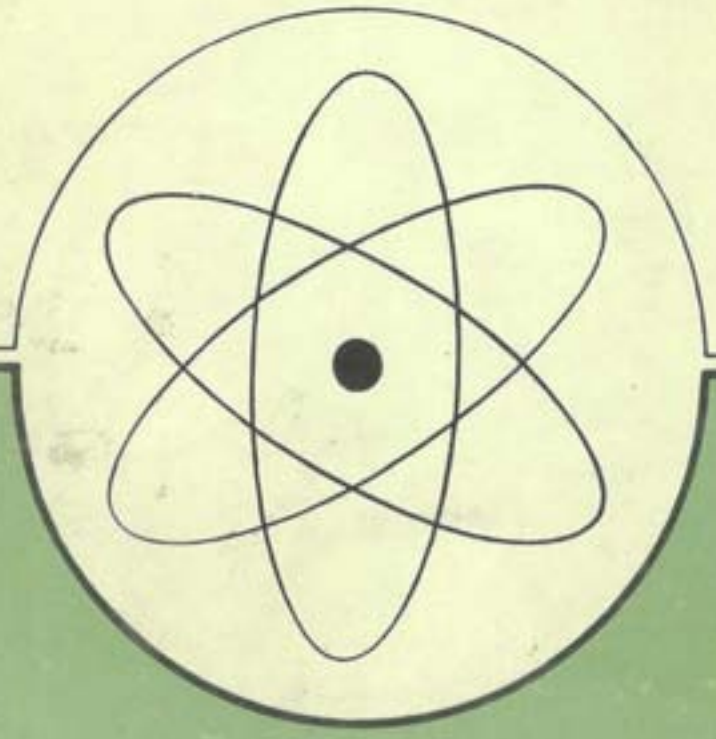
بنش هوفمان

سرگذشت شگفت‌انگیز

کوانتوم

ترجمهٔ

بهرام معلّمی



شرکت انتشارات علمی و فرهنگی

هوفمان، بنش Hoffman, Banesh.
سرگذشت شگفت‌انگیز کوانتوم/ترجمه بهرام معلمی.

عنوان اصلی:
The Strange Story of the Quantum.

۱. کوانتوم. ۲. اتم. ۳. فیزیك هسته‌ای. الف. معلمی، بهرام، ۱۳۲۴- مترجم. ب. عنوان.
QC ۱۷۴/۱۳ ۵۳۰/۱۲

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيمِ

فَبَشِّرْ عِبادِالَّذين يَسْتَمِعُونَ القَوْلَ فَيَتَّبِعُونَ اَحْسَنَه
اُوْلئِك الَّذِينَ هَديٰهُمُ الله وَ اُوْلئِكَ هُمْ اُوْلُوْا الاَلْبابْ .

پس بشارت ده بندگان مـرا ، آنان که سخن را می شنونـد و
بهترینش را پیـروی می کنند ، آنان کسانی هستند کـه خدای
هدایتشان کرده و خردمندان هم آنانند .

سرگذشت شگفت انگیز

کوانتوم

نوشتهٔ

بنش هوفمان

ترجمهٔ

بهرام معلّمی

شرکت انتشارات علمی و فرهنگی

۲۴۶

شرکت انتشارات علمی و فرهنگی

وابسته به

وزارت فرهنگ و آموزش عالی

سرگذشت شگفت‌انگیز کوانتوم

چاپ اوّل: ۱۳۶۹

تعداد: ۳۰۰۰ جلد

چاپ: چاپخانهٔ شرکت انتشارات علمی و فرهنگی

کلیهٔ حقوق برای ناشر محفوظ است

فهرست مطالب

پیشگفتار	۱
فصل ۱ـ درآمد	۵
فصل ۲ـ پردهٔ یکم ـ کوانتوم به تصور می آید	۱۹
فصل ۳ـ پرده بالا می رود	۲۷
فصل ۴ـ چه علی خواجه ، چه خواجه علی	۳۵
فصل ۵ـ اتم نیلس بور	۴۳
فصل ۶ـ اتم بور به زانو در می آید	۵۹
فصل ۷ـ میان پرده ـ هشدار نویسنده به خواننده	۶۹
فصل ۸ـ صحنهٔ II ـ شاهکارهای پرنس انقلابی	۷۱
فصل ۹ـ لیستهای رختشویخانه به دور انداخته می شوند	۸۳
فصل ۱۰ ـ ریاضت‌جویی پُل	۱۰۳
فصل ۱۱ ـ الکترونها پرداخت می شوند	۱۰۷
فصل ۱۲ ـ یگانگی	۱۲۱
فصل ۱۳ ـ اخطار شگفت انگیز	۱۳۵
فصل ۱۴ ـ چشم انداز نوین علم	۱۶۵
فصل ۱۵ ـ پسگفتار	۱۸۹
بعدالتحریر ۱۹۵۹	۲۱۹
فهرست اعلام	۲۵۶

پیشگفتار

این کتاب برای راهنمایی کسانی نوشته شده است که می‌خواهند در نظریه‌هایی تجسس کنند که به یاری آنها دانشمندان می کوشند دنیای اسرارآمیز اتم را بفهمند. علم اتمی به شکافت هسته‌ای و بمبهای اتمی منحصر نمی شود. در پس این دو، افکاری نامتعارف و رویدادهایی تکان دهنده پنهان است که بدون آنها فهم ما از مطلب براستی اندك خواهد بود.

سرگذشت کوانتوم، داستان جستجویی بی سامان و کورمال در پی دانش است؛ جستجویی که آن را دانشمندان بسیار از سرزمینهای گوناگون در وسیعترین جبهه‌ای که تا آن زمان دنیای فیزیك در برابر خود دیده بود، هدایت کردند، جرقه‌های نبوغ راهش را روشن داشتند، تصادفها و گمانها یاریش دادند، و با سوانحی همانند آن که تنها در افسانه‌ها انتظار می رود، به آن جان بخشیدند.

این داستان، سرگذشت انقلابی پر تلاطم است؛ سرگذشت فروپاشی و انقراض فیزیکی از خود راضی است که سالیان دراز بر حوزه‌ای محدود فرمان رانده بود، سرگذشت دوران فترتی است که نابودیش را از پیش، تناقضات درونیش رقم زده بودند، و سرانجام، سرگذشت ظهور توفان آسای نظامی از هفت آب گذشته، یعنی مکانیك کوانتومی است.

مکانیك کوانتومی اگرچه با قدرت تمام بر سرزمینهای نو یافته فرمان می راند، ولی پیروزیش کامل نیست. آنچه در ظاهر خراشهایی بر رویهٔ درخشان قلمرو آن است، شکافهایی فریبنده می شود که تیرگی درون را فاش می سازد و اهل جسارت را به ماجراجویی تازه‌ای فرامی خواند. سلطهٔ مکانیك کوانتومی بی چون و چرا هم نیست، بلکه در حکمرانی براین قلمرو، شورشی دیگری، یعنی نسبیت، نیز شریك است؛ و با آنکه این هردو نظریه مجموعاً به پیشرفتی عظیم در جستجوی ما در پی دانش انجامیده‌اند، امّا هنوز معاند یکدیگر بشمار می آیند. تا هنگامیکه این دو نظریه مقهور نظریه‌ای نیرومندتر نشوند که دردسرهای کنونی را دربارهٔ چیزهایی مانند فضا و زمان، ماده و انرژی، و علیّت برطرف کند، ناسازگاری اساسی آنها از میان نخواهد رفت. در مورد ماهیت این نظریهٔ جامعتر تنها می توان به حدس و گمان روی آورد، ولی اینکه سرانجام بدان دست خواهیم یافت کم و بیش همانقدر مسلم است که دوام تمدن ما.

آن همزادهای پرتوانی که زمان و مکانشان می نامیم و بدون آنها عالم ما تصور-ناپذیر خواهد بود چیستند؟ ماده، این جوهر اسرارآمیز که به صورتهای شگفت در ما و گرداگرد ما وجود دارد؛ که هم خدمتگزار هم فرمانروای ذهن است، و به عنوان وسیلهٔ اولیٰ آفرینش الهی جایگاه برتر را در سلسله مراتب عالم دارد، چیست؟ و تابش، این سریعترین پیام آور آسمانی، که گستره‌های تهی فضا را به سرعت برق در می نوردد، چیست؟

هرچند ممکن است هیچیك از این پرسشها پاسخی واقعی نداشته باشد، امّا 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 پیچیدهٔ خود را برآن قرار دهد. این موازنه‌ای است بسیار ظریف و حساس، و هر تغییری در تمامی این بنا تا بالاترین نقطه‌اش، لرزه می افکند. داستان نسبیت تاریخچهٔ رویدادهایی است که با تسلیم یك نظریهٔ موقت زمان و مکان به نظریهٔ دیگر، گریبانگیر علم شد. سرگذشت کوانتوم از ماجراهایی سخن می گوید که اخیراً نظریه‌های ماده و تابش، دچارشان شده است و پیامدهای نامنتظر آنها را نقل می کند.

موضوعی مجرد و انتزاعی چون نظریهٔ کوانتومی بخوبی می تواند شالودهٔ

رساله‌های عالمانه‌ای قرار گیرد، که صفحات آنها آکنده از نمادهای نامأنوس ریاضیات عالی است. این کتاب، سرگذشت کوانتوم است بدون ریاضیات، و درعین حال بی آنکه مفهومی از قلم افتاده باشد. در همین کتاب نیم نگاهی نیز به نظریه‌پرداز علمی می اندازیم که با ابزارش، قلم و کاغذ، اندیشه‌ها را می آزماید. استعدادش را در رسیدن به نتایجی با ارزش از مقدماتی که نادرستی آنها بعداً معلوم می شود نباید دست کم گرفت. زیرا بصیرتش ژرف است. از اشارتی در اینجا و آنجا، مشابهتی تقریبی و یا حدسی عجیب و خیالی، فرضیه‌هایی کارآمد از مصالح موجود بر پا می دارد، و به یاری شهود خدا داده‌اش، جسورانه کم سوترین فروغ را پی می گیرد تا راهی به سوی حقیقت بیابد.

عروج شکوهمند کوانتوم به مسند سلطه بر علم و فلسفهٔ نوین، داستان و ماجرای والایی است که اغلب اوقات باورکردنی نیست. قصّه‌ای است آشفته، امّا از میان این آشفتگی ظاهری، اندك اندك بنایی باشکوه سر برمی آورد، هرکشف هراندازه هم به ظاهر بی ربط یا بی معنی بنماید، به طرزی زیبا در جای خود قرار می گیرد تا سرانجام این معمای ظریف و پیچیده به عنوان یکی از کشفیات بزرگ ذهن آدمی، سربرون آورد.

فصل ۱

درآمد

در گوشهٔ آزمایشگاهی کاملاً تاریك، ماشینی الکتریکی قرار گرفته است و روی آن دو کرهٔ فلزی کوچك و براق سوار شده که در نزدیکی هم عبوسانه به یکدیگر می‌نگرند. این همان ماشین متعارف ایجاد جرقه‌های الکتریکی است که زائده‌ای کوچك هم برآن اضافه شده است. دو صفحهٔ فلزی با میله‌های رسانای باریکی به این کره‌ها متصل شده‌اند، چنانکه گویی برای این غول دو چشم گوشهای بزرگی گذاشته باشند.

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

همه‌چیز آماده است، آزمایشگر کلیدی را وصل می‌کند تا جرقه‌ها با سروصدا بین دو کره رد و بدل شوند. او از جرقه‌ها روی برمی‌گرداند و مدّتی منتظر می‌ماند تا چشمش به تاریکی عادت کند. آیا اینکه او می‌بیند شکاف حلقه از فروغ ضعیفی پر شده است حقیقت دارد یا تصوری 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 نزدیك می کند می چرخاند. با باریکتر شدن شکاف، فروغ درخشانتر می شود. باز هم دو سر حلقه را به هم نزدیکتر می کند تا سرانجام تقریباً با هم تماس پیدا می کنند. حال دیگر جای تردید نیست. آزمایشگر نفس راحتی می کشد. جرقه‌های الکتریکی بسیار خردی عرض شکاف را می پیمایند.

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، یك فیزیکدان برجستهٔ جوان آلمانی بود به نام هاینریش هرتز.

ارزش اقتصادی این کشف بی اندازه 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 بی سیم) نبود. شاید تلگراف رادیویی هم مهمترین حاصل این آزمایشها بشمار نمی‌رفت. هرتز سدی را می شکست که مدتی مدید دانشمندان را از پیشرفت بازداشته بود: آزمون درستی نظریه‌ای ریاضی که به نور، الکتریسیته و مغناطیس مربوط می شد و سه سال پیشتر از سوی جیمز کلرك ماکسول، 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 یك معنی، موقعیتی چنین طنزآلود بود. زیرا بدون این شور، هرتز هرگز به خود زحمت تحقیق در پدیده‌ای ظاهراً جزئی را نمی داد که در جریان آزمایشهایش دیده بود. این آزمایشها را همه به این منوال ستودند که نظریهٔ ماکسول را به طرزی درخشان بر شالودهٔ صخره مانند واقعیت تجربی قرار می داد. امّا مقدر بود که این پدیدهٔ ظاهراً پیش‌پاافتاده و بی اهمیت، در دست اینشتین نقش خطیری در انقلاب نظریهٔ کوانتومی بازی کند و از این راه ضربه‌ای ویرانگر بر نظریهٔ ماکسول وارد آورد، ضربه‌ای که این نظریه هرگز نتوانسته است از آثار آن کاملاً کمر راست کند.

برای آنکه ارزش کار ماکسول و هرتز، و تمامی سرگذشت کوانتوم را بفهمیم، باید نخست نگاهی کوتاه به بعضی از نظریه‌هایی بیندازیم که آدمی دربارهٔ نورپرداخته است. گرچه در دوران معاصر، دانشمندان یهودی برجسته‌ای وجود

داشته‌اند، ولی حکمای عبرانی باستان مایه چندانی در پژوهش علمی از خود نشان ندادند. ایشان با ادای این گفته که و خدا گفت نور باشد؛ و نور شد، از کنار مسئلهٔ نور به سرعت گذشتند تا به مسائل مهمتری بپردازند. نور در نزد آنها، چیزی بیش از ضد تاریکی، و شرطی برای توانایی دیدن نبود.

امّا، یونانیان با شمّ علمی قویتری، ایدهٔ نوینی را با اهمیت بسیار ارائه دادند. آنان درك کردند که باید چیزی وجود داشته باشد که در فاصلهٔ میان چشمان ما، چیزهایی که می بینیم، و چراغهایی که آنها را می افروزند، پلی ارتباطی برقرار کند. لذا به نور واقعیتی عینی بخشیدند و به مطالعه‌اش برخاستند و نظریه‌هایی پیرامون آن پرداختند. هنگامیکه دانشمند امروزی از نور سخن می گوید یك چنین چیزی در ذهن خود دارد. تمایز میان صرف قدرت دیدن، و نورعینی، تمایزی مهّم است، درست مانند تمایز میان احساسی که از اصابت سنگ به آدمی دست می دهد و خود سنگ که فضا را می پیماید تا به هدف اصابت کند.

متأسفانه، یونانیان پس از آغازی چنین درخشان، درگیر نظریه‌های متضاد شدند. یکی از این نظریه‌ها می گفت نور چیزی است که مانند آبی که از مجرایی تنگ بیرون می آید، از چشمها جریان پیدا می کند. بر پایهٔ این ایده، وقتی یك شیء را می بینیم که این جریان نور را به سویش متوجه کنیم تا با آن برخورد کند؛ همان طور که مثلاً یك نابینا با پیش بردن دستها و لمس کردن چیزی، آن چیز را «می بیند». این نظریه این نکته را توضیح می‌دهد که هرچیز را تنها هنگامی می بینیم که روبرویمان باشد، و نیز این که با چشمان بسته نمی توانیم ببینیم؛ امّا نمی تواند توضیح دهد که مثلاً چرا در تاریکی نمی توانیم ببینیم. در گیرودار پاسخگویی به این ایرادها، افلاطونِ فیلسوف نظریه‌ای پرداخت که بی گمان، در فراوانی ساز و کارهای زائد، بی همتاست. او برهم‌کنشی سه‌گانه میان سه جریان مختلف قائل بود، یکی از چشمان، یکی از آنچه دیده می شود، و یکی از چراغی که آن را روشن می کند!. مشکل افلاطون در کج نهادن خشت اوّل بود. بر مبنای ایده‌های جدید، هر شیٔ به این علت دیده می شود که نور از آن به چشم ما وارد می شود نه اینکه از چشمان خارج شود، و جالب این جاست که این نکته، یکصد سال پیش از افلاطون، از جانب فیثاغورث بزرگ، با قوت تمام مطرح شده بود. نظریهٔ فیثاغورثی ساده است. بنابراین نظریه، نور چیزی است که از هر جسم درخشانی در

تمام جهات جریان پیدا می کند و پخش می شود، فقط در برابر موانع فوراً به عقب برمی گردد. اگر نور، سرانجام به طور تصادفی وارد چشمان شود، در ما احساس دیدن چیزی را به وجود می آورد که نور در واپسین مرحله از روی آن جهیده است.

در اینجا سخاوتمندانه‌ترین و بخشنده‌ترین جلوهٔ طبیعت را می بینیم، که با گسترش نور فراوانش در هر امتداد ممکنی چشمان ما را خیره می سازد، و در نمایش دقت خطاناپذیر راز و رمز آن هیچ صرفه‌جویی و نظر تنگی را مشاهده نمی کنیم.

البته مسئله نور با چنین نظریه‌ای به هیچ وجه حل نمی شود. تازه اول دردسر است. هر کشف جدیدی در علم یك رشته مسائل جدید با خود به همراه می آورد، همانگونه که اختراع اتومبیل، جایگاههای سوختگیری، جاده‌ها، توقفگاهها، تعمیرگاهها، و هزاران دنگ و فنگ دیگر به دنبال داشت. مثلاً، در اینجا به محض آنکه می فهمیم باید چیزی وجود داشته باشد که بین چشمان ما و آنچه می بینیم پل بزند، یعنی چیزی که «نور» می نامیم، سیلی از پرسشها سرازیر می شود؛ پرسشهایی که پیش از این دانش، به ذهنمان خطور نمی کرد. مثلاً، نور چه شکلی است و اندازهٔ آن چقدر است؟ اصلاً آیا شکل و اندازه‌ای دارد؟ مادی است یا اثیری؟ آیا وزن دارد؟ آیا اگر به چیزی برخورد کند آن را مرتعش می کند؟ داغ است یا سرد؟ با چه سرعتی حرکت می کند؟ اصلاً حرکت می کند؟ اگر نمی تواند به درون مقوای نازکی نفوذ کند، چگونه از شیشه عبور می کند؟ آیا نور رنگهای گوناگونی را منتقل می کند؟ اینها، و بسیاری پرسشهای پیچیده‌تر، به محض کشف وجود نور سر و کله‌شان پیدا می شود.

با فاش کردن قصهٔ کوانتوم، برای برخی از این پرسشها پاسخهایی خواهیم یافت، و از تماشای علمی که بارها و بارها باورهایش را دگرگون می کند، لذت خواهیم برد. پرسشهای دیگر، که پاسخشان خارج از مسیر اصلی این سرگذشت است، دیگر به گوشمان نخواهند خورد.

برای توضیح این که نور چگونه فضا را در می نوردد تا پیامش را به چشمان ما برساند، دو نظریهٔ متفاوت مطرح شد. مطلب را با این سؤال آغاز کنیم که چگونه می توان سنگی را که خارج از دسترس است به حرکت درآورد؟ این کار فقط دو راه دارد، که متناظر با این دو نظریهٔ نورند: یکی پرتاب چیزی به سوی سنگ، و دیگری به حرکت در آوردن آن با یك چوب دستی.

ایدهٔ پرتاب کردن الهامبخش نظریهٔ نخست بود، یعنی نظریهٔ معروف ذره‌ای، یا نظریهٔ تنیزه‌ای. مطابق این نظریه، نور از هزاران ذرهٔ کوچك یا «تنیزه» تشکیل می‌شود که از اجسام درخشان، مانند تکه‌های بمبی که پیوسته در حال انفجار است، به همه طرف پرتاب می‌شوند.

نظریهٔ دیگر، نظریهٔ موجی یا نوسانی بر مبنای روش چوبدستی تنظیم شد. امّا در این مورد باید کمی توضیح بدهیم، چرا که در نظر اوّل به هیچ وجه روشن نیست که جنباندن یك سنگ با چوبدستی اصلاً چه رابطه‌ای ممکن است با امواج داشته باشد. امّا، یادمان باشد که این چوبدستی هرچقدر هم صُلب باشد، اندکی تراکم پذیری خواهد داشت. برای اینکه این واقعیت مهّم را توضیح دهیم، فرض می‌کنیم که این چوبدستی از ماده‌ای ژله مانند ساخته شده باشد، البته، چنین چوبدستی حتی اگر در زیر بار وزن خود تاب آورد چیز سنگینی را حرکت نخواهد داد. امّا در علم انتزاعی (آنچه اینك پیرامونش سخن می‌گوییم علم انتزاعی است، هرچند که ظاهراً حرفمان بی‌پایه و اساس باشد) اصل مهّم است، و در اینجا اصل این است که چوبدستی هرگز کاملاً صُلب نیست. بنابراین ممکن است ژله‌ای هم باشد. و برای اینکه کاری از آن ساخته باشد، به جای سنگ از توپ پینگ‌پنگ استفاده می‌کنیم.

هنگامیکه به یك سر این چوبدستی ژله‌ای فشار می‌آوریم چه اتفاقی روی می‌دهد؟ سردیگر به حرکت در نمی‌آید. در عوض، لرزه‌ای باوقار و سنگینی و به آرامی از این سرچوبدستی به سر دیگر حرکت می‌کند. در زمان معینی به آن سر می‌رسد، آن را به حرکت در می‌آورد، و بنابراین توپ پینگ‌پنگ را حرکت می‌دهد. وقتی هم سنگ را با یك میلهٔ فلزی هل می‌دهیم همین اتفاق، با اندك تفاوتی، روی می‌دهد. اکنون به سؤالی بسیار مهّم می‌رسیم. در واقع چه چیزی در امتداد این چوبدستی نرم حرکت می‌کند؟ یك تپ، یك لرزهٔ صرف! نه چیزی که مثل پرتاب سنگ مادی باشد. چیزی به نامحسوسی پوزخند ماندگار گربهٔ چسایر آلیس* که خودش محو شده بود امّا خنده‌اش در فضا پراکنده بود. با این همه، چیزی توپ پینگ‌پنگ را، بعداز همهٔ حرکتهای آن، به حرکت در می‌آورد. اگر این موضوع را مجسم کنیم و جوهرش را بیرون بکشیم به این نتیجه می‌رسیم که نور در حالیکه رفتاری موج مانند دارد، می‌تواند پیام خود را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر برساند. در

* اشاره به داستان آلیس در سرزمین عجایب است، که از یك گربه تنها لبخندش باقی می‌ماند و جسمش محو می‌شود. م.

واقع به نظریهٔ موجی نور می رسیم.

امّا موج در چه چیزی؟ بعداز همهٔ این حرفها موج فقط هم که یك موج نیست. باید موجی در چیزی باشد. آیا موجی در هوا است؟ خیر، زیرا نور می تواند از خلاء بگذرد. این نکته خود نشان دهندهٔ این است که نور می تواند موجی در یك محیط مادی باشد؛ اگر ماده‌ای خلاء را پرکند دیگر خلئی وجود نخواهد داشت. بنابراین، آیا ما باید به خاطر نیاز به محیطی که امواج در آن بتوانند به نوسان در آیند، از این نظریه دست بشوییم؟ به هیچوجه. هیچ دانشمندی به خاطر یك فرضیهٔ ساده که فعلاً هیچ کس نمی تواند آن را رد کند، از یك نظریهٔ خوش آتیه دست برنمی دارد. بیان این نکته ضروری است که باید محیطی همه‌جا حاضر، و بی واسطه وجود داشته باشد که نور در آن به صورت موج باشد، و باید دقت کرد که به آن نام پرطمطراقی اطلاق شود. این محیط اتر نوررسان نامیده شد، و تنها دلیل وجودی آن تکیه بر نظریهٔ موجی نور بود که از طریق آن تصویری ظاهراً موّجه به این نظریه می بخشیدند.

بنابراین، ما در اینجا دو نظریهٔ نوری رقیب، نظریهٔ ذره‌ای و نظریهٔ موجی، داریم. کدامیك از این دو نظریه درست است؟

سِرایزاك نیوتون کبیر، که تمامی کشفیات بنیانی خود را در دینامیك، گرانش، حساب دیفرانسیل و انتگرال، و بسیاری دیگر از شاخه‌های علم تنها در دوازده سال فعالیت علمی انجام داد، در خلال آن دوران فرصتی یافت تا در نور شناخت هم به پیشرفتهای مهّمی نایل آید. او ترجیح داد نظریهٔ ذره‌ای را به کار گیرد، زیرا پی برد که انتشار امواج در همهٔ راستاها حرکت راستخط نور را توجیه نمی کند. در واقع، در آن زمان به بسیاری از حقایق دقیق در پیرامون نور که ظاهراً با تصویر ذره‌ای جور نبود، پی برده بودند. امّا نبوغ نیوتون با اندك زحمتی بر چنین مشکلاتی چیره شد. آخر کار، او فقط با کمی پیچیده‌تر کردن مطلب، موفق شده بود هرچه تا آن روز در مورد نور دانسته بودند، عملاً توضیح دهد. امّا، اکنون دیگر ذرات او بی اهمیت نبودند. حقایق تجربی او را مجبور کرده بود که به قدرت بازتابیده شدن این ذرات، اوج و حضیض دقیق و شگفتی ببخشد. نور دیگر مانند شلیك تفنگهای سرپُر قدیمی نبود، بلکه به پرواز نوسانی پرندگان شباهت داشت. هنگامی که در خصوص این تپ موزون صحبت می کنیم که توجه را به رهیافت اخیر به نور جلب می کند، قصدمان

این نیست که این دو را همسنگ بگیریم.

هرچند هواداران نظریهٔ موجی در زمان نیوتون کم نبودند، امّا در رویارویی با این نبوغ غول‌آسا که‌در برابرشان قدبرافراشته بود، شانس پیروزی اندکی داشتند. طراحان نظریهٔ موجی، به رهبری هویگنس، فیزیکدان هلندی، پایه‌های اصلی امیدهای خود را براین واقعیت نهاده بودند که ذرات باید یکدیگر را واجهانند، در حالی که تجربه واقعیتی عکس این مطلب را نشان می‌داد، یعنی نشان می‌داد که دو باریکهٔ نور بدون تحمل هیچگونه خسارتی همدیگر را قطع می‌کنند. امّا، این مطلب به تنهایی برای نظریه‌ای که با ذرات تپندهٔ نیوتون رقابت می‌کرد، شالوده‌ای سست بود.

پس از مرگ نیوتون، در حوزهٔ نور و شیوه‌های ابداعی نوینی که ریاضیات مربوط به حرکت موجی را به کار می‌گرفت، کشفیاتی تجربی به عمل آمد. نظریهٔ ذره‌ای، درست به خاطر سادگی و نبوغی که در آن به کار رفته بود، روزهای تاریکی را می‌گذرانید. این ایراد که امواج در نزدیکی کناره‌ها خم می‌شوند، هنگامی مطرح شد که دریافتند امواج نور صرفاً موجکهایی اند به اندازهٔ پنجاه هزارم اینچ که فاصلهٔ قله‌ای تا قلهٔ دیگر آنهاست؛ زیرا انتشار این موجکهای کوچك زیاد چشمگیر نیست. البته این موجکها بُرد انتشار اندکی دارند، و می‌توان محاسبه کرد که معنی این انتشار جزئی آن است که نور نباید سایه‌های کاملاً شدیدی بیندازد؛ اما الگوی مشخص فریزهایی را در لبه‌ها ایجاد می‌کند. عملاً پی بردند که این فریزها حتی در زمان نیوتون وجود داشته و نیوتون در واقع در برابر ذکر علتی قانع کننده برای آنها درمانده بوده است. تمام مدارك جدید، تجربی یا نظری، به طور قطعی از نظریهٔ ذره‌ای کنار گذاشته شد، و تقریباً صد سال بعداز مرگ نیوتون، نظریهٔ موجی به دست ا. ژ. فرنل فرانسوی به چنان درجه‌ای از دقت رسید که به جای آنکه رقیبی شکست خورده باشد، به فرمانروایی بی منازع تبدیل شد. فرنل نظریهٔ موجی نور را با چنان قدرت و ظرافتی تکامل داد که هر تجربهٔ ظریف و پیچیده‌ای که تا آن موقع باز شناخته و انجام شده بود، می‌بایست توضیح خود را در آن بجوید. هنگامیکه استدلال بیشتری مبنی بر خطا بودن نظریهٔ ذره‌ای ضرورت پیدا کرد، در آزمایش تعیین کنندهٔ ژ. ب. ل. فوکو فرانسوی، که بر مبنای آن سرعت نور عملاً در آب اندازه‌گیری شد، یافته شد؛ زیرا در همین جا بود که اختلاف این دو نظریه به طور قطعی آشکار شد. نور در خلأ

با سرعت باور نکردنی ۱۸۶,۰۰۰ مایل در ثانیه (تقریباً ۲۹۷,۶۰۰ کیلومتر در ثانیه) حرکت می کند. بنابر نظر نیوتون، این سرعت در آب حتی باید بیشتر باشد. نظریهٔ موجی تصریح می کرد که این سرعت (در آب) کمتر است. علم مدتی دراز چشم انتظار کسی مانند فوکو باقی ماند تا رویه‌ای آزمایشی برای اندازه‌گیری این سرعتهای بسیار زیاد طراحی کند: هنگامی که این آزمایش انجام شد، نشان داد که سرعت نور در آب درست همان مقدار کمتر از سرعت نور در هواست که نظریهٔ موجی ابراز داشته بود. ستارهٔ نظریهٔ ذره‌ای افول کرده بود، و از آن پس نور جدیدی در آسمانها درخشیدن گرفت.

دلایل نظریهٔ موجی از مدتها پیش تردیدناپذیر بودند. امّا، این نظریه هم خواهان دریافت حمایت قطعیتری بود. کوته‌زمانی پس از فرنل، در علوم کهن و تا حدودی هم راکد الکتریسیته و مغناطیس، نوزایشی روی داد، نوزایی چشمگیری در جهت پژوهشهای تجربی مایکل فارادهٔ انگلیسی، که کشف القای الکترو مغناطیسی و اختراع دینام توسط او شالودهٔ دستاوردهای تکنولوژی الکتریکی امروزی را تشکیل داد.

فاراده از ریاضیات سررشتهٔ چندانی نداشت. اگر کس دیگری جای او بود، در چنین حوزه‌ای که ریاضیات پیشرفته‌ای می طلبید، در برابر موانعی که از میان برداشتن آنها ناممکن به نظر می رسید، متوقف و سرخورده می شد. اما همین برای فاراده موهبتی محسوب می شد، زیرا او را مجبور می کرد به تنهایی کار کند و به خاطر توضیح دادن نتایج تجربی در نزد خودش، یك سیستم تصویری شخصی ابداع کند. این سیستم، با سادگی بسیار و در ظاهر صرفاً غیر ریاضی، بر مبنای چیزی استوار بود که فاراده آن را «لوله‌های نیرو» نامیده بود، و اگرچه در ابتدا ریاضیدانان حرفه‌ای آن زمان به نحوی او را به ریشخند گرفتند، این سیستم از جهاتی بر سیستمهای خود آنها برتری داشت. این ریاضیدانان رمز و راز آثار الکترو مغناطیسی را به طور عمده در توده‌های فلزی و سیم پیچهایی که آن آثار را پدید می آوردند، جستجو می کردند.

فاراده به هیچیك از این کارها دست نزد. از نظر او، هیچ چیز کمتر از کل عالم مطرح نبود؛ سیم، آهنربا، و دیگر چیزهای کوچك جزئیات بی اهمیتی بودند. این دو دیدگاه در حالت ساده‌ای که آهنربا توده‌ای بُرادهٔ آهن را جذب می کند، تفاوت

ظریفی پیدا می کنند. از نظر ریاضیدانان چیزهای اساسی در اینجا، آهنربا، آهن، و فاصله‌های سانتیمتری میان آنها بود. از سوی دیگر، در نزد فاراده، آهنربا تودهٔ معمولی ماده نبود بلکه یك اختاپوس عظیم با شکم آهنی بود که شاخکهای حساس نادیدنی و فراوان خود را در همهٔ جهات تا دورترین حدود عالم می گستراند. توسط همین شاخکهای حساس بود که فاراده آنها را لوله‌های نیروی مغناطیسی نامید، و به همین علت بود که آهنربا آهن را به سوی خودش می کشید. این شاخکهای حساس در نزد فاراده چیزهای مهمی بودند؛ واقعیت غائی همینها بودند و نه خرده‌های ناچیز آهن.

فاراده با هر کشف تجربی مهر تأیید جدیدی بر ایده‌های خود می نشانید. همهٔ اینها، تا مدتها فکر می کردند لوله‌های نیروی او فاقد آن دقتی است که یك نظریهٔ ریاضی طلب می کند. سالها بعد توجه ماکسول عمیقاً به ایده‌های فاراده جلب شد. همین علاقه بود که به خاستگاه یکی از زیباترین تعمیمهای تاریخ علم فیزیك تبدیل شد، تعمیمی که به راستی با نظریهٔ نسبیت اینشتین و خود نظریهٔ کوانتومی همپایه است ـ نظریهٔ نسبیت شکل عام آن را با استحکام تثبیت می کند، و نظریهٔ کوانتومی دقیقاً پایه‌هایش را سُست می کند. *

نخستین گام ماکسول ترجمه ایده‌های ظاهراً پرراز و رمز فاراده به زبان ریاضی آشناتری بود. این کار به خودی خود چیز کمی نبود، امّا هنگامی که انجام شد ایدهٔ فاراده را به صورت یك جوهر تفکر ریاضی نمایان کرد. یك مفهوم فیزیکی نوین مهم، یعنی میدان، که بعداً شالودهٔ نظریهٔ نسبیت عام اینشتین را تشکیل داد، از رهگذر همین تلاشها زاده شد. میدان الکترو مغناطیسی شکل کم و بیش ریاضی پالوده شدهٔ لوله‌های نیروی فاراده است. به جای اینکه به فضایی پراز شاخکهای مجزا فکر کنیم، باید فرض کنیم که این شاخکها از جوهری فراگیر، به نام میدان الکترو مغناطیسی، ناشی شده‌اند. باید میدان الکترو مغناطیسی را به صورت یك واقعیت فیزیکی نهایی بپنداریم، یعنی جمعبندی تمامی آن تنشها و کششهای بیشماری بدانیم که وقتی آهنربایی آهنی را می رباید، وقتی دینامی جریان الکتریکی پدید می آورد، وقتی قطاری برقی حرکت می کند، سرانجام وقتی رادیویی صدای ما

* اشاره به این مطلب است که پایه‌های نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول موج است و شالودهٔ نظریهٔ کوانتومی ذره (فوتون) است. ـ م.

را به سراسر جهان می رساند، می توانیم آثارشان را مشاهده کنیم. محمل همه‌جا حاضر این کششها اِترِ نامیده شده است، امّا وظیفهٔ حفظ تمایزی دقیق میان اتر جدید و اِتِر نور رسانی که نظریهٔ موجی نور آن را طلب می کرد، به اِتِر الکترو مغناطیسی محول شد.

ماکسول تنها به این مطلب بسنده نکرد که ایده‌های فاراده را به زبان ریاضی برگرداند، بلکه در راه تکامل دادن پیامدهای این نظریه و گسترش قلمرو آن، به تلاش خود ادامه داد. او خیلی زود به تناقض رسید، ظاهراً، همه‌چیز با نظریه نمی خواند، اما یافتن چارهٔ کار هم آسان نبود. دانشمندان گوناگون، و از آن میان خود ماکسول، به جستجوی چاره برخاستند. نظریهٔ الکتریسیته و مغناطیس هم اکنون چنان پالوده شده و به زبان ریاضی درآمده بود که وقتی ماکسول به کمك شهودی ناب و بر پایهٔ شباهتهایی بسیار نامطمئن به چاره‌جویی برخاست، مجموعهٔ معادلاتی را پیشنهاد کرد که با معادلات پیشین فقط در شکل ظاهر جزئی اختلاف داشتند. اما این معادلات جدید نه تنها تناقض را از میان برداشتند، بلکه مفهوم مهم و جدیدی نیز ارائه کردند. بنابراین معادلات، باید چیزهایی مانندامواج الکترو-مغناطیسی وجود داشته باشند، که با سرعت نور حرکت کنند و تمام خواص فیزیکی عمدهٔ شناخته شدهٔ دیگر نور را داشته باشند. در واقع، این امواج باید همان چیزی باشند که در راستای توضیح همهٔ مطالب شناخته شده دربارهٔ نور، پیشنهاد شده بودند. وقتی معلوم شد که جزئیات پیچیدهٔ نظریه‌های تابناك فرنل بدون هیچ استثنایی در دل معادلات الکترومغناطیسی جدید جای می گیرند، همسانی امواج الکترومغناطیسی با امواج نور، و به اعتبار آن همانندی دو پدیده‌ای که دانشمندان در راه متمایز کردن آنها رنج بسیاری کشیده بودند، دیگر اجتناب‌ناپذیر به نظر می رسید.

پیش از آنکه این نظریه پذیرفته شود، ضرورت ایجاب می کرد که امواج الکترو مغناطیسی فرضی ماکسول به یاری الکتریسیته در آزمایشگاه تولید شوند. معلوم شد که این کار مشکل است، امّا این اشکال در تولید آنها چندان نبود که در پی بردن به اینکه آیا اصولاً تولید شده‌اند یا خیر. با گذشت سالها عدم موفقیت در آشکارسازی این امواج، ابراز تردید نسبت به اعتبار ایده‌های ماکسول، از سوی فیزیکدانان آغاز شد. این تردیدها مخصوصاً وقتی قوت گرفت که ایده‌های نامبرده

بر شالودهٔ شباهتهای نسبتاً سستی بنا نهاده شدند. این نکته که نظریهٔ ماکسول بر روی کاغذ تا چه حد جاذب است، اهمیت چندانی نداشت؛ تا امواج الکترومغناطیسی را عملاً در آزمایشگاه آشکارسازی نمی کردند و خواصشان بررسی نمی شد، در نهایت نمی توانستند آن را چیزی بیشتر از فرضیه‌ای بدانند که بسیار جالب و نسبتاً هم مهم است.

ماکسول زنده نماند تا شاهد تأیید تجربی نظریهٔ خود باشد. بیش از هفت سال از مرگ او نگذشته بود که هرتز امواج الکترومغناطیسی را که او پیشگویی کرده بود، آشکارسازی کرد.

جرقه‌های ضعیفی که از شکاف حلقهٔ سادهٔ هرتز می گذشتند فقط نمایانگر این واقعیت بودند که آشفتگیهای الکترومغناطیسی، عرض آزمایشگاه را طی کرده‌اند. اثبات موج بودن این آشفتگیها پژوهشهای دقیقی را می طلبید. هرتز با جابه‌جا کردن حلقهٔ خود و مشاهدهٔ چگونگی تغییر شدت جرقه‌ها، رفتار این آشفتگیها را به دقت مورد بررسی قرار داد. انجام این کار با وجود جرقه‌هایی تا آن حدّ ضعیف کار ساده‌ای نبود؛ با همهٔ اینها، هرتز با وسایلی بسیار ابتدایی و ناقص ثابت کرد که این آشفتگیها باز تابش، شکست و سایر ویژگیهای موج گونه را نشان می دهند؛ ضمناً طول موج آنها را نیز اندازه گرفت. اندازه‌گیریهای بعدی نشان داد که آنها با سرعت نور حرکت می کنند؛ به این ترتیب، تردیدهای بیهوده‌ای را که نسبت به رفتار آنها مطابق پیشگویی ماکسول و شباهت بنیانیشان با امواج نوری وجود داشت، از میان برداشت. اهمیت راستین کار هرتز نه در تلگراف رادیویی، بلکه در اثبات صحت نظریهٔ ماکسول بود.

نظریهٔ ماکسول نظریه‌ای پر مایه بود، بجاست این سؤال را مطرح کنیم که علیرغم آنچه با حواسمان در می یابیم، چگونه می توانیم ادعا کنیم امواج رادیویی و نوری مشابهند. تفاوت آنها در بسامد امواج، یعنی سرعت تپیدنشان، یا تعداد ارتعاشاتی که در هر ثانیه انجام می دهند، نهفته است. قبلاً در نظریهٔ موجی قدیمیتر، و حتی در نظریهٔ ذرات تپندهٔ نیوتون، این اختلاف بین رنگهای گوناگون خود را نشان داده بود. باید این نظریه به سایر شکلهای تابش گسترش می یافت. امواج نوری کم بسامد به نور قرمز مربوط اند. با افزایش آهنگ ارتعاش، این رنگ به نارنجی، آنگاه زرد، و سپس به ترتیب رنگهای رنگین‌کمان، و بنفش تیره تغییر می کند.

امّا چرا در کرانه‌های طیف مرئی متوقف می شوند؟ برای دستیابی به تصویری کامل از این موضوع، رویدادهای بعدی را پیش‌بینی کنیم. با زیاد و زیادتر شدن بسامد به نور نامرئی، فرابنفش، آنگاه پرتوهای X، و سرانجام پرتوهای گامای ناشی از رادیوم و مواد دیگر پرتوزا، و به برخی از عناصر تشکیل دهندهٔ پرتوهای کیهانی می رسیم. با دنبال کردن بسامدهای پایینتر از امواج نوری قرمز، ازپرتوهای فرو-سرخ، و پرتوهای گرمایی می گذریم و سرانجام به امواج رادیویی ماکسول و هرتز می رسیم. عاقبت دریافتند که این گونه‌های متفاوت تابش جملگی یك چیزند، و تنها تفاوت آنها در بسامد ارتعاش است: می توان گفت این فقط رنگ آنهاست که فرق می کند و خواص اینها همه با پدیدهٔ الکتریسیته و مغناطیس، و با مکانیك نیوتونی، پیوند سختی یافته بود. همین یگانگی مهم حاصل نظریهٔ ماکسول است که معیاری از عظمت آن را به دست می دهد.

اکنون که این مفهوم پر شکوهِ دستاوردهای برجستهٔ دینامیك نیوتونی را زینت بخشیده بود، علم می توانست کاملاً احساس خشنودی کند. آیا اکنون کارهای عالم به قانون ریاضی دقیقی برگردانده نشده بود؟ آیا نشان داده نشده بود که حرکات اجزای عالمی که باید مسیر مقرر خود را در دل تمامی ابدیت پی گیرد، دقیقاً بر پایهٔ الگوهای تغییر ناپذیر زیبا و پرشکوهِ ریاضی تعیین می شوند؟ آیا روشن نشده بود که هر تك ذره‌ای مادی، هر موجك خرد تابشی، و هر تکان تنش اتری باید تا واپسین مرحله و تا آخرین حد از قوانین والایی تبعیت کند که سرانجام انسان و دانش ریاضی او مقرر کرده‌اند؟ به راستی دلایلی برای احساس غرور پیدا می شد. این عالم عظیم از طریق معادلات شناخته شده‌ای کنترل می شد، هر حرکت آن را به طور نظری پیشگویی می کردند و هر حرکت آن با عظمت تمام از علت به معلول رخ می داد. در واقع، مشکلات عملی غلبه ناپذیری وجود داشت که یك پیشگویی کامل را ناممکن می ساخت، امّا در حوزهٔ نظری، اگر مشاهدات و اندازه‌گیریهای بی شمار انجام می شد و محاسبات تردیدآمیز به انجام در می آمد، کل سرنوشت مرموز عالم در هر جزئی روشن می شد. دیگر هیچ چیز اساسی که می بایست چشم انتظار کشف آن بود وجود نداشت. کارهای ابتدایی انجام شده بود و اکنون تنها یك مسئله باقی مانده بود؛ و آن گسترش جزئیات بر مبنای چیزهایی شناخته شده بود. معدود کسانی با نیروی پیامبر گونه‌شان قادر بودند نزدیك شدن پنهانی و مرموز توفانهای دور دست را

تمیز دهند، اما هشدارهای آنان در آشفتن آرامش خاطر عمومی چندان تأثیری نداشت. مسائل علم فیزیك به طور اساسی حل شد، و آدمی به آنجا رسید که این علم سیستمی کامل ودقیق است. فیزیکدان به همین قانع است که باغ خود را کشت کند، بی خبر از آنکه به زودی در یك وادی بی کرانه سرگردان خواهد شد، زیرا پلانك و همکارانش رفته‌رفته مزهٔ تلخ امّا زندگی بخش درخت دانش را می چشیدند.

مدتها پیش از ماکسول نظریهٔ ذره‌ای دیگر علت وجودی خود را از دست داده بود،به همراه نوزایی نظریهٔ موجی نور که باردیگر به طور مستقل از سرچشمهٔ نامنتظره‌ای، چون الکترومغناطیس، سر بر آورد، نظریهٔ ذره‌ای بی گمان مرده بود.

با همهٔ این احوال، هرتز در سال ۱۸۸۷، در همان آزمایشهایی که وجود امواج ماکسول را تأیید کرد، از رویداد شگفتی نیز خبر داده بود. این رویداد چنان کم اهمیت بود که به زحمت به تفسیرش می ارزید: وقتی که نور از جرقه‌های درخشان دستگاههای انتقال دهندهٔ او به دو سر باز حلقه‌اش می تابید، جرقه‌های کم سو در آن شکاف با سهولت بیشتری پدید می آمد.

فصل ۲

پردهٔ یکم
کوانتوم به تصور می‌آید

در سال ۱۸۸۷ هرتز به این واقعیت شگفت پی برده بود که وقتی نور فرابنفش بر دستگاههای او می تابند ایجاد جرقه‌ها نسبتاً آسانتر است.

او نمی‌دانست که یکی از روشنترین و بی‌واسطه‌ترین شواهدی که بر وجود کوانتوم دلالت می کند، و در حال حاضر هم چنین است، در همان دریافت او نهفته است. جهان هنوز آمادگی نداشت که چنین موهبت گرانقدری را دریابد و پاس دارد. برای بازشناسی کوانتوم تا پایان قرن انتظار کشیدند، و با آغاز قرن جدید، این بازشناخت از سویی کاملاً متفاوت میسر شد.

ما اکنون می‌دانیم که چگونه کوانتوم کل هستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کوانتوم به وسوسهٔ ذهنی هر فیزیك پیشه‌ای تبدیل شده است، روح هر معادلهٔ او را تسخیر می‌کند، الهام‌بخش هر تجربهٔ اوست، و او را به مناقشه‌ای طولانی و نه همیشه پرثمر با فیلسوف و روحانی، در خصوص خدا و ارادهٔ آزاد، می‌کشاند. ظهور آن برخی جنبه‌های شیمی نظری را، و از طریق شیمی که تنها یك گام کوتاه تا زیست‌شناسی فاصله دارد، خود زیست‌شناسی را زیر و رو کرده است. با وجود این، همین کوانتوم همه‌جا حاضر با ارائهٔ راهنماییهای بسیار صریح مبنی بر وجود داشتنش، نخست با تردید و دو دلی، در حوزه‌ای بازشناخته شد که در آن این

راهنماییها تا اندازه‌ای مبهم، و سپس تا حدودی هم به عنوان نتیجهٔ حدس و گمانها، چیز فرخنده‌ای بودند.

تسلیم رسمی کوانتوم به علم فیزیك با چیزی به نام «فاجعهٔ بنفش» رابطه دارد. این عنوان طعنه‌آمیز (که به درد قصه‌های ترسناکی می‌خورد که ریاضیدانی نامی در یکی از کالجهای کالیفرنیای خودمان، در هفته نامه‌ای نوشته باشد) از جانب فیزیك پیشگان در یك فاجعهٔ صرفاً نظری ـ به هردو معنی عبارت ـ به کار گرفته شد.

فاجعهٔ بنفش به طور خلاصه چنین است: اگر کسی محاسبه کند که جسمی چگونه پس از گرم شدن برافروخته می‌شود، به فرمولی ریاضی دست می‌یابد که حاکی از تمام انرژیی است که مدتها پیش در روند یك انفجار فاجعه‌آمیز تابش فرابنفش از ماده خارج شده است.

فقدان چنین رویدادی دلیل بر رسیدن به نتیجه‌ای است مبنی بر اینکه فرمول نادرست است. با این همه، این نتیجه‌گیریها خیلی هم بد نبودند. درواقع، در مورد نور کم بسامد نتایج خوبی هم به بار آوردند. در مورد نور پربسامد بود که این فرمول به فاجعهٔ موهوم پر هیاهو و با آوازه‌ای کشیده شد.

مسیر دیگر حمله به مسئلهٔ جسم تابان، به فرمول ریاضی دیگری انجامید، که به طور موفقیت‌آمیزی از فاجعهٔ بنفش دوری می‌جُست، و با تجربهٔ نور پر بسامد سازگاری فوق العاده داشت.

بنابراین، آیا این فرمول مسئله را حل کرد؟ به هیچوجه، زیرا پی بردند که فرمول اولی برای بسامدهای پایین بسیار عالی و برای بسامدهای بالا غلط است، در حالی که فرمول دوّم، که برای بسامدهای بالا بهتر از آن وجود نداشت، در بسامدهای پایین صدق نمی‌کند. نیمی از هریك از این دو فرمول درست بود.

خلاصهٔ هنگامی که ماکس پلانك، استاد فیزیك نظری دانشگاه برلین، سلسله پژوهشهای تعیین کنندهٔ خود را آغاز کرد، چگونگی امور در این حوزهٔ علم بدین منوال بود.

پلانك ابتدا به حدس‌زنی نسبتاً محضی تن در داد. او تأثیر راههای گوناگون کاربرد نامطلوب این دو فرمول ناقص را آزمود تا اینکه در سال ۱۹۰۰ به فرمول ریاضی منحصر به فردی برخورد کرد که برای بسامدهای پایین، درست مثل اولی بود و برای بسامدهای بالا، کاملاً به دوّمی شباهت داشت. اینجا، واقعاً هیچگونه

استدلال اساسیی لازم نبود. تا حد زیادی یك کار سر هم‌بندی تجربی و فرصت‌طلبانه بود، درست مانند یك دست لباس منحصر به فرد که شلوار آن را از یکی به وام گرفته باشند و کتش را از کس دیگری. پلانك به کمك بخت مساعد و دقت نظر عالی موفق شد این شلوار و کت را با هم جور کند، چنانکه لباس حاصل از آن کت و شلوار جداگانه ارزش بسزایی یافت.

سازگاری این فرمول جدید (به نام فرمول تابش) با آزمایش فوق‌العاده عالی بود. امّا پلانك خود را در وضعیت پسر بچه‌ای مدرسه‌ای می یافت که با مهارت تمام موفق شده است به جواب مسئله‌ها، نگاه دزدانه‌ای بیندازد، و دریابد که این مسئله‌ها آن طور هم که خیال می کرده دشوار نبوده‌اند. پلانك رویهمرفته، برای این کار خود که همانا یافتن نوعی توجیه نظری برای فرمولی بود که این طور ساده طرح کرده بود، زیاد هم از آمادگی دور نبود. پژوهشهای طولانی و ناتمام، این تصور را برای او پیش آورد که تنها یك چیز جدی می تواند نوید رهایی از این بن‌بست را بدهد. او، مسلح به این ایمان کارساز، با چنان تمرکز ذهنی شدیدی در زمینهٔ این مسئله به کار پرداخت که تنها چند هفته‌ای سپری نشده بود که پاسخ را یافت؛ پاسخش چندان بدعت‌گذارانه بود که هفده سال پرماجرا و حادثه گذشت تا به ربودن جایزهٔ نوبل موفق شد.

توصیف دقیق استدلال پلانك ما را به وادی تجرید ریاضی خواهد کشانید، امّا شاید بتوان چیزی از روح این کار او را به کمك روایتی نسبتاً ساده نقل کرد، روایتی که هر چند بیان مو به موی برهان او نیست امّا دست کم از دقتی ماهرانه برخوردار است و تا حدودی کیفیت و ویژگی کلی آن را، همچون یك تمثیل، در خود دارد. اگر هم این داستان با دقتی وسواس‌آمیز بازگو شود، خیلی هم کسل‌کننده نخواهد بود.

با یك کلك ریاضی، که یونانیان مبتکر آن بودند، یك رشته تضاریسهای کوچك را که از لحاظ ریاضی قابل محاسبه‌ترند، به جای منحنیهای هموار قرار می‌دهند. این کلك بنیان حساب دیفرانسیل و انتگرال است، که در جنبه‌های کلی خود کار ساده‌ای است. مثلاً، اگر بخواهیم طول محیط دایره‌ای را به قطر یك اینچ محاسبه (و نه اندازه‌گیری) کنیم، در می یابیم که محاسبهٔ این محیط همیشه هم از لحاظ ریاضی مناسب نیست. بنابراین چنان به سوی مسئله می خزیم که حرکاتمان

اصلاً محسوس نباشد. ما کار خود را با محاسبهٔ چیزی آغاز می کنیم که زمینهٔ ذهنی استواری را فراهم کند. بنابراین، با گذشتن از دست اندازهای سخت و پرمَخافَت پس از رسیدن به وضعیتی ایمن، می توانیم به طور ناگهانی و بدون تن دادن به خطر سقوط برروی آن بِجَهیم.

از اینرو، در مورد محیط نامبرده، دایره را با گذاردن چهار، هشت، یا شانزده و... نشانه، به اجزای مساوی تقسیم و آنها را با خطوطی راست، که در شکل نشان داده‌ایم، به هم وصل می کنیم. در مورد هریك از این چند ضلعیهای منظم می توانیم کل پیرامون را محاسبه کنیم، و آشکار است که این اضلاع هرچه کوچکتر باشند، جمع کل طول آنها به محیط دایره نزدیکتر خواهد بود. مثلاً، مجموع کل پیرامون یك شکل شانزده ضلعی از مجموع اضلاع مربع به محیط این دایره نزدیکتر است. آنچه ریاضیدان انجام می دهد، محاسبهٔ پیرامون شکلی است که شمار اضلاع آن را تعداد زیادی می گیرد. از اینرو پس از آنکه او این محاسبهٔ کلی را انجام می دهد، ناگهان ضمن آنکه افزایش بدون محدویت این اضلاع را در فرمولش مجاز می دارد، این پیچ و تابها را هموار می کند. در این روش تا مادامی که فرمول کلّی به‌دست آید، به آن همواری رام نشدنی اجازهٔ دخالت در جزئیات محاسبه داده نمی شود. در ضمن، محیط دایره‌ای با قطر واحد را با حرف یونانی π نشان می دهند، و این عددی است که به طور ناگهانی در نظریهٔ کوانتوم رخ می نماید. π، تقریباً ۳٫۱۴ است امّا اگر بخواهیم مقدار دقیق آن را بنویسیم، شدیداً اعتراض می کند و همانند سواره نظامی بسیار ورزیده، فراتر از تحمل و شکیبایی انسان ره می سپرد و رفتارش چنان است که بی آنکه سایه‌ای از خود برجای بگذارد، تا جاودانگی پیش می رود

π = ۳٫۱۴ ۱۵ ۹۲ ۶۵ ۳۵ ۸۹ ۷۹ ۳۲ ۳۸ ۴۶ ۲۶ ۴۳ ۳۸ ۳۲ ۷۹ ۵۰۰۰۰

باردیگر به پلانك بازگردیم. او، حتی پیش از سال ۱۹۰۰ نشان داده بود که در راستای اهداف خاصش می تواند توده‌ای ماده را از طریق ذرات بی شماری که با رفتاری موزون به بالا و پایین موج برمی دارد، نمایش دهد. برخی از آنها به سرعت موج می زدند و پاره‌ای آهسته‌تر. تمام بسامدهای نوسان گنجانده می شدند. پلانك اینها را که کار ساده‌ای انجام می دادند نوسانگر نامید، که انرژی گرمایی و نورانی را از طریق نوسان شدید جذب می کردند و مجدداً با فراهم آوردن امکان فرو نشست

شدید و ناگهانی، این انرژی را پس می‌راند. رفتارشان کاملاً به تاب خوردن کودکان، که کسی آنها را با نوسان دم افزایی هُل بدهد، شبیه بود؛ می‌توانستند انرژی را چنان در خود نگه دارند که اسفنج، آب را.

تودهٔ ماده، از طریق گرم شدن انرژی جذب می‌کند. پلانك، با به کار گرفتن مدل سادهٔ خود، محاسبه کرد که ماده چگونه گرما و نور را در هر دمایی نگه می‌دارد و انگاه پس می‌دهد. از آنجا که او به تغییرات آرام مقدار انرژی جذب شده و گسیلیده می‌پرداخت، برای توصیف این تغییر تدبیری اندیشید که بر پایهٔ آن، تغییرات آرام جای خود را به تغییرات تضاریسی می‌سپرد که او می‌توانست آنها را محاسبه کند. او برای تکمیل کردن این محاسبات، همان طور که انتظار داشت، دریافت اگر تضاریسهای انرژی را به روش متداول هموار کند، مستقیماً به فاجعهٔ بنفش باز می‌گردد. او از پیش جواب مسئله را می‌دانست. پلانك از همان آغاز آماده بود که هر فرصت معقولی را برای دریافت پاسخ درست، غنیمت بشمرد، حتی اگر به ازای این پاسخ درست اندکی خطا در محاسباتش راه یابد، و در اینجا در خلال محاسبات خود به فرصتی در جستجویش برخورد می‌کرد که فرصتی عالی امّا نومید کننده بود؛ چرا که این فرصت مستلزم خطای بسیار زیادی بود. اگر می‌توانست خود را تا آنجا بکشاند که با افکار هموار شدن تضاریسهای انرژی با یکی از مقدسترین سنتهای فیزیك نظری درافتد، می‌توانست روشی را بیابد که او را به پاسخی موافق با آزمایش برساند.

امّا چنین ایده‌ای سرشار از خیالپردازی بود؛ درست مثل اینکه کسی بگوید یك تاب می‌تواند با دامنه‌ای یك متری، یا دو متری، یا سه متری، یا چهار متری، و الیٰ آخر، نوسان کند، امّا نه با دامنه‌هایی مثلاً یك و یك چهارم متری یا مقدار دیگری بین این اعداد حتی کودکان نیز می‌توانستند به خیالی بودن این ایده پی ببرند. امّا این ایده به پاسخی صحیح انجامید...

اگر پلانك به هر چیزی امکان هموار شدن می‌داد، بسامدهای بالا عملاً تمام انرژی خود را می‌بلعیدند و فاجعه پیش می‌آمد. او می‌بایست به نحوی از این فاجعه پیشگیری کند. رها کردن تضاریس انرژی به خودی خود مسئله را حل نمی‌کرد، امّا فرصتی به دست می‌داد تا تمییز گذاریی را که تحت قوانین کلاسیك غیر قانونی بود، علیه بسامدهای بالا بیازمایند. چرا که اگر پلانك مقرر می‌داشت انرژی باید در

پیمانه‌های منظم رها شود، پس می توانست گامی به پیش بردارد و بسامدهای بالای متمرد را با صدور حکمی به مجازات برساند تا آنها در پیمانه‌هایی گردآیند که از بسامدهای پایین خیلی بزرگتر باشند. بنابراین یك بسامد پایین می توانست به سهولت مقدار کمی انرژی را که برای پیمانه‌اش نیاز داشت، بیابد. امّا احتمال بسیار اندکی وجود داشت که یك بسامد بالا سهمیه‌ای را که تعهد کرده بود بیندوزد.

پلانك با سود جُستن از یك کلمهٔ مناسب، که از پیش حتی در نوشتارهای علمی و در حوزه‌های دیگر عملاً شناخته شده بود، این پیمانه یا سهمیه را کوانتوم انرژی نامید.

پلانك برای اینکه جواب درستی دریافت دارد، فهمید که باید کوانتوم انرژی را برای هر بسامد ویژه، مطابق با قاعدهٔ معینی ـ و از لحاظ ریاضی، قاعده‌ای بسیار ساده که ممکن است از نظر فیزیکی مشکل باشد ـ جا بیندازد. او با وارد کردن کمیت ویژه‌ای، با نماد h، این فرمول مشهور و از دیدگاه اتمی انفجارآمیز را بیان کرد:

$$\text{کوانتوم انرژی} = \text{بسامد} \times h$$

کمیت بنیادی h را که پلانك عرضه کرد، امروزه ثابت پلانك می نامند و پرچم مباهات فیزیك جدید و نماد اصلی مبارزه طلبی آن علیه نظم کهن است. از زمان ارائهٔ این کمیت به بعد، رویدادهای بزرگی اتفاق افتاده‌اند، امّا با همهٔ اینها مشکل بود که آدمی یکی را از آن میان بزرگ بنامد. مقدار این کمیت فقط عبارت بود از:

$$۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۶,۶\ldots$$

معنی کوچك بودن فوق العادهٔ h این است که تضاریسهای انرژی خیلی ضعیف‌اند. امّا هموار نکردن آنها کلاً چیزی بود که بوی آتش و دود می داد و برای روح جاویدان سنتهای کهن فیزیك منادی خبرهای شوم بود. این نوع پیمانه‌های انرژی بدعتگذاریهایی نابخشودنی بود، که حتی این گستاخترین فیزیکدان از آن هراس داشت. پلانك به هیچوجه خشنود نبود. با وحشتی افزاینده که از نگرانی برای موقعیتش برمی خاست، می دانست که ناچار بوده فرض تضاریس خود را در مرحلهٔ محاسباتش نقض کند. عجیب نیست که او سالها برای اصلاح نظریهٔ خود

تلاش کرده باشد، تا ببیند که آیا می تواند بدون قربانی کردن جواب، این تضاریسها را هموار کند.

امّا همه‌چیز هم بر وفق مراد نبود. این تضاریسها وجود داشتند. انرژی به شکل پیمانه جذب می شد. کوانتومهای انرژی یکی از حقایق بنیادی طبیعت بودند، و افتخار جاویدان کشف آنها نصیب ماکس پلانك شده بود.

فصل ۳

پرده بالا می‌رود

چهار سال از زندگی لرزان و مردد ایدهٔ پلانك می گذشت، و در این مدت پدر تقریباً فرزند خود را ترك گفته بود؛ تا اینکه در سال ۱۹۰۵ مُنشیی در ادارهٔ ثبت اختراعات سویس در برن مطالبی خطیر و گستاخانه ابراز داشت که باعث شد ابداع در حال نزع پلانك زندگی از سر گیرد و توانا و مطمئن، در سال ۱۹۱۳، در مسیر برخورد محتومش با بور قرار گیرد.

چندی پیش از آن، همین مُنشی ادارهٔ ثبت تبیین نظری کاملی از حرکت معروف براونی ارائه داده بود، و تقریباً چهار ماه پس از کار تابناکش که احیاءِ کشف پلانك باشد، نظریهٔ نوینی در ارتباط با الکترو دینامیك اجسام متحرك، که اکنون آن را نظریهٔ نسبیت خاص می نامیم، اعلام کرد. نام این شخص آلبرت اینشتین بود. ایده‌های او چندان نو مایه و شگفت‌انگیز بودند که چهار سال طول کشید تا برای پیوستن به هیئت علمی دانشگاه زوریخ از پناهگاه موقتش در ادارهٔ ثبت اختراعات فرا خوانده شود.

از نظر اینشتین ایدهٔ پلانك حتی از آنکه خود پلانك جسارت ورزیده و به تصور آورده بود، انقلابیتر بود. بنابر نظر پلانك، انرژی تنها به شکل بسته‌هایی وارد ماده می شود؛ و بیرون از ماده، همانجا که به شکل تابش در می آید، باید از قوانینی که

ماکسول بنیاد نهاد پیروی کند. امّا اینشتین نشان داد که این دو ایده معادل یکدیگر نیستند، و در جای دیگر نشان داد که اگر تابش نیز از بسته‌هایی تشکیل یافته باشد، این توازن وجود خواهد داشت.

تأثیر کلی این محاسبات چه بود؟ اگر چیزی هم بود، آیا برای پلانك زیانی به بار نمی آورد؟ آیا به این معنی نبود که پلانك تازه به دوران رسیده با اصول پا برجای ماکسول به منازعه برخاسته است؟ این کار جسارت و بینش ژرف اینشتین جوان را طلب می کرد که فریاد سر دهد آن که با پلانك سر ستیز دارد، کسی جز ماکسول نیست.

آنجا پلانك ادعا می کرد ماده انرژی را فقط به صورت بسته جذب یا گسیل می کند، اکنون اینشتین با گریز از موضوع، اصرار می کرد که کوانتوم انرژی، به جای آنکه صرفاً رفتاری شبیه یك موج داشته باشد تا در معادلات ماکسول صدق کند، باید به نحوی شبیه یك ذره، یك ذرهٔ نور، که ما آن را فوتون می نامیم، رفتار کند.

این طرحی انقلابی بود. امّا اینشتین برگهای برنده‌ای در دست داشت، که قاطعتر از همهٔ آنها پدیده‌ای بود که هرتز در حدود بیست سال پیش متوجهش شده بود.

از آن زمان به بعد مطالب فراوانی دربارهٔ این پدیده گفته بودند. ج. ج. تامسون در انگلستان الکترون را کشف کرده بود، و لنارد که در آلمان زیر نظر هرتز کار کرده بود، با نشان دادن اینکه نور فرابنفش می تواند الکترونها را از سطوح فلزی تبخیر کند، مانند پرتوخورشید که آب سطح اقیانوس را بخار کند، ساز و کار پدیدهٔ هرتز را پی گیری کرده بود. و همین تبخیر، که اکنون اثر فوتو الکتریك نامیده می شود، بود که باعث می شد جرقه‌ها آزادانه‌تر به حلقهٔ هرتز وارد شوند.

اینشتین نظریهٔ اثر فوتو الکتریکی ارائه داد که برای ایدهٔ نوین کوانتومهای نور او، پیروزی چشمگیری به شمار آمد. فهم نظریهٔ اثر فوتو الکتریك او، برخلاف نظریهٔ نسبیتش، ساده است. این نکته را بعداً، همانجا که چگونگی توضیح این نظریه را دربارهٔ بی هنجاریهای بسیاری که در آن اثر مشاهده شده بود بیان می کنیم، خواهیم دید. جالب توجه این است که اثر فوتو الکتریك شالودهٔ چیزهایی مثل سلول فوتو الکتریك، سینمای ناطق، و تلویزیون، و نیز فراورده‌های فرعی بسیار متنوعی

است که پیامد تحقیق آکادمیك هرتز برای انجام اصلاحات جزئی در معادلات الکترومغناطیسی ماکسول است.

اینشتین از تضاریس انرژی پلانك به ایدهٔ تکان دهندهٔ اتمی بودن آن رسید. اسفنجی را در یك وان حمام در نظر بگیرید. می توانیم آن را به توده‌ای از مادهٔ تابان، و آب حمام را به اِتِر تشبیه کنیم. بنابر نظریهٔ ماکسول، هنگامی که این اسفنج چلانده شود مطابق معمول آب خود را بیرون داده و امواجی در وان پدید می آورد. اسفنج پلانك از نوعی بسیار نادر است. در واقع بیشتر شبیه خوشه‌ای انگور است تا یك اسفنج، خوشه‌ای شامل هزاران بادکنك کوچك با اندازه‌های گوناگون، و هریك از آنها پر از آب. وقتی این اسفنج چلانده شود، بادکنکها یکی پس از دیگر می ترکند. هر کدام در تك انفجاری سریع، محتویات خود را، به شکل مقداری آب به بیرون پرتاب، و امواجی از نوع امواج ماکسول ایجاد می کنند. امّا، اینشتین اسفنج را از وان بیرون کشید. آب درون آن به کار او نمی آمد. وقتی اسفنج خودرا به آرامی چلاند، آب مانند قطره‌های باران به طور نامنظمی از آن فرو ریخت. تضاریس نه تنها از ساز و کار درونی اسفنج ناشی می شد، بلکه در ماهیت خود آب نیز نهفته بود، چرا که آب حتی پس از آنکه از اسفنج بیرون آمده بود، به شکل قطرات باقی می ماند.

تصور اینشتین بسیار شگفت بود. این تصور از هر لحاظ به معنی بازگشت به نظریهٔ ذره‌ای قدیمی نیوتون بود. حتی تپشهای نیوتونی، با ایفای نقشی اساسی، در این تصور حضور داشتند. زیرا آهنگ همین تپشها در نظریهٔ ذره‌ای به مثابهٔ بسامد نور بود، و بسامد در اینجا باید نقشی دوگانه بازی می کرد. نه تنها باید رنگ فوتون را تمیزپذیر کند، بلکه بنابر قاعدهٔ پلانك، باید انرژی آن را نیز تعیین کند.

امّا کی بود که بتواند نظریه‌ای چنین خیالپردازانه را باور کند؟ آیا نظریهٔ ذره‌ای را، یکصد سال پیش، و با دلایلی بسیار قاطع، از میدان نرانده بودند، و آیا نظریهٔ موجی از طریق دو خط پژ وهشی مستقل وارد صحنه نشده بود؟ نظریهٔ ذره‌ای چگونه می توانست این امید را در دل بارور کند که از پیروزیهای بی چون و چرای نظریهٔ موجی برای خود نسخهٔ بدلی بسازد؟ وانگهی، این منشی ادارهٔ ثبت اختراعات، کی بود؟ او حتی استاد دانشگاه هم نبود. بازگشت به چیزی شبیه نظریهٔ ذره‌ای باید در حکم پذیرش این مطلب باشد که نظریهٔ قانع کننده و کاملاً تأیید شدهٔ پدیده‌های

الکترومغناطیسی از پایهٔ نادرست است. با همهٔ اینها، اینشتین در واقع نه خوشدلانه و ابهام آمیز، بلکه دقیقاً و به طور کلّی، در پی اندیشه‌ای ژرف و استدلالی توانا، چنین طرحی را پیشنهاد کرد.

امّا آیا این پیشنهاد تا آن حد هم جدی بود؟ در حقیقت، نظریهٔ موجی در دو مکان متفاوت مستقل از یکدیگر، به منصهٔ ظهور رسیده بود، اما اکنون کار اینشتین صرفاً ارائهٔ معیاری هم ارز برای این دو بیان مختلف از یك نظریه بود. به مدتی بیش از یك قرن همهٔ آزمایشها نظریهٔ ذره‌ای را انکار کرده بودند، امّا آیا رویدادهایی مانند فاجعهٔ بنفش دست کم نشان نداده بودند که نظریهٔ ماکسول نیز با دردسر مواجه شده است؟ رویهمرفته، حتی در آغاز کار، در واقع این جنگ خیلی هم نابرابر نبود.

اولین بار پلانك این منازعه را به راه انداخته بود. اینشتین در مدت کوتاهی چیزهای بسیار پر دردسری برای نظریهٔ موجی به وجود آورد. او در حالی که از مقوله‌هایی چون نظریهٔ نسبیت فارغ شده بود، در حالی که خود را یك سرباز جنگی توانا نشان می‌داد، و در حالی که خیل پژوهشگران رو به افزایش پیرو خود را برمی انگیخت، فرصت می یافت که دوباره و دوباره به حمله پردازد. او و شاگردانش در تأیید دیدگاه جدید نور بارها به پیشرفتهای مهم و جدیدی نایل آمدند؛ و نه تنها پیشرفتهای موشکافانهٔ نظری صِرف، بلکه توضیحات ساده و مستقیم حقایق تجربی، که نظریهٔ موجی با خاطری آسوده از آن اجتناب کرده بود. امّا آنچه که برتر از همه باقی ماند توضیحی بود که اینشتین برای اثر فوتو الکتریك ارائه داد.

در بادی امر، در خصوص اثر فوتو الکتریك چیز خارق العاده و تقریباً معجزه‌آسایی وجود دارد. با وجود این حتی از دیدگاه نظریهٔ ماکسول طبیعی است که نور باید بر الکترونها نیرو وارد آورد، زیرا ماکسول نشان داد نور الکترومغناطیسی است، و یك موج الکترومغناطیسی مسلماً بر ذره‌ای ذاتاً الکتریکی مانند الکترون، تأثیر می گذارد. بنابراین هیچ چیز شگفت‌انگیزی دربارهٔ صِرف وجود اثر فوتو الکتریك وجود نداشت. چیزی که نظریهٔ موجی را پریشان کرد این موضوع نبود. شگفتی وقتی رخ نمود که از سرعت الکترونهایی که از فلز جدا می شدند اندازه‌گیریهای دقیقی به عمل آمد. اگر می شد به نظریهٔ ماکسول اتکا کرد، باید به ازای افزایش شدت، یا مقدار نور، سرعت الکترونها نیز افزایش می یافت. امّا **آزمایشگران چیز دیگری یافتند**. سرعت به همان مقدار قبلی باقی می ماند. آنچه

افزایش می یافت شمار الکترونها بود. این آزمایش کننده‌ها دریافتند که برای افزایش سرعت باید بسامد نور افزوده شود و نه شدت آن.

در اینجا بین آزمایش و نظریه اختلافی پیش آمد، که با وجود آنکه اهمیت چندانی نداشت، امّا همانقدر جدی بود که فاجعهٔ بنفش نظریهٔ ماکسول در برابر توضیح حقایق ناتوان بود. ببینیم اینشتین چگونه هر چیزی را به یاری فوتون خود توضیح می داد.

اینشتین آزمایش فوتو اللکتریك را مانند نوعی سالن تیراندازی در نظر گرفت، که در آن فوتونها را به مثابه گلوله می گرفت و بیرون ریختن الکترونها را مانند توپهای پینگ‌پنگی می پنداشت که با سرگردانی روی فواره‌های آب زیر و رو می شوند. به‌منظور افزودن شدت نور فرابنفش فقط لازم است تعداد فوتونهایی که در هر ثانیه پرتاب می شوند افزایش یابد. این روند حتماً باید در هر ثانیه به برخورد الکترونهای بیشتری با فلز بینجامد؛ و دقیقاً همان چیزی است که آزمایش کننده‌ها مشاهده کردند.

اثر تغییر بسامد با ظرافت تمام توضیح داه شد. زیرا بنابر قاعدهٔ پلانك، بالارفتن بسامد نور به معنی افزایش انرژی هرفوتون است. مانند اینکه از گلوله‌های سنگینتر استفاده کنند. بنابراین، هرچه بسامد بیشتر باشد، الکترون تکان بیشتری می خورد، و هرچه تکان الکترون بیشتر باشد سرعت آن افزونتر است. این رانیز آزمایشگران مشاهده کرده بودند.

وقتی اینشتین توضیح خود را دربارهٔ اثر فوتو الکتریك ارائه کرد، در واقع هیچ اندازه‌گیری دقیقی از اندازهٔ تغییر سرعت الکترونها به‌ازای تغییر بسامد نور، انجام نگرفته بود. او در سال ۱۹۰۶ بر مبنای نظریهٔ فوتون این نظریه را پیشگویی کرد، و ریاضیاتی که برای فهم آن ضرورت داشت چندان ساده بود که هر دانش آموز دبیرستانی آن را می فهمید. آزمایشهای بعدی که در سال ۱۹۱۵ در امریکا به پژوهشهای کلاسیك میلیکان منجر شدند، فرمول اینشتین را با چنان دقت و کمالی به اثبات رساندند که در زمینهٔ تأیید یك نظریهٔ علمی، فقط تأیید نظریهٔ موجی ماکسول به‌وسیلهٔ هرتز باآن قابل مقایسه است! ماجرای عجیب این است که‌همین اینشتین بود که نظریهٔ گرانش نیوتون را به اعتبار نظریهٔ نسبیت عام خود ویران کرد، بله هم اوبود که با نظریهٔ فوتونهای خود در احیای نظریهٔ نور نیوتون نقشی چنین مهم ایفا کرد.

نظریهٔ ماکسول در برابر اثر فوتو الکتریك قدرت عرض اندام نداشت و در مقابل بقیهٔ ایده‌های کوانتومی اینشتین نیز بی اعتبار می نمود. به محض آنکه مفهوم فوتون تأیید شد، با کمال شگفتی دریافتند که بسیاری از پدیده‌های خیلی مشهور امّا کم اهمیت‌تر، که از دیدگاه ماکسولی نمی شد آنها را درك کرد، بر طبق ایدهٔ جدید کامل و دقیق‌اند. اینشتین و شاگردانش برای تدارك حملات خود، از حوزه‌های گوناگونی همچون فوتولومینسان، گرمای ویژه، و حتی فوتوشیمی، مهمات فراهم آوردند. با هر گام پیشروی ثابت می شد که فوتون برای مسائلی که از طریق نظریهٔ موجی حل نشده باقی مانده، رهگشای بسیار ساده‌ای است. سرانجام در سال ۱۹۲۱ اینشتین جایزهٔ نوبل را دریافت کرد؛ این جایزه اصلاً نه به خاطر نظریهٔ نسبیت، بلکه به طور کلی به پاس خدمات او به فیزیك نظری، و به ویژه به خاطر نظریهٔ فوتوالکتریکش، به او اهدا شد. دو سال پس از آن جایزهٔ نوبل به میلیکان که اندازه‌گیریهای دقیقش ایده‌های اینشتین را در حدّی بسیار عالی تأیید کرد، تعلق گرفت.

خیال نکنید که اینشتین دشمن قسم خوردهٔ نظریهٔ ماکسول بود. ابداً. نظریهٔ نسبیت نه تنها مظهر کمال مفهوم ماکسولی میدان است، بلکه به همان زیبایی و ظرافت از نظریهٔ ماکسول دفاع و آن را اثبات می کرد که خود نظریهٔ ماکسول از نظریهٔ موجی هویگنس و فرنل به دفاع برخاسته بود. نظریهٔ نسبیت ایجاب می کند که هر قانون فیزیکی شرط اکیدی را برآورده کند. هنگامی که قوانین شناخته شدهٔ فیزیك را در برابر این شرط آزمودند یکی پس از دیگری رد شدند. ایده‌های قدیمی اندازه‌گیری و همزمانی، فضا و زمان و جرم و انرژی جملگی ناگزیر به کناره‌گیری شدند. در تمامی علم دینامیك، از جمله قانون مشهور گرانش نیوتون می بایست تجدیدنظر شود. از میان همهٔ آنچه زمانی شالودهٔ فیزیك نظری بود، تنها دو بازماندهٔ عمده از گزند تندباد توفانی که همانا نسبیت باشد، برجای باقی ماند. یکی از اینها مجموعهٔ قوانین بقای جرم، انرژی، و اندازهٔ حرکت بود، که گفته می شد هیچیك از این کمیتهای فیزیکی نه می توانند از هیچ به وجود آیند و نه کلاً از بین بروند؛ امّا این کمیتها با آنچه قبلاً تصور می شد فرق کلی کرده بودند! بازماندهٔ دیگر معادلات ماکسول بود که توفان را به سلامت از سرگذراندند. شکلشان، به عنوان یادگاری ارزنده از نبوغ ماکسول، بدون تغییر، همچنان گردن فراز و مغرور بر جای ماند.

قوانین بقا که در فیزیك قدیمتر سه قانون مجزا را تشکیل می دادند، اینك به یاری نسبیت در چنان وحدت جدایی ناپذیری به هم جوش می خوردند که دیگر جدا نمی شدند. جرم به صورت شکلی از انرژی و در حقیقت، به صورت قویترین شکل متمرکز انرژی شناخته شده جلوه‌گر شد، و هر چند هم قدرت آن پوشیده بود، گاهی گوشه‌ای از چشم انداز رها شدنش نمایان می شد. این قدرت به راستی عظیم بود. بنابر فرمول اینشتین، انرژی ذاتی نهفته در توده‌ای ماده از حاصلضرب جرم آن و سرعت نور، و دوباره ضرب در سرعت نور محاسبه می شود ـ کمیتی که به راستی سرگیجه‌آور است. مقیاس انرژی اتمی نیز چنین بود. اکنون رها شدن جزئی از این انرژی با نتایجی ویرانگر برای ژاپنیها و پیامدهای خطیر برای نوع بشر، مشاهده شده است. با همهٔ اینها انفجار بمب اتمی با همهٔ آثار ویرانگرش تنها حاصل جزئی کوچك از کل انرژی نهفته در جرم آن است.

اتر قربانی اصلی کارهای هراس‌آور اینشتین بود. او به هر طریقی که استدلال می کرد، چه برای فوتونها یا نظریهٔ ماکسول و امواج، اتر که در حقیقت بدجوری داشت همهٔ علت وجودی خود را از دست می داد، نغمهٔ ناسازی بود. البته، در یك نظریهٔ محض ذره‌ای نور، اتر باید غیر ضروری و زائد باشد. امّا در نظریهٔ نسبیت، که امواج الکترومغناطیسی ماکسول را هم به راحتی در برمی گرفت، گرچه این امواج در چارچوب این نظریهٔ نوین حضور داشتند، دیگر نیازمند اِتِری نبودند که در آن به تموج درآیند. خود فضا و زمان، که اکنون توان خم کردن و انتقال امواج را در خود سراغ داشتند، جانشین آن جوهر همه‌جا حاضر شده بودند.

با همین نیت نیك بود که اتر، در حالی که به هدفهای خود رسیده بود، سرانجام می بایست از دنیای فیزیك رخت بربندد. اتر در روزگار شکوفائیش، با داشتن مفاهیم کاملاً متناقض دردسرهای فراوانی آفریده بود، زیرا تیزهوشترین اندیشمندان را برای ساختن مدلهای بسیار پیچیدهٔ مکانیکی که کمترین شباهتی به مدل اتر داشتند، به خود مشغول داشته بود؛ همان مغزهایی که در صورت نبودن اِتِر با سرعت بیشتری دیواره‌های مستحکم دژ پیشرفت علمی را فرو می شکستند. عظمت این کار درست بر پایهٔ نمونه‌ای از چند خصیصهٔ ناسازگار ارزیابی می شود که برای اتر بیان شد (نه اینکه دیگر در نظریهٔ کوانتومی نوین پدیده‌های ناسازگاری وجود ندارد!). از آنجا که اتر امواج نوری را با سرعتی شگفت منتقل می کند، و این امواج از نوع

ویژه‌ای به نام امواج عرضی اند، اتر صرفاً نمی تواند یك ماده لزج شل (ژلاتینی) باشد بلکه جامدی است با سختی بسیار، به مراتب سخت‌تر از خالصترین فولاد. با وجود این، گرچه این ماده باید هرگوشه و رخنهٔ عالم را پرکند، اما مادهٔ جامد چنان شگرفی است که نباید کوچکترین مقاومتی در برابر حرکت سیارات به دور خورشید بروز دهد که محسوس باشد.

در زندگینامهٔ اِتِر، مایه‌ای از تراژدی وجود دارد. ارزش خدمات بی منت و رایگانی که این ماده به عنوان ماما و پرستار به نظریهٔ موجی نور به مفهوم میدان ارائه داده است، برای علم بسیار گرانسنگ است. امّا در همان هنگام که مسئولیتهایش تا مرتبهٔ انسان بالا رفته بود، ناگهان با سنگدلی و حتی از روی مسرت، به کنارش نهادند، به وفاداریش خیانت کردند و واپسین روزهایش همراه با استهزا و رسوایی، تلخ و ناگوار به سر رسید. اکنون که از این جهان رخت کشیده است هنوز هم بی هیچ آوایی باقی است. در اینجا آیین خاکسپاری شایسته‌ای برای او به جا آوریم، و چند خطی به مناسبت بر سنگ قبرش نقش کنیم:

نخست اتر نور رسان را داشتیم.
سپس اتر الکترومغناطیسی را داشتیم.
و اکنون هیچ اتری نداریم.

فصل ۴

چه علی خواجه، چه خواجه علی

موج یا ذرّه؟

در قرن هفدهم نظریهٔ ذره‌ای نور، دست بالا را داشت. یکصد سال بعد بود که نظریهٔ موجی با آن به جدال برخاست. البته در قرن نوزدهم، وصلت موج و نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول چنان باشکوه بود که ذره احساس کرد باید برای همیشه از بازیابی عظمت گذشته قطع امید کند، امّا طلوع قرن بیستم شاهد تحول دیگری بود.

با این همه، موج در موضع دفاعی خوبی بود، و ذرهٔ تجدید حیات یافته، در عوض پیروزی سریع و قطعی، تنها موفق شد فیزیك را درگیر جنگی داخلی کند که بیشتر از یك ربع قرن به درازا بکشد و چنان به سرعت گسترش یابد که وقتی در سال ۱۹۲۷ آتش بس اعلام شد، تمامی دانش فیزیکی به طور گریزناپذیری درگیر آن شده بود.

قبلاً، برآمدن ابرهای تاریك و شوم جنگ، و کشمکشها و اضطرابهای اولیه‌ای را که منادی توفان بودند، از دیده گذرانده‌ایم. اکنون، به جای اینکه این برآمد نبرد بی امان را، همان طور که از گزارشهای فنی برمی آید، پی گیریم، باید اندکی درنگ کنیم تا جنگ افزار نظریه‌های رقیب را باز شناسیم، زیرا این نظریه‌ها بعداً نیز در

جاهایی عجیب به کار خواهند رفت.

توان تسلیحاتی موج، عظیم بود. به خوبی می توانست از عهدهٔ حفظ کل نظریهٔ الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری سرعت نور در آب به عنوان یك خط دوم دفاعی برآید، زیرا جنگ افزارهای ابتدایی تر آن ظاهراً به تنهایی مقاومتها را درهم شکسته بود. فقط به یکی از آنها نظری خواهیم انداخت.

اولین طغیان علیه نظریهٔ ذره‌ای نیوتون به این واقعیت مسلح بود که امواج، و نه ذرات، قادرند بدون هیچ‌گزند و آسیبی از میان یکدیگر بگذرند، و این همان پدیده‌ای بود که به گونه‌ای غریب «تداخل» نام گرفت.

از تداخل امواج بهره گرفتند تا توضیح دهند چگونه دانشمندان می توانند از دو باریکهٔ نور نه روشنایی بیشتر، بلکه تاریکی به وجود آوردند. فرض کنید نور دو چراغ را روی یك دیوار کاملاً سفید می تابانیم. این دیوار کم و بیش به طور یکنواخت روشن می شود، و اتفاقی نامعمول، که لازم باشد دربارهٔ آن بحثی به میان آید، نخواهد افتاد. حتی اگر می توانستیم چراغهایی به کوچکی سر سوزن بیابیم، که روشنی آن برابر روشنی آذرخش باشد، و با نوری تك بسامد بتابند، باز هم نباید چیز عجیب و نامنتظره‌ای اتفاق افتد که به گفتنش بیرزد.

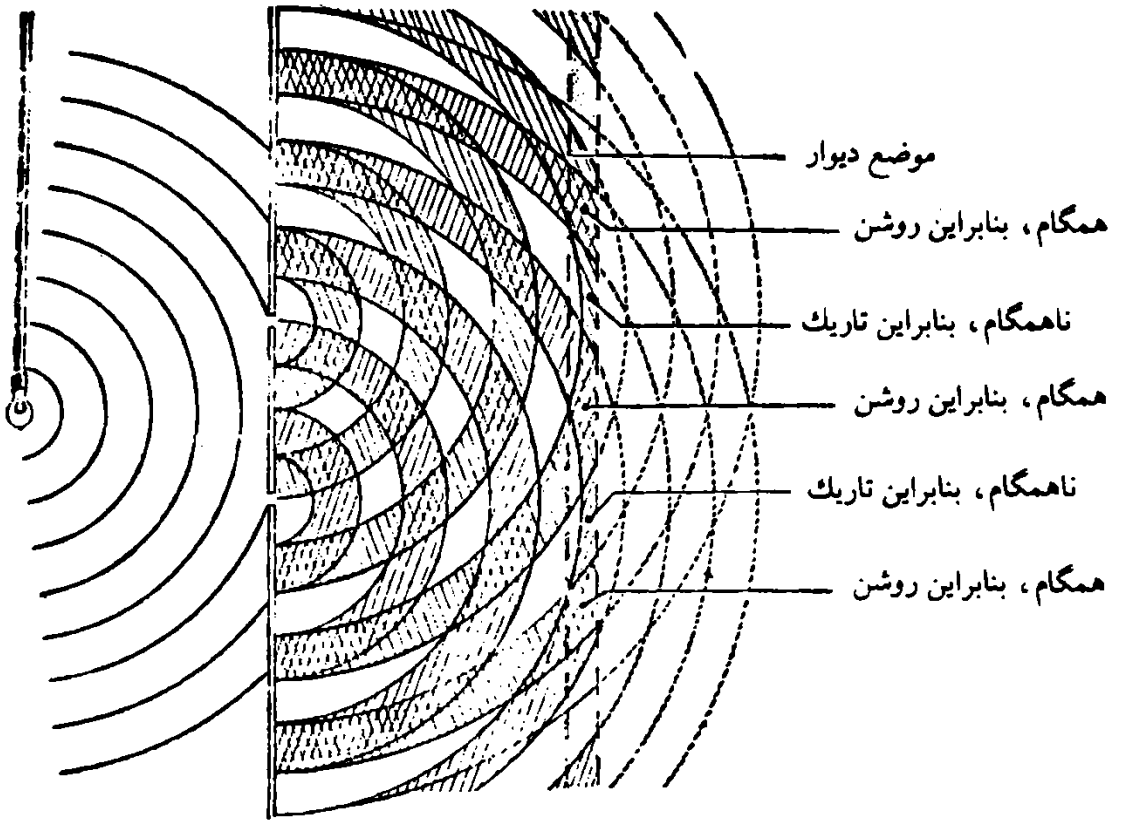
حالا فرض کنید به جای استفاده از دو لامپ مختلف، لامپی را به کار بریم که در آن واحد دو کار انجام دهد. مثلاً، از طریق دو روزنهٔ کوچك به یك پرده بتابد. در این صورت آن نمود روی دیوار چیز دیگری خواهد شد. دیگر روشنایی یکنواختی نخواهد داشت. در عوض، شبیه چیزی مثل پشت گورخر کوچکی به‌نظر می رسد، که نوارهای تاریکی با نقشهای مشخص و منظم روی آن کشیده شده‌اند. اینها را نقشهای تداخلی می گویند. نور تداخل می کرد و تاریکی پدید می آورد. پس از مرگ نیوتون نقشهای تداخلی را کشف کردند. دانستن این مطلب جالب بوده است که نیوتون و ذرات او با این نقشها چه می توانستند بکنند. باز هم می بایست اینها را به کمك نظریهٔ ذره‌ای ساده‌ای توضیح دهند، اما این نقشها برای دفاع از نظریهٔ موجی برهانی قطعی بودند.

