*نوشته زیر بر پایه سخنرانی استاد یوسف ثبوتی در رویداد «شب علم»، هفتم آبان ۱۴۰۵، در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان تهیه شده است.*

*یادداشت حقوقی: این نوشته در «نامه علوم پایه»، فصلنامه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران، به چاپ خواهد رسید. چاپ، تکثیر یا بازنشر تمام یا بخشی از آن با ذکر نام فصلنامه یاد شده مجاز است.*

# مکانیک کوانتومی: از پیدایش تا امروز

**یوسف ثبوتی**

دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان

فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

## Abstract

Quantum mechanics began in 1900 with Planck's hypothesis that energy is exchanged in discrete quanta, and between 1925 and 1927 it grew into a complete theory through the work of Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac and others. This article traces the history of the theory from the crisis of classical physics, through the Einstein–Bohr debate, to the experimental tests of Bell's inequality, and shows how quantum mechanics became the common language of chemistry, solid-state and nuclear physics, astrophysics and biology. It then reviews the technologies that grew out of it, from the transistor and the laser to magnetic resonance imaging and satellite navigation, as well as the ongoing "second quantum revolution" in quantum computing, communication and sensing. The article closes with three lessons of this history for human society: the value of fundamental research, humility before nature, and the collective, international character of science.

**Keywords:** Quantum mechanics; History of science; Entanglement; Bell's inequality; Quantum technology; Second quantum revolution

## چکیده

مکانیک کوانتومی در سال ۱۹۰۰ با فرض پلانک درباره گسستگی انرژی آغاز شد و در سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۷ به نظریه‌ای کامل بدل شد. این مقاله سیر تاریخی این نظریه را از بحران فیزیک کلاسیک تا آزمون‌های نامساوی بل مرور می‌کند و نقش آن را در شیمی، فیزیک حالت جامد، فیزیک هسته‌ای، اخترفیزیک و زیست‌شناسی نشان می‌دهد. سپس فناوری‌های برآمده از آن، از ترانزیستور و لیزر تا تصویربرداری تشدید مغناطیسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی، و نیز «انقلاب کوانتومی دوم» شامل رایانش، ارتباطات و حسگری کوانتومی بررسی می‌شود. در پایان، سه درس این تاریخ برای جامعه انسانی، یعنی ارزش پژوهش بنیادین، فروتنی در برابر طبیعت و جهانی بودن علم، مورد بحث قرار می‌گیرد.

**واژگان کلیدی:** مکانیک کوانتومی، تاریخ علم، درهم‌تنیدگی، نامساوی بل، فناوری کوانتومی، انقلاب کوانتومی دوم

## ۱. مقدمه

اگر این نوشته را می‌خوانید به احتمال زیاد یک گوشی همراه با خود دارید. گوشی همراه نمونه‌ای روشن از وابستگی زندگی امروز به مکانیک کوانتومی است. در درون آن میلیاردها ترانزیستور کار می‌کنند، صفحه‌اش با دیودهای نورگسیل روشن

می‌شود، مکانش را سامانه موقعیت‌یاب جهانی تعیین می‌کند و داده‌هایش از راه فیبرهای نوری و لیزر به سراسر جهان می‌رسد. هیچ‌یک از این فناوری‌ها بدون نظریه‌ای که بیش از یکصد سال پیش، تقریباً از سر ناچاری پدید آمد، ممکن نبود.

هدف این مقاله تنها مرور تاریخ مکانیک کوانتومی نیست. نشان خواهیم داد این نظریه چگونه شیوه اندیشیدن ما درباره طبیعت را دگرگون کرده، و چگونه همین دگرگونی فکری به یکی از بزرگ‌ترین پیشران‌های پیشرفت فناوری در تاریخ بشر انجامیده است.

یونسکو سال ۲۰۲۵ را، به مناسبت صدمین سالگرد پیدایش مکانیک کوانتومی نوین، «سال جهانی علم و فناوری کوانتومی» نامید. اکنون که این نظریه وارد سده دوم عمر خود شده، فرصت مناسبی برای بازنگری در گذشته و نگاه به آینده آن فراهم شده است.

ساختار مقاله چنین است: بخش ۲ بحران فیزیک کلاسیک در پایان قرن نوزدهم را شرح می‌دهد؛ بخش ۳ به گام‌های نخستین پلانک، اینشتین و بور می‌پردازد؛ بخش ۴ انقلاب سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۷ را مرور می‌کند؛ بخش ۵ بحث‌های بنیادین و آزمون‌های بل را بررسی می‌کند؛ بخش ۶ نقش نظریه کوانتومی در علوم دیگر را نشان می‌دهد؛ بخش‌های ۷ و ۸ به فناوری‌های انقلاب کوانتومی نخست و دوم می‌پردازد؛ بخش ۹ پیامدهای این تاریخ برای جامعه انسانی را بررسی می‌کند؛ و بخش ۱۰ نتیجه‌گیری است.

## ۲. ابرهای ابهام در آسمان فیزیک کلاسیک

در پایان قرن نوزدهم، بسیاری از فیزیک‌دانان بر این باور بودند که کار اصلی فیزیک تقریباً به پایان رسیده است. مکانیک نیوتن حرکت سیارات را با دقتی شگفت‌انگیز پیش‌بینی می‌کرد. معادلات ماکسول الکتریسیته، مغناطیس و نور را در قالبی واحد گرد آورده بود. ترمودینامیک و مکانیک آماری نیز رفتار گازها و گرما را توضیح می‌دادند. به نظر می‌رسید تنها کاری که مانده، افزودن چند رقم اعشار به دقت اندازه‌گیری‌هاست.

