فیزیکدانان بزرگ

از گالیله تا هاوکینگ

مجلّد دوّم

مکانیک کوانتومی
فیزیک هسته ای
فیزیک ذرات
اخترشناسی
اخترفیزیک و کیهان شناسی

مؤلف: ویلیام ه. کروپر
مترجمان: احمد خواجه نصیر طوسی
سهیل خواجه نصیر طوسی

انتشارات فاطمی

فیزیکدانان بزرگ

از گالیله تا هاوکینگ

مجلّد دوّم

مکانیک کوانتومی
فیزیک هسته ای
فیزیک ذرات
اخترشناسی، اخترفیزیک
و کیهان شناسی

مؤلف: ویلیام ه . کروپر

مترجمان: احمد خواجه نصیر طوسی
سهیل خواجه نصیر طوسی

انتشارات فاطمی
www.fatemi.ir

Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking

William H. Cropper

Oxford University Press, 2001

فیزیکدانان بزرگ

از گالیله تا هاوکینگ

مجلّد دوم

تألیف: ویلیام ه. کروپر

مترجمان: احمد خواجه نصیر طوسی، سهیل خواجه نصیر طوسی

ویراستار: منیژه رهبر

ناشر: مؤسسهٔ فرهنگی فاطمی

چاپ اول، ۱۳۸۹

شابک ۱ـ۶۰۸ـ۳۱۸ـ۹۶۴ـ۹۷۸ (ج.۲)

ISBN 978-964-318-608-1(v.2)

تیراژ: ۲۰۰۰ نسخه

قیمت: ۶۵۰۰ تومان

آماده‌سازی پیش از چاپ: واحد تولید مؤسسهٔ فرهنگی فاطمی

- مدیر فنی تولید: فرید مصلحی
- طراح جلد: زهرا قورچیان
- مسئول واحد حروفچینی (TEX-پارسی): زهره امینی
- حروفچینی و صفحه‌بندی (TEX-پارسی): زهره تاجیک
- نمونه‌خوان: شکوفه صراف
- آماده‌سازی تصاویر: فاطمه ثقفی
- نظارت بر چاپ: علی محمدپور

لیتوگرافی: صاحب

چاپ و صحافی: چاپخانهٔ خجسته

کلیهٔ حقوق برای مؤسسهٔ فرهنگی فاطمی محفوظ است.

مؤسسهٔ فرهنگی فاطمی تهران، میدان دکتر فاطمی، خیابان جویبار، خیابان میرهادی، شمارهٔ ۱۴، کدپستی ۱۴۱۵۸۸۴۷۴۱، تلفن: ۸۸۹۴۵۵۴۵ (۲۰ خط)

www.fatemi.ir • info@fatemi.ir

Cropper, William H.

کروپر، ویلیام ه.

فیزیکدانان بزرگ (مجلّد دوم)/مؤلف ویلیام ه. کروپر؛ مترجمان احمد خواجه نصیر طوسی، سهیل خواجه نصیر طوسی.ـ تهران: فاطمی، ۱۳۸۷-۱۳۸۹.

ISBN 978-964-318-608-1 (ج۲)_ISBN 964-318-434-X (ج۱)

فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

عنوان اصلی: Great Physicists: the life and times of leading physicists from Galileo to Hawking, 2001.

مندرجات: ج۱. مکانیک، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، مکانیک آماری، نسبیت. ج۲. مکانیک کوانتومی، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات، اخترشناسی، اخترفیزیک و کیهان‌شناسی.

۱. فیزیکدانان ـ ـ سرگذشتنامه. الف. خواجه نصیر طوسی، احمد، ۱۳۰۶ ـ ، ب. خواجه نصیر طوسی، سهیل، ۱۳۴۳ ـ ، مترجم. ج. عنوان.

QC۱۵/ف۴ک۹

۱۳۸۹

کتابخانهٔ ملی ایران

۵۳۰/۰۹۲۲

۸۵ـ۲۹۷۶۸م

فهرست

سخنی از مترجمان ..... پنج

vi. مکانیک کوانتومی

خلاصهٔ تاریخی ۲۸۱

۱۵. انقلابی ناراضی ۲۸۳
ماکس پلانک

۱۶. علم با گفت و شنود ۲۹۶
نیلس بور

۱۷. دانشمندی به منزلهٔ منتقد ۳۱۳
ولفگانگ پائولی

۱۸. مکانیک ماتریسی ۳۲۱
ورنر هایزنبرگ

۱۹. مکانیک موجی ۳۳۵
اروین شرودینگر و لویی دوبروی

vii. فیزیک هسته‌ای

خلاصهٔ تاریخی ۳۵۵

۲۰. گشودن درها ۳۵۷
ماری کوری

۲۱. بر ستیغ موج ۳۷۳
ارنست رادرفورد

۲۲. فیزیک و دوستیها ۳۹۹
لیزه مایتنر

۲۳. فیزیکدان کامل ۴۱۷
اِنریکو فرمی

viii. فیزیک ذرات

خلاصهٔ تاریخی ۴۳۹

۲۴. $i\gamma \cdot \partial\psi = m\psi$ ۴۴۱
پل دیراک

۲۵. چه اهمیتی دارد؟ ۴۵۵
ریچارد فاینمن

۲۶. قصه کوارکها ۴۸۹
مورای گل-مان

ix. اخترشناسی، اخترفیزیک و کیهان‌شناسی

خلاصهٔ تاریخی ۵۱۵

۲۷. فراتر از کهکشان ۵۱۷
ادوین هابل

۲۸. دانش‌پژوه ایده‌آل ۵۳۷
سوبراهمانیان چاندراسخار

۲۹. رنج، شهرت و اقبال ۵۵۶
استیون هاوکینگ

وقایع‌نگاری رویدادهای عمده ۵۷۳

شرح واژه‌ها ۵۷۷

به‌نام‌خدا

سخنی از مترجمان

هر علمی دو وجه بسیار متفاوت دارد، یکی وجه نظریه‌ای و دیگری وجه کاربردی آن است که تکنولوژی نامیده می‌شود. وجه نظریه‌ای علمی، شناخت طبیعت و مسیر تحولات آن در طی زمان از آغاز تا زمان حال و پیشگوییهای آینده و به‌طور کلی دانستن نادانستنیهایی است که تا ابد ادامه دارد. اما تکنولوژی اگر مهار شده باشد با مایه گرفتن از وجه نظریه‌ای، وسایلی ایجاد می‌کند که موجب پیشرفت علم نظریه‌ای و رفاه زندگی می‌شود.

این کتاب به‌طور عمده تاریخ علم نظریه‌ای را باز می‌نمایاند. مطالب کتاب شامل نُه بخش است. در هر بخش، مختصری دربارهٔ شرح حال و عمدتاً بیان نقش و فعالیتهای دانشمندانی که به‌ترتیب در پیشرفت آن بخش از فیزیک مؤثر بوده‌اند آمده است. مسیر مفاهیم هر بخش کتاب نشان می‌دهد که چگونه نکته‌ای به‌طور شهودی در ذهن شکوفا می‌شود و با روش علمی و پژوهشهای مداوم و بعضاً بسیار سرسختانه پیش می‌رود، و در این رهگذر افت‌وخیزهایی دارد اما جزمیت و نقطهٔ پایانی ندارد. فیزیک نظریه‌ای گرچه منشأ اختراعات و پیشرفت آن وابسته به تکنولوژی مهار شده است، اما از لحاظ مادی سودآور نیست. بدین معنی که پژوهش علمی عشق حقیقت‌جویی می‌طلبد و چندان پاداش مالی ندارد. بیان مطالب با استفاده از فرمولهای اساسی فیزیک بسیار صریح، قابل فهم و استادانه است. با توجه به این نکات و موارد دیگری که در طول کتاب آمده است، خواندن این کتاب برای طالبان علم به‌ویژه دانشجویانی که در مرحلهٔ تصمیم‌گیری و جهت‌یابی مسیر فعالیتهای آیندهٔ خود هستند، مفید خواهد بود.

سپاسگزاری

از استاد دکتر منیژه رهبر که ویرایش این کتاب را پذیرفته و تصحیحات لازم را به عمل آورده‌اند و همچنین آقای فرید مصلحی که متن این کتاب را بازخوانی کرده‌اند و نکاتی را در جهت بهبود کتاب یادآور شده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

vi

مکانیک کوانتومی

خلاصهٔ تاریخی

داستان ما تاکنون قصه‌ای از پنج انقلاب علمی بود. نخستین آنها با گالیله آغاز و عمدتاً با نیوتون، که علم مکانیک و مفهوم گرانش جهانی را پدید آورد، کامل شد. پیشگام دومین انقلاب کارنو بود که به دنبال او میر، جول، هلمهولتز، تامسن، کلازیوس، گیبس و نرنست علم ترمودینامیک را برای ما فراهم آوردند. در انقلاب سوم، فارادی و ماکسول مفهوم میدان را ارائه و نظریهٔ الکترومغناطیس را مطرح کردند. کارهای کلازیوس، ماکسول، بولتزمن، و گیبس در انقلاب چهارم، به نام مکانیک آماری دری به سوی فیزیک مولکولی گشود و در انقلاب پنجم، نظریهٔ نسبیت اینشتین، دید ما از فضا، زمان و گرانش را تجدید بنا کرد.

این بخش از کتاب شرح بیشتری از انقلاب علمی را آغاز می‌کند. داستان به‌طوری آسان، در سال ۱۹۰۰ آغاز، و بیست‌وپنج سال بعد در علم جدیدی که امروزه «نظریهٔ کوانتومی»، «مکانیک کوانتومی» یا «فیزیک کوانتومی» نامیده می‌شود که بیشتر ریزجهان مولکولها، اتمها و ذرات زیراتمی را کندوکاو می‌کند آغاز می‌شود. به‌عنوان تذکر، من به‌جای فیزیک کوانتومی اولیه و فیزیک کوانتومی بعدی، از صفت «کلاسیک» برای اولیه و «کوانتومی» برای بعدی استفاده خواهم کرد، مثلاً در «مکانیک کلاسیک» و «مکانیک کوانتومی» و همچنین در «فیزیک کلاسیک» و «فیزیک کوانتومی». («کوانتال، Quantal» همتای بهتری برای «کلاسیکال» خواهد بود امّا این واژه به‌ندرت به‌کار گرفته می‌شود.)

در مراحل اولیه، انقلاب کوانتومی سه رهبر بزرگ داشت: ماکس پلانک، که درک و بینشهای منضبطش آنچه را که در پیش می‌آمد نشان می‌داد، آلبرت اینشتین، که عمیقاً به این ماجرای عقلانی همچون نظریهٔ نسبیت توجه داشت، و نیلس بور، که در بزرگترین بحرانش انقلابی ایجاد کرد. هر یک از این سه پیشگام، نخست با این وظیفه مواجه شدند تا فیزیک کلاسیک را با استنتاجات عجیبی که در فیزیک جدید اعمال می‌شد آشتی دهند و هر یک از آنها در راه خود ناکام ماندند. پلانک و بور کوشیدند تا ابهاماتی را که تا حدی با ایجاد فیزیک جدید در قالب فیزیک قدیم پیش می‌آمد رفع کنند. اینشتین به‌سرعت اساسی‌ترین ویژگیهای فیزیک جدید را پذیرفت، و سپس سرسختانه برای سطح عمیقتری از واقعیت فیزیکی کندوکاو کرد.

هیچ‌یک از این تلاشها به‌طور کامل موفقیت‌آمیز نبود و مدتی طول کشید تا نسل دیگری از نظریه‌پردازان کوانتومی این انقلاب را کامل کنند. در این نسل دوم، ورنر هایزنبرگ[1]، اِروین شرودینگر[2]، ولفگانگ پائولی[3]، و لویی دوبروی[4] بودند. میراث آنان مکانیک کوانتومی، نوعی از فیزیک بود که احتمالاً از نظر فکری و عقلانی چالش‌انگیزتر از بخشهای دیگر فیزیک بود. از کاوش در جهان ریزمقیاس قانونهایی از فیزیک کوانتومی حاصل می‌شود که برای ما در جهان بزرگ مقیاسمان بیگانه و رمزآلود است. شرودینگر این هشدار را به ما می‌دهد:

> وقتی چشم ذهنی ما در فاصله‌های کوچکتر و کوچکتر و زمانهای کوتاه و کوتاهتری نفوذ می‌کند، در می‌یابیم که طبیعت، رفتاری کاملاً متفاوت از آنچه دارد که ما در اجسام مشهود و آشکار پیرامونمان مشاهده می‌کنیم، به‌طوری که هیچ مُدل شکل‌گرفته‌ای از تجربه‌های بزرگ مقیاس ما هرگز نمی‌تواند «درست و حقیقی» باشد. یک مُدل رضایت‌بخش از این نوع نه تنها عملاً غیرقابل وصول، بلکه حتی غیرقابل تصور است. یا دقیقتر بگوییم، البته ما می‌توانیم فکر آن را بکنیم، امّا هر قدر فکر می‌کنیم تصور ما نادرست است؛ شاید به قدر یک «دایرهٔ سه‌گوشه» بی‌معنی نباشد، امّا بسیار بی‌معنی‌تر از یک «شیر بالدار» است.

با این توجه هشداردهنده، ما داستان نظریهٔ کوانتوم و مکانیک کوانتومی را آغاز می‌کنیم.

1. Werner Heisenberg 2. Erwin Schrödinger 3. Wolfgang Pauli 4. Louis de Broglie

۱۵

انقلابی ناراضی

ماکس پلانک

فیزیک به اتمام رسیده است

نخستین نظریه‌پرداز انقلابی کوانتومی که با او برخورد می‌کنیم، ماکس پلانک است که در انقلابهایی از نوع دیگر موفقیتی نداشته است. پلانک در جامعهٔ محافظه‌کار قرن نوزدهم پروس چشم به جهان گشود و در راه رسمی و منضبطش در سراسر زندگی به سنتهای پروسی متعهد باقی ماند، حتی در کار علمی‌اش، زندگی پلانک وقف یک پژوهش شدید، سخت و بعضاً نومیدانه برای چیزی شد که مطلق و بنیادی و به گفتهٔ اینشتین یک «عطش روحی» بود. پلانک در زندگینامهٔ شخصی‌اش می‌نویسد، «این امر از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است که جهان خارج، چیزی مستقل از انسان است، چیزی است مطلق، و پژوهش دربارهٔ قانونهایی که برای این مطلق به‌کار می‌آیند، به‌نظر من والاترین فعالیت کاوشگرانهٔ علمی در زندگی است.» اعتقادش در فیزیک، به‌طور ایده‌آل ریشه در اصول فیزیک کلاسیک داشت، به‌صورتی که تجلی و تظاهری از اصول مطلق برای او به‌صورت یک اعتقاد مذهبی بود. به گفتهٔ اینشتین، «قدرت و جامعیت عقلانی او از یک حالت هیجانی نشأت می‌گرفت. . . بیشتر شبیه به شخص عمیقاً مذهبی یا عاشق؛ تلاش روزمره، از یک مقصود یا برنامهٔ معینی فرمان نمی‌گیرد، بلکه حکم آن از یک نیاز آنی است.»

یکی از طعنهای عجیبی که به‌نظر می‌رسد بخشی از یک رُمان پیش‌پا افتاده باشد، این بود که در سال ۱۸۷۵ به پلانک که در آن زمان هفده سال داشت، توصیه شده بود به سراغ فیزیک و به خصوص فیزیک نظریه‌ای نرود، زیرا کار مهم و قابل ملاحظهٔ آن، بجز بعضی جزئیات به اتمام رسیده است. امّا پلانک صلاحدید خود را انتخاب کرد و سرانجام راهی برلین شد و در آنجا زیر نظر دو تن از مشهورترین فیزیکدانان آلمان، هرمان هلمهولتز و گوستاو کیرشهوف به تحصیل پرداخت. این دانشمندان بزرگ در سالن سخنرانی کمتر شوق‌انگیز و الهام‌بخش بودند ــ سخنرانیهای هلمهولتز به‌طور ضعیفی تهیه شده

بود و از آنِ کیرشهوف «خشک و ملال‌آور بود.»ــ امّا در نوشته‌ها و در اصول موضوع بحثشان، یعنی ترمودینامیک، پلانک آنچه را یافت که جستجو می‌کرد، «چیزی مطلق.»

در سال ۱۸۹۰ پلانک ایده‌هایی که دربارهٔ ترمودینامیک داشت به‌طورکامل بسط داد و از بعضی عقب‌ماندگیها و موانع اجرایی رنج می‌برد، احتمالاً به این علت که در آن موقع قصد داشت بر مفهوم انتروپی تأکید کند. پلانک دریافته بود که تقریباً غیر ممکن است در بَدو امر تأثیر مناسبی، یا به‌طورکلی تأثیری برتر بر فیزیکدانان بزرگ آلمان داشته باشد. کیرشهوف فقط مطالعه‌های پلانک را عیب‌جویی کرد، و هلمهولتز زحمت خواندن آنها را به خود نداد. حتی رودلف کلازیوس که برای مفهوم انتروپی آن‌طور که پلانک اصطلاح کرده بود و به‌کار می‌برد مسئولیت داشت، برای پلانک و مقالاتش وقت نگذاشت. سرخوردگی دیگر وقتی به وقوع پیوست که پلانک فهمید بسیاری ازکارش دربارهٔ نظریهٔ انتروپی پیش از او به‌وسیلهٔ ویلارد گیبس انجام شده است. سرانجام در سال ۱۸۹۵، پلانک با کمک پدرش یک منصب دانشگاهی «همچون یک پیام نجات» از دانشگاه کیل دریافت کرد.

چند سال بعد پلانک هنوز در جستجوی شناسایی حرفه‌ای وسیعتری بود. او مطلوب خود را در ورود به مسابقه‌ای یافت که بانی آن دانشگاه گوتینگن بود، و دربارهٔ موضوعی مربوط به نظریهٔ الکتریکی که به سادگی از جانب هلمهولتز حمایت می‌شد، بر علیه نقطه‌نظر مخالف ویلهلم وِبِر[1] ازگوتینگن به‌طوری که قابل پیش‌بینی بود، مقام اوّل بودن شرکت پلانک در مسابقهٔ گوتینگن رد شد. امّا با تأخیرکار او مورد تأیید و تصدیق هلمهولتز قرارگرفت و پلانک شانس خوبی به‌دست آورد. در سال ۱۸۸۹، با حمایت هلمهولتز از نامزدی او، پلانک به جانشینی کیرشهوف در دانشگاه برلین منصوب شد.

تابش جسم سیاه

داستان ماکس پلانک به عنوان یک انقلابی بی‌شوق در حدود سال ۱۸۹۵ در برلین در حالی آغاز شد که پلانک به عنوان یک فیزیکدان نظریه‌پرداز تثبیت شد. در این حال فعالیت او دربارهٔ نظریهٔ نور و تابش گرمایی گسیل‌یافته ازکوره‌های دما ـ بالای خاصی بود که در عُرف فیزیکی به «اجسام سیاه» مشهورند. یک جسم سیاه، رسماً، چیزی است که وقتی گرم می‌شود تابش خودش راگسیل می‌کند، امّا تابش نور فرودی را باز نمی‌تابد. این ویژگیهای ساده شده را می‌توان در درون کوره‌ای ایجاد کرد که به‌طور کامل، بجز یک سوراخ کوچک، با دیواره‌های ضخیم محصور شده باشد، سوراخ کوچکی که تابش از آن می‌گریزد و مشاهده می‌شود.

رنگ تابش گسیل‌یافته از جسم سیاه (و دیگر) کوره‌ها بستگی به آن دارد که کوره تا چه حد داغ است: در $550^\circ C$ سرخ تاریک به‌نظر می‌رسد، در $750^\circ C$ سرخ روشن، در $900^\circ C$ نارنجی، در $1000^\circ C$ زرد و در $1200^\circ C$ و فراتر از آن سفید است. این تابش ویژگی عمومی چشمگیری دارد: درکوره جسم سیاهی که دیواره‌های آن با تابش در تعادل‌اند، طیف رنگ، منحصراً بستگی به دمای

1. Wilhelm Weber

کوره دارد. اهمیتی ندارد که در کوره چه هست، یک رنگ یکنواخت گسیل می‌یابد که تغییر آن فقط به تغییر دمای کوره بستگی دارد. نظریه‌ای که تا حدی این مشاهدات را توصیه می‌کند در سال ۱۸۵۹ به‌وسیلهٔ کیرشهوف به دست آمده بود.

برای پلانک در اینجا نشانه‌های غیرقابل تردیدی وجود داشت از «چیزی مطلق»، آن حضور شکوه‌مندی که او در مطالعات ترمودینامیکی‌اش دنبال می‌کرد. کورهٔ جسم سیاه، یک مورد ایده‌آل برهم‌کنش تابش با ماده راکه اکنون به‌طور آزمایشی قابل حصول است، مجسم می‌کرد. کار نظریه‌ای جسم سیاه به‌سرعت در حال پیشرفت بود، زیرا روشهای آزمایشگاهی برای تحلیل طیف جسم سیاه ــ یعنی، رنگین‌کمان رنگهای گسیل‌یافته از جسم سیاه ــ به‌سرعت بهبود می‌یافت. نظریه، یک فرایند متوازن از تبدیلهای انرژی بین انرژی گرمایی دیواره‌های کورهٔ جسم سیاه و انرژی تابشی محتوای درون کوره را، در ذهن مجسم می‌کرد. در زمانی که پلانک کار پژوهشی‌اش را آغاز کرد، مسئلهٔ تابش جسم سیاه به‌صورت درختی نظری با چند میوهٔ ظاهراً رسیده، توسعه یافته بود.

نخستین اقدام پلانک همان اقدامی بود که معمولاً نظریه‌پردازان وقتی داده‌های آزمایشی دقیقی را به‌دست می‌آورند، انجام می‌دهند: او یک معادلهٔ تجربی به‌دست آورد که با داده‌ها جور بود. راهنمای او در این تلاش یک رابطهٔ ترمودینامیکی بود بین انتروپی و انرژی میدان تابش جسم سیاه. او دو نوع حد و نهایت (extreme) از رابطهٔ انرژی ـ انتروپی تعیین کرد، و سپس حدس زد که رابطهٔ عام، نوعی ترکیب خطی از این دو حد است. در این طریق فوق‌العاده ساده، پلانک به یک فرمول تابش رسید که آنچه او می‌خواست برآورده می‌کرد. این فرمول، داده‌های گردآوری شده به‌وسیلهٔ دوستانش هاینریش روبنس[1] و فردیناند کورلباوم[2] را به‌قدری دقیق بازتولید می‌کرد که دقیقتر از داده‌های طیفی خودشان بود. پلانک می‌گوید: «هرچه روشهای اندازه‌گیری به‌کار گرفته شده ظریفتر و دقیقتر باشد فرمولی که می‌باید یافت شود دقیقتر خواهد بود.»

h بداقبال

ماکس بورن[3]، فردی از نسل فیزیکدانان نظریه‌ای که به پیروی از پلانک، در ساختن بنای جدید نظریهٔ کوانتومی بر شالوده‌های پلانک، یاری می‌رساند، بر شگردها و مانورهای فریبندهٔ ساده‌ای که پلانک را به فرمول تابش او می‌رساند چنین می‌نگریست: «یکی از معتبرترین و پر معنی‌ترین بُرون‌یابیهایی که تاکنون در تاریخ فیزیک به‌عمل آمده است؛ که شهود فیزیکی تقریباً مرموزی را آشکار می‌کند.» نه تنها این فرمول یک فرمول تجربی دقیق و ساده، و مفید برای کنترل و همبستگی داده‌ها بود، بلکه در ذهن پلانک چیزی بیش از این بود. این فقط یک فرمول تابش نبود، فرمول تابش معینی، قانون نهایی موثق حاکم بر تابش جسم سیاه بود ــ و به‌معنی دقیق کلمه این فرمول می‌توانست به‌عنوان اساس یک نظریه

1. Heinrich Rubens 2. Ferdinand Kurlbaum 3. Max Born

به‌کار گرفته شود ــ حتی، چنانکه معلوم شد، یک نظریهٔ انقلابی باشد. بدون تردید پلانک سخت در تعقیب و تنظیم آن نظریه بود، او می‌نویسد: «از همان روزی که من [قانون تابش] را فرمولبندی کردم وقت و انرژی من صرف به‌دست آوردن معنی فیزیکی حقیقی آن شد.»

مارتین کلاین[1]، تاریخ‌نویس علم، می‌نویسد: پلانک هنگام نزدیک شدن به این مسئله بار دیگر از «اِلههٔ انتروپی» الهام می‌گرفت. اگر یک مفهوم وحدت‌بخش در دورهٔ کار علمی طولانی و مفید ماکس پلانک وجود داشته باشد، آن مفهوم انتروپی است. پلانک سالهای متمادی را وقف غور و مطالعهٔ انتروپی و قانون دوم ترمودینامیک کرده بود، و یک رابطهٔ بنیادی انتروپی ـ انرژی در به‌دست آوردن قانون تابش او جنبهٔ حیاتی داشت. اینک هدف بلندپروازانه‌تر او یافتن یک رابطهٔ انرژی ـ انتروپی نظریه‌ای بود که در مسئلهٔ جسم سیاه کاربرد داشته باشد.

به‌طوری که در فصل ۱۳ متذکر شدیم، لودویک بولتزمن قانون دوم ترمودینامیک را به‌عنوان یک «قانون احتمال» تعبیر کرد. او چنین استنتاج کرد که اگر احتمال یا بی‌نظمی نسبی برای حالت یک سیستم W باشد، در این صورت انتروپی S سیستم در آن حالت متناسب با لگاریتم W خواهد بود،

$$S \propto \ln W$$

پلانک با یک حرکت ماهرانهٔ ریاضی، این رابطه را برای مسئلهٔ جسم سیاه با نوشتن آن به‌صورت

$$S = k \ln W \qquad (۱)$$

برای انتروپی کل مولکولهای در حال ارتعاش موجود در دیواره‌های کورهٔ جسم سیاه ــ که پلانک آنها را مُشدّدها (resonators) می‌نامید ــ به‌کار گرفت. در این معادله k یک ثابت عمومی و W معیاری از بی‌نظمی است. گرچه اعتبار ابداع معادلهٔ انتروپی (۱) غالباً به بولتزمن داده می‌شود، و k امروزه «ثابت بولتزمن» نامیده می‌شود، امّا پلانک نخستین کسی بود که به اهمیت بنیادی معادله و ثابت مذکور پی‌بُرد.

پلانک با اکراه و نارضایتی به این معادله رسید. این معادله به‌شیوهٔ آماری که به‌وسیلهٔ بولتزمن گسترش یافته بود، عمل می‌کرد. نظریهٔ بولتزمن این درس را می‌آموخت که به احتمال زیاد هر فرایند بزرگ مقیاس می‌تواند معکوس شود و در جهت غیرطبیعی، یعنی، در جهت کاهش انتروپی و مخالف قانون دوم ترمودینامیک پیش رود. به‌رغم ناسازگاری با واقعیت‌های نجومی تکنیکهای کمی بولتزمن حتی نشان داد که چگونه می‌توانست احتمال نامساعد باور نکردنی را محاسبه کند. استنتاجات بولتزمن برای پلانک افسانه‌ای عالی به‌نظر می‌رسید، امّا در سال ۱۹۰۰ او در کار پژوهشی‌اش، یافتن راه قابل قبولی برای محاسبهٔ انتروپی مشدّدهای جسم سیاه، به‌طور فزاینده‌ای ناامید و حتی بی‌توجه می‌شد. او چند راه نادرست را در پیش گرفته بود، در تفسیر آنها دچار خطاهای اساسی می‌شد، و خزانهٔ نظری او تُهی شده بود. هیچ مسیرِ نظریه‌ای از آشنایی قبلی راهنمای او نبود تا ــ با استنتاجی از قانون تابش

1. Martin Klein

تجربی‌اش ــ سرانجام مطمئن شود به‌کجا باید برسد. به‌عنوان آخرین چاره، او با جانبداری از بولتزمن، نوعی احتمال‌گرایی انتروپی و قانون دوم ترمودینامیک را پذیرفت.

برای پلانک، آن‌طور که بعد به یکی از همکارانش نوشت، این امر «عملی از روی ناچاری» بود. او نوشت، «من طبیعتاً مایل و مستعد صلح و آرامش‌ام و هرگونه ماجرای مشکوک را طرد می‌کنم، امّا در آن زمان بی‌هیچ نتیجه‌ای به مدت شش سال (از ۱۸۹۴ به بعد) با مسئلهٔ تعادل بین تابش و ماده در کشاکش بودم و می‌دانستم که این مسئله برای فیزیک اهمیت بنیادی دارد؛ همچنین فرمولی را که توزیع انرژی در طیف بهنجار را بیان می‌کند، می‌دانستم [منظور قانون تابش تجربی اوست]. تعبیر و توصیف نظریه‌ای را می‌باید به هر قیمتی شده به‌دست آورد، اهمیتی ندارد که تا چه حد دور از دسترس است.»

پلانک روند شمارشی را برای محاسبهٔ بی‌نظمی W در معادلهٔ (۱) به‌کار می‌گرفت که برگرفته از یکی دیگر از تکنیکهای نظریه‌ای دیگر بولتزمن بود. او ــ دست‌کم به‌عنوان یک اندازه‌گیری موقتی ــ در نظر گرفت که انرژی کل مُشدّدها از «اجزای» غیرقابل تقسیم کوچک ساخته شده‌اند، هر یک با قدر یا بزرگی ε. در این صورت ارزیابی W به‌عنوان شماری از تعداد راههای یک تعداد معین از اجزای انرژی که بتواند بین تعداد معینی از مُشدّدها توزیع شود ممکن می‌شد؛ محاسبهٔ ترکیبی ساده‌ای که ریاضیدانان مدتها با آن آشنایی داشتند.

معادلهٔ انتروپی (۱)، روند شمارشی بر مبنای ابداع اجزای انرژی، و یک معادلهٔ انتروپی ـ انرژی استاندارد از ترمودینامیک، دسترسی پلانک به هدفش را تقریباً ــ نه به‌طور کامل ــ فراهم آورد، هدفی که یک استنتاج نظریه‌ای از قانون تابش او بود. گام دیگری باید برداشته می‌شد. استدلال او توفیقی حاصل نمی‌کرد، مگر آنکه او فرض می‌کرد انرژی ε اجزای مذکور متناسب با فرکانس ارتعاش مشدّدها است، یعنی، $\varepsilon \propto \nu$، یا

$$\varepsilon = h\nu \qquad (۲)$$

که در آن h ثابت تناسب است. اگر او اندازهٔ اجزای انرژی را به این طریق بیان می‌کرد، سرانجام می‌توانست قانون تابشش را استخراج کند و داده‌های جسم سیاه را برای محاسبهٔ مقادیر عددی دقیق دو ثابت h و k نظریه‌ای‌اش، به‌کار گیرد.

این مسیر نظریه‌ای پلانک برای قانون تابش او بود، که خلاصهٔ آن در اواخر سال ۱۹۰۰ به انجمن فیزیک آلمان به اختصار گزارش شد. پلانک دلگرم بود که سرانجام میوهٔ نظریه‌ای را که برای آن تلاش کرده است در دست دارد، نظریهٔ عمومی برهم‌کنش تابش با ماده. امّا به‌طور دردناکی آگاه بود که برای رسیدن به این میوه، دربارهٔ یک مورد نظریه‌ای نه‌ـ خیلی ـ سخت کار دشواری را به‌عهده گرفته است. او از محاسبهٔ انتروپی آماری بولتزمن استفاده کرده بود. رویکردی که هنوز مورد بحث بود. و او تکنیک بولتزمن را به طریقی اصلاح کرده بود که مفسران جدید آن را تردیدپذیر می‌دانستند. ابراهام پایس[1]، یکی از بهترین وقایع‌نگاران تاریخ نظریهٔ کوانتومی، می‌گوید که سازگاری پلانک با روش بولتزمن «نوعی سرکشی است».

1. Abraham Pais

حتی کار سرکشانه‌تر پلانک استفاده از اجزای انرژی ε در بسط شناسهٔ آماری اوست. روال و روند او مستلزم این فرض بود که انرژی، دست‌کم انرژی گرمایی مشدّدهای مادی یک خاصیت دانه‌دانگی ذاتی و کاهش‌ناپذیر، مجسم شده در کمیتهای ε داشته باشند. هیچ‌چیز در ادبیات پذیرفته شدهٔ فیزیک کلاسیک جهانی کمترین اعتباری به این ایده نمی‌دهد. دکترین تثبیت شده ــ که پلانک هم قبلاً مانند هر کس دیگر از آن صادقانه طرفداری می‌کرد ــ این بود که همه نوع انرژی به‌صورت یک پیوستار وجود دارد. هرگاه یک مُشدّد یا هر چیز دیگری انرژی‌اش تغییر کند، این تغییر در مقادیر پیوسته صورت می‌گیرد، نه در بسته‌های ناپیوسته آن‌طور که توصیف پلانک پیشنهاد می‌کند.

فن تخصیص انرژی به‌صورت اجزای کوچک شبه ذرهٔ مورد مطالعهٔ بولتزمن، تنها یک ترفند ریاضی برای یافتن احتمالها بود. بالاخره، بولتزمن با فرض اینکه اجزای انرژی بسیار کوچک‌اند ترتیب بازگشت به پیوستار را داد. طبیعتاً، پلانک با گرفتن امتیاز از همان ترفند، امیدوار بود از درگیری و تعارض با دکترین پیوستاری کلاسیک، دوری گزیند. امّا با شگفتی تمام، نظریهٔ او این فرض را مجاز نمی‌دانست که اجزای مذکور به هر مقدار دلخواهی کوچک باشند؛ ثابت h در معادلهٔ (۲) نمی‌تواند صفر باشد.

پلانک امیدوار بود که h بداقبال، و ساخت انرژی دالِّ بر آن، مصنوعات غیرضروری شناسهٔ ریاضی‌اش باشند، و اینکه کار نظریه‌ای بیشتر با مفروضات کمتر دشواری او را به نتایجی که می‌خواهد، سوق می‌دهد. در حدود هشت سال در این عقیده که سرانجام دید کلاسیک پیروز خواهد شد اصرار می‌ورزید. او کوشید تا «ثابت h را به نحوی به چارچوب نظریهٔ کلاسیک متصل کند. امّا این ثابت در برابر چنین تلاشهایی از خود لجاجت نشان می‌داد.» سرانجام پلانک دریافت که عاقبت تلاش او برای استخراج فیزیک جدید از فیزیک قدیمی، شکست و بی‌ثمری است. امّا این شکست برای پلانک «تمام و کمال روشن‌نگری بود. . . . اکنون من به‌عنوان یک واقعیت می‌دانم که [اجزای انرژی] . . . در فیزیک نقشی دارد بسیار مهمتر از آنچه در اصل، آمادگی حدس زدن آن را داشتم، و این بازشناسی مرا وادار کرد تا به‌وضوح نیازی را ببینم برای ارائهٔ روشهای کاملاً جدید تحلیل و استدلال در برخورد با مسائل اتمی.»

معنی فیزیکی ثابت h پنهان بود، امّا برای پلانک زحمت زیادی نداشت تا نتایج مهّم فیزیکی را از ثابت همتای آن، k، استخراج کند. او با مراجعه به محاسبهٔ آماری بولتزمن از انتروپی یک گاز کامل، راهی یافت تا با استفاده از مقدار k، خودش عدد آووگادرو را محاسبه کند. عدد آووگادرو، تعداد مولکولها در یک کمیت استاندارد و یا کمیت مولی از هر مادهٔ خالص است. برآورد این محاسبه بسیار بهتر از هر عدد آووگادروی دیگر موجود در آن زمان بود، امّا این امتیاز تا مدتها شناخته نشده بود. مقدار عدد آووگادروی پلانک به او امکان می‌داد تا بار الکتریکی الکترون را محاسبه کند، و این نتیجه نیز نسبت به اندازه‌گیریهای معاصرش بهتر بود.

این نتایج برای پلانک همان اهمیتی را داشت که برای قانون تابش او. آنها شواهدی بودند از مفهوم وسیعتر نظریه‌اش، فراسوی کاربرد برای تابش جسم سیاه. او در پایان مقالهٔ سال ۱۹۰۰ خود می‌نویسد، «اگر نظریه اصلاً درست باشد همهٔ این رابطه‌ها نمی‌باید تقریباً، بلکه باید به‌طور مطلق معتبر باشد.» در

محاسبهٔ عدد آووگادرو و بار الکتریکی، پلانک توانست احساس کند که نظریهٔ او سرانجام به «چیزی مطلق» نفوذ کرده است.

تا حدی به علت تلاشهای خود پلانک که گاهی هم تردیدآمیز بود، و تا حدی به علت تلاشهای نسل علمی جدید کمتر سرکوب‌شده، نظریهٔ پلانک، از جمله ناپیوستگیهای انرژی، تثبیت شد. امّا راه پذیرش کامل این نظریه، طویل و پُر پیچ‌وخم بود. حتی توسعهٔ واژگان آن نیز کُند بود. اجزای انرژی پلانک سرانجام «کوانتومهای» انرژی شد، گرچه واژهٔ لاتین «کوانتوم» به معنی کمیت، قبلاً در زمینهٔ دیگری به‌کار برده شده بود. توسعهٔ اساسی نظریهٔ پلانک، به‌وسیلهٔ کار دیگران، تا حدود سال ۱۹۱۰ طول کشید و وجه تمایز نام رسمی آن با عنوان «نظریهٔ کوانتومی» مشخص شد.

نظر دیگر

تفسیر کار پلانک که به‌طور خلاصه بیان شد، سالیان متمادی مورد پذیرش تاریخ‌نویسان علم بوده است. بخش سرنوشت‌ساز در این داستان ورود پلانک در معادلهٔ $\varepsilon = h\nu$ است، که اندازهٔ اجزای انرژی توزیع شده در مُشدّدهای جسم سیاه را محاسبه می‌کند. چون اجزای انرژی اندازهٔ معینی دارند و غیرقابل تقسیم‌اند، یک مشدّد می‌تواند انرژیهای ۰، ε، 2ε، 3ε، ... داشته باشد، امّا نه مقادیر دیگر، و هر تغییر انرژی باید ناپیوسته باشد، زیرا تغییر کمتر از یک واحد مجاز نیست. انرژی مُشدّد، با استفاده از واژگان امروزی، «کوانتیده» است.

آیا پلانک، این نظر مربوط به مُشدّدها و انرژی آنها را حفظ کرد؟ بیشترین تاریخ‌نویسان علم پذیرفته‌اند که حفظ کرده است، امّا توماس کوهن[1] این فکر را به چالش کشید با این بیان که او، به هر صورت، می‌تواند شواهد اندکی بیابد که پلانک مفهوم ناپیوستگی انرژی را در مقاله‌های اولیه‌اش تصدیق کرده باشد. کوهن برای توجیه موضعش نشان می‌دهد که پلانک چگونه با استفاده از محاسبهٔ آماری بولتزمن بدون قربانی کردن تصور کلاسیک از مُشدّدها، انرژی آنها را به‌طور پیوسته تغییر می‌دهد. اعتقاد کوهن این است که پلانک این دید کلاسیک را تا سال ۱۹۰۸ حفظ کرد، امّا از این زمان او فرمولبندی نظریهٔ دومی را آغاز کرد که شامل ناپیوستگی انرژی به صورتی است که اکنون شناخته می‌شود. نقل قول زیر از یک نامهٔ نوشته شده در سال ۱۹۰۸، آنچه را که کوهن نخستین پذیرش ناپیوستگی انرژی پلانک می‌داند، بیان می‌کند: «آستانهٔ معینی وجود دارد: مشدّد ابداً به تحریکات کوچک پاسخ نمی‌دهد؛ اگر مُشدّد به تحریکات بزرگتر پاسخ دهد، این پاسخ فقط به چنان طریقی خواهد بود که انرژی‌اش مضرب درستی از جزءِ انرژی $h\nu$ باشد، در نتیجه مقدار لحظه‌ای انرژی همیشه با مضرب درست مذکور نشان داده می‌شود.»

کوهن تأکید می‌ورزد که با باز خواندن اثر پلانک چیزی از اعتبار و شهرت پلانک برای او کم نشد. او متقاعد شده است که این نظر «به هیچ وجه از سهم شایستهٔ پلانک نمی‌کاهد. برعکس استنتاج پلانک از قانون مشهور توزیع جسم‌سیاهش، حاوی فیزیک بهتر و خواب‌گردی کمتر، از آنچه درگذشته پنداشته می‌شد، بوده است.»

1. Thomas Kuhn

بنابراین ما با دو نوع قصه از اکتشاف پلانک مواجه هستیم. امّا احتمالاً، نمی‌باید گزینش کنیم. هر دو نوع آن بر آنچه مهم است تأکید می‌ورزند و آن: شدت تعهد پلانک هم به فیزیک قدیمی و هم به فیزیک جدید است. اینکه او واقعاً مفهوم کوانتش را در سال ۱۹۰۰ تشخیص داده است یا در هشت سال بعد، از آنجا معلوم می‌شود که نمی‌توانست از نظریهٔ جدید در هر شکلی رضایت خاطر داشته باشد تا آنکه با هر تلاش ممکنی آن را تغییر شکل دهد و راهی به گذشته، به اصول کلاسیک بیابد. طنز تاریخ این بود که پلانک نسبت به هرگونه انقلابی فوق‌العاده بی‌میل بود، امّا نخستین نگاه از این دنیای بیگانه نصیب او شد. او آزاد نبود که اعتقادات فیزیک سنتی‌اش را دنبال کند، یا آنها را در زمینهٔ فیزیک جدید توسعه دهد و بازسازی کند. او طبیعتاً محافظه‌کار بود، و تقدیر نقش شورشی را به او محول کرد. بهترین معیار هوشمندی و جامعیت پلانک این بود که در آن نقش موفق شد.

کوانتومهای انرژی اینشتین (فوتونها)

یکی از معدود خوانندگان تیزهوش مقالات اولیهٔ نظریهٔ کوانتومی پلانک، کارمند درجهٔ دوم ادارهٔ ثبت اختراعات در برن، آلبرت اینشتین بود. برای اینشتین، این اصل موضوع اجزای انرژی آشکار و واقعی بود، ولو آنکه هراس‌انگیز باشد، «گویی زمین زیر پای کسی خالی شده باشد، بدون آنکه اساس و پایهٔ محکمی در جایی دیده شود تا شخصی بتواند بر آن پایه بنای محکمی بسازد.» برحسب تصادف، جستجوی «یک زیربنای استوار» باقی‌ماندهٔ زندگی اینشتین را اشغال کرد. امّا حتی بدون یافتن یک مبنای مفهومی رضایت‌بخش، ترتیبی برای کشف یک اصل قدرتمند داد که نظریهٔ کوانتومی را، پس از کار پلانک، در گام بزرگ بعدی‌اش به پیش برد. اینشتین نظریه‌اش را در یکی از مقالاتی که در «سال معجزه‌آسایی» ۱۹۰۵ منتشر شد، ارائه کرد.

پلانک در به‌کار گرفتن مفهوم کوانتوم محتاط بود. به دلیل قانع کننده‌ای، با توجه به مفاهیم ضمنی بنیادی کوانتوم، او تردید داشت تا آن را به‌عنوان یک موجود واقعی تلقی کند. او مواظب بود چیزی دربارهٔ میدان تابش، بخشی نور و بخشی تابش گرمای محصور در داخل جسم سیاه، نتیجه‌گیری نکند. کوانتومهای انرژی مورد بحث او مربوط به مُدل مُشدّدش از مولکولهای در حال ارتعاش در دیواره‌های کوره بود. اینشتین، در یکی از مقالات ۱۹۰۵، و در چند مقالهٔ بعدی‌اش این دیدگاه «اکتشافی» را ارائه کرد که کوانتومهای واقعی وجود دارند و می‌باید آنها را یافت، دست‌کم در بعضی آزمایشها، به‌صورت اجزای سازندهٔ نور و انواع دیگر میدانهای تابشی. او موضع خود را با تهور و وضوح خاص چنین بیان می‌کند: «بنابر فرضی که در اینجا می‌باید به آن عنایت داشت، انرژی یک پرتو نور... به‌طور پیوسته در یک فضای گسترش یابنده توزیع نمی‌شود، بلکه تعداد محدودی از کوانتومهای انرژی است که در فضا جای گزیده‌اند و بدون تقسیم شدن حرکت می‌کنند، و می‌توانند فقط به‌صورت واحدهای کامل، تولید یا جذب شوند.»

گرچه صفت «اکتشافی» محدودیت دارد، تصویری را که اینشتین ارائه می‌کرد به‌طور جالبی ساده بود: انرژی موجود در میدانهای تابش، به‌ویژه نور، به‌طور پیوسته توزیع نشده‌اند، بلکه در موجودات ذره‌گونه

متمرکز شده‌اند. اینشتین این ذرات تابش را «کوانتومهای انرژی» نامید؛ در عُرف امروزی، با پیچیدگی کامیابیهای متغیر نظریهٔ اینشتین، آنها را «فوتونها» می‌نامند.

اینشتین مفهوم فوتونها را در نوعی استدلالهای کوتاه و هوشمندانه، تا حدی به شیوهٔ مقالهٔ ۱۹۰۰ پلانک، بسط داد. مفهوم انتروپی و معادلات بنیادی ترمودینامیک بار دیگر راه خود را به قلمرو کوانتومی گشود. معادلات انتروپی برای یک میدان تابش، میدانی می‌سازد که شبیه به یک گاز کامل به‌نظر می‌رسد، شامل تعدادی عظیم امّا معین از ذرات مستقل است. هر یک از این ذرات ــ به اصطلاح امروزی فوتونها ــ حامل مقداری انرژی است که با یکی از اجزای انرژی پلانک $h\nu$ معین می‌شود، و ν امروزه یک فرکانس تابش را نشان می‌دهد. اگر N فوتون وجود داشته باشد، انرژی کل عبارت است از

$$E = Nh\nu \qquad (۳)$$

اینشتین از معادلهٔ فوق نتیجه گرفت که میدان تابش، مانند گاز کامل، شامل N ذرهٔ مستقل یعنی N فوتون است، و در این‌صورت انرژی هر فوتون عبارت است از

$$\varepsilon = \frac{E}{N} = h\nu$$

بی‌تردید اینشتین به این استدلال معتقد بود، امّا هیچ اطمینانی نیست که فرد دیگری در جهان در اعتقادات او سهیم باشد. سال ۱۹۰۵ بود. اصل موضوع کوانتومی پلانک هنوز عموماً نادیده گرفته می‌شد، و اکنون اینشتین آن را در مورد نور و شکلهای تابش دیگری به‌کار گرفته بود، گامی که خود پلانک مایل نبود برای ده سال دیگر بردارد. آنچه پلانک، و هر کس دیگری که مقالهٔ سال ۱۹۰۵ اینشتین را خوانده بود، نگران می‌کرد این بود که مفهوم نور به شکل ذره را فیزیکدانان به مدت تقریباً یک قرن جدّی نمی‌گرفتند. نظریهٔ اپتیکی متداول و پیروز در آن زمان و در سراسر بیشترین زمان قرن نوزدهم، نور را به‌صورت توالی جبهه‌های موج در نظر می‌گرفت که شکلی تا حدی شبیه به موجهای دایره‌ای داشت که با انداختن یک ریگ در سطح آب آرام ایجاد می‌شود. از زمان کارهای توماس یانگ و اگوستین فِرنل[1] به بعد در اوایل قرن نوزدهم فرض بر این بود که امواج نور نقشهای جالب تداخل نور و نوارهای تاریکی را توجیه می‌کند که از به هم رسیدن دو باریکهٔ نورِ ایجاد شده به طریقی خاص، تولید می‌شوند. پدیده‌های اپتیکی دیگر، به ویژه شکست و پراش نیز به سهولت با نظریهٔ موجی نور توضیح داده می‌شود.

یک صد سال پس از نخستین مقالات یانگ، آلبرت اینشتین با بی‌پروایی پیشنهاد کرد که بازگشت به اظهارنظری که زمانی نیوتون پیشنهاد کرده بود ممکن است ارزش اکتشافی داشته باشد، پیشنهاد نیوتون این بود که نور می‌تواند رفتاری مانند رگباری از ذرات داشته باشد. اینشتین ذرات نور را در استفادهٔ خاصش از اصل موضوع کوانتومی یافته بود. و مهمتر آنکه، او در یکی از مقالات سال ۱۹۰۵ خود نیز

1. Augustin Fresnel

نشان داد که نتایج تجربی شواهد مؤثری از وجود ذرات نور به‌دست می‌دهد، که به‌طور شگفت‌انگیزی با آزمایشهای پیشین که ظاهراً پشتیبان بی‌چون‌وچرای نظریهٔ موجی بودند، در تضاد بود.

مهمترین دلیل تجربی ذکر شده از اینشتین دربارهٔ «فوتوالکتریک» است که در آن با تابش نور فرابنفش بر یک سطح فلزی تازه تهیه شده در خلأ، جریانی الکتریکی تولید می‌شود. در اواخر سالهای ۱۸۹۰ و اوایل سالهای ۱۹۰۰، این جریان فوتوالکتریک به وسیلهٔ فیلیپ لنارد مورد بررسی قرار گرفت (همان لناردی که بعد با در سر داشتن تعصب ضدیهودی از اینشتین متنفر شد، و سرانجام با اقداماتی بی‌امان توانست اینشتین را از آلمان بیرون براند). لنارد کشف کرد که جریان گسیل یافته از «هدف» فلزی تحت تأثیر نور مرکب از الکترونهایی است که انرژی جنبشی (سینتیک) آنها را می‌توان به دقت اندازه‌گیری کرد، و اینکه الکترونهای گسیل یافته انرژیشان را از باریکهٔ نور به‌دست می‌آورند که بر سطح فلزی می‌تابد. هرگاه دیدگاه کلاسیک در نظر گرفته شود ــ امواج نور مانند امواج دریا بر سطح فلزی ضربه می‌زنند، و الکترونها مانند سنگ‌ریزه‌های ساحل آشفته می‌شوند ــ در این صورت ضروری به‌نظر می‌رسد فرض کنیم که وقتی روشنایی شدیدتر است، وقتی امواج بیشتری ضربه می‌زنند، هر الکترون انرژی بیشتری دریافت می‌کند. امّا، این آنچه که لنارد دریافته بود، نیست. در سال ۱۹۰۲، او کشف کرد که، گرچه تعداد کل الکترونهایی که در هر ثانیه از سطح فلزی بیرون رانده می‌شوند متناسب با شدت روشنایی، افزایش می‌یابند، انرژی تک‌تک الکترونها مستقل از شدت نور است.

اینشتین نشان داد که این جنبهٔ معماگونهٔ اثر فوتوالکتریک زمانی فهم‌پذیر است که در آزمایش، روشنایی را مجموعه‌ای از فوتونهای ذره‌گونه، فرض کنیم. او مکانیسم ساده‌ای برای انتقال انرژی از این فوتونها به الکترونهای فلز پیشنهاد می‌کند: «به این مفهوم که نور فرودی مرکب از فوتونهایی با بزرگی $h\nu$ است. . . می‌توان تصور کرد خروج الکترونها به‌وسیلهٔ نور به طریقی است که در پی می‌آید. فوتونها به لایهٔ سطح جسم [فلز] نفوذ می‌کنند، و انرژی آنها، دست‌کم بخشی از آن، به انرژی جنبشی الکترونها تبدیل می‌شود. ساده‌ترین راه برای تصور این مطلب آن است که یک [فوتون] همهٔ انرژیش را به یک الکترون تحویل دهد، در این صورت آنچه را که روی می‌دهد خواهیم پذیرفت.»

هر فوتون، را یک الکترون جذب می‌کند و همهٔ انرژیش را به آن الکترون منتقل می‌کند. وقتی الکترون یک فوتون را جذب کرد انرژی فوتون به‌صورت انرژی جنبشی الکترون درمی‌آید، آن الکترون می‌کوشد تا از فلز بیرون بزند و در جریان فوتوالکتریک اندازه‌گیری شده شرکت کند. وقتی یک الکترون راه خود را در میان انبوهی از اتمهای فلز بازکند، انرژی از دست می‌دهد، بنابراین وقتی از سطح فلز بیرون می‌آید حامل انرژی جذب شده منهای مقدار انرژی‌ای است که در فلز از دست رفته است. اگر انرژی‌ای را که فلز از یک الکترون گرفته با برچسب P نشان دهیم، اگر انرژی فوتون جذب شدهٔ اصلی، همچنین انرژی اولیهٔ منتقل شده به الکترون را با $h\nu$ پلانک (ν در اینجا فرکانس نور فرابنفش فرودی است)، و اگر انرژی در فرایند فوتوالکتریک پایسته باشد، انرژی E یک الکترون را که از هدف بیرون می‌آید می‌توانیم به‌صورت زیر بنویسیم

$$E = h\nu - P \qquad (۴)$$

تصور اینشتین از الکترونهایی که از هدفهای فلزی در برخوردهای فوتون ـ الکترون تنها پرت می‌شوند غرابتی را که لنارد یافته بود، به آسانی توضیح می‌دهد. صرف‌نظر از شدت نور، هر برهم‌کنش به همان انتقال انرژی فوتون به الکترون می‌رسد. بنابراین الکترونهای مُلحق به جریان فوتوالکتریک از بخش معینی از هدف فلزی انرژی یکسانی دارند، خواه فقط یک یا فوتونهای بیشماری در ثانیه به فلز اصابت کند. این توضیح، گرچه به‌طور تحسین‌انگیزی ساده بود، برای مخاطب شکاک اینشتین همچون دیگر استدلالهایش، تقریباً تصنعی و باور نکردنی به‌نظر می‌رسید. این قاعده که یک فوتون را یک الکترون جذب می‌کند، بنا به اظهارنظر جیمز جینز[1] نظریه‌پرداز بریتانیایی «نه تنها کشتن دو پرنده با یک سنگ، بلکه کشتن یک پرنده با دو سنگ را نیز ممنوع می‌کند.»

نظریهٔ فوتون اینشتین، بیشتر از هر چیز دیگری که او در فیزیک به آن دست یافته بود با عدم اعتماد و تردید مواجه بود. تا سال ۱۹۲۶ که گیلبرت لوئیس اصطلاح استاندارد «فوتون» را معرفی کرد. آنچه برای اینشتین آشکار بود و به سهولت آن را با تخیل و شهودش تمرین می‌کرد، پس از بیست سال هنوز به‌طور جدی زیر سؤال بود. قریب یک کوه شاهد لازم بود تا جایی دایمی برای فوتونها در دنیای کوانتومی برقرار شود.

وقتی اینشتین پژوهشهای جسورانه‌اش را در قلمرو کوانتومی آغاز می‌کرد، پلانک منتقد عمدهٔ نظریهٔ خودش می‌شد. به نظر می‌رسد پلانک هیچ تأسف و ناراحتی نداشته ــ شاید هم خشنود بوده است ــ که کار ساختن نظریهٔ کوانتومی به اینشتین و نسل جدید واگذار شده است. او در اواخر عمرش بدون احساس کنایهٔ شخصی نوشت، «یک حقیقت علمی جدید با متقاعد کردن معارضان و مجبور کردن آنان به دریافت حقیقت پیروز نمی‌شود، بلکه پیروزی آن تا حدی به علت... رشد نسل جدیدی است که با آن مأنوس‌اند.»

بیشترین حُسن

پلانک با وجدانش زیست. جان هیلبرون[2] زندگینامه‌نویس اخیر او می‌نویسد، «وجدان پاکش تنها جهت‌یابی بود که نیاز داشت.» جهت‌یابی که او را در عوالم بسیاری از یک زندگی پیروزمند و مصیبت‌بار راهنمایی می‌کرد. او مردی بود خانواده دوست، سخنرانی ماهر، موسیقیدانی خوش ذوق، کوه‌نوردی خستگی‌ناپذیر، مُدیری با صلابت، مشاوری محترم برای همکاران تازه‌کار و منبع الهام برای همه. اینشتین، که به‌نظر می‌رسد از لحاظ شخصیت و پیشینه‌اش تقریباً نقطهٔ مقابل پلانک باشد، وقتی خوشیهای بودن در برلین را برای ماکس بورن نقل می‌کند در خاتمه می‌گوید: «امّا بیش از هر چیز نزدیک بودن با پلانک شادی‌آور است.»

شادمانه‌ترین اوقات پلانک مصاحبت با خانواده‌اش بود. او می‌نویسد، «چه‌قدر عالی بود که هر چیز دیگر را کنار می‌گذاشتیم و کلاً با خانواده زندگی می‌کردیم.» همسر دومش، مارگا، می‌گفت: «او

1. James Jeans 2. John Heilbron

فقط خود را با همهٔ کیفیتهای انسانی‌اش در خانواده نشان می‌داد.» از همسر اولش، ماری، که در سال ۱۹۰۹ وفات یافت، دو پسر به نامهای کارل و اِروین و دو دختر دوقلو به نامهای اِما و گِریت، به بار آورد. لیز مایتنر[1] بانوی جوان مستعد، مصمم و محجوبی بود که در سال ۱۹۰۷ برای دنبال کردن یک دورهٔ درسی در فیزیک به برلین رفت (در آن زمان تقریباً چنین هدفی برای یک زن غیرممکن بود.) از مساعدت پلانک برخوردار و در خانوادهٔ او پذیرفته شده بود. او در یک خاطره از پلانک می‌نویسد: «پلانک مصاحبت بی‌تکلف و شادی‌بخش را دوست می‌داشت، و خانهٔ او کانون چنین گردهم‌آییهای اجتماعی بود. دانشجویان پیشرفته‌تر و دستیاران فیزیک به‌طور منظم به وانگن‌هایم اشتراسه[2] دعوت می‌شدند. اگر دعوتها به نیم‌سال تحصیلی تابستان می‌افتاد ما در باغ گرگم به هوا بازی می‌کردیم، و پلانک هم تقریباً با رؤیای کودکانه و چالاکی زیاد شرکت می‌کرد.»

امّا شانس یا پیشامد مساعد هرگز جای دایمی در زندگی پلانک نداشت. پسر بزرگش کارل بر اثر ابتلا به زخمهایی در جنگ اوّل جهانی مُرد. چند سال بعد یکی از دخترهای دوقلویش، گریت مدت کوتاهی پس از زایمان وفات یافت، امّا کودک او زنده ماند. دختر دوقلوی دیگر، اِما، به مراقبت کودک شتافت و با پدر بیوهٔ کودک ازدواج کرد. اِما نیز در موقع زایمان از دنیا رفت. پلانک بر اثر این فقدانها مبهوت و گیج شده بود. پس از مرگ دوقلوها، او در نامه‌ای به هندریک لورنتس[3] نوشت: «اکنون من در عزا و ماتم دو فرزند عزیز و محبوبم دردناک می‌گریم و احساس می‌کنم قُوایم تحلیل رفته و دستبرد زده شده‌ام. بارها شده است وقتی که دربارهٔ ارزش خود زندگی تردید می‌کنم.» امّا او تکیه‌گاه‌های فراوان درونی و بیرونی داشت. همواره می‌توانست ازکارش بگریزد، نه فقط در تنهایی به مطالعهٔ فیزیک نظریه‌ای بپردازد، بلکه در زندگی عمومی، دانشگاه و فرهنگستانهای قدرتمند، انجمنها و کمیته‌های علمی آلمان شرکت کند.

پلانک سخنرانی ورزیده بود. مایتنر که از وین آمده بود و عملکرد پرشور بولتزمن در سالن سخنرانی را دیده بود، ابتدا از سخنرانیهای پلانک مأیوس بود، امّا به زودی دریافت که شیوه‌های خصوصی و همگانی پلانک متفاوت است: «سخنرانیهای پلانک، با وضوح فوق‌العادهٔ آنها، ابتدا تا حدی خشک و بی‌روح به‌نظر می‌رسید. امّا خیلی زود فهمیدم که نظر و برداشت من دربارهٔ شخصیت پلانک تا چه حد ضعیف بوده است.»

مدت ده‌ها سال پلانک در آکادمی برلین، همتای آلمانی انجمن سلطنتی بریتانیا، در انجمن فیزیک آلمان، در سرپرستی مجلهٔ مهم فیزیک، *Annalen der Physik*؛ و در انجمن کایزر-ویلهلم، نفوذ داشت و وجوه خصوصی به وجود آمده را به مؤسسات تحقیقاتی هدایت می‌کرد. پلانک سه سال پس از «بازنشستگی» در سال ۱۹۳۰ به‌عنوان ریاست کل انجمن کایزر-ویلهلم انتخاب شد. هیلبورن می‌نویسد که پلانک در این بالاترین موقعیتی که عهده‌دار بود روابطی داشت «با وزرا، نمایندگان، با بازرگانان، بانکداران و صنعتگران، با خبرنگاران، سیاستمداران و مقامات خارجی.» او به‌عنوان «ندای

1. Lise Meitner 2. Wangenheimstrasse 3. Hendrik Lorentz

پژوهش علمی آلمان» شهرت یافته بود. در عین حال که نفوذ مسلطی در آکادمی برلین داشت، در انجمن فیزیک فعال بود، و یک سلسله سخنرانیهایی در دانشگاه ایراد می‌کرد. بنا به اظهار هیلبورن، «پلانک ظاهراً یک اقتصاددان دقیق برای وقت خود بود.»

پلانک به نحوی فرصتی برای تفریح و سرگرمی می‌یافت، امّا هیچ چیز آن سرسری و بیهوده نبود. او نوازندهٔ عالی پیانو بود، حتی یک دورهٔ موسیقی را دیده بود. موسیقی برای او یک تجربهٔ عاطفی و هیجانی بود. او آثار آهنگسازان رومانتیک، شوبرت، شومان و برامس[1] را بر موسیقی سنگینتر باخ (به استثنای بخشهایی از مصیبت‌نامهٔ مسیح ماتیوی مقدس[2]) ترجیح می‌داد. موسیقی در شامگاه جزء ثابتی از برنامهٔ خانهٔ پلانک بود. پلانک یا با همراهی یوزف یواکیم[3]، ویولن‌نواز مشهور کنسرت، یا با یواکیم و اینشتین در نواختن یک کنسرت سه‌نفره شرکت می‌کرد. او برای تفریح بدنی کوه‌نوردی را انتخاب کرده بود. هیلبورن می‌نویسد «بدون وقفه یا حرف زدن و بدون لوازم کوه‌نوردی و راحتی، یک روز در کوهستان همان‌قدر روح پلانک را نوازش می‌داد که یک سمفونی برامس.»

پلانک تقریباً نود سال زیست. او شاهد دو جنگ جهانی، دو رایش و جمهوری وایمار[4] بود. او دید که چگونه بنیاد تشکیلات بزرگ علمی آلمان که او در ساختن آن یاری کرده است، به‌وسیلهٔ سیاستهای نژادپرستی ضدیهودی نازی و دیوانگی‌های دیگر، تخریب شد. او اعمال نازیها را تقبیح می‌کرد، امّا ماندن در آلمان را برگزید، به این امید که پس از پایان یافتن این دیوانگیها خرده پاره‌های آن را جمع‌آوری کند. او نزدیک بود در یک یورش بمباران کشته شود و خانه‌اش در برلین حومهٔ گرونوالد[5] آسیب دید. با تمام این احوال پلانک تا اندازه‌ای به امید آینده مقاومت کرد. امّا پیشامدهای بدتری در راه بود.

در فوریهٔ سال ۱۹۴۴ گرونوالد در یک یورش هوایی عظیم با خاک یکسان شد. خانهٔ پلانک با کتابخانه، مکاتبات و یادداشتهای روزانه‌اش تخریب شد. در حدود یک سال بعد، اِروین، تنها پسر بازمانده از نخستین ازدواجش، به اتهام تبانی در توطئه‌ای علیه هیتلر اعدام شد. پلانک در نامه‌هایی به برادرزاده و خواهرزاده‌اش نوشت: «او پارهٔ پُر ارزشی از وجود من بود. او آفتاب زندگی من، مایهٔ افتخار و امید من بود. با هیچ کلماتی نمی‌توان توصیف کرد که من چه موجودی را از دست داده‌ام.»

پلانک در اواخر زندگی‌اش نوشت: «تنها چیزی که با اطمینان مطلق می‌توانیم مدعی مالکیت آن باشیم، و بیشترین حُسنی که هیچ قدرتی در جهان نمی‌تواند از ما بگیرد، و آنچه می‌تواند بیشتر از هر چیز دیگر شادی جاودان به ما بدهد، صدق و کمال روح است. و آنکه بخت مساعد به او امکان داده است تا در برپا کردن بنای علم دقیق همکاری کند، رضایت‌خاطر و شادی درونی‌اش را خواهد یافت، به گفتهٔ شاعر بزرگ ما گوته، در این شناخت او کاوش‌پذیر را کاویده و کاوش‌ناپذیر را با متانت محترم شمرده است.»

یک انطباق و مناسبتِ آخرین عبارت ــ «او کاوش‌پذیر را کاوید و کاوش‌ناپذیر را با متانت محترم شمرد.» ــ می‌باید سنگ نوشتهٔ مزار ماکس پلانک بوده باشد.

---

1. Brahms 2. Saint Matthew Passion 3. Joseph Joachim 4. Weimar 5. Grünewald

۱۶

علم با گفت و شنود

نیلس بور

درود به نیلس بور

نظریهٔ کوانتومی موفقیتی یک‌شبه نبود. پذیرش آن طی نخستین دههٔ تاریخش تردیدآمیز بود، و دست‌اندرکاران نادری داشت. در سال ۱۹۱۰ اصول موضوع پلانک کم یا بیش مشخص شده بود، امّا غالباً در مسائل مربوط به تابش و حالت جامد به‌کار گرفته می‌شد و تقریباً هرگز در قلمرو اتمها و مولکولها به‌کار نمی‌رفت.

در تابستان سال ۱۹۱۳ در فیلوزوفیکال مگزین[1] نخستین سلسله مقالاتی پدیدار شد که آغازگر تغییر وضع بود. نویسندهٔ این مقالات نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی بیست‌وهشت ساله با شخصیتی بی‌همتا بود. نظریهٔ بور رفتار اتمها، بخصوص اتمهای هیدروژن را با مخلوط دقیقاً مرتبط شده از اصول موضوع پلانک و مکانیک کلاسیک کِپلر و نیوتون توصیف می‌کرد. بور این نظریه را، با موفقیت چشمگیری در مورد نقشهای زیبای طیف گسیل شده از گاز هیدروژنی که به‌طور الکتریکی برانگیخته شده بود به کار برد. (دستگاه فیزیکی آن شبیه چیزی است که در لامپهای نئون به کار می‌رود.) این امر برای فیزیکدانان آن زمان دستاوردی باور نکردنی بود. متخصصان طیف‌نمایی، آزمایشگرانی که نظم موجود در طول موجهای نور (طیف) گسیل شده از اتمها و مولکولها را بررسی می‌کنند، مدتها کارشان را بدون استفاده از یک نظریه انجام می‌دادند به‌طوری که امید خود به یافتن آن را از دست داده بودند. مقالات بور امید تازه‌ای هم برای طیف‌نمایی و هم برای نظریهٔ کوانتومی بود.

نقش بور در این مورد تاحدی بخت مساعد بود. نظریهٔ کوانتومی در سال ۱۹۱۳ به‌قدر کافی سر برآورده بود که اهمیت آن در فیزیک اتمی را دیگر نمی‌شد نادیده گرفت. با این حال وظیفهٔ بور کار

1. Philosophical magazine

ساده‌ای نبود. مهارت و احساس شهودی بسیاری لازم بود تا مخلوط کارآمدی از فیزیک کلاسیک و فیزیک کوانتومی به‌وجود آید. اینشتین می‌گفت که او ایده‌های مشابهی داشته، «امّا شهامت توسعه و پروراندن آنها را نداشته است.» برای اینشتین کاربرد حساسِ «فراهم آوردن بنیاد نامطمئن و متناقض نظریهٔ کوانتومی با مسائل اتمی یک معجزه، برترین جوهر موسیقایی در حوزهٔ تفکر» بود.

بور چیزی بیشتر از شاهکارهای نظری انجام داد. او تقریباً به تنهایی، مکتب بزرگی از فیزیک نظری و تجربی در کُپنهاک ایجاد کرد. مؤسسهٔ بور (رسماً مؤسسهٔ دانشگاهی فیزیک نظری) در ۳ مارس ۱۹۲۱ افتتاح شد، و به‌سرعت شگفت‌انگیزی فیزیکدانهای جوان آلمان، انگلستان، روسیه، هلند، مجارستان، هند، سوئد و امریکا را جذب کرد. بور مکانی را برای زندگی و کار آنان فراهم کرده بود، در آن زمان مقامات آکادمیک نادر و فیزیکدانان نظری، مانند هنرمندان، تنگدست بودند.

فعالیتهای مؤسسه همیشه آن‌طور نبود که از جمع فضلا و دانشمندان انتظار می‌رفت: پینگ‌پنگ (بازی در کتابخانه)، تماشای فیلمهای کابویی و مانند آنها سرگرمیهای مطلوبی بود، امّا کارهای بسیار جدی و درخشانی در این جَو ظاهراً ساده انجام می‌شد. ولفگانگ پائولی، ورنر هایزنبرگ، پل دیراک، لِو لانداو، فلیکس بلوخ[1]، ادوارد تِلر[2]، جورج گاموف، و والتر هیتلر همگی بازدیدکنندگان مؤسسهٔ بور بودند: نام و دستاوردهای آنان حکایتِ بخش بزرگی از رویدادهایی است که در دوران بحرانی و سرنوشت‌ساز سالهای ۱۹۲۰ و سالهای ۱۹۳۰ در فیزیک کوانتومی به وقوع پیوست. رابرت اوپنهایمر دربارهٔ این دوران و ضرورت نقش بور در آن می‌نویسد: «زمان قهرمانانه‌ای بود. کار، کار یک نفر نبود؛ بلکه تشریک مساعی تعداد زیادی از دانشمندان از بسیاری کشورهای متفاوت را شامل می‌شد، گرچه از ابتدا تا انتها روح فوق‌العاده خلاق و نقّاد نیلس بور این اقدام بزرگ را راهنمایی، کنترل و سرانجام به شکل نهایی تغییر یافته‌ای تبدیل می‌کرد.»

بور معدود خصوصیت‌هایی را داشت که از مردی چنین با نفوذ انتظار می‌رفت. سخنرانیهای او احتمالاً «نه از لحاظ صوتی مناسب بود و نه به‌طور کامل قابل فهم بود.» با وجود تلاش زیاد مقالات و کتابهایش غالباً تکراری و حجیم بود. از پرسشهای بدون شرمندگی او دربارهٔ موضوع‌های پیش پا افتاده، حکایتهای خنده‌آوری گفته شده است. شوخیهای او محدود به شش جوک بود. با وجود این شخصیت او مؤثر و نافذ بود. بور با صراحت لهجهٔ خوشایند و صمیمانه‌ای سخن می‌گفت که شاگردان، همکاران و رؤسا را به یکسان تحت تأثیر قرار می‌داد. به‌طوری که لئون روزِنفلد[3]، یکی از همکاران بور دربارهٔ سیل بازدیدکنندگان به کپنهاک می‌گوید: «آنان که در پی دانشمند بودند، با مردی به معنی کامل کلمه روبه رو می‌شدند.»

گشاده‌دستی و سخاوت بور با پاسخ قابل ملاحظه‌ای جبران می‌شد. ظاهراً، بور نمی‌توانست بدون مصاحبت و همراهی انسانهای دیگر فکر خلاق داشته باشد. او در سراسر زندگی حرفه‌ای‌اش، از طریق گفت‌وشنود با بعضی مخاطبان منتقد، ایده‌های علمی به ذهنش راه می‌یافت، شکل می‌گرفت و تکمیل

1. Felix Bloch 2. Edward Teller 3. Léon Rosenfeld

می‌شد. مخاطبان از آنان که در مؤسسه در دسترس بودند، انتخاب می‌شدند. او اندیشه‌هایش را با جمع کوچکی از مخاطبان هماهنگ می‌کرد به‌طوری که هیچ بخشی از فرایند خلاقش نمی‌توانست بدون یک هیئت مشاور انسانی پیشرفت کند. مقاله‌ها و متن سخنرانیهای او در جلساتی ناآرام و به‌طور غیرعادی تحکم‌آمیز نوشته می‌شد که بعضاً به‌صورت تک‌گویی (مونولوگ) بود. یکی از دستیاران بور به نام اُسکار کلاین[1] صحنه‌ای از اصلاح یک متن سخنرانی بور را برای ما مجسم می‌کند: «من با مداد و کاغذ در کنار میزی نشسته بودم که بور دور آن پرسه می‌زد و به‌طور متناوب مطلبی را به انگلیسی دیکته می‌کرد و به دانمارکی توضیح می‌داد، درحالی‌که می‌کوشیدم گفته‌های انگلیسی او را روی کاغذ بیاورم. بعضی اوقات وقفه‌های طولانی در گفتار او ایجاد می‌شد، خواه به این علت که دربارهٔ دنبالهٔ مطلب تعمق می‌کرد، یا به این علت که دربارهٔ چیزی خارج از موضوع فکر می‌کرد، موضوعی که می‌باید دربارهٔ آن به من گفته می‌شد ... همچنین، غالباً کار به این علت قطع می‌شد که با خانواده برای آبتنی و دوچرخه‌سواری کوتاه‌مدت به ساحل می‌رفت.»

انرژی و پیگیری او برای کامل کردن یک مقاله تقریباً فوق بشری به نظر می‌رسید. هر کلمه، هر جمله، هر مفهوم و هر معادله می‌باید بارها بازنگری و تجدیدنظر می‌شد. پس از پنج یا شش پیش‌نویس (احتمالاً آخرین آنها نمونهٔ چاپی بود) بور بدون آنکه هنوز نظرش قطعی شده باشد، به گوشهٔ ساکت و آرامی از مؤسسه می‌خزید، ضرورتاً با منشی یا نسخه‌بردار، و تلاش و تقلا همچنان ادامه داشت. سرانجام، به‌طوری غیرقابل باور، رضایت‌خاطر پیدا می‌کرد. پاسخ ولفگانگ پائولی[2]، که غالباً به جهت خدمات ارزنده و انتقادی‌اش که همیشه هم با همدردی همراه نبود، به یک دعوت‌نامه این بود که: «اگر آخرین نمونهٔ چاپی برای او ارسال شود، خواهد آمد.»

با پافشاری بی‌امان بر صراحت و وضوح، و استعداد وسیع برای استقبال انتقاد از دیگران در گفتگوهای بسیار طولانی، بور ترتیبی داده بود تا به بعضی از مشکلترین مسائل در فیزیک کوانتومی، از جمله آنها که ماهیتی مفهومی و فلسفی داشتند، نفوذ کند. استدلالهایش چنان متهورانه، کامل و دقیق بود که بلامنازع و آسیب‌ناپذیر می‌نمود. تعبیر او از نظریهٔ کوانتومی، به ویژه معمّاهای آن با نقطه‌نظرهای اینشتین مغایر و غالباً متناقض بود. در آغاز سال ۱۹۲۷، و در یک کنفرانس سولوی، و ادامهٔ آن به مدت بیست سال، بور و اینشتین مناظرهٔ دوستانه‌ای دربارهٔ معنی فیزیک کوانتومی را ادامه دادند. اینشتین هرگز استنتاج بور را مبنی بر اینکه ریزجهان اتمها و مولکولها در نهایت نامعین است نپذیرفت، و بیشترین سعی خود را برای شکستن دفاعیات بور انجام داد. بور همیشه یک پاسخ برای انتقادهای اینشتین داشت، و استدلالهایش پیروز و قانع‌کننده بود.

مانند بعضی از فیزیکدانان دیگری که داستانهایشان در این فصلها گفته شد، بور سعادت یک ازدواج ایده‌آل را داشت. مارگریت نورلاند بور[3] بانویی محبوب و هوشمند بود. بور صاحب شش پسر

1. Oskar Klein 2. Wolfgang Pauli 3. Margrethe Nørlund Bohr

شد ــ دو پسرش کودکی را پشت سر نگذاشتند و بزرگترین پسرش کریستیان در حادثهٔ قایقرانی غرق شد ــ و پس از سال ۱۹۳۲ آنان در «خانهٔ افتخار» کارلزبرگ[1]، شهروندان درجهٔ اول دانمارک، زندگی می‌کردند. روزنفلد دربارهٔ نقش حیاتی مارگریت در این زندگی پیچیده به ما می‌گوید: «وظیفهٔ مارگریت، کار آسانی نبود. بور طبیعتی حساس داشت، و دائماً به مشوق و محرک، همدردی و تفاهم نیاز داشت. وقتی سروکلّهٔ بچه‌ها پیدا شد... بور به‌طور بسیار جدّی وظیفهٔ بزرگ خانواده را به عهده گرفت. همسرش خود را بدون تلاش ظاهری با نقش میزبانی سازگار می‌کرد و شامگاه در خانهٔ بور با گفتگوی صمیمانه و شعف‌انگیز، جلوهٔ خاصی داشت.»

بور برندهٔ جایزهٔ نوبل شد. او به روزولت و ترومن رؤسای جمهور امریکا و چرچیل نخست‌وزیر انگلیس توصیه‌هایی کرد، و در هر گوشهٔ جهان فیزیک شهرت یافت. زندگی، شخصیت و آرمانهای او افسانه شد. تنها اینشتین و ماری کوری، در میان دانشمندان قرن بیستم، به چنین مقامات رفیع و بلندآوازه‌ای رسیدند. امّا پیش از هر چیز دیگر موضع بور سرخوشی و آسودگی خاطر با اعضای مؤسسه، با فداکاری و خوش طبعی آنان بود، انتقاد آنان را می‌پذیرفت و به‌کار می‌گرفت، و از مسخرگی و دوزوکلک آنها لذت می‌برد.

اتم بور ـ رادرفورد

بدون تردید جالب است بدانیم که نیلس بور دوران حرفه‌ای‌اش را به‌عنوان یک فیزیکدان عملی در آزمایشگاهی «مملوّ از شخصیتهایی از همهٔ بخشهای جهان که با خشنودی تحت نفوذ شخصیت پر انرژی و الهام‌بخش (مرد بزرگ) کار می‌کردند آغاز کرد. این «مرد بزرگ» ارنست رادرفورد[2] بود.» که ساکنان آزمایشگاه او را «پاپا» یا «پروف» می‌نامیدند و ــ مفهوم هستهٔ اتمی را برای ما به ارمغان آورد. رادرفورد یک نیوزیلندی که به انگلستان نقل مکان کرده بود مدیریت فیزیک هسته‌ای را عهده‌دار بود، در زمانی که فیزیک هسته‌ای خلاقترین و، می‌توان گفت، از لحاظ پیشرفتهای بعدی، سالمترین و بهترین سالها را طی می‌کرد.

هستهٔ اتمی، ذره‌ای است به قطر تقریبی $۱۰^{-۱۳}$ سانتیمتر، حامل بار مثبت، که بیشترین جرم اتم را در بر دارد. این هسته را بار منفی معادلی تا شعاع کامل اتمی در حدود $۱۰^{-۸}$ سانتیمتر احاطه کرده است. به گفتهٔ دیگر اتم یک صد هزار بار بزرگتر از هستهٔ آن است. از لحاظ بُعد، بنا به نظر ارنست لارنس[3] که به ساختن فیزیک هسته‌ای بر مبانی رادرفورد یاری کرده است، هسته در اتم مانند «مگسی در یک کلیسای بزرگ» است. (امّا این مگس، مگسی بسیار خارق‌العاده است که وزن آن چند هزار مرتبه بیشتر از کلیسا است.)

رادرفورد مدل اتمی‌اش را از شواهد یک سری آزمایشهای به یاد ماندنی که هانس گایگر[4] و مارسدن[5] در سال ۱۹۱۳ گزارش کرده بودند، استخراج کرد. (گایگر یکی از مستعدترین گروه آزمایشگران رادرفورد

1. Carlsberg 2. Ernest Rutherford 3. Ernest Lawrence 4. Hans Geiger 5. Marsden

بود که بعداً با نام «کنتور گایگر» شهرت یافت و ارنست مارسدن یک دانشجوی جوان بود.) گایگر و مارسدن مشاهده کردند که ذرات آلفا (یونهای هلیم تولید شده با مواد رادیواکتیو) به‌وسیلهٔ ورقه‌های نازک فلزی پراکنده می‌شوند. بیشتر ذرات آلفا همان‌طورکه انتظار می‌رفت، با اندکی یا بدون انحراف از ورقه‌های فلزی عبور می‌کردند، امّا تعدادی از مسیرهای آنها به شدت تغییر می‌کرد، گویی آنها به چیزهای بسیار کوچک و بسیار پُرجرم در ورقهٔ فلزی برخورد می‌کنند، آن چیزها همان هسته‌های اتم مُدل رادرفورد بودند.

بور در سال ۱۹۱۲، درست در آغاز ظهور اتم هسته‌ای، در دانشگاه منچستر به رادرفورد و «قبیلهٔ» او پیوست. (بور همچنین مدت کوتاهی برای ج.ج. تامسون در آزمایشگاه کاوندیش، کمبریج کار کرده بود. زبان انگلیسی ابتدایی بور، و اینکه همیشه پافشاری سنجیده و معقولی دربارهٔ مباحثات انتقادی نداشت، به نظر می‌رسد بی‌اعتنایی تامسون را به همراه داشت و او متمایل بود به هر طریق از بحث و جدل دوری گزیند.) آزمایشگاه منچستر و مدیریت آن بیشتر مورد علاقهٔ بور بود: بور به برادرش هارالد نوشت: «رادرفورد مردی است که می‌توان به او متکی بود. او به‌طور منظم می‌آید و پرس‌وجو می‌کند که کارها چگونه پیش می‌رود و دربارهٔ کوچکترین جزئیات گفتگو می‌کند ــ رادرفورد مرد برجسته‌ای است و واقعاً به کار همهٔ کسانی که دور و بَر او هستند علاقه‌مند است. بورگرچه نشانه‌هایی از یک نظریه‌پرداز را از خود نشان می‌داد، یعنی نوعی از فیزیکدانان، که همیشه در قلمرو رادرفورد مورد استقبال نبودند، ذوق و استعدادش، صمیمیت آشکار، فقدان خودنمایی و تظاهر ــ و شهرت پیشین او به‌عنوان بازیکن فوتبال ــ به‌نظر بی‌درنگ او را تحت‌تأثیر قرار می‌داد: بور متفاوت است، او یک بازیکن فوتبال است!»

بور مجذوب مدل هسته‌ای شده بود، نه تنها به خاطر موفقیتهای آن برای توجیه آزمایشهای گایگر ـ مارسدن با ورقهٔ فلزی، بلکه برای مشخص‌ترین نقص آن. آشکار بود که هیچ نوع ساده‌ای از اتم هسته‌ای نمی‌تواند (با این مدل) پایداری نامحدودی را داشته باشد، که اتمهای معمولی دارند. مثلاً، این تصور، معقول به نظر می‌رسد که الکتریسیتهٔ منفیِ محیط هسته به‌صورت الکترونهایی در مدارهای شبه سیاره‌ای حول هسته دوران کنند. امّا الکترونهایی که در مدارها می‌گردند می‌باید رفتاری مانند بار الکتریکی گردنده یا نوسان‌کننده در یک آنتن رادیو داشته باشند، و بنابراین اتمِ شامل الکترونهای مداری می‌باید شبیه آنتن عمل کند و مدام انرژی تابش کند. در این‌صورت دیر یا زود، الکترونها بر هسته می‌رُمبند، و اتم تخریب می‌شود.

چنین بود تقدیر پیش‌بینی شده برای اتم هسته‌ای رادرفورد با نظریهٔ کلاسیک الکترودینامیک. امّا، این مسئلهٔ رُمبیدن اتمها بر خودشان، چالشی برای خودِ هسته نداشت: آزمایشهای ورقهٔ فلزی گایگر ـ مارسدن جای تردید باقی نمی‌گذاشت که تصور رادرفورد از هسته درست است. این معمّایی بود که می‌باید حل می‌شد، زیرا داده‌های گایگر ـ مارسدن هیچ سرنخی دربارهٔ حالات الکترونهای محیطی به‌دست نمی‌داد.

برای بور ــ و چند نفر دیگر که پیش از او دربارهٔ این مسئله اندیشیده بودند ــ آشکار بود که هر چند الکترونها در اتمها خودشان را تنظیم می‌کنند، آنها می‌باید تابع قانونهایی فیزیکی باشند که به معنایی، اساساً با قانونهای آنتنهای رادیویی و دیگر اشیای بزرگ‌مقیاس جهان متفاوتند. بور در نخستین مقاله‌اش

دربارهٔ ساختار اتمی، با عنوان تشکیلات اتمها و مولکولها، «شناخت کلی نارساییهای الکترودینامیک کلاسیک در توصیف رفتار سیستمهایی با اندازهٔ اتمی» را متذکر می‌شود.

امّا چرا به نظریهٔ کلاسیک، که فقط در قلمرو بزرگ‌مقیاس به‌کار گرفته شده و امتحان شده بود، امکان دهیم تا معمایی دربارهٔ الکترونهای اتمی که تابشی ندارند ایجاد کند، درحالی‌که دلیلی وجود نداشت باور کنیم که باید نظریهٔ کلاسیک به‌کار گرفته شود؟ چرا از نظریهٔ کلاسیک طرفداری، و فرض کنیم که الکترونها در اتمها باید انرژی تابش کنند؟ بزرگترین دستاورد بور ارائهٔ این فرض بود که الکترونها «مکانهای انتظار» یا «حالتهای مانا» دارند که در آنها الکترونها تابش نمی‌کنند و انرژیهای ثابت و پایدار دارند. این اصل موضوع که آن را بور در پنج مقالهٔ طویل بین سالهای ۱۹۱۳ و ۱۹۱۵ به‌طور مکرر بررسی و از نو بیان کرد، سرانجام به‌صورت این گزاره ظاهر شد: «یک سیستم اتمی تعداد حالاتی دارد که در آنها حتی اگر ذرات نسبت به یکدیگر در حال حرکت باشند، گسیل مورد انتظار در الکترودینامیک عادی صورت نمی‌گیرد. این حالتها را با عنوان حالتهای 'مانای' سیستم موردنظر بیان می‌کنند.»

چگونه می‌توان الکترونها را آن‌طور که بنابر محدودیت حالتهای مانای بور، در یک اتم می‌گردند، توصیف کرد؟ بور، مانند پلانک حس می‌کرد که فیزیک کلاسیک را هرجا که ممکن باشد می‌باید حفظ کرد. گرچه الکترودینامیک کلاسیک این مُشکل را ایجاد می‌کند که الکترونهای مداری می‌باید انرژی تابش کنند، به نظر می‌رسد دلیلی وجود نداشته باشد که چرا باید قانونهای مکانیک کلاسیک حاکم بر حرکت سیارات را کنار گذاشت. بنابراین، تصور بور این بود که الکترونها در حالتهای مانا در مدارهای مدوّر یا بیضوی مطابق مکانیک نیوتون و کپلر حرکت می‌کنند. از سوی دیگر، وقتی از یک حالت مانا به حالت دیگر آن منتقل شود، این عمل به‌صورت یک «جهش» ناپیوسته است که تحت تسلط مکانیک کلاسیک نیست. بور در اصل موضوع دیگری عنوان کرد: «تعادل دینامیکی سیستمها در حالتهای مانا تحت تسلط قانونهای عادی مکانیک است، درحالی‌که آن قانونها درگذار از یک حالت به حالت دیگر صادق نیست.»

بور برای توصیف الکترونی که یکی از حالتهای مانا را اشغال می‌کند، با مشخص کردن «انرژی بستگی» E در مدار، چاره‌ای یافت. این انرژی، انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از اتمی بود که به آن وابسته است. او معادلهٔ کلاسیک را به‌صورت زیر به‌دست آورد،

$$E^{۳} = R\omega^{۲} \qquad (۱)$$

که در آن E انرژی، ω بسامد چرخش، یعنی تعداد گشتهای کامل مداری در یک ثانیه و R آمیزه‌ای بود از چند ثابت که مقادیر آنها دقیقاً اندازه‌گیری شده بود.

بور در شکلی از نظریه‌اش که اکنون می‌بینیم، به گفتهٔ بجای تاریخ‌نویسان علم جان هیلبرون[1] و توماس کوهن[2]، ماهرانه نظریه‌اش را با رابطهٔ دیگری از انرژی ـ فرکانس از طریق «حکم فرا ـ مکانیکی»،

1. John Heilbron 2. Thomas Kuhn

به دیدگاه کوانتومی متعهد ساخت. معادلهٔ دوم بور به‌صورت زیر بود،

$$E = n\alpha h\omega \qquad (۲)$$

که در آن E همان انرژی بستگی الکترون، n عدد صحیح مثبت، موسوم به «عدد کوانتومی»، و ضریب تناسبی است که در مرحلهٔ بعدی ارزیابی می‌شود. بنابراین معادله، با $n = ۱, ۲, ۳, \ldots$ یک الکترون اتمی می‌تواند دارای مقادیر انرژی «کوانتیده» زیر باشد

$$E = \alpha h\omega,\ ۲\alpha h\omega,\ ۳\alpha h\omega, \ldots$$

و نه مقادیر دیگر. بور در این مورد بر یک قیاس صوری با قاعدهٔ پلانک که اتمها در دیواره‌های یک کورهٔ جسم سیاه فقط می‌توانند انرژیهای کوانتیده داشته باشند، تأکید می‌ورزید،

$$E = ۰,\ h\nu,\ ۲h\nu,\ ۳h\nu, \ldots$$

اتم به عنوان یک موجود دینامیک کوانتوم‌ـگسیل با یک قاعدهٔ دوم و اساساً متفاوت با قاعدهٔ فرکانس بور شکل می‌گیرد. این قاعده فرض می‌کند اتم از یک حالت مانا یا انرژی بیشتر $E_۱$ به حالت مانای دیگر با انرژی کمتر $E_۲$ می‌جهد و تغییر انرژی $E_۱ - E_۲$ آن تابشی گسیل می‌کند که فرکانس آن ν با ثابت پلانک h با تغییر انرژی مربوط می‌شود.

$$E_۱ - E_۲ = h\nu \qquad (۳)$$

در نظریهٔ بور دو فرکانس، ω و ν که اولی فرکانس چرخش الکترون و دومی فرکانس تابش را نشان می‌دهد، از هم جدا می‌شوند. این یک انحراف شدید از نظریهٔ کلاسیک بود، در نظریهٔ کلاسیک تصور بر این بود که الکترون مداری در فرکانسی برابر با فرکانس چرخشی‌اش تابش می‌کند.

گرچه فرکانس چرخش ω و فرکانس تابش ν به طور کلی در نظریهٔ بور مجزا بودند، این نظریه برای مورد مبالغه آمیزی که در آن اتم به قدری تحریف شود که همچون یک جسم کلاسیک باشد، مانند یک آنتن رادیویی عادی عمل می‌کند، و با فرکانسهایی معادل فرکانسهای چرخشی الکترون تابش می‌کند. در این مورد خاص $\nu = \omega$، و قانونهای نظریه‌ای کوانتومی در قانونهای کلاسیک ادغام می‌شود.

وسیله یا ابزار نظری که باعث همخوانی قلمروهای کلاسیک و کوانتومی آن‌طور که بور مطرح می‌کند می‌شود یکی از ارزشمندترین مشارکتهای بور بود که برای وی افتخاری خاص کسب کرد. بور این «اصل تطابق» (correspondence principle) را در بخش عمدهٔ سراسر کارش دربارهٔ نظریهٔ کوانتومی به‌کارگرفت، و سرانجام شالودهٔ فیزیک کوانتومی شد که ورنر هایزنبرگ[1] آن را ایجاد کرد.

1. Werner Heisenberg

هرگاه معادله‌های (۱) و (۲) به‌وسیلهٔ حذف ω با هم ترکیب شوند، معادلهٔ ساده‌ای به‌دست می‌آید که انرژی بستگی الکترون E و عدد کوانتومی n را به هم مربوط می‌سازد،

$$E = \frac{R}{\alpha^۲ h^۲ n^۲}$$

اگر این معادله دوبار برای دو حالت انرژیهای $E_۱$ و $E_۲$، با اعداد کوانتومی $n_۱$ و $n_۲$ نوشته شود،

$$E_۱ = \frac{R}{\alpha^۲ h^۲ n_۱^۲} \quad \text{و} \quad E_۲ = \frac{R}{\alpha^۲ h^۲ n_۲^۲}$$

و این دو نتیجه در معادلهٔ (۳) گذاشته شود، خواهیم داشت

$$h\nu = \frac{R}{\alpha^۲ h^۳}\left(\frac{۱}{n_۱^۲} - \frac{۱}{n_۲^۲}\right)$$

یا

$$\nu = \frac{R}{\alpha^۲ h^۳}\left(\frac{۱}{n_۱^۲} - \frac{۱}{n_۲^۲}\right) \qquad (۴)$$

بور با توسل به بحث تطابقش، ثابت کرد که مقدار ثابت α، $\frac{۱}{۲}$ است و با گذاشتن آن در معادلهٔ فرکانس (۴) شکل نهایی زیر را به‌دست آورد:

$$v = \frac{۴R}{h^۳}\left(\frac{۱}{n_۱^۲} - \frac{۱}{n_۲^۲}\right) \qquad (۵)$$

فرمولهای بالمر

بور این معادله‌ها را صرفاً بر مبنای نظری سُست انتخاب نکرده بود. راهنمای او طرحهای مشاهده شده در طیفهای تابشی گسیل یافته از مواد عنصری، به‌ویژه هیدروژن اتمی بود. اگر اجزای طیف گسیلی هیدروژن با وسیله‌ای به نام طیف‌نما مرتب شوند، فرکانسهای مشاهده شده در سریهای منظم قرار می‌گیرند. یکی از سریهای طیفی هیدروژن سی سال پیش ازکارِ بور به وسیلهٔ یوهان بالمر[1] کشف شده بود. بالمر معلم مدرسه‌ای درسوئیس، درهنر به دست آوردن دقیق فرمولهای عددی ازدادهٔ فیزیکی پیچیده مهارت داشت. بالمر کشف کرد که خطوط مرئی در طیف نشری هیدروژن فرکانسهایی دارد که با فرمولی به صورت زیر جور درمی‌آید

$$\nu = R'\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$$

1. Johann Balmer

در این معادله R' عاملی را نشان می‌دهد که مقدار آن با داده‌های طیفی معین می‌شود، و n هر عدد صحیحی بزرگتر از ۲ است: $n = ۳, ۴, \cdots$. بالمر دریافت که فرمولهای او ممکن است نشانه‌ای از فرمولهای کلیتری به صورت زیر باشد،

$$\nu = R' \left(\frac{۱}{n_۱^۲} - \frac{۱}{n_۲^۲} \right) \qquad (۶)$$

که در سری طیفی او مقدار ۲ مفروض است، امّا مقادیر دیگر در سریهای دیگر امکان‌پذیر است.

فرمولهای بالمر، و نوعی از قواعد تجربی طیف‌نمایی دیگر که به‌ویژه کارشناس طیف‌نمایی سوئدی یوهانس ریدبرگ[1] آن را ارائه کرد (که نوع فرمول بالمر آن در بالا ذکر شد)، سالها قبل شناخته شده بود بدون بروز هیچ ظن و گمانی که آنها سرنخهایی از ساختار اتمی را دربر دارند. بور زمانی گفته بود که فرمول بالمر ـ ریدبرگ و فرمولهای مانند آن فقط «همچون نقشهای زیبا و دوست داشتنی بالهای پروانه‌ها، در نظر گرفته می‌شوند که زیبایی آنها تحسین می‌شد، امّا هرگز گمان نمی‌رفت که آنها قانونهای بنیادی زیست‌شناختی را بیان می‌کنند.»

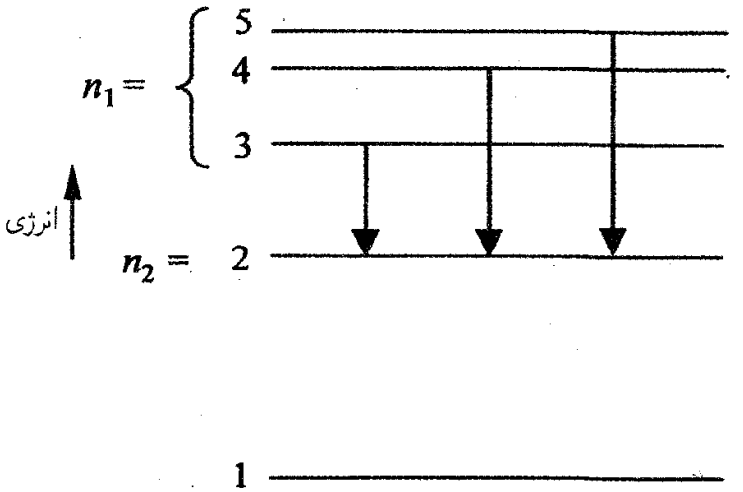
«نقشهای زیبا»ی طیف گسیلی هیدروژن اساس نظریهٔ بور بود. استدلالهایش جهت‌دار و گاه طوری تنظیم شده بود که معادلات حاصل با نقشهای طیفی مشاهده شده مطابقت داشته باشد. هدف نظری عاجل بور وقتی تحقق یافت که او معادلهٔ (۵) را که شبیه به معادلهٔ (۶) بالمر ـ ریدبرگ بود به دست آورد. موفقیت در آزمون نهایی و قاطع نظریه وقتی حاصل شد که ثابت استخراج شدهٔ $\frac{۴R}{h^۳}$ به طور نظری، در معادلهٔ (۵) با همتای تجربی R'اش در معادلهٔ (۶) تطبیق می‌کرد. محاسبهٔ اوّلی از ثابتهای بنیادی شناخته شده (که بار الکترون e و جرم m و ثابت پلانک h را شامل می‌شد) درگسترهٔ چند درصدی از مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ دومی رسید. این دستاوردی چشمگیر بود. در تاریخ علم کمتر نظریه‌پردازی چنین موفقیتی را داشته است که نظریه را، بدون استفاده از وسایل عددی دم‌دستی که شاگردان بی‌نزاکت آنها را «عاملهای سرهم‌بندی شده یا ساختگی می‌نامند» با آزمایش تطبیق دهد.

معادلهٔ بور (۵) به صورت یک نمودار *تراز انرژی* در شکل ۱۶ـ۱ نشان داده شده است. هر خط افقی انرژی یک حالت مانا را نشان می‌دهد که با مقدار عدد کوانتومی، $n_۱$ یا $n_۲$ مشخص شده است. گذارهای اتمی جهش به پایین که سه فرکانس گسیل‌یافته در سریهای بالمر را تولید می‌کند، با پیکانها نمایانده شده است.

صور خیال و ارتباطها

نظریهٔ بور تصویری انتزاعی ارائه می‌کند: رفتار اتمها را به شیوه‌هایی نشان می‌دهد که در جهان اشیاء عادی شناخت‌پذیر نیست. بور به ما می‌گوید که الکترونهای اتم در حرکت مداری‌اند، امّا این الکترونهای

1. Johannes Rydberg



شکل ۱۶ـ۱ یک نمودار تراز-انرژی که گذارهای گسیلی برای سه خط در سریهای بالمر هیدروژن را نشان می‌دهد.

مدار گرد، انرژی کوانتیده و محدودیت خاصی دارند، آنها با جهشهای ناپیوسته که نمی‌توان به طور کامل با نظریه توصیف کرد از مداری به مدار دیگر می‌روند.

معنی آن چیست؟ بنا به تشخیص خود بور، هر پاسخی ــ دست کم هر پاسخ کلامی ــ محدودیتهایی دارد. مشکل این است که ما زبان مناسب (برای بیان این مطلب) نداریم. بور در گفتگویی با هایزنبرگ می‌گوید

> هیچ‌گونه توصیف روشنی از ساختار اتم وجود ندارد؛ همهٔ چنین توصیفهایی لزوماً می‌باید مبتنی بر مفاهیم کلاسیک باشد که دیگر به‌کار نمی‌آیند. ملاحظه می‌کنید که هر کس برای پروراندن چنین نظریه‌ای می‌کوشد، در واقع آب در هاون می‌کوبد. در موردی که می‌خواهیم چیزی دربارهٔ ساختار اتم بگوییم، زبانی نداریم که با آن بیانِ مطلب برای خودمان مفهوم باشد. از بسیاری لحاظ همچون دریانوردی هستیم که یکه و تنها به سوی جزیرهٔ دور افتاده‌ای می‌رود، جایی که اوضاع و شرایط آن اساساً با آنچه دریانورد می‌داند متفاوت است و از همه بدتر، بومیهای آنجا به زبانی کاملاً بیگانه حرف می‌زنند. او صرفاً باید منظور خود را تفهیم کند، امّا وسایلی برای انجام این کار ندارد. در چنین موقعیتی یک نظریه نمی‌تواند چیزی را با معنی دقیق علمی، «توضیح» دهد. همهٔ آنچه را که نظریه می‌تواند امید به انجام آن داشته باشد این است که رابطه‌ها را آشکار کند و، بقیهٔ آن را به ما واگذار کند تا هرچه بهتر می‌توانیم با آن سروکله بزنیم.

زبان فیزیک اتمی، به عقیدهٔ بور، چیزی شبیه به زبان شعر است: «شعر آن قدرها که با خلق صور خیالی و برقراری ارتباطها سروکار دارد تقریباً به توصیف واقعیتها توجهی ندارد.»

اگر اساس نظریهٔ اتمی بور توصیفی نبود، اگر این نظریه توجیه قابل اعتمادی از آنچه واقعاً درون اتم روی می‌دهد نداشت، چه فایده‌ای داشت؟ چرا به سرعت موفقیت‌آمیز شد؟ نظریهٔ بور، مانند بسیاری وجوه دیگر فیزیک کوانتومی، ریشه در جهان یافته‌های تجربی و آزمایشی داشت. بور می‌گوید مُدلهای

به‌دست آمده از نظریهٔ او «استنتاج شده، یا اگر ترجیح می‌دهید حدس زده شده از آزمایشها بود، نه از مبانی نظری». برخلاف اینشتین، که واقعیت فیزیکی را در قلمرو تفکر ریاضی محض جستجو می‌کرد، و غالباً به آزمونهای تجربی نظریه‌هایش بی‌تفاوتی نشان می‌داد، بور مایل بود در جهت عکس عمل کند، یعنی از یافته‌های تجربی بنیادی به یک مجموعه از اصول موضوع معقول و مؤثر برسد. اینشتین «اصل خلاقیت»اش را در ریاضیات یافت. اصل خلاقیت بور احتمالاً تکیه بر نتیجهٔ تجربی بود. یکی از منابع عمدهٔ الهام بور در ایجاد نظریهٔ اتمی‌اش فرمول بالمر-ریدبرگ برای خطوط طیفی هیدروژن بود.

بور در سال ۱۹۱۳، تنها چند ماهی پس از انتشار نخستین مقالاتش دربارهٔ نظریهٔ اتمی، در گردهمایی انجمن بریتانیایی برای پیشرفت علم حضور یافت و شنید که با همدلی و تفاهم دربارهٔ نظریه‌اش بحث می‌شود. جیمز جینز بحث مسائل تابش را با اشاره و یادآوری ایده‌های بدیع بورگشود و گفت «فکر می‌کنم باید توضیح قانع‌کنندهٔ سریهای طیفی را ادامه دهیم» و اصول موضوع غیرمرسوم را با این اظهار ارزیابی کنیم که «تنها توجیهی که فعلاً برای این فرضها مطرح می‌شود، فرض جدی موفقیت است.» وقتی اینشتین، در سال ۱۹۱۳، نظریهٔ بور را شنید شگفت‌زده شد: «بنابراین فرکانس نور ابداً به فرکانس (چرخش) الکترون بستگی ندارد. . . و این یک دستاورد عظیم. . . یکی از بزرگترین اکتشافات است.» امّا بودند کسانی که اصول موضوع و بحث تطابق را تصنّعی و غیرقابل قبول می‌دانستند. ریچارد کورانت[1]، ریاضیدان اهل گوتینگن که در برابر انتقادها از بور دفاع می‌کرد ــ «فدایی مُدل بور» شد ــ کارل رانگه[2]، یک کارشناس طیف‌نمایی اهل گوتینگن یادآور می‌شود «درست است که نیلس (بور) تأثیر زیبایی به‌وجود آورده است، امّا او آشکارا با آن مقاله، اگر نگوییم کم عقلی، بلکه کار خطرناکی کرده است.»

با گسترش گروه شاگردان جوان و مستعد بور، انتقادها به تدریج تخفیف یافت. به مدت ده سال، نظریهٔ بور و شرح جزئیات آن به‌وسیلهٔ نظریه‌پرداز مونیخی آرنولد زومرفلد[3] توسعه یافت. زومرفلد مسلط در فیزیک اتمی و راهنمای پژوهش در این زمینه بود. نظریهٔ بور، همان‌طور که منظور او بود، نظام یافت اساس وحدت یافته برای علم تجربی قبلی طیف‌نمایی شد. این نظریه و دستاوردهای آن در سال ۱۹۱۹ وقتی زومرفلد این سرودنامه را برای زیباییهای کاربُرد نظریهٔ کوانتومی در طیف‌نمایی اتمی نوشت به نقطهٔ اوج خود نزدیک شده بود: «آنچه را که امروزه ما می‌توانیم از طیف بشنویم یک موسیقی اتمی تمام‌عیار از کُره‌ها، نغمهٔ یک کاریلون *(Carillon) از رابطه‌های اعداد صحیح کامل، یک نظم فزاینده و هماهنگی در کثرت است.»

ما آن را نمی‌دانستیم

نظریهٔ بور در ورای کاربردهایش برای طیف‌نمایی به‌طوری متمایز وظیفهٔ همهٔ نظریه‌های بزرگ را انجام داد: این نظریه حوزه‌های جدیدی از پژوهش تجربی و نظریه‌ای را کشف و آنها را متحد کرد. یکی از مؤثرترین و شگفت‌انگیزترین تأییدات مفاهیم بور در سال ۱۹۱۴ به‌وسیلهٔ جیمز فرانک و گوستاو

1. Richard Courant 2. Carl Runge 3. Arnold Sommerfeld

*. سازی مرکب از زنگهایی که با آن نواختن نتهایی بدون تغییر تکرار می‌شود.

هرتز (برادرزادهٔ هاینریش هرتز) از مؤسسهٔ شیمی فیزیک کایزر ویلهلم در برلین گزارش شد. آزمایش فرانک ـ هرتز تجلی جالب و مشخصی از وجود حالتهای مانا به‌عنوان خواص ذاتی اتمها به‌دست می‌داد. فرانک و هرتز روشی برای ایجاد باریکه‌های الکترون یافتند که حامل مقادیر متغیر، امّا کنترل شده‌ای از انرژی جنبشی بودند. در این روش اتمهای گاز جیوه را در مسیر چنین باریکه‌ای از الکترون قرار دادند به‌طوری که انرژی از باریکهٔ الکترون به اتمهای جیوه منتقل می‌شد. فرانک و هرتز دریافتند که وقتی انرژی باریکه به مقدار بحرانی معینی می‌رسد، انتقال انرژی از باریکه به اتمهای جیوه تقریباً کامل می‌شود و جریان باریکه ناگهان افت می‌کند. از دیدگاه نظریهٔ بور، الکترونها با انرژی بحرانی باریکه باعث گُذار بین دو حالت مانای جیوه می‌شدند.

طرح آزمایش فرانک ـ هرتز چنان سرراست از پیشنهادهای نظریه‌ای بور دربارهٔ حالتهای مانا پیروی می‌کند که وقتی کسی مقالهٔ فرانک ـ هرتز را می‌خواند تصور می‌کند که نویسنده‌اش تحت تأثیر توصیه‌های بور بوده است، چنانکه بعضی از نویسندگان کتابهای درسی چنین تصوری داشته‌اند. امّا راههای پیشرفت علمی ناقص است: فرانک و هرتز مقالهٔ ۱۹۱۳ بور را ندیده بودند، و حتی اگر هم مقاله را، پیش از جمع‌آوری نتایج کار خودشان دیده بودند، احتمالاً باور نمی‌کردند که چه چیزی را می‌خوانند. اظهارات رُک و راست فرانک دربارهٔ نگرش و طرز فکر آن زمان در برلین نشان می‌دهد که چه نور ضعیفی به اکتشافات بزرگ علمی می‌تابد (از مصاحبه‌ای که فرانک در سال ۱۹۶۰ انجام داد، به نقل از جراد هولتون تاریخ نگار علم):

> ممکن است برای شما جالب باشد که وقتی ما آزمایشهایمان را انجام می‌دادیم نوشته‌های علمی را به قدر کافی نخوانده بودیم ــ و شما می‌دانید چطور چنین چیزی اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، ممکن است فکر کنید کسان دیگری دربارهٔ آن، چیزهایی به ما گفته باشند. مثلاً، ما سمینار دانشگاهی بزرگی در آن زمان در برلین داشتیم که در آن دربارهٔ همهٔ مقاله‌های مهم بحث می‌شد. امّا هیچ کس از مقالهٔ بور بحثی نکرد. چرا؟ دلیلش این است که پنجاه سال پیش، با سطح دانشی که در آن زمان داشتیم، اعتقاد بر این بود که هیچ کس گسیل خط طیفی را نمی‌فهمد، به‌طوری که اگر کسی مقاله‌ای دربارهٔ آن منتشر می‌کرد، فرض بر این بود که «احتمالاً درست نیست.» بنابراین ما آن را نمی‌دانستیم.

نه کاملاً عجیب

جرمی برنشتین[1]، فیزیکدان نظری معاصر و مفسّر زیرک دربارهٔ زندگی در جامعهٔ علمی، داستانی دربارهٔ دیدار ولفگانگ پائولی[2] از ایالات متحد در سال ۱۹۵۸ نقل می‌کند که با آنچه فکر می‌کرد نظریهٔ عام جدیدی از فیزیک ذرات باشد که دوست و رفیق مباحثه‌اش ورنر هایزنبرگ[3] تدوین کرده بود به آنجا آمده بود. پائولی این نظریه را به جمعی از حُضار دانشگاه کلمبیا که بور هم در آنجا بود، ارائه کرد.

1. Jeremy Bernstein 2. Wolfgang Pauli 3. Werner Heisenberg

[برنشتین می‌نویسد] پس از اتمام سخنان پائولی، از بور درخواست شد تا اظهار نظر کند. پائولی اظهار داشت که شاید در نخستین نگاه این نظریه «تا حدی عجیب» به‌نظر برسد. بور پاسخ داد مسئله این است که این نظریه «کاملاً عجیب نیست.». . . سپس پائولی و بور آهسته آهسته به تعقیب یکدیگر در اطراف میز بزرگی در جلوی سالن سخنرانی پرداختند. وقتی پائولی به جلوی میز می‌رسید به حضار می‌گفت که این نظریه، کاملاً عجیب است، وقتی نوبت به بور می‌رسید می‌گفت، چنین نیست. این یک برخورد خارق‌العاده بین دو غول فیزیک جدید بود. من در این فکر بودم، که بازدیدکننده‌ای که فیزیک نمی‌داند، از این حرفها چه تصوری خواهد داشت.

احتمالاً بور همان‌قدر دربارهٔ نظریه‌های قبلی‌اش فکر می‌کرده است، که پائولی به نظریهٔ هایزنبرگ توجه داشت. عجیب و غریب بودن نظریهٔ اتمی بور را بعضی از همکارانش تأیید کرده بودند، امّا این نظریه، آن‌طور که معلوم شد، کاملاً عجیب نبود. وقتی بور کارش را در مورد ساختار اتمی آغاز کرد، نمی‌خواست از لحاظ عقلانی تسلیم همهٔ مهملات و تناقضات ظاهری شود که به‌طور ضمنی نظریهٔ کوانتومی پلانک ـ اینشتین ایجاب می‌کرد. او توانست بر مفهوم انرژی کوانتومها تکیه کند، امّا استفادهٔ کمی برای مفهوم فوتون و دوگانگی موجی ـ ذره‌ای ظاهراً نامعقولی که ایجاب می‌کرد، داشت. او توانست یک اصل موضوع «فرامکانیکی» ارائه کند که طبق آن تصور می‌شد الکترونها به‌طور ناپیوسته از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر می‌جهند، امّا نتوانست از تصویر کلاسیک الکترونها در حرکت مدارِیِ پیوستهٔ آنها دل بکند. آنچه بور پیشنهاد می‌کرد فقط نیمی از یک نظریهٔ اتمی کامل بود ــ نظریه‌ای که تنها نیمی از آن کاملاً عجیب بود.

این اظهار نظرها، پس از بازنگری به عمل آمده است و نباید دالّ بر آن باشد که بور می‌توانسته است کاری بهتر از این انجام دهد. بور توانست به زحمت و دست‌تنها انقلابی را هدایت کند که به مدت بیست و پنج سال فیزیک را در حالت آشوب نگه دارد. حتی اینشتین جرئت نداشت یک نظریهٔ اتمی بر پایه‌های مشکوک و سؤال‌برانگیز نظریهٔ کوانتومی اولیه بسازد.

در اوایل سالهای ۱۹۲۰، نظریهٔ اتمی بور ـ زومرفلد، و همراه آن بیشترین باقیماندهٔ نظریهٔ کوانتومی دُچار مشکل و اغتشاش عمیقی بود. گرچه روش بور با اتم هیدروژن می‌توانست شگفتیهایی ایجاد کند، امّا در مواجهه با اتمهای پیچیده‌تر از هیدروژن با مشکلات زیادی روبه‌رو بود. به گفتهٔ ماکس جامر[1] تاریخ‌نگار علم، «نظریهٔ کوانتومی درست پیش از سال ۱۹۲۵ از دیدگاه روش‌شناختی به جای یک نظریهٔ منسجم منطقی، معجون تأسف‌باری از فرضیه‌ها، اصول، قضایا و دستورالعملهای محاسبه‌ای بود.» بیشترین مسائل ابتدا با روشهای فیزیک کلاسیک حل می‌شد و سپس با استفادهٔ زیرکانه از اصل تطابق به زبان فیزیک کوانتومی ترجمه می‌شد. غالباً کار ترجمه مستلزم «مهارتِ حدس زدن و شهود بیشتر از استدلال منظم و روشمند بود.»

1. Max Jammer

مدتی، جامعهٔ فیزیکدانان کوانتومی دچار شیوع نوعی فلج نظریه‌پردازی بودند. ماکس بورن، که بزرگترین کارش در شُرف ظهور بود، در سال ۱۹۲۳ به اینشتین نوشت: «همچون همیشه، نومیدانه دربارهٔ نظریهٔ کوانتومی می‌اندیشم، می‌کوشم تا دستورالعملی برای محاسبهٔ هلیم و دیگر اتمها بیابم؛ امّا در هر دو مورد توفیقی ندارم. کوانتومها واقعاً در وضعیت یأس‌آوری هستند.» پائولی می‌پنداشت که باید مسیر متفاوتی برای کارش بیابد: «فیزیک در این لحظه بسیار آشفته است، به هر حال برای من بسیار دشوار شده است، آرزو می‌کنم بازیگر کُمدی سینما، یا چیزی مانند آن می‌بودم و هرگز چیزی دربارهٔ فیزیک نمی‌شنیدم.» این روحیهٔ هراس و نگرانی شایع را هندریک کرامرز[1]، نخستین دستیار بور که شخصاً نظریه‌پرداز ماهری بود چنین توصیف می‌کند: «نظریهٔ کوانتومی خیلی زیاد شبیه پیروزیهای دیگر بوده است؛ ماهها لبخند می‌زنید و سپس سالها گریه می‌کنید.»

امّا دانشمندان بزرگ از موهبت خوش‌بینی ساده و بادوام برخوردارند که با آن خُردکننده‌ترین و فاجعه‌آمیزترین ناکامیها را به‌عنوان گامهای مفید در جهت درست می‌پذیرند، تا دیر یا زود با دستاوردهای جدید و کلی، پیشرفت متکاملی را به دنبال آورد. پلانک هشت سال بیهوده تقلا کرد تا نظریه‌اش را در قالب کلاسیک بازسازی کند و به این نتیجه رسید که همهٔ تلاش ظاهراً بی‌فایدهٔ او «روشنگری تمام و کمالی» را به ارمغان آورده است. اینشتین توانست نود و نُه رهیافت نادرست به یک نظریهٔ میدان وحدت‌یافته را امتحان کند و متقاعد شود که «دست‌کم ۹۹ طریق ناموفق را می‌شناسد.» و بور، که می‌باید بر علیه رقبایش تا آخرین سنگر دفاع کرده باشد، مانند هرکس دیگر سخت می‌کوشید تا نظریهٔ جدیدی بسازد و نظریهٔ پیشین را به دور اندازد. از آنجا که تلاش بور برای پرداختن به گسترش مسائل نظریهٔ اتمی‌اش بی‌ثمر ماند، او ایمان داشت که نظریه‌اش مانند همهٔ نظریه‌های خوب دیگر، دست‌کم تاحدی درست است. هر چند با نظریه‌های بعدی مفاهیم تازه‌ای مطرح شد، امّا آن نظریه‌ها نمی‌توانستند بدون ارتباطهایی که بور و اسلاف بزرگش، اینشتین و پلانک دیده بودند امکان‌پذیر شود. اینشتین زمانی، دربارهٔ «تراژدیِ یک استنتاج قیاسی از بین رفته با یک واقعیت» اظهار داشت: «هر نظریه دیر یا زود به همین طریق از بین می‌رود. امّا هرگاه نکتهٔ مطلوب و سودمندی در نظریه باشد، آن نکته در نظریهٔ بعدی گنجانده می‌شود و ادامه می‌یابد.»

بیم و امید

یک ویژگی ــ و خطر بالقوه‌ی ــ کار علمی این است که به انضباط و مقرارت یک دیدگاه عینی بی‌طرفانه را ایجاب می‌کند. برای اکثر فیزیکدانان، بی‌طرفی لازم است زیرا تجربهٔ عادی انسانی همیشه راهنمای قابل اعتمادی برای اصول فیزیکی نیست. خطر این است که دانشمندان چنان به سلاح عینیت‌گرایی مجهز می‌شوند که از پیش‌بینی کردن، یا احتمالاً فکر کردن دربارهٔ پیامدهای پیشرفت علمی، زمانی که با بافت آدمی گره می‌خورد، کوتاهی می‌کنند.

1. Hendrik Kramers

نمونهٔ بارز این خطر در اصول عینی کار انجام شده به‌وسیلهٔ دانشمندان هسته‌ای در پیش و به هنگام جنگ جهانی دوم، برای همهٔ ما آشکار است. دانشمندان هسته‌ای هنگام بی‌طرفی کشف کردند که گیراندازی نوترون به‌وسیلهٔ اتمهای یک ایزوتوپ کمیاب اورانیم، $U^{۲۳۵}$، سبب می‌شود که اورانیم دستخوش شکافت شود (یعنی، به دو جزء، با جرم تقریباً برابر، شکسته می‌شود) همراه با آزاد شدن مقادیر عظیمی انرژی. ضمناً نوترونهای بیشتری نیز تولید کند، و محاسبه نشان می‌داد که به ازاء هر نوترون گیرافتاده، بیش از دو نوترون آزاد می‌شود.

با این کشف عینی، فیزیک هسته‌ای، معصومیت خود را از دست داد. امکان یک واکنش زنجیره‌ای که در آن نوترونهای تولید شده در یک رویداد شکافت، موجب شکافتهای بیشتری می‌شوند، به زودی مشخص شد.

بعضی از دانشمندان هسته‌ای که تکنولوژی سلاحهای هسته‌ای را توسعه دادند کارشان با وجدان پاک بود، و در مورد بعضی دیگر چنین نبود. در آغاز، با چشم‌انداز سلاحهای هسته‌ای در دست نازیها وجدان تقریباً حرف نامربوطی بود. حتی اینشتین، که در بیشتر عمرش شخصی آرام و صلح طلب بود، ضرورت طرح بمب هسته‌ای را پذیرفت. او با لئو زیلارد[1] و یوجین ویگنر[2]، دو فیزیکدان نظری مجارستانی در سال ۱۹۳۹ نامه‌ای به رئیس جمهور روزولت نوشتند با شرح مخاطرات وحشتناک و لزوم اقدام عاجل. پس از جنگ، سلاحهای هسته‌ای خود عامل تهدید بود.

از همهٔ دانشمندانی که با تهدید هسته‌ای مبارزه کردند، مردی که امروزه، یعنی شصت و اند سال بعد، معلوم شد دوراندیشترین و شجاعترین همهٔ آنان بوده، نیلس بور است. عواقب انسانی این تهدید، حتی پیش از ساخته شدن نخستین بمب هسته‌ای و آزمایش آن، تقریباً بلافاصله برای بور، واضح و آشکار بود. او این بصیرت را داشت تا آنچه را رابرت اُپنهایمر[3] «نه تنها یک خطر بزرگ بلکه یک اُمید بزرگ» اعلام کرده بود تشخیص دهد و تصدیق کند. نگرانی خاص بور در مورد امکان مسابقه‌ای نامحدود در ساختن سلاحهای هسته‌ای بود. او تنها نماند: پس از جنگ بسیاری از تشکلهای جامعهٔ علمی به او پیوستند.

بور و اعضای مؤسسه‌اش، طی سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ کار مهمی در زمینهٔ نظریهٔ هسته‌ای انجام دادند. در سال ۱۹۳۹، او و جان ویلر[4] یک مقالهٔ کلاسیک دربارهٔ نظریهٔ فرایند شکافت نوشتند، و در سال ۱۹۴۱ بور متقاعد شده بود که هرگاه بتوان جرم کافی از این ایزوتوپ به دست آورد انفجار هسته‌ای با $U^{۲۳۵}$ امکان‌پذیر است. در آغاز، کار تکنولوژیکی فوق‌العاده دشوار جداسازی ایزوتوپ $U^{۲۳۵}$ به‌عنوان یک امر غیرممکن او را تحت تأثیر قرار داده بود. امّا وقتی تلاشهای عظیمی را دید که در ایالات متحد در لوس‌آلاموس، نیومکزیکو و جاهای دیگر، به‌وسیلهٔ اعضای «پروژهٔ منهاتان» به عمل می‌آمد، تغییر عقیده داد.

بور سهم مداومی در توسعهٔ بمبهای هسته‌ای نداشت. او اوقاتی را در لوس‌آلاموس گذراند، امّا اندیشه‌های او بیشتر از آنکه فنی باشد، سیاسی بود. گرچه پروژهٔ بمب از لحاظ تکنولوژی تحسین‌برانگیز

1. Leo Szilard 2. Eugene Wigner 3. Robert Oppenheimer 4. John Wheeler

بود، بور می‌توانست ببیند که عواقب سیاسی آن حتی پیچیده‌تر و مهمترند. دانشمندان بریتانیایی و امریکایی با هم همکاری می‌کردند، امّا در سال ۱۹۴۴، زمانی که بور با مسائل سیاسی روبه‌رو شد، اتحاد شوروی اندکی یا هیچ‌چیز دربارهٔ پروژهٔ بمب نمی‌دانست. به‌نظر بور برای اجتناب از رقابت مرگبار سلاحهای هسته‌ای یک امکان وجود داشت: می‌باید استالین را آگاه کرد که بمب هسته‌ای قریب‌الوقوع است و پیشنهاد کرد که در کنترل آن مشارکت کند. آلیس کیمبال اسمیت[1] می‌نویسد، «همین عمل ایجاد و پذیرفتن چنین ژستی ممکن است... در دید جهانی بازیگران این ماجرا تغییر اساسی ایجاد کند و نقشی در روابط بین‌المللی به‌وجود آورد. تنها با سیاست 'صراحتِ' صادقانه می‌توان از رقابت شتابان اجتناب کرد.»

در جو پس از جنگ رویارویی هسته‌ای، پیشنهاد بور عجیب و غریب به‌نظر می‌رسید، اما آن‌طور که اسمیت متذکر می‌شود، «براساس بعضی داوریهای بسیار واقع‌بینانه» بود. بور با سطح استعداد علمی بسیار بالای شوروی آشنا بود. او می‌دانست که اخبار یک انفجار هسته‌ای تلاش عظیم شوروی را چنان تسریع خواهد کرد که حداکثر در چند سال موفقیت‌آمیز باشد. هر امتیاز اولیه در غرب مطمئناً موقتی خواهد بود، و هر فکر دیگری ممکن است خطر آفرین باشد.

بور به قدر کافی نسبت به اعتقادش معتقد و سرسخت بود تا بعضی از دولتمردان عالی رتبهٔ حکومتهای انگلیس و امریکا را با خود هم‌رأی کند. در بریتانیا، او سِر جان آندرسن[2] وزیر خزانه‌داری و لُرد چارول[3] مشاور علمی چرچیل را در جانب خود داشت. (چارول ــ فردریک لیندِمان ــ شاگرد قبلی نرنست بود.) در ایالات متحد، با نفوذترین حامی او فلیکس فرانکفورتر[4]، رئیس دیوان عالی کشور و دوست نزدیک روزولت بود.

بور که به چنین سطح رفیعی از نفوذ سیاسی رسیده بود، بعداً کار بسیار شاقتر متقاعد کردن چرچیل و روزولت را به عهده داشت که پیشنهادش را جدی بگیرند. ابتدا، مصاحبه با چرچیل را که چارول ترتیب داده بود، با شکست کامل مواجه شد. به‌نظر می‌رسید که چرچیل تقریباً همان‌قدر به بور بی‌اعتماد است که به استالین. سِر هنری دیل[5]، رئیس انجمن سلطنتی که در جلسه حضور داشت، شاهد تأیید نگرانیهایش بود که بور با «بیان مبهم فلسفی و نجواهای ناشمرده و نامفهومش» نمی‌توانست مکنون ذهنی‌اش را به «نخست‌وزیری با مشغلهٔ ذهنی شدید» بفهماند. چرچیل پیش از آنکه بور فرصت ارائهٔ نکات اصلی پیشنهادش را داشته باشد جلسه را خاتمه داد. بور بعداً گفت، «ما به یک زبان صحبت نمی‌کردیم.» اظهار نظر چرچیل به چارول این بود که، «من این مرد با موهای درهم پیچیده را که به من نشان دادید دوست نداشتم.»

مباحثهٔ بور با روزولت مؤدبانه‌تر بود، امّا تقریباً ثمری نداشت. مشاور علمی غیررسمی روزولت،

1. Alice Kimball Smith 2. Sir John Anderson 3. Lord Cherwell 4. Felix Frankfurter
5. Sir Henry Dale

وانیوار بوش[1] او را برای ملاقات آماده کرد. روزولت از بوش پرسید «فکر می‌کنید، می‌توانم حرفهای او را بفهمم؟» بوش پاسخ داد، «نه. من فکر می‌کنم احتمالاً نتوانید.» روزولت یک ساعت و نیم مؤدبانه به حرفهای بور گوش داد، و بور «با خوشحالی خارج شد.» امّا بوش می‌گوید، «من تردید دارم که رئیس‌جمهور در واقع ابداً حرفهای او را فهمیده باشد.»

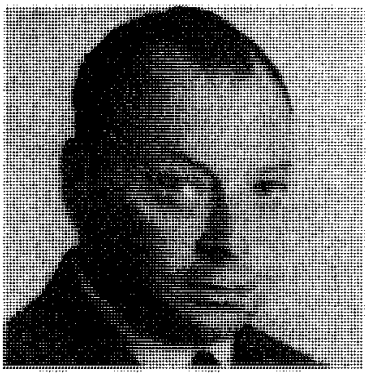
به این ترتیب تصوری که بور از یک سیاست‌بازِ هسته‌ای داشت به جایی نرسید، بدتر آنکه اعتماد او زیر سؤال رفت. چرچیل به چارول گفت: «رئیس‌جمهور و من دربارهٔ پروفسور بور بسیار نگران هستیم. چگونه او وارد این کار شده است؟ او مدافع بزرگی از تبلیغ و جار و جنجال است. او این افشاگری غیرمجاز را به فرانکفورتر رئیس دیوان عالی کشور، کسی که رئیس‌جمهور را با گفتن اینکه او جزئیات همه چیز را می‌داند، به وحشت انداخته بود، کرد. . . منظور چیست؟ به‌نظر من بور را می‌باید محبوس کرد یا به هر صورت که شده باید به او فهماند که به مرز خیانتهای مهلک نزدیک شده است.»

امیدهای بور هرگز تحقق نیافت، امّا ناکامی او نباید در شکل‌گیری داوری ما دربارهٔ این مرد اهمیت بیشتری داشته باشد. هیچ دانشمند دیگری چنین تلاش قهرمانانه‌ای نکرد که دنیای علم و سیاست را به هم مربوط سازد. این امر برای بور موضوع قهرمانی نبود. او فقط آنچه را که همیشه می‌کرد، انجام داد. گفتگوی متقاعد کننده، روش ثابت او برای یافتن و نگهداری یک موضع مهم بود. گفتگو ممکن بود با یک شاگرد، یک دستیار، یک همکار، یا در صورت لزوم، با یک نخست‌وزیر پریشان احوال یا یک رئیس‌جمهور نامطلع باشد. خطر شغلی دانشمند از لحاظ دور افتادن از مسائل انسانی هرگز مخاطره‌ای درکار بور نبود. برای بور، مسائل علمی مسائل انسانی بود، نه بیش و نه کم.

1. Vannevar Bush

۱۷

دانشمندی به منزلهٔ منتقد
ولفگانگ پائولی



پائولی چه می‌خواست بگوید؟

روایت جدید نظریهٔ کوانتومی، که امروزه به نام مکانیک کوانتومی مشهور است، فقط طی پنج سال، بین سال‌های ۱۹۲۵ و ۱۹۳۰، متولد شد، رشد کرد و به مرحلهٔ بلوغ رسید. آنچه طی آن پنج سال انجام شد بیشتر از بیست و پنج سال پیش از آن، یا درواقع طی هفتاد و اندی سال بعد از آن بود. پیشرفتهای پیش از ۱۹۲۵ دائماً با تردیدهای مفهومی مسدود می‌شد. تعارضهایی از قبیل دوگانگی موجی ـ ذره‌ای ــ تناقض بین نظریهٔ اینشتین دربارهٔ ذره‌ای بودن نور و نظریهٔ موجی کلاسیک ــ آشفتگی و محدودیت ایجاد می‌کرد. در سال ۱۹۲۵ این دشواریها، احتمالاً از لحاظ خودمانی شدن موضوع، کمتر دست و پاگیر بود. نظریه‌پردازان دیگر دربارهٔ غرابت مفهومی در قلمرو کوانتومی نگران نبودند و ایجاد یک فیزیک جدید با پذیرفتن غرابت یا بیگانگی در آن را آغاز کردند. وقتی حصارهای مفهومی کنار گذاشته شد، پیشرفت به طور شگفت‌انگیزی تسریع شد. برای آنان که بصیرتی داشته‌اند، مثل آن بود که مه غلیظی رقیق شده باشد. ناگهان دیدن در بسیاری از جهات با وضوحی ممکن شد که هیچ کس انتظار آن را نداشت.

فیزیکدانان کوانتومی نوع جدید کار خود را در اوایل سالهای ۱۹۲۰ آغاز کردند. آنان غالباً نسل دوم فیزیکدانان کوانتومی بودند، یعنی پس از آنکه پلانک مقالهٔ معروفش را در سال ۱۹۰۰ در انجمن فیزیک برلین خواند، متولد شده بودند. (می‌توان تصور کرد که ظهور مقالهٔ پلانک نشانه‌ای از پیدایش گروه کاملی از فیزیکدانان مستعد بود: در سال ۱۹۰۱ ولفگانگ پائولی، فردریک ژولیوا[1]، و جرج اولنبک[2]، در سال ۱۹۰۱ ورنر هایزنبرگ، انریکو فرمی و ارنست لارنس[3]؛ در سال ۱۹۰۴ رابرت اوپنهایمر، جان

1. Frédéric Joliot 2. George Uhlenbeck 3. Ernest Lawrence

فُن نویمان[1]، و جورج گاموف.) یکی از درخشانترین و با نفوذترین عضوهای این گروه مستعد پائولی بود، که نه تنها سهم عمدهٔ خودش را داشت، بلکه مانند بور در شکل‌گیری کار همکارانش، با بحثهای طولانی و انتقادی، تأثیرگذار بود. طی سالهای بحرانی ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ بسیاری از فیزیکدانان کوانتومی احساس می‌کردند کارشان پایان نیافته است، تا آنکه با پائولی و انتقادهای بی‌امان او مواجه شوند، یا در نبود پائولی، این پرسش را مطرح می‌کردند که، «پائولی چه خواهد گفت؟»

یکی از دستیاران پائولی، رودلف پیرلز[2]، دربارهٔ نقش پائولی به‌عنوان یک منتقد می‌گوید: «بحث کردن دربارهٔ کاری ناتمام یا ایده‌ای جدید و تأمل‌انگیز با پائولی تجربهٔ بزرگی بود، زیرا درک عمیق و صداقت فکری فوق‌العادهٔ او موجب می‌شد که هرگز مطلبی را با سهل‌انگاری یا استدلال تصنعی سرهم‌بندی شده رها نکند.» بیشتر تأثیرگذاری پائولی به‌عنوان یک منتقد حاصل بی‌توجهی افسانه‌ای بود که به حساسیتهای مورد علاقهٔ همکارانش داشت. او زمانی گفته بود، «بعضی از مردم نقطه‌های حساسی دارند، و تنها راه زندگی کردن با آنان این است که انگشت روی این نقطه‌های حساس بگذاریم تا آنها به آن عادت کنند.» نمونه‌ای از اظهار نظر پائولی دربارهٔ یک مقالهٔ کم اهمیت و تقریباً نامنسجم این بود که، «حتی غلط هم نیست.» اظهار نظر دیگر، دربارهٔ یکی از همکارانش بود که مقاله‌های او از برترین کیفیت برخوردار نبود: «اگر آهسته فکر کنید، اشکالی ندارد، امّا اعتراض من وقتی است که سریعتر از آنچه فکر می‌کنید، آن را منتشر کنید.»

پائولی اهدافی برای اظهارنظرهای گزنده‌اش در تمام سطوح شایستگی، توانایی و مقام یافته بود. پس از یک مباحثهٔ طولانی با نظریه‌پرداز روسی، لانداو، که کارش گرچه درخشان بود، ولی بینش چندان خوب نبود، در پاسخ به اعتراض لانداو که هرچه او گفته بی‌معنی نبوده گفت: «اُه، نه. خیلی بیشتر از آن است. آنچه شما گفته‌اید آنقدر مغشوش و آشفته بوده که کسی نمی‌تواند بگوید آنچه گفته‌اید بی‌معنی بوده است یا نه.» تحقیر مقامات احتمالاً در دوران نوجوانی پائولی در زمانی آغاز شد که او شاگرد مدرسه‌ای در مونیخ بود. در واکنش به اظهار نظری که اینشتین در یک سمینار رسمی کرده بود، او از عقب سالن سخنرانی مملو از جمعیت گفت: «می‌دانید، آنچه را که آقای اینشتین گفت چندان احمقانه نیست.»

از تبار ضد متافیزیکی

پائولی از جوانی چهره و اندامی گرد داشت و از لحاظ بدنی، برخلاف وضعیت عدم کمبود ناراحتی فکری، نامتناسب بود. زندگینامه‌نویسی مدعی است که پائولی پس از یک‌صد جلسه درس رانندگی موفق به گذراندن امتحان رانندگی شد. یکی از ماندگارترین افسانه‌ها «اثر پائولی» بود که بنابراین افسانهٔ پائولی می‌توانست صرفاً با حضور خود، سبب حوادثی در آزمایشگاه و همه نوع حوادث مصیبت‌بار شود. پیرلز ما را از وجود موارد مستندی مطلع می‌کند که ظاهر شدن پائولی در آزمایشگاه سبب از

1. John von Neumann 2. Rudolf Peierls

کار افتادن ماشینها، نشت سیستمهای خلأ، و خُرد شدن اسبابهای شیشه‌ای، می‌شود. شهرت افسون ویرانگری پائولی به قدری قوت گرفت که گفته می‌شد، توقف قطار حامل پائولی در ایستگاه گوتینگن، سبب انفجار آزمایشگاهی در گوتینگن شده است. امّا هیچ یک از این بد اقبالیها برای خود پائولی روی نمی‌داد. هیچ کس تردیدی نداشت که این امر پی‌آمد درستی از اثر پائولی است، پس از اینکه دستگاه دقیقی ابداع شد تا وقتی پائولی در یک مجلس مهمانی وارد می‌شود لوستری ساقط و خرد شود. پائولی ظاهر شد، قرقره‌ای گیر کرد، و مانع تکان خوردن لوستر شد.

میراث عقلانی پائولی قوی بود. پدرش، ولفگانگ جوزف، استاد دانشگاه وین و متخصص شیمی فیزیک پروتئینها بود. مادرش برتا شوتز[1]، خبرنگار روزنامه و دختر یک خوانندهٔ اُپرای سلطنتی در وین بود. پدر از خانوادهٔ یهودی سرشناس پراگ به نام پاسکلز[2] بود. او در دانشگاه چارلز در پراگ به تحصیل پزشکی پرداخت، جایی که یکی از همکلاسیهایش پسر ارنست ماخ بود. در حدود زمانی که ماخ عازم دانشگاه وین شد، ولفگانگ پاسکلز استاد آنجا شد، نامش را به پائولی تغییر داد، و به کلیسای کاتولیک پیوست.

تنها پسر پائولی در سال ۱۹۰۰ متولد شد، و به نامهای ولفگانگ ارنست فریدریک تعمید یافت: نام دوم به جهت ارنست ماخ بود، که پدر تعمیدی (پدر خوانده) کودک شد. پائولی مایل بود که وقتی در مورد مذهبش از او سؤالی می‌شود توضیح دهد که در تعمید او «ماخ شخصیتی قویتر از کشیش کاتولیک بود، و در نتیجه به نظر می‌رسد که به این طریق تعمید من به جای کاتولیک، 'ضد متافیزیکی' بود. . . برچسبی که هنوز به جا می‌ماند و خود من حامل آنم، یعنی: 'از تبار ضد متافیزیکی'.»

ولفگانگ جوان در همهٔ سطوح تحصیلاتش، نه تنها در ریاضیات و فیزیک، بلکه در تاریخ باستان کلاسیک نیز، نابغه بود. وقتی فعالیتهای کلاس درس دبیرستان ملال‌آور می‌شد، او مقالات اینشتین دربارهٔ نسبیت عام را (که فقط چند سالی از نوشتن آن می‌گذشت) می‌خواند، و سه مقاله دربارهٔ نسبیت منتشر کرد که هرمان ویل[3]، ریاضیدان و نسبیتدان مشهور را تحت تأثیر قرار داد.

پائولی به اتفاق ورنر هایزنبرگ، کسی که طی چند سال انقلابی را به راه انداخت که به مکانیک کوانتومی منجر شد، دورهٔ کاری‌اش را به عنوان یک شاگرد پژوهشگر زیر نظر آرنولد زومرفلد، آغاز کرد. زومرفلد استاد دانشگاه مونیخ و مدرس سرشناس فیزیک نظری بود. پائولی می‌خواست با هایزنبرگ دربارهٔ سبیلهای چخماقی و شیوهٔ خشک و جدی زومرفلد شوخی کند، به او گفت، «به نظر تو قیافهٔ او مثل یک افسر سواره‌نظام پیر نیست؟ امّا احترام شاگرد به معلم ماندگارتر از این شوخیها بود.» پیرلز می‌نویسد، «سالها بعد وقتی زومرفلد پائولی را ملاقات کرد و ناظر احترام آمیخته به بیمی در نگرش شاگرد قدیمی‌اش شد از برخورد مردی که به طور عادی گرایشی به کم‌رویی نداشت متعجب شد.» و زومرفلد شاگرد مستعدش را تحسین کرد. او کار دشوار نوشتن مقاله‌ای دایرةالمعارفی دربارهٔ نسبیت را، به پائولی نوزده ساله محول کرد. زومرفلد این مقاله را «کاملاً استادانه» دانست و اینشتین موافقت کرد.

1. Bertha Schütz 2. Pascheles 3. Hermann Weyl

پائولی پس از مونیخ، حضوری درخشان و گزنده در گوتینگن داشت. در سال ۱۹۲۱، او دستیار ماکس بورن شد. بورن دانشگاه گوتینگن را مرکزی برای پژوهش در فیزیک نظری ساخته بود که با مؤسسهٔ بور در کپنهاگ رقابت می‌کرد. بورن پائولی را «بسیار مهیّج و جالب» یافت. امّا مشکلاتی در کار بود: پائولی «میل داشت در رختخواب بماند» و همیشه وقتی لازم بود به‌عنوان معاون بور در جلسات درس ساعت ۰۰ : ۱۱ صبح بورن باشد، حاضر نمی‌شد. سرانجام بورن ناچار شد، به گفتهٔ خودش «خدمتکارمان را در ساعت ده و نیم به سوی او بفرستیم تا خاطرجمع شویم که او از خواب بیدار شده است.» بور مانند اکثر معاشران پائولی، این رفتار را با خوش‌خلقی چشمگیری تحمل می‌کرد. از نظر بورن که در تشخیص استعداد علمی تجربه‌ای همچون بور داشت، «پائولی بدون تردید نابغه‌ای بسیار بلند مرتبه بود.»

پائولی، پس از یک سال اقامت در گوتینگن عازم مؤسسهٔ بور شد، و یکی از پُر ثمرترین و ماندگارترین مشارکتها در فیزیک جدید شکل گرفت. گرچه بور و پائولی هرگز به‌عنوان نویسنده همکاری نکردند ــ احتمالاً آنان هرگز توافق نداشتند ــ هر یک به شیوهٔ خود نیاز به گفتگوی انتقادی داشتند. بور در فن توسعهٔ ایده‌هایش به‌وسیلهٔ مباحثه با هر کس که در دسترس بود، گاهی با شاگردان و گاهی با دستیارانش مهارت داشت. در واقع «مباحثه» برای بور صرفاً بُلند فکر کردن بود. در موارد دیگر، مثلاً در بحث با اینشتین و اِروین شرودینگر[1]، بحث دربارهٔ مسائل مفهومی دشوار به بُن‌بست می‌رسید. امّا پائولی با نبوغ بی‌رقیبش برای انتقاد، شریک مطلوب بور بود. جرّوبحثشان هرگز به پایان نمی‌رسید، امّا همیشه پیش می‌رفت و بور وابسته به آنان می‌شد. لئون روزنفلد[2]، یکی از دستیاران بور، می‌گوید که اگر پائولی شخصاً حضور نداشت، بور به نامه‌های او متوسل می‌شد: «رسیدن نامه‌ای از پائولی واقعاً یک رویداد محسوب می‌شد، بور وقتی به سراغ کارهایش می‌رفت، نامه را با خودش می‌برد، و فرصتی را برای مراجعهٔ مجدد به آن یا نشان دادن به کسانی که به مسئلهٔ مورد بحث علاقه‌مند بودند، از دست نمی‌داد. به بهانهٔ نوشتن پاسخ روزهای متوالی با دوست غایبش گفتگوی خیالی می‌کرد، به‌طوری که گویی پائولی آشکارا آنجا نشسته و با لبخند تمسخرآمیزی به حرفهای او گوش می‌دهد.»

