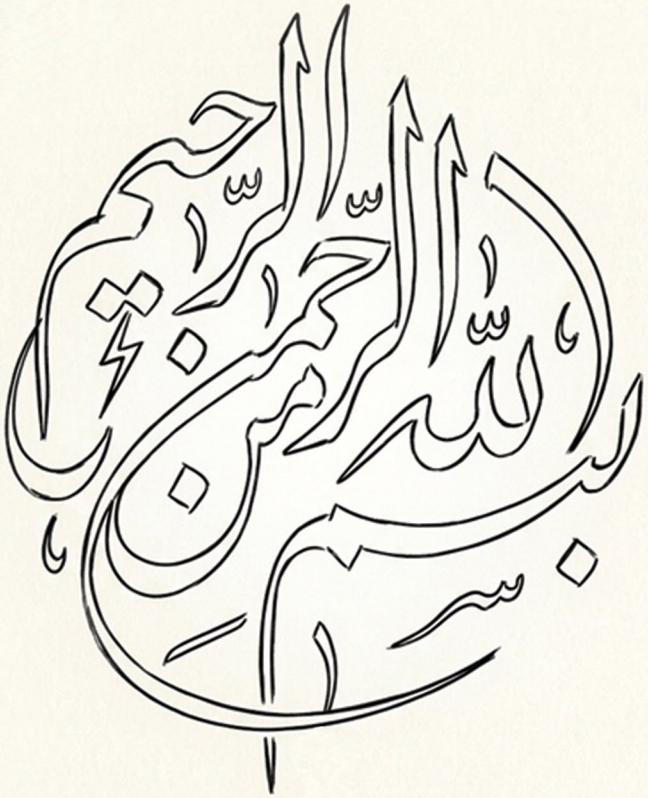


دل هر ذره را که بشکافی
آفتابیش در میان بینی

هاتف اصفهانی

تاکیون

انجمن علمی فیزیک دانشگاه شاهد

گاهنامه علمی دانشجویی

از قطعیت تا احتمال

نسخه شماره ۱

بهار ۱۴۰۵

دانشگاه شاهد
معاونت فرهنگی و اجتماعی

انجمن علمی فیزیک
دانشگاه شاهد

تاکیون

شناسنامه نشریه

نام | از قطعیت تا احتمال

صاحب امتیاز | انجمن علمی فیزیک دانشگاه شاهد

نوع نشریه | گاه نامه علمی- دانشجویی

استاد راهنما | دکتر وحید فلاحی
عضو هیئت علمی گروه فیزیک

مدیر مسئول | ساجده سلیمانی

سردبیر | امیرحسین خواجه

سرپرست اجرایی | محمدامین شعبانی

هیئت تحریریه | اسماء همتی ـ فاطمه زهرا تمیزی-نرگس امید ـ مبینا ساریخانی ـ محمدجمال فیاضی ـ مهدی بابائی

تیم ویراستاری | معصومه اخوی ـ زینب سادات طباطبایی- امیر رضا بهزادی- فاطمه سادات موسوی ـ محمدحسین باقری

صفحه آرایی | علیرضا اسدی

طراح لوگو | فاطمه فهیمی

فهرست

۵ پیشگفتار

۷ سفری به جهان نامرئی

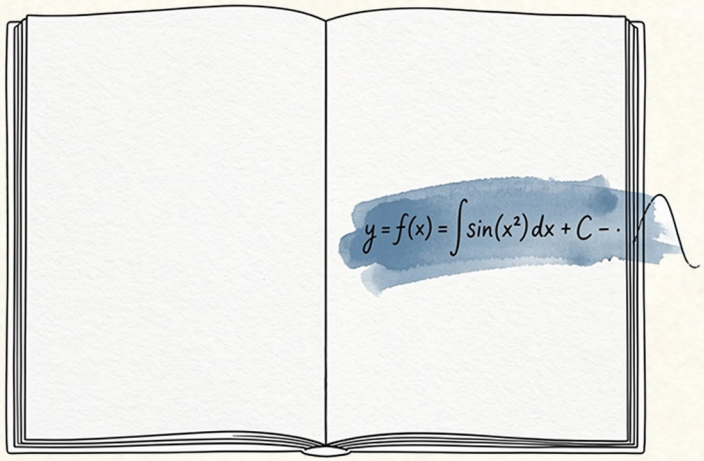
۱۱ سفر به درون اتم

۱۳ تونل زنی کوانتومی

۲۵ سفر به سرچشمه نوبل

۲۷ قهرمانان مرز های کوانتومی

شماره‌ی نخست هر نشریه، نقطه‌ی آغاز مسیری علمی است که بی‌تردید نیازمند نقد، بازخورد و مشارکت فعال مخاطبان خواهد بود. هیئت تحریریه بر این باور است که پویایی و بالندگی این نشریه در گرو همراهی دانشجویان، پژوهشگران و اساتید علاقه‌مند به توسعه‌ی علم فیزیک است. امید است این نشریه بتواند گامی هرچند کوچک اما مؤثر در جهت ترویج اندیشه‌ی علمی، تعمیق فهم مفاهیم فیزیکی و تقویت تعامل علمی در جامعه‌ی دانشگاهی بردارد.



پیشگفتار

فیزیک، بنیان فهم ما از طبیعت و زبان توصیف پدیده‌های بنیادین جهان است. پیشرفت در این حوزه، همواره حاصل پرسش‌گری دقیق، تحلیل عمیق و تکیه بر روش علمی بوده است. نشریه‌ای که پیشِ رو دارید، با چنین نگاهی و در راستای تقویت فضای علمی و پژوهشی در جامعه‌ی دانشگاهی شکل گرفته است.

هدف این نشریه فراهم آوردن بستری برای ارائه، بررسی و تبادل دیدگاه‌های علمی در حوزه‌های گوناگون فیزیک است؛ از مباحث نظری و بنیادی گرفته تا پژوهش‌های کاربردی و میان‌رشته‌ای. ما بر آنیم تا با انتشار مطالب تحلیلی، مرورهای علمی، گزارش‌های پژوهشی و یادداشت‌های تخصصی، به ارتقای سطح دانش و نگاه انتقادی در میان دانشجویان و پژوهشگران کمک کنیم.

در تدوین مطالب، تلاش شده است تا ضمن پایبندی به اصول علمی، دقت مفهومی و امانت‌داری علمی، محتوایی منسجم و قابل استفاده برای طیف گسترده‌ای از علاقه‌مندان به فیزیک ارائه شود. این نشریه نه صرفاً محلی برای بازگویی دانسته‌ها، بلکه فضایی برای طرح پرسش‌های نو، بررسی ایده‌ها و تقویت روحیه‌ی پژوهشگری است.

