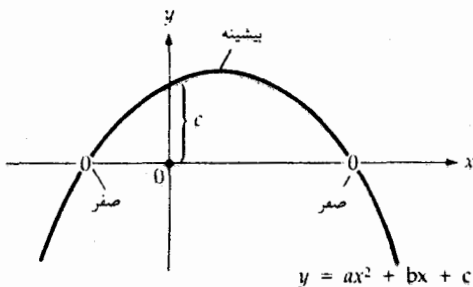


شکل ضمیمه ۵

اکنون معادله درجه دوم  $y = ax^2 + bx + c$  را که  $a$ ،  $b$  و  $c$  ثابت هستند، بررسی می‌کنیم. هنگامی که  $x = 0$  و  $y = 0$  می‌شود؛ دو صفر معادله (جایی که  $y = 0$  است) توسط فرمول درجه دوم<sup>۱</sup> زیر داده می‌شود:

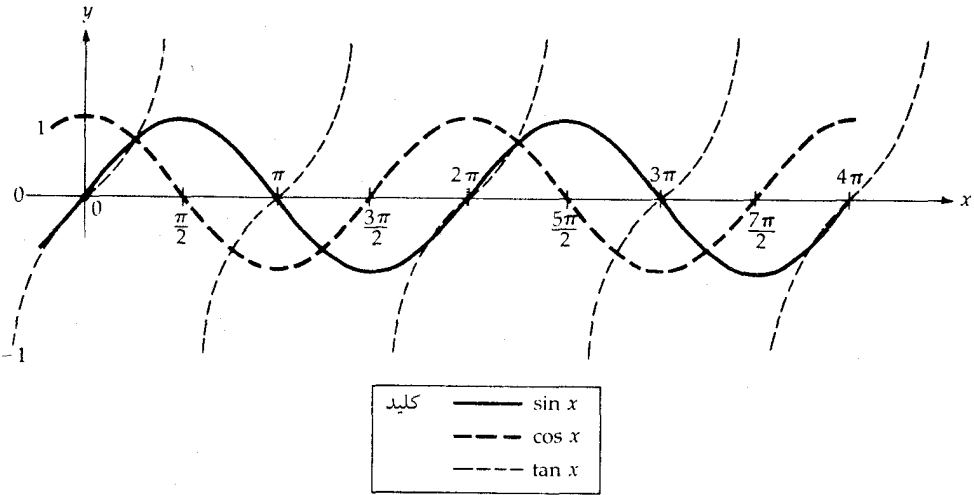
$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

نمودار این تابع (شکل (ضمیمه ۶)) یک منحنی سهمی است.

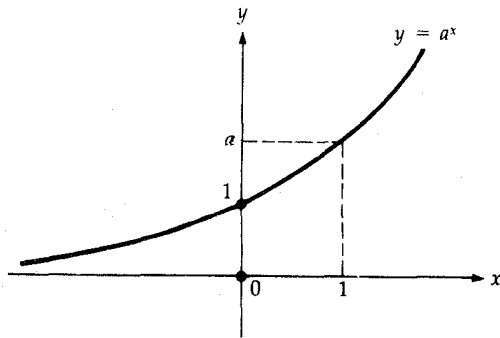


شکل ضمیمه ۶

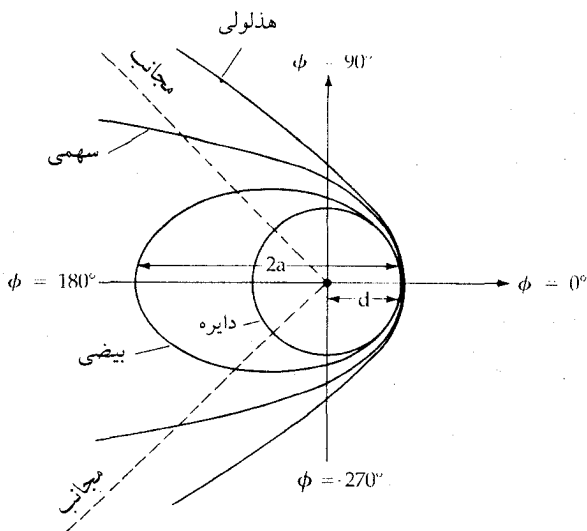
فایده این نمودارها به هنگام بررسی توابع پیچیده‌تر، بسیار آشکارتر هستند. شکل (ضمیمه ۷) توابع مثلثاتی  $\sin x$ ،  $\cos x$  و  $\tan x$  را نشان می‌دهد. شکل (ضمیمه ۸) تابع  $y = a^x$  را رسم می‌کند؛ تابع لگاریتمی  $x = \log_a y$  ممکن است با چرخش نمود درجه‌ای نمودار در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت دیده شود.



شکل ضمیمه ۷



شکل ضمیمه ۸



شکل ضمیمه ۹

### (ج) توابع کانونی

در مختصات قطبی صفحه  $(\rho, \phi)$ ، تمام مدارهای گرانشی ممکن است توسط تنها معادله  $\rho = d(1 + e) / (1 + e \cos \phi)$  تعریف شوند که  $\rho = d$  نزدیکترین فاصله تا مبدا (در  $\phi = 0$ ) می‌باشد. نمودار این تابع منحنی‌های مختلفی نتیجه می‌دهد که مقاطع مخروطی (شکل ضمیمه ۹) نامیده می‌شوند.

هنگامی که  $e = 0$  باشد، دایره‌ای به شعاع  $d$  خواهیم داشت. موقعی که  $e$  در گستره  $0 < e < 1$  باشد، منحنی یک بیضی است؛ معمولاً می‌نویسیم  $d = a(1 - e)$ ، بنابراین محور اطول (طولانی‌ترین بعد) بیضی برابر  $2a$  است. وقتی که  $e = 1$ ، منحنی یک سهمی است که نسبت به سمت چپ در  $\phi = 180^\circ$  باز می‌باشد. سرانجام، وقتی که  $e > 1$  باشد، راجع به یک هذلولی صحبت می‌کنیم؛ این منحنی در دو زاویه جایی که  $\cos \phi = -\frac{1}{e}$  (در امتداد خطوطی که مجانب نامیده می‌شوند)، دارای رفتار  $\rho \rightarrow \infty$  خواهد بود.

## ضمیمه ۹ - ۴ آنالیز برداری

## (الف) بردارها

یک بردار شبیه یک پیکان است که دارای مقدار (طول) و جهت می باشد. مقدار آن یک اسکالر یعنی یک عدد ساده بدون جهت می باشد (نظیر دما یا جرم). ما یک بردار را توسط یک حرف با علامت فلش در بالای آن،  $\vec{c}$ ، و مقدار آن را توسط همان حرف به صورت  $|\vec{c}|$  نمایش می دهیم.

دو بردار با استفاده از قانون متوازی الاضلاع جمع برداری که در شکل (ضمیمه ۱۰) نشان داده شده است به هم افزوده می شوند،  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ . به طور عکس، یک بردار همیشه ممکن است به دو مؤلفه برداری تجزیه شود. برای سهولت، بردار را در امتداد محورهای مختصات تجزیه می کنیم و آن را به صورت  $\vec{c} = (c_x, c_y)$  می نویسیم. اکنون قانون جمع برداری ممکن است برحسب مؤلفه ها به صورت زیر نوشته شود.

$$c_x = a_x + b_x \quad , \quad c_y = a_y + b_y$$

از قضیه فیثاغورث و شکل (ضمیمه ۱۰) مشاهده می شود که اندازه  $\vec{c}$  برابر است با  $(c_x^2 + c_y^2)^{1/2}$ . برحسب زاویه  $\alpha$  بین  $\vec{c}$  و محور  $x$ ، جهت  $\vec{c}$  توسط  $\tan \alpha = \frac{c_y}{c_x}$  داده می شود. سرانجام، به عنوان نتیجه ای از جمع برداری، مقدار  $c$  ممکن است به صورت زیر نوشته شود.

$$\begin{aligned} c &= [c_x^2 + c_y^2]^{1/2} \\ &= [(a_x + b_x)^2 + (a_y + b_y)^2]^{1/2} \\ &= [(a_x^2 + a_y^2) + (b_x^2 + b_y^2) + 2(a_x b_x + a_y b_y)]^{1/2} \\ &= [a^2 + b^2 + 2(a \cdot b)]^{1/2} \end{aligned}$$

(به ضرب داخلی برداری در بخش بعدی مراجعه شود) یا از قانون کسینوسها داریم

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2ab \cos \beta$$

که  $\beta$  کوچکترین زاویه بین  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  است.

به عنوان یک مثال، بردار  $a = (1, 1)$  و  $b = (3, -4)$  را در نظر بگیرید. مقادیر آنها

برابرند با

$$a = (a_x^2 + a_y^2)^{1/2} = (1^2 + 1^2)^{1/2} \\ = (1 + 1)^{1/2} = (2)^{1/2} = \sqrt{2}$$

$$b = (3^2 + 4^2)^{1/2} = (9 + 16)^{1/2} = 5$$

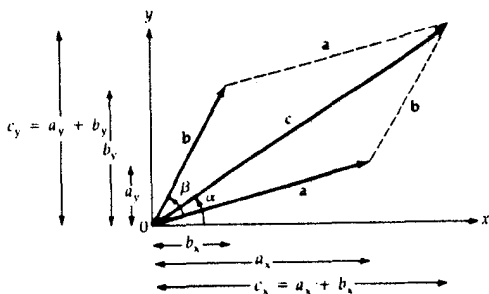
جمع برداری آنها مساویست با

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b} = (a_x + b_x, a_y + b_y) \\ = (1 + 3, 1 - 4) = (4, -3) = (c_x, c_y)$$

و مقدار آن برابر است با

$$c = (4^2 + 3^2)^{1/2} = 5$$

نموداری نظیر شکل (ضمیمه ۱۰) برای این بردارها بسازید و نشان دهید که  $\vec{a}$ ،  $\vec{b}$  و  $\vec{c}$  تشکیل یک مثلث بسته را می‌دهند!



شکل ضمیمه ۱۰

(ب) ضرب داخلی

در مختصات کارتزین سه بعدی، ضرب داخلی برداری  $\mathbf{a}$ ،  $\mathbf{b}$  به صورت زیر تعریف

می‌شود

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

اگر  $\psi$  کوچکترین زاویه بین  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  باشد، آنگاه به سادگی می‌توان نشان داد که

$$\vec{a} \cdot \vec{b} \equiv |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \psi$$

بنابراین، ضرب داخلی اندازه مؤلفه  $a$  در جهت  $b$  (یا بالعکس) می‌باشد و هنگامی که دو بردار برهم عمودند ( $\psi = 90^\circ$ ؛ شکل (ضمیمه ۱۱))،  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ .

مثال بخش قبل را در نظر می‌گیریم،  $\vec{a} = (1, 1)$  و  $\vec{b} = (3, -4)$  اکنون،

$$a \cdot b = a_x b_x + a_y b_y = (1)(3) + (1)(-4) = 3 - 4 = -1$$

زاویه  $\psi$  در رابطه زیر صدق می‌کند

$$\cos \psi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} = \frac{(-1)}{(\sqrt{2})(5)} = \frac{-\sqrt{2}}{10} = -0.1414$$

بنابراین، جدول (ضمیمه ۹ - ۱) نتیجه می‌دهد که  $\psi \cong 98^\circ$ .

### (ج) ضرب خارجی

ضرب خارجی برداری  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  به صورت  $\vec{a} \times \vec{b}$  نمایش داده شده که بردار دیگری است عمود بر  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$ . جهت بردار حاصل توسط قانون دست راست داده می‌شود: «انگشتان دست راست خود را در امتداد  $\vec{a}$  قرار دهید و سپس این دست را در امتداد کوچکترین زاویه ( $\psi$ ) بین  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  به طرف  $\vec{b}$  بچرخانید؛ انگشت سبابه شما در جهت حاصل ضرب خارجی برداری خواهد بود.» ضرب خارجی بر حسب مؤلفه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود

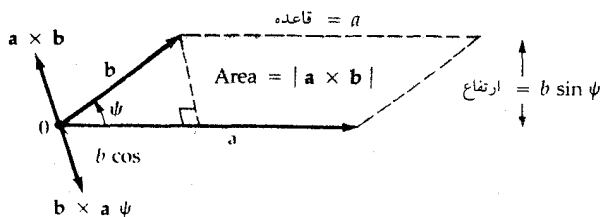
$$\vec{a} \times \vec{b} \equiv (a_y b_z - a_z b_y, a_z b_x - a_x b_z, a_x b_y - a_y b_x)$$

اساساً ضرب خارجی اندازه مؤلفه  $\vec{a}$  عمود بر  $\vec{b}$  (یا بالعکس) می‌باشد، و بنابراین به صورت زیر نیز داده می‌شود

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \psi$$

توجه کنید، هنگامی که  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  موازیند (یا پادموازی)،  $\vec{a} \times \vec{b} = 0$ ؛ همچنین  $\vec{b} \times \vec{a} = -\vec{a} \times \vec{b}$  (این نتیجه را با استفاده از قانون دست راست و تعریف مؤلفه‌ای ضرب خارجی تحقیق کنید).

شکل (ضمیمه ۱۱) بعضی از خواص ضرب داخلی و خارجی بردارهای  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$  را نمایش می‌دهد.



شکل ضمیمه ۱۱

از محاسبه ضرب خارجی  $\vec{a} = (1, 1)$  و  $\vec{b} = (-4, 3)$  (به بخشهای قبلی مراجعه کنید)، نتیجه می‌گیریم:

$$\vec{a} \times \vec{b} = (0, 0, -4 - 3) = (0, 0, -7)$$

زیرا  $a_z = b_z = 0$ . بنابراین،  $\vec{a} \times \vec{b}$  ممتد به جهت منفی z است (عمود بر  $\vec{a}$  و  $\vec{b}$ ، که در صفحه x و y قرار دارند) و مساحت متوازی‌الاضلاع در شکل (ضمیمه ۱۱) برابرست با  $|\vec{a} \times \vec{b}| = 7$ . روش دیگری برای پیدا کردن  $\vec{a} \times \vec{b}$  به صورت زیر است. ابتدا جهت آن را با استفاده از قانون دست راست پیدا می‌کنیم و سپس مقدار آن را از  $|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \psi$  بدست می‌آوریم:

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = (\sqrt{2}) (5) \sin 98^\circ = (1/414) (5) (0/99) = 6/999 = 7$$

### ضمیمه ۹ - ۵ رشته‌ها

در رابطه تابعی  $y = y(x)$  را آرگومان می‌نامیم. در بسیاری از کاربردهای عملی در نجوم و اخترفیزیک (و به ویژه در حساب؛ بخش (ضمیمه ۹ - ۶)) نیازمند به این هستیم که رفتار بعضی از توابع را برای مقادیر بسیار کوچک آرگومان ( $x \gg 0$ ) بدانیم. بنابراین، تابع را به صورت یک رشته توانی از x بسط می‌دهیم؛ بسط‌های رشته‌ای مفید در زیر لیست بندی شده‌اند (همراه با گستره دقیق مقادیر قابل کاربرد x):

دو جمله‌ای	$(1 \pm x)^n = 1 \pm nx + (1/2)n(n-1)x^2 \pm (1/6)n(n-1)(n-2)x^3 + \dots$	$(x^2 < 1; \text{all } n)$
مثلثاتی	$\sin x = x - (1/6)x^3 + (1/120)x^5 - \dots$	$(x^2 < 1)$
	$\cos x = 1 - (1/2)x^2 + (1/24)x^4 - \dots$	$(x^2 < 1)$
	$\tan x = x + (1/3)x^3 + (2/15)x^5 + \dots$	$(x^2 < \pi^2/4)$
نمایی	$e^x = 1 + x + (1/2)x^2 + (1/6)x^3 + \dots$	$(x^2 < 1)$
لگاریمی	$\ln(1+x) = x - (1/2)x^2 + (1/3)x^3 - (1/4)x^4 + \dots$	$(x^2 < 1)$

سه مثال ساده زیر نحوه استفاده از این رشته‌ها را نشان می‌دهند. اولاً، اجازه دهید  $\sqrt{e}$  را ارزیابی کنیم. داریم (به طور تقریبی)

$$\begin{aligned} e^{1/2} &= 1 + (1/2) + (1/2)(1/2)^2 \\ &\quad + (1/6)(1/2)^3 + \dots \\ &= 1 + 1/2 + 1/8 + 1/48 + \dots \\ &= 79/48 + \dots \approx 1.65 \end{aligned}$$

ثانیاً، مثلث بسیار باریک مورد استفاده در اختلاف منظر ستاره‌ای (فصل ۱۲) با ضلع کوچک برابر ۱ و ضلع مجاور مساوی  $d$  واحد نجومی و زاویه محدود به ستاره برابر  $\pi$  (رادیان) را که خیلی کوچکتر از واحد است، در نظر می‌گیریم. سپس حساب می‌کنیم

$$\frac{(1 \text{ AU})}{(d \text{ AU})} = \tan \pi \text{ (rad)} \approx \pi \text{ (rad)} \Rightarrow$$

$$d \text{ (pc)} \approx \frac{1}{\pi''}$$

چون  $206265$  ثانیه در هر رادیان وجود دارد، لذا یک پارسک برابر  $206265 \text{ AU}$  می‌باشد.