پائولی یکی از کوانتوم‌فیزیکدانان سیار بود. او پس از مونیخ، گوتینگن، و کپنهاگ، به هامبورگ رفت، جایی که مراحل ارتقای دانشگاهی را طی کرد. در سال ۱۹۲۸، در سنّ بیست و هشت سالگی استاد کُرسی فیزیک در دانشگاه فنی سویس (ETH) در زوریخ شد. او در آنجا ماند، بجز پنج سالی (۴۵-۱۹۴۰) را که در مؤسسهٔ مطالعات پیشرفته در پرینستون گذراند.

تا حدود سال ۱۹۳۴، زندگی شخصی پائولی پیچیده و دشوار بود. در سال ۱۹۲۹، با یک رقاصهٔ جوان، به نام کاته دِپنر[3] ازدواج کرد، که به زودی به خاطر یک شیمیدان او را ترک کرد. این امر او را آزرده کرد: «اگر به خاطر یک گاوباز رفته بود برایم قابل فهم بود، امّا یک شیمیدان معمولی. . . .» به دنبال یک

1. Erwin Schrödinger 2. Léon Rosenfeld 3. Käthe Deppner

دورهٔ بحرانی، با روانکاوی زیر نظر کارل یونگ[1]، و با ازدواج پایدار با فرانسیکا (فرانکا) برترام[2] در سال ۱۹۳۴، نجات یافت.

اصل طرد

پائولی ابتدا به‌عنوان شاگردی که به سخنرانیهای زومرفلد گوش می‌داد، به سوی ناکامیها و معماهای نظریهٔ کوانتومی کشیده شد. امّا به زودی با شرح مبسوط و دقیق زومرفلد از نظریهٔ بور آگاه شد و کاربرد پیچیده‌ای از آن نظریه را برای ساختار مولکول هیدروژن بسط داد. در عین حال، او که منتقد نظریهٔ بور ـ زومرفلد بود، به همشاگردیش وِرنر هایزنبرگ اظهار می‌کند که کل ماجرا «رازگرایی اتمی، atomysticism» بود. برای پائولی، با حساسیت غیرعادی گوش او برای هماهنگی‌های استدلال صوری ــ نوعی گام ریاضی کامل ــ نظریهٔ کوانتومی آن زمان به‌هم ریخته و آشفته به‌نظر می‌رسید. پائولی به هایزنبرگ شِکوه می‌کند که «همه هنوز در مه غلیظ در جستجوی چیزی هستند و این احتمالاً چند سالی طول می‌کشد که این مه از بین برود. زومرفلد امیدوار است که آزمایشها ما را در یافتن بعضی قوانین جدید یاری کنند. او به پیوندهای عددی، تقریباً به نوعی اسرارآمیزی اعداد باور دارد.»

از زمان نخستین کار بور معلوم شده بود حالتهای معینی نشان می‌دهند که رفتار اتمی دارای انرژیهای گسسته‌ای است که می‌توان آنها را از اعداد صحیحی به نام «اعداد کوانتومی» محاسبه کرد و اینکه وقتی انرژی اتم تغییر می‌کند، این تغییر به‌صورت «جهشهای کوانتومی» بین این «حالتهای مانا» انجام می‌شود. تا حدود ده سال پس از مقاله‌های ۱۹۱۳ بور، بیشتر کار دربارهٔ نظریهٔ اتمی، بر موضوع اعداد کوانتومی متمرکز بود. یکی از پرسشهایی که همواره می‌باید در ایجاد مُدلهای اتمی براساس اعداد کوانتومی پاسخ داده می‌شد این بود که چند عدد کوانتومی برای هر حالت الکترون لازم است تا بتواند رفتار فیزیکی و شیمیایی اتمها را توجیه کند. ابتدا یک عدد کوانتومی مطرح بود (مدل بور)، بعد دو، بعد سه و سرانجام، بنابر نظر پائولی، چهار عدد.

پائولی دریافت که با تخصیص‌دادن یک آرایهٔ چهارتایی به الکترونهای یک اتم برای هر حالت موجود، می‌تواند کارهای جالبی انجام دهد. کلید این مُدل مجموعه قواعدی بود که انتخابی از اعداد کوانتومی را در اختیار الکترون می‌گذاشت. دو قاعدهٔ ارائه شده به‌وسیلهٔ بور قابل استفاده بود: مجموعهٔ یکسانی از اعداد کوانتومی برای همهٔ الکترونها در همهٔ اتمها موجود است، و الکترونها حالتهای موجود را طوری اشغال می‌کنند که اوّل پایینترین حالت انرژی پر شود. پائولی اصل کلی‌تری را به این دو اصل افزود که بعداً «اصل طرد» یا «اصل پائولی» نامیده شد. این اصل همان‌قدر به روشن شدن نظریهٔ اتمی و مولکولی کمک کرد که بیشتر نظریه‌های پیشرفتهٔ بعدی. پائولی، با درجه‌ای از سهولت غیرمعمول در فیزیک کوانتومی اظهار داشت که مجموعه‌ای از چهار عدد کوانتومی حالتی از الکترون اتمی را توصیف

1. Carl Jung 2. Francisca (Franca) Bertram

می‌کند که باید برای آن الکترون بی‌همتا و منحصر به فرد باشد: هیچ دو الکترونی در یک اتم نمی‌توانند حالتی را اشغال کنند که دقیقاً با مجموعهٔ یکسانی از چهار عدد کوانتومی مشخص شده باشد.

نظریهٔ بعدی ثابت کرد که اصل پائولی برای هر سیستمی از الکترونها به‌کار می‌رود. هر جا الکترونها گردهم آیند ــ در اتمها، مولکولها یا جامدات ــ جمع شدن آنها می‌باید بنابر اصل پائولی باشد. هیچ دو الکترون مجاور هم نمی‌توانند از لحاظ فیزیکی به قدر کافی به هم شبیه باشند تا حالتهایی را اشغال کنند که دقیقاً دارای مجموعه اعداد کوانتومی یکسان باشند. این غالباً بدان معنی است که الکترونها صرفاً از یکدیگر دوری می‌کنند؛ در اتمها آنها در پوسته‌های هم‌مرکز جمع می‌شوند.

اسپین

اینکه چهار ــ و نه سه ــ عدد کوانتومی لازم بود تا داستان الکترون را کامل کند، برای مدتی معمای نظری بغرنجی بود. در نظریهٔ اولیه آشکار شده بود که شمار عدد کوانتومی برای یک حالت الکترون بازتاب تعداد ابعادی است که الکترون در آنها حرکت می‌کند. یک الکترون اتم در حرکت مداری اطراف یک هسته، در سه بُعد حرکت می‌کند، و بنابراین مستلزم سه عدد کوانتومی است، امّا فقط سه عدد، برای توصیف آن لازم است. چه معنی فیزیکی می‌توان به عدد کوانتومی چهارم نسبت داد؟ اگر بتوان به مقایسه با فیزیک کلاسیک اطمینان کرد، پاسخی به صورت حدسی آشکار وجود دارد. الکترونها، همچون سیارات ممکن است، علاوه بر حرکت مداری، حرکت چرخشی (اسپینی) به دور یک محور درونی نیز داشته باشند.

این ایده به ذهن چند نظریه‌پرداز، از جمله آرتور کامپتون[1]، هایزنبرگ، بور و پائولی، خطور کرده بود، امّا مشکلاتی داشت. از یک طرف، چرخش (اسپین) عادی سیارات و توپهای بیسبال حرکت چرخشی در سه بُعد است. اگر چرخش (اسپین) الکترونها به همان طریق باشد، هیچ عدد کوانتومی چهارمی نمی‌باید ضرورتی داشته باشد. در این‌صورت احتمالاً چرخش الکترونها مانند چرخش توپ بیسبال نیست. آیا ممکن است اسپین الکترون به طریقی مرموز، حرکتی خارج از سه بُعد عادی آشنایی باشد که زیربنای فیزیک کلاسیک است؟ پائولی، گرچه دربارهٔ مفهوم اسپین مردّد بود، امّا باور داشت که عدد کوانتومی چهارم او ارتباط به چیزی ندارد «که بتوان آن را از دیدگاه کلاسیک توصیف کرد».

موضوع در اواخر سال ۱۹۲۵ بدین قرار بود که وان در واردن[2] اظهار داشت، «طلسم شکسته شد». آنچه را نظریه‌پردازان گرانقدر از انجام آن بیم داشتند دو دانشجوی هلندی جورج اولنبک و ساموئل گوداسمیت[3]، در دانشگاه لیدن به سرعت و به آسانی انجام دادند. آنان با الهام گرفتن از پائولی به مبانی مفهوم اسپین الکترون پرداختند. اولنبک استدلال اولیهٔ آنان را توضیح می‌دهد:

1. Arthur Compton 2. B.L. van der Waerden 3. Samuel Goudsmit

گوداسمیت و من با مطالعهٔ یک مقاله از پائولی به چنین ایده‌ای رسیدیم. در مقالهٔ پائولی اصل طرد مشهور او فرمولبندی و برای نخستین بار چهار عدد کوانتومی به الکترون نسبت داده شده بود. این امر به طور نسبتاً صوری انجام شده بود، و هیچ تصور عینی و مشخصی همراه آن نبود؛ برای ما، این یک راز بود. ما با این قضیه که هر عدد کوانتومی متناظر با یک درجهٔ آزادی است، و از سوی دیگر با ایدهٔ الکترون نقطه‌ای [با ساختاری که مانند سیارات و توپ بیسبال سه‌بعدی نبود]، و آشکارا [فقط] سه درجهٔ آزادی داشت، چنان مأنوس بودیم که نمی‌توانستیم معنی عدد کوانتومی چهارم را بفهمیم.

این دو دانشجوی جوان بی‌درنگ امتیازات نسبت دادن عدد کوانتومی چهارم به نوع خاصی از حرکت اسپینی موجود برای الکترونها، در قلمرویی فراتر از سه‌بُعد فضایی معمولی را دریافتند. امّا، آنان به تدریج شاهد اوضاع نامطلوبی می‌شدند. آنان با مشاورشان، پل اِرنفست[1] استاد فیزیک نظری در لیدن، مشورت کردند، همچنین از بنیان‌گذار مکتب لیدن، هندریک لورنتس[2]، که علاقه‌مند به موضوع بود امّا ترغیب‌کننده نبود، یاری گرفتند (اِرنفست جانشین لورنتس بود). آنان پس از آماده کردن خلاصه‌ای از یافته‌هایشان برای ارنفست، بیشتر درباره‌اش فکر کردند و به ارنفست گفتند که آنان تصمیم به انتشار ندارند، امّا ارنفست در زمینهٔ کارهای علمی آگاهتر از آنان بود. او گفت مقاله را به یک مجله ارسال کرده است. درحالی‌که نظریه‌پردازان شاخصتر دربارهٔ جزئیات خاص مفهوم اسپین نگرانی و تشویش خاطر داشتند، اولنبک و گوداسمیت فرصت مناسبی داشتند. ارنفست به آنان گفت: «هر دوی شما به اندازهٔ کافی جوان هستید که بتوانید مرتکب یک حماقت شوید.»

یکی از بسیار کسانی که در رقابت برای نوشتن یک نظریهٔ موفق اسپین الکترون، مغبون شد رالف‌کرونیگ[3]، دستیار پائولی بود. چند ماه پیش از آنکه مقالهٔ اولنبک-گوداسمیت از طریق اِرنفست به یک مجله برسد، کرونیگ به نتیجه‌گیریهای مشابهی دست یافته و با پائولی دربارهٔ آنها بحث کرده بود. اما کرونیگ خوش‌شانسی رقبای هلندی‌اش را نداشت. پائولی با انتقاد طاقت‌فرسا، او را از انتشار نتیجه‌گیریهایش منع کرده بود. پیرلز می‌گوید که در سالهای بعد، «پائولی میل نداشت این داستان را به خاطر آورد.» اسپین الکترون مطمئناً یکی از ایده‌های مؤثر و دوران‌ساز فیزیک و شیمی قرن بیستم است. با وجود این، اولنبک و گوداسمیت برای نظریه‌شان جایزهٔ نوبلی دریافت نکردند. ادعای کرونیگ ممکن است یکی از دلایل آن باشد. نه‌تنها الکترونها بلکه همهٔ ذرات بنیادی (مثلاً، پروتونها، نوترونها، و پوزیترونها) دارای اسپین، و اغلب دارای دو حالت اسپین مجازند. نظریه حکم می‌کند که اعداد کوانتومی مشخص‌کنندهٔ حالتهای اسپین $+\frac{1}{2}$ و $-\frac{1}{2}$ باشد. (اغلب اعداد کوانتومی دارای مقادیر صحیح‌اند. اعداد کوانتومی اسپین، با مقادیر نیم صحیح، استثنایی‌اند.) دو حالت اسپین را تقریباً با محور اسپین «بالا» برای یک حالت و «پایین» برای حالت دیگر در نظر می‌گیرند.

1. Paul Ehrenfest 2. Hendrik Lorentz 3. Ralph Kronig

با توجه به اینکه گفته شد اعداد کوانتومی تعداد ابعاد فضایی را نشان می‌دهد که الکترون در آن حرکت می‌کند، خواننده ممکن است به این فکر بیفتد که چطور به الکترون اتم هیدروژن که بی‌شک در سه بعد حرکت می‌کند حرکت اسپینی نیز نسبت داده شده است، در حالی‌که در نظریهٔ بور به درستی با یک عدد کوانتومی n توصیف می‌شود. الکترون اتم هیدروژن، مانند الکترون اتمهای دیگر با چهار عدد کوانتومی مشخص می‌شود. اما هیدروژن یک مورد خاص است. فقط در هیدروژن و نه اتمهای دیگر، انرژی حالتهای الکترون با تقریب خوب فقط تابع عدد کوانتومی n است و به سه عدد دیگر بستگی ندارد. بور این خوش‌شانسی را داشت که توانست مدل اتم هیدروژن خود را چنان بسازد که انگار دوبعدی باشد.

منتقد

درک پائولی از مسائل فیزیک در میان معاصرانش عالی بود، به‌طوری که احتمالاً حتی اینشتین فراتر از او نبود. بورن یادآور می‌شود، «از زمانی که او در گوتینگن دستیار من بود، آگاه بودم که او یک نابغه است، نابغه‌ای قابل مقایسه با اینشتین. در واقع از دیدگاه علم محض، او شاید حتی بزرگتر از اینشتین بود.» دستاوردهای پائولی، بیان اصل طرد و سهم عمدهٔ او در فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات، مطمئناً در ردیف استادان فیزیک جدید بود. با وجود این عظمتِ تمام عیار او برابر با اینشتین، بور یا هایزنبرگ نبود.

پائولی تا حدی ذکاوت و درخشندگی خودش را کنترل می‌کرد. گاهی او فیزیک را بسیار خوب می‌فهمید. حسّ منتقدانه او چنان ظریف و گسترده بود که نمی‌توانست تواناییهای سازنده‌اش را با تخیل و قابلیت شهودی که بعضی معاصرانش، از آن برخوردار بودند به‌کار گیرد. پائولی در مورد هایزنبرگ، که جدایی و انحرافهای بی‌پروای او از فیزیک کلاسیک، به زودی موفقیت چشمگیری یافت، می‌گوید، «شاید یافتن راه برای کسی که با شکوه وحدت فیزیک کلاسیک خیلی آشنا نباشد، بسیار آسانتر باشد. شما در آنجا یک فایدهٔ مطمئن و مشخص خواهید داشت.» سپس به طور تحسین‌آمیزی اضافه می‌کند، «البته کمبود شناخت ضامن موفقیت نیست.»

گرچه حس منتقدانهٔ ظریف پائولی یک قید و بند و بازدارندگی شخصی بود، اما برای بسیاری از همکارانش الهامبخش بود. پائولی همچون یک منتقد بزرگ به معنای واقعی کلمه، نظر خود را برای همهٔ کسانی که فراست شنیدن آن را داشتند بیان می‌کرد، گاهی به‌طور دردناک گزنده، اما با صدایی متوازن حاکی از تجربه و بینش. بسیاری از بهترین کار نظری در فیزیک جدید با حضور پائولی انجام شده است، حضور شخصی که خودش یا روحش، «نشسته آنجا، با لبخندی گزنده و تمسخرآمیز گوش می‌دهد.»

۱۸

مکانیک ماتریسی

ورنر هایزنبرگ

دوقلوها

تولد ترکیب عظیمی از نظریهٔ کوانتومی، که امروزه با عنوان «مکانیک کوانتومی» مشهور است، رویداد شادی‌بخشی نبود که می‌توانست باشد. در نهایت شگفتی همهٔ افراد آنچه به دنیا آمد، نه یک نوزاد، بلکه دو نوزاد ــ دوقلوها ــ بودند. و بدتر آنکه، دو تولد آنها ماهها از هم فاصله داشت و دکترهای متفاوتی دست‌اندرکار بودند؛ حتی شایعه‌های زشتی دربارهٔ اصل و نسبت این دو نورسیده‌ها بر سر زبانها بود. اِروین شرودینگر و همکارانش در مونیخ و برلین مدعی بودند کودکی که آنان «مکانیک موجی» می‌نامیدند چیز قابل تحسینی در کودک دیگر نمی‌بینند، این کودک که ورنر هایزنبرگ و دوستانش در گوتینگن و کپنهاگ مدعی آن بودند، «مکانیک ماتریسی[1]» نامیده می‌شد. شرودینگر دربارهٔ مکانیک ماتریسی می‌گوید: «من از آنچه به‌نظر من روش نسبتاً دشواری از جبر متعالی غیرتجربی ناقض هرگونه تجسمی بود اگر نگویم بیزار، مأیوس بودم.» و هایزنبرگ در نامه‌ای به ولفگانگ پائولی، دربارهٔ مکانیک موجی می‌نویسد که: «هر چه بیشتر دربارهٔ بخش فیزیکی نظریهٔ شرودینگر فکر می‌کنم، آن را نفرت‌انگیزتر می‌یابم. . . . آنچه را که شرودینگر دربارهٔ تجسم‌پذیری می‌نویسد 'احتمالاً به‌طور کامل درست نیست' [یکی از تعبیرهای مطلوب بور]، به عبارت دیگر مزخرف است.» برای مدتی به‌نظر می‌رسید که فیزیک نسخهٔ دوکودکی مکانیک کوانتومی را، با رقابت نگران‌کننده از لحاظ موضوعهای میراث و عنوان، حمایت کند. امّا خوشبختانه بودند کسانی که هر دو کودک را فهمیدند و قدرشناسی کردند. همه آسوده‌خاطر شدند و دریافتند که هر دو دوقلوها سالم، قانونی و شایستهٔ نام خانوادگی، مکانیک کوانتومی‌اند.

1. matrix mechanics

Wunderkind (مردی که در جوانی بسیار موفق بود)

ورنر هایزنبرگ، که مهارت او در به دنیا آوردن نظریه‌های گسترده و دامنه‌دار، باعث تولد مکانیک ماتریسی شد (چند ماه پیش از آنکه شرودینگر ملازم تولد مکانیک موجی باشد)، در اواخر سال ۱۹۰۱، در وورتسبورگ[1] آلمان چشم به جهان گشود. در آن زمان اگوست، پدرِ ورنر، در دبیرستان آلتِس[2] در وورتسبورگ زبانهای باستانی تدریس می‌کرد. او در سال ۱۹۱۰ به کرسی مهم زبانشناسی یونان در دانشگاه مونیخ منصوب شد.*

در سالهای تعیین کنندهٔ نوجوانی هایزنبرگ، اروپا در جنگ جهانی اوّل پاره‌پاره شده بود. در آشوب‌های سیاسی و اقتصادی پس از جنگ، پیر و جوان آلمانی سرگردان و مأیوس بودند. هایزنبرگ در زندگینامهٔ شخصی خود می‌نویسد: «زمام و قدرت از دستهای یک نسل پیرترِ عمیقاً سرخورده و مأیوس ساقط شده بود و جوانترها با هم می‌کوشیدند تا راههای تازه‌ای را روشن نگهدارند، یا دست‌کم ستارهٔ جدیدی را کشف کنند که راهنمای گامهای آنان در تاریکی غالب و فراگیر باشد.» هایزنبرگ ستارهٔ راهنمایش را در ایده‌های رومانتیک یا آرمانهای رؤیایی نهضت جوانان موسوم به Deutscher Neupfadfinder (پیشاهنگان جدید آلمان) یافت. او رهبر گروهی از پسران جوانتر شد، که دوستان صمیمی برای بقیهٔ عمر او شدند. آنان پیاده‌روی و کوه‌نوردی می‌کردند، اردو می‌رفتند و به‌طور جدّی و صمیمانه دربارهٔ آیندهٔ آلمان به گفتگو می‌پرداختند.

اگوست هایزنبرگ با معرفی تأملات فیلسوف ـ دانشمندان یونانی به تعلیمات علمی پسرش کمک می‌کرد، به‌طوری که پسرش نوشته‌های علمی یونانیان را باورپذیرتر از کتابهای درسی‌اش یافت، که در آنها تصویرهای عجیب و غریب از مولکولها، با پیوندهایی به شکل قزن قفلی نشان داده می‌شد ــ هایزنبرگ درحالی‌که هنوز جوان بود، مانند بولتزمن، پلانک و اینشتین یک موسیقیدان ماهر شد. ابتدا می‌خواست یک پیانیست شود، امّا ابداعات اینشتین نزدیکتر و مهیجتر از ابداعات موزارت به‌نظر می‌رسید. از این‌رو در سال ۱۹۲۰، او در سن نوزده سالگی، خودش را به آرنولد زومرفلد در دانشگاه مونیخ، به‌عنوان یک دانشجوی احتمالی فیزیک نظری معرفی کرد.

حضور خشک و جدی زومرفلد، تاحدی مانند پلانک، گیرا و اثرگذار اما مرعوب کننده نبود. هایزنبرگ به خاطر می‌آورد، «او مردی کوچک اندام، خپل و قوزدار با سبیل سیاه چخماقی، و تاحدی عبوس و سختگیر به‌نظرم می‌رسید، امّا از همان نخستین جملاتش، خیرخواهی او، توجه و علاقهٔ صادقانه‌اش نسبت به جوانان آشکار شد، بخصوص برای پسری که آمده بود تا از راهنمایی و توصیه‌های او برخوردار شود.» هایزنبرگ تازه از دبیرستان فارغ‌التحصیل شده بود و به دشواری پیشنهادی که مطرح کرد آگاهی و اعتنایی نداشت، او به زومرفلد گفت که می‌خواهد دربارهٔ نظریهٔ نسبیت عام اینشتین تحقیق کند و آن را توسعه دهد. زومرفلد به او اجازه داد در سمینار پیشرفته حضور یابد، امّا دوره‌هایی از برنامهٔ فیزیک استاندارد را نیز به او توصیه کرد.

1. Würzburg 2. Altes

*. تلخیص دو پاراگراف

روزی، هنگام ورود به سالن سخنرانی زومرفلد، هایزنبرگ «دانشجوی سیاه مویی با چهرهٔ نسبتاً مرموزی را ملاحظه کرد.» این شخص ولفگانگ پائولی بود که بعداً دوست نزدیک هایزنبرگ شد، «گرچه غالباً منتقدی بسیار سرسخت بود.» هایزنبرگ و پائولی دربارهٔ زومرفلد شوخی می‌کردند، و پائولی در مورد فعالیت زومرفلد برای بسط نظریهٔ اتمی بور نظر مساعدی نداشت و آن را یک «آشفتگی» بزرگ می‌دانست.

نقطهٔ اوج آموزش هایزنبرگ در فیزیک طی چهارمین نیمسال تحصیل او زمانی حاصل شد که زومرفلد دانشجوی باهوش و زرنگش را به گوتینگن بُرد تا در یک سری از سخنرانیهایی که نیلس بور دربارهٔ نظریهٔ اتمی ایراد می‌کرد، شرکت کند، موقعیتی که دانشجویان آن را «فستیوال بور» می‌نامیدند. خاطرهٔ هایزنبرگ از این سخنرانیها تصویری به دست می‌داد از اثری تقریباً مسیحایی که بور ایجاد کرده بود:

> من هرگز نخستین سخنرانی را فراموش نمی‌کنم. ظرفیت سالن پُر شده بود. فیزیکدان بزرگ دانمارکی، که همان قد و قامتش اسکاندیناوی بودنش را نشان می‌داد، در برابر تریبون ایستاده بود. سرش اندکی خمیده بود و لبخندی دوستانه امّا تا حدی نگران بر لب داشت. نور تابستانی از پنجره‌های کاملاً باز سیل‌آسا به درون می‌تابید. بور کاملاً آرام با لهجهٔ اندکی دانمارکی صحبت می‌کرد. وقتی تک‌تک مفروضات نظریه‌اش را توضیح می‌داد کلمات را بسیار دقیق، بسیار دقیقتر از بیان معمولی زومرفلد انتخاب می‌کرد. و هر یک از جمله‌های دقیقاً انتخاب شده‌اش سلسلهٔ طویلی از افکار زیربنایی بازتابهای فلسفی را آشکار می‌کرد که به آنها اشاراتی داشت، امّا هرگز به طور کامل بیان نمی‌شد. من این رهیافت را بسیار هیجان‌انگیز یافتم، آنچه را می‌گفت هم تازه به نظر می‌رسید و نه در عین حال کاملاً تازه. ما همگی نظریهٔ بور را از زومرفلد آموخته بودیم و موضوع را می‌دانستیم، امّا شنیدن آن از لبهای بور احساس کاملاً متفاوتی ایجاد می‌کرد. ما به‌وضوح احساس می‌کردیم او نه چندان با محاسبه و نمایش، بلکه با نوعی شهود و الهام به نتایجش رسیده است.

هایزنبرگ، گرچه جوان بود امّا از گفتگو با بور و جر و بحث علیه بعضی از نکاتی که او در سخنرانیهایش گزارش کرده بود، تردید نداشت. یکی از این بحثها به قدری جذاب بود که استاد و شاگرد مجذوب را به بیرون گوتینگن به نزدیکی کوهِ هاینبرگ[1] کشانید. هایزنبرگ در زندگینامهٔ شخصی خود یادآور می‌شود، «این پیاده‌روی، پیامدهای عمیقی در زندگی حرفه‌ای من داشت، یا شاید بهتر است بگویم که دوران کار علمی واقعی من فقط در آن بعد از ظهر آغاز شد... ناگهان آینده‌ای پُر از امید و امکانات جدید در ذهنم نمایان شد که با شکوه‌مندترین رنگها برای خودم تصویر می‌کردم.» در حدود یک سال بعد، هایزنبرگ به مؤسسهٔ بور در کپنهاگ رفت و ساکنان آنجا را به طور بُهت‌انگیزی خونگرم، صمیمی و پُر از فیزیک اتمی یافت. به زودی احساس کرد که در خانهٔ خودش است و به مدت چند هفته، دوباره گفتگوهای طولانی، «بی‌نهایت آموزنده» و گردشهای پیاده‌روی با بور ادامه یافت.

1. Hainberg Mountain

نخستین پُست دانشگاهی هایزنبرگ در گوتینگن بود. در سال ۱۹۲۲، او دستیار ماکس بورن شد. متصدی قبلی این پُست در گوتینگن پائولی بود. بورن، گذشته از قابل اطمینان بودن، تحت تأثیر استعدادهای پائولی بود. امّا دستیار جدیدش حتی چشمگیرتر بود. بورن به اینشتین نوشت: «هایزنبرگ طی زمستان با من بود (چون زومرفلد در امریکا بود)، او بی‌تردید مانند پائولی با استعداد است، امّا شخصیتی خوشایندتر دارد. او پیانو را نیز بسیار خوب می‌نوازد.» از نظر بورن که متوجه تفاوتش با پائولی شده بود، او «مانند دهقان زادهٔ ساده‌ای، با موهای کوتاهِ طلایی، چشمان شفاف و شاداب، و قیافه‌ای زیبا» به نظر می‌رسید.

هایزنبرگ، مانند ده سال پیشتر بور، دورهٔ کاریش در فیزیک اتمی را، در زمانی بحرانی آغاز کرد، «وقتی‌که مشکلات نظریهٔ کوانتومی بیشتر و بیشتر مشکل آفرین می‌شد، به نظر می‌رسید که ناسازگاریهای آن بدتر و بدتر می‌شود، و ما را به سوی یک بحران می‌کشاند.» نظریهٔ بور با مسئلهٔ اتم هیدروژن معجزه کرد، و همهٔ آنچه را که می‌توانست با نظریهٔ اتمهای چند الکترونی انجام داد ــ بدون داشتن سهم قابل ملاحظه. اکثر نظریه‌پردازان، از جمله بور می‌کوشیدند تا نظریهٔ جدیدی بیابند. هایزنبرگ نخستین گام مهم را برای حل مسئله هنگامی برداشت که با بورن به عنوان مربی (privatdozent)اش در گوتینگن کار می‌کرد.

الهام‌بخش هایزنبرگ، همچون اکثر موارد مهم از این نوع، یک تغییر وضعیت اجباری، بود. «در اواخر ماه می سال ۱۹۲۵»، هایزنبرگ می‌نویسد:

> من دُچار تب یونجه شدم و از بورن برای مدت چهارده روز تقاضای مرخصی کردم. مستقیم عازم هِلگولند[1] [جزیره کوچکی در دریای شمال] شدم، جایی که امیدوار بودم در هوای فرح بخش دریا، دور از هرگونه گل و گیاه، به سرعت بهبود یابم. در هنگام ورود، قیافهٔ ورم کرده‌ام باید منظره‌ای دیدنی بوده باشد. به هر حال خانم مهمانخانه‌دار نگاهی به قیافهٔ من انداخت و چنین نتیجه‌گیری کرد که باید با کسی زد و خورد کرده باشم، و به من قول داد که در قبال پیامدهای بعدی از من پرستاری و مواظبت خواهد کرد. اتاق من در طبقهٔ دوم بود، و چون خانه در بلندی روی لبهٔ جنوبی جزیرهٔ سنگی ساخته شده بود، چشم‌انداز باشکوهی از دهکده، تلماسه‌ها و ماورای دریا داشتم. وقتی روی بالکن نشستم فرصت کافی داشتم تا دربارهٔ این حرف بور فکر کنم که می‌گفت به نظر می‌رسد، بخشی از لایتناهی در دست کسانی باشد که به پهنهٔ دریا می‌نگرند. بجز گردشهای روزانه و شنا کردنهای طولانی، چیزی نبود که توجه مرا از مسئلهٔ مورد نظرم منحرف کند، و بنابراین پیشرفت من از وقتی که در گوتینگن می‌بودم سریعتر شد.

1. Helgoland

یک مکانیک جدید

هایزنبرگ موفقیتش را تقریباً در زمانی به‌دست می‌آورد که پائولی اصل طردش را بسط می‌داد. یادآور می‌شویم که از دید پائولی، چشم‌انداز اتمی را می‌توان در نهایت به‌صورت یک سیستم ریز-دانه یا ریز بافتی از حالتهای مانا دانست که الکترونها، بنابر حکم اصل طرد، اشغال کرده‌اند. نظریهٔ پائولی گام بزرگی در تکامل مفهوم کوانتش بود. پلانک کوانتومهای انرژی را معرفی کرده بود؛ اینشتین نظریه‌ای از کوانتومهای تابش یا فوتونها را مطرح کرد؛ و بور تصویری از اتمها را ساخت که در حالتهای مانای کوانتیده وجود دارند. پائولی وحدت این اجزای نظری را با مشخص کردن حالات مانا با اعداد کوانتومی آغاز کرد.

امّا، کار پائولی، خود مانند یک بنای نظری ناپیوسته بود، زیرا مجموعهٔ چهارتایی اعداد کوانتومی که او به‌صورت اصل موضوع گرفته بود، همان‌قدر بر مبنای دانش تجربی است که بر مبنای اشتقاق نظری. نیاز مبرمی برای یک نظریهٔ کلی وجود داشت که اعداد کوانتومی را استنتاج کند، نه آنکه آنها را به‌صورت اصول موضوع در نظر بگیرد. فیزیکدانان هنوز در جستجوی یک ترکیب عظیم بودند که کل قلمرو کوانتومی را با آغاز از چند گزارهٔ ریاضی دربر بگیرد.

هایزنبرگ نخستین گامهای اطمینان‌بخش را در این مسیر نظری گذاشت. او اجزای اولیهٔ نظریه‌ای را به هم متصل کرد که سرانجام عمیقاً رفتار دینامیکی اتمها را می‌کاوید. این یک مکانیک اتمی ساخته شده به موازات مکانیک نیوتون، با شباهت صوری و تجریدی بود. هایزنبرگ، مانند اینشتین، اصل سازنده‌اش را در ریاضیات یافت. او یک‌بار اظهار داشت، «برای من طبیعی است از دیدگاه ریاضی صوری استفاده کنم که از بعضی جهات یک داوری زیباشناختی است.»

هایزنبرگ با ساده‌سازی اصول متعارف، و با ساختن نظریه‌ای در امتداد خطوط ریاضی توانست از گرفتاریهای ناگوار نظریهٔ بور دوری گزیند. او بدون آنکه گرفتار وضع فیزیکی تک‌تک الکترونهای اتمی شود، دینامیکی را ساخت که شبیه بود به شکل ریاضی مکانیک نیوتون، و شرح و بسط آن بود. در یک راه تجریدی مؤثر، او پُلی بین جهان عادی و جهان اتمی زد. بور قبلاً از این پُل عبورکرده بود، امّا با این تفاوت که رفتار درونی اتمها را با بعضی از ویژگیهای اشیای بزرگ‌مقیاس، مانند حرکت مداری سیارات، مجسم کرده بود. پُل هایزنبرگ به قلمرو اتمی صوری و کاملاً ریاضی بود، و تصویر چندان ساده‌ای از محتویات درون اتم به‌دست نمی‌داد.

هایزنبرگ یک سبک معماری نظری می‌ساخت که در فیزیک اتمی ناآشنا بود. هدایت این رهیافت با مُدلهای ریاضی و از لحاظ صوری شبیه به معادلات حرکت نیوتون بود، اما از جهات دیگر فقط وابستگی مبهمی به «تصویرها» یا مدلهای کلاسیک داشت. نگرش اساسی آن، که به زودی در نظریهٔ کوانتومی مسلط شد و باقی ماند بعداً پُل دیراک[1] صریحاً به این صورت خلاصه کرد: «هدف اصلی علم فیزیک تهیه و تدارک تصویرها نیست، بلکه تدوین قانونهای حاکم بر پدیده‌ها و به‌کارگرفتن این

1. Paul Dirac

قانونها برای کشف پدیده‌های جدید است. اگر تصویری وجود داشته باشد چه بهتر؛ امّا وجود یا عدم این تصویر، فقط در درجهٔ دوم اهمیت قرار دارد.»

تحلیل هایزنبرگ دو جزء یا عامل بنیادی فیزیکی داشت، که هر دو ساده و مشاهده‌پذیر بودند، گرچه هیچ یک در پیکربندی تصویرهای فیزیکی چندان یاری نکردند. اولی مجموعهٔ فرکانسهای گسیل یافته از یک اتم بود، در حالتی که آن اتم بین حالتهای مانا به شیوه‌ای که ابتدا بور پیشنهاد کرده بود، جهش می‌کند. اگر یک اتم یکی از این جهشهای کوانتومی را از انرژی بالاتر E_2 به انرژی پایینتر E_1 انجام دهد، یک «خط» طیفی گسیل می‌یابد که فرکانس آن را اگر ν_{21} بنامیم، بنابر قاعدهٔ بور به صورت زیر مشخص می‌شود،

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

این مفهوم کلی هر فرکانس ν_{mn} گسیل یافته در جهش اتم بین هر دو حالت مانا با انرژیهای E_m و E_n را مشخص می‌کند.

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

این مجموعه فرکانسهای $\{\nu_{mn}\}$ همهٔ خطوط مشاهده‌پذیر در طیف گسیلی اتم را تشکیل می‌دهد.

جزء اساسی دوم تحلیل هایزنبرگ از مسئله‌ای شکل می‌گرفت که به‌طور ضمنی در نظریهٔ بور مطرح می‌شد، امّا حل نمی‌شد. بور مفهوم اتمهایی را که بین دو حالتِ مانا جهش می‌کنند، به‌کار گرفت، امّا موفق به حل این مسئله نشد که چگونه بدانیم، چه وقت و کجا اتم خاصی می‌خواهد یک نوع جهش را انجام دهد. این مشکلی بود که رادرفورد وقتی نخستین مقالات بور را ملاحظه کرد، بلافاصله دریافت. او در سال ۱۹۱۳ به بور نوشت: «به‌نظر می‌رسد شما فرض کرده‌اید که الکترون [در حل جهش] قبلاً می‌داند کجا متوقف خواهد شد.» رادرفورد در جستجوی یک مکانیسم جبری بود، شبیه آنچه که در فیزیک کلاسیک معمول است.

بور هرگز موفق نشد نظریه‌اش را به این کار وادار کند، امّا راهنمایی ارزشمندی از مقاله‌ای را که اینشتین در سال ۱۹۱۶ نوشته بود، اخذ کرد. این ایده به ذهن اینشتین رسیده بود که اتمهایی که جهشهای کوانتومی را انجام می‌دهند شبیه اتمهای پرتوزای در حال فروپاشی هستند. ثابت شده است که پیش‌بینی زمان و مکان فروپاشی تک‌تک اتمها نیز غیرممکن است، و در غیاب یک روال بهتر، قانونهای پرتوزایی برای مدت زیادی به‌طور آماری فرمولبندی می‌شده است، مثلاً پیش‌بینی می‌شده است که احتمال فروپاشی اتم چقدر است. از لحاظ یک تک اتم، این یک توصیف نامعین است، زیرا گزارهٔ آماری چیزی با قطعیت دربارهٔ فرایندهای منفرد نمی‌گوید؛ این گزاره توضیحی است از رفتار میانگین به‌دست آمده از داده‌هایی که از تعداد بسیار زیادی از اتمها گرفته شده است. اینشتین دریافت که این توصیف آماری را می‌توان به همه نوع تغییر اتمی بسط داد. در میان چیزهای دیگر، او ترتیبی داد تا «از یک راه فوق‌العاده ساده و کلی» با تعریف احتمالات وقوع همهٔ گذارهای اتمی ممکن، به قانون تابش پلانک برسد. بور با بهره‌گیری این موضوع را گرفت و جایی برای «احتمالات گذار» اینشتین در نظریهٔ اتمی خودش یافت.

بنابراین می‌بینیم که هایزنبرگ در سال ۱۹۲۵ قانون بور-اینشتین را گسترش می‌دهد. دومین جزء سازندهٔ فیزیکی در نسخهٔ تحلیلی هایزنبرگ، همراه مجموعه‌ای از فرکانسهای طیفی $\{\nu_{mn}\}$، مجموعه‌ای از احتمالات گذار بود. اگر احتمال گذار m به n، که با برچسب A_{mn} نشان داده می‌شود، بزرگ باشد، احتمالاً گذار صورت می‌گیرد و خط طیفی که فرکانس آن ν_{mn} است، شدید خواهد بود. پس احتمالهای گذار تجلی شدتهای خط طیفی مشاهده‌پذیرند.

هایزنبرگ دریافت که احتمالهای گذار A_{mn} و فرکانسهای ν_{mn} را می‌توان در روش محاسبه‌ای به‌کار گرفت، که شبیه روش کاملاً تثبیت شدهٔ مشهور «تحلیل فوریه» است (ژوزف فوریه در اوایل قرن نوزدهم این روش را برای نظریهٔ تحلیلی‌اش دربارهٔ گرما، اختراع کرد). هایزنبرگ برای هر کمیّت مشاهده‌پذیر شناخته شده در مکانیک نیوتونی یک همتای کوانتومی یافت که به‌صورت یک «بسط فوریه»، با فرکانسها و احتمالهای گذار، فرمولبندی شده بود.

در تحولات بعدی، مجموعه‌ای از احتمالهای گذار در آرایه‌های مربعی مرتب شد که در آن اقلام* ورودی‌های مربوط به حالت ۱ در ردیف ۱، حالت ۲ در ردیف ۲ قرار داشتند، و غیره. اگر به‌طور کلی سه حالت دخیل باشد، آرایهٔ مربعی به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix}$$

با راهنمایی روش کار فوریه، که عمدتاً یک روش ریاضی بود، و تلاش برای دینامیکی که وقتی به جای آرایه‌ها متغیرهای متناظر کلاسیک را بگذاریم شبیه مکانیک نیوتونی می‌شد، هایزنبرگ به یک مکانیک کوانتومی مؤثر و کارآمد رسید.

الهام

وقتی هایزنبرگ موفق شد «همهٔ سنگ و ثقالهای ریاضیاتی» را که از گوتینگن به اتاق طبقهٔ دوم هلگولند آورده بود «دور بریزد» با دید محدودش از بی‌نهایت، به سرعت توانست شکل مکانیک جدیدش را ببیند. همچنان که مکانیک او شکل می‌گرفت، و او توانست ببیند که از لحاظ فیزیکی و ریاضی با هم سازگاری دارند، هایزنبرگ به شدت هیجان زده شد—«من مرتکب خطاهای بی‌شمار شدم»—و حتی با اضطراب کنجکاوانه‌ای گفت: «ابتدا نگرانی عمیقی احساس می‌کردم. احساس می‌کردم که از سطح پدیده‌های اتمی به زیبایی شگفت‌انگیز درون آن می‌نگرم و تقریباً با این فکر دچار سرگیجه می‌شدم که باید به تحقیق این ساختارهای غنی که طبیعت سخاوتمندانه در مقابلم گسترده است، بپردازم.» نخستین محاسبات موفقیت‌آمیز در ساعت سه بامداد یک روز کامل شد. خواب غیرممکن بود: «بنابراین، همچنان

*. معادل entry «درایه» آمده است.

که سپیدهٔ یک روز جدید، می‌دمید عازم رأس جنوبی جزیره شدم، جایی که اشتیاق داشتم از صخره‌ای که از دریا بیرون زده بود بالا بروم. فی‌الحال این کار را کردم. . . و منتظر طلوع خورشید شدم.»

امّا هایزنبرگ به دنبال خوشبینی و هیجان اولیه‌اش، به تدریج دربارهٔ مکانیک جدیدش احساس ناراحتی می‌کرد، زیرا با نوع خاصی از جبر کار کرده بود. دو متغیر مانند x و y، با روش هایزنبرگ به صورت آرایه‌های مربعی درمی‌آمدند که از قاعدهٔ ضرب عجیبی پیروی می‌کردند: حاصلضرب xy همیشه از لحاظ ریاضی، بر خلاف جبر معمولی، معادل حاصلضرب yx با عاملهای معکوس شده نبود. هایزنبرگ می‌نویسد، «این واقعیت که xy مساوی yx نبود برایم ناخوشایند بود. من احساس می‌کنم که این تنها اشکال درکل طرح است؛ در غیر این صورت من کاملاً خرسند بودم.» بیشتر این نظریه در ژوئن ۱۹۲۵ ساخته شد که هایزنبرگ دعوتی برای سخنرانی در آزمایشگاه کاوندیش درکمبریج دریافت کرد. چاره‌ای جز این نبود که یا کار به سرعت کامل شود یا «به شعله‌های آتش سپرده شود.» پائولی، این منتقد گرانقدر، با خواندن دست نوشته، واکنشی «شعف‌انگیز» داشت. این «امید جدید و لذت تازه‌ای از زندگی به او بخشید.» هایزنبرگ مقاله‌اش را به بورن ارائه کرد، امّا درکمبریج از تلاشهای اخیرش چیزی نگفت.

مکانیک ماتریسی

بورن در ژوئیهٔ سال ۱۹۲۵ به اینشتین نوشت: «آخرین مقالهٔ هایزنبرگ، که به زودی منتشر می‌شود، تاحدی مبهم به‌نظر می‌رسد، امّا مطمئناً درست و عمیق است.» برای بورن، آشکار بود که یک مکانیک کوانتومی واقعی در دسترس است، و او بسط و توسعهٔ یک گزارهٔ ریاضی کامل از این نظریه را آغاز کرد. او به ویژه دربارهٔ قاعدهٔ ضرب چشمگیری کنجکاو شد: «قاعدهٔ ضرب نمادین هایزنبرگ مرا آرام نمی‌گذاشت، و پس از روزها تفکر متمرکز و آزمودن، نظریهٔ جبری را به یاد آوردم که از معلمم، روزانس[1]، در برسلاو[2]، آموخته بودم.» این نظریهٔ جبری مربوط به «ماتریسها» بود، موجودات ریاضیاتی آرایه‌گونه که جبر آن را آرتور کیلی[3]، با بصیرت یک ریاضیدان، در حدود هفتاد سال پیش فرمولبندی کرده بود. قاعدهٔ ضرب عجیبی که هایزنبرگ کشف کرد دقیقاً مشابه ضرب ماتریسی بود؛ آرایه‌های هایزنبرگ را رسماً به‌صورت ماتریسها در نظر گرفت. وقتی بورن این سرنخ را به‌دست آورد، راه برای بسط و توسعهٔ یک «مکانیک ماتریسی» کوانتومی گشوده شد. این کار به‌وسیلهٔ بورن، هایزنبرگ و یک متخصص جوان ماتریس، به نام پاسکوال جُردن[4] آغاز شد.

بورن و هایزنبرگ خودشان را در جهان ریاضیاتی بیگانه‌ای می‌یافتند، که به زبان آن چندان آشنا نبودند. هایزنبرگ به جردن شِکوه می‌کرد که، «حتی نمی‌دانم ماتریس چیست.» امّا، از قضا فیزیکدانان گوتینگن از لحاظ توصیهٔ مفید دربارهٔ چگونگی برخورد با مشکلات ریاضیاتشان کمبودی نداشتند. ریاضیدان بزرگ دیوید هیلبرت[5] که درگوتینگن بود، بهتر از هرکسی در جهان، ضرورت یادگیری زبان

1. Rosanes 2. Breslau 3. Arthur Cayley 4. Pascual Jordan 5. David Hilbert

ریاضی مورد نیاز فیزیکدانان را بیان می‌کرد. ادوارد کاندن[1]، یک امریکایی که در گوتینگن بود، دربارهٔ توصیهٔ هیلبرت می‌گوید: «هیلبرت به بورن، هایزنبرگ و فیزیکدانان نظریه‌ای گوتینگن می‌خندید، زیرا وقتی آنان نخستین بار مکانیک ماتریسی را کشف کردند زحمت زیادی را متحمل شدند، امّا هرکس دیگری هم که می‌کوشید مسئله‌ای را با ماتریس حل کند، یا واقعاً ماتریسها را به‌کارگیرد و با آنها کارکند همان زحمت را داشت. بنابراین آنان از هیلبرت کمک خواستند.»

هیلبرت به آنان گفت که ماتریسها برای او ابزارهایی ساده و مفید برای توضیح بعضی از جنبه‌های رسمی مسائلی هستند که به زبان دیگر، یعنی با معادلات دیفرانسیلی نوشته شده‌اند. چون فیزیکدانان سالهای متمادی از زبان معادلات دیفرانسیل برای مسائل دیگری استفاده کرده بودند، هیلبرت پیشنهاد کرد که ماتریسها ممکن است جلوه‌هایی از معادلات مفیدتر از نوع دیفرانسیلی باشند. بنابر نظر کاندن، نظریه‌پردازان گوتینگن آن را «ایدهٔ احمقانه‌ای می‌پنداشتند که هیلبرت خودش نمی‌دانست دربارهٔ چه چیزی حرف می‌زند.» امّا هیلبرت به ندرت اشتباه می‌کرد. دُرست شش ماه بعد، اروین شرودینگر به معادلاتی که هیلبرت پیش‌بینی کرده بود، دست یافت و ثابت کرد که آنها ــ با همان روشهای معمول معادلات دیفرانسیل ــ همان کار و بیشتر از آن را به انجام می‌رسانند.

جنگ و پیامدهایش

هایزنبرگ کارش را در سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ در دوران دستاوردهای عظیم فیزیک اتمی آغاز کرد. این کار به‌وسیلهٔ نظریه‌پردازان و آزمایشگران جوان، که بسیاری از آنان در حدود بیست سالگی بودند، انجام شد. آنان از سراسر جهان آمده بودند و در کپنهاگ، گوتینگن، برلین و مونیخ ملاقات کردند. یک جامعهٔ بین‌المللی بود که افراد آن همان‌قدر به علم وفادار قسم‌خورده بودند که به کشورهای موطنشان. برای دانشمندانی که شانس شرکت در این جمع را داشتند، این جامعه می‌باید بهشتی از عقل و خرد بوده باشد.

امّا در همان زمان که روح جهانی‌نگری در بین فیزیکدانان رشد می‌کرد، نیروهای سیاسی با شدیدترین احساسات ملی‌گرایی در آلمان در حال رشد بودند. کانون آن حزب ناسیونال سوسیالیست (نازی) به رهبری آدولف هیتلر بود. در سال ۱۹۳۳، هیتلر و نازیست در قدرت بودند و آلمان به سرعت از بقیهٔ جهان منزوی می‌شد، و بسیاری از مشهورترین فیزیکدانان، شیمیدانان و ریاضیدانان آلمان مجبور به مهاجرت می‌شدند.

هایزنبرگ از لایپزیک، که در آنجا در سال ۱۹۲۷ به‌عنوان استاد فیزیک نظری منصوب شده بود، شاهد این رویدادهای مخوف و اندوه‌بار بود. هایزنبرگ در زندگینامهٔ شخصی خود می‌نویسد: «وقتی در آغاز ترم تابستانی سال ۱۹۳۳، به مؤسسهٔ لایپزیک خودم بازمی‌گشتم فساد آغاز شده و در حال گسترش بود. چند نفر از مستعدترین همکارانم آلمان را ترک کرده بودند و دیگران هم آمادهٔ فرار می‌شدند.» هایزنبرگ هرگز به حزب نازی نپیوست و در سالهای اولیه هیچ توافقی با ایده‌آلها یا روش‌های آن حزب

1. Edward Condon

نداشت. با وجود این، علاقهٔ چندانی به مهاجرت نداشت؛ او کشورش را دوست می‌داشت، و از این نظر یک ملی‌گرا بود.

فیزیکدان و شیمیدانان بزرگ چندانی در آلمان نماندند، امّا معدودی ماندند. علاوه بر هایزنبرگ، اوتو هان[1]، رادیو شیمیدانی که با فریتس اشتراسمان[2] آزمایشهایی انجام دادند، که به کشف شکافت هسته‌ای انجامید؛ ماکس فون لاوه[3] که به لحاظ کارش در زمینهٔ بلورشناسی پرتو x شهرت وافر داشت و بالاخره ماکس پلانک بودند. هایزنبرگ به دیدن پلانک رفت، مردی کُهن‌سال که همچون همیشه در ایده‌آلها، صداقت و کمالش استوار بود: «پلانک مرا با قیافه‌ای گرفته ولی صمیمی در اتاق نشیمن قدیمی‌اش پذیرفت؛ تنها چیزی که در جایش نبود، چراغ نفتی روی میزش بود. به‌نظر می‌رسید پلانک از آخرین ملاقاتمان سالها پیرتر شده است. در صورت تراشیدهٔ ظریفش چروکهای عمیقی ایجاد شده بود، لبخندش زجرکشیده و چهره‌اش فوق‌العاده خسته به‌نظر می‌رسید.»

پلانک گفت که اخیراً با هیتلر ملاقات کرده و کوشیده است تا به او بفهماند که اعمال او موجب تخریب دانشگاههای آلمان می‌شود: «من امیدوار بودم او را متقاعد کنم که... اخراج همکاران یهودیمان موجب آسیب عظیمی می‌شود؛ و به او نشان دهم که قربانی کردن مردانی که همواره خود را آلمانی میدانسته‌اند و مانند هر فرد دیگری جانشان را برای آلمان در کف می‌گرفته‌اند چه‌قدر بی‌معنی و کُلاً سخیف و غیراخلاقی است.» این تلاش بی‌ثمر بود. پلانک گفت: «من موفق نشدم منظورم را به او بفهمانم و بی‌چون و چرا زبانی وجود ندارد تا با آن کسی بتواند با چنین مردانی گفتگو کند.»

پلانک توانست کلماتی تشویق‌آمیز و دلگرم‌کننده ادا کند، امّا توصیه کرد که می‌باید ماند و برای آنچه در آن وقت بسیار ارزشمند بود، یعنی شاگردان، دوام آورد: «شما نمی‌توانید فاجعه را متوقف کنید، و برای زنده ماندن مجبورید پی‌درپی مصالحه کنید. امّا می‌توانید بکوشید با یکدیگر، با دیگران متحد شوید و جزایر ثبات تشکیل دهید. شما می‌توانید جوانان را گردِ خود آورید، آنان را آموزش دهید تا دانشمندان خوبی شوند و به این ترتیب به حفظ ارزشهای گذشته یاری کنید... از چنین گروههایی می‌توان نطفهٔ بلورهای بسیار زیادی را ایجاد کرد که از آنها اَشکال جدیدی از حیات امکان رشد داشته باشد.»

معلوم شد که عمل به توصیهٔ پلانک یک بازی حاد و غالباً پرمخاطره است. در اواسط سالهای ۱۹۳۰ یک نهضت جعلی به نام «فیزیک آریایی» یا «فیزیک آلمانی» که به‌وسیلهٔ دو آزمایشگر برندهٔ جایزهٔ نوبل، یوهانس اشتارک[4] و فیلیپ لنارد[5] ابداع و رسماً اعلام شده بود، تقویت می‌شد. نگرش آنان آشکارا ضد یهود بود. هدف آنان سرکوب کردن «فیزیک یهودی» نظری رایج ــ نسبیت و نظریهٔ کوانتومی ــ و ترویج یک علم بیشتر عینی با مبنای تجربی شفاف به جای آن بود. هدف اصلی آنان،

1. Otto Hahn 2. Fritz Strassmann 3. Max von Laue 4. Johannes Stark 5. Philipp Lenard

اینشتین، اکنون از آلمان رفته بود، امّا «صورت‌گرایی یهودی» در نظریه‌های دوستان اینشتین، پلانک و لاوه تداوم داشت، و «صورت‌گرایی نظری، هایزنبرگ، همان روحیهٔ اینشتین را داشت.»

اشتارک و شرکا مبارزهٔ شرورانهٔ بدگویی علیه هایزنبرگ به راه انداختند، که طی سالهای ۱۹۳۶ و ۱۹۳۷ تشدید شد، و سرانجام موقعیت دانشگاهی و حتی ایمنی او به مخاطره افتاد. این دوره‌ای بود از «تنهایی بی‌پایان» که به تدریج از آن بیرون می‌آمد به ویژه وقتی با الیزابت شوماخر[1]، بانوی جوان قوی بنیه‌ای ازدواج کرد که سیزده سال از او کوچکتر بود. هایزنبرگ، مدت کوتاهی پس از ازدواج، تصمیم شجاعانه و مخاطره‌آمیزی گرفت، او نامه‌ای به هاینریش هیملر[2] رئیس SS (Schutzstaffel) و در واقع به رئیس پلیس رایش نوشت و درخواست کرد که به تهمتهای علیه او رسماً رسیدگی شود. اگر نتوانست تبرئه شود، استعفا خواهد کرد و داوطلبانه به خدمت ارتش درخواهد آمد. تحقیقات SS طولانی مدت و تحقیرآمیز بود، امّا سرانجام قضاوت مساعدی دربارهٔ قابلیت اعتماد سیاسی هایزنبرگ به دست آمد. گزارش تحقیقات SS چنین بود: «شخصیت هایزنبرگ معقول و محترم است. هایزنبرگ نمونهٔ یک دانشگاهی غیرسیاسی است. . . در ظرف چند سال هایزنبرگ از طریق موفقیتهایش، خود را متقاعد کرد که ناسیونال سوسیالیسم جهت‌گیری مثبتی به سوی موفقیت دارد. هر چند نظر او این بود که فعالیت سیاسی برای یک معلم دانشگاه مناسب نیست، مگر در مشارکتهای موردی، به منظورهای خاص در اردوهای مغزشویی و مانند آن.» حتی در این صورت، هایزنبرگ می‌بایست مواظب و محتاط بود: او نمی‌توانست نام فیزیکدانان یهودی را برای شاگردانش یا در مقالاتش ذکر کند، و گاه‌گاه مجبور بود نمایندهٔ آلمان نازی در خارج باشد.

با شروع جنگ در سپتامبر سال ۱۹۳۹، به هایزنبرگ دستور داده شد که به پروژهٔ اورانیم ــ که برای اعضای آن به‌عنوان کلوب اورانیم مشهور بود ــ ملحق شود. این پروژه تأسیس شده بود تا امکانات آزمایشهای شکافت هسته‌ای را که هان و اشتراسمان مطرح کرده بودند، دنبال کند. در سال ۱۹۳۹، هایزنبرگ و همکاران دیگرش به این نتیجه رسیدند که یک واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای در اورانیم طبیعی در صورتی امکان‌پذیر است که با نوترونهایی آغاز شود که انرژی آنها در یک دستگاه «کُندساز، moderator» با آب سنگین یا گرافیت تا مقادیر کم کاهش یافته باشد. همچنین آنان متقاعد شده بودند که ایزوتوپ کمیاب اورانیم ۲۳۵ می‌تواند به‌عنوان مادهٔ منفجرهٔ هسته‌ای به‌کار آید. فعالیت شدیدی دنبال شد، و به‌طوری که هایزنبرگ می‌نویسد: «در اواخر سال ۱۹۴۱ 'کلوب اورانیم' ما به‌طور کلی مسائل فیزیکی مربوط به بهره‌برداری فنی از انرژی اتمی را درک کرده بود [که شامل بمبهای هسته‌ای نمی‌شد].» در این مرحله پژوهشهای هسته‌ای آلمان، احتمالاً یک سال جلوتر از تلاشهای هسته‌ای انگلستان و امریکا بود.

یک مسئله که کارشناسان کلوب ما تشخیص دادند، امّا نتوانستند آن را حل کنند چگونگی جدا کردن اورانیم ۲۳۵ از اورانیم ۲۳۸ بسیار فراوانتر همراه آن بود. چنین جداسازیهایی، ایزوتوپهایی با جرم

1. Elisabeth Schumacher 2. Heinrich Himmler

تقریباً یکسان، هرگز انجام نشده بود و متصور هم نبود. تهیه کردن حتی مقدار اندکی از اورانیم ۲۳۵ مستلزم سالها زمان و منابع عظیمی بود. در آن زمان، هیتلر توسعهٔ مهمّاتی را که در شش ماه نتایج نویدبخشی نداشته باشد مجاز نمی‌دانست.

تا حدی که برای کسی تحمل سالهای جنگ در آلمان نازی امکان‌پذیر باشد، هایزنبرگ خوش‌شانس بود. توسعهٔ بمب هسته‌ای، که او آشکارا از آن می‌ترسید و می‌دانست که باید از آن دوری گزیند، در آلمان غیرممکن بود. بدون انحراف از واقعیتها، کلوب اورانیم می‌توانست توصیه کند که تنها یک نوع تلاش هسته‌ای امکان‌پذیر است و آن گسترش یک راکتور هسته‌ای با کندکنندهٔ گرافیت یا آب سنگین است. طرح کار با آب سنگین در آلمان در مؤسسهٔ فیزیک کایزر-ویلهلم آغاز شد.

متفقین در سال ۱۹۴۳ بمبارانهای سنگین برلین را آغاز کردند، و راکتور تحقیقاتی می‌باید به مکان امن‌تری برده می‌شد. دهکدهٔ هایگرلاخ در جنوب، نزدیک اشتوتگارت برای جایگاه جدید انتخاب شد. هایگرلاخ نه تنها امن، بلکه مشکل بتوان گفت جزئی از این جهان بود. به‌طوری که یکی از وقایع‌نگاران پژوهش هسته‌ای زمان جنگ آلمان می‌نویسد: «در همهٔ آلمان کمتر محل عملاً رؤیایی، همچون هایگرلاخ وجود داشت. . . در اینجا، که از قرون وسطی تغییر اندکی کرده بود، جدیدترین نیروگاه قدرت آلمان ساخته شد.» کار با راکتور در اتاقی کَنده شده در صخره‌ای زیر «کلیسای نیم-گوتیک، نیم-باروکِ» شهر ادامه یافت. درحالی‌که کار آزمایشگاهی پیش می‌رفت، هایزنبرگ گاهی به کلیسا می‌رفت و با اُرگ قطعه‌هایی از موسیقی باخ را می‌نواخت. یکی از همکاران هایزنبرگ بعدها اظهار داشت، «این یکی از خیال‌انگیزترین دوران زندگی من بود.»

از یک جنبهٔ غم‌انگیز، هایزنبرگ واقعاً مرد خوش‌شانسی بود. در سال ۱۹۴۴ اندکی پس از آنکه او برلین را به قصد هایگرلاخ ترک کرد، توطئه‌ای برای قتل هیتلر به عمل آمد. توطئه با شکست مواجه شد و بعضی از دوستان و همکاران هایزنبرگ (از جمله اروین پسر پلانک) توقیف و اعدام شدند. اگر هایزنبرگ در برلین مانده بود، بدون امتیازهای بازجویی SS و تسلیم بودن او به مقتضیات رژیم (و مواردی از این قبیل)، مطمئناً زندگی او در خطر بزرگی می‌بود.

در آوریل ۱۹۴۵، ارتشهای متفقین به جنوب آلمان حمله بردند. فرانسه در صدد اشغال هایگرلاخ بود، امّا افسران اطلاعاتی امریکایی می‌دانستند که هایزنبرگ مؤسسه‌اش را از آنجا به نزدیکی هخینگن[1] منتقل کرده است. یک واحد کوچک با نام رمزی «Alsos Commission» که ساموئل گوداسمیت که شهرت کشف اسپین الکترون را داشت مشاور آن بود، به سرعت از ارتش فرانسه پیشی گرفت تا دانشمندان آلمانی، مقالات و تجهیزاتشان را به چنگ آورد. امّا غنیمتی که بیش از همه خواستار آن بودند، یعنی هایزنبرگ را نیافتند. هایزنبرگ به‌طوری که قبلاً طرح‌ریزی کرده بود در آخرین دقیقه هخینگن را ترک کرده بود، تا (با دوچرخه) خود را به خانواده‌اش درکوههای آلپ باواریا برساند و منتظر آخرین ماههای جنگ باشد.

الیزابت هایزنبرگ دربارهٔ مسافرت شوهرش از میان آشوب به‌جا مانده از ارتش فقیر آلمان می‌گوید: «وقتی اشغال در هخینگن به وقوع می‌پیوست، هایزنبرگ با دوچرخه‌اش به سوی شرق در حرکت بود.

1. Hechingen

او سه روز و شب در راه بود تا صحیح و سالم وارد خانه شد.» او از میان «گروههای غارتگران و پیکرهای پاره‌پوره که به زبانهای خارجی سخن می‌گفتند گریخت، گروههایی که از زندان یا اردوی کار اجباری رها شده یا گریخته بودند و اکنون با پرسه زدن در نواحی روستایی مشغول غارت و چپاول بودند.» او نوجوانانی را دید که در پایان جنگ به خدمت ارتش احضار شده بودند، و «اکنون در اردوهایی درکنار جاده گرسنه و گمشده می‌گریستند و نمی‌دانستند چه باید بکنند.» همه جا سربازانی خسته و وحشت‌زده در حرکت بودند، و بدون طرح و نقشه به هر طرف می‌رفتند. بعضی به شرق، بعضی دیگر به غرب و شمال. هایزنبرگ پس از این دوچرخه سواری زیاد، منتظر ورود واحد Alsos نشد. سرانجام زندانی شد، هایزنبرگ می‌نویسد: «احساس شناگر کاملاً خسته‌ای را داشتم که پایم را روی زمین سفتی گذاشته‌ام.»

به امید جمع‌آوری اطلاعات بیشتر، هایزنبرگ و نُه دانشمند آلمانی دیگر به مدت شش ماه در بازداشت نگهداشته شدند. علاوه بر هایزنبرگ، گروه شامل اُتو هان، ماکس فون لاوه، والتر گرلاخ[1] (کسی که با اُتو اشترن[2] آزمایش کلاسیکی را طرح کردند که وجود حالتهای اسپین را نشان می‌داد)، و کارل فردریک فون وایتس‌زکر[3]، همکار و دوست هایزنبرگ. این ده نفر را به یک ملک روستایی بزرگ نزدیک کمبریج به نام فارم هال بردند و آنان در آنجا «زندانی شدند.» هان، زندگی در ناز و نعمت آنان را چنین توصیف می‌کند: «زندگی ما در انگلیس واقعاً در رفاه بود. صبحانه شامل پوره، یا کورن فلکس، ژامبون، تخم‌مرغ، نان، کره و مارمالاد بود. نهار و شام کباب یا استیکهای ران یا کباب با سیب‌زمینی سرخ شده داشتیم. تعجبی نداشت که وزن همهٔ ما زیاد شود. پنج زندانی جنگ مأمور مراقبت از ما بودند که از میان آنان یکی آشپز بسیار خوبی بود. در یک خانه و باغ بسیار بزرگ، این زندانیان مانند ما آزاد بودند.»

آنان ورزش و ورق بازی می‌کردند، آثار دیکنز را می‌خواندند و سمینارهایی برقرار می‌کردند (که با میکروفونهای سرّی معلوم شد درک هایزنبرگ از فیزیک بمب اتمی ابتدایی است)؛ هایزنبرگ با یک پیانوی خوب سوناتهایی از بتهوون می‌نواخت. اگر اوضاع چنان غیر واقعی به نظر نمی‌رسید، اگر خانوادهٔ آنان در آلمان با قحطی یا بدتر از آن مواجه نبودند، زندگی در این «زندان» که آنان آن را «قفس طلایی» می‌نامیدند دورانی باصفا و آرامش‌بخش می‌بود.

بصیرت

هایزنبرگ پس از رهایی از قفس طلایی و بازگشت به آلمان توانست بار دیگر، بی‌تردید با آرامش، با واقعیت مواجه شود، و مدیر مؤسسهٔ ماکس پلانک (قبلاً مؤسسهٔ کایزر ویلهلم) در گوتینگن شد. او مانند ماکس پلانک در نسل قبلی، با بصیرت و انرژی زیاد کوشید تا علم آلمان از ویرانه‌های پس از جنگ به پا خیزد. علاوه بر بازسازی مؤسسه در گوتینگن، صدای او دربارهٔ موضوعات علمی، داخلی و بین‌المللی، در دفتر صدراعظم آلمان غربی، نافذ بود. همچون همیشه، او کار پژوهشی‌اش را بر بنیادی‌ترین مسائل

1. Walter Gerlach 2. Otto Stern 3. Carl Friedrich von Weizäcker

نظریه‌ای متمرکز کرد. در آغاز سالهای ۱۹۵۰، او رؤیای وحدت آفرینان را ــ که نظریهٔ میدان تعمیم‌یافته بود ــ دنبال می‌کرد. او امیدوار بود یک معادلهٔ موج بنیادی بیابد که همهٔ فیزیک ذرات بنیادی را در بر گیرد. وقتی فکر می‌کرد که امکان امیدبخش خاصی وجود دارد، آن را تسلیم آزمون معمول انتقاد پائولی می‌کرد. الیزابت هایزنبرگ تبادل نامه‌های خشن بین هایزنبرگ و پائولی را درحالی‌که معنی این نظریه را حلاجی می‌کردند، توصیف می‌کند: «نامه‌ها خشن و بیرحمانه بود. واقعاً مثل جنگ بود، هر رگبار از یک طرف با رگبار قوی برابر آن از طرف دیگر پاسخ داده می‌شد. این جنگ در دور اوّل خوب از کار درآمد. هایزنبرگ، سرانجام موفق شد پائولی را دربارهٔ ایده‌هایش متقاعد کند.»

پائولی به جهت‌گیری نظریه علاقه‌مند شد. در یک نامه او نوشت: «این چیز قدرتمندی است... گربه ازکیسه بیرون آمده و پنجه‌هایش را نشان داده است... یک سال نو بسیار مبارک. بیایید قدم‌زنان به سوی آن پیش برویم. تا تیپراری* راه درازی است. راهی طولانی در پیش است.» پائولی مصمم بود به ایالات متحد سفر کند و دربارهٔ نظریه سخنرانی کند، امّا هایزنبرگ نگران بود: «من ایدهٔ برخورد بین ولفگانگ با روحیهٔ شاد و شعف فعلی‌اش و عملگرایان امریکایی هشیار و متین را دوست نداشتم، و کوشید تا پائولی را از رفتن باز دارد.» یکی از این «عملگرایان امریکایی» جرمی برنشتاین بود، که شرح او از حضور پائولی در دانشگاه کلمبیا در برابر مخاطبانی از جمله بور قبلاً ذکر شد.

سرانجام پائولی با ارزیابی بور مبنی بر اینکه این نظریه «کاملاً احمقانه نیست» موافقت کرد. او این موضوع را رها کرد و به هایزنبرگ نوشت، «شما آزادید به راه خود بروید، امّا من نمی‌خواهم بیش از این با آن سر و کاری داشته باشم.» آبراهام پایس در وقایع نامه‌اش با عنوان *Inward Bound* (برگشت به درون) دربارهٔ فیزیک نظری جدید متذکر می‌شود که این نظریه و گوناگونیهای آن «در طولانی مدت نافذ و مؤثر نبودند.»

بنابراین، داستان تلاش نظری بزرگ هایزنبرگ نتیجه‌ای ناموفق داشت. امّا حکایتی از یک ماجرای عقلانی عالی، برای دسترسی بیشتر به روحیه‌ای خلاق بود. الیزابت هایزنبرگ می‌نویسد: «یک شب مهتاب برفراز کوه هاینبرگ[1] [نزدیک گوتینگن] قدم می‌زدیم و هایزنبرگ درحالی‌که کاملاً مجذوب تصوراتش شده بود، می‌کوشید تا جدیدترین اکتشافش را برای من توضیح دهد. او دربارهٔ معجزهٔ تقارن به‌عنوان الگوی کهن خلقت، دربارهٔ هم‌آهنگی، دربارهٔ زیبایی سادگی، و حقیقت درونی آن بحث می‌کرد. این نقطهٔ اوج زندگی ما بود.»

*. تیپراری (Tipperary) ناحیه‌ای از ایالت مونستر در جنوب غربی ایرلند است. امّا کل جمله یک بیت شعر متداول در زبان انگلیسی است.

1. Hainberg

۱۹

مکانیک موجی

اروین شرودینگر و لویی دوبروی

امیدها و بیمها

پل دیراک[1] این عقیده را ابراز داشته است که دوستان نظریه‌پرداز او را، نه تنها اُمیدهایشان، بلکه درست به همان اندازه بیمهایشان هدایت می‌کنند. او می‌گوید، برای پژوهشگران نظری دشوار است این ترسها را نادیده بگیرند، که مبادا کارشان شامل نقصهایی پنهان و مصیبت‌بار باشد؛ و افکارشان تحت تأثیر این نگرانی چنانکه باید منطقی نباشد: «شاید فکر کنید که یک پژوهشگر خوب موضوع کارش را به آرامی، بدون هیجان و با ذهنی کاملاً منطقی مرور و بررسی می‌کند، و به طریقی سراسر عقلانی توسعهٔ اندیشه‌هایش را هر چه باشد پیش می‌برد. این دور از واقعیت است. پژوهشگر هم انسان است و، اگر امیدهای بزرگی دارد، ترسهای بزرگی نیز دارد. . . در نتیجه، روند کارهایش بسیار آشفته است. او نمی‌تواند همهٔ توجهش را بر خط صحیح توسعه متمرکز کند.»

اگر یک وحشت اساسی توسعهٔ نظریهٔ کوانتومی را در حین دو دههٔ نخستین آن تهدید می‌کرد، مفهوم دوگانگی موجی-ذره‌ای بود، و ضرورت آن به این علت بود که ایجاب می‌کرد نور در بعضی آزمایشها به صورت موج‌گونه و در موارد دیگر به صورت ذره‌گونه ظاهر شود. اینشتین از جملهٔ نخستین افرادی بود که با این معمای دوگانگی روبه‌رو شد. با وجود شواهد نظری و تجربی که در دراز مدت برای موجی بودن نور به اثبات رسیده بود، اینشتین برای توضیح ویژگیهای معمابرانگیز اثر فوتوالکتریک یک نظریهٔ ذره‌ای پیشنهاد کرد. معادلهٔ $E = h\nu$ اینشتین برای انرژی E یک ذرهٔ نور یا فوتون، برحسب اتفاق مضمون دوگانگی را مطرح می‌کند: این معادله E، ویژگی نور به عنوان یک ذره، را با فرکانس ν که ویژگی نور به عنوان یک موج است، ترکیب می‌کند.

1. Paul Dirac

از دیدگاه منطقی، این یک تناقض بود، که بجز اینشتین هیچ نظریه‌پردازی شجاعت روبه‌رو شدن با آن را نداشت. چگونه نور می‌تواند دو چیز اساساً متفاوت یعنی موج و ذرّه در یک زمان باشد؟ به‌نظر می‌رسید دوگانگی یک تهدید یک «نقص بنیادی» باشد که اگر دربارهٔ آن زیاد پافشاری شود، باعث سقوط کُلّ بنای نظری شود.

برادرانِ دوبروی

در میان نظریه‌پردازان نخستین کسی که پس از اینشتین با چالش معمای موجی-ذره‌ای روبه‌رو شد یک نجیب‌زادهٔ فرانسوی به نام لویی-ویکتور دوبرُوی[1] بود. وی پسر جوانتر خانواده‌ای اشرافی، ثروتمند و مشهور بود. لویی دوبروی عنوان شاهزادگی داشت، اما گمان نمی‌رفت که حرفه‌ای عقلانی، اندیشمندانه و کم تحرک همچون علم را دنبال کند. برای دوک دوبروی سالخورده، پدربزرگ لویی، علم «بانوی پیری بود که به دلبری از مردان پیر خشنود بود». امّا موریس[2]، برادر بزرگتر لویی موفق شد وجههٔ خوبی در فیزیک تجربی به‌دست آورد، درحالی‌که همزمان حرفهٔ دریانوردی بیشتر سنتی را دنبال می‌کرد. لویی تحت تأثیر برادرش، و بدون شک با حمایت او از مخالفت خانواده‌اش، یک فیزیکدان نظری شد، درحالی‌که قبلاً یک مدرک غیرعلمی در تاریخ باستان و شناسایی خطهای کهن به‌دست آورده بود.

با آغاز از سال ۱۹۱۳ موریس دوبروی کاری آزمایشی دربارهٔ پرتوهای x انجام داده بود، که در آن دست‌کم برای آزمایشگران، مسئلهٔ موجی-ذره‌ای غیرقابل اجتناب است. نخستین آزمایشهای پرتو-x او به این کشف انجامید که باریکه‌های پرتو-x با یکدیگر تداخل و نقشهای تاریک و روشن خاصی ایجاد می‌کنند. این‌گونه آثار «پراش» تقریباً یک قرن پیش در آزمایشهایی با نور معمولی مشاهده و با نظریهٔ موجی توضیح داده شده بود. یکی از کاشفان پراش پرتو-x، با این مفهوم ضمنی که باریکه‌های پرتو-x را می‌توان به‌صورت دسته‌هایی از امواج دانست، ویلیام براگ[3]، یک آزمایشگر بریتانیایی بود، که قبلاً شواهد قانع کننده‌ای یافته بود که پرتوهای x خواص ذره‌ای دارند. براگ ابتدا به پرتوهای x به‌صورت امواج، از دریچهٔ چشمان پسرش می‌نگریست. پسر او لاورنس براگ معادلهٔ معروفی را ابداع کرد و به‌کار گرفت که پرتوهای x را به‌صورت امواج مورد بررسی قرار می‌داد و تحلیل جزئیات نقشهای پراش پرتو-x را امکان‌پذیر می‌کرد. براگ‌ها با داشتن تجربهٔ عینی و مشخص با پرتوهای x هم به‌صورت ذرات و هم به‌صورت امواج ــ و به‌عنوان آزمایشگران بدون آنکه ترس از نظریه‌پردازان آنان را تهدید کند ــ از نخستین کسانی بودند که تشخیص دادند نه نظریهٔ موجی و نه نظریهٔ ذره‌ای به خودی خود کافی نیستند. در سال ۱۹۱۲، براگ پیرتر نوشت: «مسئله تصمیم‌گیری بین نظریه‌های مربوط به پرتوهای x نیست، بلکه یافتن نظریه‌ای است که توانایی‌های هر دو را داشته باشد.»

1. Louis-Victor de Broglie 2. Maurice 3. William Bragg

در اوایل سالهای ۱۹۲۰، موریس دوبروی به قدر کافی با رفتار پرتو-x آشنا شده بود که در عقیدهٔ براگ سهیم شود و این دیدگاه را به برادرش لویی منتقل کند که در آن موقع متوجه استعدادهایش به‌عنوان یک نظریه‌پرداز شده بود. لویی دوبروی می‌نویسد: «برادرم پرتوهای x را ترکیبی از موج و ذره می‌دانست، امّا چون نظریه‌پرداز نبود، ایده‌های روشن خاصی دربارهٔ موضوع نداشت.» برای مدتی دو برادر دربارهٔ آزمایشهایی شامل بررسی «پس‌زنی» الکترونهای تولید شده در پراکندگی پرتوهای x با مواد جامد با هم کار می‌کردند.

در این کار تجربی، و در «بحثهای طولانی با برادرم دربارهٔ تفسیر آزمایشهای زیبایش» لویی دوبروی «به تفکرات و تأملات عمیقی دربارهٔ لزوم وابستگی همیشگی جنبه‌های موجی، با جنبه‌های ذره‌ای رهنمون شد.» او به این دید تازه رسید که دوگانگی موجی-ذره‌ای یک تقارن طبیعی است که نه تنها برای تابش‌هایی مانند نور و پرتوهای x به‌کار می‌آید، بلکه برای اجزای اولیهٔ سازندهٔ ماده، به ویژه الکترونها نیز مناسب است. از زمان کار جی.جی. تامسون در اواخر سالهای ۱۸۹۰، الکترونها به‌صورت ذرات ریز حامل بار و جرم معین شناخته شده بودند. در زمانی که دوبروی نظریه‌اش را فرمولبندی کرد، هیچ‌گونه دلیلی وجود نداشت که نشان دهد الکترونها بتوانند بجز ذره، به‌صورت دیگری ظاهر شوند. با وجود این، بر پایهٔ باور قاطع دوبروی دربارهٔ تقارن موج-ذره و استدلال در راستای راههایی که عمدتاً نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین مطرح می‌کرد، دوبروی به چند نتیجهٔ بسیار مهم و حیاتی رسید، که پیش‌بینی می‌کرد الکترونها و «ذرات» دیگر اجزای سازندهٔ ماده می‌باید رفتار موجی از خود نشان دهند.

امواج مادی

استدلال دوبروی با این فرض آغاز شد: «ایدهٔ اساسی نظریهٔ کوانتومی ناممکن بودن در نظر گرفتن یک جزء منزوی از انرژی بدون نسبت دادن فرکانس معینی به آن است.» ذرات تابش ــ همچنین ذرات ماده ــ در سطحی از موجودیت‌اند که اساساً «فرایندی تناوبی» است. محتوای فیزیکی معادلهٔ پلانک-اینشتین $E = h\nu$ با جملهٔ E برای انرژی و عامل ν برای فرکانس چنین بود. دوبروی همچنین نشان داد که طول موج فوتون، یک ویژگی موجی، با تکانهٔ فوتون، یک ویژگی ذره‌ای، را می‌توان با ترکیب $E = h\nu$ با معادلهٔ دیگر $E = mc^2$ حاصل از نسبیت خاص، به هم مربوط کرد. ترکیب این دو معادله به‌صورت زیر درمی‌آید

$$E = h\nu = mc^2$$

که از آن می‌توانیم رابطهٔ زیر را به‌دست آوریم.

$$mc = \frac{h\nu}{c}$$

چون سرعت فوتون c است، جملهٔ mc در آخرین معادله را می‌توان به‌عنوان تکانهٔ فوتون p در نظر گرفت، بنابراین

$$p = \frac{h\nu}{c} \qquad (۱)$$

اکنون با گذر از دیدگاه ذره‌ای و ملاحظات تکانه به دیدگاه موجی، با استفاده از معادلهٔ $\lambda\nu = c$ که طول موج λ، فرکانس ν، و سرعت c امواج نور را به هم مربوط می‌کند، فرکانس ν را محاسبه می‌کنیم

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

هرگاه این تعریف فرکانس در معادلهٔ تکانه (۱) گذاشته شود، خواهیم داشت

$$p = \frac{h}{\lambda} \qquad (۲)$$

این معادله هنوز مربوط به فوتونهاست، امّا دوبروی دلیلی نداشت که چرا نباید الکترونها و ذرات دیگر نیز «که قطعات منزوی انرژی‌اند»، فرکانسها و طول موجهای وابسته به هم نداشته باشند. با راه پیچیده‌تر از آنچه در اینجا بیان شد ــ امّا با شروع معادلهٔ انرژی $mc^2 = h\nu$ ــ دوبروی معادلهٔ تکانه (۲) را برای همه نوع ذرات مادی توجیه کرد. این سهم عمدهٔ دوبروی بود، که پیشنهاد می‌کرد الکترونها و همهٔ ذرات دیگر نه‌تنها تکانه و خواص انرژی، آن‌طورکه جی.جی.تامسون دهها سال پیش ثابت کرده بود، بلکه طول موج مرموزی نیز دارند.

بنابراین، معادلهٔ تکانه ـ طول موج (۲) دوبروی به رابطهٔ انرژی ـ فرکانسِ پلانک اینشتین $E = h\nu$ به‌عنوان معادلهٔ دوگانگی دیگر با یک کمیت ذره‌ای (تکانهٔ p) در یک طرف، و یک کمیت موجی (طول موج λ) در طرف دیگر پیوست، و ثابت پلانک همیشه حاضر h بین آنها قرار گرفت.

اینشتین لَه، کپنهاگ علیه

برای اینشتین، دست‌کم، استدلال نظری دوبروی قانع‌کننده، و تقریباً از لحاظ جامعیت و سادگی بدیهی بود. وقتی اینشتین به‌وسیلهٔ دوستش پل لانژون[1] از کار دوبروی آگاه شد، (دوبروی نظریه‌اش را به‌عنوان پایان‌نامهٔ دکتری به لانژون ارائه کرده بود) با فصاحت اینشتینی پاسخ داد که دوبروی «گوشه‌ای از پردهٔ بزرگ را بالا زده است.» اینشتین از آرمان «مکانیک موجی» جدید حمایت می‌کرد، و امتیاز آن برای دوبروی سرنوشت‌ساز بود: «جهان علم آن زمان به هریک از گفته‌های او چشم دوخته بود، زیرا او در اوج شهرت بود. با تأکید بر اهمیت مکانیک موجی، دانشمندان سرشناس فعالیت بسیاری برای تسریع توسعهٔ آن به‌عمل آوردند.»

ابتدا، اینشتین تنها فیزیکدان سرشناسی بود که از دوبروی طرفداری می‌کرد. دوبروی در جامعهٔ علمی بیگانه نبود؛ در کپنهاگ و گوتینگن شناخته شده بود، امّا اعتبار چندانی نداشت. چند مباحثهٔ

1. Paul Langevin

غیر دوستانه، دوبروی و بعضی از همکاران فرانسوی‌اش را در مقابل بور و کپنهاگیها قرار داده بود، که معمولاً افراد اخیر در آن برنده شده بودند. مشهورترین این رقابتها به عنصر ۷۲ مربوط می‌شد. در پاریس، این عنصر را وابسته به عناصر خاکی نادر می‌دانستند و آن را «سِلتیم» می‌نامیدند، درحالی‌که در کپنهاگ «هافنیم» (صورت لاتینی کپنهاگ) بود، و برمبنای پیشنهاد بور به عنصر زیرکونیم مربوط می‌شد. وقتی درستی نظر بور و همکارانش در این مورد و چند مورد دیگر ثابت شد، دوبروی و حامیان او حامی نظریه‌های نادرست شناخته شدند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، ایدهٔ اصلی دوبروی دربارهٔ امواج الکترون، در کپنهاگ و در دیگر جاهایی که تحت نفوذ بور بود جدّی گرفته نشد.

امواج الکترون مشاهده شد

کشف تجربی امواج الکترون، پیش‌بینی شده توسط نظریهٔ دوبروی، سرانجام در سال ۱۹۲۷ به‌وسیلهٔ کلینتون دیویسن[1] و لسترگرمر[2] در ایالات متحد، و به‌وسیلهٔ جی.پی. تامسون (تنها پسر جی.جی. تامسون، نخستین کسی که الکترونها را به‌صورت ذره دیده بود) در انگلستان گزارش شد.

آزمایشهای دیویسن ـ گرمر، کاملتر و قطعیتر از آزمایشهای تامسون بود، و تقریباً طی یک دهه تحولات تجربی دشوار شکل گرفت. وقتی آزمایشهای نهایی موفقیت‌آمیز انجام شد که یک باریکهٔ الکترون با انرژی پایین دقیقاً معین تشکیل و به یک وجه بلور نیکل، که به‌طور خاصی آماده شده بود، هدایت شد، و بخشهایی پراکنده شده از آن باریکه با یک آشکارساز متحرک جمع‌آوری شد. آزمایشهای انجام شده با این دستگاه نشان داد الکترونها به‌طور یکنواخت در همهٔ جهات پراکنده نشده‌اند؛ بلکه، تحت شرایط معینی، جریان مشخصی از الکترونها در جهتی مشاهده شد که برای آن زاویهٔ فرود بر سطح بلور برابر با زاویهٔ بازتاب بود. اگر برای الکترونها، سطح نیکل کاملاً مسطح و صاف بود، این نتیجه چندان شگفت‌انگیز نبود: اگر گوی لاستیکی را به یک دیوارهٔ صاف و مسطح پرتاب کنید با زاویه‌ای برابر با زاویهٔ فرود بازمی‌گردد. امّا برای الکترون‌های ذره‌گونه، سطح نیکل را نمی‌توان کاملاً صاف و هموار در نظر گرفت. الکترونها ذراتی بسیار کوچکتر و کم جرمتر از اتمهای نیکل‌اند. بازتاب ذرات الکترون از سطح نیکل بنابر توصیف هوشمندانهٔ دیویسن، «شبیه این است که تعدادی ساچمه به‌طور منظم از توده‌ای از گلوله‌های بزرگ توپ باز بتابند.» مشکل این است که «سطح متشکل از گلوله‌های بزرگ توپ، درشت‌بافتر و زُمختتر از آن است که بازتابندهٔ ذرات کوچکی همچون ساچمه باشد.»

دیویسن و گِرمر داده‌هایشان را با این فرض که باریکهٔ الکترون انگار باریکه‌ای از پرتوهای x با ویژگی‌های موجی باشد به‌طور موفقیت‌آمیز تحلیل کردند. لارنس براگ بازتاب امواج ـ x از سطوح بلورها را این طور در نظر گرفته بود که بازتاب پرتوهای منفرد اثر را تولید می‌کند. یک پرتو «اولیه» از سطح بلور بازمی‌تابد و به پرتوهای «ثانویهٔ» بازتابیده از لایه‌های متوالی اتمهای بلور، می‌پیوندد. پرتوهای بازتابیده،

1. Clinton Davisson 2. Lester Germer

هم اولیه و هم ثانویه در صورتی یک جبههٔ موج هماهنگ و تقویت شده ایجاد می‌کنند، که امواج به طور هماهنگ طوری به هم بپیوندند که ستیغها بر ستیغها و پاستیغها بر پاستیغها بیفتند. معادلهٔ براگ این شرط را تضمین می‌کرد، و او این معادله را برای تعیین ساختارهای بلور به‌کار گرفت.

دیویسن و گرمر دریافتند که در صورتی می‌توانند داده‌های اسرارآمیز خود را توجیه کنند که تصویر پذیرفته شدهٔ باریکهٔ الکترون به صورت رگباری از ذرات را کنار بگذارند و به جای آن فرض کنند که می‌توان از معادلهٔ براگ استفاده کرد.

این دلیل تحسین برانگیزی بر درستی دیدگاه نظری که دوبروی در حدود همان زمانی که دیویسن و گرمر آزمایشهایشان را شروع کردند، بیان کرده بود. نظریهٔ دوبروی می‌توانست راهنمای خوبی برای طرح و تفسیر آزمایشهای آنان باشد، زیرا نظریه می‌توانست جزئیات و حواشی آنچه را که دیویسن و گرمر مشاهده می‌کردند، پیش‌بینی کند. امّا، همچنانکه بارها دیده‌ایم، آزمایشگران همیشه در تماس نزدیک با نظریه‌پردازان نیستند و بالعکس. دیویسن و گرمر مقالهٔ دوبروی را نخوانده بودند تا بعداً پژوهشی نظام‌مند را برای امواج الکترون آغاز کنند؛ آزمایشهای آنان، از لحاظ حقوقی، اقامهٔ دعوی حق ثبت اکتشاف مشهوری را باب کرد.

طرفین اصلی اقامهٔ دعوی شرکتهای جنرال الکتریک و وسترن الکتریک بودند. جنرال الکتریک تقاضای حق ثبت اختراع یک لامپ خلأ سه الکترودی (تریود) را کرده بود، شبیه به طرحی که قبلاً در مالکیت شرکت وسترن الکتریک بود. جنرال الکتریک مدعی آن بود که وسیلهٔ موردنظرشان لامپی با خلأ بسیار خوب است، درحالی‌که کار لامپ وسترن الکتریک به مقدار قابل ملاحظه‌ای هوا نیاز داشت. بنابر استدلال جنرال الکتریک، مولکولهای هوا یونهای مثبت ایجاد می‌کردند که سپس با بمباران سطح اکسیدی کاتد، الکترونهایی آزاد می‌شوند که مورد نیاز کار لامپ است. وسترن الکتریک امیدوار بود با جمع‌آوری شواهد آزمایشگاهی دربارهٔ آثار بمباران یونهای مثبت بر سطوح اکسیدی، استدلال مذکور را ابطال کند. این کار را گرمر با راهنمایی دیویسن، در آزمایشگاههای وسترن الکتریک آغاز کرد. ادعای جنرال الکتریک رد شد، و سرانجام اقامهٔ دعوی به نفع وسترن الکتریک پایان یافت.

آزمایشهای بمباران پس از حل و فصل دعوی ادامه یافت تا آنجا که بمباران سطوح فلزی برهنهٔ بدون پوشش اکسیدی را نیز دربر گرفت. بنابر اظهارات گرمر همچنین ممکن بود، «با تغییر پتانسیل بعضی الکترودها گسیل حاصل از بمباران الکترون را اندازه‌گیری کرد.» بنابراین، این کار را که سرانجام به نمایش زیبایی از امواج الکترون انجامید «به عنوان نوعی کار فرعی انجام شد.» بررسی‌های الکترون به مدت چند سال ادامه یافت، و داده‌ها نقشی همواره عجیبتر و پیچیده‌تر را نشان می‌داد. سرنخ اصلی به طور تصادفی، وقتی آشکار شد که یک فلاسک هوای مایع منفجر شد و لامپ تخلیه شدهٔ شامل هدف نیکل را خرد کرد. بازسازی این اسباب مستلزم تمیزکردن سطح نیکل با گاز زدایی در دمای زیاد بود. این کار باعث تشکیل چند بلور نیکل بزرگ پیش‌بینی نشده بود که در هدف نیکل اولیه وجود نداشت. اکنون پیچیدگیها به بلورها نسبت داده شد، و آزمایشها با یک تک بلور نیکل که سطوح بازتاب آن را می‌شد در جهت‌های کنترل شده‌ای قرار داد، آغاز شد.

تا سال ۱۹۲۶، دیویسن و گرمر از نظریهٔ امواج الکترون دوبروی بی‌خبر بودند. در یک گردهم‌آیی انجمن بریتانیایی برای پیشرفت علم که در اکسفورد برپا شد، دیویسن از نظریهٔ موجی جدید آگاه شد و دریافت که نقش داده‌های ناشی از بمباران، که او و گرمر تا اندازه‌ای دال بر رفتار پرتو-x یافته بودند، در واقع حکایت از پدیده‌های موجی دارد. گرمر می‌نویسد، «بلافاصله نظریه، رهنمون آزمایشها شد و آزمایشها به سرعت موفقیت‌آمیز شدند.» دیویسن با کاشف دیگر امواج الکترون به نام جی.پی. تامسون، به طور مشترک جایزهٔ نوبل سال ۱۹۳۷ را دریافت کردند. جی.پی. تامسون که به ما می‌گوید الهام برای کارش با امواج الکترون وقتی به ذهنش خطور کرد که آزمایش دیگری را مشاهده می‌کرد، آزمایشی که بعداً نتایجی به دست داد که «کاملاً نادرست و ناشی از اشکال در وسایل بود»

زیبایی مقدم بر علم

ما داستان بصیرت نظری تقارن موجی-ذرّه‌ایِ لویی دوبروی را دنبال کردیم. همچنین دیدیم چگونه دوبروی و همکارانش در پاریس به راههای گوناگون خودشان را از «محور کپنهاگ-گوتینگن» جُدا کردند و امکان کار نظری بیشتر دربارهٔ مکانیک امواج الکترون به‌وسیلهٔ دست‌اندرکاران پابرجای فیزیک کوانتومی را نامحتمل ساختند. بدین‌سان بود که اروین شرودینگر یک فرد علمی یکه و تنهای مستقر در زوریخ، پس از دوبروی، معمار اصلی مکانیک موجی الکترون شد.

شرودینگر در سال ۱۸۸۷ در ویَن زاده شد. (شرودینگر، بور و بورن تقریباً همسن و بزرگتر از دیگر بنیان‌گذاران مکانیک کوانتومی، هایزنبرگ، دیراک و پائولی بودند که همهٔ آنان در حدود سالهای ۱۹۰۰ به دنیا آمدند.) پدرش رودلف نه تنها شغل خانوادگی لینولئوم را با موفقیت پیش می‌برد، بلکه فعالیتی نزدیک به علاقهٔ حرفه‌ای در گیاه‌شناسی، شیمی و نقاشی ایتالیایی نیز داشت. یکی از زندگینامه‌نویسان شرودینگر، ویلیام اسکات، دربارهٔ پیوند محکم پدر و پسر می‌نویسد:«به‌عنوان دوست، معلم و شریک خستگی‌ناپذیر در مباحثه، رودلف شرودینگر در حیات عقلانی پرشور و سرزنده‌اش با پسرش و تنها فرزندش سهیم بود. شرودینگر با نگاهی به گذشته به دوران طفولیتش، به خاطر می‌آورد پدرش 'دادگاه استینافی' برای همهٔ موضوعات مفید بود. تحصیلات رسمی شرودینگر در مدرسه‌ای آغاز شد، که درسهای اصلی آن زبانهای باستان و ادبیات بود. از مادربزرگ مادری‌اش که انگلیسی بود، زبان انگلیسی را با مهارت کامل آموخت؛ در سالهای بعد او زبان انگلیسی را با سبک خوب و روان می‌نوشت و صحبت می‌کرد. توانایی او در زبانهای جدید دیگر نیز چشمگیر بود؛ او با مخاطبان فرانسه و اسپانیایی زبانش، به همان خوبی زبان آلمانی و انگلیسی صحبت و از آنها پذیرایی می‌کرد.

شرودینگر اندکی پس از مرگ فاجعه‌آمیز لودویگ بولتزمن وارد دانشگاه وین شد. نفوذ بولتزمن هنوز در حلقهٔ مدرسان فیزیک نظری که جانشین او فردریک هازنورل[1] تدریس می‌کرد پابرجا بود. بعدها شرودینگر طی سالهای زیادی هنوز درسهای هازنورل را به‌عنوان «والاترین مُدل» می‌دانست و طرز

1. Friedrich Hasenöhrl

تفکر بولتزمن را «اولین عشقش در علم تلقی می‌کرد. هیچ چیز دیگری مرا آنچنان به وجد نیاورده بود و بار دیگر هرگز آن چنان مشعوف نخواهد کرد.»

دربدو امر، شرودینگر مواجهه با تحولات جدید در نظریهٔ اتمی را دشوار یافت: «تضادهای ذاتی آن در مقایسه با تحولات ناب و بی‌چون و چرا روشن استدلال بولتزمن، ناپخته و خشن به‌نظر می‌رسید. می‌شود گفت که من حتی برای مدتی از آن گریزان بودم.» شور و شوق شرودینگر دربارهٔ مسائل فلسفی و ریاضی، استادان و همشاگردیهای او را تحت‌تأثیر قرار می‌داد. با ظاهر شدن او در یک سمینار ریاضی یکی درگوش شاگرد تازه واردی نجواکنان گفت: «این شرودینگر است».

در سال ۱۹۱۸، پس از جنگ جهانی اوّل، شرودینگر مشتاقانه منتظر حرفه‌ای به‌عنوان فیزیکدان نیمه وقت و فیلسوف تمام وقت بود. یک کرسی در دانشگاه چرنویتس[1] قریب‌الوقوع بود. «من آماده بودم کار تدریس فیزیک نظری را به خوبی انجام دهم... امّا برای بقیهٔ اوقات خودم را وقف فلسفه کنم.» تصادفاً پس از جنگ، چرنویتس دیگر بخشی از اتریش نبود. «فرشته نگهبان من مداخله کرد... من می‌باید به فیزیک نظری می‌چسبیدم و با کمال شگفتی گاه‌گاه چیزی از آن درمی‌آمد.»

شرودینگر به‌مدت چند سال نوعی حرفهٔ دانشگاهی سیار را که در زندگی دانشگاهی آلمان معمول بود دنبال کرد؛ پس از اقامتهای کوتاه در ینا[2]، اشتوتگارت[3] و برسِلا[4]، سرانجام به مدت شش سال در دانشگاه زوریخ ساکن شد، (جایی که کلازیوس و اینشتین در میان پیشینیان او بودند). این فعالترین دوران زندگی‌اش بود، که در آن کار بزرگ مکانیک موجی تکمیل شد. سپس در سال ۱۹۲۷، ماکس پلانک بازنشسته شد و شرودینگر را متقاعد کرد که به‌عنوان جانشین او به برلین برود. برای مدتی زندگی در برلین مطبوع بود: پلانک، اینشتین و ماکس فون لاوه آنجا بودند، و برلین مرکز مهم پژوهش نظری و تجربی بود.

امّا بعد کابوس نازی فرود آمد و شرودینگر به مهاجرت دسته‌جمعی روشنفکران پیشرو آلمان پیوست. او یهودی نبود و یکی از معدود دانشمندان آلمان بود که بدون اخراج شدن مهاجرت کرد. بار دیگر سفر او آغاز شد، به اکسفورد رفت، به گراتی[5]، بازگشت به اکسفورد، به گنت[6] و به رُم رفت، جایی که با ایمون دِ والرا[7]، ریاضیدان، دانشمند و نخست‌وزیر ایرلند آشنا شد. دِ والرا مؤسسه‌ای برای مطالعات پیشرفته (با مُدلی برگرفته از مؤسسهٔ پرینستون) در دوبلین طراحی کرده بود. بودجهٔ مالی آن کافی نبود. ابتدا مطالعات پژوهشی به دو مدرسهٔ «کاغذ و مدادی» محدود می‌شد، یک مدرسهٔ مطالعات سلتی[8] و یک مدرسهٔ فیزیک نظری، که دِ والرا شرودینگر را برای مدیریت آن دعوت کرده بود. شرودینگر دعوت را پذیرفت، و بار دیگر در ایرلندِ بی‌طرف زندگی را آرام، توأم با صلح و سازندگی یافت. او در دوبلین مدرسی محبوب بود، خود را با معلوماتی که دربارهٔ موسیقی ایرلندی، طراحی سلتی و زبان گالی[9] داشت عزیز ایرلندیها کرده بود. امّا آب و هوای ایرلند مناسب حال او نبود. ضعف سلامتی و اشتیاق برای زادگاهش اتریش، او را در سال ۱۹۵۶ به وین بازگرداند.

1. Czernowitz 2. Jena 3. Stuttgart 4. Breslau 5. Graz 6. Ghent 7. Eamon de Valera
8. Celtic

۹. Gaelic (گالی معادل سلتی است.)

شرودینگر* در عشق و علم، مجذوب زیبایی بود. او به ماکس بورن می‌نویسد: «من هدفی بالاتر از آن ندارم که زیبایی علم را به‌دست آورم. من زیبایی را مقدم بر علم می‌دانم.»

کار علمی شرودینگر به‌طوری چشمگیر گسترده بود. یکی از اولین تلاشهای او به نظریه‌ای دربارهٔ ادراک رنگ مربوط می‌شد. گاه و بیگاه، او تقریباً به همهٔ وجوه فیزیک جدید می‌پرداخت: مکانیک آماری، پراش پرتو-x، نسبیت عام، نظریهٔ وحدت میدان و نظریهٔ گرماهای ویژه، همین طور کار معروف او دربارهٔ مکانیک موجی. او در سال ۱۹۴۴ کتاب کوچکی منتشر کرد با عنوان حیات چیست؟ــ یکی از نخستین گشت‌وگذارها در قلمرو زیست‌شناسی مولکولی. (فرانسیس کریک که با جیمز واتسن مدل مارپیچ دوگانهٔ DNA را کشف کردند، می‌گوید که کتاب شرودینگر بانی عمدهٔ تغییر رشتهٔ او از فیزیک به زیست‌شناسی مولکولی بود.) شرودینگر مانند اینشتین و بور درگوناگونی علاقه‌هایش یگانگی را یافت. او در پیشگفتار کتاب زندگی چیست؟ از اندک راههای صریح و قاطع تفکر مطرح برای [من]، سخن می‌گوید که بارها و بارها در موارد گوناگون به آن رجوع کرده است.

معادلهٔ شرودینگر

شرودینگر اذعان دارد که کارش دربارهٔ مکانیک موجی را نه‌تنها مدیون دوبروی بلکه مدیون اظهارات «مختصر، ولی بی‌نهایت دوراندیشانهٔ» اینشتین و مکانیک دوگانه‌ای است که تقریباً یک قرن پیش از آن ویلیام رَوان هامیلتون[1]، فیزیکدان و ریاضیدان ایرلندی، پدید آورده بود. مدتی پیش از آنکه این ظن به وجود آید که جهان فیزیکی از موجودات موجی-ذره‌ای ساخته شده است، هامیلتون نظریهٔ وحدت‌یافته‌ای از پرتو نور و حرکت ذره را تدوین کرده بود. دینامیک هامیلتون، همراه با استنتاج منطقی آن، ایجاب می‌کرد که به هر ذره‌ای سیستمی از امواج، وابسته باشد. هامیلتون این نتیجه‌گیری را بیان نکرد ــ احتمالاً او حتی فکر آن را هم نمی‌کرد ــ زیرا در سالهای ۱۸۳۰ هیچ‌گونه دلیلی وجود نداشت که ذرات جنبه‌های موجی داشته باشند. امّا مکانیک دوگانهٔ هامیلتون زیبایی ریاضی صوری داشت که آن را به مدت نود سالی که لازم بود تا مضمون دوگانگی با کارِ دوبروی و اینشتین احیا شود زنده نگه داشت. بنابراین برای شرودینگر طبیعی بود تا به نظریهٔ هامیلتون بازگردد و آن را در یک مکانیک موجی کاملتر وسعت بخشد.

یک مبنای نظریهٔ هامیلتون قیاسی است بین اپتیک یک باریکهٔ نور که به‌عنوان یک پرتو درنظر گرفته می‌شود و مکانیک یک ذرّهٔ مادی. امّا این تصویر، آنچنان که شرودینگر متذکر می‌شود، یک برآورد تقریبی است، زیرا نور چیزی بیشتر از یک دسته پرتو است. پرتوها ساختار ظریف موج‌گونه دارند که به پدیده‌هایی مانند پراش و تداخل می‌انجامد. اپتیک پرتو چیزی دربارهٔ این آثار نمی‌گوید؛ پرتو صرفاً یک شکل راحت، امّا تقریبی از نظریهٔ اپتیکی گسترده‌تر و ظریفتر است. نظریهٔ کاملتر، که می‌توان آن

*. در حدود یک پاراگراف ترجمه نشد.

1. William Rowan Hamilton

را «اپتیک موجی» نامید تصویر مشروحی از ساختار موجی است که چگونگی آثار پراش و تداخل را توضیح و نشان می‌دهد که پرتوها موجودات خیالی عمود بر جبهه‌های موج‌اند.

شرودینگر با بهره‌گیری از قیاس، به‌عنوان دلیل اصلی‌اش، استدلال می‌کند که این وجه‌تشابه مکانیک ـ اُپتیک می‌باید در همهٔ سطوح برقرار باشد، به‌طوری که اگر اُپتیک پرتو شکل تقریبی از اُپتیک موجی باشد پس مکانیک معمولی، نظیر اپتیک پرتو، در طرح هامیلتون، تقریبی برای یک مکانیک بنیادیتر یعنی یک مکانیک موجی جدید، است:

(مکانیک معمولی) برای (مکانیک موجی) مانند (اپتیک پرتو) برای (اپتیک موجی) است

اگر اپتیک موجی ساختار موج‌گونهٔ امواج نور را نشان دهد، مکانیک جدید قاعدتاً، ساختار موجی ذرات مادی مانند الکترونها را نشان خواهد داد.

شرودینگر با شروع این حکم‌های معقول و باورپذیر، جنبه‌های ریاضی نظریه‌اش را با آمیزش چهار جزء سازنده به دست آورد: استدلالهای هامیلتون؛ معادلهٔ دیفرانسیل بنیادی اپتیک؛ معادلهٔ انرژی ـ فرکانس پلانک $E = h\nu$؛ و معادلهٔ تکانه ـ طول موج دوبروی $p = \frac{h}{\lambda}$. پس از چند شروع نادرست، او به معادله‌ای دیفرانسیلی رسید که امروزه دانشجویان فیزیک و شیمی آن را «معادلهٔ شرودینگر» می‌شناسند. این معادله به زودی در انواع شگفت‌انگیزی از مسائل اتمی و مولکولی توفیق یافت. او بجز آنکه راهی برای تشخیص نیازهای نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین در معادله‌اش نیافت، محدودیتی که در مورد اتمها و مولکولها چندان اهمیتی ندارد، فقط در مدت شش ماه، نظریهٔ کامل ریاضی کوانتومی را تدوین کرده بود. به‌گفتهٔ ماکس جامر[1]، تاریخ نویس علم، مقالات ۱۹۲۶ شرودینگر «بی‌تردید یکی از مؤثرترین موفقیتهای تاریخ علم بود. . . درواقع تحولات بعدی نظریهٔ کوانتومی غیرنسبیتی تا حد زیادی صرفاً شرح و تفصیل و کاربرد کار شرودینگر بود.»

معادلهٔ شرودینگر از لحاظ ریاضی معادله‌ای معمولی است. این معادله که شبیه به معادله‌های به‌دست آمده برای نشان دادن انواع امواج دیگر: امواج آب، امواج الکترومغناطیسی، امواج نور و امواج صوت است. همچنین یک معادلهٔ انرژی است که به زبان ریاضی خاصی بیان می‌کند انرژی کل سیستم مورد نظر، فرضاً یک اتم هیدروژن برابر انرژی جنبشی اتم به‌علاوه انرژی پتانسیل آن است. این درست هم‌ارز کوانتوم مکانیکی اصل پایستگی انرژی کلاسیک است. جواب این معادله یک «تابع موج» است که شرودینگر و افراد بعد از او آن را با حرف یونانی Ψ (سای (psi) بزرگ) نشان می‌دهند.

نام تابع موج به این علت است که بنابر انتظار، خواص موج‌گونه را می‌نمایاند. تابع موج بستگی دارد به موضع ارزیابی در زمان و فضا، بنابراین شکل ریاضی آن وقتی تک ذره‌ای مانند الکترون را توصیف می‌کند، $\Psi(x, y, z, t)$ است، که در آن x، y، و z مختصات مشخص کنندهٔ یک نقطه در فضا و t متغیر زمان است. یک اتم یا مولکول دست‌نخورده با زمان تغییر نمی‌کند، در این مورد t را می‌توانیم از تابع موج حذف کنیم و برای یک تک ذره بنویسیم $\psi(x, y, z)$ (که در آن ψ سای کوچک است).

1. Max Jammer

آسان برای نوآموزان، سخت برای متخصصان

آبراهام پیس[1]، بهترین واقعه‌نگار فیزیک قرن بیستم اظهار داشته است که مکانیک کوانتومی مانند ارزیابی ولادیمیر هورویتس[2] از موسیقی موزارت: «برای نوآموزان بسیار آسان و برای خبرگان و متخصصان بسیار دشوار است.» منظور او این است که با برداشتی سطحی از مکانیک کوانتومی می‌توان محاسباتی انجام داد ــ به گفته‌ای دیگر نُتهایی نواخت ــ امّا شناخت کامل اینکه این محاسبات چه معنایی دارند (مانند تبحّر و خبرگی هورویتس از موزارت) کار بسیار بسیار دشواری است. تفسیر فیزیکی معادلهٔ شرودینگر و شرح و بسط آن هنوز ــ مدتها پس از مقالات اولیهٔ شرودینگر ــ موضوعی برای جرّ و بحث پرشوری است.

نخستین مسئلهٔ تفسیری را که شرودینگر، سپس بورن و بعد از آن پائولی مطرح کردند، معنی فیزیکی تابع موج بود. مفهومی که سرانجام شکل گرفت کاملاً غیرمنتظره، و سالها موجب بحث و گفتگو شد. بورن و پائولی به این نتیجه رسیدند که تابع موج یک معنی آماری تحویل‌ناپذیر دارد. برای تک الکترون یک اتم آزاد مربع تابع موج ψ^2 احتمال یافتن الکترون در یا نزدیک مکان معینی را اندازه‌گیری می‌کند: هر جا ψ^2 دارای مقدار بزرگ باشد، مثلاً نزدیک مرکز اتم، احتمالاً الکترون یافت می‌شود. به عبارت دیگر، مکانیک کوانتومی نوعی مکانیک آماری است.

امّا مکانیک کوانتومی با مکانیک آماری کلاسیک کلازیوس، ماکسول، بولتزمن و گیبس، که مبتنی بر واقعیت فیزیکی زیربنایی مشتمل بر مولکولهاست، عمیقاً تفاوت دارد. ما می‌توانیم ناظر این قلمرو مولکولی باشیم، و ببینیم چگونه مولکولها آمارها را تولید می‌کنند. امّا شواهد نظری و تجربی که طی سالهای بسیار انباشته شده‌اند بیشتر فیزیکدانان عصر جدید را متقاعد کرده است که تصویر آماری که مکانیک کوانتومی ارائه می‌کند این تفسیر زیربنایی را ندارد؛ به نظر می‌رسد که واقعیت نمایی در قلمرو کوانتومی، آماری باشد، و همین است که هست.

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

در حدود همان زمانی که شرودینگر معادله‌اش را ترکیب و تنظیم می‌کرد، هایزنبرگ مقاله‌ای منتشر کرد که ماهیت آماری نظریهٔ کوانتومی را به طریق دیگری آشکار می‌کرد. اکتشاف هایزنبرگ، مهمترین دستاورد او، «اصل عدم قطعیت» نامیده می‌شود، که پیامدهای بسیار شگفت‌انگیزی دارد. یکی از آنها این است که اگر مکان یک ذره، مثلاً الکترون یک اتم را به دقت اندازه‌گیری کنیم به ناچار الکترون را چنان آشفته می‌سازیم که رفتار بعدی آن تقریباً نامعین خواهد بود.

به عبارت رسمیتر، اصل هایزنبرگ تأکید دارد که اگر Δx عدم قطعیت در مکان یک الکترون در جهتی مثلاً جهت x، و Δp_x عدم قطعیت در تکانه در آن جهت باشد، در این صورت Δx و Δp_x متقابلاً، بر طبق رابطهٔ زیر، به هم مربوط می‌شوند، که در آن h بار دیگر ثابت پلانک است.

$$\Delta p_x \Delta x \geqslant \frac{h}{2\pi} \qquad (۳)$$

1. Abraham Pais 2. Vladimir Horowitz

گزاره‌های مشابهی برای دو جهت فضایی دیگر y و z صادق است. اگر Δx، آن‌طور که می‌باید پس از یک اندازه‌گیری دقیق مکان، کوچک باشد، در این صورت اصل هایزنبرگ ایجاب می‌کند که عدم قطعیت تکانهٔ Δp_x لزوماً بزرگ باشد، به‌طوری که حاصلضرب $\Delta p_x \Delta x$ از مقدار $\frac{h}{2\pi}$ در معادلهٔ (۳) فراتر رود. با یادآوری اینکه تکانه حاصلضرب سرعت در جرم است، پی‌می‌بریم که اندازه‌گیری دقیق مکان ما را تقریباً در یک بی‌اطلاعی کامل از سرعت بعدی الکترون هم به لحاظ اندازهٔ سرعت، هم دربارهٔ جهت آن باقی می‌گذارد.

هایزنبرگ این نتیجه‌گیری بنیادی را با در نظر گرفتن یک اندازه‌گیری مکان با یک میکروسکوپ خاص ملموستر کرد. او می‌دانست (پس از یادآوری بور) که توان تفکیک هر میکروسکوپ به طول موج نور تشکیل دهندهٔ تصویر بستگی دارد: هر چه طول موج کوتاهتر باشد توان تفکیک بیشتر است. برای اندازه‌گیری دقیق مکان الکترون در یک اتم یک طول موج کوچک لازم است، در واقع به‌قدری کوچک که پرتوهای «نور» لازم واقعاً پرتوهای گاما هستند، فوتونهای این پرتو بسیار پُرانرژی‌اند. هر فوتون پرتو-گاما حامل انرژی بسیار زیادتر از انرژی‌ای است که الکترون را در یک اتم نگه می‌دارد. هرگاه چنین فوتونی با الکترون اتمی برخورد کند و آن را در میکروسکوپ هایزنبرگ پراکنده سازد، احتمالاً طوری الکترون را از اتم بیرون می‌اندازد که هرگز بازنگردد.

نتیجه آنکه الکترون و اتم حاوی آن، در فرایند اندازه‌گیری، چنان آسیب شدیدی می‌بینند که برای اندازه‌گیری‌های بیشتر مفید نخواهند بود. یک اندازه‌گیری بامعنی برای یک الکترون خاص امکان‌پذیر است، امّا نه بیشتر؛ و بی‌شک غیرممکن است که به‌طور پیوسته، دائماً مسیر الکترون را در اتم یا هر جای دیگر دنبال کنیم. نظریه‌پردازان کوانتومی می‌گویند اگر نتوان مسیرهای الکترون را اندازه‌گیری کرد، در این صورت نظریه آنها را به رسمیت نمی‌شناسد. حرکت مداری الکترونهای اتمی، آن‌طور که بور و زومرفلد تصویر می‌کردند، ممکن نیست.

اگر الکترونهای اتم آن‌طور که استدلال هایزنبرگ نشان می‌دهد گریزپا باشند، چگونه می‌توانیم امیدوار باشیم تصویری مفید از ساختار الکترونی اتم تشکیل دهیم که حاوی عدم قطعیت باشد و باز هم چیزی دربارهٔ الکترونهای درون یک اتم آشکار کند؟ بدیهی است هیچ نظریهٔ اتمی بر مبنای تک‌تک الکترونهایی که مسیرهای معینی را دنبال کنند پذیرفتنی نیست. امّا خوشبختانه ما به نظریه‌ای از این نوع نیازی نداریم. می‌توان نظریهٔ اتمی را تدوین کرد که به جای قطعیتها با احتمالات سروکار داشته باشد.

مثلاً، فرض کنیم مشاهداتی را روی اتمهای بسیاری به‌عمل آوریم. چون اندازه‌گیریهای مکان‌یابی-الکترون احتمال آشفتگی ویرانگر اتم مشاهده شده را دارند، می‌باید متوجه باشیم که هر اتم فقط برای یک مشاهده مناسب است. اگر میکروسکوپ پرتو گامای هایزنبرگ را به‌کار گیریم، هر اندازه‌گیری بیش از یک مکانِ ممکن الکترون در اتم را ثبت نمی‌کند. نتایج بسیاری از چنین اندازه‌گیریها، تصویر آماری ترکیبی از جایگاه الکترونهای اتم را به دست می‌دهد.

میکروسکوپ هایزنبرگ هرگز تحقق نیافته است. این یک «آزمایش فکری» است که اصول فیزیکی را نقض نمی‌کند، امّا به لحاظ فنی عملی نیست. ولی روشهای کاملاً تثبیت‌شدهٔ پراش پرتو-x همان کار

را انجام می‌دهد. با تحلیل پرتوهای x بازتابیده از بسیاری اتمهای درون یک بلور، می‌توان نقشه‌ای آماری ساخت که نشان دهد الکترونها کُجا در اتمهای بلور جای گرفته‌اند و در کجا نیستند. تهیهٔ نقشه‌های آماری خوب از چگالیهای الکترون در اتمها به طور تجربی دشوار است؛ امّا توابع موج شرودینگر اصولاً همان داستان را می‌گوید، و یک تصویر آماری پیراسته از الکترونها در اتم را می‌توان با به‌کارگرفتن یک فرمولبندی مناسب از معادلهٔ شرودینگر محاسبه کرد. برای اتم آزاد، این معادله تابع موج ψ را در هر مکانی از این اتم مشخص می‌کند، و ψ^2 احتمال یافتن الکترون در آن مکان را محاسبه می‌کند.

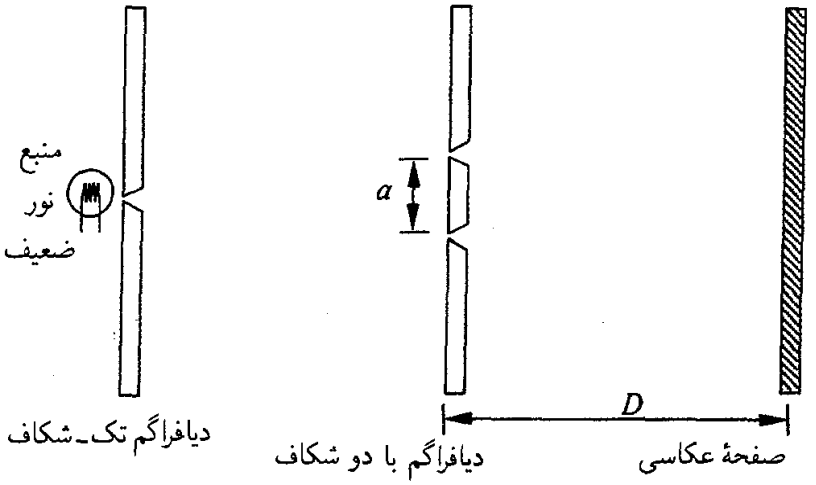
طرح اصل هایزنبرگ فراتر از تکانه و مکان به متغیرهای دینامیکی دیگر گسترش می‌یابد و با همان شیوهٔ عدم قطعیت دو جانبه به هم مربوط می‌شوند. مهمترین این ارتباطها رابطهٔ انرژی و زمان با یکدیگر است. هرگاه Δt و ΔE عدم قطعیتهای زمان و انرژی باشند، در این صورت، در قیاس با برابری ـ نابرابری معادلهٔ (۳) خواهیم داشت،

$$\Delta E \Delta t \geqslant \frac{h}{2\pi} \qquad (۴)$$

کُنه مکانیک کوانتومی

معادلهٔ شرودینگر این ویژگی را دارد که برای ریاضیدانان، عادی و بی‌هیجان است. این معادله «خطی» است به این معنی که هرگاه دارای پاسخهای Ψ_1 و Ψ_2 باشد، در این صورت برهم‌نهی $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$ نیز پاسخ آن است. آزمایشگران که از طریق آزمودن ریاضی اظهارنظرهای نظریه‌پردازان امرار معاش می‌کنند، راههای مبتکرانه و بدیعی برای مشاهدهٔ حالات برهم‌نهش یافته‌اند، و تحقیقاتشان آنان را فراتر از ریاضیات، به آنچه ریچارد فاینمن آن را «کُنه مکانیک کوانتومی» می‌نامد راهنمایی کرده است.

نخستین نمونه از آزمایشهای طراحی شده برای نشان دادن حالات برهم‌نهشی مرکب از یک منبع نور، دو دیافراگم، یکی شامل یک شکاف و دیگری شامل دو شکاف بود، و سرانجام یک صفحهٔ عکاسی به عنوان آشکارساز به‌کارگرفته می‌شد (شکل ۱۹ـ۱). اگر طول موج λ نور، در مقایسه با فاصلهٔ a بین

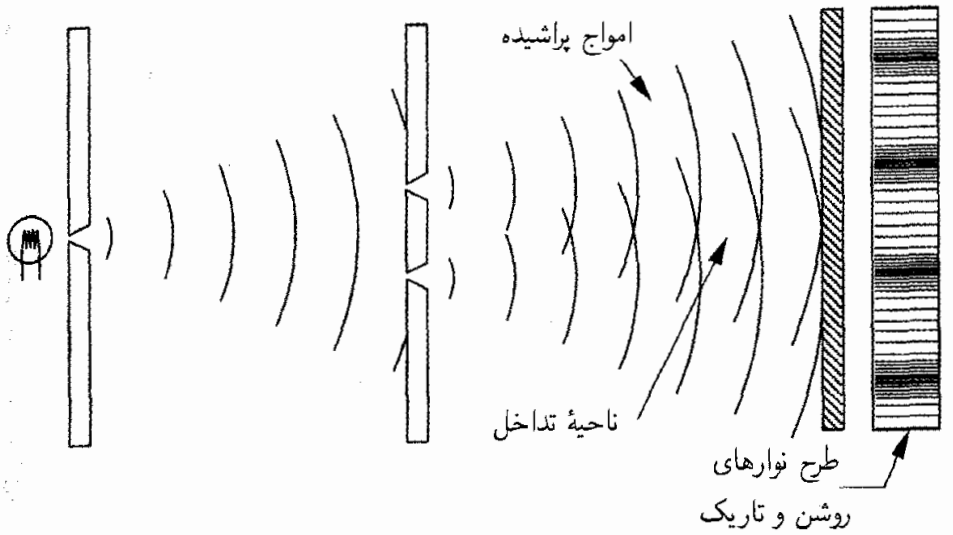


شکل ۱۹ـ۱ آزمایش با دو شکاف

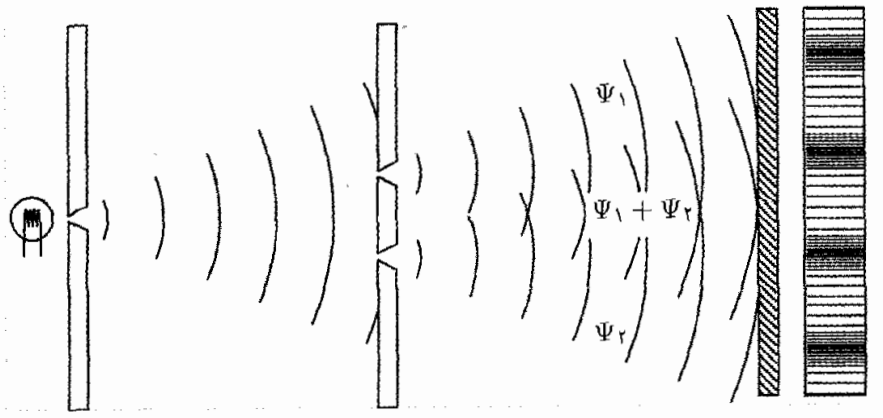
دو شکاف، کوچک باشد، روی صفحهٔ عکاسی نوارهای روشن و تاریک ظاهر می‌شود، که فاصلهٔ مراکز نوارهای روشن $\frac{\lambda D}{a}$ است. D فاصلهٔ بین شکاف و صفحهٔ عکاسی است.

از اوایل قرن نوزدهم، نوارهای روشن و تاریک، در آزمایشهایی از این نوع، به‌عنوان دلیل پدیده‌های «تداخل» پذیرفته شده بود. نور را قطار موجی در نظر می‌گرفتند که پس از عبور از یک شکاف، «پراشیده» (پراکنده) می‌شد. دو شکاف دو قطار موج پراشیده ایجاد می‌کند که همپوشانی دارند (شکل ۱۹ـ۲).

در ناحیهٔ همپوشانی، جایی که ستیغهای یک قطار موج بر پاستیغهای قطار دیگر می‌افتند، هر دو خنثی می‌شوند، و جایی که ستیغها بر ستیغها و پاستیغها بر پاستیغها می‌افتند تقویت می‌شوند. نوارهای روشن جایی است که تقویت، و نوارهای تاریک جایی است که خنثی شدن صورت می‌گیرد. همهٔ اینها به‌آسانی به زبان ریاضی مکانیک موجی شرودینگر بیان می‌شود. قطارهای موج پراشیدهٔ جدا از هم با دو تابع موج Ψ_1 و Ψ_2 مشخص می‌شوند و ناحیهٔ همپوشانی، جایی که تداخل صورت می‌گیرد با $\Psi_1 + \Psi_2$ (شکل ۱۹ـ۳).



شکل ۱۹ـ۲ پراش و تداخل در آزمایش با دو شکاف



شکل ۱۹ـ۳ تابعهای موج برای آزمایش با دو شکاف

معمولاً، آزمایش دو شکاف با منبع نور قوی که فوتونهای بسیاری را در یک زمان به دستگاه می‌فرستد انجام می‌گیرد، امّا آزمایش را با منبع ضعیفی نیز می‌توان انجام داد که در هر زمان تنها یک فوتون از فضای بین دیافراگم دو شکاف و صفحهٔ عکاسی بگذرد. حتی در این وضع، اگر زمان کافی وجود داشته باشد تا صفحهٔ عکاسی فوتونهای بسیاری را آشکار کند، نقش تداخل نوارهای روشن و تاریک ظاهر می‌شود.

به گفتهٔ فاینمن، این «پدیده‌ای است که توضیح آن به طریق کلاسیک غیرممکن، مطلقاً غیرممکن است.» مسئله این است که این آزمایش ما را با منظرهٔ جالب تداخل یک تک فوتون با خودش روبه‌رو می‌کند. فوتون از هر دو شکاف می‌گذرد و حالت برهم‌نهشی که با $\Psi_1 + \Psi_2$ نشان داده می‌شود ایجاد می‌کند، و نتیجهٔ آن یک طرح تداخل است. از این نتیجه‌گیری عجیب و غریب گُریزی نیست. اگر یک شکاف را مسدود کنیم، یا فوتون را وادار کنیم که از یک شکاف بگذرد، نقش تداخل ناپدید می‌شود.

چگونه یک تک فوتون می‌تواند در یک زمان، از دو شکاف جدا از هم بگذرد؟ فاینمن از یافتن توضیحی برای معمای چنین آزمایشهای تداخلی اطمینان ندارد. «ما نمی‌توانیم این معما را به صورت 'تبیین و باز نمودن'، چگونگی کار آن، توضیح دهیم. ما به شما می‌گوییم که چگونه کار می‌کند. برای اینکه به شما بگوییم که چگونه کار می‌کند، دربارهٔ ویژگیهای اساسی همهٔ مکانیک کوانتومی مطالبی گفته‌ایم.» جان ویلر یک فوتون در دستگاه تداخل را به صورت یک «اژدهای دودآلود» توصیف می‌کند. خاستگاه آن، دُمش را نشان می‌دهد و جایی که آشکارسازی می‌شود، دهانش را نشان می‌دهد، امّا در جاهای دیگر فقط دود وجود دارد: «در این فاصله حق نداریم دربارهٔ محل حضورش حرفی بزنیم.»

چنین غرابت و شگفتی منحصر به فوتونها نیست. آزمایشهای تداخل با باریکه‌ای از الکترونها، نوترونها و حتی اتمها نیز انجام شده است. همهٔ این چیزها سرشت موجی‌شان را در طرحهای تداخل واضح نشان می‌دهند و همان‌قدر دودآلودند که مسیر فوتونها در عبور از دستگاه.

دوگانگی[1] و مکمّلیت[1]

آزمایش تداخلِ دو شکاف، معنی و مفهوم دیگری نیز دارد. این آزمایش تصویر جالبی از مفهوم موجی-ذره‌ای برای ما فراهم می‌کند. موجها با طرح نوارهای تاریک و روشن نشان داده می‌شوند. حتی می‌توانیم طول موج λ را فقط با اندازه‌گیری فاصلهٔ بین نوارهای روشن، که برابر با $\frac{D\lambda}{a}$ است، محاسبه کنیم. نگاهی دیگر به این آزمایش نمایش متقاعد کننده‌ای هم از رفتار ذره به‌دست می‌دهد. وقتی فوتونها به صفحهٔ عکاسی می‌رسند آشکارسازی آنها در رویدادهایی کاملاً جایگزیده صورت می‌گیرد: ورود هر فوتون یک خال کوچک در امولسیون صفحهٔ عکاسی تولید می‌کند. وقتی بسیاری از این خالها در نوارهای روشن خاصی گِرد هم آیند، طرح تداخل ایجاد می‌شود. این خالهای منفرد حاکی از موجودات ذره‌گونه است، و اگر آنها را جداگانه درنظر بگیریم چیزی دربارهٔ رفتار موجی نمی‌گویند.

1. Duality 1. Complementarity

امّا (خوشبختانه) این آزمایش به ما نمی‌گوید که هر فوتون همزمان یک موج و ذره است. با مشاهدهٔ نوارهای طرح تداخل امواج را می‌بینیم، یا مشاهدهٔ صفحهٔ عکاسی ذرات را مشاهده می‌کنیم، امّا هرگز هر دو را در یک زمان نمی‌بینیم.

به نقش حیاتی ناظر در این مورد توجه کنید. ما با یک مشاهده امواج یا ذرات را مشخص می‌کنیم: امواج را با نقش تداخلی، و ذرات را با خالها. بور اصرار می‌ورزد که تنها راه رسیدن به واقعیت فیزیکی که در نظریهٔ کوانتومی مجاز شمرده می‌شود، مشاهده‌های تجربی است. او معتقد بود «مکانیک کوانتومی فقط دربارهٔ یک چیز است: ما با ابزار و وسایل خودمان چه می‌توانیم بکنیم.» ابزارآلات ما در دود نفوذ می‌کنند و موجودات معینی را نمایان می‌سازند: امواج، یا ذرات.

امّا، آن‌طورکه فاینمن به ما خاطرنشان می‌کند، ابزارووسایل، چیزی را «توضیح» نمی‌دهند. معمای دووجه مکانیک‌کوانتومی ــ موج و ذره ــ هنوز با ما است. بور به مسئلهٔ دوگانگی صرفاً با پذیرفتن آن به همان صورت و واردکردن آن در مبانی نظریهٔ کوانتومی، پاسخ می‌دهد. این یک جنبه از فلسفه یا اصل بور از «مُکمّلیت» بود. ایده‌ای که در مورد مسئلهٔ دوگانگی به‌کار می‌رود این است که، گرچه آزمایشها جنبه‌های موجی و ذره‌ای موجوداتی مانند فوتونها را متقابلاً گردنیامدنی می‌یابند، هر دوی این خواص برای توصیف فیزیکی لازم و ضروری‌اند. آنها در اصطلاح بور، ویژگیهای «مکمّل» فوتونها (یا الکترونها، نوترونها، اتمها و مانند آنها) هستند.

برای بور، این طرح شکاف به فراتر از پدیده‌های موجی ـ ذره‌ای گسترش می‌یابد. برداشت او از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ این بود که تکانه و مکان زوج مکمّلی از متغیرها هستند و همچنین‌اند انرژی و زمان. هر دو متغیر یک زوج مکمّل برای فیزیک ضروری است، امّا آنان متقابلاً گردنیامدنی‌اند زیرا نمی‌توان آنها را به‌طور همزمان با قطعیت اندازه‌گیری کرد.

یعقوب[1] حقیقی

اینشتین هرگز نتوانست ضرورت مطلق عدم قطعیت مکانیک کوانتومی را بپذیرد. او در نامه‌ای به ماکس بورن می‌نویسد: «مکانیک کوانتومی بسیار درخور توجه است، امّا ندایی درونی به من می‌گوید که این یعقوب حقیقی نیست. این نظریه چیزهای زیادی دارد، امّا به‌ندرت ما را به اسرار خداوند نزدیک می‌کند. به هر حال متقاعد شده‌ام که او تاس‌بازی نمی‌کند.» سالهای بسیار در یک سلسله مباحثه با بور، با انواع ترفندها کوشید تا اصل هایزنبرگ را نقش برآب کند. او هرگز به‌طور کامل موفق نشد، امّا کوشش نهایی‌اش بور و جانشینان بور را دهها سال دچار حیرت کرده بود.

این حمله به نامعین بودن مکانیک کوانتومی را اینشتین و دو تن از دستیارانش، بوریس پادولسکی[2] و ناتان روزن[3]، در مقالهٔ کوتاهی در سال ۱۹۳۵ شروع کردند. استدلال نویسندگان مقاله این بود که مکانیک کوانتومی کامل نیست، زیرا نمی‌تواند به بعضی اجزای قطعی واقعیت فیزیکی برسد که بنا به ادعای آنان با

۱. Jacob: یعقوب، یکی از دو پسر دوقلوی اسحاق که ارشدیت یکی از آن دو مشکوک بود.

2. Boris Podolsky 3. Nathan Rosen

آزمایش دست یافتنی است. یک کمیّت فیزیکی به عنوان یک «جزءِ واقعیت فیزیکی توصیف می‌شود» هرگاه «بدون آنکه سیستمی را به نوعی آشفته کند، بتوانیم مقدار آن را با قطعیت پیش‌بینی کنیم.»

آنچه را که اینشتین، پادولسکی و روزن مطرح می‌کردند ــ یعنی اندازه‌گیری مقدار یک کمیت با قطعیت، بدون آشفته کردن سیستم موجود ــ آن چیزی بود که عدم قطعیت کوانتوم مکانیکی ممنوع می‌کرد. امّا اینشتین و نویسندگان همکارش طرح مبتکرانه‌تری برای نفی عدم قطعیت داشتند. آنان طرفدار کار با چشمه‌ای از زوج ذرات همبسته (یا به گفتهٔ شرودینگر) «به هم پیچیده»[۴] بودند. عضوهای این زوج (معمولاً فوتونها، در موارد متعدد آزمایش عملی) در جهات مخالف از چشمه دور می‌شوند، و نوعی خاصیت همبستگی مانند P [قطبش (polarization)]، هرگاه فوتونها دخیل باشند]، در دو مکان A و B بسیار دور از هم اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش را می‌توان طوری طراحی کرد که همبستگی نتایج مخالف در نقاط A و B را تضمین کند، حتی اگر آنها کیلومترها فاصله داشته باشند. اگر در A، $P = +۱$ اندازه‌گیری شود (با یکاهای مناسب)، در این صورت آزمایشگر می‌داند که در B، $P = -۱$ است بدون آنکه در آنجا اندازه‌گیری واقعی انجام شود.

آیا این آزمایش، شرط اینشتین ـ پادولسکی ـ روزن را برای مشخص کردن خاصیت P به عنوان یک جزءِ واقعیت فیزیکی برآورده می‌کند؟ این آزمایش با قطعیت مقدار P را آن‌طور که باید پیش‌بینی می‌کند، و اگر اثر اندازه‌گیری در A «موضعی» باشد، به طوری‌که اثر آن به B دست‌کم با سرعت فراتر از سرعت نور نرسد، می‌توانیم آزمایش را طوری طراحی کنیم که نتیجه‌ای در B به دست دهد بدون آنکه به‌گونه‌ای فوتون را در آنجا آشفته کند. با تکیه بر این «فرض موضعیت (locality assumption)» و مزیتهای چشمگیر از همبستگی ذره، اینشتین، پادولسکی و روزن نشان دادند چگونه می‌توان ویژگیهای فیزیکی قطعی را به دست آورد، که با روشهای مکانیک کوانتومی دسترسی به آن امکان ندارد. آنان به این نتیجه‌گیری رسیدند که مکانیک کوانتومی کامل نیست، زیرا «واقع‌گرایی موضعی» این جهان را نادیده می‌گیرد (این عبارت از آنان نیست).

فیزیکی با اجزای واقعیت موضعی می‌باید متغیرهایی داشته باشد تا آن اجزا را، قاعدتاً با یک شیوهٔ علیّتی، توصیف کند. چنان متغیرهایی برای مکانیک کوانتومی پنهان است، امّا اگر وجود داشته باشند، چنانکه اینشتین ـ پادولسکی ـ روزن به طور ضمنی استدلال می‌کردند، می‌باید نظریهٔ ژرفتری وجود داشته باشد که با به‌کارگرفتن آنها عدم قطعیت مکانیک کوانتومی از بین برود. آیا این «نظریه‌های متغیر پنهان» واقعاً وجود دارند؟ مرحلهٔ بعدی در جستجوی طولانی معنی مکانیک کوانتومی متمرکز بر این پرسش است.

قضیهٔ بِل

جان بل[۱] فیزیکدان نظری ایرلندی آنقدر خودسر بود که خود را یک «مهندس کوانتومی» بنامد. او در آزمایشگاه عظیم اروپایی ذرات ـ بنیادی در مرز فرانسه، نزدیک ژنو مستقر بود. این آزمایشگاه با نام سِرن (CERN)

4. Entangled 1. John Bell

مخفف مرکز اروپایی تحقیقات هسته‌ای (European Center for Nuclear Research) مشهور است. او به‌عنوان یک «مهندس» سهم مهمی در نظریهٔ کانونی کردن باریکه در شتاب دهندهٔ بزرگ-ذره داشت. او در بیشترین دوره کاری‌اش علاقهٔ شدیدی به مباحثهٔ پایان‌ناپذیر دربارهٔ مبانی مکانیک کوانتومی داشت. در سال ۱۹۶۴ که بِل سی و چهار ساله بود، در مجلّه‌ای ناشناخته مقاله‌ای کوتاه ولی دشوار با عنوان «دربارهٔ پارادوکس اینشتین-پادولسکی-روزن»، منتشر کرد. لُبّ مطلب مقاله، قضیه‌ای بود که به‌صورت یک نامعادلهٔ ریاضی تدوین شده بود که برای هر نظریهٔ متغیر-پنهان که فرض موضعیت را ارضا می‌کرد معتبر بود، امّا چنانکه انتظار می‌رفت برای مکانیک کوانتومی معتبر نبود. در این مورد بار دیگر بگومگوهایی با اینشتین، پادولسکی و روزن مطرح بود.

به مدت پنج سال، مقالهٔ بل اَغلب نادیده گرفته شد. سپس ناگهان فیزیکدانان تجربی به این نتیجه رسیدند که قضیهٔ بل چیزی بیش از راه دیگری برای رسیدن به استنتاجات اینشتین-پادولسکی-روزن است؛ نامعادله را می‌توان به‌طور تجربی آزمود. جرمی برنشتین[2] در زندگینامهٔ مختصر بِل می‌نویسد، «آنچه در چنین امتحانی به خطر می‌افتاد، چیزی کمتر از معنی و اعتبار نظریهٔ کوانتومی نبود. معتبر بودن نامعادلهٔ بل، به معنی آن بود که همهٔ اظهارات شهودی اینشتین دربارهٔ ناکاملی اساسی نظریهٔ کوانتومی همواره درست بوده است. نقض نامعادله به معنی آن بود که دست‌کم همچنانکه بسیاری از دانشمندان باور دارند، نظر بور و هایزنبرگ همواره درست بوده و بازگشت به فیزیک کلاسیک غیرممکن است.»

آزمایشها آسان نبودند. روشهای مناسب برای تولید فوتونهای همبسته (در هم پیچیده) می‌باید توسعه می‌یافت. فوتونها را می‌باید با لوله به مکانهایی منتقل می‌کردند که کیلومترها از هم فاصله داشتند، تا همبستگیها را بتوان بررسی و زمان بین یک اثر در یک مکان و نتیجهٔ آن را در مکان دیگر اندازه‌گیری کرد. نخستین آزمایشها در اوایل سالهای ۱۹۷۰ گزارش شد و بعداً بسط و پالایش یافتند تا نقاط ضعف آن را از بین ببرند. اکنون داده‌های تجربی آشکارا با قضیهٔ بل مخالف‌اند؛ و این به معنی پیروزی مکانیک کوانتومی و شکست مفهوم نظریهٔ جبری موضعی (محلی) اینشتین است.

بل به برنشتین گفت از جهاتی احساس تأسف می‌کنم: «برای من چنان معقول است بپذیرم که فوتونها در آن آزمایشها برنامه‌هایی با خود داشته‌اند، برنامه‌هایی که از پیش همبسته بوده‌اند، برنامه‌هایی که به فوتونها می‌گوید چه رفتاری داشته باشند [آن‌طور که واقعیت‌گرایی موضعی (محلی) اینشتین ممکن می‌دانست]. این امر به قدری منطقی بود که فکر می‌کنم زمانی اینشتین متوجه آن شد، و دیگران [مثلاً بور، هایزنبرگ، بورن، پائولی] از توجه به آن امتناع کردند، او مردی معقول و منطقی بود... برای من مایهٔ تأسف است که ایدهٔ اینشتین مؤثر نیست. چیز منطقی مؤثر نیست.»

بنابراین مفهوم موضعی بودن که اینشتین امیدوار بود بتواند به آن تکیه کند تأیید نشد و به جای آن، آزمایشها یک «ناموضعی بودن» را آشکار کردند که اینشتین آن را وهمناک (spooky) می‌نامید. اندازه‌گیری روی یک فوتون از یک زوج به هم پیچیده احتمالاً بلافاصله، یا به هر حال سریعتر از سرعت

2. Jeremy Bernstein

نور بر اندازه‌گیری فوتون دیگر اثر می‌کند. آیا این اثر با نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین مبنی بر اینکه هیچ سیگنالی نمی‌تواند سریعتر از سرعت نور منتشر شود، مغایرت دارد؟ در واقع نه. ناموضعی بودن کوانتوم ـ مکانیکی نمی‌تواند وسیله‌ای برای ارسال پیامها باشد زیرا داده‌های اندازه‌گیریها کُلاً کاتوره‌ای‌اند و تحت کنترل آزمایشگر نیستند؛ شما آنچه را که به شما می‌رسد دریافت می‌کنید، نه آنچه را که می‌خواهید در پیام باشد. بنابراین به‌طوری که آبنر شیمونی[1] می‌نویسد، «به رغم ناموضعی بودن کوانتوم مکانیکی همزیستی مسالمت‌آمیزی بین مکانیک کوانتومی و نظریهٔ نسبیت وجود دارد.»

