

پس از نخستین سه دقیقه

... تقدیم به دخترم هم‌ساکه فکر می‌کند به جای نوشتن

چنین کتاب‌هایی باید با او بازی کنم...

پادمانابان

ت. پادمانابهان، تهانو، ۱۹۵۷ - م. Padmanabhan, Thanu

پس از نخستین سه دقیقه: حکایت خلقت عالم / ت. پادمانابان؛ مترجمان محسن شادمهری، فاضله خواجه‌نبی. - تهران: ققنوس، ۱۳۸۳. ۲۷۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.

ISBN 964-311-484-8

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

عنوان اصلی: *After The First Three Minutes:*

The Story Of Our Universe, 1998.

نمایه.

۱. کیهان‌شناسی. الف. شادمهری، محسن، مترجم. ب. خواجه‌نبی، فاضله،

مترجم. ج. عنوان. د. عنوان: حکایت خلقت عالم.

۵۲۳/۱ QB۸۹۱/پ۲/پ۵

۱۳۸۳

۸۳-۸۲۴۰ م

کتابخانه ملی ایران

پس از نخستین سه دقیقه

حکایت خلقت عالم

ت. پادمانابان

مترجمان:

دکتر محسن شادمهری

فاضله خواجه‌نبی



این کتاب ترجمه‌ای است از:

After The First Three Minutes

The Story Of Our Universe

T Padmanabhan

Cambridge University Press, 1998



انتشارات ققنوس

تهران، خیابان انقلاب، خیابان شهدای ژاندارمری

شماره ۲۱۵، تلفن ۶۴۰۸۶۴۰

* * *

ت. پادمانابان

پس از نخستین سه دقیقه

مترجمان دکتر محسن شادمهری - فاضله خواجه‌نبی

چاپ اول

۱۱۰۰ نسخه

۱۳۸۳

چاپ شمشاد

حق چاپ محفوظ است

شابک: ۸ - ۴۸۴ - ۳۱۱ - ۹۶۴

ISBN: 964-311-484-8

Printed in Iran

فهرست

پیشگفتار	۷
۱. معرفی عالم	۱۱
۲. ماده، تابش و نیروها	۱۹
۳. مشاهده عالم	۶۵
۴. شناخت عالم	۸۹
۵. عالم در حال انبساط	۱۲۷
۶. شکل‌گیری کهکشان‌ها	۱۶۳
۷. عالم در قرمزگرایی بالا	۲۱۷
۸. پرسش‌های بی‌پاسخ	۲۴۳
ضمیمه	۲۵۷
منابعی برای مطالعه بیشتر	۲۶۵
نمایه	۲۶۷

پیشگفتار

در طول زندگی‌ام یک نکته را آموختم: همه دانش ما در برابر واقعیت، مقدماتی و بچگانه است و البته این نکته هنوز هم با ارزش‌ترین چیزی است که داریم.

آلبرت اینشتین

کیهان‌شناسی و شناخت ما از این که چگونه ساختارهایی نظیر کهکشان‌ها شکل گرفته‌اند طی دو دهه اخیر به شکل قابل‌ملاحظه‌ای بسط و گسترش یافته است. همراه با این پیشرفت شاهد افزایش آگاهی عمومی درباره نجوم و کیهان‌شناسی هستیم که بدون شک بخشی از این نگرش ناشی از مطبوعات است. در چنین شرایطی، مسلماً کتابی که تفکر رایج در کیهان‌شناسی را به شکلی قابل درک برای عموم آرایه کند، مطلوب خواهد بود. این کتاب قصد دارد توصیفی بدون ریاضیات از کیهان‌شناسی برای خواننده عام، در سطح مقالات مجلات نیوساینتیست و ساینتیفیک امریکن، عرضه کند. خواننده متوسط چنین مجلاتی نباید مشکلی با این کتاب داشته باشد.

ساختار این کتاب چنین است: فصل ۱ به معرفی عالم، ساختارهای مختلف آن و مقیاس‌های طولی می‌پردازد. فصل ۲ مرور سریعی است بر مفاهیم فیزیکی بنیادی مورد نیاز برای درک بقیه کتاب. تلاش کرده‌ام این فصل را به شکلی آرایه کنم که خواننده به پایه‌ای مناسب از مفاهیم مختلف دست یابد به طوری که حتی هنگام مطالعه هر مقاله دیگر در علوم فیزیکی — که به زبان ساده نوشته شده باشند — این

مفاهیم را مفید یابد. باید اعتراف کنم که در فصل ۳ کمی از موضوع اصلی دور می‌شویم. در این فصل مشاهدات نجومی مفیدی عرضه می‌شود که خواننده لذت می‌برد و با فصل ۴ نیز ارتباط نزدیکی دارد. به دلیل ارتباط تنگاتنگ فصل‌های ۳ و ۴ جداً توصیه می‌کنم که خواننده پس از مطالعه فصل ۴ دوباره به فصل ۳ بازگردد. چهارمین فصل گستره وسیعی از ساختارهای اختر فیزیکی و فرایندها را توصیف می‌کند: ستاره‌ها، تحول ستاره‌ای، کهکشان‌ها، خوشه‌های کهکشانی و... در این فصل جایگاه خود را می‌یابند. فصل ۵ به مدل مهبانگ و توصیف عالم آغازین اختصاص دارد. به این ترتیب بستری برای فصل کلیدی کتاب، یعنی فصل ۶، فراهم می‌شود که به شکل‌گیری ساختارهای مختلف در عالم می‌پردازد. علاوه بر این که تفکر و ایده‌های رایج در این زمینه به تفصیل عرضه می‌شود، ارزیابی دقیقی از مدل‌ها نیز ارائه کرده‌ام. فصل ۷ به دورترین اجرام عالم می‌پردازد که هم‌اکنون اخترشناسان سرگرم مطالعه آن‌هایند، مثل اختروش‌ها و کهکشان‌های رادیویی. آخرین فصل ضمن جمع‌بندی کل کتاب، بر دیدگاه فعلی ما از عالم تأکید می‌کند.

انتخاب مطالب ضرورتاً بازتابی است از دیدگاه‌های نویسنده؛ و علی‌رغم این واقعیت که مطالب این کتاب به عرصه‌ای سریعاً در حال تحول مربوط می‌شود، تلاش زیادی کرده‌ام که «طول عمر» این کتاب را افزایش دهم. مثلاً فصل‌های ۲، ۴، ۵ و بیش‌تر ۳ برای مدتی نسبتاً قابل قبول مفید خواهند بود. بدون شک برخی از جزئیات فصل‌های ۶ و ۷ تغییر خواهند کرد، اما معتقدم ایده‌ها و مفاهیم کلی برای مدت طولانی‌تری قابل استفاده خواهند بود.

مباحث بدون ریاضیات ارائه می‌شوند، اما به هنگام ضرورت از ذکر اعداد واقعی و یکاها اجتناب نکرده‌ام. این موضوع در برخی زمینه‌ها واقعاً ضروری است؛ ضمن این که هر نوع تلاشی برای توصیف نتایجی از این دست، صرفاً به صورت گفتاری و عاری از اعداد، بسیار ساده‌انگارانه خواهد بود. در واقع، تا آن‌جا که امکان داشت سعی کردم از ساده‌انگاری بیش از اندازه بپرهیزم، هر چند در ارتباط با جزئیات باید مرزهایی را رعایت می‌کردم. این کتاب برای خواننده‌ای است که واقعاً می‌خواهد بداند، و از این رو انتظار دارم چنین خواننده‌ای برای درک ایده‌های مطرح شده کمی تلاش کند. همچنین از قصه‌گویی پرهیز کردم؛ در هیچ‌کجای کتاب با چنین جمله‌ای برخورد نخواهید کرد: «... همچنان که پروفیسور... و همسرش با اتومبیل به کنسرت

می‌رفتند، ناگهان به ذهنش رسید که...» معتقدم ایده‌ها و کشفیات مهم‌تر از افرادند و به همین دلیل، مباحث را غیرشخصی و نه به شکل تاریخی، ارایه کردم. (چند استثناء پیدا خواهید کرد که البته عمدی بوده‌اند.) ناشر و من بحثی داشتیم که آیا کتاب را به صورت نفیس همراه با تعداد زیادی عکس‌های رنگی چاپ کنیم؛ یا به صورت معمولی همراه با تصاویر و نمودارهای سیاه و سفید که در نهایت تصمیم بر مورد آخر گرفته شد. تصمیم دشواری بود و امیدوارم کیفیت و گویا بودن مطالب جبران فقدان رنگ را بنماید.

