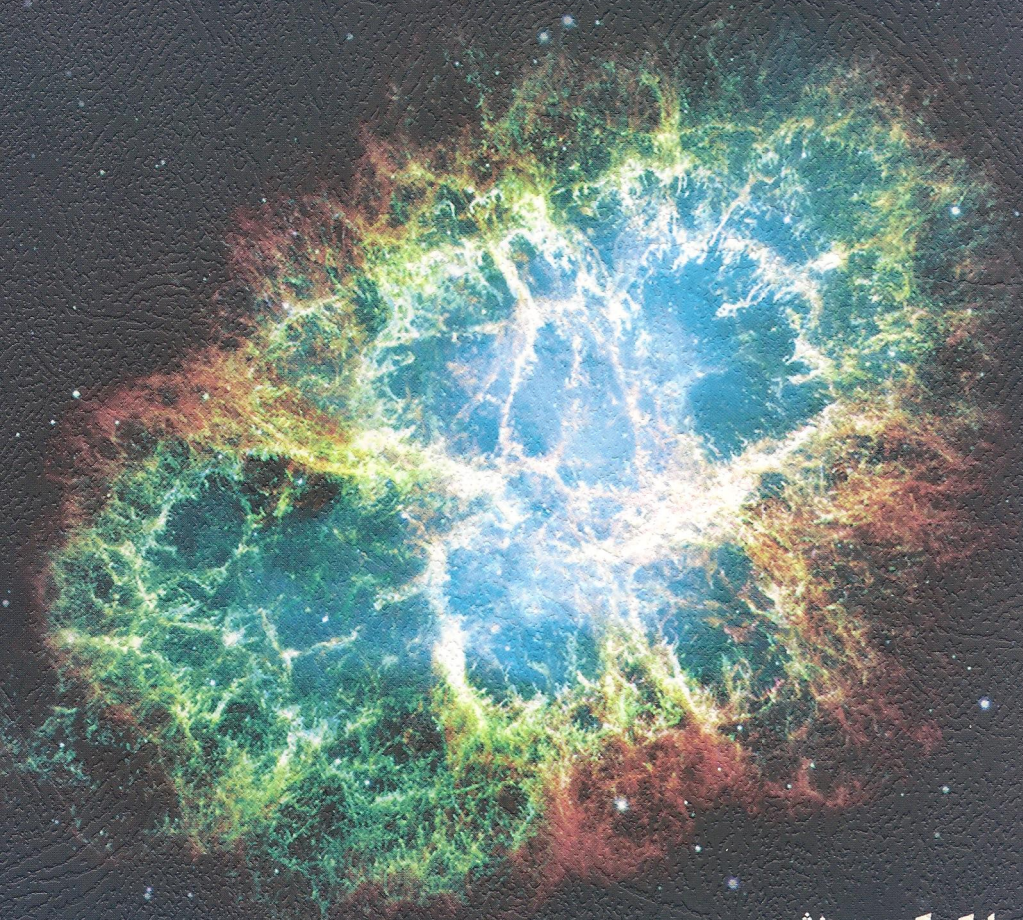
مبتکران

# اختر فیزیک

## مقدماتی



بابک کبیری‌منش

# اخترفیزیک مقدماتی

بابک کبیری‌منش

**به نام خدا**

## سخن نخست

دانش اخترفیزیک امروزه بسیاری از دانشجویان و دانش‌پژوهان را به سمت و سوی خود می‌کشد. در این زمینه، کتاب‌های بسیاری چه در سطح پیشرفته و چه در سطح عامه‌پسند (بدون استفاده از روابط ریاضی) نوشته شده است. این کتاب پلی است بین این دو روش پیشرفته و عامه‌پسند و می‌تواند برای بسیاری از دانشجویان مفید باشد. روابط ریاضی استفاده شده در این کتاب به‌طور عمده در سطح دبیرستان و فقط در یک مورد در سطح سال اول دانشگاه می‌باشد.

شیوه‌ی طرح موضوع و ارائه‌ی مطالب در این کتاب در غالب اوقات از روی کتاب «اخترفیزیک» نوشته‌ی کریستوفر بیشاب برگرفته شده است که در قسمت منابع به آن اشاره شده است.

**با سپاس**

**بابک کبیری‌منش**

# فهرست

**عنوان** **صفحه**


پیشگفتار ..... ۵

تابش، ماده و گرانش ..... ۱۹

اندازه‌گیری‌های اخترفیزیکی ..... ۳۵

طیف‌سنجی ستاره‌ای ..... ۴۳

ویژگی‌های مشاهدتی ستارگان ..... ۴۷

تشکیل ستارگان و محیط بین ستاره‌ای ..... ۵۵

تولید انرژی در ستارگان ..... ۶۳

زندگی ستارگان و تجزیه‌ی هسته‌ای ..... ۷۱

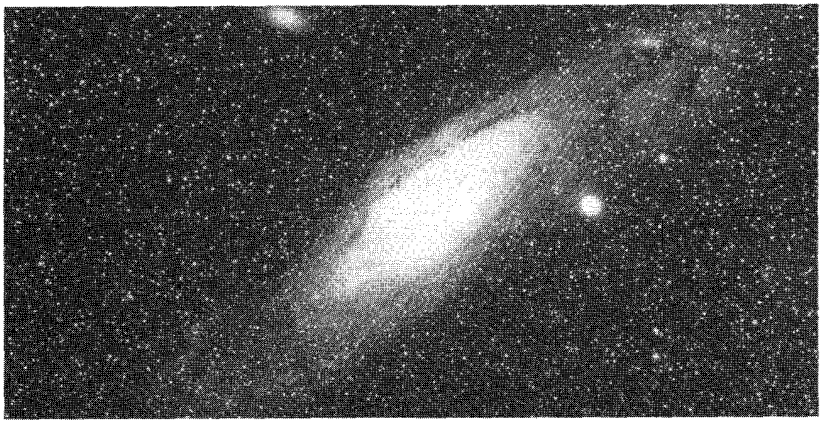
مرگ ستارگان ..... ۷۳

تشکیل سیاه‌چاله ..... ۷۹

نظریه‌ی نسبیت عام و کیهان‌شناسی ..... ۸۳

جدول‌ها ..... ۸۹

منابع ..... ۹۱



**Andromeda**

## پیشگفتار

می‌دانیم که بابلی‌ها از ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد باور داشتند که جایگاه و حرکت اجرام آسمانی (celestial bodies) در سرنوشت انسان تأثیر می‌گذارد، بنابراین نجوم (Astronomy) با باورهای اختربینی (Astrology) در ابتدا پیوند خورده بود. این پیوند تا سال‌ها ادامه پیدا کرد، ولی‌کم‌کم از آن جدا شد و اختربینی به عنوان توهّمات انسان ماقبل علمی به کنار گذاشته شد.

نجوم (ستاره‌شناسی) به معنای دانشی می‌باشد، که در آن به مشاهده‌ی سیستم‌وار اجرام آسمانی و پدیده‌هایی مانند خورشیدگرفتگی، ماه‌گرفتگی، ستاره‌های دنباله‌دار، نواخترها و ماه می‌پردازد.

هیپارکوس (Hipparchus) 190 BC به عنوان یکی از بنیانگزاران اخترشناسی با استفاده از روش اختلاف منظر (parallax) فاصله‌ی ماه تا زمین را محاسبه کرد. او نخستین نقشه‌های دقیق ستارگان را ایجاد کرد، که در آن با استفاده از روشنایی ستاره (star brightness) طبق مقیاس قدر (magnitude scale) که سپس کامل‌تر شد، به طبقه‌بندی سیستم‌وار ستارگان پرداخت. اختراع تلسکوپ و استفاده از آن در قرن هفدهم میلادی، اخترشناسی را دچار انقلاب کرد و کشفیات زیادی پس از آن انجام شد. در این میان قانون جهانی گرانش نیوتن با پژوهش‌های او در زمینه‌ی طبیعت نور، باعث ایجاد پیوند بین نجوم و فیزیک شد.

امروزه اخترفیزیک (Astrophysics) مطالعه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبات اجسام آسمانی می‌باشد که با استفاده از قوانین و الگوهای فیزیکی انجام می‌گیرد. بیش‌تر اطلاعات در مورد طبیعت فیزیکی جهان نجومی به وسیله‌ی امواج الکترومغناطیسی که اجرام آسمانی با طول موج‌های متفاوت گسیل می‌کنند، صورت می‌گیرد. با تحلیل شدت (intensity) و شکل (form) طیف (spectrum) اخترفیزیکدانان می‌توانند از شرایط داخلی ستاره و فضای بین‌ستاره‌ای و طبیعت کهکشان‌ها (galaxies) اطلاعاتی به دست آورند و حتی حدس بزنند که جهان نخستین به چه صورت بوده است.

گوستاو کیرشهف (G. Kirchhoff) 87 – 1824 به عنوان اولین اخترفیزیکدان شناخته می‌شود. او اولین طیف‌سنج (spectroscope) را توسعه بخشید، که می‌تواند خطوط طیف عناصر شیمیایی را وقتی آنان را تا دمای بالا حرارت می‌دهیم، مشخص کند. هر عنصر شیمیایی طیف مخصوص به خود را دارد. برای مثال بخار داغ سدیم، طیف زرد دوگانه‌ی ویژه خود را دارد. با توجه به این نکته می‌توانیم ترکیب شیمیایی ستاره را مطالعه کنیم. او با تحلیل نور خورشید فهمید که بسیاری از عناصر طیف در زمین پیدا می‌شود.

باید توجه کرد که نجوم یک دانش مشاهدتی می‌باشد که به حرکت و پخش اجرام آسمانی مربوط می‌باشد. در حالی که اخترفیزیک به ویژگی‌های فیزیکی اجرام آسمانی و برهم‌کنش ماده و انرژی در آن‌ها می‌پردازد. به‌طور ساده:

**اخترفیزیک = فیزیک + اخترشناسی**

## زمین در فضا

زمین سیاره‌ای است تقریباً کروی و دارای قطر استوایی (equatorial diameter) تقریبی ۱۲۷۵۶km و چگالی متوسط $۵۵۰۰\frac{kg}{m^۳}$. تقریباً ۷۰ درصد زمین از آب تشکیل شده است. هر ۲۴ ساعت یک دور حول محوری که از قطبینش می‌گذرد، می‌چرخد. زمین به دور خورشید با سرعت متوسط $۲۹/۸\frac{km}{s}$ می‌گردد. فاصله‌ی متوسط زمین از خورشید $۱/۴۹\times۱۰^۸km$ می‌باشد و زمان تناوب مداری آن تقریباً ۳۶۵ روز است. شکل مدار زمین به دور خورشید تقریباً دایره است و محور دوران زمین با خط عمود صفحه‌ی مداری، زاویه‌ی $۲۳^\circ۲۷'$ می‌سازد، که این باعث ایجاد فصل‌ها می‌شود.

زمین دارای جوی (Atmosphere) است که ۷۸٪ آن نیتروژن، ۲۱٪ آن اکسیژن و ۰/۹٪ آن آرگون و بقیه‌ی آن‌ها گازهای عناصر دیگر هستند. لایه‌ی اتمسفر تا ارتفاع (altitude) ۱۰۰۰km گسترش می‌یابد و دارای سیستم پیچیده‌ی آب و هوایی می‌باشد که به علت جریانات گرمایی هوا ایجاد می‌شود که از تابش خورشید تغذیه می‌کند. این جو برای گستره‌ی محدودی از طول موج‌ها شفاف می‌باشد. آسمان آبی به نظر می‌رسد که به علت پراکندگی نور خورشید به وسیله‌ی ذرات جو می‌باشد.

داخل زمین دارای هسته‌ی داخلی (inner core) آهن و نیکل می‌باشد و یک هسته‌ی مذاب خارجی (outer core) مایع آهن ـ نیکل و یک رویه (mantle) که از صخره تشکیل شده است و ترکیب آن از آهن و منیزیم است، که با سیلیکون و اکسیژن ترکیب شده است. در روی قله‌ی پوسته (crust) جامد که صخره‌ای‌شکل می‌باشد، ما زندگی می‌کنیم. دما در هسته‌ی خارجی ۲۶۰۰k می‌باشد و منبع گرما از مواد رادیواکتیو به دام افتاده سرچشمه می‌گیرد، مانند ایزوتوپ‌های اورانیوم و توریوم که انرژی هسته‌ای را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند.

زمین هم‌چنین دارای یک میدان مغناطیسی می‌باشد، که دارای شدت متوسط $5\times10^{-5}T$ می‌باشد، که به نظر می‌رسد به علت قسمت سیال هسته باشد، که مانند یک مولد الکتریکی عمل می‌کند. وقتی که هسته‌ی مایع که فلزی می‌باشد به علت دوران زمین حرکت کند، این باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. مدل دینامی پیشنهاد می‌کند که اگر سیاره‌ای دارای میدان مغناطیسی قدرتمندی باشد، پس در هسته‌ی خود دارای یک سیال رسانای در حال حرکت می‌باشد.

**۱۰ عنصری که بیش‌تر در زمین یافت می‌شوند**

| عنصر | درصد متوسط جرم | عنصر | درصد متوسط جرم |
|---|---|---|---|
| Fe | 34.6% | S | 1.9 % |
| O | 29.5% | Ca | 1.1% |
| Si | 15.2% | Al | 1.1% |
| Mg | 12.7% | Na | 0.57% |
| Ni | 2.4% | Cr | 0.26% |

سن یا عمر زمین با توجه به روزنگاری رادیواکتیو (عمرشماری) (Radioactive Dating) صخره‌ها مشخص می‌شود. با توجه به واپاشی ربیدیم به استرانتیوم که به تقریب در حدود $4/0\times10^{9}$ سال می‌باشد.

$$^{87}_{37}Rb \longrightarrow {}^{87}_{38}Sr+\beta+\bar{\nu}+Q$$

$$^{87}_{37}Rb \quad \begin{cases} 50\ n \\ 37\ p \end{cases} \qquad n \rightarrow p+e$$

$$^{87}_{38}Sr \quad \begin{cases} 49\ n \\ 38\ p \end{cases}$$

دمای زمین از بیشینه‌ی $60^{\circ}C$ تا کمینه‌ی $-90^{\circ}C$ تغییر می‌کند.

زندگی در سیاره‌ی ما به‌طور جدی به داشتن یک مدار پایدار بستگی دارد. اگر به خورشید بسیار نزدیک شویم، دما بسیار زیاد شده و حیات قابل دوام نمی‌باشد و اگر از آن بسیار دور شویم، یخ زده و می‌میریم. این نشان می‌دهد که زمین دارای مدار پایداری بوده، حداقل از زمانی که حیات وجود داشته است.

## منظومه‌ی شمسی (Solar system)

زمین همراه با ۹ سیاره و کمربندی از سیاره‌های کوچک یا سیارک‌ها (Asteroids) (اجرامی که قطر آن‌ها کم‌تر از ۱۰۰۰km می‌باشد) در مدارات بیضی‌شکل به علت نیروی گرانشی به دور خورشید

می‌چرخند. مدارات سیارات کم و بیش دایره‌ای می‌باشد و تقریباً در یک صفحه می‌باشند. ۹ سیاره به نام‌های عطارد (Mercury)، زهره (Venus)، زمین (Earth)، مریخ (Mars)، مشتری (Jupiter)، زحل (Saturn)، اورانوس (Uranus)، نپتون (Neptune) و پلوتو (Pluto) می‌باشند. به غیر از عطارد و زهره، همگی دارای قمرهایی (moons) می‌باشند. مشتری دارای ۱۶ قمر می‌باشد که چهار عدد از آن‌ها با دوربین معمولی قابل رؤیت است.

این نکته قابل توجه است که خورشید و قمر زمین یا ماه دارای قطر زاویه‌ی (Angular Diameter) می‌باشند. به همین علت وقتی که ماه از میان زمین و خورشید می‌گذرد، می‌تواند خورشید را به‌طور کامل یا به‌طور جزئی بپوشاند. این پدیده‌ی خورشیدگرفتگی (solar eclipse) نامیده می‌شود. این پدیده چندین‌بار در یک سده رخ می‌دهد. در یک خورشیدگرفتگی کامل، نور خورشید خاموش می‌شود و جوّ خارجی خورشید که تاج خورشیدی (solar corona) نام دارد که میلیون‌ها کیلومتر در فضا گسترش یافته، قابل دیدن می‌شود.

اخترشناسان، سیارات را به دو گروه تقسیم می‌کنند:

۱- سیارات خاکی (terrestrial)

۲- سیارات مشتری‌گون (Jovian)

**- سیارات خاکی**

سیارات خاکی مانند عطارد، زهره، زمین و مریخ می‌باشند که از آهن و صخره‌های سیلیکانی تشکیل شده‌اند.

**- سیارات مشتری‌گون**

سیاراتی مانند زحل، اورانوس و نپتون می‌باشند که عمدتاً از هیدروژن و هلیم تشکیل شده‌اند.

سیارات خاکی به خورشید نزدیک‌ترند، در حالی که سیارات مشتری‌گون بزرگ‌تر، پرجرم‌تر و دارای میدان مغناطیسی شدیدتری می‌باشند و دور محورشان سریع‌تر می‌چرخند. هم‌چنین دارای سیستم حلقه‌ای بوده که قمرهایی به دور آن‌ها می‌چرخند. پلوتو، کوچک و غیرمعمول می‌باشد و مداری شبیه سیارک‌ها دارد و سطح آن از یخ متان تشکیل شده است.*

برخلاف ستارگان، سیارات نوری تولید نمی‌کنند، بلکه به وسیله‌ی نوری که از آن‌ها تابیده می‌شود، دیده می‌شوند. ما سیارات و قمرهای آن‌ها را می‌بینیم، برای این‌که نور خورشید آن‌ها را می‌تاباند.

---

* امروزه پلوتو را به عنوان Minor planet یا Dwarf planet در نظر می‌گیرند، بدین معنی که آن را یک سیاره در نظر نمی‌گیرند.

ستارگان دنباله‌دار (Comets) در مدارات بیضی‌شکل به دور خورشید می‌چرخند و ممکن است از زمین دیده شوند. این‌ها از هسته‌ای از ذرات ریز که از گاز منجمد پوشیده شده‌اند، تشکیل شده‌اند. وقتی که ستاره‌ی دنباله‌دار از نزدیکی خورشید می‌گذرد، گازهای آن بخار می‌شوند و ستاره یک دُم یونیده (ionized) پیدا می‌کند. دم ستاره همیشه خلاف جهت خورشید منحرف می‌شود، چون این به علت باد خورشیدی است (solar wind)، که عبارتست از جریانی از ذرات زیرا اتمی باردار مانند الکترون‌ها و پروتون‌های پرسرعت که از خورشید پرتاب می‌شوند. باد خورشیدی دارای میدان مغناطیسی می‌باشد که یون‌ها را در دم دنباله‌دار در راستای خودش می‌کشد.

شهاب‌واره‌ها (Meteoroids) تکه‌هایی از صخره هستند که در فضای زمین دیده می‌شوند و در مدارها حرکت می‌کنند. اگر وارد جو شوند، به‌صورت یک رگه‌ی نوری درمی‌آیند که به آن شهاب (meteor) می‌گویند. بیش‌تر آن‌ها قبل از این‌که به زمین برسند می‌سوزند، ولی آن‌هایی که به زمین می‌رسند، شهاب‌سنگ (meteorites) نام دارند.

جرم شهاب‌سنگ‌ها از چند گرم تا چندین تن تغییر می‌کند. به نظر می‌رسد که شهاب‌سنگ‌های بزرگی به زمین در گذشته‌ی دور برخورد کرده و این مسئله موجب تغییرات محیطی و آب و هوایی زیادی شده است. با تحلیل عناصر و مواد موجود در شهاب‌سنگ‌ها می‌توانیم اطلاعات خوبی درباره‌ی فراوانی عناصر در منظومه‌ی شمسی بیابیم.

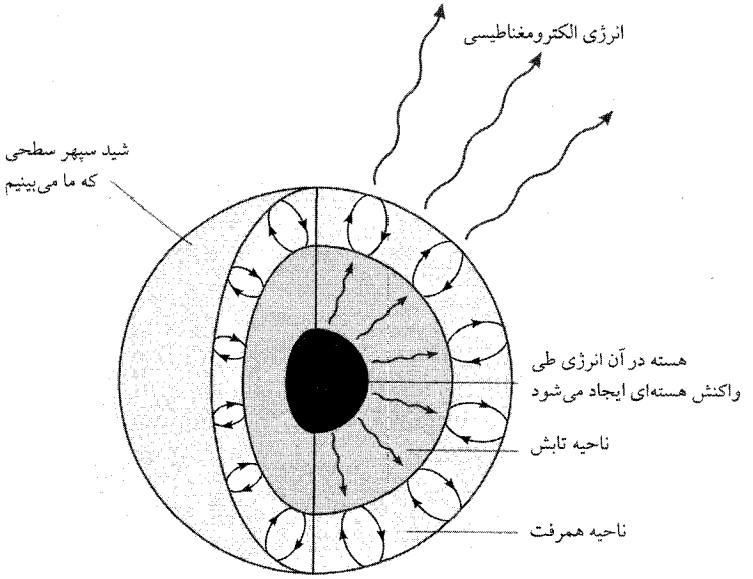
محیط بین سیاره‌ای از غبار (dust) و مقادیر پراکنده‌ی گاز هیدروژن، پروتون و الکترون تشکیل شده است. این عناصر از خورشید پرتاب می‌شوند. باد خورشیدی در محیط بین‌سیاره‌ای نیز غالب می‌باشد، حتی تا فواصلی بیش‌تر از مدار پلوتو.

شدت تابش خورشیدی به فعالیت سطح خورشید بستگی دارد. وقتی شراره‌ی خورشیدی (solar flare) ایجاد می‌شود، افزایش قابل توجهی در باد خورشیدی داریم. این می‌تواند در زمین، ایجاد اختلالات جوی کند که پدیده‌ای مانند شفق قطبی (aurora borealis) یا انوار شمالی، نمونه‌ای از آن است.

منظومه‌ی شمسی شاید از دوران سحابی خورشیدی (solar nebula) اولیه یا یک ابر گازی ایجاد شده باشد. یک جسم در حال دوران دارای اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای (angular momentum) می‌باشد. اصل پایستگی (conservation) تکانه‌ی زاویه‌ای $L_i = L_f$ باعث صاف شدن ابر گازی به‌صورت یک بشقاب می‌شود. تجمع‌های محلی ماده، کپه‌هایی از گاز را ایجاد می‌کند و این باعث ایجاد اجسام پرجرم می‌شود و این‌ها چگالیده شده و باعث ایجاد خورشید و سیارگان می‌شوند.

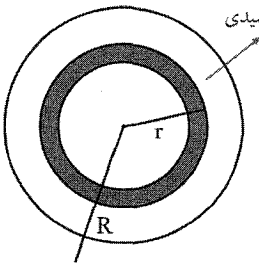
## خورشید و دیگر ستارگان

ستاره عبارتست از جرم کروی، گازی‌شکل و بسیار داغ که انرژی را در فرآیند واکنش‌های گرماهسته‌ای (thermonuclear reactions) ایجاد می‌کند. با تبدیل H به He. ساختار اساسی ستاره براساس یک‌سری لایه بررسی می‌شود، که این لایه‌ها هر کدام انرژی خود را دارند و انتقال می‌دهند. در مرکز هسته (core) قرار دارد که براساس واکنش هسته‌ای می‌سوزد. این انرژی ابتدا طی فرآیند تابش (radiation) انتقال داده می‌شود، سپس طیٔ فرآیند همرفت (convection) و سپس از روی سطح ستاره به فضا با مکانیسم تابش الکترومغناطیسی انتقال داده می‌شود. در یک ستاره در حالت عادی فشاری که به سمت بیرون به علت واکنش گرماهسته‌ای ایجاد می‌شود، با فشاری که از درون به وسیله‌ی گرانش ایجاد می‌شود، در تعادل است. به این پدیده «تعادل هیدرواستاتیک» می‌گویند.



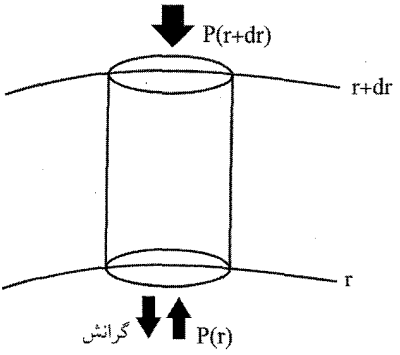

**ساختار اساسی یک ستاره**

در این‌جا ستاره را به‌صورت منزوی، ایستا (استاتیک) و متقارن کروی در نظر می‌گیریم.




$$dm = 4\pi r^2 \rho dr$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$




$$F_g = \frac{-GmM}{r^2}$$

$$\Delta M = \rho dA\, dr$$

$$F_p = P(r)\,dA - P(r+dr)\,dA$$

$$F_P = P(r)\,dA - P(r)\,dA - \frac{dp}{dr}dr\,dA$$

$$F_P = -\frac{dp}{dr}dr\,dA$$

$$F_T = ma = 0$$

$$\frac{-GmM}{r^2} - \frac{dp}{dr}dr\,dA = 0$$

$$\Delta M = \rho dA\, dr$$

$$\frac{-Gm\rho dA\, dr}{r^2} - \frac{dp}{dr}dr\,dA = 0$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{-Gm\rho}{r^2}$$

معادله‌ی هیدرواستاتیک ستاره

$$\frac{dp}{dm} = \frac{dp}{dr}\frac{dr}{dm} = \frac{-Gm\rho}{r^2}\frac{1}{4\pi r^2\rho} = \frac{-Gm}{4\pi r^4}$$

فشار همواره به سمت بیرون کم می‌شود، به‌طوری که در سطح ستاره مقدار فشار برابر با صفر است.

$$p(r = R) = 0$$

$$Vdp = \frac{4}{3}\pi r^3\left(\frac{-Gm}{4\pi r^4}\right)dm = \frac{-1}{3}\frac{Gm}{r}dm = \frac{1}{3}dU_g$$

$$\int Vdp = PV\Big|_0^R - \int pdV = -\int pdV$$

چون

$$V(r = 0) = 0$$

$$P(r = R) = 0$$

$$-\int pdV = \frac{1}{3}\int dU_g = \frac{1}{3}U_g$$

$$\frac{1}{3}U_g + \int_{r=0}^{r=R} pdV = 0$$

فشار در سطح ستاره به چگالی و ثابت‌هایی بستگی دارد.

U انرژی درونی در واحد جرم می‌باشد. $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ $p = (\gamma - 1)\rho U$

$$\frac{1}{3}U_g + \int(\gamma-1)\rho u dV = 0 \Rightarrow \frac{1}{3}U_g + (\gamma-1)U_{int} = 0$$

بیش‌تر ستارگان دارای ویژگی‌های مشترک هستند و ستاره‌ای که بیش از همه می‌شناسیم، خورشید می‌باشد. جرم خورشید در حدود $2\times10^{30}$ kg و قطر آن در حدود $1/4\times10^{6}$ km می‌باشد. چگالی متوسط آن $1/4\times10^{3}\ \frac{kg}{m^3}$ و دمای سطح آن در حدود ۶۰۰۰k می‌باشد. خورشید در هر ۲۵ روز، یک دور حول محورش می‌چرخد و شدت میدان مغناطیسی آن در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلی تسلا در سطح آن می‌باشد.

سطح درخشان یک ستاره مانند خورشید، شید سپهر (photosphere) نام دارد. این قسمت قابل دیدن خورشید است که از زمین می‌بینیم و از شبکه‌ی درخشانی از لکه‌های دانه‌ای‌شکل پوشیده شده است که آن را «دانه‌ای شدن» (granulation) می‌گویند. شبکه‌ی دانه‌ای‌شکل وقتی گازهای گرم از داخل به سطح می‌آیند، به‌طور پیوسته تغییر می‌کند.