دانشمند به‌عنوان انسان‌گرا

شرودینگر یکی از زبان‌آورترین سخنگویان زمان خود برای انسان‌گرایی در علم بود. در پاسخ به نخوت کسانی که تصور می‌کردند علم فیزیک پیش از گالیله وجود نداشت و مفاهیم فیزیک کوانتومی جدید و بی‌همتاست می‌گفت: «نظریهٔ کوانتومی به ۲۴ قرن پیش به لئوکیپوس[2] و دموکریتوس می‌رسد. آنان نخستین ناپیوستگی، یعنی اتمهای منزوی تثبیت شده در فضای خالی را ابداع کردند. تصور ما از ذرهٔ بنیادی به لحاظ تاریخی از تصور آنان دربارهٔ اتم به ما به ارث رسیده است... علم فیزیکی به شکل امروزی آن اولاد مستقیم و استمرار بی‌وقفهٔ علم باستانی است.» او بیم آن را داشت که نظریه‌پردازان تنها به گفتگو در میان خودشان بپردازند: «علم نظری بدون آنکه بداند ساختارهای آن مربوط به هم و تعیین‌کننده‌اند، سرانجام به‌صورت چارچوبی از مفاهیم و کلمات درمی‌آید که بر فرهنگ جامعه تسلط می‌یابد و جزئی از کل جهان می‌شود ــ می‌گویم علم نظری، اگر این امر فراموش شده باشد و جایی که مبتکران آن غرق تفکر در چیزی شوند که آن را، در بهترین حالت، گروه کوچکی از یاران بسیار نزدیکشان می‌فهمند ــ لزوماً از بقیهٔ فرهنگ بشری جدا می‌شوند، و در طولانی‌مدت محکوم به پوسیدگی و تحجّر خواهند شد.»

فیزیکدانان، نظریه‌های خود را در وظایف روزانه برای تنظیم داده‌ها و طراحی آزمایشها به‌کار می‌گیرند. نظریه‌ها در صورتی «کار می‌کنند» که پاسخگوی نیازهای خاص فیزیکدان باشد، امّا برای جهان بیرون از مجله‌ها و بدتر از آن برای فرهنگ نواحی دیگر جهان «خلاقیتهای» ذهنی فیزیکدانان، به‌نظر می‌رسد به خط هیروگلیف نوشته شده باشد. شرودینگر نوشت، «آیا این به معنی هدفی خودخواهانه و بسیار بعیدی خواهد بود اگر گاه و بیگاه فکر کنیم مقالات علمی ما ۳۰۰۰ سال بعد چه خواهند شد؟ علم به کلی تغییر خواهد کرد. آیا کسی معنی و منظور ما را، همان طور که ما منظور ارشمیدس را می‌فهمیم، خواهد فهمید؟»

شرودینگر معتقد بود که فیزیکدانان و دانشمندان دیگر باید به خود جرئت اظهارنظر در فراسوی تخصص‌هایشان بدهند. او در پیشگفتار کتابش با عنوان «زندگی چیست؟» عبارات دلگرم‌کنندهٔ شگفت‌انگیزی مبنی بر به‌کار بستن مطالب بین رشته‌ای دارد. او احساس می‌کرد باید برای فقدان مهارتش در بعضی از جنبه‌های موضوعِ موردنظرش معذرت خواهی کند:

1. Abner Shimony 2. Leucippus

فرض بر این است که یک دانشمند، از بعضی موضوعها شناختی کلی و تمام‌عیار دارد، و بنابراین، انتظار می‌رود دربارهٔ موضوعی که مهارت و تسلط ندارد چیزی ننویسد. این نوعی وظیفهٔ شرافتمندانه تلقی می‌شود. برای منظور فعلی، درخواست من چشم‌پوشی از این وظیفهٔ شرافتمندانه است، تا آزادی لازم برای دنبال کردن اهداف به‌دست آید. توجیه من به‌صورت زیر است:

ما وارث اشتیاق شدید پدرانمان برای معلوماتی وحدت یافته و فراگیر هستیم. همان نامی که به بلندپایه‌ترین مؤسسات یادگیری [*university*] داده شده است به ما یادآور می‌شود، که از قدیم و در سراسر قرنهای متعدد جنبهٔ جهانی *universal* تنها چیز دارای اعتبار کامل بوده است. امّا گسترش شاخه‌های گوناگون علم هم در عرض و هم در عمق طی صد و چند سال اخیر ما را با معمای عجیبی مواجه کرده است. ما به‌وضوح احساس می‌کنیم که فقط اکنون مواد معتبری را برای به‌هم پیوستن مجموع همهٔ آنچه را که وجود دارد به‌صورت یک کل شناخته شده به‌دست آورده‌ایم. امّا از سوی دیگر برای یک ذهن تنها تقریباً غیرممکن است که بر چیزی بیش از بخش تخصصی‌اش به‌طور کامل تسلط داشته باشد.

من نمی‌توانم راه‌گریزی از این محظور بیابم (مبادا هدف حقیقی ما برای همیشه از دست برود) جز آنکه بعضی از ما به سنتزی از واقعیتها و نظریه‌ها گرچه به‌صورت دانشی دست دوم و ناکامل بپردازد و خطر مفتضح کردن خود را بپذیرد.

با عذرخواهی فراوان

vii

فیزیک هسته‌ای

خلاصهٔ تاریخی

مضمون کلی در این بخش از کتاب، بار دیگر مانند بخش ۶، دربارهٔ ساختمان اتم است. به طور خلاصه، هر اتم شامل یک بخش مرکزی با بار مثبت به نام هسته است. این هسته را ساختارهای پوسته‌مانندی از الکترونها که بار منفی دارند، احاطه کرده است. هسته نسبت به بقیهٔ اتم بسیار کوچک است («مگسی است در یک کلیسای بزرگ») امّا بسیار سنگین: هسته تقریباً همهٔ جرم اتم را در بر دارد. من هستهٔ اتم را به اختصار در فصل ۱۶ به‌عنوان بخشی از میراث بور و جانشینان او، ذکر کردم که نظریهٔ اتم را در حوزهٔ الکترونی ارائه کردند. امّا داستان بیشتر هستهٔ اتم به‌صورت موجود فیزیکی بنیادی جداگانه باقی‌ماند که می‌باید دربارهٔ آن گفتگو شود.

زمان را از سالهای ۱۹۲۰، زمانی که توسعهٔ مکانیک کوانتومی در بخش ۶ را ترک کردیم، تا سالهای ۱۸۹۰ که نخستین مطالعات آشکارترین مظهر هستهٔ اتمی یعنی رادیواکتیویته مطرح شد، باز می‌گردانیم. دو کاشف بزرگ در پژوهش رادیواکتیویته، ماری کوری و ارنست رادرفورد بودند، کوری در پاریس و رادرفورد نخست در مونترآل، سپس در منچستر و سرانجام در کمبریج بود. ماری کوری و همسر او پی‌یر ابتدا به جداسازی عنصر رادیواکتیو رادیم اقدام کردند. رادرفورد سه «پرتو» گسیل یافته از عناصر رادیواکتیو را مشخص کرد و آنها را α، β و γ نامید. او و شریک نوجوان کار پژوهشی او، فردریک سادی[1]، نشان دادند که کیمیاگری (نام مناسبتر آن تبدیل هسته‌ای *transmutation*) تحقق یافته است: یک عنصر رادیواکتیو به عنصر دیگر تبدیل می‌شود. رادرفورد، هانس گایگر[2] و ارنست مارسدن[3] با استفاده از ذرات α (در واقع آنها یونهای هلیم با دو بار مثبت‌اند، نه پرتو) و بمباران کردن ورقه‌های نازک فلزی با آن ذرات دلیل محکمی برای وجود هسته در یک سری آزمایشها به‌دست آوردند که در سال ۱۹۱۳ کامل شد.

مُدل رادرفورد از هسته، آن را فوق‌العاده کوچک، امّا با اندازهٔ محدود و متناهی نشان می‌دهد. این موضوع پرسش دیگری را مطرح کرد: اجزای سازندهٔ هسته چه هستند؟ یکی از آنها آشکارا پروتون، کوچکترین هسته، یعنی هستهٔ هیدروژن بود. دیگری، نوترون بود که در سال ۱۹۳۲ به‌وسیلهٔ جیمز

1. Frederick Soddy 2. Hans Geiger 3. Ernest Marsden

چادویک[1] که معاون رادرفورد در آزمایشگاه کاوندیش در کمبریج بود کشف شد. نوترون جرم هسته را در حدود پروتون افزایش می‌دهد، امّا بار الکتریکی ندارد.

ابزار آزمایشی مطلوب رادرفورد ذرهٔ α بود. او با این ذره به مفهوم هسته و نخستین نمونهٔ «شیمی هسته‌ای» دست یافت: او دریافت که با بمباران گاز نیتروژن به‌وسیلهٔ ذرات α پُر انرژی، نیتروژن را به اکسیژن تبدیل می‌کند. چادویک با بمباران برلیم با ذرات α، نوترون تولید کرد. در پاریس ایرن ژولیو کوری (دختر ماری کوری) و همسرش فردریک[2] بور و آلومینیم را با ذرات α بمباران کردند تا عناصر رادیواکتیو مصنوعی که در طبیعت یافت نمی‌شود، به‌دست آورند.

انریکو فرمی[3]، در رُم پرتابهٔ مؤثر دیگری برای آزمایشهای بمباران کردن یافت: نوترونهای «کُند» یعنی نوترونهای کم‌ـانرژی. بسیاری از عناصر پس از اکسیژن در جدول تناوبی، نوترونهای کُند را جذب می‌کنند و در این فرایند رادیواکتیو می‌شوند. گیراندازی نوترون تأثیر ویرانگری بر سنگینترین عنصر، اورانیم، دارد و سبب می‌شود هسته‌اش از هم پاشیده یا به دو پارهٔ تقریباً با جرم برابر «شکافته» شود. فرمی و همکارانش نخستین بمباران اورانیم با نوترون را در سال ۱۹۳۵ انجام دادند، امّا دربارهٔ نتایج آن دچار سوءِ تعبیر شدند. تا آنکه در سال ۱۹۳۸ لیز میتنر[4] و اُتو فریش[5] در آن موقع در سوئد، و اُتو هان[6] و فریتس اشتراسمان[7] در برلین مفهوم شکافت هسته‌ای را مطرح کردند.

در یک رویداد شکافت، یک نوترون مصرف و دو یا سه نوترون تولید می‌شود. اگر توجه دقیقی به نوترونهای از دست رفته و نوترونهای به‌دست آمده داشته باشیم، نوترونهای تولید شده در رویدادهای شکافت می‌توانند سبب شکافتهای بیشتری شوند، در نتیجه یک واکنش هستهٔ زنجیری تداوم می‌یابد. هر شکافت مقدار انرژی زیادی آزاد می‌کند. یک واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای اگر کنترل شود منبع توان مفیدی خواهد بود، و اگر کنترل نشود ممکن است به‌عنوان یک بمب به‌کار گرفته شود که قادر است شهرهایی را با خاک یکسان کند. در یک آزمایش پیچیدهٔ بی‌سابقه، فرمی در سال ۱۹۴۲ نشان داد که چگونه واکنش زنجیره‌ای اورانیم کنترل می‌شود. طی سه سال بعد، گروه برجسته و ممتازی از فیزیکدانان، مهندسان، شیمیدانان و ریاضیدانان با کار در لوس آلاموس، نیو مکزیکو بمبی را طراحی کردند و ساختند ــ که وقتی آن را آزمایش کردند خودشان به وحشت افتادند.

1. James Chadwick 2. Frédéric 3. Enrico Fermi 4. Lise Meitner 5. Otto Frisch
6. Otto Hahn 7. Fritz Strassmann

۲۰

گشودن درها

ماری کوری

ماریا و ماری

در یک کلام زندگی او قهرمانانه بود. ماری کوری هر کاری را که به عهده می‌گرفت، موانع هر چه بود مطلقاً توقف‌ناپذیر بود. وقتی بیست‌ویک ساله بود، در نامه‌ای به یکی از دوستانش نوشت، «اصل اول: هرگز نگذار کسانی یا رویدادهایی تو را منکوب کنند» در آن زمان، او زندگی خود را به‌عنوان معلم سرخانه در شهرکی در لهستان می‌گذراند و رؤیای آموزش دانشگاهی در پاریس را درسر داشت. سرانجام زندگی دانشجویی در سوربون واقعیت یافت و با وجود آموزش متوسطهٔ نامنظم در ورشو، او بر نقصانها فائق آمد. ابتدا در امتحان علوم (در میان ۱۸۲۵ شاگرد، ۲۳ نفر از آنها زن بودند)، نفر اول و در امتحان ریاضیات نفر دوم شد. او برای موضوع پایان‌نامهٔ دکتری خود موضوع بسیار دشوارِ بررسی پدیده‌های تازه کشف‌شدهٔ رادیواکتیویته را انتخاب کرد. برای این کار جایزهٔ نوبل دریافت کرد، و نخستین زنی بود که به دریافت این جایزه نائل می‌شد. بعد جایزهٔ نوبل دومی دریافت کرد؛ او نخستین زن یا مرد دانشمندی بود که به چنین افتخاری دست یافت. او نخستین زنی بود که در سوربون تدریس می‌کرد، امّا با اختلاف دو رأی نتوانست اولین زن عضو فرهنگستان علوم شود (این نخستین‌بار در زندگی‌اش بود که «منکوب شدن» خودش را می‌پذیرفت). طی جنگ جهانی اول، او عملیات واحدهای یک ناوگان سیّار رادیولوژی ـ پرتو x را در میان آشوب و وحشت جبههٔ غرب طراحی و اداره کرد. پس از جنگ مدیر عالی یک آزمایشگاه شد، که نه‌تنها وظایف علمی مورد علاقهٔ خود را انجام می‌داد، بلکه کار شاقّ جمع‌آوری اعانه و روابط عمومی ناخوشایندش را نیز به عهده داشت.

او به نام ماریا اسکلودوفسکا در ورشو زاده شد. لهستان در آن موقع، بجز روحیهٔ میهن‌پرستی اهالی آن، به‌عنوان یک ملت وجود نداشت. در پایان قرن هیجدهم، این کشور به‌صورت سه ایالت

کشورهای روسیه، اتریش و پروس تقسیم شده بود. روسیه به طرز جابرانه‌ای بر ورشو حکومت می‌کرد. پدر ماریا، ولادیسلا[1]، معلم فیزیک و ریاضیات یک دبیرستان دولتی (تحت کنترل روسیه) بود، امّا به علت اختلافهای سیاسی با مافوقهای متکبر روسی از یک سری تنزل رتبه رنج می‌برد. سرانجام مجبور شد یک مدرسهٔ شبانه‌روزی را در خانه‌اش برپا و اداره کند. ماریا بعدها نوشت، «من مشتاق... یاری حاضر و آمادهٔ (در ریاضیات و فیزیک) پدرم بودم، که عاشق علم بود و باید آن را خودش می‌آموخت. او از هر توضیحی که می‌توانست دربارهٔ طبیعت و رفتارهای آن به ما بدهد، لذت می‌بُرد. متأسفانه او آزمایشگاه نداشت و نمی‌توانست آزمایشهایی را انجام دهد.» یوزف، برادر ماریا به خاطر می‌آورد که «ما برای همهٔ پرسشهایمان، مانند یک دایرةالمعارف به او مراجعه می‌کردیم.»

ماریا از مادر خود، برونیسلاوا[2]، به‌عنوان زنی با «شخصیتی استثنایی یاد می‌کرد، که... در خانواده اقتدار اخلاقی چشمگیری داشت.» او مانند همسرش معلم بود، سرانجام خانم مدیر یک مدرسهٔ معتبر دخترانه شد و در عین حال پنج فرزند خود را بزرگ کرد. ماریا جوانترین فرزندش، در سال ۱۸۶۷ چشم به جهان گشود. درحالی‌که ماریا هنوز جوان بود، دو فقدان ویرانگر خانواده را از هم پاشید. در سال ۱۸۷۶، بزرگترین دختر خانواده، زوفیا، بر اثر بیماری تیفوس هلاک شد، و در سال ۱۸۷۸ مادرش، برونیسلاوا بر اثر بیماری سل درگذشت. به گفتهٔ ماریا از دست دادن مادرش «نخستین غم و اندوه بزرگ زندگی من بود و مرا دچار افسردگی عمیق کرد... نفوذ او بر من غیرعادی بود، زیرا در من عشق طبیعی دختر کوچکی به مادرش با یک تحسین احساسی پرشور آمیخته شده بود.»

همهٔ خواهر و برادران اسکلودوفسکا در مدرسه شاگردان خوبی بودند، به ویژه ماریا، که وقتی از دبیرستان فارغ‌التحصیل شد شاگرد اول کلاسش بود. ولادیسلا مصمّم بود که دخترش پس از فارغ‌التحصیل شدن نیازمند تغییر محیط است. پدرش او را برای یک سال به ملک کوچکِ ییلاقی (تقریباً فقیرانه) دائی‌هایش فرستاد، جایی که او زندگی بی‌قید و با نشاطی با پسر دائی‌هایش داشت، به‌عنوان آخرین دورهٔ خوشی و بی‌خیالی. ماریا و خواهرش هِلِنا، تابستانی را در ملک یک شاگرد ثروتمند قدیمی مادرشان گذراندند که در آنجا مهمانیهای رقص، روزها دوام داشت. هِلِنا خاطره‌ای از یک رقص به یاد می‌آورد که، «به مدت سه روز آن‌قدر رقصیدیم که دیگر حرکت کردن برای ما دشوار بود.» هلنا نوشت، «چه خوب است که شخص دست‌کم یک چنین تابستان دیوانه‌وار را در زندگی‌اش داشته باشد.»

در بازگشت به ورشو زندگی چندان شاد نبود. ماریا، به هر طریقی که شده، می‌باید راهها و امکانات آموزش دانشگاهی را فراهم کند. دانشگاه ورشو یک حق انتخاب نبود، زیرا زنان را نمی‌پذیرفت. او مدتی در «دانشگاه سرپایی» مخفی شرکت می‌کرد، هرجا که سازمان‌دهندگان آن حمایتی می‌یافتند تشکیل می‌شد. بهترین راه تحصیل پیشرفته برای یک شاگرد بلندپرواز لهستانی سوربون در پاریس بود که دور از دسترس به نظر می‌رسید. حقوق ولادیسلا کافی نبود و پس‌اندازش را در طرح نادرست غیر عاقلانه شوهر خواهرش از دست داده بود. ماریا و بزرگترین خواهرش برونیا، با نهایت خوش‌بینی و قدرت جوانی، عهد

1. Wladyslaw 2. Bronislawa

شجاعانه‌ای بستند که از خراب شدن اوضاع جلوگیری می‌کرد. عهد آنان این بود که ماریا شغلی به‌عنوان معلم سرخانه به‌دست آورد و به برونیا، مادامی که در پاریس در رشتهٔ پزشکی تحصیل می‌کرد کمک کند، سپس برونیا با یک مدرک دانشگاهی، درآمد کافی داشت که تلافی کند و خواهرش را به پاریس بیاورد.

ماریا چهار سال را به‌عنوان معلم سرخانه در خانه‌های مردم دیگر گذراند، و این یک تجربهٔ فرساینده برای یک نوجوان بود. او گاه‌گاه ناامید می‌شد؛ در نامه‌ای به دوستش می‌نویسد، «لحظاتی بوده است که مطمئناً دردناکترین لحظات زندگی من به‌شمار می‌آیند»، امّا او در انزوای خودش اوقاتی را برای تحصیل علم می‌یافت: «من به انجام کار مستقل عادت کردم. . . اندک‌اندک کوشیدم تا اولویتهای واقعی‌ام را بیابم، و سرانجام به ریاضیات و فیزیک روی آوردم.»

نخستین موقعیت شغلی ماریا به‌عنوان معلم سرخانه، با خانوادهٔ زووارسکی[1] در شهر کوچکی در پنجاه مایلی شمال ورشو بود؛ در آنجا تغییر سرگرمیهایی پیش می‌آمد که چندان سودمند نبود. او عاشق کازیمیرز[2] پسر زووارسکی شد. این علاقه دوجانبه بود و موضوع جدّی شد. امّا یک معلم سرخانهٔ تهیدست هر چند قابل و باکمال، چیزی نبود که زووارسکیها برای پسرشان در سر داشتند، و آنها ناگهان به این ماجرای عاشقانه پایان دادند.

عاقبت، برونیا از پاریس نامه‌ای دربارهٔ رهایی موعود نوشت. او تقریباً کار مدرک پزشکی‌اش را تکمیل کرده بود و برنامه‌ریزی ازدواج باکازیمیرز دلوسکی[3] را می‌کرد، که او نیز به زودی دکتر می‌شد. برونیا نوشته بود، «و حالا تو ماریای عزیز من: تو باید زندگی خود را بسازی. اگر امسال یک چندصد روبلی جمع و جور کُنی، سال دیگر می‌توانی به پاریس بیایی و با ما زندگی کُنی، جایی که مسکن و غذای خود را خواهی یافت.» ماریا به مدت یک سال تردید داشت ــ ظاهراً هنوز کازیمیرز زووارسکی در ذهنش بود ــ امّا در نوامبر سال ۱۸۹۱ رهسپار سفری هزار مایلی با قطار به پاریس شد که در قسمت درجهٔ چهار آن روی یک چهارپایهٔ تاشو نشسته بود، و همهٔ غذایی را که در سفر لازم داشت با خود داشت. کازیمیرز دلوسکی، اکنون شوهر خواهرش، او را در Gare du Nord (ایستگاه راه‌آهن شمال) ملاقات کرد.

ماریا اسکلودوفسکا در پاریس زندگی جدیدی را آغاز و نام جدید ماری را برای خود انتخاب کرد. تغییراتی چند در ترتیب امور زندگی ضروری بود. برونیا از ورشو بازدید می‌کرد، و کازیمیرز سرزنده و بانشاط، امیدوار بود که ماریا از گفت و شنودهای طولانی لذت ببرد و مایهٔ سرگرمی او باشد. در این حال ماریای اکنون ماری، اولویتهای دیگری داشت. کازیمیرز به پدر زنش می‌نویسد: «مادموازل ماری، خانم جوان بسیار مستقلی است. . . او تقریباً همهٔ وقت خود را در سوربون می‌گذراند و ما فقط در هنگام صرف شام یکدیگر را می‌بینیم.» در نامه‌ای که ماری به برادرش یوزف می‌نویسد: «شوهر خواهر گرامی بی‌وقفه مزاحم من می‌شود و نمی‌تواند تحمل کند که من به کار دیگری جز ورّاجی با او بپردازم. . . دربارهٔ این موضوع باید به جنگ او بروم.»

1. Zowarski 2. Kazimierz 3. Kazimierz Dluski

عدم توافق دوستانه بود، امّا ماری می‌باید استقلالش را حفظ می‌کرد. پس از شش ماه، به یک اتاق زیرشیروانی در کارتیه لاتن* نقل مکان کرد. این محل اتاق کوچکی بود که در تابستان بسیار گرم، در زمستان بسیار سرد می‌شد و شش ردیف پله بالاتر از خیابان بود. او با یک چراغ الکلی غذایش را آماده می‌کرد، و غالباً نمی‌توانست بیش از نان و یک فنجان شیر و کاکائو با تخم‌مرغ یا میوه، فراهم آورد. با وجود این احساس یأس و نومیدی نمی‌کرد. او بعدها در یادداشتهای زندگینامهٔ شخصی‌اش نوشت: «این زندگی، از بعضی جهات دردناک است، با وجود این، برای من جذابیت واقعی دارد، زیرا احساس بسیار پرارزش آزادی و استقلال به من می‌دهد. بدون شناخت پاریس، در این شهر بزرگ گُم شده بودم. امّا احساس زندگی تنها در آنجا، و مراقبت از خود بدون هرگونه کمک، ابداً مرا افسرده نمی‌کرد. اگر گاهی احساس تنهایی می‌کردم، حالت عادی ذهن من آرامش و رضایت خاطر روحی شدید بود.»

زن نابغه

ماری ابتدا می‌خواست پس از گرفتن درجهٔ کارشناسی ارشد، به ورشو بازگردد تا با پدرش زندگی کند و مانند پدر و مادرش به شغل معلمی بپردازد. ولی در ۱۸۹۴، وقتی پی‌یر کوری وارد زندگی او شد، این نقشه‌ها برای همیشه به هم خورد. وقتی آن دو با هم آشنا شدند، پی‌یر کوری سی و پنج ساله بود و موفقیتهای زیادی در فیزیک نظری و تجربی داشت مایهٔ خوش‌نامی‌اش بود. او و برادرش ژاک[1] در کشف اثر «پیزو الکتریک» همکاری داشتند. اثری که با اعمال نیرو به دو وجه مقابل بعضی از بلورها، به‌ویژه کوارتز، پتانسیل الکتریکی تولید می‌کند، یا به عکس با به کارگرفتن یک پتانسیل به بلور، یک نیرو به‌وجود می‌آورد. او به تنهایی با تمرکز بر آثار تغییرات دما بر مواد مغناطیسی بررسی تجربی مغناطیس را تکمیل کرده بود. او طراح و سازندهٔ ماهر وسایل حساس الکتریکی بود، استعدادی که در کار بعدی او با ماری دربارهٔ رادیواکتیویته اهمیت فوق‌العاده‌ای داشت.

ماری و پی‌یر را یک فیزیکدان لهستانی که دوستدار کار پی‌یر بود با هم آشنا کرد. در اینجا خاطرهٔ ماری از نخستین برداشت او از پی‌یر را ملاحظه می‌کنید: «وقتی وارد اتاق شدم، پی‌یر کوری کنار پنجره‌ای قدی که رو به بالکن باز می‌شد ایستاده بود. به‌نظر من بسیار جوان بود، گرچه در آن زمان سی و پنج سال داشت. چهرهٔ گشاده و مختصر نشانهٔ استقلال رأی و بی‌تعصّبی در کل نگرش او مرا تحت تأثیر قرار داد. صحبت کردن نسبتاً ملایم و سنجیده، سادگی، لبخندش، که درعین جدی بودن شاداب بود، اعتماد به‌نفس به‌وجود می‌آورد.»

به نظر دیگران یک آدم خیالباف، امّا در عین حال اهل عمل نیز بود. او یک‌بار در دفتر خاطراتش نوشته بود: «باید زندگی را به‌صورت رؤیا و رؤیا را به‌صورت واقعیت درآورد.» ماری در زندگینامه‌اش دربارهٔ پی‌یر نوشت: «او در آزادی کامل رشد کرد، علاقه‌اش به علوم طبیعی در گشت و گذارهای خارج از شهر، جاهایی که گیاهان و جانورانی برای پدرش جمع‌آوری می‌کرد پرورش می‌یافت. گشت و گذارهایی

*. Latin Quarter ناحیه‌ای در جنوب رود سن در پاریس که بسیاری از هنرمندان و دانشجویان در آنجا زندگی می‌کنند.
1. Jacques

که به تنهایی یا با یکی از افراد خانواده می‌کرد، کمکی برای ایجاد یک عشق بزرگ در او نسبت به طبیعت بود، شور و شوقی بود که تا پایان زندگی‌اش پایدار ماند.»

او همیشه به راه خاص خودش می‌رفت. ما در فصلهای دیگر این کتاب با تکروهای علمی دیگر مواجه شده‌ایم، امّا پی‌یر کوری قاطع‌ترین این‌گونه افراد بود. او از بازی قواعدی که به‌وسیلهٔ مؤسسات علمی فرانسه دیکته می‌شد، امتناع می‌کرد. پی‌یر جایزه‌های افتخاری معمول ملی را نمی‌پذیرفت. او در تکمیل آداب پایان‌نامهٔ دکتری با تأخیر عمل می‌کرد، و با دوستانی که می‌خواستند شاهد انتخاب وی به عضویت آکادمی علوم باشند، همراهی نمی‌کرد. در خلال بیشترین دورهٔ زندگی شغلی‌اش، مقامهایی در مدرسهٔ فیزیک و شیمی[1] داشت، که اخیراً طی مراسمی برای آموزش مهندسان افتتاح شده بود، و نه یکی از مدرسه‌های بیشتر معتبر.

وقتی ماری و پی‌یر با هم ملاقات کردند در پی تعلق خاطر عاشقانه نبودند. خاطرات ماری از رابطهٔ او با کازیمیرز هنوز دردناک بود، و پی‌یر مرگ فاجعه‌بار دختری را که ازکودکی دوست می‌داشت فراموش نکرده بود. علم برای او نوعی روحانیت شده بود، و ازدواج غیرممکن به‌نظر می‌رسید. او در بیست و دوسالگی در دفتر خاطراتش نوشته بود، «زنان بسیار بیشتر از مردان، زندگی را به خاطر زندگی دوست می‌دارند، زنانِ نابغه نادرند... وقتی ما همهٔ افکار خودمان را به کاری می‌سپریم که ما را از آنچه در اطراف ما است دور کند، این زنان هستند که ما را به نزاع و چالش می‌کشند، و این نزاع، نزاعی برابر نیست. زیرا آنان به نام زندگی و طبیعت می‌کوشند تا ما را عقب برانند.»

امّا پی‌یر کوری آن وجه نادر را در ماری اسکلودوفسکا یافت. او «زنی نابغه» بود، زنی با استعداد فوق‌العاده که مانند خودش، زندگی را وقف علم کرده بود. پی‌یر موضعش را نسبت به عشق و ازدواج تعدیل کرد و به جلب موافقت ماریِ اندکی سرسخت پرداخت ــ بعدها به ماری گفت که این نخستین کاری در زندگی من بوده است که بدون تردید انجام داده‌ام.

تصمیم‌گیری بر سر این دوراهی برای ماری دشوار بود. اگر او پیشنهاد پی‌یر و زندگی دائمی در فرانسه را می‌پذیرفت، به این معنی بود که «کشورم و خانواده‌ام را ترک کنم.» او در تابستان سال ۱۸۹۴ با تردید پاریس را ترک کرد و به لهستان بازگشت. پی‌یر نامه‌هایی برای او نوشت و ضمن به هم بافتن اُمید و آرزوهایش از ماری تقاضا کرد که در ماه اُکتبر بازگردد. پی‌یر در نامه‌ای نوشته بود، «چه زیبا خواهد بود، چیزی که من جرأت امیدواریش را ندارم، هرگاه ما می‌توانستیم کنار یکدیگر زندگی کنیم و خودمان را با رؤیاهایمان، رؤیای میهن‌پرستی تو، رؤیای انسان دوستی‌مان، و رؤیای علمی‌مان، مسحور کنیم.» ماری در فصل پاییز با غلبه بر تردیدهایش به پاریس بازگشت. ماری و پی‌یر در ژوئیهٔ سال ۱۸۹۵ در سالن شورای شهرک سو[2] در حومهٔ پاریس، جایی که والدین پی‌یر می‌زیستند، ازدواج کردند. سپس جشن عروسی در منزل خانوادگی کوری برپا شد و در آنجا پذیرایی به عمل آمد. جدیدترین زندگینامه‌نویس ماری کوری سوزان کوین[3] می‌نویسد: «روز قشنگی بود، باغ غرق گلهای زنبق و رُز اواخر ماه ژوئیه بود. پدر و

1. École de physique et chemie 2. Sceaux 3. Susan Quinn

خواهر ماری، هِلنا از ورشو آمده بودند. و البته برونیا خواهر ماری آنجا بود، همراه با کازیمیرز [دلوسکی]، که با تعداد بیشتر اعضای خانوادهٔ کوری قاطی شدند، هلنا به یاد می‌آورد که فضایی مسرّت بخش بود.»

پرتوهای بِکرل

اکتشافات علمی گاهی به قدری متضاد و شگفت‌انگیزند که تنها می‌توان آنها را برحسب تصادف آشکار کرد. (در مورد همکاری کوریها، هانری بکرل[1] و کشف رادیواکتیویته (پرتوزایی) چنین بود.) داستان در سال ۱۸۹۵ با گزارشی آغاز می‌شود از یک فیزیکدان تجربی آلمانی با استعداد بی‌سر و صدا به نام ویلهلم رونتگن[2]، دربارهٔ نوعی تابش که او آن را «پرتوهای x» نامید. پرتوهای جدید رونتگن شبیه نور بودند: آنها در خط مستقیم حرکت می‌کردند، سایه ایجاد می‌کردند، و به سهولت صفحهٔ عکاسی را نور می‌دادند. امّا توانایی حیرت‌انگیزی داشتند که تقریباً بر هر چه می‌تابیدند می‌توانستند در آن نفوذ کنند از جمله دستها، پاها، ساقها و بازوها. سایه‌هایی که این پرتوها از بخشهای دیگر استخوانبندی درون بدن ایجاد می‌کردند شور و هیجان عمومی را برانگیخت. پیش از آن هرگز یک پیشرفت علمی با چنین سرعتی گسترش نیافته بود.

پرتوهای x رونتگن در یک لولهٔ شیشه‌ای تخلیه شده، با ایجاد یک تخلیهٔ الکتریکی متمرکز، باریکه‌ای از «پرتوهایی کاتودی» تولید می‌کرد. پرتوهای x در جایی به‌وجود می‌آمد که باریکهٔ پرتو کاتدی به جدار شیشه‌ای لوله برخورد می‌کرد. در همان نقطهٔ برخورد با شیشه نیز یک درخشندگی قوی، یا فلوئورسانی ایجاد می‌شد. به ذهن بکرل و دیگران رسید که فلوئورسانی و پرتوهای x می‌باید با سازوکار یکسانی تولید شوند. در سال ۱۸۹۶ این گمان بکرل را به جستجوی پرتوهای x همراه با منابع شناخته شدهٔ دیگر فلوئورسانی کشانید. به ویژه، او به تحقیق مادهٔ مرکبی شامل اورانیم به نام سولفات اورانیل پتاسیم پرداخت، که قبلاً خاصیت فلوئورسانی آن را تحت تأثیر نور خورشید بررسی کرده بود. مُسلماً، این نمک اورانیم در معرض نور خورشید تابشی نافذ گسیل می‌کرد. امّا سپس، ظاهراً با یک حادثهٔ شانسی، بکرل کشف کرد که نمک اورانیم منبع ثابتی از پرتوهای نافذ است، حتی بدون آنکه در معرض نور خورشید باشد؛ پرتوهای نافذ پدیدهٔ مستقلی بودند که مستقیماً با فلوئورسانی ارتباطی نداشتند. اکنون اگر سازوکار فلوئورسانی در کار نباشد، چگونه این پرتوها تولید می‌شوند، که برانگیختن آنها همواره مستلزم نوعی ورودی انرژی است؟ پرتوهای بکرل منبع انرژی آشکاری نداشتند؛ ظاهراً آنها نقض آشکار قانون اول ترمودینامیک بودند.

این خبر نگران‌کننده‌ای بود؛ ولی توجهی را که در خور آن باشد جلب نکرد، احتمالاً به علت اشتغال ذهنی به پرتوهای x هیجان‌انگیزتر و جنجالی‌تر. امّا این مسئله مورد توجه دو پژوهشگر جوان بلند پرواز قرار گرفت: یکی ماری کوری در پاریس، که در آن موقع در جستجوی موضوع پایان‌نامهٔ دکتری مناسبی بود، و دیگری ارنست رادرفورد در کمبریج، که دورهٔ حرفه‌ای چشمگیری را آغاز کرده بود، و ما در فصل بعد آن را دنبال می‌کنیم.

1. Henri Becquerel 2. Wilhelm Röntgen

علم در یک انباری

یک بررسی تجربی مفصل از پرتوهای بکرل، انتخاب کاملی برای گروه تحقیق تازه تشکیل شدهٔ اسکلودوفسکا-کوری بود: آنان قصد داشتند تا به دقت شدت پرتوهای حاصل از منابع گوناگون را اندازه‌گیری کنند. بکرل گزارش کرده بود که پرتوهای اورانیم می‌توانند اجسام الکتریسیته‌دار شده را تخلیه کنند. مثلاً اگر یک نمک اورانیم بین صفحات یک خازن باردار شده جای داده می‌شد، یک جریان ضعیف الکتریکی تولید می‌شد، که به آهستگی خازن را تخلیه می‌کرد. یکی از اختراعات برادران کوری، الکتریسیته سنج حساسی بود که برای اندازه‌گیری چنین جریانهایی بسیار مطلوب بود.

ماری کوری کارش را با ارزیابی فهرستی از مواد مرکب خالص و کانیها آغاز کرد. او هر ماده را روی یکی از صفحه‌های خازن که تا ۱۰۰ ولت باردار شده بود، می‌پاشید و سپس جریان تخلیه را الکتریسیته سنج کوری اندازه‌گیری می‌کرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت ثابت شد که ترکیبات اورانیم در این طرح «فعال‌اند»، و در مورد ترکیبات توریم نیز این امر صادق است. مشاهدهٔ کلیدی ماری کوری، که به مهمترین پژوهش کوریها انجامید، این بود که کانیهای اورانیم، به ویژه پیچبلند[1] (بیشتر اورانیم اکسید)، فعالتر از اورانیم خالص بودند. چون در غیر این صورت فعالیت متناسب با مقدار عنصر اورانیم در نمونه بود، به نظر می‌رسید این موضوع وجود مقادیر اندکی از یک عنصر ناشناخته با فعالیت بیشتر از اورانیم را نشان دهد. شگفت آنکه پژوهش به سرعت در جهتی پیش رفت، که همواره فیزیکدانان و شیمیدانان را برای شکار یک عنصر جدید برمی‌انگیزد.

ماری در یادداشتهای زندگینامهٔ خود می‌نویسد: «در آغاز ما هیچ یک از خواص شیمیایی مواد ناشناخته را نمی‌دانستیم و پژوهشهای ما فقط براساس همین پرتوها بود.» کوریها با استفاده از فنون تجزیهٔ شیمیایی پیچبلند اجزای شامل عناصر موجود در آن را که می‌شناختند از هم جدا کردند و سپس فعالیت این اجزای جدا شده را اندازه‌گیری کردند. این رهیافت مبتکرانهٔ جدید به زودی موفقیت‌آمیز شد: اجزای غنی از بیسموت بسیار فعالتر، یا به گفتهٔ آنها «رادیواکتیوتر» از نمونهٔ پردازش نشده بودند. کوریها در مقاله‌ای در سال ۱۸۹۸ مدعی موفقیت کار خود شدند و ماری با افتخار مُهر خود را بر یک عنصر جدید کوبید: «ما باور داریم... مادهٔ استخراج شده از پیچبلند حاوی فلزی است که تاکنون شناخته نشده و خواص شیمیایی آن ارتباط نزدیکی با بیسموت دارد. اگر وجود این فلز جدید تأیید شود، پیشنهاد می‌کنیم آن را به نام کشور مبدأ یکی از ما پولونیم نامگذاری کنید.» در حدود شش ماه بعد، کوریها با همراهی گووستاو بمون[2]، یکی از همکاران در مدرسهٔ فیزیک و شیمی، مدعی کشف عنصر بسیار رادیواکتیو دیگری شدند. این عنصر از لحاظ شیمیایی به باریم مربوط می‌شد و آن را رادیم نامیدند.

هر دو ادعا پذیرفتنی، امّا دقیقتر بگوییم موقتی بودند، تا آنکه عناصر جدید را بتوان خالص، و خواص فیزیکی و شیمیایی آنها را مشخص کرد. معلوم شد که جدا کردن عناصر در این مورد کاری سترگ

1. pitchblende 2. Gustave Bémont

است. گرچه می‌شد آنها را با پرتوهایشان تشخیص داد، امّا عناصر رادیواکتیو موجود مقادیر بی‌اندازه اندکی بودند، تنها جزئی از یک گرم در یک تُن مادهٔ خام. محصول نهایی می‌باید طی مراحلی متوالی از مقادیر عظیمی از بقایای پیچبلند، جدا می‌شدند. ماری کوری این کار حیرت‌انگیز جدا کردن رادیم را به عهده گرفت: «ما از لحاظ وسایل و امکانات بسیار فقیر بودیم... لازم بود تا مقادیر عظیمی از کانه را برای اعمال شیمیایی دقیق آماده کنیم. ما پول نداشتیم، آزمایشگاه مناسب نداشتیم و یار و یاوری برای مسئولیتی که به عهده گرفته بودیم نداشتیم. گویی از هیچ، می‌خواهیم چیزی را خلق کنیم. و اگر شوهر خواهر من سالهای تحصیلی قبلی مرا یک بار دورهٔ قهرمانی زندگی من نامید، من می‌توانم بگویم، بدون اغراق دورانی که شوهر من و خودِ من اکنون وارد آن شده‌ایم واقعاً دورهٔ قهرمانی زندگی مشترک ما بود.»

> هیچ فضای مناسب آزمایشگاه در دسترس ما نبود، بنابراین به جهت فقدان چیزی بهتر، مدیر [مدرسهٔ فیزیک و شیمی] به ما اجازه داد تا از انبار متروکه‌ای که قبلاً به عنوان اتاق تشریح مدرسهٔ پزشکی به‌کار می‌رفت،استفاده کنیم. سقف شیشه‌ای آن سرپناه کاملی در برابر باران نبود، گرما در تابستان خفقان‌آور بود و سرمای گزندهٔ زمستان را بخاری آهنی فقط در نزدیکی آن اندکی کاهش می‌داد. موضوع به‌دست آوردن تجهیزات و لوازم مناسب مورد نیازی که معمولاً شیمیدانان به‌کار می‌گیرند مطرح نبود. ما فقط چند میز از چوب کاج با کوره‌ها و مشعلهای گازی داشتیم. ما می‌باید برای اعمال شیمیایی که گازهای زیان‌آور ایجاد می‌کرد، از حیاط مجاور استفاده می‌کردیم؛ اما در این حال هم انباری ما اغلب پر از گاز می‌شد.

این مانند یک کابوس به‌نظر می‌رسد، با وجود این جای شگفتی دارد که ماری کوری آن زمان را با عشق و علاقه به یاد می‌آورد:

> در این انباری کهنهٔ غم‌انگیز ما بهترین و شادترین سالهای زندگیمان را می‌گذراندیم، همهٔ اوقاتمان وقف کارمان بود... گاهی می‌باید یک روز تمام را صرف به‌هم زدن و مخلوط کردن توده‌ای در حال جوش با یک میلهٔ آهنی سنگین به اندازهٔ خودم می‌کردم. در پایان روز از خستگی هلاک بودم. برعکس، روز دیگر کارم دقیقترین و ظریفترین کار تبلور جزءبه‌جزء در تلاش برای تغلیظ اورانیم بود. حفظ محصولات ارزشمندم در برابر گرد و غبار آهن و ذغال مرا به دردسر می‌انداخت امّا هرگز نمی‌توانم لذت این جوّ آرام و بی‌دغدغه را بیان کنم، جو تحقیق و شور و شوق پیشرفت واقعی و امید حاکی از اعتماد به نتایج باز هم بهتر.

زوج کوری

طرح پژوهشی رادیم پُر زحمت و شاق بود، امّا به هنگام تعطیلات کوریها فرصت می‌یافتند که معمولاً با دوچرخه به فضای سبز بیرون شهر بروند. آنان از مسافرخانه‌ای به مسافرخانهٔ دیگر می‌رفتند و پی‌یر، یک طبیعیدان ماهر، گیاهان مشخصی را جمع‌آوری می‌کرد. در سال ۱۸۹۷، ماری دختری به دنیا آورد، به نام ایرن[1]، که غالباً پدربزرگش اوژن[2]، پدر پی‌یر، که به تازگی همسر خود را از دست داده بود، از او

1. Irène 2. Eugéne

مراقبت می‌کرد. دختر دوم آنان، ایو[1]، در سال ۱۹۰۴ به دنیا آمد. پی‌یر و ماری گرچه تقریباً زندگی اجتماعی سوای گردآمدنهای خانوادگی، اجلاسهای علمی، و چند دوست نزدیک از جامعهٔ فیزیک نداشتند، اما راضی بودند. از جملهٔ حلقهٔ همکاران نزدیکشان، پُل لانژون[2]، شاگرد پیشین پی‌یر که شهرت او به خاطر اولین نظریهٔ الکترونی مغناطیس بود؛ ژان پرّن[3]، شیمی‌فیزیکدان که کارش دربارهٔ فیزیک بزرگ‌مولکولها بود و قبلاً بدان اشاره‌ای داشتیم، و گئورگس گوی[4] بود، که به‌نظر می‌رسید پژوهش او کل قلمرو فیزیک را دربر می‌گرفت.

امّا وقتی موضوع پژوهش رادیم منتشر شد، خواه ناخواه توجه دانشوران جهان به زودی جلب ماری و پی‌یر کوری شد. نمونه‌های غنی از رادیم فراتر از همهٔ انتظارات رادیواکتیو بودند، نمونه‌ها برای آنکه توانمندی خود را نشان دهند در تاریکی می‌درخشیدند. ارنست رادرفورد در ژوئن سال ۱۹۰۳، روز آکنده از شادی که ماری به‌طور موفقیت‌آمیزی از پایان‌نامهٔ دکتری‌اش دفاع می‌کرد، به ملاقات وی رفت. او در مهمانی شامی که پل لانژون به افتخار ماری برپا کرده بود شرکت کرد. رادرفورد یادآور می‌شود: «پس از یک عصر هیجان‌انگیز، در حدود ساعت ۱۱ به باغ رفتیم، و در آنجا پروفسورکوری درِ لوله‌ای را بازکرد که بخشی از آن لوله با سولفید روی (ZnS) پوشیده بود و درون آن مقداری زیاد محلولی حاوی رادیم بود. درخشش آن در تاریکی تابناک بود و این پایان یک روز باشکوه و عالی فراموش نشدنی بود.»

پی‌یر سخنرانی بسیار مقبولی دربارهٔ کارشان در انجمن سلطنتی لندن ایراد کرد و اندکی بعد به خاطر مهمترین کشف سال در شیمی، مدال همفری دیوی به ماری و پی‌یر اهدا شد. پذیرفتن مدال بازتاب تغییری در موضع پی‌یر بود که پیش از آن، هرگونه نشان و مدال را تحقیر می‌کرد. سپس در سال ۱۹۰۳، کوریها مشترکاً با بکرل جایزهٔ نوبل را دریافت کردند. گزارش کمیتهٔ نوبل این بود که «حوزهٔ کاملاً جدید با بیشترین اعتبار، منزلت و علاقه برای پژوهش فیزیک گشوده شده است. اعتبار این اکتشافها بدون تردید در نخستین مرحله متعلق به هانری بکرل و آقا و خانم کوری است. . . کشف بکرل دربارهٔ رادیواکتیویته خودبه‌خود اورانیم. . . الهام‌بخش پژوهش جدی مداوم برای یافتن عناصر بیشتر با کیفیتهای چشمگیر شد. عالیترین پژوهش اسلوبمند و استقامت مستمر در این‌باره به‌وسیلهٔ آقا و خانم کوری به عمل آمد.»

این بار پی‌یر تاحدی به راه و رسم پیشین خود بازگشت. او جایزه را رد نکرد، امّا آکادمی سوئد را مطلع کرد که خود و همسرش نمی‌توانند در مراسم اعطای جایزه حضور یابند، زیرا «ما نمی‌توانیم در آن موقع از سال بدون ایجاد اختلال شدید در امر آموزشی که به هر یک از ما واگذار شده است، کار خود را ترک کنیم.» سرانجام پی‌یر سخنرانی اجباری نوبل را در بهار سال ۱۹۰۵ ایراد کرد.

جایزهٔ نوبل مقامی را برای پی‌یر در سوربون به ارمغان آورد، و سیل شهرت و تبلیغاتی که کوریها برای آن به‌طور کلی آمادگی نداشتند. پی‌یر به گوی نوشت: «روزنامه‌نگاران و عکاسان از همهٔ کشورهای جهان ما را تعقیب می‌کنند. آنان حتی تا آنجا پیش می‌روند که گفتگوی بین دختر من و پرستارش

1. Eve 2. Paul Langevin 3. Jean Perrin 4. Georges Gouy

را گزارش می‌کنند، و به توصیف گربهٔ سیاه و سفیدی را که با ما زندگی می‌کند، می‌پردازند. . . علاوه بر آن ما تقاضای بسیار زیادی برای دریافت پول داریم. . . بالاخره، جمع‌آوری‌کنندگان امضاها، افراد فضل‌فروش، مردم طبقهٔ ممتاز جامعه، و حتی گاهی، دانشمندان برای دیدن ما می‌آیند ــ در محل با شکوه و آرام آزمایشگاه ما [انباری] ــ و هر شامگاه مکاتبات حجیمی را می‌باید با پست ارسال کنیم.»

روزنامه‌نگاران، شیفتهٔ «زوج کوری»، و سادگی آزمایشگاه فیزیک آنان بودند. توجه آنان به ویژه معطوف به ماری بود. سوزان کوین در زندگینامهٔ اخیرش می‌نویسد، «ماری بسیار متفاوت از یک زن و همسر متعارفِ یک دانشمند بود، و این بیش از هر چیز دیگر کنجکاوی مطبوعات و عامهٔ مردم را جلب کرد. این موضوع که یک مرد و یک زن بتوانند رابطه‌ای عشقی کاری داشته باشند برای بعضی از مردم هیجان‌آور و برای بعضی دیگر تهدیدآمیز بود.»

ساعات مرگبار

رادیواکتیویته جنبهٔ منفی و تاریک خاص خود را دارد. «پرتوهای» گسیل یافته از رادیم و عناصر رادیواکتیو دیگر فوق‌العاده پُر انرژی‌اند؛ آنها می‌توانند سلولهای زنده را تخریب کنند، سبب سوختگیهای عمیق شوند، و به اندامهای درونی ما آسیب برسانند. کوریها و همکارانشان در پژوهشهای رادیواکتیویته از بعضی از این آثار زیست‌شناختی آگاه بودند، امّا آسیب را سطحی می‌پنداشتند، و تهدیدهای فراگیر بر سلامتی‌شان را جداً دست‌کم می‌گرفتند. با بازنگری تاریخهای معاینه‌های پزشکی کوریها، می‌توانیم حدس بزنیم که آنان از شکلهای گوناگون آنچه که امروزه «بیماریهای تابشی» می‌نامیم رنج می‌برده‌اند. طی سالهای بلافاصله پس از کشف رادیم، هم ماری و هم پی‌یر به‌طور فزاینده از خستگی مفرط در عذاب بودند. ماری کم‌خونی و کمبود وزن داشت؛ پی‌یر از «حملهٔ دردهای حاد رنج می‌برد.» مشکل سلامتی پی‌یر ابتدا روماتیسم و سپس «نوعی ضعف اعصاب» تشخیص داده شد. این بیماری درد استخوانی بود که او در ساقها و پشتش احساس می‌کرد. یک «بُحران شدید» در تابستان ۱۹۰۴ موجب دومین تعویق در سخنرانی نوبل او شد. در بهار سال بعد، او به گوی نوشت که با درد و خستگی «کار در آزمایشگاه به زحمت پیشرفت می‌کند.» اگر آسیب زیست‌شناختی تابش واقعاً علت بیماری باشد، می‌توانیم حدس بزنیم که سلامتی پی‌یر رو به وخامت بیشتری گذاشته و موجب می‌شده است که او نخستین قربانی بیماری ناشی از تابش باشد. امّا خوب یا بد، پی‌یر با چنین تهدیدی مواجه نشد. در ۱۹ آوریل سال ۱۹۰۶، در حالی‌که می‌کوشید پیاده از یک تقاطع شلوغ در پاریس بگذرد، یک اسب عصبی او را نقش زمین کرد، و سرش زیر چرخهای یک دُرشگه، خُرد شد. او در این موقع چهل و هفت ساله بود.

فقدان پی‌یر، ماری را از پای درآورد؛ او برای دست و پنجه نرم کردن با غم و غصه‌هایش خاطرات و احساساتش را در دفتر خاطراتش، به صورت مدخلهایی خطاب به پی‌یر ثبت می‌کرد. در سال ۱۹۹۰ دفتر کامل خاطراتش در دسترس پژوهشگران قرار گرفت. سوزان کوین دفتر خاطرات را محور زندگینامهٔ زیبای کوری قرار داده است. کوین می‌نویسد: «این دفتر خاطرات سوگواری که یک سال پس از آن روز

نحس به‌طور پراکنده ثبت شده سند فصیح و عمیقاً مهیّجی است. ما در آن نه‌تنها از درد و رنج ماری، بلکه از شادمانیها و تنشهایی که در زندگی‌اش با پی‌یر و دو فرزند جوانش داشته است نیز آگاه می‌شویم. این دفتر همچنین به ما امکان می‌دهد که ماری کوری را دور از چشمان کنجکاو مرموزی که از او چهرهٔ اجتماعی سرد و خشکی می‌سازد، بهتر بشناسیم. دفتر خاطرات سوگواری ماری، زیر نقاب وقار و متانت، هیجان گزنده و پرسوزی را نمایان می‌سازد.» خاطرهٔ گفتگوی ماری با پی‌یر از صبح حادثه چنین است: «تو عجله داشتی، من مشغول کار بچه‌ها بودم، تو رفتی، از طبقهٔ پایین از من پرسیدی می‌توانم به آزمایشگاه بیایم. جواب دادم نمی‌دانم، خواهش می‌کنم اذیتم نکن. و این وقتی بود که تو رفته بودی، و آخرین جمله‌ای که من به تو گفتم محبت‌آمیز نبود. . . هیچ چیز بیشتر آرامش مرا به هم نمی‌زند.»

هنگام عصر، پس از آنکه اخبار هولناک را شنید، ماری «چند ساعت مرگبار» منتظر ماند تا درشگهٔ حامل جسد پی‌یر از راه برسد، سرانجام آمد:

> آنان چیزهای مربوط به تو را که یافته بودند برای من آوردند. . . همهٔ آنها چیزهایی بودند که من به تو داده بودم، همراه با تعدادی نامه و چند مقاله. . . همهٔ آنچه را که من در تبادل با دوست مهربان و دوست داشتنی دارم، با دوستی که در نظر داشتم زندگی‌ام را با او بگذرانم. . . من صورت تو را که اندکی تغییر کرده بود در درشگه بوسیدم. [در خانه] من بار دیگر تو را بوسیدم، و تو هنوز نرم و تقریباً گرم بودی، و من دست مهربان تو را که هنوز خم می‌شد، بوسیدم. . . پی‌یر، پی‌یرِ من اینجا تو آرام مانند ناتوانی زخمی شده با سَرِ باند پیچیده، خوابیده‌ای. و چهرهٔ تو هنوز دلنشین، جذاب و ساکت و آرام است. چهرهٔ تو محصور در رؤیایی است که تو نمی‌توانی از آن بیرون آیی.

ماری برای خودش می‌توانست مرگ را بپذیرد ــ امّا نه خودکشی را: «من بدون آنکه به چیزی توجه داشته باشم، راه می‌روم، گویی هیپنوتیزم شده‌ام. من نمی‌خواهم خودم را بکُشم، من حتی آرزوی خودکشی ندارم. امّا در میان این همه درشگه‌ها، یکی از آنها نیست که مرا در سرنوشت محبوبم سهیم سازد؟»

رسوایی و تُهمت

آنچه ماری پس از جاروجنجال جایزهٔ نوبل، و به هنگام سوگواری عمیقش برای پی‌یر، نیاز داشت، آرامش و سکوت بود. امّا جاروجنجال بیشتری در انتظارش بود. ابتدا رویدادی جدّی و بسیار مهم در سوربون رخ داد. ماری به‌عنوان جانشین پی‌یر منصوب، و نخستین زنی شد که در سوربون تدریس کرد. او در دفتر خاطرات سوگواریش می‌نویسد، «پی‌یر من، آنان به من پیشنهاد کردند که جای تو را بگیرم. . . من پذیرفتم، نمی‌دانم کار بدی کردم یا خوب. . . چند بار گفته بودم که اگر تو را نداشته باشم، احتمالاً کار بیشتری نخواهم کرد؟ همهٔ امید کار علمی‌ام با تو بود و اکنون جرئت کرده‌ام که بدون تو آن را به عهده بگیرم. تو گفته بودی این حرف درست نیست، هر چه شد اهمیتی ندارد؛ تو باید کارت را ادامه دهی، امّا

چند بار خودت گفتی که 'اگر مرا نداشتی، شاید به کارت ادامه می‌دادی، اما چیزی بیش از یک جسم بی‌روح نبودی'، و اکنون چگونه می‌توانم روحیه‌ای داشته باشم وقتی وجودم از تو جدا شده است؟» بعداً در دفتر خاطراتش می‌افزاید، «احمقهایی هستند که در واقع به من تهنیت و شادباش می‌گویند.»

یکی از شاگردان ماری یادآور می‌شود که، نخستین جلسهٔ درس او «شمار زیادی از مردم عادی، هنرمندان، گزارشگران، عکاسان، چهره‌های سرشناس فرانسه و خارجی، بانوان بسیاری از لهستان و بعضی از شاگردان را نیز جلب کرد. ماری دقیقاً در ساعت معین وارد شد، بسیار رنگ پریده به‌نظر می‌رسید، چهره‌ای پرابهت، و لباس سیاه فوق‌العاده ساده‌ای داشت؛ فقط پیشانی درخشان و بزرگ او با موهای خاکستری تور مانند فراوان روی سرش به چشم می‌خورد که آنها را محکم به عقب کشیده بود، بدون آنکه موفق به پنهان کردن زیبایی‌اش شده باشد» سخنرانیهای ماری دقیقاً دنبالهٔ دورهٔ درس‌های پی‌یر بود. او بدون هیچ مقدمه‌ای دقیقاً آخرین جملهٔ پی‌یر در سالن سخنرانی را تکرار کرد.

در بهار سال ۱۹۱۰، ماری با کنار گذاشتن لباس سیاه معمولی، دوستانش را شگفت‌زده کرد و به گفتهٔ دوستش مارگریت بورل[1]، «در یک پیراهن بلند سفید، با گل سرخی در کمر آن، ظاهر شد. او مثل همیشه ساکت نشست، امّا چیزی حاکی از رستاخیز او بود، درست همان طور که فصل بهار، زمستان پوشیده از یخ را پشت سر می‌گذارد و فرا رسیدن خود را هوشمندانه، در تمام جزئیات، اعلام می‌دارد.» «رستاخیز» یک معجزه نبود: ماری دوباره عاشق شده بود: دوستی طولانی‌مدت با پل لانژون به یک رابطهٔ عشقی شدید تبدیل شده بود. کُوین می‌نویسد: «در اواسط ژوئیهٔ سال ۱۹۱۰، همهٔ شواهد دلالت داشت بر اینکه ماری و پل عاشق یکدیگرند.»

لانژون همسر و چهار فرزند داشت. ژان[2] همسر او، از سَر و سِّر مذکور آگاه شد، و داستان چنان پیچیده و هیجان‌انگیز شد که به صورت یک رُمان عشقی درآمد. ژان لانژون در خیابان با ماری برخوردی تهدیدآمیز داشت، نامهٔ سرقت‌شدهٔ متهم‌کننده‌ای منتشر شد. مطبوعات جناح ـ راست بیرحمانه حمله‌های تهمت‌آمیز نثار ماری کردند؛ چند بار ماری مجبور شد پاریس را ترک و به‌طور ناشناس سفر کند: لانژون دوئلی (بدون شلیک گلوله) داشت.

نبرد افترا وقتی درگرفت که ماری نامزد عضویت در فرهنگستان علوم شد. کُوین می‌نویسد، «ماری متوجه شد که چه دردسری ممکن است برای یک زن تنها ایجاد شود، هرگاه او نه‌تنها به عشق و دلبستگی، بلکه به بلندپروازی مظنون باشد.» توفانی از حس بیگانه‌هراسی و ضد طرفداری از حقوق زنان، که اغلب ناشی از حسادت بود، بر سر او فرود آمد. رقیب اصلی او برای عضویت در فرهنگستان، با دو رأی برنده شد، امّا او کوشید که توجهی به این امر نداشته باشد؛ نفرت پی‌یر از فرهنگستان یک فقره از «کیش خاطرات» او بود.

در میان این آشوب، اعطای جایزهٔ نوبل دوم به ماری بود که بی‌تردید به آن دامن زد. این جایزه، جایزهٔ شیمی سال ۱۹۱۱ بود که تنها به ماری داده می‌شد، «به مناسبت خدمات وی در پیشرفت شیمی

1. Marguerite Borel 2. Jeanne

با کشف عناصر رادیم و پلونیم.» سوانته آرنیوس[1] به نمایندگی از فرهنگستان سوئد، ابتدا دربارهٔ رسوایی فزاینده در پاریس بُردباری نشان داد امّا وقتی از دوئل لانژون با خبر شد تغییر عقیده داد. در این صورت آرنیوس پیشنهاد کرد که اعطای جایزه تا تبرئهٔ ماری و دادگاه قریب‌الوقوع طلاق لانژون، به تعویق افتد. ماری به عضو دیگر فرهنگستان نوشت: «در واقع جایزه به لحاظ کشف رادیم و پُلونیم اعطا می‌شود. من معتقدم که میان کار علمی و واقعیتهای زندگی خصوصی ارتباطی وجود ندارد. . . من نمی‌توانم اصولاً این ایده را بپذیرم که قدردانی از ارزش یک کار علمی تحت‌تأثیر افترا و تهمت دربارهٔ زندگی شخصی قرارگیرد. من اطمینان دارم بسیاری از مردم با این عقیده موافق‌اند. من بسیار متأسفم که شما این طور فکر نمی‌کنید.» در دسامبر سال ۱۹۱۱، ماری کوری به استکهلم رفت و جایزه‌اش را دریافت کرد.

آخرین ضربهٔ این دوران وحشتناک زندگی ماری، از بین رفتن سلامت او بود، کوین می‌نویسد: «یک بیماری جدی و پیچیدهٔ کلیوی که بی‌تردید درد رسوایی و تُهمت آن را وخیمتر می‌کرد. او نمی‌توانست کارکند.»

امّا او «اصل اول» جوانی‌اش را فراموش نکرده بود، «نمی‌باید منکوب اشخاص و رویدادها شد.» در سال ۱۹۱۳، او رو به بهبودی نهاد.

ما خود را ثمربخش خواهیم کرد

برای بعضی از منتقدان ماری کوری، او یک «زن خارجی» بود، با وجود اینکه او دو دهه در پاریس زندگی و در یک خانوادهٔ فرانسوی ازدواج کرده بود. امّا تنها مرتجعان سرسخت می‌توانستند دربارهٔ وطن‌پرستی او پس از خدماتش در هنگام جنگ جهانی اول، تردید کنند. وقتی جنگ در اوت سال ۱۹۱۴ اعلام شد ماری در پاریس و دور از دو دخترش بود که در شمال در ساحل بریتانی* تعطیلات خود را می‌گذراندند. ایرن، که در آن موقع نوجوان ناآرامی بود، وقتی نوشتهٔ مادرش را خواند مبنی بر اینکه: «تو و من می‌خواهیم خودمان را ثمربخش کنیم» برخود لرزید.

وقتی جنگ درگرفت، دکترهای غیرنظامی کار رادیولوژی و استفاده از دستگاه‌های پرتو-x در جراحی و تشخیص پزشکی را می‌دانستند. امّا پزشکان افسر ارتش به روشهای پرتو-x چندان توجهی نداشتند، ماری وظیفهٔ خود می‌دانست که آنان را روز آمد کند. او یک واحد سیّار به وجود آورد که می‌توانست وسایل پرتو-x را به جبهه برساند. او یک پرتوشناس، استادکار پرتو-x، رانندهٔ آمبولانس، مربی آموزش و جمع‌کنندهٔ اعانه شد و یاد گرفت که چگونه بر تشریفات اداری ارتش غلبه کند. نخستین واحد سیار موفقیت‌آمیز بود و اغلب با اعانه‌های شخصی اجرا شد، ماری ترتیبی داد تا بیست واحد سیار رادیولوژی مجهز، و دویست مرکز تأسیسات ثابت برقرار شود.

ماری که به گفته‌اش پایبند بود، ایرن را دستیار اصلی خودش در این کار پُرتکاپو کرد. ایرن با تحصیل دیپلم پرستاری کار خود را آغاز کرد. در سپتامبر ۱۹۱۶، او با پرستاران دیگر به آموزش یک گروه رادیولوژی پرداخت. او در سالهای جنگ تحصیلاتش را در سوربون با درجات عالی در ریاضی، فیزیک و شیمی تکمیل کرد. آری، ایرن دختر مادرش بود.

1. Svante Arrhenius

*. Brittany ایالتی در ساحل شمال‌غربی فرانسه، نام فرانسوی آن برتانی Bretayne است.م.

پشتیبان

پس از جنگ، ماری به‌کار ناتمام مؤسسهٔ رادیم بازگشت. این مؤسسه هدیه‌ای به پی‌یر بود که اگر زنده بود از آن تقدیر بسیار می‌کرد، امّا هرگز چنین نشد. وقتی کرسی تدریس او، در سوربون ایجاد شد، قرار بود یک آزمایشگاه برای مطالعات رادیواکتیویته تأسیس شود. امّا تا زمان مرگ او این وعده تحقق نیافت. در یک مورد که مدالی به او اهدا شد، او در پاسخ گفت: «من از شما درخواست می‌کنم از وزیر تشکر کنید و به اطلاع ایشان برسانید من کمترین نیازی به مدال ندارم، امّا بیشترین نیاز را برای یک آزمایشگاه احساس می‌کنم.»

آزمایشگاه رادیواکتیویته حتی تا سه سال پس از مرگ پی‌یر وجود نداشت، تا آنکه ماری جانشین او در سوربون شد. از آن پس روند رویدادها تغییر کرد. ایو کوری، این داستان را در زندگینامهٔ مادرش با عنوان مادام کوری، نقل می‌کند.

> در سال ۱۹۰۹، دکتر رو[1]، مدیر مؤسسهٔ پاستور، ایدهٔ سخاوتمندانه و جسورانهٔ ساختن یک آزمایشگاه برای ماری کوری را داشت. اگر ساخته می‌شد، ماری می‌باید سوربون را ترک می‌کرد و ستارهٔ مؤسسهٔ پاستور می‌شد.
>
> سران دانشگاه ناگهان گوششان تیز شد. . . بگذاریم مادام کوری برود؟ غیرممکن است! هزینه هرچه باشد ماری باید جزء گروه آموزشی رسمی ما بماند!
>
> تفاهم بین دکتر رو و معاون لیارد[2] [از دانشگاه] نقطهٔ پایانی بر این بحثها بود. دانشگاه و مؤسسهٔ پاستور، با هزینهٔ مشترک ــ هر یک ۴۰۰,۰۰۰ فرانک طلا ــ [مؤسسهٔ رادیم] را تأسیس کردند، که شامل دو بخش بود: یک [آزمایشگاه رادیواکتیویته]، زیرنظر و به مدیریت مادام کوری، و یک آزمایشگاه تحقیقات زیست‌شناسی و کوری ـ درمانی، که در آن مطالعات درمان سرطان و درمان بیماران سازمان دهی می‌شد. . . این دو مؤسسهٔ عمدتاً مستقل، با همکاری برای توسعهٔ علم رادیم کار می‌کردند.

در سال ۱۹۱۵ وقتی آزمایشگاه جدید آماده و ماری وارد آن شد، هنوز دوران جنگ بود. ماری در یادداشتهای زندگینامه‌اش، یادآور می‌شود، «این یک تلاش و تجربهٔ پیچیده‌ای بود، که بار دیگر برای آن، من نه پولی داشتم و نه کمکی. بنابراین فقط بین سفرهایم بود که می‌توانستم، تجهیزات آزمایشگاهی‌ام را در ماشینهای رادیولوژیکی خودم، منتقل کنم.»

ماری همیشه باغها را تحسین می‌کرد، و اصرار داشت که محوطهٔ بین دو ساختمان مؤسسه پر از درخت و گُل باشد. او بدون ترس از گلوله‌باران آلمانها خودش گلکاری می‌کرد و می‌گفت: «احساس می‌کنم که برای استراحت چشم نگاه کردن به برگهای تازهٔ بهار و تابستان ضروری باشد. بنابراین سعی می‌کنم چیزها، برای کسانی که در این ساختمانهای جدید کار می‌کنند، خوشایند باشد. ما تا جایی که

1. Dr Roux 2. Vice-Rector Liard

توانستیم درختهای چنار و لیموکاشتیم و گلکاری را نیز فراموش نکردیم. من به خوبی بیاد می‌آورم که در نخستین روز گلوله باران پاریس با توپخانهٔ سنگین آلمان، صبح زود به بازار گل فروشی رفته بودیم، و تمام روز را، درحالی‌که گلوله‌ها نزدیک ما می‌افتاد، سرگرم گلکاری بودیم.»

مؤسسهٔ رادیم به سرعت، مرکز تحقیق پُررونقی شد. ماری پژوهشگران را خودش انتخاب می‌کرد، با گرایش بی‌چون و چرا برای بانوان و لهستانیها. آنان او را «la patronne» (رئیس) می‌نامیدند. اگر فکر می‌کرد لازم است تحکّم می‌کرد. یکی از تازه‌واردان نقل می‌کند که ماری به او گفته بود، «به مدت یک سال بردهٔ من خواهی بود، سپس کار روی یک پایان‌نامه را زیرنظر من شروع خواهی کرد، مگر آنکه تو را برای تخصص به یک آزمایشگاه خارجی بفرستم.»

بیشتر اوقات او یک شنونده و مشاور مُشفق بود. یک پژوهشگر، زن جوانی که کار پایان‌نامه‌اش در آزمایشگاه دیگر متوقف شده بود، نخستین مصاحبه‌اش با ماری را چنین نقل می‌کند: «ابتدا، این خانم، رنگ‌پریده و لاغر در یک لباس تنگ سیاه، با نگاه سرد و نافذش مرا به دقت وارسی و با خجالت فلجم کرد. . . سپس با چنان سادگی و با چهره‌ای آرام و لبخندی که مملو از زیبایی بود، شروع به پرسیدن کرد، که به من امکان داد دربارهٔ یاس و ناامیدیهایم به‌عنوان یک پژوهشگر تازه‌کار با او سخن بگویم. سپس تصمیم گرفت مرا در مؤسسهٔ رادیومش بپذیرد.»

وقتی پروژهٔ پژوهش در جریان بود، ماری هر دو سه روز یک بار برای یک کنفرانس در آزمایشگاه ظاهر می‌شد. «او ناگهان، بدون سر و صدا، همیشه با لباس سیاه، در حدود ساعت شش بعدازظهر ظاهر می‌شد، روی یک چهارپایه می‌نشست و با توجه و دقت کامل به گزارش آزمایشها گوش می‌داد؛ او آزمایشهای دیگری را پیشنهاد می‌کرد.»

ماری هرکاری راکه سبب پیشرفت آرمان آزمایشگاه می‌شد، انجام می‌داد، حتی تسلیم به دو چیزی که هرگز دوست نداشت، شهرت و مسافرت، می‌شد. او با مساعدت روزنامه‌نگار پُر انرژی امریکایی، ماری ملونی[1] که معمولاً «میسی[2]» نامیده می‌شد، هدیهٔ مهمّی برای آزمایشگاه کسب کرد و بهای آن را با سفری طاقت‌فرسا به امریکا و تبلیغات گسترده پرداخت.

میسی ملونی مانند ماری به سختی از چیزی دست برمی‌داشت. او به نحوی ترتیبی داد تا ماری از خودداری سرسختانه دست بکشد و با یک مصاحبه موافقت کند. بعدها میسی، شرحی از نخستین ملاقاتشان در سال ۱۹۲۰ را نوشت: «من چند دقیقه‌ای در یک دفتر ساده منتظر ماندم، سپس در باز شد و یک بانوی رنگ‌پریدهٔ کوچک اندام و خجالتی را در یک لباس نخی سیاه دیدم، با غمگین‌ترین چهره‌ای که هرگز دیده بودم. . . صورت زیبا، شکیبا و مهربانش ترجمان انزوای یک دانشمند بود.» او ماری را به‌صورت «زن ساده‌ای می‌دید که در یک آزمایشگاه نامناسب کار می‌کند و در یک آپارتمان ساده با حقوق ناچیز یک استاد فرانسوی زندگی می‌کند.» این بیشتر یک وهم بود، امّا به‌صورت بخشی از اسطورهٔ کوری درآمد، همچنین سبب این افسانه شد که بنابر ادعای میسی، کوری می‌توانست

1. Marie Meloney 2. Missy

با رادیومش بیمار سرطانی را مداوا کند. میسی در مجله‌اش به نام *Delineator* نوشت، «زندگی می‌گذرد، کوریِ بزرگ پیرتر می‌شود، همه چیز از دست می‌رود، فقط خدا می‌داند که این راز بزرگ چیست. و هر سال میلیونها نفر بر اثر بیماری سرطان می‌میرند!» یکی از مقاله‌های همان شماره از مجله تأکید داشت که «دانشمندان سرشناس امریکایی می‌گویند ماری کوری، با فراهم آوردن تنها یک گرم از رادیم، ممکن است علم را به مرحله‌ای پیش ببرد که به‌طور بسیار وسیعی بیماری سرطان ریشه‌کن شود.» چنین ادعاهایی بیش از حد مبالغه‌آمیز بود. یک محصول فرعی رادیم تا حدی با موفقیت در درمان سرطان به‌کار گرفته می‌شد، و هیچ دانشمند مسئولی حرفی دربارهٔ مداوای سرطان نمی‌زد.

میسی ملونی به‌عنوان وسوسه برای کشاندن ماری به ایالات متحده، با تلاش فراوان ترتیبی داد برای خرید یک گرم رادیم (قیمت روز آن یک‌صد هزار دلار بود.) تا رئیس جمهور هاردینگ[1]، آن را طی تشریفاتی در کاخ سفید، به ماری اهدا کند. جمع‌آوری اعانه موفقیت‌آمیز بود، و سرانجام ماری به سفر امریکا رضایت داد. این سفر ابداً آنچه ماری می‌خواست یا انتظار داشت نبود. حتی در فرانسه، پیش از عزیمت او، جشنهای تجلیلی از وی برپا شد. کوین جشنواره‌های پاریس را چنین توصیف می‌کند: «یک مجلّهٔ فرانسوی، *Je sais tout*،... جشنی را برای گرامیداشت 'یکی از افتخارات علم فرانسه، کاشف رادیم'... سازمان‌دهی کرد، عالیترین مقامات فرانسه، از جمله آریستد بریان[2] دولتمرد بزرگ فرانسوی، در اُپرا[3] گرد هم آمدند تا سخنرانیهای ژان پرن[4] و دیگران، دربارهٔ دستاوردها و اکتشافات ماری کوری را بشنوند... سارا برنار[5] (هنرپیشهٔ معروف) قصیده‌ای برای مادام کوری خواند،... 'زن خارجی' رسوایی لانژون فراموش شده بود» اکنون مادام کوری ژاندارک جدید فرانسه بود.

سفر او در امریکا دور خسته‌کنندهٔ مهمانیها، پذیراییها، تشریفات دانشگاهی و رفتن به جاهای تماشایی بود. ماری از این دور خسته، فرسوده و مریض بیرون آمد، امّا آنچه را که می‌خواست به‌دست آورده بود. در مراسم کاخ سفید مشهور یک گرم رادیم گرانبها را پذیرفت.

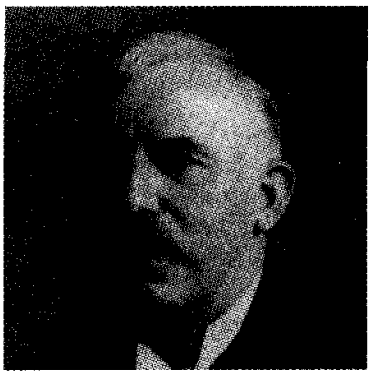
طی سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ مؤسسهٔ رادیم رونق گرفت، امّا سلامت ماری به آهستگی رو به افول می‌رفت، سرانجام، تشخیص پزشکی «کم‌خونی مُهلک در شکل حادّ آن بود.» او در ژوئیهٔ سال ۱۹۳۴ درگذشت. تابوت او روی تابوت پی‌یر در گورستان کوچک سو قرار گرفت.

در آخرین سالهای زندگی ماری بسیاری چیزهای عالی و خوشایند و اندکی چیزهای زشت دربارهٔ او گفته شد. ژان پرن این ارزیابی ساده را از عالیترین موفقیت او به عمل آورد: «مادام کوری نه‌تنها یک فیزیکدان مشهور، که بزرگترین مدیر آزمایشگاهی است که من تاکنون دیده‌ام.»

1. Harding 2. Aristide Briand 3. Opéra 4. Jean Perrin 5. Sarah Bernhardt

۲۱

بر ستیغ موج
ارنست رادرفورد



علم به منزلهٔ عمل

او درشت‌اندام و تاحدی بی‌قواره بود؛ صدایی رعدآسا و چشمانی نافذ داشت که در عکسهای قدیمی تکان دهنده است. نقش مرسوم و معمولی یک اندیشمند روشنفکر برایش جالب نبود، از این‌رو او نقش خاص خود را بازی می‌کرد. زمانی یک بیگانهٔ سرشناس، از ظاهر و لهجهٔ غیر عالمانه‌اش، او را با یک کشاورز استرالیایی اشتباه گرفت (خاستگاه نیوزیلندی او این برداشت را توجیه می‌کند). یک همکار دانشگاهی غیر علمی به او گفت تو یک «وحشی ــ قبول دارم یک وحشی نجیب ــ امّا هنوز هم یک وحشی!» هستی! (این واکنش بی‌جهت نبود. رادرفورد باب گفتگویی را گشوده بود با این مضمون: «الکساندر، همهٔ آنچه را که تو در سی سال گذشته گفته‌ای و نوشته‌ای ــ سرجمع چه ارزشی دارد؟ باد هوا! حرف مفت!») اگر چیزی فاقد شایستگی بود تعارف نداشت. متعاقب رفتن از دانشگاه مک‌گیل[1]، جایی که بعضی از تحقیقات اولیه‌اش را انجام داده بود، به دانشگاه منچستر، که دورهٔ میانی حرفه‌اش به حساب می‌آید، به دوست و همکارش برترم بولتوود[2]، در ییل[3] نوشت، «من در اینجا شاگردانی را می‌بینم که استاد را فقط اندکی کمتر از خداوند قادر متعال می‌دانند. پس از نگرش انتقادی از شاگردان کانادایی این موضوع کاملاً خوشایند است. اینکه احساس کنیم از ما قدرشناسی می‌شود همواره مطبوع است.»

انرژی و بلندپروازی رادرفورد، فقط با اندکی اغراق آتشفشانی توصیف شده است. او طی نُه سال در مک‌گیل که نخستین مقام دانشگاهی‌اش بود، توانست در حدود هفتاد مقاله منتشر کند، عضو انجمن سلطنتی شود، یک مکتب پژوهشی مهم بنا و پژوهشی را تکمیل کند که جایزهٔ نوبل را برای

1. McGill 2. Bertram Boltwood 3. Yale

او به ارمغان آورد. این کارهای عظیم با اندک تجربهٔ قبلی انجام شد (وقتی او به کانادا رفت بیست و هفت ساله بود). معدودی شاگرد، حقوقی ناچیز، و اقیانوس اطلس او را از مراکز علمی بریتانیا و اروپا جدا می‌کرد. فردریک سادی[1]، که در مهمترین کارِ رادرفورد در مک‌گیل، او را یاری می‌کرد گاهی زندگی زیر آتشفشان را اندکی سخت می‌یافت: «رادرفورد، گسیل‌های پرتوزا و رسوبهای فعالش، بیش از آنکه هفته‌های بسیاری سپری شده باشد مرا گیج و سردرگم کرد و من برای دنبال کردن او همه چیز را کنار گذاشتم. به مدت بیشتر از دو سال، زندگی علمی من به اندازه‌ای که شاید در عمر یک فرد نادر باشد، پُر دردسر و تب‌آلود شده بود.» رابرت اُپنهایمر[2] روش رادرفورد را در یک عبارت خلاصه کرده است ــ «علم در عمل». منظور اُپنهایمر به استراتژیهای تجربی رادرفورد یعنی «وسیلهٔ مناسب اِعمال قدرتش»، ذرات آلفا بود، اما این توصیف برای خود رادرفورد نیز صادق بود که بی‌امان، با چرب‌زبانی گروه تحقیقش را هدایت می‌کرد.

رادرفورد از نعمت شهود علمی غیرعادی برخوردار بود. به‌نظر چارلز الیس[3]، شاگردی در دورهٔ نهایی کار رادرفورد در آزمایشگاه کاوندیش درکمبریج، رادرفورد احساسی چنان حساس و دقیق «دربارهٔ هنرمندی طبیعت» داشت، که «تقریباً آنچه را که انتظار می‌رفت می‌دانست.» در سال ۱۹۲۰، او وجود نوترون را پیش‌بینی کرد، دوازده سال پیش از آنکه جیمز چادویک[4]، نفر دوم در کاوندیش نوترونها را به‌طور تجربی مشاهده کند. او می‌توانست به سرعت کُنه یک مسئلهٔ تجربی را ببیند. پتر کاپیتزا[5]، مهندس ـ فیزیکدان روسی که در کاوندیش کار می‌کرد می‌گوید «شما می‌باید فقط دربارهٔ واقعیتها و ایده‌های بنیادی حرف می‌زدید، بدون پرداختن به جزئیاتی که مورد توجه رادرفورد نبود. او ایدهٔ اساسی یک آزمایش را بسیار سریع، در یک نیم‌گفتار، درمی‌یافت.» طرحهای تجربی رادرفورد که به‌طور معمول با کمترین تجهیزات انجام می‌شد، در میان فیزیکدانان افسانه بود. الکساندر راسل شاگردی از دورهٔ دانشگاه منچستر می‌نویسد: «مناسب‌ترین پرسشها را از طبیعت می‌پرسید» او می‌توانست «به آنچه طبیعت نجوا می‌کرد بیش از آنچه طبیعت می‌گفت توجه کند، در این مورد رادرفورد یک هنرمند بود.» هیچکس نتوانسته است زیبایی و در عین حال سادگی بدوی آزمایشهای موفقیت‌آمیز رادرفورد را پشت سر بگذارد ــ «کمترین تکلف با کمترین خطا.»

خلق آزمایشهای بزرگ، آسانتر از خلق رُمانها، نقاشیها و سمفونیهای بزرگ نیستند. کاپیتزا یادآور می‌شود که دوازده سال کار پژوهشی برای نوترون، عمدتاً دشوار و ناامیدکننده بود و موفقیت نهایی بدون اندکی خوش‌شانسی، حاصل نمی‌شد. رادرفورد مانند هنرمندی بود که تحمل برملا کردن آغازهای نادرست، اشتباهات و حوادثی را ندارد که سرانجام به خلق اثری می‌انجامد، رادرفورد به‌طور عجیب و غیرمنتظره‌ای دربارهٔ پیشرفت کار خود سکوت می‌کرد. کاپیتزا می‌گوید، «او میل نداشت دربارهٔ پروژه‌های

1. Frederick Soddy 2. Robert Oppenheimer 3. Charles Ellis 4. James Chadwick
5. Peter Kapitza

تحقیقاتیش حرفی بزند و فقط تاحدی از آنچه قبلاً انجام داده و نتایجی که به‌دست آورده بود صحبت می‌کرد.» و می‌افزاید، «هرگز نشنیدم که رادرفورد دربارهٔ علم جرّ و بحث کند، معمولاً نظراتش را دربارهٔ هر موضوع، بسیار مختصر، با حداکثر وضوح و بسیار سرراست بیان می‌کرد. اگر کسی با او مخالفت می‌کرد، با علاقه گوش می‌داد، امّا پاسخی نمی‌داد، و سپس بحث پایان می‌یافت.» (درست برخلاف بورکه با بحث و جدال زندگی می‌کرد.) فیزیکدانی به نام اِسنو[1] که داستان‌نویس شده بود نیز این تفاوت را در رادرفورد می‌دید. داستان اسنو به نام، پژوهش (The Search) با توصیف واقع‌گرایانهٔ دانشمندان و روش آنها، رادرفورد را ناراحت می‌کرد: «او با سر و صدا می‌پرسید 'مرد جوان، تو با ما چه می‌خواهی بکنی؟'... او انتظار داشت که من درصدد آن نباشم که همهٔ داستانهایم را دربارهٔ دانشمندان بنویسم، او می‌گفت، 'تو می‌دانی که این دنیای کوچکی است'. منظورش دنیای علم بود. 'هرچه می‌توانی از ما فاصله بگیر. مردم لزوماً به این فکر می‌افتند که شما بعضی از ما را سرزنش می‌کنید و من گمان می‌کنم همهٔ ما چیزهایی داریم که نمی‌خواهیم هیچ‌کس بفهمد'.»

از آن سر دنیا

رادرفورد در سال ۱۸۷۱ نزدیک شهر نلسون، در ساوت آیلند نیوزیلند به دنیا آمد. او چهارمین فرزند از دوازده فرزند خانواده بود. پدرش جِیمز، این خانوادهٔ بزرگ را با درآمد متوسط از فعالیتهای گوناگون اداره می‌کرد. فعالیتهایی از قبیل: کِشت گیاه کتان و پردازش آن، صنعت تراورس ریلهای راه‌آهن، پل‌سازی و کشاورزی. مادرِ رادرفورد، مارتا، آموزگار و بانویی با شخصیت فوق‌العاده قوی بود که از کار سخت به‌عنوان «علاج بی‌چون و چرای پلیدیها و مصیبتها» طرفداری می‌کرد. او نفوذ غالبی بر خانوادهٔ پیچیدهٔ شامل هفت پسر و پنج دختر داشت، و وابستگی مادر و پسر مشهورش هرگز کاهش نیافت. رادرفورد هر هفته یا دو هفته یک‌بار نامه‌ای به مادرش می‌نوشت و این کار تا درگذشت مادرش در سن نود و دو سالگی ادامه داشت. در سال ۱۹۳۱، هنگامی که به‌عنوان بارون منصوب شد به مادرش تلگراف زد: «اکنون لُرد رادرفورد که افتخارش برای شما بیشتر از من است.»

آموزش و پرورش ارنست رادرفورد جوان با بورسهای تحصیلی و فداکاری والدینش حاصل شد. او شاگردی ممتاز در یک مدرسهٔ متوسطهٔ خوب، کالج نلسون، بود و ابتدا استعداد فوق‌العاده‌اش برای علم تجربی را در کالج کانتربوری[2] در کرایست چِرچ* نشان داد. در آنجا او به مطالعهٔ اثر امواج الکترومغناطیسی بر عقربه‌های فولادی مغناطیده که هاینریش هرتز اخیراً آن را مشاهده کرده بود پرداخت. این کار به سرعت او را به توسعهٔ یک دستگاه حساس برای آشکارساز امواج هرتزی در فاصله‌های دور هدایت کرد. اختراع آشکارساز رادرفورد را در سن بیست و چهار سالگی، پیشگام حوزهٔ پژوهشی کرد که گولیلمو مارکونی[3] به زودی با بهره‌برداری از آن تلگراف بی‌سیم را به‌وجود آورد.

1. C. P. Snow 2. Canterbury

*. Christchurch شهری در ساحل شرقی جزیرهٔ جنوبی نیوزیلند. م.

3. Guglielmo Marconi

بلیت رادرفورد به دنیای خارج از نیوزیلند یک بورس نمایشگاه سال ۱۸۵۱ بود. درآمدهای حاصل از نمایشگاه بزرگ ۱۸۵۱ لندن برای بورسهای تحصیلی کنارگذاشته شده بود تا صرف آوردن شاگردان شایسته از دومینیونها (هر جایی در امپراتوری بریتانیا) به انگلستان برای تحصیل بیشتر در دانشگاهها شود. در سال ۱۸۹۵ دو کاندیدا وجود داشت، رادرفورد و مکلورین[1]، شیمیدانی که دربارهٔ رفتار طلا مقاله‌ای منتشر کرده بود. ممتحنان بدون تشخیص نبوغ، بورس تحصیلی را به مکلورین دادند. امّا خوش‌شانسی اغلب در لحظات حساس دورهٔ کاری‌اش به سراغ رادرفورد می‌آمد، و یکی از آن لحظات در همین مورد بود: مکلورین تصمیم گرفت ازدواج کند و در نیوزیلند بماند. در این حال بورس در تابستان سال ۱۸۹۵ به رادرفورد داده شد، و او با قرض گرفتن پول خرج سفر، راهی انگلستان شد.

رادرفورد تصمیم گرفته بود تا دانشجوی پژوهشی در آزمایشگاه کاوندیش شود. نخستین مدیر کاوندیش جیمز کلارک ماکسول بود. در طول پنج سال تصدی ماکسول به‌عنوان استاد کاوندیش او برای دانشجویان کارشناسی ارشد، آزمایشگاه شکوفا و پررونق درجه اوّلی را در انگلستان سازمان‌دهی کرد. جانشین او جان ویلیام استرات، لرد ریلی[2] بود، که تاحدی به هزینهٔ خودش، آزمایشگاه را گسترش داد، با تأکید بر اندازه‌گیریهای ظریف و دقیق الکتریکی. سومین استاد کاوندیش، که مشاور و مربی رادرفورد شد، جوزف جان[3] بود که همیشه «ج.ج.» تامسن نامیده می‌شود (خویشاوند ویلیام تامسن نبود).

تامسن در سال ۱۸۸۴ وقتی که فقط بیست و هشت سال داشت به‌عنوان استاد کاوندیش برگزیده شد. و نامزد مناسبی برای کرسی استادی فیزیک تجربی نبود. او خام‌دست و فراموشکار بود و در مواردی می‌باید نمی‌گذاشتند به وسایل ظریف دست بزند. امّا با درک هوشمندانهٔ طرز کار آزمایشهایش، و خدمات دستیاران و شاگردان مستعدش، به هنگام ورود رادرفورد در سال ۱۸۹۵، فیزیکدان تجربی تراز اولی شده بود.

تامسن مانند پیشینیانش، دریافت که اعتبار استادی کاوندیش در طرح کارهای جاری کمبریج، جای چندانی ندارد. این وضع حتی وقتی دانشگاه یک درجهٔ پژوهشی به‌وجود آورد که به فارغ‌التحصیل دانشگاههای دیگر امکان می‌داد تا بر اساس دو سال اقامت و یک پایان‌نامهٔ مناسب مدرک کارشناسی فنی بگیرند بهتر نشد. دانشجویان پژوهشی در مجمع کمبریج پذیرفته نمی‌شدند. آنها برای بسیاری از اعضای هیئت علمی بیگانه، حتی متجاوز شمرده می‌شدند؛ و هرگز نمی‌توانستند عضو کمبریج باشند. امّا تامسن با اشتیاق از برنامهٔ کاوندیش حمایت کرد، و ارنست رادرفورد نخستین عضو جدید آن، به تنهایی حکمت این سیاست و خط مشی را تأیید کرد.

رادرفورد در یک روز ابری در سپتامبر سال ۱۸۹۵ وارد لندن شد، و از هوای آن بُهت زده شد. او به کمبریج پناه برد و در آنجا تامسن به گرمی از او پذیرایی کرد. رادرفورد به نامزدش «ماری نیوتون» در

1. J. C. Maclaurin 2. John William Strutt, Lord Rayleigh 3. Joseph John

نیوزیلند می‌نویسد، «من به آزمایشگاه رفتم، با تامسن ملاقات کردم و گفتگویی طولانی با او داشتم، مصاحبت او بسیار مطبوع است و ابداً متحجّر و کهنه‌اندیش نیست. از لحاظ ظاهری مردی با قامت متوسط، سبزه و هنوز بسیار جوان به‌نظر می‌رسد: ریشش را بسیار بد می‌تراشد و موهایش را نسبتاً بلند نگه می‌دارد. صورتش تاحدی دراز و باریک است؛ سری متناسب دارد و بالای بینی‌اش یک جفت چین و چروک عمودی دیده می‌شود.»

رادرفورد پیش از آنکه به‌عنوان یک دانشجوی پژوهشی شناخته شود، در آزمایشگاه کاملاً راحت بود، با چنان جدیّت و اشتیاقی کار می‌کرد که یکی از همکاران جدیدش در کاوندیش وسوسه شد تا بنویسد، «ما خرگوشی داریم که از آن سر دنیا آمده و در اینجا نقب عمیقی می‌زند.»

ابتدا آزمایشهای بی‌سیم مطرح بود، که به طور فزاینده‌ای موفقیت‌آمیز، امّا برای رادرفورد از لحاظ علمی پیش‌پا افتاده بود. سپس دعوتی بود از تامسن برای همکاری در بررسی آثار پرتوهای x در گازها. تامسن بیش از ده سال موجودات فیزیکی گریزپایی به نام «یونها*» را دنبال می‌کرد. این نامگذاری (به‌وسیلهٔ مایکل فارادی) به این علت بود که موجودات مذکور در میدانهای الکتریکی به‌طور دسته‌جمعی حرکت می‌کردند. یونها وقتی در یک گاز به وجود می‌آیند ــ «یونش» صورت می‌گیرد ــ که ولتاژی زیاد بین دو صفحهٔ فلزی با گازی در میان آنها، اعمال شود. تامسن در آزمایشهای بعدی به دلایلی، مطرح کرده بود که ولتاژ اعمال شده موجب باردار شدن مولکولهای گاز می‌شود به‌طوری که بعضی حامل بارهای منفی و دیگران حامل بار مثبت می‌شوند. پس یونها مولکولهای باردار هستند. آزمایشهای اولیهٔ تامسن با یونش گازی ناامید کننده بود، یا یونش به یک جرقه یا تابش پیچیدهٔ غیرقابل کنترل منجر شده بود، یا اثر الکتریکی یونش به‌قدری ناچیز بود که امکان اندازه‌گیری نداشت. سپس در سال ۱۸۹۵، وقتی رادرفورد به کمبریج رفت، رونتگن نتیجهٔ کارش دربارهٔ پرتوهای x را منتشر کرد. تامسن، علاوه بر خواص هیجان‌انگیزتر پرتوهای x، به قابلیتی از آنها توجه داشت که با به‌کار گرفتن ولتاژهایی بسیار کمتر از آنچه برای تولید جرقه لازم بود، گازها اندکی رسانای جریانهای الکتریکی می‌شدند. تامسن آزمایشهای رونتگن را تکرار کرد و دریافت که جریانهای کمی که با پرتو x به وجود می‌آورد خیلی شبیه جریانهای یونش به‌نظر می‌رسند؛ شاید این روشی برای ایجاد و بررسی یونها تحت شرایط کنترل شده‌ای بود که مدتها در جستجوی آن بودند.

رادرفورد با طیب خاطر آزمایشهای بی‌سیم را کنار گذاشت و طی نامه‌ای به ماری نیوتون نوشت، «ظرفیت من برای موضوع قدیمی خودم تکمیل است». و با منّت وظیفه‌ای را که تامسن برای بررسی آثار الکتریکی پرتوهای x بر گازها، به او واگذار کرده بود، پذیرفت. آزمایشهای او با جزئیات فراوان، فرض یونش تامسن را تأیید کرد که نشان می‌داد چگونه یونها تولید می‌شوند، با چه سرعتی حرکت می‌کنند و چگونه می‌توانند یکدیگر را نابود کنند. یونها به‌قدری برای رادرفورد آشکار بودند، که او به دوست و

*. یون، اسم مفعول ienai در یونانی به معنی رفتن و مهاجرت کردن است.

زندگینامه‌نویس اصلی‌اش، آرتور ایو[1] گفته بود، او تقریباً می‌تواند این «پدرسوخته‌های کوچک سرحال» را ببیند.

وقتی رادرفورد کار پرتو x مورد نظرش را تکمیل کرد، برایش دشوار نبود تا طرحی برای آزمایشهای بعدی بریزد. اگر آثار الکتریکی پرتوهای x آن‌قدر جالب بود، بدون شک آثار مشابه حاصل از تابش اورانیم و عناصر رادیواکتیو دیگر، که بکرل و کوریها به تازگی مطرح کرده بودند، موضوع ارزشمندی برای کار تحقیقی او بود. او بدون تردید خط مشیِ پژوهشی را آغاز کرد که او را به بنیادیترین اکتشافاتش رهنمون می‌شد. در حالی‌که ماری کوری روشهایی را برای جداسازی اورانیم کشف می‌کرد، رادرفورد فنونی فیزیکی را برای مشخص کردن تابش پرتوزای همراه آن ابداع می‌کرد. نخستین کشف مهم او این بود که تابش اورانیم دست‌کم دو جزء دارد؛ یک جزء با ورقه‌هایی از آلومینیم که در مسیر آن قرار می‌گرفت، متوقف می‌شد، و جزء دیگر قدرت نفوذ بسیار بیشتری داشت. از «لحاظ سهولت» آن جزئی را که نفوذ نمی‌کرد، «پرتوهای α» و جزئی را که نفوذ می‌کرد، «پرتوهای β» نامید. معلوم شد که این یک مشخصهٔ تقریباً کلی گسیلهای پرتوزاست. بعدها او فقط یک جزء دیگر، به نام «پرتوهای γ» را کشف کرد.

رادرفورد هنگام تکمیل این کار، دربارهٔ آینده‌ای می‌اندیشید که درکمبریج برای او امیدبخش به نظر نمی‌رسید. امّا چشم‌اندازهای دیگری وجود داشت، و برای تبلیغ استعدادش توصیه‌نامهٔ پرشور و شوقی از تامسن داشت به این مضمون که: «من هرگز برای پژوهش بدیع، دانشجویی مشتاقتر و تواناتر از آقای رادرفورد نداشته‌ام.» جالبترین کار برای او استادی دانشگاه مک‌گیل در مونترآل بود. رادرفورد با وجود جوانی و فقدان تجربهٔ آموزشی در مسابقهٔ مک‌گیل موفق شد. مقامات مک‌گیل می‌خواستند دانشگاه دارای شهرت پژوهشی خاص خود شود. (رادرفورد بعداً به ماری نیوتون نوشت: «از من انتظار دارند که یک مکتب عالی تحقیقاتی ایجاد کنم تا یانکیها را مبهوت کنم!») رادرفورد برای منظور خودش آنچه را که بیشتر از هر چیز لازم داشت به‌دست آورد و آن یک آزمایشگاه فیزیک درجه یک، یکی از بهترین آزمایشگاههای جهان بود. بودجهٔ آزمایشگاه و کرسی استادی را سر ویلیام مک‌دونالد[2] یک تاجر میلیونر توتون، کسی که سیگار کشیدن را یک «عادت کثیف» می‌دانست، تأمین کرد.

رادرفورد در سپتامبر سال ۱۸۹۸ دورهٔ تصدی خودش را به‌عنوان استاد فیزیک مک‌دونالد آغاز کرد. یکی از نخستین کارهای تحقیقاتی‌اش همکاری با مهندس برق جوانی به نام ار. بی. اوئینز[3] بود که وظیفه‌اش بررسی تابش توریم بود همان‌طورکه رادرفورد قبلاً تابش اورانیم را بررسی کرده بود. اوئینز با شگفتی کشف کرد تابش توریم متأثر از جریانهای هواست. به گفتهٔ آرتور ایو «چیزی که نه توریم، نه آلفا، نه بتا بود می‌توانست فوران کند» رادرفورد جزء مرموز جدید توریم را «اماناسیون (emanation)» نامید و آزمایشهایی طرح کرد تا نشان دهد که آن یک گاز پرتوزا است. (سرانجام به‌عنوان یکی از گازهای بی‌اثر به نام «رادون» شناخته شد.) اِماناسیون توریم ویژگی مرموز دیگری داشت: این اماناسیون یک گاز

1. Arthur Eve 2. Sir William MacDonald 3. R. B. Owens

بود، امّا می‌توانست درون محفظه‌اش را با معجونی از مواد پرتوزای جامد بپوشاند. رادرفورد ابتدا این آمیزه‌های پرتوزا را «فعالیت برانگیخته» و وقتی توانست آنها را بهتر بشناسد، «رسوبهای فعال» نامید.

رادرفورد درحالی‌که از پیچیدگیهای اِماناسیونها و رسوبهای فعال پرده برمی‌داشت، سوّمین جزء تابش اساسی تولید شده از عناصر پرتوزا را کشف کرد. او این پرتوها را که قدرت نفوذی بیشتر از پرتوهای β داشتند، پرتوهای γ نامید. رادرفورد حدس زد که این پرتوها شبیه پرتوهای xاند، امّا تا بعدها راهی برای اثبات این نکته نیافت.

در خلال سال ۱۹۰۰، پس از دو سال کار فوق‌العاده فشرده، رادرفورد به مرخصی رفت. او به نیوزیلند بازگشت تا به دیدار والدینش برود و مراسم عروسی را که چند بار به تعویق افتاده بود به انجام رساند. این زوج در سپتامبر سال ۱۹۰۰، با صرف نصف درآمد یک سالشان (۱۲۵۰ دلار) برای هزینه‌های سفر و ماه عسل، به مونترآل بازگشتند.

کیمیاگری

وقتی رادرفورد به آزمایشگاهش بازگشت، یکی از نخستین فکرهایش این بود که بدون کمک یک شیمیدان ماهر نمی‌تواند ذخایر اکتشافات اخیرش را استخراج کند. توریم، عنصر پرتوزایی که بررسی کرده بود، اِماناسیون آن، و اجزای سازندهٔ رسوب فعّال به‌وضوح از لحاظ شیمیایی با یکدیگر متفاوت بودند و شناسایی و در صورت امکان جدا کردن آنها ضرورت تام داشت. رادرفورد مرد مناسب این کار را در همسایگی خود در بخش شیمی مک‌گیل یافت. او فردریک سادی[1]، یک دستیار آزمایشگاه شیمی (مربی آزمایشگاه) بود، که اخیراً از اکسفورد فارغ‌التحصیل شده بود. سادی پُرانرژی، بلندپرواز و آزاداندیش بود. در بین تعداد زیاد همکاران جزء پژوهشی رادرفورد او یکی از با استعدادترین آنها بود.

رادرفورد و سادی ابتدا شیوه‌هایی شیمیایی برای جدا کردن جزء پرتوزای توریم یافتند. آنان مادهٔ بسیار پرتوزایی را جدا کردند، که آن را «توریم X» نامیدند و توریم غیرفعال را به جا گذاشتند. امّا فعالیت و بی‌فعالیتی دوامی نیافت؛ طی یک هفته، توریم فعالیت اولیه‌اش را بازیافت، و توریم X واپاشیده شد. پیش از آن، بکرل در آزمایشهایی با اورانیم رفتار مشابهی را یافته بود. رادرفورد و سادی با بررسی ریاضی این طرح بازیابی و واپاشی، شواهدی را برای یک نظریهٔ انقلابی یافتند. آنان فرض کردند که توریم X، مانند توریم یک عنصر شیمیایی با خواص شیمیایی و فیزیکی مشخص است، که خودبه‌خود با آهنگی بسیار کُند، در یک واکنش شیمیایی از توریم به وجود می‌آید، و توریم X به‌نوبهٔ خود، به‌طور خودبه‌خود به عنصر متفاوت دیگری تبدیل می‌شود، عنصری که هنوز شناسایی نشده بود.

$$\text{توریم} \longrightarrow \text{توریم X} \longrightarrow ?$$

اینها واکنشهایی شیمیایی در قلمرویی بودند که هیچ شیمیدان یا فیزیکدانی هرگز به آن راه نیافته بود. یک عنصر پرتوزا یا «رادیواِلِمنت[2]» خودبه‌خود به عنصر دیگر تبدیل می‌شود؛ در مقیاس اتمی،

1. Frederick Soddy 2. Radioelement

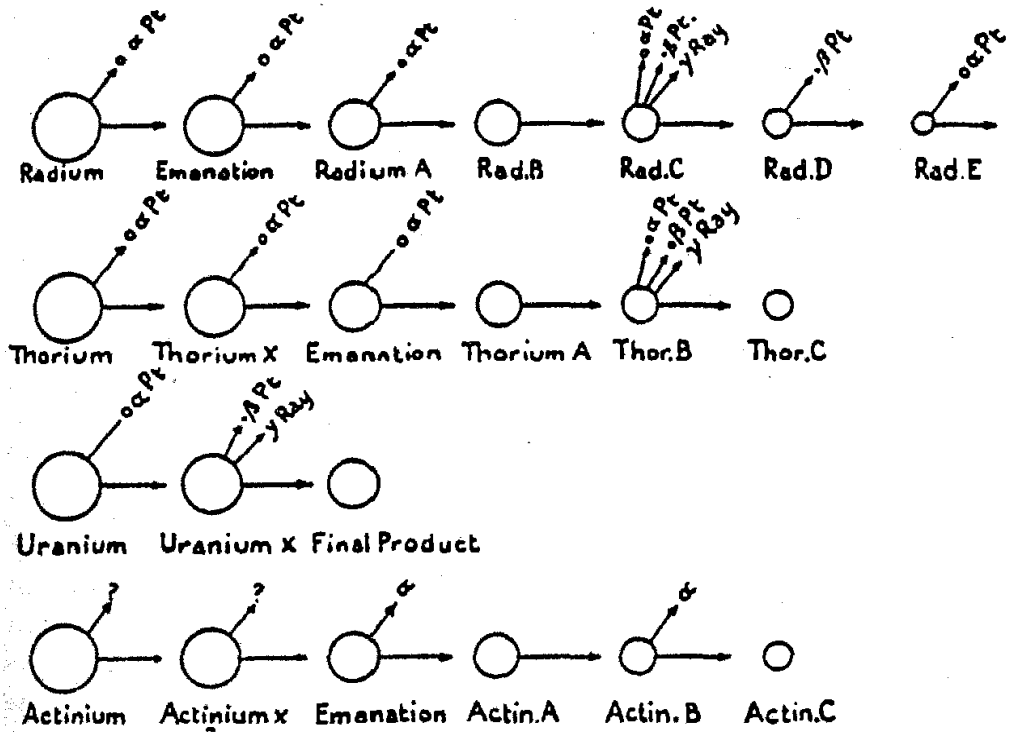
اتمها خودبه‌خود به اتمهای جدیدی فرومی‌پاشند. خلاصه آنکه، این کار یک تبدیل بود، کیمیاگری بود.

تعجّبی ندارد که نظریهٔ فروپاشی پرتوزای رادرفورد ـ سادی، با توجه به ماهیت اساسی آن، منتقدانی نیز داشت، از جمله پی‌یر کوری و لُرد کلوین (ویلیام تامسن در فصل ۷). اما معلوم شد که این نظریه به‌طور شگفت‌انگیزی ماندگار است. رادرفورد و سادی این نظریه را برای یک عنصر پرتوزای بینابین و سپس برای دیگران به‌کار گرفتند و زنجیره‌های کاملی از فروپاشیهای متوالی به‌دست آوردند. آنان در بررسی رسوب‌های فعال توریم، رادیم، و اکتِنیم (که همگی با اماناسیونها تولید شده بودند)، عناصر پرتوزای جدید بسیاری کشف کردند. اکثر فروپاشیها با گسیل یک یا چند پرتو از سه نوع پرتوهای α، β و γ رادرفورد توصیف می‌شدند. هر فرایند فروپاشی با آهنگ واپاشی حاصل از فعالیت عنصر پرتوزا نیز مشخص می‌شد. بیان این آهنگ برحسب زمانی که طول می‌کشد تا فعالیت آن به نیمهٔ مقدار اصلی‌اش فروافتد، آسان بود. این «نیمه‌عمرها» به‌طور چشمگیری از ۳×۱۰^{۹} سال در یک مورد تا ۱٫۵ دقیقه در مورد دیگر تغییر می‌کردند. بعضی از عناصر پرتوزا بسیار پایدار و به‌طور کلی به زحمت پرتوزا بودند، درحالی‌که بعضی دیگر بسیار ناپایدار و به شدت پرتوزا بودند.

مقدار بعضی از عناصر پرتوزا که رادرفورد و سادی مشاهده می‌کردند به قدری اندک بود که نمی‌توانستند آن را اندازه‌گیری کنند، یا امکان تشخیص آنها از لحاظ شیمیایی امکان‌پذیر نبود، ولی با روشهای بسیار حساسی که رادرفورد و سادی به‌کار می‌گرفتند، اندازه‌گیری فعالیت آنها دقیقاً امکان‌پذیر بود. بنابراین تا زمانی که هویت شیمیایی آنها مشخص شود (که در حدود یک دهه بعد حاصل شد)، رادرفورد و سادی و دیگران مجبور بودند برای عناصر پرتوزایی که مشاهده می‌کنند از نامهای مستعار دلخواه استفاده کنند. مثلاً، رادرفورد و سادی گزارش کردند که در رسوب فعال رادیم، رادیم A، رادیم B و غیره تا رادیم G یافته‌اند. در سال ۱۹۰۴ از رادرفورد دعوت به عمل آمد تا سخنرانی مهم بیکری[1] را برای انجمن سلطنتی در لندن ایراد کند. (او فقط یک سال پیش به‌عنوان عضو انجمن سلطنتی انتخاب شده بود.) او از این فرصت استفاده کرد تا همهٔ کارهایی را که با همکاری سادی انجام داده بود به‌طور خلاصه بیان کند. شکل ۲۱ـ۱ نموداری را که او تهیه کرده بود نشان می‌دهد؛ این نمودار فروپاشیهایی را که او و سادی طی سالهای ۱۹۰۲ و ۱۹۰۳ مشاهده کرده بودند، می‌نمایاند. او برای هر فروپاشی (پس از هر پیکان) گسیل α، β، یا γ را فهرست کرده است. («Pt» در این نمودار نماینده «particle» یعنی ذره است؛ در این زمان رادرفورد دریافته بود که «پرتو»های α و β در واقع ذره‌اند.)

جالبترین مشخصهٔ طرح رادرفورد ـ سادی این است که فروپاشیهای پرتوزا غالباً در سریهای متوالی به هم متصلند: مثلاً فروپاشی رادیم A رادیم B تولید می‌کند، که آن نیز به‌نوبهٔ خود فرومی‌پاشد و به رادیم C تبدیل می‌شود، و همچنان پیش می‌رود تا سِری با تولید یک عنصر غیر پرتوزا پایان یابد (رادیم G در نمودار رادرفورد نشان داده نشده است). بعدها رادرفورد کشف کرد که اورانیم X و رادیم به هم مرتبط‌اند، و اینکه سری رادیم در واقع ادامهٔ سری اورانیم است.

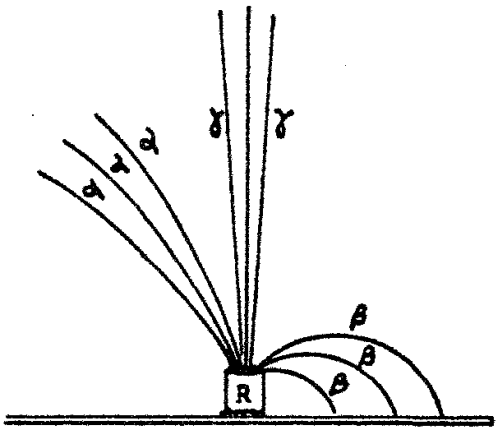
1. Bakerian Lecture



شکل ۲۱ـ۱ فروپاشیهای سریهای پرتوزای رادیم، توریم، اورانیم و اکتنیم آن‌طور که رادرفورد در سخنرانی بیکری در سال ۱۹۰۴ ایراد کرده است.

کار رادرفورد با سادی دربارهٔ نظریهٔ فروپاشی پرتوزا بزرگترین کار او بود، امّا تنها دستاورد او در مک‌گیل نبود. در همان زمان او بررسی گستردهٔ خواص فیزیکی پرتوهای αی همه‌جا حاضر را آغاز کرده بود. روش آزمایشی او هدایت پرتوها به یک میدان مغناطیسی قوی در جهتی عمود بر پرتوها بود. قانونهای حرکت نیوتون در ترکیب با قانونهای الکترومغناطیس ماکسول مقرّر می‌دارد که یک ذرهٔ باردار الکتریکی در چنین وضعیتی می‌باید یک مسیر خمیده‌ای را دنبال کند که خمیدگی آن به بار، جرم و انرژی ذره بستگی دارد. جی. جی. تامسن از این راهبُرد برای شناسایی الکترونها در پرتوهای کاتدی استفاده کرد، و بکرل آن را برای پرتوهای β به‌کارگرفت و نشان داد که پرتوهای β، مانند پرتوهای کاتدی در واقع جریانهایی از الکترونهای بسیار سریع‌اند.

رادرفورد دریافت که پرتوهای α از رادیم و منابع دیگر نیز در یک میدان مغناطیسی «انحراف پذیرند»، امّا بسیار کمتر از ذرات β (نه پرتوها). رادرفورد نتیجه‌گیری کرد که پرتوهای α نیز جریانهایی از ذرات‌اند، امّا با این تفاوت که ذرات α (نه پرتوها) جرمشان بسیار بیشتر از ذرات β است. از سوی دیگر پرتوهای γ در میدان مغناطیسی انحراف‌پذیر نیستند و در واقع پرتوهایی هستند شبیه به پرتوهای x. رادرفورد این جنبه‌های گوناگون گسیلهای پرتوزا را با طرح شکل ۲۱ـ۲ در سخنرانی سال ۱۹۰۴ برای مؤسسهٔ سلطنتی نشان داد. توجه داشته باشید که خمیدگی مسیرهای α و β در دو جهت مخالف‌اند. نظریهٔ نیوتون ـ ماکسول این اختلاف را به این معنی تعبیر می‌کند که ذرات α و β حامل بارهای الکتریکی با علامت متفاوت‌اند، ذرات α حامل بار مثبت و ذرات β حامل بار منفی‌اند.



شکل ۲۱ـ۲ طرح رادرفورد از سه نوع گُسیل از رادیم

وقتی رادرفورد و سادی دنبالهٔ سریهای رادیم را جمع و جور و گسیلهای همراه آنها را مشخص می‌کردند، توانستند انرژیهای حاصل از تبدیل‌های شیمیایی را که مشاهده می‌کردند، برآورد کنند. اگر شگفتی و غرابت کلی پرتوزایی هنوز شناخته نشده بود، باورکردن آنچه را که آنان یافته بودند دشوار بود. بنا به تخمین آنان، انرژی آزادشده به هنگام تبدیل یک گرم رادیم در تمام سری تا رسیدن به یک محصول نهایی غیر پرتوزا، دو هزار برابر انرژی تولیدشده از یک گرم آب است که از ترکیب هیدروژن و اکسیژن که با معیارهای عادی یک واکنش پُرانرژی (گاهی انفجاری) است تولید می‌شود. رادرفورد و سادی در آخرین مقالهٔ همکاریشان به این نتیجه رسیدند که «انرژی نهان در اتم (پرتوزا یا غیر پرتوزا) می‌باید در مقایسه با انرژیی که در تغییر شیمیایی عادی آزاد می‌شود، بسیار عظیم باشد.» آنان حدس زدند که اگر این «انرژی اتمی» با تغییرات زیراتمی در خورشید حاصل شود، می‌تواند دلیلی برای تداوم انرژی خورشیدی باشد.

بمباران با ذرات آلفا

رادرفورد هر آنچه را که لازم بود در مک‌گیل داشت، بجز نزدیکی به مراکز علمی بریتانیایی و اروپایی. این نقطهٔ ضعف سرانجام او را ترغیب کرد تا کانادا را ترک کند، وقتی کرسی فیزیک لانگورتی[1] در دانشگاه منچستر به او پیشنهاد شد ارتور شوستر[2] که تصدی این کرسی را به عهده داشت از استادی بازنشسته می‌شد و می‌خواست که رادرفورد جانشین او شود. شوستر می‌دانست آزمایشگاه فیزیک منچستر که در انگلستان پس از کاوندیش قرار دارد، برای او گیرایی دارد. رادرفورد در بهار سال ۱۹۰۷ (اکنون همراه با یک دختر جوان، به نام ایلین[3]) وارد منچستر شد. آزمایشگاه مطابق انتظارات رادرفورد بود. او به مادرش نوشت، «آزمایشگاه بسیار خوب است، گرچه، مثل آزمایشگاهِ مونترآل بدون توجه به هزینه‌ها ساخته نشده است.» در همان نامه، او با خوشحالی تأثیری را که بر یک بازکنندهٔ رسمی داشت برای مادرش نقل کرد: «گرچه تواضع مانع از بیان آن می‌شود، اما بارون کیکوچی[4] وزیر آموزش و پرورش

1. Langworthy 2. Arthur Schuster 3. Eileen 4. Baron Kikuchi

ژاپن دیروز اینجا بود و شوستر مرا به او معرفی کرد، او بعداً به شوستر گفت: 'گمان می‌کنم رادرفوردی را که شما به من معرفی کردید پسر استاد رادرفورد مشهور باشد'!!!»

آزمایشگاه منچستر نه‌تنها حاوی مجموعه‌ای عالی از وسایل بود بلکه دستیار جوان سرحالی به نام هانس گایگر[1] نیز داشت، که می‌توانست همکاریهای سرنوشت‌سازی برای پژوهشهای بیشتر رادرفورد دربارهٔ ذرات آلفا به‌عمل آورد. گایگر آلمانی و درست کسی بود که رادرفورد به آن نیاز داشت، یک آزمایشگر مستعد با ظرفیت نامحدود برای کار سخت. رادرفورد پس از گذشت یک سال در منچستر در سال ۱۹۰۸ به یکی از همکارانش نوشت: «گایگر مرد خوبی است و مانند یک بَرده کار می‌کند. من هرگز برای آنکه کارها سبک و سیاق خوبی پیدا کند دردسری نداشته‌ام. سرانجام همه‌چیز خوب پیش می‌رود، امّا پراکندگی (scattering) برای من شیطان رجیم است.» چنانکه بعداً خواهیم دید، «پراکندگی» نیز مأمن فرشته بود.

رادرفورد ابزار آزمایشی مطلوبش، «دست راست توانایش» یعنی ذرهٔ α را، با خودش به منچستر آورد. او ذرات α را به‌طور فیزیکی در آزمایشگاه مک‌گیل مشخص کرده بود و حدس می‌زد که آنها اتمهای هلیم باردار، یعنی یونهای هلیم‌اند. اکنون او می‌خواست آن حدس را به دقّت تثبیت کند. او با گایگر یک وسیلهٔ الکتریکی ابداع کرد که تک‌تک ذرات α را با تقویت زیاد اثر یونش آنها، ثبت و شمارش می‌کرد. (نمونهٔ بعدی این وسیله «شمارگر گایگر» نامیده شد.)

در همان زمان، او برای آشکارسازی تک‌تک ذرات α از روش دیگری استفاده کرد: وقتی ذرات α به پرده‌ای پوشیده از سولفید روی برخورد کنند درخشهای ریزی مشاهده می‌شود. شمارگر گایگر تأیید می‌کرد که ورود هر ذرهٔ α بر پردهٔ پوشیده از سولفید روی یکی از این «سوسوها» را ایجاد می‌کند. شمارش سوسوزدنها بخصوص همان چیزی بود که رادرفورد می‌خواست: چیز دیگری برای دیدن یک ذرهٔ αی منفرد.

رادرفورد و گایگر روش سوسوزدن را برای شمارش تعداد ذرات αی آزاد شده از یک گرم رادیم در یک ثانیه به‌کار گرفتند. سپس با اندازه‌گیری همزمان بار الکتریکی مربوط به آنها، بار یک ذرهٔ α را دقیقاً به‌دست آوردند. اندازهٔ این بار دو برابر بار الکترون بود، و آنان با شواهد تأییدکنندهٔ دیگری، به این نتیجه رسیدند که ذرات α یونهای هلیم (He^{++}) دو باری‌اند.

رادرفورد به عضوهای جوانش در منچستر اعلام کرد که «همهٔ علم یا فیزیک است یا جمع‌آوری تمبر.» او می‌دانست که یکی از مقرّرات «جمع‌آوری تمبر» به خوبی به‌کارش آمده است. نظریهٔ فروپاشی پرتوزای او الهام‌بخش بوده، و با روش عالی سادی در آزمایشگاه شیمی تأیید شد. رادرفورد در سال ۱۹۰۸، یک سال پس از ورودش به منچستر برندهٔ جایزهٔ نوبل شیمی شد. او گفت: «این بسیار غیرمنتظره بود و من از دگردیسی‌ام به شیمیدان شگفت‌زده شدم.»

رادرفورد زمانی اظهار داشته بود، «من با این فکر بار آمده بودم که به اتم به‌صورت چیزی سخت و زیبا به رنگ سُرخ یا خاکستری به مذاق هرکس، بنگرم.» این تصویر اتمهای جامد و سخت با یک رشته

1. Hans Geiger

آزمایشهایی که بین سالهای ۱۹۰۹ و ۱۹۱۳ به‌وسیلهٔ رادرفورد، گایگر و دانشجوی جوانی به نام ارنست مارسدن[1] انجام شد، برای همیشه نابود شد. آنان در آزمایشهایی با باریکه‌های ذرات α با «شیطان» سر و کار داشتند: باریکه برای هر ماده حتی گازی که در مسیرش قرار می‌گرفت پراکنده می‌شد ــ یعنی تعریف دقیقی نداشت. گایگر با استفاده از روش شمارش ـ سوسوزنی دریافته بود که هرگاه یک باریکهٔ α ورقهٔ فلزی نازکی را بمباران کند، اکثر ذرات، یا از ورقه به‌طور مستقیم می‌گذرند یا اندکی منحرف می‌شوند (پراکنده می‌شوند). امّا نشانه‌هایی هم بود از اینکه بعضی از ذرات در زاویه‌های بزرگتری پراکنده می‌شوند.

برای رادرفورد نتایج آزمایشی نامحتمل همواره کنجکاوی برانگیز بود. او تصمیم گرفت مارسدن را به بررسی پراکندگی در زاویهٔ بزرگ وادار کند. بعدها یادآور شد که: «من با گایگر موافق بودم که مارسدن جوان، که در زمینهٔ روشهای پرتوزایی آموزش دیده است می‌باید تحقیقی را در این‌باره آغاز کند. چرا نگذاریم ببیند که آیا اصلاً ذرات α می‌توانند در زاویهٔ بزرگ پراکنده شوند یا نه. من باور نداشتم.» امّا مارسدن کشف کرد که در واقع معدودی در حدود یک ذرهٔ α در هشتادهزار، در زاویه‌ای بزرگتر از 90°، از ورقهٔ پلاتین پراکنده می‌شدند. برای رادرفورد این «کاملاً باورنکردنی‌ترین رویدادی بود که در زندگی من به‌وقوع پیوست. این رویداد همان‌قدر باورنکردنی بود که یک گلولهٔ ۱۵ اینچی به قطعه‌ای از دستمال کاغذی شلیک کنید و آن گلوله بازگردد و به شما برخورد کند.»

ذرات αیِ رادرفورد بسیار پُرانرژی بودند ــ آنها حامل انرژی‌ای بودند که گویی در اختلاف پتانسیل میلیونها ولت شتاب گرفته‌اند ــ و آنها در مقیاس اتمی پُرجرم بودند. برای بازگشت آنها از یک ورقهٔ فلزی، می‌باید با چیزی برخورد کرده باشند باردار و سنگین، در عین حال با قُطری کوچک. رادرفورد نتایج آزمایشی را با مُدلی توضیح داد که برخوردهای نزدیک بین ذرات α و میدان الکتریکی شدید «یک مرکز باردار» فوق‌العاده کوچک، یا «هسته» چنانکه بعداً آن را چنین نامید در نظر گرفت. او برآورد کرد که قطر هستهٔ باردار پُر جرم 10^{-13} سانتیمتر است. چون اندازهٔ اتم به‌طور کلی، با وسایل دیگر 10^{-8} سانتیمتر برآورد شده بود، مدل رادرفورد ناچار به این نتیجه رسید که اتم عمدتاً فضای خالی است، که با «چیزهای سخت زیبا»ی پیشین او تفاوت بسیار داشت.

رادرفورد برای یک‌بارکاری به‌عنوان نظریه‌پرداز انجام داد و مُدلش را به زبان ریاضیِ آسانی بیان کرد و معادلات آن را برای آزمونی کامل به گایگر و مارسدن سپرد. مارسدن بعداً متذکر شد که «بررسی کامل، کاری پرزحمت، امّا هیجان‌انگیز بود. به خاطر می‌آورم گایگر محاسبه‌ای کرد که در فرایند این کار ما بیشتر از یک میلیون ذرات آلفا را شمارش کردیم.» ذرات با مشاهدهٔ مستقیم، یک‌به‌یک، سوسوزدن به سوسوزدن شمرده شدند. معادلات و مُدل شگفت‌انگیز رادرفورد موفق بودند: آنها در امتحان قبول شدند.

امّا، شگفت اینکه همکاران رادرفورد متقاعد نشدند؛ حتی علاقه‌مند هم نبودند. یکی از زندگینامه‌نویسان رادرفورد، لارنس باداش[2] می‌نویسد، «جامعهٔ علمی... تحت تأثیر قرار نگرفت. با

1. Ernest Marsden 2. Lawrence Badash

نظریهٔ جدید اتم مخالفت نشد، بلکه عمدتاً نادیده گرفته شد. دو رویداد اتم هسته‌ای رادرفورد را وارد روند کلی تفکر فیزیکی کرد». یکی استقبال مطلوب از نظریهٔ اتمی بور بود، که با مفهوم هسته آغاز می‌شد و سپس اتمها را به‌طور کامل با افزایش الکترونهای مداری بنا می‌کرد. رویداد دیگر انتشار دو مقاله از عضو جوانی از جمع افراد منچستری رادرفورد به نام هاری موزلی[1] بود، که به شیمیدانان نشان داد چگونه بعضی معماهای دیرینه دربارهٔ جدول تناوبی عناصر را بدون «جمع‌آوری تمبر» حل کنند. من داستان موزلی را با بازنگری سریع شواهدی که شیمیدانان در زمان موزلی برای تنظیم جدول تناوبی به‌کار می‌گرفتند، آغاز می‌کنم.

درسهای شیمی

در سال ۱۸۶۹، پنجاه سال پیش از آنکه مُدل اتمی رادرفورد وارد صحنه شود، دمیتری ایوانوویچ مندلیف، استاد شیمی دانشگاه سنت پترزبورگ، توجهش به نوعی خصلت تناوبی در خواص شیمیایی عناصر جلب شد: «اگر عناصر را برحسب مقدار وزنهای اتمی‌شان مرتب کنیم، آشکارا نوعی تناوبی بودن در خواص آنها مشاهده می‌شود.» منظور شیمیدان از «وزن اتمی» جرم اتم در مقیاسی نسبی است که در آن وزن اتمی هیدروژن، سبکترین اتم، در حدود یک است.

هشت عنصر بعدیِ فراسوی هیدروژن به‌ترتیب افزایش وزن اتمی در ردیف بالای جدول تناوبی شکل ۲۱ـ۳ جای دارند. این جدول به شکلی است که در سال ۱۹۱۱ شناخته شده بود. (نام و علامت اختصاری عناصر ردیف مذکور عبارتند از: He= هلیم، Li= لیتیم، Be= بریلیم، B= بور، C= کربن، N= نیتروژن، O= اکسیژن، F= فلوئور.) عنصر دهم، نئون (Ne)، قاعدهٔ مندلیف دربارهٔ خصلت تناوبی خاصیت شیمیایی را نشان می‌دهد. نئون گازی است بی‌اثر، مانند هلیم. ردیف جدیدی در جدول آغاز می‌شود که در همان ستون خویشاوند نزدیکش، هلیم، جای می‌گیرد. عنصر بعدی سدیم (Na) است با شباهت شیمیایی به عنصر بالای آن لیتیم، در جدول. این طرح در ردیف دوم تداوم می‌یابد: منیزیم (Mg) شبیه به بریلیم، آلومینیم (Al) شبیه به بور، و غیره.

در ردیفهای سوم و چهارم پیچیدگیهایی بروز می‌کند که در اینجا نمی‌خواهیم به شرح دقیق آنها بپردازیم، بجز آنکه بگوییم آرگون (A) و پتاسیم (K) نه برطبق قاعدهٔ مندلیف، بلکه برحسب خانواده‌های شیمیایی معقول آنها فهرست شده‌اند: آرگون اندکی سنگینتر از پتاسیم است. در جدول ۱۹۱۱ جاهای خالی وجود دارد، بعضی از آنها مربوط به عناصری بود که هنوز کشف نشده بودند و بعضی دیگر مربوط به یک سری از عناصر بود که صرفاً جور درنمی‌آمدند. بسیاری از این عناصر ناجور بین سریم (Ce) و ایتربیم (Yb)اند، و شامل بعضی عناصری هستند که شیمیدانان آنها را «خاکهای نادر*» می‌نامند.

1. Harry Moseley *. rare earths

0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
He 6.94	**Li** 6.94	**Be** 9.1	**B** 11.0	**C** 12.00	**N** 14.0	**O** 16.0	**F** 19.0	
Ne 20.2	**Na** 23.0	**Mg** 24.32	**Al** 27.1	**Si** 28.3	**P** 31.0	**S** 32.07	**Cl** 35.46	
A 39.9	**K** 39.10	**Ca** 40.1	**Sc** 48.1	**Ti** 48.1	**V** 51.0	**Cr** 52.0	**Mn** 54.9	**Fe** **Co** **Ni** 55.8 59.0 58.7
	Cu 63.6	**Zn** 65.4	**Ga** 69.9	**Ge** 72.5	**As** 75.0	**Se** 79.2	**Br** 79.92	
Kr 82.9	**Rb** 83.5	**Sr** 87.6	**V** 89.0	**Zr** 90.6	**Nb** 94	**Mn** 96.0	**?**	**Ru** **Rh** **Pd** 101.7 102.9 106.7
	Ag 107.88	**Cd** 112.4	**In** 113	**Sn** 119.0	**Sb** 120.2	**Te** 127.5	**I** 126.9	
X 130	**Cs** 133	**Ba** 137.4	**La** 139	**Ce** 140.25	—	—	—	
	—	—	**Yb** 172.0	—	**Ta** 181.5	**W** 184.0	—	**Os** **Ir** **Pt** 191 193.1 195.2
	Au 197.2	**Hg** 200.6	**Tl** 204.0	**Pb** 207.1	**Bi** 208.0	—	—	
	—	**Ra** 226	—	**Th** 232.4	—	**U** 238.5		

شکل ۲۱ـ۳ جدول تناوبی عناصر آنچنان که در زمان رادرفورد شناخته شده بود.

سرانجام شیمیدانان می‌باید شواهد شیمیایی را به‌ترتیبی منظم می‌کردند تا آشفتگی جدول تناوبی ناقص سال ۱۹۱۱ رفع شود. امّا با سرنخ‌های رادرفورد و بور و بعضی از داده‌های پرتو x خودش، موزلی نشان داد که چگونه می‌توان جدول را به سرعت و بدون استفاده از شیمی، منظم و آشفتگی آن را رفع کرد.

پرتو X از اتمها

هاری موزلی پس از یک دورهٔ دانشجویی معمولی در اتون[1] و اکسفورد به منچستر رفت. نوید بخش نبودن او، طبق استانداردهای دانشگاهی، یادآور دانشجوی ناموفق دیگر، آلبرت اینشتین است. (موزلی می‌گفت که هنگام فارغ‌التحصیل شدن از اکسفورد ذهن او چنان «پُر از تارهای عنکبوت» بود که نمی‌توانست تصور سازنده‌ای از کار پژوهشی داشته باشد.) امّا چشم تیزبین و فهیم رادرفورد آشکارا جرقه‌ای را در او تشخیص داد، او موزلی را به‌عنوان معلم آزمایشگاه استخدام کرد. نخستین طرح تحقیقاتی موزلی شمارش ذرات β گسیل شده از رادیم B و رادیم C بود. این کار یک بورس تحقیقاتی را برای او به ارمغان آورد، و او تصمیم گرفت که با استفاده از آن دربارهٔ (پارادوکس) موجی-ذره‌ای پرتوهای x تحقیق کند. او مشارکتی با چارلز داروین، نظریه‌پرداز مقیم منچستر و نوهٔ نویسندهٔ کتاب منشأ انواع به وجود آورد. آن دو بررسی پرتو x را به رادرفورد پیشنهاد کردند. استاد مردد بود، زیرا در منچستر کسی نبود که تجربه‌ای در پیچیدگیهای پژوهش پرتو x داشته باشد. موزلی این مسئله را با رفتن به لیدز[2] و گرفتن درسهایی از ویلیام براگ[3] حل کرد، در آن موقع او مرجع پیشگام پرتو x در انگلیس بود.

رادرفورد قانع شد، و موزلی و داروین به بررسی پرتوهای x به‌صورت امواج پرداختند. آنان فرکانس پرتو x را که به‌طور پیوسته در گسترهٔ وسیعی توزیع شده بود یافتند، امّا موفق به کشف قله‌های تیزی نشدند که بر طیف پیوسته نهاده شده بود. تیم پدر و پسر براگ، ویلیام[4] و لارنس[5] این قله‌ها را یافتند. موزلی و داروین با دنبال کردن مفصل و مشروح کار آنان نشان دادند آنچه آنان مشاهده می‌کنند، همان چیزی است که قبلاً چارلز بارکلا[6]، فیزیکدان اسکاتلندی به‌عنوان جزء همگن پرتو x گزارش کرده بود.

تابش بارکلا مشخصهٔ ماده‌ای بود که به‌عنوان منبع پرتوهای x به‌کار گرفته می‌شد. موزلی تصمیم گرفت بررسی منظمی از پرتوهای x مشخصهٔ یک سری عناصر به‌عمل آورد. ابتدا هدف او این بود که پرتوهای x مشخصه را که بارکلا با «K» علامتگذاری کرده بود به «اعداد اتمی» عناصر ربط دهد. عدد اتمی یک عنصر، محل آن را در جدول تناوبی تعیین می‌کند (۱ برای هیدروژن، ۲ برای هلیم، ۳ برای لیتیم، و غیره).

موزلی که اکنون تنها کار می‌کرد، در این طرح تحقیقاتی با شدت تقریباً دیوانه‌واری، غرق شده بود. داروین در یک خاطره می‌نویسد، «او بدون استثنا سخت‌کوشترین آدمی بود که می‌شناسم.» موزلی

1. Eton 2. Leeds 3. William Bragg 4. William 5. Lawrence 6. Charles Barkla

غالباً در طول شب کار می‌کرد و آموخته بود که در ساعت ۳ صبح چگونه در منچستر غذا پیدا کند. خستگی ذهنی سبب حواس‌پرتی او نمی‌شد. داروین به یاد دارد، «وقتی به او گفتم باید در خانه و در رختخواب باشد، پاسخ او این بود که سرحال هستم، می‌خواهم به خارج شهر بروم و در صحرا قدم بزنم، و تنها وقتی که خسته شدم به‌کار در آزمایشگاه بازمی‌گردم.» او هرگز از اصلاح و بهبود بخشیدن وسایل و لوازم پرتو x خود، چه بزرگ و چه کوچک، کوتاهی نمی‌کرد: «او همواره آماده بود، تا چنانچه امید هرگونه بهبودی در نظرش باشد، همهٔ دستگاه را پیاده و بار دیگر آنها را سوار کند.»

کشف اولیهٔ موزلی معادله‌ای دقیق و بسیار ساده بود که عدد اتمی Z عنصرهای کلسیم تا روی ($Z = ۲۰$ تا ۳۰) را با فرکانس ν_{K} از پرتوهای x مختص K، مربوط می‌کرد.

$$\nu_{\mathrm{K}} = \left(\frac{۳R'}{۴}\right)(Z-۱)^{۲} \qquad (۱)$$

یا

$$\nu_{\mathrm{K}} = R'\left(\frac{۱}{۱} - \frac{۱}{۲۲}\right)(Z-۱)^{۲} \qquad (۲)$$

که R' همان ثابت معادلهٔ بالمر برای فرکانس ν در طیف اپتیکی هیدروژن بود.

$$\nu = R'\left(\frac{۱}{n_{۱}^{۲}} - \frac{۱}{n_{۲}^{۲}}\right) \qquad (۳)$$

که در آن $n_{۱}$ و $n_{۲}$ اعدادی صحیح‌اند. موزلی با خوشحالی از این موفقیت معادلهٔ تجربی دیگری را برای پرتوهای x مشخصهٔ بارکلا با برچسب L، پیشنهاد کرد، و آن را برای

$$\nu_{\mathrm{L}} = R'\left(\frac{۱}{۲۲} - \frac{۱}{۳۲}\right)(Z-۷٫۴)^{۲}, \qquad (۴)$$

و بسیاری از عناصر بین زیرکونیم ($Z = ۴۰$) و طلا ($Z = ۷۹$) به‌کار گرفت.

در حدود همان زمان که موزلی این تحقیق را دنبال می‌کرد، بور[1] نیز در آزمایشگاه منچستر کار می‌کرد و به توجیه نظری چشمگیرش دربارهٔ فرمول بالمر (۳) نزدیک می‌شد. برای موزلی و بور، شباهتهای دو معادلهٔ (۲) و (۴) موزلی، از یک طرف، و فرمولهای بالمر از سوی دیگر، تحول نظری بیشتری را نوید می‌داد. آنان امیدوار بودند نظریه‌ای برای اتمهای شامل الکترونهای زیاد را از معادله‌های موزلی به‌دست آورند، همان‌طور که نظریهٔ بور دربارهٔ اتم هیدروژن با یک الکترون، از معادلهٔ بالمر نشأت گرفته بود. آنان هرگز متوجه تفاوتها نشدند، امّا در تلاشهای نظری دو فرض را مطرح کردند که تداوم یافت و اجزایی ماندگار از نظریهٔ اتمی شد، یکی آنکه عدد اتمی Z برای یک عنصر، تعداد الکترونهای اتم هر عنصر است، و دیگر آنکه عدد اتمی معیاری از بار مثبت متوازن کنندهٔ هسته برحسب یکاهای الکترونی نیز هست.

1. Bohr

موزلی طیفهای پرتو x مشخصهٔ سی‌ونه عنصر از شصت‌وهفت عنصر بین آلومینیم و طلا را مشاهده کرد، و معادلاتش را برای تعیین اعداد اتمی به‌کار گرفت. علاوه بر تأیید ضرورت فهرست کردن بعضی از عناصر خارج از نظم توالی وزن اتمی (مثلاً آرگون و پتاسیم)، ارزیابی صریح و بی‌ابهام موزلی از اعداد اتمی جاهایی خالی را نیز نشان می‌داد که یک عدد اتمی وجود داشت، امّا عنصر شناخته‌شده‌ای که با آن جور باشد وجود نداشت. چهار عنصر مفقودالاثر برای اعداد اتمی ۴۳، ۶۱، ۷۲، و ۷۵ مشخص شد. سرانجام این چهار عنصر پیدا شدند که آخرین آنها سی‌وچهار سال بعد بود. بنابه اظهار موزلی هر عنصر «در خانهٔ درست جدول» قرار می‌گرفت، حتی آنها که هرگز دیده نشده بودند. ژرژ اوربین[1]، شیمیدان فرانسوی، که نمونه‌های خاکهای نادر را در اختیار موزلی می‌گذاشت، با تعجب و ناباوریش دربارهٔ موزلی و آنچه او می‌تواند انجام دهد، به رادرفورد نوشت: «من از یافتن مرد بسیار جوانی که می‌تواند چنین کار چشمگیری انجام دهد بهت‌زده شده‌ام. . . قانون موزلی، برای انتها و همچنین برای ابتدای خاکهای نادر، نتیجهٔ بیست سال کار صبورانهٔ مرا، طی چند روز تثبیت کرد.»

کار پرتو x موزلی، تلاش برجسته و ممتازی که مستلزم یک عمر بود، کمتر از یک سال تکمیل شد. (این مدت شامل یک نقل مکان از منچستر به اکسفورد و یک بازسازی کامل لوازم و تجهیزات می‌شد با خدمات نامطمئن یک تکنیسین که چون «خاری در چشم بود.») رادرفورد گفت که موزلی «بهترین فرد جوانی است که هرگز داشته‌ام» او می‌توانست همتای رادرفورد باشد.

در سال ۱۹۱۴، وقتی انگلیس وارد جنگ با آلمان شد، موزلی به سرعت داوطلب خدمت شد. مأموریت او در رستهٔ مهندسان سلطنتی بود و افسر مخابرات شد. در ژوئن سال ۱۹۱۵، تیپ او به داردانل فرستاده شد. دو ماه بعد، یک عملیات مبهمی به‌وقوع پیوست که در آن تیپ موزلی، عمداً یا سهواً، با دو راهنمایی که بعداً ناپدید شدند، به‌موضعی در خطوط مقدم جبههٔ بریتانیا هدایت شد. افراد در طول شب خوابیدند و سپیده‌دم که بیدار شدند به اشتباهشان پی‌بردند، امّا در آن موقع تُرکها حمله را آغاز کرده بودند. صبحگاه گلوله‌ای به سر موزلی شلیک شد و او در دم جان سپرد.

کافی نبودن خانه‌های جدول

شماره‌گذاری عناصر به‌وسیلهٔ موزلی پارامتری با اهمیت بنیادی بیشتر را به وزن اتمی می‌افزاید و آن عدد اتمی است. در حدود همان زمان این دو پارامتر به طریق کاملاً متفاوتی ادغام شدند. برای مدتی فرض بر این بود که فقط حدود ده تا از سنگینترین عناصر در جدول تناوبی پرتوزا هستند. امّا رادرفورد، سادی و دیگران مدعی کشف عناصر پرتوزای بسیار بیشتری بودند. آنها را با گسیل تابشها و نیمه‌ـعمرشان مشخص می‌کردند و نامهای نامشخص وگنگی به آنها می‌دادند، مثلاً رادیم A، توریم X و یونیم. چگونه این عناصر پرتوزا در جدول تناوبی قرار می‌گرفتند؟ خانه‌های کافی در جدول نبود.

در حدود سالهای ۱۹۱۰، آشکار بود که گرچه تکثیر عناصر پرتوزا از لحاظ فیزیکی مشخص است، امّا همهٔ آنها از لحاظ شیمیایی منحصربه‌فرد نبودند. مثلاً توریم X و رادیم را نمی‌شد از هم جدا

1. Georges Urbain

کرد زیرا خواص شیمیایی یکسانی داشتند؛ همچنین رادیم D و سرب جدانشدنی بودند، وضع یونیم و توریم نیز بر همین منوال بود. سادی بحران خانه‌های جدول را با این فرض حل کرد که این قبیل زوجهای جدانشدنی، وزنهای اتمی متفاوت اما هویت شیمیایی یکسان دارند ــ یعنی در جدول تناوبی خانهٔ یکسانی به آنها تخصیص داده می‌شود. منشأ این ایده پیچیده است و آغاز آن به سادی مربوط نمی‌شود. دو اتم یک عنصر با وزنهای اتمی متفاوت در واژگان (اصطلاح‌شناسی) سادی «ایزوتوپ» (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. با نمادهایی که امروزه به‌کار برده می‌شود، ایزوتوپها با نماد شیمیایی مشخص می‌شوند، بزرگی بار هسته (برابر با عدد اتمی) به صورت یک زیروند، و وزن اتمی تقریبی به صورت یک زیروند است: رادیم A رادرفورد اکنون به صورت $_{۸۴}Po^{۲۱۸}$ نشان داده می‌شود، که پولونیم با وزن اتمی تقریباً ۲۱۸ و عدد اتمی (یا بار هسته‌ای) ۸۴ است. اگر عدد اتمی زاید باشد، حذف می‌شود و نشانه‌گذاری به صورت $Po^{۲۱۸}$ خواهد بود.

