علیت در دنیای کوانتوم‌ها

فیلیپ والتر و کاسلاو برونکر
برگردان: امید برومند

بر اساس یک **اصل پولادین** در فیزیک، یک رویداد همیشه یا علتِ رویدادِ دیگر است و یا معلول آن. اما این اصل در سطح کوانتومی همیشه کاربرد ندارد.

در اثر دومینو، قانون‌های علت و معلول مشخص‌اند. اما در مکانیک کوانتومی فرایندهای مختلف می‌توانند یک‌دیگر را هم پوشانی کنند.

فیلیپ والتر (در سمت چپ) پروفسور فیزیک در دانشگاه وین و سخنگوی گروه‌های نورشناسی (اپتیک) کوانتومی، نانوفیزیک کوانتومی و اطلاعات کوانتومی در دانشکده فیزیک است. کاسلاو برونکر نیز پروفسور فیزیک در دانشگاه وین و مدیر موسسه نورشناسی (اپتیک) کوانتومی و اطلاعات کوانتومی است.

اصل علت و معلول از زمان کودکی برای ما آشناست، اگر در ردیف منظمی از سنگ‌های دومینو به اولین سنگ ضربه‌ای وارد شود، همه آنها با تق‌تق کردن دل‌چسبی در مدت چند ثانیه به زمین خواهند افتاد. اثر دومینو مفهوم علیت **(1)** را که در علم و زندگی روزمره ریشه‌ی عمیقی دارد، برای‌مان ملموس می‌سازد. رویداد B، یعنی واژگون شدن آخرین سنگ دومینو، پی‌آمد رویداد A، یعنی افتادن اولین سنگ دومینو است. B بعد از A و تنها بعد از رخ دادن A اتفاق می‌افتد. تفاوتی ندارد که اولین سنگ از سمت چپ در ابتدا به زمین افتد و بدین ترتیب در انتها آخرین سنگ از سمت راست، و یا در ابتدا اولین سنگ از سمت راست و در انتها آخرین سنگ از سمت چپ؛ در هر حال یکی از این دو رویداد باید اولین رویداد باشد.

در جهان کوانتومی قوانین دیگری عمل می‌کنند. گاهی اوقات نمی‌توان مشخص کرد که آیا A قبل از B رخ داده است و یا B قبل از A؛ نه به این دلیل‌که این اطلاعات در دستگاه قابل خواندن نبوده و یا به‌خوبی پنهان شده‌اند، بلکه این اطلاعات اصلن وجود ندارند. فیزیک کوانتومی هم‌پوشانی هر دو فرایند، یعنی یک برهم‌نهی **(2)**، را شدنی می‌کند (نگاه شود به «درهم‌تنیدگی و برهم‌نهی» در صفحه 3). به‌گونه‌ای که گویا سنگ‌های دومینو هم‌زمان از چپ به راست و همچنین از راست به چپ به زمین می‌افتند.

در سال 2015 هر دو گروه کاری ما در وین، در آزمایش‌هایی با ذرات جداگانه‌ی نور نشان دادند، مشخص کردن این نکته که فوتون بر اساس چه ترتیبی در عملیات مختلف گذر کرده، یعنی از A به B یا از B به A رفته است، امکان‌پذیر نیست. یک تیم به رهبری **کوین رِش** از دانشگاه کانادایی واترلو همراه با **روبرت اِسپِکنز**، نظریه‌پردازی از موسسه‌ی فیزیکِ نظریِ پریمتر در همسایگی آن دانشگاه، در سال 2017 آزمایش مشابهی را انجام دادند. فیزیک‌دانان نه تنها دو فرایند، بلکه رابطه‌های کاملن متفاوتی را نیز هم‌پوشانی کردند. بدین ترتیب، آنها برای مثال یک آمیزه کوانتومی از یک رابطه‌ی مستقیم علت و معلولی –همانند آنچه که بین قطعات دومینو دیده می‌شود و همچنین یک رابطه‌ی مشترک علّی، ایجاد کردند. رابطه‌ی مشترک علّی را می‌توان با یک روز بارانی مقایسه کرد، که موجب پر پشت شدن چمن‌زارها و همچنین فروش

بیشتر چکمه‌های لاستیکی می‌شود. اما تقاضا برای کفش و رشد گیاهان، مستقیم به یک‌دیگر وابسته نیستند. دانشمندان کانادایی موفق شدند با یک طرح پیچیده، چندین سناریوی در اساس متفاوتی را هم‌پوشانی کنند.

با توجه به تجربیات روزمره، انگاشتن این نکته که هیچ ترتیب روشن و مشخصی از وقایع در یک فرایند وجود نداشته، و یا حتی آمیزه عجیب و غریبی از ساختارهای گوناگون علیتی در آن موجود باشد، بی‌معنی به نظر می‌رسد. اما چنین آزمایش‌هایی نشان می‌دهند که باید با این ویژگی‌های عجیب دنیای کوانتومی کنار آمد و شاید بتوان از آنها حتی استفاده مفید و یا مناسبی کرد.

در یک نگاه
قلمرویی بدون نظم و ترتیب

1- علیت مستقیم یکی از اصول اساسی فیزیک است. این اصل بیان می‌کند که یک رویداد همیشه یا علت رویداد دیگر و یا معلول آنست.

2- اما پژوهش‌گران در آزمایش‌های کوانتومی پیچیده، شرایطی را ایجاد کردند که در آنها رابطه علت و معلولی بین رویدادها، دیگر بطور واضح و روشن مشخص نیست.

3- آگاهی و شناخت بدست آمده می‌تواند برای محاسبه‌های کارآمدتر در رایانه‌های کوانتومی مفید باشد و همچنین بینش‌های جدیدی درباره‌ی رابط بینِ فیزیکِ کوانتومی و نظریه‌ی نسبیت عام، ارائه دهد.

سوالی به دیرینگی فیزیک کوانتومی: چه چیز بر چه چیزی تاثیر گذار است و چگونه؟

علیت در میان پیشاهنگان مکانیک کوانتومی موضوع داغِ و بحث‌برانگیزی بود. **نیلز بور** و **ورنر هایزنبرگ** در آزمایش-های فکری و بحث‌ها، تصادفی بودن کوانتومی را به عنوان یک ویژگی اساسی این نظریه تشخیص دادند. **نیلز بور** با «**تفسیر کپنهاگی**» [(3)] خویش اصرار داشت که یک نتیجه در سطح پایه‌ای و تنها با مشاهده رخ می‌دهد و پیش از آن مشخص نیست. نتیجه‌های اندازه‌گیری را نمی‌توان پیش‌بینی کرد زیرا آنها نتیجه یک تصادف خالص‌اند. قبل از آن تنها احتمالات وجود دارند.

در مقابل **آلبرت اینشتین** تصادف و احتمال در فرایندهای کوانتومی را زیر سوال برد. او در سال 1935 همراه با همکاران-اش **نیتان روزِن** و **بوریس پُدُلسکی** یک آزمایش فکری‌ای را که بعدها تحت نام **تناقض-EPR** شناخته شد توصیف کرد. در این آزمایش، یک منبع، دو ذره‌ی به لحاظ مکانیک کوانتومی مرتبط با یکدیگر، مانند جفتی از فوتون را ایجاد می‌کند. یکی از آنها به سمت دستگاه **آلیس** به بعنوان ناظر و دیگری به سمت آشکارگرِ **باب** که در فاصله‌ی بسیار دوری واقع است، به پرواز در می‌آیند. فوتون‌ها «درهم‌تنیده»اند، به این معنی که نتیجه اندازه‌گیری‌ها به شکل واضح و روشنی با یکدیگر پیوند دارند. برای نمونه در فوتون‌ها، خاصیت مورد بررسی، که به‌اصطلاح قطبش [(4)] نامیده می‌شود، اغلب سطح و یا صفحه ارتعاش ذره نور است. در هر تنظیمی برای اندازه‌گیری، دو نتیجه ممکن وجود دارند- برای نمونه افقی یا عمودی بودن قطبش ذره نور معین می‌گردد. برای هر یک از این تنظیمات، که هر تعداد از آنها امکان‌پذیرند، هر مشاهده نتیجه دیگری به دست می‌دهد. اگر ذره دیگر هم تحت شرایط طرح شده در مسئله اندازه‌گیری شود، به دلیل **درهم‌تنیدگی**، اندازه و مقدار آن بی‌درنگ مشخص خواهد بود.

آلیس با تصمیم‌گیری به استفاده از تنظیمات مشخصی در اندازه گیری و سپس آزمایش بر روی فوتون، در صورتی که **باب** از همان تنظیمات استفاده کند، به شکل خودکار و با اطمینان می‌داند که **باب** چه رویدادی را اندازه خواهد گرفت. **آلیس** از این امر بی‌درنگ و بدون وابستگی به محدودیت سرعت نور و مستقل از فاصله بین دو آزمایشگاه، اطلاع پیدا می‌کند. اما بنابر نظریه‌ی نسبیت خاص (توضیح دهنده رفتار فضا-زمان از دید ناظر. م)، اطلاعات نمی‌توانند سریع‌تر از سرعت نور انتشار یابند. به این ترتیب **اینشتین**، **پُدُلسکی** و **روزِن** نتیجه گرفتند که قطبشِ فوتونِ باب باید برای تمام تنظیمات ممکن در اندازه‌گیری و مستقل از اینکه آلیس فوتون خود را دیده باشد یا نه، به گونه‌ای از پیش معین و مشخص شده باشد. از آنجا که مکانیک کوانتومی مشخص بودن قطبش برای هر جهت قابل تصوری را پیش از مشاهده مجاز نمی‌شمرد، نتیجه منطقی این بود که نظریه ناقص است. در یک شرح کامل، قطبش برای همه تنظیمات با «**متغییرهای پنهان محلی**» [(5)] در ابتدا از پیش معین شده، و در اندازه‌گیری تنها آشکار می‌شود.

