

فهرست مطالب

۷	پیشگفتار
۱۰	آشنایی ابتدایی
۲۱	فصل ۱. درآمد
۳۵	فصل ۲. پرده‌ی یکم - کوانتوم به تصور می‌آید
۴۳	فصل ۳. پرده بالا می‌رود
۵۳	فصل ۴. چه علی خواجه، چه خواجه علی
۶۳	فصل ۵. اتم نیلز بور
۷۹	فصل ۶. اتم بور به زانو در می‌آید
۸۹	فصل ۷. میان پرده - هشدار نویسنده به خواننده
۹۱	فصل ۸. صحنهٔ II - شاهکارهای پرنس انقلابی
۱۰۳	فصل ۹. لیست‌های رختشویخانه به دور انداخته می‌شوند
۱۲۵	فصل ۱۰. ریاضت جویبی پُل
۱۲۹	فصل ۱۱. الکترون‌ها پرداخت می‌شوند
۱۴۵	فصل ۱۲. موجودی به نام عملگر
۱۶۱	فصل ۱۳. اختطار شگفت‌انگیز
۱۹۵	فصل ۱۴. چشم‌انداز نوین علم
۲۲۱	فصل ۱۵. پسگفتار
۲۵۳	بعدالتحریر
۲۹۵	گفتار پایانی جمع‌بندی از ابتدا تا اول هزاره‌ی سوم
۲۹۹	گاه‌شماری جامع تکوین مکانیک کوانتومی
۳۲۱	نمایه

این کتاب برای راهنمایی کسانی نوشته شده است که می‌خواهند در نظریه‌هایی تجسس کنند که به یاری آن‌ها دانشمندان می‌کوشند دنیای اسرارآمیز اتم را بفهمند. علم اتمی به شکافت هسته‌ای و بمب‌های اتمی منحصر نمی‌شود. در پس این دو، افکاری نامتعارف و رویدادهایی تکان‌دهنده پنهان است که بدون آن‌ها فهم ما از مطلب به راستی اندک خواهد بود. سرگذشت کوانتوم، داستان جستجوی بی‌سامان و کورمال در پی دانش است؛ جستجویی که آن را دانشمندان بسیار از سرزمین‌های گوناگون و وسیع‌ترین جبهه‌ای که تا آن زمان دنیای فیزیک در برابر خود دیده بود، هدایت کردند، جرقه‌های نبوغ راهش را روشن داشتند، تصادف‌ها و گمان‌ها یاریش دادند، و با سوانحی همانند آن‌که تنها در افسانه‌ها انتظار می‌رود، به آن جان بخشیدند.

این داستان، سرگذشت انقلابی پرتلاطم است؛ سرگذشت فروپاشی و انقراض فیزیکی از خودراضی است که سالیان دراز بر حوزه‌ای محدود فرمان رانده بود، سرگذشت دوران فترتی است که نابودی‌اش را از پیش، تناقضات درونی‌اش رقم زده بودند، و سرانجام، سرگذشت ظهور توفان آسای نظامی از هفت آب گذشته، یعنی مکانیک کوانتومی است.

مکانیک کوانتومی اگرچه با قدرت تمام بر سرزمین‌های نویافته فرمان می‌راند، ولی پیروزی‌اش کامل نیست. آنچه در ظاهر خراش‌هایی بر رویه‌ی درخشان قلمرو آن است، شکاف‌هایی فریبنده می‌شود که تیرگی درون را فاش می‌سازد و اهل جسارت را به ماجراجویی تازه‌ای فرا می‌خواند. سلطه‌ی مکانیک کوانتومی بی‌چون و چرا هم نیست، بلکه در حکمرانی بر این قلمرو، شورش‌ی دیگری، یعنی نسبیت، نیز شریک است؛ و با آنکه این هر دو نظریه مجموعاً به پیشرفتی عظیم در جستجوی ما در پی دانش انجامیده‌اند، اما هنوز معاند یکدیگر به شمار می‌آیند. تا هنگامی که این دو نظریه مقهور نظریه‌ای نیرومندتر نشوند که در دسره‌های کنونی را درباه‌ی چیزهایی مانند فضا و زمان،

بصیرتش ژرف است. از اشارتی در این جا و آن جا، مشابهتی تقریبی و یا حدسی عجیب و خیالی، فرضیه‌هایی کارآمد از مصالح موجود برپا می‌دارد، و به یاری شهود خداداده‌اش، جسورانه کم سوترین فروغ را پی می‌گیرد تا راهی به سوی حقیقت بیابد.