در شید سپهر، تکه‌های تاریکی به‌نام لکه‌های خورشیدی (sun spots) وجود دارد، که اندازه‌ی آن‌ها از چند کیلومتر تا چندین برابر اندازه‌ی زمین تغییر می‌کند. به‌طور معمول یک لکه‌ی خورشیدی از یک هسته‌ی سیاه به‌نام سایه (umbra) تشکیل شده که یک ناحیه‌ی روشن‌تر به‌نام سایه‌روشن (penumbra) یا نیم‌سایه آن را احاطه کرده است. دمای لکه‌های خورشیدی ۲۰۰۰k کم‌تر از میانگین شید سپهر است، برای همین در تقابل (in contrast) تاریک‌تر به نظر می‌آید. لکه‌های خورشیدی تمایل دارند به‌صورت گروه‌هایی متناظر با شدت میدان مغناطیسی بالا ظاهر شوند که مقدار میدان مغناطیسی تا ۰/۴T می‌رسد.

لکه‌های خورشیدی همیشه به‌صورت جفت ظاهر می‌شوند. میدان مغناطیسی در هر جفت دارای قطبیت مغناطیسی متضاد است. خطوط میدان مغناطیسی از داخل خورشید و از میان یک عضو خارج شده و در جو خورشید حلقوی می‌شوند و دوباره وارد شید سپهر شده، به نقطه‌ی دیگری می‌روند. مشاهدات خورشیدی در قرن‌های متمادی نشان داده است که فعالیت لکه‌های خورشیدی به‌صورت دوره‌ای می‌باشند. میانگین تعداد لکه‌ها تقریباً در مدت ۱۱ سال به وجود می‌آید و تقریباً به صفر کاهش می‌یابد، قبل از این‌که دوباره شروع شود. علاوه بر دوره‌ی لکه‌های خورشیدی، یک دوره‌ی خورشیدی (solar cycle) طولانی‌مدت‌تر وجود دارد، که ۲۲ سال طول می‌کشد. در حینی که دوره‌ی لکه‌های خورشیدی به وقوع می‌پیوندد، جفت‌های لکه‌های یک گروه در سمت نیمکره‌ی شمالی دارای یک

قطبیعت مغناطیسی هستند، در حالی که در قسمت دیگر (قسمت جنوبی)، قطبیت‌ها مخالف هستند. در مدت ۱۱ سال جهت قطبیت‌ها عوض می‌شود. اگر خورشید از نظر مغناطیسی بررسی شود، کل دوره ۲۲ سال می‌باشد.

خورشید دارای جوی از گازهای یونیده شده می‌باشد که تا ۲۵۰۰km ادامه می‌یابد، که به آن «رنگین سپهر» می‌گویند. دمای این ناحیه بیش از شید سپهر می‌باشد که تا ۲۸۰۰۰k می‌رسد. در لبه‌ی رنگین‌سپهر (chromosphere) یک ناحیه‌ی انتقالی (transition region) می‌باشد که در آن دما به‌صورت ناگهانی (sharply) افزایش می‌یابد تا به تاج خورشیدی (corona) برسد، ناحیه‌ای از گاز رقیق یونیده که پلاسما (plasma) نام دارد، که دمای آن در حدود چندین میلیون کلوین می‌باشد. تاج تا صدها و هزاران کیلومتر ادامه پیدا می‌کند و به‌طور معمول قابل دیدن نیست، اما در زمان خورشیدگرفتگی کامل قابل دیدن است.

**تغییر دمای خورشید از سطح آن**

| ناحیه | Km / ارتفاع از سطح خورشید | K / دما |
|---|---|---|
| شید سپهر | 0-320 | 6500-4500 |
| رنگین‌سپهر | 320-1990 | 4500-28000 |
| تاج | $\sim 7\times10^5$ | $1.8\times10^6$ |

شراره‌های خورشیدی (flares) تخلیه‌های ناگهانی انرژی در رابطه با لکه‌های خورشیدی می‌باشند. یک شراره‌ی بزرگ تا $10^{25}$ ژول انرژی را می‌تواند در مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه و یا تا چندین ساعت آزاد کند. شراره‌ها، پروتون‌ها و الکترون‌های آزاد پرانرژی را به فضا پرتاب می‌کنند و بیش‌تر تابش آن‌ها به‌صورت پرتو X و تابش ماوراء بنفش می‌باشد. با توجه به این‌که این پرتوها با سرعت نور حرکت می‌کنند و در عرض ۸ دقیقه به زمین می‌رسند و لایه‌ی بالای جو را یونیده کرده و باعث ایجاد اختلال در مخابرات می‌شوند. پروتون‌ها و الکترون‌هایی که سرعت کم‌تری دارند، یک روز دیرتر می‌رسند و در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند. این‌ها با اتم‌های جو برخورد کرده و آن‌ها را به انرژی بالاتر انگیخته‌ای (exite) می‌برند. وقتی که اتم‌ها واانگیخته (dexite) می‌شوند، فوتون تابش می‌کنند که این باعث ایجاد شفق قطبی می‌شود.

زبانه‌های خورشیدی (prominces) انفجارهای بزرگ گاز هیدروژن بالای شید سپهر می‌باشند، که ارتفاع آن‌ها تا چندین هزار کیلومتر می‌رسند. مانند شراره‌ها، زبانه‌ها به لکه‌های خورشیدی ارتباط دارند، این‌ها حلقوی شده و شکل خود را تغییر داده و تا تاج خورشیدی کشیده می‌شوند. برخلاف

شراره‌ها، زبانه‌ها می‌توانند برای چندین هفته دوام داشته باشند تا زمانی که ماده‌ی خورشیدی بر روی شید سپهر به طرف پایین می‌بارد. شراره‌ها و زبانه‌های خورشیدی، طوفان‌هایی در باد خورشیدی پدید می‌آورند و تابش بیش از حد آن‌ها می‌تواند به فضانوردان و ماهواره‌ها صدمه رساند.

## انواع مختلف ستارگان

انواع بسیاری از ستارگان با توجه به دما و بزرگی آن‌ها وجود دارد. ستاره‌های سرد (cool stars) ستارگانی هستند که دمای آن‌ها بین ۱۶۰۰k و ۲۵۰۰k می‌باشد. این‌ها رنگ قرمز تابش می‌کنند، در حالی که ستارگان گرم (hot stars) دمایی در حدود ۳۵۰۰۰k دارد و نور سفید آبی‌گون می‌توانند. ستارگان از نظر اندازه از کوتوله‌های سفید (white dwarfs) با ابعادی تا حد زمین تا ابرغول‌ها (super giants) که چندین صد برابر خورشید هستند، تغییر می‌کنند. جرم ستارگان از ۰/۱ جرم خورشید تا ۱۰۰ برابر جرم خورشیدی تغییر می‌کند. در عین حال ستارگان نامعمولی مانند ستارگان نوترونی (neutron stars) و سیاه‌چاله‌ها (black holes) را داریم. این‌ها در واقع ستارگان پیشین هستند (exstars).

فاصله‌ی بین ستارگان بسیار بزرگ است. اخترشناسان از یکای سال نوری (light year) ly استفاده می‌کنند، که برابر است با فاصله‌ای که نور در مدت یکسال طی می‌کند که تقریباً برابر است با:

$$ly = ۳۶۵\times۲۴\times۶۰\times۶۰\times۳\times۱۰^{۸} = ۹/۴۶\times۱۰^{۱۲}km$$

یکای دیگری که استفاده می‌شود، پارسک pc (parsec) نام دارد، که برابر است با $۳/۱\times۱۰^{۱۳}km$. نزدیک‌ترین ستاره به زمین (به‌غیر از خورشید)، آلفا قنطورس ($\alpha$centauri) است که بیش از ۴ سال نوری از ما فاصله دارد.

## ستارگان متغیر (Variable stars)

یک رده‌ی مهم ستارگان، ستارگان متغیر است. این‌ها ستارگانی هستند که روشنایی (brightness) آن‌ها تغییر می‌کند و به دو نوع تقسیم می‌شوند:

- ستارگان متغیر گرفتی (eclipsing variables)
- ستارگان متغیر ذاتی (intrinisic variable)

۵۰ درصد ستارگان به‌صورت دوتایی (binary) هستند. ستارگان دوتایی، ستارگان دوجزئی هستند که به دور یکدیگر می‌چرخند. با استفاده از تلسکوپ‌های قوی مشخص شده است که ستارگانی وجود دارند که از ۳ یا تعداد بیش‌تری ستاره تشکیل شده‌اند و به وسیله‌ی نیروی گرانشی به یکدیگر مقید

شده‌اند. هرگاه یکی از این ستارگان جلوی ستاره‌ی دیگری را بگیرد، روشنایی ظاهری دیگری تغییر می‌کند (به‌طور منظم).

با توجه به این نکته می‌توان منحنی نوری (light curve) ستاره را رسم کرد، که منحنی روشنایی در برابر زمان می‌باشد.

ستارگان متغیر ذاتی علت تغییر روشنایی‌شان، تغییرات داخلی ساختار ستاره می‌باشد. یکی از انواع ستارگان متغیر، ستاره‌ی متغیر قیفاوسی (cepheid variable) نام دارد. تغییرات روشنایی این‌ها به این علت است که ضربان‌هایی در شید سپهر و جوشان رخ می‌دهد. با توجه به این‌که ستارگان دوتایی به دور یکدیگر می‌چرخند، می‌توانیم با توجه به قانون سوم کپلر، جرم آن‌ها را تعیین کنیم.

## نواخترها و ابرنواخترها (Novas and Supenovas)

این‌ها ستارگان انفجاری هستند که به‌طور ناگهانی انرژی آزاد می‌کنند. در این فرآیند، روشنایی آن‌ها صدها و هزارها برابر در یک دوره‌ی چندین روزه افزایش می‌یابد. یک پدیده‌ی نواختری در یک سیستم دوتایی ایجاد می‌شود، که در آن ماده از یک ستاره به ستاره‌ی دیگر جریان می‌یابد و باعث ایجاد انفجارهای شدیدی در سطح آن‌ها می‌شود. ابرنواخترها فاجعه‌آمیزتر هستند (Catastrophic). این پدیده زمانی رخ می‌دهند که یک ستاره‌ی پرجرم، سوختش را تمام می‌کند و فرو می‌ریزد و این باعث ایجاد موج شوکی پرانرژی می‌شود تا حدود $10^{44}$ J، که این مقدار انرژی است که خورشید در تمام طول عمرش تولید می‌کند.

ابرنواخترها نقاط پایانی ستارگان پرجرم هستند. در یک ابرنواختر ماده از درون ستاره با سرعت بسیار زیاد به فضا پرتاب می‌شود. انفجارات ابرنواختری بسیاری از عناصر سنگین در جدول تناوبی را ایجاد می‌کنند و این باعث شکل گرفتن عناصر بنیادینی می‌شود که ستارگان و سیاره‌ها از آن‌ها ساخته شده‌اند. هر چیزی شامل عناصری است که در زمان‌های بسیار دور در یک حادثه‌ی ابرنواختری ایجاد شده است.

## فضای بین ستاره‌ای (The interstellar medium)

فضای بین ستاره‌ها، فضای بین ستاره‌ای (ISM) نام دارد. این فضا خالی نیست، بلکه تشکیل شده است از غبار، گاز و ابرهایی از هیدروژن اتمی و مولکولی آلی و غیرآلی. حال پرسش این است که این ماده از کجا آمده است؟

اخترفیزیکدانان در نظریات خود این را بیان می‌کنند که ماده و انرژی از یک گوی آتشین اولیه (primordial fireball) در مهبانگ (Big Bang) ایجاد شده است. چند هزار سال بعد از مهبانگ، جهان تا حدی سرد شده است، که اتم‌های ساده‌ای مانند هیدروژن و هلیم ایجاد شده است، سپس عناصر سبک‌تری مانند لیتیم و بُرُم. با گذشت زمان تجمع ماده تحت تأثیر گرانش و چگالیده شدن ماده باعث تشکیل ابرهای گازی غول‌پیکر شده، که از آن‌ها ستارگان و کهکشان‌ها ساخته شده‌اند.

ISM سیستمی ایستا نیست، بلکه سیستمی پویاست. ستارگان و اجرام آسمانی در آن تشکیل می‌شوند و جرم خود را از ISM برمی‌گیرند و طی زندگی‌شان بسیاری از مواد سنگین‌تر را در درونشان ایجاد می‌کنند. وقتی که ستارگان می‌درخشند، مقدار کمی از ماده‌ی آن‌ها به درون ISM ریخته می‌شود، به‌صورت موادی که از سطحشان به‌صورت باد ستاره‌ای می‌وزد. در انتهای عمرشان بیش‌تر جرم‌شان را چه به‌صورت پوسته‌هایی از لایه‌ی بیرونی‌شان یا انفجارات نواختری و ابرنواختری رها می‌کنند. بنابراین ISM یک اکوسیستم است که در آن ستارگان متولد می‌شوند، می‌زیبند و می‌میرند.

چون ISM به‌طور عمده به‌صورت گازی‌شکل است، ما می‌توانیم با مشاهده‌ی خطوط طیفی که گسیل یا جذب می‌کند، چگالی، ترکیب، دما و توزیع جرم آن را تعیین کنیم.

## کهکشان‌ها (Galaxies)

ستارگان به‌طور یکنواخت توزیع نشده‌اند، بلکه به وسیله‌ی ربایش گرانشی در مجموعه‌ی عظیمی به‌نام کهکشان گرد آمده‌اند. یک کهکشان تا $10^{11}$ ستاره می‌تواند داشته باشد و با توجه به شکلش به‌صورت بیضوی (elliptical)، مارپیچی (spiral) یا به‌صورت نامنظم قرصی‌شکل می‌تواند باشد.

در یک شب بدون آلودگی نوری می‌توانیم یک نوار کمرنگ که بر فراز آسمان کشیده شده است را مشاهده کنیم، که راه شیری (milky way) نام دارد. چیزی که مشاهده می‌شود، لبه‌ی قرص کهکشان است اگر با یک تلسکوپ کم‌قدرت مشاهده کنید، می‌بینید که ضخامت این دیسک از میلیون‌ها ستاره تشکیل شده است. کهکشان ما مارپیچی می‌باشد که قطر آن در حدود ۳۰/۰۰۰pc می‌باشد و جرم آن $10^{11}$– $10^{12}$ برابر جرم خورشید می‌باشد. برآمدگی کروی که در کهکشان ما وجود دارد، دارای شعاع ۵kpc می‌باشد و ضخامت قرص آن ۱۰۰۰pc می‌باشد. فاصله‌ی منظومه شمسی تا هسته‌ی کهکشان در حدود ۸۵۰۰pc می‌باشد.

در طول دیسک، خطوط غباری بزرگی که حاوی هیدروژن اتمی و مولکولی می‌باشد، وجود دارد. این‌که کهکشان ما بازوان مارپیچی دارد، نشان می‌دهد که دوران می‌کند، هر چند تمام اجزای آن با یک سرعت حرکت نمی‌کنند. خورشید $2\times10^{8}$ سال می‌گذرد تا یک مدار کامل به دور کهکشان طی کند.

خوشه‌های کروی (globular clusters) در عرض‌های (latitudes) بالای کهکشانی وجود دارند. خوشه‌ها از $۱۰^۵$– $۱۰^۴$ ستاره تشکیل شده‌اند، که سن این ستارگان از سن متوسط ستارگان بیش‌تر است (پیرتر هستند) و این‌ها یک هاله (halo) کهکشانی را تعریف می‌کند. در حدود ۱۰۰ خوشه‌ی کهکشانی در اطراف راه شیری رصد شده است.

ما قادر نیستیم مرکز کهکشان را مشاهده کنیم، به علت ابرهایی از گاز و غبار بین ستاره‌ای که آن را تاریک می‌کند، ولی مشاهدات رادیویی و زیر قرمز نشان می‌دهد که ماده‌ی بین ستاره‌ای به دور هسته‌ی کهکشان با سرعت زیاد و با تلاطم بسیار می‌گردد. این حرکت تنها می‌تواند به وسیله‌ی اشیاء پرجرم فشرده که دارای میدان گرانشی قوی هستند ایجاد شود، که این به‌جز سیاه‌چاله‌ی بسیار پرجرم نمی‌تواند باشد، که در مرکز کهکشان قراردارد.

اگر به خارج راه شیری نگاه کنیم، تعداد بیش‌تری کهکشان می‌بینیم. ۷۷ درصد آن‌ها مارپیچی هستند، ۲۰ درصد بیضوی و ۳ درصد نامنظم. ما می‌توانیم تشعشع آن‌ها را در امواج رادیویی، زیر قرمز، مرئی و پرتو X مشاهده کنیم و از آن‌جا درباره‌ی ساختار آن‌ها نکاتی را بیاموزیم.

مشاهدات نشان می‌دهد کهکشان‌ها در مجموعه‌ی بزرگ‌تر به‌نام خوشه (cluster) قرار دارند. مثلاً راه شیری به خوشه‌ی گروه محلی (local group) متعلق است که شامل ۲۰ کهکشان می‌باشد و فضایی در حدود ۱Mpc را دربر گرفته است.

با این حال، این پدیده به خوشه‌ها ختم نمی‌شود، بلکه ما خوشه‌ی خوشه‌ها یا ابرخوشه (super clusters) را داریم، که قطر آن ۷۵Mpc است که از گروه‌های کوچکی که با نیروی گرانشی به یکدیگر مقید شده‌اند، تشکیل می‌شود. نکته‌ی قابل توجه ابرخوشه‌ها این است که فضای بین آن‌ها به‌طور نسبی خالی است، که در بین آن‌ها هیچ یا تعداد کمی کهکشان وجود دارد. در این مقیاس، معماری جهان به‌صورت رشته‌ای (filamental) می‌باشد.

## اختروش‌ها (Quasars)

برخی از دورترین اجسام در جهان به‌نام شبه‌ستارگان (quasi-stellar) یا اختروش (quasar) نام گرفته‌اند. این‌ها به عنوان منابع نقطه‌ای نور و امواج رادیویی دارای انتقال به سرخ بالایی می‌باشند. انتقال به سرخ، افزایش طول موج الکترومغناطیسی می‌باشد که ما به علت اثر دوپلری دریافت می‌کنیم. اگر تابش به سمت قرمز طیف برود، این نشان می‌دهد که جسم از مشاهده‌کننده دور می‌شود. هرچه انتقال به سرخ بیش‌تر باشد، جسم سریع‌تر از ما دور می‌شود. انتقال به سرخ اختروش‌ها نشان می‌دهد که این‌ها با سرعت نزدیک به سرعت نور از ما دور می‌شوند. اگر این سرعت دور شدن آن‌ها به علت

انبساط جهان باشد، بی‌تردید آن‌ها بسیار از ما دور هستند. به علت ثابت بودن سرعت نور، زمان محدودی لازم است که نور به ما برسد (نسبیت خاص) اختروش‌ها اجسامی باید باشند که در تاریخ اولیه‌ی جهان شکل گرفته‌اند، چون ما می‌توانیم آن‌ها را از فواصل دور ببینیم. آن‌ها بسیار درخشنده هستند، هزاران بار بیش‌تر از کهکشان‌های عادی.

انرژی گسیل شده از یک اختروش در حدود $10^{40}$ W می‌باشد، که از یک ناحیه‌ی کوچک از فضا و از مرکز آن به ما می‌رسد و خروجی آن با توجه به روزها و سال‌ها تغییر می‌کند. برخی به‌صورت جهش فوران‌های ماده دیده می‌شوند. اخترفیزیکدانان می‌اندیشند که این اجسام اسرارآمیز ممکن است شکل آغازین کهکشان‌ها باشند. اختروش‌ها برخی شباهت‌ها با دیگر اجسام که کهکشان‌های فعال (active galaxies) نامیده می‌شوند، دارند. کهکشان‌های فعال به ما نزدیک‌ترند و درخشندگی آن‌ها بسیار است ($10^{37}$ W)، تغییرات سریعی دارند، شکل ویژه‌ای دارند و تشعشعات فورانی از هسته‌ی خود منتشر می‌کنند.

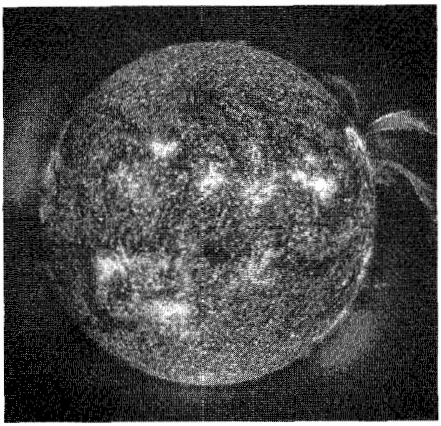
## چه منبع انرژی، اختروش‌ها و کهکشان‌ها را فعال می‌کند؟

همان‌طور که گفتیم، یک نظریه می‌تواند این باشد که در مرکز این اجسام، سیاه‌چاله‌های پرجرم وجود دارد که ستارگان عبوری را به سمت خود کشیده و در این فرآیند مقادیر بالایی از انرژی را آزاد می‌کند. یک کهکشان از تعداد زیادی ستاره تشکیل شده که اشتهای سیاه‌چاله را سیر می‌کند و این نظریه هم‌چنین نشان می‌دهد چرا انرژی از یک حجم نسبتاً کوچک از فضا گسیل می‌شود. آیا یک اختروش به‌طور ساده یک کهکشان در مراحل آغازین تکامل آن است یا خیر؟

## بزرگی جهان در چه حد است؟

پاسخ به این پرسش به این بستگی دارد، که ابزار مشاهدتی ما تا چه حد می‌تواند به فضا نفوذ کند و چه نظریه‌هایی درباره‌ی پیدایش جهان داریم. نظریه در مورد پیدایش جهان و منشاء آن در کیهان‌شناسی (cosmology) بررسی می‌شود. معلومات مشاهدتی ما از جهان با پیشرفت نجوم فضایی که در آن از موشک و ماهواره که حامل تلسکوپ‌ها و آشکارسازها در ارتفاع بالای زمین هستند، استفاده می‌شود. جایی که ما می‌توانیم از موانع اتمسفر زمین رها شویم و با طول موج‌هایی که به‌طور عادی به زمین نمی‌رسند، جهان را بررسی کنیم. حدود مشاهدتی ما در حدود ۳۰۰ میلیون سال نوری می‌باشد، هر چند تلسکوپ هابل این فضا را گسترش می‌دهد. به علت سرعت محدود نور، ما اجسام دور را در حالی که میلیون‌ها سال از آن‌ها گذشته است، مشاهده می‌کنیم. پس اگر ما به فضا نگاه می‌کنیم، به زمان پیشین نگاه می‌کنیم و همان‌طور که حدود مشاهدتی ما افزایش می‌یابد، می‌توانیم به ساختارهای ابتدایی و آغازین آفرینش جهان نزدیک شویم.

# ۱



خورشید ما

## تابش، ماده و گرانش (Radiation, matter and gravitation)

### طبیعت تابش الکترومغناطیسی

مکانیسمی که امواج الکترومغناطیسی را ایجاد می‌کند، به طبیعت ماده در سطح اتمی و مولکولی بستگی دارد.

تابش الکترومغناطیسی می‌تواند طبق حرکت موج عرضی (transverse wave) یا براساس بسته‌هایی با انرژی مشخص یا فوتون (photon) الگوبندی شود. این توصیف مکمل (complementary) یا دوگانگی موج ـ ذره (wave-particle duality) می‌تواند پدیده‌های مختلف الکترومغناطیسی را توصیف کند.

پدیده‌هایی که با توصیف موجی به بهترین وجه قابل تبیین هستند؛ عبارتند از:

- پراش (diffraction)
- تداخل (interference)
- شکست (refraction)
- قطبش (polarization)

اما با توصیف ذره‌ای

- اثر فوتوالکتریک (photoelectric effect)
- طیف اتمی (atomic spectra)
- تابش گرمایی (thermal radiation)

در حالت کلی وقتی تعداد فوتون‌ها کم باشد، مدل ذره‌ای موفق‌تر می‌باشد و هنگامی که تعداد فوتون‌ها بیش‌تر باشد، مدل موجی.

امواج الکترومغناطیسی با سرعت نور $\sim ۳\times۱۰^{۸}\frac{m}{s}$ در خلاء حرکت می‌کنند. رابطه‌ی بین سرعت و طول موج یک موج به‌صورت مقابل می‌باشد.

$$v = \lambda\nu \qquad v = \frac{\lambda}{T}$$

## طیف امواج الکترومغناطیسی (The electromagnetic spectrum)

رابطه‌ی پلانک نشان می‌دهد که یک فوتون تابش الکترومغناطیسی دارای انرژی E برحسب ژول J می‌باشد.

$$E_{photon} = h\nu$$

$$h = ۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,Js$$

$$c = \nu\lambda$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

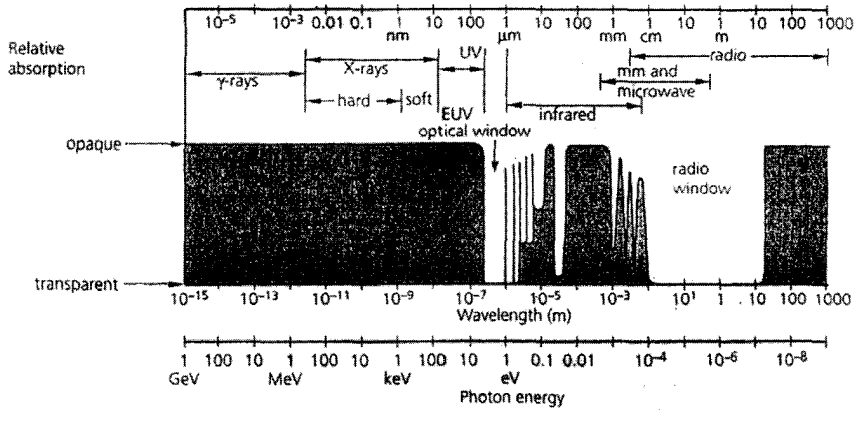
انرژی فوتون به‌طور مستقیم با بسامد و به‌طور معکوس با طول موج مناسب است.

یکای دیگری که می‌توانیم انرژی را به‌طور مناسب با آن بیان کنیم، الکترون‌ولت است.

$$۱eV = ۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}\,J$$

فوتون‌ها دارای دامنه‌ی وسیعی از انرژی‌ها هستند. امواج گاما انرژی در مقیاس MeV دارند، در حالی که پرتوهای X انرژی در حد KeV دارند. فوتون‌های رادیویی انرژی‌های کوچکی در حد $۱۰^{-۱۰}eV$ دارند.

جو زمین برای گستره‌ی خاصی از امواج شفاف (transparent) می‌باشد. یک پنجره‌ی اپتیکی (optical window) و یک پنجره‌ی رادیویی (radio window) وجود دارد، که در این گستره امواج می‌توانند به زمین برسند و هم‌چنین برخی مقادیر امواج فروسرخ. جو زمین، مانع رسیدن امواج دیگر به سطح زمین می‌شود. به همین علت از نجوم فضایی (space astronomy) برای بررسی تمام گستره‌ی امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌کنیم.

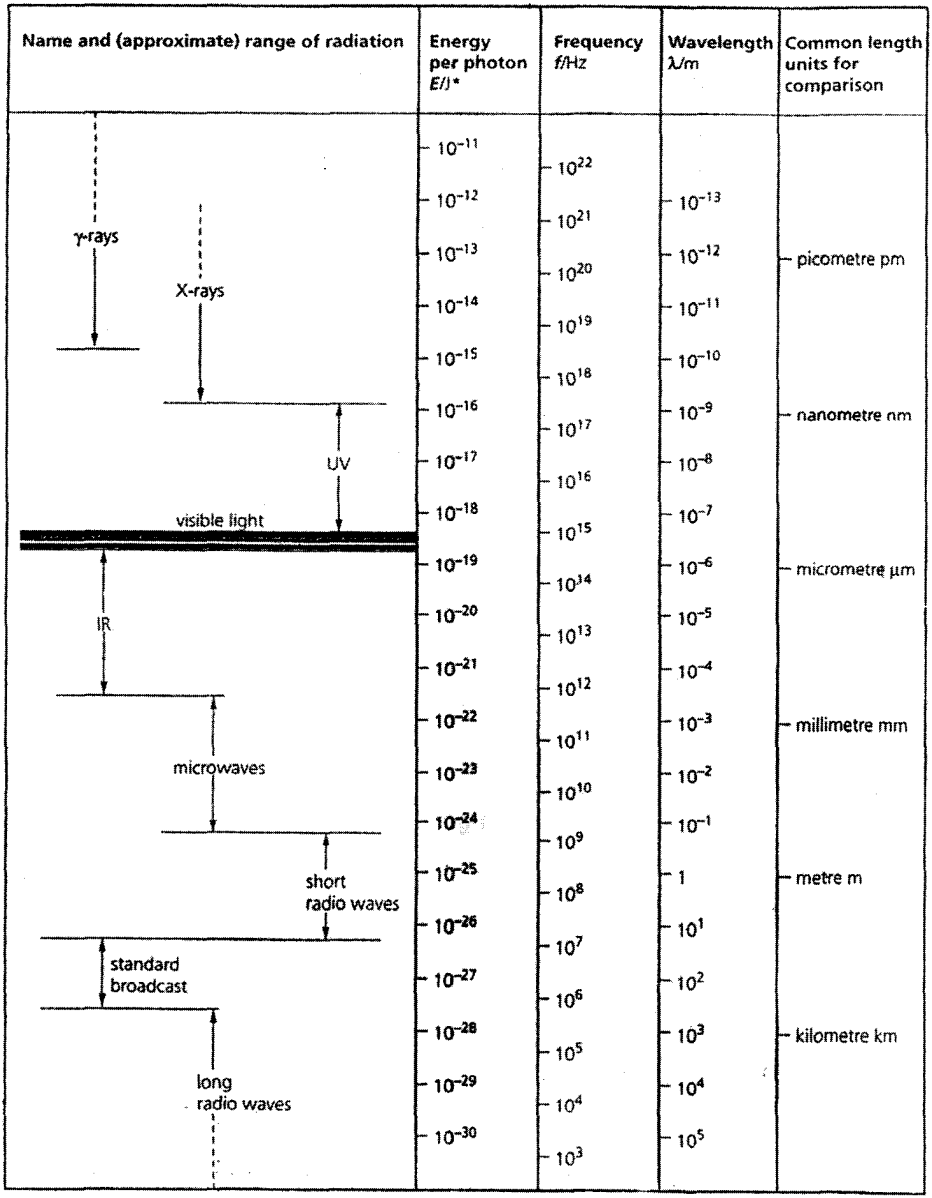


## ساختار اتمی (Atomic structure)

اتم از نوترون، پروتون و الکترون تشکیل شده است، که اتم دارای اندازه‌ی متوسط $10^{-10}$ m و قطر هسته در حدود $10^{-14}$ m است.

$$A = Z + N$$

A: عدد اتمی — Z: تعداد پروتون — N: تعداد نوترون



## مدل اتمی بور

۱- انرژی الکترون در هر مدار ثابت است.

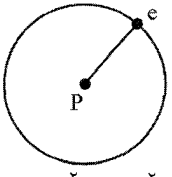
طبق نظریه‌ی الکترودینامیک کلاسیک، الکترون دارای شتاب است و این باعث تابش الکترومغناطیسی آن می‌شود تا به‌صورت مارپیچی بر روی هسته سقوط کند. بنابراین اصل اول بور به‌صورتی اتخاذ شده تا این مشکل را برطرف کند.

۲- الکترون فقط می‌تواند مقادیر مشخصی از انرژی را اختیار کند، به عبارتی انرژی الکترون کوانتیده است.

۳- جذب یا گسیل تابش الکترومغناطیسی در هر اتم به علت انتقال الکترون بین مدارها به وجود می‌آید. وقتی فوتون جذب می‌شود، الکترون انتقالی از مدار با انرژی پایین‌تر به مداری با انرژی بالاتر می‌رود. $h\nu + E_1 \rightarrow E_2$

وقتی فوتون گسیل می‌شود، الکترون به مدار پایین‌تر انتقال می‌یابد. $E_2 \rightarrow h\nu + E_1$

## اتم هیدروژن




$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

$$F = ma = \frac{mv^2}{r}$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}}$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$U = \frac{-1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$U_{ij} = \Sigma\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}$$

طول موج دوبروی $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

طول موج دوبروی الکترون $\lambda = \frac{h}{e}\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_0 r}{m}}$

شرط پایداری مدار $n\lambda = ۲\pi r_n$

$$r_n = \frac{n^۲h^۲\varepsilon_۰}{\pi me^۲} \qquad a_۰ = r_۱ = ۰/۵۲۹۲A^\circ$$

$$r_n = n^۲a_۰$$

$$E_n = \frac{-e^۲}{۸\pi\varepsilon_۰r_۰} = \frac{-me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲h^۲}\frac{۱}{n^۲} \qquad n = ۱,۲,۳,...$$

$$E_i = \frac{-me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲h^۲}\frac{۱}{n_i^۲}$$

$$E_f = \frac{-me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲h^۲}\frac{۱}{n_f^۲}$$

$$E_i - E_f = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲h^۲}(\frac{۱}{n_f^۲} - \frac{۱}{n_i^۲})$$

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲h^۲}(\frac{۱}{n_f^۲} - \frac{۱}{n_i^۲})$$

$$\frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(\frac{۱}{n_f^۲} - \frac{۱}{n_i^۲})$$

$$n_f = ۱ \rightarrow \frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(۱ - \frac{۱}{n^۲}) \qquad n = ۲,۳,...\text{Lymam}$$

$$n_f = ۲ \rightarrow \frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad n = ۳,۴,۵,...\text{Balmer}$$

$$n_f = ۳ \rightarrow \frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad n = ۴,۵,۶,...\text{Paschen}$$

$$n_f = ۴ \rightarrow \frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad n = ۵,۶,۷,...\text{Brackett}$$

$$n_f = ۵ \rightarrow \frac{۱}{\lambda} = \frac{me^۴}{۸\varepsilon_۰^۲ch^۳}(\frac{۱}{۵^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad n = ۶,۷,۸,...\text{Pfund}$$

خطوطی که در محدوده‌ی طول موج مرئی هستند، خطوط بالمر هستند که متناظر با الکترون‌هایی هستند که به پایین‌ترین حالت برانگیخته‌ی انرژی می‌رسند (از سطح انرژی‌های بالاتر). کل این ترتیب «سری بالمر» نامیده می‌شود. انتقال الکترون‌ها به حالت پایه، خطوطی ایجاد می‌کند که در آن گسیل طول موج فرابنفش داریم و این سری لیمان را به وجود می‌آورد. در حالی که آن‌هایی که به حالت دوم برانگیخته می‌رسند، فوتون‌های زیر قرمز گسیل می‌کنند و به این ترتیب به ایجاد سری پاشن می‌انجامد.

## الگوی مکانیک کوانتومی

مدل اتمی بور برای اتم‌های ساده‌ای مانند اتم هیدروژن موفقیت‌آمیز است و نمی‌تواند پدیده‌های پیچیده‌تر را تبیین کند. مکانیک کوانتومی با استفاده از ابزارهای کاراتری مانند مکانیک موج شرودینگر و مکانیک ماتریسی هایزنبرگ، تفسیر بهتری برای طیف اتمی ارائه می‌دهد. $H\Psi = E\Psi$

$\Delta x \Delta p \geq \hbar$

## دیگر منابع تابش الکترومغناطیسی

تابش الکترومغناطیسی وقتی که یک بار الکتریکی به وسیله‌ی میدان الکتریکی شتاب می‌گیرد، ایجاد می‌شود یا وقتی که بار الکتریکی نوسان می‌کند. این اثر به وسیله‌ی ماکسول پیش‌بینی شده بود و نمونه‌ی آشنای آن، پخش امواج رادیویی از فرستنده‌های رادیویی می‌باشد. الکترون‌هایی که در یک میدان مغناطیسی حرکت مارپیچی انجام می‌دهند، تابش الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند (مانند اجاق میکروموج). گازهای گرم یونیده شده که مربوط به اجسام نجومی بسیاری است که تحت تأثیر گرانش حرکت کرده و با این روش، تابش می‌کنند.

در نهایت اثر فلوئورسانی (fluorescence) را داریم که در آن فوتون‌هایی با انرژی بالا به فوتون‌هایی به انرژی پایین‌تر تبدیل می‌شوند. به عنوان مثال یک فوتون فرابنفش به وسیله‌ی اتمی جذب می‌شود و الکترون آن را به انرژی بالاتری می‌برد. الکترون یک‌سری انتقال انجام می‌دهد تا به سطح انرژی پایه برسد و در هر پله فوتون‌هایی با بسامد کم‌تر گسیل می‌کند. پدیده‌ی فلوئورسانی، فرآیندی مهم در سحابی‌های گسیلی (emission nebulae) است.

## تابش گرمایی ـ قانون استفان (Stefan's Law)

اگر یک قطعه‌ی آهنی را حرارت دهیم، ابتدا به رنگ تیره‌ی قرمز درمی‌آید. وقتی گرم‌تر می‌شود، به نارنجی و سپس زرد درمی‌آید و اگر بسیار گرم شود، به رنگ سفید آبی‌گون درمی‌آید. این نشان می‌دهد که هرچه جسم به دمای بالاتری برسد، تابش با طول موج‌های کوتاه‌تری را گسیل می‌کند.

پژوهش‌های جوزف استفان در قرن نوزدهم نشان داد یک جسم انرژی را با آهنگی گسیل می‌کند که مرتبط با دمای آن می‌باشد. این رابطه آروینی (empirical) به وسیله‌ی لودویک بولتسمان با استفاده از فرض‌های ترمودینامیکی درباره‌ی اتم‌ها و مولکول‌ها به‌صورت تئوریک به دست آمد. این منجر بدان شد که وقتی به جسمی گرما می‌دهیم، تابش الکترومغناطیسی در بازه‌ای که طول موج‌ها گسیل می‌کند، که شدت کل آن متناسب است با توان چهارم دما. علاوه بر این، طول موج شدت گسیل قله با دمای جسم به‌طور معکوس متناسب است.

انرژی که از یک جسم تابش می‌شود، می‌تواند با شار انرژی (energy flux) آن تعریف شود و این برابر است با انرژی که از واحد سطح در واحد زمان خارج می‌شود، بنابراین رابطه‌ی استفان بولتزمان به این صورت $P = \sigma T^4$ نوشته می‌شود.

یکای P به‌صورت $\frac{J}{m^2 s}$ و T برحسب K می‌باشد. ثابت تناسب به‌نام ثابت استفان ـ بولتزمان است که برابر است با

$$\sigma = 5/67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$$

## تعادل گرمایی

قانون استفان برای جسمی که در تعادل گرمایی می‌باشد، معتبر است. این بدان معنی است، برای این‌که دما پایدار بماند، آهنگ انرژی که به وسیله‌ی جسم از اطراف جذب می‌شود، برابر است با انرژی که به محیط بدهد و دمایی که در آن تعادل برقرار می‌ماند، دمای تعادل (equilibrium temperature) می‌نامند. این پدیده به‌طور دقیق‌تر با قانون کیرشهف بیان می‌شود: برای یک دمای مشخص، نسبت ظرفیت یک جسم برای گسیل تابش به ظرفیت برای جذب آن (در یک طول موج مشخص) ثابت می‌باشد و به ترکیب جسم بستگی ندارد.

این گزاره نشان می‌دهد که یک گسیلنده‌ی خوب تابش باید یک جذب‌کننده‌ی خوب تابش نیز باشد. اگر یک جسم جذب‌کننده‌ی کارایی در یک طول موج باشد، یک تابشگر کارا در همان طول موج خواهد بود. این اصل در طیف‌سنج ستاره‌ای بسیار مهم است، چون اتم و مولکول‌ها در جوّ گرم ستارگان به وسیله‌ی طیف‌های خطی‌شان قابل شناسایی‌اند و طبق قانون کیرشهف، گازی که خطوط روشن طیفی گسیل می‌کند، باید در همان دما، انرژی را در همان طول موج جذب کند.

## جسم سیاه ـ قانون وین (The black body – Wien's Law)

قانون استفان ـ بولتسمان فقط برای جسمی معتبر است که یک جذب‌کننده‌ی کامل انرژی باشد. برای همین جسم باید در تمام طول‌موج‌ها به‌طور مطلق سیاه به نظر آید، که به چنین جسمی، جسم سیاه (black body) می‌گویند. برای این‌که یک تقریب خوب از جسم سیاه داشته باشیم، کافی است در یک کره‌ی توخالی شکاف بسیار ریزی ایجاد کنیم. این شکاف مانند یک جسم سیاه عمل می‌کند. هر تابشی که داخل این حفره می‌رود، به دام می‌افتد و تعدادی انعکاس‌های پی‌درپی در داخل کره رخ می‌دهد، تا در داخل سطح داخلی جذب شود.

یک جسم سیاه نوری را بازنمی‌تاباند، یعنی شار انرژی گسیل شده فقط به دمای آن بستگی دارد تا به ترکیب آن مطابق با قانون استفان.

خورشید و دیگر ستارگان را مانند جسم سیاه آرمانی در نظر می‌گیریم. به این علت که آن‌ها نور را در هر طول موجی جذب می‌کنند، ولی آن را بازنمی‌تابانند (اگر شما نوری به خورشید بتابانید، به سمت شما بازنمی‌تابد).

یک جسم سیاه امواج الکترومغناطیسی را در گستره‌ی وسیعی از طول موج‌ها گسیل می‌کند، ولی یک طول موج به‌نام طول موج قله (peak wavelength) وجود دارد، که در آن گسیل تابش دارای بیشینه (maximum) شدت است.

فیزیکدان آلمانی، ویلهلم وین رابطه‌ی ساده‌ای بین دما T و بیشینه‌ی طول موج $\lambda_{max}$ را کشف کرد، که در آن تابش انرژی به بیشینه‌ی شدت می‌رسد.

$$\lambda_{max} = \frac{۲/۹۰\times۱۰^{-۳}}{T}$$

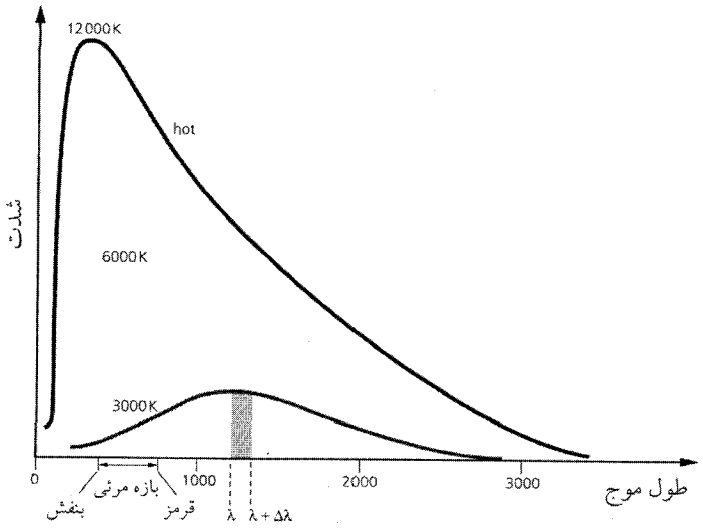
این رابطه قانون وین (Wien's Law) نامیده می‌شود، چون طول‌موج با دما رابطه‌ی معکوس دارد. طول‌موج غالب یک تابش‌کننده‌ی جسم سیاه وقتی که جسم گرم‌تر می‌شود کاهش می‌یابد، درست همان پدیده‌ای که در مورد میله‌ی آهنی دیدیم. یک جسم در دمای اتاق که در حدود ۳۰۰k می‌باشد به‌طور عمده تابش زیر قرمز گسیل می‌کند. یک جسم بسیار سرد در حدود چند کلوین بالای صفر مطلق به‌طور اولیه میکروموج گسیل می‌کند، در حالی که در چند میلیون کلوین پرتوهای X گسیل می‌کند.

وقتی که جسم سیاه در ابتدا در دمای مشخصی در تعادل است و انرژی اضافی به آن داده می‌شود تا آن را جذب کند، جسم گرم‌تر می‌شود تا به دمای جدید تعادل برسد، که در این دما می‌تواند تابش ورودی را با همان آهنگ که جذب کرده، تابش کرد. این جسم تمام طول موج‌ها را گسیل می‌کند، حتی طول موج قله‌ی خود را که می‌تواند مرئی نباشد.

در شکل، نوار کشیده شده کل انرژی تابش شده بر $m^{۲}$ بر ثانیه را برای یک جسم سیاه که در ۳۰۰۰k کلوین است را بین طول موج‌های $\lambda$ و $\lambda+\Delta\lambda$ نشان می‌دهد.

پخش شدت تابش جسم سیاه همیشه یک شکل مشخصه دارد. نموداری که در آن شار انرژی در برابر طول موج پیوسته می‌باشد و هیچ خط مشخصه‌ای را شامل نمی‌شود. در شکل، طیف تابش‌کننده‌های سیاه در دماهای گوناگون نشان داده شده است. در نظر داشته باشید هرچه دما بیش‌تر باشد، طول موج شدت بیشینه کوتاه‌تر می‌شود، همان چیزی که قانونی وین می‌گوید.

این منحنی‌ها را به عنوان منحنی‌های پلانک یا منحنی‌های جسم سیاه می‌نامند. نکته‌ای که باید بدان توجه شود این است که فرآیندی که باعث گسیل تابش می‌شود، به دما بستگی دارد و نه ترکیب شیمیایی جسم. مساحت کل زیر یک منحنی جسم سیاه برابر است با کل انرژی بر یکای سطح بر یکای ثانیه برای تمام طول موج‌ها.




**منحنی‌های جسم سیاه برای اجسام در دماهای تعادل مختلف**

اندازه‌گیری‌های بالای جو نشان داده است که پخش شدت نور خورشید در گستره‌ی وسیعی از طول موج‌ها می‌تواند تقریب خوبی برای جسم سیاهی باشد که در دمای ۵۸۰۰k قرار دارد. به همین علت ستارگان به عنوان جسم سیاه در نظر گرفته می‌شوند و از این‌جا می‌توانیم دمای سطح آن‌ها را به دست آوریم.

**مثال:** مقدار متوسط شار انرژی که به زمین از خورشید می‌رسد را ثابت خورشیدی (solar constant) می‌گویند، که مقدار آن برابر $۱۳۷۰\frac{w}{m^۲}$ است. خورشید تابش امواج الکترومغناطیسی را در گستره‌ی وسیعی از طول موج‌ها گسیل می‌کند، ولی شدت آن در طول‌موج ۵۰۰nm بیشینه است. اگر خورشید را به عنوان جسم سیاه در نظر بگیریم، با استفاده از قانون استفان و وین، دمای سطح خورشید را محاسبه کنید.

$$\sigma = ۵/۷\times۱۰^{-۸}\frac{w}{m^۲k^۴}$$

$r_{ES} = ۱/۵\times۱۰^{۱۱}\,m$ فاصله‌ی زمین تا خورشید

$r_{sun} = ۷\times۱۰^{۸}\,m$ شعاع خورشید

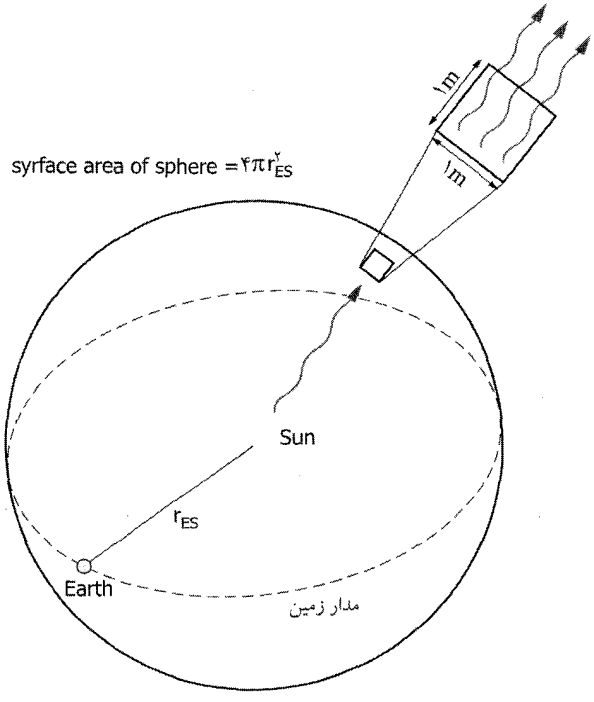
$$P_{tot} = A\sigma T^{۴} = ۴\pi r_s^{۲}\times\sigma\times T^{۴}$$

$$\frac{۱}{۴\pi r_{ES}^{۲}}۴\pi r_s^{۲}\sigma T^{۴} = \frac{r_s^{۲}}{r_{ES}^{۲}}\sigma T^{۴} = ۱۳۷۰\frac{w}{m^{۲}}$$

$$T^{۴} = \frac{۱۳۷۰}{۵/۷\times۱۰^{-۸}}\frac{۱/۵\times۱۰^{۱۱}}{۷\times۱۰^{۸}} \Rightarrow T = ۵۸۰۰k$$

$$\lambda_{max} = \frac{۲/۹\times۱۰^{-۳}}{T} \Rightarrow ۵۰۰\times۱۰^{-۹} = \frac{۲/۹\times۱۰^{-۳}}{T}$$

$T = ۵۸۰۰k$ در نظر داشته باشید که این دمای شید سپهر می‌باشد.




## اثر دوپلر (The Doppler effect)

با این پدیده آشنا هستید که وقتی در ایستگاه قطاری ایستاده‌اید، وقتی قطار به شما نزدیک می‌شود، صدای بوق آن را زیرتر و وقتی قطار از شما دور می‌شود، صدای آن را بم‌تر می‌شنوید. این پدیده‌ای است که در مورد امواج الکترومغناطیسی نیز صادق می‌باشد و به وسیله‌ی دوپلر، فیزیکدان اتریشی در قرن نوزدهم فرمول‌بندی شد.

توجه کنید که وقتی قطار به شما نزدیک می‌شود، شما تعداد موج‌های بیش‌تری در ثانیه دریافت می‌کنید و بنابراین طول موج $\lambda$ کوتاه می‌شود. برای یک سرعت مشخص طول موج با فرکانس مرتبط می‌باشد و بسامد متناسب با عکس طول موج می‌باشد، بنابراین فرکانس افزایش می‌یابد. عکس این پدیده زمانی است که قطار از شما دور می‌شود، یعنی فرکانس کاهش یافته یا طول موج بلند می‌شود.

اثر دوپلر برای نور نیز می‌تواند بررسی شود. در نظر بگیرد ستاره‌ای با سرعت v که بسیار از سرعت نور کوچک‌تر است، از ما دور می‌شود. این ستاره طول موج $\lambda_{\circ}$ و بسامد $\nu_{\circ}$ را گسیل می‌کند. طول موج دریافت شده در زمین $\lambda$ می‌باشد، که به آن طول موج ظاهری (apparent wave length) می‌گویند.

$$v' = c + v$$

$$\nu' = \lambda \nu_{\circ}$$

$$\lambda = \frac{c+v}{\nu_{\circ}} = \frac{c+v}{\frac{c}{\lambda_{\circ}}}$$

$$\Rightarrow \lambda = \lambda_{\circ}(1 - \frac{v}{c})$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\circ}} = 1 + \frac{v}{c}$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{\circ}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\circ}} = \frac{v}{c}$$

این رابطه‌ایست غیرنسبیتی و تقریبی می‌باشد. رابطه‌ی نسبیتی و دقیق برحسب بسامد $\nu'$ به‌صورت

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$\theta = 0$ ناظر به سمت ما حرکت می‌کند

$\theta = 180^{\circ}$ ناظر از منبع دور می‌شود

$\theta = 90^{\circ}$ دوپلر عرضی

اگر $\lambda > \lambda_{\circ}$ باشد، ستاره از زمین دور می‌شود یا $\frac{v}{c}$ مثبت می‌باشد و می‌گوییم نور به سمت سرخ میل کرده است (red-shifted) و اگر $\lambda < \lambda_{\circ}$ باشد، $\frac{v}{c}$ منفی می‌شود، بنابراین می‌گوییم ستاره به سمت ما می‌آید و نور به سمت آبی (blue-shifted) انتقال پیدا کرده است.

باید در نظر داشته باشیم که اخترفیزیکدانان خطوط طیفی ستاره را با خطوط طیفی در زمین مقایسه کرده و از آن $\Delta\lambda$ را به دست آورده و از آنجا سرعت ستاره را تعیین می‌کنند.

**مثال:** در آزمایشگاه یک خط طیف هیدروژن مشاهده شده که طول موج آن ۶۵۶/۲۸۵nm است. یک اخترفیزیکدان همین خط طیف را در ستاره‌ای به‌نام نسرواقع (vega) اندازه‌گیری می‌کند و آن را برابر ۶۵۶/۲۵۵mn می‌یابد. سرعت این ستاره را بیابید و بگویید از ما دور می‌شود یا به ما نزدیک می‌شود.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_\circ}=\frac{v}{c}\rightarrow v=c\frac{\Delta\lambda}{\lambda_\circ}$$

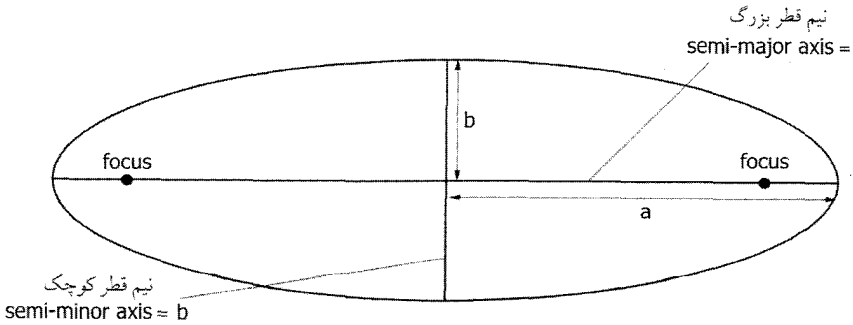
$$\Delta\lambda=\lambda-\lambda_\circ=۶۵۶/۲۵۵-۶۵۶-۲۸۵=-۰/۰۳۰mn$$

$$v=(۳\times۱۰^۸)(\frac{-۰/۰۳۰}{۶۵۶/۲۸۵})=-۱۳/۷\frac{km}{s}$$

نسرواقع به سمت ما می‌آید.

اثر دوپلر برای حرکت محلی ستارگان و هم‌چنین کل جهان به کار می‌رود. می‌دانیم که جهان در حال انبساط می‌باشد و انتقال به قرمز کهکشان‌ها و دیگر اجسام دور به عنوان انبساط جهان تفسیر می‌شود. اخترشناسان از نماد z به‌صورت $z=\frac{\Delta\lambda}{\lambda_\circ}=\frac{v}{c}$ استفاده می‌کنند. هرچه مقدار z بیش‌تر باشد، جسم از ما با سرعت بیش‌تری دور می‌شود. برای فواصل دور باید از تصحیح (correction) نسبیتی اثر دوپلر استفاده کنیم.

## قوانین کپلر




| | |
|---|---|
| مقدار ثابت | $r+r'=۲a$ |
| دایره | $e=۰$ |
| بیضی | $۰<e<۱$ |
| سهمی | $e=1$ |

هذلولی $e > ۱$

حضیض $a - ae = a(۱ - e)$

اوج $a + ae = a(۱ + e)$

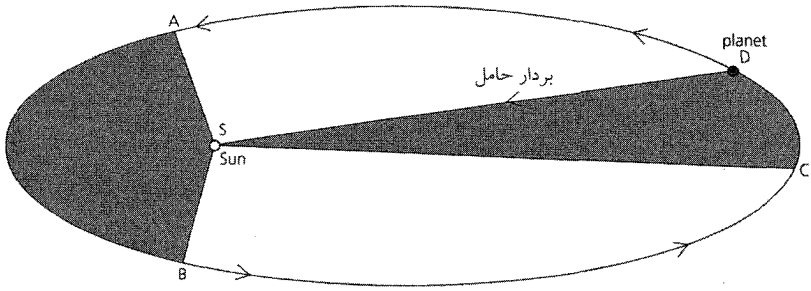
معادله بیضی $(\frac{x}{a})^۲ + (\frac{y}{b})^۲ = ۱$

**ـ قانون اول کپلر**

مدار یک سیاره‌ی بیضی است و خورشید در یکی از کانون‌های آن قرار دارد، در حالی که کانون دیگر آن خالی است.