سرانجام، هنگامی که شتابهای جذر و مدی را حساب می‌کنیم (فصل ۳)، در جستجوی اختلاف بسیار کوچک بین دو کمیت بزرگ می‌باشیم:  $r^2 \cdot \frac{GM}{[r \pm (d/2)]^2}$  را از مخرج خارج کرده و از رشته دو جمله‌ای در باقیمانده مخرج استفاده می‌کنیم (چون



$d > r > d/2r < 1$  در نتیجه  $(x = d/2r < 1)$

$$\left(1 \pm \frac{d}{2r}\right)^{-2} = 1 \pm 2\left(\frac{d}{2r}\right) + \dots = 1 \pm \frac{d}{r} + \dots$$

بنابراین، به سرعت درمی یابیم که

$$\begin{aligned} \frac{GM}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2} - \frac{GM}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2} &= \frac{GM}{r^2} \left[ \left(1 - \frac{d}{2r}\right)^{-2} - \left(1 + \frac{d}{2r}\right)^{-2} \right] \\ &= \frac{GM}{r^2} \left[ \left(1 + \frac{d}{r} + \dots\right) - \left(1 - \frac{d}{r} + \dots\right) \right] \\ &\approx 2GMd/r^3 \end{aligned}$$

### ضمیمه ۹ - ۶ حساب

#### (الف) مشتقات

ما در جستجوی مشتق (یا شیب لحظه‌ای) تابع  $y(x)$  در نقطه  $x$  می‌باشیم. همان‌طور که در شکل (ضمیمه ۱۲) نشان داده شده است، نقطه نزدیک  $x + \Delta x$  را انتخاب کرده،  $y(x + \Delta x)$  را ارزیابی می‌کنیم و در حالت حد وقتی  $\Delta x$  بسیار کوچک می‌شود ( $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$ )، مشتق را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{\Delta x}$$

اکنون این تعریف را برای بدست آوردن دو مشتق ساده به کار می‌بریم.  $y(x) = x^2$  را در نظر می‌گیریم؛ آنگاه

$$y(x + \Delta x) = (x + \Delta x)^2 = x^2 + 2x(\Delta x) + (\Delta x)^2$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{x^2 + 2x(\Delta x) + (\Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} 2x + \Delta x = 2x \end{aligned}$$

از این رو، مشتق  $x^2$  در  $x$  برابر  $2x$  می‌باشد.

بنابراین

ثانیاً،  $y(x) = \sin x$  را در نظر می‌گیریم. سپس (با استفاده از اتحاد جمع زوایا)  $y(x + \Delta x) = \sin(x + \Delta x) = \sin x \cos \Delta x + \cos x \sin \Delta x$  چون  $\Delta x$  خیلی کوچک می‌شود، لذا ممکن است از بسط‌های رشته‌ای برای  $\sin \Delta x \cong \Delta x$  و  $\cos \Delta x \cong 1$  استفاده کنیم. بنابراین،

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sin x + (\Delta x) \cos x - \sin x}{\Delta x} = \cos x$$

که نتیجه، مشتق  $\sin x$  می‌باشد.

درست با دنبال کردن این روش، ممکن است به سهولت فرمولهای مفید زیر را برای مشتق تحقیق کرد [که  $a$  و  $n$  ثابت و  $u = u(x)$  و  $v = v(x)$  می‌باشند]:

تعاریف	$da/dx = 0$ $dx/dx = 1$
خطی بودن	$\begin{cases} d(au)/dx = a(du/dx) \\ d(u+v)/dx = (du/dx) + (dv/dx) \end{cases}$
قانون زنجیره‌ای	$d(uv)/dx = u(dv/dx) + v(du/dx)$
توانها	$d(u^n)/dx = nu^{n-1}(du/dx)$
مثلثاتی	$\begin{cases} d(\sin u)/dx = \cos u(du/dx) \\ d(\cos u)/dx = -\sin u(du/dx) \\ d(\tan u)/dx = \sec^2 u(du/dx) \end{cases}$
نمائی	$\begin{cases} d(a^u)/dx = a^u(\ln a)(du/dx) \\ d(e^u)/dx = e^u(du/dx) \end{cases}$
لگاریتمی	$d(\ln u)/dx = (1/u)(du/dx)$

برای مثال، در اینجا مراحل پیدا کردن  $d(x \sin x)/dx$  عبارتند از:  
 ۰۱ توجه کنید که تابع فوق به شکل  $\frac{d(u^n)}{dx}$  می‌باشد:

$$\frac{d}{dx} (x \sin x)^2 = 2 (x \sin x) \frac{d}{dx} (x \sin x)$$

۰۲ قانون زنجیره‌ای را به کار می‌بریم

$$= 2(x \sin x) \left[ x \frac{d(\sin x)}{dx} + \sin x \left( \frac{dx}{dx} \right) \right]$$

۰۳ توجه کنید که  $\frac{dx}{dx} = 1$  و  $\frac{d(\sin x)}{dx} = \cos x$

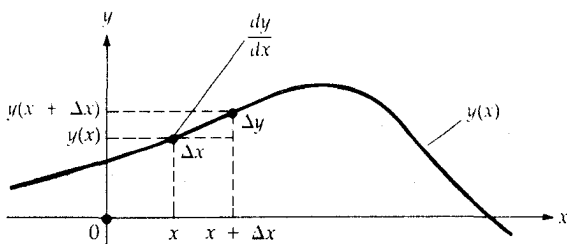
$$= 2(x \sin x) (x \cos x + \sin x)$$

۰۴ با بسط عبارت فوق داریم

$$= 2x^2 \sin x \cos x + 2x \sin^2 x$$

توجه کنید که مشتق یک بردار برحسب مشتقات مؤلفه‌های آن تعریف می‌شود:

$$\left[ \frac{da}{dx} = \left( \frac{da_x}{dx}, \frac{da_y}{dx}, \frac{da_z}{dx} \right) \right]$$



شکل ضمیمه ۱۲

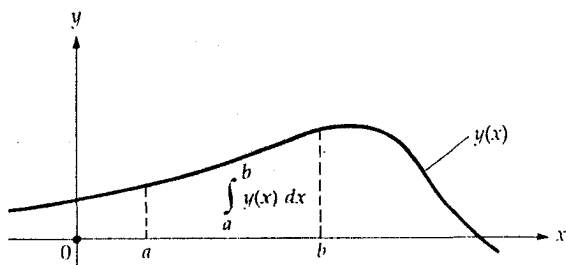
(ب) انتگرالها

انتگرال تابع  $y(x)$  ممکن است به صورت نامعین یا معین باشد. انتگرال نامعین توسط  $\int y(x) dx$  نشان داده می‌شود و چنین تصور می‌شود که آن تابعی از  $x$  می‌باشد که مشتق آن  $y(x)$  است. بنابراین، واضح است که  $\int \cos x dx = \sin x$  چون  $\frac{d(\sin x)}{dx} = \cos x$ . لذا، انتگرال نامعین عکس مشتق است، در حالی

$$\int \left[ \frac{dy(x)}{dx} \right] dx = y(x)$$

که انتگرال معین به صورت  $\int_a^b y(x) dx$  نشان داده می‌شود که برابر با سطح خالص زیر منحنی  $y(x)$  بین  $x = a$  و  $x = b$  است (شکل ضمیمه ۱۳). اگر داشته باشیم  $y(x) = \frac{df(x)}{dx}$ ، سپس با استفاده از تعریف نتیجه می‌گیریم که

$$\int_a^b y(x) dx = \int_a^b \left( \frac{df}{dx} \right) dx = f(x) \Big|_a^b = f(b) - f(a)$$



شکل ضمیمه ۱۳

عموماً، انتگرالهای نامعین با خطا پیدا می شوند، اما می توانیم بعضی از نتایج مشهور و مفید را جدول بندی کنیم (به لیست مشتقات فوق مراجعه کنید):

خطی بودن	$\begin{cases} \int ay(x) dx = a \int y(x) dx \\ \int (u + v) dx = \int u dx + \int v dx \end{cases}$
جزء به جزء	$\int u dv = uv - \int v du$
توانها	$\int x^n dx = x^{n+1}/(n+1)$ <p>(except for <math>n = -1</math>)</p>
مثلثاتی	$\begin{cases} \int \sin x dx = -\cos x \\ \int \cos x dx = \sin x \\ \int \sec^2 x dx = \tan x \end{cases}$
نمایی	$\int e^{ax} dx = e^{ax}/a$
لگاریتمی	$\begin{cases} \int [(dy/dx)/y(x)] dx = \ln y(x) \\ \int (1/x) dx = \ln x \end{cases}$

برای جدول بندی بسیار وسیع تر، به جدول استاندارد انتگرالها نگاه کنید.

مأمکن است فایده این جدول خلاصه انتگرالها را با بررسی  $\int (\sin^2 x) \cos x \, dx$  نمایش دهیم. با قرار دادن  $u = \sin x$ ؛ سپس  $du = \cos x \, dx$  و انتگرال ما برابر می شود با  $\int u^2 \, du = \frac{u^3}{3}$ . با جانشینی  $u = \sin x$  داریم:  $\int (\sin^2 x) \cos x \, dx = \frac{1}{3} \sin^3 x$ . اگر این انتگرال حدود می داشت،  $\int_0^{\pi} (\sin^2 x) \cos x \, dx$  درمی یابیم که

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} (\sin^2 x) \cos x \, dx &= \left[ \frac{1}{3} \sin^3 x \right]_0^{\pi/2} \\ &= \left[ \left( \frac{1}{3} \right) \sin^3 \left( \frac{\pi}{2} \right) - \sin^3 (0) \right] \\ &= \left( \frac{1}{3} \right) (1^3 - 0^3) = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

[توجه کنید که انتگرال یک بردار، بردار دیگری است که بر حسب مؤلفه های آن

تعریف  $\int f \, dx = \int (a_x(x), a_y(x), a_z(x)) \, dx = (\int a_x \, dx, \int a_y \, dx, \int a_z \, dx)$  می شود.]

### ضمیمه ۹ - ۷ فرمولهای اندازه گیری

کمیت هایی نظیر طول، مساحت و حجم با فرمولهای اندازه گیری داده می شوند؛ یک مثال نمونه، مساحت دایره ای به شعاع  $R$  است:  $A = \pi R^2$ . در بخش ضمیمه (۹ - ۷ الف)، نشان خواهیم داد که چگونه این فرمولها را برای استفاده حساب انتگرال بدست می آوریم؛ افرادی که به پاسخها علاقمندند بایستی بلافاصله به بخش ضمیمه (۹ - ۷ ب) مراجعه کنند.

#### (الف) انتگرالهای چندگانه

در نقطه ای معین و در یک سیستم مختصات، تغییرات کوچکی در سه مختص ایجاد می کنیم و (الف) طولهای جزئی، (ب) مساحتهاى جزئی سطح و (ج) حجمهای جزئی را

تعریف می‌کنیم. با جمع تقریبی (یعنی، با انتگرال‌گیری) این کمیات، طول‌ها، مساحت‌ها و حجم‌های محدود را بدست می‌آوریم. عموماً، با انتگرال‌های چندگانه سروکار داریم. در مختصات کارتزین متعامد  $(x, y, z)$ ، تغییرات جزئی به صورت  $(dx, dy, dz)$  می‌باشند. فاصله در طول محور  $x$  از  $x = 0$  تا  $x = L$  برابر است با  $L = \int_0^L dx = x$ . مساحت‌های جزئی سطح  $dx dy$  [در صفحه  $xy$  در  $(x, y, z)$ ،  $dy dx$  و  $dz dx$  می‌باشند. بنابراین، مساحت در صفحه  $xy$  و محدود به  $L \geq x \geq 0$  و  $W \geq y \geq 0$  برابر

$$\int_0^L dx \int_0^W dy = x \Big|_0^L y \Big|_0^W = LW$$

است. سرانجام، در  $(x, y, z)$  حجم جزئی برابر  $dx dy dz$  می‌باشد. به وضوح، حجم یک متوازی‌السطوح قائم به ابعاد  $L \times W \times H$  برابر است با

$$\int_0^L dx \int_0^W dy \int_0^H dz = LWH$$

در مختصات قطبی استوانه‌ای، طول‌های پایه  $(dp, \rho d\phi, dz)$ ، مساحت‌های پایه  $(\rho d\rho d\phi, \rho d\phi dz, \rho dz)$  و حجم پایه  $\rho d\rho d\phi dz$  می‌باشند. بنابراین، محیط دایره‌ای به شعاع  $\rho = R$  برابر است با

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} (\sin^2 x) \cos x dx &= \left[ \left(\frac{1}{3}\right) \sin^3 x \right]_0^{\pi/2} \\ &= \left[ \left(\frac{1}{3}\right) \sin^3 \left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin^3 (0) \right] \\ &= \left(\frac{1}{3}\right) (1^3 - 0^3) = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

مساحت این دایره برابر

$$\int_0^{2\pi} \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{1}{2} \rho^2 \Big|_0^{2\pi} = \left(\frac{R^2}{2}\right) (2\pi) = \pi R^2$$

و حجم یک استوانه قائم (به شعاع  $\rho = R$  و ارتفاع  $z = H$ ) مساوی

$$\int_0^R \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^H dz = \pi R^2 \int_0^H dz = \pi R^2 H$$

می‌باشد.

در مختصات کروی، طولهای پایه  $(dr, r d\theta, r \sin \theta d\phi)$ ، سطوح پایه  $r^2 dr \sin \theta d\theta d\phi$  و عنصر حجم پایه  $r^2 \sin \theta d\theta d\phi, r dr \sin \theta d\phi, r^2 dr \sin \theta d\theta d\phi$  می‌باشند. بنابراین، مساحت سطح یک کره به شعاع  $r = R$  برابر

$$\int_0^\pi R^2 \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi R^2 \int_0^\pi \sin \theta d\theta = 2\pi R^2 [-\cos \theta]_0^\pi = 4\pi R^2$$

و حجم آن مساوی

$$\int_0^R r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = \left[ \left( \frac{1}{3} r^3 \right) \right]_0^R [-\cos \theta]_0^\pi [ \phi ]_0^{2\pi} \\ = \frac{4}{3} \pi R^3$$

می‌باشد.

آخرین مثال، نشان می‌دهد که چگونه این روشها برای حالات پیچیده‌تر توسعه داده می‌شوند. تصور کنید که می‌خواهیم مساحت سطح کره‌ای به شعاع  $r = R$  را در گستره  $0 \leq \theta \leq \theta_0$  بدانیم. انتگرال چندگانه مناسب به صورت

$$R^2 \int_0^{\theta_0} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi R^2 [-\cos \theta]_0^{\theta_0} = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta_0)$$

است. توجه کنید که وقتی  $\theta_0 = \pi/2$ ، مساحت برابر  $2\pi R^2$  (نصف سطح کره) و هنگامی که  $\theta_0 = \pi$  برابر  $4\pi R^2$  (تمام سطح کره) می‌باشد.

(ب) فرمولهای مفید برای اندازه گیری

با استفاده از روشهایی مشابه با آنچه در بخش ضمیمه (۹ - ۷ الف) نشان داده شده است، بدست آوردن فرمولهای کاربردی زیر نسبتاً ساده می باشند.

مسطح

مثلث اختیاری

$$\begin{aligned} \text{ارتفاع عمودی} \times (\text{طول قاعده}) &= \frac{1}{4} \text{ مساحت} \\ \text{که } S &= \left(\frac{1}{4}\right) (a + b + c) \text{ و} \\ \text{اضلاع دارای طولهای } a, b, c \text{ می باشند.} \end{aligned} \left\{ \right.$$

$$= [s(s-a)(s-b)(s-c)]^{\frac{1}{4}}$$

متوازی الاضلاع و لوزی

$$\text{ارتفاع عمودی} \times (\text{طول قاعده}) = \text{مساحت}$$

دو زنگه

$$\text{ارتفاع عمودی} \times (a + b) \left(\frac{1}{4}\right) = \text{مساحت}$$

که  $a, b$  طول قاعده های بالا و پائین می باشند

دایره

$$\begin{aligned} \text{محیط} &= 2\pi (\text{شعاع}) = \pi (\text{قطر}) \\ \text{مساحت} &= \pi (\text{شعاع})^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) (\text{قطر})^2 \\ \text{مساحت قطعه} &= \left(\frac{1}{4}\right) (\text{شعاع})^2 (\theta - \sin \theta) \\ \text{مساحت قطاع} &= \left(\frac{1}{4}\right) (\text{شعاع})^2 \theta \\ \text{مساحت تاج نازک} &= 2\pi R (\Delta R) \end{aligned} \left\{ \begin{array}{l} \text{که } \theta \text{ زاویه مرکزی} \\ \text{بر حسب رادیان است} \\ \text{که } R \text{ شعاع و } \Delta R \text{ ضخامت شعاعی است} \end{array} \right.$$

بیضی

$$\text{مساحت} = \pi ab \quad (a = \text{نیم محور اطول}, b = \text{نیم محور اقصر})$$



## فضایی

متوازی السطوح قائم

اضلاع دارای طولهای  $a, b, c$  هستند)  $\text{حجم} = abc$

هرم و مخروط

(ارتفاع قائم)  $\times$  (مساحت قاعده)  $\left(\frac{1}{3}\right) = \text{حجم}$

استوانه قائم

(ارتفاع  $H$  و شعاع  $R$ )  $\text{حجم} = \pi R^2 H$

کره

$\text{مساحت سطح} = 4\pi (\text{شعاع})^2 = \pi (\text{قطر})^2$

$\text{حجم} = \left(\frac{4\pi}{3}\right) (\text{شعاع})^3 = \left(\frac{\pi}{6}\right) (\text{قطر})^3$

(ارتفاع قطعه)  $\times$  (شعاع)  $2\pi = \text{مساحت سطح قطعه}$

(ارتفاع - سه برابر شعاع)  $\times$  (ارتفاع)  $\left(\frac{\pi}{3}\right) = \text{حجم قطعه}$

بیضی‌گون

$\text{حجم} = \left(\frac{4\pi}{3}\right) abc$

که  $a, b, c$  طول سه نیم محورها هستند

## ضمیمه ۱۰

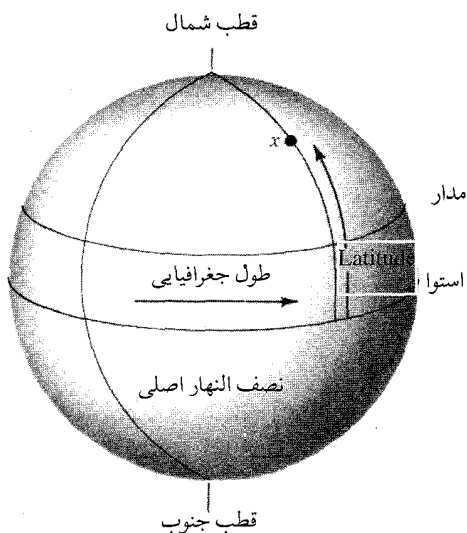
### کره سماوی

برای نقشه برداری از آسمان، مکانهای مربوط به هر واقعه نجومی را که مورد مطالعه قرار می دهیم، مشخص می کنیم. موقعیت فضایی سه بعدی هر واقعه را توسط مختصات کارتیزین (متعامد)، قطبی و کروی تعیین می کنیم. به علت این که موقعیت های زاویه ای از علائق اولیه ما در نجوم موضعی است، ما تقریباً مختصراً سیستم های مختصات کروی را مورد بحث قرار می دهیم. بر سطح یک کره، محیط و شعاع یک دایره با ضریب  $2\pi$  به هم مربوط نیستند و جمع زوایای داخلی یک مثلث همیشه بزرگتر از  $180^\circ$  است. از این رو، هندسه مسطحه و مثلثات معمول قابل کاربرد نیستند؛ بایستی آنها با مثلثات و هندسه کروی جایگزین گردند که مهمترین فرمولها برای آنها در ضمیمه ۹ آورده شده اند.

