

واقعیت ناپیدا

واقعیت ناپیدا

سفری به گرانش کوانتومی

نویسنده: کارلو روولی

مترجم: علی خدادادی شاهی

نشر نو

کانال تلگرام:

@meteorjournal

چند نکته درباره ترجمه

۱. چند عبارت که روولی در متن خود از آنها استفاده کرده است، عبارات مشهور فلسفه‌اند و قبلاً در زبان فارسی برابرهایی جا افتاده‌ای داشته‌اند. برای مثال *indivisible particle* را فلاسفه اسلامی و مترجمان فارسی «جزء لایتجزا» ترجمه کرده‌اند. از آنجا که کتاب روولی یک کتاب تخصصی در فلسفه نیست و با هدف فهم راحت مخاطب عام نوشته شده، ترجیح دادم برای این عبارات، معادل‌هایی ساده‌تر و هماهنگ‌تر با نثر و نوع گفتار روولی در نظر بگیرم. مثلاً به جای «جزء لایتجزا» از «ذره تقسیم‌ناپذیر» استفاده کرده‌ام. هدفم از این کار حفظ سادگی و شفافیت نثر روولی در زبان فارسی بوده است.
۲. روولی کلمه *infinite* را نه در قالب یک مفهوم فلسفی، که به صورت یک کلمه معمولی و با تمام معنای آن به کار برده است. در زبان فارسی چند معادل مختلف برای این کلمه وجود دارد: نامتناهی، بی‌نهایت و نامحدود. من با توجه به شکل نثر فارسی ترجمه و موقعیت‌های مختلفی که در آنها این کلمه به کار برده شده از هر سه معادل آن استفاده کرده‌ام. در این مورد حفظ وحدت مفهومی در کل متن معنایی نداشت چرا که نویسنده همه جا در متن این کلمه را به منزله یک مفهوم به کار نبرده است.
۳. در تمام متن در برابر کلمه *granule*، معادل فارسی «دانه» را به کار برده‌ام. این کلمه در متن روولی یک مفهوم مهم است و باید وحدت آن همه جا حفظ شود. کل کتاب در مورد دانه‌ها و دانه‌بندی جهان است. به همین دلیل هم معادل «ذره» را در ترجمه این کلمه کنار گذاشته‌ام و آن را در برابر *particle* به کار برده‌ام.
۴. در برابر کلمه *information* از معادل فارسی معمول و مصطلح آن یعنی «اطلاعات» یا «اطلاع» استفاده کرده‌ام. در سال‌های اخیر معادل دیگری برای این کلمه پیشنهاد شده: «داده». ترجیح دادم که این کلمه را برای ترجمه *data* کنار بگذارم.
۵. علم و به خصوص فیزیک همواره برای فلسفه اهمیت داشته است. قسمتی از فعالیت تاریخی فلسفه توضیح و تبیین ساختار جهان بوده (اینکه این فعالیت چقدر با فعالیت علمی متفاوت است و چه اهدافی دارد، بماند) و همین مسأله همواره توجه اهل فلسفه را به فیزیک جلب کرده است. من هم از این قضیه مستثنی نبوده و نیستم و همواره تغییر و تحولات فیزیک را با دقت دنبال کرده‌ام. کتاب روولی اتفاقی بسیار مهم در فضای علم عمومی (علمی که خطاب آن به مخاطب عام است) در زبان فارسی خواهد بود. عموم کتاب‌هایی که از فیزیک عمومی در زبان فارسی ترجمه شده‌اند به نوعی به نظریه ریسمان مربوطند و آن را توضیح می‌دهند. این اولین کتابی است که به شکلی جامع نظریه رقیب یعنی نظریه «حلقه» را توضیح می‌دهد. همین مسأله مرا واداشت که این کتاب جذاب را ترجمه کنم تا نه تنها مخاطبان عام بلکه اهل فلسفه هم در زبان فارسی با این تحولات آشنا شوند و در صورت علاقه یا نیاز، آن را بی بگیرند.
- در پایان می‌خواهم از کسانی تشکر کنم که هر یک به نوعی در شکل‌گیری این ترجمه نقش داشته‌اند: از سید محمد جواد (سروش) سیدی که صبورانه تمام پرسش‌ها و اشکالات مرا پاسخ داد. از آزاد عندلیبی که برادرانه برای این کتاب زحمت کشید. سهم او در به بار نشستن این اثر قطعاً بیش از این اشاره ساده است. از جناب محمدرضا جعفری مدیر پیشرو نشر نو که پدرانۀ این ترجمه حمایت کرد و در نهایت از همسرم پریسا رفائی که بدون کمک‌ها، صبوری‌ها و حمایت‌های او این ترجمه ممکن نبود.

یادداشت نویسنده

در طول زندگی علمی‌ام، دوستانم و بسیاری از انسان‌های کنجکاو، همواره از من خواسته‌اند که درباره آنچه در تحقیقات گرانث کوانتومی در جریان است توضیح دهم. دستیابی به راه‌های تازه‌اندیشیدن درباره فضا و زمان چگونه ممکن شد؟ بارها و بارها از من خواسته شده گزارشی قابل فهم از این تحقیقات ارائه دهم. پیش از این، کتاب‌های زیادی با موضوع کیهان‌شناسی و نظریه ریسمان‌ها نوشته شده بود اما کتابی درباره ماهیت کوانتومی فضا و زمان و به خصوص گرانث کوانتومی حلقه وجود نداشت. من مدت زیادی مردد بودم چرا که قصد داشتم بر تحقیقاتم متمرکز شوم. اما چند سال قبل، پس از اتمام کتاب کاملاً فنی و تخصصی‌ام درباره همین موضوع، به این نتیجه رسیدم که کار جمعی بسیاری از دانشمندان به مرحله‌ای رسیده است که نیاز به نوشتن کتابی عمومی و همه‌فهم احساس می‌شود. منظره‌ای که ما در حال کاوش آن هستیم بسیار جذاب و دل‌رباست: چرا پنهانش کنیم؟

اما باز هم این پروژه را به تأخیر انداختم چرا که نمی‌توانستم [طرح کلی] کتاب را در ذهنم «بینم». چگونه می‌توانستم جهانی بدون زمان و مکان را توصیف کنم؟ شی در سال ۲۰۱۲، وقتی که تک‌وتنها مشغول رانندگی طولانی‌ای از ایتالیا به فرانسه بودم، فهمیدم تنها راه قابل فهم برای توضیح این شکل تازه از زمان و مکان این است که داستان را از ابتدا تعریف کنم: از دموکریتوس شروع کنم و تمام راه را تا کوانتوم‌های فضا بپیمایم. به هر حال این همان راهی بود که خود من از طریق آن کل داستان را فهمیده بودم. در حین رانندگی، شروع کردم به ساختن طرح کلی کتاب در ذهنم و هر لحظه هیجان‌زده‌تر می‌شدم تا لحظه‌ای که صدای آژیر ماشین پلیسی را شنیدم که می‌خواست متوقفم کند: داشتم با سرعتی بسیار بیشتر از حد مجاز می‌راندم. پلیس ایتالیایی مؤدبانه از من پرسید که آیا دیوانه شده‌ام که با چنین سرعتی رانندگی می‌کنم؟ برایش توضیح دادم که ایده‌ای را که مدت‌ها دنبالش بودم پیدا کرده‌ام. پلیس، بدون اینکه جریمه‌ام کند، گذاشت بروم و برای کتابم آرزوی موفقیت کرد. این همان کتاب است.

کتاب را به زبان ایتالیایی نوشتم و اولین بار در سال ۲۰۱۴ چاپ شد. کمی پس از آن چند مقاله درباره فیزیک بنیادی برای یک روزنامه ایتالیایی نوشتم. یک ناشر معتبر ایتالیایی، آدلفی، از من نسخه‌ای کامل‌تر از این مقالات خواست تا به شکل کتابچه‌ای کوچک چاپ شود. این منشأ نوشتن کتابی شد با عنوان هفت درس مختصر درباره فیزیک که برخلاف انتظارم به یک کتاب پرفروش بین‌المللی مبدل شد و راهی جذاب برای ارتباط با خواننده‌های خوب زیادی در سراسر دنیا برآیم باز کرد. بنابراین هفت درس مختصر درباره فیزیک بعد از این کتاب نوشته شده و از برخی جهات تکمله‌ای است بر بسیاری از موضوعاتی که در کتاب حاضر یافت می‌شود. اگر شما هفت درس مختصر درباره فیزیک را خوانده‌اید و می‌خواهید دانش بیشتر و عمیق‌تری درباره جهانی که آن کتاب ترسیم کرده داشته باشید، می‌توانید آن را در کتاب حاضر بیابید.

اگر چه گزارشی که من اینجا از مبانی فیزیک ارائه می‌دهم نظر شخصی من است - نظرگاهی که خودم از طریق آن فیزیک را فهمیده‌ام - اما بیشتر مطالب آن قطعی و متقن است. با این حال آن بخش از کتاب که به توصیف تحقیقات جاری در گرانث کوانتومی می‌پردازد، فهم شخصی من از وضعیت کنونی این علم است. این ناحیه‌ای است محصور میان آنچه می‌دانیم و آنچه هنوز نمی‌دانیم و راه درازی تا دانستنش داریم. برخی از همکاران فیزیکدانم با آنچه در این بخش‌ها نوشته‌ام موافق خواهند بود و برخی دیگر نه. این خصلت تمام نوشته‌هایی است که از تحقیقات جاری در خط مقدم علم گزارش می‌دهند و من ترجیح می‌دهم این مسأله را پیش‌تر و به شکلی واضح بیان کنم. این کتابی درباره قطعیت‌ها نیست: کتابی است درباره سفری به سوی ناشناخته‌ها.

به طور کلی، این سفرنامه‌ای است درباره یکی از تماشایی‌ترین سفرهای تاریخ بشر: سفری به خارج از درک محدود و تنگ ما از واقعیت، به سوی درکی عمیق و گسترده‌تر از ساختار چیزها. سفری جادویی به بیرون از درک معمولی ما از چیزها که تازه شروع شده و ما هنوز در ابتدای آن هستیم.

پیشگفتار: قدم زدن در ساحل

ما به خودمان مشغولیم. ما تاریخ خودمان، روان‌شناسی خودمان، فلسفه خودمان، و خدایان خودمان را مطالعه می‌کنیم. بخش بزرگی از دانش ما درباره خودمان است انگار که مهم‌ترین چیز در جهان هستیم. من فیزیک را دوست دارم چون پنجره‌ای در مقابل ما می‌گشاید که از طریق آن می‌توانیم از خودمان فراتر برویم. فیزیک در نظر من هوای تازه‌ای است که وارد خانه‌ام می‌شود.

آنچه از طریق این پنجره می‌بینیم، مدام شگفت‌زده‌مان می‌کند. ما چیزهای زیادی درباره هستی آموخته‌ایم. در طی قرون و اعصار دریافته‌ایم که چه تعداد از ایده‌هایمان اشتباه بوده‌اند. می‌پنداشتیم زمین صاف است و در عین حال مرکز جهان هم هست. می‌پنداشتیم که جهان کوچک و تغییرناپذیر است. باور داشتیم که انسان تافته‌ای جدابافته است که هیچ ربطی به حیوانات دیگر ندارد. کوارک‌ها، سیاهچاله‌ها، ذرات نور و موج‌های فضا را کشف کردیم و دریافتیم که ساختارهای مولکولی فوق‌العاده‌ای در تک‌تک سلول‌های ما وجود دارد. نژاد بشر مانند کودکی در حال رشد است که با شگفتی کشف می‌کند جهان صرفاً اتاق خواب و زمین بازی‌اش نیست. او پی می‌برد که جهان پهنه‌ای بسیار گسترده است که در آن هزاران چیز تازه برای کشف کردن هست: هزاران ایده، متفاوت با آنچه او با آنها آغاز به فهم جهان کرده است. جهان چندوجهی و بی‌مرز است و ما هر بار در مناظر تازه‌اش سرگردان می‌شویم. هرچه بیشتر درباره جهان یاد می‌گیریم، بیشتر از تنوع و زیبایی و سادگی‌اش حیرت‌زده می‌شویم.

در عین حال، هرچه بیشتر کشف می‌کنیم بیشتر متوجه می‌شویم که نادانسته‌هایمان بسیار بیشتر از دانسته‌هایمان است. هرچه تلسکوپ‌هایمان قوی‌تر می‌شود، چیزهای عجیب‌تر و غیرمنتظره‌تری در آسمان مشاهده می‌کنیم. هرچه دقیق‌تر به جزئیات ریز ماده می‌نگریم، چیزهای بیشتری از ساختار اعجاب‌انگیز آن کشف می‌کنیم. امروزه ما نه تنها مه‌بانگ را - انفجاری که ۱۴ میلیارد سال پیش، تمام کهکشان‌ها از آن به وجود آمدند - مشاهده می‌کنیم، بلکه در حال نگاه کردن به فراسوی آن هم هستیم. ما دریافته‌ایم که فضا خمیده است اما همچنین پیش‌بینی می‌کنیم که همین فضا از نوسانات ذرات کوانتومی ساخته شده است.

دانش ما از قوانین بنیادین هستی در حال رشد است. اگر تلاش کنیم آنچه را در طول قرن بیستم راجع به واقعیت فیزیکی آموخته‌ایم کنار هم بگذاریم، به نتایجی کاملاً متفاوت از آنچه در مدرسه به ما یاد داده‌اند خواهیم رسید. ساختار بنیادینی از جهان در حال پدیدار شدن است که در آن زمان و مکان وجود ندارد و جهان از ازدحام رویدادهای کوانتومی ساخته شده است. میدان‌های کوانتومی، فضا، زمان، نور و ماده را می‌سازند و انتقال اطلاعات از رویدادی به رویداد دیگر را ممکن می‌کنند. واقعیت، شبکه‌ای از رویدادهای ذره‌ای است و یک دینامیک احتمالاتی آنها را به هم وصل می‌کند یعنی فضا، زمان، ماده و انرژی میان یک رویداد و رویداد دیگرند پوشیده در ابری از احتمالات.

این دنیای شگفت‌نواز مطالعه مهم‌ترین پرسش‌های فیزیک بنیادی سربرمی‌آورد: از گرانش کوانتومی. این تلاشی است برای ترکیب منسجم آنچه ما پیش از این درباره جهان می‌دانستیم با دو کشف بزرگ فیزیک قرن بیستم: نسبیت عام و نظریه کوانتوم. این کتاب روایتی است از گرانش کوانتومی و جهانی که از آن سربرمی‌آورد.

این کتاب گزارشی است زنده از پژوهشی در دست انجام: آنچه یاد می‌گیریم، آنچه پیشاپیش می‌دانیم و آنچه قرار است راجع به ماهیت بنیادین چیزها بدانیم. این کتاب از مبدأ و منشأ ایده‌های بنیادینی شروع می‌کند که به درک امروز ما از جهان شکل داده‌اند و تا بررسی دو کشف بزرگ قرن بیستم - نسبیت عام اینشتین و مکانیک کوانتومی - پیش می‌رود و تلاش می‌کند نظری بر محتوای فیزیکی این دو نظریه بیندازد. این کتاب روایت ترسیم تصویری از جهان است که از دل تحقیقات گرانش کوانتومی ظهور کرده و بر آخرین نشانه‌هایی که طبیعت برای ما فرستاده، تمرکز می‌کند. نشانه‌هایی مانند تأیید مدل استاندارد کیهان‌شناسی به وسیله ماهواره پلانک و عدم موفقیت مشاهده ذرات ابرمتقارن در سن. در نهایت هم درباره پیامدهای این ایده‌ها بحث می‌کند: ساختار ذره‌ای فضا، محوشدن زمان در مقیاس‌های کوچک، فیزیک مه‌بانگ، منشأ گرمای سیاهچاله‌ها و نقش اطلاعات در بنیاد علم فیزیک.

در اسطوره مشهوری که افلاطون در کتاب هفتم جمهوری آورده، چند نفر در ته غاری تاریک با زنجیر بسته شده‌اند و صرفاً می‌توانند سایه‌هایی را ببینند که آتش پشت سرشان روی دیوار می‌اندازد. آنها فکر می‌کنند واقعیت همین سایه‌هاست. یکی از آنها خود را آزاد می‌کند،

غار را ترک می‌کند، با نور خورشید مواجه می‌شود و کشف می‌کند که جهان بسیار بزرگ‌تر است. در ابتدا، نور خورشید چشمان او را که به تاریکی عادت کرده، می‌زند. اما سرانجام می‌تواند ببیند و با شور و شغف بازمی‌گردد تا به همراهانش از آنچه دیده بگوید. آنها باور نمی‌کنند. همه ما در اعماق غار هستیم و با جهل مان، تعصباتمان و حواس ضعیفمان که فقط سایه‌ها را به ما نشان می‌دهند، بسته شده‌ایم. اگر سعی کنیم بیشتر ببینیم سرگردان خواهیم شد چرا که چشمانمان هنوز عادت نکرده است. با این وصف تلاش می‌کنیم و این یعنی علم. تفکر علمی جهان را مکرراً می‌کاود، هر لحظه تصویر بهتری از جهان در اختیار ما می‌گذارد و به ما یاد می‌دهد مؤثرتر و کارآمدتر بیندیشیم. علم، جست‌وجوی بی‌وقفه راه‌های اندیشیدن است. علم به این دلیل قدرتمند است که می‌تواند ایده‌های مرسوم و متعارف را ویران کند، ناحیه‌ای تازه از واقعیت را کشف کند و تصویری باشکوه‌تر و در عین حال کاربردی‌تر از جهان بسازد. ما با دانش قدیمی خود از جهان این سفر را آغاز می‌کنیم و به سوی دگرگونی پیش می‌رویم. می‌خواهیم برویم و جهانی را ببینیم که بی‌مرز و رنگارنگ است. ما در رازآمیزی و زیبایی آن غوطه‌وریم و آن سوی افق، قلمروهایی کشف نشده قرار دارد. نقص و عدم قطعیت دانش ما، بی‌ثباتی و معلق ماندنمان بر پرتگاه چیزهایی که نمی‌دانیم، زندگی را بی‌معنا نمی‌کند: آن را جذاب و بارز می‌کند.

من این کتاب را نوشتم تا بگویم چه چیز این سفر برایم جذاب است. وقتی آن را می‌نوشتم چنین مخاطبی در ذهن داشتم: کسی که در مورد فیزیک امروز دانش زیادی ندارد - یا اصلاً دانشی ندارد - اما مشتاق است بفهمد دربارهٔ بافت بنیادین جهان چه چیزهایی می‌دانیم و چه چیزهایی را هنوز نمی‌دانیم و کجا باید به دنبال آنها بگردیم. این کتاب را نوشتم تا زیبایی نفس‌گیر چشم‌اندازی را به نمایش بگذارم که از جایی که من ایستاده‌ام قابل رؤیت است.

همچنین این کتاب را برای همکارانم نوشته‌ام، هم سفرانی از سراسر جهان. و برای زنان و مردان جوانی که علاقه‌ای به علم دارند و مشتاق‌اند نخستین قدم‌هایشان را در این سفر بردارند. تلاش کرده‌ام نمای کلی ساختار فیزیکی جهان را آن گونه که در نور دو چراغ نسبیت و فیزیک کوانتومی به نمایش درمی‌آید، ترسیم کنم و چگونگی ترکیب آنها با هم را نشان دهم. این کتاب صرفاً یک «دانستنی‌ها» نیست بلکه همچنین کتابی است که تلاش می‌کند نظرگاهی را در رشته‌ای خاص صورت‌بندی کند که در آن، پیچیدگی زبان تخصصی گاهی نمای کلی را مبهم می‌کند. علم از آزمایش‌ها، فرضیات، معادلات، محاسبات و مباحث طولانی ساخته شده است. اما اینها صرفاً ابزارهایی مانند سازهای موسیقی‌دان‌ها هستند. در نهایت آنچه در موسیقی اهمیت دارد خود موسیقی و آنچه در علم مهم است درک جهانی است که علم نمایش می‌دهد. برای درک اهمیت این کشف که زمین به دور خورشید می‌گردد، نیازی به پیگیری محاسبات پیچیده کوپرنیک نیست. همچنین برای فهم اهمیت این کشف که تمام موجودات زنده نیاکان مشترکی داشته‌اند نیازی به مطالعه استدلال‌های پیچیده کتاب‌های داروین نیست. علم یعنی خوانش جهان از نظرگاهی که مدام در حال گسترش است.

این کتاب روایتی است از نظرگاه من دربارهٔ موقعیت کنونی تحقیقات ما برای ارائه تصویری تازه از جهان. اگر دوستی یا همکاری دم‌عصری در چلهٔ تابستان، گرم قدم‌زدن در ساحل از من می‌پرسید: «تو فکر می‌کنی ماهیت حقیقی چیزها چیست؟»، من با نوشتن این کتاب پاسخش را می‌دادم.

بخش اول: ریشه‌ها

این کتاب ۲۶ قرن پیش، در میلئوس آغاز می‌شود. چرا باید کتابی دربارهٔ گرانث کوانتومی را با رویدادها و انسان‌ها و ایده‌هایی چنین باستانی آغاز کرد؟ امیدوارم خواننده‌ای که مشتاق یادگیری دربارهٔ کوانتوم‌های فضا است، چنین ایرادی بر من نگیرد، چرا که ساده‌ترین راه برای فهم ایده‌ها آغاز کردن از ریشه‌های این ایده‌هاست و تعداد زیادی از ایده‌هایی که مبنای فهم جهان قرار گرفته‌اند، حدود دو هزار سال پیش زاده شده‌اند. اگر ما به شکلی مختصر رد آنها را دنبال کنیم واضح‌تر می‌شوند و می‌توانیم گام‌های بعدی را ساده‌تر و طبیعی‌تر برداریم. اما مسأله صرفاً این نیست. مسائلی که اولین بار در کرت باستان مطرح شده‌اند هنوز نقش مهمی در فهم ما از جهان دارند. برخی از آخرین ایده‌ها دربارهٔ ساختار فضا، هنوز هم متشکل از مسائل و مفاهیمی هستند که در آنجا زاده شدند. من در بحث از این ایده‌های قدیمی، مسائلی را پیش خواهم کشید که در گنه گرانث کوانتومی جای دارند. این کار به ما امکان می‌دهد که در بررسی گرانث کوانتومی بین مفاهیمی که به خاستگاه باستانی تفکر علمی بازمی‌گردند هر چند با آنها آشنا نباشیم—و مفاهیمی که کاملاً جدیدند، تمایز قائل شویم. همان‌طور که خواهیم دید مسائلی که دانشمندان باستانی مطرح کرده‌اند رابطه‌ای بسیار نزدیک با پاسخ‌هایی دارند که اینشتین و گرانث کوانتومی یافته‌اند.

۱: دانه‌ها

مطابق روایات، در سال ۴۵۰ قبل از میلاد مردی با کشتی از میلوس به آبدرا^۱ سفر کرد. این سفر، سفری مهم در تاریخ دانش است. این مرد احتمالاً با آشفته‌گی سیاسی در میلوس مواجه شده بود، جایی که اشرافیت به شکل خشنی مشغول بازپس‌گیری قدرت بود. میلوس در آن زمان شهری پررونق و در حال توسعه بوده و شاید مهم‌ترین شهر در جهان یونانی پیش از دوران طلایی آتن و اسپارت به حساب می‌آمده و قطب تجاری پررونقی بوده با شبکه‌ای متشکل از حدوداً صد پایگاه و مرکز اقتصادی از دریای سیاه تا مصر. کاروان‌هایی از بین‌النهرین و کشتی‌هایی از سراسر مدیترانه به میلوس می‌آمدند و از این رهگذر، ایده‌ها و افکار سفر می‌کردند و پخش می‌شدند. یک قرن قبل از آن، انقلابی بنیادی برای تفکر بشر در میلوس رخ داده بود. گروهی از متفکران چگونگی پرسش از جهان و شیوه پاسخ به این پرسش‌ها را تغییر داده بودند. بزرگ‌ترین آنها آناکسیمندر بود. انسان‌ها از زمان‌های دور، یا حداقل از زمانی که دست‌نوشته‌های بشر به دست ما رسیده، همواره از خود پرسیده‌اند که جهان چگونه به وجود آمده، از چه ساخته شده، چگونه نظم گرفته و پدیده‌های طبیعی چگونه پدیدار شده‌اند.



شکل ۱-۱ سفر لوکیپوس میلیتی^۲، بنیان‌گذار مکتب اتمیسم (حدود ۴۵۰ قبل از میلاد)

در طی هزاران سال پاسخ‌های بشر به این پرسش‌ها همواره شبیه به هم بوده است: این پاسخ‌ها همواره به داستان‌هایی دور و دراز درباره موجودات اساطیری و خیالی و چیزهایی شبیه به اینها اشاره داشته است. از الواح میخی تا متون باستانی چینی، از متون هیروگلیف درون اهرام تا اساطیر سرخپوستی، از باستانی‌ترین متون هندی تا عهد عتیق، از داستان‌های افریقایی تا بومیان استرالیا، همه و همه داستان‌هایی رنگارنگ اما یکنواخت بوده‌اند درباره مارهای پردار، گاوهای بزرگ و موجوداتی تندخو و آتشین مزاج یا مهربان و صمیمی که جهان را با دمیدن بر مفاک یا خواندن اوراق رازآمیز یا استخراج آن از یک تخم مرغ سنگی پدید آورده‌اند. بعد ناگهان در میلوس، پنج قرن قبل از میلاد مسیح، تالس، شاگردش آناکسیمندر، هکاته و شاگردانشان روشی متفاوت برای پاسخ به این سؤالات یافتند. این انقلاب عظیم در تفکر، شکلی تازه از دانش و فهم را پدید آورد که اولین نشانه طلوع اندیشه علمی بود. میلوسی‌ها فهمیدند که به جای جست‌وجوی پاسخ در خیالات و اساطیر و داستان‌های باستان، می‌توانند با به کارگیری هوشمندانه مشاهدات و عقل و بالاتر از همه تفکر انتقادی دقیق، تصور ما را از جهان مدام تصحیح کنند و وجوه تازه‌ای از واقعیت را که از چشم مردم عادی پنهان است کشف کنند. کشف امر نو ممکن شده بود.

اما شاید کشف اصلی در اینجا، روش جدیدی از تفکر است که در آن شاگرد دیگر مجبور نیست به نظرات استاد خود احترام بگذارد و آنها را صرفاً منتشر کند، بلکه می‌تواند این نظرات را بدون ترس نقد کند و با حذف قسمت‌های قابل حذف، بسط و گسترش‌شان دهد. این راه میانه باارزشی است میان سرسپردگی مطلق به یک مکتب و رد و انکار کلی یک ایده. این کلید پیشرفت‌های بعدی در تفکر علمی و فلسفی

است: از اینجا به بعد دانش با سرعت سرسام‌آوری رشد می‌کند و در عین اینکه می‌تواند از دانش گذشته تغذیه کند، امکان نقد و به تبع آن، گسترش دانش و فهم نیز برایش وجود دارد. مقدمه خیره‌کننده کتاب تاریخ هکاته با اعلام آگاهی به خطاپذیری بشر، در مرکز این تفکر انتقادی قرار می‌گیرد: «من چیزهایی نوشتم که به زعم من درست است چرا که نوشته‌های یونانیان آکنده است از چیزهای متناقض و مضحک.»

طبق افسانه‌ها، هرکول از طریق دماغه تنارو وارد هادس شد. هکاته به دماغه تنارو رفت و فهمید که هیچ راه پنهان یا هیچ گونه دسترسی دیگری از تنارو به هادس وجود ندارد و به همین دلیل این افسانه را باطل اعلام کرد. این طلوع عصری جدید بود. به سرعت مشخص شد که این رویکرد، رویکردی کارآمد و تأثیرگذار است. آناکسیمندر در طول چند سال فهمید زمین در آسمان شناور است، آسمان تا زیر زمین کشیده شده است، آب باران از تبخیر آب‌های روی زمین به وجود می‌آید، چیزهای مختلف و متنوع در جهان همه از یک جزء ساده - که او آپایرون^۳ می‌نامید - تشکیل شده‌اند، حیوانات و گیاهان تطور و دگرگشت می‌یابند و خود را با محیطشان سازگار می‌کنند، و انسان باید امتداد زیست جهان پیش از خود بوده باشد. همان‌طور که مشخص است او شیوه‌ای از فهم جهان را بنیان گذاشت که امروز هم، بنیان فهم ما از جهان است.

میلتوس با قرارگیری میان تمدن در حال ظهور یونانی و امپراتوری‌های باستانی در بین‌النهرین و مصر، با تغذیه از دانش باستانی آنها در کتابخانه‌ها و در فضای آزاد سیاسی‌ای که مشخصاً یونانی بود، با فضایی اجتماعی که از قصرهای پادشاهی و طبقه قدرتمند روحانیون خالی بود و با شهروندانی که هر یک شخصاً بر سر سرنوشت خود در میدان‌ها و بازارها به بحث می‌نشستند، اولین جایی بود که بشر به شکلی جمعی قوانینش را خودش تعیین کرد، اولین جایی بود که پارلمان در تاریخ بشر به وجود آمد - مجلسی که پانیونیوم^۴ نامیده می‌شد و محل ملاقات نمایندگان اتحاد ایونی بود - و در نهایت اولین جایی بود که بشر به این مسأله که صرفاً از طریق خدایان می‌توان جهان را توضیح داد و فهمید، شک کرد. از طریق بحث، هم می‌توان به بهترین تصمیم برای جامعه رسید و هم می‌توان جهان را درک کرد. این بزرگ‌ترین میراث میلتوس و گاهواره فلسفه، علوم تجربی، تاریخ و جغرافیا بود. اغراق نیست اگر بگوییم که کل سنت علمی و فلسفی مدیترانه‌ای و مدرن در تأملات متفکران میلتوس قرن ششم قبل از میلاد ریشه دارد. [۱]

این میلتوس درخشان در مدت کوتاهی به پایان فاجعه‌بار خود رسید. حمله امپراتوری پارس و شورش ناموفق شهر علیه امپراتوری باعث ویرانی سهمگین شهر در سال ۴۹۴ قبل از میلاد و بردگی و اسارت عده زیادی از شهروندان شد. تراژدی فتح میلتوس اثر فرانیکوس شاعر چنان تأثیری بر آثنی‌ها گذاشت که نمایش دوباره آن به دلیل ایجاد ناراحتی شدید در آتن ممنوع اعلام شد. اما بیست سال بعد یونانی‌ها خطر پارس‌ها را دفع کردند و میلتوس دوباره متولد شد و پرجمعیت شد و باز به مرکزی برای اقتصاد و تفکر بدل شد و یک بار دیگر نور تفکر و معنویتش را بر جهان افکند.

شخصی که از او در ابتدای فصل سخن گفتیم، احتمالاً تحت تأثیر این فضا از میلتوس به سمت آبدرا سفر می‌کرده است. نام این مرد لوکیپوس بوده و اطلاعات ناچیزی از زندگی‌اش در دست است. [۲] او کتابی نوشته بوده به نام کیهان‌شناسی کبیر^۵. لوکیپوس در بدو ورود به آبدرا یک مدرسه عمومی فلسفه دایر کرد و خیلی زود شاگردی به نام دموکریتوس یافت. کسی که بر تفکر و دانش در تمام اعصار و قرون بعد از خود سایه‌ای بلند افکند.

این دو متفکر به همراه یکدیگر بنای عظیم و باشکوه نظریه اتمی باستانی را پایه‌ریزی کردند. لوکیپوس معلم بود و دموکریتوس شاگرد بزرگی که در تمام زمینه‌های علم کتاب‌های زیادی نوشت و هر کس که در دنیای باستان آثارش را می‌دید احترامی عمیق برایش قائل بود. سنکا او را «دقیق‌ترین فرد دنیای باستان» می‌داند [۳] و سیسرون می‌پرسد: «چه کسی را می‌توان نه تنها از نظر نبوغ، که از نظر معنویت با او مقایسه کرد؟» [۴]

اما لوکیپوس و دموکریتوس چه چیزی را کشف کردند؟ میلتوسی‌ها فهمیده بودند که جهان از طریق عقل قابل تبیین است. آنها به این نتیجه رسیدند که تنوع و تکرر پدیده‌های طبیعی باید منشئی یگانه و ساده داشته باشد و تلاش کردند که این منشأ را بیابند. آنها به ماده‌ای اولیه اعتقاد داشتند که همه چیز از آن ساخته شده است. آناکسیمنس میلتوسی معتقد بود که این ماده می‌تواند متراکم یا رقیق شود و در

نتیجه، مدام از یکی از عناصر [چهارگانه] سازنده جهان به دیگری تغییر شکل می‌دهد. این اولین ریشه علم فیزیک بود و اگرچه خام بود و بدوی اما در مسیری درست قرار داشت. ایده‌ای بزرگ و بصیرتی عمیق لازم بود تا لایه‌های پنهان نظم جهان آشکار شود. لوکیپوس و دموکریتوس این ایده را پیدا کردند.

ایده نظام دموکریتوس به شدت ساده است: کل جهان از فضای بی‌حدومرزی تشکیل شده که تعداد بی‌شماری اتم در آن سرگردانند. فضا نه حد و حدودی دارد، نه بالا و پایینی، نه مرکزی و نه مرزی. اتم‌ها به غیر از شکل‌شان هیچ کیفیت دیگری ندارند: نه وزنی، نه رنگی، نه طعمی. «برحسب عرف چیزی را شیرین، تلخ، گرم یا رنگی می‌پنداریم اما در حقیقت فقط اتم‌ها وجود دارند و فضای خالی.» [۵]



شکل ۱-۲ دموکریتوس آبدرایی

اتم‌ها تقسیم‌ناپذیرند. دانه‌های واقعیت‌اند و خودشان به چیزی تقسیم نمی‌شوند، اما همه چیز از آنها ساخته می‌شود. آزادانه در فضا حرکت می‌کنند، با هم برخورد می‌کنند، یکدیگر را جذب یا دفع می‌کنند و به هم وصل می‌شوند. اتم‌های مشابه یکدیگر را جذب می‌کنند و با هم ترکیب می‌شوند.

بافت جهان این گونه است. واقعیت این گونه است. اشیا چیزی نیستند جز محصول تصادفی همین حرکت و ترکیب اتم‌ها. تنوع نامتناهی موادی که سازنده جهان‌اند صرفاً نتیجه همین ترکیب اتم‌هاست.

وقتی که اتم‌ها با هم درگیر می‌شوند، تنها چیزی که در وهله اول اهمیت دارد شکل آنها، چینش‌شان، و ساختاری است که تحت آن منظم می‌شود. دقیقاً همان گونه که با ترکیب‌های متفاوت حروف الفبا می‌توان تراژدی، کمدی، داستان‌های مضحک یا اشعار حماسی نوشت، از ترکیب اتم‌های اولیه هم می‌توان جهان را با تنوع و تکثری بی‌پایان تولید کرد. استعاره الفبا متعلق به خود دموکریتوس است. [۶]

در این رقص بی‌پایان اتم‌ها نه انجمای هست نه کرانه‌ای. ما انسان‌ها نیز مانند مابقی طبیعت، جزئی از این رقص بی‌پایان هستیم. جزئی که نتیجه ترکیبی تصادفی است. طبیعت همچنان به تجربه و آزمایش ترکیب‌ها و فرم‌های جدید ادامه می‌دهد و ما مانند حیوانات، نتیجه یک انتخاب تصادفی و بی‌انجامیم که در طول ادوار متمادی ساخته شده است. زندگی ما ترکیبی از اتم‌هاست. افکار ما از اتم‌هایی کوچک ساخته شده است. رؤیاهای ما محصول اتم‌هاست. امیدها و عواطف ما به زبانی متشکل از الفبای اتم‌ها نوشته شده است. نوری که ما می‌بینیم ساخته شده از اتم‌هایی است که حامل تصاویر برای ما هستند. دریاها، ستاره‌ها و شهرها همه از اتم ساخته شده‌اند. این دیدگاهی با عظمت و نامحدود و به شکلی حیرت‌آور ساده و قدرتمند است که تمدن جهانی ما دانش خود را بر پایه آن به دست آورده است. دموکریتوس بر پایه این نظریه ده‌ها کتاب نوشت که در آنها به گسترش نظامی بزرگ و پاسخ به پرسش‌هایی فیزیکی، فلسفی، اخلاقی، سیاسی و کیهان‌شناختی پرداخت. او درباره ماهیت زبان، مذهب، منشأ اجتماعات انسانی و بسیاری چیزهای دیگر مطالبی نوشت. (شروع کیهان‌شناسی صغیرش^۷ جذاب است: «من در این کتاب به همه چیز خواهم پرداخت.») تمام این کتاب‌ها امروزه از دست رفته‌اند. ما با نظریات او از طریق نقل قول‌ها و شروحي که متفکران باستانی دیگر از او یا درباره او نوشته‌اند آشناییم. [۷] نتیجه این متون سربرآوردن نوعی اومانيسم قدرتمند، عقل‌گرا و ماده‌گرا بوده است. [۸] دموکریتوس دو چیز را با هم ترکیب کرد: از سویی، توجهی دقیق به طبیعت که با وضوح و دقتی علمی آراسته شده و تمام بقایای نظام اسطوره‌ای از آن زدوده شده است و از سوی دیگر، توجهی عظیم به انسانیت و تمرکزی عمیق بر زندگی اخلاقی که بهترین جنبه‌های روشنگری قرن هجدهم را دو هزار سال قبل از آن پیش‌گویی می‌کند. آرمان اخلاقی دموکریتوس رسیدن به آرامش ذهن از طریق اعتدال و میانه‌روی است. و اعتدال، از اعتماد به عقل و کنترل عواطف به دست می‌آید. افلاطون و ارسطو با نظریات دموکریتوس آشنا و با آنها مخالف بودند. آنها به نظریات و ایده‌هایی مخالف با نظریات دموکریتوس اعتقاد داشتند. ایده‌هایی که بعضاً تا قرن‌ها مانع رشد علم شدند. هر دو آنها توصیفات طبیعت‌گرایانه دموکریتوس را به نفع توصیفی غایت‌انگاران - که در آن همه چیز در جهان هدف و غایتی دارد - مؤکداً رد می‌کردند.

ارسطو مفصل و محترمانه درباره نظریات دموکریتوس سخن می‌گوید. افلاطون هیچ ارجاعی به او نمی‌دهد. اما امروزه متخصصان گمان می‌کنند که این رفتار کاملاً آگاهانه بوده نه از سرب‌بی‌اطلاعی و ناآشنایی با نظریات دموکریتوس. نقد نظریات دموکریتوس به شکلی تلویحی در بسیاری از آثار افلاطون وجود دارد، مثلاً در نقد او بر «طبیعت‌گرایان». در قطعه‌ای از فایدون، افلاطون از زبان سقراط تمام «طبیعت‌گرایان» را چنان سرزنش می‌کند که تا قرن‌ها تأثیرش باقی می‌ماند. او توضیح می‌دهد که وقتی فهمیده «طبیعت‌گرایان» گفته‌اند که زمین گرد است برآشفته شده؛ چرا که جواب این پرسش را نیافته که «هدف» این گرد بودن برای زمین چیست و به چه کار زمین می‌آید. سقراط توضیح می‌دهد که چگونه در ابتدا جذب فیزیک شده اما بعد از آن سرخورده شده است:

انتظار داشتم ابتدا به من بگویند که زمین گرد است یا صاف اما همچنین انتظار داشتم که ضرورت این شکل را هم توضیح بدهند و با شروع از اصل بهترین گزینه، به من نشان دهند که بهترین چیز برای زمین، برخورداری از این شکل خاص است. و اگر می‌گفتند زمین مرکز جهان است، باید نشان می‌دادند که این مرکزیت چه نفعی برای زمین دارد. [۹]

افلاطون بزرگ در اینجا کاملاً از مرحله پرت بود!

آیا حدی برای تقسیم‌پذیری وجود دارد؟

بزرگ‌ترین فیزیکدان نیمه دوم قرن بیستم، ریچارد فاینمن، در ابتدای درس‌های درخشان مقدماتی فیزیکش می‌نویسد: اگر در یک سیل جهانی تمام دانش علمی بشر نابود شود و بتوان تنها یک جمله را به دست نسل بعدی موجودات رساند، کدام جمله است که شامل بیشترین اطلاعات در کمترین کلمات ممکن است؟ به نظرم این جمله فرضیه اتمی یا واقعیت اتمی یا هر نامی که ترجیح می‌دهید بر آن بگذارید، است با این محتوا که: همه چیز از اتم‌ها درست شده: ذرات کوچکی که تا ابد در حرکت‌اند و وقتی به هم نزدیک می‌شوند یکدیگر را جذب می‌کنند اما اگر به هم فشرده شوند یکدیگر را دفع می‌کنند. با کمی اندیشه و تخیل می‌توانید در همین یک جمله اطلاعات بسیار زیادی راجع به جهان بیابید. [۱۰]

دموکریتوس بدون نیاز به فیزیک مدرن، پیشاپیش به این نتیجه رسیده بود که همه چیز از ذرات تقسیم‌ناپذیر ساخته شده است. اما

چگونه؟

استدلال‌های او مبتنی بر مشاهده بود. مثلاً به درستی فرض می‌کرد که پوشیدن یک چرخ چوبی یا خشک شدن لباس‌های روی بند رخت، به خاطر جدا شدن آرام ذرات چوب یا آب از آنهاست. اما او استدلال‌هایی فلسفی هم داشت. بیایید بر این استدلال‌ها تمرکز کنیم چرا که توان و قدرت آنها سرانجام منجر به پیدایش گرانث کوانتومی شد.

دموکریتوس به این نتیجه رسید که ماده نمی‌تواند یک کل به هم پیوسته باشد چرا که تأیید این ادعا باعث تناقض می‌شود. ما از استدلال دموکریتوس از طریق متون ارسطو آگاهیم. [۱۱] دموکریتوس می‌گوید تصور کنید که ماده تا بی‌نهایت تقسیم‌پذیر باشد یعنی بتوان آن را به بی‌شمار قطعه تقسیم کرد. فرض کنید که یک قطعه از ماده را بی‌نهایت بار می‌شکنید و تقسیم می‌کنید. چه چیز باقی می‌ماند؟ آیا قطعات کوچکی که باقی می‌مانند دارای بُعد هستند؟ خیر، زیرا قطعه‌ای که بُعد دارد همچنان می‌تواند تقسیم شود و در نتیجه تقسیم تا بی‌نهایت انجام نشده است. بنابراین فقط نقطه‌هایی بدون بُعد باقی خواهند ماند. بیایید با این قطعات ماده را دوباره بسازیم: با قرار دادن دو یا سه یا حتی چهار نقطه بی‌بُعد در کنار یکدیگر نمی‌توان به چیزی دارای بُعد رسید. درواقع اهمیتی ندارد که چه تعداد نقطه بدون بُعد را کنار یکدیگر قرار می‌دهید، شما به بُعد دست پیدا نمی‌کنید چون نقاط بُعد ندارند. بنابراین ما نمی‌توانیم ساخته شدن ماده از نقاط بی‌بُعد را تصور کنیم چون هر تعداد نقطه بی‌بُعد کنار هم بگذاریم هیچ گاه به جسمی دارای بُعد نخواهیم رسید. دموکریتوس نتیجه گرفت که تنها حالت ممکن این است که هر قطعه از ماده باید از تعدادی متناهی از ذرات مجزای تقسیم‌ناپذیر ساخته شده باشد که هر کدام اندازه‌ای مشخص دارند: اتم‌ها.

ریشه چنین استدلال هوشمندانه‌ای به پیش از دموکریتوس بازمی‌گردد. به ناحیه چیلنتو در جنوب ایتالیا و شهری که امروزه ولیا^۷ نامیده می‌شود اما در قرن پنجم پیش از میلاد مستعمره یونانی درخشانی بود به نام *التا*^۸. در آنجا پارمنیدس می‌زیست، فیلسوفی که کاملاً - و شاید بیش از اندازه - دنباله‌رو عقل‌گرایی میلتوسی و پیرو این ایده بود که عقل می‌تواند به ما نشان دهد ظاهر چیزها با باطن‌شان متفاوت است. پارمنیدس به دنبال جاده‌ای به سوی حقیقت بود که تنها از عقل محض بگذرد. جاده‌ای که او را به جایی رساند تا در نهایت ادعا کند که تمام پدیده‌ها توهم‌اند. او مسیری را در تفکر باز کرد که هر چه بیشتر به متافیزیک نزدیک می‌شد و از آنچه بعدها «دانش طبیعی» نام گرفت، فاصله می‌گرفت. شاگردش، زنون، که او هم اهل *التا* بود، استدلال‌های دقیقی برای حمایت از این عقل‌گرایی بنیادگرایانه - که مطلقاً هیچ اعتباری برای پدیده‌ها قائل نبود - دست و پا کرد. این استدلال‌ها شامل پارادوکس‌هایی هستند که «پارادوکس‌های زنون» نامیده می‌شوند و هدفشان این است که نشان دهند تمام پدیده‌ها توهم‌اند و مفهوم عادی حرکت بی‌معناست. [۱۲]

مشهورترین پارادوکس زنون در قالب یک داستان مختصر ارائه می‌شود: لاک‌پشت آشیل را به یک مسابقه دو فرا می‌خواند با این شرط که لاک‌پشت ده متر جلوتر از آشیل حرکت را آغاز کند. آیا آشیل می‌تواند به لاک‌پشت برسد؟ زنون استدلال می‌کند که منطق دقیق به ما می‌گوید جواب منفی است. پیش از اینکه آشیل به لاک‌پشت برسد باید آن ده متر را طی کند و برای انجام این کار به مقدار مشخصی زمان نیاز دارد. در این زمان، لاک‌پشت چند سانتی‌متر جلوتر خواهد رفت. آشیل برای طی این چند سانتی‌متر به زمان کمی نیاز دارد اما در همین زمان کم لاک‌پشت باز هم جلوتر خواهد رفت و این فرایند تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت. بنابراین آشیل به تعدادی نامتناهی از این بازه‌های زمانی نیاز خواهد داشت و زنون استدلال می‌کند که تعداد نامتناهی از بازه‌های زمانی، مقداری نامتناهی از زمان است. نتیجه منطقی این است که آشیل به زمانی نامتناهی برای رسیدن به لاک‌پشت نیاز خواهد داشت یا به عبارت دیگر ما هیچ‌وقت رسیدن او به لاک‌پشت را نخواهیم دید. اما از آنجا که ما می‌بینیم آشیل تیزپا می‌تواند به هر تعداد لاک‌پشتی که دلش می‌خواهد برسد و از آنها پیش بیفتد، در نتیجه آنچه می‌بینیم غیر عقلانی و توهم‌آمیز است.

بیایید صادق باشیم: این استدلال متقاعدکننده نیست. اما مشکلش کجاست؟ یک جواب ممکن این است که زنون اشتباه می‌کند چرا که ما با جمع تعدادی نامتناهی از یک شیء به یک شیء نامتناهی نخواهیم رسید. فرض کنید که یک قطعه ریسمان داریم، آن را از وسط نصف کنیم و یکی از قطعات را باز از وسط نصف کنیم و این کار را تا بی‌نهایت ادامه دهیم. در نهایت تعدادی نامتناهی از قطعات کوچک ریسمان در اختیار خواهیم داشت. جمع این قطعات با یکدیگر به هر حال متناهی است چون می‌توانیم آنها را تا جایی با هم جمع کنیم که به طول

اولیهٔ ریسمان برسیم. از آنجا که تعدادی نامتناهی از قطعات ریسمان، یک ریسمان متناهی می‌سازد، جمع تعدادی نامتناهی از بازه‌های کوچک شوندهٔ زمان هم زمانی متناهی خواهد ساخت و قهرمان ما حتی اگر مجبور باشد تعدادی نامتناهی از فواصلی را که مدام کوتاه می‌شوند بپیماید، باز هم به زمانی متناهی برای این کار نیاز خواهد داشت و در نهایت به لاک‌پشت خواهد رسید. به نظر می‌رسد پارادوکس رفع شده است. این راه‌حل بر مفهوم پیوستار مبتنی است: می‌توان بی‌نهایت زمان به‌دلخواه کوچک داشت که حاصل جمع‌شان متناهی باشد. ارسطو اولین کسی بود که چنین امکانی را مشاهده کرد و پس از او ریاضیدانان باستانی و مدرن آن را بسط دادند.

۱. به لحاظ فنی، جمع‌های نامتناهی همگرا وجود دارند. در مورد مثال ریسمان، جمع نامتناهی $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \dots$ همگرا به ۱ است. جمع‌های نامتناهی همگرا در زمان زنون شناخته شده نبودند. ارشمیدس چند قرن بعد آنها را کشف و از آنها برای محاسبهٔ مساحت استفاده کرد. نیوتن از آنها زیاد استفاده می‌کرد اما در قرن نوزدهم، بولتسانو و وایرشتراس، به این ابره‌های ریاضیاتی وضوحی مفهومی بخشیدند. با این حال ارسطو پیشاپیش فهمیده بود که این یک جواب ممکن به زنون است. شکاف ارسطویی بین نامتناهی بالقوه و نامتناهی بالفعل پیشاپیش ایدهٔ اصلی را در خود داشت: تفاوت بین «نبود حدی برای تقسیم‌پذیری» و «امکان تقسیم یک چیز تا بی‌نهایت».

اما آیا این راه‌حل در دنیای واقعی درست است؟ آیا ریسمان‌های به‌دلخواه کوچک واقعاً وجود دارند؟ آیا ما می‌توانیم یک ریسمان را هر قدر که دلمان می‌خواهد نصف کنیم؟ آیا بازه‌های زمانی بی‌نهایت کوچک وجود دارند؟ این دقیقاً همان مسأله‌ای است که بعدها گرانث کوانتومی با آن مواجه خواهد شد.

طبق روایات، زنون لوکیپوس را دیده و معلمش شده است. بنابراین، لوکیپوس با معماهای زنون آشنا بوده اما راهی متفاوت برای پاسخ به آنها یافته است. لوکیپوس می‌گوید شاید قطعات به‌دلخواه کوچک واقعاً وجود نداشته باشند: یک حد نهایی برای تقسیم‌پذیری وجود دارد. جهان دانه‌ای است، نه پیوسته. طبق استدلال دموکریتوس که پیش‌تر آن را از قول ارسطو نقل کردیم، با نقطه‌های بی‌نهایت کوچک نمی‌توان چیزی دارای بُعد و امتداد ساخت. بنابراین طول ریسمان باید با تعدادی متناهی از قطعاتی متناهی با اندازه‌ای متناهی ساخته شده باشد. ما نمی‌توانیم ریسمان را هر قدر که می‌خواهیم نصف کنیم. ماده پیوسته نیست و از اتم‌هایی با اندازهٔ محدود و مشخص ساخته شده است.

فارغ از درست یا نادرست بودن این استدلال انتزاعی، نتیجه‌گیری آن بر حسب مشاهدات امروز ما تا حدود زیادی درست است. ماده واقعاً ساختاری اتمی دارد. اگر من یک قطرهٔ آب را به دو قسمت تقسیم کنم، آن گاه دو قطرهٔ آب خواهم داشت. می‌توانم هر یک از این دو قطره را دوباره و دوباره تقسیم کنم. اما نمی‌توانم این کار را تا بی‌نهایت ادامه دهم. در یک نقطهٔ مشخص، فقط یک مولکول خواهم داشت و تقسیم در این نقطه تمام است چرا که هیچ قطرهٔ آبی کوچک‌تر از یک مولکول آب وجود نخواهد داشت.

ما امروزه چگونه به این امر پی برده‌ایم؟ شواهد در طی قرن‌ها و به‌خصوص در علم شیمی پدیدار شده‌اند. هر ماده‌ای به لحاظ شیمیایی از ترکیب چند عنصر و با نسبت‌های وزنی مشخصی از این چند عنصر ساخته شده است. شیمی دان‌ها راهی برای اندیشیدن به مواد پدید آورده‌اند: مواد از مولکول‌هایی ساخته شده‌اند که خودشان حاصل ترکیبی ثابت از اتم‌ها هستند. مثلاً، آب، H_2O ، از دو هیدروژن و یک اکسیژن تشکیل شده است.

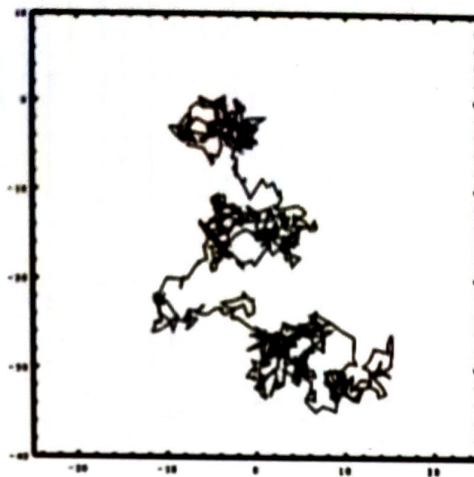
اما اینها صرفاً سرنخ‌اند. تا اوایل قرن قبل، تعداد زیادی از دانشمندان و فلاسفه برای فرضیه اتمی اعتباری قائل نبودند. در میان آنها ارنست ماخ هم بود که نظریاتش درباره فضا تأثیر زیادی بر اینشتین گذاشت. در سال ۱۸۹۷ در پایان سخنرانی لودویگ بولتسمان در آکادمی سلطنتی علوم وین، ماخ در انظار عموم اعلام کرد: «من باور ندارم که اتم‌ها وجود دارند.» خیلی‌ها مانند ماخ نحوه نگارش معادلات شیمی را روشی قراردادی برای خلاصه کردن قوانین واکنش‌های شیمیایی می‌دانستند نه شاهدهی بر وجود مولکول‌های آب تشکیل شده از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن. آنها می‌گفتند شما هرگز نمی‌توانید اتم‌ها را ببینید. یا می‌پرسیدند که اندازه یک اتم چقدر است؟ دموکریتوس هیچ‌گاه نتوانست اتم‌هایش را اندازه بگیرد...

اما یک نفر دیگر توانست. اثبات دقیق فرضیه اتمی تا سال ۱۹۰۵ پدیدار نشد. این اثبات به دست یک شورشی بیست و پنج ساله انجام شد. او فیزیک خوانده بود اما نتوانسته بود به عنوان دانشمند کاری برای خود بیابد و در نهایت در اداره ثبت اختراعات برن مشغول به کار شده بود. من در طول این کتاب، درباره این جوان و سه مقاله‌ای که برای معتبرترین مجله فیزیک زمان خودش، سالنامه فیزیک^۱، فرستاد بسیار سخن خواهم گفت. در مقاله اول، او وجود اتم‌ها را اثبات و ابعاد آنها را اندازه‌گیری می‌کند و به مسأله‌ای که لوکیپوس و دموکریتوس بیست و سه قرن پیش مطرح کرده بودند، پاسخ می‌دهد.



شکل ۱-۳ آلبرت اینشتین

نام این جوان بیست و پنج ساله، همان‌طور که می‌دانید، آلبرت اینشتین است. او چگونه این کار را کرد؟ ایده این کار به نحو شگفت‌انگیزی ساده است. هر کس، حتی خود دموکریتوس هم اگر تیزهوشی اینشتین و توانایی ریاضیاتی او برای انجام محاسبه‌ای نه چندان ساده را داشت، می‌توانست به آن دست یابد. ایده، چنین چیزی است: اگر به دقت به چیزهای بسیار کوچک مانند ذرات گرد و غبار که در هوا یا آب معلق‌اند نگاه کنیم، می‌بینیم که در حال لرزش و جنب و جوش‌اند. به خاطر این لرزش، آنها زیگزآگی و تصادفی حرکت می‌کنند و همچنان که بی‌هدف تکان می‌خورند، کم‌کم از نقطه آغازین‌شان دور می‌شوند. این حرکت ذرات در یک مایع، پس از رابرت براون، زیست‌شناسی که جزئیات این حرکت را در قرن نوزدهم توضیح داد، حرکت براونی نامیده می‌شود. مسیر مثالی ذره‌ای که به این شکل حرکت می‌کند در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. این مسیر به گونه‌ای است که انگار ذره کوچک از هر طرف خود ضربه می‌خورد. درواقع نه «انگار» بلکه واقعاً هم ضربه می‌خورد. ذره به این دلیل دچار جنب و جوش می‌شود که از مولکول‌های هوا، گاهی از راست و گاهی از چپ، ضربه می‌خورد.



شکل ۴-۱ حرکت براونی

نکته ظریف اینجاست: تعداد مولکول‌های هوا بسیار زیاد است. به طور متوسط تعداد آنهایی که از چپ ضربه می‌زنند با تعداد آنهایی که از راست ضربه می‌زنند برابر است. اگر مولکول‌های هوا بی‌نهایت کوچک بودند و تعدادشان نامتناهی بود، ضربه‌هایی که از راست و چپ وارد می‌شد یکدیگر را در هر لحظه خنثی می‌کردند و ذره بی‌حرکت می‌ماند. اما اندازه متناهی مولکول‌ها - یعنی این واقعیت که تعداد آنها محدود و متناهی است و نه نامتناهی - منجر به جنب و جوش می‌شود. این ایده اصلی است: برخورد ها هیچ‌گاه دقیقاً با هم برابر نمی‌شوند. تنها میانگین آنها با هم برابر است. فرض کنید تعداد مولکول‌های هوا بسیار کم و اندازه‌شان بزرگ بود: آن‌گاه ذره به وضوح به شکل تک‌وتوک ضربه می‌خورد، در این لحظه ضربه‌ای به راست، بعد ضربه‌ای به چپ... بین یک ضربه و ضربه بعد، ذره با زاویه‌ای کاملاً مشخص به این طرف و آن طرف حرکت می‌کرد، درست مانند توپ فوتبالی که بچه‌ها در زمین بازی به آن ضربه می‌زنند. هرچه مولکول‌ها کوچک‌تر شوند وقفه‌های بین ضربه‌ها کمتر می‌شود و ضربه‌هایی با مسیر متفاوت بیشتر یکدیگر را خنثی می‌کنند و ذره کمتر حرکت می‌کند.

با کمی محاسبات ریاضی می‌توان از میزان حرکت قابل مشاهده ذره به ابعاد مولکول‌ها دست پیدا کرد. اینشتین همان‌طور که پیش‌تر گفتم، در بیست و پنج سالگی این کار را انجام داد. او با مشاهده تکان‌های ذره درون مایع و محاسبه اندازه این تکان‌ها، یعنی تغییر موقعیت‌های ذره، توانست اندازه اتم‌های دموکریتوس یعنی ذرات بنیادینی را که ماده از آنها ساخته شده است، محاسبه کند. او پس از ۲۳۰۰ سال، دقت بصیرت دموکریتوس را اثبات کرد: ماده دانه‌بندی شده است.

ماهیت چیزها

آثار والای لوکریتوس نابود نخواهد شد مگر زمانی که جهان خود نابود شود.

اووید [۱۱۳]

اغلب با خود فکر می‌کنم که از دست رفتن تمامی آثار دموکریتوس^{۱۱} بزرگ‌ترین تراژدی فکری‌ای است که در پی فروپاشی تمدن کلاسیک باستان رخ داد. به فهرست آثار او در پانویس نگاهی بیندازید. مشکل بتوانید با تصور آنچه بشر از تأملات گسترده علمی دنیای باستان از دست داده، حسرت نخورد.

هرچه برای ما باقی مانده از ارسطوست، و تفکر غربی خود را بر مبنای آثار ارسطو بازسازی کرده نه دموکریتوس. شاید اگر تمام آثار دموکریتوس باقی می‌ماند و تمام آثار ارسطو از بین می‌رفت، اوضاع تاریخ فکری تمدن ما دگرگون می‌شد...

بستن مدارس باستانی، مانند مدرسه آتن و اسکندریه، و نابودی نوشته‌های ناسازگار - به شکلی گسترده و نظام‌مند - به طبیعت‌گرایی دموکریتوس مجال نداد. این سرکوب که از زمان امپراتور تئودوسیوس در سال ۳۹۱ آغاز شد، افلاطون و ارسطو کافر اما معتقد به جاودانگی روح و وجود یک خالق اولیه را جایز شمرد اما دموکریتوس را نه.

از این مصیبت فقط یک متن نجات یافته و کامل به دست ما رسیده است. ما اطلاعات اندک خود را درباره اتم‌گرایی باستانی از این متن به

دست آورده‌ایم و مهم‌تر از آن، از روح حاکم بر این دانش باخبر شده‌ایم. این متن، شعر باشکوه ماهیت چیزها^{۱۱} یا درباره ماهیت هستی اثر شاعر رومی، لوکرتیوس است.

لوکرتیوس پیرو فلسفه اپیکور و شاگرد یکی از شاگردان دموکریتوس است. اپیکور بیشتر با مسائل اخلاقی سروکار دارد تا مسائل علمی و به اندازه دموکریتوس هم عمیق نیست. گزارش او از اتم‌گرایی دموکریتوس گاه سطحی است. اما نگاه او به جهان طبیعی اساساً همان نگاه فیلسوف بزرگ آبدرا است. لوکرتیوس، تفکرات اپیکور و اتم‌گرایی دموکریتوس را به شعر درآورد و این گونه بود که بخشی از این فلسفه عمیق را از فاجعه فکری قرون تاریک نجات داد. او درباره اتم و دریا و آسمان و طبیعت سروده است و مسائل فلسفی و ایده‌های علمی و استدلال‌هایی ناب را در قالب شعری درخشان به نظم درآورده است.

... من شرح خواهم داد که طبیعت با کدام نیرو، گردش‌های خورشید و سفرهای ماه را هدایت می‌کند تا گمان نبریم که آنها به اراده خود سالانه میان زمین و آسمان در گردش‌اند... [۱۴]

زیبایی این شعر به حس باشکوهی است که نگاه عمیق اتم‌گرایانه در آن به وجود آورده است. حس عمیق وحدت چیزها که زاده این دانش است: ما همه از همان ماده‌ای ساخته شده‌ایم که ستاره‌ها و دریاها از آن ساخته شده‌اند:

... ما همه از بذرهایی آسمانی زاده شده‌ایم. همه از یک پدریم که به مادر روزی دهنده ما، زمین، قطرات باران را می‌بخشد. پس زمین مادر باردار می‌شود و مزارعی خندان و درختانی اغواگر و انسان و همه جانوران دیگر را به دنیا می‌آورد. زمین مادر است که همه اینها را خوراک می‌دهد تا با آن بدن‌شان را سیر کنند، زندگی شادمانه در پیش بگیرند و نسل‌ها نسل زاد و ولد کنند... [۱۵]

آرامش و متانت درخشانی که در این شعر هست حاصل این آگاهی است که دیگر خدایانی دمدمی مزاج وجود ندارند تا از ما چیزهای سخت طلب کنند یا مجازات‌مان نمایند. لذت پرشور و سبک‌بال این شعر از همان ابیات ابتدایی کتاب که به ونوس، سمبل درخشان نیروی خلاقه طبیعت، تقدیم شده رخ می‌نماید:

از پیش روی تو بادها می‌گریزند و با آمدنت ابرها از آسمان کنار می‌روند. برای توست که موج‌های دریا لبخند می‌زنند و برای خاطر توست که آسمان آرام می‌گیرد و با پرتوهای پراکنده می‌درخشد. [۱۶]

این شعر عمیقاً پذیرای زندگی است. زندگی‌ای که خود ما نیز جزئی از آن هستیم:

آیا نمی‌بینی که طبیعت برای لذت‌بردن از احساسات زیبا تنها بی‌تاب دو چیز است: بدنی خالی از درد و ذهنی رها از نگرانی و ترس. [۱۷]

و در نهایت این شعر ناگزیری مرگ را با متانت می‌پذیرد. مرگی که محوکنندهٔ بدی‌هاست و نباید از آن ترسید. برای لوکرتیوس دین ناآگاهی و عقل مشعل روشنایی است.

کتاب لوکرتیوس قرن‌ها فراموش شده بود و در ژانویهٔ سال ۱۴۱۷ به دست پوجو براچولینی^{۱۲} اومانیست، در صومعه‌ای در آلمان دوباره کشف شد. پوجو منشی چند پاپ بود و به‌پیروی از اکتشافات مشهور فرانچسکو پترارک^{۱۳}، به شکار کتاب‌های باستانی علاقه داشت. کشف دوبارهٔ یک متن از کوینتیلیان^{۱۴} به دست او، باعث اصلاح رشتهٔ مطالعات حقوق در دانشکده‌های اروپا شد و کشف رساله‌ای دربارهٔ معماری از ویرتوویوس^{۱۵}، طرز طراحی و ساخت بناهای فاخر را تغییر داد. شاهکار او کشف دوبارهٔ لوکرتیوس است. نسخه‌ای که پوجو پیدا کرد امروز از دست رفته است اما نسخهٔ رونوشتی که دوستش، نیکولو نیکولی^{۱۶}، از آن تهیه کرد (نسخه‌ای که امروز به لورنزیانا مشهور است) اکنون در کتابخانهٔ لورنزیانای فلورانس نگهداری می‌شود.

زمانی که پوجو کتاب لوکرتیوس را به بشر بازپس داد، زمینه از قبل برای ظهور چیزی تازه آماده شده بود. از زمان دانته به بعد، می‌شد چیزهای تازه‌ای شنید:

چشمان تو به قلبم تیر می‌انداختند

تا ذهن خواب‌آلود مرا بیدار کنند

نگاه کن که اکنون شوریده و ناامیدم

با عشقی که زندگی‌ام را تکه پاره می‌کند. [۱۸]

اما کشف دوبارهٔ دربارهٔ ماهیت هستی^{۱۷}، تأثیری عمیق بر رنسانس ایتالیایی و اروپایی [۱۹] گذاشت و پژواکش، مستقیم یا غیرمستقیم در آثاری از گالیله [۲۰] تا کپلر [۲۱] و از بیکن تا ماکیاوولی شنیده می‌شود. یک قرن بعد از پوجو، اتم‌ها به شکلی جذاب در یکی از متون شکسپیر پدیدار می‌شوند:

مرکاشیو: اوه، پس ملکه مَب به خوابت آمده بوده:

او قابلهٔ پریان است

و با قد و بالایی کوچک‌تر از نگین عقیقی

که بر انگشت کدخدای شهر می‌درخشد

در حالی که کالسکهٔ او را دسته‌ای از موجودات ریز (atomies) می‌کشند

بر بینی مردانی که خوابیده‌اند پدیدار می‌شود... [۲۲]

مقالات مونتینی شامل حداقل صد نقل قول از لوکرتیوس است. اما دامنهٔ تأثیر مستقیم او از نیوتن، دالتون، اسپینوزا، داروین تا اینشتین گسترده شده است. ممکن است این ایدهٔ اینشتین که حرکت براونی یک ذرهٔ معلق در مایع نشان‌دهندهٔ وجود اتم‌هاست، از لوکرتیوس گرفته شده باشد. این متنی است که در آن لوکرتیوس، «شاهدی عینی» برای مفهوم اتم ارائه می‌کند:

این فرایندی است که همواره پیش چشم ما نقش می‌بندد. ببینید چه اتفاقی می‌افتد وقتی که پرتو آفتاب بر یک ساختمان می‌تابد و نور وارد قسمت‌های تاریک ساختمان می‌شود. در پرتو نور، دسته‌ای از ذرات ریز را می‌بینید که به شکل‌های مختلف در فضای خالی با هم برخورد می‌کنند، انگار که در یک درگیری جاودانه گیر کرده‌اند و صف به صف به خط مقدم اعزام می‌شوند بدون اینکه حتی یک لحظه در روند اتحاد و جدایی‌شان وقفه‌ای بیفتد. با این اوصاف می‌توانید تصور کنید که چه اتفاقی برای اتم‌هایی که مدام به فضای بی‌کران پرتاب می‌شوند، می‌افتد. یک شیء کوچک می‌تواند تصویری هرچند ناقص از چیزهای عظیم عرضه کند. به علاوه، دلیل دیگری که باید به این ذرات در حال رقص در پرتو خورشید توجه کنیم این است: رقص آنها نشانهٔ جنبش‌هایی پنهان در ماده است که ما قادر به دیدنشان نیستیم. اینجا شما می‌توانید ذره‌های بسیاری را ببینید که تحت تأثیر ضربه‌هایی نامرئی در تمام جهات، از مسیرشان خارج می‌شوند و به این طرف و آن طرف می‌روند. باید توجه کنید که تمام این بی‌قراری ذرات از وجود اتم‌ها ناشی می‌شود. این فرایند ابتدا از اتم‌هایی شروع می‌شود که خود به خود در حرکت‌اند. سپس ذرات مرکبی که از انرژی اتم‌ها خالی‌اند تحت تأثیر ضربات نامرئی اتم‌ها به حرکت درمی‌آیند

و آنها هم به نوبه خود ذرات بزرگ‌تر را به حرکت درمی‌آورند. در نتیجه جنبش از سطح اتم‌ها به سطح حواس ما می‌رسد و بنابراین ذراتی که ما حرکت‌شان را در پرتو خورشید می‌بینیم، به وسیله ضرباتی به حرکت درآمده‌اند که برای ما قابل رؤیت نیستند. [۲۳]

اینستین به این «شاهد عینی» که لوکرتیوس و شاید اولین بار دموکریتوس معرفی‌اش کرده بودند، دوباره جان بخشید و با ترجمه‌اش به زبان ریاضی، شکل مشخصی به آن داد و در نهایت از آن برای محاسبه اندازه اتم‌ها استفاده کرد.

کلیسای کاتولیک تلاش کرد جلوی تأثیر لوکرتیوس را بگیرد: شورای کلیسای فلورانس در دسامبر سال ۱۵۱۶، مطالعه لوکرتیوس را در مدارس ممنوع اعلام کرد. در سال ۱۵۵۱ شورای ترنت کتاب او را ممنوع کرد. اما دیگر دیر شده بود. یک جهان‌بینی کامل که بنیادگرایی مسیحی در قرون وسطی آن را سرکوب کرده بود، داشت دوباره در اروپایی که چشمانش را از نو گشوده بود ظهور می‌کرد. آنچه در اروپا مطرح شده بود نه صرفاً عقلگرایی و ماده‌گرایی لوکرتیوس بود و نه صرفاً تأملات درخشان و باوقارش بر زیبایی طبیعت. قضیه بسیار مهم‌تر از این حرف‌ها بود: ساختار دقیق و پیچیده اندیشه‌ای درباره واقعیت. طرز فکری تازه که با طرز فکر مسلط در قرون وسطی به تمامی تفاوت داشت. [۲۴]

کیهان قرون وسطایی که دانته آن را در شعر درخشان توصیف کرده، بر مبنای ساختاری سلسله‌مراتبی از هستی شکل گرفته بود که بازتابی از ساختار سلسله‌مراتبی جامعه اروپایی بود: یک ساختار کروی کیهانی که زمین در مرکز آن قرار گرفته، با شکافی ناپیمودنی بین زمین و آسمان و توصیف غایت‌انگازانه و استعاری پدیده‌های طبیعی. ترس از ماوراء، ترس از مرگ، توجه اندک به طبیعت، اعتقاد به اینکه ایده‌ها (مثل افلاطونی) پیشاپیش جهان را شکل داده‌اند، اعتقاد به اینکه دانش را تنها می‌توان در گذشته، یعنی در سنت و الهامات جست و....

