

مکانیک کوانتومی راه برون رفتی از غیر واقعی بودن نیست آنیل آنانتسوای برگردان: امید برومند

چنین به نظر می‌آید که آزمایش معروفی توانست ثابت کند اشیاء کوانتومی تا زمان اندازه‌گیری‌شان، خصوصیات درونی خودویژه‌ای ندارند. اما سه پژوهش‌گر اکنون راه برون رفتی پیدا کرده‌اند که چنین «متغیرهای پنهانی» (1) خصوصیات خودویژه را روا می‌داند. این در حالی است که دیگر پژوهش‌گران در تلاش برای نجات قوانین فیزیک کوانتومی‌اند.



آنیل آنانتسوای روزنامه نگار علمی و نویسنده است. کتاب او «عبور همزمان از دو دَر» که در اوت 2018 منتشر شده، تاریخ و اهمیت امروزی آزمایش دو شکاف (2) را بررسی می‌کند.

فیزیکدان نظری **جان ویلر**، زمانی در توصیف یک ذره‌ی نور در حال حرکت از یک منبع نور به سوی یک آشکارگر، از «یک اژدهای بزرگ آتش پراگن» سخن گفته بود. او نوشته بود «اژدها با دندان‌های خود، آشکارگر را گاز می‌گیرد. دم‌نک تیزش، آغاز و اول است». فوتون هم در ابتدا و هم در پایان، واقعیت مشخص و واضح تعریف‌پذیری دارد. اما میان این دو نقطه، بدن اژدها غیر واقعی و تا حدی در ابهام است. ویلر اضافه کرده بود «توضیح چگونگی شکل اژدها و عملکردش در این فاصله، امکان‌پذیر نیست».

پدیده‌های کوانتومی بنیادین (پدیده‌هایی که از محدوده‌ی فیزیک کلاسیک به مراتب فرارفته و در این چارچوب قابل توضیح نیستند. م) تا زمانی که مشاهده نگردند واقعی نیستند – این نظر فلسفی بیان شده از سوی ویلر، **ضد واقع‌گرایی (Antirealism)** نامیده می‌شود. در مقابل، از دیدگاه کلاسیک، اشیاء همیشه ویژگی‌های درونی و نهادین آشکار و روشنی دارند. ویلر آزمایشی را طراحی کرد که نشان دهد، پافشاری بر روی دیدگاه کلاسیک، ناگزیر منجر به نتیجه‌گیری‌ای می‌شود که آینده برگزیده تأثیرگذار است. با در نظر گیری پوچ بودن چنین سفرهایی در زمان، آزمایش ویلر به یکی از پایه‌های **ضد واقع‌گرایی** در سطح کوانتومی تبدیل شد.

اما در ماه مه سال 2018، **رافائل چاوز**، **گابریلا بارتو لموس** و **ژاک پینار** از موسسه بین‌المللی فیزیک در **ناتال**، در برزیل، راه برون رفتی پیدا کردند. آنان نشان دادند که آزمایش ویلر را می‌توان تحت شرایط مشخصی با یک مدل کلاسیک که در آن فوتون دارای خواص درونی است، توضیح داد. به این ترتیب پژوهش‌گران برای اژدها بدن معینی را تعریف کردند، که از دید **صورت‌گرایی (فرمالیسم) ریاضی (3)** (mathematischer Formalismus) مکانیک کوانتومی استاندارد پنهان می‌ماند.

فیزیکدانان تیم **چاوز** با پیشنهاد تغییر کوچکی در آزمایش ویلر خواستند که این برون رفت را بررسی و امتحان کنند. سه گروه کاری، مشتاقانه و بی‌درنگ تلاش به انجام آزمایش اصلاح شده کردند. به گفته پژوهش‌گران، نتایج منتشر شده در ژوئن 2018، با مدل‌های کلاسیک و حامی واقع‌گرایی، به شکل بخردانه‌ای قابل توضیح نیستند. مکانیک کوانتومی ممکن است عجیب و غریب باشد، اما هنوز ساده‌ترین توضیح را ارائه می‌دهد.

ویلر آزمایش خود را در سال 1983 برای روشن کردن یکی از مهم‌ترین معماهای مفهومی و نظری در مکانیک کوانتومی، یعنی **دوگانگی موج و ذره**، طراحی کرد. اشیاء کوانتومی یا رفتاری ذره مانند و یا موج مانند دارند، اما هیچگاه این دو رفتار را هم‌زمان از خود نشان نمی‌دهند. به نظر می‌رسد تا زمانی که آنها مشاهده نگردند واقعیت درونی خودویژه‌ای ندارند (نگاه شود به واقعیت آزمایش دو شکاف در صفحه 4).

در یک نگاه

مسیر تار و مبهم کوانتوم‌ها

1- پدیده‌های کوانتومی بنیادین تنها هنگامی واقعیت پیدا می‌کنند که مشاهده گردند. در غیر این صورت باید آینده برگزیده تاثیر بگذارد. این نتیجه یک آزمایش پرترفند است.