معلومات پایه: درهم‌تنیدگی و برهم‌نهی

برهم‌نهی (Superposition) یک مفهوم بنیادی در مکانیک کوانتومی است: چند کمیت می‌توانند یک‌دیگر را هم‌پوشانی کنند که طی آن یک شئ کوانتومی به تعبیری هم‌زمان در حالت‌های گوناگون وجود دارد.

برای نمونه، در واقعیت کلاسیک معمولی، بیت‌های رایج در رایانه‌ها، حالت 0 (صفر) و یا 1 به خود می‌گیرند؛ این به لحاظ فیزیکی با جهت گیریِ مغناطیسیِ یک ذره به سمت پایین یا بالا مطابقت دارد. اما در یک برهم‌نهی، یک **بیتِ** مکانیکیِ کوانتومی («کیوبیت»)، در یک حالتِ هم‌پوشانیِ چندین حالتِ منفردِ ممکن قرار دارد. اعداد مختلط («دامنه‌ها»)، نسبت‌های این حالت‌ها در وضعیت کلی را تشریح می‌کنند.

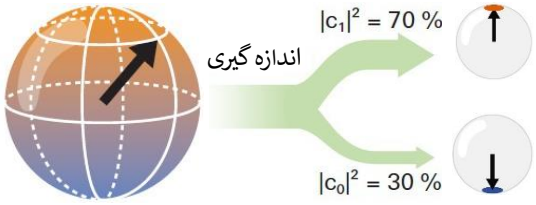
تنها در لحظه اندازه‌گیری، یک حالت آشکار و روشنِ کلاسیک به‌وجود می‌آید. سپس دامنه‌های مختلط (complex amplitude) احتمالات حقیقی برای یافتن بیت به‌مثابه صفر و یا یک را ارائه می‌دهند. مکانیک کوانتومی اجازه برهم‌نهی هر خاصیت ممکن را می‌دهد، برای نمونه می‌توان از خاصیت‌های ذرات نور، الکترون‌ها، اتم‌ها و یا ترکیبات آنها در آزمایش‌های گوناگون نام برد.

برهم‌نهی چندین شئ منفرد **درهم‌تنیدگی** نامیده می‌شود، که در آن حداقل دو ذره با یکدیگر در پیوند بوده و یک سیستم مکانیکی کوانتومی را تشکیل می‌دهند و حالت‌های جداگانه هر یک از ذرات (به سمت بالا یا پایین نشان دادن ذره 1 یا ذره 2، و یا برعکس) دیگر مستقل از یک‌دیگر نیستند.کل سیستم می‌تواند تنها با یک وضعیت مشترک توصیف شود. از آنجا که ذرات، بشکل جداناپذیر با یک‌دیگر پیوند دارند، اندازه‌گیری روی ذره‌ی اول، می‌تواند بی‌درنگ اطلاعی در مورد وضعیت ذره‌ی دوم بدهد، حتی اگر این دو، فاصله‌ی بسیاری از یک‌دیگر داشته باشند.

1 جهان کلاسیک
بیت کلاسیک

حالت : |0> یا |1>

2 جهان کوانتومی: برهم‌نهی
کیوبیت

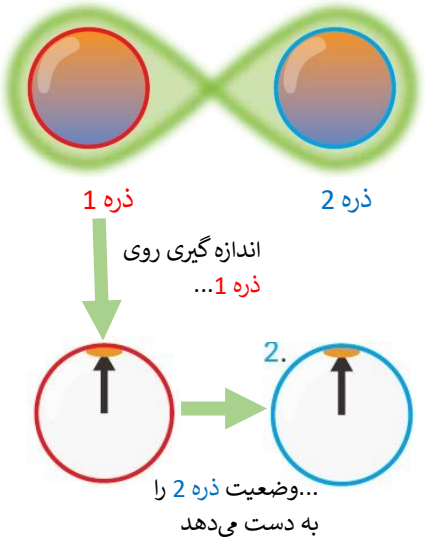


هم پوشانی حالت های جداگانه ممکن → $: c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$

دامنه‌ها : اعداد مختلط با

$$|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1 \quad (6)$$

3 جهان کوانتومی: درهم‌تنیدگی
برهم‌نهی چندین ذره



سه دهه بعد **جان بل** فیزیک‌دان، در یک آزمایش فکری دیگر نشان داد، که مفهوم **متغییرهای پنهان محلی** با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی در تناقض‌اند. او دقیقن نشان داد که چگونه با تصمیم‌گیری تجربی می‌توان نشان داد که آیا **اینشتین، پُدُلسکی** و **روزِن** حق داشته‌اند و یا آن‌گونه که نیلز بور می‌پنداشت، مکانیک کوانتومی این چنین عجیب و غریب است. بدین ترتیب او بهمنی از آزمایشات را به حرکت درآورد. از اواسط دهه 70 میلادی، فیزیک‌دانان با آزمایش‌های بسیاری این نکته را بررسی کردند که آیا هر نتیجه اندازه‌گیری منفرد، برای هر فوتون در واقع از نظر عینی تصادفی است یا خیر. آنها بارها و بارها مجبور به تأیید این نکته بوده‌اند که واقعن چنین است. **اینشتین، پُدُلسکی** و **روزِن** اشتباه می‌کردند. تصادف کوانتومی فراتر از آن چیزی است که ما در زندگی روزمره تصادف می‌نامیم، مانند پرتاب یک تاس و یا یک سکه. در اینجا ما نتیجه را از پیش نمی‌دانیم، زیرا که از جزئیات کامل تمامی پارامترها بی‌اطلاع‌ایم. اما احتمال و تصادف در سطح کوانتومی نتیجه بی‌اطلاعی ما نیست. در اینجا ما نمی‌توانیم حتی در صورت شناخت کامل سیستم، نتیجه را پیش‌بینی کنیم.

در جهان کوانتومی بسیاری از چیزها، حتی سلسله‌ای از رویدادها را می‌توان هم‌پوشانی کرد

علی‌رغم این ویژگی‌های عجیب و غریب، به نظر رسید که علیت حداقل در سطح پدیده‌های مکانیک کوانتومی نیز همچنان تزلزل‌ناپذیر است. زیرا انتقال اطلاعات صرفن از طریق درهم‌تندیگی امکان‌پذیر نیست. **آلیس** تنها با اندازه‌گیری فوتون خود نمی‌تواند به **باب** خبری بدهد و بنابراین بالقوه بر او تاثیری بگذارد. البته او از وضعیتی که **باب** فوتون خود را در آن خواهد یافت، آگاه است. اما این نکته کمکی به **باب** نمی‌کند، مگر این که **آلیس** نتیجه را به روش کلاسیک و بنابراین محدود به سرعت نور، به او اعلام کند.

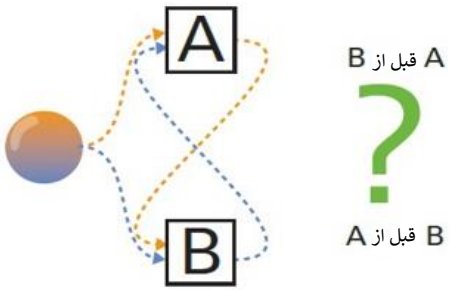
با این وجود، در حال حاضر دانشمندان علم رایانه‌ی کوانتومی از چنین پدیده‌های درهم‌تنیدگی، برای کارآمدتر کردن و مطمئن‌تر کردن انتقال اطلاعات به روش سنتی استفاده کرده و برای پردازش اطلاعات در رایانه‌های کوانتومی روش‌های کاملن جدیدی را طراحی می‌کنند. همه اینها فراتر از چیزی هستند که به‌طور کلاسیک امکان‌پذیر است. اما فرآیندها در اینجا از اصل آشنای علت و معلول آشکار پیروی می‌کنند.

مبهم شدن مرز بین علت و معلول

در یک آزمایش، ترتیب اثرگذاری عملیات A و B بر وضعیت کوانتومی یک سیستم، به یک سوئیچ در ابتدا بستگی دارد. این سوئیچ با بودن در موقعیت یک موجب رخ دادن B بعد از A شده و درصورت بودن در موقعیت صفر، موجب رخ دادن A بعد از B خواهد شد. این یک مورد کلاسیک است – در اینجا علیت مشخص است. اما اگر سوئیچ یک کیوبیت در حالت برهم‌نهی باشد، ترتیب عملیات نیز هم‌پوشانی شده است. این به معنی آن است که A قبل از B و همان زمان، B قبل از A خواهد آمد.

جهان کوانتومی

یک کیوبیت سوئیچ هر دو امکان را هم-پوشانی می‌کند.



جهان کلاسیک

بسته به حالت سوئیچ، یا A قبل از B و یا B قبل از A می آید.

با این حال آزمایش‌ها آشکار می‌سازند که در فیزیک کوانتومی رابطه‌های علیتی تعریف ناشده امکان‌پذیرند. برخی سناریوها، وجود دو رویداد A و B را امکان‌پذیر می‌دانند که در آنها اساسن نمی‌توان گفت که آیا A قبل ازB بوده و به آن منجر شده، و یا برعکس. چنین علیت‌های کوانتومی، تبادل اطلاعات بین A و B را امکان‌پذیر می‌سازند که در آن هر دو به طرز شگفتی همزمان فرستنده و گیرنده‌اند. در اینجا شگرد اصلی، در هم‌پوشانیِ ماهرانه کوانتومیِ نظم‌ها و ترتیب‌های علیتی است.