فرض کنید یك میلیونر عجیب غریب و کاملا خونسرد، برای خوشگذرانی و تفریح می خواهد در آزمایشی پیرامون هیجانات، از شما به عنوان خوکچهٔ هندی استفاده کند. محافظان گردن کلفت این میلیونر به دقت مراقبتان هستند و آماده‌اند تا

با دیدن کوچکترین نشانهٔ مقاومت یا طغیان حسابتان را پاك کنند. او یك دسته اسکناس هزار دلاری در دستتان می چپاند، فقط به این خاطر که لحظه‌ای بعد پولها را از میان انگشتان لرزان شما بقاپد؛ همین که این پولها را به او دادید دوباره آن را در دستتان می گذارد، امّا پیش از آنکه بتوانید آن را محکم نگهدارید، پس می گیرد و از شما دور می کند. اگر او این بازی حقارت بار خود را چندین بار ادامه دهد، اُفتاخیز موزون و چشمگیری در مقدار پولتان پدید می آید که اگر از این بابت قدری هم نگران شوید، زیاد بیجا نخواهد بود. امّا اگر خیلی هیجان زده باشید، این افتاخیز تأثیری در حال شما نخواهد داشت. اکنون این پرسش پیش می آید اگر دو نفر از این میلیونرهای عجیب وجود داشته باشند، آیا وضع بدتر خواهد شد؟ لزوماً خیر. اگر آنها دقیقاً با یکدیگر هماهنگ باشند، کار واقعاً بدتر خواهد شد، چرا که از دست رفتن دارایی شما نسبت به گذشته افتاخیزی دو برابر خواهد داشت. امّا فرض کنید که آنها ناهماهنگ باشند. پس در همان لحظه‌ای که یکی از میلیونرها پول را می دهد، دیگری پول خود را پس می گیرد، نتیجهٔ خالص این خواهد بود که دارایی شما به طور ثابتی همان صفر، یا ده سِنت، یا هر مقداری که از ابتدا بوده است باقی خواهد ماند. هیچ افتاخیزی وجود نخواهد داشت، و شما حضور دو میلیونر را بسیار آرامبخشتر از حضور یکی از آنها، به تنهایی، خواهید یافت، چرا که وقتی آنها ناهمگام باشند با یکدیگر تداخل می کنند، و نتیجهٔ مؤثری به بار نخواهد آورد.

درست به همین ترتیب، اگر دو موج نوری همیشه کاملاً همگام به موضع مشخصی برسند، ارتعاشاتشان یکدیگر را تقویت می کنند و روشنایی بیشتری نسبت به روشنایی هریك از آنها به تنهایی پدید می آورد. امّا اگر این دو موج همیشه کاملاً ناهمگام برسند، ارتعاشاتشان با یکدیگر در تقابل قرار می گیرد، به طوری که نتیجهٔ کلی یا آشفتگی صفر است، یا تاریکی.

نمودار صفحهٔ بعد نشان می دهد چراغی که از طریق دو روزنهٔ کوچك بر پرده‌ای می تابد، چگونه می تواند روی یك دیوار نقشهای تداخلی پدید آورد. از آنجا که این امواج به طور همزمان از چراغ به دو روزنهٔ کوچك می رسند، امواج جدیدی که از طرف دیگر پرده بیرون می آیند با یکدیگر همگام اند. این امواج در بعضی جاها روی دیوار همیشه همگام هستند و بنابراین روشنایی تولید می کنند. امّا، در مکانهای دیگر، فاصله از این روزنه‌ها چنان است که امواج همیشه ناهمگام اند. در این



مکانها آثار این امواج از بین می‌رود و نتیجهٔ حاصل تاریکی است.

این موضوع توضیح رسمی نظریه موجی نقشهای تداخلی است. این توضیح یکی از قویترین و تهاجمی ترین سلاحهای زرّاد خانهٔ این نظریه را در مبارزه با نظریهٔ ذره‌ای تشکیل می دهد. برای توضیح این اثر به کمك نظریهٔ ذره‌ای، باید فرض کنیم که تك ذره‌ای در آن واحد از هردو روزنه عبور می کند، و این بی تردید فرضی است رویایی. اکنون، با فیزیکدانهایی هم آوا شویم که به اعتبار آزمایشهای خویش می گفتند وقتی به تداخل برمی‌خوریم، با امواج سر و کار داریم.

هرتز هم عمدتاً به کمك نشان دادن تداخل توانست اعتبار نظریهٔ امواج الکترومغناطیسی ماکسول را تثبیت کند. همچنین، به یاری تداخل نشان داده شد که پرتوهای X هم موج اند، زیرا هرگاه پرتوهای X از بلوری عبور می کنند، برروی صفحهٔ عکاسی نقشی مشخص پدید می آورند که می توان آن را نتیجهٔ تداخل امواجی دانست که اتمهایی با آرایش منظم در بلور، آنها را آشفته کرده‌اند. این نقشها، که نقشهای پراش پرتو X نامیده می شوند، باردیگر در داستان ما خودنمایی خواهندکرد.

مدتها پیش از ظهور ماکسول، قدرت سهمگین نظریهٔ موجی ذرهٔ نگون بخت را در هم نوردیده بود. این ماجرا یکصد و پنجاه سال پیش از زمانی اتفاق افتاد که ذره به اندازهٔ کافی توان یافت تا بار دیگر مبارزه را آغاز کند. پس از چنین انقیادی طولانی ذره نمی توانست امیدوار باشد که آشکارا و در همان قلمرو حاکمیت خود موج، به آن حمله کند. ناگزیر به حیله روی آورد و به جستجوی گوشه‌های تاریك سرزمینی پرداخت که موج در آنجا حاکمیتی نداشت: بیابان سِترون و متروکی چندان بی حاصل که موج نمی توانست در آنجا بارآید و رشد کند. در اینجا دفاع ساده بود، زیرا توپخانهٔ سنگین موج در چنین دیار ناهنجاری، از مهمات تُهی بود، و این سرزمین برای ساکنین متمدن و مهذب موج شرایطی بس نامناسب داشت. ذره در این وادیهای فراموش شده مأوا گرفت، و در همانجا سرسختانه برای خودش موجودیت نوینی دست و پا کرد، و در این حال رگه‌های غنی طلا را از زیر این زمین بی بروبار بیرون کشید. قدرت ذره در آغاز نسبت به قدرت موج همچون قطره‌ای بود در قیاس با اقیانوس، امّا تجدید حیاتش چنان پرتوان و سریع رخ داد که به زودی همچون قاره‌ای غول‌آسا در هفت دریای علم فیزیك سر برون آورد، و در دفاع از سرزمینش سلاحهای نوین بسیاری ساخت تا با قدرت عظیم تداخل موج به پیکار برخیزد. اثر فوتو الکتریك فراتر از همه جای داشت. ذره می توانست تأیید تجربی دقیق میلیکان از فرمول اینشتین را در راستای مقابله با خط دوم دفاع موج، برای خود ذخیره کند. در مورد اثر فوتو الکتریك چیزی اساسی تر و مؤثرتر در کار بود که می شد آن را به خوبی در خط اول جبهه به کار گرفت: چیزی که درست به همان اندازه برای ذره تعیین کننده بود که نقشهای تداخلی برای موج، و حتی چیزی بسیار صریحتر و روشنتر از آن.

فرض کنید در امتداد کرانهٔ دریا، نزدیك لبهٔ آب، ردیفی طولانی از بُطریهای همسان را در یك ردیف قرار داده‌اید. وقت ناهار آنها را بدون توجه رها کرده و می روید. وقتی برمی گردید یکی یا دو تا از آنها را اینجا و آنجا واژگون می یابید، امّا بیشتر بطریها درست به همان شکلی که پیش از ناهار گذاشته و رفته‌اید، سرجای خود هستند. آیا می توانید تصور کنید که موجی عظیم با دقت تمام یکی دو تا از بطریهای شما را نشانه گرفته است؛ در حالی که با همان دقت بطریهای دیگر را نادیده گرفته است؟ چنین اتفاقاتی تنها در مملکت کارتونی والت دیسنی روی می دهند. احتمال

بیشتر آن است که کسی از جنس آدمهایی که نمی توانند در برابر وسوسهٔ پرتاب سنگ مقاومت کنند، از آن نزدیکی گذشته است.

اکنون، چه چیزی را در اثر فوتو الکتریك می یابیم؟ نور فرابنفش، الکترونهای موجود در همهٔ سطح فلز را یکباره بیرون نمی اندازد. این نور آنها را از اینجا و آنجا، بدون هیچگونه نظم یا یکنواختی، به بیرون پرتاب نمی کند، بلکه میانگینی از آنها را به بیرون می اندازد. آیا موج می تواند عامل این بیرون راندنهای اتفّاقی الکترون باشد؟ در اینجا امکانی برای پدید آمدن نقشهای تداخلی وجود ندارد، زیرا یکنواختی هر چیزی به صورت میانگینی است. مطمئناً فقط ذراتی می توانند موجد چنین آثار اتفاقی و پراکنده‌ای باشند که از روی بی دقتی و سهل انگاری نشانه‌گیری شده باشند. مطمئناً نور از ذرات تشکیل شده است. اگر هنوز هم در این مورد تردیدی وجود داشته باشد، می توانیم مدرك نور خیلی ضعیف را ارائه دهیم. فرض کنید نور موجی است. آنگاه می توانیم شدت آن را چندان ضعیف کنیم که، مثلاً لازم باشد انرژی فرودی این نور به مدت نیمساعت بر سطحی فرود آید تا تك الکترونی را از آن سطح بَر کَند: هفته‌ها می گذرد واتفاقی نمی افتد، و سپس ناگهان، هنگامی که انرژی کافی ذخیره شد، الکترونها شبیه خط دفاعی توپخانه در ساعت صفر، شروع می کنند به پریدن به چپ و راست. امّا چنین چیزی عملاً اتفاق نمی افتد. الکترونها بمباران پراکنده و نامنظمی را ادامه می دهند. حتی پیش از آنکه امواج فرصتی بیابند تا اثری به وجود آورند، هرچند هم که جملگی در یك نقطه متمرکز باشند، غالباً این بمباران آغاز می شود. در مورد ذرات این نکته درست همان چیزی است که باید انتظار داشته باشیم، چرا که نور را به مثابه بمباران فوتونها می دانیم. وقتی نور ضعیف باشد این بمباران متناوب و پاسخ الکترونی نیز به همان نسبت پراکنده است.

امّا شاید در فقدان تمامیت و انسجام سازماندهی موج، سلاح خط اول جبههٔ فوتون در اینجا با موج برابری کند. برای اینکه به قیاسی مطلوب برسیم، اندکی از سرگذشت خود فراتر رویم تا باز هم مدارك دیگری را ارائه دهیم، مبنی براینکه نور از ذره تشکیل می شود. در سال ۱۹۱۱، س. ت. ر. ویلسون[1]، فیزیکدان انگلیسی، پس از یازده سال تحقیق، وسیلهٔ بسیار پرارزشی اختراع کرد. این وسیله اتاقك ابری

1. C. T. R. Wilson

بود که مسیر الکترونهای منفرد یا سایر ذرات بارداری را که از داخلش می گذشتند، رؤیت پذیر می کرد. ا. هـ. کامپتون[1]، فیزیکدان امریکایی، در سال ۱۹۲۳ آزمایشی بنیادی انجام داد که می توان آن را فقط بر مبنای این نظریه تفسیر کرد که نور الکترونها را وامی جهاند؛ مانند گوی بیلیاردی که گوی دیگر را وامی جهاند. البته، این آزمایش در مقابله با نظریهٔ موجی نقش تعیین کننده‌ای داشت، و دو سال بعد، همان وقتی که کامپتون و سایمون به اتفاق هم کار می کردند، او موفق شد در یك اتاقك ابر اثر برخوردهای منفرد را در این بازی گویهای بیلیارد کیهانی مشاهده کند. رد الکترونها مستقیماً قابل مشاهده بود، و می شد مسیر فوتونها را از مواضع زوج الکترونهایی که متوالیاً به هم برخورد می کردند، استنباط کرد. این آزمایشهای گوناگون تردیدی باقی نگذاشت که فوتونها دقیقاً مطابق قوانین ریاضی برخورد، الکترونها را وامی جهانند. تصور این نکته که در یك بازی بیلیارد، چوب بیلیارد موج باشد کار مشکلی است، و قوانین برخورد را هم در چنین شرایطی نمی توان به کار برد. پس، مطمئناً نور باید از ذره تشکیل شده باشد. و به خاطر همین توضیح روشن حقیقت بود که کامپتون و ویلسون با همدیگر در جایزهٔ نوبل فیزیك سال ۱۹۲۸ شریك شدند.

اینك جنگ افزار اولّیهٔ دو طرف مخاصمه را از نظر گذرانده‌ایم. سلاح موج تداخل بود و از آنِ ذره اثر فوتو الکتریك، و این نکته که نور الکترون را وامی جهاند. به جنگ افزارهای دیگری هم برخوردیم، سلاحهایی پیچیده‌تر ازاسلحهٔ هردو طرف؛ امّا همینها که گفتیم عمدتاً به مقصود ما مربوط می شوند، چرا که اساسی و اصلی اند. اکنون ببینیم نبرد در چه مرحله‌ای است.

در آغاز همه‌چیز درهم و برهم به نظر می رسید، نخست یك طرف، و سپس طرف دیگر امتیازاتی کسب می کرد. امّا معلوم شد که توپهای عظیم نظریهٔ موجی فاقد تحرّکند، و ذره در میدان جنگی که این نظریه انتخاب کرده بود امکان یافت توپهای سهمگینش را به صحنه آورد، فقط به این خاطر که آنها را نیز فاقد تحرك بیابد. پس از زمانی کوتاه این نبرد به جنگی سنگری تبدیل شده بود، که هیچیك از دو طرف نمی توانست با موفقیت به دیگری حمله کند.

فوتون نمی توانست سرزمین موج را تسخیر کند و موج نمی توانست به قلمرو

1. A. H. Compon

فوتون تهاجم کند. وقفه‌ای در هردو طرف جا خوش کرده بود. بین دو اردوگاه متخاصم در حوزهٔ علم شکافی افتاده بود، که نه چشم انداز تصمیمی سریع و نه افق آشتی معقولی در آن پیدا بود.

علم با چنین موقعیتهایی ناآشنا نبود؛ موقعیتهایی که در روند آنها یك نظریه، مجموعه‌ای از حقایق را پنهان کند در حالی که نظریهٔ دیگر آنها را توضیح دهد، امّا در موارد پیشین دلایل موجهی برای این رویدادها وجود داشته است. مثلاً، اینکه معادلات ماکسول بر گرانش اعمال نمی شد موجبی برای نگرانی نبود، چرا که در آن سطح خاص هیچ کسی انتظار نداشت پیوندی میان الکتریسیته و گرانش بیابد. امّا اکنون فیزیك با موقعیتی کاملاً جدید روبه‌رو بود. موجودی واحد، نور، هم موج بود و هم ذره. اصلاً چگونه می توانستند اندازه و شکل ویژهٔ آن را به تصور آورند؟ برای اینکه تداخل را پدید آورد منتشر می شود، امّا برای واجهانیدن الکترونها باید دقیقاً جایگزیده باشد. این یك معضل بنیادی بود، و وقفه در نبرد فوتون ـ موج به این معنی بود که این موضوع باید به صورت معما باقی بماند تا روح فیزیکدان واقعی را آزار دهد. اینکه نور درعین حال دو چیز متناقض باشد، غیر قابل تحمل بود. اینکه علم چنین ثنویت حل نشدنی جونده‌ای را در اجزای حیاتی خود پرورش می دهد، با تمامی آرمانها و سنتهای آن مغایر بود. با این همه، مدارك موجود متعلق به هردو طرف مناقشه انکارناپذیر بود. یافتن راهی برای رهایی از این سرگردانی مستلزم صرف وقت بود. این به صورت نتیجه‌ای از یك ضد حملهٔ تابناك از سوی نظریهٔ موجی جلوه کرد، امّا برای نقل این ماجرا، اکنون باید تمام داستان را بازگوییم. خواننده می تواند به کمك تجربهٔ شخصی خود، رنج و عذاب فیزیکدان آن دوره را درك و ارزیابی کند. بهترین کاری که آنها می توانستند بکنند این بود که با چهره‌هایی افسرده و اندوهناك در این سو و آن سو سرگردان شوند و شکوه کنند که دوشنبه‌ها و چهارشنبه‌ها، و جمعه‌ها باید نور را موجی تماشا کنند؛ سه‌شنبه‌ها، پنجشنبه‌ها، شنبه‌ها باید آن را ذره‌ای ببینند. یکشنبه هم فقط باید به دعا می گذشت.

فصل ۵

اتم نیلس بور

در سال ۱۹۱۱، که نبرد میان موج و ذره وقفه‌ای آکنده از نومیدی را می‌گذرانید، جوانی به نام نیلس بور، برای ادامهٔ تحصیلات خود از سرزمین مادریش دانمارك، دریاهای خاکستری را پیمود و به انگلستان رفت. او پس از یك سال تحصیل در کمبریج رهسپار منچستر شد، که در آنجا مردی به نام رادرفورد استاد فیزیك بود. بور، از لحاظ علمی، عملاً ناشناس بود. تکنیك ریاضی او را با معیارهای حرفه‌ای نمی‌شد برجسته خواند. امّا تخیلی قوی و جسارتی شگرف داشت، و قدرت ادراکش چنان بود که فیزیك را بدون توسل به روابط پیچیدهٔ ریاضی درك می‌کرد. کوانتوم هم فقط برای مردانی از این دست رازهای گنجینهٔ خود را فاش می‌کند؛ امروزه، خبرگان تابناك دنیای علم به این انسان فروتن و آرام به عنوان رهبر روحانی پژوهشهای اتمی حرمت می‌گذارند. او، در سال ۱۹۲۲، یك سال پس از اینشتین، جایزهٔ نوبل را در فیزیك دریافت کرد. دو سال پیش از آن، بور به ریاست مؤسسهٔ نوبنیاد فیزیك نظری در کُپنهاك برگزیده شده بود؛ و این همان مؤسسه‌ای بود که با الهام از رهبری او می‌رفت تا به مرکز جهانی پژوهشهای اتمی تبدیل شود، و دانشمندان برجستهٔ تمام ملل را به خود جذب کند، و بر آن دورهٔ شتابان دانش فیزیك تأثیری فوق‌العاده برجای گذارد.

بور چنین شخصی بود. اما رادرفورد، مردی که بور زیر نظر او مطالعات خود را انجام داد، چه کسی بود؟ به سال ۱۸۹۵، خیلی کمتر از پنجاه سال پیش از ظهور بمب اتمی، برمی‌گردیم، همان هنگام که رادرفورد هنوز جوانی بیش نبود، و و. ك. رونتگن فیزیکدان آلمانی با کشف پرتوهای X جهان را تکان داد. او در حالی که مسیر تخلیهٔ الکتریکی از طریق گازها را آزمایش می‌کرد، تقریباً به تصادف و با مشاهدهٔ نوری که آنها را در ماده‌ای فلوئورسان در نزدیکی دستگاهش تولید کردند، به وجود همین پرتوها پی برد. هنگامی که جوایز نوبل را در سال ۱۹۰۱ بنیاد نهادند، جایزهٔ فیزیك آن را به رونتگن دادند. امّا، در سال ۱۹۱۲ بود که معلوم شد پرتوهای X او خصیصهٔ نقش پراش امواج را هم ظاهر می‌کنند.

کشف پرتوهای X پژوهش را در بسیاری حوزه‌ها برانگیخت، و یك سال بعد به کشف تصادفی هـ. ا. بکرل، دانشمند فرانسوی، که حتی از اهمیت بیشتری برخوردار بود، منجر شد.

از آنجا که این پرتوهای نویافته سبب فلوئورسانی می‌شدند، بعید نبود که به وسیلهٔ ماده‌ای منتشر شوند که پس از نورگیری، در تاریکی بدرخشد. بکرل، با اطمینان کافی دریافت که برخی نمکهای اورانیوم پس از نورگیری، چنین پرتوهایی بیرون می‌دهند. سپس، به یاری بختی مساعد، کشف کرد که این مواد، پرتوهای نامبرده را حتی بدون نورگیری بیرون می‌دهند. این موضوع به راستی شگفت انگیز بود. پس پی بردند که اورانیوم، سنگینترین عنصر شناخته شده، به طور خود به خودی پرتوهای نافذی بیرون می‌فرستد که آنها را به نحوی بدون کمك عاملی خارجی تولید می‌کند. بکرل سهواً به چیزی برخورده بود که ما اینك آن را پرتوزایی می‌نامیم. معلوم شد که پرتوی است بسیار اختلال‌زا؛ زیرا، انرژی، هر چند به مقداری ناچیز، بدون هیچگونه وسیلهٔ تقویتی قابل رؤیتی وجود داشت. این انرژی چگونه ایجاد می‌شد؟ از کجا می‌آمد؟

تابشهای بکرل در نزد دانشمند بی‌همتایی چون ماری کوری فریبندگی مقاومت ناپذیری داشت. این زن، در آن موقع دانشمند جوان و نسبتاً ناشناسی بود، اما بعداً تنها کسی شد که در تاریخ دوبار جایزهٔ نوبل دریافت داشته است؛ او یکبار در سال ۱۹۰۳ مشترکاً با بکرل و همسرش پییرکوری، و باردیگر در سال ۱۹۱۱ به تنهایی این جایزه را در رشتهٔ شیمی ربود. او و همسرش که در پاریس کار می‌کردند،

در سال ۱۸۹۸ توانستند وجود دو عنصر جدید را اعلام کنند، که قدرت پرتوزایی شان از اورانیوم بیشتر بود. آنها یکی از این عناصر را به افتخار لهستان (پولند)، زادگاه ماری، با توجه به روحیهٔ میهن پرستی گرم او، پولونیوم نام نهادند. این ماجرا چهار سال پر بار در پی داشت؛ او در این چهار سال با تلاش و کوششی فرساینده، توانست خرده‌های ریز نمك گرانبهای رادیوم را که از تنها پس ماندهٔ کانی اورانیوم حاصل شده بود، با دست تقطیر کند.

پرتوزایی رادیوم تقریباً باور نکردنیٰ بود. این ماده فعالترین مادهٔ شناخته شده تا آن زمان، و در حدود دو میلیون بار قویتر از اورانیوم بود. این عنصر جریان بی پایان انرژی را به اشکال گوناگون از درون خود به بیرون می فرستاد: این عنصر به طور خود به خودی در تاریکی می تابید و خود را اندکی گرمتر از پیرامونش نگه می داشت؛ بعداً پی بردند که گاز پرتوزای سنگینی که پیشتر ناشناخته بود به بیرون می فرستد؛ این عنصر به وسیله‌ای برای مبارزه با سرطان تبدیل شد؛ بالاتر از همه، می رفت تا گواه بارزی باشد بر تلاطم و جوشندگی هراسناکی که پیوسته در دل ماده جریان دارد. مقدار انرژیی که از یك ذرهٔ رادیوم خارج می شود بی نهایت اندك است. امّا چنین موجودات ریزی اغلب از رویدادهای بزرگی در علم خبر می دهند. بکرل و کوریها عصر اتم را آغاز کرده بودند.

ما از بابت فهمی که از معنی باطنی پرتوزایی دستگیرمان شده، خود را مدیون ارنست رادر فورد و همکار آزمایشگاهی اش ف. سادی انگلیسی می دانیم. آنان که در کانادا کار می کردند، یك رشته آزمایشهایی ماهرانه انجام دادند که حقایق بنیادی فرایند پرتوزا را اثبات کرد، و به این ترتیب در همان سال ۱۹۰۳ به یك نظریهٔ فروپاشی و استحالهٔ پرتوزای اتمها، که مبانی آن امروزه نیز پذیرفته است، انجامید. رادرفورد می رفت تا به کشفیات دیگری دست یازد که در ارتباط با اتم اهمیت عظیمی داشتند و او را به عنوان بزرگترین فیزیکدان تجربی عصر تثبیت می کردند. او در سال ۱۹۰۸ جایزهٔ نوبل شیمی را دریافت داشت. و سادی در سال ۱۹۲۱ به همین جایزه دست یافت.

به نظر رادر فورد و سادی، اتمهای پرتوزا منفجر و از هم جدا می شوند. سه نوع پرتو به بیرون فرستاده می شود، که به سه حرف اول الفبای یونانی، پرتوهای α، پرتوهای β، و پرتوهای γ نام گرفتند. معلوم شد که پرتوهای γ، پرتوهای

ایکسی اند که از پرتوهای یافتهٔ رونتگن بسیار نافذترند، و پی بردند که پرتوهای β جریانی از الکترونها هستند. همین طور پرتوهای α ، که پاره‌های رادیوم بودند و با وجود این پاره‌های رادیوم هم نبودند. این پرتوها هرچند حاصل انفجار اتمهای رادیوم بودند، امّا رادیوم نبودند بلکه اتمهای مادهٔ متفاوتی، یعنی گاز خنثی و بسیار سبك هلیم، بودند که چون بار الکتریکی حمل می کردند حالت یونیده نام گرفتند. وقتی یك اتم رادیوم منفجر می شود، نه تنها مواد مختلفی چون ذرات α و β گسیل می کند، بلکه پارهٔ برجای مانده، خود مادهٔ دیگری است. این مادهٔ برجای مانده به نوبهٔ خود پرتوزا بود و منفجر شد، و پس مانده‌های آن، در زنجیرهٔ استحاله‌های طولانی، به سرب، سنگینترین ماده، ختم شد. چشم انداز نوینی، در برابر علم گشوده شده بود.

در آن زمان پیرامون ساختار اتم کمتر چیزی می دانستند. تامسون، کاشف الکترون، که جایزهٔ نوبل ۱۹۰۶ را دریافت داشت، از باب آزمایش هم که شده پیشنهاد کرد که اتم از یك گوی الکتریسیتهٔ مثبت تشکیل شده که الکترونها مانند کشمشهایی در داخل یك کیك کشمشی، آن را در برگرفته‌اند. ذرات سریع پرواز حاصل از مواد پرتوزا ابزار باشکوهی بودند که با آنها اتمها را به زیر تازیانه می گرفتند و رازهایش را با زور بیرون می کشیدند. همان طور که لِنارد، برندهٔ جایزهٔ نوبل ۱۹۰۵، قبلاً خاطرنشان کرده بود، ذرات β چندان سهل از درون اتمها عبور می کنند که باید فضای وسیعی در درون آنها وجود داشته باشد. امّا معمای واقعی را ذرات α به وجود آوردند، زیر دستخوش تصادمهای شدیدی با اتمها بودند که احتمالاً مدل اتمی تامسون از توضیح آنها عاجز بود.

رادرفورد، که در سال ۱۹۱۱ جایزهٔ نوبل را برده و در منچستر ساکن بود، مدل اتمی جدیدی پیشنهاد کرد تا این برخوردهای استثنایی و عجیب را تبیین کند. او نشان داد که بار الکتریکی مثبت اتم باید در هسته‌ای سنگین، کوچك و به قطری کمتر از یك میلیون میلیونم اینچ متمرکز باشد. این هسته‌های سنگین و فشرده چنان به زور در اتم جا داده می شدند که ذرات شدید α را می تابانند. الکترونهای اتم، به جای اینکه مطابق مدل تامسون در درون آن باشند، می بایست به گرد هسته و در فواصلی نسبتاً عظیم از آن پرواز کنند. ترکیب بار الکتریکی منفی آنها می بایست دقیقاً با بار مثبت هسته به موازنه درآید، و ساختار کلّی آن با منظومه‌ای خرد تشابهی نمایان

داشته باشد.

رادرفورد آماتور و شتابزده نبود. تا وقتی که صحت و سقم شواهد تجربیش از لحاظ ریاضی ثابت نشد، مدل اتمیش را ارائه نکرد. و به راستی مدل اتمی او شالودهٔ تمامی ایده‌های ساختار اتمی نوین ما را تشکیل می‌دهد. با این حال، نقایص نظری چنان ریشه‌داری توانایی اتم رادرفورد را در توضیح نتایج آزمایش سست می‌کردند که فقط کارآمدترین نحوهٔ رفتار می‌توانست در رفع آنها امیدی بیافریند. در اینجا دو مورد را بازگو می‌کنیم.

برابر نظریهٔ ماکسول، اتم رادرفورد می‌بایست با نوری متشکل از همهٔ بسامدها تابش کند. برعکس، از دیرباز معلوم شده بود که بسامدهای نوری که با آنها اتمها شناخته می‌شوند از نوعی بسیار خاص هستند. هر عنصر، گروه ویژه‌ای از بسامدهای نور را، مانند نوعی علامت تجارتی، برای استفادهٔ خودش برمی‌گزیند، و هیچ عنصری هرگز نمی‌تواند علامت تجاری عنصر دیگری را جعل کند. مثلاً هیدروژن، سبکترین و ساده‌ترین عنصر، را در نظر می‌گیریم. طیف نگار، به اتکای کارهای ماهرانهٔ خود هیدروژن را به تابش وامی‌دارد و آنگاه به بررسی نور آن با منشور می‌پردازد، امّا به طیفی که شامل تمام رنگهای رنگین کمان باشد دست پیدا نمی‌کند. در عوض تنها مجموعه‌ای از رنگهایی خاص را می‌یابد. از آنجا که این رنگها در طیف به صورت خط نمایان می‌شوند، خطوط طیفی نام دارند. می‌توان آنها را طبق موضع و سایر نشانه‌هایشان، در خانواده‌هایی آرایش داد. طیف نگار، در وقت اندازه‌گیری بسامد خطوط گوناگون هیدروژن و جدولبندی آنها در چارچوب خانواده‌هایی، آرایه‌ای از اعداد را به صورت زیر پیدا می‌کند:

... ۳,۰۸۲,۴۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۲,۹۲۲,۵۶۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۲,۴۶۵,۹۱۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶۹۰,۶۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۶۱۶,۶۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۴۵۶,۷۷۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
... ۲۷۴,۰۷۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۲۳۳,۸۷۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۵۹,۸۷۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰

این اعداد که اینک می‌توان آنها را با دقتی چشمگیر اندازه‌گیری کرد، مطمئناً معنی و مفهوم عمیقی دارند. اینها علامت تجارتی هیدروژن‌اند، و هیچ عنصر دیگری نمی‌تواند این مفهوم را از آنها برباید، قابل تصور نیست که تمام سیستم پیچیدهٔ علامتهای تجارتی منحصر به فرد صرفاً به طور تصادفی به وجود آمده باشد؛

یعنی هر علامت تجارتی نباید بیش از یك اجتماع اتفاقی از بسامدها باشد. این اعداد باید راز و رمزهای شخصی و ذاتی هیدروژن را در برگیرند. امّا پیام آنها چیست؟

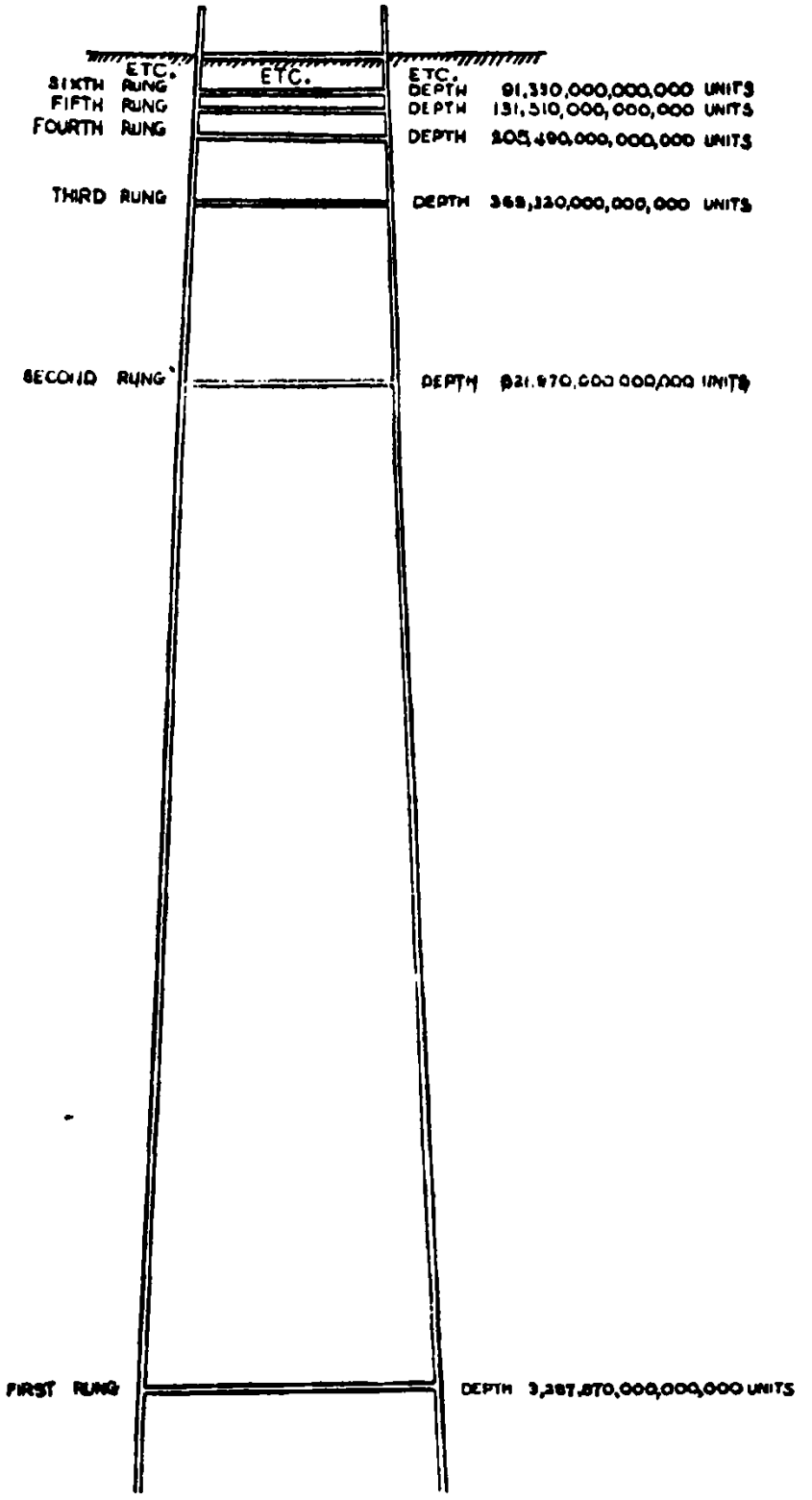
در آستانهٔ آخرین دههٔ قرن نوزدهم بود که توجه یك آموزگار گمنام سویسی، به نام یوهان یاکوب بالمر، به بررسی این بسامدها جلب شد. در آن روزها بیشتر از چهار بسامد هیدروژن را نمی‌شناختند. سایر بسامدها، در بطن فروسرخ و فرابنفش، در آنسوی بخش مرئی طیف قرار داشتند. بالمر از این مادهٔ بی برکت فرمولی فوق العاده استخراج کرد که هرچند برای آن چهار بسامد شناخته شده توضیح باشکوهی در برداشت، پذیرفتن آسان و تمام و کمال آن بسیار شگفت انگیز بود؛ موفقیت آن هم باید صرفاً تصادفی بوده باشد.

بالمر در زمینهٔ طول موجها کارکرد. کیفیت قاعده‌ای که او در ارتباط با بسامدها کشف و نوین‌سازی و اصلاح کرد، چنین است:

عدد مرموز ∞, ∞, ∞, ۸۷۰, ۲۸۷, ۳ را در نظر بگیرید و با آن نوعی نردبان نامنظم بسازید،طوری که فواصل پلکان آن، در ضمن پایین آمدن تقسیم این عدد را بر ۱، ۴، ۹، ۱۶، ۲۵، ۳۶، . . . به دست دهند. آنچه بویژه فرمول بالمر را جالب می کند این نکته است که اعداد اخیر، اعداد مرموزی نیستند. اینها مجذورهای اعداد طبیعی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، و. . . هستند. نردبان رادر صفحهٔ بعد نشان داده‌ایم.

اینها با بسامدهای هیدروژن که در صفحهٔ ۴۷ بر شمرده‌ایم چه ربطی دارند؟ بیان ساده‌اش این است: بسامدهای واقع در نخستین ردیف افقی، فواصل نخستین پله تا دوّمی، سوّمی، چهارمی، و. . . هستند؛ بسامدهای ردیف دوم فواصل پلهٔ دوم از پلکان سوم، چهارم، پنجم، و. . . هستند. بالمر اصول این قاعدهٔ برجسته را تنها از چهار بسامد نخست ردیف دوم استنتاج کرد، و حتی تا آنجا پیش رفت که بگوید ردیفهای دیگری نیز وجود خواهد داشت. سالها گذشت، بسامدهای هرچه بیشتری نه تنها برای اتم هیدروژن که برای عناصر دیگر اندازه‌گیری شد. همانگونه که در سال ۱۹۰۸ و. ریتس، دانشمند سویسی، نشان داد، برای تمامی این بسامدها یك نردبان اصلی وجود دارد. کاری که بالمر از ناقصترین داده‌ها انجام داده بود، **شاهکار شگفت انگیز** پیدا کردن کلیدی بود که به طیفهای تمامی عناصر

می‌خورد، و این کار چنان از زمان خودش پیش بود که تا وقتی او زنده بود کسی قدرش را نشناخت.



دقت تطابق مفهوم بالمر با حقایق، سادگی ژرف آن، و دخالت سیستماتیك اعداد طبیعی، هیچ تردیدی در این مورد باقی نمی گذارد که این مفهوم جزئیات به غایت مهمی از کالبدشناسی نهفتهٔ طبیعت را به نمایش می گذارد و استخوان بندی راستین عالم را آشکار می کند. این مفهوم، در مقایسه با اتم رادرفورد، با پای فشردنش در برون فرستادن نور متشکل از تمامی بسامدها، صرفاً مانند یك آمیب جلوه کرد.

اینها که گفتیم عبارت بود از ایراد اول بر اتم رادرفورد. توضیح ایراد دوم زیاد طولانی نیست. این نکته‌ای ساده است که اتم رادر فورد بنابر نظریهٔ ماکسول ساختاری ناممکن است. بین سیاراتی که به روال نیوتونی به دور خورشید می گردند، و الکترونی که به موجب قوانین الکترو دینامیکی به دور هسته در پرواز است تفاوتی ذاتی وجود دارد. سیارات به آرامی و در مدارهای بیضی وار خورشید را دور می زنند. امّا الکترونهایی که هسته را دور می زنند سرعت بسیار زیادی دارند. آنها نه تنها انرژی خود را به صورت امواجی نوری متشکل از همهٔ بسامدها به بیرون می فرستند، بلکه درعین حال حرکتی مارپیچی نیز به سوی هسته دارند. اگر اتم واقعاً چیزی به سبك مدل رادرفورد بود، چگونه می توانست برای مدتی طولانی دوام آورد؟

در همان زمان که اتم رادر فورد برای بقای خود در برابر تهاجم فاجعه‌آسای ایرادهایی که در بالا برشمردیم به نبرد مشغول بود، بورِ جوان پیشنهادهایی به میدان کارزار نهاد که تعبیری جز «متهورانه» برازندهٔ آن نیست. آیا او، همان طور که استدلال می کرد، قبلاً به این ایراد دوّم بر نخورده بود؟ آیا این هم دوباره چیزی شبیه فاجعه بنفش بود؟ و آیا این به نوبهٔ خود به آن معنی نبود که حجم شواهد تجربی گرد آمده نسبتاً سست در تأیید مدل رادرفورد باید از چندین جلد کتاب درگذرد، بلکه به همین زودی شواهد مربوط به نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول را نیز متزلزل کرده بود؟ در واقع، شالودهٔ خود شواهد رادرفورد مستقیماً بر پایهٔ ریاضیات ماکسولی استوار بود؛ امّا کسی که تنها بر فهم تام و تمام مشهود خودش اصرار ورزد، پژوهشگری حقیر است، و بور کسی نبود که با مدرك یا دلیلی کوچك قانع شود و از پای بنشیند؛ این هم حرف درستی است، زیرا نیاز به اتکاءِ بر ماکسول در راستای طلب چیزی بازهم بهتر، مانند آن است که پیروزیهای برخی از جدیدترین

نظریه‌های فیزیك اتمی به سخره گرفته شود.

گزافه است اگر بگوییم بور در تکوین نظریهٔ کوانتومی اتم خودش آشکارا مرتکب سرقت اختراع یا تألیف دیگران شده است. امّا مطمئناً و بدون هیچ تردیدی، او در نهان خیلی به سیاستمدار برجسته و نامبردار انگلیسی، لرد چانسلر، در اپرای یولانته مدیون است.

و. س. گیلبرت[1]، این واقعه را به وضوح تمام شرح می دهد. یولانتهٔ پری، برای آنکه لُردچانسلر را از ارتکاب گناه نادانستهٔ داشتن دو همسر برهاند و از تباهی کامل داستان اپرا پیشگیری کند، برای او فاش کرده است که خودش همسر اوست که مدتها پیش از دست رفته است. به این ترتیب پیمان مقدس سکوت را می شکند و مُستوجب کیفر مرگ می شود. هنگامی که ملکهٔ پریان، سختدل و نفوذناپذیر، برآن است که حکم هولناك را برای یولانته قرائت کند، بقیهٔ پریان که او را خیلی دوست دارند افسرده و اندوهگین نظاره می کنند.

امّا صبر کنید! چه خبر شده؟ چه هیجانی! از آن هم بالاتر، برهم زدن مجلس! اشراف و اعیان قاقم پوش آن اقلیم، گویی با نیتی مشترك و مقاومت ناپذیر که ارادهٔ آنها را سلب کرده است، از هرسو سرازیر می شوند؛ آن قدرت پرتوانی که بدینسان آنها را به اینجا می کشاند چیست؟ کسی نمی داند! این از اسرار ناگشودنی است که ویژهٔ اپراست. از حرکات آنان برمی آید مجذوب کسی شده‌اند که جامهٔ رسمی و فاخری در بردارد، و درآن جلو، تعلیمی بردست، چنین قدرتمند از فضایی تهی به شعبده موسیقی می آفریند. مطمئناً چشمانشان او را می بیند و بس. به هر دلیلی که باشد، ورود اعیان و اشراف بسیار به موقع است، چرا که بر پریان جرئت می بخشد تا از آخرین فرصت بهره‌گیرند و یولانتهٔ محبوبشان را نجات بخشند.

لیلای پری: دست نگهدارید! اگر یولانته باید بمیرد، همهٔ ما نیز باید بمیریم؛ چون، اگر او مرتکب گناهی شده است، ما نیز شده‌ایم!

ملکهٔ پریان: چه گفتی؟

سلیای پری: ما همهٔ پریان: دوشس، مارکیز، کنتس، ویکنتس، و بارون هستیم...

لُرد مونتارارا: گناه از ماست. نمی توانستند خود را نگهدارند.

1. W. S. Gilbert

ملکه: برعکس، به نظر می رسد خود را نگه داشته‌اند، آنهم بسیار آزادانه! (پس از مکثی کوتاه) همهٔ شما مستوجب مرگید؛ امّا من که نمی توانم همه را از دم تیغ بگذرانم! با این حال (طوماری می گشاید) قانون صراحت دارد ـ کیفر هر پری ای که با موجود فانی ازدواج کند، مرگ است!

لُرد چانسلر: به من که قانونگذاری کهنه کارم، اجازه بدهید پیشنهادی کنم. ظرایف ذهن حقوقدان در موقعیتهای خطیر به کار می آید، موضوع کاملاً ساده است ـ چارهٔ کار تنها اضافه کردن یك کلمه است. چطور است بگوییم هر پری ای که با یك موجود فانی ازدواج نکند، مستوجب مرگ است، و ملاحظه می کنید که مشکلاتتان بی درنگ حل می شود!

ملکه: از شوخ طبعی تان محظوظ شدیم بسیار خوب!

بور نیز همان کاری را کرد که لرد چانسلر کرده بود. او نیز در موقعیتی تا همان حد بحرانی، تنها یك کلمه وارد کرد. به جای قانون ماکسولی که طبق آن گفت که:

الکترونهایی که به دور یك هسته می گردند انرژی خود را تابش می کنند و به سوی هسته حرکت مارپیچی انجام می دهند گفت که:

الکترونهایی که به دور یك هسته می گردند انرژی خود را تابش نمی کنند و به سوی هسته حرکتی مارپیچی انجام نمی دهند.

او با این گام تعیین کننده در جهت رهایی اتم رادرفورد به کمك وجه المصالحه قرار دادن نظریهٔ ماکسول در برابر ناممکن این اتم، دیگر آزاد شده بود تا قاعده‌های نوینی را که بدون احساس اجبار و با دقتی متعارف برگزیده بود بر پا دارد. او، با این روش روشن، صریحاً دو قاعده برای برطرف کردن عیب بزرگ دیگر اتم رادرفورد ـ و برای حمایت از ستون فقرات آن، جانشین قوانین ماکسول کرد.

سیاراتی که به گرد خورشید می گردند می توانند در دوایری با هر شعاعی حرکت کنند. هرچه این دایره کوچکتر باشد سرعت آن سیاره بیشتر است. برای اینکه سیاره‌ای را واداریم بر محیط هر دایرهٔ خاصی به مرکز خورشید حرکت کند، ضروری است که دقیقاً با سرعتی متناسب با اندازهٔ شعاع آن دایره به حرکت درآید؛ طبیعت خود هرکار دیگری را که لازم باشد انجام می دهد. برابر نظریهٔ نیوتونی گرانش، تمام این نوع دوایر مدارهای سیاره‌ای احتمال هستند. بور در پی پیشگامی رادرفورد، این تصویر عمومی را تحویل گرفت؛ امّا او تصحیحاتی مهم در این امر به

عمل آورد که آزادی گردش الکترونها به دور هسته را بسیار محدود می کرد. تنها مدارهای معینی برای آنها مجاز بودند، و بقیه خارج از مرز اعلام شدند. دیگر هیچ الکترونی نمی توانست در هر جایی که میل داشت گردش کند، خیلی به قطاری برقی شبیه بود تا به یك اتوبوس، و می بایست دقیقاً مسیرهایی را طی کند که بور تعیین کرده بود، هر چند، چنانکه کمی بعد خواهیم دید، این الکترون نسبت به قطار معمولی آزادی عمل بیشتری داشت.

بور مسیر خود را با دقتی ریاضی تعیین کرد، و از فرمولی بهره گرفت که در واقع سال پیش از آن توسط ج. و. نیکولسون در آکسفورد کشف شده بود.

با نگاهی به گذشته می توانیم ببینیم که این مفهوم نوین اتم بور چگونه ایدهٔ بنیادی پلانك را گسترش می داد. کشف عظیم پلانك به قاعده‌ای منجر شد که نوسانهای ذرات لرزان او را تنها به دامنهٔ مجاز معینی منحصر می کرد؛ همه دامنه‌های دیگر ممنوع بودند. بور فقط ایدهٔ حرکتهای ممنوع را دربارهٔ ذراتی که به جای نوسان به بالا و پایین روی دوایری حرکت می کردند، اعمال می کرد. در واقع، قاعدهٔ بعدی که بعداً به قاعدهٔ نیکولسون ـ بور تبدیل شد، چنان سازگاری دقیقی داشت که وقتی آن را به حرکتهای پیچیده‌تری بسط دادند معلوم شد که قاعدهٔ مدارهای مجاز انتخابی و قاعدهٔ حاکم بر ذرات لرزان را می توان با فرمول واحدی بیان کرد. این فرمول نماد ریاضی نسبتاً خوش نمایی را به کار می برد، که چنان مختصر و فشرده است که اگر بخواهیم آن را ارائه دهیم جای اندکی اشغال خواهد کرد:

$$\oint p\,dq = n\,h$$

در اینجا هدف ما ایجاب نمی کند که این فرمول را دقیقتر از حالتی بررسی کنیم که مثلاً من و شما از قسمتی از یك موزهٔ معمولی بازدید می کنیم، و در حالی که به زیباییها و ویژگیها توجه می کنیم به سخن گفتن سریع و یکنواخت راهنما نیز گوش فرا می دهیم، امّا به دیدن قسمت دیگری از نمایشگاه می رویم. در اینجا به ثابت پلانك، h، و همچنین حرف n نظری می اندازیم. این n که عدد کوانتومی نام دارد، برای نشان دادن اعداد طبیعی، یکی پس از دیگری و به نوبت، به کار می رود. بنابراین دیده می شود که اعداد طبیعی عمداً در فرمول جای داده می شوند ـ نکته‌ای که به خاطر اتفاقات آتی سرگذشتمان باید خوب به یاد داشته باشیم.

از نظر ریاضیدان حرفه‌ای این فرمول اطلاعاتی در بردارد که در تمام شرایط کار بردپذیر است. در مورد الکترونهای گردان به دور هسته می توان این فرمول را، به زبان غیر مصطلح نیکولسون و بور، اینطور تعبیر کرد که اندازهٔ حرکت زاویه‌ای الکترون باید مضرب صحیحی از ثابت پلانك تقسیم بر دو برابر π باشد. امّا این تعبیر نسبتاً فنی است. بکوشیم که (بانگاهی به پیشرفتهای بعدی)این فرمول را عجالتاً به طور روشنتری تفسیر کنیم.

فرض کنید مدارهای الکترون همان قطار برقی باشند و شما پیمانکاری که باید آنها را بسازید. تصمیم می گیرید که کار را با راه‌آهنهایی برای یك الکترون و با سرعتی ویژه آغاز کنید.از جیب خود نسخهٔ کاملاً کهنه و اوراق شدهٔ کتاب «راهنمای ساخت قطار برقی الکترون برای همه» را بیرون می آورید و به اندازهٔ داده شده برای شعاع دایرهٔ مورد نیاز آن سرعت خاص، در آن کتاب نگاه می کنید. آنگاه از طریق تلفن به کارخانه خبر می دهید خط آهنی برایتان بفرستند که قادر به تحمل سرعت مورد نظر شما باشد. تنها این خط آهن را به صورت قطعاتی برای شما می فرستند. و ناگهان متوجه می شوید که مسئله حادتر از آن است که فکر می کردید. زیرا، به علت مشکلات نامعمول صنعتی، کارخانه فقط می تواند راه‌آهن را به صورت قطعاتی با طول ویژه و متناظر با سرعتی که باید تحمل کند بسازد. بنابراین کارخانه کتاب راهنمای ویژهٔ خود را دارد، و این کتاب هم زیاد با کتاب شما نمی خواند. مثلاً، باید طول راه‌آهن شما هفده واحد باشد، امّا برای این سرعت کارخانه می تواند راه‌آهنی بسازد به قطعاتی که طول هریك از آنها تنها سه واحد است این خط آهن، هرچند خم پذیر امّا چندان سخت است که اصلاً شکسته نمی شود؛ هفده هم بر سه قابل قسمت نیست. چکار می کنید؟ نمی توانید خط آهنی دایره‌ای را که می خواستید بسازید زیرا باید قطعاتی مجزا یکدیگر را بپوشانند. فقط باید بگویید که ساخت آن مسیر خاص خط آهن ناممکن است؛ یعنی، این روش مقرون به صرفه نیست، ناگزیر باید بار دیگر بخت خود را برای سرعتی دیگر بیازمایید. معلوم می شود که این بار به دایره‌ای به طول بیست و پنج واحد نیاز دارید، امّا اتفاقاً کارخانه برای آن خط آهنی می سازد که طول قطعاتشان تنها چهار واحد است. باز هم این قطعات با دایره جور نمی شوند، و شما نسبت به امکان ساخت یك مدار ناامید می شوید. امّا جستجوی سیستماتیك هردو کتاب راهنما چندین امکان پیش پای

شما می گذارد. حالتی وجود دارد که در آن اتفاقاً یك قطعه برابر طول محیط دایره است. احتمال بیشتری هم وجود دارد که قطعات، سه بار محیط دایره را بپیمایند. قطعهٔ دیگری چهار بار این محیط را طی می کند، و به این ترتیب این روند بی پایان ادامه پیدا می کند. اینها مدارهایی مجازند، مدارهای دیگر جملگی مدارهای ممنوع هستند.

ممکن است شباهت بالا اختیاری به نظر آید، اما علی الاصول از قاعدهٔ اصیلی که توصیفگر آن است چندان دور نیست. محدود کردن الکترونها به مدارهایی ویژه و چنین بی پروا، نخستین اصلاح از سوی بور بود. امّا طبیعت نباید در اینجا به خود اجازهٔ توقف دهد. محدودیت برای آزادی الکترونها بسیار زیاد بود و می بایست برای اشتیاق طبیعی آنها مفری تدارك دید. بور به یك الکترون اجازه می داد که هروقت بخواهد روی مسیرهایی بجهد، به شرط آنکه هنگام برخورد به منطقهٔ ممنوع بی درنگ به مدار مجاز بعدی برگردد و در آنجا گردیدن خود را پی گیرد تا اینکه یك بار دیگر گیر بیفتد. الکترون آمیزه‌ای شده بود از یك قطار برقی و یك پشه.

این اجازهٔ جهش، دوّمین تصحیح بور بود، تصحیحی که پرسش خاصی را مطرح می کند. از آنجا که هر مدار به انرژی متفاوتی تعلق دارد، الکترونی که از یك مدار به مدار دیگری وامی جهد یا باید در این فرایند انرژی به دست آورد یا انرژی از دست بدهد. در این صورت، بر سر قانون پایستگی انرژی، که به تعبیر آن انرژی نه به وجود می آید و نه از بین می رود بلکه تغییر شکل می دهد، چه می آید؟ آیا بور این قانون را انکار کرد؟ نه، اصلاً. جنبهٔ مهم نظریهٔ او همین نکته بود. او می توانست ایدهٔ فوتون اینشتین را ارائه دهد. انرژیی که الکترونی در یك واجهش از دست می داد می بایست به یك فوتون نور تبدیل شود که رنگ، یا بسامد آن، از قاعدهٔ پلانك (صفحهٔ ۵۳) محاسبه شود. اگر الکترونی در یك واجهش به جای از دست دادن انرژی آن را به دست می آورد، همین کار را از راه فرو بلعیدن یك فوتون با بسامد مناسب، به جای گسیل یك فوتون، انجام می داد.

نظریهٔ اتمی کارآمد بور چنین چیزی بود. نخستین گام در راه انکار ماکسول برداشته شده بود. گام دوم ممنوع کردن تمامی مدارها بود، به استثنای گروه گزیده‌ای از آنها. و سومین گام، مجاز داشتن واجهشایی از یك مدار به مدار دیگری

بود، به شرط آنکه اختلافهای انرژی از انرژی یك تك فوتون تجاوز نکند. این نظریه بیشتر نظریهٔ الکترونهای در حال گردش به دور هسته بود تا نظریهٔ اتم به عنوان یك کلّ اگر به آن دقیق شویم در می یابیم که در واقع نسخه‌برداری مستقیمی از فرمولی است در قالب جملات نظری که توسط بالمر و پیروانش کشف شد. اتمها واقعاً وجود دارند؛ بنابراین بور از انکار ماکسول کار خود را آغاز کرد. این اتمها تنها با بسامدهای خاص معینی که اختلاف بین ترازهای یك نردبان بسامدی است، می تابند. از آنجا که بسامدها با ضرب شدن در h به انرژی تبدیل می شوند، بور با طرح این احتمال که الکترونهایش مجاز باشند در مدارهای خاص معینی، که مدارهایش نردبان انرژی را با پله‌های مدور تشکیل می دهند، بگردد، بیباکانه یك نردبان انرژی را در اتم خود ترکیب می کند.

نظریهٔ بور بسامدهای هیدروژن را با دقت حیرت آوری به دست می دهد، امّا این نظریه چنان نسخه‌برداری مستقیمی از فرمول بالمر بود که در نحوهٔ نمایشی که بور عرضه داشت، نمی توانست از اعتباری جدی برخوردار شود. اگر موضوع به همین جا ختم می شد، توجهی اندك و ناکافی به نظریه‌ای این طور دور از اصالت و بس نامتعارف، مبذول شده بود. امّا یك فراوردهٔ فرعی و جانبی وجود داشت که توجه را کاملاً به سوی خود کشید. می توانیم بدون قید و شرط مسلم بدانیم که تمام مطالب دربارهٔ بسامدهای ویژه و اختلاف ترازها چندان آشکار بوده‌اند و درست از همان آغاز با بی پروایی و به زور وارد این نظریه شده‌اند که اگر در پایان کار از نظریه حذف نمی شدند خیلی شگفت انگیز بود. آنچه که این نظریه را یك شبه مشهور کرد سود سرسام آوری بود که برای سهام خود پرداخت کرد. زیرا این نظریه در توضیح بسامدهای هیدروژن، در ضمن توضیح کاملی هم از عدد مرموز ۳,۲۸۷,۸۷۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ارائه داد که بر پایهٔ آن نردبانمان را ساختیم. این سودی خالص بود. این عدد چیزی نبود که در آغاز و عمداً به این نظریه تزریق شده باشد. این عدد از طریق خط سیری نسبتاً غیر مستقیم از این نظریه بیرون آمد، و به این وسیله این نظریه به صورت سهمی ارزنده به علم پرداخت شد. ثابت می شود که این عدد آمیزهٔ نه چندان پیچیده در زمینهٔ حساب از ثابتهای فیزیکی ساده و مطالب گوناگون ریاضی است. در اینجا دستورالعملی برای آن ارائه می شود که در

سال ۱۹۱۳ از نظریهٔ بور استنتاج شد:

اجزای تشکیل دهنده

گروه *I*	گروه *II*
(الف) جرم الکترون	(هـ) ثابت پلانك، h، به توان ۳
(ب) بار الکترون به توان ۴	
(ج) عدد ۲	
(د) مربع عدد π	

دستورالعملها:

عناصر موجود در گروه *I* را درهم ضرب کنید و آنگاه بر گروه *II* تقسیم کنید. نتیجه تا دو صدم درصد با آزمایش وفق می‌دهد.

این همان نوع رابطه‌ای است که فیزیکدانان از آن لذت می‌برند. چنین توافقی با آزمایش حتی برای نظریه‌ای کاملاً جا افتاده، قابل ملاحظه بوده است. با بررسی عوامل اصیلی که بور از قواعد جدید استخراج کرد، در می‌یابیم که کاری کمتر از معجزه انجام نداده است. در واقع پیشرفتهای بعدی هم اعجاز آن را به ثبوت رساندند.

نیوتون، که بناهای عظیمی را بر شالوده‌های ایده‌های گالیله بنا کرد، در همان سالِ مرگ گالیله به دنیا آمد. بور در سال ۱۸۸۵، همان سالی که بالمر فرمول خود را اعلام کرد، متولد شد.

فصل ۶

اتم بور به زانو در می‌آید

رخنه دلیرانهٔ بور به درون جهان ناشناخته، راستای مستقیم پیشرفت بود و با دقت زیادی با بهترین سنتهای انقلابی سازگاری داشت. بور، در مبارزه با ماکسول، کاری جز پیروی از پلانك و اینشتین، که پیشاهنگ او بودند، انجام نداد؛ در راه مشخص کردن مدارهای مجاز، از مدار اصلی فعالیتهای پلانك پا فراتر نگذاشت؛ در معرفی فوتونها، بیش از نمایاندن ایدهٔ اینشتین با پیروزیهای بیشتر، کار دیگری انجام نداد. نظریهٔ او امکانی بود برای گرد هم آمدن نیروهای پراکندهٔ انقلاب. وی با فراست نبوغ آسایی می‌دانست آنها را چگونه در کنار یکدیگر جمع کند. تمامی اجزای تشکیل دهندهٔ این نظریه تقریباً دارایی مشترك صدها فیزیکدان بود. امّا تنها یك بور وجود داشت.

ظهور نظریهٔ بور برق‌آسا بود. به کمك آزمایشهای جی. فرانك و گ. هرتز در آلمان، که جایزهٔ نوبل ۱۹۲۵ را برایشان به ارمغان آورد، تقریباً معلوم شد که نردبان انرژیی که با مدارهایش نشان داده شده بود، موجودیت فیزیکی سر راستی دارد.

کامیابیها در پی هم و با چنان سرعتی به دست می‌آمدند، و نتایج نظری جدید چنان سهل کشف می‌شدند و با آزمایش چنان سازگاری داشتند، که تعارض کهن موج و ذره در غوغای هیجان عمومی تقریباً به فراموشی سپرده شد. بور دروازه‌های

چنان سرزمین پر بار و سرشار از جذبه‌ای را گشوده بود که معدود کسانی بودند که به صحراهای ظاهراً بایری می اندیشیدند که در آنجا هنوز هم پیکار ذره ـ موج در جریان بود.

امّا دیر زمانی نگذشت که جنگی از نوع دیگر جهان را در کام خود فرو بلعید: جنگ توپ و خون انسان، جنگ هواپیماهای ابتدایی و اندوه فراوان، جنگ زیر دریاییها و گرسنگی، مرگ در اعماق گِل و لای و کثافت. هـ. ج. جی. موزلی[1]، یکی از تابناکترین دانشمندان جوان انگلستان، برای رفتن به سربازی نام نویسی کرد و هیچ اهل خردی پیدا نشد که وی را از این کار باز دارد. او در حملات بی نتیجهٔ نزدیك گالیپولی در داردانل کشته شد، و رادر فورد خود، آگهی درگذشت او را نوشت.

در آن فضای تیره هنوز هم شعلهٔ پژ وهشی انتزاعی می درخشید. جنگ نتوانست این آتش را خاموش کند. ارشمیدس، که غرق در اندیشهٔ مطلق از دنیا رفت، قطعاً از ضربت کُشندهٔ دشمن که به هلاکتش افکنده بود بی خبر مانده بود. در خلال جنگهای ناپلئونی که اروپا را به ویرانی کشاند، مهندسان فرانسوی نخستین اندازه‌گیری دقیق ابعاد زمین را به عمل آوردند. در ضمن جنگ جهانی اوّل، اینشتین نظریهٔ گرانش خود یعنی نظریهٔ نسبیت عام را تکمیل کرد. و در حالی که خاطرهٔ جنگ در یادها هنوز زنده بود، یك هیئت انگلیسی به سرپرستی ا. س. ادینگتون با وسایل حساس و دقیقی برای رصد کسوف به جزایر دور دست اعزام شد و نظریهٔ اینشتین را آزمود، و پیشگویی او را در مورد خم شدن پرتوهای نور تأیید کرد، و به دنیای خسته و فرسوده از جنگ اعلام کرد که دشمن زمان جنگ انگلیس، میزبان بزرگترین دانشمند زمانهٔ ما بوده است.

علیرغم جنگ و پیامدهایش، نظریهٔ بور حتی با آنکه پیچیدگیش فزونتر شد، به رشد خود ادامه داد. مدارهای دایره‌ای آن جای خود را به مدارهای بیضی وار، و مدارهایی دیگر با شکلهایی کاملاً پیچیده سپرد. از میان دستاوردهای تابناك بسیار آن چندتایی را به کوتاهی ذکر می کنیم.

در سال ۱۹۱۳، که موزلی جوان مشغول آزمایش با پرتوهای X بود، به نظمهایی بنیادی دست یافت که برافزایش مقادیر مساوی بار هسته در عناصر گوناگون

1- H. G. J. Moseley

دلالت می‌کرد. این یافته، تأییدی قوی بر مدل اتمی رادرفورد بود، و جزئیات اصلی کار موزلی بعداً نشان داد که تأییدیه‌ای کارآمد برای نظریهٔ بور نیز بوده است.

هرچند فرمول اصلی پلانك با آزمایش بسیار سازگار بود، ذرات نوسان کنندهٔ او کم و بیش نمایشی طرح واره از ماده بودند. در روزهای گذشته، هیچ چیز بهتری در دست نبود، اما اینك موفقیت اتم بور تأکید می‌کرد که باید اساس نظری فرمول پلانك نوین سازی شود تا با مفاهیم جدید ماده انطباق یابد. معلوم شد که این مسئله به طور نامنتظره‌ای مشکل است، و اینشتین در سال ۱۹۱۷، در میان چیزهای قابل توجه دیگر، به کمك برهانهایی عام، نه تنها نشان داد که فرمول تابش پلانك را می‌توان برحسب اتمهای حاوی نردبانهای انرژی استنتاج کرد، بلکه این نکته را نیز خاطر نشان کرد که رابطه‌ای که بور بین جهشهای انرژی و نور پیشنهاد کرده است پیامدی ضروری بوده، و بنابراین به یك ضربه هم پلانك و هم بور را تأیید می‌کند.

همچنین باید از اثر زیمان نام برد که پ. زیمان فیزیکدان هلندی، به خاطر آن در جایزهٔ نوبل سال ۱۹۰۲ با هم میهن برجستهٔ خود، هـ. ا. لورنتس سهیم شده بود. زیمان مدتی پیشتر در سال ۱۸۹۶، تحت تأثیر نظریه‌های لورنتس، نور ناشی از اتمهای تابشی را که در میدان یك آهنربای قوی قرار گرفته بودند، مورد بررسی قرار داد و خطوط طیفی را که اندکی پهن شده بودند، یافت. او و دیگران، بعداً به کمك تجهیزات کارآمدتری دریافتند که خطوط طیفی جداگانه به گروههای سه‌تایی، و حتی بیشتر، شکافته می‌شوند. می‌توان این سه‌تاییهای زیمان را در نظریهٔ ماکسولی لورنتس توجیه کرد، امّا شکافتگی پیچیده‌تر قابل توجیه نیست. هرچند نظریهٔ بور نیز براثر شکافتگی پیچیده‌تر با تنگناهایی روبرو می‌شود، اما این مشکلات نیز هم تراز چالش با سه‌تاییها بود. در اتم هیدروژن معمولی مدارهای مجاز با عدد کوانتومی منحصر به فرد n مشخص می‌شوند. معلوم شد که تعداد مدارهای مجاز تحت تأثیر یك آهنربا زیاد می‌شود. به طوری که برای هر مدار دو عدد کوانتومی لازم است. این امر به توضیح کاملی از سه‌تاییهای زیمان (با یك استثنا) منجر شد.

جی. اشتارك، فیزیکدان آلمانی، برندهٔ جایزهٔ نوبل سال ۱۹۱۹، آنجا که زیمان از آهنربا استفاده کرد، الکتریسیته به کار برد و در سال ۱۹۱۳ دریافت که این امر به پیچیدگی حتی بیشتر خطوط طیفی منجر می‌شود. آنچه در شرایط معمولی

عبارت از خطوط واحدی بود، اکنون به سی و دو خط و حتی بیشتر تبدیل می شد. در این مورد نظریهٔ کلاسیك ناتوان بود. این نظر نمی توانست توضیحی از این اثر ارائه دهد ـ حقیقتی که پیروزی نظریهٔ بور را از تأثیر بیشتری برخوردار کرد. چرا که در سال ۱۹۱۶، در گرماگرم جنگ، شوارتسشیلد و اپشتین مستقل از یکدیگر نشان دادند که نظریهٔ بور، به کمك عدد کوانتومی ثالثی، به طوری موفقیت آمیز جزئیاتی از نوع شکافتگی پیچیده را توجیه می کند، امّا در اینجا نیز باید یك استثنا را به حساب آوریم.

وقتی اتمهای معمولی از لحاظ طیف نمایی با ابزاری بسیار قویتر مورد مطالعه قرار گیرند، خطوطی طیفی به دست می آیند ـ دسته‌های مجزایی از خطوط ریز چنان نقش پیچیده‌ای تشکیل می دهند که ابزارهای پیشین فقط قادر بود این دسته خط را به صورت یك کل واحد ظاهر کند. هیچ تأثیری خارجی مانند آهنربا سبب به وجود آمدن این ساختار، ساختار ریز، نمی شود. پس آن اثر داخلی که با تکیه بر آن نظریهٔ بور می خواهد این ساختار را توضیح دهد، کجاست؟

و این ا. زومرفلد نظریه‌پرداز آلمانی، بود که در سال ۱۹۱۵ در اوج درگیریهای جنگ جوابی برای این مسئله یافت. کلید این مشکل نسبیت بود. بنابر نظریهٔ نسبیت، هر چیزی که سریعتر حرکت کند سنگینتر می شود. زومرفلد، با به کار بستن این اصل در اتم بور، فرمولی یافت که با آزمایش توافق فوق العاده‌ای داشت اما تا آن موقع فقط در مورد جزئیات ناچیزی به کار می رفته است. اتفاقاً تاریخچهٔ آن هم بسیار قابل توجه است. امّا به این پاراگراف نیز باید استثنایی بیفزاییم.

استثنا در تمام این موارد مشابه است. نظریهٔ اصلی بور بسیار بارور بود، نه تنها خطوط طیفی قابل مشاهده را به دست داد، بلکه خطوط بسیار بیشتری را نیز ارائه داد که قابل مشاهده نبودند. این اسراف یکی از نقایص بنیانی این نظریه بود، که نه تنها در این نمونه‌های مشخص، بلکه تقریباً در هر موردی که به‌کار می رفت جلوه‌گر می شد؛ زیرا آشکار بود که نظریه‌ای ناکامل است. قادر بود از بسامدهای خطوط طیفی سخن گوید، اما دربارهٔ روشنایی نسبی آنها گفتنی زیادی نداشت. با این وجود مطمئناً برخی از این خطوط روشن و برخی دیگر تاریك بودند. بور به روشی برای محاسبهٔ روشنایی آنها نیاز داشت، و خوشبختانه این روش می توانست مسئلهٔ دیگر او را از طریق نسبت دادن روشنایی صفر به خطوط ناخواسته، حل کند.

او در سال ۱۹۱۸ چاره‌ای موقتی یافته بود که در کارهای عمدهٔ سال ۱۹۱۳ خودش ریشه داشت. بور به روشی نمونه‌وار قاعدهٔ دیگری را بر نظریهٔ خود افزود. این یکی آمیزه‌ای مغشوش از مفاهیم کوانتومی و کلاسیکی بود که او آن را اصل همخوانی نامید. این اصل را در فصل بعد تشریح خواهیم کرد. این اصل، مانند بیشتر ایده‌های بور، به طور شگفت انگیزی نیات او را برآورده می کرد. اصل نامبرده، از جمله، تقریباً تمامی خطوط طیفی ناخواسته را با موفقیت تمام حذف کرد، و بعداً یك اصل راهنمای ضروری، یعنی پژوهشهای آزمایشی تر را اثبات کرد.

سیاههٔ بلند بالای دستاوردهای نظریهٔ بور ستایش ژرفی را نسبت به بزرگی بنیانگذارش برمی انگیزد. این نظریه، با چارچوبی از نوع بسیار ابتدایی، و به کار بستن ابزار ریاضی نسبتاً ساده، فراسوی اهداف فوری خود قرار گرفت و نتایجی برتر از تمامی انتظارات معقول به بار آورد. این نظریه از همان آغاز رهبری مطالعهٔ طیفها را به عهده گرفت، الهامبخش آزمایشهای اتمی فراوانی شد و آنها را هم مرتب کرد، و کلید راهنمای پرارزشی برای تحلیل و تفسیر نتایجشان به دست داد. فراتر از همهٔ اینها، کوانتوم را در موضع پیشگامی به حق خود، در پلکان ارتقاءِ بنیادی علم فیزیك، قرار داد. اینك با تمام پیشرفتی که در دانش حاصل شد، اهمیت تاریخی نظریهٔ بور در تکامل تفکر علمی هرچه بیشتر آشکار شده است.

این که سرنوشت نظریه‌ای با این توانایی در ادامهٔ دستاوردهای برجسته، آن بود که فقط دوازده سال پس از تولدش کنار زده شود، چیزی نیست مگر نشانه‌ای از سرعت حیرت آور پیشرفت علمی در آن دوران خاص. نظریهٔ بور دشمن خطرناك و سرسختی برای خود تراشیده بود. این نظریه نه تنها با بی اعتنایی به جدال قدرتمند ذره ـ موج نگریسته بود، بلکه با توجه نکردن به آن، خوارش‌شمرده بود. مناقشهٔ ذره ـ موج نمی توانست چنین بی حرمتی جدّیی را نادیده انگارد. این جریان که حقاً در مرکز توجه فیزیك بود، هرگز نمی توانست نظریه‌ای را تحمل کند که به این صورت مقامش را غصب کرده بود؛ کین خواهی او، هرچند مدت زیادی زمان بُرد تا به تکامل رسد، امّا سرانجامش سریع و ویرانگر بود. اگر نظریهٔ بور می توانست به این جدال پایان بخشد تا امروز هم دوام می آورد، امّا این نظریه، جدا از صحه نهادن بر فوتون بدون حذف موج، با پشتکاری تمام مزرعهٔ خود را کشت می کرد و با دقت تمام در راستای پایان بخشیدن به جنگ میان آنها از هر کنش سازنده‌ای اجتناب می کرد.

این انزوا طلبی ضعفی بنیانی در ساختارش بود و آن را به یك قربانی بی دفاع در برابر ناسازگاری و تضاد درونی تبدیل می کرد.

با بروز نخستین نشانه‌های گسیختگی، نخستین ناکامیهای اضطراب آلود پیشگوییهای نظری در همسازی با داده‌های تجربی، در حالی که به راحتی در پشت ابهام اصل همخوانی نهان شده بودند، حیات این نظریه در فراسوی محدودهٔ طبیعی خود به گونه‌ای مصنوعی گسترش می یافت. امّا نطفه‌های زوال در درون خود نظریهٔ نهفته بود و هنگام درو اجتناب ناپذیر این حاصل را نمی توانستند مدت درازی به تأخیر اندازند. ظهور ناسازگاریها میان نظریه و آزمایش، که دیگر نمی توانست با پناه بردن به اصل همخوانی پوشیده بماند، آغاز به خودنمایی کرد. در واقع برخی از این ناسازگاریها اصلاً رابطه‌ای با آن اصل نداشتند، چرا که آنها برخود اعداد کوانتومی، یعنی تاروپودهای این نظریه، تأثیر می گذاشتند. مشاهدات طیف‌نمایانه نشان می داد که این اعداد کوانتومی بیشتر اوقات علی الاصول اعداد درستی نیستند بلکه اعداد درست و نیم درست‌اند، و این همان چیزی است که نظریهٔ بور از توضیح آن عاجز بود. باز هم از آن بدتر، آنجا که نظریهٔ بور بر مجذور یك عدد کوانتومی، مثلاً ۴×۴، دلالت می کرد، تحلیلهای طیف نمایانه بر این موضوع اصرار داشت که این عدد باید در عدد بالاتر بعدی ضرب شود، مثلاً ۴×۵. آزمایشگران دریافتند که می توانند آثار خلاف قاعدهٔ زیمان را که در آنها سه‌تاییها به دسته‌های پیچیده‌ای از خطوط تبدیل می شدند و تمامی هنرهای نظریهٔ بور را به مبارزه می طلبیدند، ارائه دهند. حتی معلوم شد که این نظریه طیفهای بهنجار اتمهایی با بیش از یك الکترون را توجیه نمی کند. به زودی پی بردند که شاهراه کامیابی قطعاً به برگشتگاه خود رسیده است و به شدت بر علیه بور می تازد؛ همان طور که اوزمانی بر ماکسول تاخته بود. نظریهٔ بور که تا سال ۱۹۲۴ خسته و نفس زنان راه پرنشیب و فراز حیات خود را لنگان ادامه داده بود، همواره در تلاشی نومیدانه موضع خود را تغییر می داد تا از فرود آمدن ضربه‌های هولناك مُصیبت، خود را حفظ کند، در حالی که در تمام این مدت فقط آگاهی مبهمی نسبت به هویت دشمنی داشت که کمر به هلاکش بسته بود. و ناگهان زمان مرگش فرارسید.

نظریهٔ اتمی بور چنین بود. این نظریه در جهانی که به سرعت در حال تحول و تغییر بود دلیرانه پرداخته و با جسارت تمام نگه داشته شد. این که این نظریه پس از

مدت کوتاهی کنار زده شده بود نمی‌توانست روشنی آن را زایل کند. نظریهٔ بور، در وقت شکست، مانند هنگام پیروزی عظمت داشت؛ چرا که موفقیتش همانا انگیزهٔ کشف سریع ناسازگاریهایی بود که مایهٔ بارز انحطاطش نیز همانها بودند، و نظریه‌های جدیدتری که بعداً بر جایگاه رفیع آن تکیه زدند، اگر نظریهٔ بور آن صحرای پهناور را کشف نکرده و راه را برایشان نگشوده بود، هرگز نمی‌توانستند روزهای نامطمئن نوباوگی خود را از سر بگذرانند.

نظریهٔ بور در واپسین لحظات زندگی، تجدید حیات مختصری از خود نشان داد. می‌دانیم که سیارات ضمن گردش به دور خورشید حول محور خود نیز می‌چرخند. در سال ۱۹۲۵، گودشمیت و اولنبك اظهار داشتند که الکترونها همچنانکه به دور هسته می‌گردند به دور محور خود نیز می‌چرخند، زیرا هر چند قید و بندهای مصنوعی حصاری به دور این ایده می‌کشیدند امّا کارهای قابل ملاحظه‌ای هم انجام می‌داد؛ به توضیح ناهنجاری طیفهای پیچیده کمك می‌کرد و حتی، به طور شگفت انگیزی، ساختار ریز خطوط هیدروژن را بدون کاربرد نسبیت توجیه می‌کرد. این مورد اخیر کاملاً سرگیجه‌آور بود. آیا این ساختار ریز، همان طور که زومرفلد یك دهه پیشتر نشان داده بود، به علت آثار نسبیتی بود یا ناشی از اسپین الکترون؟

اسپین به خاطر همان خصلت جانشینی موقتش مستلزم توجه بود، با وجود این بسیار دیرتر از آن به میدان آمد که اثری قابل توجه بر فرصتهای نظریهٔ بوری که پدیدش آورده بود، برجای گذارد. امّا، از تأثیر آن بر کل فیزیك نمی‌شد چشم پوشید. بعداً پی بردند که عملاً باید گونه‌ای اسپین به هر نوع ذرهٔ بنیادی در عالم نسبت داد. یکی از خدمات بی‌شمار آن را در اینجا بازگو می‌کنیم.

دانشمندان قبلاً ناگزیر بودند برای هر الکترونی سه عدد کوانتومی منظور کنند. اسپین عدد چهارمی ارائه کرد. این عدد از توجهی واقعی برخوردار بود، چرا که ولفگانك پاولی، نظریه پرداز اطریشی، به اعتبار استنتاجهای خودش از دیرباز در جستجوی عدد کوانتومی چهارمی بود. پاولی از همان اوایل بیست سالگیش، شرحی تکنیکی بر نظریهٔ نسبیت نوشت که اینشتین هم با خشنودی تمام پذیرفت که حاوی جزئیات بیشتری است از آنکه خودش دربارهٔ این نظریه می‌دانست. پاولی بعداً کار مهمی در فیزیك کوانتومی انجام داد، و در خلال پژوهشهایش به واقعیتی

شگرف برخورد که هرچند آشکارا معنی بسیار ژرفی داشت، نمی توانست با نظریهٔ بور جور باشد مگر آنکه به عنوان قاعدهٔ خاص دیگری مطرح شود. این قاعده، که او به خاطرش جایزهٔ نوبل سال ۱۹۴۵ را دریافت داشت، بیان ساده‌ای دارد. بنابراین قاعده، در هیچ دو الکترونی مجموعهٔ چهار عدد کوانتومی آنها نمی تواند یکسان باشد. به یك معنی گویی اتم بور شهر بزرگی است که در آن الکترونها در آپارتمانهایی جداگانه زندگی می کنند. هر آپارتمان نشانیِ جداگانه‌ای دارد، یك عدد کوانتومی بر خیابان دلالت می کند، دیگری برخانه، سومی بر طبقه، و چهارمی به آپارتمان. پس، این چهار عدد کوانتومی نشانیِ کامل هر آپارتمان هستند، و اصل پاولی مقرراتی است علیه ازدحام بیش از حدّ. در واقع، این اصل از لحاظ تکنیکی اصل طرد نامیده می شود. در نتیجهٔ این اصل، در یك زمان تنها یك الکترون می تواند در یك آپارتمان سکونت کند، و تا هنگامی که الکترون اولی آنجا را تخلیه نکرده است، سکونت در آنجا برای الکترون دیگر کاملاً ممنوع خواهد بود. هنگامی که پاولی این قاعده را کشف کرد، الکترون هنوز هم سه عدد کوانتومی داشت، و او ناچار شده بود به آن عدد چهارم دلخواهی نسبت دهد. کشف اسپین نشان داد که تمامی این چهار عدد می توانند به طور طبیعی به الکترون تعلق داشته باشند. به اعتبار اصل طرد، دست کم شالودهٔ فیزیکی جدول تناوبی عناصر که مندلیف، شیمیدان روس، آن را کشف کرده و توسط موزلی اصلاح شده بود، امکان پذیر شد. تا آن موقع، در نظریهٔ فیزیکی، هرگاه چیزی به طریقی در قید و بندی افتاد، همیشه می توانستند از نیرو به عنوان یك توضیح برای آن کمك بگیرند. اصل پاولی در مورد نیروهای معمولی به مشکلی برنمی خورد. تأثیرات خارجی در اینجا از نوعی کاملاً جدید بود. موضوع از این قرار بود که گویی مؤدبانه به الکترونها گفته می شد وارد نشوند، و آنها نیز فروتنانه پیروی می کردند؛ به طریقی هم گویی، در عوض به کارگیری نیروی پلیس برای جلوگیری از ازدحام، می بایست تابلویی در آنجا می آویختند که هشدار دهد: «خطر مرگ! وارد نشوید.»

اصل پاولی در تمامی پژوهشهای نظری جدید اصلی اساسی است. این اصل بر ذرات دیگری جز الکترون هم اعمال می شود، و معلوم شده است که با آثار عظیم درون هسته پیوند خورده است. اعتبار آن برهانی اساسی است برای موضوعات علم شیمی. از هنگامی که این اصل یافته شده است، هیچ ذره‌ای در

طبیعت یافت نشده که از آن مستثنی باشد؛ در علم هم هیچ بیانی بدون یاری این اصل کامل نیست.

اگرچه اسپین الکترون و اصل پاولی در دوران فرمانروایی بور کشف شدند، امّا به دورهٔ بعداز او تعلق دارند. این دو نمی‌توانستند از هجوم جریان مخالف جلوگیری کنند، و حالا دیگر نظریهٔ بور یك خاطره است. امّا بور از قصّهٔ ما کنار نمی‌رود. او نیز، مانند اینشتین، در سرگذشت شگفت کوانتوم بازیگری نقش دیگری را به عهده می‌گیرد.

و اکنون آن زمان فرا رسیده است که پردهٔ صحنهٔ *I* را پایین آوریم. با استفاده از سخن مارسلوس می‌توان گفت که یك جای کار در نظریهٔ دانمارکی ایراد داشت.

فصل ۷

میان پرده
هشدار نویسنده به خواننده

تا اینجا، سرگذشت ما، دست کم، ظاهری از انتظام و سامان را حفظ کرده است. ما خیزش باشکوه فیزیك کلاسیکی را که به اعتبار اثبات کامل نظریهٔ ماکسول از جانب هرتز به اوج خود رسید، آغاز انقلابی را که پلانك برانگیخت، گسترش پرقدرت آن را به رهبری اینشتین، و وقفهٔ بی‌سابقه‌ای را که در خلال آن فیزیك کلاسیکی ویران شد، همه را دیده‌ایم. در این میان ما امکانات نظریهٔ اتمی بور را از خیزش آذرخش گونهٔ آن تا سقوط سریعش، که علم را به همراه خود به عدم قطعیت پر هرج و مرجی کشید، پیگیری کرده‌ایم.

امّا، اگر همهٔ اینها مخالف با پیشرفت به نظر می‌رسند، اگر ظاهراً توالی شتابزدهٔ کارهای سرهم‌بندی شده و نظریه‌های متناقضی‌اند که بر شالودهٔ ریگهای روان و سرگردان بنا شده‌اند تا پیشرفتی جدی و مداوم در درك ما از طبیعت باشند، اگر به نظر می‌رسد که تمام ایمان به بصیرت و خردمندی دانشمندان و تکیه بر روش علمیی که به چنین تناقض فاحشی انجامیده از میان برداشته شده است، آنگاه در واقع این رویدادها گاهی کاملاً شگفت‌اند و خیالی به نظر می‌آیند. علت این است که ناگهان این گام سریع برداشته می‌شود. نه تنها اتم بلکه نظریهٔ اتمی در آستانهٔ انفجار است.

آنچه رخ می‌دهد چندان سریع و شدید است که برای لحظه‌ای تمامی پیوستگی و سامان را از کف خارج می‌کند و دانش فیزیك به گرداب بزرگ جوشانی از ایده‌های شگفت تبدیل می‌شود که در آن تنها تیزهوشترین اذهان می‌توانند طلا را از مس باز شناسند. فیزیکدانان حرفه‌ای، که تمامی این جریانهای سریع را در نور دیده بودند، به جایی کشیده شده بودند که نمی‌دانستند کجاست، و سالها طول کشید تا بازماندگان به اندازهٔ کافی به خود آمدند تا در دور نماهای نوینی ببینند که آنچه این طور دانش آنها را به زیر سلطه کشیده است، نشانه‌های خیره‌کننده و مهیجی از دوران نوین و بزرگتری بوده است.

اگر کتاب را تا اینجا خوانده‌اید، دیگر راه گریزی برایتان باقی نمانده است. شما کرایهٔ خود را پرداخته‌اید، و به بالاترین نقطهٔ قلهٔ کوهستان صعود کرده‌اید. بنابراین خود را در گرداب پیامدهای اجتناب ناپذیری گرفتار کرده‌اید. تلاش برای دبّه در آوردن بی فایده است. از دیباچهٔ آنچه مورد انتظار است آگاه شده‌اید، و اگر اندیشهٔ بلندپروازیهایی که توصیف شد اکنون شما را گیج و بیمناك کرده است، من نمی‌توانم هیچ مسئولیتی بپذیرم. از این پس راه ناهموار است، امّا می‌توانم قول بدهم که با هیجان فراوانی توأم است. بنابراین محکم سرجای خودتان بنشینید و انتظار چیزهای بسیار خوبی را داشته باشید. می‌رویم که وارد فضایی سرگیجه‌آور شویم.

فصل ۸

صحنهٔ II
شاهکارهای پرنس انقلابی

همانطور که بور هم نیك می‌دانست، تمامی کامیابیهای اولیهٔ نظریهٔ او درعین حال نمی‌توانست نارساییهای آن را هم بپوشاند، زیرا او شراب تازهٔ کوانتوم را درون بطریهای کهنه و قدیمی ریخته بود. از آنجا که این شراب گیرایی داشت کسی در برابرش قادر به مقاومت نبود. امّا همه همین که سیراب شدند برای فتح قلمروهایی به پیش تاختند که تا آن موقع بیم داشتند در آن گام نهند. آنان در مسیر فتح و غلبهٔ خود پیشروی زیادی کردند، و این کارها را بدون ملاحظهٔ امکانات خود انجام دادند. و سرانجام هنگامی که بطری قدیمی شکست، آنان خود را در ژرفای سرزمینی بیگانه یافتند، پریشان و آشفته، بدون رهبر، و بدون هیچگونه الهامی.

ماکس بورن فیزیکدان آلمانی، این سرگشتگی را به روشنی بیان کرده است. در اواخر سال ۱۹۲۴ او کتابی را پیرامون نظریهٔ اتمی به پایان برد. او هر مطلبی را که باید گفته می‌شد در آن کتاب گنجانید، اما آن را جلد نخست نامید. در حالی که اصولاً چیزی نبود تا او در جلد دومی بگنجاند، چرا کتابش را جلد اول نام داد؟ زیرا اطمینان داشت که نظریهٔ بور محکوم به نابودی است و باید دستگاه کاملاً نوینی پدید آید تا جای آن را بگیرد، و او در نظر داشت جلد دوم را به این دستگاه (که هنوز نظریه‌ای زاده نشده بود) اختصاص دهد. شرط کار آن بود که به هنگام زاده شدن این

نظریه او خودش هنوز زنده باشد!

این نظریه به دنیا آمد، و او هم جلد دوم کتاب خود را نوشت ـ بسیار زودتر از آن که انتظار داشت. نه تنها بخش بزرگی از روند تولد نظریهٔ جدید در همان سالی که پیش رو داشت آغاز شد، و نه تنها او خودش نقش مهمی در رشد و تفسیر آن بر عهده داشت، بلکه همان هنگام که او هنوز درگیر نوشتن جلد اول بود، نخستین گلوله در هنگامهٔ آشفتگیهای پرغوغایی که خبر از آغاز عصر نوینی در فیزیك می داد، شلیك شد.

افتخار هدایت این انقلاب نصیب پرنس لویی دوبروی شد که عضو یکی از خانواده‌های اشرافی قدیمی فرانسه بود. ریشهٔ کار او در ایده‌هایی بود که، پیشتر در سال ۱۹۲۲، منتشر کرده بود، و نسخهٔ دستنوشتهٔ اصلی آن در دسامبر سال ۱۹۲۳، تقریباً یکسال پیش از انتشار جلد اول کتاب بورن، به نشریات علمی سپرده شده بود. امّا کار دوبروی در آن وقت ناشناخته بود. البته نمی توان گفت این مقاله شالودهٔ جلد دوم کتاب بورن را تشکیل می داد. برای دانستن این مطلب که بر این جلد دوم چه رفت، باید تا بخش آینده به انتظار بنشینیم. زیرا، همانطور که هشدار دادیم، این سرگذشت به سوی پیچیدگی پیش می رود.

در حالی که دانشمندان هنوز هم زیر پرچم نظریهٔ بور، نظریه‌ای که در حال نزع بود سرگرم کشمکش بودند، دوبروی بهتر آن دید که در سرزمین ایده‌های نظریهٔ نسبیت اینشتین گشت و گذار آرامی بکند. دلبستگی اولیهٔ او بیشتر به نور بود تا ماده امّا این ایده که جرمی ذاتی برای فوتون قائل شود در اندیشه‌های او ریشه داشت. حالا دیگر مفهوم فوتونی که چنین جرمی داشته باشد پذیرفتنی نیست، اما همین ایده دوبروی را به یك کشف قدر اول راهبری کرد، چرا که این فوتون با ذرهٔ مادی خویشاوند است و تکامل ریاضی آن بر همتاهای مهمی اشاره می کرد.