2- فیزیک‌دانان نشان دادند که این نتایج می‌توانند تحت شرایط ویژه‌ای با یک مدل کلاسیک توضیح داده شوند. در این مدل، اشیاء کوانتومی همیشه دارای خواص ویژه‌ای هستند که برای ما قابل دسترسی نیستند.

3- سپس چندین گروه از فیزیک‌دانان تجربی این سناریو را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. به نظر می‌رسد که نظریه‌های شناخته شده‌ی مکانیک کوانتومی در این جریان تأیید می‌شوند- اما برخی شبهه‌ها و عدم قطعیت‌ها باقی می‌مانند.

دیوید کایزر، فیزیک‌دان و تاریخ‌نگار علمی در موسسه فناوری ماساچوست در ایالات متحده آمریکا می‌گوید «یک صد سال است که فیزیک‌دانان با **دوگانگی موج و ذره** به‌مثابه گوهر مکانیک کوانتومی در کنجار و کشمکش‌اند. این انگاره (ایده) حتی از سایر اجزای غیرعادی و عجیب نظریه‌ی کوانتومی مانند **اصل عدم قطعیت هایزنبرگ (4)** و **گره‌ی شرودینگر (5)** قدیمی‌تر است».

این پدیده را می‌توان به‌خوبی در شکل ویژه‌ای از **آزمایش معروف دوشکاف**، یعنی **تداخل‌سنج ماخ-زندر (6)** مشاهده کرد که در آن پژوهش‌گران فوتونی را به سوی آینه‌ی نیمه شفاف، یعنی یک **تقسیم‌کننده‌ی پرتو (7)** پرتاب می‌کنند. فوتون با احتمال برابر یا انعکاس می‌یابد و یا از آن رد خواهد شد، یعنی می‌تواند دو راه ممکن را برود (نگاه شود به «رابطه علت و معلولی وارونه» در صفحه 3). فوتون یا در امتداد مسیر 1 و یا در امتداد مسیر 2 می‌رود و با احتمال برابر به آشکارساز D1 و یا D2 برخورد خواهد کرد. در این جریان، فوتون به‌مثابه شیئی تنهایی عمل کرده و سرشت ذره‌ای‌اش را نمایان می‌کند.

در نقطه تقاطع مسیرهای 1 و 2 می‌توان **تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2** را قرار داد. با قرار دادن این تقسیم‌کننده وضعیت کاملن تغییر می‌کند: در این ترکیب از آزمایش، فوتون به‌طور هم‌زمان، هر دو مسیر را به مانند یک موج می‌پیماید. این دو موج، در **تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2**، دوباره به یک‌دیگر می‌رسند. ساختار آزمایش را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که بخش امواج حرکت‌کننده به سمت آشکارگر D1، به شکلی سازنده برهم نهاده شوند (8)، یعنی قله‌ی موج به قله‌ی موج برسد. در مقابل، مسیر به سوی آشکارگر D2، تداخل مخربی برای امواج ایجاد خواهد کرد. از این لحظه به بعد پژوهش‌گران فوتون را همیشه در آشکارگر D1 ثبت خواهند کرد و نه در آشکارگر D2. بدین ترتیب فوتون طبیعت موجی خود را آشکار می‌سازد.

اختلال ماهرانه در واقعیت

ویلر مسئله را به شکل عالی‌ای طرح کرد. او پرسید چه اتفاقی خواهد افتاد اگر تصمیم‌گیری برای نصب **تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2** با تأخیر انجام شود؟ فرض کنیم که فوتون داخل تداخل‌سنجی شود که تنها **تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 1** در آن قرار دارد. در این صورت فوتون باید در این‌جا مانند ذره رفتار کند. هنگامی که فوتون در راه است، **تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2** را می‌توان در آخرین میلیارد ثانیه (9-10⁹) نصب کرد. هم نظریه و هم آزمایش نشان‌دهنده این نکته‌اند که فوتون که در ابتدا با رفتار ذره مانندش، باید به آشکارگر D1 و یا D2 رسیده باشد، تا اندازه‌ای تصمیم خود را تغییر می‌دهد و به مثابه موج ظاهر شده و تنها توسط آشکارگر D1 ثبت خواهد شد. برای رخ دادن این امر، فوتون باید هر دو مسیر را هم‌زمان انتخاب کرده باشد، و نه یکی یا دیگری را. تفکر به سبک کلاسیک، این تصور را در ذهن زنده می‌کند که گویا فوتون در واکنش به شرایط تغییر یافته آزمایش، به گذشته سفر کرده و سرشت خود را از ذره به موج تغییر داده است.

یک امکان برای اجتناب از **رابطه علیتی معکوس (Retrocausality) (9)** (سفر فوتون در زمان و تاثیر گذاری برگزیده خود. م)، انکار و رد هر گونه واقعیت درونی ذره‌ی نور است. پس فوتون تنها با اندازه‌گیری واقعیت پیدا می‌کند. در این حالت چیزی وجود ندارد که با پس‌گنش تغییر یابد.

چنین **ضدواقع‌گرایی‌ای در تفسیر کپنهاگی (10)** از مکانیک کوانتومی که نزد فیزیک‌دانان محبوب است، دیده می‌شود.