در آخر کتاب ضمیمه‌ای وجود دارد که اصطلاحات فیزیکی به کار رفته در فصل‌های مختلف را توصیف می‌کند. چون مفاهیم مطرح شده در فصل‌های ۲ یا ۴ ممکن است (مثلاً) در فصل ۷ مورد نیاز باشند؛ این ضمیمه می‌تواند برای خواننده ناآشنا نیز مفید باشد. همچنین در پایان فهرستی از کتاب‌ها برای مطالعهٔ بیش‌تر را آورده‌ام که مطمئناً این انتخاب برپایهٔ تجربیات شخصی‌ام بوده است و فقط می‌تواند به عنوان راهنما باشد. برخی از این کتاب‌ها شامل منابع بسیار بیش‌تری هستند.

ایدهٔ نوشتن این کتاب به دنبال پیشنهادی از سوی جان گرینین شکل گرفت. او هنگام بازنگری کتاب من تحت عنوان شکل‌گیری ساختار در عالم (۱۹۹۳)، انتشارات دانشگاه کمبریج) گفت: «خوب است که ببینیم نویسنده، کتابی در همین زمینه و به زبان ساده عرضه کند.» رافوس نیل از انتشارات دانشگاه کمبریج از این پیشنهاد استقبال کرد، و البته امیدوارم که آن‌ها را ناامید نکرده باشم.

افراد دیگری هم هستند که نقش قابل ملاحظه‌ای در تکوین این کتاب داشته‌اند: این دومین باری است که با آدام بلک از انتشارات دانشگاه کمبریج کار می‌کنم که لذت‌بخش بود. کل حروفچینی کتاب، الگوی شکل‌ها و بازخوانی نمونهٔ حروفچینی شده را واسانتی پادمانابان انجام داد؛ از او سپاسگزارم به دلیل ساعت‌ها تلاشی که صرف این کار کرد. بیش‌تر شکل‌ها را پرم کومار آماده کرد که از کمکش تشکر می‌کنم. همچنین از دوستانم که ضمن مطالعه نسخه‌های اولیه کتاب پیشنهادهای سازنده‌ای مطرح کردند سپاسگزارم. از مرکز آیوکا نیز به دلیل امکان استفاده از تجهیزات رایانه‌ای اش تشکر می‌کنم.

معرفی عالم

۱.۱ فهرست کیهانی

کشتی بزرگی را مجسم کنید که حامل بار سیب زمینی است و در اقیانوسی حرکت می‌کند. داخل یکی از سیب زمینی‌ها حشره‌ای وجود دارد که در پی شناسایی ماهیت اقیانوسی است که کشتی در آن حرکت می‌کند. سر آرتور ادینگتون^۱، اخترشناس مشهور انگلیسی، زمانی جستجوی بشر برای درک اسرار عالم را با فعالیت‌های حشره داخل سیب زمینی مثال بالا مقایسه کرد. تا جایی که به مقایسه ابعاد مربوط می‌شود حق با ادینگتون است؛ اما در ارتباط با ماهیت شناخت عالم او کاملاً در اشتباه بود. این «حشرات داخل سیب زمینی» - یا آبرومندانه‌تر، همان اخترشناسان و کیهان‌شناسان - به طور حتم چیزهای زیادی درباره محتویات و ماهیت کیهان آموخته‌اند.

اگر در شبی صاف به آسمان نگاه کنید، گستره عظیمی از ستاره‌های جذاب و درخشان و - احتمالاً - ماه و تعدادی از سیاره‌ها را خواهید دید. همچنین، ممکن است حتی بتوانید تعدادی از صورت‌های فلکی مثل خرس بزرگ [دب اکبر] را تشخیص دهید. به این ترتیب، شاید به این دیدگاه برسید که عالم از مجموعه‌ای از ستاره‌ها، سیارات و ماه ساخته شده است. نه، این‌طور نیست، خیلی بیش‌تر از آنچه با چشم غیرمسلح دیده می‌شود در عالم وجود دارد.

هر یک از ستاره‌هایی که در آسمان می‌بینید شبیه خورشید خودمانند، و مجموعه همه این ستاره‌ها «راه کاهکشان» (کاهکشان راه شیری) نامیده می‌شوند.

1. Sir Arthur Eddington

تلسکوپ‌ها نشان می‌دهند که عالم از میلیون‌ها کهکشان، شبیه کهکشان خودمان — هر یک شامل تعداد بی‌شماری ستاره — تشکیل شده است که در فاصله‌های زیادی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. سایر کهکشان‌ها آن‌قدر دورند که نمی‌توانیم با چشم غیر مسلح آن‌ها را ببینیم. بنابراین آنچه شما در آسمان شب می‌بینید تنها قطره کوچکی است از دریای عظیم کیهان. برای شناخت و درک عالم، ضروری است، نخست با اعداد بزرگ، که برای توصیف کیهان به کار می‌آیند، آشنا شویم.

برای انجام این کار به طور اصولی، از سیاره خودمان، زمین، آغاز می‌کنیم. شعاع زمین ۶۴۰۰ کیلومتر است که در مقایسه با استانداردهای امروزی حمل و نقل عدد کوچکی است. یک جت تجاری می‌تواند در مدت حدود چهل ساعت زمین را دور بزند. نزدیک‌ترین جسم کیهانی به زمین، ماه است که در فاصله حدوداً چهارصد هزار کیلومتری قرار دارد. این فاصله تقریباً شصت برابر شعاع زمین است و آپولو ۱۱ — که بشر را برای اولین بار به ماه برد — چهار روز در راه بود تا این فاصله را طی کرد. همان طور که می‌دانید ماه تنها قمر زمین است که هر سی روز یک بار به دور زمین می‌چرخد. البته خود زمین هم به دور خورشید می‌چرخد که در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری آن قرار دارد. اگر آپولو ۱۱ می‌خواست این فاصله را طی کند، تقریباً پنج سال طول می‌کشید. چندین سیاره دیگر هم وجود دارند که در فواصل مختلف از خورشید، مثل زمین، به دور آن می‌چرخند. نزدیک‌ترین آن‌ها به خورشید عطارد است و سیاره بعدی، زهره (احتمالاً آن را به عنوان «ستاره شامگاهی» می‌شناسید) و سومین سیاره زمین است. بعد از زمین، به ترتیب افزایش فاصله، سیارات مریخ (سیاره سرخ)، مشتری، زحل (سیاره حلقه‌دار)، اورانوس، نپتون و پلوتو قرار دارند. پلوتو، دورترین سیاره شناخته‌شده منظومه شمسی، در فاصله‌ای نزدیک به چهل برابر فاصله زمین از خورشید قرار دارد. بنابراین منظومه سیاره‌ای ما شعاعی در حدود شش هزار میلیون کیلومتر دارد.

این فواصل با ارقام بزرگی بیان می‌شوند، و بهتر است از یکاهای بزرگ‌تری برای توصیف این فواصل نجومی استفاده کنیم. مثلاً شما طول یک مداد را بر حسب سانتیمتر اندازه می‌گیرید ولی فاصله بین دو شهر را بر حسب کیلومتر که یکای بزرگ‌تری است، بیان می‌کنید. به همین ترتیب، استفاده از یک یکای زمینی نظیر کیلومتر، برای توصیف ابعاد کیهانی نامناسب به نظر می‌رسد؛ و برای این منظور،

چنانچه یکاهای بزرگ‌تری در اختیار داشته باشیم، عالی خواهد بود. چنین یکایی که به طور گسترده استفاده می‌شود، سال نوری نام دارد. با وجود آن که در نام این یکا کلمه «سال» وجود دارد، یکای فاصله است و نه زمان. یک سال نوری مسافتی است که نور در یک سال طی می‌کند. نور مسافتی نزدیک به سیصد هزار کیلومتر را در یک ثانیه طی می‌کند، بنابراین، یک سال نوری حدود ده میلیون میلیون کیلومتر است. چنانچه بخواهیم این فاصله را به طور کامل بنویسیم می‌شود ۱۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ کیلومتر. برای سهولت در نوشتن از نماد 10^{13} کیلومتر برای مشخص کردن این کمیت استفاده می‌کنیم. این نماد بیانگر عددی است که از حاصل ضرب ده به اندازه سیزده بار در خودش به دست می‌آید، یعنی عدد یک به همراه سیزده صفر مقابلش. بنابراین ممکن است بگوییم که یک سال نوری حدود 10^{13} کیلومتر است.