فیزیک‌دانان اکنون در رابطه با برهم‌نهیِ حالت‌های کوانتومی تجربه بسیاری دارند. برای مثال آنها از «اسپین»ها [(7)] یعنی تکانه‌های زاویه‌ای مکانیکی کوانتومی، که در یک حالت هم‌پوشانی موقعیت‌های بالا و پایین می‌توانند وجود داشته باشند، و یا از فوتون‌ها با قطبش افقی و عمودی، استفاده می‌کنند. چنین حالت‌های کوانتومی، پایه و اساس به‌اصطلاح بیت‌های کوانتومی و یا **کیوبیت‌ها** [(8)]، یعنی حاملان اطلاعات در رایانه‌ها و ارتباطات کوانتومی هستند.

یک هم‌پوشانیِ علیتی بر همین مفهوم پایه‌ای استوار است. اما در اینجا، ترتیب رویدادهایی که یک شئ کوانتومی تجربه می‌کند، برهم‌نهاده می‌شوند. این می‌تواند در نمونه فوتون، کاربُرد یک عمل A و یک عمل B باشد. پس یا حالت خروجی A مقدار ورودی B را مشخص می‌کند و یا برعکس.

در سال 2009 فیزیک‌دان نظری **جولیو کیریبلا** (که در حال حاضر در دانشگاه هنگ‌کنگ تدریس می‌کند) و همکارانش روشی را پیشنهاد کردند، که در آن یک کیوبیت به مثابه یک سوئیچ در چنین طرح‌های پنداری عمل کرده و ترتیب علیتی حوادث برای یک ذره کوانتومی دوم را تعیین می‌کرد. اگر کیوبیت - سوئیچ در حالت 1 باشد، ذره ابتدا از **دروازه‌ی منطقی کوانتومی** (Quantum logic gate) [(9)] **A** و سپس از **دروازه‌ی منطقی کوانتومی B** عبور خواهد کرد. اما اگر کیوبیتِ کنترلی (control qubit) در حالت صفر باشد، B قبل از A قرار خواهد داشت. برای نمونه هر یک از **دروازه‌های منطقی کوانتومی** می‌توانند یک عمل محاسباتی باشند. اگر کیوبیتِ کنترلی، در یک حالت بر هم‌نهی از 0 (صفر) و 1 باشد، کیوبیت دوم هم‌پوشانی علیتی هر دو روند را تجربه خواهد کرد. این سازه سپس یک «سوییچ کوانتومی» بدونِ ترتیب تعریف شده و نامشخصی برای **دروازه‌های منطقی** خواهد بود (نگاه شود به «مبهم شدن مرز بین علت و معلول» در صفحه قبل). پژوهش-های نظری بیشتری در سال 2012 نشان دادند که چنین سوییچ‌های کوانتومی‌ای تنها یکی از نمونه‌های بسیار برای ساختارهای علیتی نامعین هستند. فیزیک کوانتومی موارد کاملن عجیب و غریب بیشتری را ممکن می‌داند.

ساختار یک سوئیچ کوانتومی حقیقی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با آزمایش‌های نوری کوانتومی معمولی با استفاده از تداخل‌سنج‌ها دارد. آزمایش‌های نوری کوانتومی موجب برهم‌نهی یک ذره‌ی نور می‌شوند. اما یک سوییچ کوانتومی در مجموع دو فرایند مختلف را بر روی یکدیگر هم‌پوشانی می‌کند –بنابراین در واقع به چندین سازه‌ی تودرتو نیاز است. با روشن شدن چگونگی عملکرد سوئیچ کوانتومی به لحاظ نظری، گروه‌های کاری ما شروع به اجرای عملی آن کردند و در سال 2015 به موفقیت دست یافتند. در اینجا دو گزینه تنظیم برای یک فوتون، یعنی شیوه انتشار (Propagation mode) و قطبش آن، مورد استفاده قرار گرفتند. با این **درجه‌های آزادی** [(10)] یک کیوبیت کنترلی و یک کیوبیت هدف (Target-Qubit) رمزگذاری شدند. در آزمایش، کیوبیت کنترلی تعیین‌کننده شیوه انتشار بود، و عملیات A و B هر یک، وضعیت قطبش ذرات نور به‌مثابه **کیوبیت هدف** را تغییر دادند. اگر کیوبیت کنترلی در حالت 1 باشد، فوتون با شیوه انتشاری که در آن عملیات به ترتیب AB اتفاق می‌افتند، حرکت می‌کند. و برعکس، یک کیوبیت کنترلی در حالت 0 (صفر)، منجر به دنباله BA خواهند شد. برای مثال، یک تقسیم‌کننده‌ی پرتو که با احتمال 50% فوتون را عبور داده یا و منعکس می‌کند می‌تواند موجب یک حالت هم‌پوشانی برای یک کیوبیتِ کنترلی شود. پس از آن نیز ترتیب عملیات در حالت هم‌پوشانی خواهد بود.

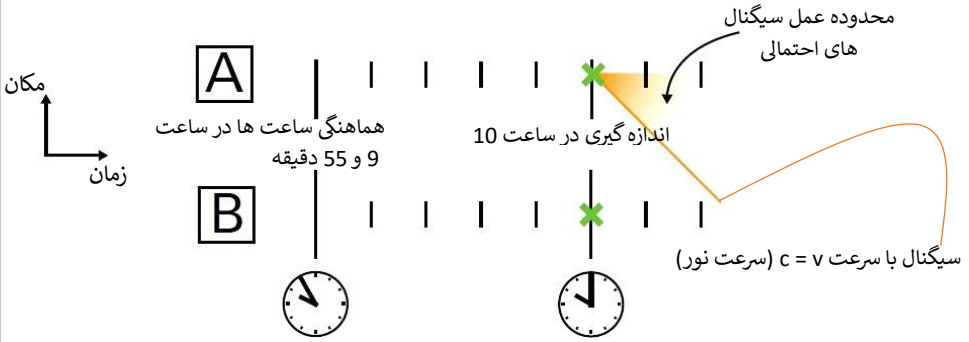
این شناخت شگفت‌انگیز می‌تواند بزودی پیامدهای محسوسی داشته باشد. **لوسیان هاردی** فیزیک‌دان نظری از **مؤسسه پریمتر** کانادایی در سال 2007 پیشنهاد کرد، که برای سرعت بخشیدن به رایانه‌های کوانتومی از علیت کوانتومی استفاده شود. معماری آنها بر پایه کیوبیت‌ها و هم‌پوشانی آنها، که باید محاسبات کاملا جدیدی را امکان‌پذیر سازد، استوار است. گروه‌های پژوهشی بسیاری در سراسر جهان رویکردهای مختلفی را برای طبیعت فیزیکی کیوبیت‌ها و الگوریتم‌های کوانتومی مورد آزمایش قرار می‌دهند. رایانه‌های کوانتومی علیرغم ساختار غیرمعمول خود، تا کنون از روش‌های علت و معلولی پیروی کرده‌اند.

گرانش و علیت کوانتومی

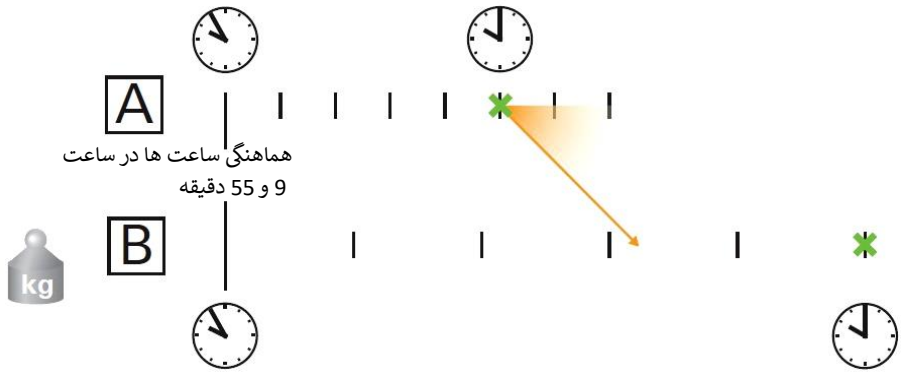
آلیس و باب هر یک در ساعت 10 صبح رخدادهای آزمایشگاه‌های خود را اندازه گیری می‌کنند، (نشانه-گذاری‌ها بر روی محورها، فاصله-های زمانی را به دقیقه و به زمان محلی نشان می‌دهند). آلیس و باب ساعت‌های خود را در ساعت 9 و 55 دقیقه هماهنگ می‌کنند. با جدایی این دو رویداد به لحاظ مکانی از یکدیگر، A و B توانایی تبادل سیگنال در بین اندازه‌گیری‌ها را نخواهند داشت. به این معنی که هر دو بر یکدیگر تاثیری نگذاشته، و نه علت و نه معلول برای یکدیگر هستند. اما اگر جرمی به آزمایشگاه باب نزدیکتر باشد تا به آزمایشگاه آلیس، ساعت باب به دلیل نسبیت عام کندتر خواهد شد. («**اتساع زمانی گرانشی**») [(12)](). اکنون یک پرتو نور که در ساعت 10 صبح از آلیس شروع شده است، می‌تواند قبل از اینکه ساعت باب، 10 صبح را نشان دهد به باب برسد، بدین ترتیب رویداد A در گذشته‌ی رویداد B واقع است. به همین گونه، اگر جرم به آزمایشگاه آلیس نزدیک‌تر باشد تابه آزمایشگاه باب، B می‌تواند با یک سیگنال بر A تاثیر بگذارد. مکانیک کوانتومی، برهم-نهی هر دو چیدمان مکانی جرم را اجازه می‌دهد. اکنون هم‌پوشانی فضا- زمان باید مانند یک کیوبیت کنترلی عمل کند و ترتیب عملیات A و B دیگر مشخص نخواهد بود.