سفری به جهان نامرئی

روایت تاریخ کوانتوم: از بحران تا انقلاب

آسمان صاف کلاسیک و اولین ابر تیره

اواخر قرن نوزدهم را تصور کنید. فیزیکدانان با غرور و اطمینان به دنیا نگاه می کردند. به قول لرد کلوین، فیزیکدان بزرگ بریتانیایی، "آسمان" فیزیک صاف و آبی است و فقط دو ابر کوچک در آن دیده می‌شود. قرار بود این دو ابر کوچک، یکی به نام "تابش جسم سیاه" و دیگری "نتیجه منفی آزمایش مایکلسون-مورلی"، طوفانی به پا کنند که تمام بنیان‌های فیزیک کلاسیک را در هم بکوبد.

ماجرا ما از اولین ابر شروع می‌شود. تابش جسم سیاه.

فصل اول: معمای اتاق داغ (۱۹۰۰-۱۸۹۰)

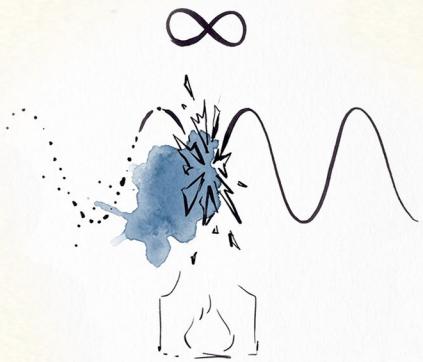
تصور کنید در آزمایشگاهی در برلین، فیزیکدانی به نام گوستاو کیرشهوف سال‌ها پیش پیشنهادی نظری داده بود: اگر جسمی داشته باشیم که بتواند تمام تابش‌های ورودی را جذب کند (یک جسم سیاه ایده‌آل)، آنگاه وقتی این جسم را گرم کنیم، الگوی تابشی که از خود ساطع می‌کند، باید تنها به دما وابسته باشد و نه به جنس جسم. این یک قانون جهانی می‌شد.

فیزیکدانان عملی مانند اتو لومر و ویلهلم وین در موسسه فیزیک برلین شروع به ساختن جسم سیاه می‌کنند. ساده‌ترین راه: یک محفظه توخالی با یک سوراخ کوچک. نوری که وارد سوراخ می‌شود، بارها درون محفظه منعکس و جذب می‌شود و دیگر بیرون نمی‌آید. اگر محفظه را گرم کنیم، سوراخ شروع به درخشیدن می‌کند. اندازه‌گیری دقیق این تابش داغ، دانشمندان را با معمایی عجیب روبرو کرد.

ویلهلم وین توانست فرمولی پیدا کند که برای طول موج‌های کوتاه (نور آبی و فرابنفش) با آزمایش‌ها جور درمی‌آید. از سوی دیگر، لرد ریلی و جیمز جینز در انگلستان فرمولی برای طول موج‌های بلند (نور قرمز و مادون قرمز) ارائه دادند.

اما مشکل اینجا بود: فرمول ریلی-جینز، که از فیزیک کلاسیک کاملاً پذیرفته‌شده‌ای استخراج شده بود، پیش‌بینی می‌کرد که هرچه به سراغ طول موج‌های کوتاه‌تر برویم (به سمت فرابنفش)، انرژی تابشی باید به بی‌نهایت برسد! این یعنی یک اتاق معمولی در خانه شما باید آنقدر پرتو فرابنفش مرگبار منتشر کند که شما را بکشد. پاول ارنفست، فیزیکدان اتریشی، بعدها نام این فاجعه نظری را گذاشت: «فاجعه فرابنفش».

فیزیک کلاسیک در بن‌بست کامل گیر کرده بود.



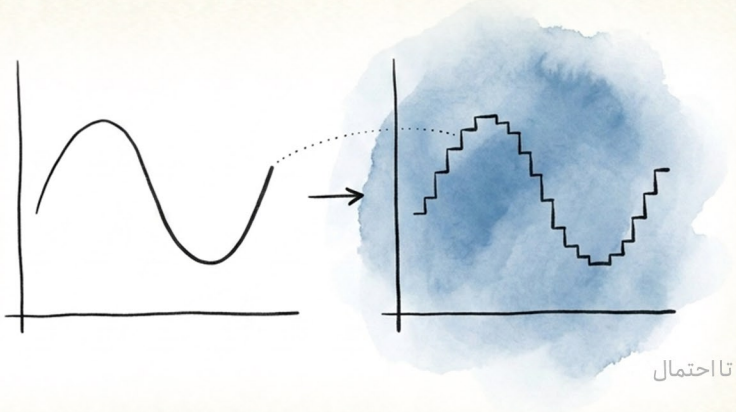
فصل دوم:
شبی که پلانک به اعداد اجازه داد خودشان حرف بزنند
(۱۴ دسامبر ۱۹۰۰)

ماکس پلانک، فیزیکدان ۴۲ ساله برلینی، مردی محافظه‌کار و عمیقاً وفادار به فیزیک کلاسیک بود. استادانش به او گفته بودند وارد فیزیک نظری نشود، چون «چیز جدیدی برای کشف باقی نمانده است!» اما پلانک عاشق قوانین ترمودینامیک بود و سرسختانه روی مسئله تابش جسم سیاه کار می‌کرد.

اواخر سال ۱۹۰۰ بود. پلانک که از ناتوانی نظریه در توضیح داده‌های تجربی خسته شده بود، تصمیمی گرفت که خودش بعدها آن را «**یک اقدام ناامیدانه**» نامید. او گفت: «من یک کار نابخشودنی کردم. فرمولی پیدا کردم که با داده‌های تجربی جور درمی‌آید، اما باید توجیهی نظری برای آن پیدا می‌کردم.»

او فکر کرد: «چه می‌شود اگر نوسانگرهای کوچک درون دیواره محفظه، انرژی را نه به طور پیوسته، بلکه به صورت بسته‌های مجزا جذب و منتشر کنند؟ چه می‌شود اگر انرژی متناسب با فرکانس باشد و یک ثابت جدید در طبیعت وجود داشته باشد که این تناسب را تعیین کند؟»

پلانک فرمول خود را در ۱۴ دسامبر ۱۹۰۰ به انجمن فیزیک برلین ارائه داد. هیچ‌کس متوجه انقلابی که در راه بود نشد، حتی خود پلانک. او سال‌های بعد را صرف کرد تا ثابت کند این «بسته‌های انرژی» (**کوانتا**) فقط یک ترفند ریاضی هستند، نه واقعیت فیزیکی. او نمی دانست که درهای جهانی را گشوده که تا ابد آرامش فیزیک کلاسیک را بر هم خواهد زد.



اینشتین، مامور درجه دو اداره ثبت اختراعات

در سال ۱۹۰۵، آلبرت اینشتین ۲۶ ساله، کارمندی گمنام در اداره ثبت اختراعات برن سوئیس بود. او فرصت نداشت به کتابخانه برود و مقالات علمی بخواند. اما ذهنش آزاد بود تا فکر کند.

