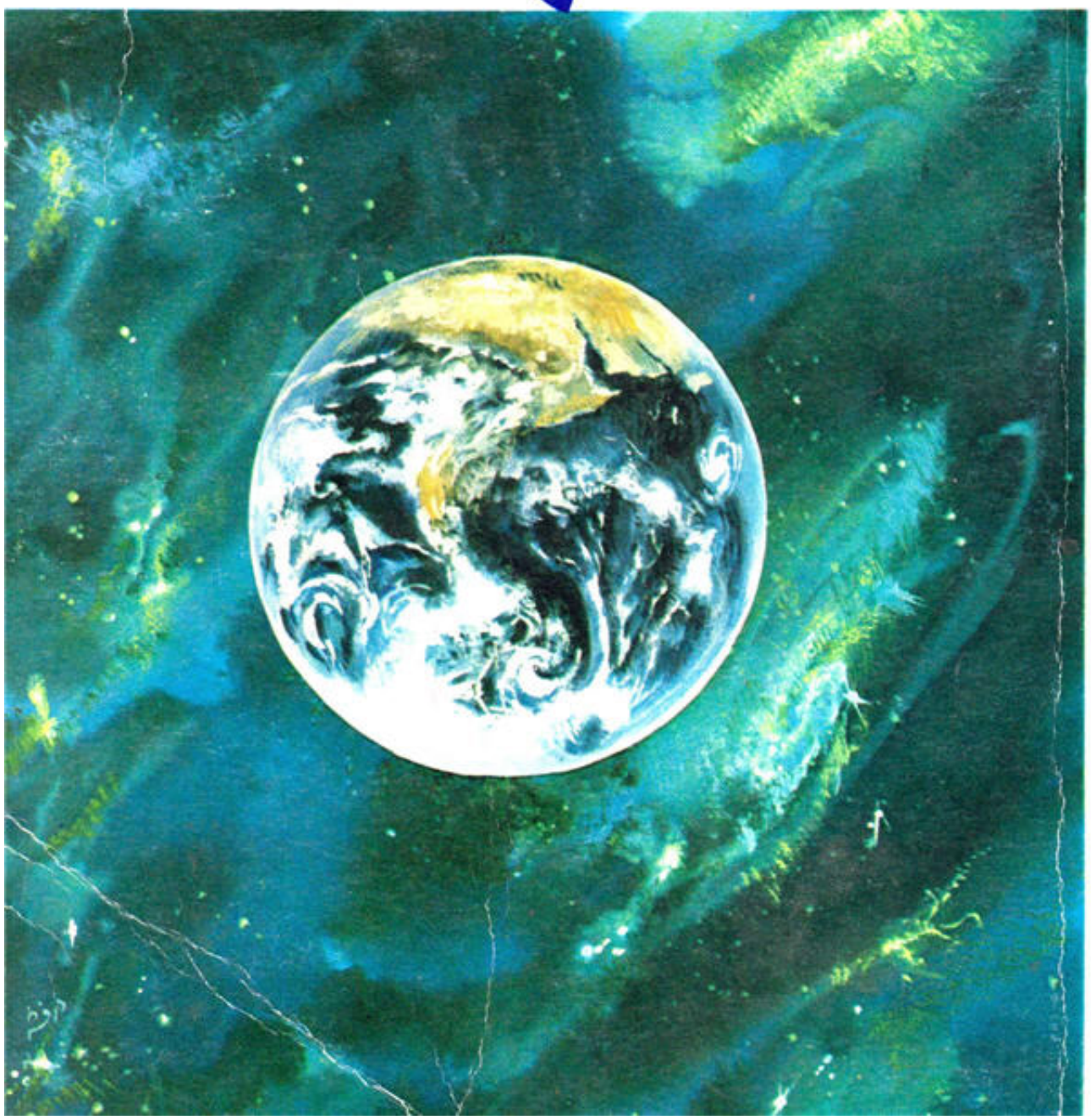
ژرژ گاموف

ترجمهٔ: رضا اقصی

آفرینش جهان



قیمت ۳۵۰ ریال

گیورگی گیماوGeorge Gamowکه در زبان فارسی به جورج (ژرژ) گاموف شهرت یافته است، در ٤ مارس ۱۹۰٤ در اودسا، واقع در جمهوری اوکرائین روسیهٔ شوروی، تولد یافت، و در ۱۹ اوت ۱۹٦۸ در بولدر (ایالت کولورادو، در امریکا) درگذشت. وی فیزیکدان هسته‌ای و کیهانشناس بود، و در زمینهٔ کیهانشناسی، یکی از برجسته‌ترین حامیان نظریهٔ «بیگ‌بَنگ» یا نظریهٔ انبساط جهان بود که طبق آن، جهان براثر انفجار عظیمی ساخته شده که میلیاردها سال پیش روی داده است. علاوه براین، مطالعهٔ او در مورد اسیددزوکسی ریبونوکلئیک DNA به نظریهٔ نوین توارث کمکی اساسی کرد.

گاموف در ۱۹۲۸ به گوتینگن نقل مکان کرد، و در آنجا نظریهٔ کوانتوم در رادیواکتیویته را تحول بخشید. این نخستین نظریه‌ای بود که با موفقیت وضعیت عناصر رادیواکتیو (که بعضی از آنها در چند ثانیه تباه می گردند، در حالی که تباهی بعضی دیگر تازه پس از هزاران سال صورت می گیرد) را توجیه می کرد. وی، به دعوت نیلس بور، در «مؤسسهٔ فیزیک نظری» دانشگاه کپنهاگ به تحصیل پرداخت (۲۹ــ ۱۹۲۸ و ۳۱ــ ۱۹۳۰) و فاصلهٔ میان این سالها را در آزمایشگاه کَوِندیش دانشگاه کیمبریج سپری کرد.

گاموف در ۱۹۳٤ استاد فیزیک نظری دانشگاه جورج واشینگتن شد و با همکاری ادوارد تلرTellerفیزیکدان آمریکایی، نظریهٔ «تباهی بتایی» را به ضابطه درآورد.

گاموف طی تحقیقاتش در مورد فرایندهای هسته و کاربردهایشان در کیهانشناسی، افکار اخترشناس بلژیکی ابه ژرژ لمترLemaitreوفیزیکدان اتریشی‌تبار هانس آلبرشت بته Bethe را به دقت مطالعه و نظریهٔ نوین «بیگ‌بَنگ» را تدوین کرد. اندکی پس از آنکه گاموف این اصل مسلم را پذیرفت که انرژی خورشید ناشی از فرایندهای گرماهسته‌ی است بته این فرایندها را محاسبه کرد و به تشریح جزئیات آنها پرداخت. گاموف و تلر در ۱۹٤۲ نظریهٔ خود را در بارهٔ ساخت درونی ستارگان سرخ غول‌آسا اعلام کردند، و این گام مهمی بود که در جهت شناخت تحول همهٔ ستارگان برداشته می‌شد.

گاموف در ۱۹٤۸ با همکاری دانشجویی به نام رالف الفرAlpher. کتاب «خاستگاه عناصر شیمیائی» را نوشت، و در آن این فرضیه را مطرح کرد که این عناصر از فرایندهایی پی در پی به نام «جذب نوترونی» ساخته شده‌اند. این نظریه را گاهی نظریهٔ الفر-بته-گاموف می‌خوانند. در ۱۹۵٤ علاقهٔ گاموف به علم گسترش یافت، تاحدی که زیست شیمی را نیز در برگرفت. وی مفهوم قانون وراثت را پیشنهاد کرد و مدعی شد که این قانون از ترتیب تکرار نوکلئوتیدهای سه گانه ــ که اجزای اصلی DNA هستند ــ تعیین شده است، و افکار او در تحول سریع نظریهٔ وراثت، که بعدها ارائه شد، نقش عمده داشت.

گاموف از ۱۹۵٦ تا زمان مرگش مقام استادی فیزیک در دانشگاه کولورادو را حفظ کرد. شهرت وی شاید بیشتر به سبب نوشته‌های مردم‌پسندی باشد که به قصد شناساندن موضوعات دشواری چون نسبیت و کیهان شناسی به افراد غیر متخصص انتشار داده است. نخستین اثر او در این زمینه «آقای تامکینز در سرزمین عجایب»، سرآغاز سلسله کتابهای چند جلدی «آقای تامکینز» در سالهای ۱۹۳۹ تا ۱۹٦۷ بود. از دیگر آثار او «یک، دو، سه...بیهایت»، «آفرینش جهان»، «سیاره‌ای به نام زمین»، «ستاره‌ای به نام خورشید»، «ماده، زمین، وآسمان»، «سرگذشت فیزیک»، و«پیدایش و مرگ خورشید» می باشد که همگی به فارسی ترجمه شده است.

ژرژ گاموف

آفرینش جهان

ترجمهٔ رضا اقصی

انتشارات جامی

This is an authorized Persian translation of
THE CREATION OF THE UNIVERSE
by George Gamow.
Copyright 1952 by George Gamow.
Published by The Viking Press, New York.
Tehran 1960
Tehran 1984

نشر جامی

نام کتاب : آفرینش جهان

نویسنده : ژرژ گاموف

مترجم : رضا اقصی

چاپ دوم با تجدیدنظر کامل : شهریور ماه ۱۳۶۳

تیراژ : ۵۵۰۰ نسخه

چاپ : **پژمان**

حق چاپ محفوظ است.

باهمکاری سازمان انتشارات وآموزش انقلاب اسلامی

پیشگفتار

ایـن کتاب سومین کتاب از یك مجموعهٔ سه بخشی کیهانشناختی من است کـه بخشهای اول و دوم آن بـه تـرتیب تولد و مرگ خورشید و سرگذشت زمین بوده است . در حالی که بخش اول اساساً از مکان خورشید مـا در میان ستارگان بحث می کند ، و بخش دوم جـای زمین را در میان سیارات مورد نظـر قرار می‌دهد ، این بخش عمدتاً مربوط به‌جهان به طور کلی است . چندان توجهی به مکان اختصاصی خود ما در پهناوری لایتناهی جهان ندارد ؛ بلکه مسائلی اساسی ازاین قبیل را مورد بحث قرار می‌دهد : آیا جهان آغازی در زمان داشته است یا نه ؟ و آیا پایانی در فضا دارد ؟ رویهٔ معرفی همان است کـه در دو بخش اول بـه کار رفته ، جز اینکه در این بخش چند عبارت ریاضی ، بـالاخص در ضمیمهٔ آخر کتاب ، بـرای خوانندگانی که می‌توانند از آن استفاده کنند ، آورده شده است .

ژ . گاموف

دانشگاه جورج واشینگتن

نوامبر ۱۹۵۱

یادداشتی برای چاپ دوم

از نظرپاره‌ای ایرادات که از سوی بعضی خوانندگان در بارهٔ استفاده از کلمهٔ «آفرینش» شده است ، باید توضیح داد که مؤلف ایـن اصطلاح را نه در مفهوم «ساختن چیزی از هیچ»، بلکه بیشتر «ساختن چیزی شکلدار از بیشکلی» به‌کار برده است ، همچون فی المثل «آخرین مد پاریس».

ژ . گاموف

اوت ۱۹۵۲

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۹
فصل اول ـ تحول در مقابل ثبات	۱۲
سن اتمها	۱۲
سن سنگها	۱۴
سن اقیانوسها	۱۹
سن ماه	۲۱
سن خورشید و دیگر ستارگان	۲۴
سن خوشه‌های کهکشانی	۲۷
سن کهکشان زمین راه شیری	۲۸
فصل دوم ـ انبساط عظیم	۳۳
افقهای درحال گسترش	۳۳
تئوری جهان در حال انبساط	۳۹
چگونه انبساط آغاز شده؟	۴۴
تاریخ تراکم عظیم	۴۵
آیا انبساط هرگز متوقف خواهد شد؟	۵۱
آیا جهان محدود است یا نامحدود؟	۵۲
شمارشهای سحابی، و اشتباه میان فواصل وسنها	۵۶
نخستین مراحل انبساط	۵۸

عنوان	صفحه
فصل سوم ـ ساخته شدن اتمها	۶۲
فراوانی طبیعی انواع اتمی	۶۲
فرضیهٔ تعادل منجمد	۶۷
فرضیهٔ اتم اولیه	۷۵
فرضیهٔ «ایلم» ylem	۷۸
منحنی فراوانی نظری	۸۵
مسئلهٔ عناصر سبك	۹۳
فصل چهارم ـ سلسله‌مراتب تراکمها	۱۰۰
نخستین ابرها	۱۰۰
دوران کهکشانی و آشفتگی گردابی	۱۰۸
ستارگان ظاهر می‌شوند	۱۱۵
ستارگان پیرو جوان	۱۲۲
خوشه‌شدن کهکشانده‌ها و ستارگان	۱۳۰
منظومه‌های سیاره‌ای	۱۳۵
فصل پنجم ـ زندگیهای خصوصی ستارگان	۱۵۱
همزیستی اختری	۱۵۱
منابع انرژی هسته‌ای	۱۶۰
ستارگان رو به پیری	۱۶۸
ستارگان مرده	۱۸۴
نتیجه‌گیری	۱۸۶
ضمیمه	۱۹۰
ریاضیات مربوط به روش هومز (ضمیمهٔ فصل اول)	۱۹۰
انرژی پتانسیل وانرژی جنبشی انبساط (ضمیمهٔ فصل دوم)	۱۹۱
دما و تغییرات چگالی درجهان در حال انبساط (ضمیمهٔ فصل دوم)	۱۹۳
فرایند ساختمانی اتم (ضمیمهٔ فصل سوم)	۱۹۴

مقدمه

از فجر تاریخ مسئلهٔ آفرینش جهان ــ تئوری مبدأ جهان ــ فکر بشر را مغشوش و به خود مشغول داشته است. در میان قدما مبدأ جهان لزوماً با یك عمل آفرینش الهی توأم بوده که روشنی را از تاریکی جدا ساخته، آسمانها را بر فراز زمین ثابت نگاه داشته، و جمیع سیماهای جهان را که وجه تمایز تصویر بی‌اندازه محدود بشر عصر قدیم می‌باشد، سرشته است.

هرچه قرنها گذشت و آدمی اطلاعات و دانسته‌هایی در باب پدیده‌های گوناگون جهان اطراف خود گرد آورد، تئوریهای کیهانزایی صورت علمیتری به‌خود گرفت. نامهای دانشمندانی همچون بوفون، کانت، و لاپلاس عهدی را مشخص می‌سازند که نخستین مساعی برای ادراك مبدأ جهانی به‌کار رفته که منحصراً ناشی از علل طبیعی بوده است. تئوریهای آن زمان که اصولا محدود و منحصر به منظومهٔ شمسی خودمان بود بعداً دوچار تحولاتی شد و به‌یك تئوری نسبتاً کامل و استوار تشکیل سیاره‌ای ارتقاء یافت که توسط کارل‌فون وایتسزکر و جرارد کوییپر تکمیل شد.

درخلال این مدت، پیشرفت نجوم رصدی افقهای تازهٔ اطلاعات جهان را کاملا باز کرد و معمای کهن تولید سیارات را به‌حادثهٔ کوچکی در تصویر بسیار پهناور تحول جهان تبدیل کرد. مسئلهٔ اصلی کیهانزایی امروز این است که مبدأ و تحول خانواده‌های

غولپیکر اختری به‌نام کهکشانه‌هایی* را توضیح دهد که درسراسر فضای پهناور جهان، تا آنجا که با نیرومندترین تلسکوپها دیده می‌شوند، پراکنده شده‌اند. عاملی که کلید ادراك این تحول کیهانی دامنه‌دار به شمار می‌رود قریب ربع قرن پیش** توسط منجم آمریکایی، ادوین هبل، فراهم شد. هبل چنین در یافت که کهکشانه‌هایی که فضای جهان را مسکون ساخته‌اند در یك حالت پراکندگی سریع («جهان در حال انبساط») به سرمی برند. این امر ایجاب می کند که پس از زمانی همهٔ مادهٔ جهان بایدبه طور یکنواخت به صورت جرم گاز گرم و پیوسته فشرده و متراکم شده باشد. چنین ارتباط نزدیك میان پدیدهٔ مشهود انبساط و نتایج مسلم تئوری عمومی نسبیت اینشتین را نخستین بار یك دانشمند بلژیکی پرتخیل به نام ژرژ ادوار لومتر شناخت، و برنامهٔ آرزومندانه‌ای برای تعبیر و توضیح ساختمان بی‌اندازه پیچیدهٔ جهانی تنظیم کرد که امروزهمچون نتیجهٔ مراحل متوالی متمایزی برما معلوم است که باید همراه با انبساط مادهٔ متجانس اولیه روی داده باشد. اگر چنین برنامه‌ای با همهٔ جزئیاتش انجام گیرد، آنوقت است که ما منظومهٔ کاملی از کیهانزایی خواهیم داشت که به وسیلهٔ تبدیل پیچیدگی پدیده‌ها به کمترین تعداد فرضیات اولیه، نیل به‌هدف اصلی علم را تحقق می‌دهد. با آنکه چنین برنامه‌ای، با صورت امروزی آن، ازمرحلهٔ اجرا به دور است، پیشرفتهای قابل توجهی در قسمتهای مختلف آن انجام یافته و به نظر چنین می‌رسد که پایان آن‌هم اکنون نزدیك باشد.

در اینجا باید توجه داشت که در حال حاضر هنوز اختلافات نسبتاً اساسیی میان نظریات دانشمندان مختلفی که در این زمینه کار می کنند وجود دارد. بسیاری ازآنان (از جمله مؤلف این کتاب) چنین گمان دارند که حالت کنونی جهان ناشی از یك روش تحولی پیوسته‌ای است که چند بیلیون سال پیش در مواد متجانس بی‌اندازه متراکم آغاز شده ــ «فرضیهٔ تکوین» ــ ؛ دیگران چنین ترجیح

* ــ در این کتاب اصطلاح کهکشانه به طورعام برای جمیع کهکشانها اختیار شده واصطلاح کهکشان بالاخص برای کهکشانهٔ خودمان به کار برده شده‌است (مترجم).

** اکنون قریب نیم قرن پیش (مترجم).

می‌دهند که جهان را تقریباً به‌همین «حالت موجود» در ابدیت در نظر گیرند ــ فرضیهٔ یك «جهان ایستان» . یکی از طراحان نظریهٔ اخیر در بـاب تحول اختری منجم مشهور روسی وورونتزوف ــ ولیامینوف[1] است که ، ظاهراً فلسفهٔ ماتریالیسم دیالکتیك، وی را به‌پذیرفتن این‌فرضیه وادار کرده است. نظریات مشابهی، به‌صورت نسبتاً متفاوت و به دلیل کاملا متفاوت ، توسط منجم انگلیسی فـرد هویل[2] مراعات شده و سعی کرده است کـه حالت آرامش ادعایی جهان را بـا وارد کردن یك فـرضیهٔ خلقت دائمی ماده در فضای بین کهکشانی توضیح دهد.

شاید بسیار زود باشد کـه بگوییم صحت کدام یك از ایـن دو نظر سرانجام ثابت خواهد شد. موضوع اصلی این کتاب‌این است که دلایل را به نفع فرضیهٔ تکوین عرضه دارد و بـا نظر انتقادی ادعای بنیانگذاران طرح «جهان ایستان» را تجزیه و تحلیل کند.

امید است که این کتاب یك بررسی کافی از موضوع را برای دانشمندان رشته‌های مختلف تشکیل خواهـد داد ، و درعین حال برای همهٔ علاقه‌مندان به مسئلهٔ کیهانزایی نو مفید واقع خواهد شد.

۱ ــ وورونتزوف ــ ولیامینوف ، **سحابی‌گازی و ستارگان نو** (در روسیه) ، فرهنگستان علوم اتحاد جماهیر شوروی، ۱۹۴۸، تجدید نظرشده به توسط شترووه در مجلهٔ **نجومفیزیك** سال ۱۹۴۹، صفحات ۱۱۰ و ۳۱۵.

۲ ــ فرد هویل، **طبیعت جهان**، هارپر و برادران، نیو یورك.

فصل اول

تحول در مقابل ثبات

پیش از آنکه مسئلهٔ مبدأ جهان خود را مورد بحث قرار دهیم باید ازخود پرسش کنیم که آیا واقعاً چنین بحثی ضروری است. آیا ممکن نیست صحیح باشد که جهان درحالی که از ازل وجود داشته، و به راههای گوناگون سیمای حقیر خود را تغییر داده ، پیوسته این سیما را آن طور که امروز برما معلوم است در اساس حفظ کرده‌است؟ بهترین راه پاسخ دادن به این پرسش گردآوری اطلاعاتی است مربوط به سن احتمالی قسمتهای اصلی جهان و سیماهایی که حالت کنونی آن را مشخص می‌سازند.

سن اتمها

مثلا ممکن است از شیمیدان یا فیزیکدان پرسید که سن اتمهای سازای موادی که جهان را تشکیل می‌دهند چیست؟ فقط نیم قرن پیش، یعنی قبل‌از کشف رادیو آکتیویته وتعبیر از آن به تباهی خودبخود اتمهای ناپایدار، چنین پرسشی چندان مفهوم نداشت: اتمها همچون

ذرات نامرئی اصلی به شمار می‌رفتند که در یك دورهٔ نامتناهی زمانی وجود داشته بوده‌اند. با این حال، پس‌از آنکه عناصر رادیـو آکتیو شناخته شد، وضع بکلی تغییر کرد، و آشکار شد که اگر اتمهای عناصر رادیـو آکتیو از زمانهای بسیار دور تشکیل یافته‌انـد ، بدیـن ترتیب فراوانی نسبی عناصر رادیـو آکتیو گوناگونی کـه اکنون مشاهده می‌شود ممکن است کلیدی برای دسترسی به زمان مبدأ آنها به دست دهد. قبل از هرچیز متوجه می‌شویم که فراوانی توریوم و ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۸ ($U^{۲۳۸}$) نسبت به سایر عناصر سنگین، مثلا بیسموت یا جیوه یا طلا، کمترنیست. چون دورهٔ نصف عمر[۱] توریوم وایزوتوپ معمولی‌اورانیوم به ترتیب ۱۴ بیلیون[۲] و ۴٫۵ بیلیون سال است، باید چنین نتیجه‌گرفت که چند بیلیون سالی بیش‌از تشکیل این اتمها نمی‌گذرد. ازطرف دیگر، چنانکه امروز برهر کس معلوم است، ایزوتوپ شکافپذیر اورانیوم ۲۳۸ بسیار کمیاب است، وتنها ۰٫۷ درصد ایزوتوپ اصلی را تشکیل می‌دهد؛ و اگـر جز این می‌بود، « طـرح مانهتن » بآسانی ماهیگیری در یك چلیك می‌نمود. نصف عمر $U^{۲۳۵}$، یعنی ۰٫۹ بیلیون سال به نسبت قابل توجهی کوتاهتر از نصف عمر $U^{۲۳۸}$ است؛ و چون مقدار کل اورانیوم شکافپذیر درهر ۰٫۹ بیلیون به نصف کاهش می‌یابد، بایـد هفت بار[۳] چنین دورهٔ زمان، یعنی قریب ۶ بیلیون سال گذشته باشد تا، درصورتی که هردو ایزوتوپ به مقدار قابل‌مقایسه‌ای

۱ــ دورهٔ نصف عمر یك عنصر رادیو آکتیو دورهٔ زمانی است که مقدار اولیهٔ آن را از دو برابر به یك برابر تقلیل دهد. از این رو، پس از ۲ دوره ، ۳ دوره، وغیره نصف عمر، تنها یك ربع، یك هشتم، وغیره از مقدار اولیه باقی خواهد ماند.

۲ــ اصطلاح بیلیون به جای هزار میلیون به‌کار رفته است.

۳ــ زیرا $(۱/۲)^{۷} = ۱/۱۲۸ = ۰/۰۰۸$

وجود می‌داشت، ایزوتوپ اورانیوم به‌کمیابی کنونی تنزل می‌یافت.

بـه همین ترتیب در معدودی عنصر رادیو آکتیو دیگر، نظیر پوتاسیوم رادیو آکتیو طبیعی، ایزوتوپهای ناپایدار نیز پیوسته به مقدار نسبی بسیار کم یافت شده‌اند. این کیفیت چنین به فکر می‌اندازد که این ایزوتوپها به طرز قابل توجهی به وسیلهٔ تباهی بطئی کـه درطی بیش از چند بیلیون سال انجام گرفته تقلیل یافته‌اند. بدیهی است دلیل قاطعی برای این فرض وجود ندارد کـه تمام ایزوتوپهای یك عنصر معین در اصل به مقادیر کاملا متساوی تولید شده باشند، ولی انطباق نتایج قابل توجه است، چـه زمان تقریبی تشکیل هستهٔ آنها را تعیین می کند. باآنکه عناصر رادیو آکتیو قدیمتر از این را که نصف عمر آنها کوچکتر از جزئـی از یك بیلیون سال است، بآسانی مـی‌توان مصنوعاً درپیلهای اتمی تولید کرد. این مطلب ضمناً نشان می‌دهد که تشکیل انواع اتمی زودتراز چند بیلیون سال قبل تشکیل نیافته‌است؛ و از این‌رو دلیل قاطعی برای این فرض وجود دارد که اتمهای رادیو-آکتیو، وتـوأم با آنها همهٔ اتمهای پایدار دیگر در بعضی اوضاع و احوالهای غیر عادیی تشکیل یافته‌اند کـه باید چند بیلیون سال قبل در جهان وجود می‌داشت.

سن سنگها

درمرحلهٔ بعدی تحقیقات خود باید از دانشمند زمینشناس چنین سئوال کنیم: سنگهایی که قشر کرهٔ زمین را تشکیل می‌دهند چه سنی دارند؟ سن سنگهای گوناگون ـ یعنی زمانی که ازهنگام انجماد آنها ازحالت مذاب گذشته است ـ را می‌توان با دقت بسیار زیاد به وسیلهٔ روشی که به «روش ساعت رادیو آکتیو» موسوم است تخمین زد. این

روش که در اصل توسط لرد راذرفرد تکمیل شده متکی برتعیین مقدار سربی است که درانواع سنگهای معدنی رادیو آکتیو، همچون پچبلند و اورانینیت، وجود دارد. نکتهٔ قابل توجه وپرمعنی‌این است که تباهی طبیعی سنگهای معدنی رادیو آکتیو نتیجهٔ تشکیل ایزوتوپهای سربی است که به‌وسیلهٔ مقداری معین از جسم رادیو آکتیو رسوب می‌کند. ازین رو هرگاه مقادیر نسبی ایزوتوپهای سرب تولیدشده و اجسام رادیو آکتیو مولدآنها (یعنی نسبتهای $\frac{Pb^{۲۰۶}}{U^{۲۳۸}}$ ، $\frac{Pb^{۲۰۷}}{U^{۲۳۵}}$ ، $\frac{Pb^{۲۰۸}}{Th^{۲۳۲}}$) اندازه گیری شود، و هرگاه نسبتهای تباهی مربوط معلوم شود، می‌توان سه تخمین مستقل (ومعمولا منطبق) از زمانی به دست آورد که یك جسم رادیو آکتیوی که متعلق بـه دوره‌های زمینشناختی مختلف می‌باشد، نتایجی که در جدول صفحهٔ بعد نشان داده شده به دست می‌آیـد. دو سنگ معدنی آخر جدول کهنترین سنگهایی هستند که تاکنون یافت شده، واز سن آنها باید چنین نتیجه گرفت که قشر زمین دست کـم ۲ بیلیون سال عمر دارد.

روش بسیار ماهرانه‌ای بتازگی توسط زمینشناس انگلیسی آرثر هومز[1] پیشنهاد شده است که از زمان تشکیل رسوبهای گوناگون رادیو-آکتیو فراتر می‌رود، و مدعی رقم دقیقی بـرای مـواد تشکیل‌دهندهٔ زمین است. شاید ساده‌ترین راه برای مجسم ساختن این روش از راه داستانی باشد که در باب گله‌دار گیج و فراموشکاری نقل می‌کنیم: گله‌دار به یاد می‌آورد که یکی از روزهای بهار همهٔ گلهٔ خود را برای چریدن درمرتع رها کرده ولی نمی‌تواند تاریخ انجام دادن ایـن کار را درست به خاطر آورد. همچنین به یاد دارد که در روزهای مختلف

1_ Arthur Holmes

سن سنگهای معدنی رادیوآکتیو گوناگون

سنگ‌معدنی	محل	دورهٔ زمینشناختی	سن تخمین‌شده برحسب میلیون سال
پچبلند	کولورادو (ایالات متحدهٔ امریکا)	دورهٔ سوم	۵۸
»	بوهم (اروپا)	دورهٔ کربونیفر	۲۱۵
»	کنگوی بلژیك (افریقا)	پرکامبرین	۵۸۰
اورانینیت	ویلبرفرس (کانادا)	»	۱۰۳۵
پچبلند	گریت بیرلیك (کانادا)	»	۱۳۳۰
اورانینیت	کارلیا (اتحادجماهیرشوروی)	»	۱۷۶۵
» »	مانیتوبا (کانادا)	»	۱۹۸۵

درطی تابستان گله را از مراتع مختلف جمع‌آوری کرده و آنها را درپناهگاه نوسازی (یك پناهگاه در هـر مرتع) جا داده است، ولی این روزها را نیز فراموش کرده است. آیا راهی برای او هست که ترتیب و ردیف این کارها را باز سازد؟

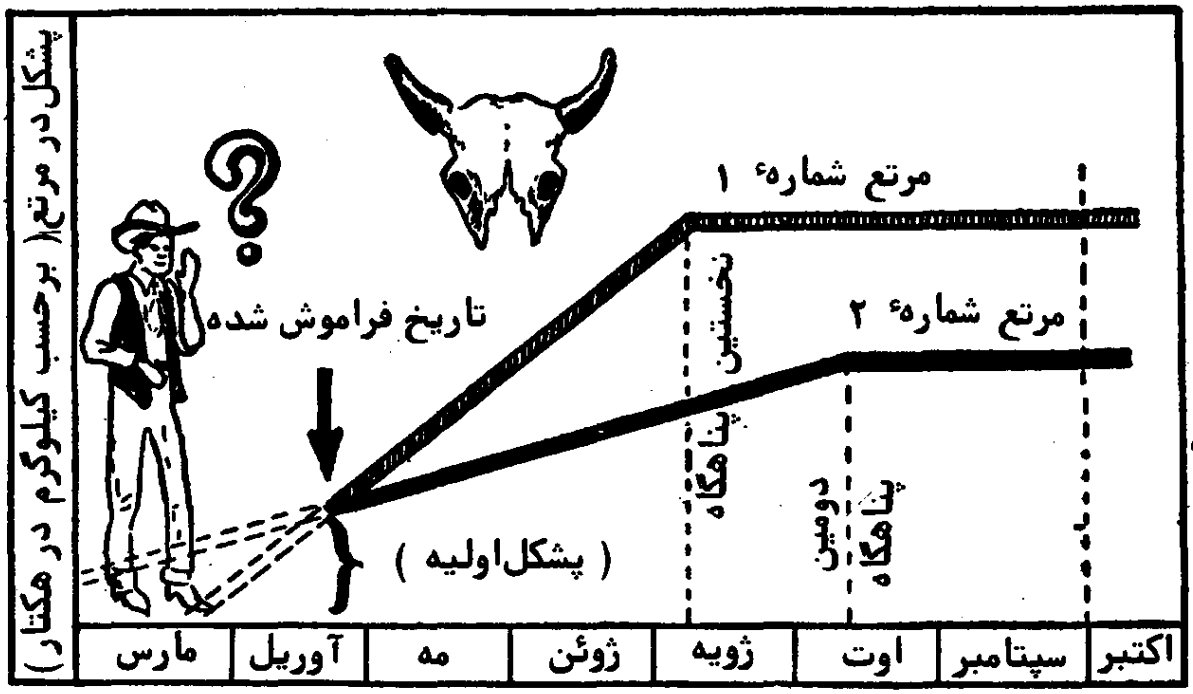
بلی، چنین راهی‌وجود دارد، مشروط برآنکه‌وی متوجه باشد به پشگلی که‌گله‌اش در پناهگاهها و مراتع تولید کرده دست نزند. خواننده شاید گمان کند که در اینجا پشگل تولیدشده به‌وسیلهٔ گله مانند نشانه‌ای ازسرب تولیدشده به وسیلهٔ تباهی اورانیوم به‌کار می‌رود، و محصور ساختن گله در پناهگاهها تشکیل رسوبهای رادیوآکتیو را در سنگهای در حال انجماد نشان می‌دهد. بدیهی است با انـدازه‌گیری

مقدار کل پشگل جمع‌شده در هر پناهگاه وتقسیم آن بر گله‌های مربوط (یعنی درست نظیر روش ساعت رادیو آکتیو برای تعیین سن سنگها) یافتن تاریخ تقریبی اشغال پناهگاهها آسان خواهد بود. ولی در باب زمانی که نخستین بار گله در مراتع رها شده چه باید کرد ـ تاریخ تشکیل اتمهای رادیو آکتیو؟

درنخستین نظراجمالی ممکن است چنین به نظر رسد که به‌کار بردن روش مشابهی در این مورد، به وسیلهٔ جمع آوری همهٔ پشگلهای تولیدشده به توسط گله هنگامی که در مراتع مشغول به چریدن بوده ، میسر باشد، با این حال چنین روشی نمی‌تواند پاسخ صریحی بـه ما بدهد، زیرا ممکن‌است قبل از نخستین رهایی گله درمراتع، پشگلهای دیگری نیز درمراتع وجود داشته بوده‌باشد (نظیرسربی که با اورانیوم همزمان بوده و، بی آنکه تباهی‌اورانیوم بعداً آن را تولید کرده باشد، درطی دورانی که همهٔ اتمها تشکیل یافته بـه وجودآمده است). البته همین اشکال در به کار بردن روش پشگل بـرای تعیین سن پناهگاهها ممکن است پیش آیـد ، اما در این حال بـه سبب کـوچکی عرصهٔ پناهگاهها، ازمقدار کل سابق بالنسبه به پشگل تولیدی گله، حتی در مدت چند روز، می‌توان صرف نظر کرد، وحال آنکه در زمین باز و نامحصور وضع بکلی‌متفاوت است و وجود پشگلهایی ازپیش ممکن است تأثیر مهمی در نتیجه داشته باشد.

اگر موضوع را مشروحتر مورد نظر قرار دهیم باید درك کنیم کـه ، با فرض یکسان بودن پشگلهای قدیمتر در همهٔ مـراتع (فرضیهٔ یکنواختی اتمسازی)، در مراتعی که از آنها گله زودتر به پناهگاه رفته پشگلها کمتر است (البته زمینشناسان در سنگهای دوران زمینشناختی قدیمتر کمتر از این مقدار سرب تولیدشده بـه وسیلهٔ رادیو آکتیویته

می‌یابند). برای هرمتر مرتع می‌توان مبدأ را مقدار پشگلهایی درنظر گرفت که ازهنگام قرارگرفتن گله در پناهگاه تغییرنکرده، و با کاستن مقدار تولید روزانهٔ پشگل زمان پیشین تولید پشگلها را به دست آورد. بدین وسیله باید به روزی (در بهار) رسید کـه مقدار پشگل در مراتع صفر بوده است. اگر پشگل قدیمتری وجـود نمی‌داشت، این تاریخ روزی راکه گله‌دار فراموش کرده نشان خواهد داد، ولی اگر از سابق نیز پشگلی درکار بوده باشد (که مسلماً مقدار آن معلوم نیست) ، به کار بردن این روش در مراتع خاص بـرای پاسخ دادن به پرسش ما کافی‌نخواهد بود. با این حال، اگر اطلاعاتی راکه ازمراتع مختلف به دست آمده مقایسه کنیم وضع بکلی متفاوت است. منحنیهایی کـه داستان گذشتهٔ پشگلهایی را نمایش می‌دهدکه در مراتع به جاگذاشته شده، به عبارت کلی متفاوتند، زیرا شکل آنها بستگی به وسعت زمین، تعدادگله‌ها، تاریخ ساختمان پناهگاهها، وغیره دارد. ولی اگر کلیهٔ



شکل۱-چگونه می‌توان گله‌داری راکه تاریخ رهاکردن گلهٔ خود را در مرتع فراموش‌کرده کمك‌کرد؟ (طریقهٔ زمینشناختی آرثر هومز)

این منحنیهارا بر روی‌یك نمودار (مانند نمودار شکل۱) ترسیم کنیم، همه در یك نقطه متقاطع خواهند شد کـه تاریخ فـراموش‌شدهٔ آزاد کردن‌گله در مرتع و مقدار پشگل قدیمی موجود در آن تاریخ را به دست می‌دهد. با به کار بردن این‌روش (که با وارد کردن دسته‌های گوسفندها وپشگل آنها برای جوابگویی دو ایزوتوپ U^{235} و U^{238} اورانیوم و دو ایزوتوپ Pb^{206} و Pb^{207} سرب تـولیدشده بـه وسیلهٔ رادیو آکتیویته بسط یافته) در مقادیر ایزوتوپهای سربی که در دوران مختلف زمینشناسی در سنگها یافت شده، هومزچنین در یافت که همهٔ منحنیها درنقطه‌ای متقاطع‌اند که مربوط بـه سن ۳،۳۵ بیلیون سالی است که باید سن صحیح زمین ما را نشان دهد.

سن اقیانوسها

با کمکی کـه از زمینشناسان در بارهٔ رسوبهای جامد به دست آوردیم، بهتراست که یك بار دیگر با این سئوال به‌آنان رجوع کنیم: اقیانوسهایی که بـه این اندازه سطح زمین را پوشانیده‌اند چـه سنی دارند؟ پاسخ کاملا صحیحی در این مـورد یافت نمی‌شود. نخستین روشی که پیشنهاد شد دو قرن پیش توسط ادمندهالی[2] بـود که تناوب ستارهٔ دنباله‌داری راکه بـه نام خود اوست پیشبینی کـرد. این روش مبنی بر این واقعیت است که شورایی آب اقیانوسها اساساً مربوط به نمکهایی است که به وسیلهٔ رودها وارد آنها می‌شود. می‌دانیم که‌آب رودها مقادیرکم نمك در خود محلول داردکـه مـزهٔ آن را با آب متفاوت می‌سازد. جویبارها و جریانهایی کـه بر دامنهٔ کـوهها جاری

۱ــ به ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود.

2— Edmund Haley

هستند قسمت عمدهٔ این نمکها را درسنگهای سطح زمین شست وشو می‌کنند. آب رودها که در حوضچه‌های اقیانوسی می‌ریزد تبخیر می‌شود؛ بخار آب به صورت ابر درمی‌آید وسپس با دورهٔ منظمی به صورت باران بر روی قاره‌ها باز می‌گردد. نمکها تبخیر نمی‌شوند، و پیوسته در اقیانوسها جمع شده تدریجاً برشورایی آب می‌افزایند. با تقسیم کردن مقدار کل نمکی که اکنون در اقیانوسها محلول است بر مقدار معلوم نمك سالیانه‌ای که به وسیلهٔ رودها درآنها وارد می‌شود، می‌توان دریافت که شورایی اقیانوسها در هر قرن یك میلیونم درصد افزایش می‌یابد. هرگاه شرایط موجود درآینده تغییرنکند، چنین نتیجه می‌شود که همهٔ اقیانوسها تقریباً پس‌از ۳۰۵ بیلیون سال دیگر ازنمك اشباع (۳۶٪) شده وآن‌وقت شبیه بحرالمیت وگریت سالت لیك خواهند شد. و نیز چنین نتیجه می‌شود که رودها باید ۳۰۰ میلیون سال پیش به جریان افتاده باشند تا مقدارنمك اقیانوسی کنونی (۳٪) جمع شده باشد.

ولی چون معلوم شده است که نرخ رسوب کنونی نمك به طور استثنایی زیاد می‌باشد؛ رقم فوق رقمی نقصانی است. دلیل این امر آن است که درطی قسمت اعظم تاریخ زمین، سطح قاره‌ها کاملا صاف وهموار بوده. کوههای کهن کاملا شسته و به داخل اقیانوسها برده شده، وکوههای تازه هنوز به وسیلهٔ انقباض تدریجی قشر زمین تشکیل‌نشده بوده‌اند (زمینشناسان دست کم ده چنین دوره‌های پیدایش کوه متوالی را حساب کرده‌اند). به طور بسیار تقریبی تخمین شده که در طی این دوره‌های صاف شدن زمین ، تأثیر فرسایش رودها باید بیش‌از ۱/۳۰ آنچه امروز هست نبوده، و در نتیجه چنین به دست می‌آید که سن تخمین‌شدهٔ اقیانوسهای زمین چند بیلیون سال است ،

و این رقمی است که با سن تخمین‌شدهٔ قدیمترین سنگها سازگار است.

سن ماه

پس از سپاسگزاری از علم زمینشناخت برای اطلاعات مفیدی که در اختیار ما گذاشته، بهتر است به علم نجوم روی آوریم و در بارهٔ سن اجسام آسمانی گوناگون پرسش و نخستین پرسش خود را چنین آغاز کنیم: سن ماه چقدر است؟ نخستین چیزی که آموخته‌ایم این است که ملکهٔ آسمان شب همیشه آن چنان که هست نبوده و در زمان گذشته و بسیار قدیم چندان به زمین نزدیك بوده که تقریباً با دراز کردن دست بالای سر لمس کردن آن ممکن می‌شد (به فرض وجود حیواناتی در آن عهد که سرودستی می‌داشتند) . به طوری که کارهای منجم انگلیسی جورج داروین (فرزند چارلز داروین زیستشناس) نشان داده، ماه پیوسته در حال دور شدن از زمین است ، و فاصلهٔ آن تا زمین به نرخ تقریبی ۱۲۷ میلیمتر در سال افزایش می‌یابد . تذکر این نکته لازم نیست که حتی اسبابهای بسیار دقیق قادر به اندازه گیری چنین افزایش خفیفی در مسافت ماه نیستند ، ولی از راه غیر مستقیم ، و در عین حال مناسب و کامل، همین نتیجه را می‌توان به دست آورد.

برای آگاه شدن برطرز استدلال باید به یاد آورد که تأثیر متقابل ماه و زمین به حداکثر پدیدهٔ امواج کشندیی آشکار می‌شود که به وسیلهٔ جاذبهٔ ماه بر اقیانوسهای زمین روی می‌دهد. امواج کشندیی که پیرامون زمین جاری می‌شوند در مسیر خود به مقاومتی برمی‌خورند که به صورت قاره‌هایی است که سر راه آنها قرار گرفته‌اند. هرگاه از نقطهٔ ثابتی در فضا بتوان به منظومهٔ زمین ـ ماه نگاه کرد ، مشاهده

می‌شود که کـرهٔ زمین میان دو بـر آمدگی کشندی، همان طور کـه محور یك چرخ میان دو سر ترمزی دوران می کند ، می‌چـرخد ، و بدین سبب باید انتظار داشت کـه دوران زمین بتدریج کند شود ، و در نتیجهٔ این امر به نوبهٔ خود سبب‌یك افزایش تدریجی درطول مدت شبانه‌روز ماگردد . بنابر یکی از قوانین اساسی مکانیك ـ قانون بقاء مقدار حرکت ـ ، این دراز شدن مدت شبانه‌روز باید ناشی از دراز شدن دورهٔ تناوب قمر (ماه قمری) و از افزایش تدریجی فاصلهٔ آن تا زمین باشد .

چنین تخمین شده‌است کـه اصطکاك کشندی مـاه ، علاوه بـر افزایشی که در فاصلهٔ ماه تا زمین می‌شود و قبلا بدان اشاره شد، طول مدت شبانه‌روز را در حدود ۱/۱۰۰۰ ثانیه در هر قرن وطول ماه را ۱/۸ ثانیه در هر قرن افزایش خواهد داد . هراندازه‌که این تغییرات که در طول مدت شبانه‌روز و مدت ماه تخمین شده خفیف بـه نظر رسد ، با این حال می‌توان با رصدهای مستقیم نجومی آنها را مورد رسیدگی قرار داد . ایـن تغییرات فعلا مـوضع خورشید را در میان ستارگان ثابت (کواکب) ۰٫۷۵ ثانیهٔ قوسی ، و موضع ماه را ۵٫۸ ثانیهٔ قـوسی در هـر قـرن پیش می‌بـرد . رصدهای کنونی مقادیـر ۰٫۰۳ ± ۱٫۵ و ۰٫۷ ± ۴٫۳ را به دست می‌دهند که با تأثیرات تخمین‌شده تا اندازه‌ای که معقول است سازگاری دارد. نتیجتاً در صحت و دقت افـزایش تخمین‌شدهٔ فاصلهٔ میان زمین و ماه ممکن است اندکی تردید یافت شود.[1]

۱ـ توجه بـه این نکته جالب است کـه افـزایش مدت شبانه‌روز و طول مدت ماه نقش‌عمده‌ای در ارتباط میان خسوفهایی ایفا می کند که ازنوشته‌های قدیمی نقل شده و از محاسباتی کـه به وسیلهٔ روشهای مکانیك سماوی به ←

با تقسیم کردن فاصلهٔ کنونی ماه ــ ۳۸۴،۵۵۰ کیلومتر ــ برمیزان پسروی آن در سال، چنین خواهیم یافت که عملا ماه باید چهاربیلیون سال* قبل در مجاورت زمین بوده باشد. یکی از نتایج شگفت‌انگیز این محاسبات آن است که در آن زمان طول مدت شبانه‌روز (دورهٔ تناوب روزانهٔ زمین) متساوی و هر دو برابر با هفت ساعت کنونی بوده‌اند !

در آن زمان می‌بایستی ماه بیحرکت بالای نقطه‌ای از سطح زمین آویزان باشد که در آنجا ، براثر جدا شدن از مادرخود به توسط

→

دست می‌آید انجام یافته‌است. نوشته‌های مردم بابل و مصر که تاریخ آنها تا قرن هشتم قبل از میلاد می‌رسد تاریخ خسوفهای رصدشده را به دست می‌دهد. این آثار ثبت‌شده تاریخهایی را نشان می‌دهد که با محاسبه کاملا سازگاراست، ولی با محاسباتی که نسبت به تاریخ روز مشاهدهٔ خسوف به دست می‌آید منطبق نیست. عملا در پاره‌ای موارد گرفتهای خورشیدی که درنوشته‌ها ثبت است، بنابرمحاسبه، چند ساعت قبل ازطلوع خورشید یا پس از غروب آن در شرق مدیترانه وقوع می‌یابند، به طوری که ارصاد آنها در بابل یا مصر میسر نخواهد بود؛ توضیح این اختلاف در این واقعیت است که محاسبات نظری با فرض ثابت ماندن طول مدت شبانه‌روز انجام یافته ، و حال آنکه اگر شبانه‌روز به نسبت ۰،۰۰۱ ثانیه در هر قرن دراز شود ، لازم می‌آید که چهل قرن پیش ۰،۰۴ ثانیه کوتاهتر بوده باشد. مقدارمتوسط طول مدت شبانه‌روز برای این چهل قرن فاصله باید ۰،۰۲ ثانیه کوتاهتر از مقدار کنونی آن در نظر گرفته شود. ولی چهل‌قرن شامل ۱،۳۰۰،۰۰۰ روزاست، و از این رو اختلاف کل

ساعت۸ = ثانیه ۲۸۰۰۰ = ثانیه ۰،۰۰۲ × ۱،۴۰۰،۰۰۰

است. همین امر برای توضیح اینکه مردم بابل ومصر گرفتهای‌خورشیدی را، هنگامی که خورشید بالای افق است، مشاهده می کردند کافی می‌باشد.

* خارج قسمت ۲ عدد ۳۸۴،۵۵۰ و $12{,}7/10^5$ برابر با 3×10^9 است. بنا براین به جای ۴ بیلیون باید ۳ بیلیون سال به حساب آید (مترجم).

نیروهای کشندی خورشید، به دنیا آمده است . این قدیمترین حالت قمر خودمان را بالاخص ممکن است «ماه هـاوایی» نامید ، زیرا بـه احتمال بسیار قوی زادگـاه آن میان اقیانوس کبیر بوده است . عملا دلایلی در دست است که به وسیلهٔ آن این فرضیه را می‌توان پذیرفت که حوضچهٔ اقیانوس کبیر چیزی جزیك اثر غولپیکر در پوستهٔ خارایی «مادر–زمین» نبوده ، که یادگار جاودان تولد نخستین و تنها دختر آن است.

سن خورشید و دیگر ستارگان

اما در بارهٔ خورشید و ستارگان ، یعنی سن آنها، چه می‌دانیم ؟ سن کنونی کهکشان را، که خانوادهٔ عظیمی است که خورشید ما عضو کوچکی از آن است، می‌توان بـه وسیلهٔ تحقیق در منابع انرژیی که ستارگان گرم و درخشان نگاه می‌دارد، تخمین کرد. این امر مسلم‌شده است که انرژی تولیدشده در ستارگان از تبدیل ئیدروژن اولیهٔ آنها به هلیوم بوده (این موضوع در فصل پنجم مشروحاً مورد بحث قرار گرفته) ، و معلوم شده است که در تبدیل هسته‌ای ئیدروژن به هلیوم ، برای هر اتم ئیدروژن مصرف‌شده ، ۲×۱۰^{-۱۲} کالری حرارت آزاد می‌شود. چون، فی‌المثل، خورشید ما درهر ثانیه $۱۰^{۲۶}$ کالری حرارت آزاد می کند، لازم می آید که در هر ثانیه ۵×۱۰^{۳۸} اتم ، یا در حدود ۸۰۰ میلیون تن ئیدروژن مصرف کند. از طرف دیگر نیز می‌دانیم که ئیدروژن قریب ۰٫۰۵۰ جرم همهٔ خورشید را، که ۲×۱۰^{۲۷} تن است، تشکیل می‌دهد؛ بنا براین لازم می آید که

$$\frac{۱ \times ۱۰^{۲۷}}{۸ \times ۱۰^{۸}} = ۱٫۴ \times ۱۰^{۱۸} \text{ ثانیه} = ۵ \times ۱۰^{۱۰} \text{ سال} *$$

* عدد صحیح در این معادله $۱٫۲۵ \times ۱۰$ یا ۴×۱۰ است(مترجم).

بگذرد تا کلیهٔ ئیدروژن خود را مصرف کند. بنابراین اگر فرض کنیم که خورشید ما سه میلیون سال است که می‌سوزد، تنها ۷٫۵٪ سوخت خود را توانسته است مصرف کند، و از این لحاظ باید همچون ستاره‌ای به شمار رود که در مراحل اولیهٔ خود به سر می‌برد. ولی باید به خاطر آورد که ستارگانی که ابعادشان مختلف است سنهای متفاوت دارند. به طوری که ستارگانی که طول عمر آنها یکسان است ممکن است در مراحل کاملا متفاوتی از دوران تحول خود باشند. عملا یك ستارهٔ کوچك، متوسط، و بزرگ، که در گذشته همزمان به وجود آمده‌اند، ممکن‌است اکنون به مراحل مختلفی از تحول خود رسیده باشند، همان طور که یك موش و یك سگ و یك موجود بشری در یك سال مراحل مختلفی از تحول را به دست می‌آورند.

دلیل این اختلاف طول عمر ستارگان را می‌توان در این‌حقیقت یافت که درخشندگی اختری به نسبت توان سوم جرم ستاره افزایش می‌یابد. بدین سبب، ستاره‌ای که جرمش دو برابر جرم خورشیداست سوخت خود را هشت بار تندتر مصرف می‌کند، و چون مقدار کل سوخت آن تنها دو برابرسوخت‌خورشید است (به تناسب‌جرم آنها)، طول عمر چنین ستاره‌ای فقط ۱/۴ طول عمر خورشید خواهد بود. این اختلاف طول عمر ستارگان راه مناسبی برای تخمین سکنهٔ اختری کهکشان ما فراهم می‌سازد. دلایل رصدی نشان می‌دهد که اختلاف عمیقی میان ستارگانی که چهار برابر سبکتر از جرم خورشید و آنهایی که سنگینتر از آن هستند وجود دارد. ستارگان گروه اول قسمت عمدهٔ سکنهٔ اختری را تشکیل می‌دهند و افراد بسیار آرام این جامعه هستند. به محض آنکه به حد ستارگان چهار بار سنگینتر از خورشید برمی‌خوریم، چنین در می‌یابیم که تعداد ستارگان بشدت تقلیل می‌-

یابد ، و آن چند ستاره‌ای هم که در این گروه قرار می‌گیرند به طرز نسبتاً غیر عادی رفتار می‌کنند؛ چند تا از آنها به طـرز عجیبی حول محور خود می‌چرخند و جریانهای مواد بسیار گرم از برآمدگیهای استوایی خود خارج می‌سازنـد .[1] در خط مرزی میان این دوگـروه اصلی ستارگانی قرار می‌گیرند که ظاهراً در حالت بسیار نا پایداری هستند و رفتارشان خارج از هـر گونه عادات و رفتار سماوی است . پـاره‌ای از آنها بـه نسبتهای عظیم متورم شده و متناوبـاً بـا تغییر درخشندگی به تپیدن آغاز می‌کنند: اینها **قیفاووسیان یا ستارگان متغیر قیفاوسی** هستند. برخی دیگر از طرق انفجار کامل می‌گذرند و از برقهای آنی کوچك (انفجارهـای متناوب ستارگان U جوزا) بـا انفجارهـای تماشایی وجالبی (فوق نواختر) ردیف بندی می‌شوند که تولید ستارهٔ مجزایی می‌کنند که موقتاً به درخشندگی کهکشانه‌ای است که به‌آن تعلق دارد.

درفصل پنجم بحث مشروحتری دربارهٔ این تپشها و انفجارهای ستارگان خواهید یافت که به‌نظر می‌رسد نشانه‌هایی از سن زیادآنها و تشنجات گذشتهٔستارگانی باشد که تقریباً ذخیرهٔ سوخت‌خود رامصرف کرده‌اند.با به‌کاربردن ارتباط میان جرمهای اختری و طول عمر آنها که‌قبلا ذکر شد،چنین‌خواهیم یافت که سن‌متوسط ستارگانی که‌اکنون نزدیك به مرگ حرارتی خود هستند قریب سه بیلیون سال است .[2] از

۱ــ ستارگان گروه اول اغلب دوران هم‌می‌کنند، ولی‌حرکت دورانی آنها، مانند دوران خورشید، بسیار کند است.

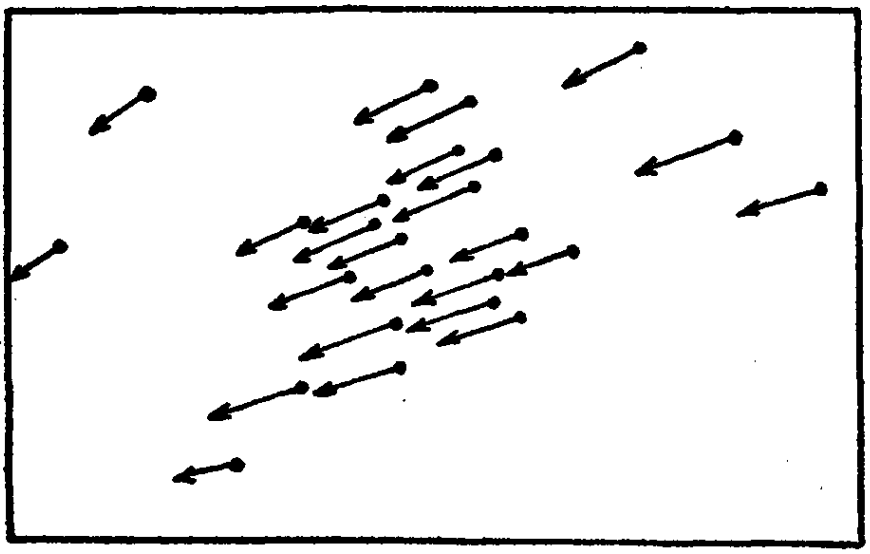
۲ ــ ستارگانی که چندبار سنگینتر از خورشیداند باید فقط ۱/۱۶ عمـر خورشید عمر داشته‌باشند. چون طول عمر خورشید ما ۵۰ بیلیون سال تخمین شده ، این ستارگان باید طول عمری برابر $\frac{۵۰}{۱۶}$ = ۳٫۲ بیلیون سال داشته باشند .

این رو به این نتیجه می‌رسیم که اغلب ستارگان تشکیل دهندهٔ منظومهٔ کهکشانی سه بیلیون سال پیش به‌وجود آمده‌اند و چندستارهٔ بزرگتری که در آسمان دیده می‌شوند مبدأ تازه‌تری دارند. به‌طوری که درفصل پنجم کاملا توضیح داده خواهد شد، دوران سریع مشهوداین‌ستارگان بسیار سنگین باید تاحدی مربوط به‌جوانی نسبی آنهاباشد. هرچه‌زمان می‌گذرد و جهان اختری ما پیرتر وپیرتر می‌شود، ستارگان کم‌جرم و کم‌جرمتر بتدریج به پایان عمر خود نزدیکتر خواهند شد و در سال ۴۷,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ خورشید ما جواز مرگ خود را به دست خواهد آورد .

سن خوشه‌های کهکشانی

روش دیگر برای تخمین سن سکنهٔ اختری کهکشان ما متکی‌بر رویهٔ مکانیکی محض ستارگانی است که خوشه‌های معروف کهکشانی را تشکیل می‌دهند؛ بدین معنی که گروههای ستارگانی که از نزدیك به هم پیوسته‌اند دسته جمعی در سراسر دسته‌های دیگر ستارگان در کهکشان حرکت می‌کنند . یکی از این گروهها که در صورت فلکی ثور یافت می‌شود در شکل ۲ نمایش داده شده است . سهمها جابه‌جا شدن اعضای گروه را در دورهٔ پانصد قرن نشان می‌دهند . در اینجا متوجه می‌شویم که حرکت همان تأثیر یك «مسیر راه‌آهن» را نشان می‌دهدکه مشخص دور شدن این گروه خاص اختری از موضع کنونی خورشید است.

واضح است که چنین گروههای اختری ، که ظاهراً دارای یك‌مبدأ معمولی از ابر ساده‌ای از غبار هستند ، نمی‌توانند برای مدت نامشخصی با هم باشند . اینها باید بتدریج ، در اثر عکس-



شکل ۲ ــ حرکت ستارگان خوشهٔ ثور

العمل گرانشی ، با دیگر ستارگانی که در مسیر خود تلاقی می کنند منحل و پراکنده شوند. ب . ژ . بوك B. J. Bok با محاسبات خود نشان داده است کـه عمر متوسط چنین خوشه‌های اختری باید میان یك و ده بیلیون سال باشد ؛ و چون چندین صد چنین خوشهٔ اختری در منظومهٔ ما ، یعنی در کهکشان یافت می‌شود ، سن آنها نمی‌تواند از چند بیلون سال تجاوز کند .