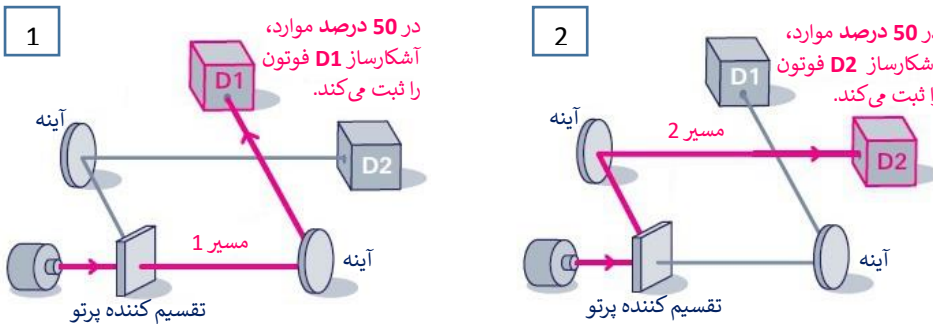
این ضدواقع گرایی حداقل در رابطه با آزمایش ویلر، ضربه محکمی به کار چاوز وارد کرد. تیم چاوز می خواست جنبه های دشوار فهم و یا تصور خلاف غریزه ی مکانیک کوانتومی را با کمک اندیشه های جدید - به اصطلاح مدل های رابطیه ی علت و معلولی- شرح دهد.

رابطه علت و معلولی وارونه

یک آزمایش با «گزینهش تأخیری» نشان دهنده ی ناپایداری سرشت یک ذره نور است.

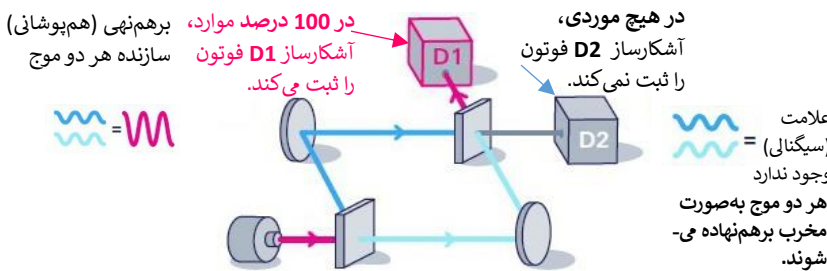
فوتون به مثابه ی ذره

ذره با خروج از یک منبع و قرار گرفتن در پشت یک تقسیم کننده ی پرتو، مسیر 1 و یا 2 را خواهد رفت و متناسب به آشکارگر 1 و یا 2 خواهد رسید.



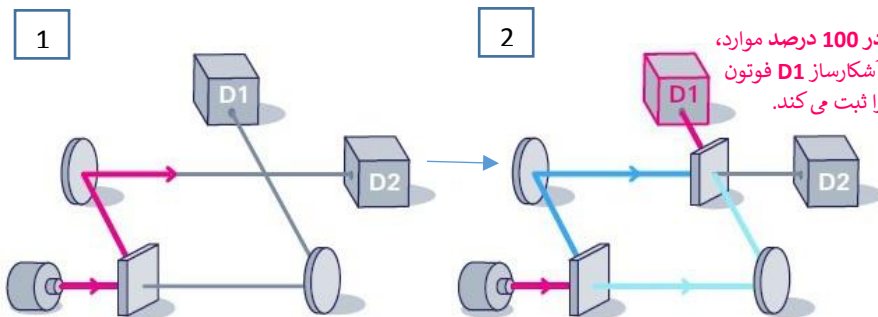
فوتون به مثابه ی موج

با قرار دادن تقسیم کننده ی پرتوی شماره 2، فوتون رفتار موجی از خود نشان می دهد و در تقسیم کننده ی پرتوی شماره 1 تقسیم می شود. هر دو موج دوباره در تقسیم کننده ی پرتوی شماره 2، به یک دیگر می پیوندند. فوتون همیشه توسط یک آشکارساز (در این جا آشکار ساز شماره 1) ثبت می گردد.