برای شروع، سطح کره ای به شعاع اختیاری را در نظر بگیرید. هر صفحه که از مرکز این کره بگذرد، سطح آن را در یک دایره عظیمه قطع می کند. یک صفحه را انتخاب می کنیم - معمولاً صفحه عمود بر محور چرخش - و دایره عظیمه آن را دایره اولیه می نامیم. تمام دوایر عظیمه ای که دایره اولیه را قطع کرده و بر آن عمود باشند، دایره ثانویه نامیده می شوند. تمام دوایر ثانویه یکدیگر را در دو نقطه، قطبها، قطع می کنند. یک نقطه تقاطع دایره اولیه با یک دایره ثانویه (دایره مرجع) را به عنوان نقطه مبدا تعریف می کنیم. اکنون ممکن است یک سیستم مختصات بر سطح کروی به صورت زیر برپا شود: موقعیت نقطه A توسط (۱) فاصله زاویه ای در جهت مناسبی در امتداد دایره اولیه از نقطه مبدا تا نزدیکترین نقطه تقاطع به A از دایره ثانویه عبوری از A و (۲) کوتاه ترین فاصله زاویه ای در امتداد این دایره ثانویه از دایره اولیه تا نقطه A تعیین می شود. قبل از بحث در مورد مختصات کروی، ابتدا این عقاید را با استفاده از سطح زمین نمایش می دهیم.

## ضمیمه ۱۰ - ۱ طول و عرض جغرافیایی بر روی زمین

شکل (ضمیمه ۱۴) سیستم طول - عرض جغرافیایی مختصات زمینی آشنا را نشان می‌دهد. استوا دایره اولیه است که توسط صفحه مرکزی عمود بر محور چرخش زمین تعریف می‌شود؛ محور چرخشی سطح زمین را در قطبهای شمال و جنوب قطع می‌کند. دوائر ثانویه از قطبین می‌گذرند و هر نیم‌دایره محدود به دو قطب یک نصف‌النهار نامیده می‌شود. نیم‌دایره مرجع، نصف‌النهار اصلی از گرینویچ انگلستان عبور می‌کند و استوا را در نقطه مبدا (طول جغرافیایی  $0^\circ$ ) قطع می‌کند. طول جغرافیایی عبارت است از کوتاه‌ترین فاصله زاویه‌ای در امتداد استوا که از نصف‌النهار اصلی شروع شده و به نصف‌النهار مشخص ختم می‌شود؛ این فاصله در جهت شرق یا غرب از  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  اندازه‌گیری می‌گردد. خط بین‌المللی تاریخ ضرورتاً در طول جغرافیایی  $180^\circ$  شرقی (یا غربی) قرار دارد. عرض جغرافیایی، فاصله زاویه‌ای شمالی یا جنوبی از استوا می‌باشد که در امتداد یک نصف‌النهار و برحسب درجه از  $0^\circ$  (استوا) تا  $90^\circ$  (قطبها) اندازه‌گیری می‌شود. توجه کنید که صفحات موازی با استوا، سطح زمین را به دوائر کوچکی تقسیم



شکل ضمیمه ۱۴

می‌کنند - مدارها<sup>۱</sup>. بعضی از مثالهای مکانهای تقریبی مشخص شده توسط این سیستم عبارتند از شهر نیویورک (شمالی  $40^{\circ} 40'$  و غربی  $73^{\circ} 58'$ ) و سیدنی استرالیا (جنوبی  $33^{\circ} 55'$  و شرقی  $151^{\circ} 17'$ ).

### ضمیمه ۱۰ - ۲ سیستم افقی

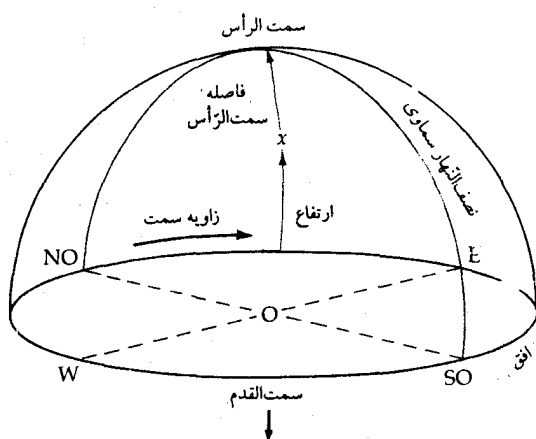
به وضوح، مشاهدات اولیه وابسته به مکان هستند و بنابراین اجازه دهید سیستم مختصات ناظر وابسته به افق یا سمت - ارتفاعی را توضیح دهیم. بر روی کره سماوی، یک سیستم مختصات کروی با ناظری در مرکز آن (شکل (ضمیمه ۱۵)) بنا می‌کنیم. نقطه عمودی بالای سر را سمت الرأس<sup>۲</sup> و نقطه مقابل آن (مستقیماً زیر پا) را سمت‌القدم<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. این دو نقطه با هم یک محور را تعریف می‌کنند. صفحه عبورکننده از ناظر و شامل این محور، آسمان را در افق سماوی قطع می‌کند که به فاصله  $90^{\circ}$  از سمت‌الرأس و سمت‌القدم می‌باشد. به علت موانع طبیعی و مصنوعی، به ندرت افق واقعی، همان افق سماوی است؛ نزدیکترین تقریب برای ناظر سطح دریا در وسط یک اقیانوس بدون تلاطم رخ می‌دهد. صفحات موازی با این محور و شامل ناظر، کره سماوی را در دوائر عظیمه‌ای به نام دوائر عمودی قطع می‌کنند. دایره مرجع آن دایره عمودی است که شامل سمت‌الرأس ناظر و نقاط شمال و جنوب افق ناظر باشد - این دایره را نصف‌النهار سماوی ناظر می‌نامیم. نقطه شمال روی افق، نقطه مبداء است و شرق و غرب روی افق و در وسط نقاط شمال و جنوب قرار دارند.

موقعیت یک پدیده سماوی در سیستم مختصات افقی توسط سمت و ارتفاع لحظه‌ای معین تعریف می‌شود. زاویه سمت فاصله زاویه‌ای در امتداد افق و به طرف شرق از نقطه شمال تا پای دایره عمودی شامل واقعه است که نزدیکترین نقطه به واقعه مورد نظر می‌باشد و زاویه سمت در گستره  $0^{\circ}$  تا  $360^{\circ}$  قرار دارد. ارتفاع کوتاه‌ترین فاصله زاویه‌ای در امتداد این دایره عمودی از افق تا واقعه و به طرف بالا می‌باشد که در گستره  $0^{\circ}$  (افق) تا  $90^{\circ}$  (سمت‌الرأس) قرار دارد. متمام ارتفاع یک جسم فاصله

1. The Parallels of Latitude.

2. Zenith.

3. Nadir.



شکل ضمیمه ۱۵

سمت الرأسی آن (ارتفاع -  $90^\circ$ ) است. به ویژه، دو واقعه بر روی نصف النهار سماوی ناظر مورد توجه می باشد: یک جسم سماوی هنگامی در گذار بالاتر قرار دارد که نصف النهار سماوی را در طول حرکت به سمت غرب قطع کند و وقتی در گذار پایین تر است که به هنگام حرکت به طرف شرق آن را قطع نماید. در موارد شهابسنگها و اقمار مصنوعی که ممکن است در غرب پدیدار شده و در شرق ناپدید شوند، معیار دیگری برای گذار بالاتر ضروری می باشد: معمولاً گذار بالاتر آن است که نصف النهار سماوی مرئی برای ناظر را قطع می کند.

### ضمیمه ۱۰ - ۳ مختصات استوائی سماوی

اکنون به مهمترین سیستم مختصات نجومی برمی گردیم - سیستم استوایی سماوی. به خاطر بیاورید که این کره سماوی به مرکز کره زمین است و شعاع آن به طور نامحدودی بزرگ می باشد. این شرط آخر از اینجا ناشی می شود که قصد داریم تمام آسمان را بر روی سطح این کره نقش کنیم، زیرا که خطوط دید به هر ستاره (به استثناء خورشید) اساساً به طور کامل برای دو ناظر زمینی موازی می باشند. طرق زیادی برای تصویر کردن یک سیستم مختصات کروی بر سطح داخلی کره سماوی وجود دارند؛

چرخش زمین مبنائی برای روش اخیر است. گرچه، بیشتر اصطلاحات متفاوت اند، اما سیستم مختصات استوائی سماوی تقریباً به طور کامل با طول و عرض جغرافیایی زمینی قابل قیاس می باشد.

در مورد یک ناظر مشخص، چرخش ظاهری کره سماوی موجب می شود که تمام ستارگان هر شبانه روز یکبار آسمان را دور بزنند؛ از این رو، زاویه سمت و ارتفاع هر ستاره به طور ثابت با زمان تغییر می کنند. با انتقال به یک سیستم مختصات کروی که با کره سماوی می چرخد - سیستم استوائی سماوی - می توانیم مواضع را با دقتی که برابر یک قسمت در  $10^2$  سال ثابت اند، بدست آوریم. علت اصلی تغییرات باقیمانده، حرکت تقدیمی زمین است که سبب می شود اعتدالین حدود  $50''$  در سال به طرف غرب جابه جا شوند.

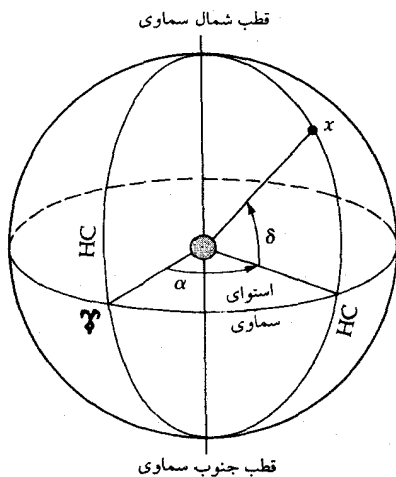
یک کره سماوی ثابتی را در نظر بگیرید که در مرکز آن زمین حول محورش در هر شبانه روز به طرف شرق بچرخد. فرض کنید که چرخش زمین متوقف شود و گروه مختصات طول - عرض جغرافیایی زمینی بر سطح چنین کره سماوی تصویر گردد، بنابراین صفحه استوایی زمین کره سماوی را در دایره عظیمه استوای سماوی قطع می کند و محور چرخشی زمین را طوری امتداد می دهیم تا کره سماوی را در قطبهای شمالی و جنوبی قطع کند (شکل (ضمیمه ۱۶)). نصف النهارات طول جغرافیایی بر دوایر ساعتی روی کره سماوی نقش بسته و صفحات موازی عرض جغرافیایی به شکل دوایر کوچک و هم مرکز با قطبها ظاهر می شوند. اکنون، اگر مجاز باشیم که زمین چرخشش را از سر بگیرد، هر ناظر این گروه مختصات استوایی سماوی ثابت بر کره سماوی را در حال چرخش به طرف غرب در هر شبانه روز ملاحظه می کند.

در سیستم مختصات استوایی سماوی، استوای سماوی دایره اولیه است و دوایر ساعتی دایره های ثانویه می باشند. موقعیت یک جسم سماوی با میل  $(\delta)^1$  و زاویه بعد  $^2$  آن  $(\alpha)$  مشخص می شود. میل، قابل مقایسه با عرض جغرافیایی، کوچکترین فاصله زاویه ای (اندازه گیری شده بر حسب درجه، دقیقه و ثانیه قوسی) از استوای سماوی تا جسم و در امتداد دایره ساعتی عبور کننده از جسم است. برای سهولت، موقعیت های

1. Declination.

2. Right Ascension.

بین استوای سماوی و قطب شمال سماوی دارای میل مثبت و نقاط بین استوا و قطب جنوب سماوی دارای میل منفی می‌باشند؛ از این رو، میل در گستره  $0^\circ$  (استوای سماوی) تا  $90^\circ$  (قطب شمال سماوی) یا  $-90^\circ$  (قطب جنوب سماوی) قرار دارد. زاویه بعد، قابل مقایسه با طول جغرافیایی زمینی، فاصله زاویه‌ای (اندازه‌گیری شده بر حسب ساعت، دقیقه و ثانیه زمانی یا hms) در امتداد استوای سماوی و به طرف شرق و از دایره ساعتی اولیه تا دایره ساعتی شامل جسم می‌باشد. زاویه بعد در گستره  $0^h 0^m 0^s$  تا  $23^h 59^m 59^s$  قرار دارد. برای درک این که چگونه واحدهای زمان در مورد زاویه بعد به کار می‌رود، دایره ساعتی اولیه را که دقیقاً بر نصف‌النهار سماوی محلی ناظر منطبق است، در نظر بگیرید. چون زمین  $360^\circ$  را در ۲۴ ساعت می‌چرخد، نصف‌النهار سماوی ناظر بعد از یک ساعت ۱۵ درجه در شرق دایره ساعتی اولیه قرار می‌گیرد. بنابراین، این زاویه بعد را  $1^h 0^m 0^s$  می‌نامیم؛ چرخش یک‌درجه به چهار دقیقه زمانی، یک دقیقه قوسی به ۴ ثانیه زمانی و یک ثانیه قوسی به  $\frac{1}{15}$  ثانیه زمانی مربوط می‌شود.



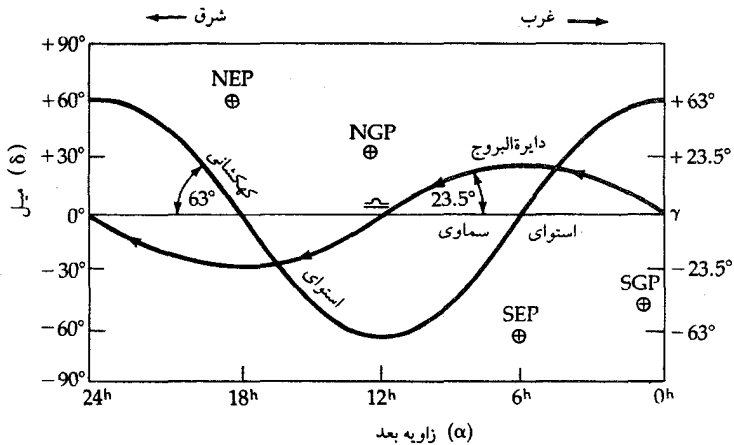
شکل ضمیمه ۱۶

نقطه مبدا زاویه بعد، اعتدال بهاری<sup>۱</sup> (γ) می‌باشد، که از دید تاریخی آن اولین نقطه

1. Vernal equinox.

حمل<sup>۱</sup> شناخته شده است. این مبدا ثابت بر کره سماوی، توسط استوای سماوی و دایره البروج تعریف می شود. دایره البروج، مسیر سالانه ظاهری خورشید در آسمان، دایره عظیمه ای است که صفحه مداری زمین کره سماوی را قطع می کند. شکل (ضمیمه ۱۷) نقشه ای از کره سماوی است که استوای سماوی و دایره البروج سینوسی را نشان می دهد. این دو دایره عظیمه با زاویه  $23^{\circ} 25/6'$  نسبت به یکدیگر تمایل دارند، بنابراین آنها فقط در دو نقطه یکدیگر را قطع می کنند - اعتدالین همان طور که خورشید در امتداد دایره البروج در امتداد شرق پیش می رود، استوای سماوی را به طرف شمال در اعتدال بهاری (بهار) و مجدداً شش ماه بعد به طرف جنوب در اعتدال پاییزی<sup>۲</sup> (پائیز) قطع می کند. بنا به تعریف، زاویه بعد - میل اعتدال بهاری  $(0^h, 0^{\circ})$  است.

برای مقاصد مشاهده ای، گاهی اوقات از سیستم استوائی سماوی با توجه به این که دایره مرجع را نصف النهار سماوی محلی در نظر می گیریم، استفاده می کنیم. میل، مواضع زاویه ای شمال - جنوب را اندازه می گیرد در صورتی که زاویه ساعتی بیان می کند که یک جسم سماوی بر حسب زمان چه اندازه غرب نصف النهار سماوی قرار دارد. زاویه ساعتی یک جسم نجومی به زمان و همچنین مکان ناظر بستگی دارد، مثلاً  $0^h 0^m 0^s$  در گذار بالاتر و  $2^h 30^m 0^s$  در  $2/5$  ساعت بعد.



شکل ضمیمه ۱۷

1. Aries.

2. Autumnal equinox.



## ضمیمه ۱۰ - ۴ مختصات دایرة البروجی و کهکشانی

برای توصیف حرکات اجرام داخل منظومه شمسی سیستم مختصات دایرة البروجی بسیار مفید می‌باشد. در اینجا دایرة البروج دایره اولیه است و قطبین را قطب شمال دایرة البروجی (قطبی که به قطب شمال سماوی نزدیکتر است) و قطب جنوب دایرة البروجی نامند. طول سماوی ( $\lambda$ ) برابر است با فاصله زاویه‌ای (از  $0^\circ$  تا  $360^\circ$ ) به طرف شرق و در امتداد دایرة البروج از نقطه اعتدال بهاری (نقطه مبدا). عرض سماوی ( $\beta$ ) عبارت است از زاویه اندازه‌گیری شده از دایرة البروج که به طرف قطب شمال دایرة البروجی مثبت و به طرف قطب جنوب دایرة البروجی منفی؛ این زاویه در گستره  $0^\circ$  تا  $90^\circ \pm$  تغییر می‌کند. از این رو، هنگامی که مرکز خورشید در اعتدال پائیزی قرار دارد، مختصات آن برابر است با  $(\lambda, \beta) = (180^\circ, 0^\circ)$ .