هیچ‌یک از اینها در جهان دموکریتوس، آن گونه که لوکرتیوس آن را توصیف کرده، وجود ندارد. در این جهان نه ترسی از خدایان المپ هست، نه غایت و انجامی برای جهان، نه سلسله‌مراتبی کیهانی نه شکافی بین زمین و آسمان. در اینجا عشقی عمیق به طبیعت در جریان است و ره‌اشدگی در همین طبیعت. اینجا می‌دانیم که ما جزئی از جهانیم و زن‌ها و مرد‌ها و حیوانات و گیاهان و ابرها بدون هیچ سلسله‌مراتبی، اجزای یک کل خارق‌العاده‌اند. در پس سخنان باشکوه دموکریتوس علاقه‌ای ژرف به کل هستی موج می‌زند: «در نگاه انسانی حکیم، زمین بدون مرز است چرا که وطن حقیقی یک روح فضیلت‌مند، تمام هستی است.» [۲۵]

در پس این سخنان، همچنین اراده‌ای هست برای اندیشیدن به طبیعت با زبانی ساده. اراده‌ای برای اینکه طبیعت را جست‌وجو کند، رازهای آن را دریابد و دانشی بیش از آنچه پیشینیانش داشتند کسب کند. در آثار او ابزار مفهومی فوق‌العاده‌ای وجود دارد که گاليله و کپلر و نیوتن بناهای نظری‌شان را با آنها ساخته‌اند: مفهوم حرکت مستقیم یکنواخت در فضا، مفهوم اجسام بنیادینی که اجزای سازنده جهان‌اند و فعل و انفعالات آنها و مفهوم فضا به منزله ظرفی که جهان در آن قرار دارد.

و در نهایت مفهوم ساده حد تقسیم‌پذیری اشیا. ویژگی دانه‌ای بودن جهان. ایده‌ای که نامتناهی را بین انگشتان ما قرار می‌دهد. این ایده که مبنای فرضیه اتمی بود، بعدها به شکلی مستدل‌تر در مکانیک کوانتومی بازگشت و امروزه به منزله سنگ بنای گرانش کوانتومی، هنوز هم قدرتمند می‌نماید.

کسی که اولین بار قطعه‌های پازل طبیعت‌گرایی رنسانس را کنار یکدیگر چید، بینش دموکریتوس را احیا کرد، به آن قدرت بخشید و آن را در مرکز تفکر مدرن قرار داد، یک مرد انگلیسی بود: بزرگ‌ترین دانشمند تاریخ و اولین شخصیت اصلی فصل بعد.

۲: کلاسیک‌ها

آیزاک و ماه کوچک

اگر در فصل قبل این گونه به نظر می‌رسید که من معتقدم افلاطون و ارسطو فقط به پیشرفت علم صدمه زده‌اند، بهتر است آن را تصحیح کنم. مطالعات ارسطو درباره طبیعت - مثلاً در زیست‌شناسی و گیاه‌شناسی - کارهای علمی فوق‌العاده‌ای هستند که بر مشاهده دقیق جهان طبیعی بنا شده‌اند. وضوح مفهومی، توجه به تنوع طبیعت، هوش حیرت‌انگیز و گشودگی ذهن فیلسوف بزرگ، تا قرن‌ها به او مرجعیتی تام داده بود. اولین فیزیک نظام‌مندی که ما می‌شناسیم فیزیک ارسطوست و به هیچ وجه فیزیک بدی هم نیست. ارسطو این فیزیک را در کتابی به همین نام یعنی فیزیک ارائه کرده است. کتاب نام خود را از رشته فیزیک نگرفته است بلکه برعکس این رشته را به خاطر کتاب ارسطو فیزیک نام نهاده‌اند. فیزیکی که ارسطو ارائه می‌دهد به این شرح است: نخست اینکه تمایز بین زمین و آسمان ضروری است. در آسمان، اشیاء همه از ماده‌ای شفاف ساخته شده‌اند و با حرکتی دورانی روی دایره‌هایی هم‌مرکز، به دور زمینی می‌گردند که کروی است و در مرکز جهان قرار دارد. در زمین، تمایز حرکت اجباری و حرکت طبیعی ضروری است.^{۱۹} حرکت اجباری با نیروی بیرونی آغاز می‌شود و زمانی به پایان می‌رسد که آن نیرو دیگر وجود نداشته باشد. حرکت طبیعی عمودی است - به بالا یا به پایین - و به نوع ماده و موقعیت آن بستگی دارد. هر ماده یک مکان طبیعی (حیز طبیعی) دارد که در واقع سطحی است که ماده به آن تعلق دارد و همواره به آن بازمی‌گردد: زمین در پایین، بعد آب که کمی از زمین بالاتر است، بعد هوا که کمی بالاتر از آب است و در نهایت آتش که از همه بالاتر قرار می‌گیرد. وقتی سنگی را برمی‌دارید و آن را رها می‌کنید، سنگ به این دلیل رو به پایین سقوط می‌کند که می‌خواهد به مکان طبیعی خود بازگردد. حباب‌های هوا در آب، آتش در هوا و بادکنک‌های بچه‌ها رو به بالا حرکت می‌کنند تا به مکان طبیعی‌شان بازگردند. این ایده را نه مسخره کنید نه دست کم بگیرید چرا که کاملاً فیزیکی است. این توصیفی خوب و صحیح از حرکت اجسامی است که در مایع غوطه‌ورند یا در معرض جاذبه قرار دارند یا درگیر اصطکاک هستند، یعنی هر آنچه ما در زندگی روزمره مشاهده می‌کنیم. برخلاف آنچه بارها گفته شده، این یک فیزیک نادرست نیست^{۲۰} بلکه نوعی تقریب است. اما فیزیک نیوتن هم نوعی تقریب از نسبیت عام است و احتمالاً تمام دانش امروز ما هم نوعی تقریب از چیزی خواهد بود که هنوز ناشناخته است. فیزیک ارسطو نه ظریف است نه محاسباتی (نمی‌توانیم کمیت چیزی را با آن محاسبه کنیم)، اما منسجم و عقلانی است و به ما امکان می‌دهد پیش‌بینی‌های کیفی درستی داشته باشیم. بی‌دلیل نیست که طی قرن‌ها این بهترین مدل ارائه‌شده برای فهم حرکت بود.^[۱]

با این حال، احتمالاً افلاطون برای پیشرفت علم اهمیت بیشتری داشت.

این افلاطون بود که به ارزش شهود فیثاغورس و پیروانش پی برد: او دریافت که کلید پیشرفت و فراتر رفتن از میلئوس، ریاضیات است. فیثاغورس در ساموس، جزیره‌ای کوچک و نه‌چندان دور از میلئوس، به دنیا آمد. اولین زندگینامه‌نویسان او، یامبلیکوس و فرفورئوس، گزارش کرده‌اند که او در اوان نوجوانی شاگرد آناکسیمندر پیر شد. همه چیز از میلئوس آغاز شده است. فیثاغورس به سفرهای زیادی رفت، احتمالاً به مصر و حتی به بابل. سپس در کروتون در جنوب ایتالیا ساکن شد و در آنجا فرقه‌ای مذهبی و سیاسی و علمی بنیان نهاد که هم نقشی پراهمیت در سیاست آن شهر کوچک بازی کرد، هم میراثی عظیم برای کل جهان به جا گذاشت: کشف سودمندی ریاضیات به لحاظ نظری: گفته شده که او ادعا می‌کرد «اشکال و ایده‌ها تحت سلطه اعدادند».^[۲]

افلاطون محتوای عرفانی دست‌وپاگیر و بی‌مصرف نظریه فیثاغورس را دور انداخت و پیام مفید آن را جذب و پالایش کرد: بهترین زبان برای فهم طبیعت، ریاضیات است. دستیابی به این بصیرت، بسیار مهم و یکی از دلایل موفقیت علم غربی است. مطابق روایات، افلاطون این جمله را بر سردر مدرسه خود حک کرده بود: «آن که هندسه نمی‌داند وارد نشود».

افلاطون مسأله‌ای مهم را بر اساس این ایده پیش کشید: مسأله‌ای که پس از انحرافی طولانی، دانش مدرن از دل آن زاده شد. او از شاگردان ریاضی خوانده‌اش پرسید که آیا می‌توانند قوانین ریاضیاتی مشخصی را بیابند که اجرام سماوی قابل رؤیت در آسمان طبق آنها حرکت می‌کنند. ناهید و مریخ و مشتری به راحتی در آسمان شب قابل مشاهده‌اند. به نظر می‌رسد که آنها تا حدودی تصادفی، در میان ستاره‌های دیگر عقب و جلو می‌شوند. آیا می‌توان ریاضیاتی یافت که حرکت آنها را توصیف و پیش‌بینی کند؟

انودوکسوس در همان مدرسه افلاطون حل این مسأله را آغاز کرد و ستاره‌شناسانی مانند آریستارخوس و هیپارخوس آن را در قرون بعد ادامه دادند و ستاره‌شناسی دنیای باستان را به سطح علمی بسیار بالایی رساندند. ما از موفقیت‌های این دانش فقط از طریق یک کتاب که تا امروز سالم مانده است، خبر داریم: المجسطی^{۲۱} بطلمیوس. بطلمیوس ستاره‌شناسی بود که در قرن اول میلادی در اسکندریه تحت حکومت روم در زمانه‌ای زندگی می‌کرد که علم به سبب فروپاشی جهان هلنیستی و مسیحی شدن امپراتوری، در حال افول و زوال و خاموشی بود.

کتاب بطلمیوس یک اثر مهم علمی است. این کتاب به‌شکلی محکم و دقیق و پیچیده و با نهایت دقتی که محدودیت چشم انسان اجازه می‌دهد، یک نظام ستاره‌شناسی ریاضیاتی ارائه می‌کند که می‌تواند حرکت به‌ظاهر تصادفی سیارات را در آسمان پیش‌بینی کند. این کتاب ثابت می‌کند که شهود فیثاغورس درست بود. جهان با ریاضیات قابل توصیف و پیش‌بینی می‌شود: سرگردانی ظاهری و حرکات بی‌نظم سیارات را می‌توان با استفاده از فرمول‌های ریاضی‌ای که بطلمیوس -با خلاصه کردن نتایج قرن‌ها کار ستاره‌شناسان یونانی- به‌شکلی نظام‌مند و استادانه ارائه کرده، دقیقاً پیش‌بینی کرد. حتی امروز نیز می‌توانید کتاب بطلمیوس را بگشایید، با کمی مطالعه تکنیک‌هایش را یاد بگیرید و مثلاً، موقعیتی را که مریخ در آینده در آسمان خواهد داشت، محاسبه کنید. امروز: دو هزار سال پس از نوشته شدن کتاب. پی‌بردن به اینکه چنین جادویی واقعاً ممکن است، آغاز علم مدرن بود و ما این را مدیون فیثاغورس و افلاطون هستیم.

پس از فروپاشی دانش باستانی، هیچ‌یک از ساکنان دنیای حاشیه‌مدیترانه نه قادر به فهم کتاب بطلمیوس بود نه قادر به فهم چند کتاب علمی محدود دیگری که از فاجعه نجات یافته بودند -کتاب‌هایی مانند اصول^{۲۲} اقلیدس. در هند که دانش یونانی به لطف مراودات تجاری و فرهنگی گسترده، به آن وارد شده بود، این کتاب‌ها خوانده و فهمیده شدند.

دانشمندان آموزش‌دیده ایرانی و عرب که می‌توانستند این کتاب‌ها را بفهمند و حفظ کنند، این دانش را دوباره از هند به غرب منتقل کردند. اما ستاره‌شناسی تا هزار سال بعد جایگاه مهمی در میان علوم نیافت.

تقریباً همان زمانی که پوجو براچولینی متن لوکرتیوس را کشف کرد، جو و سوسه‌انگیز اومانسیم ایتالیایی و اشتیاق به متون باستانی جوانی لهستانی را که برای تحصیل به ایتالیا -اول به بولونیا و سپس به پادوا- آمده بود، اغوا کرد. او به شیوه‌ای لاتین خود را معرفی می‌کرد: نیکلائوس کوپرنیکوس. کوپرنیک جوان المجسطی بطلمیوس را خواند و به شدت به آن علاقه‌مند شد. او مصمم شد که مابقی عمر خود را وقف ستاره‌شناسی کند و همان راهی را برود که بطلمیوس بزرگ رفته بود.

همه چیز فراهم است و حدود هزار سال پس از بطلمیوس، کوپرنیک می‌تواند چنان گامی به جلو بردارد که نسل‌هایی متمادی از ستاره‌شناسان هندی و ایرانی و عرب نتوانستند: او به یادگیری صرف، اعمال اصلاحات و بهبود جزئی نظام بطلمیوس اکتفا نمی‌کند و شجاعانه آن را تغییر می‌دهد و از مرزهای قبلی‌اش فراتر می‌برد. کوپرنیک نسخه‌ای برعکس و تصحیح‌شده از المجسطی بطلمیوس می‌نویسد که در آن به جای اینکه اجرام سماوی به دور زمین بگردند، خورشید در مرکز قرار دارد و زمین به همراه سیارات دیگر دور خورشید در گردش‌اند.

کوپرنیک امیدوار بود که با این تغییر شکل، محاسبات کارآمدتر شوند. اما در واقعیت این محاسبات چندان کارآمدتر از محاسبات بطلمیوس از آب درنیامدند و در نهایت حتی بدتر هم شدند. با این حال ایده اصلی درست بود: یوهانس کپلر، از دانشمندان نسل بعد، ثابت کرد که نظام کوپرنیکی واقعاً بهتر از نظام بطلمیوس کار می‌کند. او با تحلیل موشکافانه نظام جدید و مشاهدات دقیق نشان داد که چند قانون ساده ریاضی می‌تواند حرکت سیارات به دور خورشید را با دقتی حتی بیشتر از آنچه در دنیای باستان به دست آمده بود، توصیف کند. اکنون در سال ۱۶۰۰ هستیم و بشر اولین بار است که مشغول انجام دادن کاری است بهتر از آنچه هزار سال پیش در اسکندریه انجام شده است.

در همان زمانی که کپلر در سرمای شمال اروپا مشغول محاسبه حرکات اجرام آسمانی بود، در ایتالیا علم جدید با گالیلئو گالیله نمایان شد. گالیله یک ایتالیایی بسیار پرکار، اهل جدل و استدلال، بسیار با فرهنگ، به‌طرزی استثنایی باهوش و لبریز از خلاقیت بود. اختراعی تازه از هلند -تلسکوپ- به دست او رسید و او به‌شکلی از آن استفاده کرد که تاریخ بشر را تغییر داد. گالیله، تلسکوپ را به جای زمین، رو به آسمان

گرفت.

او، مانند روی در فیلم بلید رانر^{۲۲}، چیزهایی می‌بیند که مردم عادی نمی‌توانند باور کنند: حلقه‌های دور زحل، کوهستان‌های روی ماه، حالات گوناگون ناهید، اقمار مشتری... هر یک از این پدیده‌ها ایده کوپرنیک را باورپذیرتر می‌کرد. ابزار علمی، چشمان نزدیک‌بین انسان را به جهانی گشود بسیار گسترده‌تر و متنوع‌تر از آنچه تا آن زمان قابل رؤیت بود.

اما کار بزرگ گالیله این بود که می‌خواست از انقلاب کیهانی کوپرنیک، نتایجی منطقی استخراج کند: گالیله متقاعد شده بود که زمین سیاره‌ای مانند سیارات دیگر است و استدلال می‌کرد که اگر حرکت سیارات در آسمان از قوانین ریاضیاتی دقیقی پیروی می‌کند و اگر زمین مانند سیارات دیگر و بخشی از همان آسمان است، نتیجتاً حرکات اشیاء روی زمین هم باید از قوانین ریاضیاتی دقیقی پیروی کند. گالیله با اعتماد به عقلانی بودن طبیعت و با بینشی افلاطونی فیثاغوری که در آن طبیعت از طریق ریاضیات قابل فهم می‌شود، تصمیم گرفت چگونگی حرکت اشیاء در حال سقوط روی زمین را مطالعه کند. او با اطمینان به اینکه حتماً قانون ریاضیاتی مربوط به این حرکت وجود دارد، با روش آزمون و خطا این قانون را جست‌وجو کرد. اولین بار در تاریخ بشر، یک آزمایش در حال انجام است. علوم تجربی با گالیله آغاز می‌شود. آزمایش او ساده است: او اشیاء را رها می‌کند تا سقوط کنند یعنی به قول ارسطو به جایگاه طبیعی شان بازگردند و سعی می‌کند دقیقاً سرعت سقوطشان را محاسبه کند.

نتیجه بسیار چشمگیر بود: برخلاف تصور عموم، اشیاء همواره با یک سرعت ثابت سقوط نمی‌کنند. برعکس، سرعت آنها در بخش ابتدایی سقوط مدام زیادتر می‌شود. در این مرحله آن چیزی که ثابت است شتاب یا همان میزان افزایش سرعت است نه خود سرعت سقوط. به‌شکلی ناباورانه مقدار این شتاب برای تمام اشیاء یکسان است. گالیله اندازه‌گیری تقریبی اولیه خود را تکمیل کرد و فهمید که مقدار این شتاب ثابت است. مقدار آن ۹.۸ متر بر مجذور ثانیه است یعنی در هر ثانیه‌ای که شیء در حال سقوط است، سرعتش ۹.۸ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این عدد را به خاطر بسپارید.

این اولین قانون ریاضیاتی‌ای بود که برای اجسام زمینی کشف شد: قانون سقوط آزاد اجسام. تا آن موقع، فقط قوانین ریاضیاتی حرکت سیاره‌ها در آسمان کشف شده بود. کمال ریاضیات دیگر صرفاً مختص آسمان نبود.

اما مهم‌ترین نتیجه هنوز در راه بود و مقدر بود که آیزاک نیوتن به آن دست یابد. نیوتن آثار کپلر و گالیله را با دقت مطالعه کرد و با ترکیب آنها به گنجی پنهان دست یافت. می‌توانیم سیر استدلال او را تحت عنوان «ماه کوچک»، عنوانی که خودش در کتاب اصول ریاضی فلسفه طبیعی^{۲۴} آورده است، دنبال کنیم. این کتابی بود که شالوده علم مدرن را شکل داد.

نیوتن می‌نویسد: فرض کنید زمین مانند مشتری ماه‌های زیادی داشته باشد. علاوه بر ماه واقعی، چند ماه دیگر و به خصوص یک ماه کوچک را تصور کنید که با کمترین فاصله ممکن، یعنی کمی بالاتر از قله کوه‌ها، دور زمین می‌گردد. این ماه با چه سرعتی حرکت خواهد کرد؟ یکی از قوانینی که کپلر کشف کرد این بود که شعاع یک مدار با دوره گردش آن، یعنی مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک مدار طی شود، در ارتباط است.^{۲۵} ما اندازه شعاع مدار ماه واقعی و دوره گردش آن را می‌دانیم (شعاع را هیپارخوس در دوره باستان اندازه گرفته بود و دوره گردش هم یک ماه است). شعاع مدار ماه کوچک را هم می‌دانیم (شعاع زمین، که اراتوستنس در دوران باستان اندازه گرفته بود). با یک تناسب ساده، می‌توانیم دوره گردش ماه کوچک را محاسبه کنیم. طول دوره گردش آن یک ساعت و نیم است. ماه کوچک در مدت زمان یک ساعت و نیم، یک دور کامل دور زمین می‌چرخد.

اما شیئی که دور می‌زند، مسیر مستقیمی را طی نمی‌کند: این شیء مدام تغییر مسیر می‌دهد و تغییر مسیر نشانه وجود شتاب است. در نتیجه، ماه کوچک به سمت مرکز زمین شتاب دارد. محاسبه این شتاب ساده است. نیوتن محاسبه‌ای ساده می‌کند و نتیجه... ۹.۸ متر بر مجذور ثانیه است! همان شتابی که گالیله در آزمایش اجسام در حال سقوط به آن رسیده بود.

نیوتن استدلال می‌کند که این شباهت نمی‌تواند اتفاقی باشد. اگر معلول‌ها یکسان‌اند - شتاب رو به پایین ۹.۸ متر بر مجذور ثانیه است - پس باید حتماً علت‌ها هم یکسان باشند. در نتیجه: نیرویی که باعث گردش ماه کوچک بر مدارش شده است باید همان نیرویی باشد که باعث سقوط شیء به سمت زمین شده است.

ما نیرویی را که باعث سقوط اشیاء می‌شود جاذبه یا گرانش می‌نامیم. نیوتن فهمید که همین گرانش باعث چرخیدن ماه کوچک به دور زمین می‌شود. بدون این گرانش، ماه کوچک روی یک خط مستقیم حرکت می‌کرد و دور می‌شد. بنابراین ماه واقعی هم تحت تأثیر همین گرانش به دور زمین می‌گردد! ماه‌های مشتری را گرانش این سیاره جذب می‌کند و در نهایت سیاراتی هم که به دور خورشید می‌گردند تحت تأثیر گرانش خورشید قرار دارند! اگر این نیروی گرانش نبود، تمام اجرام آسمانی روی یک خط مستقیم حرکت می‌کردند. در نتیجه، هستی فضایی گسترده است که در آن اجسام به میانجی نیروها یکدیگر را جذب می‌کنند و نیرویی جهانی وجود دارد که با آن هر جسمی تمام اجسام دیگر را به خود جذب می‌کند: گرانش.

دیدگاهی عظیم در حال شکل‌گیری است. ناگهان پس از هزاره‌های متمادی، دیگر شکافی بین زمین و آسمان نیست. دیگر آن گونه که ارسطو می‌گفت، اشیاء «جایگاه طبیعی» ندارند. جهان دیگر مرکزی ندارد و چیزهایی که سقوط می‌کنند در پی رسیدن به مکان طبیعی‌شان نیستند و روی یک خط مستقیم حرکت خواهند کرد، تا همیشه.

نیوتن با محاسبه ساده‌ای درباره ماه کوچک به این نتیجه رسید که نیروی گرانش با فاصله تغییر می‌کند و توانست مقدار آن را محاسبه کند. ما این مقدار را امروزه ثابت نیوتن^{۲۶} می‌نامیم و آن را با حرف G نشان می‌دهیم. این نیرو در زمین باعث سقوط اجسام می‌شود و در آسمان سبب باقی ماندن سیارات و ماهواره‌ها در مدارشان می‌شود.

این تخریب ساختار مفهومی جهان ارسطویی یعنی جهان بینی مسلط در قرون وسطی است. مثلاً جهان دانته را تصور کنید: او نیز مانند ارسطو زمین را تویی در نظر می‌گرفت که در مرکز هستی قرار دارد و اجرام آسمانی حول آن در گردش‌اند. همین. اما هستی فضایی عظیم و بی‌کران است که ستاره‌ها بدون هیچ مرز و مرکزی در آن قرار گرفته‌اند. درون این هستی اجسام به شکلی آزادانه و مستقیم حرکت می‌کنند تا آن هنگام که نیرویی که به وسیله جسمی دیگر تولید شده، آنها را منحرف کند. ارجاع به اتم‌گرایی باستان در کارهای نیوتن مشهود است حتی اگر آن را به زبان سنتی آن زمان بیان کرده باشد:

به‌نظرم کاملاً احتمال دارد که خداوند در آغاز، ماده را به شکل ذراتی جامد، دارای جرم، سخت، غیرقابل نفوذ و متحرک آفریده باشد که

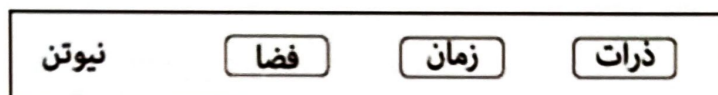
اندازه و شکل و ویژگی‌های مشخصی دارند و در نسبت‌هایی مشخص با فضا هستند... [۳]

جهان مکانیک نیوتنی ساده است و در شکل‌های ۱-۲ و ۲-۲ خلاصه شده. این تولد دوباره جهان دموکریتوس است. جهانی گسترده و یکدست و همگن که ذرات همواره در آن در حرکت‌اند و برهم اثر می‌گذارند و دیگر هیچ. جهانی که لئوپاردی آن را این گونه سروده است: ... اینجا نشسته‌ام و چشم دوخته‌ام به آن طرف پرچین‌ها که در آن فضایی بی‌کران یافته‌ام

و سکوتی فرابشری

و عمیق‌ترین آرامش و سکوت در ذهنم شکل گرفته است... [۴]

اما اکنون این بینش بسیار پر قدرت‌تر از بینش دموکریتوس است به این دلیل که دیگر صرفاً یک تصویر ذهنی برای نظم‌دادن به جهان نیست: این بینش اکنون با ریاضیات، با میراث فیثاغورس و با سنت باارزش ریاضی فیزیکی ستاره‌شناسان اسکندریه ترکیب شده است. جهان نیوتن همان جهان دموکریتوس است که با زبانی ریاضیاتی ارائه شده است.



شکل ۱-۲ جهان از چه چیز ساخته شده است؟



شکل ۲-۲ جهان نیوتن: ذراتی که در فضا در حرکت‌اند با گذر زمان یکدیگر را جذب می‌کنند.

نیوتن بدون تردید به دینی که علم مدرن به دانش باستانی دارد واقف است. مثلاً در سطرهای ابتدایی کتابش، نظام جهان^{۲۷}، ریشه‌های انقلاب کوپرنیکی را (به‌درستی) به دنیای باستان متصل می‌کند: «این عقیده که ستاره‌ها در بالاترین بخش آسمان ثابت و بی‌حرکت می‌مانند و زمین به دور خورشید می‌گردد، متعلق به فلاسفه باستان است.» هر چند او درباره اینکه چه کسی در گذشته چه کاری انجام داده کمی سردرگم است و گاهی برعکس و گاهی خارج از موضوع، از فیلولائوس، آریستارخوس اهل ساموس، آناکسیمندر، افلاطون، آناکساگوراس، دموکریتوس و «نوما پومپیلیوس، امپراتور فرهیخته رومیان» (!) نقل قول می‌آورد.

قدرت چارچوب فکری نیوتنی فراتر از حد انتظار بود. تمام تکنولوژی قرن نوزدهم و دنیای مدرن ما تا حد زیادی بر پایه فرمول‌های نیوتن ساخته شده است. به‌رغم گذشت سیصد سال ما هنوز به لطف نظریه‌هایی مبتنی بر معادلات نیوتن پل، قطار، آسمان‌خراش، ماشین و سیستم‌های هیدرولیکی می‌سازیم، در آسمان پرواز می‌کنیم، آب و هوا را پیش‌بینی می‌کنیم، به وجود یک سیاره پیش از رؤیت آن پی می‌بریم و فضاپیما به مریخ می‌فرستیم... دنیای مدرن بدون گردش ماه کوچک نیوتن به وجود نمی‌آمد. فهم تازه‌ای از جهان، طرز فکری که اشتیاق ولتر و کانت را به روشنگری برانگیخت، راهی کارآمد برای پیش‌بینی آینده، همه و همه میراث عظیم انقلاب نیوتنی بوده و هست.

به نظر می‌رسید که کلید نهایی فهم واقعیت پیدا شده است: جهان از فضایی گسترده و بی‌کران تشکیل شده که در آن، ذرات با گذر زمان حرکت می‌کنند و یکدیگر را با نیروهای خود به سوی هم می‌کشند. بشر توانست معادلات دقیقی برای توصیف این نیروها بنویسد. این معادلات فوق‌العاده کارآمد از آب درآمدند. در قرن نوزدهم مردم معتقد بودند که نیوتن نه تنها یکی از باهوش‌ترین و دوراندیش‌ترین ابنای بشر است، بلکه یکی از خوش‌شانس‌ترین‌ها هم هست چرا که فقط یک نظام قوانین بنیادی وجود دارد و او این شانس را داشته که کشف این نظام باشد. همه چیز روشن به نظر می‌رسید.

اما آیا این همه ماجرا بود؟

مایکل: میدان‌ها و نور

نیوتن می‌دانست که معادلاتش تمام نیروهای موجود در طبیعت را توضیح نمی‌دهد. نیروهایی غیر از جاذبه هم وجود دارند که بر اجسام تأثیر می‌گذارند. اشیاء صرفاً در هنگام سقوط حرکت نمی‌کنند. اولین مسأله‌ای که نیوتن آن را حل نکرده باقی گذاشت فهم نیروهای دیگری بود که به رویدادهای اطراف ما شکل می‌دهند. این مسأله تا قرن نوزدهم بی‌جواب ماند و به دو کشف شگفت‌انگیز منجر شد. اولین کشف شگفت‌انگیز این بود که نیروی منفرد دیگری غیر از گرانش تقریباً بر تمام پدیده‌هایی که می‌بینیم حاکم است: نیرویی که ما امروزه آن را الکترومغناطیس می‌نامیم. این همان نیرویی است که با حفظ اجزای ماده در کنار یکدیگر به اجسام جامد شکل می‌دهد و اتم‌ها را در مولکول و الکترون‌ها را در اتم کنار یکدیگر نگه می‌دارد. این همان نیرویی است که علم شیمی و ماده زنده با آن کار می‌کنند. همان نیرویی که فرایند پردازش اطلاعات دریافتی ما را در نورون‌های مغزمان هدایت می‌کند و به شیوه‌اندیشیدن ما شکل می‌دهد. این نیروست که همواره باعث ایجاد اصطکاک و توقف شیء لغزنده می‌شود، فرود آرام یک چتر باز را ممکن می‌کند، موتورهای الکتریکی و موتورهای احتراق را به کار می‌اندازد^{۲۸} و به ما امکان می‌دهد که چراغ‌ها را روشن کنیم و به رادیو گوش دهیم.

دومین و بزرگ‌ترین کشفی که برای داستان من بسیار اهمیت دارد، این است که برای فهم این نیرو باید اصلاحات مهمی در جهان نیوتن انجام شود: اصلاحاتی که از دل آنها، هم فیزیک مدرن زاده می‌شود و هم مهم‌ترین مفهومی که برای فهم باقی کتاب به آن نیاز داریم: مفهوم میدان.

فهم چگونگی کار نیروی الکترومغناطیسی به دست یک یا به عبارتی دو انگلیسی دیگر ممکن شد: عجیب‌ترین زوج علمی تاریخ، مایکل فارادی و جیمز کلارک ماکسول.

مایکل فارادی یک لندن‌ای فقیر بود که تحصیلات رسمی نداشت و ابتدا در یک صحافی و بعد از آن در یک آزمایشگاه مشغول به کار شد. در این آزمایشگاه بود که او از استاد خود پیش افتاد و اعتماد او را به دست آورد و به درخشان‌ترین آزمایشگر فیزیک قرن نوزدهم و بزرگ‌ترین رؤیاپرداز آن بدل شد. او بدون دانش ریاضی، کتابی تقریباً خالی از معادله نوشت که یکی از بهترین کتاب‌های تاریخ فیزیک است. او فیزیک را با چشم ذهنش می‌دید و با همین چشم جهان‌های زیادی را تصور می‌کرد. اما جیمز کلارک ماکسول، نجیب‌زاده‌ای اسکاتلندی و ثروتمند و یکی از بزرگ‌ترین ریاضیدانان قرن نوزدهم بود. آنها با وجود یک دنیا فاصله علمی و اجتماعی توانستند یکدیگر را خوب بفهمند و با ترکیب دو نوع نبوغ متفاوت با هم، راه فیزیک مدرن را گشودند.



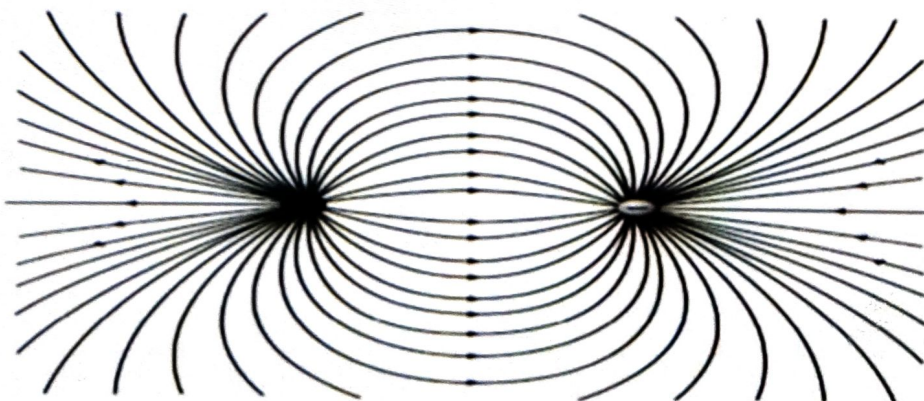
تصویر ۲-۳ جیمز کلارک ماکسول و مایکل فارادی

در ابتدای قرن هجدهم دانش الکتریسیته و مغناطیس به چند ترفند و تردستی سرگرم‌کننده مانند جذب تکه کاغذ توسط میله‌های شیشه‌ای و جاذبه و دافعه آهنرباها خلاصه می‌شد. مطالعه الکتریسیته و مغناطیس از قرن هجدهم تا نوزدهم به آرامی ادامه یافت تا اینکه در قرن نوزدهم سروکله مایکل فارادی در لندن پیدا شد که در آزمایشگاهی پر از قرقره، سوزن، نخ و قفس‌های آهنی، مشغول آزمایش درباره چگونگی جذب و دفع اشیاء الکتریکی و مغناطیسی بود. او به عنوان یک نیوتنی راسخ تلاش می‌کرد تا نیروی بین اشیاء دارای بار الکتریکی یا مغناطیسی را درک کند. اما کم‌کم تماس نزدیک با این اشیاء به او کمک کرد به شهودی برسد که بعدها مبنای فیزیک مدرن شد. او چیز تازه‌ای «دیده بود».

شهود او این است: ما نباید به نیروهایی که به قول نیوتن مستقیماً بین اشیاء دور از یکدیگر عمل می‌کنند فکر کنیم. برعکس، باید به چیزی فکر کنیم که در فضا پراکنده است و تحت تأثیر اجسام الکتریکی و مغناطیسی به وجود می‌آید و به نوبه خود با کشش و فشار بر آنها اثر می‌گذارد. این چیز که فارادی وجود آن را با شهودش دریافته بود امروزه میدان نامیده می‌شود.

اما میدان چیست؟ فارادی آن را متشکل از خطوطی نازک (بی‌نهایت نازک) می‌پنداشت که فضا را پر کرده‌اند. یک تار عنکبوت بزرگ و نامرئی که تمام چیزهای اطراف ما را در بر گرفته است. او این خطوط را «خطوط نیرو» می‌نامید، زیرا به تعبیری آنها «حامل نیرو» بودند: این خطوط، نیروهای الکتریکی و مغناطیسی را از جسمی به جسمی دیگر منتقل می‌کنند انگار که کابل‌هایی هستند که اجسام را از هم دور یا به هم نزدیک می‌کنند (شکل ۲-۴)

یک شیء با بار الکتریکی (مثلاً یک میله شیشه‌ای مالش داده شده) میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (خطوط) اطراف خود را منحرف می‌کند و این میدان‌ها هم به نوبه خود بر هر شیء بارداری که درون آنهاست نیرو وارد می‌کنند. بنابراین، دو شیء باردار دور از هم مستقیماً یکدیگر را جذب یا دفع نمی‌کنند بلکه این کار را از طریق واسطه‌ای که میان آنهاست انجام می‌دهند.



شکل ۲-۴ خطوط میدان فضا را پر می‌کنند. دوشیء دارای بار الکتریکی از طریق آنها بر هم اثر می‌گذارند. خطوط نیروی میدان، نیروی این دوشیء را «حمل» می‌کنند.

اگر دو قطعه آهنربا را در دستان‌تان بگیرید و آنها را مدام از هم دور و به هم نزدیک کنید، نیرویی را که باعث جاذبه و دافعه بین آنها می‌شود حس می‌کنید. در این حالت احساس میدانی که بین آنهاست، یعنی شهودی که فارادی داشت، کار سختی نیست. اگرچه این ایده به‌شکلی بنیادین با فهم نیوتن از نیروی بین دو جسم دور از هم متفاوت است، اما احتمالاً برای نیوتن جذاب می‌بود. درواقع نیوتن درباره نیرویی که خودش توصیف کرده بود یعنی همین نیروی جذب با فاصله، سردرگم شده بود. چگونه زمین ماه را از این فاصله دور به خودش جذب می‌کند؟ چگونه خورشید زمین را بدون هیچ‌گونه تماسی به خود جذب می‌کند؟ او در یک نامه نوشته است: نمی‌شود قبول کرد که ماده بی‌جان و بی‌تحرک بدون دخالت چیزی غیرمادی بتواند بر ماده دیگری تأثیر بگذارد بدون اینکه با آن تماس داشته باشد. [۵]

و حتی در ادامه می‌نویسد:

برای اینکه یک جسم بر جسمی دیگر در فضایی خالی و در فاصله‌ای دور بدون وجود واسطه‌ای برای انتقال نیرو بین این دو جسم اثر بگذارد، نیروی جاذبه باید درونی و ذاتی ماده باشد و این به نظر من چنان مهمل است که هر انسانی که قدرت تفکر در مسائل فلسفی داشته باشد، آن را باور نخواهد کرد. گرانث را باید عاملی به وجود بیاورد که پیوسته بر حسب قوانین مشخصی عمل می‌کند. اما قضاوت درباره اینکه این عامل مادی است یا نه را به خوانندگانم وامی‌گذارم. [۶]

نیوتن شاهکار خودش را مهمل می‌خواند - همان شاهکاری که به منزله دستاورد نهایی دانش، این همه در قرون بعد ستایش شد! او فهمیده بود که ورای کنش از راه دوری که در نظریه‌اش وجود دارد باید چیز دیگری نهفته باشد اما نمی‌دانست چه چیز و به همین دلیل هم آن را «به قضاوت خوانندگان»ش وا گذاشت!

از مشخصات نواغ است که از محدودیت یافته‌های خود آگاه باشند حتی اگر این یافته‌ها به عظمت کشف قوانین مکانیک و گرانش جهانی به دست نیوتن باشند. نظریه نیوتن بسیار خوب کار می‌کرد و چنان کارآمد از آب درآمد که دو قرن کسی به خود زحمت نداد تا آن را زیر سؤال ببرد. تا زمانی که فارادی، یعنی همان «خواننده» ای که نیوتن آن پرسش بدون پاسخ را برایش مطرح کرده بود، راهی عقلانی برای فهم این مسأله یافت که اجسام چگونه می‌توانند از فاصله‌ای دور یکدیگر را جذب یا دفع کنند. اینشتین بعدها راه حل درخشان فارادی را در مورد نظریه گرانش خود نیوتن به کار برد.

فارادی با معرفی این ماهیت جدید یعنی میدان، کاملاً از هستی‌شناسی باشکوه و ساده نیوتن فاصله می‌گیرد: جهان دیگر صرفاً از ذراتی که با گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند ساخته نشده است. یک بازیگر جدید به نام «میدان» در صحنه ظاهر می‌شود. فارادی از اهمیت گامی که برداشته کاملاً آگاه است.



شکل ۵-۲ جهان فارادی و ماکسول: ذرات و میدان‌هایی که با گذر زمان، در فضا حرکت می‌کنند.

در کتاب او قطعات زیبایی هست که در آنها به این پرسش می‌پردازد که آیا این خطوط نیرو واقعاً می‌توانند وجود داشته باشند یا نه. او پس از تردیدها و تأملات گوناگون نتیجه می‌گیرد که این خطوط واقعی‌اند، اگرچه با «تردیدی که لازمه مواجهه با عمیق‌ترین پرسش‌های علمی است» [۷] او کاملاً آگاه است که آنچه پیشنهاد کرده، چیزی است به بزرگی اصلاح ساختار جهان، آن هم پس از دو قرن موفقیت بی‌رقیب فیزیک نیوتنی. (شکل ۵-۲)

ماکسول به سرعت ارزش نهفته در این ایده را دریافت. او بینش فارادی را که فقط از طریق کلمات بیان شده بود، به یک صفحه معادله ترجمه کرد.^{۲۹} این معادلات که امروزه به معادلات ماکسول معروف‌اند، رفتار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را توصیف می‌کنند: نسخه ریاضیاتی «خطوط میدان فارادی».^{۳۰}

امروزه معادلات ماکسول برای توصیف تمام پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی، طراحی آنتن‌ها، رادیوها، دستگاه‌های الکتریکی و کامپیوترها به کار می‌روند. تازه این تمام ماجرا نیست: به این معادلات برای توضیح چگونگی کارکرد اتم‌ها (آنها به میانجی نیروی الکتریکی کنار یکدیگر می‌مانند)، توضیح این مسأله که چگونه ذرات ماده در کنار هم می‌مانند تا مثلاً یک سنگ بسازند و همچنین نحوه کارکرد خورشید نیاز داریم. گستره و تعداد پدیده‌هایی که این معادلات می‌توانند توضیح دهند شگفت‌انگیز است. تقریباً هر چیزی که در مقابل چشم ما رخ می‌دهد - به استثنای گرانش و پدیده‌های محدودی غیر از آن - با معادلات ماکسول قابل توضیح است.

اما نکته دیگری هم هست: نکته‌ای که شاید زیباترین موفقیت علم باشد: معادلات ماکسول به ما می‌گویند نور چیست. ماکسول دریافت که بر حسب معادلاتش خطوط میدان فارادی می‌توانند مانند امواج دریا مرتعش شوند یا نوسان کنند. او سرعت نوسان خطوط میدان فارادی را محاسبه کرد و نتیجه‌ای که به دست آورد... برابر سرعت نور بود! اما چرا؟ ماکسول دریافت که نور چیزی نیست مگر همین نوسانات سریع خطوط میدان فارادی! فارادی و ماکسول نه تنها چگونگی کارکرد الکتریسیته و مغناطیس را فهمیدند بلکه با یک تیر دو نشان زدند و به ماهیت نور هم پی بردند.

ما دنیای اطرافمان را رنگی می‌بینیم. رنگ چیست؟ به زبان خیلی ساده، رنگ فرکانس یا سرعت نوسان امواج الکترومغناطیسی یعنی همان نور است. هرچه موج سریع‌تر نوسان کند، نور آبی‌تر می‌شود. هرچه آرام‌تر نوسان کند، نور قرمزتر می‌شود. رنگ، آن گونه که ما آن را درک می‌کنیم، واکنش روان‌فیزیکی ما به سیگنال‌هایی عصبی است که حسگرهای چشم ما تولید کرده‌اند. حس‌گرهایی که می‌توانند تفاوت فرکانس‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی را تشخیص دهند.

خیلی دوست دارم بدانم ماکسول چه حسی داشت وقتی فهمید معادلاتی که برای توصیف قرقره‌ها، قفس‌های کوچک و سوزن‌های باریک آزمایشگاه فارادی نوشته بود، موفق شده‌اند نور و رنگ را هم توضیح دهند.

بنابراین، نور چیزی نیست جز نوسان سریع شبکه تار عنکبوتی خطوط فارادی که مانند سطح یک دریاچه موقع وزیدن باد موج می‌شوند. این درست نیست که ما خطوط فارادی را «نمی‌بینیم». درواقع ما چیزی جز ارتعاشات این خطوط نمی‌بینیم. «دیدن» یعنی ادراک نور و نور یعنی ارتعاش خطوط فارادی. هیچ چیز نمی‌تواند از نقطه‌ای در فضا به نقطه‌ای دیگر حرکت کند مگر اینکه به وسیله چیزی حمل شود. اگر می‌توانیم بچه‌ای را مشغول بازی کنار ساحل ببینیم صرفاً به این دلیل است که بین او و ما دریاچه‌ای از خطوط مرتعش کشیده شده که تصویر او را به ما منتقل می‌کند. آیا جهان خارق‌العاده نیست؟

این کشف بی‌نظیر است اما داستان همین‌جا تمام نمی‌شود. یکی از نتایج نهایی این کشف برای ما بی‌نهایت ارزشمند است. ماکسول دریافت که طبق پیش‌بینی معادلاتش خطوط فارادی می‌توانند با سرعت‌های کمتری یعنی سرعتی بسیار کمتر از سرعت نور هم نوسان کنند. در نتیجه باید موج‌های دیگری وجود داشته باشد که هنوز کسی آنها را ندیده است. موج‌هایی که با ارتعاش بارهای الکتریکی درست می‌شوند و به نوبه خود بارهای الکتریکی را به ارتعاش درمی‌آورند. پس می‌توانیم باری الکتریکی را در جایی مشخص به نوسان درآوریم و موجی درست کنیم که باعث به وجود آمدن یک جریان الکتریکی در جایی دیگر شود. تنها چند سال بعد از اینکه ماکسول این موج‌ها را به لحاظ نظری پیش‌بینی کرد، فیزیکدان آلمانی، هاینریش هرتز، آنها را نشان داد و چند سال بعد از آن هم گوگلیلمو مارکونی^{۳۱} اولین رادیو را ساخت.

تمام تکنولوژی ارتباطی مدرن -رادیو، تلویزیون، تلفن، کامپیوتر، ماهواره، وای فای، اینترنت و...- با استفاده از پیش‌بینی ماکسول ممکن شده است. تمام محاسبات مهندسان مخابرات و ارتباطات، بر مبنای معادلات ماکسول است. کل دنیای معاصر ما -یعنی دنیای ارتباطات-



شکل ۶-۲ جهان از چه ساخته شده است؟

حاصل تخیل یک کتاب‌ساز فقیر لندنی است، کاوشگر ماهر ایده‌ها با تخیلی درخشان که چند خط را با چشم ذهن دید، و کاریک ریاضیدان عالی است که این بینش را به معادله برگرداند و دریافت که در یک چشم‌به‌هم‌زدن می‌توان اخبار را از یک طرف زمین به طرف دیگر آن مخابره کرد.

کل تکنولوژی امروز ما بر مبنای استفاده از یک موجودیت فیزیکی - یعنی امواج الکترومغناطیسی - شکل گرفته است که تجربی کشف نشده: این موجودیت فیزیکی را ماکسول زمانی که در حال جست‌وجوی توصیفی ریاضی برای توضیح شهود فارادی بود، پیش‌بینی کرد. شهودی که از قرقره‌ها و سوزن‌ها به دست آمده بود. این است قدرت شگفت‌انگیز فیزیک نظری.

جهان دگرگون شده است: جهان دیگر متشکل از ذرات معلق در فضا نیست، بلکه اکنون از ذرات و میدان‌های پراکنده در فضا تشکیل شده است (شکل ۶-۲). شاید این دگرگونی کوچک به نظر می‌رسید اما چند دهه بعد، جوانی یهودی، مردی بی‌وطن، از آن نتایجی گرفت بسیار فراتر از تخیل سودایی فارادی. نتایجی که جهان نیوتنی را تا مغز استخوان لرزاند.

بخش دوم: شروع انقلاب

فیزیک قرن بیستم تصویر نیوتنی از جهان را به طرز بنیادین اصلاح کرد. این گام‌های جدید مبنای بخش عظیمی از تکنولوژی امروز هستند. فهم ما از جهان بر پایه دو نظریه نسبیت عمومی و مکانیک کوانتومی عمیق‌تر شد. هر دو این نظریه‌ها مستلزم ارزیابی دوباره مفاهیم سنتی درباره جهان‌اند: فضا و زمان در نسبیت، و ماده و انرژی در نظریه کوانتوم.

در این بخش از کتاب به شرح مبسوط این دو نظریه خواهیم پرداخت. تلاش می‌کنم معنای اصلی آنها را توضیح دهم و انقلاب مفهومی‌ای را که بر پا کرده‌اند به تصویر بکشم. از همین نقطه است که جادوی فیزیک قرن بیستم آغاز می‌شود. مطالعه و فهم عمیق این نظریات، سفری جادویی خواهد بود.

امروزه، این دو نظریه نسبیت و کوانتوم—شالوده‌ای را برای ساخت نظریه گرانش کوانتومی فراهم آورده‌اند. بر پایه این دو نظریه، می‌توانیم فراتر رویم و رو به جلو حرکت کنیم.

۳: آلبرت

پدر آلبرت اینشتین در ایتالیا نیروگاه می ساخت. زمانی که آلبرت پسری جوان بود فقط چند دهه از عمر معادلات ماکسول می گذشت اما انقلاب صنعتی در ایتالیا هم رخ داده بود و توربین ها و ترانسفورماتورهای پدر آلبرت همه بر پایه معادلات ماکسول ساخته می شدند. قدرت فیزیک جدید آشکار شده بود.

آلبرت سرکش بود. والدینش او را به دبیرستانی در آلمان فرستادند اما او احساس می کرد سیستم مدارس آلمانی زیاده از حد خشک و نظامی است. او نتوانست امر و نهی مدرسه را تحمل کند و درس را رها کرد. آلبرت به پاپوا در ایتالیا، نزد والدینش بازگشت و مدتی را به بیکاری و بطالت گذراند. پس از مدتی برای ادامه تحصیل به سوئیس رفت اما در ابتدا نتوانست مطابق میلش وارد دانشگاه پلی تکنیک زوریخ شود. پس از اتمام تحصیل در دانشگاه هم نتوانست شغلی پژوهشی برای خود دست و پا کند و به خاطر اینکه بتواند با دختر مورد علاقه اش زندگی کند، مجبور به کار در اداره ثبت اختراعات برن شد.

این شغل در شأن یک دانش آموخته فیزیک نبود اما به او فرصت داد تا بتواند بیندیشد و مستقل کار کند. او هم می اندیشید و کار می کرد. هر چه باشد این همان کاری بود که از نوجوانی انجام داده بود: به جای اینکه به درس های مدرسه توجه کند، اصول اقلیدس و نقد عقل محض^{۳۲} کانت می خواند. هرگز با پیمودن مسیرهای از پیش مشخص شده به جای تازه ای نخواهید رسید.

اینشتین در سن بیست و پنج سالگی، سه مقاله برای سالنامه فیزیک فرستاد. هر کدام از این سه مقاله یک جایزه نوبل و شاید هم بیشتر می ارزید. هر یک از این مقالات، ستونی است که درک امروز ما از جهان بر آن استوار است. من قبلاً از مقاله اول سخن گفته ام. مقاله ای که در آن آلبرت جوان اندازه اتم ها را محاسبه کرد و پس از ۲۳ قرن ثابت کرد که اندیشه های دموکریتوس درست بوده اند: ماده ساختاری دانه ای دارد.

عمده شهرت اینشتین به خاطر مقاله دوم است که در آن نظریه نسبیت را معرفی می کند و این بخش از کتاب به این نظریه اختصاص یافته است.

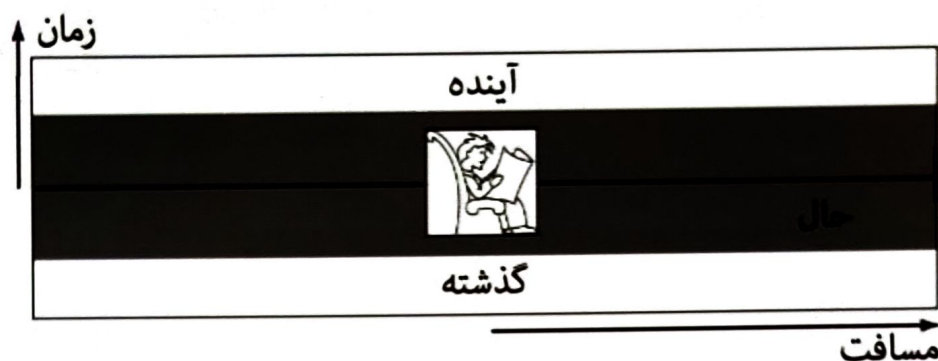
درواقع دو نظریه نسبیت وجود دارد. مقاله ای که اینشتین بیست و پنج ساله فرستاد شامل بیان و توضیح اولین نظریه بود: نظریه ای که امروزه با عنوان «نسبیت خاص» شناخته می شود. این نظریه شرحی مهم از ساختار فضا و زمان است. من در اینجا پیش از آنکه به دومی و درواقع مهم ترین نظریه اینشتین یعنی نسبیت عام بپردازم، اولی را توضیح خواهم داد. نسبیت خاص نظریه ای هوشمندانه و به لحاظ مفهومی پیچیده است. فهم آن بسیار مشکل تر از نسبیت عام است. اگر مطالب ارائه شده در چند صفحه بعد کمی پیچیده و سخت فهم است، دلسرد نشوید. این نظریه اولین بار نشان داد که تصویر نیوتنی جهان صرفاً نیازمند تکمیلی مختصر نیست؛ برعکس، این نظریه را باید از بنیاد اصلاح کرد، آن هم به شیوه ای که کاملاً مخالف عقل سلیم است. این نخستین جهش به سوی بازبینی و اصلاح شهودی ترین درک ما از جهان است.

حال امتداد یافته

به نظر می رسد که نظریات نیوتن و ماکسول، به طرزی ظریف یکدیگر را نقض می کنند. معادلات ماکسول یک سرعت ثابت به دست می دهند: سرعت نور. اما مکانیک نیوتنی با وجود یک سرعت ثابت سازگار نیست چرا که نقش اساسی را در معادلات نیوتن، شتاب بازی می کند نه سرعت. در فیزیک نیوتنی، سرعت صرفاً می تواند سرعت چیزی نسبت به چیزی دیگر باشد. گالیله قبلاً تأکید کرده بود که زمین نسبت به خورشید در حرکت است، اگرچه ما این حرکت را حس نمی کنیم. چون سرعت برای ما معمولاً سرعت «نسبت به زمین» است. مفهوم سرعت آن گونه که ما آن را به کار می بریم، مفهومی نسبی است یعنی سرعت مختص به خود یک جسم معنا ندارد: تنها سرعتی که درواقع وجود دارد سرعت یک جسم نسبت به جسمی دیگر است. این چیزی است که دانشجویان فیزیک، هم در قرن نوزدهم یاد

می گرفتند و هم امروز یاد می گیرند. با این اوصاف، معادلات ماکسول سرعت نور را نسبت به چه چیز معین کرده است؟ یک احتمال این است که لایه ای فراگیر از ماده در همه جهان وجود دارد که نور در آن حرکت می کند و سرعتش نسبت به آن سنجیده می شود. اما به نظر می رسد که پیش بینی های نظریه ماکسول مستقل از وجود چنین ماده ای است. تمام آزمایش های اواخر قرن بیستم

برای محاسبه سرعت زمین نسبت به این ماده جهانی فرضی به شکست انجامید. اینشتین مدعی بود که بدون هیچ گونه آزمایشی و صرفاً از طریق تأمل بر تناقض معادلات ماکسول و مکانیک نیوتنی در مسیر درست قرار گرفته است. او از خود می پرسید که آیا راهی برای سازگار کردن هسته اصلی کشفیات گالیله و نیوتن با نظریه ماکسول وجود دارد یا نه. در این مسیر بود که اینشتین به کشف حیرت انگیز خود دست یافت. برای فهم این کشف، کل زمان گذشته و آینده را در نسبت با حال، یعنی لحظه ای که در حال خواندن این صفحه هستید، در نظر بگیرید و آن را مانند آنچه در شکل ۱-۳ تصویر شده فرض کنید.



شکل ۱-۳ فضا و زمان قبل از اینشتین



شکل ۲-۳ ساختار «فضا زمان». «حال امتداد یافته» برای تمام ناظرها

ناحیه واسطه بین گذشته و آینده است.

کشف اینشتین این بود که این نمودار (شکل ۱-۳) اشتباه است. در واقعیت، چیزها به آن صورتی هستند که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

بین گذشته و آینده یک رویداد (مثلاً بین گذشته و آینده شما در این لحظه که مشغول خواندن کتاب هستید) یک «ناحیه واسطه»، یک «حال امتداد یافته» وجود دارد که نه گذشته است و نه آینده. این کشفی است که با نسبیّت خاص ممکن شد.

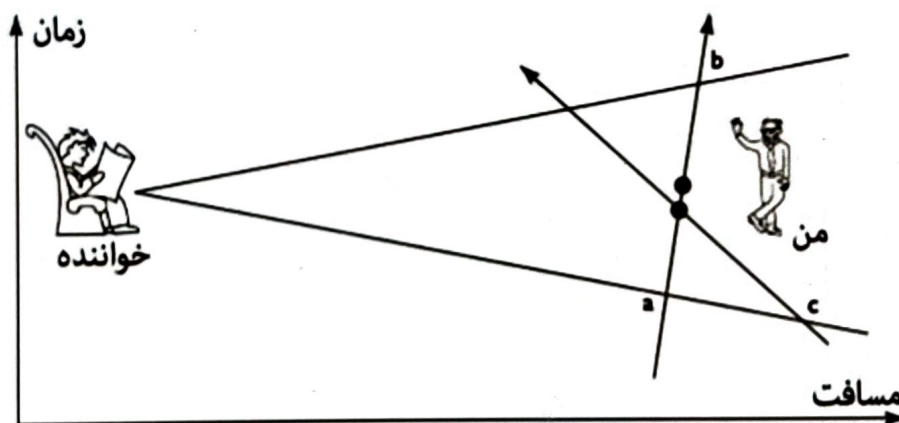
مدت این ناحیه واسطه^{۳۳} که نه در گذشته شماست نه در آینده، بسیار کوتاه است و آن گونه که در شکل ۲-۳ نشان داده شده، به محل وقوع یک رویداد نسبت به شما بستگی دارد: هرچه فاصله یک رویداد از شما بیشتر باشد، مدت حال امتداد یافته بیشتر است. در فاصله چند متری از چشمان شما، خواننده عزیز، مدت ناحیه واسطه تان که نه گذشته است نه آینده، در حد چند نانو ثانیه است: تقریباً هیچ (تعداد نانو ثانیه ها در یک ثانیه برابر است با تعداد ثانیه ها در سی سال). این مدت بسیار کوچک تر از آن است که برای ما قابل ادراک باشد. در آن سوی اقیانوس ها مدت این ناحیه واسطه در حد یک هزارم ثانیه است که باز هم بسیار کمتر از حدی است که بتوانیم آن را ادراک کنیم. کمترین مدت زمانی که ما می توانیم درک کنیم، چیزی حدود یک دهم ثانیه است. اما در ماه، حال امتداد یافته در نسبت با ما چیزی حدود چند ثانیه و در مریخ، چیزی حدود یک ربع ساعت است. این یعنی ما می توانیم بگوییم که در مریخ رویدادهایی هستند که در این لحظه خاص رخ داده اند و رویدادهایی هستند که در حال رخ دادن اند، اما به مدت ربع ساعت، هرچه در آنجا رخ داده و رخ می دهد [تا

زمانی که به ما برسد [نه به آینده ما تعلق دارد نه به گذشته ما.

آنها جای دیگری هستند. پیش تر ما از این «جای دیگر» آگاه نشده بودیم، چرا که در اطراف ما این «جای دیگر» بیش از اندازه کوچک است. ما آنقدر سریع نیستیم که آن را دریابیم. اما این «جای دیگر» وجود دارد و واقعی است.

به همین دلیل است که نمی‌توان مکالمه‌ای مستقیم بین زمین و مریخ برقرار کرد. فرض کنید که من در مریخ‌ام و شما روی زمین. من سؤالی از شما می‌کنم و شما به محض اینکه سؤال مرا شنیدید پاسخ می‌دهید. پاسخ شما یک ربع ساعت پس از اینکه من سؤال را مطرح کردم به من خواهد رسید. این ربع ساعت، نسبت به آن لحظه‌ای که شما مشغول پاسخ دادن به من هستید، نه گذشته است نه آینده. نکته کلیدی‌ای که اینشتین درباره طبیعت فهمید این بود که این ربع ساعت اجتناب‌ناپذیر است: به هیچ وجه نمی‌توان آن را کاهش داد. این در بافت رویدادهای فضایی و زمانی تنیده شده است: ما نمی‌توانیم آن را کوتاه کنیم، همان طور که نمی‌توانیم به گذشته نامه بنویسیم. هرچند عجیب، اما این واقعیت جهان است. به همان اندازه عجیب که مثلاً در سیدنی مردم نسبت به ما [در نیم کره شمالی] سر و ته زندگی می‌کنند: عجیب است ولی حقیقت دارد. ما ابتدا به واقعیت‌ها عادت می‌کنیم سپس آنها به نظرمان نرمال و منطقی می‌شوند. این وضعیت در مورد ساختار فضا و زمان هم صدق می‌کند.

با این اوصاف، اینکه بگوییم یک رویداد «همین حالا» در مریخ رخ می‌دهد معنایی ندارد چرا که این «همین حالا» اصلاً وجود ندارد (شکل ۳-۳).^{۲۴} به زبان فنی، اینشتین دریافته بود که «همزمانی مطلق» در کار نیست: مجموعه‌ای از رویدادهای «اکنون» در جهان وجود ندارد. مجموعه رویدادهای هستی را نمی‌توان به منزله توالی «اکنون» ها، توالی زمان‌های حال که یکی پس از دیگری اتفاق می‌افتد، توصیف کرد. این مجموعه ساختار پیچیده‌تری دارد که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. این شکل چیزی را به تصویر می‌کشد که در فیزیک «فضازمان» نامیده می‌شود: مجموعه‌ای از رویدادهای گذشته و آینده و همچنین آنها که نه گذشته‌اند و نه آینده. این رویدادها لحظه‌ای واحد را شکل نمی‌دهند: آنها هر کدام مدت خودشان را دارند.



شکل ۳-۳ نسبیت همزمانی

در کهکشان آندرومدا مدت این حال گسترده نسبت به ما به دویلیون سال می‌رسد. هرچه در این دویلیون سال رخ می‌دهد نه در گذشته ما قرار می‌گیرد نه در آینده ما. اگر یک تمدن پیشرفته صلح جو در آندرومدا تصمیم بگیرد سفینه‌ای برای دیدن ما بفرستد، این پرسش که آیا این سفینه «هم‌اکنون» حرکت کرده یا هنوز حرکت نکرده، پرسشی بی‌معناست. تنها پرسش بامعنا این است که ما چه زمان اولین علامت را از این سفینه دریافت می‌کنیم: فقط از این لحظه و نه زودتر از آن، سفر سفینه متعلق به گذشته ما خواهد بود. کشف ساختار فضازمان به دست اینشتین جوان پیامدهای قابل مشاهده‌ای داشت. این واقعیت که فضا و زمان، همان طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، رابطه‌ای تنگاتنگ با هم دارند مستلزم بازسازی هوشمندانه فیزیک نیوتنی بود. اینشتین این بازسازی را به سرعت در سال‌های ۱۹۰۵ و ۱۹۰۶ انجام داد. اولین نتیجه این بازسازی این است: همان طور که فضا و زمان در مفهوم «فضازمان» با هم ترکیب می‌شوند و به هم می‌پیوندند، به همان صورت هم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به هم می‌پیوندند و در یک مفهوم واحد که امروزه میدان الکترومغناطیسی می‌نامیم با هم ترکیب می‌شوند. معادلات پیچیده ماکسول که برای دو میدان نوشته شده بود، در این حالت تازه یعنی برای یک میدان بسیار ساده می‌شوند.

یک نتیجه ضمنی دیگر این نظریه با پیامدهایی چشمگیر این بود: در این مکانیک جدید، مفاهیم «انرژی» و «ماده» به همان صورتی با هم ترکیب می‌شوند که فضا و زمان یا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با هم ترکیب شدند. تا قبل از سال ۱۹۰۵ دو اصل فیزیکی به نظر

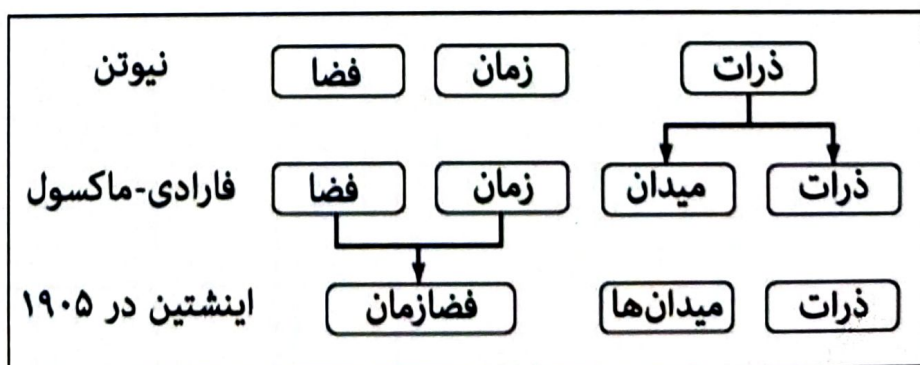
قطعی می‌آمدند: اصل پایداری ماده و اصل پایداری انرژی. اولی را شیمی دان‌ها بارها ثابت کرده بودند: مقدار ماده در یک واکنش شیمیایی تغییر نمی‌کند. دومی یعنی قانون پایداری انرژی محصول مستقیم معادلات نیوتنی بود و یکی از یقینی‌ترین قوانین فیزیک به حساب می‌آمد. اما اینشتین دریافت که ماده و انرژی دو وجه از یک چیزند همان‌گونه که الکتریسیته و مغناطیس دو روی یک میدان‌اند و فضا و زمان دو جلوه از یک چیز یعنی «فضازمان». این به این معناست که ماده (جرم) -آن‌گونه که آن زمان فهمیده می‌شد- به تنهایی پایسته نیست، همچنان که انرژی هم به تنهایی پایسته نیست. یکی از آنها می‌تواند به دیگری تبدیل شود: تنها یک قانون پایداری وجود دارد، نه دو تا. باید فرایندهایی وجود داشته باشد که ماده را به انرژی و انرژی را به ماده تبدیل کند.

یک محاسبه سریع به اینشتین نشان داد که چه مقدار انرژی از تبدیل یک گرم ماده به دست می‌آید. نتیجه، فرمول مشهور $E = mc^2$ بود. از آنجا که c (سرعت نور) بسیار زیاد است و c^2 از آن هم زیادتر است، انرژی به دست آمده از تبدیل یک گرم ماده بسیار بسیار زیاد خواهد بود، انرژی‌ای برابر با انرژی میلیون‌ها بمب که همزمان منفجر می‌شوند. این انرژی برای یک ماه روشنائی یک شهر یا یک ماه کار کارخانه‌های کشور یا برعکس، برای کشتن صدها هزار انسان در شهری مثل هیروشیما کافی است.

تأملات نظری اینشتین جوان بشر را وارد دوران تازه‌ای کرد: دورانی با امکانات تازه و همین‌طور خطرات تازه، یعنی دوران نیروی هسته‌ای. امروز به لطف هوش یک جوان سرکش که قوانین را رعایت نمی‌کرد می‌توانیم خانه‌های ده میلیارد انسانی را که به زودی در کره زمین ساکن می‌شوند روشن کنیم، به سیارات دیگر در فضا سفر کنیم و البته یکدیگر را نابود و زمین را ویران کنیم. این به انتخاب ما بستگی دارد: به رهبرانی که انتخاب می‌کنیم تا برای ما تصمیم بگیرند.

امروزه ساختار فضازمان اینشتین به خوبی فهمیده شده و بارها در آزمایشگاه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته و کاملاً ثابت شده است. فضا و زمان نسبت به آنچه پس از نیوتن از آنها می‌فهمیدیم، فرق کرده‌اند. فضا مستقل از زمان وجود ندارد. در فضای گسترده شکل ۲-۳، هیچ برش خاصی وجود ندارد که بهتر از بقیه برش‌ها نماینده «فضای حال» باشد. فهم شهودی ما از زمان حال -مجموعه تمام رویدادهایی که «هم‌اکنون» در جهان رخ می‌دهند- محصول محدودیت دید ماست: محصول ناتوانی ما در درک وقفه‌های کوچک زمانی. این فهم شهودی در واقع چیزی نیست جز تعمیم نابه‌جای تجربه محدود ما به جهان.

زمان حال، مانند صاف بودن زمین، یک توهم است. ما به خاطر محدودیت‌های حواس مان فکر می‌کردیم زمین صاف است چون نمی‌توانستیم جلوتر از نوک بینی مان را ببینیم. اگر مانند شازده کوچولو روی سیارکی به قطر فقط چند کیلومتر زندگی می‌کردیم، خیلی زود می‌فهمیدیم که این سیارک کروی است. اگر ذهن و حواس ما دقیق‌تر بود و می‌توانستیم به سادگی نانوئانی‌ها را ادراک کنیم، هیچ‌گاه فکر نمی‌کردیم «زمان حال» همه جا گسترده شده است. در این صورت، می‌توانستیم به راحتی فضای واسطه بین گذشته و آینده را تشخیص دهیم و می‌فهمیدیم که گفتن «اینجا و اکنون» بامعناست اما به کار بردن «اکنون» برای تمام رویدادهایی که «هم‌اکنون» در جهان رخ دادند، هیچ معنایی ندارد. مانند این است که بپرسیم کهکشان ما بالای کهکشان آندرومدا قرار دارد یا پایین آن. این سؤال بی‌معناست چرا که «بالا» و «پایین» فقط در سطح زمین معنا دارند نه در کل هستی. به همین صورت «قبل» یا «بعد» ی بین دو رویداد در هستی وجود ندارد.



شکل ۳-۴ جهان از چه ساخته شده است؟

ساختار درهم‌بافته‌ای که فضا و زمان با هم می‌سازند و در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ نشان داده شده است، چیزی است که فیزیکدانان «فضا-زمان» می‌نامند (شکل ۳-۴).

چاپ مقاله اینشتین در سالنامه فیزیک که در آن تمام اینها را یک‌جا کرده بود، جهان فیزیک را تکان داد. تناقض سربرآورده بین معادلات ماکسول و فیزیک نیوتنی در آن زمان به خوبی شناخته شده بود و هیچ‌کس نمی‌دانست چگونه باید آن را حل کند. راه حل عجیب و بسیار شکوهمند اینشتین همه را شگفت‌زده کرد. روایت شده که یک استاد سخت‌گیر دانشگاه کراکوف، پس از مطالعه مقاله اینشتین آن را در هوا تکان می‌داد و فریاد می‌زد: «ارشمیدس جدید متولد شده است!»

