



دومین انقلاب کوانتومی

دومین انقلاب کوانتومی

از درهم تنیدگی تا محاسبات کوانتومی
و دیگر فوق-تکنولوژی‌ها

لارس یانگر

ترجمه‌ی

فواد قاسمی (عضو هیئت علمی دانشگاه کردستان)

و

سوران زورآسنا

زمت‌آلات ماریار

سرشناسه	: لارس یانگر Jaeger, Lars
عنوان و نام پدیدآور	: دومین انقلاب کوانتومی: از درهم تنیدگی تا محاسبات کوانتومی و دیگر فوق-تکنولوژی‌ها/ لارس یانگر؛ ترجمه ی فواد قاسمی، سوران زوراسنا؛ ویراستار م.ک.
مشخصات نشر	: تهران: مازیار، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	: ۳۶۸ ص: ۲۱/۵ × ۱۴/۵ س.م.
فروست	: قلمرو علم
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۶۱-۱۸-۵
وضعیت فهرست‌نویسی: فیبا	
یادداشت	: عنوان اصلی: The Second Quantum Revolution : From Entanglement to Quantum Computing and Other Super-Technologies, 2018
یادداشت	: کتابنامه: ص. [۲۶۸ - ۲۶۵].
عنوان دیگر	: از درهم تنیدگی تا محاسبات کوانتومی و دیگر فوق-تکنولوژی‌ها.
موضوع	: کوانتوم
موضوع	: Quantum theory
موضوع	: کامپیوترهای کوانتومی
موضوع	: Quantum computers
موضوع	: اسپینترونیک
موضوع	: Spintronics
موضوع	: فیزیک
موضوع	: Physics
شناسه افزوده	: قاسمی، فواد، ۱۳۶۶- مترجم
شناسه افزوده	: زوراسنا، سوران، ۱۳۶۹- مترجم
رده‌بندی کنگره	: QC1۷۴/۱۲
رده‌بندی دیویی	: ۵۳۰/۱۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۷۸۹۴۸۵۵

www.mazyarpub.ir
mazyarpub@yahoo.com

انتشارات مازیار

نیت علامت تجاری: ۳۵۲۴۲۴

مقابل دانشگاه تهران، ساختمان ۱۲۹۶ (ظروفچی) طبقه اول، واحد ۴، تلفن ۶۶۴۶۲۴۲۱

دومین انقلاب کوانتومی
از درهم تنیدگی تا محاسبات کوانتومی و دیگر فوق-تکنولوژی‌ها

لارس یانگر

ترجمه‌ی فواد قاسمی - سوران زوراسنا

صفحه‌آرایی مروا ک.

ویراستار م. ک.

چاپ اول ۱۴۰۰

شمارگان ۱۲۰۰

لیتوگرافی، چاپ و صحافی طیف‌نگار

شابک ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۶۱-۱۸-۵

فهرست مطالب

- شرح نویسنده بر ترجمه‌ی فارسی ۷
پیشگفتار: سرآغاز: خرگوش سفید ۹

بخش اول: کوانتوم 2.0 - دومین انقلاب تکنولوژی ناشی از جهان کوانتومی

۱. قدرت بزرگ: چگونه نظریه‌ی جهان کوچک جهان ما را تغییر داد ۱۵
۲. اتاق‌های زیادی در پایین وجود دارد: نسل جدیدی از
تکنولوژی کوانتومی ۲۸
۳. فناوری در کوچکترین مقیاس: قابلیت‌های فناوری نانو ۴۱
۴. سرعتی باورنکردنی: از کامپیوتر دیجیتال به کامپیوتر کوانتومی ۵۴

بخش دوم: دنیای کوانتوم - عجایب در مقیاس خیلی کوچک

۵. اتم‌های متناقض: مسائل فلسفی مربوط به کوچکترین
واحدهای سازنده‌ی طبیعت ۷۳
۶. طبیعت باعث جهش می‌شود: جهش‌های کوانتومی و
خلق ذرات از هیچ ۸۳
۷. انتخاب سوم: موج و ذره به صورت همزمان ۹۴
۸. نه این و نه آن: برهم‌نهی - اشیاء چگونه می‌توانند همزمان
در اینجا و آن‌جا باشند ۱۰۵
۹. فقدان هویت: مفهوم واقعیت جدید از دیدگاه مکانیک
کوانتومی و پیامدهای آن ۱۱۶

بخش سوم: از نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی به نظریه‌ی همه‌چیز - حال بنیادی همه‌چیز

۱۰. انرژی‌های منفی و اسپین الکترون: نظریه‌ی کوانتومی جدید
محصول ترکیب با نظریه‌ی نسبیت ۱۳۵
۱۱. نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی: همه‌چیز حل می‌شود ۱۴۵
۱۲. بی‌نهایت منهای بی‌نهایت، به متناهی ختم می‌شود: دانشمندان چگونه یاد
گرفتند که با مقادیر بی‌نهایت بزرگ در دنیای بی‌نهایت کوچک کار کنند ... ۱۶۰