هنگامی که پدیده‌های مربوط به کهکشان خودی را مورد بحث قرار می‌دهیم، مناسب است مختصات کهکشانی جدید را به کار ببریم. در اینجا دایره اولیه توسط صفحه مرکزی راه شیری تعریف می‌شود که استوای سماوی نام دارد. مرکز کهکشان خودی (در صورت فلکی قوس)<sup>۱</sup> که روی استوای سماوی قرار دارد، نقطه مبدا می‌باشد. طول کهکشانی ( $l$  یا  $l^{\text{II}}$ ) به طرف شرق در امتداد استوای کهکشانی و از جهت مرکز کهکشانی اندازه‌گیری می‌شود که در گستره  $0^\circ$  تا  $360^\circ$  تغییر می‌کند. همان‌طور که از قطب شمال کهکشانی دیده می‌شود، طول کهکشانی در جهت عکس چرخش عقربه‌های ساعت زیاد می‌شود. عرض کهکشانی ( $b$  یا  $b^{\text{II}}$ ) عبارت است از زاویه اندازه‌گیری شده از استوای کهکشانی به طرف قطب شمال یا جنوب کهکشانی که در گستره  $0^\circ$  تا  $90^\circ \pm$  قرار دارد. برای اجتناب از اشتباه، بایستی یادآوری کرد که قبل از اوت ۱۹۵۸ میلادی سیستم مختصات کهکشانی متفاوتی ( $l^{\text{I}}$  و  $b^{\text{I}}$ ) مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ در هیچ زمان به این سیستم قدیمی مراجعه نخواهیم کرد.

در شکل (ضمیمه ۱۷) همچنین قطب‌ها و استوای سیستم مختصات دایرة البروجی و کهکشانی را مشخص کرده‌ایم. در آنجا می‌بینیم که دایره عظیمه استوایی کهکشانی  $63^\circ$  نسبت به استوای سماوی متمایل است. از این رو، تاکنون سه سیستم مختصات مختلف را شناخته‌ایم که هر یک کاملاً کره سماوی را می‌پوشاند.

## واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

آ

Hydrosphere	آب سپهر
Shield volcanoes	آتشفشانهای سپر
Hawaiian volcanoes	آتشفشانهای هاوایی
Adams, J. C.	آدامز، جی. سی.
Cavendish experiment	آزمایش کاوندیش
Detectors	آشکار سازها
Insolation	آفتاب زدگی
Albedo	آلبدو
Alpha centauri	آلفاقنطورس
Alphonsus (crater)	آلفونسوس (دهانه آتشفشان)
Amalthea	آمالتی
Ariel	آنتن
Anorthosites (lunar)	آنورتوزایتز (قمری)
True anomaly	آنومالی حقیقی
Stony irons (meteorites)	آهن‌های سنگی (شهابسنگها)
Io	آیو
IUE	آی یو ای

Supergranules	ابر دانه‌ها
Oort comet cloud	ابر دنباله‌دار اورت
Oberon	اُبرون
Charge - Coupled Devices.(CCD)	ابزار بار جفت شده (سی سی دی)
Retention of atmospheres	ابقاء جوها
Aberration of star light	ابیراهی نور ستاره
Bohr atom	اتم بوهر
Atoms	اتمها
Daughter atoms	اتمهای دختر
Parent atoms	اتمهای والدین
Coriolis effect	اثر کوریولیس
HEAO2	اچ ای ۲
Transition probability	احتمال‌گذار
Parallax	اختلاف منظر
Stellar parallax	اختلاف منظر ستاره‌ای
Vega parallax	اختلاف منظر نسرواقع
Edlen, B.	ادلن، بی
Eddy, John	ادی، جان
Eratosthenes	اراتوستن
Characteristic height	ارتفاع مشخصه
Aristotle	ارسطو
Europa	اروپا
Stratosphere	استراتوسفر
Steradian	استرادیان
Struve, F. G. W.	استرو، اف. جی. دبلیو
Stefan, Josef	استفان، جوزف
Planetary configurations	اشکال سیاره‌ای

Widmanstatten figures	اشکال ویدمنس تاتن
Tidal friction	اصطکاک جذر و مدی
Pauli exclusion principle	اصل انحصار پاولی
Uncertainty principle	اصل عدم قطعیت
Heisenberg uncertainty principle	اصل عدم قطعیت هایزنبرگ
Vernal equinox	اعتدال بهاری
Equinoxes	اعتدالین
Galilean moons	اقمار گالیله
Artificial satellites	اقمار مصنوعی
Ocean of storms (moon)	اقیانوس طوفانها (ماه)
Electron	الکترون
Electron volt	الکترون ولت
Valence electrons	الکترونهای ظرفیت
Olympus Mons (Mars)	الیمپوس مانز (مریخ)
Longitudinal compression (P) waves	امواج تراکمی (P) طولی
Radio waves	امواج رادیویی
Acoustic waves	امواج صوتی
P waves	امواج P
S waves	امواج S
Atmospheric transmission	انتقال جوی
Doppler shift	انتقال دوپلر
Relativistic Doppler shift	انتقال دوپلری نسبیتی
Phase shift	انتقال فاز
Continental drift	انتقال قاره‌ای
Transfers distortion (s) waves	انتقالهای امواج اغتشاش (های)
Momentum	اندازه حرکت
Linear momentum	اندازه حرکت خطی
Angular momentum	اندازه حرکت زاویه‌ای

Tidal intractions	اندراکنش‌های جذر و مدی
Energy	انرژی
High energy	انرژی بالا، مراجعه شود به پرتوهای ایکس
Potential energy	انرژی پتانسیل
Kinetic energy	انرژی جنبشی
Enceladus	انسیلادوس
Reflection	انعکاس
Decameter radio bursts (DAM)	انفجارات رادیویی دکامتری (دی‌ام)
Gravitational contraction	انقباض گرانشی
Solstices	انقلابین
Atmospheric refraction	انکسار جوی
Einstein, Albert	اینشتین، آلبرت
Apogee	اوج
Uranus	اورانوس
Oort, Jan.	اورت، یان
Ozone (Earth's atmosphere)	اوزون (جو زمین)
Lunar Phases	اهله‌های قمری
Isotopes	ایزوتوپها

## ب

Solar wind	باد خورشیدی
Meteor shower	بارش شهابی
Perseid meteor shower	بارش شهابی پرسید
Recombination	بازترکیب
Quantum efficiency	بازده کوانتومی
Beta Regio (Venus)	بتارجیو (سیاره زهره)
Bode, Johann	بُده، یوهان
Tidal bulge	برآمدگی جذر و مدی
Bradley, James	برادلی، جیمز

Excitation of atoms	برانگیختگی اتمها
Collisional excitation	برانگیختگی برخوردی
Radiative excitation	برانگیختگی تابشی
Meteorite impact	برخورد شهابسنگی
Imapacts	برخوردها
Magnetic field vector $\vec{B}$	بردار میدان مغناطیسی $\vec{B}$
Breccia	بریسیا
Apollo Program	برنامه آپولو
Frequency	بسامد
Bessel, Friedrich Wilhelm	بسل، فریدریک ویلهلم
Aphelion	بعید خورشید
Conservation of energy	بقاء انرژی
Planetary bombardment	بمباران سیاره‌ای
Boltzmann, Ludwig	بولتزمن، لودویگ
Bohr, Neils	بوهر، نیلز
Biermann, Ludwig	بیرمن، لودویگ
Ellipse	بیضی
Bailly (lunar crater)	بیلی (دهانه آتشفشانی قمری)

پ

Impact prameter	پارامتر برخورد
Dispersion	پاشندگی
Foucault's pendulum	پاندول فوکو
Excitation potential	پتانسیل برانگیختگی
Oblateness	پخی
Poynting - Robertson effect	پدیده پوینتینگ - رابرتسون
Doppler effect	پدیده دوپلر
Zeeman effect	پدیده زیمن
Photoelectric effect	پدیده فوتوالکتریک

Greenhouse effect	پدیده گلخانه‌ای
Diffraction	پراش
Proxima Centauri	پراکسیما قنطورس
Perturbations	پربشندگی‌ها
X - rays	پرتوهای ایکس
Solar cosmic rays	پرتوهای کیهانی خورشیدی
Gamma rays	پرتوهای گاما
Proton	پروتون
Plages	پلاژها
Plasma	پلازما
Pollack, James	پلاک، جیمز
Planck, Max K. E. L.	پلانک، ماکس ک. ای. ال.
Pluto	پلوتو
Ejecta blanket	پوشش پرتابه
Occultations	پوشیدگیها
Equivalent width	پهنای هم‌ارز
Broadening	پهن‌شدگی
Expansion broadening	پهن‌شدگی انبساط
Rotational broadening	پهن‌شدگی چرخشی
Doppler broadening	پهن‌شدگی دوپلری
Thermal Duppler broadening	پهن‌شدگی دوپلری گرمایی
Pressure broadening	پهن‌شدگی فشار
Turbulence broadening	پهن‌شدگی آشفته
Piazzzi, Guisepe	پیازی، گاسپ
Pioneer	پیش‌تاز
Protoplanets	پیش‌سیارات
Pixel	پیکسل

ت

Radiant (meteor)	تابان (شهاب)
Electromagnetic radiation	تابش الکترومغناطیسی
Cyclotron Frequency radiation	تابش بسامد سیکلوترونی
Blackbody radiation	تابش جسم سیاه
Decimeter radiation (DIM)	تابش دسیمتری (دی آی ام)
Bolometer	تابش سنج
Microwave radiation	تابش کهموج
Inferared radiation	تابش مادون قرمز
Ultraviolet radiation	تابش ماوراء بنفش
Corona	تاج
F Corona	تاج اف
Solar corona	تاج خورشیدی
K corona	تاج K
Dating	تاریخ گذاری
Radioactive dating	تاریخ گذاری رادیواکتیو
Limb darkening	تاریکی لبه
Tethys	تتیس
Accretion	تجمع
Evolution	تحول
Tidal evolution	تحول جذر و مدی
Interference	تداخل
Very large base line interferometer (VLBI)	تداخل سنج زمینی خیلی بزرگ (VLBI)
Interferometry	تداخل سنجی
Quadrature	تربیع
Triton	تریتون
Image	تصویر
Thermal equilibrium	تعادل گرمایی



Hydrostatic equilibrium	تعدادل هیدرواستاتیک
Sun spot numbers	تعداد لکه خورشیدی
Equation of time	تعدیل زمان
Resolution (angular)	تفکیک (زاویه‌ای)
Cassini division	تقسیم کاسینی
Gregorian calendar	تقویم گریگوری
Radioactive decay	تلاشی رادیواکتیو
Hubble Space Telescope	تلسکوپ فضایی هابل
Telescopes	تلسکوپ‌ها
Radio telescope (s)	تلسکوپ (های) رادیویی
Hale telescope	تلسکوپ هیل
Magnifying power	توان بزرگنمایی
Resolving power	توان تفکیک‌کنندگی
Light - gathering power	توان جمع‌آوری نور
Rayleigh - Jeans distribution	توزیع رایله - جینز
Maxwellian distribution	توزیع ماکسول
Tombaugh, clyde W.	تومبا، کلاید دبل‌یو
Titan	تیتان
Titania	تیتانیا
Titus of Wittenberg	تیتوس ویتنبرگ
Tycho (crater)	تیکو (دهانه آتشفشانی)
Taylor, Joseph	تیلر، جوزف

### ث

Boltzmann constant	ثابت بولتزمن
Planck constant	ثابت پلانک
Decay constant (radio activity)	ثابت تلاشی (فعالیت رادیویی)
Rydburgh constant	ثابت ری‌دبرگ
Gravitational constant	ثابت گرانشی

ج

Jansky, karl	جانسکی، کارل
Tides	جذر و مدها
Mass	جرم
Atomic mass	جرم اتمی
Coronal streamers	جریانهای تاجی
Spin - orbit coupling	جفت شدگی مدار - چرخش
Atmosphere	جو
Jolly, Philip Von	جولی، فیلیپ فن
Atmosphere (unit)	جو (واحد)

چ

Charon	چارون
Solar rotation	چرخش خورشیدی
Differential solar rotation	چرخش خورشیدی جزئی
planetary rotation	چرخش سیاره‌ای
Synchronous rotation	چرخش همزمان
Solar cycle	چرخه خورشیدی
Saros cycle	چرخه ساروس
Metonic cycles	چرخه متونی
Energy density	چگالی انرژی

ح

Ground state of atom	حالت پایه اتم
Metastable states	حالت‌های شبه پایدار
Diffraction limit	حد پراش
Roche limit	حد روچ
Instability limit	حد ناپایداری
Precession	حرکت تقدیمی

Retrograde motion	حرکت معکوس
Perigee	حضيض خورشیدی
Coronal holes	حفره‌های تاجی
Rings	حلقه‌ها
Coronal loops	حلقه‌های تاجی
Caloris Basin (Mercury)	حوضچه کالوریس (عطارد)

### خ

Viking landers (Mars)	خاک‌نشین‌های وایکینگ (مریخ)
Extinction	خاموشی
Planetesimals	خرده سیارات
Eccentricity of planetary orbits	خروج از مرکز مدارهای سیاره‌ای
Line of nodes	خط گره‌ها
Emission line	خط نشری
Balmer line (s)	خطوط بالمر
Coronium lines	خطوط تاجی
Absorption lines	خطوط جذبی
Spectral lines	خطوط طیفی
CaI spectral lines	خطوط طیفی CaI
Forbidden lines	خطوط قدغن
Lyman lines	خطوط لیمن
Sun	خورشید

### د

Spicules	دانه‌ها
Antarctic Circle	دایره جنوبگان
Arctic Circle	دایره شمالگان
Ecliptic	دایرة البروج
Mare Orientale	دریای اورین تیل

Mare Imbrium	دریای ایمبریوم
Descartes, Rene	دکارت، رنه
Temperature	دما
Boltzmann - saha temperature	دمای بولتزمن - ساها
Subsolar temperature	دمای زیر خورشید
Comet Arend - Roland	دنباله دار آرند - رولند
Comet Ikeya - seki	دنباله دار ایکیا - سکی
Comet Giacobini - zinner	دنباله دار جیوکیبینی - زینر
Comet, Kohoutek	دنباله دار، کوهوتک
Comet West	دنباله دار وست
Comets	دنباله دارها
Comet Halley	دنباله دار هالی
Doppler, C. J.	دوپلر، سی. جی
Deuterium	دوتریوم
Sidereal rotation period	دوره تناوب چرخش نجومی
Sidereal period	دوره تناوب نجومی
Synodic period	دوره تناوب هلالی
Barringer Meteor Crater	دهانه آتشفشانی شهاب برینجز
Meteor crater	دهانه آتشفشانی شهابی
DIM (Jupiter)	دی آی ام (مشتری)
DAM (Jupiter)	دی اِم (مشتری)
Seeing	دید
Atmospheric seeing, see Seeing	دید جوی، به دید مراجعه شود
Deimos	دیموس
Dione	دیونه
Elementary Particles	ذرات بنیادی

Stefan - Boltzman relation	رابطه استفان - بولتزمن
Rutherford, Ernest	راترفورد، ارنست
Reber, Grote	ربر، گروت
Lunar libration	رخگرد قمری
Librations (lunar)	رخگردها (قمری)
Very large array (VLA)	ردیف خیلی بزرگ (VLA)
Filaments (solar)	رشته‌ها (خورشیدی)
Einstein x - ray observatory	رصدخانه پرتو ایکس انیشتین
Pic - du - Midi Observatory	رصدخانه پیک - دیو - میدی
Capilla Peak Observatory	رصدخانه کاپیلا پیک
Lowell Observatory	رصدخانه لوول
Nutation	رقص محوری
Regolith	رگولیت
Chromosphere	رنگین سپهر
Roche, Edouard	روچ، اژرد
Limb brightening	روشنی لبه
Romer, Ole	رومر، اول
Riccioli	ریچولی

Solid angle	زاویه فضایی
Prominences (solar)	زبان‌ها (خورشیدی)
Solar prominences	زبان‌های خورشیدی
Saturn	زحل
Helioseismology	زلزله‌شناسی خورشیدی
Time	زمان
Standard time	زمان استاندارد
Ephemeris time	زمان تقویمی

Universal time (UT)	زمان جهانی (UT)
Apparent solar time	زمان خورشیدی ظاهری
Mean solar time	زمان خورشیدی متوسط
Greenwich mean time	زمان متوسط گرینویچ
Absolute time	زمان مطلق
Sidereal time	زمان نجومی
Earth	زمین
Plate tectonics	زمین ساخت صفحه
Venus	زهره
Zeeman, pieter	زیمن، پیتر
<b>س</b>	
Year	سال
Sidereal year	سال نجومی
Saha, Meghnad N.	سها، مگنادان
siderius Nunciu	سایدیریوس ناسیوس
Umbriel	سایه
Evening star	ستاره شامگاهی
X - ray astronomy	ستاره شناسی پرتو ایکس
Gamma ray astronomy	ستاره شناسی پرتو گاما
Radar astronomy	ستاره شناسی راداری
Radio astronomy	ستاره شناسی رادیویی
Space astronomy	ستاره شناسی فضایی
Inferared astronomy	ستاره شناسی مادون قرمز
Ultraviolet astronomy	ستاره شناسی ماوراء بنفش
Solar nebula	سحابی خورشیدی
Ceres	سرس
Escape velocity	سرعت فرار
Velocity of light	سرعت نور

Velocities	سرعتها
Energy level (s)	سطح (های) انرژی
Hadley cells	سلولهای هادلی
Aperture synthesis	سنتز شکاف
Lithosphere	سنگ سپهر
Parabola	سهمی
Superior planets	سیارات بالایی
Terrestrial planets	سیارات خاکی
Inferior planets	سیارات داخلی
Minor planets	سیارات ریز
Jovian planets	سیارات مشتری‌گون
Asteroids	سیارکها
Planetology	سیاره شناسی
Comparative planetology	سیاره‌شناسی مقایسه‌ای
Pluto - charon system	سیستم پلوتو - چارون
Solar system	سیستم خورشیدی
Earth - Moon system	سیستم زمین - ماه
Cyclone	سیکلون