با توجه به انبوه اسناد و مدارك، استدلال دوبروی بر این پایه بود که ادعای عدم وجود فوتون در نور ابلهانه است. این را هم نمی شد انکار کرد که نور حاوی موج نیز هست. این دو باید همزیستی کنند. افـزون بر این، نور و ماده در نسبیت به هم می پیوندند، زیرا در آنجا نور و ماده هردو به صورت اشکال گوناگون انرژی ظاهر می شوند. با توجه به این، می توانیم زنجیرهٔ کوچکی از روابط را پدید آوریم که دستاورد آن ایجاد مفاهیم دقیقی در این زمینه است. بنابر اصول نسبیت، جرم یکی

از تجسمهای انرژی است. بنابر قاعدهٔ پلانك، انرژی h برابر بسامد است. پس، در اینجا، زنجیرهٔ ما این طور حکایت می کند:

ذرات مادی جرم دارند.

جرم انرژی است.

انرژی دال بر بسامد است.

بسامد دال بر تپش است.

بنابراین، یك لحظه نفس را در سینه‌تان حبس کنید، نتیجه می گیریم که ذرات می تپند.

باز هم جلوتر برویم:

ذرات تپنده، از روی مسامحه، مانند فوتونها هستند.

فوتونها منسوب به امواج نوری‌اند.

بنابراین ماده باید به «امواج مادی» منسوب باشد.

یا به طور مختصر، چاشنی و خوراك غاز چاشنی غاز زنده هم هست. امّا تکیه بر چنین مسامحهٔ کم مایه‌ای، مخاطره‌آمیز است. فرض کنیم یك تنیزهٔ مادی تپندهٔ موزون، با موجی توأم باشدفقط به این علت که این ذره می تپد به مثابهٔ آن است که فرض کنیم فقط وقتی که احتمالاً غواصی به یکی از امواج فکر می کند، آنگاه تنفس موزونش با موج هماهنگ می شود. زمینه‌های کار دوبروی می بایست از اینها مناسبتر باشد.

نسبیت می تواند دست به نیرنگهایی عجیبتر از اینها نیز بزند، و دوبروی رابطه‌های زیادی یافت که بر ارتباط میان ذرات و امواج دلالت می کرد. برای پی گیری یکی از مسیرهای استدلال او باید واقعیتی ویژه دربارهٔ نظریهٔ نسبیت را بشناسیم، واقعیتی که هروقت زمانش فرا رسد تذکر خواهیم داد. برای لحظه‌ای هرچه دربارهٔ امواج می دانیم به فراموشی بسپریم و توجه خود را بر ذرات تپنده متمرکز کنیم. موضوع شگفت انگیز این است که می توانیم آهنگ دقیق تپش آنها را تعیین کنیم. این موضوع از زنجیرهٔ روابط ما درست از آب بیرون می آید. جرم را می شناسیم. اگر آن را در مجذور سرعت نور ضرب کنیم، برابر قانون اینشتین، انرژی به دست می آید. اگر این انرژی را بر ثابت پلانك تقسیم کنیم، بسامد به دست می آید. زنجیرهٔ روابط ما، به خاطر کل کیفیت غریب آن، رابطهٔ ریاضی

دقیقی است و از روی آن می توانیم تصویری از یك ذره با آهنگ تپش مشخص بیافرینیم.

اکنون توجه خود را بر تپش خالص متمرکز می کنیم. اگر عبارت ریاضی معمولی را برای چنین تپشی بنویسیم می توانیم آن را به دو روش تفسیر کنیم: یا به مثابهٔ ضربان نگهداشته شده یا به عنوان یك ضربان گسترش یابنده. این موضوع به دوبروی اطمینان بخشید که اگر هردو تفسیر را یکباره به کار بَرَد هیچ تناقض ریاضیی پدید نخواهد آمد. بنابراین فرض کرد که ذرهٔ در حال سکون نه تنها دارای ضربان قلب جایگزیده‌ای است، بلکه تپشی همه‌جا گستر نیز با آن توأم است که تا ابد با آن به پیش می رود و در تمام عالم گسترش می یابد. این تپش چنان بود که گویی اقیانوس کاملی است مانند کف یك آسانسور وسیع که در حال بالا رفتن و پایین آمدن است؛ در اینجا امواجی به معنی متداول وجود نداشت، بلکه یك صعود و سقوط دائم بود. آیا اینها همه‌زادهٔ خیال بود؟ بی‌گمان این طور است! امّا نه بیشتر از فوتون اینشتین ـ پلانك، یا اتم بور، یا آن دسته چیزهایی که قبلاً به آنها برخورده بودیم و در آینده هم برخواهیم خورد (لطفاً فعلاً زیاد به مسائل حاشیه‌ای این موضوع فکر نکنید، اصل مطلب خیلی مهم است. در واقع سعی کنید به مفاهیم نوینی در فیزیك خو بگیرید).

بدین ترتیب، ذره‌ای در حال سکون اکنون غوطه‌ور در تپشی همه‌جا گستر در نظر گرفته می شود که همواره و به طور همزمان کنارهم قرار دارند.

گفتیم به طور همزمان؟ نسبیت اصلاً این را دوست ندارد. نخستین چیزی که همواره در طول حیات نسبیت، از جانب او مورد حمله قرار گرفته است، معنی همین واژه است. این کلمه گوشهای او را تیز می کند. با اصرار بر این نکته که همزمانی نسبی است، غوغا به پا می کند. او خواهد گفت: «هم اکنون حرکت دادن آن ذرهٔ تپنده خودتان را آغاز کنید» و «سپس ببینید که چگونه همزمانی شما با شتاب تمام همه‌جا به پیش خواهد رفت! بعداً نگویید که من به شما نگفتم!»

ما توضیح بهتری دربارهٔ این نسبیت قدیمی بیچاره در چنته داشتیم. او در واقع از این مطلب همزمانی به شدت متأثر می شود و همین بود دلیل اینکه چگونه از زیر، شروع به اِفساد مفهوم همزمانی کرد. اگر کسی می دید که دو چیز بسیار دور از هم در آن واحد اتفاق می افتند، بنابر نسبیت، به این معنی نبود که شخص دیگری هم توافق داشته باشد آن دو چیز در آن واحد اتفاق افتاده‌اند. در حقیقت، اگر این دو چیز

بسیار از هم دور باشند، و اگر یکی از آن اشخاص نسبت به دیگری در حال حرکت باشد، آن دو نفر قطعاً و به ناگزیر عدم توافق دارند. اینشتین، جدا از این کشف پنهانی، کل نظریهٔ نسبیت خود را، همراه باتمامی پیامدهای معما گونه‌اش، و از آن جمله این نتیجه که سیگنالها از هر نوعی که باشند نمی توانند سریعتر از نور حرکت کنند، تکامل بخشید. در گذشته‌های دور، اگر تپشی در همه‌جا به طور همزمان پیش می رفت ذره هم در همه جا به طور همزمان به پیش می رفت، و این حرف بی معنایی نبود. امّا، در چارچوب نسبیت، به محض آنکه ذره یا دانشمند شروع به حرکت کنند، طومار تمامی طرح همزمانی درهم پیچیده می شود. در سال ۱۹۰۵، اینشتین مانند هملت در زمان درازی پیش از او فریاد برآورد که:

«زمانه از مدار به درگشته...»

و فیزیکدانان پریشان، که آرامش و آسودگی خیالیشان به هم خورده بود، بقیهٔ سخن را به شکلی تحریف شده چنین ادامه دادند:

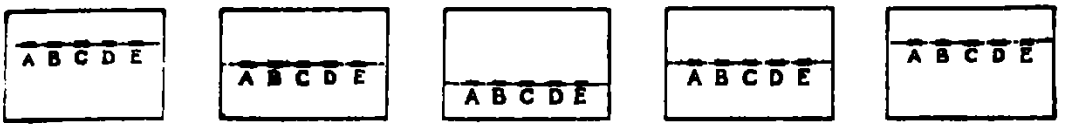
«... آه چه رنجی،
که او زاده شده تا باز برجایش نهد!»

دوبروی ماهیتهای ویژهٔ نسبیت را می شناخت. اینشتین فرمولهای ریاضی دقیقی برای درهم پیچیدن طومار همزمانی ارائه داده بود. دوبروی اینك می توانست آنها را بر تپشهای خود اعمال کند و پی بَرَد که وقتی این ذره حرکت کرد، چه روی داده است.

و آنچه اتفاق افتاد این بود که ـ دوباره به امواج روی آورند.

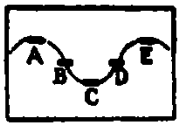
شاید بتوانیم به طور کلی ببینیم این رخداد چگونه بوده است. برای انجام این کار ناگزیر به یاد می آوریم که بنابر اصول نسبیت، حرکت نافی همزمانی است. طبیعتاً، بیان صرف این مطلب که حرکت همزمانی را نفی می کند توضیح نکته‌ها و دقایق ذاتی نظریهٔ نسبیت نیست، و اصولاً حتی مفهوم خود همزمانی نفی شده را به صورت رضایتبخشی هم در نمی آورد چه رسد به اینکه بگوییم آن را پذیرفتنی می کند. امّا، نیت ما تلاش برای ملاحظهٔ چگونگی تبدیل تپشها به امواج است. بنابراین، همزمانی را فعلاً در نظر بگیریم و ببینیم با چه روشی این واگردانی را انجام می دهد.

یك سری چوب پنبهٔ E, D, C, B, A را در نظر بگیرید که به فواصل مساوی بر روی اقیانوس متلاطم «کف آسانسور» شناور باشد. چند و چون قرارگیری آنها در زمانهای گوناگون را چنین نمایش می‌دهیم:



(الف) اکنون (ب) بعد (ج) بعداز آن (د) باز هم بعد (هـ) باز هم بعد از آن.

البته، تنها آنها که با هم بالا و پایین می‌روند، همیشه با یکدیگر هم تراز خواهند بود. امّا فرض کنید که ما آنقدر نزدیك‌بین باشیم که ناگزیر برای واضح دیدن چوب پنبه، کاملاً به آن نزدیك شویم. پس دیگر نمی‌توانیم منظره‌ای سراسری و کامل از این وضعیت داشته باشیم. باید نگاهی گذرا به A بیندازیم، نگاهی شتابزده به B، سپس به C، آنگاه به D، و سرانجام به E؛ و تمامی این نگاههای شتابان در حالی است که اقیانوس کاملاً متلاطم در حال بالارفتن و پایین آمدن است. از وضع چوب‌پنبه‌ها چه نوع برداشتی خواهیم داشت؟ باید A را در (الف)، B را در (ب)، C را در (ج)، و الی آخر ببینیم. ناچاریم این چوب پنبه‌ها را این طور تصور کنیم:



در واقع باید سطح اقیانوس را مانند شکل موجی بسیار متلاطمی به تصور آوریم.

البته این موجی بودن ناشی از آن است که این پنج چوب پنبه را به طور همزمان مشاهده نمی‌کنیم. امّا دربارهٔ نسبیت چه بگوییم؟ آیا نمی‌گوید که در صورتیکه من در پشت چوب پنبه‌ها حرکت کنم امّا شما حرکت نکنید، تصور من از مشاهدهٔ همزمان با تصور شما در توافق نخواهد بود؟ در واقع، نسبیت می‌گوید شما به مشاهدات سراسری و همزمان من که به وسیلهٔ پیام‌آوران نزدیك‌بینی انجام می‌شود که با سرعتی باورنکردنی از چوب پنبه‌ای به چوب پنبهٔ دیگر می‌جهند، فکر می‌کنید.

درهم پیچیدن زمان درهم پیچیدنی در شکل در پی دارد به طوری که آنچه از نظر شما سطح صاف اقیانوس است در نظر من آشفته و متلاطم خواهد آمد؛ و امواج آن را پوشانیده‌اند، و معلوم می شود که این امواج عملاً سطح را خواهند پیمود.

پیمودن، به راستی کلمهٔ بجایی است، چرا که موجها با سرعتی بسیار بیشتر از نور حرکت می کنند.

گفتیم سریعتر از نور؟ نسبیت با این بیان موافق نیست.

پس چه بگوییم؟ آه! خیلی هم بد نیست. اگر انرژی حقیقتاً سریعتر از نور انتقال یابد، نسبیت اعتراض می کند.علم از دیرباز با امواجی که سریعتر از نور حرکت کنند، نوری که بتواند انرژی را به آن سرعت منتقل کند، آشناییهای داشت.

با همهٔ اینها انرژی منتقل می شد، چرا که خود ذره حرکت می کرد. جرم نیز همان انرژی است. این ذره چگونه با امواج فازی پیوند برقرار می کند؟ دوبروی این پیوند راکشف کرد.

اگر تعداد زیادی از قطارهای موج دوبروی را، با سرعتهای اندکی متفاوت، در نظر گیریم، اثرهای خود را به روش همان دوستان میلیونر قدیمیمان می افزایند یا می کاهند. فرض می کنیم آنها در یك راستا به حرکت بیفتند؛ تمامی آنها در یك مکان ویژه همراه هم به پیش خواهند رفت. در ابتدا یك موج بسیار عظیم در آن مکان به وجود می آید. امّا در آنجا باقی نخواهند ماند. دوبروی ثابت کرد که این موج با سرعتی خیلی زیاد، امّا خیلی آهسته‌تر از نور، به پیش می رود. در واقع، این موج مرکب بسیار بزرگ، و بلند ـ با سرعت ذره ـ حرکت خواهد کرد. پیوند عجیب بین ذرهٔ کند حرکت و موج که با سرعتی باور نکردنی حرکت می کند، همین بود.

دوبروی پیوندهای نزدیك دیگری را میان ذرات و امواج همراه آنها پیدا کرد. مثلاً، پیر دوفرما ریاضیدان بزرگ فرانسوی مدتها پیش قوانین نور شناخت هندسی را به قاعدهٔ فراگیر واحدی تبدیل کرده بود که بنابرآن، یك پرتو نور مسیر مورد نیاز خود را در کمترین زمان می پیماید. همچنین، قوانین دینامیك به قاعدهٔ یگانه‌ای تبدیل شده بودند که بر مبنای آن هر دستگاه مادی چنان حرکت می کند که از کمترین مقدار یك موجود تکنیکی معین به نام کُنش، استفاده کند. در یك سو اصل کمترین زمان وجود دارد؛ در سوی دیگر اصل کمترین کنش.

اتفاقاً ثابت پلانك، h، واحدی از این کُنش به حساب می آید. در واقع، این

واحد کوانتوم کُنش (یا عمل) نامیده می شود. دوبروی پی برد که این کمیت همچون پلی بین موج و ذره عمل کرده است. اصل کمترین زمان برای امواج مادی او از لحاظ ریاضی همان چیزی است که به عنوان اصل کمترین کنش برای ذراتش عمل می کند.

این نکته که چگونه ایدهٔ دوبروی تصویری ساده و مؤثر از قاعدهٔ بور دربارهٔ برگزیدن مدارهای مجاز نیز ارائه می دهد، در فصل بعد خواهد آمد.

اکنون، فیزیکدان حرفه‌ای به شدت مشغول کار است. و تمام کاری که او برای همگامی با پیشرفتهای معقول در حوزهٔ خاص خودش می تواند انجام دهد، همین است. او با وسواسهایی همراه با ایده‌های پر ارزشی که جهت گشودن گرهٔ فروبستهٔ عالم طراحی شده‌اند، با احتیاط و ملاحظه کاری برخورد می کند. و موارد فراوانی از این دست ایده‌ها وجود دارد. پس، او با پیشنهاد دوبروی چه کرد؟ این امر برای توجیه صریح او یك نظریه‌پردازی خالص و کاملاً خیالپردازانه بود. این نظریه، در مقام مقایسه با پیروزی ناگهانی نظریهٔ بور، یعنی دستورالعملی برای این ثابت مرموز، پیروزی تکان دهنده‌ای به همراه نداشت. دلایل تجربی را باید در کجا جُست؟

مطمئناً، دوبروی نسبت به امواجش نظر کاملاً خاصی داشت، و بر مبنای آن پیشگویی می کرد که طول موج آنها باید برابر h تقسیم بر جرم و سرعت ذره باشد. امّا آیا پذیرفتنی بود که امواج ماده، اگر هم وجود داشته باشند، بتوانند این همه سال از دست آزمایشگر بگریزند؟ این نیز نگرشی جالب بود، امّا فقط همین. این موضوع بسیار زیبا، بسیار ظریف، سرگرم کننده، و حتی شگفت‌انگیز بود؛ دقیق، ساده، و بسیار حیرت‌آور نیز بود. امّا آیا این فیزیك بود؟ دلیل تجربی کجا بود؟

اگر در تمام دنیا یك مرد وجود داشت که کشف دوبروی را پیش‌بینی کرده باشد، اینشتین بود. چرا که ایدهٔ دوبروی مکمل ایدهٔ خود او دربارهٔ فوتون بود و از نظریهٔ نسبیت خودش سرچشمه گرفته بود. اینشتین نشان داده بود نور که از مدتها پیش فکر می کردند موجی است، شبیه ذره است. دوبروی با اظهار این که ماده، که از دیرباز تصور می شد حاوی ذرات است، باید با امواج توأم و بنابراین در ماهیت آنها سهیم باشد، استدلال را به یك دور کامل کشیده بود. پس همین بود که وقتی **اینشتین به کار دوبروی** برخورد کرد، فوراً اهمیت احتمالی آن را دریافت و وزنهٔ

اعتبار بی چون و چرای خود را در پشت آن قرار داد.

س. ج. داویسون، در آزمایشگاههای بل تلفن، در نیویورك سیتی، از سال ۱۹۲۱ یك رشته آزمایش کرده بود. من نمی دانم قرار بود چه کاری با تلفنها بکنند. امّا ناگزیر بودند کاری با جهش جریانی از الکترونها در یك تودهٔ فلز انجام دهند. در آوریل سال ۱۹۲۵ حادثه‌ای پیش آمد. داویسون، که اکنون گِرمر یاریش می کرد، الکترونهایی از یك کپهٔ نیکل[1] در خلأ کامل جهانید. در حالی که کُپهٔ نیکل بسیار داغ بود، یك قمقمه هوای مایع در آزمایشگاه منفجر شد، وسایل را در هم شکست، خلأ را از بین برد، به هوا امکان داد که هجوم آورده سطح نیکلی را که به دقت آماده شده بود، خراب کند. تنها روش عملی پاکیزه کردن این سطح، گرما دادن دراز مدت بود. از بخت خوش، داویسون و گرمر، بدون پروا از این مانع، خرابیها را بازسازی کردند. سطح نیکل را به حال نخست برگردانیدند، و به آزمایش خود ادامه دادند.

این عملیات حرارتی، بدون آنکه داویسون و گرمر آگاه باشند، تغییر گسترده‌ای در نیکل آنها پدید آورده بود؛ آن را به صورت بلورهای بزرگی گداخت که قبلاً شامل هزاران بلور کوچك بودند. بنابراین، هرچند ساختار درونی تغییر چشمگیری کرده بود، نشانه‌ای مبنی بر آشکار سازی این دگرگونیها در سطح وجود نداشت.

داویسون و گرمر بی خبر از حوادثی که سرنوشت نیکخواهانه بر سر راهشان قرار داده بود به آزمایش ناتمام خود ادامه دادند. با حیرت نظاره‌گر نخستین نتایج خود شدند. نقشهای نمونه‌ای در برابر چشمهای آنان قرار داشت که علم از دیرباز آنها را به عنوان نقشهای پراش پرتو X می شناخت. اما پرتو Xی در کار نبود فقط الکترونها بودند. این آزمایشها سالها پیشتر از آنکه دوبروی نتایج خود را اعلام کند آغاز شده بود، امّا اگر حادثهٔ انفجار قمقمه نبود هرگز چنان کشف تکان دهنده‌ای صورت نمی گرفت. اما داویسون دیگر نامزد دریافت جایزهٔ نوبل ۱۹۳۷ شده و پیش از او دوبروی جایزهٔ نوبل سال ۱۹۲۹ را ربوده بود. این نقشهای پراش پرتوهای X نخستین تأیید مستقیم تجربی بر نظریهٔ دوبروی بودند. این آزمایشها نشان دادند که

---

۱. در تلفنها تردید دارم که این حلقهٔ گمشده این بوده باشد! [بعدالتحریر بر یك پانوشت، ۱۹۵۹: این کنایه از فضاو بلای زمان است. من این را به صورت یادوارهٔ روزهای بهتر که قیمت مکالمات تلفنی ۵ سنت بود باقی می گذارم]. - م.

رفتار الکترونها شبیه امواج است و حتی چیزهایی بیشتر از این نیز نشان دادند. نشان دادند که رفتار الکترونها درست مانند امواجی است که دوبروی پیشگویی کرده است، زیرا اندازه‌گیریها ثابت کرد که این طول موجها درست همانهایی اند که دوبروی از پیش خبر داده بود. پس این تأیید بر شالوده‌ای صحیح، و کمّی، استوار بود. اثبات و استدلال تجربی گریز ناپذیری در کار بود.

امّا چه موقعیت عجیبی برای این دو دشمن سازش ناپذیر، موج و ذره، پیش آمده بود. و چه منزلت باشکوهی برای موج. تجهیزات و مهمات اولیهٔ موج را به یاد آوریم، تجهیزاتی که او پایگاه اصلی خود را برآن قرار داده بود، و تجهیزاتی که حتی فوتون ناچار شده بود بپذیرد شکست ناپذیر است: هر چیزی که تداخل را نشان می‌دهد باید موجی باشد ـ فوتون خودش، البته از روی بی‌میلی، این موضوع را پذیرفته بود. در تمام طول این مدت فوتون با چرب زبانی لاف زده بود که درست مانند هر ذرهٔ دیگر، مثلاً مثل الکترون، یك ذره است. و اکنون دریافته بودند الکترون، آن ذره‌ای که مزیتش نمایی بودن یا بنیادی بودنش بود، رفتاری مانند موج دارد.

آدم نمی‌داند که ذره اگر می‌توانست یکی از نتایج را پیش‌بینی کند چه می‌گفت. توانایی میکروسکوپ در آشکار کردن جزئیات در واقع به کوتاهی طول موج به کار رفته وابسته است. بنابراین قویترین میکروسکوپها، نور فرابنفش را به کار می‌گیرند. از آنجا که طول موج الکترونهایی که بسیار سریع حرکت می‌کنند هزاران بار کوتاهتر از طول موج نور فرابنفش است، بشارت دادند که جزئیات بسیار بیشتری را آشکار کنند، همان بشارتی که بعداً با ظهور میکروسکوپ الکترونی کاملاً تحقق پیدا کرد.

موج پس از سالها پس نشینی آرام، توانایی یافته بود تا دست به چند حملهٔ کامل بزند: «بسیار خوب، شما می‌گویید ذره هستید، این طور نیست؟ امّا، شما، و ایده‌های نوین شگفت‌تان، حتی نمی‌دانید ذره چیست، دربارهٔ یار و همدمتان الکترون چه می‌دانید؟ گفتید که او ذره است. اینك به او نگاه کنید. اگر از ما بپرسید می‌گوییم او موج است. به تصور ما شما هم همین طور فکر می‌کنید. در واقع، ما همیشه نسبت به آن همین بدگمانی را داشته‌ایم، امّا شما چنان با فریاد سخن گفته بودید که تقریباً نزدیك بود ما را به اشتباه بیندازید.» و موج، پس از این ظهور،

می‌توانست بیاساید و از نیکبختی نویافتهٔ خود، با احساسی بسیار مطبوعتر، لذت برد. اما سپس موج می‌بایست شروع به بازتابش کند ـ همان‌گونه که از نور انتظار می‌رود. آیا این یك ضد حمله بود؟ او جنگ را نُبرده بود. در واقع اصلاً در موضعی حیاتی به فوتون حمله نکرده بود. صرفاً میدان جنگ را از نظریهٔ نور به نظریهٔ ماده نیز گسترش داده بود. البته، همه همواره فرض کرده بودند که ماده با امنیت کامل متعلق به اردوگاه فوتون بوده است، و اینك مشاهدهٔ آن در خط جبههٔ نبرد گیج کننده بود. امّا ذرّ فوتون تسخیرناپذیر باقی ماند. موج هنوز هم نمی‌توانست بر اثر فوتو الکتریك چیره شود. نیز نمی‌توانست بر اثرهای اتاقك‌ابر الکترون غلبه کند. در واقع، رویهمرفته ضد حمله‌ای عبث بود. موج ضمن کشانیدن الکترون به میدان نبرد، اثرهای الکترون را به مهمات ذره افزوده بود. او در طلب کیفیتهای موج گونهٔ الکترون برای خودش، کیفیتهای ذره‌گونهٔ الکترون را به اردوگاه فوتون کشانده بود، تا در آنجا مرکز فرماندهی کل منسجمی برای تمامی ذرات بر پا دارد. اکنون جنگ داخلی، که تقریباً تمامی دانش فیزیکی به طور گریزناپذیری درگیر آن شده بود، بیش از هر زمان دیگری به وخامت گراییده بود.

امّا، رویدادها سرعت بسیار داشتند. مذاکرات دیپلماتیکی در جاهای دیگر در جریان بود که، در خلال یکسال، می‌رفت تا مناقشات دیرپای ذره ـ موج را با رضایت معقول هردو طرف، حل و فصل کند.

امّا اکنون ما باید به روزهایی برگردیم که نظریهٔ دوبروی هنوز فرضیه‌ای اثبات نشده بود و برای بازشناسی خود از جانب دیگران تکاپو می‌کرد. دوبروی در عصری پرهیجان و برانگیخته زندگی می‌کرد. در همان زمانی که داویسون و گرمر به دفاع از ایده‌های او برخاسته بودند، تقریباً دانسته شده بود که این ایده‌ها کلاً از نظر فیزیکی قابل دفاع نیستند.

فصل ۹

لیستهای رختشویخانه به دور انداخته می‌شوند

همچنانکه ایدهٔ دوبروی منتظر بود تا به رسمیت شناخته شود، نظریهٔ متزلزل بور هنوز هم توجه فیزیکدانان را به سوی خود فرار می خواند. کسانی بدون در دست داشتن اصل راهنمای مشخصتری، در محاسبات خود به استفاده از آن ادامه می دادند، محاسباتی که به نظر می رسید یگانه نتیجه‌اش بی اعتبار کردن بیش از پیش این نظریه بود.

بخت خوش این بود که ایدهٔ دوبروی با تأخیر اندکی پای به صحنه گذاشت؛ چرا که در غیر این صورت دو محقق جوان یعنی کرامرز هلندی و هایزنبرگ آلمانی پژوهش مشخصی بر شالودهٔ نظریهٔ بور انجام نمی دادند. این محاسبه به گونه‌ای درخور در برابر نارساییهای اصل همخوانی بور قد علم کرد، وجوانهٔ یك ایدهٔ ژرف و اصیل را در ذهن هایزنبرگ پدید آورد. اگر اعتبار نظریهٔ بور تنها به این باشد که ضعف خود را و در نتیجه ضعف تمام دانش فیزیك پیش از خود را بر هایزنبرگ آشکار ساخت، می توانیم بگوییم در تکامل دانش تأثیری متعالی داشته است.

در روزهای پیش از به قدرت رسیدن هیتلر، گروهی از مردان درخشان و پیشرو، در دانشگاه گوتینگن آلمان گرد آمده بودند تا یکی از سرافرازیهای عمدهٔ علم و ریاضیات آلمان را شکل دهند؛ گروهی که اکنون در جاهای دیگر دنیا پراکنده شده اند. در اینجا ماکس بورن استاد بود، و ورنر هایزنبرگ، جوانی بیست و چند ساله،

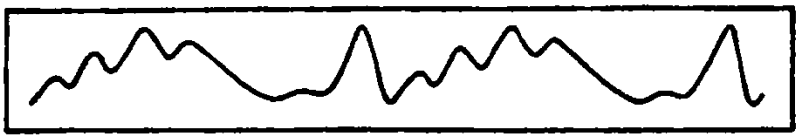
عضوی ساده و پایین مرتبه در دانشکده. آنگاه که کشف بزرگ هایزنبرگ مطرح شد، به مراتب بیش از تپهای همزمان دوبروی، شگفت‌آور بود. امّا بورن، با بصیرتی هوشمندانه، می توانست در آن بنیان نظریهٔ نوینی را ببیند که آن را جسورانه در جلد اول کتابش پیشگویی کرده بود. ایدهٔ ابتدایی در سال ۱۹۲۵ مطرح شد. بورن با به کار انداختن تمامی کاردانیش، و یاری جُستن از همکارش جوردان، در سال ۱۹۳۰، درحالی‌که‌همراه‌بااو جلددوم‌کتابش‌رامنتشرکرد پاداش‌خود را دریافت‌داشت.

ایدهٔ هایزنبرگ، همانند هر ایدهٔ بزرگ دیگری، اساساً ساده بود امّا برای نشان دادن چگونگی رشد این ایده از بُن نظریه‌های پیشین، ما با ملاحظه‌کاری و به کمك اصل همخوانی بور به آن خواهیم رسید. بنابراین تکامل تاریخی آن را پی می‌گیریم. اصل همخوانی ما را وا می‌دارد که باز هم به عقبتر و به شاخه‌ای از ریاضیات، به نام آنالیز فوریه، برگردیم. و این مبحث، به نوبهٔ خود، ما را به قلمرو نامنتظرهٔ موسیقی راهبری می کند.

چه طنین ناب یك فلوت باشد یا نوای پرآوای یك ارکستر، آواز لطیف فرشته‌ای از دور دستها یا غرش نفس‌بُر یك بمب اتمی، شیار نادیدنی نوار ضبط صوت آن را ثبت می کند و در مارپیچ موجی منحصر به فردی نگه می دارد. این شیار ساده چگونه چنین کار سحرآمیزی انجام می دهد؟

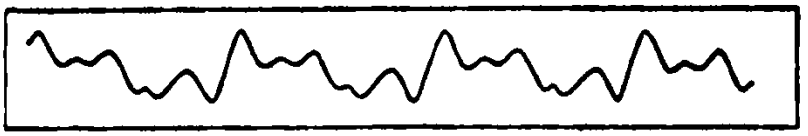
می توانیم بگوییم که این ماهیّت گوشهای ما و سرشت موجی بودن صوت است که این امکان را فراهم می آورد تا به این ترتیب، پیچیده‌ترین نوفه را همچون یك شیار منحصر به فرد، ثبت کند، و با دقیقترین جزئیاتش از طریق ارزش نوك سوزنی که موجکهای این شیار را تعقیب می کند، بازسازی شود.

در اینجا شکل صوت یك اوبوا را هنگامی که از طریق شیار یك نوار ضبط صوت ثبت می شود، می بینیم:



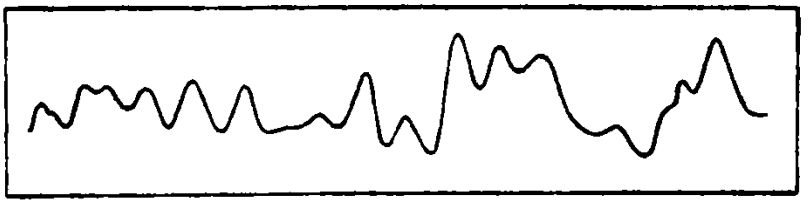
I. اوبوا

و در نمودار بعد یك کلارینت را:



II. کلارینت[1]

هنگامی که اوبوا و کلارینت با هم به صدا در می آیند، شیار چنین نمودار می شود:



III. اوبوا و کلارینت با هم

از آنجا که صوت ناشی از حرکت موجی است، شکل *III* نتیجهٔ خالص شکلهای *I* و *II* است که به شیوهٔ همان میلیونرهای پیش گفته، باهم تداخل می کنند. بنابراین با دانستن و شناختن موارد *I* و *II* در شکل *III*، که از آنها تشکیل یافته، مسئلهٔ کاملاً متفاوتی است. هرچه بخواهید می توانید نگاه کنید، امّا نمی توانید اوبوا را از کلارینت تمیز دهید.

امّا نوار را در ضبط صوت به گردش در آورید، بی درنگ گوشتان تشخیص خواهد داد که چه سازی در کار نواختن است، چه نُتی را می نوازد، و بلندی یکی از آنها نسبت به دیگری چقدر است، و حتی نوفهٔ بیگانه را که مربوط به برخورد سوزن به دیوارهای شیار است، تشخیص خواهید داد.

این معجزهٔ واقعی تحلیل است! ما پیش از تکمیل کل تحلیل، آوای نوار ضبط صوت را نمی شنویم. این همان فرایند پیچیده‌ای است که به خوبی می گوید؛ *III* که آمیزهٔ *I* و *II* است به طور همزمان توسط گوش تکمیل می شود. و این تنها یك نمایش سادهٔ تطبیقی است. فکر کنید که ما در زندگی خود چه تحلیلهای خارق العاده‌ای انجام می دهیم، بدون آنکه حتی لحظه‌ای بیندیشیم. آمیزهٔ پیچیدهٔ تپهای هوا که به گوش ما می رسند به طور خودکار و بدون زحمت در سازاهایی با معانی آشنا، دسته‌بندی می شوند. در میان غریو و آشوب ترافیك و غوغای فریادها، می توانیم صدای تیك تاك ساعت و زمزمهٔ نسیم را تمیز دهیم. در حالی که در نمایش جادویی یك سنفونی غرق شده‌ایم، و از تأثیر پیچیدهٔ سازها بر یکدیگر لذت

1. D. C. Miller, *The Science of Musical Sound*, New York, The Macmillan Co.

می بریم، باز هم می توانیم خش و خش ورقهای بروشور کنسرت را در دست شنوندگان کناریمان در ذهن خود ثبت کنیم. اینها شاهکارهایی باور نکردنی اند که بسیار پیش پا افتاده‌اند، و براثر تکرار بی رنگ شده‌اند.

ریاضیدان، با روش خاص خودش، ولو نه به این سادگی، می تواند شاهکارهای تجزیه و تحلیلی نظیر اینها پدید آورد. او یك تپ موزون را در فلان ترومپت، و در فلان ویولون، و در فلان کلارینت تجزیه نمی کند. مسائل او معمولاً به موسیقی مربوط نمی شود او ترجیح می دهد که ساده‌ترین و خالصترین انواع نوسانها، یعنی امواج سینوسی را که صدایشان شیرینی گوشنواز اوبوا و شکلشان وزن بی آلایش کوچك آبهای آرام را دارد، به کار گیرد.

موج سینوسی

فقط موج سینوسی است که یك تك بسامد دارد. تمامی امواج موزون دیگر می توانند به امواج سینوسی سازای بسامدهای گوناگون، تجزیه شوند. این مطلب، که فوریه دانشمند فرانسوی بیشتر از یکصد سال پیش بیان داشت، شالوده‌ای است که ما آنرا آنالیز فوریه می نامیم. این مبحث می تواند کارهایی انجام دهد که گوش قادر به شنیدن آنها نیست.می تواند طنین یك ویولون را دریافت کند. طنینهای سینوسی خالصی که آنها را ساخته‌اند، بیابد. و وقتی که این طنینهای خالص یکدیگر را به صدا در می آورند، مانند نواخته شدن تعدادی دیاپازُن، در واقع ترکیب می شوند تا طنین آن ویولون را به گوش برسانند. پایینترین بسامد، گام نت را تعیین می کند. بسامدهای بالاتر، که آرمونیك نامیده می شوند، طنین ویژه‌ای را به دست می دهد. بسامدهای این آرمونیکها تصادفی نیستند، بلکه مضرب صحیحی از پایینترین بسامدها هستند. بنابراین، اگر بالاترین بسامد، صد در ثانیه باشد، بسامدهای آرمونیك دویست در ثانیه، سیصد در ثانیه، چهارصد در ثانیه، والی آخر خواهند بود، اگرچه ضرورتی ندارد که همهٔ این آرمونیکهای احتمالی عملاً در آن نت حضور داشته باشند.

آنالیز فوریه ابزاری ریاضی بود که بور در اصل همخوانی خود به کار گرفت. هنگامی که وزن حرکت یك سیاره به دور خورشید از اصول آنالیز فوریه پیروی کند،

عددی به دست می آید که با بسامدهای خالص متفاوت است. همین موضوع در مورد الکترونی که به دور هستهٔ یك اتم و در یکی از مدارهای مجاز بور می گردد، صادق خواهد بود. اکنون باید یك چیز برای ما روشن باشد. این بسامدها با بسامدهای ناشی از جهشهای کوانتومی از مداری به مدار دیگر، رابطه‌ای نخواهد داشت. اینها چیزهایی کاملاً متفاوتند. بنابر نظریهٔ بور، کسی هرگز این بسامدها را در خود مدارهای منفرد ندیده است. تنها می توان این بسامدها را به اعتبار پرشهای انرژی از یك مدار به مدار دیگر دید. در واقع، این دو مطلب از حوزه‌های متفاوت دانش فیزیك ناشی می شوند، چرا که مطلب اول کلاسیکی و دومی کوانتومی است.

امّا بور احساس می کرد که چیزی (یعنی، اصل همخوانی) خود را خارج از این دو حوزه، بنیاد نهاده است. البته هر چقدر از هسته دور می شویم، فواصل میان مدارهای مجاز بیشتر می شود و اختلاف انرژی آنها کمتر می شود. فرض کنید الکترونی از یك مدار به مدار دیگر بپرد و هردو مدار بزرگ باشند. اگر این پرش برحسب فاصله اندازه‌گیری شود، ابعادی غول آسا خواهد داشت. اما اگر برحسب انرژی اندازه‌گیری شود، عملاً صفر است و این پرشهای انرژی است که اهمیت دارد چرا که همین ها هستند که نوری را که می بینیم پدید می آورند. پس آیا، در مورد مدارهای بزرگ، همواره با پرشهای انرژی تقریباً آرام، نباید مکانیك کوانتومی به طریقی با مکانیك کلاسیك یکی شود؟ آیا نباید رابطه‌ای میان بسامدهای پرش کوانتومی و بسامدهای مداری کلاسیکی وجود داشته باشد؟ ممکن است این پرسش موجه برای شما پیش بیاید که چرا باید چنین باشد؟ امّا این نظریهٔ خود بور بود و او می توانست هر کاری که می خواست با آن بکند. افزون به این، او قبلاً در سال ۱۹۱۳ که نخستین بار نظریهٔ خود را مطرح کرد، عملاً به چنین رابطه‌ای توجه کرده بود. در سال ۱۹۱۸، و بنابر ضرورت، او رابطهٔ خود را به آن سوی گسترهٔ مجاز خود توسعه داد و آن را بر پرشهای بزرگ انرژی اعمال کرد. به یاری جسارتش موفق شد قواعدی کارآمد برای محاسبهٔ شدت و چیزهایی نظیر آن، که به خاطر فقدانشان نظریه‌اش به طور جدی دچار آشفتگی می شد به دست آورد. مشکل این بود که وقتی پرشهای انرژی بزرگ بودند، دیگر بسامدهای کلاسیکی با بسامدهای کوانتومی جور در نمی آمدند. این نکته‌ای جدّی بود که چنانکه خواهیم دید، باز هم اهمیت تعیین کننده‌ای نمی یافت. امّا علیرغم اینها بور برآن شد که نوعی همخوانی میان آنها

برقرار سازد که از طریق آن بتواند برای چیزهایی مانند شدت به نتایج کلاسیك برسد و آنها را در به اصطلاح بسامدهای کوانتومی متناظر به زور جای دهد. این مطلب، به طور خلاصه، اصل همخوانی مشهور بور بود. این شگردی بسیار هوشمندانه بود، و به راستی کارآیی آن دامنه شگفت‌آوری داشت. اما هیچکس نبود که فریب آن را بخورد. این اصل صرفاً یك راه چارهٔ موقتی و ساده بود. در واقع، حتی وقتی هم به زبان ریاضی بیان می‌شد، دقیق نبود. در حالی که برخی آزمایشها برای آن یك مفهوم را اعلام می‌کردند، آزمایشهای دیگری بودند که معنی آن را چیز کاملاً دیگری می‌دانستند. دورگه بودن آن ـ بخشی کوانتومی، بخشی کلاسیکی ـ همیشه سرچشمهٔ نابسامانیهای عظیمی بوده است. پیوستن مؤثر آن به این نظریهٔ کلاسیکی بی‌اعتبار و نامربوط در واقع اعتراف به شکست بود، یا دست‌کم در آن زمان چنین بود.

در همین جا بود که هایزنبرگ پا به میدان گذاشت. حرکت یك ذره را می‌توان با دو دسته کمیت، که آنها را با p و q نشان می‌کنیم، مشخص کرد. اینها برای ما بیگانه نیستند. ما آنها را پیشتر در قاعدهٔ $\oint$ برای انتخاب مدارهای بور دیده‌ایم. q موقعیت ذره را نشان می‌کند، و p اندازهٔ حرکت یعنی حاصلضرب سرعت در جرم آن است. مثلاً، طول موج امواج دوبروی برابر است با h تقسیم بر p.

بنابر نظر فوریه، این pها و qها می‌توانند به امواج سینوسی خالص تشکیل دهنده تجزیه شوند، و بنابر اصل همخوانی اینها باید در مورد اتم بورهم کاربرد داشته باشد. امّا، هایزنبرگ، در کاری که با کرامرز می‌کرد، جدولبندی بسامدها را در ارتباط با pها و qها ضروری یافته بود، و این جدولبندی به طور حیرت‌آوری او را راهنمایی کرد، زیرا جدولی مربعی بود.

به نظر نمی‌رسد این جدول چیز مهمی باشد. امّا صبر کنید تا ببینیم که این جدول، هایزنبرگ و همکارانش را به کجا برد.

به pها و qها که حرکت الکترون را توصیف می‌کنند برگردیم. با تجزیهٔ آنها به امواج سینوسی تشکیل دهنده‌شان می‌توانیم نوعی لیست لباسشویی تهیه کنیم که ببینیم از لحاظ بسامدی شامل چه چیزهایی است. بنابراین خواهیم گفت که به ازای فلان q اولاً چه چیزهایی ثابت‌اند، و چه مقدار از این بسامد، چه مقدار از آن بسامد، و چه مقدار از بسامد دیگر در لیست داریم. این کار را با بسامد پایه شروع می‌کنیم و تا لیست بی‌پایان آرمونیکها پیش می‌رویم:

علامت لباسشویی: اسمیت

کالا	تعداد
دستمال	۴
جوراب	۸
پیراهن	۵
حوله	۲
لباس زنانه	۰
پیژاما	۱
شمد	۲
غیره	غیره

علامت لباسشویی: q

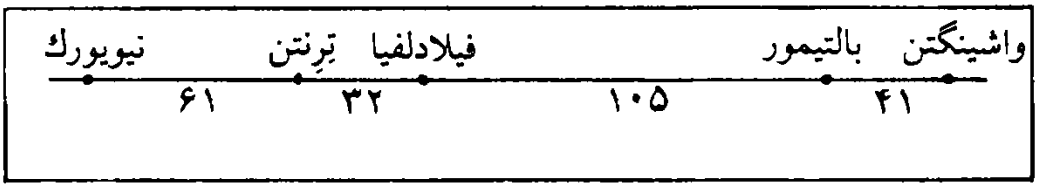
بسامد	تعداد
ثابت (یعنی، صفر بر ثانیه)	۴ واحد
۱,۰۰۰ بر ثانیه	۸ واحد
۲,۰۰۰ بر ثانیه	۵ واحد
۳,۰۰۰ بر ثانیه	۲ واحد
۴,۰۰۰ بر ثانیه	۰ واحد
۵,۰۰۰ بر ثانیه	۱ واحد
۶,۰۰۰ برثانیه	۲ واحد
غیره	غیره

این آرایش ظریفی است وگرنه لباسشوییهای تجاری آن را به کار نمی گرفتند. با این آرایش، بی درنگ می توانیم ساخت دقیق هر p و q را ببینیم، و ریاضیدانان خوشحال می شوند اگر داده‌های خود را به این گونه آرایش داده باشند.

اما هایزنبرگ قانع نشد. چنانکه او به روشنی فهمید، این سیستم برای مکانیك کلاسیکی سیستم مطلوبی بود اما مطمئناً برای کوانتوم خطا بود. چرا که روابط میان بسامدهای فوریه با روابط میان بسامد طیفهای اتمی انطباق نمی کنند.

نقطهٔ آغاز بازسازی فیزیك از جانب هایزنبرگ مشاهدهٔ این بود که بسامدهای نردبان بالمر ـ ریتس را نمی توان به طور طبیعی، مانند لیست لباسشویی، نوشت.

هر نقشه‌کش جاده دلیل این را می داند. آنچه در اینجا مورد بحث ماست بخش کوچکی از نقشهٔ یك جاده است، که البته با تفصیل بیشتر، به سبك نقشهٔ اقیانوس در *The Hunting of the snark*[1] طرح شده است. این نقشه بخشی از شاهراه



نقشهٔ جاده: شاهراه U.S.1

۱. شکار اسنارك. عنوان شعری از لوئیس کارول که در سال ۱۸۷۶ منتشر شد. این شعر تقلیدی است هجوامیز و بی معنی از اشعار حماسی. اسنارك حیوانی است تخیلی که سرشتی گول زنك دارد.

U.S.1 را نشان می دهد. پنج شهر برروی این شاهراه مشخص شده‌اند و فاصله میان آنها با اعدادی مشخص شده است. این پنج شهر البته بر مسیر واحدی واقعند، اما روش طبیعی تشکیل جدول فاصله شمار برای آنها چنین است:

جدول فاصله شمار

نام شهر	بالتیمور	نیویورك	فیلادلفیا	ترنتن	واشینگتن
بالتیمور	۰	۱۹۸	۱۰۵	۱۳۷	۴۱
نیویورك	۱۹۸	۰	۹۳	۶۱	۲۳۹
فیلادلفیا	۱۰۵	۹۳	۰	۳۲	۱۴۶
ترنتن	۱۳۷	۶۱	۳۲	۰	۱۷۸
واشینگتن	۴۱	۲۳۹	۱۴۶	۱۷۸	۰

این بخش از شاهراه *U.S.1*، به عنوان نقشه، تنها یك خط است، امّا به عنوان یك جدول فاصله شمار، یك مربع است. گاهی تنها نیمی از این جدول در زیر قطر نشان داده می شود، امّا این نکته‌ای بی اهمیت است. نکتهٔ مهم آن است که این جدول به صورت یك تك ستون به شیوهٔ لیست لباسشویی نوشته نمی شود.

چرا یك نقشه‌کش بر یك مربع یا یك مثلث اصرار می ورزد؟ آیا او به خاطر حس زیبایی شناسی خود به این شکل روی می آورد؟ شاید مطلب این باشد که مربع و مثلث رمز بسیار مکتومی در نهاد خود دارند که در تنجیم و تعدید حالت مقدسی دارد. البته، این مطلب احتمالاً ملاحظات ثانویه است، امّا علت اساسی این است که داده‌هایی که باید جدولبندی شوند، خودشان به خاطر چنین شکل جدولبندی فریاد اعتراض سر می‌دهند. همین داده‌هاست که نوع جدولبندیی را تعیین می کنند، وگرنه چه کسی به فکر تنظیم لیست لباسشویی مربعی می افتاد؟

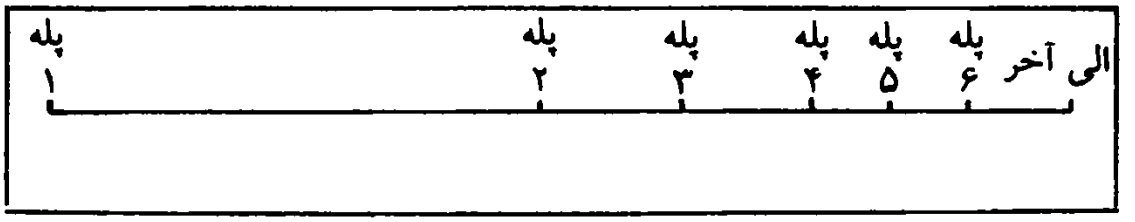
موضوع دیگر این است، که ما مثلاً برای گرفتن اطلاعاتی دربارهٔ تعداد پمپ بنزین در امتداد قطعات گوناگون این جاده می توانیم آنها را در جدولی مانند جدول فاصله شمار بگنجانیم؛ حتی می توانیم آن را با جدول فاصله شمار ترکیب کنیم، تا هم دربارهٔ بنزین و هم دربارهٔ فاصله اطلاعاتی به دست آوریم. باز هم، می توانیم جدولی مربعی در مقابل جدولبندی مثلثی احتمالی پیشین، و به کمك

نوشتن لیستی از تعداد پمپ بنزینها، تنها در سمت راست جاده، به دست آوریم؛ چیزی مثل جدول زیر:

جدول فاصله شمار ـ پمپ بنزین

نام شهر	بالتیمور	نیویورك	غیره
بالتیمور	۲۵۰ پمپ بنزین در بالتیمور	۳۸۰ پمپ بنزین در سمت راست در مسافت ۱۹۸ مایلی از بالتیمور به نیویورك	غیره
نیویورك	۴۵۰ پمپ بنزین در سمت راست در مسافت ۱۹۸ مایلی از نیویورك به بالتیمور	۵۲۵ پمپ بنزین واقع در نیویورك	غیره
غیره	غیره	غیره	غیره

در این نمونه، از جدول نویس داده‌های نقشه تا فیزیکدان تنها یك گام فاصله است. فیزیکدان می خواهد داده‌هایی را در ارتباط با بسامدهای گنجانیده شده در نوع نردبانی بالمر ـ ریتس، جدولبندی کند. بنابراین، به خاطر به وجود آوردن شباهتی کامل، نردبان بسامدی هیدروژن را به مثابه یك نقشهٔ راه، ترتیب دهیم:



نقشه راه: نردبان بالمر

فاصلهٔ یك پلهٔ دیگر، متناظر با فاصلهٔ شهری تا شهر دیگر، و دامنه‌های بسامدهای گوناگون، می توانند به همان طریقی جدولبندی شوند که تعداد پمپ بنزینها را در بالا جدولبندی کردیم. اتومبیل سوار ممکن است هوس کند از ترنتن به بالتیمور برود، و الکترون نیز می تواند آرزوی پریدن از پلهٔ سوم به پلهٔ پنجم یا

از پلهٔ دهم به هشتم را داشته باشد. تفاوت عمده میان این دو حالت این است که اکنون برروی نقشه، به جای پیچ، تعدادی نامتناهی مکان وجود دارد. امّا همین موضوع کاربرد یك جدولبندی مربعی را ضروریتر می کند.

بنابر استدلال هایزنبرگ، اکنون تمام آنچه ما یقیناً دربارهٔ اتمها می دانیم چیزهایی است مانند علامتهای تجارتی آنها، یعنی، بسامدها و شدتها و. . . ی ویژهٔ نوری که آنها بیرون می فرستند. هیچکس هرگز مدارهای الکترون را ندیده است. اینها از نوع نابترین تخیلات و داستانهای ساختگی هستند. ما باید این چیزهای بچگانه را برای همیشه کنار بگذاریم، زیرا آنها فقط به گمراه کردن ما کمك می کنند. ریاضت‌کشی و سختگیری باید شعار نظریه‌ای باشد که به بلوغ می رسد.

پس، چه باقی می ماند؟ ما با چه چیزی باید نظریهٔ خود را بسازیم؟ با چه چیزی باید یك عالم واقعیتر را بنا کنیم؟

ما باید فقط آن را از طریق چیزهایی که واقعاً می دانیم بنا کنیم: چیزهای مشخصی مانند هستی درون اتمهای پله‌های بسامدی بالمر ـ ریتس.اینك، کمیتی مانند p، همان حاصلضرب جرم در سرعت که قبلاً داشتیم، باید جدولبندی مربعی بی پایانی بسازد. و q نیز، که وضعیت یك ذره را بیان می کند، باید به همین ترتیب باشد. در واقع، تمام کمیتهای اتمی ما باید چنین نمایش یابند.

این هم کار بسیار شگفتی بود. به معنی آن نظری بیندازید. اولاً، از همان آغاز قرار نبود که بسامدهای ویژه در آن درج شوند. پله‌های نردبان باید به نخستین پله، دومین پله، سومین پله، و الیٰ آخر نشانه‌گذاری شوند، اما قرار نبود که بسامدهای مشخصی به آنها نسبت داده شوند. خود این نظریه می بایست از لحاظ ریاضی بسامدها و شدتهای صحیح را برای هر وضعیت ویژه، به وجود می آورد. این هم شرط سرسختی بود که هایزنبرگ در ذهن خود می پرورانید. دست کم، این شرط خاص و ویژه بود. امّا دربارهٔ اساس لمس ناپذیری که کل طرح هایزنبرگی را پریشان و گیج کرده بود، چه بگوییم؟ پیش از دوران هایزنبرگ، اگرچه در صورت لزوم pها و qها می توانستند به لیستهای لباسشویی فوریه تجزیه شوند، این لیستها همیشه می توانستند به شکل Pها و qها که آنها را تشکیل داده بودند، بازسازی شوند. امّا اکنون در مورد اینکه pها و qها چه باشند، حرفی در میان نیست. تنها بایستی جدولبندیهای مربعی آنها شناخته شوند. این جدولبندیهای پشت سر هم

فقط pها و qها بودند، و هیچ نیرویی نمی توانست آنها را دوباره به عقب برگردانند. با چنین pها و qهای عجیبی که اندازه حرکت ذرات و مکان آنها را در فضا باز می نمایند، عالم به چه نحوه‌ای داشت پدیدار می شد؟ فضا و حرکت، مطمئناً در این روش، دیگر همان چیزی نبودند که قبلاً بودند. هنوز هم نمی شد بالمر و ریتس را انکار کرد. هایزنبرگ که در آن هنگام بیست و سه سال داشت، گستاخ و جسور بود.

بنابراین هایزنبرگ از لیستهای لباسشویی فوریه چشم پوشید. p و q دیگر از نظر او چیز آشنایی مانند این نبود:

q

مقادیر	نام اجزاء
۴ واحد دامنه در بسامد صفر	بخش ثابت
۱۱ واحد دامنه در ۱۰۰۰ بر ثانیه	نخستین آرمونیك
۶ واحد دامنه در ۲۰۰۰ بر ثانیه	بسامد اصلی
۱ واحد دامنه در ۳۰۰۰ بر ثانیه	آرمونیك دوّم
۲ واحد دامنه در ۴۰۰۰ بر ثانیه	آرمونیك سوم
۰ واحد دامنه در ۵۰۰۰ بر ثانیه	آرمونیك چهارم
غیره	غیره

در عوض، می بایست چیز ناآشنا و مربعی به این صورت باشد.

یك کمیت متفاوت، مثلاً p، باید دقیقاً همان بسامدها را، امّا با دامنه‌های متفاوت، داشته باشد. بنابراین، اگر q با یك جدول از پمپهای بنزین متناظر باشد، p با جدول مشابهی از داده‌های دیگری، مثلاً جایگاههای ارائهٔ غذا، در همان مسیر، متناظر خواهد بود.

هایزنبرگ سرانجام پذیرفت که pها و qهایش به تکه‌های کوچکی خُرد شوند،

در حالی که در تابوتهای مربعی خود مانند استخوانهای یك اسکلت صداهایی درآورند و حرکتهایی کنند به طوریکه، به یك معنی انگار که بخواهند موجودیت خود را اثبات کنند، به دور و بر بگردند.

هرکسی کمتر جسارت داشت می ترسید و پس می نشست. آیا چنین اتاقکهای ردیف شدهٔ بد هیبتی، چنین هیولای ناپاکی، می تواند سنگ بناهای این عالم باشد؟ آیا با همین چیزها بود که انسان توانست طبیعت را بازسای کند ـ طبیعتی که در نهایت خود را تا این حد ساده نمایانده بود؟

q

نام پله‌های نردبان	پلهٔ نخست	پلهٔ دوّم	پلهٔ سوّم	بقیه
پلهٔ نخست	۳واحد دامنه متعلق به تنها پله نخست	۱۳واحد دامنه در بسامد متعلق به یك پرش از پلهٔ ۱ به پلهٔ ۲	۱ واحد دامنه در بسامد متعلق به یك پرش از پلهٔ ۱ به پلهٔ ۳	بقیه
پلهٔ دوّم	۸ واحد دامنه در بسامد متعلق به یك پرش از پلهٔ ۲ به پلهٔ ۱	۰واحد دامنه متعلق به تنها پلهٔ دوم	۰ واحد دامنه در بسامد متعلق به یك پرش از پلهٔ ۲ به پلهٔ ۳	بقیه
پلهٔ سوّم	۵ واحد دامنه در بسامد متعلق به پرش از پلهٔ ۳ به پلهٔ ۱	۲ واحد دامنه در بسامد متعلق به پرش از پلهٔ ۳ به پلهٔ ۲	۴ واحد دامنه در بسامد متعلق به تنها پلهٔ سوّم	بقیه
بقیه	بقیه	بقیه	بقیه	بقیه

هایزنبرگ با منطق انکارناپذیر آزمایش که در مقابل ضرورتهای صرف خود را عیان می کرد، رو به رو بود. او باید این آزمایش را تا آنجا که ممکن بود دنبال کند، اگر او اکنون خود را به دور از کرانه‌های ایمن و دوستانهٔ ریاضیات آشنا می یافت.

دست کم یك تبعیدی اختیاری بود، و اگر به موطن‌خود باز نمی گشت به این علت بود که انتخابی نداشت جز اینکه به سوی افقهای دور دست شراع برکشد. پیشاپیش او تاریکی بود، بدون هیچ ستاره‌ای که در این ماجراجویی عظیم راهنمائیش کند. تنها از کرانهٔ دور دست، تا آنجا که مردانی چون بور چراغهایی برافروخته بودند، نورهای محوی کورسو می زد، پرتو ضعیفی به چشم می رسید که او می بایست به کمك آن راه خود را پیدا کند. او به پیش می تاخت، در حالی که بر گرما و راحتی سرزمین مادری چشم می پوشید، و با این وجود، همین سرزمین مادری بود که راه او را روشن کرد. چرا که خوب یا بد، او نمی توانست از نفوذ ژرف آن بگریزد. این سرزمین زاد و بوم او بود، بخشی از میراث علمیش، که هرگز آن را وانگذاشته و فراموش نکرده بود. دنیای نوینی که او در جستجویش بود می بایست در خیالش سرشته و در جهتی که این خیال نشان داده بود یافته شود.

از pها و qهای قدیمی، معادلات مؤثری با توانی عظیم بنیاد گذاشته شده بود تا این اکتشاف را به پیش ببرد. در این معادلات، چیزهای زیادی که درست هم بود وجود داشت. آیا هایزنبرگ می توانست احتمالاً شکل ظاهری آنها را حفظ کند، و درعین حال جدولهای غول‌آسا و نوینش را بر شالودهٔ آنها بر پا دارد؟

در معادلات قدیمی، pها و qها در یکدیگر ضرب می شدند. هایزنبرگ در جهت باز آفرینی این معادلات می بایست به همان ترتیب پی ببرد که جدولهای مربعیش چگونه در هم ضرب می شوند. اگر او صرفاً می توانست این مسئلهٔ تعیین کننده را حل کند، آنگاه قادر می بود همان معادلات نظریه‌های قدیمیتر را بر پا دارد- معادلات قدرتمند پیشین را، که اکنون باید عهده‌دار عنصر نوین شگفت توانایی نامکشوفی باشد.

ولی اصلاً چگونه می توان جدولبندیهای مربعی را در یکدیگر «ضرب» کرد؟

بسیار خوب در نظریه‌های قدیمیتر، آنجا که pها و qها را در هم ضرب می کردیم، آیا الزاماً لیستهای لباسشویی متناظر آنها را هم در یکدیگر ضرب نمی کردیم؟ بنابراین فرض کنید p را به یك آنالیز فوریه تبدیل کنیم، و q را به آنالیز فوریه‌ای دیگر، و سرانجام یك آنالیز فوریه هم از کمیت $p \times q$ بسازیم. آیا نمی توانستیم لیست لباسشویی آخری را همچون نتیجه‌ای از «حاصلضرب» لیستهای لباسشویی p و qی اصلی در یکدیگر به حساب آوریم؟ این کار نه تنها تخیل

نیست، بلکه مفهومی است که از جانب ریاضیدانها بسیار به کار می رود. قاعده‌ای که برای در هم ضرب کردن لیستهای لباسشویی به دست می آید شاید اندکی غریب باشد. امّا اگر این از جمله قوانین غریبی است که ما دربارهٔ آنها بیمناکیم، پس دربارهٔ قاعدهٔ معروفی که ما همگی صرفاً به هنگام اضافه کردن کسرهای ساده در حساب این طور به سهولت از آن استفاده می کنیم، چه بگوییم؟

مثلاً، به کاری که ما برای جمع کردن $\frac{۲}{۱۳}$ و $\frac{۳}{۷}$ انجام می دهیم درست توجه کنید. ابتدا باید ۱۳ را در ۷ ضرب کنیم تا مخرج جدید ۹۱ را به دست آوریم. تا اینجا کار کاملاً سر راستی انجام داده‌ایم، گرچه شگفت زده می شویم در حالی که در فرایند انجام یك عمل جمع هستیم، خود را در عمل ضرب می یابیم. گام بعدی پیچیده‌تر است. برای یافتن صورت باید دستور نسبتاً پر زحمت ضرب کردن ۲ در ۷ و ۳ در ۱۳، و سپس جمع کردن حاصلضرب آنها یعنی ۱۴ و ۳۹ و به دست آوردن ۵۳ را، پی‌گیری کنیم. با قرار دادن صورت بر بالای مخرج، سرانجام جواب، $\frac{۵۳}{۹۱}$، را به دست خواهیم آورد.مطمئناً اگر بتوانیم زحمت به کارگیری چنین قاعده پیچیده‌ای را صرفاً برای جمع بستن کسرها در حساب بر خود هموار کنیم، دیگر نمی توانیم برای قاعدهٔ عجیب ضرب لیستهای لباسشویی در یکدیگر، در ریاضیات بالاتر، قاعدهٔ ضرب جدولبندیهای مربعی هایزنبرگ در فیزیك کوانتومی، نازك طبعی به خرج دهیم.

در واقع هایزنبرگ قاعده‌ای نسبتاً طبیعی طرح کرد که با قاعدهٔ مربوط به ضرب کردن لیستهای لباسشویی فوریه بستگی داشت. یك نمایش ساده برای نشان دادن انجام این کار کافی خواهد بود. به جای جدول بی شمار هایزنبرگ، جدولهایی به کار بریم که هریك تنها چهارخانه داشته باشند، و در آنها فقط دامنه‌ها را یادداشت کنیم. بنابراین، وانمود می کنیم که p و qی ما چنین اند:

$q \rightarrow$

پله	۱	۲
۱	۱	۳
۲	۵	۷

$p \rightarrow$

پله	۱	۲
۱	۲	۴
۲	۶	۸

نتیجه حاصلضرب $p \times q$ باید در همین نوع خانه بندی بگنجد.

$p \times q \rightarrow$	پله	۱	۲
	۱	؟	؟
	۲	؟	؟

خانه‌های گوناگون چگونه پر خواهند شد؟ فرض کنید ۶ را در جدول p در ۳ متعلق به جدول q ضرب کرده‌ایم. جوابی که خواهیم داشت ۱۸ است. امّا آن را کجا قرار دهیم؟ ۶ مربوط به پرشی است از پلهٔ ۲ به پلهٔ ۱، و ۳ بیانگر پرشی از پلهٔ ۱ به پلهٔ ۲ است. بنابراین ۳ × ۶، یا ۱۸، بیانگر پرشی است از پلهٔ ۲ به پلهٔ ۱ ودوباره بازگشت به پلهٔ ۲. یعنی، این پرش از پلهٔ ۲ آغاز و به پلهٔ ۲ ختم می شود. بنابراین، این عدد به خانهٔ پایینی سمت راستی تعلق دارد. در آن خانه چه چیز دیگری نوشته خواهد شد؟ برای یافتن آن، تمامی «پرشهای» دوگانهٔ ممکن دیگر را که نخستین پرش در p و دومی در q است، و نتیجهٔ خالصش «پرشی» از پلهٔ ۲ به ۲ پله باشد، جستجوی می کنیم. حاصلضرب ۷ × ۸ وجود دارد، چرا که این مقدار بیانگر «پرشی» است از پلهٔ ۲، به پلهٔ ۲ که «پرش» مشابهی به دنبال آن آمده است. امّا پرشهای دیگری وجود ندارند. بنابراین رویهمرفته مادر آن خانه ۱۸ و ۵۶، یعنی مقدار کلی ۷۴ را ردیف خواهیم کرد.

در دومین خانهٔ ردیف بالایی چه عددی خواهیم گذاشت؟ باید عددی باشد نمایانگر یك پرش از پلهٔ ۱ به پلهٔ ۲. ۳ × ۲ به اینجا متعلق خواهد بود، چرا که تنها به پلهٔ ۱ تعلق دارد و ۳ به پرش از پلهٔ ۱ به پلهٔ ۲ متعلق است. ۷ × ۴ نیز در این خانه جای خواهد گرفت. بنابراین، جمعاً برای این خانه مقدار ۶ به اضافهٔ ۲۸، یا ۳۴ را خواهیم داشت.

اگر با همین شیوه به پیش رویم به سهولت خواهیم یافت:

$p \times q \rightarrow$	پله	۱	۲
	۱	۲۲	۳۴
	۲	۴۶	۷۴

اکنون برای اینکه تفریحی کرده باشیم، p و q را بچرخانیم و ضرب $p \times q$ را تشکیل دهیم. البته، از آنجا که قبلاً $q \times p$ را به دست آورده‌ایم، به دست آوردن

$q \times p$ نیز ساده است. در اینجا نیز q و p مانند پیش است:

	پله	۱	۲
$q \rightarrow$	۱	۱	۳
	۱	۵	۷

	پله	۱	۲
$p \rightarrow$	۱	۲	۴
	۲	۶	۸

بر سر خانهٔ سمت چپ بالا چی می آید؟ البته مجموع ۲ × ۱ و ۶ × ۳، ۲۰ خواهد شد.

امّا معنی این چیست؟ ما قبلا ۲۲ را داشتیم. مطمئناً اشتباهی روی داده است. آن را دوباره وارسی کنیم. خیر، مطمئناً ۲۰ وجود دارد. پس آن ۲۲ قبلی چه می شود؟ شاید در آنجا اشتباه کرده بودیم. خیر، آن هم درست بود؛ بی گمان ۱ × ۲ و ۵× ۴ عدد ۲۲ را می دهد. خانهٔ دیگری را امتحان کنیم، خانه‌ای را که در بالا سمت راست واقع است. در اینجا ۴ × ۱ و ۸ × ۳ را خواهیم داشت، که جمعاً می شود ۲۸. باز هم با نتیجهٔ پیشین منطبق نیست. عجب موقعیت پر دردسری! برای این وضعیت تنها می توان یك معنی جُست:

قاعدهٔ ضرب هایزنبرگ بین $q \times p$ و $p \times q$ تفاوت می گذارد.

بی گمان این نتیجه نمایش ریشخندآمیزی از بالاترین امیدهای هایزنبرگ بود. اگر او مردی سُست عزمتر، و با الهامی کم ژرفاتر بود، قطعاً کاوُشش را در پی این کشف سُخره‌آمیز، رها می کرد.

و اینك این مسافر تنها در گردش بود و مشتاق خبرهای سرزمین اصلی. سیر و سفر به تنهایی و در دریاهای ناشناختهٔ فردا، همواره کار مشکلی بوده است. او برای متوقف کردن تلاشهای کنونی خود شتاب به خرج داد، و دریانوردان باتجربه‌تری را به یاری خود فرا خواند. اگرچه، نخست می بایستِ به یك عمق پیمایی دست می زد تا ژرفای اکتشاف خود را بیازماید. او به شتاب محاسباتی مقدماتی انجام داد تا ببیند چه نتایجی باید از آن به دست آورد ـ و به موقعیت تردید ناپذیر شگفتی نائل آمد. دانشمندان از دیرباز، و از روی نتایج آزمایشی گوناگونی پی برده بودند که یك ذرهٔ نوسان کننده مانند ذره‌ای که پلانك به آن برخورده بود، هرگز نمی تواند تمام انرژیش را از دست بدهد و بنابراین به حال سکون درآید. نیمی از یك کوانتوم انرژی باید برای همیشه در درون حبس شود. تا آن هنگام هیچگونه توضیح نظری برای این

انرژی بازمانده ارائه نشده بود. و این یك حقیقت مطلق طبیعت بود که از ساختار نظری اساسی فیزیك بیرون مانده بود. اکنون هایزنبرگ، با محاسبات شتابزدهٔ خود، در می یافت که این موضوع پیامد خود به خود نظریهٔ نوین اوست. و نیز دریافت که این تغییرات انرژی باید درست مانند پیش در کوانتومهای کامل روی دهد، و کامیابی شگفت‌آور او همین بود. این گواهی آشکار بود بر این مطلب که نگرش او درست بوده است. در سال ۱۹۳۲ او جایزهٔ نوبل را دریافت داشت. امّا هنوز ژوئیهٔ سال ۱۹۲۵ بود.

هایزنبرگ بازگشت تا ماجراجویی علمی خود را بازگوید. ما می توانیم او را در حالی تصور کنیم که برای شنوندگان مشتاقش توضیح می دهد که ایده‌هایش حتی برای خودش تا حدی عجیب به نظر می رسیدند؛ و وقتی که او قاعدهٔ خود را در مورد ضرب جدولبندیهای مربعی و اینکه چگونه $p \times q$ و $q \times p$ یکسان نیستند باز می گفت، از اینکه مخاطبین چگونه باید این خبرها را دریافت دارند، کاملاً حیران است.

به موجب یکی از آن تشابهات علمی فوق العاده که به نظر می رسد تقریباً جزئی از یك طرح باشد، بیشتر از نیم قرن پیش از آن تحول مشابهی در همین زمینه رخ داده بود. همان طور که بورن به هایزنبرگ گوشزد کرده بود، کایلی، ریاضیدان انگلیسی، در ۱۸۵۸ به پژوهش در جنبه‌هایی از هندسه مشغول بود. حساب جدید وعجیبی یعنی حساب ماتریس را ابداع کرده بود. این ماتریسها جدولهایی مربعی از اعداد بودند که از قوانین ریاضی معینی پیروی می کردند. آنگاه که هایزنبرگ جدولهای مربعی خویش را بنا گذاشت و قواعد خاص خود را برای کاربرد آنها طراحی کرد، ندانسته در حال کشف این حساب ماتریسی بود. مفاهیمی از این دست نهایتاً می بایست در فیزیك اتمی که تا آن موقع به این روش خاص به خواب کسی هم نمی آمد، و در نهایت روشی انقلابی بود، راه پیدا کند.

این به هیچ وجه تنها نمونهٔ تاریخ نبود که ریاضیدانان با غریزهٔ شگفتشان نیازهای ریاضی آینده را پیشگویی می کردند، و در داستان ما هم آخرین مورد نخواهد بود. گذشته از داستان ما، مشهورترین پیشگویی از این دست حساب تانسوری هندسه‌دان ایتالیایی، ریچی بود که وقتی زمانش فرا رسید، اینشتین را دقیقاً به ابزاری مجهز کرد که برای تکامل نظریهٔ نسبیت عام گرانشش به آن نیاز داشت.

گرچه هایزنبرگ حساب خود را در حوزهٔ نظریهٔ اتمی پرورش داده بود، با این وجود این حساب یك نظریهٔ اتم نبود. به یك معنی، خیلی مانده بود تا این حساب، فلسفهٔ علم نوینی شود، امّا این مطلبی بود که بعداً به آن پی بردند. در این ضمن، این حساب کمی بیش از یك حساب و یك پیشنهاد بود، در کاربردهایش هم این امر صادق است. بورن و جوردان، بر کنار از این موضوع، به وجود آوردن یك نظریهٔ نوین اتمی، و از آن هم بیشتر، یك علم مکانیك نوین، مکانیك ماتریسی، را عهده‌دار شدند. اگر p ضربدر q برابر q در p نبود، پس بورن و جوردان باید به نحوی کشف می کردند که تفاوت میان آنها در چیست. امّا بورن و جوردان در کجا در پی شهود و اشراق می گشتند؟ هیچ نظریهٔ اتمی دیگری در دسترس نبود. کار اصل همخوانی ایجاد پلی بر فراز خلیج واقع در میان اتم بور و مکانیك کلاسیك نیوتون بوده است. اکنون این پُل باید آن دو را در دسترس ماتریسها قرار دهد. این ارتباط سستترین امّا با وجوداین وسوسه انگیزترین ارتباط بود. بورن و جوردان در این ارتباط کلید راهنمای مورد نیاز خود را یافتند، و سرانجام رابطهٔ قدیمی $\oint pdq = nh$، و با مفروضاتی بسیار نامربوط، معادلهٔ بسیار مهم زیر را استخراج کردند:

$$p \times q - q \times p = \frac{h}{2\pi\sqrt{-1}}$$

آنچه این معادله بیان می کند حتی تکان دهنده‌تر از آن کشف اولیّه است که در آن p ضربدر q با $q \times p$ تفاوت دارد. بنابراین معادلهٔ تفاوت آنهال برابر است با عدد پلانك تقسیم بر دو برابر عدد π در ریشهٔ دوم منهای یك. ریشهٔ دوم منهای یك اصلاً یك عدد حسابی نیست. گاهی ریاضیدانان آن را عدد موهومی می نامند زیرا هیچ عدد «حقیقی» وجود ندارد که پس از ضرب شدن در خودش حاصل آن یك عدد منفی باشد؛ منفی در منفی می شود مثبت.

چنان فرمولی باید با دنیای اکیداً تجربی که دنیای فیزیك است و شناخت آن فی نفسه به اندازهٔ کافی دشوار است، رابطه‌ای داشته باشد. اینکه قرار بود این فرمول بنیاد ژرف و مستحکم فیزیك نوین باشد، و اینکه این فرمول در واقع باید عمیقتر از هرچیزی باشد که در پیش وجود داشته است، خود ژرفای علم و ماوراءِ طبیعت را بکاود، همانقدر باورنکردنی است که قبلاً ادعا می کردند زمین گرِد است.

ماه سپتامبر ۱۹۲۵ بود. برای ایجاد یك مکانیك نوین اتمی هنوز کار زیادی مانده بود. بورن و جوردان قبلاً در جهت در آمیختن ایده‌های نوین با ایده‌های مکانیك کلاسیك نیوتونی پیشرفت کرده بودند. اکنون بورن، هایزنبرگ، و جوردان برآن بودند تا تواناییهای قابل توجه خود را در خلال حمله‌ای قاطع به این مسئلهٔ مرموز به کار اندازند. در ماه نوامبر آنان چنان پیشرفت کرده بودند که پژ وهشهایشان را منتشر کردند.

امّا جوان دیگری به این میدان پای گذاشته بود؛ یك انگلیسی به نام دیراك. او که تقریباً همسن هایزنبرگ بود، می توانست با سهولت و ظرافت کاری کند که مجموع استعداد بورن،هایزنبرگ و جوردان فقط به تدریج و به زحمت می توانست انجام دهد. وقتی که این سه تن پژ وهش مشترك خود را دنبال می کردند، دیراك به طور مستقل و با ایده‌ای جدید به مسئله حمله کرد و دشواریهای سهمگینی را که پیش پای بورن، هایزنبرگ و جوردان بود، به آسانی از میان برداشت. هنگامی که در ژانویهٔ سال ۱۹۲۶ پاولی موفق به اثبات این واقعیت تعیین کننده شد که نظریهٔ نوین هایزنبرگ دقیقاً نردبان هیدروژن را ارائه می دهد، همین دیراك بود که تعمیمی کاملاً تجریدی از نظریهٔ هایزنبرگ اعلام کرد و آن را برای به دست آوردن استنتاجی ساده‌تر از بسامدهای بالمر به کار برد.

امّا مرد مهمی چون دیراك را نباید در آخر فصلی که دربارهٔ هایزنبرگ است، معرفی کرد. او در فصل مستقلی جایگاه مستقل خودش را دارد.

فصل ۱۰

ریاضت جویی پُل

پُل آدرین موریس دیراك می خواست مهندس برق شود، امّا از بیم آنکه این شایستگی را نداشته باشد، توجه خود را معطوف فیزیك تجریدی، که آن را جالب یافته بود، کرد. اینکه آیا او علیرغم بیم و هراسهایش مهندس برق موفقی می شد یا نه، خوشبختانه یك مسئلهٔ آکادمیك است، زیرا او در اوایل سالهای سی عمر خود قرار بود به شایستگی، همان کرسی استادی دانشگاه کمبریج را اشغال کند، که در اختیار ایساك نیوتون کبیر بوده است.

اگرچه دیراك شایستهٔ فصلی جداگانه است، امّا این فصل نسبت به اهمیت بعدیش بیش از حد مختصر و کوتاه است و نسبت به ظهور بعدی او در داستان ما، تنها یك پیش درآمد به شمار می آید، چرا که اگر مفهوم هایزنبرگ چنان پیچیده بود که تقریباً خالی از معنی تصویری به نظر می رسید، مقالهٔ دیراك که در پاییز و زمستان ۱۹۲۵ منتشر شد، ظاهراً خارج از متن ریاضی آن نمونهٔ کامل تجرید بود، و تجسم بخشیدن به آن ناممکن. و این به آن علت بود که این نوشته در آن موقع هنوز هم یك نظریهٔ ناآزموده بود. بعداً خواهیم دید که این نظریه به خاطر تمامی تجریدش، که این تجرید به جای آنکه به مرور زمان از میان برود بر آن افزوده می شد، می توانست به سادگی و به طور معنی داری مجسم شود. با این وعده که بتوانیم مطلب را وضوح

بخشیم، در اینجا هرچند به طور ناقص، نوع ایده‌هایی را ملاحظه می کنیم که دیراك قبلاً، در آن روزهای اولیه، به آنها می اندیشید. اگرچه طرح کلی ما باید ناقص و مختصر باشد، دست کم جوهر سفت و سخت ویژهٔ اکتشافات اولیهٔ دیراك را نشان می دهد.

اعلام نظریهٔ هایزنبرگ بی درنگ در ذهن دیراك جرقه‌ای روشن کرد. او مستقل از پژوهشهای بورن، هایزنبرگ، و جوردان که حتی در آن موقع در جریان بود، آفرینش نظریهٔ مکانیك نوینی را از ایدهٔ هایزنبرگ به عهده گرفت. اگر x ضربدر y با y ضربدر x یکی نبود، پس دیراك می بایست به نحوی پی برد که تفاوت میان آنها چیست؛ و با به کارگرفتن اصل اجتناب ناپذیر همخوانی، او به جستجوی شباهتی در مکانیك کلاسیك پرداخت. در نظریهٔ کلاسیك کمیتهای ریاضی مشخصی وجود داشتند، که آنها را با [x,y] نمادگذاری می کردند. این نماد را پواسون فرانسوی کشف کرده بود، و کروشه‌های پواسون نامیده شده‌اند. دیراك، با شادمانی فراوان، رابطه‌ای بسیار ساده کشف کرد: مقدار کروشهٔ پواسون، [x,y]، را بر مبنای نظریهٔ کلاسیك، با ضرب کردن آن در ثابت پلانك و ریشهٔ دوم منهای یك، و تقسیم بر 2π محاسبه کنید، آنگاه نتیجه مقدار ویژه‌ای خواهد بود که تفاوت بین x ضربدر y و y ضربدر x را مشخص می کند.

آیا ممکن است این یك کشف نسبتاً بی ثمر به‌نظر رسد؟ یکبار دیراك گفته بود که پرهیجانترین لحظهٔ زندگی او لحظهٔ الهام همین کشف بوده است. دیراك در یك یورش سریع، و مبهوت کننده، بر موانع و مشکلات بی شماری فائق آمد که بورن، هایزنبرگ، و جوردان در طی تلاشهایشان در راستای بنا کردن مکانیك ماتریسی جدید در چارچوب مکانیك کلاسیك، در برابر آنها ناکام مانده بودند، و نتایجش را عملاً اندکی پیش از آنکه آنها بتوانند نتایج کشفیات خود را در همان زمینه (البته با ظرافت کمتری) منتشر کنند، انتشار داد.

کشف ابتدایی دیراك، او را در امتداد مسیری از تجرید عمیق به پیش برد. او با تأمل بر نظریهٔ هایزنبرگ، دریافت که تأکید این نظریه نابجا بوده است، و پی برد که این نظریه جنگل را در پشت درختان پنهان کرده است. اگرچه آن جدولبندیهای مربعی عظیم الهام عمدهٔ هایزنبرگ بوده‌اند، اینها در هستهٔ مرکزی نظریه جای نداشته‌اند، بلکه نتایج چیز بنیادیتری بوده‌اند. او با کنار نهادن چوب بستی که

هایزنبرگ، بورن، و جوردان به اشتباه بنا کرده بودند، نگاه خیرهٔ خود را متوجه آن عمارت غول پیکر و باشکوه که در زیر واقع بود، کرد. به همان ترتیب که کوری‌ها از یك کوه کانی خرده‌ای رادیوم استخراج کردند، دیراك هم آخرین شیوهٔ جدولبندیهای مربعی عظیم هایزنبرگ را، فقط همان یك مفهوم اساسی آنها، مبنی بر اینکه x ضربدر y با y ضربدر x متفاوت است، بیرون کشید.

دیراك می گفت: از این پس علم باید آماده باشد که با دو نوع «عدد» سر وکار داشته باشد. علم باید به همراه اعداد معمولی از آن چیزی سود برد که او آنها را «اعداد q» نامید، اعدادی که با نقش معمولی ضرب مبنی بر اینکه x ضربدر y برابر است با y ضربدر x، مخالفت می ورزند. pها و qهای مکانیك کلاسیك، که از دیدگاه کلاسیکی اعدادی معمولی بودند، اکنون باید اعداد q به شمار آیند، و علم نوین مکانیك کوانتومی، چنانچه از مکانیك ماتریسی برمی آمد، باید از ریشهٔ آنها جوانه زنند.

امّا آیا بدون جدولبندیهای مربعی چیز زیادی از این نظریه باقی می ماند؟ آیا واقعاً دیراك از هایزنبرگ پیشی جُسته بود؟ آیا به نظر نمی رسد که او زیاد هم پیش نرفته بوده است؟ اندکی بیشتر در این باره حوصله به خرج دهیم.

پس، قرار بر آن می شود که pها و qهای مکانیك کلاسیکی به مثابه اعداد q به شمار آورده شوند. انرژی و زمان، و تمامی کمیتهای دینامیکی دیگر از این دست، که هایزنبرگ پنداشته بود جدولبندیهای مربعی وسیعی باشند، نیز همینطورند. چیز دیگری در این لیست جای می گیرد؟ واضح است، به یك معنی، هیچ چیز دیگر! این بود کشف بزرگ دیراك. مکانیك کلاسیکی می توانست از راه این تدبیر، توسط کروشه‌های پواسون، به مکانیك کوانتومی تبدیل شود. چرا که کروشه‌های پواسون موجودات توانایی در نظریهٔ کلاسیك بودند، که می توانستند کلاسیك اصلی را به شکل ساده‌ای نمایش دهند. به خاطر آنکه بشود مکانیك کوانتومی نوین را آفرید، می توان این معادلات نظریهٔ کلاسیك را مطلقاً بدون تغییر نوشت، و کروشه‌های پواسون را صرفاً مطابق دستورالعمل اولیّهٔ دیراك تفسیر مجدد کرد.

ماتریسها چه؟ آنها اهمیت درجهٔ دوم داشتند. می توان با عمل ساده‌ای، از معادلات دیراك جدولبندیهای مربعی یکسانی را به وجود آورد که هایزنبرگ نخستین بار با آنها دنیای نوینی را که علم واردش می شد کشف کرد. نشان داده شد که

مکانیك نوین اتم، به خاطر تمام رادیکالیسم جوان گرایانه‌اش، وارث بر حق و صالحی برای سُنت ارجمند و بزرگ مکانیك کلاسیك است.

بور اصل همخوانی خود را در راه درخواست کمکی نومیدانه از نظریهٔ کلاسیك طرح ریزی کرده بود. هایزنبرگ و دیراك مفهوم ژرفتر آن را یافته بودند. نقطهٔ اوج آن همین بود ـ رابطه‌ای ژرف و پایدار بین مکانیك کلاسیکی و کوانتومی.

فصل ۱۱

الکترونها پرداخت می‌شوند

خیلی از سرگذشت ما باقی است. همانطور که فیزیکدانان به طور جنون آسایی ثروت ناگفتهٔ پنهان در نظریهٔ هایزنبرگ را کشف می کردند، ستایش صریح اینشتین از ایده‌های دوبروی به مثابه عاملی عمده در تکامل علم فیزیك متجلی شد. زیرا، در روزهای پایانی ۱۹۲۵، سخنان ستایش آمیز اینشتین از ایده‌های هنوز هم تأیید نشده دوبروی، توجه شرودینگر، فیزیکدان وینی را در دانشگاه مشهور زوریخ در سویس، جلب کرد.

تأثیر این اتفاق ناگهانی بود. شرودینگر در مدت کوتاه چند ماه به تنهایی نظریهٔ اتمی موفقی را ارائه داد که تنها از دور دستها با ایدهٔ دوبروی رابطه داشت و به تمامی از نظریه‌های هایزنبرگ و دیراك جدا بود. هیچ چیز شگفتی دربارهٔ شیوه‌های ریاضی این نظریهٔ نوین وجود نداشت. در واقع، این شیوه‌ها چنان آشنا بودند، که شرودینگر حتی در نخستین اعلان نظریهٔ خود توانست راه حل مسئلهٔ اساسی حاصل از بسامدهای اتم هیدروژن بهنجار را، مسئله‌ای که چنان سخت مهارتهای گروه هایزنبرگ را به خدمت گرفته بود، ارائه دهد. این راه حل در ژانویه سال ۱۹۲۶ـماهی که پاولی و دیراك نیز مستقلاً راه حل خود را از همین مسئله به ناشر سپرده بودندـبرای ناشرین فرستاده شد. هیچ مهارت اختر گویانه‌ای نیاز نبود تا در

این شگفتی رویدادهای غوغا آمیز در جهان فیزیك نظری عجیب و غریب مشاهده شود.[۱]

شرودینگر روش عجیبی برای اعلام نظریه‌اش به دنیا اختیار کرد. او نه توضیح داد که این نظریه چگونه در ذهنش رشد یافته است، و نه تسلسل منطقی کاملی از ایده‌ها را نشان داد. او صرفاً به خوانندگانش یادآور شد که فرآیند ریاضی شناختهٔ مشخصی رشته‌هایی از اعداد را ارائه می دهد که باید به عنوان اعداد کوانتومی به کار گرفته شوند. ناگهان یك معادلهٔ به اصطلاح موج نوشت ـ که اکنون معادلهٔ شرودینگر خوانده می شود ـ و بی درنگ مبادرت به استخراج جوابی با معنی از آن برای مسئلهٔ تعیین کنندهٔ هیدروژن کرد. از این ماجرا فریاد موحشی از دنیای فیزیك به هوا برخاست. دانشمندان چنین نمایشهایی را که به تردستی می مانند زیاد دوست ندارند. آنان میل دارند بدانند این نیرنگها چگونه و چرا عمل می کنند. کافی نیست که با امر واقع نشده مطلب را به آنها بنمایانند. آنان می خواهند بدانند که در پشت آن چه چیزی پنهان است. شرودینگر تحت تأثیر فشارهای همکاران فیزیکدانش، راز افسونگری خود را گشود، و این در حالی بود که در دومین مقاله‌اش توضیح داد نظریهٔ او چگونه بسطی طبیعی از ایده‌های دوبروی است، و نیز بسط مکانیك کلاسیك نیوتون که توسط ویلیام راون هامیلتون، نابغهٔ ایرلندی، تکامل یافته است.

به راستی موقع آن است که نام هامیلتون در این وقایع نامه آورده شود، زیرا گرچه او در سال ۱۸۶۵ درگذشت. کارش نه تنها بر نظریهٔ شرودینگر، بلکه همچنین بر نظریهٔ هایزنبرگ پیش از او، و پیش از آن بر نظریهٔ بور، و حتی پیش از آن بر نظریهٔ پلانك نفوذ و تأثیری قاطع داشت. مثلاً هم او بود که نخستین بار اهمیت pها و qها را در مکانیك کلاسیك نشان داد. بدون پژوهشهای او نظریهٔ کوانتوم امروزی مدتها به تأخیر می افتاد. و اگر او زنده می ماند تا در جریان احیای تضاد موج ـ ذره قرار گیرد، مطمئناً پیشرفتهای جدید را پیشگویی می کرد، همان قدر دقیق که واقعاً خودش به آنها نزدیك شده بود.

---

۱. می خواهید کار انطباقهای زمانی را ببینید؟ شرودینگر و پاولی هردو وینی بودند. اولی در سال ۱۸۸۷ و دومی در سال ۱۹۰۰ زاده شد. پس کجای این ماجرا انطباق زمانی بود؟ واضح است، سال ۱۸۸۷ سال انجام آزمایش توسط هرتز بود، و پلانك در ۱۹۰۰ کوانتوم را کشف کرد. باید انطباق کار بور ـ بالمر را هم به اینها افزود، و ما اکنون یك تریلوژی داریم.

شالودهٔ نخستین مقالهٔ شرودینگر وجود اعداد کوانتومی سادهٔ پنهان در میان پیچیدگی طیفهای اتمی بود. بور این اعداد کوانتومی را به سادگی از دنیای بیرونی به درون نظریه‌اش تزریق کرده بود؛ این اعداد چیزهایی اند همچون n از فرمول $\mathcal{H}$. شرودینگر می خواست از چنین نیرنگی اجتناب ورزد. او احساس می کرد که یك نظریهٔ ریاضی اتمی مطلوب، باید از شیوه‌ای ریاضی سود برد که اعداد کوانتومی را به رویه‌ای طبیعی از درون خودش ایجاد کند. پس، به جستجوی این روش پرداخت، و معنی فیزیکی را به عهدهٔ خود آن روش واگذاشت.

بیش از پانصد سال پیش از میلاد مسیح بود که فیثاغورث، فیلسوف یونانی، رابطهٔ قابل ملاحظه‌ای را میان عدد و موسیقی کشف کرد. اگر زه کشیده‌ای نت C را بنوازد، زه مشابهی با طول نصف آن یك هشتم بالای C را به صدا در خواهد آورد. زهی با طول یك سوم زه اصلی Gی بالای آن را خواهد نواخت؛ یك چهارم طول، Cی بالای آن را؛ یك پنجم طول، E بالای آن؛ و به همین ترتیب تا آخر. بنابراین فیثاغورث از این کشف خود که بی درنگ رأی داده بود که اعداد، همان اعداد صحیح شگفت انگیز، باید کلید عالم باشند، لذت برده و به هیجان آمده بود؛ تنها به خاطر اینکه امیدهای فراوان او از سوی کشف دیگرش، همان قضیهٔ مشهور وتر مثلث قائم الزاویه، برباد رفته بود. چرا که این قضیه نشان می داد که اعدادی، مانند ریشهٔ دوّم دو، وجود دارند که بیان گویایی را برحسب اعداد صحیح ناممکن می کنند.