اما با وجود سروصدایی که گام‌های رو به جلوی اینشتین در سال ۱۹۰۵ به پا کرد، هنوز زمان شاهکار او فرا نرسیده بود. شاهکار اینشتین دومین نظریه نسبیت او یعنی نسبیت عام بود که ده سال بعد، زمانی که او سی و پنج ساله بود، چاپ شد.

نظریه «نسبیت عام» زیباترین نظریه‌ای است که فیزیک تا به حال ارائه کرده و اولین سنگ بنای گرانش کوانتومی محسوب می‌شود. این نظریه قلب روایت این کتاب است. از اینجا به بعد جادوی واقعی فیزیک قرن بیستم آغاز می‌شود.

زیباترین نظریه

پس از انتشار نظریه نسبیت خاص، اینشتین به یک فیزیکدان مشهور بدل شد و از دانشگاه‌های زیادی پیشنهاد کار گرفت. اما چیزی او را آزار می‌داد: نسبیت خاص با دانش مستقر درباره گرانش سازگار نبود. او زمانی به این مسأله پی برد که مشغول نوشتن خلاصه‌ای از نظریه خود بود و می‌خواست بداند که آیا می‌توان نظریه بالارزش نیوتن یعنی «گرانش عمومی» را دوباره بازبینی کرد تا با نسبیت خاص سازگار شود.

منشأ این مسأله قابل فهم است. نیوتن می خواست بداند که چرا اشیاء سقوط می کنند و سیاره ها می گردند. او نیرویی را تصور کرد که تمام اجسام را به سوی یکدیگر می کشد: «نیروی گرانش». اینکه این نیرو چگونه باعث می شود اجسام دور از هم، بی هیچ واسطه ای به سمت یکدیگر کشیده شوند، هنوز روشن نبود. همان طور که دیدیم خود نیوتن هم به این شک کرده بود که در مسئله نیرویی که بین دو شیء دور از هم عمل می کند، احتمالاً چیزی نادیده گرفته شده است و برای اینکه زمین بتواند ماه را به سوی خود بکشد باید چیزی بین این دو وجود داشته باشد که این نیرو را منتقل کند. دویست سال بعد، فارادی برای نیروهای الکتریکی و مغناطیسی، و نه برای نیروی جاذبه، راه حل را یافت: میدان. میدان های الکتریکی و مغناطیسی، نیروهای الکتریکی و مغناطیسی را حمل می کنند.

با این اوصاف، برای هر فرد منطقی ای مسلم است که نیروی گرانش هم باید خطوط میدان خودش را داشته باشد. همچنین مسلم است که نیروی جاذبه بین خورشید و زمین، یا بین زمین و اشیاء در حال سقوط، باید به یک میدان -در این مورد، یک میدان گرانشی- نسبت داده شود. پاسخ فارادی و ماکسول به این پرسش که چه چیز نیروها را حمل و منتقل می کند، باید قاعدتاً نه تنها برای نیروی الکتریسته بلکه برای نیروی گرانش هم قابل استفاده باشد. باید یک میدان گرانشی وجود داشته باشد و تعدادی معادله شبیه به معادلات ماکسول نوع حرکت خطوط این میدان را توضیح دهند. در اوایل قرن بیستم این مسأله برای هر انسانی که به اندازه کافی عاقل بود مسلم می نمود، یعنی درواقع فقط برای اینشتین.

اینشتین از دوران نوجوانی جذب میدان الکترومغناطیسی ای شده بود که پروانه های نیروگاه پدرش را می چرخاند و درباره میدان گرانشی و ریاضیاتی ای تحقیق می کرد که این میدان را توصیف می کند. او خود را در مسأله غرق کرده بود و ده سال طول کشید تا آن را حل کند. ده سال پر از مطالعه دیوانه وار، تلاش، اشتباهات، سردرگمی ها، ایده های درخشان، ایده های اشتباه، تعداد زیادی مقاله چاپ شده که حاوی معادلات اشتباه بودند، اشتباهات دوباره و استرس. بالاخره در سال ۱۹۱۵، مقاله ای منتشر کرد به نام «نظریه نسبیت عام» که راه حل کامل این مسأله را دربرداشت: شاهکار اینشتین. لف لندو، بزرگترین فیزیکدان نظری اتحاد جماهیر شوروی، آن را «زیباترین نظریه» نامید. فهم دلیل زیبایی این نظریه سخت نیست. اینشتین به جای اینکه شکل ریاضیاتی میدان گرانشی را ابداع کند و معادلاتی برای آن بیابد، پرسشی را از اعماق نظریه نیوتن بیرون کشید و آن را با پرسش اصلی خود ترکیب کرد.

نیوتن نظریه دموکریتوس را که می گفت اجسام در فضا حرکت می کنند، پذیرفت. این فضا باید یک ظرف عظیم خالی باشد، یک جعبه محکم که هستی درون آن قرار دارد. یا یک قالب بزرگ که در آن، اشیاء تا زمانی که نیرویی آنها را از مسیر منحرف نکند مستقیم حرکت می کنند. اما این «فضا» بی که هستی را دربردارد از چه ساخته شده است؟ فضا چیست؟

برای ما مفهوم فضا مفهومی آشناست، فقط به این دلیل که به فیزیک نیوتن عادت کرده ایم. اگر به آن دقت کنید می بینید که ما نمی توانیم تجربه ای از فضای خالی داشته باشیم. از ارسطو تا دکارت، یعنی به مدت دو هزاره، هیچ گاه ایده دموکریتوس درباره فضا یعنی یک موجودیت منفرد که جدای از اشیاست، معقول پنداشته نشد. در نگاه ارسطو و همین طور دکارت، اشیاء امتداد دارند. امتداد جزء خصوصیت های ذاتی شیء است. امتداد، بدون وجود چیزی که بتوان آن را امتداد داد وجود ندارد. من می توانم آب درون یک لیوان را خالی کنم اما بلافاصله هوا درون لیوان را پر خواهد کرد. آیا تا به حال یک لیوان واقعاً خالی دیده اید؟

ارسطو استدلال می کند که اگر بین دو شیء، شیء دیگری نباشد، هیچ چیز دیگری هم نیست. چگونه می شود یک شیء (فضا) هم باشد هم نباشد؟ فضای خالی ای که ذرات در آن حرکت می کنند چیست؟ خودش یک شیء است یا هیچ چیز نیست؟ اگر هیچ چیز نیست پس وجود ندارد و ما به آن کاری نداریم. اگر یک شیء است، آیا درست است که بگوییم تنها خصوصیت آن این است که وجود داشته باشد اما هیچ تأثیری بر هیچ چیز نگذارد؟

از دوران باستان ایده فضایی خالی که هم هست و هم نیست متفکران را آزار می داد. خود دموکریتوس هم که فضای خالی را مبنای جهانی قرار داد که در آن اتم ها در حال حرکت اند، نتوانست مسأله را روشن کند: او می نویسد که فضای خالی «چیزی میان بودن و نبودن است»: سیمپلیکوس می گوید: «برای دموکریتوس مفهوم وجود یعنی پر و مفهوم عدم یعنی خالی». [۱] اتم ها موجودند. فضا ناموجود است. ناموجودی که به هر حال وجود دارد. به سختی می توان از این مبهم تر سخن گفت.

نیوتن که مفهوم فضای دموکریتوسی را احیا کرده بود سعی کرد با بیان اینکه فضا محل احساسات و ادراکات خداوند است اوضاع را کمی مرتب کند.^{۳۵} هیچ کس نفهمید که منظور نیوتن از «محل احساسات و ادراکات خداوند» چیست. احتمالاً حتی خودش هم نمی دانست. برای اینشتین توضیح نیوتن از ماهیت فضا مطلقاً قانع کننده نبود.

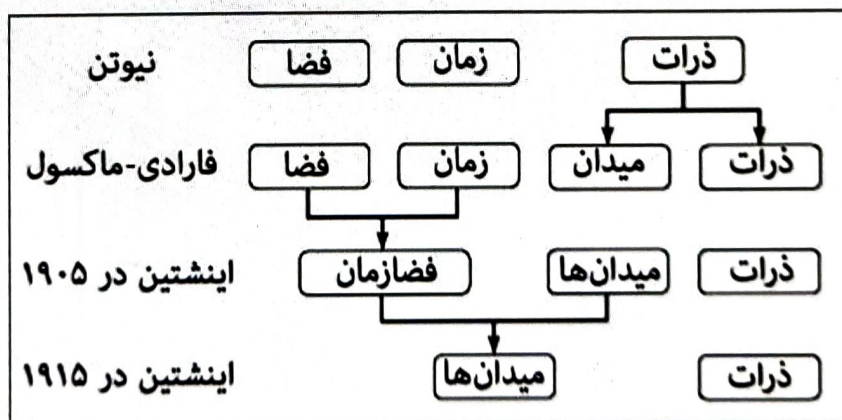
نیوتن برای غلبه بر مقاومت دانشمندان و فلاسفه در مقابل پذیرش مفهوم دموکریتوسی او از فضا، دست به نبردی گسترده زد. ابتدا هیچ کس او را جدی نگرفت. آنچه در نهایت دهان منتقدان را بست، کارآمدی بی نظیر معادلات او بود که همیشه به پاسخ درست می رسید. اما تردیدها درباره معقول بودن مفهوم نیوتنی فضا ادامه پیدا کرد و اینشتین که فلسفه هم می خواند کاملاً از آن آگاه بود. ارنست ماخ که تأثیرش بر اینشتین زبانزد است، فیلسوفی بود که بر مشکلات مفهومی ایده نیوتنی فضا انگشت نهاد. این همان مایه بود که معتقد بود اتم ها وجود ندارند (یک مثال خوب برای اینکه چگونه یک نفر می تواند از یک جنبه کوتاه نظر و از جنبه ای دیگر تیزبین باشد). در نتیجه، اینشتین نه یکی بلکه دو مسأله را پیش کشید. اول اینکه چگونه می توان میدان گرانشی را توضیح داد و دوم اینکه فضای نیوتنی چیست.

و اینجا بود که پرتو شگفت و غیرعادی نبوغ اینشتین و یکی از بلندپروازانه ترین افکار تاریخ بشر آشکار شد: اگر میدان گرانشی همان فضای مرموز نیوتنی باشد چه؟ اگر فضای نیوتنی چیزی بیش از میدان گرانشی نباشد چه؟ این ایده بی نهایت ساده و زیبا و درخشان، نظریه نسبیت عام است.

جهان از فضا به علاوه ذرات، به علاوه میدان های الکترومغناطیسی، به علاوه میدان گرانشی ساخته نشده است. جهان تنها از ذرات و میدان ها ساخته شده و دیگر هیچ. هیچ نیازی به افزودن فضا به منزله یک جزء جدا نیست. فضای نیوتنی همان میدان گرانشی است. یا برعکس، که البته همان می شود: میدان گرانشی همان فضا است (شکل ۳-۵).

اما برخلاف فضای نیوتنی که صاف و ثابت بود، میدان گرانشی به خاطر میدان بودنش حرکت می کند و نوسان دارد و مانند خطوط میدان فارادی، موضوع معادلاتی شبیه به معادلات ماکسول است.

جهان به شکل درخشانی ساده شده است. فضا دیگر جدای از ماده نیست و با آن تفاوتی ندارد. فضایی از اجزای «مادی» جهان است، چیزی شبیه به میدان الکترومغناطیسی.

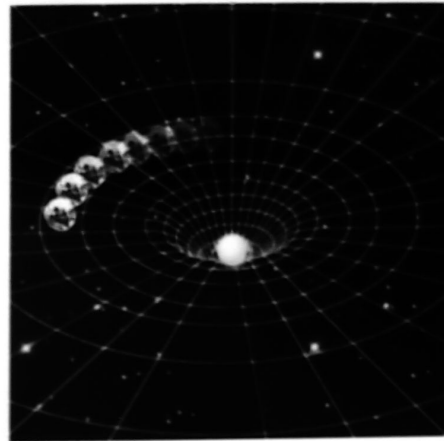


شکل ۳-۵ جهان از چه ساخته شده است؟

یک ماهیت واقعی که نوسان می کند، مرتعش می شود، کش می آید و در هم می پیچد. ما درون یک قالب نامرئی و صلب قرار نداریم: ما درون یک نرم تن عظیم و منعطف غوطه وریم (این استعاره متعلق به خود اینشتین است). خورشید فضای دور خود را خم می کند و زمین مستقیم در فضایی خمیده حرکت می کند نه اینکه با یک نیروی مرموز به سمت خورشید کشیده شود. همانند مهره ای که درون یک قیف می چرخد: ماهیت خمیده دیواره قیف است که مهره را به چرخش وامی دارد نه نیرویی مرموز که مرکز قیف تولید کرده است. سیارات به دور خورشید می گردند و اشیاء سقوط می کنند، چرا که فضای اطراف آنها خمیده است (شکل ۳-۶).

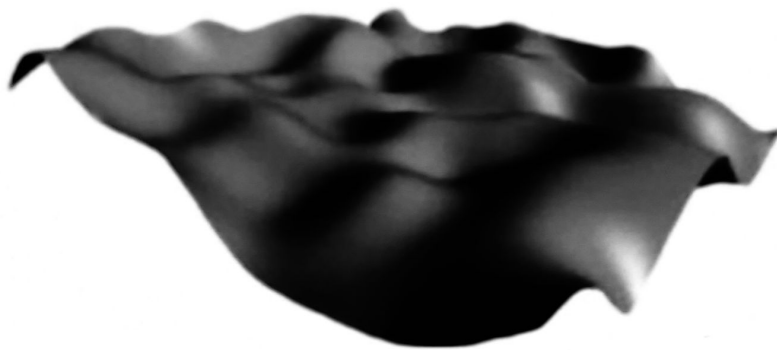
اگر بخواهیم کمی دقیق‌تر باشیم، این فضا نیست که خمیده می‌شود بلکه فضا زمان است. همان فضا زمانی که اینشتین ده سال پیش نشان داده بود که یک کل ساختارمند است نه توالی لحظه‌ها.

این ایده اصلی بود. تنها مسئله اینشتین این بود که معادلاتی بیابد که این ایده را ملموس کنند. چگونه می‌توان این خمش فضا زمان را توضیح داد؟ و اینجا اینشتین خوش شانس بود: ریاضیدان‌ها قبلاً مسأله را حل کرده بودند.



شکل ۳-۶ زمین دور خورشید می‌گردد، چون فضا زمان در اطراف خورشید خمیده است. مانند مهره‌ای که روی دیواره خمیده قیف می‌گردد.

بزرگ‌ترین ریاضیدان قرن نوزدهم، کارل فریدریش گاوس، «شاهزاده ریاضیدان‌ها»، معادلاتی برای توصیف سطوح خمیده مانند سطح تپه‌ها و یا آنچه در شکل ۳-۷ نشان داده شده، نوشته بود. سپس از یکی از دانشجویان با استعدادش خواسته بود که این معادلات را به فضاهای خمیده سه بعدی یا بیشتر تعمیم دهد. آن دانشجو، برنهارد ریمان، این کار را در رساله دکتری بسیار پیچیده خود به شکلی انجام داد که کاملاً بی‌استفاده می‌نمود. ریمان به این نتیجه رسید که مشخصات یک فضای (یا فضا زمان) خمیده در هر بُعد، با یک پارامتر ریاضی مشخص توصیف می‌شود که امروزه به آن منحنی ریمان می‌گوییم و آن را با R نشان می‌دهیم. منظره‌ای از دشت‌ها و تپه‌ها و کوه‌ها را در نظر بگیرید. منحنی R در سطح دشت‌ها صفر است یعنی دشت‌ها صاف‌اند یا «خمیده نیستند». این منحنی در دره‌ها و تپه‌ها صفر نیست. این مقدار در نوک قله کوه‌ها یعنی جایی که زمین کمترین صافی یا بیشترین خمیدگی را دارد به حداکثر می‌رسد. با استفاده از تئوری ریمان می‌توان شکل خمیدگی فضا در سه یا چهار بُعد را توضیح داد.



شکل ۳-۷ یک سطح خمیده دو بعدی

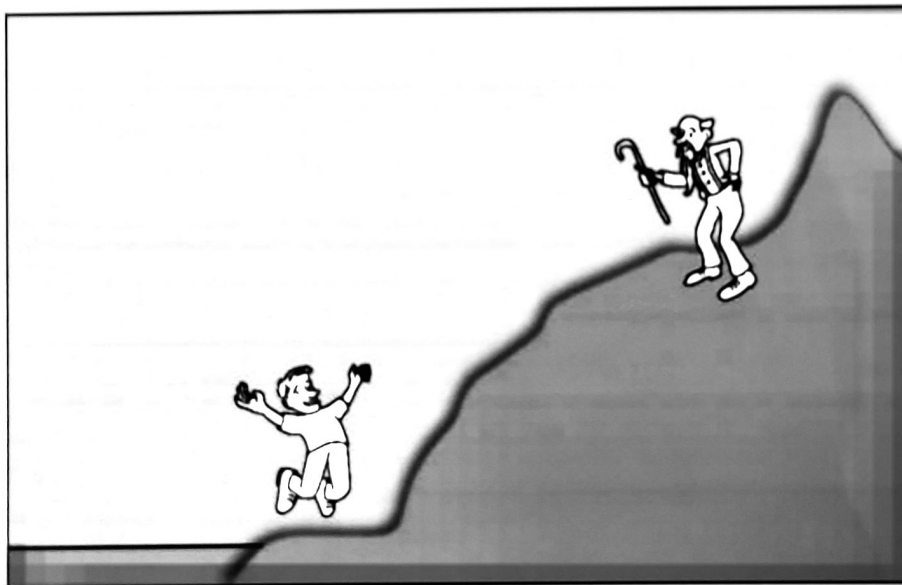
اینشتین با تلاش زیاد و کمک گرفتن از دوستانی که مهارت بیشتری در ریاضیات داشتند نظریه ریمان را فرا گرفت و معادله‌ای نوشت که در آن R با انرژی ماده در تناسب است. به زبان غیرریاضی: فضا زمان در جایی که ماده وجود دارد بیشتر خمیده می‌شود. این معادله شبیه معادلات ماکسول بود اما به جای الکتریسیته برای گرانش نوشته شده بود. طول این معادله فقط نصف یک خط بود نه بیشتر. یک بینش - اینکه فضا خمیده می‌شود - به یک معادله تبدیل شد.

اما در این معادله، جهانی پرتکاپو در جریان است. و اینجاست که غنای جادویی این نظریه در را به روی سلسله‌ای وهم‌انگیز از پیش‌بینی‌ها می‌گشاید. دقیقاً مثل اینکه پرت و پلاهای هذیانی یک مرد دیوانه، همه درست از آب درآید. حتی تا اوایل سال ۱۹۸۰ هم تقریباً هیچ کس بیشتر این پیش‌بینی‌های تخیلی را خیلی جدی نمی‌گرفت. در حالی که تمامشان یکی پس از دیگری از طریق آزمایش ثابت شده‌اند. بیایید

چند تا از آنها را بررسی کنیم.

برای شروع: اینشتین اثر جرمی مانند خورشید را روی خمش فضای اطراف آن، و اثر این خمش را بر حرکت سیارات دوباره حساب کرد. او دریافت که معادلات کپلر و نیوتن حرکت سیارات را پیش‌بینی کرده‌اند اما این پیش‌بینی چندان دقیق نیست: در مجاورت خورشید، تأثیر خمش فضا از تأثیر نیروی نیوتنی بیشتر است. اینشتین به محاسبه حرکت عطارد پرداخت که چون نزدیک‌ترین سیاره به خورشید بود، پیش‌بینی‌های اینشتین و نیوتن در مورد آن بیشترین اختلاف را داشت. او دریافت که چیزی ناهمخوان است: نزدیک‌ترین نقطه مدار عطارد به خورشید، هر سال ۰.۴۳ قوس ثانیه بیشتر از چیزی که نیوتن پیش‌بینی کرده حرکت می‌کند. این اختلاف زیاد نیست اما در محدوده آنچه ستاره‌شناسان می‌توانستند اندازه بگیرند و با مقایسه پیش‌بینی اینشتین با مشاهدات آنها، نتیجه مشخص بود: عطارد مسیری را که اینشتین پیش‌بینی کرده طی می‌کند نه مسیر نیوتن را. عطارد (همان مرکوری در اساطیر رومی)، پیک بادپای خدایان، خدایی که صندل بال‌دار به پا دارد، از اینشتین پیروی می‌کرد نه از نیوتن.

همچنین معادله اینشتین توضیح می‌دهد که فضا چگونه در فاصله‌ای بسیار نزدیک به یک ستاره خمیده می‌شود. به خاطر وجود این خمیدگی، نور منحرف می‌شود. اینشتین پیش‌بینی کرد که خورشید باعث خمیدگی نور در اطراف خود می‌شود. در سال ۱۹۱۹ امکان اندازه‌گیری این پیش‌بینی به وجود آمد. خمیدگی نوری که اندازه گرفته شد دقیقاً با پیش‌بینی اینشتین همخوان بود. اما فقط فضا نیست که خمیده می‌شود: زمان هم هست. اینشتین پیش‌بینی کرد که زمان در نقاط مرتفع‌تر زمین سریع‌تر از نقاط کم‌ارتفاع آن می‌گذرد. این مورد هم اندازه‌گیری شد و باز هم با پیش‌بینی مطابقت داشت. امروزه ساعت‌های بسیار دقیقی در آزمایشگاه‌ها وجود دارند که می‌توانند این پدیده عجیب را در اختلاف ارتفاعی حتی در حد چند سانتی‌متر اندازه‌گیری کنند. یک ساعت را روی زمین و یکی دیگر را روی میز قرار دهید: عقربه‌های آن که روی زمین است کندتر از آن که روی میز است حرکت می‌کند. چرا؟ به این دلیل که زمان یک چیز عمومی و ثابت نیست و به نسبت فاصله‌ای که با جرم‌ها دارد منبسط یا منقبض می‌شود: زمین مانند تمام اجرام دیگر، فضا زمان را خم می‌کند و باعث کندشدن زمان در مجاورت خود می‌شود. اگر دو برادر یا خواهر دوقلو داشته باشیم که به ترتیب یکی شان در سطح دریا و دیگری روی کوه زندگی کند، وقتی دوباره یکدیگر را ببینند درمی‌یابند که یکی شان بیشتر از دیگری عمر کرده است. هرچند این اختلاف بسیار اندک است (شکل ۳-۸).

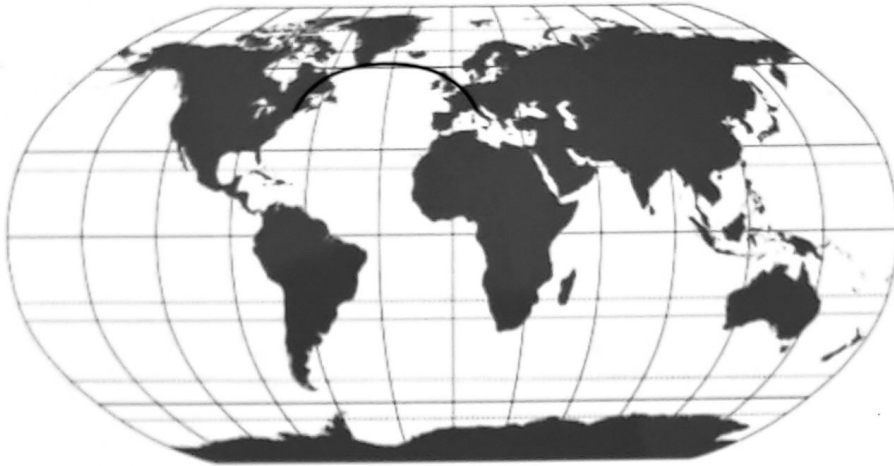


شکل ۳-۸ از این دوقلوها یکی شان عمر خود را در سطح دریا می‌گذراند و دیگری در کوهستان. وقتی دوباره یکدیگر را ببینند، آن که در کوهستان زندگی کرده پیرتر است. این اتساع گرانشی زمان است.

این پدیده توضیح جالبی برای سقوط اجسام ارائه می‌دهد. اگر یک نقشه جهان داشته باشید که مسیر هواپیمایی که از رم به سوی نیویورک در پرواز است روی آن ثبت شده باشد، خواهید دید که این مسیر مستقیم نیست: مسیر هواپیما یک قوس با خمشی به طرف بالا (شمال)

است. به دلیل انحنای زمین، حرکت از مسیری که از شمال می‌گذرد کوتاه‌تر از حرکت روی همان مسیر به شکلی مستقیم است. هر چه به سمت شمال برویم، فاصله نصف‌النهارها کمتر می‌شود. بنابراین، بهتر است برای کوتاه‌تر شدن مسیر به طرف شمال حرکت کنیم (شکل ۹-۳).

باور کنید یا نه، تویی که به هوا می‌اندازید به همین دلیل پایین می‌آید: هر چه بالاتر می‌رود «زمان بیشتری به دست می‌آورد»، چرا که زمان در آن بالا با سرعت متفاوتی می‌گذرد.

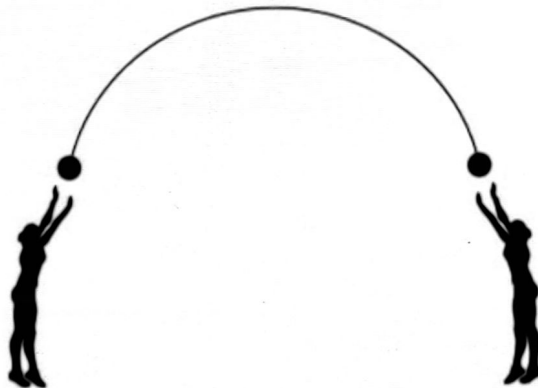


شکل ۹-۳ هر چه به سمت شمال بروید، فاصله نصف‌النهارها کمتر می‌شود.

هم هواپیما و هم توپ مسیری مستقیم را در فضا یا فضازمانی که خمیده است طی می‌کنند (شکل ۱۰-۳).

اما پیش‌بینی‌های این نظریه از این پدیده‌های جزئی بسیار فراتر می‌رود. ستاره‌ها تا زمانی که هیدروژن در اختیار دارند - یعنی سوخت دارند - می‌سوزند و سپس خاموش می‌شوند. در این حالت دیگر فشاری که به وسیله گرما تولید می‌شد، ماده باقی‌مانده را سرپا نگه نمی‌دارد. بنابراین، این ماده بر اثر وزن خود ویران می‌شود و در خود فرو می‌ریزد. وقتی این اتفاق برای ستاره‌ای بسیار بزرگ رخ می‌دهد، وزن آنقدر بالاست که ماده را به شدت متراکم می‌کند و فضا در کنار این ماده متراکم شده چنان خم می‌شود که چاله‌ای واقعی به وجود می‌آورد. یک سیاهچاله.

زمانی که دانشجو بودم، سیاهچاله‌ها را پیامد بی‌اعتبار یک نظریه مبهم می‌دانستند. امروزه ستاره‌شناسان صدها سیاهچاله را مشاهده و آنها را به دقت بررسی کرده‌اند. یکی از این سیاهچاله‌ها با جرمی حدود یک میلیون برابر خورشید در مرکز کهکشان ما قرار دارد. می‌توانیم ستاره‌هایی را که دور آن می‌گردند مشاهده کنیم. گرانش شدید این سیاهچاله ستاره‌هایی را که بسیار به آن نزدیک می‌شوند نابود می‌کند.



شکل ۳-۱۰ هر چه چیزی بالاتر برود، زمان برایش زودتر می‌گذرد.

علاوه بر این، این نظریه پیش‌بینی می‌کند که فضا مانند سطح آب موج می‌شود و این موج‌ها شبیه موج‌های الکترومغناطیسی‌ای هستند که تلویزیون ما با آنها کار می‌کند. تأثیر این «امواج گرانشی» را می‌توان بر ستاره‌های دوتایی مشاهده کرد: آنها این امواج را منتشر می‌کنند، انرژی از دست می‌دهند و به آرامی به سوی یکدیگر سقوط می‌کنند.^{۳۶} در اواخر سال ۲۰۱۵، امواج گرانشی دو سیاهچاله در حال سقوط به طرف هم، مستقیماً با آنتنی از روی زمین دریافت شد و خبر رسمی آن در اوایل سال ۲۰۱۶، بار دیگر جهان را در بهت فرو برد. باز هم یکی دیگر از پیش‌بینی‌های به‌ظاهر دیوانه‌وار نظریه اینشتین دقیق از آب درآمده بود.

و باز هم یکی دیگر: نظریه پیش‌بینی می‌کند که جهان از یک انفجار کیهانی در ۱۴ میلیارد سال پیش پدید آمده و در حال منبسط شدن است. مسأله‌ای که در ادامه با جزئیات بیشتر به آن خواهیم پرداخت.

این مجموعه غنی و پیچیده از پدیده‌ها - خمش پرتوهای نور، اصلاح نیروی نیوتنی، کندشدن ساعت‌ها، سیاهچاله‌ها، امواج گرانشی، انبساط جهان، بیگ‌بنگ - پیامد فهم این مسأله‌اند که فضا یک ظرف بی‌روح و ثابت نیست. فضا مانند ماده و میدان‌های دیگری که در آن هستند، پویایی و «فیزیک» خودش را دارد. اگر دموکریتوس بود و می‌دید که ایده‌اش درباره فضا چنین آینده درخشانی پیدا کرده، لبخندی از سر رضایت می‌زد. هر چند که دموکریتوس این فضا را عدم می‌نامید اما منظورش از وجود، ماده بود. با این همه، او نوشت که این عدم (خلأ)، فیزیک و مادیت مخصوص خودش را دارد. چقدر حق با او بود.

بدون مفهوم میدان که فارادی آن را وضع کرد، بدون قدرت فوق‌العاده ریاضیات و بدون هندسه گاوس و ریمان، این «فیزیک مخصوص» فضا همچنان قابل بیان نبود. اینشتین، با استفاده از ابزار مفهومی جدید و ریاضیات، برای توضیح خلأ دموکریتوس معادلاتی نوشت و برای «فیزیک مخصوص» خودش جهانی رنگارنگ و جذاب یافت که در آن جهان‌ها منفجر می‌شوند، فضا درون چاله‌ای بی‌انتها فرو می‌ریزد، زمان در مجاورت یک سیاره کندتر می‌شود و گستره نامحدود فضای میان ستاره‌ای، همچون سطح دریا، موج برمی‌دارد و مرتعش می‌شود...

تمام اینها مانند داستانی است که احمقی آن را تعریف می‌کند، پر از خشم و هیاهو اما بی‌معنا.^{۳۷} و با این حال، نیم‌نگاهی است به سوی

واقعیت. به بیان بهتر، گوشه‌چشمی است به واقعیت، اما کمی واضح‌تر از تصویر تار و پیش‌یافتاده‌ای که ما از آن داریم. واقعیتی که از همان عناصری ساخته شده که رؤیاهای ما از آنها ساخته شده، اما به هر حال واقعی‌تر از رؤیاهای مبهم هرروزه‌ماست. تمام اینها محصول این شهود ساده است که فضا زمان و میدان گرانشی یک چیزند و همچنین محصول یک معادله ساده که مشتاقم آن را اینجا بیاورم، حتی اگر بیشتر خوانندگان این کتاب از آن سر در نیاورند. این معادله را به این امید می‌آورم که شاید خوانندگان بتوانند گوشه‌ای از زیبایی و سادگی آن را دریابند:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + 8g_{ab} = \Lambda \pi G T_{ab}$$

در سال ۱۹۱۵ این فرمول از این هم ساده‌تر بود چرا که عبارت

$$\Lambda \pi G T_{ab}$$

که اینشتین آن را دو سال بعد اضافه کرد (و من در ادامه توضیحش خواهم داد) هنوز وجود نداشت.^{۳۸} R_{ab} با منحنی ریمان نسبت دارد و به همراه

$$\frac{1}{2} R g_{ab}$$

خمش فضا زمان را نشان می‌دهد. T_{ab} نشانگر انرژی ماده است. G همان ثابتی است که نیوتن کشف کرد: ثابتی که مقدار نیروی جاذبه را نشان می‌داد.

همه‌ش همین است. یک بینش و یک معادله.

ریاضیات یا فیزیک؟

پیش از اینکه مسائل فیزیکی را ادامه دهم، می‌خواهم کمی صبر کنم و به چند نکته ریاضیاتی بپردازم. اینشتین ریاضیدان بزرگی نبود. او با ریاضیات کلنجر می‌رفت. این را خودش می‌گفت. در سال ۱۹۴۳ در جواب دختری نه‌ساله به نام باربارا که برای رفع مشکلات ریاضی‌اش از او کمک خواسته بود، این‌گونه نوشت: «نگران مشکلات با ریاضی نباش. مطمئن باش که مشکلات من با ریاضی از تو بیشتر است!» [۲] این بیشتر شبیه یک شوخی است اما اینشتین شوخی نمی‌کرد. او در ریاضیات نیاز به کمک داشت: از دانشجویان و دوستان صبورش، کسانی مثل مارسل گروسمان، می‌خواست که مسائل را برایش توضیح دهند. این شهود او در مقام یک فیزیکدان بود که شگفت‌انگیز بود.

اینشتین در سال آخر تکمیل نظریه‌اش متوجه شد که در حال رقابت با دیوید هیلبرت، یکی از بزرگ‌ترین ریاضیدانان تاریخ است. هیلبرت در سخنرانی‌ای که اینشتین در گوتینگن داشت شرکت کرد و بلافاصله فهمید که اینشتین در مسیر کشفی بسیار بزرگ قرار گرفته است. او ایده را گرفت و سعی کرد از اینشتین پیش بيفتد و اولین کسی باشد که معادلاتی صحیح برای نظریه‌ای می‌نویسد که اینشتین به کندی سرگرم ساخت آن بود. رقابت دو غول برای رسیدن به خط پایان نفس‌گیر بود و تکلیف آن سرانجام ظرف چند روز مشخص شد. کار اینشتین به آنجا رسید که در کلاسی که در برلین داشت، تقریباً هر هفته، نگران از اینکه هیلبرت زودتر از او به جواب برسد، معادله‌ای جدید ارائه می‌کرد. هر بار هم معادلات اشتباه بود. تا اینکه به فاصله یک‌تا دو ماه جلوتر از هیلبرت، اینشتین به معادله درست رسید. او مسابقه را برده بود.

هیلبرت که مرد محترمی بود، با اینکه خودش هم در آن زمان روی معادلاتی بسیار شبیه به معادلات اینشتین کار می‌کرد هیچ‌گاه پیروزی اینشتین را زیر سوال نبرد. او گزاره‌ای بزرگ‌منشانه و زیبا از خود به جا گذاشت. گزاره‌ای که دقیقاً بیانگر رابطه دشوار اینشتین با ریاضی بود و شاید بیانگر رابطه دشواری که عموماً بین ریاضیات و فیزیک برقرار است. ریاضیاتی که برای صورت‌بندی نظریه مورد نیاز بود، هندسه چهاربعدی بود. هیلبرت نوشت:

هر جوانکی در خیابان‌های گوتینگن^{۳۹} هندسه چهاربعدی را بهتر از اینشتین می‌فهمد. با این حال، اینشتین بود که مأموریت را کامل کرد. چرا؟ چون اینشتین این قابلیت منحصر به فرد را داشت که چگونگی ساختن جهان را تصور کند و آن را در ذهن خود «ببیند». معادلات تنها پس از این تخیل می‌آمدند. معادلات زبانی بود که با آن، تخیلاتش راجع به واقعیت را بیان می‌کرد. تئوری نسبیت عام برای اینشتین مجموعه‌ای از معادلات نیست: تصویری ذهنی از جهان است که با زحمت فراوان به معادلات ترجمه شده است.

ایده‌ای که پشت این نظریه وجود دارد این است که فضا زمان خمیده می‌شود. اگر فضا زمان فقط دو بعد داشت و ما روی این سطح دوبعدی زندگی می‌کردیم، تصورش ساده بود که منظور از «خمش فیزیکی فضا» چیست. منظور این بود که فضای فیزیکی‌ای که ما بر آن زندگی می‌کنیم نه شبیه یک میز صاف، بلکه برعکس، شبیه سطحی است که از کوه‌ها و دره‌ها تشکیل شده است. اما جهانی که ما در آن زندگی می‌کنیم به جای دو بعد، سه بعد دارد. و در واقع چهار بعد، اگر زمان را هم به آن اضافه کنیم. تصور کردن یک فضای خمیده چهاربعدی بسیار مشکل‌تر است چرا که ما در ادراک عادی مان، درکی از یک «فضای بزرگ» تر نداریم که فضا زمان در آن خم می‌شود. اما تخیل اینشتین مشکلی در به تصویر کشیدن این نرم‌تن کیهانی که ما در آن غوطه‌وریم نداشت. نرم‌تنی که می‌تواند له شود، کش بیاید، موج بردارد و به فضا زمان اطراف ما شکل دهد. به لطف همین وضوح تخیل بود که اینشتین توانست اولین کسی باشد که نظریه را ارائه می‌دهد.

در نهایت بین اینشتین و هیلبرت قدری تنش به وجود آمد. چند روز پیش از اینکه اینشتین معادله موفق خود را منتشر کند، هیلبرت مقاله‌ای برای یک نشریه ادواری فرستاد که نشان می‌داد چقدر به پاسخ درست نزدیک شده است. حتی امروز هم تاریخ‌نویسان علم در ارزیابی میزان ادای سهم این دو غول به جهان علم، با شک و تردید مواجه‌اند. در مقطعی روابط آنها سرد شد و اینشتین ترسید که هیلبرت، که از او با سابقه‌تر و قدرتمندتر بود، در پی آن باشد که بیشتر امتیاز خلق این نظریه را به خود نسبت دهد. اما هیلبرت هیچ‌گاه ادعا نکرد اولین کسی است که نسبیت عام را کشف کرده است. در دنیایی مانند دنیای علم که اغلب به دفعات ثابت شده که دعوا بر سر حق تقدم نتایجی زیان‌بار دارد، این دو نفر مثال زیبایی از خرد را به نمایش گذاشتند و تمام تنش‌های منفی پیش‌آمده را زدودند.

اینشتین نامه‌ای درخشان به هیلبرت می‌نویسد و در آن از احساس خوبی می‌گوید که در مسیری که با هم پیموده‌اند، داشته است: لحظه‌ای بود که چیزی شبیه آرزوگی میان ما پیش آمد و من تمایلی به تحلیل منشأ آن ندارم. من با تلخکامی‌ای که این اتفاق در من پدید آورد جنگیده‌ام و با موفقیت بر آن غلبه کرده‌ام. دوباره به دوستی بی‌دغدغه با تو می‌اندیشم و از تو هم می‌خواهم که در قبال من چنین کنی. واقعاً مایه افسوس خواهد بود که همراهانی چون ما، که مسیری جدا از کوتاه‌نظری‌های دنیا برگزیده‌ایم، در همراهی یکدیگر چیزی غیر از لذت بیابیم. [۳]

کیهان

اینشتین دو سال پس از چاپ معادله‌اش تصمیم گرفت که از آن برای توصیف کل هستی در بزرگ‌ترین مقیاس خود استفاده کند. اینجا هم او یکی از ایده‌های جذابش را به کار گرفت.

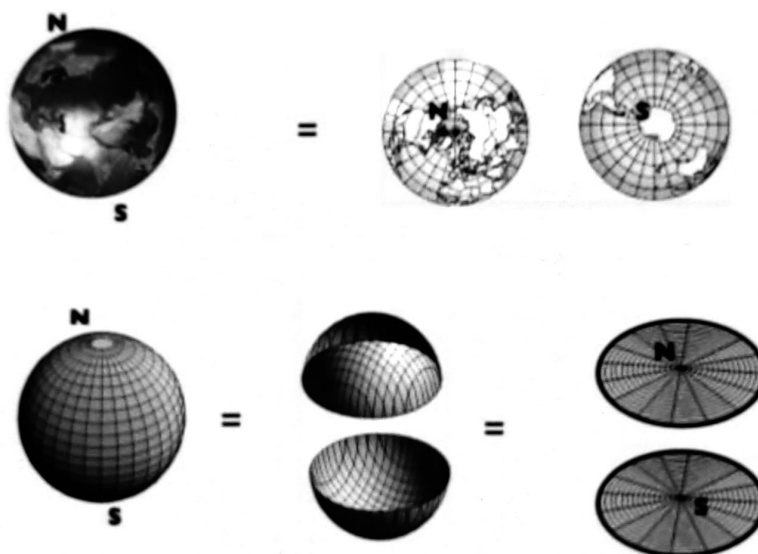
بشر در طی هزاران سال مدام از خود پرسیده است که جهان نامتناهی است یا محدودی دارد. هر دو فرضیه مشکلاتی آزاددهنده ایجاد می‌کنند: یک جهان نامتناهی عقلانی به نظر نمی‌رسد؛ مثلاً اگر جهان نامتناهی باشد، باید در جایی از آن، خواننده‌ای وجود داشته باشد دقیقاً شبیه شما که مشغول خواندن همین کتاب است (نامتناهی واقعاً بزرگ است و تعداد ترکیبات اتم‌ها آنقدر نیست که همه این جهان نامتناهی را با چیزهای جدید و متفاوت با هم پر کند). در واقع، باید بی‌نهایت خواننده مانند شما وجود داشته باشد نه فقط یکی... اما اگر حدی برای جهان وجود داشته باشد، آن حد چیست؟ مرزی که آن طرفش هیچ چیز نیست چه معنایی دارد؟ آرخوتاس، از پیروان فیثاغورس در قرن ششم پیش از میلاد نوشته بود:

اگر در دورترین نقطه آسمان یعنی در جایگاه ستارگان ثابت باشم، می‌توانم دست خود یا میله‌ای را رو به بیرون آن دراز کنم یا نه؟ بی‌معناست اگر نتوانم چنین کاری انجام دهم. اما اگر بتوانم، معنایش این است که خارج از این حد باز هم چیزی وجود دارد که یا ماده است یا فضا. در این حالت باز هم می‌توانم به سوی پایان جهان پیش بروم و هر بار این سؤال را از خود بپرسم که آیا آن طرف‌تر باز هم چیزی هست که بتوانم میله را به سوی آن دراز کنم؟ [۴]

هر دوی این گزینه‌ها چنان مهم‌اند - هم وجود فضایی نامتناهی مهم‌ل است، هم جهانی با مرزی ثابت - که ظاهراً امکان انتخاب عقلانی میان آنها وجود ندارد.

اما اینشتین یک راه سوم پیدا کرد: جهان می‌تواند متناهی باشد اما در عین حال هیچ مرزی نداشته باشد. چگونه؟ دقیقاً شبیه به سطح زمین که نامتناهی نیست اما هیچ مرزی هم ندارد که آنجا «به پایان برسد». این پدیده طبیعتاً برای چیزهای خمیده رخ می‌دهد: سطح زمین هم خمیده است. و البته در نظریه نسبیت عام فضای سه‌بعدی هم می‌تواند خمیده باشد. در نتیجه، جهان ما می‌تواند متناهی اما در عین حال بدون مرز باشد.

اگر روی سطح زمین در یک مسیر مستقیم حرکت کنید، نمی‌توانید تا بی‌نهایت پیش بروید: نهایتاً به نقطه‌ای بازمی‌گردید که از آن شروع کرده‌اید. جهان ما هم می‌تواند به همین صورت باشد: اگر با یک فضاپیما سفر کنید و همواره در مسیر مستقیم پیش بروید، دور جهان را خواهید پیمود و نهایتاً به زمین باز خواهید گشت. چنین فضای سه‌بعدی‌ای که متناهی است اما مرزی ندارد، کره سه‌بعدی نامیده می‌شود.



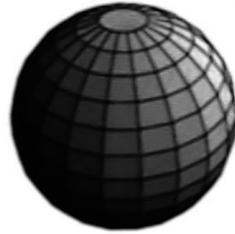
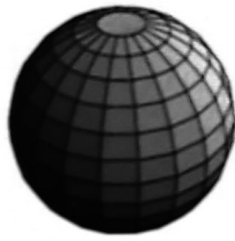
شکل ۳-۱۱ یک کره می‌تواند با دو دایره نمایش داده شود، دو دایره‌ای که

در واقعیت از طریق لبه‌هایشان به یکدیگر وصل شده‌اند.

بیایید برای فهم هندسه یک کره سه‌بعدی، به یک کره معمولی مثلاً سطح یک توپ یا سطح زمین توجه کنیم. برای نشان دادن سطح

زمین روی یک صفحه تخت، باید دو دایره رسم کنیم. این همان کاری است که برای نشان دادن قاره‌ها روی یک صفحه انجام می‌دهیم (شکل ۳-۱۱).

توجه داشته باشید که یک ساکن نیم کره جنوبی همواره توسط نیم کره شمالی محصور و احاطه شده است چون از هر مسیری که بخواهد از نیم کره‌اش خارج شود سر از نیم کره شمالی درخواهد آورد. اما عکس این نیز به وضوح درست است: هر نیم کره هم با نیم کره دیگر احاطه شده و هم آن را احاطه کرده است. یک کره سه بعدی را هم می‌توان به همین شکل به تصویر کشید، با این تفاوت که یک بعد به همه چیز اضافه خواهد شد: دو کره یا مثلاً دو توپ که در امتداد لبه‌هایشان به هم چسبیده‌اند. (شکل ۳-۱۲)



شکل ۱۲-۳ یک کره سه بعدی را می توان با دو توپ که به هم متصل اند، تصویر کرد.

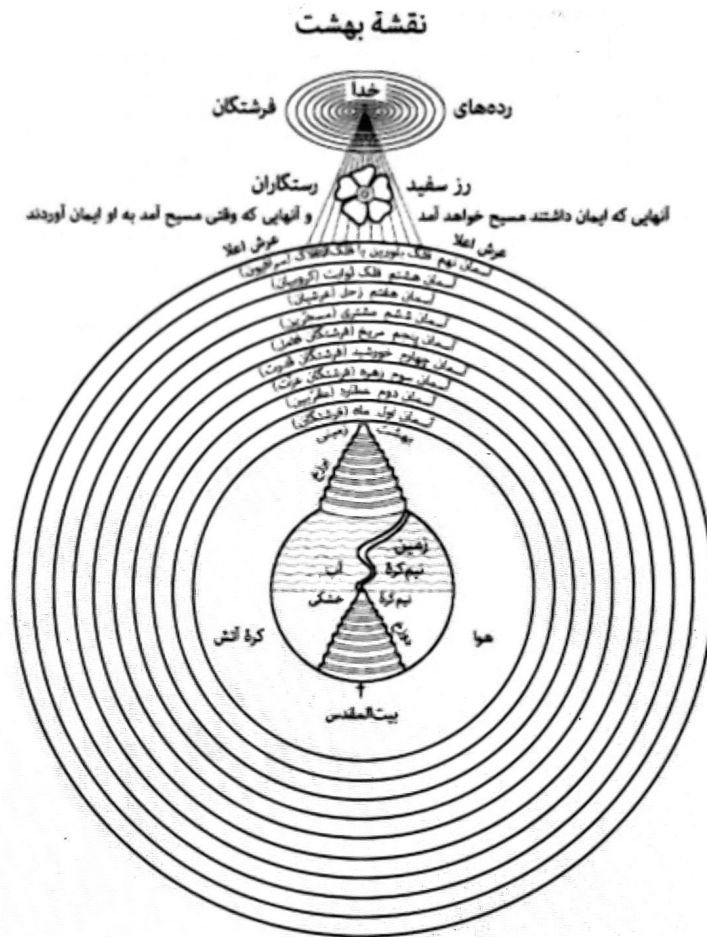
با خارج شدن از یکی از توپ ها وارد توپ دیگر می شویم، همان طور که در تصویر کره با خروج از یکی از دایره ها وارد دایره دیگر می شویم. هر توپ، هم دیگری را احاطه کرده و هم به وسیله آن احاطه شده است. ایده اینشتین این است که فضا می تواند یک کره سه بعدی باشد: چیزی با حجم محدود (جمع حجم دو توپ) اما بدون مرز.^{۴۱} کره سه بعدی راه حلی بود که اینشتین در مقاله سال ۱۹۱۷ خود در پاسخ به مسئله مرز جهان ارائه داد. این مقاله آغازگر کیهان شناسی مدرن، یعنی مطالعه کل جهان رؤیت پذیر در بزرگترین مقیاس آن بود. کشف انبساط جهان، نظریه بیگ بنگ، مسئله پیدایش هستی و بسیاری چیزهای دیگر، پیامدهای این مقاله اند. من درباره تمام اینها در فصل ۸ سخن خواهم گفت.

نکته دیگری در مورد کره سه بعدی اینشتین هست که دوست دارم به آن اشاره کنم. هرچقدر هم که باورنکردنی به نظر برسد، یک نابغه دیگر، از یک جهان فرهنگی کاملاً متفاوت، این ایده را قبلاً بیان کرده بود: بزرگترین شاعر ایتالیا، دانته آلیگیری. دانته در بهشت، قسمت سوم اثر بزرگش یعنی کمدی الهی، تصویری باشکوه از جهان قرون وسطی ارائه می دهد که مبتنی بر جهان ارسطویی است: زمینی کروی در مرکز که با کره هایی آسمانی احاطه شده است (شکل ۳-۱۳).

دانته به همراه معشوقش بئاتریس، در سفری خیالی وارد این کرات می شود و تا کره آخر می رود. زمانی که به آخرین کره می رسد، جهانی که زیر پا گذاشته را در نظر می آورد: آسمان های چرخان و زمینی که بسیار دور از دانته در مرکز این جهان قرار دارد. سپس به بالاتر نگاه می اندازد. چه می بیند؟ نقطه نوری که با کرات معلق که جایگاه فرشتگان است، یعنی با یک توپ معلق دیگر، احاطه شده است که به قول دانته در عین اینکه کره جهان ما را احاطه کرده، به وسیله آن احاطه هم شده است. این قطعه ای از سرود ۲۷ بهشت دانته است: «این قسمت دیگر از جهان، قسمت اول را در دایره ای احاطه می کند، همان طور که قسمت اول این قسمت را احاطه کرده است.» و در سرود بعد کماکان در دایره آخر می گوید: «به نظر می رسد که با همان چیزهایی احاطه شده که خود احاطه شان کرده است.» نقطه نور و کرات فرشتگان، هستی را احاطه کرده اند و در همان حال با هستی احاطه شده اند! این توصیفی دقیق از کره سه بعدی است!

در نمایش مرسوم جهان دانته که در کتاب های درسی ایتالیا هم آورده اند، (مانند شکل ۳-۱۳) کرات فرشتگان از کرات آسمان تفکیک شده است. اما دانته گفته که این دو توپ همدیگر را احاطه کرده اند و با یکدیگر احاطه شده اند. دانته تصور هندسی روشنی از یک کره سه بعدی

داشته است.^{۴۱}



شکل ۳-۱۳ نمایش مرسوم جهان دانته

اولین بار یک ریاضیدان آمریکایی به نام مارک پترسون در سال ۱۹۷۹ متوجه شد که بهشت دانته، جهان را هم چون یک کره سه بعدی به تصویر کشیده است. در کل، بیشتر متخصصان دانته با کره سه بعدی آشنایی ندارند. امروزه هر فیزیکدان و ریاضیدانی می تواند به آسانی کره سه بعدی را در توصیف دانته از هستی تشخیص دهد.

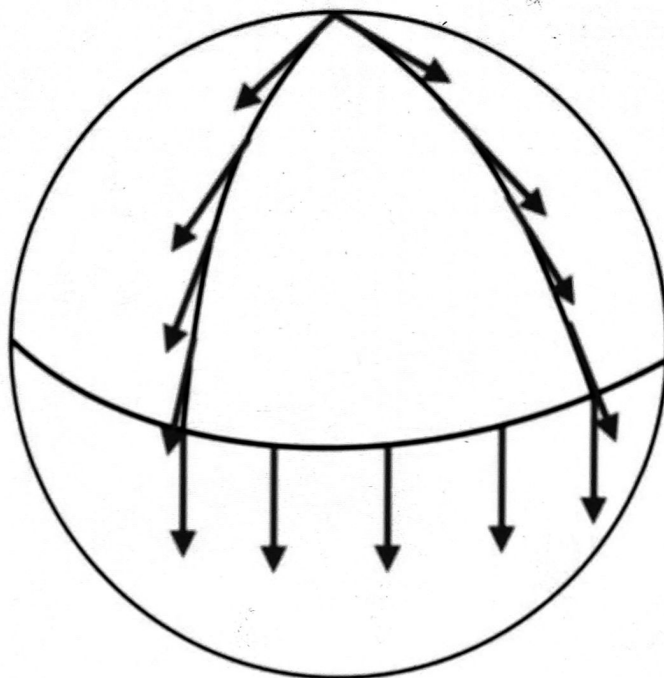
چگونه ممکن است که دانته ایده ای چنین امروزی داشته باشد؟ به نظر من به چند دلیل: نخست به دلیل هوش ژرف این بزرگترین شاعر ایتالیا. هوشی که یکی از دلایل جذابیت کمدی الهی دانته است. دوم آنکه دانته بسیار پیش تر از زمانی می نوشت که نیوتن همه را متقاعد کرد که فضای نامتناهی کیهان همان سطح صاف هندسه اقلیدسی است. دانته از محدودیت های شهود ما که نتیجه آموزش نیوتنی ماست، رها بود.

دانش علمی دانته عمدتاً بر پایه آموزش های برونیتو لاتینی^{۴۲}، مرشد و استادش، بنا شده بود که از او رساله کوچکی به نام گنج^{۴۳} به جا مانده که گونه ای دایره المعارف دانش در قرون وسطی است و با ترکیب جذابی از فرانسوی و ایتالیایی کهن نوشته شده است. برونیتو در این رساله این واقعیت را که زمین کره ای است، با جزئیات کامل شرح می دهد. اما این کار را به شکلی انجام می دهد که ممکن است در نگاه خواننده امروزی عجیب به نظر برسد، یعنی آن را با هندسه ای «از درون» وضعیت توصیف می کند نه «از بیرون». به این معنا که نمی گوید «زمین شبیه یک پرتقال است»، یعنی آن گونه که زمین از بیرون به نظر می رسد. بلکه به جای چنین توصیفی، می گوید که «اگر دو شوالیه در مسیر مخالف یکدیگر به اندازه کافی از هم دور شوند، در طرف دیگر به هم خواهند رسید». یا «اگر انسانی تصمیم بگیرد که تا همیشه راه برود، به شرط اینکه دریاها مانعش نشوند، به همان نقطه ای از زمین خواهد رسید که حرکتش را از آنجا شروع کرده بود.» به عبارت دیگر، او از یک زاویه دید درونی سخن می گوید نه یک زاویه دید بیرونی: زاویه دید همان کسی که تصمیم گرفته روی زمین راه برود، نه زاویه دید کسی که او را از دور دست می نگرد. در نگاه اول ممکن است این طرز بیان، راهی بی معنا و پیچیده برای گفتن این واقعیت به نظر برسد که زمین گرد است. چرا برونیتو خیلی ساده نگفت که زمین شبیه پرتقال است؟ بیایید همه جوانب را در نظر بگیریم: مثلاً اگر مورچه ای را تصور

کنیم که روی یک پرتقال راه می‌رود، در نقاطی از مسیر، خود را وارونه می‌یابد و باید از چسبندگی پاهایش استفاده کند تا به پرتقال بچسبد و نیفتد. اما مسافری که دور کره زمین سفر می‌کند هرگز خود را وارونه نمی‌یابد و به همین دلیل نیازی به پاهای چسبنده ندارد. بنابراین توضیح برونیتو خیلی هم عجیب و غریب نیست.

حال به این بیندیشید: برای کسی که از معلمش یاد گرفته که شکل زمین این گونه است که اگر روی آن همواره بر یک خط راست راه برویم به نقطه شروع بازمی‌گردیم، احتمالاً خیلی مشکل نیست که گام بدیهی بعدی را بردارد و نتیجه بگیرد که شکل کلی هستی هم این گونه است که اگر در آن روی یک خط مستقیم پرواز کنیم، به نقطه آغاز باز خواهیم گشت: یک کره سه‌بعدی، فضایی است که در آن «اگر دو شوالیه بال‌دار در مسیر مخالف هم پرواز کنند، یکدیگر را در آن طرف هستی خواهند دید». به زبان فنی، توصیفی که برونیتو لاتینی در رساله گنج از هندسه زمین ارائه می‌دهد، به زبان هندسه درونی (مشاهده یک وضعیت از درون) است نه هندسه بیرونی (مشاهده یک وضعیت از بیرون). این دقیقاً توصیفی مناسب برای تعمیم مفهوم کره از دو بُعد به سه بُعد است. بهترین راه برای توصیف یک کره سه‌بعدی این است که اتفاقاتی را که حین حرکت در آن می‌افتد توصیف کنیم، نه اینکه آن را طوری توصیف کنیم که انگار از بیرون مشغول مشاهده آن هستیم. روشی که گاوس برای توصیف سطوح خمیده به کار گرفت و ریمان آن را برای توصیف خمش فضا در سه بُعد یا بیشتر تعمیم داد، اساساً همان روش برونیتو لاتینی است. در واقع نکته این است که برای توصیف یک فضای خمیده، نباید آن را طوری توصیف کنیم که انگار از بیرون مشغول دیدن آن هستیم و می‌خواهیم ببینیم سطح بیرونی آن چگونه خمیده شده است. برعکس، باید بگوییم: کسی که درون این فضا قرار گرفته، در آن حرکت می‌کند و همیشه هم در آن خواهد ماند، ممکن است چه چیزهایی را تجربه کند و با چه چیز مواجه شود. مثلاً همان طور که برونیتو مشاهده کرد که سطح یک کره معمولی سطحی است که تمام خط‌های مستقیم روی آن پس از طی مسافتی مساوی (طول خط استوا) به نقطه شروعشان باز خواهند گشت. یک کره سه‌بعدی هم فضایی سه‌بعدی است با همین مشخصات.

خمیدگی فضا زمان اینشتین به این معنا نیست که این فضا زمان «در یک فضای بیرونی» خم شده است. این فضا زمان به این معنا خمیده است که هندسه درونی آن، یعنی شبکه فواصل بین نقاط آن که به وسیله یک ناظر درونی قابل مشاهده است، هندسه یک فضای تخت نیست. این فضایی است که در آن قضیه فیثاغورس معتبر نیست، همان طور که قضیه فیثاغورس روی سطح زمین هم معتبر نیست.^{۴۴} برای درک خمیدگی فضا از درون آن و بدون نگاه کردن به آن از بیرون، راهی وجود دارد که برای بحث‌های بعدی ما مهم است. فرض کنید که در قطب شمال قرار دارید و به سوی جنوب حرکت می‌کنید تا به استوا برسید و در کل این مسیر، پیکانی در دست دارید که آن را رو به جلو گرفته‌اید. وقتی که به استوا رسیدید بدون اینکه جهت پیکان را تغییر دهید به سمت چپتان حرکت کنید. پیکان هنوز رو به جنوب است که الآن سمت راست شماست. کمی روی خط استوا به سمت شرق پیش بروید و دوباره بدون اینکه جهت پیکان را تغییر دهید به سمت شمال حرکت کنید. جهت پیکان اکنون به سمت پشت شماست. وقتی دوباره به قطب شمال می‌رسید، یک مدار بسته - یا یک «حلقه» - را طی کرده‌اید و پیکانتان دیگر در همان مسیری قرار ندارد که در ابتدای حرکتتان قرار داشت (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۴ گریک پیکان را بدون تغییر دادن جهتش روی یک مدار (حلقه) در یک فضای منحنی حمل کنیم، وقتی به نقطه شروع برسیم جهت آن پیکان تغییر کرده است.

زاویه‌ای که پیکان در پایان حلقه با جهت ابتدایی‌اش پیدا کرد، میزان خمیدگی را نشان می‌دهد.

من به این روش اندازه‌گیری خمش از طریق ایجاد یک حلقه در فضا بازخواهم گشت. اینها همان حلقه‌هایی هستند که نظریه گرانش کوانتومی حلقه، نام خود را از آنها گرفته است.

دائمه در سال ۱۳۰۱، در حالی که صحنه موزاییک گنبد تعمیرگاه فلورانس داشت تکمیل می‌شد، فلورانس را ترک کرد. این موزاییک (اثر کوپو دی مارکوالدو^{۴۵}، استاد چیمابونه^{۴۶}) که نمایانگر دوزخ است و در نظریک انسان قرون وسطایی احتمالاً وحشتناک بوده است، اغلب منبع الهام دائمه به شمار می‌آید (شکل ۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵ موزاییک نمایانگر دوزخ، کوپو دی مارکوالدو، در تعمیدگاه فلورانس

کمی قبل از آغاز نوشتن این کتاب، همراه امانوئلا مینای -دوستی که مرا متقاعد کرد این کتاب را بنویسم- به دیدن این تعمیدگاه رفتم. زمانی که وارد تعمیدگاه می‌شوید و بالا را نگاه می‌کنید نقطه درخشانی از نور می‌بینید (منبع نور، نورگیر بالای گنبد است) که با نه گروه از فرشتگان احاطه شده با نام‌هایی به این ترتیب: فرشتگان، مقربین، فرشتگان عزت، فرشتگان قدرت، فرشتگان فضل، مسخرین، عرشیان، کروبیان و سرافیون. این دقیقاً با ساختار کره دوم در بهشت دانتی منطبق است. فرض کنید که شما مورچه‌ای هستید که روی کف تعمیدگاه در حال حرکتید و می‌توانید به هر طرف که می‌خواهید بروید. هر مسیری را برای بالا رفتن از دیوار انتخاب کنید در نهایت به همان نقطه نور روی سقف خواهید رسید که فرشتگان دور آن قرار دارند: نقطه نور و فرشتگان دورش، هم با باقی فضای تزئین شده داخل تعمیدگاه «احاطه شده‌اند» و هم آن را «احاطه کرده‌اند» (شکل ۳-۱۶).

دانتی نیز مانند هر شهروند فلورانسی دیگری در اواخر قرن سیزدهم باید عمیقاً مبهوت تعمیدگاه شده باشد: پروژه معماری عظیمی که در شهرش در حال تکمیل بود. من معتقدم که احتمالاً او نه فقط تحت تأثیر دوزخ کوپو دی مارکوالدو بلکه تحت تأثیر کل معماری تعمیدگاه، کیهانش را شکل داده است.

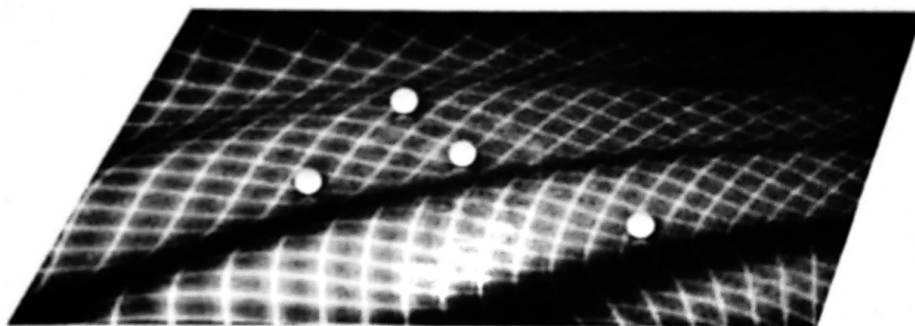


شکل ۳-۱۶ نمای داخلی تعمیدگاه

او در بهشت دقیقاً و به وضوح، معماری تعمیدگاه را بازسازی کرده است که در آن همان نه دایره فرشتگان و نقطه نور هم وجود دارند اما به جای اینکه دوبعدی باشند، سه‌بعدی‌اند. برونیتو بعد از توصیف جهان کروی ارسطو می‌نویسد که پس از این جهان عرش الهی قرار دارد و پیش از این هم در شمایل‌نگاری قرون وسطی، بهشت را به شکل خدایی که با کرات فرشتگان محصور شده است، تصویر کرده بودند. دانتی کاری نکرد غیر از اینکه این تکه‌های از قبل آماده شده را در یک ساختار معمارانه منسجم که از معماری تعمیدگاه گرفته شده بود به هم بچسباند و مسئله قدیمی مرزهای هستی را حل کند. دانتی با این کار، شش قرن قبل از کره سه‌بعدی اینشتین، آن را پیش‌بینی می‌کند. نمی‌دانم اینشتین در زمان گردش‌های فکری‌اش در ایتالیا به بهشت برخورد کرده بود یا نه و آیا تخیل درخشان شاعر ایتالیایی مستقیماً بر این شهود او که جهان بدون مرز اما متناهی است تأثیر گذاشته بود یا نه. فارغ از اینکه چنین تأثیری بوده باشد یا نه، این مثال خوبی است که

ثابت می‌کند علم و شعر سطح بالا، هردو مبتنی بر تخیل‌اند و حتی ممکن است به شهودهایی یکسان برسند. فرهنگ ما نادان است که علم و شعر را جدای از هم نگه می‌دارد: هردو آنها ابزاری هستند که چشم ما را بر روی پیچیدگی‌ها و زیبایی‌های جهان می‌گشایند. کره‌سهبعدی دانه فقط شهودی است که از دل یک رؤیا زاده شده است. کره‌سهبعدی اینشتین فرم ریاضیاتی دارد و از دل معادلات نظریه‌اش بیرون آمده است. تأثیر هر کدام متفاوت است. شهود دانه تکان‌دهنده است و احساسات عمیقی برمی‌انگیزد. شهود اینشتین راهی برای حل رازهای سربه‌مهر جهان در مقابل ما می‌گشاید. اما هردو از زیباترین و تأثیرگذارترین بلندپروازی‌های ذهن بشرند. بیایید به سال ۱۹۱۷ بازگردیم یعنی زمانی که اینشتین تلاش می‌کرد کره‌سهبعدی را وارد معادلاتش کند. در اینجا او با یک مشکل مواجه شد. او معتقد بود که جهان ثابت و تغییرناپذیر است اما معادلاتش نشان می‌دادند که چنین چیزی غیرممکن است. دلیلش پیچیده نیست. از آنجا که همه چیزها در جهان یکدیگر را جذب می‌کنند تنها راه برای اینکه جهان متناهی در خود مچاله و جمع نشود، منبسط شدن است: همان‌گونه که تنها راه جلوگیری از سقوط یک توپ فوتبال روی زمین، شوت کردن آن به سمت بالاست. توپ یا بالا می‌رود یا پایین می‌آید اما نمی‌تواند در هوا معلق بماند.

اما اینشتین آنچه را معادلاتش به او می‌گفتند باور نکرد. او حتی برای اجتناب از نتایج نظریه‌اش یک اشتباه فیزیکی احمقانه مرتکب شد (متوجه نشد که راه‌حلی که به دنبالش می‌گردد یک جهان در حال تغییر است): نتیجه نظریه‌اش این بود که جهان یا منقبض می‌شود یا منبسط. او معادلاتش را طوری دستکاری کرد که از پیامدهای آن یعنی انبساط جهان در امان بماند. به همین دلیل بود که عبارت *Agab* را به معادله بالا اضافه کرد. اما این یک اشتباه دیگر بود: عبارت اضافه‌شده صحیح است اما این واقعیت را که پیامد این معادله انبساط جهان است، تغییر نمی‌دهد. اینشتین نابغه با تمام شجاعتش جسارت باور کردن معادلات خود را نداشت.



شکل ۳-۱۷ جهان اینشتین: ذرات و میدان‌ها در حال حرکت بر میدان‌های دیگر.

چند سال بعد مجبور شد کوتاه بیاید: آنچه درست بود، معادلات او بود نه تردیدهایش درباره آنها. ستاره‌شناسان متوجه شدند که تمام کهکشان‌ها در واقع در حال دور شدن از ما هستند. دقیقاً همان‌گونه که معادلات پیش‌بینی کرده بودند، جهان در حال انبساط است. چهارده میلیارد سال پیش، جهان تنها در یک نقطه به شدت داغ و سوزان متمرکز شده بود. جهان با یک انفجار عظیم «کیهانی» از آن نقطه، در حال منبسط شدن است. من در اینجا کلمه «کیهانی» را به معنای دقیق و تحت‌اللفظی آن به کار می‌برم: این انفجار واقعاً کیهانی بوده است. این انفجار همان مه‌بانگ است.

امروزه می‌دانیم که انبساط جهان واقعیت دارد. در سال ۱۹۶۴ یعنی زمانی که دو رادیوستاره‌شناس آمریکایی، آرنو پنزیاس و رابرت ویلسون، تصادفاً پرتوی پراکنده در کل جهان را کشف کردند که دقیقاً بازمانده گرمای بسیار زیاد آغاز جهان بود، سناریوی پیش‌بینی شده به وسیله معادلات اینشتین کاملاً اثبات شد. یک بار دیگر درستی نظریه از طریق پیش‌بینی‌های حیرت‌انگیزش تأیید شده بود.

از همان زمانی که بشر کشف کرد که زمین گرد است و دیوانه‌وار به دور خودش می‌چرخد، دریافت که واقعیت آن چیزی نیست که به نظر می‌رسد: هر بار که ما نگاهی گذرا به وجهی تازه از آن می‌اندازیم و پرده دیگری را برمی‌داریم، احساساتی عمیق را تجربه می‌کنیم. اما جهش اینشتین بی‌نظیر بود: فضا زمان یک میدان است، جهان فقط از میدان‌ها و ذرات ساخته شده است، فضا و زمان دو چیز جدا از هم یا جدا از کل طبیعت نیستند: آنها صرفاً میدان‌هایی هستند در میان میدان‌های دیگر (شکل ۳-۱۷).

یک دانش‌آموز ابتدایی در سال ۱۹۵۳ به اینشتین نوشت: «ما در کلاس‌مان در حال مطالعه جهان هستیم. من خیلی فضا را دوست دارم.

می خواستم از شما برای تمام کارهایی که انجام داده‌اید تا ما فضا را بشناسیم تشکر کنم». [۵]
من هم همین طور.

