

فیزیک کوانتوم به زبان ساده؛ جهانی در هاله احتمال

مهدیه یوسفی

در دنیای عجیب کوانتوم، قوانین فیزیک به گونه‌ای دیگر عمل می‌کنند و مفاهیمی مانند احتمال، عدم قطعیت و درهم‌تنیدگی،

جایگزین قطعیت می‌شوند

تبلیغات

فیزیک کوانتوم، دنیایی شگفت‌انگیز و پر از رمز و راز است که در اعماق ذرات زیراتمی پنهان شده است. این شاخه از فیزیک، برخلاف فیزیک کلاسیک که دنیای ماکروسکوپی را توصیف می‌کند، به بررسی رفتار ذرات در مقیاس‌های بسیار کوچک می‌پردازد. در این دنیای عجیب، قوانین فیزیک به گونه‌ای دیگر عمل می‌کنند و مفاهیمی مانند احتمال، عدم قطعیت و درهم‌تنیدگی، جایگزین قطعیت می‌شوند.

تصور کنید که یک ذره‌ی زیراتمی می‌تواند همزمان در چند مکان مختلف حضور داشته باشد یا اینکه دو ذره‌ی درهم‌تنیده می‌توانند بدون توجه به فاصله‌ی بینشان، به طور آنی بر یکدیگر تاثیر بگذارند. این پدیده‌ها که در دنیای روزمره‌ی ما غیرقابل تصور هستند، در دنیای کوانتوم به امری عادی تبدیل می‌شوند.

فیزیک کوانتوم، نه تنها دنیای ذرات زیراتمی را متحول کرده است، بلکه تاثیرات شگرفی بر فناوری‌های نوین نیز داشته است. از ترانزیستورها و لیزرها تا کامپیوترهای کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی، همگی بر پایه‌ی اصول فیزیک کوانتوم بنا شده‌اند. این فناوری‌ها، آینده‌ی بشر را دگرگون خواهند کرد و امکاناتی را فراهم خواهند آورد که تا چندی پیش غیرقابل تصور بودند. باوجود پیشرفت‌های چشمگیر در فیزیک کوانتوم، هنوز سوالات بسیاری بی‌پاسخ مانده است. ماهیت واقعی ذرات زیراتمی، چگونگی ارتباط بین فیزیک کوانتوم و گرانش و رازهای نهفته در دل سیاه‌چاله‌ها، از جمله مسائلی هستند که ذهن فیزیکدانان را به خود مشغول کرده‌اند. تلاش برای یافتن پاسخ این سوالات، ما را به مرزهای دانش بشری نزدیک‌تر خواهد کرد و پنجره‌ای جدید به سوی درک عمیق‌تر جهان هستی خواهد گشود.

فهرست مطالب

[فیزیک کوانتوم چیست؟](#)

[آغاز عصر کوانتوم: از لامپ ادیسون تا تابش جسم سیاه](#)

[فرضیه کوانتیده‌شدن انرژی](#)

[اینشتین و اثر فوتوالکتریک](#)

[از مدل بور تا مکانیک کوانتومی؛ انقلابی در درک ساختار اتم](#)

[برهم‌نهی کوانتومی و گربه شرودینگر](#)

[مکانیک ماتریسی هایزنبرگ](#)

[اصل عدم قطعیت هایزنبرگ](#)

[فیزیک کوانتوم از نگاه شرودینگر؛ قطعیت یا احتمال؟](#)

[درهم‌تنیدگی کوانتومی؛ کنش شب‌خوار از راه دور](#)

[از انرژی منفی تا پوزیترون؛ انقلاب کوانتومی دیراک](#)

[آزمایش‌های آلن اسپه و پیروزی فیزیک کوانتوم](#)

[فرا‌تر از کوانتوم؛ جستجوی قوانین ژرف جهان](#)

فیزیک کوانتوم چیست؟

فیزیک کوانتوم، رفتار ذرات بسیار ریز، مانند الکترون‌ها، را توصیف می‌کند. برخلاف فیزیک کلاسیک که در آن قطعیت حرف اول را می‌زند، فیزیک کوانتوم بر احتمالات، عدم قطعیت و دوگانگی موج-ذره استوار است.

هسته و الکترون‌هایی که اطراف آن حرکت می‌کنند

فیزیک کوانتوم همیشه به‌عنوان مبحثی پیچیده و مرموز شناخته می‌شود. بسیاری، این شاخه از فیزیک را سخت و غیرقابل درک می‌دانند. [ریچارد فاینمن](#)، فیزیکدان بزرگ و برنده‌ی جایزه‌ی نوبل برای پژوهش در حوزه‌ی الکترودینامیک کوانتومی، جمله‌ای معروف در این زمینه دارد: «اگر فکر می‌کنید فیزیک کوانتوم رو می‌فهمید، پس هنوز آن رو نفهمیده‌اید.» با خواندن نقل قول مشهور ریچارد فاینمن، مبنی بر اینکه «هیچ کس کوانتوم را درک نمی‌کند»، احتمالاً احساس ناامیدی به شما دست خواهد داد. اگر کسی به هوشمندی فاینمن هم نتوانسته این شاخه پیچیده از فیزیک را درک کند، پس تکلیف ما چه خواهد بود؟ اما خوشبختانه، این اظهار نظر فاینمن کمی اغراق آمیز است. در واقع، ما درک بسیار خوبی از فیزیک کوانتوم داریم. این نظریه نه تنها پایه و اساس بسیاری از فناوری‌های مدرن را تشکیل می‌دهد، بلکه به‌طور مستقیم منجر به اختراع و توسعه فناوری‌های کلیدی مانند کامپیوترها، نمایشگرهای LED، لیزرها و حتی نیروگاه‌های هسته‌ای شده است.

در دنیای کوانتوم، قطعیت جای خود را به احتمالات می‌دهد

آنچه فیزیک کوانتوم را از سایر شاخه‌های فیزیک متمایز می‌کند، نگاه منحصر به فرد آن به ماهیت ذرات بنیادی است. در فیزیک کلاسیک، ذراتی مانند الکترون، پروتون و نوترون به‌عنوان اجسام مادی و مجزا در نظر گرفته می‌شوند. اما در قلمرو کوانتوم، این

ذرات ماهیتی دوگانه دارند و به شکل امواج نیز توصیف می‌شوند. به عبارت دیگر، در این دنیای شگفت‌انگیز، همه چیز می‌تواند همزمان خواص ذره‌ای و موجی از خود نشان دهد.

برای درک بهتر رفتار الکترون، دیگر نمی‌توان آن را صرفاً به عنوان یک ذره‌ی مادی در نظر گرفت، بلکه باید آن را به شکل یک موج نیز تصور کرد. این موج که در فیزیک کوانتوم با عنوان «تابع موج» شناخته می‌شود، اطلاعاتی را در مورد ویژگی‌های ذره، مانند موقعیت مکانی آن، به صورت احتمالی ارائه می‌دهد. به جای تعیین دقیق مکان الکترون، تابع موج احتمال حضور آن را در نقاط مختلف فضا مشخص می‌کند.

آغاز عصر کوانتوم: از لامپ ادیسون تا تابش جسم سیاه

جرقه‌ی فیزیک کوانتوم از جایی شروع شد که کسی فکرش را نمی‌کرد: لامپ الکتریکی. [۱] اواخر قرن نوزدهم، ادیسون با اختراع لامپ رشته‌ای، انقلابی بزرگ به پا کرد. شرکت‌های مهندسی در آلمان، میلیون‌ها مارک سرمایه‌گذاری کردند تا امتیاز این اختراع را در اروپا به دست آورند. اما در کنار پیشرفت صنعتی، پرسش علمی مهمی نیز مطرح شد: چرا و چگونه یک جسم داغ، نور تولید می‌کند؟

سیم رشته‌ای داخل لامپ در دمای بالا

دانشمندان می‌دانستند که رشته‌ی داخل لامپ به دلیل عبور جریان الکتریکی گرم می‌شود و نور تولید می‌کند، اما چگونگی این اتفاق، هنوز یک معما بود؛ و اینجا نقطه‌ی شروع بود. جرقه‌ی فیزیک کوانتوم از یک مسئله‌ی به ظاهر ساده اما بنیادین آغاز شد: چرا رنگ نور یک جسم داغ (مانند لامپ) با افزایش دما تغییر می‌کند؟ پاسخ این پرسش، پایان سلطه‌ی قوانین نیوتن در دنیای میکروسکوپی را رقم زد.

بیش از یک قرن پیش، فیزیکدانان در تلاش برای یافتن پاسخی برای یک سوال به ظاهر ساده بودند: چرا اجسام داغ، مانند شیشه مذاب یا گدازه‌های آتشفشانی، نور از خود ساطع می‌کنند؟ این پرسش که در نگاه اول شاید چندان پیچیده به نظر نمی‌رسید، ذهن بزرگانی همچون **لرد ریلی** [۲] را به خود مشغول کرد و زمینه‌ساز تحولات بنیادینی در فیزیک مدرن شد.



فلزی بسیار داغ

ریلی کسی بود که علت آبی بودن آسمان را توضیح داد. او برای حل مسئله‌ی نور، ساده‌ترین جسم ممکن را تصور کرد: جسمی به نام جسم سیاه که تمام نور را جذب کند. اجسام می‌توانند نور را جذب، بازتاب یا منتشر کنند، اما جسم سیاه، فقط نور را جذب و ساطع می‌کند.

ویژگی جسم سیاه

جسم سیاه اصلاً سیاه نیست؛ بلکه در حال درخشیدن است. این جسم به صورت واقعی در طبیعت وجود ندارد، زیرا هیچ چیزی نمی‌تواند تمام نور را به طور کامل جذب و به صورت کامل و بدون بازتاب منتشر کند. جالب است بدانید ستارگانی مانند خورشید به طور شگفت‌انگیزی مشابه جسم سیاه واقعی هستند.