امروز می دانیم که آن زه اصلی تمامی نُتهای مختلف را یکباره به صدا در می آورد. معمولاً پایینترین نُت به تنهایی بلند بود، نُتهای دیگر صرفاً رنگ، یاطنین را، به تُن اضافه می کردند، اینها آرمونیکهایی بودند که قبلاً به آنها برخورد کردیم. بنابراین یك زه ارتعاش کننده رشته‌ای از اعداد، مانند اعدادی که شرودینگر در جستجویشان بود، در خود می گنجاند.

امّا، یك تار ویولون برای ارتعاش به هر شیوه‌ای که بخواهد، آزادی عمل ندارد. از آنجا که دو سر آن محکم بسته می شود، تنها به نحوی می تواند ارتعاش کند که دو سرش حرکت نکند. البته، این یك سخن بدیهی است. امّا حرف متقاعد کننده‌ای هم هست. چرا که درست همین واقعیت است که ارتعاشات را محدود و رشته‌های اعداد صحیح را واردکار می کند. کل این تار می تواند چنین به ارتعاش درآید:

یا در دو بخش، به این ترتیب:

یا در سه بخش، به این شکل:

یا در چهار، پنج، شش بخش، یا در بخشهای مساوی به تعداد هر عدد صحیح دیگری، امّا این تار نمی‌تواند در دو بخش و نیم ارتعاش کند، چنین:

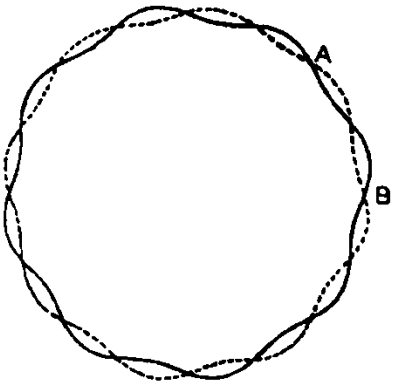
چرا که در این صورت تنها حداکثر یك سر این تار می‌تواند ثابت نگهداشته شود. پس این سخن بدیهی است که دو انتهای آن باید ثابت نگهداشته شود و اینکه همین سخن تعیین کننده است که رشتهٔ اعداد صحیح ۱، ۲، ۳، . . . را داخل می‌کند؛ و آنها را به طبیعیترین شیوهٔ ممکن وارد می‌کند، همچنانکه از این راه اثبات می‌شود که این سخن در ابتدا چندان بدیهی به نظر می‌رسید که ارزش یادآوری نداشت.

مطمئناً، شگفت‌ترین اشارهٔ ممکن همین جاست. آیا ما بیش از آنکه این اصل را در اتم به کار گیریم نیاز به انگیزهٔ دیگری هم داریم؟ دوبروی قبلاً به ما گفته بود که در آنجا امواجی برای استفادهٔ ما وجود دارد. این گفته را نادیده بگیرید. چه کسی می‌داند که نظریهٔ او بهتر از نظریهٔ بور است، یا حتی نظریه‌ای مطلوب است. در اینجا ایده‌ای نهفته است که انسان را وسوسه می‌کند تا آن را به کار گیرد.

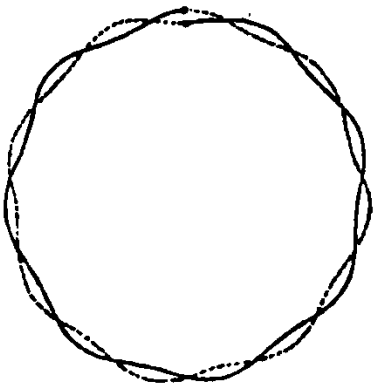
امّا صبر کنید. یك چیزی هست که یك ایدهٔ عجیب دارد؛ چیز کاملاً دیگری

برای دیدن اینکه این کار چگونه انجام می‌شود.

چه چیزی؟ آیا اطمینان بیشتری می‌خواهیم؟ آیا هنوز هم هراس داریم؟ آیا حتی بعد از این همه ماجرا برای دل به دریازدن باید تأمل کنیم؟ دوبروی هنوز هم برای ما، کشش دیگری، یك کشش مقاومت ناپذیر، دارد. به ظاهر یك حلقهٔ فلزی باریك توجه کنید. وقتی ضربه‌ای به چنین حلقه‌ای زده شود، به طور موزونی به ارتعاش درمی‌آید. نمیتوانیم بگوییم که این حلقه به علت آنکه دو سرش ثابت است، چنین حرکتی می‌کند. امّا، چون دایره‌ای است، ارتعاشات آن به همان ترتیب یك سیم مستقیم قطعاً محدودند، و همین طور هم هست، چرا که این حلقه چنان است که دو سر داشته است که به یکدیگر متصل شده باشند. تمامی آن، یا در دو قسمت، یا چهار قسمت، یا در شش قسمت، می‌تواند ارتعاش کند. امّا در دو قسمت و نیم نمی‌تواند به ارتعاش درآید. می‌تواند چنین ارتعاش کند:



اما نمی‌تواند به این ترتیب به ارتعاش درآید:



زیرا در اینجا موج پس از دور زدن حلقه به خودش نمی‌پیوندد. زیرا یك طول موج فاصلهٔ A تا B در نمودار پیش موجود است، باید همیشه تعداد صحیحی طول موج در حلقه وجود داشته باشد. آیا این مطلب چیزی را به یاد ما نمی‌آورد؟ چیزی دربارهٔ تعداد صحیح دفعاتی که یك طول دایره را دور می‌زند؟ واضح است، بلی، البته! شرط مداری بور، کار عجیب قسمتهای ترن برقی که نباید شکسته شوند بلکه باید دقیقاً با مدار جفت و جور شوند. این کار همیشه ساختگی و دلخواه به نظر رسیده است. اکنون اگر طول موج دوبروی را مربوط به موجی که یك الکترون را در یك مدار بور همراهی می‌کند حساب کنیم، به نتیجه‌ای به راستی سحرآمیز دست خواهیم یافت. معلوم می‌شود که این طول موج دقیقاً همان طول ویژهٔ قطعهٔ مسیر برای این مدار است. و همین، موضوع را کاملاً روشن می‌کند. پس، چنانکه دوبروی عملاً در سال ۱۹۲۴ خاطر نشان کرده بود، کل مسئله این حلقهٔ فولادی است. دوران معنی‌دار شدن اتم تقریباً آغاز می‌شود.

امّا شرودینگر از کجا آغاز کرد؟ دوبروی این ایدهٔ امواج همراه با الکترونها را مدتها در سرداشته است بدون آنکه بتواند یك نظریهٔ اتمی بپردازد. شاید این امر به آن علت بود که او بر پایهٔ اصول نسبیت فکر می‌کرد. کاری بسیار وسوسه کننده از جانب هامیلتون، و بسیار پیش از نسبیت، انجام شده بود، که به نظر می‌رسید به نحوی با همهٔ این ماجرا سازگار و جور است. شاید آدمی با رها کردن نسبیت می‌توانست شتابانتر پیشرفت کند. آشکارا، یك معادلهٔ موج مورد نیاز بود. تمام تاریخ حرکت موجی بر این مطلب تأکید کرده است. از دیرباز دانسته شده بود که معادلات موج با انواع مشابه، بر ارتعاشات سیمها و تارهای اُرگ، ارتعاشات دُهُل، ارتعاشات لرزانك، و امواج نور، حاکم‌اند. همچنین می‌دانستند که به مجرد آنکه شرایطی مافوق ریاضی برقرار می‌شد، معادلهٔ موج باید رشته‌ای از اعداد به وجود آورد. و اینها شرایط طبیعی بودند. آنان، به زبان ریاضی، می‌گفتند که دو سر این سیم ساکن است، می‌گفتند که حاشیهٔ پوست دُهُل محکم می‌شود، و چیزهایی تصویری و معقول نظیر اینها را عنوان می‌کردند.

شرودینگر بر آن شد که نظریه‌ای اتمی خارج از این ایده‌ها بیافریند. او با پنهان کردن راز و رمز تمهیداتش، چند حیلهٔ ریاضی به کاربُرد، مجموعه‌ای خردمندانه از دعاها و افسونهای ریاضی، مانند معادلهٔ دیفرانسیل بامشتقات جزئی هامیلتون، انتگرالهای

کمین، و اشکال درجهٔ دوم در فضای فاز منتشر کرد، و گویی از هیچ کجا و به گونه‌ای جادوگرانه، یك معادلهٔ موج کاملاً بالغ با تواناییهای قابل ملاحظه‌ای، پدید آورد.

این معادله، معادلهٔ موجی نبود که بر یك تار اعمال شود، معادله‌ای هم نبود که بر یك پوسته اعمال شود، بلکه معادله‌ای بود که در مورد جوهری به کار می رود که آکنده از افسانهٔ ریاضی فضایی‌آشنا برای ریاضیدانان است. جوهری که با حرف یونانی پسی، ψ، نموده شد.

جوهر ψ ی شرودینگر ـ که اگر در اینجا بکوشیم درمعنی آن تأمل کنیم، کار بیهوده‌ای انجام داده‌ایم ـ اگر با یك شرط برآورده می شد، در ارتعاش کردن آزاد بود. این جوهر، به تعبیر ریاضی، به شدیدترین قیدهای فضای افسانه‌ای بسته شد. و همین جوهر بود که می رفت تا اعداد کوانتومی را اقامه کند.

اکنون، البته، باید انتظار داشته باشیم که این سرگذشت به آنجا برسد که بگوید شرودینگر چه موقع معادلهٔ موج خود را در مورد مسئلهٔ اتم هیدروژن به کار برد، مسئله‌ای که او با فیروزی تمام دریافت که بسامدهای جوهر ـ ψ ی او دقیقاً همان بسامدهای موجود در آن علامت تجاری اتم، یعنی بسامدهایی در طیف آن هستند. امّا مطلب چنین نیست. کامیابی شرودینگر به نحوی از نوع گیج کنندهٔ آن بود. معلوم شد که بسامدهای جوهر ψ آنهایی اند که به پله‌های نردبان بالمر تعلق دارند. از آنجا که تفاوتهای این بسامدها تنها در طیف آشکار می شود، یك مسئلهٔ زیبا جلوه کرد. مدلهای پیشین الکترون و مدارهایش کنار نهاده شده بود. اینها را ψ ی نوینی، یعنی یك ابر مرتعش از الکترونهای پیرامون هسته، در خود فرو بلعیده بود. بدون پرشهای الکترونی، تفاوت بسامدها را چگونه توضیح می دادند؟

شرودینگر توضیحی موجه، چندان موجه که در فیزیك متداول بود، ارائه کرد. آیا چیز مشابهی در موسیقی وجود نداشت؟ هنگامی که دو نُت کاملاً هم کوك نباشند، آیا یك نُت‌زنش وجود نخواهد داشت؟

اگر یك نُت یکصدبار در ثانیه ارتعاش کند و نُت دیگر یکصد و یك بار، و هردو همگام با هم آغاز کنند، نیم ثانیه بعد، دقیقاً ناهمگام خواهند بود، چرا که یکی از آنها پنجاه ارتعاش کامل انجام داده است و دیگری پنجاه و نیم ارتعاش. به همین ترتیب که در مورد میلیونرها پیش آمد، اثرات اینها نیز بعداً خنثی خواهد شد. امّا نیم ثانیه بعد آنها به همگامی برمی گردند و دوباره یکدیگر را تقویت می کنند، و ترکیب

می‌شوند، و اثر بیشینه‌ای پدید می‌آید. این تغییر موزون از حذف، از طریق تقویت، به حذف مجدد با آهنگ یك بار در ثانیه، یعنی اختلاف بسامدهای اصلی، ادامه پیدا می‌کند. این اختلاف بسامد از ازدواج این دو بسامد مختلف زاده می‌شود ـ حتی در فیزیك نیز ازدواج موجد اختلاف است!

این بسامد جدید، بسامدزنش نامیده می‌شود و هنگامی که دو نفر تقریباً با نُتی مشابه سوت می‌زنند، می‌توان آن را به عنوان یك زنش یا تپش، به سادگی شنید. صداهای سوت مانندی که در رادیوها در نزدیکی ایستگاه اصلی به گوش می‌رسد پیامدهای زنش است. سازندگان ارگ، آنها که آثار لرزهٔ مشخصی را با قراردادن عمدی دو تار به طور ناهمگام به وجود می‌آورند، چنانکه با تپیدن دلخواهی تولید زنش کند، به این ترتیب از زنش بهره‌برداری تجاری کرده‌اند.

اکنون نوبت شرودینگر بود که از بسامدزنش بهره‌برداری کند. اتم او با بسامدهایی که به پله‌های نردبان بالمر تعلق داشتند، ارتعاش می‌کرد. بسامدهای مورد نظر، که بسامدهای آنها بودند، چیزی جز بسامدهای زنش گوناگون نبودند. اکنون، ψ جوهری بود از الکترون بدون ابر، و الکترون مرتعشی که می‌دانستند نور بیرون می‌دهد، هر چند که بور به خاطر سازگار سازی مقصود خاص خودش در انکار این مطلب تردیدی به خود راه نداده بود. پس بگذارید که با بیان جزمی گفته شود که بسامدهای زنش ψ به نور تبدیل می‌شدند و ما یکباره توضیحی برای علامت تجارتی اتم در اختیار داریم، به ویژه اگر بسیاری از ایرادهایی را که پیش خواهد آمد، نادیده بگیریم. شرودینگر خودش بعداً تصویری را با اندك تفاوتی عرضه کرد، امّا این موضوع فعلاً به بحث ما ربطی پیدا نمی‌کند.

چیز مهم، پیدایش بسامدهای ضروری از دل محاسبات ریاضی بود. اگر تصویر فیزیکی که همراه این محاسبات به دست آمد به نحوی مبهم بود، همین موضوع را می‌توانستند در مورد نظریه‌های هایزنبرگ و دیراك، و حتی نظریهٔ بور، عنوان کنند. کافی بود که جوابها درست درآیند. در دریچهٔ ناشناخته‌ها رخنهٔ کوچکی گشوده شده بود. علم اینك می‌توانست به آن سوی دیگر هجوم و فشاری وارد آورد، و فرصت آن پیش آمده بود که به الهامات موجود توجه شود. راه آینده اکنون به روشنی نمایان بود.

در واقع، خوب هم نمایان بود. مسئلهٔ نردبان بالمر، که زمانی غیر قابل حل به

نظر می‌رسید، اکنون دست کم به سه روش مختلف حل شده بود. بور که با روابط درونی ویژه و فراوان بسامدهای طیفی رو به رو بود، از پرش الکترونها از مداری به مدار دیگر تصوری پیدا کرده بود. هایزنبرگ با نشاندن جدولبندیهای مربعی به جای لیستهای لباسشویی به این موضوع پرداخته بود. شرودینگر اکنون به تعبیر سومی دست یافته بود. در نظر او معنی این مسئله نه پرشهای الکترون بود و نه جدولبندیهای مربعی، بلکه زنشهای یك جوهر ψ ی الکتریکی مرتعش بود.

آیا خیلی موفق بودن ممکن است؟ فیزیکدانان سخت وسوسه می شدند که به این موضوع بیندیشند. در سال ۱۹۱۲، اندك زمانی بیشتر از دوازده سال پیش از آن موقع، اصلاً هیچ نظریهٔ شایسته‌ای برای اتم هیدروژن وجود نداشت، امّا اکنون، در ژانویهٔ سال ۱۹۲۴، اگر نظریه‌های دیراك و هایزنبرگ را جدا از هم بپنداریم، تا چهار نظریه در این باب وجود داشت. آیا آنها جملگی، اشاره‌ای به یك تشابه خانوادگی با کمترین سردرگمی و ابهامی ابراز می کردند؟ امّا آدمی چه شباهت ممکن را می‌توانست بین مدارهای بور، جدولبندیهای هایزنبرگ، و ψ ی شرودینگر، آشکار کند؟ اینجا انبوهی ازسردرگمیها وجود داشت.

فیزیکدانان در آن ژانویهٔ پر غوغا، به چه چیزی می اندیشیدند، و متوجهٔ کجا بودند؟ نظریهٔ خردمندانه و آزمودهٔ بور در گذشته می توانست کامیابیهای بسیاری را نشان دهد، امّا اکنون پیر بود و از ناتوانیهای توانفرسا رنج می برد. نظریه‌های جوانتر، از جمله نسبیت ناآزموده، می توانستند فیروزیهای ناچیزی را نشان دهند، امّا از پیش خبر از لرزان بودن نظریهٔ بور می دادند، چرا که آنان از چنگ بیماریهایی که اعداد کوانتومی بور را مبتلا کرده بودند، سالم جسته بودند، و هنوز هم متحمل هیچ شکستی نشده بودند. ماتریسها و امواج شانه به شانه به پیش می رفتند و هیچیك نمی توانست یك مزیت قطعی را نشان دهند. پیروزی اولیهٔ هایزنبرگ به‌همراه ذرات مرتعش در ژوئن سال ۱۹۲۵ می رفت تا در فوریهٔ سال ۱۹۲۶ توسط شرودینگر دو چندان شود. دیراك نشان داده بود که نظریهٔ هایزنبرگ نظریه‌ای باشکوه است امّا، حتی همچنانکه این مسابقه ادامه داشت، شرودینگر آشکار ساخت که نظریهٔ او نیز نظریه‌ای اصیل است، که مستقیماً از بطن ایده‌های دوبروی و هامیلتون زاده شده است. اینجا از راز و رمز بی افتخار زایش آن بسیار به دور است:

مکانیك نیوتون بر پایهٔ سه قانون حرکت او بنا نهاده شد. امّا در زیر این قانونها،

شالوده‌ای ژرف از مفاهیم بنیادی بی‌شمار قرار داشت که گرچه زمانی انقلابی بودند، بدون هیچ تردیدی چنان مسلم فرض شده بودند که اصلاح نسبیت اینشتین در آنها نخست بسیار غیر طبیعی به نظر می‌رسید. این مفاهیم زیر بنایی، فلسفهٔ زمان و فضا و مادهٔ نیوتونی، فرضهای ابتدایی اساسیی بودند که قوانین حرکت بدون آنها نمی‌توانست بنیاد گیرد، و ریاضیات هم نمی‌توانست آنها را به معادلات ریاضی تبدیل کند. هنگامی که لاگرانژ و هامیلتون سهم عظیم خود را در تکامل مکانیك نیوتونی پرداختند، فلسفهٔ آن را به معادله برنگردانند، چرا که در آن روزها تحریف کردن مسائل بنیادی مرسوم نبود؛ هدف بیشتر تکامل‌شان به منتهی درجه ریاضی آنها بود با این اعتقاد مسلم که آنها باید از آن پس عالم را توضیح دهند.

معادلات حرکت نیوتون شیوهٔ حرکت اجسام را بیان می‌کردند: سنگی که در هوا پرتاب می‌شود نمایانگر مسئله‌ای کاملاً ساده است، اما بیان مثالهای پیچیده‌تر، زیاد هم ساده نیست. فرض کنید تعدادی خرت و پرت از چیزهای گوناگون از یك کپهٔ اشیاء برداریم، آنها را با فنر و کِش به هم ببندیم، و این تودهٔ متورم را با حرکتی ناگهانی و ناموزون به هوا پرتاب کنیم. باز هم قوانین نیوتون، از لحاظ نظری، کارایی خواهد داشت، امّا پیگیری ریاضی این حرکتها بسیار پیچیده خواهد بود. هرچند برای کاهش پیچیدگیهای چنین مسئله‌هایی روشهای گوناگون کشف شد، امّا یکصد سال پس از نیوتون بود که لاگرانژ، ریاضیدان بزرگ فرانسوی، به یك ساده‌سازی واقعاً قابل ملاحظه دست یافت؛ اما این ساده سازی به راستی به موقع بود.

یك جنبهٔ آن توجه ما را به خود فرا می‌خواند. آن توده‌ای از اشیاء که به هوا پرتاب کردیم، یکباره چنین حرکتهای متعددی پیدا خواهند کرد که دیدن اینکه چه اتفاقی افتاده است کاملاً ناممکن خواهد بود. امّا، با فراهم آوردن تمهیدی ریاضی، می‌توانیم این مشکل را از میان برداریم. نمی‌توانیم به طور کامل آن را از بین ببریم، بلکه می‌توانیم آن را کوچك کنیم و جایی قرارش دهیم که مزاحمت کمتری ایجاد کند.این تدبیر عبارت است از فضایی خیالی که ابعاد بسیاری داشته باشد، چنانکه تمامی حرکت پیچیدهٔ آن انبوه اشیاء را از راه جنبش غیر مستقیم یك عقربه در داخل آن فضا، نشان دهد.

بیایید به چنین مفهوم‌خیالپردازانه‌ای نزدیکتر شویم. ما خودمان از روی عادت

در زندگی روزمرهٔ خود این فضاهای خیالی را به کار می بریم، زیرا نموداری که در بیمارستان تغییرات دمای بدن بیمار را نشان می دهد چه چیزی است جز آنکه اثر یك عقربه در فضایی خیالی دوبعدی باشد؟ بیشتر اوقات نموداری را رسم می کنیم که در یك فضای خیالی به کار می بریم. بی تردید در دینامیك، این فضای خیالی ابعاد بی شماری دارد، امّا تمام راز آن نیرنگ و تدبیر در همین است. این پیچیدگی اکنون در میان ابعاد بی شمار فضا پنهان شده است، و حرکت گیج کنندهٔ آن تودهٔ انبوه اشیاء به حرکت فرضی یك تك نقطه تبدیل می شود. در واقع، این نقطه در یك فضای پیچیده حرکت می کند، امّا تصور کلی یك نقطهٔ متحرك بسیار ساده‌تر از حرکت تودهٔ انبوه اشیاءِ در پروازی است که آن تصور کلی را باز می نمایاند. و ساده‌تر بودنِ فکر کردن دربارهٔ چیزی، کشفهای دیگری را بر می انگیزد.

این کشف دیگر به همت هامیلتون، مردی با استعداد ذهنی فوق العاده، جامهٔ عمل پوشید. هامیلتون همان کسی بود که، حتی پیش از کایلی و ماتریستهای او، رابطه‌ای کاملاً متفاوت، کشف کرد که چنان کمیتهای غیر حسابیی وجود دارند که در آنها یکسان بودن x ضربدر y و y ضربدر x ضرورتی ندارد. هامیلتون همچنین همان کسی بود که، معادلات بنیادی دینامیك را، در برگیرندهٔ pها و qها، که می رفت تا به شالودهٔ تمامی پژوهشهای نظری بعد در زمینهٔ فیزیك اتمی تبدیل شود، به شکل ساده‌ای تحویل کرد، و همان کسی بود که آن پژوهشها را با مفهوم ریاضی مرکزیشان، که عبارتی بود برای بیان انرژی که امروز تابع هامیلتونی نام دارد، تغذیه کرد. هامیلتون در سیزده سالگی بر سیزده زبان تسلط پیدا کرده بود. در بیست و دو سالگی استاد شده بود. و در سال ۱۸۳۴، در بیست و هشت سالگی، علم مکانیك را به همان ترتیبی که در سطور بعد خواهیم آورد، دگرگون کرده بود، و از این طریق چیزی را که شرودینگر گفت، کم و بیش پیش بینی کرد.

امّا چون هامیلتون می دانست که می تواند یك پرتو نور خیالی را خمیده کند، زیرا پرتو نور مسیر مستقیم نمی پیماید، مسیر عقربه را کج کرده بود. یك منشور ساده، یا یك عدسی، یا حتی هوای گرم می تواند آن را خم کند. تقریباً هر فقدان یکنواختی در جایی که این نور حرکت می کند، آن را منحرف خواهد کرد. هوای صحرا در نزدیکی شنهای کویری داغتر از ارتفاع بالاتر است، و این ناهمسانی، که پرتوهای نور را خم می کند، سراب را پدید می آورد. یك راننده که در بیابان روی

یك جادهٔ خشك داغ پرتو ضعیف زودگذری را همچون آب موجدار سرد می بیند، متوجه چه عاملی نشده است؟ این نیز سراب است، شاهدی زودگذر برای خمیدگی پرتو نور. هامیلتون با برگزیدن نوع صحیحی از ناهمسانی، می توانست مسیر عقربه را با پرتو نور خود دو برابر کند و بنابراین پیوندی میان علم شناخت پرتوهای نوری و دینامیك پدید آورد. این کار انجام شد، باید به طور منطقی نتیجه‌گیری کنیم که این دو علم متفاوت از نظر ریاضی یکسانند. هامیلتون در اثبات این موضوع در جزئیات ریاضی دقیق موفق شد، و البته، همهٔ اینها را برحسب آن فضای خیالی به انجام رسانید. امّا آیا خود این امر گواهی بر نتیجه بخشی بنیاد نهادن آن فضا نیست؟ آیا کی می توانست بستگی نوری را برحسب تودهٔ درهم برهم انباشتهٔ اشیاءِ در حال پرواز، به تصور در آورد؟ تصور این نوع بستگی نوری بسیار سخت خواهد بود.

هامیلتون با یك پرتو نور کار بیشتری از دو برابر کردن مسیر عقربه انجام داد. یك پرتو نور کم و بیش با مسیر یك ذره نور متناظر است. هامیلتون از طریق داخل کردن بخشی از مفهوم موج، آن بخش از موج که مسیر اینِ پرتو را کنترل می کرد، بیشتر از پرتو یا ذره، به پیش رفت. بنابراین، هامیلتون قبلاً تمامی علم دینامیك را به مطالعهٔ امواج نور تبدیل کرده بود، اما امواج نوری که فاقد خاصیت تعیین کنندهٔ میلیونرها، یعنی خاصیت تداخل، بودند. اکنون، در حوزهٔ نور شناخت، پرتوها برای تحقیق در خواص ساده‌تر ابزار نوری کاملاً کافی اند، اما هنگامی که می خواهیم اثرات دقیق را توضیح دهیم، باید به تداخل امواج استناد کنیم. چطور می شد اگر همین اثرات در مکانیك کلاسیك نیز صادق بودند؟ درست همچنانکه پرتوهای نور برای محاسبهٔ یك زوجِ منشور دوچشمی بسنده بودند، دینامیك نیوتون برای پدیده‌های بزرگ مقیاس کاملاً کفایت می کرد، امّا برای سیستمهایی با ابعاد اتمی ناکامیاب بود. چه می شد اگر حقیقت این باشد که دینامیك نیوتون دینامیك «پرتوی» می بود، در حالی که چیز مورد نیاز برای ابعاد کوچك اتم دینامیك موجی است؟ این یك امکان فریبنده بود.

چیزی بسیار شبیه این موضوع، قبلاً توسط دوبروی نشان داده نشده بود. دوبروی پیرامون فضا و زمان واقعی نسبیت اندیشیده بود. امّا در اینجا، دینامیکی نوری در یك فضای خیالی بود، که عمر درازی داشت و قبلاً تکامل زیادی پیدا کرده بود، و تنها فاقد یك جزء کوچك بود. شرودینگر، با بازشناسی مشکل فنی کار با

نسبیت، در ایده‌های نوری هامیلتون امکانات عظیمی را دید. او با در نظر گرفتن امواج ناکامل هامیلتون، به آنها خاصیتی، یعنی توان تداخل، بخشید که فاقدش بودند. آنها اینك امواج راستین بودند، همان پرتوهایی را به دست می دادند که پیشتر برای پدیده‌های بزرگ مقیاس داده بودند، با این تفاوت که وقتی در حوزهٔ اتم اعمال می شدند، می توانستند خواص کاملاً جدیدی را به نمایش بگذارند.

می توان در آینهٔ تاریخچهٔ نور شناخت دید که این گام تا چه حد طبیعی بوده است، چرا که نور شناخت نیز به مثابه علم پرتوها تنها از آنجا آغاز شده بود که وقتی با پدیده‌های نوری پالاییده‌ای روبرو شد، ضرورت خواص موجی را برآورده کند. اینکه این گام تا چه حد موفقیت آمیز بوده است، گواه آن در لابلای برگهای تاریخچهٔ همان ماههای مبهوت کننده‌ای که در پی نخستین اعلان شرودینگر پیرامون نظریه‌اش آمد، پنهان است.

قبلاً، نظریهٔ شرودینگر از لحاظ نتایج رقیب قدرتمند نظریهٔ هایزنبرگ بود، و امیدواری می رفت که در شهرت عامه از آن پیشی جوید. این نظریه از مشکلات فنی سهمگین نظریهٔ هایزنبرگ برکنار بود. این نظریه تصویری سهل از فرایندهای اتمی ارائه می داد. دودمان اصیل آن می توانست با نظریه‌ای که توسط دیراك کشف شد برابری کند، و منش مهیج و تصویری آن برتری داشت. این نظریه می توانست با سهولتی نسبی نتایج خود را به وجود آورد، و در این حال به زبان ریاضی فیزیکدان نظری معمولی سخن می گفت. این نظریهٔ او به [هایزنبرگ] تکلیف نمی کرد که در ریاضیات ناآشنا کاوش کند، همچنین درخواست نمی کرد که روشهای ویژه‌ای برای هر مسئلهٔ جدیدی ابداع کند. هنوز هم از طریق یکی دیگر از آن پیشگوییهای غیر طبیعی که تهدیدی در جهت آسیب رسانیدن به هنرمندی این سرگذشت بود، روشهای ریاضی او از پیش برای این نظریه آماده می شد، و در انتظار ورود آن [نظریه] با ظرافت روی هم جمع می شدند. کورانت و هیلبرت، دو ریاضیدان بزرگ آلمانی نه فیزیکدان، امّا رهبران گروه ریاضیدانان گوتینگن، کتابی به نام روشهای ریاضی در فیزیك نوشته بودند. این کتاب، به شکلی فشرده، و مناسب و راحت، عملاً هر ابزار، حیله و روش، و جزئیات ویژهٔ مورد نیاز برای تکامل نظریهٔ شرودینگر را دربرداشت، جدا از بسیار چیزها که در نظریهٔ هایزنبرگ به کاربردنی بود. تاریخ انتشار این کتاب سال ۱۹۲۴ بود.

در اینجا، علم قطعهٔ تردستی زیبایی به صحنه می برد! نظریهٔ بور به دست خود سقوط کرده است امّا عجالتاً، در پی چاره‌ای برای نجات این صحنه، سریع و پیاپی دو زوج نظریهٔ دوبروی، هایزنبرگ، دیراك، و شرودینگر را به هوا پرتاب می کند. اکنون با دلخوشی بیشتر از هر موقع دیگری شعبده‌بازی می کند. علم مطمئناً قصد شعبده‌بازی نداشت. با این وجود، چهار نظریهٔ درخشان در آن واحد در هوا آویزانند، و تا به حال هیچیك به زمین نیفتاده است.

در واقع، چهار نظریه، و حتی خیلی بیشتر از چهار نظریه، پا در هوا بود، و تا به حال هیچکدام عملاً پا برزمین نگذاشته است.

امّا این وضعیت به مدتی طولانی در علم ادامه نخواهد یافت. بیماری درونی آن در حالتی بحرانی است. لحظهٔ سرنوشت ساز فرا رسیده است. اضطراب و هیجان به اوج خود رسیده است. مقدر نیست که هیچگونه نظریهٔ دیگری سر برآورد و بر این پریشانی و سردرگمی بیفزاید، چرا که علم بیمار برای خودش فیزیك نوین قدرتمندی قالب ریزی کرده و سرشته است. معالجه‌ای آرام کالبد پریشانش را تسکین می دهد و به پایه‌ای از قدرتش می رساند، بسیار قویتر از گذشته موج و ذره با هم سازش می کنند. نظریه‌های واگرا به هم نزدیك می شوند، و درك نوینی فراهم

می آورند. اینها جملگی درد و رنج زایمانی بوده‌اند که علمی بزرگتر، و درعین حال متواضعانه‌تر به دنیا خواهد آورد.

نظم معینی، از پیش نمودار است. نظریه‌های دوبروی و شرودینگر آشکارا همانند یکدیگرند، و به همین ترتیب است نظریه‌های هایزنبرگ و دیراك. بنابراین تنها دو محور عمدهٔ پیشرفت وجود دارد. امّا این همه چنان نامحتمل است که هر امیدی به بنیادگذاری دوباره، عبث به‌نظر می رسد.

با این وجود پیرامون این بی شباهتی چیز مظنونی هم وجود دارد. هیچیك از این نظریه‌ها نسبت به دیگری مزیت صریحی ندارد. در واقع، به نظر می رسد هرکدام پیروزیهای آن دیگری را تقلید می کند. راز و رمز توارث آنها نیز مطرح است. هریك در مورد دودمان عالی مقام خود گزافه گویی می کند، ادعا می کند که تنها وارث طبیعی مکانیك کلاسیك است. با این وجود یکی از تبار مکانیك و دیگری زادهٔ نور شناخت است. امّا آیا هامیلتون خودش در نظریهٔ کلاسیك، نور شناخت را به مکانیك پیوند نداد؟ پس چرا این دو نظریهٔ نوین در ورای تفاوتها، نباید برادر و احتمالاً دوقلو باشند؟ خاستگاههای به ظاهر واگرای آنها ممکن است یکی باشند. طبیعی نیست که دو شاخه چنین خوش ظاهر مکانیك کلاسیك، که هیچیك قادر نیست دیگری را از میدان به در کند، چنین از هم جدا باشند که ظاهرشان ادعا می کند. طبیعی نیست که دو نظریهٔ واقعاً متفاوت زمان درازی بر سر دسته‌ای از حقایق مشابه با هم به جنگ بپردازند.

امّا دربارهٔ موج و ذره چه بگوییم؟ آیا هنوز هم در حال جنگ‌اند؟

شاید وحدتی پنهانی در ورای ظواهر سرگذشت ما نهان باشد. شاید این نبرد نظریه‌ها چیز جدیدی نیست. دقیقتر بررسی کنیم. ریشهٔ ایده‌های هایزنبرگ و دیراك در دینامیك ذره‌ای هامیلتون است، در حالی که خاستگاه ایده‌های شرودینگر در دینامیك موجی هامیلتون پایه دارد. بنابراین ممکن است این مناقشهٔ هایزنبرگ ـ شرودینگر تنها گسترش یا باز تابشی ازستیزهٔ کهن میان ذره و موج باشد. سر خود را هر کجا بگردانیم، این نبرد همچون یك چهرهٔ محوری علم، حضور خود را به زور تحمیل می کند. امّا خود هامیلتون قول می دهد که این دو را می‌توان با هم سازش داد. شاید او در خلال رساندن نظریه‌های شرودینگر و هایزنبرگ به تولدی مشترك، آنها را خیلی به موج و ذره نزدیك می کند.

شرودینگر در همان مارس سال ۱۹۲۶، مدت زمان کوتاه سه ماهه‌ای پس از اعلام نظریه‌اش، گامی قطعی در جهت وحدت برداشت. یکبار دیگر این راز در هامیلتون نهفته است، که آفرینش دینامیك نوری او صرفاً اشاره‌ای به یك تشابه نبوده است. دینامیك معمولی مستلزم معادلات حرکت بسیاری بود. امّا هامیلتون می توانست معادله‌ای واحد حاکم بر شبه امواجش بنویسد، درست به همان سان که یك معادلهٔ واحد موج بر امواج اصلی حاکم است. بنابراین اکنون هامیلتون می توانست تمامی علم دینامیك را به یك معادلهٔ واحد تبدیل کند، دستاوردی به راستی مهم و ماندگار.

شرودینگر به شبه موجهای هامیلتون قدرت تداخل بخشیده بود. پس، بی گمان باید بین معادلهٔ هامیلتون و معادلهٔ موج شرودینگر پیوندی وجود داشته باشد.

بله، مطمئناً، نوع مبهمی از ارتباط وجود داشت، ارتباطی که برای پژوهش باز هم بیشتری جا دارد. امّا یك روز رابطه‌ای بسیار ژرفتر در ذهن شرودینگر نقش بست، رابطه‌ای که به غایت برانگیزاننده بود. او پی برد که با تدبیر ریاضی بی نهایت ساده‌ای می تواند معادلهٔ نخست را به معادلهٔ دوم برگرداند. در معادلهٔ هامیلتون هرجا p ظاهر می شد باید موجود ریاضی معینی به نام «عملگر» به جای آن بنشیند. اینکه این عملگر دقیق بود یا نه، اهمیتی نداشت. مهم این بود که گام برداشتن از مکانیك کلاسیك به مکانیك کوانتومی به کمك نشاندن یك عملگر به جای p، عملی می شد. می خواهید این عملگر را ببینید؟ این کار واقعاً ضرورتی ندارد. آیا می خواهید ببینید این نیز مانند آن چیز مداری بور زیباست؟ البته، زیباست. نگاهی بیندازید:

$$\frac{h}{2\pi\sqrt{-1}}\quad\frac{\partial}{\partial q}$$

باز هم سر و کلهٔ h و ریشهٔ دوم منهای یك و 2π در اینجا پیدا شد. اینها مطمئناً به هم چسبیده‌اند. عملگر در ریاضیات نه یك عدد بلکه یك دستور است. انجام عمل ریاضی ویژه‌ای را فرمان می دهد. مثلاً «در ۲ ضرب کنید» و نیز «با ۳ جمع کنید» یك عملگر است. ریاضیدان این عملگرها را خلاصه‌تر می نویسد، امّا باز هم منظورش همان دستورهاست. وقتی می خواهند دو عملگر به طور متوالی اعمال شوند، می گویند در هم ضرب می شوند. این عمل با ایده‌های متداول ما موافق است و آن

در حالتهایی است که به خاطر آنکه عملگرهایی مانند «ضربدر ۲» و «ضربدر ۳»، به طور متوالی اعمال شوند، مانند آن است که در حاصلضرب آنها، یعنی ۶، ضرب شود. در اینجا نمایش ساده‌ای از کارایی فراوان عملگرها ارائه می دهیم.از آنجا که عمل ضرب در عدد منهای یك، علامت یك کمیت ریاضی را عکس می کند، می توان عملگر را متناظر با حکم نظامی «عقب گرد» در نظر گرفت. پس، چه دستوری متناظر با ضرب کردن در آن کمیت به اصطلاح موهومی، یعنی ریشهٔ دوّم منهای یك، است؟ اتفاقاً، چیز زیاد مرموزی نیست. در واقع، کاملاً پیش پا افتاده است، چرا که باید دستوری باشد که وقتی اجرا می شود حاصل کار به مثابه دوبار عقب گرد باشد؛ یعنی، حکم «به راست گرد» یا حکم دیگری مانند «به چپ گرد». این ایهام حتی مقتضی هم هست، زیرا کاملاً معلوم است که یك ریشهٔ دوم علامتی مبهم دارد. این نمود ویژهٔ ریشهٔ دوم منهای یك در ریاضیات کاربرد فراوانی دارد. در واقع هرچند به علت سادگی بسیارش سادهٔ به نظر می رسد، نفوذ ژرفی در جریان تفکر ریاضی داشته است.

در اینجا خاصیت مهمی از عملگرها ارائه می‌شود. فرض می کنیم عملگرهای «ضربدر ۲» و «به اضافه ۳» را به دنبال هم نسبت به عدد ۱ اعمال کنیم. حاصل ضرب‌کردن آن در ۲، عدد ۲ است. به اضافهٔ ۳، می شود ۵. اکنون آنها را به ترتیب عکس اعمال می کنیم. ۳ بعلاوه یك می شود ۴. با ضرب کردن در ۲، ۸ را به دست می آوریم که همان جواب پیش نیست.

البته، این موضوع از اهمیت بسیاری برخوردار است. اگر p و q عملگر باشند، پس نیازی نیست که p ضربدر q و q ضربدر p برابر باشند. کشف شرودینگر از این مطلب هم فراتر رفت. وقتی تفاوت بین عملگر p ضربدر q و q ضربدر pی او محاسبه می شود (و این محاسبه‌ای است که هر نوآموزی در حساب توانایی انجام آن را دارد.) ثابت می شود که این عملگر در مورد هر چیزی اعمال شود، نتیجه یکی خواهد بود ـ یعنی دقیقاً همان کمیتی که در نظریهٔ هایزنبرگ به دست آمد. آنچه شرودینگر انجام داد این بود که کشف دیراك را دوباره به تمامی انجام دهد، امّا به جای ذرات، برحسب امواج. آشکار است که این کشف، در پایه و بنیاد، مانند کشف قبلی بود ـ امّا شاید از آن یکی مهمتر بود. این کشف نشان می داد که تمامی نظریهٔ دیراك در مورد اعداد q در نظریهٔ امواج شرودینگر هم به طور ضمنی آمده است.

اینها همهٔ چیزهایی بود که دربارهٔ دیراك و اعداد qی او گفتیم. امّا دربارهٔ هایزنبرگ و ماتریسهای او چه بگوییم؟ کار شرودینگر به هیچوجه به پایان نرسیده بود. او با به کارگیری ψ خود، در فرایندی ریاضی که زیاد هم پیچیده نبود، نشان داد که pها و qها و کمیتهای مشابهی در نظریه‌اش چگونه می توانند تجزیه شوند، و چگونه می توان استخوانبندی آن را آشکار کرد و در معرض دید همگان قرار داد. آنگاه که این pها و qها آرایشی کامل پیدا کردند، جدولبندی مربعی از این استخوانبندی پر شد؛ اینها دقیقاً ماتریسهای هایزنبرگ بودند.

اکنون نظریهٔ هایزنبرگ نیز در نظریهٔ شرودینگر می‌گنجید. باید حدس می زدیم که نظریهٔ دیراك نیز به زودی توسط این نظریه بلعیده می شود، چرا که خود دیراك نشان داده بود که ماتریسهای شرودینگر در اعداد qی او پنهان اند.

تنها سه ماه از بحران تلاطمی فیزیك نظری سپری شده بود، امّا تصویر آن چه تغییرات ژرفی کرده بود! نظریهٔ شرودینگر، با تصویر آشنایش از امواج، که عملیات ریاضی آن نسبت به نظریه‌های هایزنبرگ بسیار ساده‌تر بود، اکنون به طور کامل رقبای خود را فرو بلعیده بود. در واقع، آن نظریه‌ها استخوانبندی این نظریه بودند. شگفت آور نیست که متصور ساختن نظریهٔ شرودینگر آسانتر بود. اکنون چه کسی می‌خواست به عقب، به ماتریسها یا اعداد qبرگردد؟ آنان کسانی نبودند جز کهنه‌پرستان، گواهان مراحل میانی تحول کوانتوم. اکنون، سرانجام پرده از روی این نظریه به طور کامل کنار می رود. شرودینگر کامیاب است، و همه چیز به خوبی پیش می رود. برای پایان بردن این فصل، همین جا مکان ایده‌آلی است، یك دورهٔ پر غوغا پایان یافته است و سرانجام آرامش برقرار شده است.

امّا نه! سرگذشت کوانتوم چنین ساده هم نیست. متأسفانه، در مورد اینکه اینجا پاراگراف آخر باشد اشتباه شده است. این شادمانی نابهنگام است، فصل را باید ادامه داد.

جنبهٔ دیگری در این وضعیت هم وجود دارد. آیا نظریهٔ شرودینگر تقریباً همان قدر پشتیبان نظریهٔ دیراك نبود که از نظریهٔ خودش پشتیبانی می کرد؟ در حقیقت، شرودینگر ψ را داشت، که دیراك فاقد آن بود. امّا دیراك در تمام مدت بر این عقیده پای فشرده بود که اهمیت جدولبندی هایزنبرگ از نوع درجهٔ دوم است، و شرودینگر قویترین تأیید ممکن تا آن زمان را یافته بود که عملگرهای او به هیچوجه شباهتی به

ماتریسهای هایزنبرگ ندارند. وقتی که این عملگرها با گوشت و خون ψ ی او جامه بر تن کردند، به مثابه عملگرهای کاملاً ساده و آشنای حساب، به نظر می رسیدند. شرودینگر تنها پس از بحث ریاضی کاملاً مفصلی توانست استخوانبندیهای هایزنبرگی آنها را از پس پرده برون آورد. ممکن است که نظریهٔ شرودینگر، نظریهٔ هایزنبرگ را در خود فرو بلعیده باشد، امّا در انجام این کار، شهود و بصیرت اولیهٔ دیراك او را حمایت کرده بود. نوبت دیراك به زودی فرا رسید.

ماههای پس از کشف شرودینگر سرشار از فعالیت بود. ایده‌های نوین به سرعت از یك پیروزی به پیروزی دیگری می جهید. از همه سو خبر فتوحات درخشان موج و ماتریس و عدد q، به گوش می رسید. پیچیدگیهای اثر زیمان به سرعت به زانو در می آمد. جزئیات اثر اشتارك با تمامی پیچیدگیها توضیح داده می شد. در ماه ژوئن هایزنبرگ توضیح تابناکی از جنبه‌های باز دارندهٔ طیف هلیوم را که به کلی ورای قدرت نظریهٔ قدیمی بور بود، ارائه داده بود. همزمان با اینها، بورن کشف دانشمندانه‌ای را، که دست کم معنی حقیقی ψ ی شرودینگر را آشکار می کند، اعلام می دارد. حتی هایزنبرگ به کارگیری ψ را شروع می کند.

در ماه اوت، دیراك یك ψ را به استخوانهای نظریهٔ qی خود پیوند زد، معلوم شد که اعداد q به طور ایده‌آلی مناسب این پیوندند. او، در راستای خم کردن عضلات نویافتهٔ نظریهٔ خود، نشان داد که اقتباس خردمندانهٔ شرودینگر از ماتریسهای هایزنبرگ اکنون چگونه می تواند به نحو واقعاً ساده‌ای انجام پذیرد. بدون آنکه این آزمایش کوچك او را قانع کرده باشد، ایده‌های هایزنبرگ را دربارهٔ طیف هلیوم پی گرفت تا دریابد برای این روزها که ما به توضیحی برای اصل مرموز پاولی بسیار نزدیك شده‌ایم، دیگر چه چیزی باقی می ماند. این اصل پاولی الکترون را از انبوهش بیش از حد باز می دارد.

امّا اینها همه یك آزمایش مقدماتی قدرت بود. مقدر این بود که قدرت این ایده فوق العاده زیاد شود. در ماه دسامبر، دیراك اعداد qی خود و ψ ی به وام گرفتهٔ آنها را در چیزی بازسازی کرده بود که هنوز هم نسبت به هر قاعده‌ای که فیزیکدانان نظری کشف کرده‌اند، جامعترین و عامترین فرمولبندی قواعد این بازی جدید مکانیك کوانتومی است. جوردان تقریباً در همان زمان و به طور مستقل این قواعد را کشف کرد.

برای ارزیابی آنچه انجام شد، قواعد آن بازی بسیار باستانی، شطرنج، را از نظر بگذرانیم. با خرج مقداری پول می توان جزوه‌ای خرید که قواعد شطرنج را با وضوح تمام و به تفصیل شرح می دهد.

در این جزوه، پیرامون قواعد شطرنج همه‌چیز گفته می شود؛ نام مهره‌ها، حرکت هریك، نکته‌هایی از این دست که پیاده را چگونه به جلو ببریم، و از بخت خوش، حتی آغاز و پایان بازیهای استاندارد را باز گفته‌اند. همه‌چیز روشن است. کیست که چیزی بیشتر از این بخواهد؟

امّا همه‌چیز واقعاً کامل نیست. چیزی در این قواعد وارد شده است که متعلق به شطرنج نیست. قواعدی که چنین ارائه شده‌اند تقلبی اند. به زبان انگلیسی نوشته شده‌اند. شاید این عذر چندان موجه نباشد امّا در اصل یك خطای جدی است. آخر شطرنج چه ربطی به زبان انگلیسی دارد؟ مگر شطرنج در تمامی پهنهٔ جهان بازی نمی شود؟ مگر در فرانسه شطرنج متفاوتی بازی می کنند؟ چینیها و روسیها هم آن را بازی می کنند. جزوهٔ خود را به یك نفر اهل چین یا روسیه نشان دهید. به احتمال زیاد لب به تحسین نمی گشاید. او هم در مقابل، یك جزوهٔ ساده، که در آن قواعد شطرنج به زبان چینی یا روسی سلیس و از روی سلیقهٔ تمام توصیف شده است، در برابر چشمان شما خواهد گذاشت.

برای امریکایی متوسط، قواعد شطرنجی که به زبان روسی نوشته شده است ظاهراً هیچ چیز مشترکی با همان قواعدی که به زبان چینی نوشته شده است، ندارد. امّا اگر او یك روسی و یك چینی را در حال بازی شطرنج ببیند این رابطه بی درنگ روشن خواهد شد[1]. قوانین شطرنج در زبانهای مختلف، متفاوت به نظر می رسند، اما این بازی مانند موسیقی یا دندان درد جنبهٔ جهانی دارد و از موانع زبانی رهاست. از لحاظ نظری، شیوهٔ عام و جهانی برای توصیف شطرنج عبارت است از فراهم آوردن یك صفحه و تعدادی مهره و انجام بازی به کمك زبان علامتی. کسی که زبان شناس با استعداد نبوده باشد به چه شکل دیگری می توانسته‌است برای گروه مهاجران جزیرهٔ الیس که هریك به زبانی تکلم می کردند، شطرنج را توضیح دهد؟

---

۱. بدبختانه شطرنج چینی اندکی تفاوت دارد. امّا زبان چینی چنان جلوه تصویری زیبایی دارد که اجازه دهید یك واقعیت جزئی تمثیل ما را خراب نکند. واقعیات سرسخت‌اند، آقای اولیانوف هم این را گفته است، امّا شاید چندان هم سرسخت نباشند.

طبیعیترین روش توصیف، با هر ایده عام و جهانی، اغلب بدوی‌ترین و نابخردانه‌ترین شیوه‌است. کسی را در نظر بگیریم که در کرانه‌ای بسیار غریب و بیگانه سرگردان می شود. اگر این بد اقبالی که توسط درندگان بلعیده شود به سراغش نیاید، و شانس زنده ماندن پیدا کند، همیشه قادر خواهد بود به بومیان بفهماند که گرسنه یا تشنه است، یا کمبود خواب دارد، یا دل دردی ملایم، یا اندکی شدید، یا وحشتناك دارد. و همهٔ اینها را با دقت و وضوحی به نحوی متفاوت بگوید، که با تجربه‌ترین نویسندگان نمی تواند با کلمات از پس آنها برآید. علائم او می تواند هر زبانی را که در عالم بدان سخن می رود نمایش دهد، و صداهای مختلفی در زبانهای مختلف ایجاد کند. امّا در زیر سردرگمی زبانها، گرسنگی یا تشنگی یا خواب آلودگی یا به نحوی دچار درد بودن به ویژه برای قربانی، همان واقعیت اولیه باقی خواهد ماند.

دیراك کشف کرد که در ورای پریشانی نظریه‌های کوانتومی چه واقعیت اولیه‌ای نهفته است؛ قواعد اساسی بازی جدیدی که فیزیکدانان بازی می کردند. او آنها را بر حسب هم ارز ریاضیی زبان علامتی، در شکلی ابتدایی امّا با دقتی حیرت آور در بیان، اظهار داشت. گرچه این قواعد از نظریه‌های هایزنبرگ و شرودینگر بیرون کشیده شده بودند، نشان و اثر اندکی از اصل خود نشان می دادند. اعداد q وجود داشتند، زیرا دیراك از همان آغاز آنها را دقیقاً پیشگویی کرده بود. ψ هم همین طور، امّا این یکی فریادی از دور دستها از جانب ψ اصلی شرودینگر بود. هم اکنون خواهیم گفت که ماجرا به کجا کشید.

یافتن قوانین بنیادی مکانیك کوانتومی به زبان علامتی ریاضی فقط قسمتی از دستاورد دیراك بود. او همچنین نشان داد که این قواعد را چگونه به زبان ریاضی که بتواند آنها را بیان دارد، ترجمه کند؛ مثلاً، حساب هم جزءِ آن زبانها نیست، چیزی بیشتر از زبان بومیان استرالیایی برای گفتن سرگذشت کوانتوم به شمار نمی آید. وقتی که دیراك این قواعد را به یکی از این زبانهای ریاضی ـ بگذارید آن را زبان ریاضی «چینی» بنامیم ـ نوشت، به سادگی به نظریهٔ هایزنبرگ به اضافهٔ یك ψ، تبدیل شدند. امّا، هنگامی که آنها را به زبانی که زبان ریاضی «روسی» می نامیم نوشت، اینها دقیقاً به نظریهٔ شرودینگر تبدیل شدند. دیراك حتی یك «فرهنگ لغات» جهانی برای ترجمه از هریك از این زبانها به زبان دیگر، پدید آورد. وقتی او

فرهنگ لغات ویژهٔ پیوند دهندهٔ زبان «روسی» ریاضی به زبان «چینی» ریاضی، یعنی پیوند دهندهٔ نظریهٔ هایزنبرگ را نوشت؛ دریافت که محتویات این فرهنگنامه چیزی نیست مگر ψ های شرودینگر.

چشم انداز با شکوه ادغام دیراك چنین بود. نظریهٔ شرودینگر میهمان را با نوشیدن نظریهٔ هایزنبرگ آغاز کرده بود و فکر می کرد نظریهٔ دیراك را نوشیده است. اکنون نظریهٔ دیراك هر چیزی را نوشیده بود، و این همبسترهای شگفت، شرودینگر و دیراك، جایزهٔ نوبل ۱۹۳۳ را نیز با هم شریك شدند. مکانیك کوانتومی به جای آنکه فربه تر و شکفته‌تر شود، پی درپی ظریفتر و بسامانتر شده بود. دیگر طرح ساختاری عمدهٔ مکانیك کوانتومی به همت دیراك شکل گرفته بود.

امّا همهٔ این چیزها واقعاً به چه معنی بود؟ آدمی چه نوع تصویر ذهنی می توانست از آن به دست آورد؟ با تمامی پرباری و دستاورد بی نظیرش، هنوز هم مهجور، مبهم، و پر سنگلاخ باقی مانده بود.

حتی در حالی که رویدادهای پیش گفته از پرده بیرون می آمدند، هایزنبرگ درون ابهامات بنیانهای نظری آنها پیچ و تاب می خورد، و بور برآن بود که به زودی روشنگری بیشتری به ارمغان آورد. اینکه قلمروهای نوین دانش فیزیك تا چه حد شگفت بودند، در فصول آینده توضیح داده خواهد شد. در اینجا به خاطر تشریح آنها زیاد درنگ نکنیم. اگرچه مهمترین وجوه وحدت آنها هم اکنون به تمامی گفته شده است، ضرورت و محرکی در رویدادها وجود دارد که ما را به پیش می راند. برای درك آنها وقت کافی خواهیم داشت. بیایید باز هم یك چند این وحدت را پی گیریم.

نظریهٔ نوین کوانتوم خود را با ماده مشغول کرده بود و نور را واگذاشته بود تا هر کاری که می توانست انجام دهد. دیگر نور بهترین نقش خود را در نظریه‌های پلانك، اینشتین، و بور بازی کرده بود. نظریهٔ ماده ناگهان همچون گلی کامل شکفته بود. امّا همتای آن، نظریهٔ نور، در پس پرده پنهان مانده بود. این نظریه [نور] همچون جوانی که در سن بلوغ باشد، در حالت ناهنجار نوجوانی نیمه کلاسیکی - نیمه کوانتومی مانده بود و طلوع موّرب و موجی فوتون که ویژگیهای هموار و کلاسیك آن را می آراست، هیچکس را با این فکر که کاملاً کوانتومی شده است، نفریفت.

در جو تب آلوده‌ای که حاکم بود، پیشرفت سریع بود. در فوریهٔ سال ۱۹۲۷، دیراك فوتون را به چنان بلوغ شتابانی رسانید که حتی از آنچه در همان روزها نصیب ذره شده بود، سریعتر بود.

جعبه‌ای را در نظر می گیریم که پایین، بالا، و تمامی دیواره‌های داخلی آن را آیینه کاری کرده باشند. امواج نوری که از بخت بد در آن به دام می افتند باید اوقات خود را در حرکتهای دیوانه‌وار شتاب آلودی، به جلو، عقب، و همهٔ پیرامون بگذرانند، و بارها خود را به دیواره‌های آیینه‌ای بکوبند تا بی رحمانه و اجتناب ناپذیر در هر برخوردی به عقب بازتابیده شوند.

بنابر آنچه جیمز جینز، فیزیکدان انگلیسی، در پژوهشی مربوط به فاجعهٔ بنفش در سال ۱۹۰۵ کشف کرد، در چنین شرایط سختی امواج نور کارهای شگفتی انجام می دهند. امواج نوری به دام افتاده در اتاقك آینه کاری، همانند دیوانگانی که ادعای ناپلئون بودن می کنند، وانمود می کنند که مجموعه‌ای از ذرات نوسان کننده‌اند؛ زیرا جینز نشان داد که معادلات ماکسول را برای نور در یك جعبهٔ باز تابشی می توان چنان از روی حیله و بداندیشی به کار برد که به جای آنکه شبیه معادلات معمولی موج به‌نظر رسند، شباهت قابل توجهی با معادلات مکانیکی معمولی چنین نوسانگرهایی ـ و در واقع، تعدادی نامتناهی از آنها ـ پیدا کنند.

و بر شالودهٔ این کشف جینز بود که دیراك نظریهٔ نوری و نظریهٔ برهم کنش نور با ماده را بنیاد نهاد. جینز معادلات موج ماکسول را به معادلاتی حاوی pها و qها برگرداند، درست انگار که معادلات هامیلتون را به دست آورده باشد. فرصت باشکوهی دست داد. دیراك با توده کردن ایده‌های کوانتومی خودش دربارهٔ اعداد qبرحسب این pها و qها، این ایده را به نظریه‌ای کوانتومی از فوتونها تبدیل کرد که پیچیدگیهای بسیاری داشت. این فرایند هنگامی که چنین بد بیان می شد ممکن بود ساده به نظر رسد، اما عملی بود که از مشکلات ناشی می شد و استعداد چشمگیری طلب می کرد. باید موجودات جدیدی معرفی می شدند که، برخلاف چیزهای ساده‌ای همچون pها و qها، در مکانیك کلاسیك همانندی نداشته باشند. باید ایده‌های نوینی از هر نوع، هم ریاضی و هم فیزیکی، آماده می شدند تا رخنه‌های بسیاری را که این نظریه را تهدید به نابودی می کردند، ببندند. البته همهٔ این رخنه‌ها بسته نشدند، با این وجود مادامی که دیراك سخت و فراوان نکوشید، نتوانست این

نظریه را رواج دهد.

دیراك نظریهٔ دیر جنب و کند نور را به قلمرو مکانیك کوانتومی نوین یك شبه معرفی کرده بود تا به شکل یار و همدم با ارزش نظریهٔ ماده در آید. تاریخ تکرار شده بود و این گونه‌ای از یك دههٔ کاملاً تکرار شدهٔ پیش بود. در سال ۱۹۱۷ اینشتین نظریهٔ تأثیر متقابل ماده و تابش را همسو با آنکه در نظریهٔ بور به تازگی پیشنهاد شده بود، ارائه داده بود. اکنون دیراك خدمتی شبیه آن را به مکانیك کوانتومی جدید انجام می‌داد. از اهمیت عام نظریهٔ نور دیراك در طرح مکانیك، و پیشرفتهای مهمی که از آن ناشی شد، زمینهٔ گفتگوی فراوانی در اختیار خواهیم داشت. امّا یك چیز دیگر هم وجود دارد که به عنوان یك وحدت کامل کننده، توجه ویژه‌ای را به سوی خود می‌کشد. زیرا دیراك اکنون می‌توانست با تمامی ابزار آکنده از مهارت مکانیك کوانتومی و سرانجام به عنوان بخش مکمل آن، چیزی را استنتاج کند که پیشتر ازین در خارج از حوزهٔ واقعه مانده بود. ایده‌های گوناگون اینشتین ده سال پیش در زمینه‌های عامی پدید آمده بود، و فرمول تابش تجربی اصلی ماکس پلانك که همه چیز با آن آغاز شده بود نیز چنین بود. کوانتوم، همراه با فرمول ماندگار پلانك که برای سومین بار سر بر می‌آورد، همچون صخره‌ای راستین در دریایی خروشان، که گذشت سالهای متلاطم شکل آن را تغییر نداده بود، یك چرخهٔ کامل را پیموده بود. وقت آن رسیده است که این فصل را به پایان بریم. نکند باز هم فکر می‌کنید که وقت پایان فصل نرسیده است؟

هنوز هم کارهای ناتمامی هستند که باید جمع و جور شوند. در تمامی این مدت بر امواج دوبروی چه گذشته بود؟ در مورد نسبیت چه بگوییم؟ و همچنین، در مورد اسپین الکترون، دو فرمول نسبیتی مربوط به ساختار ریز زومرفلد که در توفان اخیر نابود شد؟ بر سر همهٔ اینها چه آمده است؟

باید پیرامون یك عمل ادغام دیگر، که همهٔ اینها را به هم بپیوندد، گفتگو کنیم.

در همانجا که دوبروی امواج نسبیتی را در فضا و زمان معمولی به کار برده بود، شرودینگر امواج نانسبیتی را در یك فضای تخیلی به کار گرفته بود. موفقیت درخشان نظریهٔ شرودینگر به زودی چنان جلوه کرد، که گویی روزگار دوبروی رو به افول بود. اما بدون نسبیت یا اسپین، فرمول زومرفلد احیاء پذیر نبود. البته در راستای

جایگزینی امواج نسبیتی به جای امواج شرودینگر کوششهایی انجام شد، اما فرمول زومرفلد جز به شکلی تحریف شده خودی نشان نداد. در این نظریه چیزی اشتباه بود. در این مورد خاص، این نظریه حتی هم تراز نظریهٔ بور هم نبود ـ امّا ادعای آن را داشت.

در این میان معمای دیگری رخ نمود. اگر، بنا به گفتهٔ زومرفلد، هر الکترون یك موج بود، پس چگونه می شد اسپین را در آن گنجانید؟ پاولی به این مسئله روی آورد، و داروین، نوادهٔ چارلز داروین واضع انتخاب طبیعی، مستقل از او به این مسئله پرداخت. پاولی، با پی گرفتن سنت هایزنبرگ، با داخل کردن ماتریسهای ویژه، در جستجوی نسخه‌برداری از اثر یك اسپین بود. اما داروین، که احساس آشنایی بیشتری با ایده‌های شرودینگر می کرد، شکل تعدیل یافته‌ای از موج الکترون را معرفی کرد. اکنون دیگر موقعیتی بود که از وجود دو نظریهٔ المثنی «روسی و چینی» همان طوری که جوردان نشان داده بود، حیرت نکنیم. هنگامی که این ایده‌های نو به طور مصنوعی و ساختگی با نسبیت ترکیب شدند، فرمول زومرفلد را، جز با یك مورد اختلاف ناچیز، به جهان گذشتهٔ فیزیك برگرداندند. امّا این ایده‌ها از اختلافی مهمتر از این در رنج بود، زیرا کمیت معینی را دقیقاً دو برابر آنچه از راه تجربه به دست آمده بود، به دست می دادند.

در همین جا بود که دیراك، در سال ۱۹۲۸، با مراجعه به دوبروی و نسبیت بر اوضاع تسلط پیدا کرد، و اسپین را واگذاشت تا به خود مشغول باشد؛ چرا که دیراك، با بینشی ژرف که در بنیانهای مکانیك کوانتومی داشت، توجه کرده بود که معادلهٔ سادهٔ موج دوبروی را باید با تعبیر کوانتومی همچون امری دو جنبه‌ای نگریست. این دو بخش چنان به حیله با هم جور می شدند، چنان با استحکام در یکدیگر مقید می شوند، که هیچکس تا آن هنگام بر سرشت دو جزئی آن تردیدی نکرده بود. دیراك، با مهارت ریاضی عظیمی این دو بخش جدا را کاویده بود، و اینك هر بخشی را ماتریسهای موجود در ساختمان آن اشغال کرده بود ـ ماتریسهای پایه‌ای که دقیقاً اسپین الکترون را تشکیل می دادند. او نشان داد که هر بخش به تنهایی یك معادلهٔ موجی کافی است برای الکترون، و نشان داد که معادلهٔ نوین او نه تنها می گوید که فرمول زومرفلد در فیزیك کوانتومی دست نخورده می ماند، بلکه حتی بهبود پیدا می کند. این مطلب همچنین آن اختلاف دو برابر بودن مقدار را

نسبت به آنچه باید باشد، برطرف کرد. همین نشان داد که اسپین الکترون چیزی نیست مگر یك انعکاس طبیعی نسبیت؛ بنابراین تناقض ظاهری نسبیت و اسپین را در ارتباط با عامل به وجود آورندهٔ ساختار ریز، حل می کند. به تعبیر ریاضی، این امر کمیتهای جدیدی را به نظریهٔ نسبیت وارد می کرد که به حساب جدیدی به نام حساب اسپینور، به خاطر اسپین، مشهور شد. این مبحث، معادلهٔ شرودینگر برای یك الکترون تك را به کناری نهاد، و به پیشرفتهای مهم مشخصی منجر شد که در فصل آینده از آنها سخن خواهیم گفت؛ و رویهمرفته نشان داد که از ازدواج موفق این دو یاغی برجستهٔ فیزیك نوین ـ نظریهٔ کوانتوم و نظریهٔ نسبیت ـ نتایج حیرت آوری به بار خواهد آمد.

با همهٔ اینها، این وصلت موفق بیشتر یك پیوند منفعت طلبانه بود تا یك اتحاد راستین. این ماجرا، با تمامی درخشندگی فلج کننده‌اش، با تمامی آنچه نفوذ ژرفی را در ناشناخته‌ها نشان می داد، نسبیت و مکانیك کوانتومی را خیلی به هم نزدیك نمی کرد. در میان این دو یك عنصر ناسازگاری باقی ماند، که به نظر می رسید فعالیتهای هردو را محدود کرده است، به طوری که مثلاً هیچ راه خاصی یافته نشد که این معادلهٔ جدید را بر اتمی با دو الکترون یا بیشتر اعمال کند. مسائل بسیاری در ارتباط با آن پدید آمد، مسائلی که با موفقیت خیره کننده‌ای که به دست آمده بود، همه‌چیز را حادتر می کرد. یکی از این مسائل، که انرژیهای منفی را برطرف می کرد، فریبندگی خاصی داشت. امّا این مطلب به بخش بعدی سرگذشت ما تعلق دارد، چرا که گذاشتیم اندازهٔ حرکت قصه‌مان ما را از آنچه باید، فراتر ببرد. در سال ۱۹۲۸، انقلاب مکانیك کوانتومی دیگر پایان یافته بود. ظهور ایده‌های جسورانه و کشفهای مهم ادامه داشت، اما غوغای انقلاب فرو نشسته بود و مکانیك کوانتومی دیگر بر مسند فرمانروایی و رهبری دانش اتمی جلوس کرده بود. داستان ما اکنون بار دیگر به گذشته باز می گردد تا بار دیگر به سخت ترین مرحلهٔ نبرد وارد شود.

فصل ۱۳

اخطار شگفت‌انگیز

مکبث: «. . . . . افسانه‌ایست
خشم آلوده و پرخروش که ابلهی حکایت می کند و هیچ
معنی ندارد».
(مکبث، پردهٔ پنجم، مجلس پنجم)[۱]

پولونیوس: «با آنکه این همه دیوانگی است، باز از منطق برکنار نیست».
(هملت، پردهٔ دوم، صحنهٔ دوم)[۲]

مکبث یا هملت، مسئله این است. قصهٔ ما چیزی از خروش و خشم، یا دیوانگی کم نداشته است. خوانندگان ممکن است بگویند این قصه را یك ابله گفته است. با این همه از منطق برکنار نیست. این قصه از معنی تُهی نیست.

نظریهٔ کوانتومی جدید دیر هنگام درك شد. آدمیان کوانتوم را تا بلنداهایی با چشم انداز گسترده به پیش رانده‌اند بدون آنکه معنی آن را بدانند. آنها بر این امر آگاهی داشتند که رویدادهای خطیر خارجی اند، امّا پیش آگاهی آنها نسبت به محتوای کشفهایشان همانقدر ناچیز بود که یك کرم از سرنوشت خود، مبنی بر اینکه

---

۱. ویلیام شکسپیر، مکبث، ترجمه عبدالرحیم احمدی، تهران، نشر اندیشه، چاپ چهارم، ۱۳۵۵. ـ م.
۲. ویلیام شکسپیر، هملت، ترجمهٔ م. ا. به آذین، تهران، حبیبی، چاپ دوم، ۱۳۴۶. ـ م.

در آینده به یك پروانه تولید خواهد شد، خبر دارد. آنها از پیش، هنگامی که نخستین نشانه‌های ادراك شروع به خودنمایی کردند به پیروزیهایی جالب توجه و تماشایی دست یافته بودند.

شاید این‌که‌ادراك با اندکی تأخیر به‌دست می‌آید امری طبیعی است، چرا که در آن موقع پذیرش مفاهیم نوین سخت و حیرت آور بود. آنان این مطالب را که فاقد آرایهٔ مؤثری از مدارك تأیید کننده‌شان بوده‌اند انکار کرده بودند، آرایه‌ای که تقریباً مقاومت ناپذیر بود. این همسازی بی نظیر بین نظریه و آزمایش بود که باعث می شد ایده‌های نو، دانش خیلی رضایت آمیز و مطلوبی نباشند.

گمانها، امیدها، و تصویرهای ذهنی اولیه می رفتند تا کنار گذاشته شوند. چه چیزی می توانسته است بیشتر از راه حل دوبروی برای معمای ذره ـ موج موجه باشد؟ او عقیده داشت که امواجش ملازم ذره‌اند، و نه جانشین آن؛ معتقد بود که هرگز نمی توان ذره‌ای داشت بدون موج راهنما و همراه آن که با چشم دیده می شود؛ باید راهی را به پیش جستجو کرد و ذرهٔ درنگ کننده را در امتداد آن مسیری که کمترین کنش را طلب می کند، به جلو راند. چه چیزی می توانست عهده‌دار حل راز و رمز ذره ـ موج باشد که به این ترتیب از مفهوم ذره به اضافهٔ موج، نویدبخش‌تر باشد؟ اما این موضوع زیاد دوام پیدا نکرد. معلوم شد که این راز و رمز باریکیها و دقایق بیشتری دارد.

هایزنبرگ امید داشت که با بازی کردن نقش شترمرغ، احتیاط به خرج دهد. او تمامی تصویرهای ذهنی را انکار کرد و هیچ تصویر اثبات نشده‌ای را از آنچه باید در اتم راه پیدا کند عرضه نکرد، چرا که احساس می کرد چنین تصویرهایی بودند که موجب شکست نظریهٔ بور شدند. دیراك نیز، با کنار گذاشتن تجسمهای تصویری کار خود را آغاز کرد. او به قلب و روح نظریهٔ‌عدد qی‌خود هجوم آورد، ظاهراً بدون واهمه از اینکه این مسیر آکنده از رفاقت گرم و انسانی، باید چیزی مفقود باشد.

شرودینگر امواج دوبروی را از میدان بازیشان در فضا و زمان، به دور دستهای فضای افسانه‌ای پرتاب کرد و همبازی سابق آنها یعنی ذره را به کناری نهاد. الکترون از اکنون دیگر از جای خود خارج شده بود، و حتی در فضای افسانه فاقد موضع بود. بگذارید در اینجا، و در این رابطه کمی حرف بزنیم. شرودینگر بدون هیچگونه تأسفی به خاطر موجش، و به‌خاطر از دست دادن همبازی او، تلاش کرد تا با برپا

کردن موجهای بسیار کوچك درون یك موج عظیم جایگزیده، به عنوان ستون، به آن موضع و مکانی ببخشد. او حتی به کمك روشهای ریاضی اثبات کرد که این «بسته موج» جانشین مطلوبی برای ذره است، که از هم نمی پاشد، امّا دقیقاً همچون یك ذره که با مکانیك کلاسیکی مطابقت دارد، و حرکت می کند. بدبختانه به خاطر کوشش در راه تسلی بخشیدن به موج به خاطر از دست دادن مکان و موضعش، بعداً در پی انطباقی خاص، معلوم شد که شرودینگر با نوعی مسئله کار کرده است که در آنجا یك بستهٔ موج می بایست به این شیوهٔ مناسب رفتار کند. تقریباً در تمامی نمونه‌های دیگر باید بستهٔ موج از هم بپاشد. بنابراین، باید چنین به نظر رسد که ایدهٔ شرودینگر در جهت تعیین موضع الکترون، نادرست است. امّا مطالب بیشتری از آنچه در حال حاضر به چشم می خورد وجود دارد، و ما بعداً به این موضوع باز خواهیم گشت.

چندین ماه پس از آنکه شرودینگر نظریهٔ خود را عرضه کرد، ماههایی که در خلال آنها او این نظریه را با موفقیت شگفت انگیزی به کار گرفته بود و حتی نظریه‌های رقیب را نیز فروبلعیده بود، او سرانجام با جسارت اقدام به تفسیری از qی خود کرد. باید ضخامتی را که الکترون در آن پخش می شد اندازه‌گیری می کردند، بیشتر به همان ترتیب که کسی ضخامت ناموزون کره‌ای را که روی نان مالیده می شود، اندازه‌گیری کند. او فرمول ریاضی خاصی برای این کار ارائه داد. تعبیر آن به سرعت کنار گذاشته شد، اما فرمول به موجودیت خود ادامه داد. در ژوئن سال ۱۹۲۶ بورن اظهار داشت که الکترون نهایتاً ناپدید نمی شود، بلکه ψ معیاری است از احتمال وجود الکترون در هر مکان خاص. یك فیزیکدان جوان امریکایی را می یابیم که پیرامون این مفهوم بحث می کند. نام او اوپنهایمر بود.

تازه خود را با امواج یك الکترون محو آشتی داده‌ایم که به جایگزین کردن آنها با امواج احتمال فراخوانده می شویم. چند تای دیگر از این ایده‌های خیالی را باید بشنویم تا به ایدهٔ درستی دست یابیم؟ و، بدین منوال، اگر ایده‌ای درست به دست آید، چگونه می توانیم تشخیص دهیم که به آن دست یافته‌ایم؟

ما دقیقاً به آن رسیده‌ایم! امواج شرودینگر امواجِ احتمال‌اند. دست کم، همان تعبیری است که امروزه پذیرفته شده است، و فعلاً چیزی دال بر اینکه این تعبیر در آیندهٔ نزدیکی کنار گذاشته شود وجود ندارد. در واقع، این امواج برای تفسیر

مکانیك کوانتومی کاملاً بنیادی است، و مدارکی بسیار قوی آن را تأیید می کند. با این همه مفهومی غریب است. بورن باید دلایل قانع کننده‌ای برای پذیرش آن یافته باشد. چه چیزی می توانست او را وادارد که ایدهٔ شرودینگر مبنی بر یك الکترون محو را به کناری نهد؟

او با ملاحظهٔ اینکه، مثلا هنگامی که یك الکترون تقریباً با یك هسته برخورد می کند، چه اتفاقی می افتد، به تعبیر جدید خود رسید. اگر این الکترون را به عنوان موج ψ مورد بحث قرار دهیم در می یابیم که ψ از طریق این برخورد در تمام فضا پخش می شود.

هرچند، تا اینجا به نظر نمی رسد که مشکل زیادی وجود داشته است. پس چرا این موج نباید پخش شود؟

دشواری به اندازهٔ کافی وجود دارد. البته این ψ ، به عنوان موج، می تواند با آداب دانی کامل پخش شود. امّا این کار در رابطه با الکترونها چه معنی دارد؟ آیا به این معنی است که الکترون به تکه‌های ریزی پخش شده است؟ آزمایش این نکته را روشن می کند. الکترونها این طور پخش و پاشیده نمی شوند. آنها اگر از نزدیکی هسته بگذرند منحرف می شوند. مطلب همین است. امّا آنها الکترونهای کاملی باقی می مانند. با این وجود ایدهٔ شرودینگر حاکی از این است که یك الکترون هرگز در سرتاسر یك برخورد دوام نمی آورد. این هم برای یك الکترون محو وضعیتی ناممکن است. به نظر می رسید که تنها راه چاره این است که ψ تا آن حد توصیف کنندهٔ رفتار یك الکترون منفرد خاص نباشد که بیانگر این است که الکترون به طور میانگین مشمول برخوردهای بسیار زیادی است.

ایده‌ای مشکل است. شاید بهتر باشد به ایده‌های دیگری که این تفسیر را معقولتر عرضه کنند، بپردازیم.

تا پیدایش این ایده‌های دیگر، امواج احتمال، و تقریباً هر چیز دیگری در ارتباط با تفسیر مکانیك کوانتومی جدید، جز برای تنی چند از فیزیکدانان خوش اقبال، برای همه رنج و ناراحتی ذهنی حادی به ارمغان آورد، و حتی آن تعداد معدود آدم خوش اقبال، در همان صف مقدم مرزهای پیشرفت، وقتی این ایده‌های دیگر پدیدار شدند، نفسی به راحتی کشیدند. ما هرگونه درك خود را از معنی امروزی مکانیك کوانتومی جدید، و توانایی خود را نسبت به شکل دادن تصویرهای ذهنی

سازگار با آن چیزی که در جریان است، در نخستین مرحله مرهون نبوغ هایزنبرگ ایم؛ هایزنبرگی که کار خود را با کنار گذاشتن تمامی تصورات گمراه کننده آغاز کرد و آنان را از چشمان ذهن خود پنهان داشت، تا مبادا به سرگردانی و گمراهی افتد.و ما به زودی خواهیم دید که فراست او تا چه حد ژرف بوده است، چرا که ایده‌های نوین او آشکار ساخت که هر تصویری که پیشاپیش می ساخت مطمئناً به طور فاحشی گمراه کننده می بود.

هایزنبرگ، مانند هرکس دیگری که از آنچه در فیزیك نظری جریان داشت با خبر بود، از تناقض میان وضوح دستاوردهای معادلات ریاضی نوین و ابهامات عدم قطعیتهای تفسیر اساسی آنها سرگشته و ناآرام بود.

زمانی مرد کله طاسی از یك پسر کوچك پرسید که آیا دوست دارد او هم طاس باشد و مویی نداشته باشد که شانه کند؟ آن پسر بچه، با همان ادراك بچگانه پاسخ داد: «آه خیر! در آن صورت باید دو برابر صورتم را بشویم.» آن پسر بچه با این اصل بنیادی ناسازگاری طبیعی نزد کسانی که هم خدا را می خواهند هم خرما را، به خوبی آشنا بود. هایزنبرگ برآن بود که همین ناسازگاری را در قلمرو فیزیك کشف کند. او این کار را با پرسیدن چند سؤال بنیادی از خود آغاز کرد.این هم خیلی خوب بود که بگوییم تفاوت p بار q و q بار p، پدیده‌های اتمی را توضیح می داده است؛ امّا توضیح نمی دهد که چرا p با q یا q با p برابر نیست. البته، اگر p و q را همچون عملگرهایی می پذیرفتیم می توانستیم بفهمیم که چرا آنها چنین رفتاری دارند، امّا این ریاضیات صرف بود، و نه توضیحی بر این موضوع. دربارهٔ فیزیك چه بگوییم و دربارهٔ آزمایش؟ رویهمرفته، p و q دقیقاً نمادهای ریاضی نبودند. فرض می کردند که این دو چیزهایی فیزیکی را باز می نمایانند: p تکانه (اندازهٔ حرکت) و q مکان بود. پس معنی نابرابری p ضربدر q و q ضربدر p برحسب مکان و تکانه چه بود؟ و در ارتباط با آزمایش چه معنی می داد؟

سررشتهٔ کار هم همین بود. معنی این موضوع در ارتباط با آزمایش چه بود؟ هایزنبرگ در سال ۱۹۲۷ پاسخ را یافت؛ در حالی که آن را به طریق ریاضی از قواعد زبان ـ اشاره‌ای مکانیك کوانتومی استنتاج کرد و آن را توسط نمایشهای هندسی بسیار روشنی پالایش بخشید و توضیح داد. دیراك در همین ایام، به طور مستقل، حالت حقیقی مسائل را دریافت، و بور به سرعت برآن شد تا معنی ژرفتر ایده‌های نو

را دریابد. بیایید به دنبال هایزنبرگ و بور، ببینم این ایده‌ها را چگونه به روش ترسیمی می توان توضیح داد. چگونه آزمایشی برای اندازه‌گیری p و q برای یك ذره، مثلاً الکترون، ترتیب می دهند؟

این کار آسان است. ما به سادگی به این ذره نگاه می کنیم و مکان و سرعت آن را یادداشت می کنیم. مکان q است. و p، که بعداً از آزمایشهای دیگر می شناسیم برابر سرعت ضربدر جرم است. مکان آن را چگونه بیابیم؟ البته، با نگاه کردن به آن. سرعت آن را چگونه پیدا کنیم؟ البته، با دوبار نگاه کردن حرکت الکترون را درست مثل اینکه دونده‌ای در یك مسابقه باشیم، زمان بندی می کنیم. در آغاز و دوباره پس از یك فاصله زمانی به آن نگاه کرده تغییر مکان را یادداشت می کنیم. این همه وسواس برای چیست؟ موضوع کاملاً روشن است. این طرز کار کاملاً عادی است. اخترشناسان در طول قرنها به مواضع و سرعت ستارگان نظر کرده‌اند. چرا با آنها حرف نزنیم؟ آنها می توانند بگویند که چگونه با دقتی تقریباً باورنکردنی به دنبال موضوع مورد مطالعه خود می گردند.

بله، این کار قرنها و قرنها انجام شده است، امّا با سیارات، و ستارگان، و سحابیها، و سیارکها، و ماهواره‌ها، وشها بسنگها؛ و در مسائل زمینی، با قطارها، و هواپیماها، و شناورها، و اسبهای مسابقه، خمپاره‌اندازها، و فلاخن اندازها. امّا دربارهٔ الکترونها چه کارهایی انجام شده است؟ الکترونها کوچکند و خیلی هم کوچك. آنها بی‌نهایت کوچك هستند. برای اندازه‌گیری آنها، باید بتوانیم نگاهشان کنیم. چگونه به دیدن آنها اقدام کنیم؟

بسیار خوب، همیشه امکان به کاربردن یك میکروسکوپ وجود دارد.

امّا یك میکروسکوپ با قدرت کافی در هیچ جایی وجود ندارد.

می توانیم میکروسکوپی را با قدرت کافی تصور کنیم. پس نکتهٔ اصلی چیست؟

حتی اگر یك میکروسکوپ فرضی با قدرتی فوق العاده را به کار بریم باز هم ناگزیریم به الکترون نگاه کنیم.

مطمئناً! البته! هرکسی این را می داند. امّا هیچکس به این قصد نیست. اجازه دهید به این کار بپردازیم.

ما به این کار اقدام می کنیم. یك قاعدهٔ کاملاً شناخته دربارهٔ میکروسکوپها

وجود دارد. توان انها به اندازهٔ امواج نوری که به کار می گیرند ، محدود است. این ابزار نمی توانند جزئیاتی را که کوچکتر از یك طول موج است تمیز دهند. پس چرا قدرتمندترین میکروسکوپهای نوری، نور فرابنفش را به کار می برند؛ اگر چه مربوط به این نور نباشد؟ چرا میکروسکوپهای الکترونی پر قدرت ترند، اگر چه نه به خاطر این امر باشد که طول موج دوبروی مربوط به الکترونهای سریع بسیار کوتاهتر است؟

به هرحال، میکروسکوپ ما یك میکروسکوپ فرضی است. پس چرا نور فرضی را در آن به کار نبریم؟در صورت لزوم از پرتوهای X یا پرتوهای γ ی گسیلیده از رادیوم، یا نوری حتی با طول موج کوتاهتر، استفاده می کنیم. استفاده از نور به هر نحوی ضروری است، و اهمیتی ندارد که طول موج آن تا چه حد کوتاه باشد. همهٔ اینها فرضی است. این کار برای ما خیلی گران تمام می شود.

بسیار خوب. ما نوری را با طول موج بی نهایت کوتاه به کار می گیریم. امّا قاعدهٔ بسیار معروفی دربارهٔ نور وجود دارد. هرچه طول موج کوتاهتر باشد، بسامد بالاتر است. و همان طور که پلانك و اینشتین کشف کردند، هر چقدر که بسامد فوتون بالاتر باشد، انرژی آن بیشتر است.

بنابراین اکنون فوتون را به کار می گیریم. آیا این کار واقعاً خوب است؟ ما فقط دربارهٔ یك میکروسکوپ حرف زدیم. نیازی نیست که نتیجه کار را با به میدان آوردن فوتون مغشوش کنیم.

امّا اگر می خواهیم به نظریهٔ کوانتوم بیندیشیم باید فوتونها را مطرح کنیم. این همان نکتهٔ اساسی است که در تمام بررسیهای قبلی از این دست، نادیده گرفته شده است. می دانیم که نور به نحوی اتمی است، و می دانیم که هر بسامد با بسته‌های انرژی مشخصی همراه است. اگر برآنیم که کوانتوم را درك کنیم چگونه می توانیم این امر اساسی را به فراموشی بسپاریم؟ و اکنون تمامی این هیجانی که از میکروسکوپ ما ناشی می‌شود، چیست؟ ظاهراً الکترون این واگشت نوین رویدادها را دوست ندارد، زیرا نمی تواند این شداید را تحمل کند. حالا دیگر می خواهیم آرامش را از او سلب کنیم. تنها به آن نگاه نمی کنیم، بسته‌های عظیم انرژی را به سویش پرتاب می کنیم و او با وضع بدی سرگردان می شود. این چه نوع آزمایش علمی است؟ مطمئناً از دقت بسیار به دور است. فرض کنید به دیدن الکترون و ثبت موقعیت آن موفق شویم. در این صورت به پیروزی بی اساس و

معنایی دست یافته‌ایم. همین که می بینیم به این معنی است که ما یك ضربهٔ مستقیم را با یك فوتون هماهنگ کرده‌ایم. الکترون ذرهٔ بسیار سبکی است، نمی تواند در برابر ضربهٔ یك ذرهٔ نور تاب آورد. این الکترون بر اثر برخورد به طور نامناسبی تکان می خورد. ما در هنگام مشاهدهٔ مکان الکترون به آن تکانی می دهیم که سرعتش را تغییر می دهد. ما هدف خودمان را پایمال می کنیم. نمی توانیم از فونوتهای آرامتر و ظریفتری سود بریم، زیرا هرچه انرژی آنها کمتر باشد بسامدشان پایینتر و طول موجشان بلندتر، و به این ترتیب توان میکروسکوپ کمتر است. یك روح خلاف جریان طبیعت در هوا موج می زند..

امّا چرا با مشاهده کردن مکان اصلی، و سپس سرعت، بعد از تکان خوردن مشاهدهٔ اولیه، به همین امر قانع باشیم؟

این کار اصلاً کمکی به ما نمی کند. سرعت را چگونه اندازه بگیریم؟ ناگزیریم از یك کرونومتر ذهنی استفاده کنیم. دو دیده‌بانی پی درپی از مکان انجام دهیم تا ببینیم الکترون چگونه حرکت کرده است. دیده‌بانی دوم موجب یك تکان دوم می شود. سرعتی که ما در پی مشاهداتمان به دقت محاسبه کردیم نباید سرعت کنونی الکترون باشد؛ آن تکان دوم باید این سرعت را در همان لحظه‌ای که مشاهداتمان را از آن تکمیل کردیم، تغییر داده باشد. سرعت گذشته را می توانیم بدانیم، امّا سرعت حال و آینده را نه. آن روح خلاف طبیعت مسلماً مزاحم می شود.

بی معنی و مهمل است. خنده‌آور است. این یکی نمی تواند مانند آن یکی باشد. باید راه گریزی و راه حلی وجود داشته باشد. چرا به تکان خود فوتون توجه نکنیم؟ در این صورت می توانیم حساب کنیم که چه تکانی باید بر الکترون وارد آمده باشد، درست همانگونه که می توانستیم برای برخورد گویهای بیلیارد محاسبه کنیم.

بسیار زیرکانه، و بسیار ژرف. امّا آنچنانکه بور خاطرنشان ساخت، بدبختانه قاعدهٔ کوچك دیگری پیرامون میکروسکوپها وجود داشت. طول موج به تنهایی مهم نیست. قطر عدسی شیئی نیز مهم است. به خاطر تفکیك مطلوب باید قطر بزرگ باشد و اگر قطر بزرگ باشد، چگونه می توان گفت فوتون الکترون را در چه جهتی جهانیده است؟ باید هر بخشی از عدسیهای بزرگی را که ناگزیریم به کار بریم تا توان تفکیکی مورد نیاز را به دست آوریم، مورد بررسی و مرور قرار دهیم. عدسیها

چیزهای غریبی اند. تمامی پرتوهای گسیلیده از الکترون را در کانون واحدی جمع می کنند. نمی توانیم سوی این پرتو را با نگاه کردن به تصویر الکترون تعیین کنیم. اصل خودسری باز هم رخ می نماید. در واقع هرچه عدسی بزرگتر باشد توان تفکیك آن بیشتر است؛ امّا عدم قطعیت سوی فوتون و همچنین تکانی که این فوتون به الکترون می دهد، نیز بیشتر است. رویهمرفته، نمی توانیم داده‌هایی را که برای محاسبهٔ گوی بیلیارد نامبرده ضروری است، به دست آوریم. موقعیت از هر وقتی بدتر است. وقتی می خواهیم موقعیت را مشاهده کنیم شانسهای خود را برای یافتن سرعت تباه می کنیم.