اینشتین مقاله‌ای از پلانک خوانده بود. او با نگاه تیزبین خود متوجه شد که اگر تابش جسم سیاه واقعاً اینگونه رفتار می‌کند، پس باید نتایجش خیلی عمیق‌تر از این حرف ها باشد.

او در یکی از چهار مقاله شگفت‌انگیز خود در سال ۱۹۰۵ (که هر کدام کفایت یک نوبل را می‌کردند)، به سراغ اثر **فوتوالکتریک** رفت. این پدیده سال‌ها بود فیزیکدانان را گیج کرده بود: وقتی نور به فلز می‌تابد،

الکترون‌ها از آن جدا می‌شوند. اما نکته عجیب این بود: اگر نور را ضعیف کنید، باز هم الکترون جدا می‌شود؛ ولی اگر فرکانس نور را کم کنید (مثلاً از آبی به قرمز بروید)، دیگر هیچ الکترونی خارج نمی‌شود، حتی اگر شدت نور را به شدت افزایش دهید!

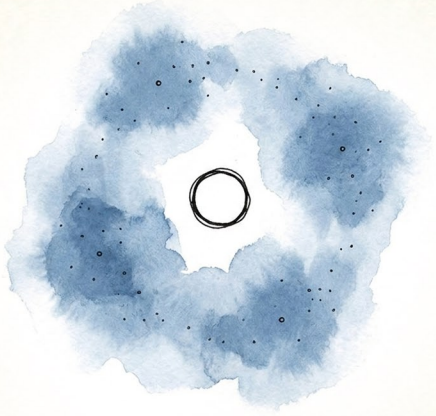
فیزیک کلاسیک می‌گفت: شدت نور تعیین‌کننده انرژی است. پس با نور قرمز پرتوان هم باید الکترون خارج شود. اما نمی‌شد.

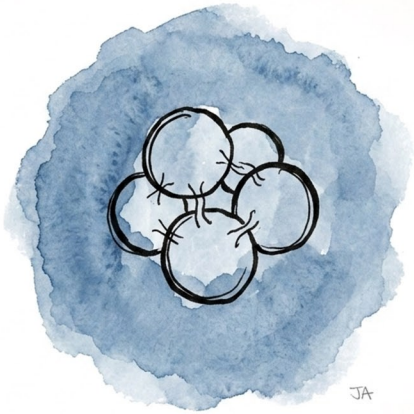
اینشتین گفت: «اگر خود نور هم از بسته‌های گسسته‌ای (**فوتون**) تشکیل شده باشد که انرژی هر بسته برابر h/nu باشد (همان ثابت پلانک ضربدر فرکانس)، آنگاه ماجرا حل می‌شود. نور آبی فرکانس بالاتری دارد، پس هر فوتونش انرژی بیشتری دارد و می‌تواند الکترون را بیرون بیندازد. نور قرمز فرکانس کمتری دارد، پس هر فوتونش انرژی کمتری دارد و هرگز نمی‌تواند الکترون را بیرون کند، مهم نیست چقدر فوتون بتابانید.»

این یعنی **نور هم ذره است!** این حرف آنقدر رادیکال بود که بسیاری از فیزیکدانان، از جمله پلانک، تا سال‌ها نتوانستند آن را بپذیرند. پلانک در معرفی اینشتین برای عضویت در آکادمی علوم نوشت: «گاهی در فرضیاتش از هدف تیراندازی می‌کند، مثلاً در فرضیه فوتون‌ها، اما باید او را ببخشیم چون دانشمند بزرگی است.»

سفر به درون اتم (۱۹۱۱-۱۹۱۳)

حالا به انگلستان می‌رویم. در آزمایشگاه رادرفورد در منچستر، آزمایشی در حال انجام بود که قرار بود تصویر اتم را برای همیشه تغییر دهد.
ارنست رادرفورد و دستیارانش هانس گایگر و ارنست مارسدن ورقه بسیار نازکی از طلا را با ذرات آلفا (هسته هلیوم) بمباران می‌کردند. بر اساس مدل اتمی تامسون (مدل کیک کشمشی)، ذرات آلفا باید به راحتی از ورقه عبور می‌کردند و حداکثر کمی منحرف می‌شدند.
اما نتیجه شگفت‌انگیز بود: برخی ذرات به شدت منحرف می‌شدند و تعداد کمی حتی به سمت عقب برمی‌گشتند! رادرفورد بعدها گفت: «این باورنکردنی بود، انگار با یک گلوله ۱۵ اینچی به یک دستمال کاغذی شلیک کنید و گلوله به سمت خودتان برگردد!»
نتیجه: اتم عمدتاً تهی است و تمام بار مثبت و جرم آن در هسته‌ای بسیار کوچک متمرکز شده است. مدل هسته‌ای اتم متولد شد.
اما مشکل بزرگی وجود داشت: بر اساس الکترودینامیک کلاسیک، الکترونی که به دور هسته می‌چرخد (شتاب دارد)، باید مدام انرژی تابش کند، به سرعت انرژی خود را از دست بدهد و در نهایت در مدتی حدود یک ده میلیونیم ثانیه به درون هسته سقوط کند. پس اتم‌ها باید ناپایدار باشند. در حالی که ما می‌دانیم اتم‌ها پایدارند.
نیلز بور، فیزیکدان جوان دانمارکی که برای دوره پسادکترا به نزد رادرفورد آمده بود، راه حلی یافت. او ترکیبی جسورانه از مدل هسته‌ای و ایده کوانتومی پلانک-اینشتین ساخت.





بور گفت: «فیزیک کلاسیک در این مقیاس کار نمی‌کند. بیایید چند اصل جدید وضع کنیم:»
مدارهای مجاز: الکترون‌ها فقط می‌توانند در مدارهایی خاص با انرژی معین (کوانتیده) حرکت کنند، بدون اینکه انرژی تابش کنند.
جهش کوانتومی: الکترون فقط با دریافت یا از دست دادن مقدار دقیق انرژی (یک کوانتوم نور) می‌تواند از یک مدار مجاز به مدار دیگر بپرد.
کوانتش: اندازه حرکت زاویه‌ای الکترون در مدارهای مجاز، مضرب صحیحی از $\frac{\pi^2}{h}$ است.
این مدل توانست طیف خطی اتم هیدروژن را با دقت شگفت‌انگیزی پیش‌بینی کند. فرمول بالمر که سال‌ها بود به صورت تجربی کشف شده بود، حالا از دل نظریه بور بیرون می‌آمد.
جهان فیزیک شوکه شد. آلبرت اینشتین وقتی مدل بور را دید، گفت: «این یکی از بزرگ‌ترین اکتشافات است.» اما در جایی دیگر ابراز نگرانی کرد: «اگر این درست باشد، یعنی فیزیک کلاسیک دیگر جایی در دنیای اتمی ندارد.»

