

فیزیک کوانتوم چیست؟ آشنایی ساده با دنیای عجیب اتم‌ها و ذرات

وقتی از فیزیک کوانتوم صحبت می‌کنیم، معمولاً تصاویری از ذراتی که هم‌زمان در چند حالت هستند، گره‌ای که هم زنده است و هم مرده، یا ذراتی که با فاصله زیاد از یکدیگر ارتباط دارند به ذهنمان می‌رسد.

اما فیزیک کوانتوم واقعاً چیست؟

آیا کوانتوم فقط درباره اتم‌ها و ذرات بسیار کوچک است؟ چرا اصلاً به نظریه‌ای جدید نیاز پیدا کردیم؟ چه چیزی در فیزیک کلاسیک مشکل داشت که مکانیک کوانتومی به وجود آمد؟ و مهم‌تر از همه، چرا رفتار جهان کوانتومی تا این اندازه با تجربه روزمره ما متفاوت است؟

در این مقاله از پایه شروع می‌کنیم و بدون ورود به ریاضیات پیچیده، تصویری از مکانیک کوانتومی می‌سازیم که بتوانیم مفاهیم مهم آن را در ادامه بهتر درک کنیم.



فیزیک کوانتوم چیست؟

فیزیک کوانتوم مجموعه‌ای از نظریه‌های فیزیکی است که برای توصیف رفتار ماده و انرژی در مقیاس‌های اتمی و زیراتمی به کار می‌رود.

در این مقیاس، طبیعت همیشه مطابق تصویری که از اجسام روزمره داریم رفتار نمی‌کند. الکترون‌ها را نمی‌توان مانند گلوله‌های کوچکی تصور کرد که همیشه مسیر مشخصی را طی می‌کنند؛ نور نیز در آزمایش‌های مختلف می‌تواند ویژگی‌هایی را نشان دهد که با تصویر ساده «موج» یا «ذره» به تنهایی قابل توضیح نیست.



مکانیک کوانتومی چارچوب ریاضی اصلی برای توصیف این رفتارهاست.

این نکته مهم است که «کوانتوم» و «مکانیک کوانتومی» دقیقاً یک معنی ندارند. کوانتوم به مفهوم گسسته بودن برخی کمیت‌های فیزیکی مربوط است، در حالی که مکانیک کوانتومی نظریه‌ای گسترده برای توصیف حالت، تحول و اندازه‌گیری سامانه‌های کوانتومی است.

کوانتوم یعنی چه؟

واژه Quantum از واژه لاتین *quantum* به معنای «مقدار» گرفته شده است.

در فیزیک، یک کوانتوم به یک مقدار گسسته از یک کمیت فیزیکی اشاره می‌کند. یکی از نخستین نمونه‌های مهم این ایده در کار ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ ظاهر شد.

پلانک هنگام بررسی تابش جسم سیاه دریافت که برای توضیح درست طیف تابش، انرژی نمی‌تواند کاملاً به شکل پیوسته و با هر مقدار دلخواه مبادله شود. در ساده‌ترین حالت، انرژی کوانتیده‌شده برای تابشی با فرکانس (f) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E = hf$$

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

که در آن (h) ثابت پلانک است.

این رابطه به‌تنهایی تمام مکانیک کوانتومی نیست، اما یکی از نقاط آغاز انقلاب کوانتومی بود.

بعدها این ایده بسیار فراتر رفت و به چارچوبی کامل برای توصیف رفتار سامانه‌های اتمی و زیراتمی تبدیل شد. ([Nobel Prize](#)) ([Educational Games](#))

چرا اصلاً فیزیک کوانتومی به وجود آمد؟

در پایان قرن نوزدهم، فیزیک کلاسیک موفقیت بسیار زیادی داشت.

قوانین نیوتن می‌توانستند حرکت سیارات، پرتاب توپ، حرکت آونگ و بسیاری از پدیده‌های روزمره را با دقت بالایی توضیح دهند. الکترومغناطیس ماکسول نیز رفتار نور و پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را به شکل بسیار موفقی توصیف می‌کرد.