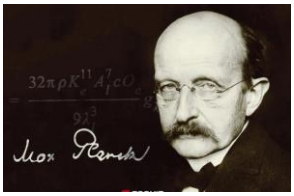
لرد کلوین در سال ۱۹۰۰ در سخنرانی معروفی از «دو ابر» در افق فیزیک سخن گفت: یکی نتیجه منفی آزمایش مایکلسون و مورلی (حرکت زمین در اتری که فرض می‌شد تمام عالم را پر کرده است)، و دیگری مشکل تقسیم انرژی در تابش گرمایی. از ابر نخست نظریه نسبیت زاده شد و از ابر دوم مکانیک کوانتومی. به بیان دیگر، آن دو ابر ابهام کوچک به دو انقلاب بزرگ قرن بیستم انجامیدند.

ابر دوم موضوع این نوشته است: هر جسم سیاهی که داغ شود نور می‌تاباند. پرسش این بود که شدت تابش از یک جسم داغ در طول موج‌های مختلف چقدر است.

به‌کارگیری فیزیک کلاسیک در این مسئله به نتیجه‌ای فاجعه‌بار انجامید. قانون ریلی و جینز پیش‌بینی می‌کرد که شدت تابش در طول موج‌های کوتاه تا بی‌نهایت افزایش یابد؛ یعنی هر جسم گرمی باید انرژی بی‌پایانی به صورت پرتو فرابنفش بتاباند. این تناقض بعدها «فاجعه فرابنفش» نام گرفت. طبیعت آشکارا چنین رفتاری نداشت.

در چهاردهم دسامبر ۱۹۰۰، ماکس پلانک در انجمن فیزیک آلمان راه‌حلی ارائه کرد. او فرض کرد که نوسانگرهای دیواره جسم سیاه نمی‌توانند هر مقدار دلخواه انرژی داشته باشند؛ انرژی تنها در بسته‌های گسسته مبادله می‌شود و اندازه هر بسته با بسامد نور نسبت مستقیم دارد:

$$E = h\nu$$



ماکس پلانک (۱۸۵۸–۱۹۴۷)

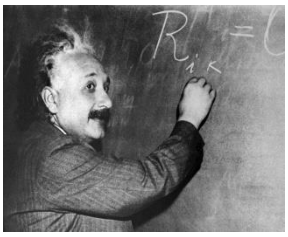
ثابت h که امروز «ثابت پلانک» نامیده می‌شود، مقدار بسیار کوچکی دارد:

$$h \approx 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$$

کوچکی این عدد توضیح می‌دهد که چرا گسستگی انرژی در زندگی روزمره احساس نمی‌شود.

پلانک خود انقلابی نبود. او این فرض را «اقدامی از سر ناامیدی» می‌دانست و سال‌ها امید داشت که بتوان آن را در قالب فیزیک کلاسیک توضیح داد. با وجود این، فرمول او به‌طور شگفت‌آوری با داده‌های تجربی سازگار بود، و بدین‌سان بذر کوانتوم تقریباً ناخواسته کاشته شد. امروز ثابت h چنان بنیادی است که از سال ۲۰۱۹ تعریف کیلوگرم در دستگاه بین‌المللی یکاها بر پایه آن استوار شده است.

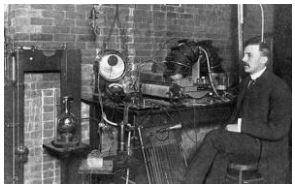
## ۳. اینشتین، بور و نظریه کوانتومی قدیم


آلبرت اینشتین (۱۸۷۹–۱۹۵۵)

نخستین کسی که ایده پلانک را جدی گرفت، کارمند جوانی در اداره ثبت اختراعات شهر برن بود: آلبرت اینشتین. او در سال ۱۹۰۵، که به «سال معجزه» شهرت دارد، گامی جسورانه برداشت و گفت گسستگی تنها ویژگی ماده نیست؛ خود نور نیز از بسته‌های انرژی تشکیل شده است. این بسته‌ها بعدها «فوتون» نام گرفتند.

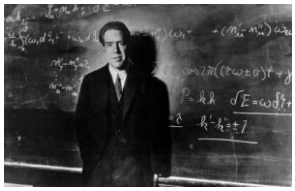
اینشتین با این ایده پدیده فوتوالکتریک را توضیح داد. هنگامی که نور به سطح فلز می‌تابد، الکترون‌هایی از آن جدا می‌شوند. فیزیک کلاسیک نمی‌توانست توضیح دهد که چرا نور قرمز پرشدت هیچ الکترونی جدا نمی‌کند، اما نور فرابنفش کم‌شدت این کار را می‌کند. پاسخ اینشتین ساده بود: آنچه اهمیت دارد انرژی هر فوتون است، نه شمار فوتون‌ها. جایزه نوبل ۱۹۲۱ اینشتین نیز برای همین کار بود، نه برای نسبیت او. امروز سلول‌های خورشیدی و حسگرهای دوربین‌های دیجیتال بر همین اصل کار می‌کنند.

این ایده بحرانی تازه پدید آورد. آزمایش دوشکاف یانگ صد سال پیش‌تر نشان داده بود که نور موج است، و اکنون اینشتین آن را ذره می‌دانست. پاسخ، چنان‌که بعدها روشن شد، این بود: هر دو، و هیچ‌کدام. این همان «دوگانگی موج و ذره» است که در ژرفای مکانیک کوانتومی جای دارد.


ارنست رادرفورد (۱۸۷۱–۱۹۳۷)

بحران دوم در درون اتم بود. ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ نشان داد که اتم هسته‌ای کوچک و سنگین دارد و الکترون‌ها گرد آن می‌چرخند. اما طبق الکترومغناطیس کلاسیک، الکترونی که می‌چرخد باید تابش کند، انرژی از دست بدهد و در کسری از ثانیه بر هسته فرو افتد. به بیان دیگر، فیزیک کلاسیک پیش‌بینی می‌کرد که اتم‌ها پایدار نباشند، و در آن صورت ماده به شکلی که می‌شناسیم نمی‌توانست وجود داشته باشد.