۱۳. ذرات بیشتر و بیشتر: از باغ وحش ذرات تا مدل استاندارد فیزیک

ذرات بنیادین ۱۷۰

۱۴. اینشتین سازگار نیست: مسئله‌ی اساسی فیزیک امروزی ۱۸۴

بخش چهارم: گذری به چارچوب‌های فلسفی، زیبایی‌شناختی و معنوی تفکر

۱۵. مسیری به سمت بی‌جوهره‌گی: شکست ۲۶۰۰ سال تفکر فلسفی ۲۰۳

۱۶. درک تازه‌ای از حقیقت: چگونه فیزیک کوانتومی واقعیت مطلق

و همراه با آن حقیقت مطلق را از میان برد ۲۱۲

۱۷. فعل و انفعالاتی ابدی: همپوشانی عجیب بین فیزیک

کوانتومی و بودیسم ۲۲۵

۱۸. تقارن: زیبایی در خانه‌ی فیزیک ۲۳۶

۱۹. آگاهی کوانتومی و تائوی فیزیک: درباره‌ی هولیسم کوانتومی،

شفابخشی کوانتومی و دیگر غیرحسیات کوانتومی ۲۵۱

۲۰. فیزیک کوانتومی و ایمان: بیانی غیرقابل بیان ۲۶۲

بخش پنجم: درهم‌تنیدگی - رسیدن به معمای ماده

۲۱. سرنوشت‌های گربه: مسئله‌ی اندازه‌گیری در فیزیک کوانتومی ۲۷۵

۲۲. دوست و یگنر: فیزیک کوانتومی و آگاهی ۲۸۵

۲۳. EPR و متغیرهای پنهان: بحث درباره‌ی کنش شبح‌وار از راه دور ۲۹۶

۲۴. نتیجه‌ی تجربی بحث بور-اینشتین: چگونه ذرات درهم‌تنیده

راه‌شان را از نظریه به عمل باز می‌کنند ۳۰۴

۲۵. عصر درهم‌تنیدگی: از اشباح تا انقلاب جدید کوانتومی ۳۲۱

۲۶. گربه‌ی شرودینگر زنده است: بازگشتی به فیزیک کلاسیک ۳۳۴

بخش ششم: آینده - به کجا می‌رویم؟

۲۷. دومین انقلاب کوانتومی: وقتی نانوبوت‌ها و کامپیوترهای کوانتومی

جزئی از زندگی روزمره‌ی ما می‌شوند ۳۴۹

منابع ۳۶۴

نمایه ۳۶۵

شرح نویسنده بر ترجمه‌ی فارسی

بسیار خوشحال هستم که کتاب «دومین انقلاب کوانتومی» به زبان فارسی یعنی به زبان فیزیکدان بزرگ ایرانی «حسن ابن هیثم» و ریاضیدان بزرگ «محمد بن موسی خوارزمی»، دو پدر بزرگ علوم و ریاضیات مدرن ترجمه شده است. ۹۰۰ سالی که بین ابن هیثم و فیزیک کوانتومی وجود دارد از مهیج‌ترین دوران‌های پیشرفت علوم مدرن است که یکی از ریشه‌های آن را می‌توان در جهان عربی-ایرانی یافت، قبل از آنکه در غرب به اوج خود برسد. از این رو برای من بسی افتخار است که افکار و اندیشه‌های خود را جمع به فیزیک کوانتومی را با خواننده‌ی فارسی‌زبان به اشتراک بگذارم.

با احترام لارس یانگر

پر، سوئیس، نوامبر ۲۰۲۰

سرآغاز:

خرگوش سفید

در منظومه‌ی زندگی بین کهکشانی داگلاس آدام، راهنمای هیچهایکر برای کهکشان^۱، در ابتدای کتاب دوم می‌خوانید:

نظریه‌ای وجود دارد که می‌گوید اگر هر کسی بفهمد که جهان هستی دقیقاً برای چه کاری است و چرا در اینجا وجود دارد، فوراً ناپدید می‌شود و چیزهای شگفت‌انگیز و غیر قابل توضیح دیگری جایگزین آن می‌شود. نظریه‌ی دیگری وجود دارد که می‌گوید این رخداد قبلاً افتاده است.

به سختی می‌توان توصیف مناسبی برای فیزیک قرن بیستم بیان کرد. در حدود سال ۱۹۰۰، مفاهیم فیزیکی مانند میدان‌ها و امواج، نیروی نامرئی گرانش و آنتروپی از قبل کاملاً عجیب و غریب بوده و درک آن برای اکثر شنوندگان دشوار. همه‌ی این پدیده‌ها قابل مشاهده یا لمس نبودند، اما قابل محاسبه و قابل پیش‌بینی بودند و بازتابی از آنچه که مردم در زندگی روزمره‌ی خود تجربه می‌کردند. علیرغم انتزاعی بودن، آن‌ها در مقایسه با ساختارهای ذهنی‌ای که فیزیکدانان برای درک ماهیت جهان اتمی (و همچنین وسعت جهان هستی) مجبور به ایجاد آن‌ها داشتند، کاملاً واقعی بودند.

پیروزی کاملاً عجیب با این مشاهده آغاز شد که در سطح اتمی، اتم‌ها نمی‌توانند هر مقدار مشخصی انرژی داشته باشند. به عنوان مثال، فرض شد که انرژی تابیده از اجسام مشخص فقط مقادیر ثابت و گسسته‌ای را به خود می‌گیرند. به عبارت دیگر این انرژی در بسته‌هایی بودند که فیزیکدانان آن‌ها را کوانتا (Quanta) (از کلمه لاتین Quantum به معنای مقدار گرفته شده است) می‌نامیدند. اگر قوانین دنیای میکرو در دنیای «ما» نیز معتبر باشند، آن وقت هر شخص فقط می‌تواند دمای اتاقش را روی

1. *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*

۱۰، ۲۰ یا ۳۰ درجه سانتی گراد تنظیم کند در حالی که مقادیر بین آن‌ها دیگر وجود نخواهند داشت. اندکی بعد، فیزیکدانان دریافتند که نور ماهیتی دوگانه دارد: گاهی اوقات موج است، در حالی که در زمانی دیگر ممکن است ذره باشد. همان چیزی که اندکی بعد در مورد الکترون مشاهده شد. اما چگونه یک ذره‌ی موضعی شده‌ی فضایی (Spatially Localized Particle) همزمان می‌تواند موج فضایی گسترش یافته^۱ (غیر موضعی)^۲ نیز باشد؟ در دنیای علوم کلاسیک، سفید همیشه سفید است و سیاه دقیقاً سیاه است، این «دوگانگی موج-ذره» تحریکی بیدادگرانه به نظر می‌رسید.