سن کهکشان زمین (راه شیری)

یك روش تعیین سن ستارگان که تا حدی کلی است ، شامل همهٔ ستارگان کهکشان زمین و متکی بر مطالعهٔ طرز توزیع انـرژی در میان ستارگان است . چنین معلوم است که ستارگان ، علاوه بر حرکت منظم گـردابی در حول مـرکز کهکشان ما ، یك حرکت نامنظم اتفاقی نیز انجام می‌دهند که شبیه جنبش حرارتی مولکـولها در گازهاست . ستارگان ، به سبب عمل گرانشی مشترك میان افـراد این گروه عظیم ، حرکتی دیگر به خود می گیرنـد و پس از زمان

معینی انتظار این می‌رود که سرعت کاملا مشخصی به دست آورند. بنا بر قوانین مکانیك ستاتیك ، این طرز توزیع سرعت باید مربوط به توزیع یکنواخت انرژی جنبشی باشد ، و در این حال سرعت هر ستاره معکوساً متناسب با ریشهٔ دوم جرم آن است .

طرز توزیع سرعت در مخلوطی از گازها به‌خصوص تابع این قوانین است . بدین ترتیب ، در مخلوطی از ئیدروژن و اکسیژن ، سرعت متوسط مولکولهای اکسیژن۴/ ۱ سرعت مولکولهای ئیدروژن است ، زیرا جرم آن ۱۶ برابر بیشتر می‌باشد. ولی در حالی که چنین توزیع یکنواخت انرژی در جزء بسیار کوچکی از ثانیه در یك گاز متعارفی برقرار می‌شود ، همین روش در یك « گاز ستارگان » زمان بسیار درازتری به طول می‌انجامد. منجم آلمانی ف. گوندولاچ[1] بتازگی نشان داده است که در حال حاضر توزیع یکنواخت انرژی جنبشی در میان ستارگان مجاور خورشید هنوز کاملا بر قرار نشده ، ولی قریب دو درصد از مرحلهٔ نهایی دور است. مفهوم این است که، بنا بر این نظریه ، وجود منظومهٔ اختری بین دو بیلیون سال است.

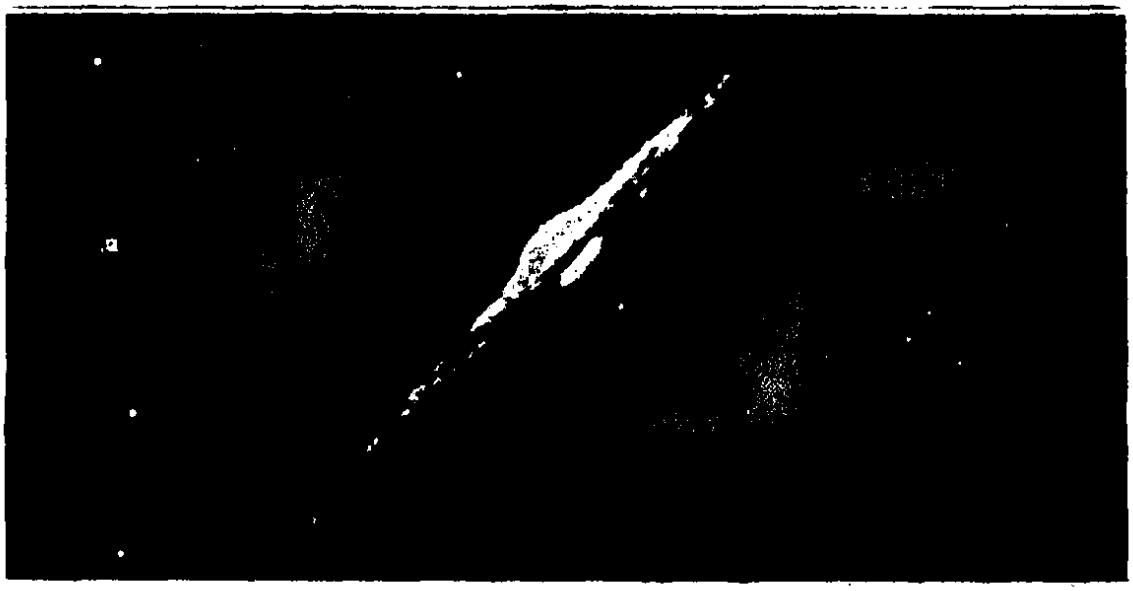
بنا بر این مشاهده می‌شود که هر وقت درباب قسمتهای خاصی از جهان یا خواص آن تحقیق می کنیم ، پیوسته پاسخ تقریبی چند بیلیون سال عمر به دست می‌آید.

راست است که پاسخها از لحاظ رقم دقیق بیلیون متفاوت است ، ولی میزان عظمت آنها با یکدیگر سازگار است. بنا بر این به نظر چنین می‌رسد که باید فکر یك جهان پیوسته تغییرناپذیر را به دور افکند و چنین پذیرفت که سیماهای اصلیی‌که جهان (۱ ، چنان که امروز می‌شناسیم ، مشخص می‌سازند نتیجهٔ مستقیم پاره‌ای پیشرفتهای تکاملی

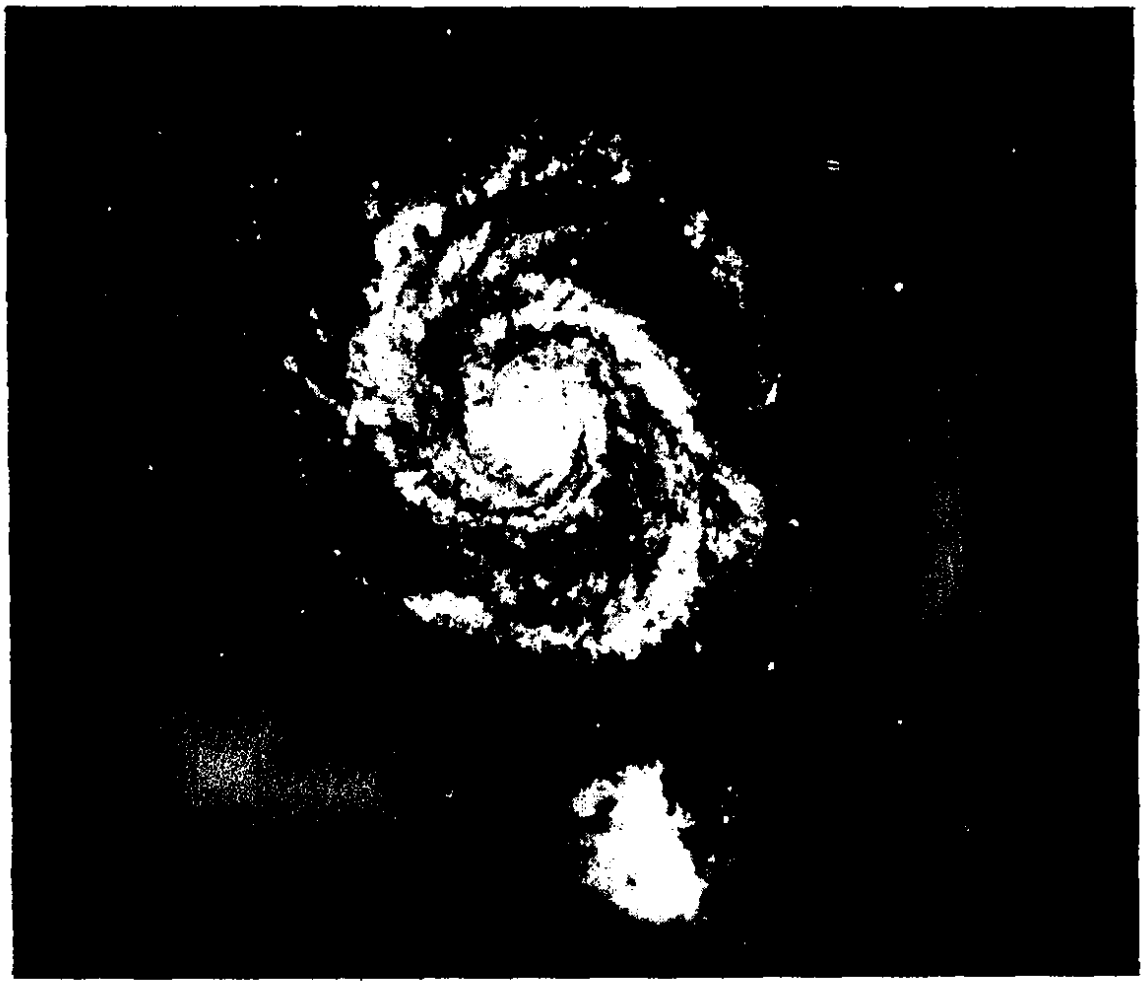
1_ F. Gondolatsch

است که باید چند سال پیش آغاز شده باشد. نیز باید بپذیریم که در این گذشتهٔ دور جهان ما کمتر از امروز تنوع و پیچیدگی داشته، و حالت ماده در آن زمان می‌توانسته است دقیقاً از راه مفهوم «آشفتگی اولیه» توصیف شود.

واقعاً هم، چنانکه در فصلهای بعد خواهیم دید، دلایل تجربی فراوانی که بدین سو متوجه است وجود دارد. با چنین فرضی مسئلهٔ علمی آفرینش جهان می‌تواند همچون کوشش و تلاشی برای دوباره سازی روش تحولی بیان شود که از سادگی نخستین روزهای اولیهٔ پیدایش تا پیچیدگی جهان کنونی اطراف ما ادامه دارد. در این تحقیقات، نظریه‌ی جهان در حال انبساط که در فصل دوم مورد بحث قرار گرفته، کمك فراوانی به ما خواهد کرد.



صفحه تصویر I — سحابی مارپیچی در «ذوائب برنیس» که جزیرهٔ جهانی بسیار دوری است که از پهلو دیده شده . به حلقهٔ تاریکتری که این سحابی را احاطه کرده توجه کنید .



صفحه تصویر II — سحابی مارپیچی در «تازیها». از بالا عکسبرداری شده.
به قمری که در انتهای بازوی پایینتر است توجه کنید.

فصل دوم

انبساط عظیم

افقهای در حال گسترش

از مدتها پیش منجمان با بعضی اجسام آسمانی آشنا بوده‌اند که سیمای خاصی داشته و به سحابیهای مارپیچی معروف شده‌اند. بر خلاف دیگر سحابیهای نسبتاً معلوم که معمولا اشکال نامنظم داشته و کمابیش شبیه ابرهایی در آسمان دیده می‌شوند، سحابیهای مارپیچی همیشه ساختمانهای کاملی دارند که یك جسم عدسی مانند مرکزی با یك جفت بازوی مارپیچی، می‌باشند (صفحه تصویر I و II) تا بیش از یك ربع قرن قبل، کمابیش گمان می‌رفت که سحابیهای مارپیچی به طور کلی میان ستارگان منظومهٔ کهکشان زمین قرار گرفته‌اند و چنین تصور می‌شد که ممکن است نمونه‌های ممکنی از ستارگانی باشند که در منظومهٔ سیاره‌ای زمین، بنا بر تصویر رسمی کانت و لاپلاس به دنیا آمده‌اند.

مع ذلك، در سال ۱۹۲۵ همهٔ این نظریات، با کشف عظیم ادوین پ. هبل[1] (یکی از منجمان رصد خانهٔ ماونت ویلس)

1- Edwin P. Hubble

واژگون شد. با مطالعهٔ سحابی مارپیچی بزرگ امرأة المسلسله ، که در نظر بزرگتر از همه و در نتیجه سهل الرصدتر است ، وی متوجه شد که بازوهای مارپیچی آن مشتمل بـر تعدادی ستارگان بی‌اندازه کمنور است کـه درخشندگی آنها به تناوب ، برحسب یك قانـون سادهٔ جیبی ، تغییر می‌کند. این ستارگان که قیفاووسیان متغیر نامیده شده‌اند (به نام قیفاووس دلتا که نخستین ستاره‌ای است کـه در آن چنین تغییر پذیـرییی مشاهده شده) ، در منظومـهٔ کهکشانی زمین بخوبی شناخته شده و تغییرات تابندگی آنها از راه تپشهای تنه‌های عظیمشان توضیح می‌شود . میان دورهٔ تناوب این تپشها و تابندگی مطلق ستارهٔ مـورد بحث ارتباط ساده‌ای بـرقرار است ، یعنی دورهٔ تناوب تپش ستارهٔ درخشنده‌تـر طولانیتر است . این ارتباط « دورهٔ تناوب ـ تابناکی»، که به وسیلهٔ هارلو شپلی[1] (منجم دانشگاه هاروارد) برقرار شد ، ابزار نیرومندی است برای اندازه‌گیری فواصل ستارگان تپنده‌ای که دورتر از آن هستند که بتوانند جا به جا شدن اختلاف منظری را نشان دهند. از راه انـدازه گیری مستقیم دورهٔ تناوب تپش یك ستارهٔ معین می‌توان به نتیجه‌ای قطعی در بارهٔ درخشندگی مطلق آن رسید. این نتیجه ، توأم بـا درخشندگی نظـری ، فاصلهٔ حقیقی ستاره را به دست می‌دهد.

دوره‌های تناوب رصد شدهٔ قیفاووسیان ، که به وسیلهٔ هبل در بازوهای مارپیچی سحابی امرأة المسلسله به دست آمد، نشان می‌دهند کـه قیفاووسیان بایـد تابندگیهای مطلق بسیار زیاد داشته بـاشند . از طرف دیگر ، این ستارگان به اندازه‌ای به چشم ضعیف و کمنورند کـه در حد رؤیت قرار گـرفته‌اند . نتیجهٔ مسلم این است کـه این

1_ Harlow Sapley

ستارگان ـ همچنین خود سحابیها ـ باید بی‌اندازه از ما دور باشند. مسافتی که از این راه بـرای سحابی امرأة المسلسله تخمین شده به مقداری در حدود یك میلیون سال نور می رسد کـه تقریباً صد برابر قطر کامل کهکشان است ! سحابیهای مـار پیچی دیگر ، که به چشم کوچکتر و کمنورتر از یکی از آنها در سحابی امرأة المسلسله اند، باید از آنچه هم کـه در اصل گمان می‌رفت بزرگتر و در حقیقت تقریباً به بزرگی خود منظومهٔ کهکشان ما باشند .

کشف هبل موجب شد که سحابیهای مارپیچی از وضع محقر قدیمیی که داشتند و در ردیف افراد معمولی کهکشان ما (راه شیری) قرار می‌گرفتند جا به جا شده و بر مسندی کـه در خور آنها بود ، یعنی مسند کهکشانه‌هایی که در سراسرفضای پهناور جهان پراکنده‌اند، جلوس کنند. بنابرایـن ، چنین آشکار می‌شود که ایـن اجسام هیچ رابطه‌ای با سحابیهای معمولی ندارند (مانند سحابی مارپیچی صورت فلکی جبار) که در واقع ابرهای غباری عظیمی هستند که در فضای میان ستارگان شناورند . سحابیهای مارپیچی از بیلیونها ستارهٔ مستقل تشکیل یافته‌اند که به‌سبب فاصلهٔ بسیار زیادشان از راصد به صورت جرم کمنور و درهمی دیده می‌شونـد . در همین تـازگی این نتیجه مستقیماً توسط منجم دیگری از رصدخانهٔ ماونت ویلسن ، به نام والتر بادِه[1] ، اثبات شد، بدین طریق که وی توانسته بود از راه عکسبرداری تنهٔ مرکزی سحابی امرأة المسلسله و تنه‌های دو رفیق آن ، آنها را به میلیاردها ذرات کمنوری تجزیه کند که هر یك نشانهٔ ستارگان مستقل بوده و از آنها این منظومه‌های دور دست ساخته شده است . به نظر چنین مناسب می‌رسد که اصطلاحگذاری قدیم را تغییر داده و به جای

1— Walter Baade

آنکه در بارهٔ سحابیهای مارپیچی سخن گوییم از کهکشانه‌های مارپیچی [1] بحث کنیم .

چنین ثابت شده که کشف هبل منشأ پیشرفت قابل توجهی در اطلاعات ما در بارهٔ کیفیت جهان می‌باشد؛ زیرا معلوم شده است که گاهی خطوط طیفی نور صادر از سحابیهای مارپیچی حرکتی به سوی انتهای قرمز طیف نشان می‌دهد . اگر این کیفیت را بیان معمولی «اثر دوپلر» [2] تفسیر کنیم مفهوم چنین است که این اجسام از راصد دور شده‌اند . تا زمانی که گمان می‌رفت که این اجسام جزو منظومهٔ اختری ما بوده‌اند ، گمان می کردند که اینها حرکت خاصی در میان ستارگان دارند و از مناطق مرکزی کهکشان راه شیری به سوی محیط آن کشیده می‌شوند. با گسترش افقهای جدید ، تصویر کاملا نوظهوری آشکار می‌شود : فضای کامل جهان که به وسیلهٔ بیلیونها کهکشانه مسکون است ، با همهٔ افرادی که دور از یکدیگر با سرعت بسیار زیاد در آن پرواز می‌کنند ، در یك حالت انبساط سریع است .

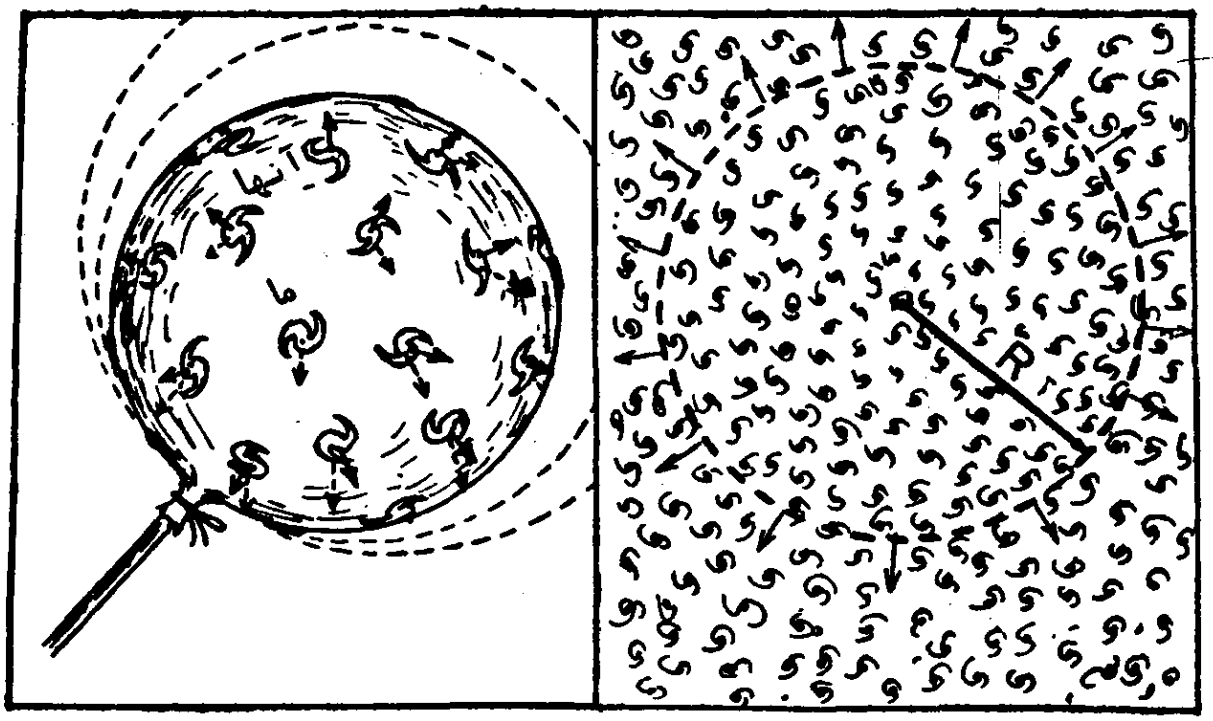
اگر انبساط فضای جهان در همهٔ جهات یکنواخت باشد ، ناظری که در یکی از کهکشانه‌ها قرار گرفته مشاهده خواهد کرد که کهکشانه‌های دیگر همگی با سرعتهایی متناسب با فاصلهٔ آنها از ناظر، از او دور می‌شوند . این کیفیت را می‌توان بآسانی بدین طریق اثبات کرد که قطعاتی از کاغذ را (که اگر بخواهند می‌توان آنها را به شکل

۱ــ بعضی کهکشانه‌ها بازوان مارپیچی حرکتی ندارند ؛ و در موارد لازم اینها کهکشانه‌های بیضوی یا کروی نامیده شده‌اند .

۲ــ وقتی منبع نور به راصد نزدیك شود ، امواج نورانی، به سبب حرکت منبع ، کوتاه می‌شوند ، و همهٔ رنگها به سوی انتهای آبی طیف جا به جا می‌شوند. وقتی منبع نور دور شود ، امواج نورانی بلندتر و همهٔ رنگها به سوی انتهای قرمز جا به جا می‌شوند .

کهکشانه‌ها برید) بر روی بالونی لاستیکی بچسبانند و سپس بـالون را باد کنند تا حجم آن زیـاد و زیادتر شود (شکل ۳). ناظری که بر هر یك از ایـن نمونهٔ کهکشانه‌ها قرار گرفته مشاهده خواهد کـرد که سایر کهکشانه از او دور می‌شوند ، و شاید گمان کند (به غلط) که خود او مرکـز ایـن انبساط است . یك نمونهٔ سه بعدی از فضایی در حال انبساط به وسیلهٔ «جنگل ورزشی» بـه دست می‌آید که اغلب در زمین بازی کودکان یافت می‌شود . تنها احتیاج به ایـن تصور است که «جنگل ورزشی» در همهٔ جهات بی حد و حصر گسترش یابد ، و از لوله‌هـای تلسکوپی ساخته شده باشد ، به طوری کـه فواصل میان کودکانی که در مقاطع مختلف قرار گرفته‌اند رو به افزایش می‌رود.

علاوه برسرعتهای پسروی منظم ، که ناشی از انبساط یکنواخت منظومهٔ کامل است، کهکشانه‌ها دارای حرکت اتفاقی فردی نیز می‌باشند که بسان جنبش حرارتی مولکولهای گازها ست. چون سرعتهای این



شکل ۳ ــ تصویر و طرح انبساط یکنواخت

حرکت اتفاقی ، از لحاظ مقدار ، قابل قیاس با سرعتهای پسروی کهکشانه‌های مجاور است ، این دو نوع حرکت ممکن است گاهی یکدیگر را خنثی و از این رو نتایج اشتباه آمیزی تولید کنند. ممکن است چنین پیش آید که سرعت حرکت اتفاقی یك کهکشانهٔ مجاور که به سوی ما متوجه است بزرگتر از سرعت پسروی مربوط به این کهکشانه باشد. در این حالت کهکشانه به سوی ما در حرکت است ، و در خطوط طیفی خود جا به جا شدنی در ناحیهٔ بنفش نشان خواهد داد . در مورد سحابی مارپیچی بزرگ امرأة المسلسله چنین چیزی واقعاً مشاهده شده است . با وجود این ، در مسافتهای دور ، سرعتهای پسروی دائم التزاید بزودی به اندازه‌ای بزرگ می‌شوند که به وسیلهٔ حرکت «حرارتی» اتفاقی کهکشانه‌های فردی مشاهده می‌شوند ، و انبساط همهٔ منظومه کاملا واضح می گردد .

علاوه بر پسروی مشترك و حرکت انفرادی اتفاقی ، کهکشانه‌ها حرکاتی دورانی نیز حول محورهای خود با سرعتهای متفاوت نشان می‌دهند . تعداد کمی از کهشکانه‌ها هیچ حرکت دورانی ندارند و دارای شکل منظم کروی هستند . دیگر کهکشانه‌ها با سرعتهای متغیری دوران می کنند که به وسیلهٔ مقادیر کشیدگی تنهٔ بیضوی شکل آنها نشان داده شده است .

با این حال ، دوران بیشتر کهکشانه‌ها به اندازه‌ای کند است که بعضی مواد از برآمدگیهای استوایی آنها جاری شده و نمونهٔ متمایز بازوان مارپیچی را تشکیل می‌دهد . توجه به این نکته جالب است که انرژی جنبشی متوسط دوران کهکشانی برابر با انرژی حرکت انتقالی اتفاقی آنهاست . این کیفیت با قانون کلی مکانیك ستاتیك ، که در بارهٔ حرکات انتقالی و دورانی مولکولها در یك گاز

متعارفی نیز مسلم است ، سازگار می‌باشد .

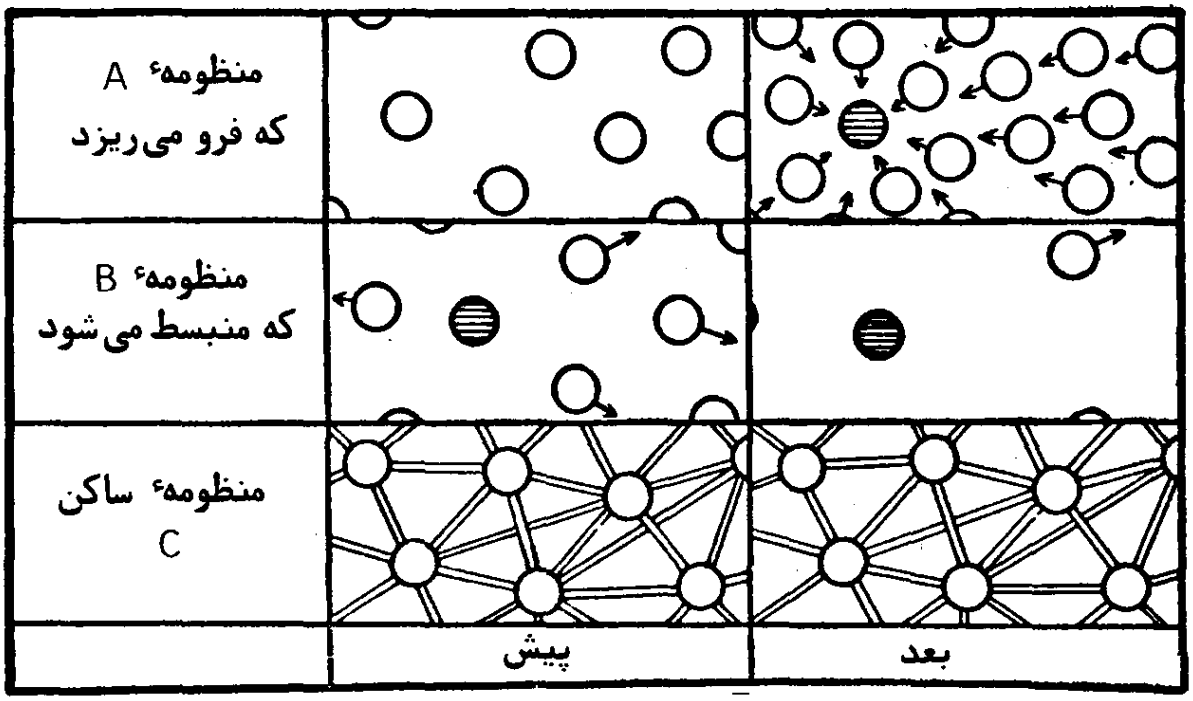
تئوری جهان در حال انبساط

نخستین‌بار دانشمند بلژیکی ژرژ لومتر[1] متوجه شد که منظومهٔ کهکشانه‌ها بـا نتایج کیهانشناخت نظریهٔ نسبیت عمومی سازگـار است. درست است که نمونهٔ (مدل) «جهان کروی» معروف اینشتین از لحاظ مکانیك ستاتیك است و آماده برای انبساط یا انقباض نیست. بـا ایـن حال ، ریاضیدان روس ، ا. فریدمان[2] خاطر نشان ساخت که طبیعت ستاتیك جهان اینشتین نتیجهٔ اشتباه جبریی بوده (اساساً تقسیمی بر صفر) که در فرایند مشتقگیری آن به عمل آمده . آنوقت فریدمان به دنبال این رفت که نشان دهد کـه با به کار بـردن صحیح معادلات اصلی اینشتین بـه نـوعی انبساط و انقباض جهانها منجر می‌شود . «جهان کروی» که بالاخص در اصل تـوسط اینشتین تصور شد نشان می‌داد کـه از لحاظ دینامیك نا پایدار و مستعد به ایـن است کـه با کوچکترین انگیزه‌ای انبساط یا انقباض یابد. ما نمی‌توانیم در حدود مطالب ایـن کتاب در طـرز به‌کار بـردن ریاضی مشروح معادلات اساسی نظریـهٔ اینشتین و نیز در مورد استعمال آن بر مسائل کیهان ـ شناخت تفحص کنیم . ولـی خوشبختانه بعضی خـواص نمونـه‌های کیهانشناختی طبق نظریهٔ اینشتین را می‌توان توصیف کرد و آنها را بر مبنای نظریـهٔ رسمی نیوتن ، بابه‌کاربردن اندکی ریاضیات ، درك کرد .

فضای بی پایان جهان را با کهکشانه‌های فراوانی تصور کنید

1— George Lemaître
2— A. Friedmann

که به طور کمابیش یکنواخت در آن پراکنده‌اند. آیا این کهکشانه‌ها نسبت به یکدیگر آرام و بیحرکت قرار می‌گیرند؟ ظاهراً نه، زیرا نیروهای گرانشی نیوتنی که میان کهکشانه‌های انفرادی تأثیر می‌کنند آنهارا چنان به سوی یکدیگر خواهند کشید که همهٔ منظومه فرو ریزد (شکل ۴ A). اگر فرض کنیم که کهکشانه‌ها ابتدا در یك حالت آرامش نبوده بلکه باسرعتهای اولیهٔ زیاد از یکدیگر دور می‌شوند، آنوقت فواصل میان کهکشانه‌های مجاور پیوسته در حال افزایش خواهد بود و همهٔ منظومه انبساط خواهد یافت (شکل ۴ B).



شکل ۴ ــ سه‌حالت از یك منظومهٔ اجسامی که تحت تأثیر گرانش‌اند.

در اینجا وضعیتی خواهیم داشت که قابل قیاس با وضع یك خبرگزار ورزشی است که عکس توپ فوتبالی را که بالای سر بازیکنان در حرکت است بررسی می‌کند. با آنکه تصویر حرکتی را نشان نمی‌دهد، او مطمئن است که توپ یا بآرامی در حال صعود است یا بزودی پایین می‌آید. در هر حال، توپ نمی‌تواند بیحرکت بر فراز میدان آویزان بماند ــ مگر آنکه بر نوك دکلی قرار گیرد یا

به ریسمانی آویزان باشد. به همین طریق فرض یك منظومهٔ کهکشانه‌های در حال سکون کـه تحت تأثیر نیروی کشش گـرانشی مشترك هستند دخالت نیروهایی اضافی را ایجاب می‌کند که کهکشانه‌ها را از کشیده شدن به سوی یکدیگر باز دارد . در اینجا ما باید منظومه‌ای چفت و بست دار فرض کنیم (شکل ۴ C) که نیروهای جاذبه را خنثی کـرده و کهکشانه‌ها را از یکـدیگر جدا نگاه دارد . دستگاه ریاضی نظریهٔ نسبیت عمومی (که چیزی جز نظریـهٔ گرانشی قدیمی نیوتن نیست)نیز درست به‌همین نتیجه می‌رسد. برای به دست آوردن نمونهٔ (مدل) جهانی در حال سکون (ایـن کار پیش از کشف هبل انجام شده بـود) . اینشتین ناگزیر بود در معادلات کلی خود یـك جملهٔ اضافی وارد کند که شامل عددی معروف به «مقدار ثابت کیهانشناختی» بود و از لحاظ فیزیکی معادل بـا فـرض یك «نیروی دافعهٔ عمومی» میان اجسام مادی است. فرض چنین است کـه ، بر خلاف دیگر نیروهای فیزیکی کـه پیوسته با افزایش فاصله کاهش می‌یابند، «نیروی دافعهٔ کیهانشناختی در فـواصل کـم بسیار ضعیف ولی در فواصل میان کهکشانی بسیار مهم است.[1] وارد کـردن ایـن نیرو به توسط اینشتین کاملا من عندی نبود ، چون بـه طوری کـه قبلا نشان داده شد ، ایـن جمله تعمیـم منطقی ریـاضی معـادلات اولیهٔ نسبیت عمومی را نمایش می‌دهد . وقتی حقیقت این است که جهان مـا در

۱ــ بیان ریاضی این نیروی دافعه‌را که برذره‌ای به جرم m وارد می‌شود می‌توان چنین نوشت

$$F=-\frac{1}{3}c^2\Lambda\, mr$$

که درآن c سرعت نور ، Λ مقدار ثابت تازهٔ کیهانشناختی ، و r فاصله تا ذره است .

حال سکون نیست بلکه انبساط سریع آن شناخته شده است ، «مقدار ثابت کیهانشناختی » بیمورد است . با این حال ، چنانکه قبلا دیدیم ، این مقدار ثابت را هنوز می‌توان در کیهانشناخت نگاه داشت ، ولو آنکه دلیل وارد کردن آن در معادلات از میان رفته باشد .

پی بردن به اینکه جهان ما در حال انبساط است یك کلید و مفتاح اصلی برای گنجینهٔ معماهای کیهانشناختی فراهم می‌سازد . اگر اکنون جهان در حال انبساط باشد ، لازم می‌آمده که زمانی در حال انقباض بسیار شدید بوده باشد ؛ و ماده‌ای که اکنون در فضای خالی جهان به صورت قسمتهای کوچکی که ستارگان مجزا به شمار می‌روند ، پراکنده است ، باید در آن زمان به صورت جرمی با چگالی بسیار زیاد می‌بود . این ماده باید در معرض دماهای بسیار زیاد قرار گرفته باشد ، چون همهٔ اجسام مادی وقتی متراکم می‌شوند گرم و هنگامی که انبساط می‌یابند سرد می‌شوند. در حال حاضر بزرگترین چگالی ممکن برای این حالت فشرده و متراکم اولیهٔ ماده دقیقاً معلوم نیست ، و نزدیکترین احتمال این است که بالاترین چگالی جهان در آن زمان قابل قیاس با چگالی سیال هسته‌ای ، یعنی قطرات رقیقی که از آنها هستهٔ اتمهای گوناگون تشکیل شده ، می‌باشد . این احتمال چگالی جهان پیش از انبساط اولیه را در آن زمان صد هزار بیلیون برابر چگالی آب خواهد ساخت ؛ یعنی هر سانتیمتر مکعب از فضا در آن زمان محتوی صد میلیون تن ماده بوده است ! در یك چنین حالت تراکم بسیار زیاد، هر ماده که اکنون در دیدرس تلسکوپ ۵ متری (۲۰۰ اینچ) قرار گیرد باید فضایی را که فقط سی برابر بزرگتر از خورشید است اشغال کند . اما چون جهان همیشه لایتناهی بوده و هست ، فضای خارج از این کره پیوسته به وسیلهٔ ماده‌ای که

اکنون از دیدرس تلسکوپ پنج متری خارج است اشغال می‌شده .

یکی از « تناقضهای لایتناهی » (پارادوکس لایتناهی) معروف این حقیقت است که به موجب آن مواد اشغال کنندهٔ یک فضای لایتناهی می‌تواند منقبض یا منبسط شود ، این تناقض به وسیلهٔ مثالی که ریاضیدان معروف آلمانی دواید هیلبرت در یکی از سخنرانیهای خود ذکر کرده بهتر مجسم و مصور می‌شود .

هیلبرت چنین گفت : « مهمانخانه‌ای با اطاقهای فراوان فرض کنید که همهٔ اطاقهای آن اشغال شده باشد . وقتی مهمان تازه‌ای برسد متصدی مهمانخانه باید با تأسف وی را جواب گوید . اما اگر مهمانخانه‌ای با تعداد بینهایت اطاق در نظر گیریم ، در این حال حتی اگر همهٔ این اطاقها نیز اشغال شده باشد ، متصدی مهمانخانه خوشوقت خواهد شد که برای یك مهمان تازه وارد اطاق آماده کند. تنها کاری که باید بکند این است که کسی را که در نخستین اطاق است به اطاق دوم ، دومی را به اطاق سوم، سومی را به اطاق چهارم ، و قس علیهذا جا به جا کند . . . به این ترتیب مشتری می‌تواند اطاق شمارهٔ یك را به دست آورد . » هیلبرت به سخنان خود چنین ادامه داد : « اکنون مهمانخانه‌ای با تعدادی بینهایت اطاق فرض کنید که همهٔ اطاقهای آن پر باشد ، و تعداد بینهایتی مسافر سر برسد . متصدی مهمانخانه خوشوقت خواهد شد که رضایت همه را جلب کند : او مسافر اطاق ۱ را به اطاق شمارهٔ ۲ و از آن شمارهٔ ۲ را به شمارهٔ ۴ و از آن شمارهٔ ۴ را به شمارهٔ ۶ و قس علیهذا . . . انتقال می‌دهد و بدین ترتیب همهٔ اطاقهای شمارهٔ فرد برای مشتریانی که تعداد آنها بینهایت است آزاد خواهد شد . »

درست به همان طریق که یك مهمانخانهٔ بی‌پایان تعداد بیشمار

مشتری را می‌تواند جا دهد بی آنکه پر شود ، یك فضای بی‌پایان نیز می‌تواند مقداری ماده در خود نگاه دارد و همیشه ، چه این ماده فشرده تر از ساردین در یك قوطی و چه گسترده‌تـر از کره بر روی ساندویچ زمان جنگ باشد، در هرحال جای کافی بـرای آن وجـود خواهد داشت .

چگونه انبساط آغاز شده ؟

اکنون این دو پرسش ممکن است پیش آید : چرا جهان مـا در یك چنین حالت انقباض بسیار زیـاد بوده ، و چرا شروع بـه انبساط کرده است ؟ ساده ترین راه برای پاسخ دادن به این سئوالات، که از لحاظ ریاضی استوارتر است ، این است که بگوییم انقباض عظیمی که در تاریخ گذشتهٔ جهان مـا روی داده نتیجهٔ یك فـرو ریختگی بوده که در دورهٔ باز هم قدیمتری رخ داده است ، و اینکه انبساط کنونی فقط یك بازگشت « کشسانی » (ارتجاعی) است که به محض حاصل شدن بزرگترین چگالی مجاز برای انقباض آغاز شده است . همان طور که در قسمت پیش نشان دادیم، درست معلوم نیست کـه چگالی حاصل در حداکثر انقباض چـه مقدار بوده ، ولـی بنا بر جمیع قراین ، این چگالی مسلماً می‌تواند بسیار زیـاد بوده باشد . بسیار احتمال دارد که جرمهای جهان به اندازه‌ای فشرده شده بوده‌اند کـه صورتهـای ساختمانی که ممکن است در طی « دوران نزدیك فـرو ریختگی » وجود می‌داشت کاملا از میان رفته ، و حتی اتمها و هسته‌هـای آنها شکسته شده و به صورت ذرات اولیه‌ای (پـروتـون و نوترون و الکترون) که از آنها ساخته شده در آمده باشند . بنا بر این هیچ چیز دربارهٔ « دورهٔ نزدیك تراکم » نمی‌توان گفت ، یعنی دوره‌ای

که ممکن است بدرستی « دورهٔ سنت آوگوستین » نامیده شود ، چه نخستین بار سنت آوگوستین آدهیپو بود که مسئله را بـه ایـن صورت مطـرح ساخت: «خدا پیش از آنکـه آسمان و زمین را بسازد چـه می‌کـرده ؟ » به‌محض آنکه چگالی اجـرام جهان بزرگترین مقدار خود را به دست آورد ، امتداد حرکت معکوس و انقباض آغاز شده ، به طوری‌که چگالیهای بسیار زیاد تنها مدت کوتاهی توانسته‌اند وجود داشته بوده باشند . در طی مراحـل قبل و بعد از ایـن انبساط ، کیفیات گوناگون متمایزی باید در جرمهای کیهانی روی داده باشد که منجر به ساختمان بی‌اندازه پیچیده و در هم جهان کنونی ما شده است .

تاریخ تراکم عظیم

دیـدیـم کـه مشاهدات هبل تعیین می‌کرد کـه کهکشانه‌های پراکنده در سراسر فضای جهان به نظر می‌رسد که از مـا دور می‌شوند ، و هراندازه دورتر باشند سریعتر حـرکت می‌کنند . ارتباط میان سرعت پسروی و فاصله به وسیلهٔ قانون هبل (به ضمیمهٔ آخـر کتاب مراجعه شود) به دست می‌آید :

[سرعت پسروی] = مقدار ثابت × [فاصله]

اگر فاصله برحسب « سال نور » و سرعتها بر حسب کیلومتر در ثانیه بیان شده باشند ، مقدار عـددی « ثابت معادلـهٔ هبل » $۱٫۸ \times ۱۰^{-۴}$ است . بدین ترتیب ، مثلا کهکشانه‌ای که در فاصلهٔ یك میلیون سال نور قرارگرفته با سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ثـانیه پسروی می‌کند . اگر ، چنانکه در فیزیك متداول است ، فواصل را برحسب سانتیمتر و سرعتها را بر حسب سانتیمتر در ثانیه انـدازه بگیریم ،

مقدار عددی ثابت «معادلهٔ هبل» برابر با $۱٫۹ \times ۱۰^{-۱۷}$ می‌شود. برای به دست آوردن اینکه همهٔ کهکشانه‌ها در گذشته چه زمانی با هم فشرده شده‌اند، فقط احتیاج به‌این است که فواصل مشترك آنها را بر سرعتهای پسروی هر یك تقسیم کنیم. ولی چون سرعتهای پسروی مستقیماً متناسب با فاصله‌اند، به هر طریق که دو کهکشانه‌را، چه نزدیك به هم و چه دور از هم انتخاب کنیم، نتیجهٔ این تقسیم همیشه یکسان، و برابر است با عکس مقدار ثابت قانون هبل. بنا بر این، برای تاریخ تراکم مقدار

$$\frac{۱}{۱٫۹ \times ۱۰^{-۱۷}} = ۵٫۳ \times ۱۰^{۱۶} \text{ ثانیه} = ۱٫۷ \times ۱۰^{۹} \text{ سال}$$

به دست می‌آید.

اگر فرایند انبساط را در جهت معکوس تصور کنیم، بدان‌سان که کهکشانه‌ها احتمالا درهم فرو روند، اختلاف میان لحظه‌ای که کهکشانه‌ها به یکدیگر پیوسته و لحظه‌ای که ستارگان و اتمهایی که آنها را تشکیل می‌دادند متلاشی شده‌اند، از یك درصد مقداری که به دست آمده تجاوز نخواهد کرد. چنین کیفیتی از این حقیقت نتیجه می‌شود که فواصل میان کهکشانه‌ها هم اکنون بدرستی صدها برابر بزرگتر از قطرهای آنهاست. مقدار $۱٫۷ \times ۱۰^{۹}$ را ممکن است همچون بهترین تخمین نجومی برای زمان تراکم عظیم بپذیریم.

با مقایسهٔ این رقم با دیگر تخمینهای گوناگون مربوط به سن جهان (به فصل اول مراجعه شود)، چنین به دست می‌آید که این رقم از مقدار متوسط کوچکتر است؛ و بخصوص مشاهده می‌شود که فقط در حدود نصف رقمی است که توسط هومز از مطالعهٔ فراوانی نسبی ایزوتوپهای سرب تولید در اثر رادیو آکتیویته به دست آمد.

ایـن اختلاف را کـه میان تخمینهای نـجومی و زمینشناختی موجود است می‌توان به وسیلهٔ تعبیری در فرایند انبساط ترمیم کرد. همان طور که نخستین بار لومتر پیشنهاد کرد، ممکن است همان «مقدار ثابت کیهانشناختی را در محاسبه وارد کرد که توسط اینشتین برای نمونه‌ای (مدلی) از جهان در حال سکون به کار گـرفت. این مقدار ثابت از لحاظ فیزیکی مربوط بـه وارد کردن نیروهای دافعه‌ای است کـه میان کهکشانـه‌های واقع در فواصل دور بـرقرار است. چنین نیروهایی بـرای جهان ما انبساطی فراهم خواهند ساخت که سرعت آن پیوسته در افـزایش است و موضع نقطهٔ صفر را نسبت بـه زمان تغییر می‌دهد. اگـر فرایند انبساط تند شده بـاشد، سرعتهای پسروی کهکشانه‌های مجاور در زمان گذشته کوچکتر از امروز خواهند بود، به طوری که تاریخ پیدایش جهان بـه عقب جابه‌جا خواهد شد. بـا فرض مقدار عددی کوچکی معادل $۱۰^{-۳۳}$ بر ثانیه برای مقدار ثابت کیهانشناختی Λ، می‌تـوان مقدار اصلی هبل را بـه صورتی در آورد که با مقدار تخمین شدهٔ زمینشناختی[1] سازگار باشد.

دو ریاضیدان انگلیسی، بوندی[2] و گولد[3]، بتازگی تغییر قطعیتر دیگری در نظریـهٔ انبساط پیشنهاد کـرده‌اند. ایـن تغییر (کـه بـا خوشوقتی مـورد تأیید منجم انگلیسی فرد هویل[4] قرار گرفته و آن را همچون اساس «کیهانزایی جدید» خود به کار برده) متکی بر این فرض است که رقت ماده در جهان، کـه ناشی از انبساط دائمی آن

۱ ــ این موضوع به‌وسیلهٔ محاسبات انتشارنیافتهٔ رالف آلفر و ر. هرمن نشان داده شده بود.

2 ــ H.Bondi
3 ــ T.Gold
4 ــ Fred Hoyle

است ، به واسطهٔ پیدایش مادهٔ تازه‌ای که در فضای بین کهکشانی رخ می‌دهد جبران شده است . جبران کامل انبساط مستلزم تولید بیش از یك اتم ئیدروژن تازه در هر گالن (حدود ۳٫۸ لیتر) فضای در حال انبساط نیست ، آن هم فقط یك بار در هر ۲۵۰ میلیون سال ، به طوری که فشار زیادی بر کار قدرت خلاقه وارد نخواهد آمد . بنا بر این نظریات، کهکشانه‌های سالخورده‌تر تدریجاً دورتر و دورتر عقب‌می‌روند، ولی پیوسته کهکشانه‌های تازه ، در اثر انقباض مادهٔ نوپدید در فضاهای درحال انبساط میان آنها ، تشکیل می‌شوند. پس این نمایش، بی‌آنکه آغاز و پایانی داشته باشد ، ادامه می‌یابد. هرگاه در صدد تهیهٔ تصویر متحرکی (فیلمی) برآییم که نظریات بوندی و گولد و هبل را نشان دهد ، و آن را به گذشته بکشانیم ، نخست چنین به نظر خواهد رسید که به‌محض رسیدن به ۱٫۷ بیلیون سال ، همهٔ کهکشانه‌ها رو به انقباض می‌روند ، ولی بتدریج که فیلم به پسروی خود در زمان ادامه می‌دهد متوجه خواهیم شد که کهشانه‌های مجاور ، که از هر سو در حال نزدیك شدن به‌منظومهٔ کهکشانی ما (راه شیری) هستند و چنان رفتار می‌کنند که آن را به صورت خمیری در آورند ، مدتها پیش از آنکه به صورت خطری واقعی در آیند ، همچون فضای رقیقی نابود می‌شوند ، و پیش از آنکه نزدیکترین کهکشانهٔ مجاور بعدی بتواند به سوی ما تمرکز یابد (۳٫۴ بیلیون سال پیش) ، کهکشان اختصاصی خودمان نیز ناپدید خواهد شد . مادام که این نظر مبدأ و تحول کهکشانه‌های انفرادی را پیشبینی می‌کند ، خود جهان را جاودان در نظر می‌گیرد ، با آنکه سکنهٔ کهکشانی آن پیوسته در تغییر است .

با آنکه این فرضیه ممکن است برای کسانی که آن را، برای تصور آغاز و مبدأ زمان، از لحاظ فلسفی دشوار می‌یابند بسیار جالب

باشد ، در زمینه‌های نظری و رصدی با مشکلاتی واقعی برخورد می کند . چون این نظریه برای پیشبینی آغاز تراکم عظیم کافی نیست ، عاجز از جوابگویی مبدأ اتمی است (به فصل سوم مراجعه شود) ، مگر آنکه چنین فرض شود (و چرا چنین فرض نشود !) که اتمهای عناصر متنوع شیمیایی و همجاها (ایزوتوپها)ی آنها به نسبتهای صحیح به وسیلهٔ فرایند مسلم خلقت دائمی ماده تشکیل شده باشند . هبل خود متمایل بر قبول این فرض است که تا وقتی اتم ئیدروژن پیوسته از عدم به وجود می آید ، اتمهای عناصر سنگینتر بعداً در درون داغ ستارگان پخته شده و به وسیلهٔ انفجارات اختری (سوپرنووا یا فوق نواختران) در سراسر فضا پراکنده شده‌اند . این نظر تاکنون نتوانسته است ما را با توضیح رضایتبخشی از کمیت فراوانی عناصر شیمیایی مجهز سازد ، و به عقیدهٔ مؤلف نظری مصنوعی و غیر واقعی است .

با آنکه ایرادات نظری بر حالت آرامش جهان تا حد قابل توجهی مربوط به عقاید است . دلایل رصدیی که ظاهراً با این نظریات متناقض است داستان دیگری دارد . چند سال قبل دو منجم امریکایی، ستبینز[1] و ویتفرد[2]، تصمیم برمطالعهٔ طرز توزیع کهکشانه‌های دور گرفتند . آنان چهار گروه ، یا خوشه ، انتخاب کردند که درصورت فلکی سنبله ، ذوائب برنیس ، و اکلیل‌شمالی و حواء قرار داشتند (فواصل تخمین شدهٔ این کهکشانه‌ها به ترتیب ۶ ، ۴۰ ، ۱۴۰، و ۲۴۰ میلیون سال نور است) . چیزی که موجب شگفتی ایشان و دیگران شد پی بردن به این نکته بود که رنگ کهکشانه‌ها بر حسب

1 – J . Stebbins
2 – A. E. Whitford

فاصلهٔ آنها تـا زمین متفاوت است و هر چه دورتر باشند قرمزتر بـه نظر می‌رسند . ایـن تغییر کلی رنگ ،کـه غیر از حرکت دوپلری نـاحیهٔ قـرمز خطوط طیفی است ، مسلماً می‌تواند بـا فرض وجود غبار در فضای بین کهکشانی توضیح داده شود ؛ در ایـن صورت پـدیده‌ای همچون سرخی خورشید در مجاورت افق خواهد بود. ولی بـرای توضیح قـرمزی مشهود از راه وجود غبار ، مقدار غباری کـه باید دخالت داد بـه اندازه‌ای است کـه مشکلاتی بـرای دیگر واقعیات نجومی پیش می‌آورد . گـذشته از ایـن ، اغلب رصدهـای جدیـد ظاهراً چنین نشان می‌دهند کـه قرمزی تنها منحصر به کهکشانه‌های بیضوی (بی بازو) است و چنین تأثیری در کهکشانه‌های مـارپیچی یـافت نمی‌شود ، و حال آنکـه اگر قرمـزی مربـوط بـه غبار میان کهکشانه‌ها می‌بـود تأثیر آن بستگی بـه نوع کهکشانه نـداشت . اکنون تقریباً همهٔ منجمان پذیرفته‌اند که قرمزی کهکشانه‌های دور باید نتیجهٔ تعداد نسبی ستارگان آبی و قرمزی بـاشد کـه آنها را تشکیل داده‌انـد . ولی وقتی کهکشانه‌ای را نگاه می‌کنیم کـه ، مثلا ، ۳۰۰ میلیون سال نـور از ما دورتـر است آن را چنان می‌بینیم کـه ۳۰۰ میلیون سال پیش بوده است ؛ چون ممکن است چنین انتظار داشت که سکنهٔ اختری کهکشانه‌ها در طی زمان انبساط یافته باشند (به فصل پنجم مراجعه شود)، این استنتاج منطقی است که کهکشانه‌ها می‌توانند ستارگان غولپیکر جوان را بیش از سالخوردگان آنها شامل باشند . اگر چنین تفسیری از قرمـزی مشهود پـذیرفته شود (و ظاهـراً راه دیگری جز قبول کردن این تفسیر یافت نمی‌شود) ، راهی جز پذیرفتن این مطلب نداریم که خواص عموی کهکشانه‌ها در گذشته با خواص کنونی آنها متفاوت بوده است ، و ایـن امر بشدت بـا فرضیهٔ حالت

آرامش جهان ، آن طور که بوندی و گولد و هبل پیشنهاد کرده‌اند ، متناقض است. خوشبختانه چنین به نظر می‌رسد که دخالت دادن «مقدار ثابت کیهانشناختی» (دافعهٔ عمومی) و فرضیهٔ حالت آرامش جهان (خلقت دائمی ماده) هیچ یك واقعاً برای از میان برداشتن تناقض میان ارقام هومز و هبل برای سن جهان مورد نیاز نیست . در حقیقت مطالعات تازهٔ منجم آلمانی بر نشان می‌دهد که مقادیر معمولی مورد قبول برای فواصل میان کهکشانی صحیح نیست و باید به وسیلهٔ مدارك و دلایل رصدی مورد تجدید نظر قرار گیرند . با در نظر گرفتن نکاتی فنی ، از قبیل «تفرق تابناکی کهکشانی» ، « انحراف از توزیع انرژی تشعشعی سیه جسم » ، و «فضای قرمزی» ، بر به این نتیجه رسید که فاصلهٔ واقعی میان کهکشانه‌ها باید تقریباً دو برابر بزرگتر از آنچه تاکنون فرض شده است باشد . این موضوع سبب خواهد شد که ضرایب عددی فرمول هبل به‌نصف تقلیل یابد و، درنتیجه، تخمین زمان تراکم عظیم از مقدار ۱۰۷ بیلیون به قریب ۳۰۴ بیلیون سال ترقی کند.

آیا انبساط هرگز متوقف خواهد شد ؟

این موضوع که آیا انبساط کنونی جهان ما پیوسته ادامه خواهد داشت یا آنکه زمانی متوقف شده و در آن حال به صورت فروریختگی در خواهد آمد ، نظیر این است که آیا موشکی که از سطح زمین آتش می‌گیرد پیوسته به حرکت خود در فضا ادامه خواهد داد یا متوقف شده بر سر ما فرود می‌آید . در مورد موشك همه چیز بستگی به سرعتی دارد که موشك به دست می‌آورد . اگر سرعت آن بیش از ۱۱۰۲ کیلومتر در ثانیه باشد (سرعتی که «سرعت

1—A.Behr

گریز » نامیده شده و در حال حاضر بـه دست‌نیامـدنی است) ، موشك با نیروی جاذبه مقاومت کرده هرگز باز نمی‌گردد، و به ازای هر سرعت کمتر از این مقدار ، موشك ناگزیر در ارتفاع معینی متوقف می‌شود و آن وقت سقوط خواهد کرد. در حالت اول می ـ گوییم کـه انرژی جنبشی موشك بیش از پتانسیل میدان گـرانشی زمین ، و در حالت دوم عکس آن است .

مورد کهکشانه هایی که در مقابـل جاذبهٔ مشترکی کـه سعی می کند آنها را به یکدیگر نزدیك کند ، بـا سرعتهای معینی از هـم دور می‌شوند ، شبیه مثال موشك پرتاب شده از زمین است . صورت سادهٔ مسئله این است که آیـا نیروی جبری پسروی کهکشانی نیرو ـ مندتر است یانقش میدانهای گرانشی آنها . محاسبات ساده‌ای کـه در قسمت ضمیمهٔ کتاب ذکر شده نشان می‌دهد که در زمـان حاضر کشش گرانشی میان کهکشانه‌ها بـه سرعتهای جبری پسروی آنهـا بسیار نـاچیز و صرفنظر کـردنی است ؛ و ایـن مـورد نظیر وضع موشکی است که با سرعتی بسیار بزرگتر از «سرعت گریز» از زمین دور می‌شود . فواصل میان کهکشانه های مجاور از هر حد تجـاوز می کند ، و احتمال این نمی‌رود که انبساط کنونی هرگز متوقف شود یا به صورت فروریختگی درآید .

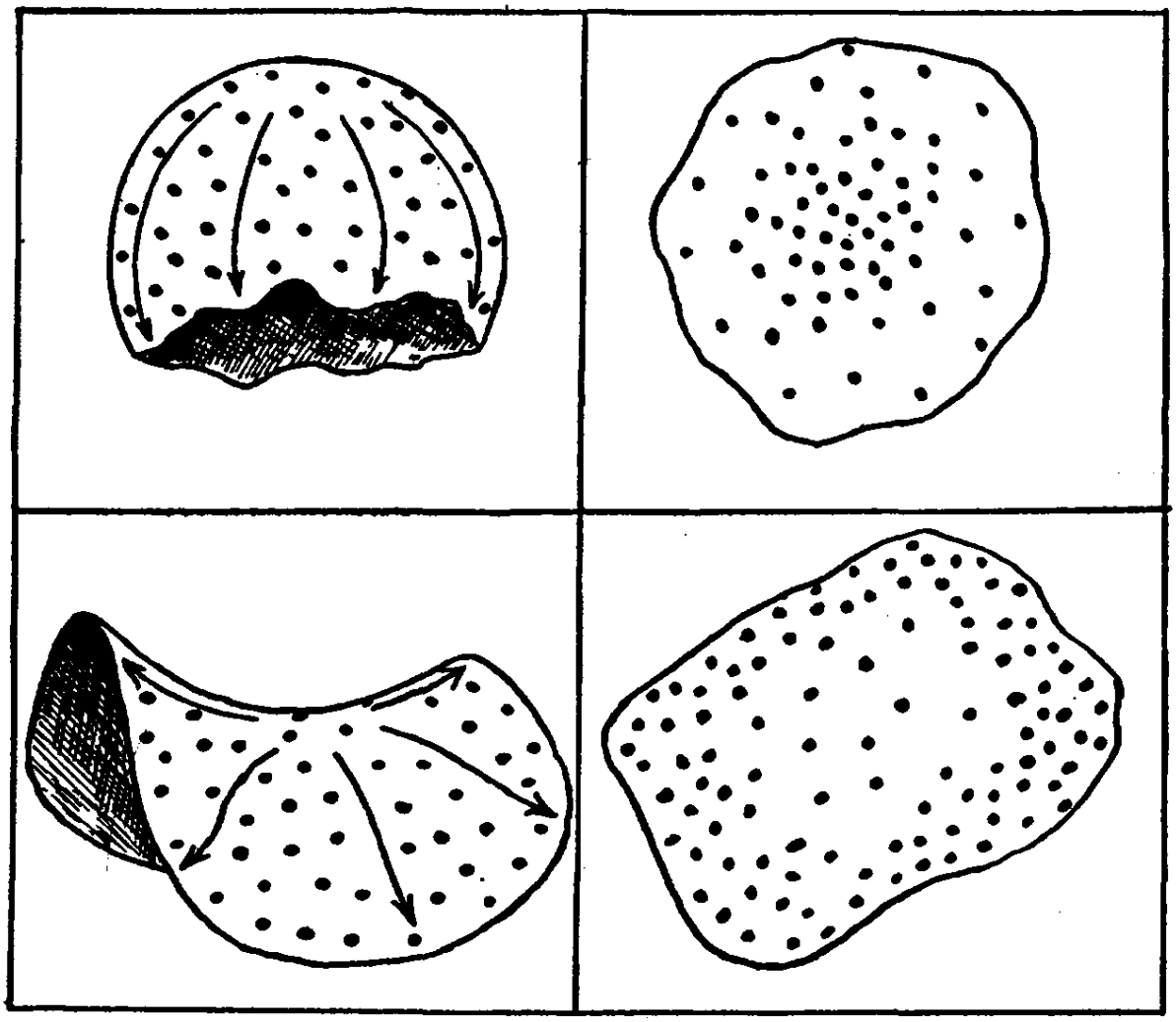
آیا جهان محدود است یا نامحدود ؟

به نظر نمی‌رسد که موقع مناسب باشد که مسئلهٔ حجم و ابعاد کل جهان مطرح شود . آیا جهان ، همان طـور کـه سابقـاً اینشتین پیشنهاد کرده بود ، محدود و حجم آن چندین متر مکعب یا چندین سال نور مکعب است ، یا همان هندسهٔ اقلیدسی بسیار قدیمی آن را

مجسم می‌سازد که بی‌حد و حصر در هر سمت گسترش می‌یابد؟ در درون فاصلهٔ یك بیلیون سال نوری که تلسکوپ پنج متری رصدخانهٔ پالومار می‌تواند زیر نظر گیرد، به نظر می‌رسد که کهکشانه‌ها (قریب یك بیلیون از آنها) به سبك کمابیش یکنواختی در سراسر فضا پراکنده شده‌اند. ولی فرض کنید که منجمان موفق به ساختن تلسکوپهای ۱۰ متری، ۲۰ متری، ۴۰ متری، و . . . شوند. آن‌وقت چه خواهند یافت؟ فرضیهٔ نسبیت اینشتین و فرضیهٔ گرانشی به دو راه حل ریاضی ممکن منجر می‌شود.