به نظر می‌رسید تصویر فیزیک تقریباً کامل شده است.

اما وقتی دانشمندان با دقت بیشتری سراغ اتم، نور و ماده در مقیاس‌های کوچک رفتند، با پدیده‌هایی مواجه شدند که با فیزیک کلاسیک سازگار نبودند.

از جمله:

- تابش جسم سیاه
- اثر فوتوالکتریک

- طیف خطی اتمها
- پایداری اتمها
- رفتار موجی ذرات
- و بعدها پدیده‌هایی مانند برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی

این مشکلات به تدریج نشان دادند که برای توصیف طبیعت در مقیاس اتمی، به چارچوبی بنیادی‌تر نیاز داریم.

در واقع مکانیک کوانتومی حاصل یک کشف ناگهانی توسط یک دانشمند نبود؛ مجموعه‌ای از پژوهش‌ها توسط دانشمندانی مانند پلانک، اینشتین، بور، هایزنبرگ، شرودینگر، بورن، پاولی و دیگران طی چند دهه به شکل‌گیری آن انجامید. (Nobel Prize)



آیا فیزیک کلاسیک اشتباه بود؟

نه.

این یکی از مهم‌ترین نکاتی است که هنگام یادگیری فیزیک کوانتومی باید به آن توجه کنیم.

مکانیک کوانتومی نیامد تا تمام فیزیک کلاسیک را کنار بزند. فیزیک کلاسیک همچنان برای توصیف بسیاری از پدیده‌های روزمره فوق‌العاده دقیق است.

برای مثال، اگر بخواهیم حرکت یک توپ فوتبال، یک خودرو یا یک سیاره را بررسی کنیم، معمولاً نیازی به استفاده مستقیم از معادلات مکانیک کوانتومی نداریم.

اما وقتی به مقیاس اتمی و زیراتمی می‌رویم، پیش‌بینی‌های مکانیک کلاسیک دیگر کافی نیستند.

می‌توان گفت مکانیک کلاسیک در محدوده‌ای خاص، یعنی در مقیاس‌های معمول زندگی روزمره، تقریب بسیار خوبی از رفتار طبیعت است. مکانیک کوانتومی چارچوب بنیادی‌تری در اختیار ما قرار می‌دهد و در شرایط مناسب، رفتار کلاسیک از آن به عنوان یک تقریب ظاهر می‌شود.

بنابراین بهتر است به جای اینکه بگوییم:

«فیزیک کلاسیک غلط است و فیزیک کوانتومی درست است»

بگوییم:

فیزیک کلاسیک در محدوده کاربرد خودش بسیار موفق است، اما برای توصیف کامل طبیعت در مقیاس کوانتومی کافی نیست.

جهان کوانتومی چه تفاوتی با جهان روزمره دارد؟

برای درک اهمیت مکانیک کوانتومی، باید چند ویژگی مهم آن را بشناسیم.

البته این ویژگی‌ها را نباید به شکل جمله‌هایی مانند «ذرات قوانین عجیبی دارند» حفظ کنیم؛ هر کدام نتیجه چارچوب ریاضی و آزمایش‌های دقیق فیزیکی هستند.

۱. انرژی می‌تواند کوانتیده باشد

در فیزیک کلاسیک، بسیاری از کمیت‌ها می‌توانند هر مقدار پیوسته‌ای داشته باشند.

اما در بسیاری از سامانه‌های کوانتومی، بعضی کمیت‌ها فقط می‌توانند مقادیر مشخصی داشته باشند.

برای مثال، الکترون در یک اتم نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی داشته باشد. حالت‌های انرژی مجاز آن به ساختار کوانتومی اتم وابسته‌اند.

همین موضوع به توضیح خطوط مشخص طیف اتم‌ها کمک می‌کند.

اما توجه کنید که همه کمیت‌ها و در همه شرایط الزاماً گسسته نیستند. عبارت «در دنیای کوانتومی همه‌چیز گسسته است» یک ساده‌سازی نادرست است.

