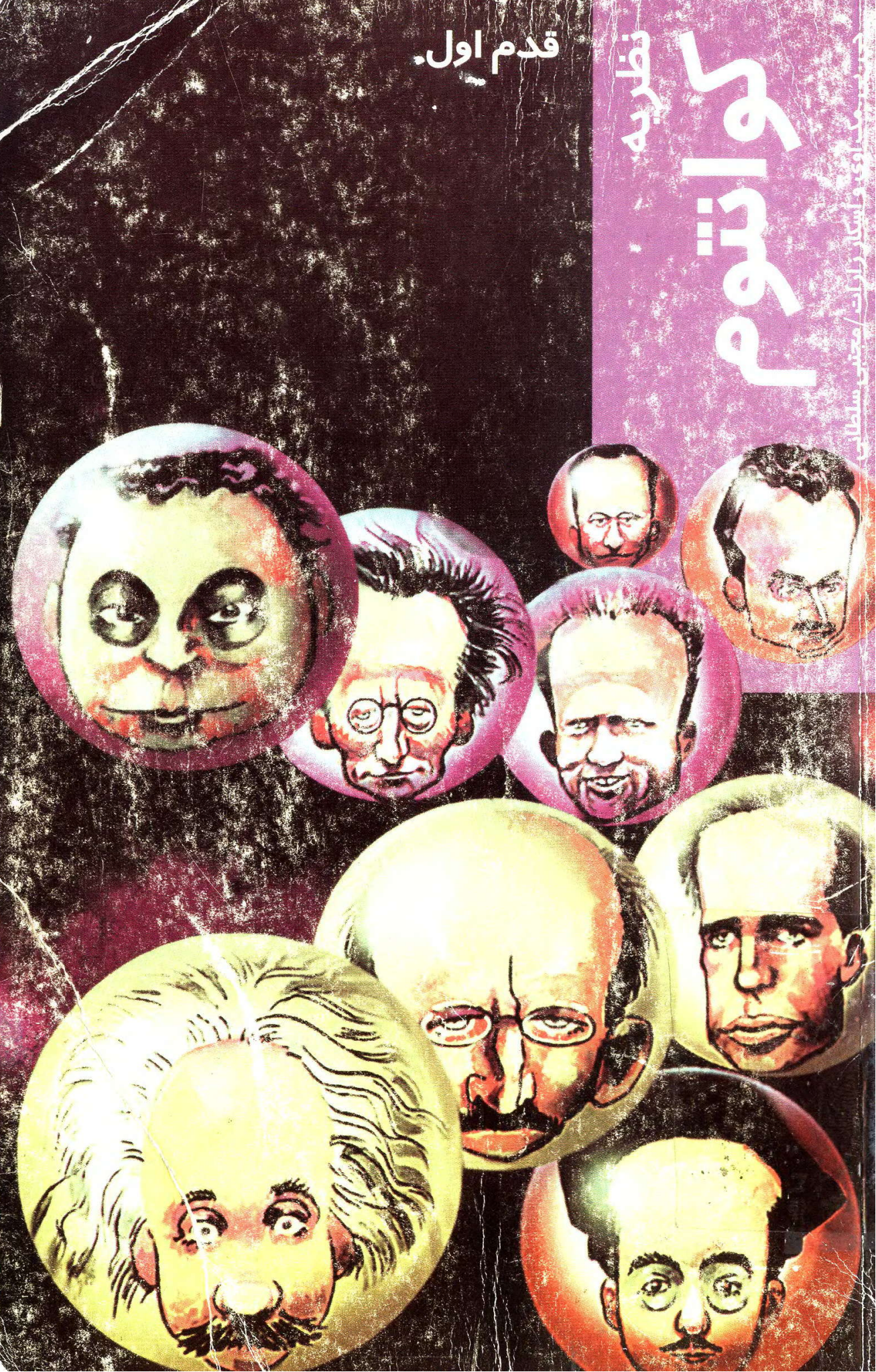
قدم اول

کوالتوم



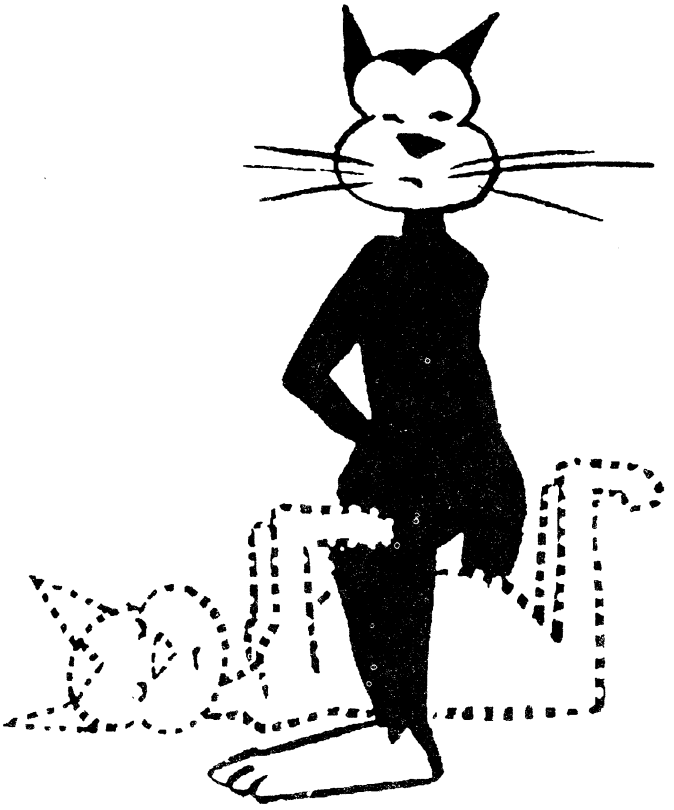
نظریهٔ کوانتوم

قدم اول

نظریهٔ کوانتوم

قدم اول

نویسنده: جی. پی. مک اوی ـ طراح: اسکار زارات
مترجم: مجتبی سلطانی



این کتاب ترجمه‌ای است از:

Introducing Quantum Theory

McEvoy, Joseph P. and Oscar Zarate

Published in 1995 by Icon Books Ltd.

McEvoy, Joseph P. مک اوی، جوزف

نظریه کوانتوم (قدم اول) / جی. پی. مک اوی؛ نقاش اسکار زارات؛ مترجم مجتبی سلطانی. ـ تهران: نشر و پژوهش شیرازه، ۱۳۷۹.

۱۷۳ ص. : مصور؛ ۲۱/۵×۱۴/۵ س م. ISBN 964-6578-64-0: ۱۲۰۰۰ ریال

فهرستنویسی براساس اطلاعات فیپا.

عنوان اصلی: Introducing Quantum Theory.

۱. کوانتوم. الف. زارات، اسکار ۱۹۴۲ـ ، Zarate, Oscar ، تصویرگر. ب. سلطانی، مجتبی، ۱۳۵۱ ـ ، مترجم. ج. عنوان.

۶ ن ۷ م / ۱۲ / QC ۱۷۴ ۵۳۰/۱۲

۱۳۷۹

کتابخانه ملی ایران ۷۹ - ۲۲۲۶۹ م

محل نگهداری:

نظریه کوانتوم

قدم اول

نویسنده: جی. پی. مک اوی

طراح: اسکار زارات

مترجم: مجتبی سلطانی

حروفچینی و صفحه‌آرایی: مؤسسهٔ جهان کتاب

لیتوگرافی: کوثر

چاپ: آسمان

چاپ جلد: نفیس

چاپ اول: ۱۳۸۰

تعداد: ۲۲۰۰

حق چاپ و نشر محفوظ است.

تهران. صندوق‌پستی: ۱۱۳۸ / ۱۹۳۹۵

تلفن: ۲۵۶۰۹۸۳

ISBN 964 - 6578 - 64 - 0 ۹۶۴ - ۶۵۷۸ - ۶۴ - ۰

نظریه کوانتوم چیست؟

نظریه کوانتوم موفق‌ترین دستگاه‌های فکری است که تاکنون توسط بشر ابداع شده. این نظریه، جدول تناوبی عناصر و چگونگی رخ‌دادن واکنش‌های شیمیایی را توضیح می‌دهد. نظریهٔ کوانتوم همچنین پیش‌گویی‌های دقیقی دربارهٔ لیزر، میکروچیپ، پایداری DNA و چگونگی تشعشع ذرات آن از درون هسته، به‌دست داده است.

قوائت بور از نظریهٔ کوانتوم که در سال ۱۹۲۷ ارائه شد، امروزه نیز متداول است. این امر با وجود این است که آزمایش‌های فکری اینشتین در سال ۱۹۳۰ اصول بنیادی قوائت بور را زیر سؤال برد. خود آزمایش فکری اینشتین نیز تاکنون محل بحث است. آیا ممکن است باز هم حق با اینشتین باشد؟ آیا چیزی نادیده گرفته شده؟ بگذارید از اول شروع کنیم...

معرفی نظریه کوانتوم

مسئله این است که قبل از آغاز قرن حاضر فیزیکدان‌ها که کاملاً به ایده‌های‌شان دربارهٔ مواد و تابش اطمینان داشتند به مفاهیمی که با این تصور کلاسیک، درتضاد بود، توجه چندانی نمی‌کردند.

نه‌تنها صورت‌بندی ریاضی ایزاک نیوتن (۱۷۲۷ـ۱۶۴۲) و جیمز کلارک ماکسول (۷۹ـ۱۸۳۱) نقصی نداشت، بلکه سال‌های متمادی پیش‌گویی‌های مبتنی بر نظریه آنها به‌وسیله آزمایش‌های دقیق تأیید شده بود. عصر برهان به عصر یقین تبدیل شده بود.

فیزیکدان‌های کلاسیک

تعریف «کلاسیک» چیست؟

عنوان **کلاسیک** به فیزیکدان‌های اواخر قرن نوزدهم اطلاق می‌شود که از سنت آکادمیک مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیسی ماکسول پیروی می‌کنند؛ اینها دو مورد از موفق‌ترین نظام‌های استدلالی هستند که در تاریخ تفکر در مورد پدیده‌های فیزیکی به‌وجود آمده‌اند.

از زمان **گالیله** (۱۶۴۲ـ۱۵۶۴) محک‌زدن نظریه‌ها به‌وسیله مشاهده معیار صحت نظریه‌های فیزیکی بوده است. او نشان داد که چگونه می‌توان آزمایش طرح کرد، اندازه‌گیری انجام داد و نتایج حاصل را با پیش‌بینی‌های منتج از قوانین ریاضی مقایسه کرد.

هنوز هم تقابل نظریه و آزمایش بهترین شیوه قابل قبول پیشرفت در دنیای علم است.

کاملاً اثبات شده (و کلاسیک) است...

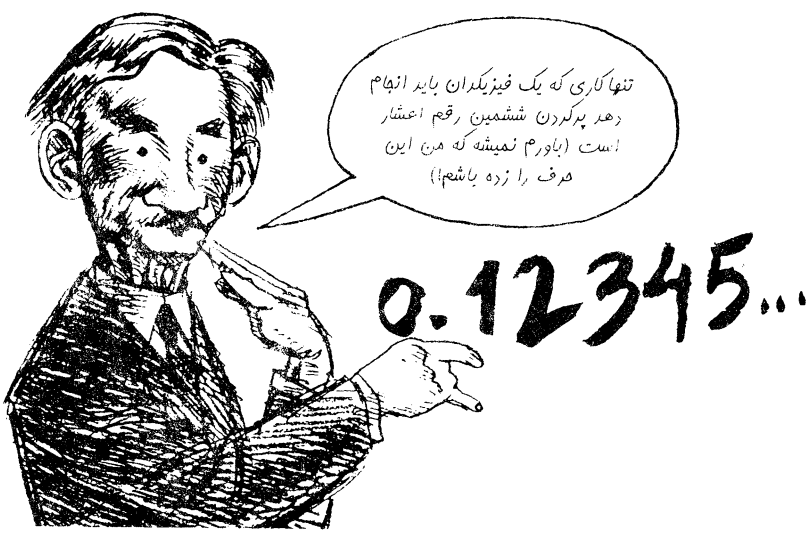
قوانین حرکت نیوتن در طول قرن‌های هجدهم و نوزدهم به‌وسیله آزمایش‌های معتبر با دقت بررسی و صحت آنها محرز شده بود.

تعجبی ندارد که این فیزیکدان‌های کلاسیک نسبت به آنچه می‌دانستند خاطرجمع باشند.

«ششمین رقم اعشار را پیدا کن»

لرد کلوین یک فیزیکدان کلاسیک با نفوذ در دانشگاه گلاسکو (۱۹۰۷ـ۱۸۴۲) بود که از دو ابر تاریک در افق فیزیک نیوتنی سخن می‌گفت.

در ژوئن ۱۸۹۴ **آلبرت مایکلسون** (۱۹۳۱ـ۱۸۵۲)، برنده آمریکایی جایزه نوبل، سعی کرد نظر کلوین را تفسیر کند؛ اظهارنظری که تا آخر عمر از آن پشیمان بود!



فرض‌های بنیادین فیزیک کلاسیک

فیزیکدان‌های کلاسیک مجموعهٔ کاملی از فرضیات را بنا نهادند که باعث می‌شد تفکرشان متمرکزشده و افکار و ایده‌های جدید را به‌سختی پذیرا شوند. موارد زیر بخشی از **یقین‌های آنان** دربارهٔ جهان مادی بود:

۱) کیهان همانند ماشین غول‌پیکری است که در ساختاری از زمان و مکان مطلق قرار گرفته. حرکات پیچیده را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از حرکات سادهٔ قسمت‌های درونی این ماشین درک کرد؛ حتی اگر این اجزا درونی قابل مشاهده نباشند.

۲) استنتاج نیوتنی تلویحاً برای هر حرکتی علتی را برمی‌شمرد. یعنی اگر جسمی حرکت کند همیشه می‌توان فهمید عامل حرکت چه بوده است. این اصل ساده **علت و معلول** است که هیچ‌کس آن را زیر سؤال نمی‌برد.

۳) اگر وضعیت یک حرکت در یک نقطه ــ مثلاً در زمان حال ــ شناخته شده باشد، آنگاه وضعیت آن در هر نقطه در آینده و گذشته معین خواهد بود. به‌جز توالی علت‌های پیشین، چیزی نامعلوم نیست و این، اصل **موجبیت** است.

۴) ویژگی‌های نور **کاملاً** به‌وسیله نظریهٔ **امواج** الکترومغناطیسی ماکسول **توصیف**، و در آزمایش الگوهای تداخلی ساده یانگ در سال ۱۸۰۲ محرز شده‌اند.
۵) دو مدل فیزیکی برای انتقال انرژی موجود است: یکی مدل **ذره‌ای** است که در آن ذرات به‌صورت کرات سخت نفوذناپذیر، مانند توپ بیلیارد مجسم می‌شوند و دیگری مدل **موجی** است: مانند امواجی که روی سطح دریا به‌سوی ساحل حرکت می‌کنند. این دو مدل مانعةالجمع هستند و انرژی باید به یکی از این دو صورت انتقال یابد.
۶) ویژگی‌های یک سیستم، مانند دما یا سرعت، را با هر دقتی می‌توان اندازه گرفت.
این کار به سادگی، با تغییر معیارهای آزمایش یا تصحیح‌های نظری قابل انجام خواهد بود. تصور می‌شد که سیستم‌های اتمی نیز از این قاعده مستثنی نباشند.

فیزیکدان‌های کلاسیک به **صحت کامل** این عبارات باور داشتند، اما سرانجام ثابت شد که همهٔ این شش فرض **متزلزل** هستند. اولین کسانی که به این مطلب پی برده بودند گروهی از فیزیکدانان بودند که یکدیگر را در هتل متروپل بروکسل در ۲۴ اکتبر ۱۹۲۷ ملاقات کردند.

تدوین نظریه کوانتوم، کنفرانس سولوِی ۱۹۲۷

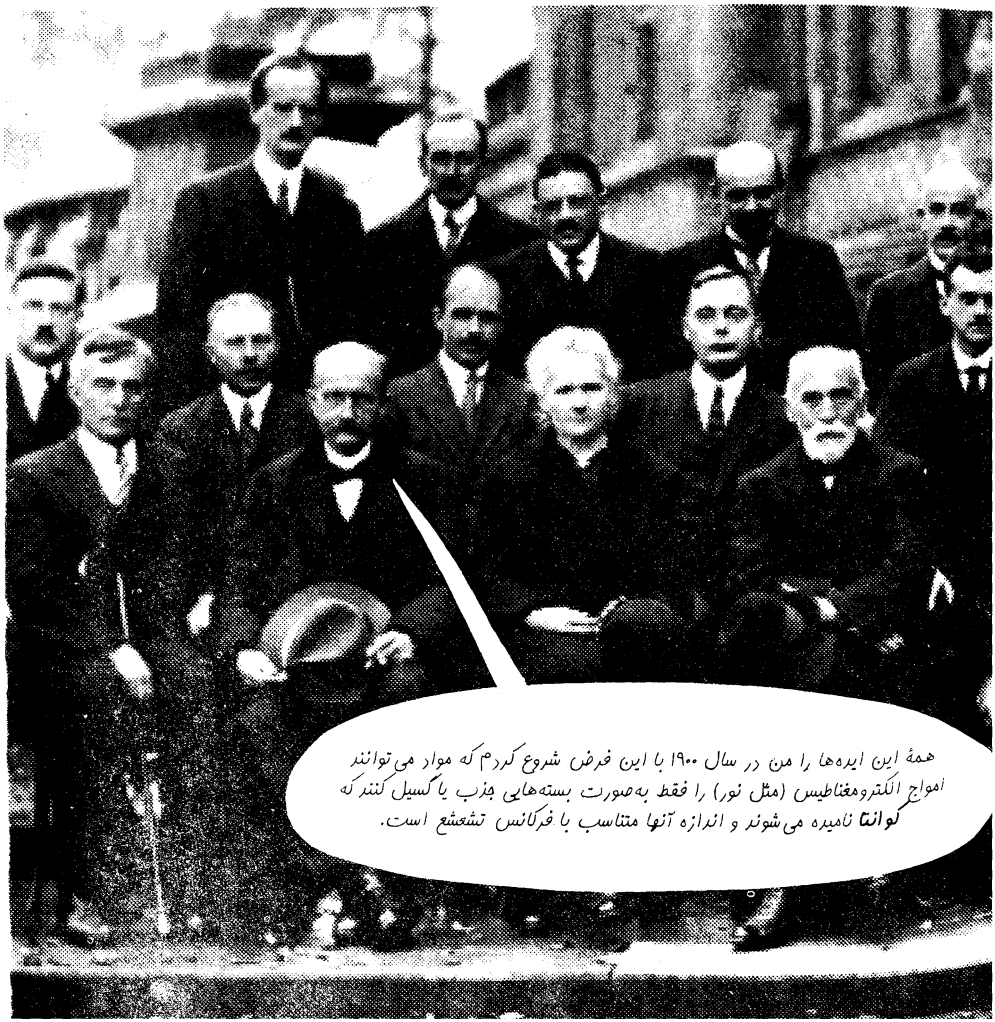
اندکی پیش از شروع اولین جنگ جهانی، یک صنعتگر بلژیکی، ارنست سولوِی (۱۹۲۲ـ۱۸۳۸) اولین نشست از سری نشست‌های بین‌المللی فیزیک را در بروکسل سازمان داد. شرکت در این کنفرانس‌ها با دعوت خاص انجام می‌گرفت و از شرکت‌کنندگان که معمولاً حدود ۳۰ نفر بودند خواسته می‌شد که بر روی موضوع از پیش تعیین‌شده‌ای تکیه کنند.

پنج نشست نخستین که بین سال‌های ۱۹۱۱ تا ۱۹۲۷ برگزار شدند، سیر تاریخی پیشرفت فیزیک قرن بیستم را به‌بهترین نحوی ثبت کرده‌اند. نشست ۱۹۲۷ به نظریه کوانتوم اختصاص یافته بود و در آن ۹ فیزیکدان نظری که هریک سهمی بنیادین در نظریه کوانتوم داشتند، شرکت کرده بودند. همهٔ این نُه فیزیکدان سرانجام به‌خاطر سهم‌شان در شکل‌گیری نظریه کوانتوم برنده جایزه نوبل شدند.

این عکس که در کنفرانس ۱۹۲۷ سولوِی گرفته شده نقطه‌شروع مناسبی برای معرفی نقش‌آفرینان اصلی در پیدایش جدی‌ترین نظریه‌های فیزیک است. نسل آینده از نزدیکی زمانی و مجاورت مکانی‌ای که این غول‌های فیزیک را در سال ۱۹۲۷ گرد هم آورده بود شگفت‌زده خواهد شد.

به‌ندرت می‌توان در تاریخ علم دوره‌ای را یافت که این پایه از روشنگری توسط چنین جمع معدودی صورت پذیرفته باشد.

ماکس پلانک (۱۹۴۷ــ۱۸۵۸) را با کلاه و سیگارش در کنار **ماری کوری** (۱۹۳۴ــ۱۸۶۷)، در ردیف جلو، بنگرید. پلانک عاری از نشاط است، او از سال‌ها تلاش برای افکار و ایده‌های انقلابی‌اش، دربارهٔ مواد و تابش، خسته به‌نظر می‌آید.



همهٔ این ایده‌ها را من در سال ۱۹۰۰ با این فرض شروع کردم که مواد می‌توانند امواج الکترومغناطیس (مثل نور) را فقط به‌صورت بسته‌هایی جذب یا گسیل کنند که **کوانتا** نامیده می‌شوند و اندازه آنها متناسب با فرکانس تشعشع است.

چندسال بعد، در سال ۱۹۰۵ ــ یک کارمند جوان اداره ثبت اختراعات در سوئیس که **آلبرت اینشتین** (۱۹۵۵ــ۱۸۷۹) نامیده می‌شد، نظریهٔ پلانک را تعمیم داد.
اینشتین با لباس رسمی شق‌ورقش در وسط ردیف جلو نشسته است. او بعد از انتشار اولین مقاله‌اش حدود بیست‌سال بود که دربارهٔ مسائل کوانتوم می‌اندیشید بدون اینکه به هیچ بینش حقیقی‌ای رسیده باشد. با این حال در این مدت در روند پیدایش این نظریه و تأیید وحمایت از ایده‌های دیگران با جسارتی غیرعادی شرکت کرده بود. اکنون یک دهه از ارائه بزرگترین دستاورد او ــ یعنی نظریه نسبیت خاص ــ که او را به چهره سرشناس جهانی تبدیل کرده می‌گذشت.

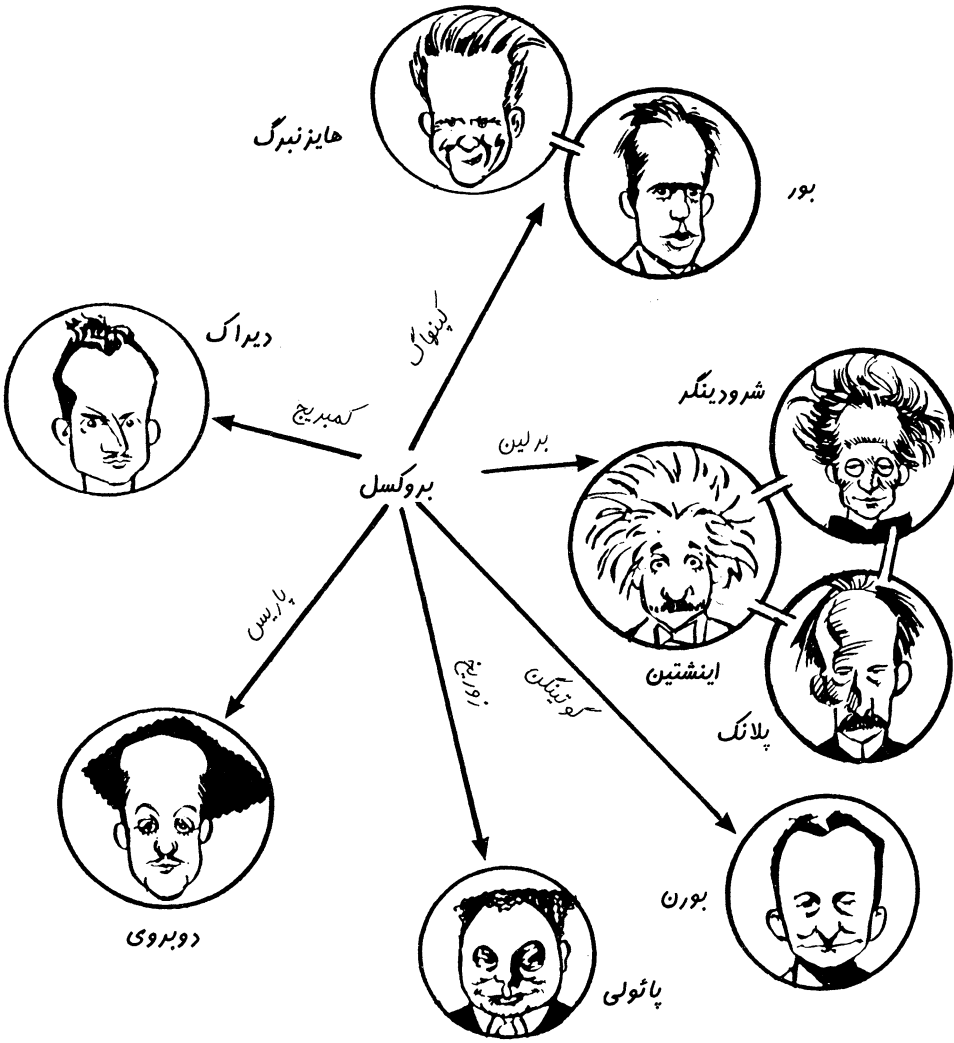
در بروکسل اینشتین دربارهٔ نتایج باورنکردنی نظریهٔ کوانتوم، با مشهورترین و قاطع‌ترین مبلغ آن یعنی فیزیکدان «دانمارکی بزرگ» **نیلز بور** (۱۹۶۲ـ۱۸۸۵) به بحث نشست. بور بیش از هرکس دیگری در تلاش برای تعبیر و فهم این نظریه سهیم بود. در گوشه سمت راست عکس، او پرفسور ۴۲ ساله‌ای است در اوج توانایی‌اش، آرام و مطمئن که در ردیف وسط نشسته است.

و به این ترتیب یک بحث دائمی بین این دو سرور فیزیک قرن بیستم آغاز شد. بحثی که تا مرگ اینشتین در سال ۱۹۵۵ به طول انجامید.

در ردیف آخر، پشت سر اینشتین **اروین شرودینگر** (۱۹۶۱ـ۱۸۸۷) با ژاکت و پاپیون‌اش به‌وضوح فردی بی‌قید به‌نظر می‌رسد. در سمت راست او، و با یک فاصله، «دو جوان افراطی» **ولفانگ پائولی** (۱۹۵۸ـ۱۹۰۰) و **ورنر هایزنبرگ** (۱۹۷۶ـ۱۹۰۱) قرار دارند که هنوز در دهه سوم عمرشان به‌سر می‌برند. جلوی آنها **پل دیراک** (۸۴ـ۱۹۰۲)، **لویی دوبروی** (۱۹۸۷ـ۱۸۹۲)، **ماکس بورن** (۱۹۷۰ـ۱۸۸۲) و بور قرار گرفته‌اند. امروزه این مردان به‌سبب پیوندشان با ویژگی‌های بنیادین جهان میکروسکوپی، معادله موج شرودینگر، اصل طرد پائولی، رابطهٔ عدم قطعیت هایزنبرگ و اتم بور و...، جاودانه شده‌اند.

پیرترین آنها پلانک ۶۹ ساله بود که همه این ماجراها را در سال ۱۹۰۰ شروع کرد تا دیراکِ ۲۵ ساله که جوانترین آنها بود نظریه را در سال ۱۹۲۸ کامل کند.

روز ۳۰اکتبر ۱۹۲۷ یعنی روز بعد از گرفته‌شدن این عکس، شرکت‌کنندگانِ کنفرانس درحالیکه مشاجره تاریخی بور و اینشتین در ذهنشان طنین می‌افکند در ایستگاه مرکزی بروکسل سوار ترن‌هایی شدند که به برلین، پاریس، کمبریج، گوتیگن، کپنهاک، وین و زوریخ بازگردند.



آنها باورنکردنی‌ترین مجموعه افکاری راکه تاکنون دانشمندان به هم بافته بودند به‌همراه خود می‌بردند. اما احتمالاً اکثر آنها باطناً با اینشتین موافق بودند و باور داشتند که این جنون، که نظریه کوانتوم نامیده می‌شود، تنها گامی است در راهی به‌سوی نظریه‌ای کاملتر، و نهایتاً با چیزی بهتر که با عقل سلیم سازگارتر باشد جایگزین خواهد شد.

اما این نظریه چگونه به‌وجود آمد؛ چه آزمون‌هایی این مردان دقیق را به نادیده‌گرفتن اصول فیزیک کلاسیک ناگزیر کرد و آنها را مجبور بـه پـیشنهاد ایـده‌هایی دربـاره طبیعت کرد که عقل سلیم را نقض می‌کنند؟

قبل از مطالعهٔ این تجربه‌های ضدونقیض به پیشینه‌ای دربارهٔ **ترمودینامیک** و آمار نیاز داریم که برای فهم نظریهٔ کوانتوم ضروری‌اند.

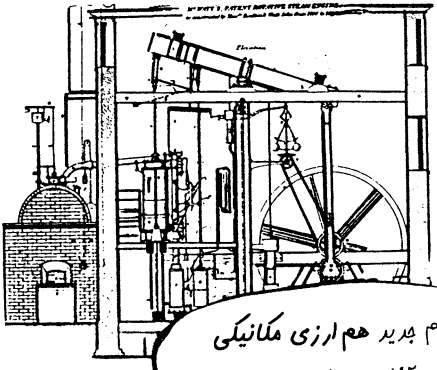
ترمودینامیک چیست؟

این کلمه به‌معنای «جابجایی گرما» است. گرما همیشه از جسمی با دمای بیشتر به جسمی که دمای کمتری دارد جاری می‌شود و تا زمـانیکه دو جسـم دارای دمـای یکسان نشوند این جریان ادامه می‌یابد. ایـن حـالتِ هـم‌دمایی دوجسـم را **تـعادل گرمایی** می‌نامند.

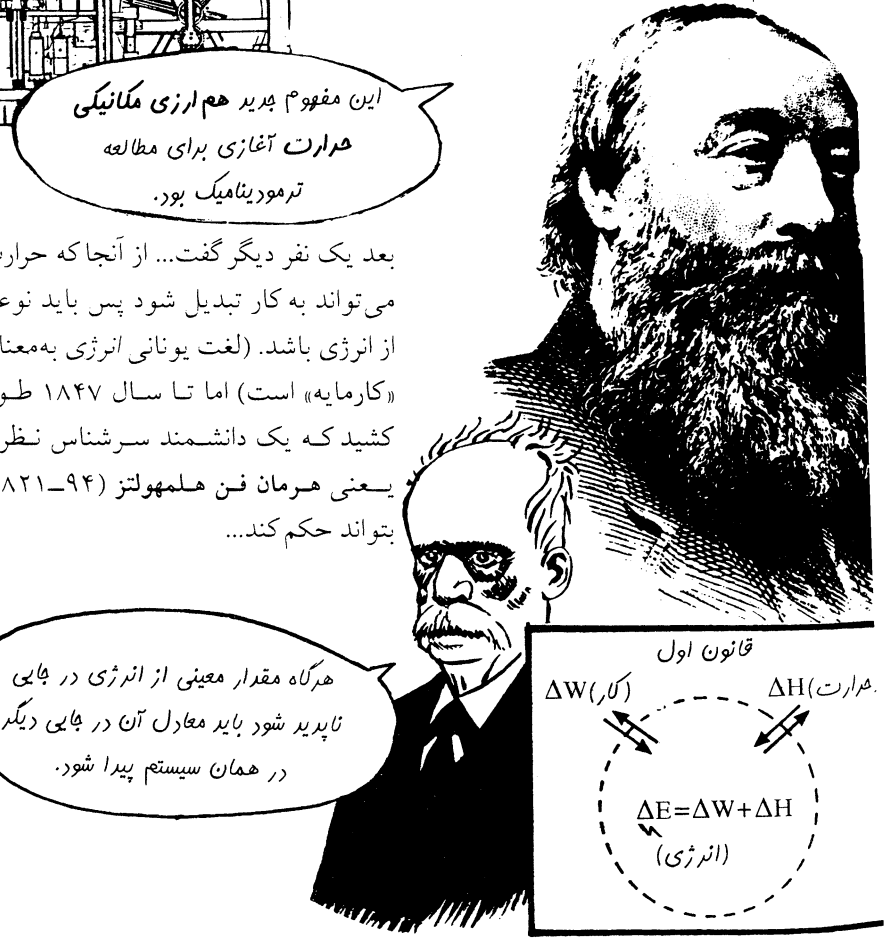
حرارت به‌درستی به **نوعی ارتعاش** تشبیه می‌شود.

اولین قانون ترمودینامیک

مدل مکانیکیِ توصیف جریان گرما برپایه تحقیقات **جیمز وات** (۱۸۱۹ـ۱۷۳۶) قرن نوزدهم در انگلستان به‌سرعت توسعه یافت. وات همان اسکاتلندی‌ای بود که موتور بخار کارآمدی ساخت.



انـــدکی بـــعد، **جـــیمز پـــرسکات ژول** (۸۹ـ۱۸۱۸)، پسر یک آبجوساز منچستری، نشان داد که مقدار مشخصی از گرما را می‌توان هم‌ارز مقدار معینی کار مکانیکی دانست.



بعد یک نفر دیگر گفت... از آنجا که حرارت می‌تواند به کار تبدیل شود پس باید نوعی از انرژی باشد. (لغت یونانی *انرژی* به‌معنای «کارمایه» است) اما تا سال ۱۸۴۷ طول کشید که یک دانشمند سرشناس نظری یعنی **هرمان فن هلمهولتز** (۹۴ـ۱۸۲۱) بتواند حکم کند...

هرگاه مقدار معینی از انرژی در جایی ناپدید شود باید معادل آن در جایی دیگر در همان سیستم پیدا شود.

این قاعده را **قانون تبدیل انرژی** می‌گویند، که به‌عنوان زیربنای فیزیک جدید باقی ماند و از نظریه‌های جدید تأثیر نپذیرفت.

رودلف کلاوسیوس: دو قانون

در سال ۱۸۵۰ فیزیکدان آلمانی **رودلف کلاوسیوس** (۸۸ـ۱۸۲۲) مقاله‌ای منتشر کرد که در آن قانون تبدیل انرژی را اولین قانون ترمودینامیک خواند. در همان‌جا او نشان داد در ترمودینامیک قانون **دومی** هم هست که می‌گوید: همیشه در انرژی کل یک سیستم نوعی **افت**، و در فرایندهای ترمودینامیک مقداری حرارت بی‌ثمر، وجود دارد.

کلاوسیوس مفهوم جدیدی را که **آنتروپی** نامیده می‌شود، معرفی کرد. آنتروپی اصطلاحی است برای بیان انتقال حرارت از جسمی به جسم دیگر.

آنتروپی یک سیستم عایق همواره افزایش می‌یابد و در تعادل گرمایی ــ یعنی هنگامی که تمام اجسام دارای یک دما باشند ــ بیشینه می‌شود.

وجود اتم‌ها

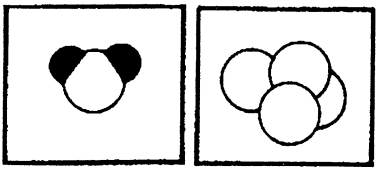
اولین کسی که مفهوم اتم را پیشنهاد کرد فیلسوفی یونانی به‌نام **دموکریت** (حدود ۳۷۰ـ۴۶۰ قبل از میلاد) بود. (اتم در زبان یونانی به معنای تقسیم‌ناپذیر است).

ارسطو به این ایده اعتراض کرد و تا قبل از اینکه **جان دالتون** (۱۸۴۴ـ۱۷۶۶)، شیمی‌دان انگلیسی ـ در سال ۱۸۰۶ از مفاهیم اتمی برای پیش‌گویی خواص شیمیایی عناصر و ترکیبات استفاده کند، به مدت هزاران سال مورد تردید بود.

اما یک قرن بعد محاسبات نظری اینشتین و آزمایش‌های یک فرانسوی به‌نام **جان پرن** (۱۹۴۲ـ۱۸۷۰) شکاکان را وادار کرد که وجود اتم‌ها را به‌عنوان یک واقعیت بپذیرند. به‌هرحال در طول قرن نوزدهم، بسیاری از نظریه‌پردازان، حتی قبل از اثبات فیزیکی اتم‌ها، این مفهوم را به‌کار بردند.

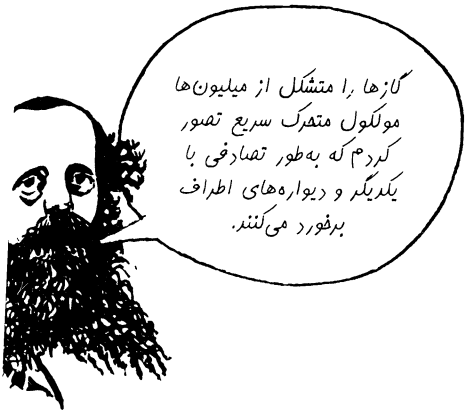
متوسط‌گیری مولکول‌های دواتمی

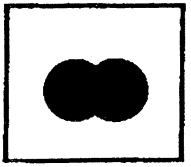
در سال ۱۸۵۹، جیمز کلارک ماکسول فیزیکدان اسکاتلندی، که شدیداً معتقد به نظریهٔ اتمی بود نظریهٔ جنبشی گازها را ارائه کرد.



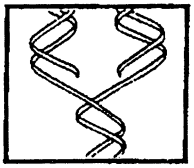
شن: کریستالهای شن از میلیونها اتم ساخته شده‌اند

آب H_2O: مولکولهای آب از سه اتم ساخته شده‌اند.

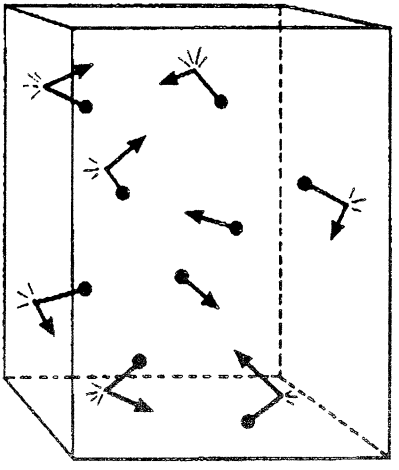


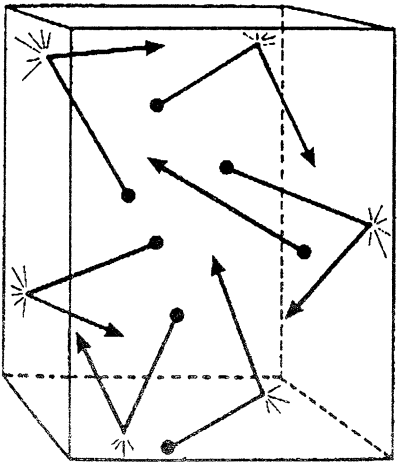


گازهای H_2، O_2 و N_2 مولکول‌های گاز از دو اتم ساخته شده است.



DNA: مولکول DNA از هزاران اتم ساخته شده است.

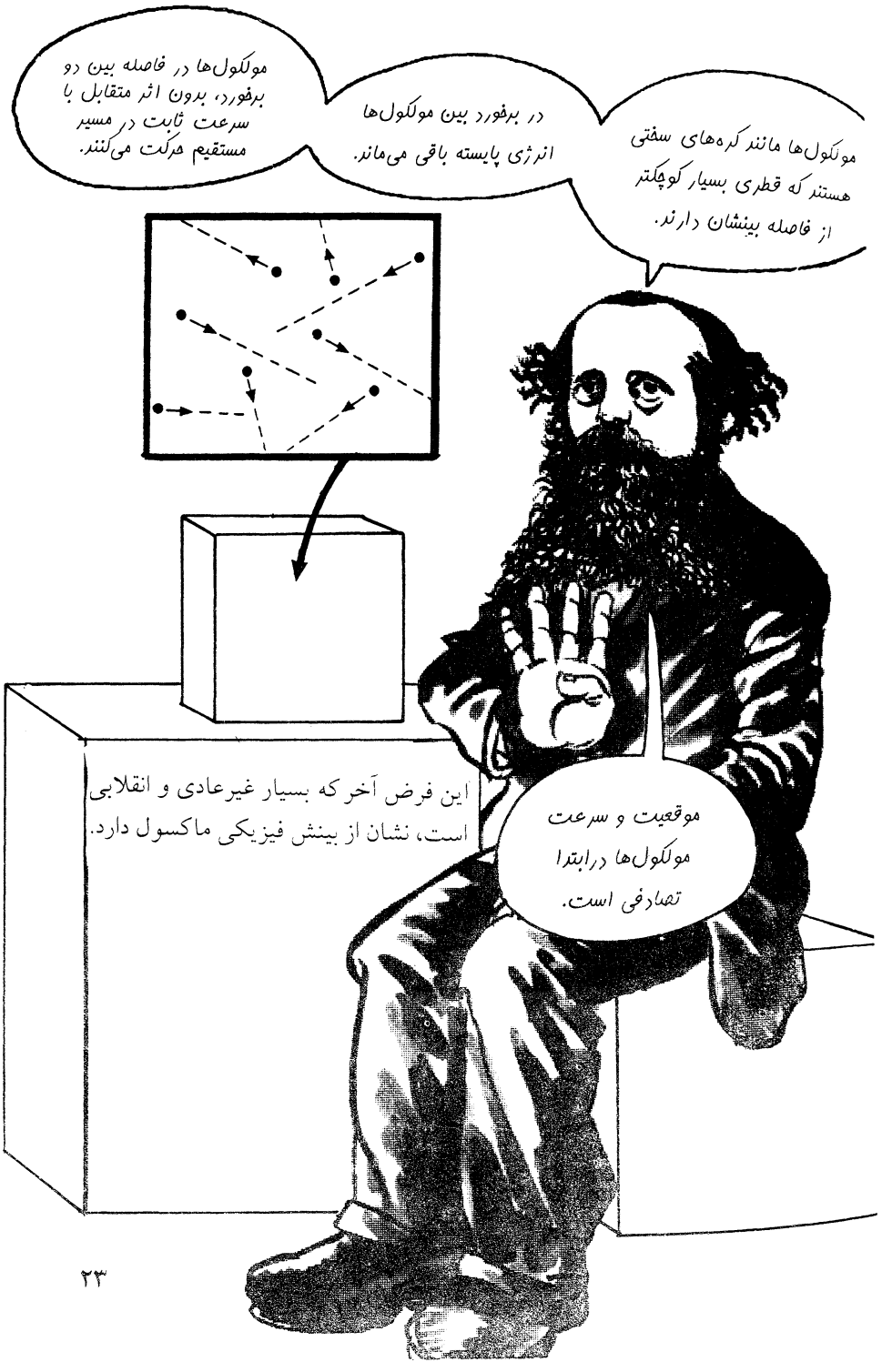


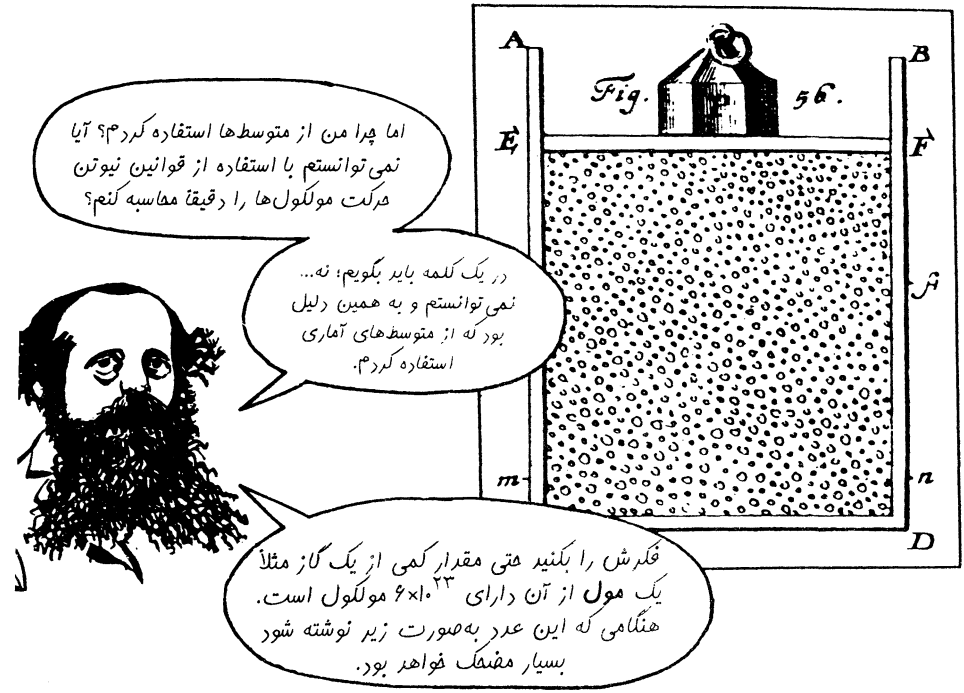


اگر این نظر را بپذیریم که حرارت‌دادن باعث حرکت سریعتر مولکول‌ها و تصادم بیشتر آنها با دیواره ظرف می‌شود، خواص فیزیکی گازها به‌صورت کیفی توجیه‌پذیر خواهد بود.

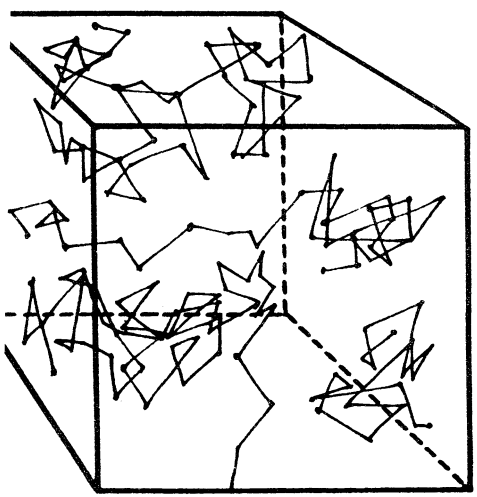
این نکته که ویژگی‌های ماکروسکوپی (ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه) را می‌توان از روی مدل میکروسکپی برخورد مولکول‌های گاز پیش‌گویی کرد، در نظریه ماکسول براساس میانگین‌گیری آماری تبیین شده است.

ماکسول چهار فرض وضع کرد:





۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰

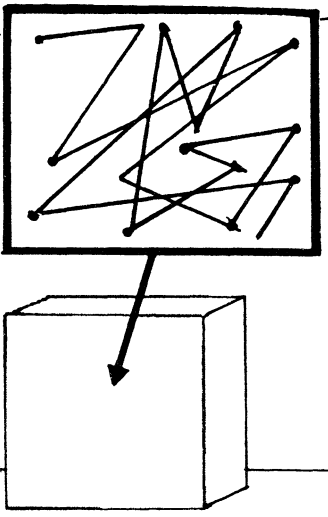


تلاش برای محاسبه حرکت انفرادی این تعداد ذره بی‌فایده است. تحلیل ماکسول که برپایه قوانین نیوتن استوار است نشان داد دما، سنجه‌ای از **مربع میانگین سرعت** میکروسکپی مولکول‌ها است. این یعنی سرعت متوسطی که در خودش ضرب شده است.