ماجرای عجیب یک پایان‌نامه دکترا (۱۹۲۳-۱۹۲۴)

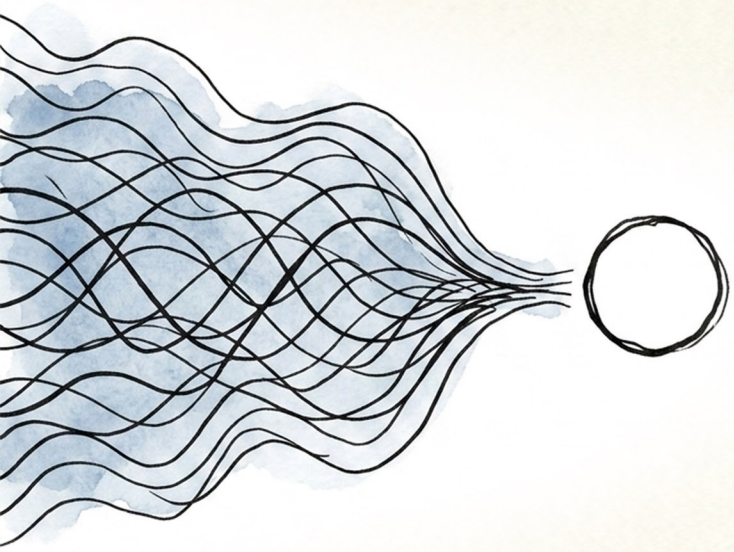
در پاریس، شاهزاده لویی ویکتور دوبروی، برادر فیزیکدانی به نام موریس دوبروی که آزمایشگاه خصوصی داشت، به فکر فرو رفته بود. لویی ابتدا تاریخ خوانده بود، اما بعد به فیزیک روی آورده بود.

او فکر می‌کرد: «اگر نور که ما فکر می‌کردیم موج است، می‌تواند گاهی رفتار ذره‌ای داشته باشد (فوتون اینشتین)، پس شاید ذراتی مثل الکترون که فکر می‌کنیم ذره هستند، گاهی رفتار موجی داشته باشند.»

این ایده آنقدر عجیب بود که استاد راهنمایش، پل لانژون، مردد بود آیا اصلاً این پایان نامه را قبول کند. او یک نسخه از آن را برای اینشتین فرستاد. اینشتین پاسخ داد: «او بخشی از حجاب بزرگ را کنار زده است.»

دوبروی رابطه معروف خود را پیشنهاد داد: $\lambda = h/p$

یعنی هر ذره با تکانه p یک طول موج λ دارد که با ثابت پلانک مرتبط است.



این ایده تا چند سال فقط یک فرضیه بود، تا اینکه در سال ۱۹۲۷، کلینتون دیویسون و لستر گرمر در آزمایشگاه‌های بل در آمریکا، در حال آزمایش با الکترون‌ها بودند. تصادفاً یک اتفاق غیرمنتظره افتاد: لوله آزمایششان شکست و سطح نیکل اکسید شد. وقتی آن را تغییر کردند و آزمایش را ادامه دادند، الگوهای عجیبی روی صفحه ظاهر شد. این الگوها چیزی نبود جز الگوی پراش الکترون، درست مثل نوری که از یک توری پراش عبور کرده باشد. الکترون‌ها واقعاً موج بودند!

ورنر هایزنبرگ و شب‌های بخارآلود در هلیگولاند (ژوئن ۱۹۲۵):

در همان زمان، در جزیره کوچک و طوفان‌خیز هلیگولاند در دریای شمال، جوانی ۲۳ ساله به نام ورنر هایزنبرگ از آلرژی شدید رنج می‌برد و به توصیه پزشک برای استراحت به آنجا رفته بود.

هایزنبرگ شاگرد آرنولد زومرفلد در مونیخ و سپس دستیار ماکس بورن در گوتینگن بود. او بر خلاف شرودینگر، به هر چیزی که قابل مشاهده مستقیم نباشد بدبین بود. می‌گفت: «چرا باید درباره مدار الکترون حرف بزنیم، چون نمی‌توانیم آن را ببینیم. فقط باید درباره چیزهایی حرف بزنیم که قابل اندازه‌گیری هستند: فرکانس و شدت نور گسیل شده.»

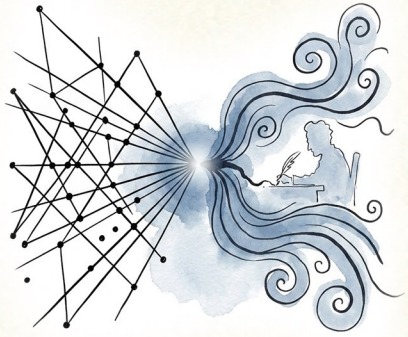
او در آن جزیره، شب‌ها راه می‌رفت و روی مسئله کار می‌کرد. ناگهان ایده‌ای به ذهنش رسید: چه می‌شود اگر موقعیت و تکانه الکترون را نه با اعداد معمولی، بلکه با آرایه هایی از اعداد (ماتریس) نمایش دهیم که در ضرب کردن، جابه‌جا نمی‌شوند؟

$$xp \neq px$$

او محاسباتش را انجام داد و نتیجه گرفت. صبح زود، از صخره‌های جزیره بالا رفت و احساس کرد دارد تولد یک نظریه جدید را می‌بیند. بعدها نوشت: «تقریباً گیج شده بودم. آنقدر هیجان‌زده بودم که دیگر نمی توانستم فکر کنم.»

وقتی به گوتینگن برگشت، محاسباتش را به ماکس بورن نشان داد. بورن نگاه کرد و فهمید: «این همان جبر ماتریس‌هاست!» مکانیک ماتریسی متولد شد.

دو غول و دو نگاه متفاوت (۱۹۲۵-۱۹۲۶)



حالا به دو نقطه مختلف اروپا می‌رویم، جایی که دو فیزیکدان کاملاً متفاوت، از دو مسیر کاملاً مجزا، به یک مقصد واحد می‌رسند.

اروین شرودینگر و تعطیلات عاشقانه در آروسا (کریسمس ۱۹۲۵)

اروین شرودینگر،فیزیکدان اتریشی، مردی رمانتیک، اهل هنر و فلسفه بود. او از مدل بور خوشش نمی آمد.«جهش‌های کوانتومی» برایش زشت و غیرقابل قبول بودند. او می‌گفت: «اگر قرار است با این جهش ها سر و کار داشته باشیم، حیف هیچ‌وقت فیزیک نخوانده بودم!»

دسامبر ۱۹۲۵ بود. شرودینگر برای یک تعطیلات کوتاه به ویلایی در آروسا، دهکده ای ییلاقی در سوئیس رفت، و یک دست‌نوشته از پیتر دبای که در حاشیه آن به ایده دوبروی اشاره شده بود.