۲. احتمال در مکانیک کوانتومی نقش بنیادی دارد

یکی از تفاوت‌های مهم مکانیک کوانتومی با تصویر کلاسیکی این است که نظریه کوانتومی معمولاً نتیجه یک اندازه‌گیری مشخص را با یک احتمال توصیف می‌کند.

در توصیف کوانتومی، حالت یک سامانه اطلاعاتی درباره نتایج ممکن اندازه‌گیری‌ها در اختیار ما قرار می‌دهد.

برای مثال، ممکن است یک آزمایش کوانتومی به چند نتیجه متفاوت منجر شود و نظریه به ما بگوید احتمال مشاهده هر نتیجه چقدر است.

این به این معنا نیست که فیزیک کوانتومی صرفاً «نمی‌داند چه اتفاقی می‌افتد».

احتمال بخشی بنیادی از پیش‌بینی‌های نظریه کوانتومی است.

این موضوع یکی از تفاوت‌های عمیق میان تصویر کلاسیکی و کوانتومی از طبیعت است. نقش بنیادی احتمال در مکانیک کوانتومی یکی از مهم‌ترین اختلاف‌نظرهای تاریخی میان فیزیکدانان بود. اینشتین با اینکه در شکل‌گیری فیزیک کوانتومی نقش مهمی داشت، با این ایده که احتمال بخشی بنیادی از توصیف طبیعت باشد، به‌طور کامل موافق نبود. او در نامه‌ای به ماکس بورن در سال ۱۹۲۶ نوشت: «خدا تاس نمی‌اندازد.» منظور این جمله مخالفت با وجود احتمال در محاسبات کوانتومی نبود؛ بلکه اینشتین معتقد بود نظریه کوانتومی، با وجود موفقیت‌هایش، ممکن است توصیف کامل‌تری از واقعیت را در پس خود داشته باشد. در مقابل، نیلز بور و دیگر بنیان‌گذاران مکتب کپنهاگی احتمال را بخشی بنیادی از توصیف کوانتومی می‌دانستند. این اختلاف بعدها به یکی از مهم‌ترین بحث‌ها درباره ماهیت واقعیت در فیزیک کوانتومی تبدیل شد.

۳. تابع موج چیست؟

یکی از ابزارهای مهم در مکانیک کوانتومی، تابع موج است که معمولاً با نماد (Ψ) نمایش داده می‌شود.

تابع موج را نباید به سادگی با یک موج معمولی مثل موج آب یکی دانست.

تابع موج اطلاعاتی درباره حالت کوانتومی سامانه در اختیار ما قرار می‌دهد و از روی آن می‌توان احتمال نتایج مختلف اندازه‌گیری را به دست آورد.