**ـ قانون دوم کپلر (قانون مساحت‌های مساوی)**

یک خط مستقیم که خورشید و ستارگان را به یکدیگر متصل می‌کند بردار حامل (radius vector) نام دارد و در زمان‌های مساوی، مساحت‌های مساوی را جاروب می‌کند.




**ـ قانون سوم کپلر**

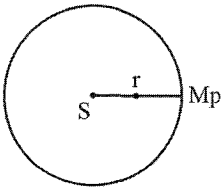
مربع زمان تناوب مداری سیارات متناسب است با مکعب نیم‌قطر بزرگ‌تر.

$$\frac{T^۲}{a^۳} = cte$$

قانون دوم و سوم کپلر نشان می‌دهد که نیرویی که بین خورشید و سیارات است، یک نیروی مرکزگراست و با فاصله کم می‌شود.

هر چند که قانون کپلر در ابتدا برای حرکت سیارات وضع شد، اما این قانون می‌تواند برای سیستم‌های دوتایی ستارگان، ستارگانی که دور یک کهکشان می‌گردند و حتی کهکشان‌هایی که به دور یکدیگر می‌چرخند، به کار رود.

## گرانش و مدار




$$F_r = M_p a_r$$

$$F_r = \frac{GM_pM_S}{r^2}$$

$$a_r = r\omega^2 \qquad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{GM_sM_p}{r^2} = M_p r\omega^2 \rightarrow \omega^2 = \frac{GM_s}{r^3}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{GM_s}{r^3}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_s} = cte$$

مدارها و انرژی

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 + U_g$$

انرژی پتانسیل گرانشی

$$U_g = -\sum \frac{Gm_im_j}{r_{ij}}$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

### سرعت فرار (Escape speed)

از نظر هندسی، گریختن از یک مدار بدان معنی است که آن‌قدر مدار را بیضوی کنیم که قطر بزرگ‌تر آن بی‌نهایت دراز شود. چنین مسیری سهمی (parabola) می‌باشد و سرعت فرار سرعت لازمی است، برای این‌که جسم این راه را بدون برگشت دریافت کند.

$$E = K + U = cte$$

$$\frac{1}{2}mv_{esc}^2 - \frac{GMm}{R} = 0 + 0$$

انرژی پتانسیل گرانشی

انرژی جنبشی در بی‌نهایت

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

**مثال:** سرعت فرار از سطح زمین را بیابید.

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2\times 6/67\times 10^{-11}\times 6\times 10^{24}}{6/4\times 10^6}} = 11/2\frac{km}{s}$$

**مثال:** اگر فرض کنیم زمین به دور خورشید در یک مدار دایره‌ای می‌گردد و شعاع آن $r = 1/5\times 10^{11} m$ باشد، جرم خورشید را بیابید.

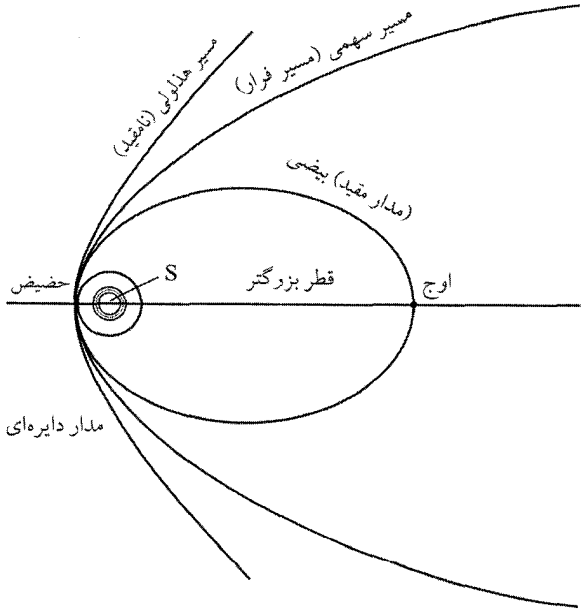
$$\frac{GM_SM_E}{r_{ES}^2} = M_E \frac{v_E^2}{r_{ES}}$$

$$M_S = \frac{v_E^2 r_{ES}}{G} = \frac{4\pi^2}{T^2}\frac{r_{ES}^2}{G}$$

$$T = \text{۱ سال} = ۳/۰\times۱۰^۷ S$$

$$M_S = ۲/۰\times۱۰^{۳۰} kg$$

معادله‌ی انرژی کل، ما را قادر می‌سازد تا درباره‌ی حرکت مداری، گزاره‌های عمومی داشته باشیم. وقتی که انرژی مدار منفی باشد، مدار ما مقید (bounded) است. به عبارت دیگر، جسم در یک مدار بیضوی به دور یک جسم پرجرم محدود شده است. اگر انرژی کل دقیقاً برابر با صفر باشد، جسم در یک مسیر گریز در مسیر سهمی‌شکل حرکت می‌کند. اگر انرژی کل مثبت باشد، مدار کاملاً نامقید است و در مدار هذلولی‌شکل حرکت می‌کند.



# ۲

Spiral galaxy M96

## اندازه‌گیری‌های اخترفیزیکی

## یکاهای فاصله‌ی نجومی

### یکای نجومی AU (The astronomical unit)

این مقدار برابر است با فاصله‌ی متوسط زمین تا خورشید. چون مدار بیضی‌شکل است، فاصله‌ی متوسط نیم‌قطر بزرگ‌تر مدار زمین در نظر گرفته می‌شود.

$1AU = 1/496 \times 10^{11} m$

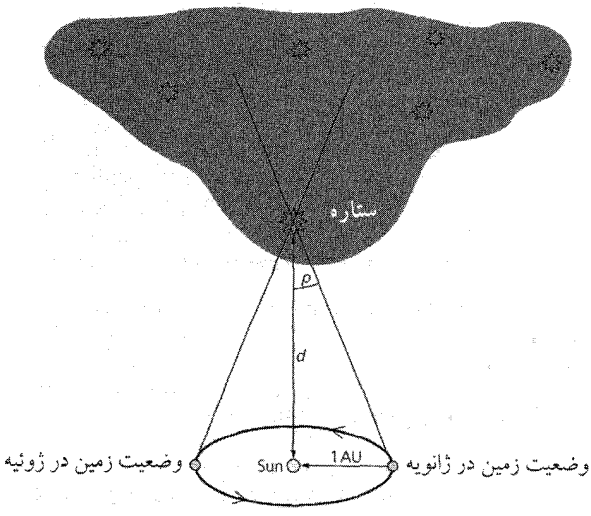
یکای نجومی برای مقیاس‌های بین سیاره‌ای مناسب می‌باشد.

### پارسک (The parsec)

یکایی می‌باشد که برای فواصل بین ستاره‌ای مناسب می‌باشد. با توجه به اختلاف منظر (parallax) و زاویه‌ی اختلاف منظر برای یک ستاره از زمین داریم:

$$\tan p = \frac{1AU}{d}$$

یک پارسک فاصله‌ای است که اختلاف منظر ستاره برابر است با یک ثانیه.



$$\tan p = p \rightarrow d = \frac{1AU}{p}$$

$$1rad = 57^\circ 17' 44/81''$$

$$1rad = 206264/81''$$

$$1'' = \frac{1}{206264/81} rad$$

$$1pc = 206264/81 AU$$

$$d = \frac{1}{p''} pc$$

**مثال:** زاویه‌ی اختلاف منظر برای ستاره‌ی $0/762''$ ثانیه به دست آمده است. فاصله‌ی این ستاره از ما چند pc است؟ (اختلاف منظر سالانه)

این فاصله‌ی ستاره پراکسیما قنطورس (proxima centauri) از زمین است.

$$d = \frac{1}{p''} pc$$

$$d = \frac{1}{0/762} = 1/31 pc$$

اختلاف منظر سالانه (annual parallax) تغییر زاویه‌ای است که در طی نیم‌سال ایجاد می‌شود. اختلاف منظری که به علت حرکت زمین به دور خورشید ایجاد می‌شود را اختلاف منظر خورشید مرکزی (heliocentric parallax) می‌گویند.

از Kpc و Mpc برای اندازه‌گیری فواصل بزرگ استفاده می‌کنند. حدّ اندازه‌گیری اختلاف منظر با استفاده از قطر مدار زمین در حدود ۰/۰۱ قوس ثانیه می‌باشد.

## سال نوری ly (light year)

یک سال نوری فاصله‌ایست که فوتون نوری در فضا در یک سال طی می‌کند.

$$3\times10^8 \frac{m}{s} \times 365 day \times 24 h \times 3600 s = 9/46\times10^{15} m$$ مقدار آن

$$1pars ec = 3/262 ly$$

## قدرهای ستاره‌ای (Stellar magnitudes)

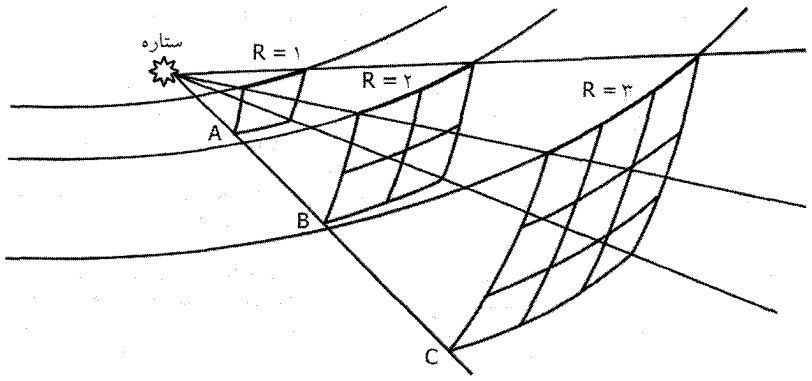
وقتی به ستارگان در شب نگاه می‌کنیم، آشکار است که برخی از آن‌ها روشن‌تر از دیگری به نظر می‌آیند. با این حال این پدیده‌ای فریبنده است، چون ستارگان در فواصل مختلفی از شما می‌باشند. مثلاً یک لامپ 60w در فاصله‌ی 7/5m و یک لامپ 100w در فاصله‌ی ۱۰ متری،هر دو دارای روشنایی ظاهری (apparent brightness) یکسانی می‌باشند، ولی اگر این دو را کنار یکدیگر بگذاریم، لامپ ۱۰۰ واتی تابنده‌تر می‌باشد.

درخشندگی (luminosity) یک جسم، انرژی است که جسم برحسب ژول بر ثانیه تابش می‌کند و با یکای وات اندازه‌گیری می‌شود. این انرژی از قانون عکس مجذور فاصله پیروی می‌کند. در نظر بگیرید که ستاره یک منبع نقطه‌ای باشد، که در مرکز کره‌ای به شعاع R قرار دارد، بنابراین انرژی که از هر مترمربع در ثانیه می‌گذرد، مساوی است با درخشندگی تقسیم بر مساحت کره، بنابراین روشنایی (brightness) یک ستاره:

$$b = \frac{L}{4\pi R^2} \frac{w}{m^2}$$

و این شار نوری (light flux) دریافت شده را نشان می‌دهد.

اخترشناسان مایلند بیش‌تر در مورد روشنایی ستاره که برحسب قدر بیان می‌شود، بحث کنند تا درخشندگی. این مقیاس در دو قرن پیش از میلاد به وسیله‌ی هیپارکوس، اخترشناس یونانی وضع شد. ستارگان با قدر ظاهری‌شان طبقه‌بندی شدند، که آن مقدار روشنایی است که شما بدون چشم غیرمسلح وقتی که به ستاره نگاه می‌کنید، پدیدار می‌شود. درخشان‌ترین ستاره دارای قدر ۱/۰+ و کم‌نورترین آن دارای قدر ۶/۰+ می‌باشد. با اختراع تلسکوپ، ستارگانی با قدر بیش از ۱+ مانند نسرواقع ۰/۰ و شعرای یمانی (sirius) با قدر ۱/۴− و خورشید با قدر ۲۶/۷۴− یافت شدند. کم‌نورترین اجسام رصد شده به وسیله‌ی تلسکوپ تا حد ۲۱+ و ۲۸+ می‌رسد.




این مهم است که به یاد داشته باشیم هر چه‌قدر ظاهری منفی‌تر باشد، آن ستاره روشن‌تر است و هرچه مثبت‌تر باشد، ستاره کم‌نورتر است.

چشم انسان نسبت‌های مساوی در شدت نور را مانند اختلاف‌های مساوی در روشنایی دریافت می‌کند. در مقیاس هیپارکوس، روشنایی ستاره‌ای دارای قدر ۱+ می‌باشد. ۱۰۰ برابر بزرگ‌تر از ستاره‌ای است، که قدر آن ۶/۰+ می‌باشد. این بدان معناست که اختلاف ۵ قدر به معنی ۱۰۰ برابر شدن روشنایی است. بنابراین یک قدر اختلاف روشنایی $(۱۰۰)^{\frac{۱}{۵}}$ برابر می‌شود یا ۲/۵۱۲.

در قرن نوزدهم، اخترشناس انگلیسی به‌نام نورمن پوگسن (Norman Pogson) رابطه‌ی هیپارکوس را به‌طور دقیق‌تری فرمول‌بندی کرد:

$m_۲ - m_۱ = -۲/۵ \log \frac{b_۲}{b_۱}$ قانون Pogson

$m_۱ = ۱$ قدر ظاهری ستاره

$m_۲ = ۲$ قدر ظاهری ستاره

$b_۱ = ۱$ روشنایی دریافت شده‌ی ستاره

$b_۲ = ۲$ روشنایی دریافت شده‌ی ستاره

## قدر مطلق (Absolute magnitude)

اگر فرض کنیم ستارگان را در فاصله‌های مساوی از زمین بگذاریم، اختلاف قدرها در واقع اختلاف بین درخشندگی‌ها می‌شود و در این حالت شما با قدر مطلق سروکار دارید.

اخترشناسان فاصله‌ی استاندارد ۱۰pc را برای قدر مطلق در نظر می‌گیرند. با استفاده از قانون Pogson داریم:

$$m - M = -۲/۵ \log \left(\frac{b_d}{b_{۱۰}}\right)$$

$$\frac{b_d}{b_{۱۰}} = \frac{L}{۴\pi d^۲} \div \frac{L}{۴\pi (۱۰)^۲} = \left(\frac{۱۰}{d}\right)^۲$$

$$m - M = ۵ \log d - ۵$$

$$d = ۱۰^{(m-M+۵)/۵} \text{ pc}$$

**مثال:** ستاره‌ای به‌نام Procyon A دارای قدر ظاهری ۰/۴+ می‌باشد و در فاصله‌ی ۳/۵pc از زمین می‌باشد. قدر مطلق آن را بیابید.

$$M = m - ۵ \log d + ۵$$

$$M = +۰/۴ - ۵ \log ۳/۵ + ۵ = +۲/۷$$

## قدر تابش‌سنجی (Bolometric magnitude)

در واقع مقدار زیادی از گسیل الکترومغناطیسی ستاره‌ها در ناحیه‌ی نامرئی طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. برای مثال، ستارگان بسیار درخشان گرم برای چشم ما کم‌نور به نظر می‌آیند، برای این‌که بیش‌تر گسیل‌شان در ناحیه‌ی فرابنفش می‌باشد و ما می‌دانیم که جو زمین بسیاری از طول موج‌های غیرمرئی را جذب می‌کند، بنابراین قدر ظاهری باید تصحیح (correction) شود. اخترشناسان قدر

تابش‌سنجی را برای تمام طول موج‌های الکترومغناطیسی در نظر می‌گیرند و از دستگاهی به‌نام تابش‌سنج (bolometer) استفاده می‌کنند. برای خورشید چون بیش‌تر گسیلش در ناحیه‌ی مرئی است، این تصحیح تقریباً برابر صفر می‌باشد.

## تابش‌سنج

تابش‌سنج وسیله‌ایست که در آن افزایش دما که به علت انرژی تابیده شده در تمامی طول موج‌ها رخ می‌دهد را اندازه‌گیری می‌کند. دو نوع تابش‌سنج داریم:

۱- ترمیستورها (thermistor) که در دمای اتاق کار می‌کنند.

۲- تابش‌سنج‌های نیمه‌رسانا (semiconductor bolometer) که از ژرمانیوم ساخته شده و تا دمای ۲ درجه کلوین سرد شده‌اند.

در هر دوی این دستگاه‌ها، مقاومت ویژه یا به عبارتی مقاومت، وقتی که دستگاه گرم می‌شود تغییر می‌کند، به همین علت، مقدار جریان نیز تغییر می‌کند. تغییرات جریان نسبت به دما نشان می‌دهد که تابش‌سنج چه‌قدر انرژی دریافت کرده است.

## درخشندگی و قدر

$$\frac{b_2}{b_1}=\frac{\frac{L_2}{4\pi d^2}}{\frac{L_1}{4\pi d^2}}=\frac{L_2}{L_1}$$

$$m-M=-2/5\log\frac{b_2}{b_1}=-2/5\log\frac{L_2}{L_1}$$

$$M_2-M_{sun}=-2/5\log\frac{L_2}{L_\odot}$$

$$M_{sun}=m_{sun}-5\log d+5=-(26/8)-5\log(4/848\times10^{-6})+5=+4/77$$

$$M=4/77-2/5\log(\frac{L}{L_\odot})$$

**مثال:** ستاره‌ی شعرای یمانی دارای قدر مرئی $-1/46$ می‌باشد و در فاصله‌ی $2/64\,pc$ می‌باشد. این ستاره نسبت به خورشید چه‌قدر درخشنده است؟

$$M=m-5\log+5=-1/46-5\log(2/64)+5=1/4$$

$$M=4/77-2/5\log\frac{L}{L_\odot}$$

$$۱/۴ = ۴/۷۷ - ۲/۵ \log \frac{L_{sirius}}{L_{\odot}}$$

$$L_{sirius} = ۲۲/۴ L_{\odot}$$

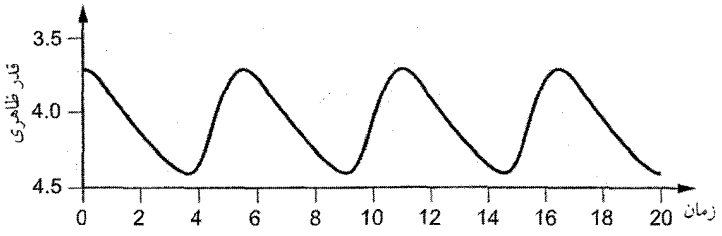
## یکای جانسکی (Jansky)

یکایی است که به وسیله‌ی اخترشناسان رادیویی استفاده می‌شود و مقدار انرژی است که از اجسام نجومی دریافت می‌شود، که در طول موج رادیویی، روشنایی رادیویی می‌باشد. مقدار آن بسیار کوچک بوده و در یکای بسامد می‌باشد. جانسکی از نام کارل جانسکی می‌آید، که اولین‌بار امواج رادیویی را که از فضا می‌آید را کشف کرد. $Jy = ۱۰^{-۲۶} Wm^{-۲} Hz^{-۱}$

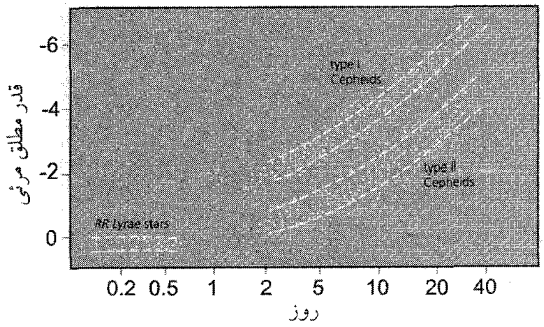
## رابطه‌ی زمان تناوب ـ درخشندگی (P-L)

برای فواصل بیش از چند هزار پارسک، اخترشناسان از راهنمای فاصله (distance indicator) استفاده می‌کنند. ما درباره‌ی ستارگان متغیر که قیفاوسی‌ها (cepheids) نامیده می‌شوند و تابندگی آن‌ها به‌صورت تناوبی با زمان تغییر می‌کند، صحبت کردیم. این امکان وجود دارد که از این ستاره‌ها برای تخمین فاصله استفاده می‌کنیم.

ستاره‌ی قیفاوسی دلتا و منحنی نوری آن که با زمان تغییر می‌کند را در زیر داریم. ویژگی مورد توجه قیفاوسی‌ها این است که رابطه‌ی بین تابندگی متوسط آن‌ها و زمان تناوب‌شان بدین صورت است که هرچه زمان تناوب بیش‌تر باشد، قیفاوسی بیش‌تر تابنده است.




در شکل بعدی، رابطه‌ی بین زمان تناوب و تابندگی ستاره به‌صورت تابعی از قدر مطلق با زمان (برحسب روز) رسم شده است. در واقع دو نوع قیفاوسی وجود دارد، I و II که تفاوت آن‌ها فقط در مشخصه‌ی طیفی آنان است و شکل منحنی نوری آن‌ها، ولی رابطه‌ی P−L یکسان است. هم‌چنین در نمودار نوع سومی از ستاره‌ی متغیر به‌نام RR شلتاقی (RR Lyrae stars) داریم، که به‌طور عمده در سحابی‌های کروی یافته می‌شوند و فرقشان با قیفاوسی‌های I و II در زمان تناوب کوتاه‌ترشان است.




با استفاده از رابطه‌ی $P-L$ می‌توانیم فاصله را از یک قیفاوسی را با طی مراحل زیر به دست آوریم:

۱- موقعیت یک قیفاوسی را تعیین کنید. (باید ببینیم یک منحنی نوری متناوب دارد یا نه.)

۲- زمان تناوب آن را تعیین کنید.

۳- قدر مطلق ستاره را با استفاده از رابطه‌ی $P-L$ بیابید.

۴- شار دریافتی نوری ستاره را بیابید و از آن‌جا قدر ظاهری آن را حساب کنید (این به وسیله‌ی فوتومتر سنجیده می‌شود).

۵- فاصله تا ستاره را برحسب پارسک از رابطه‌ی $d = ۱۰^{(m-M+۵)/۵}$ محاسبه کنید.

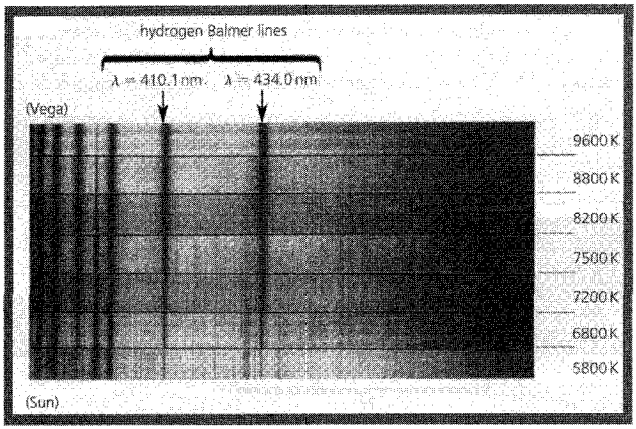
**مثال:** یک ستاره‌ی متغیر دارای زمان تناوب ۵ روز و قدر ظاهری مرئی $+۸$ می‌باشد. فاصله‌ی d آن را بیابید.

با استفاده از نمودار، زمان تناوب ۵ روز با قدر مطلق مرئی $-۲/۷$ متناظر است.

$$\log d = \frac{(+۸)-(-۲/۷)+۵}{۵} = ۳/۱۴$$

$$d = ۱۳۸۰\,pc$$

# ۳




## طیف‌سنجی ستاره‌ای (Stellar spectroscopy)

سه اصل کیرشهف برای تحلیل طیف‌سنجی که آروینی (empirical) می‌باشد، به‌صورت زیر است:

**ـ اصل اول**

یک جامد تار (opaque) گرم، یا مایع یا گازی که تحت فشار زیاد باشد، طیف پیوسته (continious spectrum) گسیل می‌کند.

**ـ اصل دوم**

یک گاز داغ تحت فشار کم (بسیار کم‌تر از فشار اتمسفر) یک‌سری خطوط روشن در زمینه‌ی سیاه تولید می‌کند. به چنین طیفی، خط روشن یا طیف گسیلی (emission spectrum) می‌گویند. تعداد و جایگاه خطوط روشن بستگی به ترکیب شیمیایی منبع دارد.

**ـ اصل سوم**

وقتی که یک منبع نور که طیف آن پیوسته است، به گازی که دما و فشار آن پایین‌تر است تابیده می‌شود در طیف پیوسته، یک‌سری خطوط تاریک ظاهر می‌شود که در آن بر هم نهاده (superimposed) شده است. به این نوع طیف، خط تاریک یا طیف جذبی (absorption spectrum) می‌گویند. تعداد و جایگاه این خطوط بستگی به ترکیب شیمیایی گاز سردتر دارد.

خطوط درخشان در طیف گسیلی گاز در همان طول موج‌هایی ظاهر می‌شود که خطوط تاریک در طیف جذبی همان گاز. برای جسم گرم گداخته (glowing) که به وسیله‌ی یک گاز زمینه احاطه شده است، خطوط جذبی در طیف دیده می‌شوند، اگر گاز زمینه سردتر باشد. اگر گاز زمینه گرم باشد، گاز زمینه خطوط گسیلی را در همان طول موج‌ها گسیل می‌کند.

با مقایسه‌ی الگوهای خط طیف مشاهده شده در آزمایشگاه با خطوط طیفی ستارگان، با استفاده از اصول کیرشهف می‌توانیم ترکیب عنصری ستارگان را تعیین کنیم. ترکیب شیمیایی ستارگان به‌طور عمده یکسان می‌باشد.

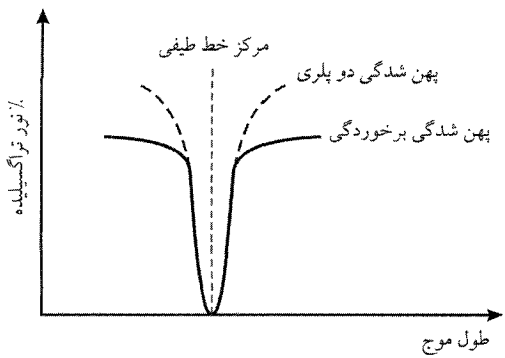
فرانهوفر در قرن هجدهم ۷۸۴ خط تیره پیدا کرد (با استفاده از توری پراش). این خطوط، خطوط فرانهوفر (Fraunhofer Lines) نامیده شدند.

اخترفیزیکدانان امروزه هزاران خطوط جذبی در طیف خورشید یافته‌اند. با استفاده از اصول کیرشهف وجود ۶۷ عنصر مختلف در خورشید آشکار شده است. عنصر He ابتدا در خورشید کشف شد، که در ابتدا به‌صورت یک خط ناشناخته در خورشید یافته شد، چون با خطوط طیفی در زمین قابل مقایسه نبود. ۴۰ سال بعد این عنصر در زمین کشف شد.

شدت یا قدرت خط طیفی در طیف ستاره به دمای ستاره بستگی دارد. برخی خطوط طیفی به نوارهای مشخص طول موج تقسیم می‌شوند، که به علت سطوح انرژی مولکولی است. برخی دیگر تحت اثر زیمان که به علت وجود میدان مغناطیسی است، تقسیم می‌شوند.

اگر الکترونی در یک انتقال در داخل اتمی که جزئی از مولکول می‌باشد به حالت برانگیخته‌ی انرژی برود، آن‌گاه انرژی‌های دورانی و لرزشی تغییر می‌کند، هر چند برای مقادیری بسیار کوچک. این آن اثر را دارد که انرژی انتقالی الکترون را به تعداد زیادی انرژی‌هایی که در نزدیکی یکدیگر واقع شده‌اند، تقسیم می‌کند. این باعث ایجاد طیف مولکولی می‌شود.