با پایان قرن نوزدهم، فیزیکدانان تازه به این ایده عادت کرده بودند که نظریه‌های آن‌ها به زودی به درک کاملی از تمام چیزهای موجود در جهان نائل خواهد آمد. ناگهان مدتی بعد مجبور شدند با حقایق فیزیکی ۲۵۰ ساله و قطعیت‌های فلسفی بیش از ۲۵۰۰ ساله خداحافظی کنند. آن‌ها مجبور بودند با شرایط به ظاهر غیرممکن، بیشتر و بیشتر کنار بیایند. اشیای کوانتومی می‌توانند همزمان در چندین حالت به عنوان مثال می‌توانند همزمان در چندین مکان باشند. مورد دیگر اینکه اشیای کوانتومی حتی فاقد ویژگی‌های تعریف شده عینی (Objectively Defined Properties) نیز هستند: ویژگی‌های آن‌ها فقط با احتمال مشخص می‌شود، نتایج اندازه‌گیری‌ها به ناظر بستگی دارد و حالت‌های کوانتومی آن‌ها (توابع موج) به راحتی از بین می‌روند. سرانجام عجیب‌ترین پدیده‌ی کوانتومی نمایان می‌شود: درهم‌تنیدگی ذرات مجزای فضایی. حتی زمانی که دو ذره از هم دور باشند، آن‌ها را می‌توان به گونه‌ای به هم جفت کرد که گویی جادویی در بین آن‌ها وجود دارد. نکته‌ی نهایی این است که ماهیت و ویژگی‌های اشیای کوانتومی کاملاً انتزاعی می‌باشند و دیگر نمی‌توانند با نحوه‌ی درک و تفکر ما در مورد مسائل زندگی روزمره سازگار باشند. با این وجود، علی‌رغم همه‌ی این موارد غیرقابل استدلال، نظریه‌های کوانتومی امروزی نتیجه‌ی آزمایش‌ها و پدیده‌های طبیعی را با دقتی که هیچ نظریه‌ی دیگری در علم ندارد، پیش‌بینی می‌کند. در اینجا جلوه‌ای دیگر از مخالفت با شهود معمولی وجود دارد که با تجربه‌ی روزمره مغایرت دارد: چیزی که نامعین و گریزان (Indefinite and Elusive) است، با این وجود فرآیندی است که می‌توان آن را با دقت ۱۰۰ درصدی محاسبه نمود.

فیزیک کوانتومی کاملاً احمقانه به نظر می‌رسد. نه می‌توانیم بفهمیم که دقیقاً چه اتفاقی می‌افتد و یا اینکه چرا اتفاق می‌افتد، اما می‌توانیم آن را دقیقاً محاسبه کنیم.

از آن‌جا که می‌توانیم دقیقاً آنچه که در سطح اتمی در جریان است را محاسبه کنیم، بنابراین می‌توانیم کنترل روزافزون و بیشتری بر عالم میکرو داشته باشیم. کاربردهای فیزیک کوانتومی مدت‌هاست که تبدیل به جزئی از زندگی ما شده است. الکترونیک، فناوری‌های دیجیتال، لیزر، تلفن‌های همراه، ماهواره‌ها، تلویزیون‌ها، رادیو، فناوری هسته‌ای، شیمی مدرن، تشخیص پزشکی — همه‌ی این فناوری‌ها براساس فیزیک کوانتومی می‌باشند. ما به فناوری‌های کوانتومی متکی هستیم، حتی اگر نظریه‌ی زیربنایی آن‌ها جهانی را توصیف کند که — از لحاظ تصور رایج ما — دارای ویژگی‌های نامشخص، ناپایدار و ظاهراً متناقض باشند.

تنها در سال‌های اخیر فیزیکدانان متوجه شده‌اند که فیزیک کوانتومی می‌تواند تأمین قابل توجهی از توانایی‌های تکنولوژیکی هنوز بهره‌بردار نشده را تضمین کند. راینر بلات (Rainer Blatt)، فیزیکدان مشهور کوانتومی، «قرن فناوری کوانتومی» دیگری را برای قرن بیست و یکم پیش‌بینی کرده است که برای تغییر بنیادین اقتصادی و اجتماعی کافی می‌باشد. بلات معتقد است که ما فقط در آغاز درک توانایی‌های ناشی از این انقلاب هستیم.

بسیاری از تکنولوژی‌هایی که استفاده می‌شوند، مدت زمان زیادی از لحاظ نظری کاملاً درک نشده بودند و بعضی از آن‌ها هنوز هم کاملاً درک نشده‌اند. فیزیکدانان کوانتومی امروزی مانند جادوگران روی صحنه هستند که خرگوش‌های سفید را هر روز با نهایت راحتی از کلاه بیرون می‌آورند. اما آن‌ها از چگونگی ورود این خرگوش‌ها به داخل کلاه همچون تماشاکنندگان درک چندانی ندارند.