هنوز هم فرصتی وجود دارد. آتش که گرفت خشك و تر می سوزد. ما فوتونها را تحت فشار و اعتراض مطرح کردیم. اکنون آنها باید به ما کمك کنند تا از چاله‌ای که خودشان ما را بدان انداخته‌اند، بیرون کشند. چرا نمی توانیم راستای فوتون را به کمك اندازه‌گیری تکانی که به میکروسکوپ داده است، پیدا کنیم؟

این تکان بر میکروسکوپ را چگونه اندازه‌گیری کنیم؟ باید ببینیم این میکروسکوپ چگونه حرکت می کند. این موضوع را چگونه می توانیم مشاهده کنیم؟ با نگاه کردن به آن. این امر به معنی تابانیدن نور برآن است. و به معنی بمباران کردنش با فوتونهاست. و اینها باید فوتونهایی با انرژی عظیم باشند زیرا تلاش ما اندازه‌گیری یك جهش بی نهایت کوچك است و این همان جایی است که به ماجرا وارد می شویم. یکبار دیگر همان رنج و زحمت. هر وقت تلاش می کنیم یك مشاهدهٔ قبلی را به مشاهدهٔ دیگری تکیه دهیم، باعث تکان جدیدی می شویم که اطلاعات جدید را منسوخ می کنند. اصل خودسری پرغوغا و مهاجم است. هرچه در جهت تعیین مکان الکترون کوشش بیشتری به عمل آوریم دانش ممکن خود را از آن بیشتر تباه می کنیم؛ و تمامی اینها به علت کوانتوم پلانك، h، است. و این، کم و بیش، دقیقاً همان اصل عدم قطعیت مشهور هایزنبرگ است. بنابراین اصل، ما باید خود را با این واقعیت وفق دهیم که نمی توانیم هم مکان و هم سرعت یك ذره را، حتی در خیال، با دقت تعیین کنیم و اکنون کوانتوم همین جاست، که ما نمی توانیم به طور همزمان p و q را بدانیم. می توان با آزمایشهای فرعی دیگری نشان داد که وقتی p را اندازه می گیریم، q را آشفته و مختل می کنیم. وتمام دردسر و زحمت این است که راهی برای تعیین مقدار دقیق این آشفتگی وجود ندارد. اگر در عوض

دانستن دقیق مکان به دانستن تقریبی آن اکتفا کنیم، می توانیم تکانه را نیز تا حدودی تعیین کنیم. و این عمل تنها هنگامی امکان پذیر است که بردانستن مکان و یا تکانه به طور دقیق پافشاری کنیم، که در این صورت تمامی نشانه‌های اطلاعاتی دربارهٔ آن دیگری از بین می رود. هایزنبرگ دریافت که اگر عدم قطعیت در مکان و عدم قطعیت در تکانه، درهم ضرب شوند، در بهترین حالتشان نمی توانند مقداری به دست دهند که از h کمتر باشد؛ بار دیگر ثابت پلانك، آن قهرمان شریر نمایشنامه، رخ می نماید.

این مطلب با موقعیت پیش از کوانتوم در تناقض است. در اینجا هم ناگزیریم از نوری با طول موج کوتاه استفاده کنیم، و همچنین نوری که فشار وارد می آورد. امّا شدت این نور را می توان تا میزان دلخواهی ضعیف کرد و بنابراین فشار را بدون محدودیت کاهش داد؛ به همراه آن آشفتگی الکترون کاستی می گیرد. از دیدگاه کوانتومی، کاهش یافتن شدت، تکانهای منفرد فوتونها را نمی کاهد، بلکه صرفاً آنها را کم بسامد می کند. تا هنگامی که یك فوتون عملاً الکترون را نَجَهانده باشد، نمی توان مشاهده‌ای انجام داد. ازآنجاکه کاهش شدت انرژی یك فوتون منفرد را نمی کاهد، نمی توان از این تکان چشم پوشید. و این تکان خودش اساساً نامعین باقی می ماند.

یکی از مشخصه‌های مهم فیزیك نوین در همین جا نهفته است. چیز دیگری، و بدتر از این، در راه است. ما هنوز حتی توضیح نداده‌ایم که این موضوع چگونه با این امر که p ضربدر q با q ضربدر p متفاوت است، مربوط می شود. امّا چند لحظه‌ای آنچه تاکنون دریافته‌ایم، بررسی کنیم.

نخست باید بدانیم که تمامی این بحث تصویری آزمایشهای فرضی، از عامیت کمتری برخوردار است، و حتی آنچه ما را نسبت به مفهوم نظریهٔ کوانتومی دلگرم می کند بر پایه‌های مستحکمی قرار ندارد. میکروسکوپهایی به این توان باور نکردنی که فرض کرده‌ایم، وجود ندارند. ما حتی با این هم کاملاً موافق نبوده‌ایم، زیرا اگرچه الکترون را یك ذره پنداشته‌ایم به آنجا رسیدیم که اگر یك ذره می بود مطمئناً عجیب و شگفت بود. توجیه راستین چنین فرضها و پندارهایی موفقیت خود نظریهٔ کوانتومی است، چرا که این آزمایشهای ذهنی جز تفسیری از قواعد آن نیستند. به مفهوم نوینی از ذره رسیده‌ایم. یك ذره هرچه باشد، دیگر آن چیزی نیست که

ما بنابر عادت به آن می اندیشیدیم. آن ذره قدیمی هم می توانست مکان و هم سرعت داشته باشد. ذرهٔ جدید می تواند مکان داشته باشد، یا می تواند سرعت داشته باشد، یا می تواند مکانی نسبتاً نامعلوم همراه با سرعتی نسبتاً نامعلوم داشته باشد، امّا نمی تواند هردوی آنها را با هم و به طور دقیق داشته باشد. در آزمایشها و تجربه‌های فرضی خود، الکترون را همچون ذره‌ای نامتعارف می پنداشتند، تنها به خاطر آنکه معلوم دارند نمی توان تمامی صفتهای بر شمرده برای آن رامشاهده کرد. امّا اکنون باید ایدهٔ کهنه را به دور افکنیم. مادام که در تلاشیم این دیده را نگه داریم، روح خودسری ما را از پیش رفتن باز خواهد داشت. اگر نمی توان صفتها و نشانه‌های قدیمی را، حتی در نظریه، مشاهده کرد، نتیجه می گیریم که آنها در واقع وجود ندارند. می رویم تا با نوع جدیدی «ذره» که نسبت به آنچه با ایدهٔ کلاسیکی در نظر داشتیم بسیار متفاوت است، برخورد کنیم. این ذرهٔ جدید را نمی توان همچون تودهٔ ریزی که به نحوی خاص در حال حرکت است، در نظر گرفت. می توان آن را به عنوان یك تودهٔ ریز در نظر گرفت، یا اینکه به عنوان چیزی که به طریقی حرکت می کند، امّا نمی توان در آن واحد هردو این صفتها را به آن نسبت داد. طبیعتاً، آن معمای ذره ـ موج اکنون مفهوم جدیدی پیدا می کند. بعداً در این مورد به بحث بیشتری خواهیم پرداخت.

در این ضمن باید جنبه دیگری از موقعیت کنونی را در نظر داشت، زیرا علم ناگهان متواضع تر شده است. در روزهای خوش گذشته می شد آینده را متهورانه پیشگویی کرد. امّا اکنون چه؟ برای پیشگویی آینده باید حال را بشناسیم، و حال نیز شناختنی نیست، چرا که در ضمن تلاش برای شناختن آن ناگزیر تغییرش می دهیم. اگر فرودگاهی را که از آنجا هواپیما آغاز به حرکت می کند، و نیز سرعت و جهت آن را بشناسیم، می توانیم پیشگویی کنیم که در آیندهٔ نزدیکی کجا خواهد بود. اما اگر تنها مکان فرودگاه را بشناسیم، یا تنها جهت و سرعت هواپیما را، اما همهٔ اطلاعات را توأم با هم ندانیم، پس پیشگویی به حدس زنی صرف تبدیل خواهد شد. موقعیت الکترون هم بدین گونه بود. علم دستخوش تغییر بنیادی و شگرفی شده بود بدون آنکه در آغاز آن را درك کرده باشد. علم تمامی راه را از پلانك تا هایزنبرگ پیموده بود پیش از آنکه به‌طور کامل تشخیص دهد چه روی داده است؛ پیش از آنکه کل ساختار و اندیشهٔ علمی تبدیل و تغییری پذیرفته باشد. آن گزافه‌گوییهای مغرورانه،

آن خودستاییها از علم دور شده بودند. علم ناگهان به بلوغی عقلی رسیده بود. دست کم دریافته بود که هرگز توانایی پیشگویی جزئیات آینده را نداشته است.

با وجود این، علم هنوز هم آینده را پیشگویی می‌کرد؛ و به یُمن کوانتوم، موفقتر از هر موقع. ناگزیر به این مطلب نیز باز خواهیم گشت.

باز هم یك مورد دیگر را مطرح کنیم. بر سر مدارهای بور چه آمد؟ اگر یك اتم بور را زیر میکروسکوپ فرضی خود قرار می‌دادیم، چه مشاهده می‌کردیم؟ آیا می‌توانستیم الکترونی را که بر گرد مداری می‌گردد دنبال کنیم؟ بهیچوجه. همان عمل مشاهده به الکترون تکانی خواهد داد که مانند این است که آن را از مدار خودش به مدار مجاز دیگری پرتاب کرده باشند؛ و در مواردی هم آن را به کلی از اتم به بیرون می‌اندازد. بنابراین حتی اگر به خود اجازه دهیم که اینطور حرف بزنیم که گویی مدارها وجود داشته‌اند، می‌بینم که آنها به اعتبار مفهوم قدیمی، از لحاظ نظر مشاهده پذیر نیستند. غریزه و شعور هایزنبرگ چه راسخ بود که از همان آغاز او را به انکار این مدارها راهبری کرد؟

مورد آخری هم وجود دارد و ما سرگذشت خود را با آن ادامه می‌دهیم. همان‌طور که هامیلتون هم به خوبی می‌دانست، درست به همان ترتیب که تکانه و مکان با هم جفت و جور می‌شوند، انرژی و زمان هم اینطورند. اما حالا می‌فهمیم که وقتی پلانك انرژی را به بسامد پیوند داد چه‌کار عجیب و غریبی کرد. نمی‌توانیم در یك آن بسامد را اندازه بگیریم. برای این کار باید مدتی صبر کنیم، دست کم، یك یا دو نوسان را به دقت بررسی کنیم. بنابراین اگر انرژی به بسامد وابسته باشد، نمی‌توانیم انرژی را در یك لحظه اندازه‌گیری کنیم بلکه برای انجام این کار باید زمانی بگذرد. اینرا با آنچه هایزنبرگ در مورد تکانه و مکان کشف کرد می‌سنجیم و شباهتی کامل را ملاحظه می‌کنیم. اگر تکانه را داشته باشیم، نمی‌توانیم موضع دقیق مکان را تعیین کنیم، اگر انرژی را بدانیم، نمی‌توانیم وضع دقیق زمان را داشته باشیم.

شباهت واقعاً کامل است. اما باید به این ارتباط زمان و انرژی توجه خاصی مبذول داریم، زیرا برای پی بردن به آن هیچ میکروسکوپ فرضی ضروری نیست. می‌بینیم که اگر ما فقط جسارت و ذکاوت لازم را برای شناخت آن داشتیم، متوجه می‌شدیم که موضوع چقدر روشن است. و به مجرد آنکه پلانك کوانتوم را کشف

کرد، شناخت این موضوع هم امکان‌پذیر شد؛ این کشفی بود با ابعاد غول‌آسا که فقط منتظر بود تا کسی کشفش کند. اگر کسی می‌توانست از موضع قدرت آن را مطرح کند، قطعاً به شکوه باورنکردنی علمیی دست می‌یافت ـ اما این شخص را تا سال ۱۹۲۵ یا حوالی آن، یعنی تا یك ربع قرن پرغوغای دیگر، کسی جدی نمی‌گرفت. اما چه کسی می‌داند که امروز هم چیزهایی شبیه آن نباشد. و درست به همان میزان بدیهی، که رودررویمان ایستاده‌اند، اما کسی نگاهشان نمی‌کند زیرا آدمی فاقد آن جرأت و دلاوری لازم است. چرا که در علم نیز مانند میدان نبرد تهور و دلاوری ضروری است.

به داستانمان برگردیم، که هنوز هم بسیاری چیزها باید در آن روشن شوند. آیا می‌توانیم برای عمل p ضربدر q تعبیری فیزیکی به دست دهیم؟ این موضوع با میکروسکوپ هایزنبرگ چه ارتباطی دارد؟

به‌خاطر این امر باید به قواعد زبان ـ نشانهٔ مکانیك کوانتومی برگردیم، چرا که آن قوانین عملاً کشف هایزنبرگ را در بطن خود دارند. به اعتبار همهٔ حرفهایی که در بخش پیشین زدیم، این نکته که قواعد دیراك بدون هیچ حکم و بیان رسمی برجای ماندند، ذهن خواننده را به خود مشغول داشته است. پس هنوز هم درست جانیفتاده بود. اما همراه با هایزنبرگ راه برای ما هموار شده است. اکنون باید به وارسی معدودی از جزئیات آنها بپردازیم، تا ببینیم کشف انقلابی هایزنبرگ چگونه به شایستگی آنها را فرا می‌گیرد.

بنابر نظر دیراك، یك الکترون، یا اتم، یا سحابی، یا اتومبیل، یا هر سیستم دینامیکی دیگری ممکن است حالتهای حرکتی ممکن گوناگونی داشته باشد. او هر حالت ویژه‌ای را با ψ باز نمود، که همچنانکه گفتیم، به ψ ی شرودینگر شباهتی نداشت. توجه خود را به الکترونی معطوف می‌کنیم که هایزنبرگ آن را به این میدان مناقشه افکند. برای مشاهده موقعیت (مکان) آن عمل آزمایشی مشخصی را رویش انجام می‌دهیم. ناگزیریم این حقیقت را به نحوی به زبان نمادین ریاضی بیان کنیم، و بنابراین به این عمل فیزیکی یا یك عملگر ریاضی q اشاره می‌کنیم. همان‌گونه که اکنون می‌دانیم، از آنجا که عمل فیزیکی معمولاً حرکت فیزیکی سیستم را مختل می‌کند، عملگر ریاضی را می‌سازیم که اثرش توسط تغییر ψ بر روی آنچه که عمل می‌کند، تصویری آینه‌ای به‌دست می‌دهد؛ می‌گوییم که q

معمولاً با ψ تفاوت دارد. آیا مطلبی از این سرراست‌تر هم وجود دارد؟ این یك المثنای دقیق از وضعیت فیزیکی متناظر در زبان علامتی ریاضی است.

در زندگی روزمره نمونه‌های بسیاری از عملیات وجود دارند که وقتی با دستورها و احکام مختلفی اجرا می شوند، اثرات متفاوتی دارند. مثلاً، اگر، عمل شیرینی خوردن کسی را با p و عمل شیرینی داشتن کسی را با q نشان‌گذاری کنیم، پس p باید در پی q بیاید، اما نه‌برعکس. اگر عمل شستشوی موی آدمی را با p، و عمل انجام کاری با این مو را با q نشان کنیم، پس باز هم، آنچنانکه هر خانمی می داند، p می تواند به دنبال qبیاید اما q به آسانی به دنبال p نمی آید. اگر p (به هر مفهومی) نشانهٔ عمل داشتن یك بچه باشد، و q نمادی برای ازدواج کردن، پس آمدن p به دنبال q با آمدن q به دنبال p متفاوت است. در تمامی این موارد باید بگوییم که p ضربدر q و q ضربدر p با هم متفاوتند. و در مکانیك کوانتومی هم شباهت زیادی با این موارد موجود است.

فرض کنید می توانیم مکان دقیق الکترون هایزنبرك را بیابیم، مثلاً در مورد این الکترون q مقدار ۳ را داشته باشد. می توانستیم به جای عملگر q عدد ۳ را قرار دهیم و بگوییم که q ضربدر ψ برابر است با ۳ ضربدر ψ. به همین ترتیب، اگر می دانستیم که مقدار تکانه ۵ است می توانستیم بگوییم که p ضربدر q برابر است با ۵ ضربدر ψ. اینها همه چیزهایی ابتدایی اند. هر کسی هر چقدر هم نسبت به ریاضیات بیگانه باشد می‌تواند موضوع را درك کند. اما اینها قواعد مکانیك کوانتومی نوین اند.

برای الکترون هایزنبرگ، این موضوع که p ضربدر q همسان q ضربدر p نیست، به چه معنی است؟ ما سرانجام در موضع پاسخ به این پرسش قرار گرفته‌ایم. این معنی در زبان اشاره‌ای (یا نمادین) ریاضی عمل ساده‌ای است، تا اندازه‌ای ساده‌تر از حساب ساده؛ و تنها به آن سمت می رود که نشان دهد چه چیزهای مهیبی در زیر این قوانین ظاهراً ساده پنهان اند.

لحظه‌ای وانمود کنیم که یافته‌ایم q مقدار مشخص ۳ و p مقدار مشخص ۵ را دارد. بدون توجه به اینکه کدام اندازه‌گیری نخست انجام شده است. پس p ضربدر q ضربدر ψ برابر است با ۵ ضربدر ۳ ضربدر ψ یا ۱۵ ضربدر ψ، درحالی که q ضربدر p ضربدر ψ برابر است با ۳ ضربدر ۵ ضربدر ψ، یا همان ۱۵ ضربدر ψ -

همان مقدر پیشین. و این آشکارا یك تناقض است. نتیجه نمی‌تواند مانند پیش باشد، زیرا اولی p ضربدر q ضربدر ψ ودومی q ضربدر p ضربدر ψ است، وما می‌دانیم که p ضربدر q با q ضربدر p برابر نیست. به‌طور خلاصه، p و q هردو نمی‌توانند مقادیرعددی دقیقی ،مانند ۵ و ۳، داشته باشند، تنها به این علت که ۳ ضربدر ۵ و ۵ ضربدر ۳ برابرند؛ در خالی که این امر دربارهٔ p و q صادق نیست. البته، این تناقض بدان معنی است که فرض اولیه خطا و غلط بوده است. بنابراین نابرابری p ضربدر q و q ضربدر p یعنی اینکه ترتیب انجام مشاهدات بر نتایج آنها تأثیر می‌گذارد. یعنی مشاهدهٔ یکی، مشاهدهٔ دیگری را مختل می‌کند، که همان چیزی است که هایزنبرگ و بور با میکروسکوپ فرضی خود نشان دادند.

حال سرگرمی و تفریح واقعاً آغاز می‌شود. تمامی اینها چیزی نبودند جز درآمدی بر انقلاب اصلی در اندیشهٔ علمی که مکانیك کوانتومی نوین آن را فراهم آورد. کشف هایزنبرگ مطالبی بیشتر از ناتوانی صرف دانستن همزمان مکان و سرعت در بطن خود دارد، و به همین ترتیب نیز، مطالبی بیش از قواعد مکانیك کوانتومی. خوش باوری در ابتدا به سرخوردگی منجر می‌شود. اما از آن هم گریزی نیست. مدارك و شواهد مقاومت ناپذیرند. و پس از مدتی آدمی ایده‌های نو را، هر چند عجیب و غریب باشند، می‌پذیرد، و درستی احتمالی آنها را تشخیص می‌دهد.

اما با چشمان گشودهٔ خود به درون این چیز برویم. اجازه دهید از پیش مزهٔ آنچه را در راه است بچشیم. موقعیت بیشتر چنان است که گویی بچه‌ای در جستجوی حقیقت، سؤالی قدیمی را بارها از ما پرسیده است.

او می‌گوید، «پدر، مرغ زودتر به وجود آمد یا تخم مرغ؟».

ما به اصرار، وحتی به نومیدی، از زیر بار این سؤال شانه خالی می‌کنیم. اما پرسشگر ما مصر است. تنها حقیقت او را قانع می‌کند، و نه چیز دیگری. سرانجام ما تمامی جسارت خود را جمع و جور می‌کنیم تا با مقاومت تمام به این پرسش پاسخ دهیم:

«بله!»

و او ادامه می‌دهد

«پدر آیا موج وجود دارد یا ذره؟»

«بله»

«پدر آیا الکترون همه جا هست؟»

«بله»

«پدر، آیا دانشمندان واقعاً می دانند دربارهٔ چه چیزی حرف می زنند؟»

«بله!»

راه از پیش کوبیده شده است. ما از قبل و از اصل هایزنبرگ می دانیم ذره دیگر همان چیزی که فکر می کردیم، نیست. ما در آستانهٔ فهمیدن این نکته‌ایم که ذره حتی کمتر از آنچه هم اینك فکر می کنیم، به ذره قدیمی شبیه است. از آنجا که حالا واژهٔ «ذره» مبهم است، و روابط کلاسیك آلوده‌اش کرده‌اند، ما بیشتر دربارهٔ الکترون سخن خواهیم گفت، گرچه آنچه می گوییم بر فوتون، اتم، یا هر «ذره» دیگری قابل اطلاق است. اما، خود واژهٔ «الکترون» تا اندازه‌ای آلوده است. معمولاً به آن به عنوان ذره‌ای از نوع قدیمیتر فکر می کنیم، و باید تشخیص دهیم که این دلیل عمده‌ای است برای آنکه چرا هر چیز شگفت و معماگونه به نظر می رسد. اما، علیرغم تمام معماها، باید همیشه این را تشخیص دهیم که ما از این جهان سخن می گوییم، و نه از نظریه‌هایی بی اساس که تارهایی شیطانی رامی‌تنند. ما از آنچه من و شما را، درختان و سنگها را، ستارگان و بمبهای اتمی را، امواج رادیویی و ویروسها را و کلمها و پادشاهان را، می سازند سخن می گوییم؛ و، به اعتبار همهٔ آنچه می دانیم، از شالودهٔ مادی عشق و نفرت، وطن پرستی و خیانت، و جذبهٔ مذهبی، سخن می گوییم. در پشت تمام ایده‌های عجیب و غریب ما دربارهٔ *p*ها و *q*ها و عدم قطعیتهای آنها دنیایی از واقعیت خشن در رابطهٔ تحقق با آنها، نهفته است.

با توجه به همهٔ اینها، وقتی می گویند الکترونی می تواند در آن واحد در دومکان باشد، یا در عین حال می تواند به دو راستا برود؛ یا حتی بیشتر از دو راستا، چه احساسی خواهیم داشت؟ این را به زودی خواهیم دانست، زیرا چیزی شبیه به این نیز باید هم اکنون دانسته شود، درست همان گونه که این موضوع را باید فیزیکدانانی متعلق به نه چندان سال پیش درك می کردند. اما، در نهایت این موضوع می تواند کلاً در طرحی سازگار پیاده شود، و به همین ترتیب می تواند با چیزهای مشابهی که از پیش برای ما آشنایند، ربط داده شود.

پس، نخست بدترین حالت را در نظر بگیریم. پس از آن ما باید ببینیم که چگونه بهترین آن را به دست آوریم، و در این راه به توفیقی چنان مطلوب و راحت برسیم که باید تأمل کنیم تا از آن به سوی دیدگاه قدیمیتر با تمام ناتوانیش در توجیه برخی از تجربیات و آزمایشهای اساسی و برجسته، پس نشینیم.

الکترون می‌تواند با سرعت هزار و پانصد و بیست متر (پنج هزار پا) بر ثانیه به خط راست و به سوی بالا حرکت کند. این حالت حرکت معقولی خواهد بود و می‌توان آن را با ψ نشان کرد. یك الکترون می‌تواند با سرعت ۲۵۶۰ متر (هشت‌هزار پا) بر ثانیه به سمت راست حرکت کند. این هم یك حالت حرکت خواهد بود، که با یك ψ ی دیگر نمایش دادنی است. اکنون باید به یادآوریم که قواعد زبان نمادی دیراك چکیدهٔ نظریه‌های موفق هایزنبرگ و شرودینگر بودند. یکی از این قواعد، و شاید مهمترین آنها، قاعده برهمنهی است. این قاعده را پیشتر از این مطرح نکرده‌ایم. بنابراین قاعده می‌توانیم یك حالت حرکتی شامل ترکیبی از دو حالت بالا گفته را داشته باشیم؛ همان اندازه از اولی که از دومی. این چیزی است کاملاً ریشه‌ای. معنایش وجود واسطهٔ حرکتی کلاسیکی میان آن دو، که ترکیب کلاسیك حرکتهای همزمان شمالی و شرقی یك حرکت شمال شرقی واحد را تشکیل می‌دهند. این به معنی هردو حرکت در آن واحد است.

در حال حاضر می‌توانیم خود را با این فکر دلداری دهیم که با احتمالات سروکار داریم، اما این دلداری، اگرچه درست است، نمی‌تواند بدون توجیه دیری بپاید. باوجود این، از آنجا که این موضوع بخش مهمی از فیزیك جدید است، در راه آن تلاش می‌کنیم.

فرض کنید کار خود را با الکترونی آغاز می‌کنیم که با سرعت سه‌هزار و دویست متر برثانیه به بالا حرکت می‌کند. اگر مکان آن را مشاهده کنیم به ψ ی آن q را اعمال می‌کنیم. ریاضیات نشان می‌دهد که حالت جدید، q ضربدر ψ، حالتی ترکیبی است نه تنها شامل آن دو حرکت بلکه تعدادی نامتناهی از حرکتهای خالص که در آن واحد در جریانند. برای بیان مفهوم فیزیکی این موضوع، به میکروسکوپ هایزنبرگ نگاهی بیندازیم. در هنگام مشاهدهٔ مکان الکترون یك تغییر نامعین در سرعت آن ایجاد کردیم. بنابراین، اکنون همهٔ چیزی را که از حرکت آن می‌توانیم بدانیم این است که احتمالاً فلان حرکت است، یا با احتمال کمتری حرکت دیگری

است، یا آن یکی، یا حرکتی دیگر، تا یك سیاههٔ نامحدود از احتمالات را بیان داریم. اگرچه می‌توانیم فهرستی از تمام حرکتهای ممکن تشکیل دهیم و حتی احتمالهای نسبی آنها را تعیین کنیم، نمی‌توانیم حرکت دقیق را بدون انجام مشاهدهٔ دیگری تثبیت کنیم ـ و این هم کمکی به ما نخواهد کرد، زیرا این کار حرکت را تغییر می‌دهد و اطلاعات کهنه‌ای را نشان می‌دهد که خود این مشاهده به دست داده است. پس، در این معنی، الکترون درآن واحد در چندین حالت حرکتی است؛ به آن مفهوم که در واقع در یك حالت ویژه است، اما حالتی که نه می‌شناسیم و نه می‌توانیم بشناسیم که چه حالتی است. به یاد داشته باشید که، هیچ چیزی این طور ساده باقی نمی‌ماند. اما این جا پای مطلوبی در زیر آبهای ژرفتر است. لحظه‌ای بر روی این جای پا توقف کنیم و در پی نشانه‌های آشنا، و شباهتهای روزمره، به اطراف بنگریم.

وضعیتی مشابه با این مطلب را در مبحث توارث می‌یابیم. برای ارائهٔ یك نمونهٔ ساده، یك مرغ سیاه و یك خروس سپید جفتگیری می‌کنند و یك جوجه به وجود می‌آید. پیش از آنکه جوجه از تخم درآید رنگ آن را نمی‌دانیم. اما ممکن است بگوییم که این جوجه از نوعی حالت ترکیبی رنگ است، بیست و پنج درصد سیاه، و بیست و پنج درصد سپید، و پنجاه درصد خاکستری، نوعی جوجهٔ آبی رنگ که اندلسی نامیده می‌شود.

این حرف یعنی چه؟ نه اینکه این جوجه در آن واحد به نحوی جامع همهٔ این چیزهاست. فقط یکی از آنهاست. اما، بافقدان اطلاعات کامل، باید خود را به احتمالات خشنود سازیم اگر یکصد جوجه از این تبار به‌وجود آیند، بنابر تجربیات گذشته، انتظار داریم که، در حدود بیست و پنج تای آنها سیاه، بیست و پنج تا سپید، و پنجاه تا اندلسی باشند. یك جوجه خاص دارای رنگ خاص است. این جوجه متناظر است با یك مشاهده، و حالت خود را از یك حالت ترکیبی به یك حالت مربوط به یك رنگ خاص تغییر می‌دهد.

این ایده که حالت ترکیبی یك فقدان اطلاعات را باز می‌نمایاند می‌تواند نمایانگر یك زیر دریایی شکاری بدون بهره‌گیری از رادار یا تجهیزات جهت‌یابی دیگر، باشد. هوا نوردی در حال مشاهدهٔ یك زیردریایی درست در همان وقتی که در حال فرو رفتن در آب است، مکان آن را می‌داند، اما نمی‌داند که این زیردریایی

چگونه حرکت می‌کند. بنابراین، از نظر او، زیردریایی در حالتی ترکیبی است که تمام حرکتهای ممکن در پیرامون نقطهٔ غوطه‌وری را دربر می‌گیرد.

می‌توانیم این شباهت آخری را بیشتر پی‌گیریم. زیردریایی، در هنگام فرو رفتن، خود را در یك جهت‌دوگانه در امواج فرو برده است. این زیردریایی به یك بستهٔ موج شرودینگر تبدیل شده است.

وقتی شرودینگر امواج الکترونی خود را در یك بستهٔ موجی تشکیل داد موفق شد مکان الکترون را به دست دهد. اما این بسته موج متشکل باقی نخواهد ماند. پخش و پهن می‌شود. چرا؟ زیرا، بنابر اصل هایزنبرگ، به محض آنکه شرودینگر مکان الکترون خود را به دست آورد اطلاعات در مورد حرکت آن را از دست داد. این‌همه‌به‌ایدهٔ بورن مبنی بر اینکه امواج شرودینگر امواج احتمال‌اند، وابسته است. زیرا اگر حرکت الکترون دانسته می‌شد، چند لحظه پس از اینکه جایگزیده می‌شد، در کجا آن را می‌شد یافت؟ به یك معنی، این الکترون مخصوصاً در هیچ جایی نبود. تقریباً می‌تواند هرجایی باشد، البته به احتمال فراوان جایی در نزدیکی همان مکان اصلی است. مکان آن اکنون چیزی بود بیشتر از یك احتمال سریع پخش شدن.بستهٔ موج احتمال آن پخش و پراکنده می‌شد.با گذشت زمان، بی‌خبری از مکان افزایش پیدا می‌کند. بستهٔ موج آن بیشتر پراکنده می‌شود.

این هم مورد زیردریایی است. وقتی در حال عمل فرو رفتن مشاهده می‌شود بستهٔ موج آن در ستیغ خود واقع است. اگر هواپیما به سرعت به این نقطه برسد می‌تواند بمبهای خود را با موفقیت زیاد بر سر آن فرو افکند. اما اگر این هواپیما تأخیر کند، شانس کامیابی در زدن گلوله کمتر وکمتر می‌شود، زیرا همچنانکه زمان می‌گذرد «مکان» زیردریایی همچون یك ناحیهٔ دایره‌ای همه جاگستر احتمال، پخش می‌شود، درست همان‌گونه که موجکهای اقیانوس از نقطهٔ فرو رفتن آن، پخش می‌شوند. بستهٔ موج زیردریایی، در اصل در ستیغ خود، همچنانکه این زمان گرانبها به پیش می‌رود، به سرعت پخش می‌شود.

باز هم به بسته‌های موج باز خواهیم گشت. ما هنوز هم با آنها کار زیادی نکرده‌ایم. اما جنبه‌ها و شباهتهای دیگری هم باید مورد توجه ما قرار گیرند؛ مانند بالا انداختن سکه. وقتی که شیر یا خط می‌کنیم، تا عملاً فرود نیاید نه شیر است و نه خط. در حالی که این سکه در هواست به سرعت می‌چرخد. اما اکنون فرض

می کنیم که به هیچوجه نمی دانیم بین بالا انداختن و فرود آمدن نهایی آن چه روی می دهد. فرض کنید جهان چنان ساخته شده باشد که هیچگونه مشاهده‌ای از حرکت واسطه‌ای امکان‌پذیر نباشد. فرض کنید آن اصل خود سرانهٔ خلاق طبیعت از چنین مشاهده‌ای ممانعت به عمل آورده باشد. آیا ما از بالا انداختن یك سکه چه نوع نظریه‌ای باید بپردازیم؟

مطمئناً یك چیز با اهمیت فوق‌العاده باید به‌طور ناگهانی ما را به خود آورد؛ سکه فقط می تواند شیر باشد یا خط، و نه چیز دیگری. تنها دو نتیجهٔ ممکن برای یك مشاهده وجود دارد. و ما به زودی خواهیم دیدکه برای بیان اینکه چه نتیجه‌ای به دست خواهد آمد، از پیش راهی نداریم. اگر بخواهیم از ناآگاهی خود نسبت به این موضوع به زبان فیزیك جدید دفاع کنیم، باید بگوییم که حالت این سکه ترکیبی از شیر و خط بوده است. از آنجا که یك رشتهٔ طولانی مشاهدات نشان می دهند که این سکه‌ها به همان تعداد شیر می آیند که خط، باید بگوییم که در این حالت ترکیبی این سکه پنجاه درصد احتمال وجود وضعیت خط را دارد. البته، به محض آنکه سکه روی میز به حالت سکون برسد، کاملاً به‌طور مشخصی خواهیم دانست که وضعیت آن از چه قرار است، یا خط یا شیر. این حالت از یك ترکیب به یك حالت خالص تغییر یافته است، و همان عمل مشاهده این حالت را تغییر داده است؛ همهٔ آن را می توانیم به زبان نمادین ریاضیی بیان کنیم.

فرض کنید ما اینك در حالتی هستیم که می توانیم ببینیم. پس باید تلاش کنیم که ماجرا را از لحاظ تصویری تصور کنیم. باید بکوشیم فرایند یا سازوکار میانه‌ای را به تصور آوریم. اگر واقعاً از ذکاوت برخوردار بودیم حتی باید تصور می کردیم که سکه در حال چرخش است. این تصویری رضایت بخش است، و مطمئناً با هیچیك از آثار شناخته شده‌ای که آن اصل خلاف طبیعت مشاهده کردن ما را مُجاز داشته است، تناقضی ندارد. تنها رنج و زحمت این است که راهی برای مشاهدهٔ خود چرخش واقعی نداریم. اما می توانستیم به یك نظریهٔ کوانتومی کوچك تکیه کنیم. چرا که می توانستیم توجه کنیم که انرژی به سکه داده می شود تا آن را به چرخش آورد. انرژی بابسامد همبسته است، و بسامد کاملاً می تواند همان آهنگ چرخش سکه باشد، هرچه انرژی بیشتر باشد آهنگ چرخش بیشتر است.

به اعتبار این تصویر در ذهنمان، ناگهان جرقه‌ای از الهام برافروخته خواهد

شد. چرا ما هرگز شاهدی عملی از این چرخش نیافتم؟ آشکار است که، به همین دلیل تنها وجه مشاهده به ما امکان می داد که اجازه دهیم این سکه روی میز قرار گیرد. بنابراین، عمل مشاهده به سکه یك تکان نامعین داد. حرکت سکه کاملاً آزاد بود؛ ما خودمان معلوم ساختیم که تنها دو وضعیت ممکن وجود دارد. فروافتادن سکه روی میز بود که یا شیر یا خط را پدید می آورد، نه چیزی بینابین آنها. اگر به آن اجازه می دادیم به سقوط خود ادامه دهد به چرخش خود ادامه می داد ـ البته، هر چند، پس از آن، اصل خلاف طبیعت به ما اجازه نمی داد به هیچ وجه آن را مشاهده کنیم.

اما به زودی باید پی ببریم که تمامی این مطالب تنها یك تصویر ذهنی است که در جهت احساس راحتی، طراحی شده است. یك چیز برتر از بقیه باقی مانده است که باید حفظ شود. همان خود اصل خلاف طبیعت برجای مانده است. چرخش قابل مشاهده نبود. تا آنجا که می دانیم، این چرخش واقعاً اتفاق نمی افتد. اگر چرخش اتفاق می افتاد، اصل خلاف طبیعت به‌طور مؤثری ما را از دیدن آن باز می داشت. اگر اصل خلاف طبیعت چیزی بیشتر از یك انطباق بود، و آن دوام و پایداری پلیدش مطمئناً نشان می داد که چیزی بسیار بنیانیتر و قویتر است، پس باید نسبت به وارد کردن حرکت چرخشیی که اصرار دارد از ما پنهان کند هوشیار باشیم، زیرا رویهمرفته شاید اصلاً چنین حرکتی وجود نداشته باشد. گرچه می توانیم توضیح دهیم چرا تکان مشاهده همیشه باید چرخش را بپوشاند، که به معنی این نیست که چرخش واقعاً وجود داشته است. معنی این بحث آن است که طرحی زیبا به رنگ سرخ و سبز برروی این سکه وجود داشته باشد، اما اتفاقاً و از بخت بد، نسبت به رنگ سرخ ـ سبز کور باشیم. تا وقتی که روشی آزمایشی دربارهٔ اصل خلاف طبیعت کشف نشده بود، این چرخش هم در تفکر علمی جایگاه معتبری نداشت. باید محتاط باشیم وگرنه گمراه می شویم. نظریه‌ای کاملاً مناسب داریم که تمام حقایق مشاهده شده را پوشش می دهد. پس چرا می خواهیم فراتر از اینها به پیش رویم؟ ما باید به این دیدگاه تیره بازگردیم، و در جهت تصویر یك حرکت چرخشی یا هر ساز و کار میانه‌ای از این دست، تلاش کنیم. باید به ایدهٔ خود دربارهٔ اینکه سکه در آنِ واحد در دو حالت مکانی باشد، بخشی شیر و بخشی خط، و به این ایده که این حالت با مشاهده تغییر می کند، باز گردیم.

طبیعتاً، ما با اکراه و افسوس قابل ملاحظه‌ای در تصویر ذهنی خود سکهٔ

چرخان را رها می‌کنیم. این تصویر اگر دوام می‌آورد، مفرح بود. شاید امید دیرپایی را می‌پرورانیم که البته تا ابد نمی‌پاید. اما چه کسی می‌داند که شاید شواهد قابل توجه علمی یك روزی این چرخش را برای دیدن همه رؤیت پذیر کند؟ تا فرارسیدن آن روز فرضی، همهٔ این فکرها یك بوالهوسی است ـ شاید هم حتی یك بوالهوسی خطرناك. چرا که موضوع خنده‌آور آن است که ما در واقع نمی‌دانیم آیا این سکه اصلاً می‌چرخد یا خیر، چرا که این نظریه تنها بر شالودهٔ نتایج دانسته استوار بود. اما، تصویر ما از سکهٔ چرخان آشکارا یك حدس محض است.

آیا هنوز هم می‌خواهیم به چرخش بپردازیم؟ آیا فکر می‌کنیم توضیح ممکن دیگری که این معنی را القاء کند وجود ندارد؟ آیا چنین می‌نماید که به یك موشکافی فلسفی دست زده‌ایم تا وانمود کنیم این چرخیدن ممکن است توهم باشد؟ پس به یك اتفاق پیش پاافتاده فکر کنیم که نمی‌توانیم ادعا کنیم با آن آشنا نیستیم. وقتی یك سیگنال اشغال از یك تلفن عمومی دریافت می‌کنیم و سکهٔ نیکلی ما برمی‌گردد، آیا واقعاً فکر می‌کنیم در تمام مدتی که سکه در آن محفظه بوده در حال چرخش بوده است؟ می‌توانیم نظریه‌ای کاملاً هنرمندانه و استادانه ارائه دهیم که چرخش را با صدای زنگی که از گیرنده می‌شنویم ارتباط دهد.این نظریه می‌تواند این امر را به گونه‌ای رضایت بخش توجیه کند که وقتی سکه از آن سوراخ تلفن بیرون می‌آید، زنگ زدن نیز قطع می‌شود. معهذا، باید یك چیز اشتباهی در این میانه وجود داشته باشد. از کجا می‌دانیم که چرا این همان سکه خودمان بود که برگشت داده شد؟

شاید سکه‌هایی در داخل این تلفن موجود باشند که وقتی گوشی برداشته می‌شود یکی از آنها فرو می‌افتد. ناچاریم برای اینکه به طور جهشی به نتایجی برسیم دقت کافی به خرج دهیم. اگرچه ممکن است این نتایج کاملاً بدیهی باشند، اما امکان دارد غلط هم باشند. این چرخش رویهمرفته حدس محض بود.

باید در پرتو این مطلب به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ نگاه کنیم. اگرچه این اصل با گذاشتن گناه دیدگاههای شخصی آزمایشگر برگردن عدم مهارت اجتناب ناپذیر او، این ذره را یك ذرهٔ کاملاً شناخته شده وانمود می‌کند، اما این اصل اعتبار ایدهٔ قدیمی را هم به ذره باز نمی‌گرداند. برعکس، اینکه بی‌مهارتی اجتناب ناپذیر و نامشخص است، نشانگر همه‌جایی بودن و قدرت آن روح خلاف طبیعت است که

کوششهای ما را برای مشاهدهٔ صفات کامل ذره تداوم می بخشد، و این در صورتی است که ذرهٔ شناخته نشده واقعاً وجود داشته باشد، و بر ادعاهای قدیمیش سایهٔ شك بیندازد. بیشتر آشفتگی ذهنی می تواند ناشی از عدم توجه به این موضوع باشد.

وقت آن فرارسیده است که آن جای پای سنگی راحتمان را ترك کنیم. اکنون باید یك مطلب کم اهمیت آخری را نیز به تدریج اضافه کنیم. وقتی می گوییم الکترونی در یك حالت ترکیبی داریم، که به طور همزمان به شمال و شرق می رود، به مثابه اعتراف ساده‌ای به ناآگاهی خودمان است. حرف ما حاکی از این معنی است که الکترون درست به شمال می رود، یا اینکه درست به شرق، امّا تمام آنچه مطمئناً می دانیم این است که احتمالی از رفتن آن به شمال و احتمالی از رفتن آن به شرق وجود دارد. این احتمالات را از روی آزمایش واحدی که قبلاً چندین بار انجام شده است، می دانیم. امّا بدون توجه به اینکه کار ما با چه دقتی انجام می شود، این آزمایشها یك پاسخ بدون الهام به دست نمی دهند؛ بلکه تنها این دو احتمال را می دهند. امّا می خواهیم بگوییم یك الکترون تك فقط یکی از این دو حرکت را انجام می دهد؛ هیچ راهی نداریم که بگوییم کدامیك بدون آن دیگری، یعنی آزمایش متفاوت و بنابراین تغییر یافتن حالت، انجام می شود.

افسوس، این کار انجام نخواهد شد.ناگزیریم آن را تماماً خراب کنیم. ما نمی توانیم وهم بی دردسر خود را در مقابل فشار حقایق آزمایشی حفظ کنیم، زیرا هنوز هم نبرد موج ـ ذره که باید فیصله پیدا کند وجود دارد.

یکبار دیگر به مهمات اساسی موج و ذره نگاهی بیندازیم. آیا می خواهیم ثابت کنیم الکترون ذره است؟ بسیار خوب بگذاریم به یك پردهٔ فلوئورسان برخورد کند و سوسوزنی ضعیف آن را مشاهده کنیم؛ یا رد باریکش را در یك اتاقك ابر نظاره کنیم؛ یا بگذاریم بر یك صفحهٔ عکاسی فرود آید و لکه‌های کوچکی را که هنگام ظهور فیلم پدیدار شوند یادداشت کنیم. در این صورت یك ذره داریم.

آیا می خواهیم ثابت کنیم که الکترون یك موج است؟ بسیار خوب پرده‌ای را می آویزیم که دو سوراخ نزدیك هم برروی آن تعبیه شده است، بگذاریم جریان الکترونها که از یك چشمهٔ منفرد بیرون می آید از آنها بگذرند، و با غرور، و نه آمیخته با از خود رضایتی تنگ نظرانه، به نقش تداخل مشخص برروی صفحهٔ عکاسی بر بالای پرده، اشاره کنیم. اینك، موج داریم.

برای اینکه دقت بیشتری کرده باشیم، این دو نمایش بالا را چنان ترکیب می‌کنیم که درعین حالی که ثابت می‌کنیم الکترون موج است همچنین ثابت می‌کنیم که ذره هم هست. این امر چیز با ارزشی را به ما می‌دهد که واقعاً به فکرکردنش می‌ارزد. تمام آنچه باید انجام دهیم این است که الکترونها را از یك چشمهٔ واحد و از طریق دوسوراخ روی پرده بفرستیم و برایشان این امکان را فراهم آوریم که بر روی یك پردهٔ سوسوزنی در سمت دیگر فرود آیند.آنگاه این سوسوزنیها نشان می‌دهند که ما ذره داریم، در حالی که نقشهای تداخل نشانگر امواجند؛ وضعیتی کاملاً عجیب و غریب پیش آمده است.

امّا چیزی بدگمانی ما را برمی‌انگیزد. بیشتر به نظر می‌رسد این امواج از دسته‌های الکترون ناشی می‌شوند تا از الکترونهای منفرد. نگذاریم دسته‌های الکترون ما را آشفته و گیج کنند. به دقت نظاره کنیم که یك تك الکترون چکار می‌کند. اگر این الکترون سرانجام یك سوسوزنی پدید می‌آورد مطمئناً ذره است. پس چگونه می‌تواند یك موج هم باشد؟ به علت آنکه نقش تداخل پدید آورده است؟ هر تك سوسوزنی یك نقش تداخل نیست. نقش تداخل را گروه انبوهی سوسوزنی پدید می‌آورند. این پدیده اثری است مربوط به کثرت. سوسوزنیهای منفرد در برخی نقاط روی هم انباشته می‌شوند و در جاهای دیگر این کار انجام نمی‌شود، و همهٔ مطلب همین است. وقتی که توپخانه یك دیوار آتش درست می‌کند، این نقش در یك تك انفجار گلوله قابل تشخیص نیست، بلکه تنها در گروهی از آنها تشخیص دادنی است. ما به سهولت می‌توانیم دیواری برپا داریم که نمود یك نقش تداخل را به ما می‌دهد؛ با این حال این مطلب به آن معنی نیست که گلوله‌یك موج بوده‌است.وقتی‌که نسیمی‌از روی گندمزاری می‌گذرد، همهٔ ما امواجی را که در این مزرعه پدید می‌آید دیده‌ایم، با این وجود گندم موج نیست. دست کم ما مسئلهٔ موج و ذره را حل کرده‌ایم. الکترون رویهمرفته ذره است، و فوتون نیز. فوتون تنها هنگامی شبیه موج به نظر می‌رسد که در دسته‌های عظیمی مشاهده شود.

امّا این طور هم نیست. ما فقط خودمان را گول می‌زنیم. هنوز هم تلاش می‌کنیم این نتیجهٔ سرسخت را نجات دهیم. هم اکنون در جهتی خطا حرکت می‌کنیم، و در خطر ارتکاب اشتباه مهلك کم برآورد کردن ظرافت مسئلهٔ خود هستیم. این مسئله از آن نوع ساده نیست، وگرنه باید مدتها پیش حل شده باشد. در

حقیقت، هنگامی که یك گروه الکترون داشته باشیم نقش تداخل آشکار است. امّا باید دلیلی هم برای به وجود آمدن نقش تداخل وجود داشته باشد. و این دلیل باید در بطن هر تك الکترونی نهفته باشد. این نقش به نحوی در بطن هر تك الکترون نهفته است. اگر گلوله‌های توپ را، در عوض تعداد زیادی در یك زمان، یکی پس از دیگری شلیك کنیم، هنوز هم می توانیم همان نقش گودالهای حاصل از انفجار توپ را، مانند پیش به وجود آوریم. این امر به علت آن است که یك عامل انسانی فریزرا هدایت می کند. اگر الکترونهایمان را خیلی به ندرت به بیرون بفرستیم و به سوسوزنیهای انفرادی آنها توجه کنیم، در حالی که تك تك فرود می آیند، همچنین آنها را در حالی خواهیم یافت که هنوز هم با نقش تداخل ویژه‌ای منطبق اند، اما درك این مطلب از درك نقش توپخانه بسیار مشکلتر است، زیرا وسیلهٔ خارجی آشکاری وجود ندارد که شلیك کنندهٔ الکترون را مطابق یك نقش از پیش تصور شده، هدایت کند. گرچه به نظر می‌رسد هر سوسوزنی تصادفی به وجود می آید، در این تصادفی بودن معماریی وجود دارد، زیرا این سوسوزنیها به تدریج بنا می شوند تا نقش تداخل را مشخص کنند.

الکترون این کار را چگونه انجام می دهد؟ کدام سوراخ در پردهٔ الکترون ویژه‌ای را عبور می داد؟ نقش تداخل یك نقش دو سوراخی است، کاملاً متفاوت با یك نقش تك سوراخی. راه گریزی وجود ندارد. نتیجهٔ سرسخت و هولناك، اجتناب ناپذیر است. چه بخواهیم چه نخواهیم، اگر یك تك الکترون به نحوی نقش تداخل دو سوراخه را در خودش جای دهد، آن تك الکترون باید از هردو سوراخ عبور کرده باشد؛ و پس از گذشتن از هردو سوراخ باید با خودش تداخل کرده باشد! این نتیجه‌گیری انقلابی و تقریباً غیر قابل تحمل است که آزمایش بر ما تحمیل می کند.

آیا بزرگتر از آن است که هضم شود؟ باورنکردنی است؟ آیا برخلاف عقل سلیم است؟ شاید. با این وجود بر شالودهٔ قویترین شواهد علمی استوار است.

صبر کنید! فریبش خواهیم داد. آن را وادار می کنیم به نادرستی خود اعتراف کند. یك وسیلهٔ ثبّات در هر سوراخ پرده قرار می دهیم. اگر یك تك الکترون از چشمهٔ خود بیرون بفرستیم و این الکترون از پرده بگذرد مطمئناً باید آن را در هنگام عبور از یکی از سوراخها و نه از هردو سوراخ آشکارسازی کنیم، زیرا می دانیم که ما

هرگز کسری از یك الکترون را مشاهده نمی‌کنیم. به این طریق مشخصاً اثبات می‌کنیم الکترون تنها از یکی از این سوراخها عبور کرده است و حتی سوراخی را که الکترون از آن گذشته نام‌گذاری خواهیم کرد. ما از آنهایی نیستیم که به این آسانی با نظریه‌های ناممکن فریفته شویم. بچه نیستیم که به قصه‌های جن و پری باور آوریم. این مهملات دیگر کافی است.

بله. حقیقت دارد که می‌توانیم به این طریق کشف کنیم الکترون از کدام سوراخ گذشته است، و حتی می‌توانیم نشان دهیم که این الکترون تنها از یك سوراخ عبور کرده و نه از هردو آنها. امّا این یکی آزمایشی کاملاً متفاوت خواهد بود. این موضوع با آنچه در بالا گفتیم تناقضی ندارد، زیرا ما دیگر برآن نیستیم که الکترونها را از پرده‌ای با دو سوراخ ساده واقع بر آن، بگذرانیم. آن روح خلاف طبیعت همیشه در کار است. خواب آرام ندارد. بگذارید کار فریبندهٔ آن را در همین جا نظاره کنیم. فرض کنید که فهمیده‌ایم الکترون از سوراخ پایینی عبور کرده است. از آنجا که ابزار ثبّات در آن سوراخ را الکترون متأثر می‌کند، این ابزار باید بر الکترون نیز تأثیر گذاشته باشد، تأثیر دقیق روی الکترون نامعین می‌شود. اگر هر الکترون در هنگام گذشتن از پرده به طور متفاوت و به طور دلخواه تحت تأثیر قرار گیرد. برای به دست آوردن یك نقش تداخل با یك گروه الکترون چه امیدی وجود دارد؟ اگر اکنون نمی‌توانیم یك نقش تداخل دو سوراخی ایجاد کنیم، پس حالا چه نیازی وجود دارد که ادعا کنیم هر الکترون از هردو سوراخ گذشته است؟ وضعیت نسبت به پیش کاملاً فرق کرده است. با بسته شدن یك در تله، ما ناگزیر شده‌ایم در دیگری را بگشایم. همان طرح و تدبیری که نشان می‌دهد هیچ تك الکترونی از هردو سوراخ و در آن واحد نگذشته است، خودش نقش تداخل دو سوراخی را نابود می‌کند، و از این طریق امکان گریز الکترون را از تله فراهم می‌آورد.

به این موضوع از دیدگاه دیگری بنگریم. وقتی که هردو سوراخ باز و بدون مانع هستند، هر الکترونی که پرده را می‌پیماید باید در یك حالت ترکیبی حرکت باشد، که در این حال در آن واحد از دو سوراخ عبور می‌کند. این دو حرکت با یکدیگر تداخل کرده و نقشهای تداخل پدید می‌آورند. وقتی ابزار ثبّات خود را داخل می‌کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟ هر الکترون که اکنون پرده را می‌پیماید در یك حالت خالص حرکت ثابت می‌شود، که از یك سوراخ عبور می‌کند یا اینکه از

سوراخ دیگر. دیگر نمی توانیم انتظار یك نقش تداخل دو سوراخی را داشته باشیم، زیرا یك مشاهدهٔ اضافی انجام داده‌ایم و بنابراین حالت را چنان تغییر داده‌ایم که دیگر به دو سوراخ وابسته نیست.

آیا اینها همه دشوار و دلسرد کننده‌اند؟ آیا ایدهٔ وجود یك الکترون در آن واحد در چندین مکان یا با چندین حالت حرکت در آن واحد، ما را متوقف می کند؟ آیا این موضوع حساسیتهای ما را به طغیان و جوشش وامی دارد؟ ما خیلی دقیق بوده‌ایم. ما به شدت به تصویر ذره تکیه کرده‌ایم. تصور نکنیم که دانشمندان این ایده‌های جدید را با فریادهای شادی پذیرا شده‌اند. آنها تا آنجا که می توانسته‌اند با این ایده‌ها جنگیده‌اند و در برابر آن مقاومت کرده‌اند، تمام دامهای فرضیه‌های بدیل را در تلاشهای تباه ابداع کرده‌اند تا از این ایده‌ها بگریزند. امّا در ماجرای نور و از همان سال ۱۹۰۵، و حتی زودتر، پارادوکسهای خیره‌سری وجود داشتند، و تا ظهور مکانیك کوانتومی نوین هیچ کس جسارت یا ادراك توضیح و حل آنها را نداشت. پذیرش ایده‌های نو بسیار دشوار است زیرا ما هنوز هم بی اراده تلاش می کنیم که، علیرغم اصل عدم قطعیت، آنها را برحسب همان ذرهٔ منسوخ و قدیمی به تصور آوریم. ما هنوز هم از متصور ساختن یك الکترون همچون چیزی که حرکت داردو می تواند در مکانی خاص نباشد، و یا اینکه دارای مکان معینی است در حالیکه چیزی در حال حرکت یا سکون نیست، پرهیز می کنیم. هنوز هم می کوشیم عدم مهارت آزمایشگر بی گناه را به خاطر این مشخصهٔ بنیادی الکترون، یا فوتون، محکوم کنیم.

با همهٔ اینها ما جا پای سنگی پیشین خود را ترك نکرده‌ایم، بلکه آن را بر شالوده‌ای برای پیشرفت بیشتر بنا کرده‌ایم. هنوز هم می توانیم حالت ترکیبی حرکت را اعتراف بی توجهی خود به نتیجهٔ دقیق یك مشاهده بدانیم، و یا آن را یکی از بی شمار احتمالات گوناگون در نظر آوریم. نقشهای تداخل، یعنی تجسم این احتمالات، هنوز هم فقط به عنوان اثرات ازدحام تشخیص دادنی اند. این تصویر ذهنی است که تغییر یافته است. ما سرانجام عدم امکان محض تجسم فرایندهای اتمی را مگر به صورت تصویرهای بسیار عجیب و غریب، فهمیدیم. اگر با تصاویر ذهنیمان به مراقبهٔ چیزی بپردازیم که اصل عدم قطعیت بر آن پرده استتار افکنده است، آنگاه خواهیم دید که این تصاویر ذهنی به چه شکلهای خیال انگیزی می مانند.

بور با قطعیت فراوان و در غایت مهارت این چیزها را باز شناخت. او کسی بود که سرانجام تعارض ذره ـ موج را حل کرد، و برای نخستین بار از دوران نوین و شگفت انگیزی در علم طرحی با وضوح تمام ترسیم کرد. و هم او بود که دید ذره و موج جز دو جنبه از یك چیز نیستند. این دو با هم سر دشمنی ندارند. تمام ستیز آنها ساختگی و دروغ بوده است. کشمکش مُزمن آنها یك فریب طولانی بوده است، نمونه‌ای عالی از قدرت تبلیغ کلاسیك. اگر موج قطعه‌ای از یك قلمرو را تسخیر می کرد، ذره هرگز در پس گرفتن آن تلاش نمی کرد، امّا ناحیهٔ جدیدی را برای خودش می گشود. اگر موج تداخل را توضیح می داد، ذره به مخالفتی جدی دست نمی یازید بلکه خود را با تأکید ادعایش بر اثر فوتو الکتریك تسلی می داد، ادعایی که هرگز مورد منازعهٔ موج واقع نشده است. این نوع کشمکش کاذب عجیبترین کشمکش قابل تصور بوده است، امّا با چنان جار و جنجالهای کلاسیکی جنگجویانه‌ای جریان داشته است که تأثیرات کاذب آن چون نیروی وحشتناك و واقعی بوده است. مثلاً، هنگامی که ابزار آشکار ساز را در سوراخهای پرده قرار دادیم چه اتفاقی افتاد؟ آیا این سوراخها ذره و موج را وادار به نبردی حقیقی می کردند؟ خیر. به هیچوجه. ذره مؤدبانه راهی یافت برای آنکه موج بدون دست پاچگی از دام بگریزد.

هنگامی که سرانجام دانشمندان بر ماهیت راستین این چیزهای عجیب و غریب گمان بردند حیله‌های شیطانیتر، و سخت‌تر می اندیشیدند تا جنگ ذره و موج را بنیاد نهند. امّا بور و دیگران قادر بودند که به طور مفصل ثابت کنند آن روح آرام خلاف طبیعت، یعنی اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، همیشه گوش به زنگ بوده تا حتی از آغاز شدن نزاع هم جلوگیری کند. اگر بکوشیم موج و ذره را همچون دو موجود جدا از هم به حساب آوریم، باید به آنها، نه به عنوان دشمنانی کینه‌ورز، بلکه به عنوان کشتی گیران حرفه‌ای که قدرت خود را به نمایش می گذارند، فکر کرد. امّا آنها واقعاً از هم جدا نیستند. آنها تصویرهایی بدیل اند، و پاره‌ای از آنها هم عیناً خود همان چیز هستند.

این جنبهٔ مکمل ذره و موج یکی از چهره‌های محوری فیزیك جدید است. جنبه‌ای گریزناپذیر؛ بخشی از همان کالبد مکانیك کوانتومی است. قواعد زبان علامت آن را ایجاب می کنند، و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ توجیهی تصویری

عرضه می دارد. در چند صفحهٔ پیش گفتیم که بسته‌های موج شرودینگر چیزی بیشتر از یك شباهت سطحی حالتهای دیراك نیستند. بیش از هرچیز، این بور بود که آشکار ساخت آنها بیشتر از یك شباهت‌اند. در واقع، آنها یك المثنای دقیق‌اند، امّا بیشتر به زبان امواج بیان می شوند تا به زبان ذرات. می توان به سهولت از آنها رابطهٔ عدم قطعیت اندازه حرکت (تکانه) و مکان، یا رابطهٔ انرژی و زمان را استنتاج کرد. در واقع ما قبلاً تا همین حد به مطلب اشاره کرده‌ایم، زیرا در حالی که از عدم قطعیت اندازهٔ حرکت و مکان، از ذره بحث کرده‌ایم، آیا با اشاره به عدم قطعیت انرژی و زمان از دیدگاه موج به ریاکاری و دورویی دست نمی زنیم؟ درست همان طوری که نظریه‌های شرودینگر و هایزنبرگ در نظریهٔ واحد دیراك یکی می شوند، به همان گونه هم موج و ذره در یك کل خود سازگار یکی می شوند؛ موجودی که ادینگتون به طور مناسبی نام «موج ذره» برای آن پیشنهاد کرد:

دختر کوچکی بود باطرهٔ گیسوان کوچك
درست در میانهٔ پیشانیش.
وقتی که خوب بود، خیلی خیلی خوب بود
امّا وقتی دختر بدی می شد نفرت انگیز بود.

الکترون، مانند این دختر کوچك باطرهٔ گیسو، گاهی یك بعد ماهیت خود را نشان می دهد و گاهی بعد دیگر را. هنوز هم با وجود همهٔ اینها این یك الکترون است. و یك الکترون کاملاً معمولی و سالم. الکترون اگر شخصیتی کاملاً رشد یافته از خود بروز نمی داد، الکترونی نبود که گاهی شبیه موج است و گاهی شبیه ذره. اگر نور قرمز بر صفحات این کتاب بتابد، کاغذ قرمز درخشانی را نمایان می کند، امّا اگر این نور تابنده آبی باشد، قرمز درخشان نیز به آبی تغییر رنگ می دهد. در اینجا هیچ تناقضی وجود ندارد. بین قرمزی اولیهٔ کاغذ و آبی بودن بعدی آن همانقدر تناقض وجود دارد که بین رنگهای گوناگون غروب و درخشش نیمروز. این شیوهٔ مشاهدهٔ ماست که تغییر یافته است. و همین تغییر از نور قرمز به آبی پی گیری ما را از مشاهدهٔ کاغذ با رنگ قرمز باز می دارد. اینکه آیا ما الکترون را با جنبهٔ موجی یا ذره‌ای ان بیابیم، به همین ترتیب، و بدون تناقض، به شیوه‌ای که آن را مشاهده می کنیم وابسته است. درست همانگونه که می توانیم با فراهم آوردن امکان خودنمایی و درخشیدن دخترك کوچك باطرهٔ گیسویش، او را خیلی خیلی خوش خلق کنیم، یا از

راه تداخل خلق او را تنگ و زشتش کنیم ؛ در نتیجهٔ تغییری که در او پدید می آید چنان زیاد است که به سختی می توان تشخیص داد که همان دخترك سابق باشد. به همین ترتیب می توانیم با فراهم آوردن امکان سوسوزنی الکترون آن را در وجه ذره‌ای قرار دهیم یا با جستجو در پی تداخل آن را در وجه موجی قرار دهیم. الکترون در خلال تمام این جریان، موجی یا ذره‌ای، یك الکترون باقی می ماند. الکترون مانند فوتون، موج ذره باقی می ماند.

«پدر، الکترون اینجاست یا آنجاست؟»

«بله.»

«پدر موج است یا ذره؟»

«بله.»

رویهمرفته، ما نسبت به پرسشگر کوچکمان تا چه حد بی ریا و روراست بوده‌ایم! ما نیز به نوبهٔ خود برای آنکه ببینیم او این درس را تا چه میزانی فرا گرفته است، می توانیم از او بپرسیم:

«حوری دریایی زن است یا ماهی؟»

او دریافتن پاسخ مناسب قطعاً مشکلی نخواهد داشت.

فصل ۱۴

چشم انداز نوین علم

اکنون تارهای گسیختهٔ افکارمان را بار دیگر به دست گیریم تا ببینیم هنگامی که این رشته‌های گسیخته درهم تنیده شوند، چه نقشی تشکیل می دهند.

چنین به نظر می رسد که ما به یك دنیای شبح گون و وهم آور در زیر دنیای فضا و زمان خودمان نظر می کنیم؛ دنیایی عجیب و مرموز که به نحوی بر ما حاکم است. قوانین آن با تعبیر ریاضی دقیق اند، و ظاهراً رویدادهای آن با علیت دقیقی بروز می کنند.

برای کاویدن رمزهای این دنیا آزمایشهایی می کنیم. امّا آزمایشها ابزار غیر دقیق و دور از ظرافتی اند، که عدم قطعیت مخربی که علیت را نابود می کند، بر آن تأثیر می نهد. و به علت آنکه تصویرهای ذهنی ما نیز غیر دقیق شکل می گیرند، نمی توانیم امیدوار باشیم تصویرهای ذهنیی در فضا و زمان از آنچه به داخل این دنیای ژرفتر نفوذ می کند، بسازیم. فقط ریاضیات محض شاید شبیه و همانندی برای آن ترسیم کند.

با عدم قطعیتی که آزمایش را خراب و علیت را نابود می کند، همه‌چیز از دست رفته می نماید. باید حیران باشیم که علم معقول چگونه به وجود می آید. امّا اگرچه جزئیات کارهای عدم قطعیت از ما پنهان است، در آن یکنواختی حیرت آوری

می یابیم. علیرغم عدم قطعیت گریزناپذیر آزمایش، اثری مشخص و موثق از دقت و قطعیت می یابیم. در مقایسه با قطعیتی که علم کلاسیك در جزئیات هم مدعی آن بود، این دقت چندان هم قطعی نیست. امّا، با همهٔ اینها، دقت گرانبهایی است که بتوان علم قانون طبیعی را بر شالودهٔ آن بنا کرد.

نفس این دقت به نوعی پارادوکس می ماند، چرا که دقتی است که در احتمالات ریشه دارد؛ در واقع، دقتی از احتمالات موج مانند و دخالت کننده. امّا احتمالات چنانچه تنها بر تعداد زیاد اعمال شوند، چیزهایی بسیار و مؤثرند. ببینیم تا چه حد می توانیم بر این احتمالات تکیه کنیم.

در بازی شیرو خط، نمی توان نتیجه را پیشگویی کرد، چرا که نتیجه کاملاً تصادفی است. با این وجود کاملاً هم نامعین نیست. می دانیم که نتیجه باید تنها یکی از دو احتمال باشد. و حتی مهمتر از آن، اگر ما ده‌هزار بار شیرو خط کنیم می دانیم که می توان با اطمینان پیشگویی کرد که در حدود نصف آن شیر بیاید. البته ممکن است ما یك بار در یك مدت طولانی دچار خطا شویم. در چنین پیشگویی به یك خطرورزی کوچك هم دست می زنیم. امّا بیایید با نتیجهٔ کار منصفانه روبرو شویم، در این صورت می بینیم که خیلی بیش از وقتی که خودمان کاملاً انتزاعی به قطعیت احتمالات فکر کنیم، به آنها بها داده‌ایم. اگر کسی پیشنهاد پرداخت دو دلار به ازای آمدن هر شیر را به ما می کرد به شرط آنکه به ازای آمدن هر خط ما یك دلار به او بپردازیم، آیا در پذیرفتن پیشنهاد او درنگ می کردیم؟ اگر در این امر تردیدی روا می داشتیم، آیا علتش این بود که نسبت به این احتمالات نامطمئن بوده‌ایم؟ برعکس، علت آن می تواند این باشد که جاذبهٔ این پیشنهاد چنان زیاد است که گمان می بریم کاسه‌ای زیر نیم کاسه است. سورهای قمارخانه‌های رولت بر احتمالات متکی است، به این شانس اعتماد می کند که، در دراز مدت، صفر یا دو صفر به همان فراوانی اعداد دیگر خواهد آمد و درصدی پیوسته را از کار برد و باختها برای آنها تضمین خواهد کرد. گاهی بخت از آنها روی برمی تابد و شامگاه به ورشکستگی می رسند. امّا این به آن علت است که وقتی تنها چند درصد چرخش اجرا می شود، هنوز هم شانس زیاد قطعی نیست. شرکتهای بیمه نیز بر شالودهٔ احتمالات استوارند، امّا با اعداد بسیار بزرگتری سروکار دارند، کسی هرگز نشنیده است که آنها ورشکسته شوند. آنها با شانس روزگار می گذرانند، زیرا وقتی بتوان

احتمالات دقیق را یافت، شانس، در دراز مدت، به یقین قطعی تبدیل می شود. حتی دانش کلاسیك با مهارت و موفقیت تابناکی نظریهٔ جنبشی گازها را ظاهراً بر پایهٔ ریگهای روان احتمال، بنا کرد.

ما در دنیای نوین اتم هم احتمالات دقیق و هم اعداد غول آسا را می یابیم، احتمالاتی که از قوانین ریاضی دقیقی پیروی می کنند، و اعداد بزرگ و باورنکردنی که در قیاس با آنها کثرت افرادیْ که بیمه می شوند ناچیز است. دانشمندان وزن یك تك الکترون را تعیین کرده‌اند. آیا فکر می کنید که وزن یك میلیون الکترون به اندازهٔ وزن یك پَر باشد؟ یك میلیون تعداد زیادی نیست. حتی وزن یك میلیارد الکترون هم به وزن یك پَر نمی رسد. بسیار خوب، پس مطمئناً یك میلیون میلیارد تعدادی کافی است. خیر حتی وزن یك میلیون میلیارد الکترون هم به وزن یك پر نمی رسد. حتی یك میلیارد میلیارد، میلیارد هم تعدادی کافی نیست. حتی از وزن یك میلیارد میلیارد میلیارد آنها هم نمی توانیم با مفاهیم و اصطلاحات روزمره سخن گوییم. مکانیك کوانتومی قوانین قدرتمند و دقیقی حاکم بر احتمالات کشف کرده است، با همین اعدادی که هم اکنون ذکر کردیم است که علم بر موانع خود در راه عدم قطعیت اساسی چیره می شود. به اعتبار همین وسایل است که علم جسورانه پیشگویی می کند. اگرچه اکنون فروتنانه به ناتوانی خودش در پیشگویی رفتار دقیق الکترونها، یا فوتونهای منفرد، یا دیگر موجودات بنیادی اعتراف می کند، هنوز هم می تواند با اطمینان شگرفی بگوید که چنین اکثریت عظیمی از آنها دقیقاً چگونه باید رفتار کند.

امّا برای این دقت فوق‌العاده ما فقط در محدودهٔ اینکه بشر هستیم توانایی داریم، تا در نخستین وارسی فروریختگی قطعیت در علم بنیادی، چنانچه با اشتیاق به پشت سر و به روزهای کلاسیك قدیمی مطلوب بنگریم که امواج امواج بودند و ذرات ذرات، آنگاه که عوامل دخیل در کار طبیعت می توانستند به سادگی به تجسم در آیند و آینده در هر تفصیل منفردی، دست کم در نظریه، قابل پیشگویی بود. امّا روزهای مطلوب متعلق به گذشته مانند روزهای خوشی نیستند که احساسات حاکی از دلتنگی برای وطن و پس نگریهای گلرنگ و رنگارنگ آنها را در نظر ما خوش مجسم می کنند. تناقضهای بسیار زیادی حل نشده جلوه می کردند. حقایق کاملاً تصدیق شدهٔ بسیاری نقش نابودسازی ادعاهای آنها را بازی می کردند. آن روزها جز روزهای کودکی علم ایام دیگری نبودند. و به همین ترتیب که به کودکی نمی توان

بازگشت، برای اینها هم بازگشتی وجود ندارد.

اگر برآنیم که داستانمان را به درستی تکمیل کنیم، نمی توانیم در دنیایی که هم اکنون توضیح دادیم متوقف شویم. برای فرونشاندن احساس غربت، دنیای قانون علّی را تصویر کردیم که در زیر دنیای فضا و زمان ما پنهان است. بنابراین، در حالی که دانشمندان مهمی احساس کرده‌اند که چنین دنیایی باید وجود داشته باشد، خیلیها هم، در حالیکه خاطرنشان می کنند این جهان نمودپذیر نیست، آن را همچون خرده‌ای از تصوف می نگرند که بیشتر به خاطر راحتی به دنیای آنها پای نهاده تا به خاطر آنکه نقش یك منطق بی روح را بازی کند.

تشخیص این امر که علم کجا پایان می گیرد و تصوف از کجا آغاز می شود مشکل است. به محض آنکه شروع به پرداختن حتی ابتداییترین نظریه‌ها بکنیم، به در افتادن در فلسفهٔ ماوراءالطبیعه متهم می شویم. با این وجود، نظریه‌ها، هرچند موقتی و سردستی، درست همان نیروی محرکهٔ پیشرفت علمی اند. ما به آسانی نمی توانیم از فلسفهٔ ماوراءالطبیعه بگریزیم، اگرچه نمی توانیم به طور کامل هم تسلیم آن شویم، و نیز نمی توانیم گوشه‌ای بسیار جزئی از آن بردامن خود داشته باشیم. همیشه هم تمیز فلسفهٔ ماوراءالطبیعه خوب از بد، امکان‌پذیر نیست. زیرا ممکن است یك ماوراءالطبیعی «بد» به پیشرفت منجر شود، در حالی که خوب آن، از پیشرفت جلوگیری کند. وقتی کریستف کلمب سفر دریایی تاریخی خود را آغاز کرد بر این باور بود که در مسیر خود به سوی باختر و به ژاپن روان است. حتی وقتی که به خشکی رسید فکر می کرد آنجا بخشی از آسیاست؛ زنده هم نماند تا عکس این پندار، یعنی واقعیت را دریابد. آیا کریستف کلمب که دست به یك سفر دریایی مخاطره‌آمیز زده بود، فاصلهٔ حقیقی ژاپن را از سوی باختر می دانسته است؟ خود مکانیك کوانتومی تا حدودی از کشف و شهودهای شگفت کسانی چون ماکسول و بور و دوبروی ناشی شده است. فیزیکدانها، وقتی از معنی مکانیك کوانتومی حرف می زنند، مطابق ذائقه‌های فردی خود کم و بیش به عرفان و تصوف تن می سپارند. درست به همان ترتیب که هنرمندان گوناگون به طور غریزی نمایشهای مختلفی از الگوی یکسانی را ارائه می دهند، دانشمندان نیز با شخصیتهای مختلف خود را مُجاز می دانند تا تفسیرهای خود را از مکانیك کوانتومی ارائه دهند. سرگذشت ما کامل نخواهد بود اگر از مفهوم خشك مکانیك کوانتومی که در بالا به آن اشاره شده و

نیز از مقایسهٔ خود با سکه و اصل خلاف طبیعت سخن نگوییم، چرا که این دیدگاهی است که از جانب بسیاری از فیزیکدانان ارائه شده است.

این فیزیکدانان با قواعد زبان علائم، دقت فوق‌العادهٔ احتمالات، و قوانین شگفت و موج مانندی که این قواعد از آنها پیروی می‌کنند، اقناع می‌شوند. آنها عدم امکان پیروی عوامل فعال جزء به جزء از یك عدم قطعیت را که از طریق آن چنین دقت سخاوتمندانه‌ای و چنین قانونی آنقدر بیان ناپذیر به دست می‌آید، تشخیص می‌دهند. آنان رویدادهایی همچون تلاشهای عبث در جهت بنانهادن مدلهای اتر، و باورهای سادهٔ پیشین خودشان را در ارتباط با اندازهٔ حرکت و مکان، که اکنون چنین سخت درهم شکسته است، به یاد می‌آورند. و، با یادآوری آنها، چنانکه باید محتاط و هوشیارند. آنان به چیزهایی همچون قواعد زبان علائم، یا احتمالات و قوانین ریاضی دقیق در فضای خیالی چند بعدی که برآنها حاکم است و قوانینی که چنان و به طور بارز خود را در محك آزمایش تثبیت کرده‌اند، اشاره دارند؛ و آنها می‌گویند این چیزها همان اند که می‌توانیم امیدوارم باشیم و به طور معقولی انتظار داریم که بدانیم؛ آن علم، که به تجربیات می‌پردازد، نباید تا ژرفای زیادی را در زیر این آزمایشها در جستجوی چیزهایی که حتی در نظریه نمی‌توان نمایش داد، وارسی کنند.

یوهان فون نویمان، ریاضیدان بزرگ، که کار بسیار دشوار پالودن و آماده کردن بنیادهای ریاضی نظریهٔ کوانتومی را به انجام رسانید، حتی از لحاظ ریاضی ثابت کرده است که نظریهٔ کوانتومی به خودی خود سیستم کاملی است، بی‌نیاز به کمکهای مرموز دنیایی ژرفتر، و پنهانی، و هیچ شاهدی ارائه نمی‌کند که دال بر وجود چنین دنیایی باشد. پس بیایید این دنیا را همان طوری بپذیریم که خود را از خلال آزمایشهایمان به ما نشان می‌دهد، که به هرحال ممکن هم هست که دنیایی عجیب به نظر رسد. تصویر دنیای علم همین و فقط همین است. پس از تنبیه نظریه‌پردازان کلاسیك به خاطر فرضهای نارواپشان، هرچند ظاهراً بی‌گناه هم بودند، آیا ابلهانه و از روی نادانی نخواهد بود که دنیای پنهان علیت دقیقی را که قبلاً چنان از سر شوق به آن می‌اندیشیدیم، دنیایی که به اعتبار همان ماهیت خودش باید فراسوی حدود آزمایشهای ما قرار گیرد، اختراع و ابداع کنیم؟ یا به راستی، چیز دیگری را ابداع می‌کنیم که نتوان آن را نمایش داد؛ مانند رُخدادهای جزءِ به جزءِ در

زیر میکروسکوپ هایزنبرگ و تمامی قطعه‌های دیگر تسهیل کنندهٔ تصوراتی که در آن، مقدمتاً یك موج ذره را به عنوان یك ذرهٔ بسیار پیش پا افتاده در تصور می آوریم تا اثبات کنیم که این یکی، ذره نیست؟

تا اینجا، تمام گفتگو پیرامون دقتی که به نحوی از مسیر عدم قطعیت می گذشت، فقط حرف بود. ما باید ذهن خود را از خیالات تصویری پیشین بیالاییم و از سر نو آغاز کنیم. خود قوانین مکانیك کوانتومی را همچون شالوده و طرح کاملی از فیزیك نوین، تصویری کلی از دنیای کوانتومی که برفراز آن چیزی وجود ندارد، که آن طور که باید به علوم فیزیکی متعلق باشد، در نظر گیریم. مانند مورد علیت دقیق و سرسخت، نه تنها، پس از این همه سالها، علم ناگهان آن را مفهومی ناضروری می یابد، حتی نشان می‌دهد که بنابر نظریهٔ کوانتومی، این علیت سرسخت اساساً و ذاتاً نمودناپذیر است. بنابراین، علیت سرسخت و دقیق دیگر مفهوم علمی پذیرفتنی نیست، و باید از حوزهٔ رسمی علم زمان حال کنار گذاشته شود. بنابر نوشتهٔ دیراك، «تنها موضوع فیزیك نظری محاسبهٔ نتایجی است که می تواند با آزمایش مقایسه شود، و کاملاً غیر ضروری است که توصیفی قانع کننده از جریان کل این پدیده‌ها ارائه شود.» در اینجا تأکید (حروف ایرانیك) از خود دیراك است. از این احساس که بسیار بجا بوده است و بر جزءِ دوم آن نیز مثل جزءِ اولش باید تأکید می کرد، گریزی نیست!

پس، در اینجا الگوی محدودتری وجود دارد که به طور معما گونه‌ای درعین حال هم دیدگاهی محتاطانه نسبت به جهان فیزیك کوانتومی است و هم دیدگاهی جسورانه است؛ جنبهٔ احتیاط آمیز آن این است که کاملاً مصمم خطرورزی نکند، و جسور است در پذیرفتن نتیجه و کاملاً قانع شدن با آن. از آنجا که این دیدگاه به طور کاملاً آزادانه‌ای تسلیم نمی شود، یك نظرگاه شایسته فیزیك کوانتومی امروزه است و به نظر می رسد از آن نوع نگرشی باشد که خیلی ها برآن باور دارند. با وجود این، همان طور که گفتیم، سایه‌های زیادی بر این نگرش افکنده شده است، و گاهی تعیین اینکه دیدگاههای صحیح افراد خاص چیست، دشوار می نماید.

بعضیها احساس می کنند تمام این ماجرا یك مرحلهٔ گذار است که علم سرانجام از طریق آن به چیزهای بهتری دست می یابد ـ و امیدوارند که این گذار هرچه زودتر انجام شود. دیگران، با پذیرش آن به همراه رنج و زحمت مشخصی،

کوشیده‌اند با داخل کردن ابزاری همچون انواع منطق، زشتی و عدم ظرافتش را اعتدال بخشند. بعضیها گفته‌اند که ناظر نتیجهٔ مشاهدهٔ خود را با عمل مشاهده می‌آفریند، تا اندازه‌ای مثل شیرو خط کردن سکه، بسیاری از غیر دانشمندان، و چند نفری هم که دانشمند بودند، در ایده‌های نوین تجسم ارادهٔ آزاد را در دنیای بی‌روح دیده، و به وجدآمده‌اند. بعضی هم، که محتاطترند، اکنون که فرایندهای فیزیکی ما از جنگ موانع علیت دقیق رها شده‌اند، صرفاً امکان دوباره جان گرفته‌ای از ارادهٔ آزاد را در خودمان می‌بینند. می‌توان سیاههٔ بی‌پایانی از این دست فکر و نظرها را ادامه داد، که جملگی بر توانایی ویرانگر کوانتوم عمل پلانك، h، یعنی کمیتی چندان کوچك که در نظر آدم ناوارد کلاً ناچیز به نظر می‌رسد، گواهی می‌دهد.

عجبا که بعضی ترجیح می‌دهند مکانیك کوانتومی آنها را به سادگی باور کنند، در حالی که دیگران از این کار تن می‌زنند، مگر اینکه مطلب را با تخیل و متافیزیك که موضوع ذائقهٔ فردی است که در پشت آن حقایق بنیانی مشخص نهفته است و نمی‌توان انکارش کرد، تبدیل کرد؛ حقایق سرسخت، قطعی، و فعلاً گریزناپذیر تجربه و آزمایش تلخ، با همه چیز در توافق است و مستقیماً با شیوهٔ کلاسیك تفکر در تقابل:

در تمام تصویرسازی از فرایندهای اتمی بنیادی طبیعت برحسب فضا و زمان و علیت اصلاً راه قانع کننده‌ای وجود ندارد.

معمولاً نتیجهٔ یك آزمایش را دربارهٔ یك تك ذرهٔ اتمی نمی‌توان پیشگویی کرد. تنها می‌توان سیاهه‌ای از نتایج گوناگون ممکن را از پیش معلوم کرد.

معهذا، نتیجهٔ آماری انجام همین آزمایش منفرد را می‌توان بارها و بارها و بی‌نهایت مرتبه، بیشتر با قطعیت واقعی پیشگویی کرد.

مثلاً، گرچه می‌توانیم نشان دهیم که تناقضی وجود ندارد، نمی‌توانیم مجسم کنیم که چگونه الکترون چنان موجی است که از دو سوراخ یك پرده می‌گذرد و با خودش تداخل می‌کند، و می‌تواند ناگهان آنقدر به ذره‌ای تبدیل شود که یك تك سوسوزنی را پدید آورد. نمی‌توانیم هم پیشگویی کنیم در کجا سوسو خواهد زد، گرچه می‌توانیم بگوییم تنها در نواحی معینی این کار را می‌کند، امّانه در جاهای دیگر. معهذا وقتی که به جای یك تك الکترون، یك جریان غنی و فراوان بفرستیم،

می‌توانیم با دقت زیادی پیشگویی کنیم که این همان نقش پیچیدهٔ تداخل است که تشکیل می‌شود، حتی با درخشانی نسبی اجزای گوناگونش.

عدم توانایی ما در پیشگویی، نتیجهٔ فردی، همان عدم توانایی که دیدگاه کلاسیکی، علیرغم مدارك موجود، نمی‌تواند مجازش بشمرد، نه تنها یك مشخصهٔ بنیانی بلکه در واقع یك مشخصهٔ پذیرفتنی و موجه مکانیك کوانتومی است. تا مادامیکه اعتبار مکانیك کوانتومی کاملاً به رسمیت شناخته شود، تا همان موقع هم باید این عدم توانایی ذاتی را اجتناب ناپذیر بدانیم. اگر راهی برای فائق آمدن بر این عدم توانایی یافته شود، آنگاه همین پیدا شدن راه‌حل بر چیرگی و حکمروایی مکانیك کوانتومی به عنوان یك نقش بنیادی طبیعت مُهر پایانی خواهد نهاد. باید نظریه‌ای نوین، و ژرفتر جای آن را بگیرد، و بایستی مکانیك کوانتومی کنار زده شود، تا به نظریه‌ای که با احترام بازنشسته شده تبدیل شود، اگرچه «کلاسیك» هم زیاد نامحترم نیست.

اکنون که ما، تا حدودی، به ایده‌های نوین و عجیب خو گرفته‌ایم سرانجام می‌توانیم نگاهی کوتاه و اجمالی از دیدگاه مکانیك کوانتومی به مفهوم چیزی بیندازیم که در نگاه نخست ناچیز و کم مایه جلوه می‌کرد، یعنی به الکترونهایی که چندان شبیه‌اند که نمی‌توانیم یکی را از دیگران تمیز دهیم. این مطلب در مورد ذرات اتمی دیگر نیز صادق است، امّا به خاطر سهولت کار فقط دربارهٔ الکترونها صحبت می‌کنیم. با در نظر داشتن این مطلب که موضوع تنها به الکترونها هم منحصر نیست.

پس الکترونی را در این صفحه و الکترون دیگری را در صفحهٔ مقابل تصور کنید. به آنها دقیقاً نظر افکنید. نمی‌توانید میان آنها تمیز قائل شوید. اکنون چشمانتان را به هم بزنید و نگاه دیگری به آنها بیندازید. باز هم آنها همین جا هستند، یکی در این صفحه و آن دیگر در صفحهٔ مقابل. امّا چگونه می‌فهمید که آنها درست در همان لحظه‌ای که چشمانتان نزدیکشان شده است جای خود را تغییر نداده‌اند؟ آیا به این مطلب یا احتمال خیلی ناچیزی فکر می‌کنید؟ آیا همیشه درست در همان روزهایی که بیرون می‌روید و پنجره‌ها را باز می‌گذارید، باران نمی‌بارد؟ آیا همیشه اتفاقاً درست در همان روزهایی که عجله دارید بند کفشتان پاره نمی‌شود؟ به یادآورید که این الکترونها دوقلوهای همسانی اند و مُستعد بازیگوشی. مطمئناً

بهتر از اینها می دانید که نامحتمل بودن مبادلهٔ الکترون را مورد تردید قرار دهید. حتماً راهی برای اثبات آن ندارید.

شاید هنوز هم متقاعد نشده‌اید. پس، موضوع را به طور دیگری مطرح کنیم. فرض کنید الکترونها به هم برخورد می کنند و از هم دور می شوند. در این حال بی گمان نمی توانید آنها را از وضعیت پیش از برخوردشان تمیز دهید.

باز هم اینطور می کنید؟ آیا فکر می کنید می توانستید به آنها چنان چشم دوخته باشید که نمی توانستند شما را فریب دهند؟ امّا، عزیز من، این موضوع، ماجرایی کلاسیك است. یعنی کهنه و از مد افتاده. نمی توانیم مراقبت و هوشیاری همیشگی و دائمی کوانتومی به عمل آوریم. بهترین کاری که می توانیم انجام دهیم ادامهٔ بمباران با فوتونهاست. و با هر برخوردی الکترونها می جهند و ما نمی دانیم چگونه. زیرا کلاً می دانیم که آنها همواره می توانند مکان خود را تغییر دهند. به ویژه در لحظهٔ برخورد، خطر ضریب مطمئناً خیلی زیاد است. پس به این توافق برسیم که هرگز نمی توانیم از هویت هر الکترون اطمینان حاصل کنیم.

اکنون فرض کنید که می خواهیم معادلات کوانتومی برای این دو الکترون بنویسیم. ما در وضعیت کنونی نظریه‌هایمان، ناچاریم نخست به آنها به عنوان موجودات منفرد بپردازیم. یعنی مختصات ریاضی معینی متعلق به اولی و مختصات دیگری متعلق به دوّمی در نظر بگیریم. این کار نادرست است. به اطلاعات ناروا و غیر مجاز منجر می شود، چرا که هر الکترونی را مُجاز می دارد که هویت خود را حفظ کند، در حالی که الکترونها به جرمهای بدون نام تعلق دارند. ما باید به نحوی برای خطای اولیهٔ خود چاره اندیشی کنیم. باید به طریقی الکترونها را احیاء کنیم و فردیّت نامطمئن را از آنها بگیریم. این روند به یك معادلهٔ ساده تقارنهای ریاضی تبدیل می شود. باید معادلاتمان را چنان بازسازی کنیم که تبادل الکترونها از لحاظ فیزیکی هیچ تأثیر قابل آشکارسازی بر روی پاسخهایی که به دست می دهد، نداشته باشد.

ایجاد این عدم فردیت محدودیت ریاضی خطرناکی است، که تأثیر شدیدی بر رفتار الکترونها می گذارد. از راههای ممکن ایجاد آن، دو راه آنها مخصوصاً از لحاظ ریاضی ساده است، و اتفاقاً درست همین دو راه از لحاظ فیزیکی مورد توجه است. یکی از آنها بر رفتاری دلالت می کند که در واقع در وضعیت فوتونها، و ذرات α ، و

ذرات اتمی دیگر، مشاهده می‌شود. راه دیگر پدید آوردن عدم فردیت به این معنی برمی‌گردد که این ذرات با یکدیگر برخورد نمی‌کنند؛ در حقیقت، دقیقاً اصل طرد پاولی را ارائه می‌کند.

به راستی که این نتیجه‌ای قابل ملاحظه، و پیروزی برجسته‌ای برای مکانیک کوانتومی است. وقتی پی ببریم تمام ذرات اتمی که از اصل پاولی پیروی نمی‌کنند مثل فوتونها و ذرات α رفتار می‌کنند، این نتیجه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. موضوع تا اینجا مربوط به کسی است که تا درك معنی ژرفتری از اصل طرد پیش رفته است. با این وجود جایی برای اعتراف به شکست باقی می‌ماند، چرا که به جای داشتن عدم فردیت، از همان آغاز با فردیت شروع و سپس آن را انکار می‌کنیم. اصل پاولی بسیار ژرفتر از اینهاست. این اصل در دل طبیعت مرموز نهفته است. شاید، روزی نظریه‌ای جامع و ژرف داشته باشیم که اصل طرد در آن نظریه جای درست خود را پیدا کند. در این ضمن، باید به بصیرت پنهانی خود خشنود باشیم.

جداسازی ریاضی از فردیت معادلات ما را منحرف می‌کند و سبب اثرات فوق‌العاده‌ای می‌شود که نمی‌توان آن را با اصطلاحات تصویری به درستی توضیح داد. این مطلب را می‌توان با مطرح کردن نیروهایی عجیب به نام نیروهای تبادلی تعبیر کرد، امّا این نیروها، اگرچه بیشتر در روابط دیگری در مکانیك کوانتومی ظاهر شدند، اصلاً در فیزیك مثل و مانند کلاسیکی ندارند.

ما باید نسبت به چنین نیروهایی بدگمان شویم. باید به طور باور نکردنی ساده‌لوح می‌بودیم که به قانونی باور می‌داشتیم که با سرسختی بر تجمع فوق‌العاده‌ای چون اصل پاولی بدون نیرویی ولو کاملاً تغییر شکل یافته، اعمال شود. .

آیا کاملاً مسلم است که این نیروهای تبادلی را نمی‌توان به درستی به شکل تصویری توضیح داد؟ رویهمرفته، انرژی به نیرو وابسته است. و بنابر قانون کوانتومی اساسی پلانك انرژی وابسته به بسامد است. می‌توانیم نوعی نوسان را به بسامد وابسته کنیم. پس، شاید ما به خود نیروهای تبادلی فکر نمی‌کنیم بلکه به نوسانهای وابسته به آنها می‌اندیشیم و ممکن است بتوانیم ساز و کاری را تصویر کنیم که عامل وجودی این نیروها هستند. این ایده‌ای امیدبخش است. امّا، بدیهی است که اگر این فکر را دنبال کنیم به شدت از آن ناامید خواهیم شد.