او در آن تعطیلات، در میان برف و آرامش کوهستان، روی پژوهش معادله معروفش را نوشت:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi$$

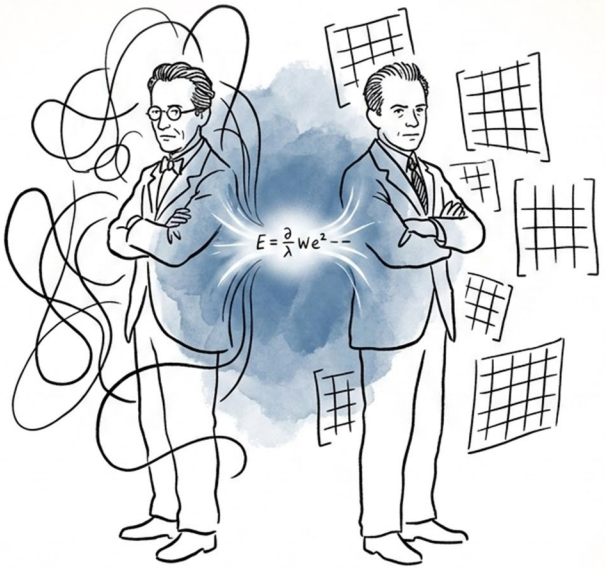
این معادله موجی، رفتار الکترون را نه به صورت ذره‌ای که در مدار می‌چرخد، بلکه به صورت موجی ایستا در اطراف هسته توصیف می‌کرد. جواب‌های این معادله، اعداد کوانتومی بور را به طور طبیعی به دست می‌دادند، بدون هیچ فرضیه اضافی.

شرودینگر بعدها با غرور گفت: «دیگر خبری از جهش‌های کوانتومی نیست!» او فکر می‌کرد به فیزیک کلاسیک بازگشته است.

وحدت در جنگ (۱۹۲۶)

دو نظریه کاملاً متفاوت: یکی موجی و پیوسته، دیگری ذره‌ای و گسسته. فیزیکدانان به دو دسته تقسیم شدند. شرودینگر نشان داد که این دو نظریه از نظر ریاضی معادل هستند، اما از نظر تفسیر فیزیکی، هر کدام راه خود را می رفتند.

شرودینگر سعی کرد نشان دهد که امواج، واقعی هستند و ذرات فقط بسته‌های موجی کوچک. هایزنبرگ و ولفگانگ پائولی قبول نمی‌کردند. در یک کنفرانس، بحث بالا گرفت. شرودینگر بیمار شد و در تخت بیمارستان افتاد. همسرش از او پرستاری می‌کرد. هایزنبرگ به عیادتش آمد و باز هم بحث کردند. برزنز ناامید گفت: «آقای هایزنبرگ، لطفاً کمی صبر کنید تا دکتر خوب شود!»

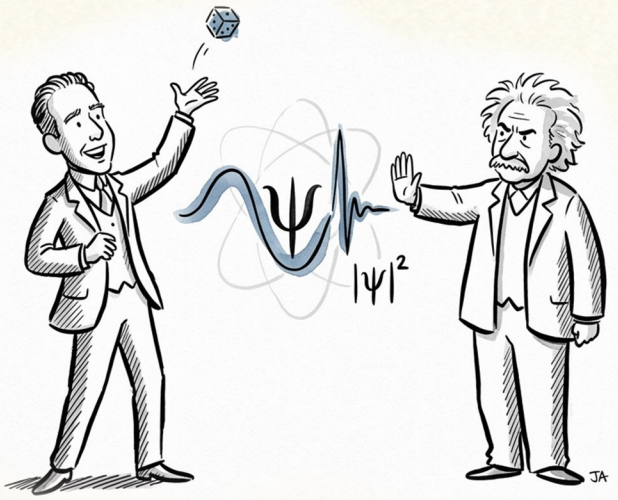


اصل عدم قطعیت و پایان قطعیت (۱۹۲۷)

هایزنبرگ که حالا در کپنهاگ با نیلز بور کار می‌کرد، به فکر فرو رفته بود. اگر جابجایی‌ناپذیری در مکانیک ماتریسی وجود دارد، معنای فیزیکی آن چیست؟
یک روز عصر در پارک فالهِد در کپنهاگ، ایده‌ای به ذهنش رسید. اگر بخواهیم مکان یک الکترون را دقیق اندازه بگیریم، باید از نوری با طول موج کوتاه (مثلاً گاما) استفاده کنیم. اما فوتون‌های با طول موج کوتاه، انرژی بالایی دارند و با برخورد به الکترون، تکانه آن را تغییر می‌دهند. هرچه مکان را دقیق‌تر اندازه بگیریم (طول موج کوتاه‌تر)، تکانه را بیشتر بر هم می‌زنیم.
اصل عدم قطعیت معروف متولد شد:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

یعنی هرگز نمی‌توان همزمان مکان و تکانه یک ذره را با دقت بی‌نهایت اندازه گرفت. طبیعت یک حد نهایی برای دقت ما تعیین کرده است.
هایزنبرگ این اصل را در نامه‌ای به پائولی نوشت: «من دیوانه شده‌ام، دارم تلاش می‌کنم تا اصل عدم قطعیت را فرموله کنم.» بعداً در مقاله‌ای نوشت: «من معتقدم که زبان ریاضی مکانیک کوانتومی تنها زبانی است که می‌تواند با عدم قطعیت ذاتی طبیعت صحبت کند.»



تفسیر نهایی (کپنهاگ در برابر بقیه)

ماکس بورن، استاد هایزنبرگ، با الهام از ایده دوبروی، تفسیر نهایی را ارائه داد. او گفت: «آن تابع موج شرودینگر چه می‌گوید؟ این که الکترون همه جا پخش شده؟ نه. مجذور تابع موج به ما می‌گوید احتمال اینکه الکترون را در یک نقطه پیدا کنیم چقدر است.»

یعنی الکترون تا زمانی که مشاهده نشود، یک «امکان» محض است. مشاهده، آن را به «واقعیت» تبدیل می‌کند.

نیلز بور و هایزنبرگ این تفسیر را در مکتب کپنهاگ تدوین کردند: جهان ذاتاً احتمالی است، عدم قطعیت یک اصل بنیادین است و مشاهده در واقعیت دخالت می‌کند.

شرودینگر تا آخر عمر از این تفسیر متنفر بود. او می‌گفت: «اگر این درست باشد، من از اینکه با مکانیک کوانتومی سروکار داشته‌ام پشیمانم.» اینشتین هم هرگز آن را قبول نکرد. جمله معروفش را در نامه‌ای به بورن نوشت: «خدا با عالم تاس نمی‌اندازد.»

بورن در پاسخ گفت: «اینشتین، به خدا دستور نده که چه کار کند!»