در آن زمان، فیزیکدان‌ها هنوز درک دقیقی از اتم‌ها و مولکول‌ها نداشتند. آن‌ها فکر می‌کردند که همه چیز از ذراتی مشابه فنر ساخته شده است که با فرکانس خاصی نوسان می‌کنند. در نتیجه، ریلی و همکارش نیز تصور مشابهی از ساختار درونی جسم سیاه داشتند.

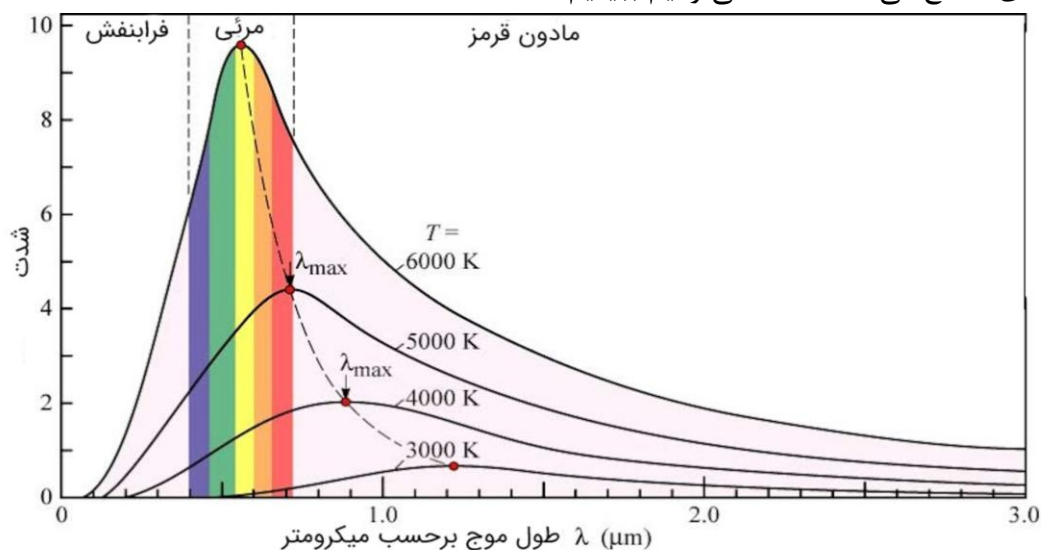
در این مدل، نوسان ذرات به صورت پیوسته به نور تبدیل می‌شد. با این مدل، ریلی توانست پیش‌بینی کند در هر دما، جسم سیاه چه رنگی تابش می‌کند. اما یک مشکل بزرگ به وجود آمد: جسم سیاه باید مقدار نامتناهی نور فرابنفش ساطع کند.

فیزیک کلاسیک که بر پایه‌ی قوانین نیوتنی و الکترومغناطیس ماکسول بنا شده بود، نمی‌توانست رفتار این تابش را به درستی توضیح دهد. طبق محاسبات فیزیک کلاسیک، جسم سیاه باید مقدار نامتناهی نور فرابنفش منتشر کند، که نتیجه‌ی آن پدیده‌ای بود که بعدها فاجعه‌ی فرابنفش (Ultraviolet Catastrophe) نامیده شد. اگر این محاسبات درست بودند، هر بار که فر را روشن می‌کردید، می‌بایست از شدت تابش فرابنفش آن می‌سوختید، اما چنین چیزی در واقعیت رخ نمی‌دهد.

فاجعه‌ی فرابنفش

تابش جسم سیاه یکی از پدیده‌های جذاب طبیعت است: توزیع تابش فقط به دما بستگی دارد، نه به ماده‌ای که جسم از آن ساخته شده است. این بدان معناست که هر جسمی در دمای یکسان، نور مشابهی تولید می‌کند.

نکته‌ی جالب آن است که با افزایش دمای جسم، طول موجی که بیشترین شدت تابش در آن رخ می‌دهد (طول موج بیشینه یا $\lambda_{\max}$)، به سمت چپ (طول موج‌های کوتاه‌تر) می‌رود. به همین دلیل، اجسام داغ مانند خورشید یا لامپ‌های رشته‌ای نور مرئی زیادی ساطع می‌کنند که ما می‌توانیم ببینیم.



شدت تابش بر حسب طول موج در دماهای مختلف

فرضیه کوانتیده‌شدن انرژی

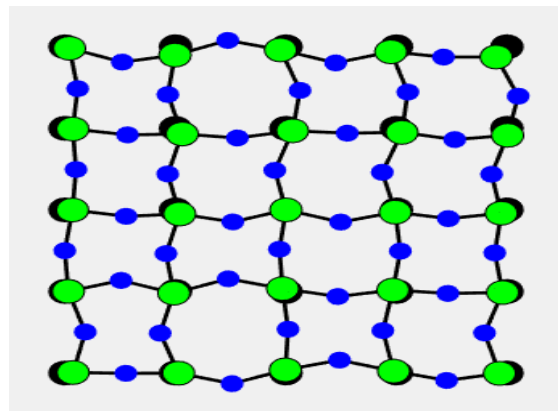
فیزیکدانان در توصیف تابش جسم سیاه در طول موج‌های بلندتر، مانند مادون قرمز، موفق بودند. اما با نزدیک شدن به طول موج‌های کوتاه‌تر، به‌ویژه فرابنفش، با پدیده‌ای غیرقابل توضیح به نام «فاجعه فرابنفش» روبرو شدند. این فاجعه، که با نتایج تجربی

مغایرت داشت، نشان‌دهنده ناتوانی فیزیک کلاسیک در توصیف دقیق این پدیده بود و ضرورت ظهور یک نظریه‌ی جدید را آشکار کرد.

نظریه‌ی الکترومغناطیس کلاسیک، قادر به توصیف صحیح رفتار نور و انرژی در این مقیاس نبود. در این نقطه، **ماکس پلانک** با ارائه فرضیه‌ای انقلابی، یعنی «کوانتیده‌شدن انرژی»، گره این معما را گشود.

پلانک با ارائه فرضیه کوانتیده‌شدن انرژی، نگرشی انقلابی را مطرح کرد: انرژی نه به‌صورت پیوسته، بلکه در بسته‌های گسسته و مجزا به نام «کوانتا» منتشر می‌شود. به بیان ساده‌تر، انرژی نمی‌تواند مقادیر دلخواه را بپذیرد، بلکه تنها می‌تواند مقادیر خاص و مشخصی داشته باشد. این ایده، به‌طور کامل با فرضیات فیزیک کلاسیک در تضاد بود، چرا که فیزیک کلاسیک انرژی را کمیتی پیوسته و قابل تغییر در هر لحظه می‌دانست.

برای درک این مفهوم، پلانک فرض کرد که وقتی یک فلز داغ می‌شود، انرژی حرارتی آن به‌صورت لرزش‌های اتمی یا نوسانات اتمی ظاهر می‌شود. این لرزش‌ها همان چیزی هستند که باعث تولید نور می‌شوند.



نوسانات اتمی در دمای بالا

پلانک پیشنهاد داد که این نوسانات و انرژی‌هایی که از آن‌ها منتشر می‌شود باید کوانتیده باشند، یعنی فقط می‌توانند مقادیر خاصی از انرژی را داشته باشند و نمی‌توانند به‌طور پیوسته از یک مقدار به مقدار دیگر تغییر کنند. این ایده‌ی جدید، مبنای نظریه‌ای شد که بعدها به فیزیک کوانتوم معروف شد.

پلانک برای توضیح تابش جسم سیاه، معادله‌ی زیر را نوشت:

$$E = hf$$

که در آن:

- n عددی صحیح و مثبت است.
- h ثابت پلانک و مقدار آن برابر 6.626×10^{-34} است.
- f فرکانس تابش است.

مقدار n در این فرمول همان چیزی است که باعث کوانتیده شدن انرژی می‌شود؛ یعنی انرژی، تنها می‌تواند مقادیر خاصی داشته باشد و هیچ مقداری بین آن‌ها قابل قبول نیست. این ایده، نه تنها برای تابش جسم سیاه، بلکه به‌طور کلی برای فهم رفتار انرژی در مقیاس‌های میکروسکوپی اهمیت زیادی دارد.

ثابت پلانک و ایده‌ی کوانتیده شدن انرژی، به‌طور شگفت‌انگیزی توانستند توزیع واقعی تابش جسم سیاه را در تمام طول موج‌ها پیش‌بینی کنند. این پیش‌بینی‌ها نشان داد که ثابت پلانک تنها یک عدد ریاضی تصادفی نیست، بلکه سرنخی از ماهیت بنیادی واقعیت است.

کوانتیده بودن انرژی در مقیاس میکروسکوپی آغازگر انقلابی کوانتومی بود

ثابت پلانک آن قدر کوچک است که به راحتی نمی‌توان آن را در زندگی روزمره مشاهده کرد؛ بنابراین، تا پیش از این هیچ‌کس به اهمیت کوانتیده شدن انرژی پی نبرده بود. این نشان می‌دهد که انرژی در مقیاس‌های بسیار کوچک به بسته‌های گسسته تقسیم می‌شود و به علت این مقدار بسیار کوچک، ما نمی‌توانیم تغییرات انرژی را در مقیاس‌های بزرگ مشاهده کنیم. در دنیای ماکروسکوپی که با حواس خود درک می‌کنیم، انرژی به‌نظر پیوسته و بی‌کران می‌رسد. اما در اعماق ذرات زیراتمی و در قلمرو میکروسکوپی، واقعیت به‌گونه‌ای دیگر رقم می‌خورد. در این سطح بنیادی، انرژی به‌صورت گسسته و در بسته‌های مشخصی به نام «کوانتا» تقسیم می‌شود. این مفهوم چنان با شهود ما در تضاد بود که حتی خود ماکس پلانک، بنیان‌گذار نظریه کوانتوم، در ابتدا از پذیرش آن به‌عنوان یک واقعیت فیزیکی عینی تردید داشت. او می‌دانست که این ایده، انقلابی در درک ما از جهان هستی به پا خواهد کرد.