سادی تشخیص داد که ایزوتوپها در ساخت و آرایش عناصر غیرفعال همچون عناصر پرتوزا اهمیت دارند. مثلاً در طبیعت، عنصر کلر، مخلوطی از ایزوتوپهای $_{۱۷}Cl^{۳۵}$ و $_{۱۷}Cl^{۳۷}$ است. وزن اتمی اندازه‌گیری شده، ۳۵٫۴۷ است، که میانگینی است از وزنهای اتمی ۳۵ و ۳۷، با تفوق اوّلی.

کار سادی همچنین به روشن شدن این مفهوم کمک کرد که هسته جایگاه پرتوزایی است. او با مثالهای فراوان نشان داد که وقتی عناصر پرتوزا با گسیل α و β دگرگون شوند در جدول تناوبی جابه‌جا می‌شوند. او حدس زد که هنگام تغییرات هسته عدد اتمی تغییر می‌کند که با استدلالهای موزلی سازگار بود.

انهدام اتم

با آغاز جنگ در سال ۱۹۱۴، اکثر شاگردان رادرفورد به خدمت در ارتش یا سایر وظایف زمان جنگ پرداختند و آزمایشگاه منچستر به سرعت خالی از سکنه شد. خود رادرفورد به‌عنوان عضو یک کمیتهٔ غیرنظامی، وظیفهٔ توسعهٔ روشهای صوتی برای آشکارسازی زیردریاییها را به عهده گرفت. امّا در حین سالهای جنگ فرصتی یافت تا تحقیقی را کامل کند که در ردیف بهترین کارش قرار می‌گرفت.

منشأ این کار بعضی مشاهدات چشمگیری بود که چند سال پیشتر توسط مارسدن دربارهٔ بمباران گاز هیدروژن با ذرات α از یک چشمهٔ رادیم C ($_{۸۳}Bi^{۲۱۴}$) ثبت کرده بود. رادرفورد آزمایش مارسدن را تکرار کرد و به این نتیجه رسید که ذرات α و هستهٔ هیدروژن، مانند دو گوی بیلیارد با انرژی کافی به هم برخورد می‌کنند به طوری که هر دو هسته در حرکت پس‌زنی از هم دور می‌شوند و سرانجام آثارشان را بر پردهٔ سوسوزن به‌جا می‌گذارند. هسته‌های هیدروژن ــ که اکنون رادرفورد آنها را پروتون می‌نامید ــ از ذرات α، تشخیص‌پذیر بودند به این دلیل که قدرت نفوذ پروتونها در موادی که بر سر راه آنها قرار می‌گرفت بیشتر از ذرات α بود.

این بسیار طبیعی بود. امّا بعد رادرفورد این آزمایش را، به‌جای هیدروژن، با گاز نیتروژن انجام داد، و بار دیگر سوسوزدنهای پروتونی را دید. توضیح او این بود که هسته‌های نیتروژن در برخورد با ذرات

α، به‌طور مصنوعی فروپاشیده می‌شوند. او در سال ۱۹۱۹ نوشت: «اجتناب از این نتیجه‌گیری دشوار است که اتمهای بلندبُردِ تولیدشده از برخورد ذرات آلفا با نیتروژن اتمهای نیتروژن نیستند بلکه احتمالاً اتمهای هیدروژن، یا اتمهایی با جرم ۲اند. اگر چنین باشد، می‌باید نتیجه‌گیری کنیم که اتم نیتروژن تحت تأثیر نیروهای شدید ناشی از برخورد نزدیک با ذرهٔ α سریع، فرومی‌پاشد و هیدروژن آزادشده بخشی از هستهٔ نیتروژن است.»

پس از جنگ، در سال ۱۹۱۹، رادرفورد بار دیگر متقاعد شد تا محل و شغلی را که دوست می‌داشت ترک کند. او به مادرش نوشت:

> اکنون با خبر شده‌اید که من برای کرسی استادی فیزیک کاوندیش انتخاب شده‌ام. سِر جی. جی. تامسن که عهده‌دار این سمت بود و اکنون رئیس [کالج] ترینیتی است مرا انتخاب کرده است. تصمیم ترک منچستر که در آنجا همه با من خوب بودند، دشوار بود، امّا برای من بهتر است که اینجا بیایم، زیرا از هرچه بگذریم، این معتبرترین کرسی فیزیک در این کشور است که بیشترین استادان فیزیک را بیرون داده است ... این جدایی دردناکی خواهد بود که باید از همه چیز دل برکنم، بار دیگر از نو دوستان جدیدی بیابم، امّا خوشبختانه چند دوست خوب را قبلاً در آنجا می‌شناسم و در کالج ترینیتی بیگانه نخواهم بود.

یکی از زندگینامه‌نویسان رادرفورد و فارغ‌التحصیل منچستر به نام ادوارد اندراد[1]، می‌نویسد، «همهٔ کسانی که او را می‌شناسند و دربارهٔ او چیزی نوشته‌اند عموماً موافقت دارند که شادترین سالهای عمر او در منچستر گذشت، سالهایی که شاهد تولد اتم هسته‌ای و نخستین فروپاشی [مصنوعی] هسته‌ای، بود.»

برای خوشامدگویی رادرفورد به آزمایشگاه کاوندیش کارکنان شعرها و آوازهای گروهی سروده‌اند.*

رادرفورد در کمبریج هدف گرفتن «اتمهای در حال پرواز» با ذرات α را ادامه می‌داد. در این کار جیمز چادویک[2] با او همکاری می‌کرد، چادویک با او از منچستر آمده بود و نزدیکترین همکار، معتمد، و معاون در آزمایشگاه کاوندیش بود. مارک آلیفنت[3]، که سرانجام به جای چادویک قائم‌مقام رادرفورد شد، می‌نویسد: «چادویک بهتر از رادرفورد دقیقاً می‌دانست که هرکس در آزمایشگاه چه می‌کند. او بود که اعضای تازه‌کار را برای تحقیق در یک آزمایشگاه ابتدایی در اتاق زیر شیروانی بالای دفتر رادرفورد تربیت و آماده می‌کرد. او با رادرفورد کار تحقیقی اکثر دانشجویان را انتخاب، و آنان را آمادهٔ کار می‌کرد. . . تعهدات و مسئولیتهای رادرفورد در خارج از آزمایشگاه، بدون توجه فداکارانهٔ چادویک هرگز انجام نمی‌گرفت. چادویک ممکن بود سرد و بی‌روح باشد، امّا به ندرت نامعقول و بی‌انصاف بود. او بهتر از هر یک از شرکای تحقیق دیگرِ رادرفورد در هنر فیزیک آزمایشگاهی استاد بود.

1. Edward Andrade

*. نمونه‌ای از این اشعار در کتاب آمده که ترجمه نشده است.

2. James Chadwick 3. Mark Oliphant

رادرفورد و چادویک نخست نشان دادند که بمبارانهای α نه تنها می‌تواند باعث فروپاشی هسته‌های نیتروژن شود، بلکه هسته‌های عناصر سبک دیگر، مانند بور، فلوئور، سدیم، آلومینیم و فسفر را نیز می‌پاشد. امّا این آزمایشها پرسش بی‌پاسخی را به‌جا می‌گذاشتند. آیا ذرات α واقعاً در هستهٔ هدف نفوذ می‌کنند، یک هستهٔ مرکّب و یک پروتون تولید می‌کنند، یا آنها پروتونها را از هستهٔ هدف جدا می‌کنند و خودشان، مانند اصابت گلوله‌هایی به یک صخره، کمانه می‌کنند؟

اتفاقاً، تجهیزات لازم برای پاسخ این پرسش در آزمایشگاه کاوندیش، در کار چارلز تامسن ریس ویلسون[1]، که معمولاً «C.T.R.» ویلسون نامیده می‌شد، در دسترس بود. ویلسون تقریباً همسن رادرفورد و دوستی قدیمی، درکار پژوهش ابرها و تشکیل ابر بود. آزمایشگاه او ابتدا قلهٔ بن نویس[2] مرتفعترین کوه در اسکاتلند و یک ابرساز فوق‌العاده بود. ویلسون تحت‌نظر جی. جی. تامسن درکاوندیش دریافت که می‌تواند، آنچه را که طبیعت در بن نویس می‌سازد، در آزمایشگاه با انبساط ناگهانی و سپس سرد کردن هوایی که با بخار آب اشباع باشد، بسازد. او همچنین کشف کرد که تشکیل ابر مصنوعی‌اش با یونش هوا به‌وسیلهٔ پرتوهای x اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این امر، در سال ۱۹۱۱، به مهمترین کشف او منجر شد: که از ردِّ یونهای به‌جا مانده از یک ذرهٔ α در «اتاقک ابر» او یک خط سیر ابری ایجاد می‌شد که مسیر ذره را به‌وضوح مشخص می‌کرد، مانند نوعی دنبالهٔ مینیاتوری بخار هواپیما که مسیر آن را نشان می‌دهد. اتاقک ابر ویلسون، مانند پردهٔ سوسوزن، آزمایشگر را در تماس با تک‌تک ذرات قرار می‌داد، نه تنها ذرات α بلکه ذرات β، پروتونها، و الکترونهای تولید شده با یک باریکهٔ پرتو x، نیز از آن جمله بودند.

در سالهای ۱۹۲۰، پاتریک بلکت[3] اتاقک ابری ویلسون را بهبود بخشید و شواهد مستقیمی برای انهدام‌های اتم که رادرفورد و چادویک گزارش کرده بودند، به دست آورد. در تصویرهای حدود چهارصد هزار مسیر ذرهٔ α، بلکت هشت مسیر منشعب شدهٔ دو شاخه یافت، یک شاخه برای پروتون گسیل شده و دیگری برای هستهٔ مرکب. هیچ مسیر سه شاخه‌ای یافت نشد، و بنابراین هیچ ذرهٔ αی کمانه‌کرده‌ای نبود. در این صورت معلوم بود که «واکنش» هسته‌ای که رادرفورد در بمباران نیتروژن با ذرات α مشاهده کرد عبارت بود از

$$_{2}He^{4} + {}_{7}N^{14} \rightarrow {}_{1}H^{1} + {}_{8}O^{17}$$

این واکنش با یک ذرهٔ α ($_{2}He^{4}$) و نیتروژن ($_{7}N^{14}$) شروع می‌شود و یک پروتون ($_{1}H^{1}$) و یک هستهٔ مرکب (ایزوتوپ اکسیژن $_{8}O^{17}$) تولید می‌کند.

ذرات آلفا دوستان خوب رادرفورد در آزمایشگاه بودند. او آنها را ترجیح می‌داد زیرا به‌آسانی در چشمه‌های سادهٔ رادیم و پولونیم در دسترس، و بسیار قدرتمند بودند. یک ذرهٔ α رادیم به تنهایی انرژیی را برای یک برخورد هسته‌ای تأمین می‌کند که اگر آن ذره در اختلاف پتانسیل میلیونها ولت شتاب می‌گرفت آن انرژی را می‌داشت و آن انرژی به ذرهٔ α امکان می‌دهد تا با نفوذ در هسته آن را

1. Charles Thomson Rees Wilson 2. Ben Nevis 3. Patrick Blackett

متلاشی کند. رادرفورد حدس می‌زد که ذره‌های دیگر، مانند پروتونها، را می‌توان «به‌عنوان مهمّات برای کندوکاوهای موردنظرش» به‌کار گرفت، هرگاه آنها نیز می‌توانستند انرژیهای میلیونها ولت را به‌دست آورند. عناصر پرتوزا در گسیل پروتون به اندازهٔ ذرات α گشاده‌دست نیستند امّا دو مهندس فیزیکدان کاوندیش، جان کوکرافت[1] و ارنست والتون[2] ماشینی را ساختند که باریکه‌های پروتون شتاب‌یافته تا چند صد هزار ولت تولید می‌کرد. آنان یک هدف لیتیم را با این باریکه بمباران کردند. هسته‌های لیتیم متلاشی، و ذرات α تولید شد. واکنش هسته‌ای استنتاج شدهٔ آنان، چنین بود

$$_{1}H^{1} + {}_{3}Li^{7} \rightarrow {}_{2}He^{4}$$

ماشین کوکرافت‌ـوالتون پروتونها را در یک لولهٔ مستقیم شتاب می‌داد. در حدود همان زمان ارنست لارنس[3] در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی یک ماشین شتاب‌دهندهٔ دایره‌ای که او آن را سیکلوترون می‌نامید توسعه داد. سیکلوترون لارنس ذرات باردار را به مسیرهای مارپیچ هدایت می‌کرد و آنها را در گامهای فزاینده، دوبار در هر دور مارپیچی، شتاب می‌داد. این طرح امتیازش این بود که در فاصلهٔ شتابگیری فضای کوتاهتر و ولتاژی کمتر از شتاب‌دهندهٔ خطی کوکرافت‌ـوالتون لازم داشت.

شتاب‌دهنده‌های کاوندیش و برکلی اجداد سلسلهٔ طویلی از شتاب‌دهنده‌های خطی و دایره‌ای، بودند که به‌وسیلهٔ فیزیکدانان و مهندسان در بسیاری از آزمایشگاهها توسعه یافتند. دست‌اندرکاران جدید فیزیک انرژی‌ـبالا میلیاردها دلار برای ماشینهای شتاب‌دهنده‌شان و برای اخلاف اتاقک ابری ویلسون، که برای آشکارسازی ذره به‌کار می‌آیند، هزینه می‌کنند. دهها، بلکه صدها دانشمند، مهندس و کاردان فنی برای انجام یک آزمایش با این تجهیزات لازم است. هم‌اکنون هدف ساختن ماشینهای شتاب‌دهنده‌ای است که به انرژیهای برخورد، معادل شتاب‌دهنده‌ای تا صدها میلیارد ولت برسد.

رادرفورد، کوکرافت و والتون را حمایت کرد و بدین ترتیب به آغاز دوران شتاب‌دهنده‌های بزرگ یاری رساند. امّا روش کار او استفاده از ماشینهای بزرگ و تأمین پول کلان لازم برای هزینهٔ آنها نبود. دستگاه‌های یک آزمایش معمولی رادرفورد روی یک میز کار ساخته می‌شد و با یک یا دو دانشجوی پژوهشگر کار می‌کرد و هزینهٔ سالانهٔ لازم آن احتمالاً در حدود پنجاه پوند بود. امّا او کاملاً آگاه بود که بمباران اتمهای سنگین بدون انرژیهای زیادی که فقط با شتاب‌دهنده‌های بزرگ فراهم می‌شود، بی‌فایده خواهد بود. او طرحهایی برای ساختن یک شتاب‌دهندهٔ خطی دو میلیون ولتی تجارتی و یک سیکلوترون را تصویب کرد، که چندان از آن سردر نمی‌آورد، امّا هرگز نتوانست سهم مهمی در آن داشته باشد، زیرا در سال ۱۹۳۷ چشم از جهان فروبست.

نوترون گریزپا

رادرفورد در سال ۱۹۲۰ سخنرانی بیکری معتبرش را برای دومین‌بار در انجمن سلطنتی ایراد کرد. در نخستین سخنرانی بیکری او، در سال ۱۹۰۴، توضیحی دربارهٔ تبدیلهای همراه با پرتوزایی بود. در

1. John Cockcroft 2. Ernest Walton 3. Ernest Lawrence

سخنرانی دوم، او از تبدیل‌های مصنوعی که اخیراً به یاری ذرات αی تحسین برانگیز به وجود آورده بود سخن گفت. از جمله او پیش‌بینی‌هایی نیز کرده که مهمترین آن آشنا کردن مخاطبانش با نوعی ذرهٔ به لحاظ الکتریکی خنثی بود: «در شرایطی، ممکن است یک الکترون [با یک پروتون] پیوندی بسیار نزدیکتر [از مورد اتم هیدروژن] داشته باشد و نوعی دوتایی خنثی ایجاد کنند. چنین اتمی خواص بدیعی خواهد داشت. میدان خارجی آن عملاً صفر خواهد بود. مگر آنکه بسیار نزدیک به هسته باشد، و در نتیجه این اتم می‌باید بتواند در ماده آزادانه حرکت کند. . . وجود چنین اتمهایی ممکن است برای توضیح ساختار عناصر سنگین لازم باشد.»

از نظر رادرفورد «دوتایی خنثی» که به زودی «نوترون» نامیده شد (واژه‌ای وام‌گرفته که پیش از آن در مورد دیگری به‌کار گرفته شده بود)، به‌عنوان جزء بنیادی ساختار هسته به پروتونها پیوست. تعداد پروتونها در یک هستهٔ بار مثبت آن و تعداد پروتونها به اضافهٔ نوترونها وزن اتمی آن را معین می‌کنند. مثلاً ایزوتوپ نیتروژن $_{7}N^{14}$، با بار هسته‌ای ۷+ و وزن اتمی ۱۴، شامل ۷ پروتون و ۷ نوترون است. در فصل ۲۶ خواهیم دید که نظریهٔ جدید و نتایج تجربی، تصویر رادرفورد در این مورد را که نوترون از ترکیب نزدیک الکترون و پروتون تشکیل شده باشد، تأیید نمی‌کند.

مسیر جیمز چادویک برای کشف نوترون طولانی و پُرپیچ و خم بود. زیرا نوترونها بار الکتریکی ندارند، به‌هنگام عبور از ماده ردهای مشاهده‌پذیری از یونها را به‌جا نمی‌گذارند، و در اتاقک ابر ویلسون خط سیر آنها دیده نمی‌شود؛ آنها برای آزمایشگر نامرئی بودند. همچنانکه چادویک راه پرپیچ و خمی را به سوی نوترون می‌پیمود، راههای نادرستی می‌پیمود و به بن‌بستهای بسیاری برمی‌خورد. چادویک در مصاحبه‌ای گفته بود، «آزمایشهای بسیاری انجام داده‌ام که دربارهٔ آنها هرگز چیزی نگفته‌ام.»

> بعضی از آنها کاملاً احمقانه بود. گمان می‌کنم این عادت یا تمایل یا هرچه می‌خواهید آن را بنامید، از رادرفورد گرفته‌ام. او گاهی آزمایشهای بسیار احمقانه‌ای انجام می‌داد، و بعضی از آنها را با هم انجام می‌دادیم. آنها واقعاً احمقانه بودند. امّا او هرگز تردید نمی‌کرد. گاهی دربارهٔ چیزی حرف می‌زد که ابلهانه به‌نظر می‌رسید. او از چیزهایی حرف می‌زد که اگر روی کاغذ نوشته می‌شد، ابلهانه بود، یا در اصل ابلهانه بود. امّا با اندکی تفکّر دربارهٔ آنها کم‌کم معلوم می‌شد که کلمات او برای بیان آنچه در سر دارد و در ذهن او می‌گذرد، کافی نیست، امّا آنچه در پشت آن بود ارزش فکرکردن را داشت. به‌نظرم همان‌چیز برای بعضی از این آزمایشهای [نوترونی] که گفتم احمقانه بوده است، به‌کار می‌آید. همیشه امکان پیش‌آمدن چیزی وجود داشت، و شخص نمی‌باید از چند ساعت کار بیشتر یا حتی چند روز کار برای حصول اطمینان لازم غفلت می‌کرد. . . امّا من یکریز کار می‌کردم. من راه دیگری برای ساخت هسته [یعنی، بدون نوترونها] نمی‌دیدم.

سرنخ نهایی که چادویک برای اکتشافش لازم داشت از پاریس سربرآورد. در سال ۱۹۳۱، ایرن ژولیو-کوری، دختر ماری کوری، و فردریک ژولیو همسرش تابش تولید شده از بمباران یک هدف بریلیم با ذرات آلفای حاصل از چشمهٔ پولونیم را توصیف کردند. وقتی آنان کوشیدند تا این تابش را با لایه‌هایی از پارافین تضعیف کنند، تابش به جای کمتر شدن، بیشتر شد ــ و این تابش از پروتونها تشکیل شده بود. توجیه آنان برای پروتونها این بود که از پارافین شامل هیدروژن به‌وسیلهٔ پرتوهای γ آزاد می‌شوند، اثری که آرتور کامپتون[1] در سالهای ۱۹۲۰ کشف کرده بود. آنان متوجه شدند برای اینکه پرتوهای γ این کار را انجام دهند می‌باید فوق‌العاده پُرانرژی باشند. رادرفورد می‌گفت «من باور ندارم.»

نه چادویک و نه او توضیحی بهتر از این نداشتند که: ذرات α ($_{2}He^{4}$) و نوترونها با هستهٔ بریلیم ($_{4}Be^{9}$) ترکیب می‌شوند و هسته‌های کربن ($_{6}C^{12}$) و نوترونهایی تولید می‌کنند (نوترون به‌صورت $_{0}n^{1}$ نشان داده می‌شود، زیرا آنها وزن اتمی تقریباً یک و بار الکتریکی صفر دارند)،

$$_{2}He^{4} + {}_{4}Be^{9} \rightarrow {}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1}$$

نوترونهای پُرجرم نامزد بسیار مناسبتر از پرتوهای γ تقریباً بی‌جرم به‌عنوان پرتابه‌هایی هستند که در برخورد با پارافین، پروتونها را از آن جدا کنند.

رادرفورد و چادویک دوازده سال را در جستجوی نوترون گذراندند. چادویک پس از یک ماه آزمایش پرجوش و خروش که مقالهٔ ژولیو-کوری انگیزهٔ آن بود، کشف نهایی را به‌عمل آورد. اسنو[2]، که در سالهای ۱۹۳۰ یکی از دانشجویان پژوهشگر کاوندیش بود می‌نویسد، «او به مدت سه هفته شب و روز کار می‌کرد.»

در گفتگویی که به صورت سنت کاوندیش در آمد:

«چادویک، خسته‌ای؟»

«نه آنقدر خسته که نتوانم کار کنم.»

پس از آنکه چادویک داستان پژوهش خود را برای گروه پژوهش کاوندیش بیان کرد، او درخواست کرد «مرا با کلروفورم بیهوش کنید تا دو هفته بخوابم.»

در خانه

اصل و نسب رادرفورد در نیوزیلند افرادی ساده و معمولی بودند؛ حتی با شهرت و نفوذ بعدی‌اش مردی ساده باقی ماند. او هرگز ثروتمند نشد. خانه‌هایی که با همسرش ماری ترتیب می‌داد بی‌تکلف و ساده بود. دیوید ویلسون[3]، جدیدترین زندگینامه‌نویس رادرفورد می‌نویسد، «نیونهام کاتیج[4]، خانهٔ کرایه‌ای آنان در کمبریج، یک خانهٔ راحت، بی‌سلیقه، دانشگاهی و فاقد زیبایی بود که با سه یا چهار خدمتکار به شیوهٔ زمان و با همسری اداره می‌شد که علاقهٔ اصلی‌اش گلکاری باغچه برای شوهری بود که علاقهٔ اصلی‌اش آزمایشگاه بود.»

1. Arthur Compton 2. C. P. Snow 3. David Wilson 4. Newnham Cottage

مارک آلیفنت[1]، جانشین چادویک به‌عنوان معاون رادرفورد در مدیریت کاوندیش می‌گوید، ماری رادرفورد (بعد از سال ۱۹۱۳ لیدی رادرفورد) زنی بود کُند ذهن، واقع‌بین، با صورتی گِرد و اندامی خِپل، امّا پُر جُنب و جوش. آلیفنت با شرح کوتاهی از زندگی خانوادگی رادرفورد ادامه می‌دهد:

> رادرفوردها، هم در نیونهام کاتیج و هم در خانه‌های ییلاقی اتاقهای خواب مجزا داشتند. آنان روابط عاشقانهٔ چندانی نداشتند. با وجود این با هم صمیمی بودند. لیدی رادرفورد چیز چندانی از کار شوهرش نمی‌فهمید، امّا از افتخاراتی که نصیب او می‌شد احساس سرافرازی می‌کرد و به هر انتقادی شدیداً واکنش نشان می‌داد. ماری در موارد بسیاری با شوهرش به‌صورت کودکی برخورد می‌کرد، هنوز می‌کوشید تا عیبهای غذا خوردن او را تصحیح کند. من هرگز نشنیدم که با بی‌حوصلگی به ماری پاسخ دهد، آن‌طور که اغلب مردان چنین رفتاری دارند.

سهم لیدی رادرفورد در گفتگوی سر میز صبحانه می‌توانست چنین باشد «اِرن[2]، آب از دهانت سرازیر شده.» یا اِرن «مربّا قطره‌قطره روی لباست می‌ریزه.»

تنها فرزند رادرفورد، آیلین[3]، با رالف فولر[4]، نظریه‌پرداز بزرگ در کاوندیش ازدواج کرد، و فولرها چهار فرزند داشتند. آیلین، به‌طور غم‌انگیزی، مدتی کوتاه پس از تولد چهارمین فرزندش، درگذشت. رادرفورد نوه‌هایش را دوست می‌داشت و می‌توانست وارد دنیای آنها شود. زندگینامه‌نویسان او عکسی دارند که در ساحل دریا گرفته شده از پدربزرگ که به طرحهای ساختمانی نوهٔ جوانش کمک می‌کند. از سوی دیگر مادربزرگ بیشتر مایل است درسهایی دربارهٔ سلوک و نزاکت به بچه‌ها بدهد؛ آنان او را «لیدی رادرفورد» یا «لیدی R» نامیدند.

مبانی موفقیت

رادرفورد، به‌عنوان یک فیزیکدان همان‌قدر صریح، ساده و بی‌پیرایه بود که در موارد دیگر زندگی، و بدون تردید این خصلت یکی از رموز موفقیتی بود. او می‌گفت: «من همیشه به‌سادگی معتقد بودم و خودم مرد ساده‌ای بودم.» او تأکید داشت اگر نتوانیم اصلی از فیزیک را برای بقال توضیح دهیم، گرفتاری مربوط به آن اصل است، نه بقال.

برای رادرفورد سادگی به معنی مفاهیم عینی و تجسم‌پذیر، با اندکی ریاضیات و لوازم مقدماتی بود. چادویک در سال ۱۹۳۷، اندکی پس از مرگ رادرفورد نوشت: «هر آزمایش پس از آزمایش دیگر چنان سرراست در ذهن راه می‌یافت، چنان منزّه و ناب و چنان قانع کننده بود که احساس شکوه و

1. Mark Oliphant

۲. Ern مخفف Ernest

3. Eileen 4. Ralph Fowler

ابهّت ایجاد می‌کرد و آنها به چنان کثرتی می‌رسیدند که تعجب‌آور بود کسی بتواند آن کارها را به انجام برساند. او شگفت‌انگیزترین بینش در فرایندهای فیزیکی را داشت، و با چند اشاره و اظهارنظر، کل موضوع را روشن می‌کرد. . . کارکردن با او پیوسته با لذت و شگفتی همراه بود. به‌نظر می‌رسید او پیش از انجام واکنش نتیجه را می‌داند، و آماده بود تا با اشتیاقِ مقاومت‌ناپذیر آزمایش دیگری را به راه اندازد.» رادرفورد می‌گفت، «دیگران ممکن است با نمادهایشان بازی کنند، ولی ما در کاوندیش حقایق استوار واقعی طبیعت را آشکار می‌کنیم.»

رادرفورد صدای پُرقدرتی داشت. وقتی یکی از دوستانش شنید که سخنرانی رادرفورد به‌وسیلهٔ رادیو از این طرف به آن طرف اقیانوس اطلس پخش می‌شود، پرسید، «چرا از رادیو استفاده می‌شود؟» بد خُلقیها و غلیانها ممکن بود موجب ترس شاگردان و دستیارانش شود، امّا توفان به زودی آرام می‌شد و احتمالاً کار به عذرخواهی می‌کشید. با وجود این، شایان ذکر است که در زیر این تندخویی و بی‌حوصلگی، تدبیری عالی نهفته بود. یک دوست قدیمی‌اش می‌گفت، «رادرفورد هرگز دشمن‌تراشی نمی‌کند، و دوستی را از دست نمی‌دهد.» البته این اغراق است؛ مردی با شُهرت و نفوذ رادرفورد به ناچار دشمنانی هم داشت. امّا یافتن حتی یک نفر از دوستان بی‌شمار او، که به او پشت کرده باشد، دشوار است. او از مشاجرهٔ علمی پرهیز و از بحثهای سیاسی و مذهبی اجتناب می‌کرد. وقتی موضوعات مورد اختلاف و جنجالی، گاه و بیگاه مطرح می‌شد، او راههایی می‌یافت تا آنها را دوستانه برای همهٔ افراد درگیر فرونشاند و آرام کند. برای این موهبت مدبّرانه و حاکی از محبت، رادرفورد متقابلاً خدمات ذی‌قیمتی از ده‌ها شاگردان مستعد و سخت‌کوش و انجمنها، دریافت می‌کرد. آنان او را دوست می‌داشتند.

رادرفورد مانند هم‌ترازانش در گروه مشاهیر ما ــ نیوتون، فارادی، ماکسول، گیبس، اینشتین و بور ــ توانست مدتی طولانی روی یک مسئلهٔ دشوار و یأس‌آور متمرکز شود، بدون آنکه حدّت و شدت یا اشتیاقش را از دست بدهد؛ به‌نظر می‌رسید که او هرگز خسته نمی‌شود. هارولد رابینسون[1]، فارغ‌التحصیل منچستر، داستانی می‌گوید که اشتیاق خالص رادرفورد را در کار آزمایشگاه، حتی در بدترین شرایط، نشان می‌دهد. رابینسون، نه به انتخاب و اختیار، در یک بعدازظهر زیبای رمق‌گیر، خود را با رادرفورد در آزمایشگاه یافت

> در یک تلاش ظاهراً تاحدی نومیدانه می‌خواستیم با تصفیهٔ چند پس‌ماندهٔ هوای مایع، نمونهٔ بسیار کوچکی از رادون [اماناسیون] به دست آوریم، که امیدوار بودم با آن کاری انجام دهیم. کوشش ما با لغزش زودگذر از طرف رادرفورد به پایان رسید، که نتیجهٔ آن ورود حجم هوای بیشتر از چیزی بود که پیش از آن موفق به استخراج آن شده بودیم ــ لغزشی که این اظهارنظر را در پی داشت، «خُب، این کاری بود که من آن را انجام دادم، نه شما.» من احساس کردم که این بعدازظهر را ممکن بود به نحو بهتری بگذرانیم، امّا نظر نهایی رادرفورد، درحالی‌که با آسودگی خیال به پیپش پُک می‌زد و به‌هم ریختگیها را جمع و جور می‌کردیم، این بود که: «رابینسون، می‌دانی من برای کسانی که برای کارکردن آزمایشگاه ندارند متأسفم!»

1. Harold Robinson

برای اختتام فهرست اسرار موفقیتهای رادرفورد، من یک رمز دیگر را اضافه می‌کنم: شانس. درست وقتی او دورهٔ کاری‌اش را آغاز کرد، که پرتوزایی کشف شده بود، و این پژوهش ترغیب کننده و جذّابی را می‌طلبید که دقیقاً مناسب سبک و حال و هوای خاص او بود. اگر، گیریم، سی سال بعد به دنیا می‌آمد آیا به همان خوبی این کارها را انجام می‌داد؟ احتمالاً نه، امّا نباید توان شگفت‌انگیز رادرفورد برای استفاده از شانس را دست‌کم بگیریم. گذشته از همهٔ اینها، وقتی او پژوهش پرتوزایی را آغاز کرد، آن‌طور که به مادرش گفت: «دونده‌های دیگری در مسیر این تحقیق» بودند، امّا کل تلاش آنان کمتر از او بود. آرتور ایو یک‌بار به او گفت، «رادرفورد تو آدم خوشبختی هستی، همیشه بر ستیغ موج حرکت می‌کنی!» و رادرفورد در پاسخ گفت، «دُرست! امّا این موج را من به وجود آورده‌ام، این طور نیست؟» سپس اضافه کرد «دست‌کم تا اندازه‌ای.»

۲۲

فیزیک و دوستیها

لیزه مایتنر

وین

تاکنون، ما بیست و دو فیزیکدان بزرگ را ملاقات کرده‌ایم. آیا از خود پرسیده‌اید که چه قدر سرگرم کننده می‌بود، اگر چند ساعتی را در یک گفتگوی خودمانی با یکی از آنها می‌گذراندیم؟ شاید نیوتون عصبی‌تر از آن بود که درگیر یک گفتگوی رضایت‌بخش شود؟ شاید اینشتین بی‌اعتنا بود؟ هایزنبرگ بسیار رسمی؟ رادرفورد بسیار پُر سر و صدا؟ فارادی بسیار پُرمشغله؟ ماکسول بسیار طنز آلود؟ بولتزمن بسیار پریشان احوال؟ شرودینگر بسیار خودخواه؟ دربارهٔ لیزه مایتنر، موضوع بعدی ما، چنین شک و تردیدها را ندارید. گذراندن یک عصر با وی خوشایند و جذاب می‌بود. او مصاحب خوبی بود.

لیزه مایتنر در سال ۱۸۷۸ در وین، در یک خانوادهٔ یهودی طبقهٔ متوسط آزادیخواه زاده شد. او سومین فرزند از هشت فرزند خانواده بود. پدرش حقوقدان و مردی با علایق گوناگون بود. روت سایم[1]، زندگینامه‌نویس اصلی مایتنر می‌نویسد: «او و همسرش هِدویگ[2] خانه‌شان را محل تجمعِ افراد جالب ــ قانون گذاران، نویسندگان، شطرنج بازان و حقوقدانان ــ کرده بودند. بچه‌ها بیدار مانده و گوش می‌دادند. سالها بعد وقتی از مایتنر دربارهٔ کودکی‌اش پرسیدند، او اغلب موارد را به یاد می‌آورد. 'مهربانی و خوبی فوق‌العادهٔ پدر و مادرم، و جوّ فوق‌العاده عقلانی، روشنفکرانه و جذّابی که من، برادرانم و خواهرانم در آن رشد می‌کردیم.'»

فرزندان مایتنر (پدر) با استعداد بودند و نتیجهٔ آن را دیدند. خواهر بزرگتر لیزه، آگوسته[3] (گوستی) نابغهٔ موسیقی بود، او آهنگساز و پیانونوازکنسرت شد. لیزه، موسیقی را دوست می‌داشت، امّا فاقد طبع

1. Ruth Sime 2. Hedwig 3. Auguste

آهنگسازی بود. در هشت سالگی علاقهٔ پیشرفته‌ای به ریاضیات و فیزیک داشت و هدف او تحصیل در دانشگاه بود. امّا در اتریشِ قرن نوزدهم، تحصیل در مدرسهٔ دخترانهٔ دولتی تا سن چهارده سالگی بود، که آمادگی لازم برای ورود به دانشگاه را تأمین نمی‌کرد. لیزه مایتنر را مانند ماری کوری تحصیل ناکافی دبیرستانی متوقف نکرد. او به کمک یک معلم خصوصی و کار سخت بی‌وقفه امتحان ماتورا[1]، یعنی امتحان ورود به دانشگاه را گذراند. شوخی خانوادگی این بود که اگر لیزه، هر دقیقه از روز کتابی در دستش نباشد، در امتحان ماتورا مردود خواهد شد.

مایتنر، در دانشگاه وین این فرصت فوق‌العاده خوب را پیدا کرد تا در آخرین دورهٔ درسهای فیزیک نظری که لودویگ بولتزمن تدریس می‌کرد حاضر شود. بولتزمن خرسند بود که بانوان در جلسات درس او حضور داشته باشند. اوتو فریش[2] خواهرزادهٔ مایتنر، که بعداً در مهمترین پژوهش مایتنر، با او همکاری داشت، می‌نویسد، «بولتزمن بینش فیزیکی لازم را برای پیکار در دست یافتن به حقیقت غایی به او داد، بصیرتی که او هرگز از دست نداد.» بولتزمن در زمان خود بهترین معلم فیزیک در جهان بود. او در اولین به دانشجویانش می‌گفت،

> اگر امروز همهٔ چیزهایی را که شامل قضایا، مفاهیم بسیار ظریف و اثباتهای پیچیده است به انجام نرساندم، پوزش می‌طلبم... فکر می‌کنم بسیاری از آنها بعداً ضمن کار آشکار خواهد شد. امروز فقط می‌خواستم چیزهای کاملاً معمولی را ارائه کنم، که اذعان می‌کنم همهٔ آن چیزی است که من دارم، از خودم است، روش کلی تفکر و احساس من است. همین طور در طول درس از شما انتظارهایی دارم که توجه کامل، پشتکار جدی، و ارادهٔ خستگی‌ناپذیر است. امّا مرا ببخشید، اگر پیش از آنکه پیشتر برویم چیزی را بخواهم که برایم بیشترین اهمیت را دارد: اعتماد شما، همنوایی شما، عشق شما، در یک کلام بزرگترین چیزی که می‌توانید بدهید یعنی خودتان.

مایتنر مسحور شده بود. او هر آنچه را که بولتزمن درخواست کرده بود ادا کرد، و به نوبهٔ خود عالیترین زمینهٔ فیزیک زمان خود را به‌دست آورد. یادداشتهای دقیق او از درسهای بولتزمن توجه پل اِرنفست[3]، شاگرد دیگر بولتزمن را که بعداً یک نظریه‌پرداز برجسته شد، جلب کرد. این دو باهم مطالعه می‌کردند، و مایتنر همان‌قدر از آموزش خلاق اِرنفست بهره‌مند می‌شد که از بولتزمن. مایتنر بعدها نوشت، «[او] یک معلم عالی و جالب بود. اطمینان دارم که کارکردن با او کمک بزرگی به توسعهٔ علمی من کرد.» با وجود این، مایتنر هنوز خجالتی، ساده‌لوح و دلربا بود. اِرنفستِ با تجربه‌تر گاهی او را ناراحت می‌کرد. مایتنر می‌نویسد، «باید اعتراف کنم که گاهی با گرایش او به مطرح کردن پرسشهایی که روی هم رفته مطالبی شخصی بود مضطرب می‌شدم.»

1. Matura 2. Otto Frisch 3. Paul Ehrenfest

مایتنر با بولتزمن و اِرنفست نقش نظریه‌پرداز را تمرین کرد. برای بهره‌گیری از نظریه‌ای که آموخته بود در آزمایشگاه، او یک پایان نامهٔ دکتری انتخاب کرد که شامل آزمون تجربی یکی از معادلات ماکسول می‌شد. او در سال ۱۹۰۵ امتحانات شفاهی‌اش را با بهترین درجهٔ ممکن (summa cum laude) گذراند؛ او دومین زنی بود که از دانشگاه وین درجهٔ دکتری گرفت.

در پاییز سال ۱۹۰۶ در همه جا فیزیکدانان از خبر اینکه بولتزمن، با افسردگی عمیق، اقدام به خودکشی کرده است، مات و مبهوت شدند. درک کار بولتزمن برای مایتنر دشوار بود؛ او فقط می‌توانست آن را «ناپایداری ذهنی» تشخیص دهد. امّا این امر او را به حرفه‌ای در فیزیک نزدیکتر کرد. روت سایم[1] می‌نویسد، «مرگ بولتزمن عزم او را برای ماندن در دنیای فیزیک تقویت کرد، تا جرقه‌ای که در وجود او روشن کرده بود، زنده بماند.»

ناگهان و به صورتی غیر منتظره مایتنر مسیر تحقیقی را یافت که درباقی دورهٔ کاری‌اش آن را دنبال کرد. استفان مایر[2]، یک پیشگام در پژوهش پرتوزایی، زمام امور مؤسسهٔ بولتزمن را به دست گرفت، و از مایتنر دعوت کرد که دربارهٔ رفتار تابش α و β در گذر از فلزات مطالعه کند. مایتنر بر پدیدهٔ پراکندگی تمرکز کرد، که رادرفورد بعداً آن را بسیار «شیطانی» و سپس برای دنبال کردن هستهٔ اتم بسیار مفید یافت.

برای مایتنر، فیزیک همیشه همان‌قدر یک تلاش انسانی بود که یک تلاش فنّی. او مشاوران و همکارانش را برای خصلتهای انسانیشان انتخاب، و با آنان به‌عنوان دوستان نزدیک رفتار می‌کرد. در سال ۱۹۰۷ مایتنر، پس از یک سال پژوهش موفقیت‌آمیز با استفان مایر، تصمیم گرفت به برلین برود تا با ماکس پلانک، که او را در جامعهٔ فیزیکدانان بیش از همه تحسین می‌کرد، کار کند.

پیروزیهای برلین

مایتنر در برلین گرمای دوستی پلانک و تلخی طرز برخورد آلمانی به حضور زنان در دانشگاهها را تجربه کرد. در سراسر قرن نوزدهم، زنان فقط می‌توانستند به صورت ثبت نام نکرده و مستمع آزاد در کلاسهای دانشگاههای آلمان حاضر شوند. بنابراین مایتنر مجبور بود از پلانک اجازهٔ حضور در کلاسهای درس او را درخواست کند. پلانک مردی مهربان و مشفق، امّا شکاک بود. مایتنر در یادداشتهای خاطراتش با عنوان نگاهی به گذشته ملاقاتشان را چنین توصیف می‌کند: «او مرا با محبت بسیار پذیرفت و پس از آن مرا به خانه‌اش دعوت کرد. نخستین باری که در آنجا او را دیدم از من پرسید: 'شما قبلاً درجهٔ دکتری گرفته‌اید! بیش از این چه می‌خواهید؟' من در پاسخ گفتم می‌خواهم درکی واقعی از فیزیک به دست آورم، او فقط چند جملهٔ دوستانه گفت و موضوع را بیشتر از آن دنبال نکرد. طبیعتاً، من نتیجه گرفتم که او اعتقاد چندانی به شاگردان زن ندارد، و احتمالاً در آن زمان به قدر کافی درست بود.»

شاید پلانک دربارهٔ تخصص و حرفه‌ای بودن زنان تردیدهایی داشته است، امّا او خرسند بود که مایتنر را در خانه‌اش بپذیرد و به او خوشامد بگوید. جلسات موسیقی عصرانه شکل مطلوب تفریح او

1. Ruth Sime 2. Stefan Meyer

بود. نوازندگان، اغلب پلانک در پیانو، یوزف یواخیم[1] ویولونیست مشهور کنسرت، و (بعداً) اینشتین با ویولن، بودند. مایتنر چیزی نمی‌نواخت، امّا عمیقاً از موسیقی لذت می‌برد. در میان دوستان نزدیک همسِن او دختران دوقلوی همانند پلانک، اِما[2] و گرته[3] بودند.

در جمع حاضران جلسات موسیقی عصرانهٔ خانهٔ پلانک، یک صدای آواز عالی تِنور از اُتو هان[4] بود، اتو هان رادیوشیمیدان جوان، دست پروردهٔ رادرفورد در مونترآل بود. هان خونگرم، معاشرتی و خودمانی بود، او بدون معطلی پیشنهاد کرد که مایتنر در پژوهش پرتوزایی به او ملحق شود. مایتنر که هنوز خجالتی و در محیط پرجُنب و جوش برلین احساس امنیت نمی‌کرد، به سرعت هان را یک دوست و یک همکار ارزشمند تشخیص داد. مایتنر در نگاهی به گذشته یادآور می‌شود، «هان، همسن خود من بود و رفتاری بسیار خودمانی داشت، و من این احساس را داشتم که بدون تردید می‌توانم هر چیزی را که می‌خواهم بدانم، از او بپرسم. علاوه بر این او اعتبار و شهرت بسیار خوبی در پرتوزایی داشت، بنابراین متقاعد شد که می‌توانم چیزهای زیادی از او بیاموزم.»

بدین ترتیب، یک همکاری علمی بی‌نظیر، آغاز شد. هان یک شیمیدان، ماهر در فنون جداسازی شیمیایی و مجرّب در رادیوشیمی بود، و مایتنر فیزیکدانی بود که به سرعت هم به‌عنوان نظریه‌پرداز و هم آزمایشگر پیشرفت می‌کرد. آنان با یکدیگر می‌توانستند نیازهای میان‌رشته‌ایِ پژوهش پرتوزایی را برآورده کنند. آنان از سال ۱۹۰۷ تا سال ۱۹۳۸ در یک مؤسسه کار می‌کردند، تا آنکه مایتنر مجبور شد به علت قوانین نژادی نازی، آلمان را ترک کند. در طول این زمان، آنان نه‌تنها به‌عنوان همکار، بلکه به‌عنوان دوستان نزدیک با هم کار می‌کردند. هان آراسته، تر و تمیز و زیبا، و مایتنر ریزنقش و دوست داشتنی بود. امّا، هرگز رابطهٔ عاشقانه‌ای بین آنها نبود. قواعد اخلاقی ویکتوریایی می‌باید رعایت می‌شد: آنان با هم غذا نخوردند یا برای قدم زدن با هم بیرون نرفتند، و به مدت شانزده سال آنان یکدیگر را با عنوان آقای هان و خانم مایتنر خطاب می‌کردند. این رابطهٔ همکاری مانند کوری‌ها نبود.

هان به‌عنوان دستیار در مؤسسهٔ شیمی دانشگاه برلین کار می‌کرد، که شیمی آلی‌دان مشهور، امیل فیشر[5] رئیس آن بود. امّا مایتنر کار ثابتی نداشت؛ بدتر آنکه زنان در مؤسسهٔ فیشر راه نداشتند. (یکی از موارد ترس فیشر این بود که موهای زنان خطر آتش‌سوزی دارد.) امّا بر اثر ترغیب و اصرار هان، فیشر موافقت کرد که مایتنر بتواند در یک اتاق زیرزمینی که قبلاً کارگاه نجّاری بوده و فقط یک در ورودی داشته است، کار کند. مایتنر بدون آنکه قدمی در جای دیگر مؤسسه بگذارد از این اتاق استفاده می‌کرد. او این وضع و تحقیرهای دیگر را با شکیبایی تحمل کرد. تنها توالت موجود برای او در رستوران پایین‌دست خیابان بود. برای بعضی از دستیاران مؤسسه، او یک زن نامرئی بود. آنان وقتی مایتنر را همراه با هان می‌دیدند به‌عنوان سلام می‌گفتند، «روز بخیر آقای هان.»

خارج از مؤسسه، مایتنر روابط دوستانهٔ بادوام بسیاری در جامعهٔ فیزیک به وجود آورد. در یک

1. Josef Joachim 2. Emma 3. Grete 4. Otto Hahn 5. Emil Fischer

مباحثهٔ غیر رسمی که به‌وسیلهٔ هاینریش روبنس[1] منعقد شده بود مایتنر با جیمز فرانک[2] و ماکس فون لاوئه[3] ملاقات کرد. فرانک آزمایشگری بود که با گوستاو هرتز آزمایشی را انجام داده و برندهٔ جایزهٔ نوبل شده بودند، آزمایشی که واقعیت کوانتش اتم را نشان می‌داد. مایتنر و فرانک وقتی برای نخستین بار ملاقات کردند فهمیدند که به یک زبان گفتگو می‌کنند. بیشترین شهرت لاوئه به خاطر پیشگامی او در پراش پرتو-x بود. لاوئه و مایتنر در خلال روزهای سیاه رژیم نازی از یکدیگر حمایت کردند. سالها بعد، لاوئه سپاس خود از مایتنر را چنین بیان کرد: «آیا می‌دانید گفتارهای شما چه اثر عمیقی بر ما داشته است؟. . . لطف و صفای شما، ملاحظه‌کاری و عنایت شما تأثیر خود را داشت. اندیشهٔ انسانیت تحقق یافت، از این‌رو من سپاسگزار شما هستم. . . من از چیزهایی که برای آنها هرگز خودم را نمی‌بخشیدم، نجات یافتم.»

به‌تدریج و به‌طوری فزاینده موانع علیه زنان در دانشگاههای پروسی کاهش می‌یافت. در سال ۱۹۰۹، تحصیل دانشگاهی برای زنان رسماً تصویب شد، و به مایتنر امکان دسترسی به آزمایشگاههای مؤسسهٔ شیمی داده شد (و یک اتاق خاص زنان به وجود آمد). امّا هنوز حقوقی به او پرداخت نمی‌شد و او با دریافت مستمری از والدینش با قناعت زندگی می‌کرد. با وجود شرایط کاری نامساعد، مایتنر و هان سه مقالهٔ مهم در سال ۱۹۰۸ و شش مقاله در سال ۱۹۰۹ منتشر کردند. تمرکز اصلی آنان بر «β-گسیل‌ها» بود، آن عناصر پرتوزایی که به هنگام واپاشی، ذرات β منتشر می‌کنند. نظریهٔ گیج‌کننده و حیرت‌انگیز «واپاشی-β» بیش از یک دهه موضوع مورد علاقهٔ مایتنر بود.

کار اساسی رادیوشیمی، جداسازی یک عنصر از عناصر دیگر است که می‌توان آن را به روش‌های شیمیایی انجام داد. مثلاً می‌توان روی یک مخلوط، اعمالی شیمیایی انجام داد به‌طوری که ترکیباتی از عناصر معین رسوب کنند و عناصر دیگر در محلول باقی بمانند. روشهای شیمیایی کارهای متعددی انجام می‌دهند، امّا به ندرت «کامل (تمیز)»اند ــ یعنی به ندرت توانایی تولید محصول کاملاً خالص را دارند. هان و مایتنر روشی را به وجود آوردند که کارآمدتر بود. آنان کشف کردند که یک اتم-«دختر» تشکیل شده از یک فروپاشی پرتوزا ممکن است به قدری پرانرژی باشد که از سطح جامدی که روی آن تشکیل شده است دور شود و بتوان آن را به صورت خالص بر سطح دیگری جمع‌آوری کرد. شبیه دانهٔ ذرتی که در برخورد با صفحهٔ داغ بیرون می‌جهد و در جای دیگری فرود می‌آید.

سرانجام، در سال ۱۹۱۲ مایتنر این فرصت را یافت تا از کارگاه نجاری خارج شود، و به نخستین پله‌های مراتب دانشگاهی دست یابد. مؤسسه‌هایی برای شیمی و شیمی‌فیزیک با حمایت مالی قیصر ویلهلم در دالم[4]، در حومهٔ برلین گشوده شد. هان به‌عنوان «دانشیار علمی» منصوب شد و مسئولیت بخش پرتوزایی در مؤسسهٔ شیمی قیصر ویلهلم به او واگذار شد. مایتنر به‌عنوان «فیزیکدان مهمان» بدون حقوق به او پیوست.

1. Heinrich Rubens 2. James Franck 3. Max von Laue 4. Dahlem

در حدود همان زمان، پلانک، مایتنر را به‌عنوان دستیارش منصوب کرد. کار مایتنر بی‌اهمیت بود، او اوراق شاگردان را تصحیح می‌کرد و نمره می‌داد. امّا او پلانک را دوست داشت، و این نخستین مقام دانشگاهی او بود که حقوق دریافت می‌کرد. چند سال بعد فیشر، که بدگمانی‌اش دربارهٔ کار زنان در آزمایشگاه را از دست داده بود، ترتیبی داد که به مایتنر همان عنوان هان یعنی دانشیاری علمی داده شود، امّا حقوق دریافتی او به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از حقوق هان بود. بخش پرتوزایی، اکنون لابراتوریم هان‌ـ‌مایتنر بود. تفاوت حقوق، به کنار، مایتنر اکنون می‌دانست که کامیاب شده است. او به یکی از دوستانش نوشت، «من با تمام وجود و از ته قلب فیزیک را دوست می‌دارم. نمی‌توانم تصور کنم که فیزیک بخشی از زندگی من نباشد. این نوعی عشق شخصی است، عشقی که شخصی نسبت به کسی دارد که از جهات بسیاری برای او خوشایند و دل‌انگیز است. و من، که گرایش به عذاب وجدان دارم، بدون کمترین عذاب وجدانی فیزیکدان هستم.»

مایتنر و هان در مواضع جدیدشان به جستجوی بسیار دشواری برای یافتن عنصر پرتوزایی با عمر طولانی پرداختند که فکر می‌کردند پیشگام، «مادهٔ مادرِ» اکتینیم است. این کار عمدتاً به‌وسیلهٔ مایتنر در خلال سالهای جنگ، به مدت چهار سال انجام شد. در این مدت هان به‌طور فعال در خدمت ارتش بود و مشاورهٔ آنان عمدتاً به‌وسیلهٔ پست انجام می‌شد، و مقالهٔ نهایی در سال ۱۹۱۸ منتشر شد. استفن مایر که همواره طرفدار مایتنر بود، برای نامگذاری عنصر جدید، پیشنهادهایی داشت: «لیزونیم» یا «لیزوتونیم». نام رسمی پروتاکتینیم جذابیت کمتری داشت.

حتی پیش از موفقیت پروتاکتینیم، مایتنر می‌توانست دوران شکوفایی بیشتر کارش را ببیند. او از پراگ پیشنهاد جالبی برای مقام دانشگاهی جزء و چشم‌اندازهای عالی برای پیشرفت دریافت کرد. پلانک متوجه این رویداد شد و ترتیبی داد تا فیشر از آن مطلع شود. فیشر حقوق او را تا سه هزار مارک زیاد کرد، و مایتنر با خوشحالی در برلین ماند.

پیشرفت مایتنر در دنیای دانشگاهی ادامه یافت. در سال ۱۹۱۷ بخش فیزیک مربوط به خودش به او واگذار شد و حقوق او تا چهار هزار مارک افزایش یافت (اساساً معادل حقوق پنج هزار مارک هان، که شامل حق همسر نیز می‌شد.)، و لابوراتوریم هان‌ـ‌مایتنر به دو قسمت تقسیم شد، لابراتوریم هان و لابراتوریم مایتنر. دو سال بعد مایتنر عنوان جدید استاد مؤسسه را داشت، و احتمالاً نخستین زنی بود که در آلمان دارای عنوان استادی می‌شد. مایتنر برای این عنوان ارزش زیادی قائل نبود، اما «از این لحاظ که مایهٔ دلخوشی دوستانم می‌شود، لذت می‌برم.»

مسئلهٔ واپاشی‌ـβ

مایتنر و هان از آغاز همکاریشان به عناصر پرتوزایی که با تولید ذرات β فرومی‌پاشیدند علاقه‌مند بودند. معمای عجیبی دربارهٔ واپاشی β در مقابل واپاشی α وجود داشت که مایتنر مصمم به حل آن بود. ذرات آلفای حاصل از یک عنصر پرتوزای معین، همیشه با حدود انرژی یکسانی ظاهر می‌شوند. از سوی

دیگر ذرات β با انرژیهایی گسیل شدند که گسترهٔ پیوستهٔ وسیعی، عملاً از صفر تا یک مقدار ماکزیمم معین را می‌پوشاند. این الکترونها از کجا می‌آیند؟ مایتنر معتقد بود که آنها تا حدی منشأ «ثانویه» دارند، منشأیی که آنها به صورت الکترونهای اولیه از هسته گسیل می‌شدند و سپس در فرایندهای ثانویه انرژی را به صورت پرتوهای x در میدان الکتریکی قوی هسته‌ها، از دست می‌دادند.

یکی از همکاران رادرفورد در آزمایشگاه کاوندیش، به نام چارلز اِلیس[1] با این نظر مخالف بود. او مطمئن بود که آثار ثانویهٔ پیشنهادی مایتنر بسیار کوچکتر از آنند که طیف پیوستهٔ ذرات بتای (β) مشاهده شده را توجیه کنند. الیس در نامه‌ای که در سال ۱۹۲۵ نوشته شده، نکات مورد توافق و عدم توافق آنان را چنین خلاصه کرد: «ما هر دو موافقیم که وقتی [ذرات β] خارج از اتم مادر هستند، از لحاظ سرعت ناهمگن‌اند [گسترهٔ پیوسته‌ای از انرژیها را می‌پوشانند]. ما هر دو موافقیم که هستهٔ کوانتیده می‌باید [ذرات β] با [انرژی] معینی بدهد. درحالی‌که شما فکر می‌کنید آثار جنبی گوناگون به قدر کافی بزرگ‌اند تا ناهمگنی مشاهده شده را تولید کنند، من فکر می‌کنم آنها بسیار بسیار کوچک‌اند.»

الیس و شاگرد او ویلیام ووستر[2] درصدد برآمدند که این موضوع را با آزمایشی که دیدگاه آنان را قویاً تأیید کند انجام دهند. مایتنر آزمایش آنان را تکرار کرد و به الیس نوشت: «ما نتایج شما را به طور کامل تأیید می‌کنیم. اکنون به‌نظر می‌رسد که نظر شما که تابشهای β در اصل ناهمگن است [و طیف وسیعی را دربر می‌گیرد] کاملاً درست است. امّا من این نتیجه را به هیچ وجه نمی‌فهمم.»

مناظرهٔ طولانی مایتنر-الیس به پایان رسید، امّا ماهیّت بنیادی واپاشی β همچنان مرموز باقی ماند. مسئله این بود که دو طرف مناظره معتقد بودند انرژی کل فرایند واپاشی بتا ثابت است. مقداری از این انرژی به ذرات β و مقداری به یک هستهٔ جدید داده می‌شود. امّا اگر انرژی β کم بود، آنچنان‌که در طیفی که الیس قبلاً و اکنون مایتنر از آن جانبداری می‌کردند چنین بود، مجموع این دو انرژی با انرژی کل جور درنمی‌آید. بقیهٔ انرژی چه می‌شد؟ نظریه‌پردازان دُچار بحران بودند. مدتی بور درصدد برآمده بود تا اصل پایستگی انرژی را در مقیاس اتمی نادیده بگیرد.

معلوم شد که اقدام سخت و شدید لزومی ندارد: ولفگانگ پائولی[3] اندیشهٔ متفاوتی داشت. او مانند همیشه برخلاف عرف چکیده‌ای از نظریه‌اش را در نامهٔ سرگشاده‌ای، در سال ۱۹۳۰، برای لیزه مایتنر و هانس کایگر و دیگر کسانی که در کنفرانس توبینگن[4] حضور داشته‌اند ارسال کرد. او ذرهٔ جدیدی را که «نوترون» می‌نامید مطرح کرد، امّا این ذرهٔ نوترونی نبود که دو سال بعد چادویک، همراه با پروتون در هسته مشاهده کرد. مضمون نامهٔ پائولی به این شرح بود:

> خانمها و آقایان عزیز پرتوزا، به‌عنوان نویسندهٔ این خطوط، که برای او عنایت بزرگوارانهٔ شما را درخواست می‌کنم، می‌خواهم جزئیات بیشتری را که من با آن مواجه هستم برای شما

1. Charles Ellis 2. William Wooster 3. Wolfgang Pauli 4. Tübingen

توضیح دهم. . . طیف پیوستهٔ β، به شدت نیازمند درمان است. به این معنی که احتمالاً در هسته، ذراتی به لحاظ الکتریکی خنثی وجود دارد که من آنها را نوترون می‌نامم، این ذرات اسپین یک دوم دارند و از اصل طرد تبعیت می‌کنند و علاوه بر آن با کوانتومهای نور این تفاوت را نیز دارند که با سرعت نور حرکت نمی‌کنند. جرم این نوترون می‌باید در همان حدود جرم الکترون، به هر حال، بزرگتر از ۰٫۰۱ جرم پروتون نباشد. در این صورت طیف پیوستهٔ β قابل فهم می‌شود، با این فرض که در واپاشی β یک نوترون همراه با الکترون گسیل می‌شود، به طوری که مجموع انرژیهای نوترون و الکترون ثابت می‌ماند. . .

در این لحظه اطمینان کافی ندارم که چیزی دربارهٔ این ایده منتشر کنم، و با اطمینان به شما عزیزان دست‌اندرکار پرتوزایی متوسل می‌شوم، با این پرسش که چگونه می‌توانیم از طریق آزمایش وجود چنین نوترونی را ثابت کنیم، اگر قابلیت نفوذ آن برابر یا در حدود ۱۰ برابر نفوذ تابش γ باشد، من می‌پذیرم که شاید راه علاج پیشنهادی من در ابتدا فقط اندکی محتمل باشد، زیرا اگر نوترونها وجود داشتند، می‌باید مدتها پیش مشاهده شده باشند! امّا نابرده رنج گنج میسر نمی‌شود. اهمیت و جدّی بودن وضع و حال طیف پیوسته با گفته‌ای از دبی[1] پیشگام محترم من در این‌باره روشن می‌شود. آقای دبی اخیراً در بروکسل به من گفت: «وای، بهتر است ابداً در این‌باره فکر نکنید، مثل فکر کردن دربارهٔ مالیاتهای جدید.» از این‌رو باید دربارهٔ هر وسیلهٔ نجاتی بحث کنیم. بنابراین متخصصان پرتوزایی گرامی امتحان کنید و تصمیم بگیرید! متأسفانه من نمی‌توانم شخصاً در توبینگن باشم. با درود فراوان به همگی شما، حقیرترین و خدمتگزار مطاع شما، و. پائولی.

پیشنهاد پائولی در حقیقت «علاج از روی ناچاری» فقط اندکی خفیف‌تر از تمایل بور به کنارگذاشتن اصل پایستگی انرژی در مورد ذرات بنیادی بود. «نوترونِ» پائولی جرم اندکی داشت (برآورد او به مراتب بزرگ‌تر از مقدار واقعی بود) و بدون بار الکتریکی، پائولی از همکارانش درخواست کرد تا «امتحان کنند و تصمیم بگیرند»، امّا آنان چگونه می‌توانستند؟ در آن زمان هیچ‌گونه تجهیزات آزمایشگاهی که بتواند، به طور مستقیم یا غیرمستقیم، چنین ذره‌ای را آشکارسازی کند موجود نبود. کافی بود تا ارواح پیروان مکتب تحققی یا اثبات‌گرایان (positivists) قرن نوزدهم احضار شوند، آنان هر آنچه را که به طور مستقیم مشاهده‌پذیر نبود، نمی‌پذیرفتند. امّا ناچاری و استیصال، اعتماد به نظریه‌های عجیب و غریب به بار می‌آورد. اِنریکو فرمی[2]، در سال ۱۹۳۴ نظریهٔ کاملتری از واپاشی β را پیشنهاد کرد که در آن نوترونهای چادویک (مشاهده شده در سال ۱۹۳۲) ساکنان اولیهٔ هسته بودند. در واپاشی β نوترونها به یک الکترون (یک ذرهٔ β)، یک پروتون، و یکی از «نوترونهای» پائولی، که اکنون فرمی آنها را «نوترینو» می‌نامید، تبدیل می‌شدند. نظریهٔ فرمی نکته‌های مبهم واپاشی β، همچنین برخی مسائل مربوط به آمار

1. Debye 2. Enrico Fermi

هسته‌ای، را روشن کرد. نوترینوها به‌عنوان انواع جدیدی از ذرات بنیادی به الکترونها، پروتونها، نوترونها، و «پوزیترونهای» جدیداً کشف شده (الکترونهای با بار مثبت) پیوستند، گرچه تا بیست و دو سال بعد، به‌طور تجربی آشکارسازی نشدند. جرم نوترینوی فرمی هنوز یک مسئلهٔ مورد بحث است.

کابوس‌های برلین

در ۳۰ ژانویهٔ ۱۹۳۰، آدولف هیتلر به‌عنوان صدراعظم رایش آلمان سوگند یاد کرد. اگر پیش از استقرار او، تردیدهایی دربارهٔ مقاصدش وجود داشت، معدودی از آنها، از آن پس باقی‌ماند. در ماه مارس رایش استاگ مُنحل شد، انتخابات برنامه‌ریزی شده انجام پذیرفت، و هیتلر قلادهٔ میلیشیای شخصی‌اش را برای سرکوب هرگونه مخالفت رها کرد. مایتنر، همچون اغلب دانشمندان دیگر، نمی‌توانست آنچه را که در حال وقوع بود باور کند، و امیدوار بود که عقل سلیم پیروز شود. او به هان، که از ایالات متحده دیدار می‌کرد نوشت، «اوضاع سیاسی عجیب و غریب است، امّا من بسیار امیدوارم که وضع آرامتر و معقولتر شود.» دو هفتهٔ بعد او نوشت، «همه چیز و هر کس تحت‌تأثیر آشوبهای سیاسی است.»

سیاستهای نژادی حزب نازی هیتلر به زودی اعمال شد. در ماه آوریل تحریم کار یهودیان در سراسر کشور اعلام و یک مبارزهٔ عمومی برای اخراج یهودیان از همه نوع کارهای دولتی، پزشکی، قضایی، فرهنگی، آموزشی و هنری آغاز شد. برنارد روست[1] وزیر علوم پروس امیدوار بود تحریم یهودیان را با اخراج مشهورترین یهودی آلمان و در واقع جهان، آلبرت اینشتین، از فرهنگستان علوم پروس تشدید کند. امّا اینشتین پیش از آنکه مأمور نازی بتواند علیه او اقدامی بکند، از خارج کشور اعلام کرد که او به آلمانی باز نمی‌گردد که در آن «آزادی مدنی، بُردباری و برابری برای همهٔ شهروندان در برابر قانون وجود ندارد و گروهی اراذل خشک مغزِ میلیشیای نازی بر آن حکومت می‌کنند.»

بدین ترتیب مهاجرت بعضی از عالیترین دانشمندان و روشنفکران آلمان، آغاز شد. جیمز فرانک[2]، مدیر دومین مؤسسهٔ فیزیک درگوتینگن، یکی از نخستین استعفادهندگان بود. به دنبال او ماکس بورن[3]، رئیس مؤسسهٔ فیزیک نظری در گوتینگن، و ریچارد کورانت[4] یک ریاضیدان برجسته استعفا کردند. وزیر جدید علوم از دیوید هیلبرت[5] بزرگترین ریاضیدان گوتینگن می‌پُرسد، آیا مؤسسه‌ها: «از عزیمت و خروج یهودیان و دوستانشان آسیب دیده‌اند؟» هیلبرت در پاسخ می‌گوید، «آقای وزیر آسیب ندیده‌اند؛ اکنون دیگر وجود ندارند!»

در این جوّ معیارهای اخلاقیِ ویران شده، واکنش لیزه مایتنر به‌طور مخاطره‌آمیزی مبهم بود. او به حرف پلانک، که به قول بورن، «اطمینان داشت خشونت و تعدی طی زمان فروکش خواهد کرد و همه چیز به حالت عادی بازخواهد گشت گوش می‌کرد. او نمی‌دید که فرایند به‌طور برگشت‌ناپذیر ادامه

1. Bernhard Rust 2. James Franck 3. Max Born 4. Richard Courant 5. David Hilbert

خواهد یافت.» پلانک، مطمئن‌ترین مشاور مایتنر، به او توصیه می‌کرد که بماند و هان هم همین کار را کرد. به‌طوری که مایتنر بعداً به یکی از دوستانش نوشت، خطر فزاینده را احساس می‌کرد، «امّا فقط بسیار مایل بودم گفته‌های پلانک و هان مرا متقاعد کند.» گرفتاری او دردآور بود. روت سایم[1] می‌نویسد: «مهاجرت دشوار بود؛ جهان دُچار بحران و رکود شده بود و موقعیتها کمیاب. لیزه نمی‌توانست به ناشناخته روی آورد، روزهای اولیه‌اش در برلین را بار دیگر از سر بگذراند، غریبه‌ای وحشت‌زده و بیگانه‌ای در سرزمینی بیگانه باشد، او سخت به بخش فیزیکش وابسته بود: من آن را از سنگ اولش بنا کرده‌ام، آن کار تمام زندگی من است، و جدا شدن از آن برای من بسیار دشوار به نظر می‌رسید.»

او بورس یک سال اقامت در مؤسسهٔ بور در کپنهاگ را از دست داد، و امکان پستی در کالج سوارتمور[2] در ایالات متحده را رد کرد. (سوارتمور نمی‌توانست نیازهای او را از لحاظ فضا، کارکنان، و تجهیزات آزمایشگاهی تأمین کند.)

سایم می‌نویسد، «لیزه مایتنر کار خود را ترک نکرد تا همه چیز از دست رفت، و اخراج شد.» ابتدا، از دانشگاه برلین اخراج شد، و به او اجازه داده نشد تا در ملاقاتها و مباحثات آنجا حضور پیدا کند. پلانک، لاوئه، و هان همگی ضد نازی بودند، و برای مدتی توانستند با استفاده از تابعیت اتریشی او به‌صورت سپر، از او حفاظت کنند. سپس در سال ۱۹۳۸ موضوع الحاق (Anschluss) اتریش پیش آمد و مایتنر دیگر آن وسیلهٔ دفاعی ضعیف را نیز نداشت. هان دائماً زیر حملهٔ طرفداران جاه‌طلب نازی در مؤسسه‌اش بود، و کم‌کم جرئت و جسارت خود را از دست می‌داد. او زیر فشار مقامات ارشدش، از مایتنر خواست که دیگر به مؤسسه نیاید. او در دفتر خاطراتش نوشت، «در حقیقت او مرا بیرون انداخت.» مُهلتی وجود داشت، اما اطمینان‌بخش نبود. بعدها او در دفتر خاطراتش نوشت: «وعده‌ها بی‌فایده‌اند، به آنها وفا نمی‌شود. امکانات، کمتر می‌شوند.» او می‌دانست که می‌باید از آلمان خارج شود، امّا اکنون بدون گذرنامهٔ معتبر و محدودیت حاصل از فرمان اخیر ممنوعیت کارکنان فنی و دانشگاهی برای خروج از آلمان، در دام افتاده بود.

در این حال بسیاری از دوستان مایتنر تلاشهای قهرمانانه‌ای کردند تا او را از آلمان خارج کنند. در هُلند، دو فیزیکدان، کوستر[3] و آدریان فوکر[4] می‌کوشیدند تا پول کافی، دست‌کم برای مستمری یک سال در یک دانشگاه هلندی فراهم کنند. بور بیهوده در جستجوی بورسی بود تا از کار او در کپنهاگ حمایت کند. پل شرر[5]، شیمی فیزیکدان در زوریخ، پی‌درپی به او تلگراف می‌زد که برای «کنفرانسی» به آنجا برود، امّا این راه هم بسته بود، زیرا کشور سویس بدون گذرنامهٔ معتبر او را نمی‌پذیرفت. طی این اقدامات نجات دیوانه‌وار پیتر دبی، رئیس مؤسسهٔ شیمی فیزیک قیصر ویلهلم در برلین، که ملیت هلندی‌اش از او محافظت می‌کرد، خط ارتباط را باز نگه داشته بود. سرانجام، بور یک امکان دیگر را فراهم ساخت: شاید مانه سیگبان، فیزیکدان تجربی، جایی برای مایتنر در انستیتوی جدیدش در استکهلم داشت.

1. Ruth Sime 2. Swarthmore 3. Dirk Coster 4. Adriaan Fokker 5. Paul Scherrer

فوریت و اضطرار به ناامیدی و استیصال کشانده شد. دبی به کوستر پیام رمزداری، با یک معنی صریح و روشن، فرستاد: «اگر به برلین آمدید، ممکن است خواهش کنم با ما بمانید، و (البته مشروط بر اینکه اوضاع هنوز مطلوب باشد) اگر خواستید زودتر بیایید ــ انگار که یک *SOS دریافت کرده‌اید ــ برای من و همسرم مایهٔ دلخوشی بیشتری خواهد بود.» کوستر به برلین رفت و با مراقبت دقیق که موجب سوءظن نشود، مایتنر لوازم معدودی را جمع آوری کرد. او همراه با کوستر به مرز هلند گریخت، جایی که کوستر قرار و مدارهای پنهانی را با گارد مرزی گذاشته بود. وقتی هان با مایتنر در برلین خداحافظی می‌کرد یک حلقهٔ الماس‌نشان موروثی را به مایتنر داد: «من می‌خواستم برای موارد ضروری مجهز باشد.»

سرانجام مایتنر سالم و در امان بود، امّا هنوز به طور دائم مستقر نشده بود. کوستر و فوکر هنوز در جستجوی پول مستمری برای او بودند. در این حال پیشنهاد مربوط به سوئد پس از ماهها ردّ و تأیید سرانجام قطعی شد، و مایتنر تصمیم گرفت آن را بپذیرد. این امر، آن‌طور که بعداً معلوم شد، انتخابی عقلانی بود، زیرا بعداً وقتی که آلمان به هلند حمله کرد، مایتنر بار دیگر بی‌پناه می‌ماند ــ هنوز لحظات نگران‌کنندهٔ دیگری وجود داشت، یکی آنکه وقتی مایتنر به کُپنهاگ و سپس به استکهلم پرواز می‌کرد ــ بدی هوا ممکن بود موجب شود که هواپیما در آلمان فرود آید. سرانجام مایتنر در یکم اوت سال ۱۹۳۸ وارد استکهلم شد، دنیای ایمن از مزاحمت نازی امّا با مسائل افسردگی و یأس‌آور خودش. او در نامه‌ای به کوستر نوشت، «نه جرئت نگاه به گذشته دارم و نه می‌توانم پیش رو را ببینم.»

انزوا در استکهلم

مانه سیگبان، حامی مایتنر در استکهلم، مردی بود با یک برنامهٔ کاری که برای لیزه مایتنر چندان باعث تشویق و دلگرمی نبود. او آزمایشگری بود که برای کار دربارهٔ طیف نمایی پرتو ـ x به دریافت جایزهٔ نوبل ۱۹۲۴ نائل آمده بود. در سال ۱۹۳۷، با ساختن یک سیکلوترون برنامهٔ پژوهش هسته‌ای را آغاز کرد. سیگبان و مایتنر از دو نسل متفاوت بودند. به‌طوری که سایم می‌نویسد، «شاید سیگبان مایتنر را قدیمی می‌دانست. مایتنر هشت سال بزرگتر از او، بسیار زودتر به فیزیک هسته‌ای رسیده بود و با وسایل ساده اکتشافات مهمی به عمل آورده بود. سیگبان همواره آزمایشهایش را به پیشرفت وسایل‌اش پیوند می‌داد. مایتنر فکر کرده بود سیگبان از همکاری او خُرسند خواهد شد؛ سیگبان احتمالاً فکر می‌کرد که مایتنر فقط به فضای آزمایشی نیاز خواهد داشت، نه چیزی بیشتر.»

مایتنر حقوق یک دستیار جزء را از فرهنگستان سوئد دریافت می‌کرد. حساب بانکی او در برلین بسته بود، و او امکان دریافت پول بازنشستگی‌اش را نداشت. او با پول قرضی در اتاق هتل کوچکی زندگی می‌کرد. در نامه‌هایی برای هان، از گرفتاری و وضع اسفناکش می‌نوشت، و از او ملتمسانه تقاضا می‌کرد راهی برای آزاد کردن دارایی و حساب بانکی‌اش در برلین، بیابد. هان به نوبهٔ خود شکایت داشت

*. SOS: پیامی برای درخواست کمک

که زیر حملات زیردستان جاه‌طلب و بی‌رحم نازی مؤسسهٔ خودش است. آن دو مانند زوجی بودند که تحت بدترین شرایط به اجبار از هم جدا شده‌اند.

آنچه بیشتر مایهٔ نارضایتی مایتنر می‌شد، وضعیت او ــ یا فقدان آن ــ در مؤسسهٔ سیگبان بود. او به هان نوشت، «مؤسسهٔ سیگبان به‌طوری غیرقابل تصور خالی است، ساختمانی بسیار ظریف و عالی، که در آن یک سیکلوترون و یک دستگاه طیف‌نمایی پرتو ـ x آماده است، امّا به‌ندرت کار تجربی یا فکری صورت می‌گیرد. از پمپها، رئوستاها، خازنها و آمپرسنجها خبری نیست ــ چیزی نیست که با آن آزمایشی انجام شود، و در کل این بنای بزرگ چهار فیزیکدان جوان و یک سازمان کاری بسیار مرتب وجود دارد.» سایم می‌نویسد، «به‌نظر می‌رسید که مایتنر در آن سازمان جایی نداشته باشد. نه دعوت می‌شد که به گروه سیگبان ملحق شود و نه امکاناتی به او داده می‌شد که خودش کاری انجام دهد، او فضای آزمایشی داشت امّا نه همکارانی، نه تجهیزاتی، نه کمکهای فنی، نه حتی دسته‌کلیدهایی برای کارگاهها و آزمایشگاهها» او همچون نخستین روزهای کاری‌اش در مؤسسهٔ شیمی فیشر در برلین، بار دیگر زنی نامرئی شده بود. با وجود این در آن شرایط غم‌انگیز، لیزه مایتنر، با همکاری خواهرزاده‌اش، اوتو فریش، یکی از مهمترین اکتشافات فیزیک قرن بیستم را به عمل آورد، که مطمئناً همتراز کشف هستهٔ رادرفورد است.

شکافت هسته یا عناصر فرااورانیمی که هرگز وجود نداشتند

فیزیکدانانِ نظری، اساساً محافظه‌کارند (در فعالیتهای حرفه‌ای‌شان، اگر نه در خط مشی سیاسیشان). آنان در صورت امکان نظریه‌هایشان را در مسیرهای هوشمندانه‌ای که قبلاً طی شده است، توسعه می‌دهند. فقط وقتی با شواهد مسلم و بی‌چون و چرا مواجه شوند از راه طی شده منحرف می‌شوند و با دلهره و اضطراب به ناشناخته رو می‌آورند. تردید پائولی دربارهٔ پیشنهاد نقش «نوترون»اش در واپاشی β را به یادآورید («فعلاً خودم اطمینان کافی ندارم تا چیزی دربارهٔ این ایده منتشر کنم»). داستان اکتشاف مایتنر ـ فریش همین درس را می‌آموزد.

در سال ۱۹۳۵ اِنریکو فرمی، که در رُم، بمباران اورانیم با نوترون را آزمایش می‌کرد بعضی عناصر پرتوزای جدید را مشاهده کرد. فرض محافظه‌کارانهٔ او این بود که وقتی اورانیم نوترون جذب کند، هم سنگینتر می‌شود و هم β گسیل می‌کند. گسیل ذرهٔ β عدد اتمی اورانیم را از ۹۲ بالاتر می‌برد، و آن را به قلمرو عناصر مصنوعی «فرااورانیم» که در طبیعت وجود ندارند تبدیل می‌کند. هان و مایتنر به مطالعهٔ این عناصر «فرااورانیم» پرداختند.

ایرن ژولیو ـ کوری و پاول ساویچ[1] در پاریس نیز در جستجوی فرااورانیمها فعال بودند. مایتنر درست پیش از فرار مخاطره‌آمیز از برلین، با هان و فریتس اشتراسمان[2]، جوانی متخصص شیمی تجزیه، دربارهٔ یافتهٔ عجیب ژولیو ـ کوری ـ ساویچ، بحثی کرد مبنی بر اینکه یکی از عناصر پرتوزای ناشی از بمباران

1. Pavel Savitch 2. Fritz Strassman

نوترونی اورانیم رفتار شیمیایی شبیه به لانتانم دارد، که وزن اتمی آن تقریباً نصف وزن اتمی اورانیم است. تفسیر افراطی این نتیجه آن خواهد بود که بمباران اورانیم با نوترون باعث شکافته شدن هستهٔ اورانیم به دو هستهٔ کوچکتر، هر یک با وزن اتمی در حدود نصف وزن اتمی اورانیم، شده است.

هیچ کس این موضوع را پیش‌بینی نکرده بود، امّا هان و اشتراسمان آزمایش ژولیو-کوری-ساویچ را تکرار و این کشف شگفت‌انگیز را کردند که در میان محصولات بمباران اورانیم-نوترون، عناصر پرتوزایی بودند که رفتاری مانند رادیم داشتند، جز آنکه نیمه-عمرشان بسیار کوتاهتر از نیمه-عمر رادیم بود. اشتراسمان با تجزیهٔ دقیق نشان داد که آنها ایزوتوپهایی از باریم، عنصری با تقریباً نصف وزن اتمی اورانیم‌اند. اکنون شواهد بیشتری در دست بود که اورانیم با بمباران نوترون شکافته می‌شود.

هان هنوز مشکوک بود و باور نداشت. او در اواخر سال ۱۹۳۸، به مایتنر نوشت: «خودمان می‌دانیم که [اورانیم] واقعاً نمی‌تواند به چیزی مانند [باریم] شکسته شود، اگر می‌توانید پیشنهادی بکنید که بتوانید آن را منتشر کنید، در این صورت هنوز به طریقی کارِ هر سه نفر ما خواهد بود.» (هان دیگر نمی‌توانست چیزی را با همکار یهودی‌اش منتشر کند.) چند روز بعد او نوشت: «چه قدر زیبا و مهیج می‌بود، اگر می‌توانستیم مانند گذشته با هم کار کنیم. ما نمی‌توانیم نتایج کارمان را پنهان کنیم، حتی اگر آنها احتمالاً از لحاظ فیزیکی بی‌معنی باشند. می‌دانی، اگر می‌توانستی راه دیگری بجز این بیابی، چه قدر کار خوبی می‌شد.» مایتنر نوشت که او «راه حلی» نمی‌بیند، امّا تجربه‌اش به عنوان یک نظریه‌پرداز به او گفت که مفاهیم عجیب و غریب، گاهی موفقیت‌آمیز است. او به هان نوشت، «در فیزیک هسته‌ای شگفتی‌های بسیاری را تجربه کرده‌ایم، به طوری که نمی‌توان بدون قید و شرط گفت: این غیرممکن است.» وقتی هان نتایج کار خود و اشتراسمان را منتشر کرد با تردید بود: «آزمایشهایی را که ما به عنوان شیمیدان، به طور خلاصه توصیف کردیم ما را مجبور می‌کند تا به جای عناصر [سنگین] که قبلاً به عنوان رادیم، اکتینیم، توریم شناخته شده بودند، عناصر [بسیار سبکتر] باریم، لانتانم، و سریم را جانشین کنیم، امّا به عنوان 'شیمیدان هسته‌ای' نزدیک به فیزیک هنوز نمی‌توانیم این تغییر ناگهانی را که مخالف همهٔ تجارب فیزیک هسته‌ای است، بپذیریم.» این عقیدهٔ هان بود. اشتراسمان بعداً به خاطر آورد که او بیشتر می‌خواست این «تغییر ناگهانی» را بپذیرد و پیشنهاد کند. بمباران نوترون می‌تواند باعث شکافت هستهٔ اورانیم شود.

در همان زمان، درست پیش از کریسمس ۱۹۳۸، اُتو فریش[1]، خواهرزادهٔ محبوب مایتنر (او پسر مستعد گوستی، خواهر بزرگتر لیزه بود) به سوئد رفت تا تعطیلاتش را با خالهٔ محبوبش در شهر کونگالو[2]، در ساحل شرقی سوئد بگذراند. او از کپنهاگ، که در آنجا در مؤسسهٔ بور کار می‌کرد، می‌آمد. او در زندگینامهٔ شخصی‌اش با عنوان، اندکی که به‌یاد می‌آورم، می‌نویسد «وقتی من پس از نخستین شب در کونگالو از اتاق هتلم خارج شدم لیزه مایتنر را در حال مطالعهٔ نامه‌ای از هان که ظاهراً نگران‌کننده بود، یافتم.» فریش می‌خواست دربارهٔ کارش در کپنهاگ چیزی بگوید، «امّا او گوش نمی‌داد؛ باید این نامه

1. Otto Frisch 2. Kungälv

را بخوانم.» در آن نامه، هان یافتهٔ خود و اشتراسمان را گزارش کرده بود که در پرتودهی اورانیم با نوترون، باریم حاصل شده است، و از مایتنر درخواست کرده بود که این معمّا را حل کند.

هان پرتوـشیمیدان ورزیده و ماهری بود، و مایتنر فکر نمی‌کرد که دربارهٔ باریم اشتباه کرده باشد. بنابراین به اجبار این نتیجه‌گیری حاصل می‌شد که هستهٔ اورانیم واقعاً شکافته شده است. امّا چگونه؟ بور و جورج گاموف، یک نظریه‌پرداز جوان روسی که اغلب به‌عنوان مهمانی دلپذیر از مؤسسهٔ بور بازدید می‌کرد، قبلاً پیشنهاد کرده بود که هسته مانند یک قطرهٔ مایع است. می‌توان تصور کرد که قطره می‌تواند دراز و باریک، و در نزدیکی مرکز منقبض، و سرانجام به دو قطره تقسیم شود. چیزی شبیه به کشش سطحی یک قطرهٔ مایع معمولی، با چنان تقسیمی مخالفت می‌کند، امّا هر پارهٔ هستهٔ اورانیم حامل بار مثبت بزرگی است، و دافعهٔ بین بارها به شدت فرایند تقسیم را یاری خواهد کرد.

هنگام راه‌پیمایی در جنگلهای برفی سوئد، فریش با اسکی و مایتنر «در اثبات با این ادعا که می‌تواند بدون اسکی با همان سرعت راه برود» دو فیزیکدان با نگاهی اجمالی، ساختن نظریه‌ای را آغاز کردند. فریش می‌نویسد، «در آن هنگام ما، هر دو روی تنهٔ درختی نشسته بودیم و روی پاره‌هایی از کاغذ محاسبه را آغاز کردیم. ما دریافتیم که بار هستهٔ اورانیم، در واقع به‌قدر کافی بزرگ است که تقریباً به‌طور کامل بر کشش سطحی غلبه کند؛ بنابراین هستهٔ اورانیم در واقع ممکن است شبیه قطرهٔ بسیار ناپایدار و لرزانی باشد، که با کوچک‌ترین تحریک مانند برخورد یک نوترون تقسیم شود.»

اکنون مایتنر و فریش می‌توانستند فرایند شکافت‌ـاورانیم را مجسّم کنند، امّا آنان می‌باید با مسئلهٔ دیگری دست و پنجه نرم کنند. دو پارهٔ باردار مثبت هسته، با دافعهٔ متقابلشان، با انرژی عظیم در حدود ۲۰۰ MeV ــ یعنی ۲۰۰ میلیون الکترون ولت، یعنی انرژی‌ای که الکترون در عبور از اختلاف پتانسیل ۲۰۰ میلیون ولت می‌گیرد ــ از هم دور می‌شوند. این انرژی در حدود ده برابر انرژی‌ای بود که قبلاً در یک فرایند هسته‌ای مشاهده شده بود. منشأ این انرژی از کجاست؟ مایتنر فرمولهایی را که برای محاسبهٔ جرمهای دو پارهٔ معمولاً تشکیل‌شده در فرایند شکافت لازم بود، به خاطر آورد. با درنظرگرفتن تفاوت بین جرم اورانیم و جرم کل پاره‌ها، و تبدیل این تفاوت به انرژی طبق معادلهٔ $E = mc^2$ اینشتین، آنان توانستند به‌طور کامل ۲۰۰ MeV احتمالاً همراه شکافت اورانیم را توجیه کنند، و به این ترتیب، مایتنر و فریش در یک روز برفی ماه دسامبر، درکنار یک رد اسکی، نظریه‌ای را طراحی کردند که شکافت هستهٔ اورانیم با بمباران نوترون را توجیه می‌کرد.

فریش این خبر را در بازگشت به کپنهاگ، به بور رساند که آن را فهمید و بی‌درنگ نظریه را پذیرفت. فریش می‌نویسد، «من هنوز کاملاً برای او توضیح نداده بودم که او درحالی‌که با دست بر پیشانیش می‌زد، فریاد کشید: 'اوه، همهٔ ما چقدر احمق بودیم! این شگفت‌انگیز است! این درست همان چیزی است که باید باشد! آیا شما و لیزه مایتنر دربارهٔ آن مقاله‌ای نوشته‌اید؟' گفتم، هنوز نه، اما به زودی خواهیم نوشت و بور قول داد که پیش از انتشار مقاله دربارهٔ آن صحبت نکند.» مدت کوتاهی پس از این گفتگو، بور برای ایراد چند سخنرانی، با کشتی عازم ایالات متّحده شد.

مایتنر و فریش مقالهٔ تاریخیشان را از طریق چند مکالمهٔ تلفنی طولانی از فاصلهٔ دور، تنظیم و تألیف کردند. آنان تصمیم گرفتند که واژهٔ شکافت (fission) را، که زیست‌شناسان برای تقسیم سلولی به‌کار می‌بردند، به‌کار خود اختصاص دهند. از این‌رو فرایند مایتنر ـ فریش، «شکافت هسته‌ای (Nuclear fission)» نامیده شد.

یک همکار شکاکِ فریش، گئورگ پلاچک[1]، او را به چالش کشید تا نظریه‌اش را با طرح یک آزمایش آشکارسازی «پاره‌های شکافتِ» بسیار پرانرژی تولید شده در شکسته شدن هستهٔ اورانیم امتحان کند. فریش می‌نویسد، «عجیب این بود، که این فکر به نظرم نرسیده بود، امّا به سرعت کار را شروع کردم، آزمایش را (که در واقع بسیار آسان بود) طی دو روز انجام دادم، و با یادداشتی مختصر دربارهٔ آزمایش، همراه با یادداشت دیگری که با لیزه مایتنر تنظیم و تألیف کرده بودیم را برای مجلهٔ نیچر[2] فرستادم.»

بور در راه امریکا، فرایند مایتنر ـ فریش را با همکارش لئون روزنفلد[3]، مورد بحث قرار داد و از اهمیت و اعتبار آن بیشتر متقاعد شد. امّا وقتی در نیویورک فرود آمدند، بور فراموش کرد به روزنفلد بگوید موضوع را پیش خود نگهدارد تا مایتنر و فریش آن را منتشر کنند و حق تقدم آنان تضمین شود. وقتی بور چند روزی در نیویورک بود، روزنفلد به پرینستون رفت، در سمیناری حضور یافت و همه‌چیز را دربارهٔ شکافت هسته‌ای برای حضار حیرت‌زده بیان کرد. این خبر هیجانی ایجاد کرد. آزمایشگران به آزمایشگاه‌هایشان هجوم بردند تا آزمایش فریش را تکرار کنند. بسیاری موفق شدند، امّا خوشبختانه، از لحاظ آسودگی خاطر بور، حق تقدم مایتنر و فریش برای طرح نظریه و فریش برای آشکارسازی پاره‌های شکافت، محفوظ ماند.

با پذیرفتن شکافت هسته‌ای اورانیم، گروه اولیهٔ عناصر فرااورانیمی، از میان رفت، بجز دو عنصر که باقی‌ماند. این دو عنصر نیز اکتشاف مایتنر محسوب می‌شد، هرگاه می‌توانست یک چشمهٔ نوترون قوی در اختیار داشته باشد. اِدوین مک‌میلان[4] و امیلیو سِگره[5] با استفاده از سیکلوترون برای بمباران نوترونی اورانیم، عنصر پرتوزایی را کشف کردند با فعالیت β و نیمه‌ـعمر ۲٫۳ روز، که سِگره آن را به‌عنوان یک پارهٔ شکافت شناسایی کرد. مایتنر این تعبیر را باور نداشت، زیرا فعالیت ۲٫۳ روز با اورانیم باقی‌مانده بود: یک پارهٔ شکافت می‌باید انرژی زیاد کافی برای پس‌زنی از نمونهٔ نازک مورد استفادهٔ مک‌میلان و سگره را داشته باشد. برای مایتنر آشکار بود که فعالیت ۲٫۳ روز مربوط به یک عنصر فرااورانیم حقیقی، یعنی عنصر ۹۳ است و واپاشی β آن را به عنصر دیگر، یعنی عنصر ۹۴ تبدیل می‌کند.

مایتنر برای اثبات نظر خود، می‌باید آزمایش مک‌میلان ـ سگره را تکرار می‌کرد. امّا ماهها برای دسترسی به سیکلوترونِ سیگبان، بیهوده معطل ماند. سرانجام در آوریل ۱۹۴۰، مایتنر به کپنهاگ رفت تا از سیکلوترون موجود در مؤسسهٔ بور استفاده کند. روزِ پس از ورود او، آلمان به دانمارک حمله کرد، دانمارکیها تسلیم شدند و طرحهای مایتنر بار دیگر عقیم ماند. هفت هفته بعد، مک‌میلان و فلیپ ابلسون[6]

1. George Placzek 2. Nature 3. Léon Rosenfeld 4. Edwin McMillan 5. Emilio Segrè
6. Philip Abelson

عنصر ۹۳ را آن طور که مایتنر انتظار داشت شناسایی کردند و آن را نپتونیم نامیدند. روت سایم می‌نویسد، «پذیرفتن آن برای مایتنر فوق‌العاده دشوار بود. بیشتر از آن جهت که نپتونیم مک‌میلان و ابلسون، یک گسیلندهٔ بتا پیشگام عنصر فرااورانیمی دیگر، یعنی عنصر ۹۴ هم بود [که سرانجام پلوتونیم نامیده شد]. از بسیاری غم و غصه‌هایی که مایتنر پس از ترک برلین تحمل کرده بود، ناکامی یافتن عنصر ۹۳ از همه بیشتر بود. آن طور که او تا آخر عمر می‌گفت، همواره دل شکسته (crêve coeur) خواهد ماند.»

سزاواری و ناسزاواری شهرت و اعتبار

ادامهٔ داستان شکافت هسته‌ای حکایت پیچیده‌ای نه‌تنها از فیزیک، بلکه همچنین از سیاست ملی و بین‌المللی، دیوان سالاری، کنترل نظامی، شیمی و مهندسی است. یک نتیجهٔ آن بمبهای اتمی است که در سال ۱۹۴۵ بر هیروشیما و ناکازاکی انداخته شد، و ما در فصل بعد، بدان اشاره خواهیم کرد. در اینجا دو جنبهٔ دیگر از شکافت هسته‌ای را که در نخستین ماههای ۱۹۳۹ ظاهر شد، ذکر می‌کنم. بور و جان ویلر[1] یک نظریه‌پرداز پرینستون، نشان دادند که شکافت حاصل از بمباران اورانیم طبیعی با نوترونهای «کُند» (کم‌ـانرژی) به‌طور عمده ناشی از ایزوتوپ کمیاب $U^{۲۳۵}$ است، نه از ایزوتوپ بسیار فراوانتر آن $U^{۲۳۸}$. علاوه بر آن، آزمایشها در پاریس و دانشگاه کلمبیا نشان دادند که هر شکافت اورانیم نه‌تنها یک نوترون مصرف می‌کند، بلکه دو یا سه نوترون بیشتر آزاد می‌کند. این امر امکان هیجان‌انگیزی را به وجود آورد که نوترونهای تولید شده در یک شکافت بتوانند موجب یک یا چند شکافت بیشتر شوند، و این شکافتها باز هم نوترونهای بیشتر و بیشتری تولید کنند. چنین تکثیر سریع نوترون ممکن است به‌صورت یک واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای ادامه یابد و با آهنگ شگفت‌انگیزی انرژی تولید کند، به ویژه اگر این فرایند کنترل شده نباشد.

در این زمان، ارتشهای آلمان، اروپا را درمی‌نوردید، و امکانات نظامی یک بمب شکافت اورانیم برای همهٔ فیزیکدانان هسته‌ای آشکار بود. تلاش آلمان توسط گروهی شامل ورنر هایزنبرگ و اتو هان در میان دیگران، سرانجام با عدم موفقیتی شرم‌آور همراه شد. در ایالات متحده، پس از شروعی کُند، تلاشی عظیم در چند جا، به تولید دو بمب ویران کننده انجامید که در ژاپن انداخته شد.

لیزه مایتنر کاملاً مخالف سلاحهای هسته‌ای بود. از او دعوت به عمل آمد تا به گروهی از فیزیکدانان و مهندسان بریتانیایی و مهاجر ملحق شود که مقرّر شده بود در آزمایشگاه در حال رشد لوس آلاموس[2] در نیومکزیکو که در آن بمبها طراحی می‌شدند، کار کنند. مایتنر با صراحت امتناع کرد، و تنها فیزیکدان هسته‌ای سرشناس از جانب متفقین بود که چنین کاری کرد. خدمت در لوس آلاموس به معنی گریز از رکود در استکهلم، و فرصتی برای کار مجدد با دوستانش بود. امّا هیچ وسوسه‌ای عقیدهٔ او را تغییر نمی‌داد. او اعلام کرد، «من هیچ کاری با بمب ندارم!»

1. John Wheeler 2. Los Alamos

وقتی اخبار وحشتناک از هیروشیما و ناکازاکی رسید، مایتنر در این وضعیت ناراحت کننده قرار داشت که تنها فیزیکدان هسته‌ای بود که در جایی دور از دسترس مطبوعات و گزارشگران قرار نداشت. فیزیکدانان آلمانی در آن زمان در انگلستان در بازداشت بودند. متخصصان هسته‌ای امریکایی، بریتانیایی و مهاجر، پشت حصارهای لوس آلاموس و دیگر تأسیسات هسته‌ای در ایالات متحده، بریتانیا و کانادا بودند. گزارشگران از هر سو به مایتنر هجوم بردند. مایتنر «یهودی فراری» نامیده شد، کسی که راز بمب اتمی را از دانشمندان هیتلری دزدیده و در دسترس دوستان بریتانیایی‌اش گذاشته است. یک گزارشگر علمی معتبر نیویورک تایمز می‌گفت مایتنر راز هسته‌ای را به اُتو فریش درکپنهاگ تلگراف زده، و سپس او آن راز را به نیلس بور «پدرزنش» رسانده است. بعضی ازگزارشگران دوست داشتند مایتنر را «مادر یهودی بمب» بنامند.

شهرت ناشی از بمب ناخواسته، برای مایتنر شدیداً ناراحت کننده بود، درحالی‌که شهرتی را که سزاوارش بود، و از هر نظر انتظارش را داشت از او، مضایقه و دریغ شد. در سال ۱۹۴۴، جایزهٔ نوبل در شیمی برای کشف شکافت هسته‌ای تنها به اُتو هان داده شد. مایتنر به جایزهٔ هان اعتراض نداشت، امّا او و بسیاری از دوستانش نفهمیدند چرا سهم او و فریش نادیده گرفته شد. توضیح او به یکی از دوستانش چنین بود که، «مطمئناً هان کاملاً سزاوار جایزهٔ نوبل شیمی بود. واقعاً در این مورد تردیدی نیست. امّا فکر می‌کنم که سهم فریش و من در روشن کردن فرایند شکافت اورانیم بی‌اهمیت و ناچیز نبود. چگونگی شروع این فرایند و اینکه چگونه چنان انرژی زیادی تولید می‌کند، از نظر بور خیلی بعید بود.»

آزمایشهای پرتو شیمیایی هان (و اشتراسمان) برای اکتشاف عاملی اساسی بود، امّا آنها تا حد زیادی مفاهیمی فیزیکی بودند که به‌وسیلهٔ مایتنر و فریش تثبیت شده بود. در بازنگری، می‌توان فهمید که یک اکتشاف به اهمیت شکافت هسته‌ای، شایستهٔ دو جایزه است، جایزهٔ شیمی برای هان (و اشتراسمان)، و جایزهٔ فیزیک برای مایتنر و فریش. کمیتهٔ اسرارآمیز نوبل مسئله را این طور نمی‌دید. سایم می‌نویسد، «کسانی پی‌بردند که دست دشمنان او، از جمله سیگبان درکار بوده است. در سوئد دوستان لیزه خشمناک بودند، آنان کنارگذاشتن مایتنر را نه از روی سهو می‌دانستند، نه به غفلت، بلکه طرد شخصی از روی عمد را کارِ مانه سیگبان[1] می‌دانستند.»

گرچه مایتنر از نخستین جایزه محروم ماند، امّا کار او بی‌قدر نماند. در سال ۱۹۴۶، برای نخستین‌بار به ایالات متحده سفرکرد، جایی که دورکاملی از پذیراییها، ملاقاتها، جایزه‌ها و مدارج افتخاری، و سیلی از نامه‌های تبریک، او را فراگرفت. ورود او شبیه به ورود ماری کوری بود. هالیوود[2] فیلم‌نامه‌ای برای او داشت با عنوان آغازِ پایان. مایتنر به فریش نوشت، این فیلم‌نامه «از اول تا آخر مزخرف است. مبنای آن داستان احمقانهٔ روزنامه‌ای است، که من با بمبی درکیفم آلمان را ترک کرده‌ام، و افراد هیملر[3] به دالم آمدند تا مرا از اخراجم آگاه کنند و مطالبی از همین قبیل.»

1. Manne Siegbahn 2. Hollywood 3. Himmler

آخرین روزها

اندکی پس از جنگ، در سال ۱۹۴۷، مایتنر از مؤسسهٔ سیگبان بازنشسته شد و در یک آزمایشگاه کوچک که کمیسیون انرژی اتمی سوئد در مؤسسهٔ فناوری سلطنتی، برای او ایجاد کرده بود آغاز به کار کرد. سپس به آزمایشگاه فرهنگستان سلطنتی علوم مهندسی رفت تا در مورد یک راکتور هسته‌ای آزمایشی، تحقیق کند. سرانجام، در سال ۱۹۶۰، پس از حدود بیست سال در سوئد، مایتنر به کمبریج در انگلستان رفت، تا نزدیک اُتو فریش و خانواده‌اش باشد. او به زندگی فعال همراه با مسافرت، سخنرانی و حضور در کنسرتهای خود ادامه داد.

پس از آنکه مایتنر در سال ۱۹۳۸ برلین را ترک کرد، همکاری مایتنر ـ هان از بین رفت، امّا دوستی آنان ادامه یافت که گاهی با درد و تلخ‌کامی برای مایتنر همراه بود. این امر به ویژه در موسم نوبل سال ۱۹۴۶ حقیقت داشت که وظیفهٔ ناخوشایند پذیرایی و بزرگداشت هان، برندهٔ جایزهٔ نوبل جدید، در استکهلم را به عهده داشت. برای مایتنر چنین به نظر می‌رسید که هان کشف شکافت اورانیم را به صورت نمایشی یک نفره ارائه کرده است. او به یکی از دوستانش نوشت، «برای من بسیار دردناک بود که هان در مصاحبه‌اش یک کلمه دربارهٔ من، در این‌باره که مدت سی‌سال با هم کار می‌کردیم، چیزی نگفت. انگیزه‌اش تا حدی پیچیده است. او متقاعد شده است که رفتار با آلمانها عادلانه بوده است، بیشتر از این نظر که برگذشته کاملاً سرپوش می‌گذارد. بنابراین، وقتی او اینجا بود [در استکهلم] تنها اندیشه‌های او بحث دربارهٔ آلمان بود. همچنین است دربارهٔ من، من بخشی از گذشتهٔ سرکوب شده‌ام.»

امّا این خاطرات سرانجام رنگ باخت و دوستی مایتنر با هان، با همهٔ آثارش (که مایتنر بیشتر از هان از آن رنج می‌برد) باقی‌ماند. ماکس پروتس[1] یک زیست شناس مولکولی که مایتنر را درکمبریج می‌شناخت، نقل می‌کرد که بنابر گفتهٔ بیوهٔ اُتو فریش، مایتنر «چیزی ابراز نمی‌کرد، مگر دلبستگی عمیق به هان.»

لیزه مایتنر چند روز پیش از نودمین سال تولدش درگذشت. اُتو هان چند ماه قبل از آن مرده بود. مایتنر درگورستان یک کلیسای روستایی در انگلستان دفن شد. درکتیبهٔ روی سنگ گور او، که فریش آماده کرده بود، می‌خوانیم

لیزه مایتنر: فیزیکدانی که هرگز انسانیت را فراموش نکرد.

او آنچه را که حقاً سزاوارش بود به دست آورد: دورهٔ زندگی حرفه‌ای عالی، عمر طولانی، افتخارات بسیار، و دوستیهای پایدار بی‌شمار.

1. Max Perutz

۲۳

فیزیکدان کامل

اِنریکو فرمی

نابغه

قاعدتاً، دانشمندان استعدادشان را به‌صورت نظریه‌پرداز یا آزمایشگر بروز می‌دهند، نه هر دو آنها. مثلاً، اینشتین، ماکسول و گیبس نظریه‌پردازان بزرگی بودند، نه آزمایشگران خلاق، درحالی‌که فارادی و رادرفورد آزمایشگران بزرگی بودند با نظریه‌پردازی محدود. تنها نیوتون در جمع فیزیکدانانی که تاکنون دیدیم، استعداد فوق‌العاده‌ای، هم به‌عنوان آزمایشگر و هم به‌عنوان نظریه‌پرداز (و همچنین ریاضیدان) نشان می‌داد. موضوع این فصل، انریکو فرمی[1] استثنای دیگری از این قاعدهٔ دوگروهی فیزیک است. فرمی، آن‌طور که زندگینامه‌نویس و همکارش، امیلیو سِگره[2]، اظهار می‌کند، «از ابتدا فیزیکدان کاملی بود که برای او نظریه و آزمایش، وزنی برابر داشتند.»

او در سال ۱۹۲۶، با نشان دادن چگونگی شمارش حالتهای کوانتومی اتمها برطبق اصل طرد پائولی، کارش را به‌عنوان نظریه‌پرداز، آغاز کرد. در سالهای ۱۹۳۰ بر مبنای ایدهٔ پائولی نظریهٔ کاملی برای واپاشی β تدوین کرد. ایدهٔ پائولی این بود که ذرات β همیشه همراه با ذرات کوچکی ظاهر می‌شوند که حامل بار الکتریکی نیستند و تقریباً بدون جرم‌اند. این کار فرمی تلاشی پیشگام در حوزه‌ای بود که به نظریهٔ میدان کوانتومی معروف است. فرمی توانست در این جهت به کار خود ادامه دهد و یک نظریه‌پرداز متعهد شود. اما در عوض تصمیم گرفت یک آزمایشگر مسلح به روش بمباران نوترونی شود. این کوششها نیز پیشگام بودند، و سرانجام او را به یکی از دستاوردهای بزرگ فیزیک تجربی جدید رهنمون شدند: کنترل واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای.

1. Enrico Fermi 2. Emilio Segrè

انریکو فرمی در سال ۱۹۰۱ در رُم زاده شد، و جوانترین فرزند از سه فرزند خانواده‌اش بود. مادرش، آیدا[1]، معلم مدرسه، پدرش، آلبرتو[2]، کارمند اداری راه‌آهن بود. خانوادهٔ فرمی تجملات چندانی نداشتند. همسر فرمی، لورا[3]، در زندگینامه و خاطرات جذابی با عنوان اتم‌ها در خانواده می‌نویسد آپارتمانشان «هیچ نوع وسیلهٔ گرمایشی نداشت. انریکو به هنگام مطالعه مجبور بود روی دستهایش بنشیند تا آنها را گرم نگه دارد و راهی یافته بود تا برای ورق زدن کتابش، به‌جای بیرون آوردن دستهایش از جای گرم، آن را با نوک زبانش ورق بزند.»

آیدا بیشترین تأثیر را در خانوادهٔ فرمی داشت. لورا فرمی می‌نویسد، «ایثار و محبت تمام‌عیار آیدا بود که آنان را متحد نگه می‌داشت.» آیدا قواعدی داشت و آنان اعمال می‌کردند: «فداکاری او با یک حسّ وظیفه‌شناسی مؤکد و صداقت انعطاف‌ناپذیر آمیخته بود که فرزندان به ارث برده بودند، گرچه آنان گاهی اوقات از آن دلخور می‌شدند. در مهربانی و عاطفه‌اش به‌گونه‌ای بود که همان قدر که می‌بخشید به‌دست می‌آورد. فرزندان او می‌باید با سخت‌کوشی استانداردهای اخلاقی و عقلانی عالی کسب می‌کردند، استانداردهایی را که برای آنان تعیین کرده بود و از آنان انتظار داشت.»

انریکو و برادر بزرگش، جولیو[4]، دوستان و همکاران ثابتی بودند در طرح‌های بی‌پایان دوران جوانی. این همکاری به‌طور مصیبت‌باری گسیخته شد، وقتی جولیو بر اثر یک جراحی جزئی گلو درگذشت. خانواده ویران شد: آیدا از شدت هیجان درهم شکسته شد، انریکو بهترین دوستش را از دست داد. او برای فرار از مالیخولیا و افسردگی، مطالعهٔ شخصی ریاضیات و فیزیک را آغاز کرد.

ابتدا مطالعاتش بی‌هدف بود و عمدتاً بستگی به کتابهایی داشت که بتواند در بازار کتاب پیدا کند. امّا انریکوی نوجوان یک فرشتهٔ نگهبان داشت. او آدولفو آمیدیی[5]، یک همکار آلبرتو فرمی بود با زمینهٔ مهندسی و روحی سخاوتمند. آمیدیی که تحت‌تأثیر پرسشهای انریکو دربارهٔ هندسه قرار گرفته بود، یک کتاب هندسهٔ تصویری در اختیار او گذاشت. دو ماه بعد، وقتی انریکو کتاب را بازگرداند، او، با شگفتی و حیرت آمیدیی، در بُرهانها و اثباتها مهارت یافته بود، و همهٔ تمرینهای عملی بعضاً دشوار را، کامل کرده بود. خود آمیدیی تا این حد پیشرفت نکرده بود. او با نگاه به برهانهای انریکو نتیجه گرفت که «این پسر، با دقت کمی که پس از انجام تکالیف دبیرستان برایش باقی‌می‌ماند، هندسهٔ تصویری را کاملاً یاد گرفته و بسیاری از مسائل پیشرفتهٔ آن را بدون هیچ مشکلی حل کرده بود. من متقاعد شدم که انریکو، دست‌کم تا آنجا که به هندسهٔ تصویری مربوط می‌شد، واقعاً نابغه بود.»

آمیدیی دوست جوانش را برای یک دورهٔ چهار ساله درگیر کتابهای مثلثات، جبر، حسابان (دیفرانسیل و انتگرال) و مکانیک نظری کرد. فرمی حتی به‌عنوان یک نوجوان می‌توانست کتابی دربارهٔ ریاضیات یا فیزیک را درک کند و به خاطر بسپارد. آمیدیی یادآور می‌شود، «من از پیش می‌دانستم که وقتی او کتابی را، حتی یک‌بار، بخواند آن را یاد می‌گیرد و فراموش نمی‌کند.» وقتی او کتابی را تمام می‌کرد،

1. Ida 2. Alberto 3. Laura 4. Giulio 5. Adolfo Amidei

آن را به‌عنوان مرجع نگه نمی‌داشت. فرمی به آمیدیی گفت، «در واقع پس از چند سال محتوای آن را واضحتر از حال می‌دانم، و اگر به فرمولی نیاز داشته باشم می‌دانم چگونه آن را به راحتی به‌دست آورم.» این توانایی نگه داشتن در حافظه یا «دانستن چگونه با سهولت کافی به‌دست آوردن» هر مطلبی از فیزیک را که لازم بود، یک جزء اساسی از استعداد فرمی بود. این شبیه توانایی موسیقی‌دانی بود که یک متن موسیقایی را به خاطر می‌سپرد. سگره به ما می‌گوید، «فرمی بخشهای مختلف فیزیک را چنان تمرین می‌کرد که یک رهبر ارکستر یک سمفونی را مرور می‌کند. او این کار را در رانندگی‌های طولانی یا موارد مشابه انجام می‌داد.»

آمیدیی می‌فهمید که جوّ غم و اندوه در خانه عامل بازدارندهٔ مهمی برای پیشرفت دست‌پروردهٔ اوست. او، آیدا و آلبرتو را متقاعد کرد که پسرشان باید به‌عنوان یک دانشجوی بورسیه وارد Scuola Normale Superiore وابسته به دانشگاه پیزا[1] شود. Scuola Normale (مدرسهٔ عادی) زمانی یک مدرسهٔ تربیت معلم بود، امّا به‌صورت مؤسسه‌ای در آمده بود که چهل نفر از زرنگترین دانشجویان ایتالیا را در خود جای داده بود. فرمی حتی در این محیط جزء نخبگان برجسته بود. رسالهٔ ورودی او با عنوان «ویژگیهای صوت» یک تحلیل ریاضی پیشرفته، شامل بیان معادلات دیفرانسیل برای انتشار صوت و راه‌حلهای آنها بود. ممتحن از این عملکرد او آن‌قدر شگفت‌زده شده بود که اصرار می‌ورزید با متقاضی ملاقات کند (شیوه‌ای که معمول نبود) تا به او بگوید که طی دورهٔ کار طولانی دانشگاهی‌اش، هرگز چنین رسالهٔ دانشجویی ندیده است. مدیر آزمایشگاه فیزیک، مردی مهربان و مستعد، که دیگر در صف مقدم حرفه‌اش نبود، بی‌رودرواسی برتری فرمی را پذیرفت، و غالباً به او می‌گفت، «چیزی به من یاد بده.»

فرمی در سال ۱۹۲۲ پیزا را ترک کرد، و به رُم بازگشت، و به فرشتهٔ نگهبان دیگری اُرسو ماریو کوربینو[2]، مدیر آزمایشگاه فیزیک در دانشگاه رُم، برخورد کرد. کوربینو، مانند آمیدیی، به سرعت نبوغ فرمی را تشخیص داد، و دوست و حامی او شد. رؤیای کوربینو احیای مجدّد فیزیک ایتالیا به مقام والای گذشتهٔ آن بود. اوگالیلهٔ دیگری را در وجود فرمی می‌دید ــ و حق با او بود. در آن زمان فیزیکدانان و ریاضیدانان ایتالیایی سهم مهمی در نظریهٔ نسبیت عام داشتند، امّا در زمینه‌های جدید دیگری که در آن زمان در جاهای دیگر اروپا شکوفا می‌شد، به‌ویژه نظریهٔ کوانتومی، دخالتی نداشتند و حتی آن را تدریس هم نمی‌کردند. به توصیهٔ کوربینو، فرمی با بورس تحقیقاتی به دنیای علم خارج سفر کرد، نخست به مؤسسهٔ ماکس بورن در گوتینگن رفت، جایی که در محفل هایزنبرگ ــ پائولی، احساس راحتی نمی‌کرد. ایستگاه بعدی او لیدن بود. او را پل اِرنفست[3]، استاد فیزیک نظری و جانشین فیزیکدان بزرگ کلاسیک، هندریک لورنتس[4]، دعوت کرده بود. آشنایی ارنفست با فیزیک معاصر جامع بود (چنانکه فرمی بعداً چنین بود). او می‌گفت در پیشرفتهای انقلابی که در پیش است، نقشی برای فرمی وجود دارد.

1. Pisa 2. Orso Mario Corbino 3. Paul Ehrenfest 4. Hendrik Lorentz

در بازگشت به ایتالیا در دانشگاه فلورانس مشغول به کار شد و در آرستری[1]، جایی که گالیله اواخر عمرش را در آنجا گذراند، زندگی می‌کرد. در آنجا او جنبهٔ دیگری از استعدادش را نشان داد، و آن توانایی استثنایی او در امر آموزش بود. سِگره می‌نویسد، «یک دلیل جدّی او برای خواستن یک منصب استادی، عشق به آموزش بود، که در همهٔ فعالیتهایش از زمان جوانی نمایان بود.» در عین حال، او مجله‌های فیزیک متداول را می‌خواند و همچون همیشه مطالب آنها را به‌طور مؤثری جذب می‌کرد. سِگره می‌گوید، «او دربارهٔ آنچه که می‌خواند عمیقاً فکر می‌کرد و غالباً سر شوق می‌آمد تا چیزی جدید را به آنها بیفزاید. این عادت که تا زمان کارش دربارهٔ نوترون ادامه داشت، عظمت و جهان‌شمولی شناخت علمی او را توجیه می‌کند.» در یکی از این گشت و گذارهای او در نوشته‌های فیزیک معاصر، او با «افزایش چیز جدیدی» به اصل طرد پائولی، نخستین کمک بزرگش را به جهان علم کرد.

آمار کوانتومی (Quantum Statistics)

فرمی به طور غیرمستقیم به اصل پائولی رسید. هدف او این بود که با استفاده از معادلهٔ انتروپی آماری بولتزمان،

$$S = k \ln W$$

انتروپی یک گاز کامل از اتمها را با توجه دقیق به قواعد مکانیک کوانتومی محاسبه کند. یکی از این قواعد این است که اتمها فقط می‌توانند در حالات گسستهٔ معینی وجود داشته باشند، نه در حالات دیگر. قاعدهٔ دیگر این است که اتمهای موجود در یک ظرف را نمی‌توان برچسب زد و از یکدیگر تمیز داد، زیرا تابع موج نمایندهٔ یک اتم دامنهٔ دسترسی به‌قدر کافی طولانی دارد که با تابعهای موج برای اتمهای دیگر موجود در ظرف همپوشانی کند. (تابعهای موج برای الکترونها در فصل ۱۹ مورد بحث قرار گرفت. با معادلهٔ شرودینگر مناسب می‌توان تابعهای موج اتمها، یا هر موجود فیزیکی دیگری را تعریف کرد.) بنابراین مُدل فرمی از مُدل بولتزمان که فرض می‌کند اتمها (یا مولکولهای) مشابه یک گاز از یکدیگر تشخیص‌پذیرند فاصله می‌گیرد.

فرمی برای موفقیت در محاسبهٔ انتروپی‌اش، می‌باید انحراف بیشتری از بولتزمان را درنظر می‌گرفت. او با گرفتن رهنمودی از پائولی، این قاعده را اضافه کرد که هر حالت کوانتومی می‌تواند فقط و فقط یک اتم همساز را جا دهد. حتی در دماهای پایین، می‌باید همهٔ اتمها را در حالتهای کوانتومی متفاوت یافت. فرمی با ردّ قاعدهٔ تشخیص‌پذیری بولتزمان و تطبیق با قاعدهٔ پائولی، محاسبهٔ انتروپی مورد نظرش را به‌دست آورد. او مُدل آماری جدیدش را در سال ۱۹۲۶ منتشر کرد.

فرمی نخستین کسی نبود که از مُدلهای آماری اصلاح‌شده برای برآورده کردن نیازهای مکانیک کوانتومی استفاده کند. دو سال پیش از مقالهٔ فرمی، ساتینت‌دِرانات بوز[2]، فیزیکدان هندی مُدلی را بر

1. *Arcetri* 2. *Satyendranath Bose*

مبنای این مفهوم اینشتین که نور و شکلهای دیگر تابش، رفتاری شبیه گاز کاملی از ذرات دارند، «که بعداً فوتون نامیده شد» منتشر کرد. بوز دریافت که می‌تواند با به دست آوردن قانون تابش پلانک به وسیلهٔ یک مُدل آماری که غیرقابل تشخیص بودن و نیز اینکه هر حالت کوانتومی می‌تواند هر تعداد فوتون، نه مثل مُدل فرمی فقط یک فوتون، را در خود جا دهد نظریهٔ تابش اینشتین را با نظریهٔ پلانک آشتی دهد.

بوز کارش را به عنوان یک نظریه‌پرداز وقتی آغاز کرد که این ارتباط را بین نظریه‌های پلانک و اینشتین یافت که در غیر این صورت آشتی‌ناپذیر بودند. او دست‌نوشته‌اش را برای اینشتین ارسال کرد. اینشتین تحت تأثیر قرار گرفت، مقاله را به آلمانی ترجمه، و آن را در *Zeitschrift für Physik* منتشر کرد، همراه با این یادداشت که: «به عقیدهٔ من استنتاج بوز از فرمول پلانک پیشرفت مهمی را نشان می‌دهد.»

همچنان که فرمی مدل آماری‌اش را دنبال می‌کرد، پل دیراک[1] به‌طور مستقل، همان قلمرو را از دیدگاه وسیعتری می‌کاوید. او تأکید کرد تفاوت مدل بوز-اینشتین و مدلی که او برای الکترونهای مستقر در اتمها پیشنهاد می‌کرد، مانند نظریهٔ فرمی بر مقتضیات اصل پائولی استوار است. مقالهٔ فرمی مقدم بر مقالهٔ دیراک بود امّا دیراک از ذکر آن در مقاله‌اش کوتاهی کرد، گرچه آن‌طور که بعداً پذیرفت، او کار فرمی را دیده بود، امّا متوجه اهمیت آن نشده بود. این امر موجب اعتراض فرمی شد. فرمی به دیراک نوشت، «چون گمان می‌کنم که مقالهٔ مرا ندیده‌اید، خواهش می‌کنم به آن توجه کنید.»

مدل فرمی-دیراک محدود به اتمها و الکترونها، و مدل بوز-اینشتین محدود به فوتونها بود، امّا معلوم شد که هر دو مدل بسیار فراگیرترند. تلقی فیزیکدانان ذرات بنیادی معاصر این است که همهٔ ذرات—نه تنها الکترونها و فوتونها، بلکه پروتونها، نوترونها، نوترینوها و بسیاری ذرات دیگر—از یک مدل یا مدل دیگر پیروی می‌کنند. دیراک برای جبران خطای غفلتش پیشنهاد کرد که همهٔ ذرات تابع مدل فرمی (و خود دیراک) «فرمیون نامیده شوند.» همچنین، او اصطلاح «بوزون» را برای ذراتی که تابع مدل بوز-اینشتین‌اند پیشنهاد کرد.

فیزیک در رُم دوباره فعال می‌شود

فرمی در پاییز سال ۱۹۲۶ به رُم بازگشت. عمدتاً بر اثر تلاشهای اورسو کوربینو[2]، حامی فرمی، یک کرسی فیزیک نظری در دانشگاه رُم تأسیس شد، و فرمی به آسانی در رقابت پُست جدید برنده شد. سِگره می‌نویسد، «او در سن بیست و پنج سالگی، عملاً به نقطهٔ اوج یک دورهٔ کار دانشگاهی در ایتالیا رسیده بود.»

کوربینو انتظار داشت که فرمی فیزیک جدید را به ایتالیا بیاورد... بنابر اظهارات سگره، «نسل جدیدی می‌باید به رهبری فرمی زمام امور را به دست می‌گرفت.» نخستین گام فرمی برای شناساندن خود و موضوع کارش این بود که سخنرانیها و کتابهای درسی عامه‌پسند ارائه کند. نوشتن این کتابها هنگام تعطیلات تابستان در روستای کوهستانی دلخواه او در سلسله کوههای جنوب‌شرقی ایتالیا (Dolomites) انجام شد. به گفتهٔ سگره، او گاهی کارش این بود که «روی شکم در علفزار کوهستان

1. Paul Dirac 2. Orso Corbino

دراز می‌کشید، مجهّز به مقدار کافی مداد و دفترهای یادداشت سفید، بدون مراجعه به کتاب، بدون پاک کردن یا خط زدن یک کلمه، صفحه‌های زیادی را می‌نوشت (مدادهای ایتالیایی پاک‌کُن ندارد).»

یک سال پس از ورود فرمی، کوربینو دست پروردهٔ دیگری را به رُم آورد، و آن فرانکو راسِتی[1]، آزمایشگری جوان بود. به گفتهٔ لورا فرمی، او «مردی بلند و باریک با موهای تُنُک وگونه‌ای مصمم و نگاهی نافذ» بود. راسِتی و فرمی در اسکولا نرمال در پیزا همشاگردی و در شر و شورهای نوجوانی با هم بودند.

فرمی و راسِتی، با دو عضو جدید، ادواردو آمالدی[2]، دانشجوی سابق مهندسی، و امیلیو سِگره[3]، نخستین دانشجوی تحصیلات تکمیلی فرمی، هستهٔ مدرسهٔ کوربینوی رُم را تشکیل می‌دادند. کوربینو آنان را «پسران خود» می‌نامید. آنان جوان، با استعداد، و فوق‌العاده متعهد به کارشان و متقاعد شده بودند که اکتشافات بزرگی در سر راهشان است، چنانکه واقعاً هم بود. به طور خودمانی، فرمی رهبر آنان شده بود. او در موارد نظری مصون از خطا بود، از این رو آنان او را «پاپ» می‌نامیدند. اُتو فریش[4] که بعد با فرمی آشنا شد، اظهار می‌کرد که «هرگز کسی را ندیده است که چنان آرام و بی‌تکلف بتواند آن‌قدر مسلط باشد.»

سبک فرمی به عنوان یک نظریه‌پرداز همواره عمل‌گرایانه (pragmatic) و تا حد ممکن ساده بود. هدف او رسیدن به امر عینی و ملموس بود و از موارد انتزاعی و مجرد دوری می‌کرد. هانس بته، همکار دیگر فرمی در کار بعدی‌اش، تفاوت طرز کار فرمی با شیوهٔ دیگر، عمدتاً آلمانی، را چنین بیان می‌کند:

> بیشترین تأثیری که روش فرمی در فیزیک نظری بر من گذاشت، سادگی و سهولت آن بود. او می‌توانست هر مسئله‌ای را، هرچند پیچیده به‌نظر می‌رسید، به عوامل اصلی آن تجزیه و تحلیل کند. او مسئله را از پیچیدگیهای ریاضی و از صورتگرایی غیرضروری می‌زدود. به این طریق، اغلب طی نیم ساعت یا کمتر می‌توانست مسئلهٔ فیزیکی را که درگیر آن بود، حل کند. البته این هنوز یک حل کامل ریاضی نبود، امّا وقتی فرمی را پس از یکی از این بحث‌ها ترک می‌کردید، معلوم بود که راه حل ریاضی باید چگونه انجام شود.
>
> این روش تأثیر خاصی بر من داشت، زیرا من از مدرسهٔ زومرفلد در مونیخ آمده بودم، کسی که همهٔ کارهایش با راه حلهای ریاضی کامل پیش می‌رفت. با بزرگ شدن در مدرسهٔ زومرفلد، فکر می‌کردم که روش حل کردن مسئله نوشتن معادلهٔ دیفرانسیل برای مسئله (معمولاً معادلهٔ شرودینگر) است، تا با به‌کارگیری مهارت ریاضی، حلّی را که تا حد ممکن دقیق و ظریف باشد بیابیم و سپس دربارهٔ آن بحث کنیم. در بحث، جنبه‌های کیفی راه حل را درمی‌یابیم و از این رو فیزیک مسئله را می‌فهمیم. روش زومرفلد وقتی خوب بود که فیزیک بنیادی آن قبلاً فهمیده شده باشد، امّا فوق‌العاده پرزحمت بود. چند ماه طول می‌کشید تا پاسخ پرسش را بیابید.

1. Franco Rasetti 2. Edoardo Amaldi 3. Emilio Segrè 4. Otto Frisch

دیدن اینکه فرمی به این همه زحمت نیازی نداشت بسیار تحسین برانگیز بود. فیزیک با تحلیل اصول اساسی و چند برآورد مرتبه‌ـ بزرگی روشن می‌شد. رهیافت او عمل‌گرایانه بود. . . . فرمی ریاضیدان قابلی بود. هرجا لازم بود، می‌توانست عملیات ریاضی مفصلی را انجام دهد، امّا نخست می‌خواست مطمئن شود که این کار ارزش انجام آن را دارد. او در به‌دست آوردن نتایج با حداقل تلاش و وسایل ریاضی استاد بود.

در یک روز گرم در ماه ژوئیهٔ سال ۱۹۲۸، انریکو فرمی با لورا کاپون[1] ازدواج کرد. آنان چهار سال پیش در یک گردش جوانان در نواحی روستایی جنوب رم با هم ملاقات کرده بودند. «مرد جوان پاکوتاه در لباس سیاه و کلاه نمدی سیاه، با شانه‌های مدور و گردن به جلو کشیده شده» تأثیری بر لورا نگذاشت امّا وقتی فرمی عهده‌دار تشکیل یک تیم فوتبال شد، و لورا را به‌عنوان دروازه‌بان (گُلر) گماشت، لورا به گفتهٔ او عمل کرد. دو سال بعد آنها بار دیگر با هم ملاقات کردند امّا این بار در یک کوه‌نوردی بود. فرمی، کسی که لورا او را به‌عنوان «آدم عجیبی که مرا به بازی فوتبال واداشت» به خاطر می‌آورد، بار دیگر در مقر فرماندهی بود. او طرح پیاده‌روی دوازده مایلی مشروط را ریخت، و هیچ عذری را نمی‌پذیرفت. لورا می‌گوید، «همواره چنین بود، فرمی پیشنهاد می‌کرد، و دیگران تسلیم می‌شدند و از وی پیروی می‌کردند.»

در پاییز سال ۱۹۲۶، کاپیتان فوتبال و رفیق پیاده‌روی، در دانشگاه رُم «استاد فرمی» شد، امّا «هالهٔ کوبندهٔ نفوذ و اُبهتی» را که از یک استاد انتظار می‌رفت، بر چهره نداشت. لورا می‌نویسد، «این فیزیکدان جوان که می‌توانست در میان همکاران مسن‌تر از خودش احترامی کسب کند، توانایی چشمگیری نشان می‌داد تا خود را در سطح جوانان جای دهد، و من دریافتم که هنوز می‌توانم بدون قید و بند با او صحبت کنم. غالباً در یکشنبه‌ها من به او و گروهش برای پیاده روی در صحرا یا قدم زدن در Villa Borghese، مهمترین پارک رُم، می‌پیوستم. به این ترتیب معاشرت ما قطع نشد.» سپس، در یک روز گرم ژوئیه، در سال ۱۹۲۸، لورا شریک کار و زندگی فرمی شد. داستان این ازدواج شادی‌آور است، و لورا فرمی این داستان را با صراحت و سادگی در اتمها در خانواده بیان کرده است.

واپاشی بتا، دنباله

نظریه‌پردازان اواخر سالهای ۱۹۲۰ و اوایل سالهای ۱۹۳۰ از رفتار ذرات β که در گسیل از عناصر پرتوزا یافت می‌شدند سردرگم و مأیوس شده بودند. ذرات β آشکارا با انرژیهایی که گسترهٔ وسیعی را دربر می‌گرفت، از هسته‌های پرتوزا گسیل شدند. منشأ آنها چه بود؟ در نظریه‌های اولیه به سادگی فرض می‌شد که الکترونها همراه با پروتونها در هسته‌ها جای دارند، و گاهی به‌صورت ذرات β می‌گریزند. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ با نشان دادن اینکه اگر الکترون در هسته محبوس باشد، عدم قطعیت مکان آن (Δx در نامعادلهٔ هایزنبرگ) بسیار کوچک خواهد بود، و لزوماً عدم قطعیت تکانه (Δp_x) به قدری بزرگ خواهد بود که الکترون هسته‌ای نمی‌تواند پایدار بماند، به این تصور پایان داد.

1. Laura Capon

معمای دیگر ذرات β، طیف انرژی آنها بود: این ذرات می‌توانستند هر انرژی را، در یک طیف پیوسته از صفر تا مقدار ماکزیمم نسبتاً بزرگی داشته باشند. این ویژگی موجب شد تا ولفگانگ پائولی نامه‌ای خطاب به دوستانش با این عنوان بنویسد «بانوان و آقایان عزیزِ پرتوزا» و در آن بدون هیچ مدرکی پیشنهاد کند که هر ذرهٔ β همراه با ذرهٔ دیگری که در مرز موجود نبودن است، ظاهر می‌شود. این ذره بار الکتریکی ندارد و جرم آن اندک یا فاقد جرم است.

گرچه عجیب بود اما فرمی این ذرهٔ مرموز پائولی را پذیرفت و آن را «نوترینو» (نوترون کوچک) نامید. او همچنین مفهومی را پذیرفت که اخیراً هایزنبرگ مطرح کرده بود، مبنی بر اینکه دو جزء اصلی ساختار هسته، پروتون و نوترون است و بنابراین او الکترونها را از هسته کنار گذاشت. او برای توجیه ظهور الکترونها به صورت ذرات β، نظریه‌ای از یک برهم‌کنش ــ که امروزه به عنوان «برهم‌کنش ضعیف» معروف است ــ بنا کرد، مبنی بر اینکه این برهم‌کنش در میدان صورت می‌گیرد و یک پروتون، یک الکترون و یک نوترینو تولید می‌کند. به صورت نمادین

$$\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p}^{+} + \mathrm{e}^{-} + \nu$$

که n، p^{+}، e^{-} و ν به ترتیب نمادهای یک نوترون، یک پروتون، یک الکترون و یک نوترینو است. (در این برهم‌کنش ضعیف، نوترینو در واقع یک پاد نوترینو، پاد ذره، و پاد ماده است که در فصل بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد.)

این یک فرایند واپاشی نوترون، بسیار شبیه به واپاشی یک هستهٔ پرتوزاست. هر نوترون، درون یا بیرون هسته، ممکن است به این طریق واپاشیده شود. این واپاشی نوترون را به یک پروتون (که در هسته می‌ماند، اگر هسته محل واپاشی باشد) تبدیل می‌کند و یک زوج الکترون ـ نوترینو ایجاد می‌کند (که در خارج یک هسته ظاهر می‌شود). فرمی در ساختار ریاضی نظریه‌اش میدانِ مسئول برهم‌کنش را با یک موجود ریاضی نشان داده است که در مکانیک کوانتومی به تابع «هامیلتون» معروف است. خلاصه‌ای از این نظریه چنین است: «الکترونها (یا نوترینوها) ممکن است تولید یا ناپدید شوند. . . تابع هامیلتونی دستگاه مرکب از ذرات سنگین و سبک می‌باید چنان انتخاب شود که هر گذار از نوترون به پروتون با تولید یک الکترون و نوترینو همراه باشد. فرایند معکوس یعنی تغییر از پروتون به نوترون می‌باید با ناپدید شدن یک الکترون و یک نوترینو همراه باشد.»

فرمی در دسامبر سال ۱۹۳۳ طی یادداشتی نظریه‌اش را به مجلهٔ انگلیسی نیچر ارائه کرد و در نهایت دلخوری همیشگی او، این مقاله رد شد، «زیرا فرضهای آن دور از واقعیت‌تر از آن بود که نظر خوانندگان را جلب کند» امّا یک نسخهٔ طولانیتر آن در دو بخش در مجلّهٔ فیزیک *Zeitschrift für Physik* ظاهر شد، و امروزه مهمترین مقالهٔ نظری فرمی محسوب می‌شود.

کار با نوترون

فرمی دربارهٔ نظریهٔ واپاشی β حرف بیشتری نداشت، گرچه دیگران خشنود بودند با توجه به این مبانی آن را گسترش دهند. فیزیکدان کامل ما بعداً به‌کار تجربی روی آورد. ژولیو ـ کوریها از پاریس گزارش

کرده بودند که از بمباران بور و آلومینیم با ذرات αی پُرانرژی می‌توان ایزوتوپهای پرتوزای جدید نیتروژن و فسفر تولید کرد. این امر، گذشته از چیزهای دیگر درس جالبی در الکتروستاتیک بود: با اینکه هسته‌ها و ذرات α بار الکتریکی مثبت دارند و بنابراین متمایل به دفع یکدیگرند (بنابر قواعد الکتروستاتیک، بارهای همانند یکدیگر را دفع و بارهای ناهمانند یکدیگر را جذب می‌کنند)، آنان می‌توانستند بر سدّ الکتروستاتیکی غلبه کنند، با هم ادغام شوند و یک هستهٔ پرتوزا تولید کنند. حال اگر نوترونها، که حامل بار نیستند، به‌عنوان ذرات بمباران کننده به‌کارگرفته شوند، چه می‌شود؟ فرمی پیش‌بینی می‌کرد که آنان می‌باید در فرایندهای هسته‌ای، کارآمدتر باشند. حق با او بود، امّا برای بعضی شگفتی‌ها آماده نبود.

فرمی این طرح تحقیقاتی را به تنهایی آغاز کرد؛ راسِتی[1]، آزمایشگر گروه، برای گذراندن یک تعطیلات طولانی در مراکش بود. فرمی، با کمک استاد جولیو تراباکچی[2]، یکی از کارکنان دیگر ساختمان فیزیک دانشگاه، یک چشمهٔ نوترون آماده کرد. تراباکچی به‌عنوان مدیر آزمایشگاه فیزیک ادارهٔ بهداشت عمومی بسیار مجهز و منظم بود. به‌نظر می‌رسید که او همیشه مواد و تجهیزات لازم برای فیزیکدانان را در اختیار دارد: آنان او را «مشیت الهی» می‌نامیدند. این بار او ارزشمندترین هدیه‌اش را نثار کرد، و آن ذخیرهٔ پایای رادون استخراج شده از اندوختهٔ یک گرم رادیم او بود. فرمی یک چشمهٔ رادون ساخت، همان‌طور که چادویک با بمباران بریلیم با ذرات αی گسیل‌یافته از رادون ساخته بود. طرح آزمایش او ساده بود: او می‌باید عناصر متفاوت را با نوترونها بمباران کند و در جستجوی پرتوزایی به وجود آمده باشد، همچنان که ژولیو-کوریها کرده بودند. لورا فرمی داستان این نخستین آزمایشهای نوترونی را چنین بیان می‌کند:

> فرمی مردی روشمند بود؛ بمباران مواد را به‌طور تصادفی انجام نمی‌داد، بلکه به‌طور منظم پیش می‌رفت، با سبکترین عنصر یعنی هیدروژن آغاز و جدول تناوبی عناصر را دنبال کرد. هیدروژن نتیجه‌ای نداد: وقتی آب را با نوترون بمباران کرد اتفاقی نیفتاد. او عنصر بعدی یعنی لیتیم را امتحان کرد، امّا توفیقی حاصل نشد. به سراغ بریلیم، سپس بور، کربن و نیتروژن رفت، هیچ‌یک فعالیتی نداشتند. انریکو مردد، مأیوس و در آستانهٔ رها کردن تحقیقاتش بود. او می‌خواست یک عنصر دیگر را امتحان کند، امّا آن عنصر اکسیژن بود که از قبل می‌دانست که پرتوزا نمی‌شود، زیرا نخستین آزمایش او با آب بود. بنابراین، به تابش‌دهی فلوئور پرداخت. هورا! او به نتیجه رسیده بود. فلوئور به شدت فعال شد، و همچنین دیگر عناصر پس از فلوئور در جدول تناوبی.

فرمی راه تحقیق جدیدی را گشوده بود و بی‌درنگ از آن بهره‌برداری می‌کرد. آمالدی و سِگره به پروژه ملحق شدند. راسِتی از مراکش فراخوانده شد و یک رادیوشیمیدان به نام اُسکار دِاگستینو[3] که در مؤسسهٔ کوری در پاریس تعلیم دیده بود، استخدام شد.

1. Rasetti 2. Professor Giulio Trabacchi 3. Oscar D'Agostino

گروه به زودی دریافت که نوترونها به‌عنوان پرتابه‌های بمباران ویژگیهای عجیبی دارند. نخستین آنها معمای میزهای چوبی بود. آمالدی[1] در این باره می‌گوید: «در یک اتاق تاریک چند میز چوبی نزدیک طیف‌نما وجود داشت که ویژگیهای شگفت‌انگیز داشتند، زیرا از پرتودهی نقره روی آن میزها فعالیت بسیار بیشتری عاید می‌شد تا پرتودهی آن روی یک میز سنگ مرمر در همان اتاق.»

فرمی برای دنبال کردن این امر غیرعادی تصمیم گرفت تا نوترونهای بمباران کننده را از صافی یک گوهٔ سربی بگذراند، به دلایلی که به درستی نفهمید، تصمیمش را عوض کرد. بعدها فرمی کوشید تا این دودلی و تردیدش را توضیح دهد.

> من می‌خواهم به شما بگویم چگونه موفق به کشفی شدم که فکر می‌کنم مهمترین کشف من باشد. ما به سختی بسیار دربارهٔ پرتوزایی ناشی از بمباران نوترون کار می‌کردیم و نتایجی را به‌دست می‌آوردیم که از آن سر در نمی‌آوردیم. یک روز وقتی به آزمایشگاه آمدم به‌نظرم رسید که باید اثر گذاشتن یک قطعه سرب پیش از نوترونهای فرودی [بین چشمهٔ نوترون و هدف] را بررسی کنم. به جای عادت معمول، خواستم تا قطعه سرب را به‌طور دقیق بتراشند. به‌وضوح از چیزی ناراضی بودم. به هر بهانه‌ای متوسل می‌شدم تا گذاشتن قطعه سرب را به تعویق بیندازم و سرانجام وقتی با بی‌میلی می‌خواستم آن را در جایش بگذارم، به خود گفتم: «نه، من نمی‌خواهم این قطعه سرب در اینجا باشد، آنچه می‌خواهم یک قطعه پارافین است.» این طور بود که بدون اخطار قبلی، و بدون استدلال خودآگاه. فوراً قطعه پارافین کهنه‌ای را برداشتم و آن را در جایی که قرار بود سرب باشد، گذاشتم.

این شُهود افسانه‌ای فرمی در عمل بود. قرار دادن سرب نتیجهٔ جالب‌توجه خاصی ایجاد نکرده بود. گذاشتن پارافین، آن‌طور که بعداً کسی اظهار کرد، «جادوگری» بود: وقتی پارافین در جای خود گذاشته شد پرتوزایی ناشی از نوترون به‌طور شگفت‌انگیزی زیاد شد.

فرمی نظریه‌پرداز پا پیش گذاشت، و طی چند ساعت، توضیحی برای اثر پارافین پیشنهاد کرد. نوترونهایی که از چشمه می‌آمدند «سریع» بودند، یعنی بسیار پُر انرژی. امّا وقتی از پارافین می‌گذشتند، مثل توپ‌های بیلیارد، با هسته‌های هیدروژن برخورد می‌کردند (پارافین یک هیدروکربن است)، و در هر چنین برخوردی کسر قابل ملاحظه‌ای از انرژی آنها از دست می‌رفت. این عمل کُندسازی یا «تعدیل» بود، که نوترونهای سریع حاصل از چشمه را به «نوترونهای کُند» تبدیل می‌کرد. وقتی نوترونهای کُند از کنار هستهٔ نقره (یا هسته‌های دیگر) می‌گذشتند وقت بیشتری داشتند که به‌وسیلهٔ هسته‌های سنگین جذب شوند و فعالیت ایجاد کنند. فرمی با فرض اینکه چوب حاوی هیدروژن است و مرمر هیدروژن ندارد، اثر عجیب میزهای چوبی و مرمری را توجیه کرد. هانس بته[2] به شوخی می‌گفت که «اگر ایتالیا از لحاظ سنگ مرمر غنی نبود کارآیی نوترونهای کُند هرگز کشف نمی‌شد.»