می‌خواهم شما را به دنیای کاملاً دیوانه‌وار، افسانه‌ای و باورنکردنی کوانتوم ببرم. در این سفر، ابتدا به دنیای فناوری‌های کوانتومی که امروزه در حال شکل‌دهی دنیای ما هستند، نگاهی خواهیم انداخت. پس از آن خواهیم فهمید که در آغاز یک پیشرفت مهیج دیگر هستیم. در بخش‌های دوم و سوم کتاب،

نگاهی دقیق‌تر به کشف‌های عجیب در جهان کوانتومی می‌اندازیم. همان‌طور که در بخش چهارم توضیح داده خواهد شد، این کشف‌های عجیب در شکل‌گیری اندیشه‌ی فلسفی، معنوی و مذهبی قرن بیستم به شدت تأثیرگذار بوده‌اند. بخش پنجم ما را به هسته‌ی اصلی جهان کوانتومی می‌برد، که شالوده‌ی چندین فناوری جالب در آینده است و فیزیکدانان فقط در چند سال گذشته توانسته‌اند در آن تصرفی داشته باشند: پدیده‌ی درهم‌تنیدگی. در این بخش، همان‌طور که خواهید دید، برای چالش‌برانگیزترین تناقضاتی که بنیانگذاران فیزیک کوانتومی برای حل آن‌ها تلاش می‌کردند، راه‌حلی پیدا می‌کنیم. با این حال، با سوالات جدید و تناقضاتی آشکار روبرو خواهیم شد. در فصل آخر، ما چندین پیشنهاد را ارائه خواهیم داد که چگونه فناوری‌های جدید کوانتومی می‌توانند آینده‌ی ما را شکل دهند.

افراد زیادی این متن را خوانده و پیشنهادهای ارزشمندی برای بهبود آن ارائه داده‌اند. پیش از هر چیز، می‌خواهم از بتینا بورچارد تشکر کنم که بدون او چاپ این کتاب در نسخه‌ی آلمانی‌اش امکان‌پذیر نبود. او ساعت‌های زیادی را وقف خواندن متن و مطالب آن کرده و این کتاب را به شکل کنونی آن درآورده است. به علاوه، مایکل تن برینک سهم قابل‌توجهی در چاپ نهایی این کتاب داشته است. من از همکاری وی در زمینه‌ی مسائل فنی بسیار قدردانی کردم. پس از آن، می‌خواهم از شریک زندگی‌ام یوکا ناکامورا برای حمایت‌های عاطفی‌اش طی هفته‌های زیادی که مشغول نوشتن و ترجمه‌ی این کتاب بودم، تشکر کنم. همچنین می‌خواهم از فرانک ویگر برای مدیریت عالی و حمایتش در طول مدت تکمیل این کتاب تشکر کنم. از وکیل، بیت ریس و همکارش جرمان نئونورفر، به خاطر حمایت و تشویق‌شان تشکر می‌کنم. با وجود همه‌ی این کمک‌ها، به نظر می‌رسد وجود اشتباهات و کاستی‌ها اجتناب‌ناپذیر است. من از خواننده عذرخواهی می‌کنم و البته مسئولیت کامل آن را به عهده می‌گیرم.

اکنون، پرده‌ها بالا می‌روند!

بخش اول

کوانتوم 2.0 — دومین انقلاب تکنولوژی
ناشی از جهان کوانتومی

قدرت بزرگ: چگونه نظریه‌ی جهان کوچک جهان ما را تغییر داد

همه‌ی آن با سه مسئله آغاز شد:

۱. در ۱۹۰۰ ماکس پلانک خود را در توضیح انرژی تابشی آنچه او اجسام سیاه نامیده بود، ناتوان دید. این انرژی کمیته‌ی اختیاری نیست، بلکه به صورت «بسته‌های انرژی» و در اندازه‌های معینی وجود دارد.

۲. در ۱۹۰۵ آلبرت اینشتین نتیجه گرفت که نور هم موج است و هم ذره.

۳. در ۱۹۱۲ ارنست رادرفورد در آزمایشی عجیب کشف کرد که اتم شامل هسته‌ای از پروتون‌ها به همراه الکترون‌های در حال چرخش به دور آن می‌باشد، هرچند مطابق قوانین فیزیک کلاسیک این امکان‌پذیر نبود.

فیزیکدانان با داشتن این سه پدیده در کوله‌پشتی‌های‌شان، یکی از هیجان‌انگیزترین سفرهای فکری در تاریخ بشریت را آغاز کردند. در ۳۰ سال ابتدایی قرن بیستم همانند ملوانان قرن پانزدهم و شانزدهم از سواحل امن فیزیک کلاسیک شروع کردند و لذا به اقیانوسی کشف نشده وارد شدند تا مشتاقانه آنچه در طرف دیگر بود را بیابند.

فیزیکدانان در ابتدای قرن بیستم، کشف کردند که قوانین فیزیک کلاسیک همیشه قابل کاربرد نمی‌باشند.

آزمایش‌های آن‌ها بیشتر و بیشتر آشکار ساخت که تعدادی از ویژگی‌های اساسی جهان اتمی را نمی‌توان یا با مشاهدات روزمره و یا با نظام فکری فلسفه غرب تطبیق داد:

• برهم‌نهی:

موجودات کوانتومی به‌طور همزمان می‌توانند در ترکیبی از حالات مختلفی قرار گیرند که در جهان کلاسیک متقابلاً منحصر به فردند. برای مثال، آن‌ها

می‌توانند همزمان در مسیرهای مختلف حرکت کنند، یعنی می‌توانند همزمان در مکان‌های مختلفی باشند.

• **رفتار تصادفی:**

ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری یک سیستم کوانتومی و تحول زمانی آن را نمی‌توان به‌طور مطلق تعیین کرد. با امکان بودن در دو مکان به‌صورت همزمان، ویژگی‌های قابل مشاهده آن را فقط می‌توان به‌صورت احتمالاتی مشخص نمود.