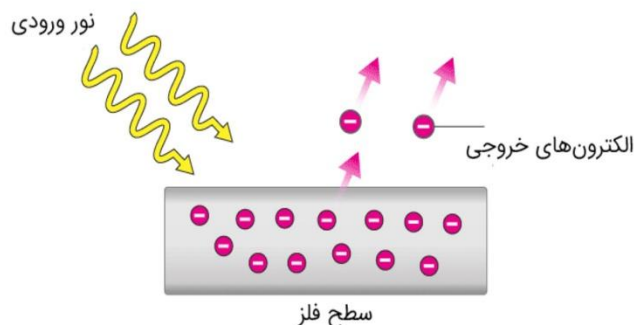
این نخستین بار بود که کوانتیده شدن انرژی توانست یک مشکل بزرگ را در فیزیک حل کند، ولی این پایان کار نبود. این ایده‌ی جدید، نقطه‌عطفی بود که دنیای فیزیک را به‌شکلی اساسی تغییر داد و درک ما را از واقعیت دگرگون کرد. با این حال، این کشف پلانک باعث شد سوال بزرگ دیگری پیش بیاید: چرا انرژی باید کوانتیده باشد؟ این پرسش، آغازگر انقلاب کوانتومی بود و مسیر جدیدی را در علم گشود.

اینشتین و اثر فوتوالکتریک

در سال ۱۹۰۱، ماکس پلانک با کشف کوانتیده بودن انرژی در مقیاس میکروسکوپی، گام جدیدی در دنیای فیزیک برداشت. اما بعد از او، [آلبرت اینشتین](#) قرار بود این مسیر را ادامه دهد. در سال ۱۹۰۵، زمانی که اینشتین هنوز در سوئیس به‌عنوان کارمند اداره‌ی ثبت اختراعات مشغول به کار بود، سه مقاله‌ی انقلابی منتشر کرد که فیزیک را برای همیشه تغییر داد. این مقالات درباره‌ی حرکت براونی، [نسبیت خاص](#) و اثر فوتوالکتریک بودند.

یکی از مهم‌ترین اقدامات اینشتین در سال ۱۹۰۵، بررسی اثر فوتوالکتریک بود. مشابه پژوهش‌های پلانک، این اثر نیز به کوانتیده بودن انرژی اشاره داشت و نشان داد که این مفهوم چیزی فراتر از یک فرضیه‌ی ریاضی است.

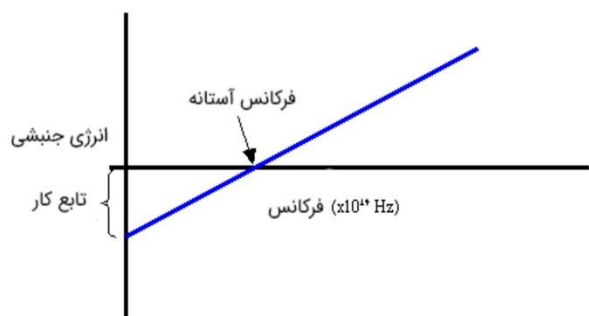
در اثر فوتوالکتریک بررسی می‌کنیم که چگونه نور می‌تواند الکترون‌ها را از سطح یک فلز جدا کند. طبق نظریه‌های کلاسیک، با افزایش شدت نور تابشی، انرژی کافی برای جدا کردن الکترون از سطح فراهم می‌شود. اما آزمایش‌ها نشان دادند که این فرضیه درست نیست. طبق یافته‌های اینشتین، نور با فرکانس خاص (یعنی انرژی کافی) می‌تواند الکترون را از فلز بیرون بپندارد.



اثر فوتوالکتریک

به بیان ساده‌تر، مهم نیست شدت نور چه مقدار باشد، اگر فرکانس آن به اندازه‌ی کافی بالا نباشد، هیچ الکترونی جدا نخواهد شد. این مشاهدات، اینشتین را به یک نتیجه‌ی انقلابی رساند: نور از بسته‌های کوچک انرژی به نام فوتون تشکیل شده است.

هر فوتون مقدار انرژی مشخصی برابر با $h \times f$ دارد (که در آن h ثابت پلانک و f فرکانس نور است). اگر انرژی فوتون به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، پس از برخورد به یک الکترون، می‌تواند آن را از سطح فلز خارج کند. تصویر زیر، رابطه‌ی بین انرژی جنبشی الکترون‌های آزادشده و فرکانس نور تابشی را در اثر فوتوالکتریک نشان می‌دهد. تا زمانی که فرکانس نور کمتر از فرکانس آستانه باشد، هیچ الکترونی خارج نمی‌شود. اما اگر فرکانس از مقدار آستانه بیشتر شود، انرژی جنبشی الکترون‌ها به‌صورت خطی با فرکانس افزایش می‌یابد. مقدار تابع کار نشان‌دهنده‌ی انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح فلز است.



نمودار انرژی جنبشی الکترون‌های آزادشده برحسب فرکانس نور تابشی

نور؛ هم موج، هم ذره

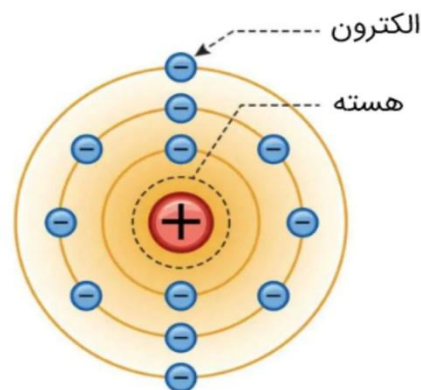
تا اینجا فهمیدیم نور از ذراتی به‌نام فوتون تشکیل شده است. اما نکته‌ی عجیب‌تر آن است که نور، علاوه بر ماهیت ذره‌ای، ویژگی‌های موجی هم دارد. پدیده‌هایی مانند تداخل و پراش نور، مدت‌ها پیش ثابت کرده بودند که نور می‌تواند مانند یک موج رفتار کند. اما حالا آزمایش‌های اینشتین نشان می‌دادند که نور در برخی شرایط مانند یک ذره عمل می‌کند.

نور همزمان هم موج است، هم ذره؛ مفهومی که در دنیای کلاسیک غیرقابل تصور است

اینجا بود که مفهوم انقلابی «دوگانگی موج-ذره» (Wave Particle Duality) متولد شد؛ ایده‌ای که بیان می‌کرد نور، بسته به شرایط، می‌تواند هم مانند موج و هم مانند ذره رفتار کند. این مفهوم، که در تضاد کامل با درک شهودی ما از دنیای ماکروسکوپی است، در ابتدا برای بسیاری از فیزیکدانان نیز پذیرفتنی نبود. در دنیای روزمره، ما هرگز با پدیده‌ای مواجه نمی‌شویم که همزمان خواص موج و ذره را از خود نشان دهد. اما این تنها یکی از شگفتی‌های بی‌شمار دنیای کوانتوم است؛ جهانی که قوانین حاکم بر آن، به‌طور بنیادین با قوانین دنیای ماکروسکوپی که با حواس خود درک می‌کنیم، متفاوت است.

از مدل بور تا مکانیک کوانتومی؛ انقلابی در درک ساختار اتم

پس از اینشتین، [نیلز بور](#) گام بزرگی در درک ساختار اتم برداشت. او نشان داد که انرژی الکترون‌های یک اتم نیز کوانتیده و گسسته است. یعنی الکترون‌ها نمی‌توانند در هر مدار دلخواهی حرکت کنند، بلکه فقط در مدارهای مشخصی قرار می‌گیرند.



مدل اتمی بور

مدل اتمی بور که در سال ۱۹۱۳ ارائه شد، بیان می‌کند که الکترون‌ها تنها می‌توانند در مدارهای مشخص و گسسته‌ای به دور هسته اتم گردش کنند و امکان حضور آن‌ها در هر فاصله‌ای از هسته وجود ندارد.

براساس مدل بور، انتقال الکترون بین این مدارها نیازمند تبادل انرژی به شکل فوتون است. به این ترتیب، اگر الکترونی بخواهد به مداری با انرژی بالاتر منتقل شود، باید فوتونی با انرژی دقیقاً برابر با اختلاف انرژی بین دو مدار را جذب کند. در مقابل، هنگام بازگشت الکترون از مداری با انرژی بالاتر به مداری با انرژی پایین‌تر، فوتونی با همان میزان انرژی ساطع می‌شود. این مدل توانست طیف نشری هیدروژن و سایر عناصر را توضیح دهد و به عنوان سنگ بنایی برای پیشرفت‌های بعدی در فیزیک کوانتوم عمل کند. مدل بور، با وجود محدودیت‌هایی که داشت، نقش مهمی در شکل‌گیری درک ما از ساختار اتم و رفتار الکترون‌ها ایفا کرد.

دنیای کوانتومی شبیه خرید کفش است. نمی‌توان هر اندازه‌ای را انتخاب کرد، بلکه باید از بین سایزهای مشخص انتخاب کنیم. در فیزیک کوانتوم هم انرژی به صورت بسته‌های گسسته (کوانتا) وجود دارد، نه به صورت پیوسته.

پس از اکتشافات پیشگامانه اینشتین و بور، **لویی دوبروی**، فیزیکدان جوان فرانسوی، در سال ۱۹۲۴ فرضیه‌ی انقلابی دیگری را مطرح کرد: دوگانگی موج-ذره، که تا آن زمان تنها برای نور اثبات شده بود، برای ذرات مادی نیز صادق است. به عبارت دیگر، الکترون‌ها، همانند نور، دارای ماهیتی دوگانه هستند و می‌توانند هم به شکل ذره و هم به شکل موج رفتار کنند. طول موج این امواج، با تکانه (مومنتم) ذره رابطه معکوس دارد.