## ش

Flux	شار
Energy flux	شار انرژی
Lava flows	شارشهای مواد آتشفشانی
Acceleration	شتاب
Centripetal acceleration	شتاب جانب مرکز
Intensity of radiation	شدت تابش
Monochromatic intensity	شدت تک فام
Flares (solar)	شراره‌ها (خورشیدی)
Solar flares	شراره‌های خورشیدی

Aurorae	شفق قطبی
Kirkwood gaps	شکاف‌های کیرکوود
Refraction	شکست
Magnetic buoyancy	شناوری مغناطیسی
Meteorites	شهابسنگها
Micrometeorites	شهابسنگهای ریز
Meteoroids	شهابواره‌ها
Meteors	شهابها
Objective	شیئی
Schiaparelli	شیاپارلی
Photosphere	شید سپهر

### ض

Einstein absorption coefficient	ضریب جذب انیشتین
Index of refraction	ضریب شکست

### ط

Wave nature of light	طبیعت موجی نور
Wave length	طول موج
Spectrum	طیف
Fraunhofer absorption spectrum	طیف جذبی فرانهورفر
Spectroheliograms	طیف نگارهای خورشیدی
Spectra	طیفها
Electromagnetic spectrum	طیف‌های الکترومغناطیسی

### ظ

Image processing	ظهور تصویر
------------------	------------

### ع

Solar insolation	عایق خورشیدی
------------------	--------------



Atomic number	عدد اتمی
Quantum number	عدد کوانتومی
Wave number	عدد موج
Regression of nodes	عقب‌گردی گره‌ها
Photography	عکاسی
Optical depth	عمق نوری

## ف

Gibbous phase	فاز گیبوس
Focal length	فاصله کانونی
Fraunhofer, Joseph von	فرانهوفر، جوزف فُن
Abundance of elements	فراوانی عناصر
Radiation pressure	فشار تابش
Seasons	فصول
Pioneer Venus Spacecraft	فضاپیمای زهره پیشتاز
Venera spacecraft	فضاپیمای ونرا
Solar activity	فعالیت خورشیدی
Faculae	فکولاه‌ها
Flourescence	فلورسانس
Phobos	فوبوس
Photons	فوتونها
Foucault, Bernard Leon	فوکو، برنارد لئون
Phoebe	فوئب
Fizeau, Armand	فیزو، آرماند

## ق

Snell's law	قانون اسنل
Bode's law	قانون بُد
Rayleigh scattering law	قانون پراکندگی رایله

Titus - Bode rule	قانون تیتوس - بود
Law of areas	قانون سطوح
Kepler's law	قانون کپلر
Coulomb's law	قانون کولمب
Gas law	قانون گاز
Perfect gas law	قانون گاز کامل
Wein's law	قانون وین
Harmonic law	قانون هم آهنگ
Perihelion	قرین خورشید
Polaris	قطبی
Polarization	قطبیدگی
Sun spot polarity	قطبیدگی لکه خورشیدی
Lunar	قمری
Newton's laws	قوانین نیوتون

## ک

Work	کار
Cassini, Giovanni	کاسینی، جیوانی
International Cometary Explorer (ICE)	کاشف دنباله دار بین المللی (آی سی ای)
International Ultra-Violet Explorer (IUE)	کاشف ماوراء بنفش بین المللی (آی یو ای)
Callisto	کالیستو
Computers	کامپیوترها
Focus	کانون
Cavendish, Henry	کاوندیش، هنری
Kepler, Johannes	کپلر، یوهان
Opacity	کدری
Fireball	کره آتشین
Celestial sphere	کره سماوی
Christy, James	کریستی، جیمز

Elongation	کشیدگی
Clavius (lunar crater)	کلاویوس (دهانه آتشفشانی قمری)
Polar ice - caps	کلاهکهای یخی قطبی
Asteroid belt	کمربند سیارکی
Van Allen radiation belts	کمربندهای تابشی وان آلن
Chondrites	کندرایتز
Carbonaceous chondrites	کندرایت‌های کربنی
Chondrules	کندورلس
Quanta	کوانتا
Copernicus (lunar crater)	کوپرنیک (دهانه آتشفشانی قمری)
Copernicus, Nicolaus	کوپرنیک، نیکلاس
Coriolis, Gaspard Gustave de	کوریولیس، گاسپارد گوستاودی
Coulomb (unit)	کولمب (واحد)
Apennine Mountains (lunar)	کوههای آپنین (قمری)

## گ

Galle, Johann G.	گاله، یوهان جی
Galilei, Galileo	گالیله‌ای، گالیلئو
Ganymede	گانیمد
Transition (atomic)	گذار (اتمی)
Free - free transitions	گذارهای آزاد - آزاد
Atomic transition	گذار اتمی
Graboske, Harold	گرابسک، هارولد
Gravitation	گرانش
Universal gravitation	گرانش جهانی
Lunar eclipses	گرفتگی‌های قمری
Eclipses	گرفتی‌ها
Thermosphere	گرما سپهر
Grotian, W.	گروتیان، دبل‌یو

Coma (Comet)	گیسو (دنباله‌دار)
<b>ل</b>	
Limb	لبه
Tharsis ridge (Mars)	لبه تارسیس (مریخ)
Inertia	لختی
Seismology	لرزه شناسی
Sun spot (s)	لکه (های) خورشیدی
Leverrier, U. J.	لوریر، یو. ج
Phototubes	لوله‌های نور
Lowell, Percival	لوول، پرسیوال
<b>م</b>	
Ejected matter	ماده پرتاب شده
Anomalistic month	ماده غیر عادی
Mariner	مارینر
Mascons	ماسکون
Maxwell, Montes	ماکسول، مانتز
Moon	ماه
Draconic month	ماه اژدهایی
Nodical month	ماه گره‌ای
Sidereal month	ماه نجومی
Asteroidal moons	ماه‌های سیارکی
Synodic month	ماه هلالی
Michelson, Albert A.	مایکلسن، آلبرت ا.
Interplanetary medium	محیط بین سیاره‌ای
Equatorial coordinates	مختصات استوایی
Celestial coordinates	مختصات سماوی
Parallatic orbit	مدار اختلاف منظری

Least energy orbit	مدار انرژی حداقل
Tropic of copricorn	مدار رأس الجدی
Tropic of cancer	مدار رأس السرطان
Planetary orbits	مدارهای سیاره‌ای
Capture model	مدل جذب
Heliocentric model	مدل خورشید مرکزی
Barycenter	مرکز جرم
Center of mass	مرکز جرم
Mars	مریخ
Voyager (s)	مسافر (ها)
Inferared observations	مشاهدات مادون قرمز
VLA Observations	مشاهدات VLA
VLBI Observations	مشاهدات VLBI
Boltzman equation	معادله بولتزمن
Barometric equation	معادله جوسنجی
Equation of state	معادله حالت
Saha equation	معادله ساها
Vis Viva equation	معادله ویز ویوا
Magnetosphere	مغناطیس سپهر
Magnetograph	مغناطیس نگار
Opposition	مقابله
Conjunction	مقارنه
Superior conjunction	مقارنه بالائی
Inferior conjunction	مقارنه داخلی
Conic séctions	مقاطع مخروطی
Gravitational cross section	مقطع عرضی گرانشی
Scale height	مقیاس ارتفاع
Richter scale	مقیاس ریشر

Plate scale	مقیاس صفحه
Scale (photographic plate)	مقیاس (صفحه عکاسی)
Celestial mechanics	مکانیک سماوی
Planck radiation curve	منحنی تابش پلانک
Excitation curves	منحنی های برانگیختگی
Zodiac	منطقه البروج
Time zones	منطقه های زمانی
Electromagnetic wave	موج الکترومغناطیسی
Light wave	موج نوری
Mesosphere	میان سپهر
Electric field	میدان الکتریکی
Magnetic field(s)	میدان (های) مغناطیسی
Miranda	میراندا

## ن

Transition region	ناحیه گذار
Neptune	نپتون
Nereid	نرید
F ratio	نسبت F
Maxwell's theory of radiation	نظریه تابش ماکسول
Quantum theory	نظریه کوانتومی
Einstein's theory of relativity	نظریه نسبیت انیشتین
Countourmap	نقشه پربند
Line profiles	نمایه های خط
Lunar Rock Samples	نمونه های صخره قمری
Active regions	نواحی فعال
Bipolar Magnetic Regions (BMR)	نواحی مغناطیسی دو قطبی
HII regions	نواحی HII
Neutron	نوترون

Light	نور
Optics	نور، اپتیک
Photoelectric Photometric	نورسنجی فوتوالکتریکی
Visible light	نور مرئی
Zodiacal light	نور منطقه البروجی
Extreme UV (corona)	نهایت UV (تاج)
Force	نیرو
Differential forces	نیروهای جزئی
Centripetal force	نیروی جانب مرکز
Lorentz force	نیروی لورنتز
Semi - major axes	نیم محوره‌های اصلی
Half life	نیمه عمر
Newton, Isaac	نیوتون، اسحاق
Newton (unit of force)	نیوتون (واحد نیرو)

و

De - excitation	واانگیختگی
Astronomical Unit	واحد نجومی
Polarity reversals (sun spots)	واژگونی‌های قطبیت (لکه‌های خورشیدی)
Valas Marineris (Mars)	والاس مارینریس (مریخ)
Van Allen, James	وان آلن، جیمز
Van Biesbroeck	وان بیسبروک
Van Jolly, phillip	وان جولی، فیلیپ
Weight	وزن
Wildt, Rupert	ویلدت، راپرت
Wein, Wilhelm	وین، ویلهلم

ه

Hall, Asaph	هال، اساف
-------------	-----------

Hyperbola	هذلولی
Hertz	هرتز
Herculina	هرکولینا
Nucleus, atomic	هسته، اتمی
Helium	هلیوم
Convection	همرفت
Henderson, T.	هندرسون، تی
Exosphere	هواسپهر
Huygens, Christian	هویگنس، کریستین
Hey, John S.	هی، جان اس
Hydrogen	هیدروژن
Metallic Hydrogen	هیدروژن فلزی
Hale, George E.	هیل، جورج ای

### ی

Iapetus	یاپتوس
Ionosphere	یون سپهر
Ions	یونها
Ionization	یونیدگی



## واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

### A

Aberration of star light	ابیراهی نور ستاره
Absolute time	زمان مطلق
Absorption lines	خطوط جذبی
Abundance of elements	فراوانی عناصر
Acceleration	شتاب
Accretion	تجمع
Acoustic waves	امواج صوتی
Active regions	نواحی فعال
Adams, J. c.	آدامز، جی. سی.
Albedo	آلبدو
Alpha centauri	آلفا قنطورس
Alphonsus (crater)	آلفونسوس (دهانه آتشفشان)
Amalthea	آمالتی
Angular momentum	اندازه حرکت زاویه‌ای
Anomalistic month	ماده غیر عادی
Anorthosites (lunar)	آنورتوزائیز (قمری)
Antarctic Circle	دایره جنوبگان
Aperture synthesis	سنتز شکاف
Aphelion	بعید خورشید

Apogee	.....	اوج
Apollo Program	.....	برنامه آپولو
Apparent solar time	.....	زمان خورشیدی ظاهری
Appenine Mountains (lunar)	.....	کوههای آپنین (قمری)
Arctic Circle	.....	دایره شمالگان
Ariel	.....	آنتن
Aristotle	.....	ارسطو
Artificial satellites	.....	اقمار مصنوعی
Asteroid belt	.....	کمربند سیارکی
Asteroidal moons	.....	ماههای سیارکی
Asteroids	.....	سیارکها
Astronomical Unit	.....	واحد نجومی
Atmosphere	.....	جو
Atmosphere (unit)	.....	جو (واحد)
Atmospheric refraction	.....	انکسار جوی
Atmospheric seeing, see Seeing	.....	دید جوی، به دید مراجعه شود
Atmospheric transmission	.....	انتقال جوی
Atomic mass	.....	جرم اتمی
Atomic number	.....	عدد اتمی
Atomic transition	.....	گذر اتمی
Atoms	.....	اتمها
Aurorae	.....	شفق قطبی

## B

Baily (lunar crater)	.....	بیلی (دهانه آتشفشانی قمری)
Balmer line (s)	.....	خطوط بالمر
Barometric equation	.....	معادله جوستنچی
Barringer Meteor Crater	.....	دهانه آتشفشانی شهاب برینجز
Barycenter	.....	مرکز جرم

Bessel, Friedrich Wilhelm	بسل، فریدریک ویلهم
Beta Regio (Venus)	بتارجیو (سیاره زهره)
Biermann, Ludwig	بیرمن، لودویگ
Bipolar Magnetic Regions (BMR)	نواحی مغناطیسی دو قطبی
Blackbody radiation	تابش جسم سیاه
Bode's Law	قانون بُد
Bode, Johann	بُد، یوهان
Bohr atom	اتم بوهر
Bohr, Neils	بوهر، نیلز
Bolometer	تابش سنج
Boltzmann constant	ثابت بولتزمن
Boltzman equation	معادله بولتزمن
Boltzmann, Ludwig	بولتزمن، لودویگ
Boltzmann - saha temperature	دمای بولتزمن - ساها
Bombardment, see also crating	بمباردمان، همچنین به دهانه آتشفشان مراجعه شود.
Bradley, James	برادلی، جیمز
Breccia	برسیا
Broadening	پهن‌شدگی

## C

CaI spectral lines	خطوط طیفی CaI
Callisto	کالیستو
Caloris Basin (Mercury)	حوضچه کالوریس (عطارد)
Capilla Peak Observatory	رصدخانه کاپیلاپیک
Capture model	مدل جذب
Carbonaceous chondrites	کندرایت‌های کربنی
Cassini division	تقسیم کاسینی
Cassini, Giovanni	کاسینی، گیوانی
Cavendish experiment	آزمایش کاوندیش

Cavendish, Henry	کاوندیش، هنری
Celestial coordinates	مختصات سماوی
Celestial mechanics	مکانیک سماوی
Celestial sphere	کره سماوی
Center of mass	مرکز جرم
Centripetal acceleration	شتاب جانب مرکز
Centripetal foree	نیروی جانب مرکز
Ceres	سرس
Characteristic height	ارتفاع ویژه
Charge - Coupled Devices (CCD)	ابزار بار جفت شده (سی سی دی)
Charon	چارون
Chondrites	کندرایتز
Chondrules	کندورلس
Christy, James	کریستی، جیمز
Chromosphere	رنگین سپهر
Clavius (lunar crater)	کلاویوس (دهانه آتشفشانی قمری)
Collisional excitation	برانگیختگی برخوردی
Coma (Comet)	گیسو (دنباله دار)
Comet Arend - Roland	دنباله دار آرنند - رولند
Comet Giacobini - zinner	دنباله دار جیوکیبینی - زینر
Comet Halley	دنباله دار هالی
Comet Ikeya - seki	دنباله دار ایکیا - سکی
Comet, Kohoutek	دنباله دار، کوهوتک
Comet West	دنباله دار وست
Comets	دنباله دارها
Comparative planetology	سیاره شناسی مقایسه ای
Computers	کامپیوترها
Conic sections	مقاطع مخروطی

Conjunction	مقارنه
Conservation of energy	بقاء انرژی
Continental drift	انتقال قاره‌ای
Countourmap	نقشه پربند
Convection	همرفت
Copernicus, Nicolaus	کوپرنیک، نیکلاس
Copernicus (lunar crater)	کوپرنیک (دهانه آتشفشانی قمری)
Coriolis effect	اثر کوریولیس
Coriolis, Gaspard Gustave de	کوریولیس، گاسپارد گوستاودی
Corona	تاج
Coronal holes	حفره‌های تاجی
Coronal loops	حلقه‌های تاجی
Coronal streamers	جریانهای تاجی
Coronium lines	خطوط تاجی
Cosmic rays	پرتوهای کیهانی
Coulomb's law	قانون کولمب
Coulomb (unit)	کولمب (واحد)
Cyclone	چرخه
Cyclotron Frequency radiation	تابش بسامد چرخش

## D

DAM (Jupiter)	دی‌ام (مشتری)
Dating	تاریخ‌گذاری
Daughter atoms	اتمهای اختر
De - excitation	واانگیختگی
Decameter radio bursts (DAM)	انفجارات رادیویی دکامتری (دی‌ام)
Decay constant (radio activity)	ثابت تلاشی (فعالیت رادیویی)
Decimeter radaition (DIM)	تابش دسیمتری (دی‌ای‌ام)
Deimos	دیموس

Descartes, Rene	.....	دسکارتز، رنه
Detectors	.....	آشکار سازها
Deuterium	.....	دوتریوم
Differential forces	.....	نیروهای جزئی
Differential solar rotation	.....	چرخش خورشیدی جزئی
Diffracton	.....	پراش
Diffracton limit	.....	حد پراش
DIM (Jupiter)	.....	دی آی ام (مشتری)
Dione	.....	دیونه
Dispersion	.....	پاشندگی
Doppler broadening	.....	پهن شدگی دوپلری
Doppler effect	.....	پدیده دوپلر
Doppler shift	.....	انتقال دوپلر
Doppler, C. J.	.....	دوپلر، سی. جی
Draconic month	.....	ماه اژدهایی

## E

Earth	.....	زمین
Earth - Moon system	.....	سیستم زمین - ماه
Eccentricity of planetary orbits	.....	خروج از مرکز مدارهای سیاره‌ای
Eclipses	.....	گرفتی‌ها
Ecliptic	.....	دایرة البروج
Eddy, John	.....	ادی، جان
Edlen, B.	.....	ادلن، بی
Einstein absorption coefficient	.....	ضریب جذب انیشتین
Einstein x - ray observatory	.....	رصدخانه پرتو ایکس انیشتین
Einstein's theory of relativity	.....	نظریه نسبیت انیشتین
Einstein, Albert	.....	انیشتین، آلبرت
Ejecta blanket	.....	پوشش پرتابه