• **وابستگی یک حالت کوانتومی به اندازه‌گیری:**

در جهان کوچک، اندازه‌گیری‌ها تأثیری مستقیم بر شیء اندازه‌گیری شده دارند. حتی عجیب‌تر از آن این حقیقت است که مشاهده فقط یک حالت تعریف شده را به یک ذره کوانتومی اختصاص می‌دهد. در اصل، این بدان معناست که ذرات کوانتومی هیچ ویژگی مستقل و عینی ندارند. هر ویژگی‌ای که دارند به واسطه‌ی ناظر خارجی به دست آمده است.

• **درهم‌تنیدگی:**

ذرات کوانتومی ممکن است به‌صورت غیرموضعی با هم در ارتباط باشند. حتی اگر آن‌ها از لحاظ مکانی از یکدیگر دور باشند، باز هم به یک وجود فیزیکی مشترک تعلق دارند (فیزیکدانان آن را «تابع موج» واحد می‌نامند). بنابراین انگار توسط تعدادی نیروی جادویی به یکدیگر جفت شده‌اند.

هر یک از ویژگی‌های بالا یکی از چهار اصل فلسفه سنتی را نقض می‌کند:

۱. اصل یکتایی^۱، که مطابق آن اشیاء در حالت‌های قابل تعریفی می‌باشند (صندلی در جلوی پنجره است و در کنار درب نمی‌باشد)؛

۲. اصل علیت^۲، که مطابق آن هر اثری (معلولی) باید علتی داشته باشد (اگر صندلی بیفتد، باید نیرویی بر آن وارد شده باشد)؛

۳. اصل عینیت^۳ (مربوط به اصل واقعیت^۴)، که مطابق آن اشیاء، وجودی عینی

1. The principle of uniqueness
3. The principle of objectivity

2. The principle of causality
4. The principle of reality

مستقل از فهم ذهنی ما دارند (زمانی که اتاق را ترک می‌کنیم، صدلی دقیقاً در جایی که ایستاده است باقی می‌ماند و حتی هنگامی که دیگر به آن نگاه نمی‌کنیم هنوز هم آن‌جاست)؛

۴. اصل استقلال، که مطابق آن اشیاء به صورت جداگانه و مستقل از یکدیگر رفتار می‌کنند (صدلی تحت تأثیر صدلی‌ای که در اتاق مجاور قرار دارد نمی‌باشد).

برای بیش از ۲۵۰۰ سال، فلاسفه با سوالات وجودی بشریت دست به گریبان شده‌اند. دموکریتوس متعجب بود که آیا ماده می‌تواند بی‌نهایت بار به اجزای کوچک و کوچک‌تری تقسیم شود و به این نتیجه رسید که باید ذرات ریز غیرقابل تجزیه‌ای به نام اتم‌ها وجود داشته باشند. پارمنیدس (Parmenides) در جستجوی ماده نهایی و بدون تغییر بود. ارسطو و افلاطون علاقه‌مند بودند که چگونه ما به عنوان مشاهده‌گر با آنچه مشاهده می‌شود ارتباط داریم. پس از آن صدها نسل از فلاسفه‌ای که به دنبال توضیحاتی منطقی و مطلوبی از جهان بودند، این راه را ادامه دادند. اما پس از آن، در اوایل قرن بیستم آشکار شد که بسیاری از اصول فلسفی که از طریق تفکری خستگی‌ناپذیر و دقیق به دست آمده‌اند، فقط در بخشی از جهان کاربرد دارند.

تعدادی از ویژگی‌های اتم‌ها و مواد سازنده آن‌ها کاملاً با جهان روزمره‌ی ما متفاوتند. در آن‌جا قوانین فیزیک کلاسیک دیگر کار نمی‌کنند، حتی اصول فلسفی نیز اعتبار خود را از دست می‌دهند.

فیزیکدانان کوانتومی – از جادوگران تا مهندسان

درحالی‌که پدیده‌ها و ویژگی‌های جهان کوچک در ابتدا برای فیزیکدانان شبیه جادو به نظر می‌رسید، به کمک ابزارها و ترفندهای ریاضی به مرور زمان یاد گرفتند که محاسبات را دقیق و دقیق‌تر انجام دهند و با وجود اینکه هنوز به طور کامل آن را درک نکرده‌اند نهایتاً این جهان جادویی را رام کنند. سفر فکری‌شان آن‌ها را به سمت نظریه‌ی کوانتومی سوق داد که با اصول و مفاهیمی کاملاً جدید

پدیده‌های مشاهده شده در جهان کوچک را توضیح می‌دهد. بر پایه‌ی این اصول نظری، فیزیکدانان مدت زیادی جادوگر نماندند، بلکه به زمره دانشمندان بازگشتند — و پس از آن مهندسان، بر مبنای این نظریه‌ی جدید بسیاری از تکنولوژی‌های شگفت‌انگیز و گاه وحشتناک را ممکن ساختند. اولین مورد زمانی رخ داد که فیزیکدانان، مدل‌های فیزیک کوانتومی خود را برای هسته‌ی اتم به کار بردند. آن‌ها فهمیدند که در هسته اتم مقدار عظیمی انرژی پنهان وجود دارد. در سال‌هایی که جهان در هرج و مرج دو جنگ جهانی به سر می‌برد و تمام شهرها قربانی بمباران طرف‌های جنگ می‌شدند، فیزیکدانان مجبور بودند با فروپاشی روش‌های سنتی تفکر خود کنار بیایند. از دل این نظریه‌ی جدید عجیب و غریب، فناوری‌ای ظهور کرد که می‌تواند نه تنها چند خیابان، بلکه کل شهرها را نیز در یک لحظه از بین ببرد. حتی وقتی فیزیکدانان — دور از چشم عموم — هنوز در مورد ویژگی‌های عجیب و غریب و گاه مضحک این دنیای کوچک اختلاف داشتند، فیزیک کوانتومی اولین حضور خود را در صحنه جهانی و با صدای بسیار واقعی و بلند نشان داد.

