کوانتوم به زبان آدمیزاد

مدل اتمی بور

پیدایش واژه ی اتم به معنای امروزی آن، به چندقرن پیش بازمی گردد، زمانیکه برای اولین بار دانشمندی یونانی به نام دموکریت، اتم را کوچکترین جز سازنده ی تمام مواد عالم، معرفی کرد. این واژه از نظر لغوی به معنای غیرقابل تقسیم است.

اما بعدها توسط دانشمندی انگلیسی به نام دالتون معلوم شد که اتم ها واقعاً قابل تقسیم بوده و شامل پروتون های با بار مثبت و الکترون های با بار منفی و البته نوترون های خنثی هستند. این مدل ساده و پیش پا افتاده تا اوایل قرن بیستم، تغییر زیادی نکرد و تقریباً دست نخورده باقی ماند.

اما انگار قرار بود قرن بیست به یک قرن تاریخی تبدیل شود، چرا که شک و شبهه ها در مورد ساختار اتم، شدت گرفت.

در سال ۱۹۱۱، ارنست رادرفورد به لطف آزمایش مشهور خود یعنی ورقه ی طلا، مدل سیاره ای اتم را پیشنهاد داد.طبق این مدل، هر اتمی متشکل از یک هسته ی مثبت و الکترون های منفی هستند که این الکترون ها مانند سیاره هایی به دور هسته می چرخند.

اما این مدل، یک نقص بزرگ داشت، اگر اتم ها از این مدل پیروی می کردند، کاملاً ناپایدار بودند، زیرا الکترون ها تمام انرژی خود را به خاطر شتاب ثابت ساطع کرده و تقریباً فوراً به درون هسته سقوط می کردند. اما اوضاع این طور باقی نماند و در سال ۱۹۱۳ یک فیزیکدان دانمارکی به نام نیلز بور، مدل تازه ای برای اتم را بنیان نهاد..مدل بور بسیار شبیه به مدل سیاره ای است.

اما بور سه قاعده را برای حفظ پایداری اتم ها درنظرگرفت:

الکترون ها حول هسته و در مدارهایی دایره مانند و بدون تابش نور می چرخند. مدارها در هر فاصله ی دلخواهی از هسته قرار نگرفته اند، بلکه صرفاً در ترازهای انرژی مجازی که مضربی از ثابت کاهش یافته ی پلانک هستند، قرار دارند. (ثابت پلانک کاهش یافته، مقدار ثابت پلانک تقسیم بر مقدار $2\prod$ است.(

بنابراین از اینجا معلوم شد که کوانتش یا مقادیر معین انرژی (یا مقادیر گسسته ی انرژی) تنها مختص نور نبوده، بلکه می توان آن را در مورد مواد هم به کار برد (در این مورد الکترون ها).

الکترون ها می توانند از یک مدار به مدار دیگر جهش کنند. زمانیکه الکترون ها از یک مدار با انرژی پایین تر به مدار با انرژی بالاتر می روند، یک کوانتوم نور را جذب می کند. این فرآیند، برانگیختگی نامیده می شود و الکترون هایی که در تراز انرژی بالاتری نسبت به تراز انرژی اولیه شان قرار بگیرند، الکترون های برانگیخته نامیده می شوند.الکترون هایی که در تراز انرژی اولیه شان قرار دارند، در واقع در حالت پایه خود هستند.

اثرفوتوالکتریک

طبق مدل اتمی بور، برای فرستادن الکترون ها به ترازهای بالاتر اتمی باید به صورت تابش الکترومغناطیسی به آنها انرژی دهیم.اگر مقدار این انرژی به اندازه ی کافی، زیاد باشد، الکترون قادر به ترک اتم خواهد شد.این پدیده، اثر فتوالکتریک نامیده شده و الکترون هایی که به این روش آزاد می شوند، فوتوالکترون نام دارند.

اجازه دهید باز هم برای فهم بهتر، یک آزمایش را تصور کنیم.وقتی به الکترون های داخل اتم نور بتابانیم، بعضی از این الکترون ها از لایه ی اتمی جدا شده و تبدیل به فوتوالکترون می شوند.

فیزیک کلاسیک می گوید انرژی فوتوالکترون ها باید وابسته به شدت نور باشد، چرا که در این نظریه، تابش شدیدتر (یعنی نور درخشان تر) به معنای انرژی بالاتر است.

اما این وابستگی هیچگاه در تجربه مشاهده نشد، بلکه از نظر تجربی ثابت شده بود که انرژی الکترون های تابشی فقط به فرکانس تابش بستگی دارد، بعلاوه، وجود فرکانس آستانه هم یک تناقض دیگر بود.(فرکانس آستانه، حداقل انرژی لازم برای کندن الکترون از اتم است).

در واقع اگر نوری پایین تر از فرکانس آستانه به اتم بتابانیم، هیچ الکترونی آزاد نمی‌شود، حتی اگر تابش بسیار شدید باشد.با توجه به مشاهدات بالا، فیزیک کلاسیکی قادر به توضیح اثر فوتوالکتریک نیست.

همانطور که در بخش اول این مقاله دیدیم، آزمایش یانگ شاهدی بر ماهیت موجی نور بود.اما برای توضیح اثر فوتوالکتریک دانشمندان مجبور بودند نور را به صورت مجموعه ای از ذرات فرض کنند.

طبق این فرض، الکترون ها امواج الکترومغناطیسی را به صورتی که مکانیک کلاسیک پیش بینی می کرد، دریافت نمی کردند، بلکه آنها ذرات نور (فوتون) را جذب می کنند.فوتون ها همان بسته های انرژی بودند که پلانک آنها را برای حل مسئله ی تابش جسم سیاه پیشنهاد کرد.

اما اینشتین نخستین کسی بود که ماهیت ذره ای این کوانتوم ها را درک کرد و با استفاده از آنها معمای اثر فوتوالکتریک را حل کرد.اگر نور را به صورت مجموعه ای از ذرات فرض کنیم، اثر فوتوالکتریک به آسانی توضیح داده می شود.

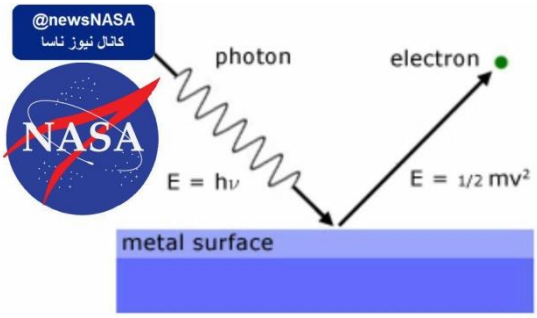
افزایش شدت تابش باعث افزایش تعداد فوتون های موج الکترومغناطیسی می شود، اما انرژی هر فوتون، تغییری نمی کند!

در نتیجه اگر نور شدیدتری را به اتم بتابانیم، انرژی فوتوالکترون ها تغییر نمی کند، زیرا الکترون ها تنها می توانند یک فوتون را جذب کنند. (مطابق قانون سوم بور).

اما با افزایش شدت نور، تعداد الکترون های تابش شده (فوتو الکترون ها) بیشتر می‌شود، چرا که در این حالت فوتون های بیشتری در امواج الکترومغناطیسی برای جذب شدن وجود دارد.

اثر فوتوالکتریک

شکل ۶- طرح ساده ای از اثر فوتوالکتریک



شکل ٦ - طرح ساده ای از اثر فوتوالکتریک

دوگانگی موج ذره

نور یک موج -ذره است!

انرژی هر الکترون را می توان با توجه به انرژی هر فوتون محاسبه کرد. برای اینکار باید فرکانس تابش را از معادله ی پلانک E=h.f محاسبه کنیم (E انرژی یک فوتون است).

از طرفی با فرض کوانتیزه بودن تابش، می توان فرکانس آستانه را هم توضیح داد: فوتون های با فرکانس پایین، انرژی کافی برای کندن الکترون را ندارند، بنابراین اثر فوتوالکتریک رخ نمی دهد، به همین سادگی!

آلبرت اینشتین همچنین معادله ای را برای محاسبه ی اندازه حرکت یک فوتون : λ) طول موج امواج الکترمغناطیسی) بدست آورد:

$p=h/\lambda$

وقتی الکترون، یک فوتون را جذب می کند در واقع تمام انرژی آن را بدست می آورد.

بخشی از این انرژی صرف جداسازی الکترون از اتم می شود (انرژی فرکانس آستانه) و انرژی باقی مانده به انرژی جنبشی تبدیل می شود.

انرژی کلی یک فوتوالکترون را می توان با استفاده از معادله ی زیر محاسبه نمود که در آن W انرژی فرکانس آستانه است:

$E=W+½\ mv^2$

اگرچه آزمایش یانگ ماهیت موجی نو را ثابت می کند، اما اثر فوتوالکتریک نور را به صورت مجموعه ای از ذرات فرض می کند و نتیجه ی کلی این می شود که نور ماهیتی دوگانه دارد، یعنی هم موج است و هم ذره!

امواج مادی

پس از آنکه با آزمایش یانگ و اثر فوتو الکتریک، ماهیت عجیب و دوگانه ی (ذره-موج) نور ثابت شد، در سال ۱۹۲۴، یک فیزیکدان جوان فرانسوی بنام لویی دوبروی، ایده ی بسیار جسورانه تری را مطرح کرد. او بیان کرد که این ماهیت دوگانه تنها به نور محدود نمی شود، بلکه هر ماده ای را می توان به صورت یک موج در نظر گرفت.

البته همانطور که در تاریخ علم، ایده های جسورانه همیشه در ابتدا با مخالفت شدید مواجه می شدند، این ایده ی انقلابی هم در ابتدا پذیرفته نشد.

اما در نهایت معلوم شد که دوبروی درست گفته و وجود این موج مادی را می توان با کمک آزمایش یانگ ثابت کرد.

تمام جزییات مانند آزمایش اصلی یانگ بود، اما این بار به جای تابش الکترومغناطیس (فوتون) از الکترون استفاده شد و جالب اینکه باز هم همان الگوهای تداخلی ایجاد شد!

در نتیجه ثابت شد که ذرات (در اینجا الکترون) هم دارای ماهیت موجی هستند.

ارتباط بین اندازه حرکت یک شی و طول موج آن، با معادله ی زیر بیان می شود:

$\lambda = h/p$

طبق معادله ی بالا، با افزایش اندازه حرکت شی، طول موج ماده، کاهش می یابد. به عبارت دیگر اشیای بزرگتر، طول موج کمتری دارند و به همین دلیل است که ما خاصیت موجی اشیای ماکروسکوپی را نمی بینیم.

بنابراین در مکانیک کوانتوم، موج و ماده دو روی یک سکه هستند!

گاهی ماهیت موجی و گاهی ماهیت ذره ای پدیدار می شود و این یکی از اصول عجیب و اساسی مکانیک کوانتوم است!

<u>تابع موج و برهم نهی کوانتومی</u>

تابع موج

مکانیک کوانتوم را میتوان به دو بخش قدیم و مدرن تقسیم کرد.

دوره ی کوانتوم قدیم، اندکی پس از معرفی دوگانگی موج-ذره توسط دوبروی، به پایان رسید.

به این ترتیب سال های ۱۹۰۰تا ۱۹۲۵ را دوره ی کوانتوم قدیم می نامند.

پدیده های اصلی کوانتوم قدیم، کوانتش انرژی و دوگانگی موج-ذره هستند.

از سال ۱۹۲۵ به بعد، با مکانیک کوانتومی مدرن سروکار داریم.

فیزیکدان اتریشی، اروین شرودینگر در سال ۱۹۲۵، نظریه ی نادقیق دوبروی را اصلاح کرد و به هر شی کوانتومی یک تابع موج را نسبت داد.

بررسی فضایی یک تابع موج با یک معادله ی پیچیده بنام معادله ی شرودینگر توصیف می شود.