۴: کوانتوم‌ها

دو ستون اصلی فیزیک در قرن بیستم یعنی نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، کاملاً با یکدیگر تفاوت دارند. نسبیت عام جواهری یک‌تکه است: بینشی ساده و منسجم از گرانش، فضا و زمان، که یک ذهن منفرد آن را بر مبنای ترکیب نظریات قبل از خود ساخته و پرداخته است. اما مکانیک کوانتومی یا نظریه کوانتوم از دل آزمایش‌ها و مشاهداتی برآمده که در طول یک ربع قرن گردآوری شدند و اشخاص زیادی در ساختن آن سهیم بودند. این نظریه به موفقیت عملی بی‌نظیری دست یافته و کاربردهایش زندگی روزمره ما را هم دگرگون کرده است (مثلاً کامپیوتری که با آن می‌نویسم) اما پس از گذشت یک قرن از پدیدارشدنش هنوز هم مبهم و درک‌ناپذیر به نظر می‌رسد. در این فصل به بررسی فیزیک عجیب این نظریه که محصول چگونگی به وجود آمدن آن است می‌پردازیم و سه وجهی از واقعیت را که این نظریه پدیدار کرده است - دانه‌ای بودن، عدم قطعیت و رابطه‌مندی - از نظر می‌گذرانیم.

دوباره آلبرت

می‌گویند مکانیک کوانتومی دقیقاً در سال ۱۹۰۰ متولد شد و آغازگر عصر نوینی سرشار از تفکر بود. در این سال، فیزیکدان آلمانی، ماکس پلانک^{۴۷}، تلاش کرد تعداد موج‌های الکترومغناطیسی در حال تعادل در یک جعبه داغ را محاسبه کند. او برای به دست آوردن فرمولی که با نتایج آزمایشگاهی همخوان باشد، از ترفندی استفاده کرد که به نظر بی‌معنا می‌رسید: او فرض کرد که انرژی میدان الکتریکی در قالب کوانتوم‌ها، یعنی بسته‌های کوچکی از انرژی، توزیع و پخش می‌شود. او همچنین فرض کرد که اندازه این بسته‌ها به بسامد امواج الکترومغناطیسی (یعنی رنگشان) بستگی دارد. برای موجی با بسامد ν ، هر بسته انرژی یا هر کوانتوم انرژی‌ای برابر E دارد:

$$E = h\nu$$

این اولین فرمول مکانیک کوانتوم است. h ثابت جدیدی است که امروزه ثابت پلانک نامیده می‌شود. این ثابت برای هر تابش (رنگ) با بسامد ν ، مقدار انرژی موجود در هر بسته انرژی را تعیین می‌کند. همچنین مقیاس تمام پدیده‌های کوانتومی را نشان می‌دهد. این ایده که انرژی از بسته‌های محدود و کوچک ساخته شده، با هر آنچه در آن زمان راجع به انرژی می‌دانستند در تناقض بود: در آن زمان انرژی را چیزی می‌دانستند که به شکلی پیوسته تغییر می‌کند و دلیلی نداشت که آن را دانه‌ای و گسسته ببینند. مثلاً انرژی یک آونگ میزان دامنه نوسان آن را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد دلیلی نداشته باشد که یک آونگ صرفاً با دامنه‌های مشخص و تعیین شده‌ای نوسان کند و دامنه‌هایی وجود داشته باشد که آونگ نتواند در آنها نوسان کند. در نگاه ماکس پلانک، فرض انرژی به شکل بسته‌هایی کوچک، تنها یک ترفند عجیب محاسباتی بود که در زمان محاسبه - یعنی تولید دوباره نتایجی که در آزمایش به دست آمده بود - به کار می‌رفت اما هیچ دلیل مشخص و معلومی نداشت.

پنج سال بعد باز هم آلبرت اینشتین بود که دریافت که بسته‌های انرژی پلانک واقعیت دارند. این موضوع سومین مقاله‌ای است که برای سالنامه فیزیک فرستاد و این تاریخ حقیقی تولد نظریه کوانتوم است.

اینشتین در این مقاله استدلال کرد که نور حقیقتاً از دانه‌هایی کوچک یعنی ذرات نور ساخته شده است. او بر پدیده‌ای متمرکز شد که آن اواخر در آزمایش‌ها مشاهده شده بود: اثر فوتوالکتریک. موادی وجود دارند که وقتی در معرض تابش نور قرار می‌گیرند، جریان الکتریکی ضعیفی تولید می‌کنند. یعنی زمانی که نور بر آنها می‌تابد، از خود الکترون ساطع می‌کنند. مثلاً، امروزه ما از آنها در ساخت سلول‌های فوتوالکتریکی استفاده می‌کنیم که یک در را، با نزدیک شدن ما به آن، باز می‌کنند یا در ساخت سلول‌هایی که در سنسورها هستند. این اتفاق چیز عجیبی نیست چون نور حامل انرژی است (مثلاً نور ما را گرم می‌کند) و این انرژی باعث می‌شود که الکترون‌ها از درون اتم‌های خود «بیرون بپرند». این انرژی الکترون‌ها را به جلو می‌راند.

اما چیز عجیبی اینجا هست: منطقی این است که اگر انرژی نور ناچیز باشد یعنی اگر نور ضعیف باشد، اتفاقی که در بالا گفته شد رخ ندهد. یعنی تنها زمانی این اتفاق بیفتد که انرژی نور کافی است یا نور قوی است. اما ماجرا این گونه نیست: آنچه در عمل می‌بینیم این است که این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس نور بالا باشد و اگر فرکانس پایین باشد این اتفاق نخواهد افتاد. یعنی رخ دادن یا ندادن این پدیده به رنگ نور (فرکانس) بستگی دارد و نه به شدت نور (انرژی). در فیزیک استاندارد راهی برای توضیح این پدیده وجود ندارد.

اینشتین ایده پلانک یعنی بسته‌های انرژی‌ای را که اندازه‌شان وابسته به فرکانس است بررسی کرد و دریافت که اگر این بسته‌ها واقعی باشند، این پدیده قابل توضیح است. فهمیدن دلیلش سخت نیست. تصور کنید که نور به شکل دانه‌های انرژی بر چیزها می‌تابد. یک الکترون تنها زمانی از اتم خود بیرون رانده می‌شود که دانه‌ای که به آن برخورد می‌کند انرژی زیادی داشته باشد. آنچه اهمیت دارد انرژی هر دانه است نه تعداد دانه‌ها. اگر همان طور که در فرضیه پلانک آمده، انرژی هر دانه به وسیله فرکانس معین شود، پدیده بالا زمانی رخ خواهد داد که فرکانس نور به اندازه کافی بالا باشد یعنی فارغ از مقدار کلی انرژی نور، باید هر دانه به‌تنهایی انرژی کافی داشته باشد. دقیقاً مثل زمانی که تگرگ می‌بارد: آنچه تعیین می‌کند که بدنه ماشین شما فرو خواهد رفت یا نه، اندازه هر تگرگ است نه تعداد تگرگ‌هایی که از آسمان می‌بارد. ممکن است تعداد تگرگ‌هایی که از آسمان می‌بارد خیلی زیاد باشد اما به این دلیل که تمام آنها کوچک هستند، هیچ آسیبی به ماشین شما وارد نشود. به همین ترتیب، اگر نوری شدید باشد -تعداد بسته‌های انرژی‌اش زیاد باشد- اما اندازه دانه‌هایش بیش از حد کوچک باشد -فرکانسش پایین باشد- نمی‌تواند الکترون‌ها را از درون اتم‌هایشان بیرون بیندازد. با این اوصاف روشن می‌شود که چرا رنگ نور تعیین‌کننده رخ دادن یا ندادن اثر فوتوالکتریک است نه شدت نور. برای این استدلال ساده، اینشتین برنده نوبل فیزیک شد. فهم چیزی که قبلاً به آن اندیشیده‌اند، ساده است؛ مشکل، فکر کردن به چیزی است برای اولین بار.

امروزه ما این بسته‌های انرژی را فوتون می‌نامیم که از کلمه یونانی نور ($\phi\omega\varsigma$) گرفته شده است. فوتون‌ها ذرات یا دانه‌های نورند. «کوانتوم» های نور. اینشتین در مقاله‌اش می‌نویسد:

فکر می‌کنم مشاهدات مربوط به تابش جسم سیاه، پدیده فلورسنس، تولید تابش‌های کاتدی به وسیله نور فرابنفش و دیگر پدیده‌های مرتبط با انتشار و دگرگونی نور، با این فرض که انرژی نور به شکلی گسسته در فضا توزیع می‌شود، بیشتر قابل فهم‌اند. طبق این فرض، انرژی پرتو نوری که از یک منبع نقطه‌ای بیرون می‌آید، به شکلی پیوسته در فضا پیش نمی‌رود و منتشر نمی‌شود بلکه از تعداد محدودی از «کوانتوم‌های انرژی» تشکیل شده که: جای مشخصی در فضا دارند، بدون اینکه تجزیه شوند حرکت می‌کنند و فقط در قالب یک واحد کامل تولید و جذب می‌شوند. [۱]

این سطرهای ساده و روشن سند واقعی تولد نظریه کوانتوم است. به آن گزاره درخشان ابتدایی یعنی «فکر می‌کنم...» توجه کنید: این گزاره یادآور تردیدهای فارادی، تردیدهای نیوتن یا عدم اطمینان داروین در صفحات آغازین منشأ انواع است. نابغه حقیقی از حساسیت گام‌هایی که برمی‌دارد آگاه است و همواره تردید دارد...

رابطه روشنی میان پژوهش اینشتین در مورد حرکت براونی (که در فصل اول شرح داده شد) و پژوهش او در مورد کوانتوم‌های نور که هر دو در سال ۱۹۰۵ تکمیل شدند، وجود دارد. اینشتین ابتدا فرضیه اتمی یعنی ساختار دانه‌ای ماده را اثبات کرد. سپس این فرضیه را به نور هم بسط داد: نور هم باید ساختاری دانه‌ای داشته باشد.

همکاران اینشتین در ابتدا این ایده‌او را که نور باید از فوتون‌ها ساخته شده باشد، چیزی بیش از یک سرکشی جوانانه در نظر نگرفتند. همه او را به خاطر نظریه نسبیت تشویق می‌کردند اما فوتون‌ها را بیش از اندازه عجیب و بی‌ربط می‌دانستند. دانشمندان تازه متقاعد شده بودند که نور، موجی در میدان الکترومغناطیسی است: چگونه یک موج می‌تواند از ذرات ساخته شده باشد؟ مهم‌ترین فیزیکدانان آن روز آلمان در نامه‌ای که به وزارت علوم آلمان نوشتند پیشنهاد کردند که برای اینشتین یک کرسی استادی در دانشگاه برلین در نظر گرفته شود و گفتند که ذهن این مرد جوان چنان درخشان است که می‌توان برخی گزافه‌گویی‌هایش از جمله ایده فوتون‌ها را «بر او بخشید». چند سال بعد همین دانشمندان به خاطر کشف وجود فوتون‌ها جایزه نوبل را به او اهدا کردند. نور مانند رگبار ملایم تگرگ بر یک سطح می‌بارد. برای فهم اینکه نور چگونه همزمان هم می‌تواند یک موج الکترومغناطیسی باشد هم گروهی از فوتون‌ها، به ابداع کل نظریه مکانیک کوانتومی نیاز بود. اما خشت اول آن گذاشته شده بود: همه چیزها اساساً دانه‌بندی شده‌اند، از جمله نور.

نیلز، ورنر و پل

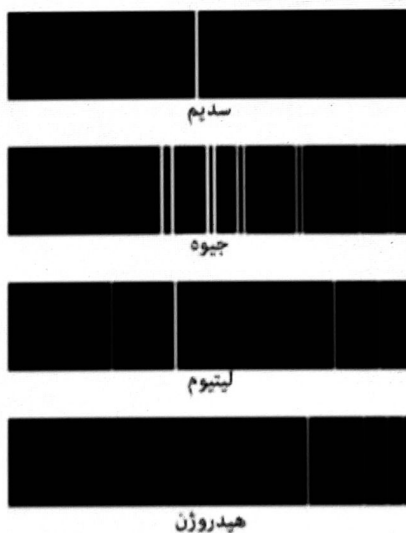
اگر پلانک پدر واقعی نظریه کوانتوم باشد، اینشتین مادری است که آن را به دنیا آورد و پرورش داد. اما همانند هر کودکی، این نظریه نیز چنان به راه خود رفت که اینشتین نتوانست او را به عنوان فرزندش به جا آورد.

نیلز بور^{۴۸} دانمارکی در دو دهه اول قرن بیستم مسئول جهت‌دهی به پرورش این نظریه بود. بور به مطالعه درباره ساختار اتم که از ابتدای قرن آغاز شده بود پرداخت. آزمایش‌ها نشان می‌داد که یک اتم شبیه یک منظومه شمسی کوچک است: جرم اتم در یک هسته مرکزی سنگین متمرکز شده است که الکترون‌هایی سبک دور آن می‌گردند، کمابیش مانند چرخش سیاره‌ها به دور خورشید. اما در این تصویر یک واقعیت ساده غایب بود: ماده رنگی است.



شکل ۱-۴ نیلز بور

نمک سفید است، فلفل سیاه و فلفل قرمز، قرمز. چرا؟ با مطالعه نوری که اتم‌ها می‌تابانند، مشخص شده بود که هر ماده رنگی مختص به خود دارد. از آنجا که رنگ، فرکانس نور است، پس نوری که مواد می‌تابانند فرکانسی ثابت دارد. مجموعه فرکانس‌هایی را که مشخصه یک ماده است، «طیف» آن ماده می‌نامیم. یک طیف مجموعه‌ای از خطوط نازک با رنگ‌های متفاوت است که در آن، نوری که از ماده تابیده می‌شود تجزیه شده است (انگار که با یک منشور آن را تجزیه کرده باشیم). طیف‌های چند عنصر در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. اوایل قرن بیستم در بسیاری از آزمایشگاه‌ها طیف‌های تعداد زیادی از مواد را مطالعه و فهرست کرده بودند اما هیچ‌کس نمی‌توانست توضیح دهد که چرا هر ماده این یا آن طیف خاص را دارد. چه چیز رنگ این خطوط را معین می‌کند؟



شکل ۲-۴ طیف‌های چند عنصر:
سدیم، جیوه، لیتیم، هیدروژن

رنگ، سرعت ارتعاش خطوط میدان فارادی است و این سرعت را ارتعاش بارهای الکتریکی ای معین می‌کنند که باعث انتشار نور می‌شوند. این بارها همان الکترون‌هایی هستند که در اتم در حال حرکت‌اند. بنابراین با مطالعه طیف‌ها می‌توان فهمید که الکترون‌ها چگونه دور هسته می‌چرخند. راه دیگر این است که طیف هر اتم را با محاسبه فرکانس‌های الکترون‌هایی که دور هسته اتم‌ها می‌چرخند، پیش‌بینی کنیم. گفتنش ساده است اما در عمل هیچ‌کس قادر به انجام آن نبود. در واقع، کل قضیه ناممکن به نظر می‌رسید چرا که در مکانیک

نیوتنی یک الکترون می‌تواند با هر سرعتی دور هسته بچرخد و در نتیجه نور را با هر فرکانسی منتشر کند. اما چرا نوری که یک اتم منتشرش کرده شامل تمام رنگ‌ها نیست و فقط از چند رنگ مشخص تشکیل شده است؟ چرا طیف یک اتم به جای اینکه پیوستاری از رنگ‌ها باشد تنها از چند خط جدا از هم تشکیل شده است؟ به زبان فنی، چرا طیف‌ها به جای اینکه پیوسته باشند، «گسسته» اند؟ به مدت چند دهه، فیزیکدانان پاسخی برای این سؤالات نداشتند.

بور با یک فرضیه عجیب، راه حلی موقتی برای این مسأله پیدا کرد. او دریافت که اگر فرض کنیم که انرژی الکترون‌های درون اتم‌ها مقدارهای مشخص درجه‌بندی شده داشته باشد - یعنی هر الکترون بتواند فقط مقدارهای مشخصی از انرژی را اختیار کند نه همه مقدارهای ممکن را - می‌توان همه چیز را توضیح داد. دقیقاً شبیه همان فرضی که پلانک و اینشتین درباره انرژی کوانتوم‌های نور داشتند. یک بار دیگر کلید حل معما دانه‌ای بودن است اما این بار نه دانه‌ای بودن انرژی نور، بلکه دانه‌ای بودن انرژی الکترون‌های درون اتم‌ها. کم‌کم معلوم می‌شود که دانه‌ای بودن چیزی است که در تمام طبیعت رایج است.

بور این فرض را پیش کشید که الکترون‌ها باید صرفاً فواصلی به خصوص و مشخص از هسته داشته باشند، یعنی فقط مدارهای ویژه‌ای داشته باشند که مقیاس‌شان به وسیله ثابت پلانک تعیین می‌شود. بنابراین، الکترون‌ها فقط می‌توانند از مداری با مقدار مجاز انرژی به مدار دیگر جهش کنند. این همان «جهش‌های کوانتومی» مشهور است. فرکانس گردش الکترون‌ها روی این مدارها، فرکانس نور منتشرشده را تعیین می‌کند و از آنجا که گردش فقط روی مدارهای مشخصی مجاز است، بنابراین نور فقط با فرکانس‌های مشخصی تابیده می‌شود.

این فرضیه همان «مدل اتمی» بور است که صدسالگی‌اش را در سال ۲۰۱۳ جشن گرفتند. با این فرضیه عجیب ولی ساده، بور نه تنها توانست طیف‌های تمام اتم‌ها را محاسبه کند بلکه حتی طیف‌هایی را پیش‌بینی کرد که تا آن هنگام هنوز مشاهده نشده بودند. موفقیت تجربی این مدل ساده شگفت‌انگیز است.

مشخص بود که باید حقیقتی در این فرض‌ها وجود داشته باشد حتی اگر با تمام علم معاصرشان درباره ماده و انرژی در تضاد باشند. اما چرا همواره فقط مدارهای مشخصی وجود دارند؟ گفتن اینکه الکترون‌ها «جهش می‌کنند» چه معنایی دارد؟ درخشان‌ترین ذهن‌های جوان قرن در مؤسسه بور در کپنهاگ گرد هم آمدند تا به این مجموعه به هم ریخته از رفتارهای غیرقابل فهم دنیای اتمی نظم دهند و نظریه‌ای منسجم بسازند. این پژوهش دشوار تا زمانی به درازا کشید که یک جوان آلمانی دروازه ورود به دنیای کوانتومی را کشف کرد.

ورنر هایزنبرگ^{۴۹} در بیست و پنج سالگی یعنی درست همان سنی که اینشتین سه مقاله بزرگش را نوشت، معادلات مکانیک کوانتومی را به دست آورد. ایده‌های او برای انجام این کار سرسام‌آور بود.



شکل ۴-۳ ورنر هایزنبرگ

یک شب در پارک پشت مؤسسه فیزیک کپنهاگ، ایده اصلی به او الهام می‌شود. ورنر جوان غرق در فکر مشغول قدم زدن در پارک است. این منطقه واقعاً تاریک است. مادر سال ۱۹۲۵ هستیم. تک‌وتوک چراغ‌هایی در خیابان هستند که اینجا و آنجا جزیره‌هایی از نور ساخته‌اند. ورطه‌های بزرگ تاریکی این جزیره‌های نور را از هم جدا کرده است. ناگهان هایزنبرگ فردی را می‌بیند که در حال عبور است. درواقع او عبور آن فرد را نمی‌بیند؛ فقط می‌بیند که آن فرد در نور چراغ پدیدار می‌شود و دوباره در دل تاریکی ناپدید می‌شود و دوباره زیر نور بعدی پدیدار می‌شود و باز هم در دل تاریکی ناپدید می‌شود و همین‌طور از یک جزیره نور به جزیره‌ای دیگر می‌رود تا در نهایت در دل شب محو می‌شود. هایزنبرگ با خود فکر می‌کند «مشخص است» که مرد واقعاً ناپدید و دوباره پدیدار نمی‌شود؛ می‌تواند در ذهنش مسیر مرد از یک چراغ تا چراغ دیگر را بازسازی کند. هرچه باشد آن مرد یک شیء مادی و بزرگ و سنگین است و اشیاء سنگین به سادگی ناپدید و دوباره پدیدار نمی‌شوند...

اوه! این اشیاء مادی بزرگ و سنگین ناپدید و پدیدار نمی‌شوند... اما الکترون‌ها چطور؟ نوری ذهنش را روشن می‌کند. چرا باید اشیاء کوچکی چون الکترون‌ها مانند اشیاء بزرگ رفتار کنند؟ چه می‌شد اگر الکترون‌ها می‌توانستند ناپدید و دوباره پدیدار شوند؟ چه می‌شود اگر اینها همان جهش‌های کوانتومی رازآمیزی باشند که به ساختار طیف‌های اتمی شکل می‌دهند؟ چه می‌شود اگر الکترون‌ها در زمان بین دو برهم کنش متوالی با دو چیز مختلف، به معنای دقیق کلمه هیچ کجا نباشند؟

چه می‌شود اگر الکترون فقط در زمان برهم کنش یعنی زمانی که با چیزی دیگر برخورد می‌کند خود را پدیدار کند و بین یک برهم کنش و برهم کنش بعدی، هیچ جای مشخصی نداشته باشد؟ چه می‌شود اگر فقط اشیاء مادی بزرگ نیازمند داشتن جا و مکانی مشخص باشند، اشیاء سنگین و بزرگ مانند مردی که چندی پیش مانند روحی در تاریکی از اینجا عبور کرد و در دل تاریکی شب محو شد...؟

فقط یک جوان در میانه دهه سوم زندگی خود می‌تواند گزاره‌هایی این چنین هذیانی را جدی بگیرد. باید بیست و چند ساله باشید تا باور کنید اینها می‌توانند به نظریه‌ای درباره جهان تبدیل شوند. و احتمالاً باید همین قدر جوان باشید که بهتر از هر کس دیگری ساختار ژرف طبیعت را برای اولین بار دریابید. هم اینشتین زمانی که دریافت زمان برای همه یکسان نمی‌گذرد در اواسط دهه بیست زندگی‌اش بود، هم هایزنبرگ در آن شب کپنهاگ. شاید دیگر درست نباشد که به شهودهایمان پس از سی سالگی اعتماد کنیم...

هایزنبرگ غرق در شور و هیجان به خانه بازمی‌گردد و مشغول محاسبات می‌شود. کمی بعد با نظریه‌ای پریشان‌کننده پیدایش می‌شود: توصیفی بنیادین از حرکت ذرات که در آن ذره‌ها نه با مکان‌شان در همه لحظات، بلکه فقط با مکان‌شان در لحظاتی خاص شناخته می‌شوند: لحظاتی که در آنها با چیزی دیگر برهم‌کنش می‌کنند.

این دومین سنگ‌بنای کوانتوم و دشوارترین کلید فهم آن است: وجه رابطه‌مند چیزها. الکترون‌ها همیشه وجود ندارند. آنها صرفاً زمانی وجود دارند که در حال برهم‌کنش‌اند و تنها جایی پدیدار می‌شوند که با چیز دیگری برخورد می‌کنند. جهش‌های کوانتومی از یک مدار به مداری دیگر، به واقعیت آنها شکل می‌دهد: یک الکترون ترکیبی است از جهش‌هایی بین یک برهم‌کنش و برهم‌کنشی دیگر. تا وقتی چیزی کاری به کارشان نداشته باشد، آنها هیچ‌جا نیستند. هایزنبرگ به جای مشخص کردن موقعیت و سرعت هر الکترون، جدولی از اعداد (ماتریس) درست کرد. این جدول‌ها را در هم ضرب و برهم تقسیم کرد تا برهم‌کنش‌های ممکن یک الکترون را نشان دهد. و نتایج انگار که از چرتکه جادویی یک جادوگر بیرون آمده باشند، دقیقاً با مشاهدات منطبق بودند. اینها اولین معادلات بنیادین مکانیک کوانتومی هستند. از اینجا به بعد، این معادلات فقط درست کار کرده‌اند و بس. اگرچه غیرممکن به نظر می‌رسد اما این معادلات تا امروز اشتباه نداشته‌اند. در نهایت یک جوان بیست و پنج ساله دیگر کاری را که هایزنبرگ شروع کرده بود ادامه داد، نظریه جدید را گرفت و به آن شکلی کلی و ریاضیاتی بخشید: پل آدین موریس دیراک^۵ انگلیسی که به عقیده خیلی‌ها بزرگ‌ترین فیزیکدان قرن بیستم است پس از اینشتین. دیراک به رغم اعتبار علمی‌اش، شهرتی بسیار کمتر از اینشتین دارد. این گمنام بودن، از یک سو به انتزاع پیچیده علمش و از سوی دیگر به شخصیت ناخوشایندش ارتباط داشت. در جمع ساکت و به شدت درون‌گرا و در بیان احساساتش ناتوان بود، اغلب نمی‌توانست چهره آشنایش را به یاد بیاورد، حتی از ادامه یک مکالمه معمولی ناتوان بود و سؤالات ساده را درست نمی‌فهمید، شبیه بیماران مبتلا به اوتیسم بود و شاید واقعاً در طیف مبتلایان به این وضع جا می‌گرفت.

یکی از همکارانش در یکی از سخنرانی‌هایش به او گفت «من این فرمول را نمی‌فهمم». دیراک پس از سکوتی کوتاه، بی‌توجه، به کارش ادامه داد. مدیر جلسه حرف او را قطع کرد و از او پرسید آیا نمی‌خواهد به سؤال مطرح شده جواب دهد. او کاملاً شگفت‌زده پاسخ داد: «سؤال؟ کدام سؤال؟ همکار من فقط یک ادعا را مطرح کرد.» دقیقاً همین قدر موشکاف و خرده‌گیر. تکبری در کار نبود: کسی که می‌توانست از دل طبیعت اسراری را کشف کند که هر کس دیگری را سردرگم می‌کرد، از فهم معانی ضمنی زبان ناتوان بود. هر عبارتی را فقط در معنای دقیق و تحت‌اللفظی آن می‌فهمید و نمی‌توانست معانی تلویحی آن را درک کند. [۲] با این حال، او بود که مکانیک کوانتومی را از مجموعه به هم ریخته‌ای از شهودها، معادلات نیمه‌کاره، مباحث مبهم متافیزیکی و معادلاتی که درست کار می‌کردند اما غیرقابل فهم بودند، به یک ساختار معمارانه کامل و شفاف و زیبا تبدیل کرد. زیبا اما بی‌اندازه انتزاعی.



شکل ۴-۲ پل دیراک

بور بزرگ درباره‌ او گفته است: «دیراک بین فیزیکدانان، ناب‌ترین روح را دارد.» آیا چشمان او در عکسش (شکل ۴-۴) چنین چیزی را نشان نمی‌دهد؟ فیزیک او مانند یک ترانه، شفاف و بکر است. در نگاه او جهان نه از اشیاء بلکه از یک ساختار انتزاعی ریاضی ساخته شده بود که نشان می‌داد اشیاء چگونه پدیدار می‌شوند و در زمان پدیدار شدن چگونه رفتار می‌کنند. اندیشه‌ او مواجهه‌ای جادویی میان منطق و شهود است. اینشتین که عمیقاً تحت تأثیر قرار گرفته بود درباره‌ او گفت: «دیراک برای من مانند معمایی حل نشده است. رسیدن به تعادل میان نبوغ و جنون، آن هم در این مسیر سرگیجه‌آور، کاری هولناک و پرخطر است.»

مکانیک کوانتومی دیراک همان نظریه‌ ریاضی‌ای است که امروزه هر مهندس و شیمی‌دان و زیست‌شناس مولکولی‌ای از آن استفاده

می‌کند. در این مکانیک، هر شیء با یک فضای انتزاعی^{۵۱} مشخص می‌شود و هیچ ویژگی منحصر به فردی ندارد مگر ویژگی‌های تغییرناپذیری مانند جرم. موقعیت مکانی، سرعت، اندازه حرکت زاویه‌ای، پتانسیل الکتریکی و مشخصات دیگری شیء تنها زمانی واقعیت می‌یابند که آن شیء با شیء دیگری برخورد -برهم کنش- می‌کند. نه تنها موقعیت مکانی یک شیء (همان طور که هایزنبرگ فهمیده بود) بلکه تمام ویژگی‌های متغیر آن از یک برهم کنش تا برهم کنش بعدی نامعین و غیرقابل توصیف‌اند. وجه رابطه مند نظریه، فراگیر و جهان شمول می‌شود.

زمانی که یک شیء در خلال برهم کنشش با اشیاء دیگر ناگهان پدیدار می‌شود، متغیرهای فیزیکی‌اش (سرعت، انرژی، اندازه حرکت، اندازه حرکت زاویه‌ای) نمی‌توانند هر مقداری داشته باشند. دیراک دستورالعملی عمومی برای محاسبه مقدارهایی که یک متغیر مجاز به داشتن آنهاست تهیه کرد.^{۵۲} این مقدارها شبیه به طیف‌های نوری هستند که اتم‌ها منتشر می‌کنند. امروزه مجموعه مقدارهای مجاز یک متغیر را به خاطر شباهتش به طیف‌هایی که نور عناصر به آنها تجزیه می‌شود، «طیف» یک متغیر می‌نامند. مثلاً شعاع مدارهایی که یک الکترون در آنها به گرد هسته می‌گردد، فقط می‌تواند مقدارهای مشخصی داشته باشد -همان‌ها که بور فرض کرده بود- و این مقدارها «طیف شعاع» آن الکترون را شکل می‌دهند.

این نظریه همچنین پیش‌بینی می‌کند که کدام مقدار طیف در برهم کنش بعدی پدیدار خواهد شد. البته این پیش‌بینی در قالب احتمالات است. ما نمی‌دانیم که یک الکترون دقیقاً کجا پدیدار خواهد شد اما می‌توانیم احتمال پدیدار شدنش در اینجا یا آنجا را محاسبه کنیم. این تفاوت اصلی این نظریه با نظریه نیوتن است: در نظریه نیوتن می‌توان آینده را با قطعیت پیش‌بینی کرد. مکانیک کوانتومی احتمال را در کنه تحولات یک شیء قرار می‌دهد. عدم قطعیت سومین سنگ بنای مکانیک کوانتوم است: کشف این موضوع که در مقیاس اتمی، شانس تعیین‌کننده است. در حالی که فیزیک نیوتن اجازه می‌دهد آینده را به شرط داشتن اطلاعات کافی راجع به داده‌های اولیه و توان محاسبه دقیقاً پیش‌بینی کنیم، با مکانیک کوانتوم صرفاً می‌توانیم احتمال وقوع یک پدیده را پیش‌بینی کنیم. این عدم قطعیت در مقیاس کوچک، در ذات طبیعت است. یک الکترون مجبور نیست که بر حسب طبیعتش به چپ یا راست برود بلکه این کار را از سر شانس و تصادف انجام می‌دهد. قطعیت ظاهری جهان در مقیاس بزرگ تنها نتیجه این است که حالات تصادفی در مقیاس کوچک یکدیگر را خنثی و متعادل می‌کنند و صرفاً تغییراتی کوچک‌تر از ادراک هرروزه ما به جا می‌گذارند.

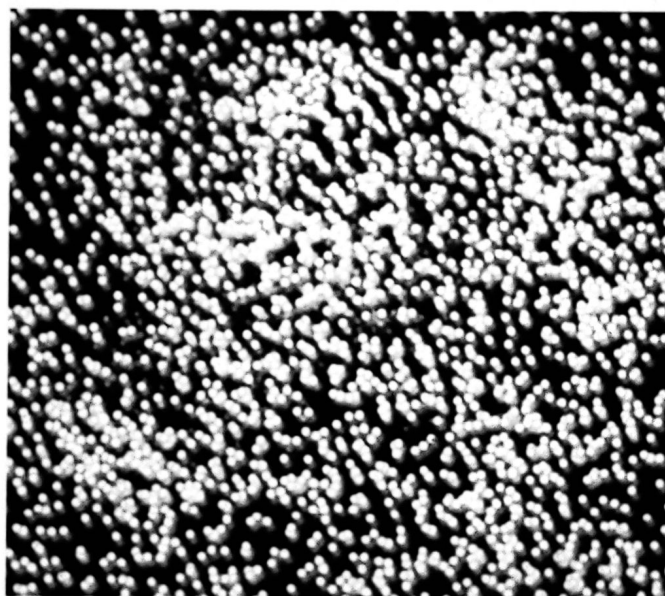
مکانیک کوانتومی دیراک انجام دو کار دیگر را هم برای ما ممکن می‌کند. اول اینکه محاسبه کنیم که یک متغیر فیزیکی ممکن است کدام مقدار را برگزیند. این کار «محاسبه طیف یک متغیر» نامیده می‌شود. این محاسبه ماهیت دانه‌ای چیزها را نشان می‌دهد. وقتی یک شیء

(یک اتم، میدان الکترومغناطیسی، مولکول، آونگ، سنگ، ستاره و مانند اینها) با چیزی دیگر برهم کنش می‌کند، مقادیری که محاسبه می‌شوند مقدارهایی هستند که متغیرهای این شیء می‌توانند در این برهم کنش اختیار کنند (رابطه‌مندی). دوم اینکه احتمال ظهور هر کدام از مقدارهای یک متغیر در برهم کنش بعدی را محاسبه کنیم. ما این کار را «محاسبه دامنۀ انتقال» می‌نامیم. احتمال، نشان‌دهندهٔ سومین مشخصهٔ این نظریه است: عدم قطعیت یعنی این واقعیت که این نظریه پیش‌بینی‌های قطعی انجام نخواهد داد و پیش‌بینی‌ها صرفاً احتمالی هستند.

مکانیک کوانتومی دیراک چنین چیزی است: دستورالعملی برای محاسبهٔ طیف‌های متغیرها و محاسبهٔ احتمال پدیدارشدن این یا آن مقدار در یک طیف در هنگام برهم کنش. همین. نظریه نمی‌گوید که چه اتفاقی بین یک برهم کنش و برهم کنش بعدی می‌افتد چرا که چنین چیزی وجود ندارد.

احتمال یافتن یک الکترون یا هر ذرهٔ دیگری در این یا آن نقطه را ابری پراکنده تصور کنید: در قسمت‌هایی که ابر متراکم‌تر است احتمال دیده شدن ذره بیشتر است. گاهی بهتر است تصور کنیم که این ابر واقعاً وجود دارد. مثلاً اگر به ابری نگاه کنیم که نمایانگر چرخش یک الکترون دور هسته‌اش است، به ما نشان خواهد داد که احتمال پدیدارشدن الکترون در کجاها بیشتر است. احتمالاً شما در مدرسه با این چیزها آشنا شده‌اید: اینها «اوربیتال» های اتمی هستند.^{۵۲}

خیلی زود معلوم شد که این نظریه فوق‌العاده کارآمد است. ما امروزه به لطف مکانیک کوانتوم کامپیوتر می‌سازیم و در زمینهٔ شیمی مولکولی و زیست‌شناسی و لیزرها و نیمه‌رساناها پیشرفت کرده‌ایم. تا چند دهه، هر روز برای فیزیکدان‌ها روز عید بود: برای هر مسئلهٔ جدیدی پاسخی همواره درست از دل معادلات مکانیک کوانتوم استخراج می‌شد. اشاره به یک مثال کافی است.



شکل ۴-۵ نور یک موج در یک میدان است اما ساختاری دانه‌ای هم دارد.

اشیاء اطراف ما از هزاران مادهٔ متفاوت تشکیل شده‌اند. طی قرن‌های نوزدهم و بیستم، شیمی‌دان‌ها متوجه شدند که تمام این مواد متفاوت از ترکیب تعداد نسبتاً کمی (کمتر از صد تا) از عناصر تشکیل شده‌اند: هیدروژن، هلیوم، اکسیژن و همین‌طور تا اورانیوم. مندلیف این عناصر را بر حسب وزن‌شان در جدول تناوبی معروفش چید و این همان جدولی است که روی دیوار بسیاری از کلاس‌ها نصب شده و ویژگی‌های تمام عناصری را که نه تنها زمین بلکه کل کهکشان‌ها از ترکیب آنها ساخته شده، خلاصه کرده است. چرا فقط این چند عنصر خاص؟ ساختار تناوبی جدول را چگونه می‌توان توضیح داد؟ چرا هر عنصر این ویژگی‌های مشخص را دارد نه ویژگی‌های دیگری را؟ چرا مثلاً بعضی عناصر به راحتی با هم ترکیب می‌شوند و برخی دیگر به سختی؟ راز ساختار مرموز جدول مندلیف چیست؟ حال معادلهٔ مکانیک کوانتوم را که شکل اوربیتال‌های یک الکترون را معین می‌کند، در نظر بگیرید. این معادله تعداد مشخصی جواب دارد و جواب‌ها دقیقاً با هیدروژن، هلیوم، اکسیژن و عناصر دیگر منطبق‌اند! ساختار جدول تناوبی مندلیف دقیقاً شبیه مجموعهٔ جواب‌ها است.

ویژگی‌های عناصر و تمام چیزهای دیگر از جواب معادله پیروی می‌کند. مکانیک کوانتومی راز ساختار جدول عناصر را کاملاً فاش کرده است.

رؤیای باستانی فیثاغورس و افلاطون برآورده شده است: توضیح تمام چیزها در جهان فقط با یک فرمول. پیچیدگی بی‌انتهای شیمی صرفاً با جواب یک معادله ساده شده است! و این فقط یکی از کاربردهای مکانیک کوانتوم است.

میدان‌ها و ذرات یک چیز هستند

دیراک کمی پس از تکمیل صورت‌بندی مکانیک کوانتوم دریافت که این نظریه می‌تواند مستقیماً در مورد میدان‌هایی مانند میدان الکترومغناطیسی به کار رود و همچنین با نظریه نسبیت خاص سازگار شود (سازگار کردن این نظریه با نسبیت عام بسیار دشوارتر و موضوع اصلی این کتاب است). دیراک در حین انجام این کار، ساده‌سازی نهان و ژرفی را در توصیف ما از جهان کشف کرد: یگانگی مفهوم ذره‌ای که نیوتن به کار می‌برد و مفهوم میدانی که فارادی کشف کرده بود.

آن ابراحتمالی که یک الکترون را بین دو برهم‌کنش متوالی در بر گرفته، بسیار شبیه یک میدان است. میدان‌های ماکسول و فارادی هم به‌نوبه خود از ذرات ساخته شده‌اند: یعنی از فوتون‌ها. همان‌طور که ذرات دقیقاً مانند میدان‌ها در فضا پراکنده‌اند، میدان‌ها هم مانند ذرات وارد برهم‌کنش می‌شوند. مفاهیم میدان‌ها و ذرات که ماکسول و فارادی آنها را جدا کرده بودند در مکانیک کوانتومی به هم می‌پیوندند. نحوه پیوستن این دو مفهوم در نظریه کوانتوم بسیار باشکوه و زیباست: معادله دیراک مقدارهایی را که یک متغیر می‌تواند داشته باشد معین می‌کند. اگر این معادله را برای انرژی خطوط میدان فارادی به کار ببریم به ما خواهد گفت که این انرژی نمی‌تواند هر مقداری داشته باشد بلکه فقط مقدارهایی مشخص خواهد داشت. از آنجا که انرژی میدان الکترومغناطیسی تنها می‌تواند مقادیر مشخصی داشته باشد، این میدان مانند مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی رفتار خواهد کرد. این بسته‌ها دقیقاً همان کوانتوم‌های انرژی‌ای هستند که پلانک و اینشتین سی سال قبل کشف کرده بودند. اینجا حلقه بسته و داستان کامل می‌شود. معادله‌ای که دیراک نوشته است شهود اینشتین و پلانک یعنی ماهیت دانه‌ای و ذره‌ای نور را توضیح می‌دهد.

موج‌های الکترومغناطیسی، ارتعاشات خطوط فارادی هستند. در مقیاسی کوچک، آنها گروه‌هایی از فوتون‌ها هم هستند. وقتی مانند مورد اثر فوتوالکتریک با چیز دیگری وارد برهم‌کنش می‌شوند، خود را به شکل ذرات پدیدار می‌کنند: نور با قطره‌هایی جدا جدا، با فوتون‌ها، بر چشم ما می‌بارد. فوتون‌ها کوانتوم‌های میدان الکترومغناطیسی‌اند.

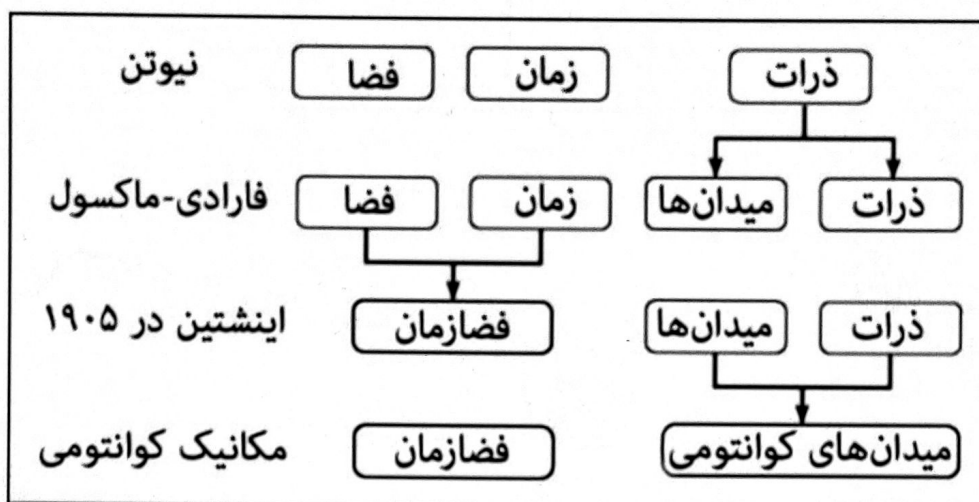
اما الکترون‌ها و تمام ذرات دیگری هم که جهان از آنها ساخته شده، کوانتوم‌های یک میدان هستند. یک «میدان کوانتومی» شبیه میدان ماکسول و فارادی که نتیجه دانه‌ای بودن و احتمال کوانتومی است. دیراک معادلاتی برای میدان الکترون‌ها و دیگر ذرات بنیادین نوشت.^{۵۴} تفاوت قاطعی که فارادی میان ذرات و میدان‌ها قائل بود کم‌کم محو شد.

فرم کلی مکانیک کوانتومی که با نسبیت خاص سازگار است «نظریه میدان کوانتومی» نامیده می‌شود و امروزه مبنای فیزیک ذرات است. دقیقاً همان‌طور که فوتون‌ها کوانتوم‌های نورند، ذرات هم کوانتوم‌های یک میدان‌اند. تمام میدان‌ها در برهم‌کنش‌هایشان رفتاری دانه‌ای از خود نشان می‌دهند.

فهرست میدان‌های بنیادی در طول قرن بیستم بارها تغییر کرد و به روز شد و امروزه ما نظریه‌ای به نام مدل استاندارد ذرات بنیادین داریم که تقریباً هر چیز قابل مشاهده به غیر از گرانش^{۵۵} را بر مبنای نظریه میدان کوانتومی توضیح می‌دهد. فیزیکدانان در بخش بزرگی از قرن گذشته مشغول بسط و گسترش این نظریه بودند: یک سفر اکتشافی عالی و ماجراجویانه. من درباره مدل استاندارد حرفی نخواهم زد: آنچه می‌خواهم درباره آن سخن بگویم گرانش کوانتومی است. مدل استاندارد در دهه هفتاد قرن بیستم تکمیل شد. تقریباً پانزده میدان وجود دارد که کوانتوم‌هایشان ذرات بنیادی هستند (الکترون‌ها، کوارک‌ها، مون‌ها، نوترینوها، ذره هیگز و چندتای دیگر)؛ به علاوه چند میدان دیگر مانند میدان الکترومغناطیسی که نیروهای الکترومغناطیسی و دیگر نیروهایی را که در مقیاس اتمی تأثیر گذارند و کوانتوم‌هایی شبیه به فوتون‌ها دارند، توصیف می‌کنند.

مدل استاندارد به خاطر ساختار وصله‌پینه‌ای‌اش که با شفافیت و سادگی نسبیت عام و معادلات ماکسول یا دیراک بسیار متفاوت بود، در ابتدا چندان جدی گرفته نمی‌شد. اما برخلاف انتظارات تمام پیش‌بینی‌هایش درست از آب درآمد. بیش از سی سال، هریک از آزمایش‌های فیزیک ذرات تأیید دوباره مدل استاندارد بود. آخرین تأیید، کشف ذره هیگز بود که در سال ۲۰۱۳ موجی از هیجان برانگیخت. میدان هیگز که برای منسجم شدن نظریه به آن افزوده شده بود، قدری مصنوعی به نظر می‌رسید تا آنکه کوانتوم این میدان یعنی ذره هیگز واقعاً مشاهده شد و معلوم شد دقیقاً همان ویژگی‌هایی را دارد که مدل استاندارد پیش‌بینی کرده است.^{۵۶} (این واقعه که این ذره را «ذره خدا»

نامیدند به قدری احمقانه بود که ارزش ندارد به آن پردازیم). خلاصه اینکه مدل استاندارد علی‌رغم نام بی‌دلیل فروتنانه‌اش یک شاهکار است.



شکل ۴-۶ جهان از چه چیز ساخته شده است؟

امروزه مکانیک کوانتومی با ذره/میدان‌هایش، توصیفی به شدت کارآمد از طبیعت را برای ما فراهم می‌کند. جهان نه از ذرات و میدان‌ها، بلکه از یک موجودیت یگانه تشکیل شده است: میدان کوانتومی. به جای ذراتی که با گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند تنها میدان‌هایی کوانتومی داریم که رویدادهای بنیادین‌شان در فضازمان رخ می‌دهد. جهان عجیب و غریب اما ساده است. (شکل ۴-۶)

کوانتوم‌ها ۱: اطلاعات محدود است

زمان آن فرا رسیده است که به نتیجه‌گیری پردازیم و ببینیم مکانیک کوانتومی دقیقاً راجع به جهان به ما چه می‌گوید. چنین کاری دشوار است چرا که مکانیک کوانتومی به لحاظ مفهومی چندان واضح نیست و بر سر معنای حقیقی آن هنوز بحث است. اما این کار برای فهم واضح‌تر این نظریه و پیشروی در این کتاب لازم است. من معتقدم که مکانیک کوانتومی سه وجه از ماهیت چیزها را آشکار کرده است: دانه‌ای بودن و عدم قطعیت و ساختار رابطه‌مند جهان. بیایید هر یک را دقیق‌تر بررسی کنیم.

نخست وجود یک دانه‌بندی بنیادین در طبیعت است. دانه‌ای بودن ماده و نور اساس مکانیک کوانتومی است. البته این همان ساختار دانه‌ای مورد نظر دموکریتوس نیست. در نگاه دموکریتوس اتم‌ها شبیه سنگ‌ریزه‌اند در حالی که در مکانیک کوانتومی ذرات ناپدید و دوباره پدیدار می‌شوند. اما به هر حال این ایده که جهان اساساً دانه‌ای است در اتم‌گرایی دوران باستان ریشه دارد و مکانیک کوانتومی با پشتوانه قرن‌ها آزمایش و توانایی فوق‌العاده‌اش در انجام پیش‌بینی‌های درست، تصدیق حقیقی بصیرت فیلسوف بزرگ آبدرا درباره ماهیت چیزهاست.

فرض کنید چیزی را در یک سیستم فیزیکی اندازه‌گیری می‌کنیم و می‌بینیم سیستم در موقعیتی خاص قرار دارد. مثلاً دانه‌نوسان یک آونگ را بررسی می‌کنیم و می‌بینیم مقدار مشخصی دارد. فرض کنید بین پنج تا شش سانتیمتر (هیچ اندازه‌گیری‌ای در فیزیک قطعی نیست). پیش از مکانیک کوانتومی اعتقاد ما این بود که چون تعداد اعداد ممکن بین پنج و شش نامحدود است (مثلاً ۵.۱ یا ۵.۱۰۱ یا ۵.۱۰۰۱ الی آخر) پس تعداد موقعیت‌هایی که آونگ می‌تواند در آن قرار بگیرد هم نامحدود است: در نتیجه، نادانسته‌های ما در مورد موقعیت آونگ نامحدود است.

اما مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید که تعداد اعداد ممکن بین پنج و شش محدود است و بنابراین، اطلاعات نادانسته ما در مورد آونگ هم محدود است.

این مسأله در مورد همه چیز صادق است.^{۵۷} بنابراین، اولین معنای مکانیک کوانتومی این است که میزان اطلاعات ممکن در مورد یک سیستم همواره محدود است: تعداد موقعیت‌های متمایزی که یک سیستم می‌تواند در آنها قرار بگیرد محدود است. این محدود کردن امر نامحدود - دانه‌ای بودن طبیعت که بصیرت دموکریتوس بود - اولین وجه اصلی نظریه کوانتوم است. مقیاس بنیادی این دانه‌ای بودن به

اندازه ثابت پلانک است.

کوانتوم‌ها ۲: عدم قطعیت

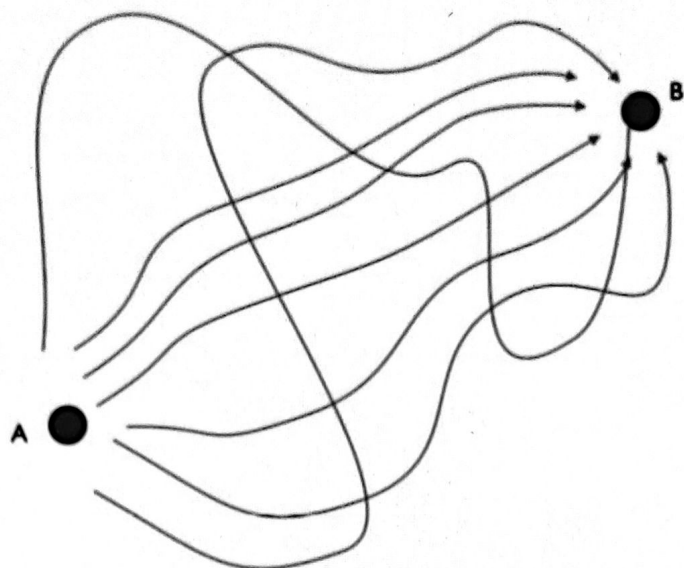
جهان توالی رویدادهای دانه‌ای کوانتوم است. این رویدادها گسسته و دانه‌ای و منفردند. برهم‌کنش‌های مجزای یک سیستم فیزیکی با سیستمی دیگرند. یک الکترون یا کوانتوم یک میدان یا یک فوتون، یک مسیر مشخص را در فضا دنبال نمی‌کنند. آنها هنگام برخورد با چیزی دیگر، در یک مکان مقدر و یک زمان مقرر پدیدار می‌شوند. چه زمانی و در کجا پدیدار می‌شوند؟ هیچ راهی برای فهم دقیق این مسأله وجود ندارد. مکانیک کوانتوم عدم قطعیتی بنیادین را در دل هستی کشف کرده است. آینده اساساً غیرقابل پیش‌بینی است. این دومین درس اساسی مکانیک کوانتومی است.

در جهانی که مکانیک کوانتومی توصیف می‌کند، به دلیل عدم قطعیت، چیزها مدام در معرض تغییرات تصادفی‌اند. تمام متغیرها پیوسته در حال نوسان‌اند انگار که در کوچک‌ترین مقیاس هستی همه چیز مدام در حال لرزش است. از آنجا که مقیاس این نوسان‌ها که همه‌جا حاضر هستند، بسیار کوچک است، ما نمی‌توانیم آنها را ببینیم. تا زمانی که نگاه ما به اجسام رؤیت‌پذیر - جهان بزرگ مقیاس - باشد نمی‌توانیم این نوسان‌ها را ببینیم. اگر به یک سنگ نگاه کنیم ثابت و ساکن به نظر می‌رسد. اما اگر می‌توانستیم اتم‌هایش را مشاهده کنیم، می‌دیدیم که آنها با ارتعاشی بی‌وقفه مدام به این سو و آن سو می‌پرند. مکانیک کوانتومی به ما نشان می‌دهد که هرچه جزئی‌تر به جهان بنگریم درمی‌یابیم که جهان کمتر ثابت و ساکن است. جهان از سنگ‌ریزه‌های کوچک ساخته نشده است. این جهان، جهانی است پر از لرزش‌ها و ارتعاشات پیوسته و توالی مداوم رویدادهای کوچک و ریزمقیاس.

اتم‌گرایی دوران باستان حتی به این وجه از علم مدرن یعنی آشکارشدن قوانین احتمالات در سطوح ژرف جهان هم ادای سهم کرده است. دموکریتوس هم مانند نیوتن معتقد بود که حرکات اتم‌ها جبراً نتیجه برخورد‌های آنهاست. اما جانشین او، اپیکور، جبرگرایی استاد خود را تصحیح و مفهوم عدم قطعیت را به اتم‌گرایی وارد کرد دقیقاً به همان شکل که هایزنبرگ عدم قطعیت را وارد جبرگرایی نیوتن کرد. از نظر اپیکور اتم‌ها می‌توانند تصادفی و شانسی از مسیر خود منحرف شوند. لوکرتیوس به زیبایی این مسأله را توضیح می‌دهد: این انحراف «در زمانی نامعلوم... در مکانی نامعلوم» رخ می‌دهد. [۳] در زمانی تقریبی، در مکانی تقریبی. همین تصادفی‌بودن و ظهور احتمال در سطح بنیادین هستی، دومین کشف اساسی مکانیک کوانتومی درباره جهان است.

اما چقدر احتمال دارد که یک الکترون مستقر در نقطه A پس از زمانی مشخص در نقطه B پدیدار شود؟

در دهه پنجاه قرن بیستم، ریچارد فاینمن که قبلاً به او اشاره کرده بودم راه‌حلی بدیع برای محاسبه این احتمال ارائه کرد: تمام مسیرهای ممکن از A تا B یعنی تمام مسیرهای ممکن را که الکترون می‌تواند طی کند (مسیر مستقیم، منحنی، زیگزاگی و...) در نظر بگیرید. هر مسیر با یک عدد مشخص می‌شود. احتمال ظهور الکترون در B برابر است با جمع تمام این اعداد. جزئیات این محاسبه مهم نیست: مهم این است که بدانیم تمام مسیرهای A به B در این محاسبه شرکت دارند: انگار که الکترون به جای اینکه مستقیم از A به B برود، «تمام مسیرهای ممکن» را طی می‌کند یا به عبارت دیگر الکترون در یک ابرپخش می‌شود: ابری که به طرزی مرموز در نقطه B یعنی نقطه‌ای که در آن الکترون دوباره با چیزی دیگر برخورد خواهد کرد، همگرا می‌شود. (شکل ۴-۷)



شکل ۷-۴ یک الکترون به جای حرکت از A به B، طوری رفتاری می‌کند که انگار در حال طی کردن تمام مسیرهای ممکن است. این تکنیک محاسبه احتمال یک رویداد کوانتومی، «جمع‌زدن تمام مسیرهای فاینمن» نام دارد ^{۵۸} و خواهیم دید که چه نقشی در گرانش کوانتومی ایفا خواهد کرد.

کوانتوم‌ها ۳: واقعیت رابطه‌ای است

سومین کشف مکانیک کوانتومی درباره جهان، عمیق‌ترین و دشوارترین کشف مکانیک کوانتومی است و اثری از آن در اتم‌گرایی دوران باستان وجود ندارد.

نظریه کوانتوم چیزها را آن گونه که هستند توصیف نمی‌کند: چیزها بر حسب چگونگی رخ دادن شان و برهم کنش شان با چیزهای دیگر توصیف می‌شوند. نظریه به جای اینکه توضیح دهد که یک ذره کجا قرار گرفته، توضیح می‌دهد که ذره چگونه خود را بر چیزهای دیگر پدیدار می‌کند. جهان چیزهای موجود، به قلمروی از برهم کنش‌های ممکن فرو کاسته می‌شود. واقعیت به برهم کنش و رابطه فرو کاسته می‌شود [۴].

به بیانی دقیق، این همان بسط و گسترش نسبیست است اما بسط و گسترشی کاملاً رادیکال. ارسطو اولین کسی بود که تأکید کرد ما فقط می‌توانیم سرعت را به شکلی نسبی درک کنیم. مثلاً اگر روی یک کشتی باشیم سرعتمان نسبت به عرشه کشتی و اگر روی زمین باشیم، نسبت به سطح زمین سنجیده می‌شود. گالیله دریافت که ما حرکت زمین به دور خورشید را به همین دلیل احساس نمی‌کنیم. سرعت یک ویژگی مختص به خود شیء نیست: ویژگی حرکت یک شیء نسبت به شیئی دیگر است. اینشتین این مفهوم نسبیت را درباره زمان به کار برد: فقط وقتی می‌توانیم بگوییم دو رویداد با هم همزمان اند که نسبت به یک حرکت مشخص سنجیده شوند (یادداشت ۲ فصل ۳ را ببینید). مکانیک کوانتوم این نسبیت را به شکلی رادیکال گسترش داد: کل جنبه‌های متغیر یک شیء تنها در رابطه با اشیاء دیگر وجود دارند. طبیعت جهان را به شکل مجموعه‌ای از برهم کنش‌ها ترسیم می‌کند.

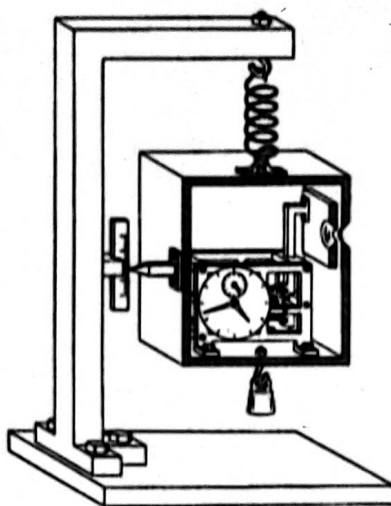
در جهانی که مکانیک کوانتومی توصیف می‌کند هیچ چیز واقعی نیست مگر روابط بین سیستم‌های فیزیکی. این اشیاء نیستند که وارد رابطه می‌شوند، برعکس، این روابط هستند که مفهوم «شیء» را می‌سازند. جهان مکانیک کوانتومی جهان اشیاء نیست، جهان رویدادهاست. وقوع رویدادهای اولیه باعث ساخته شدن اشیاء می‌شود: همان طور که نلسون گودمن فیلسوف در عبارتی زیبا در دهه پنجاه نوشت: «یک شیء فرایندی یکنواخت است». یک سنگ، لرزشی از کوانتوم‌ها است که مدتی خود را به عنوان سنگ حفظ کرده است؛ دقیقاً مثل موج دریا که پیش از بازگشتن به دریا، مدتی خود را به عنوان موج حفظ می‌کند.

یک موج که بر سطح آب حرکت می‌کند بدون اینکه هیچ قطره آب مشخصی را با خود حمل کند، چیست؟ یک موج یک شیء نیست، به این معنا که از ماده‌ای که همه جا همراهش باشد ساخته نشده است. اتم‌های بدن ما هم به همین صورت مدام به بدن ما می‌پیوندند و از آن جدا می‌شوند. ما مثل موج‌ها و مثل تمام اشیاء دیگر جریانی از رویدادها هستیم: ما فرایندهایی هستیم که تا مدت کوتاهی یکنواخت می‌مانیم...

مکانیک کوانتومی توصیف اشیاء نیست: توصیف فرایندها و رویدادهایی است که این فرایندها را به هم متصل می‌کنند. خلاصه اینکه مکانیک کوانتومی کشف سه مشخصه هستی است:

- دانه‌ای بودن (شکل ۴-۸). اطلاعات فیزیکی موجود در یک سیستم، در هر موقعیتی متناهی است و با ثابت پلانک محدود می‌شود.
- عدم قطعیت. آینده را نمی‌توان دقیقاً بر حسب گذشته تعیین کرد. حتی ثابت‌ترین قواعد موجود در جهان هم از آمار به دست آمده‌اند.
- رابطه‌مندی. رویدادهای طبیعت همواره حاصل برهم کنش‌اند. تمام رویدادهای یک سیستم فیزیکی، در رابطه با سیستم فیزیکی دیگر رخ می‌دهند.

مکانیک کوانتومی به ما یاد می‌دهد که جهان را بر حسب «فرایندها» بفهمیم نه بر حسب «اشیائی» که اینجا و آنجا قرار گرفته‌اند. یک فرایند، عبور از یک برهم کنش به برهم کنشی دیگر است. ویژگی‌های اشیاء فقط در لحظه برهم کنش، یعنی در لبه فرایندها و تنها در رابطه با اشیاء دیگر، خود را به شکلی دانه‌ای آشکار می‌کنند. پیش‌بینی آنها به طرزی قطعی ممکن نیست. تنها راه، پیش‌بینی احتمالی آنهاست. این شیرجه عمیق بور و هایزنبرگ و دیراک بود به عمق ماهیت اشیاء.



شکل ۴-۸ تصویری که بور از «جعبه نور» در آزمایش ذهنی اینشتین کشیده است.

اما آیا ما واقعاً می‌فهمیم؟

مکانیک کوانتومی حقیقتاً یک شاهکار کارآمد است. اما ای خواننده عزیز... آیا مطمئنی تمام آنچه را مکانیک کوانتومی برای ما آشکار می‌کند، فهمیده‌ای؟ یک الکترون وقتی برهم کنش نمی‌کند، هیچ جایی نیست... اممممم... اشیاء فقط زمانی وجود دارند که از یک برهم کنش به برهم کنش بعدی می‌جهند... خوب... آیا تمام اینها کمی مهمل نیست؟ به نظر اینشتین که مهمل بود.

اینشتین از یک طرف، هایزنبرگ و دیراک را برای نامزدی جایزه نوبل پیشنهاد داد، چون قبول داشت که آنها چیزی بنیادی درباره جهان کشف کرده‌اند. از طرف دیگر، از هر فرصتی استفاده می‌کرد تا یادآوری کند که کشف آنها هیچ معنای محصلی ندارد.

شیرهای جوان گروه کپنهاگ ناراحت بودند: چگونه ممکن است اینشتین چنین کاری کند؟ پدر معنوی‌شان، مردی که شجاعت اندیشیدن به چیزهایی را داشت که اندیشیدن به آنها غیرممکن بود اکنون عقب‌نشینی کرده و از این جهش تازه به عمق امور نادانسته ترسیده بود - آن‌هم جهشی که خودش پایه‌ریزی کرده بود. چگونه همان اینشتینی که به ما یاد داد زمان جهان شمول نیست و فضا کش می‌آید، امروز می‌تواند بگوید که ممکن نیست جهان این قدرها هم عجیب باشد؟

نیلز بور ایده‌های تازه را صبورانه برای اینشتین توضیح می‌داد. اینشتین آنها را رد می‌کرد. بور همیشه در نهایت پاسخی به ردیه‌های اینشتین پیدا می‌کرد. این مکالمه سال‌ها از طریق سخنرانی‌ها، نامه‌ها، مقاله‌ها و... ادامه داشت. اینشتین برای اینکه نشان دهد این ایده‌ها متناقض‌اند، آزمایش‌هایی ذهنی طراحی می‌کرد: «جعبه‌ای پر از نور را فرض کنید که در یک لحظه فوتونی اجازه خروج از آن را می‌یابد...» و این گونه یکی از معروف‌ترین نمونه‌های این مکالمات آغاز شد (شکل ۴-۸).^{۵۹}

در خلال این تبادل ایده‌ها، هر دو نابغه مجبور شدند عقب‌نشینی کنند و ایده‌های خود را تغییر دهند. اینشتین مجبور شد بپذیرد که تناقضی در این ایده‌های جدید وجود ندارد و بور هم باید می‌پذیرفت که همه چیز آنقدر که او می‌پنداشت ساده و روشن نیست. اینشتین نمی‌خواست از نقطه‌ای که برای او حیاتی بود کوتاه بیاید: اینکه واقعیتی عینی وجود دارد فارغ از اینکه چه چیز با چه چیز برهم کنش می‌کند. او از پذیرش جنبه رابطه‌ای این نظریه یعنی این ایده که چیزها تنها خودشان را در برهم کنش‌ها آشکار می‌کنند سر باز زد. بور هم نمی‌خواست بپذیرد که این راه به‌غایت تازه شناخت واقعیت نامعتبر است. در نهایت اینشتین پذیرفت که این نظریه جهشی بزرگ در فهم ما از جهان است و همچنین پذیرفت که این نظریه متناقض نیست. اما همچنان معتقد بود که چیزها آنقدرها هم که این نظریه می‌گوید نمی‌توانند عجیب و غریب باشند و باید توضیحی عقلانی‌تر و منطقی‌تر پشت این نظریه وجود داشته باشد.

یک قرن گذشته و ما هنوز در همان نقطه‌ایم. ریچارد فاینمنی که بهتر از هر کس دیگر می‌دانست چگونه با این نظریه کار کند، نوشته است: «فکر می‌کنم بتوانم بگویم که هیچ کس واقعاً مکانیک کوانتومی را نمی‌فهمد».

معادلات نظریه و نتایج آنها هرروزه در بسیاری از زمینه‌ها به کار گرفته می‌شوند: فیزیک، مهندسی، شیمی، زیست‌شناسی. اما همچنان مرموز مانده‌اند: آنها سیستم‌های فیزیکی را توضیح نمی‌دهند. تنها توضیح می‌دهند که سیستم‌ها چگونه با هم برهم‌کنش می‌کنند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. این چه معنایی دارد؟

فیزیکدان‌ها و فلاسفه مدام از خود می‌پرسند که معنی واقعی این نظریه چه می‌تواند باشد و در سال‌های اخیر مقالات و کنفرانس‌های زیادی به این مسأله پرداخته‌اند. یک قرن پس از پیدایشش، نظریه کوانتوم چیست؟ شیرجه‌ای عالی به عمق ماهیت چیزها؟ یک اشتباه که تصادفاً درست جواب می‌دهد؟ قسمتی از یک پازل ناقص؟ یا یک سرخ از چیزی عمیق درباره ساختار جهان که ما هنوز موفق به کشف آن نشده‌ایم؟

تفسیری که من اینجا از مکانیک کوانتومی ارائه کردم به نظرم از بقیه تفاسیر عقلانی‌تر است. نام این تفسیر «تفسیر رابطه‌ای» است و فلاسفه بزرگی مانند بس ون فراسن، مایکل بیتول و مائورو دوراتو درباره آن بحث کرده‌اند. [۵] اما هنوز توافقی بر سر چگونگی اندیشیدن به مکانیک کوانتومی وجود ندارد: راه‌های دیگری هم برای اندیشیدن به آن هست که فیزیکدانان و فلاسفه دیگری درباره آنها بحث کرده‌اند. ما در مرز ناشناخته‌ها قرار داریم و همین جاست که اختلاف نظر ایجاد می‌شود.

مکانیک کوانتومی صرفاً یک نظریه فیزیکی است: ممکن است در آینده، فهمی متفاوت و حتی باشکوه‌تر از جهان، آن را تصحیح کند. امروزه برخی از دانشمندان در تلاش‌اند که برای سازگار شدن این نظریه با شهود ما آن را ساده‌تر کنند. به نظر من، موفقیت تجربی چشمگیر این نظریه باید ما را متقاعد کند تا آن را جدی بگیریم و به جای تغییردادنش، مرزهایی را بشناسیم که شهودمان را چنان محدود کرده‌اند که این نظریه به نظرمان عجیب و غریب می‌آید.

من فکر می‌کنم که ابهام این نظریه به ایرادی در مکانیک کوانتومی بازمی‌گردد بلکه برعکس، به محدودیت توان تخیل ما مرتبط است. زمانی که تلاش می‌کنیم جهان کوانتومی را تخیل کنیم، حالِ موش کوری را داریم که در زمین زندگی می‌کند و کسی در تلاش است برایش کوه‌های هیمالیا را توصیف کند. یا حال کسانی که در انتهای غار افلاطون در زنجیرند.

وقتی که اینشتین مرد، بزرگ‌ترین رقیبش، نیلز بور، ستایش‌نامه‌ای تکان‌دهنده برای او نوشت. وقتی چند سال بعد خود بور درگذشت، یک نفر از تخته‌سیاه اتاق مطالعه‌اش عکس گرفت. یک نقاشی روی این تخته بود. نقاشی «جعبه نور» آزمایش ذهنی اینشتین. تا آخرین لحظه، میل به بحث، میل به فهم بیشتر. تا آخرین لحظه، تردید.

این تردید تمام‌نشدنی، منبع عمیق دانش است.

بخش سوم: فضای کوانتومی و زمان رابطه‌ای

اگر تا اینجا کتاب را دنبال کرده باشید هر چه را برای فهم تصویر فیزیک بنیادین از جهان لازم است در اختیار دارید و به نقاط قوت و ضعف و محدودیت‌های این تصویر آگاهید.

فضا زمان خمیده، چهارده میلیون سال پیش زاده شد - کسی نمی‌داند چگونه و هنوز هم در حال انبساط است. این فضا یک شیء واقعی است: یک میدان فیزیکی که دینامیکش را می‌توان با معادلات اینشتین توضیح داد. فضا تحت تأثیر وزن ماده کش می‌آید و خم می‌شود و اگر ماده بیش از اندازه متراکم باشد، فضا به سیاهچاله تبدیل می‌شود.

ماده در صد میلیارد کهکشان توزیع شده است که هر کدام صد میلیارد ستاره دارند و از میدان‌هایی کوانتومی ساخته شده‌اند که یا خود را به شکل ذراتی مانند الکترون و فوتون آشکار می‌کنند یا به صورت امواجی مانند امواج الکترومغناطیسی که تصاویر تلویزیونی و نور خورشید و ستارگان دیگر را به ما می‌رسانند.

اتم‌ها و نور و هر چیز دیگری در جهان از این میدان‌های کوانتومی تشکیل شده است. این میدان‌ها پدیده‌های عجیبی هستند: کوانتوم‌های آنها ذراتی هستند که تنها هنگام برهم‌کنش با چیز دیگری آشکار می‌شوند و وقتی در حال برهم‌کنش نیستند، به درون «ابری از احتمالات» فرو می‌روند. جهان مجموعه‌ای است از رخداد‌های بنیادین، غوطه‌ور در یک فضای دینامیک گسترده که سطحش مانند سطح دریا موج برمی‌دارد.

با استفاده از این تصویر و چند معادله که این تصویر را ملموس‌تر می‌کند، می‌توانیم تقریباً هر پدیده‌ای را که می‌بینیم توضیح دهیم. تقریباً هر پدیده‌ای. هنوز چیزی کم است و ما در جست‌وجوی همین چیز هستیم. باقی کتاب درباره همین بخش گم‌شده سخن خواهد گفت.

با رفتن به صفحه بعد، از آنچه به طور کامل یا ناقص درباره جهان می‌دانیم گذر می‌کنیم و وارد آن چیزی می‌شویم که درباره‌اش هیچ نمی‌دانیم اما در تلاشیم حتی اگر شده نیم‌نگاهی به آن بیندازیم. رفتن به صفحه بعد مانند ترک امنیت فضایی‌های معمول و قدم گذاشتن بر سیاره ناشناخته‌هاست.