عروج شکوهمند کوانتوم به مسند سلطه بر علم و فلسفه‌ی نوین، داستان و ماجرای والایی است که اغلب اوقات باورکردنی نیست. قصه‌ای است آشفته، اما از میان این آشفتگی ظاهری، اندک اندک بنایی باشکوه سر بر می‌آورد، هر کشف هر اندازه هم به ظاهر بی‌ربط یا بی‌معنی بنماید، به طرز زیبا در جای خود قرار می‌گیرد تا سرانجام این معمای ظریف و پیچیده به عنوان یکی از کشفیات بزرگ ذهن آدمی، سر برون آورد.

افزوده‌ی مترجم

کتاب حاضر تمامی خطوط اصلی تاریخچه‌ی نظریه و مکانیک کوانتومی را بیان کرده و تا سال ۱۹۶۰ را به تفصیل شرح داده است.

برای آن که اتفاقات مهم در این حوزه تا پایان قرن بیستم هم به اجمال به اطلاع خوانندگان برسد، دو فصل آشنایی ابتدایی و گفتار پایانی را از منابع اینترنتی استخراج کرده و به کتاب افزوده‌ایم. منابع و مراجع این دو فصل افزوده از این قرار است:

Wikipedia, the free encyclopedia, *History of quantum mechanics*.

ماده و انرژی، و علیت برطرف کند، ناسازگاری اساسی آن‌ها از میان نخواهد رفت. در مورد ماهیت این نظریه‌ی جامع‌تر تنها می‌توان به حدس و گمان روی آورد، ولی این‌که سرانجام بدان دست خواهیم یافت کم و بیش همانقدر مسلم است که دوام تمدن ما.

آن همزاده‌های پرتوانی که زمان و مکان‌شان می‌نامیم و بدون آن‌ها عالم ما تصورناپذیر خواهد بود چیستند؟ ماده، این گوهر اسرارآمیز که به صورت‌های شگفت در درون ما و گرداگرد ما وجود دارد؛ که هم خدمتگزار و هم فرمانروای ذهن است، و به عنوان وسیله‌ی اولای آفرینش الهی جایگاه برتر را در سلسله مراتب عالم دارد، چیست؟ و تابش، این سریع‌ترین پیام‌آور آسمانی، که گستره‌های تهی فضا را به سرعت برق در می‌نوردد، چیست؟ هر چند ممکن است هیچ یک از این پرسش‌ها پاسخی واقعی نداشته باشد، اما در سرنوشت علم است که پیوسته در فکر این قبیل مسائل باشد. بایستی تا ابد نظریه‌های آزمایشی برگرد آن‌ها بتند و از این راه دانه‌ای از حقیقت را به چنگ آورد و توازن بنای ظریف و پیچیده‌ی خود را بر آن قرار دهد. این موازنه‌ای است بسیار ظریف و حساس، و هر تغییری در تمامی این بنا تا بالاترین نقطه‌اش، لرزه می‌افکند. داستان نسبیت تاریخچه‌ی رویدادهایی است که با تسلیم یک نظریه‌ی موقت زمان و مکان به نظریه‌ی دیگر، گریبانگیر علم شد. سرگذشت کوانتوم از ماجراهایی سخن می‌گوید که اخیراً نظریه‌های ماده و تابش دچارشان شده است و پیامدهای نامنتظر آن‌ها را نقل می‌کند.

موضوعی مجرد و انتزاعی چون نظریه‌ی کوانتومی به خوبی می‌تواند شالوده‌ی رساله‌های عالمانه‌ای قرار گیرد، که صفحات آن‌ها آکنده از نمادهای نامأنوس ریاضیات عالی است. این کتاب، سرگذشت کوانتوم است بدون ریاضیات، و در عین حال بی‌آن‌که مفهومی از قلم افتاده باشد. در همین کتاب نیم نگاهی نیز به نظریه‌پرداز علمی می‌اندازیم که با ابزارش، قلم و کاغذ، اندیشه‌ها را می‌آزماید. استعدادش را در رسیدن به نتایجی با ارزش از مقدماتی که نادرستی آن‌ها بعداً معلوم می‌شود نباید دست‌کم گرفت. زیرا

آشنایی ابتدایی

واژه‌ی کوانتوم، لاتینی و به معنای «چقدر و زیاد» است. منظور از این اصطلاح یا واژه در حوزه‌ی مکانیک کوانتومی عبارت است از واحد گسسته‌ای که در نظریه‌ی کوانتومی به برخی کمیت‌های فیزیکی، مانند انرژی یک اتم ساکن، نسبت می‌دهند. این کشف و یافته که ذرات عبارت‌اند از بسته‌های گسسته‌ی انرژی با خواص موج‌گونه، به پا گرفتن شاخه‌ای از فیزیک انجامید که به سیستم‌های اتمی و زیراتمی می‌پردازد که امروزه به آن مکانیک کوانتومی می‌گویند. چارچوب ریاضیاتی زیربنایی بسیاری از حوزه‌های فیزیک، از جمله فیزیک ماده‌ی چگال، فیزیک حالت جامد، فیزیک اتمی، فیزیک مولکولی، شیمی ترکیباتی، شیمی کوانتومی، فیزیک ذرات، و فیزیک هسته‌ای را مکانیک کوانتومی تشکیل می‌دهد. بنیادهای مکانیک کوانتومی در خلال نیمه‌ی نخست قرن بیستم به دست ورنر هایزنبرگ، ماکس پلانک، لویی دوبروی، آلبرت اینشتین، نیلز بور، اروین شرودینگر، ماکس بورن، جان فون نویمان، پل دیراک، ولفگانگ پائولی، دیوید هیلبرت، و دیگران نهاده شد. برخی جنبه‌های بنیادی این نظریه هنوز هم تحت مطالعه و بررسی‌اند.