نیلس بور، فیزیک‌دان جوان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ پیشنهاد کرد که الکترون‌ها تنها در مدارهای معینی می‌توانند حرکت کنند و در این مدارها نمی‌توانند تابش داشته باشند. تنها هنگام جهش از یک مدار به مدار دیگر، فوتونی با انرژی معین جذب یا گسیل می‌شود. مدل بور طیف خطی هیدروژن را، که دهه‌ها معمایی حل‌نشده بود، به زیبایی توضیح داد، و اصطلاح «جهش کوانتومی» از همین‌جا وارد زبان علم شد.


نیلس بور (۱۸۸۵–۱۹۶۲)

مدل بور با همه موفقیتش همچنان وصله‌ای بر پیکر فیزیک کلاسیک بود. معلوم نبود چرا تنها این مدارها مجازند و این قاعده‌ها از کجا می‌آیند، و مدل برای اتم‌های پیچیده‌تر از هیدروژن درست کار نمی‌کرد. این دوره را امروز «نظریه کوانتومی قدیم» می‌نامند: مجموعه‌ای از قواعد هوشمندانه، اما بدون بنیاد نظری.

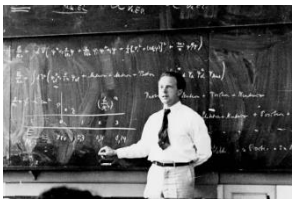
گام بعدی را لویی دوبروی، شاهزاده فرانسوی، برداشت. او در سال ۱۹۲۴ در رساله دکتری خود پرسید: اگر نور که موج است رفتار ذره‌ای دارد، شاید ذراتی مانند الکترون نیز رفتار موجی داشته باشند. او برای هر ذره طول موجی پیشنهاد کرد که با تکانه آن نسبت عکس دارد. چند سال بعد، آزمایش‌های دیویسون و جرمر و نیز جورج تامسون پراش الکترون را مشاهده کردند؛ ماده نیز موج بود. همین اصل امروز پایه میکروسکوپ‌های الکترونی است که ساختار ویروس‌ها و پروتئین‌ها را آشکار می‌کنند.

## ۴. سه سالی که جهان را دگرگون کرد: ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۷


لویی دوبروی (۱۸۹۲–۱۹۸۷)

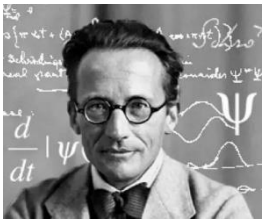
دوره ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۷ را می‌توان شگفت‌انگیزترین دوره تاریخ فیزیک دانست. در کمتر از سه سال، گروهی از فیزیک‌دانان که بیشترشان زیر سی سال سن داشتند، ساختار کامل نظریه‌ای تازه را بنا کردند؛ از همین رو آن را گاه «فیزیک پسرانه» می‌نامیدند.

در تابستان ۱۹۲۵، ورنر هایزنبرگ بیست‌وسه ساله برای درمان تب یونجه به جزیره کوچک هلگولند در دریای شمال رفت. او در آنجا به ایده‌ای بنیادین رسید: باید مدارها و مسیرهایی را که هرگز مشاهده نمی‌شوند کنار گذاشت و تنها با کمیت‌های اندازه‌پذیر، یعنی بسامدها و شدت‌های نور گسیل‌شده، کار کرد. حاصل کار او ریاضیاتی عجیب بود که در آن ترتیب ضرب اهمیت داشت؛ یعنی حاصل‌ضرب الف در ب با حاصل‌ضرب ب در الف برابر نبود. ماکس بورن دریافت که این همان جبر ماتریس‌هاست و با همکاری پاسکوال جردن «مکانیک ماتریسی» را بنا نهاد.


ورنر هایزنبرگ (۱۹۰۱–۱۹۷۶)

چند ماه بعد، در زمستان ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۶، اروین شرودینگر اتریشی راهی کاملاً متفاوت در پیش گرفت. او با الهام از ایده دوبروی معادله‌ای برای موج‌های ماده نوشت؛ معادله‌ای که امروز نام او را دارد و شاید پس از $E = mc^2$ مشهورترین معادله فیزیک باشد:

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


اروین شرودینگر (۱۸۸۷–۱۹۶۱)

معادله شرودینگر برای فیزیک‌دانان آشناتر بود، زیرا از جنس معادلات موج کلاسیک بود. با این‌حال خود شرودینگر به‌زودی نشان داد که مکانیک ماتریسی هایزنبرگ و مکانیک موجی خودش از نظر ریاضی هم‌ارزند؛ دو زبان برای بیان یک حقیقت.

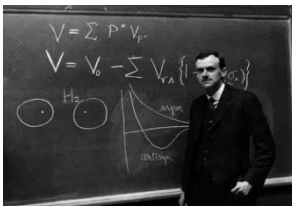
پرسش این بود که $\psi$ دقیقاً چیست و این موج در چه چیزی نوسان می‌کند. ماکس بورن در سال ۱۹۲۶ پاسخی داد که تا به امروز پابرجاست: مجذور قدر مطلق تابع موج، احتمال یافتن ذره در هر نقطه را به دست می‌دهد. با این تفسیر، احتمال برای نخستین بار نه به عنوان نشانه ناآگاهی، بلکه به عنوان ویژگی بنیادین طبیعت وارد فیزیک شد. واکنش مشهور اینشتین، «خدا تاس نمی‌اندازد»، به همین تفسیر ماکس بورن بود.


ماکس بورن (۱۸۸۲–۱۹۷۰)

هایزنبرگ در سال ۱۹۲۷ اصل عدم قطعیت را صورت‌بندی کرد. بر پایه این اصل، مکان و تکانه یک ذره را نمی‌توان هم‌زمان با دقت دلخواه اندازه گرفت:

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

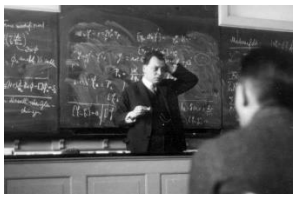
این محدودیت ناشی از ابزارهای اندازه‌گیری نیست، بلکه ویژگی خود طبیعت است. در همان سال، بور «اصل مکملیت» را مطرح کرد: موج و ذره دو چهره مکمل یک واقعیت‌اند که هرگز هم‌زمان در یک آزمایش ظاهر نمی‌شوند.