۵: فضا زمان کوانتومی است

در کُنه فهم ما از جهان فیزیکی پارادوکسی نهفته است. نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، یعنی دو گوهری که قرن بیستم برای ما به ارث گذاشته است، در فهم ما از جهان و پیشرفت تکنولوژی بسیار پرثمر بوده‌اند. نسبیت عام باعث گسترش کیهان‌شناسی و اخترفیزیک و مطالعات امواج گرانشی و سیاهچاله‌ها شد. مکانیک کوانتومی پایه‌ای برای فیزیک اتمی، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادین، فیزیک ماده متراکم و بسیاری چیزهای دیگر فراهم کرد.

در عین حال هنوز چیزی آزارنده بین این دو نظریه وجود دارد. هر دو آنها حداقل در فرم امروزی‌شان نمی‌توانند با هم صادق باشند چرا که به نظر می‌رسد یکدیگر را نقض می‌کنند. میدان گرانشی بدون در نظر گرفتن مکانیک کوانتومی و این واقعیت که هر میدانی یک میدان کوانتومی است، فهمیده می‌شود. مکانیک کوانتومی هم بدون در نظر گرفتن خمیدگی فضای توصیف شده در معادلات اینشتین، صورت‌بندی می‌شود.

دانشجویی که صبح در کلاس نسبیت عام و بعد از ظهر در کلاس مکانیک کوانتومی شرکت می‌کند، شاید حق داشته باشد استادان خود را احق بپندارد یا فرض کند حداقل یک قرن است که این استادان با یکدیگر حرف نزده‌اند. در کلاس صبح، جهان یک فضا زمان خمیده است که در آن همه چیز پیوسته است و در کلاس بعد از ظهر، جهان یک سطح صاف است که کوانتوم‌های گسسته انرژی در آن می‌جهند و برهم کنش می‌کنند.

پارادوکس در این واقعیت ریشه دارد که هر دو این نظریه‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای خوب کار می‌کنند.

به رغم اینکه هر کدام از این نظریه‌ها بر فرض‌هایی به ظاهر متضاد بنا شده‌اند، در هر آزمایش و امتحانی، طبیعت همواره هم نسبیت عام را تأیید می‌کند هم مکانیک کوانتومی را. بدیهی است که چیزی از چشم ما دور مانده است.

در بیشتر موقعیت‌ها، می‌توانیم نسبیت عام یا مکانیک کوانتومی (یا هر دو) را نادیده بگیریم. از یک طرف، ماه بزرگ‌تر از آن است که به دانه‌بندی ظریف کوانتومی حساس باشد پس می‌توان حرکتش را بدون کوانتوم‌ها توضیح داد. از طرف دیگر، یک اتم سبک‌تر از آن است که خمشی قابل توجه در فضا به وجود بیاورد پس می‌توان برای توصیفش از خمش فضا صرف نظر کرد. اما موقعیت‌هایی هم هستند که برای توصیف آنها هم به خمیدگی فضا نیاز است و هم به دانه‌بندی کوانتومی و ما هنوز نظریه فیزیکی قابل قبولی نداریم که در این موقعیت‌ها خوب کار کند.

نمونه این موقعیت‌ها فضای درون سیاهچاله است. نمونه دیگر اتفاقاتی است که برای جهان در زمان مه‌بانگ افتاده است. به بیان کلی، ما نمی‌دانیم که فضا و زمان در مقیاس‌های بسیار کوچک چگونه رفتار می‌کنند. در تمام این موقعیت‌ها نظریه‌های معاصر گمراه‌کننده می‌شوند و پاسخ‌هایشان عقلانی نیست: مکانیک کوانتومی نمی‌تواند با خمیدگی فضا زمان کنار بیاید و نسبیت عام هم توضیحی برای کوانتوم‌ها ندارد. این مسئله اصلی گرانس کوانتومی است.

مشکل از این هم عمیق‌تر است. اینشتین دریافت که فضا و زمان دو وجه از یک میدان فیزیکی‌اند: میدان گرانشی. بور و هایزنبرگ و دیراک دریافتند که میدان‌های فیزیکی خصلتی کوانتومی دارند: دانه‌ای‌اند، مبتنی بر احتمالات‌اند و از طریق برهم کنش‌ها آشکار می‌شوند. نتیجه این است که فضا و زمان هم باید موجودیت‌هایی کوانتومی و دارای این خصلت‌های عجیب باشند.

پس یک فضای کوانتومی چیست؟ زمان کوانتومی چیست؟ این مسأله‌ای است که گرانس کوانتومی نام دارد. گروهی از فیزیکدانان نظری در پنج قاره، سخت تلاش می‌کنند تا پاسخی برای این مسأله بیابند. هدف آنها یافتن یک نظریه یعنی تعدادی معادله و به خصوص تصویری منسجم از جهان برای غلبه بر سرگشتگی میان کوانتوم‌ها و گرانس است.

این اولین بار نیست که در فیزیک دو نظریه بسیار موفق اما به ظاهر متناقض کنار هم قرار می‌گیرند. نتیجه تلاش برای تلفیق این نظریه‌ها، گام‌هایی رو به جلو در فهم ما از جهان بوده است. نیوتن گرانس عمومی را دقیقاً با تلفیق نظریه گالیله درباره حرکت اشیاء روی زمین و نظریه کپلر درباره آسمان‌ها به دست آورد. ماکسول و فارادی با تلفیق دانش روز درباره الکتریسیته و مغناطیس، معادلات الکترومغناطیس را کشف کردند. نسبیت خاص اینشتین نتیجه رفع تناقض ظاهری مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیس ماکسول بود و نسبیت عامش نتیجه

رفع تناقض ظاهری مکانیک نیوتنی و نظریه نسبیت خاص خودش.

بنابراین، زمانی که فیزیکدانان نظری چنین تناقض‌هایی پیدا می‌کنند بسیار خوشحال می‌شوند: چنین تناقضی یک فرصت عالی است. در این مواقع سؤال این است: آیا می‌توانیم با استفاده از هر دو نظریه، یک ساختار مفهومی سازگار با دانش مان از جهان بسازیم؟ برای فهم فضا و زمان کوانتومی نیاز داریم که یک بار دیگر عمیقاً به این فکر کنیم که ما جهان را چگونه ادراک می‌کنیم. باید دوباره به قواعد فهم مان از جهان بیندیشیم. همان گونه که آناکسیمندر این کار را کرد و فهمید زمین در فضا پرواز می‌کند و «بالا» و «پایین» ی در کیهان وجود ندارد و همان گونه که کوپرنیک دریافت که ما با سرعت زیادی در آسمان در حال حرکتیم و همان گونه که اینشتین فهمید که فضا زمان مانند یک نرم‌تن فشرده می‌شود و زمان در مکان‌های مختلف به شکلی متفاوت می‌گذرد... یک بار دیگر در جست‌وجوی تصویری منسجم از جهان که با دانش ما سازگار باشد باید فهم مان از ماهیت واقعیت را تغییر دهیم.

اولین کسی که دریافت برای فهم گرانش کوانتومی باید مبانی مفهومی مان را تغییر دهیم، شخصیتی رمانتیک و افسانه‌ای بود: ماتوی برونشتین^۱، جوانی که در دوران استالین زندگی می‌کرد و مرگی تراژیک داشت.

ماتوی

ماتوی دوست جوان تر لاف لاندائو^۲ بی بود که بعدها بهترین فیزیکدان نظری شوروی شد. همکارانی که هر دوی آنها را خوب می‌شناختند ادعا می‌کردند که ماتوی درخشان‌تر است. در همان زمانی که هاینبرگ و دیراک مشغول پی‌ریزی مبانی مکانیک کوانتومی بودند لاندائو به اشتباه فکر می‌کرد که کوانتوم‌ها تعریف میدان‌ها را مخدوش می‌کنند: نوسانات کوانتومی اجازه نمی‌دهند یک مؤلفه از میدان را در یک نقطه (یک ناحیه کوچک دلخواه) از فضا به شکلی دقیق اندازه‌گیری کنیم. بور همه فن حریف به سرعت دریافت که لاندائو اشتباه می‌کند. عمیقاً موضوع را بررسی کرد و مقاله‌ای بلند با جزئیات زیاد نوشت تا نشان دهد که تعریف میدان‌هایی مانند میدان الکتریکی حتی با وجود مکانیک کوانتومی مخدوش نمی‌شود. [۱] لاندائو هم دیگر موضوع را دنبال نکرد.



شکل ۱-۵ ماتوی برونشتین

اما دوست جوان او ماتوی، کنجکاو شد و فهمید که شهود لاندائو اگرچه دقیق نیست اما نکته مهمی در بر دارد. او همان استدلالی را که بور برای اثبات خوش تعریف بودن میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا به کار برده بود، روی میدان گرانشی‌ای اعمال کرد که اینشتین چند سال پیش معادلاتش را نوشته بود. و اینجا در کمال شگفتی حق با لاندائو بود. تعریف میدان گرانشی در یک نقطه، وقتی که پای مکانیک کوانتومی وسط بیاید مخدوش می‌شود.

راهی شهودی برای فهمیدن این مسأله وجود دارد. فرض کنید می‌خواهیم ناحیه‌ای بسیار بسیار کوچک از فضا را مشاهده کنیم. برای انجام این کار باید چیزی را در این ناحیه قرار دهیم تا نقطه‌ای که می‌خواهیم ببینیم معلوم باشد. فرض کنید ذره‌ای در آنجا قرار می‌دهیم. هاینبرگ دریافت بود که شما نمی‌توانید مدت زمانی طولانی ذره‌ای را در نقطه‌ای از فضا قرار دهید. ذره خیلی زود خواهد

گریخت. هرچه ناحیه‌ای که می‌خواهیم ذره را در آن قرار دهیم کوچک‌تر باشد، سرعت گریختن ذره بیشتر خواهد بود. (این اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است). هرچه سرعت گریختن ذره بیشتر باشد، انرژی بیشتری نیز خواهد داشت. حال بیایید نظریه اینشتین را هم وارد ماجرا کنیم. انرژی باعث خمیدگی فضا می‌شود. هرچه انرژی بیشتر باشد فضا بیشتر خمیده خواهد شد. انرژی بسیار زیاد در ناحیه‌ای بسیار کوچک، فضا را چنان خم می‌کند که منجر به تشکیل سیاهچاله می‌شود. مانند همان چیزی که در ستاره‌های فروریخته اتفاق می‌افتد. اما اگر یک ذره به درون سیاهچاله فرو کشیده شود، دیگر نمی‌توانیم آن را ببینیم. در نتیجه، دیگر نمی‌توانیم از آن برای علامت‌گذاری ناحیه مورد مشاهده کمک بگیریم. من نمی‌توانم هر نقطه به دلخواه کوچک از فضا را اندازه‌گیری کنم چون در این صورت این ناحیه‌ها در یک سیاهچاله ناپدید خواهند شد.

این استدلال به کمک ریاضیات می‌تواند دقیق‌تر شود. نتیجه کلی است: اگر مکانیک کوانتومی و نسبیت عام را با هم در نظر بگیریم، نتیجه این می‌شود که حدی برای تقسیم‌پذیری فضا وجود خواهد داشت. پایین‌تر از یک مقیاس مشخص امکان دسترسی به هیچ چیزی وجود ندارد. یا به بیان دقیق‌تر: پایین‌تر از یک مقیاس مشخص، هیچ چیز وجود ندارد. اندازه این کوچک‌ترین ناحیه فضا چقدر است؟ محاسبه‌اش ساده است: فقط باید کوچک‌ترین اندازه ذره قبل از فروافتادن به سیاهچاله‌اش را حساب کنیم. همین. [محاسبه] کوچک‌ترین طول چنین است:

$$L_p = \sqrt{hG/c^3}$$

زیرا دیکال سه ثابت درباره طبیعت وجود دارد که ما آنها را می‌شناسیم: ثابت نیوتن، G که نماینده قدرت گرانش است و در فصل دو درباره آن صحبت کردیم. سرعت نور، c که در فصل سه در بحث راجع به نسبیت به آن پرداختیم و در آنجا گفتیم که علت اصلی حال امتداد یافته است. و ثابت پلانک، h که مقیاس دانه‌بندی کوانتومی را مشخص می‌کند و در فصل چهار آن را بررسی کردیم.^{۶۲} وجود این سه ثابت در کنار هم نشان می‌دهد که ما در اینجا با گرانش (G)، نسبیت (c) و مکانیک کوانتومی (h) سرو کار داریم. طولی که از طریق این فرمول تعیین می‌شود، L_P ، طول پلانک نام دارد. این طول را باید طول برونشتین می‌نامیدند، اما رسم دنیا همین است. به لحاظ عددی این طول تقریباً برابر است با یک میلیونیم یک میلیارد یک میلیارد یک سانتی‌متر (۳۳-۱۰ سانتی‌متر) و این یعنی... کوچک.

گرانش کوانتومی در این مقیاس بسیار بسیار کوچک پدیدار می‌شود. برای درک کوچکی این مقیاس به این مثال توجه کنید: اگر یک پوست گردو را به اندازه کل جهان قابل مشاهده گسترش دهیم باز هم نمی‌توانیم طول پلانک را بینیم. حتی پس از چنین بزرگ‌نمایی عظیمی، طول پلانک باز هم یک میلیون بار از اندازه پوست گردوی واقعی قبل از بزرگ‌نمایی کوچک‌تر است. در این مقیاس، فضا و زمان ماهیت‌شان را تغییر می‌دهند. آنها به چیزی دیگر تبدیل می‌شوند: به «فضا و زمان کوانتومی». مسئله اصلی، فهم معنای این تغییر است. ماتوی برونشتین در سال ۱۹۳۰ به این مسائل پی برد و دو مقاله کوتاه و درخشان نوشت و در آنها گفت که وقتی مکانیک کوانتومی و نسبیت عام را با هم به کار ببریم، نتیجه با فهم معمولی ما از فضا به عنوان پیوستاری که تا بی‌نهایت قابل تقسیم است، سازگار نیست. [۲] اما ناگهان مشکلی به وجود می‌آید. ماتوی و لف کمونیست‌هایی وفادارند. آنها به انقلابی برای آزادی انسان و به ساخت جامعه‌ای بسیار بهتر و بدون بی‌عدالتی و نابرابری‌های عمیقی که به شکلی سازمان یافته در جهان در حال رشد است، باور دارند. آنها پیروان پرشور لنین‌اند. با قدرت گرفتن استالین ابتدا سردرگم می‌شوند، بعد منتقد و بعد دشمن. مقالاتی می‌نویسند که چندان خشن نیست اما کاملاً انتقادی است... این کمونیسمی نبود که آنها می‌خواستند...

زمانه اما زمانه خشنی بود. لاندائو به سختی با آنها کنار آمد و جان سالم به در برد. ماتوی یک سال پس از اینکه به عنوان اولین نفر فهمید که تصور ما از فضا و زمان باید به شکلی ریشه‌ای تغییر کند، به دست پلیس استالین دستگیر و محکوم به مرگ شد. او را در همان روز محاکمه‌اش، در ۱۸ فوریه ۱۹۳۸ اعدام کردند. [۳] در این زمان فقط سی سال داشت.

جان

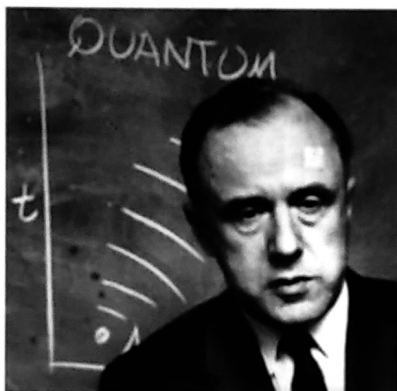
پس از مرگ زود هنگام ماتوی، بسیاری از فیزیکدانان برجسته قرن تلاش کردند تا به معمای گرانش کوانتومی پاسخ دهند. دیراک سالهای آخر عمرش را وقف پاسخ به این مسأله کرد و راه‌هایی را گشود و ایده‌ها و تکنیک‌هایی را خلق کرد که هنوز بخش عمده‌ای از پژوهش در مورد گرانش کوانتومی بر پایه آنها انجام می‌شود. همان گونه که جلوتر توضیح خواهم داد به لطف این تکنیک‌هاست که ما می‌توانیم جهان را بدون زمان توصیف کنیم. فاینمن تلاش کرد تا تکنیک‌هایی را که برای الکترون‌ها و فوتون‌ها درست کرده بود، در نسبیت عام به کار گیرد اما موفق نشد: الکترون‌ها و فوتون‌ها کوانتوم‌هایی در فضا هستند اما گرانش کوانتومی چیز دیگری است: کافی نیست که حرکت «گراویتون»‌ها را در فضا توصیف کنیم، بلکه خود فضا باید کوانتومی شود.

چند جایزه نوبل فیزیک به فیزیکدانانی تعلق گرفت که در حال حل معمای گرانش کوانتومی سهواً به مسائل دیگری جواب دادند. دو فیزیکدان هلندی به نام‌های جرارد هوفت^{۶۳} و مارتینوس ولتمن^{۶۴} در سال ۱۹۹۹ نوبل فیزیک را به این خاطر گرفتند که نشان دادند نظریه‌هایی که امروزه برای توصیف نیروهای هسته‌ای از آنها استفاده می‌کنیم و قسمتی از مدل استانداردند، با هم سازگارند؛ در حالی که برنامه اصلی پژوهش آنها اثبات انسجام یک روایت از گرانش کوانتومی بود. آنها بر نظریه‌های نیروهایی به غیر از گرانش، تنها به عنوان تمرینی فرعی کار می‌کردند. این «تمرین فرعی» برای آنها جایزه نوبل به ارمغان آورد اما موفق نشدند انسجام نسخه پیشنهادی‌شان از گرانش کوانتومی را نشان دهند.

این فهرست می‌تواند ادامه یابد و می‌توان به آن، هم به منزله فهرست افتخارات بهترین فیزیکدانان نظری قرن نگاه کرد و هم به منزله فهرستی از اشتباهات. در طی چند دهه، اگرچه بسیار آهسته و به تدریج، مفاهیم روشن‌تر و بن‌بست‌هایی پس از دیگری کاویده و به شکل

مطلوبی گشوده شدند. تکنیک‌ها و ایده‌های کلی قوی‌تر شدند و نتایج پشت سر هم به دست آمدند. اشاره به نام دانشمندان زیادی که در ساخت تدریجی و آهسته و گروهي این بنا نقش داشتند، مستلزم آوردن فهرستی خسته‌کننده از نام‌های تک‌تک کسانی است که سنگی به این بنا افزوده‌اند.

اما مایلم به یک نفر اشاره کنم. کسی که سال‌ها سر رشته این پژوهش جمعی را در دست داشت: یک انگلیسی برجسته، همیشه جوان، نیمه‌فیلسوف و نیمه‌دانشمند، کریس آیشم^{۶۵}. من با خواندن یکی از مقالات او که در آن مسئله گرانش کوانتومی را بررسی کرده بود، به این موضوع علاقه‌مند شدم. او در این مقاله از دشواری‌های این نظریه و لزوم اصلاح فهم ما از فضا و زمان سخن می‌گفت و جمع‌بندی قابل فهمی از تمام راه‌هایی که در آن زمان طی شده بود، نتایجی که به دست آمده بود و مشکلاتی که بر سر راه وجود داشت، ارائه می‌داد. من دانشجوی سال سوم دانشگاه بودم و امکان بازاندیشی بنیادین درباره فضا و زمان مرا به هیجان وامی‌داشت. هیجانی که هیچ‌گاه فروکش نکرد. همان طور که پترارک گفته: «جای زخم باقی خواهد ماند، حتی اگر دیگر کمانی در کار نباشد».



شکل ۲-۵. جان ویلر

اما دانشمندی که بیش از همه به پیشبرد گرانش کوانتومی کمک کرد، جان ویلر^{۶۶} است. شخصیتی افسانه‌ای که کل فیزیک قرن بیستم را طی کرده است. او در کنه‌هاگ شاگرد و همکار نیلز بور بود، وقتی که اینشتین به امریکا مهاجرت کرد همکار او بود، معلمی بود که در میان شاگردانش کسی مانند ریچارد فاینمن حضور داشت... ویلر در مرکز فیزیک قرن بیستم بود. او قوه تخیل فروزانی داشت. کسی بود که عبارت «سیاهچاله» را ساخت و در میان مردم رایج کرد. نام او یادآور پژوهش‌های گسترده آغازین درباره چگونگی اندیشیدن به فضا زمان کوانتومی است. پژوهش‌هایی که اغلب شهودی بودند تا ریاضیاتی. ویلر با درک این آموزه برونشتین که خصلت‌های کوانتومی میدان گرانشی موجب اصلاح مفهوم فضا در مقیاس کوچک می‌شود، در جستجوی ایده‌هایی بدیع برای کمک به درک این فضای کوانتومی بود. او این فضا را به شکل ابری از ساختارهایی هندسی تصور می‌کرد که روی هم قرار گرفته‌اند؛ دقیقاً به همان صورتی که می‌توان به الکترون به شکل ابری از موقعیت‌های مکانی فکر کرد.

فرض کنید که از جایی بسیار مرتفع در حال نگاه کردن به دریا هستید: می‌توانید گستره وسیعی از دریا را ببینید: یک سطح صاف لاجوردی. حال کمی پایین می‌آیید و از نزدیک‌تر به آن نگاه می‌کنید. حالا می‌توانید امواجی را که باد به وجود می‌آورد ببینید. باز هم پایین‌تر می‌آیید و می‌بینید که امواج در حال شکستن‌اند و سطح دریا شبیه یک کف خروشان است. فضا هم در تصور ویلر چنین چیزی است. فضا در مقیاس ما که بسیار بزرگ‌تر از طول پلانک است صاف به نظر می‌رسد اما هر چه به سوی مقیاس پلانک می‌رویم خرد می‌شود و انگار کف می‌کند. ویلر در جست‌وجوی راهی برای توصیف این کف کردن فضا یعنی موج احتمالاتی تشکیل‌شده از هندسه‌های متفاوت بود. در سال ۱۹۶۶ یکی از همکاران جوان او که در کارولینا زندگی می‌کرد، برایس دویت، کلید حل معما را یافت. [۴] ویلر اغلب در سفر بود و همکارانش را هر جا که می‌شد ملاقات می‌کرد. وقتی در فرودگاه رالی دورام در کارولینای شمالی چند ساعت بین دو پرواز فرصت داشت، از برایس

خواست تا به آنجا بیاید. برایس آمد و به او معادله‌ای برای «تابع یک موج فضا» نشان داد که با یک ترفند ساده ریاضی به دست آمده بود.^{۶۷} ویلر ذوق زده شد. نتیجه گفت‌وگوی آنها تولد نوعی «معادله اوربیتال‌ها» برای نسبیت عام بود. معادله‌ای که باید احتمال این یا آن فضای

خمیده را معین می کرد. دویت تا مدت ها این معادله را معادله ویلر می نامید^{۶۸} در حالی که ویلر آن را معادله دویت می خواند. دیگران آن را معادله ویلر دویت نام گذاری کرده بودند.

ایده خیلی خوبی بود و مبنایی شد برای تلاش های بعد به منظور ساخت یک نظریه کامل گرانش کوانتومی. اما خود معادله با مشکلاتی جدی مواجه بود. از یک طرف و از نظر گاهی ریاضیاتی، معادله به هیچ وجه خوش تعریف نبود. اگر آن را برای محاسبه به کار می گرفتیم خیلی زود نتایج به سمت نامتناهی میل می کرد و این بی معنا بود. معادله باید تصحیح می شد.

از طرف دیگر تفسیر این معادله و فهم معنای دقیق آن کار بسیار مشکلی بود. یکی از جنبه های دردسرسازش این بود که متغیرهای زمان در آن هیچ نقشی نداشتند. چگونه می توان از معادله ای که هیچ متغیر زمانی ای در آن وجود ندارد برای محاسبه تغییرات چیزی که در زمان رخ می دهد استفاده کرد؟ معادلات دینامیک در فیزیک همواره شامل متغیر زمان، t ، هستند. معنای یک نظریه فیزیکی بدون متغیر زمان چیست؟ تا سال های متمادی پژوهش ها حول چنین سؤالاتی متمرکز بود و پژوهشگران سعی می کردند معادله را به صورت های متفاوتی بازنگری کنند تا توصیف آن را بهبود بخشند و معنایش را بفهمند.

اولین گام ها به سوی حلقه ها

در اواخر دهه هشتاد قرن بیستم، ابرها کم کم کنار رفتند. در کمال تعجب چند پاسخ برای معادله ویلر دویت پیدا شد. در این سال ها من نخست در دانشگاه سیراکوز ایالت نیویورک در کنار فیزیکدان هندی، آبی آشتکار^{۶۹} بودم و بعد به کنیتک در دانشگاه ییل رفتم و در کنار فیزیکدان آمریکایی، لی اسمولین^{۷۰}، قرار گرفتم. دوره ای بود پر از بحث های پر شور و التهاب فکری شدید. اشتکار معادله ویلر دویت را در فرمی ساده تر بازنویسی کرد. و اسمولین به همراه تد یاکوبسن^{۷۱} از دانشگاه مریلند واشینگتن، اولین کسی بود که برخی از این جواب های عجیب را برای معادله پیدا کرد.

این جواب ها یک ویژگی عجیب داشتند: آنها به خط هایی بسته در فضا وابسته بودند. خط های بسته، همان «حلقه» ها هستند. اسمولین و یاکوبسن توانستند برای هر حلقه در معادله ویلر دویت جوابی بیابند: برای هر خطی که در خود بسته می شود. اما این چه معنایی داشت؟ با روشن شدن تدریجی معنای جواب های معادله ویلر دویت و از دل این بحث ها نظریه ای متولد شد که بعدها «گرانش کوانتومی حلقه» نام گرفت. بر پایه این پاسخ ها کم کم نظریه ای منسجم شکل گرفت که نام خود را -تئوری حلقه- از همین پاسخ های ابتدایی گرفته است. امروزه صدها دانشمند در سراسر جهان از چین گرفته تا آرژانتین و از اندونزی تا ایالات متحد مشغول پژوهش در مورد این نظریه هستند. نتیجه تدریجی این کارها امروز نظریه حلقه یا گرانش کوانتومی حلقه نامیده می شود: نظریه ای که باقی کتاب به توصیف آن اختصاص دارد. این تنها راه جست و جو برای یافتن نظریه کوانتومی گرانش نیست اما به نظر من امیدوارکننده ترین آنهاست.^{۷۲}

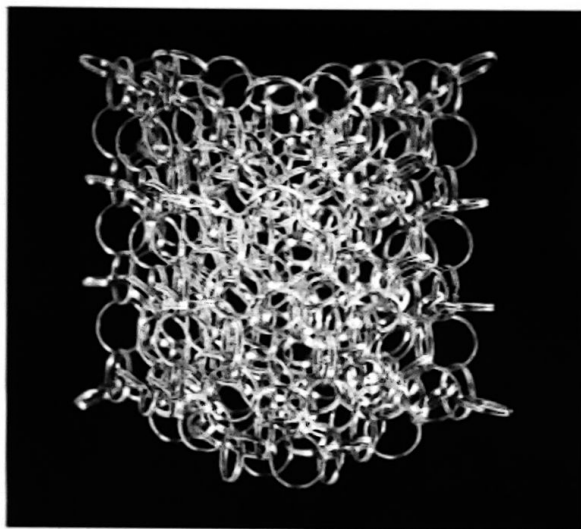
۶: کوانتوم‌های فضا

فصل قبل با جواب‌های اسمولین و یاکوبسن به معادله ویلردویت تمام شد. این جواب‌ها وابسته به حلقه‌ها یا خط‌هایی بودند که در خود بسته می‌شوند. این به چه معناست؟

خطوط فارادی را به یاد بیاورید. خطوطی که نیروی الکتریکی را حمل می‌کردند و در نگاه فارادی فضا با آنها پر می‌شد. خطوطی که مفهوم «میدان» از آنها گرفته شد. خطوط بسته‌ای که در پاسخ‌های معادله ویلردویت پدیدار شدند خطوط فارادی میدان گرانشی هستند. اما در اینجا دو ویژگی جدید به ایده فارادی اضافه شده است.

ویژگی اول اینکه ما در اینجا با نظریه کوانتوم سر و کار داریم. در نظریه کوانتوم همه چیز از هم جدا و گسسته است. این بدین معناست که تار عنکبوت خطوط فارادی با تارهای بی‌نهایت نازک و پیوسته‌اش، اکنون به یک تار عنکبوت واقعی تبدیل شده است: تعداد محدودی از تارهای جدا از هم. هریک از تارهای این تار عنکبوت، یکی از جواب‌های معادله ویلردویت است.

ویژگی بسیار مهم دوم این است که ما داریم در مورد گرانش حرف می‌زنیم و همان گونه که اینشتین دریافت بود سخن گفتن از گرانش سخن گفتن از ساختار خود فضا است نه میدان‌هایی که در فضا غوطه‌ورند. خطوط فارادی میدان گرانش کوانتومی تارهایی هستند که فضا از آنها بافته شده است.



شکل ۱-۶ نسخه کوانتومی خطوط نیروی فارادی که فضا را مانند یک تور سه‌بعدی تشکیل شده از حلقه‌های مرتبط با هم می‌بافند. در ابتدا پژوهش‌ها بر این خطوط و بر این مسأله متمرکز بودند که این خطوط چگونه فضای فیزیکی سه‌بعدی ما را می‌بافند. شکل ۱-۶ تلاشی ابتدایی است که درکی شهودی از ساختار گسسته فضا ارائه می‌دهد.

کمی بعد، به لطف شهودها و توانایی‌های ریاضیاتی دانشمندان جوانی مانند خورخه پولین^{۷۲} آرژانتینی و یورک لواندوفسکی^{۷۴} لهستانی مشخص شد که کلید فهم فیزیکی این جواب‌ها در نقطه‌های تقاطع این خطوط قرار دارد. این نقطه‌ها را گره و خطوط بین این گره‌ها را رابط می‌نامیم: مجموعه‌ای از خطوط متقاطع که یک گراف را تشکیل می‌دهند یعنی ترکیبی از گره‌ها که با رابط‌ها مانند شکل ۳-۶ به هم متصل شده‌اند.

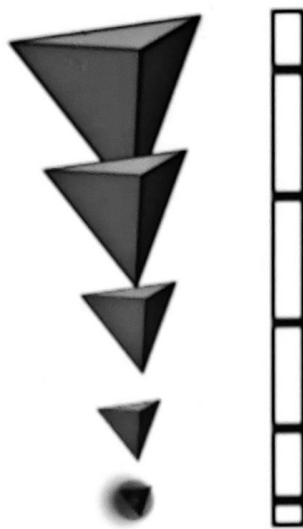
با یک محاسبه ساده می‌توان فهمید که بدون گره‌ها، فضا حجمی نخواهد داشت. به عبارت دیگر، حجم فضا در گره‌ها «قرار دارد» و نه در خطوط. خطوط، حجم‌های مجزای تک‌تک گره‌ها را به یکدیگر پیوند می‌دهند.

سال‌ها طول کشید تا فضا زمان کوانتومی کاملاً واضح شد. برای این کار لازم بود که ریاضیات بدقواره و بدتعریف معادله ویلردویت را تا حدی که محاسبه با آن ممکن باشد به یک ساختار خوش‌تعریف تبدیل کنند. با این کار، دستیابی به نتایج دقیق ممکن شد. نتیجه فنی اصلی روشن شدن معنای فیزیکی گراف‌ها، محاسبه طیف‌های حجم و مساحت است.

طیف‌های حجم و مساحت

ناحیه‌ای از فضا را در نظر بگیرید، مثلاً اگر در یک اتاق در حال خواندن این کتاب هستید همین اتاق را در نظر بگیرید. اندازه اتاق چقدر است؟ اندازه فضای اتاق همان حجم اتاق است. حجم یک کمیت هندسی است که به ساختار هندسی فضا مربوط است اما ساختار هندسی فضا همان طور که اینشتین دریافت و من در فصل ۳ توضیح دادم، میدان گرانشی است. در نتیجه حجم، یکی از مشخصات میدان گرانشی است که نشان می‌دهد چه مقدار میدان گرانشی بین دیوارهای اتاق است. اما میدان گرانشی کمیتی فیزیکی است و مانند تمام کمیت‌های فیزیکی دیگر از قوانین مکانیک کوانتومی تبعیت می‌کند. به طور مشخص، حجم هم مانند تمام کمیت‌های فیزیکی -همان طور که در فصل ۴ توضیح دادم- تنها می‌تواند مقادیر مشخصی داشته باشد نه هر مقدار دلخواهی. اگر به خاطر بیاورید فهرست تمام این مقادیر ممکن، طیف نامیده می‌شد. در نتیجه باید یک «طیف حجم» هم وجود داشته باشد (شکل ۲-۶).

دیراک معادله‌ای داشت که با آن می‌شد طیف هر متغیری را محاسبه کرد. این محاسبه زمان‌بر و پرهزینه بود چون اول باید فرمول‌بندی و سپس تکمیل می‌شد. تکمیل آن تا اواسط دهه ۹۰ به درازا کشید و پاسخ همان گونه که انتظار می‌رفت این بود که طیف حجم، گسسته است (فاینمن می‌گفت هیچ گاه دست به محاسبه نزنید اگر از ابتدا نتیجه را نمی‌دانید).

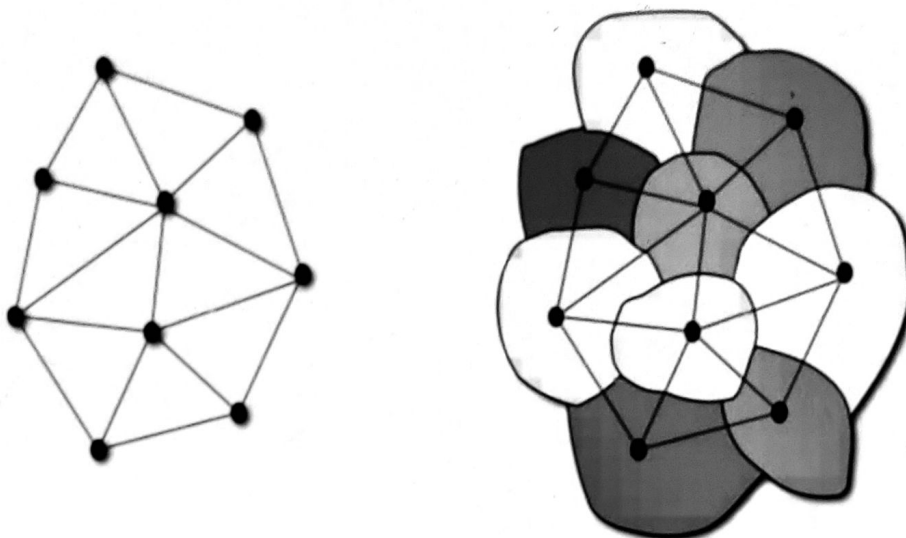


شکل ۲-۶ طیف حجم: تعداد حجم‌هایی که یک چهاروجهی منتظم می‌تواند در طبیعت داشته باشد محدود است. کوچک‌ترین چهاروجهی در پایین تصویر، نشان‌دهنده کوچک‌ترین حجم موجود ممکن است.

یعنی حجم صرفاً می‌تواند از تعدادی «بسته جدا از هم» تشکیل شده باشد. چیزی شبیه به انرژی میدان الکترومغناطیسی که آن هم از بسته‌های جدا از هم یعنی از فوتون تشکیل شده بود.

گره‌های گراف نشان‌دهنده بسته‌های جدا از هم هستند و مانند فوتون‌ها تنها می‌توانند مقادیری مشخص داشته باشند که با فرمول عمومی کوانتوم دیراک قابل محاسبه است.^{۷۵} هر گره n در گراف حجمی مختص به خودش، v_n دارد: یکی از اعداد موجود در طیف حجم. گره‌ها کوانتوم‌های اولیه‌ای هستند که فضا از آنها ساخته شده است. هر گره در گراف یک «ذره کوانتومی فضا» است. نتیجه ساختاری است که در شکل ۳-۶ به تصویر کشیده شده است.

هر رابط، یک کوانتوم منفرد از یک خط فارادی است. حال می‌توانیم بفهمیم معنای رابط چیست: اگر دو گره را دو «ناحیه از فضا» در نظر بگیرید،



شکل ۳-۶ سمت چپ: یک گراف، تشکیل شده از گره‌هایی که با رابط‌ها به هم متصل هستند. سمت راست: دانه‌های فضا که گراف نماینده آنهاست.

رابط‌ها نشان می‌دهند که ذرات مجاور با سطوح از هم جدا شده‌اند.

این دو ناحیه با یک سطح کوچک از هم جدا خواهند شد. اندازه این سطح کوچک مساحت آن است. کمیت دوم پس از حجم که شبکه‌های کوانتومی فضا را مشخص می‌کند مساحتی است که با هر خط در ارتباط است. مساحت هم مانند حجم متغیری فیزیکی است و طیفی دارد که می‌توان با معادله دیراک آن را محاسبه کرد.

۱. به همین دلیل وضعیت‌های کوانتومی گرانش را با $|I_p, v_p\rangle$ نشان می‌دهیم که در آن n نشان‌دهنده گره‌ها و l نشان‌دهنده رابط‌های گراف است.

۲. نتیجه این محاسبه ساده است. می‌توانید مشاهده کنید که طرز کار طیف‌های دیراک به چه صورت است. مقادیر ممکن ناحیه A از فرمول زیر به دست می‌آیند. در این فرمول l عددی «نیمه صحیح» است یعنی عددی که نیم یک عدد صحیح است مثل $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, 3, \dots$

$$A = 8\pi L_p^2 \sqrt{j(j+1)}$$

A مساحت سطح جداکننده دو دانه فضا است. 8 همان عدد 8 است، نکته خاصی ندارد. π همان پی یونانی است که در مدرسه یادمان داده‌اند: ثابتی که نسبت بین محیط و قطر هر

دایره‌ای را نشان می‌دهد و همه‌جا در فیزیک سروکله‌اش پیدا می‌شود و معلوم هم نیست چرا. L_p طول پلانک است، همان مقیاس بسیار کوچکی که پدیدارهای گرانش کوانتومی در آن رخ می‌دهند. L_p^2 همان L_p است به توان ۲ که مساحت بسیار کوچک مربع ریزی است که اضلاعش برابر با طول پلانک است. بنابراین $8\pi L_p^2$ همان مساحت «کوچک» است: مساحت مربعی بسیار کوچک با ضلعی تقریباً برابر یک میلیونوم یک میلیارد یک میلیارد متر است (۱۰^{-۳۶} سانتی‌متر مربع). جنبه جالب فرمول، علامت رادیکال و چیزی است که زیر آن است. نکته اصلی این است که l یک عدد نیمه صحیح است یعنی فقط می‌تواند مقادیری داشته باشد که ضرب‌های $\frac{1}{2}$ باشند. در مورد هر کدام اینها جذر مقدار مشخصی دارد که در جدول ۱-۶ به صورت تقریبی فهرست شده است.

جدول ۱-۶ اسپین (اعداد نیمه صحیح) و ارزش متناظر مساحت در واحدهای مساحت کمینه

j	$\sqrt{j(j+1)}$
$\frac{1}{2}$	0.8
1	1.4
$\frac{3}{2}$	1.9
2	2.4
$\frac{5}{2}$	2.9
3	3.4
—	—

با ضرب کردن اعداد ستون سمت راست در مساحت $8\pi L_p^2$ مقادیر ممکن مساحت سطح را به دست می‌آوریم. این مقادیر خاص شبیه مقادیری هستند که در بررسی مدارهای الکترون‌ها در اتم‌ها ظاهر می‌شوند و آنجا مکانیک کوانتومی تنها مدارهای خاصی را مجاز می‌داند. نکته اینجاست که مساحتی جز مقادیر به دست آمده از این معادله وجود ندارد. هیچ سطحی نمی‌تواند مساحتی داشته باشد برابر با یک‌دهم $8\pi L_p^2$.

مساحت پیوسته نیست، دانه‌ای است.

فضا فقط به این دلیل به نظر ما پیوسته می‌آید که نمی‌توانیم مقیاس به شدت کوچک این کوانتوم‌های مجزای فضا را درک کنیم. همان طور که وقتی از نزدیک به پارچه پیراهن خود نگاه می‌کنیم می‌بینیم که از تارهایی باریک بافته شده است. وقتی می‌گوییم که حجم یک اتاق مثلاً ۱۰۰ متر مکعب است عملاً در حال شمردن تعداد ذره‌های فضا یا همان کوانتوم‌های میدان گرانشی موجود در اتاق هستیم. در یک اتاق این عدد بیشتر از صد رقم دارد. وقتی می‌گوییم مساحت این صفحه ۲۰۰ سانتی متر مربع است در واقع در حال شمردن رابطهای شبکه یا حلقه‌هایی هستیم که از صفحه می‌گذرند. تعداد کوانتوم‌ها روی صفحه این کتاب، عددی حدوداً هفتاد رقمی است.

خود ریمن در قرن نوزدهم این ایده را مطرح کرده بود که برای محاسبه طول و مساحت و حجم باید اجزای منفرد را شمرد. ریاضیدان‌هایی هم که نظریه فضای ریاضیاتی خمیده و پیوسته را گسترش دادند، متوجه بودند که در نهایت یک فضای فیزیکی گسسته از یک فضای فیزیکی پیوسته عقلانی تر است.

خلاصه اینکه نظریه گرانش کوانتومی حلقه یا نظریه حلقه، نسبیّت عام و مکانیک کوانتومی را به شیوه‌ای تقریباً محافظه کارانه با هم تلفیق می‌کند چرا که از هیچ فرضیه تازه‌ای غیر از فرضیاتی که خود این دو نظریه قبلاً برای سازگار شدن با هم ارائه داده‌اند، استفاده نمی‌کند. اما همین تلفیق هم پیامدهایی رادیکال دارد.

نسبیّت عام به ما یاد داد که فضا مانند میدان الکترومغناطیس، پویا و متحرک است: یک نرم‌تن عظیم و جنبنده که کش می‌آید و خم می‌شود و ما در آن غوطه‌وریم. مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید که تمام میدان‌های این چنینی، از کوانتوم‌ها ساخته شده‌اند و ساختاری ریز و دانه‌ای دارند. بنابراین چون فضای فیزیکی یک میدان است، پس، از کوانتوم‌ها ساخته شده است. ساختار میدان گرانش کوانتومی و در نتیجه ساختار فضا، همان ساختار دانه‌ای میدان‌های دیگر است. ما انتظار داریم فضا دانه‌ای باشد. انتظار داریم که کوانتوم‌های گرانش دقیقاً مانند کوانتوم‌های نور و کوانتوم‌های میدان الکترومغناطیس واقعاً وجود داشته باشند و به شکل ذراتی باشند که همان کوانتوم‌های میدان‌های کوانتومی هستند. اما فضا میدان گرانشی است و کوانتوم‌های میدان گرانشی همان کوانتوم‌های فضا هستند: ذرات سازنده فضا.

پیش‌بینی اصلی نظریه حلقه این است که فضا پیوسته نیست و نمی‌توان آن را تا بی‌نهایت تقسیم کرد و از «اتم‌های فضا» تشکیل شده است. میلیارد میلیارد بار کوچک‌تر از کوچک‌ترین هسته اتم موجود.

نظریه حلقه، این ساختار اتمی و دانه‌ای و کوانتومی فضا را در یک مدل دقیق ریاضیاتی توصیف می‌کند. این مدل ریاضیاتی از اعمال معادلات عمومی مکانیک کوانتومی دیراک روی میدان گرانشی اینشتین به دست می‌آید.

به طور مشخص، نظریه حلقه نشان می‌دهد که حجم (مثلاً حجم یک مکعب) نمی‌تواند تا هر مقدار که می‌خواهد کوچک باشد. کوچک‌بودن حجم حدی دارد. پایین‌ترین حد، فضایی در کار نیست. کوچک‌ترین کوانتوم حجم واقعاً وجود دارد: یک اتم پایه‌ای فضا.

اتم‌های فضا

آشیل را در حال تعقیب لاک‌پشت به خاطر می‌آورید؟ پذیرش این مسأله برای زنون سخت بود که آشیل باید قبل از رسیدن به این موجود کندرو بی‌نهایت گام بردارد. ریاضیدانان با نشان دادن اینکه جمع تعدادی نامتناهی از قطعاتی که مدام کوچک‌تر می‌شوند، می‌تواند متناهی باشد، راه‌حلی ممکن برای این مسأله یافته بودند.

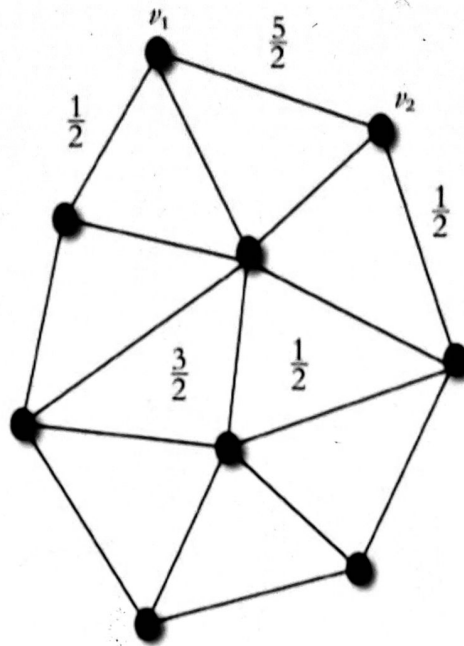
اما آیا این چیزی است که واقعاً در طبیعت اتفاق می‌افتد؟ آیا قطعاتی بین آشیل و لاک‌پشت قرار دارد که می‌تواند به هر مقدار دلخواه کوچک باشد؟ آیا اصلاً معنایی دارد که بتوانیم یک میلیونوم یک میلیاردم یک میلیاردم میلیاردم را برداریم و دوباره تا بی‌نهایت تقسیم کنیم؟ محاسبه طیف کوانتومی کمیت‌های هندسی نشان می‌دهد که جواب منفی است: تکه‌های به دلخواه کوچک از فضا وجود ندارند. حدی برای تقسیم‌پذیری فضا وجود دارد. اگرچه مقیاس این حد بسیار کوچک است اما به هر حال وجود دارد. این همان چیزی بود که ماتوی برونشتین در سال ۱۹۳۰ با شهودش دریافته بود. محاسبه طیف‌های حجم و مساحت، ایده برونشتین را تأیید می‌کند و آن را در یک قالب دقیق ریاضیاتی می‌ریزد.

آشیل نیازی ندارد بی‌نهایت گام بردارد تا به لاک‌پشت برسد چون در فضایی که از دانه‌هایی با اندازه متناهی درست شده است، گام‌های بی‌نهایت کوچک وجود ندارد. قهرمان آنقدر به لاک‌پشت نزدیک می‌شود که در نهایت با جهشی به اندازه یک کوانتوم به او می‌رسد. اما آیا این همان راه‌حلی نبود که لئو کیپوس و دموکریتوس ارائه داده بودند؟ آنها از ساختار دانه‌ای ماده حرف زده بودند و ما مطمئن نیستیم که دقیقاً راجع به فضا چه می‌گفتند. متأسفانه به متون آنها دسترسی نداریم و مجبوریم با قطعاتی که دیگران از آنها آورده‌اند سر کنیم. چنین کاری مانند این است که بخواهیم نمایشنامه‌های شکسپیر را بر حسب نقل قول‌هایی که از شکسپیر شده بازسازی کنیم.^{۷۶} استدلال دموکریتوس مبنی بر اینکه یک چیز نمی‌تواند هم پیوسته باشد هم مجموعه‌ای از نقاط، می‌تواند در مورد فضا هم به کار رود. تصور می‌کنم اگر می‌توانستیم از دموکریتوس بپرسیم که آیا تقسیم نامتناهی یک قطعه از فضا معنا دارد یا نه، جواب او فقط می‌توانست این باشد که این تقسیم‌پذیری حدی دارد. در نگاه این فیلسوف آبدرایی ماده از اتم‌هایی تشکیل شده که قابل تقسیم نیستند. از آنجا که دموکریتوس فضا را بسیار شبیه ماده می‌دید - او خودش می‌گفت که فضا ماهیت و «فیزیک مخصوص» خودش را دارد - احتمالاً در گرفتن این نتیجه تردید نداشت که فضا هم از قطعاتی پایه‌ای ساخته شده که قابل تقسیم نیستند. شاید ما تنها در حال تعقیب ردپای دموکریتوس هستیم. بدیهی است که من نمی‌خواهم بگویم فیزیک در طول دو هزار سال بدون دستاورد بوده و آزمایش‌ها و محاسباتش معنایی نداشته و می‌توان دموکریتوس را جایگزین علم مدرن کرد. مشخصاً خیر. بدون آزمایش و ریاضیات، هیچ‌گاه آن چیزهایی را که فهمیده‌ایم نمی‌فهمیدیم. اما همان‌طور که از ایده‌های تازه برای گسترش تصور مفهومی مان از جهان استفاده می‌کنیم، از شهودهای قوی غول‌های گذشته هم کمک می‌گیریم. دموکریتوس یکی از این غول‌هاست و ما جایی تازه برای نشستن روی شانه‌های بزرگش پیدا کرده‌ایم. بیایید به گرانش کوانتومی بازگردیم.

شبکه‌های اسپین

گراف‌هایی که موقعیت کوانتومی فضا را توصیف می‌کنند با یک حجم (۷) برای هر گره و یک عدد نیمه صحیح (j) برای هر خط مشخص می‌شوند. گرافی با این مشخصات و اطلاعات را شبکه اسپین می‌نامیم (شکل ۶-۴). (اعداد نیمه صحیح در فیزیک «اسپین» نامیده می‌شوند زیرا در مکانیک کوانتومی برای اشیائی به کار می‌روند که دور خود می‌گردند). یک شبکه اسپین، موقعیت کوانتومی میدان گرانشی را نشان می‌دهد: موقعیت کوانتومی فضا. یک فضای دانه‌بندی شده که در آن حجم و مساحت گسسته‌اند. در علم فیزیک همه‌جا از شبکه‌هایی تورمانند (کاغذ گرافیکی) برای تخمین فضای پیوسته استفاده می‌شد. اکنون دیگر فضای پیوسته‌ای برای تخمین وجود ندارد: فضا در واقع دانه‌ای است.

تفاوت اساسی فوتون‌ها (کوانتوم‌های میدان الکترومغناطیسی) و گره‌های گراف (کوانتوم‌های گرانش) این است که فوتون‌ها در فضا قرار دارند حال آنکه کوانتوم‌های گرانش، خودشان سازنده فضا هستند. فوتون‌ها با مکانی که در آن قرار دارند مشخص می‌شوند.^{۷۷} کوانتوم‌های فضا در مکانی خاص قرار ندارند زیرا آنها خودشان مکان‌اند. تنها چیزی که اطلاعی از وضعیت فضایی آنها در اختیار ما می‌گذارد این است که در مجاورت کدام کوانتوم‌اند و کدام کوانتوم کنار کدام کوانتوم است.



شکل ۴-۶ یک شبکه اسپین

این اطلاعات را رابط‌های گراف معین می‌کند. دو گرهی که با یک رابط به هم متصل شده‌اند دو گره مجاور نامیده می‌شوند. آنها دو دانه یا ذره فضا هستند که به هم متصل‌اند: این «اتصال»، ساختار فضا را شکل می‌دهد.

بنابراین کوانتوم‌های گرانش در فضا نیستند، آنها خود فضا هستند. شبکه‌های اسپینی که ساختار کوانتومی میدان گرانشی را توصیف می‌کنند، در فضا غوطه‌ور نیستند و به وسیله فضا احاطه نشده‌اند. موقعیت مکانی یک کوانتوم فضا نه بر حسب چیزی دیگر بلکه صرفاً با رابطه‌ها و نسبت‌هایی که برقرار می‌کند، مشخص می‌شود.

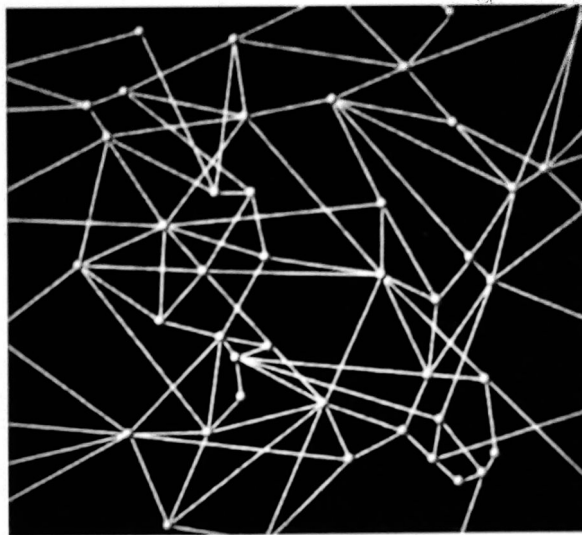
اگر از طریق رابط‌ها از یک ذره به ذره‌ای دیگر برویم و این کار را ادامه دهیم تا دایره‌ای کامل بسازیم و به ذره‌ای که از آن شروع کرده بودیم بازگردیم، یک «حلقه» ساخته‌ایم. اینها همان حلقه‌های نظریه حلقه هستند. در فصل ۴ نشان دادیم که خمش فضا را می‌توان با یک پیکان که در یک مسیر حلقوی بسته حمل می‌شود به این شکل اندازه گرفت که آیا پس از اینکه پیکان به نقطه ابتدایی رسید هنوز هم در همان راستای اولیه است یا از آن راستا منحرف شده و چرخیده است. ریاضیات نظریه، این خمش را برای تمام دایره‌های بسته در شبکه اسپین معین می‌کند و به ما امکان می‌دهد تا از طریق ساختار یک شبکه اسپین، خمش فضا زمان و در نتیجه، نیروی میدان گرانشی را حساب کنیم.^{۷۸}

بنابراین مکانیک کوانتومی فقط به دانه‌بندی محدود نیست: سیر تحولات هم احتمالی است یعنی مسیر تحول یک شبکه اسپین تصادفی است. در این باره در فصل بعد که راجع به زمان است بیشتر سخن خواهم گفت.

در واقع آنچه مهم است این نیست که چیزها چیستند بلکه این است که چیزها چگونه برهم کنش می‌کنند. شبکه‌های اسپین خودشان موجوداتی مستقل نیستند: آنها تأثیر فضا روی چیزها را توصیف می‌کنند. دقیقاً به همان صورت که یک الکترون در هیچ جای مشخصی وجود ندارد و در یک ابر احتمالاتی متشکل از تمام نقاط ممکن پراکنده شده است، فضا هم از یک شبکه اسپین مشخص و منفرد تشکیل نشده است بلکه متشکل از ابری احتمالاتی است که شامل تمام شبکه‌های اسپین ممکن است.

در مقیاسی بسیار کوچک، فضا مجموعه‌ای از ارتعاشات کوانتوم‌های گرانش است که بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و با هم بر چیزهای دیگر تأثیر می‌گذارند و در این برهم کنش‌ها خودشان را به شکل شبکه‌های اسپین نمایان می‌کنند. هر شبکه اسپین مجموعه‌ای از ذراتی است که با هم رابطه دارند (شکل ۵-۶).

فضای فیزیکی از مجموعه این شبکه ارتباطات مرتعش یافته شده است. خود خطوط هیچ‌جا نیستند. آنها به جای اینکه در مکانی خاص قرار داشته باشند، خودشان با برهم کنش‌هایشان فضا را می‌سازند. فضا از برهم کنش کوانتوم‌های مجزای گرانش به وجود آمده است.



شکل ۵-۶ یک شبکه اسپین

این اولین گام به سوی فهم گرانرش کوانتومی است. دومین گام زمان است. بحثی که فصل بعد به آن اختصاص داده شده است.

۷: زمان وجود ندارد

کسی نمی‌تواند زمان را به خودی خود و جدای از حرکت اشیاء درک کند.

لوکرتیوس، درباره ماهیت چیزها

خواننده هوشیار باید متوجه شده باشد که در فصل قبل، کمتر به مفهوم زمان توجه شده است. با این حال، اینشتین یک قرن پیش به ما نشان داد که نمی‌توانیم زمان را جدا از فضا در نظر بگیریم و باید به هر دو آنها به منزله یک کل واحد یعنی فضا-زمان بیندیشیم. وقت آن رسیده که این مسأله را لحاظ کنیم و زمان را هم به صحنه بیاوریم.

پژوهش‌های گرانش کوانتومی تا مدت‌ها تنها حول معادلات فضا می‌گشتند و شجاعت رویارویی با مسأله زمان را نداشتند. تازه در پانزده سال اخیر روشی برای اندیشیدن به زمان پیدا شده است. تلاش می‌کنم این روش را توضیح دهم.

گرانش کوانتومی، مفهوم فضا به منزله یک ظرف بی‌شکل برای اشیاء را از فیزیک حذف کرد. اشیاء (کوانتوم‌ها) درون فضا قرار ندارند، آنها کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و فضا، تاروپود این رابطه‌های همسایگی میان آنهاست. همان‌گونه که ایده فضا به مثابه یک ظرف خنثی را کنار گذاشتیم، باید ایده زمان را هم به منزله جریانی خنثی که واقعیت در طول آن گسترده می‌شود، کنار بگذاریم. همان‌گونه که مفهوم فضای پیوسته‌ای که حاوی اشیاء است حذف می‌شود مفهوم زمان جاری پیوسته‌ای که پدیده‌ها در آن رخ می‌دهند هم باید حذف شود.

به بیان واضح، فضا دیگر در نظریه بنیادین وجود ندارد و کوانتوم‌های میدان گرانشی در فضا نیستند. به همین معنا زمان هم دیگر در نظریه بنیادین وجود ندارد: تغییرات کوانتوم‌های میدان گرانشی در زمان رخ نمی‌دهد. زمان صرفاً شمارنده برهم‌کنش‌های آنهاست. همان‌طور که از معادله ویلر دویت مشخص است، معادلات بنیادی دیگر شامل متغیر زمان نیستند. زمان مانند فضا نتیجه میدان گرانشی است.

البته این قضیه تا حدی هم در نسبیت عام کلاسیک مصداق داشت، یعنی آنجا که زمان به مثابه یکی از جنبه‌های میدان گرانشی ظاهر می‌شد. اما تا زمانی که نظریه کوانتوم را نادیده بگیریم، فقط می‌توانیم به فضا-زمان به شیوه‌ای معمولی بیندیشیم: پرده‌ای نقش‌دار که بقیه واقعیت در آن گسترده می‌شود، حتی اگر این پرده متحرک و پویا باشد. به محض اینکه مکانیک کوانتومی را هم لحاظ کنیم، خواهیم فهمید که زمان هم خصوصیتی مانند باقی واقعیت دارد، یعنی عدم قطعیت احتمالاتی، دانه‌بندی و رابطه‌مندی. این «زمان» به شکل قابل توجهی با هر چه تاکنون از این کلمه می‌فهمیدیم، تفاوت دارد.

این دومین نتیجه نظریه گرانش کوانتومی، حتی از حذف فضا هم نامتعارف‌تر است.

بیایید سعی کنیم آن را بفهمیم.

زمان آن چیزی نیست که ما فکر می‌کنیم

حدود یک قرن قبل روشن شده بود که زمان آن چیزی نیست که ما عموماً درباره‌اش فکر می‌کنیم. نسبیت خاص و عام این مسأله را روشن کرده بودند. امروزه می‌توان عدم دقت تلقی معمول ما از زمان را به راحتی در یک آزمایشگاه نشان داد.

مثلاً بیایید نخستین نتیجه نسبیت عام را که در فصل ۳ توضیح داده شد، دوباره در نظر بگیریم. فرض کنید دو ساعت داریم که دقیقاً با هم تنظیم شده‌اند و هر دو یک زمان را نشان می‌دهند. یکی را روی زمین و دیگری را روی یکی از وسایل خانه قرار دهید. نیم ساعت صبر کنید. سپس آنها را دوباره کنار هم بگذارید. آیا باز هم دقیقاً یک زمان را نشان می‌دهند؟

همان‌طور که در فصل ۳ گفتیم جواب خیر است. ساعت‌های مچی و ساعت‌های موبایل‌های ما به اندازه‌ای دقیق نیستند که بتوان این اختلاف ساعت را در آنها دید اما در آزمایشگاه‌های فیزیک سراسر دنیا زمان‌سنج‌هایی بسیار دقیق وجود دارد که این اختلاف را نشان می‌دهد: ساعتی که روی زمین بوده، از ساعتی که بالا قرار گرفته کندتر است.

چرا؟ چون زمان در همه جای جهان به یک شکل نمی‌گذرد. بعضی جاها تندتر می‌گذرد و بعضی جاها کندتر. هر چه به زمین یعنی جایی که گرانش^{۷۹} بیشتر است نزدیک شوید، زمان کندتر می‌گذرد. دوقلوهای فصل سوم را به خاطر دارید که به خاطر اینکه یکی شان در سطح دریا زندگی کرد و یکی در کوهستان نهایتاً سن شان متفاوت شد؟ تفاوت بسیار کوچک است: زمان ذخیره شده در زندگی سطح دریا در مقایسه با زندگی کوهستان، در حد کسری از ثانیه است اما کوچک بودن این مقدار در این واقعیت که این دو زمان به هر حال با هم متفاوت‌اند

تغییری ایجاد نمی‌کند. زمان آن‌گونه که ما معمولاً تصور می‌کنیم کار نمی‌کند.

زمان را نباید به شکل یک ساعت بزرگ کیهانی تصور کرد که عمر جهان را نشان می‌دهد. بیش از یک قرن است که می‌دانیم باید زمان را پدیده‌ای موضعی در نظر بگیریم: هر شیء در هستی، گذر زمان مخصوص خودش را دارد و سرعت این گذر را میدان گرانشی در همان موضع تعیین می‌کند.

اما اگر ماهیت کوانتومی میدان گرانشی را لحاظ کنیم، همین تصور موضعی از زمان هم دیگر به کار نمی‌آید. در مقیاس پلانک رویدادهای کوانتومی دیگر بر حسب گذر زمان مرتب نمی‌شوند. به یک معنا، زمان محو می‌شود.

چه معنایی دارد که بگوییم زمان وجود ندارد؟

نخست اینکه لازم نیست به این دلیل که متغیر زمان در معادلات بنیادین غایب است، همه چیز را بی حرکت بپنداریم و تصور کنیم دگرگونی اتفاق نخواهد افتاد. برعکس، معنایش این است که تغییر همه جا حاضر است. فقط لازم است به این نکته توجه کنیم که فرایندهای پایه‌ای و ابتدایی را نمی‌توان بر حسب توالی لحظات معمول زمان مرتب کرد. در مقیاس فوق العاده کوچک کوانتوم‌های فضا، کل طبیعت با ریتم چوب‌دستی تنها یک رهبر ارکستر نمی‌رقصد: هر فرایندی برای رقص در کنار فرایندهای دیگر، ضرباهنگ خودش را دارد. گذر زمان در ذات خود جهان است و از خود جهان زاده می‌شود: از رابطه رویدادهای کوانتومی‌ای که در واقع خود جهان‌اند و هر یک زمان خود را تولید می‌کنند.

در واقع وجود نداشتن زمان باعث پیچیدگی چندانی نمی‌شود. بیایید سعی کنیم آن را بفهمیم.

چلچراغ و نبض

زمان در بیشتر معادلات فیزیک کلاسیک حضور دارد. همان متغیری که با حرف t نشان داده می‌شود. این معادلات به ما می‌گویند که چیزها چگونه در طول زمان دگرگون می‌شوند. اگر بدانیم چه چیز در گذشته اتفاق افتاده، این معادلات به ما کمک می‌کنند تا آینده را پیش‌بینی کنیم. به بیان دقیق‌تر، ما برخی متغیرها مانند موقعیت یک شیء A ، زاویه یک آونگ در حال نوسان B و دمای یک شیء C را اندازه‌گیری می‌کنیم و معادلات به ما می‌گویند که متغیرهای A و B و C چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند. آنها توابع $A(t)$ ، $B(t)$ ، $C(t)$ و ... را که توصیف‌کننده دگرگونی‌های این متغیرها در طول زمان هستند، پیش‌بینی می‌کنند.

گاليله نخستین کسی بود که فهمید می‌توان حرکت اشیاء روی زمین را با معادلاتی برای توابع زمانی، $A(t)$ ، $B(t)$ ، $C(t)$ ، توصیف کرد.

همچنین اولین کسی بود که معادلاتی واضح برای این توابع نوشت. $leghQ$ ، اولین قانون فیزیک زمینی که گاليله کشف کرد توضیح می‌دهد که یک شیء چگونه سقوط می‌کند یعنی چگونه ارتفاعش (x) با گذر زمان (t) تغییر می‌کند.

گاليله برای کشف و اثبات این قانون به دو اندازه‌گیری نیاز داشت. او باید ارتفاع شیء (x) و زمان (t) را اندازه می‌گرفت. بنابراین او مشخصاً به وسیله‌ای برای اندازه‌گیری زمان نیاز داشت یعنی به یک ساعت.

در زمان گاليله ساعت‌های دقیقی وجود نداشت. اما او خودش وقتی جوان بود راهی برای اندازه‌گیری دقیق زمان پیدا کرد. او کشف کرد که همه نوسانات یک آونگ مدت زمان برابری دارند (بدون در نظر گرفتن دامنه). بنابراین می‌توان زمان را خیلی ساده با شمارش نوسانات یک آونگ اندازه گرفت. این ایده الآن بدیهی به نظر می‌رسد اما گاليله باید آن را کشف می‌کرد و تا قبل از او به ذهن هیچ کس نرسیده بود. از این اتفاق‌ها در علم زیاد می‌افتد.

اما همه چیز هم به این سادگی و سراسرستی نیست.

بنابراین افسانه، این ایده زمانی به ذهن گاليله رسید که در کلیسای جامع پیزا در حال تماشای نوسان آهسته یک چلچراغ بزرگ بود که امروزه هم همان جاست. (این افسانه جعلی است چون چلچراغ در واقع سال‌ها بعد از مرگ گاليله آنجا نصب شده اما به هر حال داستان جالبی است. احتمالاً چلچراغی دیگر در زمان گاليله در آنجا نصب بوده است.) گاليله در هنگام شرکت در یک مراسم مذهبی که مشخص است جذابیت چندانی هم برایش نداشت، جذب نوسانات چلچراغ شده و مدت هر کدام از آنها را با شمارش نبض خود اندازه گرفته است. او با هیجانی تمام دریافته که تعداد ضربه‌های نبض برای تمام نوسان‌ها برابر است: این تعداد وقتی که چلچراغ آهسته‌تر نوسان می‌کند و

دامنه نوسان کمتر می شود هم تغییر نمی کند. تمام نوسان ها مدت زمان برابری دارند. این داستان جالب است، اما اگر قدری تأمل کنید شما را سرگشته می کند. این سرگشتگی در مرکز مسئله زمان قرار دارد. گالیله از کجا می دانست که تمام ضربه های نبض او مدت زمان یکسانی دارند؟^{۱۴۰}

چند سال پس از گالیله پزشکان با استفاده از ساعت، اندازه‌گیری نبض بیمارانشان را که در نهایت آن هم چیزی جز یک آونگ نبود، آغاز کردند. بنابراین ما از ضربه‌های نبض برای اطمینان از منظم بودن آونگ استفاده می‌کنیم و سپس از آونگ برای اطمینان از منظم بودن ضربه‌های نبض. آیا این شبیه یک دور نیست؟ اینها چه معنایی می‌دهد؟

معنایش این است که ما در واقعیت هیچ‌گاه خود زمان را اندازه نمی‌گیریم. ما همواره متغیرهای $A, B, C, \dots$ (نوسان‌ها، ضربان‌ها و بسیاری چیزهای دیگر) را اندازه می‌گیریم و یک متغیر را با متغیری دیگر مقایسه می‌کنیم یعنی توابع $A(B), B(C), C(A)$ ، و مانند اینها را اندازه می‌گیریم. صرفاً می‌توانیم تعداد ضربه‌های نبض در هر نوسان، تعداد نوسانات در هر تیک ساعت و تعداد تیک‌های ساعت در هر وقفه ساعت برج ناقوس را بشماریم...

نکته اینجاست که فرض وجود یک متغیر t یعنی یک «زمان حقیقی» که تمام حرکات بر مبنای آن رخ می‌دهند فرض مفیدی است حتی اگر قادر به اندازه‌گیری مستقیم خود این زمان نباشیم. ما معادلات متغیرهای فیزیکی را در نسبت با این t (زمان) غیر قابل مشاهده می‌نویسیم. معادلاتی که به ما نشان می‌دهند چیزها چگونه در t تغییر می‌کنند یعنی مثلاً هر نوسان آونگ چقدر زمان می‌برد و هر ضربان نبض چقدر طول می‌کشد. از این طریق می‌توانیم تغییرات متغیرها را نسبت به یکدیگر حساب کنیم - مثلاً یک نوسان برابر چند ضربه نبض است - و این پیش‌بینی را با آنچه در جهان مشاهده می‌کنیم مقایسه کنیم. اگر این پیش‌بینی‌ها درست باشند نتیجه می‌گیریم که این الگوی پیچیده الگویی معتبر است و به‌ویژه نتیجه می‌گیریم که به کار بردن متغیر زمان، t ، مفید است حتی اگر نتوانیم آن را مستقیماً اندازه‌گیری کنیم.

به عبارت دیگر، وجود متغیر زمان محصول یک فرض مفید است نه نتیجه یک مشاهده.

نیوتن بود که تمام اینها را فهمید؛ او دریافت که باید به این راه برود و این الگورا واضح‌تر کند و گسترش دهد. نیوتن آشکارا در کتابش ادعا می‌کند که ما هرگز نمی‌توانیم زمان حقیقی (t) را اندازه‌گیری کنیم. اما اگر فرض کنیم که وجود دارد می‌توانیم چارچوب کارآمدی برای فهم و توضیح طبیعت فراهم کنیم.

با روشن شدن این مسأله می‌توانیم به گرانش کوانتومی و معنای گزاره «زمان وجود ندارد» بازگردیم. معنای آن به همین سادگی است: وقتی که با اشیاء کوچک سرو کار داریم دیگر الگوی نیوتنی به کار نمی‌آید. این الگو فقط برای اشیاء بزرگ الگوی خوبی است.