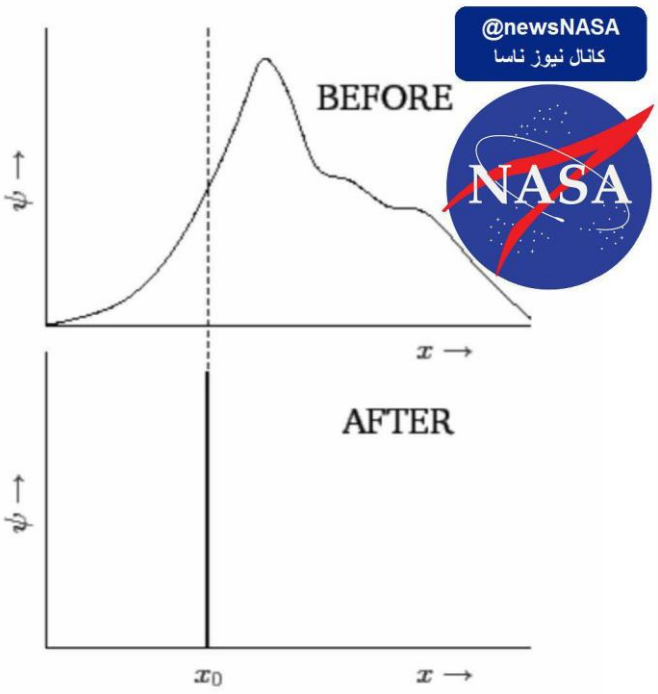
تابع موج را با حرف یونانی) Ψ (بخوانید:سای) بزرگ یا ψ کوچک نشان می دهیم (به طور دقیق تر: اگر تابع موج به زمان و مکان وابسته باشد، با حرف سای بزرگ و اگر تابع موج مستقل از زمان و تنها وابسته به مکان باشد، با سای کوچک نمایش داده می شود.(

تابع موج یک تابع ریاضی پیچیده است که تمام ویژگی های شی کوانتومی (اندازه حرکت، موقعیت و ...) در آن ذخیره می شود.

این مجموعه از ویژگی های شی کوانتومی، حالت کوانتومی نامیده می شود.

به همین دلیل است که به تابع موج، تابع حالت هم گفته می شود.

یک حالت کوانتومی به صورت (Ψ ⟩ نشان داده می شود.
تابع موج، مهمترین ایده و در واقع قلب مکانیک کوانتومی است، زیرا اکثر پدیده های مکانیک کوانتومی مدرن با استفاده از آن بدست آمده اند.
بعضی از این پدیده ها به ویژه اصل برهم نهی کوانتومی با چیزهایی که ما در جهان عادی خود می بینیم، کاملاً متفاوت بوده و باور آنها بسیار دشوار است.
برهم نهی کوانتومی
با پیدایش مکانیک کوانتومی، دانشمندان دریافتند، اصول و قوانینی که در جهان ماکرو استفاده می شود، برای جهان میکرو یا کوانتومی قابل کاربرد نیست.
یکی از قواعد اساسی جهان ماکرو می گوید: هر جسم فقط دارای یک مکان و یک سرعت است.
اما این قاعده را نمی توان در مورد جهان کوانتومی به کار برد، چرا که اشیای میکرو می توانند به طور همزمان در مکان های بسیاری باشند و کارهای مختلفی انجام دهند!!
در مورد آزمایش شکاف یانگ، یک الگوی تداخلی تنها زمانی رخ می دهد که یک موج با موجی که از شکاف دیگر گذشته، تداخل کند.
اگر قادر بودیم امواج را (چه امواج الکترومغناطیسی و چه امواج مادی) تنها از طریق یک شکاف عبور دهیم،
الگوی تداخلی ایجاد نمی شد. بیایید آزمایش دو شکاف را با پروتونها انجام دهیم.
تصور ما این است که اگر فقط یک پروتون را بفرستیم، تنها یک تابع موج وجود دارد و در نتیجه الگوی تداخلی پدید نخواهد آمد.
اما چیزی که در واقعیت اتفاق می افتد خیلی عجیب تر از این حرف هاست: الگوی تداخلی حتی با وجود یک پروتون هم ایجاد می شود!!
تابع موج و برهم نهی کوانتومی
کل فیزیک کلاسیکی مبتنی بر اصلی به نام مُعینیت است.
اصل بنیادی معینیت می گوید آینده قابل پیش بینی است و تنها چیزی که برای پیش بینی آینده ی کائنات لازم است، داشتن اطلاعات کافی از زمان حال است.
مثلاً می توانیم کسوف بعدی را با داشتن اطلاعات کافی در مورد حرکت ماه پیش بینی کنیم.
ایده ی دیگر معینیت می گوید: شرایط یکسان منجر به نتایج یکسان می شوند. برای مثال، اگر ما دو گلوله را از یک تفنگ و در شرایط یکسان (مثلاً در راستا، دما و سایر شرایط یکسان) شلیک کنیم، هر دو گلوله به مکان یکسانی اصابت خواهند کرد.
اما دنیای کوانتوم به طور کاملاً متفاوتی رفتار می کند.
یعنی اگر به جای گلوله، الکترون ها را شلیک کنیم (از یک تفنگ الکترونی فرضی)، هر یک از آنها می توانند به مکان متفاوتی برخورد کرده و حتی با وجود شرایط اولیه ی یکسان، سرعت های نامشابهی داشته باشند!
رفتار عجیب پروتون ها در آزمایش یانگ و غیرقابل پیش بینی بودن الکترون هادر تفنگ الکترونی، هر دو نتیجه ی یک اصل بنیادی مکانیک کوانتوم به نام برهم نهی هستند.
طبق اصل برهم نهی کوانتومی، در صورتی که یک شی کوانتومی، مشاهده نشود، می تواند به طور همزمان در تمام حالت های ممکن قرار داشته باشد.
بنابراین برهم نهی به معنای ترکیب تمام حالت هایی است که شی می تواند از نظر تئوری در آن ها قرار داشته باشد.
یعنی ذره ای که مشاهده نمی شود، می تواند به طور همزمان چندین سرعت داشته باشد و در چندین مکان هم باشد!
این رفتار برای ما عجیب به نظر می رسد، اما اگر به تابع موج دقت کنیم، برهم نهی ملموس تر می شود.
مثلاً به موقعیت یک شی توجه کنید. همانطور که قبلاً بیان شد، تابع موج، تمام ویژگی های یک شی را در دل خود دارد؛ در نتیجه تابع موج، موقعیت شی را مشخص می کند، اما یک مشکل وجود دارد: موج در یک مکان مستقر نمی شود، بلکه در عوض تمایل به پخش شدن در فضا دارد و این ویژگی در مورد تابع موج ما هم صدق می کند.
در نتیجه تا زمانیکه تابع موج یک شی، وجود دارد، موقعیت این شی را نمی توان به صورت دقیق تعیین کرد و تنها می توان گفت شی همان جایی است که تابع موجش قرار دارد (در چند ویژه حالت قرار دارد).
برای تعیین دقیق موقعیت یک شی کوانتومی، باید تابع موج ناپدید شود که با مشاهده می توانیم به سادگی تابع موج را محو کنیم! بنابراین به هیچ وجه، نگاه خود را دست کم نگیرید!!
فروریزش تابع موج



تابع موج قبل از مشاهده- پس از مشاهده، فروریزش تابع موج رخ می دهد و موقعیت دقیق ذره، دقیقاً تعیین می شود.

تابع موج قبل از مشاهده- پس از مشاهده، فروریزش تابع موج رخ می دهد و موقعیت دقیق ذره، دقیقاً تعیین می شود.

تابع موج و برهم نهی کوانتومی

زمانیکه یک شی کوانتومی، مشاهده می شود، به اصطلاح کلاپس یا فروریزش تابع موج رخ می دهد.

فروریزش تابع موج یعنی کاهش تابع موج به یک ویژه حالت (یک مکان و یک سرعت)

فروریزش تابع موج باعث می شود هیچگاه نمی توانیم یک شی را با چندین سرعت و چندین مکان مشاهده کنیم، زیرا با مشاهده، برهم نهی حالات از بین می رود.

بنابراین یک نتیجه ی بسیار مهم و جنجالی حاصل می شود: عمل مشاهده، فقط ویژگی های یک شی کوانتومی را مشخص نمی کند، بلکه ماهیت آنها را هم تعیین می کند!

این بدان معناست که ما آینده ی یک شی را صرفاً با مشاهده ی آن تعیین می کنیم (یعنی اندازه گیری ویژگی هایش!!)

حالا یک سوال پیش می آید: یک شی کوانتومی چگونه یک ویژه حالت را در زمان مشاهده انتخاب می کند؟

پاسخ را باید در احتمال جستجو کنیم. احتمال اینکه یک شی کوانتومی در یک ویژه حالت خاص قرار بگیرد، به وسیله ی تابع موجش مشخص می شود.

بنابراین از تابع موج به عنوان موج احتمال هم یاد می شود.

از هر تابع موجی، می توان یک عدد به نام بزرگی احتمال را بدست آورد.

احتمال اینکه یک شی کوانتومی در یک ویژه حالت معین قرار بگیرد، با مربع یا مجذور بزرگی احتمال تعیین می شود.

مثلاً اگر احتمال رخ دادن یک فرآیند معین، ۵۰ درصد باشد، بزرگی احتمال این فرآیند، برابر با ۱/√۲ خواهد بود.

تابع احتمال کوانتومی- محتمل ترین مکان ذره در شکل مشخص شده است

فرض کنید می خواهیم سرعت یک الکترون را تعیین کنیم که این الکترون در برهم نهی از دو ویژه حالت کوانتومی قرار دارد.

در نخستین ویژه حالت، سرعت الکترون، ۱ و در دومین ویژه حالت، سرعت الکترون، ۲ است.

این برهم نهی دو سرعت را می توان از نظر ریاضی به صورت زیر نشان داد:

تصویر شماره (۱)

تا زمانی که الکترون مشاهده نمی شود، هر دو سرعت را دارد. اما به محض مشاهده، تابع موج یک احتمال معین از یک ویژه حالت را به هر الکترون اختصاص می دهد.

فرض می کنیم الکترون با احتمال ۷۵ درصد در ویژه حالت اول (سرعت ۱) و با احتمال ۲۵ درصد در ویژه حالت دوم (با سرعت ۲) قرار دارد.

از نظر ریاضی می توان آن را با استفاده از بزرگی احتمال به صورت زیر نوشت:

تصویر شماره (۲)

اگر سرعت را اندازه بگیریم، طبیعتاً فروریزش تابع موج رخ می دهد و الکترون تنها یک سرعت را بدست می آورد.

فرض می کنیم که در نخستین اندازه گیری، الکترون دارای سرعت ۱ است.

اگر اندازه گیری را چندین بار با الکترون های دیگر با تابع موج یکسان، تکرار کنیم، به طور تصادفی هر یک از دو سرعت ۱ یا سرعت ۲ بدست می آید.

در ۷۵ درصد موارد، الکترون، سرعت ۱ و در ۲۵ درصد باقی مانده، سرعت ۲ را دارد.

اما هیچگاه با اطمینان نمی توانیم بگوییم که الکترون در اندازه گیری بعدی، چه مقداری را بدست خواهد آورد.

تابع موج و برهم نهی کوانتومی

هنگامیکه یک شی کوانتومی در برهم نهی چندین ویژه حالت قرار دارد، هر یک از این حالات دارای مقدار احتمال معینی هستند. جمع مقادیر احتمال تمام ویژه حالات این شی کوانتومی، مساوی با یک است.

نشانه های ریاضی آن به شکل زیر هستند(c۱ ،c۲ ،۳ بزرگی های احتمال هستند:

$$|\psi\rangle = c_1 |\text{حالت ۱}\rangle + c_2 |\text{حالت ۲}\rangle + \ldots$$

$$|c_1|^2 + |c_2|^2 + \ldots = 1$$

@newsNASA
کانال نیوز ناسا
@newsNASA
www.nojuom.ir

تصویره (۱)

اجازه دهید به عقب بازگردیم.

پروتون در آزمایش یانگ در موقعیت برهم نهی قرار دارد، بنابراین واقعاً به طور همزمان از هر دو شکاف عبور کرده و با خودش تداخل می کند!

اگر یک آشکارساز را در مقابل شکاف ها قرار داده و مشاهده کنیم پروتون از کدام شکاف عبور می کند، برهم نهی از بین رفته و الگوی تداخلی ناپدید می شود !

الکترونی که از یک تفنگ، شلیک می شود، به طور همزمان در بیش از یک ویژه حالت است و بنابراین به طور همزمان چندین سرعت داشته و در چندین مکان قرار دارد.

اما پس از برخورد و درست زمانیکه فروریزش تابع موج رخ می دهد، الکترون، تنها در یک مکان قرار می گیرد!