علیت در فضا-زمان

بین اندازه گیری‌ها در هر دو مکان، سیگنالی بین A و B رد و بدل نمی‌شود (جدایی مکانی).

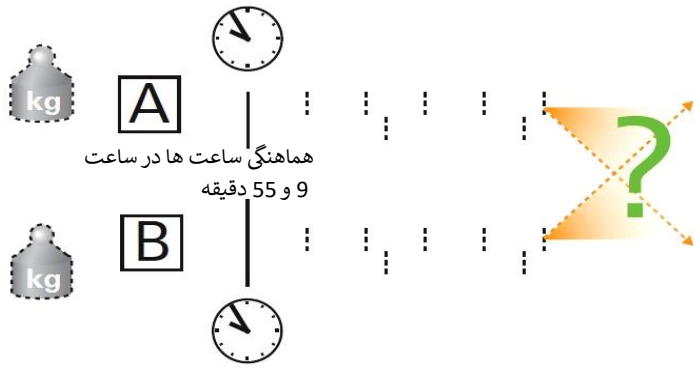


واقع شدن جرمی در نزدیکی B، موجب کندتر شدن زمان برای B (از دید A) شده، و قبل از اینکه ساعت B 10 را نشان دهد، A اول اندازه گیری شده و سپس بر B تاثیر خواهد گذاشت (جدایی زمانی).



رابطه علت و معلولی در فضا-زمان کوانتومی

اگر جرم در یک برهم‌نهی دو مکان در نزدیکی A و B باشد، A قبل از B و همزمان B قبل از A اندازه گیری می‌شوند.



چیریبلا در سال 2012، بر پایه سوئیچ کوانتومی مشخص کرد که چگونه الگوریتم‌های کوانتومی از فرایندهایِ علیتیِ تعریف نشده و نامشخص بهره می‌برند. در نتیجه آنها مسائل معینی را کارآمدتر از برنامه‌هایی با پی‌رفت ثابتی از دروازه‌های منطقی کوانتومی انجام خواهند داد. نمونه‌ای برای این مورد، مسئله امکان‌پذیر و یا امکان‌ناپذیر بودن جابجایی (Commutation) دو عملیات A و B است. به این معنا که اجرای A قبل از B، همانند اجرای A بعد از B نتایج یکسانی بدست می‌دهند، یا اینکه علامت جلوی نتیجه (مثبت یا منفی. م) تغییر می‌یابد؟ در این جا الگوریتم سوئیچ کوانتومی باید تنها یک‌بار محاسبه را انجام دهد اما با مدلِ مدارِ علیتیِ رایج در انفورماتیک کوانتومی، حل این مسئله غیر ممکن است. زیرا در اینجا باید حداقل یکی از دو عملیات، دوبار انجام شود.

با علیت نامعین به سوی رایانه‌های بهتر کوانتومی

پردازش اطلاعات کوانتومی غیرعلیتی نه تنها برای یک مورد ساده با دو عملیات، گزینه برتری است، بلکه حتی با افزایش حجم مسئله، برتری محاسباتی نیز افزایش می‌یابد. یک سوئیچ کوانتومی با برخی از پروتکل‌های ارتباطی معین که **مشکلات پیچیدگی ارتباطات** (Communication-Complexity-Problem) **(11)** نامیده می‌شوند، موجب صرفه‌جویی تصاعدی در حجم داده‌های مورد نیاز برای تبادل دوسویه اطلاعات می‌شود. بنابراین، با استفاده از الگوریتم‌های علیتی کوانتومی، می‌توان از ویژگی‌های عجیب فیزیک کوانتومی حتی بهره بیشتری جُست.

در سال 2015 ، یک گروه کاری از همکارمان (فیلیپ والتر) در آزمایشی در وین، پیش‌بینی‌های نظری در مورد برتری بیشتر با علیت کوانتومی را تأیید کرد. فیزیک‌دانان یک سوئیچ کوانتومی را طراحی کرده و با کمک آن مشخص کردند که آیا ترتیب A و B جابه‌جایی‌پذیرند، یا نه. آنها توانستند سوال طرح شده را تنها با یک بار اجرا و بدون نیاز به تکرار دوباره‌ی یک عمل، حل کنند. اگر چه در این آزمایش‌ها، عملیات جداگانه حالت فوتون را تغییر دادند اما این حالت را مستقیما اندازه گیری نکردند. این یک تفاوت مهم است. برای نمونه می‌توان جهت قطبش را بدون از بین بردن برهم‌نهی، چرخاند. در پایان، سیستم در یک حالت دیگر، اما کماکان یک حالتِ مکانیکِ کوانتومیِ آشکار خواهد بود. تنها یک اندازه‌گیری می‌تواند آن را به یکی از احتمالات مختلف کلاسیک تبدیل کند.

حتی هنگامی که عملیات با اندازه‌گیری همراه باشند، اصل علیت کوانتومی اعتبار خواهد داشت. در نگاه اول این نکته تناقض دارد. زیرا اطلاعات دراین باره که در یک لحظه زمانی، فوتون در حال گذار از چه مسیری است، نشان می‌دهد که کدام یک از عملیات A و یا B نخست انجام یافته است، اما باید در نظر داشت که یک ناظر اصولن در چه زمانی می‌تواند از این نکته آگاهی یابد. به این دلیل، یکی از همکاران ما (فلیپ والتر) با گروه پژوهشی‌اش در سال 2017 در آزمایش دیگری آزمودند که آیا در علیت کوانتومی، برهم‌نهیِ فرایندِ اندازه‌گیری یک شئ کوانتومی امکان‌پذیر است یا نه.

در آزمایش، نتیجه یکی از دو عملیات تنها زمانی قابل دسترسی خواهد بود که هر دو عملیات، به هر ترتیبِ ممکن انجام شده باشند. برای این کار حتی به تداخل‌سنجِ پیچیده‌تری نیاز بود. فوتون ابتدا در طی عمل A اندازه‌گیری می‌شود. نکته‌ی کلیدی این است که در اینجا خوانشی انجام نشده، بلکه هر دو نتیجه‌ی ممکن بدون مانع به حرکت خود ادامه داده و به B می‌رسند، جایی که تنها قطبش تغییر می‌یابد. جریان این فرآیند در جهتِ عکس، مشابه خواهد بود. تنظیماتِ نوری، هر دو نتیجه ممکن برای A (برای نمونه قطبش افقی یا عمودی یک فوتون) را به‌گونه ای به B هدایت می‌کند که نتیجه اندازه‌گیری تا پایان کل فرایند، پنهان باقی بماند. در مقایسه با آزمایش قبلی، به چندین مسیر نوریِ هم‌پوشانی شده نیاز بود، که از آنها نمی‌توان مسیرهای احتمالی فوتون را نتیجه‌گیری کرد. البته بدون آگاهی از اینکه آیا در ابتدا A و یا B رخ داده است، نتیجه‌ای که در A اندازه‌گیری شده تنها در پایان قابل دسترسی خواهد بود. این آزمایش نشان داد که در فیزیک کوانتومی، در واقع ترتیبِ هرگونه عملیاتی می‌تواند در حالت بر هم‌نهی باشد.

چه بسا رویدادهایی با ساختارهای تعریف نشده‌ی علیتی واقعی، در جاهای دیگر طبیعت وجود داشته باشند. پژوهشگرانِ علیت کوانتومی، مفاهیمی از اطلاعات کوانتومی، علوم رایانه و نظریه نسبیت عام را گرد هم می‌آورند. بدین ترتیب آنها قصد بررسی و پژوهش مفهوم علیت و زمان به شکل کاملن جدیدی را دارند.

در ساختار فضا – زمان، چه اتفاقی با علت و معلول رخ می‌دهد؟

ترکیب اثرهای مکانیک کوانتومی و فضا-زمان از نظریه نسبیت عام، نیز منجر به ساختارهای علیتی کوانتومی می‌شوند. زیرا به لحاظ نظری، برهم‌نهی به توزیع ماده و انرژی محدود نمی‌شود. برای نمونه، دو مکانِ احتمالی یک جرم در فضا می‌توانند برهم‌نهاده شوند. تیم **کاسلاو برکنِر** در 2018 محاسبه کرد که آنگاه، ترتیبِ رویدادها در فضا-زمان قابل مقایسه با ترتیب رویدادهای سوئیچ کوانتومی در آزمایشگاه خواهد بود.

این اندیشه بر اساس به اصطلاح **اتساع زمانی گرانشی**، یک اثر مهم از نظریه نسبیت عام است. هر چه یک ناظر به یک جرم دارای گرانش نزدیک‌تر باشد، به همان اندازه زمان برای او آهسته‌تر می‌گذرد (از چشم‌انداز خارج از میدان گرانشی). برای بررسی دقیق‌تر این برهم‌کنش، دو آزمایشگاهِ به لحاظ مکانی جدا از هم واقع شده‌ی **آلیس** و **باب** را در نظر بگیریم که در هر کدام از آنها یک ساعت نصب شده است. روزانه هر دو ساعت در ساعت 9 و 55 دقیقه صبح با یکدیگر هماهنگ می‌شوند. کمی بعد در ساعت 10 صبح به وقت محلی، **آلیس** (رویداد A) و همچنین **باب** (رویداد B) هر کدام عملی را بر روی یک کیوبیت انجام می‌دهند (بنگرید به «گرانش و علیت کوانتومی» در صفحه 6)، که در جریان آن اصولن نمی‌توانند سیگنالی را رد و بدل کنند – در زبان نظریه نسبیت عام، این دو رویداد «به لحاظ مکانی» جدا از یکدیگرند. به این معنی که، A و B نمی‌توانند علت و معلول یکدیگر باشند. با قرار دادن یک منبع گرانشی در بین دو آزمایشگاه که به آزمایشگاه **باب** نزدیکتر و از آزمایشگاه **آلیس** دورتر است، وضعیت تغییر خواهد کرد. از دید **آلیس**، ساعت **باب** آهسته‌تر کار می‌کند. با اتساع زمانیکافی، رویداد A در گذشته‌ی علیتی رویداد B پایان می‌یابد. بنابراین هر دو رویداد اکنون نه دیگر به لحاظ مکانی بلکه به لحاظ زمانی از یکدیگر جدا هستند. اکنون **آلیس** می‌تواند سیگنال‌ها را به **باب** ارسال کرده و کیوبیتی را که در ساعت 10 صبح به وقت محلی، عملی بر رویش انجام داده، به‌گونه ای به آزمایشگاه **باب** انتقال دهد که عملیات باب مانند گذشته در ساعت 10 صبح به وقت محلی او انجام یابند. اگر منبع گرانش به آزمایشگاه **آلیس** نزدیک‌تر و از آزمایشگاه **باب** دورتر باشد، وضعیت عکس خواهد شد. در این حالت رویداد B در گذشته‌ی رویداد A پایان خواهد یافت.