پل دیراک (۱۹۰۲–۱۹۸۴)

پل دیراک در سال ۱۹۲۸ مکانیک کوانتومی را با نسبیت خاص پیوند داد. معادله دیراک نه تنها اسپین الکترون را به‌طور طبیعی توضیح داد، بلکه وجود پادذره، ذره‌ای با بار مثبت و جرم برابر با الکترون، را پیش‌بینی کرد. چهار سال بعد، در ۱۹۳۲، کارل اندرسون پوزیترون را در پرتوهای کیهانی آشکار ساخت. این نخستین بار بود که یک معادله ریاضی وجود پادماده را پیش از مشاهده خبر می‌داد. امروز دستگاه‌های توموگرافی گسیل پوزیترون (PET)، که بر نابودی پوزیترون و الکترون استوارند، در ردیابی تومورها به کار می‌روند.

اصل طرد پائولی نیز در سال ۱۹۲۵ بیان شد: دو الکترون نمی‌توانند در یک حالت کوانتومی باشند. همین اصل ساده ساختار جدول تناوبی، پیوند شیمیایی و پایداری ماده را توضیح می‌دهد. به بیان دیگر، شیمی ریشه در مکانیک کوانتومی دارد.

## ۵. گفت‌وگوی بزرگ: اینشتین، بور و آزمون بل


ولفگانگ پائولی (۱۹۰۰–۱۹۵۸)

در اکتبر ۱۹۲۷، پنجمین کنفرانس سُلوی در بروکسل برگزار شد. از بیست‌ونه نفر حاضر در عکس معروف این کنفرانس، هفده نفر برنده جایزه نوبل بودند یا بعدها شدند. اما مهم‌تر از این عکس، گفت‌وگویی بود که آغاز شد و دهه‌ها ادامه یافت: گفت‌وگوی اینشتین و بور.

گفته شده است که اینشتین هر صبح سر صبحانه آزمایش ذهنی تازه‌ای طرح می‌کرد تا نشان دهد اصل عدم قطعیت را می‌توان دور زد، و بور هر شب، پس از ساعت‌ها اندیشه، پاسخ آن را می‌یافت. این گفت‌وگو نمونه‌ای درخشان از اخلاق علمی است: دو دانشمند بزرگ که سخت با هم مخالف بودند، اما احترام عمیقی برای یکدیگر قائل بودند.


پنجمین کنفرانس سُلوی، بروکسل، اکتبر ۱۹۲۷

اینشتین هرگز نگفت مکانیک کوانتومی نادرست است؛ او این نظریه را «ناقص» می‌دانست. در سال ۱۹۳۵، او همراه پودولسکی و روزن مقاله‌ای نوشت که به «پارادوکس EPR» شهرت یافت. استدلال آنان این بود: اگر دو ذره در گذشته با هم تنیده شده باشند، به حکم مکانیک کوانتومی اندازه‌گیری روی یکی، فوراً حالت دیگری را مشخص می‌کند، هر چند هم از همدیگر دور باشند. اینشتین این را «کنش شبح‌وار از راه دور» نامید و نتیجه گرفت که باید «متغیرهای پنهانی» وجود داشته باشد که نظریه از آن‌ها بی‌خبر است.

در همان سال، شرودینگر برای این پدیده نام «درهم‌تنیدگی» را برگزید و برای نشان دادن غرابت برهم‌نهی کوانتومی، آزمایش ذهنی گربه‌اش را مطرح کرد: گربه‌ای که تا جعبه گشوده نشود، گویی هم زنده است و هم مرده.

این بحث سال‌ها بیشتر فلسفی تلقی می‌شد. بیشتر فیزیک‌دانان به شعار «ساکت باش و حساب کن» بسنده کردند، زیرا نظریه کار می‌کرد و نتایجش شگفت‌انگیز بود. تا اینکه در سال ۱۹۶۴، جان استوارت بل، فیزیک‌دان ایرلندی شاغل در سرن، نشان داد که این پرسش فلسفی را می‌توان به داوری آزمایش سپرد.

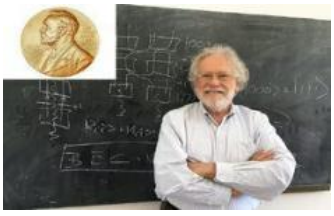

جان استوارت بل (۱۹۲۸–۱۹۹۰)

بل ثابت کرد که هر نظریه متغیر پنهان موضعی، یعنی همان نظریه‌ای که اینشتین در پی آن بود، باید در نامساوی معینی صدق کند، حال آنکه مکانیک کوانتومی پیش‌بینی می‌کرد ذرات درهم‌تنیده این نامساوی را نقض می‌کنند. بدین ترتیب داوری به طبیعت سپرده شد.

جان کلاوزر در دهه ۱۹۷۰، آلن اسپه در سال ۱۹۸۲ در فرانسه، و آنتون زایلینگر و همکارانش در دهه‌های بعد، این آزمایش‌ها را با دقتی روزافزون انجام دادند. نتیجه همواره یکسان بود: نامساوی بل نقض می‌شود، مکانیک کوانتومی درست است، و جهان در ژرف‌ترین سطح خود، به شکلی که اینشتین می‌پسندید، «موضعی و واقع‌گرا» نیست. در سال ۲۰۱۵ چند گروه آزمایش‌هایی «بی‌برو برگرد» انجام دادند، و در سال ۲۰۲۲ جایزه نوبل فیزیک به اسپه، کلاوزر و زایلینگر رسید.