مکانیک کوانتومی برای فهم رفتار سیستم‌ها در مقیاس‌های طولی اتمی و کوچک‌تر اهمیت اساسی دارد. مثلاً، اگر مکانیک کلاسیک بر کارکردهای اتم حاکم بود، الکترون‌ها باید به سرعت به سوی هسته حرکت و با آن برخورد می‌کردند، و ثبات و پایداری اتم ناممکن می‌شد. اما، در طبیعت الکترون‌ها معمولاً به صورت مسیر مداری «محو» نامعینی، یا از طریق هسته، الکترومغناطیس کلاسیک را نقض می‌کنند و آن را به چالش می‌طلبند.

مکانیک کوانتومی نخست برای توضیح و تشریح بهتر اتم، بخصوص طیف‌های نوری که انواع اتم‌ها گسیل می‌کنند، تدوین شد. نظریه‌ی کوانتومی اتم در حکم توضیحی برای ماندن الکترون در مدارش تدوین شد، که با

به بیان کلی، مکانیک کوانتومی چهار دسته پدیده را که فیزیک کلاسیک از منظور کردن آن‌ها ناتوان است، در هم می‌آمیزد و به آن‌ها می‌پردازد:

۱. کوانتش (گسستگی) برخی کمیت‌های فیزیکی؛
۲. دوگانگی موج-ذره؛
۳. اصل عدم قطعیت؛ و
۴. درهم تافتگی کوانتومی.

در بستر تاریخ

مکانیک کوانتومی در سال ۱۸۳۸ با کشف پرتوهای کاتودی به دست مایکل فاراده، با بیان مسئله‌ی تابش جسم سیاه به وسیله‌ی گوستاو کیرشهوف در سال ۱۸۵۹، حدس لودویگ بولتسمان در سال ۱۸۷۷ مبنی بر این که حالت‌های انرژی یک سیستم فیزیکی می‌تواند گسسته باشند، و فرضیه‌های کوانتومی ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰، پای بر مسیر تکوین نهاد. بنا بر فرضیه‌ی پلانک هر انرژی به صورت کمیت‌هایی قابل تقسیم به «عناصر انرژی» گسسته تابیده و جذب می‌شود، به گونه‌ای که هر عنصر انرژی با بسامد آن متناسب است.

پلانک تأکید کرد که این اتفاق صرفاً جنبه‌ای از فرایندهای جذب و گسیل تابش است و کاری به واقعیت فیزیکی خود تابش ندارد. اما، در آن زمان، اثر فوتوالکتریک، یعنی با تاباندن نور بر برخی مواد می‌توان الکترون از آن جدا کرد، غیرقابل توضیح به نظر می‌رسید. آلبرت اینشتین، در سال ۱۹۰۵ بر اساس کارهایش در خصوص فرضیه‌ی کوانتومی پلانک، این اصل را مطرح کرد که خود نور از کوانتوم‌های مجزا تشکیل می‌شود.

در نیمه‌ی دهه‌ی ۱۹۲۰، پیشرفت‌ها و تکوین‌ها در مکانیک کوانتومی بسرعت به آنجا انجامید که این اصل به فرمول‌بندی استاندارد فیزیک اتمی تبدیل شد. در تابستان ۱۹۲۵، بور و هایزنبرگ نتایجی از مطالعات خود را منتشر کردند که پرونده‌ی «نظریه‌ی کوانتومی قدیمی» را بستند. کوانتوم‌های

قوانین حرکت نیوتون و به یاری قوانین الکترومغناطیس کلاسیک مکسول نمی‌توانستند آن را توضیح دهند.