میراث انقلاب

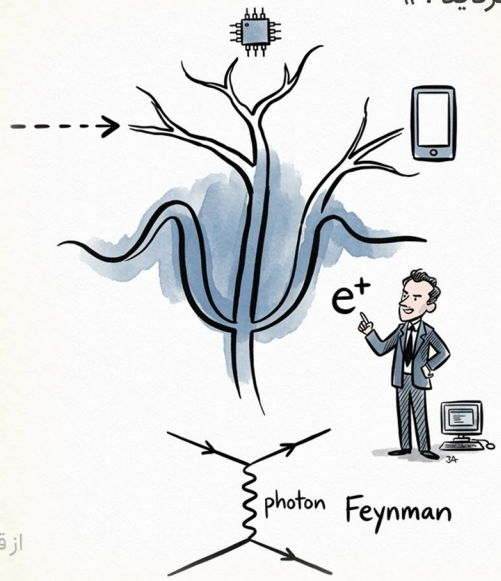
آنچه در کمتر از سی سال رخ داد، یکی از عمیق‌ترین دگرگونی‌های فکری بشر بود. جهانی که فکر می‌کردیم از ذرات قطعی با مسیرهای مشخص تشکیل شده، جای خود را به جهانی از احتمالات، امواج و عدم قطعیت داد.

پل دیراک، فیزیکدان جوان انگلیسی، با ترکیب مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص، معادله‌ای نوشت که وجود پادماده (پوزیترون) را پیش‌بینی می‌کرد. ریچارد فاینمن بعدها با دیاگرام‌های معروفش، راهی برای تجسم برهم‌کنش ذرات ارائه داد.

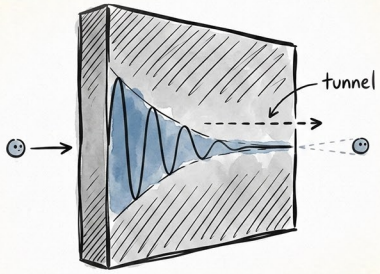
امروزه، این نظریه نه تنها پایه فیزیک مدرن است، بلکه در دل هر ترانزیستور، هر لیزر، هر تلفن همراه و هر رایانه‌ای زندگی می‌کند. ما هر روز با کوانتوم سر و کار داریم، بی‌آنکه بدانیم.

و شاید عجیب‌ترین بخش داستان این باشد که خود بنیان‌گذاران این نظریه، مانند پلانک و اینشتین و شرودینگر، هرگز نتوانستند با پیامدهای فلسفی آن کنار بیایند. آن‌ها درهایی را گشودند که خود جرأت ورود به آن را نداشتند.

همان طور که نیلز بور گفت : «اگر از مکانیک کوانتومی شوکه نشده اید ، آن را درک نکردید . »



تونل زنی کوانتومی:
معجزه عبور از دیوارهای ناممکن



مقدمه

تصور کنید در برابر یک دیوار بتنی بلند ایستاده‌اید و بدون اینکه انرژی کافی برای پریدن از آن داشته باشید یا دیوار را خراب کنید، ناگهان خود را در آن سوی دیوار بیابید! این اتفاق در دنیای ماوراءالطبیعه یا داستان‌های تخیلی به نظر می‌رسد، اما برای ذرات در دنیای کوانتوم، یک واقعیت روزمره است. نام این معجزهٔ کوانتومی: «تونل زنی» است.

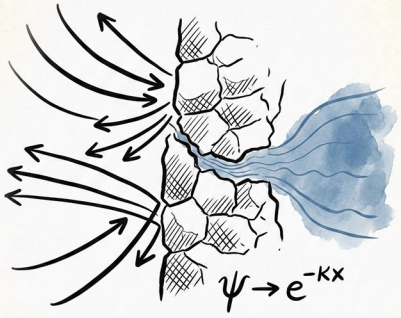
تونل زنی چیست؟

در فیزیک کلاسیک، اگر یک توپ (مثلاً یک الکترون) انرژی کافی برای عبور از یک مانع (مثل یک سد انرژی) را نداشته باشد، هرگز از آن عبور نخواهد کرد؛ درست مانند توپی که نمی‌تواند از روی یک تپه بلند بگذرد مگر اینکه سرعت اولیه کافی داشته باشد.

اما در مکانیک کوانتومی، ذرات ویژگی موجی دارند. برخلاف توپ، یک موج وقتی به مانعی می‌رسد، کاملاً متوقف نمی‌شود، بلکه دامنهٔ آن در داخل مانع به‌طور نمایی کاهش می‌یابد و اگر مانع به اندازه کافی نازک باشد، موج می تواند از سوی دیگر ظاهر شود! به زبان ساده، ذرهٔ کوانتومی شانس کوچکی دارد که ناگهان خود را در آن سوی مانع بیابد، گویی از یک تونل نامرئی عبور کرده است.

یک قیاس جالب: موج و صخره

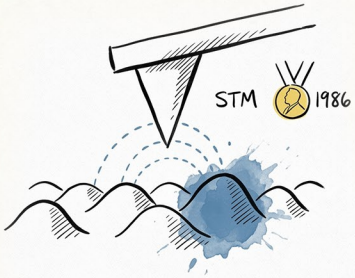
اگر به امواجی که به یک دیوار سنگی برخورد می‌کنند دقت کنید، می‌بینید که بیشتر انرژی موج بازتاب می‌شود، اما بخش کوچکی از آب از میان شکاف‌های دیوار نشت می‌کند. در کوانتوم، حتی اگر دیوار کاملاً یکپارچه باشد، موج احتمالِ ذره می‌تواند از آن «نشت» کند.



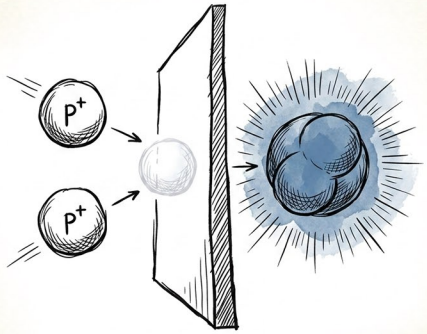
چرا تونل زنی مهم است؟

این پدیدهٔ عجیب، تنها یک نظریه نیست، بلکه پایهٔ بسیاری از فناوری‌های حیاتی امروز است:

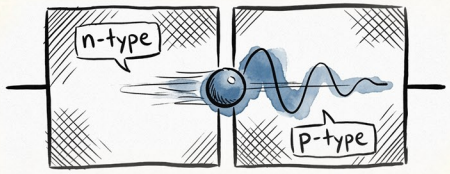
۱.میکروسکوپ تونلی روبشی (STM): نوک این میکروسکوپ آن‌قدر به نمونه نزدیک می‌شود که الکترون‌ها با پدیدهٔ تونل زنی بین نوک و سطح جریان می‌یابند. با اسکن سطح، می‌توان از اتم‌ها عکس‌برداری کرد! این اختراع که مدیون پدیدهٔ تونل زنی است، جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۸۶ را دریافت کرد.