شکل خطوط طیفی به علت اثرات برخوردی، دوپلری و دورانی پهن می‌شوند. از این پدیده‌ها، اخترفیزیکدانان می‌توانند اطلاعاتی درباره‌ی فشار گاز، سرعت ذره‌ها و دوران ستاره‌ها به دست آورند.




در جوّ یک ستاره به علت انرژی گرمایی، سرعت‌های تصادفی داریم. برخی اتم‌ها به سمت ما می‌آیند و دیگر اتم‌ها از ما دور می‌شوند و فوتون گسیل می‌کنند. این ایجاد انتقال دوپلری در خط جذبی طیف می‌کند. به این اثر، پهن‌شدگی دوپلری (doppler broadening) می‌گویند.

در دماها و فشارهای بالا، تعداد برخوردها بین اتم‌ها بیش‌تر است و این باعث می‌شود انرژی فوتون‌ها بیش‌تر تغییر کند. در این حالت، انرژی فوتون‌های جذب شده تا حد زیادی تغییر می‌کند و در واقع طول موج آن‌ها و این باعث می‌شود خط طیفی پهن‌تر شود، که به این پدیده، پهن‌شدگی برخوردی (collisional broadening) می‌گویند.

اگر محور دوران یک ستاره در راستای دید ما نباشد، آن‌گاه اتم‌ها در لایه‌های سطحی ستارگان به‌طور متناوب به سمت ما می‌آیند و دور می‌شوند، که این پدیده موجب پهن‌شدگی دورانی (rotational broadening) در خطوط طیفی می‌شود.

اگر در نظر بگیرید که محور دوران عمود بر خط دید مشاهده‌کننده باشد و تغییر در طول موج $\Delta\lambda$، آن‌گاه سرعت v اتم در ستاره با رابطه‌ی

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{v}{c}\rightarrow v=c\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

اگر شعاع ستاره را بدانیم، می‌توانیم از آن‌جا T را بیابیم.

$$T=\frac{2\pi R}{v}$$

## طبقه‌بندی طیف‌های ستاره‌ای

تغییر شدت خطوط هیدروژن با دما، ما را قادر می‌سازد که یک دستگاه طبقه‌بندی برای طیف‌ها داشته باشیم. نوع نوین این طبقه‌بندی، دستگاه MK نام دارد. برای این‌که این طبقه‌بندی را داشته باشیم، به یک ستاره، نوع طیفی (spectral type) و یک طبقه‌ی تابندگی (luminosity class) می‌دهیم.

## نوع طیفی

نوع طیفی با ۷ حرف O ، B ، A ، F ، G ، K ، M نشان داده می‌شود. گرم‌ترین نوع، نوع O و سردترین آن، نوع M می‌باشد.

| نوع | K / دمای سطحی | مشخصه‌ی طیفی |
|---|---|---|
| O | > 20000 | هلیم یونیده (He II) |
| B | 10000-20000 | He خنثی، خطوط هیدروژن شروع به پدیدار شدن می‌کنند. |
| A | 7000-10000 | خطوط قوی هیدروژن خنثی (خطوط بالمر) قابل رؤیت است. |
| F | 6000-7000 | کلسیم یونیده Ca II مرئی، خطوط هیدروژن ضعیف‌تر می‌باشد. |
| G | 5000-6000 | کلسیم یونیده Ca II بسیار برجسته است. خطوط هیدروژن خنثی ضعیف‌تر و هم‌چنین خطوط فلزی مانند آهن. |
| K | 3500-5000 | فلزات خنثی مانند Ca و Fe برجسته هستند. نوارهای مولکولی قابل رؤیت. |
| M | 2000-3500 | نوارهای مولکولی قابل رؤیت بسیار است، به ویژه اکسید تیتانیوم Tio . |

خورشید یک ستاره‌ی نوع G است.

## طبقه‌ی تابندگی

برای یک دمای مشخص، برخی ستارگان از دیگر ستارگان تابنده‌تر هستند. این بدان علت است که بزرگ‌تر بوده و جوّ خارجی آن‌ها رقیق‌تر و کم‌فشارتر از یک ستاره‌ی کم‌نورتر است. بنابراین برای هر نوع طیفی می‌توانیم یک طبقه‌ی تابندگی نیز داشته باشیم، که این‌ها به ۷ رقم رومی تقسیم می‌شوند.

I : ابرغول‌ها (super giants)

II : ستاره‌های غول روشن (bright giant stars)

III : ستاره‌های غول (giant stars)

IV : ستارگان زیر غول (sub giant stars)

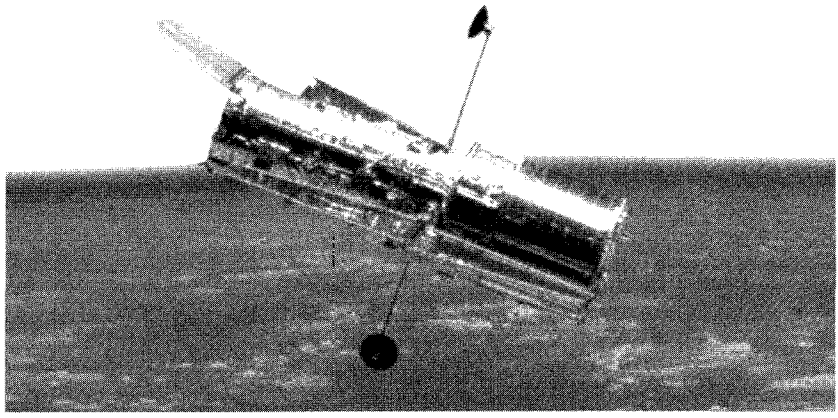
V : ستارگان کوتوله‌رشته‌ی اصلی (main sequence dwarf stars)

VI : ستارگان زیر کوتوله (sub dwarf stars)

VII : ستارگان کوتوله‌ی سفید (white dwarf stars)

خورشید به عنوان یک ستاره‌ی G2V طبقه‌بندی می‌شود.

# ۴



تلسکوپ هابل

## ویژگی‌های مشاهدتی ستارگان

۶ ویژگی مشاهدتی ستارگان عبارتند از:

۱- تابندگی ۲- دما ۳- شعاع ۴- جرم ۵- ترکیب شیمیایی ۶- سن (عمر)

### ۱ـ تابندگی

درخشندگی یک ستاره از روی قدر ظاهری با استفاده از قانون Pogson اگر فاصله مشخص باشد، به دست می‌آید. هم‌چنین طیف آن‌ها ما را قادر می‌سازد که به آن‌ها یک طبقه‌ی تابندگی نسبت دهیم. تابندگی ستاره از $۱۰^{-۴} L_\odot$ تا $۱۰^{+۶} L_\odot$ تغییر می‌کند.

تابندگی خورشید برحسب یکای جرم برابر است با: $\frac{۳/۸۳\times۱۰^{۲۶}\,w}{۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}\,kg} \simeq ۲\times۱۰^{-۴}\,\frac{w}{kg}$

که این مقدار در برابر توان برحسب یکای جرم یک انسان که تقریباً برابر $۱\frac{w}{kg}$ است، بسیار کوچک است.

### ۲ـ دما

در نظر داشته باشید که ستارگان تقریب خوبی از جسم سیاه هستند. اخترفیزیکدانان دمایی به‌نام دمای مؤثر (effective temperature) تعریف می‌کنند، که دمای یک جسم سیاه است، که به اندازه‌ی یک ستاره باشد و همان توان کل را گسیل کند. اگر جسم را کروی در نظر بگیریم:

$$L = ۴\pi R^۲ \sigma T_{eff}^۴$$

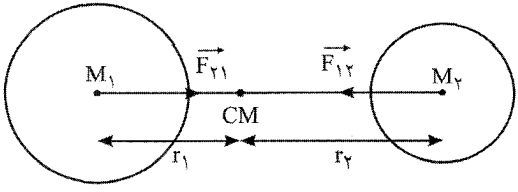
در نظر داشته باشید که این دمای سطح ستاره است در ناحیه‌ی شید سپهر. $T_{eff}$ ستاره‌ها از ستارگان بسیار سرد، در حدود ۲۰۰۰k تا ستارگان بسیار داغ ۱۰۰۰۰۰k تغییر می‌کند. نوع طیفی ستاره می‌تواند اطلاعاتی در مورد دمای ستاره به ما بدهد. هم‌چنین ما اگر تابندگی و شعاع ستاره را داشته باشیم، با استفاده از قانون استفان می‌توانیم دمای آن را تعیین کنیم.

### ۳ـ شعاع

خورشید تنها ستاره‌ای است که قطر زاویه‌ای آن (angular diameter) قابل دیدن است (از زمین). اگر ما فاصله‌ی متوسط زمین تا خورشید را بدانیم، با استفاده از مثلثات می‌توانیم شعاع خورشید را محاسبه کنیم. قطر زاویه‌ای دیگر ستارگان به‌طور مستقیم از روش تداخل‌سنجی (interferometry) به دست می‌آید. به‌صورت دیگر، اگر $L$ و $T_{eff}$ را بدانیم، شعاع ستاره از رابطه‌ی $R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$ به دست می‌آید. اندازه‌های ستاره‌ای از $0/01R_\odot$ تا $1000R_\odot$ تغییر می‌کند.

### ۴ـ جرم

ستارگان دوتایی این امکان را برای اخترفیزیکدانان فراهم می‌کنند تا جرم هر ستاره را اندازه بگیرند. هر ستاره در یک سیستم دوتایی به دور مرکز جرم (center of mass) دستگاه می‌چرخد. در نظر بگیرید که دو ستاره با جرم‌های $M_1$ و $M_2$ در یک مدار دایره‌ای با شعاع‌های $r_1$ و $r_2$ به دور مرکز جرم CM می‌چرخند.




$$F_{21} = M_1 a_1 = \frac{M_1 v_1^2}{r_1} = \frac{M_1}{r_1}\left(\frac{2\pi r_1}{T}\right)^2 = \frac{4\pi^2 r_1}{T^2} M_1$$

$$F_{12} = M_2 a_2 = \frac{M_2 v_2^2}{r_2} = \frac{M_2}{r_2}\left(\frac{2\pi r_2}{T}\right)^2 = \frac{4\pi^2 r_2}{T^2} M_2$$

$$F_{12} = F_{21} \Rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

$$M_1 r_1 = M_2 r_2$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{GM_1M_2}{(r_1 + r_2)^2} = M_1 r_1 \omega^2 = M_2 r_2 \omega^2$$

$$r_1 + r_2 = r_1 + \frac{M_1}{M_2} r_1 = r_1\left(1 + \frac{M_1}{M_2}\right) = r_1\left(\frac{M_1 + M_2}{M_2}\right) \rightarrow r_1 = \frac{M_2(r_1 + r_2)}{M_1 + M_2}$$

$$\frac{GM_1M_2}{(r_1 + r_2)^2} = M_1 M_2 \frac{r_1 + r_2}{M_1 + M_2}\omega^2$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \frac{T^2}{4\pi^2 (r_1 + r_2)^3} = \frac{1}{G(M_1 + M_2)} = \text{cte}$$

این قانون سوم کپلر برای دو جرم می‌باشد، بنابراین اگر T و $r_1 + r_2$ را بدانیم، می‌توانیم $M_1 + M_2$ را محاسبه کرده، با مشاهده‌ی دقیق مرکز جرم، جرم هر یک را محاسبه کنیم.

## دوتایی‌های طیفی (Spectroscopic binaries)

ستارگان دوتایی وجود دارند، که در آن‌ها حرکت مداری به دور مرکز جرم به‌صورت یک انتقال دوپلری در طیف هر ستاره رصد می‌شود. در یک دوره‌ی زمانی، خطوط طیفی هر ستاره به جلو و عقب انتقال پیدا می‌کند. اگر در زمانی ستاره به سمت زمین بیاید، طیف آن به سمت آبی می‌رود و زمانی دیگر ستاره از زمین دور می‌شود و طیف آن انتقال به سرخ پیدا می‌کند. با استفاده از رابطه‌ی دوپلری داریم:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

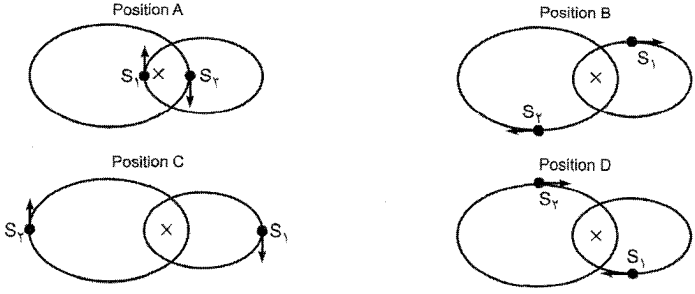
جابه‌جایی خطوط طیفی به ما امکان می‌دهد که سرعت شعاعی (radial velocity) را محاسبه کنیم. منحنی سرعت شعاعی با توجه به زمان قابل رسم است. سرعت‌های مداری هر ستاره $v_1$ و $v_2$ قابل محاسبه می‌باشد و هم‌چنین با توجه به منحنی سرعت شعاعی زمان تناوب مدار را محاسبه می‌کنیم. اگر مدار دایره‌ای باشد.

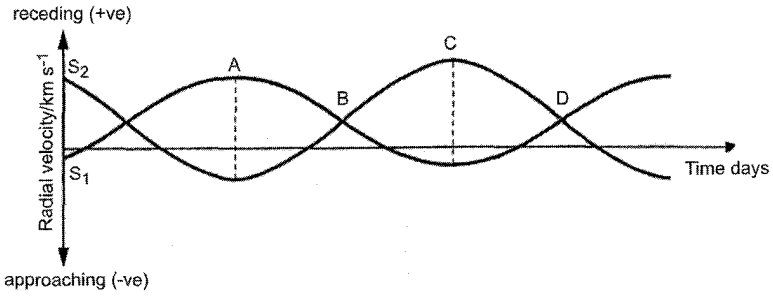
$$r_1 = \frac{v_1 T}{2\pi} \qquad r_2 = \frac{v_2 T}{2\pi}$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

اگر جدایی زاویه‌ای (angular separation) ستارگان را بدانیم و فاصله‌شان از زمین را، آن‌گاه می‌توانیم $r_1 + r_2$ را محاسبه کنیم.

با استفاده از قانون سوم کپلر می‌توانیم $M_1 + M_2$ را محاسبه کرده و چون نسبت و جمع جرم‌ها را می‌دانیم، جرم هر ستاره قابل محاسبه می‌باشد.



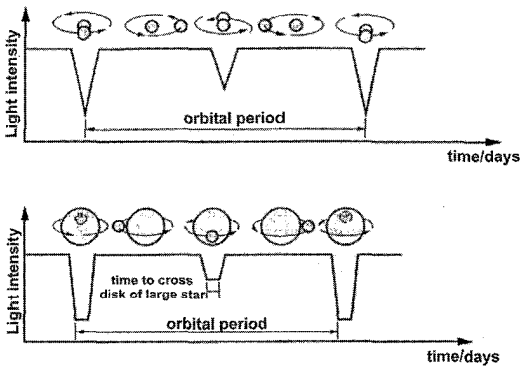



## دوتایی‌های گرفتی (Eclipsing binaries)

در این دوتایی‌ها، ستارگان به‌طور متناوب از جلوی یکدیگر عبور می‌کنند. وقتی ستاره‌ای جلوی نور ستاره‌ی دیگری را می‌گیرد، روشنایی ظاهری تصویر آن دوتایی کم می‌شود. با استفاده از نورسنج (photometer)، اخترفیزیکدانان می‌توانند تغییرات شدت نور را نسبت به زمان اندازه‌گیری کنند.

زمان بین دو گرفتگی (eclipse) می‌تواند اطلاعاتی درباره‌ی زمان تناوب مداری به ما بدهد و این مرتبط است با جدایی بین ستارگان که با قانون سوم کپلر پیوند دارد. اگر این دوتایی‌ها از نوع طیفی آن نیز باشند، سرعت هر ستاره می‌تواند محاسبه شود و از آن‌جا می‌توانیم جرم هر ستاره را نیز تعیین کنیم.

زمان گرفتگی به اندازه و سرعت ستارگان بستگی دارد. این رصدها می‌توانند برای تخمین قطر ستاره با استفاده از روابط هندسی و شکل منحنی نوری، ما را یاری کنند. هم‌چنین با رصد دقیق این‌که چگونه نور از ستاره گرفته شده قطع می‌شود، می‌توانیم اطلاعاتی درباره‌ی جوّ ستارگان، دما و فشار آن‌ها به دست آوریم.




## ترکیب شیمیایی و سن ستارگان

بیش‌تر ستارگان دارای ترکیب شیمیایی یکسان هستند، از نظر جرم ۷۲ درصد هیدروژن، ۲۵ درصد هلیم و دیگر عناصر ۳ درصد جرم را تشکیل می‌دهند، که فراوانی نسبی آن‌ها تقریباً یکسان است. این

عناصر عبارتند از Ca ، Al ، S ، Mg ، Fe ، Si ، N ، C ، O ، Na و Ni که اخترفیزیکدانان با تسامح آن‌ها را فلز می‌نامند، در حالی که بسیاری از آن‌ها فلز نیستند. اخترفیزیکدانان ستارگان را به دو جمعیت (population) عمده تقسیم می‌کنند.

## جمعیت I ستارگان

ستارگانی مانند خورشید می‌باشند که ترکیب عنصری آن‌ها به خوبی تعریف شده است و با شکل طبقه‌بندی طیفی تطابق دارند. گرم‌ترین آن‌ها آبی هستند و به‌طور عمومی در بازوی مارپیچی کهکشان‌ها یافت می‌شوند. این‌ها با ابرهای گازی بین ستاره‌ای متناظر هستند. این ستارگان نسبت به سن کهکشان‌هایشان جوان‌تر هستند و در محیط بین ستاره‌ای تشکیل می‌شوند که قبلاً با عناصر سنگین‌تر غنی شده‌اند، که این عناصر سنگین از نسل‌های پیشین ستارگان، در درون ستارگان در فرآیند هسته‌ای ایجاد شده‌اند.

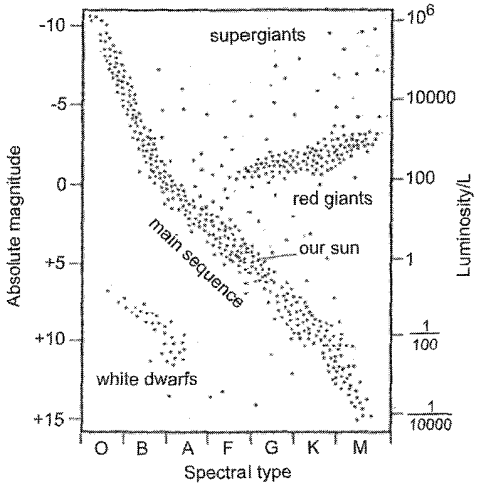
## جمعیت II ستارگان

این ستارگان از نظر فلزی فقیر هستند و درخشنده‌ترین آن‌ها سرخ می‌باشند. این‌ها تمایل دارند در خارج کهکشان‌های مارپیچی در سحابی‌های کروی، یا در عرض‌های بالای قرص کهکشانی یافت شوند. این‌ها ستارگان پیری می‌باشند و درست بلافاصله از تشکیل کهکشان، قبل از این‌که عناصر سنگین سنتز (synthesized) شده به وسیله‌ی نتیجه‌ی نسل‌های ستاره‌ای تشکیل شوند، ایجاد شده‌اند. به همین دلیل این‌ها در زمینه‌ی H و He غنی می‌باشند، ولی فقط نسبت کوچکی از عناصر سنگین‌تر را دارا می‌باشند.

این ممکن نیست که طول زندگی ستارگان را با استفاده از رصد دنبال کنیم، حتی برای ستارگان با عمر کوتاه، چون عمر این ستارگان نیز چندین هزار سال است و در مقایسه با ستارگان با عمر دراز که به صدها میلیون سال می‌رسد. برای همین از روش‌های غیرمستقیم که به مدل‌های نظری تکیه دارد، استفاده می‌کنیم.

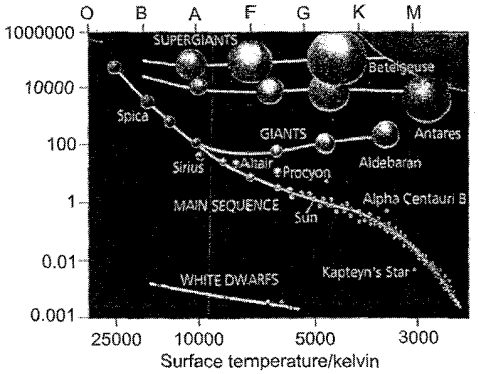
## نمودار هرتسشپرونگ ـ راسل (The Hertzsprung – Russel Diagram)

اگر ما نموداری را رسم کنیم که قدر را در برابر نوع طیفی برای تمامی ستارگانی که می‌توان این کمیت‌ها را برای آن‌ها اندازه گرفت نشان دهد، ما طبق شکل، نموداری داریم که به نمودار HRD مشهور است.




چون قدر، اندازه‌ای از تابندگی ستاره است و نوع طیفی نشان می‌دهد که ستاره چه‌قدر داغ است، HRD رسم تابندگی در برابر دما می‌باشد. با توجه به این‌که ستارگان تقریب خوبی از اجسام سیاه می‌باشند، بنابراین رنگ مرتبط با دما می‌باشد. شکل زیر، نمودار HRD به‌صورت رنگ ستاره به عنوان تابعی از دمای سطح و تابندگی آن را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های زیادی درباره‌ی ستارگان، به ویژه این‌که چگونه در زمان تکامل می‌یابند، از نمودار HRD استنباط می‌شود.



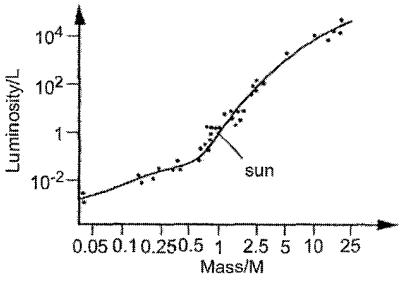

اگر به نمودار نگاه کنید، می‌بینید که ستارگان به‌طور تصادفی توزیع نشده‌اند، بلکه به قسمت‌های مجزایی تقسیم شده‌اند. هم‌چنین محور دما به‌صورت افزایش از راست به چپ، مقیاس‌بندی شده است.

نواری که از قسمت بالای چپ به قسمت پایین راست کشیده شده است، رشته‌ی اصلی (main sequence) را نشان می‌دهد و این‌ها بیش‌ترین ستارگانی هستند که ما در شب می‌بینیم. در قسمت بالای ستارگان رشته‌ی اصلی، ستارگان آبی تابنده‌ی گرم هستند و در پایین آن، ستارگان کم‌نور، سرد و قرمزگون. هر ستاره‌ای که تابندگی و دمایش در این نوار باشد، «ستاره‌ی رشته اصلی» نامیده می‌شود.

در قسمت بالای راست HRD ستارگانی قرار دارند که هم سرد و هم تابنده هستند. این‌ها غول‌های قرمز می‌باشند (red giants)، که به علت اندازه‌ی بزرگشان تابنده بوده، هر چند دمای سطح‌شان نسبتاً پایین می‌باشد؛ در حدود ۳۰۰۰–۴۰۰۰k. پخش ستارگان در قسمت بالای راست کناری به‌صورتی است که آن‌ها بزرگ‌تر و تابنده‌تر می‌باشند و ابرغول (super giants) نام دارند و این ستارگان دارای قطر بزرگ و در نتیجه تابندگی بالا، ولی دارای دمای سطحی کمی می‌باشند. آخرین گروه در قسمت کناری پایین چپ HRD قرار دارند، که داغ و کم‌نور می‌باشند. به این ستارگان، کوتوله‌های سفید (white dwarfs) می‌گویند. این‌ها بسیار کوچک بوده و در اندازه‌ی سیارگان می‌باشند. با این‌که دمای بالایی دارند، این‌ها بسیار کم‌نورند، به علت اندازه‌ی کوچکشان و بنابراین سطح کوچک تابنده‌شان.

نمودار HRD به ما می‌گوید که در واقع چندین نوع ستاره وجود دارد. ستارگان بهنجار (normal) مانند خورشید که در راستای رشته‌ی اصلی هستند و ستارگان غیرمعمول (unusual)، مانند غول‌ها و کوتوله‌های سفید، که رابطه‌ی بین تابندگی و دمای آن‌ها متفاوت است. در آسمان شب در حدود ۹۰ درصد ستارگان به رشته‌ی اصلی تعلق دارند، بقیه‌ی آن‌ها بین غول‌های سرخ و کوتوله‌های سفید و برخی گونه‌های نامعمول تقسیم می‌شوند.

## رابطه‌ی جرم ـ تابندگی

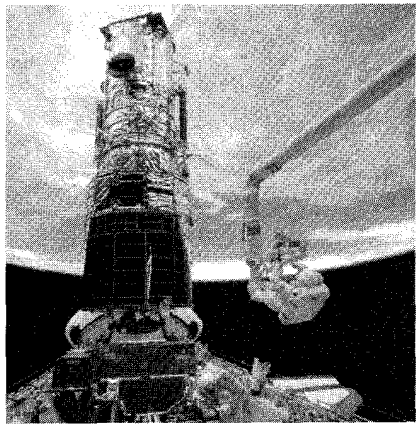



سال‌ها مشاهده‌ی دقیق مدار ستارگان دوتایی که فاصله‌ی آن‌ها را می‌دانیم، به اخترفیزیکدانان کمک کرده است که جرم ستارگان رشته‌ی اصلی را محاسبه کنند. اگر به نمودار دقت کنید، در آن تابندگی در برابر جرم رسم شده است.

در این‌جا رابطه‌ی مشخصی بین جرم و تابندگی ستارگان رشته‌ی اصلی را می‌بینید، که در آن هرچه ستاره پرجرم‌تر باشد، تابنده‌تر نیز می‌باشد. به این همبستگی، رابطه‌ی جرم ـ تابندگی می‌گویند. این نشان می‌دهد که در نمودار HR، ستارگان رشته‌ی اصلی همین‌طور که جرم‌شان ازدیاد می‌یابد، تابندگی و دمای سطح‌شان بیش‌تر می‌شود.

ستارگان گرم آبی در سمت چپ بالای رشته‌ی اصلی، پرجرم‌ترین ستارگان هستند و ستارگان سردتر، قرمزگون در قسمت پایین راست کم‌جرم‌ترین. بنابراین ستارگانی که تابندگی آن‌ها در حالت میانه می‌باشد، دارای جرم بینابین نیز می‌باشند.

# ۵



## تشکیل ستارگان و محیط بین ستاره‌ای

### محیط بین ستاره‌ای (ISM)

محیط بین ستاره‌ای از مواد زیر تشکیل شده است:

۱- ابرهای گازی بین ستاره‌ای در حالت‌های هیدروژن خنثی و هیدروژن یونیده شده.

۲- یک محیط بین ابری گرم از گاز هیدروژن نازک، که برخی از آن‌ها دمای بالایی دارند.

۳- ابرهای مولکولی بزرگ آلی و غیرآلی

۴- غبار (dust) بین ستاره‌ای

ISM یک مخلوط پیچیده (complex) اتم‌ها، مولکول‌ها و غبار می‌باشد.

### گاز بین ستاره‌ای

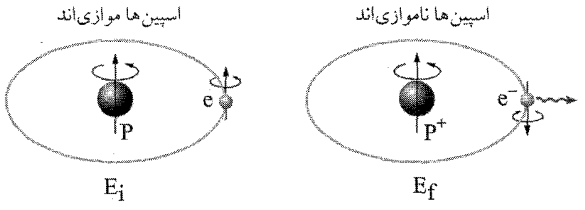
گازهای بین ستاره‌ای به‌طور عمده به شکل اتم‌ها، مولکول‌ها و یون‌ها می‌باشد. ناحیه‌ی هیدروژن یونیده شده، ناحیه‌ی HII نامیده می‌شود و ناحیه‌ی هیدروژن خنثی، ناحیه‌ی HI نام دارد.