در صورت‌گرایی مکانیک کوانتومی، حالت سیستمی در زمانی معین به وسیله‌ی یک تابع موج پیچیده و مرکب (که گاه در حالت الکترون‌های اتمی آن را ارییتال یا مدار می‌گویند) تشریح می‌شود. این موجود ریاضیاتی تجربیدی محاسبه‌ی احتمال نتایج آزمایش‌های عینی و ملموس را ممکن می‌کند. مثلاً، به کمک آن محاسبه‌ی احتمال یافته شدن یک الکترون در ناحیه‌ای خاص حول هسته در یک زمان خاص و معین میسر می‌شود. در اینجا، برخلاف مکانیک کلاسیک، هرگز نمی‌توان با دقت وضعیت متغیرهای جفت و در هم آمیخته، مانند مکان و تکانه، را همزمان پیش‌بینی کرد. مثلاً، ممکن است الکترون‌ها در جایی در ناحیه‌ای از فضا ملاحظه شوند، اما مکان دقیق آن‌ها نامعلوم خواهد بود. می‌شود برای تجسم بخشیدن جایی که الکترون ممکن است با بیشترین احتمال در آنجا باشد، طرح‌هایی کلی به دور هسته‌ی یک اتم ترسیم کرد که غالباً به آن «ابر» می‌گویند. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، ناتوانی در تعیین مکان دقیق پارامترهای مرتبط با ذره (مکان، تکانه، ...) را به صورت کمی ارائه می‌دهد.

مورد دیگری که به پایه نهادن مکانیک کوانتومی انجامید، مطالعه‌ی امواج الکترومغناطیسی مانند نور بود. در سال ۱۹۰۰ که ماکس پلانک پی برد انرژی امواج را می‌توان متشکل از بسته یا کوانتوم‌های کوچک تلقی کرد، آلبرت اینشتین این ایده را بیشتر تعمیم داد تا نشان دهد که موجی الکترومغناطیسی مانند نور را می‌شود به وسیله‌ی ذره‌ای به نام فوتون با انرژی گسسته‌ای وابسته به بسامدش، توصیف کرد. این یافته‌ها به نظریه‌ای انجامید که بنا بر آن بین ذرات زیراتمی و امواج الکترومغناطیسی وحدتی به نام دوگانگی موج-ذره برقرار است که در آن ذرات و امواج هیچکدام از آن‌ها نیستند، بلکه از خواص هر دو برخوردارند. در حالی که مکانیک کوانتومی دنیای بسیار کوچک را توصیف می‌کند، به توضیح سیستم‌های کوانتومی بزرگ مقیاس (ماکروسکوپیکی) مانند ابررساناها و ابرشاره‌ها نیز احتیاج دارد.

تحت تأثیر نیروهای الکتریکی به سرعت از هم می‌پاشند و فرو می‌ریزند)، صلب بودن جامدات، و خواص مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، نوری و مغناطیسی ماده جملگی حاصل برهم کنش بارهای الکتریکی‌اند که قوانین مکانیک کوانتومی بر آنها حاکم‌اند.

در حالی که رفتار ظاهراً عجیب و غریب ماده که در چارچوب مکانیک کوانتومی و نظریه‌ی نسبیت مسلم فرض شده، وقتی در چارچوب ذرات فوق‌العاده سریع یا بسیار کوچک بررسی می‌شوند، نمود بیشتری پیدا می‌کنند، قوانین فیزیک نیوتونی کلاسیک در پیش‌بینی رفتار اشیای بزرگ - از مرتبه‌ی بزرگی مولکول‌های بزرگ و ابعاد بزرگ‌تر از آنها - در سرعت‌های بسیار کم‌تر از سرعت نور، کماکان دقیق‌اند.

کاربردها

مکانیک کوانتومی در توضیح بسیاری از جنبه‌های جهان هستی ما موفقیت عظیمی داشته است. رفتار تکی و انفرادی ذرات زیراتمی که تمامی شکل‌های ماده - الکترون‌ها، پروتون‌ها، نوترون‌ها، فوتون‌ها و جز آنها - را تشکیل می‌دهد. غالباً فقط می‌تواند با بهره‌گیری از مکانیک کوانتومی به نحو موفقی توصیف شود. مکانیک کوانتومی بر نظریه‌ی ریسمان تأثیر بسزایی نهاده؛ نظریه‌ی ریسمان از جمله‌ی نظریه‌هایی است که باید نقش نظریه‌ی همه چیز و فرضیه‌ی چند عالمی را برعهده گیرد. بین مکانیک کوانتومی و مکانیک آماری نیز رابطه برقرار است.

نقش مکانیک کوانتومی برای فهم چگونگی ترکیب الکترون‌ها به طریق زوج الکترونی و تشکیل مواد شیمیایی یا مولکول‌ها بسیار مهم است. کاربرد مکانیک کوانتومی در شیمی را مبحث شیمی کوانتومی اطلاق می‌کنند. مکانیک کوانتومی (نسبیتی) علی‌الاصول می‌تواند از لحاظ ریاضی قسمت عمده‌ی علم شیمی را توضیح دهد. قسمت اعظم محاسبات انجام شده در شیمی محاسباتی بر اصول و قوانین مکانیک کوانتومی متکی است.