اگر می‌خواهیم جهان را عمیقاً درک کنیم و بدانیم که در موقعیت‌های کمتر آشنا یعنی موقعیت‌هایی که گرانش کوانتومی مهم می‌شود چه اتفاقی برای جهان می‌افتد، باید این الگورا کنار بگذاریم. این ایده که یک زمان t وجود دارد که خود به خود در جریان است و تمام چیزها در نسبت با آن رخ می‌دهند دیگر به کار نمی‌آید. جهان با معادلات دگرگونی در زمان t قابل تبیین نیست. کاری که باید بکنیم ساده است: شمارش متغیرهای A, B, C که آنها را واقعاً مشاهده می‌کنیم و نوشتن معادلاتی که نسبت این متغیرها را با یکدیگر بیان می‌کنند نه با چیزی دیگر: اینها معادلاتی برای نسبت‌های قابل مشاهده است $A(B), B(C), C(A)$ ، نه برای تابع‌هایی که قابل مشاهده نیستند $A(t), B(t), C(t)$.

در مثال نبض و چلچراغ، ما نبض و چلچراغی نداریم که هریک در طول زمان در حال دگرگونی‌اند، فقط معادلاتی داریم که نشان می‌دهد این دو متغیر چگونه در نسبت با یکدیگر دگرگون می‌شوند. یعنی معادلاتی که مستقیماً و بدون اینکه به t اشاره کنند به ما می‌گویند هر نوسان شامل چند ضربه نبض است.

«فیزیک بدون زمان»، فیزیکی است که ما در آن فقط از نبض و چلچراغ سخن می‌گوییم بدون اینکه به زمان اشاره کنیم.

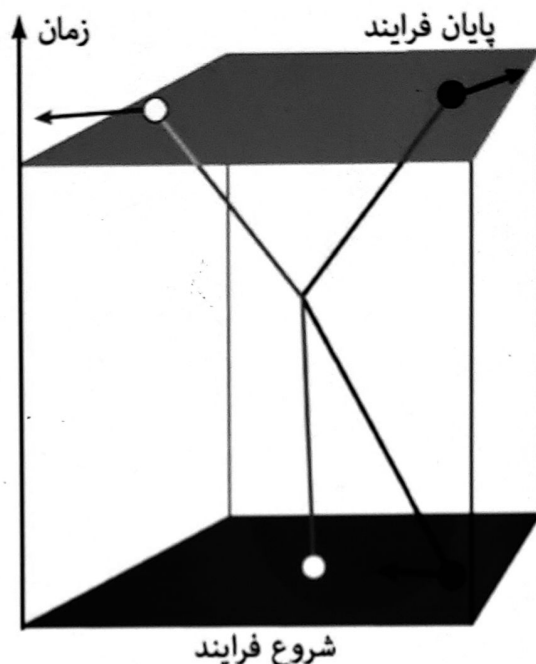
این یک تغییر ساده است اما از نظرگاهی مفهومی جهشی عظیم محسوب می‌شود. ما باید یاد بگیریم تصویر مألوف جهان یعنی چیزی که با گذر زمان تغییر می‌کند را با تصویری دیگر عوض کنیم. چیزها تنها نسبت به یکدیگر تغییر می‌کنند. در سطحی بنیادین، زمانی در کار نیست. حس ما از گذر عمومی زمان صرفاً یک تقریب است که برای دنیای بزرگ مقیاس خودمان اعتبار دارد. این حس ما از زمان از این واقعیت نشأت می‌گیرد که جهان را به شکلی درشت‌دانه ادراک می‌کنیم.

جهانی که این نظریه توصیف می‌کند، از آن جهانی که ما می‌شناسیم بسیار دور است. دیگر نه فضایی وجود دارد که جهان در آن قرار گرفته

باشد و نه زمانی که رویدادها در طول آن اتفاق بیفتند. فرایندهایی ابتدایی وجود دارد که در آنها کوانتوم‌های فضا و ماده با یکدیگر برهم کنش می‌کنند. همان‌طور که آرامش و شفافیت دریاچه‌ای کوهستانی محصول رقص سریع تعداد زیادی مولکول ریز آب است، این توهم هم که ما با یک فضا و زمان پیوسته احاطه شده‌ایم محصول میهم‌دیدن تعداد زیادی از فرایندهای ابتدایی است.

سوشی فضا زمان

این ایده‌های کلی چگونه در مورد گرانش کوانتومی به کار می‌روند؟ چگونه تغییری را توضیح دهیم که از نبود فضا به منزله ظرف و زمان به منزله چیزی که جهان در آن جریان دارد ایجاد می‌شود؟



شکل ۱-۷ ناحیه‌ای از فضا که در آن یک توپ سیاه به یک توپ سفید ساکن برخورد کرده، آن را به حرکت درآورده و خود بازمی‌گردد. جعبه ناحیه فضا زمان است. داخل آن مسیر توپ‌ها رسم شده است.

یک فرایند را در نظر بگیرید: مثلاً برخورد دو توپ بیلیارد روی میز سبز. فرض کنید یک توپ قرمز در مسیر یک توپ زرد فرستاده می‌شود، به توپ زرد نزدیک می‌شود، به هم برخورد می‌کنند و در دو مسیر مختلف از هم دور می‌شوند. این فرایند هم مثل تمام فرایندهای دیگر در یک فضای مشخص - مثلاً میزی به پهنای دو متر - و در یک بازه زمانی مشخص - مثلاً سه ثانیه - رخ می‌دهد. برای پرداختن به این فرایند از طریق گرانش کوانتومی باید فضا و زمان را هم در خود فرایند وارد کنیم (شکل ۱-۷).

به عبارت دیگر، ما صرفاً نباید دو توپ را توصیف کنیم بلکه تمام چیزهای اطراف آنها را هم باید در توصیف بگنجانیم: میز و هر شیء مادی دیگری در اطراف آنها و فضایی که آنها در خلال زمانی مشخص از شروع ضربه تا پایان فرایند در آن غوطه‌ورند. فضا و زمان میدان گرانشی‌اند، همان «نرم‌تن» اینشتین: ما میدان گرانشی یعنی قسمتی از این نرم‌تن را هم جزئی از فرایند حساب می‌کنیم. همه چیز در نرم‌تن عظیم اینشتین غوطه‌ور است: در مورد مثال بالا فرض کنید که قطعه‌ای از این نرم‌تن را که برخورد و تمام چیزهای مربوط به این برخورد در آن است، مانند تکه‌ای سوشی جدا کرده‌اید.

آنچه از این مثال به دست می‌آوریم یک جعبه فضا زمان است (مانند شکل ۱-۷): قطعه‌ای محدود از فضا زمان با فضایی در حد چند متر مکعب و زمانی در حد چند ثانیه. این فرایند «در» زمان رخ نمی‌دهد. جعبه درون فضا زمان نیست، شامل فضا زمان است. به همان صورت که دانه‌های فضا درون فضا نیستند، این فرایند هم درون زمان رخ نمی‌دهد. گذر زمان فقط شمارنده خود فرایند است، دقیقاً همان‌طور که کوانتوم‌های فضا داخل فضا نیستند و خودشان به فضا شکل می‌دهند.

کلید فهم کارکرد گرانش کوانتومی این است که به جای فرایندی که صرفاً شامل دو توپ است، کل فرایندی که با جعبه نشان داده شده و همه چیزهای درون آن از جمله میدان گرانشی را در نظر بگیریم.

حال بیابید به بصیرت اصلی هایزنبرگ بازگردیم: مکانیک کوانتومی به جای اینکه بگوید در فرایند چه اتفاقی می افتد، به ما احتمالاتی را نشان می دهد که در مسیرهایی متفاوت، حالات ابتدایی و انتهایی یک فرایند را به هم مرتبط می کنند. در مثال ما، حالات ابتدایی و انتهایی هر آن چیزی است که در مرز جعبه فضا زمان رخ می دهد.

آنچه معادلات گرانش کوانتومی حلقه به ما می دهند احتمالی است که با یکی از مرزهای ممکن جعبه در ارتباط است، احتمال اینکه اگر این توپ ها به این یا آن شکل وارد جعبه شده باشند به این یا آن شکل مشخص از جعبه خارج خواهند شد.

چگونه این احتمال محاسبه می شود؟ جمع مسیرهای فاینمن را که من پیش تر در بحث مکانیک کوانتومی توضیح دادم به یاد بیاورید. در گرانش کوانتومی احتمالات می توانند به همان صورت یعنی با در نظر گرفتن تمام مسیرهای ممکن که مرزی یکسان دارند، محاسبه شوند. از آنجا که ما پویایی فضا زمان را هم لحاظ کرده ایم، باید تمام فضا زمان های ممکن را که مرزشان با مرز جعبه یکی است در نظر بگیریم.

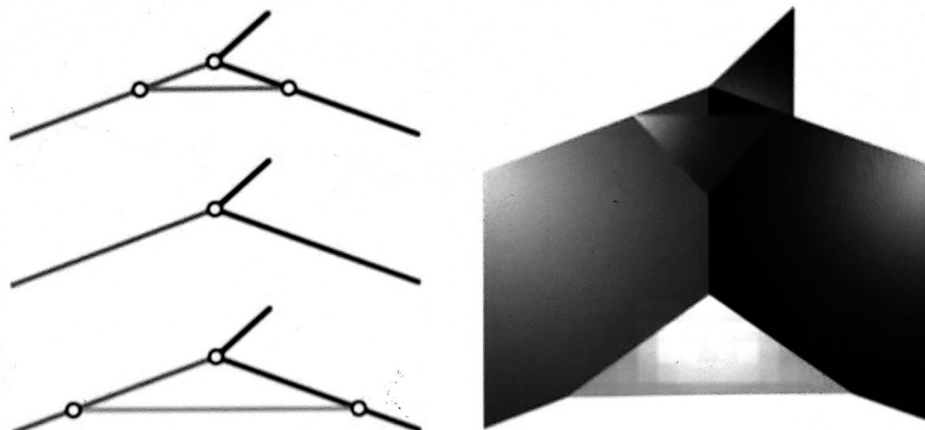
بنابر فرض مکانیک کوانتومی بین مرز ابتدایی یعنی جایی که توپ ها وارد می شوند و مرز انتهایی یعنی جایی که توپ ها خارج می شوند، نه فضا زمان مشخصی وجود دارد نه مسیر مشخص و معلومی: تنها «ابری» کوانتومی وجود دارد که تمام فضا زمان ها و مسیرهای ممکن را با هم در بر گرفته است. احتمال اینکه توپ ها به این یا آن شکل ممکن خارج شوند، می تواند از طریق جمع زدن تمام فضا زمان های ممکن محاسبه شود.

کف اسپین

اگر ساختار فضای کوانتومی یک شبکه اسپین باشد، ساختار فضا زمان چگونه است؟ هر یک از فضا زمان هایی که در محاسبه بالا وارد شده اند چه شکلی خواهند بود؟

این شکل باید چیزی شبیه یک «تاریخچه شبکه اسپین» باشد. فرض کنید که گراف شبکه اسپین را برمی دارید و آن را حرکت می دهید: هر کدام از گره های شبکه با حرکتش یک خط را ترسیم می کند - همان گونه که توپ ها در شکل ۷-۱ می کردند - و هر یک از خط های گراف در حرکت یک صفحه را شکل می دهد (مثلاً هر پاره خط متحرک یک مستطیل می سازد). اما این همه ماجرا نیست: هر گره می تواند به دو یا چند گره مبدل شود، همان طور که هر ذره می تواند به دو یا چند ذره تقسیم شود. روند برعکس نیز ممکن است: دو یا چند گره به یک گره مبدل شوند. در نتیجه یک گراف در حال تغییر، شکلی شبیه شکل ۷-۲ رسم می کند.

تصویری که در سمت راست شکل ۲-۷ به نمایش درآمده، یک «کف اسپین» است. کلمه «کف» را به این خاطر در مورد این ساختار به کار می‌بریم که از سطوحی تشکیل شده که با خطوطی از یکدیگر جدا شده‌اند و خود این خطوط در نقاط رأس‌شان یکدیگر را قطع می‌کنند: چنین ساختاری شبیه به کف صابون است (شکل ۳-۷). همچنین از کلمه اسپین استفاده می‌کنیم چون سطوح و رویه‌های کف حامل اسپین‌اند؛ همان‌طور که خطوط رابط گراف حامل اسپین بودند.



شکل ۲-۷ یک شبکه اسپین در حال تغییر: سه گره با هم ترکیب می‌شوند و

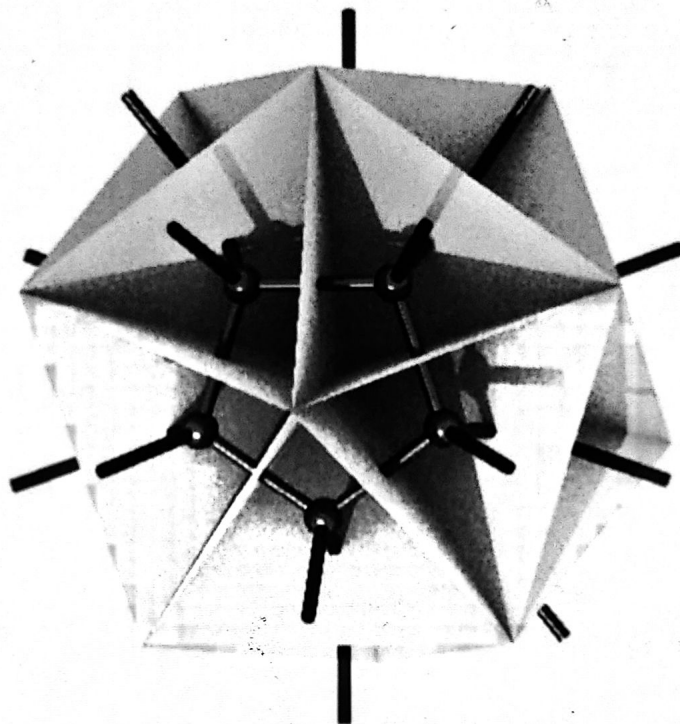
یک گره را شکل می‌دهند سپس دوباره جدا می‌شوند.

شکل سمت راست کف اسپین این فرایند را به تصویر می‌کشد.

برای محاسبه احتمال یک فرایند، باید تمام کف‌های اسپین ممکن درون جعبه را که با آن فرایند مرزهایی یکسان دارند، با هم جمع زد. مرز یک کف اسپین را یک شبکه اسپین و ماده روی آن مشخص می‌کند.



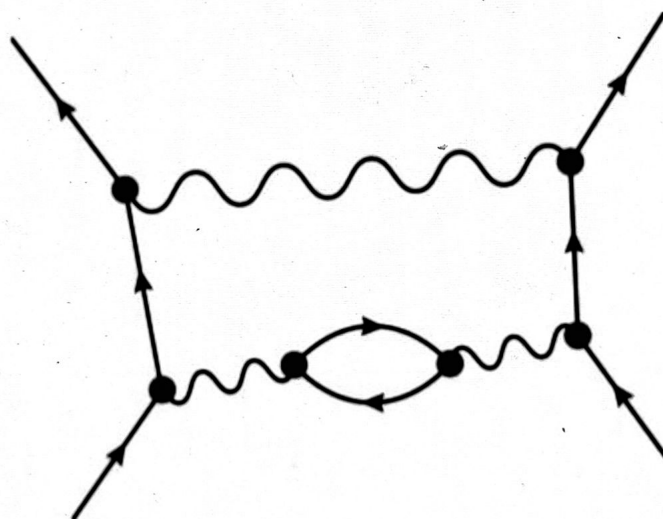
شکل ۳-۷ کف حباب‌های صابون



شکل ۴-۷ رأس کف اسپین. با احترام برگرفته از گرگ ایگن.

معادلات گرانش کوانتومی حلقه، احتمال یک فرایند را از طریق جمع تمام کف‌های اسپین با مرزهایی یکسان محاسبه می‌کنند. درواقع با این روش می‌توان احتمال هر رویداد فیزیکی‌ای را محاسبه کرد.^{۸۱}

در نگاه اول این راه محاسبه مبتنی بر کف‌های اسپین در گرانش کوانتومی با روش محاسبه چیزها در فیزیک نظری بسیار متفاوت به نظر می‌رسد. نه فضای معینی هست نه زمان معینی و کف اسپین فرضاً با ذرات مدل استاندارد بسیار متفاوت است. اما درواقع شباهت زیادی میان تکنیک کف اسپین و تکنیک‌های محاسبه در مدل استاندارد وجود دارد. تکنیک کف اسپین ترکیبی زیبا از دو تکنیک اصلی محاسبه در بافت مدل استاندارد است: نمودارهای فاینمن و تقریب شبکه.

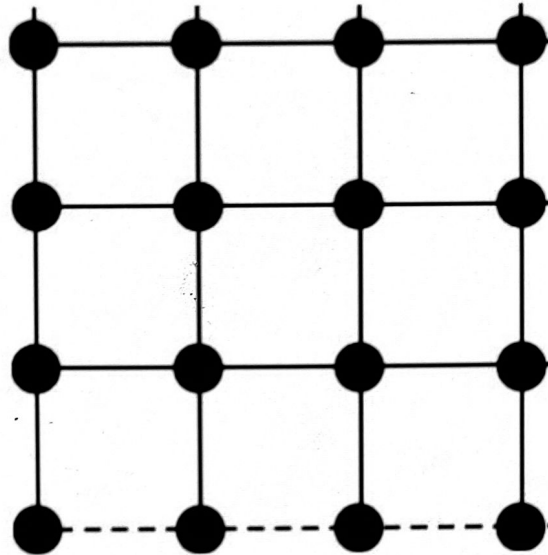


شکل ۵-۷ تقریب شبکه‌ای فضا زمان فیزیکی

به عنوان مثال، نمودارهای فاینمن برای محاسبه فرایندهایی به کار می‌روند که تحت تأثیر نیروهای الکترومغناطیسی یا نیروهای ضعیف قرار دارند. یک نمودار فاینمن توالی برهم کنش‌های اولیه میان ذره‌ها را نمایش می‌دهد. شکل ۵-۷ یک نمونه از این نمودار است که دو ذره یا دو کوانتوم میدان را در حال برهم کنش نشان می‌دهد. ذره سمت چپ به دو ذره تبدیل شده است و یکی از آن ذرات هم به نوبه خود به دو ذره دیگر تبدیل شده است سپس این دو ذره دوباره یکی شده‌اند و با ذره سمت راست به هم پیوسته‌اند. این گراف تاریخچه‌ای از

کوانتوم‌های میدان را نمایش می‌دهد.

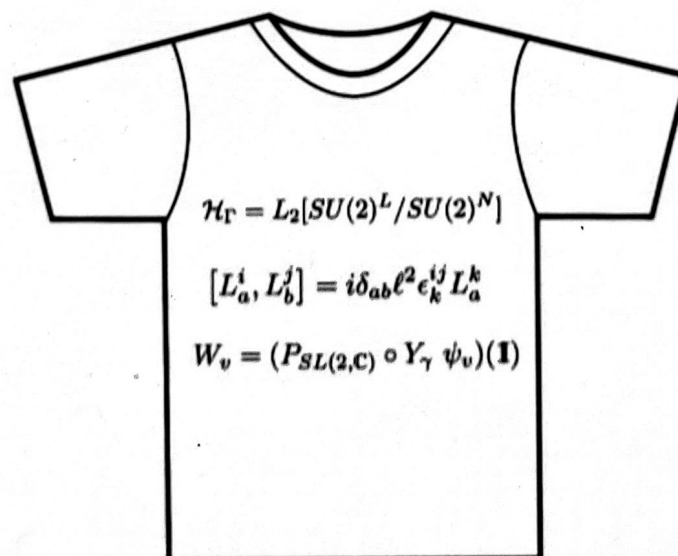
تقریب شبکه زمانی استفاده می‌شود که نیروها قوی‌اند و دیگر تصویر ذرات به کار توصیف فیزیکی نمی‌آید. مثلاً برای محاسبه نیروهای قوی بین دو کوارک درون هسته یک اتم. در تکنیک شبکه، یک فضای فیزیکی پیوسته را به شکلی تقریبی به صورت یک شبکه یا طرحی چهارخانه نشان می‌دهند (شکل ۶-۷). این طرح شبکه‌ای توصیف دقیقی از فضا نیست و صرفاً یک تقریب است مانند وقتی که مهندسان برای محاسبات پل، بتن را به چند عنصر محدود تقلیل می‌دهند. این دو روش انجام محاسبات -نمودارهای فاینمن و شبکه- کارآمدترین روش‌های محاسبه در نظریه میدان کوانتومی هستند.



شکل ۶-۷ تقریب شبکه‌ای فضا زمان فیزیکی

در گرانش کوانتومی اتفاق زیبایی می‌افتد: این دو روش انجام محاسبات با هم ترکیب و به یک روش مبدل می‌شوند. کف فضا زمان که در شکل ۲-۷ نشان داده شده و برای محاسبه یک فرایند فیزیکی در گرانش کوانتومی به کار می‌رود، هم می‌تواند یک نمودار فاینمن باشد هم یک محاسبه شبکه‌ای.^{۸۲} بنابراین، دو تکنیک محاسباتی مورد استفاده مدل استاندارد به دو جنبه یک تکنیک کلی تبدیل می‌شوند: جمع تمام کف‌های اسپین در گرانش کوانتومی.

من پیش از این معادلات اینشتین را عیناً در کتاب آوردم. اینجا هم نمی‌توانم در مقابل آوردن مجموعه کامل معادلات نظریه حلقه مقاومت کنم حتی اگر خواننده هیچ از آنها نفهمد -حداقل پیش از اینکه خیلی خوب ریاضیات بخواند.



شکل ۷-۷ معادلات گرانش کوانتومی حلقه که روی یک تی‌شرت جا داده شده‌اند.

کسی زمانی ادعا کرده بود که اگر نتوان معادلات یک نظریه را روی یک تی شرت جا داد، آن نظریه معتبر نیست. این هم تی شرت گرانش کوانتومی حلقه (شکل ۷-۷).

این معادلات^{۸۳} نسخه ریاضیاتی تصویری از جهان اند که من در دو فصل اخیر ترسیمش کرده‌ام. ما به هیچ وجه از صحیح بودن این معادلات مطمئن نیستیم اما به عقیده من فعلاً بهترین روایت از گرانش کوانتومی اند.

فضای یک شبکه اسپین است که گره‌های این شبکه نشان‌دهنده دانه‌های بنیادی فضا و پیوندهای شبکه نمایانگر پیوندهای مجاورت این دانه‌ها هستند. فضا زمان حاصل فرایندهایی است که در آنها یک شبکه اسپین به شبکه‌ای دیگر تبدیل می‌شود و این فرایندها را جمع تمام کف‌های اسپین توصیف می‌کند. یک کف اسپین بیانگر تاریخچه‌ای از یک شبکه اسپین است یعنی یک فضا زمان دانه‌ای که در آن گره‌های گراف مدام به هم می‌پیوندند و از هم جدا می‌شوند.

این جوش و خروش کوانتوم‌ها که سازنده فضا و زمان است، زیرساخت ظاهر آرام واقعیت بزرگ مقیاسی است که دور و بر ما قرار دارد. هر سانتی متر مکعب از فضا و هر ثانیه‌ای که می‌گذرد نتیجه این رقص کف‌مانند کوانتوم‌های بسیار کوچک است.

جهان از چه ساخته شده است؟

اکنون که پس زمینه فضا محو شده، زمان محو شده، ذرات و میدان‌های کلاسیک هم محو شده‌اند پس جهان از چه چیز ساخته شده است؟

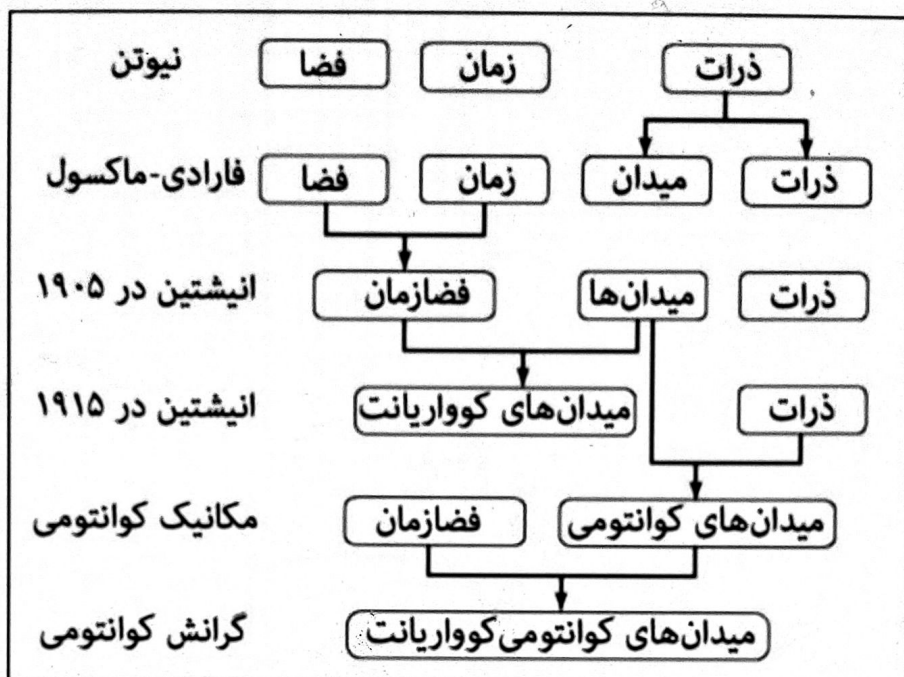
جواب ساده است: ذرات کوانتوم‌های میدان کوانتومی اند، نور از کوانتوم‌های یک میدان تشکیل شده است، فضا چیزی جز یک میدان نیست که آن هم از کوانتوم‌ها ساخته شده و زمان از دل فرایندهای همین میدان سر بر می‌آورد. به عبارت دیگر، کل جهان از میدان‌های کوانتومی ساخته شده است (شکل ۷-۸).

این میدان‌ها درون فضا زمان قرار ندارند. به بیان ساده، آنها روی یکدیگر قرار دارند: میدان روی میدان. فضا و زمانی که ما در مقیاس بزرگ ادراک می‌کنیم تصور مبهم و تقریبی ما از یکی از این میدان‌ها است: میدان گرانشی.

میدان‌هایی که بدون نیاز به فضا زمانی که زیر بنا یا پشتیبان آنها باشد روی خودشان قرار دارند و خودشان می‌توانند فضا زمان را تولید کنند، «میدان‌های کوانتومی کوواریانت» نامیده می‌شوند. ماده‌ای که جهان از آن ساخته شده در سال‌های اخیر به شکلی رادیکال ساده شده است. جهان، ذرات، نور، انرژی، فضا و زمان، همه و همه چیزی نیستند جز جلوه‌های متفاوت آشکار شدن یک موجودیت یگانه: میدان کوانتومی کوواریانت.

میدان‌های کوانتومی کوواریانت امروزه بهترین توصیف از آپایرون است: همان ماده اولیه‌ای که همه چیز از آن تشکیل شده و آناسیمند،

احتمالاً اولین فیلسوف و اولین دانشمند، آن را مطرح کرده بود.^{۸۴}



شکل ۷-۸ جهان از چه ساخته شده است؟ از یک چیز: میدان‌های کوانتومی کوواریانت.

شکاف بین فضای خمیده و پیوسته نسبیت عام اینشتین و کوانتوم‌های گسسته نظریه کوانتومی که در فضایی تخت و یکنواخت قرار دارند، از میان رفته است. تناقض ظاهری گفته شده دیگر در کار نیست. بین پیوستار فضا و زمان و کوانتوم‌های فضا همان نسبتی برقرار است که بین امواج الکترومغناطیسی و فوتون‌ها برقرار بود. امواج تصویر تقریبی بزرگ مقیاسی از فوتون‌ها ارائه می‌دهند. موج‌ها به صورت فوتون با یکدیگر برهم کنش می‌کنند. فضا و زمان پیوسته، تصویر تقریبی بزرگ مقیاسی از پویایی کوانتوم‌های گرانرش اند. فضا و زمان به صورت کوانتوم‌های گرانرش برهم کنش می‌کنند. همان ریاضیاتی که به شکلی منسجم میدان‌های کوانتومی را توصیف می‌کند، برای توصیف میدان گرانرش کوانتومی هم به کار می‌رود.

بهای مفهومی‌ای که برای به دست آوردن این توصیف پرداخته شد دست‌شستن از فضا و زمان به منزله ساختاری عمومی بود که جهان در چارچوب آن به نمایش درمی‌آید. فضا و زمان تقریب‌هایی هستند که در مقیاس بزرگ پدیدار می‌شوند. کانت احتمالاً در این ادعا برحق بود که ذهن و عین در دانش از یکدیگر جدایی‌ناپذیرند اما آنجا که فضا و زمان نیوتنی را شکل‌های پیشین دانش و قسمتی از قواعدی ضروری برای فهم جهان می‌دانست، قطعاً اشتباه می‌کرد. این قواعد تغییر کرده و با پیشرفت دانش ما هنوز هم در حال تغییر است. در نهایت آن گونه که به نظر می‌رسید، نسبیت عام و مکانیک کوانتومی با هم ناسازگار نیستند. با یک بررسی دقیق‌تر درمی‌یابیم که این دو دست به دست هم می‌دهند و به زیبایی با هم گفت‌وگو می‌کنند. روابط فضایی‌ای که فضای خمیده اینشتین را شکل می‌دهند همان برهم کنش‌هایی هستند که روابط بین سیستم‌های مکانیک کوانتومی را برقرار می‌کنند. همین که متوجه شویم فضا و زمان دو جنبه از یک میدان کوانتومی هستند و میدان کوانتومی می‌تواند بدون قرار گرفتن در فضایی خارجی هم وجود داشته باشد، نسبیت عام و مکانیک کوانتومی با هم سازگار و به دو روی یک سکه بدل می‌شوند.

این تصویر غریب از ساختار بنیادین جهان، تصویری است که امروزه گرانرش کوانتومی از واقعیت ارائه می‌دهد.

همان‌طور که در بخش بعد خواهیم دید دست‌آورد اصلی این مدل از فیزیک، حذف مفهوم بی‌نهایت است. مفهوم بی‌نهایت کوچک دیگر وجود نخواهد داشت. بی‌نهایت‌هایی که به خاطر وجود مفهوم فضای پیوسته پیش‌بینی می‌شدند و برای نظریه متعارف میدان‌های کوانتومی دردسرساز شده بودند، از میان می‌روند چون آنها دقیقاً محصول یک فرض هستند که به لحاظ فیزیکی نادرست است: پیوستگی فضا. همچنین تکنیکی‌هایی که با قوی شدن میدان گرانرش به وجود می‌آیند و نظریه اینشتین را بی‌معنا می‌کنند، از میان می‌روند: آنها صرفاً نتیجه در نظر نگرفتن خصلت کوانتومی میدان هستند. قطعات پازل کم‌کم در جای خود قرار می‌گیرند. من در فصل‌های پایانی این کتاب

چند تا از پیامدهای این نظریه را توضیح خواهم داد.

ممکن است اندیشیدن به موجودیت‌های بنیادین گسسته‌ای که در فضا و زمان قرار ندارند اما با روابطشان فضا و زمان را می‌سازند، عجیب و دشوار به نظر برسد. اما این ادعای آناکسیمندر که همان آسمانی که بالای سرمان است زیر پای مان هم قرار دارد، چقدر باید عجیب بوده باشد؟ یا این ادعای آریستارخوس که وقتی داشت برای اندازه‌گیری فاصله زمین با ماه و خورشید تلاش می‌کرد دریافت که آنها بسیار از زمین دورند و اندازه‌ای بسیار بسیار بزرگ‌تر از یک توپ کوچک دارند و حتی خورشید بسیار عظیم‌تر از زمین است. یا این ادعای هابل که دریافت ابرهای تار و کوچک بین ستاره‌ها در واقع دریایی از ستاره‌های بسیار دوردست‌اند...

جهان اطراف ما در طی قرن‌ها مدام تغییر کرده و گسترده شده است. ما بهتر می‌بینیم، آن را بهتر می‌فهمیم و از تنوعش و از محدودیت تصوراتی که از آن داشتیم حیرت‌زده می‌شویم. توصیفاتی که از جهان می‌کنیم مدام غریب‌تر اما در عین حال ساده‌تر می‌شود. شیه موش‌های کور کوچکی در زیر زمین هستیم که هیچ از جهان نمی‌دانیم اما به آموختن ادامه می‌دهیم...

اکنون تمام آنچه را در درازنای شب گفتند شنیدیم

و تمام اندیشه‌هاشان را روی هم گذاشتند

تا ما شاهد چیزی باشیم که نمی‌تواند تنها خیال باشد و وهم

و به چیزی بسیار ماندنی بدل خواهد شد

چیزی که غریب اما به هر روی ستایش‌برانگیز است. [۲]

بخش چهارم: فراسوی فضا و زمان

من تا اینجا شرحی از مبانی گرانش کوانتومی و تصویرش از جهان ارائه داده‌ام. در فصل‌های پایانی چند نتیجه این نظریه را توضیح خواهم داد: این نظریه درباره پدیده‌هایی مثل بیگ‌بنگ و سیاهچاله چه می‌گوید؟ همچنین درباره وضعیت کنونی آزمایش‌هایی که برای تأیید این نظریه انجام می‌شود بحث خواهم کرد. و اینکه در نظر من و به خصوص با کشف نشدن ذرات ابرمتقارنی که همه انتظارشان را می‌کشیدند، طبیعت چه دارد که به ما بگوید.

کتاب را با تأملاتی بر آنچه هنوز از دایره فهم ما از جهان بیرون است تمام کرده‌ام: ترمودینامیک، نقش اطلاعات در نظریه‌ای بدون فضا و زمان مانند گرانش کوانتومی و در نهایت ظهور دوباره زمان. همه اینها ما را به سرحدات دانشمان می‌برد، به نقطه‌ای که از آنجا می‌توانیم به چیزهایی که هیچ از آنها نمی‌دانیم نگاهی بیندازیم: به رمز و راز عمیقی که اطراف ما را فرا گرفته است.

۸: فراسوی مه‌بانگ

استاد

در سال ۱۹۷۲ یک دانشمند جوان بلژیکی که کشیش یسوعی کاتولیک هم بود، معادلات اینشتین را بررسی کرد و مانند خود اینشتین دریافت که بر حسب آنها جهان یا باید در حال انبساط باشد یا انقباض. اما کشیش بلژیکی به جای اینکه مانند اینشتین به طرزی احمقانه این نتایج را رد کند و قاطعانه تلاش کند تا از آنها بپرهیزد، آنها را پذیرفت و برای آزمایش آنها به جست‌وجوی داده‌های ستاره‌شناسانه پرداخت.

در آن زمان هنوز به کهکشان‌ها کهکشان نمی‌گفتند. آنها را سحابی نام نهاده بودند چرا که از پشت چشمی تلسکوپ شبیه ابرهای کوچک شیرین‌رنگی میان ستاره‌ها به نظر می‌رسیدند. هنوز کشف نشده بود که آنها مانند کهکشان خود ما، جزایری دور و بسیار عظیم از ستاره‌ها هستند. اما کشیش جوان بلژیکی دریافت که همین داده‌های اندک موجود دربارهٔ کهکشان‌ها، با امکان انبساط جهان سازگار است: کهکشان‌های نزدیک با سرعت زیاد در حال دور شدن‌اند، انگار که به آسمان پرتاب شده باشند. کهکشان‌های دورتر با سرعتی حتی بیشتر از کهکشان‌های نزدیک از ما دور می‌شوند. جهان مانند یک بالن در حال باد شدن است.

دو سال بعد به لطف مشاهدات دو ستاره‌شناس آمریکایی هنریتا لیویت^{۸۵} و ادوین هابل^{۸۶}، این نظر تأیید شد. لیویت تکنیکی بسیار خوب برای اندازه‌گیری فاصله سحابی‌ها کشف کرد که اثبات می‌کرد آنها بیرون از کهکشان ما و بسیار دور از آن هستند. هابل با استفاده از این تکنیک و تلسکوپ بزرگ رصدخانه پالومار، داده‌های دقیقی جمع‌آوری کرد که ثابت می‌کرد کهکشان‌ها با سرعتی متناسب با فاصله‌شان در حال دور شدن‌اند.



شکل ۸-۱ هنریتا لیویت

اما کشیش جوان بلژیکی در همان سال ۱۹۷۲ نتیجه مهم این کشف را دریافته بود: اگر سنگی را در حال پرتاب شدن رو به بالا ببینیم، معنایش این است که این سنگ قبلاً پایین بوده و چیزی آن را به بالا پرتاب کرده است. اگر می‌بینیم کهکشان‌ها از هم دور می‌شوند و جهان در حال انبساط است، معنایش این است که قبلاً به هم نزدیک‌تر بوده‌اند و جهان کوچک‌تر از حالا بوده است: چیزی باعث انبساط جهان شده است. کشیش جوان این نکته را مطرح کرد که جهان در ابتدا بسیار کوچک و فشرده بوده و در اثر انفجاری بسیار عظیم شروع به انبساط کرده است. او این وضع اولیه را اتم نخستین نامید. امروزه ما آن را مه‌بانگ می‌نامیم.



شکل ۸-۲ ژرژ لومتر

نام این کشیش جوان ژرژ لومتر^{۸۷} بود. این نام در زبان فرانسه شبیه به کلمه *la maître* تلفظ می شود که معنای آن «استاد» است. کمتر نامی این چنین برازنده مردی است که اولین بار مه بانگ را کشف کرد. اما برخلاف نامش، لومتر شخصیتی تودار و کم حرف داشت: او از جدل دوری می کرد و حتی هیچ گاه ادعا نکرد که انبساط جهان در ابتدا کشف او بوده است و در نهایت این کشف به هابل نسبت داده شد. دو برش از زندگی او برای نشان دادن عمق هوشش کافی است: یکی مربوط به مواجهه با اینشتین است و دیگری مربوط به مواجهه با یک پاپ.

همان طور که گفته شد اینشتین درباره انبساط جهان مردد بود. او از کودکی با این باور بزرگ شده بود که جهان ثابت است و نمی توانست خلاف این را بپذیرد. حتی بزرگ ترین ها هم اشتباه می کنند و قربانی باورهای مرسوم می شوند. لومتر به دیدار اینشتین رفت و تلاش کرد تا او را وادار کند که از این باور متعصبانه دست بردارد. اینشتین مقاومت کرد و تا آنجا پیش رفت که در جواب لومتر گفت: «محاسبات درست است، فیزیکت نفرت انگیز». بعدها اینشتین مجبور شد بپذیرد حق با لومتر بوده است. از هر کسی بر نمی آید که ثابت کند اینشتین اشتباه کرده است.

این اتفاق یک بار دیگر هم افتاد. همان گونه که در فصل ۳ توضیح دادم، اینشتین ثابت کیهان شناختی را وارد محاسبات خود کرد: اصلاحی کوچک اما مهم که به آن امیدی واهی داشت که معادلاتش را با فرض ثابت بودن جهان سازگار کند. زمانی که مجبور شد بپذیرد جهان ثابت نیست ثابت کیهان شناختی را حذف کرد. لومتر بار دیگر تلاش کرد تا عقیده او را تغییر دهد: اگرچه ثابت کیهان شناختی اثبات نمی کند جهان ثابت است اما به هر حال صحیح است و دلیلی برای حذف آن وجود ندارد. اینجا هم حق با لومتر بود: ثابت کیهان شناختی نشان دهنده وجود شتاب در انبساط جهان است و این شتاب اخیراً اندازه گیری شده است. یک بار دیگر اینشتین اشتباه می کرد و حق با لومتر بود.

وقتی این ایده که جهان از مه بانگ پدید آمده پذیرفته شد، پاپ پیوس دوازدهم در خطابه ای عمومی (در ۲۲ نوامبر ۱۹۵۱) اعلام کرد که این نظریه، آفرینش جهان را آن گونه که در سفر پیدایش آمده تأیید می کند. [۱] لومتر با حساسیت زیادی به این ادعای پاپ واکنش نشان داد. او با مشاور علمی پاپ اعظم تماس گرفت و سختی های زیادی کشید تا پاپ از برقرار کردن ارتباط میان آفرینش الهی و مه بانگ دست بردارد. لومتر اعتقاد داشت که پیوند دادن علم و دین به این صورت احمقانه است: کتاب مقدس، کتابی درباره فیزیک نیست و فیزیک هم یک متن مذهبی نیست. [۲] پیوس دوازدهم از عقیده خود کوتاه آمد و کلیسای کاتولیک دیگر هیچ گاه عمومی به این موضوع اشاره نکرد. از هر کسی بر نمی آید که ثابت کند پاپ اشتباه کرده است.

و البته در این مورد هم حق با لومتر بود: امروزه بحث های زیادی راجع به این مسأله هست که شاید مه بانگ آغاز جهان نباشد و یک جهان دیگر پیش از آن وجود داشته. تصور کنید اگر لومتر جلوی پاپ را نگرفته بود و پاپ رسماً اعلام می کرد که آفرینش همان مه بانگ است، امروز کلیسای کاتولیک تا چه اندازه شرمنده و خجالت زده بود. باید آیه «بگذار نور پدید آید» را به «چراغ را دوباره روشن کن» تغییر می دادند!

درافتادن با اینشتین و پاپ، متقاعد کردن هر دو آنها به اشتباهشان و محق بودن در هر دو قضیه، دلایلی است که یک نتیجه بیشتر ندارد: «استاد» زندگی‌ای برازنده نامش داشت.

امروزه تأییدهای این نظریه انکارناپذیرند: جهان در گذشته‌ای بسیار دور به شدت داغ و به شدت فشرده بوده و از آن زمان به بعد منبسط شده است. ما می‌توانیم تاریخ جهان را از همان گرما و فشار آغازین تا امروز به دقت بازسازی کنیم. می‌دانیم که اتم‌ها، عناصر، کهکشان‌ها و ستاره‌ها چگونه شکل گرفته‌اند و جهانی که امروزه می‌بینیم چگونه گسترش یافته است. اخیراً به طور گسترده و عمدتاً به وسیله ماهواره پلانک تابشی را مشاهده کرده‌ایم که جهان را پر کرده و این کاملاً با نظریه مه‌بانگ مطابقت دارد. ما با اطمینان زیادی می‌دانیم که در ۱۴ میلیارد سال گذشته یعنی از زمانی که جهان یک توپ آتشین بود، در مقیاس بزرگ بر جهان چه گذشته است.

فکرش را بکنید که در ابتدا عبارت «نظریه مه‌بانگ» برای مسخره کردن یک ادعای عجیب و غریب از سوی مخالفان وضع شد... اما امروز بالاخره همه مان متقاعد شده‌ایم که جهان ۱۴ میلیارد سال پیش یک گوی فشرده آتشین بوده است.

اما پیش از این وضعیت داغ و آتشین چه رخ داده است؟

با عقب رفتن در زمان، دما و چگالی ماده و انرژی افزایش می‌یابد تا در ۱۴ میلیارد سال پیش به مقیاس پلانک برسند. در این نقطه نسبت عام دیگر اعتباری ندارد چرا که باید در اینجا حتماً مکانیک کوانتومی را هم لحاظ کنیم. ما به قلمرو گرانش کوانتومی وارد شده‌ایم.

کیهان‌شناسی کوانتومی

بنابراین برای فهم اینکه ۱۴ میلیارد سال پیش چه اتفاقی افتاده به گرانش کوانتومی نیاز داریم. حلقه‌ها در این باره به ما چه می‌گویند؟ موقعیتی مشابه اما ساده‌تر را در نظر بگیرید. طبق مکانیک کلاسیک، الکترونی که مستقیماً به سوی هسته اتم سقوط می‌کند، توسط هسته بلعیده و ناپدید می‌شود. اما این چیزی نیست که در واقعیت رخ می‌دهد. مکانیک کلاسیک کامل نیست و به همین دلیل باید مکانیک کوانتومی را هم لحاظ کنیم. یک الکترون واقعی یک شیء کوانتومی است و مسیری دقیق را دنبال نمی‌کند: نمی‌توان یک الکترون را در ناحیه‌ای بسیار کوچک نگه داشت چون هرچه متمرکزتر شود با سرعت بیشتری می‌گریزد. اگر بخواهیم آن را در اطراف هسته نگه داریم بیشترین کاری که از دست مان برمی‌آید محدود کردن حرکت آن بر روی کوچک‌ترین مدار اتمی است: نمی‌توانیم بیش از این آن را به هسته نزدیک کنیم. مکانیک کوانتومی از سقوط یک الکترون واقعی به درون هسته جلوگیری می‌کند. وقتی یک الکترون بیش از اندازه به هسته نزدیک شود نوعی دافعه کوانتومی آن را دور می‌کند. بنابراین به لطف مکانیک کوانتومی است که ماده پایدار می‌ماند. بدون مکانیک کوانتومی الکترون‌ها به درون هسته سقوط می‌کردند، اتمی در کار نبود و ما هم وجود نداشتیم.

وضع برای جهان هم به همین منوال است. بیایید جهانی را تصور کنیم که آنقدر کوچک شود و تراکم یابد که زیر بار وزنش کاملاً فشرده شود. بنابر معادلات اینشتین، این جهان تا بی‌نهایت فشرده می‌شود و در نقطه‌ای نهایی مانند الکترونی که به درون هسته سقوط می‌کند، کاملاً ناپدید می‌شود. این مه‌بانگی است که معادلات اینشتین پیش‌بینی می‌کنند، البته اگر نظریه کوانتوم را نادیده بگیریم.

اما اگر مکانیک کوانتومی را لحاظ کنیم جهان نمی‌تواند تا بی‌نهایت فشرده شود. نوعی دافعه کوانتومی آن را پس می‌جهاند. یک جهان در حال انقباض نهایتاً به یک نقطه تبدیل نمی‌شود: پس می‌جهد و دوباره انبساط را از سر می‌گیرد انگار که از یک انفجار کیهانی پدید آمده باشد. (شکل ۸-۳)

بنابراین، گذشته جهان ما هم می‌تواند نتیجه چنین پس‌جهشی باشد. یک جهش عظیم که به جای مه‌بانگ، پنس جهش بزرگ نامیده می‌شود.^{۸۸} به نظر می‌رسد این همان چیزی است که از به کار بردن معادلات گرانش کوانتومی حلقه در مسئله انبساط جهان به دست می‌آید.



شکل ۸-۳ تصویر گرافیکی پس جهش بزرگ جهان که دانشمند ایتالیایی، فرانچسکو ویدوتو، کسی که اولین بار از کف چرخش برای محاسبه احتمالات این فرایند استفاده کرد، آن را طراحی کرده است.

اما این جهش را نباید به معنای تحت‌اللفظی آن تصور کرد. به خاطر بیاورید که اگر ما می‌خواستیم یک الکترون را تا حد ممکن به یک اتم نزدیک کنیم، آن الکترون دیگر نه یک ذره بلکه ابری گشوده از احتمالات ممکن بود. در این حالت دیگر یک مکان دقیق برای یک الکترون معنا ندارد. برای جهان هم اوضاع از همین قرار است: در گذار بحرانی از فرایند پس جهش بزرگ، دیگر نمی‌توانیم یک فضا و زمان یگانه را تصور کنیم حتی اگر دانه‌ای باشند. بلکه باید ابری پراکنده از احتمالات را تصور کنیم که در آن فضا و زمان به شدت در حال نوسان‌اند. در پس جهش بزرگ، جهان در ابری خروشان از احتمالات منحل می‌شود که البته هنوز با معادلات قابل توصیف است. بنابراین، جهان ما می‌تواند نتیجه فروپاشی یک جهان در حال انقباض پیشین باشد که از فاز کوانتومی گذر کرده و در آن فضا و زمان در ابری از احتمالات منحل شده‌اند.

اما در این صورت، معنای کلمه «جهان» مبهم خواهد شد. اگر منظور ما از کلمه «جهان»، «هر آنچه وجود دارد» باشد پس منطقاً نمی‌توان جهان دیگری غیر از این جهان را تصور کرد. اما کلمه «جهان» در کیهان‌شناسی معنای دیگری نیز دارد: فضا زمان پیوسته‌ای که ما در اطراف خود می‌بینیم و پر از کهکشان‌هایی است که می‌توانیم هندسه و تاریخ‌شان را مشاهده کنیم. اگر جهان را به این معنا در نظر بگیریم، هیچ دلیلی وجود ندارد که ثابت کند جهان ما تنها جهان موجود است. ما می‌توانیم گذشته را تا جایی بازسازی کنیم که پیوستار فضازمانی -مانند تصویری که جان ویلر ارائه داد- مثل کف‌های دریا از هم گسیخته و در ابری از احتمالات کوانتومی پاره‌پاره شود دلیلی ندارد که امکان وجود یک پیوستار فضازمانی دیگر شبیه فضازمان خودمان را در فراسوی این کف داغ نادیده بگیریم. احتمال گذشتن یک جهان از فاز پس جهش بزرگ و رفتن از حالت انقباض به انبساط را می‌توان با استفاده از تکنیک‌هایی که در فصل قبل توضیح داده شد، محاسبه کرد: جعبه‌های فضازمان. این محاسبات با استفاده از کف‌های چرخشی انجام می‌شود که جهان در حال انقباض را به جهان در حال انبساط متصل می‌کنند.

تمام آنچه گفته شد هنوز در مرحله ابتدایی کشف است اما نکته جالب توجه در کل این داستان این است که امروزه معادلاتی داریم که شاید بتوانیم به کمک آنها این رویدادها را توضیح دهیم. اخیراً داریم خیلی محتاطانه و فعلاً در حد یک نظریه، به فراسوی مه‌بانگ نگاهی می‌اندازیم.

۹: تأییدهای تجربی؟

جاذبیت‌های کیهان‌شناسی کوانتومی به جست‌وجوهای نظری حیرت‌آور در فراسوی مه‌بانگ محدود نمی‌شود. دلیل دیگری هم برای مطالعه کاربردهای این نظریه در کیهان‌شناسی وجود دارد: این کار می‌تواند فرصت آزمودن صحت این نظریه را فراهم کند. علم به این دلیل خوب جواب می‌دهد که پس از تمام فرضیه‌ها و استدلال‌ها، شهودها و بینش‌ها، معادلات و محاسبات، می‌توانیم امتحان کنیم که مسیر را درست پیموده‌ایم یا نه: هر نظریه پیش‌بینی‌هایی درباره چیزهایی که هنوز مشاهده نشده‌اند ارائه می‌دهد و ما می‌توانیم درستی یا نادرستی این پیش‌بینی‌ها را امتحان کنیم. این قدرت علم است که می‌تواند قابل اعتماد بودنش را اثبات کند و به ما اجازه دهد تا با یقین به آن اعتماد کنیم: می‌توانیم امتحان کنیم که یک نظریه درست است یا نه. این چیزی است که علم را از شکل‌های دیگر تفکر جدا می‌کند. شکل‌هایی که در آنها پرسش از اینکه چه کسی درست می‌گوید و چه کسی اشتباه می‌کند به مراتب دردسرسازتر و گاهی کاملاً بی‌معناست.

وقتی لومتر از ایده انبساط جهان دفاع کرد و اینشتین نپذیرفت، یکی‌شان درست می‌گفت و دیگری اشتباه می‌کرد. تمام دستاوردهای اینشتین، شهرت او، نفوذش بر دنیای علم و مرجعیت عظیمش، در این مورد به کارش نیامد. مشاهدات اثبات کردند که او اشتباه می‌کند و این پایان کار بود. یک کشیش گمنام بلژیکی درست می‌گفت. این دلیل قدرتمند بودن اندیشه علمی است.

جامعه‌شناسی علم، پیچیدگی فرایند فهم علمی را تا حدودی روشن کرده است. مانند تمام فعالیت‌های دیگر بشر، این فعالیت هم با بی‌عقلی دست‌به‌گریبان است، در بازی‌های قدرت شرکت می‌کند و از تمام فرم‌های اجتماعی و فرهنگی تأثیر می‌پذیرد. اما با وجود تمام اینها و برخلاف اغراق‌های تعدادی پست‌مدرنیست و نسبیست‌گرای فرهنگی و مانند آنها، هیچ کدام از مواردی که گفته شد از کارایی عملی و نظری تفکر علمی نمی‌کاهد. چرا که در نهایت در بیشتر موارد می‌توان به روشنی مشخص کرد که چه کسی درست می‌گوید و چه کسی نه. حتی اینشتین بزرگ هم می‌تواند به جایی برسد که بگوید: «آه... من اشتباه کردم!» (و گفت). برای آنان که به قابل اعتماد بودن اهمیت می‌دهند، علم بهترین استراتژی است.

این بدین معنا نیست که علم صرفاً هنر پیش‌بینی‌های قابل اندازه‌گیری است. برخی فلاسفه علم با محدود کردن آن به پیش‌بینی‌های عددی، دست و پایش را بیش از اندازه می‌بندند. آنها نکته اصلی را دریافته‌اند چرا که وسیله را با هدف اشتباه گرفته‌اند. پیش‌بینی‌های عددی قابل آزمایش، وسیله‌ای برای اثبات فرضیه‌ها هستند. هدف پژوهش‌های علمی صرفاً ارائه پیش‌بینی نیست: هدف علم این است که بفهمد جهان چگونه کار می‌کند، تصویری از جهان بسازد و آن را گسترش دهد و ساختاری مفهومی فراهم کند که از طریق آن بتوانیم به جهان بیندیشیم. علم بیش از اینکه فلی باشد، تصویری است.

پیش‌بینی‌های قابل آزمایش وسایلی کارآمد برای فهم اشتباهات ما هستند. نظریه‌ای که فاقد اثبات تجربی است هنوز در معرض آزمون قرار نگرفته است. این آزمون هیچ‌گاه پایان نمی‌پذیرد و یک نظریه با یک یا دو یا سه آزمایش کاملاً اثبات نمی‌شود. اما اگر پیش‌بینی‌های یکی پس از دیگری درست از کار دربیایند، به تدریج معتبرتر می‌شود. نظریه‌هایی مانند نسبیت عام و مکانیک کوانتومی که در ابتدا با انبوهی از سرگشتگی‌ها همراه بودند، با تأیید تدریجی تمام پیش‌بینی‌هایشان - حتی عجیب‌ترین پیش‌بینی‌ها - از طریق مشاهده و آزمایش، کم‌کم اعتبار به دست آوردند.

از سوی دیگر اهمیت اثبات‌های تجربی به این معنا نیست که دیگر به همین نظریه بسنده کنیم و تا داده‌های تجربی جدید به دست نیامده پیش‌تر نرویم. اغلب گفته می‌شود که علم تنها زمانی پیش می‌رود که داده‌های تجربی تازه‌ای به دست بیاورد. اگر این گونه بود امید ما برای دست پیدا کردن به نظریه گران‌ش کوانتومی، قبل از اندازه‌گیری چیزی تازه، بسیار اندک می‌بود اما درواقع این گونه نیست. چه داده تازه‌ای در اختیار کوپرنیک بود؟ هیچ. او همان داده‌هایی را در اختیار داشت که بطلمیوس داشت. نیوتن چه داده جدیدی داشت؟ تقریباً هیچ. دانش در دسترس او تنها قوانین کپلر و نتایج گالیله بودند. اینشتین برای کشف نسبیت عام چه داده تازه‌ای در اختیار داشت؟ هیچ. کل دانش در دسترس او نسبیت خاص بود و نظریه نیوتن. واضح است که پیشرفت علم صرفاً مشروط به داشتن داده‌های تازه نیست. کاری که کوپرنیک، نیوتن، اینشتین و خیلی‌های دیگر کردند تکیه بر نظریه‌هایی بود که قبلاً دانش گسترده‌ما از حوزه‌های مختلف طبیعت

را تلفیق کرده بودند و همچنین یافتن راهی برای بازاندیشی در این نظریه‌ها و ترکیب آنها با هدف بهتر کردن تصویر کلی جهان. این همان شالوده‌ای است که بهترین پژوهش‌های گرانش کوانتومی بر مبنای آن انجام شده‌اند. منشأ دانش در علم مثل همیشه نهایتاً تجربی است. اما داده‌هایی که گرانش کوانتومی بر مبنای آنها شکل گرفته از آزمایش‌هایی تازه به دست نیامده‌اند: این داده‌ها از نظام‌هایی نظری گرفته شده‌اند که پیش از این به فهم ما از جهان شکل داده بودند اما سازگاری کمی با یکدیگر داشتند. نسبیّت عام و مکانیک کوانتومی «داده‌های تجربی» برای ساخت گرانش کوانتومی بودند. ما با نظریه‌پردازی بر مبنای این نظریه‌ها و تلاش برای فهم اینکه چگونه یک جهان، که در آن هم کوانتوم‌ها وجود دارند و هم فضای خمیده، می‌تواند منسجم باشد، سعی می‌کنیم به امور ناشناخته نظر بیندازیم. موفقیت‌های عظیم غول‌هایی مانند نیوتن و اینشتین و دیراک که در وضعی مشابه وضع ما قرار داشتند، دلگرممان می‌کند. البته ما خود را هم سطح آنها نمی‌دانیم. اما این امتیاز را داریم که بر شانه‌های آنها بنشینیم و دورتر از جایی را ببینیم که آنها دیده‌اند. به هر صورت تلاش مان را خواهیم کرد.

ما باید بین سرنخ‌ها و شواهد محکم تفاوت بگذاریم. سرنخ‌ها همان‌هایی هستند که شرلوک هولمز را در مسیر درست قرار می‌دهند و به او کمک می‌کنند تا یک پرونده مرموز را حل کند. شواهد محکم آن‌هایی هستند که یک قاضی نیاز دارد تا حکم به گناهکاری متهم دهد. سرنخ‌ها ما را در مسیر رسیدن به یک نظریه درست قرار می‌دهند. شواهد محکم بعد از ساخت نظریه به ما امکان می‌دهند تعیین کنیم این نظریه درست است یا نه. بدون سرنخ ما مشغول جست‌وجو در مسیری اشتباه هستیم. بدون شواهد یک نظریه قابل اعتماد نیست. وضع برای گرانش کوانتومی هم به همین منوال است. این نظریه در حال سپری کردن دوران نوزادی‌اش است. ابزارهای نظری آن در حال محکم شدن و ایده‌های بنیادی آن در حال واضح شدن‌اند: سرنخ‌ها خوب و ملموس‌اند اما پیش‌بینی‌های تأییدشده کم داریم. این نظریه هنوز در معرض آزمون قرار نگرفته است.

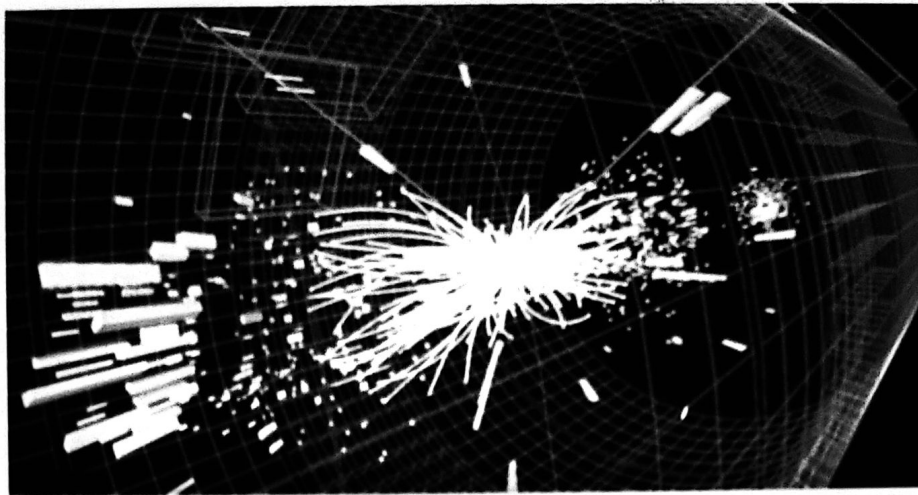
علائمی از طرف طبیعت

به غیر از نظریه‌ای که در این کتاب آمده، پرتعدادترین نظریه در این زمینه، «نظریه ریسمان» است. اکثر فیزیکدانانی که روی نظریه ریسمان یا نظریات مرتبط با آن کار می‌کردند انتظار داشتند که بلافاصله پس از به کار افتادن شتاب‌دهنده جدید ذرات در سرن ژنو (LHC) یا برخورددهنده بزرگ هادرون^۹ نوع جدیدی از ذرات پدیدار شوند که تاکنون مشاهده نشده بودند اما نظریه وجود آنها را پیش‌بینی کرده بود: ذرات ابرمتقارن^{۱۰}. نظریه ریسمان برای انسجامش به وجود این ذرات نیاز دارد: به همین دلیل، نظریه‌پردازان ریسمان چنین بی‌تابانه انتظار کشف این ذرات را می‌کشیدند. از سوی دیگر، گرانش کوانتومی حلقه بدون ذرات ابرمتقارن هم منسجم است. نظریه‌پردازان حلقه عقیده دارند که ممکن است ذرات ابرمتقارن اصلاً وجود نداشته باشند.

مشاهده نشدن ذرات ابرمتقارن خیلی‌ها را ناامید کرد. سروصدایی که کشف بوزون هیگز^{۱۱} در سال ۲۰۱۳ به راه انداخت این ناامیدی را پوشاند. ذرات ابرمتقارن در آن سطح انرژی‌ای که بسیاری از نظریه‌پردازان ریسمان انتظارش را داشتند وجود نداشت. البته این چیزی را ثابت نمی‌کند اما طبیعت سرنخ کوچکی به نفع حلقه‌ها به دست داده است.

در سال‌های اخیر سه نتیجه عمده از آزمایش‌های فیزیک بنیادین به دست آمده است. اول آشکار شدن بوزون هیگز در آزمایشگاه سرن در ژنو (شکل ۹-۱). دوم اندازه‌گیری‌های ماهواره پلانک که در سال ۲۰۱۳ اعلام شد و مدل کیهان‌شناسی استاندارد را تأیید می‌کرد (شکل ۹-۲). سوم کشف اولیه امواج گرانشی که در سال ۲۰۱۶ اعلام شد. اینها سه علامتی هستند که اخیراً از طرف طبیعت برای ما ارسال شده است.

میان این سه یافته تازه یک چیز مشترک است: کشف هیچ کدام مطلقاً با غافلگیری همراه نبود. این مسأله نه تنها چیزی از اهمیت آنها کم نمی‌کند بلکه برعکس به آنها معنای بیشتری می‌بخشد. کشف بوزون هیگز تأیید قاطع اعتبار ایده‌هایی در مدل استاندارد ذرات بنیادین است که بر مبنای مکانیک کوانتومی شکل گرفته‌اند. این کشف، اثبات پیش‌بینی‌ای است که سی سال پیش انجام شده بود.



شکل ۹-۱ رویدادی در سرن که شکل گیری ذرات هیگز را نشان می دهد.

اندازه گیری های ماهواره پلانک تأییدی محکم بر مدل کیهان شناسی استاندارد بود که بر مبنای نسبیت عام به همراه ثابت کیهان شناسی شکل گرفته است. کشف امواج گرانشی هم تأییدی بی نظیر نسبیت عامی بود که ضد سال از عمر آن می گذرد. این سه نتیجه که با تلاش های فنی طاقت فرسا و همکاری گسترده صدها دانشمند به دست آمد چیزی نبود جز تأیید محکم تر فهمی که ما پیشاپیش از ساختار جهان داشتیم. به همین دلیل هم غافلگیر نشدیم.

اما این غافلگیر نشدن به یک معنا خودش غافلگیر کننده بود چرا که خیلی ها منتظر بودند غافلگیر شوند یعنی «فیزیک جدیدی» را ببینند که با هیچ یک از نظریه های مستقر قابل توضیح نیست. آنها انتظار داشتند که در سرن، ذرات ابرمتقارن را مشاهده کنند نه بوزون هیگز را. خیلی ها هم انتظار داشتند که اندازه گیری های ماهواره پلانک با نظریه کیهان شناسی استاندارد اختلافاتی داشته باشد که به نفع نظریه های کیهان شناسی رقیب نسبیت عام تمام شود.

اما این اتفاق نیفتاد. آنچه طبیعت داشت تأیید می کرد ساده بود: نسبیت عام و مکانیک کوانتومی و مدل استاندارد در چارچوب مکانیک کوانتومی.



شکل ۹-۲ ماهواره پلانک

این روزها بسیاری از فیزیکدانان نظری می‌خواهند با فرضیه‌هایی دلبخواهی به نظریه‌هایی جدید برسند. «بیایید تصور کنیم...» من فکر می‌کنم که چنین روش علمی‌ای تاکنون نتیجه به‌دردبخوری نداشته است. تخیل ما بسیار محدودتر از آن است که «تصور کنیم» جهان چگونه ساخته شده مگر اینکه ردپاهای پیش‌رویمان را دنبال کنیم. این ردپاها (سرنخ‌ها)، یا نظریه‌های موفق‌اند یا داده‌های تجربی تازه، همین و بس. در این داده‌ها و نظریه‌هاست که ما باید به دنبال کشف چیزی باشیم که توان تصور آن را نداریم. این همان کاری است که کوپرنیک، نیوتن، ماکسول و اینشتین انجام داده‌اند. آنها برخلاف بسیاری از فیزیکدانان نظری امروزی هیچ‌گاه سعی نکردند نظریه جدیدی را «حدس بزنند».

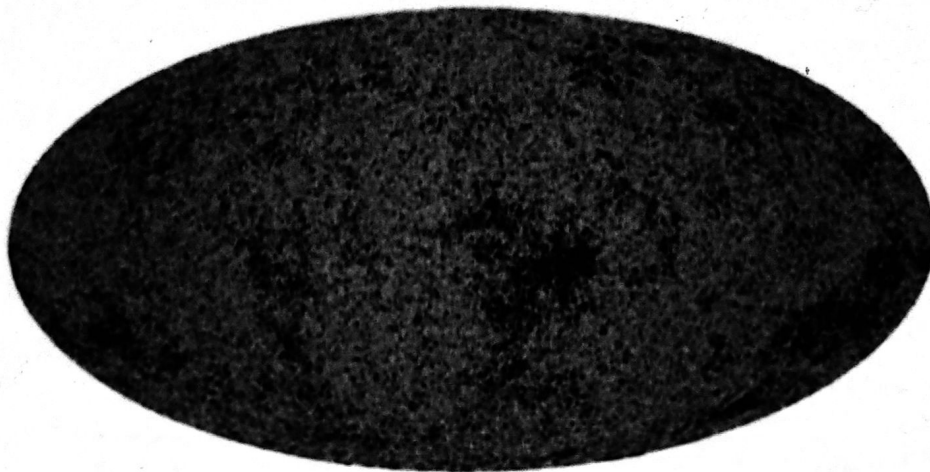
سه نتیجه تجربی اخیر که به آنها اشاره کردم طنین صدای خود طبیعت‌اند: «دست از خیال‌پردازی درباره میدان‌های تازه، ذرات عجیب، ابعاد اضافی، تقارن‌های دیگر، جهان‌های موازی، ریسمان‌ها و این‌گونه چیزها بردارید. قطعات پازل ساده‌ترند: نسیت عام، مکانیک کوانتومی، مدل استاندارد. گام بعدی می‌تواند "صرفاً" چگونگی ترکیب آنها به شیوه‌ای درست باشد». این توصیه‌ای اطمینان‌بخش برای جامعه گرانث کوانتومی حلقه است چرا که فرضیه‌های این نظریه اینها هستند: نسیت عام، مکانیک کوانتومی، سازگاری با مدل استاندارد، و نه هیچ چیز دیگر. پیامدهای مفهومی رادیکال این نظریه - کوانتوم‌های فضا و ناپدیدشدن زمان - فرضیات برجسته‌ای نیستند: آنها پیامدهای منطقی جدی گرفتن بصیرت‌های ابتدایی بهترین نظریات فیزیک‌اند.

یک بار دیگر بگویم که اینها اثبات قطعی هیچ چیز نیست. در نهایت ذرات ابرمتقارن می‌توانند در مقیاسی که هنوز از دسترس ما خارج است وجود داشته باشند و شاید وجود آنها تضادی با درستی نظریه حلقه هم نداشته باشد. ابرتقارن در جایی که باید، یافت نشد و همین نظریه‌پردازان ریسمان را اندکی سرخورده و نظریه‌پردازان حلقه را امیدوار کرد اما تمام اینها هنوز در قلمرو سرنخ‌هاست و هنوز هیچ شواهد محکمی در کار نیست.

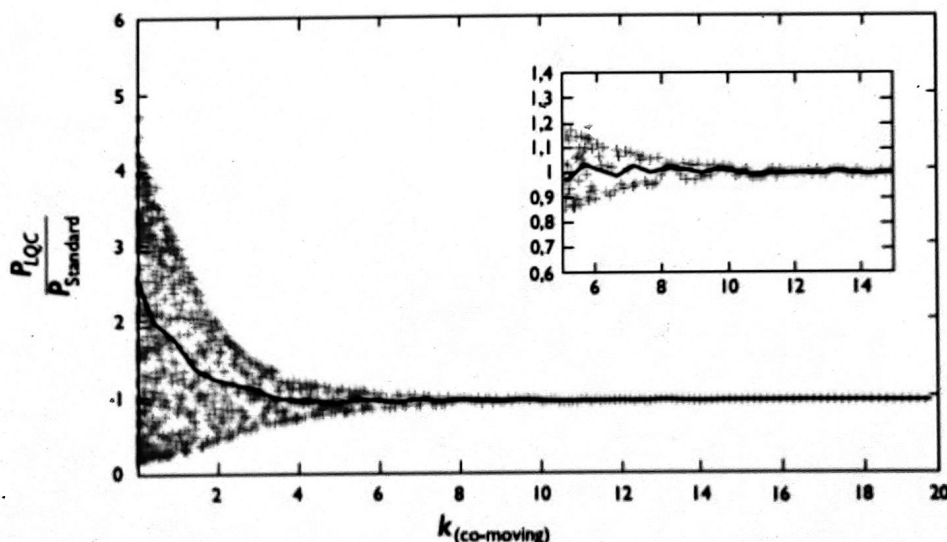
ما برای تأیید ملموس‌تر نظریه حلقه باید به جاهای دیگر هم نظری بیندازیم. شاید جهان آغازین پنجره‌ای باشد رو به پیش‌بینی‌هایی که می‌توانند نظریه را تأیید کنند. امیدوارم که هرچه زودتر این اتفاق بیفتد. شاید هم این پیش‌بینی‌ها ثابت کنند که این نظریه درست نیست.