از نظر جرمی، ناحیه‌ی HII کم‌تر از ۰/۱ کل جرم ISM را تشکیل می‌دهد. این نواحی در طول موج‌های رادیویی فلورسانس هستند و دارای طیفی پیوسته که به اخترشناسان رادیویی اجازه می‌دهند تا از اندازه‌شان نقشه‌برداری کنند و بگویند چه مقدار هیدروژن یونیده در آن‌ها وجود دارد.

ناحیه‌ی HI بسیار از ناحیه‌ی HII سردتر است و دمای آن در حدود ۱۰۰k–۵۰ می‌باشد و تقریباً تمام اتم‌های هیدروژن در حالت پایه می‌باشند. همان‌طور که این‌ها در محیط ناحیه‌ی HII می‌باشند، اتم‌های هیدروژن خنثی با یکدیگر به ابرهای کوچک‌تری با یکدیگر دسته‌بندی می‌شوند، که قطر آن‌ها به چند pc می‌رسد.

HI بیش از HII در ISM وجود دارد، در واقع ۴۰ درصد کل جرم ISM تشکیل شده از ناحیه‌ی HI می‌باشد. چون دمای گاز HI پایین است و الکترون‌های آن در حالت پایه هستند، تابش را با فلورسانس گسیل نمی‌کنند و اتم‌های آن انرژی جنبشی کافی برای انگیخته شدن به علت برخورد را ندارند. با این حال، روشی وجود دارد که این‌ها به وسیله‌ی طول موج‌های رادیویی آشکار شوند.

اتم هیدروژن یک الکترون دارد که در مداری به دور هسته که فقط یک پروتون است، می‌چرخد. الکترون دارای مشخصه‌ای به نام اسپین است، که به‌طور ساده اندازه‌ای از حرکت دورانی آن به دور محور خودش می‌باشد. پروتون نیز دارای اسپین (spin) می‌باشد. اسپین الکترون و پروتون می‌تواند در یک جهت یا در خلاف جهت هم باشد. هر حالت (state) دارای انرژی متفاوتی از دیگری می‌باشد. وقتی الکترون از حالتی که اسپین آن هم‌جهت با اسپین پروتون است (انرژی بالاتر) به حالتی که اسپین آن خلاف جهت پروتون است (انرژی پایین‌تر) تغییر موضع (flip) می‌دهد، یک فوتون رادیویی گسیل می‌شود، که طول موج آن ۲۱cm است. احتمال این‌که این پدیده خودبه‌خود ایجاد شود، بسیار کوچک است، در حدود متوسط $10^7$ سال یک‌بار اما چون تعداد زیادی اتم هیدروژن در فضای بین ستاره وجود دارد، این کافی است که این پدیده در گاز بین ستاره‌ای قابل آشکارسازی است.




$$E_i \rightarrow E_f + h\nu$$

## گاز بین ابری

بین ناحیه‌ی HII و HI گاز بین ستاره‌ای گرم و رقیقی وجود دارد که از هیدروژن خنثی و یونیده تشکیل شده است. این گاز ۲۰ درصد (از نظر جرم) ISM را تشکیل می‌دهد.

## ابرهای مولکولی

با استفاده از مشاهده‌های نوری و رادیویی، اخترشناسان گونه‌هایی از مولکول‌های آلی و غیرآلی را در فضا یافته‌اند. گازهای هیدروژن مولکولی با یکدیگر در دسته‌هایی قرار می‌گیرند که اندازه‌ی آن‌ها از اندازه‌ی کوچک تا ابرهای مولکولی غول‌آسا تا قطر ۱۰ پارسک می‌باشد. این‌ها در حدود ۴۰ درصد ISM را تشکیل می‌دهند.

## غبار بین ستاره‌ای

غبار بین ستاره‌ای بسیار کم‌تر از گاز بین ستاره‌ای می‌باشد و حدود ۱ درصد جرم بین ستاره‌ای را تشکیل می‌دهد. غبار بین ستاره‌ای به وسیله‌ی پدیده‌های خاموشی (extinction)، سرخ‌شدگی (reddening)، قطبی شدن (polarization) و گسیل زیر قرمز (infrared emission) آشکار می‌شود.

## خاموشی

خاموشی کم‌نور شدن نور ستاره وقتی از میان غبار می‌گذرد، می‌باشد. ذره‌های غبار با جذب نور یا با پراکندگی آن، عامل این پدیده می‌شوند، بنابراین نور کمی از غبار دریافت می‌شود تا آن مقداری که به میان آن می‌رود. این پدیده به طول موج نور بستگی دارد. رنگ آبی بیش از رنگ قرمز پراکنده می‌شود، بنابراین رنگ قرمز در غبار بیش‌تر نفوذ می‌کند و از ابر غباری بیش‌تر طول موج‌های قرمز به چشم شما می‌رسد، بنابراین ستاره قرمز به نظر می‌آید که به آن «اثر قرمزشدگی» می‌گویند.

نور ستاره وقتی که از میان غبارهایی می‌گذرد که در جهت‌گیری خاصی هستند، **قطبی** می‌شود. جهت غبارها در جهت میدان مغناطیسی می‌باشد. آشکارسازی نور قطبی شده دلیلی است بر میدان مغناطیسی بین ستاره‌ای. با استفاده از قطبش‌سنج‌ها (polarimeters) درمی‌یابیم که شدت میدان مغناطیسی تا حد $10^{-10}$ T می‌باشد.

دانه‌های غبارهای بین ستاره‌ای تابش زیر قرمز گسیل می‌کند، چون مانند یک جسم سیاه تابش‌کننده عمل می‌کند. هر دانه از ستاره نزدیک خود نور جذب می‌کند و آن را گرم کرده و به حدی می‌رساند که همان‌قدر که انرژی را در ثانیه جذب می‌کند، در طول موج زیر قرمز گسیل کند، سپس به تعادل گرمایی می‌رسد.

غبار بین ستاره‌ای دانه‌های خرد چند میکرومتر را دارا می‌باشند که از سیلیکات‌ها (silicates)، گرافیت و آهن تشکیل شده است. بیش‌تر آن‌ها از بیرون ریختن ماده از ستارگان سرد ابرغول و باقی‌مانده‌های حادثه‌های اختری و نواختری سرچشمه می‌گیرند.

## تولد ستاره (Star birth)

ستارگان در محیط بین ستاره‌ای به علت رُمبش گرانشی (gravitational collapse) گازو غبار در ابرهای مولکولی بین ستاره‌ای که جرمی چندین برابر بزرگ‌تر از یک ستاره دارد، ایجاد می‌شود.

مفهوم رمبش این است که ابرها تحت اثر گرانش به اجسام کوچک‌تری فشرده می‌شوند.

## ناپایداری گرانشی (Gravitational instability)

پرسش این است که چه عاملی باعث می‌شود ابرها ناپایدار شده و درجه‌ی اول فشرده شوند. این پرسش را اخترفیزیکدان انگلیسی Sir James Jeans بدین صورت مطرح کرد که جرم گاز چه‌قدر باید باشد تا اطمینان حاصل کنیم که تحت تأثیر گرانش خودش رمبیده می‌شود.

برای ساده کردن بحث، یک جرم کروی منزوی از گاز با چگالی یکنواخت را در نظر می‌گیریم. عوامل اصلی عبارتند از جرم، چگالی و دمای گاز که تعیین می‌کنند آیا ابر متراکم می‌شود یا خیر. شدت کشش گرانشی بر روی ذره‌ی گاز به کل جرم ابر بستگی دارد. بزرگی ابر به علت قانون عکس مجذور فاصله مهم می‌باشد و هرچه چگالی ابر بیش‌تر باشد، کشش بین ذرات بیش‌تر است.

حرکت ذرات گاز تصادفی (random) می‌باشد. انرژی جنبشی به وسیله‌ی دمای گاز تعیین می‌شود و باعث پراکنده شدن ذرات در ابر می‌شود و در برابر تمایل ذرات برای جذب یکدیگر وجود دارد.

در این حالت باید یک مقدار بحرانی برای جرم گاز وجود داشته باشد، که مقدار بالای گرانش آن بر حرکت گرمایی ذرات غلبه کند و ابر متراکم شود. این مقدار بحرانی را جرم جینز (Jeans mass) می‌گویند.

M جرم کروی گاز، $\rho$ چگالی گاز و R شعاع گاز می‌باشد. یک مولکول گاز m بر روی محیط این ابر می‌باشد و به علت حرکت گرمایی دارای انرژی جهشی $\frac{1}{2}mv^2$ می‌باشد.

مولکول انرژی پتانسیل گرانشی $\frac{-GMm}{R}$ را دارا می‌باشد، بنابراین داریم:

$$\frac{GMm}{R} > \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{2GM}{R} > v^2$$

$$K_{av} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}KT$$

K ثابت بولتسمان می‌باشد.

$$v^2 = \frac{3KT}{m}$$

$$\frac{2GM}{R} > \frac{3KT}{m}$$

$$\frac{2GMm}{3KT} > R$$

$$\left[\frac{2GMm}{3KT}\right]^3 > R^3$$

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \qquad R^3 = \frac{3M}{4\pi\rho}$$

$$\left(\frac{2Gm}{3KT}\right)^3 M^3 > \frac{3M}{4\pi\rho}$$

$$M > \frac{۹}{۴(۲\pi\rho)^{\frac{۱}{۲}}}\left(\frac{KT}{Gm}\right)^{\frac{۳}{۲}}$$

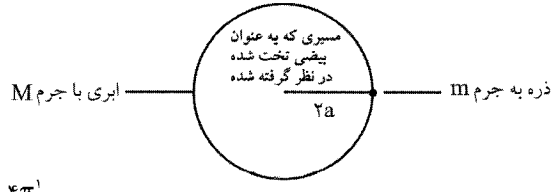
اگر جرم ابر از این مقدار کم‌تر باشد $M_j = \frac{۹}{۴(۲\pi\rho)^{\frac{۱}{۲}}}\left(\frac{KT}{Gm}\right)^{\frac{۳}{۲}}$ حرکت حرارتی مولکول بر گرانش غلبه می‌کند و ابر پراکنده می‌شود.

در واقع وضعیت از پیچیده‌تر است. ابرهای گازی دارای شکل غیرمنظم می‌باشند. ابرهای مولکولی دارای تکانه‌ی زاویه‌ای هستند، که این نیز نقش مهمی در تراکم آن‌ها بازی می‌کند. مشاهدات نشان می‌دهد درون ابرهای بین‌ستاره‌ای متلاطم می‌باشد و گاز دارای حرکت یکنواخت نمی‌باشد.

## رمبش گرانشی

چه مدت طول می‌کشد تا یک ابر متراکم شده، تشکیل یک ستاره را بدهد. ما فرض می‌کنیم حداقل زمان برای این‌که این پدیده رخ بدهد، وقتی است که ابر فقط تحت تأثیر گرانش و بدون در نظر گرفتن فشار درونی که در برابر رمبش مقاومت می‌کند. این زمان، زمان رمبش سقوط آزاد (free fall collapse time) نامیده می‌شود. این زمان فقط به چگالی اولیه بستگی دارد و نه به جرم ابر.

ابر گازی و غباری کروی به شعاع r را در نظر بگیرید. جرم m روی لبه‌ی ابر گازی می‌باشد. گرانش طوری اثر می‌کند که انگار جرم در مرکز کره متمرکز شده است. در نظر داشته باشید کل جرم ابر M و چگالی اولیه $\rho_۰$ می‌باشد. ذره به سمت مرکز کره در راستای شعاع سقوط می‌کند. ما از قانون سوم کپلر برای توصیف این ذره استفاده می‌کنیم. اگر ما در نظر بگیریم که مسیر ذره، مداری است از بیضی که آن‌قدر تخت شده که به‌صورت یک خط راست درآمده، به‌طوری که دارای کانونی است در انتهای مقابل نیم‌قطر بزرگ‌تر ۲a.




$$\frac{T^۲}{a^۳} = \frac{۴\pi^۲}{G(M+m)} \simeq \frac{۴\pi^۲}{GM} \qquad M >> m$$

$$M = \frac{۴}{۳}\pi r^۳\rho_۰ = \frac{۴}{۳}\pi(۲a)^۳\rho_۰ = \frac{۳۲\pi a^۳}{۳}\rho_۰$$

$$\frac{T^۲}{a^۳} = \frac{۴\pi^۲}{G\left[\left(\frac{۳۲\pi}{۳}\right)a^۳\rho_۰\right]}$$

$$T=\left[\frac{۴\pi}{(\frac{۳۲}{۳})G\rho_{۰}}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

در این‌جا T کل زمان تناوب مداری است، یا زمان رفت و برگشت، در حالی که زمان سقوط آزاد نصف این زمان می‌باشد، یعنی زمانی که فاصله‌ی r طی می‌شود.

$$t_{ff}=\frac{T}{۲}=\left[\frac{\pi}{(\frac{۳۲}{۳})G\rho_{۰}}\right]^{\frac{۱}{۲}}=\left[\frac{۳\pi}{۳۲G\rho_{۰}}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

$$t_{ff}=\frac{۶/۶۵\times۱۰^{۴}}{\rho_{۰}^{\frac{۱}{۲}}}\ \text{ثانیه}\ s=\frac{۲/۱۱\times۱۰^{-۳}}{\rho_{۰}^{\frac{۱}{۲}}}\ \text{سال}\ y$$

چه مدت طول می‌کشد، برای این‌که ابر مولکولی رمبیده شود. یک ابر گازی غول‌آسا که دارای تعداد $n=۱۰^{۱۲}\frac{\text{ذره}}{m^{۳}}$ ذره می‌باشد را در نظر بگیرید.

جرم هیدروژن $m_p=۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}kg$ می‌باشد.

$$\rho_{۰}=nm_p=۱۰^{۱۲}\times۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}\simeq۲\times۱۰^{-۱۵}\frac{kg}{m^{۳}}$$

$$t_{ff}=\frac{۲/۱۱\times۱۰^{-۳}}{\rho_{۰}^{\frac{۱}{۲}}}=\frac{۲/۱۱\times۱۰^{-۳}}{(۲\times۱۰^{-۱۵})^{\frac{۱}{۲}}}=۵\times۱۰^{۴}\ \text{سال}$$

این زمان نسبت به عمر متوسط یک ستاره بسیار کوتاه می‌باشد.

پس آن‌گاه که ابر گازی جرم کافی برای غلبه بر فشار به سمت بیرون داشته باشد، شروع به منقبض شدن می‌کند (تحت اثر گرانش). گرانش تنها نیرویی است که بر ذرات گاز وارد می‌شود و آن‌ها در سقوط آزاد رمبیده می‌شوند. برخی ذرات غبار با یکدیگر برخورد کرده و به سمت مرکز سقوط می‌کنند، که این حالت انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی تصادفی جنبشی یا انرژی گرمایی ذرات تبدیل می‌شود.

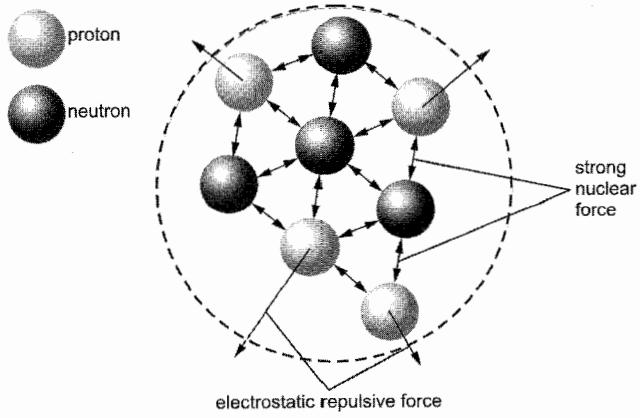
تا زمانی که ابرها در برابر تابش زیر قرمز شفافند، انرژی گرمایی به فضا تابش می‌کنند و ابر به‌طور نسبی سرد می‌ماند و فشار درونی آن پایین است. ابر رمبیده در این مرحله پیش‌ستاره (protostar) نامیده می‌شود.

وقتی که سقوط آزاد رمبشی ادامه می‌یابد، چگالی ابر افزایش می‌یابد و ابر کدر (opaque) می‌شود، بنابراین انرژی گرمایی در آن به دام می‌افتد و ابر شروع به گرم شدن می‌کند. این باعث افزایش فشار

درونی آن می‌شود. این مرحله (stage) مهمی در تشکیل ستاره است. دما و چگالی ابر به سطحی رسیده است که نیروی مربوط به فشار درونی در برابر رُمش گرانشی مقاومت می‌کند و گرمای فوق‌العاده زیاد تولید شده باعث می‌شود، پیش‌ستاره تابنده شود. این مرحله، ستاره‌ی پیش‌رشته اصلی (pre-main sequence star) نامیده می‌شود.

ستاره‌های پیش‌رشته‌ی اصلی، نور و گرما را بسیار ضعیف تابش می‌کنند. در واقع فرآیند تولد ستاره به‌طور مستقیم از دید ما پنهان است. اما این مراحل با استفاده از مشاهدات زیر قرمز و رادیویی، قابل شناسایی می‌باشد.

# ۶




## تولید انرژی در ستارگان

در قرن نوزدهم، لرد کلوین و هرمان هلمهولتز این ایده را مطرح کردند که وزن فوق‌العاده‌ی لایه‌های بیرونی خورشید باعث می‌شود که خورشید به تدریج منقبض شود و به این علت، گازهای درون آن فشرده شوند. وقتی گاز فشرده می‌شود (متراکم می‌شود) دما افزایش می‌یابد. این اثر را زمانی می‌بینید که تلمبه‌ی دوچرخه وقتی تایر آن را باد می‌کنیم، گرم می‌شود. کلوین و هلمهولتز این ایده را بیان نمودند که انقباض گرانشی موجب می‌شود گازهای خورشید آن‌قدر گرم شوند که انرژی گرمایی را به فضا تابش کنند. این فرآیند، انقباض کلوین ـ هلمهولتز (Kelvin – Helmholtz contraction) نامیده می‌شود. این اثر در واقع در فازهای ستاره‌ی اولیه و ستاره‌ی پیش‌رشته اصلی رخ می‌دهد. این امر باعث می‌شود که گازها به‌طور ضعیف بدرخشند. محاسبات نشان می‌دهد که این پدیده نمی‌تواند عامل عمده‌ی تولید انرژی در ستاره باشد.

## رابطه‌ی جرم و انرژی

رابطه‌ی جرم و انرژی که در نسبیت خاص اینشتین پشنهاد شده، به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

طبق این رابطه، ۱ کیلوگرم ماده می‌تواند به اندازه‌ی $(1\text{kg})(3\times10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 9\times10^{16}\,\text{J}$ انرژی تولید کند، که تقریباً برابر است با انرژی تولید شده توسط یک ایستگاه قدرت ۲۰۰MW که برای ۱۴ سال کار کند.

انرژی هسته‌ای منبع عمده‌ی انرژی ستاره‌ای می‌باشد. هسته ۹۹/۹۸ درصد جرم اتمی را تشکیل می‌دهد، ولی $10^{-12}$ حجم اتم را تشکیل می‌دهد.

## انرژی بستگی هسته‌ای (Nuclear binding energy)

اگر جرم اجزای هسته (پروتون‌ها و نوترون‌ها) را با یکدیگر جمع کنیم، متوجه می‌شویم که این مقدار بیش از جرم خود هسته می‌باشد. به این تفاوت، جرم کاهیده (mass defect) می‌گویند؛ زیرا برای هسته‌هایی که بیش از یک پروتون دارند، رانش کولنی الکترواستاتیکی باید موجب شود که هسته متلاشی شود. برای این‌که هسته پایدار بماند، یک نیروی قوی هسته‌ای (strong nuclear force) بین هستک‌ها (nucleons) وجود دارد، که این نیرو بردی کوتاه (short range) داشته و از نوع ربایش بوده و بر رانش کولنی بین پروتون‌ها غلبه می‌کند.

حال در نظر بگیرید که N نوترون و Z پروتون داریم (در کنار یکدیگر)، یک افزایش در انرژی پتانسیل الکتریکی داریم که موجب نیروهای الکترواستاتیکی بین پروتون‌هاست و باعث می‌شود پروتون‌ها از یکدیگر دور شوند، اما یک کاهش انرژی پتانسیل به علت نیروی قوی هسته‌ای داریم که موجب ربایش هستک‌ها به یکدیگر می‌شود. این کاهش انرژی پتانسیل، انرژی بستگی هسته‌ای (nuclear binding energy) نامیده می‌شود. طبق رابطه‌ی جرم ـ انرژی، این کاهش انرژی معادل کاهش جرم است. اگر این انرژی هسته را پایدار نگه می‌دارد، رها شدن آن موجب منبعی از انرژی است.

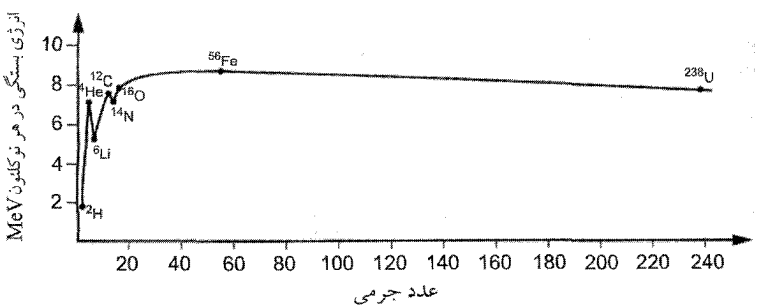
**مثال:** ${}^{4}_{2}He$ دارای دو پروتون و ۲ نوترون است. جرم کاهیده هسته‌ی هلیم ۰/۰۳۰۵u می‌باشد، که $u = ۱/۶۶\times۱۰^{-۲۹}\,kg$ می‌باشد. انرژی بستگی هسته‌ی هلیم را بیابید.

$$\Delta m = ۰/۰۳۰۵\times۱/۶۶\times۱۰^{-۲۹}\,kg$$

$$\Delta E = \Delta mc^{۲} = ۵/۰۶\times۱۰^{-۲۹}\,kg\,(۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\frac{m}{s})^{۲} = ۴/۶\times۱۰^{-۱۲}\,J$$

در نمودار زیر، انرژی بستگی در هر هستک را به عنوان تابعی از عدد جرم اتمی داریم. نمودار نشان می‌دهد که انرژی بستگی هسته‌ای با افزایش نوکلئون‌ها افزایش می‌یابد.

در نمودار، ${}^{۵۶}_{۲۶}Fe$ در ماکزیمم قرار دارد و پایداترین هسته می‌باشد. بعد از آهن، انرژی بستگی در هر نوکلئون به مقدار کمی پایین می‌آید.



در این‌جا رابطه‌ی جرم و انرژی با استفاده از ثابت جرم اتمی (unified atomic mass constant) به دست می‌آید. u به عنوان $\frac{۱}{۱۲}$ جرم اتمی کربن $^{۱۲}_{۶}C$ می‌باشد.

یک مول کربن شامل $۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}$ اتم می‌باشد و جرم آن ۱۲g می‌باشد.

$$\text{جرم یک اتم کربن} = \frac{۱۲}{۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}}\text{gr} = \frac{۱۲}{۶/۰۲\times۱۰^{۲۶}}\text{kg}$$

این برابر با ۱۲u می‌باشد.

$$۱u = \frac{۱۲}{۱۲\times۶/۰۲\times۱۰^{۲۶}}\text{kg} = ۱/۶۶\times۱۰^{-۲۷}\text{kg}$$

با استفاده از رابطه‌ی $\Delta E = \Delta mc^{۲}$

$$۱u = ۱/۶۶\times۱۰^{-۲۷}\times۹\times۱۰^{۱۶} = ۱/۴۹\times۱۰^{-۱۰}\text{J}$$

$$۱\text{MeV} = ۱/۶\times۱۰^{-۱۳}\text{J}$$

$$۱u = \frac{۱/۴۹\times۱۰^{-۱۰}}{۱/۶\times۱۰^{-۱۳}} = ۹۳۱\text{MeV}$$

$$۱u = ۱/۶۶\times۱۰^{-۲۷}\text{kg} = ۹۳۱\text{MeV}$$

## شکافت (Fission) و گداخت (Fusion)

در شکافت، هسته‌ی سنگینی مانند اورانیم به دو قسمت تقسیم می‌شود و به دو هسته‌ی سبک‌تر با جرم تقریبی مساوی تقسیم می‌شود. به همین علت، انرژی بستگی آزاد می‌شود. برآیند شکافت در راکتورهای هسته‌ای و بمب اتمی (هسته‌ای) رخ می‌دهد.

در گداخت هسته‌ای (هم‌جوشی هسته‌ای)، انرژی وقتی آزاد می‌شود که دو هسته‌ی سبک به یکدیگر جوش خورده و هسته‌ی سنگین‌تری ایجاد کنند. در این حالت نیز مقداری جرم از دست می‌رود و انرژی بستگی آزاد می‌شود، این اساس تولید انرژی در ستارگان است. (در بمب هیدروژنی نیز هم‌جوشی هسته‌ای باعث آزاد شدن انرژی بستگی می‌شود). پرسش این است که با توجه به دافعه‌ی کولنی بین پروتون‌ها، چه شرایطی لازم است تا این هم‌جوشی انجام شود. پاسخ این است که انرژی جنبشی هسته‌ها باید بتواند بر دافعه‌ی کولنی غلبه کند، یا به عبارتی دما به حدی برسد تا هسته‌ها بتوانند به یکدیگر وصل شوند.

در فرآیند تشکیل ستاره، انرژی جنبشی برای گداخت از تبدیل انرژی گرانشی به انرژی گرمایی توسط انقباض کلوین ـ هلمهولتز ایجاد می‌شود. دما معیاری است برای انرژی جنبشی میانگین. برای ستارگانی مانند خورشید، دمای ابر منقبض شده در حدود $۸\times۱۰^{۶}\text{K}$ می‌باشد. با توجه به نقش دما در این فرآیند، به آن گداخت گرماهسته‌ای (thermonuclear fusion) نیز می‌گویند.

## سوختن هیدروژن (Hydrogen burning)

این هم‌جوشی (گداخت) هسته‌ی هیدروژن طی واکنش‌های گداخت گرماهسته‌ای است، که باعث آزاد شدن انرژی بستگی می‌شود، که منبع اولیه‌ی تولید انرژی در ستارگان است. این فرآیند را اخترفیزیکدانان «سوختن هیدروژن» می‌نامند.

$4H \rightarrow He +$ انرژی آزاد شده

$H$ جرم ۴ اتم $= 4 \times 1/008u = 4/032u$

$He$ جرم ۱ اتم $= 4/003u$

$\Delta m = 0/029u$

$\Delta E = \Delta mc^2 = 4/33 \times 10^{-12} J$

$1u = 931 MeV$

$\Delta E = 0/029 \times 931 = 27 MeV$

## محاسبه‌ی دمای تقریبی برای هم‌جوشی هسته‌ی هیدروژن

انرژی جنبشی متوسط در دمای $T$ $KE = \frac{3}{2}KT$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$\frac{3}{2}KT \geq \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$T \geq \frac{1}{6K\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

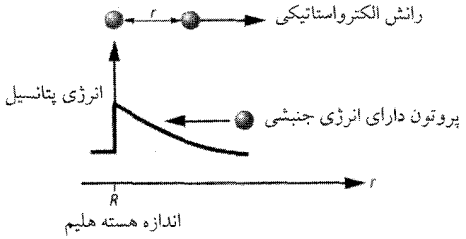
$r = 10^{-15} m$ (مقدار تقریبی اندازه‌ی هسته هلیم)

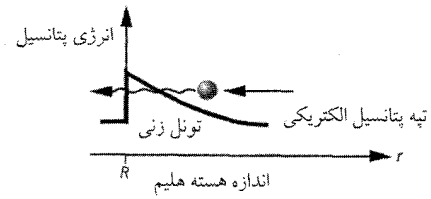
$e = 1/6 \times 10^{-19} C$

$K = 1/38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ $\epsilon_0 = 8/85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

$T \geq 10^{10} K$

دمای واقعی در مرکز خورشید کم‌تر از این مقدار، یعنی $10^7 K$ می‌باشد.