قسمت عمده‌ی فناوری امروزی در مقیاسی کار می‌کند که در چارچوب

نور را فوتون نامیدند (۱۹۲۹). از اصل موضوع ساده‌ی اینشتین نظریه‌پردازی‌ها و آزمون‌های پرتاب و تاب مجادله‌انگیزی، و به این ترتیب، کل حوزه‌ی مکانیک کوانتومی، زاده شد و به پذیرش گسترده‌تر آن در پنجمین نشست سولوی در سال ۱۹۲۹ انجامید.

مکانیک کوانتومی و فیزیک کلاسیک

پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی تا حد دقت بالایی عملاً و از طریق آزمایش تأیید شده‌اند. به این ترتیب، منطق جاری اصل همجواری (انطباق) بین مکانیک کلاسیک و کوانتومی از این قرار است که تمامی اشیاء از قوانین مکانیک کوانتومی پیروی می‌کنند، و مکانیک کلاسیک فقط مکانیک کوانتومی سیستم‌های بزرگ (یا مکانیک آماری مجموعه‌ی بزرگی از ذرات) است. از این قرار، قوانین مکانیک کلاسیک از قوانین مکانیک کوانتومی در حد سیستم‌های بزرگ یا اعداد کوانتومی بزرگ پیروی می‌کنند. اما، سیستم‌های آشوبناک اعداد کوانتومی مناسبی ندارند، و در مبحث آشوب کوانتومی رابطه‌ی بین توصیف‌های کلاسیکی و کوانتومی در این سیستم‌ها مطالعه می‌شود.

تفاوت عمده بین نظریه‌های کلاسیکی و کوانتومی اساساً عبارت است از این که مکانیک کوانتومی منسجم و یکدست است، در حالی که نظریه‌های کلاسیکی نایکدست، نامنسجم و نابسامان‌اند. در مورد اجسام ریزمقیاس (میکروسکوپیکی) امتداد و گسترش سیستم قطعاً از کمیتی به نام طول همدوسی کوچک‌تر است؛ در مورد اجسام بزرگ مقیاس (ماکروسکوپیکی) انتظار داریم که اوضاع برعکس باشد. یکی از استثناهای این قاعده می‌تواند در دماهای فوق‌العاده پایین اتفاق افتد، که در این شرایط رفتار کوانتومی می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ‌تر بروز پیدا کند.

بسیاری از خواص ماکروسکوپیکی سیستم‌های کلاسیکی پیامدهای مستقیم رفتار کوانتومی اجزای آن سیستم بشمار می‌آیند. مثلاً، پایداری ماده‌ی کپه‌ای و حجیم (که از اتم‌ها و مولکول‌هایی تشکیل می‌شود که فقط

پروتئینی بینش و بصیرت ما را بالا برده‌اند. با همه‌ی این احوال، غالباً فیزیک کلاسیک می‌تواند تقریب مطلوب و مناسبی به نتایجی باشد که در غیر این صورت، معمولاً در محیط‌هایی با تعداد زیاد ذرات می‌شد از طریق فیزیک کوانتومی به آن‌ها دست یافت.

پیامدهای فلسفی

بسیاری از نتایج مغایر با شهود در مکانیک کوانتومی، از همان آغاز، مباحثات فلسفی دامنه‌دار و تفسیر و تعبیرهای فراوانی را برانگیخته است. حتی مباحث مسائلی بنیادی چون قواعد پایه‌ی ماکس پلانک در ارتباط با دامنه‌های احتمال و توزیع‌های احتمال ده‌ها سال معطل ماند تا جا بیفتد و پذیرفته شود.

تفسیر و تعبیر کپنهاگ، عمدتاً ناشی از کارها و ایده‌های نیلز بور فیزیکدان دانمارکی، از جمله تفسیرهایی از مکانیک کوانتومی است که در میان فیزیکدانان به نحو گسترده‌ای پذیرش عام یافته است. مطابق این تفسیر، ماهیت احتمالاتی پیشگویی‌های مکانیک کوانتومی را نمی‌توان در چارچوب نظریه‌ی علیت‌باورانه‌ی دیگری توضیح داد، و به آسانی عمل و معرفت ما را منعکس نمی‌کند. مکانیک کوانتومی به این علت به نتایج احتمالاتی می‌رسد که جهان هستی فیزیکی (عینی) خودش نه علیت‌باورانه، بلکه احتمالاتی است.