نخست آن است که فضای جهان ممکن است، همان طور که سطح زمین است (انحنای مثبت)، «انحنا به سوی داخل» داشته و سرانجام در یك «نقطهٔ متقاطر» بسته شود (سمت چپ و بالای‌شکل ۵)؛ این همان جهان محدود اینشتین است (که ممکن است در حال سکون یا در حال انبساط باشد)، که در آن، صرف نظر از فضای تاریك، هر کس می‌تواند اگر چند بیلیون سال انتظار بکشد تا نور پیرامون جهان را سیر کند، اصلاح موی پشت سر خود را وارسی کند، و گرنه فضای جهان، مانند سطح یك زین اسب، «به خارج انحنا دارد» (قسمت پایین و سمت چپ شکل ۵).

اینکه کدام یك از این دو امکان باید به جهان ما تعلق گیرد تنها به وسیلهٔ مدارك رصدی محقق می‌شود، و چنین به نظر می‌رسد که مدارك موجود شدیداً به نفع امکان دوم، یعنی بی‌پایانی جهان باشد. از لحاظ ریاضی محض، اینکه هندسهٔ جهان «باز» یا «بسته» است سیر زمان رفتار آن را مستقیماً معین خواهد کرد. ممکن است نشان داده شود که یك جهان محدود اینشتین فقط تا حدی انبساط یافته و فراتر از آن حد انبساط تبدیل به انقباض شود. اما جهانی باز و بی-



شکل ۵ــ سطوح انحنای مثبت و منفی (سطوح کروی و زینی شکــل) ،
و آنچه وقتی سعی در گستردن آن برروی میزی می‌کنیم اتفاق می‌افتد .

پایان محکوم به انبساط بی‌پایان است . می‌توان گفت که اگــر جهان محدود و متناوب در فضا باشد (همچون سطح یك كره) ، نسبت بـه زمان نیز متناوب و تـابــع انبساط و انقباض متناوبـی است (جهان تپنده). از طرف دیگر، اگرجهان باز و نامتناوب در فضا باشد (هم‌چون سطح یك حجم سهمی) ، شکل آن در طی زمان نیز تجدید نخواهد شد . بنابراین ، همین استدلال که در قسمت پیش ذکرشد ما را به پذیرفتن جهان بی‌پایان در فضا و نیز جهان بی‌پایان در زمان می‌کشاند .

بدیهی است این نتایج ، که کاملا متکی بر مدارك رصدی در داخل کره‌ای به شعاع یك بیلیون سال نور است ، لزوماً بر جهانی «ماوراء نفوذ تلسکوپ پالومار» که خارج اطلاعات اختیاری ما می‌باشد تعلق نمی گیرد ؛ و نمی‌توان این امکان را از نظر دور ساخت که در بعضی فواصل دورتر خارج از این کره ، خواص فضا ممکن است اساساً چنان تغییر کند که اطلاعات کنونی ما در آنجا دیگر به کار نخورد. مثلا می‌توان فرض کرد که ، باآنکه در داخل مسافتهای رصد-گیری شده فضا کوچکترین تمایلی به محدود شدن نشان نمی‌دهد ، در فضاهای دورتر ممکن است ناگهان «تغییر تمایل» داده و محدود-شدن را آغاز کند . بحث در چنین امکانی مسلماً خارج از دامنهٔ علم اختباری است . علاوه براین ، نظر جالبی را که چند سال پیش منجم شارلیه بیان کرد می‌توان ذکر نمود ، و آن را ممکن است فرضیهٔ «درهمی بی پایان» نامید . شارلیه چنین پیشنهاد می کند که درست همان طور که ستارگان فراوان اطراف خورشید ما متعلق به ابر مجزایی، که همان کهکشان اختصاصی خودمان است ، می‌باشند ، کهکشانه‌ها نیز ابر بسیار بزرگی تشکیل می‌دهند که فقط جزء کوچکی از آن در منطقهٔ دید تلسکوپها قرار می گیرد . این امر می‌رساند که اگر ما بتوانیم دورتر و بازهم دورتر در فضا نفوذ کنیم ، سرانجام به فضایی برخورد خواهیم کرد که ماوراء کهکشانه‌هاست. با این حال ، این کهکشان غولپیکر از مجموعهٔ کهکشانه‌ها تنها کهکشان جهان نیست ، و بسیار دور و دورتر در فضا منظومه‌های مشابه دیگری می‌تواند یافت شود. این کهکشانه‌های خوشهٔ کهکشانه-ها نیز به‌نوبهٔ خود به واحدهای بزرگتری مجتمع می‌شوند، واین عمل

C.V.L. Charlier

بی‌حد و حصر ادامه دارد . چنین تصویری از طرز تشکیل دائماً صعودی ماده ، هر اندازه هم مهیج باشد ، متأسفانه خارج از حدود امکان مطالعات رصدی است .

شمارشهای سحابی ، و اشتباه میان فواصل و سنها

روش دیگری برای پی‌بردن به اینکه آیا فضای جهان «بر آمده» یا «فرو رفته» است موجود می‌باشد که متکی بر هندسهٔ محض و کاملا مستقل از انبساط نسبت به زمان است . این روش بستگی به این موضوع دارد که چه مقدار از فضا در مسافت معینی در دسترس می‌باشد و می‌تواند با مراجعهٔ به یك نمونهٔ دو بعدی بهتر درك شود . فرض کنید که یك قطعه چرم مدور از یك توپ معمولی فوتبال جدا و سعی کنیم آن را بر روی سطح یك میز بگسترانیم (قسمت راست و بالای شکل ۵) . واضح است که این کار بدون کشیدن لبه‌های چرم امکانپذیر نیست ، زیرا چون سطح اصلی به سوی داخل انحنا دارد (بر آمده است) ، در قسمتهای محیطی آن مواد به اندازهٔ کافی یافت نمی‌شود . حال اگر همین آزمایش را با قطعه چرمی که از یك زین جدا شده است انجام دهیم (قسمت راست و پایین شکل ۵) وضع بکلی متفاوت است . چون در کنارهٔ چرم مواد زیادتر وجود دارد ، برای گسترش آن احتیاج به جمع کردن آن داریم . اگر این دو سطح با نمونهٔ یکنواختی از نقاط اصلی پوشیده شده باشند ، چنین خواهیم یافت که پس از گسترش ، در کنارهٔ سطح کروی به کمبود نقاط بر می‌خوریم و در نزدیکی کنارهٔ سطح زین نقاط زیاد می آید . بیان ریاضی این کیفیت چنین است : سطح دایرهٔ مرسوم بر یك سطح کروی کندتر از مجذور شعاع ، و بر سطح زین تندتر از آن

افزایش می‌یابد .

در مورد فضای منحنی سه بعدی همین وضع پیش می‌آید ، که گرچه در درون چنین فضایی هستیم ، نمی‌توانیم آن را به همان سهولتی مجسم سازیم که سطوح دو بعدی را که در خارج آنها قرار گرفته‌ایم، می‌بینیم . در اینجا به جای نقاط واقع بر روی چرم ، کهکشانه‌هایی در فضا داریم که شاید توزیع آنها یکنواخت است . اگر فضا محدود و انحنای آن به سوی داخل بود ، لازم می‌آمد که تعداد کهکشانه‌ها کندتر از توان سوم مسافت افزایش یابد ، و اگر فضا بی پایان و انحنای آن به سوی خارج بود ، لازم می‌آمد که تعداد کهکشانه‌ها تندتر از توان سوم مسافت افزایش پیدا کند .

با چنین شمارشهای کهکشانی ، که هبل انجام داد ، بر خلاف نتایجی که در قسمت گذشته به دست آوردیم ، چنین یافت که فضای جهان به سوی داخل انحنا دارد (برآمده است) و البته انحنای آن بسیار سریع است . با این حال ، نتیجه‌ای که هبل به دست آورد بستگی کامل به درستی تخمینهای مسافات کهکشانی دارد . اگر همان طور که بر پیشنهاد کرده بود ، این مسافات واقعاً دو برابر بزرگتر از آن بود که قبلا تصور می‌کردند ، شمارشهای کهکشانی به نتیجهٔ مخالف منجر می‌شد ، و چنین به دست می‌آمد که جهان باز و بی پایان است . ضمناً باید به خاطر داشت که همهٔ تخمینهای مسافات کهکشانی متکی بر این فرض است که کهکشانه‌ها دارای تابناکی ثابتی هستند ؛ در حقیقت مسافات فقط به وسیلهٔ قانون عکس مجذور برای تابناکی ظاهری یك منبع دور اندازه‌گیری شده است . چون همهٔ کهکشانه‌های دور را ما بدان سان می‌بینیم که صدها میلیون سال قبل بوده‌اند ، اگر کهکشانه‌ها تابناکی خود را نسبت به زمان تغییر

دهند ، نتایج سرشماری کهکشانی اصولا اختلاف خواهد داشت. به طوری که دیدیم، چنین تغییراتی را باید هم‌انتظار داشت ، چه ، بنا بر رصدها و مشاهدات ستبینز و ویتفرد ، محتویات اختری کهکشانه‌های فردی ظاهراً تغییرات تحولی مشخصی را نشان می‌دهند.

تلاش در تلفیق روش هبل سر شماری کهکشانی بـا مطالعات ستبینز و ویتفرد در بـارهٔ تغییرات تحولی تـابناکی کهکشانی ما را بر سر دو راهی تأسف آوری قرار می‌دهد. روش سرشماری کهکشانی را برای مطالعهٔ انحنای فضا در صورتی می‌توان به کار برد که نخست بر سرعت و مقدار تغییر تابناکی کهکشانه‌ها در طی زمان آگاه شویم. از طرف دیگر ، یك مطالعهٔ سودمند در بارهٔ تغییرات تحولی تابناکی کهکشانه‌ها تنها وقتی ممکن است که بتوان روش قابل اطمینانی برای تخمین مسافتهای آنها به دست آورد ، که آن نیز به نوبهٔ خود داشتن اطلاعاتی از هندسهٔ جهان را ایجاب می کند . بـه نظر چنین می‌رسد که تنها راه رسیدن به منظور تئوری انبساط (به طوری که در قسمت قبل بیان شد) و به کار بردن نتایج آن برای کشف مشاهدات مربوط به تغییرات تحولی تابناکی کهکشانه‌ها باشد.

نخستین مراحل انبساط

مطالعات ریاضی در باب کیفیت انبساط (به قسمت ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود) نشان می‌دهد کـه مقدار ثابت قانون هبل بنأنی با تحول تدریجی جهان تغییر می کند . بـرای مـراحل نسبتاً قدیمی انبساط ، مقدار ثابت هبل به وسیلهٔ رابطهٔ زیر با چگالی متوسط جهان بستگی دارد :

$$[\text{مقدار ثابت هبل}]^2 = ۵٫۸ \times ۱۰^{-۷} [\text{چگالی متوسط}]$$

باید توجه داشت که چگالی متوسط جهان نه تنها شامل چگالی مادهٔ متعارفی است، بلکه شامل چگالی ـ جرم تشعشعی (نور مرئی و نامرئی) نیز می‌باشد که فضا را اشغال کرده است . می‌دانیم که بنابر اصل معروف (بـرای جرم و انـرژی) اینشتین ، تشعشع دارای وزن مشخصی است که مقدار عددی آن را می‌توان با حاصل تقسیم انرژی آن بر مجذور سرعت نور بیان کرد . در زندگی روزانه ، وزن تشعشع نورانی بـه اندازه‌ای ناچیز است کـه بـآسانی می‌توان از آن چشم پوشید ؛ و بالاخص وزن نور مرئی در اطاقهای بسیار روشن ، بالنسبه به وزن هوای داخل اطاق ، ناچیز و صرف نظر کردنی است. با این حال ، در مورد جهان وضع متفاوت است، و این اختلاف چندان به نسبت زیادی وزن تشعشع نیست ، بلکه از این لحاظ است که چگالی متوسط ماده بسیار اندك است. بنا بر فرمول معروفی از فیزیك رسمی، موسوم به فرمول شتفان ـ بولتسمان ، مقدار کل انرژی تشعشعی در واحد حجم فضا و در دمای T (دمای مطلق که صفر آن ۲۷۳ـ درجهٔ صد بخشی است) مساوی است با $۷٫۶ \times ۱۰^{-۱۵} T^{۴}$ از تقسیم این رقم بر مجذور سرعت نور ($c^{۲} = ۹ \times ۱۰^{۲۰}$) مقدار $۸٫۵ \times ۱۰^{-۳۶} T^{۴}$ گرم در سانتیمتر مکعب بـرای وزن انرژی تشعشعی بـه دست می‌آید. در دمای معمولی اطاق (در حدود ۳۰۰ درجهٔ مطلق) ، وزن تشعشع (در این مورد اشعهٔ گرم) تنها $۱۰^{-۲۵}$ گرم در سانتیمتر مکعب است. در فضای میان ستارگان ، که به وسیلهٔ ستارگان گرم می‌شود و دمای ثابتی در حدود ۱۰۰ درجهٔ مطلق (نزدیك دمای هوای مایع) دارد ، چگالی تشعشع (اشعهٔ حرارتی بسیار سرد !) $۱۰^{-۲۷}$ گرم در سانتیمتر مکعب است. این مقدار، با تمام کوچکی آن ، تقریباً یك درصد چگالی گاز میان ستارگان را ، که $۱۰^{-۲۴}$ گرم در سانتیمتر مکعب است ، تشکیل

می‌دهد .

از قوانین فیزیك رسمی این حقیقت نتیجه می‌شود که چگالی تشعشع در حجمی که در حال انبساط است سریعتر از چگالی ماده در همین حجم پایین خواهد آمد[1] . آن‌وقت این فرض پیش می‌آید که در طی قدیمترین مراحل انبساط ، وزن تشعشع نود در هر حجم از فضا بر وزن ماده در همان حجم برتری داشته است. در طی این ادوار ، مادهٔ معمولی به حساب نمی‌آمده و نقش اصلی را تشعشع بسیار گرم انجام می‌داده است .

ممکن است تقریباً گفتهٔ انجیل را در اینجا بیان کرد : « در آغاز آفرینش نور بوده» ، و بسیار هم بوده است ! ولی البته این «نور» بیشتر از اشعهٔ ایکس و اشعهٔ گامای پرانرژی تشکیل می‌یافت. اتمهای مادهٔ متعارفی به طور قطع در اقلیت قرار گرفته بودند و به میل و ارادهٔ جریانهای نیرومند کوانتومهای نوری به پیش و پس پرتاب می‌شدند .

رابطه‌ای که میان مقدار ثابت هبل و چگالی متوسط جهان قبلا برقرار شد به ما اجازه می‌دهد که بیان ساده‌ای استخراج کنیم که دما را ، در طی مراحل قدیمی انبساط ، همچون تابعی از زمان از هنگام حداکثر تراکم به دست دهد . با بیان این زمان بر حسب ثانیه و دما بر حسب درجه (به ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود) چنین

۱ ــ اگر لبهٔ یك ظرف مکعب شکل به وسیلهٔ یك عامل a افزایش یابد ، حجم ظرف به نسبت عامل a^3 اضافه خواهد شد ، وچگالی مادهٔ محتوی در آن به نسبت a^3 کاهش می‌یابد. ولی دمای انرژی تشعشعی در این حجم به نسبت a کاسته می‌شود (قانون وین) به طوری که چگالی به نسبت a^4 پایین می‌آید (بنابر قانون شتفان ــ بولتسمان).

به دست می آید :

$$\text{دما} = \frac{۱٫۵ \times ۱۰^{۱۰}}{[\text{زمان}]^{۱/۲}}$$

بنابراین وقتی یك ثانیه ، یك سال ، یك میلیون سال از سن جهان می گذشته، دما به ترتیب ۱۵ بیلیون، سه میلیون ، و ۳۰۰۰ درجهٔ مطلق بوده است . با در نظر گرفتن سن کنونی جهان (ثانیه ۳×۱۰^{۱۷}) در این فرمول چنین خواهیم داشت :

$$T = ۵۰ \text{ درجهٔ مطلق} \quad (\text{دمای کنونی})$$

واین مقداری است که با دمای واقعی فضای میان ستارگان وفق می دهد. آری ، برای آنکه جهان ما از حرارت سوزان روزهای نخستین خود سرد شده و به سرمای امروزی ! برسد ، مدتها وقت لازم داشته است.

در حالی که تئوری بیان صحیحی برای دمای جهان در حال انبساط فراهم می کند ، برای چگالی ماده تنها به عبارتی با یك عامل نامعلوم می رسد . در حقیقت می توان ثابت کرد (به ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود) که

$$[\text{چگالی ماده}] = \frac{\text{مقدار ثابت}}{[\text{زمان}]^{۳/۲}}$$

در فصل سوم مشاهده خواهیم کرد که این مقدار ثابت ممکن است از تئوری مبدأ انواع اتمی به دست آید.

فصل سوم

ساخته شدن اتمها

فراوانی طبیعی انواع اتمی

به طوری که چندین بار نشان دادیم ، این فرض معقول به نظر می‌رسد که انـواع گوناگون اتمی در طـی دورهٔ بسیار قدیم انبساط تشکیل شده باشد ، یعنی زمانـی که همهٔ مادهٔ موجود در جهان هنوز به طور یکنواخت ، با چگالی بسیار زیاد متراکم و تحت تأثیر دمای بی‌اندازه بالا قرار گرفته بود که شرایط مناسبی برای تبدیلات انواع هستهٔ اتمی فراهم می‌ساخت . چون وجه تمایز مقادیـر نسبی انـواع مختلف اتمی که در طی این «دورهٔ پخت و پز جهانی» تولید شد ، باید شرایط فیزیکی حکمفرما در آن زمان باشد، اطلاعات ما درباب فـراوانی نسبی عناصر شیمیایی و ایـزوتوپهای آنها در طبیعت ما را مجهز می‌سازد که تصویری از نخستین مراحل انبساط باز سازیم . بنا بر این ممکن است چنین انـدیشید که جدول فـراوانی نسبی انواع اتمی از قدیمترین اسنادی به شمار می‌رود که وابسته به تاریخ جهان ما می‌باشد .

چندین دانشمند بزرگ ژمینفیزیك و نجومفیزیك فراوانی نسبی عناصر را عمیقاً مطالعه کرده‌اند ، و امروز مقدار فراوانی مواد در این باره در اختیار ما گذاشته‌اند ؛ قسمت اعظم مدارك و اطلاعات از تجزیهٔ شیمیایی قشر زمین و احجار سماویی به دست می‌آید که احتمالا قطعات سیارهٔ پیشینی را که قبلا میان مدارهای مریخ و مشتری در حرکت بوده ، نشان می‌دهد. این اطلاعات به وسیلهٔ تجزیهٔ طیفی خورشید و ستارگان و مواد رقیقی که در سراسر فضای بین اختری پراکنده است ، تکمیل شده . مهمترین نتیجه‌ای که از این مطالعات به دست آمده این حقیقت است که سازمان شیمیایی جهان به طرز شگفت‌انگیزی یکنواخت است . چنین معلوم شده که قریب ۵۵٪ مواد جهانی ئیدروژن و در حدود ۴۴٪ آن هلیوم است ؛ یك درصد باقیمانده جوابگوی همهٔ عناصر سنگینتر ، به همان میزان که آنها را در زمین می‌یابیم ، می‌باشد . با در نظر گرفتن ارقام کلی برای فراوانی کیهانی ، زمین ما استثنای جالب توجهی از لحاظ فقدان تقریبی ئیدروژن و هلیوم ، که سازندگان اصلی ماده در جهان هستند ، نشان می‌دهد.[1]

۱ــ هرکس می‌داند که هلیوم عنصر کمیابی در زمین است، ولی در نخستین نظر اجمالی چنین به نظر می‌رسد که ئیدروژن عنصری کاملا فراوان است . اما چنین احساسی مربوط به این واقعیت است که اتفاقاً ما در میان رسوب اصلی ئیدروژن ، یعنی رطوبت جو، و در نزدیکی اقیانوسهایی که ۲/۳ سطح زمین را پوشانیده‌اند به سر می‌بریم . اگر به یاد بیاوریم که عمق اقیانوسها نسبت به قطر کرهٔ زمین کوچك است و سنگهای خارایی و بازالتیی که جسم اصلی زمین را تشکیل می‌دهند محتوی ئیدروژن نیستند، آنوقت به کمیابی ئیدروژن در زمین پی می‌بریم.

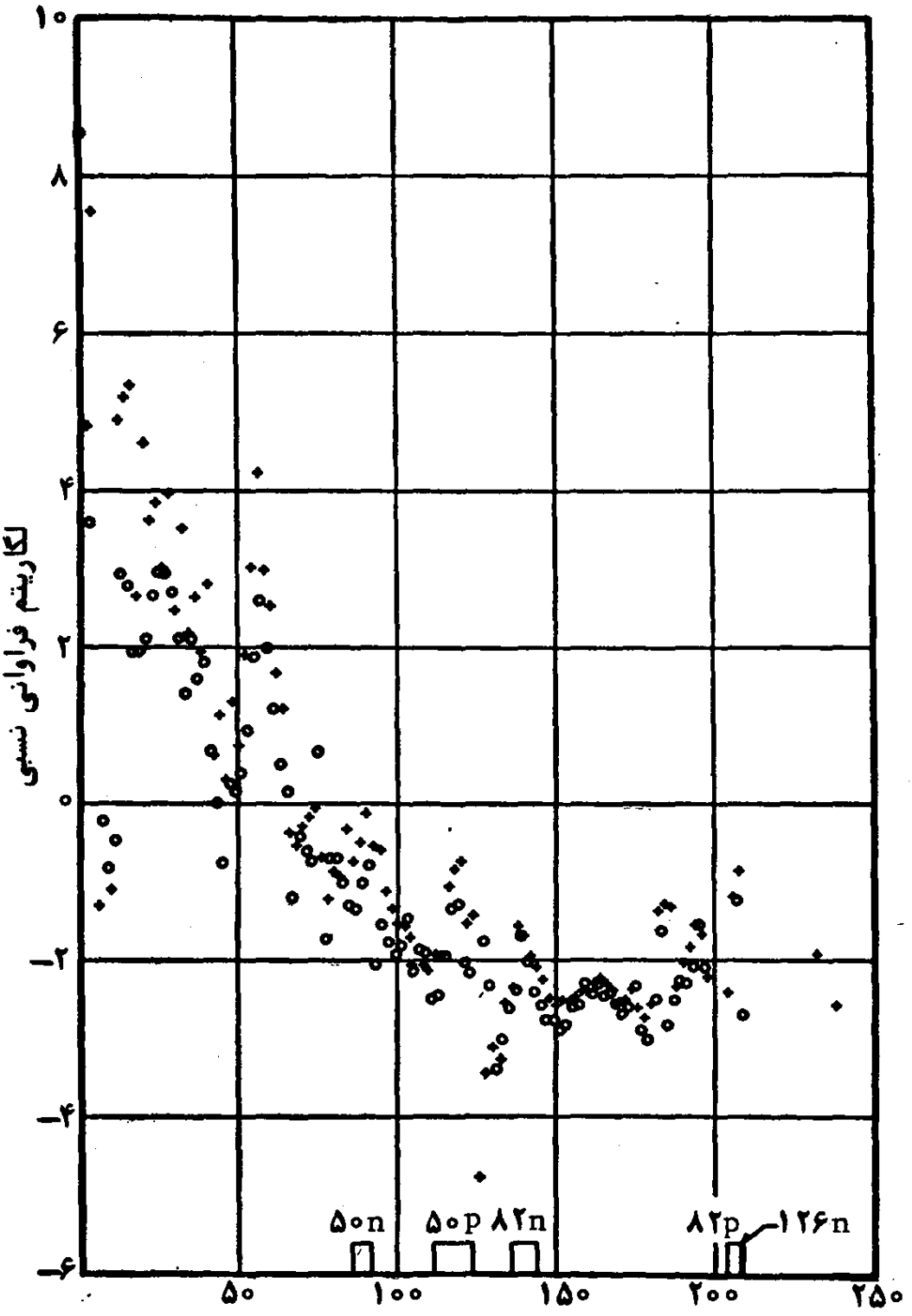
کمیابی ئیدروژن و هلیوم و دیگر گازهای کمیاب در سیارهٔ خودمان صرفاً تأثیری موضعی است که ناشی از اوضاع و احوال موجود هنگام تولد زمین است . به طوری که فصل چهارم نشان می‌دهد ، تشکیل منظومهٔ سیاره‌ای ما به وسیلهٔ یك فرایند تجمع غبار میان سیاره‌ای آغاز شده و ، به همین سبب ، ممکن است « هستهٔ سیاره‌ای اولیه » نامیده شود . این غبار، که در گاز مختلط ئیدروژن و هلیوم بین ستارگان شناور بوده ،تقریباًهمان سازمان ابرهای گرد و غبار تولید شده از تراکتوری دارد که در یك جادهٔ کوهستانی کار می‌کند ، و تجمع آن اجسام سنگی زمین خودمان و مریخ و زهره و دیگر سیارات کوچك را به وجود آورده است. موادگازی شکلی که فضای بین ستارگان را پر می‌کرد در این کیفیت سهیم نبود تا زمانی که اجسام سنگی اصلی از لحاظ حجمی و وزنی به اندازه‌ای رشد کردند که توانستند این گازها را با نیروی گرانشی خود تسخیر کنند. برای آنکه یك‌هستهٔ سیاره‌ای توانسته باشد این گونه گازها را تسخیر کند لازم بوده است که سنگینی آن به چندین برابر سنگینی زمین برسد. هیچ یك‌از سیارات زمین و مریخ و زهره به آن اندازه بزرگ نشدند که بتوانند چنین کاری را انجام دهند (شاید بدین سبب که ذخیرهٔ غبار از نزدیکی آنها گریخته بود) ، و به این جهت سیاراتی محجر به صورت کنونی باقی مانده‌اند . ولی هستهٔ اولیهٔ مشتری و دیگر سیارات بزرگ از این جرم حد تجاوز کردند و به وسیلهٔ جو-های سنگین ئیدروژن و هلیوم محاصره شدند. بنا بر این ، به‌موجب مطالعات هریسن براون [1]، هستهٔ سنگی مشتری، چون مشابه زمین ولی شش برابر سنگینتر است ، تنها بالغ بر ۲٪ جرم کل (۳۰۰ برابر

1– Harrison Brown

جرم زمین) آن می‌شود . این هستهٔ مرکزی با طبقات آب منجمد ، امونیاك و متان ، که مجموعاً ۸٪ را تشکیل می‌دهند ، پوشیده شده است ؛ ۹۰٪ که از جسم عظیم غولپیکر مشتری باقی می‌ماند مخلوط بی‌اندازه متراکم ئیدروژن و هلیوم است که تقریباً در نزدیکی سطح نهانی هستهٔ مرکزی به چگالی آب می‌رسد . این ساختمان درونی مشتری که در عکس آن بر روی هم منطبق است در صفحه تصویر III نشان داده شده است. تنها سیارات کوچك و اقمار از این قاعده، که جهان از ۵۵٪ ئیدرون و ۴۴٪ هلیوم و ۱٪ دیگر اتمها تشکیل یافته ، مستثنا هستند.

شکل ۶ فراوانی کیهانی انواع اتمی را به وسیلهٔ نموداری نشان می‌دهد که متکی بر کار رسمی دانشمند نروژی زمینشیمی ، گولدشمیت [1] می‌باشد ، و با معلومات تازه‌تری که توسط هریسن براون از تجزیهٔ احجار سماوی به دست آمده تکمیل شده است . به طور وضوح مشاهده می‌کنیم که فراوانی کیهانی با افزایش وزن اتمی بسرعت تنزل می‌کند . عناصری همچون نقره یا مولیبدن ، که در نیمهٔ بالای جدول متناوب عناصر قرار گرفته‌اند ، تنها به مقدار قریب یك قسمت درچند صدبیلیون یافت می‌شود. ظاهر جالب منحنی فراوانی طبیعی این است که پس از آنکه وزن اتمی عناصر به حدود ۱۰۰ رسید ، منحنی تراز شده و فراوانیهای متساوی برای همهٔ عناصر نیمهٔ فوقانی جدول متناوب عناصر نشان می‌دهد . این شکل شگفت‌آور منحنی اختباری ، و سقوط سریع آن (بر حسب تابع مجهول القوا) که به دنبال قسمت افقی منحنی پیش‌می‌آید ، آشکارا متضمن اشارهٔ مهمی دربارهٔ شرایطی است که در آن شرایط اتمها به وجود آمده‌اند. هر

1— V. M. Goldschmidt



شکل ۶ ــ قدیمترین مدرک باستانشناختی متعلق به تاریخ جهان . فراوانیهای مشهود انواع گوناگون اتمی در جهان که (به مقیاس لگاریتمی) نسبت به وزنهای اتمی آنها ترسیم شده . قوطیها «اعداد سحری» را تعیین می‌کنند.

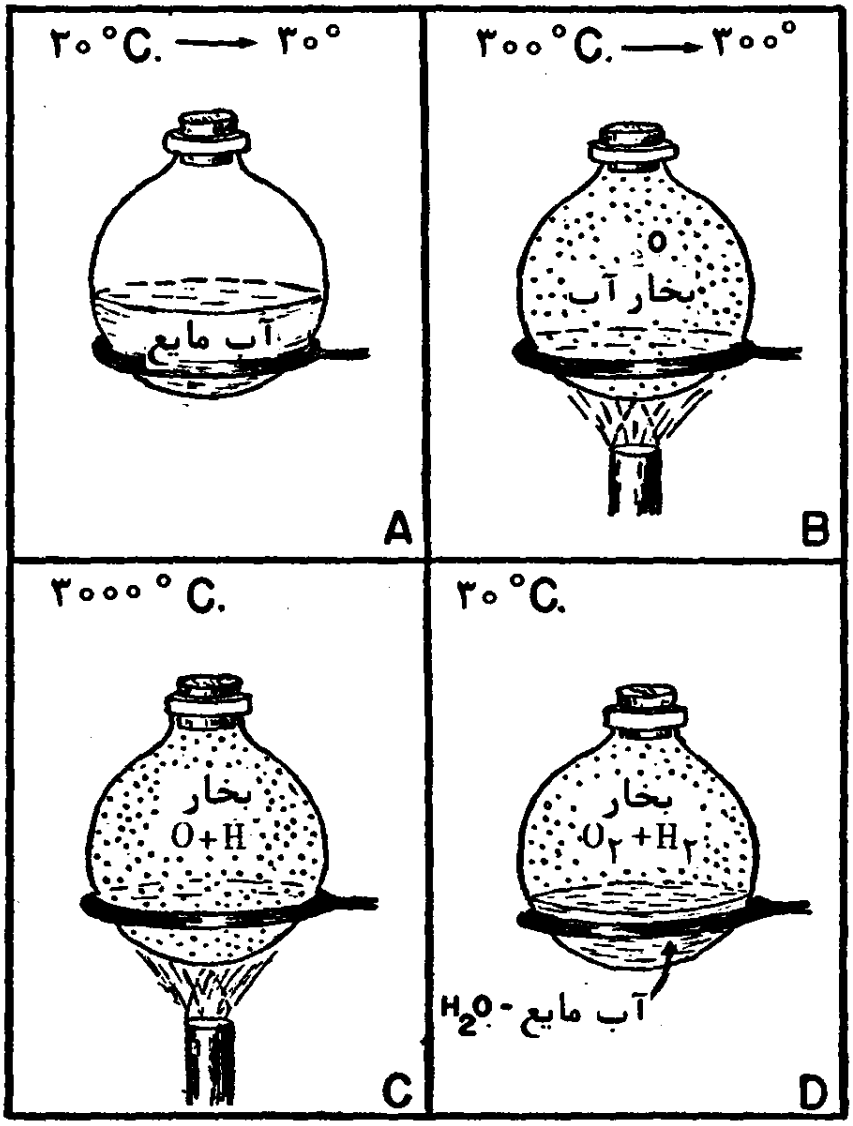
تئوریی که مستلزم به دست آوردن تصویر ثابتی از فرایند پخته شدن هسته‌ای باشد باید ضمناً بتواند این منحنی فراوانی انواع اتمی را نیز جواب گوید.

فرضیهٔ تعادل منجمد

قدیمترین تفسیرهای مربوط به منحنی اختباری فراوانی طبیعی بر این فرض ساده ـ و از جهتی معقولترین آن ـ متکی است که توزیع مشهود نوعی تعادل شیمیایی (یا تا حدی کیمیایی) را میان انواع گوناگون اتمی نشان دهد . این تعادل باید هنگامی وجود داشته باشد که دمای ماده آن اندازه بالا بوده که هرگونه فعل و انفعال هسته‌ای حرارتی را امکانپذیر ساخته باشد و هنگامی که دما ، در نتیجهٔ انبساط سریع، پایین آمده «منجمد» کرده باشد.

مفهوم « تعادل منجمد » را می‌توان با مثال ساده‌ای از مبحث شیمیفیزیك توضیح داد. فرض کنید مقدار معینی آب در ظرف سر-بسته‌ای داشته باشیم (شکل ۷ A) . اگر آن را گرم کنیم تا دمایش به اندازهٔ کافی بالا رود (بالای دمای بحرانی، که برای آب ۳۷۴ درجهٔ صد بخشی است) ، تمام آب محتوی در ظرف به حالت بخار در خواهد آمد . در این دما ، جنبش حرارتی مولکولهای آب به‌اندازه-ای سریع است که نیرو های دگرچسبی میان آنها دیگر نمی‌توانند مولکولها را نزدیك به یکدیگر نگاه دارند (شکل ۷ B) . چون دما بیش از این افزایش یابد ، جنبش حرارتی به اندازه‌ای تشدید می‌شود که تصادم میان مولکولهای مهاجم شروع به شکستن آنها به اتمهای مجزای ئیدروژن و اکسیژن می کند (شکل ۷ C). وقتی دما به حدود ۱۰۰ درجه رسید، ظرف محتوی مخلوطی اتمهای آزاد ئیدروژن و

اکسیژن و باقیماندهٔ مولکولهای آب خواهد بود. برای هردمای معین و فشار (یاچگالی) معین نسبت خاصی از ایـن اجزاء تشکیل دهنده وجود خواهد یافت که می‌تواند به وسیلهٔ فرمولهای کلاسیك تعادل به دست آید. اکنون اگر ظرف را بتأنی سرد کنیم ، فرایند خود به‌خود در جهت عکس انجام می‌گیرد ، و سرانجام به همان آبی که در آغاز کار داشتیم باز می‌گردیم . ولی اگر ظرف را سریعاً سرد کنیم (با ریختن هوای مایع بـر روی آن یا به وسیلهٔ انبساط گـاز در حجمی



شکل ۷ ــ چگونگی به دست آوردن مخلوط منفجره‌ای از ئیدروژن ــ اکسیژن به وسیلهٔ تعادل منجمد

بزرگتر) ، فرایند ترکیب مجدد باید با شتاب انجام گیرد . بعضی اتمها هنوز فرصت خواهند داشت که زوج خاص و مناسبی پیدا کنند. مقداری مولکولهای آب (H_2O) و H_2 و O_2 تشکیل خواهد شد (شکل ۷ D) . اما در دماهای معمولی باید فقط آب موجود باشد . بنا براین ، مخلوط آب به اضافهٔ اکسیژن و ئیدروژن آزاد نشانهٔ تعادلی است که در دماهای زیاد ایجاد می‌شود. چنین مخلوطی را در حال «تعادل پایدار نما»* گویند ، یعنی اگر کبریتی به آن بزنیم انفجاری صورت گرفته سپس گاز تبدیل به بخار آب خواهد شد، که آن هم بعداً تبدیل به آب می‌شود.

این مثال تشابه خوبی است بر آنچه توانسته است در طی انبساط سریع مادهٔ اولیهٔ بسیار گرم شده در جهان اتفاق افتاده باشد. همین ممکن است توضیح این واقعیت باشد که انواع اتمهای کنونی شامل هسته‌های بسیاری هستند که می‌توانند بر یکدیگر فعل و انفعال کرده ، و در نتیجه مقادیر عظیمی انرژی هسته‌ای نهانی آزاد سازند. در واقع اگر مجمع انواع اتمی موجود اکنون در حال تعادل بودند هر گونه « طرح انرژی اتمی » همان اندازه غیر ممکن است که بتوان از یك طرح تهیهٔ انرژی از فعل و انفعالهای میان کانیهای گوناگون (البته زغال سنگ و نفت مستثنا هستند) که قشر زمین را تشکیل می‌دهند استفاده کرد .

نسبتهای تعادل انواع گوناگون اتمی را ، در شرایط معینی از دما و چگالی ، می‌توان به وسیلهٔ فرمولی محاسبه کرد که شبیه همان فرمول است که شیمیفیزیکدانان در محاسبهٔ حالات تعادل میان

* ـ metastable ؛ تعادلی که به ظاهر پایدار است ولی بر اثر عواملی خارجی یا درونی در منظومه، پایداری خود را از دست می‌دهد. (مترجم)

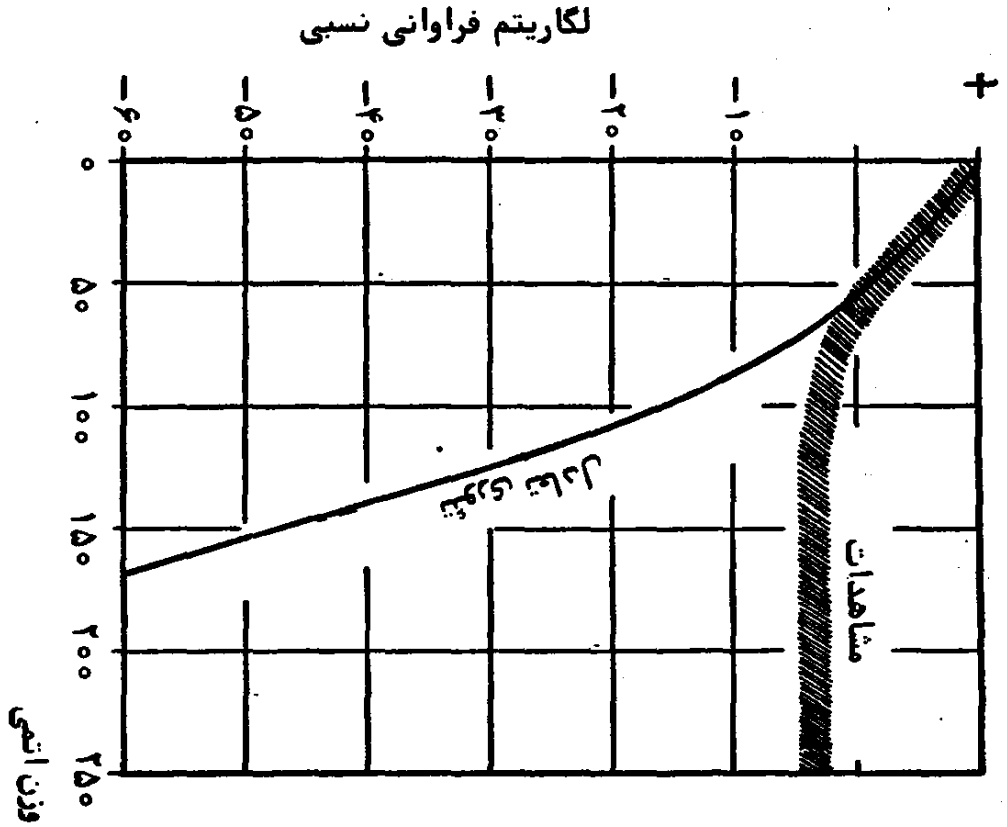
مولکولها به‌کار می‌برند. تنها کاری که باید کرد این است که به‌جای انرژی پیوند هسته‌ای (که بالغ بـرچند میلیون الکترون ولت است) انرژیهای پیوند مولکولی را (بالغ برچند الکترون ولت) قرار دهیم، و البته با به کار بـردن دماها و فشارهای بسیار زیادتر . ایـن گـونه محاسبات سابقاً تـوسط چندیـن دانشمند ، خاصه چاندرا شکهر[1] و هنریش[2] و بـه همین تـازگی توسط کلاین[3] و بشکوف[4] و ترفنبرگ[5] انجام یافته است. از ایـن محاسبات چنین به دست آمده کـه قسمت نزولی منحنی (صرف نظر از تمام بینظمیهای خفیف منحنی) می‌تواند همچون تعبیری از حالت تعادل منجمدی باشدکه مربوط به یك دمای ۸ بیلیون درجه و چگالی ده میلیون برابر چگالی آب است . مـع ذلك ، این محاسبات در ناحیهٔ عناصر سنگین قرین با موفقیت اولیهٔ خود نیست ، و منحنی نظری بـه جای آنکـه مانند منحنی اختباری فراوانی اتمی باشد، به حرکت نزولی خود ادامه می‌دهد (شکل ۸) . فراوانیهای اختباری عناصر سنگین بیلیونهابیلیون‌بار بزرگتر ازمقادیر پیشبینی شده به وسیلهٔ منحنی نظری می‌باشند . این نتیجهٔ منفی مربوط به فرض خاصی در محاسبات نیست ، بلکـه مستقیماً ناشی از ماهیت تعادل منجمد[6] است .

1_ S. Chandrasekhar 2_ V. L. R. Henriech
3_ O. Klein 4_ G. Beskow 5_ L. Treffenberg

۶ ــ در این نظریه ، فراوانیهای نسبی به‌طور تخمین از عبارت زیر به دست می‌آید:

$$\log (\text{فراوانی}) = E_A / kT$$

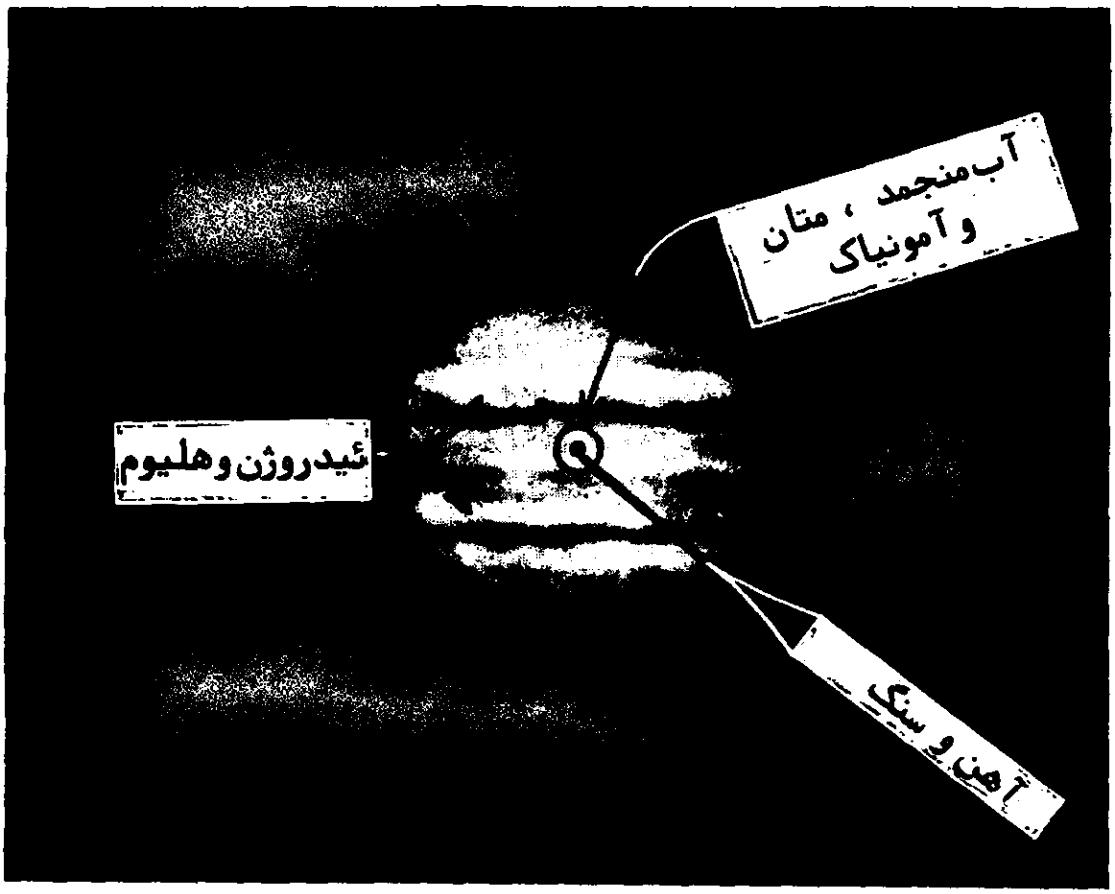
که در آن E_A مقدار کل انـرژی پیوند هسته‌ای وزن اتمی A ، k مقدار ثابت بولتسمان، و T دمای مطلق است. چون درتمام منظومهٔ متناوب انرژیهای پیوند هسته‌ای تقریباً متناسب با اوزان اتمی است،منحنی(فراوانی) log نسبت به وزن اتمی باید به نحوی از ئیدروژن به‌سرب مستقیماً نزول کند.



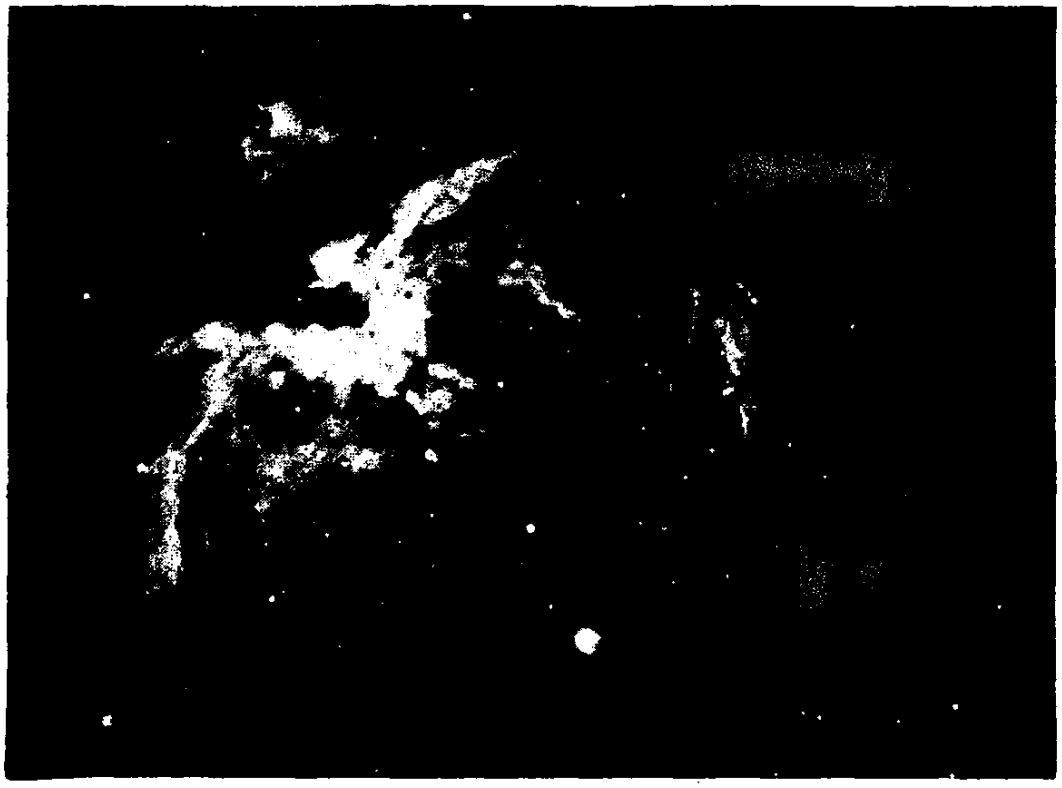
شکل ۸ــ نارسائی تئوری تعادل منجمد

این پیشامد نامناسب کــه در نظریهٔ تعادل روی می‌دهد ، ما را وادار به این می کند که در ترمیم آن تلاش کنیم. بدین‌سبب ، مثلا ، چانــدراشکهر و هنریش خودشان پیشنهاد کردند کـه نور و عناصــر سنگین ، در طی دوران انبساط ، پخته شده‌اند . بنا بــر این فـرضیه ، عناصر سنگین در زمان قدیم که دما بسیار زیاد بود پخته و « منجمد » شده‌اند ، و پخته شدن عناصــر سبکتر در مدت مدیدتــری در دمای پایینتر ادامه داشته است . با این حال ، چنین فرضی بــا آنچه فیزیك هسته‌ای در باب نسبتهای فعل و انفعال هسته‌ای در شرایط مورد بحث به ما می‌آموزد ناسازگار است .

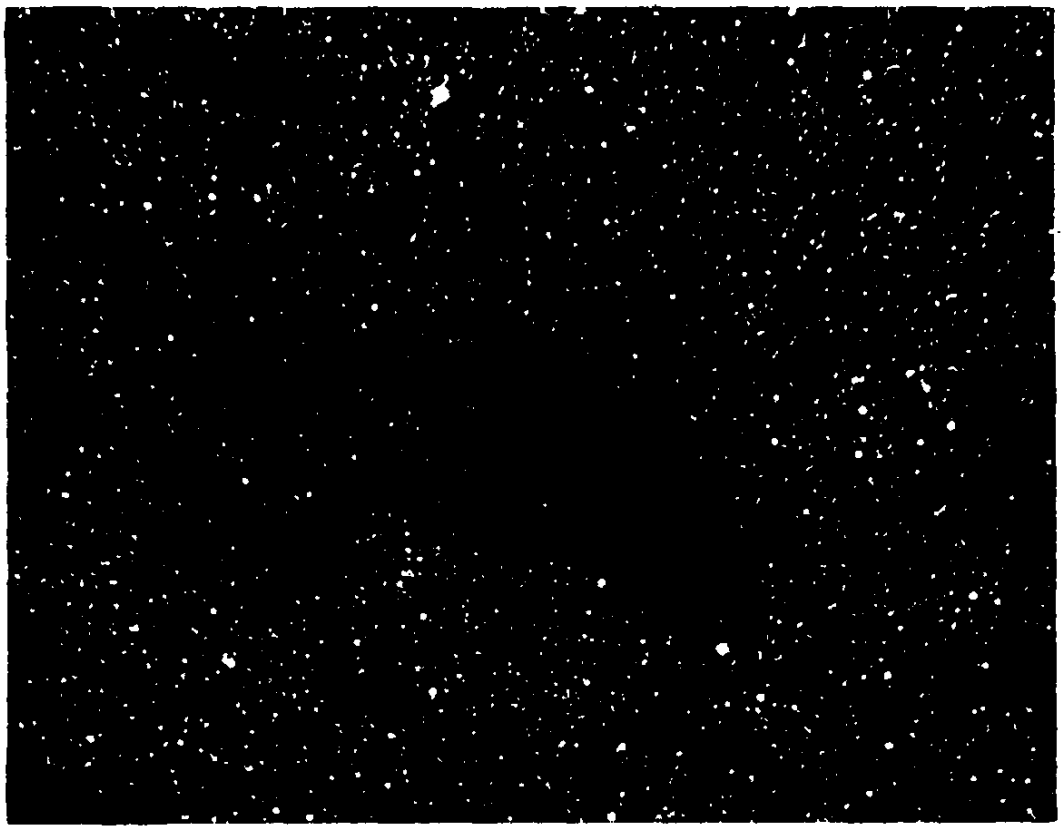
تنها راه چاره این فرض خواهد بود که اتمهای گوناگون در



صفحه تصویر III— مشتری . سهمها ساختمان درونی سیاره را تعیین می‌کنند.



صفحه تصویر IV ــ سحابی بزرگ در «جبّار» که ستارگان مجاور آن را روشن ساخته‌اند.



صفحه تصویر V ــ سحابی تاریك در «عقاب» که متن ستارگان را تاریك می‌کند.

جاهای مختلف و در شرایط حـرارتی و فشار متفاوت پخته شده‌اند. از این‌رو کلاین، بشکوف، و ترفنبرگ در سوئد چنین فرض کردند که عناصر مختلف شیمیایی دراعماق متفاوت در بعضی ستارگان‌اولیه (که دیگر وجود ندارند) تشکیل یافته‌اند ، که بعداً منفجر شده و مواد را در همهٔ فضا پـراکنده کرده‌اند. منجم هلندی وان آلبادا[1] و منجم انگلیسی فرد هویل[2] نیز همین عقیده را بیان کـردند و ترجیح دادند که کار را درستارگان کنونی انجام دهند: آلبادا در غول سرخ و هویل در فوق نواختران (سوپرنووا) منفجر شونده . با این حال، نویسند- گان بعدی آنچنانکه انتظار می‌رفت قادر به محاسبهٔ فراوانیهای نسبی بـر اساس تئوری آنان نبودند ، و ایـن امر بیشتر بـه سبب وسعت پیچیدگی تصویری بود که این تئوری دربرداشت. در شرایط مناسبی که انتخاب می‌شود پیوسته باید بتوان هرمنحنی فراوانی معین عناصر را برای توضیح قسمتهای مختلف آن دوباره به کار بـرد. آنچه وان آلبادا و هویل جستجو مـی‌کردنـد نظیر تقاضای بانوی خانـه‌دار بی‌تجربه‌ای است که برای پختن غذا سه اجاق‌برقی لازم دارد : یکی برای بوقلمون و یکی بـرای سیب‌زمینی و دیگری بـرای نان کیك. چنین فرضی بـرای شرایط نـامتجانس پخته شدن که برای به دست آوردن مقادیـر صحیح عناصر سبك و متوسطو سنگین تطبیق شده باشد ، چون ترتیب پیچیده و در هم خاصی را به نام «تسهیلات پخته شدن» دخالت می‌دهـد ، تصویـر و نمایش سادهٔ ساخته شدن اتم را ویران می‌کند .