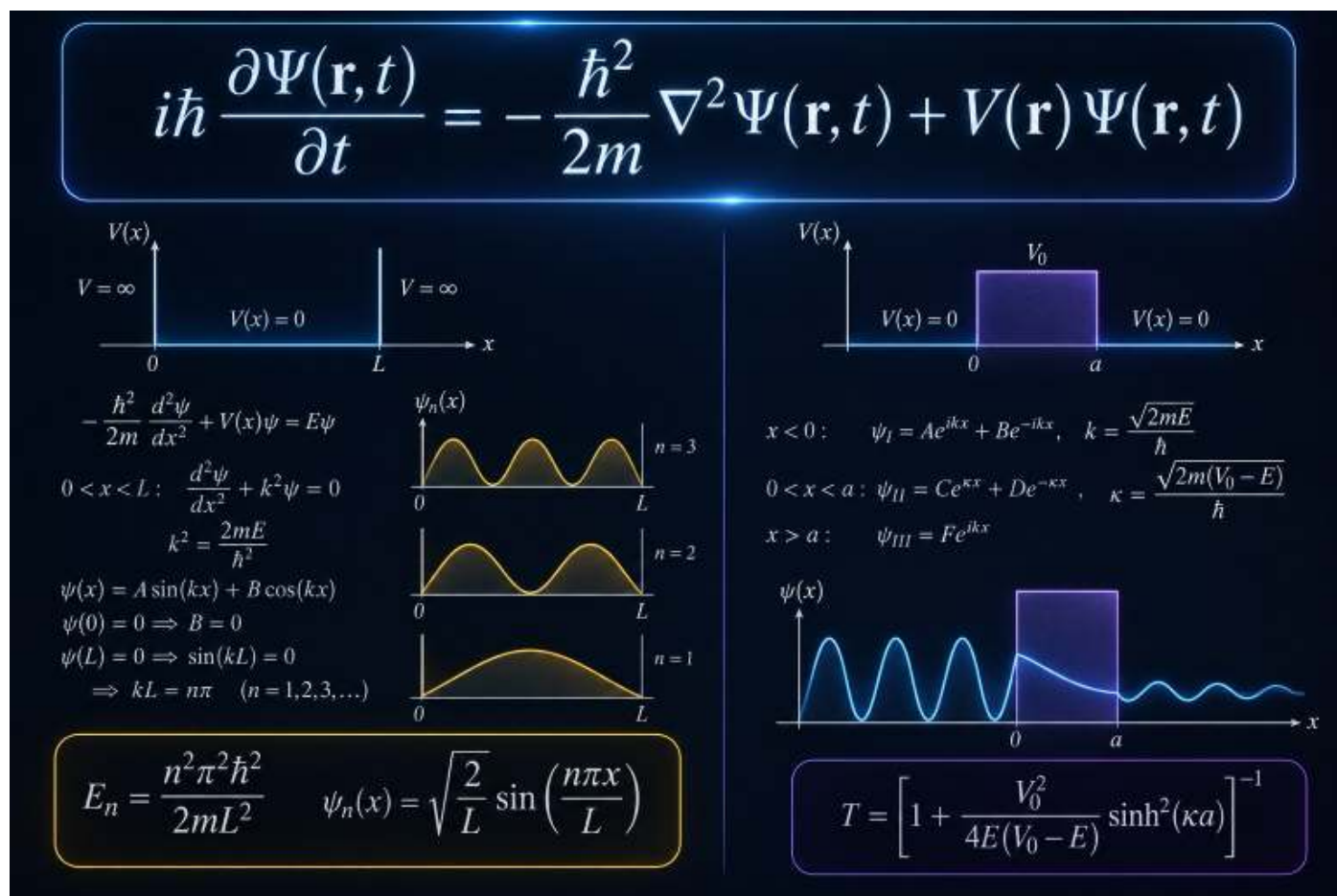
برای مثال، در توصیف مکان یک ذره، کمیتی که از قدرمطلق مربع تابع موج به دست می‌آید با چگالی احتمال یافتن ذره در مکان‌های مختلف مرتبط است.

به همین دلیل، گفتن اینکه:

«الکترون دقیقاً در این نقطه است»

معمولاً پیش از اندازه‌گیری، توصیف مناسبی از حالت کوانتومی نیست.

توصیف دقیق‌تر این است که حالت کوانتومی، احتمال نتایج مختلف اندازه‌گیری مکان را مشخص می‌کند.



۴. دوگانگی موج و ذره

یکی از مشهورترین ویژگی‌های دنیای کوانتومی، رفتار موجی و ذره‌ای ماده و نور است.

نور در برخی آزمایش‌ها رفتارهایی مانند موج نشان می‌دهد؛ برای مثال می‌تواند تداخل و پراش ایجاد کند.

از سوی دیگر، در پدیده‌هایی مانند اثر فوتوالکتریک، توصیف نور به صورت بسته‌های گسسته انرژی، یعنی فوتون‌ها، ضروری است.

اما این موضوع فقط درباره نور نیست.

ذرات ماده مانند الکترون نیز می‌توانند رفتار موجی نشان دهند.

این موضوع را نمی‌توان به سادگی با این جمله توضیح داد که «ذره گاهی موج می‌شود و گاهی ذره».

رفتار کوانتومی را باید با خود نظریه کوانتومی توصیف کرد؛ مفاهیم کلاسیک «موج» و «ذره» تنها بخشی از رفتار مشاهده‌شده را برای ما قابل تصور می‌کنند. ([American Physical Society](#))

یکی از مشهورترین آزمایش‌هایی که این مسئله را به شکلی شگفت‌انگیز نشان می‌دهد، آزمایش دو شکاف است.