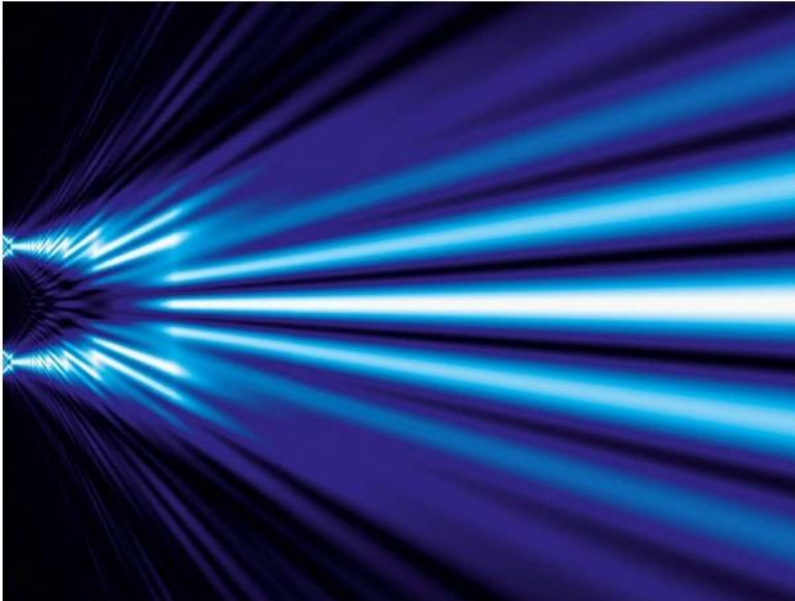


گزینهش تأخیری

در ابتدا تنها یک تقسیم کننده ی پرتو مورد استفاده قرار می گیرد. در این حالت فوتون رفتار ذره مانند از خود نشان می دهد. تنها هنگام عبور فوتون از دستگاه است که تقسیم کننده ی پرتوی شماره 2 اضافه می شود. بدین وسیله فوتون، برق آسا به یک موج تبدیل می شود- و انگار از ابتدا هر دو مسیر را انتخاب کرده است.



نتیجه : یا با افزودن تقسیم کننده ی پرتوی شماره ی 2، علامتی (سیگنالی) در زمان به گذشته فرستاده می شود تا رفتار اولیه ی ذره ی نور را تحت تأثیر قرار دهد، و یا فوتون ها تا زمانی که مشاهده نشده اند خواص درونی مشخصی از خود ندارند.



این شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی آن است که چگونه پشت یک صفحه با دو شکاف (سمت چپ عکس)، احتمال ردیابی و آشکارسازی یک شیء کوانتومی در برهم‌نهادگی، و گسترش و پخش آن است.

واقعیت در آزمایش دو شکاف

این آزمایش به‌مثابه‌ی نمایش ردکننده‌ی افکار و تصورات ایزاک نیوتن بزرگ در مورد طبیعت نور، به‌گونه‌ی شگرفی ساده طراحی شده بود. **توماس یانگ** فیزیک‌دان بریتانیایی، آنچه را که امروزه به‌عنوان آزمایش دو شکاف شناخته شده است، در سال 1803 برای اعضای انجمن سلطنتی در لندن به‌مثابه‌ی «نمایشی که بسیار آسان و در هر کجا که خورشید بدرخشد قابل تکرار است»، توصیف کرد. یانگ برای نشان دادن طبیعت موجی نور آزمایش زیبایی را طراحی کرد. او بدینوسیله نظر نیوتن در مورد تشکیل یافتن نور از ذراتی به نام **کورپاسل (کپسول) (11)** را رد کرد.

اما حدود 100 سال بعد، با پیدایش فیزیک کوانتومی روشن شد که نور در حقیقت از واحدهای خرد و تقسیم‌ناپذیر انرژی یا «**کوانتوم**» ها» (12) که همان فوتون‌ها هستند، تشکیل یافته است. اگر آزمایش یانگ با فوتون‌های تک و یا با سنگ‌بناهای ماده‌ی عادی مانند الکترون‌ها و نوترون‌ها انجام یابد، چه اتفاقی خواهد افتاد؟ در این صورت آزمایش، سوال‌های بنیادینی در مورد سرشت واقعیت مطرح خواهد کرد. در گونه‌ی جدید آزمایش یانگ، ذرات جداگانه‌ی نور و یا ماده بر روی دو شکاف واقع در مانع غیرشفافی می‌افتند. در طرف دیگر این مانع، یک آشکار ساز، برای نمونه یک صفحه‌ی عکاسی، ورود ذرات را ثبت می‌کند. از دیدگاه کلاسیک، ذرات تکی که از شکاف‌ها عبور می‌کنند، باید در پشت آن‌ها به آشکارگر اصابت کرده و به تدریج دو سیگنال (علامت) اصلی ایجاد کنند.

اما آن‌ها دو سیگنال (علامت) اصلی ایجاد نمی‌کنند. به‌جای آن، خطوط تیره و روشنی به شکل متناوب بر روی صفحه‌ی نمایش ایجاد می‌شوند. چنین الگوهای تداخل معمولن هنگامی ایجاد می‌شوند که چندین موج بر روی یک‌دیگر بیافتند. چنین الگوهای تداخل نتیجه‌ی آزمایش اصلی یانگ نیز بوده‌اند. برخورد قله‌های یک موج با قله‌های موج دیگر منجر به تداخل سازنده (خطوط روشن) می‌شود؛ و در صورت برخورد قله‌های یک موج با فرورفتگی موج دیگر، تداخل موج ویرانگر (بخش تیره رنگ) خواهد بود. در این‌جا همیشه تنها یک فوتون تک از دستگاه می‌گذرد، به‌همین دلیل به نظر می‌رسد که گویا هر ذره‌ی نور از هر دو شکاف به‌طور هم‌زمان گذشته و با خود تداخل می‌کند. این در چارچوب فیزیک کلاسیک معنایی ندارد.