1_ G. B. Van Albada

2_ Fred Hoyle

فرضیهٔ اتم اولیه

شصت سال* پیش دانشمند بلژیکی ژرژ لومتر توصیهٔ ممکن دیگری برای مبدأ انواع اتمی پیشنهاد کرد که عبارت است از بیان «فرضیهٔ اتم اولیه» . نام صحیحتری که می‌توان به کار برد «هسته‌های اولیه» است ، زیرا لومتر چنین نظر داد که قبل از آغاز انبساط همهٔ مواد جهان به حالت سیال سنگین هسته‌ای بوده‌اند که هستهٔ عظیمی شبیه هستهٔ اتم ، ولی البته بسیار بزرگتر ، تشکیل می‌دادند . این فرض چنین ایجاب می‌کند که در آغاز انبساط دمای ماده نسبتاً پست بوده باشد (زیر دمای بحرانی سیال هسته‌ای) ، به‌طوری که جنبش حرارتی نوکلئون (یکی از اجزاء تشکیل دهندهٔ هسته) آن اندازه قوی نبوده که زنجیر پیوندی را که آنها را به یکدیگر متصل می‌ساخته در هم شکند و آن را به صورت جسم سیال پیوسته‌ای در آورد. وقتی که انبساط آغاز شد ، سیال اولیه خود بخود ناپایدار شد و شروع به تجزیه شدن به قطعاتی کرد که همهٔ ابعاد را داشتند . توصیف این کیفیت با بیان خود لومتر چنین است : «جهان اتم پاره پاره شده و هر پاره به پاره‌هایی بازهم کوچکتر در آمده است . برای سهولت نوشتن فرض می‌کنیم که این پاره پاره شدن به صورت پاره‌های متساوی روی داده است . در این صورت چنین می‌یابیم که برای به دست آمدن اتمهای حقیری به صورت کنونی که تقریباً به اندازه‌ای کوچك باشند که دیگر شکسته نشوند ، ماده احتیاج به ۲۶۰ بار پاره پاره شدن داشته است . تحول جهان را می‌توان با منظرهٔ یك آتشبازی،

* در نسخهٔ اصلی مؤلف که حدود ۳۰ سال پیش نوشته شده سی سال آمده که اکنون پس از گذشت حدود ۳۰ سال شصت سال می‌شود. (مترجم)

که تازه پایان یافته ، مقایسه کرد ، یعنی تعداد کمی مشعلهای سرخ و اندکی خاکستر و دوده . با قرار گرفتن بر روی خاکستر سرد شده، ما ناظر از میان رفتن خورشیدها هستیم و کوشش می کنیم که درخشندگی ناپدید شدهٔ مبدأ جهان را به یاد بیاوریم . »[1]

مؤلف این نظریات جالب نخواست جزئیات فرایند پاره پاره شدن را به وسیلهٔ تجزیه و تحلیل ریاضی دنبال کند ؛ و انجام دادن این وظیفهٔ دشوار بر ماریا مایر[2] و ادوارد تلر[3] تحمیل شد ، که هریك ، مستقل از یکدیگر ، به نظریات مشابهی مربوط به مبدأ انواع اتمی رسیدند . این نویسندگان در بارهٔ اصل آغاز فرایند پاره پاره شدن در رابطهٔ با تئوری جهان در حال انبساط بحثی نمی کنند ، و آغاز کار را از مرحله‌ای در نظر گرفتند که پاره‌های مجزا به حجمی به قطر چندین کیلومتر و به جرمی در حدود جرم یك ستارهٔ متوسط[4] (اتم ستارگان لومتر) در آمده بودند . در لحظه‌ای که چنین پاره‌هایی ، به وسیلهٔ فرایند مکانیکی پاره پاره شدن سیال هسته‌ای خنثای اولیه تشکیل یافتند ، باید منحصراً شامل نوترونها بوده باشند ، ولی در نتیجهٔ تبدیلات مکانیکی خود بخود [الکترون + پروتون ← نوترون]، این «پولینوترونها»ی اولیه بزودی بار الکتریکی مثبت به دست آورده و جوهای الکترونی آنها را محاصره کرده‌اند . این اتمهای اولیه تا حدی شبیه اتمهای معمولی کنونی هستند ، جز اینکه حجم آنها

۱ ــ نقل از «مجلهٔ مسائل علمی» نوامبر ۱۹۳۱

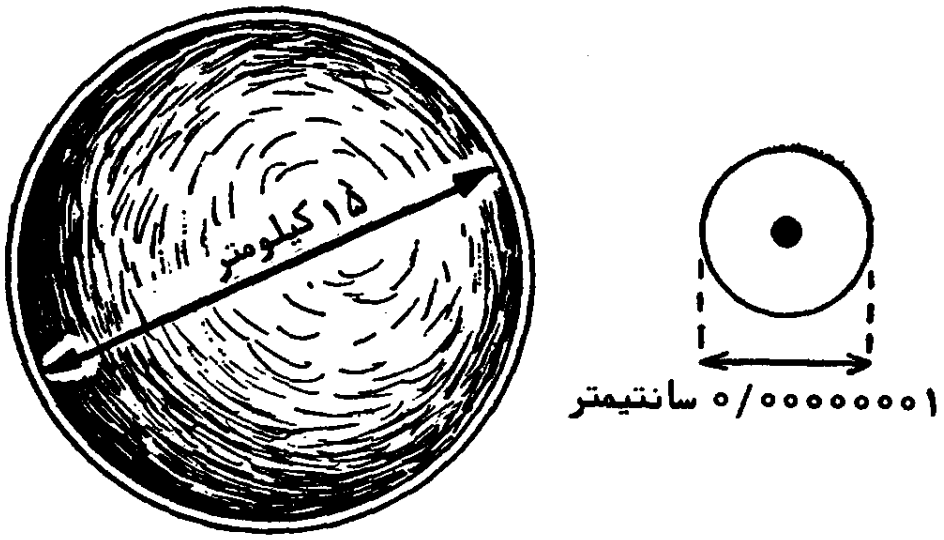
2 ــ Maria Meyer

3 ــ Edward Teller

۴ ــ چون سیال هسته‌ای به چگالی 10^{14} برابر چگالی آب است ، شعاع قطرهٔ هسته‌ای همجرم با خورشید ۱۴۰۵ کیلومتر خواهد بود .

عظیم و ضخامت جوهـای الکتـرونی آنها (فقط 10^{-15} سانتیمتر) در مقایسه با قطر هسته‌های آنها ، بسیار کوچك بوده است (شکل ۹) .

با مطالعهٔ تعادل مکانیکی ، چنین «ابر اتمها» مایر و تلر توانستند نشان دهند کـه سطح هستهٔ غولپیکر بسرعت از جوانه‌ها و غنچه‌های



شکل۹ــ یك «اَبَر اتم» فرضی، ویك اتم معمولی . ضخامت جو در اولی و حجم هسته در دومی به نسبت اغراق‌آمیز ترسیم شده است.

بیشمار کوچکی به قطر 10^{-12} پوشیده شده است . این غنچه‌ها از تنهٔ مادر جدا شده و به صورت شاخه‌هایی کـه هستهٔ عناصر سنگین مختلف را همراه دارند بـه پـرواز در می‌آیند ؛ و از راه محاسبات معلوم می‌شود که از همهٔ این غنچه‌ها ممکن است انتظار داشت کـه تقریباً دارای حجمهایی متساوی باشند که مربوط به حجم وزن اتمی برابر با چند صد واحد است. این تئوری در ضمن اجازه می‌دهد که مقادیر نسبی مورد انتظار را برای ایزوتوپهای مختلف عناصر سنگین

که بدین ترتیب تشکیل می‌شود محاسبه کرد ، و نتایج به دست آمده بـا فراوانیهای ایزوتوپی عناصر سنگین سازگار است . امـا چنین تصویـری از بیان مبدأ عناصر سبك ، کـه ۹۹٫۹۹۹۹۹۹۹ درصد همهٔ مـادهٔ جهان را تشکیل می‌دهد ، کاملا عاجز است . مایر و تلر چنین نظر دادند که حال که عناصر سنگین باید با فرایند غنچه زایی به وجود آمده باشند ، عناصر سبکتر بـاید از تعادل منجمدی نظیر آنچه قبلا شرح دادیم نتیجه شده بـاشند . با این حال ، اینکه چگونه ایـن دو تئوری می‌توانند با هم تلفیق شوند دشوار است. البته این دو تئوری شرایط فیزیکی کاملا مختلفی را بـرای پخته شدن رضایتبخش اتمی ایجاب می کنند .

فرضیهٔ ایلم (Ylem)

سومین راهی که ممکن است به وسیلهٔ آن انواع اتمی تشکیل شده باشند چندین سال پیش توسط مؤلف پیشنهاد شد ، و جزئیات آن را بـا کمك همکاران خـود رالف آلفر[1]، هرمن [2]، سمارت[3] ، ارنیکو فرمی[4] ، و آنتونی تورکویچ [5]تکمیل کرد. این تئوری ، نسبت به فرضیه های تعادل منجمد و پـاره پاره شدن مکانیکی سیال هسته‌ای اولیه در وضع میانه‌ای قرار دارد . فـرض چنین است کـه حالت اولیهٔ مـاده گاز هسته‌ای داغی (نه یك سیال) بـوده ، و نیز فرض بر این است کـه

1 – Ralf Alpher
2 – R.C. Herman
3 – j.S. Smart
4 – Ernico Fermi
5 – Anthony Turkevich

در آن زمان شرایط فیزیکی به اندازه‌ای بسرعت تغییر می کرده که هر گز یك تعادل واقعی برقرار نشده است ، و در عوض باید وضعیت از طریق یك فرایند دینامیك سریع مورد بحث قرار گیرد . ایـن دو فرض ، هر دو ، دور از آن هستند که من عندی باشند ، بلکه در واقع از همان تئوری عمومی انبساطیی نتیجه می‌شوند که در فصل دوم [1] توصیف شد ، و نشان داد که در طی مراحل اولیهٔ انبساط جهان دما باید بی اندازه بالا و تغییرات فوق العاده سریع باشد.

اختلاف میان «تعادل منجمد» و «دینامیك سریع» را می‌توان از راه مقایسه با یك آموزشگاه نمایش داد که تغییرات معینی در برنامهٔ آموزشی آن انجام می گیرد . اگر برنامه برای چند سال ثابت نگاه داشته شود (طولانیتر از مدتی که هر دانش آموز در این آموزشگاه تحصیل می کند) و سپس به طور ناگهانی تغییر یابد ، دانش‌آموزی که پیش از تغییر برنامه فارغ التحصیل می‌شود با نخستین برنامه در حال تعادل است . مثلا ، اگر تغییر برنامه مشتمل بر حذف آموزش زبانهای رسمی سابق باشد ، قدیمترین فارغ التحصیلان ، زبان لاتینی و یونانی را خواهند دانست ؛ ولی اگـر تغییرات برنامه همه ساله ادامه یابد ، معلومات فارغ التحصیلان برای هر کلاس نهایی مختلف خواهد بود و ، در این صورت ، با هیچ یك از برنامه‌های مختلفی که در زمانهای متفاوت اجرا شده منطبق نخواهد بود . بدون شك چنین وضعی کـه در یك برنامهٔ آموزشی زیـان آور است برای کمك بـه ادراك مبدأ انواع اتمی کاملا سودمند می‌باشد .

اکنون حالت ماده را طی نخستین دقایق فرایند انبساط در نظر

۱ ــ هیچ مؤلفی، قبل از این ، فرض خود را بـر کیهانزایی نسبی مبتنی نساخته است.

بگیریم ، یعنی هنگامی که دمای جهان چند بیلیون درجه بوده.[1] در چنین دماهایی انرژی جنبشی حرکت حرارتی بر حسب میلیونها الکترون ولت اندازه‌گیری شده ، و ذرات با سرعتهایی در حدود سرعتهایی که در اتمشکنهای جدید به‌دست می‌آید ، به اطراف پراکنده می‌شدند . هیچ ترکیب هسته‌ای نمی‌تواند در چنین شرایطی وجود داشته باشد ، و حالت ماده باید همچون گاز داغی مجسم شود که کاملا به وسیلهٔ ذرات هسته‌ای ، یعنی پروتون و نوترون و الکترون، تشکیل شده است . البته معلوم است که نوترونهای آزاد بالفطره ناپایدارند و خود بخود در مدت ۱۳ دقیقه پس از طرد شدن از هسته پاره پاره می‌شوند و به صورت پروتون و الکترون در می‌آیند ، ولی در دماها و فشارهای بسیار زیاد نوترونهای آزاد می‌توانند به تعداد قابل توجه همراه با پروتون و الکترون وجود داشته باشند ، حقیقت امر این است که در چنین شرایط حدی یك نوع توازن دینامیك برقرار خواهد شد . تباهی تدریجی نوترون ($n \rightarrow p+e$) ، باساخته شدن نوترونهای تازه به طریقهٔ معکوس ، یعنی برخورد پروتونها و الکترونها ($p+e \rightarrow n$) جبران خواهد شد. این اختلاط ذرات هسته‌ای را ایلم می‌نامیم که نام غیر متداولی است که بنابر تعریف لغتنامهٔ وبستر مفهوم آن «نخستین جسمی که فرض می‌شود عناصر از آن تشکیل یافته‌اند» می‌باشد.

پس از این فرض ، این سئوال پیش می‌آید که وقتی چگالی و دمای ایلم در نتیجهٔ انبساط سریع جهان نوپدید رو به نقصان گذاشته، چه بر سر ایلم آمده است. به محض آنکه ایلم شروع به سرد شدن

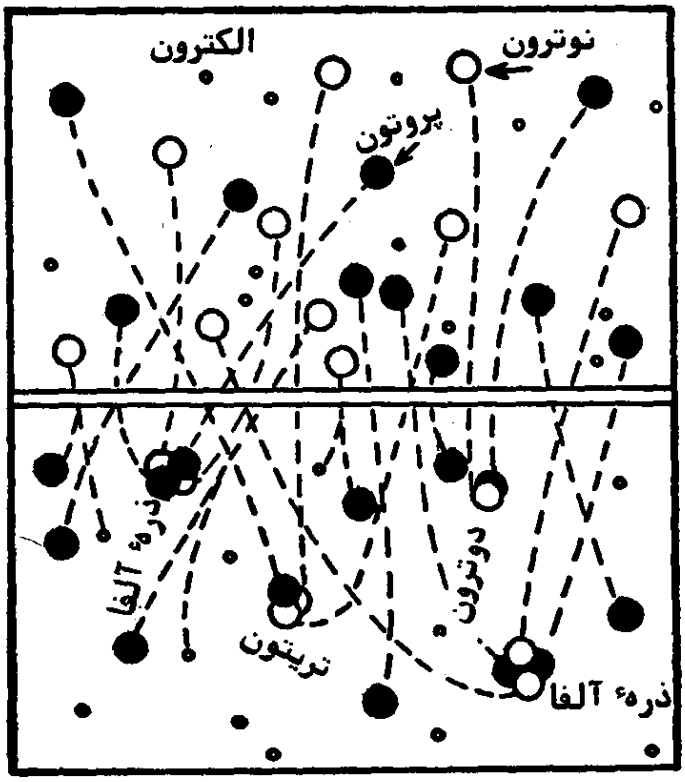
۱ ــ به فرمول آخر فصل دوم مراجعه شود .

کرده است ، فعل و انفعال نوترونزایی ($p+e \rightarrow n$) ، که نوترونهای تازه فراهم می‌ساخته است ، باید نخست بطئی و سپس ، به سبب فقدان الکترونهای حرارتی سریع ، کاملا متوقف شده باشد . آنوقت تباهی خود بخود نوترونها باید بدون هیچ جبرانی انجام گرفته باشد ، به طوری که در پایان نخستین ساعات پس از آغاز انبساط هیچ نوترون آزاد در مخلوط به جا نماند . از طرف دیگر ، پایین آمدن دما به نفع «فرایند تجمع» بوده که در آن نوترونهای باقیمانده خود به پروتونها پیوسته و بدین ترتیب اجتماعی از ذرات با پیچیدگی مختلف تشکیل داده‌اند .

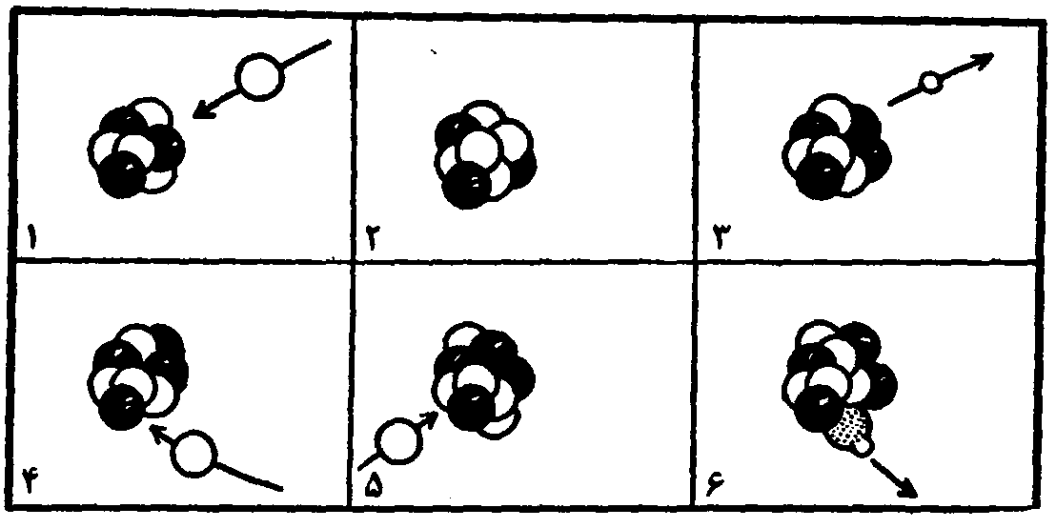
این تجمعات نمونهٔ اصلی هستهٔ اتمی موجود امروزی است . رقابت و مسابقهٔ میان فرایند تباهی و تجمع در شکل ۱۰ نمایش داده شده است .

اجتماع هسته‌ایی که از این طریقه به وجود آمده شامل پروتونهایی بیش از پروتونهای اولیه است ، زیرا نیروی دافعهٔ میان بارهای الکتریکی مشابه شدیداً از تجمع پروتونها جلوگیری می کرده است . چون ثبات هستهٔ اتمی نیازمند به تعداد تقریباً متساوی از هر دو نوع ذره است (مثلا هستهٔ پایدار اتم اکسیژن شامل ۸ پروتون و ۸ نوترون است) ، رشد اجتماعات ذره‌ای باید گاهگاهی به وسیلهٔ تبدیلات بتا ، که در آن نوترونهای اضافی با خارج ساختن الکترون منفی به صورت پروتون در می‌آیند ، متوقف شده باشد . رشد یك هستهٔ مختلط به وسیلهٔ جذب نوترون و تبدیلات بتا به طور متناوب ، اجمالا در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

چون طول مدتی که تجمع ذرات در آن مدت می‌توانسته است انجام گیرد محدود به حدود یك ساعت بوده (پس از زمانی که دیگر



شکل ۱۰ ــ تصویری اجمالی از فرایندی که در «ایلم» در حال سرد شدن روی داده است . از هر ده نوترون که در اصل وجود داشته (بالای شکل) سه تا تباهی یافته ، چهارتا در ساختمان ذرهٔ آلفا وارد شده ، دو تا برای ساختن یك تریتون به کار رفته ، و یکی برای ساختن یك دوترون مصرف شده است.



شکل ۱۱ ــ تصویری اجمالی از فرایندهای متناوب جذب نوترون و تباهی بتا (گلوله‌های سیاه نشانهٔ پروتونها ، گلوله‌های سفید از آن نوترونها ، وگلوله‌های کوچکتر الکترونهای منفی هستند) .

نوترونهایی به جا نمانده و دمای «ایلم» پایینتر از حد لازم برای فعل و انفعالات پروتون می‌شود) ، نتایج این تحول باید بستگی بـه نسبتی داشته باشد که در آن تجمع واقع شده است . این نسبت بـه وسیلهٔ چگالی «ایلم» تعیین شده ، چه هر قدر چگالی بزرگتر باشد برخوردـ های میان ذرات واقع در واحد حجم در واحد زمان فراوانتر است. اگر در لحظه‌ای کـه دمای «ایلم» بـه نقطه‌ای ـ پایینتر از 10^9 درجهٔ صد بخشی ـ تنزل می‌یابد کـه در آنجا تجمع ذرات ممکن است ، چگالی «ایلم» قبلا بسیار کم بوده و بیشتر نوترونهایی کـه در اصل وجود داشته پاره پاره شده یا پیش از آنکه احتمال برخورد بـا یك هستهٔ در حال تولید را به دست آورند و به آن بپیوندند ، به صورت پروتون و الکترون در آمده‌انـد . از طرف دیگر ، اگر در آن لحظه چگالی «ایلم» بسیار زیاده بوده ، بیشتر نوتـرونهای موجود در اصل برای ساختن هستهٔ سنگین مصرف شده ، و تنها مقدار اندکی از آنها به صورت پروتون و الکترون تباهی یافته‌اند . در حالت اول این فرایند قسمتهای بزرگی از اتمهای ئیدروژن به وجود می‌آورد و عملا عناصر سنگیـن در کار نیست . در حـالت دوم ئیدروژن بسیار کـم و هستهٔ سنگین زیاد است. مشاهده می‌کنیم کـه برای پخته شدن کامل انواع اتمی ، با نسبتهایی مربوط بـه آنچه واقعاً در طبیعت یافت می‌شود ، باید تعدیل نسبتاً دقیقی در چگالی (یا فشار) «ایلم» در طی دوران پخته شدن صورت گیرد . اگر فشاری که به‌کار رفته خارج از اندازه باشد، ئیدروژن را در این «دیگ بخار اولیه» خواهد سوزانـد و اورانیوم را نمی‌پزد ، در صورتی که فشار کمتر از ایـن بـاشد اندازه نتیجهٔ معکوس به بار خواهد آورد . ایـن گونـه تعدیل باید مقدار ثابتی را به دست دهد که در بیان چگالی ، که در فصل دوم بحث شد ، به کار

رفته و تنها ارتباط ناپیدا در زنجیرهٔ شرایطی است که خواص فیزیکی اولیهٔ انبساط جهان را مشخص می‌سازد.

نخستین نتیجهٔ تئوری «ایلم»، یعنی آنچه سرانجام از فرایند کامل اتمسازی در کمتر از یك ساعت حاصل می‌شود، ممکن است با شگفتی و بی اعتقادی تلقی گردد. آیا این کودکانه نیست که در بارهٔ چیزی گفتگو کنیم که بیلیونها سال قبل، و آن هم تنها در مدت یك ساعت، روی داده است! ولی باید به یاد آورد که در پدیده‌های هسته‌ای مقیاس نسبی زمان تا حدی کشدار است. مثلا، زنجیرهٔ فعل و انفعال هسته‌ایی که در یك بمب اتمی منفجر شونده روی می‌دهد درست چند میکروثانیه بیشتر طول نمی‌کشد، ولی بعضی محصولات شکافت رادیو آکتیو ناشی از انفجار بمب ممکن است سالها بعد در محل انفجار بمب کشف شود. نسبت چندین سال به چند میکروثانیه چنین است:

$$\frac{\sim ۳\times ۱۰^{۷}}{۱۰^{-۶}} = ۳\times ۱۰^{۱۳}$$

و نسبت ۳ بیلیون سال به یك ساعت نیز همین مقدار است:

$$\frac{۱۰^{۱۷}}{۳۶۰۰} = ۳\times ۱۰^{۱۳}$$

اگر حادثهٔ کم دوامی همچون انفجار بمب A، که سالها بعد مواد رادیو آکتیو تولید می‌کند، مایهٔ شگفتی ما نمی‌شود، چرا حوادث هسته‌ای اولیه که اتمهای اورانیوم، توریوم، و غیره را که هنوز هم وجود دارند تولید کرده‌اند ما را متعجب سازد؟

ممکن است از ما بپرسند که چرا اطلاعات اختباری فیزیك هسته‌ای امروزی را در حوادث و اتفاقاتی به‌کار برده‌ایم که در اوضاع و احوالی روی داده است که در مراحل اولیهٔ بی اندازه متراکم جهان

در حـال انبساط ، بـا مواد داغ شدهٔ چند بیلیون درجهٔ آن ، وجود داشته است . ولی در مقابل ، ایـن نکته نیز پیش می‌آید کـه چنین وضعی بیسابقه نیست ؛ و در حقیقت ، به طوری کـه قبلا ذکر شد ، در چنین دماهایی انـرژیهای حرارتی ذرات هسته‌ای در حدود یك میلیون الکترون ولت بوده ، یعنی مقداری کـه نظایر آن همه روزه در آزمایشگاههای اتمی برای مطالعهٔ فعل و انفعالات هسته‌ای بـه کار می‌رود . برای ما مهم نیست که ذرات هسته‌ای متصادم چنین انرژیهای بسیار زیـاد را ، در نتیجهٔ جنبش حرارتی یـا بـه سبب سریـع شدن حرکتشان ، در ماشینهای با فشار الکتریکی فوق‌العاده به دست‌آورده باشند . ضمناً درك خواهیم کرد که چگالی ماده در طی دوران پخته شدن اتم قابل مقایسه با چگالی هوای جو است ، به طوری که دلیلی نیست که در به کار بردن قوانین فیزیکی مربوط به گازها یـا قوانین جاذبه‌ای که فرایند انبساط تابع آن بوده تردیدی به خود راه بدهیم. حقیقت این است که راهی جز قبول فرضهایی کـه محاسبات متکی بدانهاست نداریم ، و تنها کاری که باید بکنیم این است کـه فرمول نسبیت برای انبساط عمومی ، و اطلاعات اختباری مـربوط به فعل و انفعالهای هسته‌ای گوناگون را بپذیریم ، و ببینیم آیا نتیجهٔ محاسبات بـا فراوانیهای انـواع اتمی معلومی کـه مشاهده شده سازگار است یا نه .

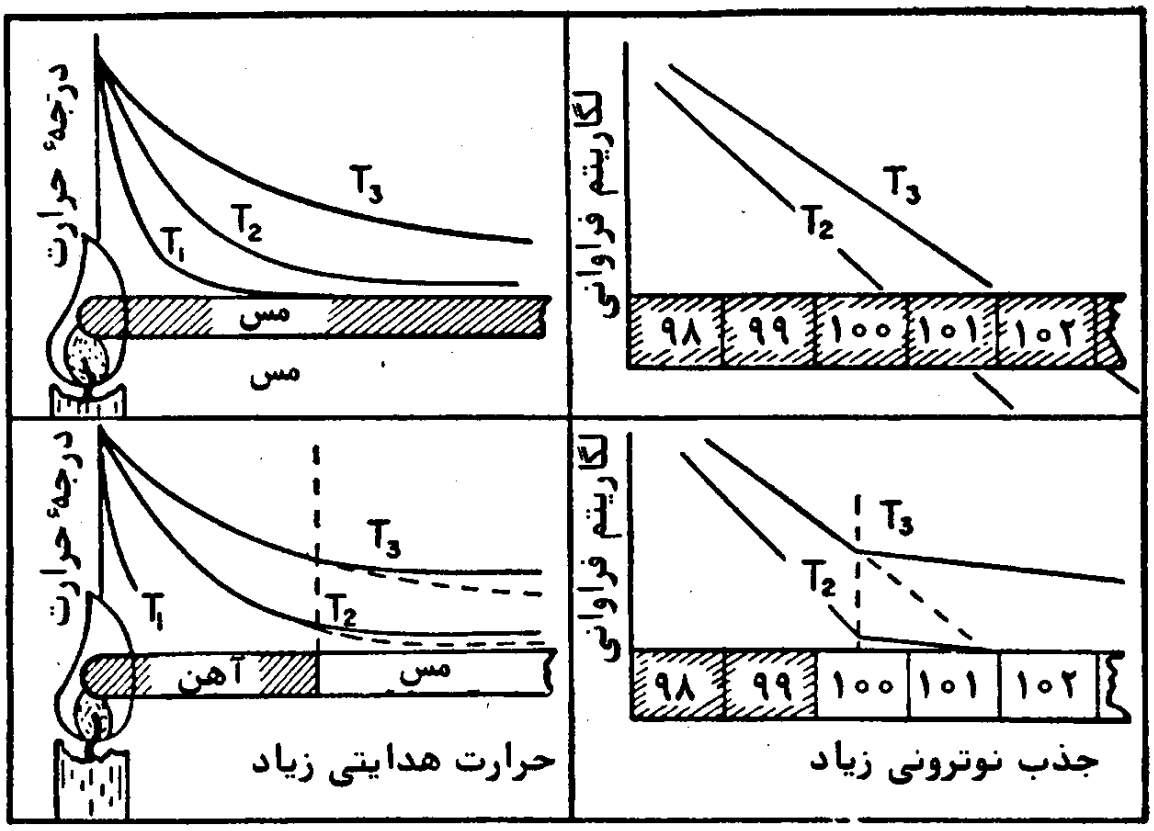
منحنی فراوانی نظری

معادلات ریاضیی که فرایند ساختمانی را که هم اکنون بحث شد توصیف می‌کند مسلماً بسیار ساده است . این معادلات چنین بیان می‌کند که میزان تغییر تعداد هسته‌ها با یك اتم به‌وزن اتمی مشخص

برابر است با اختلاف میان میزان تولید آنها به وسیلهٔ جذب نوترون از گروه وزن اتمی پست‌تر مجاور ، و میزان از دست رفتن هسته‌ها در طی جذب نوترونی به وسیلهٔ گروه یا وزن اتمی بالاتر [1] مجاور.

مسئله‌ای کـه در اینجا بـا آن مـواجه هستیم ، گـرچه بسیار دشوار است ، کاملا شبیه به مسئلهٔ هدایت حرارتی در طول میلهٔ عایق‌پوشی است که یك سر آن گرم شود . در این مورد نیز افزایش دما در هر مقطع میله اختلاف میان حرارتی است کـه از سمت چپ در آن می‌ریزد و حرارتی که از سمت راست از آن خارج می‌شود . و تصادف جالب توجه این است که ضریب هدایت حرارتی در مسئلهٔ میله معمولا با همان حرف یونـانی σ نمایش داده می‌شود کـه مقطع عرضی جذب نوترون را در مسئلهٔ هسته‌ای ما مشخص می‌سازد . تشابه میان ایـن دو مورد در شکل ۱۲ نمایش داده شده . اگـر میله شامل مواد متجانسی باشد (مثلا آهن) ، به طوری که ضریب هدایتی در سراسر طول آن یکسان بماند ، توزیع دما در امتداد میله در زمانهای مختلف پس از آغاز گرم شدن ، به وسیلهٔ منحنیهای مجهول القوایی نمایش داده می‌شود کـه در شکل نشان داده شده . اگـر احتمالات جذب نوترون (مقطع عرضی جذب σ) بـرای هسته‌های کلیهٔ اوزان اتمی یکسان بـاشد ، فـرایند ساخته شدن هسته نیز سبب فـراوانیهایی است که به‌طور تابع مجهول القوا با وزن اتمی کاهش می‌یابـد . این امر قسمت نزولی منحنی اختباری فراوانی شکل ۶ را توضیح می‌دهد، ولی نمی‌تواند برای قسمت تقریباً افقی در ناحیهٔ عناصر سبکتر به کار رود . اما ادراك این مطب آسان است که قسمت افقی منحنی ممکن است

۱ ــ به ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود.

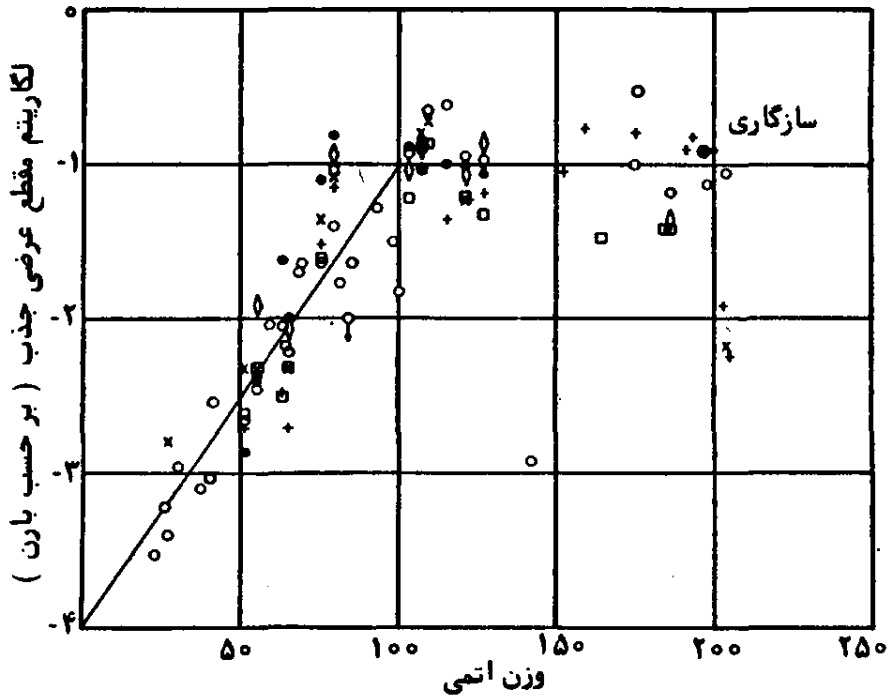


شکل ۱۲ ــ تشابه میان هدایت حرارتی و فرایند ساخته شدن هسته.

وقتی به دست آید که فرض کنیم σ از چپ به راست افزایش می‌یابد. البته اگر میله‌ای را که نیمی از آن آهن و نیم دیگرش از مس (که حرارت را بهتر از آهن هدایت می‌کند) باشد در نظر گیریم که انتهای آهنی آن در شعله فرو رفته باشد، چنین انتظار می‌رود که شیب حرارتی تندی در قسمت آهنی داشته، و توزیع دما در قسمت مسی، که در آن حرارت آسانتر جریان دارد، ملایمتر صورت گیرد. همین طور می‌توان انتظار داشت که اگر احتمال جذب هسته‌ای σ برای هسته‌های سنگینتر بیش از هسته‌های سبکتر باشد، منحنی فراوانی افقی در ناحیهٔ عناصر سنگین به دست آید. در واقع این همان حالتی است که در شکل ۱۳ نمایش داده شد و مقاطع

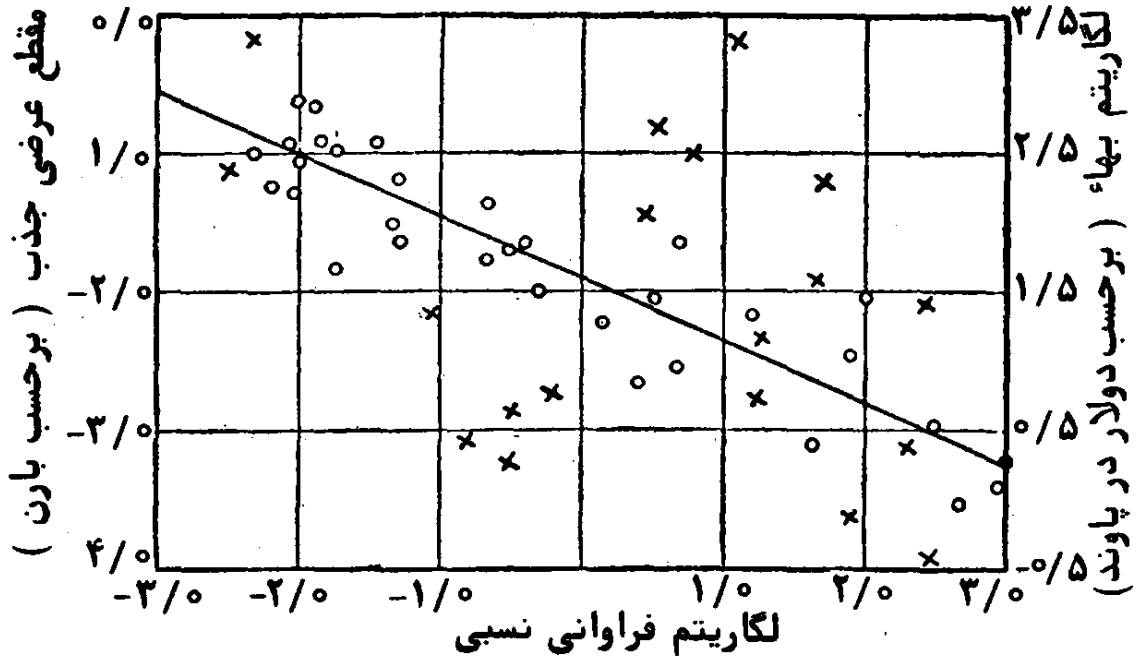
عرضی جذب هسته‌ای واقعاً اندازه‌گیری شده در عناصر گوناگون را به ازای انرژیهای نوترونی در حدود یک میلیون الکترون ولت (معادل با ۱٫۰ بیلیون دما) نشان می‌دهد. بدین ترتیب، با تئوری فرایند اتمسازی که متکی بر جذب‌هسته‌ای پی در پی است، می‌توان توضیح صحیحی برای منحنی اختباری فراوانی‌به دست آورد.

پیش از آنکه نتایج انتگرالگیری معادلات را برای چنین فرایند اتمسازیی مورد نظر قرار دهیم رابطه‌ای کاملا اختباری تعیین کنیم که میان مقاطع عرضی جذبی (که در شکل ۱۳ نشان داده شده) و فراوانی انواع اتمی (که در شکل ۶ نشان داده شده) وجود دارد. اگر، با ترکیب‌این دو منحنی، لگاریتمهای فراوانیهایی را که مستقیماً مشاهده شده در مقابل مقاطع عرضی اندازه‌گیری‌شده رسم کنیم، نتیجه‌ای که با دوایر کوچك شکل ۱۴ تعیین شده به دست می آید. دراین‌شکل می‌توان



شکل ۱۳ــ مقاطع عرضی جذب هسته‌ای، یا احتمالا آنچه قبلا جذب شده، برای نوترونهای با قریب یك میلیون الکترون ــ ولت انرژی، در مقابل اوزان اتمی عناصر جذب‌کننده رسم شده است. خط متصل یك مقدار متوسط مورد قبول به عنوان مبدأ محاسبات بعدی می‌باشد.

مشاهده کرد که دوایر بر روی خط مستقیمی قرار می‌گیرند که نشانهٔ رابطهٔ ساده‌ای میان دو مقداراست. مقاطع شکل۱۴ مقایسهٔ فراوانیهای نسبی معلوم عناصر شیمیایی گوناگون را با قیمتهای تجارتی،



شکل۱۴ــ ارتباط میان فراوانی‌نسبی عناصر شیمیایی از یك طرف، و مقاطع عرضی (دوایر) و قیمتهای تجارتی هرپاوند (مقاطع) از طرف دیگر . این ارتباط بسیار مناسبی میان فراوانی و مقاطع عرضی جذبی ، و ارتباط بسیار ضعیفی میان فراوانی و قیمت است.

آنها، آن طور که فهرست بازرگانی یك شرکت شیمیایی نشان می‌دهد، تعیین می‌کند. در این حالت، نقاط به طرز بسیار نامنظمی در سراسرمیدان پراکنده شده و نشان می‌دهند که قیمتهای تجارتی عناصر خالص آن اندازه که به وسیلهٔ استفادهٔ صنعتی و تسهیلات موجود برای استخراج و تصفیهٔ آنها مشخص می‌شود، به وسیلهٔ فراوانی یا تنوع آنها به دست نمی‌آید .

انتگرالگیری واقعی معادلات برای اتمسازی نخستین‌بار توسط

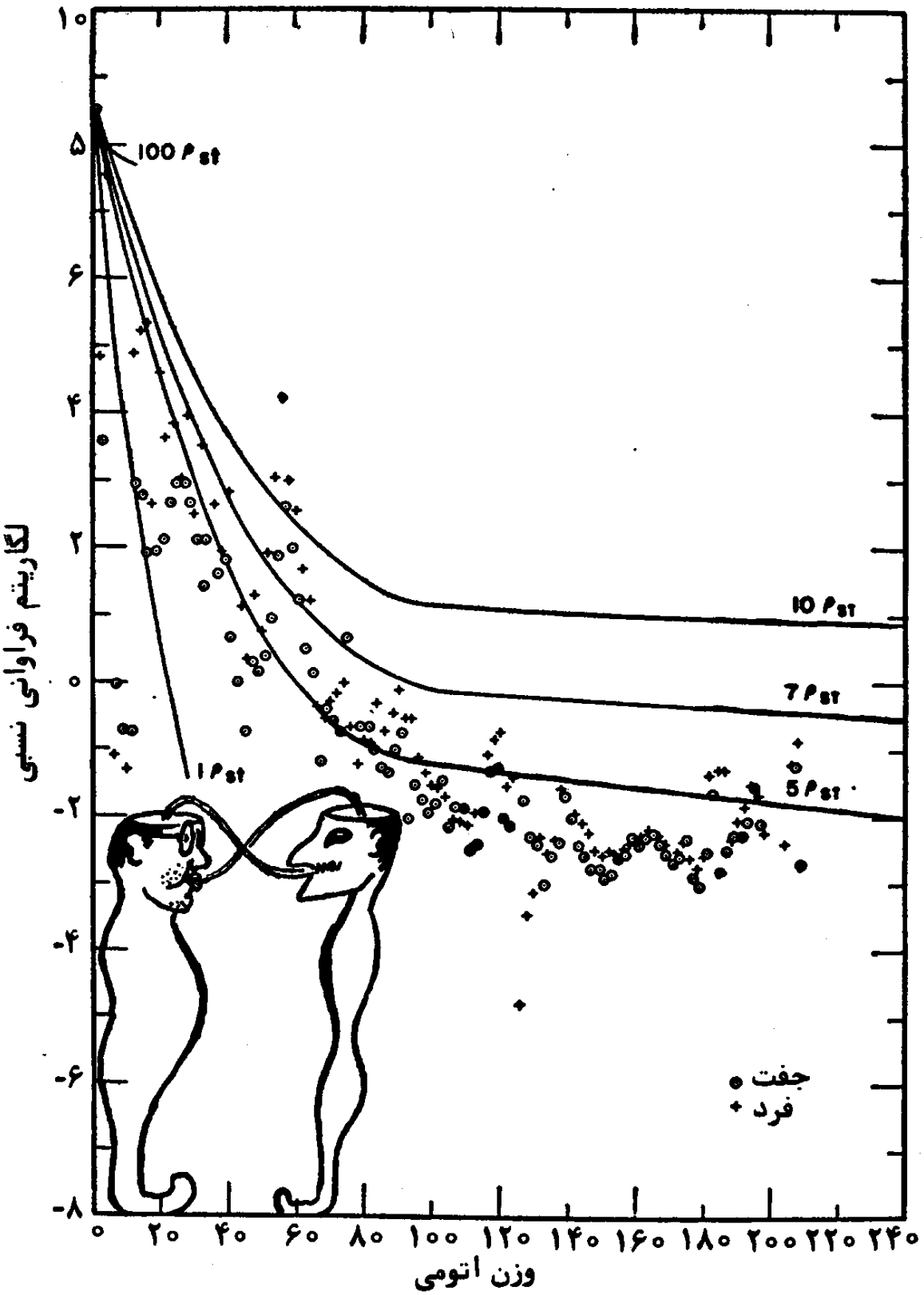
رالف آلفر[1] انجام شد.

شکل ۱۵ که نمودار نتایجی است که بعداً توسط رالف آلفر و هرمن (که مصراً از تغییر نام خود به دکتر خودداری کرد) به‌وسیلهٔ حسابگر الکترونی «دفتر ملی استانداردها» انجام گرفت، سازگاری نزدیك منحنی محاسبه شده را با فراوانیهای مشهود نشان می‌دهد. بر روی شکل آشکار است که دو منحنی بالا، یعنی منحنی $10\rho_{ST}$ و $7\rho_{ST}$، عناصر سنگین را از مرحلهٔ پختن گذرانده و آنها را می‌سوزانند، در صورتی که منحنی $1\rho_{ST}$ به صورت ناقصی آنها را نیمپز می‌کند. یك سازگاری معقول به وسیلهٔ منحنی $5\rho_{ST}$ انجام می‌گیرد و شاید اگر منحنی $4\rho_{ST}$ محاسبه می‌شد نتایج بهتری نیز به دست می‌آمد. برای آنکه چنین منحنی رضایتبخشی را به دست آوریم لازم است که مقدار ثابت عددی را در فرمول چگالی فصل

۱ــ نتایج این محاسبات درابتدا ضمن نامه‌ای در مجلهٔ فیزیك، اول آوریل ۱۹۴۸، به اطلاع عموم رسید. آن نامه امضای آلفر، بث، و گاموف را داشت که چون حروف اول این سه نام به ترتیب حروف ابجد به دنبال یکدیگر بود، غالباً به نام «مقالهٔ الفبایی» اشاره می‌کردند. چنان به نظر می‌رسید که اگر این مقاله فقط به امضای آلفر و گاموف رسیده باشد حق الفبای یونانی ادا نشده است، و به همین جهت نام دکتر هانس ا. بث را که غایب بود، هنگام تهیهٔ نسخهٔ ماشینی مقاله برای چاپ بر آن الحاق کردند. دکتر هانس که نسخه‌ای از آن مقالهٔ ماشینی را دریافت کرد، اعتراضی نکرد، و این کار او در بحثهای بعدی بسیار مفید فایده بود. با وجود این، جسته گریخته شنیده می‌شد که بعدها هنگامی که نظریهٔ آلفا، بتا، گاما، موقتاً استحکامی یافت، دکتر بث جداً در فکر آن بود که نام خود را به زاکاریس تغییر دهد.

دوم برابر $۱٫۲ \times ۱۰^{-۳}$ در سانتیمتر مکعب اختیار کنیم.

در اینجا می‌توان متوجه شد که این تئوری، علاوه بر آنکه روش عمومی منحنی فراوانی اختباری را به طرز نسبتاً مناسبی نمایش می‌دهد، بعضی مشخصات مربوط به پاره‌ای عناصر را نیز توضیح می‌کند. گروههای معدودی از عناصر به طرز غیر عادیی فراوان می‌باشند، و از این رو سبب می‌شوند که قلل تیزی بالای منحنی شکل ۶، که معمولاً یکنواخت است، ظاهر می‌شود. اگر با دقت بیشتری به این وضع توجه کنیم در خواهیم یافت که فراوانیهای غیر عادی (با یك قلهٔ تند و تیز استثنایی در نزدیکی آهن) مربوط به انواع هسته‌ایی هستند که دارای یك «عدد سحری» نوترونی یا پروتونی می‌باشند. در فیزیك هسته‌ای، اعداد سحری که ۲، ۸، ۲۰، ۵۰، ۸۲، و ۱۲۶ است همان نقش را ایفا می‌کند که اعداد ۲، ۸، ۱۸ و غیره در شیمی معمولی انجام می‌دهند. این اعداد نمایندهٔ تعداد ذراتی در هسته‌اند که در ساختمان درونی آن قشر کاملی تشکیل می‌دهند. درست همان‌طور که از لحاظ شیمیایی اتمهایی که دارای طبقات الکترونی کامل هستند (هلیوم، آرگون، نئون، و غیره) خود قوام و از لحاظ شیمیایی بی اثر می‌باشند، هسته‌هایی هم که دارای تعدادی پروتون یا نوترون برابر با «اعداد سحری»اند، درجذب ذرات‌جدید تأثیر کمتری دارند. یعنی می‌گوییم مقاطع عرضی جذبی آنها به‌طرز غیر عادیی کوچك است. مسلماً هسته‌هایی با چنین مقاطع عرضی جذب نوترون‌باید درفرایند اتمسازی پیوسته «دهانهٔ تنگی» نشان دهند به طوری که در نزدیکی این «تنگه» مواد باید به نسبت غیر عادیی متراکم شوند. به نظر چنین می‌رسد که با این استدلال تعبیر رضایت‌بخشی برای فراوانیهای غیرعادی در مجاورت «عدد سحری» هسته‌ها



شکل ۱۵ــ منحنیهای فراوانی محاسبه‌شده ، بنا بر محاسبهٔ رالف‌آلفر (سمت چپ) و بنا بر محاسبات هرمن (سمت راست) . نقاط اختباری همان نقاط شکل ۶ است .

به دست آیـد، ولی فقط بـرای نشان دادن این نکته واضح است که هسته‌هایی با ساختمان قشری کامل نیز انتظار می‌رود دارای انرژیهای پیوند غیر عادی زیاد باشند ، و بنا بر این ، فراوانیهای غیر عادی را نیز می‌توان با طرح تئوری تعادل توضیح داد ، به شرط آنکه بتواند شکل منحنی اختباری فراوانی را نمایش دهد.

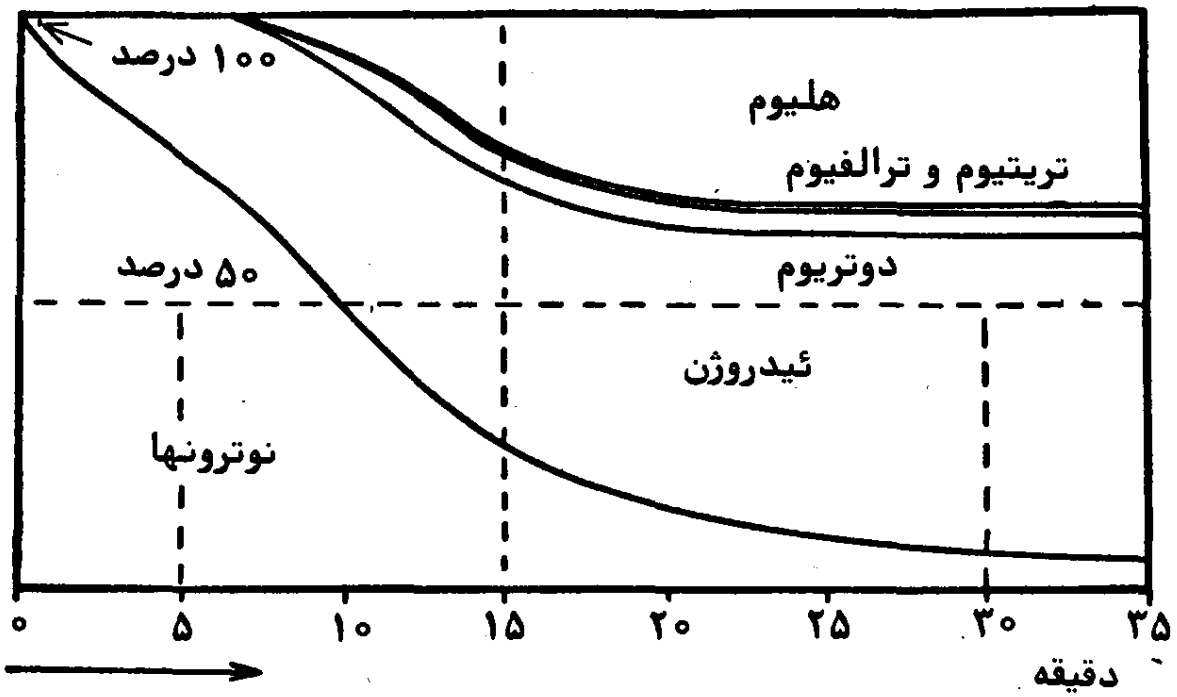
یکی از جزئیات مربوط به داده‌های اختباری دربارهٔ فـراوانی که هنوز نمی‌تواند به طرز رضایتبخشی فرایند اتمسازی را توضیح کند وجود ایزوتوپهای معروف «ایزوتوپهای سپرپوش» است . اینها انـواع هسته‌ای پـایداری هستند کـه نتوانسته‌اند به وسیلهٔ نـوعی «تبدیلات بتا»ی متوالی ازهسته‌های رادیو آکتیواصلی تشکیل شوند، چه بعضی از ایـن تبدیلات مستلزم مقدار فـراوانی انـرژی بیش از انرژی موجود در هسته می‌باشند. چون، بنا بر تئوری رسمی «ایلم» همهٔ هسته‌ها نخست با نوترونهای اضافی ساخته شده و سپس به‌وسیلهٔ مجموعه‌ای از « تبدیلات بتا»ی متوالی به حالت پایداری عادی در- آمده‌اند، چنین ایـزوتوپهایی به هیچ وجه نباید تولید شده باشند . ممکن به‌نظر می‌رسد که این ایزوتوپها از فرایندی معروف به «فرایند n ، n ۲» تولید شده باشند که در آن یك دخول سریع نـوترونی، که در بعضی فعل و انفعالات قبلی تولید شده، دو نوترون هسته را که خود بـه آنها می‌چسبد بـا یکدیگر متصادم کرده باشد . ولی با این ترتیب، مسئله نیازمند به اطلاعات بیشتری است.

مسئلهٔ عناصر سبك

محاسباتی که هم اکنون شرح دادیم یك تصویر کلی از اتم - سازی از طریق فرایند جذب نوترون به دست می‌دهـد. بـرای آنکه

مسئله را به طریقی بیان کنیم که در میدان تجزیهٔ ریاضی قرار گیرد، منحنی اختباری مقطع عرضی جذب نوترونی را یکنواخت ساخته، و فرایندی جزفرایند جذب مستقیم نوترون را درنظر نگرفتیم. روش دیگری برای طرح مسئله این خواهد بود که تنها سنگینترین هسته‌ها را درنظر بگیریم، ولی‌محاسبات را تا آنجاکه ممکن‌است مشروحتر انجام دهیم. نخستین کسی که این روش را بـه کار بـرد مؤلف و ، پس از وی به شیوه‌ای بسیار مشروحتر ، انـریکو فـرمی و انتونـی تـورکویچ بودند . این مؤلفان آنچه را کـه باید بـر سر شش تا از ساده‌ترین هسته‌ها (نـوترونها، پروتونها، دوترونها، تـریتونها، ذرات تـرالفا ، و ذرات آلفا) ، در طـی نخستین ۳۵ دقیقهٔ انبساط «ایلم» ، اتفاق افتاده باشد، با یك توصیف تدریجی بیان کردند. چون اعداد اتمی این هسته‌ها پست است ، ذرات بارداری که در میان آنها ست فعل و انفعالاتی احتمالی در بر دارند، به‌طوری کـه بر روی هم ۲۸ نـوع مختلف فـرایند هسته‌ای باید در نظر گرفته شود . نتایج ایـن محاسبات، که برای چگالی ثابت اولیه $۱۰^{-۳}$ گرم در سانتیمترمکعب و فرض وجود صد درصد نوترون درآغاز کار، انجام یافت، در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. در این شکل می‌بینیم که در طی ۵ دقیقهٔ اول ، دما هنوز به اندازه‌ای زیاد بوده که تشکیل هسته‌های مختلط را میسر نمی‌ساخته ، به طوری که تنها عمل هسته‌ای در این دوره تباهی خودبه‌خود نوترونها به صورت نوترونها و الکترونها بوده است . با پایین آمدن دما ، نوترونها و پروتونها به چسبیدن به یکدیگـر آغاز کرده و هستهٔ دوتریوم راتشکیل دادند که ، بااین حال، چون بسرعت تبدیل‌به هلیوم معمولی‌شده‌اند، هرگز نتوانسته‌اند به مقادیر زیادجمع شوند. تریتیوم (H^3) وترالفیوم(He^3)، که همچون‌مراحل‌انتقال‌ازجرم

۲ به جرم ۳ به‌کار رفته‌اند، پیوسته به مقادیر بی‌اندازه کوچك وجود



شکل ۱۶ــ تغییرات شیمیایی در جهان در طی نخستین نیم‌ساعت آن
(بنا بر نظر انریکو فرمی و انتونی تورکویچ)

داشته‌اند. می‌بینیم که در اواخر ۳۰ دقیقهٔ اول اندکی بیش‌از نیمی از کلیهٔ «ایلم» اصلی تبدیل به ئیدروژن و اندکی کمتر از نیم دیگر آن تبدیل بـه هلیوم شده است ، و ایـن درست همان ارتباطی است که امروز در جهان میان این دو عنصر یافت می‌شود. همچنین می‌بینیم که در طی این مدت نوترونهای اصلی تقریباً به طور کامل تباهی یافته و دوتریوم قریب یك‌درصد جرم کل را تشکیل داده است. البته ایـن نتیجهٔ اخیر ارتباطی بـا واقعیت فیزیکی ندارد (در واقع دوتریوم در طبیعت بسیار کمیاب‌است) ، و ناشی‌از این واقعیت است که محاسبات ما فرایند ساختمانی را فراتر از هلیوم دنبال نمی‌کند. در واقع، بیشتر دوتریومی که بدین طریق تشکیل یافته باید درفرایند ساختمانی‌عناصر سنگین به مصرف رسیده باشد.

فرمی و تورکویچ ، در برابر موفقیت اولیهٔ خود ، وقتی سعی کردند کـه محاسبات خویش در فرایند ساختمانی عناصر فراتـر از هلیوم را به کار برند به مشکل جدیی برخوردند . گرفتاری در ایـن واقعیت قرار دارد که هستهٔ با جرم ۵ ، که مرحلهٔ بلافاصله پس‌ازجرم ۴ است ، در دسترس نیست . به سبب پـاره‌ای اعمال دوجانبهٔ خاص نیروهای هسته‌ای، یك پروتون و یك نوترون مجزا هیچ‌یك نمی‌تواند به طرز استواری به‌هستهٔ هلیوم متصل شود ، به‌طوری که هستهٔ پایدار مجاور هسته‌ای است که جرمش ۶ (ایزوتوپ سبکترلیتیوم) و محتوی دو ذرهٔ خارجی است. از طرف دیگر، در شرایط فیزیکی مفروض، احتمال اینکه یـك هستهٔ هلیوم دو ذره را با هم جـذب کند ناچیز و صرف نظر کردنی است، و چنین به‌نظر می‌رسید که فرایند اتمسازی دراین محل متوقف شده‌باشد. عقاید چندی بیان شده که چگونه ممکن است از این شکاف جست تا صعودمادر منظومهٔ متناوب عناصر بتواند ادامه یابد. فرمی و تورکویچ، در مطالعات اصلی خود، فعل و انفعال

$$He^{4} + T^{3} \rightarrow Li^{7} + \gamma$$ کوانتوم

را در نظـر گـرفتند کـه متضمن هستهٔ واسطهٔ بـا جرم ۵ نیست . ولی اینان چنین دریافتند که درشرایط چگالی و دمای موجود، این فعل و انفعال کندتر از آن است که مقدار کافی هسته‌های سنگین فراهم کند. ممکن است بـه سبب وجود یك همنوایی قـوی (در مجاورت ۴۰۰ کیلو الکترون ـ ولت) فعل و انفعال به مقدار قابل ملاحظه‌ای تسریع شده بـاشد ، ولی تاکنون هیچ نشانـه‌ای از چنین همنواییی در مطالعات اختباری هستهٔ Li^{7} یافت نشده است.

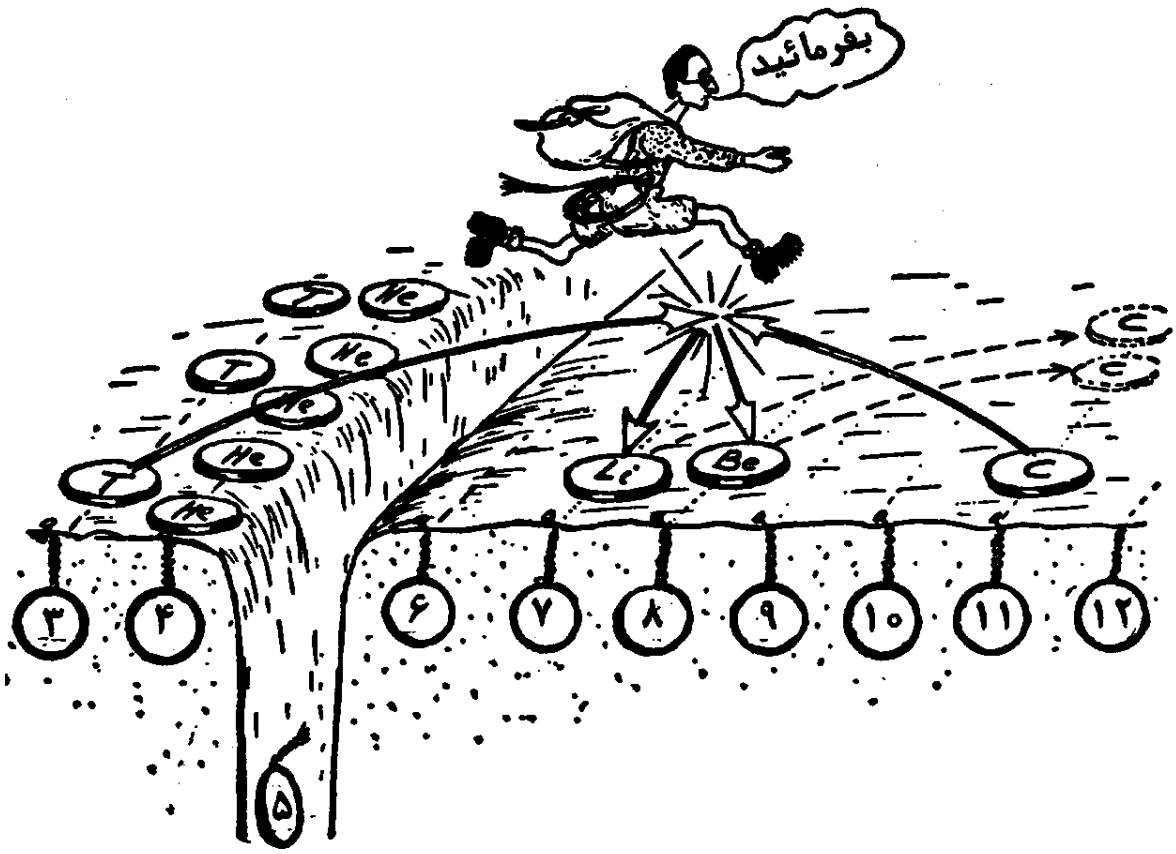
روش ماهرانهٔ دیگری برای گذشتن از شکاف جرم ۵ به وسیلهٔ

ویگنر[1] پیشنهاد شده بود که به نام « پل زنجیری هسته‌ای » معروف است. طرح ویگنر در شکل ۱۷ نمایش داده شده ، و نشان می‌دهد که آنچه برای ساختمان یك پل زنجیری لازم است فرضی است که به موجب آن دراصل تنها یك هسته در طرف راست شکاف وجود داشته است. چنین فرضی بآسانی می‌تواند پذیرفته شود، زیرا پاره‌ای از روشهای ساختمانی هنوز هم در سراسر پل با فعل و انفعال

کوانتوم $\gamma + Li^{7} \rightarrow T^{3} + He^{4}$

با وجود کمی احتمال وقوع آن ، بر قرار می‌باشد. این هستهٔ منفرد طرف راست شکاف (C^{11} در شکل) ممکن است با هستهٔ دیگری که در سمت چپ شکاف قرار گرفته (T^{3} در شکل) توأم شود و دو هستهٔ سبتکر (Li^{6} و Be^{7}) به وجود آورد که هر دو در سمت راست شکاف قرار دارند. از طریق فرایند جذب نوترونی منظم ، این دو هسته ممکن است یك جفت هستهٔ مشابه با هستهٔ مفروض اصلی (C^{11}) به وجود آورده باشند، و فرایند باز هم با حجم مضاعف آغاز شود. پس از تعدادی از چنین انشعابات ، هسته‌هایی تدریجاً ساخته شده‌اند تا در این فرایند شرکت کنند و جرم انتقال داده‌شده درسراسر شکاف به سوی سرعت متعارفی زیاد کشیده می‌شود. متأسفانه فعل و انفعال خاصی که در شکل ۱۷ ، برای مصور ساختن نظر ویگنر به‌کار رفته، در خور موضوع نیست، به طوری که فعل و انفعالات مشابه دیگری، برای آنکه جای خود را به دست آوردند، باید یافت شود. تاکنون چنین فعل و انفعالی یافت نشده و علت آن ممکن است تنها مربوط به کمبود اطلاعات ما دربارهٔ ایزوتوپهای گوناگونی باشد که شاید در کار باشند.

