کوانتوم به زبان آدمیزاد قسمت اول و دوم

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!

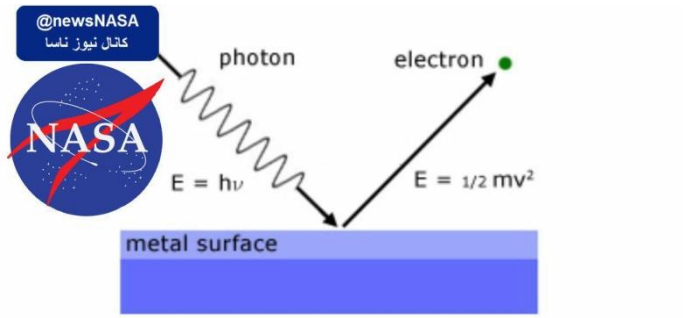
در نتیجه اگر نور شدیدتری را به اتم بتابانیم، انرژی فوتوالکترون ها تغییر نمی کند، زیرا الکترون ها تنها می توانند یک فوتون را جذب کنند.

(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!

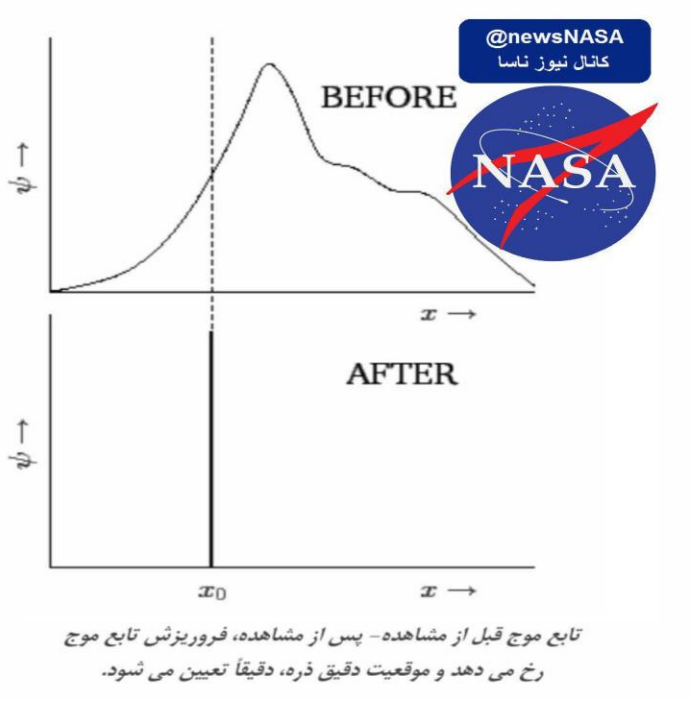
این رفتار برای ما عجیب به نظر می رسد، اما اگر به تابع موج دقت کنیم، برهم نهی ملموس تر می شود.

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) ۳,c۲,c۱ 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
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!