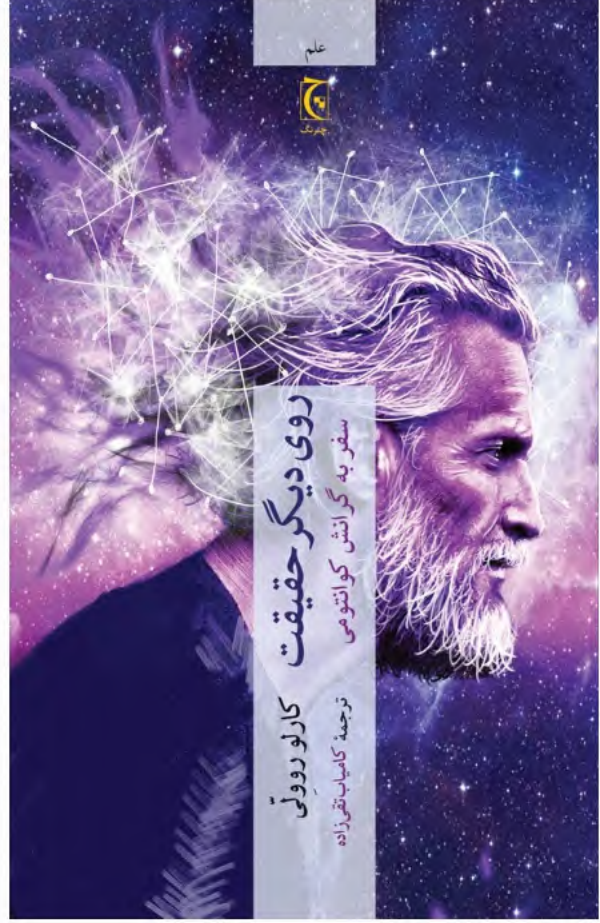




روی دیگر حقیقت کارلو رووولی

سفر بہ گرانش کو انتہائی

ترجمہ کامیاب تقری زادہ

روی دیگر حقیقت
سفر به گرانش کوانتومی
کارلو روولی
مترجم: کامیاب تقی زاده



چترنگ

سرشناسه: رووَلّی، کارلو، ۱۹۵۶-م. Rovelli, Carlo

عنوان و نام پدیدآور: روی دیگر حقیقت؛ سفر به گرانش کوانتومی

کارلو رووَلّی؛ ترجمه کامیاب تقی‌زاده

مشخصات نشر: تهران: چترنگ، ۱۳۹۹

مشخصات ظاهری: ۲۳۸ ص.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۰۶۶-۹۰-۳

وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا -

یادداشت: عنوان اصلی: La Realtà Non È Come Ci Appare -

یادداشت: کتاب حاضر از ترجمه انگلیسی با عنوان "Reality Is Not What It Seems;

The Journey to Quantum Gravity" به فارسی برگردانده شده است.

موضوع: گرانش کوانتومی

شناسه افزوده: تقی‌زاده، کامیاب، ۱۳۷۵ - ، مترجم

ده‌بندی کنگره: ۱۳۹۷ ح ۷/۹ ر ۱۷۸ QC

رده‌بندی دیویی: ۵۳۰/۱۴۳

شماره کتابشناسی ملی: ۵۱۱۴۷۷۳

درباره نویسنده

کارلو رووِلی، فیزیک‌دان نظری، تا به حال فعالیت‌های چشمگیری در حوزه فیزیک فضا - زمان داشته است. او در کشورهای ایتالیا و آمریکا مشغول به کار بوده و هم اکنون رهبری گروه پژوهشی گرانش کوانتومی را در مرکز فیزیک نظری در شهر مارس‌ی فرانسه بر عهده دارد. کتاب گفتارهایی از فیزیک او، که به یکی از پرفروش‌ترین آثارش تبدیل شد، تا کنون به زبان‌های بسیاری ترجمه شده است.

یادداشت نویسنده

در طول پژوهش‌م دوستان و افراد کنج‌کاو از من خواسته‌اند تا برایشان توضیح دهم در پژوهش‌م گران‌ش کوانتومی چه می‌گذرد. چطور امکان داشت درباره تفکرات نوین زمان و مکان مطالعه کرد؟ بارها و بارها از من درخواست کرده‌اند روایت ساده‌ای از این پژوهش بنویسم. با وجود اینکه کتاب‌های کیهان‌شناسی یا نظریهٔ ریسمان فراوان‌اند، اما در آن‌زمان هنوز کتابی که ماهیت کوانتومی فضا و زمان و خصوصاً نظریهٔ گران‌ش کوانتومی حلقه را توصیف کند، وجود نداشت. مدت زیادی تعلل کردم، چون می‌خواستم روی پژوهش‌م تمرکز کنم. چند سال پیش، پس از اینکه کتاب تخصصی‌ام را دربارهٔ این موضوع چاپ کردم، حس کردم کار جمعی دانشمندان این موضوع را به قدر کافی تکمیل کرده که بتوان آن را به کتاب محبوبی تبدیل کرد. چشم‌اندازی که می‌کاویم سحرآمیز است: چرا پنهان نگهش داریم؟

اما باز هم پروژه را به تأخیر انداختم، چون نمی‌توانستم کتاب را در ذهنم «بینم». چطور می‌توان جهان را بدون فضا و زمان توضیح داد؟ شبی در سال ۲۰۱۲ وقتی تک‌وتنها داشتم در مسیر طولانی ایتالیا به فرانسه رانندگی می‌کردم، فهمیدم تنها راه توضیح تغییرات مداوم مفاهیم فضا و زمان به شکل قابل‌فهم، روایت داستان آن از ابتداست: یعنی از دموکریت شروع کنیم و تا کوانتای فضا پیش برویم. به هر حال، داستان از دید من این‌طور است. هنگام رانندگی تمام کتاب را در ذهنم طراحی کردم و بسیار هیجان‌زده شدم، تا اینکه صدای آژیر ماشین پلیس را شنیدم که از من می‌خواست کنار بزنم: سرعت‌م از حد مجاز خیلی بیشتر بود. پلیس‌های ایتالیایی مؤدبانه پرسیدند مگر دیوانه‌ام که با آن سرعت می‌رانم. برایشان توضیح دادم همین الان ایده‌ای را که مدت‌ها دنبالش بودم، پیدا کردم؛ آن‌ها بدون نوشتن جریمه اجازه دادند بروم و برایم در نوشتن کتاب آرزوی موفقیت کردند. این همان کتاب است.

این کتاب در آغاز سال ۲۰۱۴ نوشته و نخستین بار در ایتالیا منتشر شد. مدت کوتاهی بعد، چند مقاله در مورد فیزیک بنیادی برای روزنامه‌ای ایتالیایی نوشتم. یک ناشر ایتالیایی بزرگ، آدلفی، نسخهٔ مفصل و دقیق این مقالات را از من خواست تا آن را به شکل کتاب کوتاهی دربیاورد. نقطهٔ آغاز کتاب گفتارهایی از فیزیک اینجا بود که در کمال تعجب یک کتاب پرفروش بین‌المللی شد و بین من و بسیاری

از خواننده‌های فوق‌العاده‌ام در سراسر جهان کانالی ارتباطی ایجاد کرد. گفتارهایی از فیزیک پس از این کتاب نوشته شد و تا حدی ترکیبی از موضوعاتی است که در اینجا می‌خوانید. اگر گفتارهایی از فیزیک را خوانده‌اید و می‌خواهید بیشتر بدانید، این کتاب به کارتان می‌آید.

با اینکه روایت فیزیک اثبات‌شده‌ای که در این کتاب ارائه می‌دهم از زاویه دید مختص من است، تا حد زیادی پذیرفته‌شده محسوب می‌شود؛ اما بخشی از کتاب که پژوهش فعلی پیرامون گرانش کوانتومی را روایت می‌کند، درک شخصی خودم از آخرین پیشرفت‌های علمی است. این ناحیه مرز بین چیزهایی است که فهمیده‌ایم و چیزهایی که هنوز نفهمیده‌ایم. راه زیادی تا اجماع عمومی وجود دارد. برخی از همکاران فیزیک‌دانم با چیزی که اینجا می‌نویسم موافق خواهند بود و برخی دیگر نه. هر روایتی از هر پژوهش جاری در خط مقدم دانش همین‌طور است، اما ترجیح می‌دهم از پیش این را به روشنی بگویم. این کتاب در مورد قطعیت‌ها نیست، بلکه در مورد ماجراجویی حرکت به سمت ناشناخته‌هاست.

به طور کلی، این کتاب سفرنامه‌ای است که یکی از دیدنی‌ترین سفرهایی را که بشریت طی کرده شرح می‌دهد: سفری به بیرون از دیدگاه‌های محدود و کوتاه‌بینانه‌مان در مورد حقیقت، به سوی فهمی هرچه عمیق‌تر از ساختار چیزها. سفری جادویی به خارج از دید معمولی‌مان به چیزها که فاصله زیادی با واقعیت دارد.^(۱)

کارلو رووِلّی

مارسی، ۴ مه ۲۰۱۶

پیش گفتار

قدم زدن کنار ساحل

ما غرق در خودمانیم. تاریخ خودمان، روان‌شناسی خودمان، فلسفه خودمان و خدایان خودمان را مطالعه می‌کنیم. بخش اعظم دانشمان راجع به خود انسان است، گویی مهم‌ترین چیز در عالمیم. فکر کنم من فیزیک را دوست دارم، چون پنجره‌ای باز می‌کند که از آن می‌توانیم دوردست‌ها را ببینیم. این برایمانند حس هوای تازه‌ای است که وارد خانه می‌شود.

چیزهایی که از طریق این پنجره می‌بینیم همواره شگفت‌زده‌مان می‌کند. ما چیزهای زیادی در مورد هستی فراگرفته‌ایم. در گذر قرن‌ها، متوجه شده‌ایم که چه دیدگاه‌های اشتباهی داشته‌ایم. گمان می‌کردیم زمین تخت است و مرکز جهان؛ عالم کوچک است و ثابت. خیال می‌کردیم انسان تافته‌ای جداافتاده است و هیچ ارتباطی با دیگر حیوانات ندارد. به وجود کوارک‌ها، سیاه‌چاله‌ها، ذرات نور، امواج فضایی و ساختار مولکولی حیرت‌آور تمام سلول‌های بدنمان پی برده‌ایم. نوع بشر همچون کودک در حال رشدی است که با بهت و شگفتی می‌آموزد جهان فقط به اتاق خواب و زمین بازی او محدود نمی‌شود؛ بلکه بسیار پهناور است و در آن هزاران هزار چیز کشف نشده و مفاهیمی بسیار متفاوت با شناخت ابتدایی‌اش وجود دارد. عالم چندشکلی و بدون مرز است و هر روز با ابعاد تازه‌ای از آن آشنا می‌شویم. هرچه بیشتر در مورد جهان می‌آموزیم، شگفتی‌مان از تنوع، زیبایی و سادگی‌اش بیشتر می‌شود.

اما هرچه بیشتر می‌آموزیم، بیشتر می‌فهمیم چیزهایی که نمی‌دانیم بسیار بیشتر از چیزهایی است که می‌دانیم. هرچه تلسکوپ‌هایمان نیرومندتر می‌شود، آسمانی عجیب‌تر و غیرمنتظره‌تر را می‌بینیم. هرچه دقیق‌تر جزئیات ریز ماده را می‌کاویم، ساختار پیچیده‌اش را بیشتر می‌شناسیم. امروزه تقریباً تا مه‌بانگ را، انفجار بزرگی که چهارده میلیارد سال پیش کهکشان‌ها از آن متولد شدند، می‌بینیم — اما توانسته‌ایم چیزهایی را فراتر از مه‌بانگ ببینیم. آموخته‌ایم فضا منحنی‌شکل است و در عین حال پیش‌بینی کرده‌ایم همین فضا از ذرات کوانتومی لرزان تنیده شده است.

شناختن از ساختار اساسی جهان رو به پیشرفت است. اگر بخواهیم آنچه را طی بیست قرن از جهان فیزیکی آموخته‌ایم جمع‌بندی کنیم، درمی‌یابیم چیزی که سرنخ‌ها نشان می‌دهند با آنچه در مدرسه آموخته‌ایم تفاوت بسیاری دارد. خیل وقایع کوانتومی ساختار اساسی تازه‌ای را نمایان می‌کند که در آن فضا و زمان معنا ندارد. میدان‌های کوانتومی فضا، زمان، ماده، نور و اطلاعاتی را که مابین وقایع تبادل می‌شود، جذب می‌کنند. حقیقت شبکه‌ای از وقایع ذره‌ای است؛ دینامیکی که آن‌ها را به هم مربوط می‌کند بر پایهٔ احتمالات است؛ فضا، زمان، ماده و انرژی میان یک واقعه و واقعه‌ای دیگر در ابری از احتمالات درمی‌آمیزند.

با بررسی پرسش اصلی و بی‌پاسخی که در فیزیک بنیادی ریشه دارد، قدم‌به‌قدم از این جهان نو و عجیب پرده‌برداری می‌شود: یعنی جاذبهٔ کوانتومی. مسئلهٔ ترکیب منسجم شناخت کنونی‌مان از جهان با دو اکتشاف بزرگ فیزیک در قرن بیستم همراه است: نسبیت عام و نظریهٔ کوانتومی. این کتاب به جاذبهٔ کوانتومی و جهان غریبی که این پژوهش از آن پرده برمی‌دارد، اختصاص یافته است.

این کتاب گزارش زندهٔ این پژوهش در حال پیشرفت است: آنچه می‌آموزیم، آنچه می‌دانیم و آنچه فکر می‌کنیم دربارهٔ ذات اساسی چیزها، که تازه آغاز شده است، درک می‌کنیم. از ریشه‌های کهن نظرهایی کلیدی آغاز می‌کنیم که امروزه برای سازمان دادن به شناختن از جهان و توصیف دو کشف بزرگ قرن بیستم — نسبیت عام اینشتین و مکانیک کوانتومی — از آن‌ها استفاده می‌کنیم. تلاش می‌کنیم روی محتوای فیزیکی اساسی آن‌ها متمرکز شویم. این کتاب تصویر نوظهور جهان را روایت می‌کند که از پژوهش در مورد جاذبهٔ کوانتومی حاصل می‌شود و به جدیدترین مشاهداتمان از طبیعت می‌پردازد؛ از مدل استاندارد کیهان‌شناسی تأییدشده از طریق ماهوارهٔ پلانک گرفته تا ناتوانی سرن (۲) در مشاهدهٔ ذرات ابرتقارنی که بسیاری چشم‌انتظارش بودند. در مورد نتایج این نظرها بحث می‌کنیم: ساختار ذره‌ای فضا؛ ناپدید شدن زمان در مقیاس‌های کوچک؛ فیزیک مه‌بانگ؛ خاستگاه گرمای سیاه‌چاله — و نقش این اطلاعات در اساس فیزیک.

در افسانهٔ مشهوری که افلاطون در هفتمین کتاب جمهوری (۳) روایت کرده است، مردانی در قعر غار تاریکی زنجیر شده‌اند و تنها سایه‌هایی را می‌بینند که از آتش پشت سرشان روی دیوار نقش می‌بندد. گمان می‌کنند حقیقت همان است. یکی از آن‌ها خود را آزاد می‌کند، غار را ترک می‌کند و نور خورشید و جهان وسیع‌تر را می‌یابد. در ابتدا نور، که چشمانش به آن عادت ندارد، او را حیرت‌زده و

گیج می‌کند؛ اما بالاخره می‌تواند ببیند و با هیجان بازمی‌گردد تا برای همراهانش آنچه را دیده شرح دهد. باورش برای آن‌ها سخت است. همه ما در اعماق غاری به نادانی و تعصبمان زنجیر شده‌ایم و حواس ضعیفمان تنها سایه‌ها را به ما نشان می‌دهد. اگر تلاش کنیم فراتر از این را ببینیم، سردرگم می‌شویم. به آن عادت نداریم، اما تلاش می‌کنیم؛ این علم است. تفکر علمی جهان را می‌کاود و از نو ترسیم می‌کند و به مرور دیدگاه بهتری به ما ارائه می‌دهد. روش‌های تفکر مؤثرتر را به ما می‌آموزد. علم کاوش مداوم شیوه‌های اندیشیدن است. نقطه قوت آن ظرفیت دوراندیشانه‌اش برای کنار گذاشتن نظرهای پیشین، آشکار کردن حوزه‌های تازه‌ای از حقیقت و ساختن تصویرهای نو و کارآمدتری از جهان است. این ماجراجویی بر پایه کلیت دانسته‌های پیشین است، اما در ذاتش تغییر وجود دارد. جهان بی‌کران و رنگارنگ است؛ تمایل داریم برویم و تماشایش کنیم. غرق در رازآلودی و زیبایی آن می‌شویم و آن‌سوی افق قلمروهای ناشناخته‌ای را می‌بینیم. نقصان و تردید در دانسته‌ها و قدم‌های لغزناמן بر لبه پرتگاهی عظیم از نادانسته‌هایمان، زندگی را بی‌معنا نمی‌کند، بلکه آن را جذاب و ارزشمند می‌کند.

این کتاب را نوشته‌ام تا بگویم شگفتی من از این ماجراجویی چیست. موقع نوشتن آن مخاطب خاصی را مدنظر داشتم: کسی که دانش کم یا ناچیزی در مورد فیزیک مدرن دارد، اما کنجکاو است بفهمد از بافت اساسی جهان چه می‌دانیم — و در چه حوزه‌ای تحقیق می‌کنیم. این را نوشته‌ام تا تلاش کنم زیبایی نفس‌گیر چشم‌انداز حقیقتی را که از این دورنما دیده می‌شود انتقال دهم.

همچنین آن را برای همکارانم، همسرانی در گوشه‌وکنار جهان و برای زنان و مردان جوانی که شیفته علم هستند و مشتاق‌اند برای اولین بار راهی این سفر شوند، نوشته‌ام. تلاش کرده‌ام طرحی کلی از چشم‌انداز ساختار جهان فیزیکی را که در پرتو نسبیت و فیزیک کوانتومی دیده می‌شود به طور اجمالی شرح دهم و نشان دهم چگونه می‌توان این‌دو را ترکیب کرد. این کتاب فقط از این موارد پرده‌برداری نمی‌کند، بلکه دیدگاهی را از زمینه‌ای پژوهشی ارائه می‌کند که ممکن است انتزاعی بودن زبان تخصصی‌اش گاهی چشم‌انداز کلی را تحت‌الشعاع قرار دهد. دانش از آزمایش‌ها، فرضیه‌ها، معادلات، محاسبات و مباحثه‌های طولانی تشکیل شده است، اما این‌ها تنها ابزارهایی مشابه سازهای نوازنده‌ها هستند. در موسیقی آنچه در نهایت مهم است خود موسیقی است و آنچه در علم مهم است شناختی از

جهان است که علم فراهم کرده. برای فهم اهمیت این کشف که زمین دور خورشید می‌چرخد لزومی ندارد محاسبات پیچیده کوپرنیک را دنبال کنید؛ برای درک اهمیت اینکه همه موجودات زنده اجداد مشترکی دارند، لزومی ندارد دلایل پیچیده مطرح‌شده در کتاب‌های داروین(۴) را دنبال کنید. علم مطالعه جهان از دیدگاهی است که به مرور وسعت می‌یابد.

این کتاب وضعیت فعلی جست‌وجوی تصویر تازه جهان را، از دید من، روایت می‌کند. اگر دوست و همکارم هنگام قدم زدن کنار ساحل در عصری گرم و تابستانی از من بپرسد: «به نظرت ماهیت حقیقی چیزها چیست؟» این کتاب پاسخی است که به او می‌دهم.

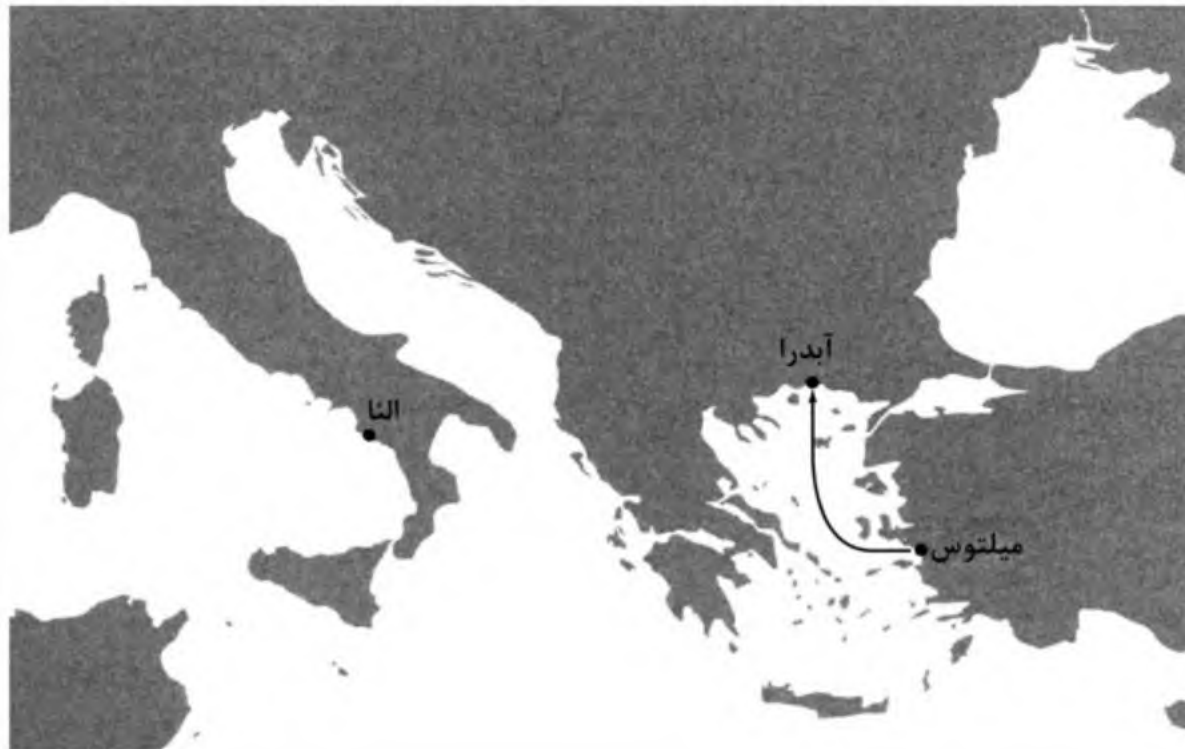
بخش اول: ریشه ها

این کتاب در میلتوس (۵) بیست و شش قرن پیش آغاز می‌شود. چرا کتابی در مورد گرانش کوانتومی را با وقایع، اشخاص و ایده‌هایی چنین باستانی آغاز می‌کنیم؟ امیدوارم خواننده مشتاق پی بردن به موضوع کوانتای (۶) فضا از این بابت بر من خرده نگیرد. اگر از ریشه ایده‌ها شروع کنیم فهمشان آسان‌تر می‌شود و بسیاری از ایده‌هایی که معلوم شد به فهم جهان کمک می‌کنند، بیش از دو هزار سال پیش مطرح شدند. اگر پیدایش این ایده‌ها را به طور مختصر در ذهن مرور کنیم، روشن‌تر می‌شوند و قدم‌های بعدی ساده‌تر و واقعی‌تر خواهند شد.

اما این همه ماجرا نیست. برخی از مسائل که نخستین بار در دوران باستان مطرح شدند، هنوز هم برای فهمان از جهان حیاتی‌اند. برخی از تازه‌ترین ایده‌ها در مورد ساختار فضا مفاهیم و مسائلی را به کار می‌برند که در گذشته ارائه شدند. هنگام بررسی این ایده‌های قدیمی پرسش‌هایی را مطرح خواهیم کرد که برای مسئله گرانش کوانتومی اساسی خواهند بود. همچنین مقدمه‌ای بر ایده‌های باستانی باعث می‌شود هنگام مطالعه گرانش کوانتومی بتوانیم بین ایده‌هایی که بر پایه تفکر علمی بنا شده‌اند و ایده‌های اساساً جدید، حتی اگر با آن‌ها آشنا نباشیم، تمایز قائل شویم. خواهیم دید که در کمال تعجب بین مسائلی که دانشمندان دوران باستان مطرح کردند و پاسخ‌هایی که اینشتین و گرانش کوانتومی پیدا کردند، ارتباط بسیار نزدیکی وجود دارد.

۱. ذره ها

طبق روایت‌ها در سال ۴۵۰ پیش از میلاد مردی سوار بر کشتی شد و از میل‌توس به آبدرا(۷) سفر کرد. این سفر برای تاریخ علم سرنوشت‌ساز بود. این مرد احتمالاً از اغتشاش‌های سیاسی میل‌توس می‌گریخت، چراکه در آنجا طبقه اشراف با اعمال خشونت در حال پس گرفتن قدرت بودند. میل‌توس از شهرهای ثروتمند و در حال پیشرفت یونان بود، شاید بتوان گفت پیش از آغاز دوران طلایی آتن و اسپارت مهم‌ترین شهر یونان بود. شاهراه تجاری شلوغی بود که شبکه‌ای متشکل از حدود صد مستعمره و پایگاه تجاری را از دریای سیاه تا مصر تحت سلطه خود داشت. کاروان‌های بی‌شماری از بین‌النهرین و کشتی‌هایی از سراسر مدیترانه وارد میل‌توس می‌شدند و اندیشه‌های زیادی ردوبدل می‌شد. یک قرن پیش از آن اندیشه‌ای انقلابی، که برای بشریت نقش اساسی بازی کرد، در میل‌توس شکل گرفته بود. گروهی از اندیشمندان شیوه مطرح کردن پرسش‌ها در مورد جهان و شیوه یافتن پاسخ‌ها را مورد بازنگری قرار داده بودند. بزرگ‌ترین این اندیشمندان آناکسیماندر(۸) بود.



شکل ۱.۱ مسیری که لئوکیپوس(۹) میلتوسی، پایه‌گذار مکتب اتم‌گرایی، پیمود.
(حدود ۴۵۰ سال پیش از میلاد)

از گذشته‌های بسیار دور یا لاقلاً از زمانی که انسان مکتوباتی به جا گذاشته و به دست ما رسیده است مردم از خود پرسیده‌اند که جهان، ترکیبات آن و نظم حاکم چگونه به وجود آمده است و دلیل وقوع پدیده‌های طبیعی چیست. تا هزاران سال پاسخ‌هایی که مطرح می‌شد شبیه یکدیگر بود: پاسخ‌هایی شامل داستان‌های مفصل در مورد ارواح، خدایان، موجودات تخیلی و اسطوره‌ای و موارد مشابه. از لوح‌های نوشته‌شده به خط میخی تا متون کهن چینی؛ از نوشته‌های هیروگلیفی در اهرام مصر تا افسانه‌های قبیله سرخ‌پوست سو؛ از باستانی‌ترین مکتوبات هندی تا انجیل؛ از داستان‌های آفریقایی تا داستان‌های بومیان استرالیا، با اینکه رنگ‌وبوی متفاوتی داشتند، اما سیر کلی آن‌ها مشابه بود — مارهای پردار و گاوه‌های بزرگ، خدایان پرخاشگر و عصبانی یا گاهی مهربان که در پوچی می‌دمیدند و با زمزمه «بگذار نور باشد» (۱۰) جهان را می‌آفریدند یا دنیا را از تخمی سنگی به وجود می‌آوردند. سپس در آغاز قرن پنجم پیش از میلاد در میلِتوس تالس، شاگردش آناکسیماندر، هکاتایوس (۱۱) و مکتبشان راهی جدید برای یافتن پاسخ‌ها پیدا کردند. این انقلاب عظیم در نحوه اندیشیدن اسلوب تازه‌ای را برای علم و ادراک تعریف کرد و پیام‌آور آغاز تفکر علمی شد.

میلِتوسی‌ها دریافتند به جای جست‌وجوی پاسخ در خیالات، اسطوره‌ها و دین با مشاهده و استدلال زیرکانه — و مهم‌تر از همه تفکر انتقادی به شکلی دقیق — می‌توانند مدام دیدگاهشان از جهان را بهبود دهند و ابعاد جدیدی از حقیقت بیابند که از دیدگاه رایج مخفی است. به این شیوه می‌توان ناشناخته‌ها را کشف کرد.

شاید مهم‌ترین کشف یافتن شیوه اندیشیدن متفاوتی بود که مطابق آن شاگرد دیگر مجبور نبود به نظرهای استاد مقید باشد و آن‌ها را به اشتراک بگذارد، بلکه آزاد بود چیزی بر آن اندیشه‌ها بیفزاید و از کنار گذاشتن یا نقد قسمتی که می‌تواند بهبود یابد، نهراسد. این امر یک میانه‌روی نوین بین تقلید بی‌چون‌وچرا از یک مکتب و مخالفت کلی با ایده‌ها بود. این کلید تمام پیشرفت‌های فلسفی و تفکر علمی بعد از خود است: از این لحظه به بعد دانش با سرعت سرسام‌آوری پیشرفت می‌کند و از اندیشه‌های قبلی بهره می‌گیرد، اما همزمان می‌توان از آن انتقاد کرد و به همین خاطر امکان پیشبرد دانش و خرد وجود دارد. هکاتایوس در ابتدای کتاب تاریخ خود، Incipit، به

قلب این تفکر انتقادی می‌رود و آگاهی از خطای خودمان را ذکر می‌کند: «چیزهایی را نوشتم که به نظرم درست می‌آیند، چون روایت‌های تاریخی یونان پر از موارد متناقض و مضحک است.»

بنا بر افسانه‌ها هرکول (۱۲) از کیپ تنارو (۱۳) به عالم اموات رفت. هکاتیوس به کیپ تنارو می‌رود و به این نتیجه می‌رسد آنجا راه زیرزمینی یا هیچ راه دیگری برای ورود به عالم اموات ندارد — و در نتیجه افسانه را رد می‌کند. این امر آغاز عصر جدیدی را نشان می‌دهد.

این رویکرد تازه به دانش سریع و تأثیرگذار است. طی چند سال آناکسیماندر می‌فهمد زمین در آسمان معلق است و آسمان پایین سیاره زمین هم گسترده شده است؛ باران از تبخیر آب موجود در سطح زمین به وجود می‌آید؛ مواد مختلف جهان را می‌توان حاصل یک جزء واحد، یگانه و ساده دانست که او آن را آپیرون، به معنای نامشخص، نامید؛ اینکه جانوران و گیاهان فرگشت می‌کنند و با تغییرات محیط سازگار می‌شوند و انسان هم باید از جانوران دیگر فرگشت پیدا کرده باشد. به این ترتیب، کم‌کم الفبای ساختاری که برای فهم جهان استفاده می‌کنیم بنا نهاده شد و اساساً هنوز همان را به کار می‌بریم.

شهر میلئوس در نقطه اتصال تمدن نوپای یونان و امپراطوری‌های کهن بین‌النهرین و مصر واقع شده بود که هم از دانسته‌های این تمدن‌های کهن استفاده می‌کرد و هم از آزادی و فضای باز سیاسی خاص یونان بهره می‌برد. شهروندان در فضایی اجتماعی فاقد کاخ‌های شاهانه یا معابد راهب‌های قدرتمند برای تعیین سرنوشتشان در محافل آزاد بحث می‌کنند. میلئوس اولین جایی است که مردم قوانینشان را به طور همگانی تصویب می‌کنند؛ جایی که اولین پارلمان تاریخ ایجاد می‌شود — پانیونیوم (۱۴)، محل ملاقات نمایندگان اتحادیه ایونیایی — و در اینجا بشر برای اولین بار این تصور را که فقط خدایان قادر به ایجاد شگفتی‌های جهان هستند، مورد تردید قرار می‌دهد. با مشورت می‌توان به مصلحانه‌ترین تصمیمات برای جامعه رسید. با مشورت می‌توان جهان را درک کرد. این میراث بزرگ میلئوس، مهد فلسفه، علوم طبیعی و مطالعات جغرافیایی و تاریخی است. اغراق نیست اگر بگوییم تمام کارهای علمی و فلسفی — در مدیترانه و سپس جهان مدرن — در گمانه‌زنی‌های اندیشمندان میلئوس در قرن ششم پیش از میلاد ریشه دارد. (۱)

عصر طلایی میلئوس کمی بعد با پایان فاجعه‌باری روبه‌رو شد. ظهور امپراطوری پارس و یک شورش ناموفق علیه حکومت به ویرانی خشونت‌بار شهر در سال ۴۹۴ پیش از میلاد و به بردگی کشیده شدن تعداد زیادی از ساکنان آن منجر شد. در آتن فرونیخوس (۱۵) شاعر با نوشتن تراژدی The Taking of Miletus آن‌قدر آتنی‌ها را متأثر می‌کند که روی صحنه بردن آن ممنوع می‌شود، مبادا مردم بیش از حد پریشان‌حال شوند. اما بیست سال بعد یونانی‌ها تهدید پارس‌ها را سرکوب می‌کنند؛ میلئوس از نو متولد شده و پر از جمعیت می‌شود و به مرکزی برای تجارت و اندیشه‌ورزی تبدیل می‌شود. خورشید روح و جان و اندیشه شهر بار دیگر طلوع می‌کند.

شخصی که این فصل را با او شروع خواهیم کرد احتمالاً از همین روح و جان الهام گرفت و طبق روایت‌ها در سال ۴۵۰ پیش از میلاد سفری را از میلئوس به آبدرا آغاز کرد. او لئوکیپوس نام داشت. از زندگی او اطلاعات زیادی در دست نیست. (۲) او کتابی با عنوان کیهان‌شناسی کلان نگاشت. وقتی به آبدرا رسید یک مکتب علمی و فلسفی بر پا کرد و کمی بعد جوانی به نام دموکریت را به شاگردی پذیرفت، کسی که تقدیر بود بر اندیشه تمام آیندگان پس از خود سایه بيفکند.

این دو اندیشمند با هم معبد عظیم اتم‌گرایی کهن را پایه‌گذاری کردند. لئوکیپوس معلم بود. دموکریت شاگرد بزرگی بود که آثار زیادی در تمام رشته‌های دانش از خود به جا گذاشت و در عصر باستان، که مردم با آثارش آشنا بودند، از احترام و اعتبار بسیاری برخوردار بود. سنکا (۱۶) او را «زیرک‌ترین اندیشمند باستان» نامید. (۳) سیسرو (۱۷) پرسید: «چه کسی یارای رقابت با عظمت او را دارد؟ نه فقط به لحاظ نبوغ، بلکه به لحاظ عزم و اراده.» (۴)



لئوکپیوس و دموکریّت چه چیزی را کشف کرده بودند؟ میلتوسی‌ها فهمیده بودند می‌توان با استدلال جهان را درک کرد. آن‌ها به این نتیجه رسیده بودند که وقایع طبیعی توضیح و منشأ ساده‌ای دارد و تلاش کرده بودند دریابند این چیز ساده چه می‌تواند باشد. آن‌ها نوعی مادهٔ بنیادی را فرض کرده بودند که همه‌چیز از آن ساخته می‌شد. از میان مردم میلتوس، آناکسیمنس (۱۸) تصور کرده بود که این ماده می‌تواند منقبض و منبسط شود و به این ترتیب عناصری را به وجود بیاورد که تشکیل‌دهندهٔ عالم هستند. این اولین جوانهٔ فیزیک، هرچند گنگ و ابتدایی، مسیر درستی را در پیش گرفته بود. به فکری عالی و دیدگاهی برجسته نیاز بود تا بتوان نظم پنهان جهان را یافت. لئوکپیوس و دموکریّت این فکر را مطرح کردند.

ایدهٔ نظام دموکریّتی بسیار ساده است: تمام عالم یک فضای نامتناهی است که اتم‌های بی‌شماری در آن وجود دارند. فضا هیچ مرزی ندارد؛ بالاوپایین ندارد؛ مرکز و حاشیه ندارد. اتم‌ها هیچ ویژگی‌ای به جز شکلشان ندارند. نه وزنی دارند، نه رنگی و نه طعمی. «به طور قراردادی شیرین‌اند، به طور قراردادی تلخ‌اند، به طور قراردادی داغ‌اند و به طور قراردادی رنگی‌اند؛ اما در ذات خود اتم‌اند و تهی.» (۵)

اتم‌ها تقسیم‌پذیر نیستند؛ ذرات بنیادی حقیقت‌اند که بیش از این تقسیم نمی‌شوند و همه‌چیز از آن‌ها تشکیل شده است. آزادانه در فضا حرکت می‌کنند و با یکدیگر برخورد می‌کنند؛ به هم می‌چسبند و همدیگر را جذب و دفع می‌کنند. اتم‌های مشابه همدیگر را جذب می‌کنند و به هم می‌پیوندند.

بافت جهان این است. حقیقت این است. هر چیز دیگر محصول جانبی، اتفاقی و تصادفی این حرکت و پیوند اتم‌هاست. تنوع بی‌حد و حصر عناصر تشکیل‌دهندهٔ جهان تنها حاصل ترکیب این اتم‌هاست.

وقتی اتم‌ها متراکم می‌شوند تنها چیزی که اهمیت دارد و تنها چیزی که در مرحلهٔ بنیادی وجود دارد شکل، چینش و ترتیب پیوند

آن‌هاست. درست همان‌طور که با ترکیب‌های مختلف حروف الفبا می‌توانیم کمدی یا تراژدی یا داستان‌های مضحک یا اشعار حماسی بنویسیم، اتم‌های بنیادی هم با ترکیب شدن جهانی این‌چنین متنوع به وجود می‌آورند. این تشبیه را خود دموکریت بیان کرد. (۶)

در این رقص بی‌پایان اتم‌ها هیچ نهایت و مقصودی وجود ندارد. ما هم درست مانند بقیه جهان یکی از محصولات این رقص بی‌پایانیم. حاصل یک ترکیب تصادفی. طبیعت به آزمودن شکل‌ها و ساختارهای مختلف ادامه می‌دهد؛ ما هم مانند دیگر جانوران حاصل یک انتخاب تصادفی و اتفاقی هزاران ساله هستیم. زندگی ما ترکیب اتم‌هاست، افکارمان از اتم‌های ریزی ساخته شده است، رؤیاهایمان نتیجه اتم‌هاست؛ امیدها و احساساتمان به زبان ترکیب اتم‌ها نوشته شده است؛ نوری که می‌بینیم از اتم‌ها ساخته شده است و تصویرها را نشانمان می‌دهد. دریاها از اتم‌ها ساخته شده است، همین‌طور شهرهایمان و ستاره‌ها. این بینشی عظیم است؛ بی‌کران، بسیار ساده و بی‌نهایت نیرومند، یکی از اندیشه‌هایی که دانش یک تمدن بعدها بر آن تکیه خواهد کرد.

دموکریت ده‌ها اثر بر این اساس نگاشت و سیستم وسیعی را بنیان نهاد که به پرسش‌های فیزیکی، فلسفی، اخلاقی، سیاسی و کیهان‌شناسی می‌پرداخت. او در مورد ذات زبان، دین، ریشه‌های جوامع بشری و بسیاری موضوعات دیگر قلم زد. (مقدمه کیهان‌شناسی خرد او بسیار تأثیرگذار است: «در این اثر به همه‌چیز خواهم پرداخت.») تمام این کتاب‌ها از بین رفته‌اند. شناخت ما از اندیشه او تنها از طریق نقل‌قول‌های دیگر نویسندگان دوران باستان و خلاصه‌های آثارش حاصل شده است. (۷) بنابراین، اندیشه او بسیار انسان‌گرایانه، خردگرایانه و ماده‌گرایانه است. (۸) دموکریت توجه ریزبینانه به طبیعت را، که با روشنی طبیعت‌گرایانه‌ای توضیح داده شده و از مابقی نظام تفکر اسطوره‌ای خالی شده است، با توجهی عمیق به بشریت و اهمیت اخلاقی زیاد برای زندگی ترکیب می‌کند. به این ترتیب چیزی حدود دو هزار سال قبل از عصر روشنگری مهم‌ترین جنبه‌های آن را پیش‌بینی می‌کند. ایده آل اخلاقی دموکریت حاصل آرامشی روانی است که از طریق اعتدال و توازن، اعتماد به خرد و دوری از تسلط احساس بر فرد حاصل شده است.

افلاطون و ارسطو با نظرهای دموکریت آشنا بودند و به جدال با آن‌ها برخاستند. آن‌دو طرفدار نظرهای دیگری بودند که برخی از آن‌ها، تا قرن‌ها، مانع پیشرفت علم و دانش شد. هر دو اصرار داشتند توضیحات طبیعت‌گرایانه دموکریت را رد کنند تا جهان را به طور غایی درک

کنند، یعنی اعتقاد داشتند هرچیزی که اتفاق می‌افتد هدفی دارد؛ تفکری که بعدها معلوم شد فرد را در درک قوانین طبیعت به اشتباه می‌اندازد — یا می‌خواستند همه‌چیز را بر اساس خیر و شر توصیف کنند و مسائل انسانی را با چیزهایی که به ما ارتباطی ندارد، اشتباه می‌گرفتند. ارسطو در مورد تفکرات دموکریت به طور مفصل و البته با احترام می‌نویسد. افلاطون هیچ‌گاه از او نقل‌قول نکرد، اما امروزه عالمان معتقدند این کار عمدی بوده، نه از روی ناآشنایی با آثار او. افلاطون در برخی از آثارش تفکرات دموکریت را به طور ضمنی نقد می‌کند، برای مثال انتقادش از «فیزیک‌دان‌ها». افلاطون در قسمتی از فایدون (۱۹) تمام «فیزیک‌دان‌ها» را از زبان سقراط نکوهش می‌کند که این موضوع برای مدت‌های مدیدی بر افراد تأثیر می‌گذارد. افلاطون می‌گوید وقتی «فیزیک‌دان‌ها» گفتند زمین گرد است، سقراط مقابلشان ایستاد؛ چون می‌خواست بداند «چرا» زمین باید گرد باشد؟ گرد بودن چه «منفعتی» برای زمین دارد؟ سقراط افلاطون تعریف می‌کند که چگونه در ابتدا مشتاق یادگیری فیزیک بود، اما از آن ناامید شد:

در ابتدا انتظار داشتم به من بگویند زمین تخت است یا گرد، سپس دلیل لزوم این شکل را هم برایم توضیح دهند. اصول بهترین شکل برای زمین را شرح دهند و به من ثابت کنند این شکل برای زمین بهترین است یا اگر به من بگویند زمین مرکز جهان است، نشانم دهند این مرکز جهان بودن چه سودی به حال زمین دارد. (۹)

افلاطون بزرگ در این زمینه چقدر از مرحله پرت بود!

آیا تقسیم‌پذیری حدی دارد؟

بزرگ‌ترین فیزیک‌دان نیمهٔ دوم قرن بیستم، ریچارد فاینمن (۲۰)، در ابتدای درس‌های مقدماتی فوق‌العاده‌اش در رابطه با فیزیک نوشت:

اگر فاجعه‌ای اتفاق بیفتد و تمام علم و دانش از بین برود و تنها یک جمله را بتوان به نسل بعدی موجودات منتقل کرد، کدام جمله با کمترین کلمات بیشترین اطلاعات را منتقل خواهد کرد؟ به نظرم پاسخ فرضیهٔ اتمی یا حقیقت اتمی یا هر اسم دیگری که دوست دارید روی آن بگذارید، است. اینکه تمام موجودات از اتم ساخته شده‌اند؛ ذرات کوچکی که دائماً به اطراف حرکت می‌کنند و یکدیگر را در فواصل نزدیک جذب می‌کنند، اما به محض اینکه به هم فشرده شوند یکدیگر را دفع می‌کنند. اگر به اندازهٔ کافی خلاقیت و تفکر به خرج دهید با همین یک جمله اطلاعات بسیاری را در مورد جهان درک می‌کنید. (۱۰)

دموکریت بدون نیاز به فیزیک مدرن به این نتیجه رسیده بود که همه‌چیز از ذرات تقسیم‌ناپذیری تشکیل شده است. چطور توانست به این نتیجه برسد؟ استدلال‌هایش بر اساس مشاهده بود؛ برای مثال به درستی تصور کرد که پوشیدن یک چرخ یا خشک شدن لباس‌ها روی بند رخت به علت جدا شدن آهستهٔ ذرات چوب یا آب است. اما او استدلال‌های فلسفی هم داشت. بگذارید به آن‌ها بپردازیم، چون پتانسیل این ایده‌ها تا گرانش کوانتومی هم پیش می‌رود.

دموکریت مشاهده کرد که ماده نمی‌تواند یکپارچه و پیوسته باشد، چون نوعی تناقض در این گزاره وجود دارد. استدلال دموکریت در گزارش‌های ارسطو ذکر شده و به ما رسیده است. (۱۱) دموکریت می‌گوید فرض کنید ماده بی‌نهایت تقسیم‌پذیر باشد، یعنی بتوان بی‌نهایت بار آن را شکست و به اجزای کوچک‌تری تقسیم کرد. حال تصور کنید یک ماده را بی‌نهایت بار بشکنید. از آن چه چیزی باقی خواهد ماند؟ آیا ممکن است ذرات کوچک چندبعدی باقی بمانند؟ نه، چون در این صورت آن ماده را بی‌نهایت بار نشکانه‌اید. باید تنها نقطه‌هایی

بدون بعد بر جا بماند. حالا بیا بید با پیوند دادن این ذرات دوباره از آن‌ها ماده بسازیم: با کنار هم قرار دادن دو ذره بدون بعد یا حتی سه یا چهار ذره نمی‌توانید به یک ماده چندبعدی برسید. مهم نیست چند ذره را کنار هم قرار می‌دهید، در واقع هیچ‌وقت نمی‌توانید بعد داشته باشید، چون ذرات هیچ بعدی ندارند. پس نمی‌توانیم فرض کنیم ماده از ذرات بدون بعد تشکیل شده است، چون هرطور که این ذرات را کنار هم قرار دهیم ممکن نیست به ماده‌ای چندبعدی برسیم. دموکریت به این نتیجه رسید تنها حالت ممکن این است که ماده از تعداد محدودی ذرات گسسته و تقسیم‌ناپذیر، یعنی اتم‌ها، به وجود آمده است که هرکدام اندازه‌ای محدود دارند.

خاستگاه این نوع استدلال زیرکانه به پیش از دموکریت بازمی‌گردد. مبدأ آن منطقه‌ای در جنوب ایتالیا به نام چیلنتو (۲۱) است، در شهری که امروز ولیا (۲۲) نام دارد. ولیا در قرن پنجم پیش از میلاد از مستعمره‌های ثروتمند یونان بود و الئا (۲۳) نام داشت. پارمنیدس (۲۴) در آنجا می‌زیست و با جان‌ودل — و به شکل افراطی — خردگرایی میلئوس را پذیرفته بود و همچنین این موضوع را که منطق می‌تواند نشانمان دهد چیزها از آنچه به نظر می‌آیند، متفاوت‌اند. پارمنیدس از طریق منطق خالص و مجرد راهی به سوی حقیقت در پیش گرفته بود، راهی که باعث شد اعلام کند تمام ظواهر خیالی هستند. به این ترتیب شیوه‌ای از تفکر را آغاز کرد که به تدریج به سمت متافیزیک حرکت کرد و از آنچه بعدها با نام «علوم طبیعی» شناخته شد، فاصله گرفت. شاگردش، زنون (۲۵)، که او هم اهل الئا بود، برهان‌های زیرکانه‌ای به کار برده بود تا از این خردگرایی بنیادگرا که باورپذیری ظواهر را شدیداً رد می‌کرد، دفاع کند. برخی از این برهان‌ها پارادوکس‌هایی بودند که به «پارادوکس‌های زنون» مشهور شدند؛ این پارادوکس‌ها نشان می‌دادند چگونه تمام ظواهر موهومی‌اند و تصور معمول از حرکت بی‌معنی است. (۱۲)

مشهورترین پارادوکس زنون مانند حکایتی کوتاه است: یک لاک‌پشت آشیل (۲۶) را به مسابقه‌ای فرامی‌خواند که در ابتدای این مسابقه لاک‌پشت ده متر جلوتر از آشیل باشد. آیا آشیل می‌تواند به لاک‌پشت برسد؟ زنون می‌گوید طبق منطق محض هیچ‌گاه نمی‌تواند. آشیل برای رسیدن به لاک‌پشت باید ده متر را طی کند که این کار کمی زمان می‌برد. لاک‌پشت در این زمان می‌تواند چند سانتی‌متر جلو برود. آشیل برای طی کردن این چند سانتی‌متر زمانی را صرف می‌کند، اما لاک‌پشت هم در این مدت کمی جلوتر می‌رود و این روند تا بی‌نهایت پیش

خواهد رفت. در نتیجه آشیل بی‌نهایت بازه زمانی لازم دارد تا به لاک‌پشت برسد و زنون این‌طور استدلال می‌کند که جمع این بی‌نهایت بازه زمانی، زمان بی‌نهایتی خواهد شد. طبق منطق محض آشیل برای رسیدن به لاک‌پشت به زمان بی‌انتهایی نیاز دارد یا به عبارتی ما هیچ‌وقت نمی‌توانیم رسیدن او را ببینیم. از آنجا که ما می‌توانیم ببینیم آشیل با چابکی به لاک‌پشت خواهد رسید و از آن جلو خواهد زد، پس آنچه ما می‌بینیم غیرمنطقی و در نتیجه موهومی است.

صادقانه بگویم: این اصلاً قانع‌کننده نیست. کجای برهان اشتباه است؟ یک پاسخ احتمالی این است که زنون اشتباه فکر می‌کند که با جمع بی‌نهایت چیز به یک‌چیز بی‌نهایت می‌رسیم. فرض کنید یک رشته‌نخ برداریم و آن را نصف کنیم، دوباره نصف کنیم و همین‌طور پیش برویم. بالاخره به بی‌نهایت رشته‌نخ خواهیم رسید، اما جمع این‌ها متناهی خواهد بود، چون مجموع آن‌ها برابر با طول رشته‌نخ اصلی است. بنابراین، مجموع بی‌نهایت رشته‌نخ یک رشته‌نخ با طول متناهی است؛ جمع بی‌نهایت بازه زمانی که به تدریج کوچک‌تر می‌شوند، یک بازه زمانی محدود خواهد بود. قهرمان ما حتی اگر مجبور باشد بی‌نهایت مسیر را، علی‌رغم کوتاه بودن، طی کند بالاخره می‌تواند در زمانی متناهی به لاک‌پشت برسد.

به نظر می‌رسد پارادوکس را حل کرده‌ایم. راه‌حل آن ایده پیوستگی است: یعنی می‌توان بازه‌های زمانی به دلخواه کوچکی فرض کرد که بی‌نهایت از آن‌ها زمانی متناهی خواهد ساخت. ارسطو نخستین فردی است که این امکان را مطرح کرد و بعدها ریاضی‌دان‌های باستان و مدرن آن را بسط دادند. (۲۷) اما آیا پاسخ درست در جهان واقعی همین است؟ آیا رشته‌نخ‌های بسیار کوچک وجود دارند؟ می‌توانیم یک رشته‌نخ را هرچقدر بخواهیم تقسیم کنیم؟ آیا بازه‌های زمانی بی‌نهایت کوتاه وجود دارند؟ این دقیقاً پرسشی است که گرانش کوانتومی با آن مواجه است.

طبق روایت‌ها زنون با لئوکیپوس دیدار کرد و معلم او شد. از این رو، لئوکیپوس با معماهای زنون آشنا بود؛ اما او راه متفاوتی برای حل آن‌ها ابداع کرده بود. لئوکیپوس می‌گوید شاید هیچ چیز به دلخواه کوچکی وجود ندارد و کران پایینی برای تقسیم‌پذیری وجود دارد.

عالم ذره‌ای است، نه پیوسته. درست مانند استدلال دموکریت، که ارسطو نقل کرد و پیش از این ذکر شد، با بی‌نهایت ذره کوچک

نمی‌توان به ابعاد دست یافت. بنابراین، ابعاد رشته‌نخ باید از تعداد متناهی‌ای رشته‌نخ با اندازه متناهی تشکیل شده باشد. نمی‌توان یک رشته‌نخ را هرچقدر می‌خواهیم تقسیم کنیم. ماده پیوسته نیست، بلکه از اتم‌های مجزا با اندازه متناهی ساخته شده است.

خواه این برهان انتزاعی درست باشد یا نه، نتیجه آن — طبق دانسته‌های فعلی‌مان — حقایق زیادی را در بر می‌گیرد. ماده واقعاً ساختار اتمی دارد. اگر یک قطره آب را دو نیم کنم، دو قطره آب خواهم داشت. می‌توانم هرکدام از این دو قطره را دو نیم کنم و به همین ترتیب پیش بروم؛ اما نمی‌توانم این کار را بی‌نهایت بار انجام دهم. در نهایت به یک مولکول خواهم رسید و کار تمام است. قطره آبی کوچک‌تر از یک مولکول آب وجود ندارد.

امروز این را از کجا می‌دانیم؟ طی قرن‌ها شواهد مختلفی برای آن پیدا کرده‌ایم که بیشتر آن‌ها را از علم شیمی گرفته‌ایم. مواد شیمیایی از ترکیب چند عنصر و نسبت‌های مختلف (وزنی) تشکیل شده‌اند که با اعداد صحیح مشخص می‌شوند. شیمی‌دان‌ها شیوه‌ای برای تصور ماده‌ها بنا گذاشته‌اند که مطابق آن مولکول‌ها از ترکیب‌های معین اتم‌ها به دست می‌آیند. برای مثال آب، (H_2O) ، از ترکیب دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن به وجود می‌آید.

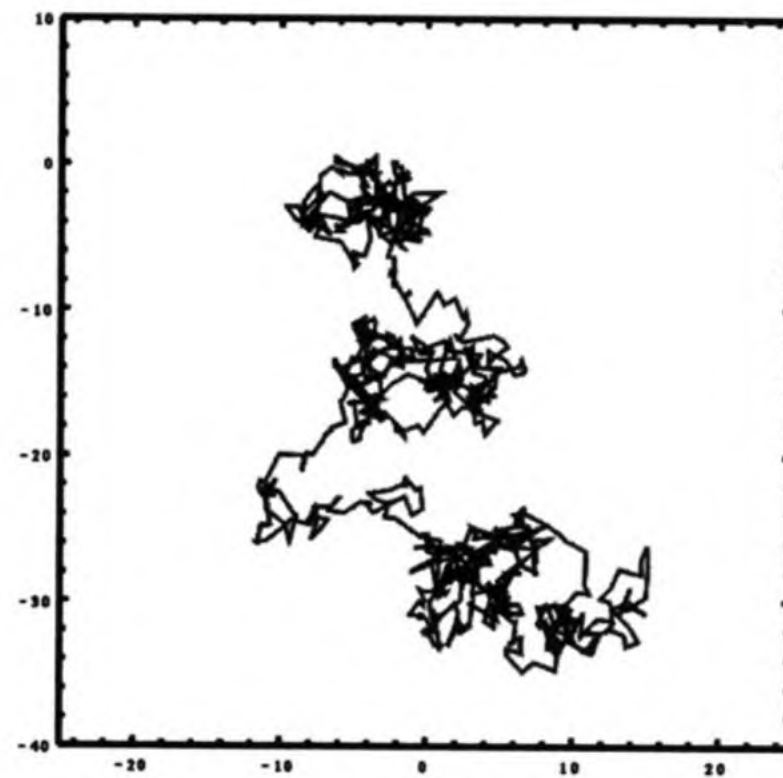
اما این‌ها تنها سرنخ‌ها هستند. با این حال، در ابتدای قرن نوزدهم دانشمندان و فیلسوفان بسیاری فرضیه اتمی را معتبر نمی‌دانستند. یکی از آن‌ها فیزیک‌دان و فیلسوف مشهور، ارنست ماخ^(۲۸) بود که نظره‌ایش در مورد فضا تأثیر شگرفی روی اینشتین داشت. سال ۱۸۹۷، در پایان یکی از سخنرانی‌های لودویگ بولتسمان^(۲۹) در آکادمی سلطنتی علوم در وین، ماخ به صراحت بیان کرد: «من به وجود اتم‌ها باور ندارم!» بسیاری، مانند ماخ، نمادهای شیمیایی را تنها قراردادی برای خلاصه‌سازی قوانین واکنش‌های شیمیایی محسوب می‌کردند — نه نشانه‌ای بر اینکه واقعاً مولکول‌های آبی وجود دارند که از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن تشکیل شده‌اند. آن‌ها می‌گفتند نمی‌توانیم اتم‌ها را ببینیم. می‌گفتند هیچ‌گاه هم نمی‌توان اتم‌ها را دید. بعد می‌پرسیدند: اندازه یک اتم چقدر است؟ دموکریت هیچ‌گاه نتوانست اتم‌هایش را اندازه بگیرد...



شکل ۱.۳ آلبرت اینشتین

اما شخص دیگری توانست. «فرضیه اتمی» برای اثبات بی‌چون و چرا باید تا سال ۱۹۰۵ صبر می‌کرد. جوان بیست و پنج ساله سرکشی آن را اثبات کرد. او فیزیک خوانده بود، اما نتوانست به عنوان محقق شغلی پیدا کند و از طریق کار در اداره ثبت اختراع شهر برن (۳۰) اموراتش را می‌گذراند. در دیگر قسمت‌های این کتاب در مورد این مرد جوان و سه مقاله‌ای که به معتبرترین مجله فیزیک آن زمان، سالنامه فیزیک (۳۱)، فرستاد زیاد صحبت خواهیم کرد. نخستین مقاله از این سه مقاله، اثبات قطعی وجود اتم‌ها، محاسبه ابعادشان و حل مسائلی را شامل می‌شد که لئوکیپوس و دموکریت بیست و سه قرن پیش از او مطرح کرده بودند.

روشن است که نام این جوان بیست و پنج ساله آلبرت اینشتین است.



شکل ۱.۴ حرکت براونی معمول

چطور این کار را کرد؟ ایده‌اش به طرز غافلگیرکننده‌ای ساده است. از همان زمان دموکریت به بعد، هرکسی می‌توانست به آن فکر کند؛ در صورتی که تیزهوشی اینشتین را داشت و برای محاسبات نه‌چندان ساده، به اندازه کافی به ریاضیات مسلط بود. ایده‌اش این بود: اگر ذرات بسیار کوچک مانند گردوغبار یا گرده گل‌های معلق در هوا یا سیالات را به دقت مشاهده کنیم، می‌بینیم که در حال حرکت و ارتعاش‌اند. به واسطه این ارتعاش حرکت می‌کنند، حرکات زیگزاگی تصادفی دارند، به آهستگی حرکت می‌کنند و از نقطه آغازینشان دور می‌شوند. به افتخار رابرت براون (۳۲)، زیست‌شناسی که در قرن نوزدهم حرکت ذرات در سیالات را با جزئیات شرح داد، به آن حرکت براونی گفته می‌شود. مسیر معمول یک ذره که چنین حرکت می‌کند در شکل ۱.۴ ترسیم شده است. انگار از جهات مختلف ضرباتی بر هر ذره کوچک وارد می‌شود. در واقع تنها «ظاهراً» به ذره ضربه وارد نمی‌شود، بلکه به معنای واقعی برخوردایی با آن صورت می‌گیرد. می‌لرزد، چون مولکول‌های هوا به آن ضربه می‌زنند و گاهی از سمت راست و گاهی از سمت چپ با هم برخورد می‌کنند.

نکته ظریفش را خواهم گفت. مولکول‌های هوا بسیار زیادند. به طور میانگین تعداد مولکول‌هایی که از سمت راست با ذره برخورد می‌کنند با تعداد مولکول‌هایی که از سمت چپ با آن برخورد می‌کنند، برابر است. اگر مولکول‌های هوا بی‌اندازه کوچک و تعدادشان بی‌نهایت بود، اثر برخوردها از راست و چپ متعادل می‌شد و در هر لحظه یکدیگر را خنثی می‌کردند و ذره ساکن می‌ماند. اما اندازه محدود مولکول‌ها — و اینکه تعداد متناهی دارند — باعث می‌شود نوساناتی در کار باشد (واژه کلیدی همین است). به عبارتی این برخوردها هیچ‌گاه دقیقاً متعادل نیستند، تنها به طور میانگین متعادل‌اند. فرض کنید تعداد مولکول‌ها بسیار کم و اندازه‌شان بزرگ بود؛ مشخصاً هر از گاهی به ذره ضربه وارد می‌شد؛ یکی از راست برخورد می‌کرد، سپس یکی از چپ... ذره بین برخوردها حرکت قابل‌توجهی می‌داشت، مانند توپ فوتبالی که بچه‌ها به آن لگد می‌زنند و در زمین دنبال آن می‌دوند. هرچه مولکول‌ها کوچک‌تر باشند و از طرف دیگر هرچه فاصله زمانی بین برخوردها کوتاه‌تر باشد ضربه‌ها از جهات مختلف متعادل‌تر می‌شوند، بهتر یکدیگر را خنثی می‌کنند و حرکت ذره کمتر می‌شود.

با کمی محاسبات ریاضی، می‌توان از مقدار حرکت ذره‌هایی که قابل‌مشاهده هستند ابعاد مولکول‌ها را به دست آورد. همان‌طور که گفتم، اینشتین در بیست‌وپنج‌سالگی این کار را انجام می‌دهد. او با مشاهده رانش ذره‌ها در سیالات و اندازه‌گیری مقدار این «رانش» —

یعنی مقدار جابه‌جایی از یک موقعیت — اندازهٔ اتم‌های دموکریت، یعنی ذرات بنیادی سازندهٔ ماده، را محاسبه می‌کند. او پس از دو هزار و سیصد سال، درستی دیدگاه دموکریت را ثابت می‌کند: ماده ذره‌ای است.

ذات اشیا

آثار شکوهمند لوکرتیوس (۳۳) همیشه پابرجا خواهند ماند، مگر اینکه جهان خود از بین رود.
- اووید (۳۴) (۱۳)

معمولاً فکر می‌کنم بزرگ‌ترین تراژدی علمی‌ای که از نابودی تمدن‌های باستانی نشئت گرفت از بین رفتن نسخه کامل آثار دموکریت است. (۳۵) به آثارش که در پاورقی آورده شده نگاهی بیندازید؛ مطمئناً از دست دادن این تفکرات گسترده علمی دوران باستان ناراحتان می‌کند. تمام آثار ارسطو، که تفکر غرب خود را با آن بازسازی کرد، بر جا مانده، اما هیچ‌یک از آثار دموکریت باقی نمانده است. شاید اگر تمام آثار دموکریت باقی می‌ماند و آثار ارسطو از بین می‌رفت تاریخ علمی تمدنمان بهتر می‌بود...

اما قرن‌ها سلطه یکتاپرستی به طبیعت‌گرایی دموکریت اجازه حیات نداده است. امپراتور تئودوسیوس (۳۶)، در سال ۳۹۰ - ۳۹۱ میلادی حکمی صادر کرد که بر اساس آن مسیحیت به تنها دین امپراطوری روم و دین اجباری این کشور تبدیل شد. این حکم منجر به سرکوب کافران شد و در پی آن تمام مدرسه‌های علمی باستانی مانند مدرسه آتن و اسکندریه بسته شدند و تمام نوشته‌های مغایر با اندیشه‌های مسیحی به طور نظام‌مند و گسترده از بین رفتند. مسیحیت حاکم عقاید افلاطون و ارسطو را، کافرانی که به جاودانگی روح یا وجود یک خالق اولیه معتقد بودند، جایز شمرد؛ اما در مورد دموکریت نه.

اما یک اثر از این فاجعه نجات یافته و به طور کامل به دست ما رسیده است. ما از طریق آن اطلاعات اندکی در مورد اتم‌گرایی باستانی و مهم‌تر از همه روح آن علم به دست آورده‌ایم. این اثر به‌جامانده شعر باشکوه De Rerum Natura (ذات چیزها یا در باب ذات هستی) از شاعر لاتین، لوکرتیوس، است. لوکرتیوس به فلسفه اپیکوروس، شاگرد شاگرد دموکریت، پایبند است. اپیکوروس بیشتر از پرسش‌های علمی، به پرسش‌های اخلاقی علاقه‌مند است و تیزبینی دموکریت را ندارد. او گاهی از اتم‌گرایی دموکریت برداشتی سطحی دارد؛ اما نگاهی به جهان طبیعی اساساً مشابه نگاه آن

فیلسوف بزرگ آبدراست. لوکرتیوس اندیشهٔ اپیکوروس و اتم‌گرایی دموکریت را در قالب شعر درآورده است و به این ترتیب بخشی از این فلسفهٔ عمیق را از فاجعهٔ علمی قرون سیاه نجات می‌دهد. لوکرتیوس از اتم‌ها، دریا، آسمان و طبیعت می‌خواند. در شعری بلیغ پرسش‌های فلسفی، اندیشه‌های علمی و برهان‌های اصلاح‌شده را مطرح می‌کند.

... خواهیم گفت که طبیعت با چه نیرویی خورشید را در سیرش و ماه را در سفرش هدایت می‌کند، تا گمان نبریم که این‌دو رقابت سالانه‌شان را بین زمین و آسمان به اختیار خود طی می‌کنند... یا اینکه برای تحقق اراده‌ای الهی می‌چرخند و می‌گردند... (۱۴)

زیبایی شعر از منتقل کردن حس شگفتی حاصل از دیدگاه گستردهٔ اتمی نشئت می‌گیرد. حس یگانگی مطلق چیزها، با علم به اینکه مواد تشکیل‌دهندهٔ ما همان مواد تشکیل‌دهندهٔ ستاره‌ها و دریاست:

... ما همه از یک دانهٔ آسمانی متولد شدیم. ما همه یک پدر داریم و زمین، مادری که ما را تغذیه می‌کند، از وی قطرات باران را دریافت می‌کند. بدین سان بارور می‌شود، به محصولات خندان و درختان تنومند، بشر و تمام گونه‌های جانوران زندگی می‌بخشد. انواع غذا را، که بدن موجودات با آن تغذیه می‌شود، ارزانی می‌دارد تا همه زندگی شادمانه‌ای داشته باشند و نسل خود را ادامه دهند... (۱۵)

نوعی آرامش و متانت واضح در این شعر وجود دارد. لذت، سبک‌بالی و سرزندگی در آن دیده می‌شود. ابتدای خارق‌العادهٔ این شعر به سیارهٔ ناهید (زهره)، نشانهٔ روشنی از نیروی خالق طبیعت، اختصاص دارد:

بادها از پیش تو می‌گریزند و با آمدنت ابرها از آسمان کنار می‌روند. سطوح اقیانوس برای تو می‌خندند و آسمان به خاطر تو آرام

می‌گیرد و روشنی‌اش را می‌گستراند. (۱۶)

زندگی را، که ما بخش جدایی‌ناپذیری از آن هستیم، عمیقاً می‌پذیرد:

نمی‌بینی که طبیعت تنها برای دو چیز در تکاپوست؟ تنی آسوده از رنج و روانی رها از نگرانی و ترس تا خوشی و رضایت را احساس کند. (۱۷)

با متانت ناگزیری مرگ را می‌پذیرد، اینکه مرگ بدی‌ها را از بین می‌برد و چیزی برای ترس از آن وجود ندارد. از نظر لوکرتیوس عقل چراغی است که روشنی می‌آورد.

پودجو براتچولینی (۳۷) انسان‌گرا این اثر لوکرتیوس را که قرن‌ها به دست فراموشی سپرده شده بود، در ژانویه ۱۴۱۷، در کتابخانه یک صومعه آلمانی مجدداً کشف کرد. پودجو منشی پاپ‌های بسیاری بود. در پی اکتشاف‌های مجدد و مشهور فرانچسکو پترارک (۳۸) با اشتیاق به شکار کتاب‌های قدیمی می‌رفت. با کشف مجدد یکی از آثار کوینتیلیان (۳۹) سیر مطالعه حقوق در دانشکده‌های اروپا متحول شد؛ کشف مجدد رساله ویتروویوس (۴۰) شیوه طراحی و ساخت بناهای فاخر را از این رو به آن رو کرد. اما پیروزی بزرگ پودجو کشف مجدد لوکرتیوس بود. نسخه خطی اصلی‌ای که او پیدا کرده بود گم شده است، اما از رونوشت دوستش، نیکولو نیکولی (۴۱) (اکنون ۳۵.۳۰ Codex Laurenziano نام دارد) هنوز نسخه‌ای کامل در کتابخانه لورنزی فلورانس نگه‌داری می‌شود.

وقتی پودجو کتاب لوکرتیوس را به بشر بازگرداند، قطعاً شرایط برای چیزی تازه مهیا بود. از نسل دانتته (۴۲) به بعد می‌شد سخنان بسیار تازه‌ای شنید:

چشمانت مانند تیری در قلم فرو رفت
تا اندیشه خاموشم را بیدار کند،
حالا بین، شوریده و نومیدم
با عشقی که جانم را از هم دریده است. (۱۸)

اما کشف مجدد De Rerum Natura تأثیر شگرفی بر رنسانس ایتالیا و اروپا (۱۹) داشت و به طور مستقیم یا غیرمستقیم در آثار نویسندگان، از گالیه (۲۰) گرفته تا کپلر (۲۱)، از بیکن (۴۳) گرفته تا ماکیاولی (۴۴) طنین انداز شد. یک قرن پس از پودجو، اتمها در آثار شکسپیر به شکل دلیذیری رخ می‌نمایند:

مرکوتیو: آه، پس ملکه ماب با تو بوده است:
او مامای پریان است و کوچک‌تر از سنگ عقیق
روی انگشت اشاره کدخدا،
او سوار بر کالسکه‌ای می‌آید که موجودات اتمی
آن را بر روی بینی مردان خفته می‌رانند... (۲۲)

کتاب مقالات از مونتنی (۴۵) دست‌کم صد نقل‌قول از لوکرتیوس دارد؛ اما لوکرتیوس بر نیوتن، دالتون، اسپینوزا، داروین و حتی اینشتین هم تأثیر مستقیم داشته است. ایده اینشتین که حرکت براونی ذرات ریز غرق در یک سیال وجود اتمها را نشان می‌دهد، ممکن است از لوکرتیوس نشئت گرفته باشد. لوکرتیوس در این متن «اثبات عینی» ای برای مفهوم اتمها آورده است:

تصویری که دائماً جلوی چشمانمان نقش می‌بندد این روند را نشان می‌دهد. ببینید وقتی نور خورشید وارد ساختمان‌ها می‌شود و مکان‌های تاریکش را روشن می‌کند، چه اتفاقی می‌افتد. تعداد انبوهی ذره ریز می‌بینید که در جهات مختلفی در فضای خالی، زیر آفتاب در هم می‌آمیزند. گویی در جدالی جاودانه با هم می‌جنگند، فوج فوج به نبرد می‌روند و حتی لحظه‌ای از به هم پیوستن و ازهم‌گسستن‌های پیاپی باز نمی‌ایستند. شاید از این طریق بتوانید بفهمید حرکت مداوم در فضای بی‌کران چگونه است. یک چیز کوچک تا حدی می‌تواند تصویر ناکاملی از چیزهای بزرگ‌تر را نشان دهد. ضمناً برای توجه کردن به ذرات متحرک زیر نور خورشید دلیل دیگری نیز وجود دارد: حرکات آن‌ها در واقع نشان‌دهنده حرکات اساسی و نهان ماده است. در زیر نور خورشید ذرات زیادی می‌بینید که تحت تأثیر ضرباتی نامرئی هستند که این ضربات مسیرشان را به این‌سو و آن‌سو، در همه جهات، عوض می‌کنند و دوباره در مسیر قرار می‌دهند. باید بدانید این حرکت دائم از اتم‌ها نشئت می‌گیرد. ریشه این حرکت‌ها اتم‌هایی هستند که خود در جنبش‌اند. سپس، اجرام مرکب ریزی که تنها کمی از نیروی محرک اتم‌ها دور شده‌اند بر اثر ضربات نامرئی آن نیرو به حرکت درمی‌آیند و به نوبه خود با اجرام کمی بزرگ‌تر برخورد می‌کنند. این حرکت که از اتم‌ها آغاز شده گام‌به‌گام افزایش می‌یابد و به تدریج به مرحله‌ای می‌رسد که بر حواسمان نمایان می‌شود. آن اجرامی که جنبششان را زیر نور خورشید می‌بینیم، از ضربه‌هایی به حرکت درآمده‌اند که نامرئی خواهند ماند. (۲۳)

اینشتین این «اثبات عینی» را که لوکرتیوس ارائه کرد و احتمالاً اولین بار دموکریت متوجه آن شد، احیا کرد و با برگرداندنش به زبان ریاضی پایه‌های آن را محکم ساخت. به این ترتیب توانست اندازه اتم‌ها را محاسبه کند. کلیسای کاتولیک تلاش کرد از گسترش اندیشه لوکرتیوس جلوگیری کند: شورای فلورانتین (۴۶)، در دسامبر ۱۵۱۶، مطالعه آثار لوکرتیوس را در مدرسه‌ها ممنوع کرد. شورای ترنت (۴۷)، در سال ۱۵۵۱، آثار او را به طور کامل ممنوع کرد. اما خیلی دیر شده بود! آن دیدگاه از جهان که مسیحیت قرون وسطایی متعصب کاملاً آن را زدوده بود، در اروپایی که چشمانش را بازگشوده بود، مجدداً پدیدار شد. تنها خردگرایی و ماده‌گرایی یا تعمق روشنگرانه

و آرام لوکرتیوس در باب زیبایی جهان نبود که در اروپا مطرح می‌شد. تفکرات لوکرتیوس بیش از این‌ها بود: ساختاری فصیح و پیچیده برای اندیشیدن در مورد حقیقت، شیوه‌ای تازه برای اندیشیدن، که کاملاً با طرز تفکر رایج در قرون وسطا تفاوت داشت. (۲۴)

کیهان قرون وسطایی که دانته به زیبایی آن را به صورت شعر درآورده، برخاسته از نگاهی سلسله‌مراتبی به جهان هستی بود که خود از سلسله‌مراتب اجتماعی اروپا نشئت می‌گرفت: یک ساختار کروی برای کیهان که زمین در مرکز آن است؛ جدایی بی‌چون‌وچرای زمین و آسمان‌ها؛ توضیح‌های غایت‌گرایی و استعاره‌ای برای پدیده‌های طبیعی؛ ترس از خدا؛ ترس از مرگ؛ توجه اندک به طبیعت؛ این تصور که اشکال پیشین چیزها ساختار جهان را تعیین می‌کنند؛ این تصور که تنها از الهامات و سنت‌های گذشته می‌توان به دانش رسید...