آلبرت اینشتین، که خودش یکی از بنیانگذاران نظریه‌ی کوانتومی است، از این فقدان علیت و حتمیت در اندازه‌گیری‌ها بدش می‌آمد و از آن بیزار بود (این بیزاری علت این کلامی است که از او نقل شده است: «خدا با جهان هستی تاس نمی‌اندازد.») اینشتین اعتقاد داشت که بایستی متغیر پنهانی موضعی در پس مکانیک کوانتومی نهفته باشد و این که، در نتیجه، نظریه‌ی موجود ناکامل بود. وی یک رشته ایراد بر این نظر وارد کرد، که مهم‌ترین آن‌ها تحت عنوان پارادوکس اینشتین-پادولسکی-روزن شناخته شده است. جان بل نشان داد که پارادوکس اینشتین-پادولسکی-روزن عملاً به تفاوت‌ها و اختلاف‌های آزمون‌پذیر بین مکانیک کوانتومی و نظریه‌های واقعی موضعی

آن آثار کوانتومی نقش پراهمیتی دارند. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان لیزر، ترانزیستور (و بنابراین ریزتراشه)، میکروسکوپ الکترونی، و تصویربرداری با تشدید مغناطیسی (MRI) را برشمرد. مطالعه‌ی نیم‌رساناها به ابداع دیود و ترانزیستور انجامید، که همه‌ی این‌ها برای الکترونیک مدرن و امروزی حیاتی‌اند.

بسیاری از پژوهشگران در حال حاضر در جستجوی یافتن روش‌هایی توانا برای دستکاری مستقیم در حالت‌های کوانتومی‌اند. تلاش‌هایی برای ایجاد رمزنگاری کوانتومی در جریان است، که انتقال ایمن اطلاعات را تضمین می‌کند. هدف دورتر عبارت است از ساخت و تکوین کامپیوترهای کوانتومی، که انتظار می‌رود برخی کارهای محاسباتی را چندین بار سریع‌تر از کامپیوترهای کلاسیک و متعارف انجام دهند. دیگر مبحث تحقیقاتی فعال انتقال به دور دست است، که با شیوه‌ها و فنون انتقال حالت‌های کوانتومی تا هر فاصله‌ی دلخواهی انتقال صورت می‌گیرد.

تونل‌زنی کوانتومی در بسیاری ابزارها، حتی در کلید نوری ساده، نقشی حیاتی دارد که در نبود آن الکترون‌ها در جریان الکتریکی نمی‌توانند در سد پتانسیلی که لایه‌ی اکسید تشکیل می‌دهد، نفوذ کنند. تراشه‌های حافظه‌ی درخشی (فلاش محوری) که در دیسک‌ران USB (کامپیوتر) کار گذاشته می‌شوند برای زودن یاخته‌های حافظه‌شان از تونل‌زنی کوانتومی استفاده می‌کنند.

مکانیک کوانتومی عمدتاً در چارچوب‌های اتمی ماده و انرژی عمل می‌کند، اما برخی سیستم‌ها آثار کوانتوم مکانیکی در مقیاسی بزرگ را هم بروز می‌دهند؛ یکی از نمونه‌های مشهور و شناخته شده در این مورد آبرشارگی (یعنی، جریان یافتن بدون اصطکاک یک سیال در دماهای نزدیک به صفر مطلق) است. نظریه‌ی کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌هایی که قبلاً توضیح داده نشده بودند، مانند تابش جسم سیاه و پایداری مدارهای الکترون، توصیف‌هایی ارائه می‌دهد. این نظریه در خصوص کارکرد بسیاری از سیستم‌های زیستی گوناگون، از جمله گیرنده‌های بو و ساختارهای

انجامیده است. آزمایش‌هایی برای تأیید صحت و دقت مکانیک کوانتومی انجام شده‌اند، و به این ترتیب نشان می‌دهند که جهان فیزیکی (طبیعت) را نمی‌توان به اعتبار نظریه‌های واقعی موضعی توصیف کرد. مباحثه‌های بور-ایشناین نقد پرشوری بر تعبیر کپنهاکی از دیدگاهی معرفت‌شناختی را باعث شد.

بنا بر تفسیر چندجهانی اُورت^۱، که در سال ۱۹۵۶ تدوین شد، تمامی احتمالات تشریح شده از طریق نظریه‌ی کوانتومی به طور همزمان در یک چند عالم نامتناهی عمدتاً مرکب از جهان‌های هستی موازی مستقل اتفاق می‌افتند. این امر با وارد کردن اصل موضعی جدید به مکانیک کوانتومی محقق نمی‌شود، بلکه برعکس از طریق حذف اصل موضوع رمبیدن بسته‌ی موج تحقق می‌یابد: تمامی حالت‌های سازگار ممکن سیستم اندازه‌گیری شده و ابزار اندازه‌گیری (از جمله ناظر) در برهم‌نهی کوانتومی فیزیکی واقعی حضور دارند. این گونه برهم‌نهی ترکیب‌هایی حالت سازگار سیستم‌های مختلف را حالت درهم‌تافته می‌گویند.