اولین کاربرد فنی فیزیک کوانتومی وحشتناک‌ترین سلاحی بود که تاکنون توسط نظامیان گسترش یافته است: بمب اتمی.

چگونه این سلاح وحشتناک به وجود آمد؟ از زمان آزمایش رادرفورد در سال ۱۹۱۲، مشخص شد که هسته‌ی اتم از ذرات بنیادین تشکیل شده است که دارای بار الکتریکی مثبت (پروتون‌ها) می‌باشند. اما همان‌گونه که در مدرسه یاد گرفته‌ایم، ذرات مشابه یکدیگر را دفع می‌کنند. پس هسته اتم‌ها چگونه می‌توانند پایدار باشند؟ بسیاری از پروتون‌های موجود در هسته اتم باید از همدیگر جدا شوند! نیروی دیگری باید در فاصله‌های بسیار کوچک درون هسته اتم عمل کند که به اندازه کافی بزرگ باشد تا با نیروی الکتریکی در تعادل بماند. در اینجا معمای کوانتومی دیگری وجود داشت!

در سال ۱۹۳۸، محققان آلمانی اتو هان و لیزه مایتنر آزمایش‌هایی را با هسته‌های اورانیوم انجام دادند تا در مورد نیروی ناشناخته هسته‌ی اتم با جزئیات بیشتری تحقیق کنند. هسته اورانیوم بسته به نوع ایزوتوپ شامل ۹۲ پروتون و

۱۴۳ یا ۱۴۶ نوترون است. هسته‌های اورانیوم با نوترون‌های آهسته شده بمباران شده و هر از چند گاهی دو عنصر بسیار متفاوت پدیدار می‌شوند: باریوم و کریبتون. اتم‌های باریوم که به سرعت با استفاده از تکنیک‌های رادیوشیمیایی آشکارسازی شدند، دارای عدد اتمی ۵۶ بوده و بنابراین کمتر از نصف جرم هسته‌های اورانیوم می‌باشند. چطور ممکن بود؟ با استفاده از محاسبات فیزیکی کوانتومی نظری، مایتنر به این نتیجه رسید که هسته‌های اورانیوم توسط بمباران نوترون به قسمت‌هایی شکسته شده‌اند و این قسمت‌ها بسیار بیشتر از آنچه که در فرآیندهای اتمی پیشین مشخص شده بود، مقدار زیادی انرژی را جذب کردند. اما این انرژی از کجا به وجود آمده است؟ معمای دیگر. مایتنر همچنین محاسبه کرد که دو هسته‌ی حاصل از شکافت (به همراه سه نوترونی که منتشر شده‌اند) وزن کمی از هسته‌ی اورانیوم اصلی به علاوه نوترونی که باعث شکافت می‌شود، داشتند. چه اتفاقی برای جرم گمشده افتاده است؟

در این مرحله، فرمول معروف اینشتین $E = mc^2$ که بیش از ۳۰ سال پیش کشف شده بود، وارد صحنه شد: تفاوت بین جرم کل قبل و بعد از شکافت دقیقاً با انرژی‌ای که قسمت‌ها به دست آورده بودند مطابقت داشت. این اولین فرآیند شناخته شده‌ای بود که در آن معادل‌سازی انرژی و جرم فرمول‌بندی شده توسط اینشتین به طور مستقیم آشکار شد. در همین زمان مشخص گردید که انرژی‌های غیرقابل‌تصور در درون این اتم‌ها نهفته است!

با توجه به تداوم جنگ، وجود چنین انرژی زیادی در چنین فضای کوچکی به سرعت نظر نظامیان را جلب کرد. در یکی از بزرگ‌ترین پنهان‌کاری‌ها (که حتی به معاون رئیس‌جمهور نیز اطلاع‌رسانی نشده بود)، دولت آمریکا تیمی از دانشمندان و تکنسین‌های ارشد را جمع‌آوری کرد. هدف از پروژه منهن، پیچیده‌ترین و دشوارترین پروژه مهندسی بود که تا آن زمان انجام شده بود، یعنی ساخت بمب اتمی. در ۱۶ ژوئیه سال ۱۹۴۵، در یک مکان آزمایشی در صحرای نیومکزیکو، اولین بمب اتمی منفجر شد. نیروی آن حتی از خوش‌بینانه‌ترین انتظارات فیزیکدانان فراتر رفت. اما هنگامی که ابر قارچ مانند هسته‌ای بزرگ در افق ظاهر شد، آن‌ها احساس ناراحتی عمیقی کردند. رابرت اوپنهایمر به عنوان سرپرست پروژه منهن بعداً گزارشی را بیان کرد که جمله‌ای از «باگاواد گیتا» اساطیر هند را در آن نقل

کرد: «اکنون من مرگ شده‌ام، نابودگر دنیاها.» یکی از همکارانش، کنت باین‌بریج به عنوان مدیر آزمایش، آن را حتی واضح‌تر بیان کرد: «اکنون همه ما پسران فاحشه‌ای هستیم.» احساس سرخوردگی آن‌ها به خوبی مشخص بود. تنها سه هفته بعد، دومین قارچ اتمی ظهور کرد، این بار بر فراز آسمان ژاپن. دو روز پس از آن نیز سومین قارچ آشکار گردید. کمی کمتر از هفت سال از کشف علمی شکافت هسته‌ای تا ظهور ابرهای قارچ اتمی بر فراز هیروشیما و ناگازاکی گذشته بود.