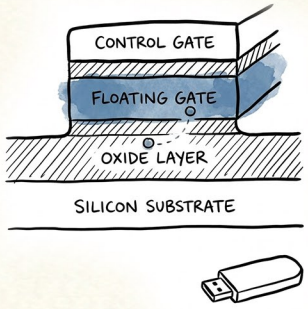
۲. واکنش‌های هسته‌ای در خورشید: دلیل درخشش خورشید و ستارگان، همجوشی هسته‌ای است. پروتون‌ها برای همجوشی باید بر دافعه شدید الکتریکی (مانع بزرگی به نام «سد کولنی») غلبه کنند. انرژی آن‌ها در هسته خورشید به نظر برای این کار کافی نیست، اما به لطف تونل‌زنی، شانس کوچکی برای عبور و ایجاد همجوشی دارند. اگر تونل‌زنی نبود، خورشید خاموش بود!



۳. الکترونیک و دیودها: عملکرد برخی از دیودها و ترانزیستورهای بسیار سریع (مثل دیود تونلی) مبتنی بر این پدیده است.



۴. حافظه‌های فلش: همان USB درایوها و کارت حافظه‌های شما. عملیات پاک کردن و نوشتن داده در آن‌ها از طریق تونل‌زنی الکترون‌ها در یک لایه عایق نازک انجام می‌شود.

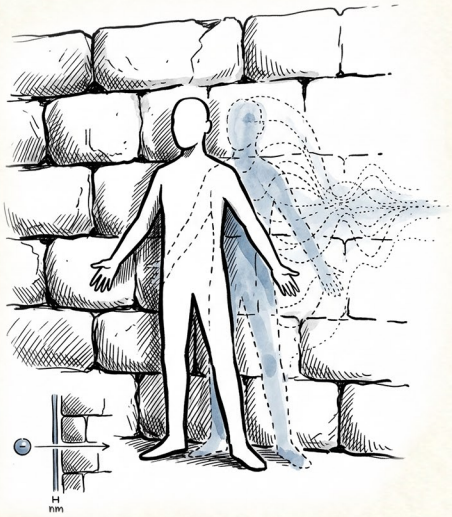


سوال بزرگ: آیا ما هم می‌توانیم تونل بزنیم؟

از نظر ریاضی، احتمال تونل‌زنی برای یک شیء کلان (مثل انسان) صفر نیست، اما به قدری بی‌نهایت کوچک است که در زمان باقیمانده از عمر جهان نیز به احتمال عملی رخ نمی‌دهد. تونل‌زنی برای اجسام ریز (الکترون‌ها، پروتون‌ها) و در فواصل بسیار کوچک (در حد نانومتر) پدیده‌ای رایج است.

نگاهی به آینده:

تونل‌زنی کوانتومی نمادین از این حقیقت است که در مقیاس اتمی، قواعد بازی کاملاً تغییر می‌کند. این پدیده نه تنها توضیح‌دهنده جهان، بلکه سازنده جهان است (از خورشید گرفته تا رایانه‌های ما). پژوهش‌های امروز روی تونل‌زنی در کامپیوترهای کوانتومی و نانوفناوری، نویدبخش انقلابی دیگر در آینده‌ای نه چندان دور است. گویی کوانتوم به ما یادآوری می‌کند: گاهی ناممکن‌ها، تنها احتمال‌های بسیار کوچکی هستند که منتظر کشف شدن‌اند.



سفر به سرچشمه نوبل؛
از وصیت یک مخترع تا معتبرترین جایزه جهان

قبل از ملاقات قهرمانان داستانمان، ببینیم این جایزه افسانه‌ای چیست و از کجا آمد.
تصور کنید مخترع دینامیت، همان کسی که دنیا را با ماده‌ای منفجره متحول کرد، وصیت کند ثروتش صرف بزرگداشت کسانی شود که دنیا را به جای تخریب، بهبود بخشیده‌اند. این دقیقاً داستان آلفرد نوبل است؛ مردی که با وجدانی نگران از استفاده نظامی از اختراعش، در سال ۱۸۹۵ پایه‌گذار جوایزی شد که امروز به عالی‌ترین نشان پیشرفت بشر تبدیل شده است.
از فیزیک و شیمی تا ادبیات و تلاش برای صلح، جوایز نوبل به برترین‌های هر رشته اهدا می‌شود. فرآیندی دقیق و محرمانه که هر سال دانشمندان، نویسندگان و صلح‌طلبان تأثیرگذار جهان را در مراسمی باشکوه در استکهلم و اسلو معرفی می‌کند.
اما نوبل تنها یک مدال طلا و جایزه نقدی چشمگیر نیست. روایتگر تاریخ علم و بشریت است؛ از کشف ساختار DNA تا تلاش‌های بی‌وقفه برای صلح جهانی. برندگانش تبدیل به سفیران پیشرفت می‌شوند و این جایزه، همچون چراغی، توجه جهان را به اکتشافاتی حیاتی جلب می‌کند که آینده ما را شکل می‌دهند.
نوبل یادآور این است که بزرگترین میراث انسان، نه در قدرت تخریب، که در اشتیاق برای ساختن و بهبود زندگی همگان نهفته است.

و امسال، در سال ۲۰۲۵، دنیای فیزیک یک بار دیگر با نوبل شگفت‌زده شد. جایزه نوبل فیزیک به کشفی اعطا شد که مرزهای واقعیت کوانتومی را جابجا کرد: "تونل‌زنی کوانتومی". این پدیده شگفت‌انگیز ــ که در آن ذرات می‌توانند از موانعی عبور کنند که در فیزیک کلاسیک غیرممکن به نظر می‌رسد ــ نه تنها پایه های درک ما از جهان زیراتمی را متحول کرده، بلکه دریچه‌ای به سوی فناوری‌های آینده گشوده است: از کامپیوترهای کوانتومی با قدرتی فراتر از تصور، تا حسگرهای فوق‌حساس و حتی شاید روزی سفر در زمان!
کمیته نوبل برای انتخاب، سال‌ها کارهای نامزدها را زیر ذره‌بین می‌برد. حداکثر سه نفر می‌توانند برای یک کشف مشخص برنده شوند، زیرا علم مدرن، اغلب حاصل کار تیمی است.
و در سال ۲۰۲۵، نوبل فیزیک به سه کاشفِ مرزهای جدید جهان کوانتوم تعلق گرفت...

قهرمانان مرزهای کوانتومی

این سه نفر، با ترکیب نبوغ نظری و مهارت تجربی بی‌نظیر، ثابت کردند پدیده‌های کوانتومی می‌توانند در مدارهای الکتریکی ماکروسکوپی - چیزی که با چشم دیده می‌شود و با دست ساخته می‌شود - نیز رخ دهند. این کشف، سنگ بنای انقلاب فناوری بعدی، یعنی رایانش کوانتومی شد.