ما برهم نهی را در جهان ماکرو نمی توانیم حس کنیم، چرا که اشیای ماکرو به طور مداوم با محیط اطرافشان به عنوان مشاهده کننده برهمکنش می کنند، بنابراین در هر لحظه فروریزش تابع موج رخ می دهد.

برهم نهی کوانتومی یک اصل بنیادی مکانیک کوانتوم است که چارچوب معینیت فیزیک کلاسیکی را در هم می شکند.

در مکانیک کوانتوم، آینده را فقط از طریق احتمال ها می توان پیش بینی کرد و برخلاف مکانیک کلاسیکی، شرایط یکسان، اغلب منجر به نتایج کاملاً متفاوتی می شود.

شاید با خودتان فکر کنید مفهوم احتمال در جهان ماکرو هم وجود دارد. اما ناچارم شما را ناامید کنم چرا که کاملاً اشتباه فکر می کنید!

هر پدیده ی به نظر تصادفی در جهان ماکرو، مثلاً پرتاب یک تاس، کاملاً معلوم و معین است.

در واقع پدیده هایی که ما آنها را تصادفی می نامیم، تنها به دلیل دانش ناکافی ما از سیستم آنها، تصادفی به نظر می رسند.

در مورد پرتاب تاس روی یک سطح، عدم اطلاع ما از ارتفاع تاس روی سطح، سرعت چرخش تاس، جرم تاس، زبری سطح و عوامل دیگر باعث می شود تا ما آن را یک عمل کاملاً تصادفی فرض کنیم!

با جمع بندی مطالب بالا به این نتیجه میرسیم که در مکانیک کوانتوم، به جای سوال "ذره کجا قرار دارد؟

"باید این سوال را بپرسیم: "احتمال یافتن یک ذره در یک مکان معین چیست؟ "

در قسمت بعد، به سراغ یکی از موضوعات جنجالی و البته فلسفی، یعنی تفسیرهای مکانیک کوانتومی خواهیم رفت .

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

معرفی اصل عدم قطعیت

در سال ۱۹۲۷ جوان نابغه ای به نام ورنر هایزنبرگ برای اولین بار، پای اصل عدم قطعیت را به فیزیک باز کرد.

ابتدا این اصل را با یک جمله ی ساده تعریف کرده و سپس به سراغ توضیح مفصل آن می روم.

اصل عدم قطعیت یک واقعیت بسیار مهم را به شما گوشزد می کند: طبیعت، به شما اجازه نمی دهد همه چیز را به صورت یکجا در موردش بدانید، اما موضوع جالب تر هم می شود اگر بدانید طبیعت حتی خودش هم در مورد خودش، همه چیز را یکجا نمی داند!!

این یعنی اصل عدم قطعیت به زبان ساده. حال اجازه دهید با یک آزمایش ساده، آن را کمی روشن تر کنیم.

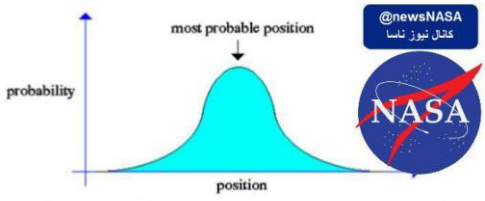
فرض کنید یک تفنگ الکترونی داریم که به وسیله ی آن، الکترون ها را از درون یک شکاف کوچک شلیک می کنیم.

در پشت شکاف و در فاصله ی معینی، یک صفحه ی آشکارسازی وجود دارد.

در واقع این صفحه مکان الکترون هایی که از شکاف عبور می کنند را مشخص می کند.

اگر از کلاس درس قبلی یادتان باشد، به دلیل اصل برهم نهی، نمی توانیم مکان برخورد هر الکترون به صفحه آشکارساز را پیش بینی کنیم.

اما اگر تابع موج آن را بدانیم، می توانیم احتمال فرود الکترون در یک مکان خاص روی صفحه را محاسبه کنیم.



تصویره (۱)

تابع احتمال کوانتومی- محتمل ترین مکان ذره در شکل مشخص شده است

$$|\psi\rangle = |\text{سرعت ۱}\rangle + |\text{سرعت ۲}\rangle$$ تصویره (۲)

$$|\psi\rangle = \sqrt{\frac{3}{4}}\,|\text{سرعت ۱}\rangle + \sqrt{\frac{1}{4}}\,|\text{سرعت ۲}\rangle$$ تصویره (۳)

تصویر شماره (۱(

حالا بیایید شکاف را اندک اندک، کوچک تر کنیم .

همه ی ما انتظار داریم که در اثر این کوچکترکردن، الکترون ها هم بخش باریک تری از صفحه ی آشکارسازی را اشغال کنند.

در ابتدا، حدس ما درست است و الکترون ها قطعاً بخش باریک تر از صفحه ی آشکارسازی را اشغال می کنند.

اما با کوچکتر شدن شکاف و گذشتن از یک مقدار مشخص، نتیجه کاملاً برعکس می شود، یعنی الکترون ها شروع به پخش شدن می کنند!

انگار سروکله ی عدم قطعیت پیدا شده است.

تصویر شماره (۲(

اصل عدم قطعیت، بیان می کند که جفت هایی از ویژگی های فیزیکی وجود دارند که نمی توان مقدار دقیق آنها را به طور همزمان بدست آورد.

مشهورترین جفت، اندازه حرکت و مکان هستند.

اندازه حرکت یا تکانه، حاصلضرب سرعت در جرم است. البته در مورد تکانه، تعریف فیزیکی کاملاً سرراستی وجود ندارد، اما می توان آن را به معنای "شوق حرکت یک شی" دانست. اصل عدم قطعیت می گوید، هرگاه شما یکی از این دو ویژگی را (مکان یا اندازه حرکت) به دقت اندازه گیری کنید، در مورد ویژگی دیگر، دچار بی دقتی خواهید شد. یعنی اگر مکان یک ذره را به صورت کاملاً دقیق اندازه گیری کنید، بی دقتی زیادی در اندازه حرکت به وجود خواهد آمد.

پس نمی توانید مقدار دقیق هر دو ویژگی را به طور همزمان در اختیار داشته باشید.

اگر یکی از آنها را دقیق تر اندازه بگیریم، عدم قطعیت یا نادقیقی در دیگری بیشتر می شود. جفت ویژگی معروف دیگر، زمان و انرژی هستند و تمام موارد بالا برای این دو کمیت نیز صادق است.

اجازه دهید دوباره به آزمایش بالا بازگردیم. اگر شکاف را باریک تر کنیم، عدم قطعیت در مورد مکان الکترون ها، کاهش می یابد، اما عدم قطعیت اندازه حرکت آنها افزایش یافته و در نتیجه محدوده ی بزرگتری از صفحه ی آشکارساز را اشغال کرده و به اصطلاح پخش می شوند.

کمی کمّی تر!

شکل ریاضی اصل عدم قطعیت در مورد جفت اندازه حرکت و مکان و همچنین جفت انرژی و زمان یک ذره به صورت زیر بیان می شود:

تصویر شماره (۳(

بنابراین حاصلضرب دو ویژگی مورد نظر، همیشه مساوی یا بزرگتر از مقدار ثابت پلانک کاهش یافته تقسیم بر دو است.

شاید بپرسید این روابط چگونه به وجود آمده اند؟

به بیان ساده، این روابط حاصل یک اصل عمومی تر در مکانیک کوانتومی هستند و آن، جابه جایی ناپذیری اپراتورهاست.

برای پاسخ دادن به این سوال باید ریشه های ریاضی پیدایش اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را بررسی کنیم که این کار را در کلاس های درس تخصصی کوانتوم انجام خواهیم داد.

ریشه ی فیزیکی پیدایش اصل عدم قطعیت

اگر بخواهیم ریشه ی فیزیکی اصل عدم قطعیت را توضیح دهیم، فقط یک انتخاب داریم:

)دوگانگی موج-ذره(

برای روشن تر شدن موضوع، باید به تفاوت بین موج و ذره توجه کنیم. در واقع یک ذره، در یک مکان مشخص قرار دارد، در حالیکه موج یک موجود پخش شده در فضاست و محدوده ای از مکان ها را دربر می گیرد.

اندازه حرکت یک ذره، محدوده ای از مقادیر را دارد، در حالیکه اندازه حرکت یک موج، کاملاً دقیق و معلوم است.

حالا یک موجود چطور می تواند به طور همزمان این دو ویژگی (موج و ذره بودن) را داشته باشد؟ پاسخ مشخص است!

یک چیز، هیچ وقت نمی تواند به طور کامل موج یا ذره باشد، بلکه باید مخلوطی از این دو باشد. به همین دلیل است که اصل عدم قطعیت پدیدار می شود.

در واقع در دو معادله ی ذکر شده در بالا، مکان (x) مربوط به خاصیت ذره بودن و اندازه حرکت (p) مربوط به خاصیت موج بودن است.

شما نمی توانید یک موج خالص (دقیق ترین (x و یک ذره ی خالص (دقیق ترین (p را به طور همزمان داشته باشید!

یک اشتباه بنیادی

برخی از افراد برای توضیح اصل عدم قطعیت، یک اشتباه بنیادی را مرتکب می شوند.

آنها اصل عدم قطعیت را اغلب با اثر ناظر اشتباه می گیرند.
اثر ناظر یا مشاهده گر، پدیده ای است که در اثر مشاهده ی سیستم کوانتومی یا به عبارت بهتر، اندازه گیری آن، به وجود می آید.
یعنی زمانیکه یک سیستم کوانتومی، مورد اندازه گیری قرار می گیرد،دچار اختلال شده و در نتیجه حالت اصلی آن (قبل از اندازه گیری) تغییر می کند.
در واقع اثر ناظر، نتیجه ی اصل برهم نهی است.
استدلال اشتباه افراد (از جمله خود هایزنبرگ(!!
این بود که با نگاه کردن به سیستم، فوتون های نوری به الکترون ها برخورد کرده و مکان آنها را تغییر می دهند، در نتیجه اندازه گیری ما باعث به وجود آمدن عدم قطعیت می شود.
اما این پدیده، هیچ ربطی اصل عدم قطعیت ندارد، زیرا عدم قطعیت در مورد مکان و اندازه حرکت یک ذره ی کوانتومی، همیشه و بدون توجه به حضور یک ناظر یا مشاهده گر رخ می دهد.
پس یادمان نرود عدم قطعیت یک ویژگی ذاتی طبیعت بوده و در تاروپود آن تنیده شده است!
<u>تونل زنی کوانتومی</u>
اجازه دهید با ملموس ترین مثال ممکن آغاز کنیم.
حیات ما در زمین وابسته به تابش خورشید است.
اما تا به حال فکر کرده اید علت تابش خورشید چیست؟
این تابش به دلیل پدیده ای به نام همجوشی هسته ای رخ می دهد.
در واقع این پدیده، طور مداوم در هر ستاره ای رخ می دهد.
در همجوشی هسته ای، دو یا چند هسته ی سبک تر با یکدیگر برخورد کرده و یک عنصر سنگین تر را می سازند.
بیشتر انرژی آزادشده در این فرآیند، به صورت نور است.
اما همانطور که میدانیم هسته ها دارای بار مثبت هستند و یکدیگر را از نظر الکتریکی دفع می کنند؛ بنابراین هسته ها باید انرژی زیادی داشته باشند تا بتوانند به اندازه ی کافی به یکدیگر نزدیک شوند.
چرا که با نزدیک تر شدن هسته ها از فاصله ی خاصی، نیروی قوی هسته ای بر نیروی الکتریکی دافعه ای غلبه می کند و همجوشی هسته ای رخ می دهد.
اما وقتی دمای خورشید به وسیله ی طیفش تعیین می شود، به نظر می رسد که همجوشی هسته ای به هیچ وجه در خورشید دست یافتنی نیست.
به عبارت دیگر، خورشید عملاً نباید تابشی داشته باشد.
اما خورشید هر صبح، طلوع می کند و زمین ما را روشن می کند.
پس علت این تابش چیست؟
تونل زنی کوانتومی!
تاریخچه ی تونل زنی کوانتومی
تونل زنی کوانتومی یکی از دستاورهای بسیار مهم دهه ی سوم قرن بیستم است، پدیده ای که تا امروز ۵ جایزه ی نوبل فیزیک را برای دانشمندان به ارمغان آورده است.
دانشمندانی همچون هانری بکرل، ماری کوری، پیرکوری و رادرفورد که تابش را مطالعه می کردند، به تونل زنی برخورد کردند.
اما تونل زنی کوانتومی به طور صریح برای اولین بار در سال ۱۹۲۷ و توسط فردریش هوند، مورد توجه قرار گرفت.
بعدها دانشمندان دیگری از این نظریه برای توضیح پدیده های تابشی استفاده کردند.
اما در نهایت این ماکس بورن بود که تونل زنی کوانتومی را نتیجه ی کلی قوانین مکانیک کوانتومی معرفی کرد.
پس از آن، پای تونل زنی کوانتومی به حوزه های وسیع تری مانند دیودها، ترانزیستورها و نیمه رساناها باز شد. برای اطلاع از تاریخچه ی مفصل تونل زنی، مقاله ی زیر را مطالعه کنید.
تونل زنی کوانتومی از نمای نزدیک!
برای تعریف ساده ی تونل زنی کوانتومی، به سراغ معروفترین مثال می روم.
فرض کنید بین در یک دره و بین دو کوه گیر افتاده اید، تنها راهی که برای بیرون رفتن از دره به فکر می رسد این است که از یکی از کوه ها بالا رفته، از قله عبور کرده و در سمت دیگر کوه فرود آیید.
اما اگر شما یک ذره ی کوانتومی بودید، راه جالب دیگری هم برای خروج شما از این دره وجود داشت: عبور از درون کوه!
این راه حل اگرچه در دنیای ماکروسکوپی ما خنده دار به نظر می رسد، اما همان اتفاقی است که هر لحظه در دنیای میکروسکوپی اتفاق می افتد، یعنی تونل زنی کوانتومی.
پس حالا می توانیم تونل زنی کوانتومی را اینطور تعریف کنیم: اگر برای رفتن یک ذره ی کوانتومی به یک حالت کوانتومی دیگر، یک سد انرژی وجود داشته باشد، ذره با وجود داشتن انرژی کمتر از آن سد، می تواند از آن عبور کند (گذشتن از درون کوه.(
اگر گذر ارواح و اشباح از درون دیوار را فقط در فیلم ها دیده اید، گذر ذرات کوانتومی از سدهای انرژی، هر لحظه رخ می دهد.
در واقع از نظر فیزیک کلاسیکی، امکان ندارد یک ذره بتواند از سدی با انرژی بیشتر از انرژی درونی اش بگذرد، اما در مکانیک کوانتومی، این پدیده کاملاً عادی است.
تونل زنی کوانتومی، نتیجه ای از اصل برهم نهی کوانتومی و اصل عدم قطعیت است.
برای روشن تر شدن، اجازه دهید به همجوشی هسته ای بازگردیم.
طبق فیزیک کلاسیکی، دمای خورشید برای همجوشی هسته ای کافی نیست.