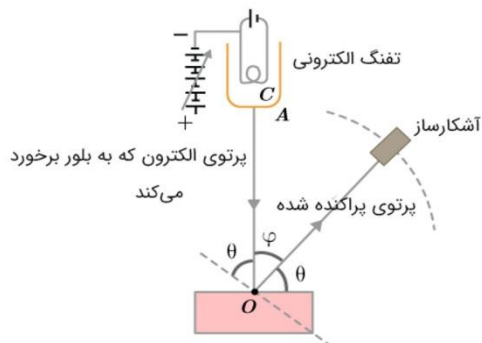
این فرضیه، زمانی به اثبات رسید که آزمایش‌ها نشان دادند پرتوهای الکترونی، هنگام عبور از یک شبکه بلوری، الگوی پراش ایجاد می‌کنند؛ پدیده‌ای که مختص امواج است. این کشف تجربی، نشان داد که خاصیت موجی الکترون‌ها، نه صرفاً یک مفهوم نظری، بلکه یک واقعیت قابل مشاهده در دنیای فیزیک است.

با اثبات دوگانگی موج-ذره برای ذرات مادی، دیگر امکان تکیه بر مکانیک کلاسیک نیوتنی برای توصیف رفتار ذرات در مقیاس‌های اتمی و زیراتمی وجود نداشت. این قلمرو، نیازمند یک چارچوب نظری کاملاً جدید بود؛ چارچوبی که امروزه آن را به نام فیزیک کوانتوم می‌شناسیم.

اثبات موجی بودن الکترون‌ها

برای آزمایش فرضیه‌ی جسورانه‌ی لویی دوبروی درباره‌ی رفتار موجی الکترون‌ها، **کلینتون دیویسون** و **استر گرمر** در اواسط دهه‌ی ۱۹۲۰، آزمایشی انقلابی انجام دادند. هدف اصلی این آزمایش، بررسی رفتار الکترون‌ها هنگام برخورد با سطح یک بلور بود. اگر الکترون‌ها واقعاً ویژگی‌های موجی داشتند، باید هنگام عبور از ساختار منظم بلور، الگوهای تداخل و پراش ایجاد می‌کردند؛ درست مانند نور که هنگام عبور از یک توری پراش، چنین الگوهایی را نشان می‌دهد.

در این آزمایش، از تفنگ الکترونی برای ارسال پرتو الکترون‌ها به سمت بلور نیکل استفاده شد. الکترون‌ها با انرژی مشخص از تفنگ الکترونی خارج و پس از عبور از حفره‌ای بسیار کوچک، به سطح بلور برخورد کردند. آرایش منظم اتم‌ها در بلور نیکل مانند یک توری پراش عمل می‌کرد و می‌توانست ویژگی‌های موجی الکترون‌ها را آشکار کند.



آزمایش دیویسون گرمر

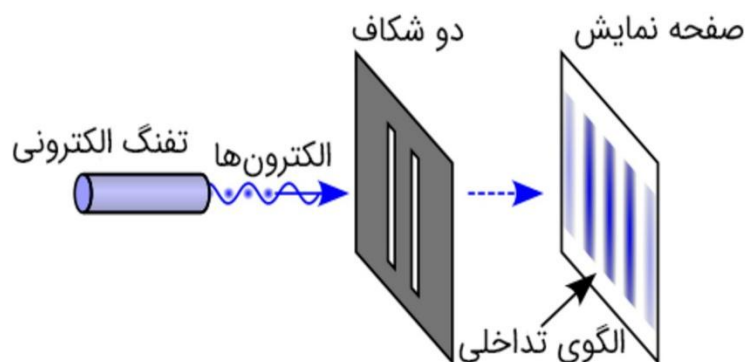
Ck12

برخی از الکترون‌ها پس از برخورد به بلور، از سطح آن منعکس شدند و برخی دیگر به درون بلور نفوذ کردند. اگر الکترون‌ها ویژگی‌های موجی داشته باشند، هنگام برخورد با ساختار منظم بلور و بازتاب از آن، الگوهای پراش و تداخل ایجاد می‌کنند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در زاویه‌های خاص، شدت الکترون‌های پراکنده به دلیل تداخل سازنده، زیاد می‌شود. این پدیده، فقط مختص امواج است و نشان می‌دهد که الکترون‌ها واقعاً ویژگی‌های موجی دارند. در ادامه، پژوهشگران تاثیر تغییر انرژی الکترون‌ها را روی الگوهای پراش بررسی کردند. با افزایش انرژی، طول موج الکترون‌ها کاهش یافت و موقعیت الگوهای پراش تغییر کرد. این دقیقاً مطابق با رابطه‌ای بود که دوبروی پیش‌بینی کرده بود:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

رابطه‌ی طول موج دوبروی

اما شگفتی‌های آزمایش به اینجا ختم نشد. حتی وقتی الکترون‌ها به صورت تک‌تک به سمت بلور فرستاده شدند، به مرور زمان یک الگوی تداخلی شکل گرفت. این موضوع نشان داد که هر الکترون می‌تواند با خودش تداخل کند، درست مانند یک موج. این یافته نشان داد که الکترون‌ها، برخلاف تصور کلاسیک که آن‌ها را ذراتی کوچک و مشخص می‌دانست، ماهیتی احتمالاتی دارند. به بیان ساده، الکترون‌ها به جای حرکت در یک مسیر مشخص، از همه مسیرهای ممکن عبور می‌کنند. این نتیجه، اصل **برهم‌نهی در مکانیک کوانتومی** را تایید کرد و نشان داد که تعیین موقعیت دقیق یک الکترون امکان‌پذیر نیست، بلکه تنها می‌توان احتمال حضور آن را در نقاط مختلف پیش‌بینی کرد. موفقیت این آزمایش، هیجان وصف‌ناپذیری را در جامعه فیزیک برانگیخت و به طور تجربی، فرضیه انقلابی دوبروی مبنی بر ماهیت موجی ماده را به اثبات رساند. همزمان، آزمایش معروف دو شکاف نیز شواهد قاطعی در تأیید رفتار موجی الکترون‌ها ارائه کرد. همان‌طور که نور هنگام عبور از دو شکاف، الگوی تداخلی ایجاد می‌کند، الکترون‌ها نیز با عبور از دو شکاف، الگوی مشابهی را از خود نشان دادند. این پدیده، که در تضاد با رفتار ذرات کلاسیک است، مهر تأییدی بر دوگانگی موج-ذره نهاد و نشان داد که الکترون‌ها، همانند نور، می‌توانند هم به شکل ذره و هم به شکل موج رفتار کنند.

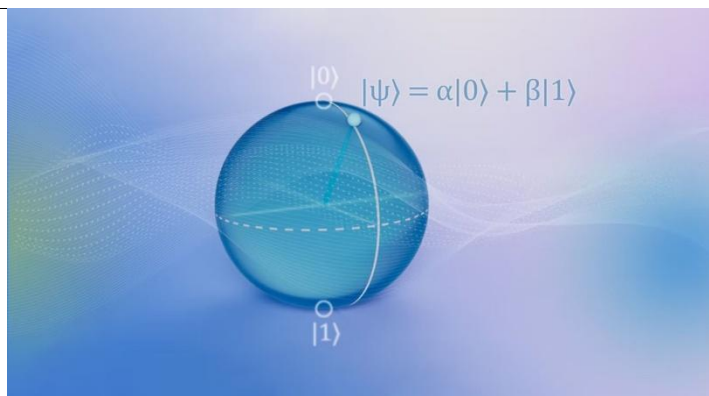


آزمایش دو شکاف

نکته شگفت‌انگیزتر این بود که حتی اگر الکترون‌ها به صورت تکی و یکی پس از دیگری به سمت شکاف‌ها پرتاب می‌شدند، باز هم الگوی تداخلی به مرور زمان بر روی صفحه آشکار می‌شد. این نتیجه حیرت‌انگیز، نشان می‌داد که هر الکترون، به نوعی، همزمان از هر دو شکاف عبور کرده و با خود تداخل می‌کند؛ مفهومی که به طور کامل با درک کلاسیک ما از جهان در تضاد است.

برهم‌نهی کوانتومی و گربه شرودینگر

اصل برهم‌نهی کوانتومی نشان می‌دهد یک ذره می‌تواند همزمان در چند حالت مختلف وجود داشته باشد. به عنوان مثال، در آزمایش دوشکاف، الکترون‌ها به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی همزمان از هر دو شکاف عبور و با خودشان تداخل می‌کنند. در فیزیک کوانتوم، قطعیت جای خود را به احتمال می‌دهد. به عبارت دیگر، ما نمی‌توانیم ویژگی‌های ذرات زیراتمی را با دقت کامل و به طور همزمان مشخص کنیم. این محدودیت، ناشی از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی، به ویژه اصل برهم‌نهی است. براساس اصل برهم‌نهی، ذرات می‌توانند در آن واحد در چندین حالت مختلف وجود داشته باشند. به همین دلیل، تا زمانی که موقعیت الکترون به طور دقیق اندازه‌گیری نشده باشد، می‌توان گفت که الکترون در تمام مکان‌های ممکن حضور دارد. اما این وضعیت عجیب، با انجام اندازه‌گیری، دستخوش تغییر می‌شود.



برهم‌نهی کیوبیت‌ها

شرودینگر در گفت‌وگویی با اینشتین، برای نشان دادن غیرمنطقی بودن این ایده، مثال معروف گربه‌ی شرودینگر را مطرح کرد. او قصد داشت نشان دهد که اگر اصل برهم‌نهی را به سیستم‌های بزرگ مقیاس تعمیم دهیم، به تناقض می‌رسیم.