1. Amaldi 2. Hans Bethe

فرمی و گروه او با نوترونهای کُند در زرادخانهٔ پرتابه‌های بمباران‌شان، بار دیگر برای یافتن آثار تازه به سراغ فهرست عناصر رفتند، سرانجام در پایان جدول تناوبی به اورانیم ــ و سردرگمی ــ رسیدند. فعالیتهایی را که آنان در بمباران نوترون ـ کُندِ اورانیم مشاهده می‌کردند نیمه ـ عمرهای ۱۵ ثانیه، ۱۳ دقیقه، و ۱۰۰ دقیقه داشتند. آنان دریافتند که فعالیتهای جدید نمی‌تواند ناشی از عناصر بین سرب و اورانیم در جدول تناوبی باشد. از این رو حدس زدند که فعالیتهای مشاهده‌شده ناشی از یک ایزوتوپ اورانیم و از عناصر ۹۳ و ۹۴ است، عناصر جدید فرااورانیم که از رویدادهای واپاشی β متوالی حاصل شده‌اند. اگر ایزوتوپهای ۹۳ و ۹۴ وجود می‌داشتند، فرمی و همکارانش می‌توانستند ادعا کنند که دو عنصر مصنوعی ساخته‌اند که ناپایدارند و در طبیعت یافت نمی‌شوند. آنان در سال ۱۹۳۵ نوشتند، «ساده‌ترین تعبیر سازگار با واقعیتهای شناخته‌شده این است که بپذیریم فعالیتهای ۱۵ ثانیه، ۱۳ دقیقه و ۱۰۰ دقیقه محصولات زنجیری [محصولات متوالی واپاشی β]، احتمالاً به ترتیب با اعداد اتمی ۹۲، ۹۳ و ۹۴ و وزن اتمی ۲۳۹اند.»

متأسفانه، ساده‌ترین تعبیر در فیزیک همیشه کامل یا درست نیست. داستان کامل بمباران نوترونی اورانیم بسیار پیچیده‌تر از آن است که فرمی و همکارانش تصور می‌کردند. مایتنر، فریش، هان و اشتراسمان سرانجام در سال ۱۹۳۸ به این نتیجه رسیدند که گیراندازی یک نوترون، سریع یا کُند، می‌تواند باعث شکافت هستهٔ اورانیم به دو پاره با جرم تقریباً برابر شود. فعالیتهای مشاهده‌شده توسط فرمی ظاهراً ناشی از تعدادی پاره‌های این شکافت بود، و نه از ایزوتوپهای فرااورانیم. بدون شک عناصر ۹۳ و ۹۴ نیز در بمباران نوترونی تولید می‌شدند، امّا فرمی و همکارانش آنها را مشاهده و شناسایی نکردند.

سردرگمی اورانیم به خارج از آزمایشگاه کشیده شد. حامی فرمی، اورسو کوربینو[1]، که همواره آماده بود موفقیتهای دست‌پرورده‌اش را تبلیغ کند، سخنرانی مهمی در برابر فرهنگستان باستانی لینکس ایراد کرد و به مخاطبانش اطمینان داد که دست‌کم عنصر ۹۳، بی‌تردید وجود دارد: «از پیشرفت این تحقیقات، که من روز به روز دنبال کرده‌ام، احساس می‌کنم می‌توانم نتیجه‌گیری کنم که تولید این عنصر قطعاً تحقق یافته است.» طُرفه آنکه، فرمی در سال ۱۹۳۸ (درست پیش از آنکه مایتنر، هان، فریش و اشتراسمان موضوع را فیصله داده باشند) جایزه نوبل را دریافت کرد که تا اندازه‌ای به خاطر کشف «عناصر رادیواکتیو جدید» او بود.

چه فرمی خشنود شده باشد و چه نشده باشد، بلافاصله پس از کامل شدن کار نوترون در سال ۱۹۳۴، نامهٔ تبریکی از رادرفورد دریافت کرد:

فرمی عزیز،

باید از لطف شما در ارسال گزارشی از آزمایشهای اخیرتان دربارهٔ ایجاد پرتوزایی موقت در تعدادی از عناصر به‌وسیلهٔ نوترونها تشکر کنم. نتایج کار شما بسیار جالب است. . . .

1. Orso Corbino

فرار موفقیت‌آمیز شما از قلمرو فیزیک نظری را تبریک می‌گویم! به‌نظر می‌رسد شما برای شروع، مسیر خوبی را یافته‌اید. شاید شنیدن این مطلب برای شما جالب باشد که استاد دیراک [برجسته‌ترین نظریه‌پرداز انگلستان در سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰] نیز آزمایشهایی انجام می‌دهد. به‌نظر می‌رسد این امر پیش‌بینی خوبی برای آیندهٔ فیزیک نظری باشد!

با تقدیم تبریکها و بهترین آرزوها. دوستدار صمیمی شما، رادرفورد

شاخهٔ امریکایی

در همان زمان که فرمی در اوایل سالهای ۱۹۲۰ شهرت می‌یافت، یک استبداد فاشیستی به سرکردگی بِنیتو موسولینی[1] در ایتالیا پدیدار می‌شد. فرمی، مانند اغلب همکاران و معاشرانش اهل سیاست نبود، امّا بلندپرواز و جاه‌طلب بود. در سال ۱۹۲۹ پُستی را در فرهنگستان ایتالیایی موسولینی پذیرفت و چنانکه سگره می‌گوید، جایی که «او ناخودآگاه در میان کَله‌گُنده‌های فاشیست قرارگرفت.» امّا انجمنهای افتخاری، عنوانهای اجباری و لباسهای تشریفاتی جایگاه طبیعی فرمی نبود. او به مراسم رسمی دعوت می‌شد، امّا هر وقت ممکن بود از آن مراسم اجتناب می‌کرد. در یک مورد که عروسی ولیعهد بود، فرمی ترجیح داد آن روز را در آزمایشگاه بگذراند. سگره «رفتن او به آزمایشگاه» را چنین نقل می‌کند،

> او می‌باید از خیابانی در مسیر کاروان بگذرد که بر روی عبور و مرور معمولی بسته شده بود و با صفهایی از سربازان محافظت می‌شد. فرمی که با لباس معمولی به جای لباس فرم پرزرق و برق فرهنگستان، ماشین کوچک و کهنه‌اش را می‌راند و کارت دعوتنامه در جیبش بود، وقتی سربازان او را متوقف کردند کارت را به یک افسر نشان داد، و گفت «من رانندهٔ جناب فرمی هستم و باید او را به عروسی ببرم. لطفاً اجازه دهید از صف سربازان عبور کنم.» به این وسیله از صف سربازان گذشت و بقیهٔ روز را در آزمایشگاه گذراند.

تا سال ۱۹۳۷ موضع سیاسی فرمی همزیستی قابل قبول و مفید با رژیم موسولینی بود، نه فاشیست بود و نه ضدفاشیست. اما بعد اوضاع و احوال سیاسی-عقیدتی در یک چرخش سریع بدتر شد و آن وقتی بود که ایتالیا به نیروهای رایش سوم آلمان به سرکردگی هیتلر پیوست. از آغاز، مشارکت زیر سلطهٔ هیتلر بود. در سال ۱۹۳۸، هیتلر مدلهای قوانین نژادی نازی را بر جامعهٔ ایتالیایی تحمیل کرد که نتیجهٔ آن برکناریها و فشار زیاد به یهودیان بود. لورا فرمی یهودی بود، و وقتی نخستین قوانین ضدیهودی، در سپتامبر سال ۱۹۳۸ تصویب شد، فرمی تصمیم گرفت که هرچه زودتر ایتالیا را ترک کند.

آنان یک راه فرار مساعد داشتند. پیش از موقع خبر رسیده بود که فرمی برندهٔ جایزهٔ نوبل ۱۹۳۸ در فیزیک خواهد بود. آنان بیرون رفتند و لیرهای ایتالیائیشان را خرج کردند، سپس برای گرفتن جایزه به استکهلم سفر کردند، و سپس، بدون اطلاع همه کس، بجز دوستان نزدیک، مستقیماً روانهٔ ایالات متحده شدند، که در آنجا فرمی مقام و موقعیتی را در دانشگاه کلمبیا پذیرفته بود.

1. Benito Mussolini

برای لورا فرمی، پایان مسافرتشان در یک روز سرد ژانویه، احساسات متضادی ایجاد می‌کرد. او می‌نویسد: «طولی نکشید که خط افق نیویورک در آسمان خاکستری ظاهر شد، ابتدا کم‌نور سپس به‌وضوح دندانه‌دار، و سرانجام مجسمهٔ آزادی به طرف ما آمد، مجسمهٔ عظیم و فلزی یک زن، که هنوز پیامی برای من نداشت.» لورا رو به همسرش کرد و او با تبسمی که بر لب داشت و چهره‌اش بر اثر آب دریا برنزه شده بود، گفت: «ما شاخهٔ خانوادهٔ امریکایی فرمی را تأسیس کرده‌ایم.» امّا آنان به طور غیرمنتظره‌ای سرزمین خودشان را ترک کرده بودند. لورا با خود می‌اندیشید، «این خانواده امریکایی نیست، نه هنوز.»

ناحیهٔ مهندسی مانهاتان

وقتی خانوادهٔ فرمی از اقیانوس اطلس عبور می‌کردند، لیزه مایتنر و اُتو فریش ایدهٔ شکافت هسته‌ای را کشف کردند. فریش اخبار این کشف را به نیلس بور رساند و او نیز آن خبرها را به سرعت، در ژانویهٔ سال ۱۹۳۹ به امریکا منتقل کرد. فرمی و دیگر کارشناسان نوترونی مجذوب و شیفتهٔ این اخبار شدند. به سرعت ثابت شد که گیراندازی نوترونهای کُند به‌وسیلهٔ ایزوتوپ کمیاب U^{235} عمدتاً عامل شکافت است، و اینکه در هر شکافت نوترونهای تولید شده بیشتر از نوترونهای مصرف شده است.

تکثیر نوترون این امکان تأمل برانگیز را به وجود آورد که ساختن مجتمعی دقیق از اورانیم می‌تواند زنجیره‌ای از واکنشهای شکافت و آزاد شدن انرژی فوق‌العاده زیاد را فراهم کند. واکنش زنجیره‌ای شکافت را می‌توان کنترل کرد و آن را به صورت منبع انرژی در نیروگاه به‌کار گرفت و اگر کنترل شده نباشد امکان تولید بمب هسته‌ای با قدرت تخریبی بی‌مانندی را فراهم می‌کند. در حالی‌که فیزیکدانان دربارهٔ این رویداد گفتگو می‌کردند، جنگ جهانی دوم در اروپا آغاز شد، و برای بعضی دانشمندان پناهنده‌ای که اخیراً از اروپا آمده بودند، خطر سلاح هسته‌ای در دستان دانشمندان آلمانی فوری و هولناک بود. در تابستان سال ۱۹۳۹ یک گروه سه نفری از پناهندگان ـ فیزیکدان مجارستانی، لئو زیلارد[1]، یوجین ویگنر[2] و ادوارد تلر[3]، کارها را به دست گرفتند. آنان نامه‌ای به رئیس جمهور روزولت نوشتند و اینشتین را متقاعد کردند که نامه را امضا کند. نامه هشدار می‌داد که «در آیندهٔ نزدیک، عنصر اورانیم ممکن است به منبع جدید و مهمی از انرژی تبدیل شود. . . این پدیدهٔ جدید به ساختن نوعی بمب نیز خواهد انجامید. و می‌توان تصور کرد ــ گرچه چندان قطعی نیست ــ که نوع جدیدی از بمبهای بسیار پُر قدرت ساخته شود.»

ایالات متحده هنوز روحیهٔ انزواطلبی داشت و این اخطار پاسخ پیش پا افتاده‌ای داشت که اختصاص بودجه‌ای اندک و انتصاب یک کمیتهٔ مشورتی کم‌تحرک بود. امّا در حدود یک سال بعد، با پیشرفت ارتش آلمان در اروپا، تدارکهای جنگی در ایالات متحده یک واقعیت شد. سازمان اداری تلاشهای علمی مربوط به جنگ آغاز به‌کار کرد، با تأسیس نخستین شورای پژوهش دفاع ملی (NDRC)*، و با کمیتهٔ اورانیم به‌عنوان یک کمیتهٔ فرعی، سپس ادارهٔ بزرگتر و جامع‌تر تحقیق و توسعهٔ علمی (OSRD)**.

1. Leo Szilard 2. Eugene Wigner 3. Edward Teller

*. National Defense Research Council ← (NDRC)

**. Office of Scientific Research and Development ← (OSRD)

OSRD را وِنوار بوش[1]، فیزیکدان و مهندسی که صاف و پوست‌کنده صحبت می‌کرد و سرپرستی تیزهوش بود، اداره می‌کرد. رهبر NDRC جیمز بریانت کونانت[2]، شیمیدان آلی و رئیس پیشین هاروارد، بود. تلاشهای هسته‌ای هنوز عمدتاً نظری بود، اما طرح بمب در حال شکل‌گیری بود. آشکار بود که برای آماده کردن یک بمب، ایزوتوپ $U^{۲۳۵}$ شکافت‌پذیر، امّا کمیاب را می‌باید از ایزوتوپ $U^{۲۳۸}$ فراوان جدا کرد، که این خود کار عظیمی بود. زیرا مقادیر بسیار زیادی اورانیم موردنیاز بود، و دو ایزوتوپ خواص شیمیایی یکسان و خواص فیزیکی اندکی متفاوت داشتند. راه دیگر ساختن یک بمب از عنصر ۹۴ کشف شده بود ــ که گلن سیبورگ[3] و همکارانش در برکلی آن را شناسایی و «پلوتونیم» نامیده بودند. ایزوتوپ $Pu^{۲۳۹}$ مانند $U^{۲۳۵}$ شکافت‌پذیر بود، و می‌شد آن را به صورت یک محصول فرعی از واکنش زنجیری کنترل شدهٔ اورانیم فراهم کرد.

بمباران پرل هاربر در اواخر سال ۱۹۴۱ به‌وسیلهٔ ژاپنیها موجب گسترش مجدد پروژهٔ اورانیم شد. طی دو سال بعد، فیزیک تا اندازهٔ زیادی تسلیم مهندسی شد. ساختن بمب در یک کارخانهٔ عظیم پخش گازی، در اوک ریج[4] تنسی[5]، برای جدا کردن $U^{۲۳۵}$ از $U^{۲۳۸}$ آغاز شد. یک فرایند الکترومغناطیسی برای جداسازی $Pu^{۲۳۹}$ در برکلی گسترش یافت. واکنش زنجیری اورانیم، نخست در مقیاس کوچک به‌وسیلهٔ فرمی در شیکاگو، و سپس در مقیاس بسیار وسیع در نزدیکی ریچلند، واشینگتن، برای تولید $Pu^{۲۳۹}$ به طور ایمن مهار شد. با پیشرفت این تلاشها، گروه عظیمی از فیزیکدانان، شیمیدانان، مهندسان و ریاضیدانان در یک محل دور افتاده در نیومکزیکو، به نام لوس آلاموس[6]، گردهم آمدند تا بمب را طراحی کنند، بسازند و آزمایش کنند.

در اواخر سال ۱۹۴۲، این تلاش غول‌آسا فراتر از آن بود که OSRD بتواند، با فوریّت و ضرورتی که پیش‌بینی شده بود، از عهدهٔ آن برآید، کل پروژه در اختیار ارتش، به طور دقیق واحد مهندسی ارتش گذاشته شده بود. سرپرست آن یکی از تسریع کنندگان عمدهٔ امور ارتش، ژنرال لِسلی گرووز[7] بود. مأموریت قبلی او سرپرستی ساخت پنتاگون بود. گرووز ابتدا به بودجهٔ پروژهٔ جدیدش بی‌اعتنا بود. بدون هیچ دلیل و فقط برای تأمین یک اسم رمز، گرووز نام کل تلاشهای تهیهٔ بمب را ناحیهٔ مهندسی مانهاتان نامگذاری کرد، که به زودی به «پروژهٔ مانهاتان» خلاصه شد.

تفاوت گرووز با همکارانش که از محیط دانشگاهی آمده بودند نمی‌توانست بیشتر از آن باشد. او تقریباً چیزی دربارهٔ فیزیک نمی‌دانست، شعور چندانی نداشت، و گاهی با قلدری راه خود را باز می‌کرد، امّا می‌دانست که چگونه پروژه‌های احداث بناهای دشوار و عظیم را راه‌اندازی کند. بوش پس از ملاقاتش با گرووز در دفتر خاطراتش نوشت «می‌ترسم دچار دردسر شده باشیم»، امّا وقتی گرووز را در عمل دید،

1. Vannevar Bush 2. James Bryant Conant 3. Glenn Seaborg 4. Oak Ridge 5. Tennessee
6. Los Alamos 7. Leslie Groves

به سرعت نظرش تغییر کرد. سرهنگ دوم کِنت نیکولز[1] دربارهٔ کار با این ژنرال با استعداد گفته است که:

> او بزرگترین حرامزاده‌ای بود که در زندگی‌ام دیده‌ام، امّا یکی از تواناترین افراد نیز بود. خودپسندی او بی‌همتا بود، انرژی خستگی ناپذیری داشت ــ او درشت‌هیکل و سنگین‌وزن بود، امّا هرگز خسته نمی‌شد. به تصمیم‌هایش اعتماد مطلق داشت، رهیافت او برای انجام یک کار دشوار مطلقاً سرسختانه و ظالمانه بود. امّا این زیبایی کار برای او بود ــ به‌طوری که شما هرگز نگران تصمیم‌هایی که گرفته می‌شد یا منظور آنها نبودید. در واقع من غالباً فکر می‌کردم، اگر مجبور بودم وظایف خودم را بار دیگر تکرار کنم، گرووز را به عنوان رئیس انتخاب می‌کردم. من از ریخت او بیزار بودم و همچنین بود برای هر کس دیگر، ولی با هم نوعی تفاهم داشتیم.

پیل در زمین اسکواش

فرمی پس از ورود به نیویورک در سال ۱۹۳۹، چالش طراحی آزمایشی را پذیرفت که واکنش زنجیری اورانیم را استمرار می‌بخشید. از لحاظ مواد، او دو چیز لازم داشت، یکی اورانیم شکافت‌پذیر ــ یعنی ایزوتوپ $U^{۲۳۵}$ کمیاب ــ و دیگری یک «کُندساز» که بتواند نوترونهای سریع تولید شده در رویدادهای شکافت را کُند سازد، تا نوترونهای کُند بتوانند شکافتهای بیشتری تولید کنند. تأسیسات بزرگی که بتواند $U^{۲۳۵}$ زیادی را از $U^{۲۳۸}$ جدا کنند چند سال بعد به وجود آمد، بنابراین فرمی چاره‌ای نداشت بجز آنکه از اورانیم طبیعی ۰٫۷ درصد $U^{۲۳۵}$ استفاده کند. این بدان معنی بود که وسیلهٔ واکنش ـ زنجیری، به هر طریقی که ساخته می‌شد به چندین تُن اورانیم و کُندساز نیاز داشت.

فرمی برای کُندسازی گرافیت را انتخاب کرد، چون اتمهای کربن به قدر کافی سبک‌اند تا نوترونهای سریع را به قدر کافی کُند کنند. گرافیت انسجام ساختاری لازم برای برپا کردن آزمایش در جایی به اندازهٔ یک اتاق را دارد. فرمی طرحی را برگزید برای مجموعه‌ای مرکب از آجرهای گرافیت که حامل شبکه‌ای از قطعات شکل گرفتهٔ اورانیم باشد.

ورای این جنبه‌های ساختاریِ طراحی پیل (pile) که فرمی آن را چنین می‌نامید، موضوع بودجه‌بندی نوترون بود. برای ادامهٔ واکنش زنجیری، نوترونهای تولید شده در رویدادهای شکافت، باید بیشتر از نوترونهایی باشد که در فرایندهای دیگر از دست می‌روند. بعضی از نوترونها از سطوح ساختار گرافیتی فرار می‌کردند و بعضی دیگر جذب اورانیم یا هسته‌های دیگر در رویدادهای غیرشکافتی می‌شدند. اتلافهای نوع اخیر در گرافیت حداقل است؛ هسته‌های کربن میل کمی به نوترونها دارند. آب که یک کُندساز بدیهی‌تر است، این مزیت را ندارد.

فرمی ضریب عملکردی به نام «ضریب تکثیر یا تولید مثل» را که با نماد k نشان داده می‌شود برگزید. این عامل میانگین تعداد نوترونهای تولید شده از یک نوترون اولیه را محاسبه می‌کند. اگر فرض

1. Kenneth Nichols

کنیم نوترونها طی چند «نسل» از رویدادهای شکافت تولید می‌شوند، k تعداد نوترونهای تولید شده از نوترون اصلی در نسل اول است، k^2 در نسل دوم، k^3 در نسل سوم، و غیره. اگر $k < 1$، این تعداد در هر نسل کمتر می‌شود و زنجیره از بین می‌رود؛ و اگر $k > 1$ باشد، تعداد نوترونها بیشتر می‌شود و زنجیره واگرا و از کنترل خارج می‌شود؛ اگر $k = 1$ باشد زنجیره با آهنگ ثابت پیش می‌رود و تولید و اتلاف نوترونها متوازن می‌شوند.

فرمی و گروه او ابتدا داده‌های مهم مربوط به اورانیم و گرافیت را در «مجتمع زیر بحرانی» یعنی برای آنها که $k < 1$، گردآوری کردند. این پیل‌ها به قدر کافی بزرگ نبودند تا واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای در آنها حفظ شود، امّا فضای بزرگتری در پردیس کلمبیا موجود بود. کار مشابهی در دانشگاه شیکاگو در جایی با نام رمز «آزمایشگاه متالورژی» در حال انجام بود. آرتور کامپتون[1]، که همهٔ پژوهشهای هسته‌ای پروژهٔ مانهاتان را هدایت می‌کرد، در اوایل سال ۱۹۴۲ تصمیم گرفت که پژوهش پیل را در شیکاگو تثبیت کند.

نقل مکان دیگر، برای اعضای خانوادهٔ فرمی خبر خوبی نبود. آنان به تازگی در شهرک حاشیه‌ای لئونیا[2] در نیوجرسی سکنی گزیده بودند و فکر می‌کردند همواره آنجا خواهند بود. لورا فرمی می‌نویسد آنان، «مالکان خوشبخت یک خانه با چمنزاری بزرگ، یک استخر کوچک، و رطوبت زیاد در زیرزمین شده بودند.» فرمی به مدت چند ماه، وقت خود را بین شیکاگو و نیویورک تقسیم می‌کرد، امّا در ژوئن سال ۱۹۴۲، خانواده تسلیم دیوان سالاری شد، چمن خود را ترک کرد و به خانه‌ای کرایه‌ای در شیکاگو نزدیک دانشگاه نقل مکان کردند.

فرمی و نیروهای همراه او، اکنون هدفشان این بود که یک «مجتمع بحرانی» با مقیاس کامل و با ضریب تکثیر k بزرگتر از یک (اندکی بزرگتر) بنا کنند. این معیاری مؤثر و چشمگیر از اعتماد به نفس فرمی، و اعتماد آرتور کامپتون به فرمی بود، که طرح فرمی را پذیرفت تا پیل بحرانی در پردیس دانشگاه شیکاگو در یک زمین بازی اسکواش زیر جایگاههای غربی استادیوم دانشگاه ساخته شود. کامپتون به سرعت و بدون مشورت با رئیس دانشگاه، رابرت هاچینز[3]، تصمیم‌گیری کرد، کاری که عادت معمول او نبود. ریچارد رودز[4] که در میان بسیاری از وقایع‌نگاران پروژهٔ مانهاتان، سرآمد همه است می‌نویسد، «استدلال کامپتون این بود که نباید از یک حقوقدان بخواهد که دربارهٔ مطلبی از فیزیک هسته‌ای قضاوت کند. واژه ذوب هستهٔ مرکزی در واژگان مهندسی هسته‌ای وارد نشده است ــ فرمی فقط آن را برای مورد خاصی ابداع کرده بود ــ امّا این ریسکی بود که کامپتون می‌کرد، یک چرنوبیل[5] کوچک در وسط یک شهر پُرجمعیت، مگر اینکه فرمی، چنانکه می‌دانست مهندسی بسیار توانا باشد.»

آنچه به کامپتون اطمینان خاطر بیشتری می‌داد طرح کنترل دقیق پیل بود. ابزار کنترل اولیهٔ او مجموعه‌ای بود از «میله‌های کنترل»، ورقه‌هایی از کادمیم که به نوارهایی چوبی میخکوب شده بود. این

1. Arthur Compton 2. Leonia 3. Robert Hutchins 4. Richard Rhodes 5. Chernobyl

نوارها را می‌شد در پیل فرو برد و بیرون کشید. کادمیم مانند یک اسفنج جاذب نوترون عمل می‌کند، به طوری که با فروبردن کامل میله‌های کنترل، تعداد نوترون به قدر کافی کم می‌شد تا پیل را زیر حد بحرانی نگه دارد. با بیرون کشیدن آهستهٔ میله‌های کنترل در پیل، جمعیت نوترونها به قدر کافی زیاد می‌شد تا به حد بحرانی برسد، ضریب تکثیر k افزایش یابد و سرانجام به مقادیری بزرگتر از یک برسد، فرمی با خرسندی از یک هدیهٔ طبیعت نیز آگاه بود. همهٔ نوترونهای تولیدشده در یک پیل «آنی» نیستند ــ یعنی بلافاصله پس از رویدادهای شکافت تولید نمی‌شوند. کسر کوچکی از آنها که «نوترونهای تأخیری» نامیده می‌شوند چند ثانیه بعد ظاهر می‌شوند. فرمی پیش‌بینی کرد که اثر مساعد نوترونهای تأخیری کُند کردن آهنگ افزایش جمعیت نوترون خواهد بود تا متصدیان پیل به هر نشانهٔ خطری واکنش نشان دهند.

لورا فرمی حکایت شورانگیز از رویدادهای یک روز سرد در اوایل دسامبر سال ۱۹۴۲ را در اختیارمان می‌گذارد که CP-۱ (پیل نمره یک شیکاگو)، شامل ۶ تُن اورانیم، ۴۰ تُن اکسیداورانیم، و ۳۸۵ تُن گرافیت، با ایمنی بحرانی شد:

> فقط شش هفته از قرار دادن نخستین آجر گرافیتی گذشته بود، و دوم دسامبر بود.
>
> هربرت اندرسن[1] [یکی از همکاران فرمی در طراحی پیل] خواب‌آلود و بدخُلق بود. او تا ساعت ۲ صبح بیدار مانده بود تا دستکاریهای نهایی پیل را انجام دهد. اگر یک میلهٔ کنترل را به هنگام شب بیرون کشیده بود، می‌توانست پیل را به‌کار اندازد و نخستین کسی باشد که به یک واکنش زنجیری دست یافته است، دست‌کم به معنی مادی و مکانیکی آن. امّا وظیفهٔ اخلاقی او آن بود که با وجود وسوسهٔ شدید، آن میله را بیرون نکشد. این کار در مورد فرمی منصفانه نبود. فرمی رهبر بود. او پژوهش را هدایت کرده و دربارهٔ نظریه‌ها کار کرده بود. ایده‌های اساسی از آنِ او بود. امتیاز و مسئولیت، هدایت و کنترل واکنش زنجیری... نیز از آن بود.
>
> از اینکه وقتی سه مرد جوان از آن بالا بر پیل خم می‌شده‌اند چه احساساتی داشته‌اند، اثری وجود ندارد... آنان را «جوخهٔ خودکشی» می‌نامیدند. این یک شوخی بود، امّا احتمالاً آنان از خود می‌پرسیدند، آیا ممکن است شوخی حقیقتی دربر داشته باشد. آنان مانند آتش‌نشانان گوش به زنگ امکان یک آتش‌سوزی، آمادهٔ خاموش کردن آن بودند. اگر چیز غیرمنتظره‌ای روی می‌داد، اگر پیل از کنترل خارج می‌شد، آنان سیل‌آسا، با محلول کادمیم، آن را «خاموش» می‌کردند.
>
> [تماشاگرانی در حدود بیست نفر] به بالکُنی در انتهای شمالی محوطهٔ اسکواش رفتند؛ همه، بجز سه نفری که در جایی بالای پیل نشستند، و بجز فیزیکدان جوانی به نام جرج ویل[2]، که به تنهایی روی زمین کنار میلهٔ کادمیم آماده ایستاده بود، تا وقتی دستور رسید آن را از پیل بیرون بکشد.
>
> و به این ترتیب نمایش آغاز شد.

1. Herbert Anderson 2. George Weil

فرمی هدف میلهٔ کنترل را توضیح داد، و به ویل دستور داد آن را بیرون بکشد و سیزده فوت آن را در پیل نگه دارد. شمارگرهایی که شدت نوترون را اندازه‌گیری می‌کردند با سریعتر شدن صدای کلیک واکنش نشان دادند، و ردّ قلم ثبات نمودار نیز که نوترونها را اندازه‌گیری می‌کرد، بالا رفت و سپس صاف شد. واکنش زنجیری که هنوز خودنگهدار نبود از تولید نوترون باز ایستاد. تمام صبح فرمی آزمایش را به همین طریق ادامه داد، به ویل دستور داد که میلهٔ کنترل را با نموهای شش اینچ بیرون بکشد، و هر بار ناظران شاهد آن بودند که قلم ثبات بالا می‌رود و سپس تسطیح می‌شود. در ساعت ۱۱/۵، پیش از ظهر، فرمی، بنا به گفتهٔ لورا فرمی، «برحسب عادت» اعلام کرد که وقت نهار است، «گرچه هیچ‌کس نشانه‌ای از گرسنگی نشان نداده بود.»

در ساعت دو بعدازظهر، فرمی و تماشاگرانی که اکنون دو برابر شده بود، به زمین اسکواش بازگشتند. فرمی با محاسبه و برونیابی، توانست بفهمد که پیل نزدیک به مرحلهٔ بحرانی است. او به ویل گفت میلهٔ کنترل را تا دوازده اینچ بیشتر بیرون بکشد. فرمی به کامپتون گفت «داریم می‌رسیم. اکنون خودنگهدار خواهد شد، ردّ ثبات بالا خواهد رفت، و به بالا رفتن ادامه خواهد داد، دیگر مسطح نخواهد شد.»

لحظهٔ موعود فرارسید، آنچه هربرت آندرسن به خاطر می‌آورد به این شرح است:

> ابتدا می‌توانستید صدای شمارگر نوترون را بشنوید، کلیکتی‌ـکلاک، کلیکتی‌ـکلاک. سپس کلیکها سریعتر و سریعتر شدند، و پس از مدتی تبدیل به یک غُرّش شد. شمارگر دیگر نمی‌توانست آن را دنبال کند، از شمارش بازماند [و خاموش شد]. . . [همه] در سکوتی ناگهانی شاهد انحراف فزایندهٔ قلم ثبات بودند. سکوتی بُهت‌انگیز حکمفرما بود، همگی معنی و اهمیت [ردّ ثبات] را می‌فهمیدند. . . مقیاس ثبات باید مدام تغییر می‌کرد تا با شدت نوترونی که پی‌درپی به سرعت در حال افزایش بود، سازگار شود. ناگهان فرمی دستش را بالا برد و اعلام کرد، «پیل بحرانی شده است.» هیچ یک از حاضران در این باره تردید نداشت.

رودز می‌نویسد، «خنده‌ای بر چهرهٔ فرمی نشست، او می‌توانست، روز بعد به شورای فنی گزارش دهد که پیل به k معادل ۱/۰۰۰۶ رسیده است. در این صورت شدت نوترون آن هر دو دقیقه دو برابر می‌شد [آهنگی آرام به همت نوترونهای تأخیری]. اگر پیل به مدت یک ساعت و نیم کنترل نمی‌شد، آهنگ افزایش [انرژی] آن را به یک میلیون کیلووات می‌رساند. در این صورت مدتها پیش از رسیدن به این حد، هرکس که در اتاق مانده بود هلاک و ذوب می‌شد.»

فرمی به ملایمت دستور داد که پیل، پس از ۴/۵ دقیقه کارکردن متوقف و توان آن تا $\frac{1}{2}$ وات کم شود، که به زحمت برای روشن کردن لامپ یک چراغ قوه کافی است. لئونا وودز، تنها زن در گروه شیکاگو با زمزمه به فرمی گفت، «چه وقت متوحش می‌شویم؟»

کامپتون تلفنی موفقیت فرمی را، با رمز: «دریانورد ایتالیایی به دنیای جدید رسیده است.» به کونانت گزارش کرد که پرسید، «برخورد با بومیان چگونه بود؟» کامپتون پاسخ داد، «بسیار صمیمانه».

تکملهٔ پیل شیکاگوی فرمی (یا «راکتور هسته‌ای»، اصطلاح عام برای هر سیستم واکنش‌ـزنجیره‌ای کنترل شده) را یوجین ویگنر[1] فیزیکدان دیگری که به مهندسی روی آورده بود، طراحی کرد. این راکتور نزدیک ریچلند، واشنگتن، درکنار رودخانهٔ کلمبیا ساخته شد که با توان ۲۵۰٬۰۰۰ کیلووات کار می‌کرد، که برای روشنایی یک شهر کوچک کافی بود. هدف آن تولید پلوتونیم بود.

به سوی متزا

لورا فرمی می‌نویسد، «انریکو فکر می‌کرد ما برای مدتی در شیکاگو خواهیم بود و سپس به لئونیا بازمی‌گردیم. او خوش‌بین بود.» بعداً معلوم شد که تعریف واژهٔ «مدتی» که در مورد پروژهٔ مانهاتان به‌کار می‌رفت عبارت از مدت زمانی بود که «طول می‌کشید تا همهٔ فیزیکدانان ساحل شرقی به ساحل غربی برسند و همهٔ فیزیکدانان ساحل غربی به ساحل شرقی.» نقل‌مکان دیگری برای خانوادهٔ فرمی، در تابستان سال ۱۹۴۴ به «سایت Y» بسیار دور از شیکاگو، در راه بود.

خانهٔ جدید آنان در تخت کوهی دور افتاده در نیومکزیکو بالای ژرف درهٔ لوس آلاموس چهل و پنج مایلی جنوب غربی سانتافه[2] بود. این محل را ــ که بعدها لوس آلاموس نامیده شد ــ یک زوج عجیب و غریب انتخاب کرده بودند: ژنرال گرووز[3]، مردی نیرومند راسخ، عملگرا، و خودرأی، و رابرت اُپنهایمر[4] مردی لاغر، جدّی، دقیق، فاضل و خودرأی. این دو در پاییز سال ۱۹۴۲ در برکلی، جایی که اُپنهایمر عضو پاره‌وقت گروه فیزیک بود، ملاقات کردند. گرووز در مراحل اولیهٔ سازماندهی پروژهٔ مانهاتان بود. اپنهایمر به او توصیه کرد تا «یک آزمایشگاه مرکزی به طور کلی مختص [طرح و ساختن بمب] تأسیس کند، جایی که ایده‌های نظری و یافته‌های تجربی بتوانند بر یکدیگر تأثیرگذار باشند، جایی که ضایعات و ناکامی و خطاهای مطالعات آزمایشگاهی جداگانه را حذف کرد، جایی که بتوان به مسائل شیمیایی، متالورژیکی، مهندسی و مهمات که تاکنون به آنها توجهی نشده است، مسلط شد.»

گرووز نه‌تنها نیاز به یک آزمایشگاه مرکزی را دریافت، بلکه معتقد شد که اپنهایمر رهبری استثنایی برای چنین آزمایشگاهی است. گرووز در مصاحبه‌ای پس از جنگ گفت، «او نابغه است، یک نابغهٔ واقعی. گرچه لارنس[5] [پدر سیکلوترون] بسیار با استعداد است، امّا او یک نابغه نیست، فقط آدم سخت‌کوش خوبی است. می‌گویید چرا؟ چون اپنهایمر دربارهٔ هر چیز شناختی دارد. او می‌تواند دربارهٔ هر چیز که مطرح کنید، صحبت کند. خوب نه دقیقاً، من حدس می‌زنم چیزهای کمی وجود دارد که او دربارهٔ آنها اطلاعی ندارد. او دربارهٔ ورزشها چیزی نمی‌داند.»

اپنهایمر با تقسیم وقت خود بین کَلتک[6] در پاسادنا[7] و دانشگاه کالیفرنیا در برکلی اعتبار خوبی به‌عنوان یک معلم و یک نظریه‌پرداز به‌دست آورده بود. او از زمرهٔ نخستین کسانی است که شواهد

1. Eugene Wigner 2. Santa Fe 3. Groves 4. Robert Oppenheimer 5. While Lawrence
6. Caltech 7. Pasadena

قانع‌کننده‌ای برای وجود سیاهچاله‌های گرانشی به‌دست آورده بود. هانس بته[1] که به عنوان رهبر بخش نظری، به لوس آلاموس می‌رفت تحت‌تأثیر «ذوق عالی» اُپنهایمر به‌عنوان یک مشاور تحقیقاتی، قرار گرفته بود: «آن‌طور که انتخاب موضوعاتش نشان می‌داد، او همواره می‌دانست که مسائل مهم کدامند. او واقعاً با این مسائل زندگی می‌کرد، برای حل آنها می‌کوشید، و مسئلهٔ مورد علاقه‌اش را به گروهش منتقل می‌کرد. . . او به هر چیز علاقه نشان می‌داد، در یک بعد از ظهر ممکن بود دربارهٔ الکترودینامیک کوانتومی، پرتوهای کیهانی، تولید زوج الکترون و فیزیک هسته‌ای بحث کند.»

گرووز و اپنهایمر تخت‌کوه دور افتاده در نیومکزیکو را به دلیل امنیتی، و همچنین به این دلیل انتخاب کردند که اُپنهایمر سرزمین کوهستانی شمال نیومکزیکو را دوست داشت. خانوادهٔ او مالک مزرعه‌ای در کوههای سانگر دوکریستو در شمال غربی لوس آلاموس بودند.

فیزیکدانان، ریاضیدانان، شیمیدانان، مهندسان، پرسنل ارتش از سراسر کشور (شرق یا غرب) راهیِ لوس آلاموس شدند. این شهر به‌طور رسمی وجود نداشت. روی نقشه نبود، ساکنان آن حق رأی نداشتند و برای بیگانگان سایت Y یا P.O. Box ۱۶۶۳ بود. خانه‌سازی هرگز پابه‌پای هجوم تازه‌واردان پیش نمی‌رفت. پوشش گیاهی در بالای تخت‌کوه (در ارتفاع هفت هزار و دویست فوت) با کامیونها و تجهیزات ساختمانی کوبیده و لِه شده بود. در نتیجه زمین، بر اثر رگبارهای تابستان و ذوب برفهای زمستانی، دائماً گل‌آلود بود. فراسوی آشوب شهر، زیبایی کوهها قرار داشت: جویبارهای پر از قزل‌آلا، مسیرهای اسکی، جنگل، و قله‌هایی برای صعود.

فرمیها مانند همسایگان لوس آلاموسی خودشان، موفق شدند در این محیط غیرعادی احساس راحتی کنند. آپارتمان D در ساختمان T-۱۸۶، به آنان تخصیص داده شد. لورا فرمی گزارش می‌دهد،

> یکی از چند خانهٔ چهار آپارتمانی یکسان در پایین خیابانی که از نزدیکی منبع آب در قسمت بالای شهر آغاز می‌شد و با شیبی ملایم به طرف نواحی بکر بیرون شهر کشیده می‌شد. . . آپارتمان ما کوچک، امّا راحت و کافی بود. در سه اتاق خواب آن تختهای سفری ارتشی قرار داشت که ساکنان قبلی آن، جوانان نیروهای مسلح، نام و درجه‌هایشان را حک کرده بودند. ملحفه‌ها و پتوها با حروف سیاه بزرگ آرم USED مُهر شده بود که ما را به‌شدت شوکه می‌کرد تا آنکه فهمیدیم آنها حروف اختصاری نمایندهٔ سازمان مهندسی ایالات متحده (United States Engineer Department) است. هر چه در اختیار پروژه بود یا نشانهٔ USED داشت یا GI، حتی لامپهای روشنایی و زمین‌شورها. امّا من از سه پنجرهٔ به هم پیوستهٔ اتاق نشیمن می‌توانستم قله‌های گرد سبز تپه‌های جمز[2] و شیب آنها را در زمینهٔ آسمان ببینم که همچون سه تابلوی نقاشی از یک استاد کهنه‌کار بود. هیچ نشانه‌ای از ساخته‌های انسان بر تپه‌ها دیده نمی‌شد، و من می‌توانستم آنها را از آنِ خود بدانم.

1. Hans Bethe 2. Jémez

فرمی مدیر بخش F (F به نام فرمی) لوس آلاموس با مأموریتی در یک رشته امور مربوط به هم شد. سِگره می‌نویسد، «مسئولیتهای کلی بخش F تحقیق و بررسی مسائلی بود که با کار بخشهای دیگر سازگاری نداشت. فرمی آدم مطلع و صاحب‌نظری بود که هر فیزیکدانی می‌توانست درخواستی از او داشته باشد و غالباً هم بدون دریافت کمکی چشمگیر باز نمی‌گشت. مسائلی که به او ارجاع می‌شد محدودیت نداشت.»

از نظر فرمی تحقیق و توسعهٔ بمب مفسده‌ای ضروری بود، و آن را وظیفه‌ای ناخوشایند می‌دانست. امّا این نگرشی نبود که او در لوس آلاموس می‌دید. در آنجا اشتیاقی حاکم بود که ابتدا او نمی‌فهمید. اُپنهایمر به خاطر می‌آورد که، «فرمی پس از شرکت در یکی از نخستین گردهماییهایش، رو به من کرد و گفت، فکر می‌کنم همکاران شما واقعاً می‌خواهند یک بمب بسازند.» این روح حاکم بر لوس آلاموس بود: بمب دل‌مشغولی آنان بود. و زمانی که بمب پلوتونیم ساخته و برای آزمایش آمادهٔ سوارکردن بود، آزمایشی که اُپنهایمر آن را «ترینیتی (تثلیث)» می‌نامید، فرمی نیز مجذوب شده بود، بنا به گفتهٔ سگره:

> تا جایی که می‌دانم، گزارشهای مکتوبی از نقش فرمی در مسائل این آزمایش وجود ندارد و بازسازی آنها به تفصیل هم، کار آسانی نیست. امّا این یکی از مواردی بود که در آن تسلط فرمی بر همهٔ فیزیک یعنی یکی از شگفت‌انگیزترین ویژگیهایش، اهمیت داشت. مسائل موجود در آزمایشهای ترینیتی گستره‌ای از هیدرودینامیک تا فیزیک هسته‌ای، از اُپتیک تا ترمودینامیک، از ژئوفیزیک تا شیمی هسته‌ای را دربر می‌گرفت. اغلب آنها به هم ربط داشتند، و حل کردن یکی مستلزم فهمیدن همهٔ مسائل دیگر بود. گرچه هدف ناخوشایند و وحشتناک بود، امّا یکی از بزرگترین آزمایشهای فیزیک در همهٔ زمانها بود. فرمی خودش را به‌طورکامل در این کار غرق کرده بود. در زمان آزمایش او یکی از معدود افرادی (یا شاید تنها کسی) بود که همهٔ پیامدهای فنی فعالیتها در آلاموگوردو[1] [محل آزمایش در نیومکزیکوی جنوبی] را می‌فهمید.

نیمهٔ خالی

یکی از نشانه‌های نبوغ فرمی، ناآرامی عقلانی‌اش بود. حتی وقتی او حوزهٔ نوید بخش جدیدی را می‌گشود، خوشحال بود که کار اولیه را کرده است و اکتشاف بیشتر در قلمرو جدید را به دیگران واگذار کند. مقاله‌های مهم او دربارهٔ آمارکوانتومی و واپاشی β دنباله نداشت. وقتی پیل شیکاگو تحقق یافت، راکتورهای هسته‌ای، دیگر از لحاظ تحقیقاتی برایش جاذبهٔ فراوانی نداشت. هنگامی که او هنوز در شیکاگو بود، مفید بودن باریکه‌های نوترون برای مطالعهٔ حالت جامد را اثبات کرد و فیزیکدانان دیگر کار او را دنبال کردند. یک حوزهٔ پژوهشی که به مرحلهٔ بلوغ رسیده باشد باب طبع او نبود. «دریانورد ایتالیایی» همواره ماجراجو در جستجوی حوزه‌های جدید بود، و هرگز در یافتن آنها ناکام نبود.

1. Alamogordo

او در سال ۱۹۴۵ لوس آلاموس و فیزیک بمب را رها کرد و به شیکاگو بازگشت. سال بعد دانشگاه شیکاگو، طی مراسمی مؤسسهٔ مطالعات هسته‌ای را افتتاح کرد، و فرمی مقام مؤثری را، در مؤسسهٔ جدید، بدون وظایف اداری، پذیرفت. اکنون ابزار آزمایشی او یک سیکلوترون جدید بود که درست در روبه‌روی جایگاه‌های غربی استادیوم دانشگاه ساخته شده بود، که در آنجا پیل شیکاگو کارش را آغاز کرده بود. لورا فرمی می‌نویسد، «سیکلوترون اسباب‌بازی او بود. او در همهٔ ساعات روز و شب تابستان ۱۹۵۱ با سیکلوترون بازی می‌کرد. او می‌گذاشت تا سیکلوترون روال عادی کار او را درهم بریزد.» ابزار نظری او به جای نوترون، مزون بود. در آن موقع فکر می‌کردند که مزون میانجی بین نوکلئونها (پروتونها و نوترونها) است، و آنها را در هسته به هم پیوند می‌دهد. او برای مطالعات تجربیِ برهم‌کنشهای بین مزونها و نوکلئونها از سیکلوترون استفاده می‌کرد.

فرمی بار دیگر درست مانند تقریباً ده سال قبل، در رُم به‌عنوان سرپرست تحقیق و معلم، فعال بود. مؤسسهٔ شیکاگویی او مرکزی برای تحقیق در فیزیک هسته‌ای و فیزیک انرژیهای زیاد شد. او پای ثابت کنفرانسها بود و معمولاً به مراکز تحقیقاتی دیگر مسافرت می‌کرد. بحث با فیزیکدانان جوانتر، هم برای آنان و هم برای خودش، ارزش خاصی داشت.

وقتی سیکلوترون در سال ۱۹۵۱ آغاز به کار کرد، فرمی هنوز به‌عنوان یک نظریه‌پرداز و آزمایشگر مقام نخست را داشت. او گله می‌کرد که حافظه‌اش مثل قبل او را یاری نمی‌کند، امّا می‌دانست که چگونه با استفاده از «حافظهٔ مصنوعی‌اش» با ضعف حافظه برخورد کند. منظور از حافظهٔ مصنوعی یادداشتهایی به دقت تنظیم و تجدید چاپ شده بود. او می‌باید بیست یا سی‌سال دیگر زندگی می‌کرد تا برای فیزیک ذرات و فیزیک انرژیهای زیاد همان‌قدر کار کند که قبلاً برای فیزیک هسته‌ای کرده بود، امّا چنین نشد. در سال ۱۹۵۴ سلامتی او ناگهان رو به ضعف نهاد. تشخیص پزشکی بیماری او سرطان معدهٔ غیرقابل علاج بود و او چند ماه بعد در سن پنجاه و سه سالگی درگذشت.

فرمی در سال ۱۹۴۵، در پایان جنگ، به سگره گفت که او در حدود یک سوم کار زندگی‌اش را تکمیل کرده است. با آن محاسبه، وقتی او نُه سال بعد درگذشت چیزی بیشتر از نیمی از آنچه را که برای ارائه داشت، به ما نداده بود.

viii

فیزیک ذرات

خلاصهٔ تاریخی

اکنون حدود یک قرن است که فیزیکدانان مشغول شکستن اتمها و دسته‌بندی ذرات زیراتمی تولید شده‌اند. نخستین آزمایشهایی از این دست را که به کشف الکترون با بار منفی منجر شد، جی.جی. تامسون در سال ۱۸۹۷ انجام داد. کشف هستهٔ اتم به‌وسیلهٔ رادرفورد و مطالعهٔ عناصر پرتوزا به‌وسیلهٔ رادرفورد، پی‌یر و ماری کوری، مایتنر، فرمی و دیگران، موجب نفوذ بیشتر در اسرار قلمرو ذرات زیراتمی شد. انبوهی از ذرات پرانرژی زیراتمی که از فضای خارج می‌آیند و پرتوهای کیهانی نام گرفته‌اند در اتاقکهای ابر و آشکارسازهای دیگر مشاهده شده‌اند. اکنون آزمایشگران آموخته‌اند که چگونه باریکه‌های پُرانرژی از ذرات زیراتمی را در ماشینهای شتاب‌دهندهٔ عظیم، پدید آورند. باریکه‌های تولید شده به سوی باریکه‌های دیگر پرتاب می‌شوند و ذراتی که به این طریق تولید شده‌اند در آشکارسازهای بسیار پیچیده مشاهده می‌شوند. ذراتی که در این آزمایشها تولید شدند به قدری متنوع بودند که ابتدا نظریه‌پردازان نمی‌دانستند با آنها چه کنند.

این بخش از کتاب به معرفی سه فیزیکدان می‌پردازد که نقش مهمی در تنظیم نظریه‌هایی داشتند که موجب نظم بخشیدن به انبوهی از داده‌ها در قلمرو ذرات زیراتمی شده است. اولینِ آنها، پل دیراک[1] است. او یکی از نظریه‌های بزرگ ریاضی فیزیک را تدوین کرد. این نظریه از نظر اهمیت، در ردیف نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول قرار دارد. نظریهٔ دیراک به تشریح الکترونهایی می‌پردازد که سرعت آنها به قدری زیاد است که باید محدودیتهای نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین را در مورد آنها اعمال کرد. این نظریه نشان می‌دهد که الکترونها نوعی حرکت چرخشی دارند و مانند آهنرباهای بسیار ریز رفتار می‌کنند که قطبهای شمال و جنوب مغناطیسی دارند. دیراک همچنین از نظریهٔ خود یک نتیجهٔ کاملاً غیر منتظره به‌دست آورد و آن این بود که الکترون، همتایی با بار مثبت دارد. این ذره پس از آنکه به‌وسیلهٔ کارل اندرسون[2] در اتاقک ابر مشاهده شد، پوزیترون[3] نام گرفت. الکترون و پوزیترون که از جنبه‌های دیگری نیز متفاوت‌اند، پادذرهٔ[4] یکدیگر نامیده می‌شوند. همهٔ ذرات دیگر، از جمله نوترونها تا نوترینوها، پادذرهٔ متناظر خود را دارند.

دومین نظریه‌پرداز در زمینهٔ ذرات، ریچارد فاینمن[5] است. او به نسل دانشمندان کوانتومی پس از

1. Paul Dirac 2. Carl Anderson 3. Positron 4. Antiparticles 5. Richard Feynman

دیراک تعلق دارد. نظریهٔ دیراک پاسخی به کشف تجربی ویلیس لَم[1] و پولی‌کارپ کوش[2] بود، که نشان می‌داد نظریهٔ دیراک، اندکی خطا دارد. روش فاینمن نیازمند محاسبات طولانی است ولی این سختی، دقت حیرت‌آوری به همراه دارد. برای آسان کردن محاسبات، فاینمن رهیافتی تصویری ابداع کرد. در آن هر مرحلهٔ محاسباتی به‌وسیلهٔ یک نمودار ابتکاری نشان داده می‌شود.

سومین نظریه‌پرداز ذرات، مورای گل‌ـمان[3] است که نظریه‌های او نه‌تنها هستهٔ اتم را می‌کاود بلکه ذرات درون هسته و همهٔ خرده‌های هسته‌ای را که در نتیجهٔ خرد شدن هسته‌ها در شتاب دهنده‌ها پدید می‌آیند، دربرمی‌گیرد. گل‌ـمان واحدهای غایی ماده را ذراتی همیشه محصور و دارای بارکسری تعیین کرد و آنها را «کوارک[4]» نامید. باریونها (مثل پروتونها و نوترونها) از سه کوارک و مزونها (مثل پیون) از دو کوارک تشکیل می‌شوند. فیزیکدانان ذرات با نامگذاری شیطنت‌آمیز به کوارکها شش «طعم» و سه «رنگ» نسبت می‌دهند، رنگ کوارک، مانند بار الکتریکی، یک میدان تولید می‌کند. کوانتوم این میدان، «گلوئون[5]» نام دارد و شبیه فوتون در میدان الکترومغناطیسی، حامل نیروی قوی است که کوارکها را در کنار یکدیگر محصور نگه می‌دارد.

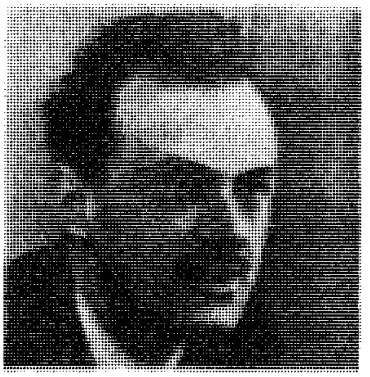
اما سخنی دربارهٔ اصطلاح «ذره». ذره درکاربرد امروزی به ذرات زیراتمی ماده و نیز به ذرات (یا کوانتومهای) موجود در میدان گفته می‌شود. مثالهایی از ذرات زیراتمی ماده الکترونها، پروتونها و نوترونها هستند و مثالی از ذرهٔ میدان، فوتونِ میدان الکترومغناطیسی است. الکترونها، فوتونها، کوارکها، نوترینوها و گلوئونها همگی ذرات بنیادی هستند و از ذرات ریزتر تشکیل نشده‌اند. نوترونها و پروتونها ذرات بنیادی نیستند زیرا از ذرات بنیادی کوارک و گلوئون ساخته شده‌اند.

1. Willis Lamb 2. Polykarp Kusch 3. Murray Gell-Mann 4. Quark 5. Gluon

۲۴

$$i\gamma \cdot \partial\psi = m\psi$$

پل دیراک



انزوا

داستان زندگی پل دیراک مانند یک رمان روان‌شناختی غمگین است. او در تمام دورهٔ کودکی، نوجوانی و اوایل بلوغ در بریستول انگلستان تحت سلطهٔ یک پدر مردم‌گریز بود. چارلز دیراک ارتباطات اجتماعی را بی‌فایده می‌دانست و برداشت غمبار خود از زندگی را بر خانواده‌اش تحمیل می‌کرد. او در دانشگاه بریستول، زبان فرانسه تدریس می‌کرد و درس فرانسه را با خود به خانه نیز می‌آورد. به این ترتیب که پل را مجبور می‌کرد تا سر میز شام با او فرانسه صحبت کند در حالی‌که بقیهٔ خانواده یعنی مادرش، فلورانس، برادر بزرگش رجینالد و خواهر کوچکش بئاتریس در آشپزخانه شام می‌خوردند. این رفتار فاجعه‌بار، ریشه‌های عمیقی داشت. خود چارلز دیراک دوران کودکی غم‌انگیزی در سویس داشت و در سن بیست‌سالگی از خانه فرار کرده بود. البته وضع پل به این بدی نشد ولی به پدرش علاقه‌ای هم نداشت. وقتی که در سال ۱۹۳۳ برندهٔ جایزهٔ نوبل شد، از پدرش برای شرکت در مراسم اعطای جوایز دعوت نکرد. وقتی چارلز دیراک در سال ۱۹۳۶ درگذشت، پل در نامه‌ای به همسرش نوشت «اکنون احساس می‌کنم که خیلی آزادتر هستم.»

درسهای فرانسه در سر میز شام، مهارت کلامی چندانی برای پل به ارمغان نیاورد. در یک کلام، او ساکت بود. بعدها نوشت «چون فهمیدم نمی‌توانم منظور خود را به فرانسه بیان کنم، بهتر آن بود که ساکت بمانم تا آنکه حتی بخواهم به انگلیسی صحبت کنم. بنابراین از همان هنگام ــ که خیلی هم زود شروع شد ــ خیلی کم حرف شدم.» دربارهٔ سکوت او در بزرگسالی، که از آن خجالت هم نمی‌کشید لطیفه‌های زیادی بر سر زبانهاست. همچنین دربارهٔ اینکه وقتی می‌خواست چیزی بگوید، چه‌قدر مقتصدانه کلمات را به‌کار می‌برد. یکی از همکاران او در کمبریج که سالها او را می‌شناخت می‌گفت

«حرف زدن با دیراک هنوز هم برایم سخت است. اگر به راهنمایی او نیاز داشته باشم سعی می‌کنم پرسش را به کوتاهترین شکل ممکن خلاصه کنم و او انگارکه در جایگاه شهود باشد پنج دقیقه به سقف و پنج دقیقه به پنجره نگاه می‌کند و بعد می‌گوید 'بله' یا 'نه' و البته همیشه هم درست می‌گوید.» او در پاسخ به پرسشهای مستقیم بر مبنای واقعیات پاسخ می‌داد و ممکن بود پنج روز طول بکشد تا بتوان یک پاسخ پنج کلمه‌ای او را فهمید. او به بورکه برعکس او خیلی حرف می‌زد گفت وقتی جوان بودم آموختم که نباید هیچ جمله‌ای را آغازکنم مگر بدانم که چگونه می‌خواهم آن را به پایان برم. خوب، این هم که به درد مکالمهٔ خودجوش نمی‌خورد.

سلطهٔ پدر، به‌صورت منفی دیراک را به سوی سرنوشتش راند. زندگینامه‌نویس دیراک، هلگه کراگ[1] می‌نویسد «او نمی‌توانست برعلیه نفوذ پدرش قیام کند و از این رو، کمبود زندگی اجتماعی و احساسی خود را با تمرکز بر ریاضی و فیزیک همراه با اشتیاقی مذهبی، جبران کرد.» معلمان دبیرستان، متوجه استعداد او شدند و تشویقش کردند. دانشگاه بریستول، جایی که پدرش تدریس می‌کرد انتخاب طبیعی او برای تحصیلات عالی بود. اما دروس دانشگاه او، مناسب یک فیزیکدان خوش‌قریحه نبود. چارلز دیراک هر دو پسر خود را مجبورکرد که مهندسی بخوانند. رجینالد که می‌خواست دکتر شود، در مهندسی موفق نبود و عاقبت بر اثر افسردگی شدید، دست به خودکشی زد. پل منفعلتر و کمتر دربند آینده بود، در دروس مهندسی موفق بود و درسهای ارزشمندی از آنها آموخت. او به این نکته پی‌برد که شاید نتوان قوانین فیزیک را به‌نحو مناسبی با زبان ریاضی محض بیان کرد بلکه برای این منظور شاید احکام ریاضی شهودی، مناسبتر باشند.

با همهٔ اینها، کار عملی در زمینهٔ مهندسی و فناوری به درد دیراک نمی‌خورد. پس از اتمام تحصیل، نتوانست کاری پیدا کند و دو سال دیگر در دانشگاه بریستول ماند و به تحصیل ریاضی پرداخت.

دانشجوی پژوهشگر

کمبریج نجات‌بخش دیراک بود. در سال ۱۹۲۳ در سن بیست و یک سالگی به‌عنوان دانشجوی پژوهشگر به کمبریج رفت. یعنی برای گذراندن همان دوره‌ای که رادرفورد دو دههٔ قبل از آن گذرانده بود. انتخاب اول دیراک تحقیقی دربارهٔ نظریهٔ نسبیت زیر نظر ابنزر کانینگهام[2] بود. ولی نسبیت پرطرفدار بود (در آن موقع اینشتین تازه نظریهٔ نسبیت عام خود را منتشر کرده بود) و کانینگهام نگران بود که دانشجویان پژوهشگر زیادی که داشت از او «بگریزند»، وکار دیراک را به رالف فاولر[3] محول کرد.

کراگ می‌نویسد «این انتخاب بدون تردید برای دیراک مبارک بود.» فاولر داماد رادرفورد بود و شاید تنها حلقهٔ اتصال بین نظریه‌پردازان و آزمایشگران در آزمایشگاه کاوندیش به‌حساب می‌آمد. برای دیراک اهمیت بسیاری داشت که «فاولر شارح اصلی فیزیک نظری جدید درکمبریج و همچنین تنها کسی بود

1. Helge Kragh 2. Ebenezer Cunningham 3. Ralph Fowler

که بر آخرین پیشرفتهای نظریهٔ کوانتومی در آلمان و دانمارک، اشراف کامل داشت.» به سختی می‌شد فاولر را برای مشاوره پیدا کرد، ولی این موضوع دیراک را زیاد ناراحت نمی‌کرد چون او تنها کار می‌کرد و نیاز به راهنمایی هر روزه نداشت. با راهنماییهای دورادور فاولر، دیراک وارد جهان نظریهٔ اتمی و فیزیک آماری شد و چیزی را یافت که قبلاً در نظریهٔ نسبیت، او را تحت‌تأثیر قرار داده بود؛ یعنی تصاویر زیبا و جذاب ریاضی از طبیعت. دیراک بعدها به خاطر آورد: «فاولر مرا با حوزهٔ کاملاً جدید اتم رادرفورد، بور و زومرفلد آشنا کرد. قبل از آن، چیزی دربارهٔ نظریهٔ بور نشنیده بودم. این نظریه چشمانم را کاملاً باز کرد. از اینکه می‌دیدم معادلات الکترودینامیک کلاسیک را نمی‌توان در مورد اتم به‌کار برد، خیلی شگفت‌زده شدم. من همیشه اتمها را چیزهایی کاملاً فرضی در نظر می‌گرفتم و حالا می‌دیدم کسانی هستند که در واقع با ساختار اتمها سروکار دارند.»

دیراک به زودی آموخت که چگونه خلاقیت علمی خود را بپروراند و آن را بیان کند. بعد از حدود یک سال اقامت درکمبریج از یک دانشجو به مرتبهٔ یک دانشمند دارای کارهای منتشرشده ترقی کرد. طی دو سال بعد از آن، او به اولین دستاورد از مجموعه دستاوردهای عظیم خود در زمینهٔ مکانیک کوانتومی دست‌یافت. او به‌ندرت با فیزیکدانان دیگر همکاری می‌کرد. از مجموع بیش از دویست و پنجاه اثر منتشر شدهٔ او، تنها تعداد کمی با همکاری دیگران نوشته شده‌اند. او حتی تردید داشت تا در مورد نظریه‌هایش، پیش از انتشار، با همکارانش گفتگو کند، او مخفی‌کاری نمی‌کرد بلکه مانند اینشتین وگیبس به توانایی خود به‌عنوان یک نظریه‌پرداز آن‌قدر اطمینان داشت که اساساً نیازی به تأیید دیگران احساس نمی‌کرد. بازدیدکنندگانی که از گوتینگن و کپنهاگ می‌آمدند از عادات کاری دیراک متعجب می‌شدند چرا که در آنجاها، کارگروهیِ سازمان‌یافته عاملی ضروری برای پیشرفت به‌شمار می‌رفت.

دیراک در طول زندگی‌اش خستگی مفرط ناشی از تمرکز ذهنی را به کمک یک استراحت کوتاه ولی مؤثر برطرف می‌کرد. درکمبریج او هر روزکار می‌کرد. به قول خودش «فقط یکشنبه‌ها استراحت می‌کردم و اگر هوا خوب بود، به‌تنهایی در هوای آزاد به مدت طولانی قدم می‌زدم. منظورم آن بود که از مطالعات سنگینی که در طول هفته انجام داده بودم، فراغتی بیابم و شاید تلاش کنم چشم‌انداز جدیدی بیابم تا بتوانم به‌کمک آن به مواجهه با مسائل روز دوشنبه بپردازم. ولی منظور اصلی از این پیاده‌روی‌ها، استراحت بود، و فقط مسائلی، احتمالاً در پس ذهنم شناور بود که آگاهانه به آنها نمی‌پرداختم. زندگی من این‌گونه بود.»

بعدها او به سفرهای دور و درازی رفت که در آنها غالباً تنها بود. به کشورهای اروپایی و سه‌بار هم به دور دنیا سفرکرد. او روسیه را بیشتر از خیلی از روسها و آمریکا را بیشتر از خیلی از آمریکاییها گشت. او غالباً در جستجوی کوهها بود و اگر بنا بود درکنفرانسی شرکت کند دوست داشت آن سفر شامل برنامهٔ گشت درکوهستانی باشد که برای او تازگی داشته باشد.

سه نوع مکانیک کوانتومی

وقتی دیراک از آموزش زیر نظر فاولر فارغ شد و شروع به مطالعه و مداقه دربارهٔ دنیای سریعاً گسترش‌یابندهٔ مکانیک کوانتومی کرد، متوجه وجود دو روش مختلف شد. یکی از این دو روش، مکانیک ماتریسی بود که از سوی اعضای مکتب گوتینگن (هایزنبرگ، بورن، و جوردان) پشتیبانی می‌شد. و روش دیگر، مکانیک موجی شرودینگر بود که در زوریخ هوادار داشت. روش ماتریسی با جدولهایی از اعداد (ماتریسها) کار می‌کند و از بعضی قواعد جبر شامل جمع، تفریق، ضرب، انعکاس، تبدیل و غیره پیروی می‌کند. مکانیک موجی ریشه در حسابان دارد؛ معادلهٔ اساسی آن که معادلهٔ شرودینگر نامیده می‌شود، یک معادلهٔ انرژی به صورت معادلهٔ دیفرانسیل است.

برای دیراک این امر از نظر ریاضی غیرقابل قبول بود و مکانیک کوانتومی به دو روش مختلف نیاز نداشت. مکانیک ماتریسی و مکانیک موجی با مسائل یکسانی سروکار داشتند و به جوابهای یکسانی نیز منجر می‌شدند. از این‌رو، هر دوی آنها باید نمایندهٔ یک زبان ریاضی واحد و خوش‌ساخت‌تر باشند. دیراک نخست کار خود را بر این قاعدهٔ عجیب ضرب هایزنبرگ متمرکز کرد که برای ماتریسهای مکانیک هایزنبرگ xy مساوی yx نیست، یعنی اینکه $xy - yx$ مساوی صفر نیست. «جابه‌جاگر[1]» $xy - yx$ که دیراک آن را با یک نماد کروشه (براکت) نشان می‌دهد،

$$[x, y] = xy - yx$$

به یک موجود ریاضی به نام «کروشهٔ پواسون[2]» شباهت ظاهری خاصی دارد. این موجود ریاضی را نظریه‌پردازان قرن نوزدهم به‌کار گرفتند تا مکانیک نیوتونی را به‌صورت مختصر و جامعی درآورند. دیراک در نخستین مقالهٔ مهم علمی خود که در سال ۱۹۲۵ منتشر شد نشان داد که بین مکانیک کلاسیکی که با کروشه‌های پواسون بیان می‌شود و مکانیک کوانتومی که با نمادگذاری کروشه‌های خودش بیان می‌شود، هماهنگی حیرت‌آوری وجود دارد. نظریه‌پردازان دیگر نیز در مسیر همین نظریه حرکت می‌کردند، ولی کار استادانهٔ دیراک چیز دیگری بود. ماکس بورن از دیدن مقالهٔ دیراک شگفت‌زده شد. او بعدها این‌گونه به خاطر آورد، «نام دیراک برایم کاملاً ناآشنا بود. به‌نظرمی‌رسید که مؤلف مقاله، جوانکی باشد، با وجود این همه‌چیز در مقالهٔ او کاملاً در جای خود و تحسین‌برانگیز بود.» اما تحسین هایزنبرگ توأم با ناخشنودی بود. او در نامه‌ای به پائولی نوشت «یک انگلیسی به نام دیراک که با فاولر کار می‌کند توانسته تمام ریاضی مربوط به کار مرا مستقلاً دوباره انجام دهد. شاید بورن و جوردان از این موضوع کمی ناراحت شوند، اما به هر صورت، آنها این کار را اول انجام داده‌اند و حالا ما واقعاً می‌دانیم که نظریه، درست است.»

اما این «جوانک» حرفهای بسیار بیشتری برای گفتن داشت. در سال ۱۹۲۶، او مکانیک کوانتومی را به سطح ریاضی بالاتری رسانید. سطحی که می‌دانست در ورای مکانیک ماتریسی و مکانیک

1. Commutator 2. Poisson

موجی وجود دارد و این همان «نظریهٔ تبدیل» بود. این نظریه به بیان ساده، نشان داد که چگونه می‌توان یک روایت از مکانیک کوانتومی را به روایت دیگر تبدیل کرد و نشان داد که انتخاب مکانیک ماتریسی یا مکانیک موجی فقط به سلیقهٔ کاربر یا اقتضای موقعیت بستگی دارد.

دیراک در نظریهٔ تبدیل خود، جوهرهٔ منطقی مکانیک کوانتومی را نشان داد و به آن افتخار می‌کرد. او بعدها نوشت: «پیشبرد و انجام این کار [نظریهٔ تبدیل] بیش از هر مقالهٔ دیگری که قبل یا بعد از آن دربارهٔ مکانیک کوانتومی نوشته‌ام برایم لذت‌بخش بوده است.»

از آسمان افتاده

عادت دیراک به کار در انزوا موجب می‌شد تا همکاران او، حتی در کمبریج هم ندانند که کار بعدی او چه خواهد بود. نویل مات[1] که به دیراک نزدیک بود می‌گوید «همهٔ کشفیات دیراک، بر من نازل می‌شدند و تمام شده بودند. هیچ‌گاه نشنیدم حرفی از آنها بزند... انگار همهٔ آنها از آسمان فرو می‌افتادند.» نظریهٔ نسبیتی الکترون، که بیشتر مفسران آن را بزرگترین کار دیراک در فیزیک می‌دانند، در سال ۱۹۲۸ از آسمان فرو افتاد.

شرودینگر به کمک معادلهٔ دیفرانسیل خود، نظریه‌ای مقدماتی دربارهٔ رفتار الکترون ارائه کرده بود ولی این معادله، دو نارسایی جدی داشت. اول آنکه به‌عنوان یک معادلهٔ انرژی، از الزامات نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین پیروی نمی‌کرد و دوم آنکه حرکت اسپینی الکترون را به حساب نمی‌آورد، در حالی‌که در سال ۱۹۲۵ اسپین به‌عنوان یکی از ویژگیهای مهم الکترون مانند بار و جرم، کاملاً پذیرفته شده بود. گمان می‌شد که نسبیت و اسپین به نحوی به هم مربوط‌اند ولی هیچ کس به کشف این ارتباط حتی نزدیک هم نشده بود.

برای بررسی اجمالی مسئلهٔ انرژی باید از نزدیک نظری به معادلهٔ شرودینگر بیندازیم. برای یک الکترون آزاد (الکترونی که به اتم مقید نیست)، معادله مقدار انرژی جنبشی را برحسب تکانه محاسبه می‌کند. در مکانیک نیوتونی، انرژی جنبشی، E یک ذره از مقادیر جرم m ذره، و سرعت v آن، به‌وسیلهٔ فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

تکانهٔ p ذره، حاصلضرب جرم و سرعت آن است،

$$p = mv$$

بنابراین

$$E = \frac{p^2}{2m} \qquad (1)$$

1. Nevill Mott

شرودینگر قواعدی را فراهم کرد که این معادلهٔ کلاسیک را به یک معادلهٔ کوانتوم مکانیکی تبدیل کند که رفتار الکترونهای آزاد را تشریح می‌کند. شکل معادلهٔ شرودینگر در این مورد به‌صورت زیر است،

$$\hat{E}\psi = \frac{\hat{p}^2\psi}{2m} \qquad (۲)$$

در این معادله، ψ یکی دیگر از اجزای بنیادی مکانیک کوانتومی یعنی تابع موج است؛ $\hat{p}^2\psi$ و $\hat{E}\psi$ نماد نوعی مشتق هستند که در اینجا نیازی نیست به تفصیل به آنها بپردازیم. معادلهٔ (۲) یک معادلهٔ دیفرانسیل است؛ حل این معادله، اطلاعاتی دربارهٔ انرژی و تابع موج الکترون آزاد در اختیار ما قرار می‌دهد.

نظریهٔ نسبیت خاص، معادلهٔ انرژی (۱) یا حتی چیزی نظیر آن را نمی‌پذیرد. معادلهٔ انرژی نسبیتی برای یک الکترون آزاد، از معادلهٔ زیر به دست می‌آید

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \qquad (۳)$$

که در آن c برابر سرعت نور است. توجه داشته باشید که انرژی E در معادلهٔ نسبیتی (۳) به‌صورت مجذور است ولی در معادلهٔ غیر نسبیتی (۱) این چنین نیست. این جنبهٔ به ظاهر کم اهمیت ریاضی، پیامدهای دامنه‌داری به همراه دارد و سرانجام راه را به سوی قلمرو جدیدی از فیزیک می‌گشاید.

تعدادی از معاصران دیراک معادلهٔ دیفرانسیلی را که مستقیماً از معادلهٔ انرژی (۳) به دست آمده بود مورد بررسی قرار دادند. این کار مشابه روش کار شرودینگر بود که موفق شده بود معادلهٔ (۲) را از معادلهٔ کلاسیک (۱) استخراج کند. معادلهٔ به دست آمده از معادلهٔ (۳) به شکل زیر است:

$$\hat{E}^2\psi = (\hat{p}^2c^2 + m^2c^4)\psi \qquad (۴)$$

که یک معادلهٔ دیفرانسیل دیگر است.

دیراک در این معادله، اِشکال ظریفی می‌دید: نظریهٔ تبدیل او، این معادله را مجاز نمی‌شمرد و این برای او یک عیب مهلک بود. بعدها نوشت: «نظریهٔ تبدیل برایم خیلی عزیز شده بود. دلم نمی‌خواست هیچ نظریه‌ای را که با این عزیز من سازگاری نداشت بپذیرم. . . به هیچ وجه نمی‌خواستم نظریهٔ تبدیل را کنار بگذارم.» او راه ایجاد هماهنگی با نظریهٔ تبدیل خود را پیدا کرد به این ترتیب که از طرفین معادلهٔ (۳) جذر گرفت و با این کار، E^2 در سمت چپ این معادله حذف شد و معادله به‌صورت زیر درآمد

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \qquad (۵)$$

همان‌طور که از علامتهای $\pm$ پیداست، معادلهٔ بالا در واقع دو معادله به‌صورت زیر است:

$$E = +\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \quad \text{و} \quad E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \qquad (۶)$$

هر یک از معادله‌های اخیر به توان دو رسانده شوند، معادلهٔ (۳) به‌دست می‌آید (مجذور یک عدد منفی، عددی مثبت است).

وظیفهٔ دیراک، آن‌گونه که خودش می‌پنداشت آن بود که معادلهٔ دیفرانسیلی به شکل معادلهٔ نسبیتی (۵) ابداع کند که تا حد امکان از همان قواعدی پیروی کند که قبلاً به شرودینگر کمک کرده بودند. این کار، مسئولیت بسیار سنگینی بود که به ابتکار ریاضی زیادی نیاز داشت. آن‌گونه که دیراک بیان می‌کند «با معادلات بازی می‌کردم تا ببینم چه حاصل می‌شود.» پس از دو ماه کار، دیراک به آنچه می‌خواست، رسید. معادلهٔ الکترون نسبیتی دیراک (که به‌عنوان سرفصل این فصل ازکتاب آمده است) در زیباترین شکل خود، به‌صورت زیر است:

$$i\gamma \cdot \partial\psi = m\psi \qquad (۷)$$

این معادله، به نحو شایسته‌ای بر روی بنای یادبود دیراک درکلیسای وست‌مینستر[1]، حکاکی شده است.

مانند بعضی دیگر از معادلات بزرگ فیزیک نظری (مثلاً معادلهٔ میدان گرانشی اینشتین)، معادلهٔ الکترون دیراک (۷)، به آن سادگی که به‌نظرمی‌رسد نیست. تمام جنبه‌های دیفرانسیلی معادله در نماد ∂ متراکم شده است؛ ضریب γ نمایندهٔ آرایه‌های ۴ × ۴ از اعداد (ماتریسها) است؛ و ψ دیگر آن تابع موج سادهٔ نظریهٔ شرودینگر نیست بلکه دارای چهار مؤلفه است. نماد i نماد ریاضیِ فراگیر $\sqrt{-1}$ است. برای سهولت محاسبات، یکاها برای معادلهٔ (۷) چنان انتخاب شده‌اند که سرعت نور c، که برحسب یکاهای معمولی عددی بسیار بزرگ و ثابت پلانک h، که عددی بسیار کوچک است هر دو مقداری برابر یک داشته باشند.

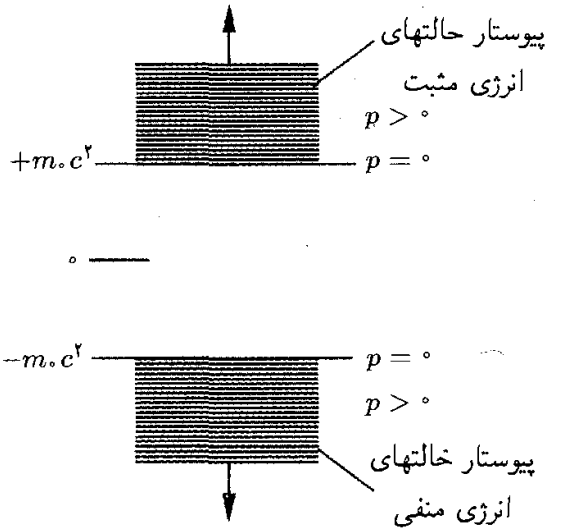
معادلهٔ (۷) الکترون آزادی را توصیف می‌کند که تحت‌تأثیر یک میدان خارجی قرار ندارد. اگر این معادله را به‌گونه‌ای بسط دهیم تا تأثیر میدان الکترومغناطیسی اعمال‌شده را نیز دربر بگیرد، اتفاق واقعاً شگفت‌آوری می‌افتد: بدون آنکه نظریه‌پرداز هیچ‌گونه تعمد قبلی داشته یا دستکاری کرده باشد، خود معادله نشان می‌دهد که الکترونها حرکت اسپینی دارند. این دلیلی عالی برای این گمان غالب بود که نسبیت و اسپین به هم مربوط‌اند.

اگر بعضی از معاصران دیراک، متوجه اهمیت نظریهٔ تبدیل او نشدند، دربارهٔ نظریهٔ نسبیتی الکترون، فقط تعداد کمی تردید به خود راه دادند. چنانکه لئون روزنفلد[2]، یکی از همکاران بور به خاطر می‌آورد «در آن موقع، نظریهٔ دیراک را یک معجزه به‌حساب آوردند. احساس عمومی آن بود که دیراک به بیش از آنچه استحقاقش را داشته دست یافته است! هیچ‌کس در زمینهٔ فیزیک چنین کاری انجام نداده بود. . . معادلهٔ دیراک بلافاصله به‌عنوان راه‌حل شناخته شد و به آن به چشم شگفتی مطلق می‌نگریستند.» معجزهٔ این نظریه آن بود که حرکت اسپینی الکترون را استنتاج کرد. نظریه‌های پیشین کاری بهتر از این نکرده بودند که کمابیش، به‌عنوان یک اقدام بعدی، مفهوم اسپین را به معادلهٔ شرودینگر پیوند بزنند.

1. Westminster Abbey 2. Léon Rosenfeld

مشکل ±

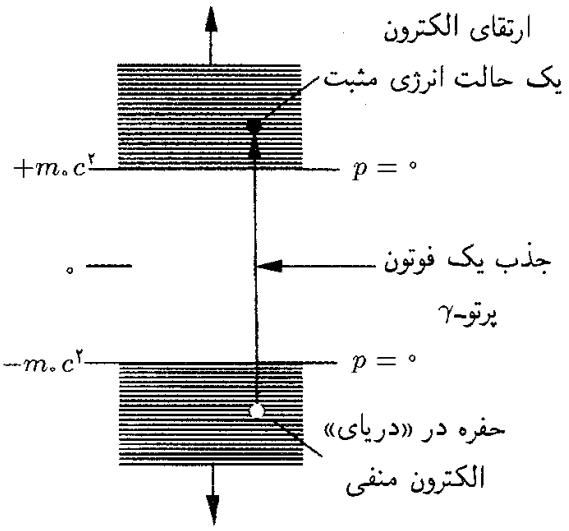
با این همه، برای این نظریه باید بهایی هم پرداخت می‌شد. گرچه معادلهٔ دیراک به پرسشهای قدیمی دربارهٔ اسپین الکترون پاسخ داد، ولی به طرح پرسش بسیار معماگونهٔ دیگری انجامید که ناشی از وجود ± در معادلهٔ انرژی (۵) بود. این معادله به ما می‌گوید که هم مقادیر مثبت و هم مقادیر منفی انرژی، مجاز شمرده می‌شوند، ولی قبل ازکار دیراک، مقادیر انرژی منفی در نظریهٔ نسبیت جایی نداشتند. در برخی موارد، فیزیکدانان برای اجتناب از چنین مسائلی، مقادیری را که از نظر ریاضی معتبر ولی از نظر فیزیکی بی‌معنی بودند، به سادگی، کنار می‌گذاشتند. ولی این رویه برای آنچه که «مشکل ±» نام گرفته بود، برون‌رفتی نداشت چراکه در نظریهٔ دیراک، الکترونها مجاز بودند که از حالتهای انرژی مثبت به حالتهای منفی و برعکس، گذارهایی انجام دهند. پس خواه خوشمان بیاید یا نیاید، حالتهای انرژی منفی باید در صحنه باقی‌بمانند. حالتهای انرژی مثبت به‌صورت یک پیوستارند که آغاز در m_0c^2 است (در حالتی که در معادلهٔ (۵)، $p = 0$ باشد و علامت + را تأثیر بدهیم)؛ m_0 جرم الکترون در حال سکون است. حالتهای انرژی منفی، به‌صورت پیوستاری قرینهٔ پیوستار قبلی است و از $-m_0c^2$ شروع می‌شود ($p = 0$ را نیز شامل می‌شود). شکل ۲۴ـ۱ را ببینید.



شکل ۲۴ـ۱ حالتهای انرژی مثبت و منفی برطبق معادلهٔ انرژی نسبیتی معادلهٔ (۵).

دیراک برای حل مسئلهٔ ± یک راه حل ریشه‌ای پیشنهاد کرد. پیشنهاد او آن بود که همهٔ حالتهای انرژی منفی را «دریا»یی از الکترونها اشغال کرده است که طبق اصل پاولی، در هر حالت یک و فقط یک الکترون می‌تواند قرارگیرد. علاوه بر این، اگر الکترونهایی نیز حالتهای انرژی مثبت را اشغال کرده باشند نمی‌توانند گذارهایی به حالتهای انرژی منفی که قبلاً به‌طور کامل اشغال شده‌اند، داشته باشند و در نتیجه رفتاری عادی خواهند داشت. دیراک همچنین پیشنهاد کرد که اگر انرژی، مثلاً به‌صورت یک فوتون پرتو-گاما (γ) در دسترس باشد، یک الکترون می‌تواند از حالت انرژی منفی به حالت انرژی مثبت ارتقا یابد. در این صورت به یک الکترون مشاهده‌پذیر با انرژی مثبت تبدیل می‌شود و یک جای

خالی به‌صورت «حفره» در دریای الکترونهای دارای انرژی منفی برجا خواهد گذاشت. چنین رویدادی به آثار فیزیکی مشاهده‌پذیری منجر خواهد شد (شکل ۲۴ـ۲ را ببینید). اما چه نوع آثار فیزیکی؟ چون حفرهٔ یک الکترون نبودِ یک بار منفی است، تأثیر آن مانند یک بار مثبت است. چنین باری $+e$ بود هرگاه الکترونهای با انرژی مثبت، بار $-e$ داشتند.



شکل ۲۴ـ۲ یک الکترون با انرژی منفی با جذب یک فوتون پرتو-γ به یک حالت انرژی مثبت ارتقا می‌یابد.

بار پروتون نیز $+e$ است از این رو، ابتدا دیراک پیشنهاد کرد که حفره‌ها در دریای الکترونهای با انرژی منفی، مشاهده‌پذیر و از جنس پروتون‌اند. فکر جذابی بود. اگر این نظر پذیرفته می‌شد به آن معنا بود که نظریهٔ دیراک می‌توانست هر دو ذرهٔ بنیادی شناخته شده تا آن زمان، یعنی الکترون و پروتون را توضیح دهد. ولی منتقدان آن را نپذیرفتند. مثلاً رابرت اپنهایمر[1] خاطرنشان کرد که یک تکه مادهٔ معمولی، بنابر نظریهٔ دیراک در مدت 10^{-10} ثانیه خود را نابود خواهد کرد زیرا الکترونها به درون حفره‌های پروتونی فرو می‌افتند و این گذار رو به پایین، با گسیل فوتونهای پرتو-γ همراه خواهند شد (یعنی معکوس فرایندی که در شکل ۲۴ـ۲ نشان داده شده، رُخ می‌دهد). پائولی نیز ناچار شد تا «اصل دوم» خود را اعلام کند به این صورت که برای آزمون هر نظریه، باید ابتدا آن را بر روی نظریه‌پردازش آزمایش کرد! اگر آزمون پائولی بر روی دیراک انجام می‌شد، نتیجهٔ کار به‌صورت تماشایی منفی از آب در می‌آمد به این ترتیب که در مدت 10^{-10} ثانیه دیراک با فورانی از پرتو-γ، ناپدید می‌شد.

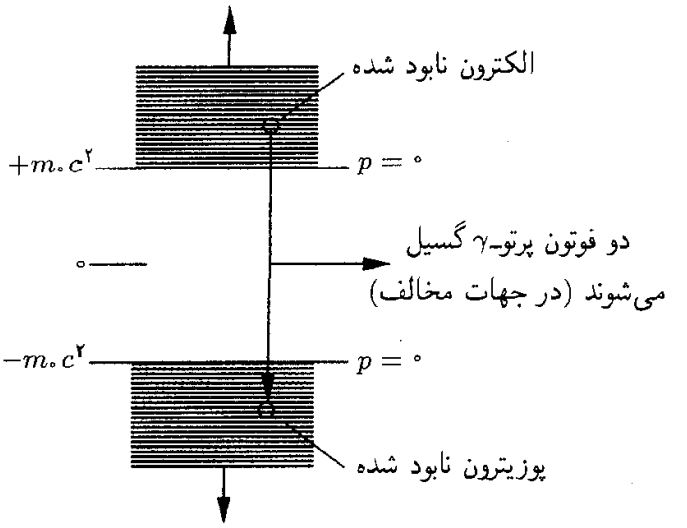
ولی عاقبت، دیراک برندهٔ نهایی بود. در سال ۱۹۳۱، او نظرش را عوض کرد و حفره‌ها را نوع جدیدی از ذرات بنیادی یعنی الکترونهایی با بار مثبت درنظر گرفت که آنها را «پاد الکترون[2]» نامید. در همین هنگام، حدس زد که «پادپروتونها[3]»، یعنی پروتونهای دارای بار منفی نیز وجود دارند. در همان سال، کارل اندرسون[4] که در مؤسسهٔ تکنولوژی کالیفرنیا (کلتک[5]) به تحقیق مشغول بود، دلایل

1. Robert Oppenheimer 2. antielectron 3. antiprotons 4. Carl Anderson 5. Caltech

تجربی محکمی در تأیید وجود پادالکترون دیراک منتشر ساخت. اندرسون مشغول مطالعه بر روی انرژی الکترونهای ثانویهٔ به‌وجود آمده به‌وسیلهٔ پرتوهای کیهانی بود. پرتوهای کیهانی از فضای خارج به زمین می‌رسد. دستگاه مورد استفادهٔ او، اتاقک ابر ویلسون[1] بود. او انتظار داشت که عکسهای اتاقک ابرش، الکترونهای ثانویه از نوعی را که آرتور کامپتون[2] شرح داده بود، نشان دهند. ولی به زودی دریافت که در اشتباه است چون بیشتر الکترونهای ثانویه، بار مثبت داشتند.

طبعاً اندرسون فرض کرد که ذرات دارای بار مثبت، پروتون‌اند، ولی ردهای اتاقک ابر چنین فرضی را تأیید نمی‌کردند، بلکه به‌نظر می‌رسید که این ردها متعلق به ذراتی بسیار کم‌جرمتر از پروتون باشند. در سال ۱۹۳۳، اندرسون کشف الکترونهای مثبت را گزارش کرد. این ذرات، ویژگیهای فیزیکی پادالکترونهای دیراک را داشتند. اندرسون این ذرات را «پوزیترون[3]» نامید.

بنابر نظریهٔ دیراک، پوزیترونها در فرایندی که در شکل ۲۴ـ۲ نشان داده شده وقتی تشکیل می‌شوند، که الکترونهای با انرژی منفی، از یکی از اجزای تشکیل دهندهٔ تابش کیهانی، احتمالاً پرتوهای گاما، انرژی جذب کنند و به حالتهای با انرژی مثبت ارتقا یابند. چون رویدادهایی که حفره، یا پوزیترون را به‌وجود می‌آورند، نادرند، چگالی حفره‌ها نیز کم است، و از دست رفتن الکترونها با سقوط در حفره‌ها فاجعه‌ای مانند آن نبود که دیراک حفره‌ها را پروتون تشخیص داده بود، ولی هر برخورد الکترون ـ حفره یعنی الکترون ـ پوزیترون، برای الکترون و پوزیترونی که به یکدیگر برخورد می‌کنند، فاجعه‌بار خواهد بود زیرا هر دو ذره، در این فرایند هویت خود را از دست می‌دهند و به جای آنها، دو فوتون پرتو ـ γ پدیدار می‌شوند (شکل ۲۴ـ۳ را ببینید).



شکل ۲۴ـ۳ از نابودی یک الکترون و یک پوزیترون، پرتوهای γ تشکیل می‌شود.

گرچه اندرسون با نظریهٔ دیراک آشنایی داشت ولی می‌نویسد «کشف پوزیترون کاملاً اتفاقی صورت گرفت. نظریهٔ دیراک می‌توانست هر آزمایشگر خردمندی را راهنمایی کند تا بتواند در یک آزمایشگاه. . .

1. Wilson cloud chamber 2. Arthur Compton 3. positron

با تجهیزات خوب، در مدت یک بعدازظهر، پوزیترون را کشف کند. . . دیراک، در کشف پوزیترون هیچ نقشی نداشت.» دریای حالات انرژی منفی دیراک و حفره‌های آن مانند تشدیدگرهای[1] کوانتیدهٔ جسم سیاه پلانک، کوانتوم‌های نور اینشتین (فوتون)، حالتهای مانای بور و امواج مادی دوبروی همه در ابتدا غیرفیزیکی‌تر از آن بودند که با اطمینان پذیرفته شوند.

کشف پوزیترون به‌وسیلهٔ اندرسون، اولین کشف از یک سلسلهٔ طولانی کشف پاد ذره‌ها بود که کشف پادپروتون و پادنوترون (در ۱۹۵۵) از آن جمله‌اند. امروزه فیزیکدانان متقاعد شده‌اند که همهٔ ذرات، چه بنیادی و چه غیربنیادی، دارای پادذرات متناظر خود هستند. همچنین این فکر به ذهن خطور می‌کند که عالم ما یا شاید عالمهای دیگر، محتوی پاد دنیاهایی باشند که تماماً از پادماده ساخته شده است.

زیبایی در معادلات

فیزیکدانان نظری برای ساختن نظریه‌های خود همان‌قدر به الهام هنرمندانه نیازمندند که به روالهای دقیق منطقی. دیگر نمی‌توان فقط با تکیه بر استدلال سرراست، یک نظریهٔ بزرگ پدید آورد، به همان ترتیب که نمی‌توان فقط به کمک یک کتاب درسیِ اصول آهنگسازی، یک سمفونی بزرگ پدید آورد. آهنگساز باید گوشِ به دقت تنظیم شده و نظریه‌پرداز باید بصیرتِ خوب تنظیم‌شده داشته باشد. آهنگساز و نظریه‌پرداز، هر دو در جستجو و امید دست‌یابی به نوعی زیبایی در کارشان هستند. دیراک در سال ۱۹۵۶ می‌نویسد «قانون فیزیکی، باید دارای زیبایی ریاضی باشد.»

این، اصل اعتقادی دیراک بود. هلگه کراگ[2] می‌نویسد «این اصل، خلاصهٔ فلسفهٔ علمی بود که از اواسط دههٔ ۱۹۳۰ بر تفکر دیراک حاکم بود. مفهوم زیبایی، ذهن دیراک را بیش از هر فیزیکدان معاصر دیگر به خود مشغول کرده بود. در آثاری که منتشر کرده، بارها و بارها به واژه‌هایی مانند زیبایی، زیبا، قشنگ، زشت و زشتی برمی‌خوریم.»

دیراک می‌نویسد «زیبایی ریاضی چیست؟ زیبایی ریاضی کیفیتی غیرقابل تعریف است، درست همان‌طور که زیبایی در هنر قابل تعریف نیست ولی کسی که به تحصیل ریاضی می‌پردازد معمولاً در درک این کیفیت هیچ مشکلی ندارد.» دیراک خطاب به فیزیکدانان نظری می‌گوید: دست‌کم برای شروع، بگذارید ریاضی راهنمای شما باشد. او توصیه می‌کند «نخست با ریاضیات زیبا، محض خاطر خودِ ریاضی، بازی کنید، بعد ببینید که آیا این رویه شما را به یک فیزیک جدید رهنمون می‌شود یا خیر. دنبال زمینه‌های مشترک بگردید. شاید بتوان وضعیت را این‌گونه تشریح کرد که ریاضیدان در حال نوعی بازی است که قواعد آن را خود ابداع می‌کند، ولی فیزیکدان مشغول یک بازی است که قواعد آن را طبیعت وضع می‌کند. ولی با گذشت زمان، هرچه بیشتر آشکار می‌شود که قواعد مورد علاقهٔ ریاضیدان، همان قواعدی است که طبیعت برگزیده است.»

1. resonator 2. Helge Kragh

اینشتین گفت «ریاضیات، اصل سازنده است.» دیراک با این حرف موافق بود و در تأیید آن گفت... «شاید بتوان گفت که خداوند ریاضیدان بسیار ماهری است و در ساخت عالم از ریاضیات بسیار پیشرفته‌ای استفاده کرده است.»

دیراک بر این نکته تأکید داشت که زیبایی ریاضی، مترادف سادگی نیست. ساده‌ترین نظریه شاید بهترین نظریه باشد، ولی الزاماً چنین نیست. او می‌نویسد «اغلب مقتضیات سادگی و زیبایی، یکی است، اما هرگاه این مقتضیات با هم رودررو قرار گیرند، زیبایی حق تقدم خواهد داشت: «نظریهٔ گرانش نیوتون، ساده‌تر از نظریهٔ اینشتین است ولی نظریهٔ اینشتین عمیقتر است و بیشتر به خاطر زیبایی‌اش مورد تحسین قرار گرفته است.» کراگ می‌نویسد «بسیاری از فیزیکدانان برجسته با این نظر دیراک موافقند که نظریهٔ گرانش اینشتین، بدون استدلال تجربی، پدید آمده است و به خاطر ارزشهای زیبایی شناختی آن باید درست باشد.»

عجیب آنکه، دیراک خود باور نداشت که فیزیکدان نظری باید راه ریاضیدان محض را دنبال کند. در اواخر عمرش نوشت «ریاضیدان محضی که می‌خواهد همهٔ کار خود را بر مبنای دقت مطلق قرار دهد، بعید است بتواند در فیزیک زیاد پیشرفت کند.» حتی نظریه‌های مبتنی بر تقریب می‌توانند زیبایی ریاضی داشته باشند. یکی از معروفترین ابداعات دیراک، موسوم به «تابع دلتا δ» هنگامی که دیراک استفاده از آن را آغاز کرد به لحاظ ریاضی چندان مورد توجه نبود. مدتها پس از آنکه او تابع دلتا را به طور تصادفی برای مکانیک کوانتومی خودش به‌کار گرفت، ریاضیدانان مشروعیت صوری آن را نشان دادند.

دیراک احساس می‌کرد که در هر مرحله از توسعهٔ فیزیک، شاید نظریه‌پردازان، همهٔ لوازم ریاضی مورد نیاز برای پیشرفت را در اختیار نداشته باشند. او تردید داشت که روزی بتوان نظریهٔ فراگیری به‌صورت «نظریهٔ همه‌چیز» ارائه کرد. او می‌نویسد «باید تا سرحد امکان، دشواریهای فیزیک را از یکدیگر تفکیک کرد و سپس یکی‌یکی از شر آنها خلاص شد.» در این مورد، منظور او نه فقط «دشواریهای فیزیک» بلکه دشواریهای ریاضی نیز بود.

چندان عجیب نبود که منتقدان دیراک، از بین ریاضیدانان بودند. یک ریاضیدان آمریکایی به نام گرت برکوف[1]، در نامه‌ای نوشت «برخلاف انتظار، دریافتم در حالی‌که روش دیراک برای نمایاندن سیستمهای فیزیکی، رسماً متداول است، اما دربرگیرندهٔ هیچ اصل ریاضی نیست که کاملاً شناخته شده باشد... دیراک شماری آزادیهای ریاضی برای خود قائل می‌شود... به‌نظر من، دیراک دست‌کم در درک اصول کمّی، سازگاری و تمامیت منطقی، و امکانات بسط یک نظریهٔ اساسی نسبتاً ضعیف است.»

همانند اینشتین

دیراک، قسمت اعظم کار سازندهٔ خود را بین سالهای ۱۹۲۵ و ۱۹۳۳ انجام داد. چنانکه آبراهام پایس می‌نویسد «این فاصلهٔ زمانی، دوران قهرمانی او بود. در این دوران، او به‌عنوان یکی از چهره‌های اصلی علم قرن بیستم ظاهر شد و چهرهٔ فیزیک را دگرگون کرد.» در سال ۱۹۳۲، استاد کرسی لوکاسی[2]

1. Garrett Birkhoff 2. Lucasian Chair

در دانشگاه کمبریج شد که زمانی به نیوتون اختصاص داشت. چنانکه سی.پی. اسنو[1] می‌نویسد او اجزای سبک نیوتونی را همراه آورد که عبارت بودند از: «صداقت»، «خردورزی»، «حس قوی مسلط زیبایی‌شناختی»، «شفافیت» و «زهدپیشگی»، به معنی عدم علاقه به تجملات غیرضروری و اساساً عدم علاقه به هر نوع تجمل‌گرایی. سال بعد، دیراک (به‌طور مشترک با شرودینگر) جایزهٔ نوبل را دریافت کرد. او از شهرتی که این جایزه به همراه داشت، بیمناک بود، بنابراین تصمیم گرفت جایزه را نپذیرد. ولی رادرفورد او را ترغیب کرد تا تصمیم خود را عوض کند. او خاطرنشان کرد که نپذیرفتن جایزه، حتی ممکن است شهرت بیشتری برای دیراک به همراه داشته باشد.

توجه به دیراک او را بیشتر وارد زندگی اجتماعی کرد. یک روزنامه‌نگار او را چنین توصیف کرده بود: «نابغه‌ای که از همهٔ زنها وحشت دارد»، و این نابغه در سال ۱۹۳۷ ازدواج کرد. همسر او، مارگیت ویگنر[2] خواهر یوجین ویگنر[3]، دیگر فیزیکدان نظری معروف بود. مارگیت از ازدواج قبلی خود، دو فرزند داشت و زوج جدید صاحب دو فرزند دیگر شدند. مارگیت در خاطرات خود می‌نویسد «تکرار تاریخ در مورد خانوادهٔ دیراک کاملاً درست است. پل، گرچه پدر سخت‌گیری نبود، ولی از فرزندان خود خیلی کناره‌گیری می‌کرد.» از این نظر و نیز از جنبه‌های دیگر، این ازدواج، «یک ازدواج به سبک قدیمی ویکتوریایی بود.»

دیراک که در سالهای دههٔ ۱۹۳۰ نظریه‌ای برای الکترونهای آزاد تدوین کرده بود، قدم بعدی را برداشت و تلاشی طولانی را آغاز کرد تا نظریه‌ای بسازد دربارهٔ الکترودینامیک کوانتومی (که فیزیکدانان اختصاراً آن را «QED» می‌نامند) ــ یعنی نظریه‌ای دربارهٔ برهم‌کنش الکترون با الکترون یا ذرات بنیادی دیگر. متأسفانه خلاقیت در مسیر این تلاش، او را یاری نکرد. درک او از زیبایی ریاضی، برخلاف کارهای قبلی‌اش، راهنمای او در اکتشاف موفقیت‌آمیز نشد. نظریه‌ای که در اواخر دههٔ ۱۹۴۰ در کانون توجه قرار گرفت و عاقبت مسایل الکترودینامیک را حل کرد، ویژگیهایی داشت که دیراک نمی‌توانست آنها را بپذیرد. نظریهٔ جدیدی که ریچارد فاینمن[4]، جولیان شوینگر[5]، شینی چیرو توموناگا[6] و فریمن دایسون[7] به‌وجود آوردند به‌عنوان ابزاری برای محاسبهٔ ویژگیهای الکترون و بررسی برهم‌کنشهای بین همه نوع ذرات بنیادی، موفقیت شگرفی یافت. اما معادلات نظریه حاوی کمیتهای نامتناهی پنهان بود که به شکل ریاضی نظریه صدمه می‌زدند: ریاضیدانان حتی قادر به انجام اعمال حساب با نامتناهی‌ها نیستند. یک ترفند اساسی ریاضی این نظریه که «باز بهنجارش[8]» نام دارد، وارد کردن پارامترهای اندازه‌گیری شده در محاسبات است که نامتناهی‌ها را جذب کنند. محاسبهٔ جرم و بار الکترون، هر دو به

1. C. P. Snow 2. Margit Wigner 3. Eugene Wigner 4. Richard Feynman 5. Julian Schwinger
6. Sin-Itiro Tomonaga 7. Freeman Dyson 8. renormalization

همین روش صورت می‌پذیرد. در نتیجه، کمیتهای اندازه‌گیری شدهٔ جرم الکترون، m و بار آن، e، وارد معادلات می‌شوند و نامتناهی‌های نامطلوب، گرچه نه از ذهن ولی از نظر محو می‌شوند.

برای دیراک، این زشتی ریاضی بود. او به مدت چند دهه تلاش کرد تا زیبایی را به معادلات الکترودینامیک بازگرداند ولی هرگز آنچه را که می‌جست، نیافت. در سال ۱۹۷۹ در سن هفتاد و هفت سالگی در یک ارزیابی نومیدانه نوشت «من به‌واقع، تمام عمر خود را صرف یافتن معادلات بهتری برای الکترودینامیک کوانتومی کرده‌ام و تا به حال موفق نشده‌ام، ولی به این کار ادامه خواهم داد.» او اصرار می‌ورزید که «نظریهٔ رایج الکترودینامیک» با آن نامتناهی‌های زمختش، که باید آنها را حذف کرد، نمی‌تواند درست باشد. همکاران او نظریهٔ بازبهنجارش را با دقت بی‌سابقه‌ای به‌کار می‌بردند و دیراک در این میان، منزوی شد.

سرنوشت دیراک مانند اینشتین بود. اینشتین سالهای بسیاری را صرف جستجویی بی‌حاصل برای نظریهٔ واحدی برای میدانهای گرانشی و الکترومغناطیسی کرد. پایس، این نقطهٔ اشتراک و نقاط اشتراک دیگر این دو نظریه‌پرداز بزرگ را چنین برمی‌شمرد: «از بعضی جهات، و البته فقط از بعضی جهات، دیراک مرا به یاد اینشتین می‌اندازد. او یکی از بزرگترین دانشمندان قرن بود، همیشه به راه خود می‌رفت، مکتبی را به‌وجود نیاورد، خود را ناگزیر از نیاز به زیبایی و سادگی در فیزیک نظری می‌دید، در سالهای آخر عمرش بیش از آنچه برای فیزیک سودمند باشد، به ریاضی معتاد شده بود و درنهایت اینکه فعالیتهایش در تحقیقات ناب را تا دم مرگ ادامه داد.»

بهترین قدردانی از دیراک، کلامی بود که بور دربارهٔ او بیان کرد. بور گفت: «در میان همهٔ فیزیکدانان، دیراک ناب‌ترین روح و روان را دارد.»

۲۵

چه اهمیتی دارد؟

ریچارد فاینمن

شخصیت شگفت‌انگیز

دانشمندان بزرگ نابغه‌اند، و نابغه‌ها معمولاً زندگی غیرعادی دارند. در فصلهای قبل نمونه‌های بسیاری از آنها را دیدیم. موضوع این فصل، ریچارد فاینمن، یکی از بزرگترین نابغه‌های علمی بود که در عین حال یکی از نامتعارفترین زندگیها را داشت.

او بیشتر دورهٔ زندگی‌اش را در جامعهٔ دانشگاهی گذراند، مدت کوتاهی در دانشگاه کورنل و بقیهٔ آن را در کالتک. گاهی از این مسیر خارج می‌شد. یک گریزگاه او لاس‌وگاس و مصاحبت با قماربازان، هنرمندان حقه‌باز، و زنان زیبا بود. وقتی وارد کالتک شد قمار نمی‌کرد و مشروب نمی‌خورد، ولی به زنان جذاب علاقه‌مند بود. وی بلند قد، خوش قیافه، رقصنده، طبل‌نوازی ماهر، و مجهز به گنجینهٔ پایان‌ناپذیری از داستانهای سرگرم‌کننده‌ای بود که در آنها در نقش قهرمانی پیکارسک[1] ظاهر می‌شد. فاینمن برخی از این صحبتها را به دوست طبل‌نوازش، رالف لیتون، دیکته می‌کرد و او آنها را با عنوان ماجراهای یک شخصیت شگفت‌انگیز در دو جلد منتشر کرد که هر دو پرفروش شدند.

یکی از پاتوق‌های فاینمن در پاسادنا بار جیانونی بود. این محل به گفتهٔ همسر بسیار فهمیدهٔ وی گوئنت[2] «باشگاه» فاینمن بود. او سون‌آپ سفارش می‌داد، سپس پس از مدتی تماشا کردن برنامه به فیزیک می‌پرداخت یا درس خود را تهیه می‌کرد. حتی وقتی فاینمن به نقاشی کردن از روی مدل زنان روی آورد (که یکی از آنها موضوع صفحهٔ ورقی وسط مجله شد) گوئنت مخالفتی نکرد. گوئنت دانا و بردبار بعدها نقش مهمی در ازدواج سعادتمند فاینمن داشت.

نخستین همسر او آرلین[3]، دست کم تا حدی باعث علاقهٔ او به نوعی زندگی نامتعارف شد. آنها

1. picaresque 2. Gweneth 3. Arline

در شرایطی ازدواج کردند که می‌دانستند آرلین مبتلا به بیماری سل دستگاه لنفاوی است و به زودی می‌میرد. دوستان، والدین، و دکترها با این ازدواج مخالفت کردند. اما فاینمن گفت «عشق شبیه هیچ چیز دیگری که می‌شناسم نیست». وقتی فاینمن دانشجوی تحصیلات تکمیلی در دانشگاه پرینستون بود، آرلین در بیمارستانی در آن حوالی بود، و هنگامی که فاینمن به فعالیتهای جنگی در لوس‌آلاموس پیوست آرلین تا زمان مرگش در سال ۱۹۴۵ در آسایشگاه مسلولان آلبوکرک بود. فاینمن او را «پاتسی» می‌نامید، و وقتی یک جعبه مداد رنگی با یادداشت «ریچارد عزیز، دوستت دارم!» برایش فرستاد به دستپاچگی او خندید. او با گفتن اینکه «چه اهمیتی دارد که دیگران چه فکر می‌کنند؟» او را سرزنش کرد و با شعری روی کارت‌پستال آن را طول و تفصیل بیشتری داد:

اگر کارهایی را که می‌کنم دوست نداری

⋮

فریمن دایسون، یکی از دوستان فاینمن در دوره‌ای حساس از زندگی حرفه‌ای فاینمن، پس از درگذشت او در سال ۱۹۸۸ در قدردانی از او نوشت «این تذکر آرلین را در تمام طول زندگی به خاطر داشت و وی را چیزی کرد که شد.»

فاینمن چه به‌عنوان فیزیکدان و چه در موارد دیگر زندگی، همواره یک ماجراجو بود. او نمی‌توانست به یک مسئلهٔ پژوهشی روی آورد مگر آنکه کل موضوع را به شیوهٔ خودش بازسازی کند یا به گفتهٔ خودش به آن جهتی تازه دهد. روی تختهٔ سیاهش در کالتک این پیام نوشته شده بود «آنچه را نمی‌توانم خلق کنم، نمی‌توانم بفهمم.» در پایان‌نامهٔ دکتری‌اش رهیافتی کاملاً جدید به مکانیک کوانتومی داشت که با برخورد هایزنبرگ، شرودینگر، و دیراک تفاوت داشت. سپس این روش را با موفقیت چشمگیری برای نظریهٔ برهم‌کنشهای الکترون و فوتون به کار گرفت.

او هیچ ترسی از تردید و عدم قطعیت نداشت. او نوشت که «من از چیزهایی که نمی‌دانم احساس ترس نمی‌کنم، از گم شدن در عالم اسرارآمیز بدون هیچ منظور وحشتی ندارم.» تردید، انگیزهٔ او بود و به اکتشاف می‌انجامید. او از اینکه حل یک معما معمولاً به معمای دیگری می‌انجامد ناراحت نمی‌شد. شناخت بیشتر به معمای ژرفتر و شگفت‌انگیزتری می‌انجامید و باعث نفوذ در عمق بیشتر می‌شد. هرگز نگران پاسخ ناامیدکننده نمی‌شد. با دلخوشی و اعتماد به نفس هر سنگ جدید را زیر و رو می‌کرد تا به شگفتی باورنکردنی می‌رسید که به پرسشهای جالبتر می‌انجامید که بدون شک ماجرای بزرگی بود!

برای فاینمن تأمل دربارهٔ عالم فراتر از انسان، و تفکر دربارهٔ عالم بدون انسان ــ که در بخش اعظم تاریخ طولانی و در بیشتر جاهایش چنین بوده است ــ «تجربه‌ای مذهبی» بود. این دیدگاه عینی فیزیکدان است. وقتی انسان به این هدف برسد، و اسرار و عظمت موضوع درک شود، نظر عینی خود را مجدداً به انسان برمی‌گرداند، تا زندگی را به‌عنوان بخشی از ژرف‌ترین معمای عالم در نظر بگیرد و به تجربه‌ای غیرقابل توصیف دست یابد. او متوجه شد که شاعران در این مورد چیزی نمی‌نویسند، بنابراین او خود شعری را سرود که این طور به پایان می‌رسد.

درکنار دریا ایستاده‌ام
به شگفتیها می‌اندیشم
عالمی از اتمها
اتمی در عالم

در فار راک‌اِوی

یکی ازکتابهای فاینمن با عنوان «حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن» این طور شروع می‌شود «حقایقی در مورد زمان‌بندی من: من در سال ۱۹۱۸ در شهرکی به نام فار راک‌اوی[1] در حومهٔ نزدیک به دریای نیویورک به دنیا آمدم.» جیمز گلایک[2] زندگینامه‌نویس فاینمن می‌نویسد: کودکان فار راک‌اوی، روستایی چندصد هکتاری با مجتمعهای آپارتمانی آجری در سواحل شنی بخش جنوبی لانگ آیلند، زندگی خوشی داشتند. این ناحیه یکی از بیش از شصت شهرک و ناحیه‌ای بود که در سال ۱۸۹۸ در هم ادغام شده و منطقهٔ کوئینز را به‌عنوان بخشی از موجودیت سیاسی نیویورک به‌وجود آوردند.

ساکنان فار راک‌اوی مردمی سخت‌کوش بودند و زندگی متوسط آبرومندانه‌ای داشتند. پدر ریچارد، ملویل، در دوران رکود اقتصادی دست به کارهایی زد که چندان مطابق میلش نبودند: فروش واکس اتومبیل موسوم به ویز، کار معاملات ملکی، و زنجیره‌ای از مغازه‌های خشک‌شویی. سرانجام مدیر فروش شرکت بزرگی شد که درکار لباسهای متحدالشکل بود.

اگر امکانات لازم در اختیار ملویل بود دانشمند می‌شد. خواهر ریچارد، جون، که او هم فیزیکدان شد به خاطر می‌آورد که درست پیش از تولد ریچارد، پدرش گفت «اگر بچه پسر باشد، باید دانشمند شود.» ملویل آموزش رسمی علوم ندیده بود، اما عقل سلیم عمیقی داشت. فاینمن به یاگدیش مهرا[3] زندگینامه‌نویس دیگرش گفته است «به گونه‌ای او هرگز حقایق را به خوبی نمی‌دانست، اما واقعیتها را می‌دانست. در نگاه به گذشته درمی‌یابم که او مرد فوق‌العاده‌ای بود. . . او شناخت کاملی از چیزهایی داشت که نباید به آنها توجه کرد، تفاوت بین نام چیزی را بردن و حقایق مربوط به آن را می‌دانست، این موضوع که اگر عمیقاً به چیزها نگاه کنید همواره چیزهای هیجان‌انگیزی را پیدا می‌کنید. او شناخت کاملی از حال و هوای عمیقتر علم داشت و آن را به من منتقل کرد.»

ملویل اولین معلم ریچارد بود. رسانهٔ اصلی او دایرة المعارف بریتانیکا بود که آن را برای پسرش می‌خواند و همچنان که پیش می‌رفتند توضیح می‌داد. او به مهرا گفت «هرچه را که می‌خواندیم به صورت چیزهای قابل درک بازگو می‌کرد و این به صورت یک ویژگی کلی من و کارهایم در تمام زمانها در آمد. هنوز هم در درک آنچه دیگران انجام می‌دهند و چگونگی انجام آن کارها مشکل دارم. همیشه می‌کوشم آنها را به صورتی درآورم که بتوانم بفهمم.»

1. Far Rockaway 2. James Gleick 3. Jagdish Mehra

مادر ریچارد، لوسیل، به قشر اقتصادی بالاتر از ملویل تعلق داشت. پدرش طراح موفق کلاههای زنانه بود، و خانواده از خانهٔ استیجاری در ایست‌ساید پایین به خانهٔ شهری در خیابان نود و دوم نزدیک پارک اونیو نقل مکان کرده بودند. شاید رفتن از پارک اونیو به فار راک‌اوی برای لوسیل سخت بود، اما او شکایتی نداشت. وسیلهٔ دفاعی او شوخ‌طبعی بود که به همان اندازهٔ درسهای علمی، ملویل شخصیت پسرش را شکل داد. فاینمن در یکی دیگر از کتابهای خود با عنوان چه اهمیتی دارد؟ می‌نویسد «گرچه مادرم چیزی دربارهٔ علم نمی‌دانست، اما تأثیر عمیقی در من داشت. به ویژه شوخ‌طبعی جالب توجهی داشت، و از او آموختم بالاترین تفاهمی که می‌توانیم به آن دست یابیم خنده و شفقت انسانی است.» یکی از چیزهایی که لوسیل بعدها که پسرش مشهور و به‌عنوان «باهوشترین مرد جهان» بلندآوازه شد گفت این بود: «اگر این باهوشترین مرد جهان است، خدا به ما رحم کند.»

ریچارد در دبیرستان به ریاضیات، علوم، و دختران، شاید نه به ترتیب بالا علاقه‌مند بود. او مقدمات حسابان را از کتاب حسابان برای اهل عمل که به کتابخانهٔ مدرسه اضافه شده بود خودش خواند. سپس در کلاس فیزیک ممتاز ابرام بادر[1] شرکت کرد. بادر مکانیک آماری و مکانیک کوانتومی را در دانشگاه کلمبیا زیر نظر ایزیدور رابی[2] خوانده بود، اما وقتی پولش تمام شد، در دورهٔ دکتری ترک تحصیل کرد. او معلمی مطلع و دلسوز بود و به سرعت متوجه استعداد ریچارد شد. بادر به مهرا گفت «فاینمن بی‌همتا بود. پس از یک روز، شاگرد اول کلاس شاگردان اول شد». با این‌همه، شاگرد اول کسل شد، و بادر کتاب حسابان پیشرفتهٔ فردریک وودز[3] را به او داد تا مطالعه کند. پس از یک ماه، ریچارد کتاب را خوانده و به پرسشهای بادر در حاشیهٔ کتاب پاسخ داده بود.

بادر درسهای جالبی از فیزیک را به ریچارد آموخت. او بر اهمیت تابعهای انرژی تأکید کرد. او متذکر شد، مجموع تابع T انرژی جنبشی و تابع V انرژی پتانسیل (به افتخار ویلیام روئن هامیلتون[4]، ریاضیدان و فیزیکدان ایرلندی، که دینامیک نیوتونی را با این تابع بیان کرد) «هامیلتونی» خوانده و با H نشان داده می‌شود

$$H = T + V \qquad (۱)$$

تفاضل T و V، تابع دیگری به همان اهمیت است

$$L = T - V \qquad (۲)$$

و (به افتخار ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی قرن هجدهم، ژوزف لاگرانژ[5]، که دینامیک نیوتونی را بر مبنای L توصیف کرد) «لاگرانژی» نامیده می‌شود.

1. Abram Bader 2. Isidor Rabi 3. Frederick Woods 4. William Rowan Hamilton
5. Joseph Lagrange

تابع هامیلتونی در معادله‌های دیفرانسیلی ظاهر می‌شود که باید آن را حل کرد (یعنی از آن انتگرال گرفت) یا حرکت جسم تعریف شود، و این کار گاهی دشوار است. تابع لاگرانژی از راه ریاضی کاملاً متفاوتی به همان نتیجه می‌انجامد. از آن در هر مسیر ممکنی که جسم متحرک دنبال می‌کند نسبت به زمان انتگرال می‌گیرند تا تابع دیگری موسوم به «کُنش» به دست آید که با S نشان داده می‌شود.

$$S = \int_{\text{هر مسیر}} L dt \qquad (۳)$$

جنبهٔ خاص کُنش، موسوم به اصل کمترین کنش، آن است که برای هر مسیر واقعی که جسم متحرک دنبال کند، کنش کمترین مقدار، کمینه، است. بنابراین کُنش، که مقید شده است تا مقدار کمینه را بدهد، مسیر را مشخص می‌کند. برای ریچارد این مکاشفه‌ای بود که حس شهود فیزیکی او را بیدار کرد. او به مهرا گفت «به جای معادله‌های دیفرانسیل، این ویژگیهای کل مسیر را مشخص می‌کند، و این مرا مجذوب کرد. این بزرگترین کشف زندگی من بود. بقیهٔ عمرم در تمام کارهایم به گونه‌ای با کُنش بازی کردم. من همواره آن را دوست داشتم».

اما در مورد دختران، در دورهٔ نوجوانی ریچارد، فقط یک دختر بود که ریچارد او را جدی گرفت. او آرلین گرینباوم (شگفت اینکه، فاینمن و ویراستاران او در تمام کتابها او را آرلن نامیده‌اند) محبوب و هنرمند بود. آرلین و ریچارد وقتی با هم آشنا شدند که هر دو سیزده سال داشتند. یکی از رقیبان قبلی ریچارد می‌گوید «او دختری بسیار دوست داشتنی، دلپذیر و شیرین بود. گونه‌هایش چال می‌افتاد، و همه او را دوست داشتند.»

ریچارد از دبیرستان فار راک‌اوی با موفقیت فارغ‌التحصیل شد. او بیشتر امتیازها و قلب آرلین را برای همیشه به‌دست آورد. دانشگاه مرحلهٔ بعدی بود. عدم پذیرش او در دانشگاه کلمبیا، پس از درخواست شهریه‌ای غیرمنطقی، می‌تواند مربوط به سهمیهٔ دانشجویان یهودی باشد. او در مؤسسهٔ فناوری ماساچوست (MIT) پذیرفته شد و پاییز سال ۱۹۳۵ همواره با دیگر دانشجویان وارد کمبریج ماساچوست شد.

عاشق مسائل

فاینمن ابتدا به لحاظ فکری در MIT سرگردان بود. رشتهٔ ریاضی برایش جالب بود، تا آنکه از مدیر گروه ریاضی پرسید با داشتن مدرک ریاضی بجز تدریس چه می‌توان کرد. مدیر گروه پاسخ داد «خُب، می‌توانید آمارگر، محاسب نرخهای بیمه در شرکت بیمه شوید.» و اضافه کرد دانشجویانی که این پرسشها را مطرح می‌کنند معمولاً جوهر و ویژگیهای ریاضیدانها را ندارند. رشتهٔ بعدی مهندسی برق بود، اما دریافت که ذوق آن را هم ندارد. با حذف برخی رشته‌های دیگر، سرانجام به فیزیک رسید.

این انتخابی عاقلانه بود؛ MIT یک گروه فیزیک قوی داشت. مدیر گروه جان اسلیتر[1] همکار بور و مؤلف یک کتاب درسی پرمحتوا بود. یکی از کتابهای او «آشنایی با فیزیک نظری» برای دانشجویان سال آخر و دورهٔ تحصیلات تکمیلی الزامی بود. جولیوس استراتون[2] و فیلیپ مورس[3] متخصص فیزیک اتمی و مولکولی این کتاب را تدریس می‌کردند. فاینمن و دوست استثنایی او تد ولتون[4] با اندکی دلواپسی تصمیم گرفتند این درس را در سال دوم بگیرند. اما جای نگرانی نبود؛ آنان به سطح دانشجویان سال آخر رسیده بودند. آنان متون مقدماتی مکانیک کوانتومی و نسبیت را خودشان خوانده و دربارهٔ آنها بحث کرده بودند. ولتون در تجدید خاطره‌ای از آن روزها، کلاس درس استراتون با حضور فاینمن را به یاد می‌آورد: «استراتون که بدون شک مدرس قابل تحسینی بود، گاهی به مطالبی که تهیه کرده بود نگاهی می‌انداخت که نتیجهٔ آن مکثی آزار دهنده و سرخ شدن چهره‌اش بود. او با لحظه‌ای تردید می‌پرسید 'آقای فاینمن، این مسئله را چطور حل کرده‌اید'، و ریچارد با خجالت و تردید پای تختهٔ سیاه می‌رفت و راه‌حلی را که همیشه درست و اغلب مبتکرانه بود می‌نوشت.»

در آن زمان (اواسط سالهای ۱۹۳۰)، مکانیک کوانتومی هنوز موضوعی جدید بود، و در دوره‌های درسی استاندارد با عمق کمی تدریس می‌شد. مدرس پیشنهاد کرد مکانیک کوانتومی کارآمد و واقعی را در یک دورهٔ درسی خاص، هفته‌ای یک بار، برای فاینمن، ولتون، و یک دانشجوی دیگر تدریس کند. آنان کار را با اصول مکانیک کوانتومی پیچیدهٔ دیراک آغاز کردند، و سپس مورس یک کار تحقیقی را پیشنهاد کرد که شامل محاسبات مفصلی دربارهٔ ویژگیهای اتمی با توابع موج هیدروژن، یا هیدروژن‌مانند (که فاینمن آن را hygienic می‌خواند) بود. کامپیوترها و ماشینهای حساب الکتریکی هنوز وجود نداشتند. ولتون می‌نویسد، «من و ریچارد کار را با این قصد آغاز کردیم که ابتدا چگونگی استفاده از ماشینهای حساب [مکانیکی] 'چوگ ـ چوگ ـ دینگ ـ چوگ ـ چوگ ـ دینگ' پیش از جنگ را یاد بگیریم.» این روی دیگر مکانیک کوانتومی، معادله‌های زیبا در حال کار، بود. محاسبات خسته‌کننده و در عین حال هیجان‌انگیز بود. فاینمن می‌گفت «مورس ما را با محاسبهٔ چیزهای واقعاً جالبی آشنا کرد. او به همراه ما تلاش فراوانی کرد. او به نحوی تأثیرگذار بود زیرا مکانیک کوانتومی را بلد بود.»

در این زمان فاینمن شناخت کافی از نسبیت و مکانیک کوانتومی به‌دست آورده بود تا معادلهٔ معتبری برای مکانیک کوانتومی نسبیتی پیشنهاد کند. او نمی‌دانست به مسئله‌ای پرداخته است که دیراک آن را در سال ۱۹۲۸ حل کرده بود. فاینمن به شکل اولیهٔ معادلهٔ دیراک دست یافت که اکنون به معادلهٔ کلاین ـ گوردون[5] معروف است. اما وقتی فاینمن و ولتون آن را برای الکترون اتم هیدروژن به کار گرفتند متوجه شدند که معادله برای الکترون معتبر نیست. فاینمن نتیجه گرفت که «این پایان کار است.» اما واقعاً این طور نبود. احتمالاً او برای نخستین بار از چیزی لذت می‌برد که آن را تلنگری به یک اکتشاف می‌نامید.

1. John Slater 2. Julius Stratton 3. Philip Morse 4. Ted Welton 5. Klein-Gordon

فاینمن در پایان‌نامهٔ سال آخرش در MIT کشف مهمی کرد. اسلیتر از او خواسته بود تا این واقعیت را توضیح دهد که چرا کوارتز بر اثر گرم شدن کمتر از بیشتر مواد دیگر منبسط می‌شود. فاینمن به مهرا گفت «من عاشق این مسئله بودم. شروع به این فکر کردم که چگونه می‌توانم این انبساط را محاسبه کنم. برای انجام آن فرض کردم کوارتز در فضا ثابت است، اندازهٔ آن هم ثابت است و در جستجوی آن برآمدم که چه نیروها و تنشهایی بر آن وارد می‌شوند. فاینمن برای شروع تجزیه و تحلیلش، قضیه‌ای را بیان و ثابت کرد که آن را شیمی فیزیکدانان به عنوان وسیله‌ای استاندارد برای محاسبات مولکولی پذیرفته‌اند. این قضیه بیان می‌کند که به طور کلی، در کوارتز یا جاهای دیگر، هستهٔ اتم نیروی الکتروستاتیک هسته‌ها و الکترونهای اطراف را حس می‌کند. الکترونها در مکانیک کوانتومی به صورت لکه‌های ابرمانند سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شوند. نسخهٔ خلاصه شدهٔ این پایان‌نامه در مجلهٔ فیزیک معتبر فیزیکال ریویو منتشر شد.

اکنون زمان تحصیلات تکمیلی بود، فاینمن امیدوار بود در MIT بماند. او به ملاقات اسلیتر رفت و انتظار موافقت او را داشت، امّا این موافقت حاصل نشد. گفت‌وگو به این صورت بود:

اسلیتر: چرا می‌خواهی به MIT بروی؟
فاینمن: زیرا بهترین جا برای آموزش علوم و مهندسی در کشور است.
اسلیتر: این طور فکر می‌کنی؟
فاینمن: آری.
اسلیتر: به همین علت است که باید جای دیگری بروی.

فاینمن که مجبور بود جای دیگری برود، سرانجام در پرینستون مقیم شد. اسلیتر و مورس با علاقه‌مندی از درخواست برای پذیرش او حمایت کردند، امّا بعضی نکات مستلزم توضیح بود. کمیتهٔ پذیرش در مدرک امتحان فارغ‌التحصیلی، دیده بود که نمرات فاینمن در ریاضی و فیزیک بهترین و در تاریخ و زبان انگلیسی کمترین است. و مسئله دیگری وجود داشت، که اچ.دی. اسمیت رئیس گروه فیزیک پرینستون، بدون پنهان‌کاری برای مورس توضیح داد: «یک سؤال همیشه مطرح می‌شود، به ویژه برای کسانی که به فیزیک نظری علاقه‌مندند. آیا فاینمن یهودی است؟ ما قانون معینی علیه یهودیان نداریم، ولی می‌باید نسبت آنان را در گروه خودمان به علت مضیقهٔ جایگاه آنان، به طور قابل قبولی، کوچک نگه داریم.» اسلیتر و مورس بر طرفداری از فاینمن اصرار ورزیدند، و بر ایرادهای حقیقی کمیتهٔ پذیرش فائق آمدند.

یکی از نخستین تجربه‌های فاینمن در پرینستون به عنوان جالب نخستین کتابهای تک‌گفتاری (monologue books) او انجامید. روزی که او در پاییز سال ۱۹۳۹ به پردیس پرینستون وارد شد در مراسم اجباری چای یکشنبهٔ رئیس دانشکده شرکت کرد. فاینمن می‌نویسد: «من حتی نمی‌دانستم 'چای' چیست و این مراسم برای چیست! من اصلاً هیچ نوع تجربهٔ معاشرت اجتماعی را نداشتم. من

هیچ تجربه‌ای در مورد این نوع چیزها نداشتم.» درکنار در، رئیس به نحوی فاینمن را شناخت و با ذکر نام به او خوشامد گفت. سپس فاینمن وارد اتاق شد و با خود گفت:

همه‌چیز بسیار رسمی است و در این فکرم که کجا باید بنشینم، آیا می‌توانم درکنار این دختر بنشینم یا نه، و چه رفتاری باید داشته باشم، که همسر رئیس که چای می‌ریخت با صدای بلند پرسید: «آقای فاینمن، برای چایتان خامه میل دارید یا لیموترش؟

من گفتم «متشکرم، هر دو را می‌خواهم»، هنوز در جستجوی جایی بودم که بنشینم، که ناگهان شنیدم، «حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن.»

شوخی؟ شوخی؟ مگر من چه گفته بودم؟ سپس متوجه شدم که چه کرده‌ام. این نخستین تجربهٔ من با ماجرای چای بود.

پرینستون دستیاریِ پژوهشی را به فاینمن پیشنهاد کرد و به او گفته شد که استاد مشاورش، یوجین ویگنر[1] خواهد بود. ویگنر نظریه‌پرداز کوانتومی مجارستانی بود که به نسل دیراک، فرمی، هایزنبرگ و پائولی تعلق داشت. فاینمن به مهرا گفت، «وقتی آنجا رسیدم معلوم شد آنان کار او را تغییر داده‌اند و با جان آرچیبالد ویلر[2] کار کردم که واقعاً بسیار خوب بود.» حقیقتاً چنین بود. ویلر جوان بود، فقط شش سال بزرگتر از فاینمن، و آمیزهٔ جالب توجهی از جسارت و محافظه‌کاری بود. جیمز گلایک[3] می‌نویسد، «او مانند یک بازرگان لباس می‌پوشید، گرهٔ کراواتش محکم و سر آستین‌های سفیدش آهار زده بود. وقتی جلسه‌ای را با دانشجویی آغاز می‌کرد، با دقت وسواس‌آمیزی ساعت جیبی‌اش را بیرون می‌کشید (این امر حاکی از این پیام بود که استاد، زمان معینی را به او اختصاص می‌دهد. . .).» عضو دیگری از گروه پرینستون، رابرت ویلسون، برداشت و نظر خود را دربارهٔ همکارش چنین بیان می‌کند: «جایی در میان این صورت ظاهرِ مؤدبانه، ببری رها شده بود؛ ماجراجوی متهوری . . . که شجاعت آن را داشت تا هر مسئلهٔ عجیبی را بررسی کند.» چنانکه دیدیم، ویلر در مطالعات مهم شکافت هسته‌ای با بور همکاری داشت.

فاینمن در نخستین جلسه با ویلر به ژست ساعت جیبی او توجه کرد و در جلسهٔ بعدی ساعت خودش را درآورد. عمداً درکنار ساعت ویلر گذاشت. هر دو به شدت خندیدند و به سراغ کار فیزیک رفتند.

یکی از «مسائل عجیب» ویلر دربارهٔ مشکل دیرپای نظریهٔ الکترون، یعنی «خود-انرژی» الکترون بود. الکترونها بار دارند، و بارها، میدان الکترومغناطیسی تولید می‌کنند، که به نوبهٔ خود با الکترون برهم‌کنش دارد. انرژی این خود-برهم‌کنش را در صورتی می‌توان با نظریهٔ کلاسیک یا کوانتومی محاسبه کرد که الکترون اندازهٔ محدودی داشته باشد. امّا نظریهٔ نسبیت این محدودیت را ایجاد می‌کند که مجاز

1. Eugene Wigner 2. John Archibald Wheeler 3. James Gleick

نمی‌داند الکترونها بجز نقطه، چیز دیگر باشند؛ یعنی باید شعاع آنها صفر باشند. این واقعیت که ظاهراً ساده و بی‌ضرر به‌نظر می‌رسد، دهها سال نظریه‌پردازان را ناکام کرده بود. وقتی آنان می‌کوشیدند تا خود-انرژی یک الکترون با اندازه-نقطه را محاسبه کنند نتیجهٔ بی‌نهایت به دست می‌آوردند، نتیجه‌ای که از لحاظ ریاضی بی‌معنی است. بی‌نهایتها اعداد معتبری نیستند، آنان را نمی‌توان با اطمینان جمع، ضرب یا تقسیم کرد. مشکل بی‌نهایت به این علت بروز می‌کند که نظریه فرض می‌کند، برهم‌کنش‌های الکترون را میدانهای الکترومغناطیسی منتقل می‌کنند. ویلر پیشنهاد کرد برای اصلاح ریشه‌ای نظریه، مفهوم میدان را کنار بگذاریم، در این صورت نظریه از مفهوم مشکل‌آفرین برهم‌کنش الکترون با خودش خلاص می‌شود. این یک بازگشت به اصل «کنش-از دور» بود که با ظهور نظریهٔ میدان سرکوب شده بود.

وقتی فاینمن در MIT بود، دربارهٔ بی‌نهایتها، این بلای نظریه‌های میدان اندیشیده بود، و همیشه می‌خواست، هر مرجع معتبر، حتی فارادی، ماکسول و اینشتین را به چالش بکشد. او از پیوستن به ویلر که در جستجوی یک نظریهٔ کنش-از دور بود، خوشحال بود. آنان موفق به بسط یک نظریهٔ کلاسیک معتبر شدند، امّا از عهدهٔ یافتن یک نظریهٔ کوانتومی متناظر آن، برنیامدند. با این همه، فاینمن گام مهمی در این جهت برداشت و راهی یافت تا مکانیک کوانتومی را بازنویسی کند، به‌طوری که متکی بر یک معادلهٔ دیفرانسیل، مانند معادلهٔ شرودینگر، نباشد: معادلات دیفرانسیل زبان ریاضی درستی برای برنامهٔ ویلر نبودند. در عوض، فاینمن احتمال وقوع یک رویداد مانند عبور یک الکترون از یک نقطه در فضا و زمان به نقطهٔ دیگر را با جمعبندی مهم هر مسیر ممکن که دو رویداد را به هم متصل کند محاسبه کرد. هر مسیر وزن یا دامنهٔ یکسان داشت، امّا در جمعبندی «فاز» متفاوتی داشت. مسیرها در جمعبندی وقتی یکدیگر را تقویت می‌کردند که همفاز بودند. چنانکه فاینمن از راهنماییهای نوشته‌های دیراک انتظار داشت، معلوم می‌شد عاملی که فاز یک مسیر را معین می‌کرد دوست قدیمی او، کُنش S بود، و او می‌توانست به طور کلی از دیدگاه مکانیک کوانتومی، اصل کمترین کنش را ثابت کند.

ویلر چنان تحت تأثیر دستاورد شاگردش قرار گرفت که آن را به اطلاع اینشتین رساند:

> فاینمن تصویر زیبایی برای فهمیدن دامنهٔ احتمال گذار یک دستگاه دینامیکی از یک پیکربندی خاص در یک زمان، به یک پیکربندی خاص دیگر در زمان دیگر یافته است. او از برابری مطلق هر تاریخچهٔ ممکنی که از حالت ابتدایی به حالت نهایی می‌رسد، صرف نظر از اینکه حرکت در این میان چقدر عجیب باشد استفاده می‌کند. این تاریخچه‌ها ابداً با دامنه تفاوت نمی‌کند، تفاوت فقط در فاز است، و فاز چیزی جز انتگرال کنش کلاسیک نیست. این پیشنهاد همهٔ نظریهٔ کوانتومی استاندارد را بازآفرینی می‌کند. راه ساده‌تری برای فهمیدن نظریهٔ کوانتومی وجود ندارد!

ویلر گفت این کافی بود تا هرکس، حتی مشهورترین منتقد آن اینشتین به نظریهٔ کوانتومی باور پیدا کند. اینشتین پاسخ داد، «من هنوز باور ندارم که خدا تاس‌بازی می‌کند، امّا شاید این حق را به‌دست آورده باشم که اشتباهاتی بکنم.»

در حالی‌که فاینمن و ویلر مبانی فیزیک را می‌کاویدند، زندگی دیگر فاینمن ناآرام بود. وقتی هنوز در MIT بود، مشکلات سلامتی آرلین پیشرفت کرده بود، یک رشد غیرقابل توضیح در کنار گردن، همراه با تب. پس از دوبار تشخیص پزشکی غلط، یک عمل بافت‌برداری (biopsy) بیماری سل سیستم لنفاوی را تأیید کرد. ریچارد و آرلین با این احتمال مواجه شدند که او بهبود نخواهد یافت. با وجود این آنان به‌رغم مخالفت شدید لوسیل و ملویل، تصمیم به ازدواج گرفتند. آنان در ژوئن سال ۱۹۴۲ ازدواج کردند.

دیراک دوّم، امّا مهربانتر

در پاییز سال ۱۹۳۹، هنگامی که فاینمن خود را با مهمانیهای چای پرینستون، «مسائل عجیب و غریب» ویلر و آیندهٔ نامطمئن آرلین، سازش می‌داد، جنگ جهانی دوم در اروپا آغاز شد. در ابتدای سال، بور اخبار شکافت هسته‌ای را برای فیزیکدانان امریکایی آورد و با ویلر، یک نظریهٔ شکافت اورانیم را طراحی کرد. در سال ۱۹۳۹، اینشتین پذیرای دو پناهندهٔ مجارستانی، لئو زیلارد و یوجین ویگنر شد و نامهٔ آنان برای رئیس‌جمهور روزولت را امضا کرد. مضمون نامه، هشدار امکان و خطرهای غیرقابل تصور سلاحهای هسته‌ای بود. واکنش در ابتدا کُند و اداری‌مآبانه بود، امّا در سال ۱۹۴۱، با پیشروی ارتش آلمان در اروپا، بمباران پیرل هاربور[1] ژاپنیها، و اطلاع از اینکه شکافت اورانیم در آلمان کشف شده است، پروژهٔ اورانیم، با آهنگ غیرمنتظره‌ای پول و پرسنل جذب می‌کرد. در اواخر سال ۱۹۴۲ همهٔ فعالیتها به گروههایی از مهندسان ارتش محول شد، که مدیرکل امور اجرایی آن ژنرال لِسلی گرووز[2] بود.

فاینمن پس از تردید اولیه دربارهٔ کار مربوط به جنگ، به فعالیتی در پرینستون پیوست که مدیر آن رابرت ویلسون[3] بود. هدف این کار توسعهٔ دستگاهی به نام «ایزوترون (isotron)» برای جدا کردن ایزوتوپ کمیاب $U^{۲۳۵}$ از $U^{۲۳۸}$ فراوان بود. روش ویلسون در رقابت با طرحهای جداسازی دیگر کنار گذاشته شد. گروه شرکت‌کنندهٔ پرینستون بی‌صبرانه منتظر مأموریت دیگری بود. در سال ۱۹۴۳ زمانی فرا رسید که آزمایشگاه بمب در لوس‌آلاموس، نیومکزیکو، تحت مدیریت رابرت اُپنهایمر درهایش را گشود. اُپنهایمر در کشور به مسافرت پرداخت تا فیزیکدانان، شیمیدانان، مهندسان و ریاضیدانان مورد نظرش را استخدام کند، حتی گاهی کسانی را از شاخهٔ دیگر پروژهٔ مانهاتان قُر می‌زد.

فاینمن، در بهار سال ۱۹۴۳ جزء نخستین کسانی بود که به اُپنهایمر توصیه شد. ریچارد و آرلین با قطار عازم سانتافه شدند، در کوپه‌ای اختصاصی از لحاظ راحتی آرلین. اُپنهایمر در آلبوکرک[4]

1. Pearl Harbor 2. General Leslie Groves 3. Robert Wilson 4. Albuquerque

آسایشگاهی خاص مسلولان، برای آرلین، یافت. ریچارد با هر وسیله‌ای، آخر هر هفته به آلبوکرک می‌رفت تا با او باشد.

استعداد فاینمن در لوس‌آلاموس به سرعت شناخته شد، به ویژه هانس بته[1]، فیزیکدان هسته‌ای که از کورنل برای ریاست بخش نظری آمده بود، از او قدردانی کرد. بته یک آلمانی با معلومات وسیع بود: او در مونیخ، کمبریج و رُم تحصیل کرده بود؛ در سال ۱۹۳۳، او به گروه مهاجران ضد نازی پیوست و از اروپا به ایالات متحده رفت. بته مردی درشت اندام با چهره‌ای ساده، و بی‌پیرایه بود، و از لحاظ ویژگیهای اخلاقی گشاده دست، معقول، عملگرا و عاری از سختگیری. سلطه‌جویی و استبداد نمونهٔ آلمانی‌اش بود. فاینمن در کتاب حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن، اولین برخوردش با بته در لوس‌آلاموس را چنین توصیف می‌کند:

> اتفاقاً تمام بزرگان بجز بته در آن زمان غایب بودند، و بته احتیاج به کسی داشت که با او صحبت کند و ایده‌هایش را در میان بگذارد. خُب، به سراغ این بچه پُررو در دفتر کار می‌آید و شروع به توضیح ایده‌اش می‌کند. می‌گویم، «نه، نه، دیوانه‌اید. این طور است.» و او می‌گوید «یک دقیقه صبر کن»، و توضیح می‌دهد چرا دیوانه نیست. من دیوانه‌ام. و این طور ادامه می‌دهم ببین وقتی چیزی دربارهٔ فیزیک می‌شنوم، فقط در مورد فیزیک فکر می‌کنم، و نمی‌دانم دارم با کی صحبت می‌کنم، بنابراین چیزهای احمقانه‌ای مثل «نه، نه، اشتباه می‌کنید»، یا «شما دیوانه‌اید» می‌گویم. اما معلوم شد این درست همان چیزی بود که او لازم داشت.

بته، فاینمن را که در آن موقع بیست و پنج ساله و جوانترین فرد در لوس‌آلاموس بود، به سرپرستی یک گروه برگزید. مسائل محاسباتی به گروه او محول شده بود. در آن زمان «کامپیوترها» افرادی بودند که با ماشینهای حساب مکانیکی کار می‌کردند. در پاییز سال ۱۹۴۳، عصر کامپیوتر در لوس‌آلاموس به‌صورت یک ماشین IBM برقی قابل برنامه‌ریزی و تنظیم با پانچ کارت در لوس‌آلاموس آغاز شد. فاینمن و گروه او ماشین مذکور را پیش از ورود متخصص شگفت‌زدهٔ IBM سیم‌کشی و سوار کردند.

محدودیت‌های لوس‌آلاموس همهٔ ساکنان آن را تحت تأثیر قرار داده بود، امّا بیش از همه فاینمن را آزار می‌داد. او و آرلین با سانسور می‌جنگیدند. او شبی مست کرده بود، در خیابان آواز می‌خواند و به در و دیوار می‌کوبید. امّا این حادثه موجب شد که مشروب‌خوری را ترک کند. او سوراخهایی در حصار اطراف پایگاه پیدا کرد، و به فکر اخلاقی بودنِ کلک زدن به ماشین کوکاکولا افتاد. تخصص او در باز کردن قفل گاوصندوقها بود. با ترکیبی از شکیبایی، انگشتان حساس، و روان‌شناسی کاربردی، قفل بازکن ماهری شد. قربانیان او یادداشتهایی را پیدا می‌کردند که آنها را به جهت غفلتهای امنیتی سرزنش می‌کرد.