هیچ‌کدام از این‌ها در جهان دموکریست که لوکرتیوس آن را سراییده است، جایگاهی ندارند. جهان پایان یا هدفی ندارد؛ سلسله‌مراتبی در هستی وجود ندارد؛ تفاوتی بین زمین و آسمان‌ها نیست. عشق عمیق به طبیعت و غرق در آرامشی دیده می‌شود؛ علم به اینکه ما عمیقاً جزئی از آنیم؛ اینکه مردان، زنان، حیوانات، گیاهان و ابرها رشته‌های ارگانیکی از یک کل شگرف‌اند که سلسله‌مراتبی ندارد. احساس ژرفی از جهان‌گرایی در کلام شکوهمند دموکریست دیده می‌شود: «زمین از نظر انسان خردمند حد و مرزی ندارد، چون وطن حقیقی یک شخص فاضل تمام هستی است.» (۲۵)

دموکریست همچنین مشتاق است که با روشی ساده به جهان بیندیشد، بتواند رازهای طبیعت را بررسی کند و آن‌ها را بشناسد و بیشتر از اجدادمان بداند. ابزارهای مفهومی و فوق‌العاده‌ای وجود دارند که گالیله، کیپلر و نیوتن از آن‌ها برای ایده حرکت آزاد در مسیری مستقیم در فضا، ایده اجسام بنیادی و برهم‌کنش‌های آن‌ها با یکدیگر — که جهان را می‌سازد — و تصور فضا به صورت یک قالب برای زمین بهره خواهند برد.

و ایده ساده تقسیم‌پذیری متناهی چیزها. خصلت ذره‌ای جهان. ایده‌ای که بی‌نهایت را بین انگشتانمان نگه می‌دارد. فرضیه اتمی از این ایده نشئت می‌گیرد، اما با قدرت بیشتر همراه مکانیک کوانتومی بازمی‌گردد و امروزه دوباره نیرومندی خودش را — به عنوان سنگ بنای گرانش کوانتومی — به نمایش می‌گذارد.

نخستین شخصی که عناصر نشئت گرفته از طبیعت‌گرایی رنسانس را به هم ارتباط می‌دهد — دیدگاه دموکریتی را با قدرت بیشتری احیا می‌کند و آن را در مرکز اندیشه مدرن قرار می‌دهد — یک مرد انگلیسی است؛ بزرگ‌ترین دانشمند تمام اعصار و اولین قهرمان فصل بعدی.

۲. کلاسیک ها

آیزاک و ماه کوچک

اگر به نظر آمده که در فصل قبلی گفته‌ام افلاطون و ارسطو تنها به پیشرفت علم ضربه زده‌اند، بگذارید حرفم را اصلاح کنم. مطالعات ارسطو روی طبیعت — برای مثال در زمینه گیاه‌شناسی و جانورشناسی — کارهای علمی فوق‌العاده‌ای‌اند که بر پایه مشاهده ریزبینانه جهان طبیعی بنا شده‌اند. روشنی مفهومی، توجه به تنوع در طبیعت، هوشمندی قابل‌توجه و روشنفکری این فیلسوف بزرگ باعث شد او قرن‌ها از شخصیت‌های بزرگ تاریخ باشد. قدیمی‌ترین فیزیک نظام‌مندی که می‌شناسیم در آثار ارسطو آمده است که فیزیک کم‌ارزشی هم نیست.

ارسطو علم فیزیک را در کتابی ارائه کرده که دقیقاً فیزیک نام دارد. این کتاب نامش را از یک شاخه علمی نگرفته، بلکه این شاخه علمی از روی کتاب ارسطو نام‌گذاری شده است. برای ارسطو طرز کار فیزیک این‌طور است: ابتدا باید بین زمین و آسمان تمایز قائل شویم. در آسمان‌ها همه چیزها از ماده‌ای کریستالی ساخته شده‌اند که حرکتی دورانی دارند و در مدارهای دایره‌ای هم‌مرکز و بزرگ تا ابد دور زمین می‌چرخند. زمین کروی در مرکز هرچیز قرار دارد. در زمین باید بین حرکت اعمال‌شده و حرکت طبیعی تمایز قائل شویم. حرکت اعمال‌شده با یک نیرو آغاز می‌شود و تا پایان یافتن نیرو ادامه می‌یابد. حرکت طبیعی عمودی است — به سمت بالا یا به سمت پایین — و به جنس و موقعیت ماده بستگی دارد. هر ماده یک «جایگاه طبیعی» دارد، یعنی یک ارتفاع مناسب که همیشه به آن بازمی‌گردد: زمین پایین است، آب کمی بالاتر، هوا بالاتر از آب و آتش از آن هم بالاتر قرار دارد. وقتی سنگی را برمی‌دارید و آن را رها می‌کنید، سنگ به سمت پایین حرکت می‌کند، چون می‌خواهد به سطح طبیعی‌اش بازگردد. حباب‌های هوا در آب، آتش در هوا و بادکنک‌های کودکان به سمت بالا حرکت می‌کنند، چون می‌خواهند به جایگاه طبیعی‌شان بازگردند.

به این تئوری نخندید یا کنارش نگذارید، چون فیزیک منطقی‌ای است. توصیف خوب و دقیقی است از حرکت اجرامی که در سیالی شناورند و جاذبه و اصطکاک به آن‌ها اعمال می‌شود، به عبارتی اجسام حقیقی‌ای که در زندگی روزمره با آن‌ها مواجه می‌شویم. بر خلاف چیزی که

دائم گفته می‌شود، فیزیک اشتباه وجود ندارد، (۴۸) فیزیک یک تقریب است. همان‌طور که فیزیک نیوتن هم تقریبی از نسبیت عام است. احتمالاً هرچه امروزه می‌دانیم هم تقریبی است از چیز دیگری که هنوز نمی‌دانیم. البته فیزیک ارسطو ابتدایی است: کمی نیست (یعنی نمی‌توانیم با آن چیزی را محاسبه کنیم) اما منسجم و منطقی است و می‌توان پیش‌بینی‌های کیفی درستی بر پایه آن انجام داد. بی‌دلیل نبود که قرن‌ها بهترین مدل موجود برای درک حرکت بود. (۱)

ممکن است برای پیشرفت آینده علم افلاطون از ارسطو هم مهم‌تر باشد.

او بود که ارزش بینش فیثاغورث و مکتبش را فهمید: کلید پیشرفت کردن و فراتر رفتن از میلئوس ریاضیات بود.

فیثاغورث در ساموس (۴۹)، جزیره‌ای نه‌چندان دور از میلئوس، متولد شد. اولین شرح‌حال‌نویسان او، یامبلیخوس (۵۰) و پورفیری (۵۱)، گزارش داده‌اند که فیثاغورث جوان از شاگردان آناکسیماندر پیر بود. همه‌چیز از میلئوس ریشه گرفته است! فیثاغورث سفرهای دورودرازی می‌کرد. به مصر و بابل رفت و نهایتاً در شهر کروتون (۵۲)، در جنوب ایتالیا، ساکن شد. در آنجا فرقه‌ای مذهبی - سیاسی - علمی پایه‌گذاری کرد که نقش مهمی در سیاست این شهر کوچک داشت، اما میراث ماندگاری برای تمام جهان باقی گذاشت: کشف کاربرد نظری ریاضیات. گفته می‌شود که او تأکید کرده است: «اعداد بر اشکال و ایده‌ها حکمرانی می‌کنند.» (۲)

افلاطون مکتب فیثاغورث را از بار سنگین و بی‌فایده عرفانی‌اش رها کنید. او پیام مفیدش را فراگرفت و استخراج کرد: ریاضیات بهترین زبان برای فهم و توصیف جهان است. دامنه این بینش بسیار وسیع است؛ این یکی از دلایل کامیابی علم غرب است. روایت شده است که افلاطون روی در مدرسه‌اش این عبارت را حک کرد: «هرکه هندسه نمی‌داند وارد نشود.»

افلاطون با این طرز فکر این پرسش مهم را مطرح کرد: پرسشی که پس از پیچ‌وخم بسیار باعث پیدایش علم مدرن شد. او از شاگردانش که ریاضیات مطالعه می‌کردند پرسید آیا می‌توانند قوانین ریاضی حاکم بر حرکت اجرام سماوی مشهود در آسمان را بیابند؟ سیاره‌های ناهید، مریخ و مشتری را به آسانی می‌توان در آسمان شب رصد کرد. به نظر می‌آید حرکتی تصادفی دارند و بین ستاره‌ها به این‌سو و آن‌سو می‌روند. آیا می‌توان یک روش ریاضیاتی برای توصیف و پیش‌بینی حرکات آن‌ها پیدا کرد؟

اُودوکسوس(۵۳) این کار را در مدرسه افلاطون آغاز کرد. اخترشناسانی همچون آریستارخوس(۵۴) و هیپارخوس(۵۵) این کار را در قرن‌های آتی ادامه دادند و اخترشناسی کهن را وارد سطوح بالای علمی کردند. اطلاعاتمان را از این موفقیت‌های علمی تنها مدیون یک کتابیم، تنها کتابی که باقی ماند: مجسطی بطلمیوس(۵۶). بطلمیوس اخترشناسی بود که در اسکندریه، که تحت سلطه امپراطوری روم بود، در قرن اول میلادی، می‌زیست. آن‌زمان علم به دلیل فروپاشی جهان هلنیستی(۵۷) و فشارهای حاصل از مسیحی‌سازی امپراطوری در شرف زوال و نابودی کامل بود.

کتاب بطلمیوس یک اثر علمی مهم است؛ دقیق، صریح و پیچیده. این کتاب یک سیستم ریاضی برای اخترشناسی ارائه می‌کند که می‌تواند حرکت‌های به ظاهر تصادفی سیاره‌ها را، با در نظر گرفتن محدودیت‌های چشم انسان، با دقت کامل پیش‌بینی کند. این کتاب اثبات درستی بینش فیثاغورث است. ریاضیات توصیف جهان و پیش‌بینی آینده را امکان‌پذیر می‌کند: با فرمول استادانه و نظام‌مند بطلمیوس، که با خلاصه‌سازی قرن‌ها کار علمی اخترشناسان یونانی تهیه شده بود، می‌توان حرکت‌های به ظاهر نامنظم و پیچ‌درپیچ سیاره‌ها را پیش‌بینی کرد. حتی امروزه هم کسی که کمی از قبل مطالعه داشته باشد می‌تواند کتاب بطلمیوس را باز کند و فنونش را یاد بگیرد و برای مثال موقعیت آینده مریخ را در آسمان محاسبه کند. امروزه یعنی دو هزار سال پس از نوشته شدن آن کتاب. علم مدرن بر پایه درک امکان‌پذیری این جادو بنا شده و مدیون فیثاغورث و افلاطون است.

پس از فروپاشی علم کهن هیچ‌کس در سراسر مدیترانه قادر نبود کارهای بطلمیوس را درک کند — یا هیچ‌یک از انگشت‌شمار آثار علمی‌ای که از فاجعه نجات یافته بودند، مانند Elements اقلیدس(۵۸). آموزه‌های یونانی به لطف تبادلهای تجاری و فرهنگی فراوان به هند رسیده بودند و این کتاب‌ها در آنجا مطالعه و تدریس می‌شدند.

به لطف دانشمندان پارس و عرب فاضل، که متوجه ارزش این آثار شده و آن‌ها را حفظ کرده بودند، این دانش از هند به غرب رسید. اما اخترشناسی تا هزار سال قدم چشمگیری رو به جلو برنداشت.

تقریباً در همان زمانی که پودجو براتچولینی نوشته لوکرتیوس را یافت، جو سرزنده انسان‌گرایی ایتالیایی و اشتیاق به متون کهن یک

جوان لهستانی را — که برای تحصیل به ایتالیا، ابتدا به شهر بولونیا (۵۹) و سپس پادوئا (۶۰)، رفته بود — نیز تحت تأثیر قرار داد. او خود را به شیوه لاتین معرفی می‌کرد: نیکلاس کوپرنیکوس (۶۱). کوپرنیک جوان مجسطی بطلمیوس را مطالعه می‌کند و شیفته آن می‌شود. تصمیم می‌گیرد زندگی‌اش را وقف اخترشناسی کند و پا جای پای بطلمیوس بزرگ بگذارد.

حالا شرایط مهیاست و هزار سال پس از بطلمیوس، کوپرنیک می‌تواند قدمی رو به جلو بردارد که نسل‌های پیشین اخترشناسان هندی، عرب و پارس نتوانستند. وی علاوه بر یاد گرفتن، اعمال کردن و اضافه کردن اصلاحات کوچکی به سیستم بطلمیوسی، آن را با شجاعت عمیقاً متحول و تماماً اصلاحش کرد. کوپرنیک به جای اینکه بگوید اجرام سماوی به دور زمین می‌چرخند، نسخه بازبینی‌شده و اصلاح‌شده‌ای از مجسطی بطلمیوس نوشت که در آن خورشید در مرکز است و زمین، به همراه دیگر سیاره‌ها، به دور آن می‌گردد.

بدین ترتیب، کوپرنیک امیدوار است محاسبات بهتر و دقیق‌تر شوند. در واقع محاسبات او بهتر از بطلمیوس نشدند، بلکه حتی ضعیف‌تر هم عمل کردند. اما در هر صورت ایده او منطقی بود: یوهانس کپلر در نسل بعدی ثابت می‌کند که می‌توان کاری کرد تا سیستم کوپرنیک بهتر از سیستم بطلمیوس عمل کند. کپلر موشکافانه مشاهدات جدید و دقیق را تحلیل می‌کند و ثابت می‌کند با چند قانون جدید ریاضی می‌توان با دقتی بسیار بیشتر از دوران باستان، حرکت سیاره‌ها را به دور خورشید توصیف کرد. حالا در سال ۱۶۰۰ به سر می‌بریم و بشر برای اولین بار می‌فهمد چگونه کاری را بهتر از اسکندریه یک هزار سال پیش انجام دهد.

وقتی کپلر در سرمای شمال مشغول محاسبه حرکت‌ها در آسمان است، در ایتالیا این گالیلئو گالیله است که علم مدرن را پروبال می‌دهد. از هلند برای گالیله ایتالیایی، کوشا، اهل مباحثه، منطقی، بسیار با فرهنگ، تیزهوش و سرشار از نوآوری، اختراعی — به نام تلسکوپ — ارسال می‌شود. گالیله با آن تاریخ بشر را متحول می‌کند. آن را به سوی آسمان می‌گیرد.

او مانند روی در فیلم بلید رانر (۶۲)، چیزهایی را می‌بیند که ما مردم باور نمی‌کنیم: حلقه‌هایی اطراف زحل، کوه‌هایی روی ماه، اهله زهره، قمرهایی که دور مشتری می‌گردند... هرکدام از این پدیده‌ها ایده‌های کوپرنیک را باورپذیرتر می‌کند. ابزارهای علمی چشمان کوتاه‌بین بشر را به دنیایی گسترده‌تر و گوناگون‌تر از هرچه تا کنون دیده بود، باز می‌کند.

اما شاهکار گالیله نتیجه‌گیری منطقی از جهان‌بینی انقلابی کوپرنیک بود: گالیله استدلال می‌کند که زمین سیاره‌ای مانند دیگر سیاره‌هاست، اگر حرکات در آسمان‌ها از قوانین دقیق ریاضی پیروی کنند و اگر زمین سیاره‌ای مانند دیگر سیاره‌ها و در نتیجه قسمتی از آسمان‌ها باشد، پس باید قوانین ریاضی دقیقی بر حرکات اجسام روی زمین نیز حاکم باشد.

گالیله که از عقلانی بودن طبیعت و دیدگاه افلاطونی - فیثاغورثی - که مطابق آن دیدگاه می‌توان طبیعت را با ریاضیات درک کرد - مطمئن است، تصمیم می‌گیرد در مورد چگونگی حرکت اجسام روی زمین هنگام رها شدن مطالعه کند؛ یعنی وقتی سقوط می‌کنند. او که متقاعد شده بود باید یک قانون ریاضی مربوط به این موضوع وجود داشته باشد، مصمم می‌شود با آزمون و خطا آن را بیابد. برای نخستین بار در تاریخ بشریت یک آزمایش طراحی می‌شود. علم تجربی با گالیله آغاز می‌شود. آزمایشش ساده است: او اجسام را به پایین می‌اندازد؛ یعنی به قول ارسطو می‌گذارد حرکت طبیعی خود را دنبال کنند و تلاش می‌کند با دقت سرعت سقوطشان را به دست آورد.

نتیجه مهم است: بر خلاف تصور عموم اجسام با سرعت ثابتی سقوط نمی‌کنند؛ بلکه در ابتدای سقوط سرعتشان به مرور زیاد می‌شود. در این مرحله سرعت ثابت نیست، بلکه شتاب، یعنی میزان افزایش سرعت، ثابت است. به طرزی جادویی، معلوم می‌شود این شتاب برای همه اجسام برابر است. گالیله برای اولین بار به طور تقریبی این شتاب را اندازه می‌گیرد و مقدار ثابت آن را به دست می‌آورد. مقدار آن تقریباً برابر $9/8$ متر بر مجذور ثانیه است، یعنی در هر ثانیه از سقوط سرعت جسم $9/8$ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این عدد را به خاطر بسپارید.

این اولین قانون ریاضی است که برای اجسام روی زمین کشف شد: قانون سقوط اجسام. (۶۳) تا اینجا فقط قوانین ریاضی برای حرکت سیاره‌ها کشف شده بود. کمال ریاضیاتی دیگر محدود به آسمان‌ها نیست.

اما بهترین نتیجه هنوز حاصل نشده است و آیزاک نیوتن آن نتیجه را کشف خواهد کرد. نیوتن نتایج کار گالیله و کپلر را با تیزبینی مطالعه می‌کند و با ترکیب آن‌ها به گنج نهان دست می‌یابد. همان‌طور که خودش در اصول ریاضی فلسفه طبیعی (۶۴)، که پایه‌گذار علم مدرن است، بیان می‌کند می‌توانیم استدلالش را به صورت «ماه کوچک» دنبال کنیم.

نیوتن می‌نویسد که فرض کنید زمین، مانند مشتری، ماه‌های زیادی داشت. غیر از ماه واقعی زمین ماه‌های دیگری را فرض کنید؛ به خصوص

یک ماه کوچک که در نزدیک‌ترین فاصله از زمین، درست بالای قلّه کوه‌ها، در گردش است. سرعت حرکت این ماه چقدر خواهد بود؟ یکی از قوانینی که کپلر کشف کرد شعاع مدار، یعنی زمان یک چرخش کامل، را شرح می‌داد. (۶۵) ما شعاع مدار ماه واقعی (هیپارخوس در دوران باستان آن را حساب کرده بود) و دوره‌اش را (یک ماه) می‌دانیم. شعاع مدار ماه کوچک را (شعاع زمین که اراتوستنس آن را در دوران باستان اندازه‌گیری کرد) می‌دانیم. با یک تناسب ساده می‌توانیم مدار گردش ماه کوچک را حساب کنیم. پاسخ یک ساعت و نیم است. ماه کوچک هر یک ساعت و نیم یک‌بار به طور کامل دور زمین می‌چرخد.

جسمی که به دور جسم دیگری می‌گردد، مستقیم حرکت نمی‌کند: جهت‌گیری‌اش مدام تغییر می‌کند و تغییر جهت یک شتاب است. ماه کوچک به سمت مرکز زمین شتاب می‌گیرد. محاسبه این شتاب ساده است. (۶۶) نیوتن آن را محاسبه می‌کند و نتیجه... $9/8$ متر بر مجذور ثانیه است! همان شتابی که گالیله برای سقوط اجسام به دست آورده بود.

آیا این موضوع اتفاقی است؟ نیوتن استدلال می‌کند که ممکن نیست این‌گونه باشد. اگر معلول — یعنی شتاب $9/8$ متر بر مجذور ثانیه رو به پایین — یکسان باشد پس علت هم باید یکی باشد. بنابراین: نیرویی که باعث می‌شود ماه کوچک در مدارش به دور زمین بچرخد، همان نیرویی است که باعث می‌شود اجسام به طرف زمین سقوط کنند.

ما این نیرو را، که باعث سقوط اجسام می‌شود، گرانش می‌نامیم. نیوتن درمی‌یابد همین گرانش است که ماه کوچک را به دور زمین می‌گرداند. بدون این گرانش ماه کوچک در خطی مستقیم حرکت می‌کرد و از مدار خارج می‌شد. اما در این صورت، ماه واقعی هم باید بر اثر گرانش دور زمین بچرخد! و مشتری هم ماه‌هایی را که به دورش می‌گردند به خود جذب کند و خورشید هم سیاره‌هایی را که به دورش می‌چرخند، به خود جذب کند! بدون این جاذبه همه اجرام سماوی در یک خط راست حرکت می‌کنند. پس عالم فضایی بزرگ است که در آن اجرام به وسیله نیروها یکدیگر را جذب می‌کنند؛ نیرویی در سراسر عالم وجود دارد: گرانش — هر جسمی تمام جسم‌های دیگر را جذب می‌کند.

دیدگاهی گسترده شکل می‌گیرد. ناگهان، پس از هزار سال دیگر آسمان‌ها و زمین از هم جدا نیستند؛ بر خلاف تصور ارسطو «سطح طبیعی» وجود ندارد؛ جهان مرکزی ندارد؛ چیزهایی که رها می‌شوند دیگر دنبال جایگاه طبیعی‌شان نیستند، بلکه تا ابد در یک خط راست حرکت می‌کنند.

نیوتن با محاسبه ساده‌ای پیرامون ماه کوچک به این نتیجه رسید اندازه نیروی گرانش با تغییر فاصله، تغییر می‌کند. (۶۷) او با استفاده از عددی که ما امروزه ثابت نیوتن می‌نامیم و آن را با حرف «G»، مخفف «Gravity»، نشان می‌دهیم توانست مقدار این نیرو را محاسبه کند. گرانش روی زمین باعث سقوط اجسام می‌شود و در آسمان‌ها، سیاره‌ها و ماهواره‌ها را در مدارشان نگه می‌دارد. نیرو یکسان است.

این امر به معنی نابودی ساختار فکری جهان ارسطو است که در قرون وسطا دیدگاه حاکم به شمار می‌آمد. برای مثال به عالم دانته بنگرید: درست مانند عالم ارسطو، زمین یک کره در مرکز عالم است و کرات آسمانی به دور آن در گردش‌اند. دیگر نه. حالا عالم فضایی نامتناهی، بزرگ و پر از ستاره است که محدودیت و مرکزی ندارد. اجسام مادی در این عالم آزادانه و مستقیم در حرکت‌اند، مگر اینکه نیروی حاصل از جسم دیگری آن‌ها را منحرف کند. اشاره به اتم‌گرایی باستان در آثار نیوتن آشکار است، هرچند با تعبیر و اصطلاحات متداولی بیان شده است:

به نظرم در ابتدا، خداوند ماده را به صورت ذرات محکم، دارای جرم، مقاوم، نفوذناپذیر و متحرک با شکل‌ها، اندازه‌ها و خصوصیات مختلف و با نسبت‌های خاصی در تناسب با فضا خلق کرد... (۳)

جهان مکانیک نیوتنی ساده است و در شکل‌های ۲.۱ و ۲.۲ خلاصه شده. همان جهان دموکریتی است که از نو زاده شده است. جهانی که از فضایی گسترده، یکپارچه و بدون تغییر ساخته شده است و ذرات مدام به این‌سو و آن‌سو می‌روند و برهم‌کنش دارند. فقط همین. لئوپاردی (۶۸) در مورد این جهان سروده:

... اینجا به تماشا نشستهام

و پشت پرچین، فضای بی‌کرانی می‌بینم

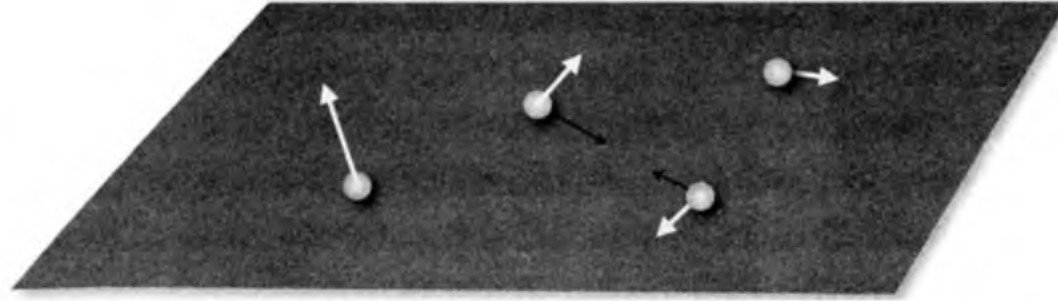
و سکوتی فراانسانی و عمیق‌ترین آسودگی و آرامش

در اندیشه‌ام شکل گرفته است... (۴)

اما این نقطه نظر از دیدگاه دموکریت بسیار قوی تر است، چون تنها تصویر ذهنی ای نیست که نظم جهان را توصیف می کند: حالا با ریاضیات، میراث فیثاغورث، و با دستاوردهای ارزشمند فیزیک ریاضیاتی اخترشناس های اسکندریه ترکیب شده است. جهان نیوتن همان جهان دموکریت است که به زبان ریاضی توصیف شده است.



شکل ۲.۱ دنیا از چه ساخته شده است؟



شکل ۲.۲ جهان نیوتن: ذراتی که با گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند و نیروها آن‌ها را جذب می‌کنند.

نیوتن بی‌درنگ می‌پذیرد که علوم جدید مدیون علوم باستانی‌اند. برای مثال در اولین سطرهای The System of the World او به درستی خاستگاه انقلاب کوپرنیک را به اندیشه‌های باستانی نسبت می‌دهد: «فیلسوف‌های باستان معتقد بودند در بالاترین قسمت‌های آسمان ستاره‌ها ثابت و بی‌حرکت‌اند و زمین به دور خورشید می‌گردد.» هرچند گاهی مطمئن نیست چه کسی چه کاری را در گذشته انجام داده و — گاهی بجا و گاهی نابجا — از فیلولائوس (۶۹)، آریستارخوس ساموسی، آناکسیماندر، افلاطون، آناکساگوراس (۷۰)، دموکریت و نوما پومپیلیوس (۷۱) دانا، پادشاه رومی‌ها، نقل‌قول می‌کند.

این چهارچوب فکری جدید نیوتن بسیار فراتر از انتظارات عمل می‌کند. تمام تکنولوژی قرن نوزدهم و جهان مدرن ما تا حد زیادی مدیون فرمول‌های نیوتن است. سه قرن گذشته است، اما هنوز هم ساخت پل‌ها، قطارها، آسمان‌خراش‌ها، موتورهای هیدرولیک را مدیون معادله‌های نیوتن هستیم. همچنین پرواز هواپیماها، پیش‌بینی وضع هوا، پیش‌بینی وجود سیاره‌ای پیش از دیدن آن و فرستادن سفینه به

مریخ... جهان مدرن بدون گذر از ماه کوچک نیوتن زاده نمی‌شد.

درک جدیدی از جهان و شیوه‌ای تازه برای اندیشیدن بستر ساز اشتیاق ولتر و کانت در عصر روشنگری شد، راهی مؤثر برای پیش‌بینی جهان: این‌ها همگی میراث انقلاب بزرگ نیوتنی بوده‌اند و خواهند ماند.

حال به نظر می‌آید کلید نهایی درک حقیقت پیدا شده است: جهان فقط فضایی وسیع و نامتناهی است و با گذر زمان ذره‌ها حرکت می‌کنند و از طریق نیروها یکدیگر را جذب می‌کنند. می‌توانیم با نوشتن معادلاتی دقیق این نیروها را توصیف کنیم. کارآمدی این معادلات اثبات شد. حتی در قرن نوزدهم مردم می‌گفتند نیوتن علاوه بر اینکه یکی از باهوش‌ترین و بلندنظرترین انسان‌ها بود، بسیار خوش‌شانس نیز بود، چون تنها یک سیستم بنیادی قوانین وجود دارد و قرعه یافتنش به نام او افتاد. همه‌چیز روشن و واضح به نظر می‌آمد.

اما آیا واقعاً همه‌اش همین بود؟

مایکل: میدان‌ها و نور

نیوتن می‌دانست معادلاتش تمام نیروهای موجود در طبیعت را توصیف نمی‌کنند. غیر از گرانش، نیروهای دیگری نیز وجود دارند که بر اجسام اثر می‌گذارند. اجسام فقط موقع سقوط به حرکت در نمی‌آیند. نخستین مسئله حل‌نشده نیوتن درک دیگر نیروها و مشخص کردن آنچه در اطرافمان رخ می‌دهد، بود. این مسئله تا قرن نوزدهم باید چشم‌به‌راه پاسخ می‌ماند و قرن نوزدهم نیز دو غافلگیری به همراه داشت.

اولین غافلگیری این بود که تنها یک نیرو، غیر از گرانش، بر تقریباً تمام پدیده‌هایی که می‌بینیم حکمرانی می‌کند: نیرویی که امروزه آن را الکترومغناطیس می‌نامیم. الکترومغناطیس همان نیرویی است که ماده سازنده اجسام جامد را کنار هم نگه می‌دارد، اتم‌ها را در مولکول و الکترون‌ها را در اتم. الکترومغناطیس پایه شیمی و ماده زنده است. نیرویی است که در نورون‌های مغزمان وجود دارد و بر پردازش اطلاعات مربوط به جهانی که مشاهده می‌کنیم و نحوه تفکرمان حکمرانی می‌کند. همیشه این نیرو است که با ایجاد اصطکاک جسمی را که سر می‌خورد نگه می‌دارد، فرود چتر باز را آهسته‌تر می‌کند، باعث کار کردن موتورهای الکتریکی و احتراقی می‌شود (۷۲) یا ما را قادر می‌سازد چراغ‌ها را روشن کنیم و به رادیو گوش دهیم.

دومین و بزرگ‌ترین غافلگیری مهم در داستانی که روایت می‌کنم این است که برای درک این نیرو باید در جهان نیوتن اصلاح مهمی صورت گیرد: اصلاحی که فیزیک مدرن و مهم‌ترین ایده‌ای که برای فهم این کتاب باید روی آن تمرکز کنیم — یعنی ایده میدان — از آن زاده می‌شود.

یک یا بهتر است بگوییم دو بریتانیایی دیگر به نحوه عملکرد نیروی الکترومغناطیس پی بردند. عجیب‌ترین زوج علمی — مایکل فارادی (۷۳) و جیمز کلرک ماکسول (۷۴).

مایکل فارادی یک لندنی تهی‌دست است که تحصیلات آکادمیک ندارد و قبلاً در یک صحافی کار می‌کرد و اکنون در یک آزمایشگاه مشغول به کار است. در آزمایشگاه عملکرد درخشانی از خود نشان می‌دهد، اعتماد استادش را جلب می‌کند و عالی‌ترین آزمایشگر و بزرگ‌ترین ایده‌پرداز فیزیک قرن نوزدهم می‌شود. او بدون داشتن دانش ریاضی یکی از بهترین کتاب‌های فیزیک تاریخ را، عملاً بدون هیچ

معادله‌ای، می‌نویسد. او فیزیک را با چشم ذهنش می‌بیند و با چشم ذهنش جهان‌ها را خلق می‌کند. جیمز کلرک ماکسول یک اشراف‌زاده ثروتمند اسکاتلندی و از بزرگ‌ترین ریاضی‌دان‌های قرن است. با اینکه هم از نظر طرز فکر و هم از نظر خاستگاه اجتماعی بین این دو شکاف عمیقی وجود دارد، آن‌ها موفق می‌شوند یکدیگر را بفهمند – و با هم، با ترکیب دو نوع نبوغ متفاوت، راهی به سوی فیزیک مدرن باز کنند.



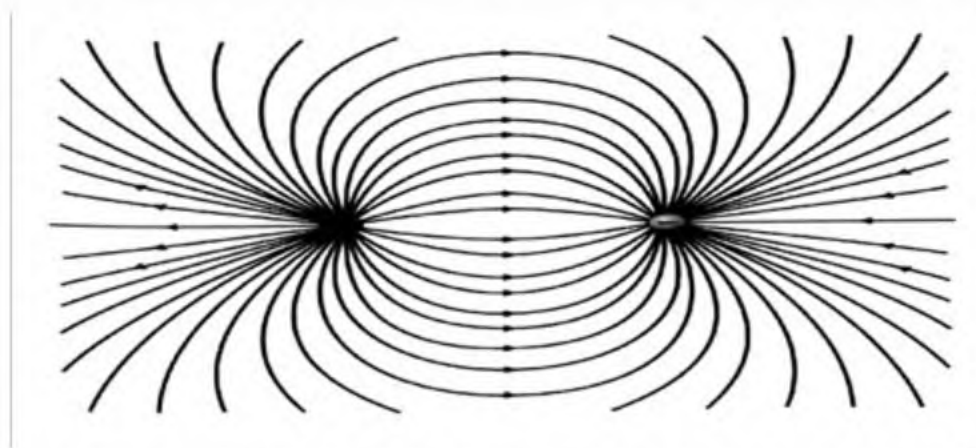
شکل ۲.۳ مایکل فارادی و جیمز کلرک ماکسول

در آغاز قرن هجدهم هرآنچه در مورد الکتریسیته و مغناطیس می‌دانستند به چند ترفند سرگرم‌کننده و کم‌اهمیت خلاصه می‌شد: میله‌های شیشه‌ای که قطعه‌های کاغذ را به خود جذب می‌کنند و آهن‌رباهایی که یکدیگر را جذب و دفع می‌کنند. مطالعه الکتریسیته و مغناطیس در قرن هجدهم به کندی ادامه پیدا کرد و به قرن نوزدهم کشیده شد. در قرن نوزدهم فارادی را مشغول کار در آزمایشگاهش که پر از ماسوره‌ها، سوزن‌ها، چاقوها و جعبه‌های فلزی بود، می‌یابیم. او در آنجا اشیای مغناطیسی و الکتریکی را می‌کاود تا فرایند جذب و دفع را درک کند. او که مرید نیوتن است تلاش می‌کند نیروی بین اجسام باردار و مغناطیسی را درک کند. اما به مرور، با راهنمایی دستانش در تماس نزدیک با این اجسام، به بینشی می‌رسد که تبدیل به پایه و اساس فیزیک مدرن می‌شود. او چیز تازه‌ای «می‌بیند».

بینش او این است: نباید مانند نیوتن تصور کنیم که نیروها مستقیماً بر اجسام دور از هم تأثیر می‌گذارند. در عوض باید تصور کنیم چیزی در تمام فضا پخش شده که اجسام الکتریکی و مغناطیسی آن را تغییر می‌دهند و این تغییر باعث جذب و دفع دیگر اجسام می‌شود. امروزه این ماهیت را، که فارادی از وجودش آگاه شد، میدان می‌نامیم.

بنابراین، یک میدان چیست؟ فارادی آن را به صورت دسته‌ای از خطوط بسیار باریک (بی‌نهایت باریک) می‌بیند که فضا را پر می‌کنند؛ یک تار عنکبوت نامرئی و عظیم که همه‌چیز را در اطرافمان احاطه می‌کند. او این خطوط را «خطوط نیرو» می‌نامد، چون به نوعی این خطوط «نیرو را حمل می‌کنند»: آن‌ها نیروهای الکتریکی و مغناطیسی را از جسمی به جسم دیگر انتقال می‌دهند، گویی ریسمان‌هایی باشند که کشیده و فشرده می‌شوند (شکل ۲.۴). جسمی با بار الکتریکی (مثلاً یک میله شیشه‌ای که باردار شده است) میدان‌های (خطوط) الکتریکی و مغناطیسی اطرافش را به دور خود می‌تاباند و باعث می‌شود این میدان‌ها به هر جسم بارداری که در آن‌ها قرار گرفته‌اند نیرویی اعمال کنند. از این رو، دو جسم

باردار دور از هم یکدیگر را مستقیماً جذب یا دفع نمی‌کنند، بلکه از طریق واسطی که بینشان قرار گرفته این کار را انجام می‌دهند.



شکل ۲.۴ خطوط میدان فضا را پر می‌کنند. دو بار الکتریکی از طریق آن‌ها برهم‌کنش دارند. خطوط نیروی میدان نیروی بین دو جسم را «حمل» می‌کنند.

اگر دو آهن‌ربا را در دست بگیرید و با آن‌ها بازی کنید، با نزدیک و دور کردن مکرر دو آهن‌ربا و احساس جاذبه و دافعه بین آن‌ها می‌توانید به راحتی بینش فارادی را تجربه کنید و از این طریق تأثیرات میدان بین دو آهن‌ربا را «حس» کنید. این ایده اساساً با تصور نیوتنی از نیرویی که بین دو جسم دور وجود دارد تفاوت دارد، اما احتمالاً نیوتن شیفته‌اش می‌شد. نیوتن در مورد این جاذبه از راه دور که خودش آن را معرفی کرده بود، سرگشته بود. زمین چگونه ماه را از این فاصله جذب می‌کند؟ چطور

خورشید، بدون تماس، زمین را جذب می‌کند؟ او در نامه‌ای نوشته بود:

نمی‌فهمم ماده‌ای بی‌جان و فاقد قدرت تعقل بدون دخالت چیز دیگری که مادی نیست، چگونه روی ماده دیگری اثر می‌گذارد و آن را می‌راند، بدون آنکه مستقیماً در تماس باشند. (۵)

و کمی پایین‌تر در همان صفحه می‌خوانیم:

گرانش باید در ذات، اساس و طبیعت ماده باشد تا جسمی بتواند از میان خلأ و فاصله‌ای دور روی جسم دیگری اثر بگذارد، بدون دخالت هیچ چیز دیگری که نیرو و عمل را از یکی به دیگری منتقل کند. به نظر من چرند است. فکر می‌کنم هرکسی که در موضوعات فلسفی تبحر داشته باشد، این موضوع را نمی‌پذیرد. گرانش باید واسطی داشته باشد که همیشه طبق قوانین مشخص عمل می‌کند؛ اما تعیین مادی یا غیرمادی بودن این واسط را به عهده خوانندگانم گذاشته‌ام. (۶)

نیوتن شاهکار خود را — که تا قرن‌ها بعد بزرگ‌ترین دستاورد علم به شمار می‌آمد — چرند می‌خواند! او می‌داند پشت‌پرده نظریه‌اش موضوع دیگری در جریان است، اما هیچ نمی‌داند چیست و پاسخ این پرسش را... «به عهده خوانندگانم گذاشته‌ام»!

از ویژگی‌های یک نابغه آگاهی از محدودیت یافته‌های خود است، حتی اگر آن یافته‌ها دستاورد عظیمی مانند کشف قوانین حرکت و گرانش جهانی نیوتن باشد. نظریه نیوتن چنان عملکرد خوبی داشت و چنان مفید بود که تا دو قرن هیچ‌کس زحمت بازنگری‌اش را به خود نداد. تا اینکه فارادی، «خواننده‌ای» که نیوتن یافتن پاسخ را به عهده او گذاشته بود، کلید قابل‌قبولی برای درک چگونگی جذب و دفع اجسام از فواصل دور پیدا کرد. اینشتین بعدها راه‌حل عالی فارادی را بر نظریه گرانش نیوتن اعمال خواهد کرد.

فارادی با معرفی این ماهیت تازه — یعنی میدان — راهش را از جهان بینی باوقار و ساده نیوتن جدا می‌کند: جهان دیگر فقط شامل ذراتی نیست که با گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند. حالا یک بازیگر دیگر — یعنی میدان — وارد صحنه می‌شود. فارادی می‌داند که چه قدم بزرگی برمی‌دارد. در قسمت‌های زیبایی از کتابش می‌پرسد آیا ممکن است این خطوط نیرو واقعاً وجود داشته باشند؟ پس از تردیدها و ملاحظات مختلف، به این نتیجه می‌رسد که به نظرش آن‌ها واقعاً وجود دارند، اما «با تردید و احتیاطی که هنگام مواجهه با پرسش‌های دشوار علمی ضروری است.» (۷) او آگاه است که پس از دو قرن پیروزی بی‌وقفه فیزیک نیوتنی، صرفاً اصلاح ساختار جهان را ارائه می‌دهد (شکل ۲.۵).



شکل ۲.۵ جهان فارادی و ماکسول: ذرات و میدان‌ها با گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند.

ماکسول سریعاً متوجه می‌شود که این ایده چه جواهری است. او بینش فارادی را، که فقط با کلمات توضیح داده بود، به یک صفحه معادله برمی‌گرداند. (۷۵) این معادلات با نام معادلات ماکسول شناخته می‌شوند. آن‌ها رفتار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را توصیف

می‌کنند: معادل ریاضی «خطوط فارادی». (۷۶)

امروزه برای توضیح تمام پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی، طراحی آنتن‌ها، رادیوها، موتورهای الکتریکی و کامپیوترها از معادلات ماکسول استفاده می‌شود. موضوع به همین‌جا ختم نمی‌شود: برای توصیف عملکرد اتم‌ها (چگونگی کنار هم قرار گرفتنشان به وسیله نیروهای الکتریکی)، چگونگی به هم پیوستن ذرات تشکیل‌دهنده یک سنگ یا چگونگی کارکرد خورشید به همین معادلات نیاز است. این موضوع انواع بسیار زیادی از پدیده‌ها را توصیف می‌کند. تقریباً هرچیزی که وقوعش را مشاهده می‌کنیم — جز گرانش و معدود چیزهای دیگر — با معادلات ماکسول به خوبی توصیف می‌شوند.

اما هنوز تمام نشده است. هنوز احتمالاً زیباترین دستاورد علم مانده: معادلات ماکسول ماهیت نور را به ما نشان می‌دهند.

ماکسول می‌فهمد معادلاتش پیش‌بینی می‌کنند که خطوط فارادی می‌توانند مرتعش شوند و نوسان کنند، درست مانند امواج دریا. او سرعت حرکت نوسان‌های خطوط فارادی را محاسبه می‌کند و نتیجه برابر است با... سرعت نور! چرا؟ ماکسول می‌گوید چون نور چیزی نیست جز ارتعاش سریع خطوط فارادی! فارادی و ماکسول نه‌تنها کشف کردند که الکتریسیته و مغناطیس چگونه رفتار می‌کنند، بلکه به همین طریق به ماهیت نور، به عنوان نتیجه اتفاقی یافته‌شان پی بردند.

ما جهان اطرافمان را رنگی می‌بینیم. رنگ چیست؟ به زبان ساده، نور فرکانس (سرعت نوسان) موج الکترومغناطیسی است. اگر این موج سریع‌تر نوسان کند نور آبی‌تر می‌شود. اگر کمی آرام‌تر نوسان کند نور قرمزتر می‌شود. رنگی که ما می‌بینیم یک واکنش روانی - فیزیکی سیگنال عصبی است که گیرنده‌های چشم‌هایمان تولید می‌کنند و باعث می‌شود بین موج‌های الکترومغناطیسی با فرکانس‌های متفاوت تمایز قائل شویم.

کاش بدانم وقتی ماکسول فهمید معادلاتش — که برای توصیف عملکرد ماسوره‌ها، جعبه‌های کوچک و سوزن‌های ریز آزمایشگاه فارادی نوشته شده بود — به توضیح طبیعت نور و رنگ منجر شد چه احساسی پیدا کرد...

بنابراین، نور چیزی نیست جز ارتعاش سریع شبکه تار عنکبوتی خطوط فارادی که به موج‌های کوچک سطح دریاچه هنگام وزیدن باد شباهت

دارد. اینکه ما خطوط فارادی را «نمی‌بینیم» چندان درست نیست. ما فقط ارتعاش خطوط فارادی را می‌بینیم. «دیدن» یعنی دریافت نور و نور حرکت خطوط فارادی است. هیچ‌چیزی بدون یک حامل، از مکانی در فضا به مکانی دیگر نمی‌پرد. اگر در ساحل کودکی را مشغول بازی می‌بینیم، تنها به خاطر دریاچه خطوط مرتعش بینمان است که تصویر او به ما می‌رسد. آیا جهان حیرت‌آور نیست؟

این کشف خارق‌العاده است، اما باز هم داستان به اینجا ختم نمی‌شود. نتیجه نهایی این کشف ارزش عینی و بی‌نظیری برای ما دارد. ماکسول درمی‌یابد معادلاتش پیش‌بینی می‌کنند که خطوط فارادی می‌تواند با فرکانس‌های بسیار پایین‌تر، یعنی کندتر از نور، ارتعاش کند. در نتیجه باید موج‌های دیگری وجود داشته باشد که هنوز کسی ندیده است، موج‌هایی که از حرکت ذرات با بار الکتریکی تولید می‌شوند و به نوبه خود بار الکتریکی را جابه‌جا می‌کنند. می‌توان یک بار الکتریکی را اینجا به نوسان درآورد و موجی تولید کرد که جریان الکتریکی را به آنجا می‌برد. تنها چند سال بعد فیزیک‌دانی آلمانی به نام هاینریش هرتز این موج‌ها را، که ماکسول وجودشان را به طور نظری پیش‌بینی کرده بود، کشف کرد و تنها چند سال بعد از او گولیلمو مارکونی نخستین رادیو را ساخت.

در تمام تکنولوژی مخابراتی امروز — رادیو، تلویزیون، تلفن، کامپیوتر، ماهواره، وای‌فای، اینترنت و غیره — پیش‌بینی ماکسول به کار می‌رود؛ معادلات ماکسول پایه تمام محاسبات مهندسان مخابرات است. جهان معاصر که متکی بر مخابرات است مدیون بینش‌ها و شهود یک صحاف لندن فقیر است — کاوشگر زیرک اندیشه‌ها با تخیلی ژرف — که با چشم ذهنش خطوط را دید؛ کارهای ریاضی‌دانی خبره که این بینش را به زبان معادلات بیان کرد و فهمید امواج این خطوط می‌توانند در چشم بر هم زدن اخبار را از یک سوی زمین به سوی دیگر آن ببرند.



شکل ۲.۶ جهان از چه ساخته شده است؟

تمام تکنولوژی فعلی ما بر پایه مفهومی فیزیکی — یعنی امواج الکترومغناطیسی — شکل گرفته است که به صورت تجربی کشف نشد: ماکسول صرفاً هنگام تلاش برای ارائه توضیحی ریاضیاتی در خصوص بینشی که فارادی از کار با ماسوره‌ها و سوزن‌ها به دست آورده بود، این امواج را پیش‌بینی کرد. این قدرت خیره‌کننده فیزیک نظری است.

جهان تغییر کرده است: فضا دیگر فقط از ذرات ساخته نشده است، بلکه ذرات و میدان‌ها فضا را تشکیل می‌دهند (شکل ۲.۶). تغییر کوچکی به نظر می‌آید، اما چند دهه بعد یک مرد جوان یهودی، که تمام جهان را خانه خود می‌داند، نتایجی از آن استخراج خواهد کرد که حتی از تخیل شگرف فارادی هم فراتر خواهد رفت و جهان نیوتن را بیش از پیش به لرزه در خواهد آورد.

بخش دوم: آغاز انقلاب

فیزیک قرن بیستم نگاه نیوتنی به جهان را از اساس تغییر داد. قدم‌های جدیدی که در این زمینه برداشته شده است پایه‌های بخش بزرگی از تکنولوژی امروز را تشکیل می‌دهد. عمیق شدن شناختمان از جهان بر پایه دو نظریه استوار است: نسبیت عام و مکانیک کوانتومی. برای درک این دو باید تصورات پیشینمان را در مورد جهان با شهامت از نو ارزیابی کنیم: فضا و زمان در نسبیت، ماده و انرژی در نظریه کوانتومی.

در این بخش از کتاب می‌خواهم دو نظریه را با اندکی جزئیات توضیح دهم. تلاش می‌کنم معنای حقیقی آن‌ها را تبیین کنم و تحول مفهومی را که به وجود می‌آورند، برجسته کنم. اینجاست که جادوی فیزیک قرن بیستم آغاز می‌شود. مطالعه و تلاش برای فهم عمیق آن‌ها ماجراجویی مسحورکننده‌ای است.

این دو نظریه — نسبیت و کوانتا — بستری را برای نظریه گرانش کوانتومی ایجاد می‌کنند. این نظریات راهی است که از آن طریق می‌خواهیم به جلو حرکت کنیم.

۳. آلبرت

پدر آلبرت اینشتین در ایتالیا نیروگاه‌های برق می‌ساخت. هنگام نوجوانی آلبرت معادلات ماکسول تنها چند دهه قدمت داشتند، اما انقلاب صنعتی ایتالیا تازه شروع شده بود و این معادلات پایه کار توربین‌ها و ترانسفورماتورهای محسوب می‌شد که پدر آلبرت می‌ساخت. قدرت این فیزیک جدید روشن و واضح بود.

آلبرت سرکش بود. پدر و مادرش او را در آلمان تنها گذاشتند تا به دبیرستان برود، اما نظام آموزشی آلمان به نظرش بسیار خشک و نظامی بود؛ نمی‌توانست حاکمیت مدرسه را تحمل کند و تحصیلاتش را رها کرد. به والدینش در پاپویای ایتالیا پیوست و وقتش را به بطالت گذراند. سپس برای ادامه تحصیل به سوئیس رفت و بر خلاف میلش در ابتدا نتوانست وارد دانشگاه پلی‌تکنیک زوریخ شود. بعد از تمام شدن تحصیلات دانشگاهی‌اش نتوانست شغلی به عنوان محقق بیابد و برای اینکه بتواند با دختری که دوستش داشت زندگی کند، در اداره ثبت اختراع شهر برن شغلی پیدا کرد.

شغل درخوری برای یک فارغ‌التحصیل فیزیک نبود، اما به آلبرت زمان داد تا بیندیشد و به صورت مستقل کار کند. او می‌اندیشید و کار می‌کرد. به هر حال این همان کاری بود که از ابتدای جوانی‌اش به آن اشتغال داشت: پیش از این به جای خواندن کتاب‌های مدرسه‌اش Elements اقلیدس و نقد عقل محض کانت را می‌خواند. با دنبال کردن راه‌های اثبات‌شده نمی‌توان به جای جدیدی رسید.

اینشتین در بیست‌وپنج‌سالگی سه مقاله به سالنامه فیزیک ارسال می‌کند. هرکدام از این مقالات شایستگی دریافت جایزه نوبل و حتی بیشتر را داشت. هرکدام از این سه مقاله ستونی است که مؤید درک ما از جهان است. پیش‌تر در مورد اولین مقاله او صحبت کردم که در آن آلبرت جوان ابعاد اتم‌ها را محاسبه می‌کند و پس از بیست و سه قرن درستی اندیشه دموکریت را اثبات می‌کند: اینکه ماده ساختار ذره‌ای دارد.

دومین مقاله که اینشتین عمده شهرتش را مدیون آن است، مقاله‌ای است که در آن نظریه نسبیت را معرفی می‌کند. این فصل هم به نظریه نسبیت اختصاص یافته است.

در واقع دو نظریه نسبیت وجود دارد. این نظریات نخستین بار در مقاله‌ای که اینشتین بیست‌وپنج‌ساله به آن مجله فرستاد، توضیح داده

شدند: نظریه‌ای که امروزه آن را با نام «نسبیت خاص» می‌شناسیم و نظریه‌ای مهم برای تبیین ساختار فضا و زمان است. ابتدا نسبیت خاص را توضیح می‌دهم و سپس به سراغ نظریه نسبیت عام، که مهم‌ترین نظریه اینشتین است، می‌روم.

نسبیت خاص نظریه‌ای ظریف و از لحاظ مفهومی دشوار است. درک آن از نسبیت عام سخت‌تر است. خواننده عزیز لطفاً از گنگی چند صفحه آینده دلزده نشوید. این نظریه برای اولین بار نشان می‌دهد که نه تنها در دیدگاه نیوتنی چیزی جا افتاده است، بلکه این دیدگاه باید کاملاً تغییر کند — به صورتی که حتی ممکن است با عقل سلیم هم تناقض داشته باشد. نسبیت خاص اولین قدم برای بازبینی شهودی‌ترین دیدگاهمان به جهان است.

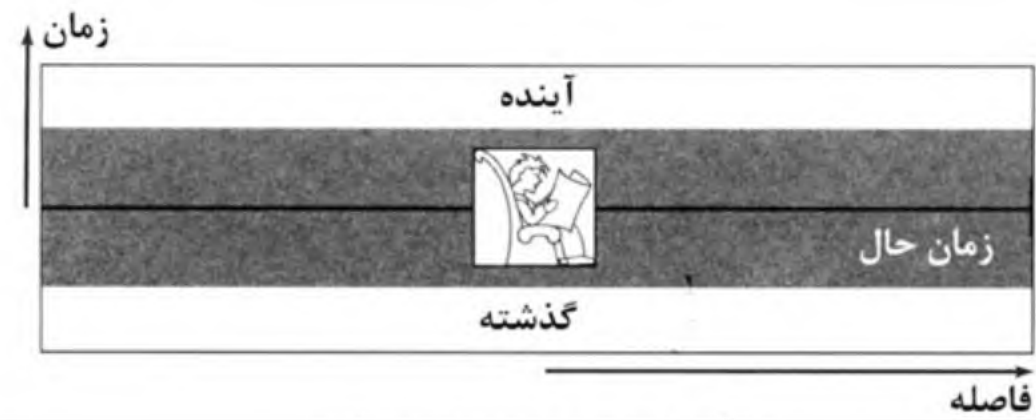
زمان حال گسترده

به نظر می‌آید نظریه‌های نیوتن و ماکسول به طور نامحسوسی یکدیگر را نقض می‌کنند. معادلات ماکسول یک سرعت را تعیین می‌کنند: سرعت نور؛ اما قوانین حرکت نیوتن با سرعتی اساسی سازگاری ندارد، چون در معادلات نیوتن شتاب وجود دارد، نه سرعت. در فیزیک نیوتن سرعت یک چیز همیشه نسبت به چیز دیگری سنجیده می‌شود. گالیله خاطرنشان کرده بود که زمین نسبت به خورشید در حرکت است، حتی اگر ما متوجه این حرکت نشویم. چون معمولاً ما «سرعت» را نسبت به زمین می‌سنجیم. به عبارتی، سرعت یک مفهوم نسبی است، یعنی سرعت یک جسم به‌خودی‌خود معنا ندارد: تنها سرعت موجود، سرعت یک جسم نسبت به یک جسم دیگر است. این چیزی است که دانش‌آموزان فیزیک در قرن نوزدهم آموختند و هنوز هم می‌آموزند. اما اگر این‌طور است، پس سرعت نور که در معادلات ماکسول تعیین شده بود، نسبت به چه چیزی سنجیده شده است؟

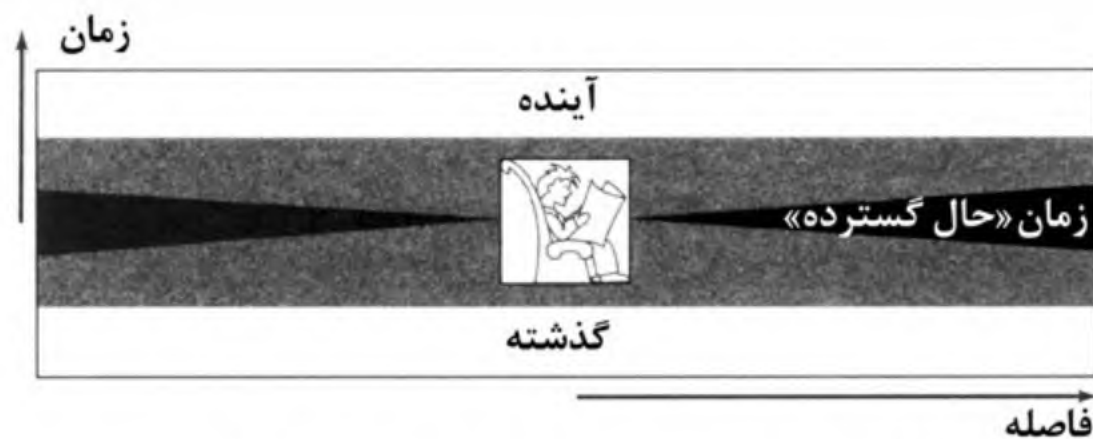
یکی از احتمالات این است که نوعی اساس جهانی وجود دارد که نور نسبت به آن حرکت می‌کند و سرعت دارد. اما پیش‌بینی‌های نظریه ماکسول به نظر مستقل از این اساس است. تمام تلاش‌های تجربی انجام‌شده در پایان قرن بیستم برای محاسبه سرعت زمین نسبت به این اساس فرضی به شکست منتهی شد.

اینشتین ادعا کرده است برای پیدا کردن راه درست هیچ آزمایشی انجام نداده، بلکه تنها به تناقض آشکار بین معادلات ماکسول و قوانین حرکت نیوتن اندیشیده است. از خود پرسید آیا راهی هست که اکتشافات مهم نیوتن و گالیله و معادلات ماکسول را با هم سازگار کرد؟ در این راه اینشتین به کشفی حیرت‌انگیز رسید. برای درک آن به تمام وقایع گذشته، حال و آینده (نسبت به لحظه‌ای که این کتاب را می‌خوانید) بیندیشید و تصور کنید که طبق شکل ۳.۱ توزیع شده‌اند.

خب، اینشتین کشف کرد این نمودار اشتباه است. در واقع همه‌چیز مطابق شکل ۳.۲ است. بین گذشته و آینده یک پیشامد (برای مثال، بین گذشته و آینده برای شما، درست در همین لحظه و در همین جایی که الان مشغول خواندن این کتاب هستید) یک «ناحیه میانی» وجود دارد، یک «زمان حال گسترده»؛ ناحیه‌ای که نه گذشته است و نه آینده. این کشف از نسبیت خاص حاصل شده است.



شکل ۳.۱ فضا و زمان پیش از اینشتین

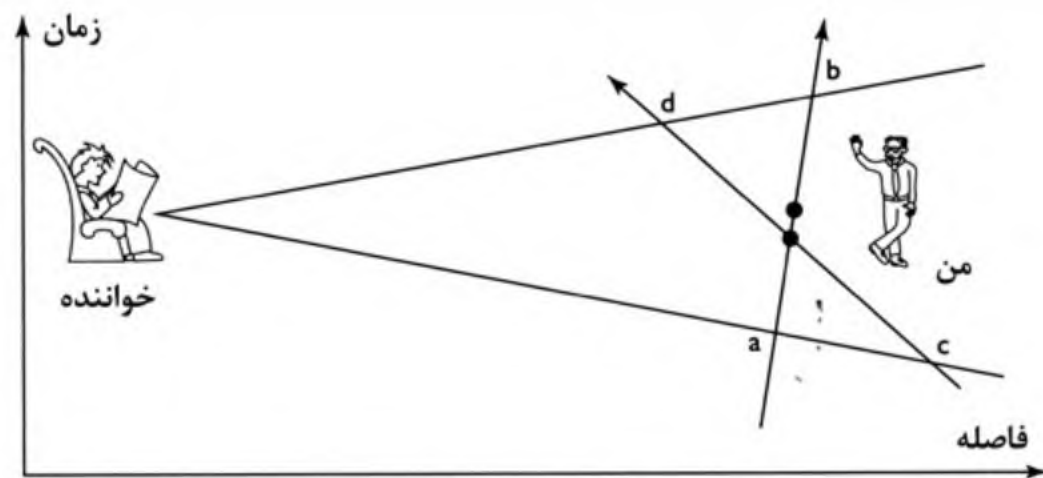


شکل ۳.۲ ساختار «فضا-زمان». برای هر ناظر «زمان حال گسترده» ناحیه میانی بین گذشته و آینده است.

طبق شکل ۳.۲، تداوم این ناحیه میانی (۷۷)، که نه در گذشته و نه در آینده شماسست، بسیار کوتاه است و بستگی به جایی دارد که یک پیشامد نسبت به شما رخ می‌دهد: هرچه این پیشامد از شما دورتر باشد، زمان حال گسترده طولانی‌تر می‌شود. خواننده عزیز، در فاصله چندمتری از نوک بینی‌تان مدت‌زمان این ناحیه میانی، که نه گذشته است و نه آینده، چیزی بیش از چند نانوثانیه نیست: یعنی تقریباً هیچ (تعداد نانوثانیه‌ها در یک ثانیه به اندازه تعداد ثانیه‌های سی سال است). این مقدار بسیار کمتر از چیزی است که بتوانیم متوجهش شویم. مدت‌زمان این ناحیه میانی در آن‌سوی اقیانوس یک‌هزارم ثانیه است که هنوز از آستانه درک ما از زمان کمتر است.

کوتاه‌ترین زمانی که ما می‌توانیم با حواسمان درک کنیم چیزی حدود یک‌دهم ثانیه است، اما روی ماه مدت این زمان حال گسترده چند ثانیه و روی مریخ ربع ساعت است، یعنی می‌توانیم بگوییم روی مریخ وقایعی هست که در همین لحظه رخ داده‌اند، وقایعی که قرار است رخ دهد و همچنین تمام وقایعی که طی یک ربع ساعت رخ می‌دهند، نه در گذشته و نه در آینده ما قرار می‌گیرند. آن‌ها جایی دیگرند. پیش‌تر هیچ‌گاه از این «جای دیگر» آگاه نبودیم، چون در نزدیکی ما این «جای دیگر» بسیار کوتاه است؛ آن‌قدر سریع نیستیم که آن را حس کنیم، اما وجود دارد و واقعی است.

به همین دلیل است که نمی‌توانیم از اینجا مکالمه‌ای روان با مریخ داشته باشیم. فرض کنید من روی مریخم و شما اینجا. من از شما چیزی می‌پرسم و به محض اینکه حرفم را شنیدید پاسخ می‌دهید؛ پاسخ شما ربع ساعت بعد از وقتی که پرسیدم به من می‌رسد. این ربع ساعت، نسبت به لحظه‌ای که پاسخ من را دادید، نه گذشته محسوب می‌شود و نه آینده. نکته کلیدی‌ای که اینشتین راجع به طبیعت متوجهش شد، این است که این ربع ساعت اجتناب‌ناپذیر است: به هیچ وجه نمی‌توان آن را کوتاه‌تر کرد. این امر در تاروپود وقایع فضا و زمان تنیده شده است: نمی‌توانیم آن را خلاصه‌تر کنیم، همان‌طور که نمی‌توانیم نامه‌ای به گذشته بنویسیم.



شکل ۳.۳ نسبیت همزمانی

عجیب به نظر می‌آید، اما جهان این‌طور است. همان‌قدر عجیب که در سیدنی مردم وارونه زندگی می‌کنند: عجیب، اما واقعی. به واقعیت‌ها عادت می‌کنیم و به مرور این واقعیت‌ها عادی و عقلانی به نظر می‌آیند. ساختار فضا و زمان این‌طور است.

از این نتیجه می‌گیریم که سخن گفتن از وقایعی که «همین حالا» در مریخ اتفاق می‌افتد بی‌معناست، چون «همین حالا» وجود ندارد (شکل ۳.۳). (۷۸)

به زبان فنی می‌گوییم اینشتین فهمید که «همزمانی مطلق» وجود ندارد: در سراسر عالم، هیچ مجموعه‌رویدادی وجود ندارد که «حالا» در حال وقوع باشد. مجموعه تمام اتفاقات عالم را نمی‌توان به صورت دنباله‌ای از «حالاها»، زمان‌های حال، که یکی پس از دیگری اتفاق می‌افتد، توصیف کرد؛ بلکه ساختار پیچیده‌تری دارد که در شکل ۳.۲ نشان داده شده است. این شکل چیزی را توصیف می‌کند که

در فیزیک فضا - زمان خوانده می‌شود: مجموعهٔ تمام اتفاقات حال و آینده، به اضافهٔ «نه گذشته و نه آینده»؛ این‌ها یک لحظهٔ واحد را توصیف نمی‌کنند: هرکدام مدت‌زمان خودشان را دارند.

مدت‌زمان این حال گسترده در کهکشان آندرومدا (نسبت به ما) دو میلیون سال است. هرچه در این دو میلیون سال اتفاق می‌افتد نسبت به ما نه گذشته است و نه آینده. اگر یک تمدن پیشرفتهٔ آندرومدا، که دوست ماست، بخواهد یک ناوگان سفینهٔ فضایی بفرستد تا به دیدارمان بیاید، معنا ندارد که بپرسیم آیا ناوگان «الان» حرکت کرده است یا هنوز نه. تنها پرسش معنادار این است که چه زمانی اولین نشانه از ناوگان را دریافت می‌کنیم: درست از آن‌زمان - و نه زودتر - به راه افتادن ناوگان در گذشتهٔ ما اتفاق می‌افتد.

پرده‌برداری اینشتین جوان از فضا - زمان در سال ۱۹۰۵ پیامدهای شگرفی دارد. اینکه فضا و زمان طبق شکل ۳.۲ ارتباط تنگاتنگی دارند به این معناست که مکانیک نیوتنی به تغییر ساختار نیاز دارد. اینشتین در سال‌های ۱۹۰۵ و ۱۹۰۶ سریعاً این تغییر ساختار را انجام می‌دهد. یکی از اولین نتایج این تغییر ساختار آن است که همان‌طور که فضا و زمان در مفهوم یکسانی به نام فضا - زمان تنیده می‌شوند، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هم به یکدیگر می‌پیوندند و مفهوم یکسانی را تشکیل می‌دهند که امروزه به آن میدان الکترومغناطیسی می‌گوییم. وقتی معادلات پیچیده‌ای را که ماکسول برای این دو میدان نوشت به این زبان تازه بازنویسی می‌کنیم، ساده‌تر می‌شوند.

این نظریه تفسیر دیگری دارد که پیامدهای مهمی را در بر می‌گیرد. مفاهیم «انرژی» و «جرم» هم مانند فضا و زمان، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با سازوکار تازه‌ای به هم می‌پیوندند. پیش از سال ۱۹۰۵ دو اصل عمومی قطعی به نظر می‌رسید: پایستگی جرم و پایستگی انرژی. شیمی‌دان‌ها به دفعات اولی را تأیید کرده بودند: در یک واکنش شیمیایی جرم هیچ‌گاه تغییر نمی‌کند. دومی - پایستگی انرژی - مستقیم از معادلات نیوتن منتج می‌شد و یکی از بی‌چون‌وچراترین قوانین به شمار می‌آمد. اما اینشتین درمی‌یابد انرژی و جرم دو روی یک سکه‌اند، همان‌طور که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دو روی یک میدان‌اند و همان‌طور که فضا و زمان دو روی یک چیزند: فضا - زمان؛ یعنی جرم به تنهایی پایسته نیست؛ و انرژی - همان‌طور که آن‌زمان تصور می‌شد - نیز مستقلاً پایسته نیست. می‌توان یکی را به دیگری تبدیل کرد: فقط یک قانون پایستگی وجود دارد، نه دو قانون. چیزی که ثابت است تنها ماده یا انرژی نیست،

بلکه مجموع این دو است. باید فرایندهایی وجود داشته باشد که انرژی را به ماده یا ماده را به انرژی تبدیل کند.

اینشتین با محاسبه‌ای سریع فهمید از تبدیل یک گرم جرم چقدر انرژی حاصل می‌شود. پاسخ همان فرمول مشهور $E = mc^2$ است. از آنجا که c ، سرعت نور، عدد بزرگی است و c بسیار بزرگ‌تر از آن، انرژی حاصل از تبدیل یک گرم ماده به انرژی بسیار زیاد است؛ این انرژی معادل انفجار همزمان میلیون‌ها بمب است — انرژی کافی برای روشن کردن یک شهر و راه انداختن صنایع یک کشور به مدت چندین ماه یا برعکس، انرژی کافی برای کشتن صدها هزار انسان در یک ثانیه در شهری مانند هیروشیما.

گمانه‌زنی‌های نظری اینشتین جوان بشریت را وارد دوره جدیدی کرد: دوره انرژی هسته‌ای؛ دوره احتمالات و خطرهای جدید. امروزه، به لطف تیزهوشی مرد جوان سرکشی که از قوانین تبعیت نکرد، ابزار روشن کردن چراغ‌های خانه ده میلیارد انسانی را در اختیار داریم که به زودی ساکن زمین خواهند بود؛ می‌توانیم در فضا به سوی دیگر ستاره‌ها سفر کنیم یا یکدیگر را بکشیم و سیاره را نابود کنیم. بستگی به انتخاب خودمان دارد؛ اینکه تصمیماتمان را بر عهده چه رهبرانی بگذاریم.