1— E. Wigner



شکل ۱۷ ــ طرح ویگنر مبنی بر چگونگی عبور از سراسر شکاف جرم ۵

ضمناً احتمال کلی در پیش است که بدون وسایل خاصی بتوان مشکلات جرم ۵ شکاف را برطرف ساخت ، یعنی تنها با در نظر گرفتن فعل وانفعالات ترکیب حرارتی هسته‌ای با جزئیاتی نسبتاً بیش از آنچه تاکنون شرح داده شده است. در همهٔ محاسبات قبلی فرض ضمنی شده بود که دمای گاز هسته‌ای همیشه معادل دمای تشعشعی برقرار می‌ماند که در فرمول آخر فصل دوم به دست آمد. ولی همهٔ فعل و انفعالات هسته‌ای درگیر درفرایند ساختمانی تدریجی همراه با آزاد شدن مقادیر هنگفتی انرژی هسته‌ای است. چنین کیفیتی این امکان را پیش می‌آورد که گاز هسته‌ای فعل و انفعال کننده ممکن است گرمتر از تشعشعی که در آن فرو رفته است بشود. در واقع، با آنکه دمای تشعشع درحال نقصان است، دمای گازهسته‌ای

ممکن است رو به‌افزایش باشد و قبل از آنکه بالاخره آن هم‌شروع به پایین آمدن کند، به مقادیر نسبتاً زیادی برسد. این افزایش موقتی دمای گاز تأثیری در نتایج محاسبات آلفر و هرمن، که در شکل ۱۵ نشان داده شده ، نخواهد داشت ، زیرا احتمال جذب نوترون به وسیلهٔ هسته‌های سنگین در دما چندان حساس نیست . ولی افزایش دمای گاز همهٔ فعل و انفعالات هسته‌ای میان عناصر سبك را کاملا تسریع خواهد کرد و ممکن‌است نتایج محاسبات فرمی و تورکویچ را تغییر دهد. این دمای فوق‌العادهٔ گاز بخصوص فعل و انفعال

$$He^{4} + T^{3} \rightarrow Li^{7} + \gamma$$

را بشدت آسان می‌سازد، و نتیجهٔ آن ممکن است تولید مقادیر کافی لیتیوم و دیگر عناصر سنگین باشد.

متأسفانه محاسباتی که متضمن گرم شدن خودبه‌خود گاز هسته‌ای فعل و انفعال‌کننده است بی‌اندازه پیچیده و در هم است و می‌تواند تنها به وسیلهٔ حسابگرهای الکترونی جدید انجام گیرد . تهیهٔ مقدمات چنین محاسباتی به وسیلهٔ یکی از دانشجویان مؤلف این کتاب ، آرثر کرسن[1] آغاز شده ،ولی قبل از آنکه محاسبات به نتیجهٔ قطعی برسد ممکن است مدت نسبتاً طولانیی بگذرد.

برای خلاصه کردن این محاسبات نسبتاً دراز ، ممکن است بگوییم که حتی تئوری « ایلم » دربارهٔ مبدأ انواع اتمی وسیلهٔ کاملی نیست، و تنها تصویر رضایتبخشی مناسب از آنچه ممکن است درطی نخستین مراحل داستان جهان ما اتفاق افتاده باشد ، فراهم می‌سازد.

1– Arthur Carson

فصل چهارم

سلسله مراتب تراکمها

نخستین ابرها

پس از تشکیل همهٔ انواع اتمی در همان یك ساعت اول انبساط، هیچ اتفاق جالبی در طی ۳۰ میلیون سال بعد روی نداده است. گاز داغ مشتمل بر اتمهای نوزاد به انبساط خود ادامه داد، و بتدریج دمای آن پایینتر و پایینتر آمد. وقتی دما از بیلیونها درجهٔ اولیه به چند صد درجه رسید، آن قسمت از گاز که از بخارهای دیرگداز تشکیل یافته بود به صورت غبار رقیقی متراکم شد که در مخلوط ئیدروژن و هلیومی که برتری داشت به شناوری خود ادامه داد. این مخلوط گاز غبارآلود (یك میلیگرم گاز و چند میلیگرم غبار در یك میلیون کیلومتر مکعب از فضا) هنوز هم در فضای بین کواکب وجود دارد، و خطوط جذبی معروف بین کواکب و سرخ نمودن ستارگان دور-دست را موجب می‌شود. چنین مواد بین ستارگان گاهی به صورت ابرهای غولپیکری به اشکال نامنظم مجتمع می‌شوند. چنین ابرهایی به نام سحابیهای نورانی یا سحابیهای تاریکی شناخته شده‌اند که

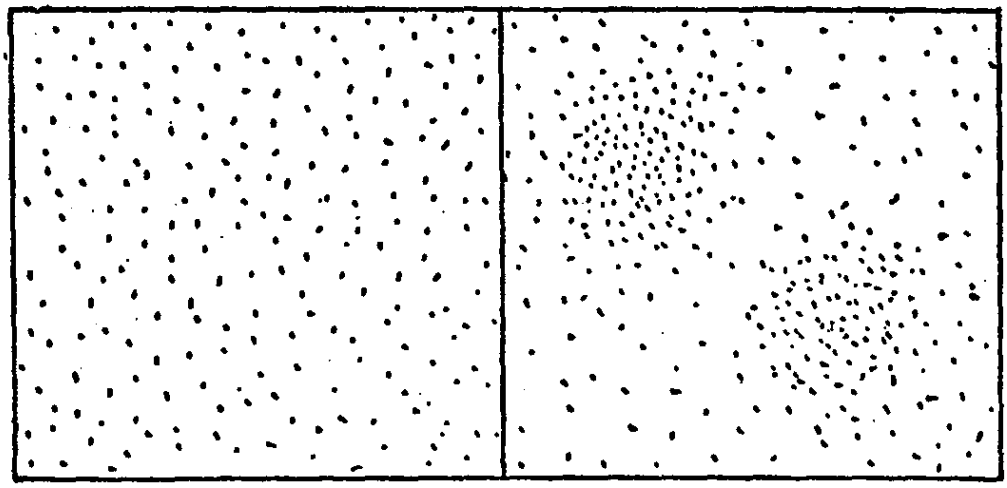
روشنی و تاریکی آنها بستگی بـه نور ستارگان مجاور دارد (صفحه تصویر IV و V) . اگر چنین وضعی بـه طور دائم ادامه می‌یـافت ، جهان امروز چیزی جز این مخلوط گازگرد آلود بی اندازه رقیق ، بـا دمای بسیار نزدیك به صفر مطلق ، را محتوی نبود . ولی می‌دانیم که در حال حاضر ، مادهٔ جهان بی اندازه متمایز بـوده و کهکشانه‌ها و ستارگان و سیارات را تشکیل می‌دهد. چه وقت و چرا ایـن تمایز وقوع یـافته ؟ پـاسخ این پرسش در رابطهٔ میان چگالیهای تشعشع و چگالیهای گازی قرار دارد که در همین دو فصلی که گذشت مورد بحث قرار گرفت . در آنجا دیدیم که در طی نخستین مراحل انبساط ، چگالی ـ جرم تشعشع محتوی در هر حجمی از فضا به نسبت فاحشی بر چگالی مادهٔ معمولی فزونی دارد . در آن دوره انـرژی متشعشع عامل عمدهٔ سیر تحولی جهان به شمار می‌رفت ؛ اتمها به واسطهٔ تصادم بـا کوانتومهای نیرومند نور بـآسانی به هر سو پرتاب می‌شدند ؛ و چون جنس و طبیعت تشعشع چنان است کـه بایـد فضا را بـه طور یکنواخت پـر کند ، طرز توزیع معمولی نیز بایـد کاملا یکنواخت بوده بـاشد . ولی ، چنانکه قبلا نیز دیدیم ، انبساط جهان ورق را به نفع ماده برگردانـد ، و زمانی رسید کـه چگالی جرم متشعشع بـه مقداری کمتر از چگالی مـادهٔ معمولی پایین آمـد . از آن زمـان ، نقش رهبری در فرایند تحول به دست ماده افتاد ، و این فرض معقول است کـه حالت بی انـدازه متنوع کنونی مـادهٔ جهانی نتیجهٔ همین تغییر رهبری باشد . در ایـن حوادث که پس از آنکه ماده دنبالهٔ کار را در دست گـرفت ، رخ داد ، نیروی جاذبهٔ نیوتنی کـه میان ذرات مادی مجاور یکدیگر و پـراکنده در سراسر فضا بـه طور یکنواخت اعمال می‌شد ، بـدون تردید نقش اصلی را ایفا کـرده است . همان

طور که منجم معروف انگلیسی سرجیمز جینز [1] قریب نیم قرن* پیش نشان داده بود ، گازی که تحت تأثیر نیروهای گرانشی قرار گرفته و فضای بی پایانی را پر می کند ذاتاً ناپایدار و آماده است که به صورت ابرهای گازی غولپیکری منقسم شود (شکل ۱۸). این ناپایداری ناشی از واقعیتی است که به موجب آن تراکمهای موضعی رویانی که به علل کاملا تصادفی در آن گاز رخ داده ، بر اثر نیروهای گرانشی ، دیگر از انحلال مصون خواهند بود . چنین تراکمهای تصادفی به مقیاس کوچکی در هوای جوی متعارفی نیز روی می‌دهد ، ولی نیروهای گرانشی خفیفتر از آن است که آنها را با هم نگاه دارد . لیکن برای جرمهای زیادتر گاز ، نیروهای گرانشی به طور صعودی عمده می‌شوند و تراکمهای با مقیاس بزرگی که ممکن است در فضای بی پایانی تشکیل شود دیگر قادر به انحلال خود آنها نخواهد بود . نتیجه این است که به صورت ابرهای مجزای بزرگی منقسم می‌شوند که خلأ تقریباً کامل آنها وجود دارند .

عظمت این تراکمها با این شرط مشخص می‌شود که پتانسیل گرانشی در سطح آنها باید بزرگتر از انرژی جنبشی حرارتی ذرات گاز باشد ، به طوری که به‌محض آنکه تراکم تشکیل شد ، ذراتی که جزو آن هستند نمی‌توانند از میدان گرانش آن بگریزند . این همان مفهوم «سرعت گریز» است که قبلا در مورد مسئلهٔ انبساط بی پایان منظومهٔ کهکشانه‌ها به کار بستیم . اشعه و جرمهای چنین ابرهایی در یك گاز متجانس باچگالی و دمای معین به وسیلهٔ فرمولهای

1 – Sir James Jeans

* اکنون سه ربع قرن پیش . (مترجم)



شکل ۱۸ — تراکم نقاط در یك توزیع یکنواخت اولیه

زیر[1] بآسانی محاسبه می‌شود .

$$\text{سانتیمتر} \quad \sqrt{\frac{[\text{دما}]}{[\text{چگالی}]}} \geq ۴,۴\times ۱۰^{۷} \quad [\text{شعاع}]$$

و

$$\text{گرم} \quad \sqrt{\frac{[\text{دما}]^{۳}}{[\text{چگالی}]}} \geq ۳,۹\times ۱۰^{۲۲} \quad [\text{جرم}]$$

اگر به‌عنوان مثال، این فرمولها را در دمای ۳۰۰ درجهٔ مطلق وچگالی $۱۰^{-۳}$ گرم در سانتیمتر مکعب در بارهٔ هوا به کار بندیم ، شعاع چگالشها برابر با

$$\text{کیلومتر} \; ۲\times ۱۰^{۵} = \text{سانتیمتر} \; ۲\times ۱۰^{۱۰}$$

به دست خواهد آمد که از قطر کرهٔ زمین بزرگتراست ! از این رو، هوای جو ما به طور ساده ، چون ضخامت طبقهٔ جو چندان زیاد نیست ، به گلوله‌های مجزای هوا منقسم نشده است.

برای گاز اولیه‌ای که فضای لایتناهی جهان در حال انبساط را

۱ — به ضمیمهٔ آخر کتاب مراجعه شود.

پر می کرد ، چنین محدودیتهایی در میان نبوده ، و می‌توان اندازه و جرمهای چگالشهایی را که در طی مراحل گوناگون تحول آن روی داده محاسبه کرد. با به کار بستن فرمولها بـرای تغییرات زمانی دما و چگالی در جهان در حـال انبساط [1] ، و قـرار دادن ایـن مقادیر در عبارت جرم ، چنین بـه دست می آیـد کـه عامل زمان از میان رفته است . بنابراین جرم ابـرهای گاز اصلی که در یك فرایند شکستگی گرانشی از مواد متجانس اولیه تشکیل یافته، صرف نظر از اینکه در چـه مرحله از انبساط عمل چگالش وقـوع یـافته ، پیوسته یکسان خواهد بود . بـا قرار دادن مقادیر عددی در فرمول ، چنین به دست می آیـد کـه کوچکترین جرم بـرای این چگالشها 10^{40} گرم است ، کـه چندین میلیون برابـر جرم خورشید خودمان می‌بـاشد . بـا آنکه کوچکترین جرمهایی که برای ابرهای گازی تخمین شده به مقادیری که معمولا برای جرمهای کهکشانه‌های فردی پذیرفته شده نمی‌رسد ، هنوز هم نتیجه کاملا رضایتبخش است . البته چون مقادیری کـه در محاسبات ما برای چگالی و دما به کار رفته مبتنی بر داده‌های هسته‌ای صرف بوده، در اینجا ممکن است پلی (یا به‌عبارت دیگر راهبری *) داشته باشیم که جهان صغیر ذرات هسته‌ای را بـا جهان کبیر منظومهٔ اختری متصل سازد .

دلایلی می‌تـوان بیان کـرد کـه چرا مقدار محاسبهٔ شده جـرم چگالشها به مقدار جرمهای مشهود کهکشانه‌ها نمی‌رسند . فرمول ما، قبل از هر چیز، فقط حداقل جرم را بـه دست می‌دهد، و چگالشهای

۱ ــ به فرمول (۵) و (۶) ضمیمه مراجعه شود.

* viaduct ؛ پلی که برای عبور راه آهن یا جاده در دره یا زمین پست یا برفراز جاده‌ای ساخته می‌شود (از دایرةالمعارف فارسی) .

واقعی ممکن است بآسانی بـزرگتر از آن باشد . دلیل دوم و مهمتر در این واقعیت است که فرمول اصلی جینز که در تخمین مـا به کار رفته منحصراً برای گازی که در حال انبساط نیست قابل انطباق است. ولی اگر ، همان طور که واقعاً چنین است ، انبساط در کار بـاشد ، باید کمبودی برای انرژی جنبشی جرمهای گاز در حال انبساط منظور شود ، و کمترین جرمی که می‌تواند به وسیلهٔ گـرانش بـه هم نگاه داشته شود باید آشکارا به‌نسبت قابل توجهی بزرگتر باشد. حل این مسائل، و مسائل دیگر، در انتظار مطالعات ثانوی و مشروحتر است.

تا وقتی کـه چنین ثابت شده است کـه جرمهای گـاز اصلی ناشی از پاره پاره شدن ماده‌ای که به طور یکنواخت توزیع شده به زمان تشکیل آنها بستگی ندارد ، محققاً ابعاد هندسی آنها بستگی به زمان دارد . واقع امر ایـن است کـه ابرهای تشکیل شده در طی نخستین مراحل انبساط از لحاظ اندازه نسبتاً کوچك و کاملا سنگین خواهند بود ، و حال آنکه ابرهایی که بعداً تشکیل یافته‌اند بزرگتر و نسبتاً رقیقتر می‌باشند. واقعیت مشهودی که به موجب آن کهکشانه‌های گوناگون ، و در عین حـال نـاجور ، اختلافات محسوسی در قطرهای خود نشان نمی‌دهند مبین این است که همهٔ آنها باید تقریباً همزمان تشکیل یافته باشند . و تنها فرض معقول این است کـه زمان تشکیل آنها منطبق با زمانی باشد که ماده همچون عامل قطعی جانشین انرژی متشعشع ، و نیروی گرانش نیوتنی حائز اهمیت اصلی شده است . زمان وقوع این حادثه را می‌توان با این فرض به دست آورد که به محض تشکیل یافتن ابرها ، چگالی آنها تغییر ناپذیر مانده و تنهافواصلشان از یکدیگر نسبت به زمان به افزایش ادامه داده است. چون اطلاعات رصدی بـرما معلوم داشته است کـه فواصل متوسط

میان کهکشانه‌های مجاور قریب یکصد برابر بزرگتر از قطرهای متوسط آنهاست ، لازم می آید که دورهٔ جدایی را در تقریباً ۱/۱۰۰ سن کنونی جهان ، یعنی در تاریخی که سن جهان در حدود سی میلیون سال بوده ، قرار دهیم. درهمین زمان باید چگالی متوسط ماده در جهان برابر چگالی متوسط کنونی درون کهکشانهٔ فردی ، که در حدود $۱۰^{-۲۴}$ گرم در سانتیمتر مکعب است ، بوده باشد. از طرف دیگر، با به کار بردن فرمول‌تغییرات دما، که در فصل پیش ذکر شد، چنین به‌دست می آید که وقتی سن جهان سی میلیون سال بوده، دمایی درحدود ۳۰۰ درجهٔ مطلق داشته، به طوری که چگالی جرم تشعشع نیز قریب $۱۰^{-۲۴}$ گرم در سانتیمتر مکعب بوده است.[۱] این موضوع گمان ما را تأئید می کند که تشکیل ابرهای اولیه زمانی روی داده است که چگالی ـ جرم انرژی تشعشعی به مقداری پایینتر از چگالی مادهٔ معمولی نزول کرده است.

اگر بتوانیم «ماشین زمانی» ولز[۲] را به دست آوریم و به سال ۳۰،۰۰۰،۰۰۰ پس از خلقت باز گردیم، خود را در خلأ تقریباً کاملی خواهیم یافت که قابل مقایسه با خلئی است که امروز درفضای میان ستارگان خودمان وجود دارد. تاریکی مطلقی اطراف ما حکمفرما خواهد بود، زیرا نورانیت نخستین روزهای آفرینش (قابل قیاس با نورانیت مرکز یك بمب اتمی در حال انفجار) در آن زمان به‌واسطهٔ عمل انبساط تیره و تار شده، و ستارگانی که امروز جهان را نورانی می‌سازند هنوز تشکیل نشده بوده‌اند. ولی چون دمای متوسطی که

۱ ـ در واقع :

$$\frac{aT^۴}{c^۲} = \frac{۱۰^{-۱۴} \times (۳۰۰)^۴}{۱۰^{۲۱}} \cong ۱۰^{-۲۴}$$ گرم برسانتیمتر مکعب

2– H. G. Wells

در آن زمان حکمفرما بود (۳۰۰ درجهٔ مطلق) بسیار نزدیك بـه دمای موردنیاز اطاق سکونت ما می‌باشد! براحتی و آسایش گرم می‌شدیم.

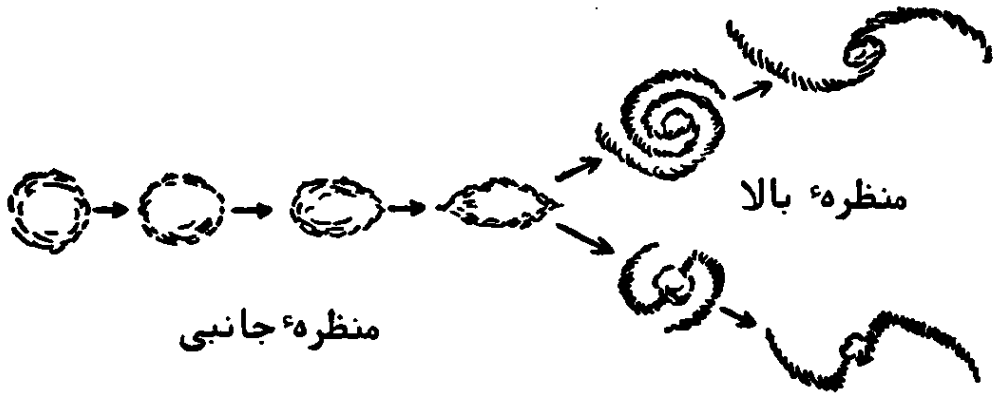
پیش از آنکه موضوع تشکیل «کهکشانـه‌های ابتدایی» گازی شکل را کنار بگذاریم، از عامل دیگری باید سخن گوییم که بـدون شك نقش عمده‌ای در تشکیل آنها ایفا کرده است. به طوری که در فصل دوم دیدیم، انرژی پتانسیل گـرانش نیوتنی میان کهکشانه‌های کنونی تنها بالغ بر قریب یك درصد انـرژی جنبشی حـرکت آنها می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، امروز کهکشانه‌ها از گرانش عمومی مشترك خود بکلی رهایی یافته‌اند. ولی اگـر زمان را به عقب باز گـردانیم چنین خواهیم یافت که هنگام جدایی کهکشانی ، فـواصل میان آنها یك درصد فواصلی که اکنون دارند بوده و در نتیجه انرژی گرانشی مشترك آنها باید صد برابر بـزرگتر بوده باشد . پس در آن زمـان گـرانش عمومی میان کهکشانه‌ها هنوز بشدت مانـع پسروی متقابل آنها می‌شده است. این وضع شبیه است به وضع راکتی که سرعتش بیش از سرعت گریز است ولی در لحظهٔ مورد نظر هنوز در میدان گرانش زمین «در حال صعود» بوده و از این راه سرعت خود را از دست می‌دهد.

بنابراین، پاره پاره شدن اصلی مواد در حال انبساط یکنواخت جهان زمانی روی داده که این مواد «از لحاظ گرانشی همجوری و ارتباط» خود را از دست داده بودند. تئوری صحیح جدایی کهکشانی هر چه باشد بسختی جای تردید است کـه ایـن پدیده باید ارتباط نزدیك با عدم «همجوری و ارتباط گرانشی» میان جـرمهای در حال انبساط داشته باشد، و همان‌طور با اتلاف انرژی تشعشعی، که نقش اساسی را دارا بوده است.

دوران کهکشانی و آشفتگی گردابی

وقتی قسمت عمده‌ای از مواد پیوسته به صورت قطعات فراوان بشدت پاره پاره می‌شود، پاره‌ها جدا از یکدیگر به پرواز درمی‌آیند و سریعاً می‌چرخند. همان‌طور که پاره‌های غلاف یك گلولهٔ توپ منفجر شده در هوا عمل می‌کنند. بنا بر ملاحظات مکانیك، هر کس انتظار دارد که انرژی قابل استفاده به طور کمابیش یکسان میان حرکت وضعی و انتقالی پاره‌ها توزیع شده باشد؛ و البته به طوری که در آغاز فصل دوم گفتیم ، مقدار انرژیهای وضعی و انتقالی کهکشانه‌ها در یك حدود است.

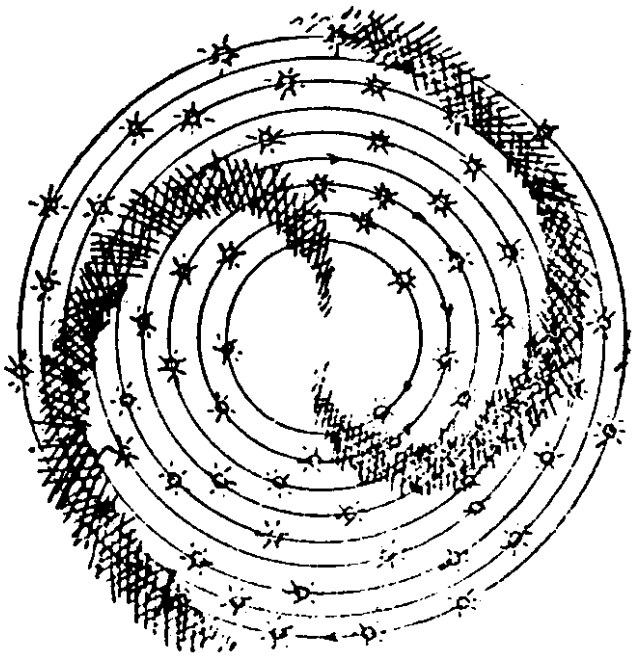
بر حسب میزان دورانی که به وسیلهٔ « کهکشانهٔ ابتدایی » در عمل جدایی به دست می‌آید، تنهٔ گازی آنها باید اشکال مختلف به خود بگیرد. معدودی از آنها که به احتمال قطعی منحصراً تنها دوران نامحسوسی به دست می‌آورند ، شکلهای نزدیك به کروی به خود می‌گیرند. برخی دیگر شکلهای بیضوی اختیار می‌کنند که دامنهٔ آنها بستگی به سرعت دورانی دارد (شکل۱۹). ولی سرعت دورانی اغلب این پاره‌های گازی به اندازه‌ای زیاد بوده که تنهٔ آنها به صورت عدسی شکلی پهن شده و مواد از لبهٔ تیز آنها شروع به خارج شدن کرده است تا شکل بازوهای مارپیچی را تشکیل دهد . با همهٔ کارهای فراوانی که در این مسئله انجام یافته ، اطلاعات ما در بارهٔ شکلهای بازوهای مارپیچی و جزئیات مبدأ آنها هنوز دور از حد کمال است. ولی مطالعات تازه نشان می‌دهد که نقش بازوهای مارپیچی در ساختمان کلی کهکشانه‌ها بسیار کم اهمیتتر از آن است که در نظر اول آشکار می‌شود. قسمت اصلی قرص کهکشانی به نظر می‌رسد که



شکل ۱۹ ــ طبقه‌بندی صورکیکشانی : کروی، بیضوی، مارپیچ معمولی، مارپیچ مسدود .

از ستارگان بیشماری تشکیل یافته باشد که بر روی مدارهای دایره‌ـ شکل منظمی حول مرکـز کهکشانه دوران می‌کنند، و حال آنکـه بازوها از جریانهای گاز غبار آلود فوق‌العاده رقیقی تشکیل یافته که به چنگ دوران منظومه افتاده و به شکل مارپیچ در آمده‌اند (شکل ۲۰) .

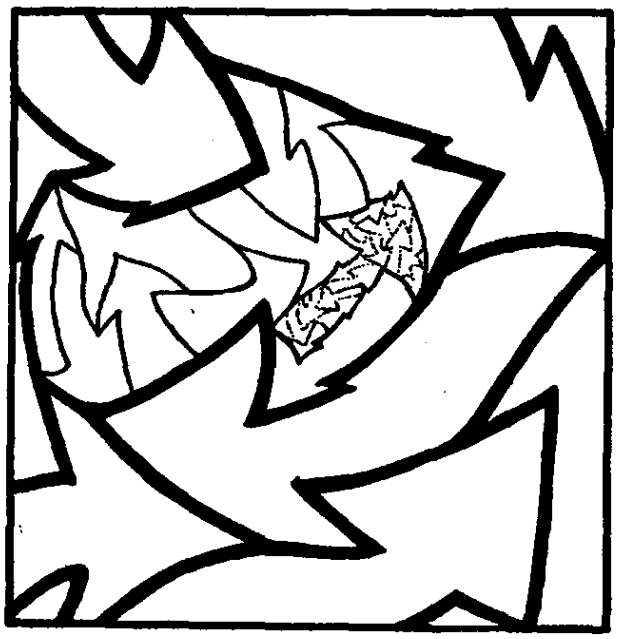
«کهکشانه‌های ابتدایی» اصلی به طور کامل، هنگامی که هنوز ستاره‌ای وجود نداشته ، تشکیل یافته‌انـد. ستارگان چگونه به وجود آمده‌اند ؟ پاسخ به‌این سئوال ممکن است با توجه به‌این نکته شروع شود که دوران جـرمهای گـازیی که کهکشانه‌های اصلی را تشکیل می‌دادند نمی‌توانستند احتمالا بـه شیوهٔ یکنواخت و متجانسی عمل کنند. جرمهای گاز کناره باید تمایل بـه این می‌داشتند که با سرعت زاویه‌ای کمتر و دورهٔ تناوبی بیشتر از جرمهای درونی دوران کنند. در منظومهٔ سیاره‌ای ما دوره‌های تناوب دوران از خورشید تا مرکز افزایش می‌یابد، و از قریب ۳ ماه بـرای عطارد تا ۱۶۵ سال بـرای نپتون می‌باشد. ولی، از آنجا که قسمتی از فضای خالی سیارات را



شکل ۲۵ ــ تشکیل مارپیچها در یك کهکشان. دوایر نشانهٔ حرکت ستارگان است؛ قسمتهای سایه‌دار گاز و غبار را نشان می‌دهد.

از هم جدا ساخته و مانع حرکت یکدیگر نمی‌شوند ، در یك قرص گازی در حال دوران وضع بیشتر شبیه به‌وضع رودخانهٔ بسیار سریعی است که حول مسیر پیچ درپیچی‌روان باشد. ریزش وجریان آب ناگزیر است که به صورت حرکات نامنظم کوچك بیشماری پاره پاره شود که جریان اصلی آنها را به‌همراه خود می‌برد. این نامنظمی حرکت، یا گرداب، عامل بسیار عمده‌ای در جمیع مباحث «دینامیك سیالها»، از طرح بال یـك هواپیما گرفته تا توضیح مبدأ ستارگان می‌باشد . وقتی که از روی یك پل به پایین نگـاه کنیم، می‌توانیم حـرکت گردابی را بر سطح یك رودخانهٔ تند حرکت مشاهده کنیم ، همان ـ طور که می‌توان این گرداب را بـه صورت تند بادهای ناپیوسته‌ای که به صورت ما می‌وزد احساس کرد. در یك سیال واسطه آشفتگی

حرکت بسیار درهم و کاملا نامنظمی است که نمایش دادن آن به وسیلهٔ یك تصویر یا نمودار آسان نیست . شاید نزدیکترین تصویر از یك آشفتگی واقعی تصویری باشد که در شکل ۲۱ نمایش داده شده ، که در آن جریانهای آشفته و گردابی مجزا اجمالاً با سهمهایی به اندازه‌های مختلف نشان داده شده‌اند . اگر از مسافت دوری به این نمودار نگاه کنیم ، نخست متوجه می‌شویم که سهمهای بزرگ دور یکدیگر پیچیده‌اند . ولی بررسی دقیقتر نشان خواهد داد که چگونه سهمهای بزرگ شامل تعداد فراوانی سهمهای کوچك می‌باشند که آنها نیز به نوبهٔ خود سهمهای کوچکتری را در بر دارند . بسط این تصویر در دو امتداد مخالف ، به طوری که بزرگترین سهمها تقریباً به بزرگی حجم سیال شوند و کوچکترین آنها به کوچکی مولکولهای فردی در آیند ، تصویر نسبتاً واضحی از یك حرکت گردابی واقعی



شکل ۲۱ ــ سلسله مراتب گردابها

به ما خواهد داد . شعری که توسط ریچاردسن[1] تنظیم شده چنین

1—L.F. Richardson

توصیف می‌کند :

گردابهای بزرگ گردابهای کوچکتری دارند ،
که از سرعت آنها تغذیه می‌شوند ،
و گردابهای کوچك گردابهای کوچکتر دارند ،
و قس علی‌هذا تا لزوجت [1]

برای آنکه این بیان را ترسیم کنیم ، سهمها در هر طبقه تقریباً به یك اندازه در شکل ۲۱ نشان داده شده است . در واقع سلسله مراتب جرمهای گردابی چنان است که همهٔ اندازه‌ها را برای سهمها و همچنین حرکت در جمیع جهات را شامل می‌باشد . حرکت گردابی در درون یك سیال به همان اندازه شامل حرکات دورانی عناصر گونا گون است که حرکات انتقالی دارد ، و به سبب نوع حرکت دورانی است که جریانهای آشفته را معمولا «گرداب» می‌نامند . این فکر نادرست خواهد بود که گردابهای آشفته موجودیت خود را مدت مدیدی نگاه داشته و به ما اجازه دهند که حرکت گردابی را ، با به دست آوردن موضع گردابهای مختلف در فواصل زمان معین ، نمایش دهیم . واقع امر این است که عمر گردابهای فردی بسیار کوتاه است ، و معمولا پس از پیمودن فاصله‌ای در حدود قطر خود از میان می‌روند و گردابهای تازه‌ای به وجود می‌آورند که ممکن است درست در جهت کاملا مخالفی حرکت کنند . وجود گرداب در یك سیال متحرك به افزایشی در اصطکاك درونی آن منجر می‌شود که موسوم به لزوجت گردابی است . اگر ، مثلا ، پروانهٔ یك قایق موتوری طوری باشد که چیزی جز یك جریان منقطع در عقب قایق تولید نکند ، قایق بسختی پیش رانده می‌شود و با قدم

1 – Viscosity

حلزون حرکت خواهد کرد . همین مطلب در بارهٔ یك هواپیما صدق می‌کند ؛ بالها از طرف دیگر باید چنان طرحریزی شده باشند که از حرکت گـردابی بر سطح خود اجتناب ورزند تا بتوانند بـا حداقل مقاومت ممکن در هوا بلغزند .

در نخستین نظـر اجمالی ، نا ممکن می‌نماید کـه بتوان تئوری قوامداری برای حرکت مختلط و نا منظمی، همچون حرکتی که بـه وسیلهٔ یك جریان گردابی عرضه می‌شود ، بیان کرد ، و همین اواخر مطالعهٔ گـرداب (بیشتر در موارد مربوط به مهندسی) بـر یك اساس صرفاً اختباری انجام گرفته بوده است ؛ و در این‌کار بیشتر تیلر [1] (در انگلستان) ، تئودور فون کارمان [2] (در ایالات متحده) ، کولموگوروف [3] (در روسیه) ، و ورنـر هایزنبرگ [4] (در آلمان) پیشقدم بـوده‌انـد . یکی از نتایج اصلی این تحقیقات استنتاج انرژی معروف به «انرژی طیفی» حرکت گردابی است . حرکت گردابها شامل مقدار فراوانی انرژی جنبشی است که چون پیوسته از گردابهای بزرگتر به‌گردابهای کوچکتر منتقل می‌شود ، در هـر حال از حرکت به میزان بـزرگ سیال بـه حرکت مولکولی ذرات تشکیل دهندهٔ آن پایین می‌آیـد . می‌دانیم که در هر گونه اصطکاك ، انرژی جنبشی حرکت به حرارت تبدیل می‌شود ؛ و در مورد خـاص اصطکاك گـردابی ، ایـن انتقال انرژی ، در طی سلسله‌مراتب گردابهایی که اندازهٔ آنها دائماً کاهش می‌یابد ، پایین می‌افتد . پرسشی که در اینجا پیش می‌آید ایـن است کـه چه مقدار انرژی در گـردابهایی کـه اندازهٔ آنها متفاوت است

1 — G. I. Taylor
2 — Theodore Von Kârmân
3 — A. N. Kolmogoroff
4 — Verner Heisenberg

ذخیره شده («انـرژی طیفی» آنها چه مقدار است ؟) ، یا به عبارت دیگر سرعتهای جریـانهای نـامنظم مختلفی که حرکت گـردابی را تشکیل می‌دهند چیست ؟ ملاحظات نظریی که پیچیده‌تر از آن است کـه در اینجا حتی بتوان بـه آنها اشاره کـرد ، به ایـن نتیجه منجر می‌شود کـه سرعت توزیع میان گردابهای متفاوت از قانونی به نـام قانون کولموگوروف پیروی می کند ، که چنین نوشته می‌شود :

$$[\text{سرعت}] \sim \sqrt[3]{[\text{اندازه}]}$$

یعنی سرعت کمتر مربوط است بـه گردابهای کوچکتر . بـه عنوان مثال ، جریان آشفتهٔ سریعی از آب را کـه در مجرایی به وسعت ده متر جـاری است تصور می کنیم . گردابهایی کـه اندازهٔ آنها قـابل مقایسه بـا پهنای مجرا باشد سرعتهایی خواهند داشت که قابل مقایسه با سرعت جریان است . گردابهایی به قطر یك سانتیمتر ۱/۱۰ (یعنی $\sqrt[3]{1/1000}$) سرعت اصلی ، و گـردابهایی که پهنای آنها ۱۰ میکرون است ۱/۱۰۰ سرعت جریان اصلی را دارا خواهند بود .

اکنون به مسئلهٔ تازه‌ای می‌رسیم که مسئلهٔ شرایطی است که در آن شرایط جریان ناپیوستهٔ سیال به گردابهای آشفته پاره پاره می‌شود. این شرایط را فیزیکدان انگلیسی آزبرن رنلدز [1] ، صرفاً از راه تجربه، بـرقرار ساخت . وی بـدین منظور جریـان مـایعات مختلف را در سرعتهای متفاوت در امتداد لوله‌هـایی با قطرهای گونـاگون مطالعه کرده ، و چنین به دست آورد که جریان آرام نا پیوستهٔ یك مـایع ، وقتی سرعت جریـان از حد معینی تجـاوز کند ، همیشه بـه صورت گردابهای آشفته‌ای پاره پاره می‌شود ؛ این حد ، برای لوله‌های فراختر و مایعاتی با لزوجت کمتر ، پایینتر می‌باشد . این کشفیات ، کـه در

1 _ Osborne Reynolds

شکل ۲۲ تصویر شده ، با فرمول اختباری ساده‌ای خلاصه می‌شود :

$$R = \frac{[\text{پهنای جریان}] \times [\text{چگالی جریان}] \times [\text{چگالی سیال}]}{\text{لزوجت سیال}}$$

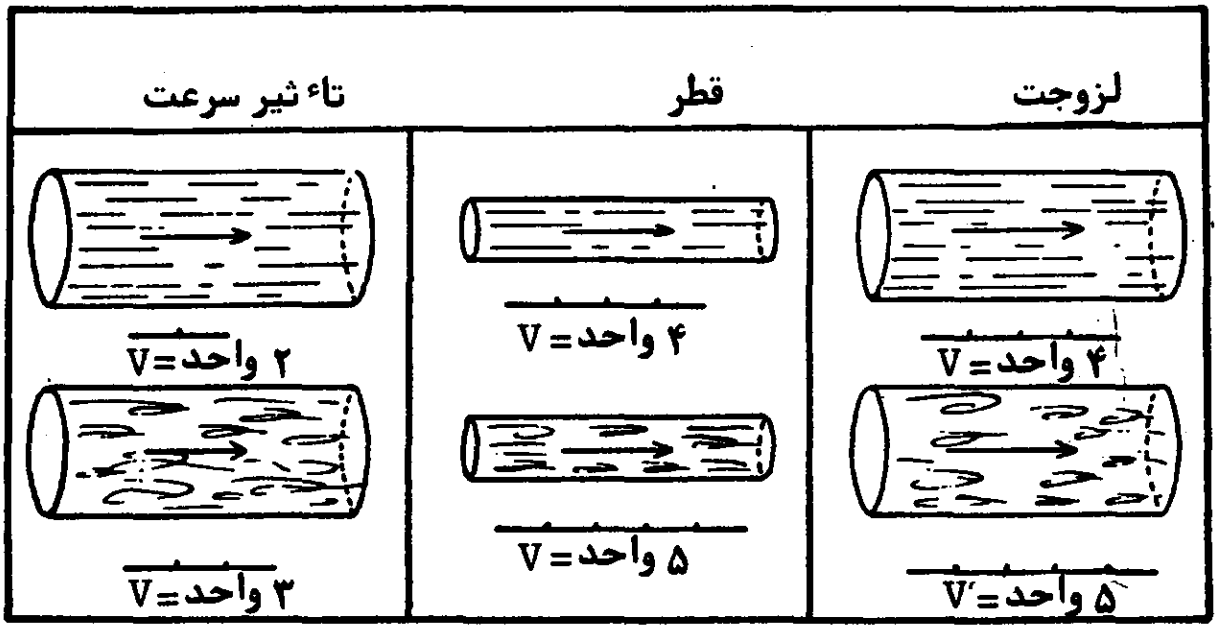
R عدد بی‌بُعدی است که به «عدد رنلدز» موسوم می‌باشد . اگر چگالی و لزوجت سیال ، و پهنا و سرعت جریان طوری باشند که عدد R معادلهٔ فوق کمتر از ۱،۰۰۰ به دست آید ، جریان ناپیوسته باقی می‌ماند . اگر عدد بزرگتر از ۱،۰۰۰ باشد ، حرکت گردابی پدید خواهد آمد . شرط اختباریی که از معادلهٔ رنلدز برای پدید آمدن حرکت گردابی به دست می‌آید یك مبنای نظری برای کارهای تازهٔ ورنر هایزنبرگ به دست داده ، ولی هنوز هم تئوری پیچیده‌تر از آن است که در اینجا توصیف شود .

ستارگان ظاهر می‌شوند

با پذیرفتن روش نظریات انجام شده توسط فیزیکدان و کیهانشناس آلمانی ، کارل فون وایتسزکر ، اکنون می‌توان مفهوم حرکت گردابی را در این بحث به کار بست که در نتیجهٔ دوران کهکشانهٔ ابتدایی چه حادثه‌ای باید در آن روی داده باشد . انرژی جنبشی گازها به ما چنین می‌آموزد که لزوجت گازی (یا اصطکاك درونی) از حاصلضرب چگالی گاز در سرعت مولکولهای گاز و در مسیر آزاد آنها میان تصادمات متوالی به دست می‌آید . بنابراین فرمول رنلدز به صورت زیر در می‌آید :

$$R = \frac{[\text{پهنای جریان}]}{[\text{مسیر آزاد مولکولها}]} \times \frac{[\text{سرعت جریان}]}{[\text{سرعت مولکولها}]}$$

اختلافات سرعت میان قسمتهای مختلف کهکشانه‌های گازی در حال دوران باید دست کم به بزرگی ۱۰ کیلومتر در ثانیه باشد ، و در



شکل ۲۲ ــ پاره پاره شدن یك جریان ناپیوسته به‌گردابهای آشفته در سراسر یك لوله . بـــرای یك قطر و لزوجت معین ، حرکت گردابی وقتی ظاهر می‌شود که سرعت از حد معینی تجاوز کند (سمت چپ شکل). اگر قطر کوچکتر (مرکز شکل) یا لزوجت زیادتر (سمت راست شکل) بـاشد ، ظهور آشفتگی ، تـا وقتی کـه سرعتهای زیادتر به‌دست آید ، به تأخیر خواهد افتاد.

نتیجه سرعت حرارتی مولکولهای گاز در دماهای پستی کـه در آن زمان حکمفرما بوده محققاً کمتر از یك کیلومتر در ثانیه بوده است. مسیر آزاد مولکولها در گاز بی اندازه رقیقی که کهکشانه‌های اولیه را تشکیل می‌داد به طور متوسط بایـد به بزرگی 10^{16} سانتیمتر بوده باشد. ولی 10^{16} سانتیمتر تنها در حدود ۱/۰۰۰ یك‌سال نور و، از این رو ، کوچکی آن بـا مقایسه بـا ابعاد هندسی کهکشانه‌ها صرف نظر کردنی است . پس مشاهده می‌شود کـه عدد رنلدز مقدار بی اندازه بزرگی بـه خود می گیرد کـه بسیار بزرگتر از مقدار بحرانی ۱۰۰۰ است ، به طوری که حرکت گاز در کهکشانه‌های ابتدایی باید لزوماً آشفته و باعث یك خردشدگی به صورت گردابهایی با هر اندازه باشد . اختلاف

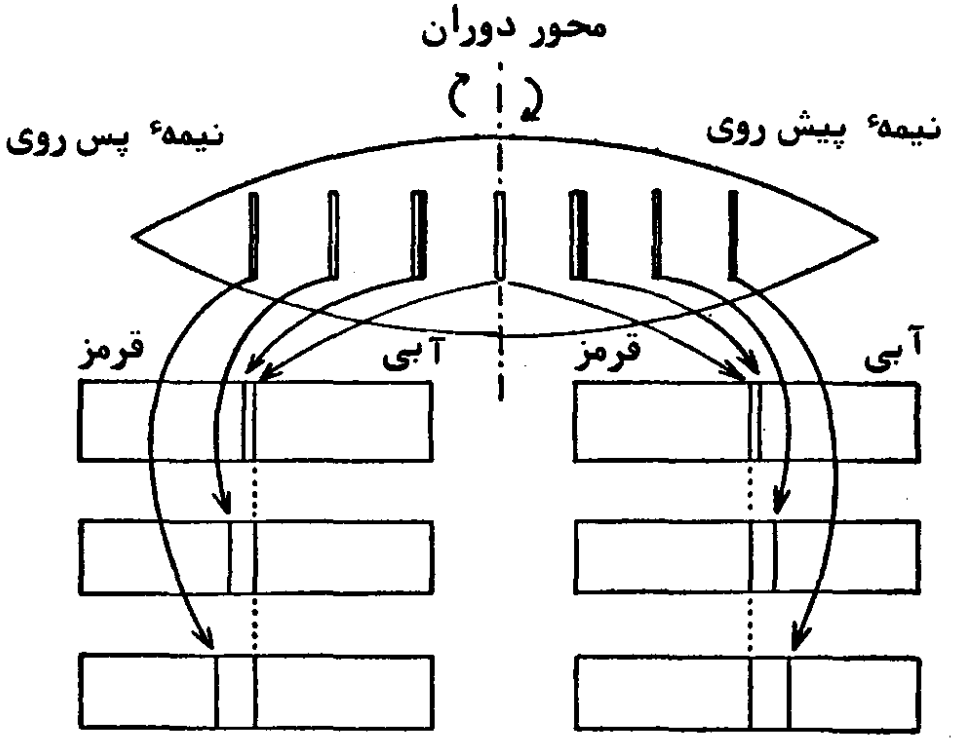
حرکت گردابی در گازها با حرکت در مایعات ناشی از این واقعیت است که میزان تراکمپذیری مواد گازی بسیار زیاد است . بنابراین، سلسله مراتب گردابهایی کـه بر ضد هم پیش می‌روند و در یکدیگر روان می‌شوند از سلسله مراتب مربوط به تراکمهای موضعی موقتی مـادهٔ گازی نتیجه خواهد شد . ایـن تراکمهای موضعی بـالاخص هنگامی شدت می‌یابد که سرعتهای جریان در مادهٔ مورد نظر از سرعت صوت بزرگتر باشد (جریـان ماوراء صوتی) ، که درست همان است که در این مورد انتظار می‌رود ، زیرا سرعت صوت در هرگاز برابر است با سرعت حرارتی مولکولهای آن ، و قبلا بیان شد که سرعتهای جریـان در کهکشانه‌هـای ابتدایی (مـانند سرعتها در گازهـای بین اختری امروزی) بـه مقدار قابل توجهی بزرگتر از سرعت حرارتی حرکت مولکولی بوده است.

اگـر هیچ نیروی گـرانشی وجـود نمی‌داشت ، چگـالشهای موضعی ناشی از حرکت گـردابی ، بدون هیچ نتیجهٔ دائمی تشکیل می‌شدند و تحلیل می‌رفتند ؛ ولی وجود گرانش نیوتنی مانع انحلال این گونه چگالشهایی خواهد بود که اتفاقاً ممکن است بـه اندازه‌ای بزرگ باشند که معیار ناپایداری گرانشی جینز را تأمین کنند . یك چنین چگالشهای موضعیی ، به جای انبساط مجدد و اختلاط با دیگر جرمهای گازی ، باید در اثر وزن اختصاصی خود به صورت کُرات گازی سنگین مجزا شوند و به تراکم ادامه دهند. نتیجهٔ تـراکم این است کـه دمای این کـرات گازی بـآرامی و به‌طور یکنواخت بالا می‌رود و سطوح گرم شدهٔ آنها شروع به خارج ساختن نخستین شعاع حرارتی و سپس بزودی طول موجهای کوتـاه نور مرئی می کند . در مرحله‌ای از تراکم ، دمای مرکزی این ستارگان ابتدایی به «نقطهٔ

اشتعال» فعل و انفعال هسته‌ای حرارتی رسیده ، منبع نیرومند انرژی هسته بـه جریـان افتاده ، و ستارگان بـه حالتی کـه امروز آنها را می‌شناسیم سرو سامان گرفتند . وقوع عمل کامل ستاره سازی نمی‌تواند بیش از چند صد میلیون سال ، یعنی جـزء کـوچکی از سن جهان ، به طول انجامیده باشد . آنوقت جرمهای گاز سرد و ابری کهکشانه‌های ابتدایی به صورت توده‌های ستارگان آشنا در آمدند.

ولی با آنکه ایـن تبدیل کهکشانه‌های ابتدایی گازی اولیه به کهکشانـه‌هـای اختری امـروزی بیلیونـها سال پیش اتفاق افتاده ، کهکشانه‌ها هنوز نشانه‌هایی از عهد جوانی خود نگاه داشته‌انـد . در حقیقت ، بدون این فرض که زمانی کهکشانـه‌ها کاملا از گاز ساخته شده بوده‌اند ، تفسیری برای اشکال منظم تنهٔ سیال دورانی کنونی آنها وجود نخواهد داشت. ستارگانی که کهکشانه‌های امروزی را تشکیل می‌دهند بـه صورتی آن اندازه رقیق در فضا پـراکنده شده‌اند کـه بسختی احتمال می‌رود که تأثیری بر حرکت یکدیگر داشته باشند . محاسبه چنین نشان می‌دهد که در طی نصف عمر کامل کهکشانه ، تنها موارد بسیار کم می‌توانسته است وجود داشته باشد که دو ستاره بـه اندازه‌ای به یکدیگر نزدیك شوند کـه به وسیلهٔ نیروهای گـرانش عمومی مشترك بین خود ، محسوساً از مسیرهای اصلی منحرف شوند، و شایـد یك مورد هم برای آنکه واقعاً دو ستاره بـاهم تصادم کنند پیش نیامده باشد . در چنین اوضاع و احوالی ، تودهٔ ستارگان تشکیل دهندهٔ کهکشانه‌ها هرگز نمی‌توانسته‌اند اشکال بیضوی منظم بـه خود بگیرند و ابرهای ستاره‌ای برای همیشه بیشکل باقی مانده‌اند . ایـن حقیقت کـه کهکشانه‌ها ، بـا موارد استثنایی بسیار معدودی نظیر دو ابر ماژلان ، دارای اشکال منظمی از تنه‌های دورانی هستند ، تنها بـا

این فرض می‌تواند درك شود که این اشکال کهکشانی وقتی به وجود آمده باشند که کهکشانه‌ها هنوز به حالت گازی بوده و هیئت عمومی آنها در اثر چگالش جرمهای گاز به صورت ستارگان در نیامده بوده است . ممکن است از راه تشابه با سنگواره‌های زمینشناختی نظیر چوب محجر ، آنها را همچون اشکال کهکشانی سنگواره شده‌ای بدانیم که ، با آنکه ترکیبات غیر آلی مدتها پیش جانشین مواد آلی آنها شده ، درست شکل و ساختمان یك ترکیب زنده را نگاه داشته‌اند .



شکل ۲۳ ــ راه اثبات طیفی کیکشانه‌های بیضوی که همچون اجسام سختپا دوران می‌کنند . انتقال دوپلری در ناحیهٔ قرمز سمت چپ ، و در ناحیهٔ آبی سمت راست قرار گرفته .

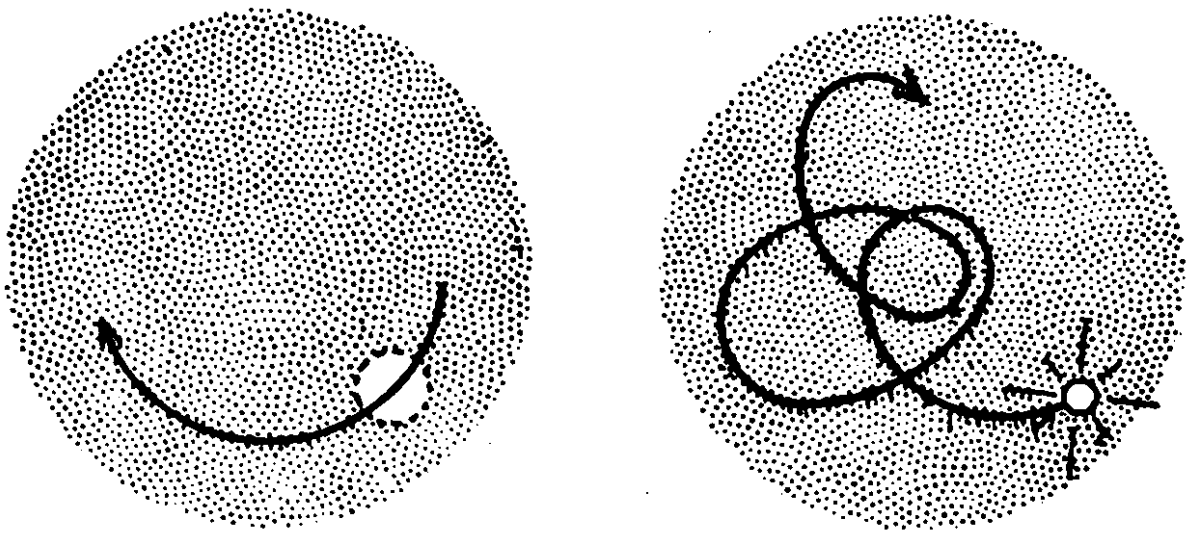
از نظر داستان تحول کهکشانی ، نظریهٔ «اشکال سنگواره شده» دارای اهمیت قابل توجهی است . با به کار بستن این نظریه ،

مؤلف با همکاری کلر [1] و بلتسر [2] توانسته است انواع دیگری از از حقایق معماآمیز را توضیح دهد . این نظریه ، مثلا ، توضیح می‌دهد که چرا تنهٔ مرکزی کهکشانه‌های مارپیچی و همچنین کهکشانه‌های بیضوی ظاهراً مانند اجسام سختپا دوران می کنند ، یعنی سرعتهای خطی آنها متناسب با فواصلشان از محور دوران است . این واقعیت نخست از راه رصد به وسیلهٔ اندازه‌گیری «انتقال دوپلری» در نور صادر از قسمتهای مختلف کهکشانه‌های دوار برقرار شد ، و به طوری که در شکل ۲۳ نشان داده شده ، در این رصد شکاف طیفنگار در مواضع مختلف سراسر یك کهکشانه که از پهلو رؤیت می‌شد قرار داده شده بود ، و جا به جا شدن دوپلری نسبت به یك خط طیفی اندازه‌گیری شد . در جمیع حالات ، این انتقال که سرعت خطی جرمهای کهکشانی را در امتداد خط نور به دست می‌دهد ، مستقیماً متناسب با فاصلهٔ از محور به دست می آید . چگونه کهکشانه‌هایی که از ستارگان بی اثر بر روی یکدیگر تشکیل یافته‌اند می‌توانند دورانی نظیر دوران یك جسم سختپا * داشته باشند ؟ توضیح این تناقض بر مبنای نظریهٔ «اشکال سنگواره شده» در شکل ۲۴ مصور شده است . تصویر سمت چپ کهکشان گازی ابتدایی را تشکیل می‌دهد که حجمی از گاز ، با بقیهٔ تنهٔ گازی آن بر مداری دایره شکل در سراسر کهکشان و حول مرکز آن در حرکت است ، وقتی چنین حجم گازیی که در اصل فضایی برابر چندین سال نور مکعب را اشغال می کرده ، به صورت ستاره‌ای چگالش یافت ، فشار گاز

1 — G. Keller
2 — J. Beltzer
* اصطلاحی که به جای اصطلاح صلب (rigid) به‌کار برده شده. (مترجم)

باقیمانده دیگر توانایی تحمل جرم آن را نداشته و ستارهٔ جدید با سرعت دائم التزایدی شروع به سقوط به سوی مرکز کرده است ، و در حالی که با بزرگترین سرعت از نزدیکی مرکز می‌گذرد ، قبل از آنکه بیشتر فرو رود ، به فاصلهٔ اولیهٔ خود پرتاب خواهد شد . بنا بر این ، حرکت دورانی اولیهٔ حجم گازی رقیق تبدیل به حرکت بیضوی ستارهٔ نوزاد [1] می‌شود . وقتی که جرمهای گازی کهکشانهٔ ابتدایی اصلی بسرعت چگالش یافتند ، ستارگان بارنده باید همچون زبانه‌هایی در سراسر کهکشانه بوده باشند . این فرایند در واقع قابل مقایسه با باران معمولی است که بر اثر چگالش بخار آب جو تولید می‌شود ، جز اینکه قطره‌های باران را زمین متوقف می کند ، و حال آنکه قطرات باران اختری به این سرنوشت دچار هستند که بدون برخورد با زمین سختپایی باید پیوسته به سیر خود ادامه دهند . هر زمان که این ستارگان غوطه‌ور بزرگترین بعد خود را به دست می آورند ، انتظار می‌رود که همان سرعت مماسی را دارا باشند که حجمهای گاز تشکیل دهندهٔ آنها دارا بوده است . بنابراین ، با رصد کردن نور ستارگانی که به زادگاه اصلی خود درکهکشکانه باز می گردند ، در واقع یك «سرعت سنگواره شدن» را اندازه‌گیری می کنیم که با آن سرعت کهکشانهٔ ابتدایی گازی اصلی حرکت دورانی به دست آورده است ، و این انتظار معقول است که کهکشانه‌های ابتدایی در واقع کما بیش همچون اجسام سختپا دوران

۱ ـ به طوری که در شکل نشان داده شده ، مدار بیضوی ستاره حول مرکز نیز حرکت خواهد کرد (تقدیم اعتدالین). این حرکت به واقعیتی مربوط است که بر خلاف منظومهٔ شمسی خودمان ، میدان گرانش در درون کهکشانه‌ها تابع قانون عکس مجذور نیست.