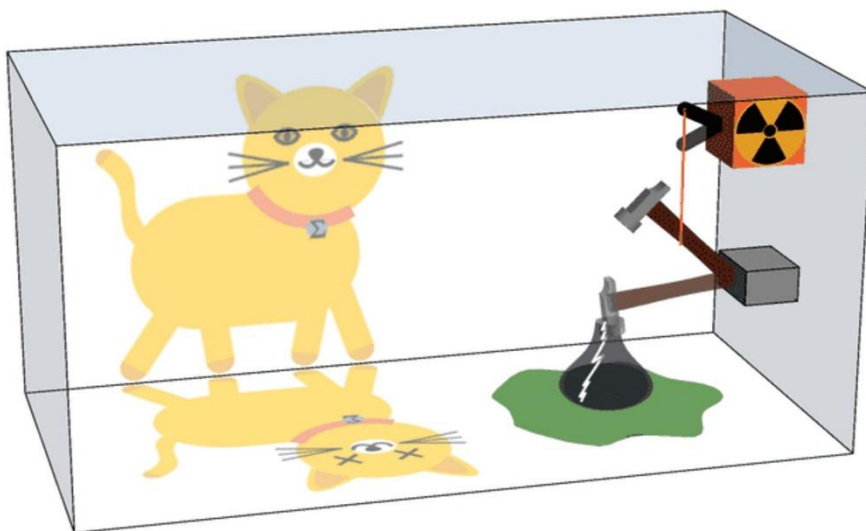
آیا ما، به عنوان ناظران هوشمند، با مشاهده خود واقعیت را شکل می‌دهیم؟

به محض اندازه‌گیری یا مشاهده یک ذره، اصل برهم‌نهی از بین می‌رود و ذره در یک حالت مشخص قرار می‌گیرد. این پدیده، بحث‌های داغی را در میان فیزیکدانان برانگیخت. آیا عمل مشاهده باید آگاهانه باشد؟ آیا ما، به‌عنوان ناظران هوشمند، با مشاهده خود واقعیت را شکل می‌دهیم؟

اروین شرودینگر، در نامه‌ای به آلبرت اینشتین، برای نشان دادن پیامدهای عجیب این ایده، آزمایش فکری معروف «گره» **شرودینگر** را مطرح کرد. او می‌خواست نشان دهد که اگر اصل برهم‌نهی را به سیستم‌های بزرگ‌تر تعمیم دهیم، به تناقضات آشکاری می‌رسیم.

در اینجا این مثال را با کمی لطافت بررسی می‌کنیم. تصور کنید یک گربه‌ی سالم و خواب‌آلود را درون جعبه‌ای قرار می‌دهید که در آن یک اتم رادیواکتیو قرار دارد.

با تجزیه‌ی اتم، یک شمارش‌گر گایگر فعال می‌شود و زنگ هشدار به صدا درمی‌آید، در نتیجه گربه از خواب می‌پرد. از آنجا که ما نمی‌دانیم اتم تجزیه شده است یا نه، گربه هم‌زمان هم خوابیده و هم بیدار است. تنها زمانی که در جعبه را باز کنیم، این وضعیت دوگانه به یک حالت مشخص تغییر می‌کند.



آزمایش فکری گربه شرودینگر

شرودینگر و اینشتین، هر دو، این ایده را غیرمنطقی و حتی پوچ می‌دانستند. آن‌ها استدلال می‌کردند که آیا خود گربه نمی‌تواند به‌عنوان یک ناظر، عمل مشاهده را انجام داده و وضعیت خود را مشخص کند؟ یا شمارش‌گر گایگر و زنگ هشدار چطور؟ آیا آن‌ها نقشی در تعیین وضعیت نهایی سیستم ندارند؟

علاوه‌براین، هنوز به‌طور دقیق مشخص نیست که چگونه و تحت چه شرایطی یک سیستم کوانتومی از حالت برهم‌نهی به یک حالت مشخص تبدیل می‌شود. و اینکه چرا ذرات زیراتمی می‌توانند در حالت برهم‌نهی وجود داشته باشند، در حالی که اجسام بزرگ‌تر، مانند انسان‌ها، چنین قابلیتی ندارند؟

باوجود تمام پیچیدگی‌ها و ابهامات موجود در مکانیک کوانتومی، مفهوم برهم‌نهی صرفاً یک پدیده فلسفی نیست، بلکه کاربردهای عملی و ملموسی در فناوری‌های پیشرفته دارد. یکی از مهم‌ترین این کاربردها، محاسبات کوانتومی است.



رایانش کوانتومی به زبان ساده؛ معجزه کوانتوم در انجام محاسبات پیچیده

در کامپیوترهای کوانتومی، به جای بیت‌های کلاسیک که تنها می‌توانند مقادیر ۰ یا ۱ را داشته باشند، از بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها استفاده می‌شود. کیوبیت‌ها، به لطف اصل برهم‌نهی، می‌توانند همزمان در حالت ۰ و ۱ قرار داشته باشند. این ویژگی، امکان انجام محاسبات پیچیده را با سرعتی بسیار بالاتر از کامپیوترهای کلاسیک فراهم می‌کند و انقلابی در زمینه‌های مختلف، از جمله رمزنگاری، **هوش مصنوعی** و شبیه‌سازی مولکولی، ایجاد خواهد کرد.

مکانیک ماتریسی هایزنبرگ

پس از آزمایش دیویسون و گرمر، مشخص شد که فیزیک کلاسیک دیگر قادر به توضیح دنیای زیراتمی نیست. در سال ۱۹۲۵، **ورنر هایزنبرگ** با رویکردی کاملاً متفاوت، تنها بر کمیت‌های قابل مشاهده تمرکز کرد و از مفاهیمی مانند مدارهای مشخص و موقعیت‌های دقیق چشم پوشید. این نگرش جدید به پیدایش **مکانیک ماتریسی** منجر شد؛ توصیف ریاضی منسجم برای فیزیک کوانتوم.

فیزیک کلاسیک، پدیده‌های طبیعی را با استفاده از معادلات دیفرانسیل و توابع پیوسته توصیف می‌کرد. اما هایزنبرگ نشان داد که این مفاهیم در مقیاس زیراتمی و میکروسکوپی کاربردی ندارند. به جای آن، او از ماتریس‌ها برای نمایش کمیت‌های فیزیکی و برهم‌کنش آن‌ها استفاده کرد. این ماتریس‌ها اطلاعات مربوط به گذارهای انرژی و دامنه‌های احتمال را در خود داشتند و مدلی را ارائه دادند که صرفاً بر پایه‌ی مشاهدات بنا شده بود.

در دنیای کوانتومی، عمل اندازه‌گیری نه تنها واقعیت را آشکار نمی‌کند، بلکه آن را شکل می‌دهد

این دیدگاه، فیزیک کلاسیک را که بر قطعیت استوار بود، کنار گذاشت و جای آن را به احتمالات داد. به جای مسیرهای مشخص یا سرعت‌های دقیق، توزیع‌های احتمالاتی و گذارهای انرژی، محور اصلی توصیف ذرات زیراتمی شدند. در مدل هایزنبرگ، حرکت الکترون‌ها نه با مدارهای ثابت، بلکه با احتمال حضور آن‌ها توصیف می‌شد.

مدل هایزنبرگ، با همکاری دانشمندانی مانند **ماکس بورن** و **پاسکال جردن** تکمیل شد و پایه‌ی ریاضی مستحکمی برای مکانیک کوانتومی فراهم کرد. مکانیک ماتریسی توانست با موفقیت طیف‌های اتمی را محاسبه کند و نتایج آن به‌طور شگفت‌انگیزی با داده‌های تجربی مطابقت داشتند.

یکی از شگفت‌انگیزترین ویژگی‌های مکانیک ماتریسی هایزنبرگ، غیرقابل جابجا بودن ضرب کمیت‌های فیزیکی بود. به زبان ساده، اگر دو کمیت فیزیکی را با A و B نشان دهیم، در اکثر موارد:

$$A \times B \neq B \times A$$

این موضوع در فیزیک کلاسیک کاملاً غیرمنتظره بود. در دنیای معمولی ما، فرقی ندارد که ابتدا عدد ۳ را در ۵ ضرب کنید یا برعکس؛ جواب همیشه یکسان است ($5 \times 3 = 3 \times 5$). اما در دنیای کوانتومی، این قاعده دیگر صدق نمی‌کند.

جلیل علیزاده



پیدایش مکانیک ماتریسی و مناظره بزرگان

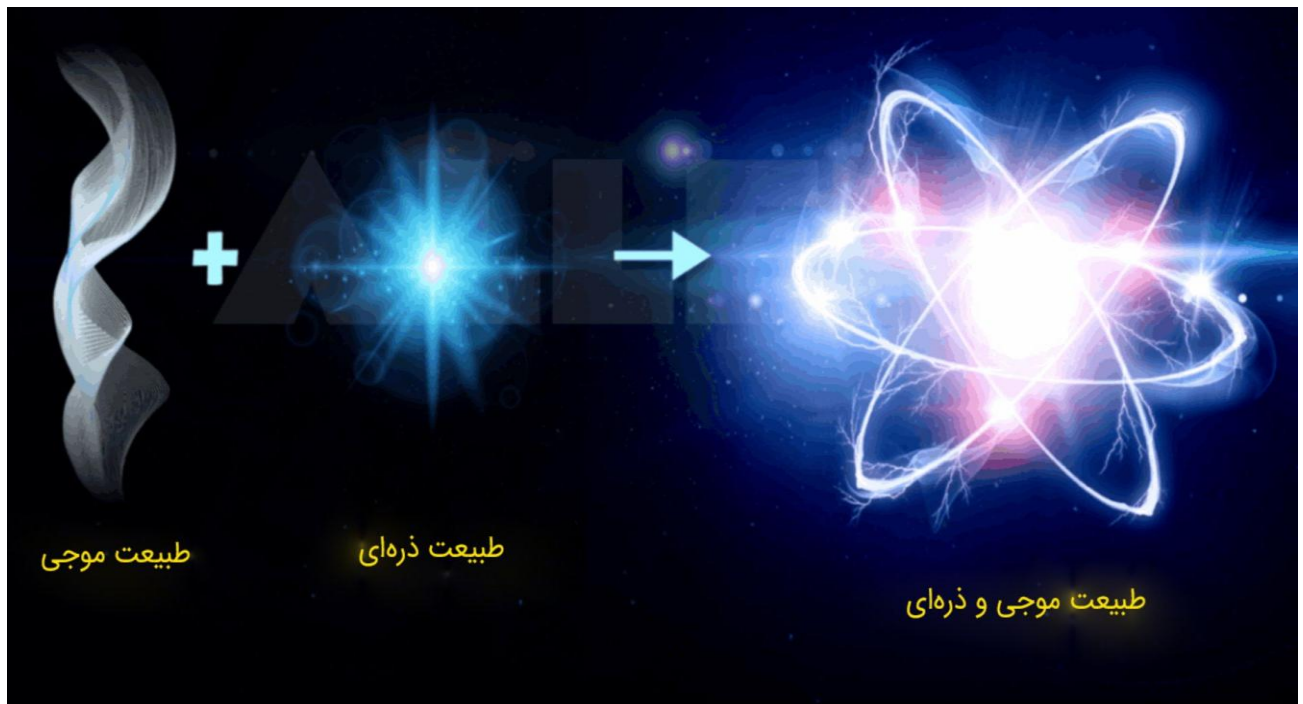
در فیزیک کلاسیک، اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی، مستقل از ترتیب آن‌ها انجام می‌شود. اما در فیزیک کوانتوم، اگر دو کمیت را به ترتیب متفاوتی اندازه‌گیری کنیم، ممکن است نتایج کاملاً متفاوتی به دست آوریم.