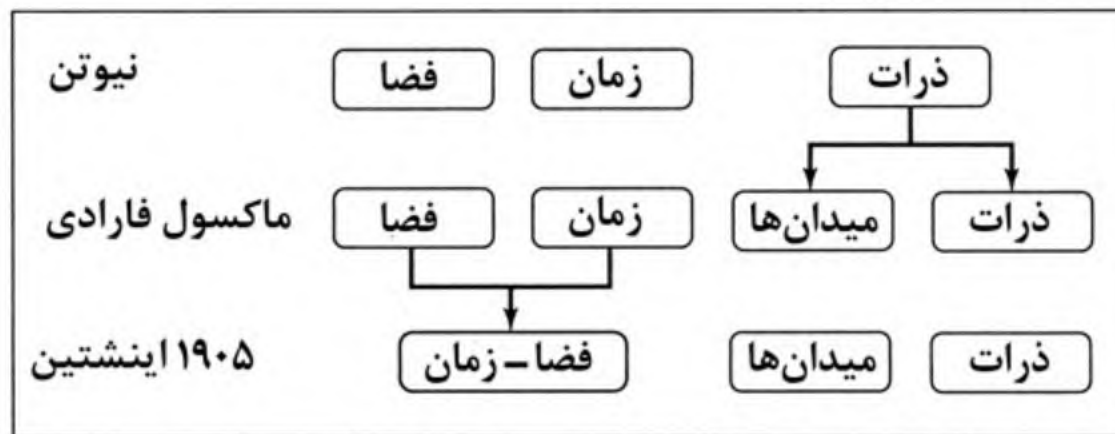
امروزه ساختار فضا - زمانی که اینشتین ارائه کرده بود به خوبی فهمیده شده و بارها در آزمایشگاه‌ها آزموده شده است؛ این نظریه امروزه به یقین به اثبات رسیده است. مفهوم فضا و زمان با آنچه در زمان نیوتن تصور می‌شد، تفاوت دارد. فضا مستقل از زمان وجود ندارد. در فضای گسترده شکل ۳.۲ قسمت خاصی وجود ندارد که بتوان در خصوص آن ادعا کرد در مقایسه با دیگر قسمت‌ها «فضای کنونی» بهتری است. درک شهودی‌مان از زمان حال — به عنوان مجموعه تمام وقایعی که «حالا» در هستی اتفاق می‌افتد — نتیجه جهلمان است: ناتوانی‌مان در درک بازه‌های زمانی کوتاه. این مفاهیم استنتاج ناروایی از تجربه محدود و کوتاه‌بینانه‌مان است.

زمان حال مانند تخت بودن زمین است: یک توهم. به دلیل محدودیت حواسمان زمین را تخت تصور می‌کردیم؛ چون نمی‌توانستیم دورتر از نوک بینی‌مان را ببینیم. اگر مانند شازده کوچولو روی سیارکی که شعاعش تنها چند کیلومتر است زندگی می‌کردیم، به راحتی می‌فهمیدیم که روی یک کره زندگی می‌کنیم. اگر مغز و حواسمان دقیق‌تر بودند و نانو ثانیه‌های زمان را درک می‌کردیم، هیچ‌وقت مفهوم «زمان حال» را که همه‌جا گسترده شده، نمی‌ساختیم. به راحتی وجود ناحیه میانی بین گذشته و آینده را حس می‌کردیم. می‌دانستیم «اینجا و حالا»

معنا دارد، اما «حالا» برای توصیف تمام وقایعی که در تمام عالم «حالا در حال رخ دادن است» معنا ندارد. مانند این است که بپرسیم کهکشان ما «بالای» کهکشان آندرومداست یا «پایین» آن؟ سؤالی که معنا ندارد، چون «بالا» و «پایین» فقط روی سطح معنا دارند، نه در سراسر عالم. جهان هستی «بالا» و «پایین» ندارد. به همین ترتیب، لزوماً «قبل» و «بعد» بین دو پیشامد در عالم معنا ندارد. فیزیکدان‌ها ساختار حاصل از در هم تنیده شدن فضا و زمان را، که در شکل ۳.۲ و ۳.۳ ترسیم شده است، «فضا - زمان» می‌نامند (شکل ۴.۳).

وقتی سالنامه فیزیک مقاله اینشتین را، که تمام این‌ها یکجا در آن توضیح داده شده بود، منتشر کرد جهان فیزیک بلافاصله به لرزه درآمد. تناقض ظاهری بین معادلات ماکسول و فیزیک نیوتن بر همه مشهود بود و هیچ‌کس نمی‌دانست چطور آن را حل کند. راه‌حل استادانه و حیرت‌آور اینشتین همه را غافلگیر کرد. می‌گویند در سرسراه‌های قدیمی و کم‌نور دانشگاه کراکوف (۷۹) پروفسور فیزیک سختگیری از اتاق مطالعه‌اش بیرون آمد، مقاله اینشتین را در دستش تکان می‌داد و فریاد می‌زد: «ارشمیدس دیگری زاده شده!»

با وجود تمام سروصدایی که این قدم رو به جلوی اینشتین در سال ۱۹۰۵ به پا کرد، هنوز به شاهکار او نرسیده‌ایم. شاهکار اینشتین دومین نظریه نسبیت است، نظریه نسبیت عام که ده سال بعد، در سی‌وپنج‌سالگی‌اش، منتشر شد.



شکل ۳.۴ جهان از چه ساخته شده است؟

نظریهٔ «نسبیت عام» زیباترین نظریه‌ای است که از فیزیک حاصل شده و نخستین ستون گرانش کوانتومی است. این نظریه جان‌مایهٔ این کتاب است. جادوی حقیقی فیزیک قرن بیستم از اینجا آغاز می‌شود.

زیباترین نظریه

اینشتین پس از انتشار نظریه نسبیت خاص فیزیکدان مشهوری می‌شود و دانشگاه‌های متعددی به او پیشنهاد همکاری می‌دهند؛ اما مسئله‌ای برایش آزاردهنده است: نسبیت خاص با آنچه در مورد گرانش می‌دانستند، جور در نمی‌آمد. وقتی مشغول نوشتن مروری بر نظریه خودش است از خود می‌پرسد آیا لازم است در نظریه قابل احترام «گرانش جهانی»

پدر فیزیک، نیوتن، تجدیدنظر شود تا با نظریه نسبیت او سازگار شود؟

درک ریشه این مسئله ساده است. نیوتن تلاش کرده بود سقوط اجسام و گردش سیاره‌ها را توضیح دهد. او «نیروی» را تصور کرده بود که اجسام را به سمت یکدیگر می‌کشد: «نیروی گرانش». اینکه این نیرو چگونه دو جسم دور را به هم جذب می‌کند، معلوم نبود. همان‌طور که دیدیم، خود نیوتن اذعان داشت این ایده، یعنی وجود نیروی جاذبه بین دو جسم دور که تماسی با هم ندارند، چیزی کم دارد؛ باید واسطی بین زمین و ماه باشد تا زمین بتواند ماه را جذب کند. فارادی دویست سال بعد پاسخ را یافت - اما نه برای نیروی گرانش، بلکه برای نیروهای الکتریکی و مغناطیسی: میدان. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نیروی الکتریکی و مغناطیسی را «حمل می‌کنند».

در این مرحله، بر هر شخص خردمندی روشن است که نیروی گرانش نیز باید خطوط فارادی داشته باشد. با قیاس این‌ها مشخص می‌شود که نیروی جاذبه بین خورشید و زمین یا زمین و اجسام در حال سقوط باید ناشی از میدان الکترومغناطیسی باشد - یعنی میدان گرانشی. منطقی است راه‌حلی را که فارادی و ماکسول برای مسئله حامل نیروی الکترومغناطیسی پیدا کرده بودند به نیروی گرانش هم تعمیم دهیم. باید یک میدان گرانشی و معادله‌هایی مشابه معادلات ماکسول برای آن وجود داشته باشد که بتواند چگونگی حرکت این خطوط گرانشی فارادی را توصیف کند. در نخستین سال‌های قرن بیستم این مسئله برای هر فردی که به اندازه کافی منطقی باشد، روشن است؛ به عبارتی، فقط برای آلبرت اینشتین.

اینشتین نوجوان از میدان الکترومغناطیسی که روتورها را در نیروگاه‌های برق پدرش به حرکت درمی‌آورد، شگفت‌زده می‌شد؛ او مطالعه میدان گرانشی را آغاز کرد و به جست‌وجوی ریاضیاتی رفت که بتواند آن را توصیف کند. خود را در این مسئله غرق کرد. حل این مسئله ده

سال طول کشید. ده سال مطالعه دیوانه‌وار، تلاش، اشتباه، سرگشتگی، ایده‌های درخشان، ایده‌های اشتباه، مقالات بسیار با معادلات نادرست و باز هم اشتباه و اضطراب. بالاخره در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای منتشر کرد که راه‌حل کامل را در بر داشت. نام آن را نظریه نسبیت عام گذاشت؛ شاهکار او. لف لاندائو(۸۰)، برجسته‌ترین فیزیک‌دان نظری اتحاد جماهیر شوروی، آن را «زیباترین نظریه» خواند.

دیدن دلیل زیبایی این نظریه دشوار نیست. اینشتین به جای اینکه فقط شکل ریاضیاتی میدان‌های گرانشی را بسازد و معادلات آن را به دست آورد، مسائل حل‌نشده دیگری را از اعماق نظریه نیوتن بیرون می‌کشد و این دو پرسش را ترکیب می‌کند.

نیوتن به ایده دموکریت، که طبق آن اجسام در فضا حرکت می‌کنند، بازگشته بود. این فضا باید یک ظرف بزرگ و خالی باشد، جعبه‌ای محکم که عالم را در بر دارد؛ چهارچوب وسیعی که درون آن اجسام در مسیری مستقیم حرکت می‌کنند، مگر اینکه نیرویی آن‌ها را منحرف کند؛ اما این «فضا» که جهان را در بر دارد از چه ساخته شده است؟ فضا چیست؟

برای ما ایده فضا عاری از پیچیدگی است، اما فقط به خاطر آشنایی با فیزیک نیوتنی این‌طور به نظر می‌آید. اگر در موردش فکر کنید، فضای خالی را تجربه نکرده‌ایم. از ارسطو تا دکارت، یعنی دو هزار سال، ایده دموکریتی فضا به عنوان ماهیتی مجزا و متمایز از اشیا، هیچ‌وقت معقول به حساب نیامد. برای ارسطو، همانند دکارت، اشیا بعد دارند: بعد از خواص اشیاست؛ وقتی چیزی بعد نداشته باشد، مفهوم بعد نیز وجود نخواهد داشت. می‌توانم لیوان را از آب خالی کنم، اما هوا لیوان را پر خواهد کرد. آیا تا به حال لیوان واقعاً خالی دیده‌اید؟

ارسطو استدلال کرد اگر بین دو چیز هیچ باشد، پس چیزی وجود ندارد. چطور همزمان یک چیز (فضا) و هیچ‌چیز می‌تواند وجود داشته باشد؟ این فضای خالی که ذرات در آن حرکت می‌کنند، چیست؟ یک چیز هست یا هیچ‌چیز نیست؟ اگر هیچ‌چیز نیست، پس وجود ندارد و این مفهوم را لازم نداریم. اگر چیزی هست، ممکن است تنها خاصیتش این باشد که صرفاً وجود دارد و هیچ کاری انجام نمی‌دهد.

از دوران باستان ایده فضای خالی، حد واسط بین یک چیز و هیچ‌چیز، اندیشمندان را آزار می‌داد. خود دموکریت که فضای خالی را، که اتم‌ها در آن حرکت می‌کنند، پایه جهان‌ش قرار داده بود در مورد این مسئله واضح سخن نگفت: او نوشت فضای خالی چیزی است بین «هست و

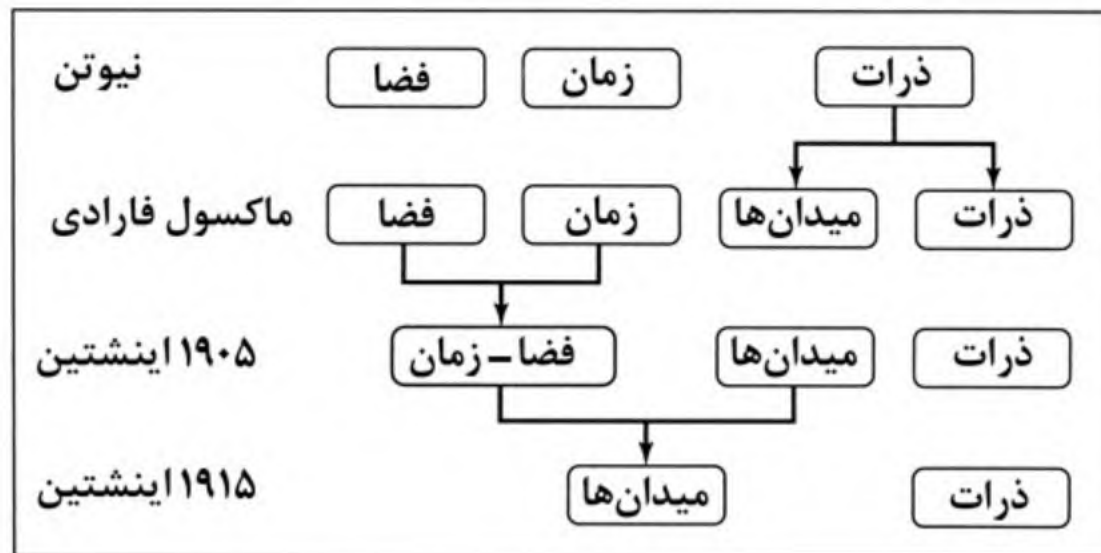
نیست». سیمپلیکیوس(۸۱) می‌گوید: «دموکریست پر و خالی را بدیهی شمرد، یکی را "هست" و دیگری را "نیست" خواند.»(۱) اتم‌ها «هست» هستند. فضا «نیست» است — «نیستی» که به هر حال وجود دارد. از این گنگ‌تر و مبهم‌تر نمی‌شود.

نیوتن که ایده دموکریست را در مورد فضا احیا کرده بود، تلاش کرد با تعریف فضا به عنوان مرکز احساس خدا این مسئله را حل کند. هیچ‌کس تا به حال نفهمیده است منظور نیوتن از «مرکز احساس خدا» چیست. شاید حتی خود نیوتن هم نمی‌دانست. توضیح نیوتن در رابطه با فضا برای اینشتین که اعتقاد چندانی به مفهوم خدا (با مرکز احساس یا بی‌مرکز احساس) نداشت، قانع‌کننده نبود؛ جز اینکه آن را لفاظی بازیگوشانه‌ای تلقی می‌کرد.

نیوتن بسیار تلاش کرد تا بر مقاومت دانشمندان و فیلسوفان در برابر احیای مفهوم دموکریستی فضا فائق آید؛ در ابتدا هیچ‌کس او را جدی نگرفت. تنها کارایی بی‌نظیر معادلاتش، که همیشه نتیجه درست را پیش‌بینی می‌کردند، توانست منتقدان را ساکت کند، اما تردید در مورد باورپذیری ایده نیوتنی فضا باقی ماند و اینشتین که آثار فیلسوفان را مطالعه کرده بود به خوبی از آن‌ها آگاه بود. ارنست ماخ، که تأثیر او بر اینشتین بسیار واضح بود، فیلسوفی بود که مشکلات مفهومی ایده نیوتن در مورد فضا را مورد توجه قرار داده بود — همان ماخ که وجود اتم‌ها را باور نداشت. (اتفاقاً مثال خوبی است که نشان می‌دهد چگونه شخصی می‌تواند در یک زمینه کوتاه‌بین باشد و در زمینه‌ای دیگر دوراندیش.)

در نتیجه، اینشتین نه تنها به یک، بلکه به دو مسئله می‌پرداخت. نخست اینکه چگونه می‌توانیم میدان‌های گرانشی را توصیف کنیم؟ دوم اینکه، فضای نیوتن چیست؟

و اینجاست که نبوغ مثال‌زدنی اینشتین جرقه زده و یکی از بزرگ‌ترین قدم‌های رو به جلو در تاریخ اندیشه بشر برداشته می‌شود: اگر میدان‌های گرانشی همان فضای اسرارآمیز نیوتن باشد چه؟ اگر فضای نیوتن فقط همان میدان گرانشی باشد چه؟ نظریه نسبیت عام همین ایده بسیار ساده، زیبا و زیرکانه است.

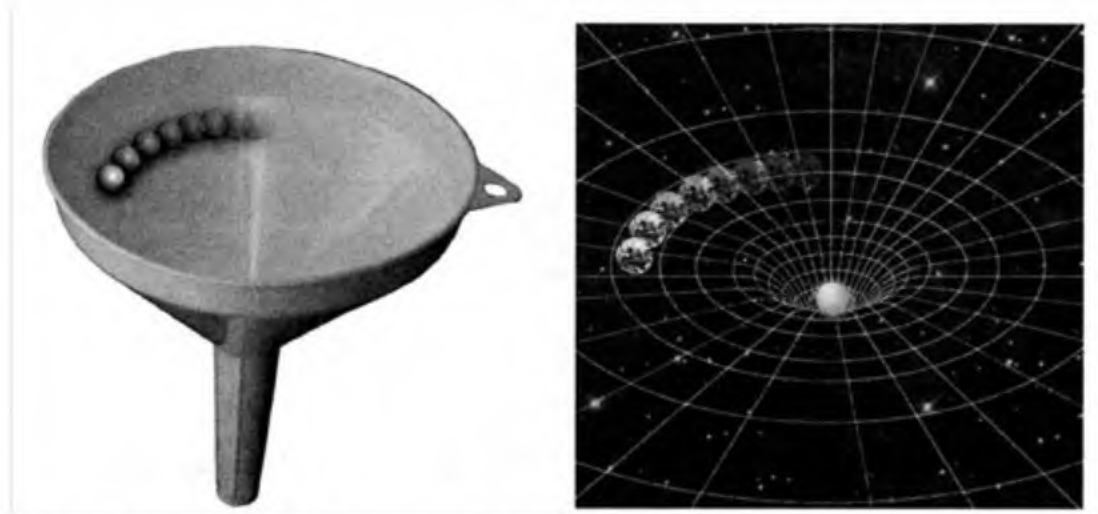


شکل ۳.۵ جهان از چه ساخته شده است؟

جهان از فضا + ذرات + میدان‌های الکترومغناطیسی + میدان‌های گرانشی ساخته نشده است. جهان فقط از ذرات + میدان‌ها ساخته شده؛ نیازی نیست فضا را به عنوان جزئی زیادی به آن اضافه کرد. فضای نیوتن همان میدان‌های گرانشی است؛ یا برعکس، می‌توان گفت: میدان‌های گرانشی همان فضا است (شکل ۳.۵).

اما بر خلاف فضای نیوتن که تخت و ثابت است، میدان گرانشی به لطف میدانی بودنش چیزی است که می‌تواند حرکت کند و به نوسان درآید

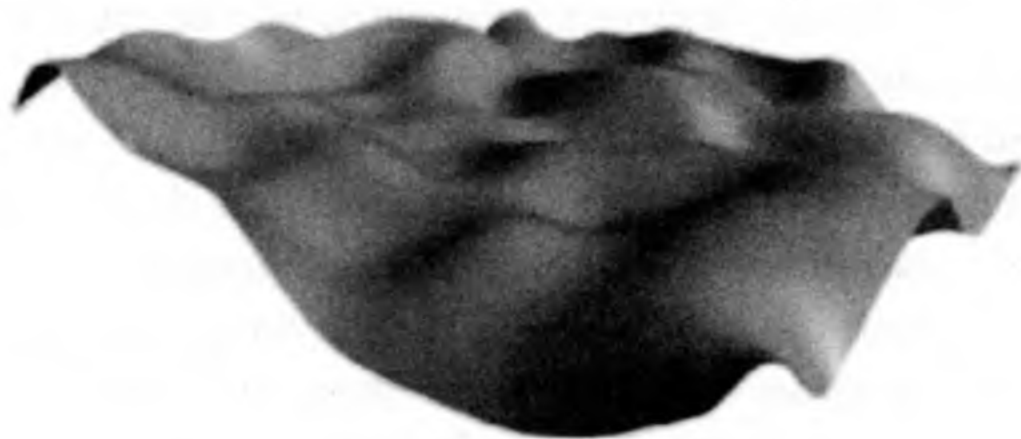
و با معادلات توصیف شود — مانند میدان‌های ماکسول و خطوط فارادی. این موضوع جهان را به طرز حیرت‌آوری ساده‌تر توضیح می‌دهد. فضا دیگر با ماده تفاوت ندارد. فضا یکی از اجزای «مادی» جهان و شبیه به میدان الکترومغناطیسی است. ماهیتی حقیقی است که نوسان می‌کند و خمیده می‌شود و در هم تابیده می‌شود. ما در یک چهارچوب نامرئی و محکم محصور نیستیم: در بدن یک نرم‌تن انعطاف‌پذیر و عظیم غوطه‌وریم (این استعاره را خود اینشتین به کار برده است). خورشید فضای اطراف خود را خم می‌کند و زمین به وسیله نیرویی اسرارآمیز دور خورشید نمی‌گردد، بلکه به طور مستقیم در خمیدگی فضا حرکت می‌کند. مانند مهره‌ای که در یک قیف حرکت می‌کند: مرکز قیف نیروی اسرارآمیزی تولید نمی‌کند، بلکه ذات منحنی قیف منجر به گردش مهره می‌شود. سیاره‌ها به دور خورشید می‌گردند و اجسام سقوط می‌کنند، چون فضای اطراف آن‌ها خمیده است (شکل ۳.۶).



شکل ۳.۶ زمین دور خورشید می چرخد، چون فضا - زمان دور خورشید خمیده است، مانند مهره‌ای که روی دیواره قیف می چرخد.

دقیق‌تر بگوییم خمیدگی نه در فضا، بلکه در فضا - زمان اتفاق می‌افتد - همان فضا - زمانی که خود اینشتین ده سال پیش نشان داده بود ساختاری یکپارچه است، نه دنباله لحظات. ایده نسبیت عام این است. تنها مشکل اینشتین پیدا کردن معادلات برای اثبات آن بود. چگونه این خمیدگی فضا - زمان را توصیف کنیم؟ بخت اینجا با اینشتین یار بود: این مسئله را پیش‌تر ریاضی‌دان‌ها حل کرده بودند.

بزرگ‌ترین ریاضی‌دان قرن نوزدهم، کارل فریدریش گاوس (۸۲)، «شاهزاده ریاضی‌دان‌ها»، ریاضیاتی برای توصیف سطوح خمیده ابداع کرده بود. سطوحی مانند سطح تپه‌ها یا سطحی که در شکل ۳.۷ ترسیم شده است.



شکل ۳.۷ سطح (دوبعدی) خمیده

سپس گاوس از دانشجوی بااستعدادش خواسته بود این ریاضیات را به فضاهای خمیده سه‌بعدی یا چندبعدی تعمیم دهد. این دانشجو، برنهارت ریمان (۸۳)، رساله دکترای سنگینی در این مورد نوشت که کاملاً بی‌استفاده به نظر می‌رسد.

ریمان نتیجه گرفت ویژگی‌های فضای خمیده (یا فضا - زمان) در هر بعد را می‌توان با استفاده از یک شیء ریاضیاتی خاص نشان داد. امروزه آن را انحنای ریمان می‌نامیم و با حرف «R» نشان می‌دهیم. اگر زمینی متشکل از دره‌ها، تپه‌ها و کوه‌ها را در نظر بگیرید، انحنای R سطح در دشت‌ها که مسطح‌اند صفر است - «بدون انحنای» - و در دره‌ها و تپه‌ها عددی غیر از صفر است؛ مقدار آن در قله‌های تیز بیشینه است، یعنی جاهایی که زمین کمترین مسطحی یا بیشترین انحنای را دارد. با استفاده از نظریه ریمان می‌توان شکل فضاهای منحنی سه‌بعدی یا چهاربعدی را توصیف کرد.

اینشتین با تلاش بسیار و کمک گرفتن از دوستانی که بیش از او با ریاضیات آشنا بودند، ریاضیات ریمان را فرامی‌گیرد - و معادله‌ای می‌نویسد که در آن R متناسب با انرژی ماده است. به عبارتی: هر جا ماده باشد خمیدگی فضا - زمان بیشتر می‌شود. همین. این معادله مشابه معادلات ماکسول است که به جای الکتریسیته برای گرانش نوشته شده است. این معادله در نیم‌خط جا می‌شود. همین. یک تصور - فضا خمیده می‌شود - تبدیل به یک معادله می‌شود.

اما در این معادله عالمی پرثمر وجود دارد. پرباری جادویی این معادله به پیش‌بینی‌های محیرالعقولی منجر می‌شود که به هذیان‌گویی‌های یک دیوانه می‌ماند، اما همگی درست از آب درآمدند. حتی تا ابتدای دهه ۱۹۸۰ هیچ‌کس اکثر این پیش‌بینی‌های تخیلی را چندان جدی نگرفت. با این حال، یکی پس از دیگری، همه با آزمایش ثابت شده‌اند. بیایید چند مورد از آن‌ها را بررسی کنیم.

برای شروع، اینشتین اثر جرمی مانند خورشید را روی خمیدگی فضای اطرافش و اثر این خمیدگی را روی حرکات سیاره‌ها مجدداً محاسبه می‌کند. او حرکات سیاره‌ها را مطابق پیش‌بینی معادلات کپلر و نیوتن به دست می‌آورد، اما محاسبات او دقیقاً مطابق با معادلات آن‌ها نیست: در نزدیکی خورشید اثر خمیدگی فضا از اثر نیروی نیوتن بیشتر است. اینشتین حرکت عطارد را محاسبه می‌کند. عطارد نزدیک‌ترین سیاره به خورشید است و در نتیجه تعارض بین پیش‌بینی‌های او و نظریات نیوتن در مورد عطارد بسیار زیاد است. او یک تفاوت پیدا می‌کند: نزدیک‌ترین نقطه مدار عطارد هر سال ۰.۴۳ ثانیه قوسی بیش از چیزی که نظریه نیوتن پیش‌بینی می‌کرد، حرکت می‌کند. اختلاف ناچیزی است، اما تا جایی که اخترشناسان توانستند محاسبه کنند و ضمن مقایسه پیش‌بینی‌ها با مشاهدات اخترشناسان نتیجه واضح

می‌شود: عطارد مسیری را که اینشتین پیش‌بینی کرد طی می‌کند، نه مسیر نیوتن را. عطارد، پیام‌آور تیزپای خدایان یا خدای صندل‌های بالدار، دنباله‌روی اینشتین است، نه نیوتن.

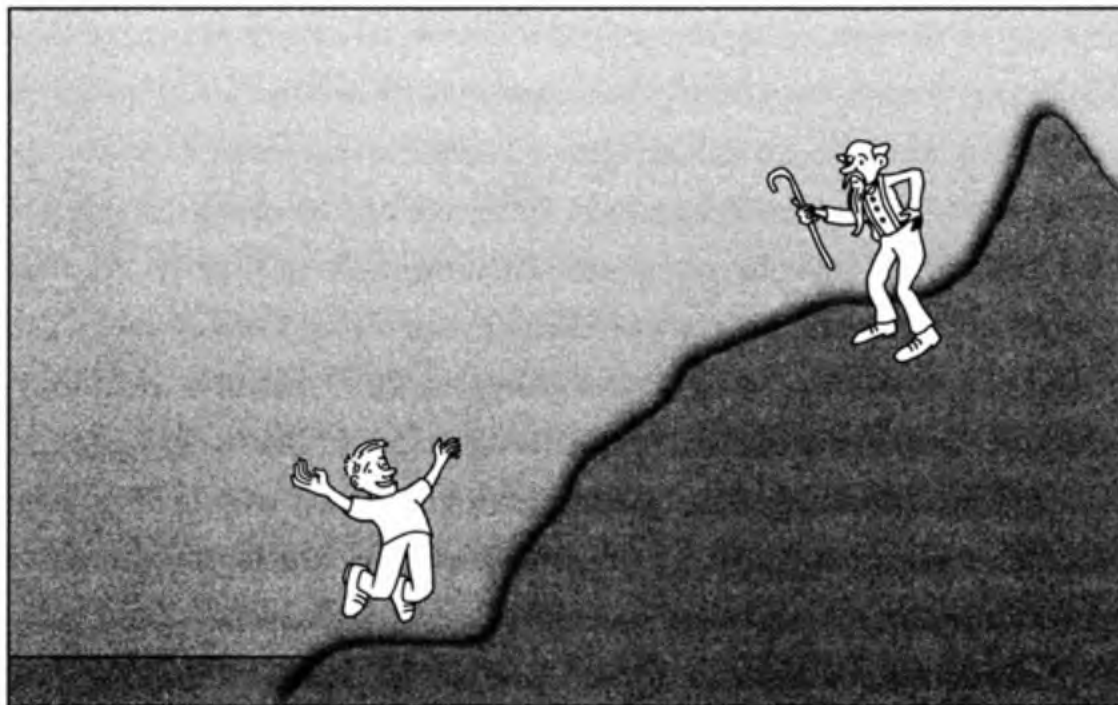
معادلات اینشتین انحنا را در نزدیکی یک ستاره توصیف می‌کند. نور به خاطر این انحنا از مسیر مستقیم منحرف می‌شود. اینشتین پیش‌بینی می‌کند خورشید هم باعث خمیدگی نور در اطرافش می‌شود. در سال ۱۹۱۹ اندازه‌گیری‌هایی انجام شد که میزان انحراف نور را نشان داد و معلوم شد این انحراف درست مطابق پیش‌بینی اینشتین است.

اما فقط فضا نیست که خمیده می‌شود: زمان هم این‌طور است. اینشتین پیش‌بینی می‌کند زمان در ارتفاعات بالاتر زمین سریع‌تر می‌گذرد و در ارتفاعات پایین‌تر، کندتر. این هم محاسبه شد و درست از آب درآمد. امروزه در بسیاری از آزمایشگاه‌ها ساعت‌های بسیار دقیقی داریم و با آن‌ها می‌توانیم این اثر عجیب را، حتی برای اختلاف ارتفاع چند سانتی‌متری هم محاسبه کنیم. یک ساعت روی کف اتاق و ساعت دیگری روی میز بگذارید: ساعت روی کف زمین گذر زمان کمتری نسبت به ساعت روی میز ثبت می‌کند. چرا؟ چون زمان جهانی و ثابت نیست، به جرمی بستگی دارد که در همسایگی‌اش قرار دارد و منقبض و منبسط می‌شود: زمین، مانند هر جرم دیگری، فضا - زمان را می‌تاباند و زمان را در نزدیکی‌اش کندتر می‌کند. دو قلوهایی که یکی در سطح دریا و دیگری در کوهستان زندگی کرده‌اند، اگر باز یکدیگر را ملاقات کنند متوجه می‌شوند یکی از آن‌ها، هرچند ناچیز، بیشتر عمر کرده است (شکل ۳.۸).

این اثر توضیح جالبی در مورد دلیل سقوط اشیا ارائه می‌دهد. اگر به نقشه زمین نگاهی بیندازید و مسیر طی شده هواپیماها در پرواز رم به نیویورک را دنبال کنید، می‌بینید مسیر به نظر مستقیم نمی‌آید: مسیر هواپیما به سمت شمال قوس دارد. چرا؟ چون به خاطر انحنا زمین مسیر حرکت به سمت شمال کوتاه‌تر از مسیر حرکت در راستای مدار جغرافیایی است. هرچه شمال‌تر باشید، فاصله بین دو نصف‌النهار کمتر می‌شود؛ در نتیجه بهتر است به سمت شمال بروید تا مسیر کوتاه‌تر شود (شکل ۳.۹).

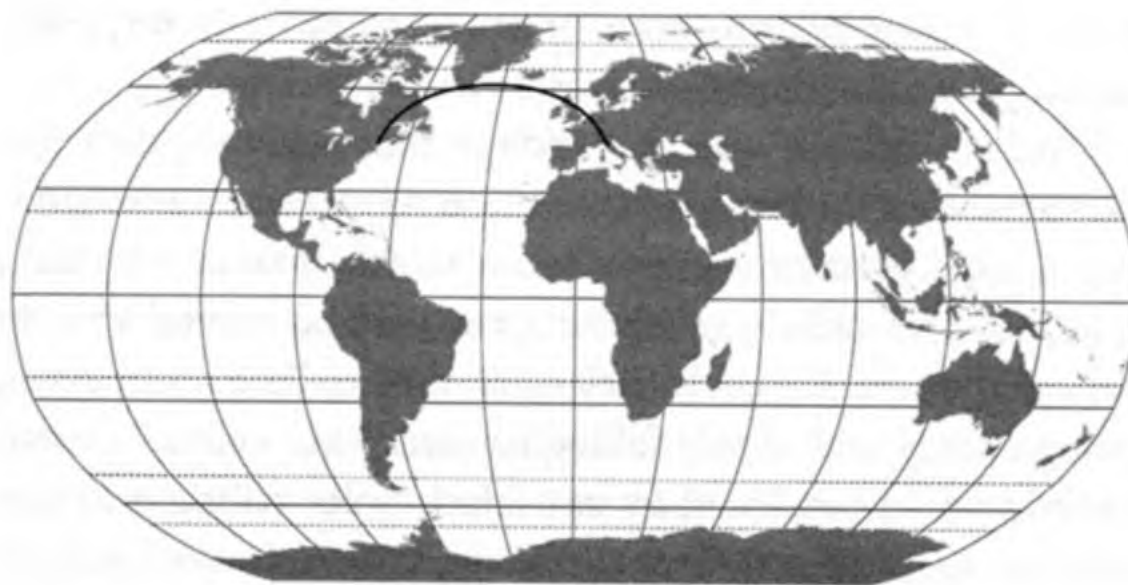
حال، باور کنید یا نه، توپی که به هوا پرتاب شده هم به همین دلیل سقوط می‌کند: با حرکت به سمت بالا «زمان به دست می‌آورد»، چون زمان در آن ارتفاع با سرعت متفاوتی می‌گذرد. در هر دو مورد، هواپیما و توپ مسیر مستقیمی را در فضا (یا فضا - زمان) دنبال می‌کنند

که خمیده است (شکل ۳.۱۰) (۸۴).

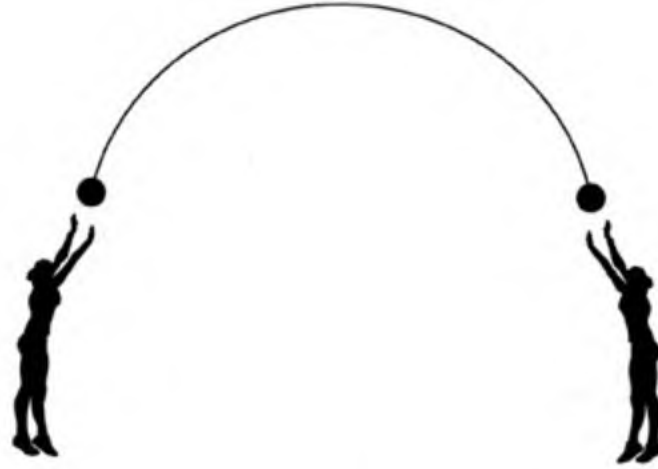


شکل ۳.۸ دوقلوهای که یکی در سطح دریا و دیگری در کوهستان زندگی می‌کنند. وقتی دوباره همدیگر را ملاقات می‌کنند، آنکه در کوهستان زندگی کرده، پیرتر است. این انبساط گرانشی زمان است.

اما پیش‌بینی‌های این نظریه از این اثرهای کوچک هم فراتر می‌رود. ستاره‌ها تا وقتی که هیدروژن — سوختشان — را دارند می‌سوزند و سپس می‌میرند. دیگر گرمایی وجود ندارد که فشارش مادهٔ باقیمانده را کنار هم نگه دارد و ماده در اثر وزن خودش فرومی‌پاشد. اگر ستاره‌ای به اندازهٔ کافی بزرگ باشد، اثر وزنش آن‌قدر زیاد می‌شود که ماده را تا حد بسیار زیادی فشرده می‌کند و فضای اطرافش چنان خمیده می‌شود که انگار به چاله‌ای واقعی تبدیل می‌شود؛ یک سیاه‌چاله.



شکل ۳.۹ هرچه بیشتر به سمت شمال بروید، فاصله بین دو نصف النهار کمتر می شود.



شکل ۳.۱۰ هرچه یک چیز بالاتر باشد، زمان برایش سریع‌تر می‌گذرد.

زمانی که دانشجو بودم سیاه‌چاله‌ها مفهومی باورناپذیر از نظریه‌ای مبهم به شمار می‌آمدند. امروزه صدها سیاه‌چاله مشاهده شده و اخترشناسان آن‌ها را با جزئیات مطالعه می‌کنند. یکی از این سیاه‌چاله‌ها، با جرمی یک میلیون برابر بیشتر از خورشید، در مرکز کهکشان ما قرار گرفته است. می‌توانیم ستاره‌هایی را که به دور آن می‌گردند، ببینیم. برخی از ستاره‌ها که بیش از حد به سیاه‌چاله

نزدیک می‌شوند، در اثر جاذبهٔ شدید آن نابود می‌شوند.

علاوه بر آن، این نظریه پیش‌بینی می‌کند فضا هم مانند سطح دریا موج برمی‌دارد و این موج‌ها شبیه موج‌های الکترومغناطیسی‌اند که تلویزیون با آن‌ها کار می‌کند. اثر این «موج‌های گرانشی» را می‌توان بین ستاره‌های دوتایی در آسمان مشاهده کرد: ستاره‌های دوتایی چنین موج‌هایی را ساطع می‌کنند، انرژی از دست می‌دهند و آهسته‌آهسته به سمت هم سقوط می‌کنند. (۸۵) اواخر سال ۲۰۱۵، آنتنی روی زمین موج‌های گرانشی حاصل از دو سیاه‌چاله را، که درون هم سقوط می‌کردند، به طور مستقیم دریافت کرد. وقتی اوایل سال ۲۰۱۶ این کشف اعلام شد، جهان بار دیگر در بهت فرو رفت. بار دیگر، پیش‌بینی‌های به ظاهر دیوانه‌وار اینشتین دقیقاً درست از آب درآمدند.

علاوه بر آن، این نظریه پیش‌بینی می‌کند عالم در حال انبساط است و چهارده میلیارد سال پیش از یک انفجار کیهانی به وجود آمده است. به زودی این موضوع را با جزئیات توضیح خواهم داد.

این پدیده‌های غنی و پیچیده — خمیدگی اشعه‌های نور، اصلاح نیروی نیوتن، کند شدن ساعت‌ها، سیاه‌چاله‌ها، امواج گرانشی، انبساط عالم و مه‌بانگ — همه حاصل درک این نکته‌اند که فضا ظرفی راکد و ثابت نیست، بلکه مانند ماده و دیگر میدان‌هایی که در بر دارد، سازوکار و «فیزیک» خودش را دارد. اگر دموکریت می‌توانست ببیند ایدهٔ فضایش چه آیندهٔ درخشانی خواهد داشت، لبخندی از سر رضایت می‌زد. درست است که آن را نیستی نامیده بود، اما منظور او از هستی (δέν) ماده بود و نوشته بود نیستی پیشنهادی او، این خلأ، در هر صورت «فیزیک» (φύσις) خاص و ماهیت خود را دارد». (۸۶) چقدر درست می‌گفت.

بدون مفهوم میدان‌ها، که فارادی معرفی کرده بود، بدون قدرت چشمگیر ریاضیات، بدون هندسهٔ گاوس و ریمان، این «فیزیک خاص» مبهم می‌ماند. اینشتین با نیروی ریاضیات و ابزارهای مفهومی جدید معادلاتی می‌نویسد که خلأ دموکریت را توصیف می‌کند و «فیزیک خاص» آن را دنیایی رنگارنگ و شگفت‌انگیز می‌یابد که در آن جهان منفجر می‌شود، فضا فرومی‌پاشد و چاله‌های بی‌انتها تشکیل می‌دهد، زمان در نزدیکی یک سیاره کندتر می‌گذرد و فضای بی‌کران بین ستاره‌ها مانند سطح دریا مواج می‌شود و نوسان می‌کند...

این حرف‌ها مانند قصه‌ای است که یک دیوانه تعریف می‌کند: هیچ‌چیز را نشان نمی‌دهد و پر از خشم و هیاهوست. با این حال نگاهی به

حقیقت است. بهتر است بگوییم نگاهی اجمالی به حقیقت که در مقایسه با دید محو و پیش‌پاافتاده ما ابهام کمتری دارد. حقیقتی که گویی از جنس خواب‌هایمان است، اما با این حال از خیال‌بافی‌های مبهمان واقعی‌تر است. تمام این‌ها حاصل یک بینش اساسی است – اینکه فضا – زمان و میدان‌های گرانشی یکی‌اند – و نتیجه معادله‌ای که نمی‌توانم اینجا ننویسم، حتی اگر بیشتر خوانندگانم نتوانند از آن سر در بیاورند. به هر حال، به امید اینکه بتوانند کمی به سادگی زیبایش پی ببرند این کار را می‌کنم:

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

در سال ۱۹۱۵ این معادله ساده‌تر بود، چون جمله Λg هنوز وجود نداشت. اینشتین این جمله را دو سال بعد اضافه کرد (که در مورد آن توضیح خواهم داد) (۸۷). R به انحنای ریمان بستگی دارد و در کنار Rg $\frac{1}{2}$ انحنای فضا – زمان را نشان می‌دهد؛ T نماد انرژی ماده است؛ G همان ثابتی است که نیوتن یافت: ثابتی که شدت نیروی جاذبه را تعیین می‌کند. همین. یک بینش و یک معادله.

ریاضیات یا فیزیک؟

می‌خواهم مکث کنم و پیش از اینکه بحث را در مورد فیزیک ادامه دهم چند نکته در مورد ریاضیات بگویم. اینشتین ریاضی‌دان بزرگی نبود. ریاضیات برایش دشوار بود. خودش این‌طور می‌گوید. در سال ۱۹۴۳ در پاسخ نامه دختر نُه‌ساله‌ای به نام باربارا که از مشکلش با ریاضیات برای اینشتین نوشته بود، گفت: «غصه سخت بودن ریاضیات را نخور، مطمئن باش من بیشتر از تو با آن مشکل دارم!» (۲) شوخی به نظر می‌آمد، اما اینشتین شوخی نمی‌کرد. او برای ریاضیات کمک لازم داشت: هم‌کلاسی‌ها و دوستان صبورش، مانند مارسل گروسمان (۸۸)، برایش توضیح می‌دادند. نبوغش به عنوان یک فیزیک‌دان او را استثنایی کرده بود.

اینشتین در آخرین سالی که مشغول تکمیل پایه‌های نظریه‌اش بود، با دیوید هیلبرت (۸۹)، یکی از بزرگ‌ترین ریاضی‌دان‌های تمام اعصار، وارد رقابت شد. اینشتین در کوتینگن (۹۰) و در حضور هیلبرت سخنرانی کرد. هیلبرت بلافاصله فهمید اینشتین در شرف کشفی بزرگ است، ایده او را فهمید و سعی کرد پیش از اینشتین معادلات درست نظریه جدیدی را که به تدریج مشغول ساختش بود، روی کاغذ بیاورد. رقابت این دو غول برای رسیدن به خط پایان، جدال نفس‌گیری بود و تنها با چند روز اختلاف پایان یافت. اینشتین تقریباً هر هفته در برلین به صورت عمومی سخنرانی می‌کرد و هر بار معادله جدیدی ارائه می‌داد تا مبادا هیلبرت پیش از او به راه حل دست یابد. هر بار معادله‌اش اشتباه بود. بالاخره با اختلاف بسیار ناچیزی — تنها کمی زودتر از هیلبرت — معادله درست را یافت. اینشتین رقابت را برده بود.

هیلبرت در کمال جوانمردی هرگز پیروزی اینشتین را زیر سؤال نبرد، با وجود اینکه همزمان روی همان معادله کار می‌کرد. در واقع جمله‌ای لطیف و زیبا گفت که رابطه پیچیده اینشتین با ریاضیات یا شاید به طور کلی رابطه دشواری را که فیزیک و ریاضیات با هم دارند، به تصویر می‌کشد. ریاضیات مورد نیاز برای فرموله کردن این نظریه هندسه چهاربعدی بود و هیلبرت می‌نویسد:

هر جوانی در خیابان‌های کوتینگن (۹۱) هندسه چهاربعدی را بهتر از اینشتین می‌فهمد؛ اما اینشتین بود که کار را تمام کرد.

چرا؟ چون اینشتین توانایی منحصربه‌فردی برای تصور ساختار احتمالی جهان داشت، توانایی «دیدن» آن در ذهنش. معادلات، برای او، پس از دیدن ساختار جهان به دست می‌آمدند: زبانی بودند که با آن بینشش را از جهان اثبات می‌کردند. برای اینشتین نظریه نسبیت عام مجموعه‌ای از معادلات نیست: تصویری ذهنی از جهان است که به سختی به زبان معادلات ترجمه شده است.

ایده پشت این نظریه خمیده شدن فضا - زمان است. اگر فضا - زمان تنها دو بعد داشت و ما روی نوعی صفحه زندگی می‌کردیم، تصور معنای عبارت «فضای فیزیکی خمیده می‌شود» راحت بود. معنی‌اش این بود که فضای فیزیکی‌ای که در آن زندگی می‌کنیم شبیه یک میز تخت نیست، بلکه شبیه سطحی است که کوه و دره دارد؛ اما جهانی که ما در آن زندگی می‌کنیم تنها دو بعد ندارد، بلکه سه بعد دارد. در واقع، با احتساب زمان چهار بعد. تصور خمیدگی فضا در چهار بعد کمی پیچیده‌تر است، چون نمی‌توانیم یک «فضای بزرگ‌تر» را که فضا - زمان در آن خمیده می‌شود، تصور کنیم؛ اما برای تخیل اینشتین دشوار نبود این نرم‌تن کیهانی را که در آن غوطه‌وریم ببیند و متوجه شود این نرم‌تن می‌تواند فشرده شود، گسترده شود و در هم پیچد - و فضا - زمان اطراف ما را تشکیل دهد - به لطف این تخیل قوی بود که اینشتین توانست نظریه را زودتر بنویسد.

در نهایت بین هیلبرت و اینشتین کمی تنش به وجود آمد. چند روز پیش از اینکه اینشتین معادله موفقش را به طور عمومی منتشر کند، هیلبرت مقاله‌ای برای یک نشریه فرستاده بود که نشان می‌دهد چقدر به همان پاسخ نزدیک شده بود. حتی امروزه مورخان علم در ارزیابی مقالات مربوط به این نظریه، که این دو غول منتشر کردند، با تردید مواجه‌اند. زمانی رسید که رابطه بین آن‌ها سرد شد و اینشتین می‌ترسید هیلبرت، که مرتبه علمی بالاتر و نفوذ بیشتری داشت، بخواهد بخش اعظم افتخار پایه‌گذاری نظریه را به خود نسبت دهد؛ اما هیلبرت هیچ‌گاه ادعا نکرد نخستین کسی است که نسبیت عام را کشف کرده است. در دنیایی مانند دنیای علم، که بسیار پیش می‌آید بحث‌و‌جدل در رابطه با پیش‌قدم بودن به جاهای باریکی بکشد، این دو الگویی عالی از خردمندی ارائه دادند و تمام تنش‌های منفی را بین یکدیگر برطرف کردند.

اینشتین نامه‌ای فوق‌العاده به هیلبرت می‌نویسد و حس عمیق مسیری را که هر دو طی کردند خلاصه‌وار شرح می‌دهد:

زمانی نوعی تنش و ناراحتی بین ما پیش آمد که دیگر نمی‌خواهم خاستگاهش را تحلیل کنم. با حس تلخی که در من برمی‌انگیخت مبارزه کرده‌ام و کاملاً برآن پیروز شده‌ام. باز هم، بدون کدورت، تو را به چشم یک دوست می‌بینم و از تو می‌خواهم در حقم همین کار را بکنی. حیف است همراهانی چون من و تو، که با وجود ناچیزی جهان توانسته‌ایم راهی بنا کنیم، از مصاحبت با یکدیگر لذت نبریم. (۳)

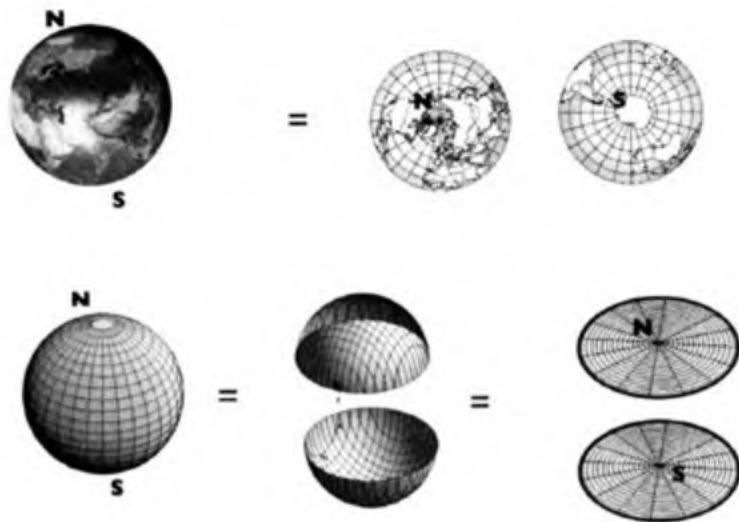
اینشتین دو سال پس از انتشار معادله‌اش تصمیم می‌گیرد برای توصیف فضای کل عالم در بزرگ‌ترین مقیاس از آن استفاده کند. اینجا هم یکی دیگر از ایده‌های شگفت‌انگیزش را رو می‌کند.

هزاران سال بشر از خود می‌پرسید آیا عالم بی‌کران است یا حد و مرزی دارد. هرکدام از این فرضیه‌ها مشکلات بغرنج خود را دارد. عالم بی‌کران معقول به نظر نمی‌رسد: برای مثال، اگر بی‌کران باشد باید در گوشه‌ای از جهان یک نفر عیناً شبیه شما مشغول خواندن همین کتاب باشد (بی‌کران خیلی وسیع است و ترکیب‌های اتم‌ها برای پر کردن آن به صورت‌های همواره مختلف کافی نیستند). در واقع نه‌تنها یک، بلکه باید بی‌نهایت خواننده یکسان با شما وجود داشته باشد... اما اگر عالم مرزی دارد، آن مرز چیست؟ مرزی که در آن سوییچ هیچ‌چیز وجود ندارد، چه معنایی دارد؟ در قرن چهارم میلادی در تارانتو (۹۲)، آرخوتاس (۹۳)، فیلسوف پیرو فیثاغورث نوشته بود:

اگر در دورترین قسمت آسمانی باشم که ستاره‌هایش ثابت‌اند، می‌توانم دستم یا میله‌ای را دراز کنم و از آن فراتر ببرم — یا نه؟ اگر نتوانم که خیلی بی‌معنی و گنگ است؛ اما اگر بتوانم پس خارج از آن چیزی وجود دارد، خواه ماده باشد، خواه فضا. در این صورت همیشه می‌توان دورتر و دورتر رفت و هر بار همین سؤال را کرد، که آیا همیشه چیزی وجود خواهد داشت که میله را فراتر از آن برد؟ (۴)

این راه‌حل‌های بی‌معنا یکی از یکی نامعقول‌تر است — فضای بی‌کران و عالمی با مرز ثابت بی‌معناست — و به نظر گزینه معقولی بین این دو وجود ندارد. اما اینشتین راه سومی یافت: عالم همزمان می‌تواند محدود و بی‌کران باشد. چگونه؟ همان‌طور که سطح زمین بی‌کران نیست، اما کران و «نقطه پایان» هم ندارد. اگر چیزی خمیده باشد، وقوع این پدیده طبیعی است: سطح زمین خمیده است. در نظریه نسبیت عام هم فضای سه‌بعدی می‌تواند خمیده شود. در نتیجه، عالم ما می‌تواند محدود، اما بی‌مرز باشد.

اگر روی سطح زمین در خط راستی حرکت کنم تا بی‌نهایت جلو نخواهم رفت: بالاخره به نقطه‌ی شروع حرکت می‌رسم. عالم ما هم می‌تواند این‌گونه باشد: اگر بر سفینه‌ای فضایی سوار شوم و همواره در جهتی یکسان سفر کنم، عالم را دور خواهم زد و نهایتاً به زمین باز خواهم گشت. چنین فضای سه‌بعدی محدود، اما بدون کران را ۳ - کره می‌نامند.



شکل ۳.۱۱ کره را می‌توان به صورت دو دیسک نشان داد که در واقع، تمام لبه‌هایشان به هم متصل است.

برای درک هندسه «۳ - کره» بگذارید ابتدا سراغ کره معمولی برویم، مانند سطح یک گوی یا زمین. برای نشان دادن سطح زمین روی یک صفحه می‌توانیم، درست مثل کشیدن قاره‌ها، دو دیسک بکشیم (شکل ۱۱.۳).
توجه کنید که به نوعی نیم‌کره شمالی هر شخص ساکن نیم‌کره جنوبی را محصور کرده است، چون او از هر سمت که بخواهد از نیم‌کره‌اش خارج شود، به نیم‌کره شمالی خواهد رسید. اما به وضوح برعکس این مسئله هم درست است: هر نیم‌کره نیم‌کره دیگر را «محصور می‌کند» و از جانب نیم‌کره دیگر محصور می‌شود. یک ۳ - کره را هم می‌توان به شکل مشابهی نشان داد، اما به هرچیز باید یک بعد اضافه کرد: دو گوی که از لبه به هم چسبیده‌اند (شکل ۱۲.۳).

وقتی از یک گوی خارج و به دیگری وارد می‌شویم، درست مانند وقتی است که از یکی از دیسک‌های نشان‌دهنده هر نیم‌کره خارج و به دیگری وارد می‌شویم. هر گوی خودش در احاطه بوده و هریک دیگری را احاطه کرده است. ایده اینشتین این است که فضا می‌تواند یک ۳ - کره باشد: چیزی با حجم متناهی (مجموع حجم دو گوی) اما بدون مرز. (۹۴) ۳ - کره راه‌حلی است که اینشتین در سال ۱۹۱۷ برای مسئله کران عالم مطرح می‌کند. این مقاله آغازگر کیهان‌شناسی مدرن بود، یعنی مطالعه کل عالم قابل‌مشاهده در بزرگ‌ترین مقیاس ممکن. کشف انبساط عالم، نظریه مه‌بانگ، مسئله آغاز عالم و موارد بسیار دیگر حاصل همین مقاله‌اند. در فصل ۸ در مورد همه این‌ها سخن خواهم گفت.

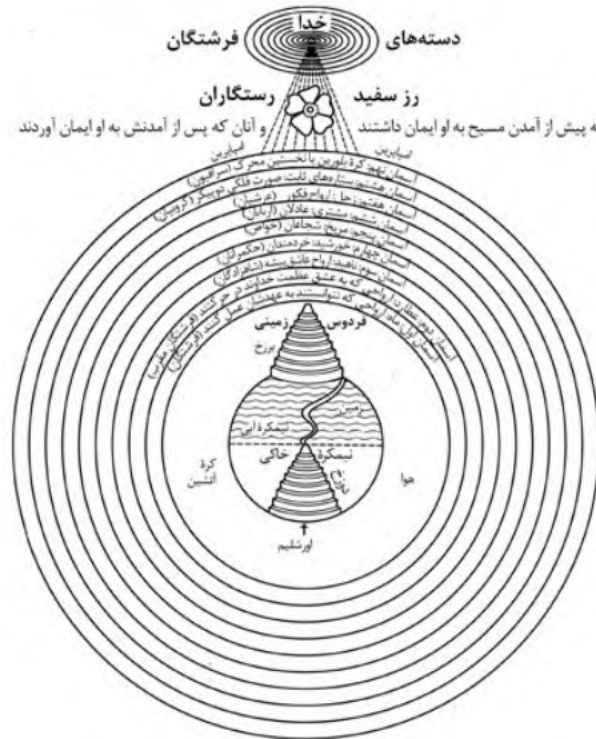


شکل ۳.۱۲ ۳- کره را می‌توان به صورت دو گوی نشان داد که به هم پیوسته‌اند.

دوست دارم به مورد قابل توجه دیگری در مورد ۳ - کره اینشتین اشاره کنم. شاید باورکردنی نباشد اما نابغه دیگری، از فرهنگ و تاریخی کاملاً متفاوت، به ایده مشابهی رسیده بود: دانته آلیگری، بزرگ‌ترین شاعر ایتالیا. دانته در بهشت (۹۵)، یعنی سومین بخش شعر عظیمش، کمدی الهی (۹۶)، از جهان قرون وسطایی که بر پایه جهان ارسطو بنا شده بود، دیدی کلی ارائه می‌دهد. در آن زمین کروی در مرکز است و دیگر کره‌های سماوی آن را احاطه کرده‌اند (شکل ۳.۱۳).

دانته همراه معشوقه زیبایش، بئاتریچه، از این کره‌ها صعود می‌کند و در سفری شگفت‌انگیز و خیالی به دورترین کره می‌رود. وقتی به آن می‌رسد با تأمل عالم زیر پایش را می‌نگرد. بسیار پایین‌تر، کره‌ها در گردش‌اند و زمین در مرکز است. بعد به بالا نگاه می‌کند - و چه می‌بیند؟ یک نقطه نورانی می‌بیند که کره‌های عظیمی از فرشتگان احاطه‌اش کرده‌اند، یعنی گوی عظیم دیگری که به زبان خود او، کره عالم ما را «احاطه کرده و همزمان محاط شده است!» این قسمتی از سرود ۲۷ بهشت است: «این قسمت دیگر جهان اولی را در دایره‌ای احاطه کرده، همان‌گونه که اولی دیگری را.» (۹۷) در سرود بعدی همچنان در مورد آخرین «دایره» می‌گوید: «گویی با همان‌هایی که احاطه کرده، احاطه شده است.» (۹۸) نقطه نور و کره فرشتگان عالم را احاطه کرده‌اند و همزمان در عالم محاط شده‌اند! این دقیقاً توصیف یک ۳ - کره است.

شمای بهشت



شکل ۱۳. ۳. نمایش سنتی جهان دانه

معمولاً تصاویر رایج عالم دانته در کتاب‌های درسی ایتالیایی (مانند شکل ۳.۱۳) کره‌های فرشته‌مانند را از کره‌های آسمانی جدا می‌کنند. اما دانته می‌نویسد این دو گوی هرکدام دیگری را «احاطه کرده و در آن محاط شده است». دانته شهود هندسی بسیار روشنی از ۳ - کره دارد. (۹۹)

در سال ۱۹۷۹ نخستین بار ریاضی‌دان آمریکایی، مارک پیترسون (۱۰۰)، فهمید در بهشت عالم به صورت یک ۳ - کره توصیف شده است. در کل، پژوهشگران آثار دانته چندان با ۳ - کره آشنایی ندارند. امروزه هر فیزیک‌دان و ریاضی‌دان به راحتی متوجه می‌شود دانته عالم را به صورت ۳ - کره توصیف کرده است.

چطور ممکن است دانته ایده‌ای چنین نوین داشته باشد؟ به نظرم در وهله اول به دلیل زیرکی بسیار برترین شاعر ایتالیا بوده است. این زیرکی از دلایلی است که کمدی الهی را این‌چنین شگفت‌انگیز کرده است، اما یکی دیگر از دلایل این است که سال‌ها پیش از آنکه نیوتن همه را متقاعد سازد فضای بی‌کران کیهان فضای تختی مطابق با هندسه اقلیدسی است، دانته درباره این موضوع نوشته بود. دانته از بار آموزه‌های نیوتنی‌ای که شهود ما را تحت تأثیر قرار داده است، رها بود.

فرهنگ علمی دانته اساساً بر پایه آموزه‌های مربی و معلمش، برونو لاتینی (۱۰۱)، بود که از او رساله کوتاه و دل‌انگیزی به نام Li Tresor برایمان مانده است. Li Tresor نوعی دانش‌نامه از علوم قرون وسطاست که به ترکیب زبان زیبای فرانسوی و ایتالیایی قدیم نوشته شده است. برونو در Li Tresor با جزئیات حقیقت گرد بودن زمین را توضیح می‌دهد. اما خواننده امروزی کنجکاو می‌بیند که این کار را از طریق هندسه «داخلی» انجام می‌دهد، نه «خارجی»؛ یعنی نمی‌نویسد اگر از بیرون به زمین بنگرید «زمین مانند یک پرتقال دیده می‌شود»، بلکه می‌نویسد «دو شوالیه اگر به اندازه کافی در دو جهت متفاوت بتازند در سوی دیگر به هم خواهند رسید.» یا می‌نویسد: «اگر دریاها مانع انسان نمی‌شدند، وقتی به یک پیاده‌روی تمام‌نشدن می‌رفت بالاخره به نقطه آغازش بازمی‌گشت.» به عبارت دیگر یک دید درونی برمی‌گزیند، نه دید برونی: دیدگاه کسی که روی زمین قدم برمی‌دارد، نه کسی که از دور آن را نگاه می‌کند. در ابتدا ممکن است شیوه‌ای سخت و بی‌فایده برای توضیح کروی بودن زمین به نظر بیاید. چرا برونو خودش را راحت نمی‌کند و نمی‌گوید زمین مانند یک

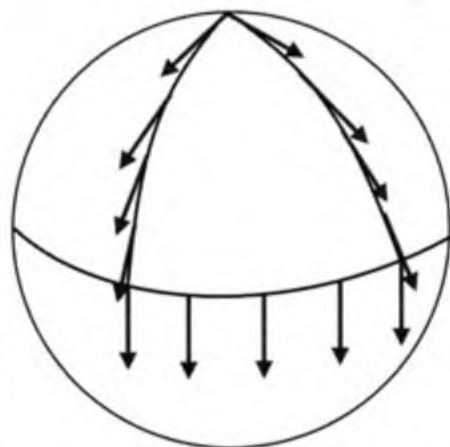
پرتقال است؟ اما فکر کنید: اگر مثلاً مورچه‌ای روی یک پرتقال راه برود، در جایی وارونه روی پرتقال می‌ایستد و باید خود را با استفاده از مکنده‌های کوچک روی پاهایش نگه دارد تا سقوط نکند. اما مسافری که روی زمین راه می‌رود هیچ‌گاه وارونه نخواهد شد و نیاز به لایه‌های مکشی روی پاهایش ندارد. توضیح برون‌تو چندان هم عجیب نیست.

حالا در موردش بیندیشید. برای کسی که از آموزگارش شکل سیاره‌مان را این‌گونه یاد گرفته است، یعنی اینکه اگر همیشه در خطی مستقیم حرکت کنیم، بالاخره به نقطه شروع حرکتان خواهیم برگشت، شاید خیلی هم سخت نباشد که قدم بدیهی بعدی را بردارد و تمام عالم را این‌طور تصور کند که اگر همیشه در خطی راست حرکت کنیم در پایان به نقطه شروعمان می‌رسیم: ۳ - کره فضایی است که «دو شوالیه بال‌دار اگر به اندازه کافی در دو جهت متفاوت پرواز کنند، در سوی دیگر به هم خواهند رسید.» به زبان فنی، هندسه زمین در Li Tresor به زبان هندسه درونی (نگاه از درون) توصیف شده است، نه هندسه برون (نگاه از بیرون). این دقیقاً توضیح مناسب برای تعمیم مفهوم «کره» از دو بعد به سه بعد است. بهترین راه برای توصیف ۳ - کره این نیست که تلاش کنیم «آن را از بیرون ببینیم»، بلکه بهترین راه این است که توضیح دهیم وقتی در آن حرکت می‌کنیم چه رخ می‌دهد.

روشی که گاوس برای توصیف سطوح منحنی ابداع کرد و ریمان آن را برای توصیف فضاها منحنی در سه یا چند بعد تعمیم داد، اساساً هم‌ارز روش برون‌تو لاتینی است. به عبارتی، ایده این است که تلاش نکنیم توضیح دهیم وقتی فضا، یک فضای خارجی، خمیده می‌شود «از بیرون چگونه دیده می‌شود»، بلکه از نگاه شخصی توضیح دهیم که درون آن فضا حرکت می‌کند و در آن می‌ماند. برای مثال سطح یک کره معمولی، همان‌طور که برون‌تو می‌گوید، سطحی است که تمام خطوط «راست» پس از طی فاصله یکسانی (طول استوا) به هم می‌رسند. یک ۳ - کره فضایی سه‌بعدی با همین مشخصات است.

خمیدگی فضا - زمان اینشتین این‌گونه نیست که در «یک فضای خارجی» خمیده شده باشد، بلکه از دید هندسه درونی خمیده است؛ یعنی درهم‌تنیدگی فواصل بین نقاطی که از درونش قابل‌مشاهده است، از جنس هندسه فضای تخت نیست. فضایی است که قضیه فیثاغورث در آن صدق نمی‌کند، همان‌طور که قضیه فیثاغورث روی سطح زمین صدق نمی‌کند. (۱۰۲)

راهی برای فهم خمیدگی فضا از درون، بدون نگاه کردن از بیرون، وجود دارد که برای درک آنچه در ادامه می‌آید، لازم است. فرض کنید در قطب شمال هستید و به سمت جنوب حرکت می‌کنید تا به استوا برسید و با خود پیکانی دارید که به جلو اشاره می‌کند. وقتی به استوا رسیدید، به چپ بپیچید، بدون اینکه جهت پیکان را تغییر دهید. پیکان همچنان به جنوب، که حالا در سمت راست شماست، اشاره می‌کند. در طول استوا کمی به سمت شرق بروید و به سمت شمال بپیچید — باز هم جهت پیکان را تغییر ندهید. حالا پیکان به پشت سر شما اشاره می‌کند. وقتی دوباره به قطب شمال برسید یک مسیر بسته را طی کرده‌اید — که «حلقه» نامیده می‌شود — و دیگر پیکان به همان جهت اولیه، هنگامی که مسیرتان را آغاز کرده بودید، اشاره نمی‌کند (شکل ۳.۱۴). از زاویه‌ای که پیکان در هنگام پیمودن چرخه ایجاد کرده می‌توان انحنا را محاسبه کرد.



شکل ۳.۱۴ پیکانی که به موازات خود یک مدار (حلقه) را روی فضای منحنی طی می‌کند و وقتی به نقطه ابتدایی بازگردد، تغییر جهت می‌دهد.

بعداً به این روش محاسبه انحنا از طریق طی کردن حلقه در فضا بازخواهم گشت. نام نظریه گرانش کوانتومی حلقه از همین حلقه‌ها برگرفته شده است. دانتته در سال ۱۳۰۱ میلادی، وقتی موزائیک‌کاری گنبد تعمیدگاه فلورانس تکمیل می‌شود، آن شهر را ترک می‌کند. این موزائیک‌کاری (اثر کوپو دی مارکووالدو^(۱۰۳))، استاد چیمابوئه^(۱۰۴)) که احتمالاً به چشم شخص قرون وسطایی هراس‌انگیز می‌آمد، معمولاً به عنوان منبع الهامی برای دانتته برشمرده می‌شود (شکل ۳.۱۵).



شکل ۳.۱۵ موزائیک‌کاری تعمیدگاه فلورانس اثر کوپو دی مارکووالدو که جهنم را به تصویر می‌کشد.

کمی پیش از آغاز نوشتن این کتاب به همراه امانوئلا مینای(۱۰۵)، دوستی که من را متقاعد کرد این کتاب را بنویسم، به دیدن تعمیدگاه رفتیم. وقتی وارد تعمیدگاه می‌شوید و بالا را نگاه می‌کنید، نقطه‌ای نورانی و درخشان می‌بینید (منبع این نور فانوسی است که در بالاترین نقطه طاق قرار دارد) که نه دسته فرشته آن را احاطه کرده‌اند و نام دسته‌ها نیز نوشته شده است: فرشتگان، فرشتگان مقرب، شاهزادگان، حکمرانان، خواص، اربابان، عرشیان، کروییان و سرافیم‌ها(۱۰۶). این درست مطابق با ساختار کره دوم است که دانته در بهشت توصیف می‌کند. تصور کنید مورچه‌ای هستید در کف تعمیدگاه و می‌توانید در هر جهتی که خواستید حرکت کنید؛ از هر سوی دیوار که بالا روید به نقطه‌ای نورانی می‌رسید که فرشتگان آن را احاطه کرده‌اند: نقطه نور و فرشتگان و باقی تزئینات داخلی تعمیدگاه یکدیگر را «احاطه می‌کنند» و «در هم محاط‌اند» (شکل ۳.۱۶).



شکل ۳.۱۶ اندرونی تعمیدگاه

دانته هم مانند هر شهروند دیگر فلورانس در پایان قرن سیزدهم بی‌شک عمیقاً تحت تأثیر تعمیدگاه، این شاهکار معماری که در شهرش

ساخته می‌شد، بود. به نظر ممکن است تعمیدگاه منبع الهام او برای دیدگاهش نسبت به کیهان بوده باشد؛ نه فقط دوزخ کوپو دی مارکووالدو، بلکه معماری کلی این ساختمان. بهشت تا حد زیادی بازسازی دقیق همین ساختار است که نه دسته فرشته و نقطه نورانی را هم شامل می‌شود. تنها آن را از دو بعد به سه بعد برده است. برون‌تو پس از توصیف عالم کروی ارسطو نوشته بود که ورای آن جایگاه الوهیت قرار دارد – و پیکرنگاری قرون وسطایی هم پیش از آن بهشت را پروردگاری تصور کرده بود که کره‌های فرشتگان آن را احاطه کرده است. در نهایت، دانتی تنها تکه‌هایی را که از قبل وجود داشتند، به مجموعه منسجم معماری پیوند می‌دهد. این پیوند از معماری الهام‌بخش تعمیدگاه پیروی می‌کند و راه‌حلی برای مسئله کهن مرزهای عالم ارائه می‌دهد. به این ترتیب، دانتی شش قرن پیش ۳ – کره اینشتین را پیش‌بینی می‌کند.

نمی‌دانم آیا اینشتین جوان در دوره تفکرات آشفته‌اش در ایتالیا با بهشت مواجه شده بود یا نه و آیا تخیل پرشور این شاعر ایتالیایی تأثیر مستقیمی بر شهود او گذاشته بود که به این نتیجه برسد عالم می‌تواند هم بی‌کران و هم کران‌دار باشد یا نه. به نظر چه تأثیر گرفته باشد و چه نه، این مثالی عالی است که نشان می‌دهد چگونه علم عالی و شعر عالی هر دو خیال‌پردازانه‌اند و حتی ممکن است به نتیجه یکسانی منتهی شوند. ساده‌انگارانه است که فرهنگ ما علم و شعر را تفکیک می‌کند: هر دو ابزارهایی‌اند که چشمانمان را به پیچیدگی و زیبایی عالم باز می‌کنند.

۳ – کره دانتی تنها حس شهودی او در یک رؤیاست. ۳ – کره اینشتین شکل ریاضیاتی دارد و از معادلات نظریه پیروی می‌کند. هر دو تأثیر متفاوتی دارند. دانتی ما را عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌دهد و احساساتمان را جریحه‌دار می‌کند. اینشتین جاده‌ای به رازهای کشف‌نشده جهان هستی می‌گشاید. اما هر دو از زیباترین و بلندپروازانه‌ترین قدم‌هایی‌اند که ذهن می‌تواند بردارد.