در مقاله بعدی این مجموعه، آزمایش دو شکاف را قدم‌به‌قدم بررسی خواهیم کرد.

۵. برهم‌نهی کوانتومی چیست؟

در مکانیک کوانتومی، یک سامانه می‌تواند در برهم‌نهی چند حالت کوانتومی قرار داشته باشد.

این عبارت گاهی به شکل گمراه‌کننده‌ای توضیح داده می‌شود:

«ذره واقعاً هم‌زمان در دو حالت قرار دارد.»

اما برای فهم دقیق‌تر، باید به زبان ریاضی نظریه توجه کنیم.

اگر دو حالت کوانتومی ممکن باشند، حالت کلی سامانه می‌تواند ترکیبی از آن دو باشد. هنگام اندازه‌گیری، نتیجه‌ای مشخص مشاهده می‌شود و احتمال مشاهده هر نتیجه به حالت کوانتومی پیش از اندازه‌گیری بستگی دارد.

برهم‌نهی یکی از ویژگی‌هایی است که در آزمایش‌های تداخل کوانتومی نقش اساسی دارد. همچنین یکی از پایه‌های فیزیکی محاسبات کوانتومی است. ([American Physical Society](#))

گرچه شرودینگر نیز دقیقاً برای فکر کردن درباره پیامدهای این نوع توصیف کوانتومی مطرح شد؛ نه برای اینکه نشان دهد گرچه‌های واقعی در زندگی روزمره هم‌زمان زنده و مرده‌اند.

۶. درهم‌تنیدگی کوانتومی چیست؟

درهم‌تنیدگی یکی دیگر از ویژگی‌های بنیادی مکانیک کوانتومی است.

وقتی دو یا چند سامانه کوانتومی در حالت درهم‌تنیده قرار می‌گیرند، نمی‌توان حالت هر کدام را به‌طور کامل و مستقل از دیگری توصیف کرد.

این ارتباط کوانتومی می‌تواند حتی زمانی وجود داشته باشد که ذرات از یکدیگر فاصله زیادی گرفته باشند.

درهم‌تنیدگی یکی از مهم‌ترین موضوعات فیزیک کوانتومی مدرن است و در آزمایش‌های مربوط به نامساوی‌های بل و همچنین فناوری‌هایی مانند ارتباطات و محاسبات کوانتومی اهمیت دارد. ([Physics](#))

اما یک نکته بسیار مهم:

درهم‌تنیدگی به معنای ارسال پیام سریع‌تر از نور نیست.

این موضوع یکی از سوءبرداشت‌های رایج درباره کوانتوم است.

در مقاله جداگانه‌ای به‌طور کامل بررسی خواهیم کرد که درهم‌تنیدگی دقیقاً چیست و چرا آزمایش‌های بل اهمیت دارند.



۷. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ چیست؟

یکی دیگر از اصول معروف مکانیک کوانتومی، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است.

برای برخی جفت کمیت‌ها، مانند مکان و تکانه، نمی‌توان حالتی را داشت که هر دو کمیت به‌طور هم‌زمان دارای عدم قطعیت دلخواه و بسیار کوچک باشند.

این موضوع را نباید با محدودیت ابزارهای اندازه‌گیری اشتباه گرفت.

اصل عدم قطعیت فقط نمی‌گوید:

«دستگاه‌های اندازه‌گیری ما به اندازه کافی دقیق نیستند.»

بلکه محدودیتی بنیادی در ساختار حالت‌های کوانتومی است.

این اصل یکی از ویژگی‌هایی است که نشان می‌دهد نمی‌توان تصویر کلاسیکی از ذره‌ای با مکان و سرعت کاملاً معین را بدون تغییر به دنیای کوانتومی منتقل کرد. ([Nobel Prize](#))

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

آیا مشاهده واقعیت کوانتومی را تغییر می‌دهد؟

احتمالاً یکی از معروف‌ترین جمله‌هایی که درباره کوانتوم شنیده‌اید این است:

«مشاهده‌گر واقعیت را تغییر می‌دهد.»