در اینجا فیزیک کوانتومی وارد عمل می‌شود. در این حالت می‌توان منبع گرانش را نه تنها در یک مکان و یا در مکان دیگر قرار داد، بلکه می‌توان آن را به برهم‌نهی هر دو مکان آورد. این عمل مانند سوئیچ کوانتومی، سبب ایجاد برهم‌نهی «A موجب B» و «B موجب A» می‌شود.

در آزمایش‌ها، بررسی اینکه آیا چنین موردهایی واقعن در طبیعت رخ می‌دهند، دشوار خواهد بود. با این حال پروژه‌های پژوهشی جاری، به برخی از جنبه‌های چنین پرسش‌هایی می‌پردازند. برای نمونه، تیم‌های مختلفی در آزمایش‌های مکانیکی کوانتومی، پیوسته اشیاء پر جرم را به حالت هم‌پوشانی با یکدیگر می‌آورند.

چنین تلاش‌هایی احتمالن در یافتن پاسخ به سوالات مهم زیر کمک می‌کنند:
آیا علیت کلاسیک حتی با گرانش در خُردترین مقیاس‌ها، دیگر وجود ندارد؟ چگونه چنین سیستمی، به سیستمی با روابط عادی علت و معلولی گذار می‌کند؟ در این رابطه زمان چه نقشی بازی می‌کند؟ برخی دانشمندان گمان دارند که در سیستم‌های کوانتومی بزرگ، هم‌پوشانی‌ها پس از به اصطلاح زمانِ **ناهمدوسی کوانتومی** **(13)** که به جرم بستگی دارد، خود به خود به حالت مشخصی فرومی‌ریزند. این اثر می‌تواند بر اساس چنین مدل‌هایی، موجب یک نظم علیتی فضا-زمان شود. حتی در صورت درست بودن این مدل‌ها، این امر باید امکان‌پذیر باشد، که اثرهای غیر کلاسیک مانند مورد **آلیس** و **باب** را هنوز قبل از **ناهمدوسی کوانتومی** به اثبات رساند.

مکانیک کوانتومی از زمان آغاز خود، پیوسته آشکارتر خواستار دست شستن ما از تصورات کلاسیک است. چند دهه است که ناگزیر به پذیرش شخصیت دوگانه اشیاء به مثابه موج و ذره و وجود آنها به شکل موازی در چندین حالت شده‌ایم. اکنون پذیرفتن این نکته نیز اجتناب‌ناپذیر است که یک رویداد، گاهی اوقات هم‌زمان علت و نیز معلول یک رویداد دیگر است – این امر پارادوکس‌ها و به همان اندازه پیامدهای هیجان‌انگیزی به همراه دارد.

منشور علم، شماره 4، آوریل 2019

پی‌نوشت‌ها:

1-علیت (Causality) (ویکی‌پدیای فارسی)
علیت رابطهٔ بین یک رویداد (علت) و رویدادی دوم (اثر یا معلول) است که در آن، رویداد دوم نتیجهٔ رویداد نخست است. این نیز به **بُن و بَر** شناخته می‌شود.

2- برهم‌نهی
تعریف شماره یک--(ویکی‌پدیای فارسی)
در فیزیک و نظریه سامانه‌ها، اصل برهم‌نهی یا خاصیت برهم‌نهی (Superposition Principle) بیان می‌کند که برای تمام سیستم‌های خطی، پاسخ خالص ایجاد شده در یک مکان و زمان مشخص به وسیله دو یا چند محرک، برابر است با مجموع پاسخ‌هایی که به وسیله هر محرک به تنهایی بوجود می‌آید.

تعریف شماره دو--(ویکی‌پدیای آلمانی)
در فیزیک، **سوپرپوزیشن**، که به عنوان اصل برهم‌نهی نیز شناخته می‌شود، به معنای هم‌پوشانی کمیت‌های یکسان فیزیکی بوده که یکدیگر را مختل نمی‌کنند. اصل برهم‌نهی، در مسائل خطی (linearen Probleme) موجود در بسیاری از زمینه‌های فیزیک مورد استفاده قرار گرفته و تنها در گونه کمیت‌های هم‌پوشانی شده تفاوت نشان می‌دهد.

3- تفسیر کپنهاگی (ویکی‌پدیای آلمانی)

نیلز بور (راست) در کنار ورنر هایزنبرگ(چپ)
تفسیر کپنهاگی یکی از تفسیرهای مکانیک کوانتومی است. این تفسیر مجموعهٔ دیدگاه‌هایی را دربارهٔ گزاره‌ها و پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی در خود دارد. به زبان دیگر، تفسیر کپنهاگی در پی یافتن پاسخ این پرسش است که «این آزمایش‌های پیچیده و شگفت‌انگیز و نتایج آن‌ها واقعاً چه معنایی دارند؟»
آشنایی
از آن‌جا که تفسیر کپنهاگی مجموعه‌ای از دیدگاه‌های فیزیک‌دانان و فیلسوفان گوناگون است، تعریف ثابتی از آن وجود ندارد[1][2]. دیدگاه‌های گوناگونی به تفسیر کپنهاگی نسبت داده شده‌اند. اشر پرز گفته‌است که نویسندگان مختلف دیدگاه‌های بسیار گوناگون و گاه متناقضی را به عنوان تفسیر کپنهاگی بیان می‌کنند.
پایه‌های تفسیر کپنهاگی

1. یک سیستم به‌طور کامل با یک تابع موج توصیف می‌شود. تابع موج نمایانگر دانش مشاهده‌گر دربارهٔ سیستم است. (هایزنبرگ)
2. توصیف طبیعت ذاتاً احتمالاتی است. احتمال یک رویداد متناسب است با مربع اندازهٔ تابع موج نشان‌دهندهٔ آن رویداد. (ماکس بورن)
3. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ می‌گوید که نمی‌توان مقدار همهٔ ویژگی‌های سیستم را همزمان دانست؛ ویژگی‌هایی که به دقت معلوم نیستند، با احتمالات توصیف می‌شوند.
4. اصل مکملیت :ماده از خود دوگانگی موج-ذره نشان می‌دهد. هر آزمایشی می‌تواند یکی از این دو ماهیت ماده را نشان دهد، ولی نشان‌دادن همزمان این دو ماهیت شدنی نیست. (نیلز بور)
5. دستگاه‌های اندازه‌گیری دستگاه‌هایی کلاسیک‌اند و ویژگی‌های کلاسیک را مانند مکان و تکانه می‌سنجند.
6. اصل همخوانی بور و هایزنبرگ: توصیف مکانیک کوانتومی از سیستم‌های بزرگ باید به تقریب با توصیف فیزیک کلاسیک یکی باشد.

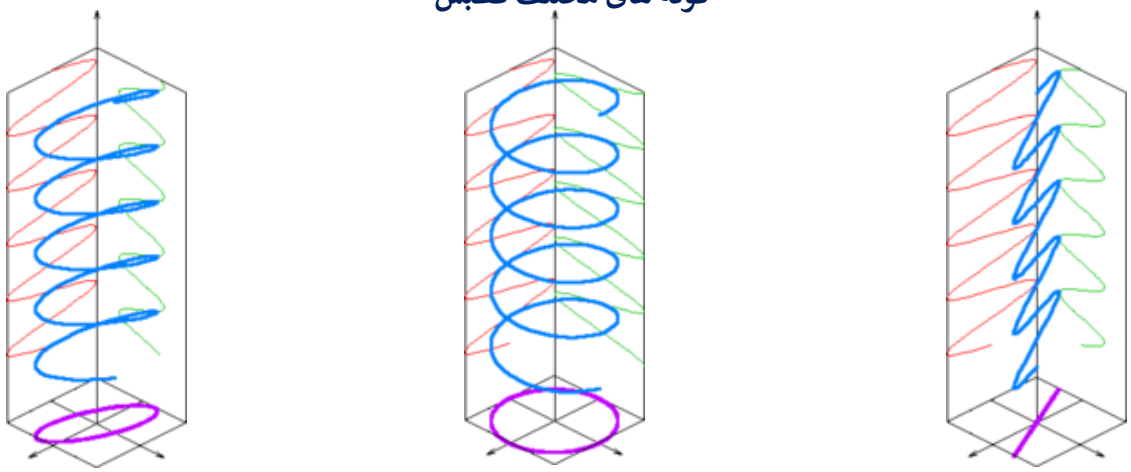
4- قطبش (ویکی‌پدیای فارسی)

قُطبِش، قُطبیدگی، یا پُلاریزاسیون به انگلیسی (Polarization)، از ویژگی‌های اساسی امواج عرضی است که راستای نوسان موج را در صفحهٔ عمود بر جهت انتشار آن نشان می‌دهد. در الکترومغناطیس، قطبش یک موج الکترومغناطیسی (مانند نور) نشان‌دهندهٔ راستای بردارِ میدان الکتریکی آن است .
امواج، قطبش‌های متفاوتی دارند؛ قطبش بیضوی، دایره‌ای (که حالت خاصی از قطبش بیضوی است.) و خطی .
قطبش نور در طبیعت و زندگی روزمره، بی‌آن‌که متوجه باشیم، بسیار به چشم می‌خورد. مثلاً قطبش نور، اساس کار نمایش‌گرهای کریستال مایع یا همان اِل‌سی‌دی (LCD) است. مواد کریستال مایع، دارای این ویژگی هستند که با اِعمال ولتاژ، می‌توانند قطبش نور عبورکننده از خود را تغییر دهند.