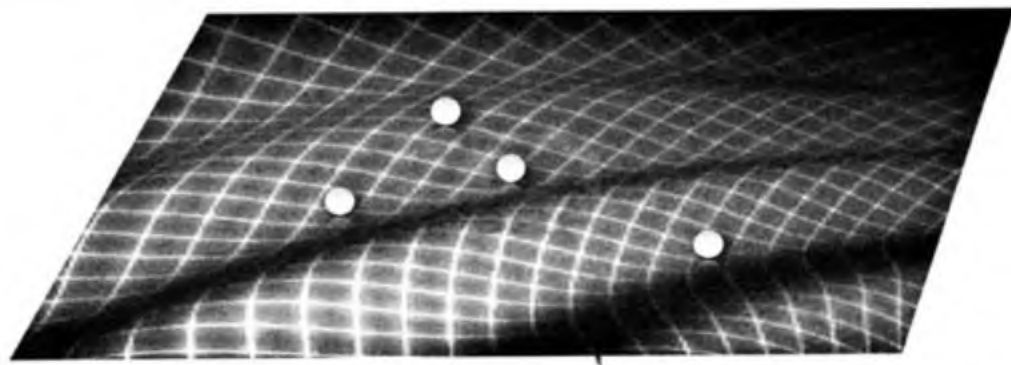
اما بگذارید به سال ۱۹۱۷ برگردیم. زمانی که اینشتین تلاش می‌کند ۳ – کره را در معادلاتش بگنجاند با مشکلی روبه‌رو می‌شود. او قانع می‌شود که عالم ثابت و بی‌حرکت است، اما معادلاتش به او می‌گویند این امر ناممکن است. درک علت این مسئله سخت نیست. همه‌چیز یکدیگر را جذب می‌کنند، بنابراین تنها راه برای اینکه یک عالم محدود در خود فرونریزد این است که گسترش یابد: درست همان‌طور که

تنها راه برای جلوگیری از سقوط یک توپ روی زمین این است که آن را به بالا پرت کنیم. توپ یا بالا می‌رود یا به پایین سقوط می‌کند. نمی‌تواند ثابت و معلق در هوا بماند.

اما اینشتین آنچه را معادلاتش نشان می‌دهد، باور نمی‌کند. حتی یک اشتباه فیزیکی ساده‌انگارانه هم مرتکب می‌شود (متوجه نمی‌شود راه‌حل مدنظرش ناپایدار است)؛ فقط برای اینکه از پیش‌بینی نظریه‌اش اجتناب کند این‌طور نتیجه‌گیری می‌کند: عالم یا فشرده می‌شود یا گسترده. معادلاتش را تغییر می‌دهد تا از این برداشت که عالم در حال گسترش است، اجتناب کند. به همین دلیل عبارت Λ gab را به معادلهٔ بالا اضافه می‌کند، اما این اشتباه دیگری است: عبارت اضافه‌شده صحیح است، اما این حقیقت را که معادله پیش‌بینی می‌کند عالم باید در حال گسترش باشد، تغییر نمی‌دهد. اینشتین نابغه، با همهٔ شجاعتش، شهامت پذیرش معادلات خود را ندارد.

چند سال بعد اینشتین وادار می‌شود باور خود را کنار بگذارد: آنچه درست است نظریه‌اش است، نه انتظاراتی که از آن دارد. اخترشناسان می‌فهمند واقعاً تمام کهکشان‌ها در حال دور شدن از ما هستند. درست طبق پیش‌بینی معادلات عالم در حال گسترش است. چهارده میلیارد سال پیش عالم تقریباً در یک نقطهٔ تکین و بسیار داغ متمرکز بود. از آنجا گسترش یافت و یک انفجار عظیم «کیهانی» رخ داد — اینجا واژهٔ «کیهانی» به معنی استعاری به کار نرفته است، بلکه این انفجار به معنای دقیق کلمه کیهانی بود. همان «مه‌بانگ».

امروزه می‌دانیم گسترش عالم حقیقت دارد. در سال ۱۹۶۴ موضوعی که معادلات اینشتین پیش‌بینی کرده بودند، به طور قطعی به اثبات رسید. دو اخترشناس رادیویی آمریکایی، آرنو پنزیاس و رابرت ویلسون، به طور اتفاقی تابش‌هایی را کشف کردند که در سراسر عالم پخش شده بودند و معلوم می‌شود دقیقاً همان باقی‌ماندهٔ گرمای شدید عالم آغازین است. بار دیگر نظریهٔ اینشتین با حیرت‌انگیزترین پیش‌بینی‌هایش درست از آب درآمد.



شکل ۳.۱۷ جهان اینشتین: ذرات و میدان‌هایی که روی دیگر میدان‌ها حرکت می‌کنند.

از وقتی دریافتیم زمین گرد است و مانند فرفره‌ای دیوانه‌وار می‌چرخد، فهمیده‌ایم حقیقت آن چیزی نیست که به نظر می‌آید: هر بار به جنبه تازه‌ای از آن نگاهی می‌اندازیم، احساساتمان عمیقاً جریحه‌دار می‌شود. پرده دیگری کنار رفته است. اما قدمی که اینشتین برداشت بی‌نظیر است: فضا - زمان یک میدان است؛ جهان تنها از میدان‌ها و ذرات تشکیل شده است؛ فضا و زمان مجزا از طبیعت نیستند: تنها یک میدان بین سایر میدان‌ها هستند (شکل ۱۷.۳).

در سال ۱۹۵۳، کودکی دبستانی خطاب به اینشتین نوشت: «کلاس ما عالم را مطالعه می‌کند. من فضا را خیلی دوست دارم. می‌خواهم از شما تشکر کنم برای اینکه تلاش کردید تا ما آن را درک کنیم.» (۵)
من هم احساس او را دارم.

۴. کوانتا

دو ستون فیزیک قرن بیستم — نسبیت عام و مکانیک کوانتومی — تفاوت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. نسبیت عام یک جواهر به هم فشرده است: یک نفر آن را ارائه کرده، از ترکیب نظریه‌های قبلی حاصل شده است و دید ساده‌ای از گرانش، فضا و زمان ارائه می‌دهد. از سوی دیگر مکانیک کوانتومی یا نظریه کوانتوم از آزمایش‌های مختلف طی یک دوره تکوینی طولانی، به مدت بیش از ربع قرن، پدید آمده است که افراد بسیاری در آن نقش داشته‌اند؛ مکانیک کوانتومی موفقیت آزمایشگاهی بی‌نظیری کسب کرده و به کاربردهایی منتهی شده که زندگی روزمره ما را متحول کرده است (برای مثال همین کامپیوتری که با آن می‌نویسم)؛ اما بیش از صد سال پس از ظهورش همچنان در هاله‌ای از ابهام و گنگی قرار دارد.

این فصل فیزیک عجیب این نظریه را شرح می‌دهد و نحوه پیدایش آن را روایت می‌کند؛ همچنین سه جنبه از واقعیت را که این نظریه آشکار کرده است، توضیح می‌دهد: ساختار ذره‌ای، تعیین‌ناپذیری و نسبی بودن.

دوباره آلبرت

گفته می‌شود مکانیک کوانتومی درست در سال ۱۹۰۰ پدید آمد و عملاً راهی به یک قرن اندیشه ژرف گشود. در سال ۱۹۰۰ ماکس پلانک (۱۰۷)، فیزیک‌دان آلمانی، در تلاش است میزان موج‌های الکترومغناطیسی را در تعادل درون یک جعبه داغ و بدون هوا محاسبه کند. برای پیدا کردن فرمولی که نتایج آزمایشگاهی را تأیید کند در نهایت به ترفندی متوسل می‌شود که چندان معنادار به نظر نمی‌رسد: او فرض می‌کند انرژی میدان الکتریکی با «کوانتا»، یعنی بسته‌های کوچک یا آجرهای کوچکی از انرژی توزیع می‌شود. او فرض می‌کند اندازه این بسته‌ها به فرکانس (یعنی رنگ) موج الکترومغناطیسی بستگی دارد. برای موج‌هایی با فرکانس ν انرژی هر کوانتوم یا هر بسته معادل است با:

$$E = h\nu$$

این اولین فرمول مکانیک کوانتومی است؛ h ثابت جدیدی است که امروزه آن را ثابت پلانک می‌نامیم. این ثابت تعیین می‌کند در هر بسته به ازای پرتویی با فرکانس (رنگ) ν چه مقدار انرژی نهفته شده است. ثابت h مقیاس تمام پدیده‌های کوانتومی را مشخص می‌کند. این ایده که ممکن است انرژی از تعداد بسته‌های معینی تشکیل شده باشد با تمام دانسته‌های آن‌زمان در تضاد بود: تصور می‌شد انرژی چیزی است که می‌تواند به طور پیوسته تغییر کند و دلیلی نداشت آن را به صورت ذره‌ای در نظر گرفت. برای مثال انرژی یک آونگ دامنه نوسان آن را تعیین می‌کند. به نظر می‌رسد دلیلی ندارد یک آونگ تنها به اندازه‌های معینی جابه‌جا شود. برای ماکس پلانک در نظر گرفتن انرژی به صورت بسته‌هایی با اندازه متناهی تنها یک ترفند عجیب بود که به صورت اتفاقی با محاسباتش جور درآمد — یعنی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را بازتولید می‌کرد — اما هیچ دلیل مشخصی نداشت.

پنج سال بعد، آلبرت اینشتین — باز هم او — بود که فهمید بسته‌های انرژی پلانک واقعی‌اند. این موضوع سومین مقاله‌ای بود که در سال ۱۹۰۵ به سالنامه فیزیک فرستاد. این تاریخ تولد حقیقی نظریه کوانتوم است.

اینشتین در این مقاله استدلال می‌کند که نور واقعاً از ذرات کوچک، ذرات نوری تشکیل شده است. وی پدیده‌ای را که اخیراً مشاهده

شده بود در نظر می‌گیرد: اثر فوتوالکتریک. موادی هستند که وقتی نور به آن‌ها می‌تابد جریان الکتریکی ضعیفی تولید می‌کنند. به عبارتی هنگامی که نور به آن‌ها می‌تابد الکترون ساطع می‌کنند. برای مثال امروزه از این پدیده در سلول‌های فوتوالکتریکی استفاده می‌کنیم که با حسگر و دریافت نور، هنگامی که به در نزدیک می‌شویم، آن را باز می‌کنند. رخ دادن این پدیده عجیب نیست، چون نور حامل انرژی است (برای مثال گرمان می‌کند) و این انرژی باعث می‌شود الکترون‌ها از اتم‌هایشان «بیرون بپرند»؛ آن‌ها را به بیرون هل می‌دهد.

اما یک چیز عجیب است: منطقی است که انتظار داشته باشیم وقتی انرژی نور اندک است — یعنی وقتی نور کم است — این پدیده رخ ندهد و تنها وقتی رخ دهد که نور به اندازه کافی وجود داشته باشد — یعنی وقتی نور زیاد باشد — اما این‌گونه نیست: چیزی که می‌بینیم این است که این پدیده تنها وقتی رخ می‌دهد که فرکانس نور بالا باشد و وقتی فرکانس پایین باشد چنین اتفاقی نمی‌افتد؛ یعنی رخ دادن یا رخ ندادنش به رنگ نور (فرکانس) بستگی دارد و نه به شدت (انرژی) نور. این پدیده را به هیچ وجه نمی‌توان با فیزیک استاندارد آن‌زمان توضیح داد.

اینشتین از ایده بسته‌های انرژی پلانک، که اندازه‌شان به فرکانس بستگی دارد، استفاده می‌کند و متوجه می‌شود در صورت وجود داشتن این بسته‌ها می‌توان این پدیده را توضیح داد. درک علت آن مشکل نیست. فرض کنید نور به صورت ذرات انرژی دریافت شود. اگر ذره‌ای با انرژی زیاد به یک الکترون برخورد کند، آن الکترون از اتم خود به بیرون پرتاب می‌شود. چیزی که اهمیت دارد انرژی هر ذره است، نه تعداد ذرات. اگر طبق فرضیه پلانک انرژی هر ذره را فرکانس آن تعیین کند، این پدیده تنها وقتی اتفاق می‌افتد که فرکانس به اندازه کافی بالا باشد، یعنی هنگامی که انرژی هر ذره، بدون در نظر گرفتن کل انرژی اطرافش، به اندازه کافی زیاد باشد.

شبیه بارش تگرگ است: اینکه بدنه خودرو شما فرورفته می‌شود یا نه، ربطی به مقدار کل تگرگ‌های باریده‌شده ندارد، بلکه به اندازه هر تگرگ بستگی دارد. ممکن است تگرگ شدیدی بیارد، اما اگر تمام تگرگ‌ها ریز باشند آسیبی به خودرو وارد نمی‌شود. به همین ترتیب، اگر شدت نور زیاد باشد — مثل آنکه بگوییم بسته‌های نور زیادند — اما اندازه ذرات نور کوچک باشد، یعنی فرکانسش خیلی پایین باشد، باعث نمی‌شود هیچ الکترونی از اتم خارج شود. این امر توضیح می‌دهد که چرا رخ دادن اثر فوتوالکتریک به رنگ نور بستگی دارد و نه به

شدت آن. اینشتین به خاطر این استدلال ساده جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد. معما چو حل گشت، آسان شود. دشواری کار در اندیشیدن و حل کردن مسئله است.

امروزه این بسته‌های انرژی را «فوتون» می‌نامیم که از واژه یونانی نور برگرفته شده است: $\phi\omega\nu$. فوتون‌ها ذرات نورند، «کوانتای» آن. اینشتین در مقاله می‌نویسد:

گمان می‌کنم اگر فرض کنیم انرژی نور به طور گسسته در فضا توزیع شده است درک مشاهدات مرتبط با تشعشعات جسم سیاه، فلورسانس، تولید پرتوهای کاتدی با نور فرابنفش و دیگر پدیده‌های مربوط به تابش یا تبدیل نور آسان‌تر شود. طبق فرضی که اینجا در نظر گرفتیم، انرژی یک پرتوی نور که از یک منبع نقطه‌ای ساطع شده است به طور پیوسته در فضای در حال گسترش توزیع نمی‌شود، بلکه از تعداد متناهی «کوانتای انرژی» تشکیل می‌شود که در نقاطی در فضا واقع شده‌اند، بدون از هم گسستن حرکت می‌کنند و تنها به صورت واحدهای کامل تولید و جذب می‌شوند. (۱)

این خطوط ساده و روشن، گواهی تولد حقیقی نظریه کوانتوم‌اند. به شروع خارق‌العاده‌اش، «گمان می‌کنم»، دقت کنید که یادآور تردید فارادی یا نیوتن یا دودلی داروین در نخستین صفحات منشأ انواع (۱۰۸) است. نابغه واقعی از اهمیت قدمی که برمی‌دارد مطلع است و همیشه محتاط... رابطه آشکاری بین مقاله اینشتین در مورد حرکت براونی (که در فصل ۱ مطرح شد) و پژوهشش بر کوانتای نور، که هر دو در سال ۱۹۰۵ تکمیل شدند، وجود دارد. در مورد اول اینشتین توانست توضیحی برای فرضیه اتمی، یعنی ساختار ذره‌ای ماده، بیابد. در مورد دوم همان فرضیه را به نور تعمیم می‌دهد: نور هم باید ساختار ذره‌ای داشته باشد.

در ابتدا، همکاران اینشتین ایده او را که می‌گفت ممکن است نور از فوتون‌ها تشکیل شده باشد تنها سرکشی دوران جوانی محسوب

می‌کنند. همه او را به خاطر نظریه نسبیت می‌ستایند، اما تصور فوتون‌ها را عجیب و غریب می‌انگارند. چندی نگذشته بود که دانشمندان قانع شده بودند که نور موجی در میدان الکترومغناطیسی است: چطور ممکن است از ذرات تشکیل شده باشد؟ مشهورترین فیزیک‌دان آن‌زمان نامه‌ای به وزارت آلمان در برلین می‌نویسد و توصیه می‌کند در آنجا یک کرسی استادی به اینشتین بدهند، می‌نویسد این مرد جوان آن‌قدر با استعداد است که می‌توان برخی از تئوری‌هایش را مانند نظریه فوتون‌ها «بخشید». در آینده‌ای نه‌چندان دور، همان همکارها درست به دلیل کشف وجود فوتون‌ها جایزه نوبل فیزیک را به او اهدا کردند. نور مانند تگرگ ملایمی بر زمین می‌بارد.

برای فهم اینکه نور چطور هم می‌تواند یک موج الکترومغناطیسی باشد و هم انبوهی از فوتون‌ها باید تا شکل‌گیری کامل مکانیک کوانتومی صبر کرد؛ اما اولین سنگ بنای این نظریه سر جایش تثبیت شده است: در همه‌چیز یک ساختار ذره‌ای وجود دارد، از جمله نور.

نیلز، ورنر و پل

اگر پلانک پدر واقعی نظریه کوانتوم باشد، اینشتین مادری است که او را به دنیا آورد و او را پروراند. اما مانند اکثر بچه‌ها این نظریه هم راه خود را رفت و اینشتین دیگر خود را مالک آن ندانست.

در دو دهه اول قرن بیستم، دین نیلز بور (۱۰۹) مسئولیت پیشبرد توسعه آن را به عهده دارد. بور ساختار اتم را، که در آغاز قرن جدید پژوهش در مورد آن شروع شده بود، مطالعه می‌کند. آزمایش‌ها نشان داده بود اتم مانند یک منظومه شمسی کوچک است: جرم در یک هسته مرکزی سنگین متمرکز شده و اطراف آن الکترون‌های سبک در گردش‌اند، کمابیش شبیه سیاره‌های اطراف خورشید. اما این تصور قادر به توضیح یک واقعیت ساده نبود: ماده رنگی است.

نمک سفید، فلفل سیاه سیاه و فلفل چیلی قرمز است. چرا؟ با مطالعه نور منتشرشده از اتم‌ها معلوم می‌شود که هر ماده رنگ مشخصی دارد. از آنجایی که رنگ فرکانس نور است، پس هر ماده نور را با فرکانس‌های مشخص و ثابتی منتشر می‌کند. مجموعه فرکانس‌های مختص هر ماده را طیف آن ماده می‌نامند. طیف مجموعه خطوط باریکی با رنگ‌های مختلف است که از تجزیه نور منتشرشده از یک ماده (مثلاً با منشور) به دست می‌آید. طیف چند ماده در شکل ۴.۲ نشان داده شده است.



شکل ۴.۱ نیلز بور

در آغاز قرن جدید طیف مواد زیادی در آزمایشگاه‌های مختلف مطالعه و دسته‌بندی شده بود، اما هیچ‌کس نمی‌توانست توضیح دهد چرا هر ماده طیف معینی دارد. رنگ این خطوط را چه چیزی تعیین می‌کند؟



سدیم



جیوه



لیتیم



هیدروژن

شکل ۴.۲ طیف چند عنصر: سدیم، جیوه، لیتیم و هیدروژن.

رنگ سرعت نوسان خطوط فارادی است. این سرعت را نوسان بارهای الکتریکی‌ای که نور را منتشر می‌کنند، تعیین می‌کنند. در نتیجه با مطالعه طیف یک ماده می‌توانیم بفهمیم الکترون‌هایش چطور به دور هسته می‌چرخند. از طرف دیگر، در هر اتم می‌توانیم با محاسبه فرکانس چرخش الکترون‌ها به دور هسته، طیف آن را مشخص کنیم. گفتنش آسان است، اما در عمل هیچ‌کس قادر نبود این کار را انجام دهد. در واقع کل ماجرا غیرممکن به نظر می‌آمد، چون در مکانیک نیوتنی الکترون می‌تواند با هر سرعتی به دور هسته بچرخد و در نتیجه نور را با هر فرکانسی منتشر کند. پس چرا نور منتشرشده از یک اتم همه رنگ‌ها را ندارد و فقط چند رنگ خاص را انتشار می‌دهد؟ چرا طیف اتمی به جای یک طیف پیوسته از رنگ‌ها، فقط چند خط مجزا دارد؟ به زبان فنی، چرا این طیف «گسسته» است و نه پیوسته؟ برای دهه‌ها بود که به نظر می‌رسید فیزیک‌دان‌ها قادر به یافتن پاسخ نیستند.

بور با فرضیه‌ای عجیب پاسخی احتمالی می‌یابد. او می‌فهمد اگر برای انرژی الکترون‌های اتم تنها مقادارهای «کوانتیزه» معینی در نظر بگیریم، می‌توانیم همه‌چیز را توضیح دهیم. درست همان‌طور که پلانک و اینشتین برای انرژی کوانتای نور مقادارهای معینی در نظر گرفتند. دوباره ذره‌ای بودن نقش کلیدی بازی می‌کند، اما این بار نه برای انرژی نور، بلکه برای انرژی الکترون‌های اتم. کم‌کم معلوم شد ساختار ذره‌ای در طبیعت متداول است.

بور فرض می‌کند الکترون‌ها تنها می‌توانند فاصله‌های معین و «خاصی» از هسته داشته باشند، به عبارتی تنها می‌توانند در مدارهای معینی بچرخند که مقیاس این مدارها را h ، ثابت پلانک، مشخص می‌کند. الکترون‌ها می‌توانند با دریافت انرژی از مداری به مدار دیگر «جهش» کنند. این همان «جهش‌های کوانتومی» معروف است. فرکانس حرکات الکترون‌ها در این مدارها، فرکانس نور منتشرشده را تعیین می‌کند و از آنجا که الکترون مجاز است تنها در مدارهای معینی قرار بگیرد، نور تنها در فرکانس‌های معینی ساطع می‌شود.

این فرضیه‌ها «مدل اتمی» بور را، که یادبود صدسالگی آن در سال ۲۰۱۳ برگزار شد، توصیف می‌کنند. با این فرضیه‌ها (عجیب اما ساده) بور توانست طیف تمام اتم‌ها را محاسبه کند و حتی طیف‌های مشاهده‌نشده را با دقت پیش‌بینی کند. موفقیت آزمایشگاهی این مدل ساده حیرت‌آور است.

روشن است که باید رگه‌هایی از حقیقت در این فرض‌ها نهفته باشد، حتی اگر با تمام تصورات فعلی ما از ماده و دینامیک در تضاد باشد. اما چرا تنها مدارهای معینی وجود دارد؟ منظور از «جهش» الکترون‌ها چیست؟

در مؤسسه بور در کپنهاگ (۱۱۰) خوش‌فکرترین جوانان قرن گرد هم می‌آیند تا به این ملغمه رفتارهای نامفهوم در دنیای اتمی سامان دهند و نظریه‌ای منسجم را پایه‌گذاری کنند. این پژوهش دشوار و زمانبر است، تا اینکه جوانی آلمانی کلید گشایش راز جهان کوانتومی را می‌یابد.

ورنر هایزنبرگ (۱۱۱) هنگامی که معادلات مکانیک کوانتومی را می‌نویسد بیست و پنج سال دارد، همان سنی که اینشتین سه مقاله بزرگش را نوشت. هایزنبرگ این معادلات را بر پایه ایده‌های گیج‌کننده‌ای می‌نویسد.



شکل ۴.۳ ورنر هایزنبرگ

این بینش شبی در پارک پشت مؤسسه فیزیک کپنهاگ به ذهنش می‌رسد. ورنر جوان، غرق در اندیشه، در پارک قدم می‌زند. خیلی تاریک است؛ سال ۱۹۲۵ است. گه‌گاه به چراغی برمی‌خوریم که جزیره‌های نیمه‌روشنی را، اینجاوآنجا، شکل می‌دهند. دریای بزرگی از تاریکی استخرهای نورانی را جدا کرده است. هایزنبرگ ناگهان گذر شخصی را می‌بیند. در واقع او گذرش را نمی‌بیند: می‌بیند که زیر چراغی پدیدار می‌شود، سپس در تاریکی ناپدید می‌شود، زیر چراغ دیگری پدیدار می‌شود و دوباره در تاریکی فرومی‌رود. به همین ترتیب از قسمتی نورانی به قسمت نورانی دیگری می‌رود تا اینکه به تمامی در تاریکی شب ناپدید می‌شود. هایزنبرگ می‌اندیشد «ظاهراً» مرد در واقع ناپدید و پدیدار نمی‌شود: در ذهنش می‌تواند به راحتی مسیر مرد را بین یک چراغ و چراغ دیگر تصور کند. به هر حال، مرد یک جسم حقیقی، بزرگ و سنگین است — اجسام بزرگ و سنگین بی‌دلیل ناپدید و پدیدار نمی‌شوند...

آه! این اجسام که حقیقی، بزرگ و سنگین‌اند ناپدید و پدیدار نمی‌شوند... اما در مورد الکترون‌ها چه می‌دانیم؟ فکری به ذهنش می‌رسد. چرا اجسام ریز مانند الکترون‌ها هم باید رفتار مشابه داشته باشند؟ اگر الکترون‌ها واقعاً بتوانند ناپدید و پدیدار شوند چه؟ اگر طبق آنچه به نظر می‌رسد، این جهش‌های کوانتومی باشند که ساختار طیف اتمی را تشکیل می‌دهند چه؟ اگر بین برهم‌کنش با یک چیز و برهم‌کنش با چیز دیگر، الکترون واقعاً هیچ‌جا نباشد چه؟ اگر الکترون تنها در برهم‌کنش یا برخورد با چیز دیگر خود را نشان دهد و بین دو برهم‌کنش هیچ موقعیت مشخصی نداشته باشد چه؟ اگر داشتن موقعیت مشخص فقط مربوط به اجسامی باشد که به اندازه کافی قابل‌توجه‌اند چه؟ اجسامی بزرگ و سنگین مانند مردی که چندی پیش مانند شبی در تاریکی پیش رفت و بعد در شب ناپدید شد...

فقط شخصی که در دهه دوم زندگی‌اش است، می‌تواند چنین گزاره‌های هذیانی‌ای را جدی بگیرد. باید بیست و چندساله باشید تا باور کنید این‌ها می‌توانند یک نظریه جهانی شوند. شاید باید این‌قدر جوان باشید تا برای نخستین بار، بهتر از بقیه، ساختار ژرف طبیعت را بفهمید. همان‌طور که اینشتین در دهه دوم زندگی‌اش فهمید زمان برای همه یکسان نمی‌گذرد. هایزنبرگ هم در آن شب در کپنهاگ همین سن را داشت. شاید بعد از سی‌سالگی دیگر نباید به بینش‌هایتان توجه کنید...

هایزنبرگ سرشار از حس هیجان به خانه بازمی‌گردد و در محاسبات غرق می‌شود. مدتی بعد با نظریه‌ای مبهوت‌کننده پیدایش می‌شود: توضیحی بنیادی از حرکت ذرات که نه با موقعیتشان در هر لحظه، بلکه تنها با موقعیتشان در لحظاتی خاص توصیف می‌شوند: در لحظاتی که با چیز دیگری برهم‌کنش دارند.

این دومین سنگ بنای مکانیک کوانتومی و دشوارترین کلید آن است: جنبه نسبی چیزها. الکترون‌ها همیشه وجود ندارند. تنها وقتی وجود دارند که برهم‌کنش داشته باشند. وقتی با چیز دیگری برخورد می‌کنند، هویدا می‌شوند. جهش‌های کوانتومی الکترون‌ها از مداری به مدار دیگر نمایانگر وجود آنهاست: الکترون ترکیبی از جهش‌ها از برهم‌کنشی به برهم‌کنش دیگر است. وقتی هیچ‌چیز سر راه الکترون قرار نگیرد، در هیچ‌جایی الکترون وجود نخواهد داشت. هایزنبرگ به جای نوشتن موقعیت و سرعت الکترون جدولی از اعداد (ماتریس) می‌نویسد. او این جدول‌های اعداد را، که نشان‌دهنده تعامل‌های ممکن الکترون هستند، ضرب و تقسیم می‌کند. نتایج، گویی از چرتکه یک جادوگر حاصل شده باشند، درست با مشاهدات تطابق دارند. این‌ها اولین معادلات مکانیک کوانتومی‌اند. از اینجا به بعد، معادلات درباره اتم‌ها صدق می‌کنند. باورنکردنی است، اما تا به حال این معادلات در هیچ موردی اشتباه نکرده‌اند.

در آخر، یک بیست‌وپنج‌ساله دیگر کاری را که هایزنبرگ شروع کرده بود از سر می‌گیرد، این نظریه جدید را برمی‌دارد و چهارچوب ریاضیاتی کامل و دقیقی برای آن می‌سازد: پل آدرین موریس دیراک (۱۱۲) انگلیسی، که بسیاری او را پس از اینشتین بزرگ‌ترین فیزیک‌دان قرن بیستم می‌دانند.



شکل ۴.۴ پل دیراک

دیراک با وجود اعتبار علمی‌اش شهرت بسیار کمتری از اینشتین دارد. این مسئله تا حدی به خاطر انتزاعی و غامض بودن آثارش و تا حدی هم به خاطر شخصیت پریشانش است. در جمع ساکت بود، بسیار گوشه‌گیر، ناتوان در ابراز احساسات و همواره از تشخیص چهرهٔ آشنایان عاجز بود — حتی نمی‌توانست یک مکالمهٔ معمولی را شروع کند یا حتی، ظاهراً، پرسش‌های ساده را بفهمد. دیراک عملاً درخودمانده به نظر می‌رسید و احتمالاً در طیف بیماران مبتلا به اوتیسم قرار می‌گرفت.

در یکی از سخنرانی‌هایش همکاری به او گفت: «این فرمول را نمی‌فهمم». دیراک پس از سکوت و مکثی کوتاه بی‌توجه به او کارش را ادامه داد. مدیر جلسه او را متوقف کرد و از او خواست پرسش را پاسخ دهد. دیراک که صادقانه متحیر شده بود، گفت: «پرسش؟ کدام پرسش؟ همکاری من یک جملهٔ خبری گفت.» اگر به دید زبان‌شناسی نگاه کنیم دیراک درست می‌گفت. کار او از روی گستاخی نبود: مردی که می‌توانست رازهای حیرت‌آور طبیعت را، که از دید دیگران مخفی بود، کشف کند، از درک معنای ضمنی زبان عاجز بود، نمی‌توانست کاربرد غیرلفظی آن را متوجه شود و معنای ظاهری همه‌چیز را در نظر می‌گرفت. (۲) با وجود این، مکانیک کوانتومی در دستان او از ملغمهٔ بینش‌ها، محاسبات خام، بحث‌های متافیزیکی مبهم و معادلاتی که دربارهٔ اتم صدق می‌کردند اما توضیح مشخصی نداشتند، به یک ساختار عالی تبدیل می‌شود: بی‌قیدوبند، ساده و بی‌نهایت زیبا، اما شدیداً انتزاعی.

بور ارجمند در مورد او گفته است: «دیراک در بین فیزیک‌دانان پاک‌ترین روح را دارد.» آیا چشمانش، در شکل ۴.۴، این موضوع را نشان نمی‌دهند؟ فیزیک او به روشنی و زلالی یک ترانه است. برای او جهان نه از اشیا، بلکه از ساختارهای ریاضی انتزاعی تشکیل می‌شود که به ما نشان می‌دهد چیزها چگونه پدیدار می‌شوند و هنگام نمایش دادن خود چه رفتاری دارند. فیزیک او برخورد جادویی منطق و شهود است. اینشتین که عمیقاً تحت تأثیر قرار گرفته بود، گفت: «دیراک من را با مسائل مواجه می‌کند. اینکه چطور توانسته در این مسیر بی‌ثبات، بین نبوغ و جنون، تعادل خود را حفظ کند بسیار شگفت‌انگیز است.»

مکانیک کوانتومی دیراک یک نظریهٔ ریاضیاتی است که امروزه هر مهندس، شیمی‌دان یا زیست‌شناس مولکولی از آن استفاده می‌کند. در آن هر جسم با یک فضای انتزاعی (۱۱۳) مشخص می‌شود که هیچ ویژگی‌ای از خود ندارد جز ویژگی‌های تغییرناپذیر مانند جرم، موقعیت، سرعت،

تکانه زاویه‌ای، پتانسیل الکتریکی و غیره تنها وقتی واقعیت پیدا می‌کنند که این جسم با چیز دیگری برخورد — یا «برهم‌کنش» — داشته باشد. فقط موقعیت آن نیست که طبق نظریه هاینبرگ تعریف نشده است: هیچ‌کدام از متغیرهای این جسم بین دو برهم‌کنش تعریف نشده است. جنبه نسبی این نظریه، جهان‌شمول است.

وقتی یک متغیر فیزیکی (سرعت، انرژی، تکانه، تکانه زاویه‌ای) طی برخورد با جسم دیگر ناگهان پدیدار می‌شود، نمی‌تواند هر مقدار ممکن را داشته باشد. دیراک برای محاسبه مجموعه مقادیرایی که یک متغیر فیزیکی می‌تواند داشته باشد، یک فرمول کلی می‌نویسد. (۱۱۴) این مقادیرا مشابه طیف نوری‌اند که یک اتم منتشر می‌کند. این پدیده نخستین بار در تجزیه نور عناصر آشکار شد، از این رو امروزه به این مقادیر مشخصی که یک متغیر می‌تواند داشته باشد «طیف» می‌گوییم. برای مثال شعاع مدار یک الکترون به دور هسته تنها مقادیرهای معینی می‌تواند داشته باشد که «طیف شعاع» مدار الکترون را تشکیل می‌دهد، همان مدارهایی که بور فرض کرده بود.

این تئوری همچنین پیش‌بینی می‌کند این طیف در برهم‌کنش بعدی کدام مقدار را به نمایش می‌گذارد، اما فقط در قالب احتمالات. نمی‌توانیم با قطعیت بگوییم الکترون کجا پدیدار خواهد شد، اما می‌توانیم احتمال پدیدار شدن آن در جاهای مختلف را محاسبه کنیم. این نظریه با نظریه نیوتن، که در آن می‌توانیم آینده را با قطعیت پیش‌بینی کنیم، تفاوت بسیاری دارد. مکانیک کوانتومی احتمالات را وارد قلب تکامل جهان می‌کند. تعیین‌ناپذیری سومین سنگ بنای مکانیک کوانتومی است: این کشف که در مقیاس اتمی شانس حکمرانی می‌کند. درحالی‌که در فیزیک نیوتن اگر درباره داده‌های اولیه اطلاعاتی کافی و توانایی محاسبه داشته باشیم، می‌توانیم آینده را با دقت پیش‌بینی کنیم، مکانیک کوانتومی تنها به ما امکان می‌دهد احتمال یک رخداد را محاسبه کنیم. عدم قطعیت در مقیاس بسیار کوچک در ذات طبیعت است. طبیعت الکترون را وادار نمی‌کند به راست یا چپ برود؛ الکترون به طور تصادفی این کار را می‌کند. قطعیت ظاهری در جهان ماکروسکوپی تنها به این دلیل است که این تصادف‌های میکروسکوپی به طور میانگین یکدیگر را خنثی می‌کنند و تغییرات حاصل از آن‌ها بسیار کوچک‌تر از آن است که در زندگی روزمره متوجه شویم.

پس مکانیک کوانتومی دیراک به ما اجازه می‌دهد دو کار انجام دهیم. اول اینکه محاسبه کنیم یک متغیر فیزیکی کدام مقادیر را

می‌تواند داشته باشد. به این امر «محاسبه طیف یک متغیر» گفته می‌شود که نشان می‌دهد همه چیز ساختار ذره‌ای دارد. وقتی یک چیز (اتم، میدان الکترومغناطیسی، مولکول، آونگ، سنگ، ستاره و غیره) با چیز دیگری برهم‌کنش دارد، مقدارهایی که محاسبه می‌شوند همان مقدارهایی‌اند که این متغیرها در این برهم‌کنش می‌توانند داشته باشند (نسبی بودن). دومین کاری که مکانیک کوانتومی دیراک به ما امکان انجام آن را می‌دهد، محاسبه احتمال هر مقداری است که یک متغیر در برهم‌کنش بعدی می‌تواند داشته باشد. به این «محاسبه اندازه گذار» می‌گویند. احتمال سومین ویژگی نظریه را نشان می‌دهد: تعیین ناپذیری — این واقعیت که نظریه نتایج بی‌مانندی را پیش‌بینی نمی‌کند، بلکه پیش‌بینی‌هایش بر پایه احتمالات‌اند.

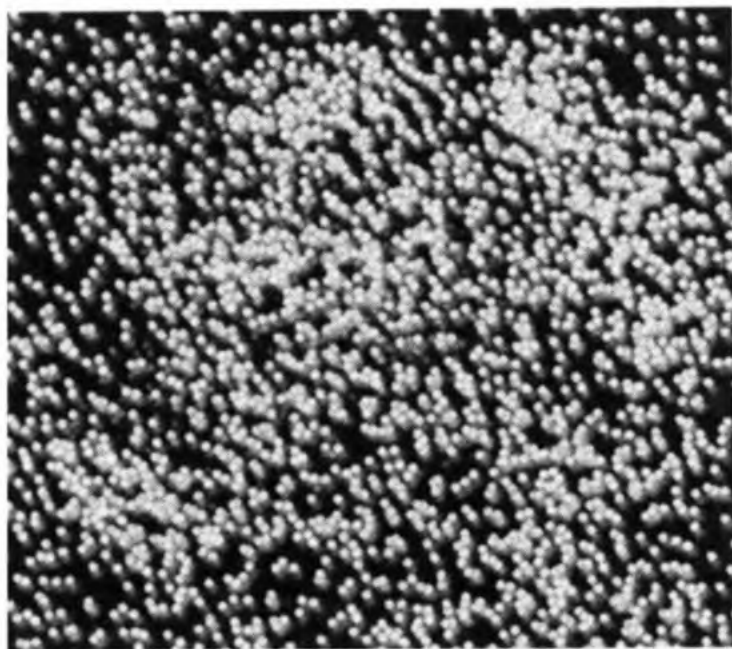
این مکانیک کوانتومی دیراک است: دستوری برای محاسبه طیف متغیرها و احتمال هر مقدار در طیف که در برهم‌کنش بعدی پدیدار می‌شود. همین. در نظریه بیان نشده است که بین دو برهم‌کنش چه رخ می‌دهد. چنین چیزی وجود ندارد.

احتمال پیدا کردن یک الکترون یا ذره دیگر را می‌توان به صورت یک ابر گسترده تصور کرد که هر جا احتمال دیدن الکترون بیشتر است، تراکم بیشتری دارد. گاهی بهتر است که این ابرها را به صورت یک چیز واقعی تصور کنیم. برای مثال، ابری که نشانگر یک الکترون در اطراف هسته‌اش است، تعیین می‌کند کجا احتمال یافتن الکترون بیشتر است. شاید در مدرسه با آن‌ها مواجه شده باشید: این‌ها همان «اوربیتال‌های اتمی» هستند. (۱۱۵)

خیلی زود معلوم شد که این نظریه کارایی شگفت‌انگیزی دارد. امروزه به لطف مکانیک کوانتومی کامپیوتر می‌سازیم، شیمی مولکولی و زیست‌شناسی پیشرفته، لیزر و نیمه‌رساناها را داریم. برای چند دهه انگار هر روز برای فیزیک‌دان‌ها کریسمس بود: برای هر مسئله جدید پاسخی وجود داشت که از معادلات مکانیک کوانتومی برمی‌خاست و همیشه پاسخ درست بود. یک مثال کفایت می‌کند.

جهان اطراف ما از هزاران ماده مختلف تشکیل شده است. شیمی‌دانان طی قرن نوزدهم و بیستم فهمیدند تمام این مواد از ترکیب تعداد نسبتاً کمی (کمتر از صد عدد) عنصر ساده به وجود آمده‌اند: هیدروژن، هلیوم، اکسیژن و به همین ترتیب تا اورانیم. مندلیف این عنصرها را (بر اساس وزن) در جدول تناوبی معروفش، که روی دیوار بسیاری از کلاس‌ها به چشم می‌خورد، مرتب کرد. این جدول خواص عناصری که

جهان — نه تنها زمین بلکه تمام کهکشان‌ها و هستی — را تشکیل داده‌اند، خلاصه کرده است. چرا این عناصر معین؟ ساختار تناوبی جدول چگونه توجیه می‌شود؟ چرا هر عنصر خواصی دارد که دیگری ندارد؟ برای مثال چرا برخی از عناصر راحت با هم ترکیب می‌شوند و بقیه نه؟ راز این ساختار عجیب جدول مندلیف چیست؟



شکل ۴.۵ نور موجی در یک میدان
است، اما ساختار ذره‌ای هم دارد.

معادله مکانیک کوانتومی را در نظر بگیرید که شکل مدارهای یک الکترون را تعیین می‌کند. این معادله تعداد مشخصی جواب دارد و این جواب‌ها دقیقاً مطابق‌اند با هیدروژن، هلیم، اکسیژن... و سایر عناصر! جدول تناوبی مندلیف درست مطابق مجموعه این جواب‌ها چیده شده است. خواص عناصر به همراه همه چیزهای دیگر از پاسخ این معادله به دست می‌آید. مکانیک کوانتومی ساختار جدول تناوبی عناصر را به طور بی‌عیب و نقصی رمزگشایی می‌کند.

رؤیای کهن فیثاغورث و افلاطون تعبیر شده است: توصیف تمام مواد جهان با یک فرمول. پیچیدگی بی‌نهایت شیمی تنها در مجموعه جواب‌های یک معادله خلاصه شده است! و این فقط یکی از کاربردهای مکانیک کوانتومی است.

میدان‌ها و ذره‌ها یکسان‌اند

دیراک اندکی پس از تکمیل فرمول‌بندی کلی مکانیک کوانتومی می‌فهمد این نظریه را می‌توان مستقیماً به میدان‌هایی مانند میدان الکترومغناطیسی تعمیم داد و با نسبیت خاص هماهنگ کرد. (معلوم می‌شود هماهنگ کردن آن با نسبیت عام بسیار دشوارتر است و موضوع اصلی این کتاب همین است). در این مسیر دیراک توصیف نهان، عمیق‌تر و ساده‌تر طبیعت را کشف می‌کند: همگرایی بین مفهوم ذرات مورد استفاده نیوتن و مفهوم میدان‌هایی که فارادی معرفی کرده بود.

ابر احتمالاتی که الکترون را بین دو برهم‌کنش همراهی می‌کند شبیه یک میدان است. از طرفی میدان‌های فارادی و ماکسول هم از ذرات تشکیل شده‌اند: فوتون‌ها. نه تنها ذرات به نوعی مانند میدان‌ها در فضا پخش شده‌اند، بلکه میدان‌ها هم رفتار ذره‌ای از خود نشان می‌دهند. مفهوم میدان و ذره، که فارادی و ماکسول آن‌ها را از هم متمایز کرده بودند، در مکانیک کوانتومی با هم ادغام می‌شوند.

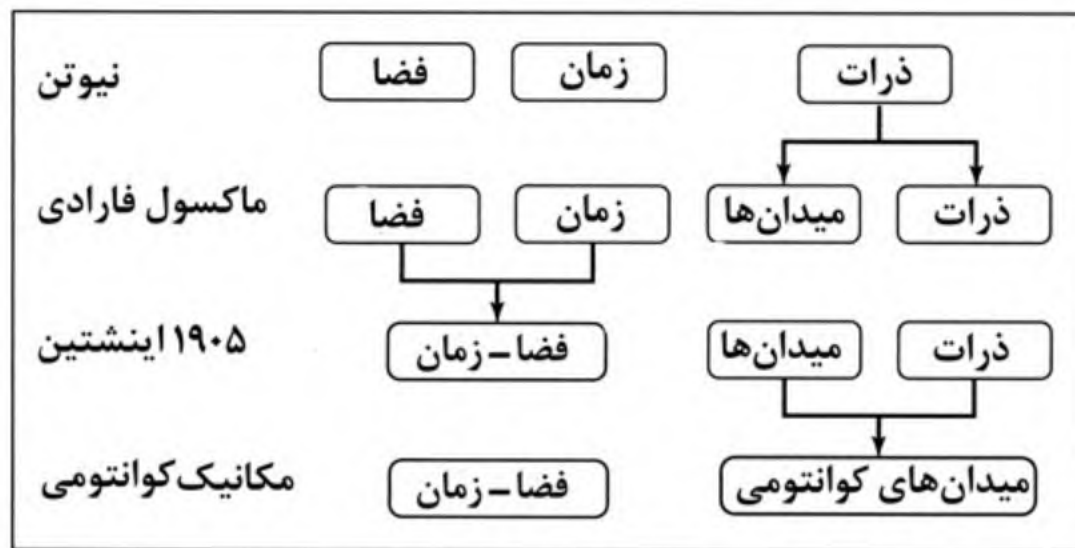
اینکه چگونه نظریه چنین چیزی را نشان می‌دهد، خواندنی است: معادله دیراک مقادیری را که یک متغیر می‌تواند داشته باشد، مشخص می‌کند. اگر این معادلات را به انرژی خطوط فارادی اعمال کنیم، معادلات به ما می‌گویند این انرژی تنها می‌تواند مقادیر مشخصی داشته باشد. از آنجا که انرژی میدان‌های الکترومغناطیسی تنها می‌تواند مقدارهای معینی داشته باشد، میدان به شکل مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی رفتار می‌کند. درست همان کوانتای انرژی است که پلانک و اینشتین سی سال پیش معرفی کرده بودند. حلقه بسته و داستان تمام می‌شود. معادلات این نظریه که دیراک آن‌ها را نوشته ساختار ذره‌ای نور را که پلانک و اینشتین با شهود به آن‌ها دست یافته بودند، توصیف می‌کند.

موج‌های الکترومغناطیسی نوسان خطوط فارادی‌اند، اما در مقیاس کوچک انبوهی‌اند از فوتون‌ها. وقتی با چیز دیگری برهم‌کنش دارند، مانند آنچه در اثر فوتوالکتریک می‌بینیم، رفتار ذره‌ای از خود به نمایش می‌گذارند: نور در چشم ما بارانی از قطرات مجزا، یعنی فوتون‌های مجزاست. فوتون‌ها کوانتای میدان الکترومغناطیسی‌اند.

اما الکترون‌ها و تمام ذرات دیگری که جهان از آن‌ها ساخته شده است، کوانتای یک میدان‌اند — یک «میدان کوانتومی» مشابه میدان فارادی و ماکسول — که ساختار ذره‌ای و رفتار احتمالاتی کوانتومی دارند. دیراک معادلات میدان الکترون‌ها و دیگر ذرات بنیادی را

می‌نویسد. (۱۱۶) تمایز اساسی که فارادی بین ذرات و میدان‌ها معرفی کرده بود، رنگ می‌بازد. شکل کلی نظریه کوانتومی که با نسبیت خاص همخوانی دارد نظریه میدان کوانتومی خوانده می‌شود و پایه فیزیک ذرات امروزی را تشکیل می‌دهد. ذرات کوانتای یک میدان‌اند، همان‌طور که فوتون‌ها کوانتای نورند. تمام میدان‌ها در تعامل‌هایشان ساختار ذره‌ای از خود به نمایش می‌گذارند. در قرن بیستم به طور مستمر فهرست میدان‌های بنیادی به‌روزرسانی می‌شد. امروزه نظریه‌ای به نام مدل استاندارد ذرات بنیادی داریم که تقریباً هرچه را می‌بینیم، به جز گرانش (۱۱۷)، در قالب نظریه میدان‌های کوانتومی توصیف می‌کند. فیزیک‌دانان مدت زیادی را در قرن پیشین مشغول توسعه این مدل بودند. توسعه این مدل خود ماجرای شگفت‌انگیزی دارد که اینجا به این قسمت از داستان نمی‌پردازم: می‌خواهم سراغ گرانش کوانتومی بروم. در دهه ۱۹۷۰ مدل استاندارد تکمیل می‌شود. تقریباً پانزده میدان وجود دارد که کوانتای آن‌ها ذرات بنیادی‌اند (الکتران‌ها، کوارک‌ها، موئون‌ها، نوترینوها، هیگز و تعدادی دیگر) به اضافه چند میدان شبیه میدان‌های الکترومغناطیسی که نیروی الکترومغناطیسی و دیگر نیروها را در مقیاس هسته‌ای توصیف می‌کنند و کوانتایشان شبیه فوتون‌هاست.

مدل استاندارد در ابتدا به خاطر جنبه درهم‌آمیخته‌اش و اینکه از سادگی نسبیت عام و معادلات ماکسول یا دیراک بی‌بهره بود، جدی گرفته نشد. با وجود این بر خلاف انتظارات تمام پیش‌بینی‌هایش تأیید شده‌اند. برای بیش از سی سال، هر آزمایشی در فیزیک ذرات بر درستی مدل استاندارد صحت گذاشته است. کشف ذره هیگز از دیگر تأییدیه‌های تازه این مدل بود که در سال ۲۰۱۳ ولوله‌ای به پا کرد. میدان‌های هیگز که برای منسجم کردن این نظریه معرفی شده بودند، به نظر مصنوعی می‌آمدند تا اینکه واقعاً ذره هیگز، کوانتوم این میدان، مشاهده شد و درست همان مشخصاتی را داشت که مدل استاندارد پیش‌بینی کرده بود. (۱۱۸) (این واقعیت که بوزون هیگز «ذره خدا» نامیده شده، چنان احمقانه است که ارزش پرداختن به آن را ندارد.) خلاصه، مدل استاندارد، بر خلاف نامش که به ناحق متواضعانه است، پیروزی بزرگی محسوب می‌شود.



شکل ۴.۶ جهان از چه ساخته شده است؟

امروزه مکانیک کوانتومی با میدان‌ها/ ذره‌های توصیف بسیار کارآمدی از طبیعت ارائه می‌دهد. جهان از میدان‌ها و ذرات به وجود نیامده است، بلکه فقط یک ماهیت دارد: میدان کوانتومی. دیگر از ذراتی که در گذر زمان در فضا حرکت می‌کنند خبری نیست، بلکه میدان‌های کوانتومی وجود دارند که پیشامدهای ساده‌شان در فضا - زمان اتفاق می‌افتد. جهان عجیب، اما ساده است (شکل ۴.۶).

کوانتا ۱: اطلاعات محدود است

زمان آن رسیده که جمع‌بندی کنیم مکانیک کوانتومی در مورد جهان دقیقاً به ما چه می‌گوید. کار ساده‌ای نیست، چون مکانیک کوانتومی مفهوم چندان روشنی ندارد و معنای حقیقی‌اش هنوز هم مورد بحث است؛ اما باید آن را به کار بگیریم، راجع به آن آگاه شویم و سپس ادامه دهیم. فکر می‌کنم مکانیک کوانتومی سه جنبه از طبیعت اشیا را برای ما آشکار کرده است: ذره‌ای بودن، تعیین‌ناپذیری و ساختار نسبی جهان. بگذارید از نزدیک نگاهی به هریک از آن‌ها بیندازیم.

اولی بر وجود یک ساختار ذره‌ای اساسی در طبیعت دلالت دارد. ذره‌ای بودن ماده و نور در قلب نظریه کوانتومی است. البته این همان ساختار ذره‌ای نیست که دموکریت به صورت شهودی تصور کرد. برای دموکریت اتم‌ها مانند سنگ‌ریزه بودند، اما در مکانیک کوانتومی ذرات پدیدار و ناپدید می‌شوند. به هر حال ریشه ایده یک ساختار ذره‌ای اساسی در جهان همچنان به اتم‌گرایی باستان برمی‌گردد. مکانیک کوانتومی به پشتوانه قرن‌ها آزمایش و ریاضیات مستدل و با ظرفیت خارق‌العاده‌اش برای پیش‌بینی‌های صحیح، بینش عمیق در باب ذات اشیایی را به رسمیت می‌شناسد که فیلسوف بزرگ آبدرا به آن دست یافته بود.

فرض کنید اندازه‌گیری‌هایی در یک سیستم فیزیکی انجام می‌دهیم و می‌فهمیم آن سیستم در وضعیت معینی قرار دارد. برای مثال دامنه نوسان‌های یک آونگ را به دست می‌آوریم و می‌فهمیم مقدار معینی — برای مثال بین پنج و شش سانتی‌متر — دارد (هیچ اندازه‌گیری‌ای در فیزیک دقیق نیست). پیش از مکانیک کوانتومی می‌گفتیم چون بی‌نهایت مقدار ممکن بین پنج و شش وجود دارد (برای مثال ۵.۱ یا ۵.۱۰۱ یا ۵.۱۰۱۰۰۱...) پس آونگ می‌تواند بی‌نهایت حالت ممکن داشته باشد: بی‌اطلاعی‌مان از وضعیت آونگ همچنان بی‌نهایت است.

در عوض مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید بین پنج و شش سانتی‌متر، تعداد محدودی مقدار ممکن برای دامنه وجود دارد، پس بی‌اطلاعی‌مان از وضعیت آونگ محدود است.

این را می‌توان به طور کلی به هرچیزی تعمیم داد. (۱۱۹) در نتیجه اولین معنای مکانیک کوانتومی این است که برای اطلاعات موجود در سیستم حدی وجود دارد: تعداد حالت‌های متمایزی که یک سیستم می‌تواند داشته باشد، محدود است. این حدود وارد بر بی‌نهایت — همان

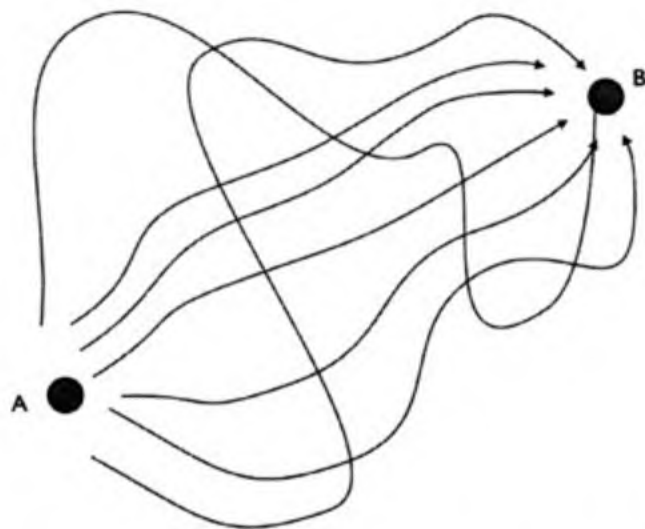
ساختار ذره‌ای طبیعت که دموکریت به آن نگاهی انداخته بود — اولین جنبهٔ اساسی این نظریه است. ثابت پلانک h مقیاس بنیادی این ساختار ذره‌ای را اندازه‌گیری می‌کند.

کوانتا ۲: تعیین ناپذیری

جهان دنباله‌ای از پیشامدهای کوانتومی ذره‌ای است. این‌ها گسسته، ذره‌ای و منحصر به فرد هستند: این پیشامدها تعامل‌های منحصر به فرد دو سیستم فیزیکی‌اند. یک الکترون، یک میدان کوانتومی یا یک فوتون مسیری را در فضا دنبال نمی‌کند، بلکه هنگام برخورد با چیز دیگر در زمان و مکانی مشخص پدیدار می‌شود. کی و کجا پدیدار خواهد شد؟ نمی‌توان با اطمینان گفت. مکانیک کوانتومی یک تعیین ناپذیری اساسی در دل جهان معرفی می‌کند. آینده واقعاً قابل پیش‌بینی نیست. این دومین درس اساسی‌ای است که از مکانیک کوانتومی می‌آموزیم.

به خاطر تعیین ناپذیری در جهانی که مکانیک کوانتومی توصیف می‌کند، چیزها به طور مداوم دچار تغییرات تصادفی می‌شوند. تمام متغیرها پیوسته «نوسان» می‌کنند و گویی در ریزترین مقیاس همه چیز دائماً در حال نوسان است. ما این نوسان‌های همیشگی را به دلیل مقیاس کوچکشان نمی‌بینیم؛ نمی‌توان مانند اجسام ماکروسکوپی آن‌ها را در مقیاس بزرگ دید. وقتی به یک سنگ نگاه می‌کنید ثابت می‌ماند، اما اگر می‌توانستیم اتم‌هایش را ببینیم، می‌دیدیم که بی‌وقفه نوسان می‌کنند و به این سو و آن سو می‌روند. مکانیک کوانتومی به ما نشان می‌دهد هرچه به جزئیات جهان بنگریم، ثباتش کمتر می‌شود. جهان از سنگ‌ریزه‌های کوچک به وجود نیامده است، بلکه از لرزش‌ها، نوسانی پیوسته و انبوهی از وقایع میکروسکوپی گذرا تشکیل شده است. اتم‌گرایی باستان این جنبه از فیزیک مدرن را نیز پیش‌بینی کرده بود: برقراری قوانین احتمالاتی در سطح عمیق. دموکریت (درست مانند نیوتن) فرض کرد حرکت اتم‌ها دقیقاً از برخوردهایشان به دست می‌آید. اما جانشینش، اپیکوروس، قطعیت استادش را تصحیح می‌کند و مفهوم عدم قطعیت را به اتم‌گرایی معرفی می‌کند — همان‌طور که هایزنبرگ عدم قطعیت را به قطعیت نیوتن معرفی کرد. برای اپیکوروس اتم‌ها می‌توانند گه‌گاه به صورت تصادفی از مسیرشان منحرف شوند. لوکرتیوس با کلام زیبایی این موضوع را بیان می‌کند: این انحراف رخ می‌دهد، در مکان و زمانی نامعلوم (۱۲۰). (۳) همان تصادفی بودن و همین وجود احتمالات در سطوح بنیادی دومین کشف کلیدی دربارهٔ جهانی است که مکانیک کوانتومی توضیح می‌دهد. بنابراین، چطور احتمال حضور الکترونی را که در مکان اولیه A قرار دارد، پس از گذر زمان مشخص، در مکان نهایی B محاسبه کنیم؟

ریچارد فاینمن در سال ۱۹۵۰ روشی روشنگرانه برای انجام این محاسبه پیشنهاد داد: همه مسیرهای ممکن از A به B را در نظر بگیرید، یعنی تمام مسیرهایی که الکترون می‌تواند طی کند (مستقیم، منحنی، زیگزاگ و ...). هر مسیر عدد مشخصی تعیین می‌کند. احتمال از جمع تمام این عددها به دست می‌آید. جزئیات این محاسبه مهم نیست: مسئله مهم این است که تمام مسیرها از A به B در آن نقش دارند: انگار الکترون برای رفتن از A به B، «از تمام مسیرهای ممکن» می‌گذرد یا به عبارت دیگر به صورت یک ابر پخش می‌شود تا به طرز اسرارآمیزی به نقطه B همگرا شود و آنجا با چیز دیگری برخورد کند (شکل ۴.۷).



شکل ۴.۷ برای اینکه یک الکترون از A به B برود، طوری رفتار می‌کند که انگار از تمام مسیرهای ممکن می‌گذرد.

این روش محاسبهٔ احتمال یک رخداد کوانتومی را مجموع مسیرهای فاینمن می‌نامند. (۱۲۱) خواهیم دید این روش در گرانش کوانتومی نقش مهمی دارد.

کوانتا ۳: حقیقت نسبی است

سومین کشف در مورد جهان که از مکانیک کوانتومی حاصل شد، ژرف‌ترین و دشوارترین آن‌هاست — که اتم‌گرایی باستان هم آن را پیش‌بینی نکرد. این نظریه چیزها را آن‌طور که هستند توصیف نمی‌کند، بلکه نحوهٔ رخ دادن و برهم‌کنش آن‌ها را با یکدیگر توصیف می‌کند. نمی‌گویید یک ذره کجاست، بلکه می‌گویید آن ذره چطور خود را به دیگران نشان می‌دهد. جهان چیزهای موجود به جهانی از تعامل‌های ممکن تقلیل می‌یابد. واقعیت به برهم‌کنش تقلیل می‌یابد. واقعیت به نسبیت تقلیل می‌یابد. (۴)

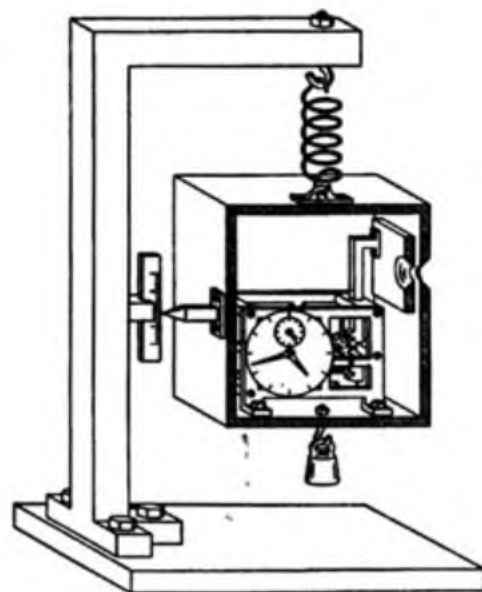
به نوعی این فقط یک تعمیم از حقیقت است، اما تعمیمی بسیار اساسی. ارسطو نخستین شخصی بود که تأکید کرد ما تنها سرعت نسبی را درک می‌کنیم. برای مثال روی کشتی از سرعتمان نسبت به کشتی حرف می‌زنیم؛ روی خشکی از سرعتمان نسبت به زمین حرف می‌زنیم. گالیله فهمید به همین دلیل است که بدون اینکه ما متوجه حرکتی شویم، زمین می‌تواند به دور خورشید بچرخد. سرعت ویژگی خود یک جسم نیست: ویژگی حرکت جسمی نسبت به جسم دیگر است. اینشتین مفهوم نسبیت را به زمان تعمیم داد: همزمانی دو واقعه تنها نسبت به یک حرکت خاص معنا دارد. مکانیک کوانتومی این نسبیت را به طور اساسی تعمیم داد: همهٔ ویژگی‌های متغیر یک جسم تنها نسبت به اجسام دیگر معنا دارند. طبیعت جهان را تنها به وسیلهٔ برهم‌کنش‌ها رسم می‌کند.

در جهانی که مکانیک کوانتومی توصیف می‌کند، واقعیتی وجود ندارد مگر در نسبت‌های بین سیستم‌های فیزیکی. اشیا نیستند که وارد نسبت‌ها می‌شوند، بلکه نسبت‌ها زمینه‌ساز مفهوم «اشیا» هستند. جهان مکانیک کوانتومی جهانی از اجسام نیست: بلکه جهانی از وقایع است. اشیا از رخداد‌های بنیادی به وجود می‌آیند: همان‌طور که فیلسوفی به اسم نلسون گودمن در دههٔ ۱۹۵۰ در عبارتی زیبا نوشت: «یک جسم فرایندی یکنواخت است.» سنگ لرزش کوانتا است که مدتی ساختارش را حفظ می‌کند، همان‌طور که موج‌های دریا مدتی پیش از آنکه دوباره در دریا حل شوند، شکل خود را حفظ می‌کنند. موج چیست که بدون حمل قطره‌ای با خود در آب حرکت می‌کند؟ موج یک جسم نیست، یعنی از ماده‌ای ساخته نشده که آن را با خود حمل کند.

اتم‌های بدن ما هم به ما نزدیک و از ما دور می‌شوند. ما مانند موج‌ها و تمام اجسام دیگر جریانی از وقایع‌ایم؛ ما مجموعه‌ای از فرایندها هستیم که مدت کوتاهی به طور یکنواخت رخ می‌دهند...

مکانیک کوانتومی اجسام را توصیف نمی‌کند: فرایندها و وقایعی را که نقطهٔ اتصال بین فرایندها هستند، توصیف می‌کند. به طور خلاصه مکانیک کوانتومی کشف سه ویژگی جهان است:

- ذره‌ای بودن (شکل ۴.۸). اطلاعات در وضعیت یک سیستم متناهی است و ثابت پلانک آن را محدود می‌کند.
- تعیین‌ناپذیری. آینده را نمی‌توان به روشنی و بر اساس گذشته پیش‌بینی کرد. حتی ترتیب و قواعد دقیق‌تری که می‌بینیم در نهایت جنبهٔ آماری دارند.
- نسبیت. وقایع طبیعت همیشه مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌ها هستند. تمام وقایع یک سیستم نسبت به سیستم دیگری رخ می‌دهد. مکانیک کوانتومی به ما می‌آموزد جهان را به صورت «چیزهایی» نبینیم که در وضعیت بخصوصی قرار دارند، بلکه آن را به صورت «فرایندها» در نظر بگیریم. فرایند یعنی گذار از یک برهم‌کنش به برهم‌کنشی دیگر. ویژگی‌های «چیزها» تنها در لحظهٔ برهم‌کنش، یعنی هنگام وقوع فرایندها و نسبت به دیگر چیزها، خود را به صورت ذره‌ای نشان می‌دهند. نمی‌توان آن‌ها را به صورت روشن پیش‌بینی کرد، بلکه باید به شکل احتمالاتی پیش‌بینی شوند.



شکل ۴.۸ «جعبه نور» در آزمایش ذهنی اینشتین که بور رسم کرده است.

این شیرجه سرگیجه‌آور بور، هایزنبرگ و دیراک به عمق ذات اشیاست.

ولی آیا واقعاً می‌فهمیم؟

مطمئنناً مکانیک کوانتومی یک پیروزی کارآمد است. با وجود این... خواننده عزیز، آیا مطمئنید که هرآنچه را مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید، فهمیده‌اید؟ وقتی الکترون برهم‌کنش ندارد هیچ‌جا نیست... اِممم... اشیا فقط هنگام برهم‌کنش با یکدیگر وجود دارند... خب... تمام این‌ها کمی مهمل به نظر نمی‌رسد؟

به نظر اینشتین مهمل می‌آمدند.

از یک سو اینشتین ورنر هایزنبرگ و پل دیراک را برای دریافت جایزه نوبل معرفی و تصدیق کرد؛ چراکه این دو چیز مهمی در مورد جهان فهمیده بودند. با این حال، از سوی دیگر از هر موقعیتی استفاده می‌کرد تا گلایه کند و بگوید هیچ‌کدام از این‌ها عقلانی نیست.

افراد سرشناس و جوان دسته کپنهاگ ناامید شده بودند: چطور شخص اینشتین چنین حرفی می‌زند؟ پدر معنوی آن‌ها، مردی که شهادت اندیشیدن در مورد تصورنکردنی‌ها را داشت، حالا پا پس کشیده بود و از جهش به سمت ناشناخته‌ها واهمه داشت — جهشی که خودش باعث آن شده بود. چطور همان اینشتینی که به ما آموخت زمان جهانی نیست و فضا خمیده می‌شود، حالا می‌گوید جهان نمی‌تواند این‌قدر عجیب باشد؟

نیلز بور بردبارانه این ایده‌های جدید را برای اینشتین توضیح داد. اینشتین مخالفت کرد. بور همیشه پاسخی برای این مخالفت‌ها می‌یافت. گفت‌وگوهای بین این دو سال‌ها از طریق سخنرانی‌ها، نامه‌ها، مقالات و... ادامه یافت. اینشتین آزمایش‌های ذهنی‌ای طراحی کرد تا نشان دهد این ایده‌های تازه متناقض‌اند. یکی از معروف‌ترین آزمایش‌هایش این‌طور آغاز می‌شود: «جعبه‌ای پر از نور را فرض کنید، برای لحظه‌ای کوتاه اجازه می‌دهیم یک فوتون از آن به بیرون بگریزد...» (شکل ۴.۸). (۱۲۲)

هر دو مرد بزرگ، طی این تبادلات، گاهی مجبور می‌شدند تسلیم شوند و نظرهایشان را تغییر دهند. اینشتین مجبور شد بپذیرد واقعاً تناقضی بین این ایده‌های جدید وجود ندارد. بور هم مجبور شد بپذیرد این ایده‌ها آن‌قدر که فکر می‌کرد، ساده و روشن نیستند. اینشتین حاضر نبود از نکته کلیدی‌ای که بر آن اصرار داشت، دست بردارد: اینکه یک واقعیت عینی، مستقل از هرچیزی که با آن برهم‌کنش داشته است، وجود دارد. وی از پذیرفتن جنبه نسبی نظریه، اینکه اشیا تنها از طریق برهم‌کنش خود را به نمایش می‌گذارند، سر باز می‌زد.

بور نمی‌خواست به اعتبار این شیوه بسیار نوآورانه، که در آن واقعیت از تصور نظریه به دست می‌آمد، اذعان کند. بالاخره اینشتین پذیرفت این نظریه جهش بزرگ و رو به جلویی در خصوص درک ما از جهان است و ساختار منسجمی دارد. با این حال همچنان پافشاری می‌کرد که چیزها آن‌قدر که این نظریه بیان می‌کند، عجیب نیستند — و باید «پشت» آن توضیحی معقول‌تر و عمیق‌تر وجود داشته باشد.

یک قرن گذشته است و ما هنوز همان‌جاییم. ریچارد فاینمن که بهتر از هرکس می‌توانست از این نظریه استفاده کند، نوشته است: «فکر کنم می‌توانم بگویم هیچ‌کس واقعاً مکانیک کوانتومی را نمی‌فهمد.»

فیزیک‌دانان، مهندسان، شیمی‌دانان و زیست‌شناسان هر روز از معادله‌های این نظریه و نتایج حاصل از آن‌ها در گستره وسیعی از زمینه‌ها استفاده می‌کنند، اما این معادلات همچنان رازآلود مانده‌اند: زیرا سیستم‌های فیزیکی را توصیف نمی‌کنند، بلکه تنها می‌گویند سیستم‌های فیزیکی چگونه برهم‌کنش دارند و بر هم تأثیر می‌گذارند. این یعنی چه؟

فیزیک‌دانان و فیلسوفان همچنان از خود می‌پرسند معنای واقعی این نظریه چه می‌تواند باشد. در سال‌های اخیر مقاله‌ها و کنفرانس‌هایی که در این زمینه ارائه می‌شود افزایش یافته است. نظریه کوانتومی، یکصد سال پس از تولدش، چیست؟ شیرجه‌ای خارق‌العاده به عمق ماهیت واقعیت؟ کافی که تصادفاً درست عمل می‌کند؟ بخشی از یک پازل نیمه‌کاره؟ یا سرخ مسئله‌ای عمیق در مورد ساختار جهان که هنوز کامل به آن پی نبرده‌ایم؟

تفسیر مکانیک کوانتومی که اینجا ارائه کرده‌ام، تفسیری است که به نظرم از بقیه معقول‌تر است. «تفسیر نسبی» نامیده می‌شود و فیلسوفان بزرگی چون بس ون فراسن، میشل بیتبول و مئورو دوراتو (۱۲۳) آن را مطرح کرده‌اند. (۵) اما اجماع نظری برای تفکر در مورد مکانیک کوانتومی وجود ندارد: راه‌های دیگری برای اندیشیدن درباره آن هست که دیگر فیزیک‌دانان و فیلسوفان مطرح کرده‌اند. ما بر لبه ناشناخته‌ها قرار داریم و در مورد آن اختلاف‌نظر وجود دارد.

مکانیک کوانتومی تنها یک نظریه فیزیکی است: شاید فردا نگرشی متفاوت و حتی عمیق‌تر به جهان آن را اصلاح کند. امروزه برخی از دانشمندان می‌کوشند مشکلات آن را تا حدودی برطرف کنند تا با شهود ما تطابق بیشتری داشته باشد. به نظرم موفقیت تجربی

خیره‌کننده‌اش باید مجابمان کند تا آن را جدی بگیریم و از خود نپرسیم چه چیزی را در نظریه تغییر بدهیم — بلکه محدودیت شهود خودمان را که باعث می‌شود این نظریه عجیب به نظر برسد زیر سؤال ببریم.