Ejected matter	.....	ماده پرتاب شده
Electric field	.....	میدان الکتریکی
Electromagnetic radiation	.....	تابش الکترومغناطیسی
Electromagnetic spectrum	.....	طیف‌های الکترومغناطیسی
Electromagnetic wave	.....	موج الکترومغناطیسی
Electron	.....	الکترون
Electron scattering	.....	پراکندگی الکترون
Electron volt	.....	الکترون ولت
Elementary Particles	.....	ذرات بنیادی
Ellipse	.....	بیضی
Elongation	.....	کشیدگی
Emission line	.....	خط نشری
Enceladus	.....	انسلادوس
Energy	.....	انرژی
Energy density	.....	چگالی انرژی
Energy flux	.....	شار انرژی
Energy level (s)	.....	سطح (های) انرژی
Ephemeris time	.....	زمان تقویمی
Equation of state	.....	معادله حالت
Equation of time	.....	تعدیل زمان
Equatorial coordinates	.....	مختصات استوایی
Equinoxes	.....	اعتدالین
Equivalent width	.....	پهنای هم‌ارز
Eratosthenes	.....	اراتوس تنز
Escape velocity	.....	سرعت فرار
Europa	.....	اروپا
Evening star	.....	ستاره شامگاهی
Evolution	.....	تحول

Excitation of atoms .....	برانگیختگی اتمها
Excitation curves .....	منحنی های برانگیختگی
Excitation potential .....	پتانسیل برانگیختگی
Exosphere .....	هواسپهر
Expansion broadening .....	پهن شدگی انبساط
Extinction .....	خاموشی
Extreme UV (corona) .....	نهایت UV (تاج)

## F

F Corona .....	تاج اف
F ratio .....	نسبت F
Faculae .....	فکولاها
Filaments (solar) .....	رشته ها (خورشیدی)
Fireball .....	کره آتشین
Fizeau, Armand .....	فیزو، آرماند
Flares (solar) .....	شراره ها (خورشیدی)
Flourescence .....	فلورسانس
Flux .....	شار
Focal length .....	فاصله کانونی
Focus .....	کانون
Forbidden lines .....	خطوط قدغن
Force .....	نیرو
Foucault, Bernard Leon .....	فوکو، برنارد لئون
Foucault's pendulum .....	پاندول فوکو
Fraunhofer absorption spectrum .....	طیف جذبی فرانهورفر
Fraunhofer, Joseph von .....	فرانهورفر، جوزف فُن
Free - free transitions .....	گذارهای آزاد - آزاد
Frequency .....	بسامد



## G

Galilean moons .....	اقمار گالیله
Galilei, Galileo .....	گالیله‌ای، گالیلئو
Galle, Johann G. ....	گاله، یوهان جی
Gamma ray astronomy .....	ستاره‌شناسی پرتو گاما
Gamma rays .....	پرتوهای گاما
Ganymede .....	گانیمد
Gas law .....	قانون گاز
Gibbous phase .....	فاز گیبوس
Graboske, Harold .....	گرابسک، هارولد
Gravitation .....	گرانش
Gravitational constant .....	ثابت گرانشی
Gravitational contraction .....	انقباض گرانشی
Gravitational cross section .....	مقطع عرضی گرانشی
Greenhouse effect .....	پدیده گلخانه‌ای
Greenwich mean time .....	زمان متوسط گرینویچ
Gregorian calendar .....	تقویم گریگوری
Grotian, W. ....	گروتین، دبل‌یو
Ground state of atom .....	حالت پایه اتم

## H

H. (negative Hydrogen ion) .....	H. (یون هیدروژن منفی)
Hadley cells .....	سلولهای هادلی
Hale telescope .....	تلسکوپ هیل
Hale, George E. ....	هیل، جورج ای
Half life .....	نیمه عمر
Hall, Asaph .....	هال، اساف
Halley's comet .....	دنباله‌دار هالی
Harmonic law .....	قانون هم‌آهنگ

Hawaiian volcanoes .....	آتشفشانهای هاوایی
HEAO2 .....	اج ای ۲
Heisenberg uncertainty principle .....	اصل عدم قطعیت هایزنبرگ
Heliocentric model .....	مدل خورشید مرکزی
Helioseismology .....	زلزله شناسی خورشیدی
Helium .....	هلیوم
Henderson, T. ....	هندرسون، تی
Herculina .....	هرکولی
Hertz .....	هرتز
Hey, John S. ....	هی، جان اس
High energy .....	انرژی بالا
Hubble Space Telescope .....	تلسکوپ فضایی هابل
Huygens, Christian .....	هویگنس، کریستین
Hydrogen .....	هیدروژن
HII regions .....	نواحی HII
Hydrosphere .....	آب کره
Hydrostatic equilibrium .....	تعادل هیدرواستاتیک
Hyperbola .....	سهمی

## I

Iapetus .....	یاپتوس
Image .....	تصویر
Image processing .....	ظهور تصویر
Impact parameter .....	پارامتر برخورد
Impacts .....	برخوردها
Index of refraction .....	ضریب شکست
Inertia .....	لختی
Inferior Conjunction .....	مقارنه داخلی
Inferior planets .....	سیارات داخلی

Inferared astronomy	ستاره‌شناسی مادون قرمز
Inferared observations	مشاهدات مادون قرمز
Inferared radiation	تابش مادون قرمز
Insolation	آفتاب‌گیری
Instability limit	حد ناپایداری
Intensity of radiation	شدت تابش
Interference	تداخل
Interfrometry	تداخل‌سنجی
International Cometary Explorer (ICE)	کاشف دنباله‌دار بین‌المللی (آی سی ای)
International Ultra-Violet Explorer (IUE)	کاشف ماوراءبنفش بین‌المللی (آی یو ای)
Interplanetary medium	محیط بین سیاره‌ای
Io	آیو
Ionization	یونیدگی
Ionosphere	یون‌سپهر
Ions	یونها
Isotopes	ایزوتوپها
IUE	آی یو ای

## J

Jansky, karl	جانسکی، کارل
Jolly, Philip Von	جولی، فیلیپ فن
Jovian planets	سیارات مشتری‌گون

## K

K corona	تاج K
Kepler's law	قانون کپلر
Kepler, Johannes	کپلر، یوهان
Kinetic energy	انرژی جنبشی
Kirkwood gaps	شکاف‌های کیرک‌وود

## L

Lava flows .....	شارشهای مواد آتشفشانی
Law of areas .....	قانون سطوح
Least energy orbit .....	مدار انرژی حداقل
Leverrier, U. J. ....	لوریر، یو. ج.
Librations (lunar) .....	آزاد سازی‌ها (قمری)
Light .....	نور
Light wave .....	موج نوری
Light - gathering power .....	توان جمع‌آوری نور
Limb .....	لبه
Limb brightening .....	روشنی لبه
Limb darkening .....	تاریکی لبه
Line of nodes .....	خط گره‌ها
Line profiles .....	نمایه‌های خط
Linear momentum .....	اندازه حرکت خطی
Lithosphere .....	سنگ سپهر
Longitudinal compression (P) waves .....	امواج تراکمی (P) طولی
Lorentz force .....	نیروی لورنتز
Lowell Observatory .....	رصدخانه لوول
Lowell, Percival .....	لوول، پرسیوال
Lunar .....	قمری
Lunar eclipses .....	گرفتگی‌های قمری
Lunar Libration .....	آزادسازی قمری
Lunar Phases .....	اهله‌های قمری
Lunar Rock Samples .....	نمونه‌های صخره قمری
Lyman Lines .....	خطوط لیمن

## M

Magnetic buoyancy	شناوری مغناطیسی
Magnetic field vectos $\vec{B}$	بردار میدان مغناطیسی $\vec{B}$
Magnetic field(s)	میدان(های) مغناطیسی
Magnetograph	مغناطیس نگار
Magnetosphere	مغناطیس سپهر
Magnifying power	توان بزرگنمایی
Mare Ibrum	دریای ایبریم
Mare Orientale	دریای اورین تیل
Mariner	مارینر
Mars	مریخ
Mascons	ماسکون
Mass	جرم
Maxwell, Montes	ماکسول، مانتز
Maxwell's theory of radiation	نظریه تابش ماکسول
Maxwellian distribution	توزیع ماکسول
Mean solar time	زمان خورشیدی متوسط
Mesosphere	میان سپهر
Metallic Hydrogen	هیدروژن فلزی
Metastable states	حالت‌های شبه پایدار
Meteors	شهابها
Meteor crater	دهانه آتشفشانی شهابی
Meteor shower	بارش شهابی
Meteorites	شهابسنگها
Meteorite impact	برخورد شهابسنگی
Meteoroids	شهابواره‌ها
Metonic cycles	چرخه متونی
Michelson, Albert A.	مایکلسن، آلبرت ا.
Micrometeorites	شهابسنگهای ریز

Microwave radiation	تابش کهموج
Minor Planets	سیارات ریز
Miranda	میراندا
Momentum	اندازه حرکت
Monochromatic intensity	شدت تک فام
Moon	ماه

## N

Neptune	نپتون
Nereid	نرید
Neutron	نوترون
Newton (unit of force)	نیوتون (واحد نیرو)
Newton's laws	قوانین نیوتون
Newton, Isaac	نیوتون، اسحاق
Nodical month	ماه گره‌ای
Nucleus, atomic	هسته، اتمی
Nutation	رقص محوری

## O

Oberon	اُبرُن
Objective	شیئی
Oblateness	پهن شدگی
Occultations	پوشیدگیها
Ocean of storms (moon)	اقیانوس طوفانها (ماه)
Olympus Mons (Mars)	الیمپوس مانز (مریخ)
Oort comet cloud	ابر دنباله‌دار اورت
Oort, Jan.	اورت، یان
Opacity	کدری
Opposition	مقابله

Optical depth	عمق نوری
Optics	نور
Ozone (Earth's atmosphere)	اوزون (جو زمین)

## P

P waves	امواج P
Parabola	سهمی
Parallatic orbit	مدار اختلاف منظری
Parallax	اختلاف منظر
Parent atoms	اتمهای والدین
Pauli exclusion principle	اصل انحصار پاولی
Perfect gas law	قانون گاز کامل
Perigee	بعید خورشید
Perihelion	قرین خورشید
Perseid meteor shower	بارش شهابی پرسید
Perturbations	پریشندگی‌ها
Phase shift	انتقال فاز
Phobos	فوبوس
Phoebe	فوب
Photoelectric effect	پدیده فوتوالکتریک
Photoelectric Photometric	نورسنجی فوتوالکتریکی
Photography	عکاسی
Photons	فوتونها
Photosphere	شید سپهر
Phototubes	لوله‌های نور
Piazz, Guisepe	پیازی، گاسپ
Pic - du - Midi Observatory	رصدخانه پیک - دیو - میدی
Pioneer	پیشتاز
Pioneer Venus Spacecraft	فضاپیمای زهره پیشتاز

pixel .....	پیکسل
Plages .....	پلاژها
Planck constant .....	ثابت پلانک
Planck radiation curve .....	منحنی تابش پلانک
Planck, Max K. E. L. ....	پلانک، ماکس ک. ای. ال
Planetary bombardment .....	بمباران سیاره‌ای
Planetary configurations .....	اشکال سیاره‌ای
Planetary orbits .....	مدارهای سیاره‌ای
planetary rotation .....	چرخش سیاره‌ای
Planetesimals .....	خرده سیارات
Planetology .....	سیاره شناسی
Plasma .....	پلازما
Plate scale .....	مقیاس صفحه
Plate tectonics .....	زمین ساخت صفحه
pluto .....	پلوتو
Pluto - charon system .....	سیستم پلوتو - چارون
Polar ice - caps .....	کلاهکهای یخی قطبی
Polaris .....	قطبی
Polarity reversals (sun spots) .....	واژگونیهای قطبیت (لکه‌های خورشیدی)
Polarization .....	قطبیدگی
Pollack, James .....	پلاک، جیمز
Potential energy .....	انرژی پتانسیل
Poynting - Robertson effect .....	پدیده پوینتینگ - رابرتسون
Precession .....	حرکت تقدیمی
Pressure broadening .....	پهن‌شدگی فشار
Prominences (solar) .....	زبانها (خورشیدی)
Proton .....	پروتون
Protoplanets .....	پیش سیارات



Proxima Centauri ..... پراکسیما قنطورس

## Q

Quadrature ..... تربیع

Quanta ..... کوانتا

Quantum efficiency ..... بازده کوانتومی

Quantum number ..... عدد کوانتومی

Quantum theory ..... نظریه کوانتومی

## R

Radar astronomy ..... ستاره شناسی راداری

Radiant (meteor) ..... تابنده (شهاب)

Radiation pressure ..... فشار تابش

Radiative excitation ..... برانگیختگی تابشی

Radio astronomy ..... ستاره‌شناسی رادیویی

Radio telescope (s) ..... تلسکوپ (های) رادیویی

Radio waves ..... امواج رادیویی

Radioactive dating ..... تاریخ گذاری رادیواکتیو

Radioactive decay ..... تلاشی رادیواکتیو

Rayleigh scattering law ..... قانون پراکندگی رایله

Rayleigh - Jeans distribution ..... توزیع رایله - جینز

Rays (lunar) ..... پرتوهای (قمری)

Reber, Grote ..... ربر، گروت

Recombination ..... باز ترکیب

Reflection ..... انعکاس

Refraction ..... شکست

Regolith ..... رگولیت

Regression of nodes ..... عقب گردی گره‌ها

Relativistic Duppler shift ..... انتقال دوپلری نسبیتی

Resolution (angular) .....	تفکیک (زاویه‌ای) .....
Resolving power .....	توان تفکیک کنندگی .....
Retention of atmospheres .....	ابقاء جوها .....
Retrograde motion .....	حرکت معکوس .....
Riccioli .....	ریچولی .....
Richter scale .....	مقیاس ریشتر .....
Rings .....	حلقه‌ها .....
Roche limit .....	حد روچ .....
Roche, Edouard .....	روچ، اُرد .....
Romer, ole .....	رومر، اُول .....
Rotational broadening .....	پهن‌شدگی چرخشی .....
Rutherford, Ernest .....	راترفورد، ارنست .....
Rydburgh constant .....	ثابت ریدبرگ .....

## S

S waves .....	امواج S .....
Saha equation .....	معادله ساها .....
Saha, Meghnad N. ....	ساها، مگنادان .....
Saros cycle .....	چرخه ساروس .....
Saturn .....	زحل .....
Scale (photographic plate) .....	مقیاس (صفحه عکاسی) .....
Scale height .....	مقیاس ارتفاع .....
Schiaparelli .....	شیاپارلی .....
Seasons .....	فصول .....
Seeing .....	دید .....
Seismology .....	لرزه شناسی .....
Semi - major axes .....	نیم محورهای اصلی .....
Shield volcanos .....	آتشفشانهای شیلد .....
Sidereal month .....	ماه نجومی .....

Sidereal period	دوره تناوب نجومی
Sidereal rotation period	دوره تناوب چرخش نجومی
Sidereal time	زمان نجومی
Sidereal year	سال نجومی
siderius Nunciu	سایدیریوس ناسیوس
Snell's law	قانون اسنل
Solar activity	فعالیت خورشیدی
Solar corona	تاج خورشیدی
Solar cosmic rays	پرتوهای کیهانی خورشیدی
Solar cycle	چرخه خورشیدی
Solar flares	شراره‌های خورشیدی
Solar insolation	عایق خورشیدی
Solar nebula	سحابی خورشیدی
Solar prominences	زبان‌های خورشیدی
Solar rotation	چرخش خورشیدی
Solar system	سیستم خورشیدی
Solar wind	باد خورشیدی
Solid angle	زاویه فضایی
Solstices	انقلابین
Space astronomy	ستاره‌شناسی فضایی
Spectra	طیفها
Spectral lines	خطوط طیفی
Spectroheliograms	طیف نگارهای خورشیدی
Spectrum	طیف
Spicules	دانه‌ها
Spin - orbit coupling	جفت‌شدگی مدار - چرخش
Standard time	زمان استاندارد
Stefan, Josef	استفان، جوزف

Stefan - Boltzman relation	رابطه استفان - بولتزمن
Stellar parallax	اختلاف منظر ستاره‌ای
Steradian	استرادیان
Stony irons (meteorites)	آهن‌های سنگی (شهابسنگها)
Stratosphere	پوش سپهر
Struve, F. G. W.	استرو، اف. جی. دبل‌یو
Subsolar temperature	دمای زیر خورشید
Sun	خورشید
Sun spot numbers	تعداد لکه خورشیدی
Sun spot polarity	قطبیدگی لکه خورشیدی
Sun spot (s)	لکه(های) خورشیدی
Supergranules	ابر دانه‌ها
Superior conjunction	مقارنه بالائی
Superior planets	سیارات بالایی
Synchronous rotation	چرخش همزمان
Synodic month	ماه هلالی
Synodic period	دوره تناوب هلالی

## T

Taylor, Joseph	تیلر، جوزف
Telescopes	تلسکوپ‌ها
Temperature	دما
Terrestrial planets	سیارات خاکی
Tethys	تتیس
Tharsis ridge (Mars)	لبه تارسیس (مریخ)
Thermal Duppler browdening	پهن‌شدگی دوپلری گرمایی
Thermal equilibrium	تعادل گرمایی
Thermosphere	گرما سپهر
Tidal bulge	برآمدگی جذر و مدی

Tidal evolution	تحول جذر و مدی
Tidal friction	اصطکاک جذر و مدی
Tidal intractions	اندرکنش‌های جذر و مدی
Tides	جذر و مدها
Time	زمان
Time zones	منطقه‌های زمانی
Titan	تیتان
Titania	تیتانی
Titus of Wittenberg	تیتوس ویتنبرگ
Titus - Bode rule	قانون تیتوس - بود
Tombaugh, clyde W.	تومبا، کلاید دبل‌یو
Transition (atomic)	گذار (اتمی)
Transition probability	احتمال‌گذار
Transition region	ناحیه گذار
Transfers distortion (s) waves	انتقال‌های امواج اغتشاش (های)
Triton	تریتون
Tropic of cancer	مدار رأس السرطان
Tropic of copricorn	مدار رأس الجدی
Troposphere	گرماسپهر
True anomaly	آنومالی حقیقی
Turbulence broadening	پهن‌شدگی متلاطم
Tycho (crater)	تیکو (دهانه آتشفشانی)