انواع قطبش

امواج طولی (مانند صوت) قطبش ندارند، زیرا راستای نوسان و راستای پیشروی (انتشار) آن‌ها یکی است. در امواج عرضی (مانند نور) راستای نوسان میدان الکتریکی یکتا نیست و با قطبش تعیین می‌شود .
قطبش، عمود بر مسیر حرکت موج الکترومغناطیسی است. ممکن است میدان الکتریکی تنها در یک راستا نوسان کند (قطبش خطی)، یا این‌که راستای نوسانش، مُدام تغییر کند (قطبش چرخشی چپ‌گرد یا راست‌گرد) .
در حالت کلی، قطبش امواج الکترومغناطیسی مسئله‌ای پیچیده‌است. مثلاً در فیبر نوری یا پرتوهای قطبیده (پلاریزه) در فضای آزاد، توصیف پلاریزاسیون موج پیچیده‌تر است، زیرا میدان‌ها، می‌توانند تا سه مؤلفه داشته‌باشند .
در مواد جامد، امواج صوتی می‌توانند به صورت عرضی باشند. در این حالت قطبش با مسیر تنش برشی در سطح عمود بر جهت انتشار در ارتباط است. این موضوع در زلزله‌شناسی اهمیت دارد. قطبش در علوم و تکنولوژی در رابطه با انتشار موج اهمیت دارد؛ مثل علوم نوری، مخابرات و رادار .
قطبش نور را می‌توان اندازه گرفت.

گونه های مختلف قطبش



خطی　　دایره ای　　بیضوی

5- متغیرهای پنهان (ویکی‌پدیای فارسی)

در فیزیک، تئوری‌های متغیر پنهان پیشنهادی است برای ارائه توضیحات جبرگرایانه از پدیده‌های مکانیک کوانتومی، از طریق معرفی موجودیت‌های فرضی غیرقابل روئیت است. وجود عدم قطعیت در برخی از اندازه‌گیری‌ها به عنوان بخشی از فرمول بندی ریاضی مکانیک کوانتومی فرض می‌شود.

زمینه‌های شکل‌گیری

طبق فرمول ریاضی، مکانیک کوانتومی غیر جبری است، به این معنی که به‌طور کلی نتیجهٔ اندازه‌گیری را با یقین پیش‌بینی نمی‌کند. در عوض، با داشتن مقادیر قابل مشاهده ای که دقت آن‌ها توسط اصل عدم قطعیت محدود شده، احتمال نتایج را نشان می‌دهد. این در حالی است که در فیزیک کلاسیک مثلاً با داشتن تکانه و مختصات یک ذره محل برخورد آن با صفحه ای در فضا به‌طور قطعی مشخص است. حال این سؤال پیش می‌آید که آیا ممکن است واقعیتی پنهان و عمیق‌تر در زیر مکانیک کوانتومی پنهان شده باشد، که توسط یک تئوری اساسی تر توصیف شده‌است و همیشه می‌تواند نتیجه هر اندازه‌گیری را با اطمینان پیش‌بینی کند: اگر خصوصیات دقیق هر ذره زیر اتمی شناخته شده باشد، کل سیستم می‌تواند مدل‌سازی شود. یک مدل‌سازی دقیقاً با استفاده از فیزیک قطعی مشابه آنچه در فیزیک کلاسیک داریم .

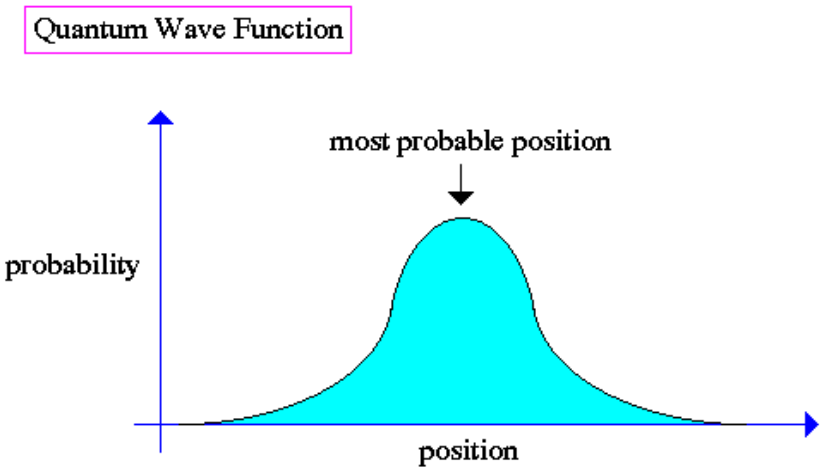
به عبارت دیگر، می‌توان تصور کرد که مکانیک کوانتومی توصیف ناقصی از طبیعت است. تعیین متغیرها به عنوان متغیرهای زیرین "پنهان" بستگی به سطح توصیف فیزیکی دارد (بنابراین، برای مثال، "اگر یک گاز از نظر دما، فشار و حجم توصیف شده باشد، سرعت اتمهای منفرد در گاز متغیرهای پنهان خواهد بود. ". فیزیکدانان حامی نظریه De Broglie-Bohm (مکانیک بوهمی) تصریح می‌کنند که در پس زمینه ماهیت احتمالی مشاهده شده در طبیعت یک اساس یا خاصیت قطعی به صورت متغیر پنهان وجود دارد. اما دیگران معتقدند که هیچ حقیقت قطعی و عمیق‌تری در مکانیک کوانتومی وجود ندارد.

6- برهم‌نهی در جهان کوانتومی

http://www.deeplook.ir/%D8%AA%D8%A7%D8%A8%D8%B9-%D9%85%D9%88%D8%AC-%D9%88-%D8%A8%D8%B1%D9%87%D9%85-%D9%86%D9%87%DB%8C-/%DA%A9%D9%88%D8%A7%D9%86%D8%AA%D9%88%D9%85%DB%8C

.....

حالا یک سوال پیش می‌آید: یک شیء کوانتومی چگونه یک ویژه حالت را در زمان مشاهده انتخاب می کند؟ پاسخ را باید در احتمال جستجو کنیم. احتمال اینکه یک شیء کوانتومی در یک ویژه حالت خاص قرار بگیرد، به وسیله‌ی تابع موجش مشخص می‌شود. بنابراین از تابع موج به عنوان موج احتمال هم یاد می‌شود. از هر تابع موجی، می‌توان یک عدد به نام بزرگیِ احتمال را بدست آورد. احتمال اینکه یک شیء کوانتومی در یک ویژه حالت معین قرار بگیرد، با مربع یا مجذور بزرگی احتمال تعیین می‌شود. مثلاً اگر احتمال رخ دادن یک فرآیند معین، ۵۰ درصد باشد، بزرگی احتمال این فرآیند، برابر با ۲ /۱۷ خواهد بود.



تابع احتمال کوانتومی- محتمل‌ترین مکان ذره در شکل مشخص شده است

فرض کنید می‌خواهیم سرعت یک الکترون را تعیین کنیم که این الکترون در برهم‌نهی از دو ویژه حالت کوانتومی قرار دارد. در نخستین ویژه حالت، سرعت الکترون، ۱ و در دومین ویژه حالت، سرعت الکترون، ۲ است. این برهم‌نهی دو سرعت را می‌توان از نظر ریاضی به صورت زیر نشان داد:

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

تا زمانی که الکترون مشاهده نمی‌شود، هر دو سرعت را دارد. اما به محض مشاهده، تابع موج یک احتمال معین از یک ویژه حالت را به هر الکترون اختصاص می‌دهد. فرض می‌کنیم 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 می‌توان آن را با استفاده از بزرگی احتمال به صورت زیر نوشت:

$$|\psi\rangle=\sqrt{\frac{3}{4}}\ |\ \text{سرعت ۱}\ \rangle+\sqrt{\frac{1}{4}}\ |\ \text{سرعت ۲}\ \rangle$$

اگر سرعت را اندازه بگیریم، طبیعتاً فروریزش تابع موج رخ می‌دهد و الکترون تنها یک سرعت را بدست می‌آورد. فرض می‌کنیم که در نخستین اندازه‌گیری، الکترون دارای سرعت ۱ است. اگر اندازه‌گیری را چندین بار با الکترون‌های دیگر با تابع موج یکسان، تکرار کنیم، به طور تصادفی هر یک از دو سرعت ۱ یا سرعت ۲ بدست می‌آید. در ۷۵ درصد موارد، الکترون، سرعت ۱ و در ۲۵ درصد باقی‌مانده، سرعت ۲ را دارد. اما هیچگاه با اطمینان نمی‌توانیم بگوییم که الکترون در اندازه‌گیری بعدی، چه مقداری را بدست خواهد آورد.
هنگامی‌که یک شیء کوانتومی در برهم‌نهی چندین ویژه حالت قرار دارد، هر یک از این حالات دارای مقدار احتمال معینی هستند. جمع مقادیر احتمال تمام ویژه حالات این شیء کوانتومی، مساوی با یک است. نشانه‌های ریاضی آن به شکل زیر هستند (c1,c2,c3 بزرگی‌های احتمال هستند):

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

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

.....