فکر می‌کنم ابهام در این نظریه مشکل مکانیک کوانتومی نیست، بلکه به خاطر محدودیت قوهٔ تخیل ماست. وقتی تلاش می‌کنیم جهان کوانتومی را «ببینیم»، شبیه موش کورهایی هستیم که همیشه زیر زمین زندگی کرده‌اند و حالا شخصی می‌خواهد هیمالیا را برایمان توصیف کند؛ یا شبیه همان مردانی که در انتهای غار افلاطون زندانی شده بودند.

وقتی اینشتین از دنیا رفت، بزرگ‌ترین رقیبش، بور، جملات تحسین‌آمیز تکان‌دهنده‌ای در مورد او گفت. وقتی چند سال بعد بور از دنیا رفت، شخصی از تخته‌سیاه محل مطالعه‌اش عکس گرفت. شکلی روی آن رسم شده است. «جعبهٔ نور» آزمایش ذهنی اینشتین. تمایل به مباحثه و فهم بیشتر، تا آخرین لحظه. تردید، تا آخرین لحظه.

این تردید دائمی، چشمهٔ ژرف علم.

بخش سوم: فضای کوانتومی و زمان نسبی

اگر تا اینجا همراه آمده‌اید، پیش‌نیازهای فهم تصویری را که فیزیک بنیادی از جهان ارائه می‌دهد، در اختیار دارید — و قدرت، ضعف‌ها و محدودیت‌هایش را می‌دانید.

چهارده میلیارد سال پیش یک فضا — زمان خمیده متولد شد — کسی نمی‌داند چطور — که همچنان در حال گسترش است. این فضا یک ماهیت واقعی یا یک میدان فیزیکی است که دینامیک آن در معادلات اینشتین توصیف شد. فضا تحت وزن ماده خمیده و منحنی می‌شود. اگر ماده بسیار چگال باشد خمیدگی فضا یک سیاه‌چاله می‌سازد.

ماده در صد میلیارد کهکشان توزیع شده که هرکدام صد میلیارد ستاره دارند و از میدان‌های کوانتومی تشکیل شده‌اند که خود را به شکل ذراتی مانند الکترون و پروتون نشان می‌دهند یا به شکل موج‌هایی مانند موج‌های الکترومغناطیسی که برایمان تصاویر تلویزیونی و نور ستاره‌ها و خورشید را می‌آورند.

این میدان‌های کوانتومی اتم‌ها، نور و تمام محتوای عالم را می‌سازند. چیزهای عجیبی‌اند: کوانتای آن‌ها ذراتی‌اند که هنگام برهم‌کنش با چیز دیگری پدیدار می‌شوند؛ اگر با آن‌ها کاری نداشته باشید، به صورت یک «ابر احتمالاتی» گسترده می‌شوند. جهان انبوهی است از رخداد‌های بنیادی که در دریای وسیع فضای دینامیکی که مانند اقیانوسی همیشه مواج است، غرق شده‌اند.

با این تصویر از جهان و چند معادله که آن را عینی می‌کنند می‌توانیم تقریباً هرچه را می‌بینیم، توصیف کنیم. تقریباً. چیزی کم است و ما در پی آنیم. باقی کتاب در مورد این قطعه گمشده است.

با ورق زدن این صفحه از دانسته‌های معتبرمان در مورد جهان، چه خوب و چه بد، گذر می‌کنیم و وارد حیطه‌ای می‌شویم که آن را نمی‌شناسیم، اما تلاش می‌کنیم نگاهی اجمالی به آن بیندازیم.

ورق زدن این صفحه مانند ترک امنیت فضایی‌های کوچکی از نیمه‌قطعیته‌ها و قدم گذاشتن درون ناشناخته‌هاست.

۵. فضا - زمان کوانتومی است

در دل شناختمان از جهان فیزیکی پارادوکسی وجود دارد. نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، دو جواهری که قرن بیستم برایمان به یادگار گذاشته است، برای شناخت جهان و تکنولوژی کنونی بسیار مفید بوده‌اند. اولی کیهان‌شناسی و اخت‌فیزیک، مطالعهٔ امواج گرانشی و سیاه‌چاله‌ها را توسعه داده است. دومی پایه‌های فیزیک اتمی، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادی و مادهٔ چگال و بسیاری دیگر را برای ما فراهم کرده است.

با وجود این، در مورد این دو مسئله‌ای ناخوشایند وجود دارد. هر دو نمی‌توانند همزمان درست باشند، لااقل به شکل فعلی‌شان، چون به نظر متناقض‌اند. میدان‌های گرانشی بدون در نظر گرفتن مکانیک کوانتومی و این حقیقت که تمام میدان‌ها کوانتومی‌اند، توصیف شده‌اند. مکانیک کوانتومی هم فضا - زمان خم‌شونده‌ای را که معادلات اینشتین توصیف کرده است در نظر نمی‌گیرد.

دانشجویی که صبح در کلاس نسبیت عام و عصر در کلاس مکانیک کوانتومی شرکت می‌کند، حق دارد فکر کند استادهایش نادان‌اند یا لااقل صد سال است که با هم حرف نزده‌اند. صبح جهان فضا - زمانی خمیده است و همه‌چیز پیوسته؛ عصر جهان تخت است و در آن کوانتای گسستهٔ انرژی جهش می‌کنند و برهم‌کنش دارند.

پارادوکس از آنجا آغاز می‌شود که هر دو نظریه به شکل قابل‌توجهی درست هستند.

علی‌رغم فرض‌های به نظر متناقضی که اساس این دو نظریه را تشکیل می‌دهند، طبیعت با هر آزمون و آزمایش مکرراً به نسبیت عام می‌گوید «حق با توست» و به مکانیک کوانتومی هم می‌گوید «حق با توست». روشن است هنوز یک جای کار را نفهمیده‌ایم.

در بیشتر موقعیت‌ها می‌توانیم از مکانیک کوانتومی یا نسبیت عام (یا هر دو) صرف‌نظر کنیم. ماه بزرگ‌تر از آن است که به ساختار ذره‌ای کوانتومی حساس باشد، بنابراین موقع توصیف حرکتش کوانتا را کنار می‌گذاریم. از سوی دیگر، اتم بسیار سبک‌تر از آن است که فضا - زمان را به اندازهٔ قابل‌توجهی خم کند و موقع توصیفش می‌توانیم خمیدگی فضا را فراموش کنیم. اما موقعیت‌هایی وجود دارد که هم خمیدگی فضا و هم ساختار ذره‌ای کوانتومی اهمیت دارد و ما هنوز نظریه‌ای فیزیکی که در این موقعیت‌ها کارساز باشد، سراغ نداریم.

می‌توان قسمت داخلی سیاه‌چاله‌ها را مثال زد. مثال دیگر اتفاقی است که هنگام مه‌بانگ در عالم رخ داد. در کل نمی‌دانیم زمان و فضا در مقیاس بسیار کوچک چه رفتاری دارند. نظریه‌های امروزی در تمام این موارد سردرگم می‌شوند و دیگر چیز معقولی به ما نمی‌گویند: مکانیک کوانتومی نمی‌تواند با خمیدگی فضا - زمان کنار بیاید و نسبیت عام نمی‌تواند برای کوانتا توضیحی ارائه کند. این مسئله‌ای است که گرانش کوانتومی با آن مواجه است. این مشکل از این هم جدی‌تر می‌شود. اینشتین فهمید فضا و زمان نمایشی از یک میدان فیزیکی‌اند: میدان گرانشی. بور، هایزنبرگ و دیراک فهمیدند میدان‌های فیزیکی ماهیت کوانتومی دارند: ذره‌ای و احتمالاتی‌اند و خود را از طریق برهم‌کنش‌ها نشان می‌دهند. در نتیجه فضا و زمان هم باید ماهیت کوانتومی داشته و این ویژگی‌های عجیب را دارا باشند.

پس فضای کوانتومی چیست؟ زمان کوانتومی چیست؟ این مسئله را گرانش کوانتومی می‌نامیم. گروهی از فیزیک‌دانان نظری در سراسر پنج قاره برای حل این مسئله تلاش بسیاری می‌کنند. هدف آن‌ها یافتن یک نظریه، یعنی مجموعه‌ای از معادلات - اما مهم‌تر از آن، تصویری منسجم از عالم - است که دوگانگی کنونی را بین کوانتا و گرانش حل کند.

نخستین بار نیست که در فیزیک دو نظریه بسیار موفق اما به نظر متناقض با هم مواجه می‌شوند. برای ترکیب نظریات در گذشته تلاش‌های بسیاری صورت گرفته و قدم‌های بزرگی برای بهبود درک ما از جهان برداشته شده است. نیوتن گرانش جهانی را دقیقاً با ترکیب فیزیک گالیله، یعنی چگونگی حرکت اجسام روی زمین، و فیزیک کپلر، یعنی چگونگی حرکت اجسام در آسمان، کشف کرد. ماکسول و فارادی با آمیختن دانسته‌هایمان در مورد الکتریسیته و مغناطیس، معادلات الکترومغناطیس را به دست آوردند. اینشتین نسبیت خاص را هنگام حل اختلاف ظاهری بین مکانیک نیوتن و الکترومغناطیس ماکسول پیدا کرد - و سپس هنگام حل اختلاف بین مکانیک نیوتن و نسبیت خاص خودش به نسبیت عام دست پیدا کرد.

از این رو، فیزیک‌دانان نظری هنگام یافتن اختلافاتی از این دست بسیار خوشحال می‌شوند: موقعیت خارق‌العاده‌ای است. این پرسش مطرح می‌شود که: آیا می‌توانیم ساختاری مفهومی بنا نهیم که با آنچه از هر دو نظریه آموخته‌ایم سازگار باشد؟

برای اینکه فضای کوانتومی و زمان کوانتومی را بفهمیم، باید بار دیگر عمیقاً در شناختمان از جهان تجدید نظر کنیم. باید قواعد دیگری برای درکمان از جهان پیدا کنیم. درست مانند آناکسیماندر که فهمید زمین در فضا معلق است و «بالا» و «پایین» در کیهان معنا ندارد؛ یا کوپرنیک که فهمید همگی با سرعت زیادی در آسمان حرکت می‌کنیم؛ یا اینشتین که فهمید فضا - زمان مانند یک نرم‌تن انعطاف‌پذیر است و زمان در مکان‌های متفاوت، با سرعت‌های متفاوتی می‌گذرد... بار دیگر، در تلاش برای یافتن نگرش منسجمی از جهان که با آنچه هم‌اکنون در مورد آن می‌دانیم سازگار باشد، باید ایده‌هایمان را در مورد ذات حقیقت تغییر دهیم.

نخستین شخصی که فهمید باید مفاهیم اساسی را برای فهم گرانش کوانتومی تغییر دهیم، شخصیتی رومانتیک و افسانه‌ای بود: ماتوی برونشتین (۱۲۴)، یک جوان روسی که در دوره استالین می‌زیست و مرگ تراژیکی داشت.



شکل ۵.۱ ماتوی برونشتین

ماتوی دوست جوان لف لاندائو — دانشمندی که برترین فیزیک‌دان نظری اتحاد جماهیر شوروی شد — بود. همکارانی که آن‌دو را می‌شناختند می‌گفتند از بین این‌دو، ماتوی با استعدادتر است. وقتی هاینبرگ و دیراک مکانیک کوانتومی را پایه‌گذاری می‌کردند، لاندائو به اشتباه فکر می‌کرد کوانتا تعریف میدان‌ها را با مشکل مواجه می‌کند: نوسان‌های کوانتومی اجازه نمی‌دهند مقدار مؤلفه یک میدان در یک نقطه (یک ناحیه به دلخواه کوچک) از فضا را اندازه بگیریم. بور در کمال استادی بلافاصله فهمید لاندائو در اشتباه است. او این مسئله را به دقت مطالعه کرد و مقاله بلند و مفصلی نوشت تا نشان بدهد میدان‌ها، مانند میدان‌های الکتریکی، حتی در چهارچوب مکانیک کوانتومی به خوبی تعریف می‌شوند. (۱) لاندائو مسئله را کنار گذاشت.

اما دوست جوانش، ماتوی، کنجکاو شد و فهمید بینش لاندائو، هرچند مبهم، مسئله مهمی را در بر می‌گیرد. او استدلال بور را، که نشان می‌داد میدان‌های الکتریکی کوانتومی را می‌توان در نقطه‌ای از فضا به خوبی مشخص کرد، تکرار کرد، ولی این‌بار آن را در مورد میدان‌های گرانشی به کار برد که اینشتین به تازگی معادلاتش را نوشته بود. عجب! در این مورد حق با لاندائو بود. میدان‌های گرانشی در نقطه‌ای از فضا، با در نظر گرفتن کوانتا، به خوبی تعریف نمی‌شوند.

به طور شهودی می‌توان فهمید ماجرا چیست. فرض کنید می‌خواهیم ناحیه‌ای بسیار کوچک از فضا را مشاهده کنیم. برای این کار باید چیزی در این ناحیه قرار دهیم تا نقطه مورد نظرمان را علامت‌گذاری کرده باشیم. فرض کنید ذره‌ای را اینجا می‌گذاریم. هاینبرگ فهمیده بود نمی‌توان برای مدت طولانی ذره‌ای را در نقطه‌ای از فضا مکان‌یابی کرد. ذره خیلی زود می‌گریزد. هرچه ناحیه‌ای که می‌خواهیم ذره را در آن بیابیم کوچک‌تر باشد، ذره با سرعت بیشتری می‌گریزد. (این اصل عدم قطعیت هاینبرگ است.) اگر ذره با سرعت زیادی بگریزد، پس انرژی زیادی دارد. حالا بیایید نظریه اینشتین را وارد کار کنیم. انرژی باعث خمیدگی فضا خواهد شد. انرژی زیاد یعنی فضا بسیار خمیده خواهد شد. انرژی بسیار در ناحیه‌ای کوچک به معنای آن است که فضا آن‌قدر خمیده خواهد شد که، مانند ستاره‌ای در حال فروپاشی، به یک سیاه‌چاله بدل می‌شود. اما اگر ذره به سیاه‌چاله بدل شود دیگر نمی‌توانیم آن را ببینیم. دیگر نمی‌توان از آن به

عنوان نقطه مرجعی برای ناحیه‌ای از فضا استفاده کرد. نمی‌توان ناحیه‌های کوچکی از فضا را به طور تصادفی اندازه گرفت، چون اگر چنین کنیم این ناحیه‌ها درون یک سیاه‌چاله ناپدید می‌شوند.

با کمی ریاضیات می‌توان این استدلال را دقیق‌تر مطرح کرد. نتیجه آن کلی است: هم مکانیک کوانتومی و هم نسبیت عام به طور ضمنی اشاره می‌کنند که تقسیم‌پذیری فضا محدودیت دارد. کمتر از مقیاسی مشخص نمی‌توان به چیزی دست یافت. به بیان دقیق‌تر، هیچ‌چیزی آنجا وجود ندارد.

کمینه این ناحیه از فضا چقدر است؟ محاسبه‌اش راحت است: کافی است کمینه اندازه یک ذره را پیش از فروپاشی به یک سیاه‌چاله محاسبه کنیم و پس از آن نتیجه روشن خواهد شد. کمینه طول حدوداً برابر است با:

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

زیر رادیکال سه ثابت طبیعت وجود دارد که قبلاً به آن‌ها برخورده‌ایم: ثابت نیوتن G ، که در فصل ۲ مطرح شد، شدت گرانش را تعیین می‌کند؛ سرعت نور c که در فصل ۳ هنگام مطرح کردن نظریه نسبیت معرفی شد، راه را برای زمان حال گسترده باز می‌کند؛ و ثابت پلانک $\hbar$ که، در فصل ۴ مطرح شد، مقیاس ساختار ذره‌ای کوانتومی را تعیین می‌کند. (۱۲۵) حضور این سه ثابت تأیید می‌کند آنچه به دنبالش هستیم

به گرانش (G)، نسبیت (c) و مکانیک کوانتومی (h) مربوط است.

طول L را که این‌گونه تعیین می‌شود طول پلانک می‌نامیم. باید طول برونشتین نام می‌گرفت اما رسم دنیا همین است. مقدار عددی آن تقریباً معادل است با یک میلیونیم یک میلیارد یک سانتی‌متر (۱۰ سانتی‌متر). بنابراین می‌توان گفت که... کوچک است. در این مقیاس بسیار کوچک است که گرانش کوانتومی خود را نشان می‌دهد. کوچکی مقیاس مورد بحثمان را این‌طور نشان می‌دهیم: اگر پوسته یک گردو را به اندازه تمام عالم قابل مشاهده بزرگ می‌کردیم، هنوز هم نمی‌توانستیم طول پلانک آن را ببینیم. حتی پس از چنین بزرگ‌نمایی‌ای طول پلانک یک میلیون بار از اندازه اصلی پوسته گردو پیش از آنکه بزرگ شود، کوچک‌تر است. در این مقیاس ماهیت فضا و زمان عوض می‌شود. به چیز دیگری بدل می‌شوند: «فضا و زمان کوانتومی»، که مشکل فهم معنای این موضوع است.

ماتوی برونشتین در دهه ۱۹۳۰ متوجه تمام این‌ها شد و دو مقاله کوتاه و راهگشا در این مورد نوشت، وی در این مقالات این نکته را متذکر می‌شود که مکانیک کوانتومی و نسبیت عام، در کنار یکدیگر، با تصورمان از فضا به عنوان یک پیوستگی بی‌نهایت تقسیم‌پذیر ناسازگار است. (۲) با این حال مشکلی وجود دارد. ماتوی و لف از صمیم قلب کمونیست‌اند. آن‌ها انقلاب را آزادی‌بخش بشر و راهی برای ساختن جامعه‌ای بسیار بهتر و خالی از بی‌عدالتی می‌دانند، بدون نابرابری‌هایی که همچنان به طور سیستماتیک در جهان افزایش می‌یابند. آن‌ها پیرو و شیفته لنین‌اند. وقتی استالین به قدرت می‌رسد، هر دو ابتدا سردرگم، سپس منتقد و بعد مخالف سرسخت او می‌شوند. مقاله‌هایی می‌نویسند که هرچند میانه‌رو، اما به روشنی منتقدانه‌اند... این کمونیسمی نبود که می‌خواستند...

اما زمانه سختی است. لاندائو از آن جان سالم به در می‌برد. هرچند به دشواری، اما زنده می‌ماند. یک سال پس از اینکه ماتوی برای نخستین بار فهمید ایده‌هایمان در مورد فضا و زمان باید تغییر اساسی کند، پلیس استالین او را دستگیر و به قصاص محکوم کرد. او در همان روز محاکمه‌اش، ۱۸ فوریه ۱۹۳۸، اعدام شد. (۳) او در آن هنگام سی سال داشت.

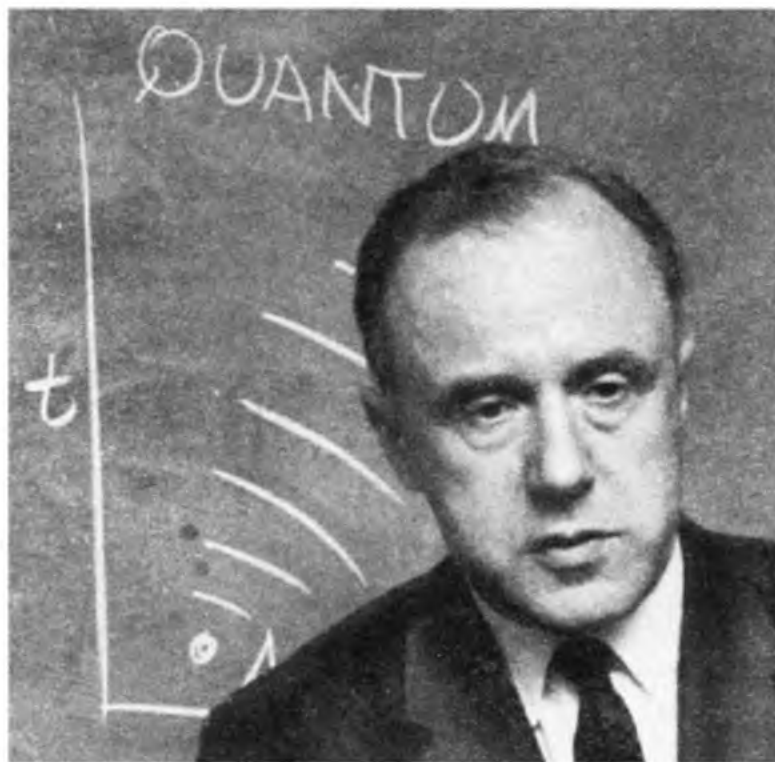
پس از مرگ زودهنگام ماتوی برونشتین، بسیاری از فیزیک‌دانان بزرگ قرن تلاش کردند معمای گرانش کوانتومی را حل کنند. دیراک سال‌های پایانی عمرش را به این مسئله اختصاص داد، راه‌های بسیاری گشود و ایده‌ها و تکنیک‌های مختلفی را معرفی کرد که امروزه اساس بخش اعظم مطالعه گرانش کوانتومی را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که در ادامه توضیح خواهیم داد، به لطف این تکنیک‌هاست که می‌دانیم چطور جهانی بدون زمان را توصیف کنیم. فاینمن تلاش کرد تکنیک‌هایی را که برای الکترون‌ها و فوتون‌ها اتخاذ کرده بود، به نسبت عام بسط دهد، اما موفقیتی نداشت: الکترون‌ها و فوتون‌ها کوانتایی در فضا دارند؛ گرانش کوانتومی چیز دیگری است: توصیف «گراویتون‌ها» که در فضا حرکت می‌کنند کافی نیست، باید خود فضا را کوانتیزه کرد.

چند جایزه نوبل به فیزیک‌دان‌هایی اهدا شد که در مسیر حل معمای گرانش کوانتومی، تقریباً به طور تصادفی، مسئله‌های دیگری را حل کردند. دو فیزیک‌دان هلندی، خیرارت هوفت (۱۳۶) و مارتینوس ولتمان (۱۳۷)، برای اثبات درستی نظریه‌هایی که امروزه برای توصیف نیروهای هسته‌ای به کار می‌بریم — بخشی از مدل استاندارد — در سال ۱۹۹۹ جایزه نوبل دریافت کردند، اما در واقع هدف پژوهششان نشان دادن درستی نظریه‌ای درباره گرانش کوانتومی بود. مطالعه آن‌ها روی نظریات دیگر نیروها تنها یک تمرین مقدماتی بود. این «تمرین مقدماتی» نوبل فیزیک را برایشان به ارمغان آورد، اما نتوانستند درستی نظریه‌شان را در مورد گرانش کوانتومی نشان دهند.

این فهرست طولانی را تا مدت‌ها می‌توان ادامه داد که بی‌شباهت به خواندن طومار افتخار فیزیک‌دانان نظری بزرگ قرن نخواهد بود. همچنین به فهرستی از شکست‌ها شبیه است. با وجود این، قدم به قدم و با گذشت چندین دهه ایده‌ها تبیین شدند و بن‌بست‌ها کاویده و به طور ثمربخشی مسدود شدند؛ ایده‌های کلی و تکنیک‌ها تقویت شدند و کم‌کم نتایجی، یکی پس از دیگری، به دست آمد. برای اشاره به دانشمندان بسیاری که به این روند ساخت جمعی، آهسته و تدریجی کمک کردند و هرکدام خرده‌سنگ یا تکه‌سنگی بزرگ به آن افزودند، به لیست اسامی کسالت‌باری احتیاج خواهیم داشت.

می‌خواهم تنها به یکی از این نام‌ها اشاره کنم که سال‌ها انسجام این پژوهش جمعی را حفظ کرد. یک مرد انگلیسی با استعداد، بسیار

سرزنده — نیمی فیزیک‌دان و نیمی فیلسوف — به نام کریس ایشم(۱۲۸). نخستین بار هنگام خواندن یکی از مقاله‌های او دربارهٔ بررسی مسئلهٔ کوانتوم گرانشی بود که شیفتهٔ این مسئله شدم. این مقاله توضیح می‌داد چرا این موضوع بسیار دشوار است، چطور درکمان از فضا و زمان باید تغییر کند و از تمام مسیرهایی که آن زمان دنبال می‌شدند، نتایج به دست آمده و دشواری‌هایی که از آن برمی‌خاست نگاه روشنی ارائه می‌داد. سال سوم دانشگاه بودم و امکان تجدیدنظر در مورد مفهوم فضا و زمان از همان اول مسحورم کرد. این سحر از آن موقع از وجودم رخت بر نبسته است. زیرا همان‌طور که پترارک می‌سراید: «تضعیف کمان زخم را التیام نخواهد داد.»



شکل ۵.۲ جان ویلر

دانشمندی که بیش از همه در مطالعهٔ گرانش کوانتومی نقش داشته جان ویلر (۱۲۹)، شخصیتی افسانه‌ای، است که فیزیک قرن پیش را دگرگون کرد. او شاگرد و همچنین همکار نیلز بور در کپنهاگ بود؛ وقتی اینشتین به ایالات متحده آمد با او همکاری کرد؛ آموزگاری که از میان دانشجوهایش می‌توان ریچارد فاینمن را برشمرد... ویلر در دل فیزیک قرن بیستم بود. قوهٔ تخیل شگرفی داشت. او بود که واژهٔ «سیاه‌چاله» را ساخت و بر سر زبان‌ها انداخت. نام او با تحقیقات گستردهٔ اولیهٔ اندیشیدن در مورد فضا - زمان کوانتومی - که معمولاً شهودی‌تر از ریاضیات هستند - گره خورده است. ویلر با آموختن درس برونشتین دربارهٔ اینکه ویژگی‌های کوانتومی میدان‌های گرانشی حاکی از تغییر مفهوم فضا در مقیاس کوچک بودند، به دنبال ایده‌های نوینی برای فهم این فضای کوانتومی رفت. آن را به صورت ابری از هندسهٔ تطبیقی تصور کرد، همان‌طور که می‌توانیم الکترون‌های کوانتومی را به صورت ابری از موقعیت‌ها ببینیم.

فرض کنید از ارتفاع بلندی به دریا نگاه می‌کنید: گسترهٔ وسیعی از آن را می‌بینید، شبیه یک میز صاف نیلگون. حالا پایین‌تر می‌روید و از نزدیک به آن نگاه می‌کنید. کم‌کم امواج برخاسته از باد را تشخیص می‌دهید. پایین‌تر می‌روید و شکست موج‌ها و کف‌های آشفته و ناآرام سطح دریا را می‌بینید. ویلر فضا را این‌طور می‌بیند. (۱۳۰) در مقیاس ما، بسیار بزرگ‌تر از طول پلانک، فضا یکپارچه است. اگر به مقیاس پلانک برویم یکپارچگی فرومی‌پاشد و کف می‌کند.

ویلر به دنبال یافتن راهی برای توصیف این کف‌های فضایی، این موج احتمالاتی با هندسه‌های مختلف، بود. در سال ۱۹۶۶، برایس دویت (۱۳۱)، یکی از همکاران جوان او که در کارولینا زندگی می‌کرد، کلید مسئله را یافت. (۴) ویلر مرتب به مسافرت می‌رفت و هر جا می‌توانست با همکارانش دیدار می‌کرد. وقتی در فرودگاه «رالی دورهام» (۱۳۲)، در کارولینای شمالی، بین دو پرواز چند ساعت وقت داشت از برایس خواست به دیدار او بیاید. برایس سر می‌رسد و معادله‌ای برای «تابع موج فضا» نشان او می‌دهد که آن را از یک ترفند سادهٔ ریاضی به دست آورده بود. (۱۳۳) ویلر مشتاق می‌شود. از این مکالمه نوعی «معادلهٔ اوربیتال‌ها» برای نسبیت عام زاده می‌شود؛ معادله‌ای که احتمال خمیدگی فضاها را تعیین می‌کند. دویت مدت‌ها آن را معادلهٔ ویلر می‌خواند (۱۳۴) و ویلر آن را معادلهٔ دویت. دیگران به آن معادلهٔ ویلر - دویت می‌گویند.

ایده آن بسیار خوب است و به پایه‌ای برای ساخت نظریه کامل گرانش کوانتومی تبدیل می‌شود. اما این معادله خود پر از مشکل است — مشکلاتی جدی. اولاً، از دیدگاه ریاضی، معادله واقعاً بد تعریف شده است. اگر بخواهیم در محاسبات از آن استفاده کنیم، سریعاً جواب‌های نامحدودی به دست می‌آوریم که معقول نیست. این مسئله باید تصحیح شود.

اما تفسیر و یافتن معنای این معادله هم واقعاً سخت است. یکی از جنبه‌های گیج‌کننده‌اش این است که متغیر زمان در آن نقشی ندارد. چگونه می‌توان تکامل رخدادی در زمان را بدون استفاده از متغیر زمان به دست آورد؟ در معادله‌های دینامیکی فیزیک همواره متغیر زمان t وجود دارد. یک نظریه فیزیکی بدون متغیر زمان چه معنایی دارد؟ برای اصلاح معادله به طرق مختلف سال‌ها پژوهش‌های مختلفی پیرامون چنین پرسش‌هایی انجام شد، تا معنای آن بهبود یابد و درکش آسان شود.

اولین قدم‌های حلقه‌ها

در پایان دهه ۱۹۸۰، کم‌کم این مه ناپدید می‌شود. به طور غافلگیرکننده‌ای، برخی از جواب‌های معادله ویلر - دویت ظاهر می‌شود. طی این سال‌ها من ابتدا به دانشگاه سیراکیوز (۱۳۵)، در ایالت نیویورک، به دیدار فیزیک‌دان هندی ابهه اشتکار (۱۳۶) و سپس به دانشگاه ییل (۱۳۷)، در ایالت کنتیکات، به دیدار فیزیک‌دان آمریکایی لی اسمولین (۱۳۸) رفتم. دوره‌ای از مباحثه‌های آتشین و التهاب سوزان اندیشه را به یاد می‌آورم. اشتکار معادله ویلر - دویت را به شکل ساده‌تری نوشته بود و اسمولین به همراه تد جیکبسون (۱۳۹)، از دانشگاه مریلند (۱۴۰) واشنگتن، نخستین افرادی بودند که پاسخ‌های عجیب و تازه‌ای برای این معادله به دست آورده بودند.

این پاسخ‌ها غرابت خاصی داشتند: به مسیرهای بسته در فضا بستگی داشتند. هر مسیر بسته، یک «حلقه» است. اسمولین و جیکبسون توانستند به ازای هر حلقه یک جواب برای معادله ویلر - دویت به دست آورند: برای هر مسیری که در خود بسته می‌شد. این موضوع چه معنایی داشت؟ با مشخص شدن تدریجی معنای این پاسخ‌های معادله ویلر - دویت، نخستین آثار در مورد چیزی که بعدها به عنوان نظریه گرانش کوانتومی حلقه شناخته می‌شود از این مباحثه‌ها پدید می‌آید. کم‌کم، از این پاسخ‌ها نظریه‌ای منسجم برمی‌خیزد که نام «نظریه حلقه» را از نخستین پاسخ‌های مطالعه‌شده می‌گیرد. امروزه صدها دانشمند در سراسر دنیا از چین تا آرژانتین، از اندونزی تا ایالات متحده روی این نظریه کار می‌کنند. چیزی که به آرامی از آن پدیدار می‌شود نظریه حلقه یا نظریه گرانش کوانتومی حلقه است، نظریه‌ای که فصل‌های بعدی به آن اختصاص داده شده است. این نظریه تنها مسیری نیست که در جست‌وجوی نظریه‌ای برای گرانش کوانتومی در نظر گرفته می‌شود، بلکه به نظرم نظریه‌ای است که درخشان‌ترین آینده را دارد. (۱۴۱)

۶. کوانتای فضا

فصل پیش با پاسخ معادله ویلر - دویت که جیکبسون و اسمولین کشف کردند، پایان یافت. این پاسخ‌ها به مسیرهای بسته یا حلقه‌ها، بستگی دارند؛ یعنی چه؟

خطوط فارادی را به یاد دارید؟ خط‌هایی که حامل نیروی الکتریکی‌اند و در تخیل فارادی فضا را پر می‌کنند؟ خط‌هایی که خاستگاه مفهوم «میدان» هستند؟ خط‌هایی که در پاسخ‌های معادله ویلر - دویت ظاهر می‌شوند، خطوط فارادی برای میدان گرانشی‌اند.

اما دو عامل به ایده‌های فارادی افزوده شده است.

نخست اینکه با نظریه کوانتومی سروکار داریم. در نظریه کوانتومی همه‌چیز گسسته است؛ یعنی تار عنکبوت پیوسته و بی‌نهایت باریک خطوط فارادی، حالا شبیه یک تار عنکبوت واقعی شده است: تعداد رشته‌های مجزایش محدود است. هر خط که تعیین‌کننده یکی از جواب‌های معادله ویلر - دویت است، یکی از رشته‌های این تار را توصیف می‌کند.

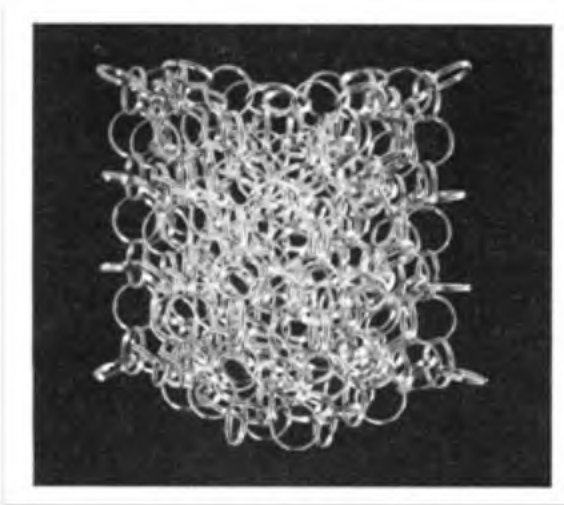
دومین نکته تازه و اساسی این است که از گرانش سخن می‌گوییم و در نتیجه، همان‌طور که اینشتین فهمید، بحث میدان‌های موجود در فضا نیست، بلکه از خود ساختار فضا سخن می‌گوییم. خطوط فارادی میدان گرانشی کوانتومی تاروپودی‌اند که فضا از آن بافته شده است.

در ابتدا، پژوهش بر این خطوط متمرکز بود و اینکه خطوط چگونه می‌توانند فضای فیزیکی سه‌بعدی ما را «در هم بتنند». شکل ۶.۱ یکی از نخستین تلاش‌ها برای ارائه ایده‌ای شهودی از ساختار گسسته فضا است که از این پژوهش حاصل شده است.

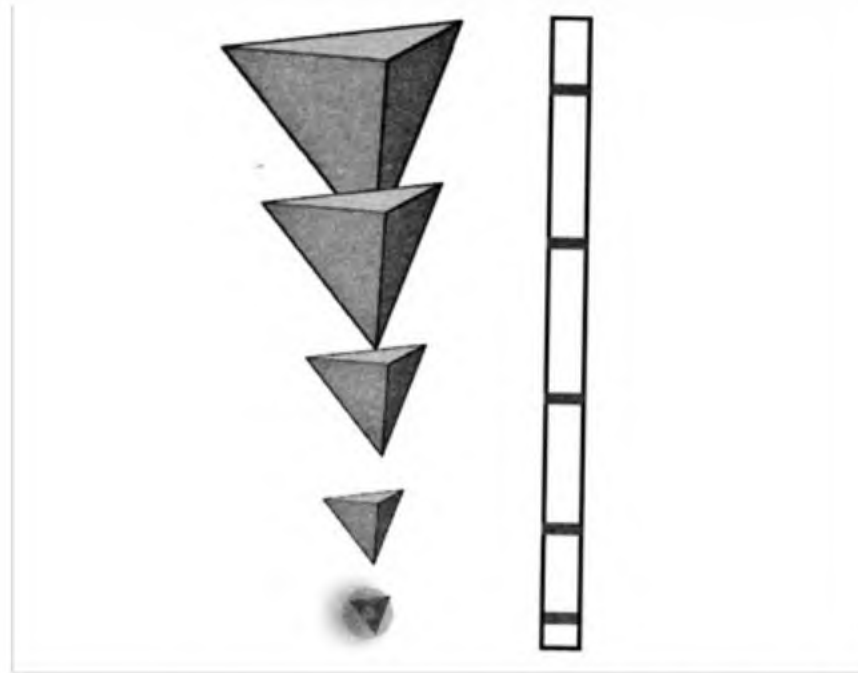
کمی بعد، به لطف بینش و توانایی ریاضیاتی دانشمندان جوانی چون خورخه پولین آرژانتینی و پول یورک لواندوفسکی (۱۴۲)، معلوم شد کلید فهم فیزیک این پاسخ‌ها در نقاط تقاطع این خطوط است. این نقطه‌ها را گره و خطوط بین نقطه‌ها را لینک می‌نامیم. مجموعه‌ای از خطوط متقاطع یک گراف تشکیل می‌دهند، یعنی مجموعه‌ای از گره‌ها که از طریق لینک‌ها به هم پیوسته‌اند، مانند شکل ۳.۶.

در واقع، یک محاسبه نشان می‌دهد که فضای فیزیکی بدون گره‌ها حجم ندارد. به عبارت دیگر، حجم فضا در گره‌ها «وجود دارد»، نه در خطوط. خطوط حجم‌های متفاوت موجود در گره‌ها را «به هم پیوند می‌دهند».

سال‌ها طول کشید تا توصیف فضا - زمان حاصل از این ایده‌ها روشن شود. باید ریاضیات بدتعریف‌شده معادله ویلر - دویت تبدیل به ساختاری می‌شد که تعریف آن به اندازه‌ای خوب باشد تا بتوان با آن محاسبه انجام داد. با انجام این کار، به دست آوردن نتایج دقیق ممکن شد. نتیجه فنی و کلیدی‌ای که معنی فیزیکی گراف‌ها را روشن کرد محاسبه طیف حجم و مساحت بود.



شکل ۶.۱ نسخه کوانتومی خطوط نیروی فارادی که فضا را مانند میخی سه‌بعدی از حلقه‌های به هم پیوسته در هم می‌تند.



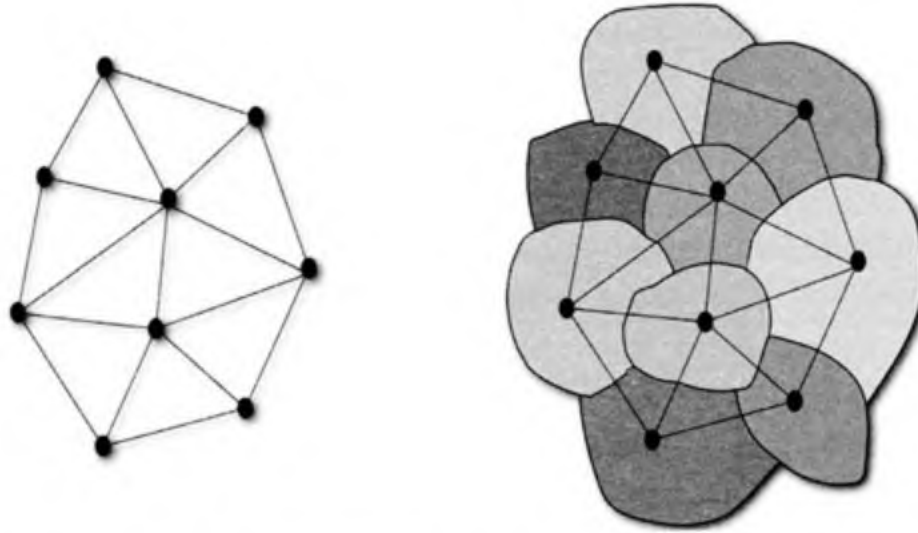
شکل ۶.۲ طیف حجم: تعداد حجم‌های ممکن برای چهاروجهی‌های منتظم در طبیعت محدود است. کوچک‌ترین چهاروجهی‌ای که پایین شکل رسم شده، کوچک‌ترین چهاروجهی موجود است.

طیف حجم و مساحت

یک ناحیه دلخواه از فضا در نظر بگیرید. برای مثال، اتاقی که این کتاب را در آن می‌خوانید (اگر در یک اتاقید). اندازه این اتاق چقدر است؟ اندازه اتاق را با حجمش می‌سنجند. حجم یک کمیت هندسی است که به هندسه فضا بستگی دارد. اما هندسه فضا — همان‌طور که اینشتین فهمید و من نیز در فصل ۳ آن را شرح دادم — یک میدان گرانشی است. پس حجم یکی از ویژگی‌های میدان گرانشی است که مشخص می‌کند بین دیوارهای اتاق شدت میدان گرانشی چقدر است. اما میدان گرانشی یک کمیت فیزیکی است و مانند همه کمیت‌های فیزیکی پیرو قوانین مکانیک کوانتومی است. بالاخص حجم، مانند همه کمیت‌های فیزیکی، نمی‌تواند هر اندازه دلخواهی داشته باشد، بلکه فقط می‌تواند مقدارهای معینی به خود بگیرد، همان‌طور که در فصل ۴ توضیح دادم. اگر به یاد داشته باشید، مجموعه تمام مقدارهای ممکن برای متغیر را طیف می‌نامیم. پس باید «طیف حجم» نیز وجود داشته باشد (شکل ۶.۲).

با فرمولی که دیراک به ما داد، می‌توانیم طیف هر متغیری را حساب کنیم. ابتدا فرمول‌بندی و سپس تکمیل محاسبات زمانبر بود و دشواری بسیاری داشت. فرمول در میانه دهه ۱۹۹۰ تکمیل شد و پاسخ، همان‌طور که انتظار می‌رفت، این است که طیف فضا گسسته است (فاینمن می‌گفت هرگز نباید پیش از دانستن جواب چیزی را محاسبه کنیم)؛ یعنی حجم تنها از «بسته‌های گسسته» ساخته می‌شود. این امر کمابیش شبیه انرژی میدان الکترومغناطیسی است که به همین ترتیب از بسته‌های گسسته، تشکیل می‌شود: فوتون‌ها.

گره‌های گراف نشان‌دهنده بسته‌های گسسته حجم‌اند و مانند فوتون‌ها تنها می‌توانند اندازه‌های معینی به خود بگیرند. این اندازه‌ها از معادله کوانتومی عام دیراک به دست می‌آیند. (۱۴۳) هر گره n حجم v خود را دارد: که یکی از اعداد طیف حجم است. گره‌ها کوانتای بنیادی‌اند که فضای فیزیکی را می‌سازند. هر گره گراف یکی از «ذره‌های کوانتومی فضا» است. ساختار حاصل در شکل ۶.۳ نشان داده شده است.



شکل ۶.۳ در سمت چپ، گرافی از گره‌ها که با لینک‌ها به هم متصل شده‌اند نشان داده شده است. در سمت راست، ذره‌های فضا که این گراف آن‌ها را نشان می‌دهد. لینک‌ها مجاورت ذره‌ها را، که با سطح‌ها از هم تفکیک شده‌اند، نشان می‌دهد.

لینک کوانتوم خاص یک خط فارادی است. حالا می‌توانیم بفهمیم لینک‌ها چه چیزی را نشان می‌دهند: اگر دو گره را به عنوان دو «ناحیه کوچک از فضا» در نظر بگیریم، سطحی کوچک این دو ناحیه را جدا می‌کند. اندازه این سطح مساحت آن است. کمیت دیگری، غیر از حجم، که

شبکه‌های کوانتومی فضا را تعیین می‌کند مساحت مربوط به هر خط است. (۱۴۴)

مساحت، درست مانند حجم، متغیری فیزیکی است که طیفش را می‌توان از معادلهٔ دیراک به دست آورد. (۱۴۵) مساحت پیوسته نیست، ساختار ذره‌ای دارد. مساحت‌های به دلخواه کوچک وجود ندارند.

فضا به نظر ما پیوسته می‌آید، چون نمی‌توانیم مقیاس بسیار کوچک کوانتای فضا را حس کنیم. همان‌طور که وقتی از نزدیک به پارچهٔ تی‌شرتی نگاه کنیم تنها درهم‌تنیدگی رشته‌های نازک را می‌توانیم ببینیم.

وقتی می‌گوییم حجم اتاق برای مثال صد متر مکعب است در عمل ذره‌های فضا — کوانتای میدان گرانشی — را که در اتاق وجود دارند، می‌شماریم. این عدد برای یک اتاق بیش از صد رقم دارد. وقتی می‌گوییم مساحت این صفحه دویست سانتی‌متر مربع است در حقیقت تعداد لینک‌های شبکه یا حلقه‌هایی را که از صفحه عبور می‌کنند می‌شماریم. تعداد کوانتایی که در این صفحه از کتاب وجود دارد، عددی کمابیش هفتادرقمی است.

در قرن نوزدهم، خود ریمان این ایده را که در اندازه‌گیری طول، مساحت و حجم مسئلهٔ مهم شمارش اجزای مجزا است، مطرح کرده بود. ریاضی‌دانی که نظریهٔ فضا‌های ریاضیاتی خمیدهٔ پیوسته را مطرح کرده بود از قبل می‌دانست که در نهایت فضای فیزیکی گسسته عاقلانه‌تر از فضای پیوسته است.

به طور خلاصه نظریهٔ گرانش کوانتومی حلقه یا نظریهٔ حلقه، نسبت عام و مکانیک کوانتومی را به شیوه‌ای تقریباً محافظه‌کارانه در هم می‌آمیزد. می‌گوییم محافظه‌کارانه، چون هیچ فرضیهٔ دیگری به غیر از خود این دو نظریه را در نظر نمی‌گیرد. آن‌ها را به شکل مناسبی بازنویسی می‌کند تا با هم سازگار شوند. اما نتایج آن دگرگون‌کننده است.

نسبت عام به ما آموخت فضا هم مانند میدان الکترومغناطیسی دینامیک است: ما در فضایی غوطه‌وریم که مانند یک نرم‌تن عظیم، متحرک و کشسان است و می‌تواند انحنا پیدا کند. مکانیک کوانتومی به ما می‌آموزد هر میدانی از این دست از کوانتا ساخته شده است؛ یعنی ساختار ذره‌ای دارد. از آنجا که فضای فیزیکی یک میدان است می‌توان نتیجه گرفت که از کوانتا ساخته شده است. همین ساختار ذره‌ای که

دیگر میدان‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد، میدان گرانشی کوانتومی و در نتیجه فضا را نیز به وجود می‌آورد. پیش‌بینی می‌کنیم که فضا ساختار ذره‌ای داشته باشد. انتظار داریم کوانتای گرانش داشته باشیم، همان‌طور که کوانتای نور و کوانتای میدان الکترومغناطیسی داریم، همان‌طور که ذره‌ها کوانتای میدان‌های کوانتومی‌اند. اما فضا یک میدان گرانشی است و کوانتای میدان گرانشی کوانتای فضا است: و در نتیجه سازه‌های ذره‌ای فضا. بنابراین پیش‌بینی اساسی نظریه حلقه این است که فضا پیوسته و بی‌نهایت تقسیم‌پذیر نیست، بلکه از «اتم‌های فضا» ساخته شده است که میلیاردها میلیارد بار از کوچک‌ترین هسته اتم کوچک‌تر است. نظریه حلقه این ساختار اتمی و ذره‌ای کوانتومی فضا را به شکل ریاضیاتی دقیقی بیان می‌کند. این نظریه از اعمال معادلات عام مکانیک کوانتومی دیراک به میدان گرانشی اینشتین به دست می‌آید. نظریه حلقه مخصوصاً مشخص می‌کند حجم (برای مثال حجم یک مکعب مشخص) نمی‌تواند به اندازه دلخواه کوچک باشد. یک حداقل حجم وجود دارد و فضایی کوچک‌تر از آن وجود ندارد. حداقل کوانتوم حجم که وجود دارد، اتم بنیادی فضا است.

اتم‌های فضا

آشیل را که به دنبال لاک‌پشت می‌دوید به یاد دارید؟ زنون فهمید پذیرش اینکه آشیل برای رسیدن به جانور کندرو باید بی‌نهایت فاصله را بپیماید، کمی دشوار است. ریاضیات پاسخی برای این ابهام پیدا کرد و نشان داد جمع بی‌نهایت بازه نزولی، می‌تواند یک بازه متناهی باشد.

اما واقعاً در طبیعت چنین اتفاقی می‌افتد؟ آیا فاصله‌هایی بین آشیل و لاک‌پشت وجود دارد که به دلخواه بسیار کوچک باشد؟ آیا واقعاً سخن گفتن از یک میلیارد یک میلیارد یک میلی‌متر معنی دارد و اینکه باز هم بی‌نهایت بار تقسیم‌پذیر باشد؟

محاسبه طیف کوانتومی کمیت‌های هندسی نشان می‌دهد که پاسخ منفی است: تکه‌های به دلخواه کوچک فضا وجود ندارند. کران پایینی برای تقسیم‌پذیری فضا وجود دارد. مقیاس آن بسیار کوچک است، اما وجود دارد. این همان چیزی است که ماتوی برونشتین در سال ۱۹۳۰ متوجه شده بود. محاسبه طیف حجم و مساحت ایده برونشتین را تأیید و آن را در قالب ریاضیاتی دقیق بیان می‌کند.

آشیل برای رسیدن به لاک‌پشت لازم نیست بی‌نهایت قدم بردارد، چون در فضایی ساخته‌شده از ذرات با اندازه محدود قدم‌های بی‌نهایت کوچک وجود ندارند. قهرمان به جانور نزدیک‌ونزدیک‌تر می‌شود و در نهایت تنها با جهشی کوانتومی به آن می‌رسد.

اما، بعد از کمی دقت به آن، این دقیقاً همان راه‌حلی نیست که لئوکیپوس و دموکریت ارائه کردند؟ آن‌ها در مورد ساختار ذره‌ای ماده سخن گفتند و مطمئن نیستیم دقیقاً در مورد فضا چه چیزی را مطرح کردند. متأسفانه نوشته‌های آن‌ها به دست ما نرسیده است و باید با نقل‌قول‌های پراکنده دیگران سر کنیم. مانند این است که از فهرست نقل‌قول‌های شکسپیر یکی از نمایش‌نامه‌های او را بازسازی کنیم. (۱۴۶) استدلال دموکریت در مورد ناسازگاری پیوستگی به عنوان مجموعه‌ای از نقاط را، که ارسطو نقل کرده، می‌توان به فضا تعمیم داد. فکر می‌کنم اگر می‌توانستیم از دموکریت بپرسیم آیا می‌توان فاصله‌ای در فضا را بی‌نهایت بار تقسیم کرد یا نه، پاسخ می‌داد تقسیم‌پذیری حدی دارد. فیلسوف آبدرا سازه ماده را اتم‌های تقسیم‌ناپذیر می‌داند. او که فهمیده بود فضا بسیار شبیه ماده است — طبق گفته او فضا «فیزیک معینی» دارد — به نظرم بی‌درنگ نتیجه می‌گرفت فضا هم از ذرات بنیادی تقسیم‌ناپذیر ساخته شده است. شاید

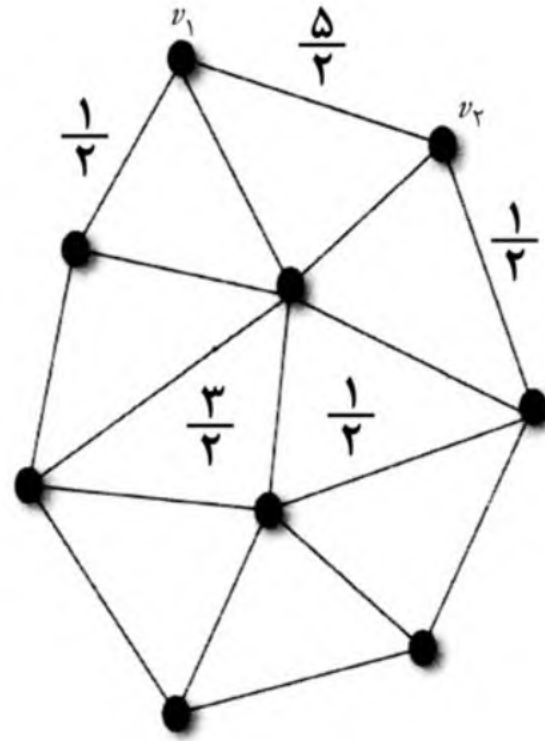
ما تنها پا جای پای دموکریت می‌گذاریم.

البته نمی‌خواهم بگویم فیزیک این دو هزار سال بیهوده بوده، آزمایش‌ها و ریاضیات بی‌نتیجه هستند و نظریات دموکریت به اندازه علم مدرن متقاعدکننده است. البته که نه. بدون آزمایش‌ها و ریاضیات هیچ‌وقت نمی‌توانستیم به دانسته‌های کنونی‌مان دست پیدا کنیم. اما به هر حال الگوهای مفهومی‌ای که برای فهم جهان نیاز داریم نه فقط از کاوش در ایده‌های جدید، بلکه از پرداختن به بینش‌های قدرتمند شخصیت‌های برجسته در گذشته به دست می‌آید. دموکریت یکی از کسانی است که با نشستن روی شانه‌های عظیمش می‌توانیم چیزهای جدیدی بیابیم. اما بیایید به گرانث کوانتومی برگردیم.

شبکه‌های اسپین

گراف‌هایی که نمایانگر حالت کوانتومی فضا هستند با حجم V برای هر گره و عدد نیم‌صحیح Z برای هر مسیر مشخص می‌شوند. گرافی با این مشخصات را یک شبکه اسپین می‌نامیم (شکل ۶.۴). (اعداد نیم‌صحیح در فیزیک «اسپین» نامیده می‌شوند، چون در مکانیک کوانتومی اجسام چرخان ظاهر می‌شوند.) یک شبکه اسپین بیانگر حالت کوانتومی میدان گرانشی است، یک حالت کوانتومی فضا؛ فضایی با ساختار ذره‌ای که مساحت و حجم آن گسسته است. در شاخه‌های دیگر فیزیک برای برآورد کردن فضای پیوسته از شبکه‌های مشبک دقیق استفاده می‌شود. اینجا فضای پیوسته‌ای برای برآورد وجود ندارد؛ فضا حقیقتاً ذره‌ای است.

تفاوت اساسی بین فوتون‌ها (کوانتای میدان الکترومغناطیسی) و گره‌های گراف (کوانتای گرانش) این است که فوتون‌ها در فضا حضور دارند، اما کوانتای گرانش خود فضا را تشکیل می‌دهند. فوتون‌ها با «موقعیت مکانی‌شان» مشخص می‌شوند. (۱۴۷) کوانتای فضا جایی را ندارند که در آن باشند، چون خودشان جا و مکان را می‌سازند. فقط یک مؤلفه وجود دارد که ویژگی آن‌ها را در فضا مشخص می‌کند: اطلاعات راجع به اینکه در کنار کدام کوانتای فضا هستند، اینکه کدام در کنار کدام قرار دارد. این اطلاعات با لینک‌های موجود در گراف نشان داده می‌شوند. دو گره‌ای که از طریق یک لینک به هم پیوسته‌اند، مجاور یکدیگرند. دو ذره از فضا هستند که با هم تماس دارند: این «تماس» ساختار فضا را می‌سازد.



شکل ۶.۴ یک شبکه اسپین

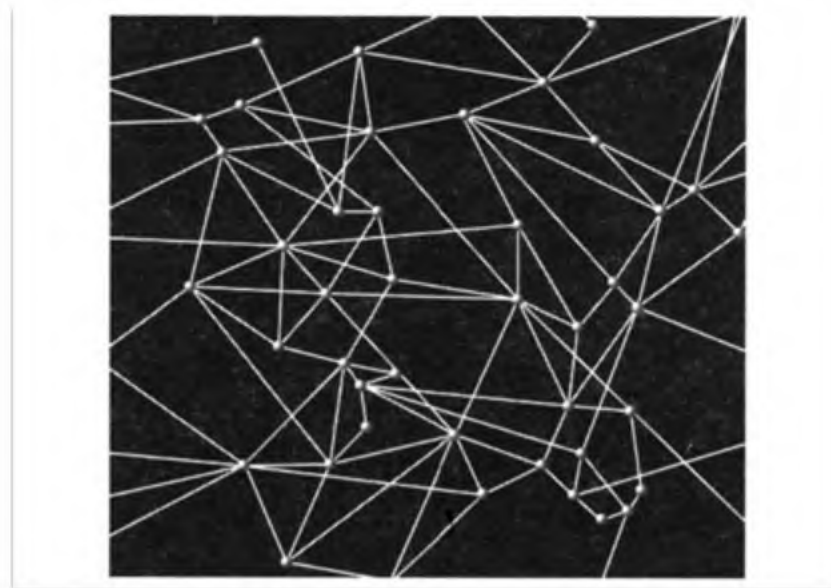
در واقع کوانتای گرانش در فضا نیستند، آن‌ها خود فضا هستند. شبکه‌های اسپین که ساختار کوانتومی میدان گرانشی را بیان می‌کنند در فضا غوطه‌ور نشده‌اند؛ فضایی را اشغال نمی‌کنند. موقعیت یک کوانتای فضا با توجه به چیز دیگری تعریف نمی‌شود، بلکه لینک‌ها و روابطی که یال‌ها نشان می‌دهند آن را معین می‌کند.

اگر در راستای لینک‌ها از ذره‌ای به ذره دیگر بروم تا یک مدار را طی کرده باشم و به ذره‌ای که شروع کرده بودم بازگردم، یک «حلقه» را طی کرده‌ام. این‌ها همان حلقه‌های اصلی نظریه حلقه‌اند. در فصل ۴ نشان دادم چطور می‌توان با بررسی ثابت ماندن یا چرخیدن جهت پیکانی که یک حلقه بسته را طی کرده است، خمیدگی فضا را محاسبه کرد. ریاضیات این نظریه خمیدگی را برای هر حلقه بسته در شبکه اسپین تعیین می‌کند و از این طریق می‌توان خمیدگی فضا - زمان و در نتیجه نیروی میدان گرانشی را از ساختار یک شبکه اسپین تعیین کرد. (۱۴۸)

اکنون، مکانیک کوانتومی تنها ذره‌ای نیست. با حقیقت احتمالاتی بودن تکامل هم مواجهیم - شبکه‌های اسپین به شکل تصادفی تکامل می‌یابند. در بخشی که به زمان اختصاص داده‌ام در این مورد توضیح خواهم داد.

مهم نیست ماهیت چیزها چگونه است، مهم برهم‌کنش آن‌هاست. شبکه‌های اسپین ماهیتی ندارند؛ تنها اثر فضا بر بقیه چیزها را بیان می‌کنند. همان‌طور که الکترون مکان بخصوصی ندارد و در ابری احتمالاتی از تمام مکان‌ها قرار دارد، فضا هم از شبکه اسپین بخصوصی تشکیل نشده است، بلکه ابری از احتمالات است که تمام شبکه‌های اسپین را در بر می‌گیرد.

در مقیاسی بسیار کوچک فضا نوسان انبوهی از کوانتای گرانش است که برهم‌کنش دارند، با هم بر سایر چیزها اثر می‌گذارند و در این برهم‌کنش‌ها خود را به صورت شبکه‌های اسپین، یعنی ذره‌های همبسته، آشکار می‌کنند (شکل ۵.۶).



شکل ۶.۵ در مقیاس کوچک، فضا پیوسته نیست: از عناصر متناهی و همبسته در هم تنیده شده است.

فضای فیزیکی بافتی است که از انبوه بسیار این شبکه از ارتباطات به وجود می‌آید. مسیرها در هیچ‌جا حضور ندارند؛ مکان بخصوصی ندارند، بلکه با برهم‌کنش‌های خود مکان‌ها را می‌سازند. فضا از برهم‌کنش کوانتای گران‌ش معینی ساخته می‌شود.

این اولین قدم به سوی شناخت گرانش کوانتومی است. قدم دوم مربوط به زمان است. بخش بعدی به زمان اختصاص یافته است.

۷. زمان وجود ندارد

کسی نباید ادعا کند زمان را مستقل از حرکت اشیا درک می‌کند.

لوکرتیوس - (۱) De Rerum Natura

خواننده هوشیار متوجه شده است که در بخش قبل اشاره خاصی به زمان نشد. با وجود این، بیش از یک قرن پیش اینشتین نشان داد ما نمی‌توانیم زمان و فضا را از هم تفکیک کنیم و باید به عنوان یک کل یکپارچه آن‌ها را در نظر بگیریم: فضا - زمان. زمانش رسیده که این سهل‌انگاری را جبران و زمان را وارد بازی کنیم.

پژوهش‌های پیرامون گرانش کوانتومی پیش از آنکه شهادت مواجهه با زمان را به دست آورند، مدت‌ها حول معادلات فضایی می‌گشت. در پانزده سال اخیر، شیوه‌ای نو برای اندیشیدن در مورد زمان به وجود آمده است. تلاش می‌کنم آن را توضیح دهم.

با وجود گرانش کوانتومی ایده فضا به عنوان ظرفی بی‌شکل برای اشیا از فیزیک رخت بر می‌بندد. اجسام (کوانتا) در فضا ساکن نیستند، بلکه هرکدام بر دیگری سوارند و فضا بافتی است از روابط نزدیک آن‌ها. همان‌طور که ایده فضا به عنوان ظرفی ثابت را کنار گذاشتیم، باید از ایده زمان به عنوان جریانی ثابت که واقعیت طی گذر آن شکوفا می‌شود نیز صرف نظر کنیم. همان‌طور که ایده فضای پیوسته که ظرف اشیاست ناپدید می‌شود، ایده جریان پیوسته «زمان» که وقایع در گذر آن رخ می‌دهند نیز کنار می‌رود.

به عبارتی در نظریه بنیادی فضا وجود ندارد؛ کوانتای میدان گرانشی در فضا نیستند. همچنین زمان در نظریه بنیادی وجود ندارد: کوانتای گرانش در زمان تکامل نمی‌یابند. زمان تنها برهم‌کنش‌هایشان را می‌شمرد. همان‌طور که معادله ویلر - دویت نشان می‌دهد، معادلات بنیادی دیگر متغیر زمان ندارند. زمان هم مانند فضا از میدان گرانشی کوانتومی پدید می‌آید.

بخشی از این موضوع تا حدودی در مورد نسبیت عام کلاسیک صدق می‌کرد که در آن زمان جنبه‌ای است از میدان‌های گرانشی. اما تا وقتی نظریه کوانتوم را نادیده بگیریم همچنان می‌توانیم با دیدی متعارف به فضا - زمان بنگریم، مانند پرده‌ای که باقی واقعیت روی آن نقش

می‌بندد، حتی اگر پرده‌ای دینامیک و متحرک باشد. وقتی مکانیک کوانتومی را وارد معادلات می‌کنیم، می‌فهمیم زمان هم جنبه‌هایی از تعیین‌ناپذیری احتمالاتی را، ساختار ذره‌ای و نسبیت که در تمام واقعیت مشترک است، در خود دارد. به «زمانی» تبدیل می‌شود که معنایش با هر معنایی که تا کنون برای این کلمه در نظر داشتیم، تفاوت دارد.

دومین نتیجه ساختار مفهومی نظریهٔ گرانش کوانتومی حتی از کنار رفتن مفهوم فضا هم پیچیده‌تر است. بیا بیا تلاش کنیم آن را بفهمیم.

زمان آن چیزی که فکر می‌کنیم نیست

یک قرن پیش هم معلوم بود ذات زمان با آن چیزی که فکر می‌کردیم، تفاوت دارد. نسبیت خاص و نسبیت عام این موضوع را روشن کردند. امروزه، نقص دیدگاه متعارفمان را به زمان می‌توان به راحتی در آزمایشگاهی ثابت کرد.

برای مثال بیایید اولین نتیجه نسبیت عام را که در فصل ۳ توضیح داده شد، بررسی کنیم. دو ساعت بردارید، مطمئن شوید هر دو زمان دقیقاً یکسانی را نشان می‌دهند، یکی را روی زمین و دیگری را روی مبلی بگذارید. نیم ساعت صبر کنید و دوباره آن‌ها را کنار یکدیگر بگذارید. آیا هنوز هم زمان یکسانی را نشان می‌دهند؟

همان‌طور که در فصل ۳ توضیح داده شد، پاسخ منفی است. ساعت‌های مچی یا ساعت‌های تلفن‌های همراهمان آن‌قدر دقیق نیستند که بتوانیم با اطمینان این حقیقت را تأیید کنیم، اما در آزمایشگاه‌های فیزیک سراسر جهان ساعت‌های بسیار دقیقی وجود دارند که این اختلاف را نشان می‌دهند: گذر زمان برای ساعت روی زمین نسبت به ساعتی که در ارتفاع بالاتر قرار دارد کندتر است.

چرا؟ چون زمان در همه‌جای جهان به طور یکسان نمی‌گذرد. برخی از جاها سریع‌تر می‌گذرد؛ برخی از جاها کندتر. هرچه به زمین نزدیک‌تر شوید، جایی که گرانش شدیدتر است، (۱۴۹) زمان کندتر می‌گذرد. دوقلوهای فصل ۳ را به یاد دارید که یکی در سطح دریا و دیگری در کوهستان زندگی کرده بود و در انتها سن متفاوتی داشتند؟ اختلاف بسیار اندک است: زمان زندگی در سطح دریا نسبت به زندگی در کوهستان فقط کسری از ثانیه بیشتر است — اما اندک بودن آن مقدار این حقیقت را که تفاوتی وجود دارد، تغییر نمی‌دهد. زمان آن‌طور که معمولاً تصور می‌کردیم، عمل نمی‌کند.

نباید زمان را به عنوان یک ساعت کیهانی بزرگ ببینیم که عمر عالم را اندازه می‌گیرد. بیش از یک قرن است که فهمیده‌ایم باید زمان را پدیده‌ای مرتبط با محل جسم در نظر بگیریم: هر جسمی در عالم سیر زمانی خاص خودش را دارد که سرعت آن را میدان گرانشی محل جسم تعیین می‌کند. اما وقتی ماهیت کوانتومی میدان گرانشی را در نظر می‌گیریم، حتی این دیدگاه زمان مرتبط با محل هم جواب نمی‌دهد؛ در مقیاس پلانک

وقایع کوانتومی به ترتیب گذر زمان رخ نمی‌دهند. به عبارتی، زمان دیگر وجود ندارد. اینکه دیگر زمان وجود ندارد یعنی چه؟

نخست، عدم وجود متغیر زمان در معادلات بنیادی به این معنی نیست که همه‌چیز ساکن است و تغییری رخ نمی‌دهد؛ برعکس، به این معناست که تغییر در همه‌جا وجود دارد؛ فقط: فرایندهای بنیادی را نمی‌توان در دنباله‌ای متعارف از لحظات مرتب کرد. طبیعت در مقیاس بسیار کوچک کوانتای فضا با ریتمی که میزانه تنها رهبر ارکستر کنترل می‌کند، نمی‌رقصد: هر فرایند مستقل همراه با همسایگانش می‌رقصد و ریتم خود را دنبال می‌کند. گذر زمان در ذات جهان است، زاده جهان و ارتباطات بین وقایع کوانتومی است که جهان را تشکیل داده‌اند و زمان خاص خود را می‌سازند. در واقع، عدم وجود زمان معنای چندان پیچیده‌ای ندارد. بیایید تلاش کنیم بفهمیم.

چلچراغ و تپش

زمان در اکثر معادلات فیزیک کلاسیک وجود دارد. متغیری است که با حرف t نشان داده می‌شود. معادلات به ما می‌گویند وقایع چطور در زمان تغییر می‌کنند. اگر بدانیم در گذشته چه رخ داده، می‌توانیم آینده را پیش‌بینی کنیم. به بیان دقیق‌تر، برخی از متغیرها را اندازه می‌گیریم — برای مثال موقعیت A یک جسم، زاویه B یک آونگ در حال تاب خوردن، دمای C یک جسم — و معادلات فیزیک به ما می‌گویند متغیرهای A و B و C چطور با گذر زمان تغییر می‌کنند. آن‌ها معادلات توابع $A(t)$ و $B(t)$ و $C(t)$ و... را پیش‌بینی می‌کنند که تغییرات این متغیرها طی زمان t را نشان می‌دهد.

گالیله نخستین کسی بود که فهمید حرکت اجسام را روی زمین می‌توان با توابع زمانی $A(t)$ و $B(t)$ و $C(t)$ توصیف کرد — و نخستین کسی بود که صریحاً معادلاتی برای این توابع نوشت. برای مثال اولین قانون فیزیک زمینی که گالیله کشف کرد سقوط یک جسم را توصیف می‌کند، یعنی می‌گوید ارتفاع x جسم چطور بر حسب گذر زمان t تغییر می‌کند. (۱۵۰)

گالیله برای کشف و تأیید این قانون دو نوع اندازه‌گیری لازم داشت. باید ارتفاع x جسم و زمان t را اندازه می‌گرفت. در نتیجه، ابزاری بخصوص برای سنجش زمان نیاز داشت. او یک ساعت لازم داشت.

در عصر گالیله ساعت‌های دقیقی وجود نداشت. خود گالیله در جوانی راهی برای ساخت ساعت‌های دقیق پیدا کرد. وی کشف کرد نوسان همه آونگ‌ها (مستقل از اندازه‌شان) به یک اندازه طول می‌کشد. در نتیجه به سادگی با شمارش نوسان‌های یک آونگ می‌توان زمان را اندازه گرفت. ایده ساده‌ای به نظر می‌رسد، اما گالیله بود که توانست آن را بیابد؛ پیش از او هیچ‌کس متوجه آن نشد. علم چنین است. اما همه چیز این‌قدر هم سراسر نیست.

طبق روایات این ایده هنگام تماشای نوسان چلچراغ بزرگ کلیسای پیزا به ذهن گالیله رسید. این چلچراغ هنوز همان‌جاست. (روایات اشتباه می‌کنند، چون آن چلچراغ سال‌ها پس از مرگ گالیله در آنجا آویخته شد، اما به هر حال داستان جالبی است. شاید چلچراغ دیگری در زمان گالیله در آنجا آویخته بود.) این دانشمند موقع عبادتی که ظاهراً چندان به آن توجهی نمی‌کرد نوسان‌ها را مشاهده کرد و

زمان هر نوسان را با شمردن نبضش سنجید. با ذوقزدگی بسیار فهمید تعداد نبض‌ها برای هر نوسان یکی بود: وقتی لوستر کند می‌شد و اندازه نوسان‌ها کم می‌شد، تعداد نبض‌ها تغییر نمی‌کرد. تمام نوسان‌ها مدت‌زمان یکسان داشتند.

داستان خوبی است، اما اندیشیدن به آن سرگشته‌مان می‌کند — و این سرگشتگی ما را به دل مسئله زمان می‌برد. گالیله از کجا می‌دانست تمام ضربان‌های قلب خودش فواصل زمانی یکسانی دارد؟ (۱۵۱)

چند سال پس از گالیله پزشک‌ها گرفتن نبض بیمارهایشان را با استفاده از نوعی ساعت، که چیزی جز یک آونگ نبود، شروع کردند. از این رو ما با شمارش ضربان‌هایمان به این نتیجه می‌رسیم آونگ منظم است و با آونگ ثابت می‌کنیم ضربان‌هایمان منظم است. آیا این دور باطل نیست؟ چه معنایی دارد؟

یعنی در حقیقت هیچ‌گاه نمی‌توانیم خود زمان را اندازه بگیریم؛ ما همیشه متغیرهای فیزیکی A ، B ، C ... را اندازه می‌گیریم (نوسان، ضربان و خیلی چیزهای دیگر) و هر متغیر را با دیگری مقایسه می‌کنیم. به عبارتی ما توابع $A(t)$ ، $B(t)$ و $C(t)$ و... را اندازه می‌گیریم. می‌توانیم تعداد ضربان را به ازای هر نوسان بشمریم؛ تعداد نوسان‌ها به ازای هر تیک زمان سنج؛ تعداد تیک‌های زمان سنج بین بازه‌های به صدا درآمدن ساعت برج ناقوس...