وقتی مقیاس‌های بزرگ را در نظر می‌گیریم، این یکا، یعنی سال نوری، مفید واقع می‌شود. همان طور که قبلاً گفتیم خورشید تنها یکی از صد هزار میلیون ستاره‌ای است که در کنار یکدیگر در کهکشانی موسوم به «راه کاهکشان» قرار دارند. با استفاده از نماد کوتاه‌نویسی، می‌توانیم بگوییم که کهکشان ما دارای حدود 10^{11} ستاره است. نزدیک‌ترین ستاره به خورشید «آلفا قنطورس» نام دارد. فاصله این ستاره از ما که در صورت فلکی قنطورس قرار دارد، حدود چهار سال نوری است. به بیان دیگر، یک پرتو نور — که می‌تواند منظومه سیاره‌ای ما را در مدت یازده ساعت ببیند — حدود چهار سال در راه خواهد بود تا به نزدیک‌ترین ستاره برسد! (همین مسافت را آپولو ۱۱ در مدت یک میلیون سال طی می‌کند!) همه ستاره‌هایی که در آسمان می‌بینید متعلقند به راه کاهکشان که در فواصل مختلفی از ما قرار دارند. هر کدام از آن‌ها ممکن است به بزرگی و درخشانی خورشید باشد و احتمالاً دارای یک منظومه سیاره‌ای. شعرای یمانی، درخشان‌ترین ستاره آسمان، در فاصله تقریبی هشت سال نوری قرار دارد؛ ستاره قرمز رنگ منکب الجوزا، در صورت فلکی آشنای جبار، در فاصله ششصد سال نوری، و ستاره قطبی در فاصله هفتصد سال نوری قرار دارد. نوری که امروزه از ستاره قطبی دریافت می‌کنیم در قرن چهاردهم گسیل شده است! گستردگی کل راه کاهکشان حدود 45000 سال نوری است. می‌بینیم که برای توصیف کهکشان خودمان، حتی سال نوری یکای کوچک نامناسبی است. بنابراین

اخترشناسان از یکای بزرگ‌تری موسوم به «کیلوپارسک» (به اختصار، kpc) استفاده می‌کنند. یک کیلوپارسک حدود سه هزار سال نوری است. شعاع یک کهکشان نوعی (شبیه کهکشان ما) حدود پانزده کیلوپارسک است. کیلوپارسک، رایج‌ترین یکا در نقشه‌برداری عالم است. درست مثل خورشید که ستاره‌ای متوسط در راه کاهکشان است، خود کهکشان ما نیز فقط یکی از بی‌شمار کهکشان موجود در عالم است. تلسکوپ‌های قوی آشکار ساختند که عالم شامل صد میلیون کهکشان مشابه کهکشان خودمان است. نزدیک‌ترین کهکشان بزرگ به ما «آندرومدا» نام دارد. این کهکشان که در فاصله هفتصد کیلوپارسک قرار دارد به زحمت با چشم غیر مسلح قابل رؤیت است و در صورت فلکی آندرومدا به صورت ابری فوق‌العاده رقیق دیده می‌شود. کهکشان آندرومدا نیز مثل کهکشان ما از 10^{11} ستاره تشکیل شده است. (فقط محض یادآوری، 10^{11} یعنی ۱۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ یا یک به همراه یازده صفر در مقابلش. از این نمادگذاری برای کوتاه‌نویسی، در این کتاب، بارها استفاده خواهیم کرد.) اما چون کهکشان آندرومدا خیلی دور است، نمی‌توانیم به طور منفرد ستاره‌های آن را با چشم غیر مسلح ببینیم.

در اطراف راه کاهکشان و آندرومدا حدود سی کهکشان دیگر وجود دارد. برخی از این‌ها، موسوم به «کهکشان‌های کوتوله» از نظر اندازه به طور قابل ملاحظه‌ای کوچکند و هر یک شامل فقط حدود یک میلیون ستاره‌اند. تعداد کمی هم از این کهکشان‌های اطراف آندرومدا، ابعاد بزرگ‌تری دارند. راه کاهکشان، آندرومدا و این کهکشان‌ها، جملگی یکای بعدی را در مقیاس کیهانی تشکیل می‌دهند که به «کهکشان‌های گروه محلی» مشهورند. اندازه گروه محلی حدود هزار کیلوپارسک یا یک مگاپارسک (Mpc) است.

این که کهکشان‌ها به صورت گروه‌ها یا خوشه‌هایی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند ویژگی عمومی عالم ماست. اخترشناسان تعداد زیادی از خوشه‌های کهکشانی را کشف کرده‌اند که برخی از آن‌ها بسیار بزرگ‌تر از گروه محلی‌اند. برخی از خوشه‌های کهکشانی بزرگ، مثل خوشه گیسو شامل حدود هزار کهکشانند.

آیا ساختارهایی بزرگ‌تر از خوشه‌های کهکشانی نیز وجود دارند؟ مشاهدات نشان می‌دهند که خود خوشه‌ها ممکن است مجموعه‌های بزرگ‌تری را تشکیل دهند با ابعاد سی تا شصت مگاپارسک به نام «ابرخوشه». مثلاً گروه محلی ما یکی

از اعضای پیرامونی ابرخوشه‌ای موسوم به «سنبله» به شمار می‌آید. با این حال، شواهد مبنی بر وجود ابرخوشه‌ها به محکمی شواهد مربوط به خوشه‌ها نیست.

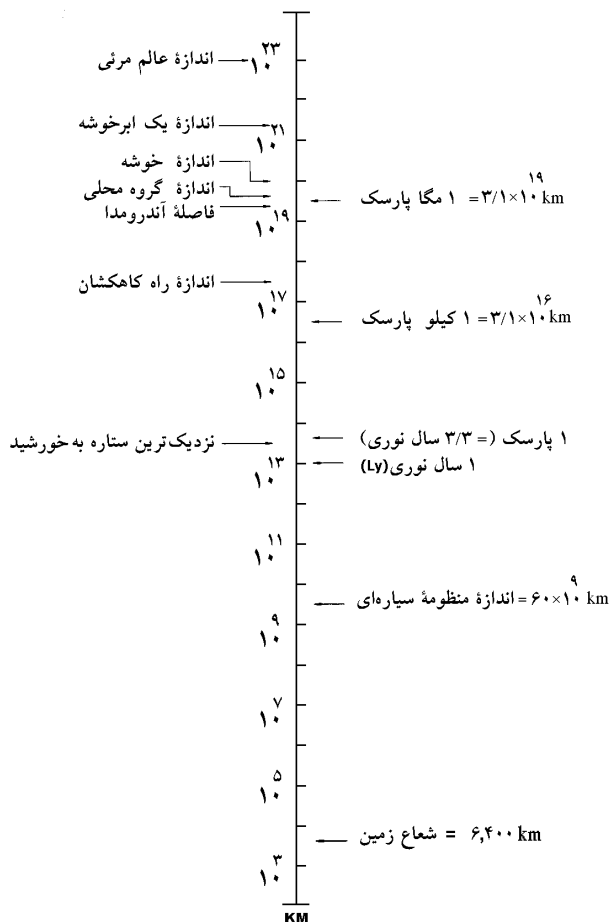
اندازه خود عالم چقدر است؟ امروزه با تلسکوپ‌های قوی می‌توانیم تا فواصل سه هزار تا شش هزار پارسی را بررسی کنیم. به عبارت دیگر، می‌توانیم بگوییم که اندازه منطقه قابل مشاهده عالم تقریباً هزار برابر بزرگ‌تر از اندازه یک خوشه کپکشان‌ی است.

باید متوجه شده باشید که در این سیر، از زمین تا یک خوشه کپکشان‌ی، با سلسله‌مراتبی از ساختارها روبرو شدیم (شکل ۱.۱ را ببینید). کوچک‌ترین آن، منظومه سیاره‌ای اطراف یک ستاره است. اندازه چنین منظومه‌ای حدود ده ساعت نوری است. در نتیجه، مجموعه ستاره‌ها که یک کپکشان را می‌سازند دارای اندازه‌ای در حدود بیست کیلوپارسی است؛ و خود کپکشان‌ها، گروه‌ها و خوشه‌هایی را با اندازه‌ای در حدود چند مگاپارسیک شکل می‌دهند. و کل منطقه مشاهده‌شده عالم ابعادی در حدود شش هزار مگاپارسیک دارد.