میان موج و ذره

با نگرش ریاضی، چیزی که از هر دو شکاف عبور می‌کند، نه ذره‌ی فیزیکی و نه موج کلاسیک است، بلکه به اصطلاح **تابع موج (13)** - یک توصیف ریاضی انتزاعی از وضعیت فوتون است، که در این مورد، موقعیت آن است. **تابع موج** در ابتدا رفتاری موج مانند از خود نشان می‌دهد، به این معنی که به هر دو شکاف برخورد کرده که در نتیجه آن، از سمت دیگر هر یک از دو شکاف موج جدیدی پخش می‌شود که با یکدیگر تداخل می‌کنند. **تابع موجی** که این‌گونه ترکیب یافته و آمیخته شده، احتمالاتی را برای مکان‌هایی بر روی صفحه‌ی نمایش به دست می‌دهد که در آن‌ها فوتون می‌تواند شناسایی شود.

در نقاط **تداخل سازنده‌ی هر دو تابع موج**، احتمال پیدا کردن فوتون بیشتر خواهد بود. اما در مناطقی با **تداخل ویران‌گر**، شانس پیدا کردن فوتون کم است. اندازه‌گیری - در این‌جا، برهمکنش با صفحه‌ی عکاسی - آن‌طور که به زبان مکانیک کوانتومی نامیده می‌شود، منجر به **رُمپش تابع موج** می‌شود. در حالی که **تابع موج**، پیش از اندازه‌گیری در تمام فضا پخش بود، هنگام اندازه‌گیری، به نهایی می‌رسد که در آن‌جا، فوتون خود را آشکار می‌سازد.

این **رُمپش ناشی از اندازه‌گیری تابع موج**، موجب مشکلات مفهومی بسیاری در مکانیک کوانتومی شده است. از پیش نمی‌توان با اطمینان گفت که فوتون در کجا آشکار خواهد شد. فوتون می‌تواند در هر جایی که احتمال ظاهر شدن برابر با صفر نباشد آشکار شود. در ضمن هیچ امکانی برای ترسیم مسیر فوتون از منبع تا آشکارساز وجود ندارد.

بنابر تفسیر **ورنر هایزنبرگ** یکی از پیشگامان مکانیک کوانتومی، اشیاء زمانی واقعیت پیدا می‌کنند که مشاهده شوند. او می‌پنداشت که «بازگشت به انگاشت جهان عینی و واقعی که کوچک‌ترین اجزاء آن همانند سنگ‌ها و درختان وجود عینی دارند، بی‌تفاوت از این‌که مشاهده شوند یا نه»، دیگر امکان پذیر نیست. **جان ویلر**، فیزیک‌دان آمریکایی نوعی از آزمایش دو شکاف را برای برهان خود استفاده کرد و گفت در تحلیل نهایی «یک پدیده کوانتومی بنیادی تا زمانی که ثبت (اندازه‌گیری) م) نشود، واقعی نیست».

اما در نظریه‌ی کوانتومی کاملاً نامشخص است که منظور از اندازه‌گیری چیست. این نظریه ایجاب می‌کند که دستگاه اندازه‌گیر متعلق به دنیای کلاسیک (عادی) باید باشد، بدون این‌که مرزی بین دنیای کلاسیک و دنیای کوانتومی معین کند. برخی از فیزیک‌دانان حتی بر این عقیده‌اند که خودآگاهی انسان در **رُمپش** نقش بازی می‌کند. اما انواع مدرن **آزمایش دو شکاف**، تاییدی تجربی برای چنین ادعاهایی ارائه نمی‌دهند.

آزمایش می‌تواند همچنین به گونه‌ی دیگری تفسیر شود. از این‌رو، نظریه **دو بروی-بوهم (14)** سرشت موجی و ذره‌ای واقعیت را پیوند می‌دهد: در این آزمایش، یک فوتون با موقعیت همیشگی آشکار و واضح‌اش، به سمت دو شکاف حرکت کرده و از یکی از آن‌ها می‌گذرد. بدین ترتیب هر فوتون مسیری دارد. فوتون بر روی یک موج هدایت‌گر گذرا از هر دو شکاف سوار است، که ذره‌ی نور را به یک مکان تداخل‌سازنده هدایت می‌کند.

مدل‌ها در آزمون آزمایشگاهی

در سال 1979، **کریس جیودنی**، **کریس فیلیپیدس** و **بازیل هابلی** از کالج **بیرک پک** در لندن، برای اولین بار پیش‌بینی‌های این نظریه برای مسیر ذراتی که از دو شکاف می‌گذرند را شبیه‌سازی کردند. چنین مسیریابی طی دهه‌ی گذشته به شکل تجربی اثبات شده‌اند، هر چند فن‌آوری بحث‌انگیز مورد استفاده برای این هدف، **اندازه‌گیری ضعیف (15)** نام دارد.

نظریه‌هایی که **رُمپش تصادفی توابع موجی** را مورد بحث قرار می‌دهند، نیز در رقابت با این نظریه مطرح‌اند: هر چه ذرات بیشتری

در سیستم کوانتومی موجود باشند، به همان اندازه این فرآیند، احتمال بیشتری پیدا می‌کند. ناظران تنها نتیجه را می‌یابند. برای نمونه، تیمی از محققان به رهبری مارکوس آرنت از دانشگاه وین، این موضوع را با فرستادن ملکول‌های بزرگتر به دو شکاف بررسی کرده است. بر اساس چنین مدل‌های رُمبش و ریزش، ذرات ماده، فراتر از حد مشخصی از جرم نباید در حالت برهم‌نهی کوانتومی (8) باقی بمانند. باقی ماندن در این حالت، الگوی تداخل را از بین خواهد برد. تیم آرنت حتی با مولکول‌هایی دارای بیش از 800 اتم، پدیده‌ی تداخل را مشاهده کرد؛ جستجو برای پیدا کردن مرزی در این رابطه ادامه دارد.