مسلم است که در اینجا نوسانی دخیل است، امّا این چه نوسان عجیب و غریبی است: یك تبادل موزون از هستیهای الکترون‌ها. از لحاظ فیزیکی الکترونها با پرش از فضایی که در آن واقع‌اند، تغییر مکان نمی‌دهند. این موضوع بسیار ساده است. البته، جزر و مد آرامی از فردیت در میان آنها وجود دارد. مثلاً اگر با الکترون A در اینجا و الکترون B در صفحهٔ مقابل بحث خود را آغاز کنیم، پس آنگاه باید آمیزه‌ای از شصت درصد A و چهل درصد B داشته باشیم، و از آن طرف چهل درصد A و شصت درصد B داریم. باز هم بعد از آن تمام B اینجا و تمام A آنجا خواهد بود، پس الکترونها مشخصاً عبارت‌اند از هویتهایی تغییر یافته. اکنون جریان برعکس خواهد بود، و این نوسان عجیب به طور نامعینی ادامه پیدا می‌کند. با چنین نوسان هویتی است که نیروهای تبادلی اصل طرد به هم وابسته می‌شوند. نوع دیگر تبادلی هم وجود دارد که حتی می‌تواند یك تك الکترون را متأثر کند، این الکترون شبیه نوسانگری تصویر می‌شود که به این طریق عجیب، و مجرد از هر چیزی، بین دو موضع متفاوت نوسان می‌کند.

اگر الکترونها را بیشتر موج بدانیم تا ذره، شاید پذیرفتن چنین نوسانهای عجیبی ساده‌تر باشد، زیرا می‌توانیم امواج الکترونی را چنان تصور کنیم که درهم فرو می‌روند. این تصور را با تعبیر ریاضی می‌توان به سادگی درك کرد، امّا به درد تجسم کردن کامل نمی‌خورد. اگر بر جنبهٔ ذره‌ای الکترونها تأمل کنیم در می‌یابیم که تصور اینکه ۶۰ درصد ـ ۴۰ درصد از A و B، در ضمن مشاهدهٔ آن، چه آمیزه‌ای خواهد بود، دشوار است. هرچند نمی‌توانیم آن را مشاهده کنیم. عمل مشاهده چنان الکترونها را تکان می‌دهد که ما یا Aی خالص یا Bی خالص را خواهیم یافت، امّا هرگز به ترکیبی از آنها دست پیدا نمی‌کنیم، این درصدها درست احتمالهای یافتن هریکی از آنهاست. این امر در واقع تمثیل ماست از چندین بار شیر و خط. در میان هوا این سکه به طور موزونی از شیر خالص به خط خالص افت و خیز می‌کند، در حالی که از حالتهای بینابینی عبور می‌کند. هنگامی که بر روی میز برخورد می‌کند، که می‌شود گفت همان وقتی است که مشاهده‌اش می‌کنیم، تکانها و بالا و پایین افتادنهایی دارد که یا تنها شیر می‌آید یا فقط خط.

اگرچه دست کم می‌توانیم با ایرادهایی رو به رو شویم، مفهوم تبدیل به همان ترتیب مشکل و اغفال کننده باقی می‌ماند. هنوز هم یك اندیشهٔ شگفت و آمیخته با

هراس وجود دارد، که من و شما به این ترتیب به طور موزونی ذرات مبادله کننده‌ایم با یکدیگر، و بازمین و با جانوران زمین، و خورشید و ماه و ستارگان، تا دور دستهای کهکشان.

نمونه‌ای قابل توجه از قدرت تبادل در ظرفیت شیمیایی دیده می شود، زیرا اساساً توسط همین نیروهای مرموز است که اتمها به یکدیگر می پیوندند. الکترونهای خارجی آنها دائماً با ماهیتی مانند ماکوی نساجی پس و پیش می روند و با تاروپودهای پیوندی که اتمها را در مولکولها می تند، موضع خود را تغییر می دهند.

همین مفاهیم سحرکننده بودند که از انقلاب مکانیك کوانتومی سربرون آوردند. این روزهای پر همهمه، علم را تا ژرفای شالوده‌اش لرزانید. آنها امتیاز نوینی به علم دادند، و حتی شاید پرتو نوینی بر اهمیت خود روش علمی افکندند. فیزیکی که این انقلاب را از سرگذراند کاملاً دگرگونه شد، و نیز به شگفتی، کل چشم‌اندازش به طور مؤثری تغییر کرد. جایی که فیزیك یك بار مدل مکانیکی واضحی از طبیعت را به خاطر همهٔ چیزی که باید مشاهده شود جستجو کرده بود، اکنون با شکلهای انتزاعی، سری و مرموز که نمی توان با چشم غیر ریاضی تصویر واضحی از آن به دست آورد، قانع شده بود. آیا این فیزیك همان مقدار مطمئن و جسور و تواناست که در روزهای جوانترش به نظر می رسید، یا تغییری درونی سلامتی آن را از بین برده است و توانائیش را به زور از او ربوده است؟ آیا مکانیك کوانتومی پیشرفت بوده است یا پسرفت؟

اگر مکانیك کوانتومی اصلاً به هر معنایی پَسرفت بوده است، عقب نشینی استراژیکی بوده است در برابر جبرگرایی خفه کنندهٔ فیزیك کلاسیك، که راههایی باز کرده بود و چیزی نمانده بود نیروهای پیشروندهٔ علم را در محاصرهٔ خود نابود سازد. اگر جبرگرایی قرن نوزدهم، علم بود یا نه، بعداً در تحقیقات خودش، می توانست یك بار دیگر با علیّت ژرف روبرو شود، چرا که تمام کشفیات بزرگی که از آن ناشی شد، خود به سرعت به مانعی در برابر پیشرفت تبدیل شد. آنگاه که پلانك وجود بی نهایت کوچك کوانتوم را کشف کرد، به نظر می رسید که برای آن مکان ویژه‌ای در جایی از کل دامنهٔ گستردهٔ علم فیزیکی، نمی تواند وجود داشته باشد. با این همه در یك چهارم قرن، چنان با توانایی تحقق و تثبیت شد، و در هر گوشه و رخنه‌ای خود را به زور وارد کرد، و نفوذش در بخشهای تصورناپذیری رشد

کرد که چهرهٔ علم کلاً دگرگونه شد. این علم سرانجام دیوارهای محدود کنندهٔ جبرگرایی را سوراخ کرد، نیروهای بسته و محصور پیشرفت علمی را رها کرد تا در سرزمینهای حاصلخیز دور دست جاری شود، و در آنجا خرمن کشف ناگفته‌ای را درو کند، در حالی که هنوز هم استفاده از آن عمارتهای باشکوهی را که در قلمرو کلاسیك آفریده بود، فراموش نکرده بود. نظریه‌های سابق مستحکمتر و مطمئنتر از هر وقت پرداخته می‌شدند. پیروزیهایشان بدون آسیب باقی بود. و شکستهایشان تعدیل می‌شد، برای اینکه اکنون اعتبار آنها در جایی که نفوذشان هر لحظه که از کوانتوم چشم پوشی شود، پابرجاست. شکست آنها دیگر سرگشتگیهای آشفته کننده‌ای نبودند که تهدید به نابود کردن کل ساختار، و واژگون کردن آن کنند. به کمك تشخیص درست ناخوشی می‌توان به خاطر مقاصد خاصی ساختارهای کلاسیکی را نجات بخشید، و از بسیاری ضعفهای آن به عنوان تأیید توانایی ایده‌های جدیدتر، کاملاً بهره گرفت، ایده‌هایی که بدون تخریب و از بین بردن تأثیر محدود ایده‌های قدیمی بر آنها برتری می‌جوید.

در حقیقت، این نظریه جدیدتر از تصور نابخردانه و ساده‌لوحانه جلوگیری کرد، و همچون نظریه‌ای فیزیکی که هرگز پیش از آن وجود نداشته است، سخت تجریدی بود. اما این بهای اندکی بود که در برابر موفقیتهای فوق‌العادهٔ آن پرداخته شد. نظریهٔ نیوتون هم پیشتر تقریباً باور نکردنی به نظر می‌رسیده است، همچنانکه نظریهٔ ماکسول نیز چنین بوده است. ولی، پدید آمدن مکانیك کوانتومی با همهٔ شگفتیش، بر پایهٔ آزمایش بنیانی با استواری قوام گرفت. سرانجام نظریه‌ای پیدا شده بود که می‌توانست آن حقیقت ویژه، و برجستهٔ جهان مادی ما را در برگیرد، آن حقیقت ساده، و روزمره را، یعنی پایداری پردوام عناصر مختلف خاصیتهای فیزیکی و شیمیایی آنها را در برگیرد که نظریهٔ ماکسولی کاملاً در آن درمانده بود. این نظریهٔ نوین از این بابت خیلی هم سفت و سخت نبود، بلکه به همین ترتیب می‌توانست حقیقت تبدیل رادیو اکتیو را نیز در برگیرد. سرانجام نظریه‌ای پیدا شده بود که می‌توانست جزئیات دقیق داده‌های بسیار پیچیدهٔ طیف‌نمایی را به دست دهد. اثر فوتو الکتریك و دسته‌ای از پدیده‌های مشابه تسلیم ایده‌های جدید شدند، اثرهای تداخل موج‌گونه نیز که قبلاً به نظر می‌رسید با آنها در تناقض است، تسلیم خود را اعلام کردند. شخصیت و موجودیت اسپین و الکترون، به یاری نسبیت، با

خوشی و موفقیت فوق‌العاده‌ای تثبیت شد. اصل طرد پاولی اهمیت گسترده‌تری یافت، و علم شیمی از طریق آن شالودهٔ نظری نوینی به دست آورد که تقریباً به یك علم نوین، یعنی شیمی نظری، دست یافت که می توانست مسائلی را که حل آنها تا آن هنگام فراتر از استطاعت نظریه‌پرداز بود، حل کند. نظریهٔ مغناطیس فلزی به گونه‌ای درخشان دگرگونه شد، و مشکلات گیج کننده در نظریهٔ جریان الکتریسیته در فلزات، به لطف مکانیك کوانتومی، و به ویژه به لطف اصل طرد پاولی، گویی با جادو، برطرف شد. هستهٔ اتمی، چنان که گفته خواهد شد، می‌رفت تا رازهای گرانبهایی را به فیزیك کوانتومی نوین تسلیم کند؛ رازهایی که اصلاً نمی توان آنها را در نظریهٔ کلاسیك آشکار کرد، چرا که آن نظریه کهنه‌تر از آن بود که اینها را درك کند؛ رازهایی چنان انتزاعی که جز با واژگان کوانتومی نمی‌توان آنها را بیان کرد. درك ما از ماهیت نیروهای سهمگین موجود در هستهٔ اتمی، هرچند هم ناکامل باشد، در واقع بدون نظریهٔ کوانتومی که جستجو و دلگرمی ما را به در کمان از این حوزه‌های بسیار مرموز و فریبنده از عالم راهبری می کند، ناچیز خواهد بود. این بیشتر از یك نظر اجمالی به دستاوردهای بی مانند مکانیك کوانتومی نیست. کمال و استحکام منطقی آن گیج کننده است.

«پدر آیا دانشمندان واقعاً می دانند دربارهٔ چه چیزی حرف می زنند؟»

انسان گاهی برای آرام کردن بچهٔ کنجکاو به افراط و تفریطهای ناراحت کننده کشیده می شود. آیا در این مورد خاص پاسخ مثبت ما شرافتمندانه بود؟

مطمئناً این پاسخ در زمینهٔ خودش به اندازهٔ کافی درست کارانه بود و بی درنگ دو پرسش دیگر را در پی داشت. امّا دربارهٔ همین پرسشی که اکنون به تنهایی مطرح است، چه بگوییم؟ آیا دانشمندان واقعاً می دانند دربارهٔ چه چیزی صحبت می کنند؟

اگر تصمیم‌گیری را به شاعران و فیلسوفان و روحانیون واگذار کنیم، آنان بی‌گمان، به دلایل دیگری ـ و کاملاً بدون توجه به مکانیك کوانتومی، علیه فیزیکدانان‌رأی خواهند داد. امّا این شاعران، فیلسوفان، و روحانیون خودشان در زمینه‌های کاملاً متمایز به ندرت می توانند ادعا کنند که دربارهٔ آنچه سخن می گویند چیزی می دانند، و در مواردی، نه چندان مشخص، علم هم آنها و هم خودش را در خطای محض فرا چنگ گرفته بود.

در حقیقت، عالم بیشتر از مجموعه‌ای از داده‌های تجربی عینی است؛ بیشتر از شبکه‌هایی از نظریه‌ها، انتزاعات، فرضهای خاصی برای پیوسته نگهداشتن این داده‌ها به یکدیگر؛ در واقع، بیشتر از هر ساختی که در این عینیت بی روح قالبریزی شده است. چرا که دنیایی ژرفتر، و عینیتر وجود دارد، یك دنیای احساس و انگیزش، دنیای ارزشهای جمال‌شناختی، اخلاقی، و مذهبی که هنوز هم فراسوی درك دانش عینی است. و پروازی باشکوه بر فراز همه، پوشیده و گریزناپذیر، رمز دردناك خود هستی است، تا ذهن را با معمای جاودان خود پریشان کند.

امّا از این جایگاهها به عالم دنیوی فرود آییم، چرا که بنابراین فیزیك کوانتومی می تواند حالتی واقعاً مؤثر پدید آورد؛ به علاوه، حالتی که از جانب آزمایشهای به هم پیوستهٔ بی شماری که برهانی از ضرورت باشکوه را تشکیل می دهد پشتیبانی می شود، در کجای دیگر می توان برهانی چنین مقاومت ناپذیر را یافت؟ چگونه می توان بر اعتبار سیستمی چنین پیروز شك کرد؟ آدمها به مدرکهایی اتکا می کنند که در ضمن اندازه‌گیری، نسبتاً باید کوچك و ناچیز به نظر برسند. پس، مطمئناً فیزیك کوانتومی می داند آنها دربارهٔ چه چیزی سخن می گویند. مطمئناً نظریه‌های کنونی آنها نظریه‌های ویژهٔ کارکردهای عالم است. مطمئناً طبیعت فیزیکی نمی تواند به طور چشمگیری از آنچه سرانجام چنین با زحمت آشکار شده است، متفاوت باشد.

و با تمام اینها، اگر اعتقاد ما این است، مطمئناً تمام این داستان را تا اینجا به عبث حکایت کرده‌ایم. مثلاً، اظهار نظری بی پروا در سال ۱۸۸۹ چنین ادا شده است:

«نظریهٔ موجی نور از دیدگاه آدمی یك یقین است».

کسی که این نظر را بیان داشت خیالپردازی غیر مسئول نبود، یك آدم درجهٔ پنجم ناشایسته هم نبود که نظریاتش با خنده و استهزا از سر گذرانیده شود. او همان مردی بود که آزمایشهای کلاسیکش، بیشتر از آزمایشهای هرکس دیگری، خصیصهٔ الکتریکی امواج نور را مسجّل کرد؛ او کسی جز هانریش هرتز کبیر نبود، که مشاهدهٔ ظاهراً تصادفیش دانه‌ای را در برداشت که می رفت تا بعدها نظریهٔ تجدید حیات یافتهٔ ذره‌ای از بُن آن بروید.

آیا فیزیکدانان کلاسیك در حمایت از نظریه‌های خود، نظریه‌هایی که اکنون

در نظر ما چنین ناکامل و کم مایه جلوه می کند، به مدرك مقاومت ناپذیری اشاره کرده‌اند؟ آیا آنها به طور کلی اعتقاد داشتند که فیزیك به پایان خود نزدیك است، مسائل عمدهٔ آن حل شده و شالوده‌اش کاملاً آشکار شده، و تنها باید با یك شستن و جلادادن جزئی آن را برای نسلهای آینده بگذارند تا بدان بپردازند؟ و آیا آنها به این چیزها اعتقاد نداشتند در حالی که از معماهای حل نشده‌ای همچون فاجعهٔ بنفش، و اثر فوتوالکتریك و فروپاشی رادیواکتیو، باخبر بودند؟

برهانهای تجربی علم، نهایت برهانها نیستند. آزمایش، آن داور نهایی علم، چیزی از جنبهٔ یك الهام در بطن خود دارد، اظهارات دقیق واقعی آن در زبان مُبهمی با جذبهٔ فریبنده‌ای ادا شده است. در حالی که چیزی مانند نردبان بالمر در نزد بور به معنی مدارها و پرشها بود، در نزد شرودینگر به معنی یك جوهر پراکندهٔ ψ بود؛ اکنون هیچیك از این دو نظر پذیرفته نیست. حتی اندازه‌گیری سرعت نور در آب، آن آزمایش ظاهراً واضح و روشن که مخصوصاً طراحی شد تا تکلیف میان ذره و موج را تعیین کند، حقیقتی را به دست داد که نادرست تعبیر شد. مواردی مشابه این در علم فراوان است. هر تغییر نظریه از سر نو قطعیت نامعین تجربه را نشان می دهد. باید به راستی گستاخ باشیم که بگوییم علم سرانجام به یك نظریهٔ غایی دست یافته است؛ بگوییم که نظریهٔ کوانتومی که ما می شناسیم اکنون تنها با یك دگرگونی سطحی به حیات خود ادامه خواهد داد. ممکن است چنین باشد. امّا ما نسبت به اثبات آن ناتوانیم، و مطمئناً سابقهٔ امر هم بر علیه آن گواهی می دهد. فیزیکدان کوانتومی خبر ندارد که آیا می داند دربارهٔ چه چیزی صحبت می کند یا خیر. امّا دست کم این را می داند، که صحبتش، هرچند هم نادرست باشد ممکن است سرانجام ثابت شود که نادرست است. در حال حاضر، به طور غیر قابل انکاری نسبت به صحبت نیاکان کلاسیکی اش والاتر است، و نسبت به هر موقع در گذشته، نقطهٔ اتکاءاش بر حقیقت استوارتر است. و این مطمئناً چیزی است که کاملاً به دانستنش می ارزد. علم بنیادی هرگز دوره‌ای را به خود ندیده است که چنین انفجارآمیز،شادمان و پیروز بوده باشد .علم فیزیك توأم مفاهیمی انقلابی چون نسبیت و نظریهٔ کوانتومی که به طور همزمان تکامل پیدا می کنند، یك اضطراب حاصل از دگرگونی و خیزش را بدون وجود مانندی در تاریخش، تجربه کرد. حرکتهای باعظمت آسمانها و درونیترین لرزشهای اتمها به یکسان مورد پژوهش دقیق این

نظریه‌های نوین قرار گرفتند. مفاهیم زمان و فضا، ماده و تابش، انرژی، اندازه حرکت، و علیّت، حتی مفهوم علم و خود عالم، نزد انسان، به طور کامل تحت برخورد هیجان انگیز این انقلاب دوگانه، تغییر ماهیت دادند. ما در سرگذشت خود بختهای شوریده و آشفتهٔ کوانتوم را در خلال آن سالهای افسانه‌ای پی‌گیری کرده‌ایم، از نخستین مفهوم متزلزلش در اذهان مردان با استعداد، از طریق سالهای اولیهٔ ناپایدار کودکی، تا به یك موضع معاصر در نظریهٔ ابتدایی بور، که در آنجا آمادهٔ خیزشی تماشایی و گیج کننده به دوران بلوغی می شویم که می رفت تا چشم انداز منظم علم را به صحنه‌ای با سردرگمی بسیار زیاد برگرداند. ما، از این سردرگمی به‌تدریج دورنمای نوینی را مشاهده کردیم که پدیدار می شود، و یکبار دیگر چشم اندازی به زحمت قابل تشخیص، آرام، و تا دور دستها گسترش یافته، منظم و دقیق که شایستهٔ چشم انداز علم است، ارائه می دهد.

وقتی که این دو ایدهٔ نوین برای نخستین بار مطرح شدند، با دانشمندان قدیمیتر که ذهنهایشان سخت در چارچوب شیوه‌های سنتی جا افتاده بود، کاملاً ناسازگاری داشتند. در آن روزها حتی ذهن انعطاف‌پذیر جوانترها نیز این ایده‌ها را تکان دهنده یافتند. با همهٔ اینها، اکنون فیزیکدانان نسل جدید، مانند کودکانی که به طور مبهم از روغن ماهی خود لذت می برند، این ایده‌های کوانتومی را با اشتهای فراوان، رها از شبهه‌ها و تردیدهای جونده‌ای که چنان سخت نیاکانشان را می فرسود، حریصانه می بلعند. بدینسان، اکنون می توان به آن سیاههٔ ناگوار پیشین تأییدها و برهانهای علمی این شهادت تکمیل کننده را از دهان کودکان و شیرخوارگان هم زدود. کوانتوم وارد شده است. قصهٔ ما به سر رسیده است. اجازه دهید واپسین پرده فروافتد.

امّا پیش از آنکه پرده فرو افتد ما با حضار هنوز قانع نشده‌ای رو به رو هستیم، که به جلو هجوم می آورند. ما کارشناسان فیزیك اتمی نیستیم. ما جز مردانی ساده‌دل که روزانه به دور وظایف مقررمان می گردیم نیستیم، و مانند کسی می مانیم که در دمدمه‌های غروب با تأمل از فراز شانه‌های نظریه‌پرداز علمی نگاه می کند تا آن نمایش افسون کننده‌ای را که از برابر ذهن او می گذرد، درك کند. آیا تمام این نحوهٔ رفتار موج ذره‌ها و فقدان علیت در فضا و زمان چیزی است که اکنون نظریه‌پرداز می تواند با آرامش بپذیرد؟ آیا، هرگز می توانیم به خودمان بفهمانیم که با احساس

عمیقی از پذیرش به آن خوشامد گوییم؟ وقتی جهانی چنین بیگانه بر ما آشکار شده است نمی توانیم از عدم مساعدت و بی تناسبی گستردهٔ آن دوری نکنیم. این دنیا از تجربهٔ روزانهٔ ما بسیار به دور است. آرامش و آسایشی به ما نمی دهد. ما را بدون هیچ محبت و گرمی به خود فرا می خواند. از اینکه علم چنین گردش عجیب و ناخوشایندی را انجام داده است، که همیشه به دور از اعتقاداتی است که با شور و شوق فراوان پرورانده‌ایم، اندوهگین می شویم. مطمئناً، خود را چنین دلداری می دهیم که این چیزی نیست مگر یك انحراف متعلق به این زمانه. مطمئناً علم روزی راه ظریفی به سوی وضع عادی گذشته خواهد یافت، و مردمان معمولی یکبار دیگر پیام آن را، ساده و واضح، و بدون آنکه از سوی پارادوکس تجریدی دچار زحمت شوند، درك خواهند کرد.

امّا به یاد آوریم که آدمی، وقتی که یك ایدهٔ جدید متهور ظهور کرده است، چه این ایده درست بوده باشد چه خطا، همواره چنین احساسی را داشته است. وقتی مردانی ادعا کردند زمین تخت نیست، آیا پارادوکسی همان طور شیطان صفت و ویرانگر مطرح نکردند که هریك از ما در روایت خود از کوانتوم به آن برخوردیم.؟ در ابتدا چنین اعتقادی حتماً در نظر بسیاری از مردم خیال کامل جلوه کرد؛ این اعتقاد که اکنون چنین سهل و کورکورانه از جانب کودکان، بر علیه مدارك بسیار روشن احساسهای بی‌میانجی آنها، پذیرفته می شود، و آنها در مسخره کردن آن آدم وسواسی گوشه‌نشینی که هنوز هم ممکن است ادعا کند زمین تخت است، هیچ درنگی نمی کنند؛ تنها نگرانی آنها، اگر اصلاً نگرانیی وجود داشته باشد، به خاطر آسایش مردم بیچارهٔ سمت دیگر این زمین گرد ماست که، بنابر استدلال بسیار روشن این بچه‌ها، مقدرشان آن است که زندگی خود را در حالی به سر آورند که با سرشان راه می روند. دعا کنیم که آن خرد سیاسی و خوشبختی خداداد به ما اعطا شود که بچه‌های بچه‌های ما بتوانند به سهولت هراسهای کوانتوم امروز را بپذیرند و به هراسها و شُبهات نیاکان جاهلشان بخندند؛ به آن جانهای حقیری که هنوز هم به امواج و ذرات بسیار کهنه شده، و به ضرورت اقتدار سلطنتی ملی، و به تمامی موهوم پرستیهای یك دوران پوسیده باور داشتند.

براساس احساسهای جاری‌مان نیست که در اینجا باید بکوشیم ارزش و اهمیت انقلاب کوانتومی را بسنجیم. بلکه براساس منطق ذاتی آن است که این کار

را انجام می دهیم.

«چی!» این را با صدای بلند فریاد می زنید. «منطق ذاتی آن؟ مطمئناً این آخرین چیزی است که می توانستیم بپذیریم. ما ناچاریم به پایهٔ تجربی مقاومت ناپذیر آن تن در دهیم. آیا منطق ذاتی که نوعی شرایط است که باور ما را در برمی گیرد، تجربی است یا غیر تجربی؟ خیر، بسیار فراتر از این حرفهاست. تجربهٔ آنها در برابر ما قرار دارد، امّا نمی توانیم ناچاری آنها را احساس کنیم. ما آنها را به زحمت فراوان، پس از مبارزه‌ای سخت می پذیریم. معنی ژرفتر آنها را چنانکه در یك لمحهٔ شهود و اشراق پیش می آمده است، ندیده‌ایم. ولو اینکه طبیعت بر علیه آنها باشد، کل طبیعت ما علیه آنهاست. منطق باطنی؟ عجب داروی تلخی!».

امّا باز هم یك امکان وجود دارد. شاید رویهمرفته در نظریهٔ کوانتوم منطق باطنیی وجود دارد. شاید باز هم ما بتوانیم در آن شهود و اشراق سادهٔ ژرفی ببینیم، که در پرتوش علم قدیمیتر همچون بینشی که بر مبنای آن زمین تخت است، خنده‌آور جلوه کند. امّا ناچاریم به یاد بیاوریم که ایده‌های ما دربارهٔ فضا و زمان از طریق تجربهٔ روزمرهٔ خودمان به ما رسیده و به تدریج با آزمایش دقیق دانشمند پالایش یافته است. همچنانکه آزمایش دقیقتر شد، زمان و فضا نیز جنبهٔ جدیدی به خود گرفت. حتی آزمایش سطحی نسبیت مایکلسون و مورلی، پیش از ۱۸۸۷، سرانجام به درهم شکستن برخی مفاهیم ما از زمان و فضا از راه نظریهٔ نسبیت، منجر شد. امروزه، از طریق شیوه‌های ژرفتر فیزیکدانان جدید در می یابیم که فضا و زمانی که ما آنها را چنین آشنا می شناسیم، و حتی فضا و زمانی که نسبیت می شناسد، به سادگی با نقش ژرفتر وجودی که توسط آزمایش اتمی نمودار می شود، منطبق و سازگار نیست.

از همهٔ اینها گذشته این موجودات مرموز فضا و زمان چیستند؟ مایلیم آنها را بدیهی بپنداریم. فضا را چنان هموار و دقیق تصور می کنیم که بتوانیم در آن چیزی به صورت نقطه ـ چیزی که اصلاً اندازه‌ای نداشته باشد بلکه تنها موضعی مداوم دارد ـ مشخص کنیم. در این صورت، چشممان روشن به تفکر انتزاعی. در واقع، تقریباً یك ضرورت اجتناب ناپذیر به نظر می رسد. با این وجود آیا اگر آن را در پرتو کشفیات کوانتومی بررسی کنیم، به یك عرصهٔ تردید پا نگذاشته‌ایم؟ زیرا چگونه چنین موضع تجسم نشده‌ای را در فضای فیزیکی واقعی به کار بریم و جدا از تصویر

ذهنی محض فضایی که در ذهنمان داریم، جایگزین کنیم؟ کوچکترین، و دقیقترین ابزاری که در جهت جایگزین کردن آن می توانستیم به کار بریم، کدامند؟ مسلماً این ابزار انگشتمان نخواهد بود. این عضو برای اشاره به یك خانه، به یك ریگ، یا حتی، با اشکال، یك دانهٔ غبار به کار می آید. امّا برای نشانه رفتن به آن نقطهٔ مورد بحث بسیار زمخت است.

در این صورت، نوك یك سوزن چگونه است؟ بهتر است. امّا باز هم خیلی نامناسب است. به نوك سوزن در زیر یك میکروسکوپ نگاه کنید و این استدلال را به وضوح ببینید، زیرا در آنجا این نوك سوزن دورنمایی پر چاله چوله، و کج و معوج، بدون شکل و بدون استفاده را، پدیدار می کند. پس چه چیزی مناسب است؟ باید نشانگری هرچه کوچکتر، و هرچه ظریفتر را به کار بریم. امّا هر چقدر هم که کوشش کنیم نمی توانیم تا بی نهایت ادامه دهیم، آن نقطهٔ غایی همیشه ما را اغفال می کند. زیرا در آخر به چیزهایی همچون الکترونهای منفرد، یا هسته‌ها، یا فوتونها، و فراتر از اینها خواهیم رسید، که در موقعیت کنونی علم، نمی توانیم پیشتر برویم. پس، بر سر ایدهٔ ما در مورد موضع یك نقطه چه آمده است؟ آیا این ایده در پذیرفتن موج ذرهٔ پیچشی استحاله نشده است؟ در واقع، ما گفته‌ایم که می توانیم مکان دقیق یك موج ذره را به بهای قربانی کردن تمامی شناختمان از حرکت آن، به دست آوریم. اتفاقاً در اینجا هم حتی دلایل نظری در ارتباط با آزمایش کامپتون که دقت شناخت این موضع را محدود می کند، وجود دارد. حتی با فرض اینکه این موضع را بتوان با نهایت دقت به دست آورد، آیا می توانیم نقطه‌ای مانند آنکه در ذهن خود داریم ،داشته باشیم؟خیر. چرا که نقطه مکانی مداوم دارد، در حالیکه این مکان ما زودگذر و ناپایدار است. باز هم باید بیشتر نوعی موج ذرهٔ انتزاعی داشته باشیم تا یك نقطهٔ انتزاعی. خواه الکترون را مانند موج ذره بپنداریم، یا به آن به عنوان ذره‌ای که در زیر میکروسکوپ هایزنبرگ از جانب فوتونها مورد ضرب و شتم قرار گرفته است فکر کنیم، در می یابیم که تصور فیزیکی یك مکان مداوم، و دقیق از ما می گریزد. اگرچه به حد پالایش نظری کنونی رسیده‌ایم، هنوز مکان را نیافته‌ایم. در واقع، به نظر می رسد از آن هنگام که چنان امیدوارانه این کار را آغاز کردیم، از آن دورتر شده‌ایم. فضا آن مفهومی که ما چنین ساده‌لوحانه فکر می کردیم، نیست. بلکه بیشتر مثل آن است که گویی ما در جستجوی دیدن جزئیات یك عکس روزنامه

هستیم. با دقت هرچه بیشتری به تصویر نگاه می کنیم امّا آن جزئیات آزاردهنده از ما می گریزند. رنجیده، یك ذره‌بین می آوریم تا تأثیری داشته باشد، و آه! خوش‌بینی مشتاقانهٔ ما از کف می رود. خود را بسیار بدحالتر از پیش می یابیم. آنچه که به نظر می رسید چشم است که اکنون در تودهٔ درهم برهمی از لکه‌های سیاه و سفید بی معنی مستحیل شده است. آن جزئیاتی که ما به سادگی تصور کرده بودیم، وجود ندارد. با این وجود هنوز هم این تصور از دور کامل به نظر می رسد.

شاید این جزئیات مانند فضا، و نیز مانند زمان باشند. ما به غریزه احساس می کنیم که این دو جزئیاتی محدود دارند. اما همینکه ظریفترین روشهای مشاهده و دقیقترین اندازه‌گیری را برای آن به کار می گیریم، در می یابیم که آن جزئیات نامتناهی که تصور کرده بودیم، به نحوی حذف شده‌اند. این فضا و زمان نیست که اساسی اند، بلکه خود ذرات بنیادی ماده یا انرژی، اساسی هستند. بدون اینها نمی توانستیم حتی تصویری تشکیل دهیم که از روی غریزه یك فضا و زمان به طور نامتناهی، جزء به جزء، بی عیب، بدون لکه، و هموار، را دارد. این الکترونها و دیگر ذرات بنیادی، همینها در فضا و زمان وجود ندارند. این فضا و زمان است که به علت آنها وجود دارند. این ذرات ـ یعنی موج ذره‌ها که چنانچه بخواهیم در خیالبافیهای نامناسب، و انسان گونهٔ خود از فضا و زمان بیامیزیم، باید آنها را بدینگونه بپنداریم ـ این ذرات بنیادی از مفاهیم فضا و زمان پیشی می گیرند و برتری می جویند. آنها ژرفتر و بنیانیتر، ابتدایی تر و قدیمیترینند. از انبوه بی شمارشان به دور است که ما مفاهیم فضایی و زمانی خود را بر مبنای آنها بنا کنیم، به همان اندازه که از تجمع ظاهراً اتفاقی نقطه‌ها و لکه‌های عکس روزنامه به دور است که ما در ذهنمان رخساره‌ای بدون عیب، و واضح از آنها بنا کنیم؛ همانقدر که ما از توالی سریع تصویرهای کاملاً بی حرکت که روی پردهٔ سینما افتاده، در ذهن خود پندار حرکت یکنواخت، و پیوسته را بسازیم.

شاید این همان چیزی است که نظریهٔ کوانتوم در تلاش بیان آن است. شاید این همان چیزی است که آن نظریه را چنین معماگونه جلوه می دهد. اگر زمان و مکان مادهٔ بنیادی عالم نبوده بلکه صرفاً اثرات میانگینی ویژه، و آماری گروههای موجودات بنیادی، وقتی که در فضا و زمان موجود فرض شده‌اند، چنان خواص ناجوری مانند خواص موج و ذره نمایش خواهند داد. رویهمرفته، منطقی باطنی در

پارادوکسهای فیزیك کوانتومی می تواند وجود داشته باشد.

این ایدهٔ اثرات میانگین به انفراد تعلق نمی گیرد و برای علم چیز جدیدی نیست. امّا، چنان واقعی و مشخص که می توانیم آن را از روی یك دماسنج ساده بخوانیم، صرفاً یك اثر آماری از حرکتهای مولکولی بی نظم است. در مورد این موضوع ما اصلاً دچار زحمت و دردسر هم نمی شویم. فشار هوا در چرخهای ماشین ما چیزی جز اثر آماری یك بمباران دائمی از سوی مولکولهای خستگی ناپذیر هوا نیست. یك تك مولکول به معنای معمولی اصطلاحات دما و فشار، هیچیك از آنها را ندارد. دما و فشار معمولی اثرات گروهی اند. وقتی که به کمك مشاهدهٔ یك مولکول منفرد، در راه بررسی بسیار دقیق آنها تلاش می کنیم، به سادگی نا پدید می شوند. جریان یکنواخت آب را در نظر بگیرید. این پدیده هم در ضمن بررسی یك تك مولکول آب محو می شود. این معنی بیشتر از یك افسانهٔ بسیار مستحکم نیست که از هزاران نوع حرکت تعداد بی شمار مولکولهای آب آفریده شده است.

به همین ترتیب این مطلب ممکن است در مورد خود زمان و فضا نیز صادق باشد، هر چند تصور آن حتی مِن باب آزمایش چیزی بسیار دشوارتر است. در حالی که مولکولهای منفرد آب فاقد کیفیات متداول دما، فشار، و سیلان اند، مثل تك حرفهای الفبا که فاقد کیفیت شعر هستند، به همان ترتیب نیز شاید ذرات بنیادی عالم به طور انفرادی فاقد کیفیت هستی در فضا و زمان باشند؛ همان فضا و زمانی که خود این ذرات، در تجمع بی شمار و عظیم، کاذبانه همچون موجودات بنیادی بسیار برجسته در برابر ما چنان جلوه می کنند که گویی اصلاً هیچ هستیی را بدون آنها نمی توانیم تصور کنیم. حالا ببینیم اصلاً این تصور به چه نحوی جور در می آید.

پارادوکسهای کوانتومی ساختهٔ خود ما هستند، چرا که ما کوشیده‌ایم تا حرکتهای ذرات منفرد را از طریق فضا و زمان دنبال کنیم، در حالیکه در تمام مدت این ذرات منفرد در آن واحد در دو مکان موجود نیست. این ذره اصلاً هیچ مکانی ندارد. آیا ما از اینکه یك فکر بتواند در آن واحد در دو مکان باشد باید احساس سرگشتگی و حیرت کنیم؟ یك فکر، اگر آن را به صورت چیزی خارج از مغزمان تصور کنیم، دارای کیفیت مکانی نیست. اگر می خواستیم آن را، به هر دلیل خاصی، به طور فرضی تعیین موضع کنیم، باید از آن انتظار داشته باشیم که از محدودیتهای معمولی فضا و زمان فراتر رود. دلیل این امر تنها این است که ما همیشه

ماده را چون موجودیتی در فضا و زمان پنداشته‌ایم که چشمپوشی از این ایده در مورد ذرات منفرد بسیار مشکل است. امّا همینکه از آن چشم بپوشیم پارادوکسها ناپدید و پیام کوانتوم ناگهان آشکار می شود: فضا و زمان بنیادی نیستند.

خیال‌پردازی؟ مطمئناً. امّا همهٔ اینها نظریه‌پردازی است. در حالیکه هنوز هم واقعاً چیزی چنین مؤثر در کالبد ریاضی مکانیك کوانتوم به هم بافته نشده است، ممکن است این موضوع به علت مسائل هیجانی و تکنیکی دشواری باشد که در این امر دخیل بوده‌اند. در این میان نظریه‌پردازان کوانتومی خود را در موضعی یافتند که با شدت هرچه بیشتری به سوی چنین خیالپردازیی روی می آورند. این خیال پردازی مسائل بسیاری را حل خواهد کرد، امّا هیچکس نمی داند چگونه اقدام به ارائهٔ بیان ریاضی دقیق آن کند. اگر چیزی مانند این ماهیت راستین فضا و زمان تثبیت می شود، پس نظریهٔ نسبیت و کوانتوم، به همان ترتیب که هم اکنون مطرح اند، کاملاً ناسازگار جلوه خواهند کرد. زیرا نسبیت به عنوان یك نظریهٔ مید ن، باید فضا و زمان را به صورت موجوداتی اساسی بنگرد، در حالیکه نظریهٔ کوانتومی، به خاطر تمامی ناتوانی تکنیکی کنونیش در جهت رهاسازی خود از بند استبداد فضا ـ زمان، نه شدت بر علیه این دیدگاه گرایش دارد. با این وجود، هم در نسبیت و هم در نظریهٔ کوانتومی اندك رگه‌هایی از حقیقت وجود دارد، و هیچیك نمی تواند دیگری را کاملاً از پای در آورد. آنجا که این دو نظریه به هم می رسند یك نقطهٔ هیجان انگیز حیاتی است. فرایندی از پیوند دو جنس در جریان است. روزی از این پیوند نظریه‌ای نوین و بسیار تواناتر پدید خواهد آمد، که آثار موروثی آن دو نیای نامبردار خود را در بردارد، و سرانجام تمامی ثروت سرشار آنها را به ارث می برد و خود را گسترده می کند تا حوزه‌های جداگانهٔ آنها را تحت حاکمیت یك قاعده بیاورد. هیچکس نمی تواند بگوید از ایده‌های کنونی چه چیزی باقی خواهد ماند. ما پیش از این دیده‌ایم که امواج و ذرات و علیت و فضا و زمان کلاً از بین رفته‌اند. بشتابیم تا پرده را به یك ضربه پایین آوریم، مبادا اتفاقی واقعاً جدی روی دهد.

فصل ۱۵

پسگفتار

پرده فرو افتاده است، امّا یکبار دیگر باید بالا رود، چرا که سرگذشت ما داستان زنده‌ای است که به سکوت تن نخواهد داد. از روزهای اوج انقلاب کوانتومی دو دههٔ سرنوشت ساز بر انسانها گذشته است. دانشمندانی که با آنها آشنا شده‌ایم به دور از سرزمینهای زادگاهشان به تبعید سیاسی رفته‌اند، نشانه‌های سرطان بدخیم و خانمانسوزی که میراث مصیبت بارش حتی هنوز هم باقی است. جنگ دوباره داغ خون آلودهٔ خود را بر سرتاسر جهان پراکنده است؛ جنگی که در آن معادلات خیالی کلارك ماکسول رادار را نه بیشتر و نه کمتر از نسبیت و مکانیك کوانتومی، که به تکامل شگفت آور بمب اتمی کمك کردند، به پیش برد.

از روزهای پر هیجان انقلاب کوانتومی به بعد اتفاقات زیادی روی داده است. امّا همراه با به تخت نشستن مکانیك کوانتومی، دورهٔ آشوب و پریشانی پایان یافت و رویدادهای بعدی، اگرچه اغلب نامنتظره بودند، دست کم نظامی یافته‌اند. ظهور این نظریهٔ نوین به معنی یك رهایی عظیم بود. موانع بر سر راه پیشرفت علمی که چندین دهه، و حتی قرنها، ادامه داشت، به سرعت برداشته شدند، و علم با انگیزه‌های تجدید حیات باقته‌ای به پیش خیز برداشت. فیزیك کار فتح سرزمینهای تازه و گسترده‌ای را رهبری کرد. حتی شکارگاههای خصوصی شیمی نیز مورد تجاوز

و دست اندازی قرار گرفت. در این حال علم طیف نمایی نیز، که نقشی چنان تابناك و تعیین کننده در ترویج انقلاب مکانیك کوانتومی بازی کرده بود، عملاً غرق شد، ضمن آنکه بسیاری معماهای دیر پایش تأییدیه‌های مؤثری بر اعتبار نظریهٔ نوین را به دست آدمی داد.

نظریه‌پردازان علمی، با طیف نمایی که بدینسان موقتاً عاری از راز و رمز بود، به جستجوی مسائل ژرفتری پرداختند که کم و بیش مانند جریان پژوهشی تجربی بود که کار خود را با شدت تمام برآن معماهای عظیم، یعنی هستهٔ اتمی و پرتوهای کیهانی، متمرکز کرده بود.

فیزیك هسته‌ای، که برای همیشه با نام رادر فورد همراه است، حتی پیش از آنکه هسته باز شناخته شود، وجود داشت، زیرا مشاهدهٔ فرایند رادیو اکتیو بسیاری از حقایق مهم را که حالا می دانند به هسته وابسته و مربوط است، اثبات کرد. رادر فورد دریافت ذرات سریعی که توسط مواد رادیواکتیو به بیرون پرتاب شده بودند می تواند زمینهٔ کاوش سایر اجزای متشکلهٔ اتم برای او باشند و این رادر فورد بود که با استفاده از آزمایشهای فیزیکدانان گوناگون برروی این پرتابه‌های اتمی، یك مدل هسته‌ای اتم استخراج کرد که تأثیر ژرف آن را بر نظریهٔ فیزیکی در همین جا و تا حدودی دنبال کرده‌ایم. و این رادرفورد بود که در سال ۱۹۱۹ از راه کشف تبدیل مصنوعی هسته‌ای، چشم انداز نوینی در برابر علم هسته‌ای گشود. زیرا در آن سال، برحسب تصادف، او ثابت کرد که وقتی یك ذرهٔ α ی سریع به یك اتم ازت، یك پروتون، یا هستهٔ هیدروژن برخورد می کند، به بیرون پرتاب می شود. به زودی واپاشیهای مصنوعی دیگری از این دست آشکارسازی شد، و پی گیری به طور جدی ادامه یافت. رادر فورد در جستجوی پرتابه‌های قویتر بود تا با آنها هسته را بمباران کند؛ امّا تا سالهای سال آدمی نتوانست پرتابه‌هایی را که در طبیعت یافت می شوند اصلاح کند. سپس در اواخر دههٔ سی فیزیکدانان، طراحی ماشینهایی را به منظور شتاب دادن خیلی زیاد به ذرات اتمی آغاز کردند که مهمترین آنها سیلکوترون است، چرا که ا. ا. لاورنس، فیزیکدان امریکایی، که آن را اختراع کرد، در سال ۱۹۳۹ جایزهٔ نوبل را دریافت داشت. با دست یافتن به چنین ماشینهایی، تبدیلهای مصنوعی هسته‌ای تقریباً به کار پیش پا افتاده‌ای تبدیل شد. با همهٔ اینها، برخی از مهمترین کشفیات هسته‌ای، که پیرامون آنها سخن خواهیم گفت، به کمك

پرتابه‌های طبیعی پرتوزایی و پرتوهای کیهانی به موفقیت انجامید.

مکانیك کوانتومی، همراه با پیشرفت چشمگیر پژوهشهای هسته‌ای، با آزمونی تعیین کننده روبه رو شد. زیرا این علم از بطن فوتونها و الکترونها زاده شد. طیف نمایی، اثر فوتوالکتریك، و دیگر پیروزیهای پر شکوه آن تقریباً به تمامی در حوزهٔ الکترون و فوتون قرار می‌گیرند. اکنون به همراه مردانی که قلمروهای ناشناختهٔ هسته را کشف می کردند، این نظریه می بایست قدرتش را علیه کشفیات تجربی در سطحی بسیار ژرفتر به کار اندازد. این آزمونی بسیار عالی از میوه‌های به بارنشستهٔ مکانیك کوانتومی هم بود. آیا این آخرین نظریه، که از جانب فوتون و الکترون، به وجود آمده، پرورش یافته و با محبت نواخته شده بود، به طور موفقیت‌آمیزی کشفیات جدید در این قلمروهای پیشروندهٔ اکتشاف علمی را در برخواهد گرفت، یا در نخستین آزمون خارجیش در این جهان خشن و ناملایم در سرزمین بیگانه، مانند بسیاری از نظریه‌های پیشتر از خود، کاستیهای جدی و شاید مهلکی را به نمایش خواهد گذاشت؟ زمان آن فرا رسیده بود که مکانیك کوانتومی بر پاهای خود بایستد و جایگاه بحق خود را در جهان به سرعت گسترش یابندهٔ اکتشاف فیزیکی، بیابد. آیا این جایگاه بلند مرتبه خواهد بود و یا پایین مرتبه، دیرپا، یا ناپایدار؟

در سال ۱۹۲۸، در اوایل زندگی این نظریهٔ نوین بود که اوپنهایمر به ویژگی ریاضی مشخصی از مکانیك کوانتومی پی برد. اندك زمانی پس از آن جورج گاموف، فیزیکدان نظری، از این ویژگی در یك کاربرد مهم در مسئلهٔ هسته‌ای پرتوزایی سود برد. در واقع، این نظریهٔ نوین چنان در ابتدای زندگی خود بود که کوانتوم هنوز هم پا از حرکتهای نامنظم کودکانهٔ خود فراتر ننهاده بود، زیرا کشف گاموف به طور مستقل، و عملاً در همان هنگام، از جانب ر. و. گورنی و ا. ی. کاندن، دو همکار انگلیسی و امریکایی صورت گرفت.

در مورد پرتوزایی از دیرباز اختلاف بی نتیجه و پریشان کننده‌ای وجود داشته است. بیان این اختلاف سهل و درك آن آسان بود؛ و همین سادگیش به طور معماگونه‌ای آن را به همان اندازه ممتنع کرده بود. به خاطر مبهم بودن این اختلاف بود که می بایست به جستجوی راه گریزی زیرکانه، و پیچیده برمی آمدند، امّا در مقابل چنین اختلاف ساده و ناسازگاری ناچیزی، زیرکی و ظرافت اصلاً کارایی

نداشت. یك مسئلهٔ دیگر هم بود: هستهٔ اتمی را می توانستند نوعی آتشفشان بدانند که درون دهانهٔ متلاطم آن اقیانوس ناآرامی از ذرات قرار دارد. هستهٔ معمولی با یك آتشفشان خاموش متناظر است، و هستهٔ رادیواکتیو با آتشفشانی فعال شبیه است. اگر انفجار آتشفشانی کوچکتری روی می داد و از دهانهٔ آن ذره‌ای به بیرون پرتاب می شد، با گسیل ذره‌ای توسط یك هستهٔ رادیواکتیو متناظر است. این تقریباً تصویر دسترس پذیر یك هستهٔ رادیواکتیو بود. این تصویر خیلی هم خوب کار می کرد.

امّا افسوس که با آزمایش تناقض داشت. اگر ذرات به نوك دهانه می آمدند، باید با سرعت چشمگیری به بیرون می افتادند. اندازه‌گیریها نشان داد که ذرات سرعت مطلوب را ندارند. همهٔ مطلب همین بود. یك اختلاف محض. اگر دفتر محاسبات انرژی هسته‌ای تراز نباشد، پس در این میان باید اختلاف حسابی موجود باشد. در مورد محاسبهٔ انرژی هیچ چیز پیچیده‌ای وجود نداشت. این اختلاف نمی توانست به دلیل تحریفی زیرکانه باشد. این اختلاف تا حد ممکن تصور گستاخانه بود، و در محافل بانکداری می توانست کسی را روانهٔ زندان کند. پس، شگفت نیست که در محافل علمی باعث اختلاف قابل ملاحظه‌ای شد زیرا اگر اندازه‌گیریها درست بودند، و کسی هم ادعای نادرست بودن آنها را نداشت، احتمالاً ذرات نمی توانستند تا نوك دهانه برسند. پس، گریز هودینی وار* چگونه مؤثر افتاد؟ چنان به نظر می رسید که گویی تصویر مناسب و در خور آتشفشان باید اساساً نادرست باشد. تنها یك معجزه می تواند آن را نجات دهد.

در همین جا بود که گاموف خدمات بی بدیل خود را در مکانیك کوانتومی عرضه کرد. آیا معجزه‌ای ضروری بود؟ پس باید مکانیك کوانتومی معجزه‌ای فراهم می آورد. امّا مطابق منطق جدی رویدادهای کوانتومی، این معجزه باید منطقی هم می بود. به جای تصور اینکه این آتشفشان دسته‌ای از ذرات باشد که به صورت فوران بیرون می آیند، باید در درون دهانهٔ آن گدازه‌ای از امواج نوسان کننده با احتمال ψ را به تصور در آوریم. مطمئناً این تصور با تعبیر مکانیك کوانتومی بیشتر معقول است. و اکنون ریاضیات نشان می دهد که چیزی چون امواج صوتی از یك

* هاری هودینی، ۱۹۲۶-۱۸۷۴، جادوگر و نویسندهٔ امریکایی، زادهٔ ایلتون ویسکانسین، نام مستعار خود را از جادوگر فرانسوی به نام هودین، گرفت. به خاطر گریزش از قید و بند هر نوع قفل و دستبندی شهرت جهانی داشت. ـ م.

اتاق بسته صادر می شود. نوسانهای ψ هم که خود را از طریق دیواره‌های دهانه وارد میدان کارزار می کنند و امواج ψ را در خارج تشکیل می دهند، همین کار را می کنند. این حکم ریاضیات، هرچند عجیب، بسیار خوشایند بود. زیرا آیا این امواج ψ چه چیزی بودند که این طور توانستند در خارج از مرز دیواره‌های دهانه پدیدار شوند؟ آیا آنها، بنابر قوانین حاکم بر مکانیك کوانتومی، احتمالات نبودند؟ و چه نوع احتمالاتی؟ پر واضح است، احتمالاتی که یك ذره واقعاً در آنجا، جایی خارج از دهانه، داشت و به طور مرموزی از دیواره‌های آتشفشانی عبور می کرد بدون آنکه سوراخ یا خللی بوجود آورد که گذرگاهش را مشخص کند.

آیا چیزی جز مکانیك کوانتومی می توانست تصویر آتشفشان را چنین با بی پروایی رهایی بخشد؟ در واقع در عمل رهایی و آزادسازی چیزی بیشتر از بی پروایی وجود داشت. شیوهٔ این رهایی باشکوه بود، حتی بدون اثری از نظر تنگیها. زیرا در برطرف کردن مشکل ابتدایی سرعتها، این امر همچنین تنوعی از خصیصه‌های شهود پرتوزایی، مانند رابطهٔ میان سرعتها و آهنگ واپاشی که به طور تجربی کشف شد، و آن حقیقت برتر طبیعت، یعنی وجود نردبانی از ترازهای انرژی در میان هسته، را به حساب می آورد.

نخستین یورش بر هسته چنین بود، و بی گمان پیروزی عظیمی هم به شمار می آمد. باهمهٔ اینها، این چیزی جز یك کشمکش مقدماتی نبود. قرار نبود هسته با چنین سهولتی شکست بخورد. ارائهٔ رازهای عمیقتر آغاز نشده بود. تصویر آتشفشانی هنوز هم در محاصرهٔ مشکلات بود، و بدبختانه فاقد جزئیاتی بود که مفهوم مناسبی از هسته بدانها نیاز داشت.

یك چیز خاص دربارهٔ تصویر آتشفشانی، نگران کننده بود. وقتی ذرات هلیومی را که از سوی یك هستهٔ رادیواکتیو به آن شلیك شده بود بررسی می کردند، نتایج بسیار خوبی به دست می آمد که آنها را در بالا نقل کردیم. اما در مورد الکترونهایی که به وسیلهٔ هسته به آنها شلیك شد نیز همین نوع نتایج به دست آمد. به نظر نمی رسد این موضوع مایهٔ نگرانی باشد ـ آنچه به ذرات هلیوم مربوط می شود بی گمان به الکترونها هم مربوط است، این طور نیست؟ مطمئناً باید همین طور فکر کرد. امّا الکترونها چشم انداز دیگری داشتند. آنها با سرعتهایی از هسته بیرون می آمدند که قطعاً با ایدهٔ وجود یك نردبان انرژی درون این هسته‌ها متناقض بود.

این تمام مطلب هم نبود زیرا به سخن دقیقتر، دریافتند که الکترون از هسته بزرگتر است. اینکه الکترون چگونه می توانست در داخل هسته قرار بگیرد، حتی در دنیای مکانیك کوانتومی، یك راز مهم عمده بود. قطعاً چیز عجیب و غریبی دربارهٔ الکترون وجود داشت. نظریهٔ کوانتومی در برابر آن ناکامیاب شد. این مطلب که این نظریه چگونه در نجات خود موفق شد، و با چه زیرکی تابناك و پیچیده‌ای مانور کرد و این کار را انجام داد، واقعاً داستان حیرت‌آوری است. هم اکنون نویسنده‌ای انسان دوست باید در بازگویی این سرگذشت بشتابد. بگذارید به جای او من رویداد عجیب پروتونهای دیراك را بازگویم.

در دو فصل پیش از این دیراك موفق شد میان نسبیت و مکانیك کوانتومی وصلتی به وجود آورد که اسپین الکترون فرزند این وصلت بود. معادلات دیراك بدون تردید برای توصیف رفتار الکترونها به خوبی جور در می آمدند. این معادلات این کار را بسیار عالی انجام دادند، و هرگونه جزئیات ناچیزی را وفادارانه ترسیم کردند. بدبختانه، آنها کار خود را بیشتر از آنچه ضروری بود انجام دادند؛ نه تنها رفتار معمولی یك الکترون را توصیف می کردند، بلکه همچنین شیوهٔ دیگری از رفتاری را وصف کردند که در آن الکترون یك مقدار انرژی منفی داشت، که قرار بود یك وزن منفی به آن نسبت داده شود. اگر نیرویی برآن وارد می آمد به سمت راست هلش می داد، در حالی که باید به سمت چپ حرکت می کرد. البته، این موضوع بی معنی و مُهمل بود، و کاملاً طبیعی بود که به عنوان یك حالت خاص تأسف بار، امّا خوشبختانه بی اهمیت، از معادلاتی که گذشته از اینها عالی و باشکوهند، چشمپوشی کرد. امّا از حالتهای انرژی منفی الکترونها نمی توان چشم پوشید.

در دوران پیش از کوانتوم همه چیز بر وفق مراد بود، زیرا میان حالتهای منفی و مثبت شکافی بود که با تعبیر کلاسیکی نمی توانستند بر روی آن پُل بزنند. امّا افسوس که ما در عصر کوانتوم هستیم و الکترونهای ما از یك مقدار انرژی به مقدار دیگر جهش خواهند کرد، چرا که این امر نشان ویژهٔ نظام کوانتومی است و ببینیم به چه معنایی است. اگر با یك الکترون معمولی آغاز می کردیم، می توانست جهش کند و به یك الکترون بی معنی و چرند دارای انرژی منفی تبدیل شود. دیراك به شدت پریشان خاطر و آشفته شد. در این معادلات چیزی وجود نداشت تا از این جهشها جلوگیری کند، شاید هم نقض بزرگ و مهمی در نظریهٔ او بود. شاید هم این

رویداد برآن بود که پیامی فوری و ضروری را برساند. آن پیام چه می توانست باشد؟ الکترونی که در هر لحظه در معرض تبدیل به معادل علمی هیولای اسطوره‌ای باشد، در نزد یك دانشمند جدّی، الکترون نیست. با این وجود چیزی در این معادلات نبود تا شاید بتواند از تبدیل جکیل به هاید* جلوگیری کند.

هیچ چیزی در درون این معادلات نبود ـ اما در مورد چیزهای خارج از آنها چه بگوییم؟ مثلاً، دربارهٔ اصل طرد پاولی، آن حکم سفت و سخت علیه انبوه شدگی بیش از حد، چه بگوییم؟ اگر این موضوع را بکاویم ممکن است به موقع از وقوع بحران جلوگیری کنیم. داروی تلخی است، امّا می توان آن را خورد، و به خوردنش هم می ارزد. فرض کنید تمام حالتهای انرژی منفی را که هیولای اسطوره‌ای از پیش آن را اشغال کرده‌اند، به تصورآوریم. پس الکترونهای معمولی دیگر نمی توانند به درون این حالتها بجهند. اصل طرد از این جهش آنها جلوگیری می کند. این جهشها ازدحام و انبوه شدگی ایجاد می کنند. مسئلهٔ ما حل می شود. رویهمرفته می توانیم از این جهشها چشم بپوشیم. و در واقع برای آن موضوع راه حل بدی هم نیست.

امّا افسوس که مسئلهٔ ما حل نمی شود. آن ایده کار آمد نیست. ثابت می شود که درمان دقیقاً همان‌قدر بد است که بیماری. مطمئناً، الکترونهای معمولی دیگر نمی توانند به حالتهای انرژی منفی جهش کنند. امّا چه چیزی از جهیدن این هزاران الکترون با انرژی منفی به حالتهای انرژی مثبت، و به این ترتیب تبدیل ناگهانی از هیولاهای تنبل به الکترونهای خوش رفتار جلوگیری می کند؟ همینکه این امر اتفاق افتد، این پرسشها می توانند حتی در هردو راستا روی دهند. افسوس که این کار انجام نمی شود. چنین اقدام جسورانه‌ای مثل داخل کردن تعداد زیادی از هیولاهای سنگین و بی‌حال شایستهٔ سرنوشت بهتری بود. با این همه، اتلاف وقت برای سوگواری بیهوده معنی ندارد. کار باید انجام شود. ما هنوز هم حل این مسئله را در پیش رو داریم.

راه ممکن دیگر برای حمله کدام است؟ آیا می توانیم این معادلات را اندکی تغییر دهیم؟ آیا جمله‌ای فراتر از ریاضی، مثلاً یك x در اینجا و یك y در آنجا،

* دو جزءِ یك شخصیت واحد که روزها دکتر جکیل بود (با سیمایی انساندوست و عادی) و شبها مسترهاید (با سیمایی غیر عادی و تجاوزکار). ـ م.

بیفزاییم؟ انجام این کار بدون آنکه به معادلات صدمه‌ای وارد آورد دشوار است، اما دست کم به صورت یك امکان وجود دارد. تلاش کردن که ضرری ندارد. ببینیم چه پیش می آید. این روش خیلی هم ساده نیست. نسبیت را باید کاملاً در نظر گرفت و این نظریه تغییرات را مشکل می کند. ناچاریم مواظب باشیم که آن رقم فرّا ریاضی را جایی درج کنیم که با... تداخل نکند. امّا صبر کنید! به سرعت به اصل طرد برگردید. رویهمرفته باید این اصل درست باشد. همه چیز را می توانیم نجات دهیم. و چیز بسیار شگفتی را نیز از آن بیرون کشیم. دقت کنید. فرض کنید تمامی حالتهای انرژی منفی را پر کرده‌ایم، یعنی یك اقیانوس واقعی از الکترونهای هیولای اسطوره‌ای. و آنگاه فرض کنید این هیولاها ناگهان به یك حالت انرژی مثبت جهش کردند. ناگهان یك الکترون معمولی پدیدار خواهد شد. امّا یك حباب کوچك هم در این اقیانوس بسیار عظیم، آنجا که این هیولا ناگهان ناپدید شده است، وجود خواهد داشت. الکترون معمولی فعلاً اهمیتی ندارد. توجه خود را بر این حباب معطوف کنید. چه طور به نظر می رسد؟ چه رفتاری دارد؟ البته باید اندکی محاسبه انجام دهیم، امّا این هم به آسانی شدنی نیست. آها! این طور بله. می توان گفت این حباب در غیاب یك انرژی منفی، چنان رفتاری خواهد داشت که گویی یك انرژی مثبت دارد. یعنی همچون یك ذرهٔ خوش رفتار معمولی به نظر می رسد. بسیار خوب است. باشکوه است! پس، مانند یك الکترون معمولی به نظر می رسد؟ به معادلات نگاه دیگری بیندازیم. همین طورست؟ خیر الکترون در راستایی مخالف راستای مورد انتظار حرکت خواهد کرد؛ یعنی درست بار الکتریکی برعکسی خواهد داشت. چه چیزی است که باری مخالف بار یك الکترون دارد؟ پر واضح است، البته یك پروتون. آفریدن نظریه پروتونها همچون فراوردهٔ فرعی صرف نظریهٔ الکترونهای ما، چه فرصت شگفتی است. این نظریه واقعاً یك چیزی است؛ وحدت پرشکوهی که تا آن زمان وجود داشته است؛ یکی از آن چیزهای بزرگ در نظریهٔ علمی که در خلال عمر هرکس یك بار ـ و شاید هم فقط برای آدمی مثل دیراك، دوبار ـ پیش می آید. مطمئناً باید اندکی بیشتر روی آن کار کنیم.

امّا این خیلی بد است. اصلاً مناسب نیست. سنگینی هر پروتون تقریباً **دوهزار** برابر سنگینی یك الکترون است. اگر مسیر تحقیق و جُستار ما صحیح

است، این جرم عظیم از کجا ناشی می شود؟ شاید بتوانیم حال ویژهٔ غیر منتظره‌ای را در معادلات الکترون، یعنی فقدان تقارن کشف نشده‌ای را، آشکار کنیم. شاید حضور تمام آن هیولاهای کم انرژی باید یك اثر نافذ بر این جرمها داشته باشد. درك این مطلب شایستهٔ کوشش فوق العاده‌ای است. پاداش این کوشش خیره کننده است.

دیراك تا اینجا به پیش آمده بود و سپس دوران نیك بختی او به سر آمد. او با هیچ کوششی نمی توانست این جرم را درست در بیاورد. این جرم با استحکام تمام به ارزش الکترونی چسبیده بود، و از هر تکان جزئی سر باز می زد، و دیراك مانده بود و یك نظریهٔ ناامید کنندهٔ تلخ مربوط به الکترونها و نوترونها روی دستانش که بر آن بود که جرم الکترون و نوترون ـ باخطای صرف دویست هزاردرصد ـ برابرند. در مورد این موضوع چیزی جز پذیرفتن شکست و اعلام این نظریه در آن حال زار نبود، به امید آنکه اذهان دیگری با نیروی جوانی راهی برای اصلاح آن بیابند.

ماهها و سالها سپری می شدند. امّا در آنجا که دیراك شکست خورده بود، هیچ کس دیگری پیروز نشد. جرم همچنان سرسخت باقی مانده بود. این نظریه معیوب بود. و دیراك دیگر هیولاهای اسطوره‌ای خود را پروتون لقب نداد، بله آنها را پاد الکترون نامید.

و پس از آن، حدود چهار سال بعد، در آن سال جادویی ۱۹۳۲، کارل. د. اندرسن، آزمایشگر جوان امریکایی، آزمایشهایی انجام داد که، در سال ۱۹۳۶ برای او جایزهٔ نوبل را به ارمغان آورد. سرگذشت ما به سوی وحدتهای فراگیرنده‌تر از همیشه به پیش رفته است. اکنون ناگهان سیمای دیگری به خود می گیرد. اندرسن در حالیکه اثرات پرتوهای کیهانی را می کاوید، ذره‌ای را از نوع جدید، یعنی پوزیترون، کشف کرد. علیرغم مشکلات آزمایش، چرا که پوزیترون یك ذرهٔ کوته عمر و گمراه کننده است، شواهد با قدرت تمام نشان دادند که پوزیترون و الکترون جرمهای برابر و بارهای الکتریکی مخالف دارند. و «پروتون» دیراك همین بود؛ پادالکترون او همین بود. نظریهٔ حبابهای عظیم الجثهٔ او محقق شد.

با این حال، در کشف اندرسن چیزی واقعاً برانگیزنده‌تر از این وجود داشت. فوتونها با انرژی عظیم در پرتوهای کیهانی به زوجهای الکترون و پوزیترون تبدیل می شدند. بنابر قانون مشهور اینشتین مبنی بر ترازمندی جرم و انرژی، تابش نور به

ماده تبدیل می شد. در این جهانِ ناآرام زیر دنیای مادی ما این فرآیند تبدیل جوشان و متلاطم، از روز ازل جریان داشته است. آیا مجسم کردن این تبدیل نور به ماده در پیش چشم تقریباً ناممکن است؟ بیایید به یاری نظریهٔ دیراك نگاهی به آن بیندازیم. نوری که با انرژی عظیم، به اقیانوس سرد و غلیظ برخورد می کند، از سوی هیولای سنگین و بی حال فرو بلعیده می شود. این هیولا، که پس از تغذیهٔ نور پر انرژی شده است، بی درنگ از اقیانوس پرش می کند، به موجب این پرش به یك الکترون منظم تبدیل می شود، و در جایی که بوده است یك حباب کوچك بر جای می گذارد. این حباب یك پوزیترون است، همدم گریز ناپذیر الکترونی که به تازگی آفریده شده. اگر بعداً الکترون می خواست به حالت خارق العادهٔ قبلی خود برگردد بایستی انرژی اضافی خود را بیرون می ریخت و دوباره به همدمان پیشترش در اقیانوس، پر از حباب منتظر، می پیوست. این ماجرا چنان برای ما نموده می شود که گویی یك الکترون و یك پوزیترون ناگهان شاخ به شاخ به هم برخورد کرده و خرد شده‌اند و در میان انفجاری از تابش محو می شوند ـ ماده جریان عکس را پیموده به انرژی تبدیل شده بود. از آنجا که این فرایند عکس میانگین زمان کوتاه عمر پوزیترون را تا کسر بینهایت کوچکی از ثانیه محدود می کند، شاید تعجبی نداشته باشد که پوزیترون در تمام این مدت از مشاهدهٔ ما گریخته است. با این وجود همینکه توجه به سوی آن معطوف شده بود، ناظران به سادگی تمام آن را آشکار کردند، و در سال ۱۹۳۳ دریافتند که نقش هسته‌ای مهمی را بازی می کند. زیرا در همان سال ف. ژولیو، دانشمند فرانسوی، و همسرش کوری، دختر ماری کوری، کشف کردند که می توانند رادیواکتیویته را در هسته‌های مشخصی توسط بمباران ذرات α به دست آوردند، و همچنین دریافتند که پوزیترونهایی که به وسیلهٔ هسته‌ها به آنها شلیك می شود به همین ترتیب به طور مصنوعی رادیواکتیو بیرون می دهند. آنها، به خاطر چنین کشفی، به این صورت، سُنت فرخندهٔ دریافت جایزهٔ نوبل شیمی را در خانوادهٔ خود در سال ۱۹۳۵ احیاء و تجدید کردند.

آیا برای اینکه یك سال را جادویی بنامیم کافی نیست در آن سال پوزیترون کشف شده باشد؟ شاید. امّا مطمئناً جادویی تر از بسیاری سالهای دیگر. آنچه در سال ۱۹۳۲ روی داد پر مایه‌تر بود. و این سال مطمئناً جادویی بود، زیرا ما به چه نحوهٔ دیگری می توانیم نقش فریبنده‌ای را توضیح دهیم که نیروهای شگفت انطباق

به خاطر لذت ما آن را شکل دادند؟ این سال ویژهٔ آزمایشگران بود، سالی افسانه‌ای، و حادثه‌ساز که ظهور سه ذرهٔ جدید را اعلام کردند. پوزیترون جزیکی از این سه تا ذره نبود. دو کشف مهم دیگر در آن سال به وقوع پیوست. مثلاً، کشف آب سنگین توسط هـ. یوری شیمیدان امریکایی، یکی از آنها بود که به خاطر آن دو سال بعد به دریافت جایزهٔ نوبل در رشتهٔ شیمی نایل آمد. آنچه آب را سنگین ساخت حضور هیدروژن سنگین بود، که هستهٔ اتمی آن، ذره‌ای که جرمش دو برابر جرم پروتون امّا بارش مساوی بار آن بود، چیزی بود که تا آن وقت برای علم ناشناخته بود. هنگامی که سرانجام این ذرهٔ نوین دوترون نام‌گذاری شد، ظریفی می‌گفت که یوری علم نوین دوترون شناسی را آفریده است.

اگرچه دوترون از اهمیت فراوانی برخوردار است، و اگرچه آب سنگین بالقوه برای تحقیقات بمب اتمی مهم بود و آدمیان بسیاری برای جلوگیری از دست یافتن نازیها به آن جان خود را فدا کردند، معهذا برای داستان کوانتوم ما دارای اهمیت نسبی است. مطمئناً کشف آن تکان دهنده بود، و آنچنان که خواهیم دید، بر کاستیهای مشخصی در ایده‌های پیشین، پیرامون هسته، تأکید کرد. امّا این کشف چیزی از برخورد آن رویداد دیگر سال ۱۹۳۲ را، آن رویداد دوران ساز که قرار بود در نظریه‌های هسته‌ای ما انقلاب بر پا کند، نداشت، و بمبهای اتمی هنوز هم می‌بایست بیرحمانه ما را از بین می‌بردند، یعنی کشف ذره‌ای جدید باز هم از نوعی دیگر، یعنی نوترون، که توسط چادویك، فیزیکدان انگلیسی صورت گرفت. چادویك به خاطر این کشف خود که دنیا را زیر و رو کرد ـ و ما این عبارت را نسنجیده به کار نمی‌بریم ـ به دریافت جایزهٔ نوبل سال ۱۹۳۵ نایل آمد. رادر فورد در سال ۱۹۲۰، و همزمان با او، هارکینز شیمیدان امریکایی، براساس خواص هسته، وجود احتمالی نوترون را حدس زده بودند. در جنبهٔ آزمایشی نیز کار چادویك جز اوج تابناك تحقیقات پیشگامانی چون بوتهد و بِکِر، فیزیکدانان آلمانی، و پژوهشهای کوری و ژولیو، در ایام قبل از آن، نبود.

نوترون ذره‌ای است که سنگینی آن تقریباً برابر سنگینی پروتون است، امّا بدون بار الکتریکی است. می‌دانیم که اتم هیدروژن شامل یك پروتون و یك الکترون است. چه می‌شد اگر این الکترون به درون پروتون فرو می‌افتاد؟ انفجار کاملی به وقوع می‌پیوست. امّا فرض کنید که این کار آرامتر انجام می‌شد، به

طوریکه پروتون و الکترون به سادگی درهم ادغام می‌شدند. نتیجهٔ کار ذره‌ای خواهد بود که از لحاظ الکتریکی خنثی است. این همان ذرهٔ احتمالی بود، این اتم هیدروژن رُمبیده است، که رادر فورد و هار کینز با آن برخورد کرده بودند. پاولی نیز، نیاز به نوعی ذرهٔ خنثی را برای توضیح امری خلاف قاعده در هستهٔ اتم نیتروژن، احساس کرده بود. امّا تمامی این مطلب از اثبات تجربی مستقیم به دور بود. آنگاه بوتهدو بِکِر از تابشی عجیب خبر دادند که به نظر می رسید با قوانین پذیرفتهٔ فیزیك به ستیز برخاسته است، پژوهشهای پیشتر کوری وژولیو جز تأکید بر رفتار شگفت آن، کاری نکرد. چادویك، یکی از شاگردان پیشین رادرفورد، هم به طور تجربی و هم به طور نظری، به روشی تابناك از علائم و قرائن نتیجه‌گیری و قاطعانه ثابت کرد که این تابش نوین باید ذرات بدون باری را که نوترون می نامیم، همان نامی که در حدود دوازده سال پیشتر از آن از سوی هارکینز و رادرفورد به کار رفت، در برمی گیرد. چه این سرگذشت تکامل علم فیزیك می بود، یا حتی قصهٔ بارها گفته شدهٔ بمب اتمی، می توانستیم درنگی کنیم تا جزئیات بسیار جالب این تحقیق و جستار را باز گوییم، این را که چگونه انریکوفرمی دانشمند بزرگ ایتالیایی نوترون را برای بمباران اورانیوم به کار گرفت، و با چه نتایج عجیبی؛ و سرانجام این امر چگونه به کشف شکافت هسته‌ای، با تمام آنچه فراهم می آورد، مُنجر شد. امّا این داستان، سرگذشت کوانتوم‌است. ما جرئت نمی کنیم از این حوزهٔ مرکزی بحث خود زیاد دور شویم.

با وجود همهٔ اینها که وجود نوترون پیشگویی شده بود، ظهور آن نظریه‌پردازان را غافلگیر کرد، نظریه‌های آنان در تسلط برآن ناتوان بودند. معلوم شد که ایدهٔ تشریح کردن آن به عنوان یك اتم هیدروژن رمُبیده ناموفق است. اکنون که نوترون توسط آزمایشگران آشکارسازی شده بود، ظهور شواهدی مبنی بر تأیید این امر که نوترون ترکیبی ساده از ذرات کاملاً شناخته شده است آغاز شد. این ذره گدای تهیدستی نبود که در ضیافتی باشکوه حضور یافته باشد، بلکه اشرافزادهٔ والامقامی در عمارتهای علم بود که می بایست توجه ویژه‌ای به آن مبذول شود و چنان که شایستهٔ اوست به عنوان یك ذرهٔ بنیادی مورد بررسی قرار گیرد.

در نزد نظریه‌پردازان همهٔ این ماجرا یك سیر قهقرایی اضطراب آفرین به نظر می رسید. تاکنون آنها این جهان پیچیده و معمایی ما را مورد توجه قرار داده‌اند و با

احساس باشکوه خشنودی دلگرم کننده‌ای، آن را به چیزی جز پروتونها، الکترونها، و فوتونها، تبدیل نکرده‌اند.

اگر دیراك در نظریهٔ پروتون خود موفق می شد، چه وحدت باشکوهی به دنبال آن می آمد؛ کلّ عالم از چیزی جز الکترونها و فوتونها ساخته نمی شد. افسوس، که پوزیترون چنین رؤیاهای دور و درازی را تباه کرد. و نوترون، که عملاً در همان زمان ظهور می کند، به نظر می رسید که بافتهٔ بسیار ظریف آنها را به شکل تکه‌های ریزی، پاره پاره کرده است.

به نحوی باید چیزی جایگزین این رؤیاهای درهم ریخته شود. زمان ناامیدی را بر نمی تافت. باید مبارزه‌ای در می گرفت. در این حال فوتونها نباید اتمهای هیدروژن رُمبیدهٔ هارکینز و رادرفورد بوده باشند، اگرچه آنها را از هسته بیرون آورده بودند، و باید به طریقی مکانی در درون برایشان پیدا می شد. باز هم در سال ۱۹۳۲ بود که هایزنبرگ نخستین حملهٔ نظری موفقیت آمیز را به ساختار درونی جزءِ به جزءِ هسته صورت داد. او در این حمله فرض کرد که هسته تنها شامل پروتونها و نوترونهاست. این امر تا چه میزانی نسبت به ایده‌های پیشین از بنیاد منحرف بود، مفهوم انقلابی آن تا چه میزانی بزرگ بود، مفاهیمش تا چه حد جسارت آمیز بود، همهٔ اینها را رویدادها نشان خواهند داد.

شاید مطالب دربارهٔ الکترونها را، و اینکه چگونه تصویر آتشفشان نمی توانست به کارشان گیرد، فراموش کرده‌اید. این تصویر، پوزیترونها را نیز نمی توانست به کار گیرد. اگر هسته تنها شامل پروتونها و نوترونها باشد، یکی از مشکلات هسته‌ای ما فوراً حل می شود. دیگر نیازی نیست نگران باشیم که الکترونها و پوزیترونها خیلی بزرگ اند. نوترونها و پروتونها خیلی کوچکترند. محل کافی در درون هسته برای آنها وجود دارد. در حقیقت، آنها کاملاً در اندازهٔ مناسبی اند و به سهولت جور در می آیند، و اگر ما تنها پروتونها و نوترونها را به کار بریم می توانیم بر برخی اختلافهای معما آفرینی که تاکنون پیش پایمان بوده است، غلبه کنیم. زیرا بسیاری حقایق عددی دربارهٔ هسته‌های گوناگون وجود دارند که باید دقیقاً به حساب آورده شوند: جرم و بار آنها، اسپین، و چیزهای دیگر.

ایدهٔ قدیمی عملا تمام اینها را توانست توضیح دهد، امّا در مورد ازت اختلافی وجود داشت. زیرا هستهٔ ازت، که جرم آن چهارده برابر جرم پروتون

است، بنابر ایدهٔ قدیمی، باید حاوی چهارده پروتون باشد. از آنجا که بار آن تنها هفت برابر بار پروتون است، باید هفت الکترون داشته باشد که بار اضافی چهارده پروتون را خنثی سازد. بدینسان گفته شده است که جرم و بار باید چند پروتون و الکترون را در برگرفته باشند. بنابراین اسپینها باید خود به خود به موازنه در آیند. اکنون معلوم شده است که اسپین الکترونها و پروتونها یك دوم‌اند. مقادیر آنها می‌تواند ترکیب شود، یا ممکن است هر زوجشان همدیگر را خنثی کنند. جمعاً با بیست و یك ذره، که عدد فردی است. به دست آوردن یك اسپین درست ناممکن است؛ و بدبختانه اسپین هستهٔ نیتروژن مورد نظر یك واحد صحیح است. چنانچه نوترونها، مانند پروتونها، اسپین یك دوم داشته باشند، این را فوراً می‌توان با نوترونها و پروتونها حساب کرد. زیرا اکنون هستهٔ ازت شامل هفت پروتون و هفت نوترون است، که رویهمرفته تعداد این ذرات زوج است. فرض کنیم شش تا از آنها اسپینهای شش تای دیگر را خنثی کنند، و دوتای باقیمانده اسپینهای یك دوم خود را ترکیب می‌کنند، و معلوم می‌شود که اسپین کل همان واحد است که می‌خواستیم. بعداً دریافتند که این دوترون تازه کشف شده تأییدیهٔ مشابهی از ایدهٔ نوین را فراهم می‌آورد. از آنجا که جرم دوترون دو برابر جرم پروتون و بار آن برابر است با بار پروتون، ایدهٔ قدیمی طلب می‌کند که دوترون دو پروتون و یك الکترون داشته باشد. امّا معلوم شد که اسپین آن برابر یك واحد است، و یك واحد نمی‌توانست ناشی از تعداد فردی از پروتونها و الکترونها باشد. ایدهٔ جدید با این مشکل مواجه نشد، زیرا بنابر آن دوترون شامل یك پروتون و یك نوترون بود.

بله، به نظر خوب نمی‌آید. امّا آیا واقعاً مسئلهٔ ما را حل می‌کند؟ آیا یك پریشان خیالی را به نگرانی دیگری تبدیل نمی‌کند؟ اگر الکترونها و پوزیترونهایی درون هسته وجود ندارند، می‌خواهیم بدانیم که به بیرون پرتاب شدن آنها چگونه اتفاق می‌افتد.

اکنون خواهیم دید که کدام شناخت گمراهی در نظریه‌های هسته‌ای ما رسوخ کرده است. با همهٔ باریك بینی پیچاپیچ کوانتوم، این مطلب ظریفی است؛ عجیب و درهم برهم. و با این وجود برای ما که اکنون چنین ژرف غرق اصول کوانتوم شده‌ایم، چنین چیزی کاملاً منطقی است. زیرا در یادآوری چیزهای گذشته ریشه دارد. مسیر عقلانی روشن است. ما به خوبی می‌دانیم که دانشمندان ایدهٔ خود را

چگونه مطرح کردند. مسیری را که تفکر آنان یکبار پیمود، پی گیریم.

مدتها قبل، که البته چند سالی بیش نیست، امّا حالا به نظرمان می رسد خیلی سال پیش بوده، بور، آن جوان پیشاهنگ، اتم را چون هسته‌ای که الکترونها آن را در برگرفته و از مداری به مدار دیگر می جهند، تصویر کرده بود. علیرغم رویدادهای این همه سال که از آن سپری شده، زمان توانایی سرزندهٔ این تصویر ناهنجار و زمُخت را آسیبی نرسانیده است. این تصویر راهنما همچنان به صورت یك مشاور پر ارزش باقیمانده است. بگذارید از آن یك پرسش قطعی بکنیم، پرسشی هنوز هم نه دربارهٔ پروتونها و نوترونها، و باز هم نه پیرامون الکترونها و پوزیترونها، بلکه دربارهٔ آن ذرات سریع و اثیری یعنی فوتونها. برسر فوتونی که یك اتم آن را فرو می بلعد، چه می آید؟

این پرسشی است که با سادگی تمام مطرح شده است. پس، چرا الهام و پیشگویی ساکت باقی می ماند؟ این سکوتی خردمندانه است، پاسخی الهامبخش و پیشگویانه که در پیام آن باید بیندیشیم، سکوتی باردار که از آن چیزهای بزرگی خواهد رویید.

هنگامی که فوتونی با انرژی ویژه تا این حد بدبخت است که به اتم بور برخورد می کند، این به معنی پایان انفرادش به عنوان فوتون است. این فوتون به طور کامل از بین می رود، و در ضمن از میان رفتن باعث می شود که یك الکترون از مداری به مدار دیگر با انرژی بیشتر جهش کند. آیا واقعاً می توان گفت که فوتون در میان این اتم به دام افتاده است؟ هیچ کس آن را در حال اسارت تشخیص نمی دهد. به چیزی کاملاً متفاوت، به جهشی الکترونی‌که قبلا روی داده است، تبدیل می شود.

فرایند عکس هم وجود دارد. وقتی الکترونی به مداری با انرژی کمتر می جهد چه روی می دهد؟ فوتونی، با جادوگری، گویی از هیچ جا، پدیدار می شود. فوتونی در درون اتم وجود نداشته است. این فوتون تازه آفریده شده چیزی نبود مگر اثری خارجی از جهش آشوبناك الکترون.

این بازی قایم باشك شکار فوتون در ابتدا باعث توجه زیادی شد. کسانی می پرسیدند در حالیکه الکترون در حال جهیدن است چه اتفاق افتاده، و فوتون با چه جادوگریی در نیستی ناپدید می شد، و جای خود را به وسیلهٔ یك جهش بی رنگ صرف به انرژی داده است. امّا رشد عمیقتری که با مکانیك کوانتومی همراه شد به

ما آموخت که چنین پرسشهایی دقیقاً باید تا ابد بی پاسخ باقی بمانند، رویدادهایی را که به عنوان دلیل به آنها اشاره می شود اصل عدم قطعیت می پوشاند.

امّا چه اصل عدم قطعیت وجود داشته باشد یا خیر، فوتون ذره‌ای بسیار عجیب، و در یك ویژگی بسیار مهم، کاملاً متفاوت از الکترون باقی مانده است. الکترونها، مانند پروتونها، مادهٔ ساختمانی شگفت انگیز، و توصیف ناپذیری برای یك عالم جاوید و فناناپذیر بودند. امّا فوتونها! عجبا، فوتونها صرفاً روشنایی کاذبی بودند، ناپایدار و غیر واقعی، تنها انرژی آنها پایدار است. در حقیقت، رفتار آنها همچون موج ذرات بود، مثل الکترونها. امّا آمد و رفت آنها آزادانه صورت می گرفت؛ از نیستی بیایند و دوباره به نیستی برگردند؛ همچون موج ذره‌های نور افشان و تابان مادیت یابند و دوباره به جهشهای انرژی بدون نور، و سیاه، تبدیل شوند. در اطراف آنها هیچ چیز سخت یا غیر حساسی وجود ندارد. آنها شخصیت پایداری ندارند. بیشتر از آنکه پروتونی باشند، پروتئوسی* بودند. آنها می توانند همچون خرگوشها تکثیر شوند. هرگز نمی توانید مطمئن باشید چند تا از آنها را دارید. حتی می توانید اصلاً با هیچ آغاز کنید و ناگهان خود را غوطه‌ور در آنها بیابید. آیا وقتی که یك بمب اتمی، یا حتی یك بمب معمولی هرچند هم کم اهمیت‌تر، منفجر می شود، دقیقاً این اتفاق نمی افتد؟ در یك لحظه، همراه با اثرات دیگری که به هیچ وجه چشم پوشیدنی نیستند، وفُور شگفت انگیزی از فوتونها نمودار می شود، جرقهٔ خیره کننده‌ای از نور در جایی که بیش از آن تاریکی بود، ناگهان فوتونهای درخشانی به تعداد سرسام آور به وجود می آیند. به بمب هم نیازی نداریم تا چنین آفرینشی را عملی کنیم. موضوع خیلی پیش پاافتاده است. هرروز بدون هیچ فکری با فشار یك کلید و روشن کردن یك چراغ، این کار را انجام می دهیم.

این تمایل دمدمی و متلون فوتون نسبت به جهیدن در هستی یا نیست شدن، آن را چیزی جدا از الکترون قوی بنیه و قابل اتکاء قرار می دهد. چه کسی می توانست پیش بینی کند که مقرر شده است الکترون ظاهراً نیستی ناپذیر همان راه فرار سرکش را در پیش گیرد؟ با این حال الهام با سکوت خود درس خوبی به ما داد. و آیا آمدن پوزیترون ادعاهای خودستایانهٔ الکترون را مبنی بر نیستی ناپذیری،

* Proteus ـ رب النوع دریایی که به اشکال گوناگون در می آمد. ـ م.

تباه نکرد؟ الکترونها و پوزیترونها، شبیه فوتونها، به وجود می آیند و از بین می روند. به راستی رسوایی آنها کامل است، چرا که آنها حتی به همان فوتونی تبدیل می شوند که یك بار آن را به خاطر ناپایدار بودنش تحقیر کرده بودند.

اگر الکترونها و پوزیترونها در این مورد خاص این طور به فوتونها شبیهند. پس چرا نباید جنبه‌های رفتاری دیگری هم شبیه فوتونها داشته باشند؟ اگر آنها نسبت به هسته خیلی بزرگ‌اند، چرا نمی توانند خارج از هسته موجودات مشخصی باشند بلکه فقط به صورت تغییر حالتهایی در درون هسته‌اند؟ این امر، در حالیکه کوانتوم را از پریشانی هسته‌ای جدی نجات می دهد، تمامی پیروزیهای دوران پیش از هسته‌ای فیزیك کوانتومی را نیز زنده نگه می دارد. در واقع، جزئیات مهم بسیاری پیرامون هسته وجود دارند که ما اصلاً ذکری از آنها به میان نیاورده‌ایم، و این جزئیات نشان می دهد اگر چنین ایده‌ای با هسته تلفیق نمی شد، کوانتوم را کاملاً از میان برمی داشت، و این یك گریزگاه باریك است. امّا راه گریز دقیقاً در بطن سنتهای پابرجای مسیر تفکر قرار داشت. ما دیگر بر آن باور نیستیم که پروتونها و الکترونها هسته را می سازند. ما اکنون فکر می کنیم که پروتونها و نوترونها آن را می سازند. الکترونها و پوزیترونها هرگز درون هسته نیستند. آنها جلوه‌های خارجی تغییراتی اند که در درون روی می دهند.

این یك مفهوم نوظهور است، و اشاره‌ای نوظهور هم دارد، زیرا به این معنی است که پروتونی که بار الکتریکی دارد و نوترونی که از لحاظ الکتریکی خنثی است عملاً یك ذرهٔ واحد هستند.

البته، این مطلب بی معنی به نظر می رسد. چگونه نوترون بدون بار می تواند ذره‌ای همسان پروتون باردار باشد؟

دانشمند بزرگ پاسخ را از پیش تدارك دیده است. وقتی فوتونی با یك الکترون ادغام می شود، چه روی می دهد؟ الکترون جهش می کند و فوتون دیگر وجود ندارد. الکترون به اضافهٔ فوتون ذرهٔ ترکیبی جدیدی نیست. درست همان الکترون قدیمی مانند پیش است امّا در حالت انرژی جدید. چه‌چیزی به هستهٔ ساخته شده از پروتونها و نوترونها، شبیه خواهد بود؟ وقتی الکترونی با یك فوتون ادغام شود جهشی در حالت انرژی و بار پروتون وجود خواهد داشت، و الکترون دیگر وجود ندارد. پروتون به اضافهٔ الکترون ذرهٔ ترکیبی جدیدی به دست نمی دهد.

درست همان پروتون قدیمی پیش خواهد بود، امّا در حالت جدیدی از انرژی و بار؛ همان پروتون قدیمی امّا اکنون از لحاظ الکتریکی خنثی، زیرا بارهای الکترونی و پروتونی دقیقاً در حال موازنه‌اند؛ همان پروتون قدیمی است، امّا اکنون آن را یك نوترون می نامیم. و اگر یك پوزیترون به همین ترتیب با یك نوترون ادغام یا ترکیب شود، نوترون به عقب و به حالتِ پروتونی قدیمی خود باید جهش کند.

این است راه و رسم فکر کردن به هسته. این خمیر مایه‌ای است که اورانیوم و پلوتونیوم بمبهای اتمی از آن ساخته می شوند. آن شیوهٔ رؤیایی که بنابر آن باید عالم خود را بسازیم، همین است. هرچند این مفهوم دقیق و ظریف است، شباهت با فوتون، حتی در بیان ریاضی جزءِ به جزءِ، کامل است.