انرژی پتانسیل الکتریکی به عنوان تابعی از فاصله از مرکز هسته‌ی هلیم تغییر می‌کند. برای مقادیر بزرگ r، انرژی پتانسیل مربوط به دافعه‌ی کولنی پروتون‌هاست. در $r = R$ در سطح هسته، انرژی پتانسیل به‌طور قابل توجهی پایین می‌آید، که این به علت تأثیر نیروهای هسته‌ای می‌باشد و در داخل هسته $o < r < R$ مقدار آن ثابت می‌باشد. مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید که پروتون‌ها می‌توانند از سد پتانسیل (potential barrier) تونل بزنند، بدون این‌که انرژی کافی برای بالا رفتن از تپه را داشته باشد. این بدان معنا می‌باشد که برای گداخت هسته‌ای، کمینه (minimum) انرژی جنبشی میانگین در واقع کم‌تر از مقدار محاسبه شده می‌باشد و در نتیجه دمای لازم.

## تولید انرژی در خورشید

سوختن هیدروژن با دو روش صورت می‌گیرد. زنجیره‌ی سه مرحله‌ای پروتون ـ پروتون (P-P) در ستارگانی با جرم پایین که دمای هسته (core) آن به ۱۶ میلیون K نمی‌رسد، رخ می‌دهد. چرخه‌ی (cycle) شش مرحله‌ای کربن، نیتروژن و اکسیژن (CNO) که در آن کربن نقش کاتالیزور در تبدیل هیدروژن به هلیم را بازی می‌کند، در ستارگانی که پرجرم‌تر می‌باشند، رخ می‌دهد.

سوختن هیدروژن در هسته (در ربع داخلی شعاع خورشید) رخ می‌دهد. انرژی به لایه‌های بیرونی به وسیله‌ی همرفت و پخش تابشی انتقال می‌یابد. خورشید دارای منابع کافی هیدروژن برای این‌که هزاران میلیون سال بدرخشد، می‌باشد.

### زنجیره‌ی پروتون ـ پروتون (p-p Chain)

**ـ مرحله‌ی اول**

دو پروتون با یکدیگر جوش می‌خورند و ایجاد ایزوتوپ هیدروژن، یعنی دوتریوم می‌کنند و هم‌چنین یک پوزیترون و نوترینو $\nu$ که دارای بار صفر می‌باشد و جرم بسیار کمی دارد.

$${}_1^1H + {}_1^1H \rightarrow {}_1^2H + {}_{+1}^{0}e + \nu \quad (1/19 Mev)$$

$\nu$ ذره‌ای می‌باشد که در چند ثانیه از خورشید می‌گریزد و انرژی را به فضا حمل می‌کند. پوزیترون در داخل خورشید با یک الکترون آزاد برخورد کرده و پدیده‌ی نابودی زوج رخ می‌دهد و جرم آن‌ها تبدیل به انرژی به شکل پرتوهای گاما می‌شود.

**ـ مرحله‌ی دوم**

پروتون سوم با هسته‌ی دوتریوم جوش خورده، ایجاد یک ایزوتوپ سبک ${}_2^3He$ می‌کند که دارای دو پروتون و یک نوترون می‌باشد. انرژی آزاد شده در این حالت به وسیله‌ی پرتوهای $\gamma$ حمل می‌شود.

$${}_1^1H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He + \gamma \quad (5/49 Mev)$$

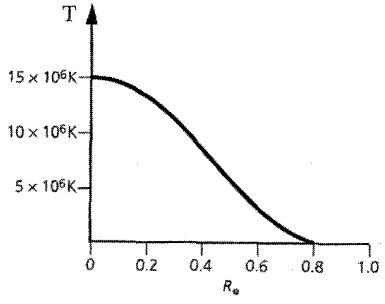
**ـ مرحله‌ی سوم**

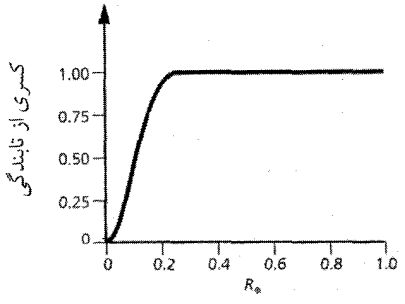
در مرحله‌ی آخر، دو هسته‌ی $^{3}_{2}He$ با یکدیگر جوش خورده، ایجاد He معمولی و دو پروتون می‌کنند.

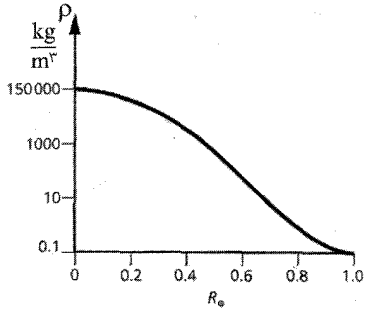
$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \quad (۱۲/۸۵ Mev)$$

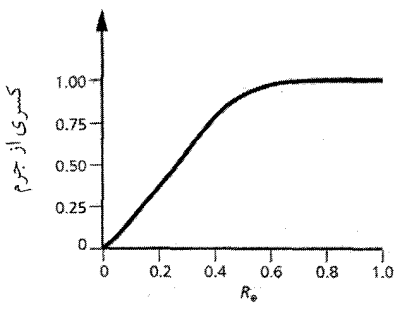
## الگوهای ستاره‌ای (Stellar models)

مدل‌های ستاره‌ای براساس داده‌ای مشاهداتی ایجاد شده‌اند، که اطلاعاتی درباره‌ی فشار دما و چگالی در سطوح مختلف در داخل ستاره می‌دهند. این الگوها می‌توانند با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شوند.




## مسئله‌ی نوترینوی خورشیدی

یکی از ویژگی‌های پرسش‌برانگیز مدل ستاره‌ای این است که مسئله‌ای به‌نام مسئله‌ی نوترینوی خورشیدی در آن به وجود می‌آید. در نظر بگیرید که نوترینو ذره‌ایست که به راحتی آشکار نمی‌شود، چون با ماده به‌طور ضعیف برهم‌کنش می‌کند. به‌طور تقریبی در حدود $۱۰^{۳۸}$ نوترینو در هر ثانیه تولید می‌شود و زمین برای این نوترینوها شفاف می‌باشد. اخترفیزیکدانان مایلند که نوترینوها را آشکار کنند،

چون این پدیده پنجره‌ایست که واکنش‌های گرماهسته‌ای در مرکز خورشید را آشکار می‌کند. آشکارکننده‌های نوترینوی بسیاری ساخته شده‌اند. یکی از آن‌ها مخزنی از $C_2Cl_4$ ماده‌ای که به آن مایع خشک‌شویی می‌گویند، که در زیر زمین در یک معدن طلا قرار دارد.

در حدود $10^{14}$ نوترینو بر مترمربع از خورشید به زمین می‌رسد (در هر ثانیه). واکنش انجام شده در آزمایش به‌صورت زیر است:

$$^{37}_{17}Cl + \nu \rightarrow ^{37}_{18}Ar + e^-$$

با استفاده از روش‌های حساس می‌توان تعداد Ar تولید شده را محاسبه کرد. با استفاده از محاسبات متوجه می‌شویم $\frac{1}{3}$ نوترینوهایی که باید به زمین برسند، در این آزمایش آشکار می‌شوند. این مسئله می‌تواند از دو عامل ایجاد شده باشد:

۱- الگو (مدل) ستاره‌ای نادرست باشد، یا به عبارتی دانش ما از فیزیک هسته‌ای ناقص باشد.

۲- اما توضیح بهتر می‌تواند این باشد که دانش ما از نوترینو به عنوان یک ذره‌ی بنیادی کاملاً پخته نیست.

فیزیکدانان ذره‌ای پیشنهاد می‌کنند که می‌توانیم پدیده‌ای به‌نام نوسان نوترینویی (neutrino oscillation) داشته باشیم، یعنی نوترینو از یک به نوع به نوع دیگری تبدیل می‌شود. تبیین دیگر این است که نوترینو تبدیل به اشکال دیگری از انرژی و ذرات می‌شود.

## چرخه CNO

برای دماهای بالاتر از ۱۶ میلیون کلوین و ستاره‌های پرجرم‌تر، چرخه‌ی CNO را داریم که در آن C نقش مهمی در تبدیل H به He بازی می‌کند.

**ـ مرحله‌ی اول**

یک اتم کربن و یک پروتون با یکدیگر جوش می‌خورند و ایزوتوپ نیتروژن و پرتو $\gamma$ را تولید می‌کنند.

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma \ (1/95MeV)$$

**ـ مرحله‌ی دوم**

ایزوتوپ نیتروژن به یک ایزوتوپ کربن واپاشیده می‌شود و یک پوزیترون و نوترینو گسیل می‌شود.

$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{0}_{+1}e + \nu \ (2/22MeV)$$

**ـ مرحله‌ی سوم**

ایزوتوپ کربن با یک پروتون جوش می‌خورد و یک نیتروژن پایدار و پرتو $\gamma$ ایجاد می‌کند.

$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma \ (۷/۵۴MeV)$$

**ـ مرحله‌ی چهارم**

نیتروژن پایدار با پروتون دیگری جوش می‌خورد و ایزوتوپ اکسیژن و پرتو $\gamma$ ایجاد می‌کند.

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma \ (۷/۳۵MeV)$$

**ـ مرحله‌ی پنجم**

ایزوتوپ اکسیژن واپاشیده شده و ایزوتوپ نیتروژن و یک پوزیترون و نوترینو ایجاد می‌کند.

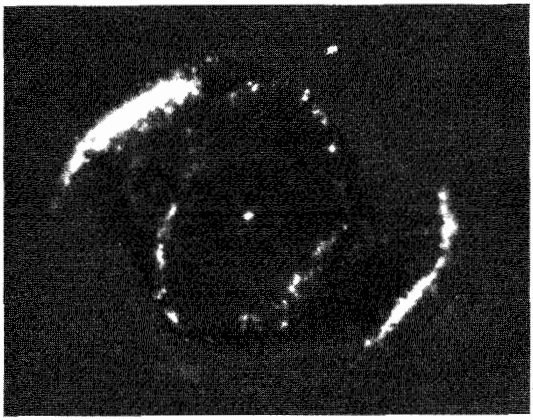
$$^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + ^{0}_{+1}e + \nu \quad (۲/۷۱MeV)$$

**ـ مرحله‌ی ششم**

در نهایت هسته‌ی هلیم وقتی که نیتروژن و پروتون با یکدیگر جوش می‌خورند، ایجاد می‌شود.

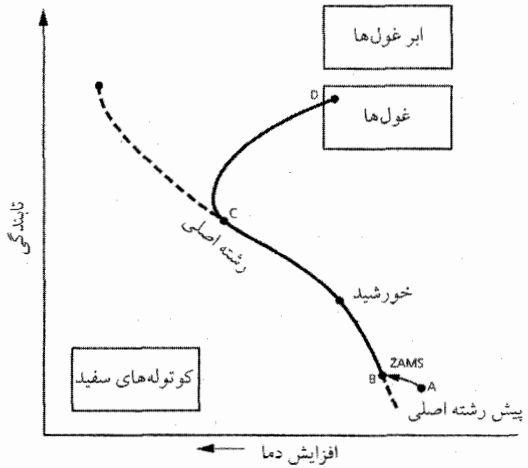
$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He \ (۴/۹۶MeV)$$

# ۷



## زندگی ستارگان و تجزیه‌ی هسته‌ای (The lives of stars and stellar nucleosynthesis)

ستارگان به‌صورت ثابت نمی‌مانند و تابندگی و دمایشان در زمان تغییر می‌کند. این اطلاعات در نمودار HRD نمایانده می‌شود. یک ستاره در طول زندگی‌اش به چهار مرحله‌ی اصلی تکامل می‌رود. پیش‌ستاره (protostar)، ستاره‌ی پیش‌رشته اصلی (pre-main sequence star) و ستاره‌ی رشته اصلی و ستاره‌ی پسارشته اصلی (post-main sequence star).




این‌که آیا یک پیش‌ستاره به رشته‌ی اصلی می‌رسد، بستگی به جرم ابر گازی رمبیده شده دارد. اگر جرم ابر کم‌تر از $0/002M_{\odot}$ باشد، جسم به عنوان یک سیاره طبقه‌بندی می‌شود. اگر جرم ابر گازی بین $0/002M_{\odot}$ و $0/008M_{\odot}$ باشد، این جسم «کوتوله‌ی قهوه‌ای» نام دارد. کوتوله‌های قهوه‌ای (brown dwarf) به‌طور ضعیف به علت انقباض کلوین ـ هلمهولتز می‌درخشد و مرکز آن به دمایی کافی برای آغاز واکنش‌های هسته‌ای نمی‌رسد و بنابراین به ستاره‌ی رشته اصلی نمی‌رسد.

نمودار HRD ما را قادر می‌سازد که مراحل مختلف زندگی ستاره را نمایش دهیم. مسیری که در HRD برای تکامل ستاره نشان داده می‌شود، مسیر تکاملی (evolutionary track) نام دارد. نقطه‌ای که در آن ستاره در آغاز شروع به درخشیدن به علت سوختن هیدروژن می‌کند و به رشته‌ی اصلی می‌پیوندند را رشته‌ی اصلی سن صفر (zero - age main sequence) (ZAMS) نام دارد. این آغاز طولانی‌ترین فاز زندگی ستاره را که تمام انرژی آن از طریق تبدیل هیدروژن به هلیم در مرکز ستاره ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. زمانی که یک ستاره در مرحله‌ی رشته اصلی می‌ماند، به جرمش بستگی دارد. ستارگان گرم پرجرم زمان کم‌تری از ستارگان سردتر و کم‌جرم‌تر در این مرحله می‌گذرانند.

وقتی یک ستاره تمام سوخت هسته‌ای‌اش را تمام می‌کند، اندازه‌ی آن افزایش می‌یابد و به یک غول قرمز تبدیل می‌شود. تابندگی آن افزایش می‌یابد و دمای سطح آن کاهش می‌یابد. از رشته‌ی اصلی بیرون رفته و به سمت بالای HRD می‌رود. سوختن هلیم در مرکز ستاره آغاز می‌شود، که درگیر واکنش‌های هسته‌ی زنجیره‌ای که به آن فرآیند $\alpha$ سه‌گانه (triple alpha process) می‌گویند، می‌شود و در آن کربن به عنوان تولید پایانی شکل می‌گیرد.

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{8}_{4}\mathrm{Be} + \gamma$$

$$^{8}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + \gamma$$

تولید عناصر سنگین در ستاره «تجزیه‌ی هسته‌ای» نام دارد. واکنش‌های هسته‌ای با تولید کربن در ستاره‌های کم‌جرم پایان می‌یابد. اگر جرم ستاره کم‌تر از $3M_{\odot}$ باشد، سحابی سیاره‌ای (planetary nebula) ایجاد می‌شود. ستارگان پرجرم‌تر به دماهای بالاتر در مرکزشان می‌رسند و می‌توانند عناصر سنگین‌تری تا آهن Fe را با واکنش هم‌جوشی عناصری مانند کربن، نئون، اکسیژن و سوختن سلیکون ایجاد کنند. بالاتر از Fe، دیگر هم‌جوشی صورت نمی‌گیرد و احاطه‌ی نوترون‌ها به وسیله‌ی فرآیند r و فرآیند s به ایجاد عناصری سنگین‌تر از آهن می‌انجامد.

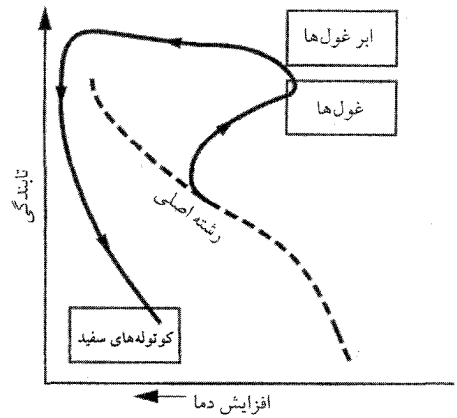
# ۸

**Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-95)**

## مرگ ستارگان

راه‌های مختلفی وجود دارد که ستارگان به انتهای عمر خود می‌رسند، رابطه‌ی آن‌ها با جرم رشته‌ی اصلی در جدول زیر نشان داده شده است.

| سرنوشت نهایی | جرم رشته‌ی اصلی / $M_\odot$ |
|---|---|
| کوتوله‌ی سفید | 0.1-0.5 |
| سحابی سیاره‌ای، سپس کوتوله‌ی سفید | 0.5-4 |
| ابرنواختر، سپس ستاره‌ی نوترونی | 4-10 |
| ابرنواختر، ستاره‌ی نوترونی یا سیاه‌چاله | 10-20 |
| ابرنواختر، سپس سیاه‌چاله | 20-60 |



سرنوشت نهایی یک ستاره وقتی سوخت هسته‌ای‌اش تمام شد، به جرمش در زمان مرگش بستگی دارد. برای ستارگانی در رشته‌ی اصلی که جرم‌شان بین ۰/۱ و ۴ برابر جرم خورشید است؛ نتیجه‌ی پایانی کوتوله‌ی سفید و برای جرم $۰/۵-۴M_{\odot}$ سحابی ستاره‌ای نیز شکل می‌گیرد.

در ستارگان با جرم کوچک یا کم‌تر از $۳M_{\odot}$، ۲۵ تا ۶۰ درصد ستاره به‌صورت سحابی سیاره‌ای رها می‌شود. بعد از این‌که سوختن هلیم به‌طور کامل انجام شد، دمای مرکز ستاره به اندازه‌ی کافی نیست؛ برای این‌که کربن و اکسیژن با یکدیگر هم‌جوشی کنند، بنابراین دما پایین می‌آید و درخشندگی کاهش پیدا می‌کند.

چون واکنش هسته‌ای متوقف شده است، فشار بیرونی وجود ندارد که در برابر نیروی گرانش مقاومت کند. در نتیجه هسته‌ی ستاره تا حد زمین فشرده می‌شود و چگالی آن تا حد $۱۰^{۸}-۱۰^{۹}\ \frac{kg}{m^{۳}}$ بالا می‌رود. برای این‌که این چگالی را تصور کنیم، باید در نظر داشته باشیم یک قاشق چایخوری از این ماده به اندازه‌ی چندین تن جرم دارد.

یک کوتوله‌ی سفید به علت فشار الکترونی تبهگنی بیش از این رمبیده نمی‌شود. حداکثر جرمی که یک کوتوله‌ی سفید می‌تواند داشته باشد به وسیله‌ی حد چاندراسکارا (Chandrasekhar limit) که $۱/۴M_{\odot}$ است، تعیین می‌شود.

## تبهگنی (Degeneracy)

یک گاز ایده‌آل از معادله‌ی حالت پیروی می‌کند، که رابطه‌ی فشار، تعداد مول‌ها، دما و حجم به‌صورت مقابل می‌باشد:

$$PV = nRT$$

که در آن R مقدار ثابتی است که ثابت جهانی گاز نام دارد.

$$R = ۸/۳\frac{J}{mol\,K}$$

در ماده‌ی تبهگن معادله‌ی حالت صادق نمی‌باشد، چون گاز دارای چگالی بالایی بوده و ذرات نمی‌توانند به‌طور کاتوره‌ای حرکت کنند. اصل طرد پائولی (pauli exclusion principle) می‌گوید اگر این ذرات فرمیون‌هایی مانند الکترون باشند، نمی‌توانند از حدی به یکدیگر نزدیک شوند و یک فشار بیرونی داریم که در برابر فشرده شدن مقاومت می‌کند.

در کوتوله‌ی سفید، گاز الکترون تبهگن (electron degeneracy gas) داریم، که به علت فشار آن، کوتوله بیش از این فشرده نمی‌شود.

فشار به چگالی بستگی دارد.

$$p \sim k\rho^{\frac{۵}{۳}}$$

$$p \sim \frac{M}{R^3}$$

طبق معادله‌ی هیدرواستاتیک ستاره $p \sim \frac{M^2}{R^4}$

$$p \sim \rho^{\frac{5}{3}} = (\frac{M}{R^3})^{\frac{5}{3}} = \frac{M^{\frac{5}{3}}}{R^5}$$

$$\frac{M^2}{R^4} \sim \frac{M^{\frac{5}{3}}}{R^5}$$

$$R \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M}}$$

بنابراین هرچه کوتوله‌ی سفید جرمش بیش‌تر باشد، شعاعش کم‌تر می‌شود. این گزاره تا حد مشخصی به‌نام حد چاندراسکارا صادق است. چاندراسکارا در ۱۹۳۱ نشان داد که حداکثر مقدار جرمی که یک کوتوله‌ی سفید می‌تواند داشته باشد تا به وسیله‌ی گاز الکترون تبهگن در برابر فشرده شدن مقاومت کند، $1/4 M_\odot$ می‌باشد.

## ترکیب کوتوله‌ی سفید

کوتوله‌ی سفید بسیار چگال می‌باشد. وقتی ستاره سردتر می‌شود، ماده‌ی آن به ساختار شبکه‌ای بلوری متشکل از اتم‌های یونی با الکترون‌های تبهگن که در آن آزادانه حرکت می‌کنند، تبدیل می‌شود. ستاره‌ای از حالت گازی به حالت مایع و سپس جامد می‌رود و در نهایت ویژگی‌های آن بی‌شباهت به فلزهای رسانایی مانند مس و نقره نیست.

بعد از هزاران میلیون سال، ستاره سردتر و کم‌نورتر می‌شود تا دمای سطح آن به سمت صفر مطلق نزدیک شود و در پایان زندگی‌اش به عنوان یک خاکستر سوخته شده که به آن کوتوله‌ی سیاه (black dwarf) می‌گویند، تبدیل می‌شود. این سرنوشت خورشید ما نیز می‌باشد.

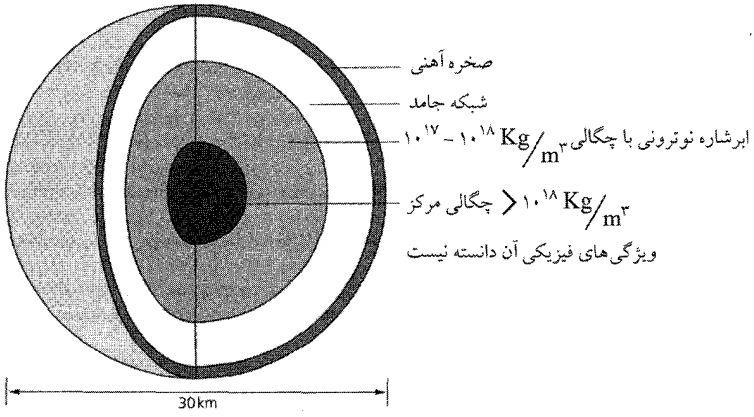
## ستاره‌های نوترونی

برای ستارگانی که جرم‌شان ۴ تا ۲۰ برابر جرم خورشید است، از حد چاندراسکارا می‌گذریم و ستاره به‌صورت ستاره‌ی نوترونی درمی‌آید. تشکیل ستاره‌ی نوترونی در نتیجه‌ی این است که ستاره به‌طور ناگهانی به‌صورت یک ابرنواختر منفجر می‌شود. ستاره‌ی نوترونی به علت فشار تبهگنی نوترونی بیش از این رمبیده نمی‌شود.

وقتی دمای هسته‌ی این ستاره تا $۱۰^{۹}K$ و چگالی آن تا $۱۰^{۱۳}\frac{kg}{m^{۳}}$ افزایش می‌یابد، انقباض گرانشی تا حدی است که الکترون‌ها به سمت پروتون‌ها فشار داده می‌شوند و ایجاد نوترون و نوترینو می‌کنند، که به آن تلاشی $\beta$ معکوس می‌گویند. $p+\bar{e}\rightarrow n+\nu$

در $\frac{۱}{۴}$ ثانیه، چگالی هسته به اندازه‌ی چگالی هسته‌ی اتم، یعنی در حدود $۲\times۱۰^{۱۷}\frac{kg}{m^{۳}}$ می‌شود.

در شکل، داخل یک ستاره‌ی نوترونی نشان داده شده است.




گاز ابر شاره از ۸۰ درصد نوترون و ۱۰ درصد الکترون و باقی‌مانده‌ی آن از پروتون تشکیل شده است. (ابر شاره، شاره‌ایست که ذرات آن می‌توانند روی یکدیگر بدون اصطکاک جریان یابند.) ستاره‌ی نوترونی به وسیله‌ی یک صخره‌ی آهنی احاطه شده که این صخره، شبکه‌ی جامد را که از نوترون و هسته‌های غنی از نوترون تشکیل شده را می‌پوشاند. هسته‌ی ابر شاره نوترونی در حالت تبهگن می‌باشد و فشار تبهگن نوترون باعث می‌شود ستاره زیاد رمبیده نشود و بیش‌تر پایدار بماند.

ستاره‌های نوترونی میدان مغناطیسی قوی دارند، که شدت آن می‌تواند تا $۱۰^{۸}T$ باشد. چرا؟

به علت اصل پایستگی شار مغناطیسی

$$\Phi_i = \Phi_f$$

$$B_i A_i = B_f A_f$$

$$B_f = B_i(\frac{R_i}{R_f})^{۲}$$

در نظر بگیرید که نسبت $(\frac{R_i}{R_f})^{۲}$ بسیار بزرگ باشد.

به علت اصل پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای، ستاره‌های نوترونی با سرعت زیادی می‌چرخند.

$$L_{star} = L_{neut}$$

$$I_{star}\,\omega_{star} = I_{neut}\,\omega_{neut}$$

$$\frac{۲}{۵}MR^{۲}_{star}\,\omega_{star} = \frac{۲}{۵}MR^{۲}\omega_{neut}$$

$$\left(\frac{\omega_{neut}}{\omega_{star}}\right) = \left(\frac{R_{star}}{R_{neut}}\right)^{۲}$$

$$\frac{\omega_{neut}}{\omega_{star}} = \left(\frac{۶/۹۶\times۱۰^{۵}\,km}{۱۲\,km}\right)^{۲} = ۳\times۱۰^{۹}$$

چون این ستارگان بسیار چگال هستند، سطح آن‌ها گرانشی در حدود $۱۰^{۱۱}$ برابر زمین دارد، بنابراین سطح آن‌ها بسیار صاف می‌باشد و کوه بلندی در سطح آن‌ها نمی‌یابید. برای این‌که از سطح ستاره‌ی نوترونی بگریزید، سرعت شما باید ۸۰ درصد سرعت نور باشد، در برابر جسمی که به طرف آن سقوط می‌کند، باید این حداقل انرژی جنبشی را داشته باشد.

## ابرنواخترها (Supernovas)

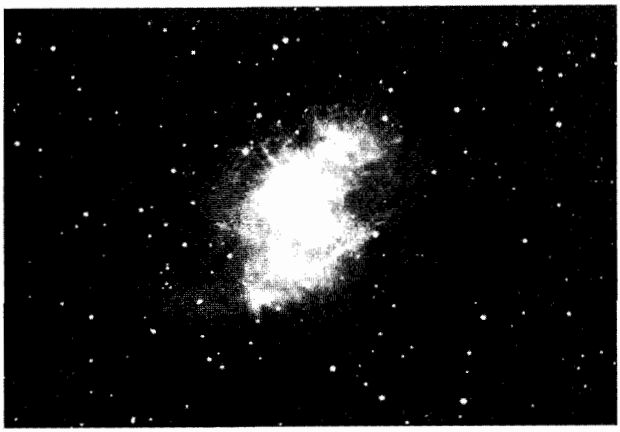
تشکیل ستاره‌های نوترونی بسیار با سرعت انجام می‌گیرد و زمانی که فشار تبهگن نوترونی ایجاد می‌شود، هسته‌ی ستاره سخت می‌شود. رمبش ستاره متوقف شده و ماده‌ای که به سمت مرکز آن حرکت می‌کند، برمی‌گردد (از هسته‌ی ستاره) و به سمت سطح ستاره می‌رود. یک موج شوکی با انرژی بسیار تولید شده (با سرعت در حدود $۵۰۰۰-۱۰/۰۰۰\frac{km}{s}$)، که باقی‌مانده‌ی لایه بیرونی ستاره را پرتاب می‌کند. نوترینوهای ایجاد شده به علت واپاشی معکوس $\beta$، به سمت خارج هسته حرکت کرده و انرژی حمل می‌کنند که ۱۰۰ برابر انرژی می‌باشد که تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. این انفجار عظیم «ابرنواختر» نام دارد و انرژی ایجاد می‌کند، که به‌طور موقت می‌تواند یک کهکشان را روشن کند.