پنجره‌ای رو به گرانث کوانتومی

اگر معادلاتی داشته باشیم که انتقال جهان از فاز کوانتومی را توضیح دهند می‌توانیم تأثیرات پدیده کوانتومی را بر جهانی که امروز مشاهده می‌کنیم، محاسبه کنیم. جهان با تابش کیهانی پر شده است: دریایی از فوتون‌ها که از فاز داغ اولیه در کیهان باقی مانده‌اند: تشعشعات بازمانده از دمای زیاد اولیه.



شکل ۹-۳ ارتعاش تابش پس زمینه کیهانی. این تصویر قدیمی ترین چیزی است که می توانیم در هستی ببینیم. این ارتعاشات ۱۴ میلیارد سال پیش به وجود آمده اند. امیدواریم که با مطالعه آماری این ارتعاشات تأییداتی برای پیش بینی های گرانش کوانتومی بیابیم. میدان الکترومغناطیسی مانند سطح خروشان دریا هنگام طوفان، در فضای عظیم بین کهکشان ها در حال ارتعاش است. این ارتعاش های پخش شده در سراسر جهان، «تابش پس زمینه کیهانی» نامیده می شوند. این تابش ها در سال های اخیر به وسیله ماهواره هایی مانند COBE، WMAP و به خصوص پلانک دریافت شده اند. تصویری از ارتعاش ظریف این تابش، در شکل ۹-۳ نشان داده شده است. جزئیات ساختار این تابش، تاریخ هستی را روایت می کند و شاید در دل این جزئیات رد پای شروع کوانتومی جهان ما پنهان شده باشد. یکی از فعال ترین بخش های پژوهش در گرانش کوانتومی حلقه، مطالعه این مسأله است که دینامیک کوانتومی این جهان اولیه چگونه در این داده ها بازتاب یافته است. نتایج به دست آمده، ابتدایی اما دلگرم کننده اند. با محاسبات بیشتر و اندازه گیری های دقیق تر شاید بتوان به آزمایشی برای امتحان این نظریه دست یافت. ابی اشتکار و ایوان اگولو و ویلیام نلسون در سال ۲۰۱۳ مقاله ای منتشر کردند و با در نظر گرفتن فرضیاتی خاص در آن به این نتیجه رسیدند که توزیع آماری ارتعاشات این منبع تابش کیهانی شواهدی از پس جهش اولیه به دست می دهد:



شکل ۹-۴ پیش بینی احتمالی نظریه گرانش کوانتومی از طیف تابش پس زمینه (خط سیاه) و مقایسه آن با خطاهای تجربی فعلی (نقطه ها). به لطف اشتکار و اگولو و نلسون.

ارتعاشاتی که زاویه باز دارند باید با ارتعاشاتی که بدون در نظر گرفتن کوانتوم ها پیش بینی شده اند، متفاوت باشند. وضعیت کنونی اندازه گیری ها در شکل ۹-۴ نشان داده شده است: خط سیاه نشان دهنده پیش بینی اشتکار و اگولو و نلسون است و نقطه های خاکستری

داده‌های اندازه‌گیری شده‌اند. آیا گرانش رو به بالای خط سیاه که این سه مؤلف پیش‌بینی کرده‌اند درست است یا خیر: اطلاعات ما هنوز برای قضاوت درباره این مسأله کافی نیست اما اندازه‌گیری‌ها مدام دقیق‌تر می‌شوند. وضعیت هنوز نامشخص است. اما کسانی مثل من که تمام زندگی‌شان را وقف جست‌وجو برای فهم رازهای فضای کوانتومی کرده‌اند، با دقت زیاد و اضطراب و امید به افزایش توان در مشاهدات و اندازه‌گیری و محاسبه این مسأله را دنبال می‌کنند و منتظر لحظه‌ای هستند که طبیعت بگوید حق با ماست یا نه.

ردپای دمای زیاد اولیه باید در خود میدان گرانشی نیز وجود داشته باشد. میدان گرانشی (همان فضا) هم باید مانند سطح دریا موج باشد. بنابراین یک تابش پس‌زمینه کیهانی گرانشی نیز باید وجود داشته باشد که حتی از تابش الکترومغناطیسی هم قدیمی‌تر است چرا که ماده عبور امواج گرانشی را کمتر از امواج الکترومغناطیسی مختل می‌کند و این امواج می‌توانسته‌اند حتی وقتی که جهان آن‌چنان متراکم بوده که مانع عبور امواج الکترومغناطیسی می‌شده، بدون اختلال حرکت کنند.

ما امواج گرانشی را در رصدخانه LIGO مستقیماً مشاهده کرده‌ایم. این رصدخانه از دو بازو، هر کدام به طول چند مایل تشکیل شده که با هم زاویه‌ای قائمه می‌سازند و پرتوهای لیزر موجود در آن، فاصله بین سه نقطه ثابت را اندازه‌گیری می‌کنند. وقتی یک موج گرانشی عبور می‌کند فضا به طرز نامحسوس بلند و کوتاه می‌شود و لیزرها این تغییر بسیار کوچک را نمایان می‌کنند.^{۹۲} امواج گرانشی مشاهده شده، با یک رویداد اخت‌فیزیکی تولید شده بودند: برخورد دو سیاهچاله. این رویدادها با نسبیت عام و بدون در نظر گرفتن گرانش کوانتومی توضیح داده شده‌اند. اما آزمایشی بلندپروازانه‌تر به نام LISA که هنوز در مرحله ارزیابی است می‌تواند این کار را در مقیاسی وسیع‌تر انجام دهد: با قراردادن سه ماهواره نه در مدار زمین، بلکه در مدار خورشید، انگار که سه سیاره بسیار کوچک، زمین را در گردش به دور خورشید دنبال می‌کنند. این سه ماهواره با پرتوهای لیزر به هم متصل‌اند و این پرتوها فاصله بین آنها را اندازه‌گیری می‌کنند یا به بیان بهتر، تغییرات فاصله این سه ماهواره را در زمان عبور یک موج گرانشی اندازه می‌گیرند. اگر LISA راه‌اندازی شود، نه تنها می‌تواند امواج گرانشی تولید شده به وسیله ستاره‌ها و سیاهچاله‌ها را دریافت کند بلکه همچنین پس‌زمینه پخش شده امواج گرانشی اولیه را که در زمانی نزدیک به مه‌بانگ تولید شده‌اند آشکار خواهد ساخت. این موج‌ها باید درباره پس‌جهش کوانتومی اطلاعاتی در اختیار ما بگذارند.

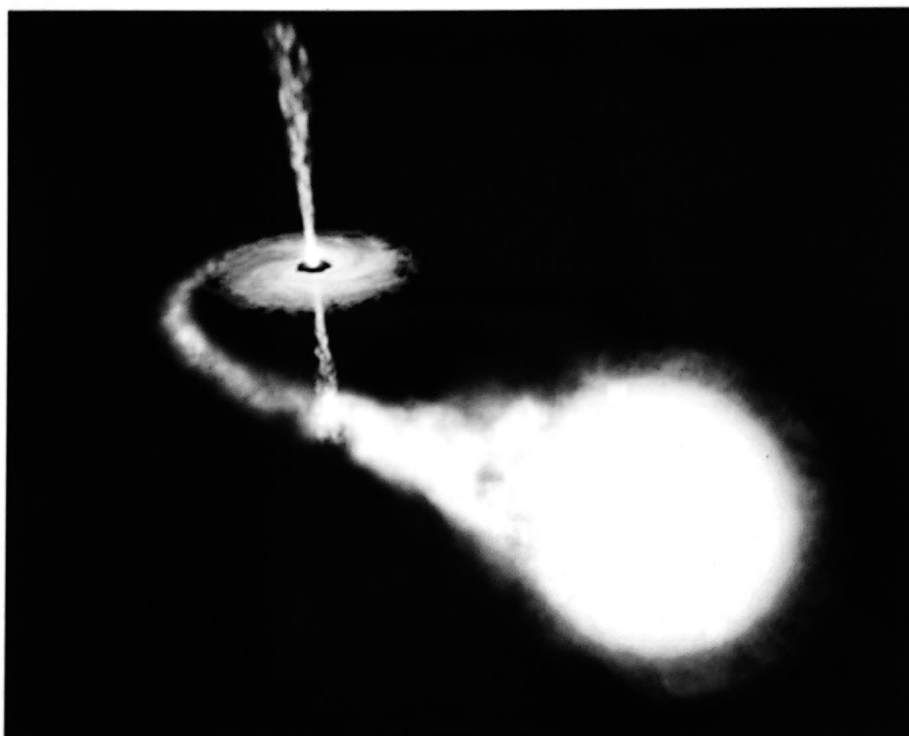
ما باید بتوانیم در این بی‌نظمی‌های کوچک فضا، ردی از رویدادهایی بیابیم که ۱۴ میلیارد سال پیش در خاستگاه جهان رخ داده‌اند و با آنها، نتیجه‌گیری‌هایمان درباره ماهیت فضا و زمان را تأیید کنیم.

۱۰: سیاهچاله‌های کوانتومی

جهان ما پر است از تعداد زیادی سیاهچاله. این سیاهچاله‌ها ناحیه‌هایی هستند که در آنجا فضا آنقدر خمیده می‌شود تا در خودش فرو بریزد و زمان از حرکت باز ایستد. همان طور که گفته شد، آنها زمانی شکل می‌گیرند که مثلاً یک ستاره تمام ذخیره هیدروژن خود را بسوزاند و سپس فرو بریزد.

در اغلب موارد، ستاره فرو ریخته بخشی از یک جفت ستاره همسایه است و در این حالت سیاهچاله و ستاره‌ای که سالم مانده به دور یکدیگر می‌گردند و سیاهچاله مدام ماده ستاره دیگر را می‌مکد (شکل ۱۰-۱).

ستاره‌شناسان سیاهچاله‌های زیادی با اندازه‌ای (یعنی با جرمی) یکسان با خورشید ما (درواقع کمی بزرگ‌تر) کشف کرده‌اند. اما سیاهچاله‌هایی غول‌آسا هم وجود دارند. تقریباً در مرکز تمام کهکشان‌ها از جمله کهکشان خود ما، یکی از این سیاهچاله‌ها قرار دارد. ما در حال مطالعه دقیق سیاهچاله مرکز کهکشان خودمان هستیم. جرم این سیاهچاله یک میلیون برابر خورشید است. هر از گاهی که یک ستاره بیش از حد به این هیولا نزدیک می‌شود، تحت تأثیر اعوجاج گرانشی آن متلاشی می‌شود و این غول یک چشم^{۹۳} او را می‌بلعد؛ مانند ماهی کوچکی که نهنگی او را می‌بلعد. تصور کنید هیولایی که یک میلیون برابر خورشید است، در کسری از ثانیه خورشید ما و سیاره‌های بسیار کوچکش را بلعد...



شکل ۱۰-۱ تصویر یک جفت ستاره/سیاهچاله. ستاره در حال از دست دادن

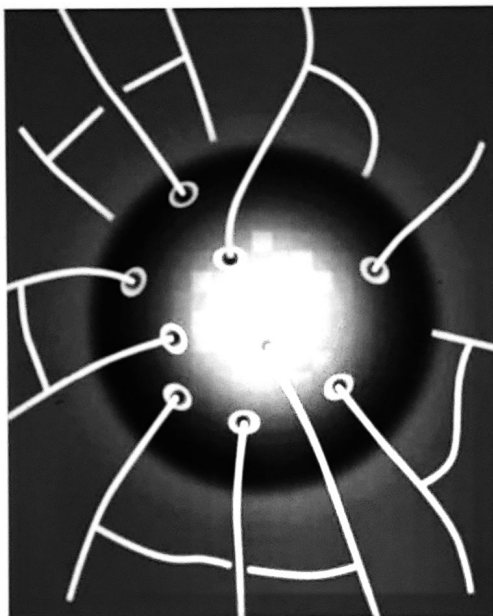
ماده‌ای است که قسمتی از آن به درون سیاهچاله مکیده می‌شود و قسمتی دیگر در راستای قطب‌های ستاره به شکل فواره‌ای پرتاب می‌شود.

پروژه‌ای بسیار جالب در جریان است که در آن شبکه‌ای از آنتن‌های رادیویی در سراسر زمین از قطب شمال تا جنوب کار گذاشته می‌شود و با این آنتن‌ها ستاره‌شناسان می‌توانند به وضوح لازم برای «دیدن» این سیاهچاله کهکشانی برسند. آنچه انتظار داریم ببینیم این است: یک قرص سیاه کوچک که با پرتوهای نوری که از ماده در حال سقوط در آن می‌تابد احاطه شده است.

چیزی که وارد سیاهچاله می‌شود دیگر خارج نخواهد شد. حداقل تا وقتی که نظریه کوانتوم را لحاظ نکنیم. سطح یک سیاهچاله مانند زمان حال است: حرکت در آن فقط در یک جهت ممکن است. هیچ بازگشتی از آینده در کار نیست. در مورد یک سیاهچاله فضای بیرونی مانند زمان گذشته عمل می‌کند و فضای درونی مانند آینده. یک سیاهچاله از بیرون شبیه یک کره است که می‌توان به آن وارد شد اما

خروج از آن ممکن نیست. یک موشک می‌تواند در فاصله‌ای ثابت از این سیاهچاله بماند بدون اینکه درون آن کشیده شود. این فاصله افق سیاهچاله نام دارد. برای این کار موشک باید موتور خود را روشن نگه دارد تا بر کشش گرانشی سیاهچاله غلبه کند. گرانش قدرتمند سیاهچاله باعث می‌شود که زمان برای موشک به کندی بگذرد. اگر یک موشک، به مدت یک ساعت به اندازه کافی نزدیک به افق سیاهچاله بماند و سپس بازگردد در خواهد یافت که در این مدت، بیرون از این افق قرن‌ها سپری شده است. هرچه موشک به افق نزدیک‌تر شود زمان برایش به نسبت بیرون کندتر خواهد گذشت. بنابراین، سفر به گذشته سخت اما سفر به آینده ساده است: کافی است با یک فضاپیما به سیاهچاله نزدیک شویم، مدتی اطراف آن پرسه بزنیم و سپس از آن دور شویم. در خود افق سیاهچاله زمان از حرکت باز می‌ایستد: اگر به شدت به آن نزدیک شویم و پس از چند دقیقه دوباره دور شویم، چیزی در حدود یک میلیون سال در کل جهان گذشته است.

نکته شگفت‌انگیز این مسأله این است که نظریهٔ اینشتین مشخصات این اشیاء غریب را که امروزه مشاهدهٔ آنها معمول شده است، پیش‌بینی کرده بود. این روزها ستاره‌شناسان این اشیاء را در فضا مشاهده و بررسی می‌کنند، در حالی که تا همین چند وقت پیش آنها را نتایج نامعتبر و نامعمول نظریه‌ای عجیب و غریب می‌پنداشتند.



شکل ۱۰-۲ حلقه‌ها، یعنی رابط‌های شبکهٔ اسپین که موقعیت میدان گرانشی را توصیف می‌کنند، از سطح یک سیاهچاله رد شده‌اند. هر حلقه با یک ناحیهٔ کوانتومی از سطح سیاهچاله منطبق است.

به خاطر می‌آورم که یکی از اساتید دانشگاهم آنها را این گونه معرفی کرد: پاسخی به معادلات اینشتین که «بعید است مابه‌ازایی در واقعیت داشته باشند». این توان بهت‌آور فیزیک نظری است که می‌تواند چیزها را پیش از آنکه مشاهده شوند، کشف کند. سیاهچاله‌هایی که ما می‌بینیم، به خوبی با نظریهٔ اینشتین توصیف می‌شوند و برای فهم آنها نیازی به استفاده از مکانیک کوانتومی نیست. اما دو معما دربارهٔ سیاهچاله‌ها وجود دارد که برای حل آنها باید از مکانیک کوانتومی کمک گرفت و نظریهٔ حلقه برای هر یک از این معماها یک پاسخ ممکن دارد. یکی از این پاسخ‌ها همچنین می‌تواند فرصتی برای آزمودن این نظریه نیز فراهم سازد. اولین کاربرد گرانش کوانتومی در سیاهچاله‌ها مربوط به واقعیت عجیبی است که استیون هاکنینگ آن را کشف کرد. او در اوایل دههٔ هفتاد به این نتیجهٔ نظری رسید که سیاهچاله‌ها «داغ» هستند. آنها مانند اجسام داغ رفتار می‌کنند: گرما می‌تابانند و با انجام این کار انرژی و در نتیجه ماده از دست می‌دهند (چرا که انرژی و ماده یک چیزند) و به تدریج کوچک‌تر می‌شوند. آنها «تبخیر» می‌شوند. «تبخیر سیاهچاله‌ها» مهم‌ترین کشف هاکنینگ است.

اشیاء به دلیل جنبش اجزای ریزمقیاس‌شان داغ می‌شوند. مثلاً یک قطعه آهن داغ، قطعه آهنی است که اتم‌هایش به سرعت حول نقطهٔ

تبادلشان نوسان می‌کنند. هوای گرم هوایی است که مولکول‌هایش سریع‌تر از مولکول‌های هوای سرد می‌جنبند. اما «اتم»‌های پایه‌ای سیاهچاله که جنبش‌شان سیاهچاله را گرم می‌کند چیستند؟ هاکینگ این سؤال را بی‌جواب گذاشت. نظریه حلقه اما پاسخی برای این سؤال دارد. اتم‌های بنیادین یک سیاهچاله که با ارتعاش خود آن را گرم می‌کنند کوانتوم‌های منفرد فضا روی سطح سیاهچاله‌اند.

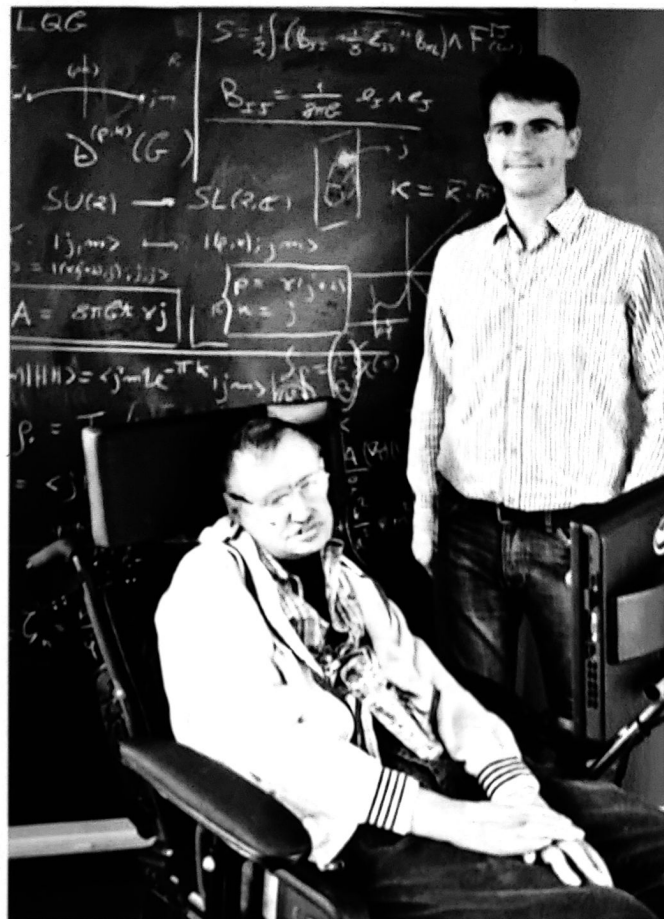
بنابراین می‌توان با استفاده از نظریه حلقه منشأ دمای مختص سیاهچاله‌ها را که هاکینگ پیش‌بینی کرده بود، توضیح داد: گرما نتیجه ارتعاش ریزمقیاس اتم‌های منفرد فضا است. چون در دنیای مکانیک کوانتومی همه چیز در حال ارتعاش است و هیچ چیز ساکن نیست، این اتم‌ها نیز مرتعش‌اند. این نکته اصلی مکانیک کوانتوم است: ثابت ماندن یک چیز به‌طور پیوسته و کاملاً ساکن در یک مکان غیرممکن است. گرمای سیاهچاله با ارتعاش اتم‌های فضا در گرانش کوانتومی نسبتی مستقیم دارد. موقعیت دقیق افق سیاهچاله فقط در نسبت با این ارتعاشات ریزمقیاس میدان گرانشی معین می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که افق سیاهچاله مانند یک جسم داغ در حال نوسان است. راه دیگری هم برای توضیح گرمای سیاهچاله وجود دارد. ارتعاشات کوانتومی، داخل و خارج یک سیاهچاله را در رابطه‌ای متقابل قرار می‌دهند. (از این رابطه متقابل و دما به تفصیل در فصل ۱۲ سخن خواهیم گفت). عدم قطعیت کوانتومی در طول افق سیاهچاله، ارتعاشاتی در هندسه افق ایجاد می‌کند. اما ارتعاشات مستلزم احتمال‌اند و احتمال مستلزم ترمودینامیک و ترمودینامیک مستلزم دما. سیاهچاله قسمتی از جهان را بر ما پوشیده نگه می‌دارد، اما از طریق گرما اجازه می‌دهد که ارتعاشات کوانتومی‌اش را بررسی کنیم.

یک دانشمند جوان ایتالیایی که امروز در امریکا استاد دانشگاه است، یو جینیو بیانکی^{۳۴}، با استفاده از این ایده‌ها و معادلات پایه گرانش کوانتومی حلقه، محاسباتی فوق‌العاده انجام داد که نشان می‌دهد چگونه می‌توان فرمول گرمای پیش‌بینی شده به‌وسیله هاکینگ را به دست آورد (شکل ۱۰-۳).

دومین کاربرد گرانش کوانتومی حلقه برای فیزیک سیاهچاله‌ها از این هم چشمگیرتر است. هنگامی که یک ستاره فرومی‌ریزد، از بیرون محو می‌شود و به درون سیاهچاله می‌رود. اما درون سیاهچاله چه اتفاقی برای آن می‌افتد؟ اگر خود شما به درون سیاهچاله سقوط کنید شاهد چه چیزی خواهید بود؟

در ابتدا به طور مشخص چیزی نخواهید دید: سطح سیاهچاله را بدون جراحت چندانی رد خواهید کرد سپس با سرعتی که مدام بیشتر می‌شود به سمت مرکز سیاهچاله سقوط خواهید کرد. و بعد؟ نسبیت عام پیش‌بینی می‌کند که هر چیزی در مرکز سیاهچاله آنقدر فشرده می‌شود تا به یک نقطه بی‌نهایت کوچک با چگالی بی‌نهایت بالا تبدیل شود. این درست است اما به این شرط که باز هم نظریه کوانتوم را لحاظ نکنیم.

اگر گرانش کوانتومی را لحاظ کنیم این پیش‌بینی دیگر درست نخواهد بود چون یک دافعه کوانتومی مانند آنچه در مه‌بانگ باعث پس‌جهش جهان می‌شود در کار است. انتظار ما این است که ماده در حال سقوط با نزدیک‌تر شدن به مرکز سیاهچاله، با این فشار کوانتومی مدام کندتر شود و در نهایت به یک نقطه با چگالی بسیار بالا اما متناهی تبدیل و سپس متوقف شود. ماده فشرده خواهد شد اما نه تا یک نقطه بی‌نهایت کوچک، چرا که حدی برای کوچک بودن اشیاء وجود دارد.



شکل ۱۰-۳ استیون هاکینگ و یوجینیو بیانکی. روی تخته معادلات اصلی گرانش کوانتومی حلقه که سیاهچاله را توصیف می‌کند نوشته شده است.

گرانش کوانتومی فشار بسیار زیادی تولید خواهد کرد که باعث پس جهش ماده می‌شود دقیقاً به همان صورت که یک جهان در حال فروریزش دچار پس جهش می‌شود و شروع به انبساط می‌کند.

پس جهش یک ستاره در حال فروریزی، به این شرط که از درون مشاهده شود، می‌تواند بسیار سریع باشد. اما به یاد بیاورید که زمان در آنجا بسیار کندتر از بیرون می‌گذرد. از بیرون سیاهچاله، فرایند پس جهش میلیاردها سال طول خواهد کشید. پس از گذشت این زمان ما می‌توانیم انفجار سیاهچاله را ببینیم. در نهایت، سیاهچاله اساساً چنین چیزی است: میان‌بری به یک آینده دور.

بنابراین، برخلاف پیش‌بینی نسبیت عام کلاسیک، گرانش کوانتومی سیاهچاله‌ها را اشیائی تا ابد پایدار در نظر نمی‌گیرد. آنها در نهایت ناپایدار هستند.

مشاهده این انفجار سیاهچاله‌ها می‌تواند تأییدیه‌ای عالی برای نظریه باشد. سیاهچاله‌های بسیار قدیمی، مانند آنها که در جهان اولیه شکل گرفته‌اند، امروز ممکن است در حال انفجار باشند. بعضی محاسبات اخیر نشان می‌دهند که سیگنال‌های انفجار آنها می‌تواند به وسیله تلسکوپ‌های رادیویی دریافت شود. حتی برخی بر این باورند که پالس‌های رادیویی رازآمیزی که ستاره‌شناسان پیش از این اندازه گرفته‌اند و آنها را ترکش‌های سریع رادیویی نامیده‌اند، ممکن است دقیقاً همان سیگنال‌هایی باشند که انفجار سیاهچاله‌های اولیه تولید کرده است. اگر این مسأله ثابت شود، داستان جالب خواهد شد: نشانه‌ای مستقیم از یک پدیده گرانش کوانتومی خواهیم داشت. صبر کنیم و ببینیم چه می‌شود...

۱۱: پایان نامتناهی

اگر گرانش کوانتومی را وارد بازی کنیم، این پیش بینی نسبیت عام که جهان در لحظه مه بانگ به یک نقطه فشرده بی نهایت کوچک تبدیل می شود، اعتبارش را از دست خواهد داد. گرانش کوانتومی کشف کرد که هیچ نقطه بی نهایت کوچکی وجود ندارد. فضا تا حد مشخصی قابل تقسیم است. جهان نمی تواند از مقیاس پلانک کوچک تر شود چرا که چیزی کوچک تر از مقیاس پلانک وجود ندارد. چشم پوشی از مکانیک کوانتومی به معنای چشم پوشی از وجود این حد کمینه است. نسبیت عام وضعیت های آسیب شناسانه ای را پیش بینی می کند که باعث معضل می شوند چون جواب های نظریه در آنها بی نهایت است. این وضعیت ها تکینگی^{۳۵} نام دارند. گرانش کوانتومی با گذاشتن حدی بر بی نهایت، معضل این تکینگی های نسبیت عام را «درمان» می کند. وضعیت برای مرکز سیاهچاله ها هم به همین ترتیب است: به محض اینکه گرانش کوانتومی را وارد بازی کنیم، تکینگی ای که نسبیت عام پیش بینی کرده محو خواهد شد.

وضعیت متفاوت دیگری هم هست که در آن گرانش کوانتومی حدی برای بی نهایت تعیین می کند: وضعیت مرتبط با نیروهایی مانند نیروی الکترومغناطیسی. نظریه میدان های کوانتومی که دیراک آن را آغاز کرد و فاینمن و همکارانش در دهه ۱۹۵۰ تکمیلش کردند، نیروهای الکترومغناطیسی را خوب توضیح می دهد اما پراز معضلات ریاضی است. وقتی از این نظریه برای محاسبه فرایندهای فیزیکی استفاده می کنیم اغلب به جواب هایی می رسیم که بی نهایت و در نتیجه بی معنا هستند. این جواب ها را جواب های واگرا می نامیم. این جواب های واگرا را با یک روش محاسباتی فنی و بسیار مفصل حذف می کنند تا نتیجه نهایی متناهی باشد. این روش در عمل جواب می دهد و اعداد به دست آمده صحیح اند و با نتایج آزمایش مطابقت دارند. اما چرا نظریه ای که شامل بی نهایت هاست باید به اعدادی معقول برسد؟

دیراک در سال های پایانی عمر از وجود بی نهایت ها در نظریه اش بسیار ناراحت بود و حس می کرد با وجود تمام کارهایی که کرده، به هدف اصلی اش یعنی درک ماهیت حقیقی چیزها نرسیده است. دیراک عاشق وضوح مفهومی بود، حتی اگر معنای وضوح برای او با دیگران فرق داشت. اما در هر صورت، بی نهایت ها ربطی به وضوح ندارند.

بی نهایت های نظریه میدان های کوانتومی از یک فرض اساسی این نظریه نشأت می گیرند: تقسیم پذیری بی نهایت فضا. مثلاً برای محاسبه احتمالات یک فرایند، از فاینمن آموخته ایم که تمام حالات وقوع این فرایند را با هم جمع بزنیم. تعداد این حالات نامتناهی است چون آنها می توانند در هر نقطه از بی نهایت نقطه پیوستار فضا واقع شوند. به این دلیل است که نتیجه می تواند نامتناهی باشد. وقتی گرانش کوانتومی را وارد بازی کنیم این بی نهایت ها از بین می روند. دلیل این مسأله روشن است: فضا تا بی نهایت تقسیم پذیر نیست در نتیجه تعداد نقاط و تعداد چیزهایی که باید با هم جمع بزنیم، بی نهایت نیست. ساختار دانه ای و گسسته فضا، با حذف بی نهایت هایی که نظریه میدان های کوانتومی با آنها دست به گریبان است، مشکلات این نظریه را رفع می کند.

نتیجه بسیار مهم است: از یک سو با لحاظ کردن مکانیک کوانتومی مشکلات به وجود آمده در نظریه گرانش اینشتین یعنی تکینگی ها را حل کرده ایم. از سوی دیگر با لحاظ کردن گرانش کوانتومی معضلات نظریه میدان کوانتومی یعنی واگرایی ها را از بین برده ایم. برخلاف انتظار اولیه، یعنی ناسازگاری مکانیک کوانتومی و گرانش کوانتومی، هر کدام از این دو نظریه پاسخی به مشکلات نظریه های دیگر می دهند!

قائل شدن حدی برای بی نهایت، مضمونی رایج در فیزیک مدرن است. نسبیت خاص می تواند در کشف این نکته خلاصه شود که سرعت هر سیستم فیزیکی حد مشخصی دارد. مکانیک کوانتومی هم می تواند در کشف این نکته خلاصه شود که در مورد هر سیستم فیزیکی، میزان مشخصی اطلاعات وجود دارد. کمترین طول، L_P یا همان طول پلانک است، بیشترین سرعت، c ، سرعت نور است و میزان اطلاعات با ثابت پلانک، $\hbar$ ، محدود می شود. موارد ذکر شده در جدول ۱-۱۱ خلاصه شده اند.

جدول ۱-۱۱ حدود بنیادینی که فیزیک نظری کشف کرده است.

کمیت فیزیکی	ثابت بنیادین	نظریه	کشف
سرعت	c	نسبیت خاص	بالاترین سرعتی که وجود دارد
اطلاعات (کنش‌ها)	h	مکانیک کوانتومی	کمترین اطلاعاتی که وجود دارد
طول	L_p	گراننش کوانتومی	کمترین طول موجود

وجود این مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای طول و سرعت و کنش، یک سیستم واحدهای طبیعی را ایجاب می‌کند. می‌توانیم به جای اندازه‌گیری سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت یا متر بر ثانیه، آن را بر حسب کسری از سرعت نور اندازه بگیریم. اگر سرعت نور را برابر با ۱ در نظر بگیریم، جسمی که مثلاً با نصف سرعت نور در حال حرکت است سرعتی برابر $v=2/1$ خواهد داشت. به همین ترتیب می‌توانیم طول را نیز بر حسب مضرب‌هایی از طول پلانک اندازه‌گیری کنیم. در نهایت می‌توانیم ثابت پلانک، h را برابر ۱ در نظر بگیریم و تعداد کنش‌ها را به صورت مضربی از ثابت پلانک نمایش دهیم. به این ترتیب، سیستمی طبیعی از واحدهای بنیادینی خواهیم داشت که واحدهای دیگر قابل تبدیل به آنها خواهند بود. واحد زمان برابر با مدت زمانی خواهد بود که نور، طول پلانک را طی می‌کند و.... در پژوهش‌های گراننش کوانتومی از همین سیستم واحدهای طبیعی استفاده می‌شود.

معرفی این سه ثابت بنیادین، امکانات به‌ظاهر نامتناهی طبیعت را محدود می‌کند. این بدان معنی است که آنچه ما نامتناهی می‌خوانیم، چیزی نیست جز آنچه تا کنون نشمرده یا نفهمیده‌ایم. من معتقدم که این حکم به‌طور کلی درست است. در نهایت «نامتناهی» نامی است که ما بر آنچه هنوز نمی‌شناسیم، گذاشته‌ایم. ظاهراً طبیعت در تلاش است به ما بگوید هیچ چیز واقعاً نامتناهی نیست. بی‌نهایت دیگری نیز وجود دارد که تفکر ما را گمراه می‌کند: گستره فضایی کیهان، بی‌نهایت است. اما همان‌طور که در فصل ۳ توضیح دادم، اینشتین راهی برای فکر کردن به کیهانی متناهی اما بدون مرز یافت. اندازه‌گیری‌های کنونی نشان می‌دهد که اندازه کیهان باید بیش از ۱۰۰ میلیارد سال نوری باشد. این درجه عظمت جهانی است که ما غیرمستقیم به آن دسترسی داریم. این اندازه چیزی حدود ۱۰۱۲۰ برابر بزرگ‌تر از طول پلانک است: عددی تشکیل شده از ۱ با ۱۲۰ صفر در مقابلش. جدایی مقیاس پلانک و مقیاس کیهانی، اختلافی حیرت‌آور در حدود عددی به توان ۱۲۰ است. عظیم. بسیار عظیم. اما متناهی.

در این فضا -از اندازه کوچک‌ترین کوانتوم فضا تا کوارک‌ها، پروتون‌ها، اتم‌ها، ساختارهای شیمیایی، کوه‌ها، ستاره‌ها، کهکشان‌ها (که هر کدام از صد میلیارد ستاره تشکیل شده‌اند)، خوشه‌های کهکشانی، تا خود جهان قابل رؤیت به‌ظاهر بی‌مرزی که از ۱۰۰ میلیارد کهکشان تشکیل شده است - پیچیدگی‌های جهان ما آشکار می‌شود. جهانی که ما تنها جنبه‌های محدودی از آن را می‌شناسیم. بسیار عظیم. اما متناهی.

مقیاس کیهانی از طریق عدد ثابت کیهان‌شناختی Λ منعکس و در معادلات اساسی نظریه ما وارد شده است. بنابراین، نظریه بنیادی شامل عددی بسیار بزرگ است: نسبت میان ثابت کیهان‌شناختی و طول پلانک. همین عدد بزرگ است که راهی به پیچیدگی عمیق جهان می‌گشاید. اما جهانی که ما می‌بینیم و می‌شناسیم، بی‌نهایتی نیست که در آن غرق شویم، دریایی عمیق اما متناهی است.

کتاب حکمت بن سیرا^{۹۶} با این گزاره بهت‌آور آغاز می‌شود:

کیست که بتواند دانه‌های شن و قطره‌های باران و روزهای ابدیت را بشمارد؟ کیست که بلندای آسمان و فراخای زمین و ژرفای خرد را دریابد؟

زمانی نه چندان طولانی پس از نوشته شدن این سطرها، متن بزرگ دیگری نوشته شده با چنین شروع پرتیننی:

ای شاه هیرو، بعضی‌ها می‌پندارند که نمی‌توان دانه‌های شن را شمرد.

این شروع کتاب شمارنده دانه‌های شن اثر ارشمیدس است که در آن بزرگ‌ترین دانشمند عهد باستان... دانه‌های شن موجود در جهان را می‌شمارد!

او این کار را انجام می‌دهد تا ثابت کند که تعداد شن‌ها متناهی و قابل تعیین است. با سیستم شمارش در عهد باستان، شمارش اعداد بسیار بزرگ راحت نبود. ارشمیدس در شمارنده دانه‌های شن، سیستم شمارش تازه‌ای مشابه سیستم نمایی ما را گسترش داده که به او امکان می‌دهد اعداد بسیار بزرگ را بشمارد. او با شمارش تعداد دانه‌های شن، نه فقط در ساحل بلکه در کل جهان (البته محض تفریح) قدرت این سیستم را به نمایش می‌گذارد.

شمارنده دانه‌های شن مفرح اما عمیق است. ارشمیدس با پرواز خیال‌پردازانه‌ای که انگار پیش‌درآمدی بر عصر روشنگری هزارها سال قبل از آن است، علیه شکلی از دانش طغیان می‌کند که به وجود رازهایی که ذاتاً برای اندیشه انسان غیرقابل دسترس است اعتقادی راسخ دارد. او ادعا نمی‌کند که ابعاد دقیق جهان یا تعداد دقیق دانه‌های شن را می‌داند. مدعی کامل بودن علم خود نیست. برعکس، کاملاً بر سرشت تقریبی و موقتی ارزیابی‌های خود واقف است. از گزینه‌های ممکن مختلفی برای اندازه جهان سخن می‌گوید اما از میان آنها صراحتاً انتخاب نمی‌کند. نکته مهم در اینجا ادعای دانستن همه چیز نیست بلکه درست برعکس: آگاهی از اینکه چهل دیروز ممکن است امروز روشن شود و چهل امروز فردا روشن خواهد شد.

نکته اصلی، شورش علیه بی‌میلی به دانش است: اعلام آشکار ایمان به قابل فهم بودن جهان و مبارزه علیه آنانی که با چهل خود خشنودند و با نامتناهی خواندن جهان، فهم و دانش را به مکان و زمان دیگری موکول می‌کنند.

قرن‌ها گذشته و کتاب حکمت بن سیرا در کتاب مقدس بسیاری از خانه‌ها یافت می‌شود؛ در حالی که کمتر کسی کتاب ارشمیدس را خوانده است. ارشمیدس در زمان غارت سیراکیوز، آخرین بازمانده سربلند یونان بزرگی که زیر یوغ امپراتوری روم رفت، کشته شد. دوره گسترش همان امپراتوری‌ای بود که چندی بعد کتاب حکمت بن سیرا را یکی از کتاب‌های اساسی دین رسمی‌اش اعلام کرد. موقعیتی که به مدت یک هزاره پس از آن نیز حفظ شد. در طی این هزاره، محاسبات ارشمیدس غیرقابل فهم باقی ماند: هیچ کس نمی‌توانست از آنها استفاده کند یا حتی آنها را بفهمد.

نزدیک سیراکیوز ارشمیدس یکی از زیباترین نواحی ایتالیا قرار دارد: تئاتر تائورمینا که مشرف است بر مدیترانه و آتشفشان اتنا. در زمان ارشمیدس در این تئاتر، نمایشنامه‌های سوفوکلس و اورپید به نمایش درمی‌آمدند. رومی‌ها از آن برای نمایش‌های گلابیاتوری و تماشای لذت‌بخش مرگ گلابیاتورها استفاده کردند.

اینکه شمارنده دانه‌های شن عمیقاً مفرح است، صرفاً به خاطر این نیست که این کتاب نمایش یک ساختار ریاضی جسورانه یا مهارت یکی از بزرگ‌ترین ذهن‌های دنیای باستان است. این کتاب همچنین فریادی بی‌پروای عقلی است که بر چهل خود آگاه است اما دیگران را از دستیابی به دانش منع نمی‌کند. این کتاب بیانیه‌ای کوچک و پرمغز و بسیار هوشمندانه علیه نامتناهی است: علیه تاریک‌اندیشی. گرانش کوانتومی یکی از مسیرهایی است که از شمارنده دانه‌های شن منشعب شده‌اند. ما مشغول شمردن دانه‌های فضا هستیم. دانه‌هایی که کیهان از آنها ساخته شده است. کیهانی گسترده اما متناهی.

تنها چیز حقیقتاً نامتناهی، چهل ماست.

۱۲: اطلاعات

داریم به پایان سفرمان نزدیک می‌شویم. در چند فصل اخیر من راجع به کاربردهای ملموس گرانش کوانتومی حرف زدم: توصیف آنچه در زمان مه‌بانگ بر جهان گذشته است، توصیف مشخصات گرمای سیاهچاله‌ها و حذف بی‌نهایت.

می‌خواهم پیش از نتیجه‌گیری به نظریه بازگردم و با نگاهی به آینده آن، از اطلاعات صحبت کنم: شبی که فیزیک نظری را در بر گرفته و هم موجب شور و شوق است هم موجب سردرگمی.

این فصل با چند فصل اخیر که در آنها از ایده‌هایی روشن و واضح اما هنوز آزمایش نشده سخن گفتم، متفاوت است. در اینجا از ایده‌هایی سخن خواهم گفت که هنوز مبهم‌اند و به شدت نیازمند سازمان‌دهی. خواننده عزیز، اگر این سفر دور و دراز تا اینجا قدری برایتان دشوار بوده پس محکم‌تر بنشینید، چرا که اکنون می‌خواهیم به سوی خلأ پرواز کنیم. اگر مشخصاً این فصل مبهم به نظر می‌رسد ایراد از شما نیست، ایراد از تصورات مبهم من است.

امروزه بسیاری از دانشمندان معتقدند که ممکن است مفهوم «اطلاعات»^{۹۷} کلید پیشرفت بعدی فیزیک باشد. در مبانی ترمودینامیک (علم گرما)، مکانیک کوانتومی و دیگر حوزه‌ها، به مفهوم اطلاعات اشاره شده است و این واژه را اغلب بسیاری دقت به کار می‌برند. من معتقدم که چیز بسیار مهمی در این مفهوم نهفته است. تلاش می‌کنم توضیح دهم چرا چنین اعتقادی دارم و مفهوم اطلاعات چه ارتباطی با گرانش کوانتومی دارد.

پیش از هر چیز، اطلاعات چیست؟ کلمه «اطلاعات» در گفتار عمومی معنای متعددی دارد و همین تعدد معنا مایه ابهام و سردرگمی در علم هم شده است. اما مفهوم علمی اطلاعات را که بسیار هم ساده است، کلود شانون^{۹۸}، ریاضیدان و مهندس امریکایی در سال ۱۹۴۸، به طرز شفاف این گونه تعریف کرده است: اطلاعات تعداد گزینه‌های ممکن یک چیز است. مثلاً اگر من یک تاس بیندازم، امکان آمدن هر یک از شش عدد آن وجود دارد. وقتی می‌بینیم که یکی از اعداد آمده، میزان اطلاعات من برابر با عدد ۶ است، چرا که شش گزینه ممکن پیش روی ما بوده است. اگر من ندانم که روز تولد شما دقیقاً چه روزی است، ۳۶۵ گزینه ممکن پیش رو دارم. اگر شما تاریخ دقیق تولدتان را به من بگویید، میزان اطلاعات من برابر با ۳۶۵ است. و برای هر چیز دیگری هم وضع به همین ترتیب است.

دانشمندان برای اندازه‌گیری اطلاعات، به جای علامت N که ابتدای عبارت تعداد گزینه‌ها (number of alternatives) است، از علامت S یعنی ابتدای عبارت اطلاعات شانون (Shannon information) استفاده می‌کنند. S مطابق تعریف لگاریتم مبنای ۲ عدد N است: $S = \log_2 N$. مزیت استفاده از لگاریتم این است که اگر S برابر با ۱ باشد، N برابر است با ۲ (زیرا $\log_2 2 = 1$) و این مسأله باعث می‌شود که واحد اطلاعات، کمترین تعداد گزینه‌های ممکن بین ۲ امکان باشد. این واحد اندازه‌گیری «بیت» نامیده می‌شود. وقتی می‌دانم که رولت به جای خانه سیاه روی خانه قرمز چرخیده یک بیت اطلاعات دارم. اگر بدانم که این خانه قرمز عدد زوج بوده دو بیت اطلاعات دارم و در نهایت اگر بدانم که این خانه قرمز زوج از اعداد $manqué$ (از اصطلاحات رولت به معنای ۱۸ یا کمتر) بوده، سه بیت اطلاعات دارم. دو بیت اطلاعات بیانگر چهار گزینه ممکن است (قرمز زوج، قرمز فرد، سیاه زوج، سیاه فرد). سه بیت اطلاعات بیانگر هشت گزینه ممکن است و به همین ترتیب.^{۹۹}

یک نکته مهم این است که می‌توان اطلاعات را در جایی قرار داد. مثلاً فرض کنید که تویی در دستان شماست که می‌تواند سیاه یا سفید باشد. فرض کنید من هم تویی دارم که آن هم می‌تواند سیاه یا سفید باشد. کل گزینه‌های ممکن دو ضرب در دو یعنی ۴ است: سفید-سفید، سفید-سیاه، سفید و سیاه-سفید و سیاه-سیاه. حال فرض کنید که ما به طریقی می‌دانیم که رنگ توپ‌ها قطعاً با یکدیگر فرق دارد (مثلاً به این دلیل که ما توپ‌ها را از درون کیسه‌ای برداشته‌ایم که تنها یک توپ سیاه و یک توپ سفید در آن است). در این حالت تعداد کل گزینه‌ها برابر است با ۲ (سیاه-سفید یا سفید-سیاه) حتی اگر تعداد گزینه‌های من ۲ باشد و تعداد گزینه‌های شما هم ۲. توجه کنید که در این حالت اتفاق عجیبی می‌افتد: اگر شما به توپ خود نگاه کنید از رنگ توپ من اطلاع خواهید داشت. در این مواقع، می‌گوییم که رنگ توپ‌ها با هم ارتباط متقابل دارند یعنی به هم پیوسته‌اند. توپ من اطلاعاتی درباره توپ شما دارد (و برعکس).

اگر دقت کنید می‌بینید این دقیقاً همان اتفاقی است که در زندگی روزمره هنگام برقراری ارتباط می‌افتد: مثلاً زمانی که من به شما تلفن

می‌زنم می‌دانم که گوشی شما صدایی تولید خواهد کرد که به صدای گوشی من وابسته است. صداها هر دو گوشی درست مانند رنگ دو توپ بالا به هم پیوسته‌اند.

این مثال تصادفی انتخاب نشده است: شانون، مبدع نظریه اطلاعات، برای یک شرکت مخابرات کار می‌کرد و در جست‌وجوی راهی برای اندازه‌گیری دقیق مقداری بود که یک خط تلفن می‌تواند «حمل کند». اما چه چیز را حمل کند؟ اطلاعات را. هر خط ظرفیت تمایزگذاری میان گزینه‌ها را حمل می‌کند. این دلیل تعریف شانون از مفهوم اطلاعات بود.

چرا مفهوم اطلاعات برای فهم ما از جهان مفید و شاید حتی اساسی است؟ به این دلیل ظریف که مفهوم اطلاعات توانایی یک سیستم فیزیکی برای برقراری ارتباط با یک سیستم فیزیکی دیگر را اندازه‌گیری می‌کند.

بیایید برای بار آخر به اتم‌های دموکریتوس توجه کنیم. تصور کنید که جهان فقط از دریای پایان‌ناپذیر اتم‌هایی ساخته شده که یکدیگر را جذب و دفع می‌کنند. آیا چیزی را نادیده نگرفته‌ایم؟

افلاطون و ارسطو اصرار داشتند که چیزی واقعاً نادیده گرفته شده است. آنها معتقد بودند آنچه برای فهم جهان باید به ماده سازنده چیزها اضافه کرد، شکل یا صورت است. در نگاه افلاطون، صوراً مستقلاً در یک جهان ایدئال اثیری یعنی جهان «ایده‌ها» وجود دارند. ایده اسب پیش از هر اسب واقعی و مستقل از آن موجود است. در نظر افلاطون، یک اسب واقعی چیزی نیست مگر انعکاسی کم‌رنگ از ایده اسب. اتم‌هایی که اسب از آنها ساخته شده است اهمیت چندانی ندارند: آنچه اهمیت دارد صورت محض، یعنی «اسب‌بودگی» اسب است. ارسطو کمی واقع‌گراتر بود اما در نظر او هم صورت قابل تقلیل به ماده نبود. در یک مجسمه چیزی بیشتر از سنگی که مجسمه از آن ساخته شده، موجود است. در نگاه ارسطو این چیز بیشتر، همان صورت است. این مبنای نقد ماده‌گرایی دموکریتوس در عهد باستان است و هنوز هم نقدی فراگیر بر ماده‌گرایی محسوب می‌شود.

اما آیا منظور دموکریتوس واقعاً این بود که همه چیز قابل تقلیل به اتم است؟ بیایید دقیق‌تر به این مسأله نگاه کنیم. دموکریتوس می‌گوید در ترکیب اتم‌ها، آنچه اهمیت دارد شکل آنها و نوع چینش آنها در ساختار و روش ترکیبشان است. او مثالی از حروف الفبا می‌آورد: الفبا حدود بیست حرف است، اما به قول او «این حروف می‌توانند در حالات متفاوتی با هم ترکیب شوند و با این ترکیب‌های متفاوت می‌توان تراژدی، کمدی، داستان‌های مضحک یا اشعار حماسی نوشت».

چیزی بیشتر از اتم‌ها در این ایده وجود دارد: آنچه اهمیت دارد روش ترکیب و ارتباط آنها با یکدیگر است. اما در جهانی که چیزی غیر از اتم‌ها وجود ندارد، روش ترکیب آنها چگونه می‌تواند منشأ اثر باشد؟

اگر اتم‌ها همان حروف الفبا باشند، چه کسی قادر به خواندن جملاتی است که با این الفبا نوشته می‌شود؟

پاسخ زیرکانه است: شیوه آرایش دسته‌ای اتم‌ها با شیوه آرایش دسته‌های دیگر در ارتباط متقابل است. بنابراین، به همان معنای فنی و دقیقی که بالا شرح داده شد، دسته‌ای از اتم‌ها می‌توانند اطلاعاتی از دسته‌های دیگر داشته باشند.

در سراسر جهان فیزیکی، پیوسته در هر لحظه و هر جا، چنین چیزی در حال رخ دادن است: نوری که به چشمان ما می‌رسد اطلاعاتی حمل می‌کند از شیئی که نمایش می‌دهد. رنگ دریا اطلاعاتی از رنگ آسمان بالای سرش دارد. یک سلول از ویروسی که به آن حمله کرده اطلاعات دارد. یک موجود زنده جدید حامل اطلاعات زیادی است؛ زیرا با والدین و با نوع خود در ارتباط متقابل است. شما خواننده عزیز، هنگامی که در حال خواندن این صفحه هستید، اطلاعاتی دریافت می‌کنید درباره آنچه من در هنگام نوشتن این صفحه به آن اندیشیده‌ام یعنی آنچه در هنگام نوشتن این متن در ذهن من اتفاق افتاده است. آنچه برای اتم‌های مغز شما رخ می‌دهد، دیگر بی‌ارتباط با آنچه برای اتم‌های مغز من رخ می‌دهد نیست: ما با هم ارتباط برقرار کرده‌ایم.

جهان صرفاً شبکه‌ای از اتم‌های در حال برخورد نیست: این جهان همچنین شبکه‌ای است از ارتباطات متقابل میان مجموعه‌های اتم‌ها. شبکه‌ای از اطلاعات واقعی دوطرفه بین سیستم‌های فیزیکی.

هیچ چیز ایدئالیستی و غیر مادی ای در این توصیف‌ها وجود ندارد. اینها چیزی نیستند جز کاربرد این ایده‌شانون که گزینه‌های دیگر اهمیت دارند. تمام اینها مانند سنگ‌های دلومیت، وزوز زنبورها و امواج دریا، جزئی از همین جهان‌اند.

به محض اینکه دریافتیم شبکه‌ای از اطلاعات متقابل در جهان وجود دارد، طبیعی است که از چنین گنجی برای توصیف جهان استفاده کنیم. بیایید با جنبه‌ای از طبیعت آغاز کنیم که آن را از اواخر قرن نوزدهم به بعد خوب می‌شناسیم: گرما. گرما چیست؟ اینکه می‌گوییم یک چیز گرم است یعنی چه؟ چرا یک فنجان چای داغ به جای گرم‌تر شدن، پس از مدتی سرد می‌شود؟

لودویگ بولتسمان^{۱۱}، دانشمند اتریشی و مبدع مکانیک آماری، اولین کسی بود که پاسخ را یافت.^{۱۲} گرما حرکت ریزمقیاس و تصادفی مولکول‌هاست: وقتی چای داغ است حرکت مولکول‌های آن شدیدتر است. چرا چای سرد می‌شود؟ بولتسمان فرضیه‌ای بسیار عالی مطرح کرد: تعداد موقعیت‌های ممکن مولکول‌ها در چای داغ و هوای خنک، از تعداد موقعیت‌های مولکول‌ها در چای خنک و هوای کمی گرم، کمتر است. وضعیت ترکیبی سیستم از حالتی که موقعیت‌های ممکن در آن کمترند، به حالتی که موقعیت‌ها بیشترند تحول می‌یابد. چای به خودی خود گرم‌تر نمی‌شود چرا که اطلاعات نمی‌توانند خود به خود افزایش یابند. توضیح می‌دهم. مولکول‌های چای بسیار پر تعداد و بسیار کوچک‌اند و ما جزئیات حرکات آنها را نمی‌دانیم. بنابراین، اطلاعات ما کم است. این کمبود یا از دست رفتن اطلاعات را می‌توان محاسبه کرد. (بولتسمان این کار را انجام داد: او تعداد موقعیت‌های مجزایی را که مولکول‌ها می‌توانند در آنها واقع شوند محاسبه کرد. این تعداد به میزان دما بستگی دارد). زمانی که چای سرد می‌شود مقدار کمی از انرژی آن به هوای اطراف منتقل می‌شود. در نتیجه مولکول‌های چای از مولکول‌های هوا آهسته‌تر حرکت می‌کنند. اگر میزان اطلاعات از دست‌رفته را حساب کنید می‌بینید که افزایش یافته است. برعکس، اگر چای از هوای سردتر اطراف خود گرما جذب کند اطلاعات از دست‌رفته کاهش می‌یابد. یعنی ما بیشتر می‌دانیم. اما اطلاعات از آسمان نازل نمی‌شود. اطلاعات خود به خود زیاد نمی‌شود چون چیزی را که نمی‌دانیم واقعاً نمی‌دانیم. بنابراین، چای نمی‌تواند در مجاورت هوای سرد، خود به خود گرم‌تر شود. شاید این توصیف کمی جادویی به نظر برسد اما درست است: ما می‌توانیم رفتار گرما را فقط بر این مبنا که اطلاعات رایگان به دست نمی‌آید، پیش‌بینی کنیم. بولتسمان را خیلی جدی نگرفتند. او در سن ۵۶ سالگی در دونیو، نزدیک تریسته، خودکشی کرد. امروز او را یکی از بزرگ‌ترین نوابع فیزیک می‌دانند. روی سنگ قبر او این معادله حک شده است:

$$S = k \log W$$

این معادله اطلاعات از دست‌رفته را به شکل لگاریتم تعداد گزینه‌های ممکن (ایده اصلی شانون) ارائه می‌دهد. بولتسمان ادعا کرد که این کمیت با آنتروپی در ترمودینامیک منطبق است. آنتروپی همان «اطلاعات از دست‌رفته» یا اطلاعات با یک علامت منفی است. مقدار کل آنتروپی صرفاً می‌تواند افزایش یابد چرا که اطلاعات فقط می‌تواند کاهش یابد.^{۱۳}

امروزه فیزیکدانان عموماً با این ایده موافق‌اند که می‌توان از مفهوم اطلاعات برای فهم ماهیت گرما استفاده کرد. ایده‌های جسورانه‌تر که روز به روز هواداران بیشتری در میان نظریه‌پردازان می‌یابد این است که می‌توان از مفهوم اطلاعات برای فهم جنبه‌های رازآمیز مکانیک کوانتومی (که در فصل ۵ توضیح داده شد) استفاده کرد.

به یاد می‌آورد که یکی از نتایج مهم مکانیک کوانتومی دقیقاً این واقعیت بود که اطلاعات محدود است. در مکانیک کلاسیک، تعداد نتایج مختلفی که می‌توان در اندازه‌گیری یک سیستم فیزیکی^{۱۴} به دست آورد نامحدود است. اما به لطف مکانیک کوانتومی، دریافتیم که این تعداد در واقعیت محدود است. مکانیک کوانتومی کشف این نکته است که اطلاعات در طبیعت همواره محدود است.

در واقع کل ساختار مکانیک کوانتومی را می‌توان به شرح زیر با مفهوم اطلاعات تفسیر کرد و فهمید. یک سیستم فیزیکی خود را تنها در برهم‌کنش با یک سیستم دیگر آشکار می‌کند. در نتیجه، یک سیستم فیزیکی همواره از طریق سیستمی دیگر یعنی سیستمی که با آن برهم‌کنش می‌کند توصیف می‌شود. بنابراین هر توصیفی از یک سیستم همواره توصیفی از اطلاعاتی است که یک سیستم در مورد سیستمی دیگر دارد یعنی ارتباط متقابل دو سیستم. تفسیر مکانیک کوانتومی به منزله توصیفی از اطلاعاتی که یک سیستم درباره سیستمی دیگر دارد، میزان رازآلودگی آن را کاهش می‌دهد.

در نهایت، توصیف یک سیستم چیزی نیست جز روشی برای خلاصه کردن تمام برهم کنش های سیستم در گذشته و استفاده از آنها برای پیش بینی تأثیرات برهم کنش های آینده.

کل ساختار صوری مکانیک کوانتومی را در نمایی کلی می توان در این دو اصل موضوعه ساده خلاصه کرد: [۱]

۱. اطلاعات مربوط به هر سیستم فیزیکی همواره محدود است.

۲. همواره می توان از یک سیستم فیزیکی اطلاعات تازه به دست آورد.

منظور ما از «اطلاعات مربوط»، اطلاعاتی است که از برهم کنش های قبلی ما با آن سیستم به دست آمده است: اطلاعاتی که به ما امکان می دهد پیش بینی کنیم که نتیجه برهم کنش های بعدی ما با این سیستم چه خواهد بود. اصل موضوعه اول، بیانگر مشخصه دانه ای بودن مکانیک کوانتومی است: این واقعیت که تعداد امکانات همواره محدود است. دومین اصل، بیانگر خصلت عدم قطعیت است: این واقعیت که همواره چیزی پیش بینی ناپذیر وجود دارد که به ما اجازه می دهد اطلاعاتی تازه به دست آوریم. هنگامی که اطلاعات تازه ای از یک سیستم به دست می آوریم میزان کل اطلاعات مربوط نمی تواند تا بی نهایت افزایش یابد (به خاطر اصل موضوعه اول). در نتیجه، قسمتی از اطلاعات پیشین نامربوط می شود یعنی در پیش بینی ما از آینده هیچ تأثیری نخواهد داشت. در مکانیک کوانتومی، وقتی که با یک سیستم وارد برهم کنش می شویم، فقط اطلاعاتی تازه به دست نمی آوریم بلکه قسمتی از اطلاعات مربوط به سیستم را هم حذف می کنیم.^{۱۰۴} کل ساختار صوری مکانیک کوانتومی در یک نمای کلی از این دو اصل موضوعه تبعیت می کند. بنابراین، نظریه به شکلی شگفت انگیز اجازه می دهد تا آن را بر حسب مفهوم اطلاعات بیان کنیم.

اولین کسی که دریافت که مفهوم اطلاعات برای فهم واقعیت کوانتومی اساسی است، جان ویلر، پدر گرانش کوانتومی بود. ویلر برای بیان این ایده، عبارت «it from bit» یعنی «همه چیز اطلاعات است» را ساخت.

بنابراین در حوزه گرانش کوانتومی هم اطلاعات دوباره پدیدار می شود. به یاد بیاورید: مساحت هر سطح با اسپین های حلقه متقاطع با آن سطح تعیین می شود. این اسپین ها کمیت هایی گسسته اند و هر یک بخشی از مساحت محسوب می شوند.

یک سطح با مساحت ثابت می‌تواند به روش‌های مختلفی از این کوانتوم‌های پایه‌ای مساحت تشکیل شده باشد، مثلاً به N روش مختلف. اگر مساحت سطحی را بدانید اما از نحوه توزیع کوانتوم‌های مساحت دقیقاً خبر نداشته باشید، در مورد این سطح اطلاعات از دست داده‌اید. این یکی از راه‌های محاسبه گرمای سیاهچاله است: کوانتوم‌های مساحت سیاهچاله که در سطحی با مساحت مشخص محصور شده‌اند می‌توانند به N حالت ممکن توزیع شوند. این همان اتفاقی است که برای فنجان چای افتاد: مولکول‌ها می‌توانند به N شکل مختلف حرکت کنند. بنابراین، می‌توان کمیتی از اطلاعات از دست رفته، یعنی آنتروپی را برای هر سیاهچاله در نظر گرفت. مقدار اطلاعات در نظر گرفته شده برای هر سیاهچاله با سطح A چاله نسبت مستقیم دارد: هرچه چاله بزرگ‌تر باشد، مقدار اطلاعات از دست رفته بیشتر است.

وقتی اطلاعات وارد سیاهچاله می‌شود، دیگر از بیرون قابل بازیابی نیست. اما اطلاعاتی که وارد سیاهچاله می‌شود با خود انرژی‌ای حمل می‌کند که باعث بزرگ‌تر شدن سیاهچاله و مساحت آن می‌شود. اطلاعاتی که درون سیاهچاله از دست می‌رود از بیرون به شکل آنتروپی مربوط به مساحت چاله نمایان می‌شود. یاکوب بکنشتاین^{۱۵}، فیزیکدان اسرائیلی نخستین کسی بود که چنین چیزی را حدس زد. اما این وضعیت اصلاً واضح نیست چون در فصل قبل دیدیم که سیاهچاله‌ها گرما می‌تابانند و به تدریج تبخیر می‌شوند و آنقدر کوچک می‌شوند تا در اقیانوس خورده سیاهچاله‌هایی که در مقیاس پلانک فضا را شکل می‌دهند، جا بگیرند و ناپدید شوند. اما زمانی که سیاهچاله در حال فشردن و کوچک شدن است چه بر سر اطلاعاتی که وارد آن شده می‌آید؟ فیزیکدانان نظری مشغول بحث بر سر این موضوع هستند و هیچ کس جواب کاملاً واضحی ندارد.

به عقیده من تمام اینها نشان می‌دهد که برای درک قواعد پایه‌ای جهان، ما نیازمند ادغام سه چیز هستیم نه دو چیز: نه فقط نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، بلکه همچنین نظریه گرما یعنی مکانیک آماری و ترمودینامیک یا به عبارتی همان نظریه اطلاعات. اما ترمودینامیک نسبیت عام یعنی مکانیک آماری کوانتوم‌های فضا هنوز مراحل نوزادی خود را طی می‌کند. همه چیز هنوز مبهم است و خیلی چیزها را باید فهمید.

همه اینها ما را به آخرین ایده‌ای که در این کتاب به آن خواهم پرداخت می‌رساند: زمان دمایی.

زمان دمایی

مسئله‌ای که در کُنه ایده زمان دمایی نهفته، ساده است. در فصل ۷ توضیح دادم که برای توصیف فیزیک نیازی به استفاده از مفهوم زمان نیست. بهتر است کلاً زمان را فراموش کنیم. در سطح بنیادی فیزیک، زمان هیچ نقشی ندارد. از وقتی این را فهمیده‌ایم، نوشتن معادلات گرانش کوانتومی ساده‌تر شده است.

بسیاری از مفاهیم مورد استفاده در زندگی روزمره مانند «بالا» و «پایین» یا «سرد» و «گرم»، دیگر نقشی در معادلات اساسی جهان ندارند. بنابراین، جای تعجب ندارد که مفاهیم مشترک روزمره از فیزیک بنیادی حذف شوند. با این حال، با پذیرفتن این ایده مشکل دیگری پدیدار می‌شود. چگونه می‌توان مفاهیم زندگی روزمره را بازیابی کرد؟ آنها در شرایط خاص ما چگونه پدیدار می‌شوند؟ مثلاً مفاهیم «بالا» و «پایین» در معادلات نیوتن وارد نشده‌اند اما ما معنای آنها را می‌دانیم بدون اینکه تصویری مطلق از آنها داشته باشیم. «بالا» و «پایین» در نزدیکی یک جرم بزرگ مانند یک سیاره، معنادار هستند. «پایین» نشان‌دهنده جهتی است که جرم بزرگ و نزدیک، در آن راستا نیروی گرانش وارد می‌کند. «بالا» نشان‌دهنده جهت برعکس آن است. این مسئله برای «گرم» و «سرد» هم صادق است: در یک سطح ریزمقیاس، «گرم» و «سرد» وجود ندارد اما وقتی که تعداد زیادی از اجزای ریزمقیاس را کنار هم می‌گذاریم و آنها را بر حسب میانگین‌شان توصیف می‌کنیم مفهوم «گرما» معنا پیدا می‌کند: یک جسم گرم جسمی است که میانگین سرعت اجزای منفرد آن افزایش یافته است. ما می‌توانیم در وضعیت‌های مشخص معنای «بالا» یا «گرم» را بفهمیم: در وضعیتی که جرمی در مجاورت ما قرار دارد یا وضعیتی که در آن با مقادیر میانگین کار می‌کنیم یا وضعیت‌هایی شبیه به اینها.

باید چیزی شبیه به این در مورد «زمان» هم اعمال شود. اگرچه مفهوم زمان هیچ نقشی در سطوح بنیادین ندارد اما مانند «بالا» و «گرم»، به وضوح نقشی اساسی در زندگی ما بازی می‌کند. اگر زمان هیچ نقشی در توصیف بنیادین ما از جهان ندارد پس معنای «گذر زمان»

چیست؟

پاسخ ساده است. منشأ زمان احتمالاً شبیه منشأ گرماست: زمان محصول میانگین تعداد زیادی از متغیرهای ریزمقیاس است. بیایید نگاهی دقیق‌تر به این مسأله بیندازیم.

ایده پیوند بین زمان و دما، ایده‌ای باستانی و تکراری است. اگر دقت کنید تمام پدیده‌هایی که در آنها گذر زمان را پی می‌گیریم، شامل دما هم می‌شوند و برعکس. مشخصه بارز زمان این است که همواره رو به جلو حرکت می‌کند و به عقب برنمی‌گردد یعنی پدیده‌ای بازگشت‌ناپذیر است. پدیده‌های مکانیکی -آنهايي که شامل گرما نمی‌شوند- بازگشت‌پذیرند. اگر از آنها فیلم بگیریم و فیلم را به عقب برگردانیم باز هم پدیده‌ای واقعی خواهیم دید. اگر از نوسان یک آونگ یا سنگی که به بالا پرتاب می‌شود و سقوط می‌کند فیلم بگیریم و فیلم را برعکس پخش کنیم کماکان صحنه‌هایی معقول می‌بینیم که در آنها یک آونگ مشغول نوسان است یا سنگی به بالا پرتاب می‌شود و سپس سقوط می‌کند.

ممکن است بگویید سنگ با رسیدن به زمین متوقف می‌شود و اگر فیلم را برعکس ببینید، سنگ خود به خود از روی زمین به بالا می‌جهد و این نامعقول است. اما وقتی که سنگ به زمین می‌رسد و متوقف می‌شود انرژی آن کجا می‌رود؟ به شکل گرما به زمین منتقل می‌شود! دقیقاً در لحظه‌ای که گرما تولید می‌شود این فرایند به فرایندی بازگشت‌ناپذیر بدل می‌شود: گذشته از آینده متفاوت می‌شود. همواره دما و تنها دماست که باعث تمایز بین گذشته و آینده می‌شود.

این پدیده جهان شمول است. یک شمع در حال سوختن به دود تبدیل می‌شود -دود نمی‌تواند دوباره به شمع تبدیل شود- و شمع گرما تولید می‌کند. یک فنجان چای داغ به مرور سرد می‌شود و دوباره گرم نخواهد شد: گرما می‌پراکند. ما زندگی می‌کنیم و پیر می‌شویم: گرما تولید می‌کنیم. دو چرخه ما در طول زمان مستهلک می‌شود: از طریق اصطکاک گرما تولید می‌کند. به منظومه شمسی بیندیشید. در نگاه اول، مانند ماشینی عظیم همواره به حرکت خود ادامه می‌دهد و همیشه در تعادل است. این منظومه گرما تولید نمی‌کند و اگر آن را برعکس ببینید متوجه هیچ چیز عجیبی نخواهید شد. اما اگر دقیق‌تر نگاه کنید پدیده‌های بازگشت‌ناپذیر را هم می‌بینید: خورشید ذخیره هیدروژن خود را تا آخر مصرف خواهد کرد و روزی خاموش خواهد شد: خورشید هم در حال پیر شدن است چرا که گرما تولید می‌کند. به نظر می‌رسد ماه هم بدون تغییر دور زمین می‌گردد و همواره در تعادل است اما در واقع دارد به تدریج دور می‌شود. این به این دلیل است که ماه جزر و مد ایجاد می‌کند و این جزر و مد کمی دریا را گرم می‌کند در نتیجه دریا با ماه انرژی رد و بدل می‌کند. تمام پدیده‌هایی که نشان‌دهنده گذر زمان هستند از طریق تولید گرما ممکن شده‌اند. زمان بدون گرما هیچ جهت مشخصی ندارد.

اما گرما نامی است که ما بر میانگین تعداد زیادی متغیر می‌گذاریم.

ایده زمان دمایی این مشاهده را وارونه می‌کند. یعنی به جای اینکه پیرسیم چگونه زمان باعث اتلاف گرما می‌شود، باید پیرسیم که گرما چگونه زمان را تولید می‌کند.

به لطف بولتسمان می‌دانیم که مفهوم گرما نتیجه برهم کنش ما با میانگین هاست. ایده زمان دمایی این است که مفهوم زمان هم نتیجه برهم کنش ما با میانگین تعداد زیادی از متغیر هاست.^{۱۶}

تا وقتی که توصیف کاملی از یک سیستم داریم، تمام متغیرهای سیستم در یک رتبه قرار دارند و هیچ کدام به منزله یک متغیر زمان عمل نمی کنند: هیچ کدامشان رابطه ای متقابل با یک پدیده بازگشت ناپذیر ندارند. اما به محض اینکه سیستم را به وسیله میانگین متغیرهایش توصیف کنیم متغیر مشخصی خواهیم داشت که مانند زمان عادی رفتار می کند. زمانی که در آن گرما پخش می شود. زمان تجربه روزمره ما.