اما اصل برهم نهی کوانتومی می گوید هسته می تواند در بیش از یک مکان وجود داشته باشد (به خاطر ماهیت موج گونه اش)، بنابراین برای رسیدن به دمای کافی و رخ دادن همجوشی، احتمال معینی وجود دارد. بنابر اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، اندازه حرکت یک شی همیشه دارای عدم قطعیت است، بنابراین با گذشت زمان، دو هسته می توانند به سرعت لازم برای همجوشی برسند.

تونل زنی کوانتومی، یکی از چند پدیده ی کوانتومی است که می توانیم آن را در جهان ماکروسکوپی حس کنیم. تونل زنی کوانتومی در واپاشی رادیواکتیو یا در دیسک های فلش رخ می دهد.

همچنین پژوهش ها حاکی از آن است که در جهش تصادفی DNA درون ارگانیسم های زنده، تونل زنی پروتون یکی از بازیگران اصلی است و حتی این پدیده می تواند علت سرطان باشد.

اسپین کوانتومی عجیب و شگفت انگیز

احتمالا شما هم میدانید نخستین وسیله ای که شوق فیزیک را در ذهن اینشتین خلق کرد، چه بود: یک قطب نمای جیبی ساده که پدرش در ۵ سالگی به او هدیه داد.

برای اینشتین ۵ ساله، تغییر جهت عقربه های قطب نما بسیار هیجان انگیز بود.

نکته ای که حالا همه ی ما دلیل آن را میدانیم، اما به احتمال زیاد ما هم زمانی از خود پرسیده ایم: آهنرباها چگونه کار می کنند؟

چرا برخی مواد مانند آهن، ویژگی های مغناطیسی از خود نشان می دهند، در حالیکه موادی مانند چوب، هیچ نشانه ای از مغناطیس، ندارند؟

پاسخ تمام این سوالات در ویژگی عجیبی از مواد به نام اسپین کوانتومی ، نهفته که موضوع بحث این کلاس درس است.

به طور کلی، دو نوع اندازه حرکت در جهان ماکروسکوپی وجود دارد: اندازه حرکت کلاسیکی که با حرکت در یک راستای مشخص بدست می آید و اندازه حرکت زاویه ای که بیشتر به صورت چرخش شناخته می شود.

اما اشیای جهان میکروسکوپی، نوع اضافه تری از اندازه حرکت دارند که به عنوان اندازه حرکت ذاتی یا اسپینی شناخته می شود.

اسپین کوانتومی اغلب با چرخش کلاسیکی مقایسه می شود (به همین دلیل نام اسپین به معنای چرخش را گرفته است.(

اما این مقایسه، دقیق نیست زیرا اشیای دارای اسپین کوانتومی ، واقعاً نمی چرخند، بلکه چرخش، یک ویژگی صرفاً ذاتی آنهاست.

مقایسه دو نوع اندازه حرکت زاویه ای

تصور شماره (۱(

اسپین، یکی از ویژگی های ذاتی ذرات بنیادی (مانند الکترون) و همچنین ذرات مرکب (مانند هسته های اتمی) به شمار می آید. واحد اسپین، ثابت پلانک کاهش یافته(ħ = h/)) ۲ (πبخوانید اچ بار) است.

ذراتی با اسپین نیمه صحیح، فرمیون و ذراتی با اسپین صحیح، بوزون نامیده می شوند.

برای محاسبه ی اسپین کل ذرات مرکب، باید اسپین ذرات سازنده ی آنها را با یکدیگر جمع کنیم .

ارتباط اسپین کوانتومی و مغناطیس چیست؟

ذرات دارای اسپین کوانتومی با تولید میدان های مغناطیسی ضعیف، مانند آهنرباهایی کوچک و عجیب رفتار می کنند. این همان دلیلی است که چرا اشیای ماکروسکوپی (که از تعداد زیادی از این آهنرباها تشکیل شده اند)، مغناطیسی هستند. با این حساب، چرا تمام اشیا دارای رفتار مغناطیسی نیستند؟

دو دلیل وجود دارد:

اگر یک اوربیتال اتمی، پر باشد، الکترون ها در این اوربیتال، اسپین کوانتومی مخالفی خواهند داشت و در نتیجه میدان های مغناطیسی آنها، یکدیگر را خنثی خواهند کرد. این بدان معناست که هیچ اتمی با اوربیتال های پر، مغناطیسی نخواهد بود .

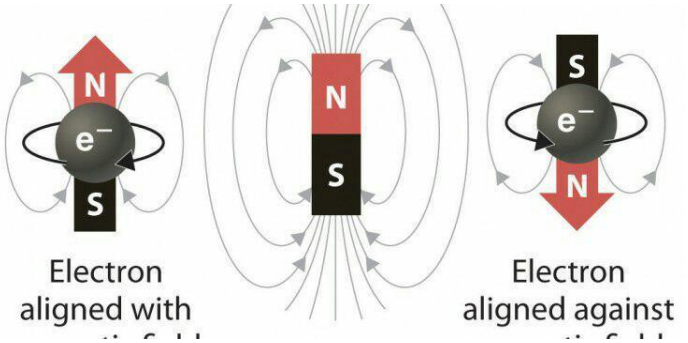
رای اینکه یک اتم، مغناطیسی باشد، باید اوربیتال های نیمه پر داشته باشد تا میدان های مغناطیسی هر الکترون، میدان الکترون های دیگر را تقویت کند.

از طرفی، تمام مواد از اتم های مغناطیسی ساخته نشده اند و بنابراین ویژگی های مغناطیسی از خود نشان نمی دهند.

حتی اگر اتم های تشکیل دهنده ی مواد، مغناطیسی هم باشند، باز ممکن است هیچ اثر مغناطیسی در آنها مشاهده نشود.

علت آن است که آرایش الکترونی اتم های تشکیل دهنده ی این مواد، در جهت های متفاوتی، جهت گیری کرده اند که در نتیجه میدان های مغناطیسی آنها یکدیگر را خنثی می کنند.

درصد کمی از مواد، دارای اتم های هم جهت بوده و بنابراین میدان های مغناطیسی یکدیگر را تقویت کرده و در نهایت، رفتار مغناطیسی از خود بروز می دهند. به دو دلیل بالا، مواد مغناطیسی بسیار کمیاب هستند.



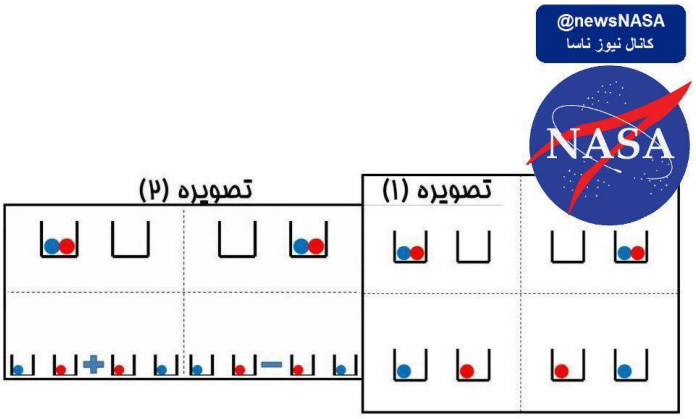
تصور شماره (۲)

منظور از اسپین کوانتومی ذرات زیراتمی مانند الکترون و پروتون، دقیقا چیست؟

مورتون تاول؛ استاد فیزیک کالج واسر نیویورک:

زمانیکه ذرات بنیادی در یک میدان مغناطیسی حرکت می کنند، مانند آهنرباهای کوچک رفتار کرده و در واقع منحرف می شوند.
در دنیای کلاسیکی، یک شی باردار و در حال چرخش، ویژگی های مغناطیسی دارد که بسیار شبیه به همین ویژگی های ذرات بنیادی است.
از آنجایی که فیزیکدانان، شباهت ها را دوست دارند، این ویژگی ذرات بنیادی را نیز به صورت چرخش آنها توصیف می کنند.
متاسفانه، این شباهت محکوم به شکست است و ما در واقع نمی توانیم الکترون را به صورت یک ذره ی در حال چرخش، تصور کنیم.
آزمایش ها نشان می دهند الکترون به وسیله ی میدان های مغناطیسی، منحرف می شود.
اگر در مورد چرخش الکترون به دور خودش، پافشاری کنیم، یک تناقض به وجود می آید: برخلاف پرتاب یک توپ نرم بیسبال، اسپین یا چرخش یک الکترون، هرگز تغییر نمی کند و تنها دو جهت ممکن دارد.
از طرفی با توجه به قواعد مکانیک کوانتومی، نمی توان مدعی شد که الکترون ها و پروتون ها، اشیای صلب و سفتی هستند.
کورت باخمن استاد کالج بیرمنگام جنوبی:
با شروع دهه ی ۱۹۲۰ میلادی، «اوتو اشترن» و «والتر گرلاخ» از دانشگاه هامبورگ در آلمان، مجموعه ای از آزمایش های پرتوی اتمی را انجام دادند.
با علم به اینکه همه ی بارهای در حال حرکت، میدان های مغناطیسی تولید می کنند، آنها تصمیم گرفتند تا این میدان های مغناطیسی تولید شده توسط الکترون ها را اندازه گیری کنند. این دو فیزیکدان دریافتند که اگر الکترون ها، به سرعت به دور خود بچرخند، میدان های مغناطیسی کوچکی مستقل از میدان های حاصله از حرکت اروبیتالی شان، تولید می شود.
در نتیجه، واژه ی اسپین (به معنای چرخش) برای توصیف این چرخش واضح حرکت های زیراتمی استفاده شد.
اسپین کوانتومی ، یک کمیت فیزیکی عجیب و غریب است.
اگرچه برخی افراد، این کمیت را به چرخش سیاره ای تشبیه می کنند، اما بر اساس اندازه های شناخته شده ی ذرات زیراتمی، این ذرات باردار برای تولید اندازه حرکت های مغناطیسی قابل اندازه گیری، باید سریع تر از سرعت نور حرکت کنند.
از طرفی، اسپین، کوانتیزه یا دارای مقادیر گسسته است، یعنی تنها اسپین های خاصی، مجاز هستند.
این عوامل باعث می شود تا اسپین کوانتومی ، یکی از چالش برانگیزترین جنبه های مکانیک کوانتومی به شمار رود.
با یک نگاه جامع تر درمی یابیم که اسپین یک ویژگی ضروری و بسیار تاثیرگذار بر الکترون ها و هسته ها در اتم ها و ملکول هاست و دنیای شیمی و فیزیک حالت جامد را می سازد.
اسپین، بخش ضروری تمام برهمکنش های میان ذرات زیراتمی در پرتوهای ذرات با انرژی بسیار بالا و سیالات با دمای پایین است.
بسیاری از فرآیندهای فیزیکی، از محدوده ی کوچکترین مقیاس های هسته ای تا بزرگترین فواصل اخترفیزیکی به برهمکنش های ذرات زیراتمی و اسپین های آنها بستگی دارد.
ویکتور استنگر، استاد فیزیک دانشگاه هاوایی:
در فیزیک کلاسیکی، اندازه حرکت زاویه ای، یک متغیر پیوسته است.
در حالیکه در مکانیک کوانتومی، اندازه حرکت های زاویه ای، گسسته بوده و به صورت واحدهایی از ثابت پلانک تقسیم بر ۴ پی، بسته بندی شده اند.
نیلز بور در سال ۱۹۱۳ پیشنهاد کرد که اندازه حرکت زاویه ای، کوانتیزه شود و از این پیشنهاد برای توضیح و تفسیر طیف هیدروژن استفاده کرد.
دانش کنونی ما می گوید ذرات بنیادی شامل کوارک ها، لپتون ها (مانند الکترون) و بوزون ها (مانند فوتون) هستند.
این ذرات، همگی به صورت شبه نقطه ای فرض می شوند، بنابراین ممکن است از اینکه چگونه آنها می چرخند (یا به اصطلاح اسپین دارند) متعجب شوید.
یک پاسخ ساده این است که شاید آنها هم از چیزی تشکیل شده باشند و به اصطلاح بنیادی نباشند.
اما دلایل نظری عمیق تری ما را ملزم می کنند تا برای آنها، اسپین قائل شویم.
نکته ی قابل توجه به تفاوت بین فرمیون ها، (ذرات با اسپین نیمه صحیح) و بوزون ها (ذرات با اسپین صحیح) برمی گردد.
فرمیون ها از اصل طرد پائولی پیروی می کنند که بیان می کند دو فرمیون یکسان، نمی توانند در حالت کوانتومی یکسانی قرار بگیرند.
بدون توجه به اصل طرد پائولی، شیمی هرگز جدول تناوبی نداشت!
از طرف دیگر، بوزون ها تمایل دارند تا در یک حالت کوانتومی یکسان، جمع شوند که منجر به پدیده هایی مانند ابررسانایی و حالت چگال بوز-اینشتین می شود.
توضیحات بالا، مفهوم بسیار مهم اسپین را به صورت کیفی توصیف می کنند، این در حالیست که ریاضیات پیچیده ای در پس پرده ی این مفهوم عجیب و غریب وجود دارد که در آینده به آن خواهیم پرداخت.
داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون
پرده ی اول: تقارن تابع موج
وقتی اشیای دنیای ماکروسکوپی را توصیف می کنیم، اغلب از کلماتی مانند "یکسان" یا "همان" استفاده می کنیم. مثلا می توانیم ادعا کنیم که دو گوشی آیفون ۶ اس، یکسان هستند. اما این فقط یک نگاه خام است!

اگرچه در نگاه اول، هیچ تفاوتی بین این دو گوشی، احساس نمی کنیم، اما آنها واقعا یکسان نیستند و در مقیاس ملکولی با یکدیگر تفاوت دارند.
از طرفی، در دنیای ماکروسکوپی، می توانیم این دو گوشی به اصطلاح یکسان را از یکدیگر تفکیک کنیم، مثلا می توانیم یکی را با رنگ آبی و دیگری را با رنگ قرمز، علامت گذاری کنیم. اما در جهان میکروسکوپی، کلمات "همسان" یا "قابل تشخیص"، معنای کاملا متفاوتی دارند.
هر دو ذره ی کوانتومی (مانند الکترون، پروتون، فوتون و ...) کاملا با یکدیگر یکسان هستند و هیچ راهی برای جدا کردن و تفکیک آنها وجود ندارد، چرا که در این مورد، نمی توانیم، یکی را علامتگذاری کنیم.
در واقع، علامت گذاری یک الکترون با رنگ های متفاوت، غیرممکن است، زیرا در جهان کوانتومی، حتی رنگ هم معنی ندارد!
اجازه دهید برای درک بهتر این موضوع، به سراغ توپ های رنگی دوران کودکی برویم.
فرض کنید یک توپ آبی و یک توپ قرمز و دو سبد دارید و میخواهید آنها را در دو سبد توزیع کنید.
چند راه برای توزیع آنها، وجود دارد؟
شکل زیر، چهار حالت ممکن برای توزیع دو توپ در دو سبد را نشان می دهد.
تقارن تابع موج : طبق شکل بالا، با احتمال ۵۰ درصد، دو توپ را درکنار هم در یک سبد خواهید دید (۲۵ درصد دو توپ در سبد سمت راست و به احتمال ۲۵ درصد هر دو توپ در سبد سمت چپ) و به احتمال ۵۰ درصد هم دو توپ در سبدهای جداگانه خواهند بود (۲۵ درصد توپ قرمز در سبد سمت راست و به احتمال ۲۵ درصد توپ قرمز در سبد سمت چپ.)
اما صبر کنید!
این ها فقط توپ های ماکروسکوپی هستند در حالیکه ما درباره ی ذرات کوانتومی صحبت می کنیم، پس اجازه دهید، داستان را با توپ های کوانتومی ادامه دهیم.
توپ های کوانتومی می توانند در یک برهم نهی از حالت های کوانتومی قرار داشته باشند. حالا دوباره فرض کنید میخواهیم دو توپ را در دو سبد توزیع کنیم.
باز هم با چهار حالت به شکل زیر مواجه می شویم:
تقارن تابع موجهمانطور که در بالا اشاره کردیم، ذرات یا توپ های کوانتومی، مانند یکدیگر هستند و هیچ راهی برای برچسب گذاری آنها وجود ندارد.
بنابراین صحبت از توپ قرمز یا آبی بی معناست.
در شکل بالا هم، فقط برای درک بهتر روش های توزیع، رنگ ها را همچنان حفظ کرده ایم. در اینجا باز هم با چهار حالت، مواجه هستیم که در دو مورد آن، هر دو توپ در یک سبد و در دو مورد دیگر، هر یک از توپ ها در یک سبد جداگانه قرار گرفته اند.
در موردی که هر دو توپ در یک سبد قرار میگیرند (نیمه ی بالایی شکل)، مسئله ی دشواری وجود ندارد.
اما زمانیکه توپ ها در سبدهای جداگانه قرار می گیرند، قضیه کمی پیچیده تر می شود چرا که توپ ها می توانند در یک برهم نهی قرار بگیرند.
همانطور که در نیمه پایینی شکل هم دیده می شود، یک توزیع، حالتی است که توپ آبی در سبد راست به اضافه ی زمانیکه در سبد چپ قرار بگیرد.
توزیع بعدی مربوط به تفریق همین دو حالت است.
اگرچه علامت منفی، کمی عجیب به نظر می رسد، اما یادتان باشد چهار حالت بالا، فقط توزیع های احتمال هستند و ما برای بدست آوردن احتمال، باید آن ها را به توان دو برسانیم، بنابراین در نهایت علامت منفی در احتمال ها وجود نخواهد داشت و این همان نکته ای که همیشه در مورد احتمال ها می دانستیم: احتمال ها همیشه مثبت هستند.



داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون
پرده ی دوم: فرمیون و بوزون
فیزیکدانان علاقمندند جهان را به دو دسته تقسیم کنند:ماده ی معمولی و ماده ی تاریک، رسانا و نارسانا، لپتون و کوارک ها. برخی از این دسته بندی ها فقط برای راحتی و به طور اختیاری انجام می شوند، در حالیکه برخی، بنیان طبیعت را توصیف می کنند. یکی از این دسته بندی های بنیادی، بوزون ها و فرمیون ها هستند، مفاهیمی که بدون آنها، گیتی به شکلی که امروز میشناسیم، وجود نداشت!
راه های زیادی برای تعریف تفاوت بین این دو مفهوم وجود دارد:
فیزیکدانان متخصص ذرات بنیادی، بوزون ها را به عنوان ذرات حامل نیرو و فرمیون ها را به عنوان ذرات ماده در نظر می گیرند، اما این دو مفهوم، به طور استاندارد بر اساس اسپین، تعریف می شوند. فرمیون ها دارای اسپین نیمه صحیح و بوزون ها دارای اسپین صحیح هستند.
همین تفاوت به نظر ساده، اثرات بسیار عمیقی بر ساختار کائنات گذاشته است.

فرمیون ها درست مانند آدم های منزوی و گوشه گیری هستند که به هیچ وجه، جمع شدن در کنار یکدیگر را دوست ندارند، در حالیکه بوزون ها، موجوداتی بسیار اجتماعی هستند و دوست دارند همیشه با یکدیگر باشند.

حالا بهتر است تفاوت فرمیون و بوزون را در بحث تقارن تابع موج نشان دهیم. در واقع هر یک از سبدها در شکل ۱ و ۲، نقش یک تابع موج Ψ را بازی می کند. با این حساب چهار حالت شکل ۲ را با استفاده از تابع موج می توان به شکل زیر نمایش داد:

حالت اول بدان معناست که هر دو ذره (توپ) در تابع موج اول (سبد اول) قرار گرفته اند و همین طور الی آخر. علامت Φ نشان دهنده ی تابع موج کلی هر توزیع است.

تفاوت فرمیون ها و بوزون ها با استفاده از تقارن تابع موج به صورت زیر تعریف می شود:

تابع موج کلی فرمیون ها باید نسبت به جابجایی ذرات، پاد متقارن بوده، در حالیکه تابع موج کلی بوزون ها باید نسبت به جابه جایی ذرات، متقارن باشد .

در شرط بالا، تابع موج متقارن به تابعی گفته می شود که با جا به جا کردن ذرات (یعنی جابه جاکردن ۱ و ۲های داخل پرانتزها)، همان تابع اولیه را بدهد و تابع موج پادمتقارن به تابعی گفته می شود که در صورت جابجایی ذرات، به منفی تابع اولیه تبدیل شود. اجازه دهید این شرط را در هر چهار تابع Φ آزمایش کنیم.

اگر جای دو ذره را درΦ ۱ وΦ ۲ عوض کنیم، باز به همان تابع موج اولیه میرسیم، بنابراین این دو تابع موج، متقارن هستند.

در مورد دو تابعΦ ۳ وΦ ۴ طبق شکل زیر اگر جای دو ذره را عوض کنیم، به ترتیب بهΦ ۳ وΦ ۴ -می رسیم. در نتیجهΦ ۳ متقارن وΦ ۴ پاد متقارن است.

در نتیجه سه تابع موجΦ ۲، Φ۱ وΦ ۳ متقارن بوده و می توانند به عنوان تابع موج بوزون ها استفاده شوند، در حالیکه برای فرمیون ها فقط یک انتخاب داشته و تنها تابع موجΦ ۴ را می توانیم استفاده کنیم.

حالا می توانیم دلیل اجتماعی بودن بوزون ها و گوشه گیر بودن فرمیون ها را درک کنیم: تنها تابع موجی که برای فرمیون ها، مجاز است، حالتی است که دو توپ جدا از یکدیگر هستند و در مقابل، از بین سه حالتی که برای بوزون ها مجاز است، دو حالت آن مربوط به زمانی است که توپ ها در کنار هم و در یک سبد قرار گرفته اند.