7- تکانه زاویه‌ای (ویکی‌پدیای فارسی)

در فیزیک، تکانهٔ زاویه‌ای یا تکانهٔ دورانی (به انگلیسی Angular momentum) کمیتی برداری است که برای بیان وضعیت حرکتی سیستم‌های در حال حرکت دورانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این که سرعت زاویه‌ای مرسوم‌ترین کمیت برای بیان وضعیت حرکتی جسم در حال دوران است، اما تکانهٔ زاویه‌ای نسبت به آن اطلاعات بیشتری را در بر دارد. تکانهٔ زاویه‌ای یک سیستم به سرعت زاویه‌ای، جرم و نحوهٔ توزیع جرم سیستم حول محور دوران یا مرکز دوران وابسته است. تکانهٔ زاویه‌ای همواره نسبت یک نقطهٔ مرجع سنجیده می‌شود. ..

عملگر تکانه زاویه‌ای (ویکی‌پدیای فارسی)

در مکانیک کوانتومی، عملگر تکانه زاویه‌ای یکی از عملگرهای متعدد مرتبط است که مشابه به تکانه زاویه‌ای کلاسیک است. عملگر تکانه زاویه‌ای نقشی محوری در نظریهفیزیک اتمی و سایر مسائل کوانتومی مرتبط باتقارن چرخشی بازی می‌کند. در هر دوی سامانه‌های کلاسیک و کوانتومی، تکانه زاویه‌ای (به همراه تکانه خطی و انرژی) یکی از سه ویژگی بنیادی حرکت است.
عملگرهای تکانه زاویه‌ای متعددی وجود دارند : تکانه زاویه‌ای کل(J)، تکانه زاویه‌ای مداری(L) و تکانه زاویه‌ای اسپین (که به اختصار به آن اسپین می‌گویند و با S نشان داده‌می‌شود) . تکانه زاویه‌ای کل همیشه پایسته است.

8- کیوبیت

در پردازش کوانتومی یک کیوبیت یا بیت کوانتومی واحد پایه‌ای پردازش کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی بوده و مشابه بیت در رایانه‌های کلاسیک می‌باشد: کوچکترین واحد ذخیره اطلاعات و معیاری از مقدار اطلاعات کوانتومی است. از نظر فیزیکی، کیوبیت یک سامانه کوانتومی دوحالتی است، یعنی سیستمی که توسط مکانیک کوانتومی به درستی قابل توصیف است و هنگام اندازه‌گیری یکی از دو حالت ممکن خود را اختیار می‌کند. مانند قطبش یک فوتون که در اینجا، جهتِ قطبشِ عمودی و جهتِ قطبشِ افقی دو حالت ممکن برای سامانه هستند. در یک سامانه کلاسیکی، هر بیت در هر لحظه یا در حالت صفر یا در حالت یک است، اما اصل‌های مکانیک کوانتومی به کیوبیت اجازه می‌دهند که در همان حال، حالتی را برابر با برهم‌نهی دو حالت اصلی نیز اختیار کند، یک ویژگی که در پردازش کوانتومی بنیادی است. به عبارتی، یک کیوبیت هم ممکن است در حالت‌های کلاسیک صفر و یک وجود داشته باشد و هم می‌تواند در حالت ترکیب این دو قرار گیرد (یعنی همزمان دارای هر دو حالت صفر و یک باشد). در واقع همین پدیده، تفاوت اصلی بین بیت‌های کلاسیک و کیوبیت‌هاست. انتقال کیوبیت‌ها بنیان دانش دورنوردی کوانتومی است.

9- دروازه‌های منطقی کوانتومی (Quantum logic gate) (ویکی‌پدیای فارسی)

دروازهٔ منطق کوانتومی (گیت منطقی کوانتومی) یا به زبان ساده‌تر دروازهٔ کوانتومی (گیت کوانتومی) به یک مدار پایهٔ کوانتومی گفته می‌شود که روی چند کیوبیت عمل می‌کند. این دروازه‌های کوانتومی در رایانش کوانتومی و به‌ویژه در مدل‌سازی مدارهای کوانتومی به کار می‌رود. این دروازه‌ها واحدهای سازنده‌ی مدارهای کوانتومی هستند؛ درست همانند دروازه‌های منطقی کلاسیک که در مدارهای دیجیتال امروزی به کار می‌رود. دروازه‌های منطق کوانتومی بر خلاف بیش‌تر دروازه‌های منطقی کلاسیک همگی بازگشت‌پذیر هستند؛ هرچند می‌توان مدارهای منطقی کلاسیکی طراحی کرد که بازگشت‌پذیر باشد.

از سایت بیگ‌بنگ https://bigbangpage.com/physics/%D8%AF%D8%B1%D9%88%D8%A7%D8%B2%DB%80-%DA%A9%D9%88%D8%A7%D9%86%D8%AA%D9%88%D9%85%DB%8C-%D8%A8%D9%87-%D8%A8%D8%B2%D8%B1%DA%AF-%D8%B4%D8%AF%D9%86-/%DA%A9%D8%A7%D9%85%D9%BE%DB%8C%D9%88%D8%AA%D8%B1-%DA%A9

.....

فقط یک مشکل در این میان وجود دارد، در واقع حالت برهم‌نهی کوانتومی زمانی رخ می‌دهد که توسّط جهان بیرونی و توسّط ما قابل مشاهده و اندازه‌گیری نیست؛ در غیر اینصورت اگر قابل مشاهده باشد، فقط یکی از احتمالات رخ خواهد داد و نتیجهٔ ما دیگر همزمان یک و صفر نخواهد شد. این امر منجربه تناقض در الزامات قوانین فیزیکی می شود؛ به خاطر اینکه اگر بخواهیم کوبیت‌ها همزمان در چند حالت متفاوت باشند، باید آنها را از هم جدا کنیم و اگر هم بخواهیم آنها را از هم جدا کنیم، باید با کوبیت‌های دیگر در ارتباط باشند که در این صورت، نمیتوانند چند حالت متفاوت باشند. به همین دلیل است که اگر چه شرکت‌ها و آزمایشگاه‌های بسیاری در سراسر جهان توانسته‌اند کامپیوترهای کوانتومی را با چند دهم کوبیت به نمایش بگذارند، ولی بزرگتر کردن مقیاس این رایانه‌ها با چند میلیون کوبیت، سخت‌ترین چالش و مانع علمی و تکنولوژی برای این شرکت‌ها است.

یکی از راه‌حل‌های امیدوارکننده برای این چالش، استفاده از واحدهایی کم و کنترل شده از کوبیت‌ها، در هنگام برقراری ارتباط نوری بین آنها است. به عبارت دیگر، اطّلاعات ذخیره شده در یک کوبیت(برای مثال یک اتم یا یک یون) را میتوان به یک کوبیت پرنده، که در واقع یک ذرّه از نور به نام "فوتون" است، انتقال داد. این نوع فوتون، میتواند از طریق فیبرهای نوری، به کوبیت‌هایی که در مسافت‌های دورتر قرار دارند اطلاعات مختلفی ارسال کند، بدون اینکه محیط زیست ما بتواند ماهیت این ذرّات را درک کند. مشکل اصلی در ایجاد چنین سیستمی، این است که تک فوتون‌ها انرژی‌های بسیار کمی با خود حمل می کنند و سیستم‌های کوچکی که حاوی این این کوبیت‌های مادی هستند، با چنین نور ضعیف و فوتون‌های کم انرژی تعامل ندارند.

همانطور که گفته شد، در سراسر جهان گروه‌های علمی بسیاری در حال دست و پنجه نرم کردن با این چالش هستند که آزمایشگاه کوانتومی «دایان» از مؤسّسه علمی «ویزمن» یکی از آنهاست. به طور کلّی، تجهیزات آزمایشی آنان دارای تک اتم‌هایی است که توسط تشدیدکنندهٔ سیلیکان بر روی تراشه‌های مخصوص قرار گرفته‌اند و فوتون‌ها به طور مستقیم از طریق فیبرهای نوری مخصوص به سمت این تراشه‌ها فرستاده می شوند. در آزمایش‌های قبلی پروفسور دایان و گروهش، نشان دادند که سیستم آنها قدرت بالایی در فعال کردن تک فوتون‌ها و عوض کردن مسیر آنان دارد و همچنین این سیستم قدرتمند آزمایشگاهی می تواند تک فوتون‌ها را از یک باریکه یا گسترهٔ نور جدا کند و مسیر آن را به طور کلّی تغییر دهد. مطالعات اخیر دایان و تیمش، به تازگی در نشریهٔ "Nature Physics" منتشر شده که نشان می دهند برای اوّلین بار موفّق به کشف دروازه‌ای قابل درک و منطقی برای درک اطّلاعات مبادله شده توسّط فوتون و اتم شده‌اند.

پروفسور دایان می گوید:«فوتون می‌تواند یک کوبیت را حمل کند و اتم، به اندازهٔ یک دوِم کوبیت است. زمانی که یک اتم و یک فوتون هم‌دیگر را ملاقات می کنند، مبادلهٔ کوبیت بین آنها به طور خودکار و هم‌زمان آغاز می‌شود وپس از به پایان رسیدن مبادلهٔ کوبیت، فوتون با اطلاعات جدیدی که به دست آورده به راه خود ادامه می‌دهد. در مکانیک کوانتوم که نمی‌توان اطلاعات را حذف و یا حتّی کپی کرد، این نوع مبادلات اطلاعات به نوعی پایه و اساس خواندن و نوشتن به صورت الکترونیکی هستند که در اصطلاح به آنها **دروازه کوانتومی (دروازه بومی ارتباطات کوانتومی)** گفته می‌شود.»