این جمله جذاب است، اما اگر بدون توضیح استفاده شود می‌تواند تصور اشتباهی ایجاد کند.

در مکانیک کوانتومی، اندازه‌گیری یک فرایند فیزیکی است که می‌تواند بر سامانه کوانتومی اثر بگذارد و نتیجه مشخصی را ثبت کند.

بنابراین منظور از «مشاهده» این نیست که ذهن انسان یا آگاهی او به‌طور جادویی واقعیت را خلق می‌کند.

در یک آزمایش کوانتومی، حتی اگر هیچ انسانی مستقیماً به دستگاه نگاه نکند، برهم‌کنش فیزیکی میان سامانه و دستگاه اندازه‌گیری می‌تواند اهمیت داشته باشد.

این موضوع به یکی از جذاب‌ترین پرسش‌های مفهومی مکانیک کوانتومی منجر شده است:

قبل از اندازه‌گیری، یک سامانه کوانتومی دقیقاً چه وضعیتی دارد؟

پاسخ به این پرسش به تفسیر مکانیک کوانتومی نیز مربوط می‌شود و موضوعی است که در ادامه این مجموعه به آن خواهیم پرداخت.



مکانیک کوانتومی فقط درباره ذرات کوچک نیست

ممکن است از این مقاله این تصور ایجاد شود که مکانیک کوانتومی فقط برای الکترون‌ها و اتم‌هاست.

اما اثرات کوانتومی پایه بسیاری از فناوری‌های مدرن هستند.

برخی نمونه‌ها عبارت‌اند از:

- ترانزیستورها و مدارهای الکترونیکی
- لیزرها
- LEDها
- نیمه‌رساناها
- ساعت‌های اتمی
- تصویربرداری و فناوری‌های پزشکی خاص
- میکروسکوپ‌های الکترونی
- فناوری‌های نوری و فوتونیک
- حسگرهای کوانتومی
- فناوری‌های ارتباطی کوانتومی
- رایانش کوانتومی

در واقع بخش بزرگی از فناوری الکترونیکی مدرن بدون درک رفتار کوانتومی ماده قابل توضیح یا طراحی نیست.

به همین دلیل مکانیک کوانتومی فقط یک نظریه عجیب درباره دنیای ذرات نیست؛ یکی از پایه‌های فناوری مدرن است. ([Pezeshk1](#))

آیا فیزیک کوانتوم جهان را «عجیب» می‌کند؟

تا حد زیادی بله؛ اما شاید مشکل اصلی این باشد که ما جهان را با تجربه‌های روزمره خود می‌سنجیم.

ما در زندگی روزمره با توپ، خودرو، سنگ، آب و سیارات سروکار داریم. این اجسام در محدوده‌ای هستند که فیزیک کلاسیک توصیف بسیار خوبی از رفتارشان ارائه می‌دهد.

طبیعی است که وقتی همان شهود را مستقیماً به اتم و الکترون منتقل می‌کنیم، با نتایجی روبه‌رو شویم که عجیب به نظر برسند.

اما «عجیب بودن» به معنای نادرست یا غیرعلمی بودن نیست.

مکانیک کوانتومی از دقیق‌ترین نظریه‌های علمی است که تاکنون ساخته شده و پیش‌بینی‌های آن در آزمایش‌های بسیار زیادی با دقت بالا آزمایش شده‌اند.

بنابراین بهتر است به جای اینکه بگوییم:

«کوانتوم یعنی دنیایی که هیچ منطقی ندارد»

بگوییم:

«کوانتوم نشان می‌دهد شهود فیزیکی‌ای که از جهان روزمره ساخته‌ایم، برای توصیف طبیعت در مقیاس‌های بسیار کوچک کافی نیست.»

فیزیک کوانتوم در یک نگاه

اگر بخواهیم تمام این مقاله را در چند جمله خلاصه کنیم:

فیزیک کوانتوم چارچوبی برای توصیف رفتار ماده و انرژی در مقیاس‌های اتمی و زیراتمی است.