منظور این است که تصور وجود متغیر t — «زمان واقعی» — که تمام حرکت‌ها را ممکن می‌کند فرضیه‌ای ارزشمند است، حتی اگر نتوانیم مستقیماً آن را اندازه بگیریم. ما معادلات یک متغیر فیزیکی را با توجه به این t غیرقابل مشاهده می‌نویسیم. معادلات به ما می‌گویند اشیا چطور در زمان t تغییر می‌کنند؛ برای مثال هر نوسان چقدر طول می‌کشد، هر ضربان قلب چقدر طول می‌کشد. به این ترتیب می‌توانیم بفهمیم متغیرها چطور نسبت به هم تغییر خواهند کرد — در یک نوسان آونگ چند بار قلب می‌تپد — و می‌توانیم این پیش‌بینی‌ها را با مشاهداتمان از دنیا مقایسه کنیم. اگر پیش‌بینی‌ها درست باشند می‌فهمیم این طرح پیچیده درست است و به خصوص بهتر است از متغیر t استفاده کنیم حتی اگر نتوانیم مستقیماً آن را اندازه بگیریم.

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

نیوتن بود که همه این‌ها را فهمید: فهمید راه خوبی را در پیش گرفته است و این طرح را بسط داد و ابهام‌زدایی کرد. نیوتن صریحاً در کتابش می‌نویسد نمی‌توانیم زمان حقیقی t را اندازه بگیریم، اما اگر فرض کنیم وجود دارد، می‌توانیم چهارچوب کارآمدی را برای توصیف طبیعت ایجاد کنیم. اکنون با روشن شدن این موضوع می‌توانیم به گرانش کوانتومی و معنای جمله «زمان وجود ندارد» برگردیم. این موضوع تنها به این معنی است که طرح نیوتنی هنگام بررسی چیزهای بسیار کوچک دیگر معتبر نیست. طرح مفیدی بود، اما فقط برای اجسام بزرگ.

اگر می‌خواهیم درک وسیعی از جهان داشته باشیم، اگر می‌خواهیم ببینیم جهان در موقعیت‌های غیرمتعارف که گرانش کوانتومی قابل‌چشم‌پوشی نیست چه رفتاری دارد، باید این طرح را کنار بگذاریم. ایده زمان t که سیر جداگانه خود را دارد و همه‌چیز نسبت به آن تکامل می‌یابد، دیگر به درد نمی‌خورد. دیگر نمی‌توان جهان را با معادلات تحول طی زمان t توصیف کرد. تنها کافی است متغیرهای $A, B, C, \dots$ را که واقعاً مشاهده می‌کنیم، بشمریم و معادلاتی که روابط بین این متغیرها را بیان می‌کنند بنویسیم، فقط همین؛ یعنی: معادلات روابط $(A(B, C), C(A, B), \dots)$ که مشاهده می‌کنیم، نه معادلات توابع $A(t), B(t), C(t), \dots$ که مشاهده نمی‌کنیم.

در مثال ضربان و چلچراغ دیگر تحول ضربان و چلچراغ را طی زمان در نظر نمی‌گیریم، بلکه تنها معادلاتی را در نظر می‌گیریم که به ما می‌گویند این دو متغیر چگونه نسبت به هم تغییر می‌کنند؛ یعنی معادلاتی که، بدون اشاره‌ای به t ، مستقیماً به ما می‌گویند در هر نوسان چند تپش قلب - ضربان وجود دارد.

«فیزیک بدون زمان» فیزیکی است که در آن تنها از ضربان و چلچراغ حرف می‌زنیم، بدون اشاره به زمان. تغییر ساده‌ای است، اما از دید مفهومی جهش بزرگی محسوب می‌شود. جهان را نباید به عنوان مجموعه‌ای که طی زمان تغییر می‌کند تصور کنیم، بلکه باید به صورت دیگری به آن بنگریم. چیزها نسبت به یکدیگر تغییر می‌کنند. در سطح بنیادی، زمانی وجود ندارد. حس مشترکمان از گذر زمان صرفاً تقریبی است که در مقیاس ماکروسکوپی اعتبار دارد. به این خاطر است که جهان را فقط در مقیاس بزرگ درک می‌کنیم. در نتیجه جهانی که در این نظریه مطرح شده است با جهانی که با آن آشناییم تفاوت بسیاری دارد. دیگر فضا جهان را در بر نمی‌گیرد،

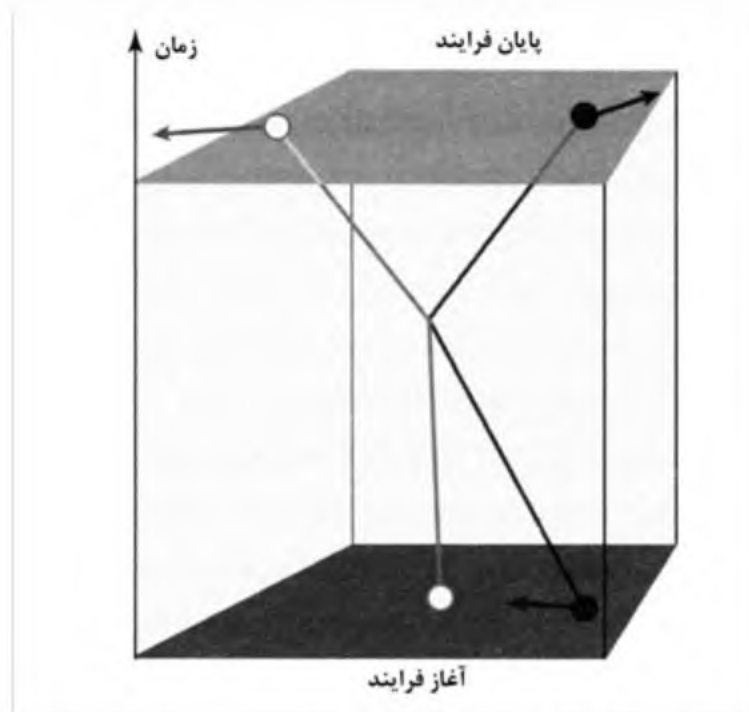
دیگر زمان چیزی نیست که وقایع طی آن رخ می‌دهند. فقط فرایندهایی بنیادی در کار است که در آن کوانتای فضا و ماده پیوسته مشغول برهم‌کنش با یکدیگرند. همان‌طور که دریاچه آرام و شفاف آلباین از رقص سریع بی‌شمار مولکول ریز آب ساخته شده است، این پندار که فضا و زمانی پیوسته ما را احاطه کرده‌اند نیز حاصل دورنمایی از انبوه فرایندهای بنیادی متراکم است.

سوشی فضا - زمان

این ایده‌های کلی چطور به گرانش کوانتومی مربوط می‌شوند؟ چطور می‌توانیم تغییر را بدون ایده فضا به عنوان یک ظرف یا زمان به عنوان چیزی که جهان طی آن می‌گذرد، توصیف کنیم؟

فرایندی را در نظر بگیرید: برای مثال برخورد دو توپ بیلیارد روی سطح ماهوت سبز میز بیلیارد. فرض کنید یک توپ قرمز به سوی یک توپ زرد می‌رود؛ به آن نزدیک می‌شود، برخورد می‌کند و دو توپ در جهت‌های متفاوت از هم دور می‌شوند. این فرایند مانند همه فرایندهای دیگر در ناحیه محدودی از فضا رخ می‌دهد — فرض کنیم روی میزی به عرض تقریباً دو متر — و زمان محدودی طول می‌کشد — فرض کنیم سه ثانیه. برای اینکه در چهارچوب گرانش کوانتومی این فرایند را توصیف کنیم، لازم است فضا و زمان را بخشی از فرایند در نظر بگیریم (شکل ۱.۷).

به عبارت دیگر نه فقط دو توپ، بلکه باید تمام چیزهای اطراف آن را توصیف کنیم: میز یا هر جسم مادی دیگر — فضایی که در آن حضور دارند و زمانی که از آغاز ضربه تا پایان فرایند طول می‌کشد. فضا و زمان میدان گرانشی‌اند، «نرم‌تن» اینشتین: میدان گرانشی، یعنی بخشی از آن نرم‌تن، را نیز در این فرایند در نظر می‌گیریم. همه‌چیز در نرم‌تن بزرگ اینشتین غوطه‌ور است: اکنون، فرض کنید قطعه‌ای کوچک و محدود از آن را مانند قطعه‌ای سوشی می‌بریم. قطعه‌ای که این برخورد و تمام چیزهای اطراف آن را در برمی‌گیرد.



شکل ۷.۱ ناحیه‌ای از فضا که در آن توپ سیاه متحرک به توپ سفید ساکن برخورد می‌کند، آن را به حرکت درمی‌آورد و به عقب پرتاب می‌شود. جعبه ناحیه‌ای در فضا-زمان است. مسیر توپ‌ها در آن رسم شده است.

چیزی که حاصل می‌شود یک جعبه فضا - زمان است (مانند شکل ۷.۱): قسمتی محدود از فضا - زمان که تنها چند متر مکعب حجم دارد و به لحاظ زمانی از یک وجه تا وجه دیگر فقط چند ثانیه به درازا می‌کشد. این فرایند «در» زمان رخ نمی‌دهد. جعبه در فضا - زمان نیست، بلکه شامل فضا - زمان است. یک فرایند در زمان نیست، همان‌طور که ذرات فضا در فضا نیستند. گذر زمان تنها ابزار سنجش خود فرایند است، همان‌طور که کوانتای گرانش در فضا نیستند، بلکه خودشان فضا را تشکیل می‌دهند.

کلید فهم کارکرد گرانش کوانتومی در این نهفته است که نه‌تنها فرایند فیزیکی برخورد دو توپ، بلکه باید تمام فرایند جعبه با تمام محتویاتش را، از جمله میدان گرانشی، در نظر بگیریم.

حال بگذارید به ایده اصلی هایزنبرگ برگردیم: مکانیک کوانتومی به ما نمی‌گوید طی فرایند چه اتفاقی می‌افتد، تنها احتمالی از وضعیت‌های اولیه و نهایی فرایند در اختیار ما می‌گذارد. در این مورد وضعیت‌های اولیه و نهایی رخدادهای مرز جعبه فضا - زمان به دست می‌آیند.

چیزی که معادلات گرانش کوانتومی حلقه به ما ارائه می‌دهد احتمال مربوط به مرز معینی از جعبه است. به بیان دیگر، اگر توپ‌ها با چینش معینی به جعبه وارد شده باشند احتمال اینکه با چینش معین دیگری از جعبه خارج شوند، چقدر است.

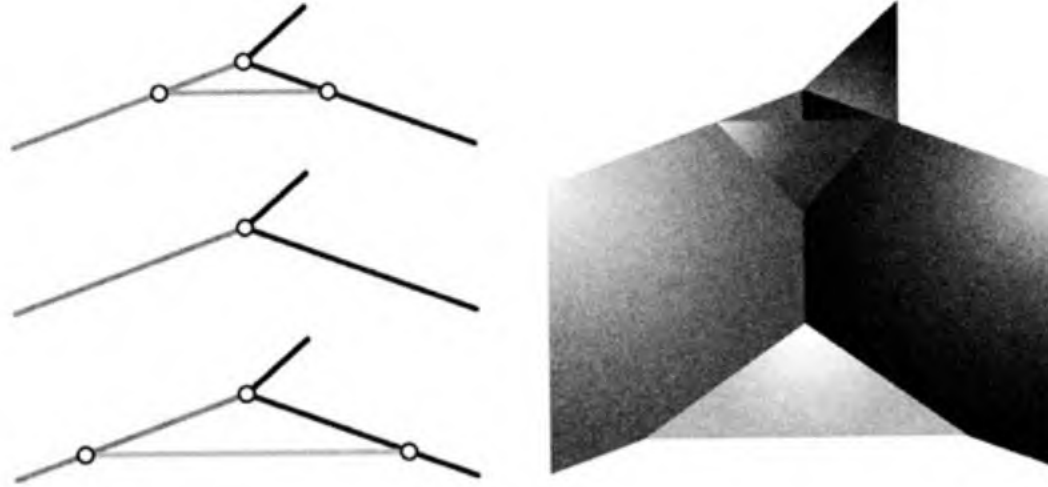
این احتمال چطور محاسبه می‌شود؟ مجموع مسیرهای فاینمن را به یاد بیاورید که موقع توضیح مکانیک کوانتومی مطرح کردم. با در نظر گرفتن تمام «مسیرهای» ممکن که مرز یکسانی دارند، می‌توان احتمالات را در گرانش کوانتومی محاسبه کرد. از آنجا که در مورد دینامیک فضا - زمان حرف می‌زنیم، این امر یعنی تمام فضا - زمان‌های ممکن که مرزهای یکسانی با جعبه دارند.

مکانیک کوانتومی فرض می‌کند بین مرز اولیه، جایی که دو توپ وارد می‌شوند، و مرز نهایی، جایی که دو توپ خارج می‌شوند، هیچ فضا - زمان یا مسیر مشخصی برای توپ‌ها وجود ندارد. یک «ابر» کوانتومی وجود دارد که تمام فضا - زمان‌های ممکن و تمام مسیرهای ممکن با هم در آن حضور دارند.

احتمال دیدن خروج توپ را از یکی از این مسیرها می‌توان از طریق مجموع تمام فضا - زمان‌های ممکن محاسبه کرد.

اگر کوانتوم فضا ساختار یک شبکه اسپین را داشته باشد، فضا - زمان چه ساختاری خواهد داشت؟ یکی از فضا - زمان‌هایی که در محاسبه قبلی به آن اشاره شد چه شکلی دارد؟

این معادلات حتماً «تاریخچه‌ای» از شبکه اسپین هستند. فرض کنید یک گراف شبکه اسپین را جابه‌جا می‌کنید: هر گره شبکه مسیری رسم می‌کند، مانند توپ‌های شکل ۷.۱، هر مسیر گراف وقتی جابه‌جا می‌شود سطحی رسم می‌کند (برای مثال پاره‌خطی متحرک یک مستطیل رسم می‌کند). اما فقط همین نیست: همان‌طور که ذره می‌تواند به دو یا چند ذره تقسیم شود، هر گره نیز می‌تواند به دو یا چند گره تقسیم شود. به این ترتیب، یک گراف در حال تکامل تصویری مانند شکل ۷.۲ رسم می‌کند.



شکل ۷.۲ یک شبکه اسپین در حال تکامل: سه گره به یک گره ترکیب و دوباره جدا می‌شوند. در سمت راست کف اسپین نمایش دهنده این فرایند است.

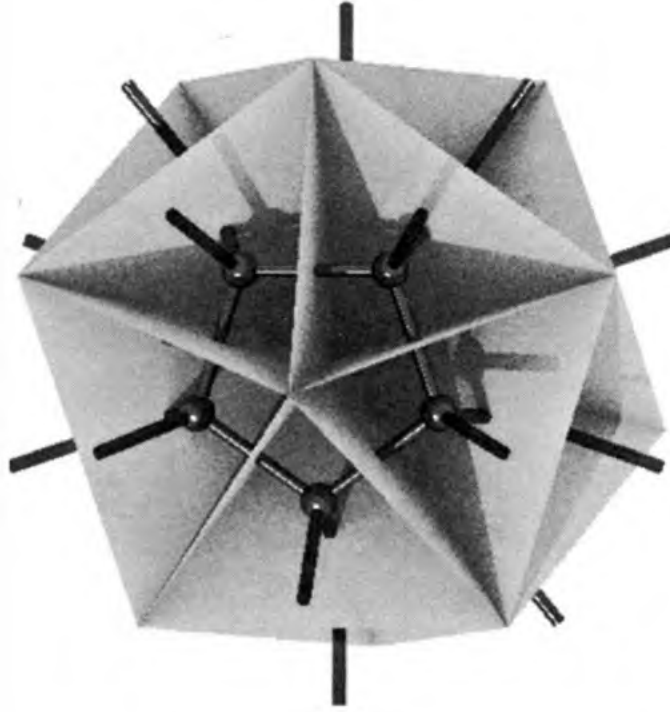
تصویر سمت راست شکل ۷.۲ یک «کف اسپین» است. «کف» چون از چند سطح تشکیل شده است که با هم در چند خط متقاطع‌اند. خط‌ها نیز در چند رأس با هم متقاطع‌اند. از این لحاظ شبیه کف حباب‌های صابون‌اند (شکل ۷.۳).

«کف‌اسپین» چون هر وجه کف شامل اسپین‌هایی است، درست مانند یال‌های گرافی که تکامل آن را نشان می‌دهند.



شکل ۷.۳ کف حباب‌های صابون

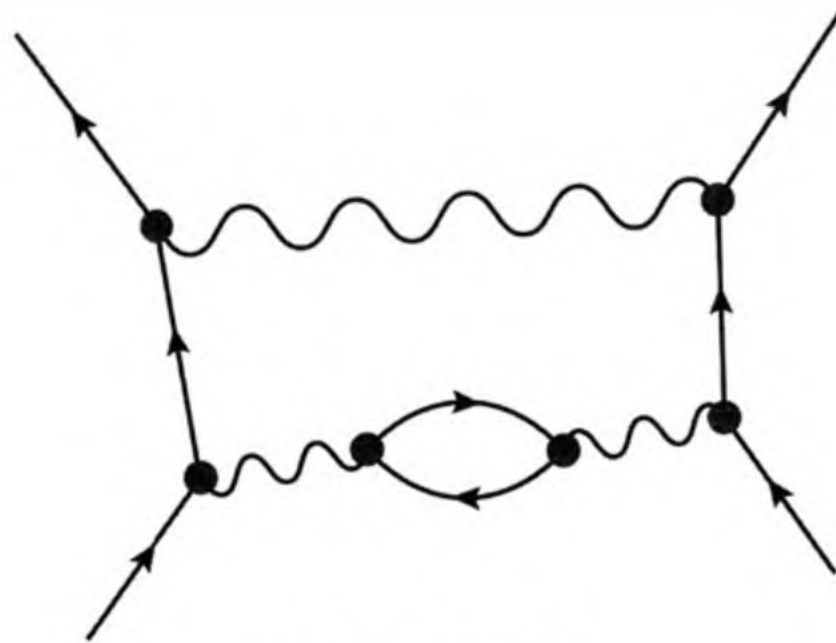
برای محاسبه احتمال یک فرایند باید تمام کفاسپین‌های ممکن در جعبه را که مرز یکسانی با آن فرایند دارند با هم جمع کنیم. مرز کفاسپین شبکه اسپین و ماده در آن است. معادلات گرانش کوانتومی حلقه احتمال یک فرایند را از لحاظ مجموع کفاسپین‌ها با مرزهای معین توصیف می‌کند. اصولاً از این راه می‌توان احتمال هر فرایند فیزیکی را محاسبه کرد. (۱۵۲)



شکل ۷.۴ رأس یک کف اسپین، اثر گرگ ایگان.

در نگاه اول، این شیوه انجام محاسبات در گرانش کوانتومی بر پایه کفاسپین‌ها با شیوه معمول انجام محاسبات در فیزیک نظری بسیار متفاوت به نظر می‌آید. نه فضای معینی وجود دارد و نه زمان معینی، به بیانی کفاسپین‌ها با ذرات مدل استاندارد بسیار تفاوت دارند، اما در واقع تکنیک کفاسپین‌ها و تکنیک‌های محاسباتی مورد استفاده در مدل استاندارد شباهت‌های بسیاری دارند. در واقع حتی فراتر از این، تکنیک کفاسپین تلفیق زیبایی است از دو تکنیک محاسباتی اصلی که در مدل استاندارد به کار می‌رود: نمودارهای فاینمن و تقریب شبکه‌ای.

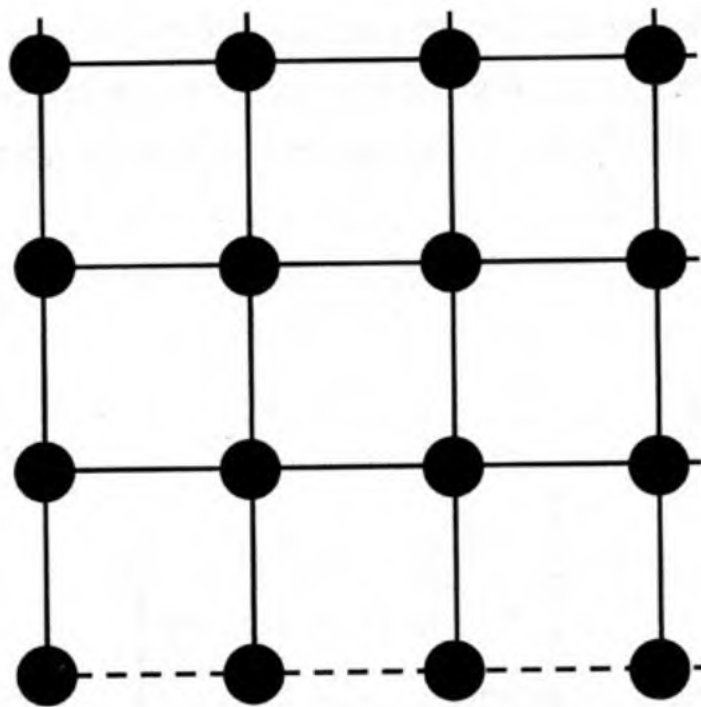
برای مثال نمودارهای فاینمن برای محاسبه فرایندهایی که نیروهای الکترومغناطیسی یا نیروهای ضعیف در آن‌ها نقش اساسی دارند، به کار می‌روند. نمودار فاینمن دنباله‌ای از برهم‌کنش‌های بنیادی را بین ذرات نمایش می‌دهد. نمونه‌ای در شکل ۷.۵ آورده شده است که برهم‌کنش دو ذره یا دو کوانتای فضا را نشان می‌دهد. ذره سمت چپ به دو ذره تقسیم می‌شود که یکی از این دو ذره باز هم به دو ذره دیگر تقسیم می‌شود، سپس این دو ذره به هم می‌پیوندند و با ذره سمت راست همگرا می‌شوند. این گراف شرحی از کوانتای میدان را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۷.۵ نمودار فاینمن

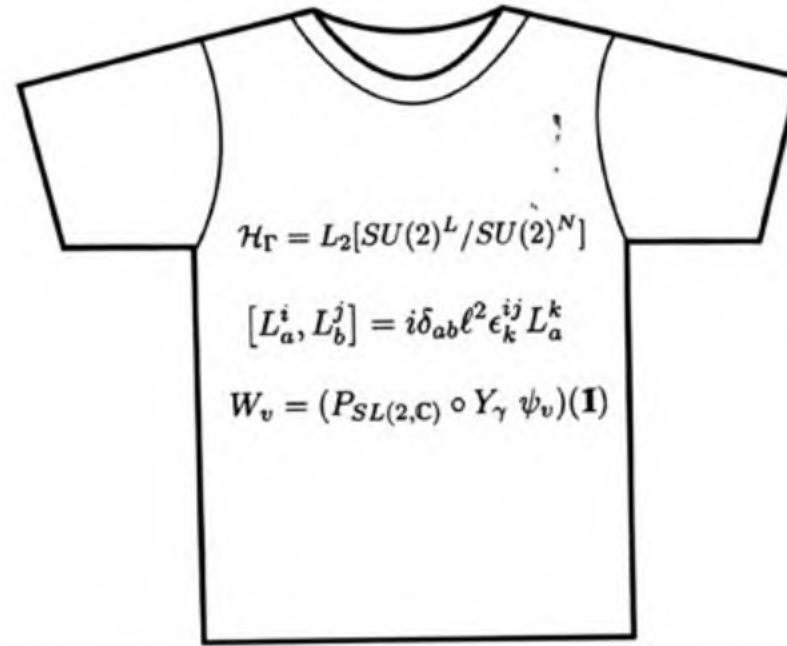
تقریب شبکه‌ای وقتی به کار می‌رود که نیروها قوی باشند و تصویر ذره‌ها برای توصیف فیزیکی مناسب نباشد، به عنوان مثال برای جهت محاسبه نیروهای قوی بین کوارک‌های درون هسته یک اتم. تکنیک شبکه‌ای شامل تقریب یک فضای فیزیکی پیوسته به وسیله شبکه یا تقریب شبکه‌ای است که در شکل ۷.۶ نشان داده شده است. این تقریب شبکه‌ای قرار نیست توصیف دقیقی از فضا باشد، بلکه تنها یک تقریب است،

مانند وقتی که مهندس‌ها با تقریب زدن تنها چند عنصر بتن پل مقاومت آن را اندازه می‌گیرند. این دو روش محاسبه — نمودارهای فاینمن و شبکه — کارآمدترین تکنیک‌های محاسباتی در نظریهٔ میدان کوانتومی‌اند.



شکل ۷.۶ تقریب شبکه‌ای فضا-زمان فیزیکی

در گران‌ش کوانتومی اتفاق زیبایی می‌افتد: این دو روش محاسبه یکی می‌شوند. اگر بخواهیم از کف‌اسپین شکل ۷.۲ برای محاسبه یک فرایند فیزیکی در گران‌ش کوانتومی استفاده کنیم، می‌توانیم آن را هم به صورت نمودار فاینمن و هم یک تقریب شبکه‌ای (۱۵۳) تفسیر کنیم. در نتیجه، معلوم می‌شود دو تکنیک محاسباتی‌ای که در مدل استاندارد به کار می‌روند دو حالت خاص از یک تکنیک مشابه‌اند: مجموع کف‌اسپین‌های گران‌ش کوانتومی. پیش‌تر معادلات اینشتین را بیان کردم. در اینجا نیز نمی‌توانم در مقابل اشتیاق گنجاندن مجموعه کامل معادلات نظریه حلقه مقاومت کنم، حتی اگر خواننده به وضوح نتواند از آن‌ها سر در بیاورد — مگر اینکه در ریاضیات سر رشته داشته باشد. شخصی ادعا کرده بود یک نظریه معتبر نیست مگر اینکه بتوان معادلات آن را روی تی‌شرتی خلاصه کرد. این تی‌شرت گران‌ش کوانتومی حلقه است (شکل ۷.۷).



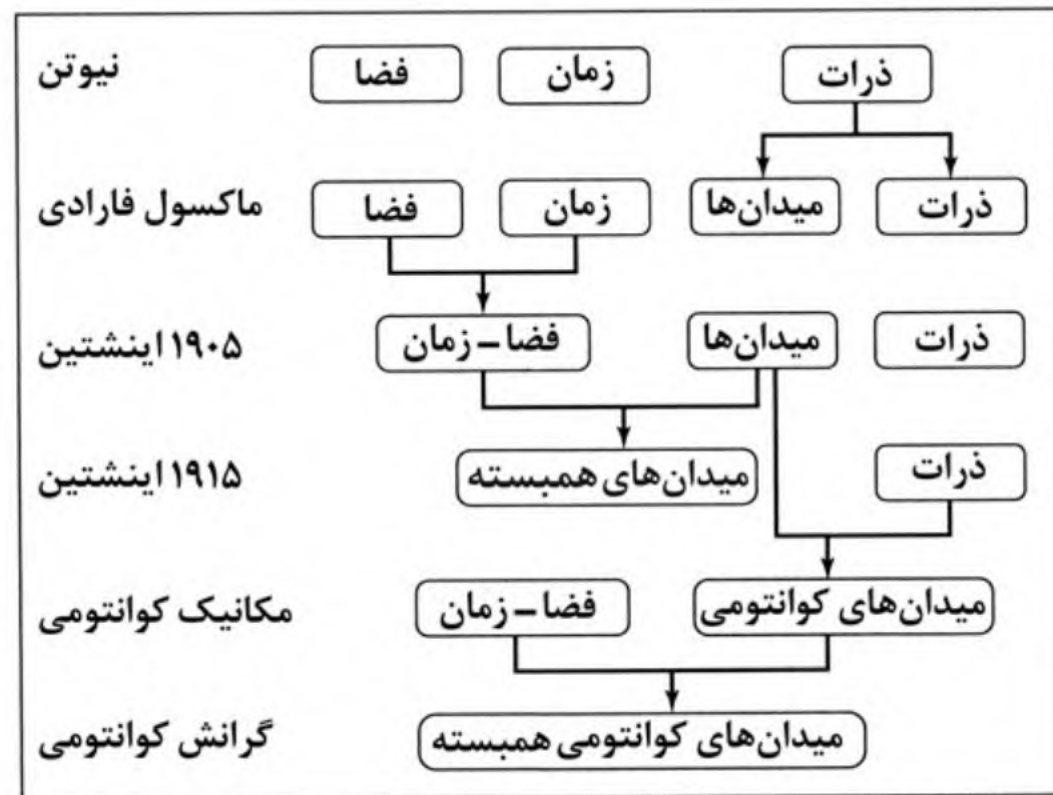
شکل ۷.۷ خلاصه معادلات گرانش کوانتومی حلقه روی یک تی شرت

این معادلات (۱۵۴) نسخه ریاضیاتی تصویری از جهان‌اند که در دو بخش اخیر ارائه کرده‌ام. به هیچ عنوان مطمئن نیستیم این معادلات درست‌اند یا نه — اما به نظر من بهترین روایت از گرانش کوانتومی‌اند که اکنون در اختیار داریم.

فضا یک شبکهٔ اسپین است که گره‌هایش ذره‌های بنیادی فضا و لینک‌هایش رابطهٔ مجاورت بین آن‌ها را نشان می‌دهد. فضا - زمان از فرایندهایی تشکیل شده است که طی آن‌ها این شبکه‌های اسپین به یکدیگر تبدیل می‌شوند و این فرایندها با مجموع کف‌اسپین‌ها توصیف می‌شوند. کف‌اسپین شرحی از یک شبکهٔ اسپین را نشان می‌دهد، در نتیجه گره‌های گراف در فضا - زمان ذره‌ای به هم می‌پیوندند و از هم جدا می‌شوند. این هجوم میکروسکوپی کوانتا که فضا و زمان را به وجود می‌آورد، اساس ظاهر آرام واقعیت ماکروسکوپی اطرافمان را تشکیل می‌دهد. هر سانتی‌متر مکعب فضا و هر ثانیه‌ای که می‌گذرد، نتیجهٔ رقص کف کوانتای بسیار ریز است.

جهان از چه ساخته شده است؟

پرده فضا برافتاده، زمان ناپدید شده است، ذرات و میدان‌های کلاسیک کنار گذاشته شده‌اند. پس جهان از چه ساخته شده است؟ اکنون جواب ساده است: ذرات کوانتای میدان‌های کوانتومی‌اند؛ نور از کوانتای یک میدان ایجاد می‌شود؛ فضا چیزی جز یک میدان نیست که آن هم از کوانتا ساخته می‌شود؛ زمان از فرایندهای همین میدان به وجود می‌آید. به عبارت دیگر، جهان کاملاً از میدان‌های کوانتومی ساخته می‌شود (شکل ۷.۸). این میدان‌ها در فضا - زمان نیستند؛ بلکه به عبارتی روی یکدیگرند: میدان‌ها روی میدان‌ها. فضا و زمانی که در مقیاس بزرگ می‌بینیم تصویر تار و تقریبی ما از یکی از این میدان‌های کوانتومی‌اند: میدان گرانشی. میدان‌هایی که به‌خودی‌خود وجود دارند و به فضا - زمانی که برایشان به عنوان اساس یا تکیه‌گاه عمل کند، نیاز ندارند و خود می‌توانند فضا - زمان تولید کنند، «میدان‌های کوانتومی همبسته» نامیده می‌شوند. شرح ماده‌ای که جهان را ساخته اساساً در سال‌های اخیر ساده شده است. جهان، ذرات، نور، انرژی، فضا و زمان - همه این‌ها چیزی نیستند جز نمودهایی از یک ماهیت: میدان‌های کوانتومی همبسته.



شکل ۷.۸ جهان از چه ساخته شده است؟ فقط از یک جزء: میدان‌های کوانتومی همبسته.

میدان‌های کوانتومی هم‌بسته بهترین تعریفی‌اند که امروزه از α -پایرون، سراغ داریم. بن‌مایه‌ای که همه‌چیز از آن ساخته شده و مفهومش را مردی که شاید بتوان او را نخستین دانشمند و نخستین فیلسوف نامید، یعنی آناکسیماندر، مطرح کرد. (۱۵۵)

جدایی فضای خمیده و پیوسته در نسبیت عام اینشتین و کوانتای گسسته مکانیک کوانتومی که در فضایی تخت و یکنواخت وجود دارند، از بین رفته است. دیگر تناقض ظاهری‌ای در کار نیست. رابطه بین فضا - زمان پیوسته و کوانتای فضا شبیه به رابطه موج‌های الکترومغناطیسی و فوتون‌هاست. امواج یک دید تقریبی و بزرگ‌مقیاس از فوتون‌ها ارائه می‌دهند. امواج از طریق فوتون‌ها برهم‌کنش دارند. فضا و زمان پیوسته یک دید تقریبی و بزرگ‌مقیاس از دینامیک کوانتای گرانش ارائه می‌دهند. فضا و زمان از طریق کوانتای گرانش برهم‌کنش دارند. همان ریاضیات به طور منسجم میدان‌های گرانشی کوانتومی را مانند دیگر میدان‌های کوانتومی توصیف می‌کند.

بهای مفهومی پرداخت‌شده رها کردن ایده فضا و زمان به عنوان ساختاری کلی است که جهان را در بر گرفته. فضا و زمان تقریب‌هایی‌اند که در مقیاس بزرگ دیده می‌شوند. شاید کانت درست می‌گفت که سوژه و ابژه دانش جدایی‌ناپذیرند، اما قطعاً اشتباه می‌کرد که فضا و زمان نیوتنی را یک شکل ازلی از دانش و بخشی از قواعد ضروری برای فهم جهان می‌دانست. این قواعد تحول پیدا کرده و با رشد دانش ما، همچنان در حال توسعه است.

در نهایت نسبیت عام و مکانیک کوانتومی آن‌قدر هم که به نظر می‌آمد ناسازگار نیستند. با بررسی دقیق‌تر به هم دست می‌دهند و مراوده زیبایی دارند. روابط فضایی‌ای که فضای خمیده اینشتین را در هم می‌تنند، همان برهم‌کنش‌هایی‌اند که روابط بین سیستم‌های مکانیک کوانتومی را می‌سازند. به محض اینکه بفهمیم فضا و زمان وجهی از یک میدان کوانتومی‌اند و میدان‌های کوانتومی حتی بدون جا گرفتن در یک فضای خارجی می‌توانند وجود داشته باشند، خواهیم دید فضا و زمان دو روی یک سکه‌اند و با هم سازگارند و پیوند دارند.

امروزه این تصویر ساده‌شده از ساختار بنیادی جهان فیزیکی چشم‌اندازی از واقعیتی است که گرانش کوانتومی ارائه می‌دهد. رنگ باختن مفهوم بی‌نهایت مهم‌ترین امتیاز این نوع فیزیک است که در بخش بعد بیشتر به آن خواهیم پرداخت. بی‌نهایت کوچک دیگر وجود ندارد. بی‌نهایت‌هایی که به نظریه متعارف میدان‌های کوانتومی، بر پایه مفهوم فضای پیوسته، آسیب می‌زدند ناپدید می‌شوند، چون

دقیقاً به خاطر فرض پیوستگی فضا، که از نظر فیزیکی نادرست است، به وجود آمدند. تکنیکی‌هایی که با قوی شدن میدان گرانشی معادلات اینشتین را بی‌معنا جلوه می‌دادند هم کنار می‌روند: آن‌ها تنها نتیجه چشم‌پوشی از کوانتیزه بودن میدان هستند. کم‌کم، قطعات پازل در جای خود قرار می‌گیرند. می‌خواهم در بخش‌های نهایی این کتاب، برخی از پیامدهای فیزیکی این نظریه را توضیح دهم.

شاید عجیب و دشوار باشد که به موجودیت‌های بنیادی گسسته در قالب فضا و زمان فکر نکنیم، بلکه تنیدگی فضا و زمان را با استفاده از روابطشان در نظر بگیریم. اما نظریات آناکسیماندر وقتی ادعا می‌کرد زیر پایمان همان آسمانی است که بالای سر می‌بینیم، چقدر عجیب به نظر می‌آمد؟ یا آریستارخوس که تلاش کرد فاصله زمین تا خورشید و ماه را اندازه بگیرد و فهمید بسیار دورند، اندازه توپ‌هایی کوچک نیستند، بلکه بسیار غول‌پیکرند — و خورشید در مقایسه با زمین بسیار عظیم است. یا هابل (۱۵۶) وقتی فهمید ابرهای شفاف و کوچک بین ستاره‌ای دریاهایی گسترده‌اند از ستاره‌هایی دور...

جهان پیرامونمان قرن‌ها پیوسته تغییر کرده و گسترش یافته است. فراتر می‌بینیم، آن را بهتر می‌فهمیم و از تنوعش و محدودیت تصویری که از آن داشتیم به شگفت می‌آییم. توصیف جدیدی که از آن به دست می‌آوریم همواره تصفیه شده و با این حال ساده می‌شود. ما خویشاوند موش‌کوره‌ای کوچکیم که زیر زمین زندگی می‌کنند و از جهان هیچ نمی‌دانند. اما آموختن را ادامه می‌دهیم...

اما داستان شب از اول روایت شد

و اذهانشان با هم تغییر کرد

از قصه‌ها خیال‌انگیزتر است

دیده‌ها و شنیده‌هایشان همه حکایت از چیز یکسانی دارد

با اینکه بسیار عجیب اما تحسین‌آمیز و منسجم است. (۲)

بخش چهارم: فراتر از فضا و زمان

پایه و اساس گرانش کوانتومی و تصویر نشئت گرفته از جهان را توصیف کرده‌ام. می‌خواهم در بخش‌های پایانی برخی از پیامدهای این نظریه را شرح دهم: اینکه نظریه گرانش کوانتومی در مورد مه‌بانگ و سیاه‌چاله‌ها به ما چه می‌گوید. همچنین وضعیت فعلی آزمایش‌های ممکن که نظریه را می‌آزمایند، توضیح خواهم داد و خواهم گفت طبیعت سعی دارد به ما چه بگوید — مخصوصاً در صورت شکست پیش‌بینی مشاهده ذرات ابرتقارنی. کتاب را با اشاره به قسمت‌هایی که هنوز در مورد جهان نمی‌دانیم پایان خواهم داد: به خصوص ترمودینامیک، نقش اطلاعات در نظریه‌ای بدون فضا و زمان مانند گرانش کوانتومی و بازگشت زمان. با همه این‌ها به مرز دانسته‌هایمان می‌رویم و نظری می‌اندازیم به چشم‌اندازی از چیزهایی که قطعاً نمی‌دانیم، به معمای عظیمی که ما را احاطه کرده است.

۸. فراتر از مه بانگ

استاد

در سال ۱۹۲۷ یک دانشمند جوان بلژیکی، یک کشیش کاتولیک یسوعی، معادلات اینشتین را مطالعه می‌کند و متوجه می‌شود — درست همان‌طور که اینشتین پی برده بود — این معادلات پیش‌بینی می‌کنند عالم باید در حال گسترش یا تراکم باشد. اما کشیش بلژیکی به جای اینکه ساده‌لوحانه نتایج را رد کند و با لجبازی بخواهد از آن‌ها اجتناب کند، همان‌طور که اینشتین این کار را کرد، آن‌ها را باور می‌کند و برای آزمودن آن‌ها به دنبال داده‌های اخترشناسی می‌گردد.

آن‌زمان کهکشان‌ها به این نام خوانده نمی‌شدند. به آن‌ها سحابی گفته می‌شد، چون وقتی از یک تلسکوپ مشاهده می‌شدند مانند ابرهای کوچک و رنگارنگ بین ستاره‌ها به نظر می‌آمدند. هنوز معلوم نشده بود مانند کهکشان خودمان جزیره‌های دور و بسیار عظیمی از ستاره‌ها هستند. اما کشیش بلژیکی می‌فهمد داده‌های اندک موجود در مورد کهکشان‌ها قطعاً با امکان گسترش کیهان سازگار است: کهکشان‌های نزدیک با سرعت زیادی دور می‌شوند، انگار در آسمان شلیک شده باشند؛ کهکشان‌های دور حتی با سرعت بیشتری دور می‌شوند. عالم مانند بادکنکی باد می‌شود.



شكل ٨.١ هنريتا لويت

دو سال بعد به لطف دو اخترشناس آمریکایی، هنریتا لویت (۱۵۷) و ادوین هابل، دیدگاه او تأیید شد. لویت تکنیک خوبی برای سنجش فاصله یک سحابی کشف کرد و به این نتیجه رسید آن‌ها خارج از کهکشان خودمان هستند و بسیار از ما دورند. هابل با به‌کارگیری این تکنیک و تلسکوپ بزرگ رصدخانه پالومار (۱۵۸) داده‌های دقیقی جمع‌آوری می‌کند که تأیید می‌کنند کهکشان‌ها با سرعتی متناسب با فاصله‌شان دور می‌شوند.

اما این کشیش بلژیکی بود که در همان سال ۱۹۲۷ نتیجه مهم این موضوع را فهمید: اگر سنگی را ببینیم که بالا می‌رود، یعنی قبلاً پایین‌تر بوده و چیزی آن را به بالا پرت کرده است. اگر کهکشان‌ها دور می‌شوند و کیهان گسترده می‌شود، یعنی کهکشان‌ها پیش‌تر به هم خیلی نزدیک بودند و عالم کوچک‌تر بود و چیزی باعث شد شروع به گسترش کند. کشیش جوان بلژیکی حدس زد کیهان در ابتدا بسیار کوچک و فشرده بوده و گسترشش را پس از انفجاری بزرگ آغاز کرده است. او به این وضعیت اولیه اتم آغازین می‌گوید. امروزه این موضوع را به نام مه‌بانگ می‌شناسیم.

نام او ژرژ لومتر (۱۵۹) بود. این نام به فرانسوی تلفظی شبیه به le maître به معنای «استاد» دارد و کمتر نامی این‌چنین شایسته مردی است که اولین بار متوجه وجود مه‌بانگ شد. لومتر بر خلاف این نام، شخصیت کم‌حرفی داشت؛ از مجادلات اجتناب می‌کرد و حتی هرگز ادعا نکرد نخستین شخصی بوده که گسترش عالم را کشف کرده است و در نتیجه این کشف به هابل نسبت داده شد. در دو بخش از زندگی‌اش هوش سرشارش را به نمایش می‌گذارد. اولی راجع به اینشتین است و دومی راجع به پاپ.

همان‌طور که اشاره شد، اینشتین درباره گسترش عالم تردید داشت. با اندیشه عالمی ثابت بزرگ شده بود و نمی‌توانست خلاف آن را بپذیرد. حتی بزرگ‌ترین‌ها هم اشتباه می‌کنند و به دام پیش‌داوری‌ها می‌افتند. لومتر با اینشتین ملاقات کرد و سعی کرد او را از دیدگاه متعصبانه‌اش منصرف کند. اینشتین مقاومت کرد و تا آنجا پیش رفت که در جواب لومتر گفت: «این محاسبات درست است، اما فیزیکش کریه.» بعدها اینشتین وادار شد بپذیرد در واقع لومتر بود که درست می‌گفت. هرکسی نمی‌تواند ثابت کند اینشتین در اشتباه است.



شکل ۸.۲ ژرژ لومتر. حق نشر متعلق به
آرشیو ژرژ لومتر، لوون.

باز هم اتفاق مشابهی افتاد. اینشتین ثابت کیهان‌شناختی را مطرح کرده بود، تغییری کوچک اما مهم در معادلاتش که در فصل ۳ توضیح دادم، به امید (واهی) اینکه معادلات با عالمی ثابت سازگار شوند. وقتی مجبور شد بپذیرد عالم ثابت نیست نظرش را راجع به ثابت کیهان‌شناختی تغییر داد. لومتر برای بار دوم تلاش کرد نظرش را برگرداند: ثابت کیهان‌شناختی باعث نمی‌شود جهان ثابت باشد، اما در هر صورت صحیح است و دلیلی برای حذف آن وجود ندارد. این بار هم لومتر درست می‌گفت: ثابت کیهان‌شناختی شتابی برای گسترش عالم ایجاد می‌کند و این شتاب به تازگی اندازه‌گیری شده است. بار دیگر اینشتین اشتباه کرد و حق با لومتر بود.

وقتی مجامع مختلف پدید آمدن جهان از مه‌بانگ را پذیرفتند، پاپ پیوس دوازدهم (۱۶۰) در یک سخنرانی عمومی (در ۲۲ نوامبر ۱۹۵۱) اعلام کرد این نظریه روایت خلقت را در کتاب پیدایش تأیید می‌کند. لومتر با نگرانی به این موضع پاپ واکنش نشان داد. با مشاور علمی پاپ ارتباط برقرار کرد و تمام تلاش خود را به کار گرفت تا پاپ را قانع کند از پیوند دادن خلقت الهی و مه‌بانگ خودداری کند. لومتر فهمیده بود این‌گونه ترکیب کردن علم و مذهب نادرست است: انجیل از فیزیک هیچ نمی‌داند و فیزیک از خدا. (۱)

پیوس دوازدهم متقاعد شد و کلیسای کاتولیک دیگر هیچ‌گاه به این موضوع اشاره عمومی نکرد. هرکسی نمی‌تواند ثابت کند پاپ در اشتباه است. این بار هم قطعاً حق با لومتر بود: امروزه گفته‌هایی در جریان است که بنا بر آن مه‌بانگ شروع حقیقی نیست و ممکن است پیش از آن جهان دیگری در کار بوده باشد. تصور کنید اگر لومتر جلوی پاپ را نگرفته بود و پاپ رسماً اعلام می‌کرد مه‌بانگ و خلقت یکسان‌اند امروزه کلیسای کاتولیک در چه موقعیت شرم‌آوری قرار می‌گرفت. بگذار نور باشد باید به «نور را دوباره بتابان» تغییر می‌کرد!

مخالفت ورزیدن با اینشتین و پاپ، متقاعد کردن هر دو به اینکه در اشتباه‌اند و درست گفتن در هر دو موقعیت قطعاً دستاورد بزرگی است. «استاد» شایسته نامش بود.

امروزه این نظریه به یقین تأیید شده است: عالم در گذشته بسیار دور شدیداً داغ و فشرده بوده و از آن هنگام شروع به گسترش کرده است. می‌توانیم به کمک حالت اولیه داغ و فشرده جهان تاریخیه دقیق آن را بازسازی کنیم. می‌دانیم اتم‌ها، عنصرها، کهکشان‌ها،

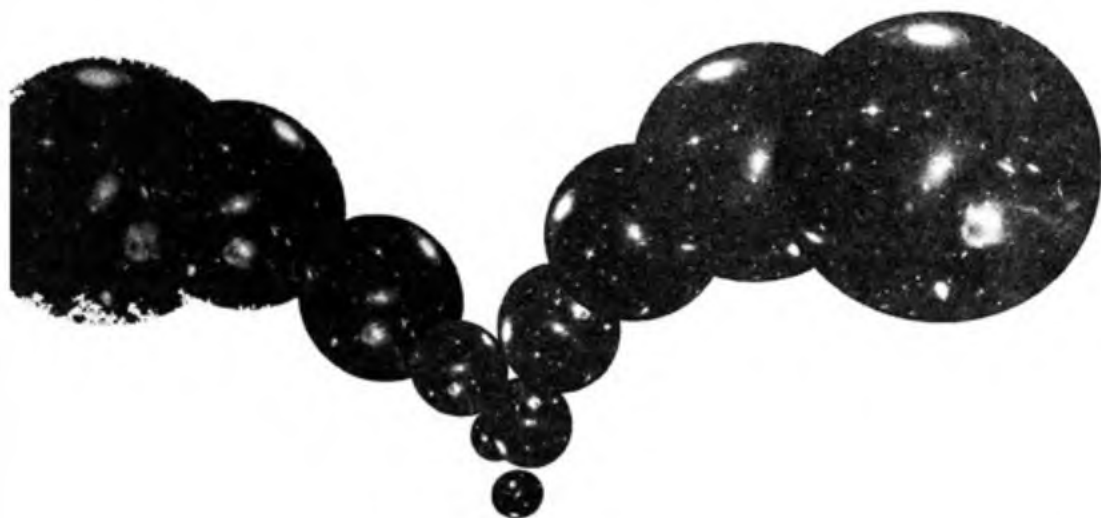
ستاره‌ها چگونه تشکیل شده‌اند و جهانی که امروز می‌بینیم، چگونه توسعه یافت. به تازگی ماهواره پلانک تابش‌هایی را که در سراسر کیهان وجود دارند به شکل گسترده مشاهده کرده که این موضوع، بار دیگر، نظریه مه‌بانگ را به طور کامل تأیید می‌کند. تا حدودی با قطعیت می‌توانیم بگوییم چهارده میلیارد سال پیش، وقتی که عالم یک گوی بسیار داغ بود، در مقیاس بزرگ چه اتفاقی برای جهانمان افتاد. ابتدا به این فکر کنید، اسم «نظریه مه‌بانگ» را مخالفان این نظریه برای تمسخر ایده‌ای که بسیار عجیب به نظر می‌آمد روی آن گذاشتند... اما به جای آن در پایان همه قانع شدیم: چهارده میلیارد سال پیش عالم یک گوی فشرده بسیار داغ بود. اما پیش از این حالت اولیه داغ و فشرده چه رخ داد؟ با بازگشتن به عقب دما و تراکم ماده و انرژی افزایش می‌یابد. لحظه‌ای وجود دارد که به مقیاس پلانک می‌رسند: چهارده میلیارد سال پیش. در آن لحظه معادلات نسبیت عام معتبر نبودند، چون دیگر امکان چشم‌پوشی از مکانیک کوانتومی وجود نداشت. وارد قلمرو گرانش کوانتومی می‌شویم.

کیهان‌شناسی کوانتومی

بنابراین برای فهم اینکه چهارده میلیارد سال پیش چه اتفاقی افتاد به گرانش کوانتومی نیاز داریم. حلقه‌ها در این مورد به ما چه می‌گویند؟ موقعیتی مشابه اما ساده‌تر را در نظر بگیرید. طبق مکانیک کلاسیک اگر الکترونی مستقیماً درون یک هسته اتم سقوط کند، هسته آن را می‌بلعد و الکترون ناپدید می‌شود. اما در واقعیت چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد. مکانیک کلاسیک ناقص است و لازم است اثر کوانتومی را وارد معادلات کنیم. یک الکترون واقعی جسمی کوانتومی است و مسیر مشخصی را دنبال نمی‌کند: نمی‌توان آن را در ناحیه‌ای بسیار کوچک محدود کرد. هرچه محدودتر شود، سریع‌تر می‌گریزد. اگر بخواهیم آن را اطراف هسته نگه داریم، در بهترین حالت می‌توانیم آن را وارد مدار کوچک‌ترین اوربیتال اتمی کنیم: الکترون نمی‌تواند بیشتر از آن به هسته نزدیک شود. مکانیک کوانتومی اجازه نمی‌دهد یک الکترون واقعی درون هسته یک اتم سقوط کند. وقتی الکترون به مرکز بسیار نزدیک می‌شود، نیروی دافعه کوانتومی آن را به عقب می‌راند. در نتیجه ماده به لطف مکانیک کوانتومی پایدار است. بدون آن الکترون درون هسته سقوط می‌کرد و اتمی در کار نبود و ما وجود نداشتیم.

عالم هم این‌گونه است. بیایید عالمی را تصور کنیم که فشرده و بسیار کوچک می‌شود و زیر وزن خودش در هم می‌شکند. طبق معادلات اینشتین این عالم تا بی‌نهایت فشرده شده و در نقطه مشخصی به طور کلی ناپدید می‌شود، مانند همان الکترونی که درون هسته سقوط می‌کند. اگر از نظریه کوانتومی چشم‌پوشی کنیم، این مه‌بانگی است که معادلات اینشتین پیش‌بینی می‌کند.

اما اگر مکانیک کوانتومی را در نظر بگیریم عالم نمی‌تواند تا بی‌نهایت فشرده شود. دافعه‌ای کوانتومی آن را پس می‌زند. یک عالم در حال فشردگی نمی‌تواند تا حدی که به اندازه یک نقطه شود، فروبریزد: پس زده می‌شود و شروع به گسترش می‌کند، گویی از انفجاری کیهانی پدید آمده باشد (شکل ۳.۸).



شکل ۸.۳ تصویری از جهش بزرگ، اثر فرانچسکا ویدوتو، دانشمند ایتالیایی که نخستین بار برای محاسبه احتمال این فرایند از کف اسپین ها استفاده کرد.

ممکن است گذشتهٔ عالم ما، نتیجهٔ چنین پس‌زدگی‌ای باشد. یک پس‌زدگی عظیم که به جای مه‌بانگ، جهش بزرگ نام دارد. وقتی معادلات نظریهٔ گرانش کوانتومی حلقه را به گسترش جهان اعمال می‌کنیم به نظر چنین چیزی از آب در می‌آید. تصویر جهش را نباید به معنی دقیق کلمه تفسیر کرد. به مثال الکترون برگردیم. به یاد آورید اگر بخواهیم الکترون را تا حد ممکن به

اتم نزدیک کنیم، الکترون دیگر یک ذره نیست؛ در عوض می‌توانیم آن را به صورت ابری گسترده از احتمالات ببینیم. دیگر موقعیت مکانی دقیق برای الکترون تعریف نمی‌شود. در مورد عالم هم این‌گونه است: در گذر مهم از جهش بزرگ دیگر نمی‌توانیم یک فضا و زمان منفرد، هرچند با ساختار ذره‌ای، در نظر بگیریم، بلکه تنها ابری گسترده از احتمالات می‌بینیم که در آن فضا و زمان سرکشان نوسان می‌کنند. در جهش بزرگ جهان در ابری از احتمالات فرومی‌رود که همچنان می‌توان آن را با معادلات توصیف کرد.

پس عالم ما می‌تواند نتیجهٔ فروپاشی یک عالم پیشین دیگر در حال فشردگی باشد که از فازی کوانتومی می‌گذرد. فازی که در آن فضا و زمان در احتمالات ناپدید می‌شوند.

کلمهٔ «عالم» مبهم می‌شود. اگر منظورمان از «عالم»، «هرآنچه وجود دارد» است، پس عالم دومی وجود نخواهد داشت. اما کلمهٔ «عالم» در کیهان‌شناسی معنای دیگری به خود گرفته است: (عالم) به فضا - زمان پیوسته‌ای اشاره دارد که مستقیماً در اطرافمان می‌بینیم و از کهکشان‌ها، هندسه و تاریخچه‌ای که مشاهده می‌کنیم پر شده است. دلیلی ندارد مطمئن باشیم که این تنها جهان موجود، به این معنا، باشد. می‌توانیم گذشته را بازسازی کنیم تا به نقطه‌ای مطابق با تصویر ارائه‌شدهٔ جان ویلر برسیم، که پیوستگی فضا - زمانی مانند کف‌های دریا متلاشی می‌شود و به ابر کوانتومی احتمالات تکه‌تکه می‌شود. دلیلی ندارد احتمال وجود پیوستگی فضا - زمان دیگری ورای این کف‌های داغ را کنار بگذاریم، مشابه آنچه در اطرافمان مشاهده می‌کنیم.

احتمال این را که جهانی پس از گذر از جهش بزرگ از فشردگی به گسترده‌گی برسد می‌توان با تکنیک‌هایی که در بخش پیش توصیف شد، محاسبه کرد: جعبه‌های فضا - زمان. با به‌کارگیری کف‌اسپین‌هایی که جهان در حال فشردگی و جهان در حال گسترش را به هم متصل می‌کنند، محاسبات انجام می‌شود.

تمام این‌ها هنوز در مرحلهٔ تحقیق و پژوهش است، اما نکتهٔ مهم ماجرا این است که امروزه معادلاتی برای توصیف این وقایع داریم و نخستین نیم‌نگاه‌های محتاطانه را، هرچند فعلاً به طور نظری، به آن‌سوی مه‌بانگ انداخته‌ایم.

۹. تأییدهای تجربی؟

جذابیت کیهان‌شناسی کوانتومی از کاوش‌های نظری شگفت‌انگیز پیرامون مسائل پیش از مه‌بانگ نیز فراتر می‌رود. برای مطالعه کاربرد نظریه کوانتومی در کیهان‌شناسی دلیل دیگری نیز وجود دارد: ممکن است فرصتی فراهم شود تا دریابیم نظریه کوانتومی صحیح است یا خیر.

علم نتیجه‌بخش است، چون پس از فرضیه‌پردازی و استدلال، پس از شهود و بینش‌ها، پس از معادلات و محاسبات می‌توانیم بررسی کنیم و ببینیم درست عمل کرده‌ایم یا نه؛ یک نظریه در مورد چیزهایی که هنوز مشاهده نکرده‌ایم پیش‌بینی‌هایی می‌کند که می‌توانیم صحت و سقم آن‌ها را بررسی کنیم. این قدرت علم است که باعث می‌شود بتوانیم به آن تکیه کنیم و از آن مطمئن باشیم، می‌توانیم درستی یک نظریه را بررسی کنیم. این همان چیزی است که علم را از دیگر انواع تفکر متمایز می‌کند؛ تفکراتی که در آن‌ها بحث درستی و نادرستی بسیار پیچیده‌تر و حتی گاهی بی‌معناست.

وقتی لومتر از ایده گسترش کیهان دفاع می‌کند و اینشتین متقاعد نمی‌شود، یکی از این دو اشتباه و دیگری درست می‌گوید. تمام نتایج اینشتین، شهرتش، تأثیرش بر جهان علم، اعتبار و نفوذ بسیارش هیچ نمی‌ارزد. مشاهدات می‌گویند او در اشتباه است و بازی تمام. حق با یک کشیش بلژیکی گمنام است. دلیل قدرتمندی تفکر علمی همین است.

جامعه‌شناسی علم پیچیدگی فرایند درک علمی را روشن کرده است؛ این فرایند مانند دیگر تلاش‌های انسان، تحت الشعاع بی‌خردی قرار می‌گیرد، وارد بازی قدرت‌ها می‌شود و از همه نوع عوامل اجتماعی و فرهنگی مختلف تأثیر می‌پذیرد. علی‌رغم اغراق‌های برخی از پست‌مدرنیست‌ها، نسبی‌گرایان فرهنگی و امثال این‌ها هیچ‌یک از این عوامل کارآمدی عملی و نظری تفکر علمی را از بین نمی‌برد، چون در نهایت در بیشتر موارد می‌توان به وضوح تعیین کرد حق با کیست و چه کسی اشتباه می‌کند. حتی اینشتین بزرگ می‌تواند بگوید (که گفت): «آه... اشتباه کردم!» اگر بحث قابلیت اطمینان باشد، علم بهترین راهبرد است.

این موضوع به این معنا نیست که علم تنها هنر ارائه پیش‌بینی‌هایی است که می‌توان آن‌ها را اندازه‌گیری کرد. برخی از فیلسوفان علم آن را تنها به پیش‌بینی‌های عددی محدود می‌کنند. آن‌ها در اشتباه‌اند، چون ابزار را با هدف اشتباه گرفته‌اند. پیش‌بینی‌های

کمی قابل اثبات ابزارهایی اند برای اعتباربخشی به فرضیه‌ها. هدف پژوهش علمی صرفاً رسیدن به پیش‌بینی‌ها نیست، فهم چگونگی عملکرد جهان است؛ هدف ساخت و ایجاد تصویری از جهان است، ساختاری مفهومی که ما را قادر سازد در مورد جهان بیندیشیم. علم پیش از اینکه فنی باشد، شهودی است. پیش‌بینی‌های قابل اثبات ابزاری نیرومند هستند که به ما کمک می‌کنند متوجه اشتباه خود بشویم. نظریه‌ای که تأیید تجربی نداشته باشد هنوز آزمون خود را پس نداده است. آزمون‌ها تمامی ندارند و یک نظریه را نمی‌توان با یک، دو یا سه آزمایش به طور کامل اثبات کرد. اما به تدریج و مرحله‌به‌مرحله با درست از آب در آمدن پیش‌بینی‌ها باورپذیرتر می‌شود. نظریه‌هایی چون نسبیت عام و مکانیک کوانتومی که در ابتدا بسیاری را سردرگم کردند — حتی عجیب‌ترینشان — به تدریج با مشاهدات و آزمایش‌ها تأیید شدند.

از طرفی، مهم بودن اثبات تجربی به این معنا نیست که اگر داده‌های تجربی جدیدی در دست نداشته باشیم، نمی‌توانیم پیشرفت کنیم. معمولاً می‌گویند علم تنها هنگامی به جلو قدم برمی‌دارد که داده‌های تجربی جدید در کار باشد. اگر این‌طور بود پیش از اندازه‌گیری چیزی تازه امیدی به یافتن نظریهٔ گرانش کوانتومی نداشتیم، اما ظاهراً این‌طور نیست. کوپرنیک چه دادهٔ جدیدی در اختیار داشت؟ هیچ. همان داده‌های بطلمیوس. نیوتن چه دادهٔ جدیدی داشت؟ تقریباً هیچ. در حقیقت ابزار کارش قوانین کپلر و نتایج گالیله بود. اینشتین برای کشف نسبیت عام چه دادهٔ جدیدی داشت؟ هیچ. ابزار کارش نسبیت خاص و نظریهٔ نیوتن بود. این تصور که فیزیک تنها با به دست آمدن داده‌های تازه پیشرفت می‌کند، درست نیست.

کاری که کوپرنیک، نیوتن، اینشتین و بسیاری دیگر انجام دادند مطرح کردن نظریه‌های تازه بر اساس نظریه‌های قبلی بود که دانش‌های تجربی از زمینه‌های مختلف طبیعت را در هم آمیخته بودند. کار آن‌ها یافتن راهی تازه برای ترکیب و بازبینی این دانش و بهبود تصویر کلی جهان بود.

پایه و اساس بهترین پژوهش در گرانش کوانتومی همین است. در نهایت ریشهٔ دانش، مثل همیشه در علم، تجربی است. اما داده‌هایی که پایه و اساس گرانش کوانتومی را تشکیل می‌دهند از آزمایش‌هایی تازه به دست نیامده‌اند: همان ساختارهای نظری‌اند که دانشمان را از جهان

تشکیل داده‌اند، اما کمی نامنسجم‌اند. «داده‌های تجربی» گرانش کوانتومی نسبت عام و مکانیک کوانتومی‌اند. بر اساس این‌ها تلاش می‌کنیم بفهمیم چطور می‌توانیم جهانی را منسجم بدانیم که هم کوانتا در آن وجود دارد و هم فضای خمیده. بر اساس این‌ها تلاش می‌کنیم به ناشناخته‌ها نظر بیندازیم. موفقیت عظیم غول‌هایی که پیش از ما در چنین موقعیتی قرار گرفته‌اند به ما قوت‌قلب می‌دهد. غول‌هایی همچون نیوتن، اینشتین و دیراک. خود را در حد و اندازه آن‌ها نمی‌بینیم، اما از نعمت نشستن بر شانه آن‌ها بهره‌مندیم و به این ترتیب می‌توانیم فراتر از آنچه را آن‌ها می‌دیدند ببینیم. به هر حال کاری جز تلاش از ما بر نمی‌آید.

باید بین سرنخ‌ها و شواهد مستحکم تمایز قائل شویم. سرنخ‌ها چیزهایی هستند که شرلوک هولمز را در مسیر درست قرار می‌دهند و به او کمک می‌کنند یک پرونده اسرارآمیز را حل کند. شواهد مستحکم چیزی است که قاضی نیاز دارد تا گناهکار را محکوم کند. سرنخ‌ها ما را در مسیری درست به سوی نظریه‌ای درست قرار می‌دهند. شواهد مستحکم در انتها به ما کمک می‌کند بفهمیم نظریه‌ای که ساخته‌ایم به کار می‌آید یا نه. بدون سرنخ مسیری نادرست را کنکاش می‌کنیم. بدون شواهد یک نظریه قابل اطمینان نیست.

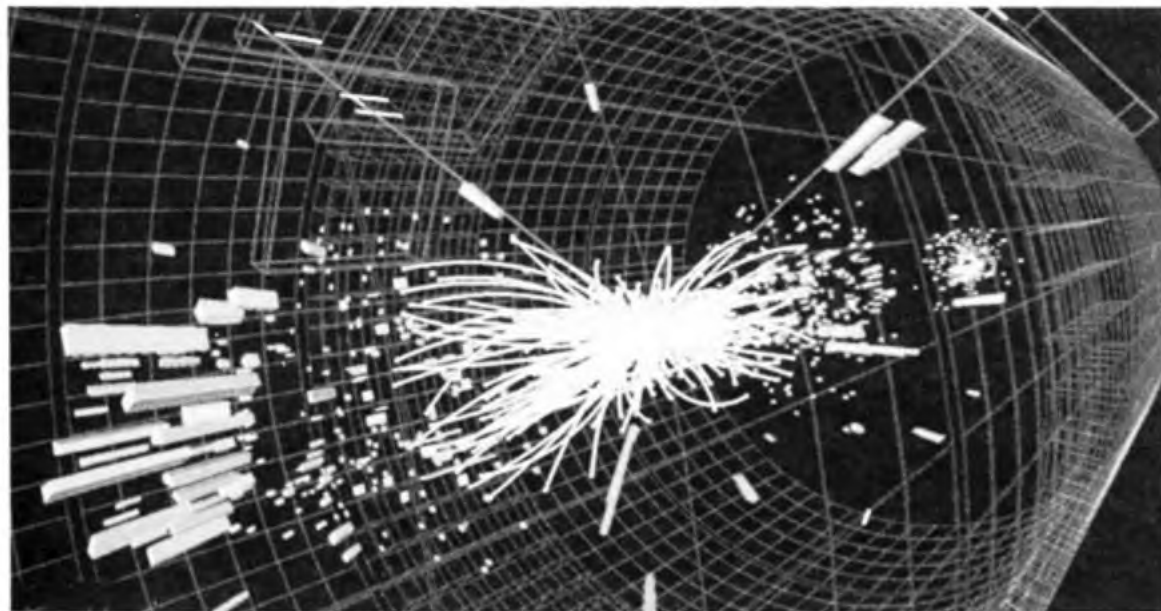
این قضیه در مورد گرانش کوانتومی هم صادق است. این نظریه در مراحل اولیه خود به سر می‌برد. بدنه نظری آن هنوز منسجم نبوده و ایده‌های اساسی‌اش تبیین نشده است: سرنخ‌ها خوب و مسلم هستند — اما هنوز پیش‌بینی‌های تأیید نشده‌ای وجود دارد. نظریه هنوز آزمونش را پس نداده است.

نشانه‌های طبیعت

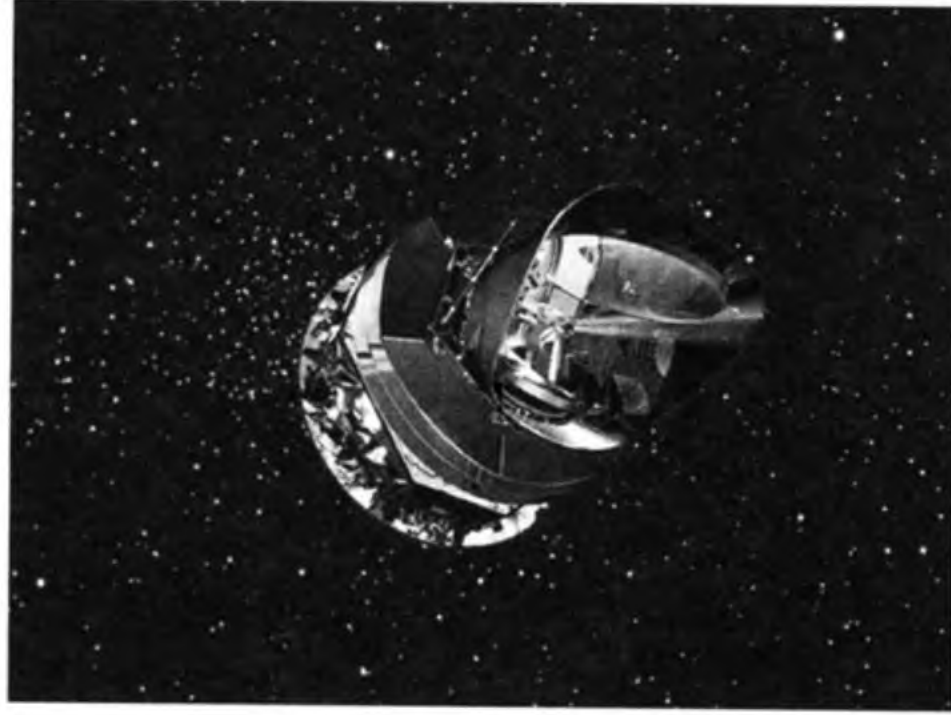
جایگزینی برای مسیر پژوهش که بیشتر از بقیه در این کتاب بررسی شد نظریهٔ ریسمان است. بیشتر فیزیک‌دان‌هایی که روی نظریهٔ ریسمان یا نظریه‌های مرتبط با ریسمان مطالعه کرده‌اند، انتظار داشتند با شروع کار شتاب‌دهندهٔ ذره‌ای جدید مؤسسهٔ تحقیقات ذرات بنیادی سرن در ژنو (ال‌اچ‌سی یا برخورددهندهٔ هادرونی بزرگ) ذراتی پیدا شوند که پیش از این مشاهده نشده بودند، اما این نظریه آن‌ها را پیش‌بینی کرده بود: ذرات ابرتقارنی. نظریهٔ ریسمان برای منسجم بودن به این ذرات نیاز دارد: نظریه‌پردازان ریسمان به همین دلیل تا این اندازه مشتاق کشف آن‌ها بودند. از طرف دیگر، نظریهٔ گرانش کوانتومی حلقه حتی بدون ذرات ابرتقارنی به خوبی تعریف می‌شود. نظریه‌پردازان حلقه ترجیحاً تصور می‌کردند این ذرات وجود ندارند.

ذرات ابرتقارنی مشاهده نشدند و بسیاری را ناامید کردند. هیاهوی کشف بوزون هیگز در سال ۲۰۱۳ بر این ناامیدی سرپوش گذاشت. ذرات ابرتقارنی در آن سطح انرژی که بسیاری از نظریه‌پردازان ریسمان انتظار داشتند، وجود ندارند. این امر چیزی را به طور قطعی اثبات نمی‌کند — ابداً این‌طور نیست؛ اما طبیعت سرنخی کوچک به نفع حلقه‌ها ارائه کرده است.

در سال‌های اخیر سه کشف تجربی بزرگ در فیزیک بنیادی رخ داده است. اولی کشف بوزون هیگز در مؤسسهٔ تحقیقات سرن در ژنو است (شکل ۹.۱)، دومی اندازه‌گیری‌های ماهوارهٔ پلانک است (شکل ۹.۲)، اندازه‌گیری‌هایی که داده‌هایش در سال ۲۰۱۳ عمومی شد و مدل استاندارد کیهان‌شناسی را تأیید کرد و سومی اولین ردیابی موج‌های گرانشی است که در نخستین ماه‌های سال ۲۰۱۶ اعلام شد. این‌ها سه نشانه‌ای است که طبیعت اخیراً به ما داده.



شکل ۹.۱ پدیده‌ای در سرن که تشکیل ذره هیگز را نشان می‌دهد.