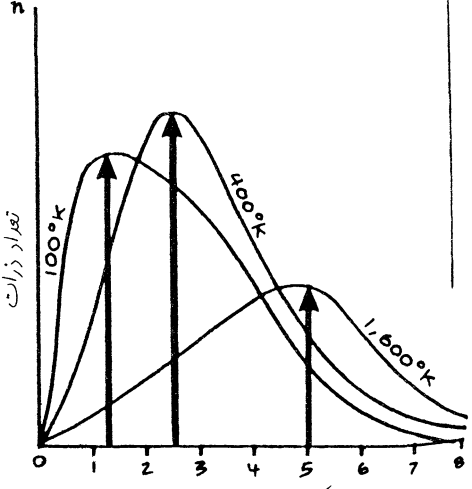
بنابراین گرما به وسیله حرکت تصادفی و مداوم اتم‌ها تولید می‌شود. حرکت تصادفی که توس
پرَن مشاهده شد.

اهمیت اساسی نظریه ماکسول، پیش‌گویی توزیع احتمال سرعت مولکول‌ها برپایه مدل او می‌باشد. به‌زبان دیگر مدل ماکسول، گسترهٔ سرعت... میزان انحراف کل مجموعه را از مقدار متوسط سرعت به‌دست می‌دهد.

طبق فرض، ذرات گاز به‌صورت ذرات یکنواختی در فضا حرکت می‌کنند که متقابلاً مستقل و دارای جهت دلخواه هستند. من می‌توانم احتمال اینکه یک مولکول تصادفاً انتخاب‌شده دارای سرعت معینی باشد را حساب کنم.



این یک منحنی مشهور است که امروزه فیزیکدانان به آن منحنی **توزیع ماکسول** می‌گویند که اطلاعات مفیدی دربارهٔ میلیون‌ها میلیون مولکول به‌دست می‌دهد، اگرچه حرکت انفرادی این مولکول‌ها هرگز قابل محاسبه نیست. این کاربرد آماری در شرایطی است که محاسبه دقیق درعمل ممکن نباشد.



لودویک بولتزمن و مکانیک آماری

در سال ۱۸۷۰، **لودویک بولتزمن** (۱۹۰۶ـ۱۸۴۴) ـ که از نظریهٔ جنبشی ماکسول الهام گرفته بود ـ یک رهیافت نظری ارائه داد.

● او یک توزیع احتمال عمومی را معرفی کرد که **توزیع بنداری یا متداول** نامیده می‌شود و به هر مجموعه‌ای از اشیاء که دارای حرکت آزادانه و مستقل، از یکدیگر و اثر متقابل تصادفی هستند، قابل اعمال است.

● او **قضیه همپاری انرژی** را تدوین کرد:

به این مفهوم که در سیستمی که به تعادل گرمایی رسیده است انرژی وابسته به درجات آزادی مختلف به‌طور یکسان تقسیم خواهد شد.

● او بیان دیگری نیز از اصل دوم ترمودینامیک ارائه داد:

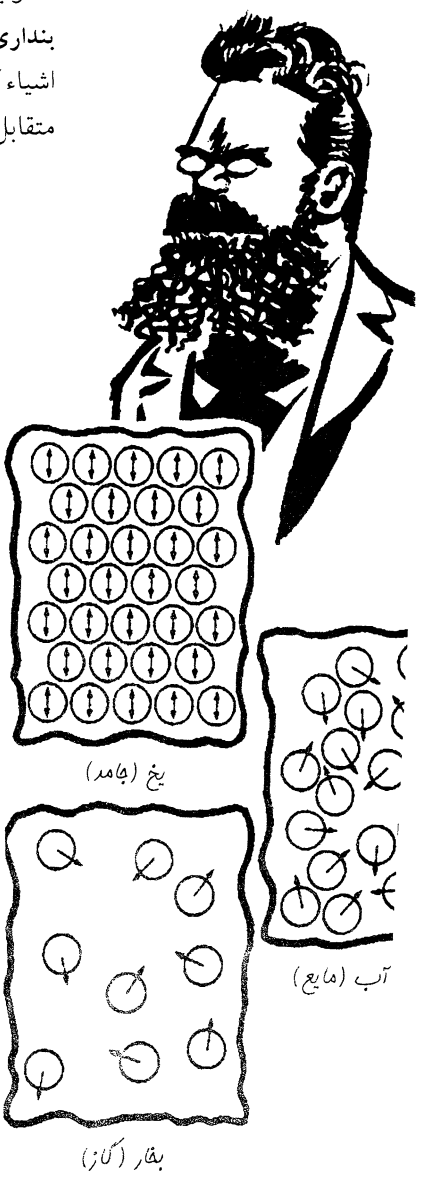
هنگامی که انرژی در یک سیستم افت می‌کند (همان‌طور که کلاوسیوس در سال ۱۸۵۰ گفته بود) اتم‌ها به‌سوی بی‌نظمی بیشتر سوق می‌یابند و آنتروپی افزایش می‌یابد. البته می‌توان سنجه‌ای از بی‌نظمی به‌دست آورد. یعنی احتمال وقوع یک سیستم مشخص، که همان تعداد شکل‌های مختلفی است که یک سیستم باتوجه به مجموعهٔ اتم‌هایش می‌تواند اختیار کند.

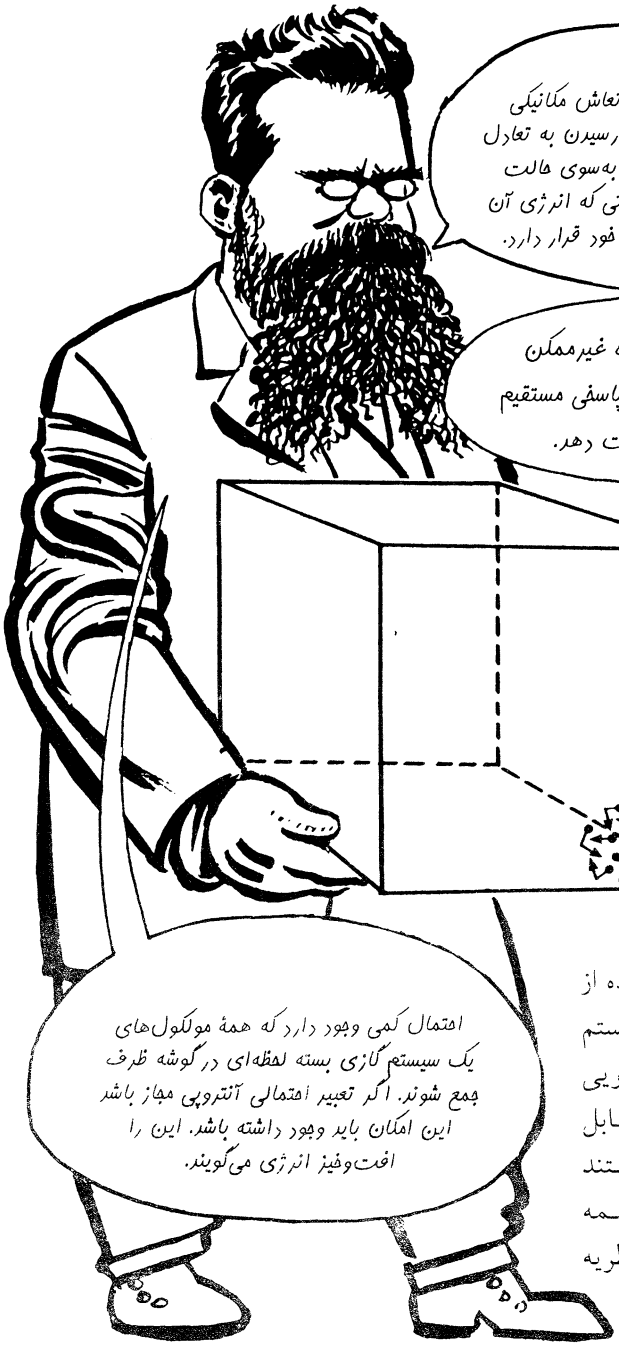
به بیان دقیقتر، *آنتروپی با رابطه زیر بیان می‌شود:*

$$S=kLogW$$

که در آن **k** یک ثابت است (امروزه **ثابت بولتزمن** نامیده می‌شود) و **W** احتمال رخ دادنِ آرایش خاصی از اتم‌ها.

این کار، بولتزمن را به خالق **مکانیک آماری** تبدیل کرد. مکانیک آماری شیوه‌ای است که ویژگی‌های اجسام ماکروسکپی را براساس رفتار آماری اجزا میکروسکپی آن‌ها پیش‌گویی می‌کند.





این افکار جدید یعنی استفاده از آمار و احتمال در سیستم میکروسکپی به‌منظور پیش‌گویی خواص ماکروسکپی که قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه هستند (نظر دما، فشار و...) پایهٔ همه چیزهایی شد که بعداً در نظریه کوانتوم وارد شدند.

جنگ سی‌ساله نظریه کوانتومی در برابر فیزیک کلاسیک (۳۰ــ۱۹۰۰)

بیائید نگاهی به سه تجربه در عصر پیش‌کوانتومی بیندازیم که نمی‌توان برای توجیه آنها فیزیک کلاسیک را به‌کار برد.

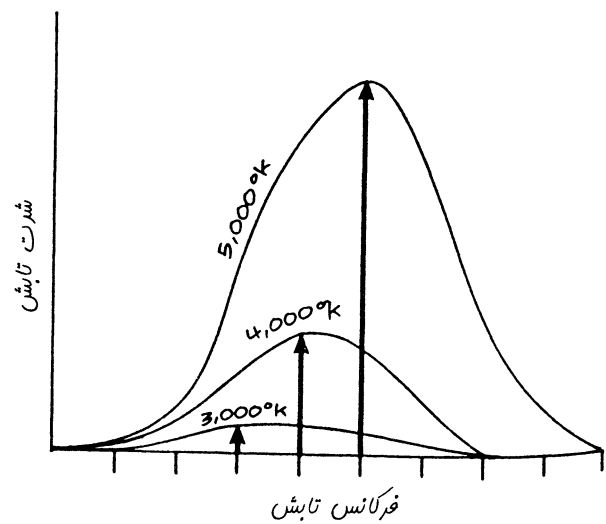
هریک از این‌ها آن‌گونه که توسط دانشمندان تجربی معتبر گزارش می‌شد متضمن برهم‌کنشِ تابش و ماده بودند. اندازه‌گیری‌ها دقیق و تکرارشدنی اما متناقض بود... وضعیتی که یک فیزیکدان نظری خوب برایش می‌میرد.

هریک از آزمایش‌ها را قدم به‌قدم شرح می‌دهیم، بحران‌های حاصل و راه‌حل‌های جدیدی را بیان می‌کنیم که توسط پلانک، اینشتین و بور مطرح شدند. این دانشمندان با ارائه راه‌حل‌هایشان نخستین قدمها را برای درک جدید طبیعت برداشتند. امروز کار مشترک این سه مرد که نقطهٔ اوج آن مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ بود، به‌عنوان **نظریه قدیمی کوانتوم** شناخته می‌شود.

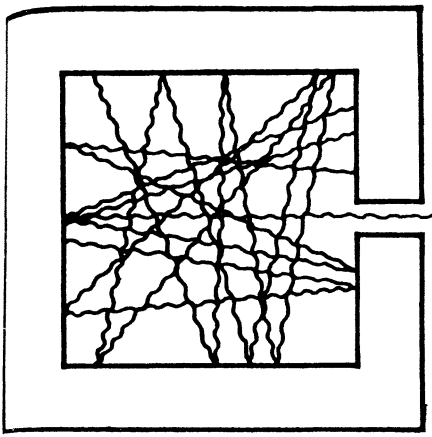
تابش جسم سیاه

وقتی جسمی گرم شود تشعشعاتی را که شامل امواج الکترومغناطیسی نظیر **نور** هستند در گستره وسیعی از فرکانس‌ها تابش می‌کند.

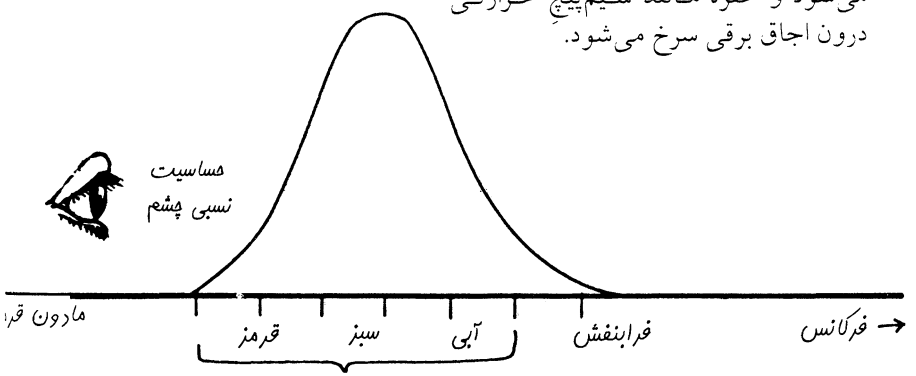
آن‌گونه که از اندازه‌گیری‌های اواخر قرن ۱۹ برمی‌آید با افزایش دما فرکانس اصلی به‌سوی مقادیر بالاتر جابه‌جا می‌شود.



جسم سیاه جسمی است که تمام تابشی را که به آن راه می‌یابد کاملاً جذب می‌کند. در درون حفره، انرژی تابش جایی برای رفتن ندارد و مرتباً به‌وسیله دیواره‌ها جذب و بازتابیده می‌شود، یک روزنه کوچک که تابش گسیل‌شده از دیوارها را منعکس نمی‌کند و آن را بیرون می‌دهد و این مشخصه یک جسم سیاه است.



هنگامی که یک کوره فقط کمی گرم شود تشعشع به‌وجود می‌آید اما چون چشم را تحریک نمی‌کند ما نمی‌توانیم آن را ببینیم. هرچه جسم گرمتر و گرمتر می‌شود، فرکانس تابش به محدودهٔ نور مرئی نزدیکتر می‌شود و حفره مانند سیم‌پیچ حرارتی درون اجاق برقی سرخ می‌شود.



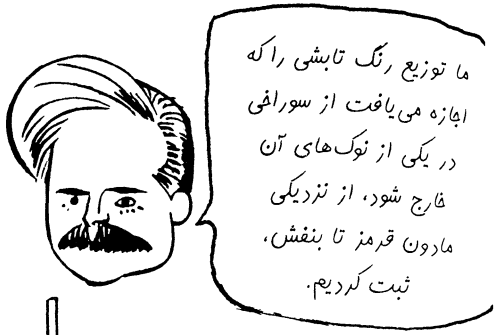
سفید، هنگامی که هرسه (قرمز، سبز و آبی) وجود دارند

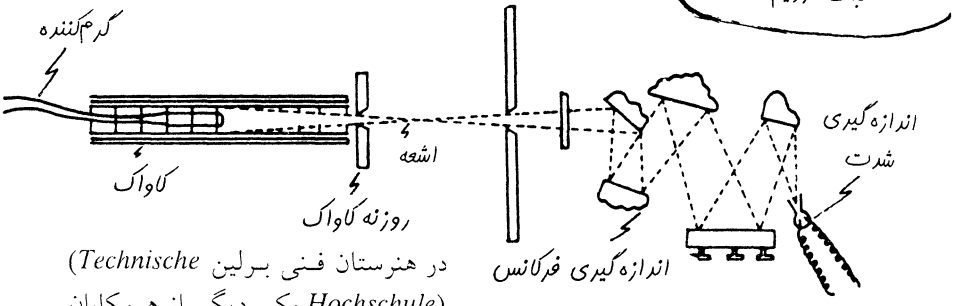
کوزه‌گران قدیمی به همین ترتیب دمای درون کوره‌هایشان را تنظیم می‌کردند. **جوزیا وِج‌وود** که یک تولیدکننده ظروف چینی بود، قبل از سال ۱۷۹۲ متوجه شد که همه اجسام در دمای معینی قرمز می‌شوند.

راهنمای کوزه‌گران

قرمز تیره	۵۵۰°C
آلبالویی	۷۵۰°C
نارنجی	۹۰۰°C
زرد	۱۰۰۰°C
سفید	۱۲۰۰°C

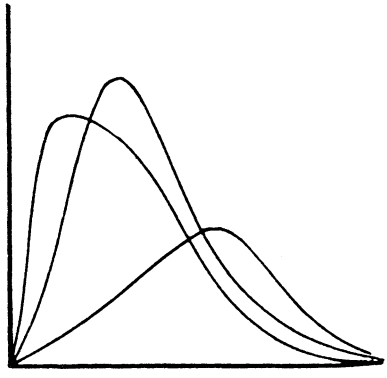
در سال ۱۸۹۶ یکی از دوستان پلانک، ویلهلم وین و همکارانش در دپارتمان فیزیک اداره استاندارد برلین (Reichsanstalt) استوانه گران‌قیمتی از چینی و پلاتین فراهم آوردند.





در هنرستان فنی برلین (*Technische Hochschule*) یکی دیگر از همکاران نزدیک پلانک، هنریش روبنز، کوره دیگری به‌کار برد.

تابش جسم سیاه



توزیع سرعت ماکسول

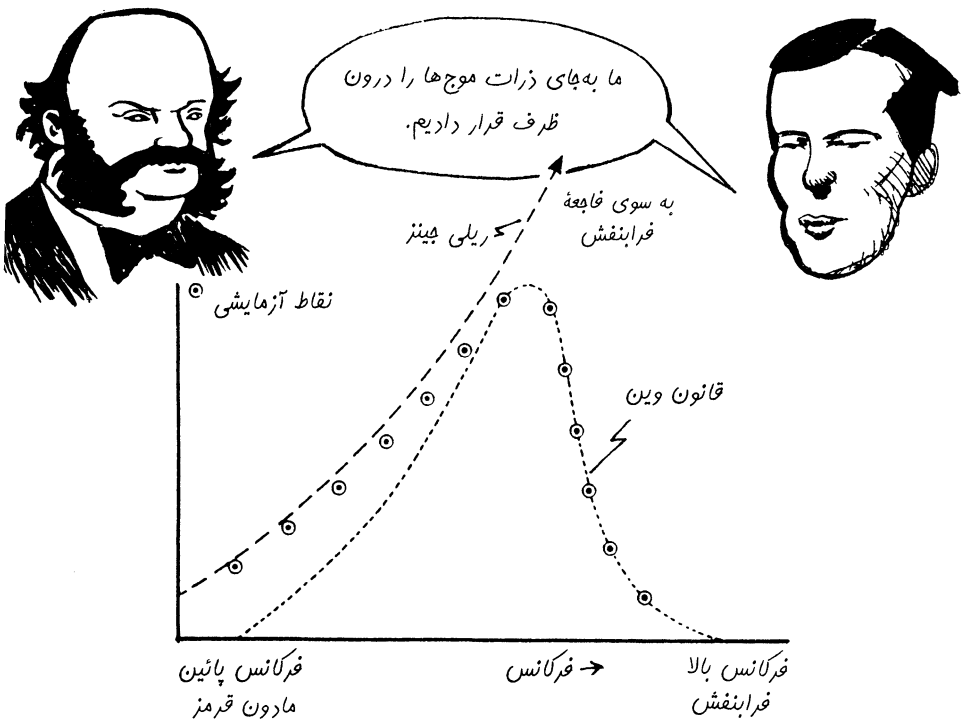
این منحنی‌های تابش، که می‌بینید بسیار به محاسبات ماکسول برای توزیع سرعت (انرژی) مولکول‌های یک گاز گرم‌شده در یک جعبه بسته شبیه‌اند. این منحنی‌ها یکی از مسائل اساسی فیزیکدانان نظری در سال‌های دهۀ ۱۸۹۰ بود.

نتایج متناقض

آیا می‌توان مسئله *تابش جسم سیاه* را مشابه گاز ایده‌آل ماکسول مورد مطالعه قرار داد؟ جسمی که در آن امواج الکترومغناطیس (بجای مولکول گازها) در تعادل با دیواره‌های ظرف بسته نوسان می‌کنند؟

وین برپایه استدلال‌های نظری شک‌برانگیز، فرمولی استخراج کرد که با آزمایش‌های انجام‌شده فقط در بخش بالای فرکانس تطابق خوبی داشت.

دو فیزیکدان کلاسیک انگلیسی **لرد ریلی** (۱۹۱۹ـ۱۸۴۲) و **سر جیمز جینز** (۱۹۴۶ـ۱۸۷۷) فرض‌هایی نظری، مشابه کاری که ماکسول در نظریه جنبشی گازها انجام داده بود، را مورد استفاده قرار دادند.



رابطه ریلی ـ جینز با **فرکانس‌های پایین** سازگار بود اما در نواحی فرکانس بالا آنها از نتایج به‌دست آمده جداً دچار شوک شدند. نظریه کلاسیک، همان‌گونه که در نمودار نشان داده شده است، برای **ناحیه فرابنفش شدت نامحدودی** پیش‌بینی می‌کرد که فاجعه فرابنفش نام‌گذاری شد.

این نتیجه تجربی دقیقاً چه معنایی دارد؟

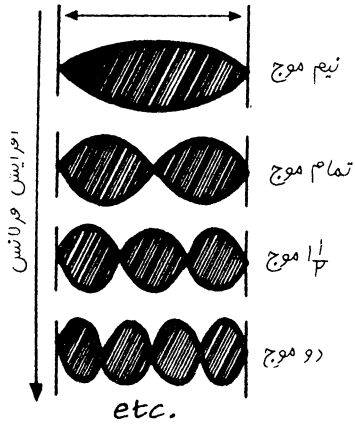
چه چیزی اشتباه بود؟

نتایج ریلی-جینز آشکارا نادرست بود، درغیر این صورت هرکس که به حفره نگاه می‌کرد (یا آقای وج وود که به درون کوره‌اش نگاه می‌کرد)...

اگر فیزیکدانان کلاسیک راه خود را می‌رفتند، سرخی خیال‌انگیز بقایای آتش به تشعشعی تبدیل می‌شد که حیات را تهدید می‌کرد: باید کاری انجام می‌گرفت.

فاجعه فرابنفش

همه با معقول‌بودن رهیافت ریلی و جینز موافق بودند، بنابراین بررسی اینکه آنها دقیقاً چه کردند و چرا جواب نگرفتند آموزنده است.

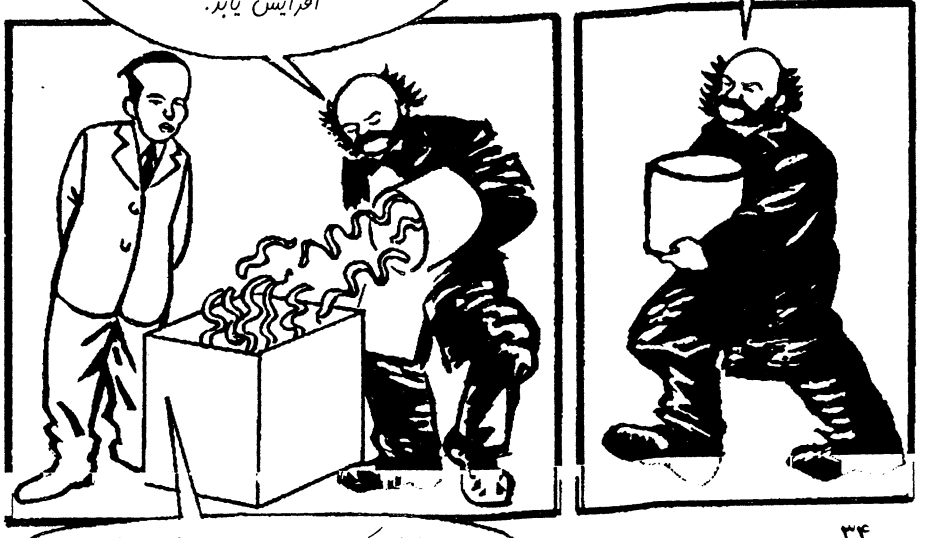


ما رهیافت فیزیک آماری را با استفاده از همپاری انرژی به **امواج** اعمال کردیم، همانگونه که ماکسول آنها را به ذرات گاز اعمال می‌کرد. به‌طور مثال ما فرض کردیم تمام انرژی تابشی به‌طور مساوی بین فرکانس‌های ممکن تقسیم می‌شود.

اما یک فرق بزرگ بین امواج و ذرات وجود دارد. در اینجا برای مودهای نوسانی‌ای که می‌توانند وجود داشته باشند محدودیتی وجود ندارد.

زیرا بسیار ساده است که امواج بیشتر و بیشتری با فرکانس‌های بالا و بالاتری در ظرف جا دهیم. (با این روش که طول موج کوچک و کوچکتر شود.)

در نتیجه مقدار تابش پیش‌بینی‌شده توسط این نظریه‌ها نامحدود است و باید با افزایش دما شدیدتر شود و فرکانس افزایش یابد.



تعجبی ندارد که این امر به‌عنوان **فاجعه فرابنفش** شناخته می‌شود.

ورود ماکس پلانک

داستان پلانک از دپارتمان فیزیک مؤسسه کایزر ویلهلم در برلین آغاز شد، درست قبل از شروع این قرن.

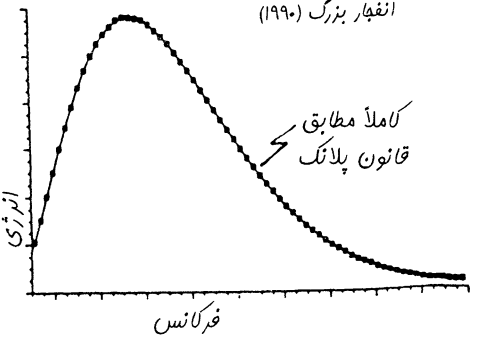
پلانک یک عضو بسیار سنتی آکادمی پروس بود، غرق در رهیافت‌های کلاسیک فیزیک و به‌شدت مبلغ و مدافع ترمودینامیک. درواقع او از زمان ارائه تز دکترای خود در سال ۱۸۷۹ (سالی که اینشتین متولد شد) تا ۲۰ سال بعد از آن یعنی زمان استادی‌اش در برلین، منحصراً روی مسایل مربوط به قوانین ترمودینامیک کارکرده بود. پلانک معتقد بودکه قانون دوم ترمودینامیک مربوط به آنتروپی عمیق‌تر خواهد شد و چیزهایی بیشتر از آنچه عموماً پذیرفته شده است را بیان خواهد داشت.

پلانک کاملاً شیفته مفاهیم مطلق و عمومی مربوط به جسم سیاه بود. دلایل موجهی وجود داشت که نشان می‌داد در حالت تعادل منحنی شدت تابش برحسب فرکانس نباید به اندازه و شکل یا جنس دیواره‌های حفره بستگی داشته باشد. فرمول باید تنها شامل دما، فرکانس تابش و یک ثابت جهانی و یا ثابت‌های بیشتری باشد که برای همهٔ رنگ‌ها و حفره‌ها یکی خواهند بود.

پیداکردن این فرمول به معنای رسیدن به رابطه‌ای با جاذبه نظری بسیار عمیق خواهد بود.

تابش زمینه کیهانی بازمانده از انفجار بزرگ (۱۹۹۰)

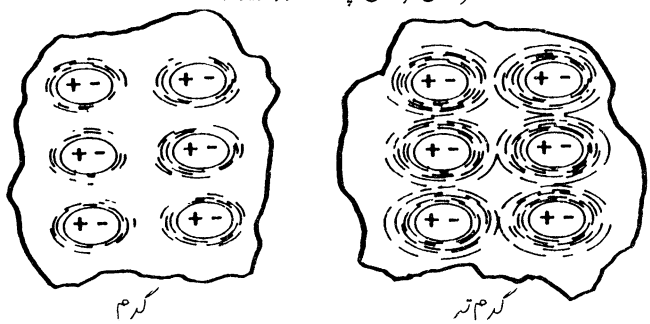
تاریخ نشان داد که نظر پلانک حتی از آنچه خود او می‌پنداشت عمیق‌تر و ژرف‌تر است. در سال ۱۹۹۰ دانشمندان از ماهواره کوبه (COBE) برای اندازه‌گیری تابش زمینه کیهانی (به‌جامانده از انفجار بزرگ) استفاده کردند و آن را با قانون جسم سیاه سازگار یافتند.



مدل پیش‌اتمی ماده

پلانک می‌دانست که اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط دوستانش هنریش روبنز و فردیناند کورلبام کاملاً قابل اعتمادند.

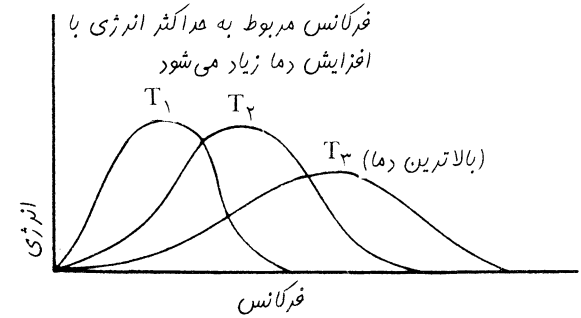
نوسان‌گرهای پلانک در دیواره حفره



پلانک کارش را با معرفی ایده گروه نوسانگرهای الکتریکی* در دیواره حفره که در آشوب گرمایی به جلو وعقب نوسان می‌کنند شروع کرد.

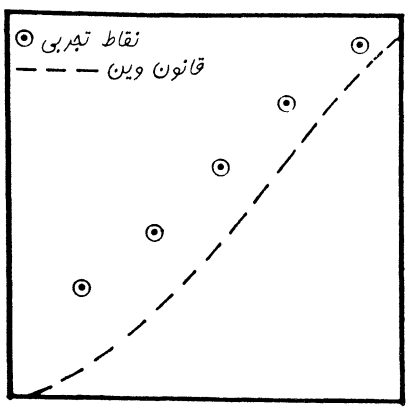
(* **توجه کنید! چیزی درباره اتم شناخته نشده بود.**)

پلانک فرض کرد تمام فرکانس‌های ممکن وجود خواهند داشت. او همچنین پذیرفت که **فرکانس متوسط** در دمای بالاتر هنگامی افزایش می‌یابد که حرارت‌دادن دیواره باعث می‌شود نوسانگرها تا وقتی به حالت تعادل برسند تند و تندتر نوسان کنند.



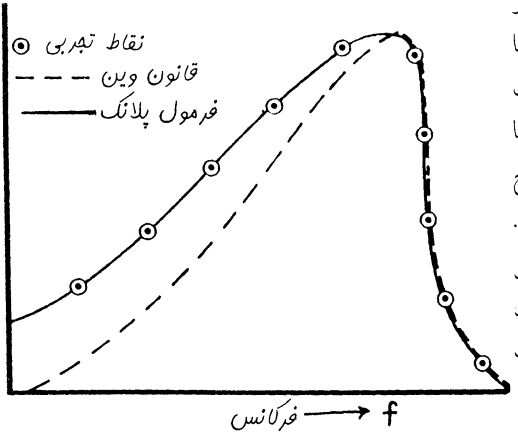
نظریهٔ الکترومغناطیس می‌توانست همه‌چیز را دربارهٔ گسیل، جذب و انتشار امواج نشان دهد اما چیزی دربارهٔ توزیع انرژی درحالت تعادل بیان نمی‌کرد. این مسئله به ترمودینامیک مربوط می‌شد.
پلانک فرض‌های خاصی مطرح کرد و متوسط انرژی نوسانگرها را به آنتروپی ربط داد و از این راه به فرمولی برای شدت تابش دست یافت که امیدوار بود با نتایج تجربی سازگار باشد.

پلانک سعی کرد توصیف خود از آنتروپی تابش را با تعمیم آن اصلاح کند. سرانجام او فرمولی برای شدت تابش در تمام گستره فرکانسی استخراج کرد.



ثابت‌های C_1 و C_2 اعدادی بودند که توسط پلانک برای تطبیق معادلات با آزمایش‌ها انتخاب شدند.

یکی از شرکت‌کنندگان در این سمینار تاریخی، هنریش روبنز بود. او به‌سرعت به خانه رفت تا اندازه‌گیری‌هایش را با فرمول پلانک مقایسه کند. تمام شب را کار کرد تا اینکه به سازگاری فرمول پی برد و صبح روز بعد این مطلب را به پلانک خبر داد. پلانک فرمول درستی برای قانون تابش یافته بود. بسیار خوب، اما آیا او اکنون می‌توانست از این فرمول برای کشف مفاهیم بنیادین فیزیک استفاده کند؟



به‌نظر می‌رسید که استفاده تعبیر آماری بولتزمن از قانون دوم ترمودینامیک که براساس احتمالات بود، تنها چاره پلانک است. اما او فرض اساسی رهیافت بولتزمن را رد می‌کرد که نقص لحظه‌ای قانون دوم را در زمان افت‌وخیزها مجاز می‌پنداشت.

آن روزنهٔ امید این بود:

$$S = k \text{ Log } W$$

(تعبیر بولتزمن از قانون دوم ترمودینامیک)

در ۴۰ مقاله یا بیشتر از آن‌که پلانک تا قبل از سال ۱۹۰۰ نوشته بود حتی یک‌بار هم از بیان آماری بولتزمن از قانون دوم استفاده و یا حتی به آن اشاره نکرده بود!

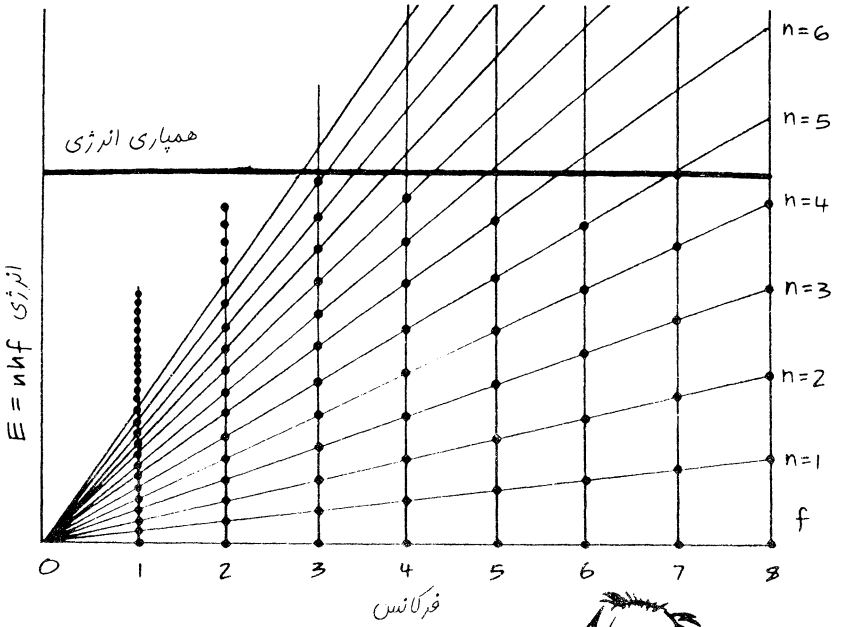
قطعه‌قطعه کردن انرژی

به این ترتیب پلانک، هر سه ایده بولتزمن را دربارهٔ آنتروپی به‌کار بست:
۱) رابطهٔ آماری او برای محاسبهٔ آنتروپی.
۲) شرط بولتزمن مبنی بر اینکه آنتروپی در حالت تعادل (حداکثر بی‌نظمی) باید بیشینه باشد.
۳) شیوه شمارش بولتزمن را برای معین‌کردن احتمال W در معادله آنتروپی.
پلانک برای محاسبه احتمال آرایش‌های متفاوت ممکن، رهیافت بولتزمن را مبنی بر تقسیم انرژی نوسانگرها به بسته‌های کوچک اختیاری اما متناهی دنبال کرد بنابراین انرژی کل به‌صورت $E=Ne$ نوشته می‌شود که N یک عدد صحیح و e یک مقدار کوچک انرژی است. براساس یک روند ریاضی، نهایتاً هنگامی که تعداد بسته‌ها نامحدود می‌شود، e بی‌نهایت کوچک خواهد شد.

یافتم! یک روش ریاضی که با فرض گسسته‌بودن انرژی، سرانجام شالوده نظری را برای قانون تابش او فراهم می‌آورد پلانک را شگفت‌زده کرده بود.

اگرچه او هیچ دلیلی برای مطرح‌کردن این نظر نداشت اما به این دلیل که چاره دیگری نداشت موقتاً آن را قبول کرد. به این ترتیب او مجبور شد فرض کند که کمیت $\epsilon=hf$ یک مقدار محدود و h غیرصفر است.

اگر این فرض درست باشد متضمن این است که یک نوسانگر نمی‌تواند انرژی را به‌صورت پیوسته جذب یا گسیل کند. پس باید انرژی را در واحدهای کوچک تجزیه‌ناپذیری که پلانک آنها را «کوانتای انرژی» می‌نامید، دریافت کند یا از دست بدهد.



اکنون می‌توانید دریابید که چرا نظریه‌های کلاسیک در ناحیه بالای فرکانس منفی تابش جسم سیاه ناکام هستند. در این ناحیه کوانتاهای انرژی به‌قدری بزرگ هستند که **تنها تعداد کمی از مودهای ارتعاشی** برانگیخته می‌شوند.

با کاهش مودهای تحریک‌شده در فرکانس‌های بالاتر، نوسانگر فرو می‌نشیند و تابش در انتهای بالای فرکانس به سمت صفر افت می‌کند و به این ترتیب فاجعه فرابنفش روی نمی‌دهد.

به این ترتیب رابطه کوانتومی پلانک از همپاری انرژی ممانعت می‌کند و بنابرآن همه مودها، انرژی مساوی نخواهند داشت، به همین دلیل است که ماا از یک فنجان قهوه دچار آفتاب‌سوختگی نمی‌شویم. (تصورش را بکنید!)

رهیافت کلاسیکی ریلی-جینز در فرکانس‌های پائین، یعنی جایی که **همه** مودهای ارتعاشی موجود می‌توانند تحریک شوند خوب عمل می‌کرد. در فرکانس‌های بالا گرچه مودهای ارتعاشی فراوانی **ممکن** هستند (به‌یاد آورید که جادادن طول موج‌های **کوتاه** در جعبه آسانتر بود) اما به دلیل اینکه انرژی فراوانی برای تولید یک کوانتوم در فرکانس بالا لازم است (زیرا **e=hf**) تعداد زیادی از آنها تحریک نمی‌شوند.

در پیاده‌روی سحرگاه روز ۱۴ دسامبر ۱۹۰۰ پلانک به پسرش گفته بود که احتمالا کار او به اندازهٔ کار نیوتن مهم بوده است. چند روز بعد او نتایج کارش را به جامعه فیزیکدانان برلین ارائه داد و تولد نظریه کوانتوم را اعلام کرد.
کمتر از دو ماه طول کشید تا او توضیحی برای فرمول تابش جسم سیاه خود بیابد. شگفت اینکه تصادفاً یک شیوه ناکامل ریاضی این کشف را سبب شده بود. یک **شروع شرم‌آور برای یکی از بزرگترین انقلاب‌های تاریخ فیزیک!**

از این شروع بود که درکی از این مطلب حاصل شد که چرا قوانین آماری باید برای اتم استفاده شود؛ چرا اتم‌ها همیشه انرژی گسیل نمی‌کنند؛ و چرا الکترون‌های اتمی به درون هسته سقوط نمی‌کند.

در اواخر سال ۱۹۰۱ ثابت h که امروزه ثابت پلانک نامیده می‌شود برای اولین بار منتشر شد. این عدد کوچک بود ــ

h=۰.۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۶ ۶۲۶

ــ **کوچک بود، اما صفر نبود!** زیرا اگر این‌چنین بود، هرگز نمی‌توانستیم درمقابل آتش بنشینیم. درحقیقت همهٔ کیهان طور دیگری بود. در زندگی *قدردان* چیزهای کوچک باشید! ــ

با کمال تعجب فرمول جسم سیاه، علیرغم مهم و انقلابی‌بودن توجه زیادی در سال‌های اولیه قرن بیستم برنیانگیخت. شگفت اینکه خود پلانک نیز به صحت آن اطمینان نداشت.

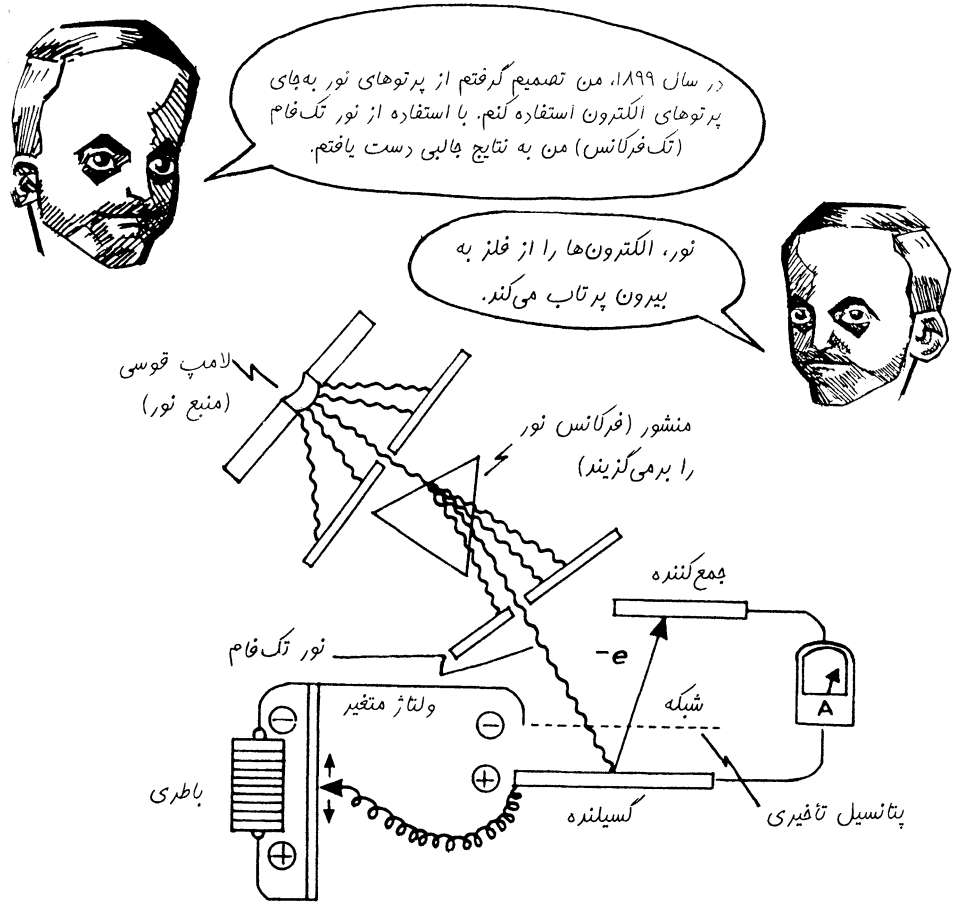
آن‌قدر به کلیت قانون آنتروپی بولتزمن شک داشتم که سالها سعی کردم نتایج کار خود را به شیوه‌ای توضیح دهم که محافظه‌کارانه‌تر باشد.

با وجود همهٔ این‌ها، نظریه کوانتوم متولد شده بود.

اکنون، این دومین تجربه‌ای بود که با فیزیک کلاسیک توجیه نمی‌شد. این موضوع گرچه ساده‌تر است ولی توصیفی عمیق‌تر می‌طلبد.

اثر فوتوالکتریک

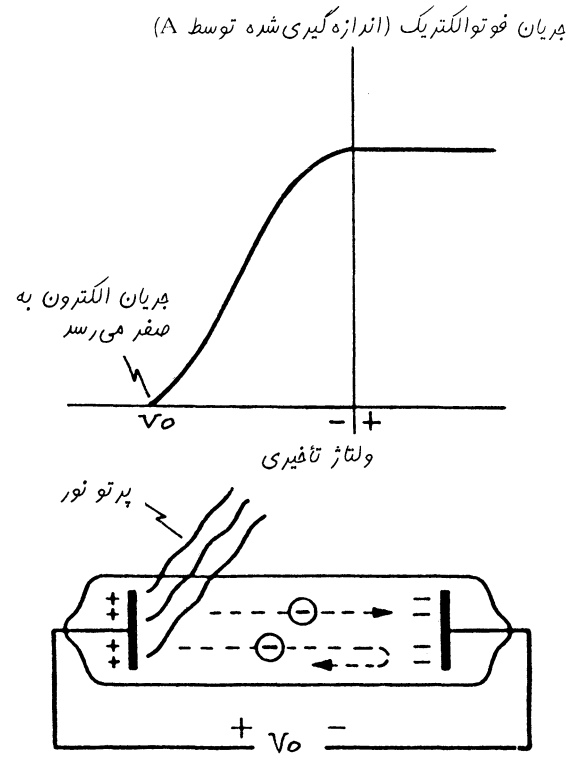
درحالی که ماکس پلانک درگیر مسئله جسم سیاه بود، **فلیپ لنارد** (۱۸۴۷ـ۱۸۶۲)، یک فیزیکدان دیگر آلمانی، پرتوهای اشعهٔ کاتودیک را (که هنوز زود بود به‌عنوان الکترون شناخته شوند) بر روی زرورق‌های نازک فلزی می‌تاباند.



اگرچه این اثر ده‌سال قبل نیز مورد توجه هنریش هرتز قرار گرفته بود، اما لنارد اکنون به‌وسیلهٔ یک مدار الکتریکی ساده قادر به اندازه‌گیری خواص این **فوتوالکترون‌ها** بود. الکترون‌های **رانده‌شده** توسط درخشاندن یک صفحه فلزی تولید می‌شوند که گسیلنده نامیده می‌شود، پس از گسیل به صفحه‌ای دیگر به‌نام **جمع‌کننده** می‌رسند. محل جریان فوتوالکتریکی به‌وسیله یک اندازه‌گیر جریان (آمپرمتر) که با (A) نشان داده شده‌است اندازه‌گیری می‌شود. **ولتاژ** یا پتانسیل الکتریکی بین جمع‌کننده و گسیلنده که می‌تواند تغییر کند بر اندازه جریان تأثیر فراوان دارد.

استفاده از ولتاژ **تأخیری** که باعث منفی‌شدن الکترود جمع‌کننده نسبت به الکترود گسیلنده می‌شود، سبب کاهش سریع جریان می‌گردد. (الکترون‌ها بار منفی دارند و به‌وسیله ولتاژ منفی دفع می‌شوند). مقدار معینی از ولتاژ تأخیری که روی نمودار V نشان داده شده است باعث از بین‌رفتن کامل جریان می‌گردد.

بخش الکتریکی این آزمایش را می‌توان به‌سادگی به شکل **ذره‌ای** تعبیر کرد.



الکترون‌های رانده‌شده صفحه نشانه را با انرژی پتانسیل معینی ترک می‌کنند و پیوسته مقداری از آن را در حین عبور از ولتاژ تأخیری بین صفحه گسیلنده و جمع‌کننده از دست می‌دهند.

الکترون‌هایی که جمع می‌شوند و در جریان اندازه‌گیری‌شده سهیم هستند حداقل (در لحظه ساطع‌شدن) باید دارای انرژی بزرگتر از qV_0 باشند (q بار الکترون است) این یک رابطه شناخته‌شده برای انرژی الکترونِ تحت تأثیر ولتاژ است.