راجر پنروز نظریه‌پرداز انگلیسی، نسخه‌ای از یک مدل رُمبش و ریزش را طراحی کرد، که در آن ناپایداری‌های گرانشی، یک شی را از حالت برهم‌نهی (superposition) به حالت دیگر می‌برد - هر چه جرم شی بیشتر باشد، این تغییر حالت سریع‌تر و مستقل از ناظران آگاه رخ می‌دهد. دیرک بومیستر از دانشگاه کالیفرنیا در تلاش است تا ایده‌ی یک نسخه تطبیق‌یافته از آزمایش دو شکاف را بررسی کند. اندیشه‌ی اصلی در این‌جا نه تنها برهم‌نهی هم زمان مسیر یک فوتون از طریق دو شکاف است، بلکه تبدیل یکی از شکاف‌ها به برهم‌نهی دو مکان ممکن نیز هست. به گفته‌ی پنروز، هنوز هنگامی که فوتون در دستگاه در حال عبور است این شکاف یا در حالت برهم‌نهی باقی می‌ماند و یا فرو ریخته، و باعث ایجاد الگوهای مختلف تداخل می‌شود. بومیستر اکنون یک دهه است که در این رابطه، برای ایجاد شرایط یک آزمایش کار می‌کند.

چنین رویکردهایی در طی دهه‌ی گذشته، توسط طرفدارانی مانند پژوهشگر پرنفوذ علوم رایانه مانند جودیا پرل، محبوبیت یافتند. مدل‌های علیتی (causality model)، رابطه‌های علت و معلولی بین اجزای یک آزمایش ایجاد می‌کنند. در بررسی دو رخداد مرتبط A و B، گاهی اوقات نمی‌توان معین کرد که آیا A علت B است و یا بر عکس. شاید حتی یک رویداد تا کنون کم توجه C که شک برانگیز نیست، ایجادگر هم A و هم B باشد. در چنین مواردی، مدل‌های علیتی، در ردیابی C کمک می‌کنند.

چاوز و همکارانش کار خود را بر روی آزمایش ویلر با گزینش تأخیری متمرکز کردند. آنان اطمینان داشتند، بدون استفاده از علیت معکوس (Retrocausality)، هیچ فرآیندی را پیدا نخواهند کرد که به شکلی پنهان به فوتون خصوصیات درونی بخشیده و رفتارش را شرح بدهد. آنان دقیقاً بر این عقیده بودند که آزمایش با گزینش تأخیری، به گفته‌ی چاوز، به این معنی «فوق‌العاده دشوار فهم است که آن را با کمک هیچ مدل علیتی نمی‌توان توضیح داد».

برای یک توضیح تا چه اندازه به مکانیک کوانتومی نیاز است؟

نتیجه پژوهش‌های نظری چاوز و همکارانش، باعث غافل‌گیری خود آنها شد، و مسیر رسیدن به این نتایج حتی نسبتن ساده از آب درآمد. در گام اول، پژوهش‌گران درست بعد از عبور فوتون از تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 1، حالت درونی‌ای برای فوتون در نظر گرفتند که از طریق یک «متغیر پنهان» توصیف می‌شود. پنهان در این رابطه به معنی این است که اندازه و بزرگی در مکانیک کوانتومی استاندارد وجود ندارد، اما رفتار فوتون را به گونه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. سپس آزمایش‌کنندگان تصمیم گرفتند که آیا تقسیم‌کننده‌ی پرتوی دیگری را وارد آزمایش کنند یا نه. در یک مدل علیتی که گذر به گذشته امکان‌پذیر نیست، انتخاب آزمایش‌کنندگان، وضعیت قبلی فوتون را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

تیم پژوهش‌گران توانست سپس با کمک متغیر پنهان، قاعده‌هایی را در مطابقت کامل با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی تنظیم کند، و با اندازه‌ی متغیر و با در نظرگیری بود و نبود تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2، امکان برخورد فوتون به آشکارگر D1 و یا D2 را بدست آورد. بدین وسیله پژوهش‌گران به گونه غیرمنتظره‌ای یک توضیح علت و معلولی کلاسیک و واقع‌گرایانه در دست داشتند. آنان در آزمایش ویلر راه برون رفتی یافتند.

تیم بایرنس فیزیکدان کوانتومی نظری از دانشگاه نیویورک در شانگهای به یاد می‌آورد که این موضوع برای برخی از فیزیکدانان غیر منتظره بود. «برای آنها تا آن لحظه واضح نبود که این نوع آزمایش می‌تواند با یک توضیح کلاسیک همخوان باشد. طراحی یک نظریه با متغیرهای پنهان که نیازی به مکانیک کوانتومی ندارد، امکان پذیر است.»