شكل ٩.٢ ماهواره پلانك

چیزی در این سه نتیجه مشترک است: هیچ موضوع غافلگیرکننده‌ای در آن‌ها وجود ندارد. این موضوع اهمیتشان را زیر سؤال نمی‌برد: حتی آن‌ها را بامعنا تر هم می‌کند. کشف بوزون هیگز مهر تأییدی است بر اعتبار ایده‌های مدل استاندارد ذرات بنیادی مبتنی بر مکانیک کوانتومی، تأییدیه‌ای بر یک پیش‌بینی سی‌ساله است. اندازه‌گیری‌های ماهواره پلانک تأیید موثق مدل استاندارد کیهان‌شناسی بر اساس نسبیت عام با ثابت کیهان‌شناختی است. کشف موج‌های گرانشی تأیید حیرت‌انگیزی است بر نسبیت عام،

یک نظریه صدساله. این سه نتیجه که از تلاش‌های تکنولوژیکی بسیار و همکاری عظیم بین صدها دانشمند به دست آمده‌اند، کاری نمی‌کنند جز تقویت درک فعلی‌مان از ساختار جهان. غافلگیری‌ای در کار نیست.

اما همین نبود عنصر غافلگیری خود غافلگیرانه است، چون بسیاری انتظار داشتند غافلگیر شوند؛ یعنی «فیزیک تازه‌ای» ببینند که نظریه‌های اثبات‌شده هنوز توصیفشان نکرده است. آن‌ها از سرن ابرتقارن می‌خواستند نه بوزون هیگز. بسیاری انتظار داشتند ماهواره پلانک تناقض‌های مدل استاندارد کیهان‌شناسی را به دست آورد و از نظریه‌های کیهان‌شناسی جایگزین نسبیت عام پشتیبانی کند.

اما نه. چیزی که طبیعت تأیید می‌کند ساده است: نسبیت عام، مکانیک کوانتومی و در مکانیک کوانتومی، مدل استاندارد.

امروزه بسیاری از فیزیک‌دانان نظری با انتخاب فرضیه‌های تصادفی به دنبال نظریه‌های جدید می‌گردند. «بیایید فرض کنیم که...» فکر نمی‌کنم این‌گونه علم‌جویی راه به جایی برد. تخیل ما محدودتر از آن است که «تصور کنیم» جهان چطور ساخته شده، مگر اینکه از نشانه‌هایی که در دست داریم الهام بگیریم. نشانه‌های در دسترس — سرخ‌هایمان — نظریه‌هایی‌اند که موفق بوده‌اند یا داده‌های تجربی جدیدند، همین. باید با این داده‌ها و نظریه‌ها از چیزهایی که تا کنون نتوانستیم تصور کنیم، پرده برداریم. همان‌طور که کوپرنیک، نیوتن، ماکسول و اینشتین پیش از ما چنین کردند. به نظر من — بر خلاف بسیاری از فیزیک‌دانان امروزی — آن‌ها هرگز تلاش نکردند نظریه‌ای جدید را «حدس» بزنند.

سه نتیجه تجربی که به آن‌ها اشاره کردم از زبان طبیعت می‌گویند: «خیال‌پردازی در مورد میدان‌های جدید و ذره‌های عجیب؛ بُعدهای اضافی، دیگر تقارن‌ها، جهان‌های موازی، ریسمان‌ها و چیزهای دیگر را بس کنید. قطعه‌های پازل ساده‌تر از این حرف‌هایند: نسبیت عام،

مکانیک کوانتومی و مدل استاندارد. قدم رو به جلوی بعدی «تنها» مسئله ترکیب درست این‌هاست.» این گفته اندرز دلگرم‌کننده‌ای برای جامعه طرفداران نظریه گرانش کوانتومی حلقه است، زیرا فرضیه‌های این نظریه همین‌اند: نسبیت عام، مکانیک کوانتومی و سازگاری با مدل استاندارد، همین. نتایج مفهومی اساسی — کوانتای فضا، ناپدید شدن زمان — فرضیه‌هایی جسورانه نیستند: نتایجی منطقی‌اند که از جدی گرفتن بینش‌های اساسی بهترین نظریه‌هایمان به دست می‌آیند.

باز هم بگویم، این چیزی را به طور قطعی اثبات نمی‌کند. در پایان حتی در صورت درست بودن نظریه حلقه ممکن است ذرات ابرتقارنی وجود داشته باشند، شاید در مقیاسی که هنوز به آن دسترسی نداریم. ابرتقارن در جایی که انتظار می‌رفت پیدا نشد، نظریه‌پردازان ریسمان کمی ناامید شده‌اند و نظریه‌پردازان حلقه کمی غره، اما این‌ها فقط سرخ‌اند؛ شواهد محکمی در کار نیست.

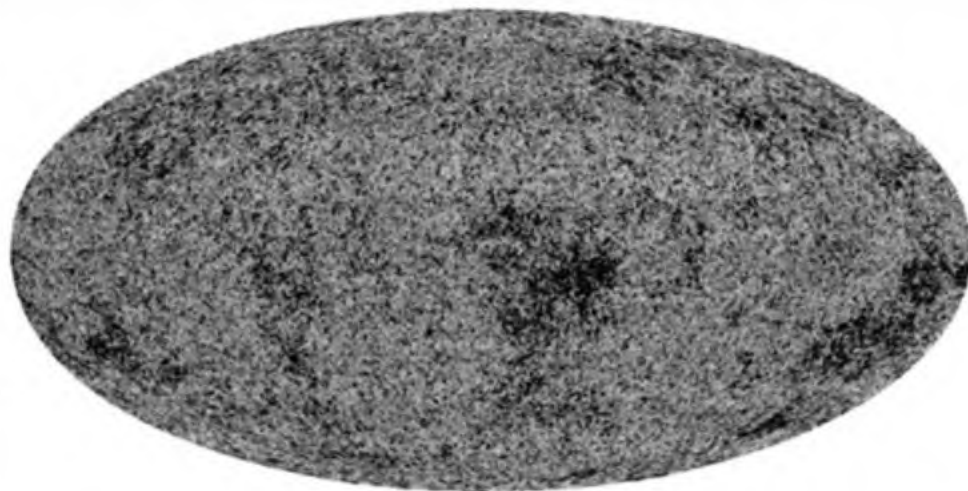
برای پیدا کردن اثبات عینی‌تر نظریه باید جای دیگری را جست‌وجو کنیم. عالم آغازین ممکن است به سوی پیش‌بینی‌هایی که بتوانند نظریه را تأیید کنند، پنجره‌ای بگشاید؛ امیدواریم در آینده‌ای نه‌چندان دور چنین اتفاقی رخ دهد. شاید هم ثابت کنند نظریه اشتباه است.

پنجره‌ای به گرانش کوانتومی

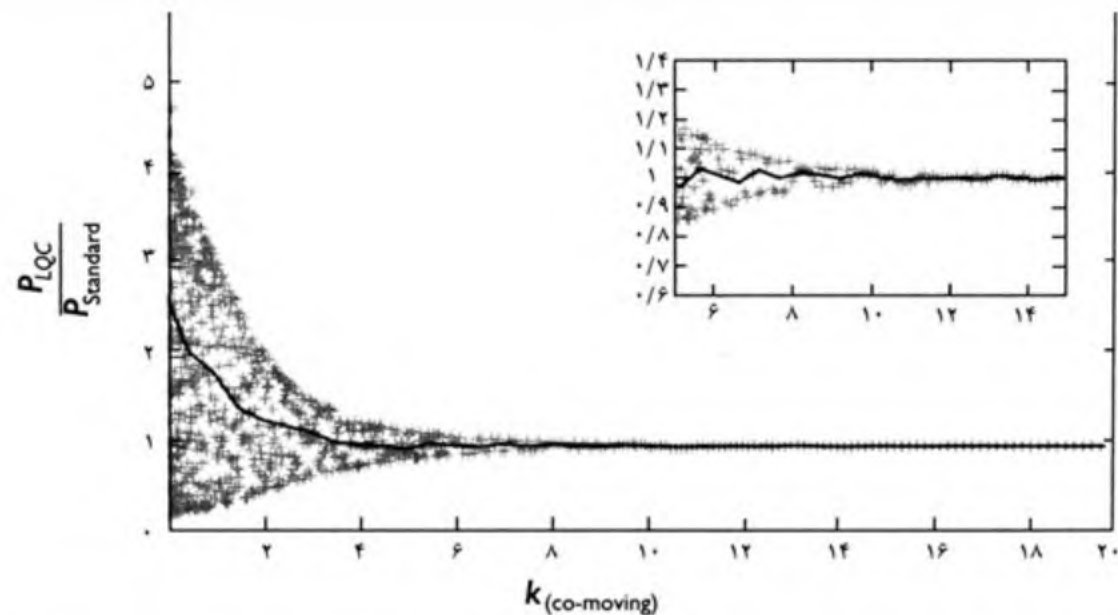
اگر معادلات توصیف‌کننده گذار عالم از فاز کوانتومی را داشته باشیم، می‌توانیم آثار وقایع کوانتومی را بر عالمی که امروزه می‌بینیم، محاسبه کنیم. عالم پر از تابش‌های کیهانی است: دریایی از فوتون‌ها که از زمان فاز داغ اولیه در کیهان مانده‌اند، درخشش باقیمانده از دمای بالای اولیه هستند. میدان الکترومغناطیسی در فضای بزرگ بین کهکشان‌ها مانند سطح دریا پس از طوفانی عظیم می‌لرزد. این لرزش که در جهان منتشر می‌شود، تابش زمینه کیهانی نامیده می‌شود. در سال‌های اخیر ماهواره‌هایی چون کوبه (۱۶۱)، دبلیو ایم ای پی (۱۶۲) و به تازگی ماهواره پلانک آن را مطالعه کرده‌اند. تصویری از نوسان‌های ریز این تابش در شکل ۹.۳ رسم شده است. جزئیات این ساختار تاریخچه عالم را برای ما روایت می‌کنند. ممکن است ردپاهای آغاز کوانتومی عالم ما در این جزئیات نهفته باشد.

یکی از فعال‌ترین زمینه‌های پژوهش در نظریه گرانش کوانتومی حلقه مطالعه نمود دینامیک کوانتومی عالم آغازین در این داده‌هاست. نتایج هنوز در مرحله مقدماتی، اما دلگرم‌کننده‌اند. با محاسبات بیشتر و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر ممکن است بتوانیم نظریه را به بوته آزمایش بگذاریم.

در سال ۲۰۱۳ ابهه اشتکار، ایوان اگالو (۱۶۳) و ویلیام نلسون (۱۶۴) مقاله‌ای منتشر کردند که در آن، طبق فرضیه‌هایی مسلم، محاسبه کردند توزیع آماری نوسان‌های این منبع تابش‌های کیهانی آثار جهش اولیه را آشکار می‌کند: نوسان‌های زاویه - باز باید با آنچه نظریه بدون در نظر گرفتن کوانتا پیش‌بینی می‌کند، تفاوت داشته باشد. وضعیت فعلی این اندازه‌گیری‌ها در شکل ۹.۴ نشان داده شده است. خط سیاه پیش‌بینی اشتکار، اگالو و نلسون و نقاط خاکستری داده‌های اندازه‌گیری‌شده را نمایش می‌دهد. در حال حاضر، برای تشخیص درستی خم رو به بالای خط سیاه که این سه مؤلف پیش‌بینی کردند این داده‌ها کافی نیستند. اما اندازه‌گیری‌ها دقیق‌تر می‌شوند. تحقیقات هنوز در جریان است، اما افرادی مانند خود من که زندگی‌شان را صرف جست‌وجوی فهم رازهای فضای کوانتومی کرده‌اند، با دقت زیاد، نگرانی و امید بهبود توانایی در مشاهده، اندازه‌گیری و محاسبه را پیگیری می‌کنند - چشم‌انتظار آن لحظه‌اند که طبیعت درستی یا نادرستی‌شان را اعلام کند.



شکل ۹.۳ نوسان‌های تابش زمینه کیهانی. این تصویر مربوط به کهن‌ترین جسم جهان است که در دسترسمان است. این نوسان‌ها چهارده میلیارد سال پیش ظاهر شدند. امیدواریم با بررسی آمار این نوسان‌ها تأییدیه‌ای برای پیش‌بینی‌های گرانش کوانتومی پیدا کنیم.



شکل ۹.۴ پیش‌بینی احتمالی گرانش کوانتومی حلقه از طیف تابش زمینه، در مقایسه با خطاهای آزمایشی فعلی (که به وسیله نقطه‌ها به نمایش گذاشته شده است). برگرفته از ای. اشتکار، آی. اِگالو و دِلیو. نلسون

ردپاهای گرمای آغازین باید در خود میدان گرانشی هم حضور داشته باشد. میدان گرانشی یا به عبارتی خود فضا هم باید مانند سطح دریا

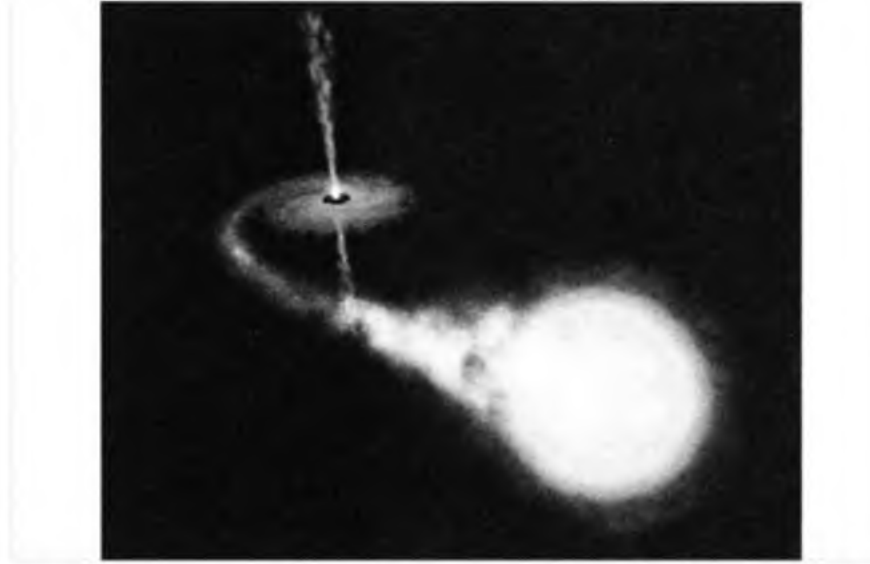
آشوبناک باشد. در نتیجه باید تابش زمینه گرانشی کیهانی — قدیمی‌تر از تابش‌های الکترومغناطیسی — هم در کار باشد؛ چون موج‌های گرانشی کمتر از موج‌های الکترومغناطیسی تحت تأثیر ماده قرار می‌گیرند و حتی زمانی که جهان چگال‌تر از آن بود که به موج‌های الکترومغناطیسی اجازه عبور دهد، موج‌های گرانشی می‌توانستند آزادانه در فضا حرکت کنند.

حالا به طور مستقیم امواج گرانشی را با آشکارساز لیگو (۱۶۵) مشاهده کرده‌ایم. این آشکارساز از دو بازو با طول چند کیلومتر ساخته شده که با هم زاویه قائم می‌سازند. پرتوهای لیزری در این دو بازو فاصله بین سه نقطه ثابت را اندازه می‌گیرند. وقتی یک موج گرانشی می‌گذرد فضا به شکل نامحسوسی بزرگ و کوچک می‌شود و پرتوهای لیزر این تغییرات کوچک را اندازه می‌گیرند. (۱۶۶) موج‌های گرانشی مشاهده‌شده را یک پدیده اخت‌فیزیکی ایجاد کرده بود: برخورد سیاه‌چاله‌ها. این‌ها پدیده‌هایی هستند که نسبت عام بدون گرانش کوانتومی آن‌ها را توضیح می‌دهد. آزمایشی بلندپروازانه‌تر به نام لیسا (۱۶۷) در مرحله ارزیابی است که می‌تواند این کار را در مقیاس بسیار بزرگ‌تری انجام دهد: سه ماهواره را نه اطراف زمین، بلکه در مدار خورشید قرار می‌دهند گویی سیاره‌هایی مینیاتوری‌اند که زمین را در مدارش تعقیب می‌کنند. سه ماهواره با پرتوهای لیزر به هم متصل‌اند که فاصله بین یکدیگر یا بهتر از آن، اختلاف فاصله‌ها را هنگام گذر یک موج گرانشی اندازه می‌گیرند. اگر لیسا به مرحله اجرا برسد نه تنها می‌تواند موج‌های گرانشی تولیدشده ستاره‌ها و سیاه‌چاله‌ها را ببیند، بلکه می‌تواند تابش زمینه منتشرشده از امواج گرانشی آغازین را که زمان مه‌بانگ تولید شده بودند نیز ببیند. این امواج می‌توانند اطلاعاتی از جهش کوانتومی در اختیارمان بگذارند.

می‌توانیم ردپای وقایعی را که چهارده میلیارد سال پیش در خاستگاه عالم ما رخ دادند، در بی‌نظمی‌های بسیار ریز فضا بیابیم و نتیجه‌گیری‌هایمان را از ماهیت فضا و زمان تأیید کنیم.

۱۰. سیاه چاله های کوانتومی

تعداد زیادی سیاه چاله در عالم ما وجود دارد. سیاه چاله ها ناحیه هایی از فضا هستند که در آن قدر خمیده می شود که در خود فرومی پاشد و زمان در آنجا متوقف می شود. همان طور که اشاره شد، وقتی که مثلاً ستاره ای تمام هیدروژن خود را بسوزاند و فروپاشد یک سیاه چاله تشکیل می شود. معمولاً، ستاره فروپاشیده با ستاره ای دیگر در نزدیکی اش جفت می شود و در این صورت سیاه چاله و جفت باقیمانده اش به دور یکدیگر می چرخند؛ سیاه چاله مدام ماده ستاره دیگر را می مکد (مانند شکل ۱۰.۱۰). اخترشناسان سیاه چاله های زیادی با اندازه ای (از لحاظ جرم) شبیه به خورشید خودمان یافته اند (در واقع کمی بزرگ تر). اما سیاه چاله های غول آسایی هم وجود دارند. در مرکز تقریباً تمام کهکشان ها، از جمله کهکشان خودمان، سیاه چاله ای وجود دارد.



شکل ۱۰.۱ نمایشی از یک جفت ستاره/سیاهچاله. ستاره ماده از دست می‌دهد. سیاهچاله قسمتی از آن را جذب می‌کند و قسمتی را مانند فواره در جهت قطب‌های خود پخش می‌کند.

در حال حاضر، مطالعات دقیقی روی سیاهچاله مرکز کهکشان خودمان انجام می‌شود. جرم آن یک میلیون بار از جرم خورشیدمان بیشتر است. گاه‌به‌گاه که ستاره‌ای بیش از حد به این هیولا نزدیک می‌شود، اعوجاج‌های گرانشی آن را متلاشی می‌کنند و سیاهچاله عظیم آن را می‌بلعد، مانند نهنگی که یک ماهی کوچک را می‌بلعد. هیولایی یک میلیون بار بزرگ‌تر از خورشید را تصور کنید که در چشم‌به‌هم‌زدنی

خورشیدمان و سیاره‌های مینیاتوری‌اش را می‌بلعد...

پروژه شگفت‌انگیزی در جریان است که می‌خواهد شبکه‌ای از آنتن‌های رادیویی بسازد که اطراف زمین، قطب تا قطب، توزیع شده‌اند. اخترشناسان از طریق آن به وضوحی کافی برای «دیدن» این سیاه‌چاله کهکشانی دست خواهند یافت. انتظار داریم دیسک سیاه کوچکی ببینیم که نور احاطه‌اش کرده است. منبع این نور تابش حاصل از سقوط مواد به داخل سیاه‌چاله است.

چیزی که وارد سیاه‌چاله می‌شود دوباره بیرون نخواهد آمد، لاقلاً اگر از نظریه کوانتومی چشم‌پوشی کنیم. سطح سیاه‌چاله مانند زمان حال است: تنها در یک جهت می‌توان از آن گذشت. از آینده بازگشتی وجود ندارد. در یک سیاه‌چاله گذشته یعنی بیرون سیاه‌چاله؛ آینده یعنی درون آن. از بیرون سیاه‌چاله مانند کره‌ای است که می‌توان وارد آن شد، اما هیچ از آن بیرون نمی‌آید. می‌توان یک موشک را در فاصله ثابتی از سیاه‌چاله که افق رویداد سیاه‌چاله نامیده می‌شود، قرار داد. برای این کار باید موتورهایش به شدت کار کنند تا در مقابل کشش گرانشی سیاه‌چاله مقاومت کند. گرانش قوی سیاه‌چاله باعث می‌شود گذر زمان برای این موشک کند شود. اگر موشک برای یک ساعت به اندازه کافی نزدیک به افق رویداد سیاه‌چاله بماند و بعد دور شود، خواهد دید در این مدت در بیرون از سیاه‌چاله قرن‌ها گذشته است. هرچه موشک به افق رویداد نزدیک‌تر شود، زمان برایش — نسبت به بیرون — کندتر می‌گذرد. در نتیجه سفر به گذشته سخت است، اما سفر به آینده آسان: کافی است با یک سفینه به سیاه‌چاله‌ای نزدیک شویم، کمی در همسایگی‌اش بمانیم و سپس دور شویم.

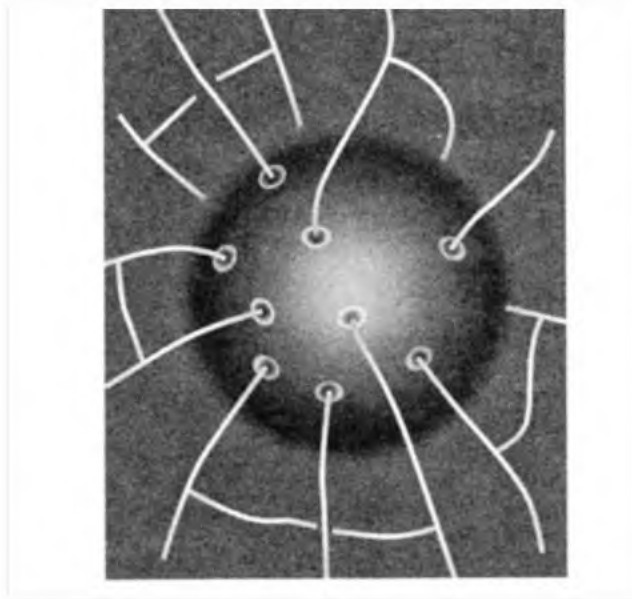
زمان روی خود افق رویداد متوقف می‌شود: اگر بسیار به آن نزدیک شویم و پس از چند دقیقه دور شویم، ممکن است در بقیه جهان میلیون‌ها سال گذشته باشد.

نکته بسیار جالب این است که نظریه اینشتین ویژگی‌های این اجسام عجیب را که امروزه بسیار مشاهده می‌شوند، پیش‌بینی کرده بود. امروزه اخترشناسان این اجسام را در فضا مطالعه می‌کنند، اما در گذشته‌ای نه‌چندان دور کسی سیاه‌چاله‌ها را باور نمی‌کرد و نتیجه عجیب یک نظریه جسورانه به شمار می‌آمدند. به یاد دارم استادم در دانشگاه آن‌ها را به عنوان پاسخ‌های معادلات اینشتین معرفی کرد که «بسیار غیرمحمتمل است اجرام واقعی معادل آن‌ها پیدا شود». یافتن چیزها پیش از مشاهده شدنشان توانایی حیرت‌انگیز فیزیک نظری است.

سیاه‌چاله‌هایی را که مشاهده می‌کنیم می‌توان به خوبی با نظریهٔ اینشتین توصیف کرد و برای فهم آن‌ها نیازی به مکانیک کوانتومی نیست. اما برای کشف دو راز سیاه‌چاله‌ها به مکانیک کوانتومی احتیاج داریم. نظریهٔ حلقه برای هر دوی این‌ها پاسخی احتمالی در چپته دارد. یکی از این‌ها می‌تواند فرصتی برای آزمودن نظریه ارائه کند.

اولین کاربرد گرانش کوانتومی در سیاه‌چاله‌ها مربوط به حقیقت عجیبی است که استیون هاوکینگ کشف کرد. او در اوایل دههٔ ۱۹۷۰ به طور نظری استدلال کرد که سیاه‌چاله‌ها «داغ‌اند». مانند اجسام داغ رفتار می‌کنند: گرما می‌تابانند. در این فرایند انرژی و در نتیجه جرم از دست می‌دهند (چون انرژی و جرم یکسان‌اند) و مدام کوچک‌تر می‌شوند. «تبخیر» می‌شوند. این «تبخیر سیاه‌چاله‌ها» مهم‌ترین کشف هاوکینگ است.

داغی اجسام به دلیل حرکت اجزای میکروسکوپی‌شان است. برای مثال در یک قطعه آهن داغ اتم‌ها حول وضعیت تعادلشان بسیار سریع نوسان می‌کنند. مولکول‌های هوای داغ بسیار سریع‌تر از مولکول‌های هوای سرد حرکت می‌کنند.



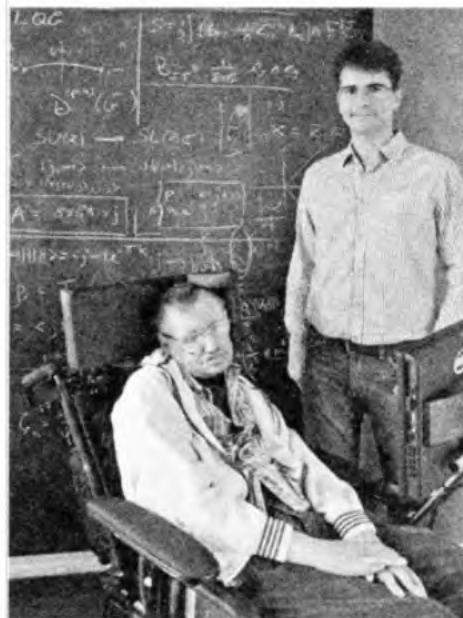
شکل ۱۰.۲ سطح یک سیاه‌چاله که حلقه‌ها از آن گذشته‌اند، به بیانی حلقه‌ها لینک‌های شبکه اسپین‌اند که وضعیت میدان گرانشی را توصیف می‌کنند. هر حلقه معادل ناحیه کوانتومی سطح سیاه‌چاله است. © جان بانس

کدام «اتم‌ها» با نوسان خود سیاه‌چاله را داغ می‌کنند؟ هاوکینگ این پرسش را بی‌پاسخ گذاشت. نظریه حلقه پاسخی احتمالی ارائه

می‌کند. اتم‌های بنیادی سیاه‌چاله که نوسان می‌کنند و باعث بالا رفتن دمای آن می‌شوند، کوانتای مجزای فضا روی سطح آن هستند. به این ترتیب با نظریه حلقه می‌توان به گرمای غیرعادی سیاه‌چاله‌ها که هاوکینگ پیش‌بینی کرده بود، پی برد: این گرما نتیجه نوسان‌های میکروسکوپی هرکدام از اتم‌های فضا است. ذرات فضا نوسان می‌کنند، چون در دنیای مکانیک کوانتومی همه‌چیز نوسان می‌کند؛ هیچ‌چیز ثابت نمی‌ماند. غیرممکن بودن سکون کامل و مداوم اجسام در یک مکان مهم‌ترین نکته در مکانیک کوانتومی است. گرمای سیاه‌چاله‌ها مستقیماً با نوسان‌های اتم‌های فضا در گرانش کوانتومی حلقه ارتباط دارد. موقعیت دقیق افق رویداد سیاه‌چاله را تنها نسبت به این نوسان‌های میکروسکوپی میدان گرانشی می‌توان یافت. در نتیجه، به نوعی، افق رویداد سیاه‌چاله مانند جسم داغی نوسان می‌کند.

راه دیگری برای درک خاستگاه گرمای سیاه‌چاله‌ها وجود دارد. نوسان‌های کوانتومی بین درون و بیرون سیاه‌چاله همبستگی ایجاد می‌کنند. (در فصل ۱۲ مفصل در مورد همبستگی و دما توضیح خواهم داد.) ابهام کوانتومی اطراف افق رویداد سیاه‌چاله باعث می‌شود در هندسه سیاه‌چاله نوسان‌هایی رخ دهد. اما نوسان داشتن حاکی از احتمال است و احتمال حاکی از ترمودینامیک و در نتیجه دما است. سیاه‌چاله قسمتی از جهان را از ما می‌پوشاند و نوسان‌های کوانتومی‌اش را به شکل گرما نشان می‌دهد. (۱۶۸)

یک دانشمند جوان ایتالیایی به نام ائوجینیو بیانکی^۱ که امروز در ایالات متحده استاد دانشگاه است محاسبات زیبایی را تکمیل کرد که نشان می‌دهد چطور می‌توان با شروع از این ایده‌ها و معادلات اساسی گرانش کوانتومی حلقه فرمول گرمای سیاه‌چاله‌ها را که هاوکینگ پیش‌بینی کرده بود، استنتاج کرد (شکل ۳.۱۰).



شکل ۱۰.۳ استیون هاوکینگ و ائوجنیو بیانکی. معادلات اساسی گرانش کوانتومی حلقه که سیاهچاله‌ها را توصیف می‌کنند، روی تخته‌سیاه نوشته شده‌اند.

دومین کاربرد گرانش کوانتومی حلقه در فیزیک سیاهچاله از قبلی هم جذاب‌تر است. وقتی یک ستاره فرومی‌پاشد از دید خارجی ناپدید می‌شود: درون سیاهچاله قرار می‌گیرد. اما درون سیاهچاله چه اتفاقی برایش می‌افتد؟ اگر درون سیاهچاله سقوط می‌کردید چه می‌دیدید؟ در ابتدا چیز خاصی نمی‌دیدید: بدون وارد شدن آسیبی از سطح سیاهچاله می‌گذشتید — سپس با شتاب به سمت مرکز سقوط می‌کردید. بعد از آن؟ نسبت عام پیش‌بینی می‌کند در مرکز سیاهچاله همه‌چیز در نقطه‌ای بی‌نهایت کوچک با چگالی بی‌نهایت فشرده شده است. اما باز هم در صورتی این اتفاق می‌افتد که از نظریه کوانتومی چشم‌پوشی کنیم.

اگر گرانش کوانتومی را در نظر بگیریم دیگر این پیش‌بینی صحیح نیست — دافعه کوانتومی وجود دارد — همان دافعه کوانتومی که باعث شد جهان در مه‌بانگ جهش کند. انتظار داریم با نزدیک‌تر شدن به مرکز فشار کوانتومی سرعت ماده در حال سقوط را کم و چگالی آن را بسیار زیاد اما متناهی کند. ماده فشرده می‌شود، اما نه تا نقطه‌ای بی‌نهایت کوچک، چون برای کوچک بودن محدودیتی وجود دارد. گرانش کوانتومی فشار زیادی ایجاد می‌کند که باعث می‌شود ماده به بیرون پرتاب شود، درست همان‌طور که یک جهان در حال فروپاشی می‌تواند بیرون بجهد و جهانی رو به گسترش را به وجود بیاورد.

اگر از درون سیاهچاله نگاه کنیم، جهش یک ستاره در حال فروپاشی می‌تواند بسیار سریع رخ دهد. اما به یاد داشته باشید در سیاهچاله زمان بسیار آهسته‌تر از بیرون می‌گذرد. از بیرون که نگاه کنیم، فرایند جهش ستاره می‌تواند میلیاردها سال به درازا بینجامد. پس از گذشت این مدت می‌توانیم انفجار سیاهچاله را ببینیم. در پایان، سیاهچاله اساساً همین است: میان‌بری به آینده دور.

در نتیجه، بر عکس آنچه نسبت عام کلاسیک پیش‌بینی کرده بود، گرانش کوانتومی می‌تواند بر این دلالت داشته باشد که سیاهچاله‌ها تا ابد پایدار نیستند. سیاهچاله‌ها در نهایت ناپایدارند.

دیدن انفجار این سیاهچاله‌ها تأییدی تماشایی بر نظریه گرانش کوانتومی حلقه است. سیاهچاله‌های بسیار پیر، مانند سیاهچاله‌هایی که در ابتدای جهان تشکیل شدند، می‌توانند امروز در حال انفجار باشند. برخی از محاسبات جدید این موضوع را مطرح می‌کنند که سیگنال‌های انفجار آن‌ها ممکن است در محدوده برد تلسکوپ‌های رادیویی باشد. حتی این موضوع نیز مطرح شده است که برخی از پالس‌های

رادیویی اسرارآمیز به نام شلیک رادیویی سریع که اخترشناسان پیش از این اندازه گرفته‌اند، دقیقاً همان سیگنال‌هایی هستند که از انفجار سیاه‌چاله‌های نخستین به وجود آمده‌اند. اگر این موضوع اثبات شود عالی خواهد شد: نشانه‌ مستقیمی از پدیده‌های گرانش کوانتومی خواهیم داشت. بگذارید چشم‌انتظار بنشینیم و ببینیم...

۱۱. پایان بی نهایت

وقتی گرانش کوانتومی را وارد معادلات می‌کنیم فشرده شدن بی‌نهایت جهان در یک نقطه بی‌نهایت کوچک، که نسبیت عام در رابطه با آغاز مه‌بانگ پیش‌بینی کرده بود، کنار می‌رود. گرانش کوانتومی کشف کرد که نقطه بی‌نهایت کوچکی در کار نیست. کران پایینی برای تقسیم‌پذیری فضا وجود دارد. جهان نمی‌تواند از مقیاس پلانک کوچک‌تر باشد، چون هیچ‌چیزی از مقیاس پلانک کوچک‌تر نیست.

با چشم‌پوشی از مکانیک کوانتومی از وجود این کران پایین چشم‌پوشی کرده‌ایم. تکینگی‌ها موقعیت‌های بیمارگونه‌ای هستند که نسبیت عام پیش‌بینی کرده به مقدارهای بی‌نهایت منجر می‌شوند. گرانش کوانتومی بی‌نهایت را کران‌دار می‌کند و این تکینگی‌های بیمارگونه نسبیت عام را «درمان» می‌کند. در مرکز سیاه‌چاله‌ها هم چنین اتفاقی می‌افتد: تکینگی پیش‌بینی‌شده در نسبیت عام به محض در نظر گرفتن گرانش کوانتومی ناپدید می‌شود.

در موردی دیگر از نوعی دیگر، گرانش کوانتومی مربوط به نیروهایی همچون الکترومغناطیس کرانی برای بی‌نهایت قائل می‌شود. نظریه کوانتومی میدان که دیراک آن را آغاز و فاینمن و همکارانش در دهه ۱۹۵۰ تکمیلش کردند، این نیروها را به خوبی توصیف می‌کند، اما پر از ابهام‌های ریاضیاتی است. وقتی سعی می‌کنیم با به‌کارگیری آن فرایندهای فیزیکی را محاسبه کنیم معمولاً به پاسخ‌های بی‌نهایت می‌رسیم که معنایی ندارند. این پاسخ‌ها را واگرایی می‌نامیم. طی یک سری محاسبات با استفاده از تکنیکی عجیب و غریب واگرایی‌ها از بین می‌روند و به پاسخ‌های نهایی محدود ختم می‌شوند. پاسخ‌ها در عمل درست هستند و مقدارهای صحیح به دست می‌آید؛ همچنین با اندازه‌گیری‌های تجربی تطابق دارند. اما چرا نظریه برای رسیدن به اعداد معقول باید از بی‌نهایت استفاده کند؟

دیراک در سال‌های پایانی عمرش از بی‌نهایت‌ها در نظریه‌اش ناراضی بود و حس می‌کرد، با در نظر گرفتن تمام جوانب، به هدفش که فهم حقیقی کارکرد جهان بود، نرسیده است. دیراک شیفته روشن بودن مفاهیم بود، حتی اگر چیزی که او روشن به شمار می‌آورد لزوماً در نظر بقیه چنین نبود. اما بی‌نهایت‌ها روشن به شمار نمی‌آیند.

اما بی‌نهایت‌های نظریه کوانتومی میدان حاصل یک فرض اساسی این نظریه‌اند: تقسیم‌پذیری بی‌نهایت فضا. برای مثال جهت محاسبه

احتمال یک فرایند — همان‌طور که فاینمن به ما آموخت — تمام راه‌هایی را که فرایند می‌تواند رخ دهد با هم جمع می‌کنیم و این راه‌ها بی‌نهایت‌اند، چون می‌توانند در هر نقطه‌ای از بی‌نهایت نقطه فضای پیوسته رخ دهند. به این دلیل نتیجه بی‌نهایت است.

وقتی گرانش کوانتومی را در نظر می‌گیریم، این بی‌نهایت‌ها هم رنگ می‌بازند. دلیل روشن است: فضا بی‌نهایت بار تقسیم‌پذیر نیست، از بی‌نهایت نقطه تشکیل نشده است؛ بی‌نهایت چیز که باید هم جمع شوند، وجود ندارند. گسسته و ذره‌ای در نظر گرفتن ساختار فضا دشواری‌های نظریه کوانتومی میدان را برطرف می‌کند و بی‌نهایت‌های برخاسته از آن را از بین می‌برد.

نتیجه محشری است: از یک‌طرف، با در نظر گرفتن مکانیک کوانتومی مشکلات برخاسته از بی‌نهایت‌های نظریه گرانش اینشتین، یعنی تکینگی‌ها، حل می‌شوند. از طرف دیگر، در نظر گرفتن گرانش مشکلات حاصل از نظریه میدان کوانتومی، یعنی واگرایی‌ها، را حل می‌کند. بر خلاف آنچه در ابتدا به نظر می‌آمد این دو نظریه ناسازگار نیستند، بلکه هرکدام برای مشکلات حاصل از دیگری راه‌حلی در چنته دارد!

محدود کردن بی‌نهایت‌ها در فیزیک مدرن موضوعی رایج است. خلاصه نسبیت خاص یافتن کران بالایی برای سرعت در تمام سیستم‌های فیزیکی است. مکانیک کوانتومی را می‌توان به یافتن کران بالایی برای اطلاعات در هر سیستم فیزیکی خلاصه کرد. طول کمینه طول پلانک L است، سرعت بیشینه سرعت نور c است، کل اطلاعات را می‌توان با ثابت پلانک h تعیین کرد. خلاصه این مطالب در جدول ۱۱.۱ رسم شده است.

اندازه‌های کمینه و بیشینه برای طول، سرعت و کنش‌ها یک دستگاه یکای طبیعی می‌سازند. به جای اندازه‌گیری سرعت بر حسب کیلومتر در ساعت یا متر در ثانیه، می‌توانیم آن را به صورت کسری از سرعت نور نشان دهیم. می‌توانیم عدد ۱ را به سرعت c نسبت دهیم و برای مثال برای جسمی که با نصف سرعت نور حرکت می‌کند، بنویسیم: $v = \frac{1}{2}$. به همین ترتیب، می‌توانیم طول پلانک را ۱ تعریف کنیم و طول را به صورت ضربی از طول پلانک اندازه بگیریم. می‌توانیم قرار دهیم $h = 1$ و کنش‌ها را به صورت ضربی از ثابت پلانک اندازه بگیریم. به این صورت، دستگاهی طبیعی از یکاهای بنیادی داریم که دیگر یکاها را با استفاده از آن مشخص می‌کنیم. یکای زمان همان زمانی است که نور طی آن طول پلانک را طی می‌کند و غیره. در پژوهش‌های گرانش کوانتومی استفاده از یکاهای طبیعی رایج است.

با تعیین این سه ثابت بنیادی برای احتمالات به ظاهر بی‌نهایت طبیعت کرانی مشخص می‌شود. مطابق آن بی‌نهایت‌های ما صرفاً

چیزهایی اند که هنوز نتوانسته‌ایم بشمریم یا بفهمیم. به نظرم به طور کلی درست است. به هر حال، «بی‌نهایت» نامی است که روی ناشناخته‌هایمان گذاشته‌ایم. ظاهراً طبیعت به ما می‌گوید هیچ‌چیز واقعاً بی‌نهایت نیست.

جدول ۱۱.۱ محدودیت‌های بنیادی یافته‌شده در فیزیک نظری

کمیت فیزیکی	ثابت بنیادی	نظریه	کشف
سرعت	c	نسبیت خاص	یک سرعت پیشینه وجود دارد
اطلاعات (کنش‌ها)	$\hbar$	مکانیک کوانتومی	یک اطلاعات کمینه وجود دارد
طول	L_p	گراننش کوانتومی	یک طول کمینه وجود دارد

بی‌نهایت دیگری در کار است که فکرمان را مغشوش می‌کند: بی‌نهایت بودن ابعاد فضایی کیهان. اما همان‌طور که در فصل ۳ توضیح دادم، اینشتین راهی برای کران‌دار در نظر گرفتن یک کیهان بدون مرز پیدا کرد. محاسبات فعلی نشان می‌دهد اندازهٔ عالم باید بیش از صد میلیارد سال نوری باشد. این مرتبهٔ بزرگی عالمی است که غیرمستقیم به آن دسترسی داریم. این اندازه ۱۰ بار از طول پلانک بزرگ‌تر است، ۱ با ۱۲۰ صفر جلایش. بین طول پلانک و طول کیهان ۱۲۰ مرتبهٔ دیوانه‌کننده وجود دارد. عظیم است. خیلی عظیم است. اما متناهی.

عالم بسیار پیچیدهٔ ما در این فضا قرار دارد — از کوانتای ریز فضا، کوارک‌ها، پروتون‌ها، اتم‌ها، ساختارهای شیمیایی، کوه‌ها، ستاره‌ها، کهکشان‌ها (که هریک از صدها میلیارد ستاره ساخته شده‌اند) و خوشه‌های کهکشانی گرفته تا عالم قابل‌مشاهدهٔ به ظاهر

بی‌کران که بیش از صد میلیارد کهکشان دارد. به چند جنبهٔ محدود آن پی برده‌ایم. بزرگ است و متناهی.

مقیاس کیهانی با ثابت کیهان‌شناختی Λ نشان داده می‌شود که وارد معادلات اساسی نظریه‌هایمان می‌شود. در نتیجه نظریهٔ اساسی عدد بسیار بزرگی در خود دارد: نسبت بین ثابت کیهان‌شناختی و طول پلانک. این عدد بزرگی است که راه را برای پیچیدگی گستردهٔ جهان باز می‌کند. اما چیزی که از عالم می‌بینیم و می‌فهمیم بی‌نهایتی نیست که در آن غرق شویم. دریایی وسیع اما متناهی است. حکمت یا سیراخ (۱۶۹) با پرسشی شگرف آغاز می‌شود:

چه کسی می‌تواند شن‌های دریا را، قطره‌های باران را، روزهای ابدیت را بشمرد؟ که می‌تواند ارتفاع آسمان را، وسعت زمین را، ژرفا و خرد را درک کند؟

کمی بعد از نگاشته شدن این سطور، متن مهم دیگری به رشتهٔ تحریر درآمد که مقدمهٔ آن هنوز بر سر زبان‌هاست:

ای شاه هی‌پرو برخی گمان می‌برند دانه‌های شن را نمی‌توان شمرد.

این مقدمهٔ کتاب شن‌شمار (۱۷۰) است که در آن ارشمیدس، بزرگ‌ترین دانشمند دوران باستان... دانه‌های شن جهان را می‌شمرد! این کار را می‌کند تا نشان دهد هرچند تعدادشان زیاد است، اما متناهی هستند و می‌توان عدد آن را تعیین کرد. کار با اعداد بزرگ در دستگاه اعداد باستان سخت بود. ارشمیدس در شن‌شمار سیستم شمارش تازه‌ای، شبیه دستگاه نمایی ما، برای شمارش می‌سازد که در آن می‌توان با اعداد بزرگ کار کرد. او قدرت این دستگاه را (البته بازیگوشانه) نه‌تنها با شمردن تعداد دانه‌های شن در ساحل‌ها، بلکه در تمام عالم نشان می‌دهد.

شن‌شمار بازیگوشانه اما عمیق است. ارشمیدس با تخیلی قوی گویی هزار سال جلوتر به استقبال عصر روشنگری می‌رود و علیه دانشی که اصرار می‌کند برخی از چیزها ذاتاً دور از دسترس اندیشهٔ انسان‌اند، می‌شورد. ادعا نمی‌کند ابعاد دقیق جهان یا تعداد دقیق دانه‌های شن را می‌داند. ادعا نمی‌کند که دانشش کامل است. برعکس، به وضوح می‌گوید ماهیت برآوردهایش تقریبی و موقت‌اند. از دیگر اندازه‌های ممکن برای جهان سخن می‌گوید — و بین آن‌ها هیچ‌کدام را قطعی نمی‌داند. منظور او فرض دانستن همه‌چیز نیست. برعکس: آگاهی از این است که ممکن است امروز از نادانی دیروز پرده برداشته شود و فردا از نادانی امروز.

نکتهٔ اساسی شوریدن علیه سرکوب، میل به دانستن است: باور به اینکه می‌توان جهان را شناخت، سرکشی کردن با سربلندی علیه کسانی که از نادانی خود راضی‌اند، کسانی که می‌گویند بی‌نهایت‌ها را نمی‌توانیم بشناسیم و دانش را به جای دیگری حواله می‌کنند.

سده‌ها گذشته است و حکمت به همراه دیگر قسمت‌های انجیل را می‌توان در خانه‌های بی‌شماری یافت، اما فقط عدهٔ کمی کتاب ارشمیدس را می‌خوانند. رومیان هنگام غارت سیراکیوز ارشمیدس را کشتند. سیراکیوز آخرین بازماندهٔ سرفراز مگنا گرایکیا (۱۷۱)، یونان بزرگ، بود که هنگام گسترش امپراطوری روم، زیر یوغ رومیان رفت. امپراطوری روم خیلی زود حکمت را به عنوان یکی از کتاب‌های اصلی دین رسمی‌اش برگزید. این اثر بیش از هزار سال این موقعیت را حفظ کرد. در آن هزاره محاسبات ارشمیدس در هاله‌ای از ابهام فرورفتند: هیچ‌کس نمی‌توانست آن‌ها را به کار بگیرد یا حتی بفهمد. یکی از زیباترین مکان‌های ایتالیا، تئاتر تائورمینا (۱۷۲)، نزدیک سیراکیوز ارشمیدس است که چشم‌اندازی به مدیترانه و کوه إتنا (۱۷۳)، که آتش‌فشانی فعال است، دارد. زمان ارشمیدس در آن نمایش‌نامه‌های سوفوکلس (۱۷۴) و اورپید (۱۷۵) را روی صحنه می‌بردند. رومیان آن را برای نبرد گلاادیاتورها و لذت بردن از تماشای مرگ آن‌ها به کار گرفتند.

بازیگوشی پیچیدهٔ شن‌شمار احتمالاً تنها به خاطر به‌کارگیری یک ساختار ریاضی دشوار یا نبوغ یکی از تیزهوش‌ترین دانشمندان دوران باستان نیست، بلکه از فریاد منطق نشئت می‌گیرد که نادانی خود را می‌پذیرد، اما از اینکه منابع دانش را به دیگران بسپرد، سر باز می‌زند. بیانیه‌ای کوچک، مختصر و بسیار هوشمندانه علیه بی‌نهایت است — علیه تاریک‌اندیشی.

گران‌ش کوانتومی یکی از بسیار مسیرهایی است که راه‌شن‌شمار را ادامه می‌دهد. ما دانه‌های فضا را که جهان از آن‌ها ساخته شده است، می‌شماریم. جهانی وسیع اما متناهی. تنها چیز حقیقتاً بی‌انتها نادانی ماست.

۱۲. اطلاعات

به انتهای سفرمان نزدیک می‌شویم. در چند فصل قبلی کاربردهای عینی گرانش کوانتومی را بیان کردم: توصیف رخداد‌های عالم حول و حوش مه‌بانگ؛ توصیف ویژگی‌های گرمای سیاه‌چاله‌ها و کنار رفتن مفهوم بی‌نهایت.

قبل از پایان کتاب می‌خواهم به نظریه برگردم، اما به آینده آن می‌نگرم و در مورد اطلاعات بحث می‌کنم: شبی بر فیزیک نظری سایه افکنده، اشتیاق و آشفته‌گی بسیاری را برانگیخته است.

این فصل با فصل‌های قبلی متفاوت است. پیش از این در مورد ایده‌های خوش‌تعریف اما ناآزموده سخن گفتم. اینجا از ایده‌هایی حرف می‌زنم که هنوز آشفته‌اند و شدیداً به سامان‌دهی نیاز دارند. خواننده عزیز، اگر تا اینجا سفر را کمی دشوار دیده‌اید، کمی محکم‌تر بنشینید، چون اکنون بین خلأ‌های هوایی پرواز می‌کنیم. اگر این فصل به طور خاص گنگ به نظر می‌رسد مشکل از به‌هم‌ریختگی فکر شما نیست. ایده‌های من به هم ریخته‌اند.

امروزه بسیاری از دانشمندان معتقدند مفهوم «اطلاعات» ممکن است کلیدی برای پیشرفت‌های تازه در فیزیک باشد. در مبانی ترمودینامیک، علم گرما، اصول اولیه مکانیک کوانتومی و دیگر شاخه‌ها به اطلاعات اشاره شده است و معمولاً اشتباه به کار گرفته می‌شود. به نظرم این ایده اهمیت زیادی دارد. تلاش می‌کنم توضیح دهم چرا و ارتباط اطلاعات را با گرانش کوانتومی نشان خواهم داد.

پیش از هر حرف دیگری، اطلاعات چیست؟ کلمه «اطلاعات» در زبان روزمره معانی و کاربردهای متفاوتی دارد و این بی‌دقتی در به کار بردن کلمه در زبان علمی هم ابهام ایجاد کرده است. با وجود این، در سال ۱۹۴۸ ریاضی‌دان و مهندس آمریکایی، کلود شانون (۱۷۶)، مفهوم علمی اطلاعات را به روشنی تعریف کرد که بسیار هم ساده است: اطلاعات تعداد جایگزین‌های ممکن یک چیز است. برای مثال اگر یک تاس بیندازیم، روی یکی از شش وجه فرود می‌آید. اگر ببینیم روی یکی از این شش وجه فرود آمده است، اندازه اطلاعاتمان $N = 6$ است، چون شش جایگزین ممکن است. اگر روز تولد شما را ندانم، ۳۶۵ احتمال مختلف وجود دارد. وقتی تاریخ را به من بگویید، اطلاعات $N = 365$ را دارم و به همین ترتیب.

دانشمندان به جای تعداد جایگزین‌های N اطلاعات را با کمیتی به اسم S ، مخفف «اطلاعات شنون»، می‌سنجند. S لگاریتم پایهٔ دوم N است: $S = \log_2 N$. مزیت استفاده از لگاریتم این است که واحد سنجش $S = 1$ بر $N = 2$ منطبق است (چون $\log_2 2 = 1$)

و در نتیجه واحد اطلاعات کمینهٔ تعداد جایگزین‌هاست: انتخاب بین دو امکان. این واحد سنجش را «بیت» می‌نامند. وقتی می‌دانم گردانهٔ رولت به یک عدد قرمز ختم شده است و نه عدد سیاه، یک بیت اطلاعات دارم؛ وقتی می‌دانم یک عدد قرمز و زوج آمده است، دو بیت اطلاعات دارم؛ وقتی می‌دانیم یک عدد زوج قرمز «ناقص» (در اصطلاح رولت عدد هجده یا پایین‌تر) برنده می‌شود، سه بیت دارم. دو بیت اطلاعات مربوط به چهار جایگزین است (زوج قرمز، فرد قرمز، زوج سیاه، فرد سیاه). سه بیت اطلاعات مربوط به هشت جایگزین است و به همین ترتیب. (۱۷۷)

یک نکتهٔ کلیدی این است که اطلاعات می‌تواند در جای خاصی قرار داشته باشد. برای مثال فرض کنید شما تویی در دست دارید که می‌تواند سیاه یا سفید باشد. فرض کنید من هم یک توپ دارم که می‌تواند سیاه یا سفید باشد. دو احتمال از طرف من ممکن است و دو احتمال از طرف شما. تعداد کل اطلاعات چهار است (2×2): سفید - سفید؛ سفید - سیاه؛ سیاه - سفید و سیاه - سیاه. حالا فرض کنید به هر نحوی می‌دانیم دو توپ رنگ متفاوتی دارند (برای مثال وقتی دو توپ را از جعبه‌ای برداشته‌ایم که فقط یک توپ سفید و یک توپ سیاه داشته است). حالا تعداد کل جایگزین‌ها تنها ۲ است (سفید - سیاه یا سیاه - سفید)، حتی اگر تعداد اطلاعات هم برای من و هم برای شما دو باشد. توجه کنید در این موقعیت چیز عجیبی اتفاق می‌افتد: اگر به توپ خودتان نگاه کنید، رنگ توپ من را هم می‌دانید. در این حالت می‌گوییم رنگ دو توپ همبسته است، یعنی با هم پیوند دارند. به عبارتی توپ من دربارهٔ توپ شما «اطلاعات دارد» (و برعکس).

در موردش فکر کنید، در زندگی هنگام برقراری ارتباط دقیقاً همین اتفاق می‌افتد: برای مثال وقتی به شما تلفن می‌زنم، می‌دانم اگر طرف من زنگ بخورد تلفن شما هم صدا خواهد داد. صدای دو طرف، مثل رنگ توپ‌ها، با یکدیگر ارتباط دارند.

این مثال اتفاقی انتخاب نشده است: شنون که نظریهٔ اطلاعات را ابداع کرد در یک شرکت تلفن کار می‌کرد و دنبال راهی بود که بفهمد یک خط تلفن دقیقاً چقدر ظرفیت «حمل» دارد. اما یک خط تلفن چه حمل می‌کند؟ اطلاعات. ظرفیت تمایز بین جایگزین‌های مختلف. شنون به این

دلیل اطلاعات را تعریف کرد.

چرا مفهوم اطلاعات برای درک جهان مفید یا شاید حتی ضروری است؟ به یک دلیل ظریف: چون توانایی ارتباط بین دو سیستم فیزیکی را می‌سازد. بگذارید برای آخرین بار به اتم‌های دموکریت بازگردیم. جهانی را فرض کنید که از دریای بی‌پایان اتم‌هایی ساخته شده است که می‌جهند، یکدیگر را جذب می‌کنند و به هم می‌چسبند. همین. چیزی را جا نینداخته‌ایم؟

افلاطون و ارسطو اصرار داشتند چیزی جا افتاده است؛ فکر می‌کردند فرم چیزها موضوعی اضافه بود که برای درک جهان باید به ماده سازنده اشیا افزوده می‌شد. در نظر افلاطون فرم‌ها وجود مستقلی دارند و در جهانی ماورایی و ایده‌آل فرم‌ها هستند، در عالم «مُثُل». ایده یک اسب پیش از هر اسب واقعی و مستقل از هر اسب واقعی وجود دارد. در نظر افلاطون یک اسب واقعی تنها سایه کم‌رنگی از ایده یک اسب است. اتم‌هایی که اسب را می‌سازند اهمیت زیادی ندارند: «اسب بودن»، فرم انتزاعی آن، مهم است. ارسطو کمی واقع‌بین‌تر بود، اما در نظر او هم نمی‌توان فرم را به ماده تقلیل داد. در یک مجسمه چیزی بیش از سنگ سازنده آن وجود دارد. ارسطو این چیز بیشتر را فرم می‌داند. این موضوع اساس انتقاد از ماده‌گرایی دموکریت در دوران باستان است. هنوز هم انتقاد مشابهی به ماده‌گرایی او وارد است.

اما آیا واقعاً دموکریت می‌گفت می‌توان همه چیز را به اتم‌ها تقلیل داد؟ بگذارید کمی دقیق‌تر نگاه کنیم. دموکریت می‌گوید وقتی اتم‌ها ترکیب می‌شوند شکل، چینش در ساختار و نحوه ترکیب آن‌ها مهم است. او حروف الفبا را مثال می‌زند: تنها بیست و چند حرف الفبا وجود دارد، اما به قول خودش «می‌توان آن‌ها را به حالت‌های مختلفی چید تا کمدی نوشت یا تراژدی، داستان‌های مضحک نوشت یا اشعار حماسی».

در این ایده چیزی بیش از اتم‌ها وجود دارد: مهم شیوه ترکیب آن‌ها و ارتباطشان با یکدیگر است. اما در دنیایی که جز اتم‌ها هیچ وجود ندارد، نحوه چینش آن‌ها چه اهمیتی ممکن است داشته باشد؟

اگر اتم‌ها هم نوعی الفبا باشند، چه کسی می‌تواند عبارت‌هایی را که با این الفبا نوشته شده است، بخواند؟

پاسخ زیرکانه است: شیوه چینش اتم‌ها با شیوه چینش دیگر اتم‌ها همبسته است. در نتیجه، یک مجموعه اتم می‌تواند راجع به مجموعه

دیگری از اتم‌ها «اطلاعات» داشته باشد. «اطلاعات» همان معنای فنی و دقیقی را دارد که در بالا ذکر شد.

در جهان فیزیکی این اتفاق به دفعات، در هر لحظه و هر مکان رخ می‌دهد: نوری که به چشم ما می‌رسد، راجع به اجسامی که از آن‌ها گذر کرده است، اطلاعات دارد؛ رنگ دریا راجع به رنگ آسمان بالایش اطلاعات دارد؛ یک سلول راجع به ویروسی که به آن حمله می‌کند، اطلاعات دارد؛ یک موجود زنده جدید اطلاعات بسیاری دارد، چون با والدین و گونه‌اش همبستگی دارد؛ و شما خواننده عزیز، وقتی این سطور را می‌خوانید راجع به اندیشه من موقع نوشتن آن‌ها، یعنی رخدادهای ذهن من موقع نوشتن این متن، اطلاعات دریافت می‌کنید. آنچه در اتم‌های مغز شما رخ می‌دهد دیگر مستقل از آنچه در اتم‌های مغز من اتفاق می‌افتد، نیست: با هم ارتباط برقرار می‌کنیم.

از این رو دنیا تنها شبکه‌ای از اتم‌هایی که به هم برخورد می‌کنند، نیست: شبکه‌ای از همبستگی‌های بین مجموعه اتم‌ها، شبکه‌ای از اطلاعات متقابل حقیقی بین سیستم‌های فیزیکی است.

هیچ چیز معنوی یا آرمان‌گرایانه‌ای در این حرف‌ها وجود ندارد؛ چیزی نیست جز به‌کارگیری ایده شنون که می‌توان جایگزین‌ها را شمرد. این ایده‌ها به اندازه سنگ‌های رشته‌کوه دولومیت، وزوز زنبورها و موج‌های دریا بخشی از همین جهان است.

وقتی شبکه اطلاعات متقابل موجود در جهان را بفهمیم، طبیعی است به دنبال استفاده از این گنج برای توصیف جهان باشیم. بیایید با یکی از جنبه‌های طبیعت که از پایان قرن نوزدهم به خوبی شناخته شد، شروع کنیم: گرما. گرما چیست؟ وقتی می‌گوییم چیزی گرم است چه معنایی دارد؟ چرا یک فنجان چای داغ جوشان به جای گرم‌تر شدن، سرد می‌شود؟

دانشمند اتریشی، لودویگ بولتسمان، پایه‌گذار مکانیک آماری، نخستین بار چرایی آن را فهمید. (۱۷۸) گرما حرکت تصادفی و میکروسکوپی مولکول‌هاست: هرچه چای داغ‌تر باشد، حرکت مولکول‌ها سریع‌تر می‌شود. چرا سرد می‌شود؟ بولتسمان جسورانه فرضیه‌ای باشکوه ارائه کرد: چون تعداد حالت‌های ممکن در مولکول‌های چای داغ و هوای سرد از تعداد حالت‌های ممکن در چای سرد و هوای کمی گرم‌تر کمتر است. این ترکیب از موقعیتی با حالت‌های کمتر به موقعیتی با حالت‌های بیشتر می‌رود. چای نمی‌تواند خود را داغ کند، چون نمی‌توان اطلاعات را به‌خودی‌خود زیاد کرد.

بیشتر توضیح می‌دهم. مولکول‌های چای بسیار زیاد و بسیار ریزند و ما از نحوه دقیق حرکاتشان اطلاع نداریم. در نتیجه کمبود اطلاعات داریم. این کمبود اطلاعات — یا اطلاعات ناقص — را می‌توان محاسبه کرد. (بولتسمان تعداد حالت‌های مجزای ممکن را برای مولکول‌ها حساب کرد. این تعداد به دما بستگی دارد.) وقتی چای خنک می‌شود، کمی از انرژی‌اش وارد هوای اطراف می‌شود؛ در نتیجه مولکول‌های چای آرام‌تر و مولکول‌های هوا سریع‌تر حرکت می‌کنند. اگر کمبود اطلاعاتتان را محاسبه کنید، می‌بینید این کمبود زیاد شده است. اگر در عوض چای از هوای سردتر گرما می‌گرفت، کمبود اطلاعات کاهش می‌یافت. اما اطلاعات نمی‌تواند از ناکجا پیدا شود. نمی‌تواند خودبه‌خود زیاد، شود، چون اگر چیزی را نمی‌دانیم، خبر نمی‌دانیم! بنابراین چای نمی‌تواند در تماس با هوای سرد خود را گرم کند. جادویی به نظر می‌آید، اما درست است: بر پایه این مشاهده که اطلاعات نمی‌تواند آزادانه زیاد شود، می‌توانیم رفتار گرما را پیش‌بینی کنیم!

کسی بولتسمان را جدی نگرفت. او در پنجاه‌وشش‌سالگی در اقامتگاه دوئینو (۱۷۹) نزدیک شهر تریسته (۱۸۰)، خودکشی کرد. امروزه او از نوابغ فیزیک به شمار می‌آید. روی مقبره‌اش این فرمول نقش بسته است:

$$S = k \log W$$

که (کمبود) اطلاعات را بر حسب لگاریتم تعداد جایگزین‌ها بیان می‌کند، همان ایده کلیدی شنون. بولتسمان یادآور شد این مقدار با آنتروپی‌ای که در ترمودینامیک استفاده می‌شود، تطابق دارد. آنتروپی همان «کمبود اطلاعات» است، یعنی اطلاعات با یک علامت منفی. مقدار کل آنتروپی فقط می‌تواند زیاد شود، چون اطلاعات فقط می‌تواند کم شود. (۱۸۱)

امروزه، عموم فیزیک‌دانان پذیرفته‌اند که اطلاعات می‌تواند ابزاری مفهومی برای روشن ساختن ماهیت گرما باشد. ایده جسورانه‌تری که نظریه‌پردازهای بسیاری از آن دفاع می‌کنند این است که مفهوم اطلاعات می‌تواند حتی در جوانب اسرارآمیز مکانیک کوانتومی، که در فصل ۵ بیان شد، هم به کار بیاید. به یاد داشته باشید که یکی از نکات کلیدی مکانیک کوانتومی دقیقاً محدود بودن اطلاعات است. در مکانیک کلاسیک تعداد نتایج

جایگزین که از اندازه‌گیری سیستمی فیزیکی به دست می‌آوریم (۱۸۲)، بی‌نهایت است؛ اما به لطف نظریه کوانتومی فهمیده‌ایم که در حقیقت این اطلاعات محدود است. مکانیک کوانتومی را می‌توان به عنوان کشف محدود بودن همیشگی اطلاعات در طبیعت تفسیر کرد. در واقع همان‌طور که در ادامه توضیح داده می‌شود، تمام ساختار مکانیک کوانتومی را می‌توان در چهارچوب اطلاعات خواند و فهمید. یک سیستم فیزیکی تنها در برهم‌کنش با سیستم دیگر خود را به نمایش می‌گذارد. در نتیجه یک سیستم فیزیکی همیشه نسبت به سیستم فیزیکی دیگری که با آن برهم‌کنش دارد، توصیف می‌شود. هرگونه توصیف یک سیستم به معنای توصیف اطلاعاتی است که آن سیستم از سیستمی دیگر دارد، یعنی همبستگی بین دو سیستم. اگر مکانیک کوانتومی را به عنوان توصیف اطلاعاتی که سیستم‌های فیزیکی راجع به یکدیگر دارند تفسیر کنیم، اسرار آن روشن‌تر می‌شود. در نهایت توصیف یک سیستم چیزی نیست جز راهی برای خلاصه کردن تمام برهم‌کنش‌های قبلی با آن و استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی اثر برهم‌کنش‌های آینده.

کل ساختار صوری مکانیک کوانتومی در مقیاس بزرگ را می‌توان با دو اصل ساده بیان کرد: (۱)
۱. اطلاعات مربوط به هر سیستم فیزیکی محدود است.

۲. همیشه می‌توان اطلاعات تازه‌ای از سیستم فیزیکی به دست آورد.

در اینجا، «اطلاعات مربوط» یعنی اطلاعات مرتبط با نتایج برهم‌کنش‌های پیشین با یک سیستم مشخص که در اختیار داریم: اطلاعاتی که ما را قادر می‌سازد پیش‌بینی کنیم نتیجه برهم‌کنش‌های آینده‌مان با این سیستم چه خواهد بود. اولین اصل ساختار ذره‌ای مکانیک کوانتومی را تعیین می‌کند: اینکه تعداد محدودی از حالت‌های ممکن وجود دارد. دومین اصل بیان‌کننده تعیین‌ناپذیری آن است: اینکه همیشه چیزی غیرقابل‌پیش‌بینی وجود دارد که می‌توانیم از آن اطلاعات تازه به دست بیاوریم. وقتی اطلاعات تازه‌ای از سیستم به دست می‌آوریم، مجموع اطلاعات مربوط نمی‌تواند به طور نامحدودی زیاد شود (به خاطر اصل اول) و بخشی از اطلاعات پیشین نامربوط می‌شود، یعنی دیگر هیچ اثری روی پیش‌بینی‌های آینده نمی‌گذارد. در مکانیک کوانتومی وقتی با یک سیستم برهم‌کنش داریم نه تنها اطلاعات

جدیدی به دست می‌آوریم، بلکه برخی از اطلاعات مربوط به سیستم را هم «خنتی» می‌کنیم. (۱۸۳)

تمام ساختار صوری مکانیک کوانتومی در مقیاس بزرگ از این دو اصل ساده حاصل می‌شود. در نتیجه این نظریه می‌تواند به طرز غافلگیرکننده‌ای به زبان اطلاعات بیان شود.

جان ویلر، پدر گرانش کوانتومی، نخستین کسی بود که متوجه شد مفهوم اطلاعات برای فهم واقعیت کوانتومی اساسی است. ویلر عبارت «آن از بیت» را ابداع کرد تا این ایده را که «اطلاعات همه‌چیز است» بیان کند.

سپس، اطلاعات در چهارچوب گرانش کوانتومی دوباره ظاهر می‌شود. به یاد داشته باشید: مساحت هر سطح را اسپین حلقه‌هایی که با آن سطح تقاطع دارند، تعیین می‌کنند. این اسپین‌ها کمیت‌هایی گسسته‌اند و هرکدام در تعیین مساحت نقش دارند.

سطحی با مساحت ثابت می‌تواند به شیوه‌های مختلفی، مثلاً به N روش متفاوت، از این کوانتای بنیادی مساحت ساخته شود. اگر مساحت سطح را بدانید، اما درست ندانید که کوانتای فضا چگونه توزیع شده‌اند در مورد سطح کمبود اطلاعات دارید. یکی از راه‌های محاسبه گرمای سیاه‌چاله‌ها این است: کوانتای مساحت یک سیاه‌چاله که در سطحی با مساحت معین محصور شده است، N توزیع ممکن می‌تواند داشته باشد. در نتیجه می‌توانیم به یک سیاه‌چاله کمیت کمبود اطلاعات، یعنی آنتروپی، را نسبت دهیم.

در نتیجه مقدار اطلاعات مربوط به یک سیاه‌چاله مستقیماً با سطح A سیاه‌چاله مرتبط است: هرچه سیاه‌چاله بزرگ‌تر باشد، مقدار کمبود اطلاعات بیشتر است.

وقتی اطلاعات وارد سیاه‌چاله می‌شود دیگر از بیرون قابل‌بازبایی نیست. اما اطلاعاتی که وارد سیاه‌چاله می‌شود با خود انرژی دارد که باعث می‌شود سیاه‌چاله بزرگ‌تر شود و مساحتش افزایش یابد. از بیرون که نگاه کنیم، اطلاعاتی که اکنون در سیاه‌چاله گم شده به عنوان آنتروپی مربوط به مساحت سیاه‌چاله ظاهر می‌شود. یاکوب بکنشتاین، فیزیک‌دان اسرائیلی، نخستین شخصی بود که چیزی مشابه این به ذهنش خطور کرد.

اما این وضعیت بسیار مبهم است، چون همان‌طور که در فصل قبل دیده‌ایم سیاه‌چاله‌ها تابش‌های گرمایی دارند، بسیار آهسته تبخیر شده

و کوچک و کوچک‌تر می‌شوند تا احتمالاً ناپدید شده و جزئی از اقیانوس سیاه‌چاله‌های میکروسکوپی شوند که فضا را در مقیاس پلانک می‌سازند. اطلاعات وارد شده به سیاه‌چاله‌ای در حال کوچک شدن به کجا می‌رود؟ فیزیک‌دانان نظری مشغول بحث پیرامون این پرسش‌اند و هنوز هیچ‌کس پاسخ روشنی ارائه نداده است.

به نظرم مجموع این‌ها نشان می‌دهد برای اینکه قاعدهٔ اساسی جهان را بفهمیم نه فقط دو نظریه، بلکه باید سه نظریهٔ اساسی را ترکیب کنیم: نه فقط نسبیت عام و مکانیک کوانتومی، بلکه نظریهٔ گرما، یعنی مکانیک آماری و ترمودینامیک که می‌توانیم آن را نظریهٔ اطلاعات هم بدانیم. اما ترمودینامیک نسبیت عام، یعنی مکانیک آماری کوانتای فضا، هنوز در مراحل ابتدایی خود به سر می‌برد. هنوز همه‌چیز آشفته است و چیزهای بسیاری هست که هنوز نفهمیده‌ایم.

این‌ها ما را به آخرین ایده‌ای می‌رساند که می‌خواهم در این کتاب بیان کنم: زمان گرمایی.

زمان گرمایی

مسئله اصلی ایده زمان گرمایی ساده است. در فصل ۷ توضیح دادم که استفاده از مفهوم زمان برای توصیف فیزیک ضروری نیست. بهتر است که به کلی زمان را فراموش کرد. در سطح بنیادی فیزیک زمان هیچ نقشی ندارد. وقتی این را درک کنیم نوشتن معادلات گرانش کوانتومی ساده می‌شود.

بسیاری از مفاهیم عادی وجود دارند که دیگر در معادلات بنیادی جهان نقشی ندارند، برای مثال مفاهیم «بالا» و «پایین» یا «سرد» و «گرم». بنابراین کنار گذاشتن مفاهیم عامیانه از فیزیک بنیادی چندان عجیب نیست. اما هنگامی که این ایده را بپذیریم واضح است که مسئله دیگری پیش می‌آید. چطور می‌توانیم مفاهیم تجربه روزمره‌مان را بازسازی کنیم؟ آن‌ها چطور در موقعیت خاصمان پدیدار می‌شوند؟

مثلاً مفاهیم «بالا» و «پایین» وارد معادلات نیوتن نمی‌شوند، اما معنی آن‌ها را در طرحی بدون بالا و پایین مطلق می‌فهمیم. «بالا» و «پایین» در نزدیکی جرمی بزرگ، مانند یک سیاره، معنی پیدا می‌کنند. «پایین» یعنی جهتی که کشش گرانشی جسم بزرگ و نزدیک به آن سو وارد می‌شود؛ «بالا» جهت مخالف آن است. «گرم» و «سرد» هم به همین ترتیب؛ در سطح میکروسکوپی چیزهای «گرم» یا «سرد» نداریم، اما وقتی سازه‌های میکروسکوپی زیادی را در کنار هم بگذاریم و به طور میانگین آن‌ها را توصیف کنیم، مفهوم «گرما» ظاهر می‌شود: وقتی میانگین سرعت ذرات سازنده جسمی زیاد شود، آن جسم گرم می‌شود. می‌توانیم معنی «بالا» یا «داغ» را در موقعیت‌های بخصوصی بفهمیم: برای مثال وقتی جرمی در نزدیکی وجود داشته باشد یا اینکه با میانگین تعداد زیادی مولکول سروکار داشته باشیم و به همین ترتیب.