اگر فرض کنید یک سکه یک سانتیمتری نمایشگر منظومه شمسی باشد، در آن صورت نزدیک‌ترین ستاره به ما در فاصله شصت متری قرار دارد و اندازه راه کپکشان حدود هفتصد کیلومتر خواهد بود! این مثال نشان می‌دهد که چقدر کل منظومه سیاره‌ای ما در مقایسه با کپکشان‌ی که در آن زندگی می‌کنیم، کوچک است. در پایین سلسله‌مراتب، سیاراتی را داریم که به دور خورشید می‌چرخند. درباره ساختارهای بزرگ‌تر در این سلسله مراتب چه می‌توان گفت؟ به نظر نمی‌رسد که هیچ کدام از این ساختارها بدون حرکت باشند (جدول ۱.۱ را ببینید). خورشید – و

جدول ۱.۱ ساختارها در عالم

ساختار	اندازه	سرعت
منظومه سیاره‌ای	$6 \times 10^9 \text{ km}$	30 km s^{-1}
کپکشان	20 kpc	200 km s^{-1}
گروه محلی	1 Mpc	100 km s^{-1}
خوشه	5 Mpc	1000 km s^{-1}



شکل ۱۰۱ عالم ما از سیارات گرفته تا ابرخوشه‌ها، شامل سلسله‌مراتبی از ساختارهاست. کوچک‌ترین واحد، منظومه شمسی است؛ مشتمل بر خورشید و سیاراتی که به دور آن می‌چرخند. خود خورشید نیز فقط یکی از صد میلیارد ستاره‌ای است که کهکشان ما را می‌سازند. کهکشان ما نیز یکی از اعضای گروه محلی است. این گروه از سی کهکشان یا بیش‌تر تشکیل شده که تحت تأثیر جاذبه گرانشیشان در حرکتند. عالم از چنین گروه‌ها و خوشه‌های کهکشانی تشکیل شده که به‌طور تقریباً یکنواخت در فضا پراکنده شده‌اند. مقیاس‌های طولی مستناظر با هر یک از این ساختارها، در این شکل، مشخص شده‌اند.

یا هر ستاره دیگر در یک کهکشان - با سرعتی نزدیک به دویست کیلومتر در ثانیه در حرکت است. حتی کهکشان ما نیز ساکن نیست و با سرعت صد کیلومتر در ثانیه به سمت کهکشان آندرومدا حرکت می‌کند. به علاوه، کل گروه محلی با سرعت تقریباً ششصد کیلومتر در ثانیه به سمت جایی در ابرخوشه سنبله در حرکت است. در حقیقت، عالم ما بر پایه تعادل ظریف و پیچیده‌ای بین حرکت و نیروی گرانشی استوار است. با دانستن ابعاد سیستم‌های مختلف و سرعت اجرامی که در آنها حرکت می‌کنند، می‌توان دوره تناوب مداری هر یک از این اجرام را محاسبه کرد. در کوچک‌ترین مقیاس، در حالی که یک دور گردش کامل زمین به دور خورشید یک سال به طول می‌انجامد، گردش کامل دورترین سیاره، یعنی پلوتو، به دور خورشید ۲۵۰ سال طول می‌کشد. مقیاس‌های زمانی مربوط به کهکشان‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌ترند. به عنوان مثال، ستاره‌ای مثل خورشید برای طی کردن یک دور کامل گردش حول مرکز کهکشان، دویست میلیون سال در راه است؛ و رفتن کهکشانی از انتهای خوشه‌ای به انتهای دیگر آن، پنج میلیارد سال طول می‌کشد. جالب است که این ارقام را با سن اجرام مختلف موجود در عالم مقایسه کنیم. سن زمین حدود ۴/۶ میلیارد سال تخمین زده می‌شود؛ به بیان دیگر، زمین از ابتدای شکل‌گیری‌اش بیش از چهار میلیارد بار به دور خورشید چرخیده است. طول عمر ستاره‌ای مثل خورشید تقریباً ده میلیارد سال است، یعنی این ستاره ممکن است در طول عمرش پنجاه بار به دور مرکز کهکشان بچرخد. سن دقیق ساختارهای بزرگ‌تر، نظیر کهکشان‌ها یا خوشه‌ها، کم‌تر مشخص است؛ اما همان‌طور که در فصل‌های بعدی خواهیم دید، احتمالاً سن آنها در حدود سیزده میلیارد سال است. این همان مقیاس زمانی است که بیش‌تر پدیده‌های کیهانی طی آن اتفاق می‌افتند.

۲.۱ سؤالات بزرگ

این فقط اندازه عالم نیست که تنوع جالب توجهی از خود نشان می‌دهد. در واقع، در مقیاس‌های مختلف پدیده‌های فیزیکی به شدت تغییر می‌کنند. مثلاً ستاره‌های راه کاهکشان دارای ابعاد و سنین متفاوتی هستند: ستاره‌های نوزاد، میانسال و پیر. همچنین بقایای ستاره‌های مرده را به صورت «کوتوله‌های سفید»، «ستاره‌های نوترونی»، و احتمالاً «سیاهچاله» می‌بینیم. مناطقی از کهکشان ما شامل مقادیر

زیادی گاز و گرد و غبارند که در برابر ستاره‌های درخشان کنش کاملاً متفاوتی دارند. در مقیاس بعدی، خود کهکشان‌ها اشکال و اندازه‌های جالبی دارند و ویژگی‌های کاملاً متفاوتی نشان می‌دهند؛ و همچنین عالم شامل اجرام اسرارآمیزی است نظیر «اخترش‌ها» که حتی در این فصل اشاره‌ای به آن‌ها نکردیم.

توضیحات بالا چندین پرسش کلیدی را پیش می‌کشد: چگونه همه این ساختارها – از سیارات گرفته تا ابرخوشه‌ها – شکل می‌گیرند؟ چه وقت شکل گرفته‌اند و چه فرایندهای فیزیکی، خصوصیات آن‌ها را مشخص کرده‌اند؟ نحوه پراکندگی آن‌ها در فضا چگونه است؟ در آینده چه بر سر این ساختارها و عالم خواهد آمد؟

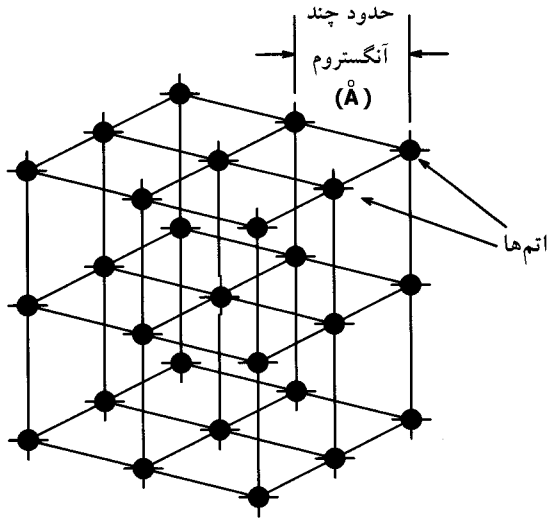
کیهان‌شناسی نوین برای بسیاری از این پرسش‌ها و سؤالات وابسته، پاسخ‌هایی یافته است. به نظر می‌رسد که کهکشان‌های نخستین حدود دوازده میلیارد سال پیش به وجود آمدند، و ستاره‌ها و سیارات از مواد موجود در این کهکشان‌ها شکل گرفته‌اند. ساختارهای بزرگ‌تر، نظیر خوشه‌ها و ابرخوشه‌ها، احتمالاً از به هم پیوستن کهکشان‌ها تحت تأثیر جاذبه گرانشیشان به وجود آمده‌اند. به نظر می‌رسد همه این پدیده‌ها بر اساس قوانین بنیادی فیزیکی حاکم بر رفتار ماده و تابش، قابل درک خواهند بود. در این کتاب به تفصیل درباره همه این موارد صحبت خواهیم کرد. برای دستیابی به پاسخ چنین پرسش‌هایی، نخست باید بفهمیم که چگونه قوانین طبیعت، رفتار ماده و تابش را تعیین می‌کنند و بر آن‌ها تأثیر می‌گذارند. این همان کاری است که در فصل آینده انجام خواهیم داد. در فصل ۳ به اختصار توضیح خواهیم داد که چگونه اخترشناسان درباره عالم اطلاعات جمع‌آوری می‌کنند. در فصل ۴ با استفاده از مفاهیم ارایه شده در فصل ۲، به توصیف ساختارهای موجود در عالم می‌پردازیم. شرحی از وضعیت دینامیکی عالم در فصل ۵، و جزئیات مربوط به شکل‌گیری ساختارهای مختلف در فصل ۶ ارایه خواهد شد. در فصل ۷ به بحث درباره دورترین قلمروهای فضا، که نجوم مستقیماً بررسی کرده است، می‌پردازیم. و سرانجام، فصل آخر، خلاصه‌ای است از درک و شناخت کنونی ما نسبت به عالم.