یک تغییر کلاسیک

تعبیر ساده این ماجرا به اینجا می‌انجامد که الکترون‌های گسیل‌شده باید انرژی جنبشی خود را از **پرتوهای نوری** که بر سطح فلز می‌تابد کسب کنند.
فرض دیدگاه کلاسیک این است که امواج نوری که بر سطح فلز می‌تابد مانند امواج دریا و الکترون‌ها نیز همانند مردم کنار ساحل هستند. واضح است هرچه شدت تابش بیشتر باشد انرژی بیشتری به الکترون‌ها داده می‌شود.

آزمایشهای بعدی یک اثر غیرقابل توضیح دیگر را نشان داد؛ یک فرکانس آستانه وجود داشت که از فرکانس‌های زیر آن بدون توجه به شدت پرتو نور هیچ **فوتوالکترونی** گسیل نمی‌شود. این واقعیتی عجیب‌بود. یک‌مشکل جدی دیگر برای سنتی‌ها!

ورود آلبرت اینشتین

در این زمان او یک استاد سرشناس و مشهور دانشگاه که به حل مسائل می‌پرداخت نبود، بلکه کارمند جوان اداره ثبت اختراعات سوئیس بود.

در سال ۱۹۰۵ در سن ۲۶ سالگی، اینشتین سه مقاله در یک جلد از *سالنامه فیزیک* (Annalen der Physik) منتشر کرد.

اینشتین از معمای بدیع آزمایش فوتوالکتریک مطلع شده بود و از کار پلانک در مورد قانون تابش نیز آگاه بود، اما رهیافت او کاملاً شخصی بود؛ رهیافتی مبتنی بر نگرش آماری ویژهٔ خودِ او به فیزیک و توصیف بولتزمن از آنتروپی مجموعه ذرات.

یک آپارتمان کوچک در شمارهٔ ۴۹ خیابان کرامرگاسه در برلین

اینشتین با همسرش میلوا (که درس مهندسی خوانده بود) و پسر کوچکش هانس آلبرت...

فرکانس
ثابت (β)
$E = \alpha f^3 \exp(-\beta F/T)$
ثابت (آلفا)
دما
خوب، حالا می‌توانی فرمول تابش ویلهلم وین، همکار پلانک در برلین را بیاد آوری که همه فکر می‌کردند برای بخش بالای فرکانس منحنی جسم سیاه هم معتبر است؟
بله به‌یاد می‌آورم. درواقع آیا فرمول تابش پلانک در فرکانس‌های بالا به فرمول وین تقلیل نمی‌یابد؟
درست است میلوا.
ولی من نمی‌خواهم از فرمول نظری پلانک استفاده کنم.
من ترجیح می‌دهم کارم را براساس قانون تجربی وین قرار دهم که تجربیات فرکانس بالا را به‌خوبی ارضا می‌کند. من روش پدیدارشناسانه را به‌جای رهیافت نظری صرف به‌کار می‌برم.

ذراتی که فقط قسمتی از حجم را گرفته‌اند
امواجی که فقط قسمتی از حجم را گرفته‌اند
من روش افت و خیز، را به کار برده‌ام که اخیراً آن را برای محاسبه تغییرات در آنتروپی ابداع کرده‌ام. این تغییرات وقتی رخ می‌دهد که یک سیستم به‌طور ناگهانی به بخشی از کل حجمش فشرده می‌شود.
با استفاده از فرمول وین محاسبه **کاهش آنتروپی** تابش تک‌فام (تک‌فرکانس) که به بخشی از حجمش متراکم شده بسیار ساده است.
- توجه کن عزیزم این بسیار شبیه **کاهش آنتروپی** به هنگام انقباض حجم ذرات یک گاز ایده‌آل است.

اما میلوای عزیز، من هیچ فرضی درباره ساختمان ذرات یا قوانین حرکت نکرده‌ام. تنها، فرمول آنتروپی S=kLogW، را به شکل بولتزمنی **قانون دوم** به کار برده‌ام. نتیجه برای تابش بسیار شبیه گاز فشرده است. بنابراین من می‌توانم این دو نمود را یکی تلقی کنم و جواب ساده‌ای ارائه دهم.
E=n K β f
بنابراین فرضیه من این خواهد بود... در محدوده اعتبار **قانون وین** (فرکانس‌های بالا) تابش به صورت ترمودینامیکی عمل می‌کند. مثل اینکه از کوانتاهای انرژی متقابلاً مستقل با اندازهٔ kβf تشکیل شده باشد. به بیان دیگر مانند ذرات نور.

یک چیز دیگر آلبرت، من متوجه شدم که تو ثابت فرمول وین را در پاسخ خود استفاده می‌کنی. اما آیا پلانک نشان نداده است که β را می‌توان به صورت نسبت ثابت خودش (h) به ثابت بولتزمن (k) نوشت؟
بله، اما من نمی‌خواهم هیچ‌یک از نتایج قانون تابش پلانک را در مقاله خود وارد کنم زیرا من به این نتایج اطمینان ندارم. من به کوانتیزه‌بودن تمام تابش نوری نظر دارم.
پلانک تنها نوسان‌گرهای درون دیواره حفره را مورد توجه قرار داده است.
اگر ثابت β را حذف کنی چه اتفاقی می‌افتد؟
خوب β=h/k همان‌طور هم E=nhf

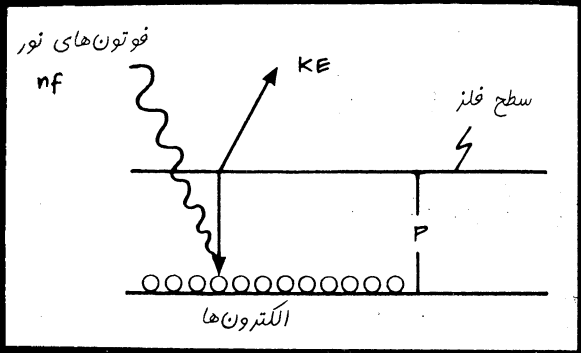
اگر این کار را انجام بدهم، معادله‌ای برای انرژی تابشی به‌دست خواهم آورد که معادل حاصلضرب تعداد ذرات در کمیت hf است که hf به‌وضوح به کوانتوم تابش اشاره دارد.
این به آن معنی خواهد بود که همه نورها و تابش‌های الکترومغناطیسی به‌صورت بسته‌های انرژی معادل hf حرکت می‌کنند. این قانون بسیار کلی‌تر از آن است که پلانک تصور می‌کرد!

آیا فکر می‌کنی سالنامه فیزیک (ANNALEN DER PHYSIK) این مقاله را چاپ کند؟ این هیچ‌چیز را به‌طور قطعی اثبات نمی‌کند اما فکر می‌کنم کمک خوبی برای ارائهٔ کارهای بعدی باشد.
چرا از لغت یافتاری (HEURISTCHEN) که معنای آن راه‌حل غیرقطعی اما دلالت‌کننده به‌سوی دستاوردهای بعدی است، در عنوان مقالات استفاده نمی‌کنی؟
از این طریق می‌توانی مقاله‌ات را منتشر کنی و این‌طور وانمود کنی که آن را چندان جدی تلقی نمی‌کنی بلکه برای تحقیقات بیشتر آن را پیشنهاد می‌کنی.
فکر خوبی است عزیزم. وقتی در کارها به من کمک می‌کنی بسیار خوشحال می‌شوم... بگذار ببینم... این برای عنوان مقاله چطور است.
دربارهٔ یک نظریه یافتاری راجع به ذرات نور.
عنوان خوبی به‌نظر می‌رسد.

توضیح اینشتین دربارهٔ اثر فوتوالکتریک

مقالهٔ ۱۹۰۵ اینشتین نشان داد به محض اینکه تابش نورانی به‌عنوان ذرات نور درک شود ویژگی‌های معماگونه اثر فوتوالکتریک توضیح داده می‌شوند. اگر فوتون‌ها بتوانند انرژی‌شان را به الکترون‌های فلزِ هدف منتقل کنند یک توصیف کامل و ساده از پدیده فوتوالکتریک ممکن می‌شود. بگذارید ببینیم چگونه...

ساده‌ترین راه برای تصور این مطلب این است که فرض کنیم کوانتاهای نور همه انرژی‌شان ــ hf ــ را به الکترون‌ها منتقل می‌کنند و این الکترون‌ها بخشی از آن را هنگام رسیدن به سطح از دست می‌دهند.



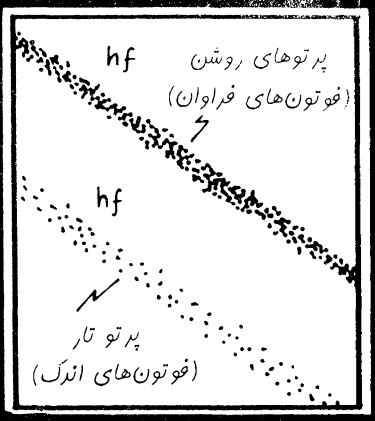
هر الکترون قبل از گسیل باید کاری به‌اندازهٔ p انجام دهد، تا به فضای آزاد برسد. مقدار این کار وابسته به ویژگی‌های فلز است. الکترون‌هایی که فلز را با سرعت بالاتر ترک می‌کنند نهایی هستند که نزدیک سطح فلز هستند و کار کمتری برای آزادشدن انجام می‌دهند. انرژی جنبشی الکترون از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

انرژی جنبشی = hf (انرژی فوتون‌های ورودی) منهای p (کاری که برای فرار لازم است).

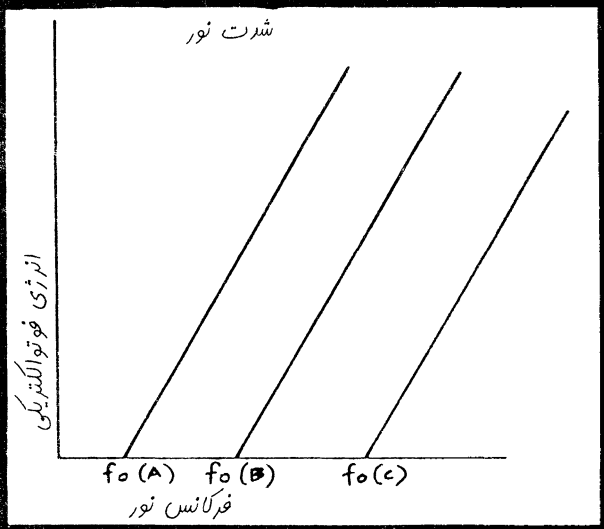
اگر صفحه برای خنثی‌کردن انرژی جنبشی و کاهش جریان الکترون‌ها به صفر (برای متوقف‌کردن پرانرژی‌ترین الکترون) تا ولتاژ V_0 شارژ شده باشد، در این صورت باید:

$qV_0 = hf - p$

باشد که q بار الکترون است.



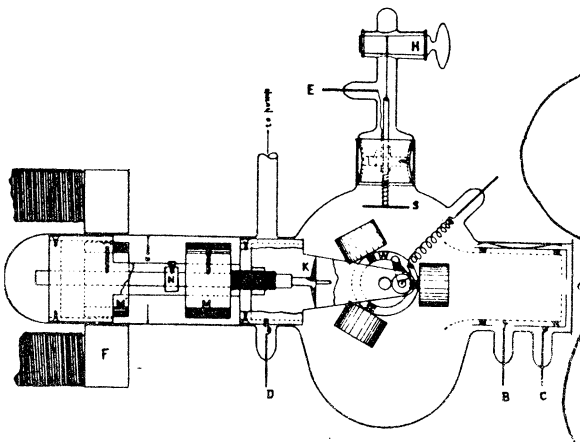
اینشتین رابطه بسیار ساده‌ای برای فوتوالکترون‌ها استخراج کرد که می‌شود در آزمایشگاه آن را آزمود. به‌علاوه از آنجا که هر برهم‌کنش به همان انتقال انرژی فوتوالکتریکی منجر می‌گردد، این مطلب که انرژی الکترون‌ها نسبت به‌شدت نور واکنش نشان نمی‌دهد به‌راحتی توضیح داده خواهد شد. شدت نور بر تعداد فوتون‌ها و درنتیجه، بر مقدار جریان الکترون تأثیر می‌گذارد اما بر ولتاژ قطع V_0 که تابع فرکانس است اثری ندارد.



واضح است که نتیجه منطقی این رابطه و ساده‌ترین استدلال این است که بیشینه ولتاژ تأخیری V_0 تابعی خطی از شدت نور برخوردکننده است. بنابراین مطابق رسمی کهن، اگر خطی‌بودن این رابطه به تجربه معلوم می‌گردید، می‌شد گفت مفهوم فوتون اینشتین آزمونی حیاتی را از سرگذرانده است. آزمایشگر باید V_0 (ولتاژ قطع) را برای فرکانس‌های نوری متفاوت اندازه‌گیری کند و نموداری برای بررسی خطی‌بودن آن رسم کند.

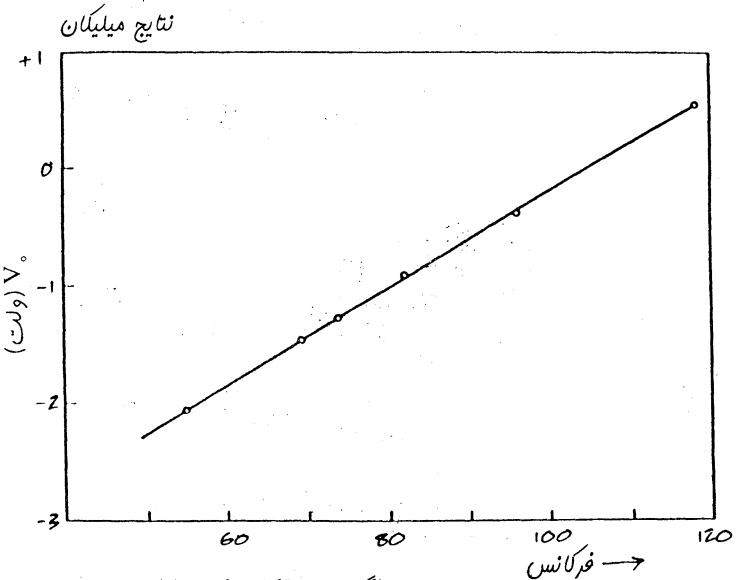
میلیکان: یک فیزیکدان سنتی سرسخت

در طول سالهای ۱۷ـ۱۹۱۲ رابرت میلیکان (۱۹۵۳ـ۱۸۶۸) که در آزمایشگاه ریورسون در دانشگاه شیکاگو کار می‌کرد، رابطه اینشتین را در معرض آزمون خطی گذاشت. او از فلزات فراوانی از جمله سدیم که به‌شدت واکنش‌پذیر است به‌عنوان هدف استفاده کرد و هریک را با نورهایی با فرکانس‌های مختلف درخشانید.
روش او بی‌نقص بود. او حتی سطح فلزات را در خلأ می‌تراشید تا از به‌وجودآمدن لایه‌های اکسید که ممکن بود بر نتایج اثر گذارد جلوگیری کند. او **هربار نتایج خطی به‌دست می‌آورد...** آن‌وقت بود که بسیار ناامید شد.



تغییرات V_0 در برابر فرکانس f ـ آن‌گونه که اینشتین لازم دانسته بود ـ مرتبا رابطه‌ای خطی را نشان می‌دهد.

۱۰ سال از عمرم را صرف این کردم که توصیف اینشتین از پدیده فوتوالکتریک را **رد کنم**. این توصیف به گمان من جمله‌ای به نظریه کلاسیک موجی نور بود.



اگرچه تنها کاری که میلیکان انجام داد این بود که توضیح اینشتین را با به‌دست‌آوردن نتایج دقیق و کاملاً خطی تحکیم کرد اما عملاً همین باعث شد که برنده جایزه نوبل شود.

برخلاف انتظارم ناچار شدم صحت بی‌ابهام تجربی نظر اینشتین را علی‌رغم مستدل‌نبودن آن تأیید کنم.

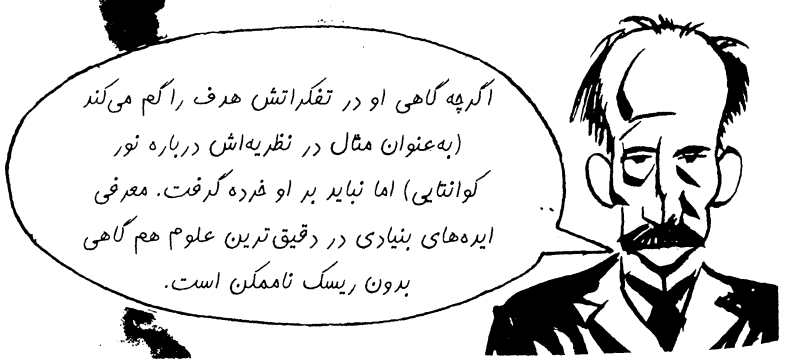
این نظریه تنها به این دلیل ارائه شد که توضیحی فوری برای این واقعیت به‌دست می‌دهد که انرژی الکترون‌های گسیل‌شده مستقل از شدت نور ولی وابسته به فرکانس است. من دریافتم حتی خود اینشتین هم دیگر آن را قبول ندارد.

این احساس نوعی فیزیکدانان دهه دوم قرن بیستم بود: پیش‌بینی کوانتومی بودن نور مسلماً دیگر برای پلانک و اینشتین تاج افتخاری نبود.

درواقع در این دوره، کار ما کاملاً نادیده گرفته شد.

در اوایل سالهای دههٔ ۱۹۰۰ کشفیات جنجالی دیگری در زمینه رادیواکتیویته توسط بکرل و کوری‌ها در فرانسه انجام گرفته بود. همچنین شعه معجزه‌آسای X به‌وسیلهٔ رونتگن در آلمان کشف شده بود. این مسایل توجه فیزیکدانان را ز مسئلهٔ تابش نور به‌سوی خود معطوف کردند.

در این فاصله پلانک نه‌تنها کار اینشتین که کار انقلابی خود در زمینهٔ کوانتای نور را هم کنار گذاشت. اما با این حال او مجذوب کار اینشتین در زمینهٔ نسبیت شده بود و نامه‌ای به آکادمی پروس در حمایت از عضویت اینشتین نوشت. اما او احساس می‌کرد که برای قضیه فوتون‌ها عذرخواهی لازم است.



خطوط روشن طیف نور

اکنون آماده‌ایم که سومین تجربه‌ای که توسط فیزیک کلاسیک توجیه نمی‌شد، یعنی خطوط روشن طیف نور، را معرفی کنیم. فهرست را به‌یاد آورید...

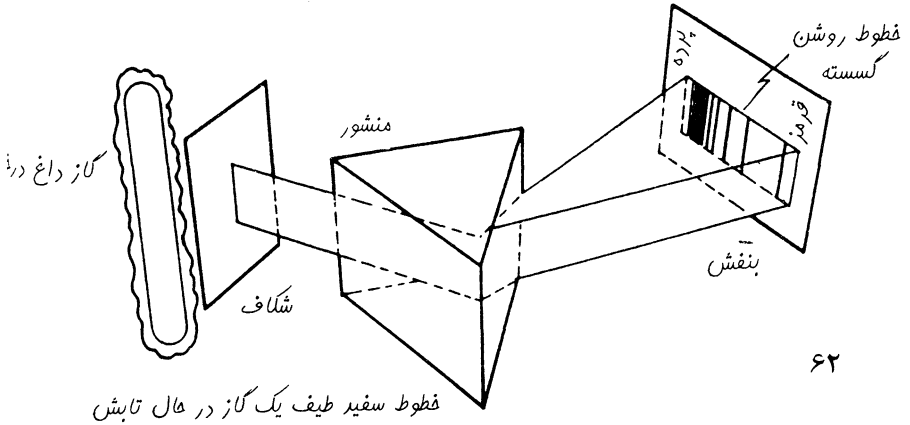
تابش جسم سیاه (توسط پلانک توجیه شد)

اثر فوتوالکتریک (توسط اینشتین توجیه شد)

خطوط روشن طیف نور (که توسط بور توجیه می‌شود)

در طول ۱۵۰ سال مشاهدات دقیقی راجع به گسیل نور گازها در آزمایشگاههای اروپایی گرد آمده بود. بسیاری براین باور بودند که این‌ها به‌عنوان رازهای اتم ناگشوده باقی خواهند ماند. اما چگونه می‌شود این اطلاعات انبوه انباشته‌شده را به منظور پدیدآوردن نظم از دل آشوب، رمزگشایی کرد؟ این یک چالش واقعی بود. اولین گزارش‌ها در مورد این مسئله به سال ۱۷۲۵ برمی‌گشت، یعنی هنگامی که توماس ملوین فیزیکدان اسکاتلندی ظرف گازهای مختلف را روی شعله آتش گرفت و ترکیب نورهای مختلف ساطع شده از آن‌ها را بررسی کرد.

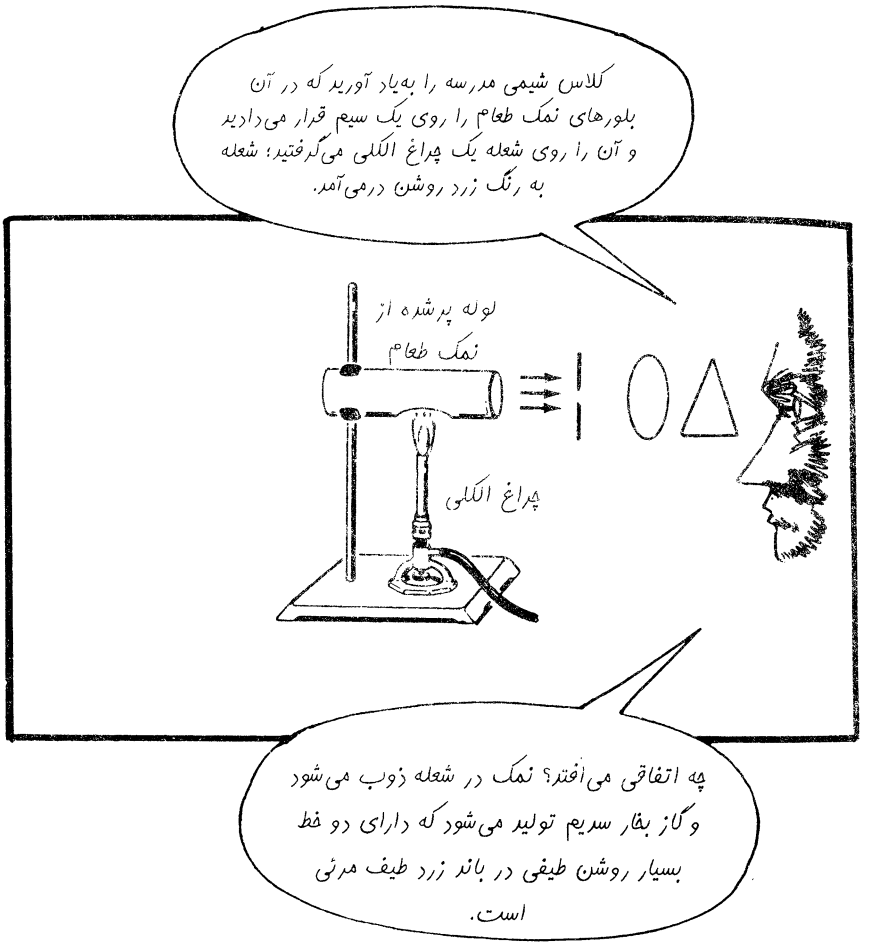
ملویل کشف قابل توجهی کرده بود. او متوجه شد که طیف نوری یک گاز داغ هنگامی که از یک منشور عبور می‌کند کاملاً از طیف رنگین‌کمان مانندِ شناخته‌شدهٔ یک جامد رخشان، متفاوت است.



خطوط سفید طیف یک گاز در حال تابش

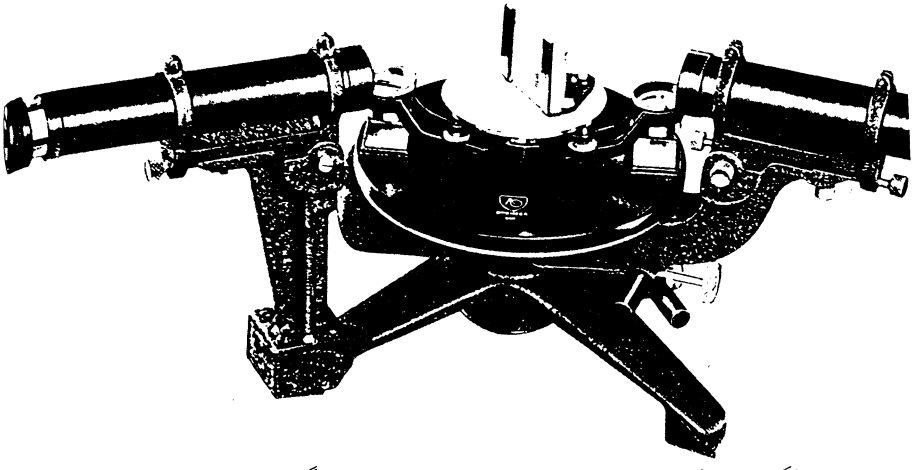
طیف گسیل شده

هنگامی که از یک شکاف باریک طیف نوری که از گاز داغ می‌آید بررسی شود، درمی‌یابیم که این طیف از **خطوط روشن ناپیوسته‌ای** تشکیل شده است که هریک رنگ قسمتی از طیف را دارند که در آن قرار گرفته‌اند. گازهای مختلف الگوهای متفاوتی دارند.

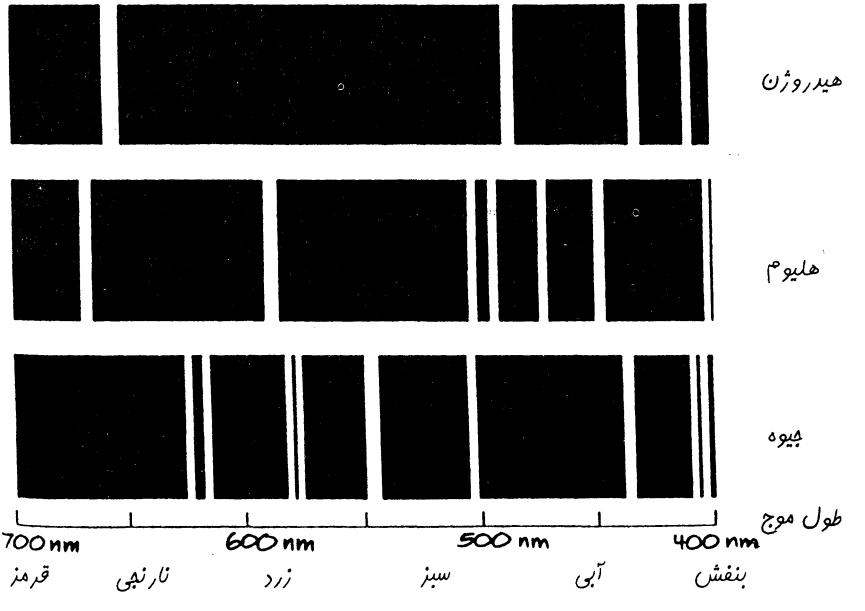


ویژگی تطبیقی چشم ما (و سایر حیوانات) که رنگ‌های مختلف را ترکیب می‌کند مانع از دیدن این خطوط می‌شود. بنابراین ما فقط ترکیب آنها را می‌بینیم (سرخ برای نئون، آبی کم‌رنگ برای نیتروژن..) برای مورد سدیم، چشم ما دو خط زرد را ترکیب می‌کند و بنابراین شعله به رنگ گل‌برگ‌های نرگس به‌نظر می‌رسد.

گاز **جیوه** (که از بخارشدن جیوه مایع به‌دست می‌آید) و گاز **نیتروژن** هنگامی که با ابزار حساسی به‌نام **طیف‌سنج** عکس‌برداری شوند الگوهایی از خطوط روشن مشخص و قابل تشخیص به‌دست می‌دهند.



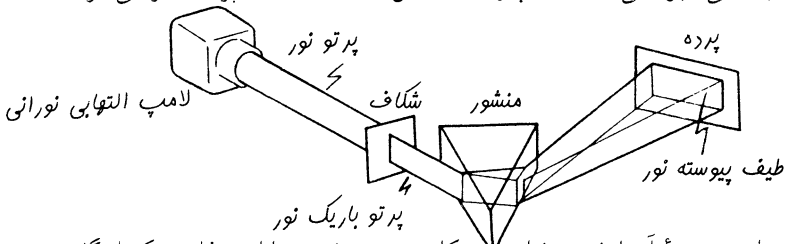
درواقع الگوهای طیفی عناصر بسیار واضح هستند و اندازه‌گیری‌ها بسیار دقیق. هیچ دو عنصر شناخته‌شده‌ای مجموعه خطوط یکسان ندارند. طیف می‌تواند برای شناسایی گازهای **ناشناخته** به‌کار رود. همانند کشف گاز هلیوم در طیف خورشید. اما قبل از شرح این کشف جالب، به نکته‌ای درباره **خطوط تاریک** طیف اشاره می‌کنیم.



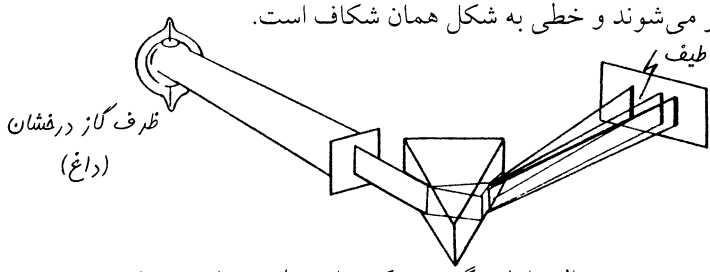
طیف جذبی (خطوط تاریک)

این سه شکل چگونگی مشاهده و انواع مختلف طیف را نشان می‌دهند.

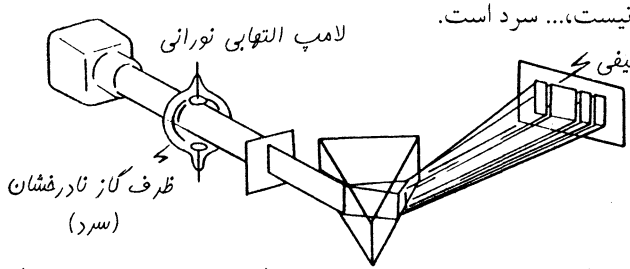
۱) اشعه «نور سفید» شامل همهٔ فرکانس‌ها از یک جامد ملتهب (مانند رشته ملتهب یک لامپ روشنایی) گسیل می‌شود که این اشعه‌ها قبل از ورود به ساق منشور مثلثی‌شکل از شکاف باریکی عبور می‌کند. **طیف پیوسته** (رنگین‌کمان‌مانند) روی پرده ظاهر می‌شود.



۲) در اینجا مجموعهٔ آزمایشی مشابهی به‌کار برده می‌شود، با این تفاوت که از **گاز داغ** به‌عنوان منبع به‌جای **جامد ملتهب** استفاده شده است. اکنون **خطوط روشن طیف** روی پرده ظاهر می‌شوند و خطی به شکل همان شکاف است.



۳) اکنون یک **چیز تازه**؛ به حالت اول برگردیم. یک جامد ملتهب تابشی حاوی همه فرکانس‌ها ساطع می‌کند. ظروف محتوی گاز بین منبع و شکاف قرار گرفته است، اما این بار گاز داغ نیست،... سرد است.

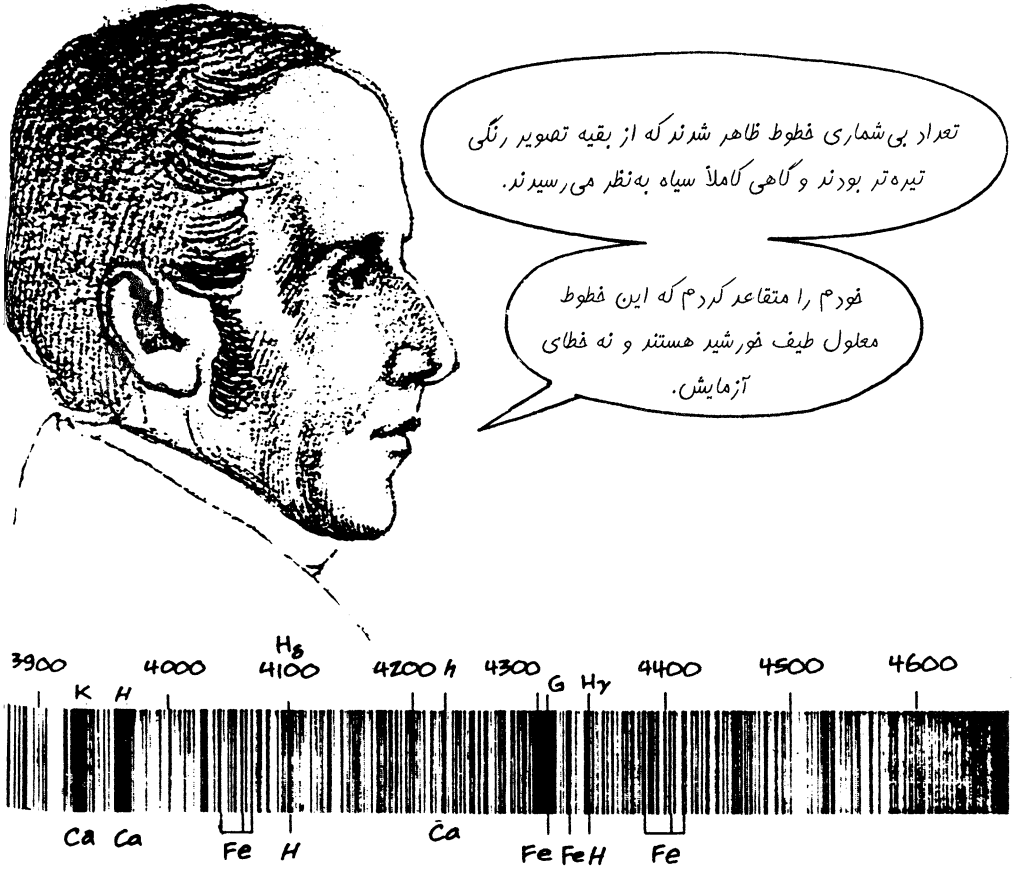


حالا به پرده توجه کنید. **خطوط تاریک طیفی**، با خط‌های از دست‌رفته متناظر با **خطوط روشن** حالت قبل به‌وجود می‌آید یعنی وقتی گاز داغ بود. یک نتیجه ساده به‌دست می‌آید؛ گاز سرد (تحریک‌نشده) نور را درست در همان فرکانس‌هایی جذب می‌کند که هنگامی داغ است آنها را گسیل می‌کند. پس باید حالت‌های انرژی ویژه‌ای در گاز وجود داشته باشد که برگشت‌پذیرند یعنی می‌توانند انرژی را **بگیرند** و یا **بدهند**. خیلی جالب است...

خطوط فرانهوفر

همهٔ این‌ها معماگونه و عجیب و درعین حال جذاب بود. زیرا در هر دو طیف گسیلی و جذبی فرکانس‌هایی (طول موج‌هایی) که خطوط در آن‌ها ظاهر می‌شوند یکسان بود. خطوط طیفی اطلاعات دقیق و تجدیدشدنی فیزیکی را درباره عناصر خالص به‌دست می‌دهد.

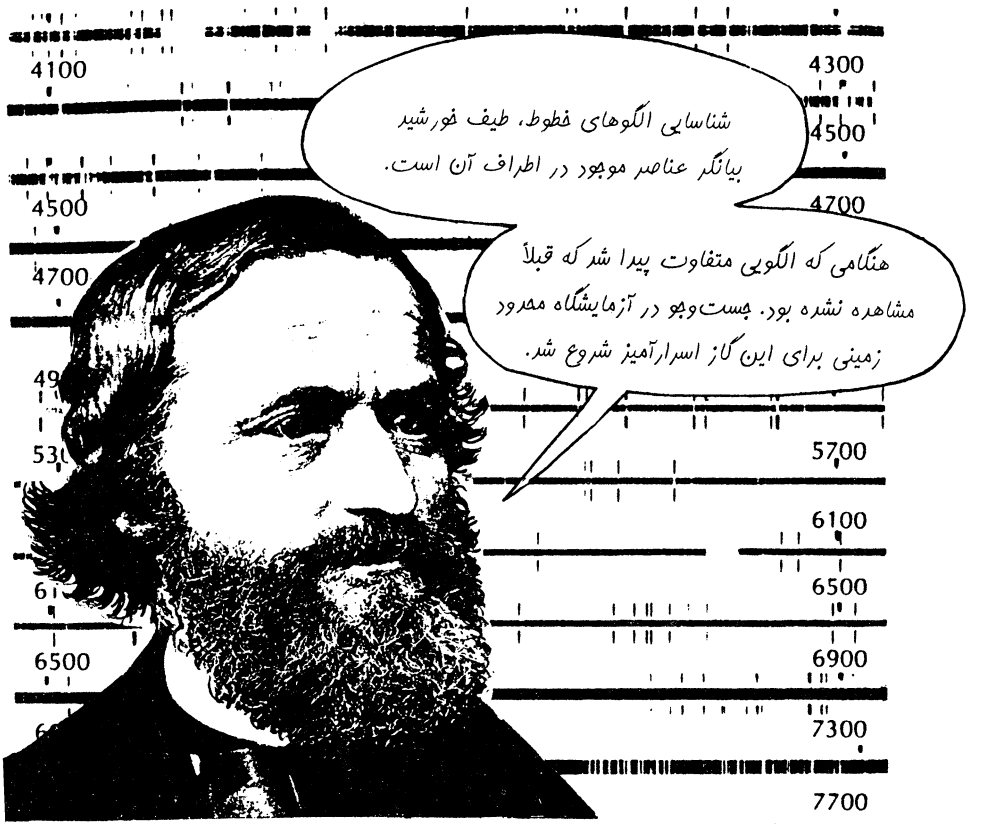
در سال ۱۸۱۴ **یوزف فن فرانهوفر** (۱۸۲۶ـ۱۷۸۷) نخستین **طیف‌نما** را که شامل یک منشور و یک تلسکوپ که یک چشمی متمرکز شده بر شکاف باریکی بود، ساخت. سپس از این وسیله برای مشاهده طیف خورشید استفاده کرد و دید...



این خطوط در طیف خورشید به‌عنوان **خطوط فرانهوفر** شناخته شده‌اند و شالوده طیف‌نمایی نجومی را تشکیل می‌دهند.

کشف هلیوم

سالها بعد، **گوستاو کیرشهف** (۸۷ـ۱۸۲۴) این خطوط را به شیوه‌ای ماهرانه با قراردادن خطوط روشن زرد محلول نمک طعام (NaCl) روی خطوط طیف خورشیدی فرانهوفر بررسی کرد. تطابق دقیق نشان داد که خطوط تیره مربوط به وجود بخار سرد سدیم و دیگر عناصر در جو خارجی خورشید است.



عنصر فرار ــ بی‌بو، بی‌رنگ و بی‌اثر شیمیایی ــ بالاخره آشکار و جدا شد. و به اقتباس از لفظ یونانی خورشید (هلیوس) **هلیوم** نامیده شد.

مطمئناً این خطوط باید بیانگر چیزهایی بسیار بنیادی درباره ساختار داخلی اتم باشد. اما آنها چه چیزهایی هستند؟ آزمایش‌های جدی‌تری لازم بود.

تعجبی ندارد که فیزیکدانان در کوشش‌هایِ‌شان برای بسط‌دادن ویژگی خطوط روشن یک نظریه دربارهٔ ساختار اتم طیف **هیدروژن** را برای بررسی انتخاب کردند؛ این ساده‌ترین اتم در میان عناصر بود.

هر چهار خط شاخص هیدروژن در بخش مرئی طیف نور در اواخر سال ۱۸۲۶ به‌وسیله اخترشناس سوئدی، ا. ج. **آنگسترم** (۷۴ـ۱۸۱۴) اندازه‌گیری شده بود.

بالمر به‌طور معجزه‌آسایی موفق به کشف فرمولی شامل اعداد صحیح شد که فرکانس‌های چهار خط مرئی هیدروژن را تقریباً به‌طور دقیق پیش‌بینی می‌کرد. وجود خطوط در بخش ماوراءبنفش بعداً قطعی شد.

$$f = \overbrace{R}^{\text{ثابت ریدبرگ}} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

با استفاده از این رابطه بالمر توانست چهار خط هیدروژن را با انتخاب n_f (نهایی) برابر ۲، n_i (اولیه) = ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و R با مقدار داده‌شده $۳/۲۹۱۶۳\times۱۰^{۱۵}$ (دور بر ثانیه) پیش‌بینی کند. این اعداد تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌ها به‌دست می‌دادند.

سازگاری مقادیر به‌دست آمده توسط بالمر با اندازه‌گیری‌های حقیقی در جدوْل زیر نشان داده شده است.

طیف گسیلی هیدروژن (بالمر، ۱۸۸۵)

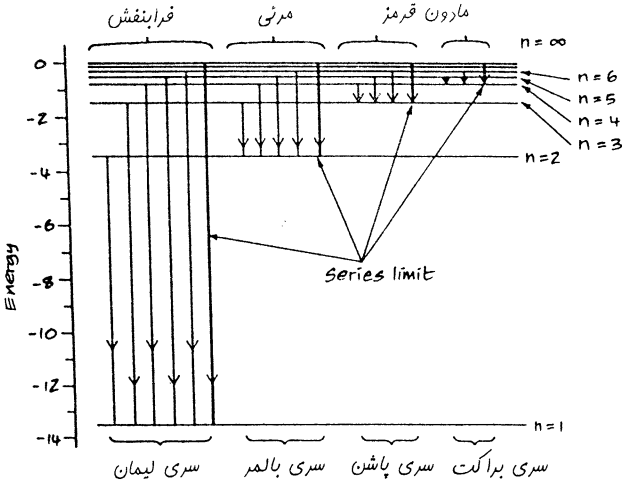
	از فرمول بالمر	مقادیر تجربی	
مقدار n_i	فرکانس	فرکانس	طول موج
$n_f=۲$	$۱۰^{۶}$Mhz	$۱۰^{۶}$Mhz	$nm=۱۰^{-۹}m$
۳	۴۵۷/۱۷۱	۴۵۷/۱۷۰	۶۵۶/۲۱۰ (قرمز)
۴	۶۱۷/۱۸۱	۶۱۷/۱۹۰	۴۸۶/۰۷۴ (سبز)
۵	۶۹۱/۲۴۲	۶۹۱/۲۲۸	۴۳۴/۰۱ (آبی)
۶	۷۳۱/۴۷۳	۷۳۱/۴۹۳	۴۱۰/۱۲ (بنفش)

به تطابق نزدیک بین فرکانس‌های به‌دست‌آمده از تجربه و فرکانس‌هایی دقت کنید که من با استفاده از رابطه‌ام حساب کرده‌ام.

دقت بیش از آن بود، که نتایج **نادرست** باشند؛ پس باید چیزی اساسی زیربنای فرمول او بوده باشد. شاید قانون فیزیکی خاصی اتم را وادار به تولید رابطه‌ای به این شکل می‌کند.

در همین حال بالمر خطوط بیشتری ــ در محدودهٔ فرکانسی ناحیه فرابنفش و مادونِ قرمز ــ پیش‌بینی کرد که در آن زمان حتی قابل اندازه‌گیری نبود، او مقادیر مختلفی برای n_f به‌کار برد و چندین سری از خطوط طیفی را پیش‌گویی کرد.

رابطه بالمر خطوط بی‌شماری را پیش‌بینی می‌کرد.. همان‌طور که می‌بینید این پیش‌بینی‌ها کاملاً صحیح بود. اما هنوز باید دید آیا این امر به‌نظریه جدیدی منجر می‌شود یا نه؟



هرچه طول پیکان‌ها زیادتر شود، فرکانس نور بیشتر می‌شود.
مبداءِ خطوط مختلف سری طیفی روی شکل مشخص شده است.

فرکانس‌های هیدروژن از فرمول بالمر

بالمر حدس می‌زد، وقتی n_f مقادیری غیر از ۲ بگیرد خطوط بیشتری در طیف هیدروژن به‌وجود خواهد آمد. برای مثال $n_f=1$ سری جدیدی در ناحیه فرابنفش و $n_f=3,4$ سری‌های دیگری در ناحیه مادون قرمز می‌دهد.

جدول سری طیفی هیدروژن (رابطه بالمر)

$n_f=4$	$n_f=3$	$n_f=2$	$n_f=1$	n نهایی
$n_i=5,6,7,8,9...$	$n_i=4,5,6,7,8...$	$n_i=3,4,5,6,7...$	$n_i=2,3,4,5,6...$	n اولیه
مادون قرمز	مادون قرمز	مرئی	فرابنفش	باند نور
۱۹۲۲	۱۹۰۸	۱۸۵۵	۱۹۰۶_۱۴	اکتشاف
براکت	پاشن	بالمر	لیمان	کاشف

این توالی قویاً نوعی نمودار انرژی را به ذهن متبادر می‌کند که در آن فرایند **گسیل/جذب** نور در اتم باید وابسته به **کاهش/افزایش** انرژی اتم باشد. شکل پائین صفحهٔ قبل نحوه استفاده از فرمول بالمر را برای پیش‌گویی فرکانس‌های خطوط طیفی با شروع‌کردن از هر رشته با اعداد متفاوت نشان می‌دهد.

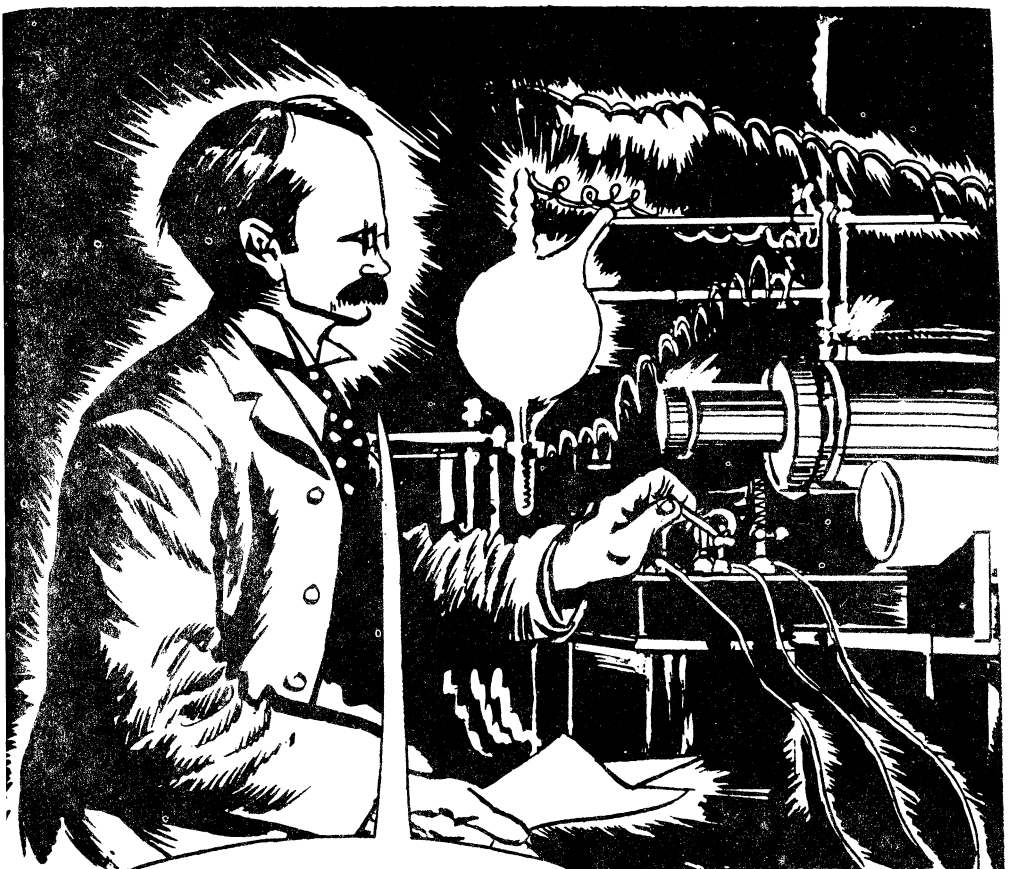
فرکانس‌های هیدروژن از فرمول بالمر

این اطلاعات برای هر نظریه اتمی حیاتی خواهند بود. این تغییر **اعداد صحیح** که فرکانس‌های دقیق امواج گسیل‌شده را به‌دست می‌دهد. یک جابجایی را به ذهن متبادر می‌کند که در قسمتی از اتم به‌وقوع می‌پیوندد.