بی‌قراری فاینمن آن‌طور که به‌نظر می‌رسید اختیاری نبود. او و همکارانش در پروژهٔ بمب بی‌امان، تحت تنش مداوم کار می‌کردند، علاوه بر آن، فاینمن باید شاهد نزول کُند اما حتمی سلامتی آرلین باشد.

1. Hans Bethe

امّا همه‌چیز در سال ۱۹۴۵ پایان یافت. آرلین در بهار آن سال درگذشت. فاینمن در یکی از کتابهایش ماجرای آخرین سفرش به بالین آرلین را شرح می‌دهد. داستان شامل اتومبیل کلاوس فوخس، و سه پنچری در جادهٔ منتهی به آلبوکرک، و ساعت ترسناکی است که در زمان مرگ آرلین متوقف شده است. «از پاافتادن فوق‌العاده‌ای وجود نداشت. . . . تنفس او به تدریج کم و کمتر شد، تا دیگر تنفسی وجود نداشت ــ اما درست پیش از آن نفس کوچکی کشید.» وقتی به لوس‌آلاموس برگشتیم (با یک پنچری دیگر در برگشت)، در پاسخ به نگاه ناراحت همکاران گفت «او مرده است؛ برنامه چطور پیش می‌رود؟» او تا یک ماه پس از آن کاملاً متوجه درد عمیق ناشی از این فقدان نشد: «از کنار یک فروشگاه در اُک ریج [تنسی، که برای کاری به آنجا رفته بودم] می‌گذشتم که لباس زیبایی را در ویترین دیدم. فکر کردم آرلین از این لباس خوشش می‌آمد، و سپس بسیار ناراحت شدم.»

در ۱۶ ژوئیه، سال ۱۹۴۵، پروژهٔ بمب، با آزمایش ترینیتی یک بمب پلوتونیومی، به اوج تماشایی و تأمل‌برانگیزی رسیده بود. فاینمن که از یک مرخصی در فار راک‌اوی بازمی‌گشت درست در زمان مناسب برای مشاهدهٔ رویداد، رسید. با یک استدلال مشکوک که «نور درخشان هرگز به چشمان شما آسیبی نمی‌رساند»، از عینک آفتابی که توزیع شده بود استفاده نکرد و انفجار را از شیشهٔ جلوی کامیون که تابش فرابنفش را سد می‌کند، مشاهده کرد، «بنابراین توانستم آن چیز لعنتی را ببینم. . . احتمالاً من تنها کسی هستم که انفجار را با چشم بشری دیده است.»

احتمالاً بجز بخش امنیتی، از عملکرد فاینمن در لوس‌آلاموس تمجید و تکریم فراوان به‌عمل آمد. اپنهایمر که می‌خواست او را به‌عنوان عضو جدید برای گروه فیزیک برکلی استخدام کند، به مدیر گروه ریموند برج[1] نوشت: «بدون شک او درخشانترین فیزیکدان جوان اینجاست، و همه به این موضوع آگاهند. او شخصیتی بسیار جالب، دلپذیر، فوق‌العاده پاک، به غایت متعادل از هر لحاظ، و معلمی عالی با احساسی پرشور برای فیزیک در جمیع ابعاد آن است. او بهترین روابط ممکن را هم با نظریه‌پردازان دارد که خود یکی از آنهاست و هم با آزمایشگران که با هماهنگی با آنان کار می‌کند.»

بته، برای اینکه از غافله عقب نماند، به مدیر گروهش، ار.سی. گیبس[2] در کورنل نوشت: «ما در اینجا جوان فوق‌العاده با استعدادی را در زمینهٔ فیزیک نظری داریم، به نام ریچارد فاینمن. او به عقیدهٔ همهٔ عُقلای اینجا به خوبیِ شوینگر است [کسی که به زودی رقیب فاینمن در ساختن نظریه‌های الکترودینامیک کوانتومی می‌شود] و در عین حال کاملاً برونگرا و سرزنده است، بنابراین برای گروهی از این قبیل بسیار مفید است. نمی‌دانم ممکن است، پیش از آنکه پیشنهادهای دیگری به او بشود، که حتماً خواهد شد، او را برای گروه خودمان حفظ کنیم.»

بته و کورنل، در پاییز سال ۱۹۴۴، با پیشنهاد کردن استادیاری و مرخصی تا پایان کار در لوس‌آلاموس به فاینمن، مرد مورد نظر خود را به‌دست آوردند. فاینمن به مهرا گفت، «من پیشنهادهایی از جاهای

1. Raymond Birge 2. R.C. Gibbs

دیگر داشتم، امّا به آنها توجهی نکردم، زیرا می‌خواستم با هانس بته باشم. او را بسیار دوست دارم، و هرگز از تصمیم خود متأسف نیستم. فقط تصمیم داشتم به کورنل بروم.»

فاینمن نخستین فرد از گروه مدیران بود که لوس‌آلاموس را ترک کرد. او در اواخر اکتبر سال ۱۹۴۵ به پردیس کورنل، در شهرک ایتاکا واقع در مرکز نیویورک، رسید. طبیعی بود که او پس از رویدادهای دردناک اوایل سال استقرار در زندگی دانشگاهی را دشوار بیابد؛ او برای نخستین‌بار در زندگی‌اش مغموم و مأیوس شده بود. امّا در معرض مخاطرهٔ آشفتگی روانی نبود؛ به گفتهٔ بته «فاینمن افسرده، اندکی شادتر از هر شخص با نشاط دیگر است.» دانشجویان دختر او را سرگرم می‌کردند. او با تغییر قیافه به‌صورت یک دانشجوی دورهٔ لیسانس به مهمانیها می‌رفت (او بیست و هفت ساله بود، و جوانتر به‌نظر می‌رسید) و در کافه‌تریا به «دخترانی» برخورد می‌کرد که برای انجام تکالیفشان نیاز به کمک داشتند. او همیشه یک قصه‌گو بود و این جنبه از شخصیت او، گفتن حقیقت را دشوار می‌کرد. مانند این گفتگو:

دختر: شما دانشجوی کارشناسی‌اید یا دانشجوی تحصیلات تکمیلی؟
فاینمن: نه، من استادم.
دختر: اُه؟ استادِ چی؟
فاینمن: فیزیک نظری.
دختر: فکر می‌کنم در زمینهٔ بمب اتمی هم کار کرده‌اید.
فاینمن: بله، من در هنگام جنگ در لوس‌آلاموس بودم.
دختر: تو یک دروغگوی کثیف هستی.

ناراحتی روحی فاینمن با نوعی تجلی ناگهان رفع شد. او در کافه‌تریا غذا می‌خورد که ناگاه «شخصی از روی مسخرگی بشقابی را به هوا پرتاب کرد.» بشقاب در هوا می‌چرخید و در عین حال می‌لرزید. فاینمن بلافاصله معادله‌های حرکت بشقاب را نوشت و معادله‌ای به‌دست آورد که به دو نوع حرکت مربوط می‌شد. این به‌دست آوردن اهمیتی نداشت؛ دینامیک چرخش و لرزش سالها پیش شناخته شده بود. امّا تبدیل حرکت پیچیدهٔ بشقاب در حال پرواز به معادلات دیفرانسیل سرگرمی محض بود.

او به سراغ بته رفت: «هی هانس! من متوجه چیز جالبی شده‌ام.» امّا بته که گاهی نمی‌توانست به کُنهِ خُلق و خوی فاینمن پی‌ببرد، گیج شده بود: او گفت، «خُب، جالب است امّا چه اهمیتی دارد؟ چرا این کار را می‌کنی؟» فاینمن پاسخ داد،«ها! اصلاً هیچ اهمیتی ندارد. من فقط برای تفریح و سرگرمی این کار را می‌کنم.»

فاینمن، مانند یک نویسنده یا هنرمند که از انسداد خلاقیت رهایی می‌یابد، بار دیگر محیط طبیعی خود را بازیافته بود. در مدت کوتاهی، باز به الکترونها و مصیبتی که محاسبهٔ خود-انرژی الکترون فراهم آورده بود می‌اندیشید: «بازی کردن با این چیزها راحت و بی‌زحمت بود. مثل بازکردن درِ یک بطری بود:

همه چیز بدون زحمت جریان داشت. من تقریباً می‌کوشیدم تا مقاومت کنم! آنچه که می‌کردم اهمیتی نداشت، امّا سرانجام همه چیز کنار هم قرار گرفت. نمودارها و کُلّ کاری که جایزهٔ نوبل را برایش دریافت کردم ناشی از کار با همان بشقاب چرخنده و لرزندهٔ بی‌اهمیت بود.»

سه همایش

در تابستان سال ۱۹۴۷، بیست و پنج فیزیکدان در رمز هد این واقع در شلتر آیلند بین دو شاخهٔ پنجه مانند، در غرب لانگ آیلند، گردهم آمدند. حضور در همایش فقط با دعوت بود و نخبگان جامعهٔ فیزیک از جمله اُپنهایمر، بته، فاینمن، ویلر، ویلیس لم[1]، ایزیدور رابی[2] و جولیان شوینگر حضور داشتند. این همایش نوع امریکایی همایشهای سُولوی بود.

جولیان شوینگر معاصر فاینمن، و مانند فاینمن دربارهٔ نظریهٔ برهم‌کنشهای الکترون ـ فوتون، که به عنوان الکترودینامیک کوانتومی یا QED معروف شده بود، به شدت کار می‌کرد. زمینهٔ خانوادگی او ــ یهودی طبقهٔ متوسط و ساکن نیویورک ــ نیز مشابه با زمینهٔ فاینمن بود. امّا زندگی شوینگر که در ناحیهٔ مرفه مانهاتان بزرگ شده بود بسیار متفاوت از زندگی فاینمن در فار راک‌اوی دور از شهر بود. پدر شوینگر طراح با استعداد لباسهای زنانه بود. شوینگر در نوجوانی محجوب، استثنایی، و شدیداً علاقه‌مند به فیزیک و ریاضیات بود. وقتی وارد کالج شهر نیویورک* (CCNY) شد، هیچ چیز دیگری برای او اهمیت نداشت. او به کلاس نمی‌رفت، و وقت خود را در کتابخانه صرف خواندن کتابهای فیزیک پیشرفته می‌کرد؛ مقالات دیراک تأثیر فراوانی روی او داشت.

وضعیت درسی شوینگر در CCNY متزلزل بود تا اینکه برادر بزرگترش هارولد او را به لوید موتز[3]، دانشجوی تحصیلات تکمیلی در دانشگاه کلمبیا، معرفی کرد. موتز «دریافت که شوینگر، بسیار، بسیار خجالتی، درونگرا، مهربان و دوستدار موسیقی است.» درک او از ریاضیات و فیزیک «آن‌قدر بالاتر از دیگران بود که نمی‌شد او را با دیگران مقایسه کرد.» موتز فکر می‌کرد ممکن است استادش، ایزیدور رابی نیز تحت تأثیر قرار گیرد. چنین شد: شوینگر موضوعی را که در مقاله‌ای از اینشتین، دربارهٔ تفسیر مکانیک کوانتومی مطرح شده بود، برای رابی توضیح داد. رابی بعداً به خاطر آورد که «در یک نکته اندکی مشکل وجود داشت و این پسر با بیانی روشن، با استفاده از قضیهٔ مکمّلیت، بحث را فیصله داد. . . من شگفت‌زده شدم. این چیست، این کیست؟ به‌طوری که از آن پس می‌خواستم با او صحبت کنم.» رابی که رئیس گروه فیزیک و یک سیاست‌گذار ماهر و متنفذ پردیس دانشگاه بود، وسیله‌ای فراهم آورد تا شوینگر با وجود مدرک نه‌چندان خوب CCNY در کلمبیا پذیرفته شود. (اظهارنظر مساعد بته دربارهٔ مقاله‌ای که شوینگر نوشته بود، به این امر کمک کرد.) رابی می‌گوید، «پس از آن، همه‌چیز برای جولیان تغییر کرد، در واقع او عضو فی بتا کاپا** شد. یک شخصیت تازه.»

1. Willis Lamb 2. Isidor Rabi

*. CCNY مخفف City College of New York

3. Lloyd Motz

**. Phi Beta Kappa: انجمن شاگردان کالج و دانشگاه که در تحصیلات خود بسیار موفق بوده‌اند.

بی‌تردید رابی عامل این تغییر بود. گروه فیزیک دانشگاه کلمبیا تحت رهبری او یک مرکز پژوهشی مهم بود. سیلوان شوبر[1]، تاریخ‌نگار علم می‌نویسد، «همه [در گروه] عمیقاً خود را متعهد به فیزیک می‌دانستند، محرک همه ذکاوت، شوخ طبعی، جَذَبه ــ و گاهی خشم ــ رابی بود.» مورتون هامرمش[2]، یکی از کسانی که در آنجا بود، به خاطر می‌آورد که «عدهٔ زیادی در کلمبیا کار می‌کردند که مطلقاً به آنجا ربطی نداشتند. اگر کسی را می‌شناختید وارد معرکه می‌شدید.»

شوینگر کار تحقیقی دورهٔ کارشناسی خود در کلمبیا را پیش از آنکه فارغ‌التحصیل شود تکمیل کرده بود، و هنوز دانشجوی کارشناسی بود که مقاله‌ای دربارهٔ پراکندگی نوترون منتشر کرد و ادامهٔ آن کار، پایان‌نامهٔ دکتری او شد. او خجالتی بودنش را کنار گذاشت و شیوهٔ تدریس ماهرانه‌ای به دست آورد. شوینگر در غیاب رابی، مکانیک کوانتومی تدریس می‌کرد.

ویلیس لم[3] یکی دیگر از ستارگان رابی بود. او فارغ‌التحصیل شیمی از دانشگاه برکلی بود. در برکلی این به معنی شیمی فیزیک بود، بنابراین او زمینه‌ای در ریاضیات و فیزیک داشت تا بتواند وارد برنامهٔ تحصیلات تکمیلی فیزیک بشود، جایی که جاذبهٔ آن نظریه‌پردازان مستعد گروه اُپنهایمر بود. لم به مدت کافی با اُپنهایمر ماند تا پایان‌نامهٔ دکتری را به پایان رساند. او در سال ۱۹۳۸ دعوت رابی را پذیرفت و به کلمبیا رفت.

در طول جنگ، کار لم دربارهٔ نظریهٔ «مگنترون، magnetron» بود که ریزموجهایی برای سیگنالهای رادار تولید می‌کرد. او، مانند فرمی، نه تنها به عنوان نظریه‌پرداز، بلکه به عنوان آزمایشگر نیز مهارت داشت. لم ساخت پُرزحمت و فنون خلأ لازم برای ساختن و عمل کردن مگنترونها را از دست پروردهٔ دیگر رابی، پولی‌کارپ کوش[4]، آموخت. او پس از جنگ، با همین طریق آزمایشی با تأکید بر ویژگیهای عجیب اتم هیدروژن شبه‌پایدار، ادامه داد. اکتشاف عمدهٔ او، که در همایش شِلتر آیلند[5] اعلام شد وجود دو حالت هیدروژن با انرژیهای اندکی متفاوت بود که متخصصان طیف‌سنجی آنها را با برچسب‌های $2P_{\frac{1}{2}}$ و $2S_{\frac{1}{2}}$ نشان می‌دهند. این تفاوت، که به عنوان «جابه‌جایی لم» شناخته شد، خیلی کوچک می‌نمود، برای نظریه‌پردازان بسیار مهم بود، زیرا نظریهٔ غالب و متداول براساس معادلهٔ دیراک بود، به طور نادرست، دقیقاً انرژی یکسانی را بر هر دو حالت محاسبه می‌کرد: نظریهٔ دیراک آسیب‌پذیر بود. آن‌طور که شوینگر مطرح می‌کند: «واقعیتها باور نکردنی بودند: که بگوییم نظریهٔ مقدس دیراک در همه‌جا نقض می‌شود.»

فریمن دایسون[6]، یک انگلیسی که در کورنل به عنوان دانشجوی تحصیلات تکمیلی به بته پیوست یادآور می‌شود که آزمایشهای لم «موجی از پیشرفت» را به راه انداخت، موجی که نظریه‌پردازان را به یکی از بزرگترین دستاوردهایشان، یعنی یک نظریهٔ جدید الکترودینامیک کوانتومی رساند. او در نامه‌ای

1. Silvan S. Schweber 2. Morton Hammermesh 3. Willis Lamb 4. Polykarp Kusch
5. Shelter Island 6. Freeman Dyson

به‌منظور تبریک شصت و پنجمین سال تولد لم می‌نویسد: «در آن سالها که 'جابه‌جایی لم' موضوع اصلی فیزیک به شمار می‌آمد، سالهای طلایی برای همهٔ فیزیکدانان نسل من بود. برای نخستین‌بار شاهد آن بودید که یک جابه‌جایی بسیار اندک که اندازه‌گیری آن دشوار و دست‌نیافتنی است، تا چه حد به‌طور بنیادی تفکر ما را دربارهٔ ذرات و میدانها روشن می‌کند.»

این روشن شدن در سال ۱۹۴۸ در گردهمایی انجمن فیزیک امریکا در نیویورک و سپس در همایش دعوتی، این‌بار در پوکونو مانور[1]، پنسیلوانیا صورت گرفت که تقریباً وسط راه ساکرانتون و گذرگاه دلاوئر بود. اغلب شرکت‌کنندگان همایش شلتر آیلند آمده بودند و بور، دیراک، و ویگنر به آنها ملحق شده بودند. اکنون نوبت شوینگر بود که صحنه‌گردانی کند. او نظریهٔ دقیق الکترودینامیک کوانتومی را بسط داده بود که جابه‌جایی لم را به درستی محاسبه می‌کرد. یک جنبهٔ ضروری از نظریهٔ شوینگر، که از بعضی پیشینیانش قرض گرفته بود، روفتن همهٔ جملات بی‌نهایت از منظر و قرار دادن آنها در عاملهایی بود که شامل جرم و بار الکترونی اندازه‌گیری شده، بودند. این روال «باز بهنجارش» نظریه را از نظر ریاضی مشکوک می‌سازد: بی‌نهایتها هنوز در جای خود هستند، امّا آنها دیگر مانعی برای محاسبات به وجود نمی‌آورند.

نظریهٔ شوینگر پیچیده بود. او آن را در یک جلسهٔ ماراتونی در یک روز تمام، ارائه کرد. بجز اپنهایمر، معدودی دیگر هم بیانات او را تا آخر دنبال کردند. به‌نظر دایسون، نظریهٔ شوینگر «بنابر اصول متعارف ساخته شده و شاهکاری از فن ریاضی بود.»

فاینمن نیز در همایش پوکونو برنامه‌ای داشت، امّا چندان چشمگیر نبود. او هم، نظریهٔ کارآمدی از الکترودینامیک کوانتومی داشت که جابه‌جایی لم را محاسبه می‌کرد، امّا اساس آن شهودی و تصویری بود، آن چیزی نبود که مخاطبان برجستهٔ همایش پوکونو با آن مأنوس باشند. دایسون توضیح می‌دهد: «درک فیزیک فاینمن از این لحاظ برای مردم عادی دشوار بود، که او از معادلات استفاده نمی‌کرد. . . او جوابها را صرفاً به‌صورت ذهنی بدون مطرح کردن معادلات می‌نوشت. او تصویری فیزیکی از مسیر وقایعی که روی می‌دهند در ذهن داشت، و این تصویر راه‌حلها را با کمترین محاسبه به او می‌داد. بدیهی است کسانی که زندگی خود را به حل کردن مسئله گذرانده بودند، از کار او مبهوت می‌شدند. ذهن آنان تحلیلی؛ امّا ذهن او تصویری بود.»

فاینمن می‌دانست که کارش درست است، امّا برای قانع کردن دیگران کمبود وسیلهٔ ریاضی داشت. او به مهرا گفته بود، «این مسئله برای من چنان بود که گویی همهٔ تفکرم فیزیکی است، من کارهایم را با روشهای حاضر و آماده که خودم ابداع کرده‌ام، انجام می‌دهم. من یک طرح ریاضی ندارم که دربارهٔ آن بحث کنم. در واقع یک روش ریاضی کشف کرده‌ام، که از آن همهٔ نمودارها، قاعده‌ها و نتایج حاصل می‌شوند. تنها راه دانستن درستی یکی از فرمولهای من این است که نتیجهٔ درستی از آن بگیریم.»

کسی که نظریه‌های ظاهراً ناهمگون فاینمن و شوینگر را با هم جمع کرد، و آنها را برای استفادهٔ فیزیکدانان عادی وحدت بخشید، فریمن دایسون انگلیسی بود. دایسون مانند شوینگر استثنایی بود؛

1. Pocono Manor

یعنی حتی ازکودکی شیفتهٔ ریاضیات و علم بود. شوبر[1] می‌نویسد «والدین فریمن عمیقاً علاقه‌مند به مسائل فکری او بودند ــ و با داشتن فریمن دقیقاً صاحب همان کودکی بودند که می‌خواستند.» او را در هشت سالگی به یک مدرسهٔ شبانه‌روزی معروف به نام تویی‌فورد کالج[2] فرستادند. این مدرسه فقط در فاصلهٔ سه مایلی از خانهٔ فریمن بود، امّا والدینش به دیدن او نمی‌رفتند، او هم بجز روزهای تعطیل به خانه نمی‌رفت. او بعدها به یاد می‌آورد که آنجا «محیطی عجیب و ترسناک» بود.

امّا عملکرد تحصیلی او برجسته و ممتاز بود، وقتی دوازده ساله بود امتحان بورس تحصیلی کالج وینچستر[3] را گذراند که شوبر متذکر می‌شود، «اوج فکری نظام دبیرستان خصوصی انگلیسی» بود. دایسون نه‌تنها بورسیه را بُرد، بلکه در این رقابت اول شد. پدرش نتوانست هیجان این افتخار را در خود کنترل کند، او می‌گفت، «این رویداد، در خانوادهٔ ما مهمتر از دریافت جایزهٔ نوبل بود.»

دایسون در وینچستر، تحصیل ریاضی را با جدیت تمام آغازکرد و جوایز بسیاری گرفت. او همچنین استعداد فوق‌العاده‌ای برای یادگیری زبانهای گوناگون داشت و فرصتی یافت تا ویولون‌نوازی شایسته و قهرمان مدرسه در پرش اسب با مانع شود. دوستی که همزمان با او در وینچستر بود، به یاد می‌آورد که، «او بسیار بشاش، تیزهوش، لاغر اندام، با چشمانی نافذ بود.»

دایسون طبعاً از وینچستر به کمبریج رفت، و با یک بورس وارد کالج ترینیتی شد. اکثر ریاضیدانان و فیزیکدانان کمبریج برای خدمت در جنگ (سال ۱۹۴۱ بود) آنجا را ترک کرده بودند، امّا دیراک فیزیکدان و جی.اچ. هاردی[4] و آبرام بسیکویچ[5] ریاضیدان در دسترس بودند. دایسون اصول مکانیک کوانتومی دیراک را در وینچستر «بدون هیچ شناختی» خواند و امیدوار بود که آن را از درسهای دیراک بیاموزد. امّا ناامید شد از اینکه درسها درست، تقریباً کلمه به کلمه مثل کتاب بودند. هاردی در آن زمان افسرده، منزوی و «نومیدکننده» بود. از سوی دیگر بسیکویچ ثابت کرد که معلمی خوب و دوستی مهربان است.

دایسون برای سرگرمی به نوعی صخره‌نوردیِ خطرناک موسوم به «صعود شبانه» پرداخت. برای این کار افراد به جای بالا رفتن از کوه به کمک طناب، آزادانه از لوله‌های بخار، لوله‌های فاضلاب، و لبه‌های پنجره در ساختمان دانشگاه بالا می‌رفتند. این ورزش شبانه بود، بنابراین می‌توانستند از گیرافتادن اجتناب کنند. دایسون و دوستش پیتر سانکی از بیشتر ساختمانهای توصیف شده در راهنمای ورزشی صعودکنندگان شب کمبریج بالا رفتند. دایسون به شوبر گفت، «خیلی خوب بود که در شب بیرون می‌رفتیم، به بالای ساختمانها می‌رسیدیم. . .[و] به طنین ناقوسها گوش می‌کردیم.»

دورهٔ تحصیلی دایسون در کمبریج به‌علت دو سال خدمت به‌عنوان یک دانشمند غیرنظامی در مقر فرماندهی بمب‌افکنهای ارتش سلطنتی، قطع شد. وظیفهٔ او تحلیل راهبردهای حمله‌های هوایی

1. Schweber 2. Twyford College 3. Winchester College 4. G.H. Hardy
5. Abram Besicovitch

شدید و خطرناک، سپس هدایت آنها به سوی شهرهای آلمان و پیشنهاد اصلاحات بود. توصیه او اغلب چیزی بیشتر از یک دریافت همگانی نبود، امّا این چیزی نبود که فرماندهٔ کل قوا می‌خواست بشنود. دایسون به این نتیجه می‌رسید که «فرماندهی بمب‌افکن را باید بعضی از جامعه‌شناسان اختراع کرده باشند تا به روشنیِ هر چه بیشتر، جنبه‌های شیطانی علم و تکنولوژی را نشان دهند.»

پس از جنگ و بازگشت به کمبریج، برای دایسون فیزیک نظری جالبتر از ریاضی به‌نظر می‌رسید، و عده‌ای هم به همان دلیل جامعهٔ فیزیک را ترک می‌کردند. دوستی می‌گفت، «فیزیک نظری به چنان افتضاحی کشیده شده است، که من تصمیم گرفته‌ام به ریاضی محض روی آورم.» واکنش دایسون این بود که: «عجیب است، من دقیقاً به همین دلیل تصمیم گرفته‌ام به فیزیک نظری تغییر رشته بدهم.» او می‌دانست چه می‌کند. فیزیک، به ویژه در امریکا در جوش‌وخروش و غلیان بود و فرصتهایی برای همکاریهای بزرگ وجود داشت. یکی از استادان راهنمای دایسون در کمبریج، به نام جی.آی. تیلور، دانش‌آموختهٔ لوس‌آلاموس، به او توصیه کرد که به کورنل برود و با بته کار کند. تیلور در توصیه نامه به بته نوشت که، «به عقیدهٔ من، دایسون بهترین ریاضیدان در انگلیس است.»

دایسون در پاییز سال ۱۹۴۷ وارد کورنل شد و به عنوان یک دانشجوی تحصیلات تکمیلی متعارف نام‌نویسی کرد (او هنوز مدرک دکتری نگرفته بود، و هرگز هم نگرفت). در بدو امر او در نامه‌ای به پدر و مادرش، مطالبی تردیدآمیز دربارهٔ بته نوشت به این مضمون که: «خودِ بته چهره‌ای عجیب و غریب دارد، بسیار درشت اندام و بی‌قواره است، با یک جفت کفش بسیار کهنهٔ گِلی. به‌نظر می‌رسد بسیار مهربان و صمیمی باشد، امّا تقریباً کاریکاتوری از یک استاد است؛ با وجود این، چون نفر دوم در لوس‌آلاموس است، پس باید یک سازمان‌دهندهٔ درجهٔ یک باشد.»

یک ماه بعد دایسون شاهد چیزهایی بسیار بیشتر از کفشها و طرز رفتار بته بود. او به خانواده‌اش نوشت که، «از بلند نظری، خوش‌قلبی و ایثارگری بته مبهوت شده است.» او به قدری تحت‌تأثیر افراد دیگر گروه کورنل، به ویژه فاینمن قرار گرفت که به زودی دوست صمیمی او شد.

دایسون در سالی که همایش شلتر آیلند برپا بود به گروه بته پیوست و در سال بعد به گردهمایی پوکونو رفت، که در آن شوینگر نظریه‌اش را در یک نمایش طاقت‌فرسا از مهارت و استادی ریاضی ارائه کرد و فاینمن کوشید که نظریه‌اش را بدون ریاضیات کافی که مناسب حال مخاطبان باشد توضیح دهد. دایسون در هیچ یک از این دو همایش شرکت نکرد ــ او صرفاً یک دانشجوی تحصیلات تکمیلی بود. امّا از یادداشتهایی که ویلر در گردهمایی پوکونو تهیه کرده بود، نکات مهم گفتارهای مهم شوینگر و فاینمن را به دست آورد. او در نظر داشت تا با حضور در سمپوزیوم تابستانی دانشگاه میشیگان در آن آربر[1] که قرار بود شوینگر دربارهٔ نظریه‌اش سخنرانی کند، نکات بیشتری بیاموزد. او به موقع با اتوبوسهای گری‌هوند[2] که وسیلهٔ مسافرت مطلوبش در امریکا بود به آن آربر رسید.

1. Ann Arbor 2. Greyhound

سخنرانیهای درسی شوینگر «عالی بود» و دایسون جزئیات آنها را درگفتگو با اوکاوید. امّا نظریهٔ شوینگر، گرچه دارای انسجام ریاضی بود، به‌نظر دایسون «به‌صورت حیرت‌انگیزی پیچیده» می‌نمود. او این‌گونه بحث را «درست» نمی‌دانست. وقتی این نظریه در سخنرانیهای شوینگر مطرح می‌شد، «برای فهم آن مهارتهایی لازم بود که هیچ‌کس بجز شوینگر نداشت. وقتی به این سخنرانیها گوش می‌دادید نمی‌توانستید انگیزهٔ آن را بفهمید! همه‌چیز در یک دستگاه ریاضی عجیب پنهان بود.»

دایسون از آن آربر عازم سفر تماشایی دیگری با اتوبوس گری‌هوند بود، این‌بار به سانفرانسیسکو و برکلی. دایسون «دربازگشت از این سفر» می‌نویسد،

> وقتی در روز سوم وقتی، از نبراسکا می‌گذشتیم ناگهان چیزی اتفاق افتاد. مدت دو ماه بود که من دربارهٔ فیزیک فکر نکرده بودم، و اکنون گویی در ضمیر خودآگاه من انفجاری صورت گرفت. نمودارهای فاینمن و معادلات شوینگر در مغز من با وضوحی بی‌سابقه، شروع به جورشدن کردند. به مدت یک یا دو ساعت، قطعه‌های مطالب را تنظیم و بازآرایی کردم. آنگاه دانستم که همهٔ آنها با هم جور درمی‌آیند. مداد و کاغذی نداشتم، امّا همه‌چیز به‌قدری واضح بود که نیاز به یادداشت‌کردن نداشتم. فاینمن و شوینگر به یک مجموعه از اندیشه‌ها از دو جهت متفاوت می‌نگریستند. با سر هم کردن دو روش، نظریه‌ای از الکترودینامیک کوانتومی به‌دست می‌آمد که دقت ریاضی شوینگر را با انعطاف‌پذیری عملی فاینمن ترکیب می‌کرد. سرانجام یک نظریهٔ سرراست میانه‌رو داشتیم.

دایسون «نظریهٔ میانه‌روی» خود را در پایان ژانویهٔ سال ۱۹۴۹، در یک گردهمایی انجمن فیزیک امریکایی، ارائه کرد. نتیجه به سرعت موفقیت‌آمیز، و دایسون مشهور شد. اظهارنظر فاینمن این بود «خُب، داک، پیروز شدی.»

برحسب اتفاق، یک بازیگر اصلی چهارم، علاوه بر فاینمن، شوینگر، و دایسون، در ماجرای الکترودینامیک کوانتومی، وجود داشت. او شینی‌چیرو تومواگا[1]، متولد ۱۹۰۶ در توکیو، پسر یک استاد فلسفه بود. درکودکی تعادل چندانی نداشت و اغلب مریض بود، از این رو برای سرگرمی به آزمایشهای خانگی می‌پرداخت. در سال ۱۹۱۳ خانوادهٔ او عازم توکیو شد، در آنجا او در یک دبیرستان معتبر موفق عمل کرد. دانش‌آموز ممتاز دیگر دبیرستان و دوست نزدیک توموناگا، هیدِکی یوکاوا[2] بود، که برای نظریه‌اش دربارهٔ نظریهٔ مزونی نیروهای هسته‌ای شهرت یافت.

در سال ۱۹۲۳، توموناگا و یوکاوا وارد دانشگاه کیوتو شدند. آنان در سال نهایی کارشان، با خواندن مقاله‌های هایزنبرگ، دیراک، جوردن، شرودینگر و پائولی، بر مکانیک کوانتومی متمرکز شدند. آنان هایزنبرگ و دیراک را در سال ۱۹۲۹، هنگامی که این دو نظریه‌پرداز کوانتومی در توکیو سخنرانی می‌کردند، از نزدیک دیدند. وقتی توموناگا فارغ التحصیل شد ــ ژاپن وارد سالهای رکود شده بود ــ و به‌ندرت کار پیدا می‌شد. امّا او این شانس را داشت که مورد توجه یوشیو نیشینا[3] ــ بورِ فیزیک ژاپن ــ واقع شده

1. Sini-Tiro Tomonaga 2. Hideki Yukawa 3. Yoshio Nishina

بود. نیشینا، بین سالهای ۱۹۲۱ و ۱۹۲۸ در مراکز عمدهٔ اروپایی تحصیل کرده بود که فیزیکدانان گِرد هم می‌آمدند: کمبریج، گوتینگن، کپنهاگ، و هامبورگ. وقتی به ژاپن بازگشت، به‌عنوان مدیر پژوهش در مؤسسهٔ پژوهشهای فیزیکی و شیمیایی (Rikagen Kenkyusho به اختصار Riken) در توکیو منصوب شد. نیشینا از توموناگا دعوت کرد به‌عنوان دستیار به آزمایشگاه او در رینکن بپیوندد. بعدها توموناگا به خاطر آورد «این فرصتی طلایی برای من بود، زیرا در آن روزها آزمایشگاه سرشار از تازگی بود. تمام اعضای آن جوان بودند؛ حتی رئیس بزرگ نیشینا در اوایل سالهای چهل عمرش بود. ما هر روز دور هم جمع می‌شدیم و گروه پرشوری برای بحث دربارهٔ مسائل مختلف، نه تنها فیزیک بلکه ترتیب دادن مهمانیها و گردشها و غیره بودیم.»

در طول سالهای ۱۹۳۰ گروه نظری در رینکن از جمله نیشینا و توموگانا پیشرفتهای الکترودینامیک کوانتومی را از هر نظر به‌دقت دنبال می‌کردند. آنان با ترجمهٔ «پُرزحمت» کتاب دیراک از انگلیسی به ژاپنی مخاطبان ژاپنی را با او آشنا کردند. در سال ۱۹۳۷ توموناگا به لایپزیک سفر کرد تا به مدت دو سال با هایزنبرگ کار کند. پروژه‌های او در لایپزیک نویدبخش نبود، و از بی‌طاقتی افسرده شد. او در دفتر خاطرات خود نوشت، «در واقع کارم به بداقبالی انجامید! اخیراً بدون هیچ دلیلی احساس غم و اندوه بسیار می‌کنم. . . چرا نمی‌توان طبیعت را واضحتر و سرراستتر درک کرد؟»

با تشویق و حمایت نیشینا، توموناگا کار نظری خود را در اوایل سالهای ۱۹۴۰ که جنگ به اقیانوس آرام رسید و به ژاپن نزدیک شد ادامه داد. اکنون او بر الکترودینامیک کوانتومی متمرکز شده بود، می‌کوشید تا فراتر از دیراک برود و با مسئلهٔ خود-انرژی الکترون و به‌طور ضمنی با بلای بی‌نهایتها دست‌وپنجه نرم کند. در سال ۱۹۴۳، او سری مقالاتی در یک مجلهٔ ژاپنی با عنوان پیشرفت در فیزیک نظری که شامل گلچینی از نوشته‌های علمی بود، منتشر کرد. به‌طوری که دایسون می‌گوید، «این مقالات به بیان ساده و روشن بدون فرمول و هیچ‌گونه شرح و تفصیل ریاضی، ایدهٔ مرکزی نظریهٔ جولیان شوینگر را بیان می‌کردند.»

این مربوط به سال ۱۹۴۳، پنج سال پیش از انتشار نظریهٔ شوینگر و چهار سال پیش از آن بود که لم نتایج آزمایشی مهمش را اعلام کند. ژاپن در آن زمان از جهان غرب منزوی شده بود و مقالات توموناگا مورد توجه واقع نشد. سرانجام شناسایی آنها بعد از جنگ به عمل آمد—توموناگا با خانه‌ای خراب و مواد غذایی موجود، اندک کاری یافت که «فکر کردن لازم نداشت» و آن ترجمهٔ مقالات زمان جنگ او به زبان انگلیسی بود. ترجمه، وقتی کار پُرمشغله‌ای شد که او مطالبی دربارهٔ آزمایشهای لم را در ستون علمی مجلهٔ نیوزویک، خواند. اکنون او می‌توانست به اهمیت کامل کار قبلی‌اش پی‌ببرد و بداند که چگونه کارش را به‌گونه‌ای ادامه دهد که شامل برنامهٔ باز بهنجارش باشد. در سال ۱۹۴۸، او خلاصه‌ای از تحقیقات اخیر و زمان جنگش را برای اُپنهایمر ارسال کرد. اُپنهایمر در یک تلگرام فوری به او پاسخ داد که «گزارش خلاصه‌ای از وضع و دیدگاههای فعلی خود را برای انتشار فوری در مجلهٔ فیزیکال ریویو ارسال فرمایید.»

سومین همایش دعوتی، پس از جنگ در آوریل ۱۹۴۹ در اُولداستون درکنار رودخانهٔ هادسون در پیکزسکیل نیویورک برگزار شد. عنوانهای مطلوب برای بحث روش فاینمن و تلفیق دایسون از دیدگاههای فاینمن و شرودینگر ــ و اکنون از نقطه‌نظرهای تومونا گا ــ بود.

پی‌نوشتی بر این داستان: جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۶۵ میان فاینمن، شوینگر و تومونا گا تقسیم شد. دایسون سهمی نداشت، گرچه بسیاری معتقد بودند که او شایستهٔ چنین افتخاری هست ــ به‌نظر می‌رسد او قربانی این قاعده شد که بیش از سه نفر نمی‌توانند در جایزهٔ نوبل سهیم باشند.

QED* و QED

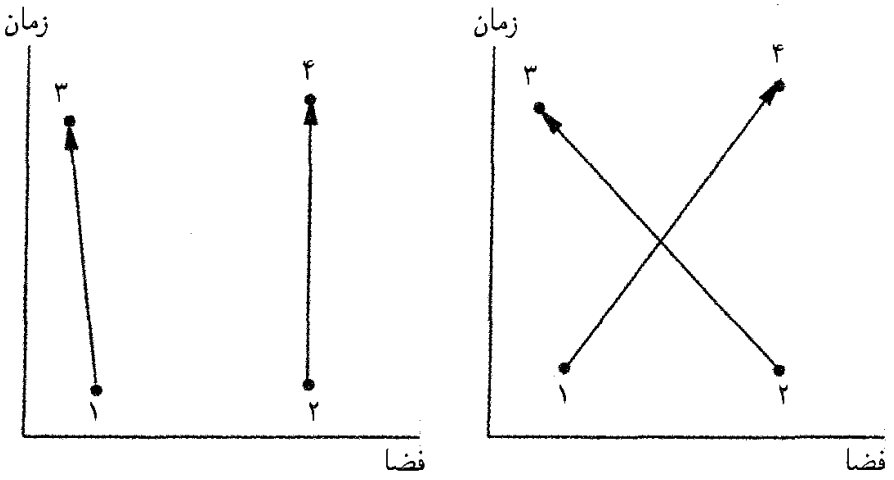
فاینمن درکتاب بسیار خوبش برای خوانندهٔ عادی، QED می‌نویسد، نظریهٔ الکترودینامیکی کوانتومی «گل سرسبد فیزیک ــ افتخارآمیزترین دارایی» ما است. کمتر کسی ممکن است با این گفته موافق نباشد. این نظریه در مورد یک عالم از آثار فیزیکی با موفقیت کامل به‌کار گرفته شده است. بعضی از این پدیده‌ها اندازه‌گیریهای صحیح و با دقت شگفت‌انگیزی را ممکن می‌سازد، که با رهیافت فاینمن به QED سازگارند. مثلاً شدت میدان مغناطیسی که یک الکترون با خود دارد، یعنی «گشتاور مغناطیسی»، به مقدار ۱٫۰۰۱۱۵۹۶۵۲۲۱ (برحسب یکاهای معین) با عدم قطعیتی در حدود ۴ در آخرین رقم اندازه‌گیری شده است. (این عدد در نظریهٔ دیراک دقیقاً ۱ پیش‌بینی شده است.) نظریه مقدار ۱٫۰۰۱۱۵۹۶۵۲۴۶ را، با عدم قطعیتی در حدود ۲۰ در آخرین رقمها، برای گشتاور مغناطیسی الکترون محاسبه می‌کند. اگر بتوانیم فاصله از نیویورک تا لوس‌آنجلس را با این دقت اندازه‌گیری کنیم، دقتی تا حدود ضخامت موی انسان خواهیم داشت.

QED به دو نوع از ذرات بنیادی، الکترونها و فوتونها، و راههای متعدد برهم‌کنش آنها می‌پردازد. مطابق معمول در مکانیک کوانتومی، این نظریه به محاسبات آماری محدود می‌شود. دامنه‌ای برای هر رویداد محاسبه می‌شود که از آن احتمال وقوع رویداد را می‌توان تعیین کرد. روشی عمیقتر از احتمال برای کندوکاو نداریم. فاینمن می‌نویسد، «در زیر این تحلیل از طبیعت، 'چرخ و دنده‌ای' وجود ندارد، اگر می‌خواهید آن را بفهمید، این آن چیزی است که می‌باید بپذیرید.»

کار جالب این نظریه تشخیص دقیقاً سه نوع کنش میان الکترونها و فوتونها است: فاینمن در QED، این سه نوع کنش را به این صورت توصیف می‌کند، (۱) «فوتون از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر می‌رود»؛ (۲) «الکترون از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر می‌رود»؛ و (۳) «الکترون فوتونی گسیل یا جذب می‌کند.» هر کنش دامنهٔ معینی دارد. اگر دو نقطهٔ مذکور را A و B در نظر بگیریم، می‌توانیم فاینمن را در QED، با استفاده از $P(B$ تا $A)$ برای نشان دادن دامنهٔ نخستین کنش، و $E(B$ تا $A)$ را برای دومین واکنش، دنبال کنیم. دامنه برای کنش سوم فقط عددی است در حدود $-۰٫۱$ (برحسب یکاهای معین)، که با بار الکتریکی الکترون هم برابر است. فاینمن در QED برای نشان دادن این عدد از حرف j استفاده می‌کند.

*. QED مخفف quantum electrodynamics است.

بنابراین در محاسبهٔ QED برای یک فرایند به شیوهٔ فاینمن، مثلاً دو الکترون از نقاط ۱ و ۲ در زمان و فضا آغاز و در نقاط ۳ و ۴ به پایان می‌رسند، که در «نمودار فاینمن» در سمت چپ شکل ۲۵ـ۱ نشان داده شده است، در این صورت باید دو دامنهٔ $E(۱ \text{ تا } ۳)$ و $E(۲ \text{ تا } ۴)$ را بدانیم.



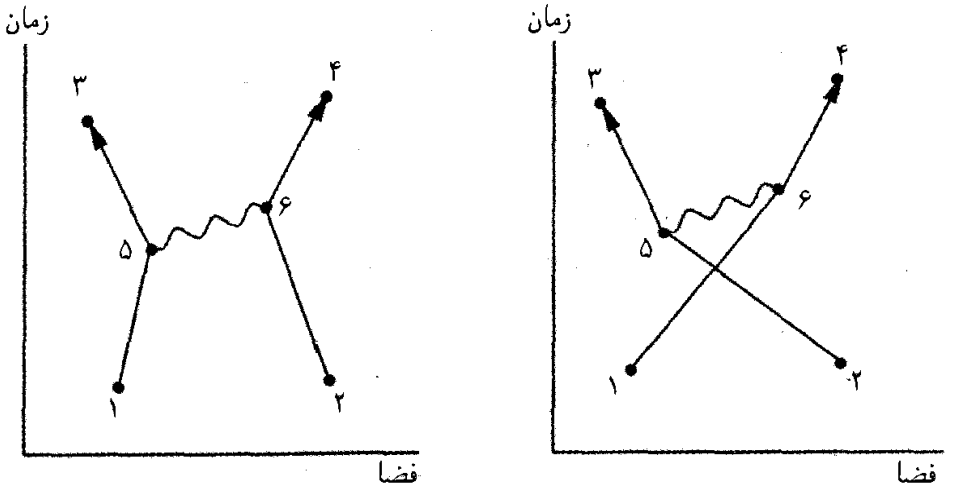
شکل ۲۵ـ۱ نمودار فاینمن برای دو مسیری که دو الکترون می‌توانند از نقاط ۱ و ۲ در فضا و زمان به نقاط ۳ و ۴ برسند.

در یک محاسبهٔ مفصلتر، به مجموعه قوانینی به نام «قواعد فاینمن»، برای یافتن شکل ریاضی دو تابع E رجوع خواهیم کرد. در این مورد چون فوتونی دخیل نیست، بنابراین P_S و j_S وارد محاسبه نمی‌شوند. دامنهٔ انجام فرایند در این راه به‌صورت $E(۲ \text{ تا } ۴) \times E(۱ \text{ تا } ۳)$ است. این تنها راهی است که الکترونها می‌توانند از نقاط ۱ و ۲ به نقاط ۳ و ۴ برسند. نمودار سمت راست شکل ۲۵ـ۱ راه دیگری را نشان می‌دهد که دامنهٔ آن به‌صورت متفاوت $E(۲ \text{ تا } ۳) \times E(۱ \text{ تا } ۴)$ است. ترکیب کردن (جمع یا تفریق) دو دامنه، تقریب اولیه‌ای برای رویداد به‌دست می‌دهد.

چون دو الکترون حامل بار الکتریکی‌اند، از طریق نیرویی که با یک فوتون اعمال می‌شود با هم برهم‌کنش می‌کنند. این احتمال در نمودار شکل ۲۵ـ۱ مشخص نیست. نمودارهای فاینمن که در شکل ۲۵ـ۲ آمده، دو راه یا دو رویداد را نشان می‌دهد که با میانجیگری یک فوتون تحقق می‌یابند. یک الکترون، نخست از نقطهٔ ۱ به نقطهٔ ۵ می‌رود. سپس این الکترون با گسیل یک فوتون، که با یک خط موجی نشان داده شده، از نقطهٔ ۵ به نقطهٔ ۳ ادامهٔ مسیر می‌دهد. الکترون دوم از نقطهٔ ۲ شروع می‌کند، در نقطهٔ ۶ فوتون را جذب می‌کند، و از نقطهٔ ۶ به نقطهٔ ۴ ادامهٔ مسیر می‌دهد. اکنون محاسبه می‌باید شامل دامنه‌های $E(۱ \text{ تا } ۵)$، $E(۵ \text{ تا } ۳)$، $E(۲ \text{ تا } ۶)$ و $E(۴ \text{ تا } ۶)$ برای الکترونها، $P(۵ \text{ تا } ۶)$ برای فوتون و دو بار j، یکی برای گسیل فوتون و بار دیگر برای جذب، باشد. شکل محاسبه، که مستقیماً از نمودار به‌دست می‌آید عبارت است از

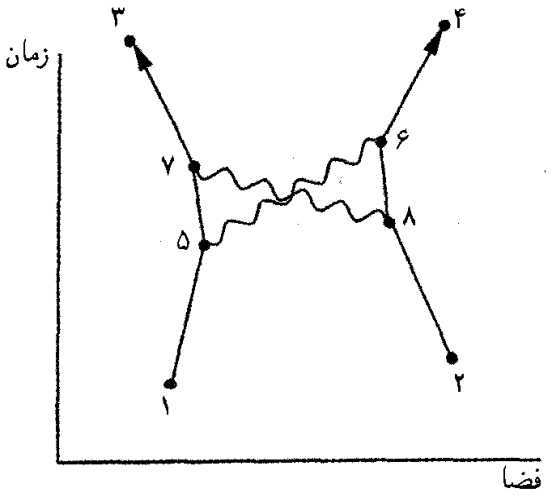
$$E(۵ \text{ تا } ۱) \times j \times E(۳ \text{ تا } ۵) \times P(۶ \text{ تا } ۵) \times E(۶ \text{ تا } ۲) \times j \times E(۴ \text{ تا } ۶)$$

برای تقریب بهتر دامنهٔ رویدادمان، این نتیجه را به دو نتیجهٔ اوّل اضافه می‌کنیم. توجه داشته باشید که j دو بار در محاسبه به‌صورت حاصلضرب $j \times j = j^۲$ وجود دارد. چون اندازهٔ j کوچک است (در



شکل ۲۵ـ۲ نمودارهای فاینمن برای دو مسیر دیگر که الکترونها می‌توانند از نقاط ۱ و ۲ در فضا و زمان به نقاط ۳ و ۴ برسند. این مسیرها شامل برهم‌کنش بین الکترونها با میانجیگری یک فوتون است.

حدود ۰/۱)، و حاصلضرب j^2 باز هم کوچکتر است (در حدود ۰/۰۱)، این جمله در مقایسه با جملهٔ اوّل سهم کمتری در دامنهٔ کل رویداد دارد. نمودار فاینمن در سمت راست شکل ۲۵ـ۳ راه دیگر امکان وقوع رویدادی را نشان می‌دهد، با یک برهم‌کنش به میانجیگری یک فوتون. فوتونی که در این نمودارها به‌صورت خط موجی نمایان می‌شود برهم‌کنش الکترومغناطیسی بین دو الکترون را نشان می‌دهد، امّا این فوتون مدت کوتاهی وجود دارد، یعنی یک فوتون عادی نیست که بتواند فاصله‌های بزرگی را طی کند. این فوتون تنها برای مدت بسیار کوتاهی وجود دارد که اصل عدم قطعیت آن را امکان‌پذیر می‌سازد. به زبان فیزیک ذرات، این فوتون یک «فوتون مجازی است.»

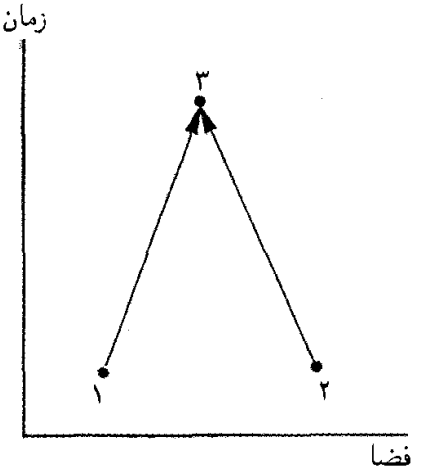


شکل ۲۵ـ۳ نمودار فاینمن برای راههایی که دو الکترون می‌توانند از نقاط ۱ و ۲ به نقاط ۳ و ۴ برسند. در این نمودار هر الکترون یک فوتون گسیل و جذب می‌کند.

محاسبهٔ فاینمن امری نامحدود است. می‌توانیم ترسیم نمودارهای فاینمن و محاسبات مربوط به آنها را تا بی‌نهایت ادامه دهیم. در شکل ۲۵ـ۳ یک امکان بیشتر برای رویداد دو الکترونی ترسیم شده

است. در اینجا دو فوتون دخالت دارند و هر دو الکترون یک فوتون گسیل و جذب می‌کنند. اکنون محاسبه شامل چهار عامل j است، یعنی، حاصلضرب j^4، که تقریباً برابر ۰٫۰۰۰۱ است، و سهم آن در دامنهٔ کلی برای رویداد، در مقایسه با مواردی که قبلاً دیده‌ایم، باز هم کمتر است. خوشبختانه برای آنان که محاسباتی از این نوع را دنبال می‌کنند، الگویی را که مشاهده می‌کنیم یک الگوی کلی است. هر چه نمودارهای فاینمن بیشتر و پیچیده‌تر شود، محاسبات مربوط به آنها کم اهمیت‌تر و بی‌ارزشتر می‌شود.

در این روایت تاکنون، یک جنبهٔ مهم رفتار الکترون، اسپین، و یک اصل توانمند از قلم افتاده است. این اصل که دو الکترون در یک حالت اسپینی نمی‌توانند یک نقطه در فضا و زمان را اشغال کنند. بنابراین دامنهٔ نظیر نمودار شکل ۲۵ـ۴ که دو الکترون با هدف فضاـزمان یکسان را نشان می‌دهد، هرگاه دو الکترون یک حالت اسپینی داشته باشند، می‌باید برابر صفر باشد. این راه دیگری برای بیان اصل طرد پائولی است، که پیش از این به زبان اعداد کوانتومی معرفی کردیم. ایدهٔ کلی این است که دو الکترون از یک نوع به هم نزدیک نمی‌شوند، در واقع آنها عمداً از یکدیگر اجتناب می‌کنند.



شکل ۲۵ـ۴ نمودار فاینمن برای دو الکترون که می‌خواهند یک نقطه از فضا و زمان را اشغال کنند. دامنهٔ این فرایند صفر است هرگاه دو الکترون یک حالت اسپینی داشته باشند، و صفر نیست اگر آنها دارای حالتهای اسپینی متفاوت باشند.

نمودارهای فاینمن به یاری اصل طرد، بسیاری از داستان الکترونها، فوتونها و نیروی الکترومغناطیسی حاکم بر رفتار آنها را بیان می‌کنند. فاینمن در QED مطرح می‌کند که با این نظریه «منبع سرشار فوق‌العاده‌ای از تنوع و هیجان ارائه می‌شود که از اصل طرد و تکرار چند باره از سه کُنش بسیار سادهٔ $P(B\text{ تا }A)$، $E(B\text{ تا }A)$، و j ناشی می‌شود.»

دختری با مایوی خال‌خالی

افکار منفی فاینمن دربارهٔ کورنل و ایتاکا در یک روز برفی زمستان سال ۱۹۵۰ آغاز شد. اتومبیل او در برفابه سُر خورد و او مجبور شد بیرون بیاید و با زنجیرهای چرخ دست‌وپنجه نرم کند، و به فکر آب و هوای بهتر بیفتد. فاینمن در یکی از کتابهایش می‌گوید «در آن لحظه تصمیم گرفتم که این وضعیت احمقانه است، باید جایی در دنیا وجود داشته باشد که این مسئله را ندارد.»

چنین جایی وجود داشت، و فاینمن وقتی آن را پیدا کرد که رابرت باخِر[1] که قبلاً در کورنل و دوست بته، اما مصون از فکر قُر زدن نبود، او را به کالتک در پاسادنای کالیفرنیا دعوت کرد. فاینمن در کتاب حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن می‌نویسد «وقتی او را ملاقات کردم بسیار باهوش بود و زیروبم مرا می‌دانست، بنابراین گفت 'فاینمن، من این اتومبیل اضافی را دارم که به تو قرض خواهم داد، پس می‌توانی به هالیوود و سان‌ست استریپ بروی. خوش باش'. بنابراین هرشب با اتومبیل به سان‌ست استریپ ــ به کلوپهای شبانه و بارها و بازیها می‌رفتم. این چیزهایی بود که از لاس‌وگاس دوست داشتم ــ دختران زیبا، برنامه‌های جالب و غیره. بنابراین باخر می‌دانست چطور مرا به کالتک علاقه‌مند کند.»

بخش دیگر جهان که در ادامهٔ هواشناسی، ایتاکا را شکست می‌داد برزیل بود. فاینمن در سال ۱۹۴۹ برای شش هفته به ریودوژانیرو رفته بود، و امیدوار بود دوباره به آنجا برگردد. باخر گفت که می‌تواند ترتیب این کار را بدهد. کالتک به او یک پُست استادی پیشنهاد کرد که با فرصت مطالعاتی برای سال تحصیلی ۵۲-۱۹۵۱ در برزیل آغاز می‌شد. فاینمن با کمال تأسف ــ او هنوز بیشترین احترام را برای هانس بته قائل بود ــ پذیرفت.

فاینمن در برزیل در هتل پالاس میرامار در کوپاکابانا اقامت کرد. او صبحها (به زبان پرتغالی) در مرکز تحقیقات فیزیک در ریو تدریس می‌کرد و بعدازظهرها به کنار دریا می‌رفت. او با زنان مهربانی در ساحل و در بارها آشنا شد. یک بعدازظهر وقتی تمایل شدیدی به نوشیدن تک و تنها احساس کرد، متوجه شد که در دام اعتیاد به الکل افتاده است. او در کتاب حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن می‌نویسد «این احساس شدید که آن را درک نمی‌کردم باعث وحشت من شد. ببینید، من چنان از فکر کردن لذت می‌بردم که نمی‌خواستم دلپذیرترین ماشینی که زندگی را چنان سرگرم‌کننده می‌سازد از دست بدهم.» پس از آن، الکل را کنار گذاشت، اما دلیلی نداشت که در مهمانیها از تظاهر به مستی خودداری کند.

در حوالی پایان مدت اقامتش در برزیل فاینمن دوستی ("دختری زیبا با موهای بافته") را به موزه برد. در بخش مصری موزه، وقتی دربارهٔ مراسم تدفین مصریان سخنرانی می‌کرد ناگهان به یاد ماری لوئیز بل[2]، یک دوستش در ایتاکا افتاد که اکنون در پاسادنا زندگی می‌کرد. ناگهان احساس دلتنگی شدیدی کرد و در نامه‌ای به او پیشنهاد ازدواج داد. او این پیشنهاد را پذیرفت و آنها در ژوئن ۱۹۵۲، که فاینمن از برزیل برگشت، ازدواج کردند. اما، این ازدواج یک اشتباه بود، زیرا شخصیت آنها با هم جور نبود و چهار سال بعد از هم جدا شدند.

سومین تلاش فاینمن در جهت ازدواجی بادوام موفقیت‌آمیز بود. او گوئینت هاوئارت[3] را در کنار دریاچهٔ ژنو در سویس ملاقات کرد؛ او یک مایوی خال‌خالی پوشیده بود. فاینمن در یک گردهمایی در

1. Robert Bacher 2. Mary Louise Bell 3. Gweneth Howarth

ژنو شرکت کرده بود. گوئینت از محیط بستهٔ شهرش در یورک شایر می‌گریخت. او می‌خواست در سفر به دور دنیا، با کارکردن هزینهٔ خود را تأمین کند: اولین توقف او در ژنو بود که در آنجا به‌عنوان دخترِ سرخانه کار می‌کرد. فاینمن صحبت را شروع کرد. فاینمن دربارهٔ کالیفرنیا و او در مورد سفر پرماجرا و دوستانش صحبت کرد. و سپس فاینمن بی‌هیچ تردید به او پیشنهاد کار به‌عنوان کدبانوی خانه را داد. این، شغلی غیرعادی بود و اوگفت که درباره‌اش فکر خواهد کرد. فاینمن به خانه‌اش در آلتادنا[1] برگشت و مصمم بود که گوئینت را به امریکا بیاورد.

به برکت تساهل و بردباری گوئینت این ازدواج بسیار موفق بود. آنها دو فرزند پیدا کردند، و زندگی خانوادگی برای هر دو مناسب بود. گوئینت در یک مصاحبه در سال ۱۹۷۷ دربارهٔ ازدواجش چنین گفت:

> من ذاتاً از کاری که می‌کنم خوشحالم و احساس رقابت کردن ندارم. احساس در سایهٔ کسی قرار گرفتن را ندارم و کاملاً خرسندم ــ فکر نمی‌کنم خدمتکار او هستم ــ با هم خوب کنار می‌آییم. می‌دانم که او خوشحال است زیرا این را می‌گوید. «مثل یک شب بارانی زمستان که آتش خوبی در بخاری داریم و پرده‌ها کشیده‌اند و بوی خوبی هم از آشپزخانه می‌آید. من این کار را فقط برای او نمی‌کنم ــ آن را برای خانواده می‌کنم و خوشحالم ــ دوست دارم احساس راحتی کنم، رضایت خاطر من در آن است، مجبور نیستم احساس مهم بودن کنم. من کارهایی را انجام می‌دهم که [ریچارد] نمی‌کند، و آنها را خوب انجام می‌دهم.»

روش V-A

فاینمن درکتابش با عنوان سرشت قانون فیزیکی می‌نویسد، «طبیعت برای بافتن نقشهایش درازترین نخها را به‌کار می‌گیرد، به‌طوری که هر قطعهٔ کوچک از بافته‌اش سازمان کل فرشینه را آشکار می‌کند.» بسیاری از این نخهای دراز مبتنی بر اصول تقارن‌اند. برای فیزیکدان، تقارن دقیقاً موضوعی از زیباشناختی نیست. هرمان وایل[2] یکی از نخستین کسانی که مکانیک کوانتومی را به زبان ریاضی موسوم به «نظریهٔ گروه» بیان کرد، تقارن را چنین تعریف می‌کند (به تعبیر فاینمن): «چیزی متقارن است که بتوانید با آن کاری انجام دهید که پس از انجام آن کار، درست همان طور که قبلاً بوده است به‌نظر آید.» از موارد بسیار جالب در فیزیک نظری تقارنهای قانونهای فیزیکی است. یکی از این تقارنها بر مبنای انتقال از یک نقطه به نقطهٔ دیگر است: اگر ما یک آزمایش، و همهٔ اشیایی را که با آن برهم‌کنش می‌کنند، از یک محل به محل دیگری ببریم، آزمایش و قانونهای فیزیکی حاکم بر آن تغییر نمی‌کند. همین طور، انتقال در زمان نیز تغییری در یک آزمایش و قانونهای فیزیکی حاکم بر آن ایجاد نمی‌کند، و به همین ترتیب است چرخش در فضا. تا اواخر سالهای ۱۹۵۰ یک قاعدهٔ تقارن بنیادی دیگر بجز این سه قانون نیز وجود داشت: به این مضمون که بازتابش یک آزمایش از یک نقطه تغییر نمی‌کند.

1. Altadena 2. Hermann Weyl

یکی از پیروزیهای مکانیک کوانتومی این است که هر یک از این تقارنها با یک قانون پایستگی بنیادی در ارتباط است. تقارن انتقال در فضا پایستگی تکانه را تضمین می‌کند، به این معنا که هرگاه با برهم‌کنش دو ذرهٔ A و B، دو ذرهٔ C و D تولید شود،

$$A + B \rightarrow C + D$$

تکانهٔ کل A و B می‌باید برابر با تکانهٔ کل C و D باشد. به همان طریق تقارن انتقال در زمان، پایستگی انرژی و تقارن چرخشی، پایستگی تکانهٔ زاویه‌ای را تضمین می‌کند. (تکانهٔ زاویه‌ای همیشه در مکانیک کوانتومی برای توصیف حرکت چرخشی به‌کار می‌رود، مانند حرکت اسپینی الکترون یا حرکت مداری الکترون به دور هستهٔ اتم.) وقتی فیزیکدانان هنوز به تخطّی‌ناپذیری تقارنِ بازتابش اعتقاد داشتند، مدعی قانون پایستگی مربوط به آن، یعنی پایستگی پاریته شدند. (برخلاف انرژی و تکانه، پاریته یک ویژگی است که فقط می‌توان آن را در متن مکانیک کوانتومی فهمید. پاریته معیار ریاضی تأثیر بازتابش بر تابع موج است.)

در واقع، تقارن بازتابی و پایستگی پاریته در بسیاری موارد معتبر است، امّا در اواسط سالهای ۱۹۵۰ دو نظریه‌پرداز جوان چینی، تسونگ‌ـدائو لی[1] و چن نینگ (یا فرانک) یانگ[2] که در دانشگاه کلمبیا و آزمایشگاه ملی بروک‌هیون مستقر بودند، به ترتیب، دچار تردیدهایی شدند. آنان نتوانستند، در مواردی که برهم‌کنش ضعیف (مسئول واپاشی بتا) دخیل بود، شواهد قانع‌کننده‌ای بیابند که پاریته، در واقع، پایسته است. آنان این دیدگاه بدعت‌آمیز را در سال ۱۹۵۶ منتشر کردند. سال بعد چین شیونگ وو[3]، همکار لی در کلمبیا نتایج یک آزمایش استادانه طراحی‌شده‌ای را منتشر کرد که ناپایستگی پاریته در واپاشی‌ـβ از Co^{60} را نشان می‌داد.

اخباری که از وو و هموطنان او به گوش می‌رسید نظریه‌پردازان را حیرت‌زده کرد. درست پیش از آنکه نتایج تجربی معلوم شود، پائولی گفته بود که آماده است مبلغ بسیار زیادی در طرفداری از پایستگی پاریته شرط‌بندی کند. فاینمن شرط‌بندی نکرد. همچون همیشه، ایده‌هایی که دیگران آن را احمقانه می‌دانستند او را کنجکاو و برانگیخته می‌کرد؛ حتی پیش از گزارش تأیید تجربی، او سخت در جستجوی نظریهٔ جدیدی از برهم‌کنش ضعیف بود که شکسته شدن تقارن بازتابش را امکان‌پذیر و پایستگی پاریته را نقض کند.

فاینمن نقطهٔ شروع کارش را مدیون پائولی بود. پائولی با توسل به مقتضیات نسبیت خاص، ثابت کرده بود که هر نوع برهم‌کنش بین ذرات را می‌توان برحسب صرفاً پنج نوع موجود ریاضی توصیف کرد که هر بار دوتای آنها در محاسبه لازم است. پنج موجود عبارتند از اسکالرها، بردارها، تانسورها، بردارهای محوری و شبه‌اسکالرها، با نمادهای اختصاری S، V، T، A و P. (کمیتهای اسکالر (S) و برداری (V) در فصل ۱۲ معرفی شدند. یک کمیت تانسوری (T) تفصیل ریاضی از یک بردار

1. Tsung-Dao Lee 2. Chen Ning Yang 3. Chien-Shiung Wu

است. بردارها، تغییر در یک جهت و تانسورها در دو جهت را بیان می‌کنند. بردارهای محوری* (A) و شبه‌اسکالرها** (P) از لحاظ تقارن بازتابی با بردارها و اسکالرها تفاوت دارند.)

کار نظریه‌پردازانی که نسخهٔ پائولی را دنبال می‌کردند یافتن این نکته بود که کدام‌یک از آنها، هرگاه به‌صورت زوج در نظر گرفته شود، صحیح است. در الکترودینامیک کوانتومی، ترکیب درست V-V است. پیش از گمانه‌زنی لی و یانگ و آزمایشهای وو، نظریه‌پردازان ترکیب S-T را برای نظریه‌های واپاشی β و موارد دیگر برهم‌کنش ضعیف، به‌کار می‌گرفتند. در همان زمان فاینمن و چند نفر دیگر، دریافته بودند که هرگاه تقارن بازتابی شکسته شود، V-A دستورالعمل درستی است. وقتی فاینمن به این نتیجه‌گیری رسید، احساس کرد بار دیگر «به کشفی دست یافته است.» او به مهرا گفت،

> وقتی در این باره می‌اندیشیدم، وقتی به آن با چشم دل می‌نگریستم، چیزی هیجان‌انگیز می‌درخشید، درخششی فوق‌العاده! همچنانکه به آن می‌نگریستم، احساس می‌کردم نخستین‌بار و تنها زمانی است که در جریان کارهای علمی‌ام قانونی از طبیعت را می‌دانم که هیچ کس دیگر نمی‌داند. این قانون به زیبایی یک قانون دیراک یا ماکسول نبود، امّا معادلهٔ من برای واپاشی بتا تا حدی شبیه به آن بود. . . این کشف کاملاً جدید بود، گرچه بعدها دانستم که دیگران، در حدود همان زمان یا اندکی پیش دربارهٔ آن اندیشیده‌اند. امّا این امر برای من تفاوتی نداشت. در آن زمان آن کشف از آنِ من بود، احساس هیجان یک کشف جدید را می‌کردم!

در میان افراد دیگر، کسی که دربارهٔ الگوی V-A برای برهم‌کنش ضعیف اندیشیده بود مورای گل‌ـمان بود که دفترکارش درست پایینتر از دفترکار فاینمن در کالتک بود. این دو نظریه‌پرداز گاهی رقیب و گاهی دوست هم بودند. هر یک دیگری را شریکی ارزشمند در مباحثهٔ ایده‌ها و نظریه‌ها می‌دانست؛ احتمالاً در آن زمان چیزی بهتر از این نبود. مباحثهٔ آنان دربارهٔ نظریهٔ V-A به رابرت باخر[1]، مدیر گروه فیزیک، ارجاع شد، و او آنان را به نوشتن یک مقالهٔ مشترک ترغیب کرد.

پارتونها و کوارکها

فاینمن در اواسط سالهای ۱۹۶۰، سهم عمده‌ای در نظریهٔ سه نیرو از چهار نوع نیروی بنیادی که فیزیکدانان می‌شناختند داشت. این سه نیرو شامل برهم‌کنشهای الکترومغناطیسی (در نظریهٔ QED او)، برهم‌کنشهای ضعیف (در نظریهٔ V-A او)، و برهم‌کنشهای گرانشی بود (نیروی دیگر مورد علاقهٔ فاینمن که در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرد). فاینمن، پس از غوغای جایزهٔ نوبل در سال ۱۹۶۵، توجه خود را به چهارمین نیروی بنیادی معطوف کرد، نیرویی که واسطهٔ «برهم‌کنشهای قوی» در داخل و

*. Axial vectors **. pseudoscalars 1. Robert Bacher

بین ذرات تشکیل دهندهٔ هسته‌ها، پروتونها و نوترونها بود. سالهای متمادی بود که می‌دانستند پروتونها و نوترونها ساختار دارند، به خلاف الکترونها و نوترینوها که بی‌ساختار تلقی می‌شوند. مدل فاینمن برای ساختار هادرون («هادرون» اصطلاحی عام برای پروتونها، نوترونها و ذرات دیگری است که با برهم‌کنشهای قوی آنها را به هم می‌پیوندد.) طوری طراحی شده بود تا با آزمایشهایی که آن وقت در مرکز شتاب‌دهندهٔ خطی استانفورد انجام می‌شد سازگار باشد، در این مرکز پروتونها با الکترونهای فوق‌العاده پُرانرژی بمباران می‌شدند.

اگر رهیافت دیداری معمولی فاینمن را در نظر بگیریم، او از خود می‌پرسید اگر یک الکترون پُرسرعت بود که به یک هادرون نزدیک و با آن برهم‌کنش می‌کرد چه می‌دید. فرض اصلی او این بود که هادرونها حاوی ذرات باردار سخت نقطه‌ای به نام «پارتون»اند که تقریباً آزادانه درون محدودهٔ هادرون شناورند. آثار نسبیتی نیز چشمگیر خواهد بود: هادرونها، از دیدگاه الکترونها، کلوچه‌وار پهن شده‌اند و زمان آنها نیز کُند شده است، به‌طوری که پارتونها تقریباً ساکن به‌نظر می‌رسند. اکثر الکترونها از میان هادرون کلوچه‌ای، بدون برهم‌کنش می‌گذرند، امّا تعدادی از آنها همچون گلولهٔ بیلیارد با پارتونها برخورد می‌کنند. این مُدل ساده‌ای بود (که شباهتهایی با تصویری که رادرفورد برای شمارش پراکندگی ذرات α به‌کار می‌برد نیز داشت)، که در میان نظریه‌پردازان و آزمایشگران شتاب‌دهندهٔ استانفورد، رواج یافت.

مورای گل‌ـمان[1] نیز نظریه‌ای برای ساختار هادرون داشت که شامل ذرات نقطه‌ای محصور می‌شد. گل‌ـمان این ذرات را «کوارک» نامید. این واژه برگرفته از بیدار شدن فینگانهای جیمز جویس[2] بود که در سطری از آن آمده است: «سه کوارک برای ماستر مارک!» مدل کوارک صریحتر از مدل پارتون فاینمن بود: کوارکها حامل بار الکتریکی بودند که کسری از بار پروتون بود، و سه تای آنها که با برهم‌کنش قوی به هم می‌پیوستند، یک پروتون تولید می‌شد.

مدل کوارک منتقدان خود را داشت، از جمله فاینمن، و برای مدتی خود گل‌ـمان دربارهٔ واقعیت ابتکارش تردید داشت. بخصوص قبول کردن بارکسری برای نظریه‌پردازان دشوار بود؛ بار پروتون همواره غیرقابل تقسیم در نظرگرفته می‌شد. این امر که دلیلی برای وجود کوارک آزاد خارج از محدودهٔ هادرون وجود نداشت و هنوز هم ندارد، به موضوع کمکی نمی‌کند.

فاینمن تا سال ۱۹۷۰ که مجموعهٔ بزرگی از داده‌ها دربارهٔ ذرات را، با دو تن از دانشجویانش، کامل کرد در مورد کوارکها تردید داشت. سرانجام متقاعد و «طرفدار کوارک» شد. او در مقالهٔ گزارش بررسی نوشت، «تصویر کوارک می‌تواند سرانجام کل میدان فیزیک هادرون را دربرگیرد.» داده‌ها «به طرزی مرموز برازش خوبی از یک مدل خاص را» نشان دادند. گل‌ـمان مکدّر بود از اینکه زیادی طول کشید تا فاینمن کوارکها را بپذیرد.

1. Murray Gell-Mann 2. James Joyce

طبیعت را نمی‌توان فریب داد

فاینمن به ندرت، با پذیرفتن درجات افتخاری، دعوت به ایراد سخنرانیها و انتصاب به عضویت کمیته‌ها، نقش یک دانشمند ممتاز وظیفه‌شناس بی‌نقص را بازی می‌کرد. امّا وقتی یک مسئولیت همگانی را می‌پذیرفت، پیامدهای شگرفی داشت. خدمت او در کمیسیونی که فاجعهٔ چلنجر را تحقیق می‌کرد، بیش از هر کار دیگری که کرده بود، مورد توجه همگان قرار گرفت.

در هشتم ژانویهٔ سال ۱۹۸۶، شاتل فضایی چلنجر، در یک هوای فوق‌العاده سرد، سکوی پرتاب در فلوریدا را ترک کرد. هفتاد و سه ثانیه پس از پرواز، شاتل منفجر شد و هر هفت سرنشین آن کشته شدند. چند روز پس از حادثه، ویلیام گراهام[1] رئیس ادارهٔ ملی هوانوردی و فضا* (NASA)، با مراجعه به فاینمن از او خواست تا به کمیسیونی بپیوندد که دربارهٔ حادثه تحقیق می‌کند. فاینمن دربارهٔ اهمیت علمی برنامهٔ شاتل و رفتن به واشینگتن که محل اجلاس کمیسیون بود تردید داشت. او در کتابش با عنوان به چه چیز اهمیت می‌دهید؟ می‌گوید «من مرامی دارم که به هیچ جای نزدیک واشینگتن نروم و با دولت هیچ کاری نداشته باشم.» او دلیل دیگری برای نرفتن داشت که نمی‌گفت. او از سال ۱۹۷۸ با نوع نادری از سرطان شکم مبارزه می‌کرد و در سال ۱۹۸۶، درست پیش از فراخوان NASA، دریافته بود که او دچار نوع نادری سرطان مغز استخوان نیز شده است.

دوستان فاینمن به او می‌گفتند که باید به واشینگتن برود و گوئینت[2] می‌گفت، «اگر این کار را نکنی دوازده نفر، همگی با هم این‌ور و آن‌ور می‌روند. امّا اگر به کمیسیون ملحق شوی یازده نفر ــ همگی در یک گروه این‌ور و آن‌ور می‌روند ــ در حالی‌که دوازدهمی همه‌جا را زیر پا می‌گذارد، و همهٔ چیزهای غیرعادی را امتحان می‌کند. احتمالاً چیزی وجود ندارد، امّا اگر باشد، شما آن را خواهید یافت. کس دیگری مثل شما نیست که بتواند این کار را انجام دهد.» فاینمن ادامه داد، «بدون فروتنی بسیار حرف او را باور کردم.» او به گوئینت گفت، «برای شش ماه دست به خودکشی خواهم زد» ــ و پیشنهاد را پذیرفت.

این ماجرای ماقبل آخر او بود. نخست، از طریق دوستان دوستی در آزمایشگاهِ پیش‌رانش جِت، در پاسادنا[3]، به سرعت با طرح موتور پیش‌رانش شاتل آشنا شد. سپس شبانه به واشینگتن پرواز کرد تا به موقع در نخستین اجلاس حاضر شود. رئیس کمیسیون، ویلیام راجرز[4]، وزیر امور خارجهٔ دولت نیکسون بود. کمیسیون شامل افراد سرشناسی مانند: نیل آرمسترانگ[5]، نخستین مردی بود که پا بر سطح ماه نهاد؛ سالی راید[6] نخستین زن امریکایی در فضا؛ چاک ییگر[7] قبلاً امتحان‌کنندهٔ خلبانی، و سرلشگر دونالد کوتینا[8] بود که برنامهٔ شاتل در وزارت دفاع را ارائه کرده بود.

1. William Graham *. NASA→National Aeronautics and Space Administration 2. Gweneth 3. Pasadena 4. William Rogers 5. Neil Armstrong 6. Sally Ride 7. Chuck Yeager 8. Donald Kutyna

معلوم شد کوتینا تنها حامی فاینمن در کمیسیون است. دو تن از اعضا، پس از انتصاب، وفاداری به [ناسا] را آشکار کردند. آرمسترانگ می‌گفت تحقیق ضرورتی ندارد، و راجرز می‌گفت، «ما نمی‌خواهیم این تحقیق به شیوه‌ای هدایت شود که انتقاد ناعادلانه‌ای از NASA کند، زیرا فکر می‌کنیم ــ من مطمئناً فکر می‌کنم ــ NASA کاری عالی انجام داده است، و من فکر می‌کنم مردم امریکا هم همین طور فکر می‌کنند.»

بعضی از اعضای کمیسیون زمینهٔ فنی، و در طرز کار شاتل تخصص داشتند. پرسشهای مفصّل آنان، پاسخهای رضایت‌بخش کمی از مدیران NASA که در برابر کمیسیون ظاهر می‌شدند، می‌گرفت، پاسخ عادی این بود که «اطلاعات را بعداً به شما خواهیم داد.»

سرانجام، معلوم شد که نامزدهای مناسب برای این حادثه، حلقه‌های ـ O (شکل) لاستیکی فراوانی بودند که به عنوان واشر آب‌بندی بین بخشهای موشکهای سوخت جامد قرار می‌گرفتند. هر یک از آنها در حدود یک چهارم اینچ و محیط آنها سی و هفت فوت بود. حلقه‌های ـ O معمولی یک شکاف ساکن را آب‌بندی می‌کند، فاینمن توضیح می‌دهد، «امّا در مورد شاتل، با افزایش فشار در موشک، شکاف منبسط می‌شود و برای حفظ آب‌بندی، لاستیک می‌باید با سرعت کافی منبسط شود تا شکاف را ببندد ــ و در هنگام پرتاب در کسری از ثانیه شکاف باز شود. بنابراین خاصیت کشسانی لاستیک، یکی از موارد بسیار مهم طرح [ساختمان شاتل] می‌شود.»

فاینمن می‌نویسد، وقتی پای حلقه‌های ـ O بیشتر به میان کشیده شد که یک مهندس از شرکت تیوکول[1]، سازندهٔ حلقه‌های ـ O، گزارش داد که مهندسان تیوکول «به این نتیجه‌گیری رسیده بودند که دماهای کم به گونه‌ای در آب‌بندی دخالت دارند، و آنان در این‌باره بسیار بسیار نگرانند. در شبِ پیش از پرتاب، به هنگام بازبینی آمادگی پرتاب [مهندسان تیوکول] به NASA تذکر دادند که اگر دما زیر ۵۳ درجه باشد شاتل نباید پرواز کند ــ پایینترین دمای قبلی ــ و در آن صبح دما ۲۹ درجه بود.» با نوعی فشار و استدلالهای پیچیدهٔ NASA، تیوکول نظرش را تغییر داد، و پرتاب انجام شد.

فاینمن مأیوس شده بود. او کوشید تا مسئلهٔ کشسانی لاستیک حلقه ـ O در دماهای پایین را دنبال کند، در حالی‌که پاسخهای مبهمی از لارنس مالوی[2]، مدیر پروژهٔ راکتهای جامد دریافت کرده بود. سرانجام تصمیم گرفت تا با نمایشی در سالن سخنرانی منظور خود را آن‌طور که می‌خواست اثبات کند. روز بعد که یک برنامهٔ گردهمایی ترتیب داده شده بود، وقت مناسبی بود. صبح آن روز از یک فروشگاه ابزار یک انبردست و یک گیرهٔ کوچک C شکل خرید. او به کمک سرلشگر کوتینا آزمایشهایش را در مقابل دوربینهای تلویزیون انجام داد. نمایش او شورانگیز بود زیرا فوق‌العاده ساده بود. فاینمن آن را به کمیسیون و دوربینها توضیح می‌دهد، «دکتر فاینمن: این شرحی است برای آقای مالوی. من این حلقه ـ O لاستیکی را از درزگیر مورد استفادهٔ شما ساخته‌ام. آن را در یخ گذاشته‌ام، و کشف کرده‌ام که وقتی برای مدتی با این گیرهٔ C شکل بر آن فشار می‌آوریم و بعد گیره را برمی‌داریم، لاستیک به حالت

1. Thiokol 2. Lawrence Mulloy

اولیه برنمی‌گردد؛ به همان شکل و اندازه باقی می‌ماند. به گفتهٔ دیگر، دست‌کم به مدت چند ثانیه و بیشتر از آن، وقتی لاستیک در دمای ۳۲ درجه باشد، خاصیت کشسانی در این مادهٔ بخصوص وجود ندارد. باور من این است که این موضوع برای مسئلهٔ ما اهمیت خاصی دارد.»

فاینمن ماهها وقت خود را صرف این بررسی کرد، به مراکز فضایی در فلوریدا، آلاباما و تگزاس و مراکز پیمانکاران سفر کرد. او با طرح «گزافه‌گویی در صدر، ناسازگار با واقعیت در ذیل» روبه‌رو شد که «ارتباط را کُند و در نهایت قفل می‌کرد.» او گزارشش را نوشت، که کمیسیون آن را به‌صورت پیوست کنار گذاشت (او آن را پیوست سوخته می‌نامید). او کار خود را با این گفته به پایان رساند: «برای یک فناوری موفق، واقعیت می‌باید مقدم بر روابط عمومی باشد، زیرا طبیعت را نمی‌توان فریب داد.»

هیچ‌چیز مطلق نیست

فاینمن بنابر قضاوت همتایانش، معلم بزرگی بود. امّا، همچون فعالیتهای دیگرش، او راه خودش را رفت. در کالتک هرگز در گردهم‌آیی اعضای گروه فیزیک شرکت نمی‌کرد، از کارهای کمیته اجتناب می‌کرد، هرگز در پی کمک‌های مالی تحقیقاتی نبود، سخنرانان سمینار را با پرسشهای کنایه‌آمیز به ستوه می‌آورد، و دانشجوی دکتری معدودی را می‌پذیرفت. یکی از همکاران او در کالتک می‌گوید، «بیشتر ما از او می‌ترسیدیم، در گردهم‌آییهای دانشکده، اگر کسی چیزی می‌گفت که او با آن موافق نبود، با زبانی تند او را سرجایش می‌نشاند. حماقتها را ابداً تحمل نمی‌کرد.» برداشت من این است که در دانشکده هیچ کس به او نزدیک نمی‌شد. از سوی دیگر دَرِ دفترش همیشه به روی دانشجویان باز بود. و سالهای بسیار یک درس غیررسمی به نام فیزیک X را تدریس می‌کرد که موضوع آن را دانشجویان انتخاب کردند. هر کسی بجز اعضای دانشکده می‌توانست در جلسات درس او حاضر شود.

برای فاینمن، کلاس درس صحنهٔ نمایش معلمی بود. در آنجا می‌باید درام، شگفتی، کمدی، و فصاحت کلام وجود داشته باشد. فارادی اگر بود، تدریس او را تحسین می‌کرد. در اوایل سالهای ۱۹۶۰، یکی از همکارانش به نام ماتیو سندز[1] او را ترغیب کرد که کار دشوار آموزش فیزیک مقدماتی را به عهده بگیرد. سندز به او گفت، «ریچارد، ببین تو سالهای بسیاری را صرف فهم فیزیک کرده‌ای، اکنون این شانس را داری که عصارهٔ آن را در اختیار دانشجویان سال اوّل دانشگاه بگذاری.» فاینمن چند روزی دربارهٔ آن فکر کرد و سپس از سندز پرسید، «آیا فیزیکدان بزرگی را می‌شناسی که فیزیک سال اوّل دانشگاه را تدریس کرده باشد؟» سندز گفت که فکر نمی‌کند کسی این کار را کرده باشد. نتیجه‌گیری فاینمن این بود که «من خواهم کرد!»

این کار ساده‌ای نبود، فاینمن برای درسها تمام وقت کار می‌کرد. سندز و رابرت لیتون، همکارش در کالتک و پدر رالف لیتونِ یار طبل‌نواز فاینمن نوعی درسهای مکتوب را در سه جلد، تولید کردند. این تلاش مشترک موقعیت تحسین‌انگیزی داشت؛ این کتابها هنوز، پس از تقریباً چهل سال، پرطرفدار است.

1. Matthew Sands

در اینجا سخنان فاینمن به مخاطبانش را دربارهٔ نیروی الکتریکی و بار الکتریکی پایهٔ الکترونها و پروتونها، ملاحظه می‌کنید:

> [همهٔ] مادهٔ مخلوطی است از پروتونهای مثبت و الکترونهای منفی که با نیروی بزرگی یکدیگر را جذب و دفع می‌کنند، به‌طوری که تعادل کامل برقرار است و اگر شما نزدیک شخص دیگری بایستید، ابداً نیرویی احساس نمی‌کنید. در صورتی‌که عدم تعادل اندکی وجود داشت آن را احساس می‌کردید. حال اگر شما به فاصلهٔ طول یک بازو از شخص دیگری می‌ایستادید و هر یک از شما یک درصد الکترون بیشتر از پروتون داشت، نیروی دافعه به قدری بزرگ می‌شد که باورکردنی نبود. چه‌قدر بزرگ؟ کافی برای بالا بردن ساختمان امپایر استیت؟ نه! برای بالا بردن کوه اِورست؟ نه! نیروی دافعه برای بلند کردن «وزن» کل زمین کافی می‌شد!

او دربارهٔ مفهوم کیفی و کمّی معادله‌های فیزیک شگفت‌زده می‌شود: «مثلاً معادلات ما برای خورشید، به‌عنوان گلوله‌ای از گاز هیدروژن، خورشید کاملی را توصیف می‌کند بدون لکه‌های خورشیدی، بدون ساختار دانه‌ـ‌برنجی، بدون زبانه‌ها، بدون هاله‌ها. با وجود این، همهٔ اینها واقعاً در معادلات هستند، فقط راه به‌دست آوردن آنها را نمی‌دانیم.»

او به منتقدانی که دربارهٔ محدودیت و بی‌روح بودن عینیت علم شکوه می‌کنند چنین پاسخ می‌دهد:

> شاعران می‌گویند علم، زیبایی ستارگان را نادیده می‌گیرد ــ آنها را صرفاً گویهایی از گاز هیدروژن می‌داند. هیچ‌چیز «ساده» نیست. من هم می‌توانم ستارگان را شبانگاه در آسمان بیابان ببینم و زیبایی آنها را احساس کنم. ولی آیا آنها را کمتر [از آنچه هست] می‌بینم یا بیشتر؟ پهنهٔ آسمان تخیل مرا به‌کار می‌اندازد ــ چشم کوچک من می‌تواند نور چند میلیون ساله را ببیند. از یک طرح عظیم ــ که من جزئی از آنم ــ شاید خمیرمایهٔ من از ستارهٔ بعضاً فراموش‌شده‌ای بیرون افتاده باشد، آن‌طور که فی‌الحال بیرون می‌افتد. یا شاید آنها [ستارگان] را با چشم بزرگتر رصدخانه پالومار، ببینیم، که از یک نقطهٔ شروع مشترک، که احتمالاً همگی با هم در آن بوده‌اند، با شتاب از هم دور می‌شوند. این طرح چیست و چه مفهومی دارد، یا چرا چنین است؟ ضرری ندارد که اندکی بیشتر دربارهٔ این معمای مرموز بدانیم! زیرا حقیقت بسیار حیرت‌انگیزتر از آن است که هر یک از هنرمندان گذشته تصور می‌کردند. چرا شاعران امروزی از آن صحبت نمی‌کنند. شاعران چگونه کسانی‌اند که اگر سیارهٔ مشتری مردی بود درباره‌اش آن سخن می‌گفتند، امّا اگر کُرهٔ چرخان بسیار بزرگی از متان و آمونیاک باشد، باید سکوت کنند؟

حضور

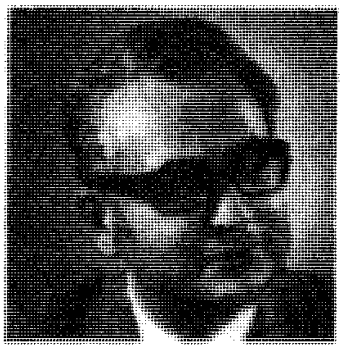
برای دانشجویان، مخاطبان، همکاران، دوستان، رقیبان، عیبجویان، حضور فاینمن، بیش از همه نیروی حیاتی بانشاط و ماندگار بود. او چیزی را از دست نمی‌داد. و دربارهٔ همه‌چیز کنجکاو بود. او از گفتن اینکه «من باید چیزی باشم که نیستم» لذت می‌برد. او طبل‌نواز ماهری شد. او زیست‌شناسی یادگرفت و به‌عنوان دستیار آموزشی به هنگام فرصت مطالعاتی، در گروه زیست‌شناسی کالتک کار کرد. او چند تابستان به‌عنوان کارمند عادی شرکت تازه تأسیس شدهٔ کامپیوتر کار کرد. او یکی از نخستین کسانی بود که به امکانات فناوری دستگاههای بسیار کوچک و بهره‌برداری از آنها پی‌برد، این فناوری امروزه نانوفناوری نامیده می‌شود. او به‌طور شایسته‌ای به فنونی از هنرهای تصویری، ترسیمی و قفل بازکنی دست یافت. دوران خلاقیت او، به استثنای گیبس و چاندراسخار، طولانیتر از فیزیکدانان بزرگ دیگر است.

حتی در دههٔ نهایی زندگی‌اش، که بیماری سرطان، آهسته آهسته او را هلاک می‌کرد، هنوز قدرت داشت و سرحال بود. در عکسی که یک هفته پیش از مرگ از او گرفته شده، به‌نظر می‌رسید هنوز شوخ طبعی خاص خود را داشته باشد و احتمالاً هم داشت. امّا آخرین ماجرای بزرگ زندگی‌اش ناامیدکننده بود. در پایان، به گوئینت گفت، «من از دوبار مردن نفرت دارم، خیلی ملال‌آور است.»

۲۶

قصه کوارکها

مورای گل‌ـمان



داستان نابغهٔ جوان

می‌گویند روزی دانشجوی جوانی از انریکو فرمی نام ذرات بنیادی را پرسید و فرمی پاسخ داد، «مرد جوان، اگر می‌توانستم نام تمام این ذرات را به خاطر بیاورم، می‌رفتم گیاه‌شناس می‌شدم.» در آن زمان (یعنی اواسط دههٔ ۱۹۵۰) فقط دوازده ذرهٔ بنیادی شناخته‌شده بود ولی نامگذاری آنها در همان موقع هم کلاف سردرگمی بود. ده سال پس از آن، با بهره‌برداری از شتاب‌دهنده‌های قوی جدید و ساخته شدن وسایل هر چه حساستر برای آشکارسازی ذرات، تعداد ذرات شناخته‌شده به یکصد رسید و فهرست آنها مرتباً طویلتر می‌شد. چنین شرایطی، «گیاه‌شناسان» فیزیک ذرات را مستأصل کرده بود.

تلاش عمده برای نظم بخشیدن به این جنگل ذرات، که کاملاً آشوبناک به‌نظر می‌رسید، به‌وسیلهٔ فیزیکدانی به نام مورای گل‌ـمان[1] انجام گرفت. او عمیقاً باور داشت که در پس همهٔ این آشفتگی، طرحهای ساده‌ای وجود دارد که اصول تقارن تعیین می‌کند. یکی از ابزارهای مورد استفادهٔ او، ابزاری ریاضی بود که فیزیکدانان کوانتومی آن را از زمان کارهای اولیهٔ بور و پائولی، می‌شناختند و آن عدد کوانتومی بود. تعدادی از مرموزترین ذرات بنیادی را می‌توان به کمک یک عدد کوانتومی جدید طبقه‌بندی کرد. این عدد کوانتومی، «شگفتی[2]» نام دارد که اسم بامسمّایی نیز هست. در طرح گل‌ـمان، عدد کوانتومی شگفتی، تنها نیمی از یک دستگاه پیچیده‌تر برای دسته‌بندی ذرات بود. این دستگاه، مستقیماً به قلب تقارنهای ساختاری پروتونها و نوترونها و دیگر خویشاوندان غریب آنها راه می‌یافت. تقارن، کلید حل مسئله بود چون می‌توانست بدون کمک گرفتن از جزئیات یک دینامیک کوانتومی مناسب که هنوز ناشناخته بودند، قصهٔ خود را بازگوید. گل‌ـمان نظریهٔ تقارن را سرلوحهٔ کار خود قرار داد و پیش رفت تا

1. Murray Gell-Mann 2. Strangeness

عاقبت مفهوم کوارک را پدید آورد که امروزه ظاهراً همه‌جا سروکله‌اش پیدا می‌شود. این داستان، به‌طور خلاصه، یکی از دو داستانی است که در این فصل گفته می‌شود. داستان دوم این فصل، حکایت خود گل‌ـمان است.

او در سال ۱۹۲۹ به دنیا آمد. در آن هنگام، خانوادهٔ او در خیابان چهاردهم در مانهاتان[1] جنوبی زندگی می‌کردند. پدر او، آرتور گل‌ـمان[2] با نام ایزیدور گلمان[3] از وین به نیویورک رفته بود. چندی بعد، نام آرتور را برگزید و کمی پس از ازدواجش، خط فاصل مشخصه را به نام‌خانوادگی خود افزود. او مردی متشخص بود و آرزوهایی روشنفکرانه داشت که هرگز تحقق نیافت. او در وین، مطالعهٔ فلسفه و ریاضی را آغاز کرده بود ولی والدینش که به نیویورک مهاجرت کرده بودند به کمک و پشتیبانی او نیاز داشتند و او هم ناگزیر به مهاجرت به بخش سفلی ایست‌ساید در نیویورک شد.

آرتور ذهنی اگر نه درخشان، ولی خوب داشت. استعداد فوق‌العادهٔ او در زبان، باعث شد تا مدرسهٔ آموزش زبان آرتور گل‌ـمان را تأسیس کند. متأسفانه مهارت تقریباً استادانهٔ او در زبان انگلیسی، با توانایی او در معلّمی همراه نبود. جورج جانسون[4]، زندگینامه‌نویس مورای گل‌ـمان در این‌باره می‌نویسد، «او [آرتور] شیوهٔ تدریس بسیار خشک و غیرقابل تحملی داشت که بعداً مورای جوان [و گویا شاگردان آرتور] را به ستوه آورده بود.» او به شاگردانش که همه مهاجر بودند، انبوهی از قواعد و فنون طاقت‌فرسای دستور زبان درس می‌داد و در هر مورد، اصطلاحات را تمام و کمال و به درستی به‌کار می‌برد. جانسون می‌نویسد «او در زبان استاد بود. فن معانی و بیان و همهٔ دقایق آن را در حد یک ادیب، می‌دانست. او عاشق یادگیری و عاشق طنین صدای خودش بود. تدریس او به‌گونه‌ای بود که گویی کسی جز خودش، شنوندهٔ آن درس نیست.»

مدرسهٔ زبان، در سالهای بحران بزرگ اقتصادی، دوام نیاورد و در سال ۱۹۳۲، خانوادهٔ آنها در تنگنای مالی شدیدی قرار گرفت. آرتور از سر استیصال، در یک بانک به‌عنوان نگهبان کاری پیدا کرد. او از خانواده و از بقیهٔ دنیا برید و هوش خود را در راه درک تجریدهای نظریهٔ نسبیت اینشتین به‌کار گرفت. مادر مورای، پاولین[5] نیز از همه بریده بود و صرفاً، همهٔ گرفتاریهایش را انکار می‌کرد. جانسون می‌نویسد «او به طرز وسواس‌گونه‌ای شاد می‌نمود، حتی هنگامی که موردی برای شادمانی وجود نداشت. به‌ندرت از چیزی گله می‌کرد. در یک دنیای خیالی به‌سر می‌برد. . . همهٔ اینها یعنی آغاز یک بیماری روحی.» والدینی که خودشان تا به این حد گرفتار بودند، نمی‌توانستند راهنمایی چندانی به فرزند با استعدادشان بکنند. از این‌رو، مورای به برادرش، بِن، روی آورد. بن، ده سال از مورای بزرگتر و پیشرس (استثنایی) بود. دو برادر در موزه‌های بزرگ نیویورک، به خودشان آموزش می‌دادند، موزه‌هایی مثل موزهٔ تاریخ طبیعی در سمت غربی شهر و موزهٔ متروپولیتن هنر که در آن سوی سنترال پارک در سمت شرقی شهر واقع

1. Manhattan 2. Arthur Gell-Mann 3. Isidore Gellmann 4. George Johnson 5. Pauline

شده بود. سنترال پارک، خود یک موزهٔ زنده بود و در آنجا، مورای شروع به یادگیری این درس بزرگ کرد که گوناگونی طبیعت پایانی ندارد.

حتماً لازم نیست نابغه باشید تا بتوانید یک فیزیکدان بزرگ شوید، ولی البته نابغه بودن به این منظور کمک می‌کند. تامسون، ماکسول، رادرفورد، هایزنبرگ، دیراک و پائولی را به خاطر آورید. مورای گل-مان نیز به همین گروه از افراد تعلق داشت. او در سه سالگی می‌توانست اعداد بزرگ را در ذهنش در هم ضرب کند. چند سال بعد، آن‌قدر زبان لاتین و تاریخ روم می‌دانست که می‌توانست اشتباهات افراد بزرگتر از خود را (آن هم به نحو جالب توجهی) اصلاح کند. وقتی هفت سال داشت در یک مسابقهٔ هجّی کلمات با بچه‌های دوازده ساله، برنده شد. معلمهایش نمی‌دانستند با او چه کنند ولی یک معلم پیانوی مهربان و فهمیده به نام فلورانس فرینت[1]، می‌دانست. او دوستی نزدیکی با مورای پیدا کرد و او را به دیدن مدیر یک مدرسهٔ خصوصی به نام مدرسهٔ کلمبیا[2] در بخش غربی مانهاتان برد. او با اصرار بر اینکه این پسر را باید ببینید تا باور کنید، توانست برای این ملاقات وقت بگیرد. در طول این دیدار، جای هیچ شک و شبهه‌ای در مورد مورای برای مدیر باقی‌نماند. او پی‌برد که توانایی هوشی مورای (در سن هشت سالگی) با توانایی اکثر دانشجویان کالج، برابری می‌کند. مورای با گرفتن کمک هزینهٔ تحصیلی کامل، وارد مدرسهٔ کلمبیا شد و برای یک دفعه هم که شده، آرتور و پاولین به نیاز فرزند فوق‌العاده‌شان پاسخ مثبت دادند. همهٔ خانواده به آپارتمانی در خیابان نود و سوم غربی، یعنی همان بلوکی که مدرسه در آن قرار داشت، نقل مکان کردند.

در مدرسهٔ کلمبیا، مورای باز هم از معلمان و همکلاسیهایش جلوتر و در عین حال از همکلاسیهایش چند سال کوچکتر بود. او بعدها این مدرسه را تحقیر می‌کرد و مدعی بود که در آنجا مطلقاً هیچ‌چیز نیاموخته، ولی همین مدرسه موجب شد تا بتواند به دانشگاه ییل[3] که جزء جامعهٔ دانشگاههای شرق آمریکا[4] بود راه یابد، البته این بار هم با گرفتن بورس تحصیلی کامل. با ورود به ییل، مورای وارد محیط آنگلوساکسونهای سفیدپوست پروتستان[5] (WASP) شد. او در نیویورک، چنین محیطی را تجربه نکرده بود. او جزء سهمیهٔ (دقیقاً ده درصدی) دانشجویان یهودی بود و سرپرست دانشجویان سال اولی این نکته را روشن کرد که هیچ استثنایی درکار نخواهد بود. او گفت: «اینجا یک آموزشگاه مسیحی است که با تقویم مسیحی اداره می‌شود و باید بدانید که از شما انتظار داریم تا در طول تعطیلات یهودیان در سر کلاس درس حاضر باشید.» وقتی بعضی از دانشجویان به این حرف اعتراض کردند، رئیس دانشگاه ییل، فرمان سرپرست مربوطه را ابطال کرد ولی با احساساتی که در پشت آن نهفته بود، مخالفتی نکرد.

اولین رشتهٔ اصلی که مورای در ییل انتخاب کرد، باستان‌شناسی بود. پدرش گفت: «این کار حماقت است و اگر باستان‌شناس بشود از گرسنگی خواهد مرد. او باید همان کاری را بکند که هاینریش شلیمان[6]

1. Florence Freint 2. Columbia Grammar School 3. Yale 4. Ivy League
5. White Anglo-Saxon Protestant 6. Heinrich Schliemann

باستان‌شناس بزرگ آلمانی کرده بود. او می‌گفت: اول ثروتمند شو و بعد سفرهای اکتشافی باستان‌شناسی ترتیب بده. و ازکجا باید این ثروت را به‌دست آورد؟ از مهندسی.» مورای به سرعت با این گزینه مخالفت کرد. او تأکید داشت که هر ساختمانی را که طراحی کند، فرو خواهد ریخت. عاقبت، پدر و پسر بر سر گزینه‌ای به توافق رسیدند که شاید در نظر اول هر دو دربارهٔ آن تردید داشتند و آن فیزیک بود.

می‌توان دست کم بخشی از اعتبار تأیید گل‌ـمان به‌عنوان یک فیزیکدان را متعلق به دانشگاه ییل دانست. یکی از اعضای هیئت علمی دانشگاه ییل که به‌عنوان یک متفکر و آموزگار، بیشترین تأثیر را بر مورای گذاشت، هنری مارگناو[1] بود. او نظریه‌پردازی کوانتومی از نسل دیراک، هایزنبرگ و پائولی و متخصص فلسفهٔ علم هم بود که به تدریس یک دورهٔ درسی غیرمعمول مشغول بود که به غور در مبانی فیزیک می‌پرداخت. به‌کمک درسها و نوشته‌های مارگناو، مورای برای اولین‌بار به ارزش معماری هوشمندانهٔ نظریه‌های کوانتومی و نسبیت پی‌برد.

گرچه مورای در حال رسیدن به سطوح عالی ریاضی و فیزیک بود، ولی کار درسی هنوز برایش آسان بود و درس خواندن برایش ضروری نمی‌نمود. در حالی‌که همکلاسیهای دل‌نگران او با زحمت روی درسها عرق می‌ریختند، او همیشه حاضر بود تا برای یک نوشیدنی و یا بحث سیاسی آن هم معمولاً از موضع چپ، بیرون برود.

در سال آخر تحصیل در ییل، نشانه‌های عارضه‌ای در مورای ظاهر شد که هیچ‌وقت درمان نشد و آن «مسدود شدن راه نوشتن» بود. او نمی‌توانست رسالهٔ پایان‌نامهٔ خود را به پایان برساند، حتی به سختی توانست آن را شروع کند. او نکات مرسوم در تحقیق و نوشتن رساله را بلد نبود و از مارگناو هم که استاد راهنمایش بود، کمک نمی‌گرفت. بدتر آنکه او نمی‌توانست با یک صفحهٔ کاغذ نانوشته روبه‌رو شود و به قول جانسون «با تصویر پدرش در بالای سرش هرگز هیچ‌چیز، راضی کننده نبود.» مورای نه در ییل و نه در هیچ دانشگاه شرق آمریکا برای طی دورهٔ تحصیلات تکمیلی پذیرفته نشد، مگر در هاروارد که آنجا هم کمک هزینهٔ تحصیلی به او داده نمی‌شد. این، شاید به خاطر آن بود که رسالهٔ پایان‌نامه نداشت و شاید هم به خاطر رأی منفی تعیین کننده‌ای بود که مارگناو به او داده بود.

معهذا در MIT جایی برای او وجود داشت. او می‌توانست دستیار ویکتور وایسکوف[2] شود که یکی از رهبران جامعهٔ فیزیک بود. «ویکی[3]» وایسکوف کار خود را، تقریباً با همهٔ بنیانگذاران مکانیک کوانتومی، آغازکرده بود: با شرودینگر در برلین، بورن درگوتینگن، هایزنبرگ در لایپزیک، بور درکپنهاگ، پائولی در زوریخ و با دیراک درکمبریج. در طول جنگ جهانی، به جمع معروف نظریه‌پردازان اُپنهایمر در لوس‌آلاموس پیوسته بود. گل‌ـمان از هیچ‌یک از این امتیازات خبر نداشت. او حتی اسم وایسکوف را نشنیده بود و اشتیاقی برای رفتن به MIT نداشت. او می‌پرسید «چطور می‌توانم به آن محیط کثیف بروم؟» ولی گزینه‌های پیش روی او، محدود بود. چنانکه خود او می‌گفت: «اندکی تأمل، مرا متقاعد کرد که می‌توانم MIT را امتحان کنم و بعداً اگر خواستم، خودکشی می‌کنم، ولی راه دیگری وجود نداشت.»

1. Henry Margenau 2. Victor Weisskopf 3. Viki

MIT ارزش امتحان کردن داشت. در آنجا، گل‌ـمان به یاری وایسکوف، فیزیک را، چنانکه باید یاد گرفت. او آموخت که «سازگاری با شواهد، با ارزشتر از ظرافتهای ریاضی است»، «در صورت امکان، برای دست‌یابی به سادگی باید تلاش کرد» و اینکه «باید از قلمبه سلمبه‌گویی و فخرفروشی پرهیز کرد.» او نقشه‌های جاه‌طلبانه‌ای برای رسالهٔ تحقیقی‌اش داشت: او می‌خواست موضوعی را پیدا کند که از نظر اهمیت، هم‌تراز یکی از رساله‌های مهم سال ۱۹۰۵ اینشتین باشد. عاقبت، وایسکوف مسئله‌ای را به او سپرد که به سختی می‌توان آن را اینشتینی نامید، ولی مسئلهٔ مهمی بود و آن، وحدت بخشیدن به دو مدل موجود در توجیه رفتار هسته‌ها بود. این کار نظری، برای فیزیکدانی با استعداد گل‌ـمان، کاری سرراست و نسبتاً مختصر بود، ولی یک‌بار دیگر عارضهٔ گرفتگی ذهنی نویسنده، گریبانگیر او شد. موعد انجام کار گل‌ـمان در حال اتمام بود و در همان حال اُپنهایمر او را برای کار در مؤسسهٔ تحقیقات عالی پرینستون پذیرفت که این پذیرش، منوط به اتمام پایان نامه‌اش بود. این عامل، تبدیل به محرکی شد تا عاقبت گل‌ـمان کار نوشتن را شروع کند و در اوایل سال ۱۹۵۱ کار را در ظرف چند روز به پایان برساند.

در مؤسسهٔ تحقیقات عالی، گل‌ـمان با فرانسیس لو[1] هم‌اتاق شد. لو به سختی مشغول دست‌وپنجه نرم کردن با مسائل باقی‌مانده در مبحث الکترودینامیک کوانتومی بود. هر دوی آنها به تازگی مدرک دکتری گرفته بودند، ولی گل‌ـمان بیست و یک ساله بود در حالی‌که لو به دلیل خدمت در زمان جنگ، کار خود را با تأخیر شروع کرده بود و سی سال داشت. بعدها، لو در یک مصاحبه گفت، «این بچه را آوردند در دفتر من نشاندند.» ولی لو به زودی دریافت که این «بچه»، بینش پخته‌ای نسبت به اصول فیزیک دارد که فراتر از حد عادی است. لو و بعدها دیگران، دریافتند گل‌ـمان از این موهبت برخوردار است که می‌تواند فراتر از جزئیات عاجل یک مسئله نظر افکند و به قول فاینمن با «چشم تحلیل»، الگوهای زیربنایی را آشکار سازد.

شیکاگو و شگفتی

اقامت گل‌ـمان در مؤسسهٔ پرینستون، سازنده ولی موقتی بود. اُپنهایمر تحت تأثیر کار او قرار گرفته بود ولی نمی‌توانست در هیئت علمی جایی به او بدهد. یکی از دوستان او در MIT به نام ماروین گُلدبرگر[2] پای گل‌ـمان را به مؤسسهٔ تحقیقات هسته‌ای انریکو فرمی باز کرد. گلدبرگر در آن زمان، دانشیار دانشگاه شیکاگو بود و بعداً رئیس مؤسسهٔ تکنولوژی کالیفرنیا (کالتک) شد. تنها جای خالی که در مؤسسهٔ فرمی وجود داشت، پست نازل مربیگری بود، ولی در اوایل دههٔ ۱۹۵۰ هر فیزیکدانی آرزو داشت در مؤسسهٔ فرمی کار کند. برای کسی که قبلاً در نیویورک بود، شیکاگو محدودیتهای خودش را داشت. و هوا بسیار ناخوشایند بود ولی حضور فرمی، همهٔ این ناملایمات را جبران می‌کرد. در آن زمان، فرمی بزرگترین فیزیکدان تجربی به‌حساب می‌آمد و از بزرگانی نظیر اُپنهایمر، رابی[3]، وایسکوف و حتی بِتِه[4] نیز یک سروگردن بالاتر بود.

1. Francis Low 2. Marvin Goldberger 3. Rabi 4. Hans Bethe

فرمی عمل‌گرایی بود که از ریاضیات بیش از حد، اجتناب می‌کرد. پائولی او را «مهندس کوانتومی» می‌نامید ولی رهیافت مستقیم، هم در فیزیک نظری و هم در فیزیک تجربی موفقیتهایی برای فرمی به ارمغان آورده بود. سبک کار فرمی با شباهتهایی که به سبک کار وایسکوف داشت، برای گل‌ـمان خوشایند بود. این محیط، همان‌جایی بود که او نیاز داشت تا بتواند خرمنی غنی از داده‌ها دروکند. این داده‌ها از سیکلوترون شیکاگو و دیگر شتاب‌دهنده‌های ذرات در برکلی و آزمایشگاه ملّی بروک هیون در لانگ آیلند حاصل می‌شد.

در آشکارسازهای ذرات، سروکلهٔ ذرات ناشناخته‌ای پیدا می‌شد که حضورشان را به نحو متمایزی با برجاگذاشتن ردی به شکل حرف V، نشان می‌دادند. نخست، این ذرات را «ذرهٔ V» نامیدند و پس از آنکه مسئلهٔ منشأ آنها جنبهٔ معماگونه‌ای پیدا کرد، نام آنها به «شگفت» تغییر کرد. در اواسط دههٔ ۱۹۵۰، گل‌ـمان دری را به سوی ذرات شگفت، گشود. او این کار را به کمک دو ابزار انجام داد که سالها برای فیزیکدانان کوانتومی، ارزشمند بود: یکی مفهوم عدد کوانتومی و دیگری قانون پایستگی. طرح گل‌ـمان به هر ذرهٔ شگفت، یک عدد کوانتومی به نام «شگفتی» نسبت می‌دهد و سپس این اصل را از فیزیک کوانتومی می‌گیرد که این عدد کوانتومی در برهم‌کنشهای قوی، تغییر نمی‌کند، یعنی پایسته است. معهذا در برهم‌کنشهای ضعیف، این عدد می‌تواند تغییر کند. (به یاد آورید که برهم‌کنشهای قوی، بین پروتونها و نوترونها در هستهٔ اتم و نیز درون نوترونها و پروتونها در بین ذرات سازندهٔ آنها صورت می‌پذیرند. گل‌ـمان، بعداً ذرات تشکیل‌دهندهٔ پروتونها و نوترونها را «کوارک[1]» نامید.)

فیزیکدانان ذرات، همهٔ ذراتی نظیر پروتون و نوترون را که در معرض برهم‌کنشهای قوی هستند، «هادرون[2]» نامیده‌اند. در یک طبقه‌بندی بعدی، هادرونها به دو گروه تقسیم می‌شوند. یکی «باریونها[3]» که جرم نسبتاً زیادی دارند و دیگری «مزونها[4]» که جرم متوسطی دارند. نوع دیگری از ذرات که «لپتون[5]» نامیده می‌شوند، شامل سبکترین ذرات یعنی الکترونها و نوترینوهاست.

هنگامی که یک باریکهٔ پرانرژی از مزونها که «پیون» نام دارد وارد یک اتاقک پُر از هیدروژن مایع می‌شود، واکنشی صورت می‌گیرد که به‌وسیلهٔ آن می‌توان قوانین شگفتی گل‌ـمان را نشان داد. پیونها با پروتونها، یا همان هسته‌های هیدروژن واکنش انجام می‌دهند و در نتیجه، دو ذرهٔ شگفت تولید می‌شود:

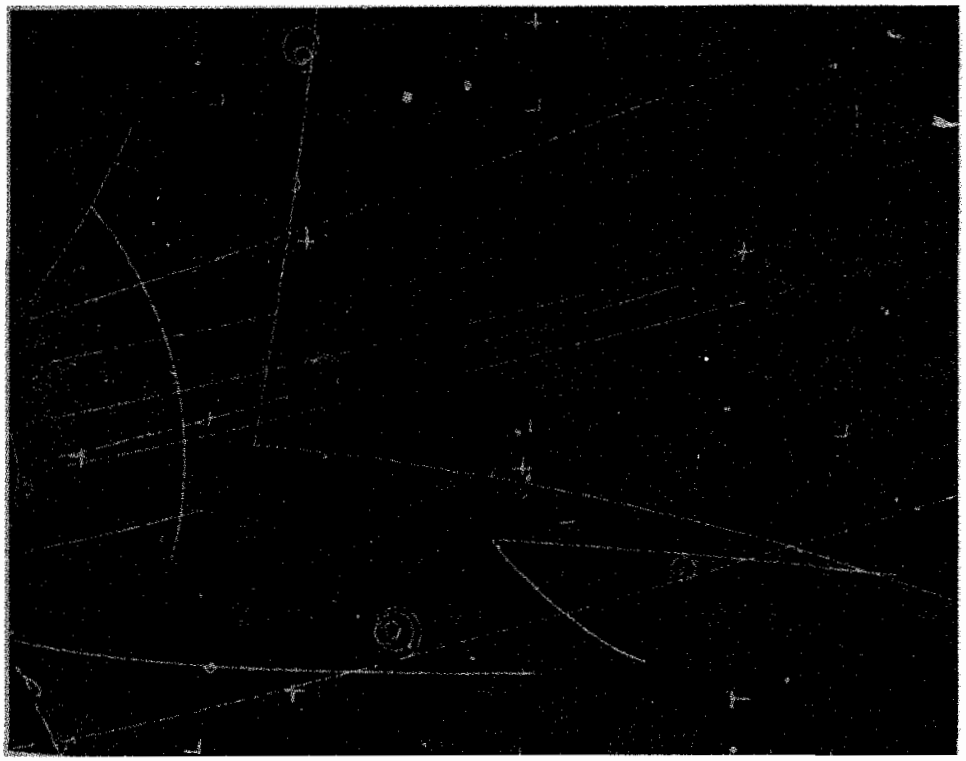
$$\mathrm{p} + \pi^- \rightarrow \Lambda^\circ + \mathrm{K}^\circ \qquad (۱)$$

که در این واکنش، p پروتون، π^- پیونی است که بار الکتریکی منفی دارد (پیون دو خواهر π° و π^+ دارد که اولی خنثی و دومی دارای بار مثبت است)، Λ° و K° هر دو ذرات شگفت خنثی هستند که اولی باریون و دومی مزون است. وقتی فشار داخل اتاقک هیدروژن مایع، ناگهان افت می‌کند، ذرات باردار عبورکننده از اتاقک، با برجا گذاشتن ردی از حباب، حضور خود را نشان می‌دهند. این وسیلهٔ آشکارساز «اتاقک حباب[6]» نام دارد. گفته می‌شود که ایدهٔ این اختراع هنگامی به مخترع آن،

1. Quark 2. Hadron 3. Baryon 4. Meson 5. Lepton 6. Bubble Chamber

دونالدگلیزر[1] الهام شد که وی غرق در افکار خود به حبابهای بالارونده در یک بطری ماءالشعیر خیره شده بود. اتاقک حباب، جانشین اتاقک ابر ویلسون[2] شد.

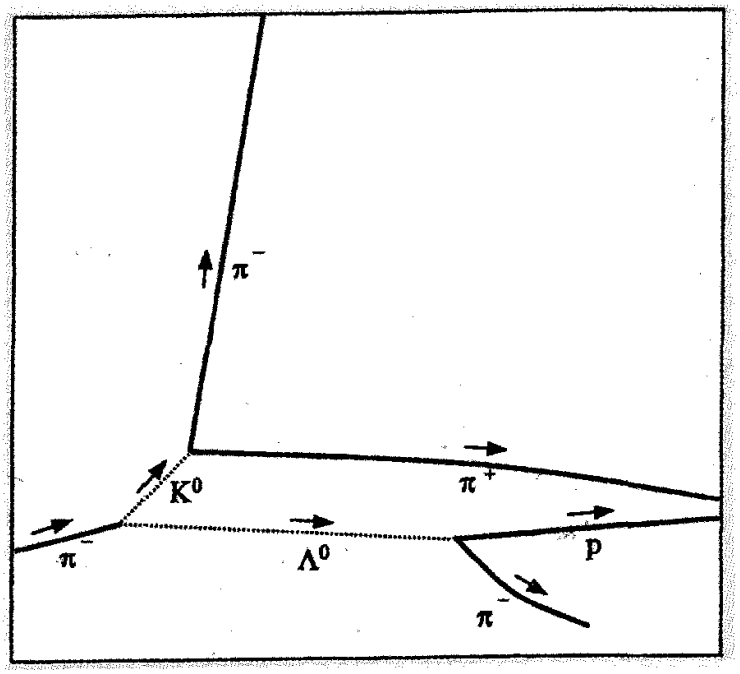
ردهای اتاقک حباب که در شکل ۲۶ـ۱ دیده می‌شوند، داستان واکنش ذرات را که در بالا گفته شد، باز می‌گویند و طرح شگفتی گل‌ـمان را در عمل نشان می‌دهند. تفسیری از این عکس در شکل ۲۶ـ۲ ارائه شده که تمام ردهای زائد در آن حذف شده‌اند. نخست به خمیدگی بسیاری از ردها توجه کنید. این خمیدگی به‌وسیلهٔ یک میدان مغناطیسی قوی که عمود بر اتاقک حباب اعمال شده، پدید آمده است. (معادلات ماکسول به ما می‌گویند که هر جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی، مسیری خمیده را دنبال می‌کند.) میزان این خمیدگی را می‌توان دقیقاً اندازه گرفت. این خمیدگی، بار و جرم ذره‌ای که رد را برجا گذاشته، بر ما آشکار می‌کند.



شکل ۲۶ـ۱ این عکس، رد پدید آمده به‌وسیلهٔ باریکه‌ای از پیونهای پرانرژی دارای بار منفی در یک اتاقک حباب پُر از هیدروژن را نشان می‌دهد.

در سمت چپ شکل ۲۶ـ۲ یک پیون پرانرژی نشان داده شده که وارد اتاقک حباب می‌شود و به یک پروتون (هستهٔ اتم هیدروژن) برخورد می‌کند. در نتیجه، واکنش (۱) صورت می‌گیرد و ذرات K° و Λ° تولید می‌شوند. هر دوی این ذرات از نظر الکتریکی خنثی هستند، بنابراین در اتاقک حباب هیچ ردی برجا نمی‌گذارند. ولی سپس طبق روابط زیر وامی‌پاشند (متلاشی می‌شوند) و در نتیجه پیون

1. Donald Glaser 2. Wilson



شکل ۲۶ـ۲ تفسیر شکل ۲۶ـ۱. فقط ردهای مورد نظر، نشان داده شده‌اند.

باردار و پروتون پدید می‌آیند.

$$K^\circ \rightarrow \pi^- + \pi^+ \qquad (۲)$$

و

$$\Lambda^\circ \rightarrow p + \pi^- \qquad (۳)$$

قواعد گل‌ـمان، عدد کوانتومی شگفتی S را به طریق زیر، تعیین می‌کند: $S = \circ$ برای ذرات غیرشگفت (p، π^+ و π^- که در مثال آورده شدند)، $S = +۱$ برای K° و $S = -۱$ برای Λ°. پس عدد کوانتومی شگفتی کل برای سمت چپ واکنش (۱) عبارت است از $\circ = \circ + \circ$، و مقدارکل برای سمت راست نیز همان است: $\circ = ۱ + (-۱)$. بنابراین چنانکه طرح گل‌ـمان برای یک برهم‌کنش قوی ایجاب می‌کند، شگفتی در واکنش پایسته است.

از سوی دیگر، واکنشهای (۲) و (۳) مستلزم تغییر در عدد کوانتومی شگفتی هستند. این مقدار در واکنش (۲) از $+۱$ به $\circ$ و در واکنش (۳) از -۱ به $\circ$ تغییر می‌کند. چنین تغییراتی در شگفتی نشان می‌دهد که این واکنشها از نوع برهم‌کنشهای قوی (و الکترومغناطیسی) نیستند و باید از نوع برهم‌کنشهای ضعیف باشند. طول یک رد برجا مانده در اتاقک حباب، چه عملاً دیده شود یا به نحو دیگری به وجود آن پی‌برده شود، معیاری از «طول عمر» یک ذره، قبل از «مرگ» آن در نتیجهٔ واکنش بعدی است. مسیرهایی که ذرات K° و Λ° در شکل ۲۶ـ۲ طی کرده‌اند نشان می‌دهد که آنها ذراتی با طول عمر نسبتاً زیاد هستند که در نتیجهٔ برهم‌کنشهای ضعیف دستخوش واپاشی می‌شوند. طول عمر این ذرات در واقع زیاد نیست و نوعاً از مرتبهٔ $۱۰^{-۸}$ ثانیه است ولی اگر این ذرات در نتیجهٔ

برهم‌کنشهای قوی وامی‌پاشیدند طول عمر آنها به اندازهٔ چندین مرتبهٔ بزرگی، کمتر می‌بود. اگر واپاشی K° و Λ° طبق الگوی برهم‌کنش قوی صورت می‌گرفت، هیچ دلیل مستقیمی بر وجود این ذرات در اتاقک حباب نداشتیم.

اسپین و ایزواسپین

ذرات ماده به‌وسیلهٔ جرم، بار الکتریکی، نحوهٔ حرکت و ویژگیهای گوناگون دیگری مانند پاریته[1]، شناخته می‌شوند. حرکت یک ذره می‌تواند آن را از جایی به جای دیگر ببرد، نظیر آنچه در مسیر ردهای برجا مانده در اتاقک حباب دیده می‌شود. همچنین حرکت می‌تواند نوعی اسپین به ذره بدهد. واژهٔ «اسپین» نامی خام برای نوعی ویژگی است که عملاً فقط در قلمرو کوانتومی وجود دارد. فاینمن پیشنهاد می‌کند که برای تأکید بر ماهیت انتزاعی اسپین ذره، به جای اسپین، آن را «کوانت‌اسپین[2]» بنامیم. اسپین چیزی شبیه به چرخش یک توپ گلف یا بیسبال نیست. از یک لحاظ الکترونها، نوترینوها و کوارکها حرکت اسپینی دارند، گرچه به لحاظ نظری اندازهٔ آنها قابل اندازه‌گیری نیست: آنها نقطه‌اند ولی حرکت اسپینی دارند.

دیگر ویژگی عجیب اسپین آن است که این ذرات، مانند همهٔ ذرات بنیادی ماده فقط دو مُد یا حالت اسپینی دارند. در اصطلاح کوانتوم مکانیکی گفته می‌شود که اسپین الکترونها، نوترینوها و کوارکها، $\frac{1}{2}$ و دو حالت اسپینی آنها، اعداد کوانتومی $\frac{1}{2}-$ و $\frac{1}{2}+$ دارند. برای منظور ما همین‌قدر کفایت می‌کند که این دو حالت اسپینی را صرفاً ساعتگرد و پادساعتگرد تعبیر کنیم.

همهٔ ذراتی که اسپین $\frac{1}{2}$ دارند «فرمیون[3]» نامیده می‌شوند. دلیل این نامگذاری آن است که رفتار آماری این ذرات، برای اولین‌بار به‌وسیلهٔ فرمی و چندی پس از آن به‌وسیلهٔ دیراک بیان شد. قاعدهٔ آماری که به‌وسیلهٔ پائولی نیز توضیح داده شد آن است که هیچ دو فرمیونی نمی‌توانند در یک حالت کوانتومی یکسان قرار گیرند. این قاعدهٔ بسیار مهم، ساختار پوستهٔ الکترونی اتمها و پیوندهای الکترونی بین اتمها در مولکولها را تعیین می‌کند. این قاعده، گل-مان و محققان دیگر را به بعضی جنبه‌های اساسی نظریهٔ کوارک رهنمون شد. ذراتی که بنیادی نیستند نیز می‌توانند دو، یا بیشتر از دو حالت اسپینی داشته باشند. برای مثال، ذره‌ای با اسپین $\frac{3}{2}$، چهار حالت اسپینی دارد که اعداد کوانتومی آنها عبارتند از $\frac{3}{2}-$، $\frac{1}{2}-$، $\frac{1}{2}+$ و $\frac{3}{2}+$. توجه کنید که دستورالعمل پیدا کردن این حالتها آن است که فقط حالتهایی مجازند که اعداد کوانتومی آنها یک واحد با هم فاصله داشته باشند. این ذره و هر ذرهٔ دیگری که اسپین نیم-درست (مثل $\frac{7}{2}$، $\frac{9}{2}$ و غیره) داشته باشد نیز یک فرمیون محسوب می‌شود.

فوتونها هم ذرات بنیادی‌اند و اسپین دارند. رفتار آنها نشان می‌دهد که اسپین آنها ۱ است و بنابراین سه حالت مجاز اسپینی دارند که اعداد کوانتومی آنها عبارتند از $1-$، ۰ و $1+$. درست برخلاف فرمیونها، هر تعداد از فوتونها می‌توانند در یک حالت کوانتومی، قرار گیرند. این طرح را ساتیندرانات بوز[4]

1. Parity 2. Quantspin 3. Fermion 4. Satyendranath Bose

کشف کرد و اینشتین آن را بسط داد. فوتونها و همهٔ ذرات دیگری که اسپین درست (۱، ۲، ۳ و . . .) دارند، خواه بنیادی باشند یا نه، «بوزون[1]» نامیده می‌شوند.

در اوایل پیدایش فیزیک ذرات (۱۹۳۲)، هایزنبرگ مفهوم اسپین را گامی به سمت انتزاعی شدن پیش برد. به‌عنوان مدلی برای ساختار هستهٔ اتم، او فرض کرد که ذرات تشکیل‌دهندهٔ هسته، نوترونها و پروتونها هستند و نیز فرض کرد که این ذرات در درجهٔ اول تحت‌تأثیر نیروهای قوی هسته‌ای هستند و تأثیر نیروهای الکتریکی بر آنها (بین پروتونهای با بار مثبت) بسیار ضعیفتر است. او با توجه به اینکه تأثیر بار الکتریکی در هسته، نسبتاً کم اهمیت است و نیز با توجه به اینکه جرم پروتون و نوترون تقریباً یکسان است و این دو ذره می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند، این نظریه را مطرح کرد که نوترون و پروتون حالتهای مختلف موجودی واحدند که «نوکلئون[2]» نامیده می‌شود. دو حالت مختلف نوکلئونها، هایزنبرگ را به یاد دو حالت مختلف اسپینی فرمیونها با اسپین $\frac{۱}{۲}$ انداخت. از این‌رو، او مفهوم «ایزواسپین[3]» را مطرح کرد: نوکلئون ایزواسپین $\frac{۱}{۲}$ دارد (نظیر اسپین $\frac{۱}{۲}$ الکترون) و دو حالت ایزواسپینی با اعداد کوانتومی $+\frac{۱}{۲}$ و $-\frac{۱}{۲}$ دارد که به‌صورت پروتون و نوترون مشاهده می‌شوند (نظیر دو حالت اسپینی الکترون با همان اعداد کوانتومی $+\frac{۱}{۲}$ و $-\frac{۱}{۲}$). انگیزهٔ هایزنبرگ در این کار، مطلقاً جنبهٔ ریاضی آن بود: او هیچ‌گونه حرکت چرخشی واقعی را تصور نمی‌کرد. ولی مفهوم ایزواسپین گرچه انتزاعی است، ولی اگر بسط یابد و با قواعد شگفتی گل‌ـمان ترکیب شود، آنچه را که نظریه‌پردازان می‌خواهند بدانند، نشان خواهد داد، یعنی تقارنهای زیربنایی نوکلئون و خویشاوندانِ هادرونی‌اش.

در اینجا، چند نامگذاری را که به آنها نیاز داریم، ذکر می‌کنیم. عدد کوانتومی ایزواسپین را با I و حالتهای مختلف ایزواسپین را با $I_۳$ نمایش می‌دهیم. (پانویس ۳، نمادی قراردادی است که برای بیان حالتهای ایزواسپین به‌کار می‌رود؛ جزئیات ریاضی مربوط به این نماد، برای بحث ما اهمیتی ندارد.) به این ترتیب، برای نوکلئون $I = \frac{۱}{۲}$ و برای حالتهای «دوتایی» ایزواسپین آن ــ یعنی نوترون و پروتون ــ $I_۳ = -\frac{۱}{۲}$ و $I_۳ = -\frac{۱}{۲}$. پیون (یک مزون) با ایزواسپین $I = ۱$ است و حالتهای «سه‌تایی» ایزواسپین آن با $I_۳ = +۱, ۰, -۱$ مشخص می‌شود. در ادامه به هادرون Δ می‌رسیم. ایزواسپین آن $I = \frac{۳}{۲}$ و حالتهای چهارتایی ایزواسپین آن عبارتند از $I_۳ = +\frac{۳}{۲}, +\frac{۱}{۲}, -\frac{۱}{۲}, -\frac{۳}{۲}$. ذرهٔ شگفت Λ که قبلاً از آن نام بردیم، تنهاست و ایزواسپین آن صفر است، $I = ۰$ و «یک‌تایی» حالت ایزواسپین آن $I_۳ = ۰$ است. اینها همه مثالهایی از «چندتایی»های هادرونی هستند. با توجه به مثالها، درمی‌یابیم که اگر ایزواسپین یک هادرون، I باشد، چندتایی ایزواسپین آن $۲I + ۱$ عضو دارد.

درسهای بیشتری دربارهٔ تقارن

عمیقترین و قابل اعتمادترین اصول فیزیک، از تقارنهای طبیعت نشأت می‌گیرند. تقارنها بر قوانین پایستگی دلالت می‌کنند و برعکس. تشخیص تقارن سرنخهای مهمی نیز در ارتباط با ساختار، در

1. Boson 2. Nucleon 3. Isospin

اختیار نظریه‌پرداز می‌گذارد. برای مثال، اگر بتوانیم تقارن یک مولکول را با استفاده از روشهای تجربی (مثلاً طیف‌نگاری) تعیین کنیم، احتمالاً خواهیم توانست شکل مولکول و آرایش اتمهای آن را استنتاج کنیم. هر دو استراتژی کاملاً مستقل از نظریه‌های دینامیکی کاربردی‌اند. نظریه‌های دینامیکی می‌آیند و می‌روند ولی هرگونه تقارنی که مبانی تجربی مستحکمی داشته باشد، پابرجا خواهد ماند.

گل-مان یکی از اولین و موفق‌ترین نظریه‌پردازانی بود که برای حل مسئلهٔ دشوار ساختار هادرونی، راه استفاده از تقارن را در پیش گرفت. او مانند نظریه‌پردازان قبل از خودش، می‌دانست که چندتایی‌های ایزواسپینی به منزلهٔ اثر انگشت یا به بیان ریاضی، «نماینده‌هایی» از یک نوع تقارن‌اند که «گروه تقارن» SU(۲) نامیده می‌شود. نماد SU حروف اول عبارت special unitary به معنای «یکانی خاص» است و تضمین می‌کند که بعضی لازمه‌های مکانیک کوانتومی برآورده شوند. عدد ۲ در پرانتز نشان می‌دهد که ساده‌ترین چندتایی ایزواسپینی، یک دوتایی دو عضوی شامل نوترون و پروتون است. گل-مان و همکاران نظریه‌پردازش به شواهد به‌دست آمده برای تقارن SU(۲) در میان هادرونها که در آن زمان به وفور کشف می‌شدند، توجه داشتند و در این اندیشه بودند که شاید این داده‌ها بتوانند تقارنهایی از مرتبهٔ بالاتر را آشکار کنند. آنها برای یافتن سرنخهایی از ساختار هادرونها باید همهٔ طرحهای تقارنی نویافته را بررسی می‌کردند. این مسابقه‌ای نخست برای کشف تقارنهای پنهان و سپس استنتاج ساختارهای هادرونی بود.

کالتک و راه هشت‌گانه

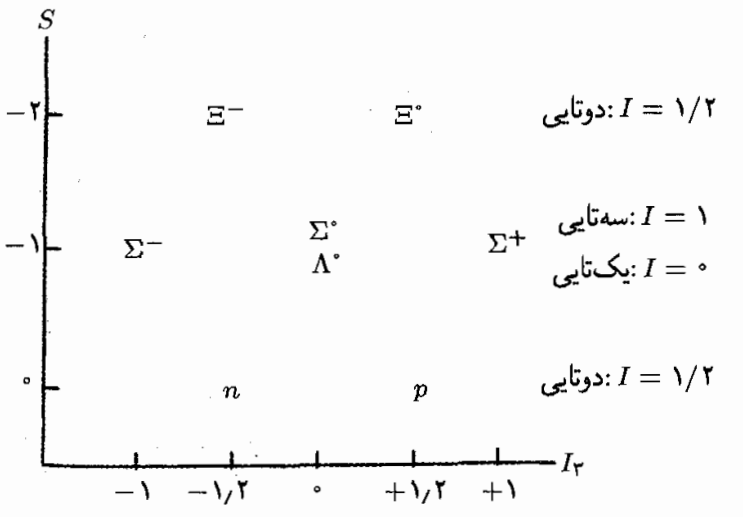
همزمان با تعمق دربارهٔ داده‌های طیف‌نگاری هادرون، گل-مان در حال بریدن از شیوهٔ زندگی‌ای بود که به‌طور فزاینده‌ای برایش ناخوشایند می‌شد. از طریق یک دوست مشترک به نام گوئن گرووز[1] (دختر ژنرال لِسلی گرووز، مدیر پروژهٔ مانهاتان)، با یک خانم جوان انگلیسی به نام مارگارت داو[2] آشنا شد. این آشنایی در پرینستون و طی دومین دورهٔ کاری او در مؤسسهٔ مطالعات عالی، صورت گرفت. خانم داو دستیار یک باستان‌شناس مؤسسه بود و زمینهٔ خانوادگی او شبیه گل-مان بود؛ هنگامی که پدر او در کارش با شکست مواجه شده بود، دوران سختی را گذرانده بود. گل-مان نیز مثل او به باستان‌شناسی علاقه داشت (اگر پدر گل-مان او را منع نمی‌کرد، شاید او هم یک باستان‌شناس می‌شد) و مارگارت هم در علاقهٔ گل-مان به پرنده‌شناسی همراه شد. آنها حتی به یک گروه اکتشافی برای یافتن پرنده‌ای به نام پافین[3] پیوستند و به جزیرهٔ دورافتاده‌ای در ساحل شرقی اسکاتلند رفتند. در این سفر توانستند تنها یک پافین بگیرند و همین پرنده زندگی آنها را عوض کرد.

گل-مان در نوامبر ۱۹۵۴ به مارگارت داو پیشنهاد ازدواج داد، او پذیرفت و آنها در بهار سال ۱۹۵۵ ازدواج کردند. در این موقع، فرمی درگذشته بود و گل-مان که دوباره در مؤسسهٔ تحقیقات عالی

1. Gwen Groves 2. Margaret Dow 3. Puffin

در پرینستون کار می‌کرد، تصمیم گرفت که به شیکاگو باز نگردد. موقعیتهای دیگری نیز برای او پیش آمد. جولیان شوینگر[1] از پذیرش او در هاروارد پشتیبانی کرد. فاینمن او را به کالتک دعوت کرد و او پذیرفت. در ابتدا مارگارت مشتاق رفتن به پاسادنا و یا جاهای دیگر در جنوب کالیفرنیا نبود ولی به‌نظر او، ازدواج مهمتر از دردسرهای زندگی در کالیفرنیا بود. مارگارت خود را با محیط وفق داد و این برای گل‌ـمان، هدیهٔ بی‌نهایت گرانبهایی بود. جانسون می‌نویسد «مارگارت. . . زندگی او را عوض کرد. گل‌ـمان شروع به درک این واقعیت کرد که چه‌قدر کم به کسی غیر از خودش می‌اندیشیده است. او می‌گفت که قبل از آشنایی با مارگارت مثل 'یک ماشین‌حساب خراب' یا مثل 'اتمی بوده که نیروهای ذی‌شعوری دائماً او را این طرف و آن طرف می‌زدند' اما حالا احساس می‌کند که کسی شده است.»

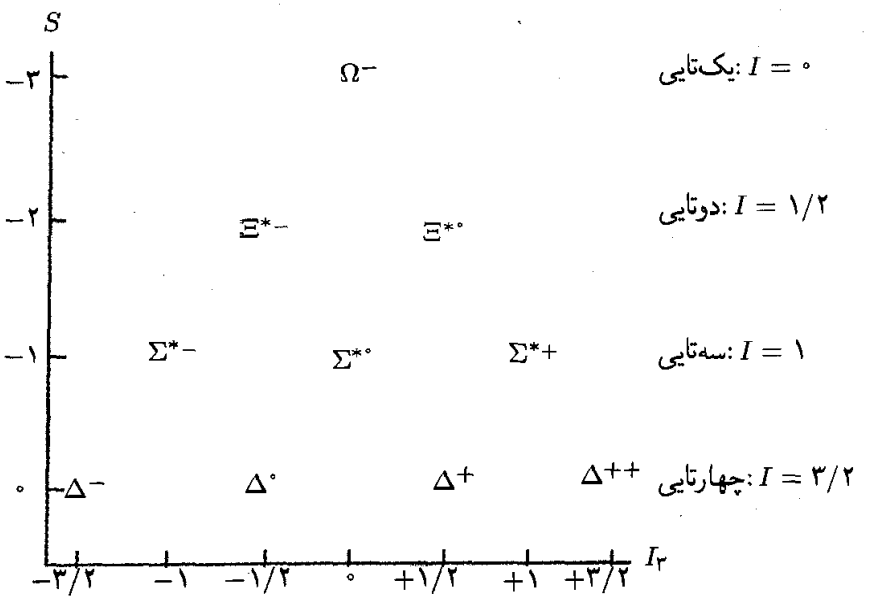
در اوایل دههٔ ۱۹۶۰، گل‌ـمان شروع به حل معماهای داده‌های هادرونی کرده بود. یکی از موفقیتهای او در جستجو برای تقارنهای بالاتر، کشف یک گروه‌بندی از چندتایی‌های ایزواسپینی بود که نکات مهمی را آشکار کرد. او نمودار ساده‌ای از باریونهای شناخته‌شده‌ای تهیه کرد که اسپین (نه ایزواسپین) $\frac{۱}{۲}$ و پاریتهٔ بخصوصی داشتند. مختصات نموداری که او رسم کرد، چنانکه در شکل ۲۶ـ۳ دیده می‌شود، عبارتند از شگفتی S و حالت ایزواسپینی $I_۳$. باریونهایی که در این نمودار آورده شده‌اند عبارتند از نوکلئونها و سه ذره که با نمادهای Λ، Σ و Ξ مشخص می‌شوند. دوتایی نوکلئونی (n برای نوترون و p برای پروتون) در ردیف پایینی نمودار قرار داده شده است. در ردیف میانی، یک‌تایی Λ° و سه‌تایی Σ شامل Σ^{-}، Σ° و Σ^{+} قرارگرفته‌اند. (Λ° و Σ° هر دو در نقطه‌ای با مختصات $S = -۱$ و $I_۳ = ۰$ جای گرفته‌اند.) در ردیف بالایی نمودار، دوتایی Ξ شامل Ξ^{-} و Ξ° قرار دارند. نقشهٔ شکل ۲۶ـ۳ گروهی شامل هشت باریون است و یک «هشت‌تایی» نامیده می‌شود. این گروه به یک معنا، یک چندتایی از نوع چندتایی‌های ایزواسپینی است، اما به دلیل تفاوت جرم ذرات، دقیقاً چنین نیست. گل‌ـمان نقشهٔ مشابهی از یک هشت‌تایی مزونی نیز تهیه کرد.



شکل ۲۶ـ۳ یک هشت‌تایی از باریونها که برحسب ایزواسپین $I_۳$ و شگفتی S در نمودار آمده‌اند. هر نماد در نمودار، نمایندهٔ یک نقطه است. مثلاً n در نقطه‌ای به مختصات $I_۳ = -\frac{۱}{۲}$ و $S = ۰$ قرار دارد.

1. Julian Schwinger

گل‌ـمان از هشت‌تایی‌ها فراتر رفت وگروه‌بندی بزرگتری شامل ده باریون در نظرگرفت که «ده‌تایی» نام دارند. ساختار یک «ده‌تایی» در شکل ۲۶ـ۴ نشان داده شده است. ده‌تایی شامل یک چهارتایی از Δها با شگفتی $S = 0$، یک سه‌تایی از Σ^*ها (جنس این ذرات با Σها در هشت‌تایی فرق دارد و از این‌رو با نماد ستارهٔ اضافی مشخص شده‌اند) با $S = -1$، یک دوتایی از Ξ^*ها (که با Ξها در هشت‌تایی فرق دارند) با $S = -2$، و در بالای نمودار یک‌تایی از ذرهٔ Ω^- با $S = -3$ قرار دارد. در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ وقتی گل‌ـمان، این ده‌تایی را مجسم کرد، فقط چهارتایی آنها (Δها) کشف شده بودند. علیرغم این کمبود در نمودار ده‌تایی، گل‌ـمان یافته‌های خود را در سال ۱۹۶۱ منتشر کرد. او عمداً بر هشت‌تایی‌ها تأکید ورزید و طرح خود را «راه هشت‌گانه[1]» نامید.