در حالی که چند عالم جبری و علیت‌مدارانه است، رفتار ناعلیتی متأثر از احتمالات را از آن در می‌یابیم، زیرا می‌توانیم فقط جهان هستی را مشاهده کنیم، یعنی سهم و تأثیر حالت سازگار در برهم‌نهی یاد شده، که به آن خو گرفته‌ایم. تفسیر اُورتی کاملاً با آزمایش‌های جان بل سازگار است و به طور شهودی آن‌ها را قابل فهم می‌کند. اما، بنا بر نظریه‌ی همدوسی‌زدایی کوانتومی، عالم‌های موازی هرگز برای ما دسترس‌پذیر نیستند. این دسترس‌ناپذیری را می‌توان از این قرار درک کرد: همین که یک اندازه‌گیری انجام می‌شود، سیستم اندازه‌گرفته شده هم با فیزیکدانی که آن اندازه‌گیری را انجام داده و هم با تعداد بسیاری ذرات دیگر، که برخی از آن‌ها فوتون‌هایی‌اند که دارند به آن سوی جهان هستی می‌روند، در هم تافته می‌شود؛ به خاطر این که اثبات کنیم تابع موج از هم گسیخته نمی‌شود باید هم‌هی این ذرات را به سر جایش برگردانیم و اندازه‌گیری روی آن‌ها را، همراه

با سیستمی که در ابتدا اندازه‌گیری روی آن انجام گرفته بود، دوباره انجام دهیم. این کار کاملاً غیرعملی است، اما حتی اگر از لحاظ نظری بتوان این کار را انجام داد، هرگونه گواه و شاهده‌ی را که ناظر بر اندازه‌گیری اولیه است (از جمله حافظه‌ی فیزیکدان اندازه‌گیری‌کننده)، از بین خواهد برد.

1. Everett

فصل ۱

درآمد

در گوشه‌ی آزمایشگاهی کاملاً تاریک، ماشینی الکتریکی قرار گرفته است و روی آن دو کره‌ی فلزی کوچک و براق سوار شده که در نزدیکی هم عبوسانه به یکدیگر می‌نگرند. این همان ماشین متعارف ایجاد جرقه‌های الکتریکی است که زائده‌ای کوچک هم بر آن اضافه شده است. دو صفحه‌ی فلزی با میله‌های رسانای باریکی به این کره‌ها متصل شده‌اند، چنان که گویی برای این گول دو چشم گوش‌های بزرگی گذاشته باشند.

در روی میز دیگر، حلقه‌ی ساده‌ی تقریباً بسته‌ای از سیمی سخت و محکم بر پایه‌ای عایق سوار شده است. از نظر آزمایشگر شکاف کوچکی که در این حلقه است جزء اصلی دستگاه به شمار می‌آید. اگر درست حدس زده باشد، در همین جاست که راز از پرده بیرون خواهد افتاد.

همه چیز آماده است، آزمایشگر کلیدی را وصل می‌کند تا جرقه‌ها با سروصدا بین دو کره رد و بدل شوند. او از جرقه‌ها روی بر می‌گرداند و مدتی منتظر می‌ماند تا چشمش به تاریکی عادت کند. آیا این که او می‌بیند شکاف حلقه از فروغ ضعیفی پر شده است حقیقت دارد یا تصویری بیش نیست؟ پاسخ دادن به این پرسش آسان نیست. ممکن است فقط بازتاب نوری باشد. به آرامی پیچی را که دو سر حلقه را به هم نزدیک می‌کند می‌چرخاند. با باریک‌تر شدن شکاف، فروغ درخشان‌تر می‌شود. باز هم دو سر حلقه را به هم نزدیک‌تر می‌کند تا سرانجام تقریباً با هم تماس پیدا می‌کنند. حال دیگر جای تردید نیست. آزمایشگر نفس راحتی می‌کشد. جرقه‌های الکتریکی بسیار خردی عرض شکاف را می‌پیمایند.

به همین سادگی بود که آدمی برای نخستین بار زیرکانه به وجود سیگنال

رادیویی پی برد.

این واقعه در سال ۱۸۸۷ روی داد، و آزمایشگر، یک فیزیکدان برجسته‌ی جوان آلمانی بود به نام هاینریش هرتز. ارزش اقتصادی این کشف بی‌اندازه بود. پس چرا انسان قابلی چون هرتز امتیازهای بهره‌برداری از آن را برای مارکونی واگذاشت؟