در سال ۱۸۹۰ هیچ‌کس ایده‌ای برای آرایش اتم در ذهن نداشت. اگرچه به‌نظر می‌رسید یک نظریه موفقِ اتمی باید فرمول اعجاب‌انگیز یوهان ژاکوب بالمر را به‌خوبی دربر داشته باشد.

کشف الکترون

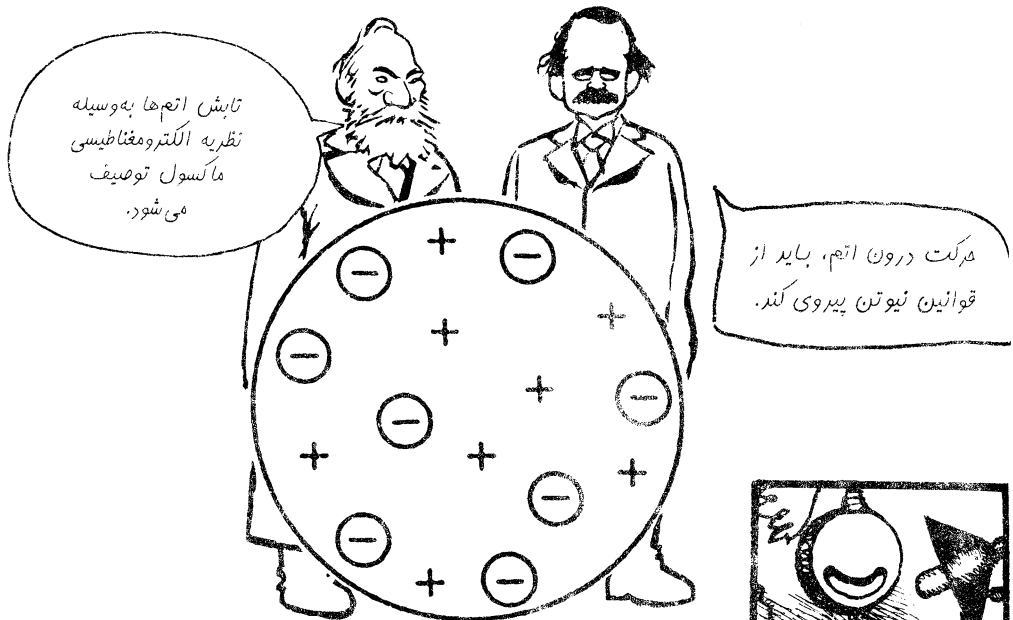
در سالن مقدس آزمایشگاه مشهور کاوندیش در دانشگاه کمبریج بود که اتم توسط ج. ج. تامسون (۱۹۴۰ـ۱۸۵۶) که یکی از بزرگترین فیزیکدانان کلاسیک قرن نوزدهم بود، مورد کاوش قرار گرفت.



درواقع در ۵ سال پایانی قرن ۱۹ نشان داده شد که این به‌اصطلاح پرتوها مانند ذرات عمل می‌کنند. پرتو α و β تبدیل شدند به ذرات α و β. قدم بعدی این بود که دیده شود این ذرات چگونه در ساخت اتم به‌کار می‌روند.

اتم کیک کریسمسی

(احتمالاً در زمان کریسمس) تامسون و لرد کلوین مدلی برای اتم ابداع کردند که در آن الکترون‌های منفی، مانند کشمش‌های کیک، درون کره همگنی از بارهای مثبت جا داشتند.



در مدل کیک کشمشی اتم، بارهای منفی الکترون‌ها (کشمش‌ها) درون کره همگنی از بارهای مثبت (کیک) قرار گرفته‌اند.

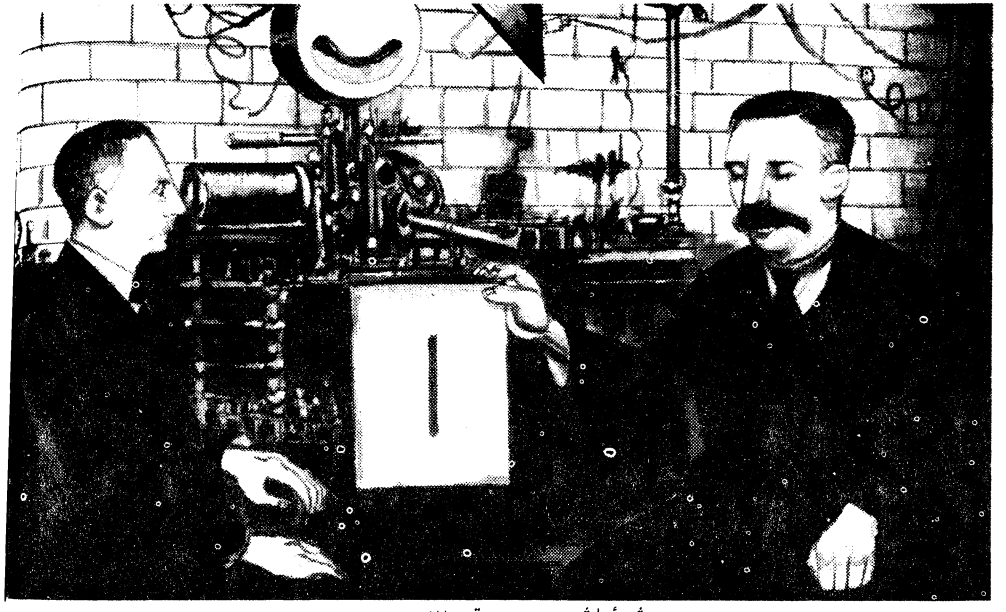
با وجود تبلیغ خوبی که از این طرح صورت گرفت، ذاتاً ناپایدار بود و راه به جایی نبرد.

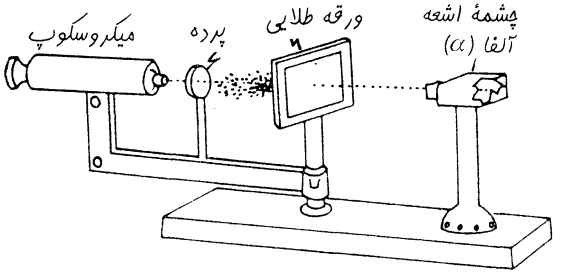
سپس، حدود سال ۱۹۰۷ یکی از خلاق‌ترین سنت‌شکنان فیزیکدانان کلاسیک به صحنه آمد. او **ارنست رادرفورد** (۱۹۳۷ـ۱۸۷۱)، شاگرد پیشین تامسون در کمبریج بود که در این زمان استاد فیزیک دانشگاه منچستر شده بود و روی زمینهٔ تحقیقاتی رادیواکتیویته کار می‌کرد.

اتم هسته‌ای رادرفورد

اگرچه رادرفورد قلباً یک تجربه‌گرای پرشور بود، اما همیشه به کار بر روی مدل نظری‌ای فکر می‌کرد که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد و قابل مشاهده و فهم باشد.

او با دانشجویان پژوهشگر خود صمیمانه کار می‌کرد و مرتباً برای تشویق آنان درحالی به آزمایشگاه وارد می‌شد که سرود «سربازان مسیحی پیشگام» را می‌خواند.



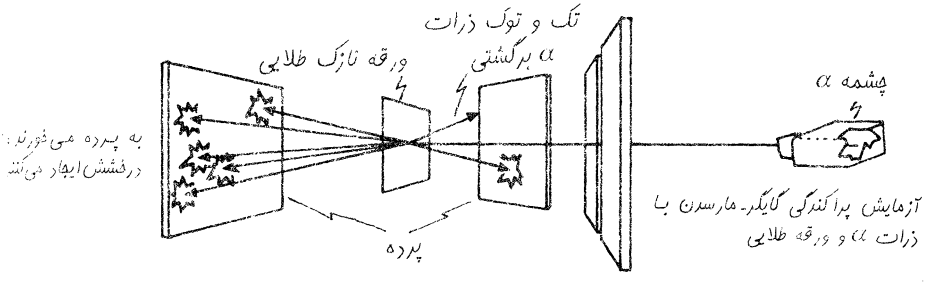


دستگاه تابش
آلفای رادرفورد

در سال ۱۹۰۸ درحالیکه برنامه تحقیقاتی در زمینه ذرات آلفا ادامه داشت رادرفورد به این فکر افتاد که احتمالاً، پرتابه‌های جرم‌دار که بار مثبت دارند، کاوشگرهای مناسبی برای مطالعه ساختمان اتم هستند. رادرفورد همراه یکی از دانشجویان آلمانی‌اش **هانس گایگر** (۱۹۴۵ـ۱۸۸۲) شروع به مطالعه انحراف ذرات α از ورقه نازک طلایی کرد که از درون یک میکروسکوپ مانند سوسویی مشاهده می‌شدند که، هریک از ذرات α در برخود به پرده فلورسانس به‌وجود می‌آورد.

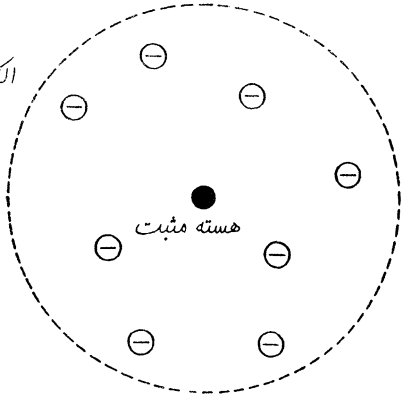
آقای **رادرفورد**، بیشتر انحرافات بسیار کم و در حدود یک درجه هستند. اما تعداد زراتی که دارای انحراف ۱۰ درجه یا بیشتر هستند بسیار بیشتر از تعدادی است که مدل **تامسون** پیش‌بینی می‌کند.
هوم... اتم تامسون روی پرتابه باید مانند ابری عمل کند که گردوغبار در آن معلق هست

روز بعد
فکر نمی‌کنی **مارسدن** جوان که روش‌های رادیواکتیو را به او می‌آموزم باید تحقیقات کوچکی را شروع کند؟
چرا که نه، بگذار اجازه دهیم ببیند که آیا ذرات α با زوایایی بزرگتر منحرف می‌شوند یا نه؟ راستش من فکر نمی‌کنم که اینطور باشد. اما این کار به ریسکش می‌ارزد، به‌علاوه مارسدن چیزهایی دربارهٔ روش پراکندگی به ما خواهد آموخت.



آزمایش پراکندگی گایگر- مارسدن با ذرات α و ورقهٔ طلایی

بعدها او در مطالعاتش دریافت...



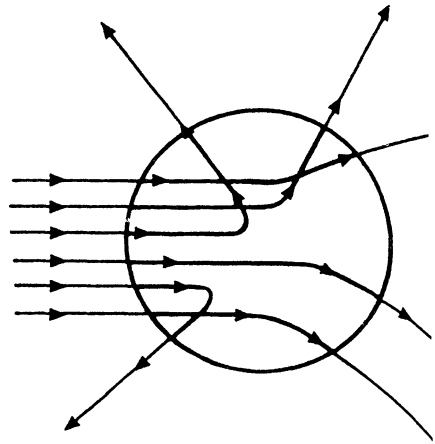
این تک و توک ذرات برگشتی باید حاصل یک برخورد باشند... اما چنین برخوردی نشانگر این است که قسمت اعظم جرم اتم باید در هسته متمرکز باشد.

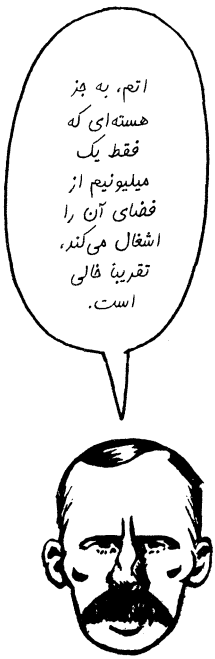
اتم باید هسته‌ای جرم‌دار داشته باشد که بسیار کوچک است و بار مثبت دارد.

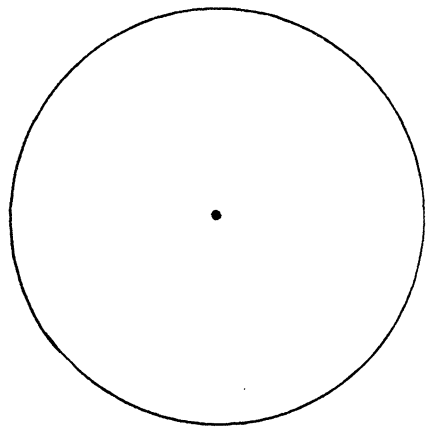
این تجربیات و توضیحات رادرفورد نقطه شروعی برای مفهوم جدید مدل هسته‌ای اتم بود.

اندازه هسته

به‌عنوان نتیجه ثانویه آزمایش پراکندگی می‌توان اندازه هسته اتم را نیز تخمین زد. اگر ذره آلفا (α) مستقیماً به‌سوی هسته حرکت کند در حال نزدیک‌شدن به آن انرژی جنبشی‌اش به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود تا هنگامیکه سرعت آن کند شود و متوقف گردد. فاصله نزدیکترین نقطه تماس از روش بقایِ انرژی قابل محاسبه است.







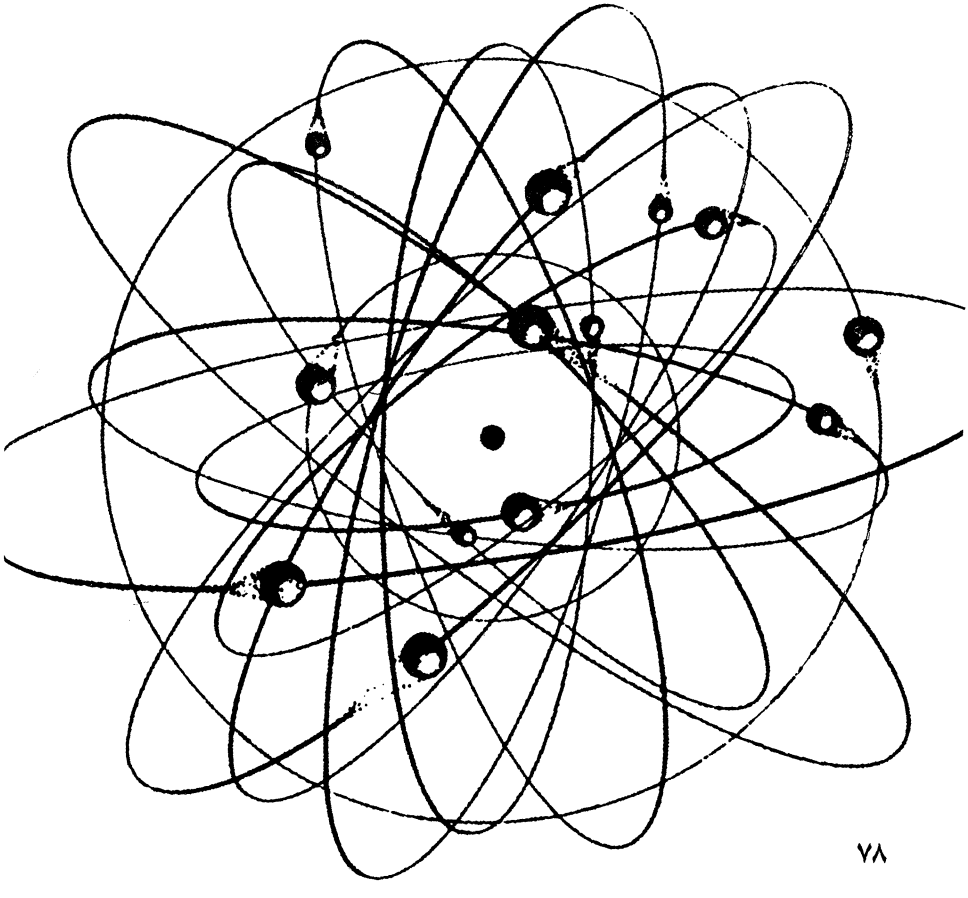
بنابراین اکثر ذرات α یا پرتابه‌های دیگر مانند اتمها یا الکترونها و نوترونها می‌توانند در هزاران لایه اتمی ورقه‌های فلزی یا گازها نفوذ کنند و تنها گاه و بی‌گاه دچار انحراف بازگشتی شوند. بنابراین گایگر و مارسدن باید (مانند هر دانشجوی خوب دیگر) بسیار صبور بوده باشند تا در منچستر موفق به کشف انحراف برگشتی شده باشند. این مدل اتم هسته‌ای گرچه در توضیح پدیده‌های پراکندگی موفق بود اما سؤال‌های بسیاری برانگیخت.

آرایش الکترون‌ها در اطراف هسته چگونه است؟

ترکیب هسته چیست؟ و چه چیزی هسته را از متلاشی‌شدن ناشی از دافعه بارهای مثبت حفظ می‌کند؟

چه چیزی مانع سقوط الکترون‌های منفی در هسته مثبت بر اثر جاذبه الکتریکی می‌شود.

با پیشنهادکردن مدل سیاره‌ای، با الکترون‌هایی که به دور هسته کوچک می‌چرخند، به این سؤالات پاسخ دادم. جاذبه الکتریکی نیرویی مرکزگرا برای حرکت الکترون‌ها در مدار فراهم می‌کند.



اما این مدل او را با مسائل دیگری مواجه کرد...

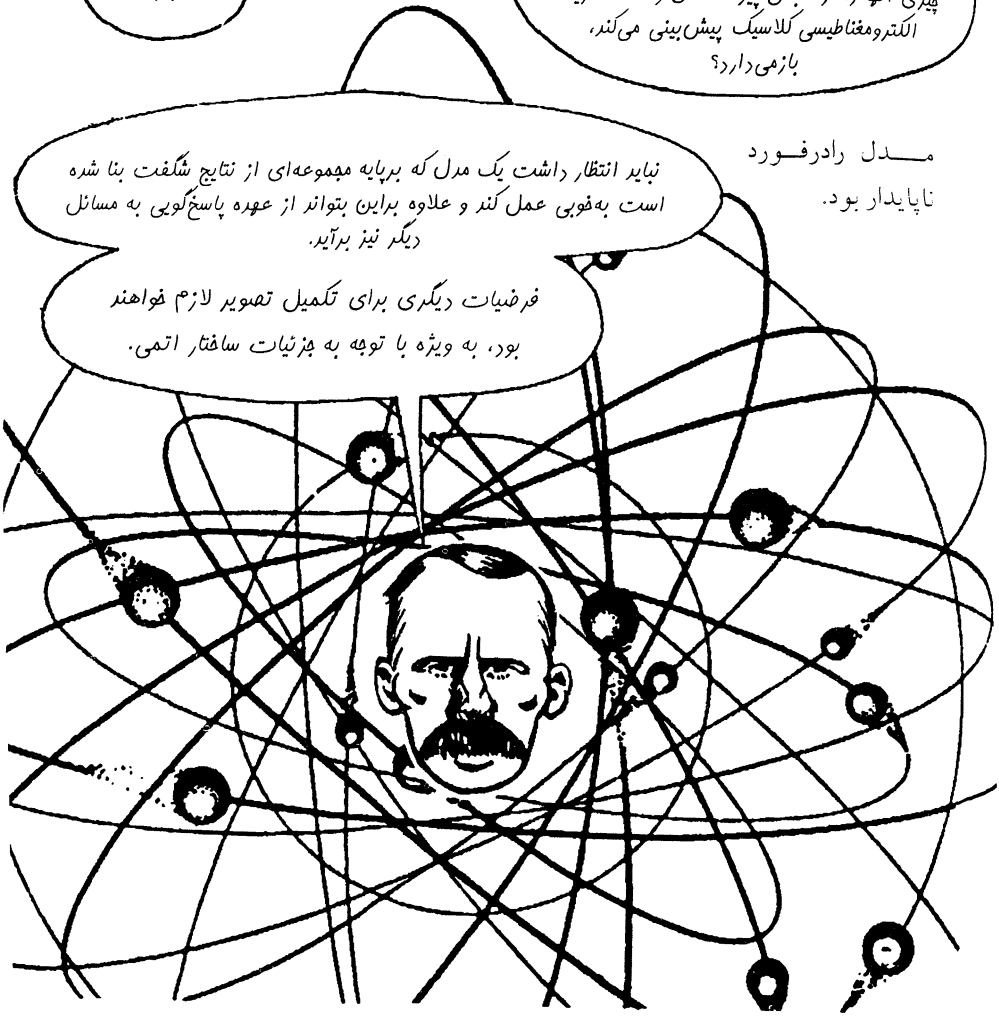
آنها همه انرژی‌شان را در کسری از ثانیه از دست خواهند داد.

اگر الکترون‌ها مانند یک سیستم خورشیدی میکروسکپی در مدارهای دایره‌ای به دور هسته حرکت می‌کنند (و بنابراین شتاب دارند) چه چیزی آنها را از تابش پیوسته، آن‌گونه که نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک پیش‌بینی می‌کند، بازمی‌دارد؟

مدل رادرفورد ناپایدار بود.

نباید انتظار داشت یک مدل که برپایه مجموعه‌ای از نتایج شگفت بنا شده است به‌خوبی عمل کند و علاوه براین بتواند از عهده پاسخ‌گویی به مسائل دیگر نیز برآید.

فرضیات دیگری برای تکمیل تصویر لازم خواهند بود، به ویژه با توجه به جزئیات ساختار اتمی.



حداقل، تجسمی از اتم پیدا شده بود. قدم بعدی در گروه رادرفورد در منچستر با ورود یک دانشجوی جوان دانمارکی برداشته شد که اخیراً از کمبریج انتقال یافته بود.

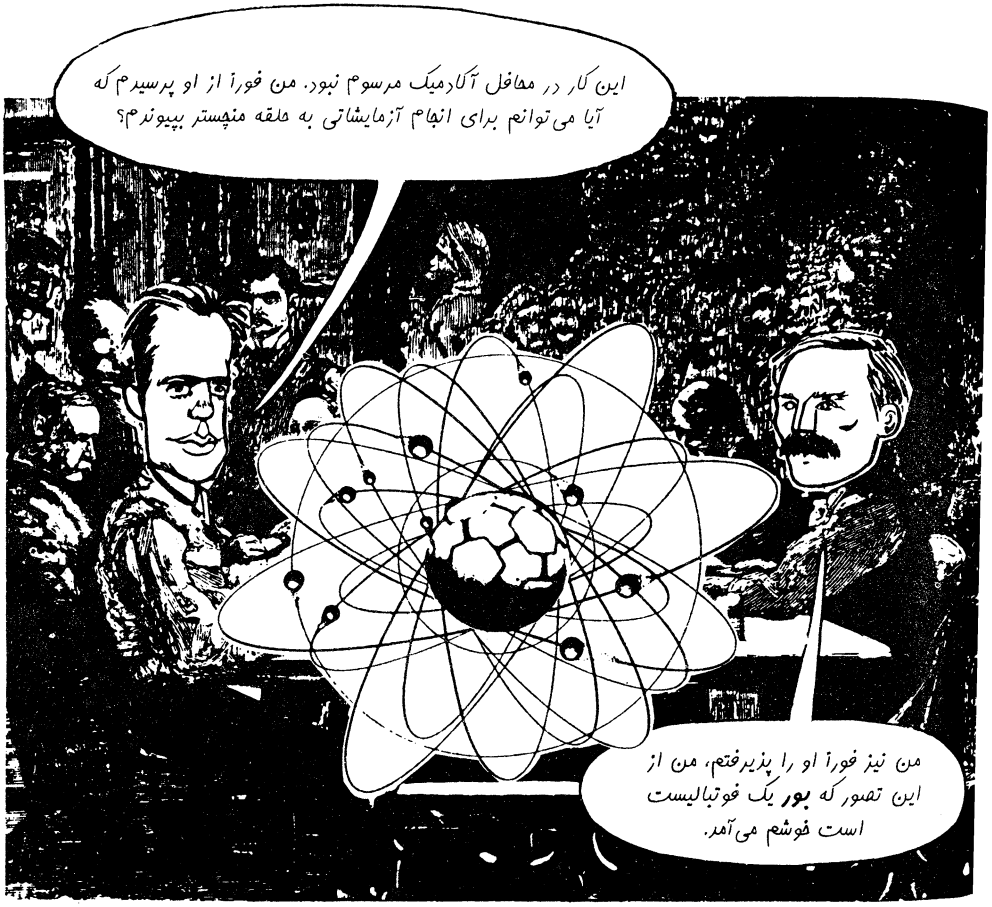
ورود قهرمان کوانتوم، نیلز بور

«دانمارکی کبیر» در آزمایشگاه رادرفورد در منچستر در سال ۱۹۱۲ تحقیقات بی‌وقفه خود را برای فهم عمیق فیزیک کوانتومی شروع کرد. تحقیقاتی که به مدت ۵۰ سال یعنی تا پایان عمرش به سال ۱۹۶۲ ادامه داشت.

در این کوشش عظیم هیچ‌کس، حتی اینشتین نیز با بور قابل مقایسه نیست. او پدربزرگ فیزیک کوانتومی است. او بود که ایده‌های اولیه را مطرح کرد و تقریباً با هرکس که در توسعه آن سهمی داشت کار کرد.

بور در سال ۱۹۱۱ با یک لغت‌نامه بزرگ و مجموعه آثار چارلز دیکنز که از آنها زبان انگلیسی را می‌آموخت به انگلستان وارد شد. علی‌رغم محدودیت‌های زبانی‌اش، بور اعتماد به نفس فراوان و ظرفیت باورنکردنی‌ای برای کارهای سخت داشت.

بور، سپس رادرفورد را در میهمانی شام مؤسسه کاوندیش ملاقات کرد و به‌شدت تحت تأثیر شوروشوق رادرفورد و تمجید او از کار دیگران قرار گرفت.

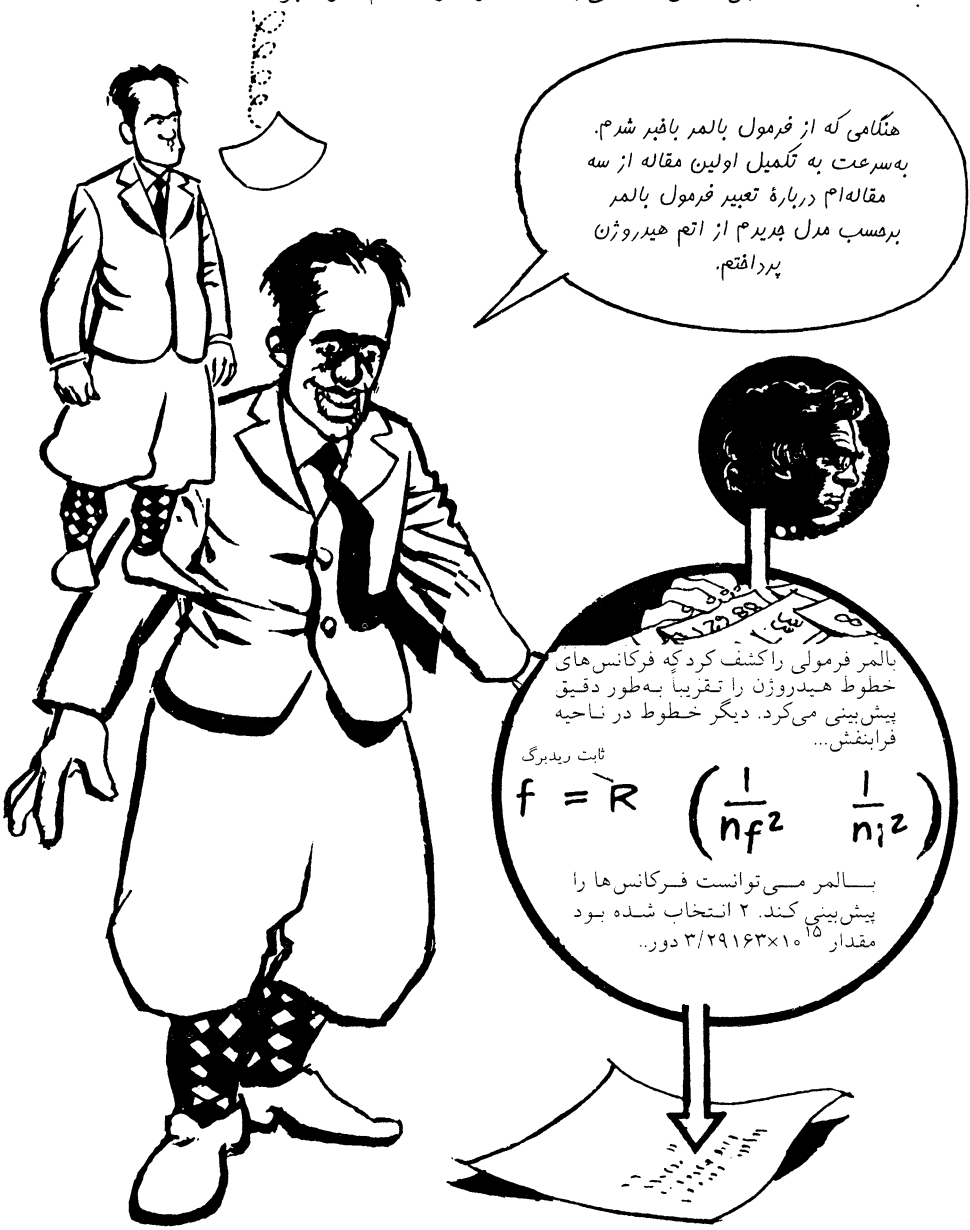


بور درحالی وارد منچستر شد که شهرت مدل جدید سیاره‌ای رادرفورد در همه جا پیچیده بود. او مرعوب محدودیت‌های مدل رادرفورد نشد اما حس می‌کرد که مکانیک کلاسیک در درون اتم کارا نیست. او می‌دانست که کار پلانک و اینشتین دربارهٔ تابش نور بسیار مهم است. آن هم نه فقط به‌عنوان اندیشه هوشمندانهٔ آلمانی.

با شروع تابستان ۱۹۱۲، بور طرحی برای رادرفورد **درباره ساختمان اتم ومولکول** آماده کرد که مستقیماً بر مسئله پایداری اتم متمرکز شده بود.

مدارهای پایدار در اتم بور

پیشرفت غیرمنتظره بور هنگامی رخ داد که در اوائل سال ۱۹۱۳ فرمول بالمر را به‌دست آورد. تا قبل از این او حتی به طیف نور توجه هم نکرده بود.



این رویداد آغاز نظریه کوانتومی ساختار اتم را رقم زد.

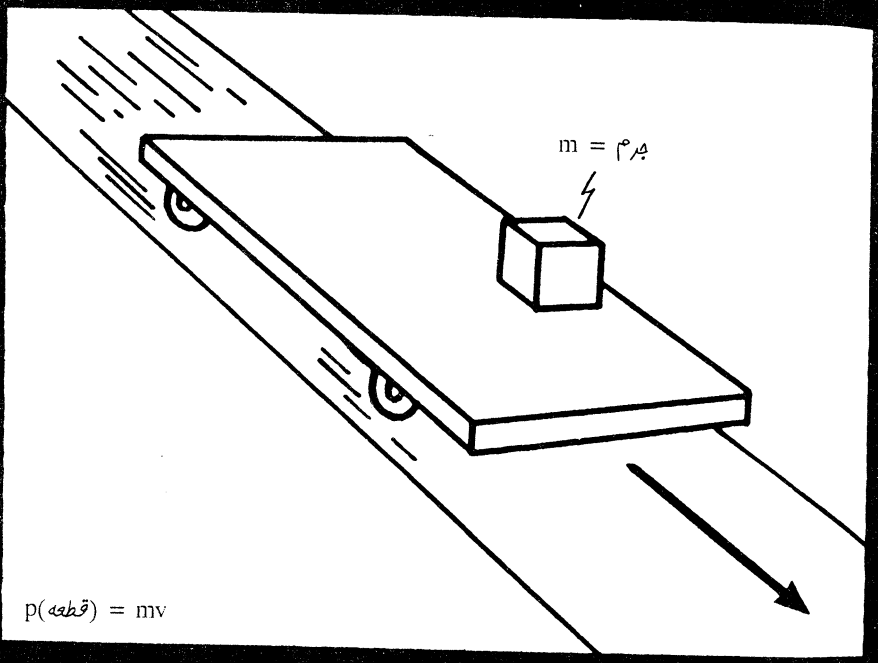
ملاقات بور با نیکلسون: اندازه حرکت زاویه‌ای کوانتمی شده

ج. دبلیو. مایکلسون (۱۹۵۵ـ۱۸۸۱) اندازه حرکت زاویه‌ای، که در روند محاسبه مقدار درست آن را ($L=mvR=n(h/2\pi)$) به‌دست آورده بود، برای اتم هیدروژن کوانتمی کرد.

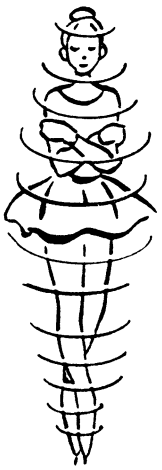
در آن لحظه به نظر نمی‌رسید که بور به ایده‌های مایکلسون برای ادامه کارش نیاز داشته باشد، اما ثابت شد که داشتن نگاه دقیقی به اندازه حرکت زاویه‌ای مهم است.

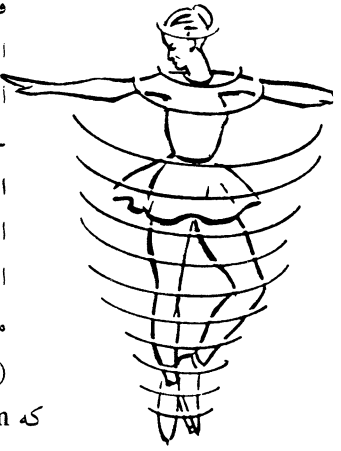
نخست: اندازه حرکت خطی

در زبان روزمره **اندازه حرکت** را در رابطه با چیزی به‌کار می‌بریم که متوقف‌کردن یکباره آن مشکل است. در فیزیک نیز معنی آن همین است. در یک سیستم خطی یا مستقیم‌الخط بی‌اصطکاک **جسم در حال حرکت تا زمانی که نیروی خارجی بر آن اعمال نشود به حرکت خود ادامه می‌دهد. این اصل، بقای اندازه حرکت** نامیده می‌شود و حتی قبل از تولد نیوتن، یعنی از زمان گالیله، شناخته شده بود.



دوم: اندازه حرکت زاویه‌ای

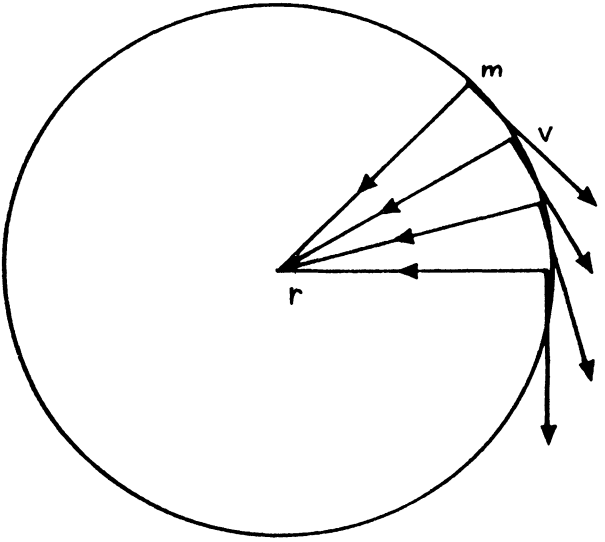




فیزیک یک **سیستم دورانی** نیز همین‌گونه است. اگر جسمی روی یک مدار بسته بدون اصطکاک **دوران** کند تا زمانی که گشتاور خارجی به آن اعمال نشود بدون نقصان با **اندازه حرکت زاویه‌ای ثابت** به حرکت خود ادامه می‌دهد. مقدار اندازه حرکت به‌سادگی از ضرب جرم جسم و سرعت آن در شعاع مدار به‌دست می‌آید...

(اندازه حرکت زاویه‌ای) $L = m v r$

که m جرم جسم و v سرعت به دور مدار است.



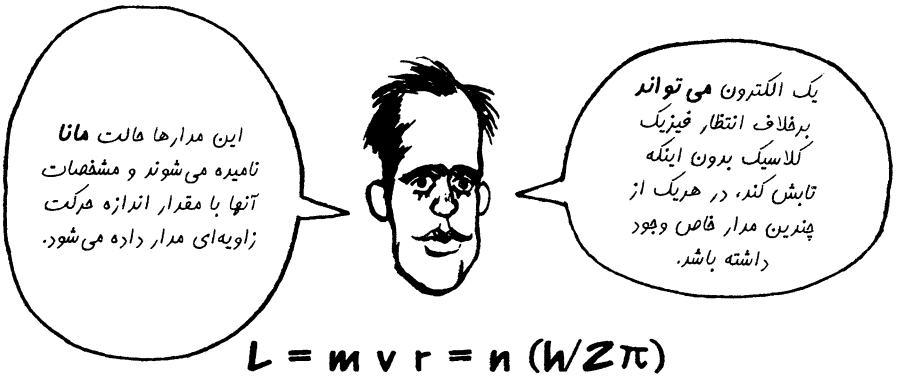
اندازه حرکت زاویه‌ای ثابت (بدون اعمال گشتاور)

در مدل بور اگر یک الکترون از سطح انرژی اولیه‌اش برانگیخته شود تنها می‌تواند به مداری برود که اندازه حرکت زاویه‌ای آن با نسبت صحیحی از $h/2\pi$ کم یا زیاد شود.

اصول کوانتومی بور

بور برای توجیه پایداری مدار الکترون دو فرض جدید ارائه کرد.
با اولین فرض او استفاده از مدل اتم هسته‌ای در مقابل اعتراضات کلاسیک توجیه شد.

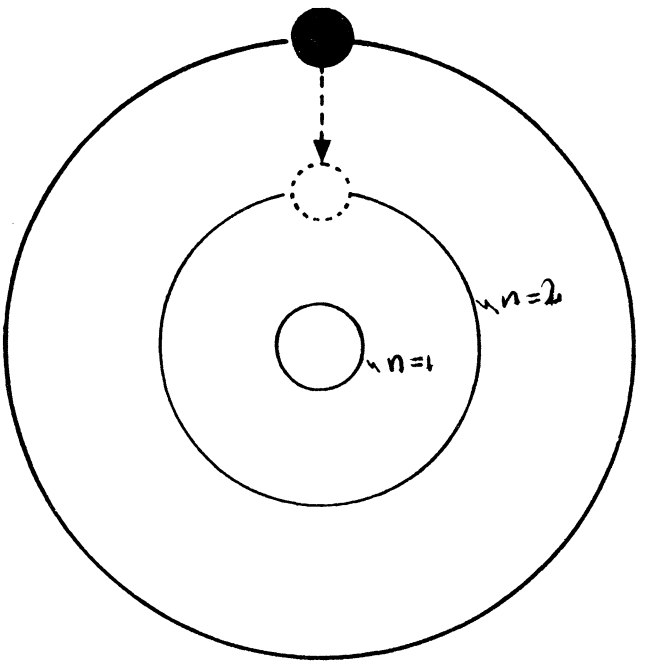
اصل اول بور



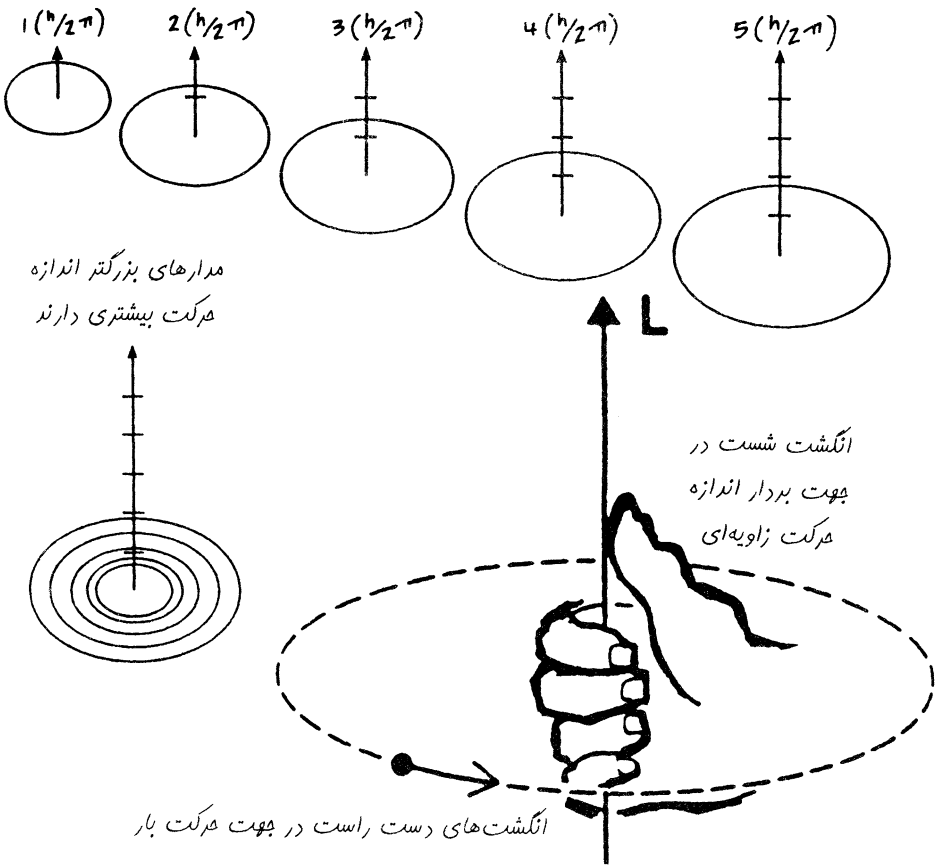
$$L = m v r = n (h/2\pi)$$

این وضعیت مدار کوانتومی است.

الکترون در حالت مانا آماده یک جهش کوانتومی



اندازه حرکت زاویه‌ای L، آنگونه که در فیزیک کلاسیک تصور می‌شود، نمی‌تواند هر مقدار دلخواهی اختیار کند بلکه تنها مقادیر معینی می‌گیرد. $L=1(h/2\pi)$ در مدار اول، $L=2(h/2\pi)$ در مدار دوم، $L=3(h/2\pi)$ در مدار سوم و به همین ترتیب... تنها مدارهایی که در آنها L مضرب صحیحی از واحد کوانتومی $h/2\pi$ است، مدارهایی مجازی هستند. (عدد صحیح n، **عدد کوانتومی اصلی** نامیده می‌شود).



کدام‌یک واحد کوانتومی اصلی است؟ h یا $h/2\pi$

ابتدا دیدیم که نور تنها می‌تواند در واحدهای کاملاً مجزای انرژی $E=hf$ موجود باشد. اکنون دریافتیم که اندازه حرکت زاویه‌ای نیز کوانتمی است اما اینبار با واحدهایی $h/2\pi$. تفاوت در کجاست؟ عامل 2π از کجا آمده است؟ چرا اندازه حرکت زاویه‌ای با واحدی متفاوت از انرژی کوانتمی شده است؟ این پرسش خیره‌کننده‌ای است که به‌زودی پاسخ داده می‌شود!

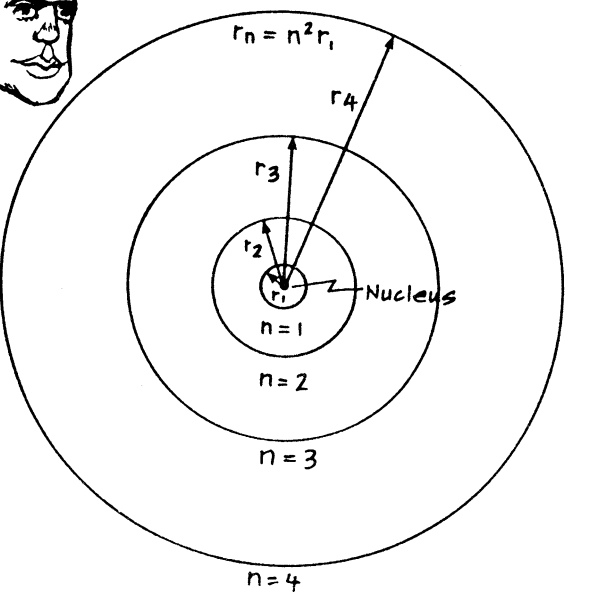
تلفیق فیزیک کلاسیک و کوانتومی

اگر اندازه حرکت زاویه‌ای جسم دوار معلوم باشد ــ در این شرایط چنین فرض شده است ــ محاسبه شعاع و انرژی مدار با استفاده از ایده‌های کلاسیک ساده است. بور اساس کار خود را برپایه مدل سیاره‌ای نیوتن قرار داد و فرمولی برای شعاع مدارهای الکترون به‌دست آورد:

$$r = \left(\frac{h^2}{4\pi^2 mq^2}\right) n^2$$

ثابت پلانک — عدد کوانتومی اصلی — شعاع مدار الکترون — جرم الکترون — بار الکترون

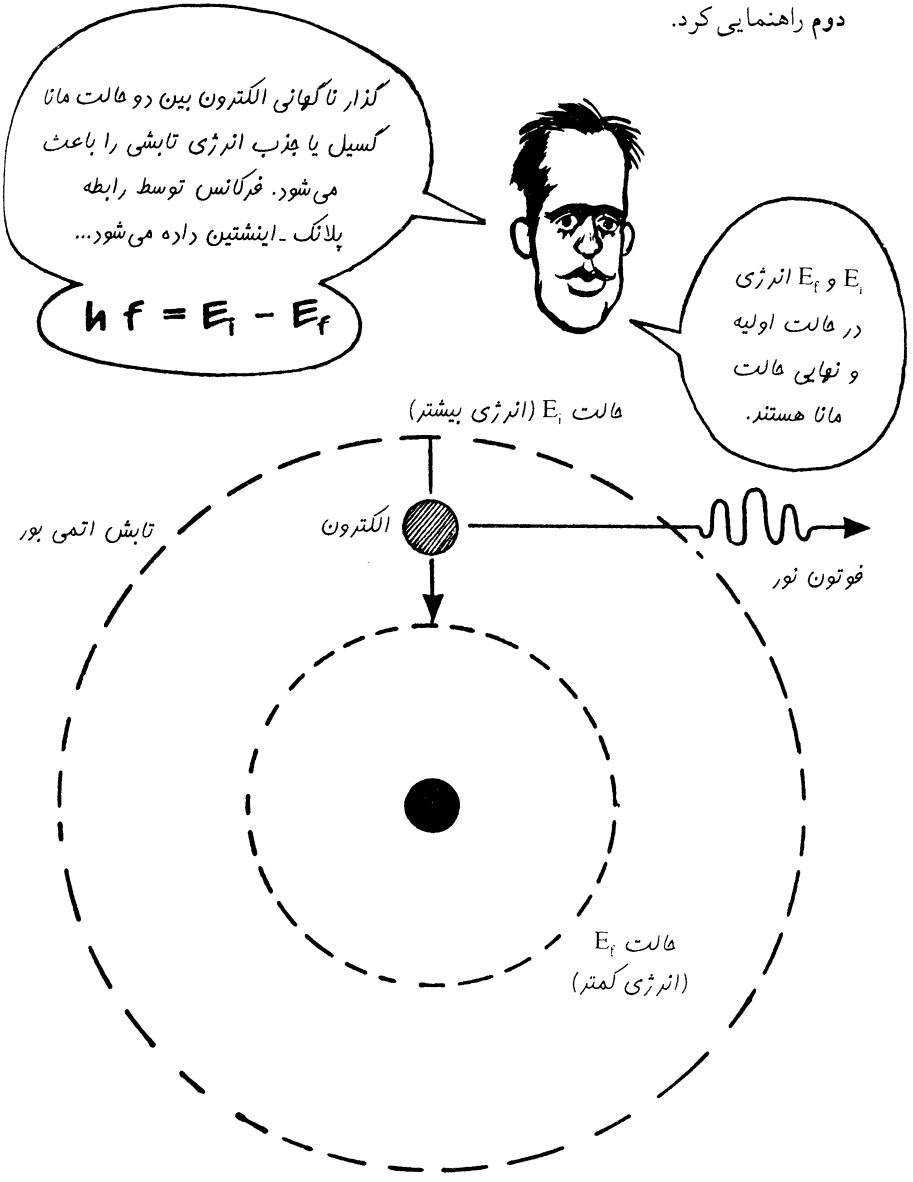
بنابراین اندازه مدار تنها وابسته به عدد صحیح h است (که اندازه حرکت زاویه‌ای را نیز کوانتمی می‌کند).