ماده، تابش و نیروها

۱.۲ سفری به اعماق ماده

شرایط موجود در مرکز یک ستاره یا فضای میان کهکشان‌ها، با شرایطی که در زندگی روزمره با آن مواجهیم کاملاً فرق می‌کند. برای شناخت و ویژگی‌های، مثلاً، یک ستاره یا یک کهکشان، ضروری است ماهیت و رفتار ماده را در شرایط مختلف بشناسیم. یعنی، لازم است اجزای بنیادی ماده و قوانین حاکم بر رفتارشان را بفهمیم.

یک قطعه یخ را در نظر بگیرید، چیزی که در زندگی روزمره با آن کاملاً آشنا هستید. یخ هم مثل اکثر جامدات، شکل مشخصی دارد. زیرا اتم‌های آن - که اجزای بنیادی ماده‌اند - به طور منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. چنین قرارگیری منظم اتم‌ها، «شبه بلوری» نامیده می‌شود و بنابراین می‌توان گفت که اکثر جامدات، ساختاری «بلوری» دارند (شکل ۱.۲ را ببینید). البته اتم‌ها بی‌نهایت ریزند و در یک شبکه بلوری بسیار نزدیک یکدیگر قرار گرفته‌اند. فقط در یک سانتیمتر از یک ماده جامد، حدود صد میلیون اتم کنار هم قرار گرفته‌اند. با استفاده از نماد کوتاه‌نویسی که در فصل قبل معرفی کردیم می‌توانیم بگوییم که در یک سانتیمتر یخ، 10^8 اتم وجود دارد. این بدان معناست که فاصله بین اتم‌ها در یک شبکه بلوری، صد میلیونوم سانتیمتر است. معمولاً این عدد را به صورت 10^{-8} - 10^{-10} سانتیمتر می‌نویسند. نماد 10^{-8} ، با علامت منفی قبل از ۸، به معنای یک در صد میلیون است. (در این نمادگذاری که بارها استفاده خواهیم کرد، یک‌دهم به صورت 10^{-1} ، یک‌صدم به صورت 10^{-2} و ... نمایش داده خواهد شد. همچنین $10^{-3} \times 2$ نمایشگر دوهزارم، و $10^3 \times 3$ نمایشگر سه هزار خواهد بود در حالی که $10^{-3} \times 30$ نمایشگر سه هزارم است.)



شکل ۱.۲ بسیاری از جامدات از آرایه منظمی از اتم‌ها به صورت شبکه، ساخته شده‌اند. این شکل «ساختار بلوری» چنین جامد ساده‌ای را نشان می‌دهد که در آن، هر اتم در یک گوشه یک مکعب قرار دارد. البته در بلورها، وجود ساختارهای بسیار پیچیده‌تر، ولی تناوبی، نیز ممکن است. نیروهای الکترومغناطیسی اتم‌ها را در جایشان نگاه می‌دارند و متوسط فاصله اتم‌ها از یکدیگر حدود چند آنگستروم است.

برای توصیف پدیده‌ها در مقیاس اتمی باید از چنین طول‌های کوچکی استفاده کنیم. درست همان‌طور که برای مطالعه اجرام نجومی بزرگ، یکاهای جدید طول، نظیر سال نوری و کیلوپارسک را معرفی کردیم؛ برای توصیف ابعاد خیلی کوچک نیز لازم است یکاهای جدیدی را معرفی کنیم. طول 10^{-8} سانتیمتر، یکای مناسبی است و یک آنگستروم (به اختصار، 1A) نامیده می‌شود. بنابراین فاصله اتم‌های یک بلور حدود یک آنگستروم است. مکعب جامد کوچکی به ضلع یک سانتیمتر شامل 10^{24} اتم است.

چه عاملی این اتم‌ها را در چنین ردیف‌های منظمی نگه می‌دارد؟ به نظر می‌رسد که نیروهای مشخصی حضور دارند که با عمل کردن بین اتم‌ها، ضمن آن‌که آن‌ها را به صورت شبکه بلوری درمی‌آورند، ویژگی‌های خاصی به جامدات می‌بخشند.

(دربارهٔ این نیروها در بخش ۲.۲ بیش‌تر صحبت خواهیم کرد.) به تجربه می‌دانید که با یخ‌خردکن راحت‌تر می‌توان یک قالب یخ را به قطعات کوچک‌تر تقسیم کرد. در این فرایند، با صرف انرژی، بر نیروهایی غلبه می‌شود که شبکهٔ بلوری را استوار نگه داشته‌اند.

حال سعی می‌کنیم با این تصور که این فرایند ممکن است به طور پیوسته تا بی‌نهایت ادامه یابد، «آزمایشی تخیلی» را انجام دهیم. اگر انرژی بیش‌تر و بیش‌تری صرف یک جسم جامد کنیم چه اتفاقی خواهد افتاد؟ پاسخ، با توجه به تجربیات زندگی روزمره، باید روشن باشد. گرما شکلی از انرژی است؛ و گرم کردن یک قطعه یخ، یکی از راه‌های صرف انرژی محسوب می‌شود. و شما می‌دانید، چنانچه مقدار کافی انرژی گرمایی به یک قطعه یخ بدهیم، ذوب و به آب تبدیل می‌شود. گرما، انرژی کافی برای شکستن پیوندهای بین اتم‌های یک شبکهٔ بلوری را فراهم می‌کند. دقیقاً به همین دلیل است که یخ، سختی‌اش را از دست می‌دهد. نظیر همین فرایند در هر جامدی ممکن است رخ دهد. چنانچه جسم جامدی را گرم کنیم – و انرژی بیش‌تر و بیش‌تری صرف آن کنیم – لحظه‌ای فرا می‌رسد که این جسم جامد ذوب و به مایع تبدیل می‌شود. (البته مقدار انرژی گرمایی لازم برای ذوب مواد جامد گوناگون، یکسان نیست؛ مثلاً، ذوب کردن یک تکه یخ آسان‌تر از یک قطعه آهن است.) برای ذوب یک گرم یخ به حدود هشتاد کالری انرژی نیاز است. این کمیت، یعنی «کالری»، یکای اندازه‌گیری انرژی است. (این یکا، با همان یکایی که عموماً در رژیم‌های غذایی و تمرینات ورزشی استفاده می‌شود، ارتباط دارد. همهٔ آن‌ها با مصرف و سوخت انرژی سر و کار دارند.) همچنین در فیزیک، استفاده از چندین یکا برای انرژی مفید است که از همه متداول‌تر «ارگ» است. یک ارگ حدود $10^{-8} \times 2/38$ کالری است؛ بنابراین برای ذوب یک گرم یخ حدود $10^9 \times 3/4$ ارگ انرژی لازم است. در این مرحله، یخ دیگر سختی‌اش را از دست می‌دهد و به آسانی «جریان» می‌یابد.

البته می‌توانیم آزمایش تخیلی بالا را باز هم با دادن گرمای بیش‌تر به مایع ادامه دهیم. در ابتدا، آب فقط گرم‌تر و گرم‌تر می‌شود. خیلی زود، تغییر دیگری روی می‌دهد و مایع به گاز تبدیل می‌شود؛ یعنی، آب به بخار تبدیل می‌شود. توجه دارید که بخار در مقایسه با آب، تقریباً غیرقابل مشاهده است. این موضوع به این دلیل

است که اتم‌های بخار آب در مقایسه با اتم‌های آب، در فواصل بیش‌تری از یکدیگر پراکنده شده‌اند. (اتم‌های یک سانتیمتر مکعب بخار، تقریباً یک‌هزارم اتم‌های یک سانتیمتر مکعب آب است.) مرحله‌گازی نیز در مورد سایر جامدات وجود دارد؛ مثلاً با گرم کردن آهن مذاب می‌توانیم بخاری گازی از اتم‌های آهن تولید کنیم.

در این آزمایش تخیلی با سه حالت مهم ماده؛ یعنی جامد، مایع و گاز مواجه شدیم. بسته به ساختار درونی مواد، برخی عناصر در دمای اتاق جامدند (مثل آهن و مس)؛ برخی مایع (مثل جیوه و بُرم)؛ و برخی دیگر گازند (نظیر اکسیژن و هیدروژن). با این حال، امکان تبدیل بیش‌تر این عناصر از یک حالت به حالت دیگر با گرمایش یا سرمایش وجود دارد. به عنوان مثال، می‌دانیم وقتی بخار آب در زیر صد درجه سانتیگراد «سرد» شود، به آب تبدیل خواهد شد. و یا با سرد کردن اکسیژن به اندازه ۱۸۳- درجه سانتیگراد (یعنی ۱۸۳ درجه زیر صفر) می‌توان اکسیژن مایع به دست آورد. (برای کامل بودن بحث، لازم به ذکر است که برخی از جامدات به عوض ساختار بلوری، ماهیتی آمورف دارند. البته این‌ها استثنا هستند که مورد توجه ما نیز نیستند.)