بنابراین، شاید فرمیون ها زیاد هم گوشه گیر نباشند، چرا که آنها چاره ی دیگری ندارند!

نکته ای که باید به آن توجه کنیم این است که اجتماعی یا منزوی بودن بوزون ها و فرمیون ها ناشی از نیروهای جاذبه ای یا دافعه ای بین آنها نیست، بلکه مستقیما ناشی از شرط متقارن یا پاد متقارن بودن تابع موج آنهاست و بنابراین بیش از آنکه یک واقعیت فیزیکی باشد، یک شرط ریاضی است.

ساتیندرا بوز، فیزیکدان بنگالی، قوانین حاکم بر بوزون ها را بدست آورد و واژه ی "بوزون" نیز به افتخار او گذاشته شده است.

انریکو فرمی نیز کسی بود که قوانین ذرات فرمیون مانند را استخراج کرد و وجه تسمیه ی "فرمیون" نیز همین است.

تصویره (۱)

$\Phi_1 = \psi(1)\,\psi(1)$	$\Phi_2 = \psi(2)\,\psi(2)$
$\Phi_3 = \psi(1)\,\psi(2) + \psi(2)\,\psi(1)$	$\Phi_4 = \psi(1)\,\psi(2) - \psi(2)\,\psi(1)$

تصویره (۲)

$$\Phi_3 = \psi(1)\,\psi(2) + \psi(2)\,\psi(1) = \psi(2)\,\psi(1) + \psi(1)\,\psi(2) = \Phi_3$$
$$\Phi_4 = \psi(1)\,\psi(2) - \psi(2)\,\psi(1) = \psi(2)\,\psi(1) - \psi(1)\,\psi(2) = -\Phi_4$$

داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون

پرده ی سوم: داستان متقارن و پادمتقارن از کجا نشات می گیرد؟

شاید برای شما هم این سوال پیش آمده باشد: چرا باید تابع موج فرمیون ها، پاد متقارن و تابع موج بوزون ها، متقارن باشد؟

پاسخ این سوال، خیلی سرراست و واضح نیست.

در واقع مکانیک کوانتومی کلاسیکی در برابر این سوال سکوت می کند.

پاسخ این سوال را باید در مکانیک کوانتومی نسبیتی، جستجو کنیم.

بهتر است بگوییم قانون تقارن تابع موج از دل مکانیک کوانتومی نسبیتی، بیرون آمده است.

به طور کلی چهار فاکتور ناوردایی لورنتس، انرژی های مثبت، نرم های مثبت و علیت در کنار هم ثابت می کنند که ذرات با اسپین صحیح از آمار بوز-اینشتین (پادمتقارن بودن تابع موج) و ذراتی با اسپین نیمه صحیح از آمار فرمی-دیراک (متقارن بودن تابع موج) پیروی می کنند.

در واقع، فرمیون ها محکوم به داشتن تابع موج پادمتقارن هستند، زیرا در غیر اینصورت، بی نهایت تراز انرژی منفی وجود خواهد داشت که به چالش انرژی منفی شهرت دارد.

داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون

پرده ی چهارم: یک تفاوت کوچک، اما طوفانی!

باید خوشحال باشیم که دنیای ما از دو نوع ذره ی فرمیون و بوزون ساخته شده است، زیرا در غیر اینصورت نه ماده ای وجود داشت، نه کهکشانی و نه انسانی. تمام نظمی که در شیمی مشاهده می شود، نتیجه ی مستقیمی از این واقعیت است که الکترون یک فرمیون است!

از آنجایی که الکترون ها، فرمیون هستند، پس باید تابع موج پادمتقارن داشته باشند و این بدان معناست که شما نمی توانید دو الکترون را در یک حالت یکسان قرار دهید.

وقتی در طول جدول تناوبی حرکت می کنیم و از یک عنصر به عنصر بعدی می رویم، یک الکترون (و البته یک پروتون)، اضافه می شود، اما

نکته اینجاست که به دلیل فرمیون بودن الکترون، نمی توانید آن را در همان مکان اشغال شده ی عنصر قبلی قرار دهید.
به این ترتیب است که الکترون های عناصر سنگین تر، در ترازهای بالاتری قرار خواهند گرفت.
اگر الکترون ها، بوزون بودند، خیلی خوشحال در پایین ترین انرژی، دورهمی می گرفتند و نتیجه ی فاجعه بار آن بود که تمام مواد، مانند هیدروژن رفتار می کردند!
در این قسمت، سه مفهوم بسیار مهم تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون را با زبانی ساده بررسی کردیم، اما پشت این مفاهیم شگفت انگیز، اقیانوسی از ریاضیات زیبا و البته پیچیده وجود دارد که حاصل تلاش دانشمندان بزرگ و جسور است.
اگر این قسمت را خوب درک کرده باشید، باید یادتان باشد کائنات را حتما با عینک تقارن نگاه کنید، زیرا بدون این عینک، اصلا چیزی برای نگاه کردن وجود ندارد
داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون
رده ی سوم: داستان متقارن و پادمتقارن از کجا نشات می گیرد؟
شاید برای شما هم این سوال پیش آمده باشد: چرا باید تابع موج فرمیون ها، پاد متقارن و تابع موج بوزون ها، متقارن باشد؟
پاسخ این سوال، خیلی سرراست و واضح نیست.
در واقع مکانیک کوانتومی کلاسیکی در برابر این سوال سکوت می کند.
پاسخ این سوال را باید در مکانیک کوانتومی نسبیتی، جستجو کنیم.
بهتر است بگوییم قانون تقارن تابع موج از دل مکانیک کوانتومی نسبیتی، بیرون آمده است.
به طور کلی چهار فاکتور ناوردایی لورنتس، انرژی های مثبت، نرم های مثبت و علیت در کنار هم ثابت می کنند که ذرات با اسپین صحیح از آمار بوز-اینشتین (پادمتقارن بودن تابع موج) و ذراتی با اسپین نیمه صحیح از آمار فرمی-دیراک (متقارن بودن تابع موج) پیروی می کنند.
در واقع، فرمیون ها محکوم به داشتن تابع موج پادمتقارن هستند، زیرا در غیر اینصورت، بی نهایت تراز انرژی منفی وجود خواهد داشت که به چالش انرژی منفی شهرت دارد
داستان تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون
پرده ی چهارم: یک تفاوت کوچک، اما طوفانی!
باید خوشحال باشیم که دنیای ما از دو نوع ذره ی فرمیون و بوزون ساخته شده است، زیرا در غیر اینصورت نه ماده ای وجود داشت، نه کهکشانی و نه انسانی. تمام نظمی که در شیمی مشاهده می شود، نتیجه ی مستقیمی از این واقعیت است که الکترون یک فرمیون است!
از آنجایی که الکترون ها، فرمیون هستند، پس باید تابع موج پادمتقارن داشته باشند و این بدان معناست که شما نمی توانید دو الکترون را در یک حالت یکسان قرار دهید.

وقتی در طول جدول تناوبی حرکت می کنیم و از یک عنصر به عنصر بعدی می رویم، یک الکترون (و البته یک پروتون)، اضافه می شود، اما نکته اینجاست که به دلیل فرمیون بودن الکترون، نمی توانید آن را در همان مکان اشغال شده ی عنصر قبلی قرار دهید.
به این ترتیب است که الکترون های عناصر سنگین تر، در ترازهای بالاتری قرار خواهند گرفت.
اگر الکترون ها، بوزون بودند، خیلی خوشحال در پایین ترین انرژی، دورهمی می گرفتند و نتیجه ی فاجعه بار آن بود که تمام مواد، مانند هیدروژن رفتار می کردند!
در این قسمت، سه مفهوم بسیار مهم تقارن تابع موج ، فرمیون و بوزون را با زبانی ساده بررسی کردیم، اما پشت این مفاهیم شگفت انگیز، اقیانوسی از ریاضیات زیبا و البته پیچیده وجود دارد که حاصل تلاش دانشمندان بزرگ و جسور است.
اگر این قسمت را خوب درک کرده باشید، باید یادتان باشد کائنات را حتما با عینک تقارن نگاه کنید، زیرا بدون این عینک، اصلا چیزی برای نگاه کردن وجود ندارد
درهم تنیدگی کوانتومی
پرده اول: درهم تنیدگی کوانتومی چیست؟
وقتی صحبت از عشق می شود، اغلب ارتباطات عرفانی و نهان، به ذهن خطور می‌کند. چنین ارتباطات مرموزی به‌لطف پدیده‌ی عجیب‌وغریبی به‌نام درهم تنیدگی کوانتومی در دنیای زیراتمی هم وجود دارد!
درهم تنیدگی کوانتومی را اینطور تعریف میکنند: دو ذره‌ای که با وجود فاصله زیاد (حتی میلیون ها سال نوری)، باهم در ارتباط بوده و تغییر یکی از آنها، باعث تغییر دیگری خواهد شد.
در سال ۱۹۶۴، فیزیکدانی به نام جان بل، این ایده را بیان کرد.
نظریه ی بل، یکی از مهم‌ترین و البته جنجالی‌ترین مفاهیم مکانیک کوانتومی است، چرا که آلبرت اینشتین، سالها قبل ثابت کرده بود که اطلاعات نمی توانند سریع تر از نور حرکت کنند. اینشتین، درهم تنیدگی کوانتومی را رفتار شبح وار از فاصله دور نامید.
محققان طی ۵۰ سال گذشته، آزمایش‌های زیادی برای آزمودن قضیه‌ی بل، طراحی کردند که در سالهای اخیر، بالاخره موفق به تایید آن شدند.
درهم تنیدگی، اغلب به عنوان یک مفهوم صرفا کوانتومی درنظرگرفته می‌شود، در حالی که واقعا اینطور نیست.
اجازه دهید ابتدا به یک نمونه غیرکوانتومی آن توجه کنیم. اینکار باعث می شود تا مفهوم درهم تنیدگی را فارغ از مفاهیم عجیب و غریب کوانتومی، درک کنیم.
درهم تنیدگی زمانی رخ می‌دهد که دانش ما در مورد حالت دو سیستم، اندک باشد.
بیایید دو سیستم موردنظر را دو کیک تصور کنیم. این کیک‌ها می‌توانند دو شکل ممکن مربعی و دایره ای داشته باشند.

پس برای دو کیک، چهار حالت ممکن داریم که حاصل ترکیب دو حالت اولیه است: {مربع، مربع}، {مربع، دایره}، {دایره، مربع} و {دایره، دایره.{

جدول زیر احتمال قرارگیری هریک از سیستم‌ها (کیک‌ها) در هر یک از چهار حالت ممکن را نشان می‌دهد.

احتمالات مربوط به شکل دو کیک مستقل

تصویره (۱(

در صورتی که کیک‌ها، مستقل از یکدیگر باشند، با دانستن حالت یکی از آنها، نمی‌توانیم حالت گونه‌ی دیگر را بفهمیم. جدول بالا، این ویژگی را دارد.

اگر یکی از کیک‌ها، مربعی باشد، ما چیزی در مورد شکل کیک دوم نمی‌فهمیم. به طور مشابه، دانستن شکل کیک دوم، اطلاعی در مورد شکل کیک اول نمی‌دهد.

حالا موردی را فرض می‌کنیم که دو کیک، درهم تنیده هستند، یعنی در صورتی که از حالت یکی از آنها، اطلاع داشته باشیم، می‌توانیم در مورد حالت گونه دیگر، اطلاعاتی بدست آوریم.

جدول زیر، احتمالات مربوط به دو ذره درهم تنیده را نشان می‌دهد. در این مورد، هرجایی که کیک اول، دایره‌ای باشد، با قطعیت می‌توانیم ادعا کنیم که کیک دوم هم دایره‌ای است و برعکس، وقتی کیک اول، مربعی باشد، کیک دوم هم مربعی است.

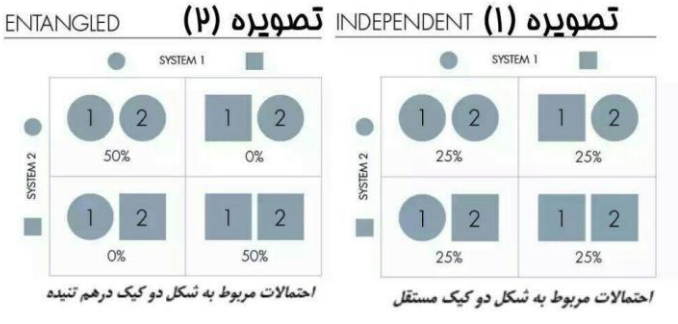
نتیجه‌ی کلی اینکه با دانستن شکل یکی، شکل دیگری را می‌توانیم با قطعیت، تعیین کنیم.