کمترین شعاع برای $n=1$ است که مقدار آن $5/3\times10^{-9}m$ یا ۵/۳ نانومتر می‌باشد. این مقدار به تخمین‌های جدید مبنی بر اندازه‌گیری‌های حقیقی نزدیک است. انرژی اتم هیدروژن در مقداری که شعاع بور نامیده می‌شود کمینه است و اتم در حالت پایهٔ خود است.

اصل دوم بور

بور با تشبیه اتم به منظومه کوچک خورشیدی به‌راحتی توانست با داشتن شعاع هر مداری انرژی آن را حساب کند. سپس او توانست از **اختلاف** انرژی بین دو حالت مانا برای مشخص‌کردن فرکانس گسیل یا جذب نور بهره گیرد. این امر او را به‌سوی **فرض دوم** راهنمایی کرد.



این حالت گذار اتمی است.

بور فرمول بالمر را به‌دست می‌آورد

بور با استفاده از این فرض‌ها و مدل اتمی جدید فرمول بالمر را به‌دست آورد. (قبلاً آشکار شده بود که این فرمول مقادیر درست را برای خطوط طیفی هیدروژن به‌دست می‌دهد).

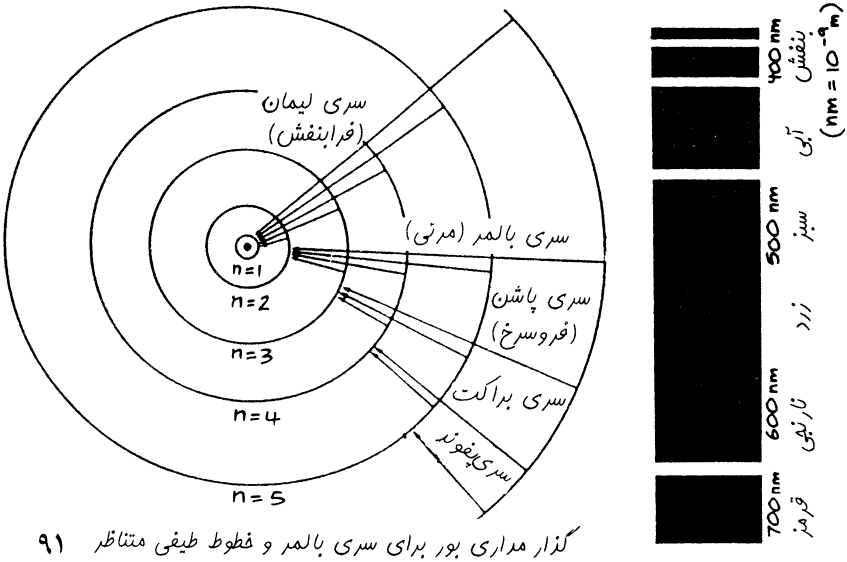
$$f = \frac{2\pi^2 mq^4}{h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

اگر بتوان جمله ثابت R در رابطه بالمر را (که **ثابت ریدبرگ** گفته می‌شود) به‌صورت $R = 2\pi^2 mq^4/h^3$ نشان داد، این دقیقاً همان فرمولی خواهد شد که بالمر برای فرکانس‌های هیدروژن به‌دست آورده بود.

بور با استفاده از مقادیر موجود در سال ۱۹۱۴ برای q و m و h، R را با درصد اختلاف اندکی در محدودهٔ مقدار بالمر مقایسه کرد؛ مقداری برابر با $3/26 \times 10^{15}$ دور بر ثانیه.

بور از یک نظریه فیزیکی برپایه الکترون‌هایی که هسته را دور می‌زنند **فرمول بالمر** را به‌دست آورده بود (که آشکار شده بود همه طیف صحیح هیدروژن را می‌دهد)، این یک نتیجه قابل ملاحظه بود.

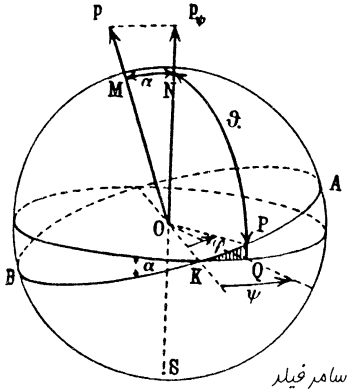
بور اکنون می‌توانست برای نشان‌دادن چگونگی به وجودآمدن سری‌های طیفی گوناگون، نمودار انرژی‌ای برپایه مدارهای فیزیکی اتم رسم کند. آیا جوان دانمارکی معمای ساختار اتم را حل کرده بود؟ آیا مدل او کارا بود؟ یعنی می‌توانست طیف عناصر دیگر را نیز پیشگویی کند؟

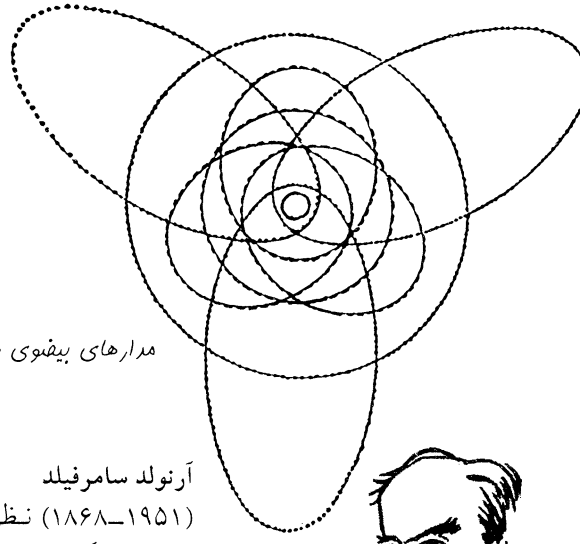


گذار مداری بور برای سری بالمر و خطوط طیفی متناظر

نگاه دقیق‌تر به طیف... خطوط دیگر

به‌زودی حتی در هیدروژن ساده خطوط طیفی اضافی ظاهر شدند و مدل بور در معرض چالش قرار گرفت. هنگامی که اندازه‌گیری‌های دقیقتر طیف هیدروژن مقدور شد آشکار گردید که سازه‌های بیشتری برای اتم لازم است. به‌نظر می‌رسید حالت‌های ممکن بیشتری برای الکترون نسبت به آنچه مدارهای ساده دایره‌ای بور وجود دارند که فقط یک عدد کوانتومی مجاز می‌دانست. و اما یک نظریه‌پرداز برجسته برای نجات مدل بور به میدان آمد.





مدارهای بیضوی سامرفیلد

آرنولد سامرفیلد
(۱۹۵۱ـ۱۸۶۸) نظریه‌پرداز و معلم بزرگ مونیخی

یوهانس کپلر
(۱۶۳۰ـ۱۵۷۱) برای توضیح انحراف مداری سیاره مریخ با استفاده از محاسبات دقیق تیکوبراهه کاری مشابه انجام داده بود.

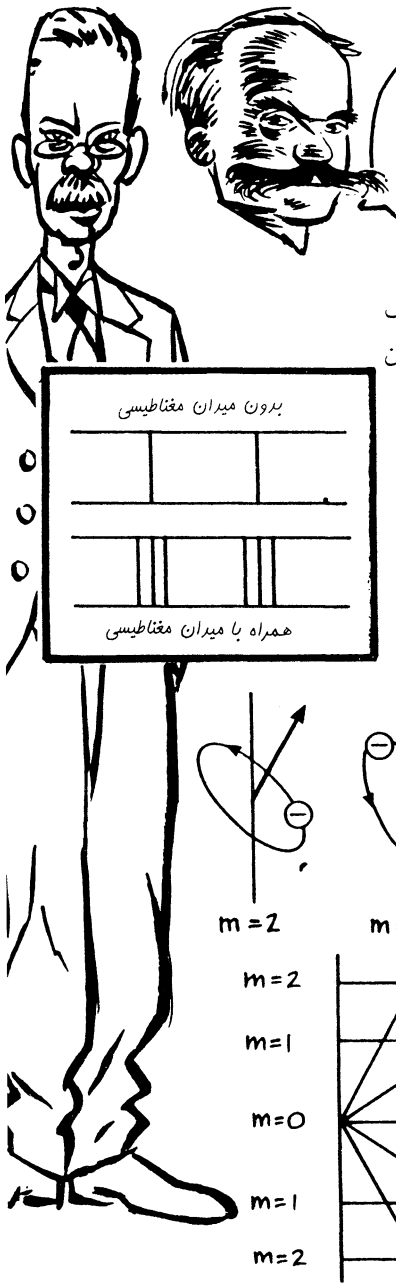
عدد کوانتومی دیگری اضافه شد؛ k

علیرغم شروع جنگ به‌اصطلاح بزرگ ــ مقاله‌ای مخفیانه از مونیخ به کپنهاک فرستاده شد که در آن سامرفیلد مدارهای بیضوی مختلف‌الشکل را برای مقدار یکسان n شرح داده بود.

باز هم تنها مقادیر مشخصی از اشکال مداری مجاز هستند. عدد کوانتومی دیگری، k، معرفی شد که با واحدهای $h/2\pi$ کوانتمی شده است.

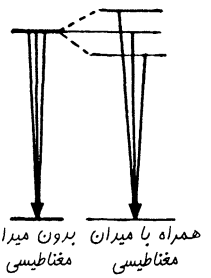
اثر زیمان... و باز هم خطوط بیشتر

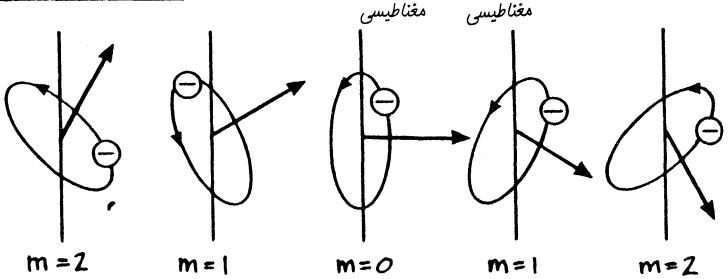
در اوایل سال‌های ۱۸۹۰ **پیتر زیمان** (۱۶۴۳ـ۱۸۶۵) هلندی نشان داد هنگامی که اتم‌های برانگیخته در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند خطوط اضافی‌ای در طیف پدید می‌آید. یک نظریه اتمی صحیح باید این پدیده، که اکنون با عنوان اثر زیمان شناخته می‌شود، را توضیح دهد.

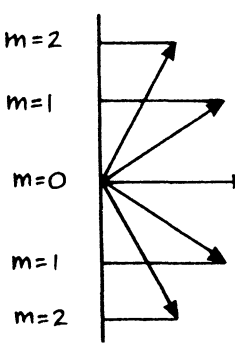


سمت و ***سوی*** *مدارها مهم است. هنگامی که میدان اعمال می‌شود، الکترون‌های تحریک‌شده می‌تواند با توجه به میدان، موقعیت‌های مداری بیشتری با انرژی مجاز برگزینند.*

جهت‌ها نیز کوانتمی شده است. بنابراین یک **عدد کوانتومی مغناطیسی، m**، نیز اضافه شد. این کار را نیز سامرفیلد انجام داد.







در فوریه ۱۹۱۶ اینشتین به سامرفیلد نوشت که او نتایج جدید را به‌عنوان «یک الهام» تلقی می‌کند. یک ماه بعد بور اضافه کرد: «به‌یاد ندارم که تاکنون از خواندن چیزی به اندازه کار زیبای شما لذت برده باشم.»

m و k و n سه عدد کوانتومی

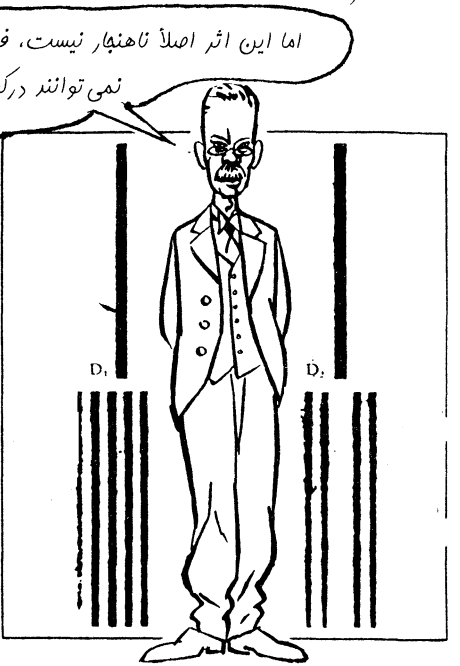
بور با کمک محاسبات سامرفیلد و به منظور کمک به او یک رشته قواعد گزینشی برپایه **سه** عدد کوانتومی پیدا کرد؛ اندازه مدار **(n)** و شکل مدار **(k)** و جهتی که مدار به آن اشاره می‌کند **(m)**

اکنون می‌توان هر حالت گسسته انرژی را به مجموعه‌ای ناپیوسته از اعداد صحیح **n** و **k** و **m** نسبت داد که گذارهای بین حالت‌ها، خطوط طیفی مشاهده‌شده را تولید می‌کنند.

آیا طرح بور-سامرفیلد برای توضیح همه خطوط طیف مشاهده‌شده هیدروژن کافی بود؟ خوب نه، یعنی نه کاملاً. هنوز جای چیزی خالی بود. عدد کوانتومی دیگری برای توضیح کامل آثار مغناطیسی لازم بود.

ولفانگ پائولی: اثر ناهنجار زیمان، اسپین، الکترون و اصل طرد

توضیح شکاف‌های مغناطیسی خطوط طیفی، که در سال ۱۸۹۴ به‌وسیله زیمان گزارش شده بود، موفیت بزرگی برای طرح مدارهای بور ـ سامرفیلد بود. اما آثار مغناطیسی خطوط بیشتری تولید کردند و فیزیکدانان گیج شدند. آنها این اثر را، اثر ناهنجار زیمان (AZE) نام نهادند. (AZE: Anomalous Zeeman Effect)



در سالهای ۵ـ۱۹۲۴ همه فیزیکدانان به‌دلیل اثر (AZE) مات و مبهوت شده بودند، به‌جز کوچکترین‌شان که نظریه‌پردازی سوئیسی به‌نام **ولفانگ پائولی** (۵۴ـ۱۹۰۰) بود. درواقع این مسئله آنقدر او را به دردسر انداخت که الهام‌بخش یکی از داستان‌هایی باشد که بسیاری از مردم دربارهٔ او می‌گفتند و اکثر آنها نیز حقیقت داشت.

پائولی دعوت بور برای کار در کپنهاک را پذیرفت و مقاله‌ای دربارهٔ AZE نوشت که البته هیچکدام این کارها او را راضی نکرد. او اغلب به دلیل متوقف‌ماندن در این مسئله در طول سالهای اقامتش در کپنهاک (۱۹۲۲ و ۱۹۲۳) ناامید و نگران بود. روزی، در حال پرسه‌های بیهوده در خیابانهای زیبای کپنهاک، پائولی همکاری را ملاقات کرد...

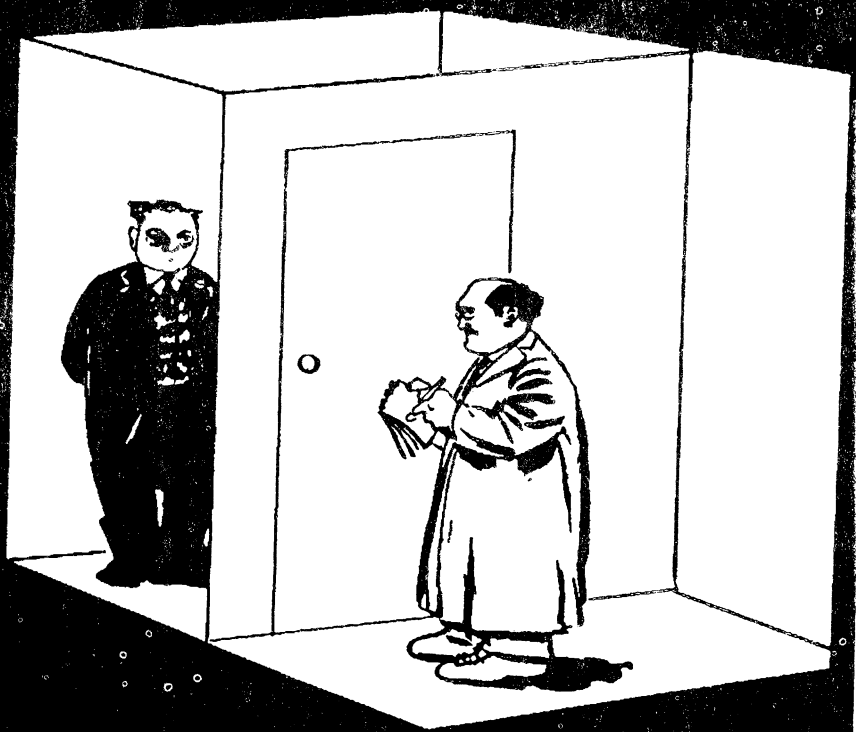
پائولی تحصیلاتش را در وین آغاز کرد. جایی که در دوران نوجوانی‌اش در آنجا ریاضیات و فیزیک آموخته بود. در سال ۱۹۱۸ در دانشگاه مونیخ ثبت‌نام کرد و با تشویق استادش مقاله‌ای انتقادی دربارهٔ نسبیت عام منتشر کرد، و وقتی اینشتین دربارهٔ این مقاله نوشت: «هرکس که *این کار سنجیده و به‌خوبی طرح‌ریزی شده را بخواند باور نخواهد کرد که نویسندهٔ آن فقط ۲۱ سال سن دارد*» پائولی به افسانه تبدیل شد.

اثر پائولی

پائولی تز دکترای خود را زیر نظر سامرفیلد درباره نظریه کوانتومی هیدروژن یونیزه در سال ۱۹۲۱ انجام داد. او یک نیم‌سال به‌عنوان دستیار بور به گوتینگن رفت و سپس به‌عنوان استاد بدون حقوق به هامبورگ عزیمت کرد.

در این دوره اولین اثر پائولی رخ داد (با اصل پائولی اشتباه نشود)...

هرگاه او به آزمایشگاهی وارد می‌شد بلایی بر سر تجهیزات آزمایشگاهی می‌آمد! (اثر پائولی!)



این حقیقتی است که نظریه‌پردازها از آزمایش‌ها ناامید می‌شوند. اما پائولی نظریه‌پردازی چنان استثنایی بود که تنها حضورش سبب تلاشی ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی می‌شد. او اغلب درحالی که قاه‌قاه می‌خندید نقل می‌کرد که چگونه دوستش اتواسترن (۱۹۶۹–۱۸۸۸) آزمایشگر بسیار سرشناس در هامبورگ تنها از پشت در بسته آزمایشگاه با او صحبت می‌کرد.

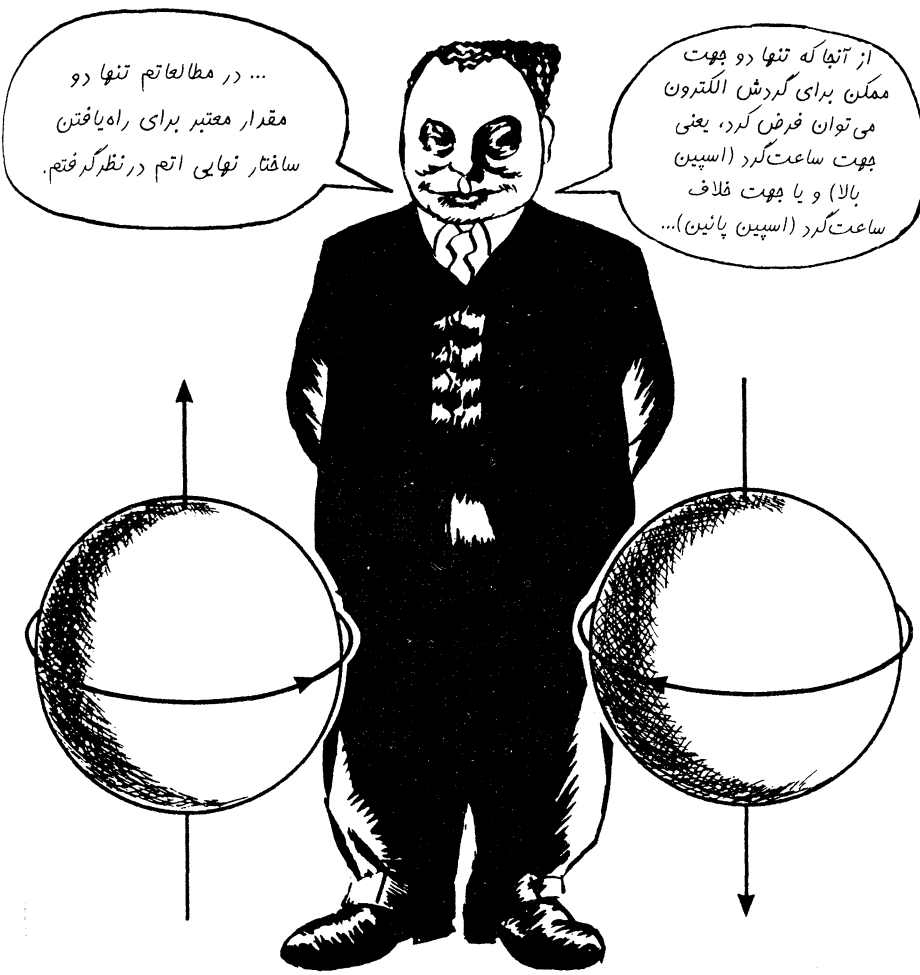
اثر ناهنجار زیمان ــ که پائولی را در کپنهاک بسیار آزرده بود ــ بالاخره سبب جاودانه‌شدن او به‌عنوان یکی از بنیان‌گذاران اصلی نظریه کوانتوم شد.

«گردش پنهان» پائولی و الکترون‌های گردان

پائولی نظریه‌ای ارائه داد که مطابق آن یک **گردش پنهان** اندازه حرکت زاویه‌ای اضافی (AZE) را فراهم می‌آورد. او عدد **چهارم** کوانتومی را با **دو** مقدار معرفی کرد. این درست همان چیزی بود که برای توضیح اثر AZE لازم داشت.

در همین حال دو فیزیکدان جوان هلندی **گئورک اولنبک** و **سام گوداشمیت** ایده مشابه‌ای ارائه کردند. **پائول ارنفست**، استادشان که با آنها بسیار همدل بود، مقاله آنها را برای چاپ فرستاد.

به‌زودی معلوم شد که آثار رازگونه AZE وابسته به گردش الکترون است، همین گردش است که به آن اندازه حرکت زاویه‌ای اضافی می‌دهد.

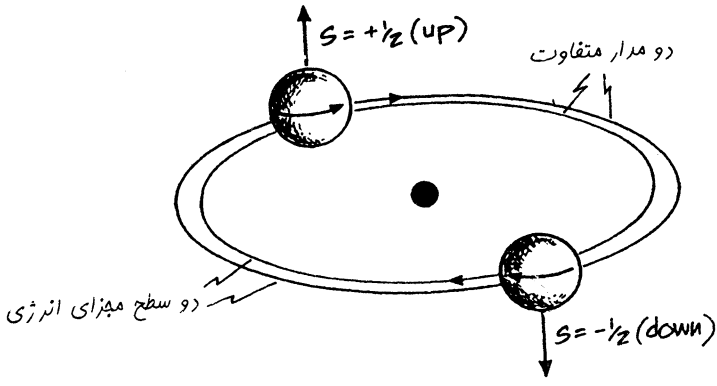


این یک جنبهٔ مشکل دربارهٔ اسپین الکترون بود که به پیدایش نظریه کوانتومی جدیدی در سال بعد منجر شد که به آن اشاره خوهیم کرد. اندازه حرکت زاویه‌ای گردش الکترون تنها **نصف مقدار معمول مدارهای اتمی** $\mathbf{h}/2\pi$ از کار درآمد که اصطلاحاً **اسپین** $\frac{1}{2}$ نامیده می‌شود.

این مثال دیگری است از یک مفهوم نیمه‌کلاسیک (اسپین) که چندان کارا نیست (یعنی این‌که الکترون باید **دو**بار دور خودش بچرخد تا به وضع اول برگردد).

اصل طرد پائولی

معمای اولیه ساختار اتمی این بود که چرا همه الکترون‌ها به حالت پایه سقوط نمی‌کنند. برای توضیح اینکه چرا چنین اتفاقی نمی‌افتد پائولی فرض کرد که هر سطح اتمی (مجموعه سه عدد کوانتومی) شامل دو الکترون است که مدار انحصاری خود را لازم دارد. به این مطلب عنوان غریب **فضای کوانتومی** داده شد.

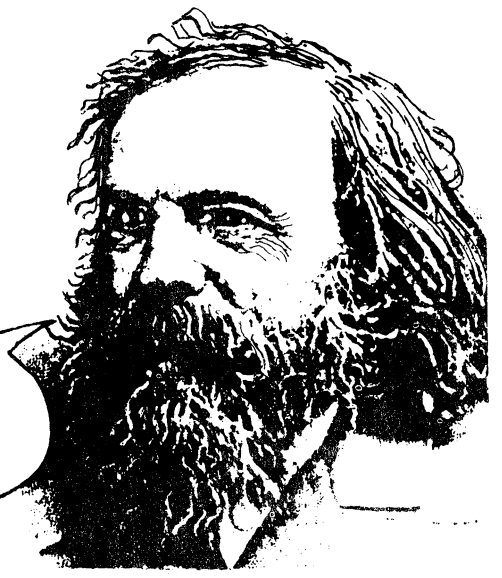


پائولی اکنون به کمک مفهوم اسپین با دو مقدار، قادر به بیان نهایی **اصل طرد** خود بود...

پائولی برخلاف نظریهٔ اولیه‌اش که برای توجیه AZE به الکترون‌های خارجی محدود می‌شود پیشنهاد کرد این اصل را به همهٔ الکترون‌ها و همهٔ اتم‌ها اعمال کنند. اکنون با این فرض ساده اما عمیق، می‌توان سطوح کوانتومی هر اتم را بنا کرد و فرم جدول تناوبی عناصر را با استفاده از این اصول اولیه فهمید.

جدول تناوبی: مندلیف

عناصر تناوبی از سالهای ۱۸۹۰ شناخته شده بودند؛ زمانی که دیمیتری مندلیف روسی (۱۹۰۷–۱۸۳۴) یک کمک تصویری برای دانش‌جویانی ابداع کرد که با شیمی آلی دست به‌گریبان بودند.



دریافتم اگر عناصر در جدولی از ستون‌ها و سطرها با توجه به افزایش عدد اتمی منظم بشوند خواص اتمی تکرار می‌شوند.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

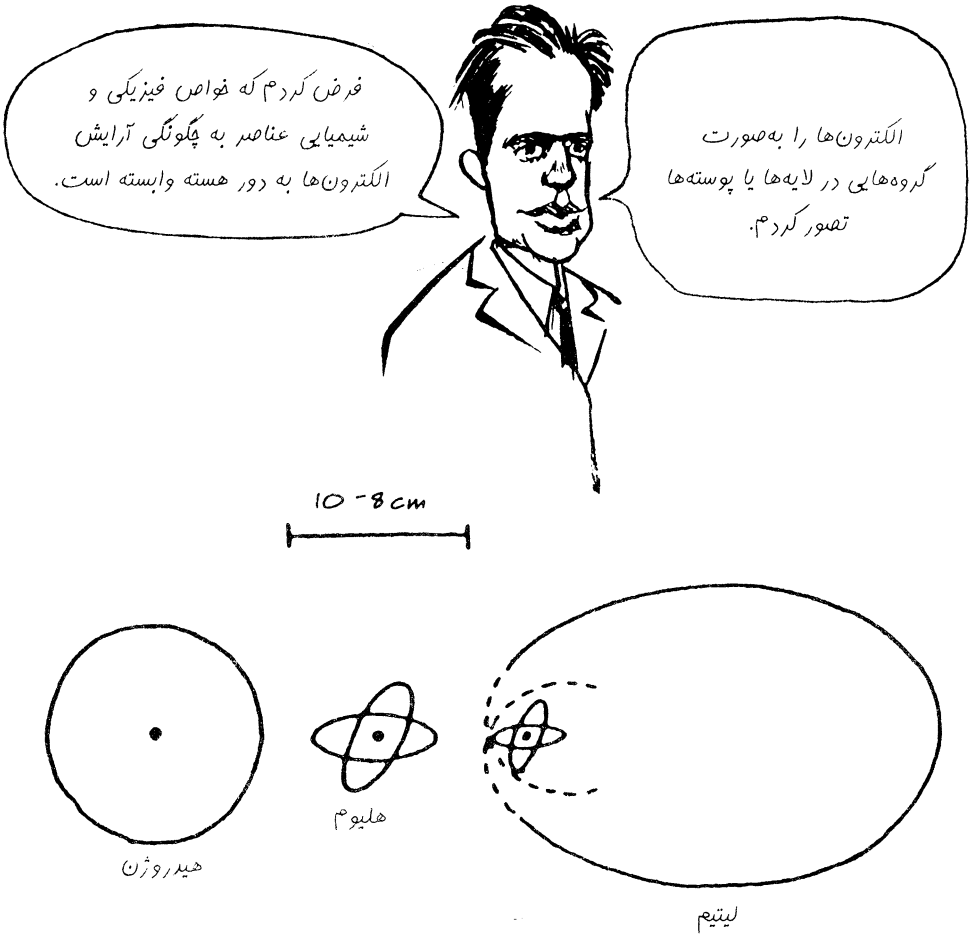
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		

این خاصیت تناوبی تا زمانی که اصل طرد پائولی به سال ۱۹۲۵ توضیح بنیادی برای آن به‌دست نداد، چون رازی باقی مانده بود. اگرچه قبل از کشف پائولی نیلز بور با استفاده از مدل مداری اتم آن را توضیح داده بود.

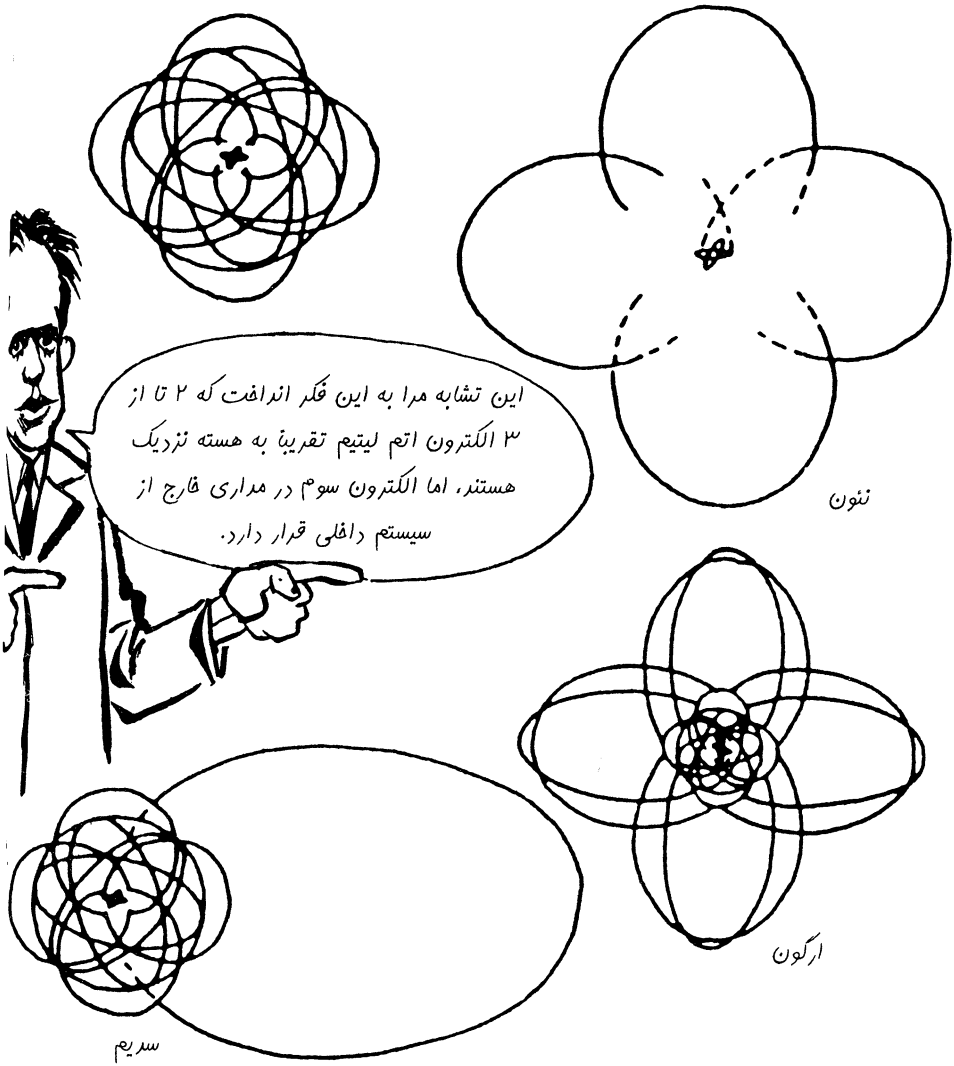
توضیح بور برای جدول تناوبی

در زمان شروع مطالعات اتمی در سال ۱۹۲۳، مسئله مورد توجه بور بیش از توضیح طیف بالمر، جدول تناوبی عناصر بود. او این کار توضیح جدول تناوبی را با شم فیزیکی بالایی که داشت و با کمک جزئیات مدل مداری‌اش انجام داد.



هر پوسته نمی‌تواند بیش از تعداد مشخصی الکترون را شامل باشد و خواص شیمیایی‌اش دقیقاً به چگونگی خالی یا پربودن این سطوح بستگی دارد. به‌عنوان مثال سطوح پر مستلزم پایداری اتمی هستند؛ مانند سطوح الکترون در گازهای بی‌اثر (هلیوم، نئون، آرگون...) که کاملاً پُر پنداشته می‌شوند.

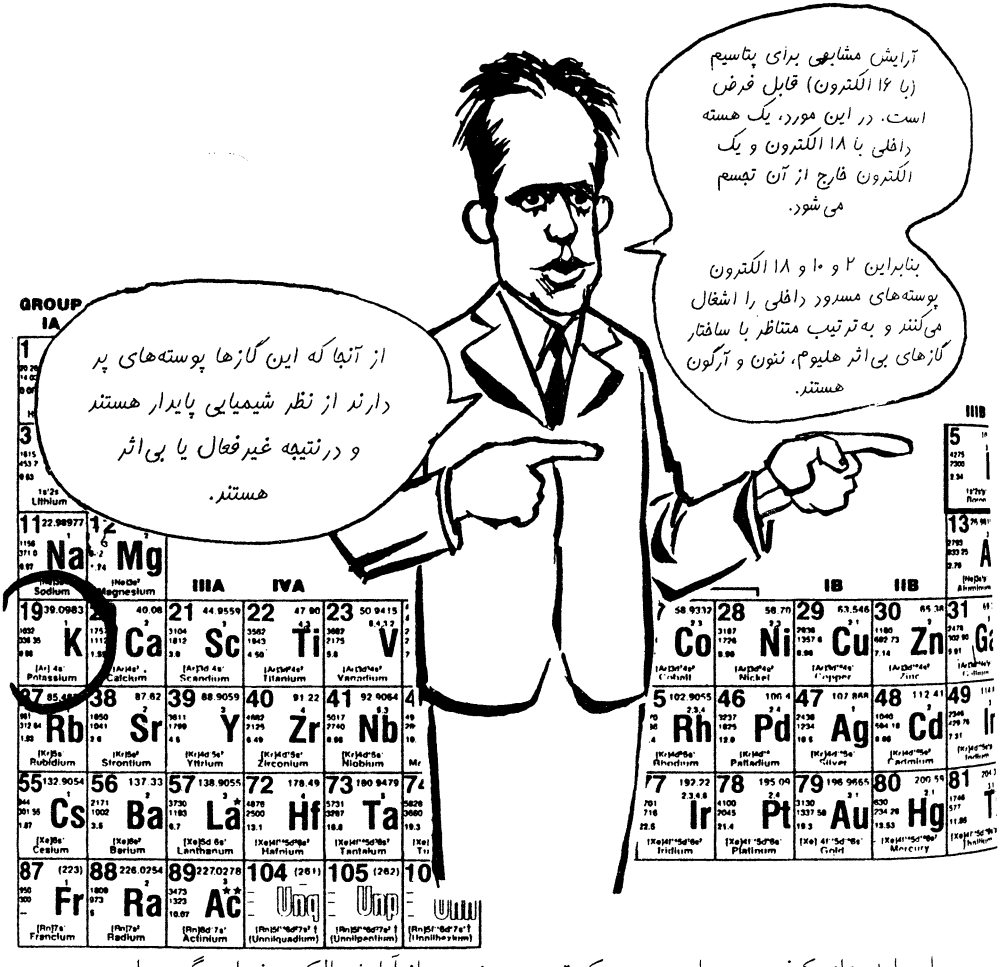
بور کار خود را با این مشاهده شروع کرد که عنصر هیدروژن (با یک الکترون) و لیتیم (با سه الکترون) از نظر شیمیایی تا حدی شبیه هستند. هردو این عناصر دارای ظرفیت یک هستند و در ترکیب‌های مشابهی وارد می‌شوند؛ مثلاً کلرید هیدروژن HCl و کلرید لیتیم LiCl.



بنابراین اتم لیتیم ممکن است با حذف جزئیات به شکل اتم هیدروژن تصور شود. این تشابه ساختار فیزیکی دلیل شباهت رفتار شیمیایی است. بنابراین اولین پوسته دو الکترون دارد و الکترون سوم به پوسته بعدی یا بیرونی می‌رود.

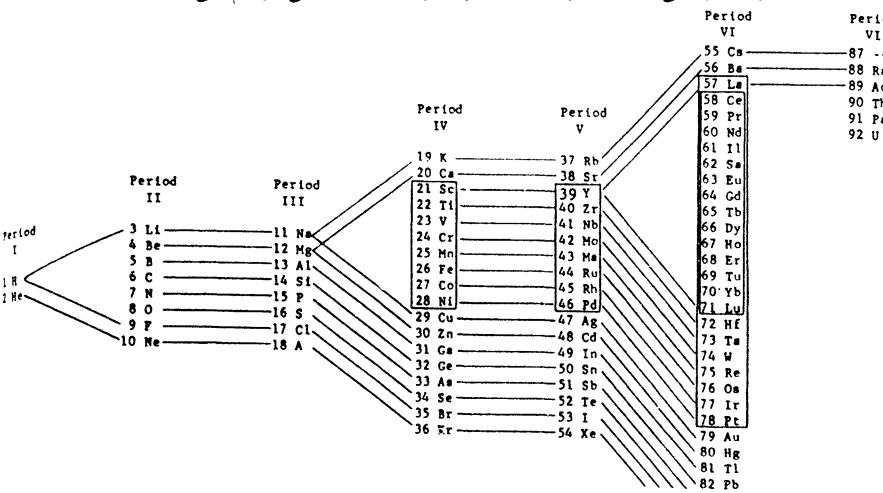
پوسته‌های مسدود و گازهای بی‌اثر

سدیم (با ۱۱ الکترون) عنصر بعدی در جدول تناوبی است که خواص شیمیایی مشابه هیدروژن و لیتیم دارد. این تشابه دال بر این است که سدیم نیز **هیدروژن‌گونه** هسته‌ای مرکزی دارد که یک الکترون به دور آن می‌چرخد. پس برای سدیم، یازدهمین الکترون باید در پوسته بیرونی باشد و بنابراین دومین پوسته ۸ الکترون دارد.



این ایده‌های کیفی، بور را به‌سوی یک تصویر منسجم از آرایش الکترون‌ها در گروه‌ها یا پوسته‌هایی به دور هسته سوق داد. هیدروژن، لیتیم، سدیم و پتاسیم هرکدام یک تک‌الکترون، به دور هسته‌ای دارند که بسیار شبیه عنصر پیشین ــ گاز بی‌اثر ــ است. این الکترون دورافتاده به‌راحتی **گرفتار** اتم‌های مجاور می‌شود و این همان چیزی است که فرض ما را با واقعیت سازگار می‌کند.

بور این خطوط را کاملاً تحلیل کرد و در سال ۱۹۲۱ شکلی از جدول تناوبی را پیشنهاد کرد که در زیر نشان داده شده است. جدول بور که هنوز هم قابل استفاده است و مثالی از یک نظریهٔ فیزیکی است که پایه‌ای معقول برای درک شیمی فراهم می‌آورد.



اما این پائولی بود که درکی بنیادی از جدول تناوبی «فیزیکی» بور به‌دست داد. اصل طرد او (که می‌گوید: هر الکترون باید مجموعه اعداد کوانتومی مربوط به خود را داشته باشد) خود به‌خود اعداد جادویی ۲ و ۸ و ۱۸ و غیره را تولید می‌کند که بور برای پوسته‌های خود ابداع کرده بود. این اولین نشانهٔ این واقعیت است که هر الکترون در اتم «آدرس» الکترون‌های دیگر را «می‌داند» و جایگاه یگانه مربوط به خود را در ساختار اتم می‌پذیرد. (درباره این پیوستگی بعداً توضیح داده می‌شود).

جدول زیر نشان می‌دهد که چگونه اصل طرد **اعداد جادویی** را تولید می‌کند (تعداد الکترون‌ها در هر مدار یا پوسته) گستره مقادیر اعداد کوانتومی **m** و **k** از نمودار صفحات ۵ــ۹۳ استخراج می‌شوند. چهارمین عدد کوانتومی که از AZE معین می‌شود اسپین الکترون، **s**، است که فقط دو مقدار **بالا** و **پائین** را می‌پذیرد. در جدول پوسته‌های بور، متناظر با مدارها با عدد کوانتومی اصلی **n** نام‌گذاری شده‌اند.

	n	k ممکن	m ممکن	s ممکن	محل ترازها	
اولین پوسته	1	1	0	± 1/2	2	= 2
	2	1	0	± 1/2	2	= 8
دومین پوسته	2	2	–1, 0, 1	± 1/2	6	
	3	1	0	± 1/2	2	
	3	2	–1, 0, 1	± 1/2	6	= 18
سومین پوسته	3	3	–2, –1, 0, 1, 2	± 1/2	10	

دوگانگی موج / ذره

قبل از پرداختن به تصویری اساساً جدید از الکترون در اتم، فهم ویژگی‌های امواج و بررسی پیچیده‌ترین پارادوکس فیزیک ضروری است.

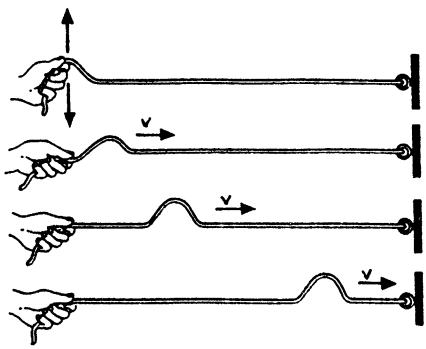
آیا سرشت بنیادین ماده و موج با نمایش موجی بهتر قابل توضیح است یا ذره‌ای؟ یا هردو لازم است؟

برای پی‌بردن به ریشه‌های جدل **ذره‌ای/موجی** باید به زمان ایزاک نیوتن و فیزیکدان هلندی **کریستیان هویگنس** (۹۵ـ۱۶۲۶) و بحث این دو دربارهٔ سرشت نور بازگردیم.

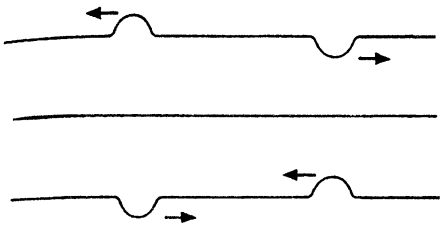
کدام‌یک درست می‌گویند؟ دلایل نظریه موجی نور کدام است؟

ویژگی امواج

یک پالس را که در طول طناب مستقیم و قابل انعطافی حرکت می‌کند درنظر بگیرید؛ این ساده‌ترین حرکت موجی است.



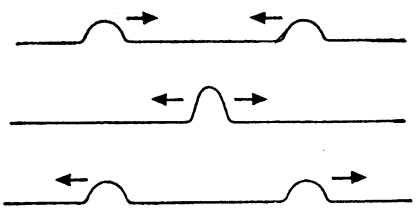
توجه کنید اگر پالس‌ها دارای یک شکل و یک اندازه اما جهت‌های مخالف باشند، یکدیگر را در نقطه مشترک کاملاً خنثی می‌کنند و از یکدیگر عبور می‌کنند (انرژی برای حرکت طناب مصرف می‌شود).