به‌عنوان مثال، فرض کنید در حال بررسی موقعیت و تکانه‌ی یک الکترون هستید. اگر ابتدا موقعیت را اندازه‌گیری کنید و سپس تکانه را، نتیجه با حالتی که ابتدا تکانه و بعد موقعیت را اندازه بگیرید، متفاوت خواهد بود. این تفاوت به ما نشان می‌دهد که در فیزیک کوانتوم، عمل اندازه‌گیری بر سیستم تاثیر می‌گذارد.

مکانیک ماتریسی، با ارائه فرمول‌بندی جدیدی از مکانیک کوانتومی، تصویری متفاوت از جهان ارائه داد؛ جهانی که دیگر یک ماشین دقیق و قابل پیش‌بینی نبود، بلکه سیستمی مبتنی بر احتمالات و عدم قطعیت بود. ورنر هایزنبرگ، با این رویکرد انقلابی، دریچه‌ای نو به سوی واقعیتی گشود که تا پیش از آن، تصور آن دشوار بود؛ جهانی که در آن، ترتیب اندازه‌گیری‌ها، نقشی تعیین‌کننده در نتایج ایفا می‌کند و قطعیت جای خود را به احتمال می‌دهد.

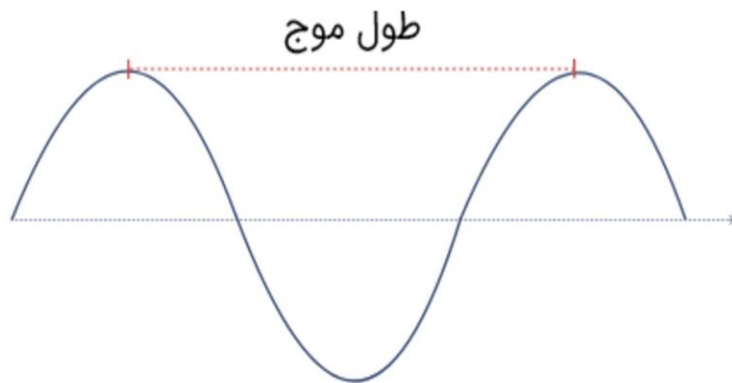
اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ یکی از مفاهیم کلیدی فیزیک کوانتوم است. براساس این اصل، هرگز و به‌طور همزمان نمی‌توان موقعیت دقیق و سرعت دقیق یک ذره را اندازه گرفت. علت اصلی این پدیده به رفتار موجی-ذره‌ای مربوط می‌شود.



طبیعت موجی و ذره‌ای

در فیزیک کلاسیک، یک ذره همیشه در یک نقطه‌ی مشخص از فضا قرار دارد، اما در مکانیک کوانتومی، اجسام می‌توانند مانند امواج در فضا گسترده شوند. تصور کنید موجی روی سطح آب در حال حرکت است. این موج را نمی‌توان به یک نقطه‌ی خاص نسبت داد. ویژگی مهم هر موج، طول موج آن است که فاصله‌ی بین دو قله‌ی متوالی را نشان می‌دهد.



تعریف طول موج

همان‌طور که در رابطه‌ی دوبروی دیدیم، طول موج یک ذره با اندازه‌ی تکانه‌ی آن (جرم $\times$ سرعت) مرتبط است. یعنی ذرات با سرعت زیاد یا جرم بالا طول موجی بسیار کوتاه و ذرات سبک‌تر یا کندتر طول موج بلندتری دارند. برای اجسام بزرگ مانند توپ بیس‌بال، این طول موج به قدری کوچک است که قابل مشاهده نیست، اما برای ذرات کوچک مانند الکترون‌ها، می‌توان آن را به صورت تجربی اندازه گرفت.

حال فرض کنید که بخواهیم هم موقعیت و هم تکانه‌ی یک ذره‌ی کوانتومی را مشخص کنیم. برای این کار، باید تصویری ترکیبی از رفتار موجی و ذره‌ای آن بسازیم.

اگر بخواهیم موقعیت یک ذره را دقیق مشخص کنیم، باید آن را در یک نقطه‌ی کوچک متمرکز کنیم. اما یک موج کاملاً متمرکز هیچ طول موج مشخصی ندارد، یعنی اطلاعاتی درباره‌ی تکانه‌ی آن در دست نیست. از سوی دیگر، اگر بخواهیم طول موج (و در

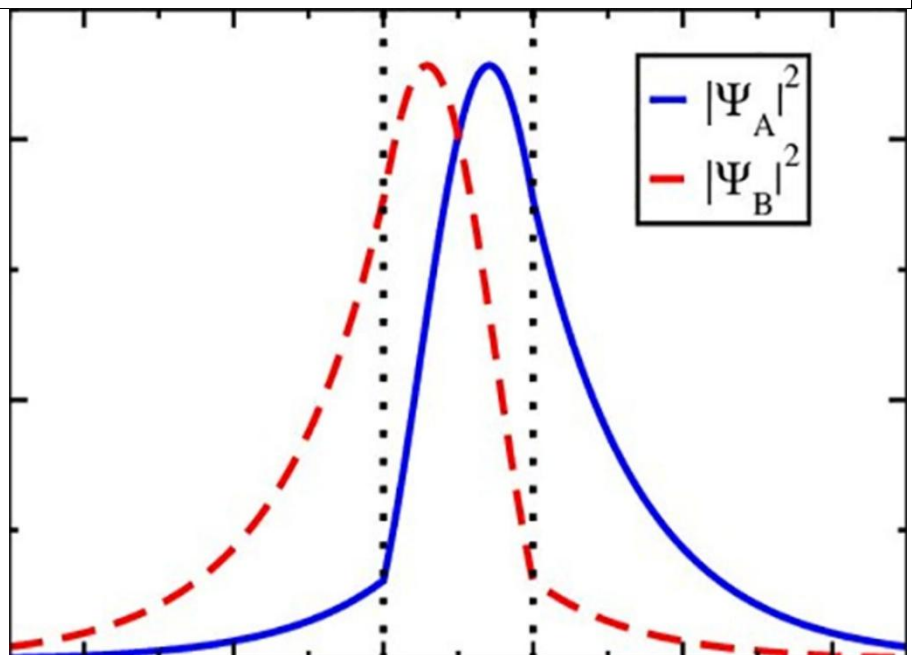
نتیجه تکانه) را دقیق تعیین کنیم، باید موجی خالص و گسترده داشته باشیم، اما در این حالت موقعیت آن کاملاً نامشخص خواهد بود.

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، صرفاً محدود به دقت اندازه‌گیری‌های ما نیست، بلکه ساختار بنیادین جهان را توصیف می‌کند. این اصل نشان می‌دهد که در مقیاس‌های زیراتمی، مفاهیم کلاسیک موقعیت دقیق و سرعت دقیق، دیگر معنایی ندارند. به عبارت دیگر، جهان در این مقیاس، برخلاف شهود ما، همواره در هاله‌ای از احتمال و عدم قطعیت قرار دارد. این اصل، محدودیت‌های ذاتی در دانش ما را آشکار می‌کند و نشان می‌دهد که حتی با دقیق‌ترین ابزارها و روش‌های اندازه‌گیری، نمی‌توانیم به طور همزمان موقعیت و سرعت یک ذره را با دقت دلخواه تعیین کنیم. این عدم قطعیت، نه ناشی از نقص در ابزارها یا روش‌های ما، بلکه ناشی از ماهیت بنیادین جهان است.

فیزیک کوانتوم از نگاه شرودینگر؛ قطعیت یا احتمال؟

هایزنبرگ با معرفی مکانیک ماتریسی، روشی انقلابی برای توصیف دنیای کوانتومی ارائه داد. اما این روش، که از ریاضیات پیچیده و انتزاعی استفاده می‌کرد، برای بسیاری از فیزیکدانان ملموس نبود. در این میان، شرودینگر معتقد بود که یک توصیف تصویری‌تر و قابل‌فهم‌تر از فیزیک کوانتوم لازم است. او در سال ۱۹۲۶، با توسعه‌ی مکانیک موجی، دیدگاه متفاوتی از جهان زیراتمی ارائه داد.

برطبق دیدگاه شرودینگر، ذرات زیراتمی مانند الکترون‌ها، صرفاً نقاطی در فضا نیستند، بلکه به‌صورت امواجی واقعی در سراسر فضا گسترده شده‌اند. به بیان دیگر، او باور داشت که هر ذره را می‌توان با یک تابع موج توصیف کرد که نشان می‌دهد آن ذره در چه نواحی‌ای از فضا حضور دارد و چگونه در طول زمان تغییر می‌کند. این رویکرد، تصویری پیوسته‌تر از واقعیت ارائه می‌داد و با دیدگاه‌های کلاسیکی که به نظم و قطعیت اعتقاد داشتند، سازگارتر بود. با این حال، ماکس بورن پیشنهاد کرد که تابع موج نباید به‌عنوان یک موج فیزیکی واقعی تفسیر شود، بلکه باید آن را به‌عنوان یک دامنه‌ی احتمالاتی در نظر گرفت؛ یعنی مربع مقدار مطلق تابع موج، احتمال حضور ذره در یک نقطه‌ی مشخص را نشان می‌دهد. اما شرودینگر به‌شدت با این تفسیر مخالفت کرد.