## U

Ultraviolet astronomy	ستاره‌شناسی ماوراءبنفش
Ultraviolet radiation	تابش ماوراءبنفش
Umbriel	سایه
Uncertainty principle	اصل عدم قطعیت
Universal gravitation	گرانش جهانی

Universal time (UT) ..... زمان جهانی (UT)

Uranus ..... اورانوس

## V

Valence electrons ..... الکترونهاى ظرفیت

Valas Marineris (Mars) ..... والاس مارینریس (مریخ)

Van Allen radiation belts ..... کمربندهای تابشی وان آلن

Van Allen, James ..... وان آلن، جیمز

Van Biesbroeck ..... وان بیسبروک

Vega parallax ..... اختلاف منظر نسرواقع

Velocities ..... سرعتها

Velocity of light ..... سرعت نور

Venera spacecraft ..... فضاپیمای ونرا

Venus ..... زهره

Vernal equinox ..... اعتدال بهاری

Very large array (VLA) ..... ردیف خیلی بزرگ (VLA)

Very large base line interfrometer (VLBI) ..... تداخل سنجزمینی خیلی بزرگ (VLBI)

Viking landers (Mars) ..... خاک نشین های وایکینگ (مریخ)

Vis Viva equation ..... معادله ویز ویوا

Visible light ..... نور مرئی

VLA Observations ..... مشاهدات VLA

VLBI Observations ..... مشاهدات VLBI

Von Jolly, phillip ..... وان جولی، فیلیپ

Voyager (s) ..... مسافر (ها)

## W

Wave nature of light ..... طبیعت موجی نور

Ware number ..... عدد موج

Ware lenght ..... طول موج

Weight .....	وزن
Widmanstätten figures .....	اشکال ویدمنس تاتن
Wein's law .....	قانون وین
Wein, Wilhelm .....	وین، ویلهلم
Wildt, Rupert .....	ویلدت، راپرت
Work .....	کار

## X

X - ray astronomy .....	ستاره‌شناسی پرتو ایکس
X - rays .....	پرتوهای ایکس

## Y

Year .....	سال
------------	-----

## Z

Zeeman effect .....	پدیده زیمن
Zeeman, pieter .....	زیمن، پیتر
Zodiac .....	منطقه البروج
Zodiacal light .....	نور منطقه البروجی

## فهرست راهنما

آ

<p>ابر دانه‌ها، ۳۹۷، ۴۰۲</p> <p>ابر دنباله‌دار اورت، ۲۸۵</p> <p>اُبْرُن، ۲۷۱، ۴۵۱، ۴۶۲</p> <p>ابزار بار جفت شده (سی سی دی)، ۳۸۱</p> <p>ابقاءِ جوها، ۷۱</p> <p>ابراهی نور ستاره، ۱۰۲</p> <p>اتم بوهر، ۳۳۰، ۴۴۰، ۴۶۲</p> <p>اتمها، ۲۵۳، ۳۲۶، ۳۳۷</p> <p>اتمهای دختر، ۱۳۹، ۴۴۲، ۴۶۲</p> <p>اتمهای والدین، ۱۳۹، ۴۵۲، ۴۶۲</p> <p>اثر کوریولیس، ۹۵، ۹۷</p> <p>اچ ای (ا<sup>۱</sup>، ۲)، ۳۷۷</p> <p>احتمال‌گذار، ۳۹۷</p> <p>اختلاف منظر، ۱۰۴، ۳۹۷</p> <p>اختلاف منظر ستاره‌ای، ۱۰۴</p> <p>اختلاف منظر نسرواقع، ۱۰۶</p> <p>ادلن، بی، ۴۰۹، ۴۴۳، ۴۶۲</p>	<p>آب سپهر، ۱۳۷</p> <p>آشفشانهای سپر، ۱۹۱</p> <p>آشفشانهای هاوایی، ۱۹۲</p> <p>آدامز، جی. سی، ۲۳۹</p> <p>آزمایش کاوندیش، ۴۱، ۴۴۰</p> <p>آشکار سازها، ۳۲۰، ۳۷۸</p> <p>آفتاب زدگی، ۹۴، ۴۴۸</p> <p>آلبدو، ۶۵، ۶۶، ۶۹، ۹۳</p> <p>آلفا قنطورس، ۱۰۶، ۳۳۸</p> <p>آلفونسوس (دهانه آشفشان)، ۱۴۵</p> <p>آمالتی، ۲۶۰، ۲۶۱، ۳۳۸</p> <p>آنتن، ۲۷۱، ۳۷۱، ۳۷۳</p> <p>آنورتوزاتیز (قمری)، ۱۴۸</p> <p>آنومالی حقیقی، ۲۷، ۴۵۸، ۴۶۱</p> <p>آهن‌های سنگی (شهابسنگها)، ۲۸۸، ۴۵۷</p> <p>آیو، ۲۱۷، ۲۵۳</p> <p>آی یو ای، ۳۷۶، ۴۴۸</p>
--	--



امواج S، ۲۵۹، ۱۳۴	ادی، جان، ۴۶۲، ۴۴۳، ۴۱۸
انتقال جوی، ۳۶۸، ۳۲۰	اراتوستن، ۴۴۴، ۱۲۴
انتقال دوپلر، ۳۷۰، ۳۲۴	ارتفاع مشخصه، ۴۴۱، ۱۷۱
انتقال دوپلری نسبیتی، ۴۵۴، ۳۲۵	ارسطو، ۴۶۲، ۴۳۹، ۳۱
انتقال فاز، ۴۵۲، ۳۲۳	اروپا، ۲۵۶، ۲۵۲، ۲۵۱
انتقال قاره‌ای، ۱۳۸	استراتوسفیر، ۲۶۳، ۱۵۰
انتقالهای امواج اغتشاش (های)، ۱۳۴	استرادیان، ۴۵۷، ۳۲۷
اندازه حرکت، ۲۹۳، ۳۱	استرو، اف. جی. دبل‌یو، ۱۰۶
اندازه حرکت خطی، ۴۴۹، ۳۱	استفان، جوزف، ۴۶۲، ۴۵۶، ۳۵۸
اندازه حرکت زاویه‌ای، ۴۲	اشکال سیاره‌ای، ۱۸
اندرکنش‌های جذر ومدی، ۱۲۰، ۱۰۸	اشکال ویدمنس تاتن، ۴۶۲، ۴۶۰، ۲۹۰
انرژی، ۲۷۷، ۴۵	اصطکاک جذر و مدی، ۱۱۱
انرژی بالا، مراجعه شود به پرتوهای ایکس، ۳۳۶، ۳۲۰	اصل انحصار پاولی، ۴۵۲، ۳۴۰
انرژی پتانسیل، ۳۰۰، ۴۶	اصل عدم قطعیت، ۳۵۱، ۳۳۴
انرژی جنبشی، ۳۳۷، ۴۵	اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، ۳۵۱، ۳۳۴
انسیلادوس، ۴۴۴، ۲۶۲	اعتدال بهاری، ۴۵۹، ۸۶
انعکاس، ۳۱۹، ۲۵۰	اعتدالین، ۴۴۴، ۹۲
انفجارات رادیویی دکامتری (دی ام)، ۴۴۲، ۲۲۴	اقمار گالیله، ۲۵۶، ۲۵۳، ۲۵۲
انقباض گرانشی، ۳۰۴، ۳۰۳	اقمار مصنوعی، ۳۶۷، ۵۱
انقلابین، ۴۵۶، ۹۳	اقیانوس طوفانها (ماه)، ۱۴۳
انکسار جوی، ۴۳۹، ۱۵۷	الکترون، ۳۲۸، ۳۲۰، ۲۸۱
انیشیتین، آلبرت، ۴۴۳، ۳۵۵	الکترون ولت، ۳۳۵، ۳۲۰
اوج، ۴۳۷، ۵۳	الکترونهاي ظرفیت، ۴۵۹، ۳۴۰
اورانوس، ۲۷۰، ۲۳۴	الیمپوس مانز (مریخ)، ۱۹۱
اورت، یان، ۴۵۱، ۲۸۵	امواج تراکمی (P) طولی، ۴۴۹، ۱۳۴
اوزون (جو زمین)، ۴۵۲، ۱۵۴	امواج رادیویی، ۳۶۷، ۳۱۹
	امواج صوتی، ۳۹۰، ۳۱۷
	امواج P، ۲۵۹، ۱۳۴

بوهر، نیلز، ۳۳۱، ۳۳۰  
 بیرمن، لودویگ، ۴۴۰، ۲۸۱  
 بیضی، ۲۶۶، ۲۵۰، ۲۵  
 بیلی (دهانه آتشفشانی قمری)، ۱۴۳

پ

پارامتر برخورد، ۳۱۰، ۳۰۰  
 پاشندگی، ۴۴۳، ۳۲۲  
 پاندول فوکو، ۴۴۵، ۹۹  
 پتانسیل برانگیختگی، ۳۴۰، ۳۳۵  
 پخی، ۴۸۹، ۶۱  
 پدیده پوبیتینگ - رابرتسون، ۲۹۴  
 پدیده دوپلر، ۴۴۳، ۳۲۴  
 پدیده زمین، ۴۶۰، ۳۵۲  
 پدیده فوتوالکتریک، ۴۵۲، ۳۸۰  
 پدیده گلخانه‌ای، ۱۸۶  
 پراش، ۳۶۵، ۳۲۳  
 پراکسیما قنطورس، ۱۰۶  
 پرپشنده‌گی‌ها، ۱۲۰  
 پرتوهای ایکس، ۳۷۶، ۳۱۹  
 پرتوهای کیهانی خورشیدی، ۴۲۴، ۳۷۸  
 پرتوهای گاما، ۳۶۸، ۳۱۹  
 پروتون، ۳۶۱، ۳۲۸  
 پلازما، ۴۱۵، ۴۰۱  
 پلاسما، ۳۸۸، ۲۶۱  
 پلاک، جیمز، ۳۰۴  
 پلانک، ماکس ک. ای. ال.، ۳۵۴  
 پلوتو، ۲۹۳، ۲۷۴، ۱۲۵

اهله‌های قمری، ۱۲۹  
 ایزوتوپها، ۳۲۹، ۲۹۱

ب

باد خورشیدی، ۲۹۳، ۲۸۲، ۲۸۱  
 بارش شهابی، ۴۵۰، ۷۹  
 بارش شهابی پرسید، ۷۹  
 باز ترکیب، ۳۳۹  
 بازده کوانتومی، ۳۷۸  
 بتارجیو (سیاره زهره)، ۱۹۰  
 بُد، یوهان، ۵۷  
 برآمدگی جذر و مدی، ۱۱۴  
 برادلی، جیمز، ۳۰۴، ۱۰۲  
 برانگیختگی اتمها، ۴۳۳، ۳۳۶  
 برانگیختگی برخوردی، ۳۳۶، ۳۳۷، ۴۰۰، ۳۳۸  
 برانگیختگی تابشی، ۳۵۵، ۳۳۶  
 برخورد شهابسنگی، ۱۴۵  
 برخوردها، ۲۷۵، ۲۵۸، ۱۴۵  
 بردار میدان مغناطیسی B، ۳۱۷  
 بریسیا، ۲۹۲، ۱۴۸  
 برنامه آپولو، ۴۳۹، ۱۳۵  
 بسامد، ۳۲۴، ۳۱۷، ۲۷۵  
 بسل، فریدریک ویلهلم، ۱۰۵  
 بعید خورشید، ۳۱۰، ۶۰  
 بقاء انرژی، ۴۴۲، ۴۶  
 بمباران سیاره‌ای، ۳۰۵  
 بولتزمن، لودویگ، ۳۴۷، ۳۴۵، ۳۴۴

تاج K، ۲۹۲، ۴۰۷	پوشش پرتابه، ۱۴۵
تاریخ گذاری، ۳۰۷	پوشیدگیها، ۶۴
تاریخ گذاری رادیواکتیو، ۲۱۳، ۱۳۹	پهنای هم ارز، ۳۴۴
تاریکی لبه، ۳۰۷	پهن شدگی، ۳۵۹، ۳۵۰
تتیس، ۲۶۲، ۲۳۵	پهن شدگی انبساط، ۳۵۳
تجمع، ۸۰، ۷۴	پهن شدگی چرخشی، ۳۵۳
تداخل سنجی، ۲۴۳، ۱۳۷	پهن شدگی دوپلری، ۳۵۱
تربیع، ۱۹، ۱۸	پهن شدگی دوپلری گرمایی، ۳۶۱، ۳۵۱
تریتون، ۱۲۵، ۵۸	پهن شدگی فشار، ۳۵۲
تصویر، ۱۱۰، ۹۰، ۶۵	پهن شدگی آشفته، ۳۵۱
تعادل گرمایی، ۳۵۳، ۳۴۴	پیازی، گاسپ، ۴۵۲، ۷۳
تعادل هیدرواستاتیک، ۲۱۴، ۱۷۱، ۱۵۲	پیشتاز، ۲۶۸، ۲۹
تعداد لکه خورشیدی، ۴۵۷، ۴۱۹	پیش سیارات، ۲۹۹، ۲۹۸
تعديل زمان، ۴۴۴، ۸۷	پیکسل، ۴۵۳، ۳۸۲
تقسیم کاسینی، ۴۶۸، ۴۴۰	
تقویم گریگوری، ۴۶۸، ۴۴۶	<b>ت</b>
تلاشی رادیواکتیو، ۳۰۵، ۲۹۱	تابان (شهاب)، ۷۸
تلسکوپ فضایی هابل، ۴۴۷، ۴۲۱	تابش الکترومغناطیسی، ۳۱۵، ۲۹۳
تلسکوپ ها، ۱۵۷، ۱۵۶، ۱۵۴	تابش بسامد سیکلوترونی، ۲۲۷
تلسکوپ (های) رادیویی، ۴۶۸، ۴۵۴	تابش جسم سیاه، ۳۵۳، ۳۲۶
تلسکوپ هیل، ۴۶۸، ۴۴۶	تابش دسیمتری (دی آی ام)، ۴۶۸، ۴۴۲
توان بزرگنمایی، ۴۶۸، ۴۵۰	تابش سنج، ۴۴۰، ۳۵۹
توان تفکیک کنندگی، ۴۶۸، ۴۵۵	تابش کهموج، ۴۶۷، ۴۵۱
توزیع ماکسول، ۳۵۱، ۷۱	تابش مادون قرمز، ۳۶۷، ۲۷۷
تومبا، کلاید دبل یو، ۲۴۲	تابش ماوراءبنفش، ۴۵۸، ۴۳۰
تیتان، ۱۲۵، ۵۸، ۵۴	تاج، ۷۸
تیتانیا، ۲۷۱، ۲۳۵	تاج اف، ۳۰۶، ۲۹۲
تیکو (دهانه آشفشانی)، ۵۴۵، ۴۵۸	تاج خورشیدی، ۳۰۷