چون با گرم کردن دما افزایش می‌یابد، روشن است که دما معیاری است برای اندازه‌گیری انرژی درونی یک جسم. ثابت شده است که پایین‌ترین تراز انرژی هر ماده‌ای تقریباً ۲۷۳- درجه سانتیگراد است و غیرممکن است جسمی را تا دمایی کم‌تر از این مقدار سرد کرد. (همان‌طور که می‌دانید برای سرد کردن یک جسم باید انرژی گرمایی آن را بگیریم؛ حال اگر جسم در پایین‌ترین تراز انرژی باشد، طبیعی است که این کار غیرممکن خواهد بود.) در فیزیک، اغلب بهتر است از یکای متفاوت دیگری استفاده شود که صفر آن، متناظر با کم‌ترین دمای ممکن است. این یکا که «کلوین» نام دارد طوری تعریف می‌شود که صفر آن متناظر با ۲۷۳- درجه سانتیگراد باشد. برای محاسبه دما بر حسب کلوین، کافی است عدد ۲۷۳ را به دما بر حسب درجه سانتیگراد اضافه کنیم. بنابراین، دمای ۱۸۳- درجه سانتیگراد (دمایی که در آن اکسیژن مایع می‌شود) متناظر با $۹۰ = ۲۷۳ + ۱۸۳$ - درجه کلوین است.

همان‌طور که دیدید می‌توانیم یک ماده جامد را با دادن انرژی، به مایع و گاز تبدیل کنیم. اما اگر هنوز هم انرژی بیش‌تری به یک گاز بدهیم چه اتفاقی خواهد افتاد؟ برای پاسخگویی به این سؤال، ضروری است نگاه دقیق‌تری به سرشت ماده

بیندازیم. مثلاً، ساده‌ترین نوع گاز یعنی هیدروژن را در نظر بگیرید. جزء بنیادی گاز هیدروژن، در حقیقت، اتم هیدروژن نیست؛ بلکه این «مولکول» هیدروژن است که گاز از آن تشکیل شده است. هر مولکول هیدروژن از دو اتم هیدروژن مقید به یکدیگر ساخته شده است. (در حقیقت در مورد یخ، آب و بخار هم قدری بحث را ساده ارایه کردیم. جزء سازنده آب یعنی مولکول آب نیز از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن تشکیل شده است.) انرژی پیوندی لازم برای کنار هم قرار گرفتن دو اتم هیدروژن و تشکیل مولکول هیدروژن، از طریق نیروهای الکترومغناطیسی بین اتم‌ها تأمین می‌شود. به طور اصولی، این نیرو دقیقاً همان نیرویی است که مسئول ماهیت بلوری جامدات است. اگر بتوانیم انرژی کافی برای غلبه بر این انرژی پیوندی را تأمین کنیم، آن‌گاه مولکول هیدروژن شکسته خواهد شد و دو اتم هیدروژن مجزا خواهیم داشت. بر اساس آزمایش‌های مختلف، مشخص شده است که برای شکستن یک مولکول هیدروژن به دو اتم هیدروژن به حدود $10^{-12} \times 7/2$ ارگ انرژی نیاز است. باز هم می‌بینیم که در فرایندهای مرتبط با مولکول‌ها یا اتم‌ها، در مقایسه با زندگی روزمره، با اعداد بسیار کوچکی سر و کار داریم. در فرایندهای اتمی و مولکولی هنوز هم بهتر است از یکای دیگر انرژی به نام الکترون‌ولت (eV) استفاده کنیم. یک الکترون‌ولت معادل $10^{-12} \times 1/6$ ارگ است؛ بنابراین، انرژی پیوندی مولکول هیدروژن تقریباً $4/5$ الکترون‌ولت می‌شود.

یک راه ممکن برای تأمین این انرژی این است که دو مولکول هیدروژن با سرعت کافی با یکدیگر برخورد کنند. وقتی گازی را گرم می‌کنیم، مولکول‌های آن با سرعت بیش‌تری حرکت می‌کنند. از طرف دیگر، این راه هم می‌دانیم که وقتی به گازی انرژی گرمایی می‌دهیم، دمایش افزایش می‌یابد. در حقیقت، این دو توصیف یکسان هستند؛ دمای یک گاز تقریباً بیانگر انرژی متوسط مولکول‌های گاز است که به طور تصادفی در حرکتند. اگر گاز هیدروژن در دمای اتاق باشد (حدود ۲۷ درجه سانتیگراد، معادل ۳۰۰ درجه کلوین)، انرژی هر یک از مولکول‌ها، به طور میانگین، حدود $0/26$ الکترون‌ولت خواهد بود. حال اگر دما صد برابر شود، انرژی هر مولکول صد برابر بیش‌تر می‌شود، یعنی حدود $2/6$ الکترون‌ولت. با گرم کردن گاز به حدود $52000 \text{ K} = 10^4 \times 5/2$ ، میانگین انرژی هر مولکول $4/5$ الکترون‌ولت خواهد بود. وقتی مولکول‌های هیدروژن با چنین انرژی با یکدیگر برخورد کنند، این

امکان به خوبی وجود دارد که هر مولکول هیدروژن به دو اتم هیدروژن مجزا تقسیم شود. گاز هیدروژن در دماهایی بالاتر از این مقدار به صورت اتمی خواهد بود و نه مولکولی.

چنانچه پافشاری کنیم و باز هم انرژی بیش تری به گاز بدهیم چه خواهد شد؟ در این صورت، انرژی مستقیماً به اتم‌های هیدروژن داده می‌شود. بنابراین، برای پاسخگویی به این سؤال، لازم است نکاتی را دربارهٔ ماهیت و اجزای یک اتم بدانیم. یک اتم از «هسته» و ذراتی به نام «الکترون» تشکیل می‌شود. می‌توانیم مدلی که برای اتم در نظر می‌گیریم به صورت هسته‌ای در مرکز باشد که الکترون‌ها به دور آن در گردشند. (لازم به تأکید است که چنین تصویری از اتم فوق‌العاده ساده‌انگارانه است. در مقیاس اتمی، مفاهیمی مثل مدار خیلی دقیق نیستند. با این حال، چنین تصویری برای درک و شناخت برخی از پدیده‌های اتمی مفید است و به استفاده از آن ادامه خواهیم داد.) خود هستهٔ اتم نیز از دو نوع ذره به نام‌های «پروتون» و «نوترون» تشکیل می‌شود. از این ذرات، پروتون‌ها حامل بار الکتریکی مثبتند و نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند؛ بنابراین، هسته که از نوترون و پروتون تشکیل می‌شود، به طور خالص، دارای بار الکتریکی مثبت خواهد بود. الکترون‌ها که به دور هسته می‌چرخند حامل بار منفی‌اند. یک اتم به تعداد مساوی پروتون و الکترون دارد و بنابراین از نظر الکتریکی خنثی است. اندازهٔ یک اتم حدود چند آنگستروم است (به خاطر بیاورید که یک آنگستروم 10^{-8} سانتیمتر است)؛ و اندازهٔ هسته بسیار کوچک‌تر است، چیزی در حدود 10^{-13} سانتیمتر. (ممکن است عجیب به نظر برسد ولی بیش‌تر فضای داخل یک اتم خالی است و این بدان معناست که بخش عمدهٔ ماده، پوک و میان‌تهی است!)

با این‌که الکترون و پروتون حامل بارهای الکتریکی برابر و مخالفند، پروتون تقریباً ۲۰۰۰ برابر سنگین‌تر از الکترون است. سنگینی نوترون نیز تقریباً مثل پروتون است. بنابراین برای کلیهٔ مقاصد عملی، وزن یک اتم را نوترون‌ها و پروتون‌های هسته‌اش تشکیل می‌دهند.