احتمالات مربوط به شکل دو کیک درهم تنیده

تصویره (۲(

حالا که با مفهوم کلی درهم تنیدگی آشنا شدید، به سراغ نسخه‌ی کوانتومی آن یعنی درهم تنیدگی کوانتومی می‌رویم که باز هم نشان‌دهنده‌ی فقدان استقلال است. از قسمت سوم کلاس درس کوانتومی می‌دانیم که در مکانیک کوانتومی، حالت یک جسم از طریق موجودی ریاضی به‌نام تابع موج توصیف می‌شود.

قوانینی که تابع موج را با دنیای احتمالات، پیوند می‌دهند، پیچیدگی‌های جالبی را معرفی می‌کنند که در ادامه در مورد آنها بحث خواهیم کرد.



پرده دوم: مثال عینی درهم تنیدگی کوانتومی

همانطور که می‌دانید، علاوه بر ماده ی کلاسیکی، چیزی به نام پادماده نیز در جهان وجود دارد. پادماده از پادذرات ساخته شده که دارای جرم یکسان، اما بار مخالف نسبت به همتای مادی خود هستند، مثلا پادماده‌ی الکترون، پوزیترون نام دارد که دارای بار مثبت است، در حالیکه می‌دانیم الکترون، بار منفی دارد.

وقتی یک ذره با پادذره‌اش، تماس پیدا می‌کند، هر دو تخریب شده و میزان زیادی انرژی آزاد می‌شود.

زمان برخورد یک الکترون و پوزیترون را تصور کنید. الکترون در زمان برخورد، دارای اسپین مخالف اسپین پوزیترون است.

بنابراین در لحظه‌ی برخورد، اسپین کل، برابر صفر خواهد بود. در واقع در لحظه‌ی برخورد، خلق و فنا به‌طور همزمان رخ می‌دهد.

الکترون و پوزیترون، نابود شده و دو فوتون تابش گاما، خلق خواهند شد. اجازه دهید، این فوتون‌ها را به‌صورت فوتون‌های A و B برچسب بزنیم.

همانطور که در کلاس درس ششم (اسپین) توضیح دادیم، اسپین نشان دهنده اندازه حرکت زاویه ای اسپینی است، بنابراین از قانون بقای اندازه حرکت زاویه ای، پیروی می‌کند.

این قانون می گوید: اندازه حرکت زاویه ای کل سیستم در طول زمان، ثابت است. به عبارت دیگر، اگر اسپین کل سیستم الکترون-پوزیترون، صفر باشد، اسپین کل فوتون‌های A و B خلق شده نیز باید صفر باشد.

این شرط در صورتی برقرار می‌شود که اسپین فوتون A مخالف اسپین فوتون B بوده و در نتیجه جمع آنها، صفر شود.

در این مورد هم، اسپینهای مخالف را به صورت اسپین ۱ و اسپین ۲ برچسب‌گذاری می‌کنیم.

اگر از کلاس درس سوم (برهم نهی کوانتومی)، به یاد داشته باشید، یک شی کوانتومی تا زمانیکه مشاهده (اندازه گیری) نشود، در یک برهم نهی از تمام حالت های ممکن خواهد بود (گربه شرودینگر را به یاد آورید.(

بنابراین فوتون A در یک برهم نهی از اسپین ۱ و ۲ خواهد بود.

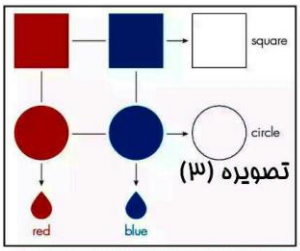
در مورد فوتون B هم، همین امر صادق است. توجه کنید که اسپین هیچ یک از فوتون ها، مشخص نیست.

تنها چیزی که می‌دانیم این است که اسپین یکی از آنها باید مخالف دیگری باشد. اگر اسپین یکی از فوتون ها (مثلا فوتون (A را اندازه گیری کنیم، فروریزش یا تقلیل تابع موج رخ داده و در نتیجه اسپین، مشخص خواهد شد.

حالا با توجه به شرطی که قانون بقای اندازه حرکت اسپینی کل، الزام می‌دارد، اگر معلوم شود که فوتون A دارای اسپین ۱ است، دقیقا در لحظه‌ی تقلیل تابع موجA ، تابع موج B هم مجبور به فروریزش شده و اسپین ۲ خواهد گرفت.

در نتیجه اسپین کل سیستم A وB ، صفر شده و شرط بقای اندازه حرکت زاویه‌ای برقرار می‌شود. از نظر ریاضی، حالت های درهم تنیده‌ی Aو B با اسپین های ۱ و ۲ را می‌توان به شکل زیر نوشت:
نشانه ی ⟩ | با نام کِت (ket) شناخته می‌شود و هر عبارت درون آن، نشان دهنده یک حالت خاص کوانتومی است.
مثلا ۱ Aبه معنای فوتون A با اسپین ۱ است. (بحث تخصصی و ریاضی تر این مفاهیم را در آینده و در کلاس های درس تخصصی کوانتومی، بررسی خواهیم کرد.(
گفته های بالا را چنین می‌توان جمع‌بندی کرد: در فرآیند برخورد الکترون و پوزیترون، فوتونها خلق شده و الکترون و پوزیترون نابود می‌شوند.
فوتون های خلق شده به دلیل شرط بقای اندازه حرکت اسپینی کل، به‌گونه‌ای رفتار می‌کنند که مشاهده‌ی یکی از آنها، فورا بر دیگری تاثیر می‌گذارد (بدون توجه به اینکه در چه فاصله ای از هم قرار گرفته‌اند). این حالت، درهم تنیدگی کوانتومی نامیده می‌شود.
اکنون دو توصیف کلاسیک از شگفتی نظریه کوانتومی را ارائه می‌کنیم که هر دوی آنها در آزمایش‌های بسیار مهمی بررسی شده‌اند. (یادتان باشد مردم در آزمایش های واقعی، به جای شکل و رنگ، ویژگی‌هایی مانند اسپین را اندازه می‌گیرند)
پرده سوم: درهم تنیدگی کوانتومی و اصل مکملیت
توجه کنید که در مثال بالا، کیک‌ها، سیستم‌های کوانتومی نیستند، اما درهم تنیدگی بین سیستم های کوانتومی به‌طور طبیعی ظاهر می‌شود. ذرات کوانتومی در حالت عادی، مستقل هستند اما پس از برخورد با یکدیگر، درهم تنیده می‌شوند. در نتیجه برهمکنش، عامل همبسته شدن ذرات و درهم تنیدگی کوانتومی است. مثلا به ملکول‌ها توجه کنید که از زیرسیستم‌هایی مانند الکترون‌ها و هسته‌ها تشکیل شده‌اند. پایین ترین حالت انرژی یک ملکول، حالت به‌شدت درهم تنیده از الکترون‌ها و هسته‌های آن است و در این شرایط، استقلال ذرات، معنی ندارد چرا که با حرکت هسته ها، الکترون ها هم حرکت می‌کنند.
به مثال‌ها برمی‌گردیم: اگر توابع موج توصیف کننده‌ی سیستم ۱ را به صورت Φ■ و Φ● و توابع موج سیستم ۲ را نیز به‌صورت ψ●, ψ■ بنویسیم. حالت کلی سیستم در شرایط مستقل و درهم تنیده به صورت زیر خواهد بود: تصویره (۱)
حالت مستقل را می‌توانیم به‌صورت زیر هم نوشت:
تصویره (۲)
که در این حالت، پرانتزها سیستم ۱ را از سیستم ۲ جدا کرده و به‌صورت دو سیستم مستقل درنظر می‌گیرند. وقتی درهم تنیدگی کوانتومی با مکملیت، درهم می‌آمیزد، سروکله‌ی اثرات جالبی مانند GHZو EPR پیدا می‌شود. حالا اجازه دهید مکملیت را تعریف کنیم.

در مراحل قبلی، فرض کردیم دو شکل ممکن برای کیک‌ها وجود دارد (مربعی و دایره ای). حالا فرض می‌کنیم کیک‌ها علاوه بر شکل، می‌توانند دو رنگ قرمز یا آبی هم داشته باشند. اگر در مورد سیستم های کلاسیکی، مانند کیک ها صحبت می‌کردیم، اینکار باعث افزوده‌شدن یک ویژگی جدید می‌شد که ثابت می‌کرد کیک‌ها می‌توانند هر یک از چهار حالت ممکن مربع قرمز، دایره قرمز، مربع آبی یا دایره آبی را داشته باشند، اما در مورد یک کیک کوانتومی، قضیه کاملا فرق دارد! وقتی می‌گوییم یک کیک کوانتومی می‌تواند در موقعیت‌های متفاوت، شکل یا رنگ‌های متفاوتی داشته باشد، لزوما به معنای آن نیست که می‌تواند به‌طور همزمان دارای یک رنگ و یک شکل مشخص باشد. اینجا حقایق تجربی با شهود ما، ناسازگار است.
تصویره (۳(
ما می‌توانیم شکل کیک کوانتومی را اندازه‌گیری کنیم، اما در این اندازه‌گیری، تمام اطلاعات در مورد رنگ آن را از دست خواهیم داد و بالعکس در اندازه‌گیری رنگ آن نیز، تمام اطلاعات در مورد شکل آن را از دست خواهیم داد. نظریه کوانتومی می‌گوید نمی توانیم هم شکل و هم رنگ کیک کوانتومی را به طور همزمان، اندازه‌گیری کنیم. در نتیجه هیچکس نمی‌تواند تمام جنبه‌های کوانتومی یک واقعیت فیزیکی را به‌طور همزمان اندازه‌گیری کند، بلکه برای دانستن هر خاصیتی، باید اندازه‌گیری مجزایی انجام دهد.
خط‌کش‌های سه‌بعدی مثال خوبی از اصل مکملیت هستند
تصویره (۴)
به‌نظرم بهترین مثال در این مورد، خط‌کش‌های سه بعدی دهه شصت است. اگر یادتان باشد در این خط‌کش‌ها شکل‌هایی وجود داشت که با یک نگاه دیده نمی‌شدند، بلکه باید خط‌کش را از زوایای مختلفی نگاه می‌کردیم. این بیان ساده مکملیت است، چیزی که بور آن را فرمول‌بندی کرد. به‌طور کلی، نظریه کوانتومی ما را مجبور می‌کند تا در تعیین ویژگی‌های اختصاصی یک واقعیت فیزیکی، محتاط باشیم. باید اقرار کنیم که:
خصوصیتی که اندازه گیری نمی‌شود، لزوما وجود ندارد.
اندازه گیری، فرآیند فعالی است که سیستم اندازه گیری شده را تغییر می‌دهد.



تصویره (۳)

مستقل: $\Phi_{\blacksquare}\psi_{\blacksquare} + \Phi_{\blacksquare}\psi_{\bullet} + \Phi_{\bullet}\psi_{\blacksquare} + \Phi_{\bullet}\psi_{\bullet}$

تصویره (۱)

درهم تنیده: $\Phi_{\blacksquare}\psi_{\blacksquare} + \Phi_{\bullet}\psi_{\bullet}$

تصویره (۲)

$$(\Phi_{\blacksquare} + \Phi_{\bullet})(\psi_{\blacksquare} + \psi_{\bullet})$$

تصویره (۴)

خط‌کش‌های سه‌بعدی مثال خوبی از اصل مکملیت هستند

پرده چهارم: درهم تنیدگی کوانتومی وEPR

اینشتین، پودولسکی و روزن(EPR) ، اثر شگفت‌انگیزی را معرفی کردند که در صورت درهم تنیده شدن دو سیستم کوانتومی، بروز می‌یابد. اثرEPR ، شکل خاص و قابل فهمی از درهم تنیدگی کوانتومی را با مکملیت، پیوند می‌دهد. یک جفتEPR ، دو کیک کوانتومی فرض می‌کنیم که شکل یا رنگ هر یک از آنها را می‌توان اندازه‌گیری کرد (اما نه هر دو.(

بیایید فرض کنیم به تعداد زیادی از این جفت‌ها، دسترسی داریم که همگی یکسان بوده و حق انتخاب با ماست که کدامیک از ویژگی‌های آنها را اندازه‌گیری کنیم.