شکل ۲۴ ــ حوادثی که هنگام چگالش مقدار زیادی گاز اتفاق افتاده که متعلق به جرم گاز دوار بوده است. چون ستاره بسیار سنگینتر از گاز اطراف خود می‌شود ، مسیر بیضوی غوطه‌وری را می‌پیماید که در سمت راست شکل نشان داده شده است.

کرده باشند .

ستارگان پیر و جوان

به طوری که قبلا دیدیم ، با آنکه محتمل است که هنوز هم ستاره سازیهایی به مقیاس کوچك در فضای بین اختری وقوع یابد ، ظاهراً اغلب ستارگان تقریباً با هم در یك دورهٔ قدیمی از تحول کهکشانی تشکیل یافته‌اند . ولی اگر تشکیل ستارگان به همین آسانی باشد که توصیف شد ، چرا همهٔ گاز کهکشانهٔ ابتدایی اصلی به صورت ستارگان چگالش نیافته و فضای میان ستارگان را خالی و تهی گذاشته است ؟ چرا هنوز هم قسمتی از گاز و غبار در فضای بین اختری ، چه در کهکشان خودمان و چه در کهکشانه‌ها ، وجود دارد ؟

نخست چند واقعیت مربوط به طرز توزیع مواد میان ستارگان

را از نظر بگذارنیم . درست است که در مجاورت خورشید خودمان، و البته در همهٔ حجم بازوان مار پیچی ، مقدار فراوانی گاز و غبار وجود دارد که به جهاتی به صورت ستارگان در نیامده است ، ولی آنچه در باب بازوان مارپیچی صدق می کند در مورد اجسام مرکزی اصلی کهکشانه‌های مارپیچی ، و همچنین کهکشانه‌های بیضوی و کرویی که بازوانی ندارند ، درست نیست . مطالعات تازه‌ای که والتر باده[1] (از رصدخانهٔ ماونت ویلسن و پالومار) انجام داده ، به شناسایی این واقعیت منجر می‌شود که دو نوع مختلف از سکنهٔ اختری وجود دارد که مربوط به دو قسمت متفاوت از ساختمان کهکشانی است :

۱ ـ بازوان مار پیچی (مشتمل بر قسمتهای مجاور خورشید ما) محتوی ستارگان و مواد بین اختری به مقادیر تقریباً متساوی هستند . مقادیر عظیم و کلان ابرهای گاز و غبار در آنجا وجوددارد ، مانند سحابی بزرگ جبار ، و فضا عموماً به اندازه‌ای غبار آلود است که از یك سر تا سر دیگر قرص کهکشانی را نمی‌توان دید . سکنهٔ اختری این مناطق به واسطهٔ وجود ستارگان غولپیکر آبی (ولو به تعداد کم) متمایز است که طول عمر آنها به اندازه‌ای کوتاه می‌باشد که باید نسبتاً بتازگی ، مدتها پس از تشکیل جثهٔ اصلی ستارگان ، تشکیل شده باشند . اینها را « سکنهٔ اختری نوع I » نامیده‌اند . ۲ ـ تنهٔ مرکزی کهکشانه‌های مارپیچی ، و همهٔ کهکشانه‌های بی بازو کاملا از ستارگان تشکیل یافته‌اند ، و گاز و غباری در آنها وجود ندارد . در این مناطق فضای میان ستارگان به اندازه‌ای روشن است که سراسر آن را می‌توان بدون جزئیترین تیرگی مشاهده کرد . ستارگانی که این مناطق بی غبار را مسکون ساخته‌اند متعلق به «سکنه اختری نوع II»

1 ـ Walter Baade

هستند ، و ظاهراً صد در صد ذخیرهٔ اصلی ـ بدون ستارگان نوپدیدی نظیر ستارگان غولپیکر آبی ـ می‌باشند .

با در دست داشتن این اطلاعات می‌توان به یکی از سئوالات قبلی خودمان چنین پاسخ داد که وقتی یك سکنهٔ اختری از نوع II می‌یابیم فرایند تشکیل اختری ظاهراً تا وقتی که همهٔ مواد بین اختری مصرف شود ، ادامه می‌یابد ، ولی در بارهٔ گاز و غباری که هنوز در بازوان مارپیچی وجود دارد چه می‌توان گفت ؟ پاسخ دادن به این پرسش در حال حاضر دشوار است ، چون حتی معلوم نیست که چگونه این مواد به وجود آمد ، و چند مدت است که آنجا مانده بوده‌اند .

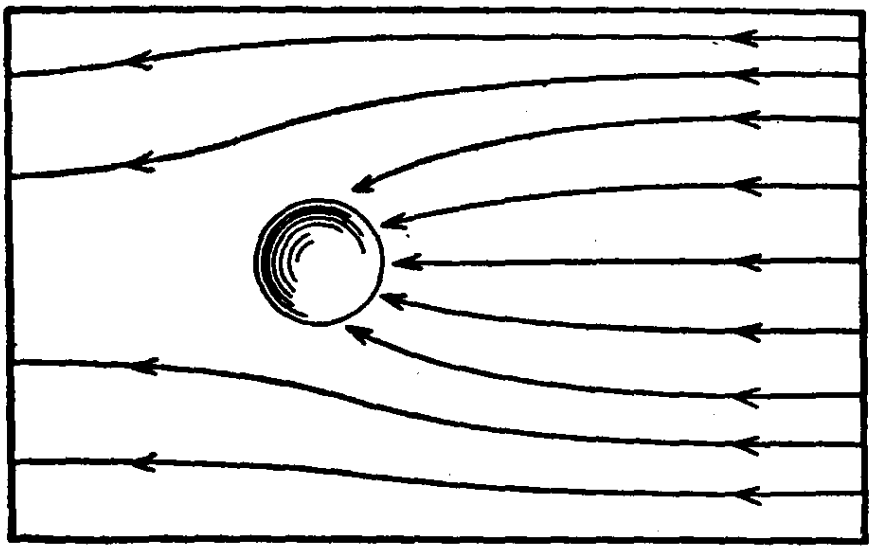
عقیدهٔ جالبی که توسط فون وایتسزکر ابراز شده در اینجا ذکر می‌شود ، چون این عقیده لااقل پاسخی به یکی از پرسشهای مذکور می‌دهد : چرا موادی بین اختری که هنوز در بازوان مارپیچی وجود دارند ، به همان میزان که ستاره‌سازی اولیه در طی بیلیونها سال پیش انجام گرفته ، به صورت ستاره چگالش نیافته‌اند ؟ به نظر چنین می‌رسد که پاسخ این باشد که ستارگانی که قبلا در آنجا وجود داشته مانع تشکیل ستارگان تازه شده‌اند . برای اثبات این موضوع بار دیگر فرمول جینز در مورد ناپایداری گرانشی را به کار می‌بریم، و به جای چگالی متوسطه مواد بین اختری مقدار 10^{-24} گرم در سانتیمتر مکعب ، و به جای جرم یك ستارهٔ بزرگ مقدار 10^{34} یا 10^{35} گرم را که مربوط به جرم ۵ تا ۵۰ جرم خورشید است ، قرار می‌دهیم . از این راه چنین به دست می‌آید که دمای گازی که در آن دما چنین چگالشهایی می‌توانست وقوع یابد باید بین ۱ و ۵ درجهٔ مطلق باشد . ولی می‌دانیم که دمایی که واقعاً در فضای بین اختری بر

اثر تشعشع ستارگان موجود برقرار می‌شود در حدود ۱۰۰ درجهٔ مطلق است . ستارگان موجود ، چون مواد بین اختری را زاید بر اندازه گرم می‌کنند ، مانع چگالش آن به صورت ستارگان تازه می‌شوند !

پرسش دیگر این است : فرایند دیگری که جوابگوی تنهٔ اصلی ستارگان است در حال حاضر در بازوان مار پیچی به‌کار نمی‌رود ، پس مبدأ چند ستارهٔ غولپیکر آبی رنگ در این مناطق چیست ؟ دو نظریه وجود دارد که سعی می‌کند جوابگوی تشکیل تعداد معدودی ستارگان غولپیکر در مناطق غبارآلود بازوان مارپیچی باشد . یکی ازاین دو نظریه، که توسط فرد هویل [1] و لیتلتن [2] پیشنهاد شده ، مبتنی بر به هم پیوستن مادهٔ بین اختری به وسیلهٔ ستارگان متحرك در آن می‌باشد . برای ادراك این فرایند بهتر آن است که ستاره را بیحرکت در نظر گرفته و مواد بین اختری را خارج از آن روان تصور کنیم (شکل ۲۵) . تحت تأثیر نیروهای گرانش ، جریانهای از این مواد از مسیر اولیهٔ خودمنحرف و داخل جو ستاره می‌شوند و پیوسته جرم آن را افزایش می‌دهند . بآسانی مشاهده می‌شود که هرچه سرعت جریان گاز بزرگتر باشد (در حقیقت هرچه سرعت حرکت اختری در گاز بزرگتر باشد) مقدار کمتری از ماده می‌تواند منحرف و بالاخره توسط ستاره تسخیر شود . محاسبهٔ دقیق نشان می‌دهد که یك ستارهٔ متوسط (نظیر خورشید خودمان) که با سرعت اختری عادی ۱۰ کیلومتر در ثانیه در حرکت است ، تنها مقدار بسیار کمی از مواد بین اختری را به وسیلهٔ فرایند به هم-

1 — Fred Hoyle
2 — R. A. Lyttleton

پیوستگی جمع خواهد کرد . این مقدار به اندازه‌ای کوچك خواهد بود که جرم ستاره را ، حتی در طی بیلیونها سال ، به طور فاحشی تغییر نخواهد داد . ولی با آنکه فرایند به‌هم پیوستگی هویل و لیتلتن به نظر نمی‌رسد کـه در طرح عمومی تحول اختری اهمیت فراوان داشته باشد ، ممکن است جوابگوی تحولاتی در شرایط خاص قرار گیرد . اگر ستاره‌ای از ابر گاز و غبار نسبتاً غلیظی بگذرد ، یا برحسب تصادف در منطقه‌ای داخل شود کـه در آنجا سرعتش تقریباً برابـر



شکل ۲۵ ــ به‌هم‌پیوستگی مادهٔ بین اختری (بنا بر نظریهٔ هویل و لیتلتن)

سرعت جریان گاز باشد (سرعتی که بالنسبه به سرعتهای ستاره و گاز کوچك است)، ممکن است بسـرعت، چند برابر بزرگتر از اندازهٔ اولیهٔ خود گردد. بنابراین، ناممکن نیست که غولپیکرهای آبی‌کوتاه‌ـ عمری که دربازوان مارپیچی یافت می‌شوند واقعاً ستارگان پیری باشند تشکیل یافته در فرایند بدیعی که در طی آن ، در اثر به هم پیوستگی مقادیر زیادی از مواد اضافی بعضی سحابیهای «فربه» که از میان آنها گذشته‌اند ، جوانی خود را بازیافته‌اند .

فرایند دیگری که به وسیلهٔ آن تازه ـ واقعاً تازه ـ می‌توانند در اوضاع و احوال موجود در زمان حاضر در فضای بین اختری تشکیل یافته باشند فرایندی است که به وسیلهٔ لیمان سپیتسر [1] و فرد ل. ویپل [2] پیشنهاد شده بود. با آنکه، به طوری که دیدیم، چنین به نظر می‌رسد که ستارگان خود مانع تشکیل ستارگان بیشتری در طی فرایند های معمولی چگالش باشند، مکانیسم پیشنهادی سپیتسر و ویپل تشعشع ستارگان موجود را به کار می‌برد. ذرهٔ غباری را در نظر بگیرید که آزادانه در فضای بین اختری شناور باشد. این ذره از هر سو به وسیلهٔ ستارگانی که کهکشانه را تشکیل می‌دهند روشن شده است. هنگامی که نور بر سطح یك جسم ماده افکنده می‌شود (ممکن است جذب یا منعکس شود) نیرویی به وجود می‌آورد موسوم به «فشار نوری». این نیرو را می‌توان ناشی از بمباران تعداد فراوانی کوانتومهای نور تصور کرد که یا به عقب می‌جهند یا در درون سطحی که با آن برخورد می‌کنند فرو می‌روند. این فشار نوری، تا آنجا که مربوط به اجسام با اندازه‌های متعارف است، بسیار خفیف می‌باشد. حتی در یك زمین تنیس بسیار روشن «فشار نوری» وارد بر گلوله‌های در حال پرواز که مورد آزمایش قرار گرفته کمترین تأثیری در حرکتشان ندارد، و نشان دادن وجود این نیرو نیاز به دستگاههای بی اندازه حساس دارد. ولی هر چه جسم کوچکتر باشد تأثیر فشار نوری عمده‌تر است، و در مورد ذرات غبار بین‌اختری ـ به قطر فقط چند میکرون ـ از این تأثیر نمی‌توان چشم پوشید. چون ذرات غبار در فضای بین اختری از هر سو تقریباً به یك اندازه روشن می‌شوند،

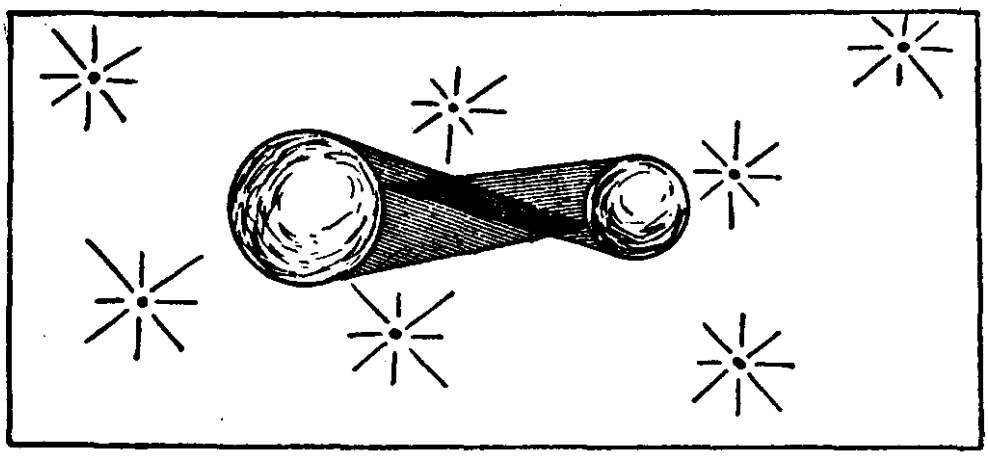
1 _ Lyman Spitzer
2 _ Fred L. Whipple

تأثیرات نورانی یکدیگر را خنثی می‌کنند . ولی تأثیری باقی می‌ماند که ناشی از «تصویر سایهٔ مشترك» است و باید در نظر گرفته شود . اگر دو چنین ذره‌ای (شکل ۲۶) را در میدان تشعشع ایزوتروپی [= تکروند] * که از ستارگان اطراف می‌آید در نظر بگیریم ، چنین می‌یابیم که هر ذره کوانتومهای نوری از ذرهٔ دیگر در یافت خواهد کرد که کمتر از کوانتومهای نوریی است که از همهٔ امتدادهای دیگر به آن می‌رسند . در نتیجهٔ این تصویر سایهٔ مشترك ، دو ذره به سوی یکدیگر رانده می‌شوند به طوری که گویی نیرویی گرانشی میان آنها برقرار است . بآسانی دیده می‌شود که این نیروی «گرانش‌نما» به نسبت عکس مجذور فاصلهٔ دو ذره تغییر خواهد کرد ، و از این لحاظ شبیه به نیروی گرانشی نیوتنی [۱] است . در مورد ذرات نسبتاً بزرگ ، مثلا به قطر چند میلیمتر ، این وضع «کاذب» بالنسبه به نیروهای گرانش واقعی بسیار کوچك است. ولی برای ذرات بسیار کوچك وضع معکوس است ، و نیروی «کاذب» بسیار قویتر از نیروی

* وصف ماده‌ای که خواص فیزیکی آن در همهٔ امتدادها یکسان است (مترجم) .

۱ ـ اگر σ (سیگما) مقطع عرضی هندسی ذرات و R فاصلهٔ میان آنها باشد ، مخروط سایهٔ مربوط به زاویهٔ صلب $\frac{\sigma}{R^2}$ خواهد بود . اگر I چگالی تشعشع کل در فضا باشد ، نیرویی که بر هر ذره وارد می‌شود ، با مقایسه با نیروی نیوتنی $G \times \frac{m^2}{R^2}$ چنین خواهد بود :

$$\frac{1}{3} I \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \sigma = \frac{1}{12} \pi I \times \frac{\sigma^2}{R^2}$$



شکل ۲۶ ــ تصویر سایه ، بنا بر نظریهٔ سپیتسر و ویپل

گرانش معمولی می‌شوند. این در واقع همان وضعی است که برای ذرات غبار بین اختری پیش آمده است. نتیجتاً در فضای بین اختری، این نیروهای تشعشعی «غبار را بـه سوی غبار» خواهند راند و سبب چگالش آنها به صورت ابرها خواهند شد . به‌محض آنکه چنین ابر رویان و نـارس تشکیل شد ، غبار بیشتر وارد خواهد شد ، چـه همهٔ ذرات مجاور از لحاظ نور ستارگانی که در سوی دیگر می‌درخشند ، در سایهٔ آن قرار خواهند گـرفت. وقتی که ابر غبار به اندازهٔ کافی بزرگ و سنگین شد شروع به این خواهد کـرد که جاذبهٔ گرانشی واقعی را نشان دهد و گـاز بین اختری و غبار بیشتر در خود جذب کند تاسرانجام به صورت هستهٔ یك ستارهٔ نوزاد تکامل یابد. مطالعات مشروح در بـارهٔ چنین سازوکار تشکیل ستاره بـه ایـن نتیجـه منجر می‌شود که تنها در مجموعهٔ شرایط خاصی متوالیاً انجام خواهدگرفت که بیشتر شبیه است بـه آنچه در سحابیهای غولپیکر بین کهکشانی یافت می‌شود . بنابرایـن ، در عین آنکه ستارگان تـازه ممکن است بدین طریق تشکیل یافته باشند ، این فرایند بیشتر جنبهٔ استثنایی نسبت

به فرایند عمومی دارد.

چنین انتظار خواهد رفت که تشکیل ستارگان تازه بـه طریق پیشنهادی سپیتسر و ویپل و بـه طریق جوان شدن ستارگان پیر بنا بـر نظر [illegible]ل و لیتلتن پدیده‌ای نا متعارفی در اوضاع و احوال کنونی باشد؛ در واقع مشاهدات و ارصاد نشان می‌دهد کـه چنین« ستاره‌زایی» در کهکشان ما به طرز استثناییی کمیاب باشد.

خوشه‌شدن کهکشانه‌ها و ستارگان

چنانکه در آغاز همین فصل دیدیم، دو فرایند اصلی تدریجی در داستان جهان ما وجود دارد: پاره پاره شدن اولیهٔ گاز ابتدایی، که به طـور یکنواخت در حال انبساط است، به بیلیونها کهکشانـه‌های فردی، و چگـالش مواد در هر کهکشانه بـه صورت بیلیونها ستارهٔ مجزا. ولی ارصاد نشان می‌دهد که علاوه‌بر این حادثهٔ اصلی، مراحل کوتاهتر و میانه‌ای نیز وجود داشته است.

اغلب کهکشانه‌های رصدپذیر به نظر می‌رسد کـه کمابیش به طور تصادفی در فضا پـراکنده شده باشند، ولی مـوارد متعددی از کهکشانه‌ها وجود دارد که به صورت گروههایی خوشه‌ور شده‌اند که ممکن است هر یـك محتوی چند صد عضو کهکشانی فـردی باشد. یکی از نزدیکترین خوشه‌های کهکشانی که دقیقاً مورد مطالعه قـرار گرفته خوشهٔ کهکشانی صورت فلکی سنبله است. این خوشهٔ کهکشانی تنها در فاصلهٔ ۸ میلیون سال نـور از منظومهٔ شمسی ما واقـع شده و قسمت اعظم سطح آسمان متعلق به صور فلکی سنبله، ذئـائب بزنیس، و اسد را می‌پوشاند. در این فاصله، سرعت پسروی مربوط به انبساط جهان تنها بالغ بر ۱٫۱۲۰ کیلومتر در ثانیه است، و چون سرعتهای

تصادفی کهکشانـه‌های مجزایی که آن خـوشهٔ کهکشانه را تشکیل می‌دهند گاهی به بزرگی ۲٫۴۰۰ کیلومتر در ثانیه می‌رسند، بسیاری از افراد خوشهٔ کهکشانی بـه سوی ما حرکت کـرده و در خطوط طیفی خود انتقالی در ناحیهٔ آبی طیف نشان می‌دهند. این یکی از مواردی است که در پیش ذکر شد و در آن سرعتهای تصادفی افراد مجـزای کهکشانی از سرعت منظم مـربوط به انبساط جهان تجاوز می‌کرد. درواقع خوشهٔ کهکشانی سنبله به اندازه‌ای بـه ما نـزدیك است که این بحث پیش آمده بود که آیا منظومهٔ اختصاصی کهکشان خود ما نباید از اعضای آن بـه شمار رود؟ چه ما به ایـن خانـوادهٔ غولپیکر کهکشانه‌ها تعلق داشته و چه از آن مجزا باشیم، شکی نیست کـه منظومهٔ کهکشان ما (راه شیری) گـرگ تنهایی در فضا نیست. واقع امر این است که کهکشان ما عضوی از گروه معروف به «گروه محلی» است که مشتمل بر سه مارپیچ ـ سحابی امراة المسلسله یکی از آنهاست ـ، شش کهکشانهٔ بیضوی، و چهار کهکشانهٔ نا منظم یا بیشکل (شامل ابرهای ماژلان بزرگ و کوچك) می‌باشد.

تنها یك دوجین از دیگر خوشه‌های کهکشانی می‌شناسیم که مشتمل بر همان تعداد افراد خوشهٔ سنبله می‌باشند (یکی از آنها کـه در صورت فلکی اکلیل شمالی است در صفحه تصویر VI نشان داده شده)، ولی بیش از صد گروه کوچکتر شبیه «گروه محلی» خودمان، و در حقیقت هزاران مجموعهٔ باز هم کوچکتر، وجود دارند که گاهی منحصر به سه یا دو کهکشانه می‌باشند. دلیل واقعی چنین گروه‌بندیی چیست؟

خوشه شدن کهکشانی از دو راه ممکن است به وجود آمده باشد. همان طور که فون وایتسزکر فرض کرده، ممکن است چنین

فرض کنیم که گاز اولیه در جهان در حال انبساط ابتدایی آن اندازه متجانس نبوده که در مباحثات اولیهٔ خود تصور کردیم. البته هر کس می‌تواند تصور کند که بعضی از انواع آشفتگیها در فرایند منظم انبساط پیچیدگی فراهم ساخته و حرکت منظم جرمهای گاز به تعداد فراوانی گردابهای متفاوت پاره پاره شده است، که بنا بر این فرض اندازهٔ استانداردِ یک کهکشانه مربوط به کوچکترین اندازهٔ گردابی خواهد بود که بتواند به وسیلهٔ گرانش اختصاصی خود به هم نگاه داشته شود، و فرایند تشکیل کهکشانی شبیه فرایندی خواهد بود که منجر به تشکیل ستارگان در کهکشانه‌های فردی می‌شود. آنوقت خوشه‌های کهکشانی باید همچون نتیجهٔ گردابهای عظیمی در نظر گرفته شوند که در مواد گازی اولیه وجود داشته‌اند. تنها قسمتی که در چنین توضیحی رضایتبخش نیست این است که ما به جای آنکه حرکت گردابی را نتیجهٔ طبیعی فرایند انبساط بدانیم، وجود آن را در موارد اولیه مسلم فرض کرده‌ایم. چنین فرض مسلمی ممکن است بخوبی ثابت کند که تنهاراه جوابگویی برای وجود حرکت گردابی در مراحل بعدی انبساط[1] است؛ آیا این همان موردی نیست که احتیاجات ما را دربارهٔ سادگی فرضهای اولیه سست می‌کند.

توضیح دیگری که ممکن است برای خوشه شدن کهکشانه‌های مشهود به دست آورد این فرض است که در لحظهٔ مبدأ آنها به طرز تصادفی در سراسر فضا پراکنده شده و اجتماع خود را به صورت

۱ــ در بحث پیش سعی کردیم که آشفتگی درون کهکشانه‌های ابتدایی را به دورانی منسوب سازیم که ناشی از بینظمیهای فرایند پاره پاره شدن در مواردی کاملا متجانس در حال انبساط بوده . ولی کاملا محقق نیست که این فرض بتواند از لحاظ ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرارگیرد.

خوشهٔ کهکشانی بعداً در اثر گرانش مشترك آغاز کرده‌اند. مسئلهٔ ریاضی مربوط به رفتار زمانی تعداد بیشماری نقاط گرانندهٔ که در اصل به طور تصادفی در فضای لایتناهی پراکنده شده‌اند بی اندازه پیچیده و بغرنج است. اخیراً س. اولم[1] این مسئلهٔ پیچیده را مورد بررسی و توجه قرار داده و توانسته است نشان دهد که ، در مورد مدل یك بعدی ساده شده (با نقاط گرانندهٔ‌ای که در امتداد یك خط مستقیم توزیع شده)، باید این انتظار را داشت که نقاط به گروههایی با اندازه‌های متنوع مجتمع شوند . ولی بسط نتیجهٔ اولم به فضای دو یا سه بعدی به نظر می‌رسد مشکلاتی حل نشدنی از لحاظ ریاضی داشته باشد.

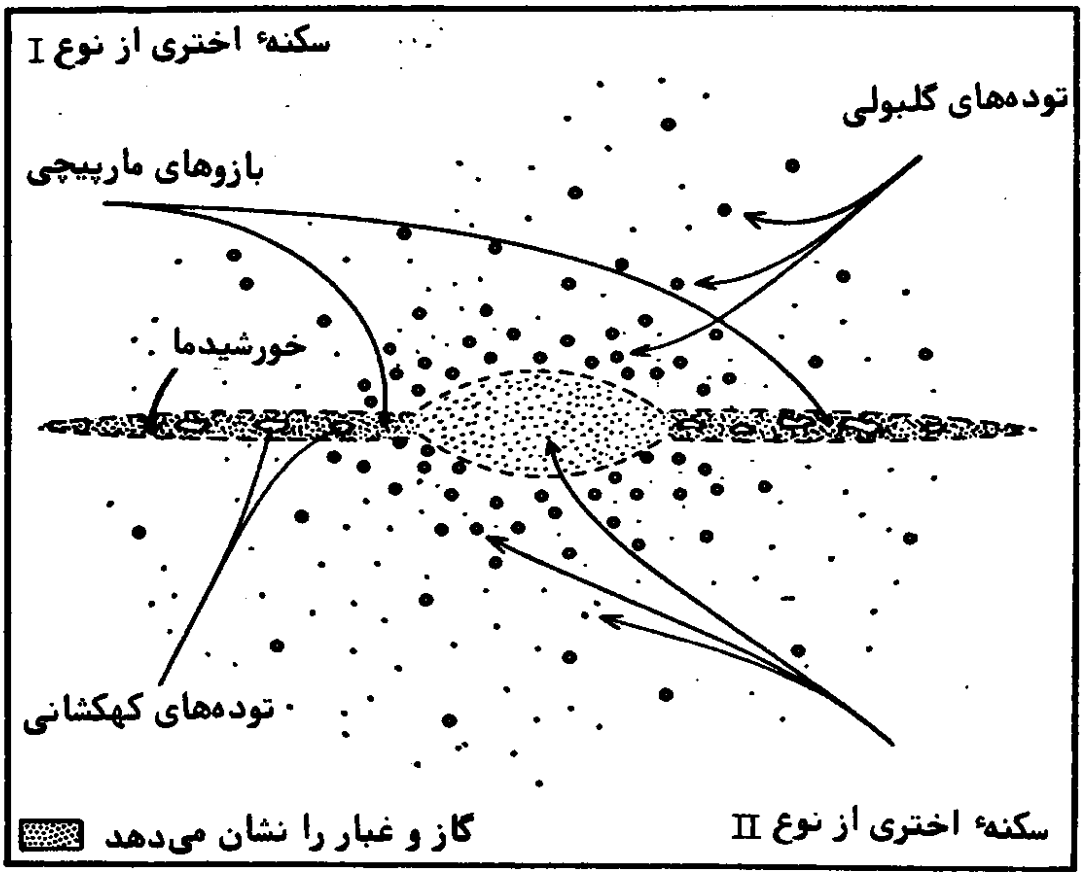
طرز خوشه شدن واسطهٔ دیگری نیز به وسیلهٔ ستارگان درون یك کهکشانه نشان داده شده است. «خوشه‌های کهکشانی»[2] ستارگانی را (نظیر خوشهٔ ثور که در شکل۲ نشان داده شد) سابقاً ذکر کردیم که شامل بسیاری ستاره با یك حرکت اختصاصی در فضا هستند. به نظر بسیار محتمل می‌رسد که همهٔ افراد این گروه از یك ابر «گاز و غبار» غول‌پیکر چگالش یافته باشند (یکی از گردابهای به مقیاس بزرگ آشفته‌ای که در کهکشان خودمان وجود دارد) و همهٔ آنها با همان سرعت ابر اصلی در حرکت می‌باشند. چنین ابرها و خوشه‌های اختری نتیجه شده از آنها، به سبب اختلالات ناشی از دیگرستارگان و همچنین تأثیر دوران متفاوت درناحیهٔ بازوان مارپیچی، هرگز قادر

1– S. Ulm

۲– در اینجا یك اشتباه قابل تأسف از لحاظ لفظی میان خوشه‌های کهکشانه‌ها و خوشه‌های کهکشانی وجود دارد. در صورتی که این دومی خوشه‌هایی از ستارگان را در بازوان مارپیچی نشان می‌دهد.

به این نبوده‌اند که شکل منظمی به خود بگیرند، و هرچه کهکشانه‌ها پیرتر شده آنها تدریجاً منحل شده‌اند.

ولی خوشه‌های اختری دیگری وجود دارند که در نواحی آرام فضا، دور از تردد اختری سطح کهکشانی واقع شده‌اند؛ و چون دیگر ستارگان مزاحمتی برای آنها فراهم نمی‌ساختند، این خوشه‌ها اشکال منظم کروی به خود گرفته و به نام «خوشه‌های گلبولی» معروف شده‌اند. یکی از این خوشه‌ها، که در صورت فلکی الجاثی یافت می‌شود در صفحه تصویر VII نشان داده شده. درچنین خوشه‌هایی فاصلهٔ میان ستارگان منفرد نسبتاً کوچك است، به طوری که چنین احتمالی بجا خواهد بود که نیروهای گرانشی مشترك حرکت آنها را تغییر دهند، و همهٔ منظومه را به صورت مدل کروی کاملی در



شکل ۲۷ ــ مقطع عرضی یك کهکشان عمود بر سطح بازوان مارپیچی

آورند که همشکل با جرم عظیم گـازی است که آزادانه در فضای تهی شناور است.

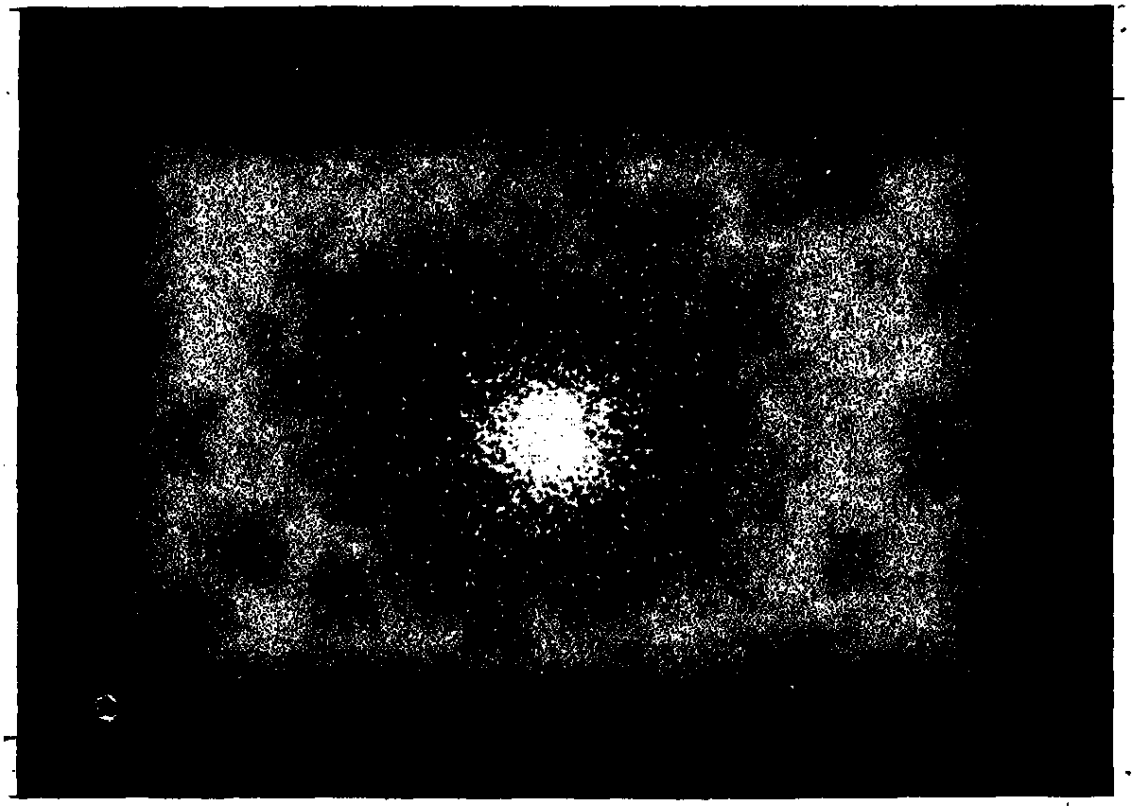
شکل ۲۷ یك طـرح کلی از کهکشان ما را نشان می‌دهد که موضع خوشه‌های کهکشانی و گلبولی را نسبت به نواحی مشخص شده بـه وسیلهٔ دو نـوع سکنهٔ اختری کـه قبلاً شرح داده شد ، معین می کند .

منظومه‌های سیاره‌ای

اکنون به تحول و خواص ستارگان منفرد توجه می کنیم که، پس‌از تمام آنچه ذکر شد، مهمترین واحدهای فردی جهان ما هستند. میان همهٔ ستارگـان جهان، خورشید که از همه بـه ما نـزدیکتر است برای ما مهمترین آنها به شمار می‌رود. واقعیت دیگری که به همین اندازه دربارهٔ این ستاره حائـز اهمیت است وجود منظومهٔ سیاره‌ای آن می‌باشد . در حقیقت، تنها تا چند قرن پیش ، خورشید با منظومهٔ سیاراتش تنها چیزهایی بودند که علم نجوم می‌توانست مشروحاً مطالعه و بررسی کند؛ در نتیجه تئوریهای اولیهٔ کیهانزایی محدود بود به‌مسئلهٔ مبدأ خانوادهٔ خورشید. کیهانزایی علمی، از لحاظ تاریخی، بانظریاتی شروع می‌شود که نخستین‌بار طبیعیدان فرانسوی ، ژرژ دوبوفون[1] ، بیان وتولد سیارات را نتیجهٔ تصادم ناگهانی خورشید ما بایك ستارهٔ دنباله دار رهگذر تصور کرد. اندکی بعد فـرضیه‌ای نسبتاً متفاوت و بدیعتر توسط فیلسوف آلمانی، ایمانوئل کانت[2]، و ریاضیدان فرانسوی،

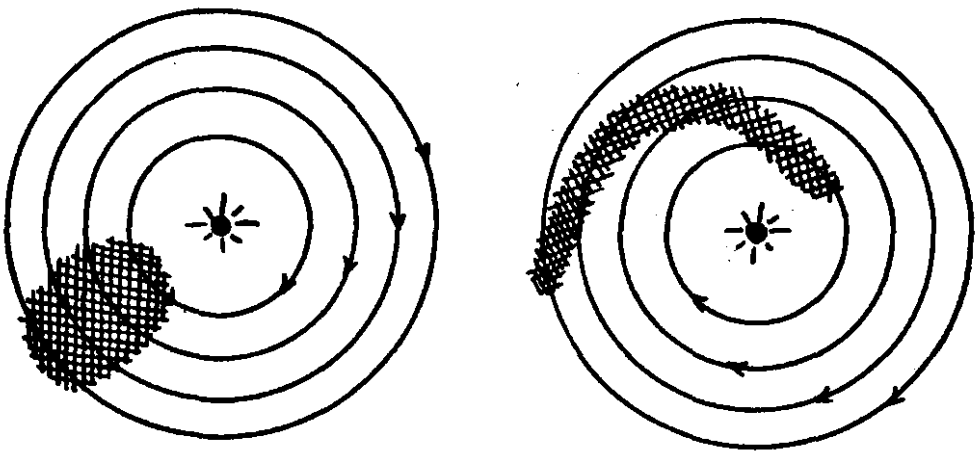
1_ Georges de Buffon
2_ Immanuel Kant

تصویر VI . خوشهٔ کیکشانه‌های کمنور در «اکلیل شمالی». شکل دوکوار کیکشانه‌ها آنها را مشخص می‌سازد .



تصویر VII . خوشهٔ گلبولی در «الجاثی»

پیر لاپلاس[1]، ابراز شد. بنا بـر فرضیهٔ آنان، تولد سیارات نتیجهٔ یك برخورد «بزن و بگریز» نبوده بلکه تا انـدازه‌ای قسمتی از فرایندی معمولی است که در زندگی تقریباً هرستاره انتظار می‌رود. کانـت و لاپلاس، هر دو، چنین فـرض کردند که خورشید جوان را غلافی گازی و رقیق به شکل عدسی (سحابی شمسی) احاطه کرده بوده که بعداً به‌صورت سیارات مجزایی که امروز آنها را می‌شناسیم چگالش یافته‌اند. چنین فرضی با نظریات جدید مربوط به تشکیل ستارگان از مواد پراکنده شدهٔ میان اختری کاملا سازگار است. البته این انتظار معقول است که قسمتی از مـواد تشکیل دهندهٔ گرداب آشفته‌ای کـه بعداًخورشید ما شده، به واسطهٔ سرعتهای زاویه‌ای زیادشان، از سقوط به مرکز جلوگیری شده‌اند. یك غلاف کروی دوار، از نوعی کـه باید نخست محیط بر خورشید نوزاد باشد، بـه علت تصادمات میان



شکل ۲۸ ــ چگونه موادی که در اصل در سطوح مختلف حرکت می‌کرده‌اند، به سبب تصادمات مشترك میان ذرات، به صورت قرصی گسترده شده‌اند.

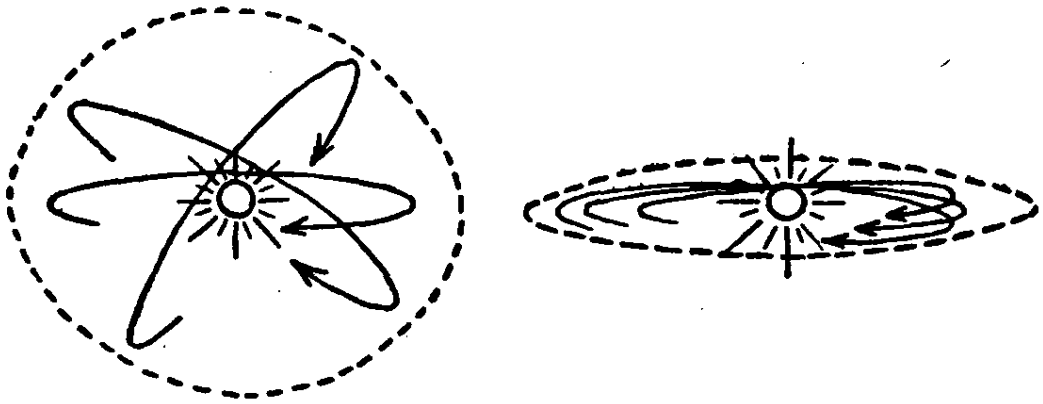
1— Pierre Laplace

قسمتهای آن که در سطوح مختلف حرکت می‌کردند ، پهن خواهد شد (شکل ۲۸). سپس مواد این قرص پراکنده ممکن است به سبب جاذبهٔ گـرانشی.موجود میان قرصهای مختلف بـه صورت سیارات جداگانه چگالش یابند.

ولی فرضیهٔ کانت-لاپلاس، که مدت بیش از یك قرن نظریات علمی را تحت نفوذ قرار داده بود، توسط یـك فیزیکدان انگلیسی، جیمز. ك . مکسول[1]، سخت مورد انتقاد قرار گرفت. نظر وی این بود که اثبات کرده است که چنین چگالشی نمی‌تواند هرگز روی داده باشد. چگالش گرانشی، بدان سان که کانت و لاپلاس تصور کـرده بودند، مورد خاصی از مفهوم تازه‌تر، یعنی «ناپایداری گرانشی» جینز بوده که قبلا چندین بار از آن بحث کردیم. به طوری که دیدیم، به ازای هر درجه دما و چگالی معین گاز، همیشه یـك حداقـل اندازه برای چگالشها وجود دارد که می‌تـواند قسمتهای گاز را بـه وسیلهٔ جاذبهٔ گرانش مشترك با هم نگاه دارد. ولی واقعیتی کـه بـه موجب قوانین کپلر قسمتهای مختلف قرص دوار گاز با سرعتهای زاویـه‌ای متفاوت دوران می‌کنند، وضع را در قـرص گـازی پیچیده و در هم می‌سازد. بنابراین، اگر چگـالش بسیار عظیم بـوده باشد، قسمتهای مختلف آن ممکن است در اثـر نیروهای بـرندهٔ دوران متفاوت از یکدیگر دور و دوباره متلاشی شده باشند . چنین فرایند بریدگی در شکـل ۲۹ نشان داده شد، سرعتهای نسبی دوران متفاوت بستگی بـه چگالی قرص دوار ندارد، ولی نیروهای گرانشی کـه سعی می‌کنند آن را به هم پیوسته نگاه دارند متناسب با این چگالی می‌باشند . در

1— James C. Maxwell

نتیجه یك مقدار بحرانی معین باید[1] برای چگالی وجود داشته باشد که به ازای مقادیر زیادتر چگالشهای اولیه، با وجود نیروهای متلاشی کنندهٔ دوران، می‌توانند قسمتهای قرص گاز را بـه هم پیوسته نگـاه



شکل ۲۹ــ چگونه یك چگالش در حال تکوین ممکن‌است به‌سبب اختلاف سرعتهای زاویه‌ای قسمتهای مختلف خود پاره پاره شود.

دارند . با این فرض که چگالی متوسط قرص اولیه برابر چگـالیی است که به وسیلهٔ گسترش مجموعهٔ جرمهای همهٔ سیارات (در حدود ۰٫۰۰۱ جرم خورشید) به طور یکنواخت بر روی سطح دایرة البروج به دست می‌آید (10^{-11} گـرم در سانتیمتر مکعب) ، مکسول چنین یافت که نیروی دوران متفاوت هـر چگالشی را ، به محض آغـاز تشکیل آن، در هم خواهد شکست. ضمناً وی توانست نشان دهد که چگالشهای گرانشی هرگز نتوانسته‌اند ظاهر شده باشند مگـر آنکـه مقدار مواد موجود در قرص دست‌کم صد برابر جرم همهٔ سیارات بوده باشد.

این تناقض ظاهـری دانشمندان کیهانـزایی را وادار به تـرك

۱ــ از لحاظ ریاضی، این چگالش بحرانی به وسیلهٔ فرمول $\rho = w^2/G$ به دست می‌آید که در آن w سرعت زاویه‌ای دوران و G مقدار ثابت گرانش نیوتنی است.

نظریات کانت و لاپلاس کرد، و آنان را به فرضیهٔ تصادم اولیهٔ بوفون بازگرداند که در آن ستارهٔ دنبالـه‌دار جای خود را بـه یك ستارهٔ رهگذر داده بود. ولی این فرضیهٔ تصادم دوباره جوان شده، که هم‌ـ زمان به وسیلهٔ سرجیمزجینز در انگلستان و فارست ری مولتن[1] و تامس ث. چیمبرلین[2] در ایالات متحده بسط یافت، هنوز هم گرفتارمشکلات عمده‌ای است، و هرگز نتوانسته است پیشرفت بیشتری به دست آورد. بـالاخره در اواخر جنگ جهانی دوم این تناقض را فون وایتسزکر حل کرد، بدین ترتیب که نشان داد که ایراد قدیمی مکسول دیگر از لحاظ اطلاعات پیشرفتهٔ ما در بارهٔ ساخت شیمیایی مادهٔ کیهانی معتبر نیست. چون مدارك و اطلاعاتی که بتواند این فـرض را رد کند در دست نیست، بنا بر عادت چنین فرض می‌شود کـه خورشید، دیگـر ستارگان، و مـواد بین اختری اکثراً شامل آهن، سیلیسیوم، و دیگر «عناصر زمینی» عیناً مانند زمین می‌باشند. این نظریات اکنون کامـلا تغییر یافته (به فصل سوم مراجعه شود) و می‌دانیم که «عناصر زمینی» تنها قریب یك در صد کلیهٔ ماده را تشکیل می‌دهد، در حالی که بقیهٔ ماده اصولا مخلوطی از ئیدروژن و هلیوم است. موادی کـه سیارات از آن ساخته شده‌اند تنها در حدود ۱/۱۰۰ کل مواد اولیهٔ قرص را نشان می‌دهد، و بدین ترتیب جرم پیشین قرص ۱/۱۰۰ جرم خورشید به ۱/۱۰ بالا می‌رود. ایـن امر موجب رسانیدن چگالی قرص اولیه درست به مقداری است که بنا بر فرضیهٔ مکسول چگالش گرانشی را، با وجود نیروهای متفاوت، امکانپذیر خواهد ساخت.

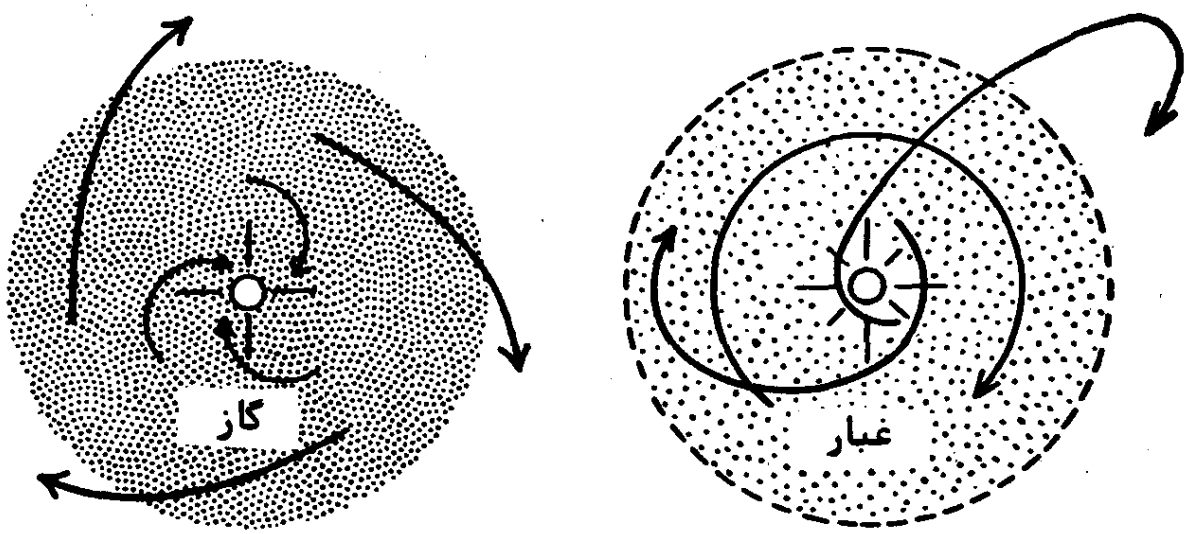
اختلاف میان فرضیهٔ قدیمی کانت ـ لاپلاس و نظریهٔ پیشنهادی

1_ Forest Ray Moulton

2_ Thomas C. Chamberlin

فون وایتسزکر در شناسایی رفتار اصولاً متفاوت قسمتهای گازی ـ ئیدروژن ـ هلیوم ـ قرص و قسمت غباری ذرات جامد «مواد زمینی» می‌باشد که با موادی که اکنون در ابرهای غباری بین اختری می‌یابیم یکی هستند (شکل ۳۰). غلاف گاز اصلی، به سبب لزوجت گاز، تمایل بر این داشتند که همچون جسم سختپایی دوران کنند، یعنی با سرعتهای خطی متناسب با فاصلهٔ آن تا خورشید. این حرکت چنان سرعتهای عظیمی به قسمتهای خارجی آن خواهد داد که نیروهای گرانشی خورشیدی دیگر قادر به نگاه داشتن آنها نباشند، و درنتیجه در فضا پراکنده شوند. از طرف دیگر، حرکت قسمت داخلی قرص کند شده و مواد آن با پیمودن مسیرهای مارپیچی به درون خورشید خواهند افتاد. درنتیجه غلاف گازی اصلی باید بتدریج پراکنده و نابود شده باشد. با محاسبه می‌توان به‌دست آورد که جرم غلاف در هر پنج میلیون سال نصف شده، و از این رو پس از قریب ۲×۱۰^{۸} سال چگالی آن از مقدار اصلی $۱۰^{-۹}$ گرم در سانتیمتر مکعب به مقدار بسیار کوچکتر $۱۰^{-۲۲}$ گرم در سانتیمتر مکعب تقلیل یافته است. می‌توانیم مشاهده کنیم که غلاف گازی خورشید، با آنکه نقش عمده‌ای در سیاره سازی ایفا کرده، باید مدتها پیش از زمان ما کاملا از میان رفته باشد.

ولی سرنوشت ذرات غبار در قرص اولیه با سرنوشت مولکولهای گاز کاملا متفاوت بوده است. این ذرات چون کوچك و سنگین بوده‌اند باید بیشتر مانند سیارات امروزی حرکت کرده و مدارهای بیضی شکل گوناگونی حول مرکز خورشید رسم کرده باشند. اما چون تعداد چنین ذراتی باید فوق‌العاده فراوان بوده باشد ($۱۰^{۳۰}$ ذره در هر وزن چند گرمی)، رفت و آمد باید بی اندازه



شکل ۳۰ ــ رفتار ذرات گاز و غبار در سحابی شمسی اولیه ، بنا بر نظر فون وایتسزکر

سخت و تصادم میان ذرات بسیار فراوان بوده باشد . وقتی دو ذرهٔ تقریباً هم اندازه با سرعتهای شهابی تصادم می کنند ممکن است انتظار خرد شدن کامل هر دو برود ، یا تا حدی تبدیل به بخاری شوند که بعداً دوباره به صورت دانه‌های غبار ذره بینی در آیند ؛ ولی وقتی که ذرهٔ کوچکی به ذرهٔ بزرگتری برمی‌خورد به آن می‌چسبد و، بنابراین، بر جرم آن افزوده می‌شود . نتیجهٔ این رویدادها باید تشکیل قطعات بزرگتر و بزرگتری از مواد جامد بوده باشد که فضای اطراف خود را روفته و قطعات کوچکتر را به‌خود جذب می کرده‌است. در حالی که اجماعات اولیهٔ غبار منحصراً به وسیلهٔ تصادمهای کامل مستقیم میان ذرات حاصل شده‌باشد، لاجرم قطعاتی بزرگتر ازحجمی نسبتاً بزرگ باید شروع به جذب ذرات کوچکتر به وسیلهٔ گرانش واقعی کرده و در نتیجه مواد را از فضای نسبتاً پهناوری گرد آوری کرده باشند . این وضع شبیه به توسعهٔ انحصارات عظیم صنعتی است که شرکتهای کوچکتر را در خود فرو می‌برند ، ولی چون قانون ضد تراست در عالم وجود ندارد ، این جریان ادامه دارد تا وقتی چند

«همکار بزرگ» باقی بمانند ـ که بقدری از یکدیگر دور و جدا هستند که دخالتی در کار هم ندارند .

فرایند اجماع غبار باید هماهنگ با پراکنده شدن قرص گازی پیش رفته باشد ، و در حقیقت مقیاسهای زمانی این دو نظیر هم بوده است : زمان لازم برای آنکه ذرات ذره‌بینی اصلی بـه بزرگی دانـهٔ ریگی شوند (به قطر یك سانتیمتر) باید فقط چند سالی باشد ، و برای ساخته شدن سیارهٔ بزرگی چون مشتری قریب 10^8 سال لازم بوده است . جرم سیارات فردی بـاید به وسیلهٔ مقدار کل مواد موجود در نواحیی که در آنجا تشکیل یافته‌اند مشخص شده باشد، به طوری که چنین باید انتظار داشت که بزرگترین سیارات تقریباً در نیمه راه میان خورشید و لبهٔ خارجی قرص آشکار شده بـاشند ؛ نـزدیك خورشید چگالی ممکن است بالا باشد ، ولی حجم فضای قابل استفاده بی‌اندازه کوچك است ، و در کناره ، با آنکه فضای وافر وجود دارد ، چگالی بی‌اندازه پست می‌باشد ، این عقیده با حقیقت مشهودی که سیارات درونی و بیرونی (عطارد ، ونوس ، زمین ، مریخ و پلوتـون بسیار کـوچکتر از سیارات وسطی (مشتری ، زحل ، اورانـوس و نپتون) هستند ، کاملا سازگار است .

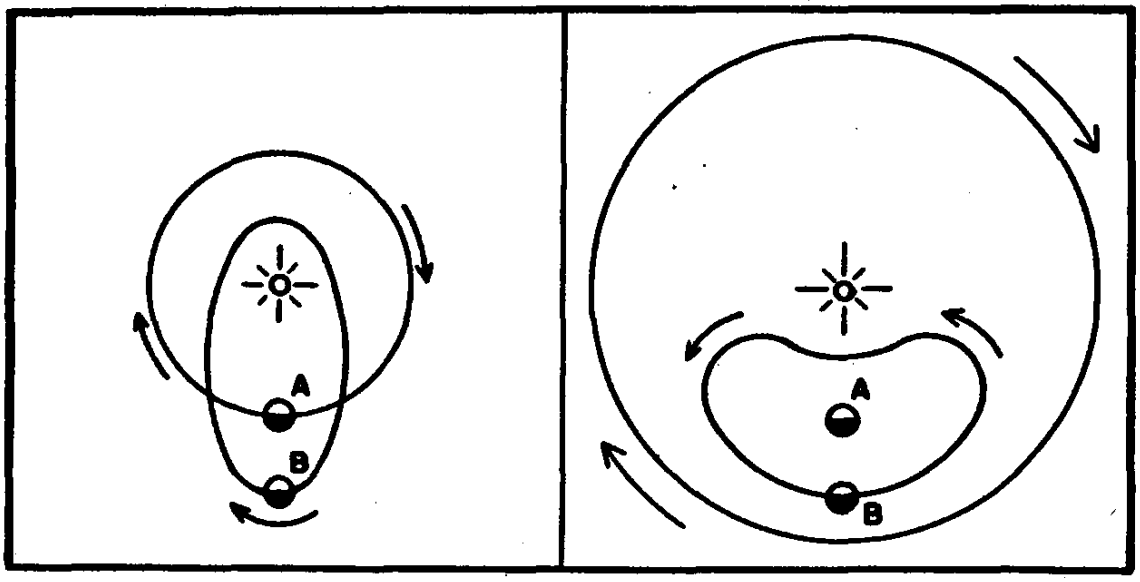
اگر بنا باشد به جزئیات تشکیل سیارات وارد شویم ، یکباره در دریای ژرفی فـرو خواهیم رفت ، چون ترکیب حرکت جرمهای گازی و ذرات غبار در حال رشد باید بسیار پیچیده باشد . شایستگی عمدهٔ تئوری وایتسزکر در این است کـه نقش مهم حرکت گردابی را شناخته است . شرایط لازم برای وجود جریـان نـاپیوسته دور از این است کـه در مواد قرص گازی صدق کند ، به طوری که حرکت باید بـه گردابهای متعددی خرد شده باشد . ایـن وضع شبیه وضعی

است که منجر به تشکیل ستارگان در کهکشانـه‌های ابتدایی گازی اولیه شده است . ولی تفاوت عمده‌ای که میان این دو موجود بوده آن است که گردابهای درون کهکشانه‌های ابتدایی تنها بـه انـدازهٔ جزئی از یك درصد ضخامت کل کهکشانی هستند . ولی در سحابی شمسی کوچکترین گردابهایی کـه از لحاظ گرانش پایدارنـد باید حجم قابل مقایسه‌ای با ضخامت کل قرص گازی داشته باشند بنابراین ابرهای کهکشانی اولیه به بیلیونها ستارد شکسته شدد ، در حالی که مواد قرص خورشیدی تنها به کمتر از ۱۲ سیارد حیات بخشیده‌اند .