او اعتقاد داشت که جهان باید قطعی و تابع موج نباید صرفاً ابزاری ریاضی برای محاسبه‌ی احتمال باشد. در دیدگاه شرودینگر، ذرات به‌صورت امواجی با انرژی و تکانه‌ی دقیق در فضا وجود دارند و رفتار آن‌ها باید توسط قوانین فیزیکی مشخص و قابل پیش‌بینی توصیف شود.

مخالفت شرودینگر با تفسیر احتمالاتی فیزیک کوانتوم، او را واداشت تا مشهورترین آزمایش ذهنی خود، گربه شرودینگر را مطرح کند. شرودینگر با این آزمایش ذهنی قصد داشت نشان دهد که اگر تفسیر احتمالاتی صحیح باشد، پس باید بپذیریم که اشیای ماکروسکوپی هم می‌توانند در وضعیت‌های متناقض قرار بگیرند، که از نظر منطقی و فیزیکی عجیب و غیرقابل پذیرش است. او این نتیجه را غیرمعقول می‌دانست و معتقد بود که باید مکانیک کوانتومی را به گونه‌ای تغییر داد که قطعیت و واقعیت عینی حفظ شود.

باین حال، نظر شرودینگر در برابر اصول احتمالاتی فیزیک کوانتوم به حاشیه رانده شد. آزمایش‌های متعدد نشان دادند که جهان زیراتمی ذاتاً احتمالاتی است و رفتار ذرات در آن به طور قطعی قابل پیش‌بینی نیست. با وجود این، ایده‌های شرودینگر همچنان الهام‌بخش بودند و بعدها زمینه‌ساز نظریه‌های دیگری مانند تفسیر **چندجهانی** (Many Worlds Interpretation) شدند.

درهم‌تنیدگی کوانتومی؛ کنش شبیح‌وار از راه دور

نیلز بور و هایزنبرگ و عده‌ای از فیزیک‌دانان دیگر در دیدگاهی به‌نام تفسیر کپنهاگی می‌گفتند ذرات کوانتومی پیش از اندازه‌گیری، در هیچ حالت مشخصی قرار ندارند و تنها به‌صورت مجموعه‌ای از احتمالات توصیف می‌شوند. اما پس از اندازه‌گیری و مشاهده، تابع موج که شامل تمام احتمالات ممکن است، فرومی‌پاشد و سیستم وارد یک حالت مشخص می‌شود. به بیان ساده، تا زمانی که به یک ذره نگاه نکرده‌ایم، نمی‌توانیم بگوییم در چه وضعیتی قرار دارد. طبق این تفسیر، واقعیت فیزیکی بدون مشاهده‌گر یا ناظر ناقص است. یعنی برخلاف فیزیک کلاسیک که جهان را مستقل از ناظر می‌دانست، تفسیر کپنهاگی می‌گوید که مشاهده، نقش کلیدی در شکل‌گیری واقعیت دارد.

اینشتین با کنایه می‌پرسید، اگر به ماه نگاه نکنم، آیا از بین می‌رود؟

آلبرت اینشتین هرگز نتوانست تفسیر کپنهاگی را بپذیرد، زیرا جهان را منظم و مستقل از مشاهده‌گر می‌دانست. او باور داشت که واقعیت باید وجودی قطعی داشته باشد، نه آن‌که با مشاهده شکل بگیرد. اینشتین با کنایه می‌پرسید، اگر به ماه نگاه نکنم، آیا از بین می‌رود؟

در سال ۱۹۳۵، آلبرت اینشتین با همکاری ناتان روزن و بوریس پودولسکی، مقاله‌ای را منتشر کردند که منجر به طرح پارادوکس مشهور EPR (اینشتین-پودولسکی-روزن) شد. هدف اینشتین از این کار، نشان دادن آنچه که او نقص‌های مکانیک کوانتومی می‌پنداشت، بود. در مرکز این بحث، پدیده‌ای شگفت‌انگیز و بحث‌برانگیز به نام **درهم‌تنیدگی کوانتومی** قرار داشت.



اینشتین



پودولسکی



روزن

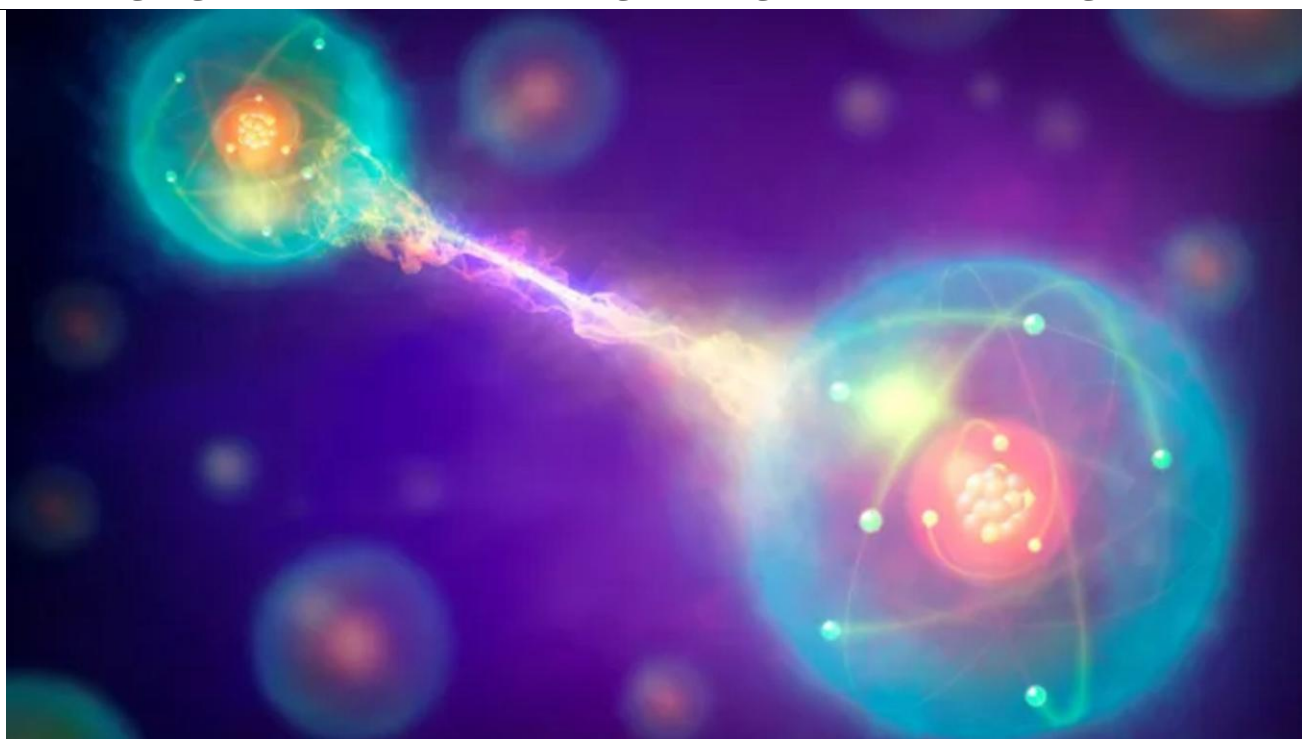
اینشتین، پودولسکی و روزن

درهم‌تنیدگی کوانتومی مفهومی است که درک آن بدون آشنایی با برهم‌نهی دشوار است. در بخش‌های قبل با مفهوم برهم‌نهی آشنا شدیم. فرض کنید سکه‌ای را پرتاب می‌کنید اما قبل از نگاه کردن به نتیجه، نمی‌دانید شیر است یا خط. در دنیای کلاسیک، سکه یک نتیجه‌ی مشخص دارد، فقط شما از آن بی‌خبر هستید. اما در دنیای کوانتومی، وضعیت سکه تا زمانی که مشاهده نشود، اصلاً مشخص نیست؛ یعنی هم‌زمان هم شیر است و هم خط. تنها زمانی که به آن نگاه کنید، یکی از این دو حالت را انتخاب می‌کند.

حالا تصور کنید یک فوتون (ذره‌ی نور) را به یک تقسیم‌کننده‌ی نور ۵۰-۵۰ بفرستیم. این فوتون می‌تواند از دو مسیر مختلف عبور کند: مسیر A یا مسیر B. اما در دنیای کوانتومی، تا زمانی که اندازه‌گیری نکنیم، فوتون هم‌زمان در هر دو مسیر قرار دارد. یعنی سیستم در دو حالت برهم‌نهی است:

- فوتون در مسیر A هست و در مسیر B نیست.
- فوتون در مسیر B هست و در مسیر A نیست.

شاید بگویید فوتون حتماً از یکی از مسیرها عبور کرده است و فقط ما نمی‌دانیم کدام مسیر. اما این فرض اشتباه است. در واقع، فوتون تا لحظه‌ی اندازه‌گیری در هر دو مسیر بوده است و تنها زمانی که آن را مشاهده کنیم، به یک مسیر مشخص می‌رود. باز هم ذهنمان وسوسه می‌شود که بگویید، اگر فوتون را در مسیر A پیدا کردم، پس حتماً از اول هم آنجا بوده است. اما این فرض ما را به دردسر می‌اندازد. چون اگر چنین چیزی درست بود، نتایج آزمایش‌های کوانتومی کاملاً متفاوت می‌شدند. حقیقت عجیب آن است که قبل از اندازه‌گیری، فوتون نه‌تنها در یک مسیر مشخص نیست، بلکه در هر دو مسیر به‌طور هم‌زمان وجود دارد. در درهم‌تنیدگی کوانتومی، دو ذره‌ی زیراتمی چنان به هم پیوند می‌خورند که حتی اگر میلیاردها سال نوری از هم فاصله داشته باشند، تغییر در یکی، بلافاصله بر دیگری تاثیر می‌گذارد؛ گویی که مرزهای فضا و زمان برای آن‌ها بی‌معنی است.