چیزی که هرتز را به انجام آزمایش‌های دوران‌سازش واداشت، به هیچ روی فکر ابداع چیزی عملی چون تلگراف رادیویی (تلگراف بی‌سیم) نبود. شاید تلگراف رادیویی هم مهم‌ترین حاصل این آزمایش‌ها به شمار نمی‌رفت. هرتز سدی را می‌شکست که مدتی مدید دانشمندان را از پیشرفت بازداشته بود: آزمون درستی نظریه‌ای ریاضی که به نور، الکتروسیسته و مغناطیس مربوط می‌شد و سه سال پیش‌تر از سوی جیمز کلرک مکسول، فیزیکدان اسکاتلندی، مطرح شده بود. ظاهراً ارزش تجاری این کار جایی در ذهن هرتز نداشت، و این شور پژوهش به خاطر نفس پژوهش بود که حاصلش، به یک معنی، موقعیتی چنین طنزآلود بود. زیرا بدون این شور، هرتز هرگز به خود زحمت تحقیق در پدیده‌ای ظاهراً جزئی را نمی‌داد که در جریان آزمایش‌هایش دیده بود. این آزمایش‌ها را همه به این منوال ستودند که نظریه‌ی مکسول را به طرز درخشان بر شالوده‌ی صخره مانند واقعیت تجربی قرار می‌داد. اما مقدر بود که این پدیده‌ی ظاهراً پیش پا افتاده و بی‌اهمیت، در دست اینشتین نقش خطیری در انقلاب نظریه‌ی کوانتومی بازی کند و از این راه ضربه‌ای ویرانگر به نظریه‌ی مکسول وارد آورد، ضربه‌ای که این نظریه هرگز نتوانسته است از آثار آن کاملاً گمراست کند.

برای آن‌که ارزش کار مکسول و هرتز، و تمامی سرگذشت کوانتوم را بفهمیم، باید نخست نگاهی کوتاه به بعضی از نظریه‌هایی بیندازیم که آدمی درباره‌ی نور پرداخته است. گرچه در دوران معاصر، دانشمندان یهودی برجسته‌ای وجود داشته‌اند، ولی حکمای عبرانی باستان مایه‌چندانی در پژوهش علمی از خود نشان ندادند. ایشان با ادای این گفته که و خدا گفت نور باشد؛ و نور شد، از کنار مسئله‌ی نور به سرعت گذشتند تا به مسائل مهم‌تری

بپردازند. نور در نزد آن‌ها، چیزی بیش از ضدتاریکی، و شرطی برای توانایی دیدن نبود.

اما، یونانیان با شَم علمی قوی‌تری، ایده‌ی نوینی را با اهمیت بسیار ارائه دادند. آنان درک کردند که باید چیزی وجود داشته باشد که در فاصله‌ی میان چشمان ما، چیزهایی که می‌بینیم، و چراغ‌هایی که آن‌ها را می‌افروزند، پلی ارتباطی برقرار کند. لذا به نور واقعیتی عینی بخشیدند و به مطالعه‌اش برخاستند و نظریه‌هایی پیرامون آن پرداختند. هنگامی که دانشمند امروزی از نور سخن می‌گوید یک چنین چیزی در ذهن خود دارد. تمایز میان صرف قدرت دیدن، و نور عینی، تمایزی مهم است، درست مانند تمایز میان احساسی که از اصابت سنگ به آدمی دست می‌دهد و خود سنگ که فضا را می‌پیماید تا به هدف اصابت کند.

متأسفانه، یونانیان پس از آغازی چنین درخشان، درگیر نظریه‌های متضاد شدند. یکی از این نظریه‌ها می‌گفت نور چیزی است که مانند آبی که از مجرای تنگ بیرون می‌آید، از چشم‌ها جریان پیدا می‌کند. بر پایه‌ی این ایده، وقتی یک شیء را می‌بینیم که این جریان نور را به سویش متوجه کنیم تا با آن برخورد کند؛ همان‌طور که مثلاً یک نابینا با پیش بردن دست‌ها و لمس کردن چیزی، آن چیز را «می‌بیند». این نظریه این نکته را توضیح می‌دهد که هر چیز را تنها هنگامی می‌بینیم که روبرویمان باشد، و نیز این‌که با چشمان بسته نمی‌توانیم ببینیم؛ اما نمی‌تواند توضیح دهد که مثلاً چرا در تاریکی نمی‌توانیم ببینیم؛ در گیرودار پاسخگویی به این ایرادها، افلاطون فیلسوف نظریه‌ای پرداخت که بی‌گمان، در فراوانی سازوکارهای زائد، بی‌همتا است. او برهم کنشی سه گانه میان سه جریان مختلف قائل بود، یکی از چشمان، یکی از آن‌چه دیده می‌شود، و یکی از چراغی که آن را روشن می‌کند! مشکل افلاتون در کج نهادن خشت اول بود. بر مبنای ایده‌های جدید، هر شیء به این علت دیده می‌شود که نور از آن به چشم ما می‌رسد نه این‌که از چشمان خارج شود؛ و جالب این‌جاست که این نکته، یکصد سال پیش از افلاتون، از جانب فیثاغورث بزرگ، با قوت تمام مطرح شده بود. نظریه‌ی فیثاغورثی ساده