باید چیزی مشابه در مورد «زمان» وجود داشته باشد. مفهوم زمان در سطح بنیادی نقشی ندارد، اما در زندگی روزمره ما، درست مانند «بالا» و «گرم»، نقش بسزایی دارد. اگر زمان در توصیف بنیادی جهان نقشی ندارد، پس «گذر زمان» چه معنایی می‌تواند داشته باشد؟

پاسخ ساده است. خاستگاه زمان شبیه خاستگاه گرماست: از میانگین تعداد زیادی متغیر میکروسکوپی به دست می‌آید. بیایید دقیق‌تر ببینیم.

وجود ارتباط بین زمان و دما ایده‌ای کهن و تکراری است. فکرش را که کنید، می‌بینید تمام پدیده‌هایی که گذر زمان را آشکار می‌کنند

به دما هم مربوط می‌شوند. ویژگی برجستهٔ زمان این است که جلو می‌رود و به عقب برنمی‌گردد، یعنی پدیده‌های برگشت‌ناپذیر وجود دارند. وقایع مکانیکی — آن‌ها که به گرما ربطی ندارند — برگشت‌پذیرند. اگر از آن‌ها فیلم بگیریم و فیلم را از آخر به اول ببینیم، چیزی واقع‌گرایانه را مشاهده می‌کنیم. اگر از نوسان یک آونگ یا از پرتاب سنگی به بالا و سقوطش فیلم بگیریم و سپس فیلم را از آخر به اول نگاه کنیم، نوسان معقول آونگ یا بالا رفتن و سقوط سنگ را می‌بینیم.

وقتی سنگ به زمین می‌رسد متوقف می‌شود. شاید مخالفت کنید و بگویید: وقتی فیلم را از آخر می‌بینیم سنگ به‌خودی‌خود از زمین بلند می‌شود و این ممکن نیست. اما وقتی سنگ به زمین می‌رسد و متوقف می‌شود، انرژی‌اش کجا می‌رود؟ زمین را گرم می‌کند! درست در لحظه‌ای که گرما تولید می‌شود، فرایند برگشت‌ناپذیر می‌شود. گذشته از آینده متمایز می‌شود. همیشه گرما و تنها گرما گذشته را از آینده تفکیک می‌کند.

این مسئله جهان‌شمول است. شمعی سوزان تبدیل به دود می‌شود — دود نمی‌تواند تبدیل به شمع شود — و شمع گرما تولید می‌کند. یک فنجان چای داغ سرد می‌شود و نه گرم: گرما توزیع می‌کند. ما زندگی می‌کنیم و پیر می‌شویم: گرما تولید می‌کنیم. دوچرخهٔ قدیمی‌مان در گذر زمان کهنه می‌شود: از طریق اصطکاک گرما تولید می‌کند. منظومهٔ شمسی را در نظر بگیرید. در برآورد اولیه مانند یک سیستم مکانیکی عظیم به نظر می‌رسد که همواره به دور خود می‌گردد و هیچ‌گاه تغییری نمی‌کند. هیچ گرمایی تولید نمی‌کند و در واقع اگر فیلمش را از آخر به اول می‌دیدید، نکتهٔ عجیبی نمی‌دیدید. اما اگر دقیق‌تر نگاه کنیم، پدیده‌های برگشت‌ناپذیر هم دارد: خورشید هیدروژن قابل‌احتراقش را می‌سوزاند و در نهایت آن را تمام می‌کند و خاموش می‌شود: خورشید هم پیرتر می‌شود و در واقع گرما تولید می‌کند. در ظاهر ماه هم به طور ثابت دور زمین می‌چرخد و برابر با حالت قبلی‌اش است، درحالی‌که در واقعیت به آهستگی از ما دور می‌شود، زیرا ماه باعث جزرومد می‌شود و جزرومد دریا را کمی گرم می‌کند و به این ترتیب زمین با ماه انرژی تبادل می‌کند. هر پدیده‌ای که گذر زمان را تصدیق می‌کند در نظر بگیرید، از طریق گرماسط که پدیده‌ها این کار را می‌کنند. بدون گرما زمان جهت مرجحی ندارد.

اما گرما نامی است که ما بر روی میانگین متغیرهای بسیار گذاشته‌ایم.

ایدهٔ زمان گرمایی این مشاهده را برعکس می‌کند؛ یعنی به جای اینکه بپرسد زمان چطور باعث اتلاف گرما می‌شود، می‌پرسد گرما چطور

زمان را تولید می‌کند.

به لطف بولتسمان می‌دانیم مفهوم گرما از برهم‌کنش ما با میانگین‌ها برمی‌آید. ایده زمان گرمایی این است که مفهوم زمان هم از برهم‌کنش ما با میانگین تعداد زیادی متغیر برمی‌آید. (۱۸۴)

تا وقتی که توصیف کامل یک سیستم را داشته باشیم تمام متغیرها جایگاه یکسانی خواهند داشت؛ هیچ‌کدام به عنوان متغیر زمان عمل نمی‌کنند؛ یعنی هیچ‌کدام با پدیده‌های برگشت‌ناپذیر همبستگی ندارند. اما به محض اینکه سیستم را به صورت میانگین متغیرهای بسیار توصیف کنیم، متغیر مرجحی داریم که مانند زمان عادی رفتار می‌کند. زمانی که گرما طی آن اتلاف می‌شود. زمانی که روزمره تجربه‌اش می‌کنیم.

در نتیجه زمان از سازه‌های بنیادی جهان نیست، اما به این دلیل ظاهر می‌شود که دنیا عظیم است و ما سیستم‌های کوچکی در دنیا هستیم که تنها با متغیرهای ماکروسکوپی کار می‌کنیم که از میانگین بی‌شمار متغیر میکروسکوپی کوچک به دست می‌آیند. ما در زندگی روزمره هیچ‌گاه یک ذره بنیادی منفرد یا یک کوانتوم منفرد فضا را نمی‌بینیم. ما سنگ، کوه و صورت دوستانمان را می‌بینیم — هرکدام از این‌هایی که می‌بینیم حاصل هزاران جزء بنیادی است. ما همیشه با میانگین‌ها همبستگی داریم. میانگین‌ها عملکردی درست مانند میانگین دارند: گرما ساطع می‌کنند و ذاتاً زمان تولید می‌کنند.

پذیرش این ایده دشوار است، چون اندیشیدن به جهان بدون زمان و پدیدار شدن آن به صورت تقریبی برای ما دشوار است. ما عادت داریم واقعیت جهان را در زمان حال ببینیم. ما موجوداتی هستیم که در زمان زندگی می‌کنیم: در زمان ساکنیم و از آن تغذیه می‌کنیم. ما یکی از آثار این حالت گذرا هستیم که از میانگین متغیرهای میکروسکوپی به دست می‌آید. اما محدودیت شهودمان نباید ما را به اشتباه بیندازد. فهم بهتر جهان معمولاً مستلزم حرکت خلاف شهود است. اگر این‌طور نبود، فهم جهان آسان می‌شد.

زمان حاصل چشم‌پوشی ما از حالت‌های فیزیکی میکروسکوپی چیزهاست. زمان اطلاعاتی است که در اختیار نداریم.

زمان نادانی ماست.

واقعیت و اطلاعات

چرا اطلاعات در این‌ها نقش اساسی بازی می‌کند؟ شاید چون نباید چیزی را که از یک سیستم می‌دانیم با وضعیت مطلق همان سیستم اشتباه بگیریم. چیزی که می‌دانیم مربوط به رابطه خودمان با سیستم است. دانش ذاتاً نسبی است؛ همان‌قدر به ابژه بستگی دارد که به سوژه. مفهوم «حالت» یک سیستم به طور صریح یا ضمنی به سیستم دیگری اشاره می‌کند. مکانیک کلاسیک این تصور غلط را ایجاد کرد که می‌توانیم بدون در نظر گرفتن این حقیقت ساده سر کنیم و دست‌کم از لحاظ تئوری به بینشی مستقل از مشاهده‌کننده دست یابیم. اما در پایان، پیشرفت در زمینه فیزیک نشان داده که چنین چیزی غیرممکن است.

دقت کنید: وقتی می‌گوییم در مورد دمای یک فنجان چای «اطلاعات داریم» یا از سرعت تک‌تک مولکول‌ها «اطلاعات نداریم»، از حالات ذهنی یا ایده‌های انتزاعی سخن نمی‌گوییم. تنها می‌گوییم قوانین فیزیک بین ما و دما (برای مثال با نگاه کردن به یک دماسنج) همبستگی تعیین می‌کند، اما بین ما و سرعت تک‌تک مولکول‌ها همبستگی تعیین نمی‌کند. این امر همان مفهوم اطلاعات است که در ابتدای این فصل گفتیم: توپ سفید در دست شما «حاوی اطلاعات» در مورد سیاه بودن توپ من است. ما با واقعیت‌های فیزیکی سروکار داریم، نه مفاهیم ذهنی. از این لحاظ توپ حاوی اطلاعات است، حتی اگر حالت ذهنی نداشته باشد. همان‌طور که یک حافظه یواس‌بی حاوی اطلاعات است (عدد گیگابایت چاپ‌شده روی دستگاه نشان می‌دهد چه مقدار اطلاعات را می‌تواند ذخیره کند) حتی اگر دستگاه حافظه یواس‌بی نتواند فکر کند. اطلاعات به این معنا — همبستگی بین حالت‌های سیستم‌های مختلف — جهان‌شمول است.

به نظرم برای فهم واقعیت باید در نظر داشته باشیم که واقعیت این شبکه از روابط و اطلاعات متقابل است که جهان را در هم می‌تند. ما واقعیت اطرافمان را به اجسام تقلیل می‌دهیم. اما واقعیت از اجسام جداگانه ساخته نشده است. یک شار متغیر است. موجی را در اقیانوس تصور کنید. کجا پایان می‌یابد؟ از کجا شروع می‌شود؟ کوه‌ها را در نظر بگیرید. آغاز کوه کجاست؟ پایانش کجاست؟ تا چه عمقی زیر سطح زمین ادامه دارد؟ این پرسش‌ها چندان بامعنا نیستند، چون موج و کوه به‌خودی‌خود جسم نیستند؛ چیزهایی‌اند که ما با تکه‌تکه کردن جهان، برای اینکه راحت‌تر در موردشان سخن بگوییم، تعریف کرده‌ایم. این مرزبندی‌ها دلخواه، قراردادی و برای راحتی‌اند: ۴۴

بیشتر به ما (به عنوان سیستم‌های فیزیکی) بستگی دارند تا به امواج یا کوهستان. راهی برای سامان‌دهی اطلاعاتی‌اند که در اختیار داریم یا دقیق‌تر، اطلاعاتی را که در اختیار داریم شکل می‌دهند.

اگر درست در نظر گرفته شود این مسئله برای تمام چیزها، از جمله ارگانیسم‌های زنده صادق است. به این دلیل بی‌معناست اگر بپرسیم ناخن گرفته‌شده هنوز جزئی از «من» است یا «غیرمن» شده؛ یا موی گربه که روی مبل به جا مانده هنوز بخشی از گربه است یا نه؛ یا درست در چه زمان زندگی یک بچه آغاز می‌شود. زندگی بچه وقتی آغاز می‌شود که کسی نخستین بار، مدت‌ها پیش از شکل گرفتن نطفه‌اش، در موردش خیال‌بافی می‌کند یا وقتی اولین بار تصورش از خودش شکل می‌گیرد یا وقتی برای نخستین بار نفس می‌کشد یا وقتی نامش را یاد می‌گیرد یا هر چیز قراردادی دیگر: همه آن‌ها واقع‌بینانه، اما قراردادی‌اند. برای اندیشیدن در مورد یک موضوع و آشنا کردن خودمان با پیچیدگی واقعیت شیوه‌های مختلفی وجود دارد.

ارگانیسم زنده سیستمی است که در برهم‌کنش بی‌وقفه با جهان خارج مدام خود را بازسازی می‌کند تا بتواند باقی بماند. از این ارگانیسم‌ها تنها آن‌هایی زنده می‌مانند که این کار را به نحو بهتری انجام می‌دهند و در نتیجه ارگانیسم‌های زنده ویژگی‌هایی از خود بروز می‌دهند که در بقا به کارشان آمده است. به همین دلیل این ارگانیسم‌ها تفسیرپذیرند و ما آن‌ها را در قالب قصد و هدف تفسیرشان می‌کنیم. بنابراین شکل نهایی جهان زیستی حاصل انتخاب فرم‌های پیچیده‌ای است که در بقا موفق‌تر بوده‌اند (کشف بزرگ داروین این است). اما راه زنده ماندن در محیطی که دائم تغییر می‌کند مدیریت بهتر همبستگی‌ها با جهان خارج، یعنی اطلاعات، است؛ جمع‌آوری، ذخیره، انتقال و پروبال دادن به اطلاعات. دی‌ان‌ای به این دلیل وجود دارد. همچنین سیستم‌های ایمنی، اندام‌های حسی، سیستم‌های عصبی، مغزهای پیچیده، زبان‌ها، کتاب‌ها، کتابخانه اسکندریه، کامپیوترها و ویکی‌پدیا. آن‌ها کارایی مدیریت اطلاعات — مدیریت همبستگی‌هایی که به بقا کمک می‌کنند — را به بالاترین میزان می‌رسانند.

مجسمه‌ای که ارسطو در قطعه‌ای از مرمر سیاه می‌بیند چیزی بیش از قطعه‌ای مرمر است: اما این فرمی انتزاعی مختص مجسمه نیست. چیزی است که در همبستگی‌های بین ذهن ارسطو (یا ما) و مرمر نهفته است، مرمر در رابطه با این امر اطلاعاتی دارد که برای ارسطو و ما

اهمیت دارد؛ چیزی است که راجع به یک دیسک‌پران، فیدئاس، ارسطو و مرمر است و در چینش‌های همبسته اتم‌های مجسمه و همبستگی بین این‌ها و هزاران چیز دیگر، بین ذهن ما و ذهن ارسطو، وجود دارد. این‌ها از یک دیسک‌پران سخن می‌گویند، همان‌طور که توپ سفید در دست شما می‌گوید توپ من سیاه است. وجود ما دقیقاً طوری است که این اطلاعات را مدیریت کنیم و به لطف چنین چیزی زنده بمانیم.

حتی از این بررسی مختصر هم معلوم می‌شود مفهوم اطلاعات در تلاشمان برای فهم جهان نقش کلیدی بازی می‌کند. از مخابرات تا اصول ابتدایی ژنتیک، از ترمودینامیک تا مکانیک کوانتومی و گرانش کوانتومی مفهوم اطلاعات به عنوان ابزاری برای فهم بهتر در حال پیش‌روی است. جهان را نباید به عنوان هیاهویی از مجموعه اتم‌ها در نظر گرفت، بلکه باید آن را بازی‌ای با آینه‌ها تلقی کرد که همبستگی بین ساختارهای بناشده با ترکیب‌های این اتم‌ها، اساس آن را به وجود آورده است.

همان‌طور که دموکریت گفت، تنها بحث این اتم‌ها نیست، بلکه نظم چینش آن‌ها مهم است. اتم‌ها مانند حروف الفبا هستند: الفبایی غیرعادی و چنان غنی که می‌تواند بخواند، بنویسد و حتی در مورد خودش فکر کند. ما اتم نیستیم: ما نظم چینش اتم‌هایی هستیم که می‌توانیم دیگر اتم‌ها و خودمان را منعکس کنیم.

دموکریت تعریف عجیبی از «انسان» ارائه داد: «انسان آن است که همه می‌شناسیم.»^(۲) در ابتدا احمقانه و پوچ به نظر می‌رسد، اما چنین نیست. سالومون لوریا (۱۸۵)، بزرگ‌ترین پژوهشگر دموکریت، اشاره می‌کند که این حرف دموکریت پیش‌پاافتاده نیست. ذات یک فرد ساختار درونی او نیست، بلکه شبکه برهم‌کنش‌های شخصی، خانوادگی و اجتماعی اوست که وی در آن‌ها وجود دارد. این‌ها ما را «می‌سازند» و از ما حفاظت می‌کنند. ما انسان‌ها آنیم که دیگران از ما می‌دانند که خودمان از خودمان می‌دانیم و آنچه دیگران در مورد دانشمان می‌دانند. ما گره‌های پیچیده‌ای در شبکه‌ای غنی از اطلاعات متقابلیم.

این‌هایی که تا به اینجا گفته‌ام هنوز یک نظریه نیستند، بلکه از نظر من مسیرهایی برای فهم بهتر جهان اطرافمان هستند که در آن‌ها قدم گذاشته‌ایم. چیزهای زیادی را هنوز درک نکرده‌ایم. در فصل پایانی راجع به این حرف می‌زنم.

حقیقت در اعماق نهفته است.

- دموکریت (۱)

برداشت خودم را از ماهیت چیزها با توجه به موضوعاتی که تا کنون شناخته‌ایم، توضیح داده‌ام. روند بهبود برخی از ایده‌های کلیدی فیزیک بنیادی را به طور خلاصه آورده‌ام و کشف‌های بزرگ فیزیک قرن بیستم را به همراه تصویر جهان که از پژوهش در زمینه گرانش کوانتومی حاصل شده است، شرح داده‌ام.

آیا از این‌ها مطمئنم؟ نه.

یکی از نخستین و زیباترین صفحات تاریخ علم قسمتی از فایدون افلاطون است که سقراط شکل زمین را وصف می‌کند.

سقراط می‌گوید «گمان می‌کند» زمین کروی است و دره‌های بزرگی دارد که مردم در آن‌ها زندگی می‌کنند. کمی سردرگم است، اما اساساً درست می‌گوید. می‌افزاید: «مطمئن نیستم.» ارزش این نوشته از تمام مطالب راجع به جاودانی روح که باقی مکالمه به آن اختصاص دارد، بیشتر است. این اثر کهن‌ترین کتاب در دسترس ماست که به وضوح در مورد حقیقت کروی بودن زمین سخن می‌گوید و مهم‌تر از آن افلاطون به روشنی هرچه تمام‌تر محدودیت‌های دانش زمان خود را می‌پذیرد. سقراط می‌گوید: «مطمئن نیستم.»

این آگاهی دقیق از نادانی خود مهم‌ترین نکته تفکر علمی است. به لطف آگاهی از محدودیت‌های دانشمان است که این‌قدر آموخته‌ایم. از تمام چیزهایی که می‌گوییم مطمئن نیستیم، همان‌طور که سقراط از ماهیت کروی زمین مطمئن نبود. ما در حال کاویدن مرزهای دانش خود هستیم.

آگاهی از محدودیت‌های دانش خود یعنی می‌دانیم ممکن است معلوم شود در اشتباه بوده‌ایم یا بی‌دقتی کرده‌ایم. تنها با در نظر داشتن این نکته که ممکن است باورهایمان اشتباه باشد می‌توانیم خود را از اندیشه‌های اشتباه رها کنیم و بیاموزیم. برای آموختن هرچیز

لازم است شهادت داشته باشیم که بپذیریم هرچه گمان می‌کنیم می‌دانیم، حتی عمیق‌ترین باورهایمان، ممکن است اشتباه یا لاف‌ساده‌انگارانه باشد: سایه‌های غار افلاطون.

علم از این فروتنی زاده می‌شود: کورکورانه اعتماد نکردن به دانش و شهود پیشینمان. باور نکردن هرچه دیگران می‌گویند. ایمان نداشتن به دانش گردآوری‌شدهٔ پدران و اجدادمان. اگر خیال کنیم اصول را می‌دانیم، اگر فکر کنیم همهٔ آن‌ها در کتابی نوشته شده‌اند یا بزرگان قبیله آن را می‌دانند هیچ نمی‌آموزیم. در قرن‌هایی که مردم به باورهایشان ایمان داشتند کمتر چیزی آموخته شد. اگر اینشتین، نیوتن و کوپرنیک به دانش پدرانشان اعتماد می‌کردند، هیچ‌گاه چیزی را زیر سؤال نمی‌بردند و دانشمان را پیش نمی‌بردند. اگر کسی شک نمی‌کرد، هنوز فرعون‌ها را می‌پرستیدیم و گمان می‌کردیم زمین در پشت لاک‌پشتی غول‌آسا است. همان‌طور که اینشتین نشان داد حتی کارآمدترین دانشمان هم، مانند چیزهایی که نیوتن یافت، ممکن است ساده‌انگارانه باشد.

معمولاً در انتقاد از علم می‌گویند: علم تظاهر می‌کند که می‌تواند همه‌چیز را توضیح دهد و برای هرچیزی پاسخی دارد. اتهام عجیبی است. همان‌طور که تمام پژوهشگران در آزمایشگاه‌های سراسر جهان می‌دانند علم یعنی تلاش روزانه برای عقب راندن مرزهای نادانی — و چیزهای بی‌شماری که هنوز نمی‌دانیم و نمی‌توانیم انجام دهیم. این با ادعای دانستن همه‌چیز تفاوت بسیاری دارد. نمی‌دانیم سال بعد در سرن چه ذره‌ای را خواهیم دید، تلسکوپ‌های بعدی‌مان چه چیزی را نشان خواهند داد یا کدام معادله طبیعت را درست توصیف می‌کند؛ نمی‌دانیم معادلاتمان را چگونه حل کنیم و گاهی حتی معنی این معادلات را نمی‌فهمیم؛ نمی‌دانیم نظریهٔ زیبایی که روی آن کار می‌کنیم درست است یا نه. نمی‌دانیم پیش از مه‌بانگ چه بوده است؛ از نحوهٔ عملکرد طوفان، باکتری، چشم، سلول‌های بدنمان یا فرایند تفکرمان آگاه نیستیم. دانشمند کسی است که با آگاهی عمیق از نادانی خود زندگی می‌کند و مستقیماً با محدودیت‌های بی‌شمار خود، از جمله محدودیت‌های دانش، در تماس است.

اما اگر از هیچ‌چیز مطمئن نیستیم، چگونه می‌توانیم به گفته‌های علم تکیه کنیم؟ پاسخ ساده است. علم به این خاطر قابل‌اعتماد نیست که پاسخ‌های قطعی در اختیارمان می‌گذارد، علم معتمد است، چون بهترین پاسخی را که فعلاً سراغ داریم به ما ارائه

می‌دهد. علم نهایت آگاهی‌مان از مسائل پیش‌رویمان است. علم دقیقاً به خاطر همین گستردگی و مدام زیر سؤال بردن دانش کنونی می‌تواند تضمین کند بهترین پاسخ موجود در حال حاضر را ارائه می‌دهد: اگر پاسخ بهتری پیدا کنید، پاسخ جدید علم خوانده می‌شود. اینکه اینشتین پاسخ‌هایی بهتر از نیوتن پیدا کرد ظرفیت علم را برای ارائه بهترین پاسخ زیر سؤال نبرد — برعکس — آن را تأیید کرد.

بدین ترتیب دلیل تکیه به پاسخ‌های علم قطعی بودن آن‌ها نیست، آن‌ها قابل‌اعتمادند، چون قطعی نیستند. به خاطر این قابل‌اعتمادند که بهترین پاسخ‌های موجود در حال حاضرند. به این خاطر بهترین پاسخ‌های موجودند که آن‌ها را قطعی نمی‌دانیم و به اصلاح هرچه بیشتر آن‌ها باور داریم، چون از نادانی خود آگاهیم می‌توانیم به علم اعتماد کنیم.

همین معتمد بودن برایمان کافی است و به قطعیت نیاز نداریم. قطعیت مطلق نداریم و هیچ‌گاه نخواهیم داشت — مگر اینکه زیر بار باور کورکورانه برویم. باورپذیرترین پاسخ‌ها را علم ارائه می‌دهد، چون علم جست‌وجو برای باورپذیرترین پاسخ‌هاست، نه ارائه پاسخ‌هایی که تظاهر می‌کنند پاسخ قطعی‌اند.

علم با اینکه ریشه در دانش پیشین دارد، یک ماجراجویی بر اساس تغییر مداوم است. داستانی که روایت کردم بیش از هزار سال قدمت دارد. شرح روایتی علمی است که به اندیشه‌های خوب بها داده، اما وقتی پاسخ بهتری پیدا شده در کنار گذاشتن ایده‌های قبلی درنگ نکرده است. ذات تفکر علمی نقادانه، سرکشانه و ناخرسند از مفاهیم قبلی است که حقیقت مطلق را مقدس می‌شمارد و به آن احترام می‌گذارد. جست‌وجوی حقیقت به قطعیت نیاز ندارد: به بی‌اعتمادی اساسی نسبت به قطعیت نیاز دارد.

نباید برای سخن کسانی که می‌گویند حقیقت را در اختیار دارند ارزشی قائل شد. به این دلیل علم و تفکر ماورایی همواره مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند. نه به این خاطر که علم ادعا می‌کند پاسخ‌های نهایی را دارد، بلکه دقیقاً برعکس: چون روش علمی به هرکسی که ادعا کند پاسخ‌های نهایی یا دسترسی مخصوص به حقایق را دارد، اعتماد نمی‌کند. این بی‌اعتمادی در برخی از قسمت‌های تفکر ماورایی قابل‌قبول نیست. هیچ‌چیز برای علم مزاحمتی ایجاد نمی‌کند: برخی از تفکرات ماورایی تفکر علمی را مزاحم می‌یابند.

پذیرش عدم قطعیت اساسی دانشمان به معنای پذیرفتن این است که همواره در نادانی و در نتیجه در اسرار زندگی می‌کنیم، یعنی بپذیریم

با پرسش‌هایی زندگی می‌کنیم که پاسخشان را نمی‌دانیم. شاید هنوز به پاسخ آن‌ها نرسیده‌ایم یا — کسی چه می‌داند؟ — شاید هرگز هم نرسیم. شاید زیستن با عدم قطعیت سخت باشد. برخی هر قطعیتی، حتی قطعیت بی‌اساس، را به عدم قطعیتی که از پذیرش شناخت محدودیت‌هایمان حاصل می‌شود، ترجیح می‌دهند. برخی به جای شجاعانه روبه‌رو شدن با عدم قطعیت ترجیح می‌دهند تنها به دلیل باور پیشینیان قبیله‌شان به یک داستان، آن را باور داشته باشند.

جهل می‌تواند ترسناک باشد. در این دنیا همیشه کسی پیدا می‌شود که ادعا می‌کند پاسخ‌های نهایی را می‌داند. دنیا پر از افرادی است که می‌گویند حقیقت را در اختیار دارند. آن را از اجدادشان به ارث برده‌اند؛ آن را در کتاب مقدس خوانده‌اند؛ آن را مستقیماً از خدا دریافت کرده‌اند؛ آن را در اعماق خود یافته‌اند. همیشه کسی هست که خود را سرچشمه حقیقت می‌داند، بی‌توجه به اینکه بسیاری دیگر نیز خود را سرچشمه حقیقتی می‌دانند که با حقیقت‌های دیگران متفاوت است.

به آن‌ها که ترجیح می‌دهند باور کنند خرده نمی‌گیرم: همه آزادیم هرچه را می‌خواهیم باور کنیم. من از طرف خودم ترجیح می‌دهم با جهل روبه‌رو شوم، آن را بپذیرم و تلاش کنم کمی فراتر از آن را ببینم: تلاش کنم چیزهایی که ظرفیتش را دارم، بفهمم. نه فقط به این خاطر که راه گریز از درگیر شدن با خرافات و تعصب روبه‌رو شدن با این جهل است، بلکه به این خاطر که به نظرم پذیرش این جهل، درست‌ترین، زیباترین و از همه مهم‌تر صادقانه‌ترین شیوه است.

به نظرم تلاش برای فراتر دیدن و فراتر رفتن از باشکوه‌ترین چیزهایی است که به زندگی معنا می‌دهد؛ مانند دوست داشتن یا نگاه کردن به آسمان. کنجکاوی برای یادگیری، کشف، ورای تپه‌ها را دیدن و اشتیاق چشیدن سیب: همین‌ها از ما انسان می‌سازند. همان‌طور که یولیسس دانت به همراهانش یادآوری کرد، ما زاده نشدیم تا «مانند وحشی‌ها زیست کنیم، بلکه برای جست‌وجوی فضیلت و دانش زاده شده‌ایم».

جهان از هر داستانی که پیشینیانمان تعریف کرده‌اند خارق‌العاده‌تر و ژرف‌تر است. من می‌خواهم بروم و آن را ببینم. پذیرش عدم قطعیت چیزی از حس کنجکاوی‌مان کم نمی‌کند. برعکس: در زیبایی و پیچیدگی‌های جهان غرق می‌شویم. جهانی که کوانتوم گرانشی روایت

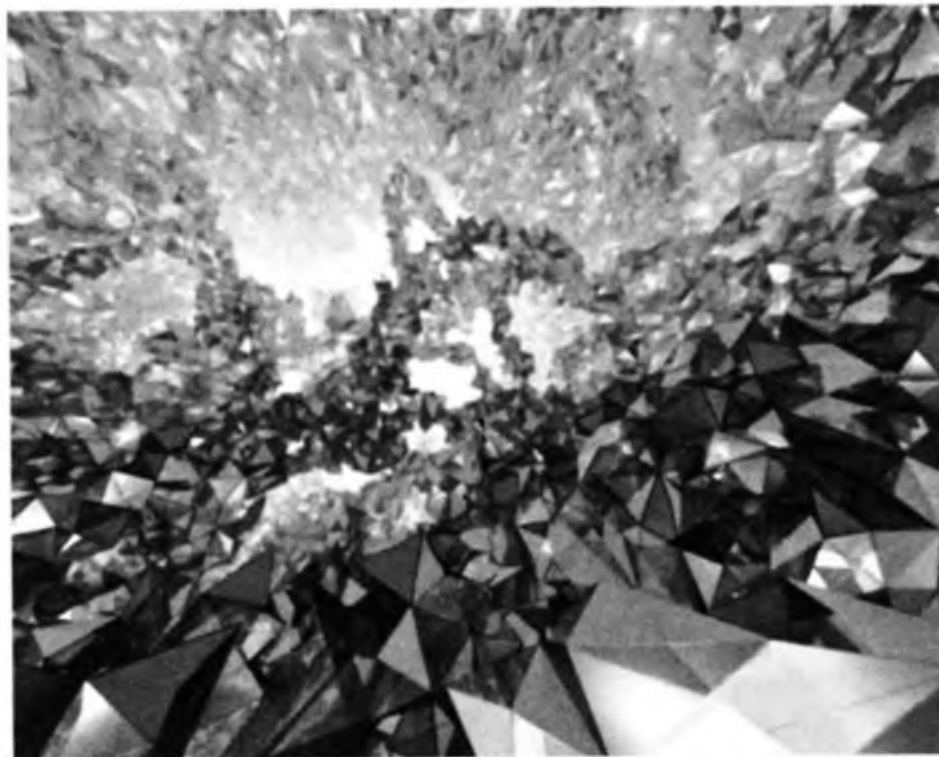
می‌کند تازه و عجیب است — هنوز پر از اسرار است — اما در عین سادگی و زیبایی آشکارش منسجم است. جهان ما در قالب فضا وجود ندارد و در زمان پیش نمی‌رود. جهان تنها از برهم‌کنش‌های میدان‌های کوانتومی ساخته می‌شود که از انبوه آن‌ها — از طریق شبکهٔ متراکمی از برهم‌کنش‌های متقابل — فضا، زمان، ذرات، امواج و نور به وجود می‌آید (شکل ۱۳.۱).

پیش می‌رود، پیش می‌رود، زندگی و مرگ را می‌زاید
مهربان است و خشن، روشن است و مبهم

در ادامهٔ شعر:

از این چشم‌انداز همین را می‌توان دید. (۲)

جهانی بدون بی‌نهایت، جهانی که در آن بی‌نهایت کوچک وجود ندارد، چون کران پایینی برای این ازدحام وجود دارد که در پس آن هیچ نیست. کوانتای فضا با کف‌های فضا — زمان درمی‌آمیزند و ساختار چیزها از این اطلاعات متقابل به وجود می‌آید که همبستگی ناحیه‌های جهان را در هم می‌تند. جهانی که می‌دانیم چطور با مجموعه‌ای از معادلات آن را توصیف کنیم. معادلاتی که شاید نیاز به اصلاح دارند.



شکل ۱۳.۱ طرح شهودی از گرانش کوانتومی

جهان وسیعی است که هنوز کاوش و روشنگری زیادی نیاز دارد. بزرگ‌ترین آرزویم این است روزی کسی — امیدوارم از خواننده‌های جوان‌تر این کتاب — بتواند فراتر از این دنیا برود و آن را روشن‌تر سازد. پشت تپهٔ روبه‌رو جهان‌هایی وسیع‌تر وجود دارند که هنوز کشف نشده‌اند.

یادداشت ها

۱. ذره ها

۱. برای مطالعه در مورد آناکسیماندر و میلئوسی ها نگاه کنید به:

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

۲. برای مثال سیمپلیکیوس به خاستگاه میلئوسی لئوکیپوس اشاره کرده است. نگاه کنید به:

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

اما قطعی نیست. اشاره به میلئوس و الئا در رابطه با خاستگاه های فرهنگی لئوکیپوس مهم است؛ در صفحات بعدی آن در مورد تأثیر زنون و الئا بر لئوکیپوس بیشتر می خوانید.

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. نگاه کنید به:

Aristotle, On Generation and Corruption, A1, ۳۱۵b ۶

در مجموعه:

.The Complete Works of Aristotle, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, ۱۹۸۴)

۷. مجموعه‌ای از متن‌ها و گزارش‌هایی باستانی در مورد اتم‌گرایی در کتاب

M. Andolfo, Ancient Atomists

آمده است. سالومون لوریا مجموعه‌ای کامل از متن‌ها و گزارش‌ها را راجع به دموکریت منتشر کرده است. (برای متن انگلیسی به نویسه «دموکریت» در کتاب‌شناسی مراجعه کنید.)

۸. برای اثر جدید مختصر و جذاب در مورد اندیشه دموکریت در چهارچوب انسان‌گرایی نگاه کنید به:

S. 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.

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

۱۱. نگاه کنید به:

Aristotle, On Generation and Decay, A۲, ۳۱۶a
در مجموعه:

.The Complete Works of Aristotle, Vol. I, ed. Jonathan Barnes (Princeton, Princeton University Press, ۱۹۸۴)

۱۲. در کتاب جدید زیر پارادوکس‌های زنون و اهمیت ریاضی و فلسفی‌شان به خوبی روایت شده است:

.Vincenzo Fano, I paradossi di Zenone (Zeno's Paradoxes), (Rome, Carocci, ۲۰۱۲)

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. همان، ص. ۸۹

۱۶. همان، ص. ۲۷

۱۷. همان، ص. ۶۰

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

۱۹. روایتی از بازیابی نوشته لوکرتیوس و تأثیر آن بر فرهنگ اروپا:

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

۲۰. نگاه کنید به:

M. 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. نگاه کنید به:

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

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

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

۲۴. ترجمه و تفسیری از نوشته لوکرتیوس برای به کارگیری در مدارس:

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

چه خوب می‌شد اگر مدارس این کتاب را درس می‌دادند و این نوشته عالی شناخته شده‌تر می‌بود. خوانش دیگری از این نوشته که کاملاً با خوانش این کتاب متفاوت است در کتاب زیر آمده است:

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

این کتاب بر کیفیت‌های محزون و شاعرانه این اثر تأکید دارد و بر اساس آن‌ها تصویری شریف اما تلخ از شخصیت لوکرتیوس ارائه می‌دهد.

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

۲. کلاسیک‌ها

۱. برای مطالعه در مورد ارزش فیزیک ارسطو مراجعه کنید به:

.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).

ترجمه انگلیسی:

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). In H. S. Thayer, Newton's Philosophy of Nature (New York, Hafener, ۱۹۵۳), p. ۵۴.

۶. همان.

.Michael Faraday, Experimental Researches in Electricity (London, Bernard Quaritch, 1839-55), 3 vols., pp. 436-7 .Y

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. این نامه در مرجع زیر نقل شده است:

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. کوانتا

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

۲. برای خواندن زندگی‌نامه دیراک که شخصیت عجیبش را به تصویر می‌کشد نگاه کنید به:

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 مطالعه این تفسیرهای نسبی از مکانیک کوانتومی نگاه کنید به:

Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in International Journal of Theoretical Physics, ۳۵, ۱۶۳۷, ۱۹۹۶.

۵. Bas van Fraassen, 'Rovelli's World', in Foundations of Physics, ۴۰, ۲۰۱۰, ۳۹۰–۴۱۷; Michel Bitbol, Physical Relations or Functional Relations? A Non-metaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Philosophy of Science Archives, ۲۰۰۷, Mauro Dorato, Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming, Philosophy of Science Archives, ۲۰۱۳, and Che cos'è il tempo? Einstein, Gödel e l'esperienza comune (What is Time? Einstein, Gödel and Shared Experience), (Rome, Carocci, ۲۰۱۳).

۵. فضا - زمان کوانتومی است

۱. اثر نیلز بور و لئون روزنفلت در مورد سنجش‌پذیری میدان‌ها:

.Niels Bohr and Leon Rosenfeld, 'Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs', in Mathematiks-fysike Meddelelser, ۱۲, ۱۹۳۳
۲. نگاه کنید به:

Matvei Bronštejn, 'Quantentheorie schwacher Gravitations- felder', 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. نگاه کنید به:

.F. Gorelik and V. Frenkel, Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics (Boston, Birkhauser Verlag, ۱۹۹۴)
نام‌خانوادگی واقعی لئون تروتسکی هم «برونشتین» بود.
۴. این واقعه را برایس دویت تعریف می‌کند.

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. فراتر از مه‌بانگ

۱. نگاه کنید به:

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

۱۲. اطلاعات

۱. می‌توانید بحث مفصلی را در مورد این دو اصل در مرجع زیر بخوانید:

.Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', in International Journal of Theoretical Physics, ۳۵, ۱۶۳۷, ۱۹۹۶

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

۱. در مرجع زیر ذکر شده:

.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.

- Andolfo, Matteo, Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze (Ancient Atomism. Fragments and Testominies), Milan, Rusconi, 1999.
- Aristotle, On Generation and Corruption, in The Complete Works of Aristotle, Vol. I. Ed. Jonathan Barnes, Princeton, Princeton University Press, 1984. 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, 2007. Commentary on and Kantian interpretation of relational quantum mechanics
- Baggott, Jim, The Quantum Story: A History in Forty Moments. New York, Oxford University Press, 2011. 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, 2010. 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, 2002. 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, 2007. 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, 1999.

Diehls, H. and Kranz, W. (eds), *Die Fragmente der Vorsokratiker.* Berlin, Weidmann, 1903.

.The classic collection, in three volumes, of the 'fragments' of the Presocratics

Dorato, Mauro, *Che cos'è il tempo? Einstein, Gödel e l'esperienza commune.* Rome, Carocci, 2013. 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, 2013. Discussion ,—

.by an Italian philosopher of interpretations of quantum mechanics

Fano, Vincenzo, *I paradossi di Zenone.* Trans. It. Rome, Carocci, 2012. 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, 2009. 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 (3 vols.). London, Basic Books, 2011. 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, 1998. Extensive and complete biography of Einstein

,Gorelik, Gennaly E. and Frenkel, Victor, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties.* Boston

Birkhauser Verlag, 1994. 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, 2011. 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, 1962. 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, 2009. 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, 1951. 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, 1731. 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, 2013. Translation with extensive commentary of .Lucretius's poem. An ideal school textbook

Plato, *Phaedo*, ed. David Gallop. Oxford, Oxford University Press, 2009. 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*, 1 (2015)

- Seven Brief Lessons on Physics, trans. Simon Carnell and Erica Segre. London, Allen Lane, 2015. 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, 2007. 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, 2007, pp. 1287–330. 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, 2004. Technical manual on quantum gravity. Definitely not ,—
 .recommended for anyone without a background in physics
- Relational Quantum Mechanics' in The Stanford Encyclopaedia of Philosophy. Synthesis of the relational interpretation of' ,—
 .quantum mechanics
- Relational Quantum Mechanics' in International Journal of Theoretical Physics, 35(1996), 1637. The article which first' ,—
 .introduces the theory of relational quantum mechanics
- Smolin, Lee, Three Roads to Quantum Gravity. New York, Basic Books, 2002. An introduction to quantum gravity and its open
 .questions

Van Fraassen, Bas. 'Rovelli's World' in Foundations of Physics, 40 (2010), 390–417. A discussion of relational quantum mechanics, by an important analytic philosopher

۱. همه دیدگاه‌ها و نظریات نویسنده الزاماً مورد تأیید نیست و نقدهایی به آن‌ها وارد است

۲. CERN: مؤسسه تحقیقات ذرات بنیادی سرن

۳. The Republic.

۴. Charles Darwin.

۵. Miletus.

۶. کوانتا جمع کوانتوم است

۷. Abdera.

۸. Anaximander.

۹. Leucippus.

۱۰. Fiat Lux: طبق «سفر پیدایش»، نخستین بخش تورات، جمله‌ای است که خدا هنگام خلق جهان گفت

۱۱. Hecataeus

۱۲. Heracles

۱۳. Cape Tenaro

۱۴. Panionium

۱۵. Phrynichus

۱۶. Seneca

۱۷. Cicero

۱۸. Anaximenes

Phaedo.۱۹

Richard Feynman.۲۰

Cilento.۲۱

Velia.۲۲

Elea.۲۳

Parmenides.۲۴

Zeno.۲۵

Achilles.۲۶

۲۷. به زبان فنی، مجموع برخی از بی‌نهایت‌ها همگرایند. برای مثال رشته‌نخ، جمع نامتناهی $1/16 + 1/8 + 1/4 + 1/16 + \dots$ به ۱ همگراست. جمع‌های بی‌نهایت همگرا در زمان زنون کشف نشده بودند. چند قرن بعد، ارشمیدس آن‌ها را کشف کرد و برای محاسبه مساحت‌ها از آن‌ها

استفاده کرد. نیوتن آن‌ها را بسیار به کار برد، اما این ایده‌های ریاضی در قرن نوزدهم و در دوران بولتزانو و وایراشتراس وضوح مفهومی پیدا کردند. با این حال، ارسطو فهمیده بود این موضوع ممکن است پاسخی برای زنون باشد؛ تمایز ارسطویی بین بی‌نهایت بالفعل و بی‌نهایت بالقوه ایده‌ای کلیدی را در خود دارد: تمایز بین حدی برای تقسیم‌پذیری و امکان تقسیم چیزی که بی‌نهایت بار تقسیم شده است

Ernst Mach.^{۲۸}

Ludwig Boltzmann.^{۲۹}

Berne.^{۳۰}

Annalen der Physik.^{۳۱}

Robert Brown.^{۳۲}

Lucretius.^{۳۳}

Ovid.^{۳۴}

۳۵. فهرست تمام آثار دموکریست با عنوان‌هایشان به روایت دیوگنس لائرتیوس: کیهان‌شناسی کلان؛ کیهان‌شناسی خرد؛ کیهان‌نگاری؛ در باب سیاره‌ها؛ در باب طبیعت؛ در باب طبیعت انسان؛ در باب هوشمندی؛ در باب حواس؛ در باب روح؛ در باب بوها؛ در باب رنگ‌ها؛ در باب حرکت پراکنده اتم‌ها؛ در باب تغییرات در شکل‌ها؛ علل پدیده‌های سماوی؛ علل پدیده‌های اتمسفری؛ در باب آتش و محتویات آتش؛ علل پدیده‌های آکوستیک؛ در باب آهن‌ربا؛ علل دانه‌ها، میوه‌ها و گیاهان؛ در باب حیوانات؛ توصیفی از آسمان؛ جغرافیا؛ توصیف قطب؛ در باب هندسه؛ حقیقت هندسی؛ در باب تانژانت‌های دایره و کره؛ اعداد؛ در باب خطوط و اشکال گنگ؛ تصویرها؛ اخترشناسی؛ جدول اخترشناسی؛ در باب پرتوهای نور؛ در باب تصویرهای منعکس‌شده؛ در باب ریتم و هارمونی؛ در باب شعر؛ در باب زیبایی ترانه؛ در باب خوش‌صدایی و بدصدایی؛ در باب هومر یا زبان حماسی؛ علم پزشکی؛ در باب کشاورزی؛ در باب کلمات؛ در باب نام‌ها؛ در باب ارزش‌ها یا فضایل؛ در باب منشی که ویژگی‌های خردمند را نشان می‌دهد؛ در باب نقاشی؛ رساله‌ای بر فنون جنگی؛ کرانه‌نوردی در اقیانوس؛ در باب تاریخ؛ اندیشه کلدی؛ اندیشه فروگیاپیان؛ در باب کتب مقدس بابل؛ در باب کتب مقدس مرواه؛ در باب تب‌ها و سرفه‌های ناشی از بیماری؛ در باب تعجب؛ پرسش‌های حقوقی؛ فیثاغورث؛ در باب معیار اندیشه؛ تأییدیه‌ها؛ نکات اخلاقی؛ در باب خوشی. همه از دست رفته‌اند

Theodosius. ۳۶

Poggio Bracciolini. ۳۷

Francesco Petrarch. ۳۸

Quintilian. ۳۹

Vitruvius. ۴۰

Niccolò Niccoli. ۴۱

Dante Alighieri. ۴۲

Bacon. ۴۳

Machiavelli. ۴۴

Montaigne. ۴۵

Florentine Synod. ۴۶

Council of Trent. ۴۷

۴۸. بدنمای فیزیک ارسطو به زمان مجادلات گالیله باز می‌گردد. گالیله باید پیش می‌رفت و در نتیجه لازم بود منتقدانه سخن بگوید.

شدیداً با نیش و کنایه به ارسطو حمله می‌کرد، اما فیزیک ارسطو را بسیار جدی می‌گرفت

Samos. ۴۹

Iamblichus. ۵۰

Porphyry. ۵۱

Crotone. ۵۲

Eudoxus. ۵۳

Aristarchus. ۵۴

Hipparchus. ۵۵

Ptolemy. ۵۶

۵۷. Hellenistic: دوره‌ای از تاریخ یونان باستان که از درگذشت اسکندر مقدونی در سال ۳۲۳ پیش از میلاد تا پدید آمدن امپراطوری روم است

۵۸. Euclid

۵۹. Bologna

۶۰. Padua

۶۱. Nicolaus Copernicus

۶۲. Blade Runner: فیلم علمی - تخیلی مشهور به کارگردانی ری‌دلی اسکات

۶۳. $(x = \frac{1}{2}at^2)$

۶۴. The Mathematical Principles of Natural Philosophy

۶۵. توان دوم دوره‌گردش متناسب است با توان سوم شعاع مدار. معلوم شد این قانون نه تنها در خصوص سیاره‌های دور خورشید (کپلر)، بلکه

در خصوص ماه‌های مشتری هم صدق می‌کند (هویگنس). نیوتن به استقرا فرض کرد این موضوع باید برای ماه کوچک فرضی دور زمین هم درست باشد. ضریب تناسب به جسمی بستگی دارد که مدار به دور آن شکل می‌گیرد: به این دلیل می‌توانیم با داده‌های مربوط به مدار ماه گردش ماه کوچک را محاسبه کنیم

۶۶. $a = v^2/r$ سرعت و r شعاع مدار است

۶۷.

۶۸. Leopardi.

۶۹. Philolaus.

۷۰. Anaxagoras.

۷۱. Numa Pompilius.

۷۲. انرژی آزادشده از موتورهای احتراقی شیمیایی و در نهایت الکترومغناطیسی است

۷۵. در رساله اصلی ماکسول، معادلات یک صفحه کامل را پر می‌کنند. امروزه، همان معادلات را می‌توان در نصف خط نوشت: $dF = 0$, $d^*F = J$. به زودی می‌فهمیم چرا

۷۶. اگر میدان را به صورت یک بردار (پیکان) در هر نقطه از فضا فرض کنید، نوک پیکان جهت خطوط فارادی، یعنی مماس خطوط فارادی، را نشان می‌دهد و طول آن متناسب با تراکم خطوط فارادی است

۷۷. مجموعه وقایع در یک فاصله شبه فضایی نسبت به یک واقعه مرجع

۷۸. خواننده تیزبین اعتراض خواهد کرد که لحظه ناتمام ربع ساعت او با پاسخ من همزمان است. خواننده‌ای که فیزیک خوانده درک می‌کند که این «قاعده اینشتین» برای تعریف همزمانی است. این تعریف از همزمانی به این بستگی دارد که من چگونه حرکت می‌کنم و در نتیجه همزمانی بین دو رویداد را توضیح نمی‌دهد، بلکه همزمانی نسبی را نسبت به وضعیت حرکت اجسام معین شرح می‌دهد. در شکل ۳.۳ نقطه‌ای میانه مسیر a و b قرار دارد، نقاطی که از طریق آن‌ها از گذشته ناظر خارج و وارد آینده او می‌شوم. نقطه دیگر در میانه مسیر e و d قرار دارد، نقطه‌ای که از طریق آن از گذشته ناظر خارج می‌شوم و اگر از گذرگاه متفاوتی بروم وارد آینده‌اش می‌شوم. بنا بر تعریف «همزمانی» هر دو نقطه از دید خواننده همزمان هستند، اما این موضوع به دفعات اتفاق می‌افتد. دو نقطه هرکدام نسبت به خواننده

همزمان هستند، اما نسبت به دو حرکت متفاوت من نسبی هستند، از این رو به آن «نسبی» می‌گوییم

Cracow. ۷۹

Lev Landau. ۸۰

Simplicius. ۸۱

Carl Friedrich Gauss. ۸۲

Bernhard Riemann. ۸۳

۸۴. هواپیما و توپ ژئودزیکی را در فضای خمیده دنبال می‌کنند (ژئودزیک تعمیمی از خطوط راست روی فضاهاست). در مورد توپ، هندسه تقریباً با این تابع متریک توصیف می‌شود: که $\phi(x)$ پتانسیل نیوتنی را نشان می‌دهد. اثر میدان گرانشی با بالارفتن ارتفاع، باعث انبساط زمان می‌شود. (خواننده آشنا با نظریه متوجه تغییر علامت عجیب می‌شود: مسیر فیزیکی زمان مخصوص را به حداکثر می‌رساند.)

۸۵. رصدهای منظومه دوتایی PSR B1۹۳+۱۶ نشان داده است دو ستاره که دور هم می‌چرخند، موج گرانشی ساطع می‌کنند. این کشف برای راسل هالس و جوزف تایلر جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۹۳ به ارمغان آورد

۸۶. پلوتارک، Adversus Colotem، ۴، ۱۱۰۸، κλῆμα به معنای «طبیعت» است و شامل معنای «طبیعت و ماهیت چیزها» هم می‌شود

۸۷. این اصطلاح «کیهان‌شناختی» خوانده می‌شود، چون در فواصل بسیار بزرگ یا «کیهانی» اثرگذار است. ثابت ۸ «ثابت کیهان‌شناختی» خوانده می‌شود و مقدارش در اواخر دهه ۱۹۹۰ محاسبه شد و در سال ۲۰۱۱ برای اخترشناسانی چون سال پرلمتر و برایان پی. اشمیت و آدام جی. ریس نوبل فیزیک را به ارمغان آورد

۸۸. Marcel Grossman

۸۹. David Hilbert

۹۰. Göttingen

۹۱. دانشگاه گوتینگن، محل کار هیلبرت، برترین دانشکده هندسه را در آن زمان داشت

۹۲. Taranto

۹۳. Archytas

۹۴. کره مجموع نقاطی در فضای R^3 است که با معادله $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ تعیین می‌شود. ۳ - کره مجموعه نقاطی در R^4 است که از معادله $x^2 + y^2 + z^2 + u^2 = 1$ تعیین می‌شود

۹۵. Paradiso

۹۶. Commedia

۹۷. Questa Altre Parte dell'Universo d'un Cerchio Lui Comprende Si Come Questo Li Altri

۹۸. Parendo Inchiuso da Quel Ch'elli Inchiude

۹۹. مخالفان با دانته می‌گویند او از «دایره» سخن می‌گوید و نه از «کره». مخالفت درستی نیست. برونو لاتینی می‌نویسد: «دایره‌ای مانند پوسته تخم مرغ». برای دانته، مانند معلم و مربی‌اش، «دایره» به معنی هر چیز مدور، از جمله کره، است

۱۰۰. Mark Peterson

۱۰۱. Brunetto Latini

۱۰۲. برای مثال در سطح زمین قطب شمال و دو نقطه روی استوا می‌توانند مثلثی متساوی‌الاضلاع و سه زاویه قائمه بسازند — چیزی که به وضوح روی یک فضای تخت امکان‌پذیر نیست

Coppo di Marcovaldo. ۱۰۳

Cimabue. ۱۰۴

Emanuela Minnai. ۱۰۵

۱۰۶. در فرشته‌شناسی مسیحیت، نه دسته فرشته وجود دارد. این نه دسته به ترتیب آمده در متن عبارت‌اند از: Angels، Archangels، Principalities، Seraphim و Powers، Virtues، Domains، Thrones، Cherubim. — م

Max Planck. ۱۰۷

On the Origin of Species. ۱۰۸

Dane Niels Bohr. ۱۰۹

۱۱۰. Copenhagen.

۱۱۱. Werner Heisenberg.

۱۱۲. Paul Adrien Maurice Dirac.

۱۱۳. فضای هیلبرت

۱۱۴. این‌ها همان «مقدارهای ویژه» عملگر مربوط به متغیر فیزیکی مورد نظر هستند. معادله کلیدی همان معادله مقدار ویژه است

۱۱۵. این ابر با یک شیء ریاضیاتی به نام تابع موج توصیف می‌شود. فیزیک‌دان اتریشی، اروین شرودینگر، معادله‌ای نوشته است که تحول آن را طی زمان نشان می‌دهد. معمولاً به اشتباه مکانیک کوانتومی را با این معادله می‌شناسند. شرودینگر امید داشت این «موج» برای توضیح مشکلات نظریه کوانتومی مفید باشد. ما موج‌ها را، از موج‌های الکترومغناطیسی گرفته تا موج‌های دریا، به خوبی می‌شناسیم. حتی امروزه برخی از فیزیک‌دانان تلاش می‌کنند مکانیک کوانتومی را بدین شکل درک کنند که واقعیت از امواج شرودینگر تشکیل شده است. هایزنبرگ و دیراک هر دو فهمیدند که این امر فایده‌ای ندارد. واقعی دانستن موج شرودینگر باری به بارهایمان اضافه می‌کند. نه تنها کمکی به درک نظریه نمی‌کند، برعکس باعث سرگشتگی بیشتر نیز می‌شود. جز مواردی خاص، موج شرودینگر در فضای فیزیکی نیست و این یعنی خالی از مشخصه شهودی است. مهم‌ترین دلیل که باعث می‌شود موج شرودینگر تصویر خوبی از حقیقت نباشد، این واقعیت است که برخورد ذره

با ذرهٔ دیگر همیشه در یک نقطهٔ مشخص اتفاق می‌افتد: هیچ‌وقت مانند یک موج در فضا پراکنده نمی‌شود. اگر الکترون را به صورت یک موج در نظر بگیریم، باید توضیح دهیم چرا این موج موقع برخورد با یک نقطه متمرکز می‌شود. موج شروودینگر نمایش خوبی از حقیقت نیست: روشی محاسباتی است که به ما اجازه می‌دهد تا حدودی با دقت پدیدار شدن دوبارهٔ الکترون را پیش‌بینی کنیم. ماهیت الکترون موجی نیست: همان‌گونه است که در برهم‌کنش‌ها خود را نشان می‌دهد، مانند مردی که هنگام پرسه زدن اندیشمندانهٔ هایزنبرگ در شبی در کپنهاگ زیر استخر نور چراغ‌ها گم و پیدا می‌شود

۱۱۶. معادلهٔ دیراک

۱۱۷. پدیده‌ای در کار است که به نظر نمی‌توان با مدل استاندارد توضیح داد: «مادهٔ تاریک». اخترفیزیک‌دان‌ها و کیهان‌شناسان در عالم اثرهای ماده‌ای را مشاهده می‌کنند که ظاهراً از جنس مادهٔ توصیف‌شده در مدل استاندارد نیست. هنوز چیزهای بسیاری هست که به آن‌ها پی نبردیم

۱۱۸. به نظرم این ادعا که بوزون هیگز، «جرم را توضیح می‌دهد» اغراق‌آمیز است. بوزون هیگز هیچ «توضیحی» از خاستگاه جرم ارائه نمی‌دهد. جرم هیگز را چه چیزی «توضیح» می‌دهد؟ موضوع فنی است: مدل استاندارد به تقارن‌های معینی بستگی دارد که این تقارن‌ها ظاهراً تنها اجازهٔ وجود ذره‌های بدون جرم را می‌دهند. اما هیگز و دیگران فهمیدند می‌توانیم هم تقارن‌ها را داشته باشیم و هم جرم را، به شرط اینکه جرم به طور غیرمستقیم و از طریق برهم‌کنش با میدانی که امروزه به نام میدان هیگز می‌شناسیم، وارد کار شود

۱۱۹. ناحیهٔ محدودی از فضای فازی — فضایی از حالت‌های ممکن برای سیستم — بی‌نهایت حالت کلاسیک مجزا دارد، اما همیشه تعداد متناهی

حالت‌های کوانتومی عمود بر هم دارد. این عدد از حجم ناحیه تقسیم بر ثابت پلانک به توان درجه آزادی به دست می‌آید. این نتیجه عمومی است

۱۲۰. Incerto Tempore... Incertisque Loci.

۱۲۱. یا انتگرال فاینمن. احتمال رفتن از A به B برابر است با مجذور مدول انتگرال بر تمام مسیرهای تابع نمایی کنش کلاسیک مسیر، ضربدر عدد موهومی تقسیم بر ثابت پلانک

۱۲۲. مکانیزمی در جعبه برای لحظه‌ای کوتاه پنجره کوچکی در سمت راست باز می‌کند و اجازه می‌دهد دقیقاً در یک لحظه یک فوتون بگریزد. با وزن کردن جعبه می‌توانیم انرژی فوتون گریخته را محاسبه کنیم. اینشتین امیدوار بود این مسئله مکانیک کوانتومی را، که پیش‌بینی می‌کند نمی‌توان زمان و انرژی را همزمان به طور دقیق محاسبه کرد، با مشکل مواجه کند. بور به اشتباه جواب داد راه گریز از مسئله نسبیت عام اینشتین است و اینشتین نیز به اشتباه پاسخ بور را پذیرفت. اما پاسخ درست برای اینشتین که بور نتوانست آن را پیدا کند امروز مشخص شده است: موقعیت فوتون گریخته و وزن جعبه همچنان به هم بستگی دارند، «همبسته»، حتی اگر فوتون از جعبه دور شده باشد

۱۲۳. Mauro Dorato.

۱۲۴. Matvei Bronštejn.

۱۲۵. علامت روی h ثابت پلانک صرفاً نشان می‌دهد که ثابت پلانک در این معادله بر 2π تقسیم شده است، علامت نسبتاً بی‌فایده و خاصی که فیزیک‌دانان نظری آن را اضافه کرده‌اند؛ از نظر آنان اضافه کردن این علامت کوچک، گنگ و زاویه‌دار بر روی h «آن را زیبا می‌کند»

Gerard't Hooft. ۱۲۶

Martinus Veltman. ۱۲۷

Chris Isham. ۱۲۸

John Wheeler. ۱۲۹

۱۳۰. برای شنیدن این تشبیه با صدای خودش به این آدرس بروید: [http:// www.webofstories.com/ play/ ۹۵۴۲?o=MS](http://www.webofstories.com/play/۹۵۴۲?o=MS)

Bryce DeWitt. ۱۳۱

Raleigh Durham. ۱۳۲

۱۳۳. دویت عملگرهای مشتق در معادله همیلتون - یاکوبی نسبیت عام (که اخیراً پرز به دست آورده بود) را به جای مشتق‌ها جایگزین

می‌کند؛ یعنی همان کاری که شرودینگر در اولین اثرش برای نوشتن معادله‌اش انجام داد: جایگزین کردن عملگرهای مشتق در معادله همیلتن - یاکوبی یک ذره به جای مشتق‌ها

۱۳۴. یا معادله اینشتین - شرودینگر

۱۳۵. Syracuse

۱۳۶. Abhay Ashtekar

۱۳۷. Yale

۱۳۸. Lee Smolin

۱۳۹. Ted Jacobson

۱۴۰. Maryland

۱۴۱. مشهورترین نظریه جایگزین گرانش کوانتومی حلقه، نظریه ریسمان است که دغدغه اصلی‌اش ربط چندان‌ی به مطالعه ویژگی‌های فضا و

زمان ندارد، در عوض می‌خواهد نظریه واحدی از تمام زمینه‌های شناخته‌شده مطرح کند. این هدف، با توجه به دانش کنونی، چندان عاقلانه به نظر نمی‌آید

۱۴۲. Pole Jurek Lewandowski

۱۴۳. معادله مقدار ویژه عملگر حجم

۱۴۴. وضعیت‌های کوانتومی گرانش با $n \leq 7$ مشخص می‌شوند که n گره‌ها و l لینک‌های گراف را نشان می‌دهد

۱۴۵. نتیجه محاسبات ساده است. همین‌جا نشان می‌دهم تا بفهمیم طیف دیراک چطور کار می‌کند. مقدارهای ممکن مساحت A طبق فرمول زیر به دست می‌آید که z یک عدد «نیم‌صحیح» است، یعنی نصف یک عدد صحیح مثل $0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3, \dots$ مساحتی است که سطح جداکننده دو ذره در فضا می‌تواند داشته باشد. ۸ عدد هشت است و نکته خاصی ندارد. عدد یونانی پی است که در مدرسه در موردش خواندیم: ثابتی که برابر است با نسبت محیط به قطر هر دایره و به دلیلی که نمی‌دانم همه‌جای فیزیک وجود دارد. L_p طول پلانک است، مقیاس بسیار کوچکی که پدیده‌های گرانش کوانتومی در آن شکل می‌گیرند. L_p^2 مجذور L_p است، یعنی مساحت (بسیار کوچک) یک مربع ریز که هر ضلعش برابر طول پلانک است. در نتیجه $8\pi L_p^2$ یک مساحت «کوچک» است: مساحت یک مربع بسیار ریز که هر ضلعش حدوداً یک میلیونیم یک میلیارد یک میلیارد یک سانتی‌متر است (10^{-16} cm²). نکته جالبی راجع به رادیکال و آنچه زیر رادیکال است، وجود دارد. نکته کلیدی این است که z یک عدد نیم‌صحیح است، یعنی تنها می‌تواند مضرب‌های $1/2$ داشته باشد. به ازای هر کدام از این اعداد ریشه مقداری مشخص دارد که برخی از آن‌ها به طور تقریبی در جدول ۶.۱ آورده شده است. جدول ۶.۱ اسپین‌ها (نیم‌صحیح‌ها) و مقدار متناظر مساحت در واحدهای ک

مینۀ مساحت با ضرب اعداد ستون سمت راست در مساحت $8\pi L^2 p$ مقدارهای ممکن برای مساحت را به دست می‌آوریم. این مقدارهای مخصوص مانند آن‌هایی‌اند که در مطالعهٔ اوربیتال‌های الکترون اتم، که مکانیک کوانتومی تنها اوربیتال‌های خاصی را برای الکترون امکان‌پذیر می‌کند، به دست می‌آیند. خلاصه هیچ حجمی جز حجم‌های برگرفته از این معادله وجود ندارد. هیچ سطحی نمی‌تواند مساحت یک‌دهم $8\pi L^2 p$ داشته باشد

۱۴۶. تصور کنید اگر ایده‌های ارسطو و افلاطون تنها از طریق توضیحات دیگران به دستمان می‌رسید و به نسخهٔ اصلی کامل و پیچیدهٔ آثار آن‌ها دسترسی نداشتیم، ایده‌هایشان چه بلبشوی بی‌معنایی به نظر می‌آمد!

۱۴۷. تعداد موقعیت‌های کوانتومی فوتون‌ها در فضای فوک همان تکانه یا تغییر موقعیت فوریه است

۱۴۸. عملگر مرتبط با هندسهٔ ساختار ذره‌ای فضا همان هولونومی ارتباطات گرانشی است یا به زبان فیزیک «حلقهٔ ویلسون» نسبت عام

۱۴۹. پتانسیل گرانشی

$$x(t) = \frac{1}{2} at^2. ۱۵۰$$

۱۵۱. مخصوصاً اینکه هیجان‌زده هم شده بود

۱۵۲. ساختار واقعی رئوس کف‌اسپین از شکل ۷.۲ کمی پیچیده‌تر است و بیشتر شبیه شکل ۷.۴ است

۱۵۳. این یک نمودار فاینمن است، چون مانند نمودارهای فاینمن وضعیت کوانتا را شرح می‌دهد. غیر از آن کوانتایش کوانتایی نیست که در فضا حرکت کند، بلکه کوانتای فضا است. گرافی که با برهم‌کنش خود رسم می‌کند، حرکت ذرات در فضا را نمایش نمی‌دهد، بلکه نشان‌دهنده شکل خود فضا است. اما تصویر حاصل درست شبکه‌ای توری‌مانند شبیه تقریب شبکه‌ای است، چون فضا - زمان گسسته را نشان می‌دهد. با این تفاوت که دیگر تقریب نیست، بلکه ساختار گسسته واقعی فضا در مقیاسی کوچک است

۱۵۴. نخستین معادله فضای هیلبرت مربوط به نظریه را بیان می‌کند. دومین معادله جبر عملگرها را توصیف می‌کند. سومین معادله، همان‌طور که در شکل ۷.۴ نشان داده شده است، اندازه گذار هر رأس را شرح می‌دهد

۱۵۵. [...] تمام عناصر بنیادی به ماده‌ای جهانی خلاصه می‌شوند که می‌توان آن را هم انرژی و هم ماده نامید و هیچ‌یک از ذرات نباید مهم‌تر یا بنیادی‌تر تلقی شوند. این دیدگاه معادل آموزه‌های آناکسیماندر است و من مجاب شده‌ام که در فیزیک مدرن این همان دیدگاه صحیح است» ورنر هایزنبرگ، فیزیک و فلسفه: تحول علوم مدرن (نیویورک، هارپر و رو، ۱۹۶۲)

Edwin Hubble. ۱۵۶

Henrietta Leavitt. ۱۵۷

Palomar. ۱۵۸

Georges Lemaître. ۱۵۹

Pope Pius XII. ۱۶۰

COBE. ۱۶۱

WMAP. ۱۶۲

Ivan Agullo. ۱۶۳

William Nelson. ۱۶۴

LIGO. ۱۶۵

۱۶۶. این یک تداخل سنج است: از تداخل لیزرهایی که در این دو بازو در حرکت اند برای تشخیص نوسان های ریز طول این دو بازو استفاده می کند

LISA.۱۶۷

Eugenio Bianchi.۱۶۸

۱۶۹. کاتولیک‌ها بخش بزرگی از کلیسای ارتدوکس شرقی و برخی از یهودیان حکمت را قسمتی از انجیل می‌دانند. کلیساهای لوتری آن را در موعظه‌هایشان به کار می‌برند و متن آن را برای خواندن، ستایش و دعا مناسب می‌دانند، اما آن را جزء انجیل به شمار نمی‌آورند. اکثر یهودی‌ها و کلیسای آنگلیکان هم همین‌طورند

Psammites (The Sand Reckoner).۱۷۰

Magna Grecia.۱۷۱

Taormina.۱۷۲

Etna.۱۷۳

Sophocles.۱۷۴

175. Euripides

176. Claude Shannon

177. یک نکته ظریف: اطلاعات دانسته‌هایمان را اندازه نمی‌گیرد، بلکه جایگزین‌های ممکن را اندازه می‌گیرد. وقتی رولت روی عدد ۳ می‌ایستد اطلاعات من $N = 37$ است، چون ۳۷ عدد وجود دارد؛ اما وقتی عدد ۳ روی قرمزها می‌ایستد اطلاعات $N=18$ است، چون ۱۸ عدد قرمز وجود دارد. اگر بدانیم کدام برادر کارامازوف پدرش را کشته است، چقدر اطلاعات داریم؟ پاسخ بستگی به تعداد برادرهای کارامازوف دارد

178. بولتسمان از مفهوم اطلاعات استفاده نکرد، بلکه می‌توان از اثرش چنین برداشتی کرد

179. Duino

180. Trieste

181. آنتروپی متناسب با لگاریتم حجم فضای فاز است. ثابت تناسب، k ، ثابت بولتسمان است که یکاهای سنجش اطلاعات (بیت‌ها) را به یکاهای سنجش آنتروپی (ژول کلون) تغییر می‌دهد

182. در ناحیه‌ای محدود از فضای فازش

۱۸۳. این همان چیزی است که به غلط «در هم شکستن» تابع موج نامیده شد

۱۸۴. به لحاظ تکنیکی عملکرد آن این‌گونه است: وضعیت آماری بولتسمان با تابع فضای فازی که با تصاعد هامیلتونین مشخص شده، توصیف شده است. هامیلتونین مولد فرگشت زمان است. در سیستمی که زمان تعریف نشده است هامیلتونینی وجود نخواهد داشت. اما اگر وضعیت آماری داشته باشیم صرفاً لگاریتم آن را می‌گیریم و نتیجه آن هامیلتونین و مفهومی از زمان را مشخص می‌کند

Salomon Luria. ۱۸۵



۴۴۰۰ تومان

دوانومی و کشف حقیقت، مسیر پیشرفت علم را از ریشه‌های تاریخی آن تا به امروز و شکل‌گیری فیزیک مدرن بررسی کرده است. از مشاهدات علمی در یونان پیش از سقوط شروع می‌کند و به گالیله و کپلر می‌رسد؛ سپس پیشرفت علم را از دوران نیوتن تا اینشتین و علم فیزیک کوانتومی به بحث می‌گذارد؛ اما چیره‌دستی و مهارت روایتی در ساده‌نویسی و خلاصه‌گویی او را یاری کرده تا مفاهیم پیچیده را در قالبی نو و با جملاتی مفهومی و موجز بیان کند.

«تا حدودی با قطعیت می‌توانیم بگوییم چهارده میلیارد سال پیش، وقتی که عالم یک گوی بسیار داغ بود، در مقیاس بزرگ چه اتفاقی برای جهانمان افتاد. ابتدایه این فکر کنید، اسم نظریه مه‌بانگ را مخالفان این نظریه برای تمسخر ایده‌ای که بسیار عجیب به نظر می‌آمد روی آن گذاشتند... اما به جای آن در پایان همه قانع شدیم: چهارده میلیارد سال پیش عالم یک گوی فشرده بسیار داغ بود. اما پیش از این حالت اولیه داغ و فشرده چه رخ داد؟»
قسمتی از متن کتاب