از این نوع دروازهٔ منطقی و قابل درک، که دروازهٔ مبادله نامیده می شود، می‌توان برای مبادلهٔ کوبیت‌ها در داخل یک کامپیوتر کوانتومی و یا بین چندین رایانه کوانتومی استفاده کرد. این روش علاوه نه تنها به کنترل کنندهٔ خارجی یا سیستم مدیریتی نیاز ندارد، بلکه ما را قادر می‌سازد تا معادلات و شبکه‌هایی در مقیاس بسیار بزرگ بسازیم .دایان می گوید:«دوازهٔ مبادله‌ای که ما آن را کشف کرده و نشان دادیم، فقط برای برقراری

ارتباط بین کوبیت‌های فوتون‌ها و اتم نیست؛ بلکه برای همه نوع کوبیت‌هایی که مبتنی بر ماده هستند، می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد . بنابراین، ما معتقدیم که این دروازهٔ کوانتومی، پایه و اساس نسل‌های بعدی سیستم‌های محاسباتی کوانتومی خواهد بود.»

10- درجه آزادی (فیزیک و شیمی) (ویکی‌پدیای فارسی)

تعداد متغیرهای شدتی مانند دما، فشار، غلظت و ... که باید به‌طور دلخواه برای تعریف کامل شرایط سیستم ثابت در نظر گرفته شوند، درجه آزادی نامیده می‌شود. از دیدگاه دیگر می‌توان گفت درجهٔ آزادی هر سیستم تعداد متغیرهای شدتی مستقلی است که می‌توان تغییر داد بدون اینکه تعداد یا ترکیب فازهای در حال تعادل سیستم تغییر کند. یک سیستم بر حسب وجود درجه آزادی صفر، یک، دو و ... به صورت سیستم ثابت، تک متغیره، دو متغیره و ... معرفی می‌گردد. تعداد درجات آزادی را می‌توان از رابطهٔ گیبس بدست آورد.

11- پیچیدگی ارتباطات (ویکی‌پدیای آلمانی)

پیچیدگی ارتباطات، شاخه ای از **نظریه پیچید گی محاسبات** است و برای بررسی مقدار مورد نیاز ارتباطات در حل برخی مسائل مورد استفاده قرار می گیرند، که داده های مربوطه در چندین رایانه پخش می شوند. در اینجا تمرکز اصلی بر روی تعداد بیت های ارسال شونده بین رایانه ها است تا رایانه ها بتوانند از عهده حل مسئله برآیند. پیچیدگی ارتباطات، ابزاری از علوم نظری رایانه است که به ویژه برای به اثبات رساندن مرزهای پایینی منابع مورد نیاز، در محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد.

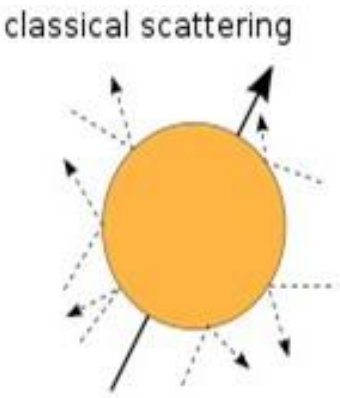
.....

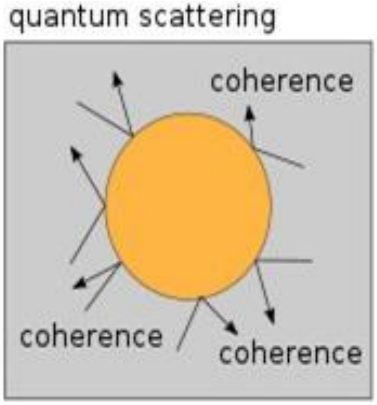
12- اتساع زمان (فراخی، بسط، گسترش) (Time dilation) (ویکی‌پدیای فارسی)

اتساع زمان یکی از مفاهیم فیزیکی مربوط به نظریه **نسبیت خاص** آلبرت اینشتین هست که مبنی بر پایه نسبیت این گونه بیان می‌شود که از دید دو ناظر با سرعت متفاوت ، گذر زمان متفاوت بررسی می‌شود. در مثال آزمایشی ساده: یکی با دو سرعت نزدیک به سرعت نور و سرعتی کمتر از سرعت نور (به‌طوری‌که دو بردار سرعت با هم زاویه غیر از ۱۸۰ و صفر درجه بسازند"برای احساس بهتر پدیده اتساع") فرض می‌شود و ناظر دوم ساکن فرض می‌شود. به‌طور کلی هرچه با سرعت بیشتری حرکت کنیم، زمان کندتر می‌گذرد واین دو رابطهٔ معکوس دارندانواع اتساع زمان.

در این نظریه ۲ نمونه از اتساع زمان بررسی شده‌است. در نسبیت خاص، ساعت‌هایی که نسبت به یک فرد مشاهده‌کننده اندازه‌گیری می‌شوند به کندی کار می‌کنند. برای نمونه اگر دو جسم داشته باشیم که یکی از آن‌ها جسم ۱ است و دیگری جسم ۲ و جسم اول با سرعت بیشتری نسبت به جسم دوم حرکت کند در این حالت گفته می‌شود که زمان برای جسم اول به‌طور محسوسی کند می‌شود. چنانچه این توسط ساعت اندازه‌گیری شود عقربه‌های ساعت در حالت اول به کندی کار می‌کنند. درنسبیت عام ساعت برای جسمی کند کار می‌کند که نزدیک نیروی گرانشی قوی مانند یک سیاره قرار گرفته‌است.

13- ناهمدوسی کوانتومی (Quantum decoherence) (ویکیپدیای فارسی)





ناهمدوسی کوانتومی از دست دادن همدوسی کوانتومی **(13-1)** است. در مکانیک کوانتومی ذرات مانند الکترون توسط یک تابع موج، یک توصیف ریاضی حالت کوانتومی یک سیستم، توصیف می‌شوند؛ طبیعت احتمالی تابع

موج باعث به وجود آمدن اثرات کوانتومی مختلف می‌شود. تا زمانی که رابطه قابل تعریف بین فاز و حالت‌های مختلف این سیستم وجود دارد، این سیستم همدوس است. همدوسی خاصیت بنیادی مکانیک کوانتومی و برای عملکرد کامپیوترهای کوانتومی لازم است. اما هنگامی که یک سیستم کوانتومی کاملاً ایزوله نباشد و در تماس با محیط اطراف خود باشد، این همدوسی با زمان از بین می‌رود که به آن ناهمدوسی کوانتمی می‌گویند. به عنوان یک نتیجه از این روند، رفتار کوانتمی مربوطه از بین می‌رود .

ناهمدوسی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط فیزیکدان آلمانی اچ. دیتر زه معرفی شد و یک موضوع تحقیقاتی فعال از دهه ۱۹۸۰ است . ناهمدوسی به یک چارچوب کامل توسعه داده شده‌است تا برای حل مسئله اندازه‌گیری استفاده شود .
ناهمدوسی را می‌توان به عنوان از دست دادن اطلاعات یک سیستم به محیط تلقی کرد (اغلب به عنوان یک منبع گرمایی مدل می‌شود، از آنجا که هر سیستم آزادانه با حالت‌های انرژی محیط اطرافش جفت می‌شود .به‌طور ایزوله‌شده سیستم دینامیک غیر یکانی دارد (اگر چه ترکیب سیستم به علاوه محیطش به شکل یکانی تغییر می‌کند در نتیجه پویایی سیستم به تنهایی برگشت‌ناپذیر است. مانند هر جفت شدن، درهم‌تنیدگی بین سیستم و محیط ایجاد می‌شود. این اثر باعث اشتراک گذاری اطلاعات کوانتومی—یا انتقال آن — به پیرامون می‌شود .
ناهمدوسی برای درک فروپاشی تابع موج در مکانیک کوانتومی استفاده می‌شود. ناهمدوسی باعث فروپاشی تابع موج فروپاشی نیست. بلکه یک توضیح برای مشاهده فروپاشی تابع موج فراهم می‌کند که به عنوان یک «نشت» طبیعت کوانتومی سیستم به محیط اطراف است. اجزای تابع موج ناجفت شده از یک سیستم همدوس هستند و از محیط اطراف خود فاز به دست می‌آورند. در مجموع برهم نهی از تابع موج سراسری وجود دارد (و همچنان در سطح سراسری همدوس است) اما سرنوشت نهایی آن یک موضوع تفسیری باقی مانده‌است. به‌طور خاص ناهمدوسی تلاش برای توضیح مسئله اندازه‌گیری نیست. بلکه ناهمدوسی یک توضیح برای تبدیل سیستم به مخلوطی از وضعیت‌ها فراهم می‌کند که ناظر آن را می‌بیند. علاوه بر این مشاهده‌ها ما به ما می‌گوید که این مخلوط به نظر می‌رسد در هنگام اندازه‌گیری یک آنسامبل کوانتومی مناسب باشد. اندازه‌گیری منجر به «تحقق» دقیقاً یک وضعیت در «آنسامبل» است .
ناهمدوسی نماینده یک چالش برای تحقق عملی کامپیوترهای کوانتومی است چرا که از این دست ماشین‌ها انتظار می‌رود به شدت بر روی تکامل ایزوله همدوسی کوانتومی وابسته باشد. به‌طور ساده‌تر آنها نیاز دارند که حالت‌های همدوس حفظ شود ناهمدوسی مدیریت شود تا بتوان محاسبات کوانتومی انجام داد.