از این لحظه به بعد، گام بعدی چاوز انجام تغییر در ساختار آزمایش بود تا به کمک آن فیزیکدانان، امکان تفکیک‌پذیری بین نظریه کلاسیک با متغیر پنهان و مکانیک کوانتومی را به دست آورند. در آزمایش فکری اصلاح‌شده، **تداخل‌سنج مخ-زندر** شامل دو تقسیم‌کننده پرتو، با دو «**نوسان‌ساز انتقال فاز**» (Phase-shift oscillator) [16]، یکی در ابتدا و دیگری در انتهای آزمایش تکمیل می‌شود. این دو «**نوسان‌ساز انتقال فاز**» می‌توانند به مثابه سوئیچی با امکان انتخاب، توسط آزمایش‌کنندگان به دل‌خواه مورد استفاده قرار گیرند.

دو **نوسان‌ساز انتقال فاز**، بر روی درازی مسیر نسبی امواج فوتون مورد مشاهده، تأثیر خالص (Netto) می‌گذارند. بدین‌وسیله الگوی تداخل و در نتیجه رفتار موجی یا ذره‌ای فرض شده شی مورد بررسی نیز تغییر می‌باید. برای مثال می‌توان **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 1** را به گونه‌ای تنظیم کرد که فوتون در **تداخل‌سنج**، مانند ذره عمل کند و اما مجبور شد که در **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 2** رفتار موجی از خود نشان دهد. در این جریان، **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 2** باید ابتدا بعد از **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 1** فعال شود.

پژوهش‌گران با آرایش جدید آزمایش، راهی برای تشخیص مدل علیتی کلاسیک و مکانیک کوانتومی از یک‌دیگر را پیدا کردند. فرض کنیم که **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 1**، یکی از سه موقعیت ممکن و **نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 2**، یکی از دو موقعیت ممکن را بتوانند به خود بگیرند. در مجموع 6 ترکیب یا آرایش مختلف برای آزمایش نتیجه می‌شود. پژوهش‌گران انتظارات خود از هر یک از این 6 ترکیب را محاسبه کردند. در این رابطه، پیش‌بینی‌های مدل کلاسیک با **متغیرهای پنهان**، با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی تفاوت داشتند. سپس گروه آزمایش‌گر با توجه به احتمالات ورود فوتون به یک آشکارساز معین که وابسته به تنظیمات **نوسان‌ساز انتقال فاز** است، فرمولی را طراحی کرد. در صورت صفر بودن نتیجه‌ی این فرمول، مدل علیتی کلاسیک، می‌توانست توضیحی برای یافته‌های آماری ارائه دهد. اگر نتیجه بزرگ‌تر از صفر می‌بود، در آن صورت (با توجه به شرایط ویژه برای **متغیر پنهان**) نمی‌توانست توضیح کلاسیکی وجود داشته باشد.

چاوز همراه با پژوهشگران تیم فیزیکدان کوانتومی، **فابیو شرینو** از دانشگاه **لس پینس** در رم، بررسی تجربی **نامعادله** را آغاز کرد. هم‌زمان در چین نیز دو گروه مختلف، یکی تحت سرپرستی **جیان وی پان**، یک فیزیکدان تجربی از دانشگاه علم و صنعت چین و دیگری توسط **گوان کان گو** از همان دانشگاه، این آزمایش را انجام دادند.

هر گروه، آزمایش را با کمی تفاوت نسبت به دیگری انجام داد. تیم **گوان کان گو**، مبنا را بر استفاده از یک **تداخل‌سنج واقعی ماخ-زندانر** گذاشت. **هاوارد وایزمن** فیزیکدان نظری از دانشگاه **گریفیس** در استرالیا، که در این آزمایش‌ها شرکت نداشت، در تفسیری می‌گوید: «به نظر من چگونگی انجام آزمایش به وسیله تیم **گوان کان گو**، نزدیک‌ترین حالت نسبت به طرح و پیشنهاد اولیه ویلر بود.»

این فرمول با اهمیت آماری انکارناپذیر، برای هر سه آزمایش، مقداری بیش از صفر را محاسبه کرد. بدین‌وسیله پژوهشگران توانستند **مدل‌های علیتی کلاسیکی** را که توضیح‌دهنده‌ی آزمایش ویلر با **گزینه‌ش تأخیری** هستند، حذف کنند. به این ترتیب شکاف در آزمایش ویلر پر شد. **پان کایزر** گفت «ما آزمایش فکری معروف **ویلر** را نجات دادیم». او تحت تأثیر کار نظری «**باوقار**» چاوز و آزمایش‌های بعدی چنین می‌گوید: «هر یک از آزمایش‌های اخیر، با پیدا کردن نقص و خطای آشکار، شواهد قانع‌کننده‌ای به دست دادند که مدل‌های کلاسیک واقع‌جهان را توضیح نمی‌دهند، در حالی که پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی به شکل عالی با نتایج جدید مطابقت دارند.»