انرژی بین دو جرم گرانشی با رابطه‌ی $U_g = \frac{-Gm_۱\,m_۲}{r}$ نشان داده می‌شود. حال در نظر بگیرید جرم ستاره $۴M_\odot$ باشد و به یک ستاره‌ی نوترونی با شعاع $r = ۱۵km$ تبدیل شود.

$$U_g = \frac{(۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱})(۸\times۱۰^{۳۰})(۸\times۱۰^{۳۰})}{۱/۵\times۱۰^{۴}} = ۳\times۱۰^{۴۶}\,J$$

این مقدار انرژی از $۱۰^{۴۴}\,J$ که به‌طور عادی در پدیده‌ی ابرنواختری دیده می‌شود، بیش‌تر است.

# ۹



The Crab Nebula

## تشکیل سیاه‌چاله (The formation of black holes)

برای ستاره‌ای که جرم رشته‌ی اصلی آن بزرگ‌تر از $۱۰M_{\odot}$ باشد، گرانش آن را در هم فشرده، از لحاظ نظری چگالی آن بی‌نهایت می‌شود و حجم آن صفر. چنین حالتی از ماده را تکینگی (singularity) می‌گویند، که برای قوانین فیزیک قابل دسترسی نیست.

میدان گرانشی اطراف یک سیاه‌چاله آن‌قدر بزرگ است که هیچ تابشی ازجمله نور نمی‌تواند از آن بگریزد، بنابراین سیاه به نظر می‌رسد.

## شعاع شوارتز شیلد (The Schwarzchild radios)

اندازه‌ی یک سیاه‌چاله چه‌قدر است؟ برای پاسخ به این پرسش، مقدار انرژی که جرم m باید داشته باشد تا به بی‌نهایت بگریزد.

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{۲GM}{R}}$$

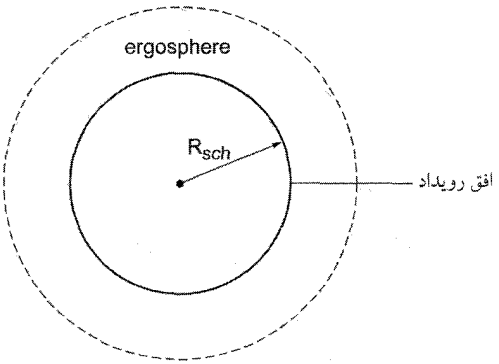
حداکثر سرعت گریز c می‌باشد.

$$R = R_{sch} = \frac{۲GM}{c^{۲}}$$

این شعاع به ما می‌گوید برای یک جرم مشخص، چه‌قدر جسم باید کوچک باشد تا نور را در دام بیاندازد و سیاه به نظر برسد.

## افق رویداد (The event horizon)

در شکل، ساختار یک سیاه‌چاله را می‌بینید. ناحیه‌ای که در آن سرعت گریز با سرعت نور برابر است، «افق رویداد» نامیده می‌شود و فاصله‌اش تا خارج سیاه‌چاله برابر است با $R_{sch}$. داخل افق رویداد، سرعت گریز بیش از سرعت نور می‌باشد، بنابراین در درون آن گریزی وجود ندارد.




## ویژگی‌های فیزیکی سیاه‌چاله

### ـ جرم

اگر ما در فضاپیمایی به دور یک سیاه‌چاله بچرخیم (به دور از افق رویداد)، با توجه به قانون سوم کپلر می‌توانیم جرم سیاه‌چاله را با توجه به شعاع و زمان تناوب تعیین کنیم.

### ـ بار الکتریکی

چون نیروی الکتریکی مانند گرانش یک برهم‌کنش با برد بلند است، می‌توانیم از فضاپیمای خود، شدت میدان الکتریکی را اندازه بگیریم و با استفاده از قانون کولن، بار الکتریکی را تعیین کنیم.

### ـ تکانه‌ی زاویه‌ای

به علت اصل پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای، ما انتظار داریم که سیاه‌چاله در حال دوران باشد. نسبیت عام پیش‌بینی می‌کند که دوران باعث کشیده شدن فضا ـ زمان به دور سیاه‌چاله در ناحیه‌ای که ergosphere نام دارد، می‌شود. با مشاهده‌ی اجسامی که در ergosphere حرکت می‌کنند، می‌توانیم تکانه‌ی زاویه‌ای سیاه‌چاله را تعیین کنیم.

### ـ داخل سیاه‌چاله

یک پیش‌بینی نسبیت عام این است که تمام میدان‌های گرانشی باعث کند شدن زمان می‌شوند. برای فضاپیمایی که دور از افق است، او می‌بیند که همکار فضانوردش به سمت سیاه‌چاله با آهنگ کند و کندتر سقوط می‌کند، تا زمانی که در افق رویداد در زمان منجمد می‌شود. از دید فضانورد سقوط‌کننده، او می‌بیند که از افق رویداد می‌گذرد و در زمان شتاب می‌گیرد، گرانش به او نیرو وارد کرده، او را پاره می‌کند و به سمت تکینگی می‌رود.

در داخل افق رویداد، نسبت عام پیش‌بینی می‌کند که فضا و زمان در هم می‌روند و تمام قوانین فیزیک در تکینگی می‌شکنند. قوانین فیزیک که در چارچوب تعریف شده‌ی فضا و در جهت زمان هستند، بی‌معنی می‌شوند؛ زیرا این درهم‌پیچیدگی واقعیت فیزیکی نمی‌تواند از افق رویداد با ما ارتباط برقرار کند. قوانین فیزیک در جهان در مورد مشاهده‌ی ما، بدون تأثیر می‌ماند.

## مشاهده‌ی سیاه‌چاله‌ها

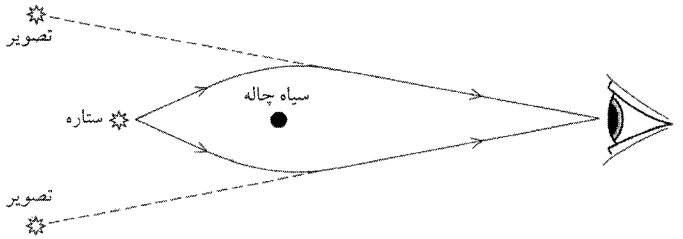
دو راه برای آشکارسازی سیاه‌چاله‌ها وجود دارد:

### منابع پرتو x

یک سیاه‌چاله جزئی از یک سیستم دوتایی می‌باشد. ماده‌ای که به سمت آن سقوط می‌کند آن‌قدر گرم می‌شود و انرژی جنبشی دریافت می‌کند که ایجاد یک قرص تجمع (accretion disk) می‌کند و تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. اگر به دمای $10^6$ K برسد، پرتو X گسیل می‌کند و به وسیله‌ی ماهواره پرتو X نجومی قابل آشکارسازی است.

### عدسی گرانشی (Gravitational lensing)

اگر زمین، ستاره و یک سیاه‌چاله به‌صورتی که در شکل نشان داده شده در یک راستا باشند، پرتو نور ستاره که از نزدیکی سیاه‌چاله می‌گذرد، می‌تواند در هر یک از جهت‌ها خم شود (به علت میدان شدید گرانشی)، بنابراین ما از زمین دو تصویر می‌بینیم، یک تصویر اولیه‌ی روشن‌تر در ناحیه‌ای که به سیاه‌چاله نزدیک‌تر است و یک تصویر ثانویه‌ی کم‌نورتر در ناحیه‌ی دیگر. اگر ستاره، سیاه‌چاله و زمین کاملاً در راستای هم باشند، شدت هر دو تصویر یکسان است. این پدیده، تأییدی بر تئوری نسبیت عام نیز می‌باشد و «عدسی گرانشی» نام دارد.




### تابش هاوکینگ (Hawking radiation)

بنا به نظر استیون هاوکینگ، فیزیکدان انگلیسی برای یک سیاه‌چاله با جرم M از دست دادن انرژی متناسب است با $\frac{1}{M^2}$، بنابراین وقتی که جرم سیاه‌چاله کم می‌شود، آهنگ تبخیر افزایش می‌یابد. وقتی جرم به سمت صفر می‌شود، آهنگ تبخیر آن‌قدر زیاد می‌شود که به ترکانه‌های (burst) ذرات بنیادی با گسیل پرتوهای گاما تبدیل می‌شود.

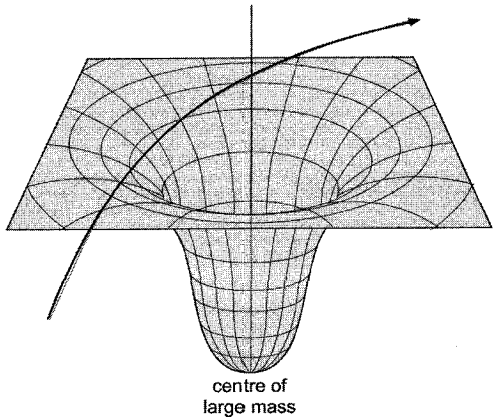
انرژی پتانسیل گرانشی سیاه‌چاله می‌تواند تولید ذره ـ پادذره در خلاء کند، که یکی از آن‌ها به سمت سیاه‌چاله می‌رود و دیگری از آن می‌گریزد و مقداری از جرم آن را حمل می‌کند. بنابراین

مشاهده‌کننده‌ی گسیل پیوسته ذراتی را می‌بیند که از سیاه‌چاله می‌آیند، که به آن «تابش هاوکینگ» می‌گویند.

$$t_{evap} \simeq (\frac{M}{M_{\odot}})^{۳} \times ۱۰^{۶۶} \quad \text{سال}$$

فیزیکدانانی مانند هاوکینگ باور دارند در زمان اولیه‌ی جهان، سیاه‌چاله‌هایی کوچک‌تر از اندازه‌ی اتم با جرمی در حدود $۵\times۱۰^{۱۱}\,kg$ وجود داشتند. پرتوهای گامای گسیل شده باید به وسیله‌ی ماهواره‌های پرتو $\gamma$ آشکار شوند.

# ۱۰




**خمش فضا به وسیله‌ی میدان گرانشی**

## نظریه‌ی نسبیت عام و کیهان‌شناسی (General theory of relativity)

در نسبیت عام با اجسامی سروکار داریم که دارای شتاب هستند (در یک چارچوب مرجع)، در مقابل نسبیت خاص که حرکت اجسام را با سرعت یکنواخت در نظر می‌گیرد. چارچوب مرجعی که در آن اجسام دارای شتاب هستند را «چارچوب مرجع غیرلخت» می‌گویند.

اینشتین معادلاتی را به‌نام معادلات میدان عرضه کرد، که در برابر مفهوم نیوتنی گرانش بود که به عنوان نیرو در نظر گرفته می‌شد و این معادلات به توصیف هندسی فضا ـ زمان می‌پرداخت، که در آن اجسام در راستای مسیری که ژئودزیک نامیده می‌شود، حرکت می‌کنند و فضا در حضور ماده خم شده است. (در هندسه ژئودزیک کم‌ترین فاصله بین دو نقطه در فضای خمیده است). هرچه جرم بیش‌تر باشد، خمش بیش‌تر است و جسم بیش‌تر منحرف می‌شود.

## اصل هم‌ارزی

رویدادهای فیزیکی در دستگاه‌های شتاب‌یافته و در میدان‌های گرانشی با یکدیگر هم‌ارزند. هیچ‌گاه نمی‌توان از طریق اندازه‌گیری فیزیکی در یک آزمایشگاه تشخیص داد که این آزمایشگاه در میدان گرانش قرار دارد، یا به دلیل دیگری شتاب پیدا کرده است، بنابراین تساوی جرم گرانشی و لختی امری بدیهی است. جرم لختی بنابر تعریف مقاومت یک جسم در مقابل شتاب از طریق دیگر گرانش درست از طریق همین شتاب نسبت به دستگاه لختی در حال سقوط به وجود می‌آید.

## آزمون‌های نسبیت عام

### I ـ انتقال سرخ پرتوهای نور در میدان گرانش

پرتو نوری که در میدان گرانش صعود می‌کند را در نظر بگیرید. بسامد نور $\nu$ می‌باشد.

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

**ـ کار، پرتو نور در هنگام صعود در میدان گرانشی**

$$h\nu' = h\nu + mgH$$

$$h\nu' = h\nu + \frac{h\nu}{c^2} gH = h\nu\left(1 + \frac{gH}{c^2}\right)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} \qquad U(R) = \frac{-GM}{R}$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{-GM}{Rc^2} \qquad R_{sch} = \frac{2GM}{c^2}$$ شعاع شوراتز شیلد

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{R_{sch}}{2R}$$

## II – انحراف نور در میدان گرانشی (Bending of light)

طبق بیش‌بینی نسبیت عام، نور باید در میدان گرانشی قوی منحرف شود. این پدیده در سال ۱۹۱۹ در یک خورشیدگرفتگی آزموده شد.

## هندسه‌ی جهان

در فیزیک نیوتنی، هندسه‌ی جهان تخت و اجرام با توجه به نیروها بر یکدیگر اثر می‌کنند و فضا و زمان به یکدیگر بستگی ندارند. در حالی که در نسبیت توزیع ماده به فضا شکل می‌دهد و زمان و فضا به یکدیگر متصلند. فضا ـ زمان به ماده می‌گوید که چگونه حرکت کند و ماده به فضا می‌گوید چگونه خم شود.

## تکینگی

کیهان‌شناسان باور دارند که جهان از یک تکینگی با چگالی بالای بی‌نهایت و دمای بالا با یک انفجار در حادثه‌ای که مهبانگ نام دارد، آغاز شده است.

### زمینه‌ی تشعشع کیهانی (Cosmic microwave background)

در سال ۱۹۶۴ دو دانشمند آزمایشگاه بل در نیوجرسی، آزمایش‌هایی را با استفاده از آنتن میکروموج برای ماهواره‌های مخابراتی انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند وقتی آنتن‌ها را به سمت آسمان می‌گیرند، یک منبع موجی در تمام جهات دریافت می‌کنند، که در زمان ثابت می‌باشد و قطع نمی‌شود. چیزی که این دانشمندان دریافت می‌کردند، باقی‌مانده‌ی تابش گرمایی مهبانگ بود.

کیهان‌شناسان می‌گویند زمانی کوتاه بعد از مهبانگ، جهان از تابش پرانرژی جسم سیاه پر شده بود، که متشکل از پرتو $\gamma$ با طول موج کوتاه بود. وقتی جهان سرد شده و گسترش یافته، این طول موج به قسمت میکروموج انتقال به سرخ پیدا کرده تا به ناحیه‌ای از طیف الکترومغناطیسی با دمای جسم سیاه $3K$ تبدیل شده است.

## تاریخ کیهان به چهار دوران (eras) تقسیم می‌شود:

### ۱ـ دوران ذرات سنگین (heavy particle era) $T > 10^{33}K$

$10^{-43}s >$ زمان بعد از مهبانگ. در این دوره، جهان آن‌قدر گرم بود تا تمام ذرات بنیادی پرجرم به وسیله‌ی فرآیند تولید زوج (pair production) ایجاد شوند. جهان در حالت تعادل گرمایی بوده و به سرعت گسترش پیدا کرده و اولین پروتون‌های پایدار در زمانی در حدود $10^{-6}s$ ایجاد می‌شوند.

### ۲- دوران ذرات سبک (Light particle era) $T < 10^{12}K$

$10^{-4}s >$ زمان بعد از مهبانگ. در این دوره، دما آن‌قدر زیاد نیست تا ذرات سنگین ایجاد شوند. ذرات سبک‌تر مانند الکترون و پوزیترون هنوز می‌توانند ایجاد شوند. پروتون و الکترون می‌توانند ترکیب شده و نوترون را به وجود آورند. ما در دورانی هستیم که ماده در آن غالب است و در این حالت، ذرات بیش از پادذرات است. فیزیکدانان به این شرایط، شکست تقارن (symmetry breaking) می‌گویند.

### ۳- دوران تابش (Radiation era) $T < 10^{10}K$

$10s >$ زمان بعد از مهبانگ. در این مرحله، نوترون‌ها و پروتون‌ها هسته‌های پایدار را ایجاد می‌کنند. مهم‌ترین هسته‌ی ایجاد شده، دوتریم ${}^{2}_{1}H$ می‌باشد و از آن هسته‌های پایدار ${}^{4}_{2}He$ و هلیم سبک ${}^{3}_{2}He$ ایجاد می‌شود و هم‌چنین ${}^{7}_{4}Be$ و ${}^{7}_{3}Li$ به وسیله‌ی واکنش‌های هم‌جوشی شکل می‌گیرند.

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + \gamma $$

$$ {}^{3}_{2}He + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e $$

$$ {}^{4}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{7}_{4}Be + \gamma $$

$$ {}^{7}_{4}Be + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \upsilon $$

ایجاد عناصر سبک از نوترون و پروتون که در دوران‌های ذرات سنگین و سبک به وجود آمده‌اند را تجزیه‌ی هسته‌ای اولیه (primordial nucleosynthesis) می‌گویند.

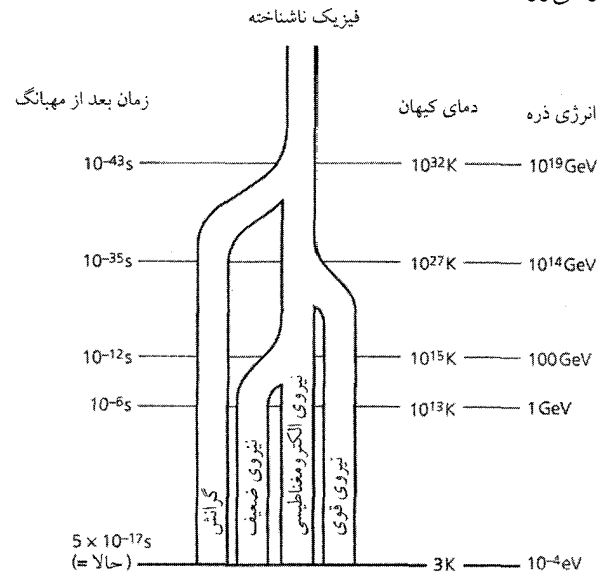
### ۴- دوران ماده (Matter era) $T < ۳۰۰۰K$

سال $۱۰^{۶}<$ زمان بعد از مهبانگ. در دوران قبل از ماده و تابش با یکدیگر برهم‌کنش داشته و به یکدیگر بسته شده بودند. تابش نمی‌توانست بگریزد و جهان کاملاً در برابر تابش کدر (opaque) بود. حال که دمای کیهان به $۳۰۰۰K$ رسیده، اولین اتم‌های هیدروژن و هلیم ایجاد می‌شوند و در این حالت، دیگر ماده و تابش جفت شده نیستند. کیهان نسبت به تابش شفاف (transparent) است، که به این حادثه نقض جفت‌شدگی (decoupling) می‌گویند. این مسئله موجب می‌شود که تابش با جهان انبساط یابد و ماده می‌تواند با خود برهم‌کنش کند و گرانش سبب ایجاد جهان با مقیاس بزرگ شود و کهکشان‌ها شکل گیرند.

**برهم‌کنش‌های بنیادی**

| ذره‌ی حامل | m / برد | شدت نسبی | برهم‌کنش |
|---|---|---|---|
| گراویتون | $\infty$ | $۱۰^{-۳۸}$ | گرانشی |
| گلوئون | $۱۰^{-۱۵}$ | ۱ | قوی |
| فوتون | $\infty$ | $۱۰^{-۲}$ | الکترومغناطیسی |
| $W^{\pm}, Z$ | $۱۰^{-۱۸}$ | $۱۰^{-۱۳}$ | ضعیف |

در زمان اولیه بعد از مهبانگ چهار نیروی بنیادی به‌صورت یکتا (unified) و به‌صورت یک ابر نیرو (super force) بوده‌اند. وقتی جهان سرد می‌شود، نیروها از یکدیگر جدا شده تا به‌صورت امروزی درآیند. نظریه‌های وحدت بزرگ GUT (grand unified theories) به وسیله‌ی فیزیکدانان ذره‌ای برای تبیین این پدیده به کار می‌رود.



## اصل کیهان‌شناخت (Cosmological principle)

۱- جهان در مقیاس چندصد Mpc همگن است. اگر ما به جهان از دید یک مکعب ۵۰۰Mpc نگاه کنیم، انتظار داریم که در تمام این مکعب‌ها، تعداد کهکشان‌ها کم و بیش یکسان باشند.

۲- جهان همسانگرد است. ما در هر جهتی که نگاه کنیم، جهان را به‌صورت یکسان می‌بینیم. ممکن است تغییرات محلی در ترتیب کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی باشد، ولی تمام مشاهده‌کنندگان در هر جای فضا، ساختار بزرگ جهان را یکسان می‌بینند.

## قانون هابل (The Hubble law)

هابل و دیگران دریافتند که خطوط طیفی کهکشان‌های دور به سمت سرخ انتقال پیدا می‌کنند، بنابراین کهکشان‌ها از ما دور می‌شوند. با رسم نمودار سرعت شعاعی در برابر فاصله، خط راستی به دست می‌آید. نتیجه‌ی این کار، قانون هابل است. $v = H_\circ r$

اگر سرعت برحسب $\frac{km}{s}$ و r برحسب Mpc باشد، $H_\circ$ ثابت هابل که یکای آن $\frac{km}{s\,Mpc}$ می‌باشد. در این‌جا این ثابت را برابر با $۷۵\frac{km}{s\,Mpc}$ می‌گیریم.

## محاسبه‌ی سن جهان

برای کهکشانی که با سرعت v حرکت می‌کند، مسافت D را در مدت t طی می‌کند.

$$D = vt \rightarrow t = \frac{D}{v}$$

$$v = H_\circ D$$

$$۱Mpc = ۳/۱\times۱۰^{۱۹}\,km$$

$$H_\circ = ۷۵\frac{km}{s\,Mpc}$$

$$t = \frac{۳/۱\times۱۰^{۱۹}}{۷۵} = ۴/۱۳\times۱۰^{۱۷}\,s$$

$$= ۱/۳\times۱۰^{۱۰} \text{ سال}$$

## باطل‌نمای البرس (Olbers' paradox)

چرا آسمان در شب‌ها تاریک است؟ اگر جهان نامحدود و دارای ستارگان به‌طور همگن باشد، به هر جایی نگاه کنیم باید نوری از ستاره‌ای به ما برسد و آسمان به‌طور یکنواخت روشن باشد. حال

مسئله این است اگر جهان نامحدود باشد، هر چند نوری که به ما می‌رسد، کم می‌شود $\sim \frac{1}{d^2}$، ولی تعداد ستارگان به نسبت $d^2$ اضافه می‌شود، بنابراین این دو عامل یکدیگر را از بین می‌برند و جهان باید روشن به نظر برسد، ولی این چیزی نیست که ما می‌بینیم.

پاسخ این است که سرعت نور محدود می‌باشد و ما جهان را در گذشته می‌بینیم. این نشان می‌دهد جهان باید از نقطه‌ای شروع شده باشد، چون اگر به‌طور نامحدود کهن باشد، باید روشن به نظر آید.

پارادوکس البرس می‌تواند وقتی قابل تبیین باشد که جهان در حال انبساط باشد.

# Physical data

| Physical constants | Symbol | Value |
|---|---|---|
| Gravitational constant | $G$ | $6.67 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\ \text{kg}^{-2}$ |
| Acceleration of free fall | $g$ | $9.81\ \text{m s}^{-1}$ (close to the Earth) |
| Gravitational field strength | $g$ | $9.81\ \text{N kg}^{-1}$ (close to the Earth) |
| Electron charge | $e$ | $-1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$ |
| Mass of electron | $m_e$ | $9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$ |
| Mass of hydrogen atom | $m_H$ | $1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}$ |
| Unified mass constant | $u$ | $1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg}$ |
| Speed of light in a vacuum | $c$ | $3.00 \times 10^{8}\ \text{m s}^{-1}$ |
| Molar gas constant | $R$ | $8.31\ \text{J K}^{-1}\ \text{mol}^{-1}$ |
| Boltzmann's constant | $k$ | $1.38 \times 10^{-23}\ \text{J K}^{-1}$ |
| Stefan–Boltzmann constant | $\sigma$ | $5.67 \times 10^{-8}\ \text{W m}^{-2}\ \text{K}^{-4}$ |
| Wien's Law constant | $\lambda_{max}T$ | $2.90 \times 10^{-3}\ \text{m K}$ |
| Planck constant | $h$ | $6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}$ |
| Avogadro constant | $N_A$ | $6.02 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ |
| Permittivity of free space | $\epsilon_0$ | $8.85 \times 10^{-12}\ \text{F m}^{-1}$ |
| Electronvolt | eV | $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}$ |
| Temperature | K | $\text{K} = {}^\circ\text{C} + 273$ |

# Astronomical data

| Astronomical constants | Symbol | Data |
|---|---|---|
| Astronomical unit | AU | $1\ \text{AU} = 1.496 \times 10^{11}\ \text{m}$ |
| Parsec | pc | $1\ \text{pc} = 206\,265\ \text{AU}$<br>$= 3.26\ \text{ly}$ |
| Light year | ly | $1\ \text{ly} = 6.324 \times 10^{4}\ \text{AU}$<br>$= 0.307\ \text{pc}$<br>$= 9.46 \times 10^{15}\ \text{m}$ |
| Mass of Earth | $M_\oplus$ | $5.98 \times 10^{24}\ \text{kg}$ |
| Radius of Earth (equatorial) | $R_\oplus$ | 6378 km |
| Orbital velocity of Earth | $V_\oplus$ | $30\ \text{km s}^{-1}$ |
| Mass of Sun | $M_\odot$ | $1.99 \times 10^{30}\ \text{kg}$ |
| Radius of Sun | $R_\odot$ | $6.96 \times 10^{5}\ \text{km}$ |
| Luminosity of Sun | $L_\odot$ | $3.90 \times 10^{26}\ \text{W}$ |
| Effective temperature of Sun | $T_{\text{eff}}$ | 5780 K |
| Mass of Moon | $M_\leftmoon$ | $7.3 \times 10^{22}\ \text{kg} = 0.0123 M_\oplus$ |
| Radius of Moon | $R_\leftmoon$ | $1738\ \text{km} = 0.273 R_\oplus$ |
| Distance of Sun from centre of our galaxy | — | 8.5 kpc |
| Velocity of Sun about galactic centre | $V$ | $220\ \text{km s}^{-1}$ |
| Diameter of Milky Way galaxy | — | 120 kpc |
| Mass of Milky Way galaxy | — | $7 \times 10^{11}\ M_\odot$ |

# «منابع»

1- Astrophysics Christopher Bishop, John Murray (2000).

2- A Brief History of time – from the Big Bang to Black Holes, S. W. Hawking. Bantam press (1988).

3- Particle physics, Christopher, Bishop, John Murrey (2000).

۴- زینک و اسمیت، نجوم و اخترفیزیک مقدماتی، ترجمه: جمشید قنبری و تقی عدالتی، انتشارات آستان قدس رضوی.

۵- سرمدی ـ مهرداد، واژه‌نامه‌ی اخترشناسی: فارسی ـ انگلیسی، تهران، فرهنگ معاصر، ۱۳۸۵.

6- www.ph.surrey.ac.uk/astrophyics/index.htmol