با بمب اتمی، فیزیک کوانتومی از همان ابتدا معصومیت خود را از دست داد. فیزیکدانان باید درک کنند که عطش دانش آن‌ها می‌تواند نه تنها منظره جهان بلکه خود جهان را نیز نابود کند.

هر چه بیشتر نظریه آرمانی، هر چه بیشتر فناوری — لیزر

اما انرژی اتمی کاربردهای مسالمت‌آمیزی نیز دارد، مانند نیروگاه‌های هسته‌ای. فیزیک کوانتومی انواع مختلفی از فناوری‌های بسیار مفید دیگری را به وجود آورده است که یکی از آن‌ها لیزر است. طبق نظریه‌ی کوانتومی که در مدل اتمی بور توضیح داده شده است، الکترون‌ها در حرکات‌شان در اطراف هسته‌ی اتم، می‌توانند به طور خودبخود از یک مدار به مدار دیگر پرش کنند. اینها «جهش کوانتومی» هستند. در حقیقت، مهم‌ترین مکانیسم‌های شناخته شده در طبیعت برای تولید نور، از جمله فرآیندهای شیمیایی مانند سوزاندن، براساس چنین جهش‌های کوانتومی شکل گرفته‌اند (تابش گسیل شده توسط ذرات باردار شتابدار، مانند تابش ترمزی (Bremsstrahlung) که باعث ایجاد پرتو X می‌شود، منبع نسبتاً ناچیزی از نور است). اما دقیقاً چگونه این جهش‌ها اتفاق می‌افتند؟ برای پرش به حالت پرنرژی‌تری، الکترون باید انرژی ذره‌ی نور ورودی (فوتون) را جذب کند. هنگام پرش به سطح پایین‌تر، الکترون یک فوتون آزاد می‌کند. اما ذرات نور دقیقاً از کجا آمده و به کجا می‌روند؟ و سؤال دیگری که مطرح می‌شود: جهش‌های کوانتومی فرآیندهای سببی نیستند که دقیقاً قابل پیش‌بینی باشند. در عوض، فرآیندهای لحظه‌ای هستند که به اصطلاح در خارج از زمان اتفاق می‌افتند. معنی آن چیست؟ هنگام زدن کلید برق، چراغ از یک لحظه به لحظه دیگر روشن می‌شود. به عبارت دیگر، قبل از اینکه اثر صورت پذیرد، یک ثانیه جفاشدگی وقت می‌برد. اما وقتی

یک الکترون پرش می‌کند، هیچ زمانی نمی‌گذرد.

هنگامی که یک الکترون به طور خودبخود به سطح پایه باز می‌گردد، هیچ دلیل مستقیمی برای آن وجود ندارد، و همچنین نمی‌توانیم یک لحظه یا فاصله زمانی مشخص را که در آن یا طی آن فرآیند اتفاق می‌افتد را به آن اختصاص دهیم.

در سال ۱۹۱۷، این معماهای کوانتومی اینشتین را تشویق کرد تا موضوع راجع به جذب و انتشار نور در اتم‌ها را با جزئیات بیشتری بررسی کند. فرمول تابش پلانک میزان انتشار فوتون‌ها از جسم سیاه را توصیف می‌کند. از نظر ملاحظات صرفاً نظری، اینشتین موفق شد چیز دیگری پیدا کند، همان‌طور که خودش نوشت، «نتیجه‌ای ساده و شگفت‌انگیز» از قانون انتشار خودبخودی نور. علاوه بر این، وی همچنین یک فرآیند کاملاً جدید را شناسایی کرد که از آن به عنوان «انتشار نور القایی»^۱ یاد می‌شود. این انتشار فوتون‌ها از اتم آماده شده («تحریک شده») است که به طور خودبخودی رخ نمی‌دهد و توسط فوتون ورودی دیگری انجام می‌شود. انرژی حاصل از تخلیه آن در میدان الکترومغناطیسی تولید کننده فوتون دیگر آزاد می‌شود. فوتون تحریک شده همچنان باقی خواهد ماند. بنابراین، در محیطی که بسیاری از اتم‌ها در حالت تحریک هستند، یعنی بسیاری از الکترون‌ها در سطح انرژی بالاتری قرار دارند، می‌تواند یک واکنش زنجیره‌ای از الکترون‌ها که در حال پریدن به سطح پایین‌تر هستند، رخ دهد که این دلالت بر انتشار همزمان نور دارد.

از ویژگی‌های جالب این است که هر یک از فوتون‌های تازه منتشر شده دقیقاً دارای مشخصات یکسان هستند: همه در حال نوسان با فاز یکسان هستند، در جهت یکسانی پخش می‌شوند و دارای یک فرکانس و قطبش (جهت نوسان) هستند. بنابراین، از بین چند فوتون که واکنش زنجیره‌ای را آغاز می‌کنند، یک نور بسیار قوی با خواصی مشابه با فوتون‌های تشکیل دهنده‌اش به وجود می‌آید. فیزیکدانان همچنین از «موج نوری منسجم» صحبت می‌کنند.