تیلر، جوزف، ۴۶۸، ۴۵۷

## ح

حالت پایه اتم، ۴۴۶، ۳۴۷، ۳۴۱

حالت‌های شبه پایدار، ۳۳۹، ۳۳۸

حد پراش، ۴۴۳، ۳۲۳

حد روچ، ۴۵۵، ۳۱۰، ۳۰۸

حد ناپایداری، ۴۷۰، ۴۴۸

حرکت تقدیمی، ۴۷۰، ۴۵۳، ۱۰۴

حرکت معکوس، ۴۷۰، ۴۵۵

حضيض (قرین خورشیدی)، ۳۱۰

حفره‌های تاجی، ۴۱۳، ۴۱۱، ۴۱۰

حلقه‌ها، ۲۵۹، ۲۵۱، ۲۴۸

حلقه‌های تاجی، ۴۷۰، ۴۴۲

حوضچه کالوریس (عطارد)، ۴۴۰، ۱۸۰

۴۷۰

## خ

خاک نشین‌های وایکینگ (مریخ)، ۱۹۸

خاموشی، ۴۷۰، ۴۴۵، ۱۵۶

خرده سیارات، ۴۵۴، ۴۵۳

خروج از مرکز مدارهای سیاره‌ای، ۲۵۰، ۲۶

خط گره‌ها، ۴۴۹، ۱۲۸

خط نشری، ۳۴۳، ۳۳۷

خطوط بالمر، ۳۵۰، ۳۴۸

خطوط تاجی، ۴۴۳، ۴۴۲

خطوط جذبی، ۳۴۴، ۳۳۶

خطوط طیفی، ۴۲۲، ۲۸۰

خطوط قدغن، ۴۷۰، ۴۴۵

## ث

ثابت بولتزمن، ۳۵۵، ۳۵۴، ۳۴۴

ثابت پلانک، ۳۵۵، ۳۳۰، ۳۲۶

ثابت تلاشی (فعالیت رادیویی)، ۴۴۲

۴۶۹

ثابت ریذبرگ، ۵۰۳، ۴۶۹، ۴۵۵

ثابت گرانشی، ۴۱، ۳۹

## ج

جانسکی، کارل، ۴۴۸، ۳۶۸

جذر و مدها، ۴۶۹، ۴۵۸

جرم، ۳۲، ۳۱، ۳۰

جرم اتمی، ۴۳۹، ۳۲۹

جریان‌های تاجی، ۴۰۸، ۴۰۷، ۴۰۵

جو، ۵۵، ۵۱، ۵۰

جولی، فیلیپ فن، ۴۶۹، ۴۴۸

## چ

چارون، ۱۲۵، ۵۵

چرخش خورشیدی، ۴۱۹، ۴۱۵، ۳۹۲

چرخش خورشیدی جزئی، ۴۶۹، ۴۴۳

چرخش سیاره‌ای، ۴۸۹، ۴۶۹، ۴۵۳

چرخه خورشیدی، ۴۲۱، ۴۲۰، ۴۱۵

چرخه ساروس، ۴۶۹، ۴۵۵

چرخه متونی، ۴۶۹، ۴۵۰

چگالی انرژی، ۴۴۴، ۳۵۶، ۳۵۵

دید، ۲۷۱، ۲۵۱

دید جوی، به دید مراجعه شود، ۴۷۳، ۴۴۰

دیموس، ۲۴۸، ۸۲

دیونه، ۴۷۳، ۴۴۴

ذرات بنیادی، ۴۴۵، ۳۲۹

ر

رابطه استفان - بولتزمن، ۴۴۵

راترفورد، ارنست، ۴۴۶، ۳۳۰

ربر، گروت، ۴۴۵، ۳۶۸

رخگرد قمری، ۱۲۸

رخگردها (قمری)، ۱۲۸

ردیف خیلی بزرگ (VLA)، ۴۷۳، ۴۶۰

رشته‌ها (خورشیدی)، ۲۵۹، ۲۵۸

رصدخانه پرتو ایکس انیشتین، ۴۷۳، ۴۴۴

رصدخانه پیک - دیو - میدی، ۴۴۱

رصدخانه کاپیلاپیک، ۲۸۲، ۳۶۴

رصدخانه لوول، ۳۸۰، ۴۵۰

رقص محوری، ۴۵۲، ۱۱۴

رگولیت، ۴۷۳، ۴۵۵

رنگین سپهر، ۳۸۹، ۳۸۸

روح، آذرب، ۴۵۶، ۱۱۷

روشنی لبه، ۴۴۱

رومر، اول، ۸۲

ریچولی، ۴۵۶، ۱۴۲

ز

زاویه فضایی، ۴۵۷، ۴۷۳

خطوط لیمن، ۴۷۰، ۴۴۹

خورشید، ۲۷۸، ۲۷۷، ۲۶۶

د

دانه‌ها، ۲۹۹، ۲۹۸

دایره جنوبگان، ۴۳۸، ۹۲

دایره شمالگان، ۴۳۹، ۹۲

دایرة البروج، ۴۹۳

دریای اورین تیل، ۴۵۰، ۱۴۵

دریای ایمبریوم، ۴۵۰، ۱۴۶

دکارت، رنه، ۴۴۳، ۳۲

دما، ۲۳۶، ۲۳۲، ۲۳۱

دمای بولتزمن - ساها، ۴۴۰

دمای زیر خورشید، ۳۴۶

دنباله دار آرنند - رولند، ۴۴۱

دنباله دار ایکیا - سکی، ۷۵

دنباله دار جیوکیبینی - زینر، ۴۴۱

دنباله دار، کوهوتک، ۴۴۱

دنباله دار وست، ۲۸۵

دنباله دارها، ۴۳۷، ۴۳۴

دنباله دار هالی، ۷۶

دوپلر، سی. جی، ۴۴۳، ۳۲۴

دوتریوم، ۴۷۱، ۴۴۳

دوره تناوب چرخش نجومی، ۴۷۱، ۴۶۵

دوره تناوب نجومی، ۴۵۶، ۴۲۱

دوره تناوب هلالی، ۴۷۱، ۴۵۷

دهانه آتشفشانی شهاب برینجز، ۴۷۱، ۴۳۹

دهانه آتشفشانی شهابی، ۴۷۱، ۴۵۰

ستاره‌شناسی مادون قرمز، ۳۷۶، ۳۷۵	زحل، ۱۲۵، ۱۵
ستاره‌شناسی ماوراءبنفش، ۴۵۸، ۳۷۶	زلزله شناسی خورشیدی، ۳۹۰
سحابی خورشیدی، ۲۹۹، ۲۹۸	زمان، ۲۵۱، ۲۵۰
سرس، ۲۵۰، ۷۳	زمان استاندارد، ۲۵۱
سرعت فرار، ۲۸۷، ۲۷۵	زمان تقویمی، ۴۷۴، ۴۴۵
سرعت نور، ۴۷۴، ۴۵۹	زمان جهانی (UT)، ۴۷۴، ۴۶۰
سرعتها، ۲۷۰، ۲۵۴	زمان خورشیدی ظاهری، ۴۷۴، ۴۳۹
سطح (های) انرژی، ۴۷۴، ۴۴۴	زمان خورشیدی متوسط، ۴۵۱، ۴۵۰
سلولهای هادلی، ۴۷۴، ۴۴۶	زمان متوسط گرینویچ، ۴۷۳، ۴۴۶
سنتز شکاف، ۳۷۴، ۳۷۳	زمان مطلق، ۴۷۳، ۴۳۸
سنگ سپهر، ۴۴۹، ۱۳۷	زمان نجومی، ۴۷۳، ۴۵۶
سهمی، ۳۷۷، ۳۶۳	زمین، ۲۵۱، ۲۵۰
سیارات بالایی، ۳۷۸	زمین ساخت صفحه، ۴۷۳، ۴۵۳
سیارات خاکی، ۳۰۴، ۲۴۸	زهره، ۲۹۵، ۲۵۴
سیارات داخلی، ۴۷۴، ۴۴۷	زیمن، پیتر، ۴۷۳، ۴۶۰
سیارات ریز، ۴۷۴، ۴۵۱	
سیارات مشتری گون، ۲۹۶، ۲۴۹	س
سیارکها، ۲۵۰، ۲۴۸	سال، ۲۴۹، ۲۴۸
سیاره شناسی، ۴۷۴، ۴۷۱	سال نجومی، ۴۷۳، ۴۵۶
سیستم پلوتو - چارون، ۴۷۴، ۴۵۳	سایه، ۳۴۷، ۳۴۶
سیستم خورشیدی، ۴۷۴، ۴۵۶	سایدربوس ناسیوس، ۴۷۳، ۴۵۶
سیکلون، ۹۷	سایه، ۴۱۴، ۴۱۶
	ستاره شامگاهی، ۴۷۳، ۴۴۴
ش	ستاره‌شناسی پرتو ایکس، ۴۷۳
شار، ۲۵۳، ۲۴۸	ستاره‌شناسی پرتو گاما، ۴۷۳
شار انرژی، ۳۲۷، ۲۹۳	ستاره شناسی راداری، ۴۷۳
شارشهای مواد آتشفشانی، ۴۷۴، ۴۴۹	ستاره‌شناسی رادیویی، ۴۵۴، ۳۶۸
شتاب، ۴۱۳، ۲۶۹	ستاره‌شناسی فضایی، ۳۶۷

شتاب جانب مرکز، ۴۴۱، ۴۷۴

شدت تابش، ۳۵۶، ۳۵۷

شدت تک فام، ۴۵۱، ۴۷۵

شراره‌ها (خورشیدی)، ۴۰۹، ۴۱۴

شراره‌های خورشیدی، ۴۰۹، ۴۱۴

شفق قطبی، ۳۳۷

شکاف‌های کیرکوود، ۴۴۸، ۴۷۵

شکست، ۳۲۰، ۳۲۱

شناوری مغناطیسی، ۳۳۱

شهابسنگها، ۲۴۸، ۲۸۶

شهابسنگهای ریز، ۴۵۰، ۴۷۵

شهابواره‌ها، ۴۵۰، ۴۷۵

شهابها، ۲۴۸، ۲۸۶

شبی، ۳۵۹، ۳۶۴

شیاپارلی، ۲۰۱، ۴۵۵

شید سپهر، ۳۸۹، ۳۹۲

## ظ

ظهور تصویر، ۴۴۷، ۴۷۶

## ع

عایق خورشیدی، ۴۵۶، ۴۷۶

عدد اتمی، ۳۲۹، ۳۳۹

عدد کوانتومی، ۳۳۱، ۳۴۲

عدد موج، ۳۳۳، ۳۴۱

عقب گردی گره‌ها، ۴۵۴، ۴۷۶

عکاسی، ۲۷۷، ۲۸۱

عمق نوری، ۳۸۴، ۳۹۳

## ف

فاز گیوس، ۴۴۶، ۴۷۶

فاصله کانونی، ۳۶۳، ۳۶۶

فرانوفر، جوزف فن، ۳۹۶، ۴۴۵

فراوانی عناصر، ۴۳۸، ۴۷۶

فشار تابش، ۲۹۳

فصول، ۴۵۵، ۴۷۶

فضایمای زهره پیشتاز، ۴۵۲، ۴۷۶

فضایمای ونرا، ۴۵۹، ۴۷۶

فعالیت خورشیدی، ۳۹۸، ۴۰۷

فکولاه‌ها، ۴۰۸

فلورسانس، ۲۸۳، ۴۴۵

فوبوس، ۸۲، ۲۴۹

فوتونها، ۳۲۶، ۳۲۷

فوکو، برنارد لئون، ۴۴۵، ۴۶۵

## ض

ضریب جذب انیشتین، ۳۵۵، ۴۴۳

ضریب شکست، ۳۲۰، ۳۲۱

## ط

طبیعت موجی نور، ۳۱۶، ۴۵۹

طول موج، ۳۱۱، ۳۱۵

طیف، ۲۵۰، ۲۶۳

طیف جذبی فرانوفر، ۳۹۶، ۴۴۵

طیف نگارهای خورشیدی، ۲۲۲

طیفها، ۲۸۰، ۲۸۳

کپلر، یوهان، ۲۶۷، ۲۲

کدری، ۳۹۳، ۳۹۰

کره آتشین، ۴۷۸، ۴۴۵

کره سماوی، ۴۷۸، ۴۴۱

کریستی، جیمز، ۴۴۱، ۲۴۳

کشیدگی، ۴۰۶، ۱۵

کلاویوس (دهانه آتشفشانی قمری)، ۱۴۵،

۴۴۱

کلاهیهای یخی قطبی، ۴۷۸، ۴۵۳

کمریند سیارکی، ۲۷۷، ۲۵۰

کمریندهای تابشی وان آلن، ۴۷۷، ۴۵۹

کندرایتز، ۴۴۱، ۲۵۰

کندرایت‌های کربنی، ۲۵۰

کندورلس، ۴۴۱، ۲۸۹

کواتنا، ۳۵۵، ۳۲۶

کوپرنیک (دهانه آتشفشانی قمری)، ۴۴۲،

۴۷۸

کوپرنیک، نیکلاس، ۴۴۲، ۱۶

کوربولیس، گاسپارد گوستاودی، ۴۴۲، ۹۵

کولمب (واحد)، ۳۳۰، ۳۲۹

کوههای آپنین (قمری)، ۴۷۸، ۴۳۹

### گ

گاله، یوهان جی، ۲۳۹

گالیه‌ای، گالیئو، ۲۱

گانیمد، ۲۵۲، ۲۵۱

گرابسک، هارولد، ۴۴۶، ۳۰۳

گرانش، ۲۶۲، ۲۵۶

فوئب، ۲۶۳، ۲۶۲

فیزو، آرماند، ۴۴۵، ۳۲۵

### ق

قانون بُد، ۴۷۷، ۴۴۰

قانون پراکنندگی رایله، ۴۷۷، ۴۵۴

قانون تیتوس - بود، ۴۷۷، ۴۵۸

قانون سطوح، ۴۷۷، ۴۴۹

قانون کپلر، ۴۷۷، ۴۴۸

قانون کولمب، ۴۴۲، ۳۳۰

قانون گاز، ۴۵۲، ۴۴۶

قانون گاز کامل، ۴۷۷، ۴۵۲

قانون وین، ۳۵۷، ۶۶

قانون هم آهنگ، ۴۷۷، ۴۴۶

قرین خورشید، ۴۵۲، ۳۱۰

قطبی، ۲۸۱، ۱۱۵

قطبیدگی، ۴۱۸، ۳۱۸

قطبیدگی لکه خورشیدی، ۴۷۷، ۴۵۷

قمری، ۲۷۵، ۲۴۹

قوانین نیوتون، ۴۷۷، ۴۵۱

### ک

کار، ۲۸۱، ۲۶۶

کاسینی، جیوانی، ۴۴۰، ۲۶۶

کالیستو، ۲۵۹، ۲۵۲

کامپیوترها، ۴۴۱، ۳۸۲

کانون، ۳۶۶، ۳۶۳

کاوندیش، هنری، ۴۴۰، ۳۹



مایکلسن، آلبرت ا.، ۱۰۸، ۴۵۰،	گرایش جهانی، ۴۷۸، ۴۵۸،
محیط بین سیاره‌ای، ۳۸۸، ۴۴۸،	گرفتنی‌های قمری، ۴۴۹، ۴۷۹،
مختصات استوایی، ۴۹۰، ۴۹۱،	گرفتنی‌ها، ۲۷۹، ۴۴۳،
مختصات سماوی، ۴۴۱، ۴۸۰،	گرما سپهر، ۴۵۷، ۴۷۹،
مدار اختلاف منظری، ۴۵۲، ۴۸۰،	گروتیان، دبل‌یو، ۴۰۹،
مدار رأس الجدی، ۹۲، ۴۵۸،	گیسو (دنباله‌دار)، ۲۸۰،
مدار رأس السرطان، ۹۲، ۴۵۸،	
مدل جذب، ۴۴۰، ۴۸۰،	ل
مدل خورشید مرکزی، ۴۴۷، ۴۸۰،	لبه، ۲۵۷، ۲۶۱،
مرکز جرم، ۴۳۳، ۴۳۹،	لبه تارسیس (مریخ)، ۴۵۷، ۴۷۹،
مرکز جرم، ۴۴۱، ۴۸۰،	لختی، ۳۱، ۲۹۷،
مریخ، ۲۴۹، ۲۵۰،	لرزه شناسی، ۴۱۴،
مسافر (ها)، ۲۱۷، ۴۵۹،	لکه‌های خورشیدی، ۴۵۷، ۴۷۹،
مشاهدات مادون قرمز، ۲۷۰، ۲۷۵،	لوریر، یو.ج.، ۲۳۹، ۴۴۹،
مشاهدات VLA، ۲۷۴،	لوله‌های نور، ۴۵۲، ۴۷۹،
مشاهدات VLBI، ۲۷۴،	لول، پرسیوال، ۲۴۲، ۴۴۹،
معادله بولتزمن، ۳۴۴، ۳۴۵،	
معادله جوسنژی، ۴۳۹، ۴۸۰،	م
معادله حالت، ۴۴۴، ۴۸۰،	ماده پرتاب شده، ۴۴۴، ۴۷۹،
معادله ساها، ۳۴۶، ۳۴۷،	مارینر، ۸۰، ۴۵۰،
مغناطیس سپهر، ۱۵۹، ۲۶۱،	ماسکون، ۴۵۰، ۴۷۹،
مغناطیس نگار، ۴۲۲، ۴۲۳،	ماکسول، مانتز، ۱۹۰، ۳۱۷،
مقابله، ۱۶،	ماه، ۲۴۸، ۲۵۲،
مقارنه، ۴۴۲، ۴۴۷،	ماه ازدهایی، ۱۲۸،
مقارنه بالائی، ۴۵۷، ۴۸۰،	ماه‌گره‌ای، ۴۵۱، ۴۷۹،
مقارنه داخلی، ۱۳۰،	ماه نجومی، ۱۲۸، ۴۵۵،
مقاطع مخروطی، ۲۸، ۴۷۲،	ماه‌های سیارکی، ۴۳۹، ۴۷۹،
مقیاس ارتفاع، ۳۸۴، ۴۳۵،	ماه هلالی، ۱۲۸، ۴۵۷،

مقیاس ریشتر، ۴۵۵  
 مقیاس صفحه، ۴۵۳، ۳۶۴  
 مقیاس (صفحه عکاسی)، ۴۳۵  
 مکانیک سماوی، ۱۶، ۱۵  
 منحنی تابش پلانک، ۴۸۱، ۴۵۳  
 منحنی‌های برانگیختگی، ۴۴۵، ۳۵۰  
 منطقه البروج، ۱۷، ۱۵  
 موج الکترومغناطیسی، ۳۱۷  
 موج نوری، ۳۲۶  
 میان سپهر، ۴۸۱، ۴۵۰  
 میدان الکتریکی، ۳۱۸، ۳۱۷  
 میراندا، ۳۲۵، ۵۰

و

وانگیختگی، ۳۴۲، ۳۳۸  
 واحد نجومی، ۴۳۹، ۲۳  
 واژگونیهای قطبیت (لکه‌های خورشیدی)،  
 ۴۸۲، ۴۵۳

ن

نالاس مارینریس (مریخ)، ۲۰۳  
 وان آلن، جیمز، ۱۶۰  
 وان بیسبروک، ۴۸۲، ۴۵۹  
 وان جول، فیلیپ، ۴۵۹، ۳۹  
 وزن، ۳۲۳، ۲۸۷  
 ویلدت، راپرت، ۴۸۳، ۴۶۰  
 وین، ویلهلم، ۳۵۶، ۲۵۴  
 ناحیه گذار، ۴۰۳، ۴۰۰  
 نپتون، ۱۲۵، ۱۷  
 نرید، ۲۷۴  
 نظریه کوانتومی، ۴۸۱، ۴۵۴  
 نظریه نسبیت انیشتین، ۴۴۳  
 نواحی فعال، ۴۱۰، ۴۰۷  
 نواحی III، ۴۱۴  
 نوترون، ۳۲۹، ۳۲۸

ه

هال، اساف، ۲۵۳، ۲۴۹  
 هذلولی، ۳۷۸، ۳۷۷  
 هرترز، ۳۲۰، ۳۱۷  
 هرکولینا، ۳۰۹، ۲۷۹  
 هلیوم، ۳۳۸، ۳۰۳  
 همرفت، ۴۲۹، ۲۶۲  
 نور، ۲۶۱، ۲۵۳  
 نور، ۲۷۳، ۲۶۹  
 نورسنجی فوتوالکتریکی، ۴۸۲، ۴۵۲  
 نور منطقه البروجی، ۲۹۳  
 نهایت UV (تاج)، ۳۴۶  
 نیرو، ۲۵۶، ۲۴۹

هندرسون، تی، ۴۴۷، ۱۰۶

هواسپهر، ۴۸۳، ۴۴۵

هویگنس، کریستین، ۴۴۷، ۲۶۶

هیدروژن، ۲۸۰، ۲۶۳

هیدروژن فلزی، ۴۸۳، ۴۵۰

هیل، جورج ای، ۴۲۰

ی

یاپتوس، ۲۶۳، ۲۶۲

یون سپهر، ۳۶۷، ۷۰

یونها، ۲۸۱، ۲۸۰

یونیدگی، ۳۳۶، ۳۳۵