اگر شکل یکی از جفت EPR را اندازه گیری کنیم، متوجه می‌شویم که احتمال دایره‌ای یا مربعی بودن، برابر بوده و در صورت اندازه‌گیری رنگ نیز، احتمال قرمز یا آبی بودن، یکسان است.

وقتی هر دو عضو را به طور همزمان،اندازه‌گیری کنیم، اثرات بسیار جالبی که EPR را به یک پارادوکس تبدیل می‌کند، ظاهر می‌شوند.

اگر شکل یا رنگ هر دو را اندازه گیری کنیم، نتایج اندازه‌گیری همیشه مانند هم هستند؛ بنابراین اگر رنگ یکی از آنها را قرمز تشخیص دادیم، رنگ دیگری نیز، قرمز خواهد بود و به‌همین ترتیب.

از طرفی اگر شکل یکی را اندازه گیری کنیم و سپس رنگ دیگری را، همبستگی وجود ندارد.

بنابراین اگر اولی، مربعی باشد، دومی با شانس مساوی، قرمز یا آبی خواهد بود. نظریه کوانتومی می‌گوید حتی اگر این دو سیستم، فاصله‌ی زیادی از یکدیگر داشته باشند و اندازه گیری‌ها تقریبا همزمان انجام شود، باز هم همین نتایج را بدست خواهیم آورد، بنابراین حالت سیستم در یک مکان، حالت سیستم دیگر در مکان دیگری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این همان رفتار شبح وار از فاصله دوری است که اینشتین برای توصیف درهم تنیدگی کوانتومی استفاده کرد.

در واقع به‌نظر می‌رسد اطلاعات دقیقا در زمان اندازه گیری و به‌صورت لحظه ای منتقل می‌شوند، با سرعتی فراتر از سرعت نور!

اما آیا ممکن است؟ نه!

تا زمانیکه من نتیجه اندازه‌گیری شما را ندانم ، نمی‌توانم نتیجه اندازه‌گیری خودم را پیش‌بینی کنم.

من وقتی اطلاعات مفیدی بدست می‌آورم که نتیجه اندازه‌گیری شما را بفهمم، نه در لحظه‌ای که شما اندازه‌گیری را انجام می‌دهید. بنابراین هر پیامی که نشان‌دهنده نتیجه اندازه‌گیری شما باشد، باید به یک روش فیزیکی واقعی و آهسته‌تر از سرعت نور، انتقال یابد.

با تفکر عمیق‌تر، این پارادوکس، بیشتر حل می شود. در حالیکه رنگ سیستم اول، قرمز اندازه‌گیری شده است، دوباره به حالت سیستم دوم توجه می‌کنیم.

اگر رنگ کیک کوانتومی دوم را اندازه بگیریم، قطعا نتیجه‌ی قرمز بدست خواهیم آورد، اما همانطور که قبلا بحث کردیم، اگر در این حالت (یعنی وقتی رنگ، قرمز اندازه‌گیری شده)، تصمیم به اندازه‌گیری شکل بگیریم، نتیجه اندازه‌گیری با احتمال یکسانی، مربع یا دایره بدست خواهد آمد.

گیرنده دستکش‌ها از طریق رابطه‌ای که دو لنگه دستکش با هم دارند، به سرعت متوجه می‌شود گیزنده دوم کدام لنگه را دریافت کرده است تصویره (۱)(

همبسته بودن سیستم‌های دور از یکدیگر، متناقض به‌نظر می‌رسد. فرض کنید هر یک از جفت‌های یک دستکش را در یک جعبه بگذارم و آنها را به جهت‌های مخالف کره زمین، پست کنم. وقتی گیرنده، بسته را باز کرده و لنگه دستکش خودش را ببیند، متوجه می‌شود که لنگه دیگر دستکش که در آن سوی کره‌ی زمین و در دست گیرنده دوم است، مربوط به کدام دست است (مثال مربوط به برخورد الکترون و پوزیترون را به یاد آورید.(

این چیزی است که در مورد سیستم‌های درهم تنیده رخ می‌دهد.

قسمت بیست و هشتم

پرده پنجم: درهم تنیدگی کوانتومی وGHZ

دانشمندانی به نام های، دیوید گرینبرگ، مایکل هورن و آنتوان زلینگر، چهره‌ی دیگری از درهم تنیدگی را کشف کردند.

در آزمایش آنها سه نوع کیک کوانتومی وجود دارد که به‌طور خاصی تهیه شده و در حالت درهم تنیده‌ای به نام حالت GHZ قرار دارند. سه کیک کوانتومی را در سه آزمایش جداگانه پخش می‌کنیم.

هر آزمایشگر مستقلا و به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند که رنگ یا شکل را اندازه‌گیری کند و در نهایت، نتیجه را ثبت می‌کند.

آزمایش چندین بار تکرار می‌شود و همیشه با سه کیک کوانتومی در حالت GHZ شروع می‌شود. نتایجی که هر آزمایشگر بدست می‌آورد، کاملا تصادفی هستند.

در اندازه‌گیری شکل، احتمال بدست آمدن مربع یا دایره، یکسان است و به طور مشابه، در اندازه‌گیری رنگ نیز، احتمال قرمز و آبی، برابر است.

خب تا اینجا همه‌چیز عادی است.

اما وقتی آزمایشگرها نزد یکدیگر آمده و نتایجشان را با هم مقایسه می‌کنند، نتیجه‌ی شگفت‌انگیزی بدست می‌آید.
اجازه دهید شکل مربعی و رنگ قرمز را "خیر"؛ و شکل دایره و رنگ آبی را "شر" بنامیم.
آزمایشگران دریافتند وقتی دو نفرشان، شکل را اندازه گرفته و نفر سوم، رنگ را اندازه بگیرد، نتایج ۱ یا ۲، شر هستند (که دایره ای یا آبی است).
اما وقتی هر سه نفرشان، رنگ را اندازه بگیرند، نتایج اندازه‌گیری‌های ۱ یا ۳، شر بدست می‌آید.
این بدان معناست چیزی که مکانیک کوانتومی، پیش‌بینی می‌کند، همان چیزی است که مشاهده می‌شود.
تعداد نتایج شر، زوج است یا فرد؟
قطعا با تکرار آزمایش‌ها، هر دو احتمال وجود دارد، بنابراین باید این سوال را رد کنیم؛ زیرا این احساس را به‌وجود می‌آورد که تعداد نتایج شر در سیستم ما، مستقل از چگونگی اندازه گیری آن است که قطعا منجر به تناقض می‌شود.
اثرGHZ ، تعصبی ریشه دوانده در شهود ما را خراب می‌کند.
این شهود می‌گوید هر سیستم فیزیکی، مستقل از اینکه اندازه‌گیری شوند یا نه، ویژگی‌های مشخصی دارد، یعنی تعادل خیر و شر، تحت تاثیر اندازه گیری، قرار نمی‌گیرد، اما اثر GHZ با این شهود مقابله کرده و بینش شما را عمیق‌تر می‌کند.
پرده ششم: درهم تنیدگی کوانتومی و نظریه چندجهانی
نظریه جهان های موازی یا چند جهانی توسط اورت پیشنهاد شد.
این نظریه که یکی از تفسیرهای مکانیک کوانتومی به حساب می‌آید، بیان می‌کند که با انجام عمل اندازه گیری، دنیا به تعداد نتایج ممکن آن اندازه گیری تقسیم می شود.
از طرفی نظریه چند جهانی اشاره به جهان‌هایی دارد که در کنار هم، هر آنچه وجود دارد را می‌سازند. این نام توسط ویلیام جیمز پیشنهاد شد.
معمولا این دو اصطلاح به جای یکدیگر به‌کار می‌روند، ولی اینجا ما به‌طور مختصر، ارتباط درهم تنیدگی کوانتومی را با چندجهانی بیان می‌کنیم.
در توضیحات بالا به‌طور مفصل نشان دادیم که چگونه درهم تنیدگی باعث می‌شود تا نتوانیم حالت‌های مستقل و منحصربفردی را به چندین کیک کوانتومی، نسبت دهیم.
وقتی نتوانیم در هر لحظه از زمان، یک حالت به سیستم، نسبت دهیم، می‌گوییم تاریخ های درهم تنیده (چند جهانی) داریم. دقیقا همانطور که درهم تنیدگی عادی را با حذف برخی از احتمالات، بدست آوردیم، می‌توانیم تاریخ های درهم تنیده را هم با اندازه‌گیری‌هایی که اطلاعات جزیی در مورد واقعیت می‌دهند، ایجاد کرد.
در ساده ترین نوع تاریخ های درهم تنیده، فقط یک کیک کوانتومی داریم که آن را در دو زمان متفاوت، کنترل می‌کنیم.
با کمی زیرکی می‌توان مکملیت را نیز به این سیستم، اضافه کرد و به نظریه چند جهانی کوانتومی رسید.
کیک کوانتومی ابتدا در حالت قرمز آماده می‌شود و در زمان بعدی در حالت آبی، اندازه گیری می‌شود.
همانطور که در مثال‌های ساده‌ی بالا، در زمان‌های میانی، نه رنگ و نه شکل کیک کوانتومی را نمی‌توانیم تعیین کنیم، تاریخ های درهم تنیده هم به‌صورت کنترل‌شده و محدود، تحقق می‌یابند.
این همان تصویری است که زیربنای نظریه چندجهانی کوانتومی یا جهان های موازی را می‌سازد.
یک حالت مشخص می‌تواند به مسیرهای تاریخی متناقضی، شاخه شاخه شود که بعدا با هم جمع می‌شوند.
اروین شرودینگر، یکی از بنیان گذاران نظریه کوانتومی معتقد بود که تحول سیستم های کوانتومی منجر به حالت‌هایی می‌شود که ویژگی‌های به‌شدت متفاوتی دارند. در مورد آزمایش گربه شرودینگر، فرد قبل از اندازه گیری نمی‌تواند زنده یا مرده بودن گربه را تعیین کند. در واقع گربه در این حالت،در برزخی از مرگ و زندگی قرار دارد.
دید ماکروسکوپی ما برای توصیف مکملیت مکانیک کوانتومی مناسب نیست، چرا که در زندگی روزمره ما، سروکله‌اش پیدا نمی‌شود.
گربه‌های واقعی بسته به اینکه مرده یا زنده باشند، با شیوه‌های بسیار متفاوتی با ملکول‌های هوای اطرافشان، برهمکنش می‌کنند، بنابراین عمل اندازه گیری، به‌طور خودکار انجام می‌شود و گربه یا زنده است یا مرده.
این در حالیست که تاریخ های درهم تنیده، یک کیک کوانتومی را توصیف می‌کنند که بچه گربه های شرودینگر به حساب می‌آیند.
توصیف کامل آنها در زمان های میانی منوط به این است که هم ویژگی و هم مسیرها را درنظر بگیریم. دستیابی تجربی به تاریخ های درهم تنیده، بسیار حساس است، زیرا لازم است در مورد کیک کوانتومی، اطلاعات جزیی جمع کنیم.
این در حالیست که اندازه‌گیری‌های سنتی کوانتومی، به‌جای تقسیم اطلاعات جزیی در چند زمان، در یک زمان مشخص، اطلاعات کاملی به‌دست می‌دهند.

"حالا دیگر در فیزیک، چیزی برای کشف وجود ندارد.
تنها چیزی که باقی مانده، اندازه‌گیری‌های دقیق و دقیق‌تر است . "

اگر چه جمله‌ی بالا برای ما قرن بیست و یکی‌ها، ابلهانه و خنده‌دار به‌نظر می‌رسد، اما درواقع مربوط به فیزیکدان اسکاتلندی مشهور، یعنی ویلیام توماس در آستانه‌ی قرن بیستم و اندکی قبل از ظهور مکانیک کوانتوم است .
مسلماً بسیاری از همکاران توماس در این مورد با او هم عقیده بودند. نظریه‌های فیزیک کلاسیک، بارها آزمایش شده بود و به نظر می‌رسید که واقعیت را به بهترین نحو ممکن توصیف می‌کنند .
اما اندکی بعد، ورق برگشت و شکست‌های پی‌درپی مکانیک کلاسیک در توجیه نتایج، آغاز شد.
این آغازی برای پیدایش فیزیک کوانتوم است.