در دهه‌ی ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ فیزیکدانان موفق به اثبات تجربی و درک فنی انتشار فوتون‌های تحریک‌شده‌ای شدند، که اینشتین در سال ۱۹۱۷ به صورت

صرفاً نظری آن را شرح داده بود. این موضوع پایه و اساس لیزر، یکی دیگر از فناوری‌های کوانتومی مهم قرن بیستم شد. لیزر در دو مرحله تولید می‌شود: اول، الکترون‌ها در یک محیط توسط تابش نور، جریان الکتریکی یا سایر فرآیندهای دیگر برای پرش به حالت‌های انرژی بالاتر تحریک می‌شوند (فیزیکدانان از «پمپاژ» صحبت می‌کنند). سپس ذرات نوری با همان انرژی (فرکانس) به عنوان انرژی تحریک الکترون‌ها به محیط فرستاده می‌شوند و باعث می‌شوند که الکترون‌ها به حالت پایه‌ی خود بازگردند. بنابراین آن‌ها فوتون‌هایی را ارسال می‌کنند که کپی‌های دقیقی از فوتون‌های دریافتی هستند. این فرآیند را به اختصار لیزر می‌نامند: تقویت نور به روش گسیل القایی تابش^۱.

حتی با وجود لیزر، فیزیکدانان با توجه به ماهیت دقیق فرآیندهای درگیر، مدت زمانی در تاریکی باقی ماندند. تنها یک نظریه کوانتومی پیچیده‌تر و کم‌درک‌تر در نهایت قادر به توصیف جهش کوانتومی اتمی الکترون‌ها و تشکیل و نابودی خودبخودی کوانتوم نور خواهد بود: نظریه‌ی کوانتومی میدان الکترومغناطیسی، یا الکترودینامیک کوانتومی. به منظور توصیف آن، ریاضیات انتزاعی‌تری از مکانیک کوانتومی اصلی لازم بود.

لیزر دوباره این ویژگی کلیدی فیزیک کوانتومی را فاش می‌کند: نظریه‌های بسیار انتزاعی و غیرتوصیفی می‌توانند کاربردهای تکنولوژیکی بسیار واقعی تولید کنند.

فیزیک کوانتوم و الکترونیک – از ترانزیستور تا مدار مجتمع

خواص حالت جامد مواد، مانند هدایت گرمایی، الاستیسیته و واکنش‌پذیری شیمیایی، عمدتاً به وسیله خواص و حالات الکترون‌ها در ماده تعیین می‌شوند. در اینجا تأثیرات کوانتومی نیز نقشی تعیین‌کننده در این زمینه ایفا می‌کنند. در میان نظریه‌های مختلف، فیزیک کوانتوم توضیح دقیقی برای رسانایی الکتریکی مواد از جمله آن‌هایی که نیمه‌رساناها نامیده می‌شوند، ارائه می‌دهد. رسانایی آن‌ها بین رساناهای الکتریکی (مانند مس) و نارساناها (مانند سفال) قرار دارد، اما می‌توانند به شدت تحت تأثیر موارد مختلفی باشند. به عنوان

1. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

مثال، تغییر دمایی سبب تغییر در رسانندگی نیمه‌رساناهای مشخصی می‌شود، و این با چیزی که در فلزات رخ می‌دهد کاملاً متفاوت است: با افزایش دما، رسانندگی در فلزات افزایش می‌یابد.

وارد کردن اتم‌های خارجی به ساختار بلوری شان (فرآیندی شناخته شده به عنوان «آلایش»^۱) نیز می‌تواند به طور قابل توجهی رسانایی آن‌ها (نیمه‌رساناها) را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، میکرو ترانزیستورها چیزی جز ترکیبی از عناصر نیمه‌رساناها با آلایش متفاوت نیستند، و نحوه عملکرد آن‌ها تا حد زیادی توسط جریان الکترون‌ها در داخل آن‌ها تعیین می‌شود. همه این‌ها از قوانین فیزیک کوانتوم پیروی می‌کنند.

قطعات نیمه‌رسانا، بلوک‌های سازنده تمام وسایل الکترونیکی و در واقع تمام تکنولوژی‌های کامپیوتر و اطلاعاتی هستند که امروزه زندگی ما را شکل می‌دهند. در «مدارهای مجتمع»، نیمه‌رساناها در تراشه‌های کوچک بسته‌بندی می‌شوند، به طوری که مدارهای الکترونیکی بسیار پیچیده می‌توانند با اجزای کوچکی به اندازه چند میلی‌متر مربع (به عنوان مثال، در ریزپردازنده‌ها و چیپ‌های حافظه) به هم متصل شوند. امروزه اجزای منحصر به فرد این مدارهای مجتمع تنها شامل چند لایه اتمی (با ضخامتی در حدود ۱۰ نانومتر) می‌باشد، و هر آنچه در داخل آن‌ها رخ می‌دهد مطابق قوانین فیزیک کوانتومی است.

بدون استفاده از فیزیک کوانتومی، نمی‌توان چیپ‌های امروزی برای کامپیوترها، تلفن‌های همراه و دیگر دستگاه‌های الکترونیکی را ساخت.

نمونه‌ای از اثر کوانتومی که در ترانزیستورها و دیودهای میکروسکوپی بسیار مهم است، اثر تونل است: با یک احتمال خاص، ذرات کوانتومی می‌توانند بر یک سد (Barrier) غلبه کنند، حتی اگر طبق قوانین فیزیک کلاسیک به اندازه کافی انرژی برای آن نداشته باشند. ذره به سادگی از میان سد انرژی تونل می‌زند و به دنیای بزرگ^۲ ما منتقل می‌شود، این بدان معنی است که اگر هزاران تیر لاستیکی را به دیواره سربی شلیک کنیم، بعضی از آن‌ها در طرف دیگر ظاهر می‌شوند، و ما می‌توانیم دقیقاً تعداد تیرهای موجود را محاسبه کنیم. تونل‌زنی

1. Doping

2. Macro world