شکل ۲۶ـ۴ یک ده‌تایی از باریونها که با همان روش شکل ۲۶ـ۳ در نمودار آمده‌اند.

چندتایی‌هایی مثل هشت‌تایی و ده‌تایی در طرح گل‌ـمان نقش اساسی دارند چون نمودهایی از یک نوع تقارن‌اند که گروه تقارن $SU(3)$ نامیده می‌شود و از گروه تقارن $SU(2)$ در نظریهٔ ایزواسپین، بالاتر است. اگر داده‌های هادرونی بیشتری، تقارن $SU(3)$ را تأیید می‌کرد، این تقارن نه‌تنها می‌توانست کلیدی برای رده‌بندی هادرونها باشد بلکه می‌توانست به منزلهٔ سرنخ مهمی در جستجوی ساختار هادرونها مورد استفاده قرارگیرد.

رهیافت گل‌ـمان در منظم کردن داده‌های هادرونی، شبیه طرح پیشنهادی دمیتری ایوانوویچ مندلیف[2] در اواخر دههٔ ۱۸۶۰ برای فهرست کردن عناصر بود. جدول مندلیف، مانند جدولهای گل‌ـمان، جاهای خالی داشت که باید عناصری در آنها قرار می‌گرفتند ولی در آن موقع چنین عناصری هنوز شناخته نشده بودند. این جاهای خالی الهام‌بخش کشف تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از عناصر جدید شد.

1. Eightfold Way 2. Dmitry Ivanovich Mendeleev

طرح ده‌تایی گل‌ـمان موجب شد تا جستجوهای مشابهی برای یافتن باریونهای گمشده، انجام گیرد. همهٔ آنها به موقع کشف شدند مگر ذرهٔ Ω^- که در رأس ده‌تایی قرار دارد و شگفتی آن $S = -3$ است. دسترسی به این ذره، به خاطر جرم فوق‌العاده بزرگ آن، مشکل است به این دلیل که برای پدید آوردن این ذره در شتاب‌دهنده باید انرژی بسیار زیادی صرف شود. در سال ۱۹۶۴ نیکولاس ساميوس[1] و رابرت پالمر[2] در آزمایشگاه ملی بروک‌هیون[3]، تلاش جانانه‌ای را برای گیرانداختن ذرهٔ Ω^-، آغاز کردند. برای این کار، بیش از نود و هفت هزار عکس از ردهای اتاقک حباب گرفتند که بیش از یک میلیون فوت فیلم صرف آن شد. ولی عاقبت وقتی آزمایشگران توانستند عکس مورد نظرشان را بگیرند، نتیجه واقعاً زیبا از کار درآمد. آن عکس، نه‌تنها تولید ذرهٔ ناپایدار Ω^-، بلکه توالی رویدادهای پس از آن را نشان می‌داد که به دستگاهی از ذرات پایدار منتهی می‌شد. از ردّ ذرات نهایی می‌توانستند به جرم ذرهٔ Ω^- پی‌ببرند. جرم آن برحسب یکای انرژی، 1682 ± 12 MeV بود (MeV به معنای میلیون الکترون‌ـولت است). گل‌ـمان، انرژی این ذره را ۱۶۸۵ MeV پیش‌بینی کرده بود. به این ترتیب، وجود تقارن SU(۳) به اثبات رسید.

سه طعم کوارک‌ها

در همان زمان که آزمایشگران در پی ذرهٔ Ω^- و خویشاوندان آن بودند، گل‌ـمان با اطمینان خاطر مشغول جستجوی معنی تقارنِ هادرونی SU(۳) بود. معمای اصلی عدد ۳ در SU(۳) بود. اگر این عدد معنی فیزیکی داشت، این معنی چه می‌توانست باشد؟ در ریاضی، نمایش سه‌تایی برای تقارن SU(۳) وجود داشت ولی گل‌ـمان نمی‌توانست هیچ نوع تناظر فیزیکی مستقیمی برای این تقارن در بین داده‌های هادرونی بیابد. تقارن ایزواسپینی SU(۲) دوتایی نوکلئون دو عضو (نوترون + پروتون) را داشت ولی جستجوی گل‌ـمان در بین داده‌ها برای یافتن یک نظیر سه‌تایی برای SU(۳)، بی‌فایده بود.

اما بهتر آن بود که تقارن سه‌تایی جزء ذاتی ساختار هادرونها باشد. گل‌ـمان شروع به ارزیابی این نظر کرد که شاید نوترونها و پروتونها و همهٔ باریونهای دیگر، از سه ذرهٔ بنیادی درست شده باشند که بر سه نوع‌اند یا به قول گل‌ـمان، سه «طعم» دارند. او نخست این ذرات را «کِی‌ورک[4]» نامید. سپس سطری در کتاب جیمز جویس[5] به نام بیدار شدن فینیگانها[6] نظر او را جلب کرد که عبارت بود از «سه کوارک برای ماستر مارک[7]!». از آن به بعد او این ذرات را «کوارک» نامید که اکنون نیز به همین نام معروفند. (فیزیکدانان ذرات عادت دارند که در نامگذاری ذرات شیطنت کنند. گل‌ـمان ادعا می‌کند که نام کوارک «فقط یک جور خوشمزگی بود... واکنشی بود به کاربرد نامهای پرطمطراق.»)

1. Nicholas Samios 2. Robert Palmer 3. Brookhaven 4. kwork 5. James Joyce
6. Finnegans Wake 7. Muster Mark

مدل گل-مان، مسائلی داشت. مهمترین آنها مسئلهٔ بار الکتریکی بود. از قرار معلوم، کوارکها حامل بار الکتریکی بودند ولی چگونه امکان داشت که مجموع بار سه کوارک برابر بار واحد پروتون یا بار صفر نوترون شود؟ تنها راه خروج از این بن‌بست آن بود که برای کوارکها خاصیتی در نظر بگیریم که هیچ‌وقت در طبیعت دیده نشده است یعنی کسرهایی از بار واحد پروتون. اگر بنا بود چنین نظریه‌ای جدی گرفته شود باید بتواند توضیح دهد که چرا کوارکهایی که بارکسری دارند طوری محکم در ماده به هم چسبیده‌اند که هرگز در آزمایشگاه خود را نشان نمی‌دهند.

یکی دیگر از ویژگیهای عجیب مدل گل-مان این بود که یکی از سه نوع کوارک، جرمی بسیار متفاوت با دو نوع دیگر داشت. این ویژگی به زیبایی مدل آسیب می‌زد به این ترتیب که تقارن سه‌تایی را ناقص می‌کرد. فیزیکدانان می‌گویند این تقارن «شکسته» شده است ولی نه آن‌قدر بد که علامت مشخصه‌های تقارن SU(۳) یعنی هشت‌تایی‌ها و ده‌تایی‌ها را نتوان در نمودارهای گل-مان به‌وضوح دید.

گل-مان کوارکهایش را «بالا»، «پایین» و «شگفت» یا به اختصار u، d و s نامید. کوارکهای u و d جرم تقریباً یکسانی دارند ولی کوارک s حدوداً چهل درصد از آن دو سنگینتر است. کوارک u بار الکتریکی کسری $+\frac{۲}{۳}$ دارد (برحسب یکای بار پروتون)، کوارک d بار $-\frac{۱}{۳}$ و کوارک s نیز بار $-\frac{۱}{۳}$ دارد. (بار مختلف کوارکها فقط به میزان اندکی، تقارن سه‌تایی را بر هم می‌زند چون وقتی کوارکها درون یک هادرون مقید هستند، برهم‌کنشهای الکتریکی در مقایسه با برهم‌کنشهای قوی، بسیار ناچیزند.)

در نظریهٔ گل-مان، پروتون از دو کوارک u و یک کوارک d، یا به اختصار uud ساخته می‌شود. بار کلی این مجموعه $\frac{۲}{۳} + \frac{۲}{۳} - \frac{۱}{۳} = ۱$ است و این همان مقداری است که باید باشد. ساختار کوارکی نوترون udd است و بار الکتریکی کلی آن، همان‌طور که انتظار می‌رود $-\frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} + \frac{۲}{۳} = ۰$ است. کوارک s چنانکه از نامش پیداست، فقط در ذرات شگفت یافت می‌شود و عدد شگفتی آن -۱ است در حالی‌که شگفتی کوارکهای u و d، صفر است. اعضای سه‌تایی شگفت یعنی Σ^-، $\Sigma^۰$ و Σ^+ به‌ترتیب ساختار کوارکی dds، uds و uus دارند و بار الکتریکی کل آنها به‌ترتیب عبارت است از $-\frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} = -۱$، $-\frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} + \frac{۲}{۳} = ۰$ و $-\frac{۱}{۳} + \frac{۲}{۳} + \frac{۲}{۳} = ۱$. ذرهٔ معروف Ω^- حاوی سه کوارک s است که هر یک شگفتی -۱ دارند و بار الکتریکی کل آن، $-\frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} = -۱$ است.

در نظریهٔ گل-مان، مزونها هم ساختار کوارکی دارند ولی ساختار آنها با ساختار باریونها، تفاوت اساسی دارد. مزونها همیشه از دو کوارک تشکیل می‌شوند که یکی از آنها کوارک عادی و دیگری پادکوارک است. یک کوارک و یک پادکوارک بارهای الکتریکی مخالف و نیز شگفتی‌های مخالف دارند. پس مثلاً کوارک d و پادکوارک d که به‌صورت $\bar{d}$ نوشته می‌شود، به‌ترتیب بار $+\frac{۱}{۳}$ و $-\frac{۱}{۳}$ دارند. کوارک s و پادکوارک نظیر آن، $\bar{s}$ به‌ترتیب بار $+\frac{۱}{۳}$ و $-\frac{۱}{۳}$ و شگفتی $+۱$ و -۱ دارند.

مثالی از مزونها، سه‌تایی مزونی K^-، $K^۰$ و K^+ است. ساختار کوارکی آنها به‌ترتیب، $u\bar{s}$ و $d\bar{s}$، $s\bar{u}$ و بار آنها به‌ترتیب $-\frac{۱}{۳} - \frac{۲}{۳} = -۱$، $\frac{۱}{۳} - \frac{۱}{۳} = ۰$ و $\frac{۲}{۳} + \frac{۱}{۳} = ۱$ است. شگفتی آنها به‌ترتیب -۱، $+۱$ و $+۱$ است. به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی در فیزیک ذرات، ذره و پادذره هیچ‌گاه نمی‌توانند در

مجاورت یکدیگر قرار گیرند چون نتیجه نابودی هردوی آنهاست. یک شاهد مثال برای این قاعده، آن است که مزونها که از یک کوارک و یک پادکوارک تشکیل شده‌اند، همواره ناپایدارند.

مدل کوارکی گل‌ـمان به هیچ عنوان یک موفقیت آنی نبود. گل‌ـمان بعدها این‌گونه به یاد آورد «از کوارکها چنان استقبال شد که گویی بادکنک سربی هستند». بارکسری کوارکها و مقید ماندن همیشگی آنها در درون هادرونها، به ویژه از مسائلی بودند که پذیرش آنها را برای فیزیکدانان نظری بسیار دشوار می‌ساخت. خود گل‌ـمان هم نسبت به درستی نظریه شک داشت. او چنین به یاد می‌آورد «حتی اندیشیدم که فکر وجود ذرات [غیرقابل مشاهده] با بارکسری، فکر عجیب و غریبی است.» همکار او شلدون گلاشو[1] به شوخی می‌گفت «چون کوارکها همیشه درون باریونها گیر افتاده‌اند، حتی با آچار کوارک هم نمی‌شود یکی از آنها را بیرون کشید.» گل‌ـمان برای طفره رفتن از این نواقص می‌گفت که این ذرات وجود ریاضی دارند ولی واقعی نیستند. چون گل‌ـمان مطمئن بود که داوران و ویراستاران مجلهٔ فیزیکال ریویو[2] مقالهٔ او دربارهٔ کوارکها را رد خواهند کرد، این مقاله را برای مجلهٔ فیزیکس لترز[3] فرستاد که در چاپ مطالب، آزادتر عمل می‌کرد و در CERN، مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا، منتشر می‌شد. این مقاله با عنوان «مُدلی کلی از باریونها و مزونها» در سال ۱۹۶۴، درست یک روز پس از گزارش کشف ذرهٔ Ω^- منتشر شد.

سه رنگ کوارکها

گل‌ـمان عقیده داشت که برای درجه‌بندی فیزیکدانان باید دو برابر ایده‌های غلطی که منتشر کرده‌اند را از ایده‌های درست آنها کم کرد. وقتی او اولین مقاله‌اش دربارهٔ کوارک را منتشر کرد، هنوز نگران آن بود که مبادا این مقاله باعث آبروریزی شود. محتوای مقاله با اصل طرد پاولی تضادی آشکار داشت، اصلی آماری که نظریه‌پردازان به مدت بیش از چهل سال به آن متکی بودند. کوارکها مانند الکترونها اسپین $\frac{1}{2}$ دارند و این یعنی آنها فرمیون محسوب می‌شوند و باید از اصل طرد پائولی پیروی کنند. این اصل می‌گوید که هیچ‌گاه دو فرمیون یا بیشتر در یک حالت کوانتومی نمی‌توانند در مجاورت یکدیگر قرار گیرند. ولی برای مثال، ذرهٔ Ω^- از سه ذرهٔ کوارک s تشکیل شده که در نزدیکی یکدیگر به صورت مقید قرار گرفته‌اند و بعضی اوقات تقریباً در یک حالت کوانتومی قرار دارند.

هیچ‌چیز برای نظریه‌پردازان نامطبوعتر از این نیست که اصلی را که چند دهه به خوبی به آنها خدمت کرده، رها کنند؛ فقط معدودی مایل بودند تا اصل پاولی را کنار بگذارند. برای بعضی دیگر، نظریهٔ کوارک چندان اهمیتی نداشت. اما راه دیگری نیز وجود داشت. اگر به کوارکها، ویژگی کوانتومی دیگری نیز نسبت داده می‌شد که برای سه کوارکی که ذرهٔ Ω^- را تشکیل می‌دادند، فرق می‌کرد، غنای نظریه بیشتر می‌شد. چنین نظریه‌ای را اولین‌بار مو‌ـیونگ هان[4] و یوئی‌چیرو نامبو[5] پیشنهاد کردند. فکر

1. Sheldon Glashow 2. Physical Review 3. Physics Letters 4. Moo-Young Han
5. Yoichiro Nambu

آنها این بود که کوارکها خاصیتی مشابه بار الکتریکی دارند و آن را «رنگ» نامیدند (باز هم شیطنت فیزیکدانها). بار الکتریکی بر دو نوع است، مثبت و منفی؛ هان و نامبو فرض کردند که کوارکها سه نوع بار مختلف و مستقل دارند. این فکر مورد قبول فیزیکدانان دیگر، از جمله گل-مان قرار گرفت و گل-مان این سه نوع بار رنگی را با قرمز، سفید و آبی مشخص کرد. فیزیکدانان دیگر (که شاید به این نکته توجه داشتند که سفید یک رنگ خالص نیست)، سه رنگ مشخص کنندهٔ کوارکها را به سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی تغییر دادند. پس به زبان عجیب نظریهٔ کوارک، می‌توان گفت که سه طعم مختلف کوارک u، d و s (و چنانکه بعداً خواهیم دید طعم‌های دیگر) می‌توانند رنگهای قرمز، سبز و آبی داشته باشند.

وقتی گل-مان در سال ۱۹۶۹ آنچه را که «جایزهٔ سوئدی» می‌نامید دریافت کرد، نظریهٔ کوارک هنوز آن‌قدر کم اهمیت بود که در تقدیرنامهٔ جایزهٔ نوبل چیزی دربارهٔ آن گفته نشد. گل-مان به خاطر «مشارکت در طبقه‌بندی و کشف ذرات بنیادی و برهم‌کنشهای آنها» مفتخر به دریافت جایزهٔ نوبل شد. سخنگویی که گل-مان را برای انجام سخنرانی جایزهٔ نوبل به حضار معرفی می‌کرد، تنها به «ارزش بزرگ اکتشافی» مفهوم کوارک اشاره کرد. گل-مان مایل نبود جلوتر از این برود. او فقط می‌توانست بگوید «کوارک تا اینجا فقط یک مفهوم ذهنی بوده، یک مفهوم مفید، ولی کوارک واقعی شاید اصلاً وجود خارجی نداشته باشد.» این پرسش که کوارک وجود دارد یا نه، «بی‌اهمیت» بود.

کوارکهای گرفتار

در همان موقع که گل-مان جایزهٔ نوبل را دریافت می‌کرد، شواهد تجربی چشمگیری برای نظریهٔ کوارک نمایان می‌شد. در اواخر دههٔ ۱۹۶۰ آزمایشهایی در مرکز شتاب‌دهندهٔ خطی استانفورد[1] انجام می‌شد که در آنها پروتونها به‌وسیلهٔ باریکه‌هایی از الکترونهای پرانرژی بمباران می‌شدند و این آزمایشها وجود ذرات باردار سخت و نقطه‌گونه‌ای را در درون پروتونها آشکار ساختند. فاینمن این ذرات را «پارتون[2]» نامید و متذکر شد که این ذرات به رغم مقید بودن در درون پروتون به‌نظر می‌رسد که آزادانه حرکت می‌کنند.

گل-مان معتقد بود که پارتونهای فاینمن اضافی‌اند و این ذرات باید کوارک نامیده می‌شدند. گل-مان در مصاحبه‌ای با رابرت کریس[3] و چارلز مان[4] مؤلفان کتاب خلقت دوم که تاریخچه‌ای از فیزیک ذرات است چنین گفت «اینکه بگوییم این ذرات، کوارک و پادکوارک نیستند بلکه ذرات جدیدی با یک اسم من‌درآوردی‌اند، توهین به تمامی نظریه‌ای است که ما پدید آورده‌ایم.»

کوارک/پارتونها موجودات عجیبی‌اند. آنها نمی‌توانند از حصارهای درونی خود بگریزند معهذا به‌نظر نمی‌رسد که درون این قفس، تأثیری بر یکدیگر داشته باشند، از گفتن اینکه وضع در قلمرو هادرونها بدین‌گونه است تا ساختن نظریهٔ دینامیکی برای توضیح رفتار آنها، راه درازی باید پیمود. کلید حل این معما، رنگ بود. گل-مان به کریس و مان گفت: «ما به تدریج دریافتیم که این متغیر [رنگ] می‌تواند هر

1. Stanford 2. Parton 3. Robert Crease 4. Charles Mann

کاری را برایمان انجام دهد. رنگ، آمار را تثبیت کرد و این کار را بدون درگیر کردن ما با ذرات عجیب جدید انجام داد. سپس دریافتیم که رنگ می‌تواند دینامیک را نیز تثبیت کند.»

«تثبیت» دینامیکی به معنای میدان کوانتومی جدیدی بود که منشأ آن، بار رنگی کوارک است، درست شبیه میدان الکترومغناطیسی که منشأ آن بار الکتریکی است. کوانتومهای این میدان جدید، نظیر فوتونها در میدان الکترومغناطیسی، حاملان نیروی قوی هستند که کوارکها را در کنار هم نگه می‌دارند و «گلوئون[1]» نامیده می‌شوند. هشت نوع گلوئون وجود دارد [باز هم یک هشت‌تایی؛ تقارن SU(۳) باز هم خودنمایی می‌کند] و به هریک از آنها رنگی هم نسبت داده می‌شود.

یکی از کارهای پایانی بر روی دینامیک رنگی یا آن‌گونه که گل‌ـمان بعداً نامید، کرومودینامیک کوانتومی (QCD)، در سال ۱۹۷۳ انجام شد. در آن سال، سه نظریه‌پرداز به نامهای دیوید پولیتزر[2]، فرانک ویلچک[3] و دیوید گراس[4] نشان دادند که میدان قوی، آنچه را که لازمهٔ نظریه است انجام می‌دهد یعنی کوارکهای آزاد را در درون قفس هادرونی‌شان محبوس نگه می‌دارد. برای این منظور، میدان باید نیرویی غیرعادی به‌وجود آورد، نیرویی که مقدار آن با افزایش فاصله، افزایش یابد. عملکرد نیروهای شناخته شده، خلاف این است یعنی مقدار آنها با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. مثالهایی از این نیروها، نیروهای گرانشی و الکتریکی‌اند که هر دوی آنها به شکل $\frac{۱}{r^۲}$اند و r فاصلهٔ دو جسمی است که بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. عملکرد نیرویی که در کرومودینامیک کوانتومی خودنمایی می‌کند، مانند یک کش لاستیکی است. اگر دو جسم که با یک کش لاستیکی به هم بسته شده‌اند از یکدیگر دور شوند، کش سفت می‌شود، کش می‌آید و آن دو جسم را به سمت یکدیگر می‌کشاند. وقتی آن دو به یکدیگر نزدیک شدند، کش شل می‌شود و دو جسم، آزاد و رها می‌شوند.

خاصیت مقید بودن، فیزیکدانان را به درک کامل نیروی قوی امیدوار کرد. به دلایلی که ذکر آنها در اینجا اهمیت ندارد، نظریه‌پردازان، این ویژگی را «آزادی مجانبی» می‌نامند. چنانکه کریس و مان اشاره می‌کنند «آزادی مجانبی مانند کنار رفتن پرده و آشکار شدن یک صحنهٔ پنهان بود که برهم‌کنش قوی را در همهٔ ابعادش آشکار ساخت.» قبل از گل‌ـمان، خیلی از فیزیکدانان، اجزای این صحنه را به تصویر درآورده بودند. ولی گل‌ـمان از همهٔ آنها به تجسّم کل صحنه نزدیکتر شد ولی هیچ‌یک از آنان تا آن موقع زیبایی بی‌نقص موجود در دریافت طبیعت را کاملاً درک نکرده بود.

نسلهای کوارکها

سه طعم کوارک کافی نبود. با افزایش انرژی باریکه‌ها در شتاب‌دهنده‌ها، ذرات با عمر کوتاه در آشکارسازهای پیشرفته‌تر بیشتر می‌شد. به این ترتیب، ذرات کم عمری به‌وسیلهٔ آشکارسازها ظاهر شدند که سه کوارک شناخته شدهٔ u، d و s برای توضیح ساختمان آنها کفایت نمی‌کردند. رد اولین نوع از این

1. Gluon 2. David Politzer 3. Frank Wilczek 4. David Gross

ذرات به‌طور غیرمنتظره و همزمان در دو آزمایشگاه مستقل از هم که روشهای کاملاً متفاوتی را به‌کار می‌بردند، آشکار شد. یک تیم، به سرپرستی ساموئل تینگ[1] در آزمایشگاه ملی بروک‌هیون ذره‌ای یافت که آن را J نام نهاد و گروهی دیگر در مرکز شتاب‌دهندهٔ خطی استانفورد به سرپرستی برتون ریشتر[2]، آشکار شدن ذره‌ای را گزارش کردند که همان جرم را داشت و آن را ψ نام نهادند. هر دوی این گزارشها معتبر بودند و هیچ‌کدام نیز سابقه نداشتند. بنابراین ذرهٔ جدید J/ψ نام گرفت. این ذره، سنگین و جرم آن سه برابر جرم پروتون بود. طول عمر آن، برای ذره‌ای با این جرم (و انرژی) زیاد، به‌طور شگفت‌انگیزی زیاد بود. مدلی بر مبنای کرومودینامیک کوانتومی و نیز وجود کوارک نوع چهارم، تصویر خوبی از J/ψ به دست داد. کوارک نوع چهارم «افسون[3]» یا c نامیده شد. J/ψ مزون و ساختار کوارکی آن به صورت $c\bar{c}$ است ($\bar{c}$ پادکوارک افسون است). موفقیت کرومودینامیک کوانتومی در مورد ذرهٔ J/ψ تأثیر مهمی در ورود مفهوم کوارک به جریان اصلی علم فیزیک داشت.

با کشف چهارمین کوارک، طرحی از خانواده‌ها یا نسلهای کوارکی نمایان شد. دو کوارک u و d که از همه سبکترند از نسل اول و کوارکهای s و c که مشخصاً سنگینترند از نسل دوم کوارکها هستند. در اواخر دههٔ ۱۹۷۰ با کشف ذرهٔ آپسیلون[4]، Y، که مزون است، طرح مذکور گسترش یافت. کشف این ذره، ایجاب می‌کرد که کوارک پنجمی هم وجود داشته باشد. این کوارک از انواع قبلی باز هم سنگینتر بود و به نسل سوم کوارکها تعلق داشت و به دلیلی نه چندان مشخص، کوارک «ته[5]» یا b نام گرفت.

چون کوارک پنجم وجود داشت، واضح بود که باید کوارک ششمی هم باشد تا سومین نسل کوارکها، تکمیل شود. در اواسط دههٔ ۱۹۹۰ دو طرح عظیم (که به‌طور دوستانه نتایج کار یکدیگر را وارسی می‌کردند) در شتاب‌دهندهٔ ملی آزمایشگاه فرمی در باتاویا[6] در ایالت ایلینویز انجام گرفت تا شواهدی بر وجود ذرهٔ خواهر کوارک ته بیابند. البته واضح بود که این ذره «سر[7]» یا t نامیده خواهد شد. این دو طرح در حدود یک هزار فیزیکدان و ارتشی از تکنیسینها را به خدمت گرفتند. از بین چند تریلیون رویداد انجام گرفته در یکی از آشکارسازها، دوازده رویداد به‌عنوان تولید زوج سر-پادسر در نظر گرفته شدند. این یک کار عظیم علمی روز بود که با تمام نیرو انجام می‌شد. رادرفورد اگر این پروژه را می‌دید حتماً وحشت‌زده می‌شد.

سه نسل از کوارکها، عناصر سازندهٔ مورد نیاز نظریه‌پردازان را به مقدار کافی در اختیار آنها می‌گذارد تا بتوانند ساختار همهٔ باریونها و مزونهای شناخته شده را توضیح دهند. طبق نظریهٔ متداول میدان کوانتومی، سومین دسته از ذرات که لپتون[8] نام دارند، فاقد ساختار هستند (آنها نقطه‌ای‌اند): نظریهٔ کوارک برای این دسته از ذرات حرفی برای گفتن ندارد. معهذا به‌نظر می‌رسد که آنها نیز سه خانواده یا نسل داشته باشند.

1. Samuel Ting 2. Burton Richter 3. charm 4. Upsilon 5. bottom 6. Batavia 7. top 8. Lepton

نسل اول لپتونها شامل الکترون e، هم منفی و هم مثبت (که پوزیترون نام دارد) و نوترینو، ν، است. چون نوترینو انواع مختلفی دارد، نوترینوی وابسته به الکترون را با ν_e نشان می‌دهند. ذرهٔ موئون، μ، دیرزمانی اسباب سرگیجهٔ فیزیکدانان شده بود. (ایزیدور رابی نق می‌زد که «این دیگر از کجا پیدایش شد؟») عاقبت، این ذره به‌عنوان یک ذرهٔ سنگین نظیر الکترون شناخته شد. موئون می‌تواند بار الکتریکی مثبت یا منفی داشته باشد و جرم آن حدوداً دویست برابر جرم الکترون است. در نظر گرفتن موئون به‌عنوان نظیر الکترون، ایجاب می‌کند که یک نوترینوی وابسته به میون ν_μ، نیز وجود داشته باشد. آزمایش عظیمی که به‌وسیلهٔ فیزیکدانان دانشگاه کلمبیا در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ در بروک‌هیون انجام شد، شواهدی بر وجود این نوترینوی نسل دوم به‌دست داد.

در دههٔ ۱۹۷۰، آزمایشهایی برای یافتن نسل سوم لپتونها صورت گرفت. ذره‌ای مشابه الکترون به‌طور غیرمنتظره در شتاب‌دهندهٔ خطی استانفورد کشف شد که τ (تاو) نام گرفت. ذرهٔ تاو، مانند الکترون و موئون می‌تواند بار مثبت یا منفی داشته باشد و جرم آن سه هزار و پانصد برابر جرم الکترون است. وقتی لپتون τ کشف شد، وجود نوترینوی وابسته به آن یعنی ν_τ نیز پذیرفته شد. این ذره، اخیراً مشاهده شده است. فهرست زیر خلاصه‌ای از سه نسل لپتونها و کوارکها را ارائه می‌کند:

نسل اول:

کوارکهای d و u

لپتونهای e و ν_e.

نسل دوم:

کوارکهای s و c

لپتونهای μ و ν_μ.

نسل سوم:

کوارکهای b و t

لپتونهای τ و ν_τ.

به یاد داشته باشید که به‌ازای هر یک از این ذرات، یک پاد ذرهٔ متناظر وجود دارد.

آیا نسل چهارمی از کوارکها و لپتونها وجود دارد؟ برای پاسخ به این پرسش، دو آزمایش پیچیده و هوشمندانه در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ در شتاب‌دهندهٔ خطی استانفورد و در مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا، CERN صورت گرفت و پاسخ منفی بود. این آزمایشها به‌طور غیرمستقیم نشان دادند که نوع چهارمی از نوترینو وجود ندارد. از اینجا نظریه‌پردازان نتیجه گرفتند که اگر نسل چهارمی از نوترینوها وجود ندارد، پس نسل چهارمی از کوارکها و وابسته‌های الکترون نیز وجود ندارد. به این ترتیب، این فهرست پایان‌یافته تلقی شد.

رقابت

مسیر نظری که گل‌ـمان در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ برای دست‌یابی به اکتشافات بزرگش پیمود، راهی پررهرو بود. بدون نام بردن از بعضی کسانی که در این راه به‌عنوان رقیب نزدیک، همسفر گل‌ـمان بوده‌اند، این داستان کامل نخواهد شد.

نظریه‌پرداز ژاپنی کازوهیکو نیشی‌جیما[1] در این اندیشه با گل‌ـمان سهیم بود که ذرات شگفت باید دارای یک عدد کوانتومی جدید باشند. یووال نه‌ئیمان[2]، سرهنگ ارتش اسرائیل و یک فیزیکدان آماتور، در کشف اصول تقارن نهفته در راه هشت‌گانه، سهیم بود. نه‌ئیمان وقتی که در لندن به‌عنوان وابستهٔ نظامی خدمت می‌کرد، در ایمپریال کالج لندن در رشتهٔ فیزیک تحصیل کرده بود. استاد او، عبدالسلام بود که برای کارش در نظریهٔ میدان الکتروضعیف مشهور است. او در ابتدا به فکر نه‌ئیمان در مورد تقارن SU(۳) علاقه‌ای نشان نداد، ولی وقتی فهمید که گل‌ـمان نیز در همین خط فعالیت می‌کند، نظرش را عوض کرد.

جورج تسوایگ[3] در کشف مفهوم کوارک با گل‌ـمان سهیم بود. او یکی از دانشجویان پژوهشگر گل‌ـمان بود و نظریهٔ خود را در سفری به CERN و مستقل از گل‌ـمان، پدید آورده بود. تسوایگ ذرات زیرهادرونی خود را «آس» می‌نامید. در نامگذاریهای او، باریونها که شامل سه آس هستند، «سه‌لو[4]» و مزونها که شامل دو آس هستند، «دولو[5]» نامیده می‌شوند. تسوایگ نظریهٔ خود را با جزئیاتش بنا کرد با این شرط که ممکن است آسها چیزی بیش از «ابزارهای یادآورندهٔ خیلی پیچیده» نباشند. معهذا از نظر او «این احتمال وجود داشت که مدل از آنچه تصور می‌رفت تقریب نزدیکتری از طبیعت باشد و آسهای دارای بارکسری به وفور یافت شوند.»

تسوایگ مایل بود تا بخت خود را در جای دیگری نیز بیازماید. انتظار می‌رفت که او مقالهٔ خود را به مجلهٔ CERN یعنی فیزیکال لترز بدهد. در عوض او تصمیم گرفت تا مقاله را به مجلهٔ وزین فیزیکال ریویو بدهد که قویاً آن را رد کردند. گل‌ـمان مسنتر و عاقلتر بود و انتظار آن را داشت که فیزیکال ریویو به مفاهیم عجیبی مثل ذرهٔ بنیادی قابل مشاهده‌ای که بارکسری دارد، واکنش منفی نشان دهد و از این‌رو، اولین مقاله‌اش دربارهٔ کوارک را در مجلهٔ فیزیکال لترز منتشر کرد. نظریهٔ تسوایگ فقط به‌صورت یک گزارش در CERN منتشر شد ولی مقاله و مؤلف آن تا حدودی اعتبارکسب کردند. وقتی تسوایگ به دنبال شغلی در یک دانشگاه بزرگ بود، رئیس بخش مربوطه، او را «شارلاتان» نامید.

کوارکها و جاگوارها

مورای گل‌ـمان را نمی‌توان به سادگی درک کرد. شخصیت او وجوه بسیاری دارد، بعضی خوب، بعضی بد و بعضی گیج‌کننده. همهٔ کسانی که او را می‌شناسند، قبول دارند که او یک نابغهٔ فیزیک نظری است و

1. Kazuhiko Nishijima 2. Yuval Ne'eman 3. George Zweig 4. Treys 5. Deuces

در مطرح کردن افکارش با استفاده از واژگانی غنی، استعداد عجیبی دارد. همچنین، علایق گوناگون و اغلب مرموزی دارد. زندگینامه‌نویس او فهرست این علایق را چنین برمی‌شمارد؛ تاریخ باستان، باستان‌شناسی، زبان‌شناسی، بوم‌شناسی حیات وحش، پرنده‌شناسی، سکّه‌شناسی و آشپزی فرانسوی و چینی. او سالها در کالتک، فعالیتهای میان‌رشته‌ای انجام می‌داد که تأثیر چندانی نداشت. در اواسط دهۀ ۱۹۸۰ به چند نفر از همکارانش که با او همفکر بودند ملحق شد و طرح مؤسسه‌ای را در سانتافه[1] ریختند که به «مطالعات مختلط» اختصاص داشت. این کار به آن معنی بود که گل‌ـمان موضوع کار خود را از ساده به مشکل تغییر داده است. مؤسسۀ سانتافه در سال ۱۹۸۷ تأسیس شد. ریاست این مؤسسه به عهدۀ جورج کانوی[2] گذاشته شد که قبلاً در لوس‌آلاموس مدیر تحقیقات بود و گل‌ـمان مدیریت هیأت علمی مؤسسه را بر عهده گرفت.

گل‌ـمان بیش از هر فیزیکدانی در این کتاب، در سطوح بالای دولتی مشغول خدمت بوده است. او در سالهای دهۀ ۱۹۶۰ به گروه مشاورینی پیوست که وابسته به مؤسسۀ تحلیل مسائل دفاعی بود. اعضای این گروه خود را «جیسون[3]» می‌نامیدند. گروه به مسائل سیاست دفاعی می‌پرداخت، مسائلی نظیر دستگاه دفاع ضد موشکی بالستیک و آشکارسازی انفجارهای هسته‌ای. آنها گروهی از نخبگان بودند مشتمل بر هانس بته، ادوارد تلر، جان ویلر، یوجین ویگنر و فریمن دایسون. گل‌ـمان در هیأت مشاوران علمی ریچارد نیکسون[4] نیز خدمت کرده و اگر کندی[5] ترور نمی‌شد، ممکن بود مشاور علمی رابرت کندی بشود. گل‌ـمان در خارج از حوزۀ فیزیک نیز مناصب معتبری داشته است که از آن جمله می‌توان انتصاب او در هیأت مدیرۀ مؤسسه‌های اسمیتسونین[6] و بنیاد مک آرتور[7] را نام برد.

گل‌ـمان سابقۀ کار رشک‌برانگیزی در کمیته‌های مختلف دارد که از قضا در آنها با دیگر اعضای کمیته‌ها، عدم توافق جدی نداشته است، معهذا او عادت داشت که همکارانش، به‌ویژه آنهایی را که با او رقابت داشتند، بکوبد یا از دور خارج کند. سوژۀ مورد علاقۀ او برای این منظور، ریچارد فاینمن بود که البته فاینمن هم این رفتار را متقابلاً تلافی می‌کرد. دفترهای آن دو در کالتک در نزدیکی هم قرار داشت و منشی مشترکی هم داشتند. ارتباط آن دو در ابتدای کار، همکاری سازنده و مطلوبی بود. هر دوی آنها به یک طرف مشورت نیاز داشتند تا بتوانند فکرهای جدید را محک بزنند. گل‌ـمان می‌نویسد «وقتی ما با هم دربارۀ فیزیک بحث می‌کردیم، در بین محاسبات ریاضی، تبادل افکار و شوخی‌های احمقانه می‌کردیم که به جروبحثهای داغی منجر می‌شد و این نشاط‌آور بود.» آنها این مباحثات را «پیچاندن دُم کیهان» می‌نامیدند.

شخصیتهای فاینمن و گل‌ـمان مثل ذره و پاد ذره، مخالف یکدیگر بود. وقتی آن دو به هم می‌رسیدند اگر نگوییم پرتو گاما ایجاد می‌شد، باید گفت آتش‌بازی به راه می‌افتاد. فاینمن هم مثل

1. Santa Fe 2. George Conway 3. Jason 4. Richard Nixon 5. Kennedy
6. Smithsonian Institute 7. MacArthur Foundation

گل-مان در هنر چزاندن دیگران استاد بود. پس از یک مکالمه که در آن، گل-مان دانش زبان‌شناسی خود را به رخ کشید و فاینمن با او موافق نبود، آخرسر فاینمن گفت: «مورای، صد سال دیگه هیچکی یادش نمی‌مونه که اسم تو خط فاصله داشت یا نه.» گل-مان دوست داشت کتابهای مونولوگی فاینمن را «کتابهای شوخی دیک» بنامد. در مجموعه مقالاتی که در یادبود فاینمن با نام بیشتر چیزهای خوب منتشر شد، گل-مان خاطرنشان کرد «از یکی از رفتارهای معروف فاینمن خوشم نمی‌آمد. دور و بر خودش هاله‌ای اسطوره‌ای پدید آورده بود و وقت و انرژی زیادی صرف می‌کرد تا دربارهٔ خودش لطیفه درست کند. بعضی اوقات، این کار به تلاش چندانی هم نیاز نداشت.»

گل-مان دو ازدواج موفق داشته است. در اواخر دههٔ ۱۹۷۰، همسر اولش مارگارت به سرطان روده مبتلا شد و قبل از آنکه بیماری او تشخیص داده شود و دورهٔ درمانی آغاز گردد، سرطان به کبدش سرایت کرد. او در سال ۱۹۸۱ درگذشت و تلاشهای دردناکی که برای درمان سرطان کبد او صورت گرفت، بیهوده بود. این واقعه برای گل-مان، ضایعهٔ جبران‌ناپذیری بود. مارگارت یکی از تکیه‌گاههای او در زندگی بود.

در همان موقع، گل-مان به‌عنوان یک پدر نیز در وضعیت دردناکی قرار داشت. دخترش لیزا که در کودکی، وظیفه‌شناس و نمونه بود گرایش تندی به گروههای سیاسی جناح چپ پیدا کرده بود. مرد جوانی که از یک خانوادهٔ ثروتمند نیویورکی بود، او را ترغیب کرده بود تا عضو یک گروه انقلابی به نام سازمان مرکزی مارکسیست-لنینیستهای ایالات متحده، بشود. قهرمان آنها جوزف استالین و ایده‌آل سیاسی آنها نظام دیکتاتوری انور خوجه[1] در آلبانی بود. گل-مان فقط گاهگاهی لیزا را می‌دید و تلاشهای او برای تغییر دادن مسیر علایق لیزا به جایی نرسید. چند سال بعد رابطهٔ او با پسرش نیک، نیز تیره شد. این جدایی‌ها برای مدت یک دهه، گل-مان را آزار می‌داد.

گل-مان به نسبت یک دانشمند، زندگی پُرخرجی داشت. او در سانتافه، آسپن و پاسادنا، خانه داشت. جانسون می‌نویسد «خانهٔ او در سانتافه، مثل موزه بود. او کلکسیونهایی از ظروف سفالی بومی آمریکا، آثار هنری آفریقا، کتابهای نایاب و سلاحهای قدیمی داشت. کلکسیون سلاحهای قدیمی او شامل یک زوبین اسکیمویی، یک گرز متعلق به شمال آفریقا، یک پرتابگر فوتی با دارتهای سمّی، یک خنجر سوماترایی و یک شمشیر چینی مخصوص گردن‌زدن بود. خانهٔ او در پاسادنا، تیره و با ابهت بود و سردر ورودی آن به یک مؤسسه می‌ماند. به نظر خیلی از کسانی که به آنجا می‌آمدند، بیشتر شبیه یک موزه بود تا خانه. مکانی که مورای کلکسیون فزایندهٔ عتیقه‌هایش را در آن نگه می‌داشت.» علاوه بر اینها، مورای خودروهای پرزرق و برق می‌پسندید. او بخشی از جایزهٔ نوبل خود را برای خرید یک ماشین جاگوار سِدان خرج کرد.

گل-مان یک سخنران ماهر و بلیغ و شخصی خوش‌رو و خوش‌بیان است. معهذا به دلایلی که شاید به سخت‌گیریهای پدرش مربوط شود، همیشه از نوعی ناتوانی در نوشتن رنج می‌برد. او نمی‌توانست

1. Enver Hoxha

پایان نامهٔ خود در ییل را تمام کند. تز دکتری او در MIT حدوداً با شش ماه تأخیر ارائه شد. او در هنگام دریافت جایزهٔ نوبل سخنانی ایراد کرد، ولی تحویل نسخهٔ مکتوب آن سخنرانی را که باید در نشریهٔ معروف $LePrixNobel$ (جایزهٔ نوبل) منتشر می‌شد دائماً پشت‌گوش می‌انداخت. ویراستار نشریه به مدت شش ماه برای او پیامهای یادآوری می‌فرستاد و او هم به خاطر تأخیر عذرخواهی می‌کرد، معهذا عاقبت نتوانست متن را به موقع ارسال کند.

وقتی از او درخواست می‌شد تا مقاله‌ای برای مجله‌ای ارسال کند، بازهم وضع او به همین منوال بود. مثلاً به ویراستار یک جشن‌نامه این‌گونه پاسخ داد: «متأسفانه هنگامی که من برای ارسال مقاله به چنین نشریاتی قول می‌دهم، تقریباً هیچ‌گاه به قولم عمل نمی‌کنم. بنابراین یاد گرفته‌ام که در وهلهٔ اول چنین قولی ندهم و متأسفم که باید درخواست شما را رد کنم.» حتی نوشتن توصیه‌نامه هم برای او مشکل بود. به یکی از دانشجویان قدیمش گفت «متأسفانه نوشتن نامه برای من خیلی مشکل است و توصیه‌نامهٔ کتبی برای کسی نمی‌نویسم. ولی اگر توصیهٔ شفاهی خواستید می‌توانید بگویید با من تماس بگیرند.»

وقتی گل‌ـمان تصمیم گرفت کتابی برای همگان بنویسد، تعلل او در نوشتن به اعلاء درجه بروز کرد. او از موفقیت فاینمن و هاوکینگ که هر دوی آنها کتابهای پرفروش منتشر کرده بودند، اطلاع داشت. جان براکمن[1] که یک کارگزار اسم‌ورسم‌دار در امور نشر بود، مشتاقانه از این طرح استقبال کرد و البته او هم موفقیت فاینمن و هاوکینگ را در نظر داشت. او یک نویسندهٔ علمی معروف را استخدام کرد تا با همکاری گل‌ـمان یک طرح پیشنهادی برای کتاب آماده کنند. شرکت Bantam Books، ناشر کتاب تاریخچهٔ زمان هاوکینگ، برای خرید حق چاپ کتاب در ایالات متحده و کانادا، مبلغ پانصد و پنجاه هزار دلار پیشنهاد کرد که بنا بود ۲۵ درصد این مبلغ، پیشاپیش به گل‌ـمان پرداخت شود. براکمن از ناشران خارجی نیز پیشنهاد پیش‌پرداختهای سنگینی دریافت کرد. معاملات براکمن، پرسودترین معاملاتی‌اند که در ارتباط با کتابهای علمی عامه‌فهم انجام شده‌اند. طرح پیشنهادی کتاب در اواخر سال ۱۹۹۰ آماده شد و متن آن باید تا ماه ژوئن سال ۱۹۹۲ آماده می‌شد. عنوان کتاب، کوارک و جاگوار بود. این کتاب می‌خواست خواننده را از طرحهای سادهٔ طبیعت به طرحهای پیچیده برساند. کوارک، تمثیلی از طبیعت در ساده‌ترین سطح آن بود و جاگوار[2]، استعارهٔ زیبای گل‌ـمان برای پیچیدگی طبیعت بود.

برای گل‌ـمان زمان مناسبی نبود که روی کار پرزحمت و شاق نوشتن تمرکز کند. در تابستان سال ۱۹۹۱، او و مارسیا ساوت‌ویک[3] نامزد شده و برای ماه ژوئن سال ۱۹۹۲ قرار ازدواج گذاشته بودند. این زمان، مصادف با پایان مهلت تحویل متن کتاب به ناشر بود. ساوت‌ویک، شاعره‌ای است که با گل‌ـمان در آسپن آشنا شده بود. او گاهی در گردهم‌آیی نویسندگان در آسپن سخنرانی می‌کند.

1. John Brockman

۲. Jaguar: حیوانی از خانوادهٔ گربه‌سانان و شبیه پلنگ. م.

3. Marcia Southwick

ازدواج آن دو، موفقیت‌آمیز بود ولی طرح کتاب موفقیتی به همراه نداشت. کمک دو نفر ویراستار و راهنماییهای ساوت‌ویک هم نتوانست آن را نجات دهد. ناشر (Bantam)، متن را نپذیرفت و گل-مان مجبور شد مبلغ پیش‌پرداخت را پس بدهد. پس از آن، ناشر کوچکتری به نام W. H. Freeman پیشقدم شد و طرح را با یک دهم مبلغ پیشنهادی اولیهٔ Bantam، در اختیار گرفت. کمک ویرایشی بیشتری به آن ارائه شد. این کمک شامل بازنگری متن به‌وسیلهٔ نویسنده‌ای به نام کورمک مک‌کارتی[1] بود. عاقبت، کوارک و جاگوار در سال ۱۹۹۴ منتشر شد. گل-مان در پیشگفتار کتاب متذکر شد که «هرگز در زندگی تا به این حد سخت بر روی چیزی کار نکرده بودم.» این کتاب برای ناشر، برگردان مالی خوبی داشت و امید است که برای مؤلف نیز، داشته باشد.

گل-مان هنوز هم در سانتافه زندگی می‌کند. مثل همیشه، از کوههای بلند، صحراها و دره‌های عمیق نیومکزیکو لذت می‌برد. و هنوز هم خیلی سفر می‌کند تا زیبایی و گوناگونی طبیعت را ببیند. (تعداد گونه‌های پرندگانی را که او دیده به عدد شگفت‌آور چهارهزار گونه بالغ می‌شود.) ازدواج دوم او موفقیت‌آمیز بوده و با دختر و پسرش، نیک و لیزا، آشتی کرده است. آنچه او اکنون انجام می‌دهد، کاری است که بزرگان علم در کهنسالی از نظر هوشی به ندرت انجام می‌دهند: او درصدد آن است که از حداکثر حدود مطالعات علمی‌اش پا را فراتر گذارد. او یک‌بار به مخاطبی در سخنرانی‌اش گفت: «برای من دو چیز از هم جدا نشدنی‌اند، عشق به زیبایی طبیعت و آرزوی اکتشاف بیشتر تقارن و ظرافت قانونهای طبیعت.»

1. Cormac McCarthy

ix

اخترشناسی، اخترفیزیک و کیهان‌شناسی

خلاصهٔ تاریخی

داستان ما در همان جایی که آغاز شد، پایان می‌پذیرد. همه‌جا با فیزیکدانانی همراه بودیم که آسمان شب را برای یافتن سرنخهایی از عالمی که در آن زندگی می‌کنیم به دقت جستجو می‌کردند. در دو فصل اول دیدیم که گالیله با تلسکوپ خود، این نظر کوپرنیکی را تأیید کرد که زمین و سیارات دیگر به دور خورشید می‌گردند. و نیوتون با نظریهٔ گرانش عمومی خود توانست مدارهای سیارات و حرکت همهٔ اجرام سماوی دیگر را محاسبه کند. در این بخش از کتاب، با گامهای بلندی که فیزیکدانان در قرن بیستم برداشته‌اند تا نقشهٔ عالم را تهیه و دینامیک آن را تعیین کنند و تاریخ آن را بنویسند، آشنا خواهیم شد. شخصیتهای اصلی داستان در این فصل عبارتند از ادوین هابل[1]، اخترشناس، سوبراهمانیان چاندراسخار[2]، اخترفیزیکدان و استیون هاوکینگ[3] که کیهان‌شناس است.

ادوین هابل نخستین کسی بود که کهکشانهای فراتر از کهکشان خودمان را شناسایی کرد. او بزرگترین تلسکوپهای موجود در زمان خود را به‌کار گرفت تا فواصل قلمرو فرا کهکشانی را برآورد کند. سپس با مطالعهٔ دقیق رنگهای کهکشانها پی‌برد که هر چه کهکشانی از ما دورتر باشد، رنگ آن بیشتر به سرخ منتقل می‌شود. او رابطهٔ خطی ساده‌ای بین فاصله و «انتقال به سرخ» پیشنهاد کرد. انتقال به سرخ یک کهکشان را می‌توان به معنی دور شدن آن از ما تعبیر کرد، بنابراین داده‌های هابل حاکی از این بود که کل عالم در حال انبساط است. هابل در ابتدا نسبت به پذیرش چنین تعبیری، محتاط بود ولی دیگران خیلی راحت متقاعد شدند و به این ترتیب، نخستین گامها در راه پدید آمدن نظریهٔ «مهبانگ» برداشته شد که نظریه‌ای دربارهٔ منشأ و تاریخ عالم، اینک مورد قبول عام واقع شده است.

سوبراهمانیان چاندراسخار (که به «چاندرا» معروف بود) در کندوکاو پیچیدگی‌های فیزیک ستارگان از همه بهتر بود. او طی دورهٔ کاری درازمدتش به‌عنوان یک اخترفیزیکدان، به ساختار، دینامیک و تحول ستارگان پرداخت. یکی از آخرین تلاشهای او، تحقیق دربارهٔ نظریهٔ ریاضی «سیاهچاله‌ها» بود. سیاهچاله‌ها، اجرام پرجرمی هستند که بر اثر رُمبش گرانشی بسیار شدید، تشکیل شده‌اند. مهمترین ابزار

1. Edwin Hubble 2. Subrahmanyan Chandrasekhar 3. Stephen Hawking

نظری او برای تحقیق دربارهٔ سیاهچاله‌ها، نظریهٔ گرانی ابراز شده در قالب نظریهٔ نسبیت عام اینشتین بود.

آخرین فیزیکدانی که به او خواهیم پرداخت، استیون هاوکینگ است. او نیز شیفتهٔ ویژگی عجیب سیاهچاله‌ها بود. او و همکارش، راجر پنروز، مطالعه‌شان را بر بی‌نهایتهای نامطلوبی متمرکز کردند که بنابر پیش‌بینی نسبیت عام، در مرکز سیاهچاله‌ها، جا خوش کرده‌اند. آنها با بدگمانی به این «تکینگی‌ها» می‌نگریستند، به‌ویژه وقتی فهمیدند عالمی که در سیطرهٔ نسبیت عام و سناریوی مهبانگ است، باید از این تکینگی نمایان آغاز شده باشد. یک راه گریز از تکینگی‌های ناجور، پدید آوردن نظریه‌ای مرکب از نسبیت عام و نظریهٔ کوانتومی است. چنین نظریهٔ وحدت‌بخشی هنوز به وجود نیامده است ولی هاوکینگ و کیهان‌شناسان دیگر، مثل همیشه خوش‌بین‌اند.

۲۷

فراتر از کهکشان

ادوین هابل

اهل میسوری

ادوین هابل مردی بود که آرمانهای بزرگی داشت و به میزان قابل ملاحظه‌ای هم به خواسته‌هایش رسید. او در رصد قلمروهای فراتر از کهکشان ما، پیشگام بود و همین او را سرآمد اخترشناسان زمانهٔ خود و تمامی قرن بیستم کرد. رصدهای اخترشناسی او، اولین نگاه به کیهان‌شناسی نوین بر مبنای عالمی بود که فضای آن در حال گسترش است. او با یک خانوادهٔ متموّل اهل کالیفرنیای جنوبی وصلت کرد و بسیاری از دوستان او، از نخبگان تحصیلکردهٔ کالیفرنیا بودند.

ولی برای هر موفقیتی باید بهایی پرداخت. همان‌طور که هابل از نظر اجتماعی و اقتصادی ترقی می‌کرد، منش او به شکلی عوض می‌شد که گاهی تأمل‌برانگیز می‌نمود. بین هابل عادی اهل غرب میانه و هابل دیگری که انگلیس‌دوست بود و با بزرگان هالیوود گرم می‌گرفت، فاصلهٔ زیادی وجود داشت. در این راه هابل با بخشی از اعضای خانواده‌اش قطع رابطه کرد و به هیچ‌یک از آنها اجازه نداد که با همسر و خانواده‌اش ملاقات کنند. کوچکترین خواهر هابل، بتسی، در مصاحبه‌ای گفت: «من همیشه در فکرم که ادوین چطور از این همه بدرفتاری که با خانوادهٔ خود کرد، احساس گناه نمی‌کرد. ولی مردان بزرگ باید به راه خود بروند و احساسات عده‌ای هم در این مسیر جریحه‌دار می‌شود. ما زیاد به این موضوع اهمیت ندادیم.» بعضی از همکارانش او را «مغرور و ازخودراضی» می‌دانستند و مانع رسیدن او به یکی از مهمترین خواسته‌هایش یعنی مدیریت رصدخانهٔ بزرگ مونت پالومار شدند.

هابل بی‌نهایت خوش‌تیپ، قدبلند و ورزشکار بود و معمولاً پیپ می‌کشید. یکی از همسایه‌هایش که خیلی او را تحسین می‌کرد، تیپ او را «خیلی، خیلی مردانه» توصیف می‌کند. آنیتا لوس[1] نویسنده‌ای

1. Anita Loos

که به خاطر رمان آقایان بلوندها را ترجیح می‌دهند که به صورت نمایشنامه‌ای با همین عنوان در برادوِی درآمد، او را برای ایفای نقش یک اخترشناس مشهور استخدام نمی‌کرد زیرا «نمی‌شد او را به شکل یک کلارک گیبل شاداب در آورد.»

ادوین در سال ۱۸۸۹ به دنیا آمد، در جایی دور از صحنهٔ موفقیتهایش، یعنی در مارش‌فیلد[1] میسوری. او سومین فرزند از هفت فرزند خانواده‌ای متشکل از سه برادر و چهار خواهر بود. پدر آنها، جان، در کار حقوق تعلیم دیده بود ولی کار بیمه را با همهٔ سفرهایی که به همراه داشت، ترجیح می‌داد. همسر او ویرجینیا لی («جنی») جیمز[2]، ظاهراً غیبتهای متعدد جان را با زندگی در نزدیکی والدینش در مارش‌فیلد، تحمل می‌کرد. گیل کریستیانسون[3]، زندگینامه نویس ادوین هابل، چهرهٔ ناخوشایندی از جان ترسیم می‌کند. او می‌نویسد: «جان هابل محصول یک نظام آموزشی خشک و پرورش خشکه مقدس بود. مردی کله شق و خشن که آمیزه‌ای از بزرگ‌منشی اخلاقی و جاه‌طلبی بی‌امان بود. آدم جدی و پرتوقعی که حسابی از دیگران کار می‌کشید و در مواقع حساس، همیشه تصمیم‌گیرندهٔ نهایی بود. ادوین به پیروی از الگوی پدرش، از الکل دوری می‌جست و به‌ندرت ناسزا می‌گفت. تنها عادت بدی که از پدرش به ارث برد، عشق به توتون بود. جان هم پیپ و هم سیگارهای بزرگ می‌کشید.»

در سوی دیگر، جنی همواره در اختیار فرزندانش بود. کریستیانسون دربارهٔ او می‌نویسد: «دخترانش او را از همه‌نظر زنی دوست داشتنی می‌دانستند.» او مانند شوهرش عمیقاً مذهبی بود ولی «در تفکر او، باور به رستگاری جایگاهی والاتر از نفرین شدگی داشت.»

ادوین ظاهراً به پدربزرگهایش بیشتر نزدیک بود تا به پدرش، پدربزرگ پدریش برای او داستانهای قشنگی تعریف می‌کرد که بسیاری از آنها دربارهٔ تاریخچهٔ واقعی خانواده‌اش بودند. پدربزرگ مادریش که نسبت دوری با جسی جیمز[4] داشت، ادوات لازم برای ساخت یک تلسکوپ را فراهم کرد. ادوین در جشن تولد هشت سالگی‌اش اجازه پیدا کرد که تا پاسی از شب گذشته، آسمان را با آن تلسکوپ نظاره کند.

وقتی ادوین به سن ده سالگی رسید، پدرش به‌عنوان بیمه‌گر در شرکت بیمه، اعتباری پیدا کرده و در پست مدیریتی خوبی در شیکاگو مشغول کار شده بود. همهٔ خانواده به محلهٔ ویتون[5] در حومهٔ شهر نقل مکان کردند و تقریباً برای یک دهه، در همان‌جا ماندگار شدند. ادوین در مدرسهٔ مرکزی ویتون که همهٔ مقاطع تحصیلی را داشت، دانش‌آموز خوبی بود ولی نابغه نبود. نمره‌های کارنامهٔ او در ستون رفتاری، چندان رضایت‌بخش نبود. ولی بعد از چند گفتگوی جدی با پدرش، این مسئله حل شد. ادوین از همکلاسیهایش قدبلندتر بود و از این امتیاز استفاده می‌کرد تا در ورزشها از همه بهتر شود. او عملاً یک تیم دوی تک نفره بود. در فوتبال در پست تکل‌زن، ستاره بود و در بسکتبال در پست میانی بازی

1. Marshfield 2. Virginia Lee James 3. Gale Christianson 4. Jesse James 5. Wheaton

می‌کرد. مدیر مدرسهٔ او در مراسم فارغ‌التحصیلی می‌خواست میزان جسارت و امیدواری او را بسنجد و به او گفت: «ادوین هابل، من چهار سال است که مراقب تو هستم و هیچ‌وقت ندیده‌ام که تو بیشتر از ده دقیقه درس بخوانی.» و پس از یک مکث پرشور، لبخندی زد و گفت، «یک بورس تحصیلی از طرف دانشگاه شیکاگو به تو داده شده است.»

از بدو ورود به دانشگاه در ۱۹۰۶، ادوین دو هدف داشت: یکی آنکه در رشتهٔ اخترشناسی تحصیل کند و دیگر آنکه یک بورس تحصیلی رودز[1] به‌دست آورد. از شبی که اجازه یافت تا با تلسکوپ پدربزرگش به آسمان نگاه کند، همواره رؤیای اخترشناسی را درسر داشت. جوایز رودز که به تازگی برقرار شده بود، به دانشجویان آمریکایی داده می‌شد که می‌خواستند در مقطع بالاتر از کارشناسی در یکی از کالج‌های آکسفورد تحصیل کنند. پدر ادوین فقط با یکی از اهداف او موافق بود. برای او باعث افتخار بود که پسرش در رقابت برای کسب بورس تحصیلی رودز برنده شود ولی اینکه در رشتهٔ اخترشناسی کار کند اصلاً قابل بحث نبود. از نظر او، ادوین به کار حقوق تعلق داشت.

مخالفت جان با اخترشناسی، درست نبود. تحصیل در رشتهٔ اخترشناسی در دانشگاه شیکاگو در اوایل دههٔ ۱۹۰۰، انتخابی عالی بود. خود دانشگاه، نهاد تازه تأسیسی بود ولی گروه فیزیک آن قوی بود. آلبرت مایکلسون[2]، یکی از دانشمندان معروف آنجا بود. او اندازه‌گیری پیچیده‌ای انجام داده بود که ثابت بودن سرعت نور را تأیید می‌کرد. رابرت میلیکان[3] نیز آنجا بود. چندی بعد میلیکان توانست بار الکترون را به‌وسیلهٔ آزمایش معروف قطرهٔ روغن در میدان الکتریکی، به دقت اندازه‌گیری کند. هر دوی آنها برندهٔ جایزهٔ نوبل شدند، مایکلسون در سال ۱۹۰۷، مقارن با سال دوم تحصیل ادوین و میلیکان در سال ۱۹۲۳. رصدخانهٔ یرکز[4] که در ویلیامز بِی[5] ویسکانسین قرار داشت نیز وابسته به گروه فیزیک دانشگاه شیکاگو بود. این رصدخانه، بی‌تردید یکی از دلایل مهم ادوین در انتخاب آن دانشگاه بود. این رصدخانه در اواخر دههٔ ۱۸۹۰ به‌وسیلهٔ جرج اِلری هیل[6] تأسیس شده بود و بعدها تأثیر زیادی بر زندگی ادوین گذاشت. تأسیسات یرکز محل استقرار یکی از بزرگترین تلسکوپهای آن زمان بود و یک آزمایشگاه بزرگ فیزیک را نیز تحت پوشش داشت.

بتسی، خواهر ادوین، به یاد می‌آورد که طی سالهای تحصیل ادوین در دانشگاه شیکاگو او «فقط یک فکر درسر داشت و به هیچ کس اجازه نمی‌داد که ذهنش را از آن فکر منحرف کند.» آن فکر، اخترشناسی بود، ولی پدرش هنوز مانع او می‌شد. هلن، خواهر دیگر ادوین چنین به یاد می‌آورد: «اگر پدرمان می‌دانست که ادوین می‌خواست به چنین کار عجیب و غریبی مشغول شود، اصلاً نمی‌گذاشت به دانشگاه برود.» به این ترتیب، اخترشناس مشتاق، همزمان دو مسیر را تعقیب کرد: او درسهای لازم

1. Rhodes scholarship 2. Albert Michelson 3. Robert Millikan 4. Yerkes 5. Williams Bay
6. George Ellery Hale

برای تحصیلات تکمیلی اخترشناسی را گرفت و همزمان به فراگیری دروس پیش‌نیاز برای پذیرش از مدرسهٔ حقوق پرداخت.

شاید خواهران هابل به این نکته توجه نکرده بودند، ولی ادوین هدف دیگر خود یعنی بورس تحصیلی رودز را از یاد نبرده بود. او از دیگر شرکت‌کنندگان در رقابت، عاقلتر بود و انتظار آن را داشت که امتحانات ورودی شامل قسمتهایی نظیر زبان لاتین باشد. او به پدربزرگش چنین نوشت: «کلمهٔ مطالعه به بخشی از نام من تبدیل شده، برای آمادگی امتحانات بورس تحصیلی رودز، تابستان امسال فقط مشغول مطالعهٔ زبان لاتین بوده‌ام.» ممتحنان رودز از شرکت‌کنندگان در آزمون چیزی بیش از معلومات دانشگاهی توقع داشتند. آنها توانایی رهبری متقاضی را ارزیابی می‌کردند و گوشه چشمی هم به قابلیتهای ورزشی داشتند. ادوین در دانشگاه، مانند مدرسه، یک ستارهٔ ورزشی نبود ولی در تیم قهرمانی بسکتبال که غالباً به‌عنوان رزرو در آن بازی می‌کرد، عملکرد قابل قبولی داشت.

با این همه ادوین در عرصهٔ امتحانات رودز، بهتر از همه ظاهر شد. او در ۱۹۱۰ به‌عنوان برندهٔ بورس تحصیلی رودز از ایلینویز، اعلام شد که به او اجازه می‌داد تا در یک دورهٔ سه ساله در یکی از کالجهای آکسفورد در رشته‌ای به انتخاب خودش و با مقرری سالانهٔ هزار و پانصد دلار، به تحصیل بپردازد. وقتی یکی از خبرنگاران پردیس دانشگاه از او دربارهٔ سمت و سوی تحصیلاتش در آکسفورد سؤال کرد، او محتاطانه در جواب گفت: «هنگامی که در شیکاگو تحصیل می‌کردم، توجه خود را عمدتاً به علوم و به ویژه فیزیک، معطوف داشته بودم، معهذا تصمیم دارم در آکسفورد به تحصیل حقوق و حقوق بین‌الملل بپردازم، چون بسیاری از موارد درسی عالی در این دو رشته، در آن دانشگاه ارائه می‌شوند.»

بورس تحصیلی رودز

در کوئینز کالج آکسفورد (کالج ادموند هالی)، ادوین بلافاصله انگلیس‌دوست شد و همین‌گونه هم باقی‌ماند. به زودی نامه‌های او مملو از اصطلاحات محلی آکسفورد شد. او سعی می‌کرد تا لهجهٔ آکسفوردی را هم تقلید کند که البته همیشه هم خوب از آب درنمی‌آمد. این کار او اسباب خندهٔ همکلاسیهایش شده بود. یکی از آنها چنین به یاد می‌آورد: «او سعی می‌کرد تا کلمات را با لهجهٔ غلیظ انگلیسی ادا کند درحالی‌که همهٔ ما سعی می‌کردیم تا لهجهٔ بومی خودمان را حفظ کنیم. ما به این کار او می‌خندیدیم و معتقد بودیم که او در این کار موفق نخواهد شد.»

ادوین که همیشه شیفتهٔ یادگیری یک ورزش جدید بود، قایقرانی با پارو را انتخاب کرد و مراحل سنتی مربوط به شاگردان نوآموز را تحمل کرد. او حالا قویتر شده بود، هنوز بدنی متناسب داشت و برای عضویت در تیم قایقرانی کوئینز کالج کاملاً مناسب بود ولی دررفتگی مچ پایش در زمان نامناسب، به عضویت او در این تیم پایان داد.

ادوین به قولش وفادار ماند و درس حقوق را دنبال کرد. او امید داشت تا دروسی که در شیکاگو گذرانده بود، برای معافیت او از امتحان مقدماتی حقوق کافی باشد. ولی دوره‌های درسی فیزیکی که او

گذرانده بود، مورد پسند رئیس کوئینز قرار نگرفت و تقاضای ادوین را رد کرد. به این ترتیب او مجبور شد یک دورهٔ آمادگی سه ماههٔ متمرکز همراه با نظم و انضباط را بگذراند. مثل همیشه وقتی با چالشی مواجه می‌شد، بر آن فایق می‌آمد. در آن امتحان موفق شد ولی این تجربه برایش سخت و فرساینده بود و به او درسی داد که هرگز فراموش نکرد. او دربارهٔ این تجربه در نامه‌ای به مادرش، جنی (با تأکید بر هجای بریتانیایی کلمات)، چنین نوشت: «کار کردن فقط برای کار و نه برای هیچ‌چیز دیگر، بیزاری به همراه دارد. . . برای آنکه کار لذت‌بخش شود، باید هدف بزرگی داشته باشد؛ هدفی آن‌قدر بزرگ که رؤیای آن و انتظار تحقق آن، بر بیزاری از کار غلبه کند. پس تا آن زمان که کسی هدفی نداشته باشد که تمام زندگی‌اش را با آن یکی بداند، کار کردن رضایتی به همراه نخواهد داشت.» جنی می‌توانست حدس بزند که «هدف بزرگ» می‌تواند کلید ایجاد انگیزه در زندگی پسرش باشد.

این مرد اهل میسوری جهان‌دیده می‌شد. هر وقت می‌توانست به اروپا سفر می‌کرد و به طرف آلمان کشیده می‌شد. او تحت تأثیر قدرت نظامی و کارآیی آلمان قرار گرفته بود و می‌ترسید که اگر در اروپا جنگی دربگیرد، اوضاع چندان به سود انگلیس پیش نرود. او فعالیت ورزشی جدید در آلمان پیدا کرده بود و آن حل اختلافات ناموسی به کمک دوئل با شمشیر بود. او با تشریح پر احساس این «ورزش»، والدینش را وحشت‌زده کرد. مثلاً می‌گفت: «در طول مبارزه، شخص حتی نباید سرش را به اندازهٔ تار مویی حرکت دهد، حتی یک مژه هم به ندرت زده می‌شود از ترس آنکه مبادا تمامی گونه‌اش شکافته، گوشش قطع یا بینی‌اش دو پاره شود.» دیدن خون در هنگام تماشای دوئل‌ها، ادوین را ناراحت نمی‌کرد ولی گاهی به نظرش می‌رسید که بعضی آثار زخمها نابجا و بیخود هستند.

پدر و مادر ادوین دربارهٔ دوستی او با هربرت ترنر[1] که استاد اخترشناسی و مدیر رصدخانهٔ آکسفورد بود، چیزی نمی‌دانستند. ترنر و همسرش، دیزی، چندین‌بار ادوین را به خانه‌شان دعوت کردند. در یک موقعیت، ادوین به آداب میسوریایی‌اش بازگشت و میزبانان را شیفتهٔ خود کرد. او در هنگام ترک مهمانی خطاب به دیزی گفت: «خانم محترم، این منتهای خوبی شما را می‌رساند که مرا برای چنین مهمانی نهاری پذیرفتید.» پس از یک مهمانی شام که ادوین در آن حضوری شایان توجه داشت، یکی از مهمانان به دیزی گفت: «شما گفته بودید که از یک دانشجوی کارشناسی کوئینز برای شام دعوت کرده‌اید ولی نگفته بودید که او از خوش‌تیپی به آدونیس[2] می‌ماند.»

هنگامی که ادوین در انگلستان و در اروپا در حال یافتن هویت جدیدی بود، سلامتی پدرش رو به افول گذاشت. جان از نوعی بیماری کلیه که بیماری برایت[3] یا نفریت نام داشت، رنج می‌برد. در تابستان سال ۱۹۱۲ معلوم شد که او در ظرف چند ماه دچار نارسایی کامل کلیوی خواهد شد. این خبر در پاییز همان سال به ادوین رسید و او از پدرش اجازه خواست تا به خانه بازگردد. جان در پاسخ، دستور داد که ادوین در انگلستان بماند و درسش را تمام کند. جان هابل در نیمه‌های ماه ژانویهٔ سال ۱۹۱۳ درگذشت.

1. Herbert Turner

۲. Adonis: جوانی بسیار زیبا در اساطیر یونان باستان

3. Bright's disease

به طوری که گیل کریستیانسون می‌نویسد، «مرگ جان برای ادوین، واقعه‌ای رها بخش بود.» ادوین همیشه تحت حاکمیت قوانین سخت‌گیرانهٔ پدرش زندگی کرده بود و اکنون احساس می‌کرد که آن قیود برداشته شده‌اند. اکنون زمان آن رسیده بود که بتواند آزادانه دربارهٔ آن «هدف بزرگ» فکر کند که قبلاً دربارهٔ آن برای جنی در نامه نوشته بود. او تکالیفش در آکسفورد را به پایان رساند و آنجا را ترک کرد. در پایان، مدیر کوئینز کالج در برگهٔ ارزشیابی او چنین نوشت: «توانایی او قابل توجه است. رفتار مردانه دارد. عملکرد او در اینجا خیلی خوب بوده. من به رفتار او اهمیتی نمی‌دهم—ولی خودش از رفتارش بهتر است. نمرهٔ او A خواهد بود.»

سرگرد هابل

ادوین در میان شگفتی خواهران کوچکترش به خانه رسید. خانوادهٔ او اکنون در لوئیزویل[1] کنتاکی زندگی می‌کردند. ادوین شلوار سه ربعی به پا و یک ساعت مچی به دست داشت (که آن موقع جزء ژست و اداهای اهالی غرب میانه محسوب می‌شد)، یک حلقه به انگشت کوچکش بود، یک شنل آکسفورد به تن و یک چوبدستی به دست داشت و طوری با لهجهٔ انگلیسی حرف می‌زد که گاهی نامفهوم بود. جان دارایی محدودی برای آنها به ارث گذاشته بود. ادوین و برادر بزرگترش هنری، با ترغیب مادرشان به سرمایه‌گذاری در کاری که عاقبت به شکست انجامید کار را خرابتر کردند. در سالهای بعد، هابل به دوستانش گفت که در آزمون وکالت کنتاکی قبول شده و مدت کوتاهی در لوئیزویل به کار وکالت اشتغال داشت. وقتی بعدها در مصاحبه‌ای در این‌باره از هلن، یکی از خواهران هابل سؤال شد، او با ناباوری گفت: «این اطلاعات را از کجا آورده‌اید؟ ادوین به کار وکالت اشتغال نداشت.»

هابل به‌عنوان دبیر دبیرستان و مربی ورزش در شهر نیو آلبانی[2] در ایندیانا موفق بود. این شهر مقابل شهر لوئیزویل در آن طرف رود اوهایو قرار داشت. او علوم، ریاضیات و زبان اسپانیایی تدریس می‌کرد. شاگردان هابل، شیفتهٔ خلق و خوی غیرمعمول او شده بودند. آنچه آنها را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌داد، عملکرد تیم بسکتبال او بود که در طول یک فصل شکست نخورده بود و در تورنمنت قهرمانی ایالت ایندیانا به مقام تحسین‌برانگیز سومی دست یافته بود. آنها کتاب سالِ ۱۹۱۴ خودشان را با علاقه به او اهدا کردند.

ولی نه تدریس و نه کار وکالت (اگر هم به آن کار پرداخته بود) نمی‌توانست هابل را که هنوز آرمانهای پرشوری در سر داشت، راضی کند. هنوز «هدف بزرگی» در چشم‌انداز او دیده نمی‌شد. او امیدهایش را بر اخترشناسی متمرکز کرد و به استاد سابق اخترشناسیش فارست ری مولتون[3] نامه نوشت و از او دربارهٔ امکان تحصیل در این رشته سؤال کرد. مولتون توصیه‌نامه‌ای به ادوین فراست[4] مدیر رصدخانهٔ یرکز در دانشگاه شیکاگو نوشت. این رصدخانه در هفتاد و پنج مایلی شمال شیکاگو قرار داشت. مولتون

1. Louisville 2. New Albany 3. Forest Ray Moulton 4. Edwin Frost

نوشت: «به‌نظر من او از لحاظ شخصیتی یکی از بهترین افراد است. از نظر جسمانی نیز نمونه‌ای ممتاز است. روی‌هم‌رفته درکارش در اینجا و به‌ویژه در علوم، توانایی خارق‌العاده‌ای از خود نشان داده است.» در آن هنگام، اخترشناسان با استعداد به رصدخانهٔ جدیدالتأسیس مونت ویلسون در نزدیکی پاسادنا درکالیفرنیا جذب می‌شدند و فراست آنها را از دست می‌داد. به همین دلیل، از این متقاضی جدید استقبال کرد.

در اوایل سال ۱۹۱۵ «اجازهٔ رصد» با یکی از تلسکوپهای رصدخانهٔ یرکز، به هابل اعطا شد و به این ترتیب او دورهٔ چهل سالهٔ کاوشهای خود در آسمان شب را آغاز کرد. او در ابتدا (و سپس در بخش اعظم دورهٔ کاریش)، کار خود را بر مطالعهٔ عکسهای گرفته شده از اجرام کم‌نوری متمرکز کرد که آنها را «سحابیهای کم‌رنگ» می‌نامید. امروزه، سحابی به ابری از گاز در فضا گفته می‌شود که منشأ آن معمولاً ستاره‌ای در شرُف نابودی است. اجرامی را که هابل مشاهده کرده بود، اکنون «کهکشان» نامیده می‌شوند؛ کهکشانها منظومه‌های ستاره‌ای هستند که از ما بسیار دور، کم‌وبیش مستقل از یکدیگر و هریک شامل دهها یا صدها میلیارد ستاره‌اند. هابل هرگز نامگذاری خود را تغییر نداد، تا حدی به این دلیل که اصطلاح «کهکشان» مورد علاقهٔ دشمن اصلی‌اش هارلو شَپلی[1] بود.

هنگامی که هابل در رصدخانهٔ یرکز مشغول جمع‌آوری داده‌ها برای نگارش پایان‌نامه‌اش بود، هر روز بیشتر متوجه رصدخانهٔ رقیب یعنی مونت ویلسون درکالیفرنیا می‌شد. مونت ویلسون تحت مدیریت جرج الری هیل[2] (که قبلاً مدیر یرکز بود) به سرعت در حال تبدیل شدن به بهترین رصدخانهٔ دنیا بود. آنجا به زودی صاحب یک تلسکوپ بازتابی عظیم می‌شد که آینهٔ آن یکصد اینچ قطر داشت، این مقدار دوبرابر اندازهٔ آینهٔ بهترین تلسکوپ مستقر در یرکز بود. برای کار با این تجهیزات، به اخترشناسان بیشتری نیاز بود و هیل پستی در آنجا به هابل پیشنهاد کرد، به شرط آنکه پایان‌نامه‌اش را کامل کند.

این یک موقعیت عالی بود. اگر وضع دنیا عادی بود، هابل این پیشنهاد را می‌پذیرفت و بی‌درنگ راهی پاسادنا می‌شد. ولی سال ۱۹۱۶ بود و وضع دنیا عادی نبود. جنگ جهانی اول درگرفته و در تمام اروپا ویرانی به بار آورده بود. بسیاری از دوستان آکسفوردی هابل در خطوط مقدم جبهه‌ها بودند و تعدادی از آنها نیز کشته شده بودند. ایالات متحده به زودی وارد جنگ می‌شد. هابل، هیل را ترغیب کرد تا پست پیشنهادی را برایش نگه دارد. آنگاه پایان‌نامه‌اش را با عجله کامل کرد و امتحان نهایی شفاهی‌اش را نیز داد و (با فارغ‌التحصیلی با درجهٔ ممتاز) برای آموزش به‌عنوان افسر ذخیره، در ماه مه سال ۱۹۱۷ در ارتش ثبت نام کرد.

هابل و کارآموزان دیگر از جنگ سنگربه‌سنگری که در اروپا به درازا کشیده و هزاران سرباز را به مسلخ کشانده بود، آگاهی مختصری داشتند. هابل با شور و هیجان زیاد در نامه‌ای برای فراست (که غلطهای املایی داشت) چنین نوشت: «گمان می‌کنم که به درد این بازیهای نظامی می‌خورم. من

1. Harlow Shapley 2. George Ellery Hale

چهارمین نفری هستم که در اینجا فرماندهٔ شاگردان می‌شود. . . و همه‌جور کاری را آموزش می‌دهم، از نحوهٔ مبارزه با سرنیزه گرفته تا دیده‌بانی. من انتخاب شده‌ام تا همین یکشنبهٔ آینده به نمایندگی از طرف گروهان به همراه یک هیأت از تعدادی سنگرهای مدل، بازدید کنم.» او سروان پیاده‌نظام شد و فرماندهی یک گردان را به عهده گرفت.

در سپتامبر سال ۱۹۱۸ سرگرد هابل (که به تازگی ترفیع گرفته بود) و یگان تحت فرمان او سوار یک کشتی نفربر نظامی، رهسپار اروپا شدند. پس از یک سفر سخت دریایی، هابل در ماه اکتبر به فرانسه رسید و شاهد آخرین مراحل جنگ بود. او بعداً دربارهٔ جنگ در طول عقب‌نشینی آلمانها، برای همسرش تعریف کرد و گفت که بر اثر انفجار گلولهٔ توپ مجروح و بر اثر ضربهٔ حاصله بیهوش شده بود و پس از آنکه در یک بیمارستان صحرایی به هوش آمده، لباس پوشیده و بدون اینکه با کسی حتی یک کلمه صحبت کند، آنجا را ترک کرده است. این داستان شاید درست باشد؛ در آشوب ناشی از جنگ هر چیزی امکان‌پذیر است. ولی مدارک موجود در اوراق ترخیص هابل، این داستان را تأیید نمی‌کند. در این اوراق در ستونهای مربوط به «نبردها، عملیات و درگیریها» کلمهٔ «ندارد» قید شده است.

پس از اعلام آتش‌بس، هابل تمام تابستان بعد را در انگلستان ماند. او هنوز به اخترشناسی فکر می‌کرد. آپارتمانی در کمبریج اجاره کرد و در همان شهر با اخترفیزیکدان برجسته، آرتور ادینگتون[1] و یک اخترشناس ثروتمند به نام اچ.اف. نیوئل[2] ملاقات کرد. نیوئل، هابل را برای عضویت در انجمن اخترشناسی سلطنتی پیشنهاد کرد. در ضیافت شامی به افتخار یک هیأت بازدیدکننده که از رصدخانهٔ مونت ویلسون آمده بودند، دیدن هابل سی ساله که در بین دو تن از برجسته‌ترین دانشمندان انگلستان نشسته بود، اخترشناسان آمریکایی را خیلی شگفت‌زده کرد. یکی از آن دو تن، آرتور شوستر[3]، فیزیکدان و دیگری فرانک دایسون[4]، اخترشناس سلطنتی بود.

در همین هنگام، هیل با بی‌صبری منتظر هابل بود. او می‌خواست که اخترشناس جوان در پاسادنا و نه در کیمبریج، مشغول کار شود و در نامه‌ای برای هابل نوشت: «لطفاً هرچه زودتر برگرد. ما انتظار داریم که در آیندهٔ خیلی نزدیک، تلسکوپ صد اینچی را راه‌اندازی کنیم و وقتی‌که به اینجا برسی، کارهای زیادی برای انجام دادن خواهیم داشت.» دستمزد سالانهٔ هابل هزار و پانصد دلار تعیین شده بود و «به محض صدور مجوز استخدام و تأمین بودجهٔ مورد نیاز» می‌توانست انتظار ترفیع داشته باشد. هابل به سرعت راه افتاد. در راه پاسادنا، به مدت یک روز در شیکاگو توقف کرد تا مادر و خواهرهایش را ببیند (آنها از خانه‌شان در مادیسون ویسکانسین به شیکاگو سفر کرده بودند). دیدار دوستانه‌ای نیز از رصدخانهٔ لیک[5] در نزدیکی سن خوزه در کالیفرنیا به عمل آورد. او هنوز یونیفورم نظامی به تن داشت، در قالب نظامی ظاهر می‌شد و خودش را سرگرد هابل معرفی می‌کرد. این کار، اخترشناسان لیک را خیلی تحت تأثیر قرار داد و آنها از آن هنگام به بعد او را «سرگرد» نامیدند.

1. Arthur Eddington 2. H.F. Newall 3. Arthur Schuster 4. Frank Dyson
5. Lick Observatory

برفراز کوه

در سپتامبر سال ۱۹۱۹، هابل به گروه برگزیدهٔ اخترشناسانی که کارکنان رصدخانهٔ مونت ویلسون بودند، پیوست. دفاتر و قسمت اداری رصدخانه در پاسادنا و تلسکوپها و تجهیزات پشتیبانی آنها بر فراز قلهٔ ۱۷۴۱ متری مونت ویلسون درکوههای سن گابریل[1] قرار داشت. اولین «رصدها»ی هابل برفرازکوه با تلسکوپهای ده و شصت اینچی انجام شد. در شب عید کریسمس سال ۱۹۱۹ او صفحات عکاسی خود را در تلسکوپ صد اینچی جدید هوکر[2] در معرض نور قرار داد.

زندگی برفرازکوه برای اخترشناسان رُهبانی بود. رسیدن به محل تلسکوپ از طریق جادهٔ کم‌عرض، پرشیب و پرپیچ و خم، خود ماجرایی بود. تلسکوپ نباید از محیط اطرافش گرمتر باشد، به همین دلیل، بیدارماندن اخترشناس در طول شبی که مشغول رصد است نه فقط با تنهایی، بلکه گاه با تحمل سرمای شدید همراه بود. ولی در آن محل، امکانات رفاهی نیز فراهم بود. محل اقامت اخترشناسان که آن را «صومعه» می‌نامیدند، اتاقهای ساده ولی راحتی داشت. کتابخانهٔ غنی و یک اتاق نشیمن با شومینه و صندلیهای راحتی و پنجره‌هایی که رو به چشم‌انداز تماشایی دره باز می‌شد، از جمله امکانات رفاهی رصدخانه بود. هِیل مراسم تشریفاتی برای شام در آنجا برقرارکرده بود. اخترشناسان که همه کت و کراوات به تن داشتند، به ترتیب اهمیتِ وظیفهٔ آنان برای رصد شبانه، سر میز شام قرار می‌گرفتند. اخترشناسی که بنا بود در آن شب با تلسکوپ صد اینچی کارکند و دستیارش، در بالای میز می‌نشستند. بعد از آنها کسانی که باید با تلسکوپ شصت اینچی کارکنند، قرار می‌گرفتند و به همین ترتیب الی آخر.

میلتون هوماسون[3] که تحصیلات رسمی چندانی نداشت، اغلب به‌عنوان دستیار هابل خدمت می‌کرد. او بعدها اخترشناس قابلی شد و در خاطراتش که بعد از مرگ هابل نوشت، هابل جوان را در هنگام کار این‌گونه به یاد می‌آورد:

> او در حال عکسبرداری به کمک تلسکوپ ۶۰ اینچی بود و در مدتی که هدایت کار را به عهده داشت، ایستاده بود. قامت خوش‌اندام و بلند او با پیپی که در دست داشت، به‌وضوح بر صفحهٔ آسمان نقش بسته بود. باد شدیدی که می‌وزید، بارانیِ نظامی او را به دور تنش می‌پیچاند و هر از چندی، جرقه‌هایی که از پیپ او برمی‌خاست در تاریکی گنبد رصدخانه پخش می‌شد. آن شب «دید» تلسکوپ در مقایسه با معیارهای مونت ویلسون، بسیارکم بود ولی وقتی هابل با فیلمهای ظاهر شده از اتاق تاریک برمی‌گشت، غرق شادی بود. او گفت: «اگر دید کم، چیزی مثل شرایط امشب باشد، پس من همیشه خواهم توانست با دستگاههای مونت ویلسون عکسهای به‌دردبخور بگیرم.» او همیشه به خودش، به کاری که می‌خواست انجام دهد و آن‌گونه که می‌خواست آن کار را انجام دهد، اطمینان داشت.

1. San Gabriel 2. Hooker 3. Milton Humason

هابل بار دیگر مثل گذشته مشاهدات خود را متوجه «سحابی‌های» کم‌نور کرد. او می‌خواست فاصلهٔ آن اجرام تا زمین را اندازه بگیرد. او می‌دانست که این کار را چگونه انجام دهد و برای این منظور می‌خواست از نتایج کار دو تن از کسانی که قبلاً روی این موضوع کار کرده بودند، استفاده کند. یکی از آن دو نفر، هنری‌یتا لویت[1]، دستیار تحقیقاتی در رصدخانهٔ کالج هاروارد و دیگری هارلو شَپلی[2] بود که چند سال در مونت ویلسون همکار هابل بود و بعداً مدیر رصدخانهٔ هاروارد شد.

در اوایل دههٔ ۱۹۰۰، لویت یک رشته مطالعات دربارهٔ «ستارگان متغیر قیفاووسی[3]» انجام داده بود. روشنایی این ستارگان در دوره‌های قابل پیش‌بینی تغییر می‌کند. کشف بزرگ لویت آن بود که دورهٔ تغییر روشنایی یک متغیر قیفاووسی دقیقاً به میانگین درخشندگی آن بستگی دارد: هرچه روشنایی ستاره بیشتر باشد، دورهٔ تغییر آن از روشنایی بیشینه به روشنایی کمینه، طولانیتر است. وقتی یک متغیر قیفاووسی رصد می‌شود، روشنایی ظاهری آن، یعنی تصویری که به‌وسیلهٔ تلسکوپ ثبت می‌شود به درخشندگی آن و به فاصلهٔ آن تا زمین بستگی دارد.

شَپلی از این روابط برای به‌دست آوردن یک معیار کیهانی استفاده کرده بود. روش او این بود که روشنایی ظاهری یک متغیر قیفاووسی را رصد می‌کرد، سپس نتایج لویت را برای محاسبهٔ درخشندگی آن به‌کار می‌برد. آنگاه از روشنایی ظاهری رصدشده، فاصلهٔ ستاره را محاسبه می‌کرد. در اواخر دههٔ ۱۹۱۰ شَپلی معیارش را در مورد ستارگان کهکشان راه‌شیری به‌کار بست و قطر استوایی کهکشان را در حدود سیصد هزار سال نوری محاسبه کرد. (سال نوری یکایی برای اندازه‌گیری فاصلهٔ نجومی است که عموماً اخترشناسان آن را به‌کار می‌برند و برابر مسافتی است که یک باریکهٔ نور در فضای تهی در طول یک سال می‌پیماید یعنی معادل ۵٫۸۸ تریلیون مایل.) مقدار محاسبه شده به‌وسیلهٔ شَپلی بیش از ده برابر تخمین‌های قبلی بود. رصدهای شَپلی همچنین خورشید را در فاصله‌ای در حدود شصت هزار سال نوری از مرکز کهکشان قرار می‌داد. این نیز یک تجدید نظر اساسی در نتایج قبلی بود که بر اساس آنها، خورشید در مرکز کهکشان قرار داشت.

رصدهای شَپلی توانست تا لبهٔ کهکشان برسد. هابل در نخستین کشف بزرگ خود، به فراتر از کهکشان نظر افکند. در طول پاییز سال ۱۹۲۳ او توجه خود را به سحابی مارپیچی در صورت فلکی زن به زنجیر بسته (آندرومدا[4]) معطوف داشت که اخترشناسان آن را M۳۱ می‌نامیدند. او ستارگان M۳۱ را به تفکیک مشاهده کرد و دریافت که بعضی از آنها متغیرهای قیفاووسی مفیدی هستند. با استفاده از روش لویت ـ شَپلی، او فاصلهٔ این ستارگان و فاصلهٔ سحابی تا زمین را در حدود یک میلیون سال نوری محاسبه کرد که مطمئناً خارج از کهکشان ما قرار می‌گیرد.

مقالهٔ سال ۱۹۲۴ هابل که «قیفاووسی‌ها در سحابی مارپیچی» نام داشت حاوی نخستین دلیل محکم دربارهٔ حدس و گمانهایی بود که مدتها اخترشناسان را به خود مشغول داشته بود. اینکه دورترین

1. Henrietta Leavitt 2. Harlow Shapley 3. Cepheid variable stars 4. Andromeda

اجرامی که به‌وسیلهٔ تلسکوپ تفکیک می‌شوند، «عالمهای جزیره‌ای» هستند، یعنی هر یک از آنها کهکشانهای مستقلی هستند که بعضی از آنها به بزرگی کهکشان راه‌شیری و بعضی بزرگتر از آنند. کار هابل تنها بر یکی از این اجرام خارجی متمرکز شده بود. او آن را «سحابی مارپیچی فراکهکشانی» نامید ولی جرم این سحابی نه‌تنها از یک کهکشان کامل شبیه کهکشان ما کمتر نبود بلکه اندکی بزرگتر از آن بود.

جار و جنجالها

مقالهٔ هابل با تأیید جامعهٔ اخترشناسان مواجه شد. هنری نوریس راسل[1]، دانشمند برجستهٔ پرینستون، کشف هابل را «یک کار زیبا» برشمرد و با پیگیری او، مقالهٔ هابل برندهٔ جایزهٔ بزرگی از سوی انجمن آمریکایی پیشبرد علم شد. ولی مخالفتهایی هم وجود داشت که هابل را آزار می‌داد، به‌ویژه کار اخترشناس هلندی آدریان وان مانن[2] که در مونت ویلسون همکار او بود. وان مانن سالها کهکشانهای مارپیچی را (که هابل آنها را سحابی می‌نامید) مورد مطالعه قرار داده بود و ادعا می‌کرد که رصدهایش نشان‌دهندهٔ نوعی حرکت دورانی کهکشانی است. وقتی او آهنگ چرخشی را که رصد کرده بود با فواصل محاسبه‌شده به‌وسیلهٔ هابل ترکیب می‌کرد، محاسبات حاکی از آن بود که بعضی از ستارگان واقع در بخشهای خارجی کهکشانهای مارپیچی باید با سرعتی باورنکردنی، یعنی بیش از سرعت نور، در حال حرکت باشند. او نتیجه گرفت که اندازه‌گیری‌های هابل غلط‌اند و سحابی‌هایی را که هابل مشاهده کرده نه در خارج از کهکشان، بلکه در داخل آن قرار گرفته‌اند. هابل که هیچ‌گاه با انتقاد شنیدن میانهٔ خوبی نداشت با وان مانن تحقیرآمیز رفتار می‌کرد و وان مانن هم متقابلاً همین رفتار را با او داشت. در این میان، شَپلی که دوست خوب وان مانن بود، از دوستش جانبداری می‌کرد و به همین ترتیب، مورد تحقیر هابل قرار می‌گرفت.

دشمنی هابل با وان مانن ادامه پیدا کرد. وان مانن از موضع خود عقب نمی‌نشست و هابل با سرسختی تمام به دنبال اشتباهی در تحلیل وان مانن می‌گشت. والتر آدامز[3] مدیر رصدخانهٔ مونت ویلسون بیهوده می‌کوشید تا هابل و وان مانن را ترغیب کند که اختلافاتشان را مثل دانشمندان و افراد متشخص حل و فصل کنند. او اذعان داشت که این اختلاف «یکی از مشکل‌ترین مسائلی بود که رصدخانه با آن مواجه شده بود... به دلیل طرز برخورد و احساساتی که هر دو طرف از خود نشان می‌دادند، نه‌تنها جوّ همکاری پدید نمی‌آمد بلکه بیشتر جوّ نفرت حاکم می‌شد.» از جمله تعریف کرده‌اند که یک شب در رصدخانه، هابل آداب معمول را کنار گذاشت و سر میز شام برخلاف سنت معمول جای وان مانن را که نوبت کار او با تلسکوپ صد اینچی و بنابراین صدرنشینی در میز بود، گرفت. بالاخره هابل موردی را پیدا کرد که نشان می‌داد وان مانن قربانی خطاهای ظریف سیستماتیک شده است.

1. Henry Norris Russell 2. Adriaan van Maanen 3. Walter Adams

آدامز پیشنهاد کرد که هابل و وان مانن مقالهٔ مشترکی منتشر کنند تا به مشاجره‌ای که اکنون یک دهه به طول انجامیده بود، پایان دهند. وان مانن موافق بود ولی هابل مخالفت کرد و آدامز از کوره در رفت. او در گزارشی به مدیر مؤسسهٔ کارنگی که منبع اصلی کمک مالی به رصدخانهٔ مونت ویلسون بود نوشت، «احساس من آن است که نحوهٔ برخورد هابل در این مورد، به هیچ‌وجه قابل توجیه نیست.»

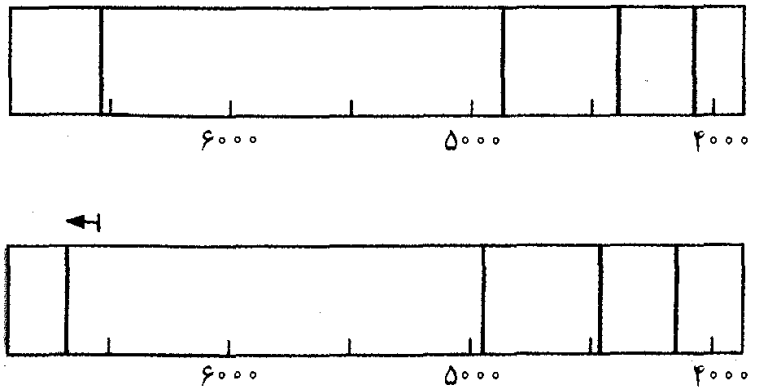
هابل و شَپلی تا پایان عمر، دشمنان سرسخت یکدیگر باقی ماندند. این، نبردِ منیّتها بود. هردوی آنها به شدت جاه‌طلب و رقیبانی به شدت کینه‌توز بودند. شَپلی با تحقیر در مورد هابل گفت: «او بورسیهٔ رودز بوده و این قضیه هیچ‌وقت فراموشش نمی‌شود.» متقابلاً همکاران هابل هم مجبور بودند به انتقادات تند او از شَپلی گوش کنند. مارتین شوارتس‌شیلد[1] که در پرینستون اخترشناس بود، در مصاحبه‌ای گفت، «هابل از همه بدتر بود. من دو بار وسط موعظه‌های او گیر افتادم که هر بار به غیرمعقولترین شکلی علیه شَپلی جار و جنجال به پا کرد.» و سپس افزود، «البته شَپلی هم فرشته نبود.»

انتقالهای به سرخ

یک جنبه از نبوغ هابل آن بود که می‌توانست کار ناتمام دیگران را به کمک رصدهای به دقت برنامه‌ریزی شده و مفصل خودش، ادامه دهد و پیش ببرد. شَپلی در یکی از تعریفهای نادرش از هابل (بیش از یک دهه پس از مرگ هابل) گفت، «راستی، هابل مشاهده‌گری عالی و از من بهتر بود. او صبور بود.» ما قبلاً با نحوهٔ استفادهٔ استادانهٔ هابل از روش لویت‌ـشَپلی برای اندازه‌گیری فواصل کیهانی، آشنا شدیم. ولی بزرگترین دستاورد او، که شاید مهمترین دستاورد کاری یک اخترشناس در قرن بیستم باشد، از یک سری رصدهای انجام شده در سالهای ۱۹۱۰ الهام می‌گرفت. که اخترشناسی خودآموخته به نام وستو اسلایفر[2] در رصدخانهٔ لوئل[3] در فلگستاف[4] آریزونا انجام داده بود.

او با یک تلسکوپ عظیم شکستی که به یک طیف‌نما مجهز بود، کار می‌کرد. طیف‌نما، وسیله‌ای است که نور را از طریق تجزیهٔ آن به رنگهای سازندهٔ یک رنگین‌کمان، مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌دهد. اسلایفر کشف کرد که طول موج خطوط طیفی مشخصهٔ نوری که از کهکشانها به ما می‌رسد، نسبت به طول موج همان خطوط طیفی که در یک آزمایشگاه زمینی به دست می‌آیند، اندکی جابه‌جا می‌شوند. مثلاً وقتی او کهکشان M۳۱ را رصد می‌کرد، جابه‌جایی به طرف طول موج‌های کوتاه صورت می‌گرفت. این جابه‌جایی، «انتقال به آبی» نام گرفت چون رنگ آبی در طیف نور مرئی در انتهای بخش طول موج کوتاه قرار دارد. معهذا بیشتر کهکشانهایی که اسلایفر رصد کرد، «انتقال به سرخ» یعنی انتقال به سمت طول موجهای بلندتر نشان می‌دادند. در اینجا، واژه‌های «سرخ» و «آبی»، بر خود این رنگها دلالت ندارند بلکه جهت جابه‌جایی خطوط طیفی به طرف طول موجهای بلندتر یا کوتاهتر را نشان می‌دهند. شکل ۲۷ـ۱ این اثر را نشان می‌دهد.

1. Martin Schwarzschild 2. Vesto Slipher 3. Lowell 4. Flagstaff



شکل ۲۷ـ۱ طول موجهایی از طیف نور گسیل‌شده به‌وسیلهٔ هیدروژن. بالا: چنانکه در حال عادی دیده می‌شوند. پایین: همان طول موجها که در حدود ۲ درصد، با $z = ۰٫۰۲$، انتقال به سرخ پیدا کرده‌اند.

اسلایفر این انتقال طول موجها را با توجه به اثری که ابتدا یوهان دوپلر[1] در سال ۱۸۴۲ توصیف کرده بود، تفسیر کرد. اثر دوپلر چند نشانهٔ مهم دارد که همهٔ آنها به تغییرات رفتار موج در هنگامی که منبع و ناظر موج نسبت به هم در حال حرکت‌اند، مربوط می‌شوند. درکاربردهای جدید، انتقال به سرخ یک نور که با z نمایش داده می‌شود با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود

$$z = \frac{\lambda_۰ - \lambda_s}{\lambda_s} \qquad (۱)$$

که در آن، λ_s طول موج نوری است که منبع گسیل می‌کند و $\lambda_۰$ طول موج بلندتر نوری است که ناظر مشاهده می‌کند. طول موج عملاً به اندازهٔ $\lambda_۰ - \lambda_s$ تغییر می‌کند و z مقدار تغییر نسبی را نشان می‌دهد. در مورد انتقال به سرخ، طول موج $\lambda_۰$ از λ_s بزرگتر و z در معادلهٔ (۱) مثبت است. معادلهٔ (۱) در مورد انتقال به آبی نیز به‌کار می‌آید که در آن مورد وضعیت برعکس است: $\lambda_۰$ از λ_s کوچکتر و z منفی است.

اگر مقدار سرعت نسبی v بین ناظر و منبع نور، زیاد نباشد، رابطهٔ دوپلر بین انتقال به سرخ (یا آبی) z و سرعت نسبی v به‌صورت زیر است

$$z = \frac{v}{c} \qquad (۲)$$

که در آن، c سرعت نور است. اگر این معادله، برای انتقال به سرخ، مقدار v مثبت را محاسبه کند، بدان معنی است که منبع نور که مثلاً ممکن است یک کهکشان باشد، در حال دور شدن از چشم اخترشناسی است که در روی زمین آن را رصد می‌کند. داده‌هایی که اسلایفر در سال ۱۹۱۴ و پس از آن گزارش کرد، حاکی از آنند که سرعت دورشدن کهکشانها از زمین تا مقدار شگفت‌انگیز ۱٫۱۰۰ کیلومتر بر ثانیه نیز می‌رسد. انتقال به آبی که به معنی وجود مقدار منفی z است، در بین کهکشانها زیاد دیده نمی‌شود. وقتی انتقال به آبی وجود داشته باشد، برای سرعت نسبی مقدار منفی محاسبه می‌شود و این یعنی کهکشان مورد نظر در حال نزدیک شدن به زمین است.

1. Johann Doppler

در اواخر دههٔ ۱۹۲۰، هابل کار بر روی انتقال به سرخ را آغاز کرد. در ابتدا او با استفاده از داده‌های اسلایفر، نموداری رسم کرد که سرعت دورشدن دوپلری کهکشانها را که با معادلهٔ (۲) محاسبه شده بود، در برابر فواصلی که خودش برای کهکشانها اندازه‌گیری کرده بود، نشان می‌داد. نمودار نشان می‌داد که با افزایش فاصلهٔ کهکشانها، سرعت دورشدن آنها افزایش می‌یابد: به‌نظر می‌رسید هر قدر کهکشانی دورتر باشد، سرعت دورشدن آن از زمین بیشتر است. از داده‌های غیرقطعی که در سال ۱۹۲۹ منتشر شد، هابل حدس زد که بین سرعت دورشدن محاسبه شدهٔ یک کهکشان، v، و فاصلهٔ بین زمین و کهکشان، l، رابطه‌ای خطی وجود دارد. بیان ریاضی این حدس، امروزه به‌صورت زیر نوشته می‌شود

$$v = Hl \qquad (۳)$$

که در آن، H ثابتی است که اکنون «ثابت هابل» نامیده می‌شود. این معادله برحسب انتقال به سرخ z به‌صورت زیر نوشته می‌شود

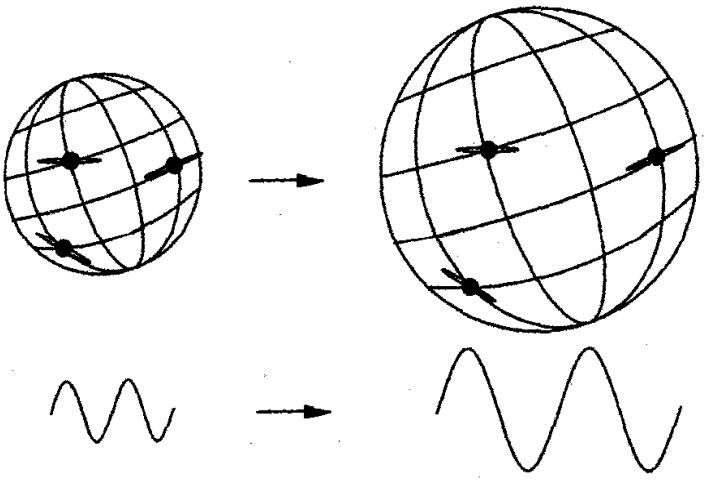
$$z = \frac{H}{c} l \qquad (۴)$$

در سال ۱۹۳۱، هابل داده‌های بهتری در اختیار داشت و به رابطهٔ خطی که توسط معادلهٔ (۳) بیان می‌شود نیز اطمینان بیشتری داشت ولی در مورد پذیرش سرعت دورشدن به عنوان یک واقعیت، محتاط بود. او ترجیح می‌داد که اصطلاح سرعت «ظاهری» را به‌کار ببرد و رابطهٔ خطی را «رابطه‌ای تجربی بین داده‌های رصدی» بنامد. دیگران، پدیدهٔ انتقال به سرخ و سرعتهای دورشدن مرتبط با آن را شاهدی بر وجود نوعی کیهان‌شناسی می‌دانستند که مبتنی بر یک جهان در حال انبساط است، به این معنی که جهان، پیوسته در حال انبساط است و متناسب با افزایش فاصله، آهنگ انبساط نیز افزایش می‌یابد.

انبساط، کهکشانها را همراه خود می‌برد و نتیجهٔ این امر افزایش فاصله‌های بین کهکشانهاست (که احتمالاً بی‌پایان است). شکل ۲۷ـ۲ برداشتی از انبساط جهان را ارائه می‌کند چنانکه گویی انبساط به جای فضای سه بعدی ما، در یک فضای دو بعدی خمیده صورت می‌گیرد. به این نکته توجه داشته باشید که همهٔ نقاط از یکدیگر دور می‌شوند و نقطهٔ مرکزی برای انبساط وجود ندارد. خطوط موج‌دار در بخش پایینی شکل، بخشی از یک موج نور و کش آمدن آن (انتقال به سرخ) در فضا زمان را با جهان در حال انبساط به طور اجمالی نشان می‌دهد.

اگر بتوان گفت که نیرویی عامل انبساط است، این نیرو در مقایسه با نیروی گرانشی موجود در محدودهٔ منظومهٔ شمسی یا کهکشان، نیروی ضعیفی است. بنابراین، چنانکه در شکل دیده می‌شود، شکل کهکشانها که متأثر از نیروی گرانش است حفظ می‌شود و الزاماً انبساط نمی‌یابند.

معادلهٔ (۲)، یک نقص دارد. سرعت دورشدن v، مثل هر سرعت دیگری نمی‌تواند از سرعت نور c، بیشتر باشد. بنابراین، طبق این حکم، انتقال به سرخ z نمی‌تواند از یک بیشتر شود. اما انتقال به سرخهایی با مقدار هشت نیز گزارش می‌شوند. مشکل در آن است که معادلهٔ (۲)، الزامات نظریهٔ نسبیت



شکل ۲۷ـ۲ بالا: برداشتی از انبساط جهان، چنانکه در یک فضای دوبعدی خمیده دیده می‌شود. انبساط دوبعدی مانند آن است که گویی جهان بادکنکی در حال بادشدن است و کهکشانها به دیوارهٔ آن چسبیده‌اند. پایین: افزایش متناظر در طول موج نور.

خاص را نادیده می‌گیرد. شکل نسبیتی معادلهٔ دوپلر برای عالمی با خمیدگی صفر به شکل زیر است

$$۱ + z = \sqrt{\frac{۱ + v/c}{۱ - v/c}} \qquad (۵)$$

این معادله افزایش مقدار z تا بی‌نهایت را مجاز می‌شمارد. (وقتی v به c میل کند، مقدار $۱ - v/c$ در معادلهٔ (۵) بسیار کوچک می‌شود و با تقسیم بر عددی کوچک، مقادیر بسیار بزرگی برای z حاصل خواهد شد.)

اخترشناسان در فضا به دوردستها و در زمان به عقب می‌نگرند. چون نور با سرعت محدود حرکت می‌کند، مدت زمان محدود ولی بسیار طولانی لازم است تا نور از یک کهکشان یا یک ستاره به زمین برسد. اگر فاصلهٔ یک کهکشان تا زمین، هشت میلیارد سال نوری باشد (فاصله‌ای که بزرگترین تلسکوپهای امروزی می‌توانند پوشش دهند)، تصویری که اخترشناس از آن ثبت می‌کند، کهکشان را نه آن‌گونه که امروز هست بلکه آن‌گونه که هشت میلیارد سال پیش بوده، نشان می‌دهد. در طول مدتی که پرتو نور در سفر هشت میلیارد سالهٔ خود بوده، جهان انبساط می‌یافته است. انتقال به سرخ مشاهده شده، معیار ساده‌ای از اندازهٔ این انبساط به دست می‌دهد. معادلهٔ (۱) را می‌توان به‌صورت زیر بازآرایی کرد

$$z = \frac{\lambda_۰}{\lambda_s} - ۱$$

یا

$$z + ۱ = \frac{\lambda_۰}{\lambda_s} \qquad (۶)$$

فرض کنید معلوم شود انتقال به سرخ نوری که درباره‌اش صحبت کردیم، $z = ۱$ است، آنگاه معادلهٔ (۶) به‌صورت $\frac{\lambda_۰}{\lambda_s} = ۲$ محاسبه می‌شود. این بدان معناست که طی سفر پرتو نور، طول موج آن، دو برابر شده است که نشان می‌دهد طی این مدت، جهان به اندازهٔ دو برابر منبسط شده و بالاخره اینکه آن کهکشان با سرعت ۱۸۰,۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه از ما دور می‌شود.

در پی تحلیلهای اولیهٔ هابل از داده‌های اسلایفر، هابل و دستیار با استعدادش میلتون هوماسون، انتقال به سرخهای زیادی را رصد کردند. آنها محدودهٔ اعتبار معادلهٔ خطی (۳) را تا فاصلهٔ بیش از یکصد میلیون سال نوری گسترش دادند و در فهرست بنیادی‌ترین قوانین فیزیک، به این معادله جایگاه برجسته و همیشگی بخشیدند.

نجیب‌زاده

در ماه فوریهٔ سال ۱۹۲۴، ادوین هابل و گریس برک لیب[1] در مراسمی ساده و خصوصی ازدواج کردند (هیچ‌یک از اعضای خانوادهٔ هابل در آن شرکت نداشتند). همسر هابل، دختر یک بانکدار ثروتمند و متنفّذ اهل لوس‌آنجلس به نام جان برک[2] بود. او دوازده سال پیش از آن با ارل لیب[3] ازدواج کرده بود که عضو خانواده‌ای ثروتمند و سرشناس بود. لیب زمین‌شناس و متخصص ارزیابی ذخایر ذغال‌سنگ بود. در ماه ژوئن سال ۱۹۲۱ وقتی که به یک معدن ذغال‌سنگ رفته بود، بر اثر گازگرفتگی جان سپرد. یک سال پس از آن تاریخ، هابل و گریس لیب مرتباً با هم دیدار می‌کردند.

آنها برای ماه عسل، نخست به انگلستان سفر کردند و در آکسفورد و کیمبریج مورد استقبال بسیار گرمی قرار گرفتند. سال ۱۹۲۴ بود و هابل به تازگی اندازه‌گیریهای خود از فاصلهٔ کهکشان M۳۱ را اعلام کرده و با این کارش، اولین نمای روشن از قلمرو عظیم ماوراء کهکشانی را به اخترشناسان نمایانده بود. هابل و همسرش در کیمبریج در ملک بزرگ اچ.اف. نیوئل اقامت کردند و با آرتور ادینگتون که سرشناس‌ترین اخترفیزیکدان انگلستان بود، نهار صرف کردند. در لندن هابل مهمان ضیافت شامی بود که از سوی انجمن اخترشناسی سلطنتی برگزار شد و دربارهٔ اندازه‌گیریهایش از فواصل کیهانی و طرحش برای طبقه‌بندی کهکشان‌ها بر اساس شکل آنها، سخنرانی کرد. آنها از انگلستان به پاریس، سویس و ایتالیا رفتند. در فلورانس اتاقهای پالاتسو وکیو[4] را دیدند و به هم قول دادند که آن اتاقها الگویی برای خانهٔ رؤیایی‌شان باشد.

به نظر می‌رسد هابل با ورود به دنیای ثروت و امتیازات اجتماعی همسرش، متوجه شد که آیندهٔ مطمئن و نویدبخشی که تا آن هنگام به عنوان یک اخترشناس در ذهن داشت، به اندازهٔ کافی چشمگیر نیست. از این‌رو لازم می‌دید تا داستانهای کم‌وبیش ساختگی دربارهٔ خودش تعریف کند. به این ترتیب، سابقه‌اش در جنگ، دوران کاری‌اش به عنوان وکیل، توانایی‌هایش در ورزش و ماجراهایش در جنگلهای شمالی و در اروپا، همه‌وهمه را بزرگتر از آنچه بودند، می‌نمایاند. گیل کریستیانسون می‌نویسد، «هابل دو هزار مایل از خانواده‌اش دور بود، کار طولانی بازآفرینی خود را به اتمام رساند. گریس تمام داستانهای او دربارهٔ قهرمانی‌هایش در جنگلهای ویسکانسین بوکس‌بازی با قهرمانان، نجات زنان جوان از غرق شدن، اشتغال به حرفهٔ وکالت و رهبری افراد وحشت‌زده در میدان جنگ را موبه‌مو [در دفتر خاطراتش]

1. Grace Burke Leib 2. John Burke 3. Earl Leib 4. Palazzo Vecchio

ثبت می‌کرد و ظاهراً کوچکترین تردیدی هم دربارهٔ معتبر بودن این داستانها به خود راه نمی‌داد. این کار، نمایش چشمگیری بود که کمک می‌کرد تا هابل، نظر مساعد همسرش و والدین او را به خود جلب کند.»

ستارگان هالیوود تقریباً به اندازهٔ سحابی‌ها برای هابل جذابیت داشتند. بسیاری از دوستان، آشنایان و همسایگان هابل از نخبگان هالیوود و نیز از قشر تحصیلکردهٔ کالیفرنیا بودند. هابل به عضویت هیأت امنای کتابخانه و گالری هنری هانتینگتون[1] منصوب شده بود که در آنها مجموعهٔ عظیمی از کتابهای کمیاب و نقاشیهای قرن هجدهم نگهداری می‌شد و دارای حدود یکصد هکتار باغهای چمن‌کاری شدهٔ آراسته بود. قبلاً هم افتخارات زیاد دیگری نصیب هابل شده بود. وقتی‌که یک روزنامه نویس لوس‌آنجلس تایمز گزارشی از سرپرستی کتابخانهٔ هانتینگتون تهیه می‌کرد، تردید داشت که هابل بتواند عنوان افتخاری دیگری را نیز بپذیرد چون «به استثنای یک یا دو مدال کم اهمیت» عنوان افتخاری دیگری نبود که به او بدهند.

شاید چون هابل خود را در تار حرفهای ساختگی‌اش گرفتار کرده بود، احساس می‌کرد که باید خودش را از خانواده و گذشتهٔ واقعی‌اش جدا کند. خواهرش بتسی به گیل کریستیانسون گفت که هابل کمک مالی مختصری برای مادرش، جنی می‌فرستاد و در طول ده سال آخر زندگی‌اش به دیدار او نیامد. گریس هیچ‌وقت جنی یا هیچ‌یک ازخواهرها و برادرهای هابل را ندید. کریستیانسون می‌نویسد، «هر وقت یکی از آنها به غرب می‌آمد، مثل لوسی که پس از ازدواجش آمد، ادوین ملاقاتی در دفترش یا جای دیگری در پاسادنا ترتیب می‌داد تا مجبور نشود آنها را به خانه‌اش ببرد. خواهران هابل فکر می‌کردند که این تمایل شدید به حفظ حریم خصوصی، همان‌قدر که خواستهٔ برادرشان است، خواستهٔ گریس نیز هست.»

در غیاب ادوین، برادر کوچکترش بیل، که گاوداری داشت، سرپرست خانواده شد. هلن، یکی از خواهران هابل، در نامه‌ای نوشت، «بیل به راستی 'قهرمان گمنام' ماست. من و بتسی احساس می‌کنیم که بیل به طور غیرمستقیم در موفقیتهای ادوین سهیم است. او رؤیاهای خودش را فدا کرد تا بتواند به امور پیش‌پا افتاده‌ای که ضرورت زندگی‌اند، برسد.»

ثابت هابل

مهمترین میراث هابل قانونی است که با معادلهٔ (۳) بیان می‌شود و «قانون هابل» نام دارد. مشخصهٔ این معادله، ضریب H است که ثابت هابل نامیده می‌شود. این ضریب درکیهان‌شناسی نقش اساسی دارد چون آهنگ انبساط عالم را بیان می‌کند. اهمیت این ضریب را به ویژه می‌توان با نوشتن معادله‌ای برای انبساط برحسب فاصلهٔ l بین دو کهکشان دریافت. برای آنکه آثار گرانشی بین دو کهکشان ناچیز باشد، فرض می‌کنیم که فاصلهٔ آن دو مثلاً ده میلیون سال نوری باشد. آنگاه می‌توان نوشت،

$$l = l_0 R \qquad (۷)$$

1. Huntington Library

که در آن l_0 فاصلهٔ کنونی بین دو کهکشان و R نقش یک «عامل مقیاس‌بندی» کیهانی را ایفا می‌کند. در زمان حال $R = 1$ و $l = l_0$ فرض می‌شوند، در این صورت برای زمانی در گذشته وقتی انبساط نصف میزان امروزی آن بوده می‌توان $R = \frac{1}{2}$ و $l = l_0/2$ در نظر گرفت و برای زمانی در آینده که انبساط دو برابر میزان فعلی خواهد شد، خواهیم داشت $R = 2$ و $l = 2l_0$.

آهنگ انبساط، یعنی سرعت آن، از مشتق R نسبت به زمان یعنی $\frac{dR}{dt}$ محاسبه می‌شود. ثابت هابل H، مستقیماً به آهنگ انبساط مربوط است و ما را به قلب مسئلهٔ انبساط رهنمون می‌شود. این ارتباط به‌صورت زیر است

$$H = \frac{1}{R}\frac{dR}{dt} \qquad (۸)$$

(اثبات این معادله، مشکل نیست. از دو طرف معادلهٔ (۷) نسبت به زمان مشتق بگیرید؛ توجه کنید که $\frac{dl}{dt}$ معادل سرعت v در قانون هابل یعنی معادلهٔ (۳) است؛ حال به جای v، معادلش را از قانون هابل و به جای I_0 معادلش از معادلهٔ (۷) را قرار دهید.)

آن‌گونه که کیهان‌شناسان امروزی وقایع را بازسازی می‌کنند، می‌توان گفت که انبساط عالم از حجم بسیار کوچکی آغاز شده است. در آن هنگام، عامل مقیاس‌بندی مساوی صفر یا مقداری نزدیک به صفر بوده است. چیزی شبیه مهبانگ، موجب آغاز انبساط جهان از حالت فشردهٔ اولیه شده و آنچه ما امروز می‌بینیم آن است که کهکشانهای دور، بنابر قانون هابل، به سرعت از یکدیگر دور می‌شوند. این سناریو نشان می‌دهد که با استفاده از قانون هابل می‌توانیم محاسبه کنیم که چه مدت طول کشیده تا عالم به وضعیت امروزی انبساط خود برسد. اگر زمان با یک مهبانگ آغاز شده باشد، این محاسبه، سن عالم را به دست خواهد داد.

دو کهکشان را در نظر بگیرید که فاصلهٔ آنها از هم برابر l است و با سرعت v از یکدیگر دور می‌شوند. اگر سرعت v ثابت باشد، زمان لازم برای دور شدن آن دو کهکشان به اندازهٔ l از یکدیگر، به سادگی برابر $\frac{l}{v}$ محاسبه می‌شود. (به‌عنوان مثالی آشنا فرض کنید دو خودرو با سرعت نسبی ثابت $v = 50$ مایل بر ساعت از هم دور می‌شوند. اگر هر دو خودرو، حرکت خود را از یک نقطه شروع کرده باشند، زمانی‌که طول می‌کشد تا $l = 100$ مایل از هم فاصله بگیرند، ساعت $2 = \frac{100}{50} = \frac{l}{v}$ خواهد بود.) از قانون هابل، یعنی فرمول $v = Hl$، درمی‌یابیم که در قلمرو کیهانی، کسر $\frac{l}{v}$ عکس ثابت هابل است، یعنی

$$\frac{l}{v} = \frac{1}{H}$$

زمانی که از این محاسبه به دست می‌آید، «زمان هابل» نامیده شده و با t_H نشان داده می‌شود،

$$t_H = \frac{1}{H} \qquad (۹)$$

این زمان، برآوردی از سن عالم به‌دست می‌دهد. این محاسبه دقیق نیست چون عملاً سرعت دور شدن کهکشانها و ثابت هابل هیچ‌کدام چنانکه فرض کرده‌ایم، ثابت نیستند. اگر انبساط شتاب مثبت داشته باشد، یعنی اگر سرعت انبساط با گذشت زمان افزایش یابد، آنگاه مقدار t_{H}، برآوردی کمتر از واقع خواهد بود و اگر انبساط شتاب منفی داشته باشد، یعنی سرعت انبساط کاهش یابد، t_{H} برآوردی بیش از واقع از سن عالم ارائه خواهد کرد.

بیش از شصت سال است که اخترشناسان به سختی در تلاشند تا مقدار قابل اطمینانی برای ثابت هابل پیدا کنند. تاکنون فقط توفیق نسبی پیدا کرده‌اند و آن هم به دلیل وجود مشکلات ذاتی موجود در اندازه‌گیری فواصل کیهانی است. اولین اندازه‌گیری هابل از ثابت خودش تقریباً به اندازهٔ یک مرتبهٔ بزرگی (یک توان ده) خطا داشت چون او نمی‌دانست که بیش از یک نوع ستارهٔ متغیر قیفاووسی وجود دارد. اندازه‌گیریهای مستقلی که امروزه از مقدار H انجام شده، حدود ۱۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارند.

در مخلوط عجیب و غریبی از یکاهای مورد علاقهٔ اخترشناسان، مقدار مورد اطمینان برای H ظاهراً باید در حدود ۶۵ باشد. این عدد نیازمند به‌کارگیری دو یکای مختلف برای اندازه‌گیری فاصله است: عامل v در قانون هابل برحسب یکای کیلومتر (بر ثانیه) و عامل l برحسب مگاپارسک بیان می‌شود که یکای ویژهٔ دیگری برای اندازه‌گیری فاصله در اخترشناسی (معادل ۳٫۲۶ میلیون سال نوری) است. طبق آموزه‌های فیزیک مقدماتی، یکاهای به‌کار رفته در محاسبات باید یکسان باشند. برای آنکه این قاعده نقض نشود، پس از یکدست‌سازی یکاها، مقدار H و از آنجا سن تقریبی عالم (مقدار اندکی زیاد)،

$$t_{\mathrm{H}} = \frac{۱}{H} = ۱۵ \quad \text{بیلیون سال}$$

به‌دست می‌آید.

تلسکوپ هابل

آخرین افتخاری که هابل پس از مرگش به آن نائل شد تلسکوپ عظیمی بود که به اسم او نامگذاری شد. این تلسکوپ در فضا قرار دارد و با وضوح بی‌مانند و درگسترهٔ طول موجیِ بی‌سابقه‌ای، آسمان را رصد می‌کند. این تلسکوپ به دلیل داشتن موقعیت مکانی ممتاز در فضا، از واپیچیدگیهای تصویری ناشی از وجود جوّ زمین، در امان است. تلسکوپ فضایی هابل در سال ۱۹۹۰ به فضا پرتاب شد. قطر آینهٔ اصلی این تلسکوپ ۹۴٫۵ اینچ است. ساخت آن دو میلیارد دلار هزینه داشته و مخارج نگهداری آن به سالی دویست میلیون دلار می‌رسد.

در طول سه سال اول شروع به کار تلسکوپ هابل، به‌نظر می‌رسید که این طرح، به طرز شگفت‌آوری شکست خورده است. در ساخت آینهٔ تلسکوپ خطایی وجود داشت که به دلایلی نامعلوم هیچ‌کس قبل از پرتاب تلسکوپ به فضا، متوجه آن نشده بود. در نتیجه، اولین تصاویر ارسالی آن، تارتر از حد مورد انتظار بودند. با انجام یک مأموریت ویژه به‌وسیلهٔ فضاپیمای شاتل در سال ۱۹۹۳، اصلاحات

اپتیکی بر روی تلسکوپ انجام شد و تصاویر مطلوبی از آن ارسال شده که مانند خود او در پنجاه سال قبل، عملکرد درخشانی داشته است.

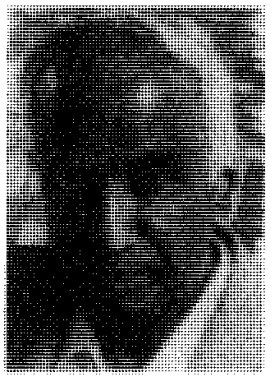
فهرستی از دستاوردهای تلسکوپ هابل از این قرار است: رصد کامل مراحل برخورد یک ستارهٔ دنباله‌دار با سیارهٔ مشتری؛ انجام رصدهایی در تأیید این فرض که سیاهچاله‌های عظیم غالباً در هستهٔ کهکشانها قرارگرفته‌اند؛ تهیهٔ نماهایی با «میدان دید عمیق» از فضا که عمق نفوذ آنها تا ۱۲ میلیارد سال نوری می‌رسید و در نتیجه به کمک برونیابی، ۱۲۰ میلیارد کهکشان در عالم قابل رصد، شمارش شدند که هر یک از آنها شامل چندین میلیارد ستاره هستند؛ رصد برخورد کهکشانها؛ تهیهٔ نما از کهکشانهایی که کمتر از یک میلیارد سال پس از رویداد مهبانگ متولد شده‌اند؛ درجه‌بندی فاصله‌های استانداردی که در محاسبهٔ مقدار ثابت هابل به‌کار می‌روند؛ و رصد ابرنواخترها (ستارگان منفجر شونده) در فواصل بسیار دور که از شتاب گرفتن انبساط عالم حکایت دارد.

هیچ دانشمندی یادبودی بهتر از این نداشته است.

۲۸

دانش پژوه ایده‌آل

سوبراهمانیان چاندراسخار



تولد و مرگ

همکاران، دوستان و بستگان، سوبراهمانیان چاندراسخار را «چاندرا[1]» می‌نامیدند. چاندرا اغلب از همسرش لالیتا[2] می‌خواست نغمه‌ای را برایش بخواند که سرایندهٔ آن حسرت چرخه‌های تولد و مرگی را می‌خورد که در طول زندگی شاهد آن بوده است. چرخه‌های تولد و مرگ ذهنی، به‌صورت الگوی زندگی خلاق چاندرا در علم درآمد. آغازگر این چرخه‌ها، پیشامد عجیبی بود که مسبّب آن آرتور ادینگتون اخترفیزیکدان برجستهٔ انگلیسی در سالهای ۱۹۱۰ و ۱۹۲۰ بود. لالیتا این الگوی منحصربه‌فرد را در یک خاطره این‌گونه شرح می‌دهد: «هر زمینهٔ کاری یا چرخه... بین ده تا پانزده سال طول می‌کشید. در این مدت او موضوع مورد تحقیق را انتخاب می‌کرد، مطالبی را که دربارهٔ آن موضوع منتشر شده بود مطالعه می‌کرد، سپس خود به تحقیق دربارهٔ موضوع می‌پرداخت، دربارهٔ آن موضوع مقالات علمی می‌نوشت و بالاخره تمامی آنچه را که در پیش رویش جمع شده بود به‌صورت کلّیتی منسجم و یکدست درمی‌آورد که درنهایت به کتابی دربارهٔ آن موضوع تبدیل می‌شد.»

وقتی کتاب تکمیل می‌شد، مثل این بود که مرگ چاندرا فرا رسیده باشد. او هیچ‌چیز دیگری برای گفتن دربارهٔ آن موضوع نداشت و برای پرداختن به مسائل جزئی باقی‌مانده دربارهٔ موضوع، وقت صرف نمی‌کرد. لالیتا می‌نویسد، «سروکله زدن با مسائل خرد، با روحیهٔ او سازگار نبود.» وقتی‌که دنبال موضوع جدید برای کار می‌گشت، مثل این بود که «دورهٔ آیش» را می‌گذراند. این دوره برای او با افسردگی و ناامیدی همراه بود و به لالیتا می‌گفت، «نغمهٔ آن دوست آهنگسازت را برایم بخوان.»

1. Chandra 2. Lalitha

اقتضائات زندگی و کار، چاندرا را مجبور کرد تا چندبار به‌طور بنیادی تغییر فرهنگ بدهد و هر بار برایش مثل این بود که می‌میرد و باز به سختی متولد می‌شود. او در جنوب هندوستان به دنیا آمده بود و در طول زندگی‌اش همواره می‌گفت که فقط هند را خانهٔ خود می‌داند. معهذا در نوزده سالگی هند را ترک کرد و هیچ‌وقت جز برای دیدار به هند بازنگشت. در هند، امکان تربیت دانشجو در مقطع کارشناسی در رشتهٔ اخترفیزیک وجود نداشت و پس از تحصیل نیز فرصت شغلی مناسب برای او وجود نداشت. برای گرفتن درجهٔ لیسانس به ترینیتی کالج کیمبریج رفت و بعداً به‌عنوان دستیار آموزشی در ترینیتی منصوب شد. آب و هوای سرد انگلستان، غذای بیمزهٔ انگلیسی و رفتارهای گاه و بیگاه عجیب انگلیسی‌ها، موانع کوچک و بزرگی در سر راه چاندرا بودند ولی او در انگلستان، دوستان ماندگاری پیدا کرد و اگر چشم‌انداز کاریِ مناسبی می‌یافت، همان‌جا ماندگار می‌شد. ولی به او گفتند که در آنجا، هیچ‌گونه فرصت شغلی برایش وجود ندارد و بنابراین به سوی فرهنگ سوم یعنی آمریکا حرکت کرد. ابتدا به هاروارد و سپس به رصدخانهٔ یرکز و عاقبت به شیکاگو رفت و به همراه لالیتا، همان‌جا ماندگار شد. او در آمریکا به‌عنوان نظریه‌پرداز، ریاضیدان، آموزگار، مشاور تحقیقاتی، ویراستار، متخصص تاریخ علم و داستان‌سرا اعتبار بی‌سابقه‌ای کسب کرد.

چاندرا خود را به‌سان مردی بر روی نردبان می‌دید و برای به یاد داشتن این استعاره، عکسی را که یک هنرمند به نام پی‌یرو بورلّو[1] گرفته بود، بر دیوار دفتر کارش آویخته بود. آن عکس، مردی را نشان می‌داد که تا وسط نردبانی بالا رفته. نردبان به دیواری تکیه دارد که برّاق و فاقد هرگونه ویژگی بارزی است ولی نمای حاشیه‌ای زیبایی دارد. مرد که بازتاب تصویرش و نردبان به‌صورت سایه دیده می‌شود، به نحو غریبی برای بالا رفتن از دیوار، ناتوان به‌نظر می‌رسد. چاندرا برای هنرمند عکاس توضیح داد که آن عکس برایش چه معنایی دارد و به این ترتیب توانست یک کپی از آن عکس برای خودش تهیه کند. او گفت: «آنچه در عکس شما، من را تحت‌تأثیر قرار داد، نحوهٔ فوق‌العاده جالب توجهی بود که شما احساس درونی یک فرد را در برابر تلاش او برای انجام کاری، به‌صورت بصری به تصویر در آورده‌اید؛ شخصی تا وسط نردبان بالا رفته ولی نشانه‌های ساختمانی که او می‌بیند و آرزو دارد تا به بالای آن برسد، حتی اگر تا انتهای نردبان هم بالا برود، مطلقاً دست نیافتنی‌اند. سایه‌ها در این عکس، به درک این نکته کمک می‌کنند که دسترسی به اهداف غایی مطلقاً غیرممکن است. آنها شخص را فروتر از جایی که قرارگرفته نشان می‌دهند.»

این کلمات دلسردکننده که کامش‌وار والی[2] آنها را نقل کرده، سر نخی از انگیزهٔ چاندرا به‌دست نمی‌دهند. چنانکه ویکتور وایسکوف، به والی گفت، «او به معنای واقعی کلمه، دانش‌پژوه بود، دانش‌پژوه ایده‌آل فیزیک. او نه گستاخ بود، نه جویای مقام و نه جویای شهرت و معروفیت. . . معلومات عمیق، رویکرد انسان‌گرایانه. . . اطلاعات او از ادبیات جهان و به‌ویژه ادبیات انگلیس، همه چشمگیر و عالی بود. در یک کلام، مشکل بتوانید فیزیکدان یا اخترشناس دیگری را بیابید که تا این حد عمیقاً باسواد و

1. Piero Borello 2. Kameshwar Wali

فرهیخته باشد.» یکی از دانشجویان چاندرا دربارهٔ او گفت، «چاندرا، به‌عنوان یک دانش‌پژوه، همواره درحال یادگیری بود. او به صاحبان قدرت ذره‌ای اهمیت نمی‌داد. هر آنچه انجام می‌داد ناشی از اشتیاق مفرط او به سازندگی بود.»

چاندرا در مراسم دریافت جایزهٔ نوبل اظهار داشت، «چالش یک دانش‌پژوه آن است که در هر زمینهٔ کاری که انتخاب می‌کند به دنبال چشم‌اندازها باشد.» منظور او از این گفته آن است که شخص باید دیدی از آنِ خودش داشته باشد. او اصرار داشت که از بدو امر، دیدگاه خود را با نظم و شکیل و با ساختاری منسجم ارائه کند. او این کار را در یک دورهٔ تقریباً شصت ساله، مکرراً انجام داد.

قلمرو اخترفیزیک، بسیار بزرگها، بسیار کوچکها (در تلاش برای دنبال کردن تاریخ جهان تا منشأ اتم‌گونهٔ آن) و بسیار پیچیده‌ها را دربر می‌گیرد. درک چاندرا از پیچیدگی‌های اخترفیزیک، در بین همهٔ معاصرانش بی‌همتا بود. او در یکی از چرخه‌های مطالعه بر روی یک موضوع، می‌توانست مبانی اساسی حوزهٔ مورد مطالعه را استخراج و میزان اهمیت آنها را برآورد کند، نظرگاه شخصی خودش را از موضوع پدید آورد و آن را در قالب یک رسالهٔ تک‌نفرهٔ مفصل، به نگارش درآورد. هیچ‌یک از همکاران چاندرا در حوزهٔ اخترفیزیک یا در حوزهٔ گسترده‌تر فیزیک، نمی‌توانستند این همه کار انجام دهند.

اهل مَدرَس[1]

یک‌بار، روزنامه‌نگاری به نام واتسالا وِدانتام[2] در مصاحبه‌ای از چاندرا پرسید «آیا پدر شما در زندگیتان نقش مسلط داشت؟» و چاندرا با لبخند پاسخ داد «همهٔ پدران هندی در زندگی فرزندشان نقش مسلط دارند.» والی، نقش پدر چاندرا، سی.اس. عیّار[3] را این‌گونه ترسیم می‌کند: «او انسانی بسیار فرهیخته، با مطالعه و دنیادیده بود، معهذا به آداب و رسوم خاصی پای‌بند بود و وقتی پای مسائل خانوادگی به میان می‌آمد، سنتی و خودرأی بود و از همه توقع پیروی بی‌چون و چرا داشت. او از این نظر، بسیار شبیه پدران نسل خودش بود. شخصیتی تودار و به دور از تظاهر داشت و از فرزندانش نیز کناره‌گیری می‌کرد.»

عیّار حسابدار بود و در دولت بریتانیا خدمت می‌کرد. او سرانجام به مقام سرممیزی رسید. انجام وظیفه، او را به دفتر بیشتر شرکتهای راه‌آهن مهم بریتانیایی در هند کشاند. هنگامی که چاندرا در سال ۱۹۱۰ به دنیا آمد، خانوادهٔ او در لاهور زندگی می‌کردند. در آنجا، عیّار به‌عنوان دستیار ممیز کل برای شرکت راه‌آهن شمال غرب خدمت می‌کرد. لاهور، هم از نظر جغرافیایی و هم از نظر فرهنگی از پیشینهٔ تامیلی عیّار که ریشه در جنوب شرق هند داشت، خیلی دور بود و وقتی موقعیتی پیش آمد، او خانوادهٔ در حال رشد خود را در مدرس در ساحل جنوب شرقی هند سکنا داد و در همین حال، خودش به سفرهای کاری متعددی می‌رفت. منزل خانوادهٔ عیّار که «چاندرا ویلاس» نام داشت وقتی‌که چاندرا به دبیرستان می‌رفت، ساخته شد؛ این منزل، جادار و راحت بود و در حومهٔ مدرس در محله‌ای که به طبقهٔ متوسط ـ مرفه اختصاص داشت، قرار گرفته بود.

1. Madras 2. Vatsala Vedantam 3. C.S. Ayyar

چاندرا به مادرش نیز به اندازهٔ پدرش مدیون بود. مادرش سیتالاکشمی[1] زن با اراده‌ای بود که ده فرزند به دنیا آورده و از پس زندگی در خانوادهٔ بزرگ شوهرش برآمده بود. چاندرا بزرگترین پسر خانواده بود. او دو خواهر بزرگتر، سه برادر کوچکتر و چهار خواهر کوچکتر داشت. سیتالاکشمی تحصیلات رسمی کمی داشت معهذا توانست زبان انگلیسی را یاد بگیرد و نمایشنامهٔ ایبسن[2] به نام خانهٔ عروسک را به زبان تامیلی ترجمه کند (که انتخاب عجیبی بود چون شخصیت اصلی در نمایشنامه، نورا هلمر[3]، شوهرش را ترک می‌کند). او از تمایل دخترانش به تحصیلات عالی حمایت کرد و در مورد انتخاب آیندهٔ کاری برای چاندرا، با شوهرش به مخالفت برخاست. او به چاندرا گفت، «تو باید کاری را که دوست داری انجام دهی. به حرف پدرت گوش نده. مرعوب نشو.»

نخستین انتخاب چاندرا، ریاضیات بود. او شیفتهٔ کار سرینیواسا رامانوجان[4] شده بود. رامانوجان درحالی‌که تقریباً فقیر بود و در ریاضیات عالی تعلیم کمی دیده بود، مقالاتی دربارهٔ نظریهٔ اعداد منتشر کرد که جی.اچ. هاردی[5]، ریاضیدان پیشرو آکسفورد را تحت تأثیر قرار داد. هاردی و همکارش در کیمبریج، جی.ای. لیتل‌وود[6]، با گرفتن یک بورس تحصیلی برای رامانوجان در ترینیتی کالج آکسفورد، او را به انگلستان آوردند. هاردی و رامانوجان به مدت سه سال با همکاری یکدیگر بر روی یک سری مقالات مهم کار می‌کردند. ولی چنانکه چاندرا بعداً فهمید، آب و هوای انگلستان با مزاج هندی‌های مهاجر سازگار نیست. رامانوجان بیمار شد. او احتمالاً به سل مبتلا شده بود، به مدرس بازگشت و همان جا در سن سی‌وسه سالگی درگذشت. چاندرا به یاد داشت که وقتی ده ساله بود، مادرش دربارهٔ دوران کاری کوتاه رامانوجان و مرگ تأسف‌بار او، تعریف کرده بود.

دورهٔ کاری وسوسه‌آفرین رامانوجان برای متقاعد کردن سی.اس. عیّار به اینکه تحصیل ریاضیات برای پسرش مناسب است، کافی نبود. او اصرار داشت که پسرش در رشتهٔ فیزیک تحصیل کند. شاید او موفقیت درخشان سی.وی. رامان[7]، یعنی برادرش و عموی چاندرا را درنظر داشت. رامان در سال ۱۹۲۸ اثر فیزیکی را کشف کرده بود که اکنون فیزیکدانان و شیمی‌فیزیکدانان آن را اثر رامان می‌نامند و عبارت است از پراکندگی نور تکفام (با یک طول‌موج معین) به‌وسیلهٔ یک مادهٔ شفاف. داده‌های حاصل از پراکندگی، به همراه داده‌های تکمیلی به‌دست‌آمده از نور گسیل‌شده، غالباً شکل مولکولهایی را که با نور برهم‌کنش داشته‌اند، آشکار می‌کنند. رامان در سال ۱۹۳۰ برای کارش به لقب شوالیه مفتخر شد و جایزهٔ نوبل دریافت کرد.

آنچه عیّار برای چاندرا درنظر داشت آن بود که او درجهٔ کارشناسی فیزیک را با درجهٔ ممتاز بگیرد و سپس به انگلستان برود و در امتحانات ورودی ادارات دولتی هند شرکت کند. موفقیت در آن امتحانات

1. Sitalakshmi 2. Ibsen 3. Nora Helmer 4. Srinivasa Ramanujan 5. J.H. Hardy
6. J.E. Littlewood 7. C.V. Raman

به منزلهٔ داشتن تضمینی برای یافتن یک شغل مطمئن در دستگاه دولتی بود. چاندرا با تحصیل در رشتهٔ فیزیک موافق بود ولی تأکید داشت که با خدمت در دستگاه دولتی موافق نیست. او به والی گفت «دو دانشمندی که نام آنها را می‌دانستم، رامانوجان و رامان بودند و آن دو، تا اندازه‌ای برایم در حکم سرمشق بودند.» هردوی آنها در زندگی، مسیر تحقیق محض را طی کرده بودند و چاندرا نیز با حمایت مادرش، همین مسیر را انتخاب کرد.

بدون شک، استعداد چاندرا در حد یک نابغه بود. در هجده سالگی و وقتی‌که هنوز در پرزیدنسی کالج مدرس دانشجوی لیسانس بود، مقاله‌ای نوشت که توجه رالف فاولر[1] را جلب کرد. فاولر نظریه‌پردازی برجسته در آزمایشگاه کاوندیش و داماد رادرفورد بود. فکر آن مقاله از دیداری نشأت گرفت که آرنولد زومرفلد، مدرس و نظریه‌پرداز آلمانی در سال ۱۹۲۸ از مدرس به عمل آورد. چاندرا برای دیدن او به هتل محل اقامتش رفت و امیدوار بود با اطلاعات کاملی که دربارهٔ کتاب زومرفلد به نام ساختار اتمی و خطوط طیفی داشت، بتواند او را تحت‌تأثیر قرار دهد. اما زومرفلد اخبار دلسردکننده‌ای داشت. چاندرا آن ملاقات را چنین به یاد آورد: «او بی‌درنگ به من گفت که پس از نوشته شدن آن کتاب، تمام فیزیک دگرگون شده است و به کشف مکانیک موجی به‌وسیلهٔ شرودینگر و پیشرفتهای جدیدی اشاره کرد که نتیجهٔ کارهای هایزنبرگ، دیراک، پائولی و دیگران بود. به گمانم متوجه شد که کمی دمق شده‌ام بنابراین پرسید که چه چیزهای دیگری می‌دانم؟ جواب دادم که کمی مکانیک آماری مطالعه کرده‌ام. او گفت، 'خوب، در زمینهٔ مکانیک آماری هم تغییرات زیادی رخ داده است' و دست‌نویسهای مقاله‌اش دربارهٔ نظریهٔ الکترونی فلزات را که هنوز منتشر نشده بود به من داد.»