این نظریه در اوایل قرن بیستم و در پاسخ به پدیده‌هایی شکل گرفت که فیزیک کلاسیک نمی‌توانست به‌درستی توضیح دهد.

در مکانیک کوانتومی، مفاهیمی مانند کوانتیده بودن برخی کمیت‌ها، حالت کوانتومی، احتمال، برهم‌نهی، تداخل، دوگانگی موج و ذره، عدم قطعیت و درهم‌تنیدگی نقش اساسی دارند.

بسیاری از این مفاهیم با شهود روزمره ما سازگار نیستند؛ اما همین ویژگی‌ها به پیش‌بینی‌های آزمایش‌پذیر و فناوری‌های واقعی منجر شده‌اند.

و شاید مهم‌ترین نکته این باشد:

برای فهم کوانتوم لازم نیست از همان ابتدا ریاضیات پیچیده آن را یاد بگیریم؛ ابتدا باید یاد بگیریم طبیعت در این مقیاس چه رفتاری دارد.

پرسش‌های متداول درباره فیزیک کوانتوم

فیزیک کوانتوم چیست؟

فیزیک کوانتوم شاخه‌ای از فیزیک مدرن است که رفتار ماده و انرژی را در مقیاس اتمی و زیراتمی توصیف می‌کند. مکانیک کوانتومی چارچوب ریاضی اصلی برای توصیف بسیاری از این پدیده‌هاست.

کوانتوم یعنی چه؟

کوانتوم در فیزیک به یک مقدار گسسته از یک کمیت فیزیکی اشاره می‌کند. مفهوم کوانتیده بودن انرژی یکی از نقاط آغاز شکل‌گیری نظریه کوانتومی در ابتدای قرن بیستم بود.

چه کسی فیزیک کوانتوم را کشف کرد؟

نمی‌توان فیزیک کوانتوم را به یک دانشمند نسبت داد. شکل‌گیری آن نتیجه کار دانشمندان متعددی بود. ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ نقش مهمی در آغاز نظریه کوانتومی داشت و پس از آن دانشمندانی مانند اینشتین، بور، هایزنبرگ، شرودینگر، بورن و پاولی در توسعه آن نقش داشتند.



آیا مکانیک کوانتومی فقط درباره اتم‌هاست؟

خیر. مکانیک کوانتومی برای توصیف بسیاری از سامانه‌های میکروسکوپی و برهم‌کنش‌های بنیادی استفاده می‌شود و پایه بسیاری از فناوری‌های مدرن است.

آیا فیزیک کوانتوم می‌گوید ذرات هم‌زمان در چند مکان هستند؟

این جمله یک ساده‌سازی رایج است. در مکانیک کوانتومی یک حالت می‌تواند برهم‌نهی چند حالت ممکن باشد و احتمال نتایج مختلف اندازه‌گیری را تعیین کند. اینکه دقیقاً درباره «وجود» ذره پیش از اندازه‌گیری چه تفسیری داشته باشیم، به تفسیر مکانیک کوانتومی نیز مربوط می‌شود.

آیا مشاهده‌گر می‌تواند واقعیت را ایجاد کند؟

خیر، دست‌کم به معنای رایج این عبارت. در مکانیک کوانتومی، اندازه‌گیری یک فرایند فیزیکی است که می‌تواند حالت سامانه و نتیجه مشاهده‌شده را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع را نباید به معنای قدرت ذهن انسان برای ایجاد واقعیت تعبیر کرد.

آیا فیزیک کوانتوم با فیزیک کلاسیک تناقض دارد؟

در شرایطی که اثرات کوانتومی مهم باشند، مکانیک کلاسیک نمی‌تواند توصیف کاملی ارائه دهد. با این حال، مکانیک کلاسیک در محدوده خودش بسیار موفق است و در شرایط مناسب به‌عنوان تقریب رفتار کوانتومی ظاهر می‌شود.

لینک مقاله:

<https://physicfa.ir/فیزیک-کوانتوم-چیست/>