جان کلاوزر (زاده ۱۹۴۲)


آلن اسپه (زاده ۱۹۴۷)


آنتون زایلینگر (زاده ۱۹۴۵)

نکته مهم این است که درهم‌تنیدگی، که روزی معمایی فلسفی بود، امروز به منبعی برای فناوری تبدیل شده است. همان «کنش شبح‌وار» اینشتین اکنون در رمزنگاری کوانتومی، رایانه‌های کوانتومی و حسگرهای فوق‌دقیق به کار می‌رود. این شاید

زیباترین درس تاریخ علم باشد: پرسش‌های بنیادینی که روزی بی‌فایده به نظر می‌رسند، فردا پایه فناوری‌های دگرگون‌کننده می‌شوند.

## ۶. کوانتوم، زبان مشترک علوم نوین

مکانیک کوانتومی پس از تثبیت، به‌سرعت از مرزهای فیزیک اتمی فراتر رفت و به زبان مشترک بسیاری از علوم دیگر بدل شد. در زیر شش به نمونه از این زبان مشترک اشاره می‌شود.

نخست، شیمی. لینوس پاولینگ در دهه ۱۹۳۰ با به‌کارگیری مکانیک کوانتومی ماهیت پیوند شیمیایی را توضیح داد. دیراک در سال ۱۹۲۹ نوشته بود که قوانین فیزیکی لازم برای بخش بزرگی از فیزیک و کل شیمی اکنون به‌طور کامل شناخته شده‌اند و دشواری تنها در حل معادلات است. امروز شیمی محاسباتی، به‌ویژه نظریه تابعی چگالی، در طراحی دارو، کاتالیزگر و مواد تازه نقشی اساسی دارد.

دوم، فیزیک حالت جامد. در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰، فلیکس بلوخ، آرنولد زومرفلد و دیگران نشان دادند که الکترون‌ها در بلور چه رفتاری دارند. «نظریه نواری» توضیح داد که چرا برخی مواد رسانا، برخی نارسانا و برخی نیم‌رسانا هستند. این بحث در آن زمان صرفاً نظری بود، اما چند سال بعد به اختراعی انجامید که جهان را دگرگون کرد.

سوم، فیزیک هسته‌ای. جرج گاموف در سال ۱۹۲۸ واپاشی آلفا را با «تونل‌زنی کوانتومی» توضیح داده بود: ذره‌ای که از نظر کلاسیک انرژی کافی برای عبور از یک سد ندارد، با احتمالی معین از آن عبور می‌کرد. همین پدیده درخشش خورشید را توضیح می‌دهد. دمای مرکزی خورشید به‌تنهایی برای غلبه بر دافعه الکتریکی پروتون‌ها کافی نیست و این تونل‌زنی کوانتومی است که همجوشی هسته‌ای را ممکن می‌کند. بنابراین نور و گرمای خورشید، و در نتیجه حیات بر زمین، وام‌دار مکانیک کوانتومی است.



لینوس پاولینگ (۱۹۰۱–۱۹۹۴)



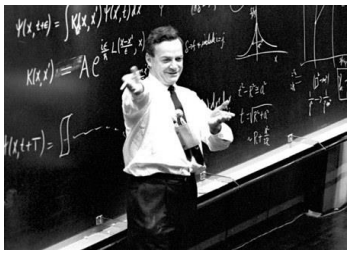
فلیکس بلوخ (۱۹۰۵–۱۹۸۳)



جرج گاموف (۱۹۰۴–۱۹۶۸)

چهارم، نظریه میدان‌های کوانتومی. در دهه ۱۹۴۰، فاینمن، شووینگر، توموناگا و دایسون الکترودینامیک کوانتومی را کامل کردند؛ نظریه‌ای که پیش‌بینی‌هایش، مانند گشتاور مغناطیسی الکترون، تا بیش از ده رقم اعشار با آزمایش مطابقت دارد. این دقیق‌ترین پیش‌بینی در تاریخ علم است. بر همین پایه «مدل استاندارد» ذرات بنیادی ساخته شد که با کشف بوزون هیگز در سرن در سال ۲۰۱۲ کامل شد.

پنجم، اخترفیزیک و کیهان‌شناسی. پایداری ستارگان کوتوله سفید، که سوبرامانیان چاندراسکار جرم حدی آن‌ها را به دست آورد، و پایداری ستارگان نوترونی حاصل فشار تبهگنی کوانتومی است؛ یعنی همان اصل طرد پائولی در مقیاس ستاره. کیهان‌شناسان امروز بر این باورند که ساختارهای بزرگ کیهان، از کهکشان‌ها تا خوشه‌ها، ریشه در افت‌وخیزهای کوانتومی کوچک در لحظات آغازین جهان دارند.



ریچارد فاینمن (۱۹۱۸–۱۹۸۸)



سوبرامانیان چاندراسکار (۱۹۱۰–۱۹۹۵)

ششم، زیست‌شناسی. شناخت ساختار مولکول‌های زیستی، از DNA تا پروتئین‌ها، بدون ابزارهای کوانتومی مانند پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی و تشدید مغناطیسی هسته ممکن نیست. پژوهش‌هایی نیز در حوزه «زیست‌شناسی کوانتومی» در جریان است که نقش اثرهای کوانتومی را در فتوسنتز، جهت‌یابی پرندگان و عملکرد آنزیم‌ها بررسی می‌کند.

به‌طور خلاصه، از کوچک‌ترین ذره تا بزرگ‌ترین ساختار کیهان، و از پیوند شیمیایی تا درخشش خورشید، مکانیک کوانتومی چارچوب اندیشه علمی امروز است.

## ۷. انقلاب کوانتومی نخست: فناوری‌هایی که جهان امروز را ساختند

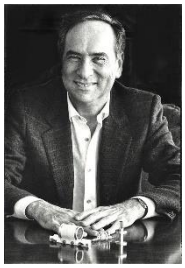
مکانیک کوانتومی چه نقشی در ساختن جهان امروز داشته است؟ پاسخ کوتاه این است: نقشی تقریباً فراگیر. فناوری‌هایی که از رفتار جمعی پدیده‌های کوانتومی بهره می‌برند، امروز «انقلاب کوانتومی نخست» نامیده می‌شوند.