بنابراین، زمان یکی از اجزای بنیادی جهان نیست و به این دلیل پدیدار می شود که جهان بسیار بزرگ است و ما سیستم های کوچکی در این جهان هستیم که تنها با متغیرهای بزرگ مقیاس برهم کنش می کنیم. متغیرهایی که چیزی نیستند جز میانگین تعداد بی شماری متغیر کوچک و ریزمقیاس. ما در زندگی روزمره مان هیچ گاه یک ذره بنیادی منفرد یا یک کوانتوم فضا را نمی بینیم. سنگ ها و کوه ها و چهره دوستانمان را می بینیم که همگی از تعداد بی شماری ذرات بنیادی تشکیل شده اند. ما همواره با میانگین ها در ارتباط متقابلیم. میانگین ها مانند میانگین ها رفتار می کنند: آنها گرما پخش می کنند و زمان را درون خودشان به وجود می آورند.

فهم این ایده برای ما دشوار است چون اندیشیدن به یک جهان بی زمان و همچنین به زمانی که به شکلی تقریبی آشکار می شود بسیار مشکل است. ما بیش از اندازه به اندیشیدن به واقعیت زمان مند عادت کرده ایم. ما موجوداتی هستیم که در زمان زندگی می کنیم: در زمان اقامت می کنیم و با آن پرورده می شویم. ما معلول این زمان مندی هستیم که میانگین مقادیر متغیرهای ریزمقیاس آن را تولید کرده است. اما محدودیت شهود ما نباید گمراهمان کند. درک بهتر جهان اغلب مستلزم عمل برخلاف شهود است. اگر چنین چیزی لازم نبود فهمیدن جهان آسان می شد.

زمان نتیجه غفلت ما از حالت های فیزیکی بسیار کوچک چیزهاست. زمان اطلاعاتی است که ما نداریم.

زمان جهل ماست.

واقعیت و اطلاعات

چرا اطلاعات نقشی چنین پراهمیت دارد؟ شاید به این دلیل که ما نباید آنچه را درباره یک سیستم می دانیم با وضعیت مطلق همان سیستم اشتباه بگیریم. آنچه ما می دانیم راجع به رابطه سیستم و خود ما است. دانش، ذاتاً رابطه ای است و همان قدر که به آنچه شناخته می شود مربوط است، به شناسنده هم ارتباط دارد. مفهوم «وضعیت» یک سیستم، مستقیم یا غیرمستقیم، به سیستمی دیگر اشاره دارد. مکانیک کلاسیک ما را دچار این توهم می کرد که چشم پوشیدن از این حقیقت ساده ممکن است و ما حداقل در نظریه می توانیم به تصویری از واقعیت برسیم که کاملاً مستقل از مشاهده گراست. اما در نهایت، پیشرفت فیزیک به ما نشان داد که چنین چیزی غیرممکن است.

توجه کنید: وقتی می گویم که ما در مورد دمای فنجان چای «اطلاع داریم» یا در مورد سرعت هر کدام از مولکول ها «اطلاع نداریم»، درباره حالات ذهنی یا ایده های انتزاعی حرف نمی زنم. منظور من صرفاً این است که قوانین فیزیک به ما اجازه می دهند تا با دما ارتباط متقابل داشته باشیم (مثلاً به دماسنج نگاه کنیم) اما اجازه نمی دهند که با سرعت تک تک مولکول ها چنین ارتباطی داشته باشیم. این همان مفهومی از اطلاعات است که من فصل را با آن شروع کردم: توپ سفید در دستان شما از این واقعیت که توپ من سیاه است «اطلاع دارد». سر و کار ما اینجا با واقعیت های فیزیکی است نه مفاهیم ذهنی. با این دید، یک توپ اطلاعات دارد در حالی که هیچ وضعیت ذهنی ای ندارد، دقیقاً مانند یک حافظه USB که اطلاعات دارد (میزان گیگابایتی که روی آن نوشته شده نشان می دهد که چقدر اطلاعات می تواند ذخیره کند) اما نمی تواند فکر کند. اطلاعات به این معنا - ارتباط متقابل وضعیت های سیستم ها - در همه جای جهان حضور دارد.

من معتقدم که برای فهم واقعیت باید به خاطر داشته باشیم که واقعیت شبکه ای از اطلاعات دوسویه ای است که تار و پود جهان اند. ما واقعیت اطراف خود را به شکل اشیاء برش می زنیم. اما واقعیت از اشیائی کاملاً مجزا ساخته نشده است. واقعیت جریانی سیال است. به یک موج دریا فکر کنید. یک موج کجا تمام می شود؟ از کجا شروع می شود؟ به یک کوه فکر کنید. کوه از کجا شروع شده؟ کجا پایان یافته؟ تا کجا زیر زمین ادامه دارد؟ این سؤالات چندان معنایی ندارند چرا که موج یا کوه اشیائی کاملاً مجزا نیستند. اینها روش هایی هستند که ما برای اینکه بتوانیم راحت تر در مورد جهان حرف بزنیم با آنها جهان را برش می زنیم. این مرزها دلبخواهی و قراردادی و بی دردسر هستند:

مانند سیستم‌های فیزیکی بیشتر به ما بستگی دارند تا اینکه متعلق به خود موج یا کوه باشند. روش‌هایی برای سامان‌دهی اطلاعات ما یا به بیان بهتر، اشکال مختلف اطلاعاتی هستند که داریم.

اگر دقیق بنگریم این مسأله برای هر چیزی، حتی موجودات زنده صادق است. از همین رو چندان معنا ندارد که بپرسیم آیا ناخن جدا شده من هنوز خود «من» است یا دیگر «من نیست». یا موهای گربه‌ای که روی کاناپه من ریخته، هنوز متعلق به گربه است یا نه. یا یک بچه دقیقاً چه وقت زندگی‌اش را شروع می‌کند. وقتی اولین بار مادرش، بسیار پیش از حامله شدنش، رؤیای او را می‌بیند؟ یا وقتی جنین شکل می‌گیرد؟ یا وقتی برای اولین بار نفس می‌کشد؟ یا وقتی نام خودش را یاد می‌گیرد؟ یا وقتی ما رسوم متفاوت دیگری را به کار بگیریم: اینها همه مفید اما دلبخواهی‌اند. اینها همه روش‌هایی هستند برای اینکه ما از طریق آنها به واقعیت بیندیشیم و مسیرمان را در هزارتوی آن پیدا کنیم.

یک موجود زنده، سیستمی است که برای اینکه همواره خودش بماند، مدام خود را از طریق برهم‌کنش پیوسته با جهان خارج بازسازی می‌کند. در میان موجودات زنده آن‌هایی به زندگی ادامه می‌دهند که در انجام این کار کارآمدترند و به همین خاطر موجودات زنده خصلت‌هایی را از خود بروز می‌دهند که برای بقای آنها مناسب‌تر است. به همین دلیل، رفتارشان تفسیرپذیر است و ما آنها را از روی قصد و هدف‌شان تفسیر می‌کنیم. در نتیجه، برندگان جهان زیستی (این کشف درخشان داروین است) نتایج گزینش اشکال پیچیده‌ای هستند که در بقا کارآمدترند. اما روش مؤثر برای ادامه زندگی در یک محیط متغیر، مدیریت ارتباطات متقابل با جهان خارجی است یعنی مدیریت اطلاعات: گردآوری، ذخیره، انتقال و شرح اطلاعات. DNA، سیستم ایمنی، حواس، سیستم عصبی، مغزهای پیچیده، زبان‌ها، کتاب‌ها، کتابخانه اسکندریه، کامپیوترها و ویکی‌پدیا به همین دلیل وجود دارند: آنها توان مدیریت اطلاعات - مدیریت ارتباطات متقابلی که برای بقا مناسب‌اند - را به حداکثر می‌رسانند.

مجسمه‌ای که ارسطو در یک قطعه مرمر می‌بیند چیزی بیش از آن قطعه مرمر است. اما یک شکل انتزاعی هم نیست که جایش صرفاً در مجسمه باشد. چیزی است که در ارتباط متقابل ذهن ارسطو یا ذهن ما و مرمر جای دارد. چیزی وابسته به اطلاعاتی که مرمر، در ارتباط با آنچه برای ارسطو یا برای ما مهم است، ارائه می‌دهد. چیزی در ارتباط با یک پرتاب‌کننده دیسک (شکل مجسمه)، فیدایس (سازنده)، ارسطو، مرمر و حالات مرتبط اتم‌های مجسمه که در ارتباطات متقابلی جای دارد که ذهن ما یا ارسطو میان اینها و هزاران چیز دیگر برقرار می‌کند. تمام اینها از یک پرتاب‌کننده دیسک سخن می‌گویند، دقیقاً به همان صورت که توپ سفید در دستان شما به شما می‌گوید که توپ من سیاه است. ما چنان ساخته شده‌ایم که این اطلاعات را با دقت مدیریت کنیم و به لطف آن زنده بمانیم.

حتی همین شرح مختصر هم باید روشن کرده باشد که چرا اطلاعات در تلاش ما برای فهم جهان نقشی اساسی دارد. مفهوم اطلاعات به منزله ابزاری برای فهم، از ارتباطات تا مبانی ژنتیک، از ترمودینامیک تا مکانیک کوانتومی و از آنجا تا گرانس کوانتومی، مدام با ارزش‌تر می‌شود. جهان نه یک مجموعه بی‌شکل از اتم‌ها، بلکه بازی‌آینه‌هاست: بازی‌ای که بر مبنای ارتباطات متقابل بین ساختارهای متشکل از ترکیب‌های این اتم‌ها برپا شده است.

همان‌گونه که دموکریتوس می‌گفت مسأله نه فقط اتم‌ها، بلکه الگویی است که اتم‌ها بر حسب آن چیده می‌شوند. اتم‌ها مانند حروف الفبا هستند: الفبایی خارق‌العاده و چنان غنی که می‌تواند بخواند و تأمل کند و حتی به خود بیندیشد. ما صرفاً اتم نیستیم بلکه الگوهایی هستیم که اتم‌ها بر حسب آنها چیده شده‌اند و این قدرت را داریم که اتم‌های دیگر یا خودمان را بازتاب دهیم.

تعریف دموکریتوس از «انسان» تعریف عجیبی است: «انسان چیزی است که همه می‌دانیم». [۲] در نگاه اول این تعریف کمی احمقانه و بی‌محتوا به نظر می‌رسد اما این‌گونه نیست.

سالومون لوریا، از بزرگ‌ترین متخصصان دموکریتوس، معتقد است که این تعریف مبتذل یا پیش‌پاافتاده نیست. ماهیت انسان نه ساختار درون او، بلکه شبکه فردی و خانوادگی و اجتماعی برهم‌کنش‌هایی است که او از طریق آنها زنده است. این چیزی است که ما را «می‌سازد» و از ما محافظت می‌کند. ما انسان‌ها، چیزهایی هستیم که دیگران درباره ما می‌دانند، چیزهایی که خودمان درباره خودمان می‌دانیم و چیزهایی که دیگران از دانش ما می‌دانند. ما گره‌هایی پیچیده در شبکه‌ای غنی از اطلاعات دوسویه‌ایم.

تمام اینها هنوز در قالب یک نظریه درنیامده است. از دید من اینها مسیرهایی است که باید برای فهم بهتر جهان اطرافمان دنبالشان کنیم. هنوز چیزهای زیادی مانده که باید فهمید. در فصل آینده از آنها سخن خواهم گفت.

حقیقت در اعماق است.

دموکریتوس [۱]

تا اینجا ماهیت چیزها را از نظرگاه خودم و بر حسب دانشی که تا امروز داریم، توصیف کردم. خلاصه‌ای از روند پیشرفت برخی از ایده‌های اصلی فیزیک بنیادین ارائه دادم، کشفیات بزرگ در قرن بیستم را بررسی کردم و تصویری را به نمایش درآوردم که نظریه گرانش کوانتومی از جهان ترسیم می‌کند.

آیا از همه اینها مطمئنم؟ نه!

یکی از اولین و زیباترین صفحات تاریخ علم قطعه‌ای از مکالمه فایدون افلاطون است که در آن سقراط شکل زمین را توصیف می‌کند. سقراط می‌گوید که «باور دارد» زمین کروی شکل است، با دره‌های عمیقی که انسان‌ها در آن زندگی می‌کنند. اگرچه حرفش کمی مبهم است اما در کل درست می‌گوید. او اضافه می‌کند: «مطمئن نیستم». این قطعه بارها از مابقی مکالمه که پر از مهملائی درباره جاودانگی نفس است ارزش بیشتری دارد. ارزش این متن صرفاً به این نیست که قدیمی‌ترین متنی است که مستقیماً درباره کروی بودن زمین سخن می‌گوید، بلکه مهم‌تر از آن، به شفافیت و وضوح درخشان اقرار افلاطون به محدودیت‌های دانش زمانه‌اش است. سقراط می‌گوید: «مطمئن نیستم».

این آگاهی تیزبینانه به جهل مان، اساس اندیشه علمی است. به لطف همین آگاهی به محدودیت دانش، چیزهای زیادی آموخته‌ایم. همان‌طور که سقراط درباره کروی بودن زمین مطمئن نبود، ما هم درباره عموم تصورات مان یقین نداریم و مشغول جست‌وجو در مرزهای دانش مان هستیم.

آگاهی از محدودیت دانش مان، آگاهی از این واقعیت است که آنچه می‌دانیم نیز می‌تواند اشتباه یا نادقیق باشد. تنها وقتی می‌توانیم خودمان را از شر تصورات نادرست خلاص کنیم و بهتر یاد بگیریم که به یاد داشته باشیم باورهای ما ممکن است اشتباه باشند. برای یادگیری لازم است شهامت پذیرش این واقعیت را داشته باشیم که ممکن است تمام آنچه فکر می‌کنیم می‌دانیم، حتی راسخ‌ترین باورهایمان، نادرست یا حداقل ساده‌انگارانه باشد: سایه‌هایی روی دیوار غار افلاطون.

علم زاده همین رفتار فروتنانه است: نباید کورکورانه به دانش گذشته و شهودمان اعتماد کنیم. نباید هر چیزی را که هر کس گفت باور کنیم. نباید به دانش اندوخته شده پدران و نیاکانمان ایمان داشته باشیم. اگر فکر کنیم آنچه را که لازم است می‌دانیم یا فرض کنیم هر چه را لازم بوده قبلاً پیران قبیله فهمیده و نوشته‌اند، هیچ چیز نخواهیم آموخت. قرن‌هایی که در آنها مردم به باورهایشان ایمان داشته‌اند، قرن‌هایی بوده که بشر چیزهای بسیار کمی آموخته است. اگر اینشتین یا نیوتن یا کوپرنیک به دانش نیاکان‌شان ایمان داشتند هرگز نمی‌توانستند چیزی را زیر سؤال ببرند و باعث پیشرفت دانش ما شوند. اگر هیچ کس شک نمی‌کرد، انسان‌ها هنوز فراعنه را می‌پرستیدند و فکر می‌کردند زمین بر پشت یک لاک‌پشت قرار دارد. حتی مفیدترین دانسته‌های ما، مانند کشفیات نیوتن نیز می‌توانند - همان‌طور که - اینشتین نشان داد - در نهایت ساده‌انگارانه از کار درآیند.

گاهی علم را به این دلیل که وانمود می‌کند همه چیز را توضیح می‌دهد و برای هر پرسش پاسخی دارد، نقد می‌کنند. اتهام عجیبی است. همان‌طور که هر پژوهشگری در هر آزمایشگاهی در هر کجای جهان می‌داند، پرداختن به علم یعنی مبارزه علیه محدودیت‌های ناشی از جهل ما در زندگی روزمره: چیزهای بی‌شماری که نمی‌دانیم و کارهای بی‌شماری که نمی‌توانیم انجام دهیم. این کاملاً با ادعای همه چیزدانی فرق دارد. نمی‌دانیم سال بعد چه ذراتی در سرن مشاهده خواهد شد، یا تلسکوپ بعدی ما چه چیزهایی نشان خواهد داد، یا چه معادله‌ای حقیقتاً جهان را توصیف خواهد کرد. ما نمی‌دانیم چگونه معادلاتی را که داریم حل کنیم و گاهی حتی معنای آنها را نمی‌فهمیم. نمی‌دانیم نظریه زیبایی که مشغول کار بر روی آن هستیم درست است یا نه. نمی‌دانیم فراسوی مه‌بانگ چیست. نمی‌دانیم نحوه کارکرد یک طوفان یا یک باکتری یا یک چشم یا سلول‌های بدن مان یا فرایند اندیشه مان چگونه است. دانشمند کسی است که همیشه با محدودیت‌های بی‌شمار مان - از جمله محدودیت فهم مان - در تماس است و همواره جهل عمیق مان را به یاد دارد.

اما اگر در مورد هیچ چیز یقین نداریم، چگونه می‌توانیم به آنچه علم به ما می‌گوید اعتماد کنیم؟ پاسخ ساده است. قابل اعتماد بودن علم به این خاطر نیست که حرف‌های قطعی می‌زند. علم قابل اعتماد است چون برای سؤالات ما در این لحظه بهترین جواب ممکن را فراهم می‌کند. علم تمام آن چیزی است که در مواجهه با مسائل مان می‌دانیم. گشودگی علم، یعنی تلاش هر لحظه‌اش برای زیر سؤال بردن دانش موجود، تضمین می‌کند که جواب‌های علم بهترین جواب‌های در دسترس هستند: اگر جواب‌های بهتری یافتید آن جواب‌ها به علم تبدیل خواهند شد. اینشتین با یافتن جواب‌هایی که از جواب‌های نیوتن بهتر بود، توان علم برای یافتن بهترین جواب ممکن را زیر سؤال نبرد. برعکس، آن را تأیید کرد.

بنابراین، جواب‌هایی که علم می‌دهد نه به خاطر قطعی بودنشان، که به خاطر غیرقطعی بودنشان قابل اعتمادند. آنها به این دلیل قابل اعتمادند که در حال حاضر بهترین جواب‌های در دسترس هستند و این جواب‌ها از این جهت بهترین جواب‌اند که آنها را قطعی نمی‌پنداریم و معتقدیم که در برابر رشد و پیشرفت گشوده‌اند. آگاهی ما از جهل مان باعث می‌شود علم قابل اعتماد باشد.

و آنچه ما به آن نیاز داریم اعتماد است نه قطعیت. چیزی به نام قطعیت مطلق بدون ایمان وجود ندارد و نخواهد داشت. معتبرترین پاسخ‌ها پاسخ‌های علم هستند چرا که علم جست‌وجویی برای یافتن معتبرترین پاسخ‌هاست نه پاسخ‌هایی که قطعی به نظر می‌رسند. علم اگرچه ریشه در دانش گذشته دارد، ماجراجویی‌ای متکی بر دگرگونی مستمر است. داستانی که من می‌گویم روایتی هزاران ساله است از علمی که همواره گنجینه‌ای از ایده‌های خوب داشته اما هرگاه ایده بهتری پیدا شده، در کنار گذاشتن ایده‌های قبلی‌اش تردید نکرده است. سرشت تفکر علمی، نقد و سرکشی و نارضایتی است در مقابل مفاهیم از پیش تعیین شده و محترم یا حقیقتی دسترس ناپذیر. جست‌وجوی دانش نه با قطعیت بلکه با یک بی‌اعتمادی رادیکال به مفهوم قطعیت پیش می‌رود.

با این اوصاف، کسانی که ادعا می‌کنند حقیقت فقط در اختیار آنهاست، به هیچ وجه قابل اعتماد نیستند. به همین دلیل است که علم و عرصه‌های پیش‌اعلمی شناخت، مدام در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند. نه به این دلیل که علم ادعا می‌کند جواب‌های نهایی را در اختیار دارد بلکه دقیقاً برعکس: به این دلیل که روح علمی به هر کسی که ادعا می‌کند جواب‌های نهایی را می‌داند یا دسترسی خاصی به حقیقت دارد، بی‌اعتماد است. بعضی‌ها این بی‌اعتمادی را مزاحم خود می‌دانند. علم از وجود عرصه‌های دیگر آشفته نخواهد شد: برخی از این عرصه‌ها با تفکر علمی آشفته می‌شوند.

پذیرش اینکه دانش ما ذاتاً قطعی و کامل نیست، پذیرفتن زندگی‌ای غرق در ناآگاهی و راز است، زندگی‌ای پر از سؤالاتی که پاسخ‌هایشان را نمی‌دانیم. سؤالاتی که هنوز پاسخ‌شان را نمی‌دانیم و شاید هیچ‌گاه هم ندانیم.

ممکن است زندگی با عدم قطعیت دشوار باشد. کسانی هستند که هر نوع قطعیتی را حتی اگر کاملاً بی‌اساس باشد، به عدم قطعیت ناشی از شناخت محدودیت‌های انسان ترجیح می‌دهند. کسانی هستند که به جای اینکه عدم قطعیت را شجاعانه بپذیرند، ترجیح می‌دهند داستان‌هایی را باور کنند که نیاکان‌شان به آنها باور داشته‌اند.

جهل می‌تواند وحشتناک باشد. برای فرار از همین وحشت ما می‌توانیم به داستان‌هایی آرامش‌بخش پناه ببریم: فراسوی ستاره‌ها باغی، رؤیایی وجود دارد که در آن پدری مهربان با آغوش باز از ما پذیرایی می‌کند. مهم نیست این داستان درست است یا نه، مهم این است که اطمینان‌بخش است.

همواره کسانی در جهان هستند که ادعا می‌کنند پاسخ‌های را در اختیار دارند. جهان پر از انسان‌هایی است که مدعی دانستن حقیقت هستند، چرا که آن را از نیاکان خود به ارث برده‌اند یا شنیده‌اند یا مستقیماً اخذ کرده‌اند یا در اعماق وجود خودشان یافته‌اند. همواره کسانی هستند که خود را کلیددار حقیقت می‌دانند بدون اینکه توجه کنند جهان پر است از این کلیدداران حقیقت که هر کدام هم حقایق خودشان را دارند که با حقایق دیگران متفاوت است. همواره کسانی هستند که می‌گویند «از من پیروی کنید، زیرا حق با من است».

من با پایبندی به آزادی عقیده به کسانی که به چنین چیزهایی معتقدند نمی‌تازم. من ترجیح می‌دهم مستقیماً با جهل مان مواجه شوم، آن را بپذیرم و سعی کنم کمی بیشتر ببینم: تلاش برای فهم چیزهایی که قابل فهم هستند. آن هم نه فقط به این دلیل که پذیرش این جهل راهی است برای فرار از گرفتاری در خرافه و تعصب بلکه همچنین به این دلیل که پذیرش این جهل را در وهله اول حقیقی‌ترین و زیباترین و

از همه مهم‌تر صادقانه‌ترین راه می‌دانم.

به نظر من تلاش برای بیشتر دیدن و پیش رفتن یکی از شکوهمندترین چیزهایی است که به زندگی معنا می‌دهد. مانند عشق ورزیدن یا نگریستن به آسمان. کنجکاوی برای یادگیری، برای کشف، برای سردرآوردن از پشت تپه بعدی، میل به مزه کردن یک سیب: اینهاست که از ما انسان می‌سازد. همان‌طور که اولیس دانه به همراهانش یادآور می‌شود، ما نه برای «زندگی مانند حیوانات، که برای جست‌وجوی فضیلت و دانش ساخته شده‌ایم».^{۱۰۷}

جهان خارق‌العاده‌تر و عمیق‌تر از تمام افسانه‌هایی است که نیاکانمان روایت کرده‌اند. من می‌خواهم بروم و آن را ببینم. پذیرش عدم قطعیت از شوق ما برای کشف رازها نمی‌کاهد. برعکس، ما غرق در رمز و راز و زیبایی جهان هستیم. جهانی که گرانش کوانتومی پدیدار می‌کند جهانی تازه و شگفت و پر رمز و راز اما در عین حال ساده و واضح است. این جهانی است که در فضا قرار ندارد و در زمان پیش نمی‌رود. جهانی که صرفاً از میدان‌های کوانتومی در حال برهم‌کنش ساخته شده که مجموع آنها -از طریق شبکه‌ای غنی از برهم‌کنش‌های دو سویه- فضا، زمان، ذرات، امواج و نور را تولید می‌کند. (شکل ۱-۱۳) ادامه دارد، ادامه دارد، پر از زندگی و مرگ پر از لطف و عداوت، پر از وضوح و ابهام و شاعر ادامه می‌دهد:

از فراز این برج دیده‌بانی، تا چشم کار می‌کند همین است. [۲]

جهانی بدون بی‌نهایت‌ها، که در آن بی‌نهایت کوچکی وجود ندارد چرا که حدی کمینه برای انبوهه حاکم است و پایین‌تر از آن چیزی نیست. کوانتوم‌های فضا با کف فضا زمان در هم می‌آمیزد و ساختار چیزها از اطلاعات دو سویه‌ای زاده می‌شود که تار و پود ارتباطات متقابل ناحیه‌های مختلف جهان هستند.



شکل ۱-۱۳ نمایشی شهودی از گرانش کوانتومی

جهانی که ما می‌دانیم چگونه با مجموعه‌ای از معادلات آن را توصیف و شاید اصلاح کنیم.

این جهانی است بسیار عظیم که هنوز چیزهای زیادی برای جست‌وجو و کشف دارد. بزرگ‌ترین رؤیای من این است که روزی کسی - امیدوارم یکی از خوانندگان این کتاب- بتواند گرد این جهان بگردد و آن را روشن‌تر کند. پشت تپه بعدی، جهان‌هایی عظیم‌تر هست که

پی‌نوشت‌ها

۱. دانه‌ها

۱. درباره‌ی آناکسیمندر و میلئوس‌ها به این منبع رجوع کنید:

Carlo Rovelli, *The First Scientist: Anaximander and His Legacy*, trans. Marion Lignana Rosenberg (Yardley, Westholme, ۲۰۰۷).

۲. به این مسأله که لوکیپوس اصالتاً اهل میلئوس بود برای مثال در این اثر اشاره شده است:

M. Andolfo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze* (Ancient Atomism. Fragments and Testimonies), (Milan, Rusconi, ۱۹۹۹), p. ۱۰۳.

اما هنوز چیزی ثابت نشده است. ارجاع به میلئوس و النا در آثار او کاملاً برجسته است. جلوتر راجع به دین لوکیپوس به زنون النایی بحث خواهد شد.

۳. Seneca, *Naturales questiones*, VII, ۳, ۲d.

۴. Cicero, *Academica priora*, II, ۲۳, ۷۳.

۵. Sextus Empiricus, *Adversus mathematicos*, VIII, ۱۳۵ (trans. R. G. Bury, *Against the Professors*), (Loeb Classical Library, ۱۹۸۹).

۶. Aristotle, *On Generation and Corruption*, A1, ۳۱۵b ۶, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, ۱۹۸۴).

۷. مجموعه‌ای از قطعات و شواهدی درباره‌ی اتم‌گرایی در *Ancient Atomists* نوشته‌ام. آندولفو آمده است. گلچین کاملی از قطعات و شواهد درباره‌ی دموکریتوس را سالامون لوریا منتشر کرده است.

۸. یک کار مختصر و جذاب درباره‌ی اندیشه‌ی دموکریتوس و ارتباط آن با انسان‌گرایی منبع زیر است:

Martini, *Democrito: filosofo della natura o filosofo dell'uomo?* (Democritus: Philosopher of Nature or Philosopher of Man?), (Rome, Armando, ۲۰۰۲).

۹. Plato, *Phaedo*, ed. David Gallup (Oxford, Oxford University Press, ۲۰۰۹), XLVI.

۱۰. Richard Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. ۱, eds. Robert Leighton and Matthew Sands (London, Basic Books, ۲۰۱۱).

۱۱. Aristotle, *On Generation and Decay*, A2, ۳۱۶a, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, ۱۹۸۴).

۱۲. اخیراً وینچنزو فانو در *I paradossi di Zenone*, (Rome, Carocci, ۲۰۱۲) گزارشی جذاب از پارادوکس‌های زنون و ارتباط آنها با ریاضیات و فلسفه ارائه داده است.

۱۳. *Amores* (Love Poems), I, ۱۵, ۲۳-۴.

۱۴. Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, ۱۹۵۱), p. ۱۷۳

۱۵. *Ibid.*, p. ۸۹.

۱۶. *Ibid.*, p. ۲۷.

۱۷. *Ibid.*, p. ۶۰.

۱۸. Guido Cavalcanti, *Rime*, trans. Leonard Cottrell.

۱۹. برای خواندن گزارشی از بازکشف متن لوکریتیوس و تأثیر آن بر فرهنگ اروپایی به این کتاب مراجعه کنید:

Stephen Greenblatt, *The Swerve: How the World Became Modern* (New York, Norton, ۲۰۱۱).

(استیون گرین‌بلت، جهان چگونه مدرن شد، ترجمه: مهدی نصرالله‌زاده، نشر بیدگل)

۲۰. Camarota, 'Galileo, Lucretius and Atomism', in F. Citti and M. Beretta (eds.), *Lucrezio, la natura e la scienza* (Lucretius, Nature and Science), (Florence, Leo S. Olshki, ۲۰۰۸), pp. ۱۴۱-۷۵.

۲۱. R. Kargon, *Atomism in England from Harriot to Newton* (Oxford, Oxford University Press, ۱۹۶۶).

۲۲. William Shakespeare, *Romeo and Juliet*, ۱.۴, ۵۵-۶۰, *Complete Works*, eds. Jonathan Bate and Eric Rasmussen (London, Macmillan/The Royal Shakespeare Company, ۲۰۰۷), p. ۱۶۹۰.

۲۳. *On The Nature of the Universe*, pp. ۶۳-۴.

۲۴. پیرجورجو اودیفردی ترجمه و شرحی خوب از متن لوکرتیوس برای استفاده در مدارس منتشر کرده است:

Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere (The Nature of Things. My Lucretius, My Venus), (Milan, Rizzoli, ۲۰۱۳).

خوب بود اگر مدارس این متن را تدریس می‌کردند و متن درخشان لوکرتیوس بیشتر مورد توجه قرار می‌گرفت. خوانشی کاملاً مخالف با خوانش اودیفردی در این منبع آمده است:

V. E. Alfieri in *Lucrezio* (Lucretius), (Florence, Le Monnier, ۱۹۲۹).

این اثر بر جنبه‌های شاعرانه و تکان‌دهنده متن تمرکز می‌کند و از این طریق چهره‌ای شریف اما تلخ از لوکرتیوس به نمایش می‌گذارد.

۲۵. H. Diels and W. Kranz, eds., *Die Fragmente der Vorsokratiker* (The Presocratics: Fragments), (Berlin, Weidmann, ۱۹۰۳), ۶۸ b ۲۴۷.

۲. کلاسیک‌ها

۱. درباره ارزش و اعتبار فیزیک ارسطو به این کتاب مراجعه کنید:

C. Rovelli, 'Aristotle's Physics: A Physicist's Look', in *Journal of the American Philosophical Association*, ۱ (۲۰۱۵), pp. ۲۳-۴۰.

۲. Iamblichus of Chalchis, *Summa pitagorica* (Milan, Bompiani, ۲۰۰۶). For an English translation, see Iamblichus, *Life of Pythagoras*, trans. Thomas Taylor (Vermont, Inner Traditions International, ۱۹۸۶).

۳. Isaac Newton, *Opticks* (۱۷۰۴), (New York, Dover, ۱۹۷۹), p. ۴۰۰.

۴. Giacomo Leopardi, *The Canti*, with a Selection of His Prose, trans. J. G. Nichols (New York, Routledge, ۲۰۰۳), p. ۵۳.

۵. Isaac Newton, *Letters to Bentley* (Montana, Kessinger, ۲۰۱۰). Cited in H. S. Thayer, *Newton's Philosophy of Nature* (New York, Hafener, ۱۹۵۳), p. ۵۴.

۶. Ibid.

۷. Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (London, Bernard Quaritch, ۱۸۳۹-۵۵), ۳ vols., pp. ۴۳۶-۷.

۳. آلبرت

۱. Simplicius, *Aristotelis Physica* (Aristotle's Physics), ۲۸, ۱۵.

۲. A. Calaprice, *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children* (New York, Prometheus Books, ۲۰۰۲), p. ۱۴۰.

۳. The letter is quoted in A. Fölsing, *Einstein: A Biography* (London, Penguin, ۱۹۹۸), p. ۳۳۷.

۴. F. P. De Ceglia (ed.) *Scienziati di Puglia: secoli V aC.-XXI, dC, Parte ۳* (Scientists of Puglia: From the Fifth Century BC to the Twentieth Centuries, Part ۳) (Bari, Adda, ۲۰۰۷), p. ۱۸.

۵. A. Calaprice, *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children* (New York, Prometheus Books, ۲۰۰۲), p. ۲۰۸.

۴. کوانتوم‌ها

۱. Albert Einstein, 'Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden Gesichtspunkt', *Annalen der Physik*, ۱۷, pp. ۱۳۲-۴۸.

۲. این اثر دربارهٔ شخصیت پریشان دیراک صحبت کرده است:

Graham Farmelo, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius* (London, Faber, ۲۰۰۹).

۳. Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, ۱۹۵۱), II, ۲۱۸.

۴. برای خواندن بحثی دربارهٔ تفسیر نسبی از مکانیک کوانتومی به این منابع مراجعه کنید:

'Relational Quantum Mechanics' in the online Stanford Encyclopedia of Philosophy, <http://plato.stanford.edu/archives/win۲۰۰۳/entries/rovelli>, or Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in *International Journal of Theoretical Physics*, ۳۵, ۱۶۳۷, ۱۹۹۶, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/۹۶۰۹۰۲>.

۵. Bas van Fraassen, 'Rovelli's World', in *Foundations of Physics*, ۴۰, ۲۰۱۰, ۳۹۰-۴۱۷; Michel Bitbol, *Physical Relations or Functional Relations? A Nonmetaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics*, *Philosophy of Science Archives*, ۲۰۰۷, <http://philsci-archive.pitt.edu/۳۵۰۶/>; Mauro Dorato, *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*, *Philosophy of Science Archives*, ۲۰۱۳, <http://philsciarchive.pitt.edu/۹۹۶۴/>, and *Che cos'è il tempo? Einstein, Gödel e l'esperienza commune* (What is Time? Einstein, Gödel and Shared Experience), (Rome, Carocci, ۲۰۱۳).

۵. فضا‌زمان کوانتومی است

۱. پژوهش نیلز بور و لئون روزنفلد دربارهٔ اندازهٔ میدان‌ها در این اثر آمده است:

'Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs', in *Mathematiks-fysike Meddelelser*, ۱۲, ۱۹۳۳.

۲. Matvei Bronštejn, 'Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder', in *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, ۹, ۱۹۳۶, ۱۴۰-۵۷; and 'Kvantovanie gravitatsionnykh voln', in *Pi'sma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, ۶, ۱۹۳۶, ۱۹۵-۲۳۶.

۳. F. Gorelik and V. Frenkel, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics* (Boston, Birkhauser Verlag, ۱۹۹۴).

۴. برایس دویت این بخش را دوباره در اینجا آورده است:

<http://www.aip.org/history/ohilist/۲۳۱۹۹.html>.

۷. زمان وجود ندارد

۱. Lucretius, *On the Nature of the Universe*, trans. E. A. Latham, (Harmondsworth, Penguin, ۱۹۵۱), p. ۴۱.

۲. William Shakespeare, *A Midsummer Night's Dream*, ۵.۱, ۲۳-۷, RSC edition, p. ۴۰۳.

۸. فراسوی مه‌بانگ

۱. این سخنرانی را می‌توانید در وبسایت واتیکان بیابید:

http://www.vatican.va/holy_father/pius_xii/speeches/۱۹۵۱/documents/hf_p-xii_spe_۱۹۵۱۱۱۲۲_di-serena_it.html#top.

۲. S. Singh, Big Bang (London, Harper Collins, ۲۰۱۰), p. ۳۶۲.

۱۲. اطلاعات

۱. بحثی دقیق درباره این دو اصل را می‌توانید اینجا بخوانید:

Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in International Journal of Theoretical Physics, ۳۵, ۱۶۳۷, ۱۹۹۶, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/۹۶۰۹۰۰۲>.

۲. Cicero, *Academica priora*, II, ۲۳, ۷۳.

۱۳. راز

۱. نقل شده از:

Diogenes Laertius, *Lives of Eminent Philosophers*, ۲ vols., (New York, Loeb, ۱۹۸۹).

۲. Mario Luzi, *Dalla torre*, in *Dal fondo delle campagne* (Turin, Einaudi) p. ۲۱۴.

کتابنامه

- Andolfo, Matteo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze* (Ancient Atomism. Fragments and Testimonies), Milan, Rusconi, ۱۹۹۹.
- Aristotle, *On Generation and Corruption*, in *The Complete Works of Aristotle*, Vol. I. Ed. Jonathan Barnes, Princeton, Princeton University Press, ۱۹۸۴. The principal work by Aristotle which provides information on the thought of Democritus.
- Bitbol, Michel, *Physical Relations or Functional Relations? A Non-metaphysical Construal of Rovelli's Quantum Mechanics*. *Philosophy of Science Archives*, ۲۰۰۷, <http://philsci-archive.pitt.edu/۳۵۰۶/>. Commentary on and Kantian interpretation of relational quantum mechanics.
- Baggott, Jim, *The Quantum Story: A History in Forty Moments*. New York, Oxford University Press, ۲۰۱۱. A good and complete reconstruction of the main stages in the development of quantum mechanics, from its origin to the present day.
- Bojowald, Martin, *Once Before Time: A Whole Story of the Universe*. New York, Alfred A. Knopf, ۲۰۱۰. An explanatory description of the application of loop quantum gravity to the origin of the universe – by one of the first scientists to use it in this way. Includes an account of the so-called 'Big Bounce' of the universe, which may have happened before the Big Bang.
- Calaprice, Alice (ed.), *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children*. New York, Prometheus Books, ۲۰۰۲. A delightful collection of letters exchanged between Einstein and several children.
- Democritus, *Raccolta dei frammenti* (Collected Fragments). Interpretation and Commentary by S. Luria. Trans. It. Milan, Bompiani, ۲۰۰۷. There is no English translation of this classic edition.
- Democritus, *The Atomists: Leucippus and Democritus. Fragments*. A text and translation with commentary by C. C. W. Taylor. Toronto, Toronto University Press, ۱۹۹۹.
- Diehls, H. and Kranz, W. (eds), *Die Fragmente der Vorsokratiker*. Berlin, Weidmann, ۱۹۰۳. The classic collection, in three volumes, of the 'fragments' of the Presocratics.
- Dorato, Mauro, *Che cos'è il tempo? Einstein, Gödel e l'esperienza comune*. Rome, Carocci, ۲۰۱۳. Precise and complete discussion, centred around special relativity, of the Einsteinian modification of the concept of time.
- , *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*. *Philosophy of Science Archives*, ۲۰۱۳, <http://philsci-archive.pitt.edu/۹۹۶۴/>. Discussion by an Italian philosopher of interpretations of quantum mechanics.
- Fano, Vincenzo, *I paradossi di Zenone*. Trans. It. Rome, Carocci, ۲۰۱۲. An excellent study which highlights the topicality of the problems posed by Zeno's paradoxes.
- Farmelo, Graham, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*. London, Faber, ۲۰۰۹. An extensive but highly readable account of the life and baffling character of the greatest physicist after

Einstein.

Feynman, Richard, *The Feynman Lectures on Physics*, eds. Richard B. Leighton and Matthew Sands (۳ vols.). London, Basic Books, ۲۰۱۱. Essential physics textbook drawn from the lectures of the greatest American physicist. They are brilliant, original, lively, the product of an outstanding intelligence. No student of physics who is truly interested in science should fail to read them.

Fölsing, Albrecht, *Albert Einstein: A Biography*. New York, Penguin, ۱۹۹۸. Extensive and complete biography of Einstein.

Gorelik, Gennaly E. and Frenkel, Victor, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*. Boston, Birkhäuser Verlag, ۱۹۹۴. Historical study of Bronštejn, the young Russian who initiated research in quantum gravity and was executed by Stalin.

Greenblatt, Stephen, *The Swerve: How the World became Modern*. New York, W. W. Norton, ۲۰۱۱. A book which reconstructs the influence of the rediscovery of Lucretius upon the birth of the modern world.

Heisenberg, Werner, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. New York, Harper & Row, ۱۹۶۲. The true originator of quantum mechanics reflects on general problems of philosophy and science.

Kumar, Manjit, *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate about the Nature of Reality*. London, Icon Books, ۲۰۰۹. A fine explanatory, detailed reconstruction of the birth of quantum mechanics and, above all, of the long dialogue between Bohr and Einstein on the meaning of the new theory.

Lucretius, *On The Nature of the Universe (De rerum natura)*, trans. R. E.

Latham. Harmondsworth, Penguin, ۱۹۵۱. The wonderful poem from which we know the ideas and spirit of ancient atomism.

Newton, Isaac, *A Treatise of the System of the World*. London, F. Fayram, ۱۷۳۱. A little-known work by Newton in which he gives his theory of universal gravity in a much less technical form than in his great treatise (*Principia*).

Odifreddi, P., *Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere*. Milan, Rizzoli, ۲۰۱۳. Translation with extensive commentary of Lucretius's poem. An ideal school textbook.

Plato, *Phaedo*, ed. David Gallop. Oxford, Oxford University Press, ۲۰۰۹. The oldest extant text to speak explicitly about the spherical nature of the earth.

Rovelli, Carlo, 'Aristotle's Physics: A Physicist's Look' in *Journal of the American Philosophical Association*, ۱ (۲۰۱۵) ۲۳-۴۰.

—, *Seven Brief Lessons on Physics*, trans. Simon Carnell and Erica Segre. London, Allen Lane, ۲۰۱۵. A concise guide through the scientific revolution that shook physics in the twentieth century and still continues to shake us today.

—, *The First Scientist: Anaximander and His Legacy*, trans. Marion Lignana Rosenberg. Yardley, Westholme, ۲۰۰۷. A reconstruction of the ideas of Anaximander – one of the greatest scientists of all time –

and their influence on the development of science. The book is also a reflection on the birth and nature of scientific thinking: its distinctive character, its difference from mythical thinking, its limitations and strength.

—, 'Quantum Gravity', in Butterfield, J. and Earman, J. (eds.), *Handbook of The Philosophy of Science, Philosophy of Physics*. Amsterdam, Elsevier/North- Holland, ۲۰۰۷, pp. ۱۲۸۷-۳۳۰. A long article aimed at philosophers, with a detailed discussion of the current state of quantum gravity, of its unresolved problems and the various approaches to them.

—, *Quantum Gravity*. Cambridge, Cambridge University Press, ۲۰۰۴. Technical manual on quantum gravity. Definitely not recommended for anyone without a background in physics.

—, 'Relational Quantum Mechanics' in *The Stanford Encyclopaedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/win۲۰۰۳/entries/rovelli/>. Synthesis of the relational interpretation of quantum mechanics.

—, 'Relational Quantum Mechanics' in *International Journal of Theoretical Physics*, ۳۵ (۱۹۹۶), ۱۶۳۷, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/۹۶.۰۹.۰۲>. The article which first introduces the theory of relational quantum mechanics.

Smolin, Lee, *Three Roads to Quantum Gravity*. New York, Basic Books, ۲۰۰۲. An introduction to quantum gravity and its open questions.

Van Fraassen, Bas. 'Rovelli's World' in *Foundations of Physics*, ۴۰ (۲۰۱۰), ۳۹۰-۴۱۷. A discussion of relational quantum mechanics, by an important analytic philosopher.

یادداشت‌ها

[←۱]

Abdera

[←۲]

Leucippus of Miletus

[←۳]

Apeiron

[←۴]

Panionium

[←۵]

The Great Cosmology

[←۶]

Little Cosmology

[←۷]

Velia

[←۸]

Elea

[←۹]

Annalen der Physik

[←۱۰]

فهرست آثار دموکریتوس که عنوان‌های آنها را دیوجنس لائرتیوس ضبط کرده است: کیهان‌شناسی کبیر، کیهان‌شناسی صغیر، شرح کلی جهان، دربارهٔ سیارات، دربارهٔ طبیعت، دربارهٔ طبع بشر، دربارهٔ هوشمندی، دربارهٔ حواس، دربارهٔ روح، دربارهٔ مزه‌ها، دربارهٔ رنگ‌ها، دربارهٔ انواع حرکات اتم‌ها، دربارهٔ تغییر شکل‌ها، دربارهٔ علل پدیده‌های کیهانی، دربارهٔ علل پدیده‌های جوی، دربارهٔ آتش و اشیای قابل اشتعال، دربارهٔ علل پدیده‌های صوتی، دربارهٔ آهنربا، دربارهٔ دانه و گیاهان و میوه‌ها، جانوران، توصیفی از آسمان، جغرافیا، توصیف قطب، دربارهٔ هندسه، حقیقت هندسی، دربارهٔ خط مماس بر دایره و کره، اعداد، خطوط گنگ و جامدات، طرح افکنی‌ها، نجوم، زیج، دربارهٔ پرتو نور، دربارهٔ انعکاس تصاویر، دربارهٔ ریتم و هارمونی، دربارهٔ شعر، دربارهٔ زیبایی آواز، دربارهٔ خوش‌آهنگی و بدآهنگی کلمات، دربارهٔ هومرو و واژه‌های اصیل حماسه، علم طب، کشاورزی، واژه‌ها، اسامی، ارزش‌ها و منافع، دربارهٔ ماهیت عقل، دربارهٔ نقاشی، رساله‌ای دربارهٔ تاکتیک، دریانوردی در اقیانوس‌ها، دربارهٔ تاریخ، تفکرات کلدانی‌ها، تفکرات فریجی‌ها، دربارهٔ نوشته‌های مقدس بابل، دربارهٔ نوشته‌های مقدس مروئه، تب‌ها و سرفه‌های ناشی از بیماری، دربارهٔ سرگشتگی، پرسش‌های حقوقی، فیثاغورس، دربارهٔ منطق یا معیار تفکر، اثبات‌ها، نکات اخلاقی، دربارهٔ سعادت. تمام این‌ها از دست رفته است.

[←۱۱]

De rerum natura: این کتاب را دکتر میرجلال‌الدین کزازی به فارسی ترجمه کرده‌اند. البته لازم به توضیح است که به دلایلی ترجیح دادم قطعات نقل شده از کتاب لوکرتیوس را اینجا دوباره ترجمه کنم. — م.

[←۱۲]

Poggio Bracciolini

[۱۳-]

Francesco Petrarch؛ شاعر و محقق و نویسنده بزرگ سده چهاردهم میلادی. پترارک از نخستین اومانیسست‌های تاریخ است و کسانی او را «پدر اومانیسسم» نامیده‌اند. اشعارش بر شاعران بزرگی مانند جفری چاسر و ویلیام شکسپیر و ادموند اسپنسر تأثیر گذاشت. آثار بزرگی درباره روم باستان و فرهنگ ایتالیا نوشت و گرد آورد، و فرهنگ اروپای پس از خود را عمیقاً تحت تأثیر قرار داد. — م.

[۱۴-]

Quintilian (۱۰۰-۳۵ م.)؛ مارکوس فابیوس کوینتیلیانوس، آموزگار و سخنور بزرگ رومی. — م.

[۱۵-]

Vitruvius (۱۵ پ. م. —)؛ نویسنده، معمار، مهندس شهرسازی و علوم نظامی در روم باستان. — م.

[۱۶-]

Niccolo Niccoli

[۱۷-]

De Rerum Natura

[۱۸-]

این قطعه توصیف شخصیت ملکه مب (queen Mab) است: یک پری خیالی که شکسپیر به سبک پری‌های داستان‌های خیالی قرون وسطی آن را پرداخته است. موجوداتی به نام اتمی (atomies) کالسکه او را می‌کشند. پس از شکسپیر نویسندگان زیادی مانند ادگار آلن پو از این شخصیت‌های پری‌وار (چه ملکه مب و چه اتمی‌ها) در نوشته‌هایشان استفاده کرده‌اند. نکته مورد نظر روولی این است: نامی که شکسپیر برای این موجودات ابداعی‌اش در نظر گرفته نامی استعاره‌ای است: اتمی بودن به معنای ریز بودن است و شکسپیر این استعاره را از گفتمان علمی زمان خود وام گرفته است. — م.

[۱۹-]

شارحان عرب و ایرانی ارسطو حرکت اجباری را «حرکت قسری» نامیده‌اند. — م.

[۲۰-]

شهرت بد فیزیک ارسطویی به دوران مجادلات گالیله بازمی‌گردد. گالیله باید رو به جلو حرکت می‌کرد و مجبور بود منتقدانه عمل کند. او با بی‌رحمی و تحقیر و نیشخند به ارسطو حمله می‌کرد اما در عین حال فیزیک او را خیلی جدی می‌گرفت.

[۲۱-]

Almagest

[۲۲-]

Elements

[۲۳-]

Blade Runner

[۲۴-]

The Mathematical Principles of Natural Philosophy

[۲۵-]

مربع دوره گردش با مکعب شعاع مدار نسبت دارد. این قانون نه تنها برای سیاراتی که به دور خورشید می‌گردند درست است (کپلر) که برای ماه‌های مشتری هم صدق می‌کند (هویگنس). نیوتن از طریق استقرا به این نتیجه رسید که این قانون در مورد ماه کوچک فرضی‌اش هم صادق است. ثابت تناسب به جسمی بستگی دارد که مدارها دور آن می‌گردند. به همین دلیل است که با داشتن اطلاعات مدار ماه

می‌توانیم دوره‌گردش ماه کوچک را محاسبه کنیم.

[←۲۶]

Newton's Constant

[←۲۷]

The System of the World

[←۲۸]

انرژی‌ای که موتورهای احتراق آزاد می‌کنند شیمیایی و بنابراین نهایتاً الکترومغناطیسی است.

[←۲۹]

در رساله اصلی ماکسول طول این معادلات واقعاً یک صفحه است. امروزه ما همان معادلات را در نیم خط به این شکل می‌نویسیم: $dF=0$, $d*F=J$. به زودی خواهیم دید که چگونه چنین چیزی ممکن است.

[۳۰-]

اگر میدان را به شکل یک بردار (یک پیکان) در هر نقطه از فضا تصور کنید، نوک پیکان مسیر خطوط میدان فارادی را نشان خواهد داد یعنی پیکان بر خطوط مماس خواهد شد و طول پیکان با تراکم خطوط میدان متناسب است.

[۳۱-]

Guglielmo Marconi

[۳۲-]

Critique of Pure Reason

[۳۳-]

مجموعه رویدادهایی که در فواصل مختلفی در فضا نسبت به یک رویداد مرجع واقع شده‌اند.

[۳۴-]

خواننده دقیق درمی‌یابد که لحظه‌ای در نیمه ربع ساعت من، ممکن است با لحظه پاسخ شما همزمان تلقی شود. کسی که فیزیک خوانده می‌داند که این «تعریف قراردادی اینشتین» از همزمانی است. این تعریف از همزمانی به چگونگی حرکت من بستگی دارد و همزمانی نسبت به وضعیت حرکت یک جسم منفرد را توضیح می‌دهد نه همزمانی بین دو رویداد را. در شکل ۳-۳ نقطه‌ای در میانه a و b وجود دارد که در آن من از گذشته ناظر خارج و با پیش گرفتن مسیری دیگر، وارد آینده او می‌شوم. بر حسب این تعریف هر دو نقطه در نسبت با خواننده همزمانند اما خودشان به شکلی متوالی رخ می‌دهند. هر دو نقطه برای خواننده همزمانند اما نسبت به دو مسیر متفاوت از زمان، و این معنای کلمه «نسبیت» است.

[۳۵-]

Sensorium؛ مجموعه ابزار و اندام‌هایی که یک موجود زنده با آنها ادراک و احساس می‌کند. در واقع سنسوریوم محلی از بدن یا ذهن موجود زنده است که از طریق آن محرک‌های بیرونی به ذهن وارد و در آن ادراک و فهمیده می‌شوند. نیوتن فضا را محلی می‌دانست که خداوند با آن ادراک و احساس می‌کند. گونه‌ای «حواس پنج‌گانه خداوند». — م.

[۳۶-]

مشاهده سامانه دوتایی $PSR B193+16$ نشان داد که دو ستاره‌ای که دور یکدیگر می‌گردند، امواج گرانشی منتشر می‌کنند. این مشاهده برای راسل هالس و جوزف تیلور یک نوبل فیزیک به ارمغان آورد.

[۳۷-]

نویسنده این قطعه را (بدون اینکه ارجاع داده باشد) از پرده پنجم، صحنه پنجم نمایشنامه مکبث شکسپیر آورده است. داریوش آشوری در ترجمه خود از مکبث آن را این گونه ترجمه کرده است: «زندگی افسانه‌ای ست کز لب شوریده مغزی گفته آید سربه‌سر خشم و خروش و غرش و غوغا، لیک بی‌معنا». — م.

[۳۸-]

این عبارت «کیهان‌شناختی» نامیده می‌شود چرا که تأثیر آن تنها در فواصل بسیار بسیار بزرگ یا کیهانی مشخص می‌شود. ثابت ۸ «ثابت کیهان‌شناختی» است و مقدار آن در اواخر دهه ۱۹۹۰ اندازه‌گیری شد و در سال ۲۰۱۱ برای سه ستاره‌شناس، سال پرموتر و برایان پی. اشمیت و آدام جی. راس، یک نوبل فیزیک به ارمغان آورد.

[۳۹-]

گوتینگن شهری بود که هیلبرت در آن کار می‌کرد و آن زمان مهد مهم‌ترین مکتب هندسه جهان بود.

[۴۰-]

یک کره مجموعه‌ای از نقاط در فضای R^3 است که با معادله $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ مشخص می‌شود. یک کره سه‌بعدی مجموعه‌ای از نقاط در فضای R^4 است که با معادله $x^2 + y^2 + z^2 + u^2 = 1$ مشخص می‌شود.

[۴۱-]

کسانی اعتراض می‌کنند که دانه از «دایره‌ها» حرف زده نه از «کرات». اما این اعتراض قابل اعتنا نیست. برونیتو لاتینی از «یک دایره شبیه به پوست تخم مرغ» سخن گفته است. برای دانه هم مانند استاد و راهنمای او، «دایره» حکم هر چیز دایره‌ای از جمله کره را داشته است.

[۴۲-]

Brunetto Latini

[۴۳-]

Litresor

[۴۴-]

مثلاً، روی سطح زمین نقطه قطب شمال و دو نقطه روی خط استوا می‌توانند مثلث متساوی‌الاضلاعی بسازند که سه زاویه قائمه هم دارد. چنین چیزی روی یک سطح صاف ممکن نیست.

[۴۵-]

Coppodi Marcovaldo

[۴۶-]

Cimabue

[۴۷-]

Max Planck

[۴۸-]

Niels Bohr

[۴۹-]

Werner Heisenberg

[۵۰-]

Paul Adrien Maurice Dirac

[۵۱-]

فضای هیلبرت.

[۵۲-]

اینها مقدارویژه‌های عملگری هستند که در مسأله با متغیر فیزیکی ارتباط دارد. معادله اصلی معادله مقدارویژه است.

[۵۳-]

این ابرها را با یک شیء ریاضیاتی یعنی تابع موج توصیف می‌کنند. فیزیکدان اتریشی، اروین شرودینگر، معادله‌ای یافت که تحولات این تابع را با گذر زمان نشان می‌دهد. این معادلات اغلب به اشتباه به عنوان مکانیک کوانتومی شناخته می‌شوند. شرودینگر امیدوار بود که «موج» بتواند تناقضات نظریه کوانتوم را توضیح دهد: ما موج‌ها را خوب درک می‌کنیم، چه موج دریا باشد چه موج الکترومغناطیسی. حتی امروز هم برخی فیزیکدانان تلاش می‌کنند که مکانیک کوانتومی را به کمک این فرض بفهمند که واقعیت همان موج شرودینگر است. اما هایزنبرگ و دیراک همان موقع دریافتند که چنین چیزی جواب نمی‌دهد. با واقعی دانستن موج شرودینگر ما به آن اعتباری بیش از

اندازه می‌دهیم و این نه تنها کمکی به فهم نظریه نمی‌کند بلکه باعث سردرگمی‌های بیشتری هم می‌شود. به غیر از موارد استثنایی، موج شرودینگر جایی در فضای فیزیکی ندارد و همین مسأله باعث می‌شود که این موج کاملاً غیرشهودی باشد. اما دلیل اصلی اینکه چرا موج شرودینگر تصویری بد از واقعیت را نشان می‌دهد این است که وقتی یک ذره با چیزی دیگر برخورد می‌کند، همواره در نقطه‌ای خاص است: این ذره هیچ وقت مانند یک موج در فضا پراکنده نیست. اگر ما الکترون را به منزله یک موج در نظر بگیریم توضیح اینکه یک موج چگونه می‌تواند پیوسته در نقاطی خاص برخورد ایجاد کند مشکل خواهد بود. موج شرودینگر بازنمایی مفیدی از واقعیت نیست: این موج تنها یک ابزار کمکی برای محاسباتی است که پیش‌بینی مکان پدیدارشدن الکترون‌ها را تا حدودی برای ما ممکن می‌کند.

واقعیت الکترون‌ها موجی نیست: واقعیت الکترون‌ها چگونگی پدیدارشدن آنها در یک برهم‌کنش است مانند همان مردی که در آن شب در کپنهاگ زیر نور چراغ پدیدار می‌شد. همان شی که هاینبرگ مشغول قدم‌زدن بی‌هدف بود.

[۵۴-]

معادلات دیراک.

[۵۵-]

پدیده‌ای وجود دارد که به نظر می‌رسد با مدل استاندارد قابل توضیح نباشد: «ماده تاریک». اخترفیزیکدان‌ها و کیهان‌شناس‌ها در کیهان تأثیرات ماده‌ای را مشاهده کرده‌اند که شبیه هیچ‌یک از مواد توضیح داده شده در مدل استاندارد نیست. آن بیرون هنوز خیلی چیزها وجود دارد که ما نمی‌دانیم.

[۵۶-]

من فکر می‌کنم در این ادعا که بوزون هیگز «بیانگر جرم» است اغراق شده است. بوزون هیگز «بیانگر» هیچ چیز در مورد منشأ این جرم‌ها نیست. چه چیز «بیانگر» جرم خود هیگز است؟ این یک نکته فنی است: مدل استاندارد مبتنی بر تقارن‌هایی دقیق است و به نظر می‌رسد که این تقارن‌ها تنها اجازه وجود ذراتی بدون جرم را می‌دهند. اما هیگز و دیگران فهمیدند که می‌توان هم تقارن داشت و هم جرم، به شرط آنکه جرم به شکلی غیرمستقیم از طریق برهم‌کنش با میدانی که امروزه میدان هیگز نامیده می‌شود وارد نظریه شود.

[۵۷-]

ناحیه‌ای محدود از فضای فاز یعنی فضای موقعیت‌های ممکن یک سیستم—تعداد نامحدودی موقعیت‌های متمایز کلاسیک و همواره تعداد محدودی موقعیت‌های مستقل کوانتومی دارد. تعداد این موقعیت‌ها برابر است با حجم این ناحیه تقسیم بر ثابت پلانک ضرب در عدد درجات آزادی سیستم. این نتیجه کلی است.

[۵۸-]

یا انتگرال فاینمن. احتمال رفتن از A به B برابر است با مربع انتگرال تمام مسیرهای تابع نمایی حرکت کلاسیک روی مسیر، ضرب در عدد موهومی، تقسیم بر ثابت پلانک.

[۵۹-]

سازوکاری در جعبه وجود دارد که دریچه سمت راست آن را برای لحظه‌ای کوتاه باز می‌کند و اجازه می‌دهد که یک فوتون خارج شود. می‌توان با وزن کردن جعبه، انرژی فوتون خارج شده را حساب کرد. ادعای مکانیک کوانتومی این بود که زمان و انرژی را نمی‌توان با هم به طور دقیق اندازه‌گیری کرد و اینشتین امید داشت که این آزمایش بتواند برای این ادعا مشکل ایجاد کند. بور به اشتباه پاسخ داد که برای حل مسأله به نسبت عام اینشتین نیاز است و اینشتین هم به اشتباه این جواب را پذیرفت. پاسخ صحیح به اینشتین که امروزه برای ما واضح است اما بور آن را پیدا نکرد این بود که موقعیت فوتون فراری و وزن جعبه با هم هم‌بسته می‌مانند حتی اگر فوتون خیلی دور شده باشد.

[۶۰-]

Matvei Bronštein

[۶۱-]

Lev Landau

[۶۲-]

نشانه روی ثابت پلانک در این فرمول نشان می‌دهد که ثابت پلانک این جا بر 2π تقسیم شده است. افزوده‌ای تقریباً بی‌فایده و سلیقه‌ای که فیزیکدانان نظری به آن اضافه کرده‌اند: یک علامت کوچک و قاطع و مورب روی h «آن را با شکوه می‌کند».

[۶۳-]

Gerard't Hooft

[۶۴-]

Martinus Veltman

[۶۵-]

Chris Isham

[۶۶-]

John Wheeler

[۶۷-]

دویت مشتق‌های معادله همیلتون-ژاکوبی برای نسبیت عام را (که کمی قبل از آن پرس نوشته بود) با اپراتورهای مشتق‌گیر عوض کرد. این همان کاری بود که شرودینگر در اثراولش برای نوشتن معادله‌اش انجام داده بود: قراردادن اپراتورهای مشتق‌گیری به جای مشتق‌ها در معادله همیلتون-ژاکوبی برای ذرات.

[۶۸-]

یا «معادله اینشتین شرودینگر».

[۶۹-]

Abhay Ashtekar

[۷۰-]

Lee Smolin

[۷۱-]

Ted Jacobson

[۷۲-]

شناخته‌شده‌ترین گزینه دیگر به غیر از نظریه حلقه، نظریه ریمان است. تمرکز اصلی این نظریه به جای مطالعه خصلت‌های کوانتومی فضا و زمان، بر ساخت یک نظریه منسجم از تمام میدان‌های شناخته‌شده است. هدفی که به نظر می‌رسد با توجه به دانش کنونی ما هنوز موقعش نرسیده باشد.

[۷۳-]

Jorge Pullin

[۷۴-]

Pole Jurk Lewandowski

[۷۵-]

معادله مقدارویژه برای اپراتور حجم.

[۷۶-]

تصور کنید چه بلایی بر سر نظریات افلاطون و ارسطو می‌آمد اگر به جای کتاب‌های آنها فقط به چند نقل قول از آنها دسترس داشتیم.

[۷۷-]

عدد کوانتومی موقعیت‌های فوتون‌ها در «فضای فوک» همان اندازه حرکت است یعنی تبدیل فوریه موقعیت مکانی.

[۷۸-]

اپراتور مرتبط با هندسه فضای دانه‌ای هولونومی اتصالات گرانشی است یا به زبان فنی فیزیکی یک «حلقه ویلسون» در نسبیت عام است.

[۷۹-]

پتانسیل گرانشی.

[۸۰-]

مخصوصاً که هیجان‌زده هم شده بود.

[۸۱-]

ساختار واقعی راس‌های کف اسپین از آنچه در شکل ۷-۲ آمده کمی پیچیده‌تر و بیشتر منطبق با شکل ۷-۴ است.

[۸۲-]

این شکل یک نمودار فاینمن است چرا که مانند نمودار فاینمن تاریخچه‌ای است از کوانتوم‌ها. با این تبصره که این کوانتوم‌ها، کوانتوم‌هایی درون فضا نیستند بلکه کوانتوم‌های خود فضا هستند. گرافی که آنها با برهم کنش‌هایشان ترسیم می‌کنند نمایش‌دهنده حرکت ذرات در فضا نیست، نشان‌دهنده طرح خود فضا است.

اما این شکل همچنین دقیقاً یک شبکه مانند آن‌هایی است که در تقریب شبکه استفاده می‌شوند چرا که نشان‌دهنده یک فضا زمان گسسته است. با این تفاوت که این دیگر یک تقریب نیست، ساختار گسسته واقعی فضا در مقیاس کوچک است.

[← ۸۳]

نخستین فرمول نمایان گر فضای هیلبرتی نظریه است. دومی جبر اپراتورها را توصیف می‌کند. سومی اندازه انتقال هر رأس را مانند آنچه در شکل ۷-۴ آمده است، مشخص می‌کند.

[← ۸۴]

«[...] تمام ذرات بنیادین می‌توانند به یک ماده جهانی فروکاسته شوند که همان قدر که ماده است انرژی هم هست. و هیچ یک از ذرات بر دیگری برتری ندارد و بنیادی‌تر محسوب نمی‌شود. این دیدگاه با نظریه آناکسیمندر منطبق است و من معتقدم که این نظرگاهی صحیح در فیزیک مدرن است.» - فیزیک و فلسفه: انقلاب در دانش مدرن، ورنر هایزنبرگ.

[← ۸۵]

Henrietta Leavitt

[← ۸۶]

Edwin Hubble

[← ۸۷]

Georges Lemaître

[← ۸۸]

روولی اینجا با دو کلمه Big Bang و Big Bounce به لحاظ آوایی بازی می‌کند. او می‌گوید شواهدی برای تقویت این فرضیه در دست است که شاید پیش از بیگ‌بنگ (یا همان مه‌بانگ) جهان دیگری وجود داشته که در یک انقباض به سمت محو شدن میل می‌کرده اما به دلیل خصلت‌های کوانتومی فضا در نقطه‌ای در مقیاس پلانک پس جهیده (یا اصطلاحاً «کمانه کرده»، مانند تویی که به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد) و جهان ما از این نقطه فشرده شدن و پس جهیدن شروع شده است.

در نتیجه ما باید به جای مفهوم مه‌بانگ (بیگ‌بنگ) از مفهوم پس جهش بزرگ (بیگ‌باونس) برای شرح آغاز جهان استفاده کنیم. در زبان فارسی کلمه بیگ‌بنگ ابتدا با معادل «انفجار بزرگ» وارد شد و پس از آن بود که معادل «مه‌بانگ» برای آن انتخاب و پذیرفته شد. مترجم هم ترجیح داد که فعلاً کلمه بیگ‌باونس را به «پس جهش بزرگ» (در مقابل انفجار بزرگ) ترجمه کند تا زمانی که شاید کلمه‌ای هم وزن و هم‌آوا با «مه‌بانگ» برای بیگ‌باونس پیدا شود.

نکته مثبت برابر «پس جهش بزرگ» یکی این است که مفهوم «جهش» در آن حفظ شده (که برای شرح روولی بسیار مهم است) و دیگر اینکه پیشوند «پس» هم معنایی مکانی دارد (به عقب جهیدن، بازگشتن) و هم معنایی زمانی (جهانی «پس» از جهانی دیگر). - م.

[← ۸۹]

Hadron Collider

[← ۹۰]

Supersymmetric particles

[← ۹۱]

The discovery of the Higgs Boson

[۹۲-]

این یک تداخل سنج است: از تداخل‌های پرتوهای لیزری که بین دو بازو در حال حرکت‌اند استفاده می‌کند تا تغییرات بسیار کوچک طول این بازوها را نشان دهد.

[۹۳-]

cyclopean؛ سیکلوپ‌ها در اساطیر یونانی غول‌هایی یک چشم هستند (خود کلمه سیکلوپ به معنای «چشم گرد» یا «یک چشم» است) که در متون مختلف سروکله‌شان پیدا می‌شود. معروف‌ترین ظهور آنها (که روولی هم در این جا به آن اشاره دارد) در متن ادیسه هومر است. گروهی چوپان وحشی و بی فرهنگ به نام برادران پولیفوم که یکی از آنها چند نفر از همراهان اولیس را می‌بلعد. — م.

[۹۴-]

Eugenio Bianchi

[۹۵-]

Singularities

[۹۶-]

Sirach؛ کتاب بن سیرا از نظر کاتولیک‌ها، بیشتر ارتدوکس‌های کلیسای شرقی و برخی از یهودیان، جزئی از کتاب مقدس محسوب می‌شود. کلیساهای لوتری این کتاب را در فهرست ادعیه خود می‌آورند و مناسب قرائت و عبادت می‌دانند اما آن را جزئی از کتاب مقدس به حساب نمی‌آورند. وضع برای بیشتر یهودی‌ها و کلیسای انگلیکان هم به همین ترتیب است.

[۹۷-]

information

[۹۸-]

Claude Shannon

[۹۹-]

یک نکته ظریف: اطلاعات تعداد چیزهایی نیست که من می‌دانم بلکه تعداد گزینه‌های ممکن است. وقتی من می‌دانم که در رولت عدد ۳ آمده است، میزان اطلاعات برابر است با ۳۷، چرا که کلاً ۳۷ عدد در رولت وجود دارد. اما وقتی که می‌دانم خانه قرمز با عدد ۳ آمده است، میزان اطلاعات من برابر است با ۱۸، چرا که تنها ۱۸ عدد قرمز وجود دارد. وقتی متوجه می‌شویم که کدامیک از برادران کارامازوف پدر خود را کشته است، چه میزان اطلاعات داریم؟ جواب به این بستگی دارد که برادران کارامازوف چند نفرند.

[۱۰۰-]

Ludwig Boltzman

[۱۰۱-]

بولتسمان از مفهوم اطلاعات استفاده نکرد اما می‌توان کار او را با این مفهوم تفسیر کرد.

[۱۰۲-]

آنتروپی با لگاریتم حجم فضای فاز تناسب دارد. ثابت تناسب، k ، را ثابت بولتسمان می‌نامند که واحد اندازه اطلاعات (بیت) را به واحد اندازه آنتروپی (ژول کلونین) تبدیل می‌کند.

[۱۰۳-]

در یک ناحیه محدود از فضای فاز آن.

[۱۰۴-]

این همان چیزی است که به شکلی نامناسب «فروپاشی» تابع موج خوانده می‌شود.

[۱۰۵-]

Jacob Bekenstein

[۱۰۶-]

قضیه به لحاظ فنی این گونه است: یک حالت آماری بولتسمان با تابعی در فضای فاز که از تابع نمایی همیلتونی به دست آمده توصیف می‌شود. اپراتور همیلتونی تولیدکننده گذر زمان است. در سیستمی که زمان وجود ندارد، اپراتور همیلتونی هم وجود ندارد. اما اگر یک حالت آماری داشته باشیم، با گرفتن لگاریتم آن، اپراتور همیلتونی را تعریف می‌کنیم و در نتیجه، مفهومی از زمان به وجود می‌آید.

[۱۰۷-]

اولیس که شخصیت اصلی داستان ادیسه هومر است، در سرود ۲۶ کمدی الهی دوباره پیدایش می‌شود. او به خاطر فریب و دروغ (هومر او را قهرمان هزار چهره می‌نامد) در یکی از پایین‌ترین طبقات دوزخ گرفتار است و به درخواست ویرژیل و دانته، داستان بازگشتش را دوباره تعریف می‌کند. جمله‌ای که روولی به نقل از او آورده در همین قسمت آمده است. — م.