۱. جان کلارک: استادِ ساختِ ناممکن

تولد: ۱۹۴۲، کمبریج انگلستان.

شخصیت: مهندس-فیزیکدانی آرام و دقیق که عاشق کار در آزمایشگاه بود. او پل مستحکمی بین ایده‌های انتزاعی کوانتوم و دستگاه‌های واقعی ساخت.

دستاورد شاهکار: پیشگام در ساخت SQUID، حسگر ابررسانای فوق‌حساسی که با استفاده از تونل‌زنی، ضعیف‌ترین میدان‌های مغناطیسی (مثل میدان مغز) را اندازه می‌گیرد. آزمایشگاه او در دانشگاه برکلی، گهواره نخستین مدارهای ابررسانای کوانتومی بود.

۲. میشل دوورت: معمار جهان کوانتومی

تولد: ۱۹۵۳، پاریس، فرانسه.

شخصیت: فیلسوف-مهندسی با ذهنی روشنفکر. پسر یک مهندس برق که از بازی با قطعات الکترونیکی به معماری قطعات کوانتومی رسید. عاشق موسیقی جاز و معتقد بود بین نظم فیزیک و بداهه‌پردازی جاز، پیوندی ناگسستنی هست.

دستاورد شاهکار: او کسی بود که ایده‌های تونل‌زنی را به طرح‌های عملی برای کیوبیت‌ها (واحدهای پردازش کوانتومی) تبدیل کرد. مانند یک معمار برجسته، طرح‌هایی مثل "ترانسمون" را ارائه داد که امروزه ستون فقرات پردازنده‌های کوانتومی شرکت‌هایی مانند گوگل و IBM است.

نگاه او: "هدف ما در ابتدا فهمیدن مرز بین دنیای کوانتومی و کلاسیک بود، نه ساختن کامپیوتر. اما زیبایی علم در همین است: کشف حقیقت، خودش راه را برای فناوری‌های غیرمنتظره باز می‌کند".

۳. جان مارتینیس: سرباز پیاده‌نظام انقلاب

تولد: ۱۹۵۸، کالیفرنیای آمریکا.

شخصیت: فیزیکدانی عمل‌گرا و بی‌قرار. اهل کار بی‌وقفه در آزمایشگاه، حتی با پیتزا و قهوه در کنار دستگاه‌ها. کسی که نظریه را به یک ماشین کاری تبدیل کرد.

دستاورد شاهکار: رهبری تیمی در گوگل که در سال ۲۰۱۹ به "برتری کوانتومی" رسید. یعنی با پردازنده "سایکامور"، محاسبه‌ای را در ۲۰۰ ثانیه انجام داد که بهترین ابررایانه کلاسیک دنیا ده‌هزار سال برایش زمان نیاز داشت! این پیروزی عملی، مستقیم‌ترین ثمره کشف تونل‌زنی در مدارهای ماکروسکوپی بود.

انرژی او: "ما نشان دادیم که می‌شود. حالا چالش واقعی شروع شده: ساختن یک کامپیوتر کوانتومی بزرگ، پایدار و مفید".

سه دانشمند و پدیده‌ای که مطالعه کردند، داستان پیروزی کنجکاوی انسان است. از یک پرسش نظری درباره مرزهای فیزیک، تا کشفی که نه تنها خاستگاه نور ستاره ها را توضیح داد، بلکه مسیر ساخت رایانه‌های نسل بعدی را هموار کرد.

نوبل ۲۰۲۵ به ما یادآوری کرد که گاهی غیرممکن، فقط نوع دیگری از ممکن است که هنوز راهش را نیافته‌ایم. و این کشف، در نهایت، یادگاری از سه کاشف است که جسارت داشتند به یک سد علمی حمله کنند، و با تونل‌زنی از دل آن، به آینده ای روشن‌تر رسیدند.

علی نایبی، پژوهشگر جوان فوتونیک کوانتومی، همان کسی‌ست که راه ارتباط میان نقاط دور جهان را با نور تک فوتونی باز کرد. کارهایش در دانشگاه‌های اروپا، پایه‌های "اینترنت کوانتومی" را بنا نهاد؛ شبکه‌ای که روزی شاید جایگزین اینترنت کلاسیک شود و ارتباط انسانی را به سطح تازه‌ای ببرد. او می‌گوید: «در هر فوتون، یک پیام رازگونه از هستی نهفته است؛ کافی‌ست گوش کنیم.»

در سوی دیگر **لیلا ناظمی** دانشمند ایرانی، نشان داد که نظم در جهان کوانتومی می‌تواند از آشوب زاده شود. او با ترکیب فیزیک کوانتوم و مدل سازی سامانه‌های پیچیده، فهم ما از رفتار جمعیِ ماده را دگرگون کرد. در نگاهش، کوانتوم فقط دنیای ذرات نیست، بلکه تقلیدی از انسان است؛ جایی که تصمیم‌ها همزمان هزار مسیر دارند.

و سر انجام **نیما آرکانی حامد**، اندیشمند بزرگ ایرانی که بر مرزِ نظریه میدان و هندسه پنهان واقعیت قدم نهاد. ایده‌های او دربارهٔ ساختارهای بنیادی طبیعت، درک ما از فضا، زمان و خودِ کوانتوم را تکان داد. او باور دارد که جهان نه به اعداد، بلکه به هندسه‌ای ناشناخته نوشته شده است، هندسه‌ای که شاید گذرگاه بعدی فیزیک کوانتوم باشد.

از کنار هم قرارگیری ذهن‌هایی از سراسر جهان، چرخ بزرگ علم روز به روز کامل‌تر می شود. همانی که امروز در کارگاه‌های برکلی، آزمایشگاه‌های تورنتو و تهران همزمان می چرخد.

کوانتوم، همین زبانِ پنهانِ واقعیت، یادمان می‌اندازد که جهان همیشه چیزی بیشتر از آن‌ست که ما می‌بینیم!

از تونل‌زنی ذرات تا تونل‌زنی اندیشه‌ها، علم راهش را به روشنایی می‌برد. و شاید نوبل بعدی، در سال‌های نه چندان دور، از دل همین داستانِ مشترکِ نوین فرامکانی برخیزد؛ داستان مردان و زنانی که جرأت کردند به مرز ناممکن‌ها حمله کنند و جهان را کمی از تاری اندیشه، روشن‌تر سازند.

ما نیز در کنار سیر سریع دانش نوین جهانی ایستاده و دانسته یا ندانسته، هر لحظه تکه‌ای کوچک از ساختار بی‌پایان هستی را لمس می‌کنیم. با تاکیون از کنارهم قرار گرفتن پازل‌های علم فیزیک، لذت ببرید و کمک‌مان کنید تا آن‌را وسعت بخشیم :)

تاکیون

انجمن علمی فیزیک دانشگاه شاهد

دانشگاه شاهد معاونت فرهنگی و اجتماعی