جان باردین (۱۹۰۸–۱۹۹۱) و همکاران

**ترانزیستور و تراشه.** در دسامبر ۱۹۴۷، جان باردین، والتر براتین و ویلیام شاکلی در آزمایشگاه‌های بل نخستین ترانزیستور را ساختند. ترانزیستور بدون نظریه نواری و درک کوانتومی نیم‌رساناها قابل تصور نبود. از آن نخستین ترانزیستور به تراشه‌های امروزی رسیده‌ایم که ده‌ها میلیارد ترانزیستور با ابعادی در حد چند نانومتر را در خود جای می‌دهند. رایانه‌ها، اینترنت، گوشی‌های همراه و هوش مصنوعی همه بر این پایه استوارند. از همین رو گاه گفته می‌شود که انقلاب دیجیتال در حقیقت یک انقلاب کوانتومی بوده است.

**لیزر.** اینشتین در سال ۱۹۱۷ مفهوم «گسیل القایی» را مطرح کرد. چهار دهه بعد، در بهار ۱۹۶۰، تئودور مایمن نخستین لیزر را، که لیزری پالسی با بلور یاقوت بود، ساخت. چند ماه بعد، در دسامبر همان سال، علی جوان، فیزیک‌دان ایرانی‌تبار، همراه با ویلیام بنت و دونالد هریوت در آزمایشگاه‌های بل، لیزر هلیوم–نئون را ساخت؛ نخستین لیزر گازی و نخستین لیزری که پرتویی پیوسته گسیل می‌کرد. این نوع لیزر به سرعت در آزمایشگاه‌ها، بارکدخوان‌ها و ارتباطات نوری به کار رفت. در آن زمان لیزر را «راه‌حلی در جست‌وجوی مسئله» می‌نامیدند. امروز لیزر در جراحی چشم، برش صنعتی، چاپگرها، بارکدخوان‌ها و بیش از همه در ارتباطات نوری به کار می‌رود. بیشتر داده اینترنت جهان به صورت پالس‌های لیزری در فیبرهای نوری زیر اقیانوس‌ها جابه‌جا می‌شود.


علی جوان (۱۹۲۶–۲۰۱۶)


تئودور مایمن (۱۹۲۷–۲۰۰۷)

**تصویربرداری پزشکی.** تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) بر اسپین هسته‌ها، که مفهومی کاملاً کوانتومی است، استوار است. آهنرباهای قدرتمند این دستگاه‌ها نیز اغلب ابررسانا هستند، و ابررسانایی خود پدیده‌ای کوانتومی در مقیاس ماکروسکوپی است. توموگرافی گسیل پوزیترون، پرتونگاری و پرتودرمانی نیز همگی ریشه در فیزیک کوانتومی دارند.

**ساعت اتمی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی.** ساعت‌های اتمی بر گذارهای کوانتومی میان ترازهای انرژی اتم سزیم یا اتم‌های دیگر تکیه دارند و از سال ۱۹۶۷ تعریف ثانیه بر پایه همین گذار است. ماهواره‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ساعت‌های اتمی حمل می‌کنند، و دقت چندمتری مکان‌یابی به دقت این ساعت‌ها و نیز به اصلاحات نسبیتی وابسته است. بدین ترتیب، هر مسیریابی ساده در شهر هم بر کوانتوم تکیه دارد و هم بر نسبیت.

**انرژی و روشنایی.** سلول‌های خورشیدی بر اثر فوتوولتاییک، یعنی همان ایده ۱۹۰۵ اینشتین، استوارند. دیودهای نورگسیل (LED) که امروز بخش بزرگی از روشنایی جهان را تأمین می‌کنند و مصرف انرژی را به‌شدت کاهش داده‌اند، بر گذارهای

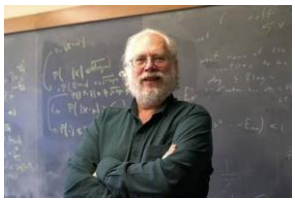
کوانتومی در نیم‌رساناها کار می‌کنند. جایزه نوبل ۲۰۱۴ برای ساخت LED آبی، که تولید LED سفید را ممکن کرد، اهدا شد. انرژی هسته‌ای نیز، چه در نیروگاه‌ها و چه در پزشکی هسته‌ای، از همین ریشه است.

**حافظه و ذخیره‌سازی.** «مقاومت مغناطیسی غول‌آسا»، پدیده‌ای کوانتومی که جایزه نوبل ۲۰۰۷ را برای آلبر فر و پتر گرونبرگ به ارمغان آورد، ساخت دیسک‌های سخت با ظرفیت بسیار بالا را ممکن کرد. حافظه‌های فلش در گوشی‌ها و رایانه‌ها نیز بر پایه تونل‌زنی کوانتومی الکترون‌ها کار می‌کنند.

سهم این فناوری‌ها در اقتصاد جهان را به‌دقت نمی‌توان سنجید. نورمن آگوستین، مدیر پیشین شرکت لاکهید، در سخنرانی‌ای در سال ۲۰۰۶ به شوخی و جدی گفت که حدود یک‌سوم تولید ناخالص داخلی به مکانیک کوانتومی نسبت داده می‌شود. این رقم برآوردی دقیق و مستند نیست و باید با احتیاط نقل شود؛ اما نگاهی به صنعت الکترونیک، ارتباطات، پزشکی و انرژی نشان می‌دهد که سهم کوانتوم در اقتصاد امروز بسیار بزرگ است.

## ۸. انقلاب کوانتومی دوم: مهار تک‌تک حالت‌های کوانتومی

انقلاب نخست بر رفتار جمعی میلیاردها الکترون و فوتون استوار بود. انقلاب دوم، که اکنون در جریان است، بر کنترل تک‌تک سامانه‌های کوانتومی و بهره‌گیری مستقیم از برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی تکیه دارد. همان پدیده‌هایی که روزی اینشتین و شرودینگر را آزار می‌داد، اکنون ابزار کار مهندسان شده است.