هستهٔ هیدروژن هیچ نوترونی ندارد و بنابراین، ساختار اتمی هیدروژن بسیار ساده است. یعنی اتم هیدروژن شامل یک پروتون و یک الکترون است، که الکترون به دور پروتون می‌چرخد؛ درست مثل مولکول هیدروژن، اتم هیدروژن هم دارای

انرژی پیوندی مشخصی است. الکترون و پروتون در اتم هیدروژن به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند که همین نیرو مسئول پایداری ساختار اتم هیدروژن است. انرژی قیدی الکترون و پروتون اتم هیدروژن در حدود $۱۳/۶$ الکترون‌ولت است. اگر بتوانیم این مقدار انرژی را به الکترون اتم هیدروژن بدهیم، آن‌گاه اتم هیدروژن به اجزای سازنده‌اش یعنی الکترون و پروتون تقسیم می‌شود.

این کار را می‌توان با گرم کردن گاز هیدروژن تا دماهای باز هم بالاتر انجام داد. دیدیم که در دمای $۱۰^۴ \times ۵/۲$ درجهٔ کلوین، هر ذره دارای انرژی تقریبی $۴/۵$ الکترون‌ولت است. در نتیجه، با گرم کردن گاز تا سه برابر این دما، یعنی حدود $۱۰^۴ \times ۱۵/۶$ درجهٔ کلوین، می‌توانیم بر انرژی قیدی بین الکترون و پروتون در هیدروژن غلبه و اتم را تجزیه کنیم. البته دماهایی که برای تجزیهٔ مولکول هیدروژن و اتم هیدروژن تخمین زدیم بالاتر از مقدار واقعی است. وقتی گاز در دمای مشخصی است، همهٔ مولکول‌های آن انرژی یکسانی ندارند. انرژی بیش‌تر مولکول‌ها به دمای گاز مربوط می‌شود ولی همیشه بخش کوچکی از مولکول‌ها دارای انرژی بالاتر از مقدار میانگین هستند. وقتی توزیع انرژی‌ها را در یک گاز در نظر بگیریم، ثابت می‌شود که در عمل برای شکستن مولکول یا اتم هیدروژن، به دماهایی کم‌تر از آنچه تخمین زدیم نیاز است. با این حال، این واقعیت چندان به ایده‌های کلیدی که می‌خواهیم به آن‌ها بپردازیم مربوط نمی‌شود.

اگر گاز به عوض هیدروژن از عناصر دیگری، مثلاً اکسیژن، تشکیل شده باشد، آن وقت چه می‌شود؟ یک اتم اکسیژن از هشت الکترون و یک هسته که شامل هشت نوترون و هشت پروتون است، تشکیل می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم تعداد الکترون‌های یک اتم در حالت عادی با تعداد پروتون‌هایش برابر است و در نتیجه اتم از نظر الکتریکی خنثی است. (این‌که تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های اکسیژن یکسان است کاملاً اتفاقی است؛ عموماً این دو مقدار برابر نیستند.) این الکترون‌ها با مقادیر مختلف انرژی به هسته مقیدند. به عنوان مثال، الکترون‌هایی که در دورترین فاصله از هسته در گردش هستند کم‌ترین نیروی جاذبه را احساس می‌کنند و، در نتیجه، در مقایسه با سایر الکترون‌ها کم‌تر مقیدند. دورترین الکترون در اتم اکسیژن دارای انرژی قیدی $۱۳/۶$ الکترون‌ولت است. (این هم کاملاً اتفاقی است که انرژی قیدی دورترین الکترون اتم اکسیژن با انرژی قیدی الکترون اتم هیدروژن یکسان

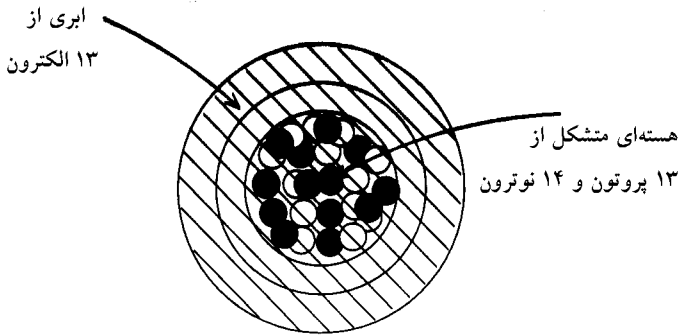
است!) در عوض، انرژی قیدی درونی ترین الکترون اتم اکسیژن حدود ۸۷۰ الکترون ولت است. چنانچه به اتم اکسیژن انرژی داده شود، نخست بیرونی ترین الکترون ها جدا می شوند و آنچه باقی می ماند هسته است با بقیه الکترون ها. وقتی الکترون ها را از هسته جدا می کنیم با پدیده جدیدی مواجه می شویم. چون یک اتم عادی به تعداد مساوی پروتون و الکترون دارد، از نظر الکتریکی خنثی است. بنابراین جامدات، مایعات و گازها که از چنین اتم هایی ساخته شده اند از نظر الکتریکی خنثی اند. حال، وقتی الکترون اتم هیدروژن را جدا می کنیم، تعادل بارهای مثبت و منفی برهم می خورد و به علت حضور پروتون در هسته، بار الکتریکی اتم مثبت می شود. البته الکترون آزاد شده دارای بار منفی است. به طور مشابه، اگر دو الکترون را، مثلاً، از اتم اکسیژن جدا کنیم، باز هم تعادل بارهای مثبت و منفی اتم به هم می خورد و چنین اتمی به گونه ای رفتار می کند که گویی حامل دو واحد بار مثبت است. در چنین وضعیتی آن را «یون» اکسیژن می نامند. (برعکس اتم اکسیژن که خنثی است.) بنابراین، جدا کردن دو الکترون از یک اتم خنثی، یونی حامل دو واحد بار مثبت بر جای می گذارد. به این فرایند «یونیدگی» می گویند. در این فرایند ماده ای که از نظر الکتریکی خنثی است به حالتی تبدیل می شود که شامل بارهای مثبت و منفی است. در حقیقت، این همان چهارمین حالت ماده است که «پلازما» نامیده می شود و نقشی اساسی در اختر فیزیک ایفا می کند (جدول ۱.۲ را ببینید). در مقیاس اتمی، همه مواد از پروتون، نوترون و الکترون تشکیل شده اند. بنابراین، می توان همه مواد را بر اساس تعداد پروتون ها (که عدد اتمی نام دارد) و

جدول ۱.۲ حالت های ماده

نام	ساختار
جامد	صلب؛ بلوری
مایع	بی شکل؛ با سطح مشخص
گاز	مولکول هایی که به طور تصادفی در حرکتند؛ بی شکل
پلازما	یون ها و الکترون هایی که به طور تصادفی در حرکتند

تعداد کل نوترون‌ها و پروتون‌های موجود در هسته طبقه‌بندی کرد (به این یکی آخری عدد جرمی گفته می‌شود چون مشخص می‌کند که جرم یک اتم چقدر است). هر عنصر شیمیایی عدد اتمی منحصر به فردی دارد. مثلاً عدد اتمی هیدروژن یک است؛ و عدد اتمی هلیوم دو است. ویژگی‌های شیمیایی هر عنصر را تعداد الکترون‌های آن، که با تعداد پروتون‌های هسته برابر است، تعیین می‌کند. با این حال، عدد جرمی یک عنصر کاملاً منحصر به فرد نیست. مثلاً هیدروژن را با عدد جرمی یک در نظر بگیرید که فقط یک پروتون دارد. این در حالی است که عنصر دیگری هم وجود دارد به نام دوتریوم که در هسته‌اش یک پروتون و یک نوترون دارد (و یک الکترون که به دور هسته می‌چرخد). به وضوح، هم دوتریوم و هم هیدروژن دارای تعداد پروتون (و الکترون) یکسانی‌اند و در نتیجه، عدد اتمیشان یکی است؛ اما وزن اتمی دوتریوم دو است در حالی که وزن اتمی هیدروژن یک است. چون خصوصیات شیمیایی عناصر بر اساس تعداد الکترون‌ها تعیین می‌شوند، هیدروژن و دوتریوم دارای ویژگی‌های مشابهی هستند. (مثلاً، درست همان طور که دو اتم هیدروژن می‌توانند با یک اتم اکسیژن ترکیب شوند و آب معمولی، یعنی H_2O بسازند؛ دو اتم دوتریوم هم می‌توانند با یک اتم اکسیژن ترکیب شوند و آب «سنگین»، یعنی D_2O تشکیل دهند.) به طور مشابه، هلیوم معمولی دارای عدد اتمی دو (دو پروتون و دو الکترون) و وزن اتمی چهار (دو پروتون و دو نوترون در هسته) است. با این حال، نوع دیگر هلیوم هم وجود دارد به نام هلیوم - ۳ که با عدد اتمی دو (دو پروتون و دو الکترون) دارای وزن اتمی سه است (دو پروتون و یک نوترون در هسته). این بار هم ویژگی‌های شیمیایی هلیوم معمولی (موسوم به هلیوم - ۴) و هلیوم - ۳ کاملاً مشابه است. به چنین عناصری (نظیر هیدروژن و دوتریوم، یا هلیوم - ۳ و هلیوم - ۴) «ایزوتوپ» گفته می‌شود. هر چند ویژگی‌های شیمیایی ایزوتوپ‌های یک عنصر یکسان است، هسته‌هایشان کاملاً فرق دارند و به طور متفاوتی رفتار می‌کنند.