اکنون فرض کنید که پالس‌ها در هر دو انتهای طناب تولید شوند و به سوی یکدیگر حرکت کنند. آنچه هنگام هم‌پوشانی رخ می‌دهد نشان‌دهندهٔ ویژگی یکتای امواج است که **برهم‌نهی** نام دارد (این امر در مورد ذرات رخ نمی‌دهد).

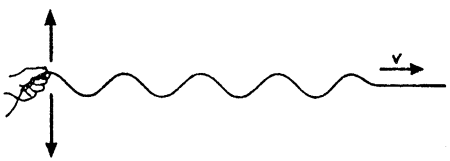
برهم‌نهی

هرگاه دو پالس روی یک طناب از یک نقطه خاص در یک لحظه عبور کنند جابه‌جایی طناب برابر مجموع هریک از جابجایی‌ها است.



امواج متناوب

اگر یک پالس، پالس دیگر را در یک توالی منظم دنبال کند، امواج متناوب به‌وجود می‌آیند.

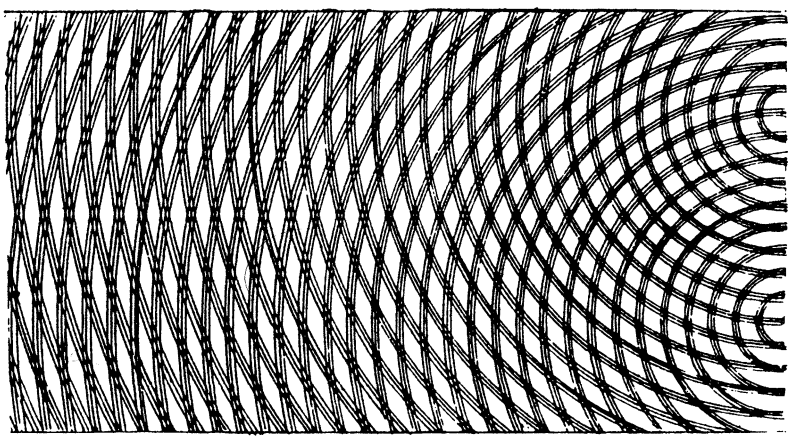


سرعت موج

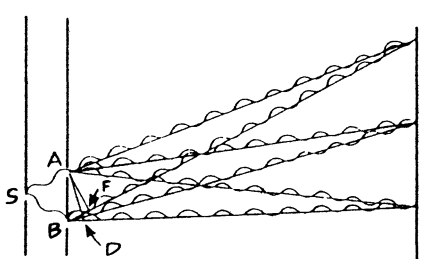
سرعت (v)، طول موج (λ) و فرکانس (f)؛ یک موج توسط رابطه سادهٔ $v=f\lambda$ به هم مربوط می‌شوند. این مطلب از این واقعیت آشکار می‌شود که فرکانسِ تعداد موج در ثانیه و λ طول موج است.

تداخل: آزمایش دو شکاف

آزمایش کلاسیک دو شکاف را درنظر بگیرید. اگر دو موج تناوب همانند، غیرهم‌فاز یعنی دقیقاً با اختلاف **نصف طول موج** به‌نقطه‌ای وارد شوند **تداخل ویرانگر** صورت می‌گیرد و امواج یکدیگر را خنثی می‌کنند (مثلاً برای نور نقاط تاریک به‌وجود می‌آیند). اگر فاصله **دقیقاً یک طول موج کامل** باشد **تداخل سازنده** رخ می‌دهد و نقاط روشن آشکار می‌شوند (یعنی برای نور).



طرح اصلی یانگ تداخل را نشان می‌دهد که با قراردادن چشمتان در لبه سمت راست و نگاه‌کردن با زاویه تصویر به بهترین وجه قابل دیدن است.



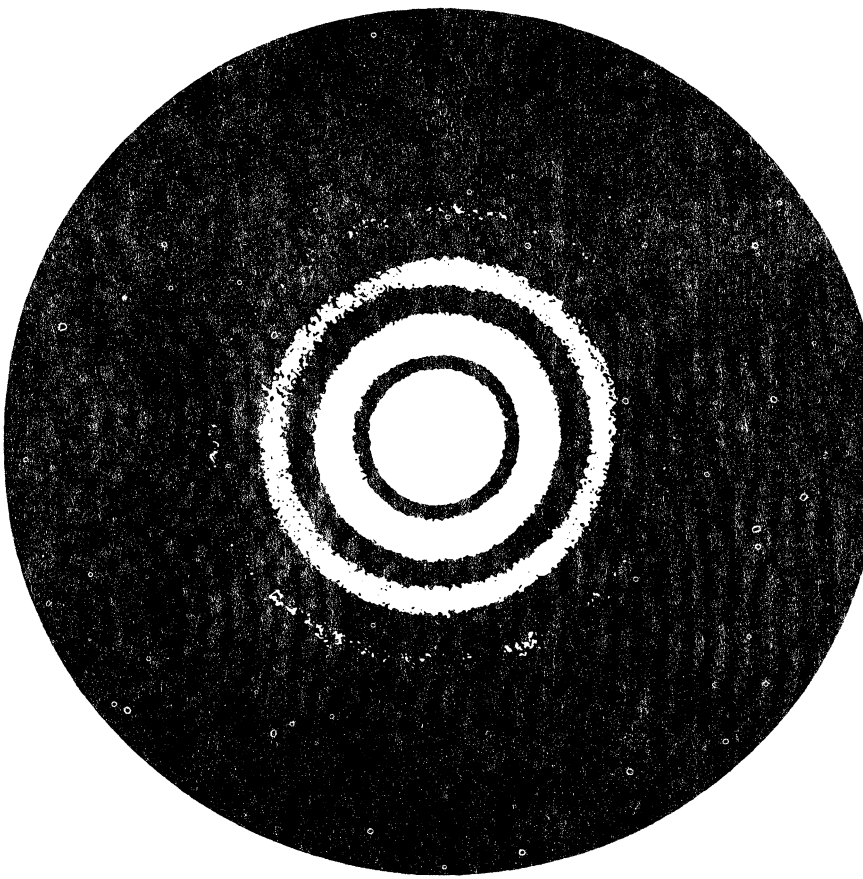
تداخل سازنده: خطوط روشن را تولید می‌کند (امواج «هم»فاز)

تداخل ویرانگر: خطوط تاریک را تولید می‌کند (امواج «نا»هم‌فاز)

تداخل سازنده: خطوط روشن را تولید می‌کند (امواج «هم»فاز)

پراش (Diffraction) و تداخل (Interference)

پراش یعنی انحناء امواج در اطراف یک لبه، نیز می‌تواند الگوهای تداخلی ایجاد کند. هنگامی که نور تابیده شده از یک منبع نور نقطه‌ای (یا هر منبع موج دیگری) از میان سوراخ دایره‌ای هم‌اندازه طول موجش عبور کند، پراش از لبه‌های روزنه، نور را به‌صورت دایره بزرگی بخش می‌کند و تداخل رخ می‌دهد.



الگوها در تصویر نشان داده شده‌اند. اگرچه مسیر امواج از آزمایش در شکاف پیچیده‌تر است، اما اصول همان است، باز هم همان الگوها را می‌بینیم؛ یعنی یک مدرک قاطع برای موجی‌بودن نور علاوه بر این آثار تداخلی، مدرک دیگری نیز برای موجی‌بودن نور توسط نظریه الکترومغناطیس ماکسول در سال ۱۸۶۵ ارائه شد. فیزیکدانان کلاسیک قرن نوزدهم متقاعد شده بودند که نور از امواج تشکیل شده است.

اینشتین... صدایی تنها

اما در آغاز قرن بیستم اینشتینِ جوان، ایدهٔ **ذره‌ای**‌بودن را برای توضیح پدیده فوتوالکتریک مجدداً مطرح کرد (صفحه ۴۶ را ببینید). چند سال بعد در سال ۱۹۰۹ او شیوه جدید و قدرتمند افت‌وخیز آماری‌اش را به قانون جسم سیاه پلانک اعمال کرد و نشان داد که به این ترتیب دو عبارت مجزا ظاهر می‌شوند که مبین **دوگانگی** هستند.

اینشتین تنها کسی بود که به این مسئله پرداخت. کسی **فوتون**‌ها را باور نداشت. این اولین باری نبود که او پیش‌تاز هم‌عصران خویش در مواجهه با ابهامات نظریه کوانتومی (دست‌کم درباره تابش نور) شده بود.

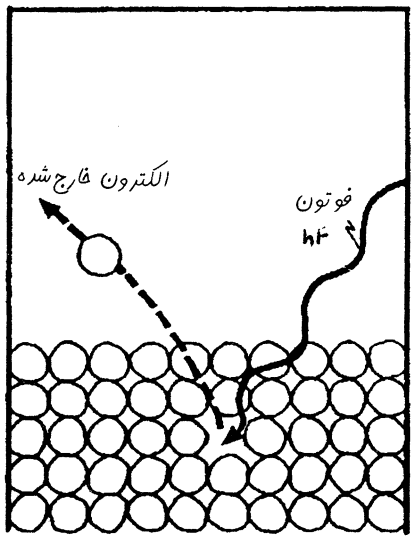
اما حتی اینشتین نیز برای ضربه‌ای که در سال ۱۹۲۴ از پاریس وارد آمد، آماده نبود. خوشبختانه او به‌سرعت با این مطلب کنار آمد. لازم بود که فوراً اظهارنظر کند!

شاهزاده فرانسوی امواج مادی را کشف کرد

در سال ۱۹۲۳ یک دانشجوی فارغ‌التحصیل از سوربن پاریس، پرنس **لویی دوبروی** (۱۹۸۷ـ۱۸۹۲) ایده حیرت‌انگیز خود را ارائه داد که بیانگر خصوصیت موجی ذرات بود. دوبروی به‌شدت تحت تأثیر بحث‌های اینشتین دربارهٔ لزوم لحاظ‌کردن دوگانگی در فهم طبیعت نور، قرار داشت.

دوبروی در سال ۱۹۲۴ در تز دکترایش نوشت...

او عمیقاً تحت تأثیر ذرات نور اینشتین بود که می‌توانستند باعث اثر فوتوالکتریک (خارج‌شدن الکترون از فلز) شوند. این ذرات اطلاعات «متناوبی» را با خود حمل می‌کردند که آثار تداخلی در شرایط دیگر (مانند آزمایش دو شکاف) موجب می‌شدند. بعد از این ملاحظات بود که نظریهٔ جنجالی او عرضه شد. او در اولین قسمت تزش یکی از وحدت‌بخش‌ترین اصول فیزیک را عرضه کرد.

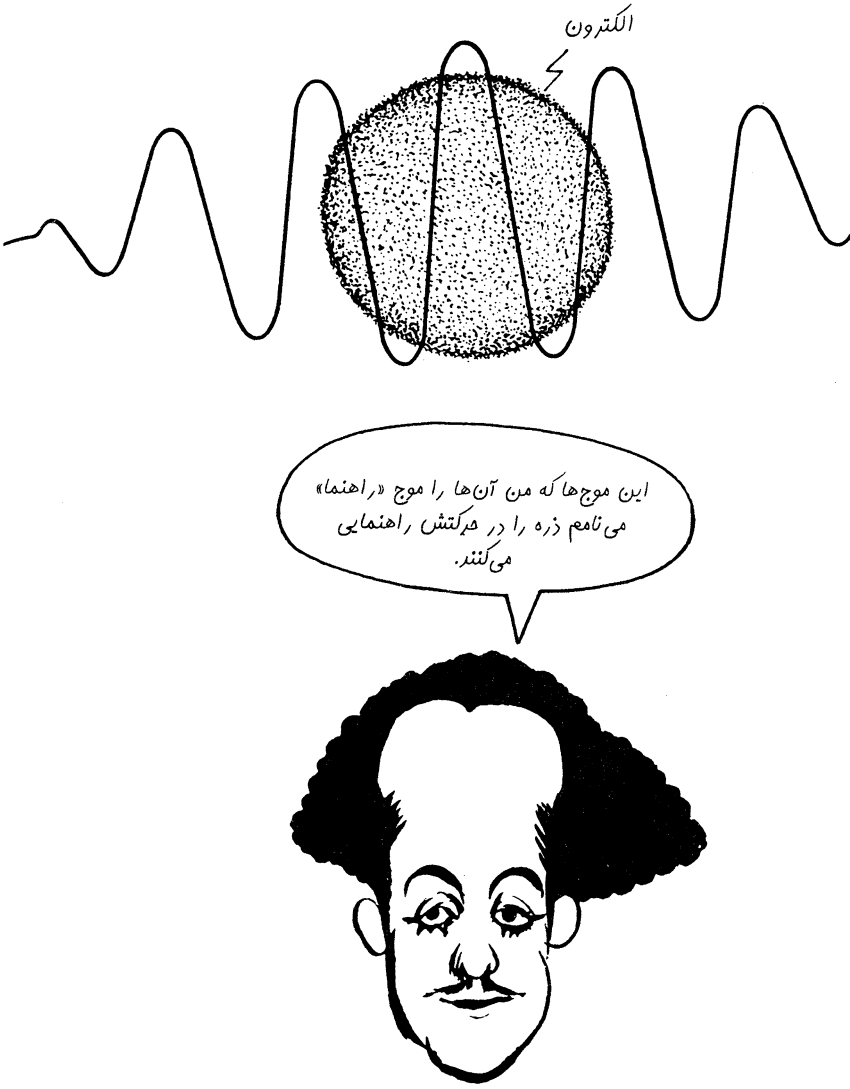


یک فوتون با فرکانس (طول موج) اندازه‌گیری‌شده با یک الکترون برهم‌کنش می‌کند.

«دریا»ی الکترون

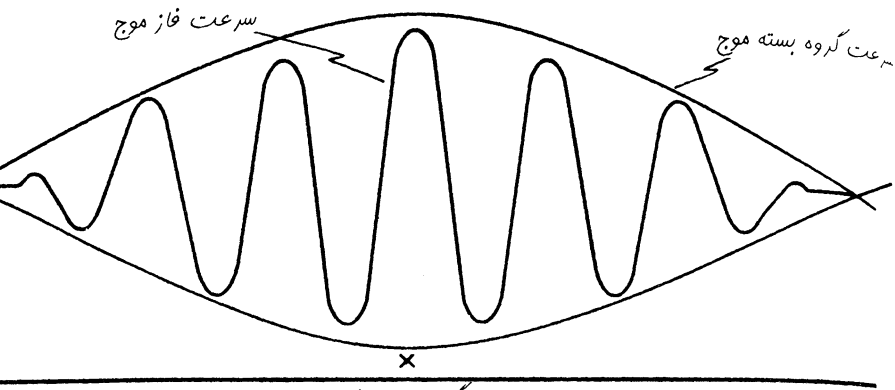
یک موج وابسته

آنچه دوبروی انجام داد نسبت‌دادن فرکانس به یک رفتار متناوب ذره‌ای نبود (آن کاری که به تصور او فوتون اینشتین انجام می‌داد) بلکه **موجی همراه ذره در فضا و زمان** بود که همواره هم‌فاز پروسه درونی بود.



آیا این امواج قابل آشکارشدن بودند؟ آیا این امواج سحرآمیز می‌توانستند با حرکت واقعی ذرات مربوط باشند و اندازه‌گیری شوند؟

دوبروی گفت، بله. این امواج فقط امواج انتزاعی نیستند. پیامد فیزیکی مهم این ایده‌های جدید این است که امواج راهنما به دو سرعت وابسته‌اند.



دوبروی سرعت گروه را به‌سرعت ذره مربوط ساخت و نشان داد که ناحیه استحکام‌یافته دارای همه خواص مکانیکی است. مانند انرژی و اندازه حرکت که معمولاً به ذره وابسته‌اند. (این مشابه روشی است که یک **پالس** از برهم‌نهی تعداد فراوانی موج با فرکانس متناوب ساخته می‌شود.)

نتایج چشمگیر

هنگامی که روابط ساده ریاضی‌ای نوشته شوند که این ایده را براساس تشابه فوتون‌ها توصیف می‌کند نتایج چشمگیر بیشتری به‌دست می‌آید.

او با فرمول معروف $E=mc^2$ اینشتین برای مقدار انرژی کل هر چیز شروع کرد. در این حالت، فوتون‌ها...

$$E = mc^2 = (mc)(c)$$

حالا رشته جایگزینی‌های دوبروی را نگاه کنید...

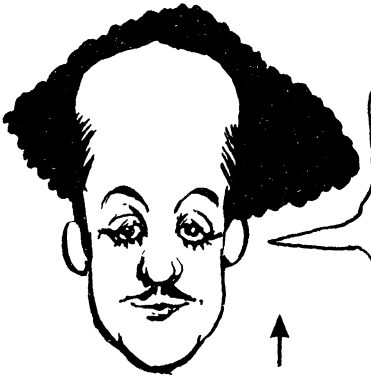
mc حاصل‌ضرب جرم در سرعت است، اندازه حرکت فوتون p است.

$$E = (p)(c) = (p)(f\lambda)$$

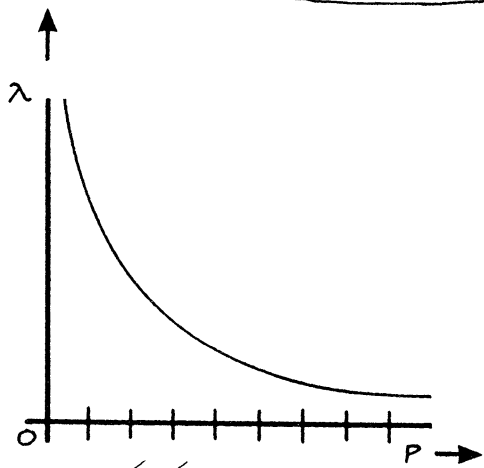
با استفاده از رابطه (طول موج)λ×(فرکانس)f = (سرعت)c برای امواج و واردکردن $E=hf$ از رابطه پلانک/اینشتین در عبارت بالا به‌دست می‌آوریم:

$$(h)(f) = (p)(f\lambda)$$

و از اعمال روابط جبری ساده به‌دست می‌آوریم $\lambda=h/p$ (فوتون)



این نتیجه بسیار مهم بود. نشان داده خواهد شد که چگونه هایزنبرگ برای توضیح **اصل عدم قطعیت** *از آن استفاده کرد. همین‌جا سعی کنید آن را درست درک کنید. فرم آن ساده و مفهومش عمیق است.*



طول موج با افزایش اندازه حرکت کاهش می‌یابد.

هنگامی که اندازه حرکت زیاد می‌شود طول موج کم می‌شود.

با یک قیاس مستقیم دوبروی پیشنهاد کرد که رابطه‌اش نه‌فقط برای **فوتون** که برای **الکترون‌ها** و همه ذرات دیگر نیز صادق است...

$$\lambda = h/P...$$

یا، طول موج = حاصل تقسیم ثابت پلانک بر اندازه حرکت

برای الکترون

اندازه حرکت $p = mv$ = (جرم) (سرعت)

با این رابطه اندازه حرکت را به‌راحتی در شرایط آزمایشگاهی می‌توان معین کرد و بنابراین طول موج را می‌توان از رابطه دوبروی پیش‌بینی کرد.

برای اغلب فیزیکدانان این مفهوم مضحک به‌نظر می‌رسید. الکترون از زمانی که توسط ج. ج. تامسون در سال ۱۸۹۷ کشف شد، ذره بود.

یک نظریه بهت آور

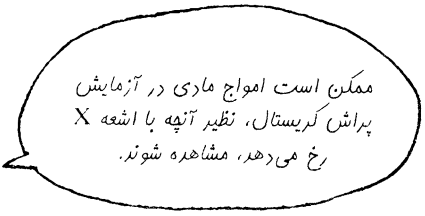
هنگامی که دوبروی تز خود را تحت عنوان «تحقیقاتی دربارهٔ کوانتوم» در سال ۱۹۲۴ ارائه کرد این ایده‌های حیرت‌انگیز هیئت آزمون دانشگاه پاریس را بهت‌زده و گیج کرد. یکی از اعضای این هیئت **پل لنژوین** (۱۹۴۶ـ۱۸۷۲) بود که خوشبختانه یک نسخه تکمیل‌شده از تز دوبروی را به‌دست آورد و آن را برای اینشتین فرستاد.

اینشتین تز را خواند و هنریک لورنتز را درجریان گذاشت.

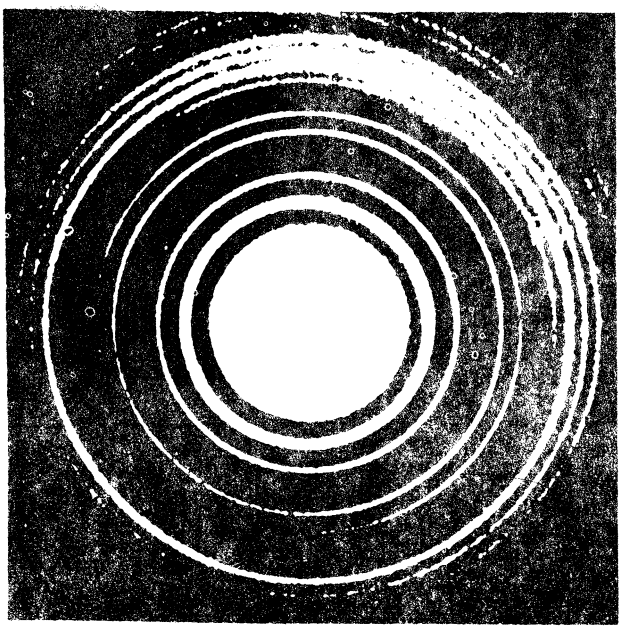
هیئت آزمون تز دکترای دوبروی را پذیرفتند.

تأیید امواج مادی

تنها در طول چندسال همهٔ پیش‌بینی‌های دوبروی توسط آزمایش تأیید شدند. جالب اینکه دوبروی برای دفاع از تز خود در برابر یکی از اعضای شکاک هیئت آزمون با جدیت گفته بود که...



جالب اینکه در یک تجربهٔ عجیب بود که الگوهای تداخلی برای اولین بار توسط ج.پ. تامسون (۱۹۷۵ـ۱۸۹۲) نشان داده شدند و خاصیّت موجی ذره ثابت شد.



دوبروی ایده جالب دیگری نیز درباره امواج الکترون در اتم داد که بعداً به آن‌ها خواهیم پرداخت.

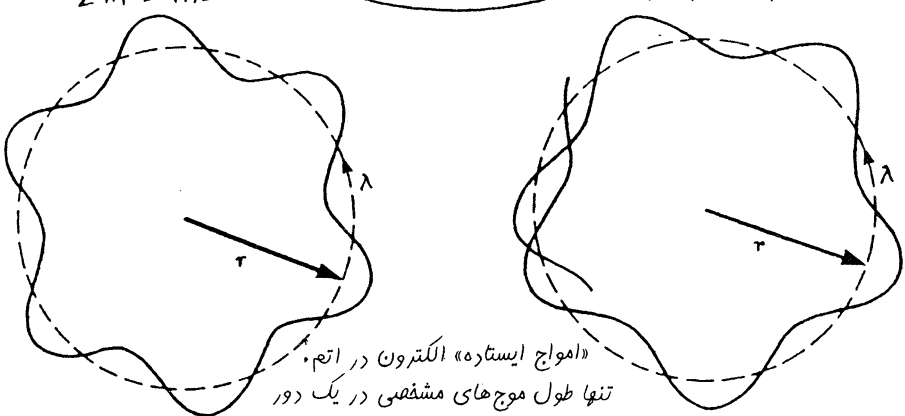
امواج الکترون در اتم

هنگامی که یک الکترون در اتم حرکت می‌کند موج وابسته به آن ایستا است یعنی به فرم موج ایستاده است (صفحه ۱۰۸ را ببینید) مانند موجی در طول یک سیم ویلون که دوطرف آن ثابت شده است.

دراین شرایط همان‌طور که هر دانشجوی موسیقی خوبی می‌داند تنها فرکانس‌های مشخص و ناپیوسته ـ فرکانس‌های اصلی و هارمونیک‌های آن ـ تولید می‌شوند.

$2\pi r = n\lambda$

$2\pi r \neq n\lambda$



«امواج ایستاده» الکترون در اتم: تنها طول موج‌های مشخصی در یک دور دایره جا می‌گیرند.

این درست همان چیزی است که بور در سال ۱۹۱۳ در طرح اتم هیدروژن خود به آن نیاز داشت (عامل غیرقابل توضیح 2π را به‌یاد آورید). با جادادن تعداد صحیحی موج الکترون در اتم و استفاده از روابط دوبروی، بور می‌توانست توجیه نظری کاملی برای کوانتومی بودن مدارها ارائه دهد. مختصری روابط جبری را ملاحظه کنید.

$$n\lambda = 2\pi r \quad \text{(موج ایستاده)}$$

$$n\,(h/mv) = 2\pi r \quad \text{(با استفاده از رابطه دوبروی)}$$

$$n\,(h/2\pi) = m\,v\,r \quad \text{(فرض کوانتومی مدار)}$$

شرط کوانتومی بور دیگر یک فرض نبود بلکه یک واقعیت بود.

تجسم اتم: نظریه کوانتومی قدیمی

«نظریه کوانتومی قدیم» را که از مدل مداری بور و مدل اصلاح‌یافته آن توسط سامرفیلد منتج شده بود می‌توان یک موفقیت واقعی تلقی کرد: **طیف هیدروژن**، یعنی استخراج فرمول بالمر، **اعداد کوانتومی قوانین گزینش** برای حالات انرژی اتم، **توضیح جدول تناوبی** و **اصل طرد پائولی**.

در موقعیت فعلی ما این مسئله مهم نیست و برای ادامهٔ این راه به هردو مفهوم نیاز خواهیم داشت. اما با این تصور مبهم از موج و ذره برای الکترون در داخل اتم ما به ماهیت واقعی نظریه کوانتومی نزدیکتر می‌شویم.

تولد سه نظریه جدید کوانتومی

اکنون یک گزارش قابل ملاحظه پس از ۲۵ سال سردرگمی!

در طول ۱۲ ماه از ژوئن ۱۹۲۵ تا ژوئن ۱۹۲۶، نه یکی نه دوتا بلکه ۳ تا طرح متفاوت و مستقل از نظریه کامل کوانتومی منتشر شد. که بعداً نشان داده شد هرسه آنها معادل یکدیگرند.

هایزنبرگ: نابغه، کوهنورد

هایزنبرگ (۷۶ـ۱۹۰۱) در مونیخ جایی که پدرش استاد زبان یونانی در دانشگاه محلی بود، پرورش یافت. او غالباً از کوهنوردی لذت می‌برد و بسیار خوش‌شانس بود که مونیخ در قسمت باواریایی آلپ قرار داشت. او دانش‌آموزی تیزهوش و پیانیستی ماهر بود. هایزنبرگ در دبیرستان مستقلاً به مطالعه فیزیک مشغول شد. در پاییز ۱۹۲۰ بعد از ثبت‌نام در دانشگاه مونیخ برای مطالعه نزد سامرفیلد رفت و در آنجا با ولفانگ پائولی ملاقات کرد. این آغاز یک دوستی همیشگی بود.

پائولی و هایزنبرگ در ژوئن ۱۹۲۲ در گوتینگن بودند. در این زمان هایزنبرگ برای اولین بار بور را ملاقات کرد. او تنها ۲۰ سال داشت و در این زمان بر روی تز دکترای خود کار می‌کرد. در همان روزها بود که پس از یکی از سخنرانی‌های بور به اعتراض برخاست و بور با تردید به اعتراض او جواب داد.

پس از پایان سخنرانی، بور نزد من آمد و از من خواست برای راهپیمایی در کوههای هایزنبرگ او را همراهی کنم.

این راهپیمایی تأثیر عمیقی بر زندگی علمی من گذاشت. شاید صحیح‌تر باشد که بگوییم که زندگی علمی واقعی من از عصر همان روز شروع شد که بور به من گفت: «**اتم شیء نیست.**»

ما حدود سه‌ساعت صحبت کردیم. برای اولین بار بود که من دیدم یکی از بنیان‌گذاران نظریه کوانتوم عمیقاً نگران مشکلات آن است. بور بینش عمیقی داشت که ناشی از مشاهده پدیده‌های واقعی بود و نه نتیجه تحلیل‌های ریاضی.

او می‌توانست به‌جای استنتاج صوری روابط، آنها را به‌طور شهودی بفهمد.

بعد از بازگشت از این پیاده‌روی بور دربارهٔ هایزنبرگ به دوستانش گفت:

هایزنبرگ **همه‌چیز را می‌فهمد.** در حال حاضر همه راه‌حل در دست اوست. او باید راهی برای فرار از مشکلات نظریه کوانتوم بیابد.

بور بی‌درنگ پی برده بود که هایزنبرگ فیزیکدانی جوان، با استعدادی استثنایی است.

اما هایزنبرگ باعث شگفتی بور شد. او از مدارهای خیالی الکترون بور متنفر بود.

او در بهار ۱۹۲۵ کپنهاک را ترک کرد و به گوتینگن رفت. جایی که ماکس بورن (۱۹۷۰–۱۸۸۱) او را در سن ۲۲ سالگی به‌عنوان استاد منصوب کرد. در آلمان دو مسئله هایزنبرگ را آزار می‌داد: یکی هوای آلوده و دیگری مشکل مدارهای اتمی.

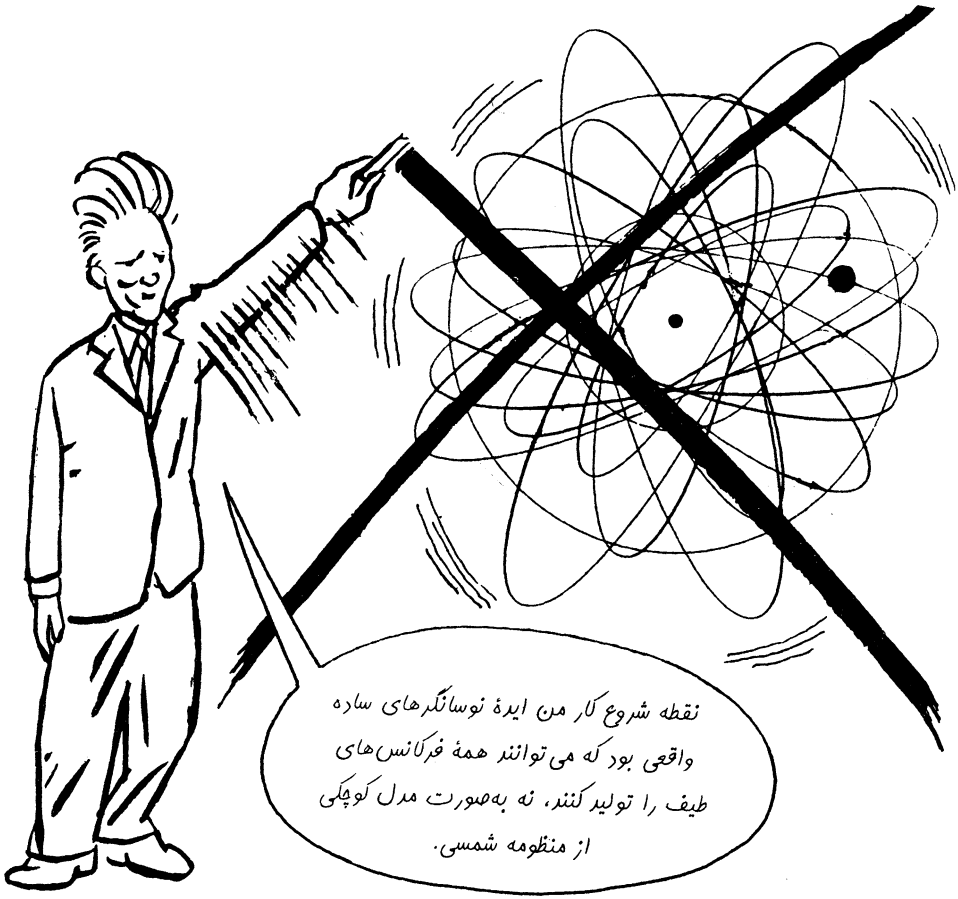
ابتلا به تب یونجه ضربه مهلکی به من زد به‌طوری که حتی بینانیم مختل شد!

در وضعیت وحشتناکی بودم بنابراین درصدد برآمدم محل بهتری بیابم، یعنی جایی که کمتر آلوده باشد. من به جزیره هِل گولند در دریای شمال رفتم.

هنگام ورود به شهر به‌شدت خسته بودم، تمام صورتم متورم بود. صاحبخانه پرسید آیا از کسی کتک خورده‌ام.

تصویر هایزنبرگ از اتم

هـایزنبرگ بـه‌ندرت مـی‌خوابـید! او وقـتش را بـین ابـداع مکـانیک کـوانـتومی، صخره‌نوردی و حفظ‌کردن اشعار گوته تقسیم کرده بود. او می‌کوشید قاعده‌ای برای ارتباط‌دادن اعداد کوانتومی و ترازهای انرژی در اتم با فرکانس‌ها و شدت روشنایی طیف نور بیابد که به‌طور تجربی معین شده بودند.

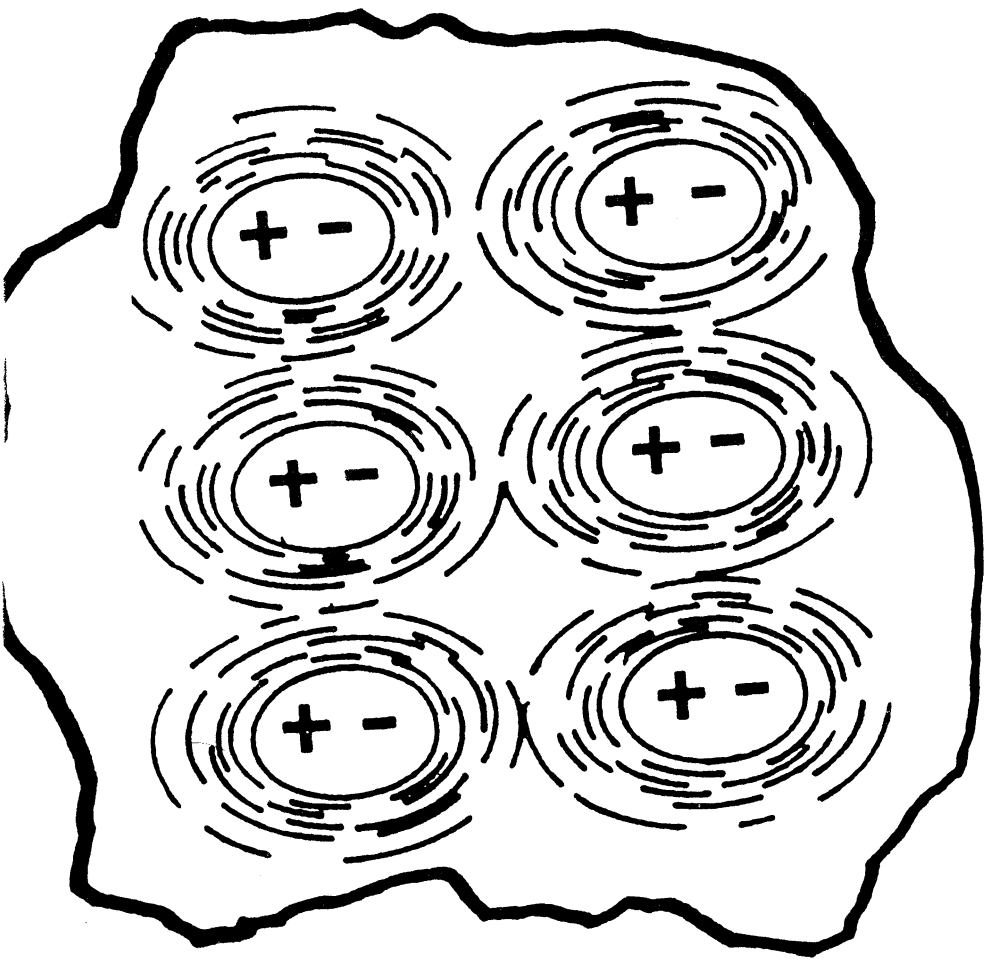


این مشابه کاری بود که پلانک برای تابش جسم سیاه در سال ۱۹۰۰ انجام داده بود.

هایزنبرگ با استفاده از مفهومی که بور آن را **اصل همخوانی** می‌نامید (جایی که قلمرو کوانتومی و کلاسیک یکسان پاسخ می‌دهند) اتم بور را با مداری بزرگ تجسم کرد. در این حالت فرکانس مدار برابر فرکانس تابش است و اتم مانند یک نوسانگر خطی عمل می‌کند.

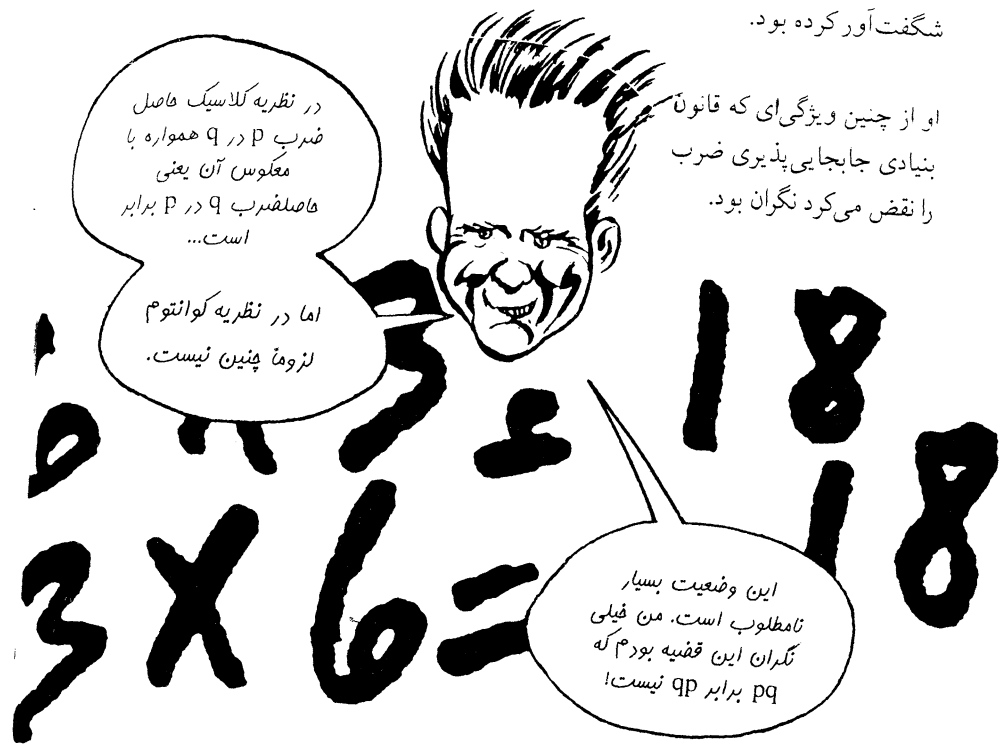
او با استفاده از فیزیک کلاسیک می‌دانست که چگونه این مسئله را تحلیل کند. کمیت‌های آشنایی نظیر اندازه حرکت خطی (p)، جابجایی از حالت تعادل (q)، اکنون قابل استفاده بود. او به‌صورت کلاسیک می‌توانست معادله حرکت را حل کند. سپس انرژی هر ذره را در تراز **n** و مقدار کوانتومی شدهٔ E_n محاسبه کند.

او کوشید وضع **درون** اتم را با استفاده از بزرگترین مدار استنباط کند؛ یعنی جایی که می‌توانست جواب بگیرد. شم فیزیکی هایزنبرگ که بعضی ممکن است آن را نبوغ بنامند، او را به فرمولی شامل همه حالات ممکن رهنمون کرد. او **رمز طیف را گشود.**



او اکنون می‌دانست که به چیز جدیدی نزدیک شده است. هایزنبرگ کشفی شگفت‌آور کرده بود.

او از چنین ویژگی‌ای که قانون بنیادی جابجایی‌پذیری ضرب را نقض می‌کرد نگران بود.



هایزنبرگ برای به‌دست‌آوردن فرکانس‌ها و شدت‌های صحیح خطوط طیف در نظریه‌اش، همانند بور یک **فرض کوانتومی** مطرح کرد.

برای

1 3 5		3 5 4			16 23 32
2 5 1	×	1 1 1		به دست می‌آوریم	13 18 18
4 3 2		2 3 5			19 29 29

برای

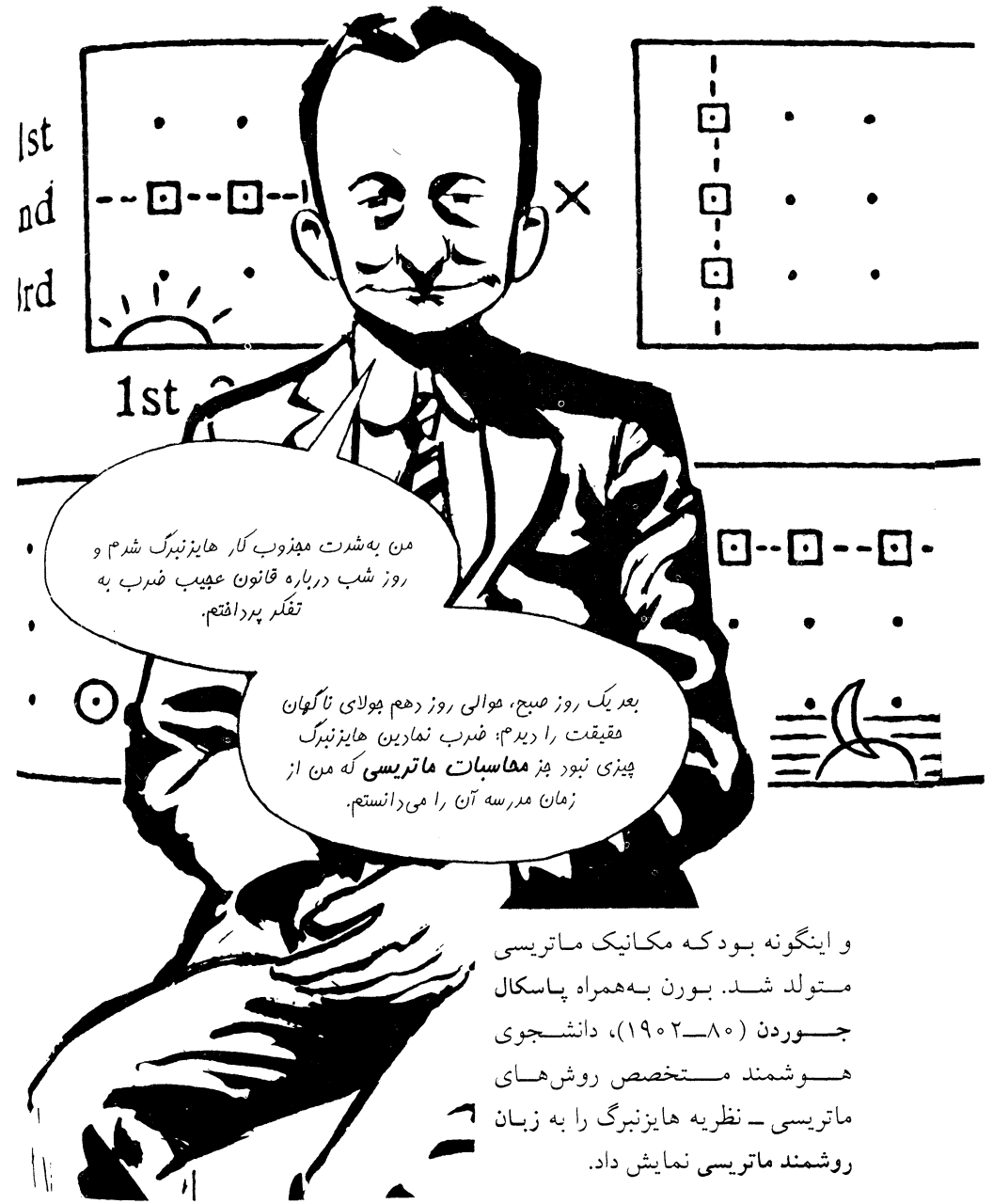
3 5 4		1 3 5	به دست می‌آوریم	29 46 28

درست همان شب در هل‌گولند، او توانست نشان دهد که انرژی ترازها کوانتومی شده و مستقل از زمان، یعنی مانا، هستند همان‌گونه که در اتم بور نیز چنین بود. او بعداً این کشف را چنین نامید:

در ۱۹ ژوئن، هایزنبرگ به گوتینگن بازگشت و نتایج به‌دست‌آمده را برای پائولی، منتقد بلندپایه، فرستاد. اگر نظریه او صحیح می‌بود، او اولین قدم را برای طرد مفهوم مدار برداشته بود. او اکنون کاملاً از هردو بیماری تب و مدارهای الکترون رهایی یافته بود.

ماکس بورن و مکانیک ماتریسی

عکس‌العمل پائولی مساعد بود. بنابراین هایزنبرگ قبل از رفتن به‌سوی آزمایشگاه کاوندیش در کمبریج و گذراندن تعطیلات، مقاله‌اش را پیش روی ماکس بورن گذاشت.



و اینگونه بود که مکانیک ماتریسی متولد شد. بورن به‌همراه **پاسکال جوردن** (۱۹۰۲ــ۸۰)، دانشجوی هوشمند متخصص روش‌های ماتریسی ــ نظریه هایزنبرگ را به زبان **روشمند ماتریسی** نمایش داد.

اکنون می‌توان فرکانس طیف نور را به‌صورت ماتریسی نامتناهی مانند این نمایش داد...

$$f_{m,n} = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} & f_{16} & \text{etc.} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} & f_{26} & \text{etc.} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} & f_{36} & \text{etc.} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} & f_{46} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

از آنجایی که ایده هایزنبرگ دربرگیرنده نوسان‌گرهای منفرد با اندازه حرکت $\mathbf{p(t)}$ و جابجایی $\mathbf{q(t)}$ بود که با این فرکانس‌ها نوسان می‌کنند بنابراین آنها نیز ماتریس‌هایی نامتناهی بودند.

$$\mathbf{p} = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & \text{etc.} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & \text{etc.} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{q} \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & \text{etc.} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & \text{etc.} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

هریک از فرض‌های کوانتومی هایزنبرگ به‌دست‌آوردن فرکانس‌ها و شدت‌های صحیح معرفی شده بودند که به‌وسیله در مجموعه از اعداد به فرم ماتریسی نمایش داده شدند.

$$\mathbf{pq - qp} = (h/2\pi i)\ \mathbf{I} \quad \text{(حالت کوانتومی)}$$

$\mathbf{I}$ ماتریس واحدی مانند این است...

$$\mathbf{1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 1 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 0 & 1 & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

پائولی نشان داد که مکانیک ماتریسی درست است

هنگامی که این حالت که به فرم ماتریسی نوشته شد و به رابط کلاسیک مکانیک اضافه شد، دستگاهی از معادلات به‌دست آمد که می‌توانست مقادیر فرکانس و شدت نسبی خطوط طیفی اتم را تولید کند. با این وجود...

هایزنبرگ اولین روایت کامل از **مکانیک‌کوانتومی** را به‌دست آورد.