پیتر شور (زاده ۱۹۵۹)

**رایانش کوانتومی.** ریچارد فاینمن در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد کرد که برای شبیه‌سازی طبیعت کوانتومی به رایانه‌ای کوانتومی نیاز است. واحد اطلاعات در این رایانه‌ها «کیوبیت»، برهم‌نهی صفر و یک، است. در سال ۱۹۹۴، پیتر شور الگوریتمی ارائه کرد که نشان می‌داد یک رایانه کوانتومی بزرگ می‌تواند اعداد بزرگ را به‌طور نمایی سریع‌تر تجزیه کند؛ و این به معنای شکستن بخش بزرگی از رمزنگاری کنونی اینترنت است.

پیشرفت‌ها در سال‌های اخیر شتاب گرفته است. پردازنده‌های ابررسانا، یون‌های به‌دام‌افتاده، اتم‌های خنثی و فوتون‌ها هر کدام مسیری جداگانه را دنبال می‌کنند. مهم‌ترین گام اخیر در «تصحیح خطای کوانتومی» برداشته شده است، یعنی نشان دادن اینکه با افزودن کیوبیت‌های بیشتر می‌توان خطا را کاهش داد، نه افزایش. با این همه، رایانه‌ای کوانتومی که بتواند مسائل واقعی صنعتی را بهتر از رایانه‌های کلاسیک حل کند هنوز در راه است. نخستین کاربردها احتمالاً در شبیه‌سازی مولکول‌ها و مواد، طراحی دارو و کاتالیزگر، و بهینه‌سازی خواهد بود.

جایزه نوبل فیزیک ۲۰۲۵ به جان کلارک، میشل دووره و جان مارتینیس رسید، برای نشان دادن تونل‌زنی کوانتومی و کوانتش انرژی در مدارهای الکتریکی ماکروسکوپی. همین پژوهش‌های دهه ۱۹۸۰ پایه کیوبیت‌های ابررسانای امروز است، و بار دیگر نشان می‌دهد که پژوهش بنیادین امروز، فناوری فرداست.

**ارتباطات و رمزنگاری کوانتومی.** در سال ۱۹۸۴، چارلز بنت و ژیل براسار پروتکلی موسوم به BB۸۴ پیشنهاد کردند که امنیت آن نه بر دشواری محاسبات، بلکه بر قوانین فیزیک استوار است. اگر کسی کانال را شنود کند، به حکم مکانیک کوانتومی، ناگزیر حالت فوتون‌ها را برهم می‌زند و ردی بر جا می‌گذارد. ماهواره چینی میسیوس، که در سال ۲۰۱۶ به مدار رفت، در سال ۲۰۱۷ توزیع کلید کوانتومی را میان ایستگاه‌هایی با فاصله بیش از هزار کیلومتر نشان داد. هم‌زمان، از آنجا که رایانه‌های کوانتومی آینده رمزهای کنونی را تهدید می‌کنند، مؤسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا در سال ۲۰۲۴ نخستین استانداردهای «رمزنگاری پساکوانتومی» را منتشر کرد و جهان در حال گذار به آن‌هاست.

**حسگری و اندازه‌گیری کوانتومی.** این حوزه شاید نزدیک‌ترین کاربرد انقلاب دوم باشد. ساعت‌های اتمی نوری امروز چنان دقیق‌اند که در طول عمر جهان (حدود ۱۳٫۸ میلیارد سال) کمتر از یک ثانیه خطا خواهند داشت، و تفاوت گذر زمان بر اثر گرانش را در اختلاف ارتفاعی کمتر از یک متر حس می‌کنند. مغناطیس‌سنج‌های کوانتومی فعالیت مغز و قلب را با دقت بالا

می‌سنجند. گرانی‌سنج‌های اتمی می‌توانند منابع زیرزمینی و تغییرات آب‌های زیرزمینی را ردیابی کنند. آشکارسازهای موج گرانشی LIGO نیز از «نور فشرده» کوانتومی برای کاهش نوفه بهره می‌برند.

این حوزه از نظر اقتصادی نیز به‌سرعت رشد می‌کند. بر پایه پایش فناوری کوانتومی مؤسسه مک‌کنزی در سال ۲۰۲۶، ارزش اقتصادی رایانش کوانتومی تا سال ۲۰۳۵ بین ۱،۳ تا ۲،۷ تریلیون دلار برآورد می‌کند. کشورهای بسیاری، از آمریکا و چین تا اتحادیه اروپا، بریتانیا، ژاپن، هند و کره، برنامه‌های ملی کوانتومی با بودجه‌های چندمیلیارددلاری دارند. رقابت جهانی آغاز شده که برخی آن را با مسابقه فضایی قرن بیستم مقایسه می‌کنند.

## ۹. کوانتوم و جامعه انسانی: درس‌ها و چشم‌انداز

فراتر از فناوری، تاریخ مکانیک کوانتومی سه درس مهم برای جامعه انسانی دارد.

**درس نخست: ارزش پژوهش بنیادین.** هیچ‌یک از پایه‌گذاران مکانیک کوانتومی در پی ساختن گوشی همراه یا دستگاه MRI نبودند. پلانک می‌خواست طیف یک جسم گرم را بفهمد، هایزنبرگ می‌خواست بداند درون اتم چه می‌گذرد، بل می‌خواست بداند حق با اینشتین است یا با بور. اما از همین کنجکاوی‌های به ظاهر بی‌فایده، فناوری‌هایی برخاست که زندگی میلیاردها انسان را دگرگون کرد. فاصله میان کشف بنیادین و کاربرد گسترده گاه چند دهه است: از گسیل القایی اینشتین تا لیزر چهل‌وسه سال، و از اسپین هسته تا MRI نزدیک به نیم سده. جامعه‌ای که تنها به نتایج فوری بیندیشد، این بذرها را هرگز نمی‌کارد. سرمایه‌گذاری در علوم پایه، سرمایه‌گذاری در آینده نسل‌های بعدی است.