با افزایش عدد اتمی، اتم‌ها بزرگ‌تر می‌شوند و عموماً خصوصیات پیچیده‌تری از خود نشان می‌دهند. به طور طبیعی، محدوده‌ی اعداد اتمی عناصر موجود از یک تا ۹۲ است. به عنوان مثال، آلومینیوم دارای عدد اتمی ۱۳ و وزن اتمی ۲۷ است؛ یعنی یک اتم آلومینیوم شامل ۱۳ پروتون و ۱۳ الکترون است. به علاوه، چون وزن



شکل ۲.۲ یک اتم عادی از هسته‌ای شامل پروتون و نوترون تشکیل شده است که الکترون‌ها به دور هسته می‌چرخند. پروتون‌ها حامل بار الکتریکی مثبت و الکترون‌ها حامل بار الکتریکی منفی اند. به طور طبیعی، اتم‌ها دارای تعداد مساوی پروتون و الکترون هستند و، در نتیجه، از نظر الکتریکی خنثی اند. ویژگی‌های عناصر بر اساس تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها تعیین می‌شوند. این شکل اتم آلومینیوم را نشان می‌دهد که دارای سیزده پروتون و چهارده نوترون در هسته‌اش است و سیزده الکترون به دور هسته می‌چرخند. توجه داشته باشید که مقیاس این شکل واقعی نیست؛ اندازه هسته به طور غیر واقعی بزرگ نمایش داده شده است.

اتمی ۲۷ و عدد اتمی ۱۳ است باید $14 = 27 - 13$ نوترون در هسته آلومینیوم وجود داشته باشد (شکل ۲.۲ را ببینید).

شاید شگفت‌زده شوید از این‌که بدانید فراوانی همه عناصر در عالم یکسان نیست (جدول ۲.۲ را ببینید). تقریباً نود درصد ماده عالم را هیدروژن و نه درصد آن را هلیوم تشکیل می‌دهد. صد عنصر باقیمانده، موسوم به عناصر سنگین، فقط یک درصد ماده موجود در عالم را تشکیل می‌دهند. (البته سیاره‌ای مثل زمین عناصر سنگین بسیار بیش‌تری دارد؛ اما فراوانی عناصر در زمین معیار خوبی برای محاسبه فراوانی کیهانی عناصر نیست.)

ویژگی‌های ساختاری یک اتم، نظیر انرژی قیدی‌اش، بر اساس برهمکنش الکترومغناطیسی بین پروتون‌های هسته و الکترون‌های اطرافش تعیین می‌شوند. بنابراین، کلیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ماده در هر چهار حالتش (جامد،

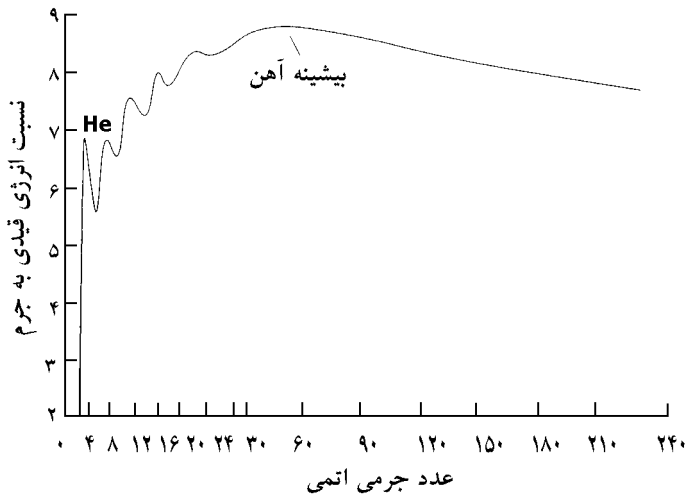
جدول ۲.۲ فراوان‌ترین عناصر عالم

عنصر	نماد	عدد اتمی	وزن اتمی	فراوانی
هیدروژن	${}^1\text{H}$	۱	۱	٪۹۰
هلیوم	${}^4\text{He}$	۲	۴	٪۹
اکسیژن	${}^{16}\text{O}$	۸	۱۶	٪۰/۰۶
کربن	${}^{12}\text{C}$	۶	۱۲	٪۰/۰۳
نیتروژن	${}^{14}\text{N}$	۷	۱۴	٪۰/۰۱

مایع، گاز و پلاسما) نتیجه نیروی الکترومغناطیسی است. با این حال، نیروی الکترومغناطیسی نقش چندانی در ساختار خود هسته اتمی ندارد. همان‌طور که قبلاً دیدیم هسته آلومینیوم شامل سیزده پروتون و چهارده نوترون است. چون بار الکتریکی پروتون‌ها مثبت است و یکدیگر را دفع می‌کنند، اگر نیروی دیگری در هسته نبود که آن‌ها را مقید کند، هسته از هم می‌پاشید. پس به طور حتم به غیر از نیروی الکترومغناطیسی، نیروهای دیگری هم وجود دارند که مسئول پایداری هسته‌های اتمی‌اند.

این نیروها موسوم به «نیروی قوی» و «نیروی ضعیف» دارای خصوصیات کاملاً متفاوتند. نیروی قوی که به طور قابل ملاحظه‌ای از نیروی الکترومغناطیسی قوی‌تر است، انرژی قیدی هسته را فراهم می‌کند. انرژی قیدی یک هسته بین هفت تا پانصد میلیون الکترون‌ولت است. معمولاً برای توصیف فرایندهای هسته‌ای از یکای «MeV» که معادل یک میلیون الکترون‌ولت است، استفاده می‌کنیم. (در بخش ۲.۲ درباره این نیروها بیش‌تر صحبت خواهیم کرد.)

انرژی قیدی از هر هسته تا هسته دیگر به شکل نسبتاً پیچیده‌ای تغییر می‌کند. شکل ۳.۲ مقدار انرژی لازم برای جدا کردن یک نوکلئون (نوترون یا پروتون) از هسته عناصر مختلف را نشان می‌دهد. در کل می‌بینید که انرژی قیدی در ازای هر نوکلئون با افزایش عدد اتمی افزایش می‌یابد تا به عنصر آهن می‌رسد. این بدان



شکل ۳.۲ هر چه انرژی قیدی هسته‌ای بیش تر باشد، جدا کردن یک نوکلئون از آن دشوارتر خواهد بود. با توجه به شکل واضح است که انرژی قیدی در ازای هر نوکلئون تا عدد اتمی ۵۶، یعنی آهن، زیاد می‌شود و سپس کاهش می‌یابد. انرژی قیدی هلیوم در بین عناصر سبک‌تر دارای بیشینه است؛ این بدان معناست که با سنتز هسته اتم هلیوم مقادیر زیادی انرژی آزاد می‌شود. در حالی که عناصر سمت راست آهن طی فرایند شکافت انرژی آزاد می‌کنند، عناصر سمت چپ زمانی انرژی آزاد می‌کنند که به دنبال فرایند گداخت شکل گرفته باشند.

معناست که آهن بیش‌ترین انرژی قیدی را دارد و در بین همه هسته‌ها، پایدارترین هسته است. همچنین تا آن‌جا که به فرایندهای هسته‌ای مربوط می‌شود، عناصر سنگین‌تر از آهن در مقایسه با عناصر سبک‌تر، رفتار کاملاً متفاوتی خواهند داشت. علاوه بر این رفتار میانگین، انرژی قیدی دارای افت و خیزهایی هم هست، به طوری که مثلاً هلیوم با انرژی قیدی بالا، دارای ساختار هسته‌ای به شدت پایداری است. با توجه به این‌که نیروهای هسته‌ای انرژی قیدی هسته‌ها را فراهم می‌کنند، می‌توانیم با غلبه بر این نیروها هسته‌های اتمی را بشکافیم. این وضعیت دقیقاً مشابه کاری است که در مورد مولکول هیدروژن یا اتم هیدروژن انجام دادیم. در آن‌جا دیدیم چنانچه دو مولکول یا دو اتم با سرعت‌های به اندازه کافی زیاد با یکدیگر