فون وایتسزکر ، و پس از وی **تر هار**[1] و **چاندراشکهر و کویپر** ، پیشرفت قابل توجهی در فهم مربوط به حرکت گردابی در سحابی شمسی به دست آوردند . نتایجی را کـه آنان به دست آوردند فقط بـه یك صورت بسیار کلی می‌توان در اینجا توصیف کـرد . کلید معرفت برای حرکت مختلطی که وقوع یافته در برگزیدن یك گروه از ذراتی قـرار دارد کـه دوره‌های دوران آنها تقریباً یکسان بـاشد (همچنین با فواصل متوسط متساوی تا خورشید) و حرکت آنها در دستگاه مختصاتی مورد توجه قرار گیرد که حول مرکز خورشید، با همان دورهٔ دوران ، حرکت می کند. چون از چنین دستگاه مختصاتی دوارنگاه کنیم، آن ذرات که با سرعت ثابت برمسیرهای دایره شکل در حرکتند بیحرکت بـه نظر خواهند رسید ؛ ولی ذراتی کـه بـر مدارهای بیضوی در حرکتند وقتی نـزدیك خورشید بـاشند جلو و وقتی از آن دور هستند عقب می‌افتند . ایـن ذرات چـون از چنین دستگاه مختصاتی نظاره شوند منحنیهای مسدودی ترسیم می کنند که هرچه مدارها کشیده‌تر باشد حجم آنها بزرگتر است . این وضع که

1 _ Ter-Harr

با «اپیسیکلها»ی نجوم قدیم مشابه است در شکل ۳۱ نشان داده شده است . در طی زمان ، حرکت ذرات متعدد غبار به سوی حالتی میل می‌کند که با حداقل تعداد تصادمات متمایز است . چنین حالتی در



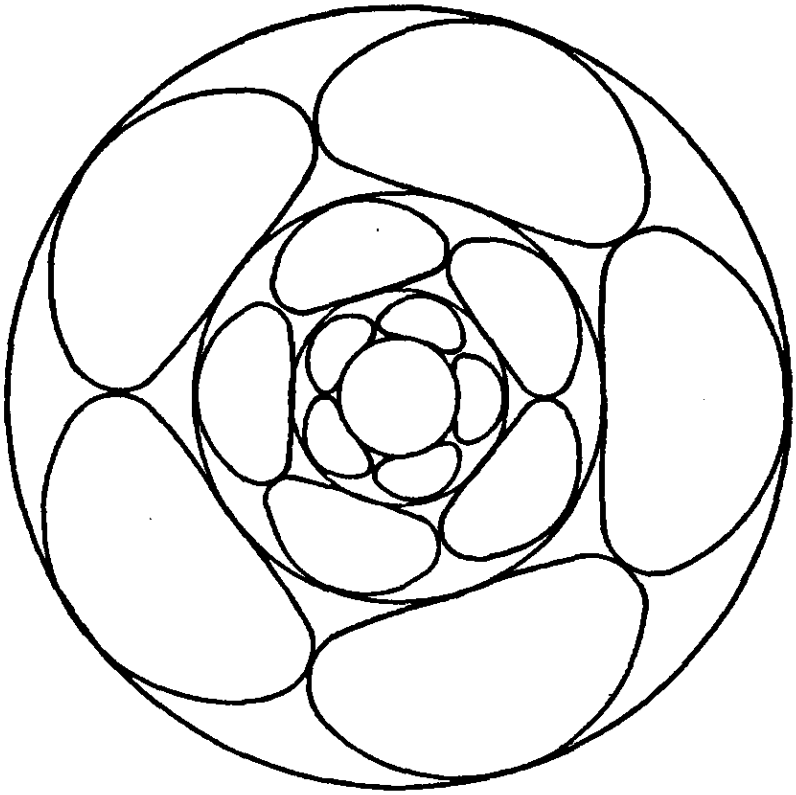
شکل ۳۱ ــ چگونه یك حرکت دورانی (A) و یك حرکت بیضوی (B) مربوط به یك ذرهٔ غبار از نظر یك دستگاه مختصات دوار ، با همان دورهٔ تناوب دیده می‌شوند .

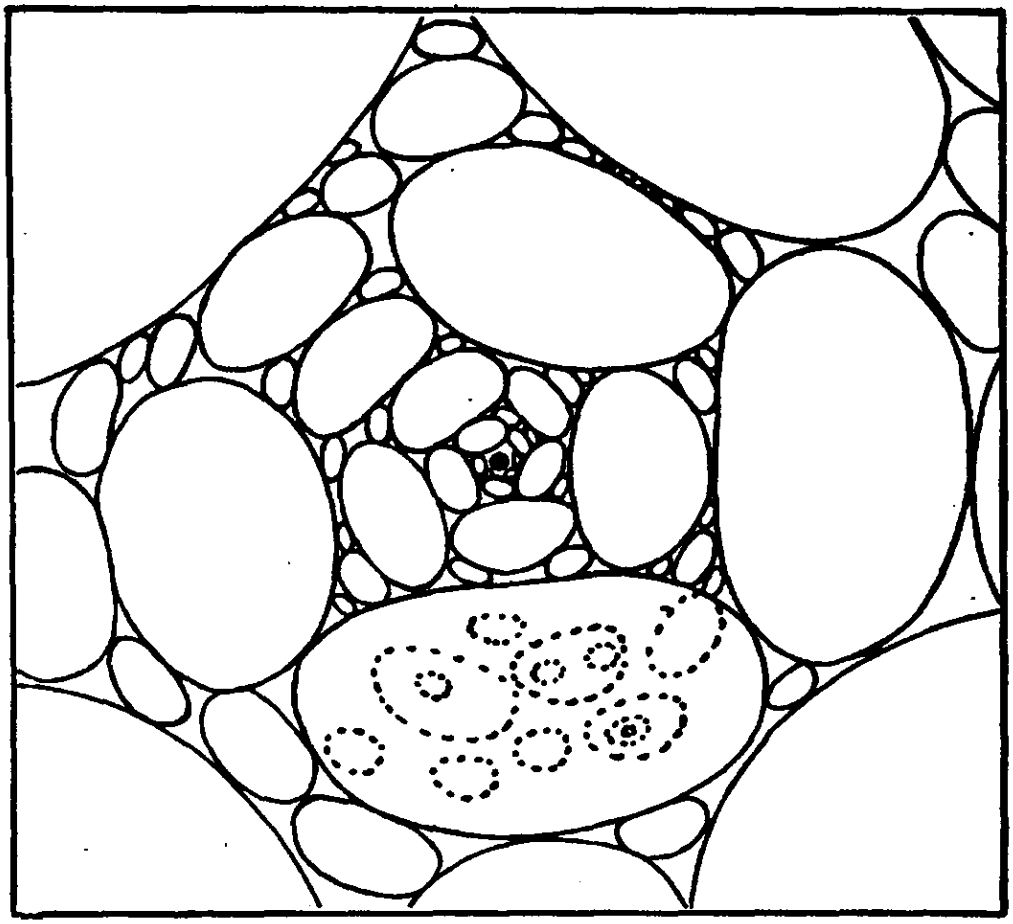
دستگاه مختصات دوار ما می‌تواند به وسیلهٔ نمونه‌ای از اپیسیکلهای غیر متقاطع نمایش داده شود که بعضی از آنها درون دیگری قرار گرفته‌اند . هر گروه ذرات که متعلق به منظومهٔ متحدالمرکزی از این اپیسیکلها هستند نشانه گردابی در میان سحابی خورشید است ، یا به عبارت دیگر ، گرداب آشفته‌ای است . چون ما تنها ذراتی را انتخاب کرده‌ایم که دارای دوره‌های تناوب و فاصلهٔ متوسط از خورشید هستند ، این نمونه شبیه طوقی است که از صدفهای پهن ساخته شده باشد . طوقهای مدور فراوانی از این قبیل وجود دارند که یکی درون دیگری قرار گرفته و با دوره‌های تناوب مختلف دوران می‌کنند ؛

کوچکترین دوره‌های تناوب نزدیك به خورشید و بزرگترین آنها دور از آن می‌باشند. شکل ۳۲ تصویر اولیهٔ (بالای شکل) فون وایتسزکر و منظومهٔ بسیار پیچیده‌تری را نشان می‌دهد که توسط کویپر، با حجمهای گردابی اتفاقی، که طرز توزیع آن مطابق با قانون آشفتگی کولموگوروف است، ساخته شده (پایین شکل). تنها گردابهای بزرگ می‌توانند به وسیلهٔ نیروی گرانش نیوتنی به هم نگاه داشته شوند و، بنابراین، درون این گردابها فرایند اجماع غباری به میزان سریعی ادامه خواهد یافت که در نهایت به رشد سیارات منجر شود. با مطالعهٔ مشروح خواص سحابی اولیهٔ خورشیدی و حرکت ناشی از گردش آن، ممکن است ابعاد صحیح سیارات مختلف منظومهٔ شمسی را به دست آورد. همچنین ممکن است تعبیر معقولی از قانون معروف «بود ـ تیتوس»[1] در بارهٔ فواصل سیارات به دست آورد، که بیان این قانون چنین است: درون خانوادهٔ سیارات (با توجه به اینکه خرده سیاره‌ای که میان مریخ و مشتری می‌گردد بقایای سیارهٔ کهنسالی در نظر گرفته شده) فاصلهٔ هر یك از افراد خانواده از خورشید تقریباً دو برابر فاصلهٔ فرد ما قبل آن است.

در اینجا مورد ندارد که وارد جزئیات بیشتر این تئوری بشویم. از این رو تنها به ذکر چند نتیجهٔ جالب آن می‌پردازیم. نخست، همان طور که در فصل سوم ذکر شد، چنین فرایند تشکیل به سازمانهای شیمیایی گوناگون برای سیارات کوچکتر و بزرگتر منجر می‌شود. در حالی که سیارات «کناره» (از عطارد به مریخ از داخل، و پلوتون از خارج) هرگز آن اندازه حجیم نشدند که گاز بین اختری بیشتری جذب کنند، و از این رو اصولا با ساختمان

1 ـ Bode - Titus





شکل ۳۲ــ گردابهای آشفته در سحابی شمسی، (قسمت بالا) بنا بر تئوری بدیع فون وایتسزکر، (قسمت پایین) بنا بر نظریهٔ کوپیر.

صخره‌ای به جا ماندند ، سیارات «نیمه راه» (مشتری ، زحل ، و به میزان کمتر اورانوس و نپتون) از ابعاد محدود تجاوز کرده و توانسته‌اند به وسیلهٔ گرانش قسمتی از مواد قشر گازی اولیه را ، پیش از آنکه در فضای اطراف پراکنده شود ، جذب کنند (به صفحه تصویر III مراجعه شود که درون ساختمان درونی بیشتر نشان داده شده) .

سیاره‌ای که باید زمانی میان مریخ و مشتری وجود می داشت از قرار معلوم در گذشته پاره پاره شده (شاید به واسطهٔ نیروهای کشندی مشتری) ، و پاره‌های آن، که اکنون در نزدیکی مدار سابق در حرکت می‌باشند، طوق خرده سیارات را تشکیل می‌دهند. بعضی پاره‌های متعلق به طوق خرده سیارد که جسورانه از قلمرو خود خارج و دور می‌شوند تصادفاً به صورت احجار سماوی بر سطح زمین سقوط می کنند. ساخت شیمیایی احجار سماوی بشدت نشان می‌دهد که مواد آن باید در فشارهای بسیار زیاد، نظیر فشارهای درون یك سیاره، منجمد شده باشد.

چنین ارتباط آشکاری به هیچ وجه در دیگر افراد منظومهٔ شمسی، یعنی ستارگان دنباله‌دار، وجود ندارد. گرچه ستارگان دنباله‌دار تقریباً پرجلوه‌ترین اجسامی هستند که می‌توان با چشم غیر مسلح در آسمان رؤیت کرد، قسمت بسیار ناچیزی از منظومهٔ شمسی اولیه درست شده و اکثر از ترکیبات شیمیایی عناصر سبك از قبیل آب و امونیاك و ئیدروکربورهای گوناگون تشکیل یافته‌اند. شاید در حدود بیست بیلیون ستارهٔ دنباله‌دار درون کره‌ای به قطر قریب سه سال نور در حرکت باشند (اکثر آنها بسیار بسیار دور از مدار پلوتون) . ولی چون جرم یك ستارهٔ دنباله‌دار متوسط فقط 10^{16} گرم است، جرم همهٔ

آنها تنها قریب ۱/۱۰ جرم زمین است. ستارگان دنباله‌دار تصادفی از این مخزن عظیم به نزدیکی خورشید می‌آیند و در اثر تشعشعات آن دنبالهٔ زیبایی تشکیل می‌دهند که در میان بومیان خرافاتی افریقا ایجاد وحشت و هراس کرده و داستانهایی عجیب و غریب دربارهٔ بد ـ رفتاری اجسام سماوی، نظیر داستان ایمانوئل و لیکوفسکی الهام می‌کنند.

در پایان باید متذکر شویم که، با استثنای احتمالی در باب کرهٔ ماه خودمان (فصل اول)، اقمار منظومهٔ سیاره‌ای به طریقی بسیار مشابه، اگر نه یکسان، با طریقهٔ تشکیل خود سیارات درست شده‌اند.

بنا بر این نظریات، بر خلاف تئوری کهنهٔ تصادم، باید چنین انتظار داشت که برای هر ستاره کاملا این احتمال وجود داشته که برای خود یك منظومهٔ سیاره‌ای فراهم سازد. و البته رصدگیری نشان می‌دهد که ممکن است واقعاً چنین بوده باشد. مطالعات مشروحی که در بارهٔ حرکت اختصاصی ستارگان نزدیك، همچون ستارهٔ بارنارد (به فاصلهٔ ۶،۱ سال نور) و دجاجه ۶۱ (به فاصلهٔ ۱۱ سال نور)، توسط وان د کمپ[1] در رصدخانهٔ سیرول و به وسیلهٔ استراند[2] در دانشگاه نورثوسترن انجام گرفت نشان داد که حرکت آنها در فضا خط کاملا مستقیم نیست. این حقیقت وجود رفیقی نامرئی را نشان می‌داد، ولی انحرافات مشهود از خط مستقیم به اندازه‌ای خفیف است که جرم این رفیق نامرئی نمی‌تواند از جرم مشتری بزرگتر باشد. میزان بزرگی آن به میزان عظمت اختری بیشتر نزدیك است تا به بزرگی

1— van de Kamp
2— K. A. G. Strand

سیارات. علاوه‌بر این، کاملا امکان دارد که این ستارگان دارای سیارات کوچکتری شبیه زمین ما باشند، ولی دقت اندازه‌گیریی که در حال حاضر به دست آوردنی است به اندازه‌ای نیست که بتواند آنها را کشف کند.

فصل پنجم

زندگیهای خصوصی ستارگان

همزیستی اختری

در فصل چهارم رشتهٔ چگالشهای متوالی را، به هر طریق، از کهکشانه‌های ابتدایی اولیه به ستارگان فردی و سیارات و اقمار آنها مورد بحث قرار دادیم. حقیقتی که تاکنون به آن توجه نشده این است که ستارگان فردی، مانند خورشید خودمان ـ با یا بی منظومه‌های سیاره‌ای ـ بیشتر جنبهٔ استثنایی نسبت به قانون کلی دارند. قریب ۸۰ درصد کلیهٔ ستارگان را ستارگان بستایی ـ بالاخص عمدتاً دوتایی ولی در بعضی موارد ستارگان سه‌تایی یا چهارتایی[1] ـ تشکیل می‌دهند. در نتیجه مسئلهٔ ستارگان بستایی در هر نوع تئوری مربوط به مبدأ و تحول اختری اهمیت اصلی به خود می‌گیرد.

ستارگان دوتایی را منجمان به دوتایی «مرئی» و «طیفی» و

۱ـ فقط در حدود بیست درصد ستارگان فهرست شده در ردیف ستارگان بستایی قرار گرفته‌اند. ولی این امر احتمالاً مربوط به انتخاب رصدی است.

«گرفتی» طبقه‌بندی می‌کنند. ولی این طبقه‌بندی به رصد بیشتر مربوط است تا به طبیعت حقیقی جفتهای ستاره. هرگاه دوستاره نسبت به فاصله‌ای که از ما دارند به اندازهٔ کافی از هم دور باشند، به صورت مجزا از یکدیگر مشاهده شوند، چنین جفتی را جفت مرئی می‌نامند. در چنین موردی می‌توان حرکات مداری آنها را مشروحاً مطالعه کرد و حداکثر اطلاع را دربارهٔ خواص مکانیکی مجموعه به دست آورد. ولی اگر دو مؤلفهٔ یك جفت ستاره بسیار به هم نزدیك، یا هرگاه مجموعهٔ جفت بسیار دور باشد، رصد تلسکوپی تنها یك نقطهٔ روشن را نشان خواهد داد، و کیفیت جفت بودن ستاره فقط به‌وسیلهٔ طیفنما می‌تواند کشف شود. مؤلفهٔ A در طی نیمی از دورهٔ دوران خود به سوی ما حرکت می‌کند و در نیم دیگر از ما دور می‌شود؛ و مؤلفهٔ B هنگامی که A به سوی ما حرکت می‌کند از ما دور می‌شود و بالعکس. بنا بر این، هر یك از خطوط طیفی ستاره یك انتقال متناوب «دوپلری» نشان خواهد داد. این انتقال خطوط طیفی مستقیماً دورهٔ تناوب دوران مؤلفه‌ها و سرعتهای مدار آنها، یا به عبارت دقیقتر تصویر هندسی حرکت مداری را بر روی خطوط نور به ما می‌دهد. بنا بر این، طیفنما در مورد این گونه ستارگان دوتایی طیفی، نه تنها حقیقت جفت بودن ستاره را آشکار می‌سازد بلکه همان اطلاعاتی را که از طریق رصد برای جفتهای مرئی به دست می‌آید برای ما فراهم می‌سازد.

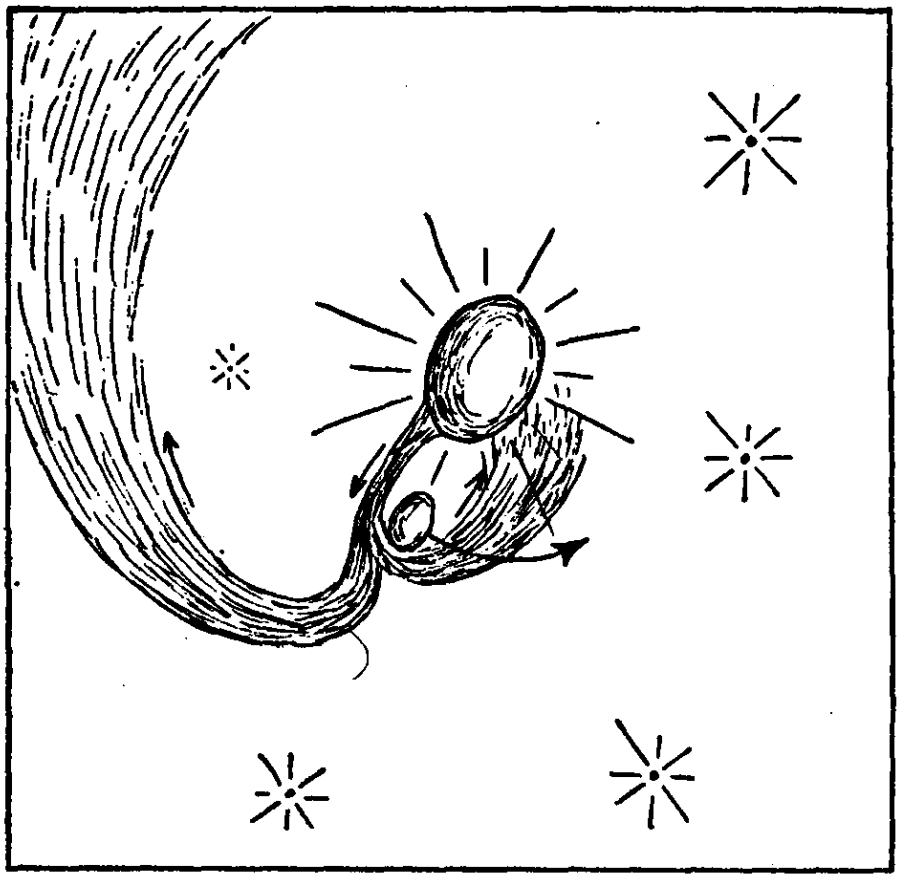
در موارد استثنایی ممکن است اتفاق افتد که یك ستارهٔ دوتایی طوری در فضا قرار گرفته باشد که خط نور صادر از زمین با سطح حرکت مداری مؤلفه‌های آن تقریباً منطبق باشد. دراین حالت دوستاره متناوباً یکدیگر را کسوف می‌کنند و بدین ترتیب **اطلاعات اضافی**

دربارهٔ ابعاد قرصها و اغلب دربارهٔ جو خود فراهم می‌سازند.

از نظر سیر تحولی اختری ، ستارگان دو تایی تنها در مواردی دارای اهمیت خاص هستند کـه فاصلهٔ میان دو رفیق بـه اندازهٔ کافی کوچك بـاشد ـ فاصله‌ای در حدود اقطار آنها ـ تا تأثیرات متقابـل فیزیکی میان جوهای آنها تولید کند . مثال نمونه‌ای از این جفتهای نـزدیك یا «در تماس» ، دومین درخشنده‌تریـن ستارهٔ صورت فلکی شلیاق ـ بتاشلیاق ـ است کـه از یـك ستارهٔ غولپیکر آبی و رفیقی بسیار کوچکتر و مایل به زرد تشکیل یـافته است . فاصلهٔ میان ایـن دو ستاره تقریباً مساوی قطر مؤلفهٔ اصلی می‌باشد. شکل ۲۳ که مبتنی بـر نتایج رصدی حـاصل توسط اوتـو شتروو[1] و مطالعات نظـری جرارد پ . کویپر است نشان می‌دهد که در نتیجهٔ گرانش نیوتنی در طبقات خارجی این ستارگان چه رخ داده است . به نظر چنین می‌رسد که جریان عظیمی از گاز داغ سطح ستارهٔ بزرگتر را ترك و با سرعت متوسطی در حدود ۳۰۰ کیلومتر در ثانیه به سوی رفیق کوچکتر خود حرکت می‌کند . ولی بـه سبب حرکت دورانی مجموعهٔ کامل ، این جریـان بدون آنکه بـه هدف خود بـرسد از عقب ستارهٔ کوچکتر گذشته و در عین حال در اثر میدان گرانشی آن از مسیر خود منحرف می‌شود . در هر حال قسمتی از جریان در طول مسیر خم شده و به منبع اصلی خود باز می‌گـردد . ولی قسمتهای تندرو جریـان آشکارا در فضا پرتاب شده و در امتداد مسیری مارپیچی کـه تدریجاً توسعه می‌یابد حرکت می‌کنند . شاید بـرخی از این مواد بـه وسیلهٔ مؤلفهٔ کوچکتر جفت جذب ، و منجر به افزایش تدریجی جرم آن شده باشد.

1 — Otto Struve

در وضع کنونی اطلاعات ما ، بیان اینکه آیندهٔ تکاملی این جفت و منظومه‌های کوچکتر چه خواهد بود دشوار است . بالاخص اینکه هنوز رصدگیری نتوانسته است آشکار سازد که آیا چنین مبادلهٔ موادی میان دو ستارهٔ یك جفت نزدیك به هم منجر به افزایش یا



شکل ۳۳ ــ دفع مواد گازی به وسیلهٔ «بتا شلیاق» بنا بر نظر شترووه وکوپر

کاهش فاصلهٔ بین آنها خواهد شد . اگر فاصله افزایش یابد ، ممکن است چنین انتظار داشت که از حجم جریان گاز بتدریج کاسته شده و سرانجام کاملا از میان برود . اگر فاصله کاهش یابد ، باید تماسی واقعی نیتجه شود که باعث به هم آمیختن ستارهٔ کوچکتر و بزرگتر و تبدیل آنها به جسم واحد شود .

با تمام اهمیتی که مبدأ منظومه‌های متعدد در کیهانزایی عمومی دارد ، متأسفانه با آنکه مساعی فراوان در این مسئله به‌کار رفته ، هنوز

تئوری رضایتبخشی بـرای بیان علت آن در دست نداریم ، بـه نظر بسیار محتمل می‌رسد کـه ایـن پدیـده به نحوی ارتباط بـه وجود سرعتهای زاویـه‌ای بسیار بـزرگ در مواد اصلی داشته بـاشد کـه ستارگان مجموعه از آن تشکیل یـافته‌اند. حقیقتی کـه وجود دارد این است که نسبت درصد ستارگان دو تائی در میان ستارگان متعلق به بازوان مارپیچی (سکنهٔ اختری نوع I) بسیار زیادتر از آن است کـه مابین ستارگان مسکون در ناحیهٔ تقریباً کـروی محیط بـر جسم کهکشانی مرکزی (سکنهٔ اختری II) یافت می‌شود.[1]

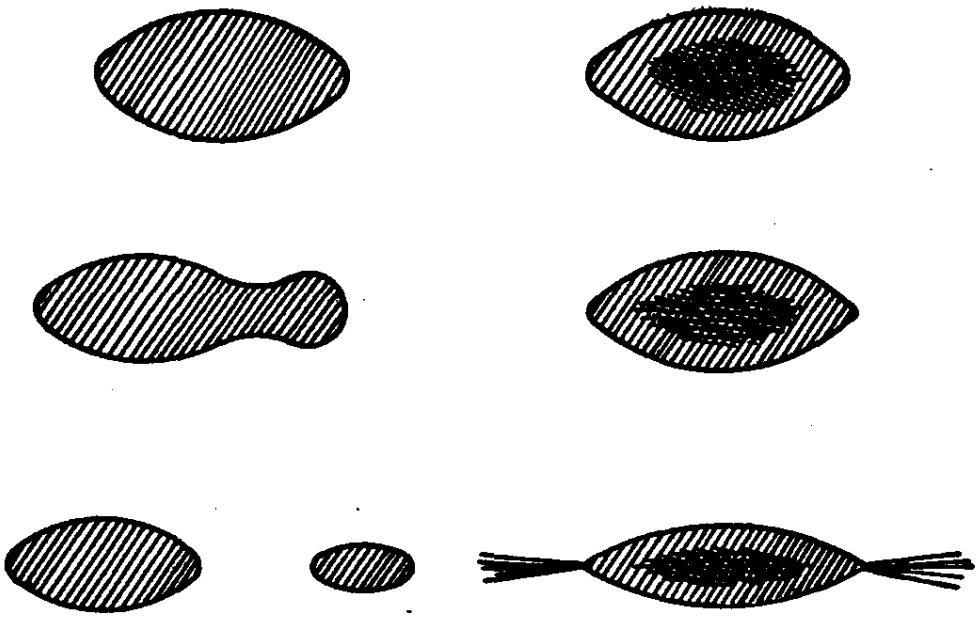
این فکر معقول به نظر می‌رسد که ستارگان دوتایی باید از راه شکافته شدن ستارگان فردی سریعاً دوار به‌وجود آمده باشند . حقیقت این است کـه وقتی ستارهٔ نوپدیدی منقبض و شعاع آن کوچکتر و کوچکتر می‌شود ، سرعت دورانی آن تـدریجـاً افـزایش یـافته و سرانجام مقداری بحرانی به دست می‌آورد کـه به ازای آن نیروی گریز از مرکز به اندازه‌ای شدید می‌شود که ستاره را پاره می‌کند ، و در نتیجه یك ستارهٔ دوتایی «در تماس نزدیك» تشکیل می‌دهد . از این پس سرگذشت ستارهٔ دوتایی به وسیلهٔ تأثیر متقابل گرانشی میان دو مؤلفه مشخص می‌گردد که ممکن است منجر به افزایشی یکنواخت در فـاصلهٔ میان آنها بشود . هـر چه دو ستاره به یکدیگر نـزدیکتر باشند این تأثیر متقابل شکل شکننده‌ای به خود می‌گیرد که شبیه است به آنچه در بارهٔ بتا شلیاق شرح داده شد . وقتی فاصله بزرگتر شود

۱ ــ همان طور که شکل ۲۷ نشان می‌دهد ، ستارگان اختری II ، به طور کما بیش یکنواخت در همهٔ جهات اطراف جسم مرکـزی پراکنده شده و اکثر حرکت شعاعی (به سوی مرکز یا طرف مقابل آن) دارند ، و دوران زاویه‌ای کوچك و اختلافات سرعت کم نشان می‌دهند.

نیروهای کشندی معمولی وجود خواهد داشت کـه نظیر نیروهایی است که ماه را از زمین دور ساخته‌اند (فصل اول).

ایراد اساسی وارد بر تئوری شکافتگی مبدأ ستارگان دوتایی در این واقعیت قرار دارد کـه چنین پاره پاره شدنی را نمی‌توان انتظار داشت که در ستارگان ، بـا طرز توزیع معمولی چگالیها در اجسام آنها ، وقوع یافته باشد . سر جیمز جینز از راه ریاضیات نشان داده که شکافته شدن یك جسم سریعاً دوار تنها هنگامی می‌تواند روی دهد که چگالی آن از مرکز تـا سطح تقریباً یکنواخت باشد . اگـر در ناحیهٔ مرکزی ماده تراکم مشخصی وجود داشته باشد ، فرایند پـاره پاره شدن جریان کاملا متفاوتی اختیار خواهد کـرد ؛ در ایـن حالت یك نوع برآمدگی مرکزی (استوایی) لب تیز در ستاره تکامل می‌یابد و مواد به صورت شاخهٔ نازکی از لبه خارج خواهد شد . اختلاف میان این دو حالت در شکل ۳۴ نمایش داده شده . می‌دانیم که همهٔ ستارگان معمولی دارای مراکز بسیار بسیار چگال هستند ؛ در نـاحیهٔ مرکزی خورشید چگالی قریب صد برابر چگالی متوسط آن است . همچنین موارد بسیاری از ستارگـان دوار مشاهده می‌شود کـه واقعاً مواد را از برآمدگی استوائی خود دفع می‌کنند . در ایـن صورت به نظر خواهد رسید که فرایند شکافتگی تعبیر قابل قبولی نباشد.

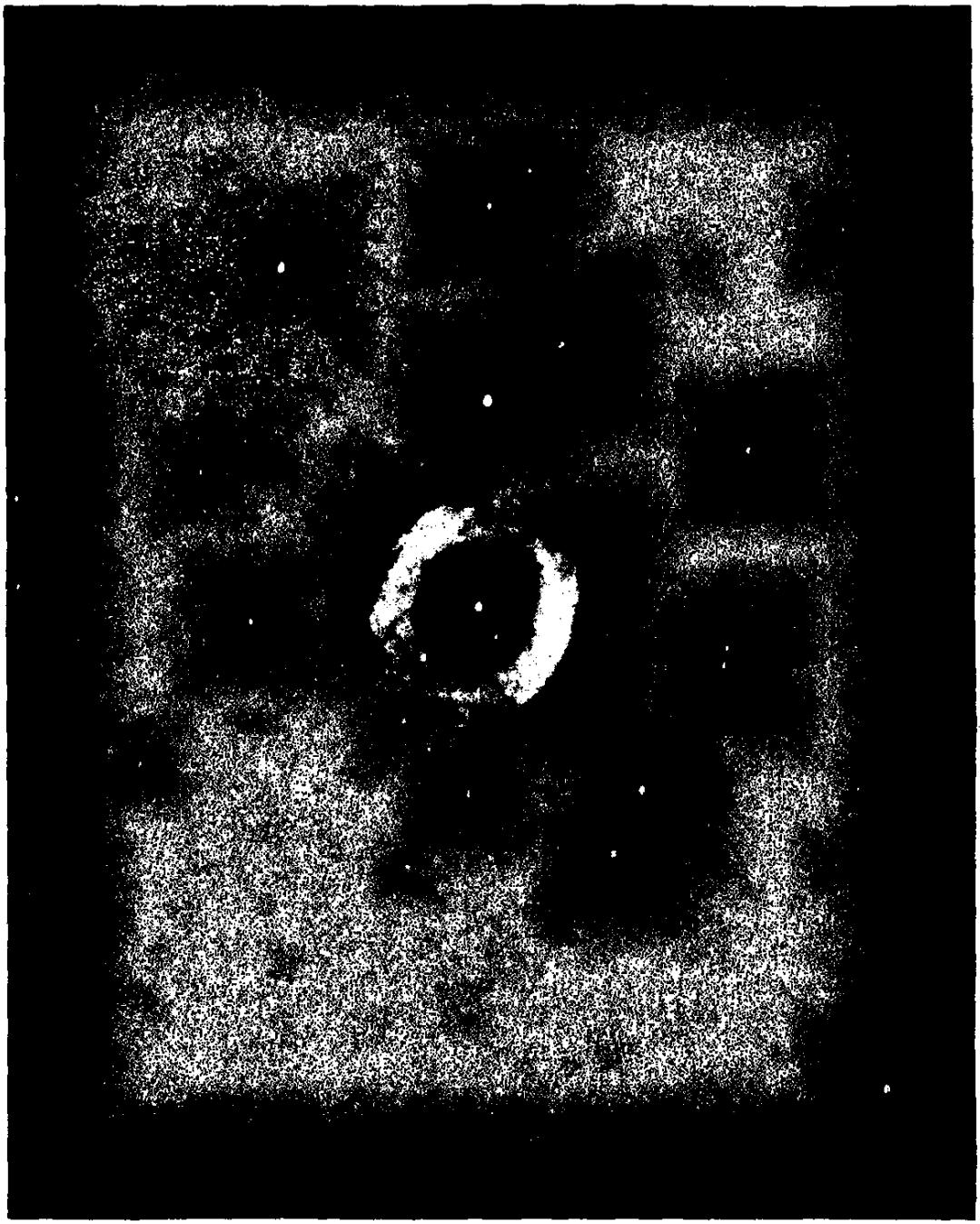
ولی کلیهٔ دانش ما مربوط به ستارگانی است که مدتها قبل تشکیل یافته و برای تعدیل کـردن طرز توزیـع مـاده در درون خود فرصت کافی داشته‌انـد . در بـارهٔ طرز توزیـع چگالی در ستارهٔ نوپدیـد ، بلافاصله پس از پیدایش آن از چگالش مواد پراکندهٔ گازی اولیه ، هیچ اطلاعی نداریم . چنین «ستارهٔ ابتدایی» ، وقتی بـه اندازهٔ کافی انقباض یافت که سرعت دورانی زیاد به دست آورده باشد ، ممکن



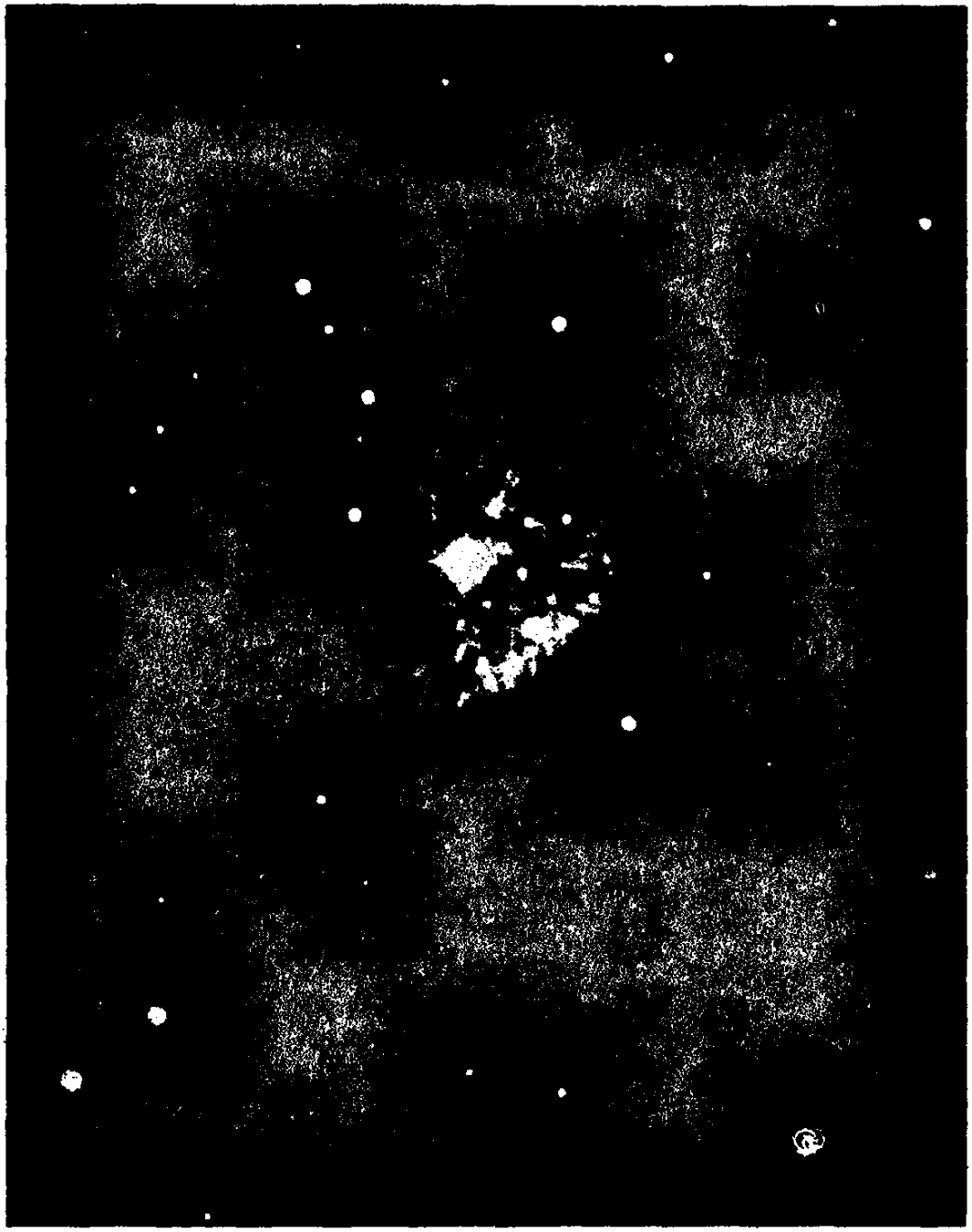
شکل ۳۴ ــ آنچه بـر سر یك ستارهٔ دوار آمده است ، سمت چپ شکل در مورد یك چگالی یکنواخت وسمت راست با یك چگالش مرکزی.

است هنوز توزیع جرم در درون آن به طرز یکنواختی باشد . در چنین شرایطی بازهم ممکن است فرایند شکافت روی داده و دو مؤلفه‌ای به وجود آورده باشد که بعداً با طرز توزیع چگالی متعارفی در جسم خود دو باره تعدیل شوند .

اشکالی که در مسئلهٔ مبدأ ستارگان دوتایی ، مانند بسیاری از دیگر مسائل کیهانزایی ، پیش می‌آید این است کـه هرگز احتمال مشاهده و رصد کـردن خود فرایند تشکیل ستاره بـرای مـا فـراهم نمی‌شود ؛ در اینجا بـا فراوردهٔ پایان یافته مواجه هستیم. بنابـراین، بسیاری از اجزاء مدارك مهمی را، که می‌تواند از طریق ارصاد تشکیل ستاره به دست آید، فاقد می‌باشیم. و تئوری ریاضی فرایندهایی را که می‌توان انتظار داشت که دریك جسم واسطهٔ آشفتهٔ گرانش‌دار روی داده باشد فوق العاده پیچیده و بغرنج و قسمت عمدهٔ آن از دسترس



صفحه تصویر VIII . «حلقهٔ سحابی» درشلیاق که یك سحابی سیاره‌ای معمولی است.



صفحه تصویر IX . سحابی گسترده‌ای که از انفجار نواختر برساووش نتیجه شده.

روشهای تجزیه و تحلیل معمولی خارج است . ولی می‌توان امیدوار بود که در آیندهٔ نزدیکی ، با استفاده از حسابگرهای الکترونی جدید، پیشرفتهای فراوانی به دست آیـد و با این حسابگرها بتوان مسائـل پیچیدهٔ ئیدرودینامیك را به همان آسانی حل کرد که دانش آموز با استعدادی یك مسئلهٔ معمولی جبر را می‌توانـد حل کند. وقتی چنین مطالعاتی کامل شد ضمناً بـه مـا خواهد گفت که چرا چگالش مـادهٔ پراکندهٔ اولیه در پـاره‌ای موارد منجر به تشکیل ستارگان دو تایی یا سه‌تایی یا بستایی شده ، در صورتی که دیگر موارد ستارهٔ فـردی یا یك منظومهٔ سیاره به وجود آورده است .

منابع انرژی هسته‌ای

وقتی که ستارگان، در آغاز کار، به‌وسیلهٔ چگالش «کهکشانه‌های ابتدایی» اولیه تشکیل یافتند، فقط کرات عظیمی از مواد گازی نیمگرم بودند که بـه تأنی منقبض می‌شدند. ولی در نتیجهٔ چگالش تدریجی و توأم با رهایی مقادیر فراوان انـرژی گرانشی، این کرات گازی‌بسرعت گرم‌شدند وسطوح آنها شروع‌به‌انتشار نور مرئی کرد. هر ستاره مسیر «تحول انقباضی» خود را، از مـرحلهٔ «حرارت قرمز» نسبتاً کمرنگی با تابناکی نسبتاً پست به سوی مـرحلهٔ بسیار نورانی سفید پیروی کرد. با توصیف خواص رصد پذیر ستارگان، عادت بر این است که نمودار معروف هرتسپرونگ ـ راسل را به‌کار برد (شکل ۳۵) کـه در آن تابناکی ستارگـان (یا بهتر بگوییم لگاریتمهای آن تابناکی) در مقابل رنگ آنها، آن طور کـه به وسیلهٔ دمای سطحی مشخص می‌شود، رسم شده است، در ایـن نمودار مسیرهای تحولی انقباضی بـه وسیلهٔ خطوط مستقیمی نمایش داده شده کـه از پایین

سمت راست آغاز شده به بالای گوشهٔ سمت چپ منتهی می‌شود.

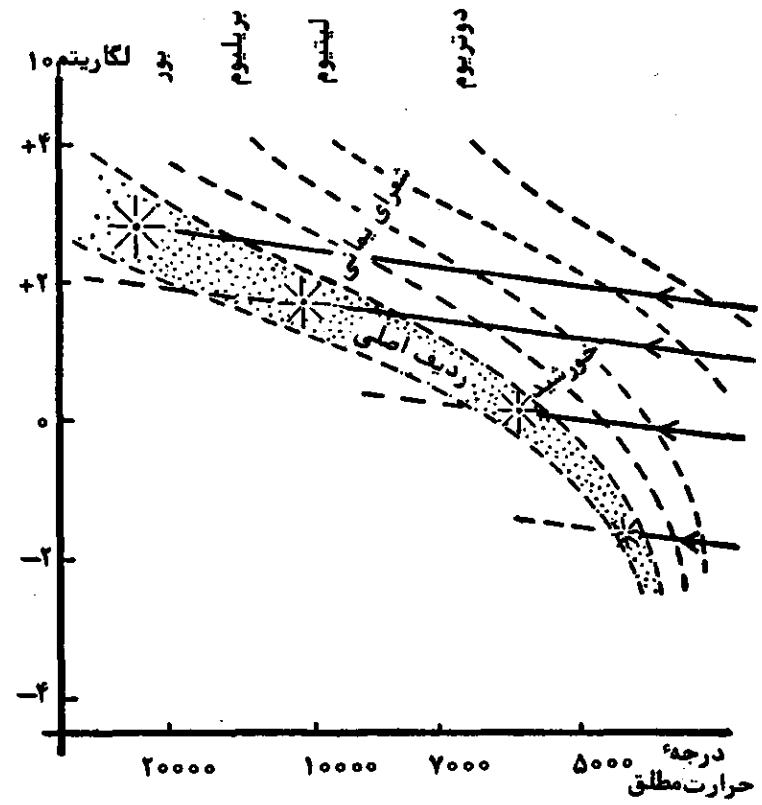
وقتی که ستاره‌ای به وسیلهٔ انقباض گرانشی تحول می‌یابد، دمای سطحی و تابناکی آن پیوسته و نسبتاً سریع با زمان افزایش می‌یابد. اگر مثلا وضع کنونی خورشید مرحله‌ای از چنین تحول انقباضی باشد، می‌توان انتظار داشت که تابناکی آن در هر ده میلیون سال دو برابر می‌شود؛ در نتیجه ده میلیون سال پیش مقدار تشعشع خورشیدی که بر سطح زمین می‌تابیده آن اندازه کافی نبوده که بتواند دماهای سطحی را بالای نقطهٔ انجماد آب[1] نگاه دارد. اگر این مطلب صحیح می‌بود، اقیانوسهای اعصار اولیهٔ زمینشناختی باید منحصراً از قطعات یخی تشکیل شده باشند که فقط در زمان نسبتاً تازه‌ای ذوب شده است.

ولی می‌دانیم که این موضوع نمی‌تواند درست باشد. مدارك دیرینشناسی نشان می‌دهد که دمای سیارهٔ ما، در دورهٔ دست کم یك بیلیون سال، بسیار نزدیك به مقدار کنونی باقی مانده، و این همان مدت زمانی است که برای توسعه و بسط اشکال حیاتی کنونی لازم بوده است. بنا بر این، ناگزیر باید چنین نتیجه گرفت که خورشید ما، و به قرار معلوم همهٔ ستارگان دیگر، دارای منبع دیگری سرشار از انرژی هستند که آنها را قادر می‌سازد که یك وضع موجود را مدتی طولانی نگاه دارند، و تردیدی نمی‌تواند وجود داشته باشد که

۱ ـ بنا بر قانون شتفان ـ بولتسمان دمای سطحی زمین (به مقیاس مطلق) همچون ریشهٔ چهارم تابناکی خورشید تغییر می‌کند. چون دمای کنونی خورشید در حدود ۳۰۰ درجهٔ مطلق است، دمای مربوط به نیمی از تشعشع کنونی خورشید چنین خواهد بود:

$$۳۰۰ : \sqrt[۴]{۲} = ۳۰۰ : ۱٫۲ = ۲۵۰ \text{ درجهٔ مطلق}$$

که کاملا زیر نقطهٔ انجماد آب است.



شکل ۳۵ــ نمودار هرتسپرونگ ـ راسل نمایشگر **رشتهٔ اصلی**، مسیرهای تحول انقباضی و « خطوط قابل توقف » مربوط به فعل و انفعال با عناصر سبک را نشان می‌دهد.

این منبع انرژی را باید در تبدیلات هسته‌ای جستجو کرد که در درون داغ ستارگان روی می‌دهد. به‌محض آنکه دمای مرکزی یك ستاره که بسرعت درحال‌تحول انقباضی است به «نقطهٔ افروزش» فعل و انفعالات هسته‌ای می‌رسد، انقباض متوقف می‌شود، و ستاره در وضع هسته‌ای تازهٔ موجود باقی می‌ماند تا سرانجام این منبع انرژی بیرون کشیده شود.

نمودار هرتسپرونگ‌ــراسل می‌تواند به ما نشان دهد که اغلب ستارگان موجود در امتداد نوار باریکی قرار گرفته‌اند که همچون رشتهٔ اصلی شناخته شده‌اند که در سراسر مسیرهای تحول انقباضی سیر می‌کند. پس این رشته باید ردیف و توالی نقاطی باشد که در

آنها منابع انرژی هسته‌ای برای ستارگان با جرمهای متفاوت به کار افتاده است. برای محقق ساختن اینکه چه نوع فعل و انفعال خاصی مسئول متوقف کردن انقباض است، باید دانست که چه نوع شرایط فیزیکیی در مناطق مرکزی ستارگان رشتهٔ اصلی وجود دارد، و این اطلاع به وسیلهٔ تئوری ساختمانی اختری فراهم می‌شود که توسط دانشمند نجومفیزیك سر آرثر ادینگتن [1] تکمیل شده است.

نظری اجمالی بر مسئلهٔ یافتن دماها و فشارهایی که درون ستارگان حکمفرماست مسلماً آن را بسیار دشوار می‌نمایاند. ولی در واقع اطلاعاتی‌را که می‌توان درباب ستاره‌ای که در چند صدسال نور از ما دور است به دست آورد بسیار وسیعتر و معتبرتر از اطلاعاتی است که راجع به قسمت درونی زمین، آن هم چند هزار کیلومتر زیر پای خود، در دست داریم. دلیل این امر آن است که زمین از جامدات و اجسام مذاب ساخته شده، در صورتی که ستارگان کلا و جملگی از گازهایی تشکیل یافته‌اند که تابع قوانین فیزیکی ساده‌تری هستند.

مواد گازی تشکیل دهندهٔ درون یك ستاره از لحاظ خواص فیزیکی خود حتی ساده‌تر از هوای جو است. اتمهای این گاز به سبب دماهای بی‌اندازه زیاد خود به هستهٔ اتمی برهنه و الکترونهای آزاد متلاشی شده‌اند. با دانسته‌های کنونی در بارهٔ فیزیك اتمی می‌توان مشخصات یك چنین گازی را با اطمینان و دقت فوق‌العاده پیشگویی کرد و فرمولهای ساده و معتبری برای خواص مکانیکی، بصری، و الکتریکی آنها استنتاج کرد. با در دست داشتن این فرمولها و آغاز کار در شرایط فیزیکی مشهود در سطح یك ستاره، می‌توان

1– Sir Arthur Eddington

شرایطی را که در طبقات درونتر آن حکمفرماست گـام به‌گام تعیین کرد و به ارقامی رسید که مربوط به دما و فشار و چگالی هستهٔ واقعی آن است. این محاسبات نخست برای خورشید خودمان انجام یـافته و نشان داده است که در مرکز خورشید باید در حدود بیست میلیون درجه و چگالی قریب صد برابر چگالی آب باشد[1]. بـا به کار بردن همین روش برای ستارگان رشتهٔ اصلی، ادینگتن چنین دریافت کـه ستارهٔ مورد نظر، خواه بسیار کمرنگ و خواه بسیار درخشان باشد، در هر حال دمای مرکـزی همیشه نـزدیك بیست میلیون درجه است. البته اختلافی میان ستارگـان کمرنگ و درخشان وجود دارد، ولی این اختلاف به طرز شگفت‌آوری خفیف است. این مقدار ۲۰ میلیون درجه آشکارا دمای افروزش فعل و انفعال حرارتی هسته‌ای را نمایش می‌دهد که تابناکی ستارگان رشتهٔ اصلی را پا بر جا نگاه می‌دارد.

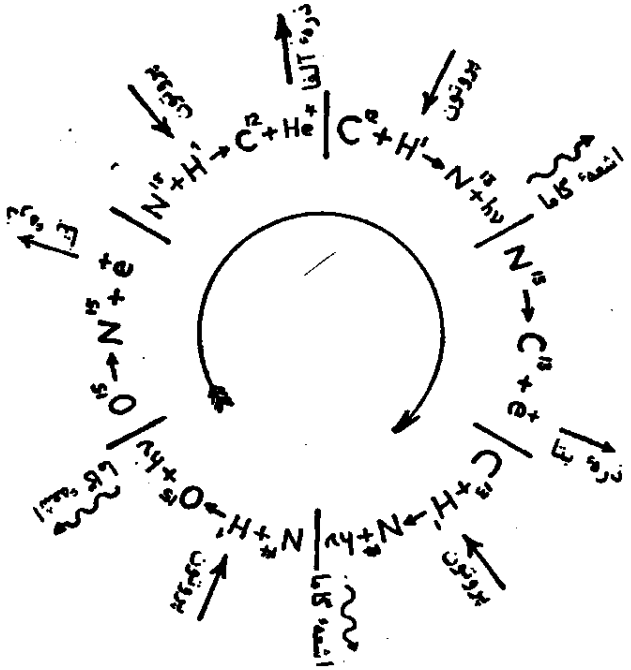
برای برقرار ساختن فعل و انفعال خاصی کـه در کار است و انواع عناصر شیمیایی کـه در آن سهیم هستند باید بـه نتایج فیزیك هسته‌ای، اختباری و نظری، هر دو، مراجعه کنیم.

چنین معلوم شده است کـه فعل و انفعال هسته‌ای وقتی روی می‌دهد که دو هسته با چنان سرعتی بـا هم برخورد کنند کـه برای نفوذ از سد دافعهٔ الکتریکی ناشی از بـارهای مثبت آنها کافی باشد. در نمونه‌های گوناگون اتمشکنهایی که در آزمایشگاههای فیزیك به

۱ــ خواننده نباید تعجب کند که موادی با چنین چگالی زیاد بازهم مانند گاز منظور شده است. مشخصات نمونه و کلی حالت گازی وقتی موجود است که فاصلهٔ میان ذرات بزرگتر از ابعاد آنها باشد. چون اتمهای مادهٔ درونی ستاره به ذرات بسیار کوچکتر پاره پاره شده (الکترون و هسته)، مواد در چگالیهای بالاتر به حالت گازی باقی می‌مانند.

کار رفته، این قبیل تصادمات پرسرعت را به وسیلهٔ ذراتی که حرکت آنها در میدانهای ولتاژ بلند تند می‌شود تولید کرده‌اند. این گونه تصادم در ستاره در اثر حرکت حرارتی شدید ذرات که ناشی از دماهای بسیار بالاست به وجود می‌آید. با به کار بردن تئوری کوانتوم مربوط به فعل و انفعالات هسته‌ای که توسط گندن و گرنی و مستقل از آنها توسط مؤلف در پنجاه سال پیش تکمیل و بسط یافت، می‌توان رهایی انرژی را برای عناصر متفاوت در چگالیها و دماهای مختلف محاسبه کرد. چنین محاسباتی نخستین‌بار در ۱۹۲۹ به وسیلهٔ اتکینسن و هاوترمانز انجام یافت. اینان تعیین کردند که تنها فعل و انفعالات هسته‌ایی که می‌تواند مقادیر مشهود انرژی در شرایط درونی خورشید تولید کند فعل و انفعالات میان ئیدروژن و هستهٔ عناصر سبك است.

ولی در آن زمان اطلاعات اختباری در بارهٔ انواع گوناگون



شکل ۳۶ ــ فعل و انفعال هسته‌ای حلقه‌ای‌که مسئول تولید انرژی خورشید است.

فعل و انفعالات هسته‌ای هنوز در مراحل کودکی به سر می‌برد؛ و ۴۰ سال بیشتر نمی‌گذرد که جزئیات فعل و انفعال خورشیدی توانسته است کاملا برقرار شود.

اکنون می‌دانیم که فرایندی که‌انرژی هسته‌ای خورشید را فراهم می‌کند شامل یك رشته فعل و انفعالاتی است که « حلقهٔ کربن » نامیده شده است. این رشته فعل و انفعالات هسته‌ای، که توسط بث[1] و کارل فون وایتسزکر مستقل از یکدیگر در ۱۹۳۸ پیشنهاد شد نتیجهٔ خالص و نهایی آن تبدیل ئیدروژن به‌هلیوم است که با نقش کاتالیزگر کربن و ازت در سراسر دورهٔ تبدیل انجام می‌گیرد.

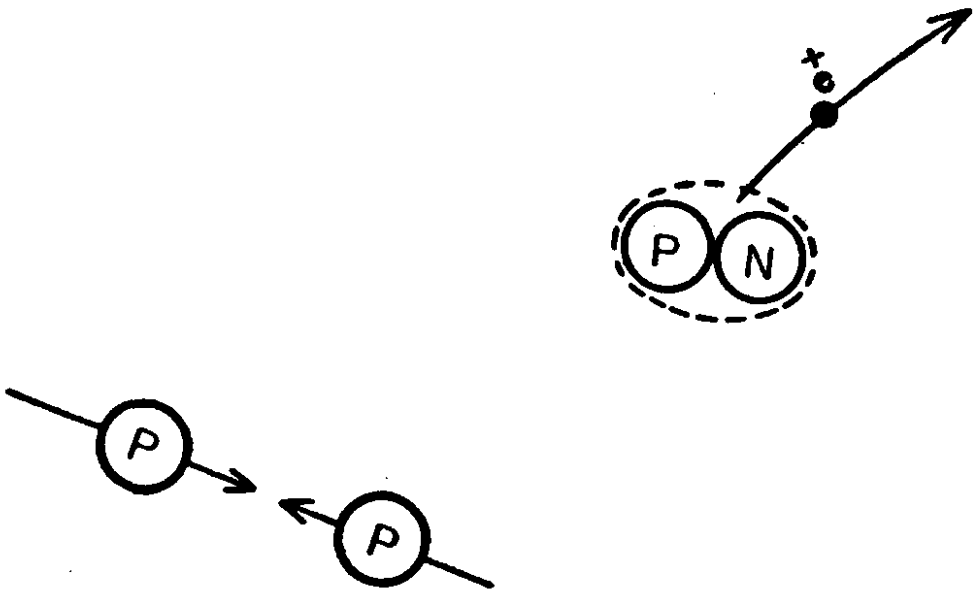
یك فعل و انفعال « رقیبانه » ، که نخست بـه وسیلهٔ کریچفیلد[2] تقریباً همزمان پیشنهاد شد (شکل ۳۷)، همین فعل و انفعال را به انجام می‌رساند، یعنی بدون کمك هیچ «کاتالیزگر هسته‌ای» ئیدروژن را به هلیوم تبدیل می‌کند. حدود ۸۵ در صد انرژی رها شده در خورشید ما به وسیلهٔ حلقهٔ کربن انجام گـرفته است ، در صورتی کـه فرایند ئیدروژن ـ هلیوم (H–H) کـریچفیلد متوجه ۱۵ در صد بقیه است. چون این دو فعل‌وانفعال به میزان وسیعی بستگی به دما دارد، اهمیت نسبی آنها در ستارگـان مختلف تغییر می‌کند و مربـوط بـه جرم و تابناکی ستاره می‌باشد. در ستارگانی که بسیار درخشنده‌تر از خورشید ما هستند، مثلا شعرای یمانی، حلقهٔ کربن واقعاً مسئول تولید انرژی است ، در حالی که در ستارگانی کـه کمنورتر از خورشید ما هستند منحصراً وابسته به فرایند H–H هستند.

این دو فعل و انفعال ، هر دو ، بـا فرایندهای مصرف کـردن

1– H. Bethe
2– C. Critchfield

ئیدروژن انجام می گیرند ، ولی چون بیش از نصف مواد اختری را ئیدروژن تشکیل می‌دهد، ستارگـان می‌توانند وضع موجود هسته‌ای خود را، برای مدتی بسیار طولانی، که چندین برابر بزرگتر از مدت انقباض است ، نگاه دارند. از آنجا کـه ئیدروژن یك ستاره بکندی تبدیل به هلیوم می‌شود، شعاع و تابناکی و دمای سطحی آن اصولا تغییر نکرده باقی می‌ماند، و تنها وقتی انـدکی افزایش می‌یابد کـه ئیدروژن محتوی در منطقهٔ تبدیل بسیار کم شود.

ولی وقتی که ئیدروژن از دست برود، ستاره باید انقباض خود را که مدتی مدید متوقف شده بود باز گیرد و «آخـرین مرحلهٔ» عمر



شکل ۳۷ــ فرایند H—H کریچفیلد

خود را آغاز کند. پیش از بحث در بارهٔ آنچه بر سر یك ستارهٔ در حال مرگ می‌آید باید تذکراتی چند در باب دیگر فعل و انفعالات هسته‌ای در میان بگذاریم.