اما در این بین چیزی تازگی داشت. نظریه جدیدِ ابزارهای کمکی مشاهده در برداشت نه مدلی برای تجسم ذهنی به‌همراه داشت. مدارهای تودرتویی که بور و سامرفیلد برای توضیح طیف هیدروژن تصویر کرده بودند از میان رفت. این تنها یک صورت‌گرایی خالص ریاضی بود، که استفاده از آن مشکل بود و تجسم آن غیرممکن، اما به‌سادگی جواب‌های درست را به‌دست می‌داد. هایزنبرگ از هر کوششی که منجر به تصویری از اتم متشکل از ذره یا موج می‌شد، دست شست. او به همهٔ تلاش‌هایی که به قیاس ساختار اتمی و ساختارهای کلاسیک می‌انجامید و منجر به ناکامی می‌شد، پایان داد.

به‌جای توصیف سطوح انرژی، صرفاً با **اعداد**، از ابزار ریاضی‌ای برای تنظیم این اعداد استفاده کردم که ماتریس نام دارد. و بنابراین نظریه من **مکانیک ماتریسی** نامیده شد. چیزی که به دلیل انتزاعی‌بودنش، از آن متنفر بودم.

بعدا الگوهای طیفی سایر اتم‌ها نیز به‌دست آمد. اما هنوز هیچ‌کس اهمیت فیزیکی قانون عجیب جابجاناپذیری یعنی قسمت اساسی نظریه هایزنبرگ را نمی‌دانست.

ایا می‌توان گفت که ترتیب اندازه‌گیری ممکن است مهم باشد؟ آیا خود عمل اندازه‌گیری می‌توانست مهم باشد؟

اروین شرودینگر، نابغه عاشق

در این فاصله سایر فیزیکدانان درمقابل ایده جدابودن تصور ساختار فیزیکی اتم از همه وجوه دیگر مفاهیم فیزیکی جهانی، تسلیم شدند و بنابراین به مکانیک ماتریسی هایزنبرگ تن ندادند.

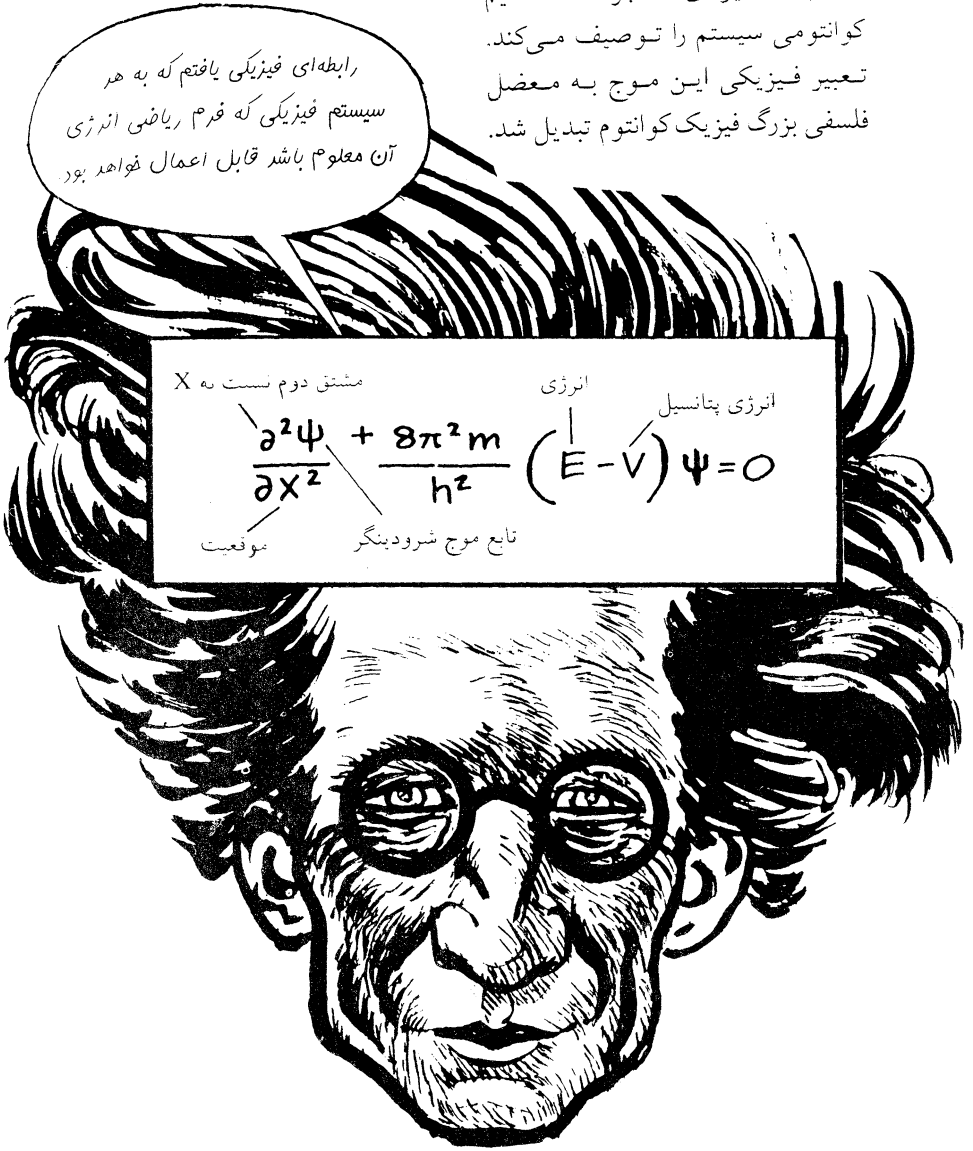
به‌خصوص اروین شرودینگر با استعداد در زوریخ از این نظریه جدید فاقد تصویر و پُر از پیچیدگی‌های ریاضی متنفر بود.

در مورد اول حق با شرودینگر بود اما دربارهٔ دومی به‌کلی اشتباه می‌کرد.

درحالیکه ورنر هایزنبرگ به انزوای گردشگاه کوهستانی و هوای پاک نیاز داشت و پل دیراک به آرامش راهبانه اتاقش در دانشکده سنت جان کمبریج، اروین شرودینگر به فضایی کاملاً متفاوت برای الهام‌گرفتن نیازمند بود.
شرودینگر عاشقی انگشت‌نما بود و در کارهای فیزیکی‌اش اغلب از آخرین دلبستگی عشقی‌اش الهام می‌گرفت. او مهمترین کشف زندگانی‌اش را در طول تعطیلات کریسمس ۱۹۲۵، در هتل خیال‌انگیز دوست‌داشتنی‌اش در تیرول اتریش انجام داد. او درباره امواج فکر می‌کرد.

معادلهٔ شرودینگر

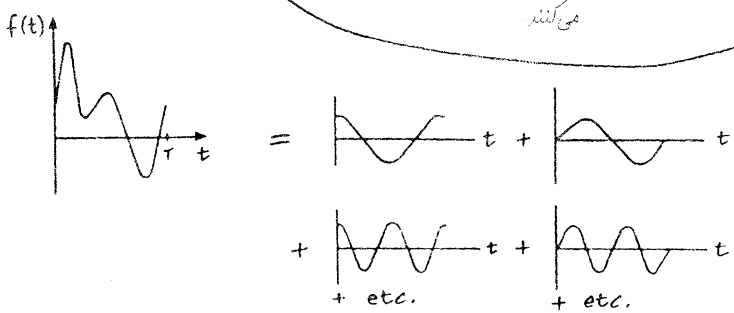
جواب معادله شرودینگر موجی است که به شیوه‌ای معجزه‌آسا مفاهیم کوانتومی سیستم را توصیف می‌کند. تعبیر فیزیکی این موج به معضل فلسفی بزرگ فیزیک کوانتوم تبدیل شد.



خود این موج که با حرف یونانی Ψ نمایش داده می‌شود که امروزه برای فیزیکدانان تنها یک معنی دارد؛ جواب معادله شرودینگر. او ایدهٔ دوبروی مبنی بر توصیف موجی ماده را یک حقیقت جدی تلقی کرد.

تحلیل موج فوریه برای توابع متناوب

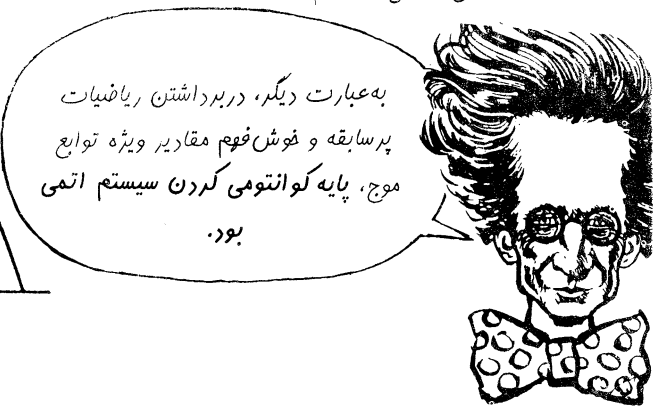
گرچه این عنوان بسیار فنی به‌نظر می‌رسد رجوع به آن برای درک شادمانی فیزیکدانان هنگامی که معادله شرودینگر در سال ۱۹۲۶ یافت شد، مهم است. چندکلمه‌ای درباره تحلیل فوریه صحبت کنیم.

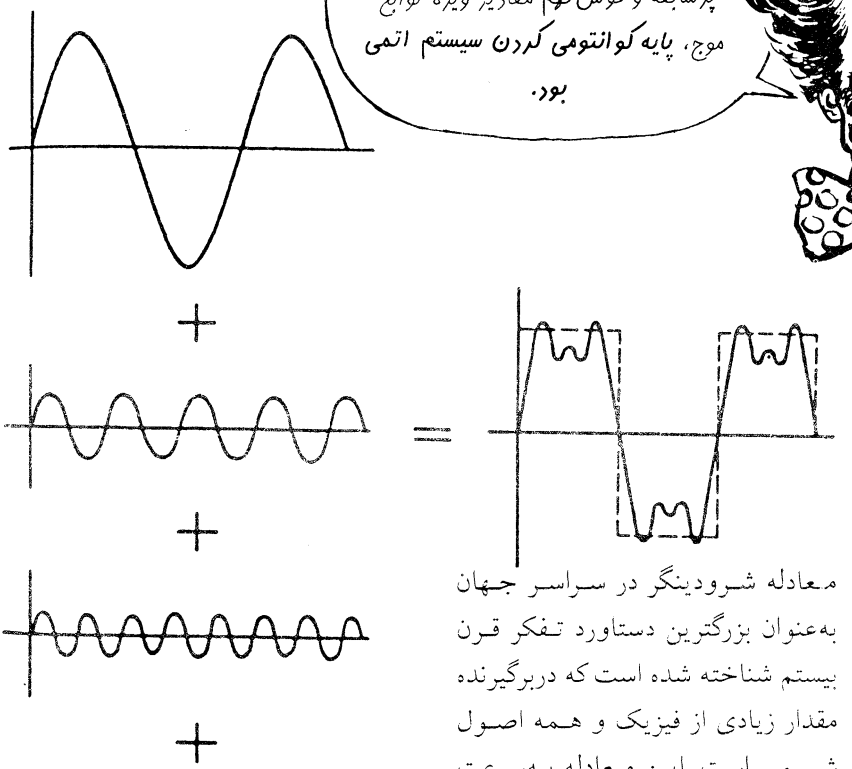


هر تابع متناوب f(t) برابر مجموع توابع هارمونیک ساده است.

بنابراین جواب معادله شرودینگر ـ **تابع موج یک سیستم** ـ باسری نامتناهی **تابع موج حالت‌های اختصاصی** جایگزین شد که هارمونیک یکدیگرند. یعنی به‌عبارت دیگر فرکانس‌ها متناسب با اعداد درست یا صحیح، است.

این روش به‌وسیلهٔ نمودارهای زیر نشان داده شده است. منحنی سیاه نشانگر تابع اولیه است که با مجموعه‌ای از سری نامتناهی توابع هارمونیک جایگزین شده.
کشف قابل توجه شرودینگر امواج جایگزیده‌ای بود که حالت‌های اختصاصی یک سیستم کوانتومی را توصیف می‌کردند و دامنه آنها نشانگر اهمیت نسبی آن حالت خاص در کل سیستم است.



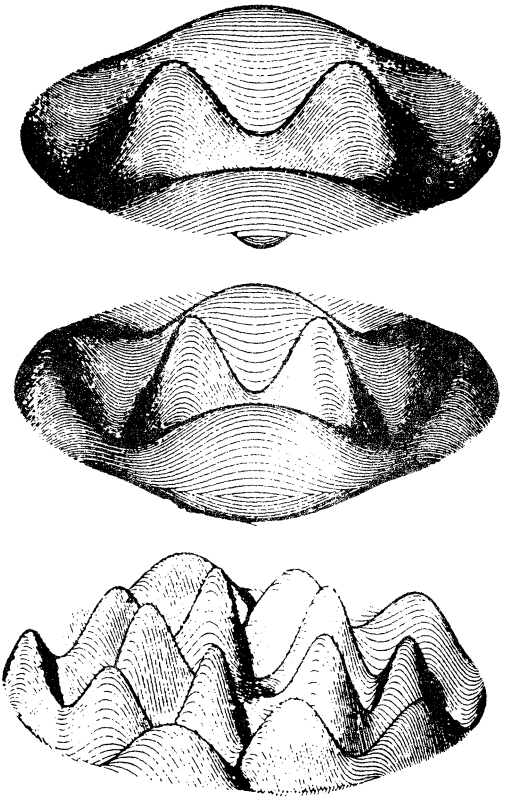


معادله شرودینگر در سراسر جهان به‌عنوان بزرگترین دستاورد تفکر قرن بیستم شناخته شده است که دربرگیرنده مقدار زیادی از فیزیک و همه اصول شیمی است. این معادله به‌سرعت به‌عنوان ابزار ریاضی‌ای با قدرتی بی‌سابقه برای پرداختن به مسائل ساختار اتمی ماده پذیرفته شد.
جای تعجبی نیست که کار شرودینگر به‌عنوان مکانیک موجی شناخته شده‌است.

تجسم اتم شرودینگر

آنچه شرودینگر انجام داد تقلیل مسئله حالت‌های انرژی در اتم به مسئله یافتن هارمونیک‌های طبیعی سیستم نوسانی با استفاده از تحلیل فوریه بود.

فرکانس‌های طبیعی و تعداد گره‌های موج ایستاده یک‌بعدی (مثلاً سیم ویولن) به‌سادگی قابل تجسم هستند. این تصویر می‌تواند به سیستم‌های دوبعدی تعمیم پیدا کند مانند سیستم نوسان پوسته طبل مرتعش. شبیه‌سازی کامپیوتری حالت‌های متفاوت در طبل مثالی از آنچه شرودینگر در ذهن داشت، به‌دست می‌دهد.

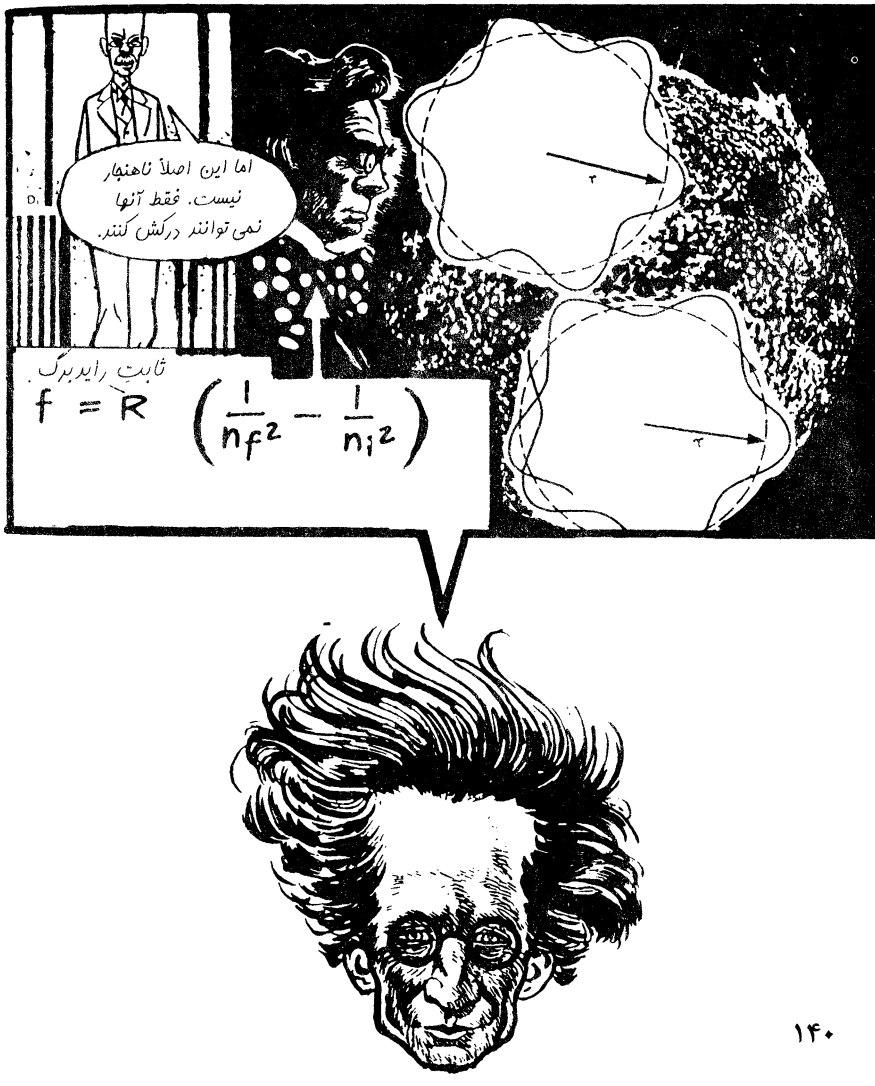


اگرچه تجسم سیستم‌های نوسانی سه‌بعدی در چیزهایی مثل اتم هیدروژن بسیار مشکل است اما تصویرهای تک‌بعدی و دوبعدی می‌توانند مفید باشند.
اعداد صحیحی که توسط بور، سامرفیلد و هایزنبرگ *اعداد کوانتومی* نامیده می‌شدند، اکنون به روشی طبیعی به **تعداد گره‌ها در سیستم ارتعاشی** مربوط شدند.

فرمول بالمر ــ اثر زیمان و بقیهٔ چیزها

به‌زودی معلوم شد که نظریه شرودینگر توصیف کاملی از خطوط طیفی هیدروژن به‌دست می‌دهد و فرمول بالمر را بازتولید می‌کند. به‌علاوه شکافته‌شدن طیف در میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به‌خوبی از معادلات موج منتج می‌شوند.

بنابراین شرودینگر قادر بود اعداد صحیح (تعداد گره‌ها) را از حل سه‌بعدی معادله موج به‌دست آورد که این اعداد دقیقاً متناظر با سه عدد کوانتومی **m** و **k** و **n** در نظریه قدیمی بودند.

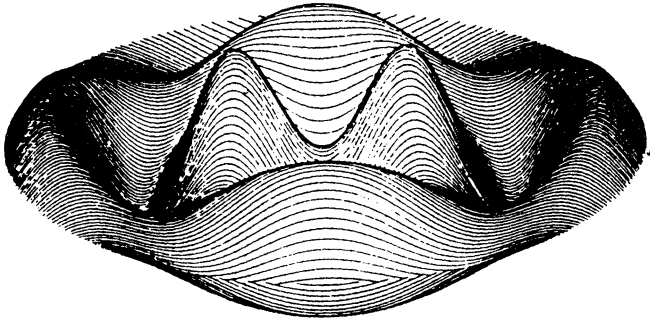


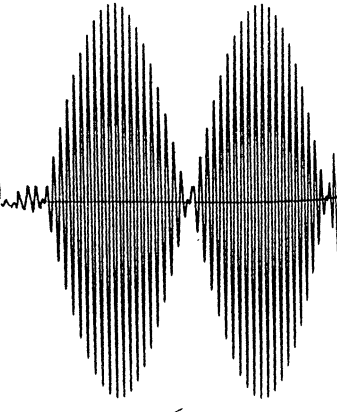
شرودینگر: بازگشت به فیزیک کلاسیک؟

علیرغم پیشرفت موفقیت‌آمیز هایزنبرگ در نظریه کوانتوم، باید گفت که این ریاضی‌-فیزیک‌دان اتریشی، به مکتب فیزیکدانان سنتی تعلق داشت. او از مفهوم جهش‌های گسسته کوانتومی در اتم که توسط بور ابراز شد، متنفر بود. او اکنون دستگاه ریاضی‌ای داشت که می‌توانست خطوط طیف را بدون نیاز به فرض نفرت‌انگیز جهش کوانتومی توضیح دهد. در این مورد او معادله موج در اتم را با امواج صوتی مقایسه می‌کرد...

فرکانس خطوط روشن طیف را می‌توان همانند **تپش** میان ارتعاش فرکانسی بین دو سطح دیگر انرژی کوانتومی مجسم کرد.

چه‌قدر مفهومی که در آن گذار انرژی کوانتومی در گذر پیوسته از یک الگوی نوسانی به الگویی دیگر صورت می‌گیرد، خوشایندتر از جهش وصف‌ناپذیر الکترون‌ها است.

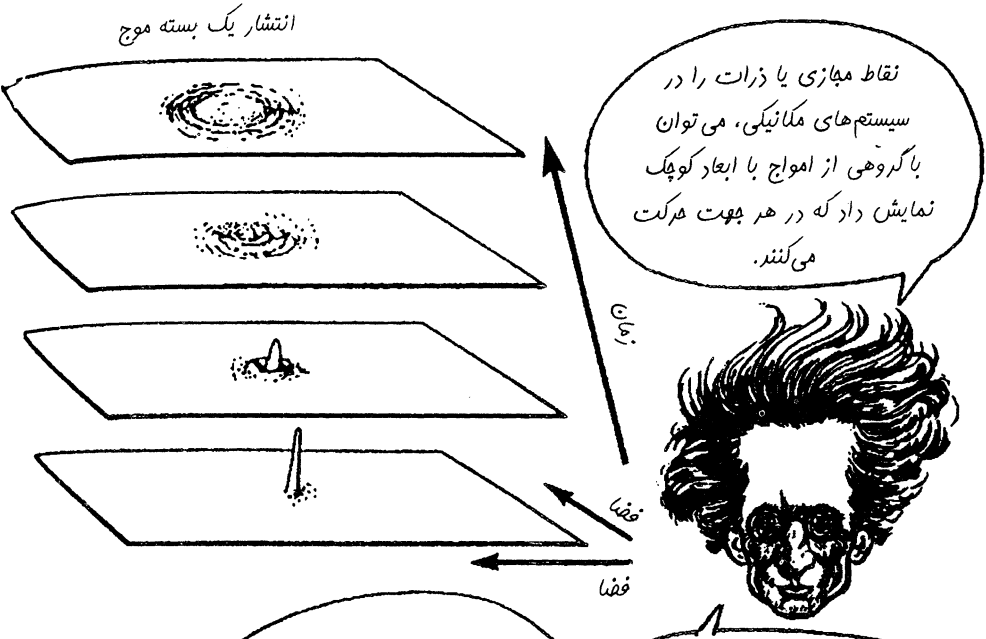




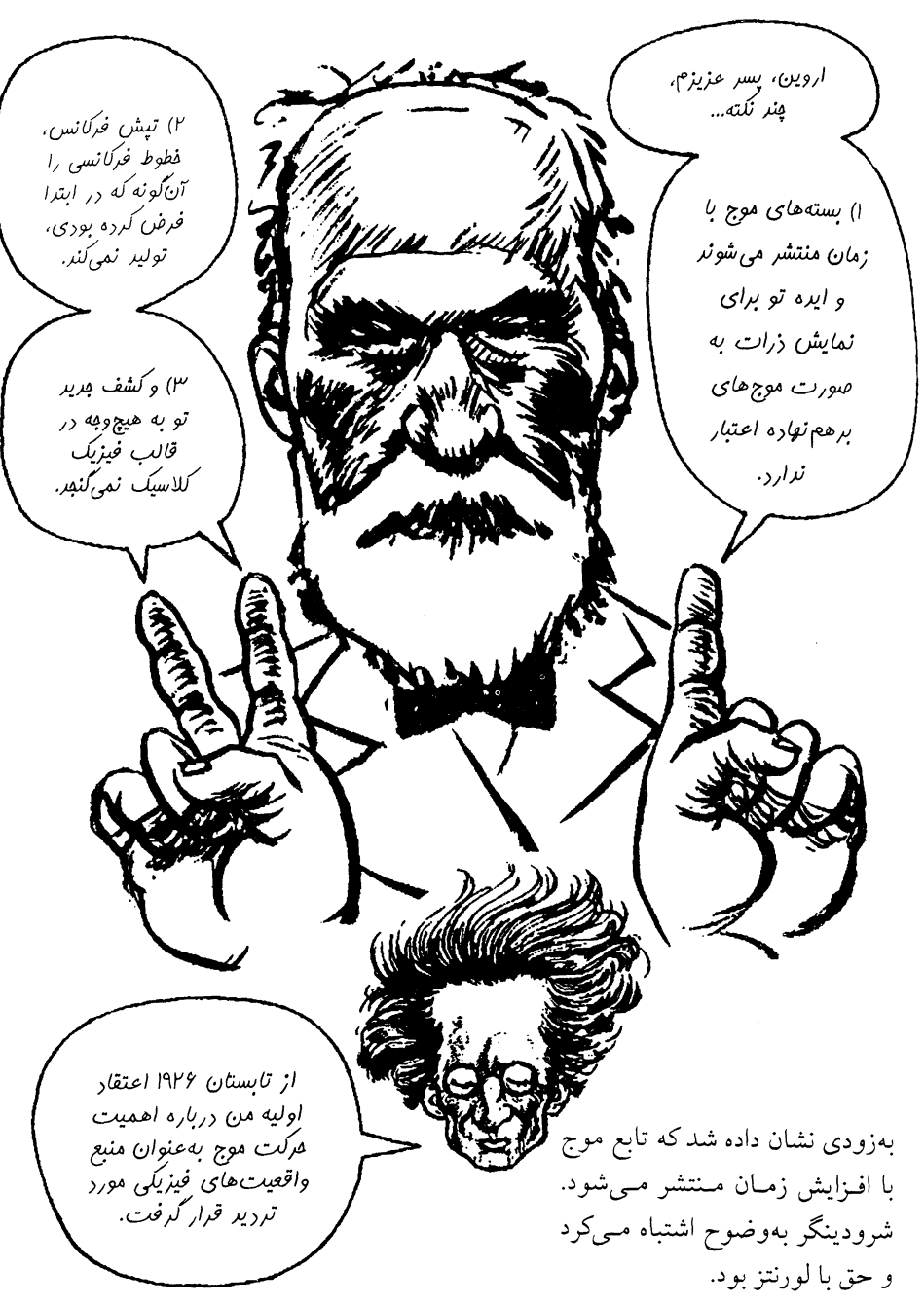
شرودینگر قصد داشت از کشف جدیدش به‌عنوان راه **بازگشت** به فیزیکی برپایه فرایندهای پیوسته استفاده کند. فرایندهایی که از گذارهای ناگهانی به‌دور بودند. او یک نظریه ذاتاً کلاسیک برای *ماده و موج* پیشنهاد می‌کرد، نظریهٔ او همان رابطه‌ای را با مکانیک داشت که نظریه *امواج الکترومغناطیس ماکسول* با نور داشت.

به این ترتیب دیگر چه نیازی به ذرات داریم؟

شرودینگر حتی در وجود ذرات نیز شک کرد!



شرودینگر می‌خواست همه ذرات را به‌صورت امواج برهم‌نهاده توصیف کند. اما پدربزرگ پیر فیزیک کلاسیک، **هنریک لورنتز** (۱۹۲۸ـ۱۸۵۳)، که مثل همیشه در اواخر عمرش نیز روشن‌بین بود، نقد ناخوشایندی از تعبیر فیزیکی او را به یادش آورد.



به‌زودی نشان داده شد که تابع موج با افزایش زمان منتشر می‌شود. شرودینگر به‌وضوح اشتباه می‌کرد و حق با لورنتز بود.

اما بین تابع موج ذرات، و خود ذرات چه رابطه‌ای هست؟ چه سؤال سختی! پیامد نهایی این سؤال به توسعه مکانیک موجی منجر شد.

دو نظریه، یک توضیح

شرودینگر تعجب می‌کرد اگر می‌فهمید که رابطه‌ای بین نظریه خودش و مکانیک ماتریسی هایزنبرگ وجود دارد. او درابتدا نمی‌توانست هیچ ارتباطی میان این دو ببیند. اما در آخرین هفته فوریهٔ ۱۹۲۶ او در تحلیل خود نتایج قابل ملاحظه‌ای یافت.

یکی برپایه تصور روشن مدل موجی از ساختار اتمی بود، و دیگری مدعی بود که چنین مدلی بی‌معنی است. با این حال هردو نتایج یکسانی داشتند. حقیقتی باورنکردنی! معادلات شرودینگر همین‌جا به حال خود باقی می‌ماند. در سال ۱۹۸۷ در اتریش این معادلات به‌شکل نهایی خود روی تمبرهای یادبودی ظاهر شدند که به مناسبت صدمین سالگرد تولد شرودینگر منتشر می‌شدند.

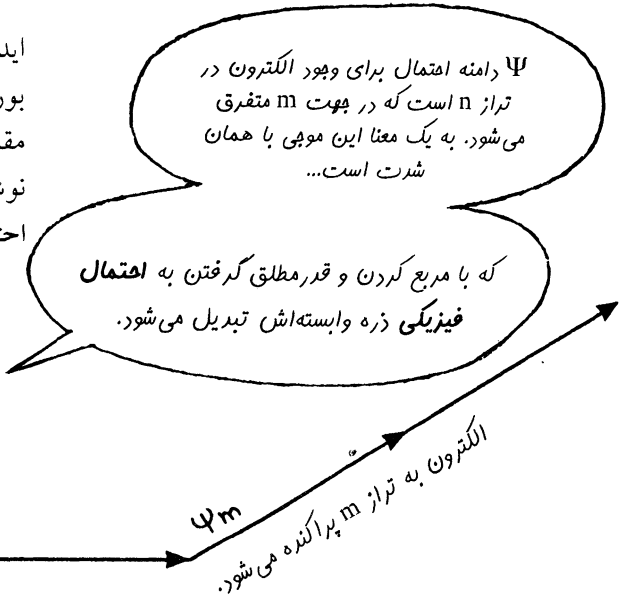
شرودینگر، هایزنبرگ را ملاقات می‌کند

در جولای ۱۹۲۶ شرودینگر در سمینار هفتگی سامرفیلد، در مونیخ سخنرانی می‌کرد. هایزنبرگ نیز از مستمعین بود. شرودینگر صحبتش را تمام کرد، فرمول او روی تخته سیاه بود، سؤالی هست؟

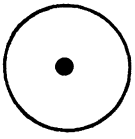
ماکس بورن: تعبیر احتمالاتیِ Ψ

شرودینگر ابتدا متقاعد شده بود که Ψ نشانگر «موج سایه»ای است که به طریقی به مکان الکترون اشاره دارد، سپس از عقیده‌اش را عوض کرد و گفت که این مفهوم نشانگر «چگالی بار الکترون» است. درواقع او گیج شده بود.

ایده قابل قبول‌تری توسط ماکس بورن در تابستان ۱۹۲۶ پدید آمد. او مقاله‌ای دربارهٔ پدیده‌های برخورد نوشت که در آن **مکانیک کوانتومی احتمالاتی** را معرفی کرده بود.

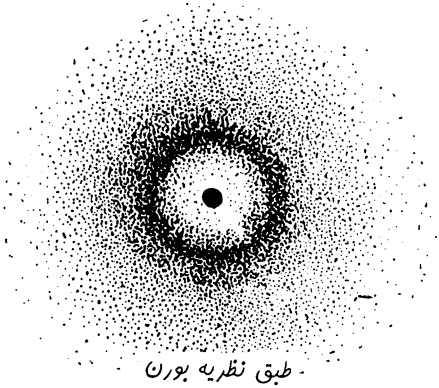


یک ماه بعد، بورن اظهار داشت که برای **احتمال وجود** یک تراز کوانتومی با مربع دامنه نرمال‌شده تابع موج اختصاصی آن در نظریه کوانتومی، پاسخ دقیقی وجود ندارد. هرآنچه به‌دست می‌آوریم **احتمالی** است.



حالت پایه هیدروژن

مطابق نظریه بور



طبق نظریه بورن

دو نوع احتمال

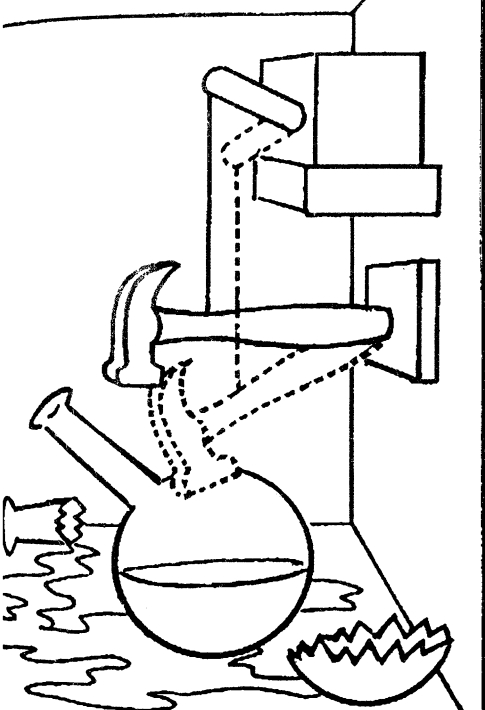
در ۱۰ آگوست ۱۹۲۶ بورن مقاله‌ای در آکسفورد ارائه کرد که در آن به روشنی بین نظریه قدیم و جدید احتمالات در فیزیک تمایز قائل شده بود. نظریه قدیمی ماکسول-بولتزمن که مؤلفه‌های میکروسکپی را در تئوری جنبش گازها معرفی کرده بود، تنها برای کنارگذاشتن آنها در مقابل مقادیر **متوسط** برپایه احتمالی ناشی از ناآگاهی بنا نهاده شده بود. محاسبه مقادیر دقیق برای تعداد زیادی ذره غیرممکن بود.

گربه شرودینگر ـــ ... مسئلهٔ اندازه‌گیری کوانتومی

حدود ۱۰ سال پس از مقاله بورن نظریه احتمالاتی برهم‌نهی حالات کوانتومی، عموماً پذیرفته شده بود. شرودینگر که نگران سوءاستفاده از معادلاتش بود، آزمایش فکری ترتیب داد، که معتقد بود یک‌بار برای همیشه پوچی، این مفهوم را آشکار خواهد کرد.

شرودینگر آزمایش غریبی را تصور کرد که در آن، یک گربه زنده به همراه منبع رادیواکتیویته، شمارنده گایگر، یک چکش و یک بالن شیشه‌ای سربسته محتوی گاز سمی و کشنده درون جعبه‌ای قرار می‌گرفت. هنگامی که تلاشی رادیواکتیویته رخ دهد، شمارنده با تحریک ابزاری، چکش را رها میکند که روی بالن می‌افتد و آن را می‌شکند، گاز گربه را خواهد کشت.

آیا گربه می‌تواند در یک زمان هم زنده و هم مرده باشد؟



فرض کنید منبع رادیو اکتیو چنان باشد که نظریه کوانتوم برای تلاشی زره از هر ساعت یک احتمال ۵۰٪ پیش‌بینی کند. هنگامی که یک ساعت گذشت، احتمال هردو حالت یکسان است؛ حالت گربه ***زنده*** *یا حالت گربه* ***مرده****.*

نظریه کوانتوم (به تعبیر بورن) درست بعد از گذشت یک ساعت از آغاز آزمایش پیش‌بینی می‌کند که جعبه محتوی گربه‌ای است که **نه کاملاً زنده است و نه کاملاً مرده** بلکه آمیزه‌ای از این دو حالت است؛ برهم نهاده دو تابع موج.

آگاهی و برهم‌خوردن تابع موج

یکی از معدود کسانی که از آنچه باعث کاهش بالفعل تابع موج می‌شد آزرده شده بود، اوژن واینر (۹۵-۱۹۰۱)، فیزیکدان مجاری تبار متخصص فیزیک کوانتوم و برنده جایزه نوبل، بود.

شعور مشاهده‌گر اغتلال ایجاد می‌کند. هنگامی که ما از چیزی آگاه می‌شویم، سبب تغییر سرنوشت‌ساز تابع موج می‌شویم و بنابراین حالت گیج‌کننده و درهم مرگ و زندگی ناپدیده می‌شود.

منتقدان می‌پرسند که آیا یک آمیب قادر است یک اغتلال ایجاد کند و یا حتی آگاهی خود گربه قادر است **وضعیت** را در تمام مدت آزمایش حفظ کند؟ امروزه فیزیک از زمان نیوتن غیرقابل فهم‌تر به‌نظر می‌رسد.

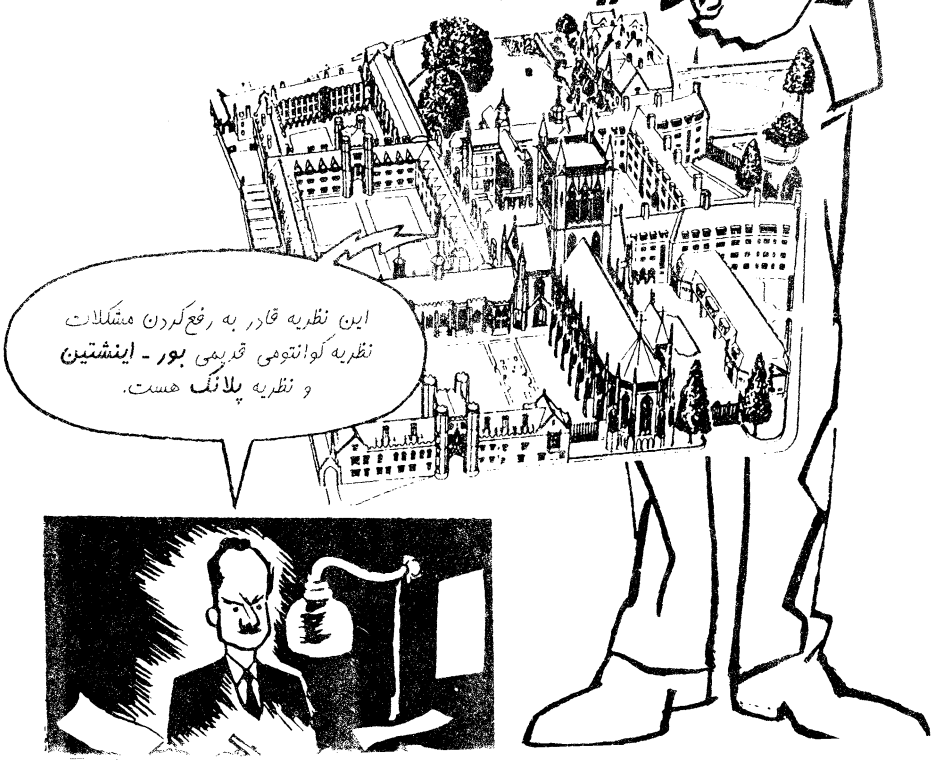
توضیح واینر نه در میان فیزیکدانان، توضیح موردپسندی است و نه حتی سعی عمده‌ای در پیشرفت نظریه کوانتوم دارد. این توضیح تنها جواب‌های معقولی به سؤال‌های نظری بسیار پیچیده، می‌دهد. کسانی که نظریه کوانتوم را به‌سان تجربه‌ای روزمره به‌کار می‌برند نمی‌توانند در مورد چیزی که باعث اختلال تابع موج می‌گردد نگران نباشند!

پل آدرین موریس دیراک: نابغه و گوشه‌گیر

دو روایت مختلف از نظریه کوانتومی را مشاهده کردید. اولی توسط هایزنبرگ با استفاده از روش ماتریسی و دیگری تحت‌الشعاع معادلات موج شرودینگر پدید آمدند. اکنون سومی را ملاحظه کنید که مستقلاً توسط ریاضی‌دان انگلیسی، پل. آ. م. دیراک ایجاد شد.

در تابستان ۱۹۲۵ هایزنبرگ سخنرانی‌ای در کلوپ کاپیتزا در کمبریج انجام داده و بعد از آن، یک نسخه از دست‌نوشته چاپ‌نشدهٔ جدیدش را به میزبان خود، رالف فولر داد. فولر آن را به همراه این یادداشت که «ببین درباره‌اش چه فکر می‌کنی؟» به دانشجوی جوان فارغ‌التحصیلش، پل دیراک داد. دیراک دستورالعمل را جدی گرفت.

پس از یک کار انفرادی ــ همانند همهٔ کارهای فیزیکی دیگرش در طول ۴۴ سال ــ دیراک کار هایزنبرگ را نقطه‌عطف جدیدی یافت.



روایت دیراک از مکانیک کوانتومی

دیراک درابتدا از ظهور کمیت‌های جابجایی‌ناپذیر متحیر شد (یعنی کمیتهایی که حاصلضرب آنها به ترتیبشان بستگی داشت و بنابراین $A \times B$ برابر $B \times A$ نمی‌شد). دیراک دریافت که این جوهرهٔ رهیافت جدید است. او به‌سرعت حلقه ارتباطی با فیزیک کلاسیک پیدا کرد. او از ایدهٔ اساسی جابجایی‌ناپذیری برای طرح روایت خود از مکانیک کوانتوم استفاده کرد.

هایزنبرگ و بور تحت تأثیر قرار گرفته بودند. دیراک بی‌درنگ عضو کلوپ شد و مقدر شده بود که به‌عنوان یکی از کاشفان نظریه کوانتوم جاودانه شود.

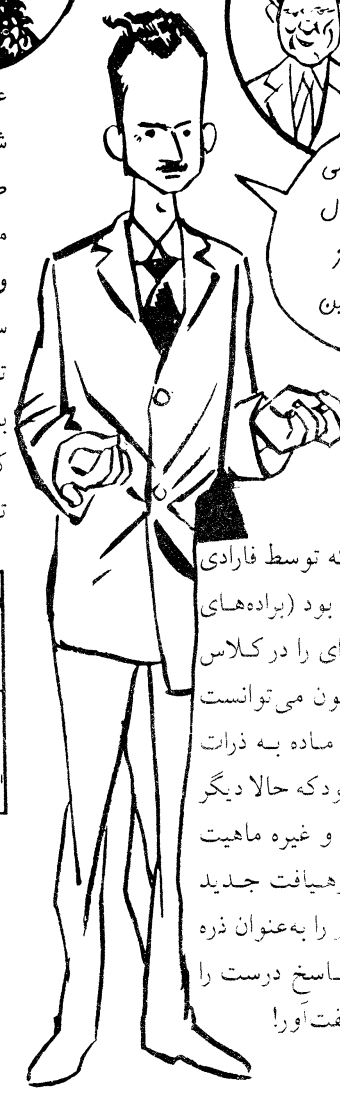
نظریه تبدیل دیراک

اما این تازه شروع کار او بود. دیراک تا نوامبر ۱۹۲۵، یعنی تنها چهارماه بعد از به‌دست آمدن بذر مکانیک جدید، یک‌سری چهارتایی مقاله نوشته بود که توجه نظریه‌پردازان را در همه‌جا، خصوصاً در مراکز اصلی تحقیقات کوانتومی یعنی کپنهاک، گوتینگن و مونیخ برانگیخت. هیئت علمی دانشگاه کمبریج با قراردادن این‌ها کنار هم به‌عنوان تز، با خوشحالی به او مدرک دکتری دادند.

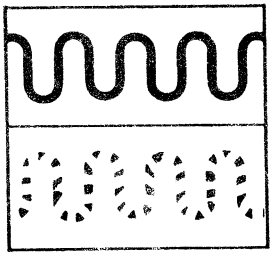
سپس در سپتامبر ۱۹۲۶ بور او را به کپنهاگ دعوت کرد. در آنجا دیراک مقاله مهم دیگری را دربارهٔ **نظریه تبدیل** کامل کرد.

شروع الکترودینامیک کوانتومی

دیراک در کپنهاک و سپس در گوتینگن شروع به کار بر روی مسئلهٔ گسیل و جذب تابش الکترومغناطیس (نور) کرد. پلانک و اینشتین یک ربع قرن قبل، شواهدی نظری ارائه کرده بودند دال بر اینکه نور شامل ذراتی است که امروزه فوتون نامیده می‌شوند.



علی‌رغم زیر سؤال رفتن شواهد مدل موجی نور در طول قرن نوزدهم، اینشتین مباحثه بر سر **دوگانگی موج و ذره** را احیا کرد. اما عقل سلیم ایجاب می‌کرد که نور تنها می‌تواند یکی از این دو باشد. دیراک نشان داد نظریه کوانتوم پاسخی برای این تناقض آشکار دارد.



مفهوم میدان پیوسته که توسط فارادی و دیگران معرفی شده بود (براده‌های آهن و آهن‌ربای تیغه‌ای را در کلاس علوم به‌یاد آورید) اکنون می‌توانست برای برهم‌کنش با ماده به ذرات کوچکتری شکسته شود که حالا دیگر نظیر الکترون، فوتون و غیره ماهیت گسسته‌ای داشتند. رهیافت جدید دیراک می‌توانست نور را به‌عنوان ذره یا موج تلقی کند و پاسخ درست را به‌دست دهد، چه شگفت‌آور!

ج. س. پلکینگهورن (متولد ۱۹۳۰) استاد سابق فیزیک نظری کمبریج که مکانیک کوانتومی را مستقیماً از دیراک آموخته بود. هنوز هم تحت تأثیر این دستاورد هفتادسال قبل است. او تمثیل روشنگری در این مورد ارائه داده است...

نظریه دیراک یک صورت‌بندی قابل درک بود. اگر به شیوه ذره‌ای مورد پرسش واقع می‌شد، رفتار ذره‌ای داشت و اگر به شیوه موجی، رفتاری موجی بروز می‌داد.

مثل این است که بگوئیم، قابل قبول نیست که پستانداری تخم بگذارد، و ناگهان یک پلاتیپوس ظاهر شود!

امواج

ذرات

از زمان کار دیراک طبیعت دوگانه نور به‌عنوان موج و ذره برای کسانی‌که بتوانند ریاضیات آن را دنبال کنند، عاری از تناقض بوده است. بعد از جنگ جهانی دوم کار دیراک توسط ریچارد فاینمن (۸۸–۱۹۱۸) و دیگران پیش برده شد.