سرگذشت ما هنوز هم شگفتیهایی در خود دارد. آیا احتمال دارد که مطالب مربوط به الکترونها را فراموش کرده باشید؟ گرچه ما اکنون آنها را از هسته بیرون رانده‌ایم، اما هنوز می توانند فتنه به پاکنند. به یاد داشته باشید که، آنها هنوز هم با این حقیقت بی‌چون و چرا که یك نردبان انرژی درون هسته وجود دارد، در تعارضند. ترازنامه‌های انرژی به نحوی با هم نمی خوانند. آیا کوانتوم می تواند یك بار دیگر ما را نجات دهد؟ تنها از راه تأکید بر اینکه تراز ستونهای حساب اسپین نیز، مثلاً وقتی یك پروتون به نوترون تبدیل می شود یا برعکس، درست در نمی آید. البته این امر از نظر پاولی کافی بود. او گفت که اگر حسابها با هم نخوانند، باید سرقت انجام گرفته یا ذره‌ای در کار باشد. موجودیت ذره‌ای از نوع جدید اعلام شود، غارتگری که مقداری انرژی واسپین را به سرقت می برد و هیچ ردپایی هم برجای نمی گذارد. امّا چنین ذرهٔ جسوری چگونه می تواند از مشاهده شدن بگریزد؟ آشکار است که باید ردایی از رؤیت ناپذیری بر آن بپوشانیم. پس، آن را از سیستمی که بار الکتریش را باز بنمایاند، محروم می کنیم. تنها برای آن کمترین جرم را منظور می کنیم. در صورت لزوم، فرض می کنیم که اصلاً جرمی نداشته باشد. چنین ذرهٔ مجرد از جسمیتی می تواند درست از زیر دماغ ما دزدی کند و از آشکار شدن بگریزد؛ فعالیتهای نابکارانهٔ آن تنها از طریق یك نوع ممیزی کردن الکترون باید فاش شود. و برای این نوترون خُرد چه نامی می تواند برازنده‌تر از نوترینوی خُرد ایتالیایی باشد؟

تنها کلید راهنمای ما به سرشت نوترینو همان دزد بودن آن است، زیرا خود دزد هرگز به دام نمی افتد. آشکار است که بر مبنای شواهد کیفی می توان علیه آن

پرونده‌ای ساخت. امّا آیا این پرونده بی عیب و نقص است؟ ایدهٔ نوترینو در دستان فرمی و همکارانش تا حد یك نظریهٔ ریاضی بالغ تکامل یافت. وقتی همه چیز تابع دقتهای ضروری برای یك وارسی تحقیقی در مورد عمق و شدت باشد همه‌چیز به سازگاری شواهد موکول است به طوری که فقط یك ریاضیدان توانا می تواند آن را به تصور در آورد. علیرغم برخی مشکلات که هنوز هم به طور کامل حل نشده است پی بردند که شواهد موجود تصویر سازگار معقولی را از بطن آن دزد نامرئی پدید می آورد، و آن نوترینوی غارتگر نیز به همین ترتیب به محرابهای متبرك علم پذیرفته شد. این ذره در سال ۱۹۳۳، تقریباً در میانهٔ آن سال جادویی ذرات، زاده شد.

از طریق این اندك فعالیت کارآگاهانه، راز و رمزهایی که تا آن موقع پوشیده بودند فاش شدند. هرگاه پروتونی به یك نوترون، یا نوترونی به یك پروتون تبدیل می شد، می بایست نوترینویی همراه با پوزیترون یا الکترون در این امر دخیل می بود، مبادا کسریهای غیر قابل محاسبهٔ دفترهای کل حسابرسی فاش شود.

امّا اگرچه نوترینو به گروه مناسبی پیوسته بود، هنوز هم راز و رمز فاش نشده‌ای وجود داشت، هنوز هم اختلافی می بایست حل شود تا اثر دیرپای آن از ذهن آدمی ریشه کن شود.

درون هسته نیروهای حیرت‌آوری با نیرویی باور نکردنی موجودند که اجزای جدگانهٔ آن را در یك کل به هم فشرده، جوش می دهند. می توان از مشخصه‌های اولیهٔ هسته‌های مختلف دید که این نیروها با نیروهای شیمیایی که اتمها را به مولکولها مقید می کند، شبیه است. بنابراین، هایزنبرگ پدیده‌های تبادلی درون هسته را به آنها نسبت داد. طرح او بعداً به صورت جزئیات با اهمیتی توسط مایورانا اصلاح شد. مطابق این تصویر عجیب که دانشمندان وقتی به این چیزها فکر می کنند ناگزیرند آن را به کار گیرند، این تبادل از نوع تبادل وضعیت موزون میان ذرات تشکیل دهندهٔ ذره است.

در این حال به کمك افشاندن یك الکترون و یك نوترینو، یك نوترون می تواند به یك پروتون تبدیل شود، و یك پروتون می تواند از طریق جذب آنها به یك نوترون تبدیل شود. بدینسان تبادل مکان میان یك پروتون و یك نوترون را می توان به عنوان نوعی پرتاب کردن به پس و پیش میان یك الکترون و یك نوترینو، شبیه به پس و پیش دویدنهای طولانی و سریع در بازی تنیس، تصویر کرد. نوترون توپ را سرویس

می کند، و در حال سرویس کردن به پروتون تبدیل می شود. پروتون اصلی سرویس را دریافت می کند، و در حال این دریافت به نوترون تبدیل می شود. این نوترون بی درنگ به سرویس می رود، و بنابراین به حالت پروتون خود برمی گردد، در حالیکه حریفش را به حالت نوترون برمی گرداند. اثر چنین پس و پیش رفتنی در بازی تنیس یك تغییر موزون است که در ضمن آن ما در یك لحظه یك نوترون در این طرف تور داریم و پروتونی در آن شو، لحظهٔ بعد یك پروتون در اینجا و یك نوترون در آنجا، و این روند ادامه خواهد یافت.

اگر بخواهیم تصویر کنیم که به این روش چگونه دو نرترون یا دو پروتون مواضع خود را مبادله می کنند، ناچاریم بازی تنیسی را تصویر کنیم که با دو توپ بازی می شود که این دو توپ در آنِ واحد در جهتهای مخالف در حال پروازند.

البته نمی توانیم به این پس و پیش رفتن با جزئیات زیادی فکر کنیم. رویهمرفته، «ذرات» گوناگون درگیر این ماجرا همگی موج ـ ذره‌اند، و تا آنجا که اصلاً صحبت کردن از اندازهٔ آنها مجاز است، الکترون از پروتون و نوترون، و کلّ میدان بازی تنیس هسته‌ای، بزرگتر خواهد بود. بدینسان هاله‌ای روح مانند از الکترونها و نوترینوها که به طور نامعینی میان هستی و نیستی افتاخیز می کنند، گرداگرد نوترونها و پروتونهای هسته را فرا گرفته‌اند. این هالهٔ الکتریکی از موج ذره‌ها با میدان الکترو مغناطیسی که ماکسول سالیان پیش آنها را به عنوآن جایگاه لوله‌های نیروی فاراده تصور کرده بود، به هم می پیوندد. و هایزنبرگ از طریق سازوکار پس و پیش رفتن بازی تنیس خود درصدد برآمد که پیوندی ژرف میان این سازوکار و نیروهای عظیم درون هسته، برپا دارد.

این ایده جاذب و فریبنده بود، امّا افسوس که با وجود همهٔ افسون غیر قابل انکارش به طور کامل عملی نبود. اگرچه نیروهایی می توانند از آن استنتاج شوند، و نیروهایی عظیم و باورنکردنی می توانند در آن باشند، نظریه‌پردازان، مانند آدمی خواب در یك شب زمستانی با رواندازی بسیار کوتاه، خود را درگیرِ معضل بی نتیجه‌ای یافتند. اینکه به این نیروها مقدار انرژی ویژه‌ای بدهند، اصلاً در نزد آنها مشکلی نبود، امّا اگر این کار را می کردند این نیروها به یك دویستُم حدّ کافی هم نمی رسید. در حقیقت، نظریه‌پردازان می توانستند تا نزدیکی این نیروها دست دراز کنند، امّا این امر مانند کشیدن یك روانداز تا گوشهاست در حالیکه شصت پاها را رو

باز می گذارند. چه بدتر، زیرا اگر آنها حدود این نیروها را تا دویست و پنجاه تای لازم وسعت می دادند، مقدار انرژی نه دویست بلکه دویست میلیارد بار ضعیف می شد.

یا انگشتان شصت پا را می توان از یخ زدن محفوظ داشت و یا گوشها را، امّا نه هردوی آنها را. به نظر می رسید که این نظریهٔ نوباوه بر اثر فقدان انرژیی که از راه بی حفاظی اجتناب ناپذیر به بیرون می فرستاد، محکوم به مرگ است. هیدکی یوکاوا، دانشمند ژاپنی، همان کسی که راهی نظری به خروج از این بن بست یافت، راهی که به طور همزمان هم گوشها و هم انگشتان شصت پا را می پوشاند، این نظریه را از چنگال مرگی نابهنگام رهایی بخشید. این نظریه مستلزم چیزی بود که پس از آن در میان دانشمندان به سرعت به یك عادت تبدیل شد؛ تقریباً یك بیماری شغلی ذهنی. می توانید حدس بزنید در آن روزها رسم متداول چه بود؟ ذرات جدید. مگر اینطور نیست؟ پوزیترونها. نوترونها. نوترینوها. و باز هم یکی دیگر. زیرا یوکاوا فرض کرد که اگر نوع جدیدی موج ذره را در آن هالهٔ قدرتمند گرداگرد پروتونها و نوترونها تصور کنیم، می توانیم نیروهای هسته‌ای مناسبی را فرض کنیم، چنانچه هایزنبرگ از ابتدا بر این امر امید بسته بود. تنیس باید با توپی از نوع جدید بازی می شد. توپی که جرم آن نه تنها میانهٔ جرم نوترون و الکترون باشد، باید یك میانجیگری کنندهٔ واقعی بین آن دو نیز وجود داشته باشد. زیرا، بنابه نظر یوکاوا، وقتی نوترونی به یك پروتون تبدیل می شد و یك الکترون و یك نوترینو را در خلال پرتوزایی از یك هسته گسیل می کرد، این ذره این الکترون و نوترینو را، همان طور که پیشتر از آن هم فکر می کردند، بی درنگ نمی آفرید و آنها را به بیرون پرتاب نمی کرد. ابتدا یك ذرهٔ یوکاوا را می آفرید، که پس از عمر فوق العاده کوتاهی منفجر می شد و به دو تکه که همان الکترون و نوترینوی ایدهٔ قدیمیتر بودند، تقسیم می شد.

آهنگ اکتشافات بسیار سریع بود. در حالیکه هایزنبرگ ایدهٔ خود را در سال ۱۹۳۴ ابراز می داشت، یوکاوا در سال ۱۹۳۵ این ذرهٔ نوین را، یك اندیشهٔ صرفاً نظری، جالب توجه و خوش آتیه، امّا تأیید نشده پیشنهاد کرد. امّا، تأیید و تثبیت آن مدت زیادی به تأخیر نیفتاد، چرا که در آغاز سال ۱۹۳۶ این نوع جدید ذره عملاً در میان پرتوهای کیهانی مشاهده شد. یکی از نخستین کسانی که به وجود آن پی برد همان اندرسن بود که قبلاً پوزیترون را کشف کرده بود. برای حل برخی از مشکلات

عظیمی که هنوز بر سر راه نظریهٔ نیروهای هسته باقی بود، فرض انواع گوناگون دیگری از ذرات یوکاوا، هم باردار و هم خنثی ضرورت داشته. چنین ذراتی اکنون به طور آزمایشی به عنوان سازاهای مهم پرتوهای کیهانی تشخیص داده شده‌اند، با این وجود هنوز هم بر سر نام آنها توافقی وجود ندارد. برخی فیزیکدانان به آنها مزوترون می‌گویند، در حالیکه دیگران آنها را مِزون می‌نامند.

معادلات حاکم بر رفتار مزونها سرانجام آشنا در آمدند. این معادلات با معادلاتی که ماکسول برای میدان الکترو مغناطیسی به دست داده بود شباهت قابل توجهی دارند. می‌توان معادلات ماکسول را در نظر گرفت و به کمك تغییر اندکی آنها را به معادلات مِزون برگرداند. آیا این همان چیزی بود که می‌توانست فیزیکدانان کوانتومی را به کودکی دومی وارد کند؟ آیا می‌توانست بر همان چیزهایی مبتنی باشد که هنوز هم در نظریه‌های قدیمی‌تر اثری از حیاتش موجود است؟

اکنون اتم قدیمی، رادر فورد ـ بور، از دریچهٔ وضعیت کنونی دانش ما، همراه با پوزیترونها و نوترینوهایمان، نوترونها و انواع گوناگون مزونهایمان، چه ساده و ابتدایی جلوه می‌کند، و ملاحظهٔ خام بودن تام و تمام آن به طور چشمگیری واقعی و مؤثر به نظر می‌آید. مطمئناً در سالیان بعد کسانی به عقب و به این گشت و گذارهای مردد و آزمایشی کنونی ما در دل تاریکی، با شگفتی و تحسین بردبارانه خواهند نگریست، سرگشته از این که مفاهیمی چنین خام و ناقص را تا چنین عمقی می‌کاوند، و بسیاری رازهای هولناك، تیره و تار، و گرانبها را از مام طبیعت انتزاع می‌کنند، و تمدن بچگانهٔ ما را در معرض چنین خطرهای مهیبی قرار می‌دهند.

اگرچه تصویر هسته با جزئیات بیشتری روشن شد، امّا دانش فزاینده راه نظریه‌پرداز را هموار نکرد. هسته ساختار بسیار پیچیده‌ای داشت. این ساختار ذرات بسیار زیادی را در مجاورت یکدیگر داشت تا تحلیل ریاضی جزءِ به جزئی را به آسانی ممکن سازد. در نظر گرفتن چیزی جز ساده‌ترین هسته‌ها همچون توده‌های ذرات با برهم کنش‌های مختلف که به طور انفرادی بررسی می‌شوند، نوترونها و پروتونها، با رفیق همراهشان الکترونها، پوزیترونها، نوترینوها، فوتونها، و مزونها ـ امر ناممکنی بود. پیچیدگی محض مسئله چنین تلاشهایی را با شکست رو به رو کرد. هر چند نتایج عملیی به دست داده شد تا پژوهش هسته‌ای را راهبری کند، امّا راه میان بُری از میان پیچ و خم پیچیدگیها مورد نیاز بود. در حالیکه می‌بایست

بررسیهای جزءِ به جزءِ را بدون توقف دنبال می کردند، اصل ساده و فراگیری هم ضروری بود تا مبادا حل مسائل مُبرم به تعویق بیفتد.

جایگاه ایده‌آل نبوغ بی همتای بور همین جا بود. وقتی نظریهٔ اتمی تزلزل پیدا می کند، او همراه با نظریه‌ای که مسلماً موقتی است به یاری آن برمی خیزد و به نحوی وضعیت خیره کننده‌ای را جا می اندازد. او با نظریهٔ اتمی اصلی خود، و نیز با اصل همخوانیش، در سال ۱۹۱۳، این کار را انجام داد. او اکنون برآن بود که در سال ۱۹۳۶، نظریهٔ دیگری را به عنوان درمان، همان ایده‌ای که چ. فرنکل نظریه‌پرداز روس مستقلاً داشت به پیش می بُرد، وارد میدان کند. بور پشتیبان و راهگشای بزرگ فیزیك اتمی است، سازمان دهنده‌ای حیاتبخش برای زنده نگهداشتن یك شغله ذهنی لرزان، تا به تکیه‌گاهی برای نیروی ذهنی تبدیل شود. کدام فیزیکدان نظری هرگز چنین موفقیت آمیز و در ضمن چنین ساده، مانند بور، ایده‌هایی را با شتاب فراهم آورده و فی البداهه ساخته است؟ کامیابیهای اولیهٔ او تصادفی نبودند. و این نیز باز هم نظریه‌ای ظاهراً پوشالی بود که باید توانایی ذاتیش محقق می شد.

این نظریهٔ نوین بور و نظریهٔ فرنکل از چه دسته‌ای بود؟ آیا آمیزهٔ شگفتی از کهنه و نو، آمیخته‌ای جادویی از اجزای ترکیبی کوانتومی و کلاسیکی برای ادامهٔ شباهتی از نظریهٔ اتمی سال ۱۹۱۳؟

این نظریه آمیخته‌ای از جوهرهای ناجور نبود، بلکه نظریه‌ای سودمند، متداول و صرفاً کلاسیکی بود. بله. کلاسیکی، و نه کوانتومی.

اگر ما از نشانه‌های مزونی اخیر کودکی دوم فیزیك اندکی حیرت می کردیم، دربارهٔ نظریه‌ای که عملاً هسته را به یك قطرهٔ آب شبیه می کند چه می گفتیم؟ دربارهٔ این واپسین پیچ و خم کلاسیکی در قصهٔ کوانتومی خود چه فکری خواهیم کرد.

نخست مردد می مانیم که چنین مدل کلاسیکی هسته، چنین مدل هسته‌ای کاملاً نامربوطی چگونه امکان موفقیت خواهد داشت. امّا آیا نیروهای هسته‌ای عمدتاً نیروهای مبادله‌ای نیستند، و آیا نیروهای بستگی شیمیایی نیز نیروهای مبادله‌ای نیستند؟ پس، آیا خیلی جای شگفتی است که اگر گروهبندیهای اتمها و مولکولهای آب به هم می پیوندند و قطره‌ای را تشکیل می دهند، ذرات هسته‌ای نیز به هم بپیوندند و هسته‌ای قطره‌گونه تشکیل دهند؟ حقایق شناخته شده پیرامون

نیروهای هسته‌ای نشان می دهند که این شباهت به راستی بسیار نزدیك خواهد بود. از دیدگاهی عام، و نه خیلی تفصیلی جامع، این دو رفتاری شبیه به هم خواهند داشت، حتی مفاهیم قطرهٔ آبی کلاسیکی مانند دما، کشش سطحی، و موجك، بر هسته قابل اعمال‌اند. در پرتو این شباهت، حقایق آشنا معنی نوینی پیدا می کنند؛ بدینسان دیگر ذرات مثل قبل از ذرات پرتوزا «شلیك» نمی شوند بلکه از آنها «تبخیر» می شوند.

در سال ۱۹۳۹، که جهان در آستانهٔ جنگی شوم قرار گرفت، آزمایش تعیین کنندهٔ هان و اشتراسمان در آلمان نشان داد که در نتیجهٔ بمباران اورانیوم توسط نوترونها، باریم حاصل می شود. لیزه مایتنر و ا. ر. فریش، که از آلمان نازی گریختند، دریافتند که در نظریهٔ قطرهٔ آب هسته، قبلاً تصویری به دست آمده است که خود سر نخی است از آنچه در حال روی دادن است. آنها همراه با این سرنخ، راز و رمز پیامی مرموز را در این آزمایشها کشف کردند. هستهٔ اورانیم که دستخوش شکافت بود، شدیداً منفجر می شد، جرم به انرژی تبدیل و موجب تداوم خود به خود فرایند شکافت می شود. پی بردند دوران نوینی در برابر چشمان آدمی گشوده می شود. زیرا، خوب یا بد، انرژی هسته‌ای با توانایی بسیار زیاد می رفت تا در دستان ناآزمودهٔ انسان قرار گیرد.

بور ایدهٔ شکافت مایتنر و فریش را ادامه داد. او کسی بود که اهمیت ایزوتوپ نادر اورانیوم با عدد جرمی ۲۳۵ را پیش بینی کرد. و همراه ج. ا. ویلر، فیزیکدان امریکایی مدل قطرهٔ آب را تا حد یك نظریهٔ ریاضی جامع برای شکافت هسته‌ای تکامل بخشید؛ در این مورد نیز فرنکل مستقلاً به همین کارها مشغول بود. این تصویرآزمایشی و کلاسیك از هسته، که سه سال پیش از آن پیشنهاد شده بود، و به نظر می رسید همراه با پدیده‌های نوین در ذهن به تصوردرآمده است، به طور فوق‌العاده مناسبی آن نظریه را محقق کرد. این نظریه به تنهایی می توانست فرایند شکافت هسته‌ای را تصویر کند. به تنهایی می توانست سازوکار آن را توضیح دهد و برآمدهای گوناگون آن را در این لحظات پر التهاب و مبرم پیشگویی کند.

تصویری که این نظریه از فرایند شکافت هسته‌ای ارائه می کند بسیار ساده است. وقتی می گوییم هسته شبیه یك قطرهٔ آب است منظورمان همان چیز مبهم و مسامحه کارانه‌ای نیست که ممکن است در محاوره گفته شود، بلکه دقیقاً و با تعبیر

ریاضی، به ساختار و تنشهای درونی آن توجه کرده‌ایم، چرا که در همین دو مورد که ما می توانیم رفتار یك قطرهٔ آب باردار الکتریکی را با رفتار یك هسته برابر گذاریم، شباهت بسیار زیاد است.

شکافت هسته‌ای یك مفهوم بدیهی نبود. البته، حضور باریم نشانگر این بود که باید هسته بمباران شده به چندین پاره شکافته شده باشد. امّا برخورد تقریباً چشم‌پوشیدنی یك نوترون چگونه می تواند تأثیری چنین طوفان آسا بر هسته برجای بگذارد؟ این نوترون آرام می توانست باعث چه تغییرات ناگهانی درونی هولناکی شود؟

علتش این بود که توانستند سازوکار موجهی را تصور کنند که مایتنر و فریش جرئت کرده بودند در مورد امکان شکافت اظهار کنند. نیروهای موجود در هسته از دو نوع مغایرند. در یك سو، رانشهای الکتریکی قرار دارند، که اگرچه آزاد و بدون قید هستند، امّا هسته را به شدت درهم می شکافند. در سوی دیگر نیروهای ربایشی قدرتمندی در کارند که ذرات هسته را به یکدیگر می پیوندند و مقید می کنند. امّا، این نیروهای بستگی محدودیتهایی هم دارند. مثلاً، برخلاف نیروهای ضدشان، یعنی نیروهای رانشی، دارای گسترهٔ عمل بی نهایت کوتاهی اند. در یك هستهٔ کوچك این نیروها می توانند به آسانی نیروهای رانشی را در کنترل گیرند، امّا اگر هسته بزرگ باشد ناکافی بودن گسترهٔ آنها آشکار می شود و، با توجه به محدودیتهای دیگر، نمی توانند به سادگی بر نیروهای گسستگی که به طور عمده از بار الکتریکی عظیم هستهٔ سنگینتر بهره می گیرند فائق آیند. پس، وقتی یك هستهٔ بزرگ با یك قطرهٔ آب باردار مقایسه می شود، یا هسته‌ای بسیار بزرگ و به شدت باردار شده که در آستانهٔ شکستگی و انفجار باشد، متناظر خواهد بود. وقتی نوترونی اضافی بر هسته افزوده می شود چنان است که گویی کمی آب بیشتر به قطرهٔ بسیار بزرگ قبلی افزوده شود. تمایل به سوی گسستگی به طور هراسناکی افزایش می یابد. امّا بگذاریم این نوترون با سرعت کمی که برای به لرزش در آوردن قطرهٔ هسته‌ای مورد نیاز است افزوده شود، و این احتمالات قطره‌ای هستند که بر اثر تکان از هم می گسلند، دو هستهٔ کوچکتر تشکیل می دهند که سپس نیروهای شکافندهٔ غالب باعث می شوند تا این دو به شدت از یکدیگر دور شوند، و خرده‌هایی کوچك از مادهٔ هسته‌ای ـ یعنی نوترونها ـ را که گرچه در آن زمان برای مایتنر و فریش ناشناخته بود، به هرسو پراکنده

و پخش کنند. برای نیروی هسته‌ای نوترونهای کُند به کار گرفته می شوند؛ در حالیکه در بمبهای اتمی، از نوترونهای سریع بهره می گیرند. امّا این دو تصویر در اساس خود به یکدیگر شبیهند.

و در همین جا بود که پرده فرو افتاد، پرده‌ای از سکوت دل تنگ کننده و رازی خفقان آور که هراسی مرگ‌زا را می پوشانید. چه چیزهایی ممکن است به پایهٔ این نظریه‌های نوین هولناك که تاکنون اسیر بودند، محصور در پشت سیمهای خاردار لوس آلاموس* و اوُك ریج**، رشد کرده باشد؟ چنین چیزهایی اکنون از اسرار نظامی اند و فقط جاسوسان باید دربارهٔ آنها حرف بزنند و دانشمندان. هنوز هم گوشه‌ای از پرده بالا رفته است تا به جزئیاتی از دانش امکان دهد به سوی نور بگریزند، و علیرغم هزینهٔ فراوان و تلاشی که مصروف ساختن بمب اتمی می شود، منابع موثق اظهار می دارند که هیچ نظریهٔ نوینی از آن برنخاسته است که جانشین کوانتوم شود و یا با آن به مبارزه برخیزد.

فیزیکدانان به روشهای صلح آمیز رو می کنند. امّا جهان که از برج عاج خود به بیرون می آید، اکنون در می یابد که تحقیقات نظری بی تزویر و سادهٔ آدمهایی مثل پلانك، اینشتین، یا بور ممکن است در خدمت به خیر یا شر قدرت حیرت آوری باشد. روزهایی آکنده از کابوس در پیش رو داریم، و علم در برابر خطر مُهلك تبدیل شدن به یك روحانیت سترون و مرموز و پوشیده قرار دارد، که رازهایش را به نوآموزان برگزیده‌ای منتقل کند که آزمونهای سختی را می گذارنند و پیمانی مُستحکم برای سکوت جاودان می بندند. فقط امیدواریم که این خطر به زودی بگذرد، و روزی که آسمانها صافتر باشند علم دوباره آزادانه و با تهور تمام، با همگامی شادمانه، در راستای مسیر فریبنده‌اش به سوی ناشناخته به پیش گام بردارد.

در حقیقت، سرگذشت کوانتوم درست از همین جا آغاز می شود. آنچه گفته‌ایم جز درآمدی بر موضوع نبوده است. مسائل بسیاری باقی است که باید حل شوند، پرسشهای بسیاری در انتظار پاسخ اند.

---

* محلی که از سال ۱۹۴۲ از سوی دولت امریکا برای پژوهشهای اتمی برگزیده شد و از سال ۱۹۶۹ تحت ادارهٔ دانشگاه کالیفرنیاست. ـ م.

** از مراکز تحقیقات اتمی امریکا که اورانیوم ۲۳۵ و پلوتونیوم ۲۳۹ را در آنجا غنی کردند و بعداً (۱۹۴۸) آزمایشگاه ملی اوك ریج خوانده شد. از مراکز مهم اتمی و هسته‌ای امریکاست. ـ م.

این تصویر درهم برهم و درعین حال خیلی هم محرك است. مهم نیست که نظریه‌های ما چیزی باشند جز پناهگاههای موقتی در برابر آن بادهای سرد تردید و جهل که قویترین دلها را افسرده می کند. شاید مقدر باشد که نسلهای آینده آنها را ترك کنند، اما ماجرایی شگفت‌انگیز از ذهن آدمی بر جای می گذارند، اکتشافی شگفت‌انگیز از کارهای خدا ممکن است برای آدمیانی که هنوز زاده نشده‌اند خام و ابتدایی به نظر آیند، اما چیزی جاودان در بطن خود دارند، و در برابر نگاه خیرهٔ فانی ما آنها عمارتی مبهوت کننده از عظمت و بزرگی را بر پا می دارند، که تابندگی آن روح را خرسند می کند و پرتوهای نافذ و رهگشایی به درون تاریکی و تیرگی پیرامون می فرستند.

در چنین نظریه‌ها و کشفهای آن عالم شگفت و مقتدر، اثرات اندکی از شهود و اشراق به چشم می خورد. در اینجا به اعتبار ذهن اینشتینها و بورهایمان می توانیم احساسی مبهم از زیبایی ساختاری و پیچیدگی ظریف آن، شعر بلند پروازش و عظمت و اهمیت الهام پر هیبت آن، بدون هیچگونه اشاره‌ای به مصیبت و جانور خویی اندوه‌زای آن، داشته باشیم.

هنگامی که در سپیده‌دم آفرینش که هیچ چیزی نبود، خدا گوهر نخستین انرژی را آفرید، چنان تواناییهای اعجازآمیز و ظریفی به آن بخشید که، همچنانکه دانه‌ای به آهستگی به گل تبدیل می شود، از آن نیز چیزی می روید که فضا و زمان، و ماده و تابشش می نامیم. عالمی عظیم، و با این وجود بینهایت کوچك تکامل یافته است تا اتمها و سحابیهای فضایی فرا رونده‌ای را ایجاد کند. انرژیی که بنابر یك قانون تغییرناپذیر درون ماده انباشته شده است، چنان عالی طراحی شده که در میان نیروهای شگفت‌انگیز عالم کائنات درهم پیچیده، هنوز هم زمان و مکان آرامی، گوشه‌ای کوچك، با آرامش، و دوست داشتنی، یافته شود تا زندگی شکننده و لرزان را چنان که هست بپروراند و تغذیه کند. تغییری ناچیز در قوانین عالم، چنان کوچك که در یك لحظهٔ قابل چشمپوشی رخ دهد، باعث می شود که انرژی به طرق دیگری رها شود، یا اصلاً هم نشود. هرچه ژرفتر در صفتهای انرژی فرورویم تعداد بیشتری از الکترونها و پوزیترونها، از پروتونها، نوترونها، مزونها، و فوتونها، از فضا و زمان و حرکت، از ترازهای انرژی در هسته‌ها و بیرون آنها، از نیروهایی که ذرات ابتدایی را درون اتمها، اتمها را درون مولکولها، و مولکولها را درون ماده‌ای که بنیان

زندگی و عشق و نفرت است، به هم اتصال می‌دهند. چه می‌شد اگر ترازهای انرژی طور دیگری بودند؟ در آن صورت هیچ عالم مادیی وجود نمی‌داشت. آن وقت هسته‌های پایدار کنونی ساختارهای ناممکنی می‌بودند. اکسیژن، اگر می‌توانست وجود داشته باشد، به طور مُهلکی به رادیو اکتیویته آلوده می‌شد. فضا و زمان در داخل محوطهٔ کوچکی چپانده می‌شوند، بدون اینکه هیچگونه خلائی برای محافظت عالم در برابر انفجار شدیدش به وجود آورد، و بدون آنکه از زمانهای ازلی نشانه‌هایی در دست باشد که بتوان به میراث ذاتی آن پی برد.

باز هم همین مقدار اندکی که ما از کارکردهای ژرف جهان می‌فهمیم برای روشن شدن یك هماهنگی فوق العاده در زیر آشوب و پیچیدگی آن، کفایت می‌کند. شناخت ناقص ما به همین سهولت به دست نیامده است. هر نسل چند تنی را با استعداد گرانبهای بینش علمی به جهان عرضه می‌کند که از توانایی آنها حیرت می‌کنیم. پس از قدرت عجیب خدایی چقدر حیرت کنیم که آسمان و زمین را با چنان موشکافی والایی از گوهر ازلی آفرید که با آن می‌توانست مغزها و ذهنهایی را درست کند که آن هدیهٔ یزدانی بصیرت و روشن بینی در آنها دمیده شود تا بر رازهایش پی برند. اگر صرفاً یك نفر مانند اینشتین یا بُور ما را از تواناییش به حیرت وامی‌دارد، چگونه شکوه خدایی را ستایش کنیم که آنها را آفریده است؟

افسوس، که ممکن است بیم و آز موجب سوءِ استفاده از برکت بی‌مانند انرژی هسته‌ای شود. افسوس که چنین گنج عظیمی باید بحرانی بی‌نظیر پدید آورد، و افسوس که در این وضعیت بسیار مخاطره‌انگیز، ملتهایی که هرچند ریشه در زمان باستان دارند از لحاظ زمانی به ما نزدیکند، درگیر نبردهای بیهوده و بی‌فرجامی اند ـ آن چیزهای نامربوط و خطرناك متعلق به قدرت فردی و قدرت مطلق ملی که، چون برای همیشه از زمین رخت برنمی‌بندند، ما را به جنگی خواهند کشانید که بیهودگی و وحشت تصورناپذیر آن پایانی جز نابودی کامل بشریت را در پی نخواهد داشت.

بشریت اکنون تقریباً یکشبه می‌تواند از فراز پیروزیهای تکنولوژیکی یك عصر اتمی به خاطر بقای فردی در برابر نیروهای قاهر طبیعت حیوانی و بی‌جان، ناگهان وارد بربریت ابتدایی جنگی بیرحمانه شود. به زودی، به علتهای نسبتاً جزئی، سایهٔ تیرهٔ رنج گرسنگی و نیاز بر فراز زمین سایه می‌اندازد. تمدن ما هم اکنون در

بحرانی مهیب غوطه‌ور است. لحظهٔ سرنوشت ساز تصمیم قطعی هم اکنون فرارسیده است. زیرا خوب یا بد، ما مردم روی این زمین باید آیندهٔ خود را برگزینیم. این آینده می تواند زیبا و دوست‌داشتنی، سرشار از آرامش و عزت، و پر از لذت و شگفتی و پر از کشفیات تکان دهنده باشد. یا می تواند سرشار از پلیدی و نفرت، آکنده از نومیدی و نکبت، در مقیاسی عظیم باشد، با مرگ و فلاکتی بدوی همراه باشد که سایهٔ شوم آن تمامی زمین را در تاریکی فرو می برد.

امروز آسمان و زمین را بر شما شاهد می آورم،
که حیات و موت، و برکت و لعنت را
پیش روی تو گذاشتم: پس حیات را برگزین
تا تو با ذریّتت زنده بمانی.

عهد عتیق، سفر تثنیه، باب سی اُم، ۱۹

بعد التحریر ۱۹۵۹

«سپاس حق شناسانه‌ام نثار آ. پایس، به خاطر آنکه
مفاهیم بسیاری را بر من روشن کرد، و ج. ا. ویلر
به خاطر خواندن بعدالتحریر و ارائه چندین پیشنهاد سودمند».

ب. هافمن

کوئینز کالج

فلاشینگ، نیویورک.

ژوئن ۱۹۵۸

بعدالتحریر ۱۹۵۹

در کتابی که شامل یك پیشگفتار، یك درآمد، یك میان پرده، و یك پس گفتار است، دیگر به زور جای دادن بعدالتحریر کار چندان شایسته‌ای نیست. از جهت آوردن این بخش، از خواننده پوزش می طلبم.

در دورهٔ طولانی دهساله‌ای که از چاپ نخست این کتاب گذشته است، جهان و نیز جهان کوانتومی، رویدادهای فراوانی را از سرگذرانده است. تجدید چاپ این کتاب برای من امکانی فراهم می آورد که آن را نوسازی کنم، و اگر این کار را به کمك نوشتن یك بعدالتحریر انجام می‌دهم، کار بجایی است. بعدالتحریر خاصیتهای پر ارزشی دارد که یك فصل رسمی و منظم کتاب قاعدتاً فاقد آنهاست. مثلاً، نه تنها می توان داغترین اخبار، بلکه مواردی را که قبلاً به فراموشی سپرده شده بودند در آن درج کرد ـ و در واقع، انتظار هم داریم که در این بعدالتحریر همهٔ آن چیزها درج شوند. بعدالتحریر فصل غیر رسمی هر کتابی است؛ کسی انتظار ندارد که پیراسته و منظم باشد. بدینسان این فصل برای نیت من ابزاری ایده‌آل است؛ چرا که علم، مگر در پس نگری، به ندرت آراسته است. رویدادهای ده سال اخیر که بررسی سطحیی از کوانتوم را در برمی گیرد، تا به اعماق آن نمی رود. این رویدادها بیراهه روی و اشتباه کاری هم بوده‌اند. این رویدادها مرزهای کهنه را در جاهای دور

از انتظار در هم می‌شکنند که ممکن است به جهانهایی جدید راه پیدا کند که جسارت زیادی می‌طلبد، شاید هم اینطور نباشد. گزارشی از رویدادهای علمی اندك مدتی پس از رخداد آنها، در حالیکه هیاهو و هیجان ناشی از آنها هنوز فرو ننشسته، کاری خطرناك است. کمیتهٔ جایزهٔ نوبل به خوبی از این خطر آگاه است، اعطای یك جایزه اغلب تا یك دهه یا گاهی هم بیشتر، پس از کشفی که جایزه باید به آن تعلق گیرد، به تأخیر می‌افتد. مثلاً، ماکس بورن، تا ۱۹۵۴، تقریباً سی سال پس از ارائهٔ تفسیرش مبنی بر اینکه الکترونی که شرودینگر مشخص کرده بود یك موج احتمال است، به دریافت جایزهٔ نوبل خود نایل نیامد. در مورد این تأخیر در ارتباط با لی و یانگ ـ که بعداز بورن کار خود را شروع کردند و پیش از او نوبل را بردند ـ استثنایی اتفاق افتاد؛ یك سال پس از انتشار نخستین مقالهٔ خود دربارهٔ احتمال این که ممکن است پاریته پایسته نباشد، و تنها در خلال همان ماههای تأیید درخشان آزمایشی فرضیه‌شان، نامزد دریافت جایزهٔ نوبل شدند که این رویداد را اگرچه همه تصدیق کردند، امّا به عنوان اتفاقی خارق‌العاده تلقی کردند.

دربارهٔ کدام رویداد کوانتومی ده سال اخیر سخن بگویم؟ کدام یك را می‌توانم نادیده بگیرم؟ دربارهٔ کدام یك از آنها اصلاً بحثی به میان نیاورم؟ داوریهای من هرچه باشد، زمان مطمئناً آنها را ناچیز خواهد شمرد. زیرا رویدادها از چنان ویژگیهایی برخوردارند که ناگهان درهم می‌پیچند.

سرگذشت مزون یوکاوا مورد تابناك و مناسبی است. من در موقع نوشتن پیشگفتار این کتاب در سال ۱۹۴۷، گفتم که یوکاوا در سال ۱۹۳۵ وجود ذره‌ای (مزون) را پیش بینی کرده بود، و گفتم که اندك زمانی پس از آن آزمایشگران پرتو کیهانی، کشف کرده بودند که مزون واقعاً وجود دارد. به نظر می‌رسید موفقیت دلخواهی حاصل شده است (اگرچه من توجیه خود را با تفسیرهایی دربارهٔ تشابه معادلات مربوط به مزون با معادلات ماکسول، که اکنون کاملاً نامناسب و بیجا هستند، آسیب‌پذیر کرده‌ام). با همهٔ اینها حتّی آنطور هم که من نوشتم، رویدادها به طور غیر منتظره‌ای پشت نوبت‌اند تا ظهور کنند. سه آزمایشگر ایتالیایی در زمینهٔ پرتو کیهانی، یعنی کونورزی، پانچینی و پیچیونی، به کشفی تشویق آفرین دست یافتند: مزونهایی که آنها در پرتوهای کیهانی مورد مطالعه قرار داده بودند، با ذرات هسته‌ای قرابت اندکی داشتند. این موضوع ضربهٔ دردناکی بر پیکر نظریهٔ یوکاوا

نواخت، زیرا نمی توان انتظار داشت مزونهایی که با ذرات هسته‌ای قرابت دارند چنین ذراتی را به یکدیگر بپیوندند. بدینسان کشف مزونها در پرتوهای کیهانی، که قبلاً تأییدی بسیار مناسب و فوری بر فرضیهٔ یوکاوا به نظر می رسید، اکنون پی برده بودند که اصلاً تأییدی هم در کار نیست، بلکه بیشتر موردی است از یك همسانی خطاآمیز. یوکاوا ذره‌ای با جرم متوسط را فرض کرده بود، و ذره‌ای هم با جرم متوسط مشاهده شده بود. اما این ذرهٔ مشاهده شده فاقد آن خاصیت کلیدی بود که یوکاوا ادعا می کرد، یعنی فاقد توانایی بر هم کنش قوی با ذرات هسته‌ای بود. موقعیت مزون یك بار دیگر دچار پریشانی شد. با این وجود حتی در جریان پیش آمدن رویدادها، گرایش دیگری نیز خود را رومی کرد. در آن روزها، کوتاه مدّتی پس از جنگ دوم جهانی، ریاضت کشی در انگلستان یك قاعده بود. با بی پولی و گرانی دستگاههای پژوهشی هسته‌ای و چیزهایی مانند آنها، فیزیکدانی به نام پاول برای مطالعهٔ پرتوهای کیهانی روشی را که هم ارزان بود و هم توانا به کار گرفت. او جعبه‌های بدون منفذی را که دور و اطرافشان را با فیلمهای عکاسی بسته بود، چندین هفته در بالای کوههای مرتفع قرار داد، و این عکسها را ظاهر و آثار ذرات پرتو کیهانی را بر آنها به دقت تحلیل کرد. این روش پاول اطلاعات جامعی به دست داد و او به خاطر پژوهشهایش، که به طور خارق‌العاده‌ای صرفه‌جویانه بود، در سال ۱۹۵۰ جایزهٔ نوبل را دریافت داشت.

پاول و دو همکارش لاتِس برزیلی و اوکیالینی ایتالیایی، در سال ۱۹۴۷، با به کار بردن روش عکاسی، مزونهای نوع جدیدی را در پرتوهای کیهانی در جوّ بالا کشف کردند. این مزونهای جدید، که نسبت به مزون قدیمی اندکی سنگینتر بودند، عمر بسیار کوتاهی داشتند؛ و آنها که دارای بار مثبت بودند، در حال واپاشی، باعث پیدایش مزونهای قدیمی می شوند. این مزونهای جدید را، که مزونهای اوّلیه هستند، مزونهای π (پی)، و مزونهای ثانویه‌ای را که از آنها زاده می شدند مزونهای μ (مو) نامیدند.

شاید بتوان از این پیچیدگی زیاد موضوع مبنی برداشتن دو نوع مزون متأسف بود، امّا اگر طبیعت چنین ساخته شده است گریزی نیست و ناچاریم واقعیت را بپذیریم. اگر فیزیکدانان می توانسته‌اند کشف ذراتی را باز هم از نوع دیگری، از جمله مزونهای دیگر، که بعداً صورت می گیرد پیش بینی کنند، بایستی نسبت به این

افزایش ناچیز به پیچیدگی بنای مادی عالم فیزیکی نگرانی خیلی کمتری به دل راه دهند. با وجود این آنها بی درنگ مورد تسلی آوری پیدا کردند، چرا که مزونهای π، بر خلاف مزونهای قدیمی μ، به شدت با ذرات هسته‌ای بر هم کنش می کردند. بنابراین، موزنهای π می توانستند همان مزونهایی باشند که یوکاوا چندین سال پیش وجود آنها را مسلم فرض کرده بود. بدینسان نظریهٔ یوکاوا رویهمرفته محقق شد، و یوکاوا در سال ۱۹۴۹ به جایزهٔ نوبل دست یافت.

با این وجود، معلوم شد که این اثبات دیر شده نیز به نوبهٔ خود مشکوك است. مزون π در مواجهه با تمامی مشخصاتی که در ابتدا یوکاوا وضع کرده بود، شکست خورد. مثلاً، این مزون ظاهراً الکترونها را به وجود نمی آورد*؛ به همین علت و به دلیل مشکلات مربوطه، و وجود معمایی مزون μ، امید اوّلیهٔ یوکاوا در توجیه گسیل الکترونها از هسته‌ها نمی توانست برآورده شود.

دربارهٔ مزونها بعداً بیشتر سخن خواهیم گفت. نظریهٔ مزونها بر مسیر راحت و باشکوه جاده‌ای سلطنتی راه نمی سپرد. امّا علیرغم مشکلات و نومیدیهای شدید، این نظریه در برانگیختن ایده‌ها و آزمایشهای نوظهور بسیار پر ثمر از آب در آمده است. این که نظریهٔ نامبرده هنوز هم تا آن حدّ توانایی نیافته است که توجیه قانع کننده‌ای از پدیده‌های هسته‌ای به دست دهد، بیشتر به علت پیچیدگی این پدیده‌هاست نه اینکه گناه این نظریه باشد. چرا که هیچ یك از نظریه‌های هسته‌ای دیگر واقعاً قانع کننده نیستند، اگرچه برخی از آنها به کامیابیهای موضعی درخشانی درست یافته‌اند.

مثلاً، از ایدهٔ بور و فرنکل دربارهٔ رفتار هسته‌ای، مبنی بر این که هسته قطره‌ای مایع است که از پروتونها و نوترونها ـ یعنی، نوکلئونها ـ ترکیب یافته است، نام می بریم. این ایده و مشتقاتش را نظریه‌های جمعی می نامند زیرا هسته را همچون یك کل جمعی بیان می کنند و به اثرهایی جامع مانند ارتعاشات شکل هسته و شرایطی که تحت آنها این ارتعاشات چندان شدید می شوند که هسته را می شکافند، مربوط می شوند.

مدلهای جمعی هسته موفقیتهایی داشته‌اند. امّا جزئیات بسیاری هم از آنها

* زمان برای نمودن ریشخند خود به هیچ وجه صبر نمی کند. در ژنو (مرکز تحقیقات اتمی و هسته‌ای اروپا) مدارکی به دست آمده است که مزون π گاهی به یك الکترون وامی پاشد.

طفره رفته‌اند. مثلاً، اعداد ظاهراً تصادفی ۲، ۸، ۲۰، ۲۸، ۵۰، ۸۲، ۱۲۶ را در نظر بگیرید. فیزیکدانان آنها را اعداد جادویی می نامند؛ این نام به روزهایی برمی گردد که اعداد را به خوبی امروز درك نمی کردند. این اعداد جادویی اهمیّت هسته‌ای ویژه‌ای دارند؛ در میان چند صد هستهٔ شناخته شده، آنها که درست حاوی این تعداد نوترونها یا پروتونها هستند به علت پایداری بیشتر و نشانه‌های بارز دیگر، از بقیه برجسته‌ترند. آشکار است که آنها خواص بنیانی پیکربندیهای ممکن مادهٔ هسته‌ای را منعکس می کنند. این اعداد با هرگونه نظریهٔ هسته‌ای به مبارزه‌جویی برخاسته‌اند. و چنین نظریه‌ای وجود دارد که به شیوه‌ای تابناك با این مبارزه روبرو شده است. این نظریه، مدل پوسته‌ای، به نخستین روزهای نظریهٔ کوانتومی هسته‌ای بازمی گردد. فرض ذاتی آن این است که می توان با چشم‌پوشی از فردیتهای تمام ذرات دیگر محاسبه‌اش کرد و آنگاه از آنجا که این آثار به تفصیل شناخته شده نیستند، نوعی جعبهٔ کروی غیر کوانتومی یا ظرفی که درونش ذرات هسته‌ای منفرد به اطراف پاشیده می شوند، جانشین آن می شود. این تقریب ظاهراً خام، در ابتدا با موفقیتهایی همراه بود؛ امّا این موفقیتها نتوانستند برخام دستی فرضهای اساسی آن فائق آیند. در واقع، بور مدل قطرهٔ مایع خود را بر علیه مدل پوسته‌ای ارائه کرد، و موفقیتهای سریع نظریه‌های جمعی باعث شد که توجه به مدل پوسته‌ای به سستی گراید. در آن روزها معدودی از اعداد جادویی خیلی کوچك را می شناختند. امّا در سال ۱۹۴۸ ماریا گوپرت ـ مِیر، در امریکا، درحال رسیدگی به نتایج تجربی شناخته شده، عملاً نشان داد که این لیست واقعاً اعداد جادویی را در برمی گیرد و باید اعداد دیگری چون ۲۰، ۵۰، ۸۲، و ۱۲۶ را نیز درمی‌گیرند. این امر انعکاسی فوری داشت. ا. هاکسل، ی. هـ. و. ینسن، و هـ. ا. زوئس در آلمان، اصلاحی برای مدل پوسته‌ای هسته پیشنهاد کردند. اصلاحی هم مستقلاً از جانب گوپرت ـ میر پیشنهاد شد. این اصلاحی‌عجیب بود! آنجا که، پیشتر، جای اثرات نوکلئونهای دیگر را به سادگی یك ظرف کروی می گرفتند، اکنون اثر دیگری از یك نوع مغناطیسی افزوده شد، امّا این اثر را نمی توانستند به طور قانع کننده‌ای توجیه کنند. معهذا این اثر جدید می توانست برای نیازهای لحظه‌ای ساخته و پرداخته شود که این نظریه بتواند به طور باشکوهی نه تنها وجود اعداد جادویی را توجیه کند بلکه مقادیر واقعی عددی آنها و خواص هسته‌ای ویژهٔ ملازمشان را نیز بیان دارد. در سال

۱۹۵۰، رینواتر در امریکا، از راه به دست دادن تعبیر دیگری از شکل کره‌ای این ظرف، موفقیتهای بیشتری نصیب این نظریه کرد.

در مدل پوسته‌ای پروتونها و نوترونهای درون هسته، غالباً این طور می‌گویند که نظریه‌پردازان کوانتومی اوّلیه الکترونها را در حرکت به گرد هسته می‌دانستند. این الکترونهای فرا هسته‌ای خاصیتهای شیمیایی اتمها را تعیین می‌کنند. و نظریه‌پردازان نخستین، با اعمال کردن اصل طرد پاولی بر این الکترونها، می‌توانستند پایداری شیمیایی استثنایی گازهای بی‌اثر، هلیم، نئون، آرگون، و. . .، راکه به ترتیب دارای ۲، ۱۰، ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۸۶ الکترون‌اند، توضیح دهند. آنان علی الاصول اعداد جادویی را در ارتباط با جدول تناوبی عناصر شیمیدانها توضیح می‌دادند. در همین حال، هواداران مدل پوسته‌ای توانسته بودند اعداد جادویی را در پیوند با جدول پیچیده‌تر فیزیکدانان، مربوط به هسته‌های اتمی، توضیح دهند.

مدل پوسته‌ای به موفقیتهای بسیار زیادی دست یافت و اعتبارش بالا رفت، موفقیتهایی که به اعتبار مؤثر بودنش نشانه‌هایی از پریشانی و گیجی به بار می‌آورد. چرا که این نظریه آشکارا نادرست به نظر می‌رسد. هسته چنان از نوکلئونهای چرخان آکنده است که باید انتظار داشت برخوردهای متقابلشان حرکتهای هسته‌ای را که از جانب نظریه‌پردازان پوسته‌ای با آسوده خیالی یکنواخت در نظر گرفته شده بود، کاملاً غیر واقعی بسازد. با این نظریه موفقیتهایی هم کسب کرده است، و نمی‌توان آن را با خنده و استهزا کنار گذاشت. امّا، همه‌چیز در پرده‌ای از ابهام است. فرمی پیشنهاد روشنگری ارائه داد: می‌دانیم که اصل طرد پاولی دو الکترون را از سهیم بودن در یك حالت کوانتومی باز می‌دارد؛ با چنین حالتهای همسایهٔ بسیار زیادی که از قبل هستهٔ آکنده را اشغال کرده‌اند. یك نوکلئون تحت برخورد، برای اینکه از آنجا بیرون آید حالتهای کوانتومی مناسبش معدود است، و بنابراین، مگر هنگامی که این برخورد به گونه‌ای نامتعارف شدید باشد، رویهمرفته قادر نخواهد بود نوکلئون را از آن حرکت شاهوار خود منحرف کند، در حالیکه مجسم کردن یك حالت کوانتومی حرکت چیز اغفال کننده‌ای است، سرشت ایدهٔ کلّی برای تمام کسانی که تلاش کرده‌اند یك مسافر سنگین و بی‌خیال را در یك قطار زیر زمینی پر جمعیت و در خلال ساعتهای هجوم مسافرین تکان دهند آشکار خواهد بود.

مدلهای پوسته‌ای و مدلهای جمعی به تکمیل کردن یکدیگر گرایش دارند. هر نوعی که به بهترین وجهی کار کند، دیگری به بدترین وجه کار می کند. پس، چرا تلاش نکنیم که بهترین جنبه‌های هریك را در نظریهٔ واحدی ـ یعنی مدل وحدت یافتهٔ هسته ـ درهم آمیزیم؟ این ایده در سال ۱۹۵۲ پیشنهاد و با موفقیّتی استثنایی، نه تنها در توضیح اثرات شناخته شده، بلکه در پیشگویی اثرات نوینی که بعداً تأیید شدند، جا افتاد. آن جنبه از مدل وحدت یافته که زیاد هم ناخوشایند نیست، و جنبه‌ای که باید مخصوصاً برای نیلس بور خشنود کننده باشد، همان جنبه‌ای است که از سوی پسرش آگه بور پیشنهاد شد.

با وجود این مدلهای هسته‌ای دیگر هم، یعنی بهبود یافته‌های انواع اساسی بالا، وجود داشتند. تمامی اینها تقریبی اند، و هریك مقام موفقی از آن خود دارد. امّا تصویر کلّی و سراسری، که به سرعت واضحتر و جامعتر می شود، هنوز هم بیشتر از آن که کاوشی قطعی باشد، تصویری است که در حال بررسی آن هستند.

نیروهای هسته‌ای به درستی درك نشده‌اند. حتی اگر درك هم می شدند، هسته‌های پر ازدحام مسائل ریاضی سختی را مطرح می کردند که محاسبات دقیق را واقعاً ناممکن می سازد. این امر فی نفسه نباید خیلی هم عجیب باشد، زیرا بیشتر محاسبات در فیزیك ناگزیر به صورت محاسبات تقریبی اند، و در این دوران کامپیوترهای الکترونیکی غولپیکر، کار پر زحمت محاسبه دیگر مانند پیش مانع پیشرفت کارها نیست. امّا، هرچند مدلهای هسته‌ای که در بالا مورد بحث قرار گرفتند در اصل با پروتونها و نوترونها سر و کار دارند، هنوز هم دلیلی وجود دارد که باور کنیم مزونها سخت درگیر نیروهای هسته‌ای اند، و مقادیر عددی ثابتهای مزونی مشخص چنان بزرگ اند که در مورد اعتبار روشهای تقریبی مرسوم ایجاد شبهه‌های فراوان می کنند و بدینسان نظریه‌پرداز را از یکی از مؤثرترین سلاحهایش محروم می کنند. هنگامی که تمامی روش محاسباتی از همان آغاز مورد تردید است، انجام یك محاسبهٔ پیچیده چه سودی در بردارد؟ شگفت آنجاست که این محاسبات علیرغم کمبودهای ذاتیشان گاهی نتایج خوبی به دست می دهند.

علاوه برهمهٔ این بدبختیها، سیلی واقعی از ذرات بنیادی جدید که در همین چند سال اخیر کشف شده اند، نظریه‌پرداز را در محاصرهٔ خود گرفته است. تمام امیدهایی را که نظریه‌پرداز در خاطر خود پرورده بود، همان امیدی که او فکر می کرد

ساختار ماده در آستانهٔ روشن شدن است، این ذرات به ریشخند گرفتند. با همهٔ اینها، او در یك هماوردجویی متهورانه بر این سیل پیروز شد، و رده‌بندیهایی گستاخانه پدید آورد و در میان ذرات نوین نقشهای سراب مانندی را کشف کرد که به چیزهای مهیبی اشاره دارند که هنوز هم با ابهام درکش می کردند. پیرامون این موضوع بعداً بحث خواهیم کرد. در این ضمن رویدادهای دیگری پیش آمدند که از آنها نیز باید یاد کنیم.

روزگاری، پیش از جاری شدن این سیل، در زمانهای خیلی پیش از سال ۱۹۲۸، وقتی که دنیای کوانتومی هنوز جوان و بی پیرایه بود، اعتقاد بر این بود که جهان مادی را پروتونها، الکترونها، و فوتونها ـ درست سه نوع ذره، تشکیل داده‌اند؛ و درست در همان روزها، دیراك در تلاش آن بود که پروتون را به صورت ذره‌ای در یك اقیانوس شگفت و بسیار بزرگ فاقد انرژی منفی الکترونها در بیاورد، و از این راه دنیایی حتی ساده‌تر بسازد ـ دنیایی که تنها از دو نوع ذره تشکیل شده باشد. در این باره قبلاً بحث زیادی کرده‌ایم. و همچنین گفته‌ایم که دیراك چگونه ثابت کرد ذراتی که الکترون نیستند، پروتون هم نیستند، بلکه پوزیترون‌اند.

کمترین چیزی که دربارهٔ یك اقیانوس بزرگ می توان گفت، خشونت آن است؛ و به اعتبار این واقعیت که علی الاصول، معادلات دیراك بر یك تك الکترون اشاره دارند و نباید گروههای زیادی را که مورد نیاز آن اقیانوس عظیم و طغیان و جوشش و پراز حبابش هستند در برگیرد، باید کاری می کردند. امّا چه کاری؟

در واقع دیراك دوای درمان درد را از پیش تدارك دیده بود. چنان که می دانیم، او نور ماکسولی را در جعبه‌ای چنان محبوس کرده بود که این نور شبیه مجموعه‌ای از نوسانگرها رفتار می کرد، و او سپس در این نوسانگرها خواص کوانتومی را گرد آورده بود. هرکجا که نظریهٔ ماکسولی نور یك نظریهٔ موجی بوده است، معلوم شد که نظریهٔ کوانتیدهٔ جدید نظریه‌ای است که هردو جنبهٔ موج و ذره را در بردارد و در واقع به گروههای فوتون اشاره می کند.

موفقیت عظیم نظریهٔ نور دیراك، مهارت وهنرمندی آن، و سیمای ذاتی درستیش آدمی را به اندیشه واداشت. هایزنبرگ و پاولی، و جوردان و ویگنر، و سایرین گسترش این ایده و اعمال آن را به انواع دیگر امواج آغاز کردند.

کدام انواع دیگر امواج؟ بله، مثلاً، امواج شرودینگر، و امواج الکترونی

دیراك. ممکن است از این حرف ایراد بگیرید و بگویید که اینها هم اکنون امواج کوانتومی اند و ذرات را صرفاً مانند امواج نمایش می دهند. به یك معنی همین طور هم هست. هرچند، فرقی هم نمی کند. اندکی صبر پیشه کنیم و ببینیم چه اتفاقی می افتد. دلایل موجهی وجود داشت که خواستار اصلاح آنها شوند؛ بنابراین نظریه‌پردازان انواع گوناگون امواج مادهٔ کوانتومی را، و در آن میان امواج الکترونی دیراك را، ارائه کردند که بر مبنای آنها گویی امواج «کلاسیکی» برابر با امواج نور ماکسولی بودند، و به کمك تدبیری که علی الاصول به همان تدبیری شبیه بود که از جانب دیراك دربارهٔ امواج نور به کار رفت، خواص کوانتومی بیشتری را درون امواج ماده جمع آوری کردند. یعنی همان فرایندی که کوانتش دوّم نام دارد.

شاید امواج کوانتومی بسیار موفقیت آمیز شایستهٔ آن است که از تحقیری که به کوانتش دوّم وارد آمده، چشم‌پوشی شود. امّا، به اعتبار تأکید نتایج به دست آمده، مثلاً امواج الکترونی اصلی دیراك، واقعاً بر فراز کوانتومی مشابه با امواج نوری ماکسولی بوده‌اند، و هنگامی که در معرض کوانتش دوّم قرار گرفتند به موجودات بسیار تواناتری تحول یافتند که می توانستند دهها هزار الکترون و پوزیترون را در یك آشوب نابودی متقابل و زوج آفرینی در برگیرند. سپس، در سال ۱۹۳۴، هایزنبرگ چگونگی صرفنظر کردن از آن اقیانوس عظیم پیشین و حبابهای آن، و بیان الکترونها و پوزیترونها را به عنوان ذرات هم پایه در نظریهٔ کوانتیدهٔ دوّم نشان داد.

امّا مخصوصاً یك چیز نظریهٔ دوباره زنده شدهٔ دیراك را آسیب رسانید و بر تابناکترین موفقیتهای آن سایه گسترد: وقتی نظریه‌پردازان تلاش کردند تا کمیتهای مشخصی را، مثلاً مقدار انرژی وابسته به یك الکترون را، محاسبه کنند پاسخ مضحك «بینهایت» را به دست آوردند. بینهایتها این نظریه را به زحمت انداختند و ناسزا نصیب آفرینندگانش کردند. پس، این نظریه‌پردازان از بینهایت به ستوه آمده چگونه از عهدهٔ محاسباتی برآمدند که می توانست در برابر داده‌های تجربی آزموده شود؟ آنان با امیدواری تمام انواع حیله‌ها و طفره رفتنهای ویژه را به کاربردند تا این بینهایتها را تعدیل، یا حتی آنها را از میدان به‌در کنند. در حالیکه محاسبات در دست انجام بود، نیرنگهای گوناگون آنان خرخرکنان در مقابل بینهایتها به دفاع مشغول بودند؛ امّا هیچ کس به طور جدی به اعتبار این نیرنگها باور نداشت، و شاید هرکسی که آنها را به کار می برد، این کار را با وجدان ریاضی ناآرام و پریشانی انجام

می‌داد. با وجود این می‌توانستند محاسبات را انجام دهند، و نتایج، شواهد قابل توجهی را از شایستگی این نظریه ارائه می‌کردند، حتی در همان حالی که بینهایتها شواهدی بودند از ناخوشی عمیق آن؛ عمیق، و نافذ، زیرا هرچند برخی از بینهایتها از نظریه‌های کلاسیك به میراث گرفته شده بودند، بینهایتهای دیگری ثمره‌های خود کوانتش دوّم بودند؛ و این هر دو نوع می‌توانستند در نظریهٔ نسبیت سزاوار نکوهش باشند.

در سال ۱۹۴۳ هایزنبرگ، خشمگین از این بینهایتها، نظریهٔ جسورانهٔ نوینی را پیشنهاد کرد که برای اجتناب از همان عرصهٔ محدودیتها طراحی شده بود. او در سن ۲۳ سالگی، تازه نفس و سرخوش از اقامتی در کپنهاك، و بسیا متأثر از خرد اتمی غریزی و ژرف بور که چنین استوار دنیای کوانتوم را در قالب ریخته بود، همان‌طور که می‌دانیم، از مدارهای الکترون غیر قابل مشاهده دست کشیده بود تا مکانیك ماتریسی خود را بنا نهد. اکنون او در پی تکرار فیروزیهای ایام جوانیش بود. او اصرار داشت به دور از جایگاهی بایستد که ذرات تهاجم می‌کنند و بینهایتها جمع می‌شوند. این جایگاه تاریك و خطرناك است. نمی‌توان مستقیماً آنجا را مشاهده کرد. عدم قطعیتها آنجا را تاریك می‌کنند، و رویدادهایی که ما اکنون در آنها تصور می‌کنیم، ممکن است مانند مدارهای الکترونی قدیم افسانه‌ای بیش نباشند. در حدّ چیزهای آزموده و واقعی متوقف شوید، چیزهایی که آشکارا دیده می‌شوند و تردید ناپذیرند.

این چیزها چه هستند؟ آیا اصلاً چیزی هستند؟ بله. می‌توانیم ذراتی را به ذرات دیگر شلیك کنیم و مشاهده کنیم که چگونه از برخوردها متأثر می‌شوند. در واقع، این یك مُد عمدهٔ کشف کردن پدیده‌های اتمی است.

در سال ۱۹۳۷، ویلر کمیّتی ریاضی، یعنی ماتریس پراکندگی، یا ماتریس S، را معرفی کرده بود که می‌رفت به طور ایده‌آلی با مفهوم نوین هایزنبرگ سازگار شود. فرض کنید یك ψ داریم که از لحاظ ریاضی باریکهٔ ذرات ما را کاملاً پیش از برخوردنشان می‌دهد، و ψ دیگری داریم که باریکهٔ پراکنده را کاملاً بعداز برخورد باز می‌نمایاند. رویدادها در ناحیهٔ خطرناك در تغییرات باریکه منعکس می‌شوند، و اینها در تغییر از نخستین ψ به دوّمین ψ بازتابیده می‌شوند. پس ناحیهٔ خطرناك را به کمك بررسی تغییرات ψ بسنجیم. قواعد حاکم بر این تغییرات را جستجو کنیم.

نخست باید این تغییرات را به گونه‌ای مناسب توصیف کنیم، و در همین جاست که ماتریس S پا به میدان می‌گذارد؛ چرا که ماتریس S عملگری است که وقتی بر نخستین ψ اعمال می‌شود، آن را به ψ ی دوم تبدیل می‌کند. بدینسان ماتریس S موضوع اصلی نظریهٔ نوین می‌شود، مجموعه اسنادی واقعی از خبرهای منطقهٔ خطر.

ماتریس S باید از چه قواعدی پیروی کند؟ هایزنبرگ نسبت به جستجو در میان ایده‌های قدیمی و معادلاتی که در نواحی خطرناك مورد ظن بودند، بی میل بود. او در پی آن بود که از راه استنتاج قواعد خود بسنده از شرایط اساسی گوناگون برای ماتریس Sاش، بر زمینه‌ای ایمن باقی بماند: مثلاً، اینکه این قواعد باید با خواستهای نظریهٔ نسبیت سازگار باشند، و اینکه این قواعد بر این امر دلالت کنند که معلول نمی‌تواند بر علت پیشی گیرد.

این برنامهٔ جاه‌طلبانه و جسورانه‌ای بود. امّاموفق‌نشد. شرایطی کُلّی مانند آنها که در بالا گفتیم ارائهٔ قواعد کاملاً مفصل را برای یك نظریهٔ مستقل و قائم به ذات با شکست مواجه کردند؛ در واقع معلوم شد این شرط دوّم که در بالا ذکر آن رفت، به طور استثنایی متمرد است. بدینسان با این شیوهٔ برخورد هایزنبرگ نمی‌توانستند از کنار بینهایتها بگذرند. امّا ماتریس S می‌رفت تا در تحولات بعدی نقشی عمده بازی کند.

و امّا در مورد بینهایتها؛ آنها هنوز هم با ما هستند ـ هرچند بسیار تعدیل یافته‌اند. نظریه‌پردازان در حالیکه نمی‌توانستند از آنها اجتناب کنند، آموختند که چگونه با آنها کنار بیایند. این شیوهٔ کنار آمدن و همزیستی را هم اکنون باز می‌گوییم.

وقتی دیراك در سال ۱۹۲۸ نظریهٔ الکترون خود را پیشنهاد کرد نمی‌توانست ماجراهایی را که این نظریه از سر خواهد گذرانید پیش‌بینی کند. دستاوردهای این نظریه حتی بدون ایدهٔ بعدی حبابهای پوزیترون بسیار گرانسنگ بود. آیا این نظریه، نسبیت را به نظریهٔ کوانتومی پیوند نداد؟ آیا اسپین الکترون را توجیه نکرد؟ آیا در فرمول زومرفلد برای ساختار ریز طیف هیدروژن اصلاحی به وجود نیاوردَ ـ اصلاحی که با جزئیات پیچیده طیف مشاهده شده سازگاری فوق‌العاده‌ای داشت؟

در اینجا نظریه‌ای شایان توجه و احترام هم وجود داشت، امّا حتی موفقترین نظریه‌ها هم از کاوشهایی که مستلزم بی‌حرمتی از سوی آزمایشگران است در امان

نیستند. پس نظریهٔ دیراك ساختار ریز هیدروژن را چگونه توجیه کرد؟ ظاهراً، بسیار عالی. به نظر می رسید این نظریه مشاهدات را تا حدود دقت اندازه‌گیری جفت و جور می کند، امّا مشاهدهٔ جزئیات دقیقتر ساختار ریز کار سهلی نبود؛ با حرکت اتمهای هیدروژن که این طیفها را پدید می آورند تیره می شوند، و برخی مشاهده‌گران در اواخر قرن نوزدهم فکر می کردند اختلافهایی را آشکارسازی کرده‌اند که از طریق تیرگی ناچیز خطوط طیفی جلوه پیدا می کنند. به علت مشکل بودن اندازه‌گیریها، هیچکس نمی توانست به نتایج به دست آمده اطمینان کند. یکی دو نظریه‌پرداز برای توضیح عدم انطباق احتمالی دست به تلاشهای تردیدآمیزی زدند، امّا در کلّ توجه چندانی به موضوع نشد؛ اگر از اختلافهای نامحتمل چشم می پوشیدند، زندگی ساده‌تر بود، با همهٔ اینها بذر تردید افشانده شده بود.

در سال ۱۹۴۷ ویلز لمب آزمایشگر امریکایی، با همکاری رِذِرفرد، این مسئله را به آزمون غریبی گذاشت. او برای تولید طیف نه از منشور بهره گرفت و نه از توری؛ او اصلاً طیف نوری را به کار نگرفت، در عوض ترازهای انرژی را مستقیماً و با روش هوشمندانه و تابناکی مورد مطالعه قرار داد که بیشتر از اثر تیره کنندهٔ حرکت اتمها اجتناب می ورزید و قادر بود نتایجی با دقت فوق‌العاده به دست دهد.

بنابه نظریهٔ الکترونی دیراك، انرژی دو تراز انرژی پایینتر هیدروژن باید دقیقاً برابر باشند. در مورد اینکه این انرژیها واقعاً برابرند یا خیر تردید به وجود آمده بود. آزمایش لمب ـ رذرفرد قطعی بود. این آزمایش آنچه را قبلاً فقط یك تردید بود به اختلافی آشکار تبدیل کرد. نظریهٔ مشهور الکترونی دیراك با حقایق سازگاری نداشت. هرچند جابه‌جایی انرژی ناچیز بود، پیچیدگیهای وجود تردیدناپذیر آن عمیق بود. این پدیده جابه‌جایی لمب نامیده شد، و لمب به جایزهٔ نوبل ۱۹۵۵ دست یافت.

در ژوئن سال ۱۹۴۷، به کمك یك حسن تصادف، در شلترآیلند، یك گردهمایی دربارهٔ طیفهای مکانیك کوانتومی برپا شد. اخبار تکان دهنده پیرامون جابه‌جایی لمب به بحثهای غوغاآمیزی در میان شرکت کنندگان انجامید؛ از میان همین بحثها بود که نه تنها همگان به درکی سریع از مطلب دست یافتند، بلکه به اثبات زیبایی نیز از آن رسیدند.

نخست علت جابه‌جایی لمب پیشگویی شد، و دیدند که محل آن در نظریه

درست در قلب منطقهٔ خطر است که بینهایتها محل را پوشانیده و در برگرفته‌اند. سپس کرامرز فیزیکدان هلندی پیشنهادی اساسی برای پرداختن به این بینهایتها مطرح کرد. و پس از آن بث، که اصلاً آلزاسی بود، به سرعت آن را در یك محاسبهٔ غیر نسبیتی به کاربرد که نتایجی بسیار قانع کننده به دست داد. به اتکای این نتایج جولین شوینگر، امریکایی با ذوق، و دیگران یك رشته محاسبات نسبیتی و مفصلتر را آغاز کردند که به نتایجی منجر شد که به طور حیرت‌انگیزی نه تنها با مقدار آزمایشی جابه‌جایی لمب، بلکه با بی هنجاریهای دیگری که ضرورتی ندارد ما در آنها وارد شویم، انطباق کافی داشتند. و این نتایج خیره کننده از همان معادلات دیراك ناشی شدند که به نظر می رسید در مظان تردید فراوان‌اند.

به ندرت با یك بحران چنین به سرعت برخورد شده بود و آن را حل کرده بودند. هنگامی که هیجان اوّلیه فرو نشست، دریافتند که یکی از ایده‌های ریاضی اساسی شوینگر پیشی بینی شده است.

نظریه‌پردازی ژاپنی به نام توموناگا این موضوع را سالها پیش، یعنی در ۱۹۴۳، منتشر کرده بود، و ریشه‌های آن به کارهای پیشین دیگران کشیده می شد. این که این ایده توجه گسترده‌ای را در آن زمان به خود جلب نکرده بود شاید از آنجا ناشی می شد که به زبان ژاپنی بوده است. با این وجود اشتوکلبرگ، فیزیکدان سویسی، عملاً در سال ۱۹۳۴ این موضوع را مورد بحث قرار داده بود؛ و توموناگا در سال ۱۹۴۶ ترجمه‌ای از مقالهٔ خود به زبان انگلیسی منتشر کرد؛ امّا این ایده نسبتاً ناشناخته ماند تا اینکه شرودینگر در اوج بحران مستقلاً دربارهٔ آن به اندیشه پرداخت.

راز و رمز جابه‌جایی چه بود، و چگونه با بینهایتها سر و کار پیدا می کردند؟ این راز در پدیدهٔ وابسته به کوانتش دوّم نهفته است که از مدتها پیش شناخته شده بود ـ پدیده‌ای که در آن ذرات دائمی نیستند بلکه می توانند آفریده شوند و نابود گردند.

ما همگی از سرگذشت مردانی در جزایر غیر مسکونی لذّت برده‌ایم. و کسانی از ما آن استدلال قدیمی را شنیده است که بودن کسی در یك جزیرهٔ نامسکون، به عنوان نخستین نفر، ناممکن است، زیرا به صرف حضور او آن جزیره دیگر نامسکون نیست. البته، این ایهام لفظی در جهان کوانتومی نیز کارآیی دارد. مثلاً، نمی توانیم در خلأ الکترون داشته باشیم زیرا حضور الکترون خلأ را نفی می کند.

امّا در جهان کوانتومی نمی توانیم با این شوخی متوقف شویم. وضعیت جدّی‌تر از اینهاست، چرا که الکترون خلأ را نابود می کند، نه صرفاً با حضور داشتن در آن، بلکه عملاً از راه برهم کنش با خلأ و تغییر دادن آن.

این هم ایدهٔ شگفتی است. یك الکترون چگونه می تواند با هیچ برهم کنش داشته باشد؟

در دنیای کوانتوم، ذرات دائماً در حال پدید آمدن و ناپدید شدن هستند. تصوری که ما از یك فضای خالی در ذهن خود داریم یك هیچ افتاخیز کننده، و زایاست، با فوتونهایی که از هیچ کجا پدید می آیند و تقریباً به محض آنکه زاده می شوند از میان می روند، با الکترونهایی که چند لحظهٔ کوتاه در اقیانوس عظیم کف می کنند تا زوج ناپایدار الکترون ـ پوزیترون را بیافرینند، و با ذرات گوناگون دیگر به اغتشاش و پریشانی بیفزایند. انرژی برای آفرینش این ذرات از کجا می آید؟ به وام گرفته می شود. و پیش از آنکه بتوان دیرکرد و قصور در باز پرداخت وام را آشکار کرد، این وام باز پرداخته می شود. و دلیل کوتاه بودن فوق‌العادهٔ عمر این ذرات همین است. اگر این ذرات به مدّت زمانی دراز حیات داشته باشند، باید تراز انرژی نابود شود.

چگونه صرف کوتاهی عمر تراز انرژی را تأمین می کند؟ از طریق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ. اگر طول عمر کوتاه باشد، زمانی که طی آن ذره وجود دارد به وضوح معین می شود. هرچه زمان را دقیقتر تشخیص دهیم، اطلاعمان از انرژی از دقت کمتری برخوردار است. و اگر زمان به اندازهٔ کافی دقیق باشد انرژی چنان در پردهٔ ابهام فرو می رود که تخطی از تراز انرژی به طور کامل مبهم می شود. توازن اندازهٔ حرکتی نیز وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد، امّا هنگامیکه مکان ذرات به طور دقیق مشخص شود، تعیین دقیق اندازه حرکت با نابسامانی روبرو خواهد شد. بدینسان، این مطلب نیز هیچگونه مانع غیر قابل عبوری بر سر راه اکاذیب حاکی از داوری شتابزدهٔ کتابها قرار نمی دهند.

ذرات ناپایدار، و آینده و رونده که از قوانین پایستگی انرژی و اندازه حرکت تن می زنند، ذرات مجاز نامیده می شوند. در دوران پیش از کوانتوم به این ذرات حتی فکر هم نمی کردند. حتی در دوران کوانتوم تنها می توانند به اعتبار اصل هایزنبرگ وجود داشته باشند. امّا اینها وجود دارند. و از نقش آنها نمی توان چشم پوشید.

مثلاً، اگر الکترونی را در فضای تهی قرار دهیم بی درنگ فوتونها، الکترونها، پوزیترونها و دیگر ذرات مجازی را از فضا با افسون و جادو به پیش می خواند. ما این ذره را با مردی در یك جزیرهٔ نامسکون تشبیه کرده‌ایم. امّا باید آن را بیشتر به مردی در یك پیك نیك شبیه سازیم، که دسته‌ای از پشه‌ها، گلها، و زنبورهای وزوزکن که به نظر می رسد از «هیچ کجا» آمده‌اند، او را فرا گرفته‌اند.

یك الکترون در فضای تهی کاری بیشتر از این انجام می دهد که با افسون و جادو پشه‌های کوانتومی را به پیش بخواند. این ذره همچنین شفیره را مختل می کند: بر زمینهٔ تخم، و بر اقیانوس عظیم که الکترونها و پوزیترونها از آنجا می آیند تأثیر می گذارد.

الکترونی که در ابری از ذرات مجازی پوشیده شده است باید نسبت به آنکه برهنه و بی پیرایه بود رفتار متفاوتی داشته باشد. نظریه‌پردازان کوانتومی نسبت به این امر به خوبی آگاه بوده‌اند، امّا خود را از آن عقب می کشیدند. چرا که آنها به خوبی دریافتند که اثر اصلی این ابر ذرات مجازی باید افزایش دادن جرم مؤثر الکترون باشد، امّا وقتی این افزایش را محاسبه کردند معلوم شد که مقدار بینهایت بزرگی است. از آنجا که این جواب نامتناهی هر چیزی را می پوشاند، نظریه‌پردازان به چشم‌پوشی از اثرات ثانویه تمایل داشتند.

اگرچه آنان تحت فشار جابه‌جایی لمب به این اثرات ثانویه با دقت بیشتری نگاه کردند ـ این نجواهای آهسته را اصوات به آهنگ بسیار بلندی در خود خفه می کردند ـ و دریافتند که محتملترین جواب معمای لمب در میان این اثرات نهفته است. گویی چنان بود که در نظریهٔ قدیمی دیراك، از انرژی کسی که در یك تفریحگاه از یك گاو نر خشمگین می گریزد در شگفت بودند، گاوی که چنان قصد جان آن فرد را کرده بود که آدمها تنها به گامهای دوان او فکر می کردند و دفاع او با حرکتهای نوسانی مگس کش در دستانش اصلاً مطرح نبود. محاسبات مشهور دیراك در مورد ترازهای انرژی اتم هیدروژن برای یك الکترون برهنه و بی پیرایه که تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی هسته در یك تهی کلاسیك قدیمی حرکت می کرد، انجام شده بوده است. امّا در واقع این الکترون را فوتونهای مجازی در یك میدان الکترومغناطیسی نوین که کوانتومها آن را به وجود می آورند، احاطه می شد. و بر هم کنش آن با این میدان کوانتیده نه تنها باید اقلام قبلی را که از جانب دیراك در نظر

گرفته شده بود، بلکه اثرات جدید ناشی از جنبه‌های کوانتومی این میدان را نیز دربرگیرد. این موارد آخری باید ترازهای انرژی را از مقادیر قبلی خود جابه‌جا می‌کردند، و بنابر این شاید می‌توانستند جابه‌جایی لمب را توجیه کنند ـ در واقع همان‌طور که معلوم شد، این کار را انجام داده‌اند.

اعضای کنفرانس در جستجوی امکانی دیگر ناچار شدند برای گریز از وزن خشکهٔ خفه کنندهٔ بینهایتها، به راهی دیگر فکر کنند. کرامرز نخستین گام قطعی را برداشت. او خاطرنشان ساخت که ما هرگز جرم یك الکترون برهنه و بی‌پیرایه را اندازه نمی‌گیریم. الکترون را همیشه ابری از ذرات مجازی احاطه می‌کند و آنچه ما اندازه می‌گیریم همیشه جرم کلّ الکترون و ابر آن است. نظریهٔ کنونی ما ناقص است؛ جرمی نامتناهی برای ابر به دست می‌دهد. فرض کنید نظریهٔ بهتری می‌داشتیم که جرمی معقول به دست می‌داد. پس می‌بایست با نسبت دادن جرم به الکترون برهنه شروع کنیم، جرم اضافی ناشی از ابر را محاسبه کنیم، و بگوییم که این جرم ترکیب همان جرمی است که ما عملاً مشاهده می‌کنیم. بدینسان جرم بی‌پیرایه‌ای که ما با آن آغاز کردیم ـ و در واقع، نظریه‌ها تاکنون با آن آغاز شده و به پایان رسیده‌اند ـ جرم مشاهدهٔ الکترون نبود. جرم بی‌پیرایه به واسطهٔ ابر می‌بایست تعدیل می‌شد، فرایندی که بازبهنجارش جرم نامیده می‌شد.

اکنون بیایید از قلمروهای خیالی لذت بخشی که در آنجا تمامی مسائل از راه نظریه‌ای شگفت حل می‌شوند بدون آنکه بینهایتها را به دست دهند، رجعت کنیم. در اینجا به‌زمین، به نظریهٔ ناقصمان، جابه‌جایی لمب، که ما را به پیش می‌راند، باز می‌گردیم. آن عبارت ریاضی را که با جرم ابر متناظر است برمی‌گزینیم. این عبارت نامتناهی است. درست است، واقعیت همین جاست. امّا این گناه ما نیست. این گناه نظریهٔ معیوب و ناقص است. در نظریه‌ای بهتر این عبارت مقدار مناسبی خواهد داشت. بنابراین بیایید این کمیت نامتناهی را در نظر بگیریم، جرم الکترون برهنه را به آن بیفزاییم، و به طور قاطعانه‌ای بگوییم که نتیجه را جرم مشاهده شدهٔ الکترون خواهیم نامید. بدینسان تمامی کاری که باید انجام دهیم نشاندن یك عدد کاملاً کوچك به جای این کمیت ریاضی نامتناهی است که آزمایشگران برایمان تدارك دیده‌اند. البته، این هم یك نوع ضریب است، امّا ضریبی الهام شده، و کار معجزه را انجام می‌دهد. زیرا اکنون می‌توانیم در مقابل

بینهایتها حالت دفاعی بگیریم و اثرات ثانویهٔ پیچیده‌ای را که آنها تاکنون پوشیده داشته‌اند، محاسبه کنیم. محاسبات بث تنها به اعتبار این حیله امکان‌پذیر شد. و تمامی محاسبات باز بهنجارش بعدی نیز به تمامی به این حیله وابسته بودند.

باز بهنجارش به جرم محدود نمی‌شود؛ مثلاً، بربار الکتریکی نیز اعمال می‌شود. اگرچه وقتی در مورد بینهایتها به کار می‌رود جنبه‌ای سفطه‌آمیز دارد و فراتر از یك حیلهٔ صرف است. حتی اگر نظریه‌ای داشتیم که جوابهای متناهیی می‌داد باز هم ناچار بودیم از شیوهٔ باز بهنجارش سود بریم ـ امّا در آن مورد می‌توانستیم آن را با خاصیّت ریاضی تمام به کار بریم.

نظریهٔ کوانتومی الکترونها، پوزیترونها، و فوتونها، به یاری شیوهٔ باز بهنجارش، به چنان درجهٔ والایی از دقت رسید که هیچ پدیدهٔ یگانه‌ای در حوزهٔ آن توجیه نشده باقی نماند. پیشگوییهای آن از راه آزمایشهایی با ریزه‌کاریهای فراوان، تا ریزترین جزءِ تأیید شدند. نظریهٔ الکترون دیراك به راستی مقام شایستهٔ خود را احراز کرده بود، که در پیوند با نظریهٔ کوانتیدهٔ میدان الکترومغناطیسی نظریه‌ای پیروز تشکیل می‌داد که قادر بود با تمامی چالشهای آزمایشی با دقتی خیره کننده روبرو شود و همین دقت آن را در میان موفقترین نظریه‌های فیزیکی همهٔ اعصار قرار می‌داد.

و با این وجود بینهایتها همیشه وجود دارند. پنهانی و غرغرکنان، رام امّا تسخیر نشده. باز بهنجارش موفقیتهای این نظریه را ورای محدودیتهای خود نظریه گسترش می‌دهد که در عمق چیزی اساساً درست وجود دارد که در زیر مرداب بینهایتهاست (که مطمئناً اشتباهند). این نظریه به ما نشان نمی‌دهد که چگونه بینهایتها را از رخ نمودن باز داریم، بلکه تنها نشان می‌دهند چگونه با آنها زندگی کنیم. این نظریه راهی را به سوی نظریه‌ای نوین که از نفرین و لعنت بینهایتها رها باشد نشان نمی‌دهد ـ یا اگر این کار را انجام می‌دهد، کسی هنوز اشاره‌هایش را به درستی تفسیر نکرده است. بیشتر به نظر می‌رسد که این نظریه کار را بیش از همیشه به درون یك کوچهٔ بن بست می‌برد. تردستی جسورانه با بینهایتها فوق العاده درخشان است. امّا ظاهراً درخشندگی آن یك کوچهٔ تاریك را روشنی می‌بخشد.

پیشرفت نظری مهّم دیگری وجود دارد که باید از آن نیز گزارشی ارائه دهیم. این پیشرفت در سال ۱۹۴۸ آغاز می‌شود، هرچند ریشه‌های آن به خیلی عقبتر برمی‌گردد؛ و چیزی جز فرمولبندی ریاضی نوینی از مکانیك کوانتومی نیست ـ این

کار را ریچارد پ. فاینمن، جوانکی امریکایی، که در آن هنگام هنوز فارغ‌التحصیل نشده بود، انجام داد. این کار باید تا اندازه‌ای با توجه به مفهوم زمان انجام شود.

ما در واقع دربارهٔ زمان چیز زیادی نمی دانیم، با این وجود زمان گوهری است که حیات را می سازد. ما زندگیمان را محبوس در اکنون زودگذر می گذرانیم، مرزی بی زمان میان گذشته و آینده که جریان آن همان گوهر زمان است. حافظه می تواند با به یاد آوردن خاطرات جالب، زمان حال را بفریبد؛ اما نمی توانیم به روزهای جوانی خود بازگردیم، زیرا چه بخواهیم و چه نخواهیم زمان شتابان می گذرد. نمی توانیم گذشت زمان را هم تسریع کنیم؛ باید با شکیبایی در انتظار آمدن فردا باشیم.

با این حال می توانیم در خیال از چنگ حال بگریزیم و آزادانه در قلمرو زمان به گردش بپردازیم. می توانیم به جلو و عقب ـ همتراز آینده و گذشته ـ حرکت کنیم و این حوزه را چنان بینگاریم که گویی همیشه زمان حال بوده است. برای این که به حال نخست برگرداندن تمامی گذر زمان را حس کنیم، نگارهٔ ایستای خود را با چشمی می نگریم که از گذشته تا آینده را در می نوردد، خیلی شبیه به پزشکی که باید جدول تب بیماری را بازبینی کند.

نگاشت زمان در علم امری متداول است، و بصیرتهای پرارزشی فراهم می آورد، هرچند که ما همیشه از آن استفاده نمی کنیم. مثلاً، چنانکه در نظریهٔ کوانتومی متداول است، هنگامی که ذرات را همچون امواج پیشرونده می پنداریم، به آنها چنان فکر می کنیم که در زمان حال جاری و دیرپای جریان دارند، و معادلاتی می نویسیم که روشی را بیان می کنند که طی آن این امواج از یك زمان حال به زمان حال یك لحظهٔ بعد می روند.

فاینمن جوان از راه ترسیم نگاره‌ای از گذشته و آینده و بیان ذرات درون آن بیشتر به صورت ذرات و نه امواج، قید و بندهای مستحکم آن را از هم گشود. او با چنین کاری سنت همیلتنی را که در بندهای مستحکم محدودیتها بسته شده بود، کنار گذاشت، و در اساس، به راه قبلی لاگرانژ بازگشت.

هنگامیکه ما در زندگی روزمرهٔ خود نگاره‌هایی از زمان را، مثلاً در نمودارهای دما و ریزش باران، و نمودار شرایط داد و ستد کالا و مانند آن، رسم می کنیم، معمولاً زمان را همچون پیشرفتی از چپ به راست می پنداریم. فاینمن، که در

مکتب نظریهٔ نسبیت پرورده شده بود، عادت نسبیتی نمایاندن زمان را همچون شکل جاری از پایین به بالای نگارهٔ خود تعقیب کرد. نگارهٔ او، به طور نظری چهار بعد داشت، سه بعد از آن فضا بود و یکی که به زمان تعلق داشت؛ امّا به خاطر امکانات عملی، نگاره‌هایی را تنها با دو بعد ترسیم کرد، یکی بعد فضا و یکی بعد زمان.

ورقهٔ سفید کاغذ نموداری را بگیریم و فضا را افقی و زمان را قائم در آن نمایش دهیم. نقطه‌ای را در جایی روی این کاغذ نمودار فرض می کنیم. این نقطه چه نوع چیزی را نمایش می دهد؟ به یاد آورید که زمان به سوی بالا جریان دارد. برای این که این نقطه را به طور آشکار به خاطر بسپاریم بیایید کاغذ نمودار را از طریق یك «شکاف زمانی»، شکاف باریك افقیی که به آهستگی به بالا سو، و از پایین به بالای کاغذ، حرکت می کند، بنگریم. آنچه که ما در هر لحظه از طریق این شکاف می بینیم فضا در حال حاضر است؛ وقتی از این شکاف نگاه می کنیم گذشته و آینده، هیچکدام را نمی بینیم. فقط به اتکای یك تك نقطه روی این کاغذ نمودار، ما بیشتر اوقات از طریق شکاف زمانیمان، اصلاً چیزی نخواهیم دید. پس از آن این نقطه ناگهان و به مدّت کوتاه، یك لحظه پدیدار و آنگاه ناپدید می شود. آشکار است که این نقطه به اندازهٔ کافی یك ذره را بازنمایی نمی کند. یك ذره در زمان پایدار است. ما باید برای نمودن آن در نگارهٔ خود خطی ـ به زبان نسبیتی، جهانخط ـ رسم کنیم. فرض کنید یك خط قائم رسم می کنیم. سپس همچنانکه از طریق شکاف زمانی متحرك خود به این خط نگاه می کنیم نقطهٔ پایداری را می بینیم که در شکاف به حال سکون باقی می ماند. بدینسان جهانخط قائم ما می تواند ذره‌ای را در حال سکون بنمایاند. آیا می خواهیم یك ذره به سمت راست حرکت کند؟ پس جهانخطی رسم می کنیم که به سمت راست شیب داشته باشد، زیرا وقتی از طریق شکاف زمانی خود به آن می نگریم نقطه‌ای را می بینیم که به سوی راست حرکت می کند. در مورد ذره‌ای که به سوی چپ حرکت می کند جهانخطی رسم می کنیم که شیب آن به سمت چپ است. هر خط زیگزاگ ذره‌ای را نشان می دهد که ناگهان، براثر برخورد با اشیای دیگر، سرعت خود را تغییر داده است.