به طوری که مؤلف، با همکاری ادوارد تلر، بعدها نشان داده، ممکن است چنین انتظار داشت که بعضی فعل و انفعالات هسته‌ای در مرحله‌ای نسبتاً قدیمی از دوران انقباض ستاره روی داده باشد. اگر فهرست همهٔ فعل و انفعالات هسته‌ای را که ممکن است میان عناصر سبك روی دهد دقیقاً از نظر بگذرانیم چنین می‌یابیم که شش فعل و انفعال وجود دارد که نقطهٔ افروزش آنها بسیار پایینتر از حلقهٔ کربن یا فرایند ئیدروژن ـ هلیوم است. اینها فعل و انفعالات میان دوتریوم، لیتیوم، بریلیوم، و بور از یك طرف، و ئیدروژن از طرف دیگر است، یعنی نقطهٔ افروزش این شش فعل وانفعال بین یك میلیون

$$
\begin{aligned}
{}_{1}D^{2} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{2}He^{3} + \text{تشعشع} \\
{}_{3}Li^{6} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{3} \\
{}_{3}Li^{7} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4} \\
{}_{4}Be^{9} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{3}Li^{6} + {}_{2}He^{4} \\
{}_{5}B^{10} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{6}C^{11} + \text{تشعشع} \\
{}_{5}B^{11} + {}_{1}H^{1} &\rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4}
\end{aligned}
$$

و هفت میلیون درجه دما قرار دارد. اختلاف اساسی میان فعل و انفعالات و حلقهٔ کربن این است که دوره‌ای و متناوب نیستند، بدین معنی که عناصر سبك وارد در آنها دوباره به وجود نمی‌آیند. چون دوتریوم، لیتیوم، بریلیوم، و بور معرف جزء بسیار اندکی از کل مادهٔ اختری هستند، انقطاعات دورهٔ انقباض ستارگان جوان که ناشی از این فعل و انفعالات هسته‌ای است باید نسبتاً کوتاه باشد.

ستارگان رو به پیری

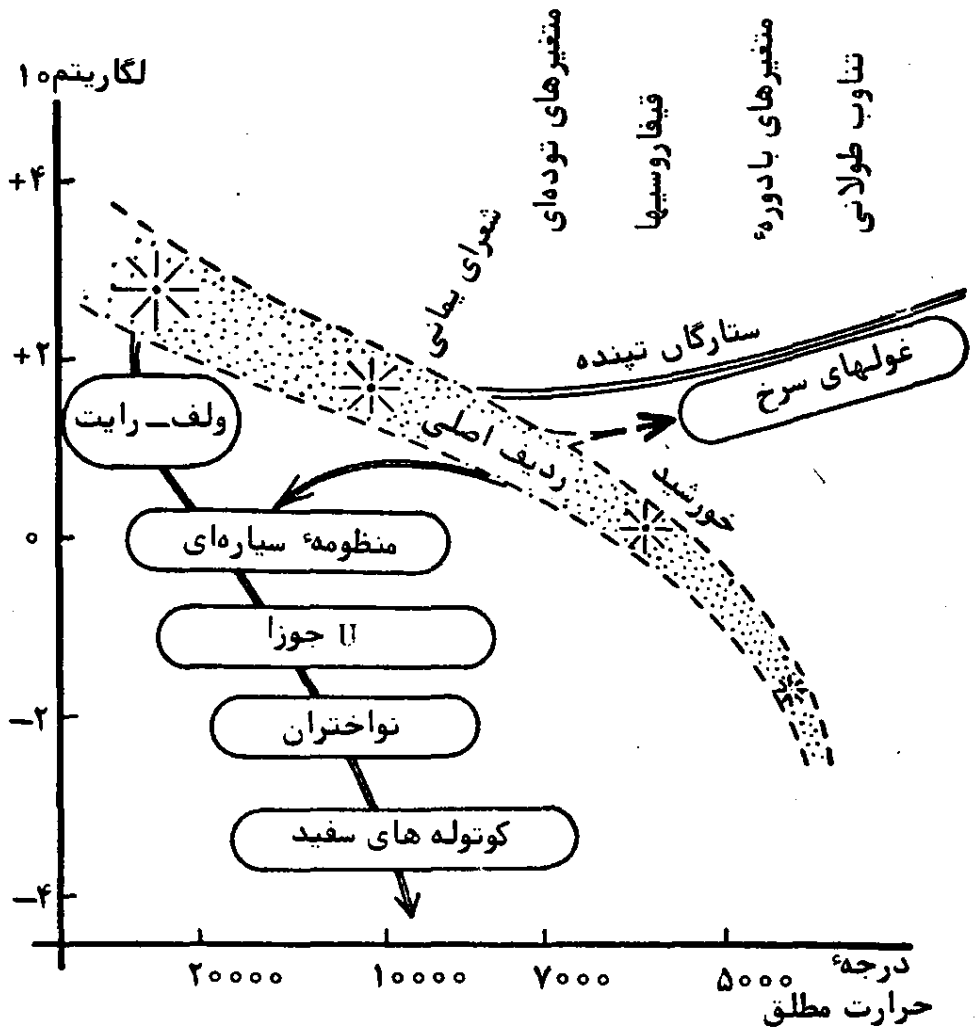
اکنون توجه خود را به مرحلهٔ نهایی تحول اختری معطوف می‌داریم، یعنی مرحله‌ای که در آن یك ستاره نزدیك به تمام کردن

منابع ئیدروژن خود می‌شود . به طوری که در فصل اول دیدیم ، می‌توان انتظار داشت که تمام شدن ئیدروژن برای کلیهٔ ستارگان در دوران کنونی با ذخیرهٔ اولیه ، که جرمهای آنها بیش از چهار یا پنج برابر جرم خورشید ما می‌باشد ، وقوع یابد .

در نمودار هرتسپرونگ ـ راسل ، این کمربند ستارگان پیر (شکل۳۸) رشتهٔاصلی را تا اندازه‌ای بالای شعرای یمانی قطع می کند، و همه گونه رفتار غیر عادی وجه تمایز آنهاست .

در سمت راست رشتهٔ اصلی گروه وسیعی از ستارگان ، نظیر غولهای سرخ ، وجود دارد که دارای قطرهای بسیار بزرگتر ، چگالیهای متوسط بسیار کمتر ، و دماهای بسیار پستتر از رشتهٔ اصلی همجرم می‌باشند . بسیاری از ستارگان متعلق به این گروه ظاهراً در یك حالت ناپایدار هستند و جسم غولپیکر آنها متورم شده و دوباره فروکش می کند ، و بدین ترتیب سبب تغییرات متناوبی در تابناکی آنها می‌شود . دورهٔ تناوب تپیدن ، هر چه از خط رشتهٔ اصلی دور می‌شویم ، افزایش می‌یابد . دوره‌های تناوب کوتاه ، که از چند ساعت تا چند روز می‌رسد وجه تمایز «ستارگان متغیر خوشه‌ای» هستند که معمولا در خوشه‌های گلبولی (نام آنها ناشی از همین است) یافت شده و متعلق به سکنهٔ اختری II می‌باشند . قیفاووسیهای متغیر با دوره‌هایی می‌تپند که از چند روز تا چند ماه است و اکثر در میان سکنهٔ اختری I در مناطق بازوان مارپیچی یافت می‌شوند . بالاخره دوره‌های تناوب طولانی متغیری وجود دارد که تغییرات تابناکی کاملا نامنظمی نشان می‌دهند ، و اغلب به یك دورهٔ بیش از چند سال می‌رسند .

در سمت چپ رشتهٔ اصلی گروهی از ستارگان منقبض شده



شکل ۳۸ ــ کمربند ستارگان رو به پیری در نمودار هرتسپرونگ ــ راسل

وجود دارد که چنان دماهای سطحی فوق‌العاده‌ای (چندین هزار درجه) دارا می‌باشند که گاز خارجیترین طبقات همیشه دور از فشار تشعشع آنهاست . این گـروه شامل «ولف ـ رایت» (به نام دو کاشف آنها) است که جریانهای گازی با سرعتهای متجاوز بر ۳ ۰۰۰ کیلومتر در ثانیه دفع می کنند . چنین تخمین شده کـه ستارگان ولف ـ رایت ، کـه مواد خود را با چنین سرعتی دفع می کنند بیش از قـریب یك میلیون سال می‌توانند دوام یابند.

فرایند دفعی که شدت آن بسیار کمتر است در هستهٔ «سحابیهای

سیاره‌ای»[1] مشاهده شده است . ایـن ستارگان گازها را بـا سرعت نسبتاً پست ده تا بیست کیلومتر در ثانیه دفع می کنند ؛ و ایـن گازها بسیار چگالتر از گـازهای دفع شده بـه وسیلهٔ «ولـف ـ رایت» نیز می‌باشند. این غلاف گازی که تشعشع ماوراء بنفش ستارهٔ داغ مرکزی آن را روشن می کند چنان فلوئـورسان می‌شود کـه رصد مستقیم و عکسبرداری آن آسان می‌شود (صفحه تصویر VIII).

این ستارگان کـه در یك سمت رشتهٔ اصلی قرار گـرفته ولی میزان تابناکی آنها تـا انـدازه‌ای پستتر است ، انواعی از ستارگان هستند کـه تابع انفجارهای متناوب شدیدی می‌باشند . درست همان‌طور کـه ستارگـان تپنده حدود وسیعی از دوره‌هـای تپش را نشان می‌دهند ، زمـان میان انفجارهای این ستارگان نیز بین حدود وسیعی قرار گرفته است . نخست ممکن است ستارگان U جوزا (که بر حسب یك نمونهٔ واقعی گـروه نامگذاری شده) را ذکر کنیم کـه بعضی از آنها هر دو هفته یك‌بار، در صورتی که بعضی دیگر هر چند ماه یك بار، منفجر می‌شوند. یکی از سیماهای بسیار مهم این ستارگان منفجر شوندهٔ متناوب‌را **کوکارین**[2] و **پرنگو**[3] کشف کردند ، بدین معنی که شدت انفجارها مستقیماً متناسب بـا زمان بین آنهاست . مثلا ستارهٔ معروف «AB تنین» به طور متوسط هر دو هفته یك بار منفجر می‌شود

۱ ـ این نام گمراه کننده است ، زیرا هیچ سیاره‌ای را شامل نیست ، و منحصراً به این سبب انتخاب شده که غلاف کروی گازی این اجسام همچون قرصی دیده شده است (صفحه تصویر VIII) ، همان طور کـه سیارات در یك تلسکوپ کوچك دیده می‌شوند .

2 ـ Kukarin

3 ـ Parengo

و در ضمن هر انفجار درخشندگی آن تا پانزده برابر درخشندگی معمولی آن افزایش می‌یابد . U جوزا به فواصل زمانی ۹۷ روز با افزایشی صد برابر درخشندگی منفجر می‌شود ؛ بنابراین فاصلهٔ بین دو انفجار آن ۷ برابر فاصلهٔ «AB تنین» و انفجار ۷ بار شدیدتر است. این ارتباط میان فاصله و شدت انفجار نشان می‌دهد که در همهٔ ستارگان منفجر شوندهٔ متناوب از دستهٔ U جوزا ، مقدار متوسط انرژی آزاد شده ثابت است . اختلاف میان تجلیات گوناگون منحصراً اختلافی است مربوط به فواصل زمان میان رهایی انرژی ذخیره شده ، و از این رو به احتمال قوی سر و کار ما با ستارگان همجرم است. کلیهٔ فعل و انفعالهای هسته‌ای حرارتی که دما را مشخص می‌سازد ، نسبت به جرم اختری بی اندازه حساس است . بنابراین ، به نظر غیر ممکن می‌رسد که ستارگان مختلف الجرم با یك نرخ انرژی آزاد سازند .

اگر این موضوع درست باشد ، ستارگان U جوزا با دوره‌های تناوب متفاوت ممکن است همچون نمایندهٔ مراحل تحولی مختلفی در زندگی یك ستارهٔ فردی این دسته ستارگان به شمار روند. به طوری که بعداً خواهیم دید ، مسلماً دلایل نظری مناسبی وجود دارد که انتظار این‌گونه رفتار از ستارگانی برود که ذخیرهٔ ئیدروژنی خود را تمام کرده‌اند .

علاوه بر ستارگان U جوزا ، انفجارات متناوب دیگری از ستارگان وجود دارد که کمیابتر ولی شدیدتر است . دو ستارهٔ معروف «RS حوا» و « U عقرب» به نظر می‌رسند که به طور تناوب از سی تا چهل سال منفجر شوند (برای اولی یك بار و برای دومی دو بار تکرار مشاهده شده) . ضمن این انفجارها درخشندگی آنها چند هزار برابر افزایش می‌یابد. البته در این صورت نو اخترانی

معمولی هستند که تابناکی آنها چند میلیون بار افزایش یافته و هرگز مشاهده نشده است کـه بیش از یك بـار منفجر شونـد. ولی ، بـا به کار بردن رابطهٔ کوکارکین ـ پرنگو ، چنین به دست می‌آید کـه دوره‌های تناوب انفجاری این ستارگان باید در حدود ده هـزار سال باشد کـه بسیار بزرگتر از دورانی است که علم نجوم بـه کار افتاده است . صفحه تصویر IX یك نمونـهٔ غلاف گـازی نورانی را نشان می‌دهد که به وسیلهٔ انفجار نو اختری دفع شده است .

بالاخره انفجارهایی که اهمیت آنها به هیچ وجه کمتر نیست انفجارهـای «فـوق نـو اختری» است کـه در ضمن آنها ستاره‌ای درخشندگی خود را بیست میلیون بار افزایش داده و اغلب مجموعهٔ کهکشانه‌ای را که به آن تعلق دارد تحت الشعاع قرار می‌دهد. البته انفجارهای فوق نو اختری بسیار نادر هستند . ما هزارها از ستارگان U جوزا را می‌شناسیم و هـر سال ۱۲ انفجار نـو اختری در کهکشان خودمان می‌بینیم ، ولی تنها یك انفجار فوق نو اختری در هـر چهار قرن پیش می‌آید .

ممکن است بیت لحم نخستین انفجار فوق نو اختری باشد که در سالنامه‌های تـاریخ ثبت شده است ، ولی نخستین مثال از انفجار فوق نو اختری کـه از لحاظ علمی ثبت شده فوق نو اختر ۴ ژویـهٔ ۱۰۵۴ میلادی بوده است. اگر ما به نقطه‌ای از آسمان نگاه کنیم که منجمان چینی معاصر «ستارهٔ تازهٔ» خود را قـرار دادنـد ، می‌توانیم تـودهٔ ابری نورانیی بیابیم کـه بـه سحابی سرطان معروف است و دارای یك ستارهٔ کمنور در وسط خود می‌بـاشد (صفحه تصویر X). بـا آنکه ایـن شیء آسمانی ممکن است شبیه بـه یکی از سحابیهای سیاره‌ای (صفحه تصویر VIII) ، بـا قشری کـه به وسیلهٔ یك نواختر

معمولی (صفحه تصویر IX) دفع می‌گردد ، دیده شود ، در واقع بسیار بزرگتر است . جرم کلی گازهایی که سحابی سرطان را تشکیل می‌دهند تخمین شده است ، و باید در حدود ۹ برابر جرم خورشید باشد ؛ جرم غلافهای نورانی سحابیهای سیاره‌ای هرگز از چند صدم جرم خورشیدی تجاوز نمی‌کند . سرعت انبساط ۱۱۱۱ کیلومتر در ثانیه ، یعنی بزرگترین سرعتی که هرگز در درون کهکشان دیده نشده، می‌باشد. ستارهٔ مرکز سحابی سرطان ، که تشعشع کهموجیی را فراهم می‌سازد که جرمهای در حال انبساط را فلوئورسان می‌کند ، به نظر می‌رسد که چگال بوده و دمایی سطحی در حدود نیم میلیون درجه داشته باشد .

نظیر فوق نو اختر چینی سال ۱۰۵۴ تنها دو انفجار فوق نو- اختری در کهکشان ما روی داده است . یکی از آنها توسط منجم معروف دانمارکی تیکو براهه در سال ۱۵۷۲ و دیگری در سال ۱۶۰۴ به وسیلهٔ یوهان کپلر ، شاگرد تیکوبراهه ، و کاشف قوانین حرکت سیاره‌ای ثبت شده است . باآنکه این دو انفجار تا اندازه‌ای به همان شدت انفجار سال ۱۰۵۴ بودند ، و از قرار معلوم غلافهای گازی مشابهی دفع کردند ، بقایای آنها تصویر تماشایی و جالبی مانند سحابی سرطان نشان نمی‌دادند . علت این امر بیشتر محتمل است مربوط به شرایط نامساعد روشنایی بوده باشد .

کمیابی بی‌اندازهٔ فوق نو اختران در کهکشان ما چنین نمی- رساند که باید یك قرن دیگر یا در این حدود در انتظار باشیم تا در وضعی قرار گیریم که یکی دیگر از آنها را رصد کنیم . اگر به طور متوسط هر چهار صد سال یك بار یك فوق نو اختر در کهکشان ما پیدا شود ، می‌توان انتظار داشت که هرگاه چند صد کهکشانهٔ مجاور

را زیر رصد قرار دهیم سالی یك فوق نواختر مشاهده کنیم. این طرح مورد قبول والتر باده و فریتس تسویکی [1] در رصد خانهٔ ماونت ویلسن قرار گرفت ، و پس از چند سالی بر تصاویر بـه حد کافی اعلا از فوق نو اختران دست یافتند کـه جزئیات فراوانی را فراهم ساختند . مراحل متوالی تکامل و بسط فوق نواختر در صفحه تصویر XI نشان داده شده است.

پس از این بررسی انواع گوناگون ناپایداری اختری ، اکنون می‌توانیم تـوجه خود را به مساعی گونـاگونی معطوف داریم کـه برای توضیح این پدیده در اصطلاحات نمونه‌های نواختریی بـه کار رفته که همچون ئیدروژن محتوی درآنها رو به زوال تدریجی است. تئوری کنونی سازمان اختری چنین مسلم می‌دارد که انـرژی آزاد شده به وسیلهٔ فعل و انفعالهای هسته‌ای حرارتی در مرکز ستارگان به وسیلهٔ دو فـرایند مختلف بـه سطح آنها انتقال یافته است . در نـاحیهٔ بلافاصلهٔ محیط بر منبع مرکزی انرژی ، که محتوی قریب ده درصد جرم اختری است ، زینهٔ * حرارتی به حدی تند است که مواد گازی شروع به جریان به سوی خارج در امتداد شعاع می کنند ، و بـه این ترتیب جریانهای همرفتی گردابی فراوانی تشکیل می‌دهند . در این حالت انـرژی بسادگی توسط جریـانهای سریـع مـادهٔ گرم شده بـه سوی خارج برده می‌شود ، کـه فرایندی مشابه فرایندی است که در یك قهوه جوش انجام می گیرد .

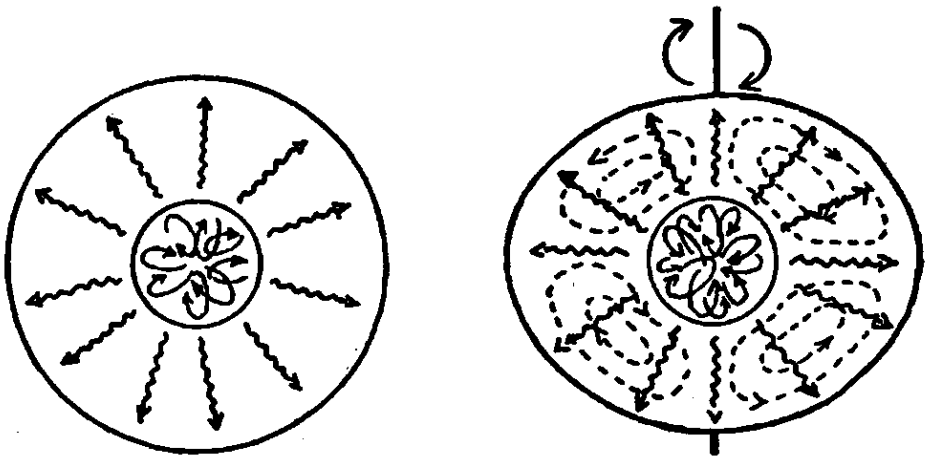
ناحیهٔ آرام ستاره درآن سوی منطقهٔ همرفتی قرار دارد ـ نود درصد باقیمانده ـ و در این ناحیه اصولا حرکت مواد وجود ندارد.

* ـ اصطلاحی که برای تعیین نرخ تغییر یك متغیر به‌کار برده شده. (مترجم)

1 ـ Fritz Zwicky

در سراسر این نواحی حرارت از طریق هدایت مستقیم ، همان طور که در امتداد میله‌ای فلزی که تنها یك سر آن گرم شده انجام می‌گیرد، انتقال می‌یابد (سمت چپ شکل ۳۹) .

جریانهای گردابی در منطقهٔ همرفتی ، نه تنها حرارت را همراه می‌برند ، بلکه مواد را نیز کاملا با هم می‌آمیزند ؛ بدین ترتیب ئیدروژن تازه را به ناحیهٔ مرکزی ، که در آنجا فعل و انفعالهای هسته‌ای انجام می‌گیرد ، وارد می‌کنند . چون زمانی بگذرد ، مواد



شکل ۳۹ ــ جریانهای همرفتی ، (سمت چپ) در یك ستارهٔ غیر دوار، (سمت راست) در یك ستارهٔ دوار . سهمهای موجی ریزش تشعشع را نشان می‌دهد .

منطقهٔ جریانهای همرفتی تقریباً بدون ئیدروژن می‌شوند . نود درصد جسم خارجی اختری ، که در سراسر آن حرارت به وسیلهٔ هدایت جریان می‌یابد ولی فعل و انفعالات هسته‌ای در آن انجام نمی‌گیرد ، ممکن است ئیدروژن اولیهٔ خود را در واقع دست نخورده نگاه دارد.

ولی در ستارگانی که دوران سریع دارند وضع بکلی متفاوت است . بنا بر قضیهٔ تسایپل [1] انتظار می‌رود که این گونه ستارگان دارای

1 ــ Zeipel

جریانهای همرفتی فرعیی باشند که از مرز منطقهٔ همرفتی بـه نحوی گـذشته و بـه سطح ستاره می‌رسند (سمت راست شکل ۳۹). اگـر چنین باشد ، و اگـر جریـانها به اندازهٔ کافی تند بـاشند ، ئیدروژن محتوی در ستاره ممکن است ادامه به این دهد که در سراسر مجموعهٔ تنهٔ ستاره یکنواخت شود .

اگر همان طور که در ستارگانی کـه بسرعت دوران می کنند ممکن است انتظار داشت ، زوال ذخیرهٔ ئیدروژن به طور یکنواخت در سراسر مجموعهٔ جسم ستاره وقوع یابـد ، اتمام نهایی ئیدروژن محتوی در ستاره آن را اصولا در همان حالتی می گذارد که پیش از به کار افتادن منبع انرژی هسته‌ای دارا بوده است . آنـوقت انتظار می‌رود که ستاره انقباض خود را که قطع شده بود ادامه دهد . بنا ـ بر این ، موضع ستاره در نمودار هرتسپرونگ ـ راسل تندتر و تندتر به سمت چپ رشتهٔ اصلی حرکت خواهد کرد ، یعنی به سوی ناحیهٔ اشعهٔ کمتر ، تابناکی شدیدتر ، و دمای سطحی بالاتر .

در مرحلهٔ معینی از انقباض ، دمای سطحی محققاً بـه اندازه‌ای زیاد می‌شود که فشار تشعشع به جدا شدن از جو خود آغاز خواهد کرد ؛ چنین کیفیتی در ستارهٔ «ولف ـ رایت» و در سحابیهای سیاره‌ای رصد شده است . باز هم پس از این ، یعنی وقتی که دما در قسمتهای مرکزی ستاره به چند بیلیون درجه رسید ، ممکن است انتظار داشت که یك فرایند هسته‌ای تـازه و نامتعارفی وقوع یابد . به طوری کـه مؤلف با همکاری شونبرگ [1] نشان دادنـد ، فعل و انفعالهای هسته‌ایی که در چنین دمایی انجام می گیرد ممکن است انتظار رود که مقادیر

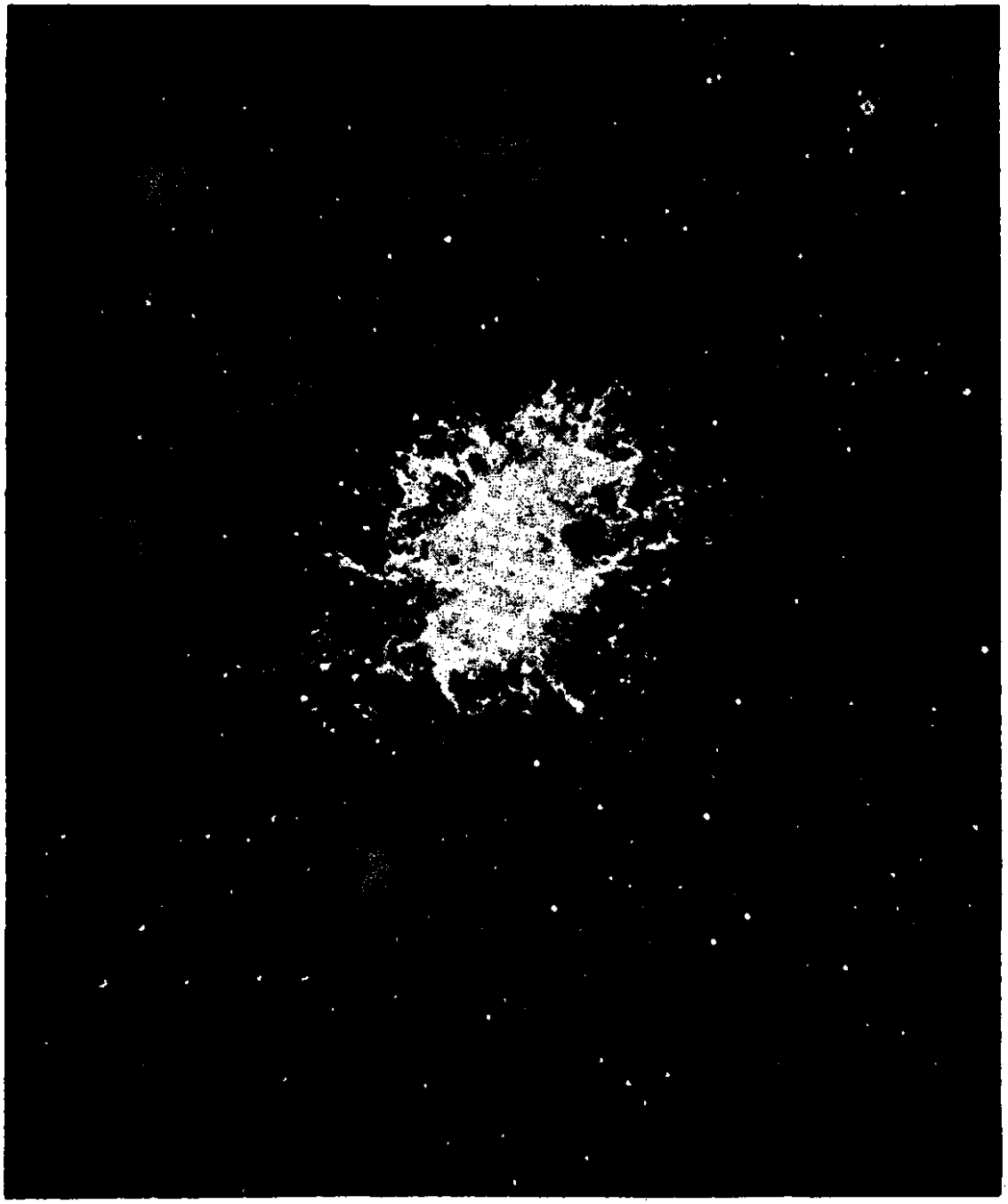
1 ـ M . Schönberg

فراوانی نوترینوس[1] تولید کنند که از تنهٔ ستاره گریخته و حرارت درونی را خارج کنند. سرد شدن درون ستاره به وسیلهٔ این فرایند که به «فرایند اورکا» ـ به نام کاسینو دا اورکا[2]، از ریو د ژانیرو ـ موسوم است به اندازه‌ای سریع است که می‌توان انتظار فرو ریختن کل ستاره را داشت. در ضمن یك چنین فرو ریختن ناگهانی مقادیر هنگفتی از مواد فوق‌العاده گرم نورانی به خارج افکنده خواهد شد. این گونه پدیده، چه واقعاً در جهان ما روی داده باشد یا بتواند موجب بعضی انفجارهای اختری رصد شده به شمار رود ـ مثلا فوق نواختری ـ، هنوز در مرحلهٔ بحث است.

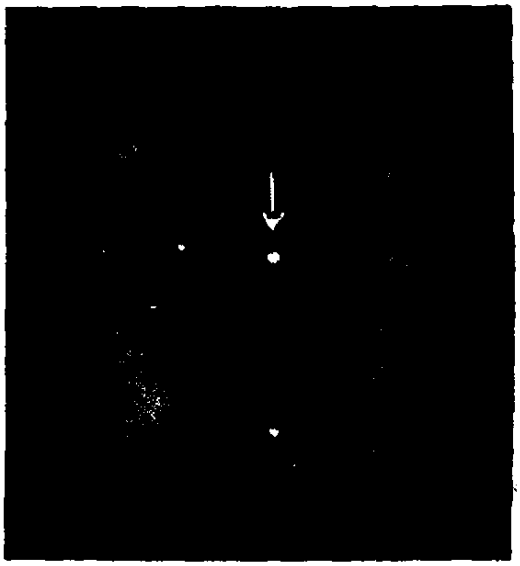
در این موارد که اختلاط مواد اختری محدود و منحصر به منطقهٔ همرفتی مرکزی است، تحول ستارگان مختلف ممکن است مسیرهای اساساً متفاوتی اختیار کرده باشد. بآسانی می‌توان درك کرد که تمام شدن ئیدروژن در منطقهٔ همرفتی مرکزی ممکن است منجر به یك گسترش «شعلهٔ هسته‌ای» بشود که از مرکز به سوی نخستین مرز میان مناطق همرفتی و غیر همرفتی که سوخت ئیدروژن هنوز به مقادیر فراوان در آن موجود است کشیده می‌شود. در این مرحله، ساختمان ستارگان معروف به «مدل منبع قشری» نامیده خواهد شد(شکل ۴۰)، که مشتمل بر یك هستهٔ همدمای بدون ئیدروژن (یك منطقهٔ همرفتی پیشین) است که به وسیلهٔ غلاف پر ئیدروژن

۱ ـ نوترینوها ذراتی هسته‌ای هستند که معمولا از فرایند تبدیل بتا خارج می‌شوند. چون بار برقی و عملا جرم ندارند، نیروی نفوذ عجیبی داشته و فقط طبقه‌ای از سرب به ضخامت چند سال نور می‌توانند آنها را متوقف سازد.

2 ـ Casino da Urca



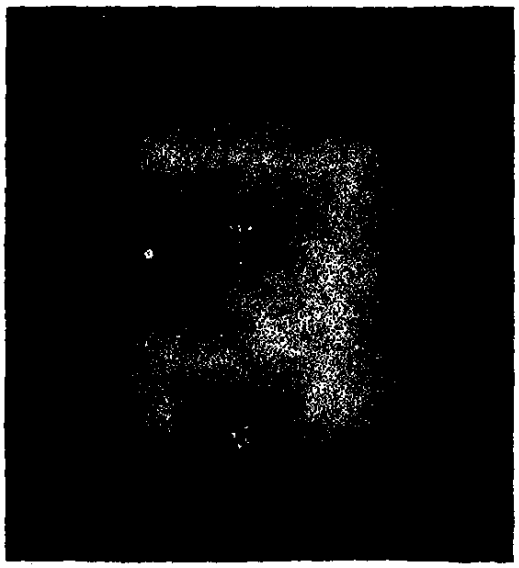
صفحه تصویر X . سحابی خرچنگ درصورت فلکی ثور



الف ــ پیش از انفجار ؛ نور آن کافی برای رصد نیست.

ب ــ در آغاز انفجار ؛ حداکثر درخشندگی.

ج ــ پس از انفجار ؛ نور آن ضعیف می‌شود.

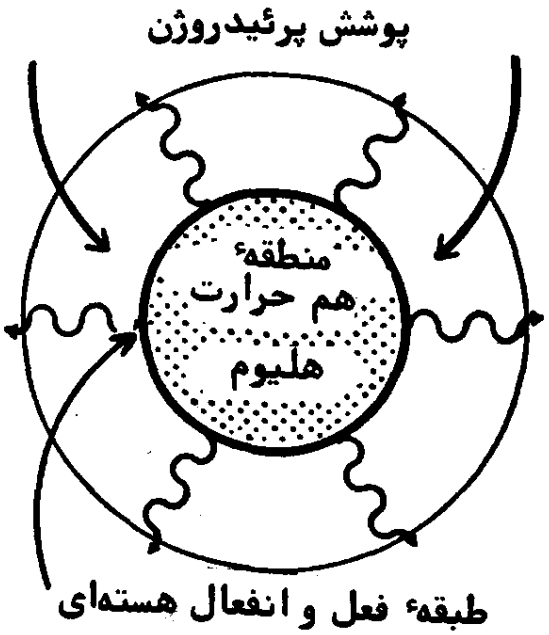


د ــ باز هم دیرتر؛ برای رصد به اندازهٔ کافی روشن نیست.

یك فوق نواختر : چهار مرحله

صفحه تصویر XI . (عکسهایی‌که در مرحلهٔ الف و د برداشته شده بیش‌از دو عکس دیگر زمان لازم داشته‌اند تا بتوانند ساختمان کهکشان را نشان دهند.)

احاطه شده است . آنوقت فعل و انفعال هسته‌ای (حلقهٔ کربن) در وجه درونی قشر محیطی انجام خواهد گرفت . این فرایند از نزدیك بسیار شبیه به گسترش حلقهٔ آتش است در چمن خشکی در یك روز آرامی هوا.



شکل ۴۵ ــ مدل منبع قشری

خواص یك مدل منبع قشری نخستین بار توسط مؤلف با همکاری کریچفیلد (آزمون معروف H_H) و کلر و به وسیلهٔ پژوهشگران دیگر مطالعه شد. ولی اغلب رفتار احتمالی چنین ستاره‌ای هنوز در معما پیچیده است. به نظر چنین می‌رسد که از دو مسیر تحولی متفاوت ــ هر دو از لحاظ ریاضی امکانپذیر ــ، وقتی که قشر تولید کنندهٔ انرژی به سوی سطح حرکت می‌کند ، یکی را باید انتخاب کرد.

اولی آن است که شعاع ستاره ممکن است به آن سوی حد

افزایش یابد و در نتیجه سقوط پیوسته و منظمی در دمای سطحی پدید آید. در این حالت ستاره در سراسر نمودار هرتسپرونگ ـ راسل به سوی منطقهٔ اشغالی غولپیکران سرخ حرکت خواهد کرد. آ. ریتس[1] در سوئد واقعاً نشان داد که مدلی از ستارهٔ عیوق می‌تواند با این فرض ساخته شود که تبدیل از طریق حلقهٔ کربن در سطح درونی قشری وقوع یافته که هستهٔ بدون ئیدروژن را احاطه کرده است.

دومین امکان این است که خواص ستاره کاملا مانند خواص ستارگان رشته اصلی باقی بماند تا وقتی که ابعاد هستهٔ بدون ئیدروژن از حد معینی تجاوز کند؛ آنوقت ستاره قادر خواهد بود که تعادل پایدار خود را محفوظ نگاه دارد. مؤلف و لونگمیر[2] نشان داده‌اند که می‌توان انتظار داشت که ستاره به حالتی تغییر یابد که‌در آن حالت شعاع آن تابع تغییرات متناوب کندی شود. وقتی که منبع قشری انرژی در حال رشد درست ازمقدار بحرانی، که در آن تعادل امکان‌پذیر است، تجاوز کند، این نوسانات دورهٔ تناوب نسبتاً کوتاه و دامنهٔ کوچکی خواهند داشت. بتدریج که منبع قشری انرژی رشد می‌کند، دورهٔ تناوب زیادتر و دامنه بزرگتر می‌شود.

البته نوساناتی با دورهٔ تناوب طولانی که از بررسی ریاضی یك منبع قشری مدل به دست می‌آید تغییرات کندی نشان می‌دهند و مستقیماً کمکی به ادراك فرایند انفجار خود بخود نمی‌کنند. ولی در مراحل معین و در مرز میان هستهٔ گرم بدون ئیدروژن و غلاف تا اندازه‌ای سرد پرئیدروژن ممکن است یك پایداری همرفتی بر قرار

1_ A. Riez
2_ C. Longmire

سازد، و اختلاط سریعی در دو منطقه روی دهد. اگر چنین اتفاق افتاده باشد تأثیری به دست خواهیم آورد که نظیر همان است که با خالی کردن سطلی پر از بنزین سرد بر روی زغال داغ سرخ به دست می‌آید؛ انرژی هسته‌ای به صورت برق زننده‌ای آزاد خواهد شد و ستاره همچون بمبی منفجر می‌شود. عظمت و شدت انفجار طبیعتاً بستگی به جرم ناحیهٔ مرزی ناپایدار دارد، و محتمل است که قشر مولد انرژی هرچه به سوی سطح نزدیکتر شویم بزرگتر شود. اگر این مطلب صحیح باشد ستارهٔ نمونه‌ای خواهیم داشت که به وسیلهٔ انفجارهای متناوب با شدت دائم التزاید مشخص شده و در فواصل زمانیی که پیوسته رو به افزایش است واقع می‌شود. همین ممکن است تعبیر [فوق نواختر← نواختر ←U جوزا] باشد که قبلا شرح دادیم.

هرگاه این نظر را بپذیریم باید کلیهٔ انفجارهای اختری را همچون مراحل متوالی در تحول یك ستارهٔ رو به کهولت منظور کنیم که با طره‌های کوچکی از نوع U جوزا آغاز و به انفجارات فوق نو اختری پایان می‌یابد. ولی تاکنون این تئوری به مقدار زیاد متکی بر حدس و الهام‌است، و تا وقتی که واقعاً یك تجزیه و تحلیل ریاضی، که نوعاً طولانی و پر زحمت است، تکمیل نشود نمی‌تواند مانند یك تئوری استوار به شمار رود. چنین محاسباتی مورد اندیشه و نظر است و شاید به وسیلهٔ یك حسابگر الکترونی انجام گیرد. هر کس می‌تواند تصور مناسبی از پیچیدگی این کار به دست آورد که با یك تخمین نسبتاً محتاطانه حل این مشکل نیازمند به خدمات صد حسابگر انسانی در مدت صد سال خواهد بود. ولی حسابگر الکترونی، که به مزاح آن را مانیاك (یعنی دیوانه) نامیده‌اند و اکنون

دو نوع آن، که یکی در پرینستن و دیگری در لوس آلاموس ساخته شده، شاید در عرض یك هفته مشکل را حل کند.

پیش از آنکه مسئلهٔ انفجار ستارگان را کنار بگذاریم باید این نکته را تذکر دهیم که مقایسهٔ امکانات نظری مختلف با وسایل موجود، در نتیجهٔ این حقیقت پیچیده و درهم می‌شود که فهرست انفجارات اختری معلوم ممکن است ستارگان دو گروه سنی مختلف را جمعاً شامل باشد. از یك طرف ستارگان رو به پیری از ذخیرهٔ اولیه‌ای می‌باشند که چهار یا پنج برابر سنگینتر از خورشید ما هستند، و پیش از آنکه ذخیرهٔ ئیدروژنی آنها تمام شود قریب سه بیلیون سال زندگی کرده‌اند. از طرف دیگر ستارگان بسیار سنگینتری با مبدأ بسیار تازه‌تر وجود دارد که ئیدروژن خود را بسرعت سوزانیده‌اند. پیش از آنکه حوادث رصد شده را به یکدیگر ارتباط داده و یك تئوری مبتنی بر رصدها و ارتباط احتمالی آنها با یکدیگر بسازیم، باید بتوانیم این دو گروه را از هم جدا کنیم، و متأسفانه این امر به هیچ وجه کار آسانی نیست.

ستارگان مرده

تا اینجا تمام زندگی یك ستاره را، از انقباضات اولیه تا تجلیات جالبی که ممکن است با تشنجات احتضار مرگ مقایسه شود، مورد بحث قرار دادیم.

ولی یك ستارهٔ مرده چگونه به نظر می‌رسد؟

هرگاه یك ستارهٔ مرده را همچون ستاره‌ای تعریف کنیم که در آن هیچ منبع انرژیی باقی نمانده و، در نتیجه، تغییرات تحول بعدی در آن امکانپذیر نباشد، ستارگان معروف به کوتوله‌های سفید در

این زمره قرار می‌گیرند. اینها گروهی از ستارگان بسی اندازه چگال و داغ در پایینترین گوشه سمت راست نمودار هرتسپرونگ‌ـراسل هستند (شکل ۳۵). رفیق معروف شعرای یمانی مثالی نمونه‌ای از یك کوتولهٔ سفید است. قطر آن چندان بزرگتر از قطر زمین نیست ولی جرمش تقریباً برابر جرم خورشید خود ما می‌باشد. کوتوله‌های سفید مرحلهٔ حد انقباض اختری را نشان می‌دهند، و چگالی متوسط آنها در حدود یك میلیون برابر چگالی آب است. مطالعات نظری مربوط به ساختمان درونی آنها تعیین می‌کند که آخرین اثر ئیدروژن از دست داده و به سبب اینکه هنوز زمان کافی نگذشته است که سرد و اجسام تاریکی بشوند، هنوز هم گرم هستند. گرمی آنها همان است که یك لاشه چند دقیقه پس‌از مرگ نشان می‌دهد؛ ولی به‌سبب حرارت زیادی که در آنها وجود داشته، بیلیونها سال لازم خواهد بود تا سرد شوند.

در کهکشان ما تقریباً یك کوتولهٔ سفید در مقابل ده ستارهٔ رشتهٔ اصلی که زندگی فعالی دارند، وجود دارد، و همین نشان می‌دهد که کهکشان ما هنوز نسبتاً جوان بوده و گورستان آن هنوز پر نشده است. به احتمال قوی همهٔ کوتوله‌های سفید کهکشان ما بقایای ستارگان نسبتاً پرجرمی بوده‌اند که ذخیرهٔ ئیدروژنی خود را به شیوهٔ مسرفانه مصرف کرده‌اند. ستارهٔ کمنور در مرکز محابی سرطان به احتمال قوی یکی از تازه‌ترین موارد مرگ و میر اختری است. البته این ستاره هنوز به تراکم رفیق شعرای یمانی نیست، و گرمای آن هنوز هم به طرز قابل توجهی زیادتر از این ستاره است که چند صد میلیون سال از مرگ آن می‌گذرد. ولی سرانجام به‌این حالت خواهد رسید، و با گذشت زمان لاشه‌های اختری زیادتر و زیادتری در افلاك پهناور جهان یافت خواهد شد.

نتیجه‌گیری

اکنون بـه پایـان سخنرانی خود می‌رسیم ، و تصویـری از کیفیت و فرایند آفریننده تجلی خود را آغاز می‌کند ـ تصویری که تـا اندازه‌ای مبهم و ناپیوسته ، ولی در رئوس مطالب کاملا مشخص است . در تاریکی گذشتهٔ «پیش ـ کهکشانی» نظری اجمالی از عهد ماوراء فیزیك سنت آوگوستین بـه دست می‌آوریم که وقتی جهان ، از هر چه ساخته شده بود ، شامل یك فـروریختگی عظیم بود . البته در بارهٔ آن عهد ، که می‌تواند از منهای بینهایت تا قریب سه بیلیون بیش طول کشیده شده بـاشد ، هیچ اطلاعی نـداریم ، چون جمیع مدارك باستانشناختی مربوط به ایـن گذشتهٔ دور بـاید هنگام فشرده شدن جرمهای کیهانی به صورت خمیر ، بکلی از میان رفته بـاشد . جرمهای جهان باید از تراکم عظیم به حالت کاملا پاره پاره خارج شده و ایلم اولیهٔ نوترونها و پروتونها و الکترونها را تشکیل داده بـاشند. بتدریج که در طی انبساط ایلم به سرعت سرد شد ، این ذرات ابتدایی شروع به چسبیدن به یکدیگر کردند و اجتماعاتی از ترکیبات مختلفی

تشکیل دادند کـه «پیش نمونهٔ» هسته‌های اتمی امروزی هستند . در طی این نخستین دورهٔ «پخت و پز هسته‌ای» که بیش از یك ساعت به طول نینجامیده ، شرایط موجود در سراسر جهان تقریباً همان بوده کـه در مرکـز یك بمب اتمی در حال انفجار موجود است . فضای کیهانی پـر از انـرژی تشعشعی گاما بـوده و چگالی جرمی آن از چگالی مـادهٔ اتمی بی‌اندازه تجاوز می‌کـرده است . دما در سراسر جهان نزدیك به یك بیلیون درجه ، ولی چگالی ماده قابل مقایسه بـا چگالی هوای جو در ارتفاعات بسیار بالا بوده است .

به دنبال این نخستین ساعت بی‌اندازه بارور از تاریخ جهان، هیچ حادثهٔ خاصی بـرای ۳۰ بیلیون سال بعد روی نداده است. گاز شامل اتمهای نـو پدید به انبساط ادامه داده و دمای آن کمتر و کمتر شده است . انرژی تشعشعی کـه در آفرینش نقش عمده را در عمل تحول ایفا کـرده بتدریج اهمیت خود را از دست داده و در پایـان سال سی میلیون تفوق خود را تسلیم مادهٔ اتمی معمولی کرده است . بمحض آنکه ماده کار را تحویل گرفت ، نیروی گرانش نیوتنی که یکی از مهمترین مشخصات مـادهٔ «وزن دار» را بیان می‌کند وارد کار شد و گاز را که تا آن زمان متجانس بود به ابرهای غولپیکر کهکشانه‌های ابتدایی پارهٔ پاره کرد . در آن عهد دما به درجه‌ای کـه آن را «دمای اطاق» می‌نامیم پایین آمد به طوری که بـا آنکه کاملا تـاریك بود هنوز نسبتاً گرم بود.

در حالی کـه کهکشانـه‌های ابتدایی اولیه بـه واسطهٔ انبساط دائمی از یکدیگر دور و دورتر شدند ، مواد درون آنها شروع کردند به چگالیدن به‌صورت جماعات کوچکتر فراوان که ستارگان ابتدایی نامیده شدند ؛ به سبب حجم نسبتاً کوچك ایـن ستارگان ابتدایی ،

انقباض آنها کاملا سریع پیشرفت کرد ، و بزودی دمای آنها به مقداری رسید که در آن دما فعل و انفعال هسته‌ای میان ئیدروژن و عناصر سبك گوناگون امکانپذیر شد ، و فضا در حالی که ستارگان بیشمار آن را روشن کرده بودند بازهم نورانی شد . وقتی که ستارگان به واسطهٔ انقباض مواد گازی کهکشانه‌های ابتدایی تشکیل شدند ، بعضی از آن مواد در همسایگی آنها به جا مانده و از آنها منظومه‌های سیاره‌ای برخاستند . سیارات کوچکتر از آن بودند که بتوانند منابع اختصاصی انرژی هسته‌ای خود را خلق کنند ، بدین جهت بسرعت سرد شدند و قشرهای سنگی جامدی به وجود آوردند . با کمك تشعشعات صادر از خورشیدهای مربوط ، بعضی ترکیبات شیمیایی که در سطح این سیارات وجود داشت ، در یك سیر تحولی که هنوز بخوبی درك نشده کشیده شدند که به وسیلهٔ آن مواد آلی پیچیده و پیچیده‌تر به وجود آمد . بدین ترتیب سطوح سنگی برهنهٔ سیارات اکنون از فرشهای سبز چوبها و چمنزارها پوشیده شدند . جانوران ، نخست جانورانی ابتدایی و سپس پیچیده و پیچیده‌تر ظاهر شدند و سرانجام به صورت موجود انسانی تکامل یافتند که هوش او آن اندازه است که پرسش و پاسخ مسائل مربوط به حوادثی را که بیلیونها قبل از به وجود آمدن وی رخ داده مطرح می کند .

شاید یکی از شگفت‌ترین نتایج حاصل از تحقیق و بررسی ما در داستان جهان این واقعیت باشد که حوادث تحولی اصلی مربوط به تکامل فیزیکی فقط جزء بسیار کوچکی از دورهٔ کل را اشغال کرده است . البته مفهوم این امر آن است که تحول و تکامل آلی به میزان بسیاربطئی‌تر از مقیاس وسیع اعمال فیزیکی جهان انجام گرفته است.

بدیهی است کمتر از یك ساعت برای ساخته شدن اتم ، چند میلیون سال بـرای ساخته شدن ستارگان و سیارات به‌کار رفته است ، ولی برای ساخته شدن انسان سه بیلیون سال لازم بوده است .

ضمیمه

ریاضیات مربوط به روش هومز (ضمیمهٔ فصل اول)

با این فرض که روشهای زمینشیمیایی می‌تواند غلظتهای نسبی اورانیوم و سرب را در نمونه‌های مختلف تغییر دهد ولی هرگز فراوانی نسبی ایزوتوپها را تغییر نمی‌دهد ، هومز سه معادلهٔ زیر را برای سه نمونهٔ سنهای زمینشاختی مختلف t_1 ، t_2 ، t_3 به دست آورد:

$$\frac{a_i - x}{b_i - y} = R(t_0)\,\frac{1 - e^{\lambda(t_0 - t_i)}}{1 - e^{\lambda'(t_0 - t_i)}} \quad (i = 1,2,3)$$

که در آن a_i و b_i غلظتهای نسبی‌مشهود Pb^{206} و Pb^{207} (در رابطه با Pb^{204}) در نمونه‌ای از عهد t_i؛ λ و λ' ، تباهی ثابتهای U^{238} و U^{235} ؛ $R(t_0)$ مقدار نسبی U^{238} و U^{235} در زمان صفر t_0 (این محاسبه از روی مقادیر نسبی مشهود کنونی آنها و مقادیر ثابت تباهی به دست آمده‌است)؛ x و y غلظتهای نسبی Pb^{207} و Pb^{206} اولیه(نسبت به Pb^{204})می‌باشند . با حل معادله برای نمونه‌های سه گانه ، هومز برای هر یك از موارد مقادیر x ، y و t_0 را به دست آورد . مقدار نقل شدهٔ $t_0 = 3{,}35 \times 10^9$ سال مقدار متوسطی است که از بسیاری

نمونه‌های سه گانه به دست آمده است .

انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی انبساط (ضمیمهٔ فصل دوم)

کرهٔ بزرگی به شعاع R فرض کنید که آن اندازه کهکشانه‌ها را شامل باشد کـه بتوان آن را به طور یکنواخت پر شده از مـاده فرض کـرد (سمت راست شکل۳) . ماده در حرکت از مرکـز دور می‌شود، به‌طوری کـه ممکن است بخوبی آن را منطبق بر کهکشان خودمان فرض کنیم . سرعت حرکت به سوی خارج ، هر چه مـاده از مرکز دورتر باشد بزرگتر است . بنابر قانون هبل ، کهکشانه‌هایی که در فاصلهٔ r قـرار گـرفته‌اند بـا سرعت $v = ar$ در حـرکتند کـه در آن a بـرای ضریب عددی فـرمول هبل کـه در متن کتاب آمده نوشته شده است . انرژی جنبشی مادهٔ متحرك در درون کـره ، طبق معمول ، از نصف حاصلضرب جـرم در مجـذور سرعت بـه دست می‌آیـد . چـون سرعت از مقدار صفر (نـزدیك مرکـز) تـا مقدار $\dot{R} = a.R$ در محیط کره ، تغییر می‌کند ، بـاید مقدار متوسطی را به کار ببریم . تجزیهٔ ریاضی نشان می‌دهد که این مقدار باید ۳/۵ مقدار سرعت محیطی باشد . بابه کار بـردن ایـن رقم ، و نوشتن ρ بـرای چگالی مـاده در کـره ، برای انـرژی جنبشی عبارت زیر به دست می‌آید :

$$K = ۱٫۲۶\rho R^۳\dot{R}^۲ = ۱٫۲۶\rho a^۲R^۵ \qquad (۱)^۱$$

از طرف دیگر ، انـرژی پتانسیل U مربوط به گـرانش نیوتنی میان

۱ ــ در فرم مبسوط :

$$K = ۱/۲(۴/۳\pi R^۳\rho)^۲ \times ۳/۵(a\dot{R})^۲ = ۲/۵\pi\rho a^۲R^۵$$

جرمهای درونی کره عبارت است از :

$$U = -7 \times 10^{-7} \rho^2 R^5 \qquad (2)^1$$

چون U و K هـر دو متناسب بـا همان قـوهٔ R (قوهٔ پنجم) هستند ، نسبت آنها بستگی به حجم کرهٔ مورد نظر دارد ، یعنی :

$$\frac{K}{U} = \frac{1{,}8 \times 10^6 \times a^2}{\rho} \qquad (3)$$

اگر $a = 1{,}9 \times 10^{-17}$ اختیار شود ، و برای چگالی متوسط مادهٔ در جهان مقدار بسیار محتمل گرم سانتیمتر مکعب $\rho = 10^{-30}$ را قبول کنیم (فقط یك اتم ئیدروژن در هر سانتیمتر مکعب) ، چنین به دست می‌آید که نسبت K/U مساوی ۶۵۰ است . انرژی جنبشی جهان در حال انبساط به طور آشکار بسیار بزرگتر از انرژی پتانسیل گـرانش نیوتنی آن است . کهکشانه‌ها با سرعتهای بسیار بزرگتر از سرعت گریز دور از هم در پروازند ، و انبساط هرگز متوقف نخواهد شد. اگر، بنا بر نظر بر ، چنین فرض کنیم که فواصل بین کهکشانی دو برابر بزرگتر از آن است که قبلا فرض کـردیم ، a نصف مقدار قبلی آن خواهد بود ، و مقدار چگالی متوسط جهان ۱/۸ مقداری است کـه به کار رفت . بنابراین ، فرمول (۳) نسبت K/U را ۱۳۰۰ خواهد داد و نتیجه‌گیری ما بازهم با حاشیهٔ اطمینانی بیشتری‌استوار خواهد ماند.

۱ ــ در فـرم مبسوط:

$$U = G/RM^2 = -G/R(4/3\pi\rho R^3)^2 = -16/15\,\pi^2 G\,\rho^2 R^5$$

که در آن مقدار ثابت نیوتن $G = 6{,}66 \times 10^{-8}$ است.

دما و تغییرات چگالی در جهان در حال انبساط
(ضمیمهٔ فصل دوم)

اگر عبارت (۱) و (۲) را برای انرژیهای جنبشی و پتانسیل در جهانی در حال انبساط بـه کار بریم ، آنوقت می‌توانیم معادله‌ای را که بر جهان حکمفرمایی می‌کند ، با بیان این نکته کـه حاصل جمع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل در هر قسمت از جهان در طی انبساط ثابت می‌ماند (قانون بقای انرژی) ، بنویسیم. بنابراین، معادلهٔ زیررا به دست می‌آوریم :

$$\text{مقدار ثابت} = \rho^{2} R^{5} - 7 \times 10^{-7}\, \rho\, \dot{R}^{2} R^{3} = 1{,}26\, \rho\, \dot{R}^{2} R^{3} \qquad (۴)$$

که رابطهٔ میان هر فاصلهٔ R و میزان تغییر R را به دست می‌دهد . این معادله که از ملاحظات سادهٔ مکانیك به دست آمده درست همان است کـه از معادلات تانسوری پیچیدهٔ تئوری نسبیت عمومی اینشتین بـه دست خواهد آمد . اکنون نیازمند به ادراك نتایج این معادلات برای مراحل قدیمی انبساط هستیم ، یعنی برای زمانی کـه چگالی و دما هر دو در جهان بی اندازه زیاد بوده‌اند .

شناسایی اهمیت عظیم تشعشع در طی مراحل قدیمی جهان در حال انبساط به ما اجازه می‌دهد که بیان ساده‌ای بـرای دمای فضا در دوره‌هـای مختلف پس از آغاز انبساط استنتاج کنیم . اگر ρ را در معادلهٔ (۴) منحصراً برای نشان دادن چگالی تشعشع در نظر گیریم ،

۱ ــ در فرم مبسوط :

$$\text{مقدار ثابت} = \rho^{2} R^{5} - 15/16\, \pi^{2} G\, \rho^{2} R^{5} = 5/2\pi\rho \dot{R}^{2} R^{3}$$

چنین خواهیم یافت [1] که t ثانیه پس از آغاز انبساط دمای فضا باید :

$$T = \frac{1{,}5 \times 10^{10}}{\sqrt{t}} \quad \text{درجهٔ مطلق} \qquad (5)$$

بوده باشد .

تا وقتی که تئوری بیان صحیحی بـرای دما در جهان در حال انبساط فراهم می‌سازد ، به‌عبارتی منجر می‌شود کـه در آن عـامل مجهولی برای چگالی ماده وجود دارد. بآسانی می‌توان به‌دست‌آورد [2] که چگالی ماده در جهان باید بستگی به سن آن داشته بـاشد ، کـه شامل عامل ثابت ولی مجهول ρ_0 است .

$$\rho = \frac{\rho^0}{t^{3/2}} \qquad (6)$$

۱ ــ معادلهٔ فوق را می‌توان چنین نیز نوشت :

$$\frac{\dot{R}}{R} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho}{3}} + \frac{\text{مقدار ثابت}}{R^2}$$

با این فرض که $\rho = \frac{aT^4}{c^2}$ (قانـون شتفان بـولتسمان) و $\dot{R}/R = -\dot{T}/T$ (قانون وین) ،باصرف‌نظر کردن از جملهٔ دوم زیر رادیکال ، به دست می‌آید:

$$-\dot{T}/T = \sqrt{8\pi G/3 \times aT^4/c^2}$$

که تبدیل می‌شود به :

$$T = \sqrt[4]{\frac{3c^2}{3^2 \pi Ga}} \times \frac{1}{t^{1/2}} = \frac{1{,}5 \times 10^{10}}{t^{1/2}}$$

۲ــ $$\rho \sim \frac{1}{R^3} \sim T^3 \sim \frac{1}{T^{3/3}}$$

از لحاظ ریاضی ، معادلهٔ ساختمانی را می‌توان چنین نوشت:

$$\dot{n_A} = v n_0 \left(\sigma_{A-1}\, n_{A-1} - \sigma_A n_A\right) \qquad (۷)$$

که در آن n_0 تعداد نوترونها ، n_A و n_{A-1} تعداد هسته‌های مختلط با وزنهای A و A − ۱ ،و سرعت نوترونهایی است که مشخص کنندهٔ تعداد تصادمات است . چون محاسبات بـرای ایلم در حال انبساط و سرد شدن انجام یافته ، باید فرض شود کـه دما و چگالی مواد ، بـه موجب بالا تابع زمان است.

«پایان»