درهم‌تنیدگی کوانتومی

این ویژگی شگفت‌انگیز، که اینشتین آن را «کنش شبح‌وار از راه دور» نامید، نگرانی عمیقی در او ایجاد کرد. چرا که این تأثیر، به‌صورت آنی و بدون تأخیر رخ می‌داد، در حالی که نظریه نسبیت خاص اینشتین، سرعت نور را به‌عنوان حد نهایی سرعت انتقال اطلاعات معرفی می‌کند. بنابراین، در نگاه اول، به نظر می‌رسید که درهم‌تنیدگی کوانتومی، قوانین نسبیت را نقض می‌کند.

با این حال، درهم‌تنیدگی کوانتومی از این تناقض ظاهری فرار می‌کند؛ به این دلیل که اطلاعات به‌دست‌آمده از درهم‌تنیدگی، ماهیتی تصادفی دارد و نمی‌توان از آن برای ارسال پیام‌های هدفمند استفاده کرد. به عبارت دیگر، شما نمی‌توانید از درهم‌تنیدگی برای ارسال اطلاعات با سرعتی فراتر از سرعت نور استفاده کنید. تنها زمانی که نتایج دو اندازه‌گیری را با یکدیگر مقایسه می‌کنید، متوجه همبستگی شگفت‌انگیز بین آن‌ها می‌شوید. این همبستگی، نشان‌دهنده وجود ارتباطی عمیق بین ذرات درهم‌تنیده است، اما به معنای انتقال اطلاعات با سرعتی فراتر از نور نیست.

پاسخ نیلز بور: واقعیت تا لحظه مشاهده وجود ندارد!

نیلز بور با اینشتین مخالف بود. او براساس آزمایش‌های کوانتومی استدلال کرد که وضعیت یک ذره تا لحظه‌ی اندازه‌گیری نامشخص است. به عبارت دیگر، ذرات کوانتومی پیش از اندازه‌گیری هیچ وضعیت قطعی ندارند. بور و طرفداران تفسیر کپنهاگی معتقد بودند که مکانیک کوانتومی، یک تصویر کاملاً جدید از واقعیت ارائه می‌دهد که نمی‌توان آن را با مفاهیم کلاسیکی توصیف کرد.

از انرژی منفی تا پوزیترون؛ انقلاب کوانتومی دیراک

در سال ۱۹۲۸، فیزیکدان انگلیسی [پل دیراک](#) تصمیم گرفت معادله‌ای ارائه دهد که فیزیک کوانتوم را با نظریه‌ی نسبیت خاص ترکیب کند. در آن زمان، معادله‌ی شرودینگر اساس مکانیک کوانتومی بود، اما نمی‌توانست رفتار ذراتی را که با سرعت‌های نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کردند، توضیح دهد. دیراک به دنبال درک عمیق‌تری از دنیای زیراتمی بود، بنابراین تلاش کرد تا حرکت الکترون‌ها را در چارچوب نسبیتی توصیف کند.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle$$

معادله‌ی شرودینگر

نتیجه‌ی تلاش‌های او، معادله‌ای بود که به‌طور طبیعی ویژگی‌های کوانتومی مانند اسپین الکترون و گشتاور مغناطیسی را توضیح می‌داد. اما این معادله، نتیجه‌ای غیرمنتظره نیز به همراه داشت: انرژی منفی. انرژی منفی ابتدا رد شد. اما دیراک نظریه‌ای جسورانه مطرح کرد: انرژی منفی می‌تواند نشان‌دهنده‌ی یک حقیقت فیزیکی باشند. او پیشنهاد داد که هر ذره باید یک پادذره داشته باشد؛ یعنی ذره‌ای با جرم برابر اما با بار الکتریکی مخالف. براین‌اساس، باید ذره‌ای مانند الکترون اما با بار مثبت وجود داشته باشد. دیراک باور داشت که دیر یا زود، آزمایش‌های علمی وجود آن را تایید خواهند کرد.

$$(i\partial - m)\psi = 0$$

معادله‌ی دیراک

Papillon

چهار سال بعد، در سال ۱۹۳۲، فیزیکدان آمریکایی، کارل اندرسون، هنگام مطالعه‌ی پرتوهای کیهانی، ردی از ذره‌ای مشابه الکترون اما با بار مثبت مشاهده کرد. او این ذره را پوزیترون نامید و به این ترتیب، پیش‌بینی دیراک به‌طور تجربی تایید شد.

آزمایش‌های آلن اسپه و پیروزی فیزیک کوانتوم

سال‌ها بعد، در سال ۱۹۶۴، جان بل، فیزیکدان ایرلندی، آزمایشی نظری را پیشنهاد داد که می‌توانست بین دیدگاه اینشتین و پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی تمایز قائل شود. او نابرابری‌هایی را فرمول‌بندی کرد که اگر متغیرهای پنهان موضعی وجود داشته باشند، باید برقرار باشند. این نابرابری‌ها، که به «نابرابری‌های بل» معروف شدند، معیاری برای سنجش صحت دیدگاه اینشتین در مورد واقعیت موضعی و متغیرهای پنهان ارائه می‌دادند.

در دهه ۱۹۸۰، آلن اسپه و تیمش در فرانسه، آزمایش‌های دقیقی را برای بررسی نابرابری‌های بل انجام دادند. نتایج این آزمایش‌ها، نشان داد که نابرابری‌های بل نقض می‌شوند، به این معنا که همبستگی‌های مشاهده‌شده بین ذرات درهم‌تنیده، قوی‌تر از آن چیزی است که با متغیرهای پنهان موضعی قابل توضیح است. این نتایج، تاییدی قاطع بر پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی بود و نشان داد که اینشتین در مورد وجود متغیرهای پنهان اشتباه می‌کرد. نتایج آزمایش‌های اسپه، پیامدهای عمیقی برای درک ما از واقعیت داشتند:

- **عدم قطعیت ذاتی:** ذرات کوانتومی، قبل از اندازه‌گیری، وضعیت مشخصی ندارند. وضعیت آن‌ها، تا زمان اندازه‌گیری، در حالت برهم‌نهی قرار دارد و تنها پس از اندازه‌گیری، یک وضعیت مشخص را اختیار می‌کنند.
- **کنش شبح‌وار از راه دور:** تاثیرات درهم‌تنیدگی، واقعاً آنی هستند و هیچ متغیر پنهانی که از قبل وضعیت ذرات را مشخص کرده باشد، وجود ندارد. این بدان معناست که ارتباط بین ذرات درهم‌تنیده، فراتر از محدودیت‌های سرعت نور است، اما این ارتباط، برای انتقال اطلاعات سریع‌تر از نور قابل استفاده نیست.

آزمایش‌های اسپه، نه تنها صحت مکانیک کوانتومی را به اثبات رساند، بلکه پنجره‌ای جدید به سوی درک عمیق‌تر واقعیت کوانتومی گشود.

فراتر از کوانتوم؛ جستجوی قوانین ژرف جهان

فیزیک کوانتوم ما را با جهانی عجیب و غیرقابل تصور در مقیاس زیراتمی آشنا کرد؛ جهانی که در آن، ذرات می‌توانند به‌طور هم‌زمان در چند حالت مختلف باشند و واقعیت، پیش از مشاهده، نامعین است. این نظریه نشان می‌دهد که طبیعت براساس احتمالات و عدم قطعیت عمل می‌کند. اما پرسشی اساسی مطرح است: آیا مکانیک کوانتومی نهایت دانش ما از جهان است؟ برخی دانشمندان، مانند [آجر پرنروز](#)، از توصیف احتمالاتی مکانیک کوانتومی رضایت ندارند. پرنروز معتقد است که این نظریه نباید تنها ابزاری برای پیش‌بینی باشد، بلکه باید به چارچوبی تبدیل شود که قوانین بنیادین جهان را آشکار کند.

آیا فروپاشی تابع موج، به‌خاطر مشاهده رخ می‌دهد، یا قانونی ناشناخته در ساختار بنیادین جهان آن را هدایت می‌کند؟

-پرنروز

یکی از ایده‌های انقلابی، ترکیب فیزیک کوانتوم و گرانش برای دستیابی به نظریه‌ای جامع به نام گرانش کوانتومی است. با ترکیب این دو شاخه، نه تنها ذرات را بهتر درک خواهیم کرد، بلکه شاید بتوانیم لحظات اولیه بیگ‌بنگ و اسرار [سیاه چاله](#) را نیز توضیح دهیم.

[بیگ بنگ؛ شروع جهانی که می‌شناسیم](#)

ما در نقطه‌ای حساس از تاریخ علم ایستاده‌ایم. آیا مکانیک کوانتومی، با تمام شگفتی‌ها و ابهاماتش، پایان مسیر جستجو برای درک نهایی جهان است، یا صرفاً ایستگاهی در سفری طولانی‌تر؟ بسیاری از دانشمندان بر این باورند که هنوز قوانین بنیادین‌تری در انتظار کشف هستند. شاید روزی بتوانیم به نظریه‌ای واحد دست یابیم که تمام پدیده‌های جهان را در چارچوبی منسجم توضیح دهد.

فیزیک کوانتوم، در این سفر پرماجرا، ما را با پدیده‌هایی شگفت‌انگیز و غیرمنتظره روبرو کرده است. از دوگانگی موج-ذره گرفته تا درهم‌تنیدگی کوانتومی، هر کشف جدید، لایه‌ای از رازهای هستی را کنار زده و افق‌های تازه‌ای را پیش روی ما گشوده است. اما آیا این سفر در نهایت به پاسخ نهایی منجر خواهد شد، یا ما را به اعماق رازهای پیچیده‌تر و عمیق‌تری رهنمون خواهد کرد؟ تنها زمان قادر به پاسخگویی به این پرسش‌هاست.