زومرفلد در مقاله‌اش، روشهای آماری را به‌کارگرفته بود که فرمی مطرح کرده و دیراک آنها را تعمیم داده بود. چاندرا سریعاً معنی و اهمیت این آمار جدید را دریافت و بدون آنکه از معلمان خود راهنمایی یا کمک بگیرد، کاربرد جدیدی برای آن پیدا کرد و موضوع را به‌صورت یک مقاله درآورد که آن را برای فاولر فرستاد. این کار یکی از آن اقدامهای بجایی بود که می‌تواند زندگی حرفه‌ای کسی را رقم بزند. او کاری از فاولر را در ماهنامهٔ اطلاعیه‌های انجمن سلطنتی اخترشناسی دیده بود. فاولر با پدید آوردن مدل ستارگان پیری که سوخت هسته‌ای آنها تمام شده و به اندازه‌ای در حدود کرهٔ زمین رمبیده‌اند و «کوتولهٔ سفید» نام گرفته‌اند، آمار فرمی ـ دیراک را به قلمرو اخترفیزیک وارد کرده بود. فاولر و یکی از همکارانش به نام نویل مات[2]، مقالهٔ چاندرا را خواندند و تغییراتی را در سبک نگارش آن پیشنهاد کردند که چاندرا به سادگی آن را انجام داد. با پیگیری و حمایت فاولر، مقاله در نشریهٔ معتبر گزارش انجمن سلطنتی منتشر شد. دست‌کم می‌توان گفت که این برای یک جوان هجده سالهٔ دست‌تنها که در حال گذراندن دورهٔ کارشناسی بود، موفقیت چشمگیری به حساب می‌آمد. مقاله، توجه افراد مهمی را جلب کرد و بورس تحصیلی ویژه‌ای به چاندرا پیشنهاد شد که به کمک آن می‌توانست پس از فارغ‌التحصیلی، در انگلستان به مطالعه و تحقیق ادامه دهد. ولی برای چاندرا، زمان برای ترک هندوستان مناسب نبود.

1. Ralph Fowler 2. Nevill Mott

سلامتی مادرش رو به افول می‌رفت و چاندرا بیم آن داشت که اگر به انگلستان برود، شاید دیگر هرگز او را نبیند. خود سیتالاکشمی، گزینهٔ دردناک را انتخاب کرد و به چاندرا گفت، «تو باید بروی. باید تا آنجا که در توان داری به دنبال ایده‌آل‌هایت بروی.» او به دیگران نیز می‌گفت، «او متعلق به دنیاست، نه به من.»

به سوی کیمبریج

چاندرا در یک روز دم‌کرده در ژوئیهٔ سال ۱۹۳۰ هندوستان را از طریق بمبئی ترک کرد. هوای بد چندین روز حرکت کشتی را کند کرده و دریازدگی، چاندرا را از پا درآورده بود. وقتی هوا آرام شد و معدهٔ او به حال عادی بازگشت، افکارش متوجه فیزیک به‌ویژه اجرام ستاره‌ای عجیبی شد که کوتولهٔ سفید نام داشتند و فاولر آنها را مطالعه کرده بود. جرم این ستاره‌ها برابر جرم یک ستارهٔ معمولی مثل خورشید است ولی اندازهٔ آنها پس از رمبش، حدوداً به اندازهٔ کرهٔ زمین می‌رسد، در نتیجه مادهٔ موجود در داخل این ستاره‌ها، چگالی (جرم در واحد حجم) عظیمی دارد که بسیار بیشتر از چگالی هر ماده‌ای در روی کرهٔ زمین است. این فکر به ذهن چاندرا خطور کرد که این شرایط، برای فیزیک کوتوله‌های سفید، محدودیتی ایجاد می‌کند: این ستاره‌ها باید نسبیتی باشند، یعنی مواد سازندهٔ آنها باید از آنچه نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین حکم می‌کند، پیروی کنند.

چاندرا همچنین دربارهٔ شرایط فیزیکی فکر کرد که اجازه می‌دهد تا کوتوله‌های سفید اندازهٔ کوچکشان را حفظ کنند و تحت‌تأثیر نیروی گرانش، دستخوش رمبش بیشتر نشوند. بنابر تحلیل فاولر، اصل طرد پاولی که به‌وسیلهٔ فرمی و دیراک بسط‌یافته، در این مورد نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. این اصل تأکید دارد که هیچ دو الکترونی را نمی‌توان به اندازه‌ای به هم نزدیک کرد که در یک حالت کوانتومی قرار بگیرند و نتیجهٔ این امر، پدید آمدن فشار الکترونی ویژه‌ای است که در برابر نیروی گرانشی مقاومت می‌کند. مقدار نهایی فشردگی که نمی‌توان بر مقاومت فشاری آن غلبه کرد، حالت «تبهگنی» نامیده می‌شود.

چاندرا که در بین اسبابهایش در کشتی فقط سه کتاب به همراه داشت، شروع به ساختن نسخهٔ نسبیتی نظریهٔ فاولر کرد و به نتیجهٔ غیرمنتظره‌ای رسید: برای جرم ستاره‌ای که بتواند به یک کوتولهٔ سفید تبدیل شود، حدی وجود دارد. این حد، بعدها «حد چاندراسخار» نام گرفت. در ستاره‌ای که جرم آن بیش از ۱/۴ برابر جرم خورشید است، فشار الکترونی برای مقاومت در برابر کشش گرانشی که ستاره را به رمبش وامی‌دارد، کافی نیست. برای چنین ستاره‌ای، هیچ سازوکاری وجود ندارد تا قبل از مرگ از حالت کوتولهٔ سفید عبور کند. چنانکه چاندرا بعداً در مقاله‌ای بیان کرد: «تاریخ زندگی یک ستارهٔ کم‌جرم باید با تاریخ زندگی یک ستارهٔ پرجرم تفاوت اساسی داشته باشد. برای یک ستارهٔ کم‌جرم، مرحلهٔ طبیعی کوتولهٔ سفید، نخستین گام به سوی نابودی کامل است ولی یک ستارهٔ پرجرم نمی‌تواند از مرحلهٔ کوتولهٔ سفید بگذرد و بنابراین باید دربارهٔ احتمالات دیگری گمانه‌زنی کرد.»

«احتمالات دیگری» بودند که می‌شد دربارهٔ آنها گمانه‌زنی کرد، گمانه‌زنی‌هایی از عجیب‌ترین نوع ممکن. مثلاً اینکه یک ستارهٔ پرجرم در حال مرگ، پس از رمبش به شیئی تبدیل شود که کوچکتر و بسیار چگالتر از یک کوتولهٔ سفید است. شاید غریب‌ترین احتمال ممکن، چاندرا را خیلی به خود مشغول کرده بود: اینکه چنین ستاره‌ای تا منتها درجهٔ ممکن یعنی چگالی بی‌نهایت رمبیده باشد به‌طوری که هیچ چیز، حتی نور هم نتواند از مجاورت آن بگریزد. حتی اگر چاندرا به چنین چیزی پی‌برده بود، عاقلتر از آن بود که دربارهٔ آن حرفی بزند. آنچه او دربارهٔ وجود یک حد برای جرم ستاره‌ای که به کوتولهٔ سفید می‌رمبد، مطرح کرده بود کافی بود تا او را به عرصهٔ جروبحثهای دشواری بکشاند.

وقتی چاندرا به لندن رسید، مناظر توجه‌اش را چندان جلب نکرد و بلافاصله خود را در چنبرهٔ کاغذ بازی دیوانسالاری یافت. او می‌خواست به عنوان یک دانشجوی محقق درکمبریج ثبت نام و زیر نظر فاولر کار کند، ولی ادارهٔ کمیسری عالی هندوستان که مسئول رسیدگی به کار او بود، وضعی درهم‌وبرهم داشت و نه تنها با او همکاری نمی‌کردند بلکه برخورد توهین‌آمیزی نیز داشتند. چاندرا برای پدرش نوشت، «ای کاش اصلاً به اینجا نمی‌آمدم و این بورس را نمی‌پذیرفتم.» ولی مثل همیشه سماجت به خرج داد و بالاخره بخت با او یاری کرد. نامه‌ای که فاولر شخصاً نوشت، موجب پذیرش او در ترینیتی کالج شد. در نامهٔ دیگری که در آن موقع برای پدرش نوشت از خوش‌اقبالیش اظهار شگفتی کرد. او نوشت: «فقط به این دلیل توانستم پذیرش بگیرم که تصادفاً فاولر را در ظرف دو سال گذشته می‌شناخته‌ام. فقط خدا می‌داند که چرا من دو سال پیش برای فاولر نامه نوشتم. لابد به این دلیل که او دو سال بعد کمکم کند!»

چاندرا تجربهٔ اقامت درکیمبریج را، هم الهام‌بخش و هم دلسردکننده یافت. او بعداً چنین به یاد آورد: «تجربهٔ خردکننده‌ای بود. . . ناگهان خود را در بین افرادی مانند دیراک، فاولر و ادینگتون یافتم. در اجتماعی که هیچ نقطهٔ اشتراکی با من نداشت.» او که همیشه مطلقاً گیاهخوار بود، عزم خود را جزم کرد تا «صراحتاً و صادقانه بگوید که نه‌تنها امکان دارد کسی برای مدت سه سال در انگلستان گیاهخوار باشد، بلکه بگوید که خود او توانسته این کار را انجام دهد.» رژیم غذایی او عمدتاً شامل نان وکره وکورن فلکس و سیب‌زمینی بود. به سیب‌زمینی پودر چاشنی هندی می‌زد که از خانه برایش می‌فرستادند.

رژیم فکری چاندرا غنیتر و تحریک‌کننده‌تر بود. او درس مکانیک کوانتومی را با دیراک، مکانیک آماری را با فاولر، نظریهٔ توابع را با لیتل‌وود و نظریهٔ نسبیت را با ادینگتون می‌گذراند. در ابتدا، دیراک اثر خوبی بر چاندرا نگذاشت. چنانکه چاندرا در توصیف او نوشت: «این مردک لاغراندام، سربه زیر و خجول، با حالت موذیانه‌ای در خیابان راه می‌رود و کاملاً نزدیک دیوارها حرکت می‌کند (انگار که دزد است!)، روی‌هم‌رفته حالش خوب نیست. (برخلاف او، آقای فاولر مردی است قوی، بزرگ جثه، سالم، میانسال، بسیار سرزنده، سرشار از شور زندگی.)» معهذا نزدیک شدن به فاولر مشکل بود درحالی‌که دیراک، آموزگار و دوست خوب چاندرا شد. چاندرا دربارهٔ او به والی گفت: «او خیلی انسان و در ارتباط خصوصی‌اش با من، فوق‌العاده گرم و صمیمی بود. گرچه به کاری که من انجام می‌دادم، علاقهٔ چندانی نداشت ولی حدود ماهی یک‌بار در اقامتگاهش در سنت جانز[1] من را برای صرف چای می‌پذیرفت.

1. St. Johns

همچنین برای صرف چای به محل اقامت من می‌آمد و بعضی یکشنبه‌ها من را با ماشین به مزرعه‌های بیرون کمبریج می‌برد که در آنجا برای پیاده‌روی‌های طولانی [و عمدتاً در سکوت] به جادهٔ رومان[1] می‌رفتیم.» این‌گونه دیدارها، ملاقات بین دو نفر با ذهنهای استثنایی بود که هر دو تودار و کم‌حرف بودند.

برای مدتی، چاندرا درنظر داشت تا زمینهٔ کاری‌اش را از اخترفیزیک به فیزیک نظری محض تغییر دهد. برای سبک و سنگین کردن کار نظری معاصر، تابستان سال ۱۹۳۱ را در مؤسسهٔ ماکس بورن در گوتینگن و زمستان ۳۳-۱۹۳۲ را در مؤسسهٔ بور در کپنهاگ گذراند. بور و بورن هر دو خیلی گرفتار بودند و چاندرا خیلی کم توانست آنها را ببیند. ولی در بین نظریه‌پردازان جوان و آزادی که مشغول ساختن بنای عظیم مکانیک کوانتومی بودند، دوستان بسیاری پیدا کرد. بعداً از این دوستان کمک گرفت. او در کپنهاگ بر روی مسئله‌ای که دیراک به او داده بود کار می‌کرد و با خوش‌بینی فکر می‌کرد راه‌حلی برای آن مسئله پیدا کرده که «روی‌هم‌رفته پیش‌پاافتاده نیست.» او برای بور و دیراک نامه نوشت و نظر آنها را جویا شد. بور مقاله را تأیید کرد و آن را برای نشریهٔ گزارشهای انجمن سلطنتی فرستاد. ولی دیراک یادداشتی برای چاندرا فرستاد و اشتباهی اساسی در مطلب را متذکر شد و به این ترتیب شادی او دوامی نیاورد. چاندرا مقاله را پس گرفت و با بی‌میلی (ولی خوشبختانه) به کار اخترفیزیک بازگشت.

در بازگشت به کمبریج، چاندرا امتحان شفاهی دکتری را در پیش‌رو داشت که به طور غیر رسمی انجام می‌شد. ممتحنان عبارت بودند از فاولر (که زحمت خواندن رساله را به خود نداده بود) و ادینگتون. پس از طرح سؤالات از سوی فاولر و ایرادات از سوی ادینگتون، سپس طرح سؤالات از سوی ادینگتون و ایرادات از سوی فاولر، فاولر ناگهان به ساعتش نگاه کرد و فریاد زد، «خدای من، دیرم شده» و با عجله از اتاق بیرون رفت. سپس ادینگتون بدون اینکه به چاندرا بگوید که قبول شده یا مردود، گفت «تمام شد». (چاندرا قبول شده بود.)

پس ازگرفتن مدرک دکتری درحالی‌که پول کمک هزینهٔ تحصیلی چاندرا در حال تمام شدن بود، در اندیشهٔ آینده‌اش فرورفت. او درحالی‌که امید اندکی به موفقیت داشت، در امتحانات بورس تحقیقاتی در ترینیتی کالج شرکت کرد. گرفتن بورس تحقیقاتی ترینیتی کالج به او امکان می‌داد تا چهار سال دیگر در انگلستان بماند، در کالج اتاق مجانی و غذا داشته باشد و مقرری سالیانه‌ای به مبلغ سیصد پوند دریافت کند. فاولر فکر می‌کرد که او در بهترین حالت هم شانس کمی برای گرفتن بورس دارد؛ تنها هندی که قبلاً موفق به این کار شده بود، رامانوجان بود که او هم موردی خاص بود. چاندرا برنامهٔ واقع‌بینانه‌تری را برگزید. او می‌خواست مدت کوتاهی در آکسفورد بماند و با ادوارد میلن[2] کار کند. او اخترفیزیکدان جوانی بود که معلم چاندرا شده و دوستی نزدیکی با او پیدا کرده بود. چاندرا اتاقی در آکسفورد اجاره کرد، اسبابهایش را بست و سوار بر یک تاکسی عازم ایستگاه قطار شد. در راه تصمیم گرفت تا سری به کالج بزند و به فهرست نامزدهای برگزیده برای بورس تحقیقاتی، نگاهی بیندازد. با کمال شگفتی دریافت که نامش در فهرست قبول‌شدگان است. با خودش گفت، «همینه، این زندگی‌ام را عوض خواهد کرد.»

1. Roman road 2. Edward Milne

دلقک‌بازی ستاره‌ای

زندگی چاندرا به راه‌های دیگری در حال تغییر بود. او در طول اقامتش در کیمبریج، دربارهٔ قطر ستارگان و این نتیجه‌گیری عجیب اندیشیده بود که برخلاف باور رایج در آن زمان، ستارگان پرجرم مجاز نیستند در پایان عمرشان به کوتوله‌های سفید بدل شوند. چاندرا مقالهٔ کوتاهی دربارهٔ نظریه‌اش تهیه کرد و آن را در نشریهٔ آسترو فیزیکال جورنال (مجله‌ای که بعداً خودش سردبیر آن شد) به چاپ رساند. میلن به برخی تقریب‌های اصلی در مقاله اعتراض کرد و این امر چاندرا را واداشت تا نظریهٔ دقیقی برای کوتوله‌های سفید پدید آورد. چاندرا این کار را در سال ۱۹۳۴، پس از آنکه کار بورسیه‌اش سروسامان گرفت، آغاز کرد. ادینگتون نسبت به این کار کنجکاو بود. چاندرا چنین به یاد آورد، «او نسبت به پیشرفت روزانهٔ کار من، توجه بسیاری داشت. او حتی تنها ماشین حساب موجود در آنجا را برایم آورد. . . در طول سه ماه، از ماه اکتبر تا دسامبر، ادینگتون غالباً به اتاق من می‌آمد، دست‌کم هفته‌ای یک‌بار و بعضی هفته‌ها دو یا سه‌بار.»

در اواخر سال ۱۹۳۴ چاندرا نظریهٔ دقیق خود را کامل کرده و ترتیبی داده بود تا خلاصه‌ای از آن را در یک گردهمایی در انجمن اخترشناسی سلطنتی در لندن ارائه کند. وقتی به برنامهٔ گردهمایی نگاه کرد متوجه شد که بناست تا بلافاصله پس از مقالهٔ او، ادینگتون سخنرانی با عنوان «واگنی نسبیتی» ایراد کند. (واگنی نسبیتی، اصطلاحی فنی برای شرایطی است که در نظریهٔ چاندرا به جرم حدی کوتولهٔ سفید منجر می‌شود.) مدتها بعد، چاندرا چنین به خاطر آورد، «من واقعاً خیلی آزرده شده بودم، چون ادینگتون در آن موقع عملاً هر روز به دیدن من می‌آمد، اما هیچ‌گاه دربارهٔ ارائهٔ مقاله، حرفی به من نزده بود.» در هنگام صرف چای قبل از گردهمایی، چاندرا مشغول صحبت با دوستش، ویلیام مک‌کریا[1] بود که ادینگتون به آنها ملحق شد. مک‌کریا پرسید «خوب، استاد ادینگتون، ما از عنوان 'واگنی نسبیتی' چه باید بفهمیم؟» ادینگتون به چاندرا نگاه کرد و گفت، «این مقاله تو را غافلگیر خواهد کرد»، و سپس آنها را ترک کرد.

چاندرا مقاله‌اش را ارائه کرد و میلن، شرح مختصری بر آن افزود. سپس ادینگتون به حضار معرفی شد. او با شوخ طبعی کنایه‌آمیزش به سرعت سر اصل مطلب رفت و گفت: «نمی‌دانم که آیا زنده از این گردهمایی خارج می‌شوم یا نه، ولی منظور مقالهٔ من این است که چیزی به نام واگنی نسبیتی وجود ندارد!» او نظر چاندرا را این‌گونه جمع‌بندی کرد «ستاره‌ای که جرم آن از حد معین M بیشتر است، یک گاز کامل باقی خواهد ماند و هیچ‌گاه نمی‌تواند سرد شود. این ستاره تابش می‌کند و تابش می‌کند، منقبض می‌شود و منقبض می‌شود تا جایی که، به گمانم، شعاع آن به چند کیلومتر می‌رسد. در این هنگام، گرانش به اندازهٔ کافی قوی می‌شود تا تابش را ببلعد و بالاخره ستاره می‌تواند به آرامش برسد.»

ادینگتون چنین ادامه داد، «دکتر چاندراسخار این نتیجه را قبلاً به‌دست آورده بوده ولی در آخرین مقالهٔ خود آن را به رخ ما کشیده است و وقتی دربارهٔ آن با او بحث می‌کردم، احساس کردم به این

1. William McCrea

نتیجه‌گیری کشانده می‌شوم که این استدلال، تقریباً یک برهان خلف برای فرمول واگنی نسبیتی بوده است. ممکن است برخوردهای گوناگون رخ دهد که موجب نجات ستاره شود ولی فکر می‌کنم که برای نجات ستاره، چیزی بیش از اینها لازم است. به گمانم باید قانونی در طبیعت وجود داشته باشد که نگذارد یک ستاره این طور نامعقول رفتار کند!» وقتی سخنان ادینگتون به پایان رسید، مدیر گردهمایی باعجله اعلام کرد «قبل از آنکه بتوان دربارهٔ این مقاله بحث کرد، لازم است تا استدلالات آن را خیلی به دقت مورد ارزیابی قرار داد.» چاندرا سکوت کرد. او تحقیر شده و کاملاً گیج شده بود.

پس از آنکه چاندرا توانست از شوک اولیهٔ این ماجرا خلاصی یابد، در تدارک ضدحمله برآمد. او دربارهٔ ماجرای ادینگتون نامه‌ای برای لئون روزنفلد نوشت. او دستیار بور و در کپنهاگ با چاندرا دوست شده بود. روزنفلد پاسخ داد که نه او و نه بور، هیچ‌یک از حرفهای ادینگتون سر در نمی‌آورند. او به چاندرا گفت که استدلالهایش درست‌اند و توصیه کرد که از این بابت خوشحال باشد و زیاد نگران «کله‌گنده‌ها» نباشد. اما چاندرا نمی‌توانست این موضوع را فراموش کند. او گفتگوهای متعددی با ادینگتون داشت که از آنها چیز زیادی دستگیرش نشد مگر این نکته که ادینگتون بر نوعی دید کاملاً متفاوت و نامتعارف از اصل طرد تکیه می‌کند.

چاندرا از پشتیبانی غیررسمی بور، فاولر، دیراک و پائولی برخوردار بود. همهٔ آنها از نحوهٔ استدلال ادینگتون گیج شده بودند. ادینگتون به حملاتش به نظریهٔ چاندرا ادامه داد و در عین حال رابطهٔ شخصی صمیمانه‌اش را با چاندرا حفظ کرد. این کارها خیلی عجیب بود. ادینگتون در یکی از آخرین اظهارنظرهایش، نحوهٔ برداشت چاندرا از قطر ستارگان را «دلقک بازی ستاره‌ای» نامید.

گرچه چاندرا شک نداشت که درست می‌گوید ولی هیچ‌گاه به آنچه می‌خواست نرسید. او می‌خواست که یکی از شخصیتهای برجستهٔ علم فیزیک نظیر بور، پائولی یا دیراک در حمایت از نظریهٔ او، اظهارنظر علنی بکند. آنها در دیدارهای خصوصی به چاندرا دلگرمی می‌دادند ولی مایل نبودند خود را در یک مباحثهٔ رسمی با ادینگتون درگیر کنند. چاندرا در این‌باره به والی گفت، «این یک واقعیت شگفت‌انگیز است که کسی مثل ادینگتون چنان جذبهٔ باورنکردنی داشت که همه از او حساب می‌بردند و واقعیت باورنکردنی آن است که در حیطهٔ علم اخترشناسی هیچ کس نبود که درک و جسارت کافی داشته باشد و بگوید که ادینگتون در اشتباه است. گمان نمی‌کنم که در تمام نوشتارهای اخترشناسی بتوانید حتی یک جمله پیدا کنید که بگوید ادینگتون در اشتباه بود. موضوع به همین جا ختم نمی‌شود. گمان نمی‌کنم تصادفی بوده باشد که در هیچ‌یک از مدال‌های اخترشناسی که دریافت کرده‌ام اسمی از کار من دربارهٔ کوتوله‌های سفید برده نشده است.» این درس مشکلی بود که چاندرا دربارهٔ جامعه‌شناسی علم آموخت. آن‌گونه که خودش آن را توصیف کرد، «روال جاری این‌طور بود.»

به این ترتیب، چاندرا از نظریه‌اش دربارهٔ کوتوله‌های سفید جدا شد. او چاره‌ای نداشت جز آنکه کل موضوع را رها کند و به موضوع دیگری بپردازد. حد جرم چاندراسخار تا سه دهه پس از آن نیز به طور کلی در بین اخترشناسان پذیرفته نشد. ولی این حادثه در زندگی چاندرا به نحو غافلگیرکننده‌ای

ثمربخش واقع شد. او که مجبور شده بود به موضوع جدیدی (ساختار ستارگان) رو بیاورد، دریافت که از نظر فکری مستعد آن است تا زمینهٔ مطالعاتی خود را متناوباً تغییر دهد. به لطف ادینگتون و افکار سرسختانهٔ حد جرمی کوتوله‌های سفید از سوی او، چاندرا توانست رویکرد «تولد و مرگ» به پژوهش علمی را که در او منحصربه‌فرد بود، در خود بیابد.

ویلیامز بِی[1]

چاندرا دوست داشت تا داستان زندگی‌اش را در دو جمله تعریف کند: «من در سال ۱۹۳۰ هند را ترک کردم و به انگلستان رفتم. در سال ۱۹۳۶ به هند برگشتم و با دختری که شش سال منتظرم بود ازدواج کردم، به شیکاگو آمدم و از آن پس به خوشی زندگی کرده‌ام.» در اینجا، نوبت به داستان آن «دختر»، یعنی لالیتا می‌رسد و به این ترتیب، فصل طولانی از زندگی چاندرا که مربوط به زندگی او در آمریکاست، آغاز می‌شود.

لالیتا و چاندرا در بخش فیزیک پرزیدنسی کالج مدرس، همکلاس بودند. لالیتا آن روزها را این‌گونه به یاد می‌آورد، «چاندرا یک سال از من بالاتر بود. بعضی از کلاسهایمان مشترک بود. من در ردیف جلوی کلاس می‌نشستم. چاندرا درست پشت سر من می‌نشست. من حضور او را احساس می‌کردم و او هم حضور من را و به این ترتیب دوستی بین ما شکل گرفت.» وقتی‌که چاندرا در انگلستان بود، لالیتا دورهٔ کارشناسی ارشد را به پایان رساند و مدیر مدرسه‌ای در کارای‌کودی[2] شد. در پاییز سال ۱۹۳۴ چاندرا و لالیتا در مکاتباتشان به «تفاهم دوجانبه» رسیدند. پدر چاندرا از این موضوع خوشحال بود. او لالیتا را به شام در چاندرا ویلاس دعوت کرد و او را «بانوی جوان فروتن و بسیار موقری» یافت. عیّار مشتاقانه امیدوار بود که این ازدواج پسرش را برای همیشه به هند بازگرداند. این نقشه شکست خورد و نامزدی آنها نیز برای مدتی برهم خورد. چاندرا، لالیتا را از زمان تحصیل در کالج، ملاقات نکرده بود و عاقلانه ندید که از او بخواهد تا همهٔ ناملایماتی را که اقتضای کارش بود، بپذیرد. یکی از این موارد احتمالی، یک دورهٔ زندگی طولانی در خارج از وطن بود. به این ترتیب، آنها به یک «تفاهم دوجانبهٔ جدید» رسیدند: اینکه ازدواجشان تا زمانی که بتوانند همدیگر را ببینند و دربارهٔ آینده صحبت کنند، به تعویق بیفتد.

تنها موقعیت شغلی جدی که در هند برای چاندرا پیدا شد، شغل استادیاری در مؤسسهٔ هندی علوم در بنگلور بود که عموی چاندرا، سی.وی. رامان پیشنهاد کرده بود. ولی چاندرا از این کار بیمناک بود. او رفتار خودنمایانهٔ رامان در مقام یک دانشمند را تأیید نمی‌کرد. والی می‌نویسد، «درحالی‌که چاندرا، رامان را به‌عنوان یک فیزیکدان برجسته تحسین می‌کرد، ولی او را به‌عنوان یک الگو قبول نداشت، چون رامان به جنجال‌طلبی عادت داشت، از مشاجره لذت می‌برد و سخنان متناقض می‌گفت. چاندرا از او دلخور بود.» پدر و پسر در این مورد با هم توافق داشتند. عیّار در یک تلگراف در این‌باره به چاندرا نوشت: «به تو نصیحت می‌کنم، دور و بر او نگرد.»

1. Williams Bay 2. Karaikkudi

در سال ۱۹۳۵ چاندرا دعوت هارلو شَپلی برای رفتن به هاروارد و ایراد سخنرانیهایی دربارهٔ «فیزیک کیهانی» را پذیرفت. این سخنرانیها موفقیت‌آمیز بود و شَپلی پست جذاب دستیاری آموزشی را به او پیشنهاد کرد. در همان زمان، اوتو اشترووه[1]، مدیر رصدخانهٔ یرکز دانشگاه شیکاگو به او پست عضو وابستهٔ تحقیقاتی را پیشنهاد کرد. ادینگتون و میلن هر دو به چاندرا توصیه کردند یرکز را انتخاب کند که یکی از پیشروترین رصدخانه‌های دنیا بود. چاندرا خودش هم با این انتخاب موافق بود.

حال که تکلیف آیندهٔ او تا حدی روشن شده بود، چاندرا تصمیم گرفت که به هند بازگردد تا هم خانواده‌اش و هم لالیتای صبور را ببیند. در ژوئیهٔ سال ۱۹۳۶، دقیقاً شش سال پس از ترک هند، چاندرا با کشتی به طرف بمبئی حرکت کرد. لالیتا او را در مدرس ملاقات کرد و آن دو خیلی زود متوجه شدند که همدیگر را از همیشه بیشتر دوست دارند. والی می‌گوید، «وقتی چاندرا پس از شش سال دوباره لالیتا را دید، تصمیم‌های قبلی او برای تعویق نامحدود زمان ازدواجش، ناگهان رنگ باختند. لالیتا بیش از یک رؤیا بود. او کاملاً واقعی بود. دربارهٔ احساسات دوجانبهٔ آنها نسبت به یکدیگر، جای هیچ شبهه‌ای وجود نداشت. اگر بنا بود که هر یک از آن دو ازدواج کند، باید با یکدیگر و نه با هیچ کس دیگری ازدواج می‌کرد. لالیتا هم مانند چاندرا به علم دلبستگی داشت. چاندرا متقاعد شده بود که لالیتا مانعی در راه جستجوی سرسختانهٔ او نیست بلکه می‌تواند در این راه او را یاری کند.»

چاندرا و لالیتا در سپتامبر سال ۱۹۳۶ ازدواج کردند. ازدواج آنها یک «ازدواج عاشقانه» بود که خانواده‌های آن دو، در آن نقشی نداشتند. چنین موردی در هند آن موقع و اکنون، خیلی نادر است. آن دو در ماه اکتبر با کشتی از بمبئی حرکت کردند و قصد داشتند تا پس از اقامتی کوتاه در انگلستان، راهی ویلیامز بِی در ویسکانسین شوند. چاندرا و لالیتا به مدت بیست و هفت سال در ویلیامز بِی و رصدخانهٔ یرکز اقامت کردند.

حضور چاندرا در یرکز، منحصربه‌فرد بود. او قبل از هر چیز، یک نظریه‌پرداز در اخترفیزیک بود درحالی‌که کارکنان یرکز عمدتاً اخترشناسانی بودند که کار رصدی انجام می‌دادند. وظیفهٔ اصلی او علاوه بر کار تحقیقی، به وجود آوردن یک برنامهٔ درسی برای تحصیلات تکمیلی در رشته‌های اخترشناسی و اخترفیزیک بود. چاندرا به همراه جرارد کویپر[2] که او نیز به تازگی به جمع کارکنان یرکز پیوسته بود، طرحی مشتمل بر هجده مادهٔ درسی تدوین کردند که موضوعاتی نظیر جوّ و ساختار درونی ستارگان، دینامیک ستارگان، طیف‌نمایی خورشید و ستارگان، منظومه‌های خورشیدی و فیزیک اتمی را دربر می‌گرفت. چاندرا دوازده یا سیزده ماده از این مواد درسی را تدریس می‌کرد، یک یا دو مادهٔ درسی در یک دورهٔ تحصیلی سه ماهه. به گفتهٔ مارتین شوارتس‌شیلد[3]، اخترفیزیکدان دیگری که در یرکز مهمان بود، «یرکز از هر نظر به یک مؤسسهٔ پیشرو تبدیل شده بود. این موضوع شامل پدید آوردن یکی از برجسته‌ترین مدارس تحصیلات تکمیلی، اگر نگوییم برجسته‌ترین آنها، در زمینهٔ اخترشناسی و اخترفیزیک درکشور

1. Otto Struve 2. Gerard Kuiper 3. Martin Schwarzschild

بود... چاندرا فعالترین عضو این گروه بود. او عاشق سخنرانی بود و از دانشجویانش توقع بسیاری داشت و بسیاری از آنها نسبت به او احساس وابستگی زیادی داشتند.»

انرژی و مسئولیت‌های چاندرا بی‌انتها به‌نظر می‌رسید. او علاوه بر تدریس، جلسات بحث هفتگی ترتیب می‌داد که دانشجویان محقق از سرتاسر دنیا به این جلسات می‌آمدند و نیز متناوباً رساله‌های تک‌نفرهٔ معتبری که مختص خودش بود منتشر می‌کرد. در طول سال اول کارش در یرکز، شش مقالهٔ تحقیقی نوشت و نسخهٔ دست‌نویس نخستین کتابش به نام مقدمه‌ای بر مطالعهٔ ساختار ستارگان را به پایان رساند.

او موضوع مطالعه‌اش را از ساختار ستارگان به دینامیک ستارگان و سپس به موضوعی به نام انتقال تابشی تغییر داد که این موضوع در اخترفیزیک به معنی انتقال انرژی در درون ستارگان به‌وسیلهٔ فوتونهاست، که موضوع مورد علاقهٔ چاندرا بود. او به والی گفت، «کار تحقیقی بر روی انتقال تابشی بیش از هر کار دیگری برای من رضایت‌بخش بود. من به مدت پنج سال بر روی این موضوع کار کردم و احساسم این بود که کار به نحوی با ابتکار و نیروی پیشرانش خودش به جلو هدایت می‌شود. مسائل یکی‌یکی پدیدار می‌شدند. هر مسئله پیچیده‌تر و مشکلتر از مسئلهٔ قبل بود و همه حل می‌شدند. کل موضوع، زیبایی و ظرافتی پیدا کرده بود که نظیر آن را در هیچ‌یک از کارهای دیگرم نیافته‌ام.»

در اواخر دههٔ ۱۹۳۰ جنگ در اروپا آغاز شد و چنانکه چاندرا در نامه‌ای به پدرش نوشت، «همهٔ ارزشها را بر هم زد.» هندی‌ها دربارهٔ حمایت یا عدم حمایت از بریتانیا در جنگ با هم بحث می‌کردند. این موضوع وقتی مبرم‌تر شد که ژاپن با حمله به پرل هاربر[1] در دسامبر سال ۱۹۴۱، وارد عرصهٔ نبرد شد. حزب کنگرهٔ ملی هند خواستار آن بود که در قبال حمایتش از بریتانیا، آن کشور تضمین بدهد که پس از جنگ، به هندوستان استقلال کامل خواهد داد. معهذا مذاکره برای حصول چنین توافقی، مقدور نبود و حزب کنگره قطعنامه‌ای تصویب کرد که در آن از بریتانیا خواسته شده بود تا بلافاصله «از هندوستان خارج شود.» و تهدید کرده بود که عدم اجابت این درخواست، نافرمانی عمومی را درپی خواهد داشت. در واکنش به این قطعنامه، بریتانیا رهبر حزب کنگره از جمله موهنداس گاندی و جواهر لعل نهرو را دستگیر و زندانی کرد و این امر به قیام‌های مردمی در سرتاسر هند دامن زد. چاندرا فکر می‌کرد که هند باید از بریتانیا جانبداری کند و دلیل آن هم ساده بود: آنان که احتمالاً جایگزین بریتانیا می‌شدند، خیلی بدتر بودند. ولی او از رفتاری که با گاندی شده بود، اظهار تأسف کرد، مردی که چاندرا او را «بزرگترین انسان عصر ما» می‌نامید.

مقارن حمله به پرل هاربر، چاندرا و لالیتا مشغول دیدار از مؤسسهٔ تحقیقات عالی در پرینستون بودند. برخی از دانشمندان پرینستون به تلاش در راه اهداف جنگی پرداخته بودند و چاندرا نیز با این عده همراه شد. او به گروهی پیوست که در محل آزمایشهای ارتش در آبردین[2]، مریلند، بر روی نظریهٔ بالیستیک کار می‌کردند. کار جالبی بود؛ گازهای چگال و داغی که در محفظهٔ انفجار یک تفنگ پدید

1. Pearl Harbor 2. Aberdeen

می‌آیند، از نظر فیزیکی به گازهای موجود در درون یک ستاره شباهت دارند. ولی آبردین محیطی روستایی و نژادپرست، حتی نژادپرست‌تر از محیط روستایی ویسکانسین داشت و چاندرا مایل نبود از لالیتا بخواهد تا با برخوردهای تبعیض‌آمیز به سبک جنوبیها کنار بیاید. از اوایل سال ۱۹۴۳ تا پایان جنگ در سال ۱۹۴۵ چاندرا دائماً جابه‌جا می‌شد. سه هفته را در آبردین و سپس سه هفته را در یرکز می‌گذراند. او چنین به یاد می‌آورد، «کار بسیار طاقت فرسایی بود. ولی همهٔ اعضای جامعهٔ علمی برای اهداف جنگی در تلاش بودند و مثل جنگ ویتنام بین آنها دودستگی وجود نداشت. من به خستگی اهمیت نمی‌دادم.»

طی سالهای دههٔ ۱۹۴۰، چاندرا از پله‌های دانشگاهی نردبان استعاره‌ای‌اش بالا رفت. در سال ۱۹۴۲ به دانشیاری رسید و در سال ۱۹۴۳ به کرسی استادی دست یافت. او هنوز تابعیت هندی داشت و وقتی در سال ۱۹۴۴ به‌عنوان عضو وابستهٔ انجمن سلطنتی انتخاب شد، به جرگهٔ نخبگان علمی پیوست. علیرغم همهٔ اتفاقات پیشین، دوستی چاندرا و ادینگتون هنوز لطمهٔ جدی ندیده بود و میلن گزارش کرد که ادینگتون از انتخاب چاندرا به عضویت در انجمن سلطنتی حمایت کرده و علت آن را «عمدتاً به خاطر تشویق و رونق بخشیدن به اخترفیزیک نظری در آمریکا» ذکر کرده بود.

شهرت چاندرا به‌تدریج از مرزهای یرکز و محافل دانشگاهی شیکاگو فراتر می‌رفت. پس از آنکه اخترشناس برجستهٔ آمریکایی، هنری نوریس‌راسل[1] از پرینستون بازنشسته شد، جانشینی او در قالب کرسی استادی پژوهشی به چاندرا پیشنهاد شد. چاندرا نخست این پیشنهاد را پذیرفت ولی بعد، رابرت هاچینز[2] که در آن موقع رئیس دانشگاه شیکاگو بود، نظر او را عوض کرد. هاچینز که همواره مخاطب خود را متقاعد می‌کرد و همواره یکی از حامیان چاندرا در شیکاگو بود از چاندرا پرسید که مگر شیکاگو برای بنا کردن آیندهٔ کاری او مناسب نیست؟ و به او گفت، «اگر کم‌وکسری نداری باید اینجا بمانی.» هاچینز معتقد بود که اگر چاندرا به پرینستون می‌رفت، از جانشینی راسل دلسرد می‌شد. او گفت «اگر از کرسی استادی که جانشینی آن افتخارآمیز است صرف نظر کنید خیلی افتخارآمیزتر است تا اینکه آن را احراز کنید.» هاچینز می‌گفت باعث تعجب خواهد بود اگر چاندرا بتواند به یاد آورد که پس از قریب به پنجاه سال چه کسی در دانشگاه گلاسگو جانشین کلوین شد.

وقوع یک سلسله رویدادهای ناگوار در سال ۱۹۵۲ سبب جدایی چاندرا از رصدخانهٔ یرکز شد. این رویدادها در درجهٔ اول ناشی از دلایل فکری و سپس دلایل جغرافیایی بود. دردسر از آنجا آغاز شد که چاندرا از توانایی مدیریت بنگت اشترومگرن[3] که مدیر رصدخانهٔ یرکز بود، انتقاد کرد. اشترومگرن سال‌ها دوست او بود و چاندرا فکر می‌کرد که نظرش بدون آنکه توهین تلقی شود، پذیرفته خواهد شد. اما این‌طور نشد و پس از مدتی کوتاه، کمیته‌ای که توسط اشترومگرن تعیین شده بود، برنامهٔ درسی تحصیلات تکمیلی را که چاندرا پانزده سال صرف ساختن آن کرده بود، تغییر داد. در جلسه‌ای در دانشکده، چاندرا

1. Henry Norris Russell 2. Robert Hutchins 3. Bengt Strömgren

به اعضای بخش گفت که این حق آنهاست که برنامهٔ درسی را تغییر دهند ولی می‌خواهد آنها درک کنند که «همان‌قدر که من نقشی در اصلاح برنامهٔ درسی نداشتم و در این مورد با من مشورتی نشد، متقابلاً من هم این حق را برای خود محفوظ می‌دارم که در صورت تمایل بتوانم در جایی در دانشگاه، خارج از بخش اخترشناسی مشغول به کار شوم.»

چاندرا به بخش فیزیک دانشگاه شیکاگو رفت و یک‌بار دیگر دانش‌پژوه ایده‌آل، در تغییر جهت اجباری مسیر کاری‌اش، جنبهٔ مثبتی یافت. او به والی گفت، «فکر می‌کنم، در مجموع، اثر این تجربه در اوایل دههٔ ۱۹۵۰ بر کار علمی من، اگر بیش از اثر تجربهٔ قبلی من با ادینگتون نبود، دست‌کم به همان اندازه خوب بود، چون باعث شد که بتوانم با افرادی مانند فرمی و گرگور ونتزل[1] معاشر شوم. اگر در یرکز مانده بودم، نمی‌توانستم با چنین افرادی ارتباط نزدیک برقرار کنم. من با همکاری سام آلیسون[2] یک آزمایشگاه تجربی هیدرومغناطیس راه‌اندازی کردم. من همهٔ دروس استاندارد فیزیک مانند مکانیک کوانتومی، الکترودینامیک و غیره را تدریس می‌کردم. من نخستین کسی بودم که در دانشگاه شیکاگو، نسبیت درس دادم که البته این کار من را به تحقیق در زمینهٔ نسبیت کشانید.»

چاندرا هنوز در قبال دانشجویان محقق در یرکز مسئولیتهایی داشت. از این‌رو، او و لالیتا تا سال ۱۹۶۴ در ویلیامز بِی ماندند و در آن سال به طور دائمی به شیکاگو نقل مکان کردند. قبل از آن، چاندرا در روزهایی که کلاس فیزیکش تشکیل می‌شد به شیکاگو می‌رفت. روابط او با همکارانش در یرکز متشنج بود و افکار تلخی دربارهٔ امتیازات داده‌شده به نور چشمی‌های یرکز که اعتبار حرفه‌ای اندکی داشتند، او را آزار می‌داد. او به والی گفت، «باورکردنش مشکل است که در آن سالها، حتی نمی‌توانستم درک کنم که رفتار بی‌ادبانه و ناشایستی با من کرده‌اند. ولی متأسفانه تا یک جای کار، بیشتر تقصیر خودم بود، چون مردم من را دست‌کم می‌گرفتند و هر طور دلشان می‌خواست با من رفتار می‌کردند و من هم این اجازه را به آنها می‌دادم.»

سردبیر

چاندرا در یرکز مسئولیتهای زیادی داشت ولی سنگینترین و طولانیترین آنها، سمت سردبیری مجلهٔ آستروفیزیکال جورنال بود که دانشگاه شیکاگو منتشر می‌کرد. این شغل به نحو غیرمنتظره‌ای نصیب چاندرا شد. سردبیر پیشین مجله، ویلیام مورگان[3]، پس از یک مشاجره با چاندرا از مقام خود استعفا داد و چاندرا که مدت هشت سال سمت معاون سردبیر را داشت، تنها کسی بود که می‌توانست عهده‌دار مسئولیت مدیریت شود. او این شغل را نمی‌خواست، ولی پذیرفت و به مدت نوزده سال از ۱۹۵۲ تا ۱۹۷۱ در این سمت باقی ماند.

1. Gregor Wentzel 2. Sam Allison 3. William Morgan

مدیریت چاندرا بر مجله مستبدانه بود ولی با وسواس بسیار سعی می‌کرد تا منصفانه رفتار کند. والی می‌گوید، «او انزوا از جامعهٔ اخترشناسی را بر خودش تحمیل کرده بود تا بتواند منصفانه عمل کند و بر له یا علیه هیچ شخص بخصوصی غرض‌ورزی نکند. به همین دلیل دعوت به کنفرانس‌ها و سمپوزیوم‌ها را که فرصتی برای مسافرت و معاشرت بود، رد می‌کرد.» فرمی از او پرسید، «چرا؟ چرا این کار را می‌کنی؟» او پاسخ خوبی برای این سؤال نداشت. بعدها اذعان کرد که «این کار اشتباه بود و به زندگی شخصی‌ام لطمه می‌زد. وقتی این کار را پذیرفتم، هیچ فکر نمی‌کردم این همه طول بکشد. در آن موقع چارهٔ دیگری نداشتم.»

شایستگی و بی‌طرفی چاندرا همیشه هم مورد قدردانی قرار نمی‌گرفت. گاهی اوقات او با نادیده گرفتن نقدهای منفی ولی بی‌اساس، موجب برانگیختن دشمنی داوران مجله می‌شد و مؤلفان هم نظرات تندی دربارهٔ داوران ابراز می‌کردند که چند نمونه از آنها به قرار زیرند:

- من به این نتیجه رسیده‌ام که تمام اظهارنظرهای داوران، بی‌اهمیت یا حرف مفت است.
- شما داوری انتخاب کرده‌اید که از قرار معلوم، شخص بی‌طرفی نیست.
- داوران نه تنها بی‌اطلاعی باورنکردنی از معلومات پایه برای شرح و بسط موضوعات تخصصی از خود به نمایش گذاشته‌اند، بلکه کوشیده‌اند که با استفاده از مطالب خودِ مؤلفان، همراه با اظهارنظرهای نامربوط و حملات شخصی ابلهانه، یک نقد بی‌ارزش را شاخ و برگ دهند.

چاندرا همهٔ مسائل را با شکیبایی قابل توجهی تحمل می‌کرد و با مدیریت او، مجله رونق گرفت. سردبیر نشر مجلات دانشگاه شیکاگو در نامه‌ای به چاندرا، این‌گونه از او قدردانی کرد:

> شما نگهبان بی‌نظیر سرمایه‌های فکری هستید و عملکرد مسئولانهٔ شما در قبال وظایفتان، در هر سو نمایان است. درآمد، شمارگان و تعداد صفحات مجله افزایش یافته و این روند افزایش، ادامه دارد. باید پس از بازنشستگی به ادارهٔ مدرسه‌ای برای ویراستاران بپردازید!

معجزه‌ای در کار نیست

چاندرا ریاضی‌فیزیکدان بود. احتمالاً او بیشتر از هر یک از فیزیکدانان این کتاب، به استثنای نیوتون، ریاضی می‌دانست. همهٔ فیزیکدانان، ریاضی را به‌کار می‌گیرند، اما معدودی از آنان مانند چاندرا و نیوتون را می‌توان هم ریاضیدان و هم فیزیکدان دانست. حتی اینشتین که خلاقیت او در به‌کارگیری هندسهٔ دیفرانسیل برای رسیدن به معادلات میدان گرانشی عالی بود، مهارت ریاضی کافی برای یافتن بعضی راه‌حلهای مهم معادلات را نداشت. چاندرا مطمئن بود که نیوتون این کار را بهتر انجام می‌داده است.

چاندرا ریاضی را زبان طبیعت می‌دانست. به گفتهٔ یکی از همکارانش، «او با این معادلات، صمیمانه و خصوصی گفتگو می‌کرد تا آنها رموزشان را برایش آشکار کنند.» چاندرا برخلاف بسیاری از

فیزیکدان بزرگ دیگر به پیام ریاضی، بیشتر از شهود فیزیکی خود، ایمان داشت و معتقد بود که در صورت امکان، محاسبهٔ ریاضی باید شفاف، کامل و دقیق باشد و نه تقریبی (مگر به‌عنوان آخرین چاره). او به جادو عقیده نداشت. دوست او رافائل سورکین[1] در بیان یک خاطره می‌گوید، «از نظر او معجزه‌ای درکار نبود. او فقط به‌وضوح و کامل بودن اعتقاد داشت.» همکار دیگر او می‌گوید، «چاندرا به جای علاقه‌مندی به کشف قانونهای جدید طبیعت می‌کوشید تا راه‌حلهای دقیق (و به طورکلی تحلیلی) برای مسائل خاص بیابد.»

وقتی چاندرا کار بر روی یک مسئلهٔ تحقیقاتی را آغاز می‌کرد، تا بهترین راه‌حل را نمی‌یافت، نمی‌توانست کار را کنار بگذارد. بعضی اوقات وقتی راه پیشرفت مسدود می‌شد، او به الهام همکار مشفقش نیاز پیدا می‌کرد. منبع الهام مطلوب او، نظریه‌پرداز آکسفورد، راجر پنروز[2] بود. او به یکی از دوستانش گفت، «هر وقت با مانعی مواجه می‌شوم، به ملاقات پنروز می‌روم.» چاندرا در شیکاگو و پنروز در آکسفورد بود. به این دلیل ملاقاتهای آنها مستلزم سفرهای هوایی چاندرا به آن سوی اقیانوس اطلس و دیدارهایی کوتاه بود. چاندرا گفت، «ما در صبحگاه یک ساعت را با هم می‌گذرانیم و من در این مدت، مسئلهٔ مورد نظرم را برای او مطرح می‌کنم. پس از نهار چهار، پنج ساعت بحث می‌کنیم. سپس سر شام دربارهٔ چیزهای دیگری گفتگو می‌کنیم ــ و من با پرواز بازمی‌گردم.» این دیدارها، که پنروز آنها را «دیدارهای برق‌آسا» می‌نامید، همیشه برای چاندرا مفید بودند. چاندرا می‌گفت، «هیچ موردی نیست که پنروز تردیدهای من را در زمینهٔ فیزیک یا ریاضی رفع نکند. او مرد فوق‌العاده‌ای است.»

چاندرا دوست نداشت پیش از آنکه به زمینهٔ کاری جدیدی بپردازد، کار قبلی‌اش را نیمه‌تمام رها کند، اما در یک مورد مجبور به چنین کاری شده بود. به دلیل مخالفت ادینگتون و ناتوانی چاندرا در کسب حمایت لازم از جامعهٔ فیزیکدانان، او مجبور شده بود به یک سؤال جالب توجه که از نظریهٔ خودش دربارهٔ کوتوله‌های سفید نشأت می‌گرفت پشت کند. سؤال این بود که اگر ستاره‌ای پرجرمتر از آن باشد که در آخر عمرش به یک کوتولهٔ سفید تبدیل شود، فرجام کارش چه خواهد بود؟

رابرت اُپنهایمر و دانشجویش جورج ولکوف[3] با یاری ریچارد تولمان[4]، نظریه‌پرداز کالتک، در سال ۱۹۳۹، به این سؤال پاسخی دادند. آنها برای «ستاره‌های نوترونی»، نظریه‌ای ریاضی پدید آوردند. ستاره‌های نوترونی، اجرام ستاره‌ای شبیه کوتوله‌های سفیدند با این تفاوت که رمبش گرانشی در آنها به‌جای فشار الکترون، با فشار نوترون متوازن می‌شود. درحالی‌که کوتوله‌های سفید تقریباً به اندازهٔ کرهٔ زمین‌اند، ستاره‌های نوترونی کوچکتر و متراکم‌ترند و قطر آنها کمتر از چند صد کیلومتر است. اُپنهایمر و ولکوف درمحاسباتشان از الگوی چاندرا پیروی کردند، با این تفاوت که مجبور بودند به جای استفاده از نظریهٔ گرانش نیوتون، که چاندرا به‌کار برده بود، نظریهٔ گرانش اینشتین را به‌کار گیرند. مثل نتیجه‌ای که

1. Rafael Sorkin 2. Roger Penrose 3. George Volkoff 4. Richard Tolman

چاندرا برای کوتوله‌های سفید به‌دست آورده بود، آنها نیز دریافتند که یک حد جرمی وجود دارد که در ورای آن، یک ستارهٔ در حال مرگ نمی‌تواند به یک کوتولهٔ سفید یا یک ستارهٔ نوترونی تبدیل شود.

در این‌صورت چه پیش می‌آید؟ اُپنهایمر در سال ۱۹۳۹ مقالهٔ دیگری با همکاری دانشجویش، هارتلند اسنایدر[1] در این‌باره نوشت. این مقاله نه به صراحت بلکه به زبان ریاضی دلالت بر آن داشت که یک ستارهٔ پرجرم می‌تواند در نتیجهٔ رمبش گرانشی به جسمی با چگالی باورنکردنی تبدیل شود که هر چیزی در مجاورت خود و حتی نور را می‌بلعد. در ابتدا این اجسام ستاره‌ای سیری‌ناپذیر آن‌قدر عجیب بودند که تعمق دربارهٔ آنها برای اکثر اخترفیزیکدانان، ناممکن می‌نمود، اما در دههٔ ۱۹۵۰ دو نظریه‌پرداز جسور به نامهای جان ویلر[2] و یاکوف زل‌دوویچ[3] مسیر پژوهش چاندرا و اُپنهایمر را دنبال کردند. بخشی از سهم ویلر در این کار، نامگذاری «سیاهچاله» برای نواحی از فضا ـ زمان بود که رمبش گرانشی در آنها به منتها درجه رسیده باشد.

طی سالهای دههٔ ۱۹۶۰، چرخهٔ مطالعه، پژوهش و نوشتن چاندرا بر نسبیت عام و اخترفیزیک نسبیتی متمرکز بود. در دههٔ ۱۹۷۰ به تحقیق دربارهٔ سیاهچاله‌ها روی آورد. در این هنگام، او در سالهای شصت سالگی و در پایان دورهٔ کاری‌اش بود. بازگشت به موضوعی که دوران کاری‌اش به‌عنوان اخترفیزیکدان را با آن آغاز کرده بود، برای او رضایت خاطر فراوانی به همراه داشت. در سال ۱۹۸۳ انتشارات دانشگاه آکسفورد کتاب ماندگار او به نام نظریهٔ ریاضی سیاهچاله را منتشر کرد. در همان سال فرهنگستان علوم سوئد سرانجام پس از تأخیر زیاد، جایزهٔ نوبل را به چاندرا اهدا کرد. دست‌کم، بخشی از این جایزه به خاطر تحقیق او دربارهٔ کوتوله‌های سفید بود که پنجاه سال قبل از آن انجام شده بود. این فاصلهٔ زمانی بین انجام کار و اهدای جایزه در نوع خود یک رکورد در تاریخ جایزهٔ نوبل بود.

چاندرا برای آخرین مطالعه‌اش، موضوع جالب توجهی را انتخاب کرد، آیزاک نیوتون. چاندرا دانشجوی تاریخ علم و زندگینامه‌نویسی بود و با دانشمندان معاصرش در فیزیک و اخترفیزیک، آشنایی بسیاری داشت. اما به‌نظر او یک دانشمند بود که مقامی بالاتر از همهٔ دانشمندان گذشته و حال داشت و او نیوتون بود. او تصمیم گرفت که برای ادای احترام به نیوتون و تلاش برای پی‌بردن به عمق نبوغ او، بخشهایی از کتاب اصول نیوتون را که به فرمولبندی قانون گرانش می‌انجامد، «برای خوانندهٔ عادی» ترجمه کند.

نیوتون به استدلالهای هندسی تکیه می‌کرد که تقریباً برای مخاطب امروزی قابل‌فهم نیستند. چاندرا برای قابل‌فهم کردن اثبات‌های نیوتون، آنها را با زبانهای ریاضی جبر و حسابان که امروزه متداول‌اند، بازگو می‌کرد. روش او آن بود که ابتدا خودش یک قضیه را اثبات می‌کرد و سپس روش اثبات خودش را با روش نیوتون مقایسه می‌کرد. او می‌نویسد، «این کار، یک تجربهٔ تفکر برانگیز بود. ظرافت، تنظیم دقیق، سبک باشکوه، ابتکار و اصالت باورنکردنی و بیش از همه روشنی شگفت‌انگیز اثباتهای نیوتون در هر

1. Hartland Snyder 2. John Wheeler 3. Yakov Zel'dovich

مورد موجب شگفتی من می‌شد و هر بار خودم را مثل شاگرد مدرسه‌ای احساس می‌کردم که استادش به او تذکر می‌دهد.»

شخصیت پیچیدهٔ چاندرا وجه تاریکی نیز داشت. قبلاً دربارهٔ دلبستگی او به تصویر مرد روی نردبان که ناشی از دید بدبینانهٔ او بود، توضیح داده‌ام. او خود را «تنهای سرگردان در جاده‌های فرعی علم» توصیف می‌کرد. این چشم‌انداز تیره نتیجهٔ تأثیر چندین عامل بود، عواملی نظیر زندگی در محیطی دور از فرهنگ بومی‌اش، عادت او به کار شدید (او معمولاً سیزده ساعت در روز کار می‌کرد) و رنج ناشی از حملهٔ قلبی در اواخر عمرش که موجب شده بود تا عمل جراحی بای‌پس انجام دهد. اما این «سرگردان تنها»، پاداش کارش را گرفت. او به مسیر انزوای خود ادامه داد چون می‌دانست که چشم‌اندازهای خیره‌کننده‌ای در آن وجود خواهد داشت. او در مقاله‌ای با عنوان «در جستجوی علم» نوشت:

> جستجوی علم غالباً با بالا رفتن از کوههای بلند و نه خیلی بلند مقایسه می‌شود. ولی کدامیک از ما می‌تواند، حتی در تصورش، امیدوار باشد که از کوه اورست بالا برود و وقتی آسمان آبی و هوا آرام است به قله برسد و در آن هوای آرام درحالی‌که سفیدی خیره‌کنندهٔ برفها تا بی‌نهایت ادامه دارد، به تمامی رشته‌کوه هیمالیا نظر افکند؟ هیچ‌یک از ما نمی‌تواند امیدوار باشد که بتواند چنین دیدی از طبیعت و جهان پیرامون خود پیدا کند، اما ایستادن در دوره‌ای در پایین کوه کان‌چن‌جونگا[1] و انتظار برای طلوع آفتاب هم کاری است نه چندان خُرد.

1. Kanchenjunga

۲۹

رنج، شهرت و اقبال

استیون هاوکینگ

قطارهای اسباب‌بازی و کیهان‌شناسی

توصیف دقیقی که از استیون هاوکینگ[1] ارائه شده «برجسته‌ترین دانشمند عصر ما» و توصیف نادقیق او «اینشتین دوم» است. (توصیف دوم مربوط به مجلهٔ تایم در ۱۹۷۸ است که عبارت «شاید هم‌تراز اینشتین» را در مورد او به‌کار برد.) هاوکینگ در هشتم ژانویهٔ سال ۱۹۴۲ در آکسفورد به دنیا آمد. سیصد سال قبل از آن در هشتم ژانویهٔ ۱۶۴۲ گالیلئو گالیلئی بدرود حیات گفته و در دسامبر سال ۱۶۴۲، ایزاک نیوتون به دنیا آمده بود.

استیون، اولین فرزند خانوادهٔ هاوکینگ، در زمان جنگ جهانی دوم به دنیا آمد. مادر او، ایزوبل[2]، بیمارستان آکسفورد را برای زایمان انتخاب کرده بود، چون آکسفورد یک شهر دانشگاهی و از بمبارانهای هوایی آلمان در امان بود. (نیروی هوایی آلمان موافقت کرده بود که اگر نیروی هوایی انگلیس، هایدلبرگ و گوتینگن را بمباران نکند، آنها نیز آکسفورد و کیمبریج را بمباران نکنند.) با این همه، آکسفورد برای آنها پناهگاه دائمی نبود. ایزوبل و همسرش فرانک، در هایگیت[3] در حومهٔ شمال لندن زندگی می‌کردند که به شدت در معرض بمباران قرار داشت. اصابت یک موشک V-۲ آلمانی در نزدیکی خانهٔ آنها، خانه را تخریب کرد ولی به ساکنان آن لطمه‌ای وارد نشد.

فرانک و ایزوبل هاوکینگ، هر دو اهل شمال انگلستان بودند. فرانک اهل یورکشایر[4] و ایزوبل اهل گلاسگو[5] بود. هر دوی آنها در آکسفورد تحصیل کرده بودند ولی یکدیگر را در آنجا ملاقات نکرده بودند.

1. Stephen Hawking 2. Isobel 3. Highgate 4. Yorkshire 5. Glasgow

فرانک در رشتهٔ پزشکی تحصیل کرد و در طب مناطق حاره به تحقیق پرداخت. ایزوبل که زندگینامه‌نویس هاوکینگ، جان گریبین[1] و مایکل وایت[2] او را «سرزنده و دوست‌داشتنی» توصیف می‌کنند، همسر آیندهٔ خود را در مؤسسهٔ تحقیقات پزشکی ملاقات کرد. فرانک بعداً در آنجا به کار مشغول شد. ایزوبل در آنجا به کار منشیگری مشغول بود. «کاری که اصلاً و ابداً در حد و اندازهٔ او نبود.»

استیون هشت ساله بود که خانوادهٔ او به شهر کلیسایی سنت آلبانز[3] در بیست مایلی شمال هایگیت نقل مکان کردند. خانوادهٔ هاوکینگ در آنجا خانهٔ بزرگی خریدند که به سبک ویکتوریایی ساخته شده بود. چنانکه استیون به یاد می‌آورد «خانهٔ شیک و سطح بالایی بود.» او چنین ادامه می‌دهد «وقتی والدین من آن خانه را خریدند وضعشان خیلی خوب نبود، و می‌باید قبل از اسباب‌کشی، کارهای بسیار زیادی روی خانه انجام می‌دادند. امّا از آن به بعد، پدرم مثل همه یورکشایری‌ها، دیگر پولی برای تعمیرات اضافی خرج نکرد. در عوض همهٔ سعی خود را معطوف نقاشی خانه و نگهداری آن کرد، ولی خانه بزرگ بود و او هم در این کارها سررشته‌ای نداشت. معهذا چون پَر و پی خانه محکم بود، این کاستی او چندان مسئله ساز نشد.»

خانوادهٔ هاوکینگ، با معیارهای زندگی سنت آلبانز، خانواده‌ای غیرعادی بودند. چنانکه استیون می‌نویسد «فرانک چون می‌خواست پول پس‌انداز کند، چندان در بند وضع ظاهریش نبود.» قبل از جنگ، ایزوبل عضو انجمن کمونیستهای جوان بود. همزمان با یکی از سفرهای طولانی تحقیقاتی فرانک به آفریقا، ایزوبل سه فرزند جوان خود را به جزیرهٔ مایورکا[4] در مدیترانه بُرد تا به دوستش بریل پریچارد[5] ملحق شود. بریل همسر رمان‌نویس و شاعر انگلیسی جلای وطن کرده، رابرت گریوز[6] بود. اتومبیل خانوادهٔ هاوکینگ برای سالهای متمادی، یکی از تاکسی‌های فرسودهٔ لندن بود که آن را پنجاه پوند خریده بودند. عاقبت یک فورد جدید خریدند و همهٔ خانواده به استثنای استیون که باید به مدرسه می‌رفت، با آن ماشین به هندوستان سفر کردند. رفت و برگشت آنها یکسال طول کشید.

در سال ۱۹۵۲، استیون ده ساله، دورهٔ دبیرستان خود را در مدرسهٔ سنت آلبانز شروع کرد. این مدرسه با کلیسای محل در ارتباط بود و سطح آموزشی بالایی داشت. برخلاف بسیاری از فیزیکدانان بزرگ، هاوکینگ در مدرسه دانش‌آموز ممتازی نبود. چنانکه خود او می‌نویسد «همیشه یکی از شاگردان متوسط کلاس بود و رتبه‌اش هیچ‌گاه از این بالاتر نیامد.» و نیز اینکه «نتیجهٔ آزمونهای تستی و امتحاناتش بهتر از نتیجهٔ کار کلاسی‌اش بود.» انرژی خلاقهٔ او صرف ساختن مدلهایی از قطار، قایق و هواپیما می‌شد که کار می‌کردند و نیز بازیهایی بی‌اندازه پر طول و تفصیل ابداع می‌کرد. (یکی از بازیهای جنگی او بر روی صفحه‌ای انجام می‌شد که چهار هزار خانه داشت.) هاوکینگ معتقد است که آن بازیها و مدل‌سازیها نشانه‌ای از تکوین او به‌عنوان یک دانشمند بود. او بعدها در یادداشتی دربارهٔ زندگی

1. John Gribbin 2. Michael White 3. St. Albans 4. Majorca 5. Beryl Pritchard
6. Robert Graves

خودش نوشت «گمان می‌کنم که اختراع آن بازیها و ساختن آن قطارها، قایقها و هواپیماها، همه و همه از احساس نیاز من به دانستن چگونگی عملکرد چیزها و کنترل کردن آنها ناشی می‌شد. از وقتی‌که دورهٔ دکتری را شروع کردم، تحقیق دربارهٔ کیهان‌شناسی، پاسخگوی این نیاز من بوده است. اگر بدانید که عالم چگونه کار می‌کند، به نحوی آن را کنترل خواهید کرد.»

پدر هاوکینگ، فرانک، تأثیر مهمی در زندگی او داشت. استیون در مصاحبه‌ای به این موضوع اشاره کرد «او برایم الگو بود. چون او یک دانشمند محقق بود، من فکر می‌کردم که وقتی بزرگ شدم طبیعتاً باید یک دانشمند محقق بشوم.» استیون ریاضی و فیزیک را ترجیح می‌داد ولی پدرش با ریاضی مخالف بود و معتقد بود که ریاضی فقط به درد معلم‌شدن می‌خورد. به این ترتیب شیمی برای او جایگزین ریاضی شد. کمبود در ریاضی، در تحقیقات بعدی هاوکینگ مسئله‌ساز شد چرا که تحقیقات او بر مبنای ریاضیات بسیار دشوار نسبیت عام قرار داشت. اما بعدها، هنگامی که با عوارض دشوار بیماریش مواجه شد و روز به روز بیشتر توانایی نوشتن به زبان رایج ریاضی (یعنی معادلات) را از دست می‌داد، مجبور شد تا همه‌چیز را از نو آغاز کند و راهی بیابد که چطور می‌توان یک مفهوم فیزیکی را از راه بهتری درک کرد. او اکنون می‌گوید «معادلات برای من زیاد مهم نیستند. بخشی از این موضوع به خاطر این است که نوشتن معادلات برایم دشوار است ولی علت اصلی، آن است که من احساس شهودی در مورد معادلات ندارم. در عوض، به طور تصویری می‌اندیشم.»

سقوط

در سال ۱۹۵۹، هاوکینگ در سن هفده سالگی با یک بورس تحصیلی به کالج دانشگاه آکسفورد یعنی کالجی که پدرش در آنجا تحصیل کرده بود وارد شد. درس فیزیک در آکسفورد آسان بود ــ خیلی آسان. هاوکینگ می‌نویسد «در آن زمان، جوّ حاکم در آکسفورد خیلی ضد کار بود. از شما انتظار می‌رفت که بدون هیچ تلاشی، ممتاز باشید یا آنکه محدودیتهای خود را بپذیرید و یک مدرک درجهٔ چهار بگیرید. اگر لازم بود که برای گرفتن مدرک درجهٔ بالاتر، به سختی کار کنید، آنگاه مرد خاکستری[1] نامیده می‌شدید و این بدترین لقب موجود در واژگان آکسفورد بود. تنها امتحانات نهایی بود که اهمیت داشت.» هاوکینگ طبق برآورد خودش به طور متوسط روزی یک ساعت کار می‌کرد. نتیجهٔ چنین وضعی برای هاوکینگ و بسیاری از همکلاسیهایش جز ملالت نبود و این احساس که «هیچ‌چیز ارزش تلاش کردن را ندارد.»

قایق‌رانی تیمی، راهی برای خلاصی از این ملالت بود. این ورزش، در آکسفورد سابقهٔ طولانی داشت و یک ورزش سنتی محسوب می‌شد. هاوکینگ هیکل تنومند لازم برای پاروزنی نداشت ولی صدای بلندی داشت و شیفتهٔ آن بود که رویدادها را در اختیار خود داشته باشد. از این رو برای پست سکاندار مناسب بود، یعنی عضوی از تیم که در جلوی قایق می‌نشیند و با فریاد، اعضای گروه را راهنمایی و هدایت می‌کند. مربی هاوکینگ عقیده داشت که او قابلیت «سکانداری» را دارد ولی بی‌ملاحظه است و آن‌قدرها که باید برای برنده‌شدن تلاش نمی‌کند.

1. gray man

با تلاش روزی یک ساعت هاوکینگ دورهٔ سه سالهٔ خود در آکسفورد را به پایان رساند. او در مرز بین مدرک درجهٔ یک و درجهٔ دو قرار داشت و در مصاحبه با ممتحنانی که تصمیم نهایی به عهدهٔ آنان بود گفت که مایل است کار تحقیقی انجام دهد. او گفت که اگر مدرک درجهٔ یک به او داده شود به کیمبریج و اگر مدرک درجهٔ دو بگیرد به آکسفورد خواهد رفت. او مدرک درجهٔ یک دریافت کرد.

هاوکینگ دوران کاری خود در کیمبریج را به‌عنوان اخترفیزیکدان نظری و کیهان‌شناس آغاز کرد. او می‌خواست دورهٔ دکتری خود را زیر نظر فرد هویل[1] که در آن هنگام سرشناسترین کیهان‌شناس بریتانیا بود، بگذراند. در عوض مقرر شد که این دوره را با دنیس شاما[2] بگذراند که اسم او را قبلاً نشنیده بود. در ابتدا، هاوکینگ از اینکه نمی‌توانست با هویل کار کند ناراحت بود ولی بعداً به محیط دوستانه و جذابی که شاما برای دانشجویانش پدید آورده بود، علاقه‌مند شد. کیپ تورن[3] که همزمان با هاوکینگ در کالتک به کار اخترفیزیک مشغول بود، ازخودگذشتگی شاما در رابطه‌اش با دانشجویان محقق را چنین توصیف می‌کند: «اشتیاق شدید شاما به دانستن اینکه عالم چگونه ساخته شده، او را به حرکت درمی‌آورد. خود او، این حرکت را نوعی تشویش متافیزیکی توصیف می‌کرد. عالم آن‌قدر دیوانه‌وار، عجیب و خارق‌العاده می‌نمود که تنها راه درافتادن با آن، سعی در فهمیدنش بود و بهترین راه فهمیدن آن از طریق دانشجویانش بود. او دانشجویانش را وامی‌داشت تا چالش برانگیزترین مسائل را حل کنند. به این ترتیب می‌توانست خیلی سریعتر از موضوعی به سراغ موضوع دیگر برود به‌جای اینکه معطل شود و همهٔ مسائل را خودش حل کند.»

کمی پس از پیوستن هاوکینگ به شاما و گروه دانشجویان با استعدادش، او اخبار خردکننده‌ای دریافت کرد مبنی بر اینکه به بیماری لاعلاجی به نام اسکلروز جانبی آمیوتروفیک[4] (ALS) مبتلا شده است که آن را در ایالات متحده، بیماری لوگریگ[5] و در بریتانیا، بیماری اعصاب حرکتی[6] می‌نامند. این بیماری به سلولهای عصبی که عملکرد ارادی ماهیچه‌ها را کنترل می‌کنند، حمله می‌کند. فرایندهای تفکر و حافظه دچار اختلال نمی‌شوند ولی ماهیچه‌های بدن تغییر شکل می‌دهند که عاقبت به فلج عمومی بدن منجر می‌شود. پزشکی که بیماری را تشخیص داده بود، دورنمای تیره و تاری ترسیم کرد و معتقد بود که او دو الی پنج سال دیگر بیشتر زنده نخواهد ماند. به قول خود هاوکینگ «دکتر به کلی دست از من شست. در نتیجه پدرم جای دکترم را گرفت و برای مشاوره به او رو آوردم.»

نخستین واکنش هاوکینگ به بیماریش، طبیعی‌ترین واکنش بود، یعنی افسردگی شدید. خوشبختانه او به الکل و مواد مخدر پناه نبرد بلکه به خلوت تنهایی‌اش و به موسیقی رعدآسای اُپرایی واگنر پناه می‌برد. با خود می‌اندیشید که اگر تا اتمام رسالهٔ دکتری خود وقت نداشته باشد، دیگر ادامه دادن آن

1. Fred Hoyle 2. Dennis Sciama 3. Kip Thorne 4. Amyotrophic lateral sclerosis
5. Lou Gehrig 6. motor neuron disease

چه‌معنی دارد؟ ولی تسلیم احساس دلسوزی برای خود نشد. وقتی برای انجام آزمایشها در بیمارستان بود، پسری را دید که بر اثر بیماری سرطان خون جان سپرد. او چنین به یاد می‌آورد «صحنهٔ زیبایی نبود. معلوم بود کسانی هستند که وضعشان از من هم بدتر است. . . از آن پس هرگاه می‌خواهم به حال خودم افسوس بخورم، آن پسربچه را به یاد می‌آورم.»

برخاستن

هاوکینگ توانست خود را از چنگ افسردگی برهاند. بخشی از این امر نتیجهٔ عزم و ارادهٔ خود او و بخشی از آن نتیجهٔ کمک دیگران بود. کمک اصلی از جانب جین وایلد[1] انجام گرفت، زن جوان خارق‌العاده‌ای که بعداً نامزد هاوکینگ شد. جین نیز در سنت آلبانز زندگی می‌کرد و آن دو یکدیگر را در یک مهمانی در سال ۱۹۶۳، کمی پس از بروز عوارض ALS در هاوکینگ، ملاقات کردند. رفتار هاوکینگ گاهی متکبرانه بود و این امر جین را می‌رنجاند ولی «چیزی از دست رفته بود. او می‌دانست که اتفاقی برایش در حال رخ دادن است که کنترلی بر آن ندارد.» به هر حال دوستی آن دو محکمتر شد و نامزد شدند. مبنای این ارتباط، عشق بود و به خاطر وضعیت استیون، نوعی حس قوی معنادار بودن در این میان وجود داشت. جین می‌گفت «می‌خواستم معنا و مفهومی برای موجودیتم پیدا کنم و به گمانم این مفهوم را در مراقبت از استیون پیدا کردم. ولی البته ما عاشق یکدیگر بودیم.»

هاوکینگ، به سهم خود معتقد است که اگر جین در زندگی او نبود، بیماری خیلی زود او را از پا درمی‌آورد. او به یک مصاحبه‌کننده گفت «مطمئناً من بدون جین نمی‌توانستم موفق شوم. نامزدی با او مرا از باتلاق ناامیدی که در آن فرو رفته بودم، بیرون کشید. اگر می‌خواستیم ازدواج کنیم، باید کاری پیدا می‌کردم و دکترایم را به پایان می‌رساندم. به سختی کارکردم و آن را لذت‌بخش یافتم. همان‌طور که وضع من بدتر می‌شد، جین به تنهایی از من مراقبت می‌کرد. آن موقع هیچ کس برای کمک به ما پیشقدم نشد.»

در تابستان ۱۹۶۵، هاوکینگ پایان‌نامهٔ دکتری خود را به پایان رسانده و بورس تحصیلی تحقیقاتی در فیزیک نظری گرفته بود. این بورس برای کالج گانویل و کایس[2] در کیمبریج بود که آنجا را همیشه به اختصار کایس Caius می‌نامند (و به دلایلی «کیز[3]» تلفظ می‌کنند). جین و استیون در ژوئیهٔ ۱۹۶۵ با هم ازدواج کردند. وایت و گریبین، عکس عروسی آنها را این‌طور توصیف می‌کنند: «هاوکینگ با حالتی سرفراز به دوربین نگاه می‌کند. نگاه او نشان‌دهندهٔ عزم ریشه‌دار و بلندپروازی اوست. مثل این است که می‌گوید: این تازه آغاز کار است. جین با خوشحالی رو به دوربین می‌خندد. او نیز به روش ملایمتر خود، مطمئن است که آنها بر همهٔ ناملایمات فایق خواهند آمد.»

هاوکینگ در گروه ریاضیات کاربردی و فیزیک نظری در کیمبریج دفتری داشت و او و همسرش مجبور بودند تا در همان نزدیکی جایی برای سکونت پیدا کنند تا هاوکینگ که روز به روز ناتوانتر می‌شد

1. Jane Wilde 2. Gonville and Caius College 3. keys

بتواند خود به سرکارش برود. چنین کاری بسیار مشکل می‌نمود بخصوص که هاوکینگ، خزانه‌دار (یعنی یک مقام مدیریتی دانشگاه) را با پرسیدن اینکه چه مقدار از کمک هزینه‌اش پرداخت شده، رنجانده بود. عاقبت با کمک خانمی که متوجه گرفتاری آنها شده بود توانستند خانه‌ای کوچک و قدیمی ولی بسیار مناسب در یک خیابان خوش‌منظره به نام لیتل سنت مری‌لین[1]، پیدا کنند. یکی از همکاران هاوکینگ به نام براندون کارتر[2] آن خانه را محلی سرزنده توصیف می‌کند، جایی که دوستان به آنها نزدیک بودند و می‌توانستند در آشپزی و نظافت کمکشان کنند. موسیقی مالر و واگنر در خانه طنین‌انداز بود و به این ترتیب هاوکینگ و همسرش زندگی زناشویی خود را به نحو خیلی عادی آغاز کردند. فرزند اول آنها، رابرت در سال ۱۹۶۷ به دنیا آمد.

کاملترین اجرام

اولین طرح تحقیقاتی هاوکینگ بر سیاهچاله‌ها تمرکز داشت، اجرام ستاره‌ای حیرت‌انگیزی که چاندراسخار آنها را «کاملترین اجرام ماکروسکوپی موجود در عالم» نامیده بود. او گفته بود «بدون توجه به اندازهٔ سیاهچاله‌ها، تنها عواملی که بر ساختار آنها تأثیر می‌گذارند، مفاهیمی هستند که ما از فضا و زمان داریم.» جرم یک سیاهچالهٔ عادی، ممکن است ده برابر جرم خورشید و شعاع آن تنها ده تا پنجاه کیلومتر باشد. امروزه اخترفیزیکدانان حدس می‌زنند که میلیونها سیاهچاله از این نوع در کهکشان ما وجود دارند. شواهد نشان می‌دهد که در هستهٔ کهکشان ما و دیگر کهکشانها، سیاهچاله‌های غول پیکری وجود دارند که قطر بعضی از آنها به اندازهٔ منظومهٔ شمسی ما و جرم آنها معادل چندین میلیارد برابر جرم خورشید است. همچنین، نظریه‌پردازان گمان می‌کنند که تعداد بی‌شماری از سیاهچاله‌های مینیاتوری در عالم وجود دارند که هر یک به اندازهٔ یک اتم‌اند و جرمی برابر جرم یک کوه دارند.

علیرغم این گوناگونی، سیاهچاله‌ها از جملهٔ ساده‌ترین اجرام موجود در عالم‌اند. سیاهچاله ممکن است به بزرگی منظومهٔ شمسی یا به کوچکی یک اتم یا در اندازه‌ای بین این دو باشد. صرف‌نظر از اندازهٔ آن، رفتار یک سیاهچاله فقط به جرم و آهنگ چرخش و بار الکتریکی آن بستگی دارد (ولی بار الکتریکی آن عموماً به نسبت، کم است). گرچه سیاهچاله‌ها از نظر اندازه، ماکروسکوپی هستند ولی از نظر فیزیکی به همان اندازهٔ ذرات بنیادی، استاندارد شده‌اند یعنی آنها هم با جرم، اسپین و بار، مشخص می‌شوند. سیاهچاله‌ها نه مثل سیارات از سنگ تشکیل شده‌اند و نه مثل ستارگان از گازهای داغ. چنانکه مارتین ریس[3]، یکی از معاصران هاوکینگ و یکی دیگر از دانشجویان سابق شاما می‌نویسد «سیاهچاله‌ها از بافت خودِ فضا ساخته می‌شوند.» همین سادگی بنیادی است که چاندراسخار را شیفتهٔ خود کرده است.

1. Little St. Mary's Lane 2. Brandon Carter 3. Martin Rees

نظریهٔ سیاهچاله، تا جایی از نظریهٔ نسبیت عام اینشتین پیروی می‌کند که منتها درجهٔ گرانش موجود درون سیاهچاله را توصیف کند. نظریه نشان می‌دهد که میدان گرانشی درون سیاهچاله به قدری قوی است که هر چیزی از جمله نور هرگاه از یک شعاع بحرانی بخصوص که «افق رویداد» نامیده می‌شود به آن نزدیکتر شود، به درون سیاهچاله سقوط می‌کند و برای همیشه گم می‌شود. بنابراین، یک سفینهٔ فضایی می‌تواند در مداری درست در بیرون افق رویداد به دور سیاهچاله بچرخد ولی از نظر امنیت بهتر است در پایینتر از افق رویداد به سفر اکتشافی نپردازد! فضانورد بی‌باکی که به پایینتر از افق رویداد وارد می‌شود، هرگز نخواهد توانست از آنجا بگریزد و حتی نخواهد توانست مشاهدات خود را به جهان خارج منتقل کند، چون نور و همه نوع علائم دیگر در درون سیاهچاله محبوس‌اند.

نسبیت عام همه‌چیز را دربارهٔ سیاهچاله‌ها به ما می‌گوید جز اینکه وضعیت فیزیکی در مرکز سیاهچاله چگونه است. نسبیت عام برای مرکز سیاهچاله، نقطه‌ای را پیشنهاد می‌کند به نام تکینگی[1] که در آن چگالی و خمیدگی فضا-زمان بی‌نهایت است. اما بی‌نهایتها در نظریه‌های فیزیکی متداول نیستند چون اعداد معتبری نیستند و احتمالاً نشان‌دهندهٔ وجود خطا در کار نظریه‌اند.

هاوکینگ و راجر پنروز[2] که گاهی با هم همکاری می‌کنند در سالهای بین ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۰، مسئلهٔ تکینگی در سیاهچاله‌ها را مطرح کردند. هاوکینگ و پنروز، تیم خوبی تشکیل می‌دهند. هاوکینگ شهود فیزیکی نافذی دارد و پنروز تسلط عالی بر ریاضیات نسبیت عام دارد که هاوکینگ فاقد آن است. به‌عنوان یک راه حل برای مسئله، پنروز اصل «سانسور کیهانی» را پیشنهاد کرد. بر طبق این اصل، تکینگی یک سیاهچاله، «سانسور» شده است چون به قول هاوکینگ، افق رویداد، تکینگی را از دید ناظران خارج از این افق، «به نحو مطلوبی پنهان می‌کند». دیدن تکینگی‌های سانسور نشدهٔ «عریان»، ممنوع است.

در سالهای دههٔ ۱۹۶۰، هاوکینگ، پنروز و دیگران توانسته بودند نظریهٔ سیاهچاله را به خوبی تثبیت کنند. در آن زمان هیچ گزارشی مبنی بر مشاهدهٔ سیاهچاله‌ها و اینکه اساساً چنین اجسامی واقعاً وجود دارند، نرسیده بود. سپس در اوایل دههٔ ۱۹۷۰ موردی مطرح شد مبنی بر اینکه یک جرم گسیل‌کنندهٔ پرتو-x به نام دجاجهٔ[3] X-۱ که در صورت فلکی دجاجه جای دارد، سیاهچالهٔ جفت‌شده با یک ستارهٔ پرجرم است. فرض می‌شد که سیاهچاله گاز را از ستاره می‌رباید و آن را تا مرحلهٔ گسیل پرتو-x گرم می‌کند. (با سقوط گاز به درون میدان گرانشی عظیم سیاهچاله، انرژی گرانشی آن از دست می‌رود و با کسب انرژی گرمایی، داغتر می‌شود.)

در سال ۱۹۷۴، هاوکینگ و اخترفیزیکدانان دیگر، در حدود هشتاد درصد اطمینان داشتند که دجاجهٔ X-۱ واقعاً حاوی یک سیاهچاله است. هاوکینگ با همکار خود، کیپ تورن که در کالتک بود، شرط بست که دجاجهٔ X-۱ حاوی یک سیاهچاله نیست. اگر هاوکینگ شرط را می‌برد، آبونمان یک

1. singularity 2. Roger Penrose 3. Cygnus

دورهٔ چهار سالهٔ مجلهٔ انگلیسی پرایویت‌آی و اگر تورن برنده می‌شد، اشتراک دورهٔ یکسالهٔ مجلهٔ پنتهاوس را به‌دست می‌آورد. در سال ۱۹۹۰ ضریب اطمینان به اینکه دجاجهٔ X-۱ حاوی سیاهچاله است تا ۹۵ درصد افزایش یافت و هاوکینگ مبلغ باخت خود را با شادمانی پرداخت.

شناخته شده‌ترین سهم هاوکینگ در اخترفیزیک، نظریه‌ای است که اندکی با سیاهی سیاهچاله‌ها ناسازگار است. به قول هاوکینگ: «سیاهچاله‌ها آن‌قدرها هم سیاه نیستند.» سازوکار فرایندی که طی آن سیاهچاله‌ها، سیاهی خود را از دست می‌دهند ریشه در مفهومی دارد که ابداع دیراک بود و پاد ماده نامیده می‌شود. الکترونها پاد ذره‌هایی به نام پوزیترون دارند. وقتی الکترونی به یک پوزیترون برسد، یکدیگر را نابود می‌کنند و در نتیجه، فوتونهای پرتو-گاما تولید می‌شوند. عکس این فرایند نیز امکان‌پذیر است که در آن، از یک فوتون پرتو-گامای حاصل از یک منبع انرژی مناسب، زوج الکترون-پوزیترون پدید می‌آید.

نظریهٔ کوانتومی روایت دیگری از فرایند اخیر را مجاز می‌شمارد که به قول فیزیکدانان «ضد شهودی» یا به بیان دیگر عجیب و غریب است. انرژی لازم برای تولید زوج الکترون-پوزیترون می‌تواند از فضای خالی خلأ «قرض» گرفته شود به شرط آنکه نابودی زوج الکترون-پوزیترونی را درپی داشته باشد که «بدهی» انرژیکی را بازپرداخت کند. توالی وقایعی که برای الکترون e^- و پوزیترون e^+ روی می‌دهد ابتدا تولید زوج،

$$\text{انرژی} \rightarrow e^- + e^+$$

و سپس نابودی سریع زوج است،

$$e^- + e^+ \rightarrow \text{انرژی}$$

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ به تفصیل نشان می‌دهد که این وقایع چگونه رخ می‌دهند. به کمک این اصل می‌توان محاسبه کرد که الکترون و پوزیترون قبل از آنکه در فرایند نابودی زوج از بین بروند برای چه مدت وجود دارند. همین محاسبه را برای همه نوع زوج ذره-پاد ذره می‌توان انجام داد. ذرات و پاد ذراتی که در فرایندهای تولید زوج و نابودی زوج شرکت دارند، ذرات «مجازی» نامیده می‌شوند چون نمی‌توان آنها را به‌وسیلهٔ یک آشکارساز ذره، مستقیماً مشاهده کرد.

فکر هاوکینگ آن بود که اگر تولید یک زوج در مجاور یک سیاهچاله صورت گیرد، ذرات زوج مجازی می‌توانند واقعی شوند و یکی از آنها می‌تواند قابل مشاهده شود. یکی از دو ذره ممکن است به‌وسیلهٔ سیاهچاله جذب شود و به یک ذره یا پاد ذرهٔ واقعی تبدیل شود درحالی‌که ذرهٔ دیگر که آن هم واقعی است می‌تواند از سیاهچاله بگریزد و به‌صورت تابش، گسیل شود. به دلیل وجود این تابشها، سیاهچاله مطلقاً سیاه نیست. برای خلق زوجهای ذره-پاد ذره، به انرژی نیاز دارد و این انرژی از میدان گرانشی سیاهچاله تأمین می‌شود. با کاهش یافتن انرژی میدان، سیاهچاله کوچک می‌شود و عاقبت از

بین می‌رود. نابودی سیاهچاله احتمالاً با یک انفجار عظیم همراه است که قدرت آن معادل میلیونها بمب هیدروژنی است.

معهذا، سیاهچاله‌ها، تقریباً سیاه‌اند. گسیل تابش سیاهچاله که «تابش هاوکینگ» نامیده می‌شود، فرایندی بسیار کُند و کم‌بازده است. طبق پیش‌بینی نظریهٔ هاوکینگ زمان لازم برای تبخیر تمامی جرم سیاهچاله‌ای با جرم برابر جرم خورشید، معادل $۱۰^{۶۵}$ سال است. سن عالم قابل مشاهدهٔ ما، بسیار کمتر از این مقدار، یعنی حدود $۱۰^{۱۰}$ سال است.

آغاز و پایان

اگر عالم اساساً آغازی داشته، آغاز آن چگونه بوده است؟ اگر پایانی دارد، پایان آن چگونه خواهد بود؟ عالمان الهیات، فلاسفه و دیگر متفکران، چند هزار سال است که این سؤالات را مطرح کرده‌اند، ولی رشتهٔ تخصصی که به تحقیق علمی معتبر در این زمینه بپردازد و دست‌اندرکاران آن، بتوانند نظریه‌هایی دربارهٔ تاریخ عالم بسازند، به تازگی در قرن بیستم پدید آمده است. افرادی که در این رشته کار می‌کنند کیهان‌شناس و رشتهٔ تخصصی آنها کیهان‌شناسی نامیده می‌شود. ابزار کار آنها، نسبیت عام، نظریهٔ کوانتومی و داده‌های رصدی است که به‌وسیلهٔ اخترشناسان تأمین می‌شود.

یکی از سرشناسترین کیهان‌شناسان عصر ما فرد هویل است که در کیمبریج جانشین ادینگتون شد. در اواخر دههٔ ۱۹۴۰، هویل به همراه دو اتریشی مقیم انگلستان به نامهای هرمان بوندی[1] و توماس گولد[2]، از یک مدل کیهان‌شناختی موسوم به «حالت‌ـپایا» دفاع می‌کردند. در این مدل، کیهان آغاز و پایانی ندارد. در روایت هویل از این مدل، یک میدان ابدی موسوم به «میدان آفرینش»، به طور خودبه‌خود ماده را خلق می‌کند. این ماده که معمولاً هیدروژن است، انبساط عالم را متوازن می‌کند و باعث ثابت ماندن چگالی آن می‌شود. اما فرایند خلقت مداوم، الزاماتی را برای نظریه ایجاب می‌کند که نظریه‌پردازان نظریهٔ حالت پایا هرگز نتوانسته‌اند این نیازها را به نحو رضایت‌بخشی برآورده کنند.

در حال حاضر، نظریهٔ حالت پایا به‌وسیلهٔ رقیب اصلی‌اش، یعنی نظریهٔ مهبانگ، کنار زده شده است. بنابر نظریهٔ مهبانگ، عالم در آغاز، بسیار کوچک و چگال بوده و با یک انفجار، از یک نقطهٔ آغازین میکروسکوپی شروع به انبساط کرده است. وقایع فیزیکی که همراه با انبساط اتفاق می‌افتند بقیهٔ تاریخ عالم را رقم می‌زنند. (هویل در حمله به مخالفانش، برای اولین‌بار اصطلاح «مهبانگ» را به طعنه به‌کار برد.)

برخی از اصول نظریهٔ مهبانگ، مدتها قبل از کار هویل پدید آمده بود. این کار در سال ۱۹۲۲ به‌وسیلهٔ الکساندر فریدمان[3]، نظریه‌پرداز برجستهٔ روسی انجام شد. فریدمان با به‌کار بستن معادلات میدان گرانشی اینشتین در مورد عالم، مدلهای دینامیکی پدید آورد. در این مدلها عالم به طور میانگین،

1. Hermann Bondi 2. Thomas Gold 3. Alexander Friedmann

یکنواخت فرض می‌شد. در یکی از این مدلها، به قول فریدمان «آفرینش عالم» در یک نقطه صورت می‌گیرد و انبساط پس از آن، جهان را به سن و اندازهٔ امروزی می‌رساند.

مدلهای فریدمان، مدلهای ریاضی بودند و سناریوی انبساط او، فقط یکی از سناریوهای متعددی بود که وجود داشت. ژرژ لومتر[1]، فیزیکدان، اخترشناس و کشیش بلژیکی، قویاً به مدل انبساط جهان پایبند بود. او «نظریهٔ آتشبازی» را در سالهای دههٔ ۱۹۳۰ ارائه کرد. او نوشت «ممکن است در آغاز، همهٔ جرم عالم به‌صورت یک اتم منفرد بوده باشد. شعاع عالم گرچه دقیقاً صفر نبوده، بلکه نسبتاً کوچک بوده است. شاید همهٔ عالم از فروپاشی این اتم اولیه به ستاره‌های اتمی، تشکیل شده باشد. سپس آن ستاره‌ها به مادهٔ معمولی و تابش کیهانی تبدیل شده‌اند. آنچه امروز می‌بینیم خاکستر و دود به‌جا مانده از یک آتش‌بازی عظیم است که خیلی سریع اتفاق افتاده.»

وقتی هویل نظریهٔ حالت پایا را پدید می‌آورد، کیهان‌شناس دیگری پا به عرصه نهاد. نام او جورج گاموف[2] بود. او یک مهاجر روسی بود که پس از توقف در گوتینگن، کپنهاگ و کیمبریج، بالاخره به ایالات متحده رفت (او برای مدت کوتاهی، دانشجوی فریدمان بود). یکی از تخصصهای متعدد گاموف، فیزیک هسته‌ای بود و او با افزودن فرایندهای هسته‌ای به مدلهایی که قبلاً فریدمان و لومتر ساخته بودند، مدل کیهان شناختی خود را پدید آورد. او عقیده داشت که مهبانگ در یک حالت آغازین عالم که آن را «یِلِم[3]» می‌نامید پدید آمده است. این حالت آغازین، شامل نوترونها، پروتونها، الکترونها و دریایی از تابش پرانرژی بوده است. گاموف و همکارش رالف آلفر[4] در نامهٔ معروفشان به مجلهٔ فیزیکال ریویو استدلال کردند که همزمان با انبساط جهان، محتویات هسته‌ای آن، اتمهای مادهٔ معمولی را ساخته‌اند. (گاموف نمی‌توانست در برابر وسوسهٔ افزودن نام هانس بته به مؤلفان مقاله، مقاومت کند. بته در آن مقاله نقشی نداشت ولی با افزودن نام او، حروف اول نامهای مؤلفان، آلفر، بته و گاموف به ترتیب حروف الفبای یونانی می‌شد. گاموف کوشید تا همکار دیگرش رابرت هرمن[5] را ترغیب کند که اسمش را به دلتر[6] تغییر دهد ولی موفق نشد.)

در مدل گاموف در مرحلهٔ ابتدایی، مادهٔ موجود در عالم با تابش برهم‌کنش ندارد و از آن به بعد، تابش به‌صورت میدان تابش زمینهٔ کیهانی باقی‌مانده است. گاموف پیش‌بینی کرد که این میدان، ویژگیهای جسم سیاه یا تابش گرمایی معادل ۵ کلوین (۲۶۸− درجهٔ سانتیگراد) را دارد. در حدود چهارده سال پس از پیشگویی گاموف، آرنو پنزیاس[7] و رابرت ویلسون[8] که برای آزمایشگاههای بل[9] و هولمدل[10] نیوجرسی کار می‌کردند، تابش زمینهٔ کیهانی را مشاهده کردند. آنها دمای این تابش را معادل

1. Georges Lemasître 2. George Gamow 3. Ylem 4. Ralph Alpher 5. Robert Herman
6. Delter 7. Arno Penzias 8. Robert Wilson 9. Bell Laboratories 10. Holmdel

۳٫۵ درجهٔ کلوین تعیین کردند که به‌طور قابل توجهی به برآورد گاموف نزدیک است. دانشمندان بل نکوشیدند تا اهمیت مشاهداتشان را از نظر کیهان‌شناسی روشن کنند. چنین کاری به‌وسیلهٔ گروهی در پرینستون انجام شد. رابرت دیکی[1] و جیمز پی‌بلز[2] جزء این گروه بودند و آماده می‌شدند تا خودشان هم این رصدها را انجام دهند. در کاری که اخیراً انجام شده، تابش زمینهٔ کیهانی به کمک ابزارهایی که با ماهواره حمل می‌شوند، به دقت اندازه‌گیری شده است. نتیجه آنکه ویژگیهای جسم سیاه در مورد تابش زمینهٔ کیهانی با دقت زیادی تأیید شده و دمای آن معادل ۲٫۷۳۵ کلوین اندازه‌گیری شده است.

هلگه کراگ[3]، مورخ کیهان‌شناسی نوین می‌نویسد «سالهای میانی دههٔ ۱۹۶۰ نقطهٔ عطفی در کیهان‌شناسی بود، نه فقط به خاطر نتایج رصدی جدید بلکه همچنین به خاطر نوآوری‌های نظری که در خود نظریهٔ نسبیت عام انجام شد.» پیشرفتهای نظری آن دوره بر مسئلهٔ تکینگی متمرکز بود. در سال ۱۹۶۵، راجر پنروز روشهای ریاضی جدیدی را به‌کار گرفت تا ثابت کند که بنابر اصول نسبیت عام، رمبش گرانشی یک ستارهٔ پرجرم به‌طور اجتناب ناپذیری به یک نقطهٔ فضا-زمانی تکین یعنی سیاهچاله ختم می‌شود. در طول پنج سال پس از آن تاریخ، کارهایی که به‌وسیلهٔ پنروز، هاوکینگ و دیگران انجام گرفت، به پیدایش قضیهٔ بزرگ کیهان‌شناختی انجامید. این قضیه می‌گوید وقتی یک سیاهچاله به پایان خود می‌رسد یعنی در یک تکینگی فضا-زمان عالمی آغاز می‌شود که در کنترل نسبیت عام است.

این نتیجه‌گیری، کیهان‌شناسان را با مسئلهٔ دشوار دیگری روبه‌رو می‌کند. مثل قبل، تکینگی عریان در نظریهٔ سیاهچاله، پذیرفتنی نیست. بنابراین، روایت نسبیت عام از عالم، ناکامل است. این روایت نمی‌تواند توجیه قابل قبولی برای رویدادهای ابتدای عالم ارائه کند. گویی این رویدادها حول یک تکینگی پیچیده شده‌اند. نظریه‌پردازان مجبورند تصویرشان از جهان میکروسکوپی را که عالم در آن متولد شده به نحوی اصلاح کنند. مقیاس در آن جهان، بسیار کوچک و حتی بسیار کوچکتر از مقیاس اتمی است. پس کاملاً ضروری است که از روشهای مکانیک کوانتومی کمک گرفته شود و این روشها با نظریهٔ گرانشی که نسبیت عام قبلاً فراهم آورده است، ترکیب شوند. در یک کلام، نظریه‌ای واحد به نام «گرانی کوانتومی» مورد نیاز است. اینک چند دهه است که فیزیکدانان تلاش می‌کنند تا این نظریهٔ واحد را بسازند ولی تاکنون توفیق کامل حاصل نکرده‌اند.

هاوکینگ یکی از پیشتازان جستجوی وحدت گرانی-کوانتومی بوده و هنوز هم هست. او طرفدار به‌کارگیری قرائت خاصی از مکانیک کوانتومی است که ریچارد فاینمن ابداع کرد. در قرائت فاینمن، مسیر واقعی یک رویداد با جمع زدن همهٔ مسیرهای ممکن برای آن رویداد، محاسبه می‌شود و هر مسیر ممکن با یک فاز بخصوص، مشخص می‌شود. هاوکینگ بُعد زمان را نیز به طریق خاصی به‌کار می‌گیرد و به زمان، هویت مجرد ریاضی می‌دهد که از نظر فنی «موهومی» نامیده می‌شود. ثمربخش بودن این روش هنوز معلوم نیست ولی هاوکینگ که خودش را «خوش‌بین مادرزاد» می‌داند، معتقد است که

1. Robert Dicke 2. James Peebles 3. Helge Kragh

نظریهٔ موفقیت‌آمیز وحدت «تا پایان قرن بیست و یکم و شاید خیلی زودتر» پدید خواهد آمد. او حاضر است «پنجاه‌ـپنجاه» شرط ببندد که این نظریه تا بیست سال آینده [از ۱۹۹۸] به وجود خواهد آمد.

کتاب عامه فهم

در سال ۱۹۸۲ هاوکینگ گرفتار مخارج درمان خودش و مدرسهٔ فرزندانش بود و تصمیم گرفت «کتاب کوتاهی دربارهٔ عالم» بنویسد. او می‌خواست که کتاب، مخاطب عام داشته باشد و امیدوار بود که فروش خوبی هم بکند. البته همین‌طور هم شد و فروش کتاب به حدی رسید که هیچ کتاب علمی قبلاً به آن حد نرسیده بود.

هاوکینگ ابتدا کتاب را به سایمون میتون[1] در انتشارات دانشگاه کیمبریج پیشنهاد داد و مصراً درخواست کرد که به غیر از حق تألیف کتاب، باید پیش‌پرداخت کلانی نیز به او داده شود. میتون قبلاً با هاوکینگ کار کرده و پیشنهاد کرده بود که هاوکینگ کتابی دربارهٔ کیهان شناسی بنویسد. او سخاوتمند بود و پیش‌پرداختی ده هزار پوندی پیشنهاد کرد. این مبلغ، قبلاً هرگز به هیچ مؤلف دیگری پیشنهاد نشده بود.

معهذا، منظور هاوکینگ این نبود. وقتی دنیس شاما از او پرسید که آیا می‌خواهد کتاب را به انتشارات دانشگاه کیمبریج بدهد، او پاسخ داد، «اوه، نه. می‌خواهم از این کار کمی پول دربیاورم.» او پول را از طریق یک کارگزار نشر اهل نیویورک به نام آل زوکرمان[2]، درآورد. زوکرمان توان بالقوهٔ موضوع کار هاوکینگ، یعنی کیهان شناسی را درک می‌کرد. او همچنین می‌دانست که داستان مبارزهٔ بیست سالهٔ هاوکینگ با بیماری ALS، موضوع مردم پسندی است که بازار کتاب را گرمتر خواهد کرد. هاوکینگ، نامهٔ پیشنهاد کتاب خود را آماده کرد و زوکرمان، آن را برای ناشران علاقه‌مند به مزایده گذاشت. رقابت بین دو ناشر بر سر کتاب، بالا گرفت. یکی بنتام بوکز[3] و دیگری دبلیو.دبلیو. نورتون[4]. (نورتون در آن هنگام در حال چاپ کتاب ریچارد فاینمن با عنوان، حتماً شوخی می‌کنید آقای فاینمن بود.) بنتام با پیشنهاد مبلغ بی‌سابقه‌ای، برندهٔ مزایده شد. این مبلغ شامل یک پیش‌پرداخت ۲۵۰,۰۰۰ دلاری و شرایط مطلوبی برای حق تألیف بود.

ویراستار بنتام که همراه هاوکینگ بر روی کتاب کار می‌کرد، پیتر گازاردی[5] بود. گازاردی و هاوکینگ هر دو مصمم بودند که کتاب نباید نویسندهٔ اصلی یا به اصطلاح، نویسندهٔ سایه داشته باشد. ولی هاوکینگ باید دربارهٔ نحوهٔ ارتباط با خوانندهٔ نامطلع، نکاتی را می‌آموخت و گازاردی در این راه، آموزگار او شد. درحالی‌که متن دست‌نویس کتاب شکل می‌گرفت، ویراستار در مکاتبات خود با هاوکینگ، بارها و بارها متذکر می‌شد که نمی‌فهمد او چه می‌گوید و می‌خواست که او موضوع را بیشتر بسط دهد و روشن کند. هاوکینگ باید تلاش می‌کرد. زوکرمان برآورد می‌کرد که در ازای هر صفحه مطلب

1. Simon Mitton 2. Al Zuckerman 3. Bantam Books 4. W.W. Norton 5. Peter Guzzardi

هاوکینگ، او دو تا سه صفحه شرح ویراستاری نوشته است. در قسمت سپاسگزاری کتاب، هاوکینگ متذکر می‌شود «گازاردی صفحات متعددی از شرح و سؤال و جواب دربارهٔ موضوعاتی برایم می‌فرستاد که احساس می‌کرد من به نحو مناسبی آنها را توضیح نداده‌ام. باید تصدیق کنم که وقتی فهرست طویل چیزهایی را که باید تغییر می‌کردند، به من می‌داد، خیلی کلافه می‌شدم ولی او کاملاً حق داشت. اینکه او در این مدت مرا سخت به کار واداشت، موجب شد که این کتاب، چیز بهتری از کار درآید.»

در تابستان سال ۱۹۸۵، زندگی شکنندهٔ هاوکینگ و طرح کتاب، تقریباً به پایان رسیدند. در آن موقع، هاوکینگ در مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا (CERN) در ژنو مشغول کار تحقیقاتی و تکمیل کار نوشتن کتابش بود و جین به آلمان رفته بود. یک شب ناگهان پرستار هاوکینگ متوجه شد که او بر اثر انسداد نای، که در نتیجهٔ حملهٔ ذات‌الریه اتفاق افتاده بود، در حال خفه شدن است. پزشک معالج او در ژنو سریعاً دست به کار شد. او که با وضع هاوکینگ از طریق دیدن یک برنامهٔ تلویزیونی، آشنا شده بود، زندگی فیزیکدان معروف را نجات داد. جین را با عجله به محل فراخواندند و او با نظر پزشکان موافقت کرد که تنها راه نجات جان هاوکینگ برای مدت طولانی، عمل جراحی موسوم به تراکیوتومی[1] است که در آن، نای را می‌شکافند و وسیله‌ای برای تنفس در آن کار می‌گذارند. عمل تراکیوتومی تنفس هاوکینگ را به او بازگرداند ولی درعین حال، مختصر کارایی تارهای صوتی‌اش را نیز از او گرفت.

چندین هفته بعد از عمل تراکیوتومی، هاوکینگ به خانه‌اش در کیمبریج بازگشت. اینک، صورتحسابهای پزشکی‌اش سرسام‌آور شده بود و جین مجبور شد تا برای گرفتن کمک به سازمانها و بنیادهای خیریه متوسل شود. او با کفایت و سرسخت بود و بالاخره توانست مبالغ مورد نیاز را فراهم کند. در همان موقع یک برنامه‌نویس کامپیوتر در کالیفرنیا توانست مشکل حرف‌زدن هاوکینگ را حل کند. او برنامه‌ای تهیه کرد که به هاوکینگ امکان می‌داد تا بتواند به‌وسیلهٔ حرکات مختصر دست، کلمات را روی صفحهٔ نمایش رایانه انتخاب کند و با آنها جمله بسازد. وقتی جمله‌ای ساخته می‌شد، یک سنتزگر صدا، می‌توانست آن را (با لهجهٔ عجیبی) ادا کند.

اکنون، مسائل پزشکی و مالی هاوکینگ تا حدی تحت کنترل درآمده بودند، او به کار تحقیق و کتابش که نزدیک به تمام شدن بود، بازگشت. کتاب اکنون دارای عنوان شده بود. عنوان کتاب تاریخ مختصر زمان و زیر عنوان توضیحی آن از مهبانگ تا سیاهچاله‌ها بود. کتاب همان طور که قول داده شده بود، حکایت کیهان‌شناسی نوین را روایت می‌کند و هرجا لازم باشد پیشینهٔ لازم در زمینه‌های نظریهٔ کوانتومی، نسبیت و فیزیک ذرات را ارائه می‌کند. گفته‌اند که کتاب، قابل خواندن نیست در حالی‌که کتاب مستحق این قضاوت نیست. تعجبی ندارد که بسیاری از مردم کتاب را خریده و بیش از چند صفحهٔ آن را نخوانده‌اند. این مطلب، برای یک مطالعهٔ سرسری نوشته نشده است. معهذا برای خوانندهٔ صبوری که دربارهٔ رویدادهای اعماق فضا و زمان کنجکاوی اندیشمندانه‌ای دارد، قابل فهم است. تقریباً ده، دوازده نفر از فیزیکدانان برجستهٔ دیگر نیز کتابهای عامه‌فهمی دربارهٔ کیهان‌شناسی نوشته‌اند، ولی کار هاوکینگ یکی از بهترین این کارهاست.

1. tracheotomy

صرف‌نظر از اینکه خوانندگان، کتاب تاریخ مختصر زمان را خواندند یا نه، فروش کتاب، بسیار فراتر از خوش‌بینانه‌ترین برآوردها بود. کتاب، به سرعت در فهرست کتابهای پرفروش نیویورک تایمز جای گرفت و برای یک سال در آن فهرست باقی‌ماند. در بریتانیا، کتاب تقریباً به مدت چهار سال در فهرست کتابهای پرفروش لندن تایمز قرار داشت. عملکرد اعجاب‌انگیز کتاب، متخصصان را گیج کرده بود. آنها کتاب را کتابی دانستند که «نان نویسنده‌اش را می‌خورد» و ناشر آن را متهم کردند که از معلولیت هاوکینگ بهره‌برداری می‌کند. یک ستون‌نویس روزنامه، «برای خواننده‌ای که بتواند توضیح قانع‌کننده‌ای در مورد موفقیت مالی کتاب *ارائه* کند» مبلغ ۱۴/۹۹ پوند (معادل یک جلد کتاب) جایزه تعیین کرد. مادر هاوکینگ، ایزوبل، پاسخی ارائه کرد و می‌باید جایزه را می‌برد. او نوشت:

> کتاب به قدری خوب نوشته شده که، خواندنش را دلپذیر می‌کند. ایده‌های کتاب دشوارند، نه نحوهٔ بیان آن. کتاب به کلی خالی از تکبّر است. در هیچ جای کتاب، نویسنده مثل بچه‌ها با خواننده صحبت نمی‌کند. او باور دارد که افکارش برای هر خوانندهٔ مشتاقی قابل فهم است. این نکته بحث‌برانگیز است که عدهٔ زیادی در هر سطح با نتیجه‌گیری‌های او مخالف‌اند، امّا افکارشان به جنب‌وجوش در آمده است.
>
> مبارزهٔ او با بیماری، مطمئناً در عامه‌پسند شدن این کتاب نقش داشته است، ولی استیون قبل از آنکه حتی فکر نوشتن این کتاب پدید آید، راه درازی را پیموده است. او درجات عالی تحصیلی و غیرتحصیلی خود را به علت بیماری اعصاب حرکتی به دست نیاورده است.

در نامهٔ دیگری به همان ستون‌نویس، اظهار عقیده شده است، خوانندگانی که نمی‌توانند کتاب را بفهمند (از جمله خود ستون‌نویس) نیازمند جبران نقایص پایه‌ای در تحصیلاتشان هستند: «شما اگر فکر می‌کنید که فقط معدودی از خریداران کتاب تاریخ مختصر زمان می‌توانند آن را بفهمند، در اشتباهید. این مسئله در مورد کسانی صدق می‌کند که تحصیلات محدودی داشته‌اند. پسر ۱۷ سالهٔ من که دانش‌آموز *A Level فیزیک است، محتوی کتاب را به آسانی می‌فهمد و امیدوار است که ای‌کاش هاوکینگ مطلب را عمیقتر نوشته بود.»

روحیهٔ عادی

وقتی زندگینامه‌نویسان هاوکینگ می‌گویند که او به یک «فوق ستارهٔ علمی» بدل شده، اغراق نمی‌کنند. او شاید معروفترین دانشمندی باشد که در قید حیات است. فهرست افتخارات و جوایزش، به چند صفحه بالغ می‌شود. او در کیمبریج استاد لوکاسی است، کرسی استادی که زمانی به نیوتون تعلق داشت. او دو بار شوالیه شده است (یک‌بار در ۱۹۸۱ و بار دیگر در ۱۹۸۹). نقاشی چهرهٔ او در گالری ملی

*. در انگلستان، معادل سال آخر دبیرستان. م.

نقاشی چهره‌ها در لندن نصب شده و خود او، موضوع برنامه‌های مستند تلویزیونی بوده است. در سخنرانی‌هایش، سالن از شنوندگان لبریز می‌شود. استقبالی که در کالتک از او شد، مانند استقبال از اینشتین در سالهای دههٔ ۱۹۳۰ بود. اخیراً او از کاخ سفید دیدن کرد و با کلینتون[1] رئیس‌جمهور وقت آمریکا گپ زد. یک ناظر خیلی شکاک، معتقد است که او در یک کلام، به یک «حادثه» بدل شده است.

علیرغم همهٔ این اقبال و شهرت، یا شاید به خاطر آن، ماجراجویی هاوکینگ در یک مورد مهم، شکست خورده است. شرکای اصلی در این ماجراجویی یعنی زن و شوهر پس از بیست و پنج سال زندگی زناشویی، از هم جدا شدند. در سال ۱۹۹۰، استیون جین را ترک کرد تا با یکی از پرستارانش به نام ایلین میسون[2] زندگی کند. ایلین نیز شوهرش را ترک کرده بود. شوهر او از قضا همان کسی بود که سخت‌افزار رایانه‌ای نصب‌شده بر روی صندلی چرخدار هاوکینگ را طراحی کرده بود. خانوادهٔ هاوکینگ سه فرزند و خانوادهٔ میسون دو فرزند دارند.

قبل از جدایی، در زناشویی هاوکینگ نشانه‌هایی از اختلال دیده می‌شد. در اواخر دههٔ ۱۹۸۰، جین درگفتگو با یک روزنامه‌نگار درکیمبریج، چشم‌اندازی از روزگار سختی راکه با هاوکینگ داشت ارائه کرد. او گفت: «فکر نمی‌کنم هیچ‌وقت بتوانم بین رویدادهای متضادی که در این خانه برایم اتفاق افتاده، در ذهنم آشتی برقرار کنم ــ از یک سو اعماق سیاهچاله‌ها و از سوی دیگر آن همه جوایز درخشان.»

جین توانست در رشتهٔ زبانهای سده‌های میانه دکتری بگیرد و در شعر اسپانیایی و پرتغالی متخصص شود و سپس در کیمبریج به تدریس بپردازد. ولی تدریس برای او تجربهٔ ناامیدکننده‌ای بود. او در این‌باره می‌گوید: «وقتی سرکارم بودم فکر می‌کردم که الان باید با بچه‌هایم بازی کنم و وقتی با بچه‌ها بازی می‌کردم فکر می‌کردم که باید سرکارم باشم.» او به یاد می‌آورد که هم پدر و هم مادر بودن احساس متناقضی به همراه دارد: «من می‌باید به دو پسرم یاد بدهم که چطور کریکت بازی کنند و همزمان می‌توانستم نگذارم بازی کنند!» جین در زندگی زناشویی‌شان نقش اساسی داشت ولی گاهی اوقات متحیر می‌ماند که اساساً جای او در این زندگی کجاست؟ او در یک برنامهٔ مستند تلویزیونی در این‌باره گفت: «من یک زائده نیستم، معهذا استیون خوب می‌داند که وقتی به اجتماعات رسمی می‌رویم من به شدت چنین احساسی پیدا می‌کنم. گاهی اوقات من را به حضار حتی معرفی هم نمی‌کنند. من از پشت سر می‌آیم و حتی نمی‌دانم که با چه کسی مشغول صحبت هستم.»

مذهب نیز عامل مشاجره‌برانگیزی در ازدواج آنها بوده است. جین عمیقاً مذهبی است، درحالی‌که استیون مانند اینشتین خدا را فقط به معنی خاصی قبول دارد. در عالم او، جایی برای یک خدای شخصی وجود ندارد. او در یک برنامهٔ مستند تلویزیونی در این‌باره گفت: «ما مخلوقات ناچیزی در یک سیارهٔ کوچک از یک ستارهٔ متوسط در محیط بیرونیِ یکی از هزاران میلیون کهکشان موجود در عالم هستیم. بنابراین برای من مشکل است باور کنم خداوند به ما چندان اهمیت می‌دهد یا اساساً به موجودیت ما توجه زیادی دارد.»

1. Bill Clinton 2. Elaine Mason

هاوکینگ هم، مثل اینشتین، از قابل درک بودن عالم در عجب است؛ او به یک «نظریهٔ کامل» ایمان دارد. در پایان، کتاب تاریخ مختصر زمان به خواننده اطمینان می‌دهد که اگر چنین نظریه‌ای کشف شود «آنگاه نه فقط معدودی از دانشمندان، بلکه همه خواهند توانست اصول آن را کاملاً بفهمند. آنگاه همهٔ ما، از فلاسفه و دانشمندان گرفته تا مردم عادی خواهیم توانست در این بحث شرکت کنیم که چرا ما و عالم اساساً وجود داریم. یافتن پاسخ این سؤال، پیروزی نهایی خرد بشر خواهد بود، چون آنگاه از ذهنیت خداوند آگاه خواهیم شد.»

از نظر جین، این راه به اشراق دینی منتهی نمی‌شود. وقتی آنها هنوز از هم جدا نشده بودند، جین به یک مصاحبه‌گر گفت، «من نظرم را برای استیون این‌طور بیان می‌کنم که برای رهیافت به مذهب راههای گوناگونی وجود دارد و راه ریاضیات فقط یکی از آنهاست و او فقط لبخند می‌زند.»

هاوکینگ اکنون (یعنی در سال ۲۰۰۱)، پنجاه و نه ساله است و مثل همیشه سرش شلوغ است. فعالیتهای تحقیقاتی‌اش را ادامه می‌دهد، تدریس می‌کند، مرتباً به سفر می‌رود و برای عدهٔ کثیری سخنرانی می‌کند. این همه فعالیت برای یک انسان سالم نیز قابل‌توجه است اما برای هاوکینگ که به نحو فزاینده‌ای تحت‌تأثیر محدودیتهای شدید ناشی از بیماری است، یک معجزه به‌شمار می‌آید. او چطور این همه کار را انجام می‌دهد؟ قطعاً بخشی از جواب این سؤال در سلامت روحی نهفته است. او می‌گوید «وقتی کسی از نظر جسمی معلول است، دیگر قابل تحمل نیست که از نظر روحی هم معلول بشود.» دخترش لوسی، موضوع را کمی تلختر بیان می‌کند. او می‌گوید: «پدرم آنچه را می‌خواهد، بدون توجه به هزینه‌ای که برای دیگران دارد، انجام می‌دهد.» یکی دیگر از مبانی شخصیتی هاوکینگ، خوش‌بینی خدشه‌ناپذیر اوست. علیرغم همهٔ مصائب توانفرسایی که در زندگی با آنها دست به گریبان بوده، زندگی خود را «عادی» می‌داند. و در سال ۱۹۹۲ به یک مصاحبه‌گر چنین گفت: «من خودم را فردی بریده از زندگی عادی نمی‌دانم و فکر نمی‌کنم اطرافیانم هم چنین نظری دربارهٔ من داشته باشند. احساس نمی‌کنم معلولم بلکه احساس می‌کنم مثل یک شخص کوررنگ، فقط بعضی از اعصاب حرکتی‌ام درست کار نمی‌کنند. به گمانم زندگی من را نمی‌توان معمولی نامید ولی احساس می‌کنم که روحیه‌ای عادی دارم.»

وقایع‌نگاری رویدادهای عمده

۱۹۲۸ دیراک معادلهٔ نسبیتی الکترون را مطرح می‌کند.

۱۹۲۹ مورای گِل‌ـمان در نیویورک متولد می‌شود.

هابل نخستین مقاله‌اش دربارهٔ رابطهٔ خطی بین سرعتهای پس‌روی کهکشانها و فاصلهٔ آنها از زمین را منتشر می‌کند.

دیراک نظریهٔ حفره‌اش را معرفی می‌کند و حفره را به‌صورت پوزیترون مشخص می‌کند.

۱۹۳۱ دیراک وجود پاد الکترون را مطرح می‌کند که بعداً پوزیترون نامیده می‌شود.

جان کوکرافت و ارنست والتون واکنشهای هسته‌ای با باریکه‌های پروتون تولیدشده در یک شتاب‌دهندهٔ خطی را بررسی می‌کنند.

۱۹۳۳ اینشتین در نیوجرسی به پرینستون می‌رود.

فرمی مقاله‌اش دربارهٔ نظریهٔ واپاشی β را منتشر می‌کند.

۱۹۳۴ وفات ماری کوری در سانسل‌موز فرانسه.

چاندراسخار نخستین مقاله‌اش را دربارهٔ کوتولهٔ سفید منتشر می‌کند.

۱۹۳۷ کشف ذره‌ای که بعداً به‌عنوان لپتون μ مشخص شد.

رادرفورد در کیمبریج، انگلستان، درگذشت.

۱۹۳۸ مایتنر و اُتو فریش نظریهٔ شکافت را پیشنهاد کردند.

۱۹۳۹ بور و جان ویلر مقاله‌ای دربارهٔ سازوکار شکافت منتشر کردند.

رابرت اُپنهایمر، جورج ولکوف و ریچارد تولمان نظریه‌ای دربارهٔ ستاره‌های نوترونی مطرح کردند.

اُپنهایمر و هارتلند اسنایدر اظهار داشتند که یک ستارهٔ منفجر شوندهٔ آرمانی یک سیاهچاله ایجاد می‌کند.

۱۹۴۱ وفات نرنست در مایملک ییلاقی‌اش نزدیک موسکا در آلمان.

۱۹۴۲ موفقیت فرمی و همکاران در دنبال کردن واکنش زنجیری هسته‌ای.

تولد استیون هاوکینگ در آکسفورد انگلستان.

۱۹۴۳ آغاز به کار افتادن آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس نزدیک سانتافه، در نیومکزیکو.
۱۹۴۵ آزمایش ترینیتی یک بمب پلوتونیمی نزدیک آلاموگردو، در نیومکزیکو.
۱۹۴۶ کشف نخستین «ذرات‌ـV»
جورج گاموف نظریهٔ مقدماتی مهبانگ را مطرح می‌کند.
۱۹۴۷ وفات پلانک در گوتینگن آلمان.
اجلاس کنفرانس شلتر آیلند.
۱۹۴۸ اجلاس کنفرانس پوکونو.
رالف آلفر، هانس بته، و گاموف نظریهٔ مهبانگ را توسعه دادند.
۱۹۴۹ اجلاس کنفرانس اولداستون.
۱۹۵۲ چاندراسخار سرویراستار مجلهٔ آستروفیزیک می‌شود.
۱۹۵۳ وفات هابل در سان‌مارینوی کالیفرنیا.
گِل‌ـمان طرح شگفتی را مطرح می‌کند.
۱۹۵۴ وفات فرمی در شیکاگو.
۱۹۵۵ وفات اینشتین در پرینستون.
۱۹۵۶ تسونگ دائو لی و چن نین یانگ در مورد پایستگی پاریته در برهم‌کنشهای ضعیف تردید می‌کنند.
نوترینوی الکترون آشکارسازی شد.
۱۹۵۸ وفات پائولی در زوریخ سویس.
۱۹۶۱ وفات شرودینگر در آلپ‌بچ، اُتریش.
گِل‌ـمان تقارن $SU(3)$ برای ساختار هادرونی را مطرح می‌کند: راه هشت‌گانه.
۱۹۶۲ وفات بور در کپنهاگ.
نوترینوی μ آشکارسازی شد.
۱۹۶۴ ذرهٔ Ω^- کشف شد.
گِل‌ـمان مدل کوارک، یا سه طعم کوارک را مطرح کرد.
یک طعم چهارم کوارک، به نام «افسون» معرفی شد.
راجر پنروز ثابت کرد که سیاهچاله‌ها می‌باید شامل تکینگی باشند.
۱۹۶۵ مفهوم «رنگ» در فیزیک ذرات معرفی شد.
۱۹۶۷ ویلر واژهٔ «سیاهچاله» را وضع کرد.
۱۹۶۸ درگذشت مایتنر در کیمبریج، انگلستان.
۱۹۶۹ هاوکینگ و پنروز ثابت کردند که کیهان از یک تکینگی آغاز شده است.
۱۹۷۲ فاینمن مدل پارتونی‌اش را مطرح می‌کند.

۱۹۷۳ نظریهٔ آزادی مجانبی و محصور بودن کوارکها مطرح می‌شود.

۱۹۷۴ کشف ذرهٔ J/ψ.

شواهد آزمایشی برای کوارک افسون گزارش شد.

هاوکینگ نشان داد که سیاهچاله‌ها کاملاً سیاه نیستند.

۱۹۷۵ لپتون τ آشکارسازی شد.

۱۹۷۶ درگذشت هایزنبرگ در مونیخ آلمان.

۱۹۷۷ شواهد آزمایشی برای کوارک «تَه» گزارش شد.

۱۹۷۹ شواهد آزمایشی برای گلوئونها گزارش شد.

۱۹۸۴ درگذشت دیراک در فلوریدا.

۱۹۸۷ درگذشت دوبروی در پاریس.

۱۹۸۸ درگذشت فاینمن در لوس‌آنجلس، کالیفرنیا.

۱۹۸۹ شواهد تجربی برای وجود تنها سه نسل از کوارکها و لپتونها گزارش شد.

۱۹۹۵ شواهد تجربی برای کوارک «سَر» گزارش شد.

وفات چاندراسخار در شیکاگو.

۲۰۰۰ نوترینوی τ گزارش شد.

شرح واژه‌ها

اسکالر (نرده‌ای): کمیتی که اندازه دارد، اما جهت ندارد.

اصطکاک: نیرویی که در حرکت نسبی دو جسم در حال تماس، مقاومت ایجاد می‌کند.

اصل پائولی: اصل طرد.

القا: یک اثر الکتریکی یا مغناطیسی که با یک میدان تولید می‌شود.

الکترود: هر پایانه یا محل اتصالی که جریان الکتریکی از آن در یک مادهٔ رسانای الکتریکی وارد یا از آن خارج می‌شود.

الکترودینامیک کوانتومی (QED): مطالعهٔ الکترونها، فوتونها و برهم‌کنش آنها.

الکتروستاتیک: بررسی بارهای الکتریکی ساکن و میدانهای آنها.

الکتروشیمی: بررسی واکنشهای شیمیایی، تولیدشده یا القاشده با الکتریسیته.

الکترولیت: مادّهٔ محلول یا مذابی که الکتریسیته را با عبور یونها از یک الکترود به الکترود دیگر هدایت می‌کند.

الکترولیز: تولید تغییرات شیمیایی با عبور جریان الکتریکی از یک محلول یا مادّهٔ مذاب.

الکترومتر: وسیله‌ای حساس برای اندازه‌گیری پتانسیلهای الکتریکی.

الکترومغناطیس: علم الکتریسیته و مغناطیس.

الکترون: ذره‌ای بنیادی، حامل بار منفی، و از لحاظ قدرمطلق برابر با بار مثبت پروتون.

الکترون‌ولت: یکای کوچکی از انرژی که برای اندازه‌گیری انرژیهای مولکولها، اتمها و ذرات زیر اتمی به‌کار گرفته می‌شود، و معادل انرژی‌ای است که یک الکترون هنگام عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت به دست می‌آورد. علامت اختصاری آن ev است.

انتقال به سرخ: تغییر در رنگ مشاهده‌شدهٔ یک ستاره یا کهکشان به سبب دور شدن ستاره یا کهکشان از زمین.

انتگرال: عملیات ریاضی که تغییرات بسیار کوچک را در یک کمیت جمع می‌کند؛ و با علامت $\int$ نشان داده می‌شود.

اندازهٔ سرعت (Speed): قدرمطلق سرعت، که برحسب متر بر ثانیه، مایل بر ساعت و غیره اندازه‌گیری می‌شود.

انرژی پتانسیل: انرژی یک جسم ناشی از موضع آن. مثلاً انرژی پتانسیل جسمی به جرم m که در فاصلهٔ z بالای سطح زمین قرارگرفته باشد mgz است، که g شتاب گرانی است.

انرژی سینتیک (جنبشی): انرژی یک جسم ناشی از حرکت آن؛ معادل با $\frac{mv^2}{2}$، که در آن m جرم جسم و v سرعت آن است.

انرژی گیبس: انرژی‌ای که می‌تواند به کار تبدیل شود، و انرژی آزاد نیز نامیده می‌شود.

ایزوتوپ: اتمهایی که جرمهای متفاوت، امّا بار هسته‌ای یا عدد اتمی یکسان دارند.

باریون: هادرون سنگینی مرکب از سه کوارک؛ نمونه‌های آن پروتونها و نوترونهاست.

برهم‌کنش ضعیف: در فیزیک هسته‌ای برهم‌کنشی که واپاشی β را در پی دارد.

برهم‌کنش قوی: در فیزیک ذرات، نیرویی که کوارکها را در هادرونها، و پروتونها و نوترونها را در هسته‌ها به‌هم می‌پیوندد.

پارسک: یک یکای فاصلهٔ اخترشناسی معادل ۳٫۲۶ سال نوری.

پتانسیل: معیاری از انرژی که در نقطهٔ معینی از میدان موجود است، و برحسب یکای ویژگی فیزیکی تحت‌تأثیر میدان (مثلاً جرم یا بار الکتریکی) اندازه‌گیری می‌شود.

پتانسیل الکتریکی: نیروی محرکهٔ یک جریان الکتریکی، که برحسب ولت اندازه‌گیری می‌شود.

پرتوزایی: فرایند واپاشی پرتوزایی. حاصل این فرایند ممکن است تغییر اتم یک عنصر به اتم عنصر دیگر، با گسیل ذرهٔ آلفا یا بتا باشد.

پرتوهای x: تابش الکترومغناطیسی پُرانرژی.

پرتوهای گاما: تابش الکترومغناطیسی با انرژی ـ زیاد که در واپاشی پرتوزا می‌شود.

پروتون: هستهٔ هیدروژن، یکی از اجزای بنیادی همهٔ هسته‌ها. حامل یک بار مثبت برابر با قدرمطلق بار الکترون است.

پیل: اصطلاح فرمی برای رآکتور هسته‌ای با استفاده از اورانیم طبیعی که با گرافیت کُند می‌شود.

پیون: یک مزون. سه نوع متفاوت از پیونها مشاهده شده است، π^-، π° و π^+، با بارهای -1، 0، $+1$.

تابع: اصطلاحی ریاضی برای کمیتی که بستگی به کمیت یا کمیتهای دیگر دارد؛ مثلاً مساحت A دایره تابعی از شعاع دایره π است، بنابر رابطهٔ $A = \pi r^2$.

تابع پارش: حاصل‌جمعی از جمله‌های نمایی که در مکانیک آماری بخشی بنیادی است.

تشدیدگر: اصطلاح پلانک برای مولکولهای در حال ارتعاش در دیواره‌های یک کورهٔ جسم سیاه.

تکینگی: درنسبیت عام، نقطه‌ای در فضا ـ زمان که در آن کمیتهای فیزیکی مانند چگالی بی‌نهایت می‌شود.

تلسکوپ بازتابی: تلسکوپی که پرتوهای نور را جمع و درکانون یک آینهٔ کاو متمرکز می‌کند.

تناسب: در ریاضیات، رابطهٔ بین دو کمیت به‌طوری که اگر یک کمیت تغییر کند دیگری متناسب با آن

تغییر می‌کند. اگر x و y با یکدیگر متناسب باشند $(x \propto y)$، دو برابر شدن x با دو برابر شدن y همراه است و برعکس. اگر x سه برابر شود، y هم سه برابر می‌شود و غیره.

تناوب یا دوره: در حرکت تناوبی به کار می‌آید. زمان لازم برای کامل شدن یک چرخهٔ حرکت.

ثابت پلانک: عدد کوچکی که با h نشان داده می‌شود و در اکثر معادلات نظریهٔ کوانتومی ظاهر می‌شود.

ثابت تناسب: در ریاضیات، ثابتی که تناسب را به معادله تبدیل می‌کند. بنابراین ثابت تناسب k تناسب $y \propto x$ را به معادلهٔ $y = kx$ تبدیل می‌کند.

ثابت گاز: ثابت R در قانون گاز کامل $PV = nRT$، که می‌گوید حجم V از یک گاز کامل با مقدار مولی n، دمای مطلق T، نسبت مستقیم و با فشار P آن نسبت عکس دارد.

جدول تناوبی: ترتیبی از عناصر شیمیایی در جدولی که ستونها شامل عناصری است با خواص شیمیایی مشابه. معمولاً (نه همیشه) ردیفهای جدول، فهرست عناصری است به ترتیب افزایش وزن اتمی.

جریان الکتریکی: جریانی از الکترونها در یک مادهٔ رسانا مانند مس که برحسب آمپر اندازه‌گیری می‌شود.

جزء خط: اندازهٔ فاصله در فضا ـ زمان بین دو رویداد نزدیک به هم.

چسبندگی: ویژگی ماده که مقاومت در برابر جاری‌شدن آن را، اندازه می‌گیرد.

چگالی: جرم در واحد حجم؛ برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، پوند بر گالن و غیره اندازه‌گیری می‌شود.

حرکت دائمی: این مفهوم که یک ماشین بتواند طوری طراحی شود که بدون الزام به درونداد انرژی، جاودانه برونداد مفید فراهم کند. وجود چنین ماشینی بنابر قانونهای ترمودینامیک، ممنوع است.

خط طیفی: طول موج، فرکانس یا انرژی خاص در یک طیف.

دامنه: در مکانیک کوانتومی، کمیتی محاسبه‌شده برای یک رویداد و هرگاه به توان دو برسد، احتمال وقوع رویداد به دست می‌آید.

ذرات آلفا (یا پرتوهای آلفا): یونهای هلیم حاصل از فروپاشی پرتوزا.

ذره: موجودی فیزیکی که در فضا و زمان در یک موضع محدود شده است. در مقایسه با مفهوم میدان، که به موجودی فیزیکی که در سراسر فضا و زمان وجود دارد مربوط می‌شود.

رآکتور هسته‌ای: وسیله‌ای برای تداوم واکنش هسته‌ایِ زنجیره‌ای کنترل‌شده.

رادیوشیمی: شاخه‌ای از شیمی که عناصر پرتوزا را با فنون شیمیایی از هم جدا می‌کند.

ژول: یکای انرژی، تقریباً معادل ۰٫۲۳۹ کالری.

سال نوری: یکای فاصله در اخترشناسی؛ فاصله‌ای که پرتو نور در خلأ به مدت یک سال طی می‌کند؛ برابر با ۵٫۸۸ تریلیون مایل.

ستارهٔ نوترونی: ستارهٔ پیری که سوخت هسته‌ای آن مصرف شده است، و برای ستاره‌ای با جرم خورشید،

به قطر ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر فرومی‌ریزد. نیروی گرانش در این ستاره با نیروی یک نوترون شمرده می‌شود.

سحابی: ابر بزرگی از گاز و غبار در فضا؛ در واژگان هابل، کهکشان.

سرعت: آهنگ تغییر فاصله با زمان که هم قدرمطلق و هم جهت را شامل می‌شود.

سلول ولتایی: وسیله‌ای شیمیایی که برونداد آن یک جریان الکتریکی است.

سینماتیک: علم حرکت بدون در نظر گرفتن نیرو یا انرژی.

شکافت: شکسته شدن هستهٔ یک اتم سنگین ناپایدار به اجزاء سبکتر، با آزاد شدن مقدار بسیار زیادی انرژی.

شمارگر گایگر: اسبابی که هانس گایگر برای اندازه‌گیری پرتوزایی ساخته است.

ضریب انبساط: ضریبی که تغییرات نسبی حجم یک جسم را که ناشی از تغییر دماست اندازه‌گیری می‌کند.

طیف: جداسازی تابش یا ذرات به اجزای سازندهٔ طول موجها، فرکانسها، یا انرژیها.

طیف‌نما: وسیله‌ای که طیف را نشان می‌دهد.

طیف‌نمایی: بررسی طیفهای اتمها، مولکولها یا ذرات.

عدد کوانتومی: عدد درست یا نیم‌ـدرستی که حالت تعیین‌شده با نظریهٔ کوانتومی را مشخص می‌کند.

فاز: در نظریهٔ موجی، یک مرحلهٔ معین در حرکت موجی. دو موج اگر همفاز باشند یکدیگر را تقویت می‌کنند، و اگر همفاز نباشند یکدیگر را خنثی می‌کنند.

فرایند برگشت‌پذیر: در ترمودینامیک، فرایندی آرمانی که جهت آن بدون تغییراتی مشخص در دستگاه مورد نظر یا در محیطش، معکوس می‌شود.

فرایند برگشت‌ناپذیر: در ترمودینامیک فرایندی غیر ایده‌آل که جهت آن بدون تغییراتی در محیط اطراف دستگاه معکوس نمی‌شود. همهٔ فرایندهای واقعی تا حدی برگشت‌ناپذیرند.

فشار الکترون: فشار ناشی از الزام اصل طرد که دو الکترون به گونه‌ای که در یک حالت باشند، نمی‌توانند یک نقطه در فضاـزمان را اشغال کنند.

فرمیون: ذره‌ای که عدد کوانتومی اسپین آن نیم‌ـدرست است. فرمیونها اجزای ماده‌اند، و رفتار آنها با اصل طرد محدود می‌شود. مشهورترین فرمیونها عبارتند از الکترونها، پروتونها، نوترونها و نوترینوها.

فوتون: ذره‌ای بنیادی که حامل نیروی الکترومغناطیسی در میدانهای تابش است. چه تابش ویژگیهای موجی داشته باشد، چه ویژگیهای ذره‌ای.

کار: در فیزیک وقتی نیرویی بر جسمی وارد می‌شود تا آن را در فاصله‌ای جابه‌جا کند، مانند بالا بردن، هُل دادن یا کشیدن جسم، آنچه حاصل می‌شود کار می‌نامیم، که برحسب ژول، کالری و غیره اندازه‌گیری می‌شود.

کوانتش: هنگام به‌کار گرفتن یک ویژگی فیزیکی مانند انرژی، تغییر در آن ویژگی در مراحل گسسته صورت می‌گیرد نه به‌صورت پیوسته.

کوتولهٔ سفید: ستاره‌ای که سوخت هسته‌ای‌اش را مصرف کرده، و به‌عنوان ستاره‌ای با جرم خورشید، به قطری برابر با قطر زمین رمبیده است. نیروی گرانشی ستاره با فشار الکترون متوازن می‌شود.

کهکشان: دستگاه مستقل متشکل از مجموعه‌ای از ستارگان.

کیلوگرم-متر: معیاری از کار؛ معادل با کاری که برای بالا بردن یک کیلوگرم به ارتفاع یک متر لازم است.

گاز ایده‌آل: گازی که حجم آن با دمای مطلق و مقدار مولی نسبت مستقیم، و با فشار نسبت عکس دارد، از این رو، از قانون گاز $PV = nRT$ تبعیت می‌کند، که در آن P، V، T و n عبارتند از فشار، حجم، دمای مطلق و مقدار مولی گاز، و R یک ثابت است.

گاز کامل: نام دیگری برای گاز ایده‌آل.

گِرَم: یکای جرم.

گرماشیمی: بررسی واکنشهای گرمازا و گرماده.

گرمای ویژه: گرمای لازم برای اینکه دمای یک واحد جرم از ماده‌ای را یک درجه بالا ببرد.

گالوانومتر: اسبابی برای اندازه‌گیری جریانهای الکتریکی اندک.

لپتون: یک ذرهٔ بنیادی که در برهم‌کنشهای قوی دخالتی ندارد؛ مثلاً الکترونها، نوترینوها، و موئونها.

لگاریتم: لگاریتم یک عدد، توان یک مبنا ــ معمولاً ۱۰ ــ که آن عدد را محاسبه می‌کند. مثلاً، چون $۱۰۰۰ = ۱۰^۳$ است، لگاریتم ۱۰۰۰ می‌شود ۳.

مبنای لگاریتم: عددی که به توانی برابر لگاریتم می‌رسد.

مثلثات: شاخه‌ای از ریاضیات که مسائل مربوط به مثلثها را حل می‌کند.

مزون: هادرونی با جرم متوسط، مرکب از یک کوارک و یک پادکوارک؛ نمونهٔ آن یک پیون است.

مکانیک آماری: بررسی دستگاههای بزرگ‌مقیاس از دیدگاه رفتار میانگین مولکولهای سازندهٔ دستگاه.

مکانیک کوانتومی: اصطلاحی عام برای مکانیک ماتریسی، مکانیک موجی و ترکیبی از آنها که دیراک تعریف کرده است.

مکانیک موجی: نوعی مکانیک کوانتومی که شرودینگر و دوبروی مبتکر آن بودند.

مگا پارسک: یکای فاصله در اخترشناسی، برابر با یک میلیون پارسک یا ۳٫۲۶ میلیون سال نوری.

مول: در شیمی، کمیت یک سازهٔ شیمیایی شامل عدد آووگادرو مولکول.

میدان: موجودی فیزیکی که در سراسر فضا و زمان وجود دارد. میدانها موجب آثار الکتریکی، مغناطیسی و گرانشی می‌شوند. در مقایسه با مفهوم ذره که به موجودی فیزیکیِ محدود شده به فضا و زمان، مربوط می‌شود.

نسبیت: بررسی مکانیک اجسام در حرکت نسبت به یکدیگر.

نوترون: ذره‌ای بدون بار که جرم آن تقریباً برابر با جرم پروتون است؛ یکی از اجزای همهٔ هسته‌ها است.

نوترون کُند: نوترونی با انرژی کم.

نوترینو: یک ذرهٔ بنیادی که حامل بار نیست و جرم بسیار اندکی دارد.

نور قطبیده: نوری که در جهت معین ارتعاش کند.

واپاشی پرتوزا: رویداد هسته‌ای که در آن یک عنصر پرتوزا خود به خود، یک ذرهٔ پُرانرژی، معمولاً ذرهٔ آلفا، یا ذرهٔ بتا، یا پرتو گاما، یا ترکیبی از آنها گسیل می‌کند.

واکنش هسته‌ای زنجیره‌ای: فرایند هسته‌ای که در آن رویدادهای شکافت، نوترونهای زیاد، یا نوترونهایی بیشتر از آنچه مصرف‌شده، تولید و این نوترونها شکافتهای بیشتری را القا می‌کنند.

وزن: نیروی گرانشی که بر یک جسم وارد می‌شود.

وزن مولکولی: جرم مولکول نسبت به جرم اتم هیدروژن، به فرض آنکه آن را ۱ بگیریم (در واقع ۱٫۰۰۸ است).

هادرون: هر ذرهٔ زیر اتمی که با برهم‌کنشهای قوی منسجم می‌شود. واحدهای ساختمانی هادرونی کوارکها هستند.

یون: یک اتم یا مولکول که از لحاظ الکتریکی باردار است.

مکانیک کوانتومی

ماکس پلانک

نیلس بور

ولفانگ پائولی

ورنر هایزنبرگ

اروین شرودینگر و لویی دوبروی

فیزیک هسته ای

ماری کوری

ارنست رادرفورد

لیزه مایتنر

انریکو فرمی

فیزیک ذرات

پل دیراک

مورای گل - مان

اخترشناسی، اخترفیزیک و کیهان شناسی

ادوین هابل

سوبراهمانیان چاندراسخار

استیون هاوکینگ