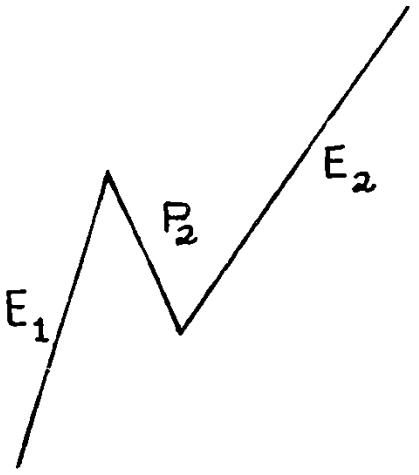
کدام زوج ذرات ناگهان آفریده شد؟ یك علامت V شکل می تواند این موضوع را بیان دارد. زیرا ما همچنانکه از طریق شکاف زمانی متحرك خود نگاه می کنیم در وهلهٔ نخست هیچ چیز نمی بینیم؛ سپس وقتی به رأس V می رسیم

نقطه‌ای را می بینیم که بی درنگ به دو نقطه که شتابان و در جهات مخالف از یکدیگر دور می شوند، تبدیل می شود. برای دو ذره‌ای که یکدیگر را نابود می کنند به یك Vای وارونه نیاز داریم.

اکنون که قواعد را می فهمیم، بیایید مهارتمان را در یك داستان کوتاه به کار اندازیم. سناریو این است:

از یك تك الکترون، E_1، آغاز می کنیم. ناگهان یك زوج پوزیترون ـ الکترون، E_2، P_2، آفریده می شود و P_2 و E_2 به سرعت از یکدیگر جدا می شوند. اکنون سه ذره داریم. امّا پس از لحظه‌ای پوزیترون P_2 با الکترون اصلی E_1 برخورد می کند و آنها یکدیگر را از بین می برند. این رویداد الکترون دوّم را، به عنوان تنها بازمانده، برجای می گذارد. در زندگی واقعی، فوتونها با پوزیترونها هم دسته‌اند، امّا ما در اینجا توجه خود را تنها روی E_1، E_2، و P_2 متمرکز می کنیم.

نگارهٔ فضا ـ زمان ما چگونه خواهد بود؟ یك روایت تصویری احتمالی آن چنین است:



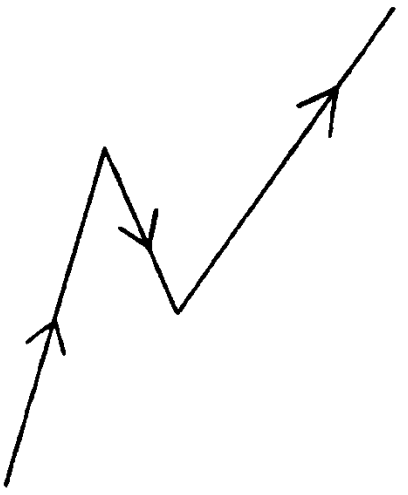
به این نمودار از درون شکاف زمانی متحرك نگاه کنید و به آسانی خواهید دید که سناریو را وفادارانه تعقیب می کند.

تا اینجا اصلاً هیچ چیز جدیدی وجود ندارد. سه جهانخط برای بازنمودن سه ذره ـ این کاری متعارف است.

امّا فاینمن، در دوران دانشجویی فوق لیسانسش، با ویلر پیرامون نظریه‌ای همکاری کرده بود که بنابر آن معلولهای مشخصی می توانستند بر علتهایشان پیشی

گیرند*. ویلر در خلال این همکاری ایدهٔ فوق‌العاده‌ای داشت. او مانند کودکی که گریه می‌کرد و می‌گفت «امپراطور جامه‌ای در بر ندارد»** ناگهان دریافته بود که تنها یك جهانخط وجود دارد، و نه سه تا. آن را نگاه کنید. یك خط زیگزاگ بیشتر نیست. بشمرید. بی‌گمان، بلافاصله با وحشت پاسخ می‌دهیم که این امر بخش $P_۲$ را در زمان به عقب برمی‌گرداند؛ که این نمودار سه جهانخط محسوس دارد، بدینگونه:

نه یك جهانخط بی‌معنی همانند این:



* به دلایل مربوط به جنگ، بخش III از برسیهای آنان چهار سال پیشتر از بخش II انتشار یافت. آیا کسی نمی‌توانست تاییدی تجربی تر از این دربارهٔ تز آنها درخصوص زمان وارونه بخواهد؟

** کنایه از پادشاهی که خیاطی قرار گذاشت برایش لباسی بدوزد که وقتی آن را می‌پوشید از نظر دروغگویان ناپدید می‌شد. ـ م.

امّا اجازه دهید این ایده را چنین خصمانه رد نکنیم. مسلماً این سناریوی جدید با آن سناریوی اصلی، چنانکه باید باشد، تفاوتهای فراوانی به شرح زیر دارد:

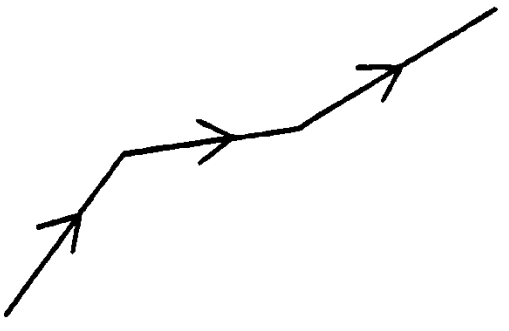
از یك تك الکترون، E_1، آغاز می کنیم. در یك لحظهٔ خاص این الکترون دستخوش چنان برخوردی می شود که به درون گذشته می افتد. پس ـ اگر این حرف درست است ـ در لحظات اوّلیه این ذره تحت تأثیر برخورد شدید دیگری ـ یا شاید بگوییم یك برخورد پیشتر از آن ـ قرار می گیرد که سبب می شود به جلو و به آینده برود.

با این وجود وقتی که از طریق شکاف زمانی خود نگاه کنیم، نمودار جدید همان داستانی را به ما می گوید که نمودار قدیمی گفت.

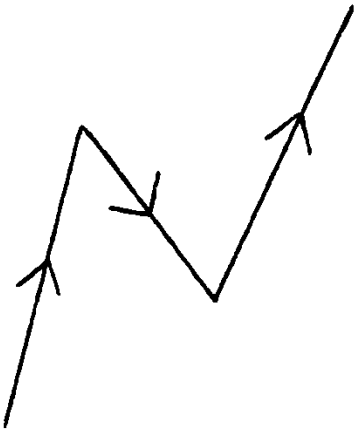
توجه کنید که یك جهانخط زیگزاگ چگونه می تواند سبب حضور همزمان سه ذره شود. وقتی ویلر در یك جرقه نقش کیهانی شگفتی دید، این ایده نخستین بار به ذهنش خطور کرد: یك تك الکترون که روی کارگاه بافندگیی از زمان، ماکووار به جلو و عقب، جلو و عقب، و جلو و عقب می رود تا پردهٔ قلمکار پر نقش و نگار باشکوهی را بتند که گویی حاوی تمامی الکترونها و پوزیترونهای جهان است.

اگر ایدهٔ غریبی مبنی براینکه الکترون باید به سوی گذشته برود در نظر بگیریم، به آسانی می بینیم که وقتی این الکترون چنین حرکتی دارد چگونه همچون پوزیترونی در حال حرکت به آینده پدیدار می شود، چرا که یك میدان الکترومغناطیسی که الکترونی را در راستای خاصی به پیش می برد یك پوزیترون را هم، که بار الکتریکی مخالفی دارد، در راستای مخالف به پیش می برد؛ و ذره‌ای که به سوی چپ در حال حرکت است، با پیشرفت زمان، وقتی که ما زمان را به عقب برمی گردانیم، به راست حرکت می کند.

فاینمن کارهای خیره کننده‌ای با این جهانخطهای زیگزاگی انجام داد. او برای نمونه نشان داد که اساسی میان:



و:



وجود دارد، هرچند که ظاهراً فرایندهای فیزیکی در همان وهلهٔ اول کاملاً نامتشابهند. در هر مورد هر الکترون با چیزهایی که در نمودار دیده نمی شوند، دستخوش دو برخورد است. در اولی این جهانخط کلاً در راستای آینده نشانه می رود، و وقتی ما از داخل شکاف زمانی متحرکمان به آن نگاه می کنیم می بینیم که الکترون دو تغییر سرعت ناگهانی انجام می دهد. در برخورد بعدی، که شدیدتر است، جهت زمان برعکس می شود، و وقتی از داخل شکاف زمانیمان می نگریم زوج آفرینش و نابودی را می بینیم. به یك معنی، تنها تفاوت بین این دو حالت این است که در اوّلی این برخوردها با نظم مورد انتظار رخ می دهند، در حالیکه در حالت بعدی برخورد دوّم پیش از اوّلی روی می دهد. آیا آن عبارت «تنها اختلاف» حق مطلب را ادا می کند؟ البته همینطور است. امّا ظاهراً اینطورها هم نیست. زیرا کار فاینمن بیشتر از نشان دادن این بود که‌این نمودارها- یعنی زیگزاگهایی هریك با دوخم ـ مشابهند. او نشان داد که روابط ریاضی برخوردهای ضعیف اصولاً مانند روابط ریاضی برخوردهای شدیدند، به طوری‌که این دو نوع برخورد را واقعاً می توان در یك ردیف برابر بیان کرد.

و او از این هم خیلی فراتر رفت. او احتمالات را به جهانخطهای ممکن گوناگون مربوط کرد و بدان وسیله فرمولبندی مجدد کاملی را از مکانیك کوانتومی به دست داد. فرمولبندیهای قدیمی تر گیر افتادن ما را در زمان حاضر از طریق نگاه کردن به جهان داخل یك شکاف زمانی متحرك منعکس می کرد و تحول امواج را از لحظه‌ای به لحظهٔ دیگر توصیف می کرد؛ امّا فاینمن دیدی آسمانی و باشکوه نسبت به زمان داشت. آنجا که فرمولبندیهای پیشین راه خود را به آینده می جستند، چنان که گویی کورمال کورمال در مه راه می پیمایند، فاینمن گامهای جسورانه و بلندی

برداشت، استراتژی خود را بر نگاره‌های زمانی پایه‌گذاری کرد و ذرات منفرد را از طریق زیگها و زاگهایشان به همان سهولتی به سوی گذشته دنبال کرد که به سوی آینده. او در جهانخطهایش برای فوتونها، الکترونها، مزونها، و مانند آنها، سیستم محاسبهٔ نموداریی برای پیچیدگی مغشوش کننده در نظر داشت، که بایستی هنگام برخوردها، آفرینشها، و نابودیهای، هم واقعی و هم مجازی، اتفاق افتند. او می توانست به هر حالت ویژهٔ نگارندهٔ زمان یك عبارت ریاضی متناظر وابسته کند، چنانکه نگاره‌های زمانی او برای پژوهشی ریاضی پیچیده به طرحهای عملیاتی ساده‌ای تبدیل شدند.

نظریه‌پردازان، قبلاً برای حل کردن معادلات مکانیك کوانتومیشان اغلب به مانورهای ریاضی پناه می آوردند که نمی توانستند آنها را برحسب مفاهیم فیزیکی توصیف کنند. نمودارهای فاینمن رویدادهای فیزیکی واقعی را تشریح می کرد، و روابط ریاضی او، به موازات پیچیدگیهای نمودارهایش، با فرایندهای فیزیکی با ارتباط بسیار نزدیك باقی ماند؛ هر جملهٔ ریاضی رونوشت فیزیکی مستقیم خود را داشت. آنجا که محاسبات پیشین در ناحیه‌ای از داخل شکاف زمانی متحرك چنان مبهم دیده می شد، فاینمن با تصویر فراگیرنده‌اش می توانست محاسبات و روابط ریاضی خود را از طریق پیچیدگیهایی که تا آن زمان خلل ناپذیر و نرم نشدنی بودند، هدایت کند و به پیش برد. نمودارهای فاینمن، روشهای ریاضی که بر شالودهٔ آنها استوار بودند، به ابزار اساسی گرانبهای نظریهٔ کوانتومی نوین تبدیل شده‌اند، که چشم انداز آن را تغییر داده و تواناییش را فراوان افزوده‌اند.

فاینمن در نظریهٔ خود، به تاریخ زندگی ذرات پرداخت و آنها را از طریق برخوردهای گوناگونشان پیگیری کرد. بدینسان او رفتار آنها را پیش از برخورد به رفتارشان بعداز برخورد پیوند داد، و به این معنی نظریه‌ای ماتریسی اظهار داشت. امّا این نظریه با آن نظریه که موردنظر هایزنبرگ بود، تفاوت می کرد. این نظریه از نواحی خطر اجتناب نمی کرد. برعکس، ذرات را تا هرجا که می رفتند دنبال می کرد و به احتمالهای بینهایتها تن می داد. باز هم، هایزنبرگ درصدد آفریدن نظریهٔ فیزیکی نوینی برآمده بود که از برخی نقائص فشارآور نظریهٔ قدیمی رها باشد. امّا معلوم شد که نظریهٔ فاینمن، به خاطر تمامی تازگی قابل توجهش، اساساً با نظریهٔ قدیمی هم‌ارز است؛ اثبات این هم ارزی در اصل کار دایسن است، که

نظریه‌پردازی جوان بود و از انگلستان آمده بود تا در امریکا کار کند و درست در ایام تعیین کننده‌ای که فرمولبندی را داشتند ساخته و پرداخته می کردند، تحت نفوذ فاینمن قرار گرفت.

اکنون زمان آن فرا رسیده است که مختصری پیرامون کشف ذرات جدیدی سخن بگوییم که تعداد آنها اینطور غیر منتظره بالا رفته است. پیگیری ترتیب زمانی کشف آنها به طور غیر ضروریی گیج کننده خواهد بود. آنها را اندکی گروهبندی خواهیم کرد تا نقششان را روشنتر بیان داریم.

پس، پیش از هرچیز آشکارسازی تجربی نوترینوی اغفال کننده را بازگو کنیم. با ظهور پیلهای اتمی، معلوم شد که ذخیرهٔ نوترینوها فراوان است؛ زیرا در این نوع پیلهای بزرگ معمولی، نشت توان ناشی از نوترینوها برای روشنایی یك شهر کوچك کافی است. بنابراین، می‌توان تصور کرد که این ذخیره برای آزمایشگرانی که به آشکارسازی نوترینوها تمایل دارند، کافی بود. امّا توانایی نفوذ نوترینوها به پوشش سنگین پیرامونی یك پیل، گواهی است مؤکد بر دشواری متوقف کردن پرواز شتاب آلود نوترینوها به سوی انتهای عالم. اگر بخش بسیار کوچکی از نوترینوهای گریزپا را می توانستند به دام اندازند، همینقدر ذخیره‌ی کافی برای آزمایشگران می بود. این ذره آزمایشهایی با ابعاد غول‌آسا را طلب می کرد، که به سه سال کار توسط رینز و کاوِن، و دیگران، انجامید تا اینکه سرانجام نوترینو را در سال ۱۹۵۶ در لوس آلاموس آشکارسازی کردند.

البته نوترینو ذره‌ای بود که انتظارش را داشتند. با این حال به مدّتی بیشتر از بیست سال پس از آنکه نخستین بار نسبت به وجودش ظنین شدند، از چنگ آزمایشگران گریخته بود. ذرهٔ دیگری هم وجود داشت که تا مدّتهایی حتی بیشتر از چنگ آزمایشگران فرار کرده بود. نظریه‌پردازان دریافته بودند که معادلات آنها دارای تقارن مشخصی بین بار مثبت و منفی است که به ناوردایی تحت همیوغگی بار معروف است. این موضوع به آنها گفته شده بود که با هر نوع ذره باید یك پاد ذره متناظر باشد. همانطور که از قبل می دانیم، پوزیترون همان پاد ـ الکترون است؛ به این معنی که هر الکترون یك پاد ـ پوزیترون دانسته می شود. امّا ناوردایی تحت همیوغی بار نشان می دهد که تمامی ذرات، از جمله حتی آنها که از لحاظ الکتریکی خنثی هستند، پاد ـ ذره خواهند داشت. مثلاً فاینمن در نگاره‌های خود ذرات و پاد ـ

ذرات را با جهانخطهایی می نمایاند که به راستاهای زمانی عکس اشاره می کنند، و وقتی یك ذره با پاد ذره‌اش برخورد کند، آنان همراه با آزاد شدن مقدار بسیار زیادی انرژی، یکدیگر را نابود می کنند.

به ویژه، از آنجا که پروتون وجود دارد، پاد ـ پروتون هم باید وجود داشته باشد. هر پاد پروتون همان جرمی را دارد که یك پروتون، امّا بار الکتریکیشان مخالف یکدیگر است. چنین ذره‌ای تاکنون شناخته و آشکارسازی نشده است، جستجوی سالیان دراز آزمایشگران در پی پاد ـ پروتون عبث بوده است، و در مورد وجود یا عدم پادپروتونها تردیدهایی پدید آمده است. البته، باگذشت زمان توان سنکر و سیکلوترونها و سایر ماشینهای اتم شکن افزایش یافته، تا آنجا که سرانجام این ابزار می توانند انرژی عظیم موردنیاز برای تولید پروتون و پاد پروتون ـ اگر وجود داشته باشد ـ را بیافرینند. در واقع، بواترون برکلی، کالیفرنیا، به خاطر پاد ـ پروتونها طراحی شد، و در سال ۱۹۵۵ گروهی از دانشمندان برکلی، به رهبری زگره، در آزمایشی که بیش از حدّ تصور درخشان بود، موفق به تولید پروتون و پاد ـ پروتون شدند، و آنچه قطعاً بدان دست یافتند، هویت این ذرهٔ اخیر به طور غیرقابل اشتباهی به عنوان پاد ـ پروتون بود. این دستاورد با تحسین آمیخته به آسودگی خیال پذیرفته شد؛ آسودگی خیال به آن علت که اکنون تقارن موجود در حوزهٔ نظریه تأیید می شد. پاد ـ پروتونها با جدیت تمام تحت پیگرد قرار گرفتند.

با همهٔ اینها، همه‌چیز هم متقارن نبود. شانس بقای پاد پروتونها ناچیز است. پروتونهای معمولی آنها را به سرعت نابود می کنند، و ذخیرهٔ این پروتونها فراوان است. اگر تقارن کامل میان پروتونها و پاد پروتونها وجود دارد، پس چرا پروتونها چنین فراوان و پیش پا افتاده، و پاد ـ پروتونها این طور نادرند؟ احتمالاً یکی از پاسخها به این پرسش آن است که تعداد پروتون در عالم همواره نسبت به پاد پروتون خیلی بیشتر است، به طوری که پس از یك کشتار عام احتمالی اوّلیه و نابودیهای متقابل، تعداد فراوانی از پروتونها باقی مانده‌اند، در حالیکه تعداد بسیار کمی پاد ـ پروتون دوام آورده است. این پاسخی یکسو نگراست. پاسخ متقارن‌تر آن است که تعداد پروتونها برابر است، امّا اتفاقاً ما در بخشی از عالم هستیم که پروتونها در آنجا فراوانترند. فراوانی پروتونها به اثراتی همچون فراوانی الکترونها نسبت به پوزیترونها می انجامد. بنابراین، اگر پاسخ دوّم درست باشد باید عالم را چنان

تصویر کنیم که نواحیی را در برمی گیرد که ماده‌ای که ضد مادهٔ ماست آنجا را اشغال کرده است. به هم پیوستن دو ناحیه با چنین خاصیّت متضادی فاجعه‌آمیز خواهد بود.

تا تقریباً سال ۱۹۵۰، هرچند تعدد و گوناگونی ذرات بنیادی شناخته شده ظاهر فیزیکی اتمی را متورم کرد، تقریباً تمامی آنها را می شد در بطن ایده‌های پذیرفته شده گنجانید؛ تنها مزونهای μ خارج از اندازه و میزان بودند. امّا پس از آن توفانی از ذرات نوین ناخواسته و نامنتظره فرا رسید که نظریه‌پردازان، با خلوصی نومیدانه، به سرعت آنها را «ذرات شگفت» نامیدند. برخی از آنها از پروتون سنگینتر بودند. بقیه، به نام ذرات K، انواع جدیدی از مزونها بودند، سنگینتر از مزونهای قدیمی امّا سبکتر از پروتونها. شگفتی عاجل این ذرات نوین در طول عمر آنها، که به حدود یك میلیاردم ثانیه می رسید، نهفته بود. اگرچه این زمان کوتاه به نظر می رسید، امّا بنابر ایده‌های پذیرفته شده، عملاً زمان خیلی درازی بود ـ دهها، حتی صدها میلیارد بار درازتر. براستی، این یك طول عمر بود!

این طول عمرهای دراز مفاهیم مبهوت کننده‌ای داشتند. نیروهای گرانشی و الکترومغناطیسی از مدّتها پیش شناخته شده‌اند. اوّلی ذاتاً چندین میلیارد میلیارد میلیارد میلیارد بار از دوّمی ضعیفتر است. در عصر کوانتوم انواع نیروهای دیگر کشف شدند، و پس از چندی دریافتند که نیروها به دو گروه کاملاً جدا تقسیم می شوند، یا خیلی قوی یا بسیار ضعیف، که بینابین آنها هیچ چیزی وجود ندارد. نیروهای قوی، ملازم با فرایندهای مربوط به نوکلئونها و هسته‌های سنگینتر دیگر ذاتاً بیش از یکصد برابر قویتر از نیروهای الکترومغناطیسی بودند، و در واقع قویترین نیروهایی اند که تاکنون شناخته شده اند؛ نیروهای ضعیف، که ذاتاً در حدود یکصد هزار میلیارد بار ضعیفتر از نیروهای قوی‌اند، در ابتدا به عنوان نیروهای ملازم با فرایندهای متضمن نوترینوها، باز شناخته شدند.

درست همچنانکه یك فنر سفت سریعتر از یك فنر نرم ارتعاش می کند، به همین ترتیب هم فرایندهای متضمن بر هم کنشهای قوی ذاتاً سریعتر از فرایندهایی که متضمن نیروهای ضعیف‌اند، به پیش می روند. بدینسان ذراتی که واپاشی آنها ناشی از برهم کنشهای قوی است، نسبت به ذراتی که به وسیله برهم کنشهای ضعیف وا می پاشند، طول عمر بسیار کوتاهتری دارند. حالا مسئلهٔ ذرات شگفت

در این امر نهفته است که: چون این ذرات در ضمن برهم کنشهای قوی تولید می شوند، مطمئناً نسبت به نفوذ برهم کنشهای قوی آمادگی دارند، و بنابر این توسط برهم کنشهای قوی واپاشیده خواهند شد؛ امّا مشخصهٔ طول عمری آنها همان مشخصهٔ برهم کنشهای ضعیف است. و افزون براختلاف عددی این طول عمرها، اختلافی کیفی نیز وجود داشت، زیرا در هر حال هیچ مکانی برای برهم کنشهای ضعیف قراردادی و مرسوم به نظر نمی رسید، چرا که این واپاشی متضمن هیچ نوترینویی نبود. ذرات شگفت مزاحمین بی دست و پا و خجولی بودند که به سهولت با طرح پذیرفتهٔ چیزها جور نمی آمدند.

در سال ۱۹۵۲، در انستیتوی مطالعات پیشرفته، پایس نظریه‌پرداز، که از هلند به امریکا رفته بود، راه‌حلی برای این مشکل یافت. پایس، سرخوش از تأثیر کنفراسی بین‌المللی در روچستر، نیویورك، که عمدتاً به این موضوع اختصاص یافته بود، و با بهره‌گیری از مطالعات مفصلی در مورد ذرات شگفت، که‌به ویژه‌از سوی نامبا، اوندا، و فیزیکدانان دیگر ژاپنی انجام شده بود، پیشنهاد کرد که قاعده‌ای ـ قانونی در طبیعت ـ باید وجود داشته باشد که از به وجود آمدن انفرادی ذرات شگفت جلوگیری به عمل آورد. مثلاً، اگر دو نوع مختلف ذرهٔ شگفت در یك برهم کنش قوی تولید می شدند، و این دو ذره بی درنگ از یکدیگر دور می شدند، آنها می توانستند از چنگالهای کوتاه ساز طول عمر، و چنگالهای دو ذره در هر بار برهم کنش قوی، لیز بخورند و تا سن پیری جا افتاده یك میلیارددم یك ثانیه زندگی کنند. پس زوال تدریجی آنها ناگزیر متضمن نوع جدیدی از برهم کنش ضعیف است که باید به گروه نوترینو اضافه شود.

این ایده انعکاسهای پر اهمیتی داشت. پارادوکس طول عمرها را حل کرد؛ وجود گروه جدیدی از بر هم کنشهای ضعیف را که ضرورتاً متضمن نوترینو نبودند، آشکار ساخت؛ و بالاتر از همه، مسئلهٔ نظری دشواری را پیش رو نهاد: چرا ذرات شگفت نمی توانند در برهم کنشهای قوی، به طور یکتا، تشکیل شوند؟

آغاز امید بخش پاسخی به این پرسش، یکسال بعد، وقتی که گل ـ من امریکایی و نیشی جیما دانشمند ژاپنی مستقل از یکدیگر طرحی را برای سروسامان دادن به انبوه ذرات بنیادی پشنهاد کردند، نمودار شد. این طرح عدد کوانتومی جدید را، S، که عددی صحیح است، برای اندازه‌گیری یك کمیّت مزاحم که به طور

درخوری شگفت نامیده شد، معرفی کرد. معنی فیزیکی آن مبهم بود ـ و هنوز هم هست. امّا این عدد به طور زیبایی نقش ذرات را پالایش داد، و حتی وجود ذرات بیشتری را که بعداً به طور تجربی آشکارسازی شدند، ایجاب کرد. بدینسان بهای این نظم افزایش تعداد ذرات بود؛ امّا این در واقع اصلاً بهایی نبود، زیرا این ذرات جدید به هر حال دیر یا زود آشکارسازی می شدند.

ظاهراً شگفتی می تواند بیشتر به حوزهٔ فن شاعری مربوط باشد تا به علم فیزیك. امّا از عنوان شدن یك اصطلاح یا واژه گمراه نشوید. شگفتی هرچیزی ممکن است باشد، یك چیز تکه‌تکه است: تاکنون، تنها در واحدهای ۲ـ، ۱ـ، ۰، ۱، ۲ یافته شده است. همچنین، چیز نسبتاً با دوامی است، چرا که در برهم کنشهای قوی نه می تواند آفریده و نه نابود شود، هرچند، با کمال تعجب، این حالت در برهم کنشهای ضعیف وجود ندارد.

لحظه‌ای توجه خود را به برهم کنشهای قوی معطوف کنیم. از میان ذراتی که برهم کنش قوی دارند، S در نوکلئونها و مزونهای π برابر صفر است؛ همین امر نشانهٔ عدم شگفتی آنهاست؛ بقیهٔ ذرات به درجات گوناگون شگفت اند. فرض کنید دو ذرهٔ شگفت با هم برخورد می کنند. شگفتی در ابتدا صفر است. بنابراین باید پس از برخورد هم شگفتی برابر صفر باشد. امّا، نمی توانیم تنها با یك ذرهٔ شگفت، یك شگفتی صفر داشته باشیم؛ ما دست کم، مثلاً به دو ذره نیاز داریم، یکی به ازای $S=1$ و دیگری به ازای $S=-1$. بنابراین دیده شد که قاعده‌ای که یك سال پیش پایس به آن پی برده و تشخیص داده بود، قانون پایستگی شگفتی در برهم کنشهای قوی است. این قانون مخصوص اقناع شرایط پایس ابداع نشد. این قانون پیامد چیزهای کاملاً متفاوتی بود که به نیروهای الکتریکی مربوط می شدند. این قانون به هیچ وجه تنها نمونهٔ عالی انطباق با نقش ناشی از ذرات بنیادی نیز نبود. این نقش کاملاً مستحکم است. اصلاً پوشالی نیست.

با وجود این، برای دلخوشی و تسلی ما، انواع بسیار زیادی ذرات بنیادی وجود دارند. چندتا؟ زمانی فرامی رسد که حقیقت می تواند ذهن را پریشان کند. اجازه دهید با این عبارت کلاسیك زنانهٔ «بیشتر از بیست و یك» پاسخ دهیم*.

بدینسان من ارزیابی خود را برای چندین دهه گشوده نگه می دارم و خود را در

* ظاهراً منظور این است که زنان همیشه در مورد سن خود چیزی مانند این عبارت را به کار می برند. ـ م.

مقابل هجوم تهدیدآمیز کشفیات جدید در وقتی که حسابگرهای غولپیکری که هم اکنون در دست ساختمان‌اند تکمیل شوند، محافظت می‌کنم.

البته این محافظت من جزئی است. من هنوز هم در معرض آسیبهایی ام که هیچ زنی نیست. زیرا مطمئناً در سطوح زیرین تکثرگرایی کنونی وحدت عمیقتری وجود دارد، و این موضوع باید معلوم شود که این وحدت می‌تواند تعداد ذرات بنیادی واقعی را کاملاً تا پایین بیست و یکی، کاهش دهد. حتی بدون این اصل هم تعداد ذرات پیوسته بالا نرفته است، چنانکه هم اکنون رقم نهایی را، به شرحی که خواهد آمد، این بعدالتحریر نشان خواهد داد.

آزمایشگری را مجسم کنید که پس از ماههای طولانی صرف وقت برای برپا داشتن دستگاههایش، در آستانهٔ انجام آزمایش خود برای آزمودن یك قانون فیزیك است. او بر سر راهش به آزمایشگاه دچار بیماری آپاندیس می‌شود و با شتاب به بیمارستان اعزام می‌شود. با این پیشامد، دو هفتهٔ بعد آزمایشش را انجام می‌دهد.

او ضمن نوشتن گزارش آزمایش خود برای یك مجلهٔ علمی، اشاره‌ای به عمل جراحی آپاندیس خود و این که سبب تأخیری در آزمایش شده است نمی‌کند. چرا این اشاره را نمی‌کند؟

زیرا مناسبتی ندارد. این عدم مناسبت بدیهی است.

براستی، بدیهی است. با این وجود اصل مهمّی در پشت این «بدیهی بودن» پنهان است: لحظهٔ دقیقی که کسی در آن برای آزمودن قانونی فیزیکی به آزمایشی دست می‌زند معمولاً تا آنجا که به آزمودن آن قانون مربوط می‌شود، به موضوع ربطی ندارد.

این که آیا این آزمایش هم اکنون انجام می‌شود یا دو هفتهٔ بعد، تفاوتی اساسی در نتایج به دست آمده پدید نمی‌آورد؛ قوانین فیزیك در خلال این مدّت تغییر نخواهند کرد. اگر این آزمایش از اهمیّت برخوردار باشد، فیزیکدانان دیگر، در مکانهای متفاوت و زمانهای مختلفی، آن را تکرار می‌کنند، ضمن آنکه اقلام تصادفی همچون تفاوتهای دما و فشار جوّ را منظور می‌کنند؛ و، اگر آن آزمایش اصلی درست و صحیح باشد، آنان نیز همان نتایج اساسی را به دست خواهند آورد. حتّی اگر آزمایشگر اوّلی آزمایش خود را در آزمایشگاه خویش تکرار کند این کار را نه تنها در زمانی متفاوت بلکه همچنین در مکانی کاملاً متفاوت انجام

می‌دهد؛ چرا که زمین در آسمان، ساکن نمی‌ایستد.

بی ارتباطی موضوع در زمان و فضا در شکل ریاضی معادلاتی که قوانین اساسی فیزیك را بیان می‌کنند بازتاب پیدا خواهد کرد؛ این معادلات مشخصه‌های معینی خواهند داشت که اطمینان می‌دهند قوانینی که این معادلات بیانگرشان هستند در هر لحظه یا در هر مکانی یکسانند.

تا اینجا ظاهراً چیز شگفت‌انگیزی نگفته‌ایم. امّا اکنون پیامد ریاضی عمیقی پدیدار می‌شود. اگر معادلات ما بی‌ربطی موضع را نسبت به زمان باز می‌تابانند، پس، خودبه‌خود، بر یك قانون بقاءِ ـ و معلوم می‌شود که این بقاءِ باید بقای انرژی باشد ـ دلالت می‌کنند. اگر معادلات ما بی‌ربطی موضع در فضا را منعکس کنند، باید یك قانون بقای متناظر، در این مورد یك بقای اندازه حرکت، وجود داشته باشد. قوانین بقاءِ با عدم ارتباطها پیوند می‌خورند.

این که ثابت می‌شود مکان و اندازه حرکت، یا زمان و انرژی، در اینجا شریکند، نباید ما را زیاد شگفت زده کند. قبلاً، در بحث عدم قطعیت با آنها به عنوان شریك برخورد کرده‌ایم؛ و این شراکت آنها به مکانیك کلاسیك دورهٔ پیش از کوانتومی برمی‌گردد[1].

عدم ارتباطهای دیگر، و قوانین بقای دیگری هم وجود دارند. مثلاً، این که دستگاههای آزمایشمان را به چه ترتیبی قرار می‌دهیم اهمیتی اساسی ندارد؛ آزمایشگران امریکایی، استرالیایی، انگلیسی، و روسی می‌توانند نتایج یکدیگر را از طریق جهت‌های موجود در آنها که کاملاً متفاوتند، مانند جهت خاوری و باختری، و شمالی و جنوبیشان که متفاوتند، وارسی کنند. قانون بقای اندازه حرکت زاویه‌ای با این عدم ارتباط ستمگیری در فضا جفت و جور شده است.

افزون بر اینها، به تجربه می‌دانیم که بار الکتریکی پایسته است؛ مثلاً یك پوزیترون می‌تواند یك الکترون را نابود کند، امّا حاصل آن تغییر بار کلّ نخواهد بود. یك نوع عدم ارتباط عجیب با این بقا وجود دارد، این بقای استقلال پیمانه، یا ناوردایی پیمانه‌ای، نامیده می‌شود، و می‌توان آن را به صورت یك ناوردایی موضع در یك خط ریاضی فرضی به نام فضای پیمانه‌ای، در نظر گرفت. این فضای پیمانهٔ یك بعدی با فضای معمولی شباهتی ندارد. با این حال، در نسبیت، با در نظر گرفتن این فضا به عنوان یك بعد اضافی، که همراه با فضا و زمان، یك جهان پنج

بعدی را تشکیل می دهد، یك نظریهٔ میدان واحد گرانشی و الکترومغناطیسی، بنا شده است. بدینسان اگرچه فضای پیمانه‌ای می تواند همانند چیزی از یك افسانهٔ ریاضی به نظر رسد، امّا، مانند بسیاری از همین افسانه‌ها، یك افسانهٔ قدرتمند است. همچنین، در ارتباط با قانونی بنیادی چون بقای بار الکتریکی، باید هم همینطور باشد. به علاوه، پایستگیهای ژرفتر این امر را القاءِ می کنند که دو بعد فرضی می تواند وجود داشته باشد، که موجودی را به نام فضای ایزوسپین تشکیل می دهند.

یك نوع بی ربطی وجود دارد که مخصوصاً در اینجا کاملاً مناسب و مربوط است: بی ربطی دست سویی. اگر به جای مستقیماً نگاه کردن به طبیعت، آن را از یك آینه نگاه کنیم، و به آن وسیله، دست سویی راست و دست سویی چپ را با هم تعویض کنیم، می توانیم انتظار داشته باشیم که در قوانین اساسی فیزیکی متوجهٔ هیچ اختلافی نشویم. این نوع بی‌ربطی، در آنجا که به قانون بقا در نظریهٔ کلاسیکی منجر نشود، با بی ربطیهای پیشین فرق می کند. این بی ربطی، به قانون بقایی در نظریهٔ کوانتومی منجر می شود؛ هر چند، این موضوع را ویگنر[1] مدّتها در سال ۱۹۲۷ نشان داده بود؛ همان قانون بقای عجیبی که بقای پاریته نامیده شد.

پاریته موجودی نیست که به آسانی تصور شدنی باشد. این معنی کیفیتی از زوجیت یا فردیت است. ذرات در حالتهای گوناگون یا پاریتهٔ زوج دارند یا پاریتهٔ فرد، و اتفاقاً قواعد ترکیب کردن پاریته‌ها همانند قواعد ترکیب کردن اعداد فرد و زوج است. مثلاً، جمع دو عدد زوج یك عدد زوج است؛ به همین ترتیب، سیستمی شامل دو سیستم کوچکتر، هریك با پاریتهٔ زوج، پاریته‌ای زوج دارد. به علاوه، جمع دو عدد فرد یك عدد زوج است؛ و به همین قیاس، دو سیستم هریك با پاریتهٔ فرد سیستمی را تشکیل می دهند که دارای پاریتهٔ زوج است. افزون بر این، مجموع یك عدد فرد و یك عدد زوج عددی فرد خواهد بود؛ و سیستمی با پاریتهٔ فرد و سیستمی با پاریتهٔ زوج یك سیستم با پاریتهٔ فرد به دست می دهد.

فرض کنید ذره‌ای با پاریته زوج به دو ذره فرو می پاشد. پس قانون بقای پاریته به ما می گوید این دو ذره باید سیستمی با پاریتهٔ زوج تشکیل دهند؛ یعنی، این دو ذره یا هردو باید با پاریتهٔ زوج باشند یا اینکه هردو با پاریتهٔ فرد. امّا یك ذره با پاریتهٔ فرد که

1. E. Wigner

به دو ذره تجزیه می شود باید یك ذره با پاریته زوج و یك ذره با پاریتهٔ فرد به دست دهد؛ در غیر این صورت پاریتهٔ کلّ باید تغییر داده شود.

بدینسان قانون بقای پاریته تعداد امکانها را محدود می کند، و معلوم شده است که این امر در فیزیك کوانتونی بسیار با ارزش است، زیرا نشان می داد که چرا بسیاری فرایندهاهرگزمشاهده‌نمی شوند، وعدم وقوع آنها به شکل دیگری غیر قابل درك است. این موضوع نخستین بار از سوی اتو لاپورته نظریه‌پرداز آلمانی در سال ۱۹۲۴، در ارتباط با تجزیهٔ طیف بسیار پیچیدهٔ آهن، مورد توجه قرار گرفت. این پیش آمد در دوران نظریهٔ بور، پیش از ظهور انفجارآسای نظریهٔ کوانتومی نوین روی داد؛ و این اصل پس از آن هنگام نقشی بسزا و افتخارآمیز داشته است. مثلاً، بدون این اصل، طرح فروپاشی پیچیدهٔ ذرات بنیادی باید کاملاً بلهوسانه به نظر رسیده باشد.

در میان ذرات شگفت ذراتی به نام ذرات θ (تتا) و ذرات دیگر به نام τ (تاو) وجود داشتند. اینها مزونهای K بودند.

در این حال یك تتای باردار می تواند به دو مزون π واپاشد؛ و یك تاو باردار به سه مزون. از آنجا که پاریتهٔ مزونهای π فرداست، قانون بقای پاریته‌نشان داد که ذرات θ باید پاریتهٔ زوج و ذرات τ پاریتهٔ فرد داشته باشند.

امّا این موضوع با اطلاعات دیگری که آزمایشگران پیرامون ذرات θ و τ دادند، تناقض داشت. مثلاً، جرم تتاها و تاوها تقریباً یکی بود، و طول عمرشان هم برابر بود. بنابر مفاد این مدرك بسیار قانع کننده که ذرات θ و τ در واقع ذراتی از یك نوع هستند، اظهارنظر پاریته مبنی براینکه اینها متفاوتند، برای فیزیکدانان به طور نامطبوعی تکان دهنده بود. این بی هنجاری در سال ۱۹۵۳، توسط دالیتس در انگستان، در جریان یك تجزیهٔ ماهرانهٔ مدرك تجربی‌موجود کشف شد، و هرچه اندازه‌گیریها بهتر شدند این تناقض را برجسته‌تر کردند. به زودی θ-Z به یکی از مجادلات علمی عمدهٔ روز تبدیل شد. این امر در کنفرانس بین المللی روچستر، نیویورك، در سال ۱۹۵۶، موضوع اصلی بحث بود، و بدون پیش نهادن راه‌حل قانع کننده‌ای در آینده‌ای نزدیك، برخی از شرکت کنندگان حتی در این امر مانده بودند که ممکن است قانون بقای پاریته غلط باشد. این معیاری برجسته از میزان نومیدی آنان بود، چرا که شواهد اعتبار قانون پاریته، قدرت خاصی داشتند.

همزمان با بحثهای کنفرانس، دو نظریه‌پرداز جوان چینی، تسونگ داثولی از دانشگاه کولومبیا و چن نینگ یانگ از مؤسسهٔ مطالعات پیشرفته، برآن شدند که با همکاری یکدیگر، با دیدگانی شکاك، شواهد ظاهراً مقاومت ناپذیر را به سود بقای پاریته، بررسی کنند.

این شواهد به راستی قوی بودند، با این وجود از جهت ناتمام بودنشان ضعف داشتند. زیرا، لی ویانگ با ارزیابی بسیار دقیق داده‌های تجربی فراوان، کشف متزلزلی انجام دادند: اگرچه شواهد بقای پاریته در قلمرو برهم کنشهای قوی و برهم کنشهای الکترومغناطیسی ناگزیر و حتمی بود، این شواهد، در قلمرو برهم کنشهای ضعیف غیر قطعی بودند.

اکنون کانون معمای θ-τ در برهم کنشهای ضعیف نهفته بود. بدینسان در اینجا اشاره‌ای به امکان یك راه گریز کوچك وجود داشت. و همین برای لی ویانگ کافی بود. آنان با جسارت، و اگرچه با نشانه‌های قابل درکی از هراس، دوگام بزرگ به پیش برداشتند، چرا که شهرتشان را بر یك قمار احتمالاً مضحك به داو گذاشته بودند: نخست اینکه پیشنهاد کردند پاریته در هر برهم کنش ضعیف پایسته نباشد؛ و پس از آن، به ویژه با نشان دادن اینکه چگونه می توان این موضوع را از راه تجربی آزمود، این نظر خود را مادّیت بخشیدند.

هیچ چیز جز این که پیشنهادهای لی ویانگ بی درنگ از سوی پاولی دست کم گرفته شد نمی توانست بر بی پروایی و جسارت آنها دلالت کند.

لی ویانگ نظریه‌پرداز بودند. آنان می توانستند نشان دهند که کجا به جستجوی عدم پایستگی احتمالی پاریته بپردازند، و چه نشانه‌های ویژه‌ای را پی گردی کنند. و اصولاً پیشنهادشان کاملاً ساده بود: آزمودن این که آیا فرایندهای متضمن برهم کنشهای ضعیف دست سویی معینی دارند؛ در واقع، ملاحظهٔ این نکته که تصویرهای آینه‌ای چنین فرایندهایی از لحاظ فیزیکی ناممکن اند یا خیر. امّا طراحی آزمایشهای امکان‌پذیر و انجام دادن آنها استعدادهای دیگری طلب می کرد.

بنابراین آنها مسئلهٔ خود را به آزمایشگران، و به طور عمده به همکار چینی با استعداد خود، در دانشگاه کولومبیا، ووُ واگذار کردند. او با مهارتی که در طراحی کارهای آزمایشگاهی داشت یك آزمایش انجام‌پذیر طراحی کرد. نخست اینکه،

اسپینهای اتمهای کبالت ۶۰ را به موازات یکدیگر در آوردند ـ عمل دو مرحله‌ای مشکلی که استفادهٔ استادانه‌ای از برهم کنشها با اتمهای دیگر را طلب می کرد. سپس، در جهت کاهش ارزش، یعنی گرما، گویی باید هرچیزی را به مدّت چند دقیقه‌ای که در خلال آن اندازه‌گیریهای قطعی انجام می گرفت، در همان جای خود باید منجمد می کردند. بنابراین امبلر، کارشناس زمزایی اهل امریکا در ادارهٔ استانداردها در واشنگتن دی. سی. را فرا خواندند، و آزمایشی را به آزمایشگاه او که به وسایل دمای پایین دسترسی داشت، منتقل کردند. در آنجا ووُ و امبلر و همکارانشان مرکز آزمایش خود را با یك جریان الکتریکی احاطه کردند. این جریان یك میدان مغناطیسی تولید می کرد؛ این میدان مغناطیسی اتمها را در بلورهای نیترات منیزیم سزیم در یك ردیف می آراست؛ و این اتمها به نوبهٔ خود اتمهای کبالت را ردیف می کردند، که در سطوح بلور به یکدیگر پیوسته‌اند. این آزمایشگران اتمهای به ردیف در آمده را به سکونی نسبی در آوردند. و آنها راستاهایی را کنترل کردند که همچنانکه کبالت تحت واپاشی رادیواکتیو قرار می گرفت الکترونها در آن راستاها جدا می شدند ـ مسئله‌ای ظاهراً ناچیز و کم اهمیّت و با وجود این یك مسئله حتمی.

ساعت خود را چنان روی میز قرار دهید که صفحهٔ آن به سوی بالا باشد، و فرض کنید که جریان الکتریکی جریان اتمهای کبالت را در سوی ساعتگرد به دور حاشیهٔ ساعت، به خط در می آورد. این را در یك ساعت قائم بنگرید و به نظر خواهد رسید که جریان در راستای عکس به جریان در می آید، فرض کنید که الکترونها به طور مساوی در بالا سو و پایین سو جدا می شوند. پس تصور آینه‌ای هم ارز واقعیت خواهد بود، واقعیت درست وارونه می شود. امّا اگر الکترونها بیشتر در جهت بالا سو جدا شوند تا پایین سو، یا برعکس، واقعیت یك دست سویی مشخص خواهد داشت و همچنانکه یك دست راست با یك دست چپ تفاوت می کند، تصویر آینه‌ای آن نسبت به خودش متفاوت خواهد بود. ووُ، امبلر و همکارانشان دریافتند که الکترونها به طور مساوی به بالا سو و پایین سو جدا نمی شوند. واقعیّت به طور ذاتی نسبت به تصویر آینه‌ای آن متفاوت بود. لی ویانگ حقانیت یافته بودند. دست سویی با اهمیت بود و پاریته پایسته نبود. و این اتفاق در یك برهم کنش ضعیف بود، همراه هر الکترون بیرون داده شده یك نوترینو وجود داشت.

حتی همچنانکه این آزمایش در حال پیشروی بود، آزمایش کاملاً متفاوتی با به کار گرفتن سیکلوترون کولومبیا در دست انجام بود. این نیز حدس جسورانهٔ لی ویانگ را تأیید کرد. نتایج این دو آزمایش تقریباً همزمان منتشر شد.

حقانیت لی ویانگ به اثبات رسید. با وجود این، از روی طعنه، آزمایشهایی که آنها را مشهور ساخت، مستقیماً معمای θ-τ را که به آنها الهام داده بود، حل نکرد. در حقیقت این آزمایشها به برهم کنشهای ضعیفی می پرداختند که متضمن نوترینوها بودند. بدینسان این آزمایشها می توانستند چنان تعبیر شوند که نشان دهند نوترینوها دارای دست سویی معینی اند، امّا هیچ نوترینویی در معمای θ-τ درگیر نبود، این برهم کنشهای ضعیف از یك نوع بدون نوترینو بودند.

امّا، به محض اینکه در استحکامات پاریته شکاف برداشته شد، سیل شواهد مبنی بر تأیید نقض بقای پاریته در واکنشهای ضعیف از همه سو روان شد. و به زودی شواهدی یافته شد که در فرایندهای مشخصی که متضمن بر هم کنشهای ضعیف از نوع بدون نوترینو هستند دست سویی از اهمیّت برخوردار است، هرچند هنوز هم نه برهمکنشهای θ و τ ی واقعی. بدینسان ما اکنون به اعتبار شواهد تجربی مستقیم می دانیم که عدم بقای پاریته به فرایندهای نوترینو محدود نمی شود. و علیرغم چنین شواهد فراوانی، معمای θ-τ دیگر یك معما نیست و بیشتر به ردیف نخست یك سیاههٔ سریعاً فزایندهٔ تأییدهای تجربی عدم بقای پاریته در تمای انواع برهم کنشهای ضعیف، تبدیل می شود.

پس، آشکار است که تمامی برهم کنشهای ضعیف خویشاوندند. امّا منشأ اینها ظاهراً متفاوت است، و چرا آنها باید خویشاوند باشند، رازی است که در حال حاضر حتی کوچکترین اشاره‌ای برای آشکار شدن آن به نظر نمی رسد.

با هزیمت بقای پاریته، چیرگی دست سویی پدیدار می شود و مقدّر به نظر می رسد که دانش فیزیك تصویر آینه‌ای آن را همچون چیزی غیر فیزیکی اعلام کند.

امّا کمی آهسته. زیاد هم تند نرویم. دست سویی هنوز هم تفوق ندارد. هنوز هم در جهان ممکن است نوعی تقارن آینه‌ای وجود داشته باشد. هنوز هم ممکن است، آنچنانکه لی ویانگ، و، به طور مستقل، لانداؤ[1] دانشمند روسی،

1. L. Landau

بیان داشتند، قوانین فیزیکی تصویر آینه‌ای خودشان باشند. فرض کنید آینهٔ ما قدرتی جادویی پیدا کند. وقتیکه آینه چپ و راست را تعویض می کند، فرض کنید که ماده را نیز با ضد ماده تعویض می کند. پس فیزیکی که در آینهٔ جادویی نگریسته هنوز هم می تواند فیزیك معتبری باشد ـ مگر آنکه نظریهٔ اساسیمان به ما خیانت کند؛ مثلاً، علیرغم عدم بقای پاریته، قوانین حاکم بر مادهٔ چپ گرد می تواند همانند قوانین حاکم بر پاد مادهٔ راست گرد باشد.

عدم پایستگی پارتیه دانش فیزیك را در آشوبی در افکنده است که هنوز هم در حال طغیان است، امّا در اینجا نمی توانیم مطالبی بیش از اینها پیرامون فرعیات مسئلهٔ تقارن آینه‌ای مطرح کنیم. این بعدالتحریر هم اکنون نیز بیش از حدّ طولانی شده است، هرچند هم مطالب فراوانی از قلم افتاده است که می توان کاملاً ادعا کرد که می بایست در این کتاب گنجانیده می شد. مثلاً، در اینجا چیزی پیرامون نظریه‌های «غیر نقطه‌ای» گوناگون یوکاوا و دیگران عنوان نشده است. و نیز در مورد کوششهای اخیر هایزنبرگ برای فرمولبندی کردن یك نظریهٔ ساده، و فراگیرنده که خواص اساسی ذرات بنیادی را توجیه کند. پیرامون تلاشهای اخیر برای برقراری مجدد علیّت میان اصول اساسی فیزیك کوانتومی، و به طور قابل ملاحظه‌ای از جانب بوهم، که الهامبخش دوبروی بوده است تا ایده‌های اوّلیه‌اش را از یك تعبیر علّی نظریهٔ کوانتومی گسترش دهد ـ که موضوعاتی فریبنده‌اند، امّا نتیجهٔ آنها در تردید باقی می ماند سخنی به میان نیاورده‌ام. اسپین ایزوتوپی که به شگفتی مربوط می شود، تنها توجهی آکنده بااکراه را به خود جلب کرده است، اگرچه به نظر می رسد نقش مهّمی در پیشرفتهای آتی بازی کند. و به خاطر همهٔ اینها ظاهراً پیمانهٔ این بعدالتحریر لبریز شده است، این پیمانه صرفاً چند لکهٔ بزرگ از قصه‌ای پرجوش و خروش و بی نظم را همچون کفهایی بر سطح خود ظاهر می کند.

اکنون فرصت من به سر رسیده است و باید این بعدالتحریر را به پایان برم.

خدانگهدار

فهرست اعلام

آب ۱۸۰، ۲۱۱
آب سنگین ۱۹۹
آپاندیس ۲۴۸
آتشفشان ۱۹۲ـ۱۹۳، ۲۰۱
آرمونیکها ۸۶، ۱۰۹
آزمایش ۱۴۰، ۱۴۷، ۱۵۷، ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۶۹ـ۱۷۱، ۱۸۰، ۱۸۳ـ۱۸۴
← مشاهده؛ هرتز
آزمایشگاههای بل تلفن ۷۹

ابرالکترونی ۱۱۳ـ۱۱۵، ۱۳۶ـ۱۳۷
← آتشفشان؛ اثر فوتوالکتریك؛ اسپین؛ اصل طرد پاولی؛ تنیس؛ میکروسکوپ؛ نوترنیو؛ هسته
اِینشتین ۶۲
اتاقك ابر ۴۰ـ۴۱، ۸۱، ۱۵۷
اتر ۱۰، ۱۴، ۳۳ـ۳۴، ۱۶۹
اتمی بودن انرژی ۲۹
اثر ازدحام ۱۵۸ـ۱۶۱، ۱۸۶
اثر دسته‌ای
← اثر ازدحام
اثر فوتوالکتریك ۲۸ـ۳۱، ۳۹ـ۴۱، ۸۱، ۱۶۲، ۱۷۷، ۱۸۰، ۱۹۱
اثر گروهی
← اثر ازدحام
احتمال ۱۳۷ـ۱۳۸، ۱۵۱ـ۱۵۴، ۱۵۷، ۱۶۱، ۱۶۶ـ۱۶۷، ۱۶۹، ۱۷۵، ۱۹۳، ۲۲۰، ۲۴۱
احتمال وجود الکترون ۱۶۷
ادینگتون ۶۰، ۱۶۳
ارادهٔ آزاد ۱۹، ۱۷۱
ارتعاش زه ۱۰۹ـ۱۱۰، ۱۱۳
ارشمیدس ۶۰
اسپین ۶۵ـ۶۷، ۱۳۱ـ۱۳۳، ۱۷۷، ۱۹۴، ۲۰۱ـ۲۰۲، ۲۰۶، ۲۲۹
اسپین ایزوتوپی
← ایزوسپین
استحاله ۴۵

اشتارك ۶۱، ۱۲۶
اشتراسمان ۲۱۲
اشتوکلبرگ ۲۳۱
اشیاء ۱۱۶ـ۱۱۸
اصل خودسری طبیعت
← ناسازگاری
اصل طرد پاولی ۶۶ـ۶۷، ۱۲۶، ۱۷۴ـ۱۷۵، ۱۷۸، ۱۹۵ـ۱۹۶، ۲۲۴
اصل عدم قطعیت ۱۴۳، ۱۵۰، ۱۵۳، ۱۵۶، ۱۶۱ـ۱۶۳، ۲۰۴، ۲۳۲
← ناسازگاری
اصل همخوانی ۶۳ـ۶۴، ۸۳ـ۸۴، ۸۶ـ۸۸، ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۰۶، ۲۱۱
اعداد جادیی ۲۲۳ـ۲۲۴
اعداد صحیح ۴۸، ۵۴، ۸۶، ۱۰۹ـ۱۱۲
← اعداد کوانتومی
اعداد موهومی ۱۰۰
← ریشهٔ دوم منهای یك
اعداد q ۱۰۵، ۱۲۴ـ۱۳۰، ۱۳۶
افلاطون ۷
الکترومغناطیس ۶، ۱۲ـ۱۷، ۲۹، ۳۰، ۳۵ـ۳۶، ۲۰۸، ۲۱۰، ۲۵۲
الکترون ۲۸، ۴۱، ۴۶، ۵۲ـ۵۷، ۷۹ـ۸۱، ۱۱۲، ۱۴۴ـ۱۴۶، ۱۴۸ـ۱۵۳، ۱۶۷، ۱۷۱ـ۱۷۵، ۲۲۰، ۲۲۲، ۲۲۴، ۲۲۶ـ۲۵۲
الکترون (نیم موج و نیز ذره) ۱۵۷ـ۱۶۴
الکترون بی‌پیرایه ۲۳۳ـ۲۳۴
الکتریسیته و مغناطیس
← الکترومغناطیس
امبلر ۲۵۳
امواج مادی ۷۳ـ۷۸، ۱۳۶
انـدازه حـرکت ۳۲، ۸۸، ۹۳، ۱۳۹، ۱۴۳ـ۱۴۸، ۱۶۳، ۱۶۹، ۱۸۱، ۲۳۲، ۲۴۹
اندرسن ۱۹۷، ۲۰۹
انرژی ۲۳ـ۲۹، ۵۲، ۵۵، ۵۶، ۷۲، ۷۷، ۹۸، ۱۱۷، ۱۴۱، ۱۴۳، ۱۶۳، ۱۷۴، ۱۸۱، ۱۹۲، ۱۹۸، ۲۰۴، ۲۰۸، ۲۱۵، ۲۳۲ـ۲۳۴، ۲۴۴، ۲۴۹
انرژی بمب اتمی ۳۳
انرژی به صورت جرم ۳۲ـ۳۳، ۷۷، ۲۱۲
انرژی منفی ۱۹۴ ـ ۱۹۶
انرژی وابسته به بسامد ۲۴، ۲۹ـ۳۱، ۷۳، ۱۱۴، ۱۴۶، ۱۵۴، ۱۷۴
اوبوا ۸۴
اوپنهایمر ۱۳۷، ۱۹۱
اورانیوم ۴۴ـ۴۵، ۲۰۰، ۲۰۶، ۲۱۲
اوکیالینی ۲۲۱
اولنبك ۶۵
اولیانوف ۱۲۷
اوندا ۲۴۶
ایزوسپین ۲۵۰، ۲۵۵
اینشتین ۶، ۱۳، ۲۷ـ۳۴، ۳۹، ۴۳، ۵۵، ۵۹ـ۶۱، ۶۵ـ ۷۰، ۷۲ـ۷۵، ۷۸، ۹۹، ۱۰۷، ۱۱۶، ۱۲۹ـ۱۳۱، ۱۴۱، ۱۹۷، ۲۱۴ـ۲۱۶

بار ۴۶، ۵۷، ۶۰، ۱۹۷ـ۲۰۱، ۲۰۵ـ۲۰۶، ۲۰۹، ۲۱۳، ۲۲۱، ۲۳۵، ۲۴۰، ۲۴۳، ۲۴۹، ۲۵۱
باریم ۲۱۲ـ۲۱۳
بازبهنجارش ۲۳۴ـ۲۳۵
بالمر ۴۸ـ۴۹، ۵۶ـ۵۷، ۸۹ـ۹۳، ۱۰۱، ۱۱۳ـ۱۱۴، ۱۸۰
بث ۲۳۱، ۲۳۵
بچه ۱۴۹ـ۱۵۹، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۷۸
برعلیه پرتو ۱۱۸

← امواج مادی؛ دوبروی
برهم کنشهای ضعیف ۲۴۵-۲۴۷، ۲۵۲، ۲۵۴
برهم کنشهای قوی ۲۴۵-۲۴۷، ۲۵۲
← ۲۲۱
برهم نهی ۱۵۱
بسامد ۱۵-۱۶، ۴۷، ۸۶-۸۹، ۹۱-۹۴
← بالمر
بسامد وابسته به انرژی ۲۴، ۲۹-۳۱، ۷۳، ۱۱۴، ۱۴۶، ۱۵۴، ۱۷۴
بستهٔ موج ۱۳۷، ۱۵۳، ۱۶۳
← ۷۶-۷۸
بقا ۳۲، ۵۵، ۲۲۰، ۲۳۲، ۲۴۷-۲۵۵
بکر ۲۰۰
بکرل ۴۴-۴۵
بمب اتمی ۳۳، ۱۸۹، ۱۹۹-۲۰۰، ۲۰۶، ۲۱۴
بوتهه ۲۰۰
بور(آگه) ۲۲۵
بور (نیلس) ۲۷، ۴۳-۷۴، ۷۸، ۸۳-۸۴، ۸۷-۸۸، ۹۵، ۱۰۰، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۰-۱۱۲، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۲۱، ۱۲۳، ۱۲۶، ۱۲۹-۱۳۲، ۱۳۶، ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۶، ۱۴۹، ۱۶۲-۱۶۳، ۱۶۸، ۱۸۰-۱۸۱، ۲۰۳، ۲۱۰-۲۱۲، ۲۱۴
بورن ۷۱-۷۲، ۸۴، ۱۰۰-۱۰۵، ۱۲۶، ۱۳۷-۱۳۸، ۱۵۳، ۲۲۰
بوهم ۲۵۵
بیمه ۱۶۶
بینهایت ۲۲۷- ۲۳۵، ۲۴۲

پاد الکترون ۱۹۷، ۲۴۳
پاد ذره ۲۴۳- ۲۴۴
← ۲۵۵
پارتیه ۲۲۰، ۲۵۰-۲۵۵
پانچینی ۲۲۰
پاول ۲۲۱
پاولی ۶۵-۶۷، ۱۰۱، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۲۶، ۱۳۲، ۱۷۴، ۱۷۸، ۱۹۵، ۲۰۰، ۲۰۶
← اصل طرد پاولی
پایس ۲۱۸، ۲۴۶-۲۴۷
پایستگی
← بقا
پرتو
←پرتوهای کیهانی؛پرتوهای گاما؛ پرتوهای X؛ ذرات α؛ذرات β
پرتوزایی ۱۶، ۴۴-۴۶، ۱۷۷، ۱۸۰، ۱۹۰-۱۹۳، ۱۹۸، ۲۰۹، ۲۱۲، ۲۱۶
پرتوها در فضاهای خیالی ۱۱۷-۱۱۸
پرتوهای کیهانی ۱۶، ۱۹۰، ۱۹۷، ۲۱۰، ۲۲۰-۲۲۱
پرتوهای گاما ۴۵، ۱۴۱
← ۱۶
پرتوهای X ۱۶، ۳۸، ۴۴، ۴۶، ۶۰، ۷۹، ۱۴۱
پرش
← جهش
پرش انرژی
← جهش انرژی
پروتون ۱۹۰، ۱۹۶-۲۱۰، ۲۱۵، ۲۲۲-۲۲۶، ۲۴۴-۲۴۵
پسی ۱۱۳- ۱۱۵، ۱۲۵-۱۲۹، ۱۳۷-۱۳۸، ۱۴۷-۱۴۹، ۱۵۱، ۱۸۰، ۱۹۳، ۲۲۹
پشه ۲۳۳
پلانك ۱۷-۳۱، ۵۳-۵۷، ۶۱، ۶۹، ۷۳، ۷۴، ۹۸، ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۰۸، ۱۲۹، ۱۳۱، ۱۴۱-۱۴۶، ۱۷۱، ۱۷۴، ۱۷۶، ۲۱۴
پلوتونیوم ۲۰۶

پواسون ۱۰۴، ۱۰۵
پوزیترون ۱۹۷ـ۲۱۰، ۲۱۵، ۲۲۶ـ۲۲۷، ۲۲۹؛ ۲۳۲ـ۲۳۵، ۲۳۸، ۲۴۰، ۲۴۳ـ۲۴۴، ۲۴۹
پولونیوس ۱۳۵
پولونیوم ۴۵
پیچبونی ۲۲۰
پیشگویی ۱۶، ۱۴۵ـ۱۴۶، ۱۶۶ـ۱۶۷، ۱۷۱
پیشگویی اتم بور ۲۰۲ـ۲۰۵
پیك نیك ۲۳۳
پیمانه ۲۴۹
پیمانهٔ انرژی ۲۴ـ۲۹

تابش ۱۶، ۲۰، ۲۷ـ۲۸، ۱۳۰، ۱۸۱، ۱۹۷، ۲۰۰، ۲۱۵
تار مرتعش
← ارتعاش زه
تامسون ۲۸، ۴۶
تبدیل تابش به ماده ۱۹۷ـ۱۹۸
تبدیل فوتون به ماده ۱۹۷
تبدیل نور به ماده ۱۹۷ـ۱۹۸
تپش موج همراه با الکترون ۷۴ـ۷۷
تپهای همزمان ۷۲ـ ۷۵، ۸۴
تداخل ۳۶ـ۳۷، ۳۹، ۴۱، ۸۰، ۸۵، ۱۱۸، ۱۲۳، ۱۵۷ـ۱۶۶، ۱۷۱
تصاویر ذهنی ۹۲، ۱۰۳، ۱۳۶، ۱۵۴ـ۱۵۶، ۱۶۱، ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۴
تضاریس ۲۱ـ۲۴، ۲۹
تقارن ۲۴۴، ۲۵۴
تکان ۳۱، ۱۴۲ـ۱۴۶، ۱۵۵، ۱۷۵
تکانه
← اندازه حرکت
تلفن ۷۹، ۱۵۶
تنیس ۲۰۷ـ۲۰۹
توارث ۱۵۲
توپخانه ۴۰، ۱۵۸ـ۱۵۹
توصیف اعداد کوانتومی ۵۳، ۶۱ـ۶۲، ۶۴ـ۶۶، ۱۰۸ـ۱۰۹، ۱۱۳، ۱۱۵
توصیف کوانتوم ۲۴
تومویاگا ۲۳۱

ثابت پلانك ۲۴، ۵۳، ۵۶، ۵۷، ۷۳، ۷۷، ۸۸، ۱۰۰، ۱۲۳، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۷۱

جابه‌جایی لمب ۲۳۰ـ۲۳۳
جایزهٔ نوبل ۲۱، ۳۲، ۴۱، ۴۳ـ۴۶، ۵۹، ۶۱، ۶۶، ۷۹، ۹۹، ۱۲۹، ۱۹۰، ۱۹۷ـ۱۹۹، ۲۲۰ـ۲۲۲، ۲۳۰
جبرگرایی ۱۷۶
← علیّت
جدولبندی مربعی ۸۸، ۹۰ـ۹۹، ۱۰۴ـ۱۰۵، ۱۱۵، ۱۲۵ـ۱۲۶
جدول تناوبی ۶۶، ۲۲۴
جدول فاصله شمار ۹۰ـ۹۱
جرم ۳۲ـ۳۳، ۵۷، ۷۲ـ۷۳، ۷۷، ۸۸، ۱۹۷، ۲۰۱، ۲۰۶، ۲۰۹، ۲۱۲، ۲۳۳ـ۲۳۵
جزیرهٔ نامسکون ۲۳۱
جمع کسرها ۹۶
جنگ افزار ۳۶ـ۴۱، ۸۱، ۱۵۷
جوردان ۸۴، ۱۰۰ـ۱۰۵، ۱۲۶، ۱۳۲، ۲۲۶
جهانخط ۲۳۷ـ۲۴۴
جهش ۵۵، ۶۱، ۸۷، ۹۷ـ۹۸، ۱۹۴ـ۱۹۵، ۲۰۳ـ۲۰۶
جهش انرژی ۵۵، ۶۱، ۸۷، ۱۹۴ـ۱۹۵، ۲۰۳ـ۲۰۴
جینز ۱۳۰

چادویك ۱۹۹ـ۲۰۰

چوب پنبه ۷۶

حالت ۱۴۷، ۱۵۱-۱۵۷، ۱۶۰-۱۶۳، ۱۹۴-۲۰۶، ۲۲۴
حباب ۱۹۶-۱۹۸
حرکت ۱۵۰-۱۵۳، ۱۵۷، ۱۶۰-۱۶۱، ۱۸۴، ۱۸۶، ۲۱۵
حساب اسپینور ۱۳۳
حقایق گریزناپذیر (بمب اتمی) ۱۷۱
حقایق گریزناپذیر (نهفته در مکانیک کوانتومی) ۱۷۱
حلقهٔ مرتعش ۱۱۱-۱۱۲

خلأ ۲۳۱-۲۳۲
خیالپردازی ۱۷۱، ۱۸۷

داروین ۱۳۲
دالیتس ۲۵۱
داویسون ۷۹-۸۱
دایسن ۲۴۱
دست سویی ۲۵، ۲۵۲-۲۵۵
دقت ۱۶۶، ۱۷۰
دما ۱۸۶، ۲۱۲
دوبروی ۷۲-۸۴، ۱۰۷-۱۱۲، ۱۱۵، ۱۱۸-۱۲۲، ۱۳۱-۱۳۲، ۱۳۶، ۱۴۱، ۱۶۸، ۲۵۵
دوترون ۱۹۹، ۲۰۲
دیراک ۱۰۱-۱۰۷، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۹-۱۲۲، ۱۲۴-۱۳۲، ۱۳۶، ۱۳۹، ۱۴۷، ۱۵۱، ۱۶۳، ۱۷۰، ۱۹۴-۱۹۸، ۲۰۱، ۲۲۶-۲۲۷، ۲۲۹-۲۳۵
دینامیک ۱۰، ۱۶، ۷۷، ۱۱۷-۱۱۸، ۱۲۳

ذرات بنیادی ۲۲۵، ۲۴۶-۲۴۸، ۲۵۲، ۲۵۵
ذرات تاو ۲۵۱-۲۵۴
ذرات تهنده ۱۰-۱۱، ۱۵، ۲۹، ۳۰، ۷۳-۷۵
ذرات تتا ۲۵۱-۲۵۴
ذرات شگفت ۲۴۵-۲۴۶
ذرات مجاز ۲۳۲-۲۳۴
ذرات هسته‌ای ۲۲۰-۲۲۲
ذرات k ۲۴۵-۲۵۱
ذرات α ۴۶، ۱۷۳-۱۷۴، ۱۹۸
ذرات β ۴۶
ذره در همه‌جا (در آن واحد) ۱۵۰، ۱۶۱، ۱۸۶

رادرفورد ۴۳-۵۲، ۶۰-۶۱، ۱۹۰، ۱۹۹-۲۰۱، ۲۱۰
رادیواکتیوتیه
← پرتوزایی
رادیوم ۱۶، ۴۵-۴۶
رِذِ رفرد ۲۳۰
رنگ جوجه ۱۵۲
روح خلاف طبیعت
← ناسازگاری
رولت ۱۶۶
رونتگن ۴۴، ۴۶
ریتس ۴۸، ۸۹-۹۳
ریچی ۹۹
ریشهٔ دوم منهای یك ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۲۳
رینز ۲۴۳
رینواتر ۲۲۴

زبان علامتی ۱۲۷-۱۲۸، ۱۳۹، ۱۴۷-۱۵۱، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۶۲، ۱۶۹
زگره ۲۴۴
زمان ۳۲، ۱۱۸، ۱۳۱، ۱۳۶، ۱۴۶، ۱۶۳، ۱۶۵، ۱۶۸، ۱۸۱-۱۸۷، ۲۱۵، ۲۳۲-۲۴۱، ۲۴۴، ۲۴۹

← همزمانی
زوئس ۲۲۳
زومرفلد ۶۲، ۶۵، ۱۳۱-۱۳۲، ۲۲۹
زیر دریایی ۱۵۲-۱۵۳
زیمان ۶۱، ۶۴، ۱۲۶

ژولیو ۱۹۸، ۲۰۰

ساختار ریز خطوط طیفی ۶۲، ۶۵، ۱۳۱، ۱۳۳، ۲۳۰
سادی ۴۵
سایمو ۴۱
سرشت موجی بودن صوت ۸۴-۸۶
سرعت ۱۴۰-۱۴۵، ۱۴۹، ۱۵۱
سرعت نور در نظریهٔ کلاسیکی ۱۲، ۱۴-۱۵، ۳۶، ۷۳، ۷۵، ۷۸، ۱۸۰
سکه ۱۵۳-۱۵۶، ۱۶۶، ۱۶۹، ۱۷۱، ۱۷۵
سناریو ۲۳۸-۲۴۰
سوسوزنی ۱۵۸-۱۵۹، ۱۶۴، ۱۷۱

شرودینگر ۱۰۷-۱۲۹، ۱۳۱-۱۳۳، ۱۳۶-۱۳۸، ۱۴۷، ۱۵۱، ۱۶۳، ۱۸۰، ۲۲۰، ۲۲۶
شطرنج ۱۲۷
شکافت ۲۰۰، ۲۱۲-۲۱۳
شگفتی ۲۴۵-۲۴۷، ۲۵۵
شوار تسشیلد ۶۲
شوینگر ۲۳۱
شیمی ۱۹، ۴۴، ۴۵، ۶۶، ۱۷۶، ۱۷۸، ۱۸۹، ۱۹۸، ۲۲۳

ضرب کردن ۹۵-۹۸، ۱۲۳-۱۲۴

طول عمر ۲۴۵-۲۴۶
← ۲۲۱، ۲۳۲
طول موج ۱۵، ۸۰، ۱۱۲، ۱۱۴-۱۴۲، ۱۴۴
طول موج امواج دوبروی ۸۰، ۸۸، ۱۱۲، ۱۴۱
طیف ۴۷، ۶۱-۶۳، ۶۵، ۸۹، ۱۰۹، ۱۱۳-۱۱۴، ۱۲۶، ۲۲۹-۲۳۰، ۲۵۱
طیف نمایی ۱۷۷، ۱۹۰

ظرفیت ۱۷۶
ظهور اتم بور ۵۰
ظهور اتم رادرفورد - بور ۴۶-۵۳، ۶۱، ۱۹۰، ۲۱۰

عالم ۱۶، ۹۳، ۹۴، ۱۷۸، ۱۸۱، ۱۹۷، ۲۰۱، ۲۰۴، ۲۰۶، ۲۱۵-۲۱۶، ۲۲۲، ۲۴۳، ۲۴۴
عدم ارتباط
← عدم مناسبت
عدم تناقض ۱۶۰، ۱۶۳، ۷۱
عدم قطعیت ۱۴۳-۱۴۴، ۱۶۵-۱۶۹، ۲۲۸، ۲۴۹
← اصل عدم قطعیت
عدم مناسبت (عدم ارتباط) ۲۴۸-۲۵۰
عکس روزنامه ۱۸۴-۱۸۵
علّیت ۱۶۵، ۱۷۰-۱۷۱، ۱۷۶، ۱۸۱، ۱۸۷، ۲۵۵
← ۱۶-۱۷، ۲۲۸-۲۲۹، ۲۳۸-۲۳۹
عملگر ۱۲۳-۱۲۴، ۱۴۷-۱۴۸، ۲۲۹

فاجعهٔ بنفش ۲۰، ۲۳، ۳۰، ۳۱، ۵۰، ۱۳۰، ۱۸۰
فاراده ۱۲-۱۴، ۲۰۸
فاز موج ۷۷
فانیمن ۲۳۶-۲۴۳
فرانک ۵۹

فرما ۷۷
فرمول (تجربی) تابش پلانك ۲۱، ۶۱، ۱۳۱
فرمی ۲۰۰، ۲۰۷، ۲۲۴
فرنکل ۲۱۱، ۲۱۲، ۲۲۲
فرنل ۱۱، ۱۴، ۳۲
فریش ۲۱۲-۲۱۳
فشار ۱۴۴، ۱۸۶
فشار نور ۱۴۴
فضا ۳۲، ۹۳، ۱۱۸، ۱۳۱، ۱۳۶، ۱۴۶، ۱۶۵، ۱۶۸، ۱۸۱-۱۸۷، ۲۱۵، ۲۳۷، ۲۳۸، ۲۴۹-۲۵۰
← فضای افسانه‌ای
فضای افسانه‌ای ۱۱۳، ۱۱۷-۱۱۸، ۱۳۱، ۱۳۶، ۱۶۹
فضای خیالی
← فضای افسانه‌ای
فوتون ۲۸-۳۳، ۴۰-۴۲، ۷۲-۷۴، ۸۰-۸۱، ۱۶۴، ۱۷۳-۱۷۴، ۱۹۱، ۲۲۶، ۲۳۲-۲۳۵، ۲۳۸، ۲۴۲
فوتون به صورت جهش ۵۵، ۲۰۳-۲۰۶
فوتون در میکروسکوپ هایزنبرگ ۱۴۱-۱۴۴، ۱۷۳
فوریه ۸۴، ۸۶-۹۶
فوکو ۱۱
فون نویمان ۱۶۹
فیثاغورث ۷، ۱۰۹

قطار برقی ۵۳-۵۴، ۱۱۲
قطره آب ۲۱۱-۲۱۳
← قطره مایع
قطره مایع ۲۲۲
← قطره آب
قطعیت ۱۶۶-۱۶۷
کالیفرنیا ۲۰
کامپتون ۴۱، ۱۸۴
کاندِن ۱۹۱
کاوِن ۲۴۳
کایلی ۹۹، ۱۱۷
کبالت ۲۵۳
کرامرز ۸۳، ۸۸، ۲۳۱، ۲۳۴
کریستف کلمب ۱۶۸
کلارنیت ۸۴-۸۶
کنش ۷۷، ۱۳۶
کوانتش دوم ۲۲۷-۲۲۸، ۲۳۱
کوانتوم پلانك
← ثابت پلانك
کورانت ۱۱۹
کوری (ایرن) ۱۹۸، ۲۰۰
کوری (پییر) ۴۴، ۱۰۴
کوری (ماری) ۴۴-۴۵، ۱۰۴، ۱۹۸
کونورزی ۲۲۰

گالیله ۵۷
گاموف ۱۹۱، ۱۹۲
گرانش ۲۴۵، ۲۵۰
گِرمِر ۷۹-۸۱
گِل - من ۲۴۶
گودشمیت ۶۵
گورنی ۱۹۱
گیلبرت ۵۱

لاپورته ۲۵۱
لاتِس ۲۲۱
لاگرانژ ۱۱۶، ۲۳۶
لانداؤ ۲۵۴
لاورنس ۱۹۰
لرد چانسلر ۵۱-۵۲

لمب ۲۳۰ـ۲۳۴
لنارد ۲۸، ۴۶
لورنتس ۶۱
لوله‌های نیرو ۱۲ـ۱۳، ۲۰۸
لی ۲۲۰، ۲۵۲ـ۲۵۳، ۲۵۴
لیست لباسشویی ۸۸ـ۹۶، ۱۱۵

ماتریس ۱۰۰، ۱۰۵، ۱۱۵، ۱۱۷، ۱۲۵ـ۱۲۶
← جدولبندی مربعی
ماتریس S ۲۲۹، ۲۴۲
ماده ۲۲ـ۲۳، ۶۱، ۷۸، ۱۳۱، ۱۸۱، ۱۸۷، ۱۹۸، ۲۱۵
مارسلوس ۶۷
ماریا گوپرت ـ مِیر ۲۲۳
ماکسول ۶، ۱۳ـ۱۷، ۲۸ـ۳۳، ۳۵، ۳۹، ۴۲، ۴۷، ۵۰ـ۵۲، ۵۵، ۵۹، ۶۱، ۶۴، ۶۹، ۱۳۰، ۱۶۸، ۱۷۷، ۱۸۹، ۲۰۸، ۲۱۰، ۲۲۰، ۲۲۶ـ۲۲۷
ماوراءِ طبیعت (متافیزیك) ۱۰۰، ۱۶۸، ۱۷۱
مایتنر ۲۱۲ـ۲۱۳
مایکلسون ۱۸۳
مایورانا ۲۰۷
متافیزیك
← ماوراءِ طبیعت
محیط دایره ۲۲، ۵۵
مدار ۵۰ـ۵۶، ۶۰، ۷۸، ۸۷ـ۸۸، ۹۲، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۵، ۱۲۳، ۱۴۶، ۱۸۰، ۲۰۳، ۲۲۸
مدل پوسته‌ای ۲۲۳ـ۲۲۵
مدل وحدت یافته ۲۲۵
مزوترون ۲۱۰
مزون ۲۱۰ـ۲۱۱، ۲۱۵، ۲۲۰، ۲۲۲، ۲۲۵، ۲۴۲، ۲۴۵، ۲۵۱
مزون پی ۲۲۱ـ۲۲۲، ۲۴۷، ۲۵۱
مزون مو ۲۲۱ـ۲۲۲، ۲۴۵
مزون K
← ذرات K
مزون π
← مزون پی
مشاهده ۱۴۲ـ۱۴۶، ۱۴۹، ۱۵۲ـ۱۵۵، ۱۶۰ـ۱۶۳، ۱۷۱، ۱۷۵، ۱۸۵
← آزمایش
معادلات حرکت ۱۱۶، ۱۲۳
معادلهٔ موج ۱۰۸، ۱۱۲، ۱۲۳، ۱۳۲
مفهوم جدید ذره ۱۴۴، ۱۵۰، ۱۵۶ـ۱۵۹
مفهوم جدید ذرهٔ تپنده
← مفهوم جدید ذرهٔ نوسانی
مفهوم جدید ذره در نظریهٔ نور ۸ـ۱۲، ۱۱۸، ۲۲۶
← فوتون
مفهوم جدیدهٔ ذرهٔ نوسانی ۱۰، ۱۵، ۲۹، ۳۰، ۷۳، ۷۴
مکان ۹۳، ۱۳۷، ۱۴۰ـ۱۴۹، ۱۵۳، ۱۵۵، ۱۶۱، ۱۶۳، ۱۶۹، ۱۷۵، ۱۸۳ـ۱۸۶، ۲۰۷، ۲۴۸، ۲۴۹
مکانیك
← مکانیك کوانتومی
مکانیك کوانتومی ۱۰۵ـ۱۰۶، ۱۳۰ـ۱۳۳، ۱۳۸ـ۱۳۹، ۱۴۹، ۱۶۱، ۱۶۲، ۱۶۷ـ۱۷۰، ۱۷۱ـ۱۷۲، ۱۷۴، ۱۷۶، ۱۷۷، ۱۹۱، ۱۹۲ـ۱۹۴، ۲۰۳، ۲۳۵
← زبان علامتی
مکانیك ماتریسی ۱۰۰، ۱۰۴، ۲۲۸
مکبث ۱۳۵
مندلیف ۶۶
موج ذره ۱۶۳، ۱۷۰، ۱۸۱، ۱۸۴ـ۱۸۵، ۲۰۸ـ۲۰۹

موج سینوسی ۸۶ـ۸۸
موج فازی ۷۷
موج همراه با الکترون ۱۱۲، ۱۳۶
مورلی ۱۸۳
موزلی ۶۰ـ۶۱، ۶۶
موسیقی ۸۴ـ۸۷، ۱۰۹ـ۱۱۰
مولکول ۱۷۶، ۱۸۶، ۲۰۷، ۲۱۱، ۲۱۵
مهمات
← جنگ افزار
میدان ۱۳، ۱۸۷، ۲۰۸، ۲۱۰
میکروسکوپ ۸۰، ۱۴۰ـ۱۴۹، ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۸۴
میلر ۸۵
میلیکان ۳۱، ۳۹
میلیونر ۳۷، ۷۷، ۸۵، ۱۱۳، ۱۱۸

ناسازگاری ۱۳۹، ۱۴۲ـ۱۴۵، ۱۵۴ـ۱۵۶، ۱۶۰، ۱۶۲، ۱۶۹
← اصل عدم قطعیت
نامبا ۲۴۶
نُت زنش ۱۱۳ـ۱۱۵
نردبان ۴۸ـ۴۹، ۵۶، ۵۹، ۶۱، ۸۹ـ۹۲، ۱۰۱، ۱۱۳، ۱۱۴، ۱۹۳، ۲۰۶
نردبان انرژی ۵۶، ۵۹، ۶۱، ۱۹۳، ۲۰۶
نظریهٔ الکترونی دیراک ۱۳۱ـ۱۳۲، ۱۹۴ـ۱۹۸، ۲۲۶ـ۲۲۷، ۲۲۹ـ۲۳۰
نظریهٔ فوتونی دیراک ۱۳۰ـ۱۳۱
نظریهٔ کلاسیکی نور ۱۶ـ۱۷، ۱۳۰
نظریهٔ کوانتومی دیراک ۱۲۹ـ۱۳۲
نظریهٔ مغناطیس ۱۷۸
← الکتریسیته و مغناطیس
نظریهٔ موجی نور ۸ـ۱۲، ۱۴ـ۱۵، ۱۷۹، ۲۲۶
نظریهٔ نسبیت ۱۳ـ۱۴، ۲۷، ۳۰ـ۳۳، ۶۰، ۶۲، ۶۵، ۷۲ـ۷۷، ۷۸، ۹۹، ۱۱۲، ۱۱۶، ۱۱۸، ۱۳۱ـ۱۳۳، ۱۸۰، ۱۸۳، ۱۸۷، ۱۸۹، ۱۹۴، ۱۹۶، ۲۲۸ـ۲۳۱، ۲۳۶ـ۲۳۷، ۲۴۹
نظریهٔ نوری دیراک ۱۲۹ـ۱۳۲، ۲۲۶
نظریه‌های جمعی ۲۲۲ـ۲۲۵
نقشهای پراش ۳۸، ۴۴، ۷۹
نقشهٔ جاده ۸۹ـ۹۱، ۸۹ـ۹۱
نقطه ۱۸۳ـ۱۸۴
نقل قول از شکسپیر ۶۷، ۷۳، ۷۵، ۱۳۵
نگاشت زمان ۲۳۶ـ۲۳۸، ۲۴۱ـ۲۴۲
نوار ضبط صوت ۸۴ـ۸۵
نوترون ۱۹۹ـ۲۱۵، ۲۲۲ـ۲۲۵
نوترنیو ۲۰۶ـ۲۱۰، ۲۴۳ـ۲۴۶، ۲۵۴
نور در جعبه ۱۳۰، ۲۲۶
نورشناخت ۱۰، ۷۷، ۱۱۸، ۱۲۲
نور فرابنفش ۱۶، ۱۹، ۲۸، ۴۰، ۸۰، ۱۴۱
نوسانگر ۲۲، ۶۲، ۹۸، ۱۱۵، ۱۳۰، ۲۲۶
نوکلئون ۲۲۲، ۲۲۴، ۲۴۵، ۲۴۷
نیتروژن ۲۰۰، ۲۰۲
نیرو ۶۶، ۱۷۴
نیروی تبادلی ۱۷۴ـ۱۷۵، ۲۰۷، ۲۱۱ـ۲۱۲
نیروی هسته‌ای ۲۰۷ـ۲۱۶
نیشی جیما ۲۴۶
نیکل ۷۹، ۱۵۶
نیکولسون ۵۳ـ۵۴
نیوتون ۱۰ـ۱۲، ۱۶، ۱۹، ۳۱، ۳۲، ۳۶، ۵۲، ۵۷، ۱۰۰ـ۱۰۳، ۱۰۸، ۱۱۵، ۱۱۶، ۱۱۸، ۱۷۷

ووُ ۲۵۲ـ۲۵۳
ویگنر ۲۲۶ـ۲۵۰
ویلر ۲۱۲، ۲۱۸، ۲۲۸، ۲۳۹، ۲۴۰
ویلسون ۴۰

هارکینز ۱۹۹ـ۲۰۱
هاکسل ۲۲۳
هالی ۲۰۸ـ۲۰۹
هامیلتون ۱۰۸، ۱۱۲، ۱۱۵ـ۱۲۳، ۱۳۰، ۱۴۶، ۲۳۶
هان ۲۱۲
هایزنبرگ ۸۳ـ۱۰۸، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۹ـ۱۲۹، ۱۳۲، ۱۳۶، ۱۳۹ـ۱۴۰، ۱۴۳ـ۱۵۳، ۱۵۶، ۱۶۱ـ۱۶۳، ۱۷۰، ۱۸۴، ۲۰۱، ۲۰۷ـ۲۰۹، ۲۲۶ـ۲۲۹، ۲۳۲، ۲۴۲، ۲۵۵
هرتز (گوستاو) ۵۹
هرتز (هاینریش) ۶، ۱۵ـ۱۹، ۲۸، ۳۱، ۳۸، ۶۹، ۱۰۸، ۱۷۹
هسته ۴۶، ۵۲، ۵۶، ۶۰، ۶۶، ۸۷، ۱۳۸، ۱۷۸، ۱۸۴، ۱۹۰ـ۱۹۴، ۱۹۹ـ۲۱۶، ۲۲۲ـ۲۲۵، ۲۳۳
هستهٔ هیدروژن ۱۹۰
هلیوم ۴۶، ۱۲۶، ۱۹۳
همزمانی ۳۲، ۷۴ـ۷۶
همزمانی تپش
← تپهای همزمان
هملت ۷۵، ۱۳۵
← مارسلیوس ۷۳
هویت الکترون ۱۷۳ـ۱۷۵
هویگنس ۱۱، ۳۲
هیدروژن ۴۸، ۵۶، ۶۵، ۹۱، ۱۰۱، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۱۳ - ۱۱۵، ۲۰۰ـ۲۰۱، ۲۲۹ـ۲۳۰، ۲۳۳
هیدروژن سنگین ۱۹۹
هیلبرت ۱۱۹
هیولا ۱۹۵ـ۱۹۸
← ۲۲۶ـ۲۲۷، ۲۳۲، ۲۳۳

یانگ ۲۲۰، ۲۵۲ـ۲۵۴
ینسن ۲۲۳
یوری ۱۹۹
یوکاوا ۲۰۹ـ۲۱۰، ۲۲۰ـ۲۲۱، ۲۵۵
یولانته ۵۱

n ۵۳، ۶۱، ۱۰۰، ۱۰۹
p ۵۳، ۸۸ـ۱۰۰، ۱۰۸، ۱۱۷، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۳۰، ۱۳۹ـ۱۴۰، ۱۴۳ـ۱۴۴، ۱۴۷ـ۱۵۰
q ۵۳، ۸۸ـ۱۰۰، ۱۰۵، ۱۰۸، ۱۱۷، ۱۲۳ـ۱۲۵، ۱۳۰، ۱۳۹ـ۱۴۰، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۷ـ۱۵۰، ۱۵۱
θ
← ذرات تتا
μ
← مزون مو
π ۲۲، ۵۴، ۵۷، ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۲۳
← مزون پی
τ
← ذرات تاو
ψ
← پسی

The Strange Story of

QUANTUM

by

Banesh Hoffman

Translated by

Bahrām Muᶜallimī

Scientific & Cultural
Publications Company

این کتاب سرگذشت حیرت‌آور فراگیرترین انقلابی را بازگو می‌کند که علم فیزیك از زمان نیوتون به‌بعد به خود دیده است.

در نخستین سال قرن بیستم ماکس پلانك نظریهٔ کاملاً جدیدی را مطرح کرد که بر پایهٔ آن نور نه به‌طور یکنواخت و پیوسته، بلکه به‌طور گسسته و به‌صورت دسته‌های کوچك یا «کوانتومها» جذب می‌شود. پنج سال بعد آلبرت اینشتاین اظهار داشت که خود تابش هم باید به صورت کوانتوم باشد. این دو نظر بینش تازه‌ای را دربارهٔ ساختار ماده مطرح کرد و علم فیزیك را بکلی دگرگون نمود.

در این کتاب سیر تاریخی این بینش جدید و مفاهیم اساسی نظریه‌ها و کشفهای بزرگی چون ترازهای انرژی اتم بور، نظریهٔ موجی دوبروی، معادله موج شرودینگر، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، مکانیك کوانتومی دیراك، ساختار ریز زومرفلد و غیره با زبانی ساده و روشن و غیر تخصصی بیان شده است.

بها: ۱۲۵ تومان