**درس دوم: فروتنی در برابر طبیعت.** مکانیک کوانتومی نشان داد که شهود روزمره راهنمای کاملی برای شناخت جهان نیست. طبیعت در ژرف‌ترین سطح خود احتمالاتی و درهم‌تنیده است، و بسیار شگفت‌انگیزتر از تصویر ساده‌ای است که از ذرات کوچک و توپ‌مانند داشتیم. فاینمن گفته بود که با اطمینان می‌تواند بگوید هیچ‌کس مکانیک کوانتومی را نمی‌فهمد. این سخن نه نشانه ناامیدی، بلکه دعوتی به کنجکاوی همیشگی است. پرسش‌های بزرگی همچنان باز است: مسئله اندازه‌گیری، تفسیر درست نظریه، و پیوند مکانیک کوانتومی با گرانش که شاید بزرگ‌ترین مسئله حل‌نشده فیزیک بنیادی باشد.

**درس سوم: علم کاری جمعی و جهانی است.** مکانیک کوانتومی را یک نفر نساخت. دانشمندانی از آلمان، دانمارک، اتریش، انگلستان، فرانسه، هند، آمریکا و بسیاری کشورهای دیگر در آن سهم داشتند. مؤسسه بور در کپنهاگ میزبان پژوهشگرانی از سراسر جهان بود. امروز نیز پژوهشگران ایرانی در فیزیک کوانتومی، اطلاعات کوانتومی و فیزیک ماده چگال سهمی ارزشمند در کشور و در جامعه علمی جهانی دارند. آینده از آنِ جوامعی است که بتوانند دانش را بدون مرز بپرورانند.

در کنار این فرصت‌ها، چالش‌هایی نیز وجود دارد. همان‌گونه که دانش هسته‌ای هم نیروگاه و پزشکی هسته‌ای را به ارمغان آورد و هم سلاح ویرانگر را، فناوری‌های کوانتومی نیز پرسش‌های اخلاقی و اجتماعی تازه‌ای پیش می‌کشند: امنیت ارتباطات و حریم خصوصی، شکاف فناوری میان کشورها، و نیاز به آموزش نیروی انسانی متخصص. نقش دانشگاه‌ها و پژوهشگران در این میان بسیار مهم است.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

تاریخ مکانیک کوانتومی با «اقدامی از سر ناامیدی» در سال ۱۹۰۰ آغاز شد: پلانک فرض کرد که انرژی گسسته است، تنها برای اینکه فرمولش با داده‌ها سازگار شود. در ادامه، اینشتین نشان داد که نور رفتار ذره‌ای دارد، بور اتم را پایدار کرد، دوبروی ماده را موج دید، و در سه سال طلایی ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۷، هایزنبرگ، شرودینگر، بورن و دیراک بنای کامل نظریه را برافراشتند.

این نظریه سپس شیمی، اخترفیزیک و زیست‌شناسی را دگرگون کرد. ترانزیستور، لیزر، GPS، MRI و LED را پدید آورد، و انقلاب دیجیتال را ممکن کرد. اکنون، صد سال پس از پیدایش مکانیک کوانتومی، رایانش، ارتباطات و حسگری کوانتومی، آغاز انقلاب دیگری را نوید می‌دهند.

می‌توان گفت هیچ نظریه علمی در تاریخ بشر به اندازه مکانیک کوانتومی، فهم ما از جهان را ژرف‌تر نکرده است و توانایی ما را برای دگرگون کردن آن گسترش نداده است. این نظریه شگفت‌انگیزترین و سودمندترین آفریده ذهن بشر در یک سده گذشته است. داستان هنوز پایان نیافته و فصل‌های بعدی آن را نسل‌های تازه پژوهشگران خواهند نوشت.

## سپاسگزاری

از سارا بازرگان برای تنظیم و ترتیب این مقاله و گردآوری تصاویر آن سپاسگزارم. در گردآوری اطلاعات تاریخی از دستیار هوش مصنوعی (claude.ai) Claude کمک گرفته شده است.

## منابع

1. Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553–563.
2. Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132–148.
3. Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, 21, 669–688.
4. Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 26, 1–25.
5. Einstein, A. (1917). Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121–128.
6. de Broglie, L. (1925). Recherches sur la théorie des quanta. *Annales de Physique*, 10(3), 22–128.
7. Pauli, W. (1925). Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren. *Zeitschrift für Physik*, 31, 765–783.
8. Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33, 879–893.
9. Born, M., & Jordan, P. (1925). Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 34, 858–888.
10. Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*, 79, 361–376.
11. Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37, 863–867.
12. Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172–198.
13. Dirac, P. A. M. (1928). The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society A*, 117, 610–624.
14. Gamow, G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkernes. *Zeitschrift für Physik*, 51, 204–212.
15. Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777–780.
16. Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23, 807–812.
17. Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74, 230–231.
18. Maiman, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187, 493–494.
19. Javan, A., Bennett, W. R., & Herriott, D. R. (1961). Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6, 106–110.
20. Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1, 195–200.
21. Freedman, S. J., & Clauser, J. F. (1972). Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 28, 938–941.
22. Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21, 467–488.
23. Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49, 1804–1807.

24. Bennett, C. H., & Brassard, G. (1984). Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, Bangalore, 175–179.
25. Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 124–134.
26. Hensen, B., et al. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526, 682–686.
27. Liao, S.-K., et al. (2017). Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature*, 549, 43–47.
28. The Nobel Prize in Physics 2022: Press release. nobelprize.org
29. The Nobel Prize in Physics 2025: Press release. nobelprize.org
30. NIST (2024). NIST releases first 3 finalized post-quantum encryption standards. nist.gov
31. McKinsey & Company (2026). McKinsey Quantum Technology Monitor 2026: A commercial tipping point. mckinsey.com
32. UNESCO (2025). International Year of Quantum Science and Technology. quantum2025.org