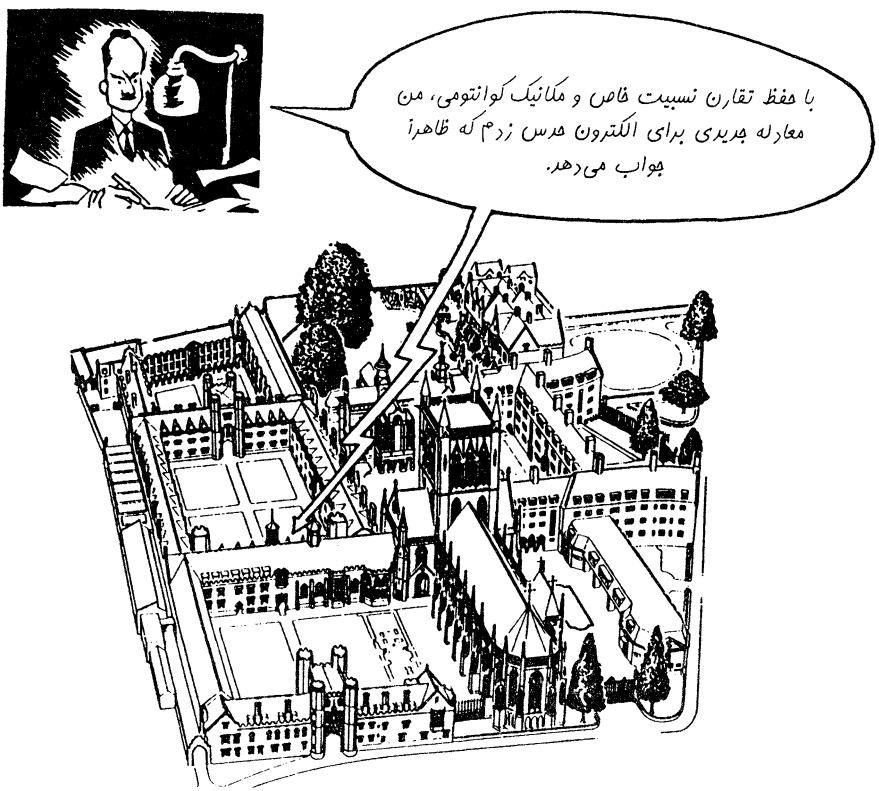
ما نظریه‌مان را الکترودینامیک کوانتومی، یا به اختصار QED نامیدیم. که برهم‌کنش نور و ماده را با دقت قابل توجهی توصیف می‌کرد.

توموناگا جولین شوینگر فریمن رایسون ریچارد فاینمن

معادله دیراک و اسپین الکترون

تحسین جهانی تغییر عمده‌ای در عادات دیراک نداد. پس از بازگشت به کمبریج، او کارش را با شدت و تقریباً باز هم مثل همیشه در خلوت اتاقش در محوطه چهارگوش کالج سنت جان ادامه داد. او مشغول کشف بزرگ دیگری بود.

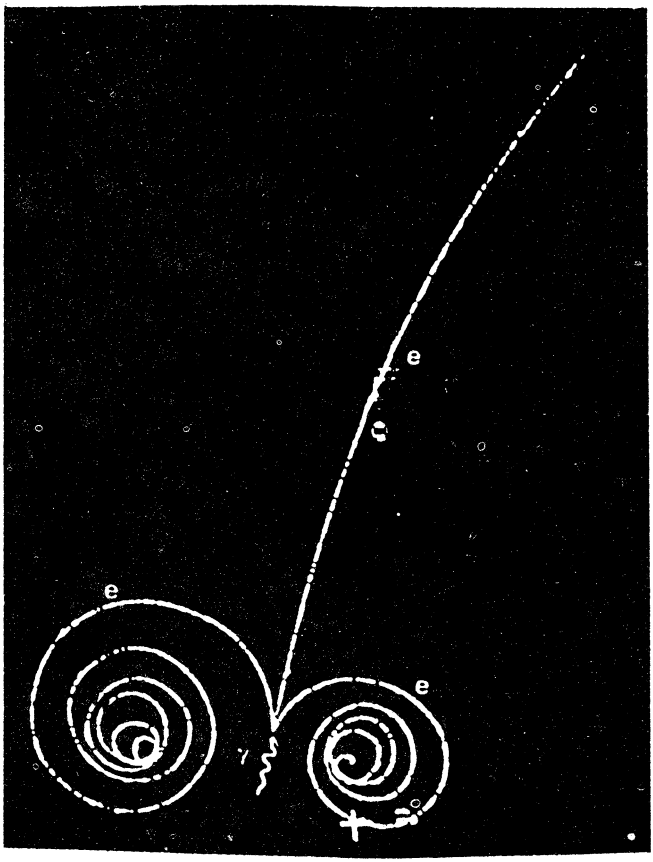
مکانیک موجی شرودینگر عرصه اصلی را فتح کرد و **معادله موج** بر نظریه کوانتوم غالب بود (هنوز هم برای بسیاری از متخصصان این‌گونه است). شرودینگر چیزی درباره ویژگی عجیب مغناطیسی الکترون که اسپین نامیده می‌شد، نمی‌دانست. درنتیجه قادر به گنجاندن موفقیت‌آمیز نسبیت اینشتین در معادله موج نبود. دیراک این کار را به شیوه خارق‌العاده خودش و با استدلالی هنرمندانه انجام داد.



فرمولی که او کشف کرد (امروزه به‌عنوان **معادله دیراک** شناخته می‌شود)، نه‌تنها حرکت نزدیک به سرعت نور الکترون را توصیف می‌کرد، بلکه **بدون هیچ فرض ویژه‌ای**، آن‌گونه که تجربیات نشان داده بود، پیش‌بینی می‌کرد که الکترون اسپین $\frac{1}{2}$ دارد.

پیش‌بینی ضدماده

معادله دیراک همچنین به شیوه‌ای شگفت وجود **الکترون‌هایی را با بار مثبت** ضروری می‌دید. یعنی الکترون‌هایی مخالف بار الکترون‌هایی که قبلاً مشاهده شده بودند.



این پیش‌گویی چند سال بعد، درست هنگامی تصدیق شد که پادالکترون‌ها، که اکنون پوزیترون نامیده می‌شوند، به وسیله **کارل اندرسون** در اتاقک ابرِکَلتِک به سال ۱۹۳۲ کشف شدند. دیراک گستره وسیع فیزیک پادماده را گشوده بود.

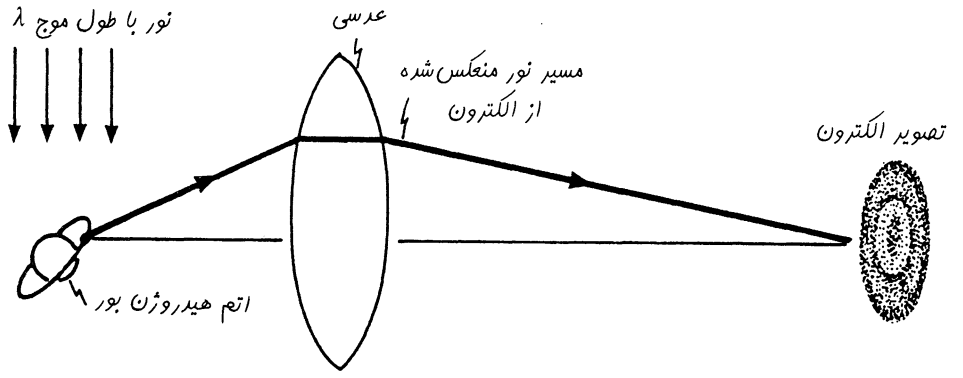
درست یک‌سال بعد از کشف پوزیترون، دیراک به همراه شرودینگر جایزه نوبل سال ۱۹۳۳ را به خاطر کارشان بر روی نظریه کوانتوم مشترکاً دریافت کردند. بیایید به سال ۷ـ۱۹۲۶ بازگردیم.

اصل عدم قطعیت

در سال ۱۹۲۷ هایزنبرگ دومین کشف عمده‌اش را که به اهمیت کشف مکانیک ماتریسی بود انجام داد. هایزنبرگ که به‌وسیله اعتقاد مثبت‌گرایانه‌اش راهنمایی می‌شد مبنی بر اینکه تنها کمیت‌های قابل اندازه‌گیری باید در نظریه گنجانده شوند، دریافت که نظریه کوانتوم تلویحاً محدودیت بنیادی بر دقت جفت‌های مشخصی از متغیرهای فیزیکی اعمال می‌کند که می‌توانستند هم‌زمان اندازه‌گیری شوند، اما آنچه او انجام داد... دو متغیر جابجایی‌ناپذیر، یعنی **موقعیت** و **اندازه حرکت** را به‌یادآورید.

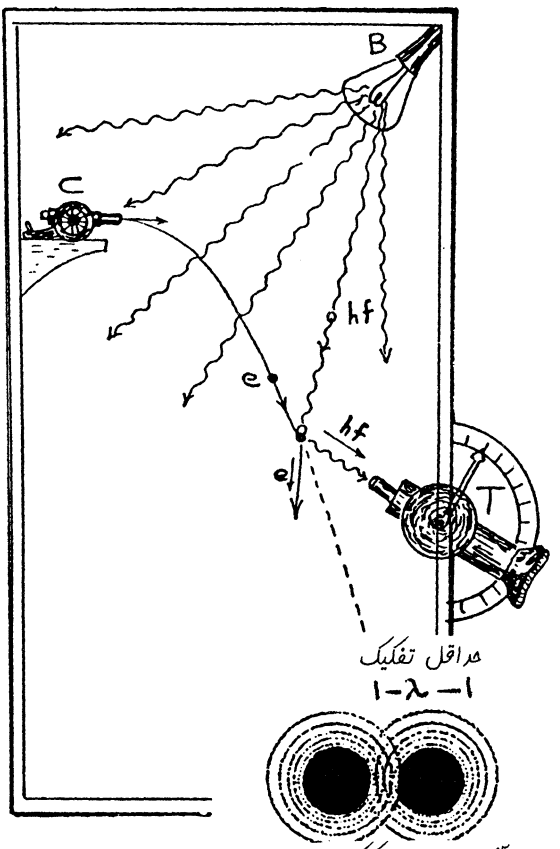
$$\ldots pq - qp = h/2\pi i$$

با برآوردکردن عدم دقت در اندازه‌گیری هم‌زمان موقعیت و اندازه حرکت، به‌سادگی می‌توان برای این عدم قطعیت رابطه‌ای کمّی استنتاج کرد. برای تعیین موقعیت یا دیدن یک شیء، پرتو روشن‌گر باید به‌اندازهٔ کافی کوچکتر از خود شیء باشد. از آنجا که کل قطر اتم هیدروژن کسری از طول موج نور مرئی است، پس برای رؤیت الکترون، امواج ارسالی باید طول موجی خیلی کوچکتر از موج فرابنفش داشته باشند.



میکروسکوپ اشعه گامای هایزنبرگ

هایزنبرگ برای بررسی مسئله، یک میکروسکوپ فرضی اشعه گاما انتخاب کرد که طول موجش کوتاه است اما اندازه حرکت زیادی را منتقل می‌کند، بنابراین مسیر الکترون‌ها پیوسته و هموار نیست بله به‌سبب بمباران‌شدن توسط فوتون‌های اشعه گاما درهم برهم است. طرح مشهور جورج گاموف از ساختار فرضی میکروسکوپ هایزنبرگ در این صفحه نمایش داده شده است. بور در توضیح این بخش از استنتاج به هایزنبرگ کمک کرد.



میکروسکوپ خیالی کوانتومی هایزنبرگ

عدم دقت در اندازه‌گیری مکان شیء که تحت بزرگ‌نمایی زیاد نوری (مثلاً یک میکروسکوپ) قرار دارد به الگوهای پراش همپوش محدود می‌شود.

حداقل تفکیک
$1-\lambda-1$

آنچه می‌تواند تفکیک شود $\sim\lambda$

این خطا همان‌طور که در طرح نشان داده شده است، تقریباً معادل طول موج اشعه‌ای است که مورد استفاده قرار گرفته. بنابراین **عدم دقت در اندازه‌گیری مکان** $\Delta X\sim\lambda$ است (توجه کنید که X بجای q برای مکان به‌کار رفته است). ($\sim$ به معنای «تقریباً برابر است با» می‌باشد).

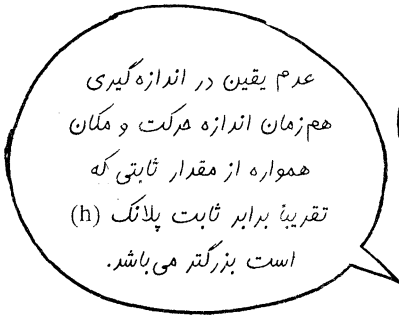
با همین قیاس، حداقل **عدم دقت در اندازه‌گیری اندازه حرکت** تقریباً برابر اندازه حرکتی است که توسط **تک‌فوتونی** به الکترون منتقل می‌شود که برای روشن‌کردن ذره استفاده شده است و این کمترین اغتشاشی است که ممکن است ایجاد شود. هایزنبرگ از رابطه دوبروی/اینشتین عدم دقت در اندازه حرکت را ($\Delta p \sim h/\lambda$) به‌دست آورد. او با ضرب دو خطا در یکدیگر نشان داد که حاصل‌ضرب $\Delta X \Delta p$ همیشه بزرگتر یا مساوی ($\geq$) یک مقدار معین است.

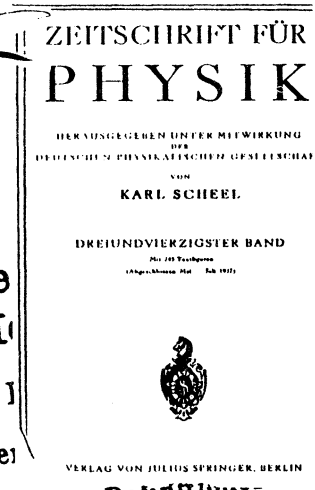
رابطه دوبروی

$$(\Delta x)(\Delta p) \geq (\lambda)(h/\lambda) \geq h \quad \text{OR} \ldots \Delta x \, \Delta p \geq h$$

ناشی از محدودیت پراش

این اصل **عدم قطعیت هایزنبرگ** (HUP) است که بیان می‌کند...





Über den anschaulichen ... de
Kinematik ... M

Von W. Heisenberg in ...

Mit 2 Abbildungen. (Eingegange...

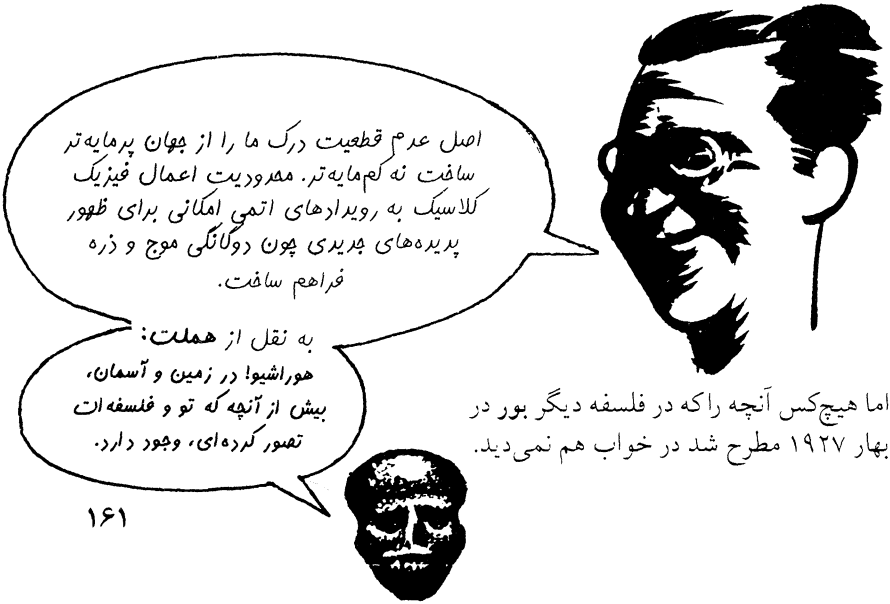
In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitio...
Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, di...
Quantenmechanik Gültigkeit beh... und es wird gezeigt, daß ... Ungenau...
jugierte Größen simultan nur mi...
werden können (§ 1). Diese ...
Auftreten statistischer Zusamm...
matische Formulierung gelingt n...
den so gewonnenen Grundsätze...
Vorgänge aus der Quantenmec...
...Theorie werden

اگرچه ما، در تجربه‌های روزمره با جهان نخراشیدهٔ ماکروسکپی به HUP توجهی نداریم، اما دوگانگی ذره/موج تجربه‌گرایان اتمی را که به جست‌وجوی کمال مطلوب بودند، ناکام کرد. با این حال بسیاری معتقدند نتایج فلسفی عمیقی در این ایده موجود است که به همهٔ ما مربوط می‌شود.

شکست جبرگرایی

در اواخر قرن هیجدهم فیلسوف فرانسوی **پیر سیمون دولاپلاس** (۱۸۲۷ـ۱۷۴۹) اصل جبرگرایی (قطعیت) را بیان کرد:

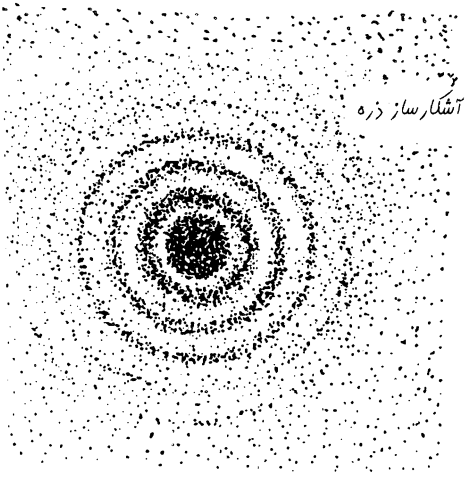
این نتیجه‌گیری منتقدانی دارد که می‌گویند نمی‌توان چنین رابطه‌ای را که بر جهان اتمی مبتنی است، به طریق مشروع به‌عنوان یک قانون جهانی تعمیم داد. این سؤال چندسال قبل توسط **ویکتور وِیسکوف** (متولد ۱۹۰۸)، فیزیکدان مجاری به‌روشنی پاسخ گفته شد، او در سالهای ۱۹۳۰ در جلسات متعدد مؤسسه بور شرکت می‌کرد.



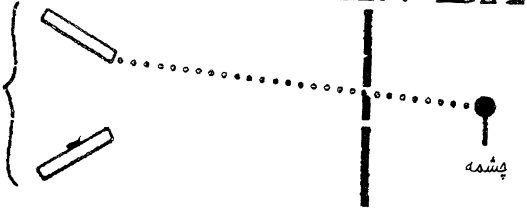
اما هیچ‌کس آنچه را که در فلسفه دیگر بور در بهار ۱۹۲۷ مطرح شد در خواب هم نمی‌دید.

مکملیت

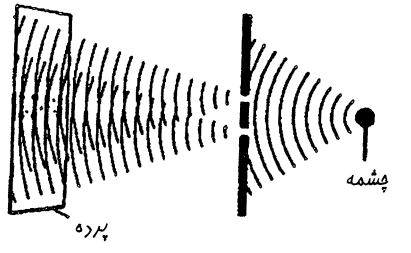
در اسکی تعطیلات سال ۱۹۲۷ در نروژ، بور چیزی یافت که تصور می‌کرد هسته اصلی درک مکانیک کوانتومی و دوگانگی موج ذره، خواهد بود. منتهی دیدگاه او تازه بود.



الکترون ویژگی‌های موجی/ذره‌ای نشان می‌دهد.



مشاهده فوتون با آشکارگر ذره



مشاهده فوتون با آشکارساز موج

تعبیر کپنهاکی

پس از هفته‌ها بحث و مشاجره با هایزنبرگ درباره این مفهوم، بور تدوین اجزای مختلف نظریهٔ کوانتومی را به‌صورت یک کل منسجم، آغاز کرد. او مفاهیم مختلف کار هایزنبرگ، مکانیک ماتریسی و اصل عدم قطعیت را با تعابیر احتمالاتی معادله موج شرودینگر و اصل مکملیّت خود تلفیق کرد.

این مفهوم جدید دیگری بود که بر مسئله اندازه‌گیری کوانتومی و ارتباط مهم آن با فیزیک کلاسیک متمرکز شده بود. مجموعهٔ این ایده‌ها به‌عنوان تعبیر کپنهاکی (CHI) شناخته می‌شود (Copenhagen Interpretation).

کومو، ایتالیا، سپتامبر ۱۹۲۷

در سپتامبر ۱۹۲۷ بور، پس از ماهها تلاش برای بیان فصیح عقایدش دربارهٔ همه مفاهیم کوانتومی، در کومو، سخنرانی‌ای برای بهترین فیزیکدانان اروپا، برکنار از چشم و گوش منتقدِ اینشتین ایراد کرد (او به ایتالیای فاشیست پا نمی‌گذاشت). بور جزئیات اصل مکملیت خود را برای اولین بار بیان کرد.

کنفرانس سولوِی، اکتبر ۱۹۲۷

در اواخر اکتبر ۱۹۲۷، تنها چند هفته پس از نشست کومو، بور، برای کنفرانس تاریخی سولوِی، که در ابتدای این کتاب به آن پرداختیم، به هتل متروپل بروکسل وارد شد.

اینشتین به‌دنبال نظریه‌ای بود که خود چیزها را توصیف کند نه احتمال وقوع آن‌ها را. با این همه بور اطمینان داشت که اینشتین تعبیر او را که متکی به آزمایش بود، قبول خواهد کرد. این روشی بود که خود اینشتین برای اثبات نسبیت خاص که عقل سلیم را به چالش می‌طلبید استفاده کرده بود.

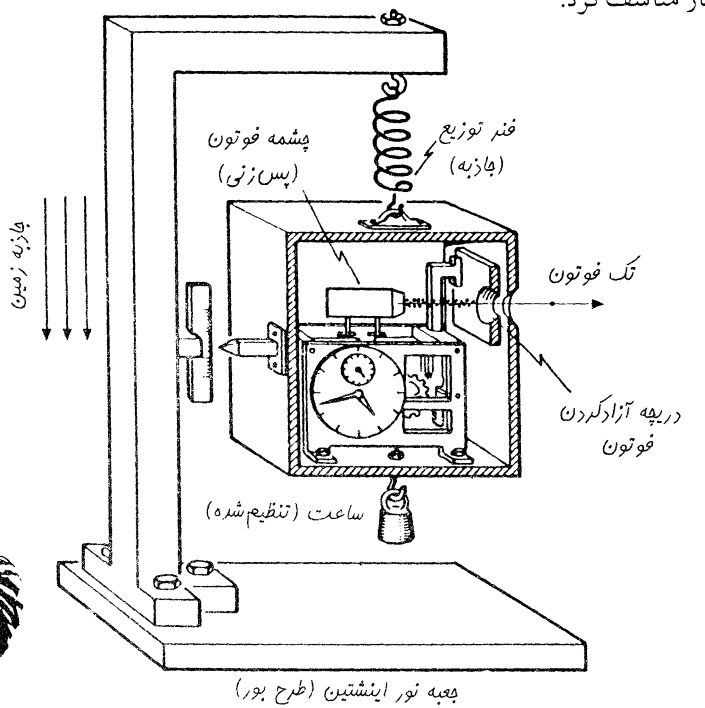
اینشتین نفی CHI را با حمله به اصل «ناخوشایند» عدم قطعیت که اساس آن بود، آغاز کرد. او با استفاده از آزمایش‌های فکری استادانه‌ای، می‌کوشید قانون هایزنبرگ را نقض کند، اما بور هربار در طرح اینشتین نقطه ضعفی می‌یافت و استدلال او را رد می‌کرد.

جعبه نور اینشتین

سه‌سال بعد، در نشست بعدی سولوِی بحث‌های بسیار مهمی رخ داد. اینشتین تصور می‌کرد که سرانجام موردی را یافته است که در آن اصل عدم قطعیت نقض می‌شود. او جعبهٔ نوری را توصیف می‌کرد که می‌گفت در آن هم **انرژی** یک فوتون منفرد و هم **زمان** گسیل آن دقیقاً قابل تعیین است. زمان و انرژی صفت دیگری از متغیرهایی هستند که از اصل عدم قطعیت تبعیت می‌کنند.

یک شب ناآرام

آیا بورگیر افتاده بود؟ از قرار معلوم قبل از پیداکردن پاسخ نهایی او همهٔ شب را بیدار ماند تا چیزی را که در این آزمایش نادرست بود، بیابد. صبح روز بعد او طرحی از جعبه نور اینشتین تهیه کرد. سپس این بور بود که با رد استدلال جعبه نور، اینشتین را بسیار متأسف کرد.



جعبه نور اینشتین (طرح بور)

هنگامی که فوتون آزاد می‌شود یک عقب‌نشینی باعث عدم قطعیت در مکان ساعت در میدان جاذبه زمین می‌شود.

این به اقتضای نظریه نسبیت عمومی خود شما یک عدم قطعیت متناظر در ثبت زمان ایجاد می‌کند. قبول دارید یا نه!

استاد نظریه خودش را از یاد برده بود، اما بور از آن برای محاسبه عدم قطعیتی که رابطه هایزنبرگ پیش‌بینی می‌کرد، استفاده کرد. بعد از این رویداد CHI به شیوه متعارف در تلقی نظریه کوانتوم تبدیل شد و تا امروز نیز باقی است.

پارادوکس EPR

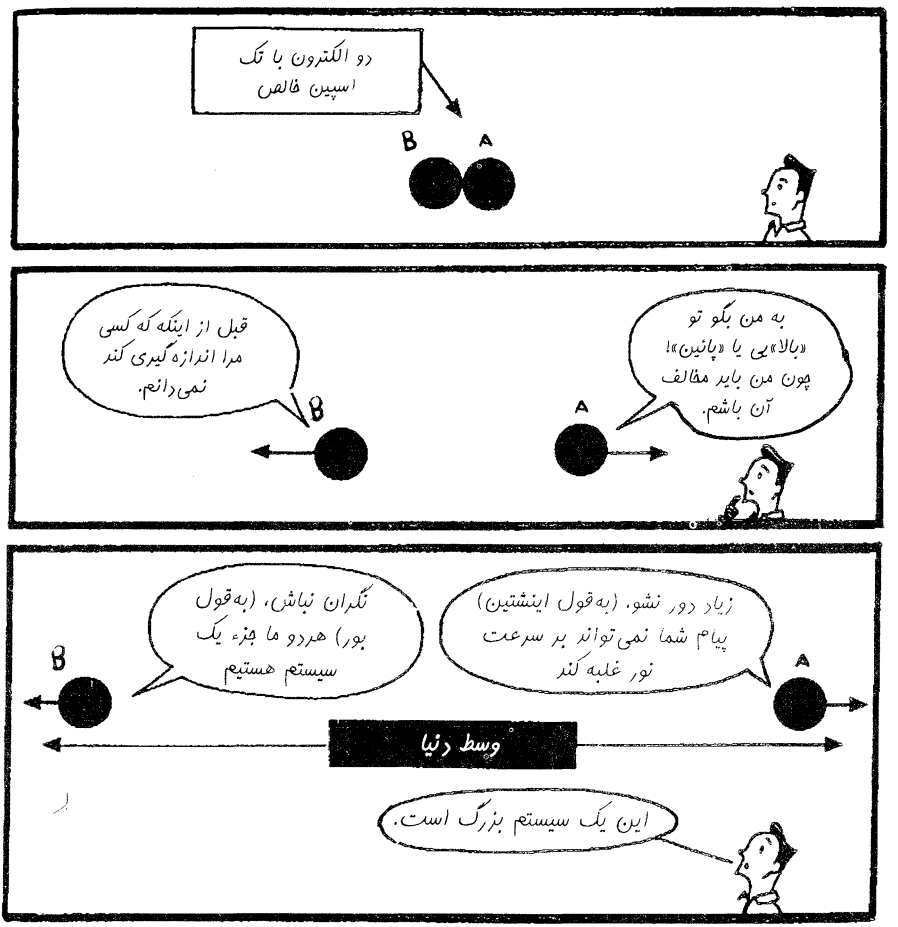
اما آیا اینشتین تسلیم شد؟ نه کاملاً! پنج سال بعد، هنگامی که قدرت‌یافتن هیتلر، فیزیکدانان اروپا را در سراسر جهان پراکند، اینشتین سرانجام در مرکز تحقیقات عالی در پرینستون، نیوجرسی با دو همکار جوان‌تر **بوریس پودولسکی** (۱۹۶۶–۱۸۹۰) و **ناتان روزن** (متولد ۱۹۰۹) چالش دیگری برای بور پدید آورد که این‌بار **براساس اصل عدم قطعیت** نبود و به احترام همکارانش با عنوان **پارادوکس EPR** شناخته می‌شود.

در سال ۱۹۳۳ اینشتین آلمان را برای همیشه ترک کرد.

اینشتین و همکارانش متقاعد شده بودند که وجود متغیرهای پنهانی (یعنی درواقع عناصری از واقعیت) را اثبات کرده‌اند که نظریه کوانتوم، آنها را درنظر نگرفته است و بنابراین نشان داده‌اند که این نظریه **کامل نیست**. موضوع مهم برای اینشتین مسئله **جدایی**، یعنی اصل موضعیت بود.

بور و غیرموضعیت

بور گفت جدایی یا موضعیت مجاز نیست، او بلافاصله به اینشتین (و جهانیان) آنچه را که CHI مدعی آن بود یادآوری کرد.

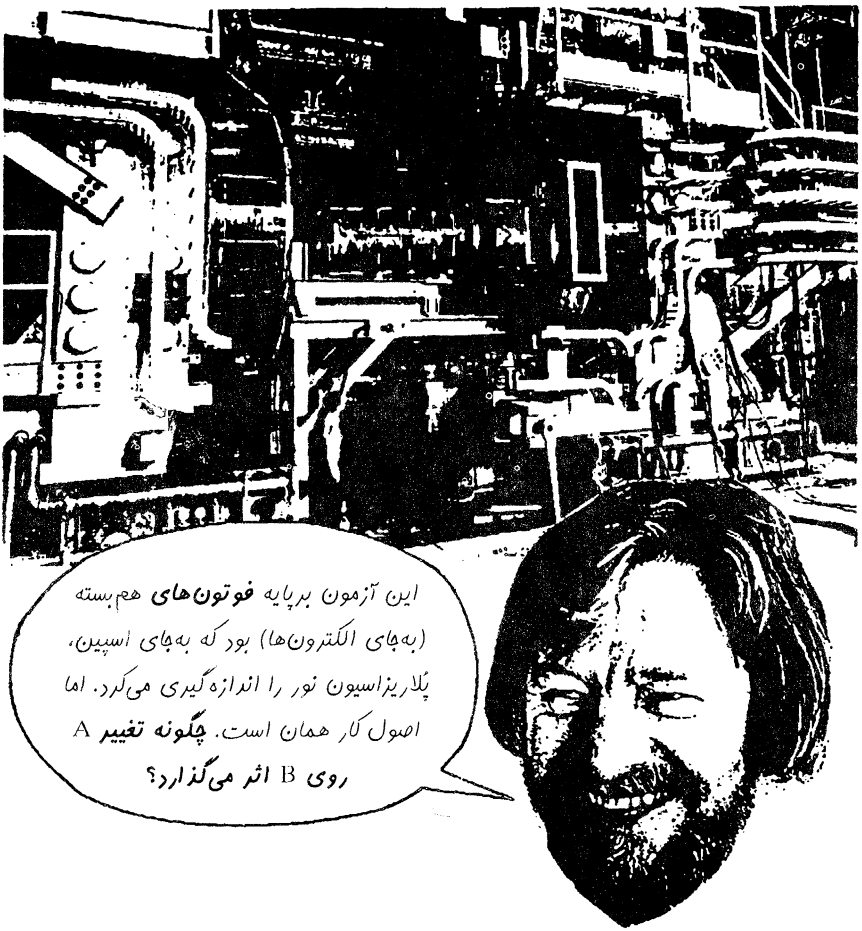


*مکانیک کوانتوم جدایی بین مشاهده‌گر و مشاهده‌شونده را اجازه نمی‌دهد. هردو الکترون و مشاهده‌گر اجزای یک سیستم هستند. آزمایش EPR ناکامل‌بودن نظریه کوانتوم را ثابت نمی‌کند بلکه ساده‌انگاری فرض **موضعیت** را در یک سیستم کوانتومی اثبات می‌کند.*

در یک سیستم اتمی هنگامی که یک بار تلاقی روی می‌دهد، دیگر جدایی ممکن نیست. سؤال مهم این بود که آیا ویژگی باورنکردنی غیرموضعیت همیشه توسط آزمایش قابل آزمون هست یا نه؟ و در غیر این صورت آیا نظریه **جدایی** اینشتین می‌تواند ثابت شود؟

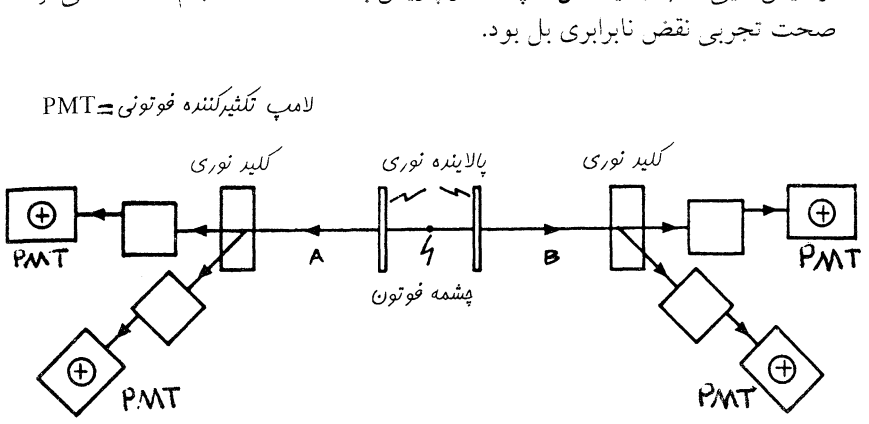
نظریه نابرابری بل

برای حدود سی‌سال، یعنی تا قبل از اینکه یک فیزیکدان بلفاستی (بلفاست پایتخت ایرلند شمالی است) **جان بل** (۱۹۹۰ـ۱۹۲۸)، مرخصی یک‌ساله‌ای از CERN (مرکز اروپایی برای تحقیقات هسته‌ای) گرفت، پیشرفت‌های بسیار کمی درباره این سؤال مهم حاصل شده بود. او **ضابطه نابرابری** هوشمندانه‌ای را برای آزمون به پرسش‌های برخاسته از پارادوکس‌ها به‌وجود آورد.



بل برای استنتاج نابرابری‌اش، از داده‌ها و ایده‌های مسلمی بهره برد که به‌جز حالت موضعیت اینشتین که او فرض کرده بود درست است، همه با بقیهٔ آنها موافق بودند. حال اگر تجربه‌ای نشان می‌داد که **نابرابری نقض** شده است به این معنا بود که یکی از مقدمه‌های استنتاج آن نادرست است. بل ترجیح داد که این را به‌معنای غیرموضعیت نبودن طبیعت تعبیر کند.

آزمایش‌هایی که توسط **جان کلوزر** و دیگران در سال ۱۹۷۸ در برکلی و آزمایش‌هایی که به‌وسیله **آلن اسپکت** در پاریس به سال ۱۹۸۲ انجام شد، حاکی از صحت تجربی نقض نابرابری بل بود.



آزمایش اسپکت، پاریس ۱۹۸۲

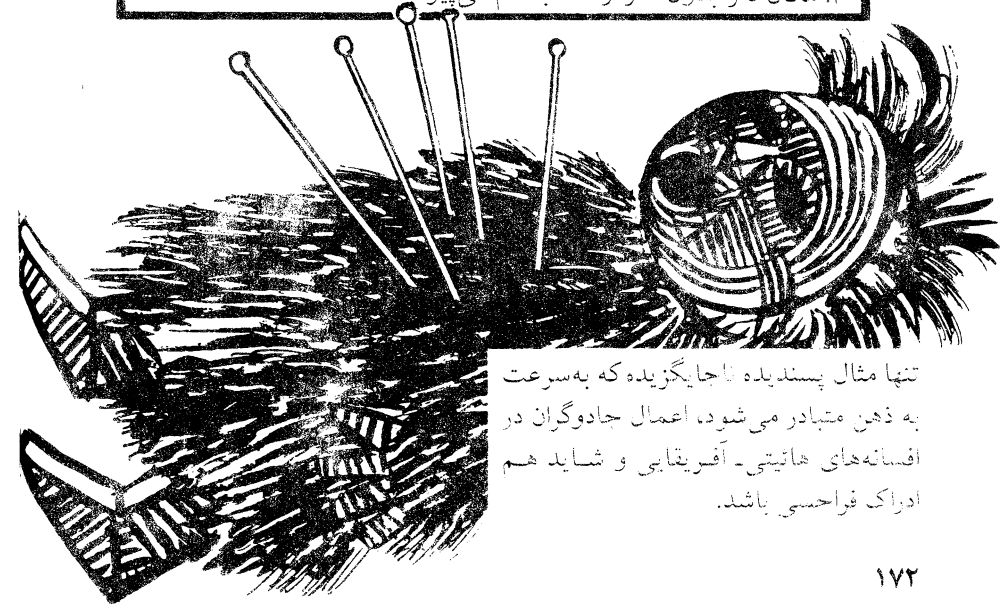
این به این معنی است که علی‌رغم پیدایش محلی پدیده‌ها، جهان ما با یک واقعیت مشاهده‌ناپذیر و بی‌واسطه پشتیبانی می‌شود که **اجازه می‌دهد انتقال سریعتر از سرعت نور، حتی به صورت لحظه‌ای**، صورت گیرد.

کنش تحت واقعیت غیرموضعی

۱. کنش با فاصله تضعیف نمی‌شود.

۲. می‌تواند بی‌درنگ عمل کند (سریعتر از سرعت نور)

۳. مکان‌ها را بدون گذر از فضا به هم می‌پیوندد.

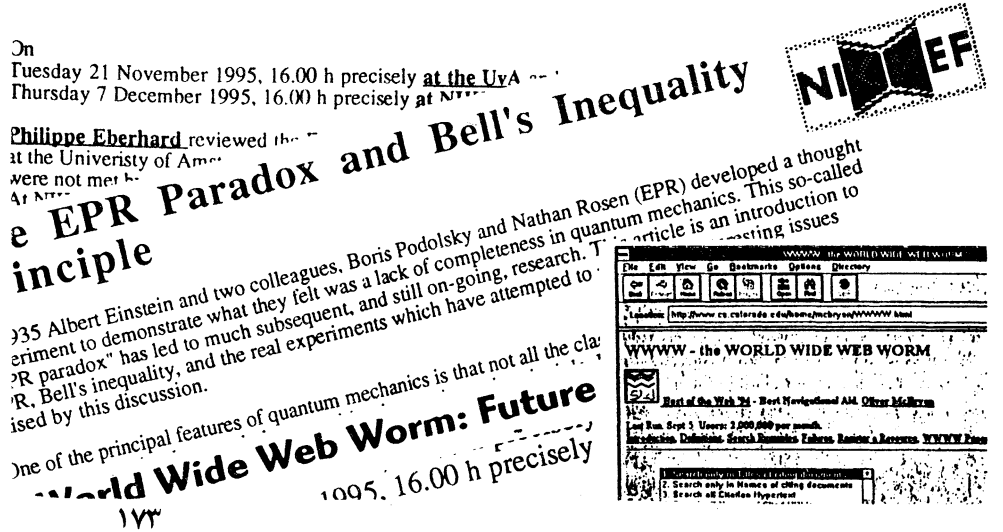


تنها مثال پسندیده جایگزیده که به‌سرعت به ذهن متبادر می‌شود، اعمال جادوگران در افسانه‌های هائیتی- آفریقایی و شاید هم ادراک فراحسی باشد.

جهان کشف نشده

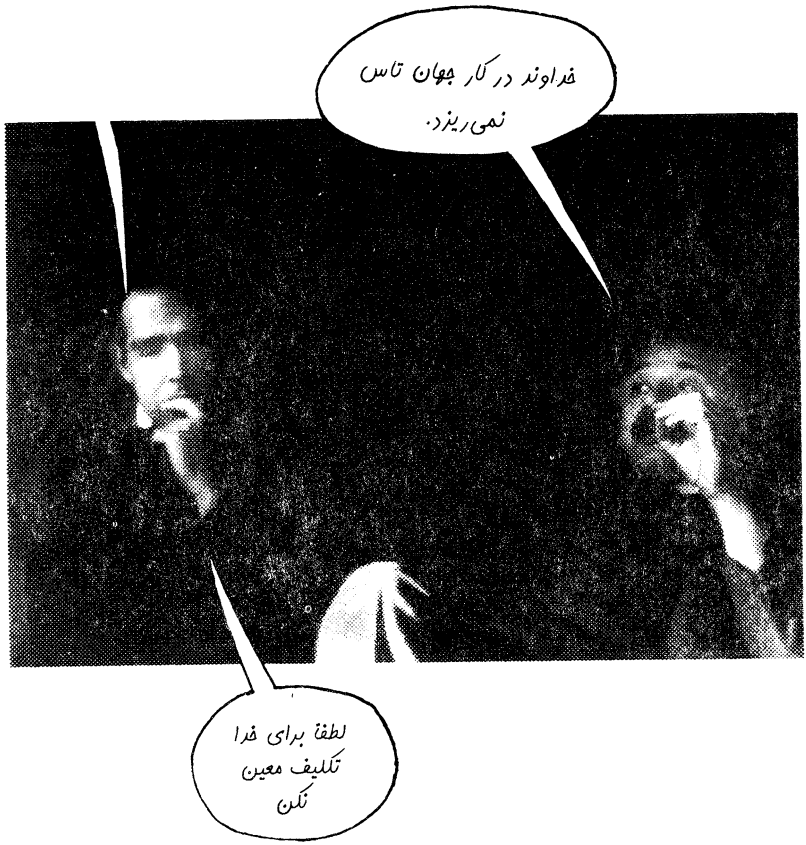
به‌نظر می‌رسد که این یک بعد استثنایی طبیعت و یک دستاورد ناشی از کاربرد نظریه کوانتومی باشد. کار بل که باید به هر نظریه بنیادی از طبیعت (و نه فقط نظریه کوانتومی) اعمال شود می‌تواند به مهمترین مسئله نظری این قرن تبدیل شود.

علی‌رغم شور و شوق فراوان دهه اخیر راه‌گریزی از تجربیاتی نظیر آزمایش اسپکت که مبتنی بر تحلیل آماری هزاران اندازه‌گیری است، یافت نشد. این راه‌گریز به اثبات قضیه بل باز می‌گردد که هنوز یکی از سؤال‌های مطرح است. اینشتین و EPR هنوز زنده‌اند. همان‌طور که از صفحات وبی برمی‌آید که اخیراً از اینترنت دریافت شده است تحقیقات فراوان جهانی دربارهٔ این پرسش ادامه دارد.



نظریه کوانتومی و عصر جدید

مشاجره معروفی که در شکل این صفحه به‌تصویر کشیده شده است، نشانگر چالش بسیار مهم اینشتین با تعبیر بور از نظریه کوانتوم نیست. امواج شرودینگر و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، نتیجه‌بخش‌اند، اما پارادوکس EPR هم برای خودش مسئله‌ای است.



این صحیح است که آزمایش‌ها روی فوتون‌های هم‌بسته در ۱۹۸۲ (اسپکت و دیگران) نقض نابرابری بل را ثابت کردند و رای به غیرموضعی بودن طبیعت دادند. با این حال به‌نظر می‌رسد که مسئله حل‌وفصل نشده است.

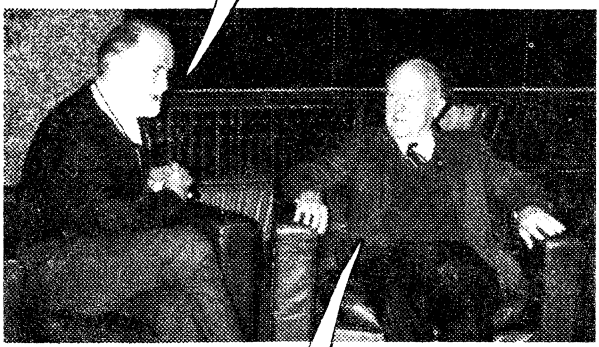
آیا غیرموضعی بودن واقعاً حقیقت دارد؟ آیا می‌توانیم با مفهوم نامعقول **کنش از راه دور** (جادوگری و...) زندگی کنیم؟

امروزه همه با این موافق نیستند که آزمایش‌های همبسته، قطعی هستند. پس ما اکنون در کجا ایستاده‌ایم؟

جان آرچیبالد ویلر، فیزیکدان کوانتومی

مردی که امروز برای پاسخ‌دادن به این سؤال زنده است **جان ویلر** (متولد ۱۹۱۱) استاد ممتاز فیزیک در دانشگاه پرینستون است. ویلر به مدت نزدیک به ۶۰ سال در فیزیک قرن بیستم، کیهان‌شناسی نسبیتی و نظریه کوانتوم، پیشتاز بوده است. او به‌دلیل کوشش‌های پایان‌ناپذیرش برای فهم همه مفاهیم فرمالیزم کوانتومی مشهور است. کار او بر نقش اساسی مشاهده‌گر در **ایجاد واقعیت** تکیه دارد.

بعضی از ما نمی‌توانیم توضیحاتی که CPI تلویحاً به‌دست می‌دهد، بپذیرم. خصوصاً غیرموضعی بودن آن. آیا به معنی این است که حق با اینشتین است؟



نویسنده جان ویلر را در یک روز برفی در دسامبر ۱۹۹۵ ملاقات کرد.

به‌یاد داشته باشید که به‌دلیل پارادوکس EPR ما حق نداریم بپرسیم فوتون‌ها در طول حرکتشان چه می‌کنند. ***هیچ ذره بنیادی تا زمانی که ثبت نشود، یک پدیده نیست.*** *باید باید هر روز با خود بگوئیم که نظریه کوانتوم، مطلق، چالش‌ناپذیر و شکست‌ناپذیر است. این یک* ***نبرد آزمایش‌شده*** *است.*

و حرف آخر

اخیراً ویلر برای نویسنده کتاب نوشت:

دسامبر ۲۰۰۰، ۱۰۰امین سالگرد بزرگترین کشفی است که تاکنون در فیزیکی رخ داده است؛ نظریه کوانتوم. برای تجلیل از آن من عنوان افتخار و شرم را پیشنهاد می‌کنم. چرا افتخار؟ برای اینکه هیچ شاخه‌ای از فیزیک وجود ندارد که کوانتوم به آن نپرداخته باشد. و شرم برای اینکه ما هنوز نمی‌دانیم کوانتوم چگونه حاصل شده است.

نظریه کوانتوم ما را به مسائل متناقض و در عین‌حال جالبی که بنای فیزیک کلاسیک را به لرزه می‌اندازد روبرو می‌سازد. به عنوان مثال در سطح ذرات، وضعیت به نحوی است که گویی هر ذره‌ای از آنچه ذرات مجاور انجام می‌دهند با خبر است. نمونه دیگر، نظریه عدم قطعیت هایزنبرگ است که به دقت تمامی شیمی و بخش عمده‌ای از فیزیک را توضیح می‌دهد و در عین‌حال حرف اصلی‌اش این است که در دقت شناخت ما نسبت به طبیعت چیزها محدودیت وجود دارد.

کتاب حاضر ما را قدم به قدم در دنیای پیچیده و جذاب نظریه کوانتوم همراهی کرده و سهم هر یک از نظریه‌پردازان کلیدی این حوزه، یعنی پلانک، اینشتین، بر، هایزنبرگ و شرودینجر را یادآور می‌شود. به این اعتبار کتاب حاضر **قدم اولی** است در دنیای شگفت‌انگیز فیزیک مدرن. با مطالعه این کتاب، خواننده در عین‌حال با فهرست مسائل حل ناشده این رشته که گشایش رازشان به قرن بیست‌ویکم میلادی محول شده است آشنا می‌گردد.

ISBN: 964-6578-64-0

شابک: ۰ - ۶۴ - ۶۵۷۸ - ۹۶۴