با این حال، پیش‌شرط‌های معینی در فرمول وارد می‌شوند. مهم‌ترین آن‌ها این است که **متغیر پنهان** موجود در مدل علیتی کلاسیک می‌تواند یکی از دو مقدار را دارا شود. به نظر چاوز این منطقی است، چرا که سیستم کوانتومی مورد بررسی، یعنی فوتون، نیز می‌تواند تنها یک بیت از اطلاعات را رمزگذاری کند. فوتون تنها از یکی از دو بازوی **تداخل‌سنج عبور** می‌کند. چاوز استدلال می‌کند که «بنابراین بُعدی بودن مدل با **متغیر پنهان** نیز، یک گمان و فرض طبیعی است.»

هنوز مشخص نیست که چه تفسیری نتایج را به درستی رده‌بندی می‌کند

از سوی دیگر مدل کلاسیک علیتی، با فرض قرار دادن یک متغیر پنهان با ظرفیت اطلاعاتی بیشتر، توانایی توضیح کامل آمار مشاهده شده در آزمایشات را دارد. افزون بر آن، آزمایش، تصمیم‌گیری به نفع یا بر ضد محبوب‌ترین مدل مبتنی بر متغیر پنهان، یعنی نظریه دو بروی-بوهم را امکان‌پذیر نمی‌سازد، که در آن صحبت بر سر جایگزین قطعی برای مکانیک کوانتومی استاندارد است. در این نظریه ذرات همیشه موقعیت‌های معینی دارند (این‌ها متغیرهای پنهان‌اند) و در نتیجه یک واقعیت عینی‌اند، اما آنها توسط یک «موج هادی» هدایت می‌شوند. این موج هر دو مسیر، و ذره تنها یکی از آنها را می‌پیماید. بودن یا نبودن تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2، دقیقن با همان نتایج حاصل در مکانیک کوانتومی استاندارد، بر روی موج هدایت‌گر ذره به‌سوی آشکارساز تأثیر می‌گذارد. به این دلیل، نظریه‌ی دو بروی-بوهم نیز به آسانی نتایج آزمایش با گزینش تأخیری را توضیح می‌دهد.

از این جهت، برای وایزمن مدت‌هاست که روشن نیست، چه تفسیری نتایج آزمایش را می‌تواند به درستی رده‌بندی کند. او موقعیت را این‌گونه توضیح می‌دهد: «در تفسیر کپنهاگی، برگرداندن ویژه‌ای از زمان وجود ندارد، زیرا که هرگونه بیانی در مورد گذشته‌ی فوتون جایز نیست. در نظریه دو بروی-بوهم واقعیتی وجود دارد، که مستقل از دانش ماست، اما واژگونی زمان و بدین ترتیب مشکلی وجود ندارد. توضیح تمامی روند به شکل واضحی علت و معلولی است.»

با این‌که کایزر این تلاش‌ها را می‌ستاید، اما خواهان شدت‌بخشی هر چه بیشتر آن‌ها است. گرچه در آزمایش‌های انجام‌شده همیشه تصادف در مورد چگونگی تنظیمات نوسان‌ساز انتقال فاز شماره 2 و یا وارد کردن یا نکردن تقسیم‌کننده‌ی پرتوی شماره 2 تصمیم‌گیرنده است، اما مولدهای تصادف (random generator) در آزمایش به‌نوبه‌ی خود بر اساس شرایط آزمایشگاهی مکانیک کوانتومی استوارند. به‌نظر کایزر این موضوع که آزمایش، خود مکانیک کوانتومی را باید بیازماید، کمی به استدلال دورانی (17) شباهت دارد: «در صورت استفاده از منابع کاملن متفاوت برای ایجاد وضعیت تصادفی بودن، بررسی این نکته که آیا نتایج تجربی بدون تغییر باقی می‌مانند یا نه، سودمند خواهد بود.»

به همین دلیل کایزر و همکارانش یک مولد تصادف برای آزمایش ساختند که از فوتون‌های اختروش‌های واقع در فاصله چندین میلیارد سال نوری استفاده می‌کند. تلسکوپ در رصدخانه‌ی کوه تیپل (Table Mountain) در کالیفرنیا فوتون‌ها را دریافت می‌کند. اگر طول موج یک فوتون کوتاه‌تر از حد مرز مشخصی باشد، مولد تصادف که بر مبنای طول موج فوتون کار می‌کند، جوابی برابر با صفر می‌دهد، در غیر این صورت، جواب برابر با 1 خواهد بود. با این بیت می‌شود در مورد آزمایش تصمیم‌گیری کرد. اگر نتایج هنوز از اندیشه‌های اولیه و اصلی ویلر پشتیبانی کنند، به بیان کایزر «دلیل دیگری برای قبول این نکته‌اند که دوگانگی موج و ذره را نمی‌توان توسط ایده‌هایی از فیزیک کلاسیک رد و حذف کرد. محدوده‌ی عمل طرح‌های جایگزین برای مکانیک کوانتومی در حال تنگ‌تر شدن هر چه بیشتر است. این هدفی است که به دنبال آنیم». بدن اژدها که ظاهرن برای مدت زمان کوتاهی در برابر چشمان پژوهش‌گران شکل یافته بود، فعلاً دوباره در مه ناپدید شده است.

طیف‌نمای علم دسامبر 2018

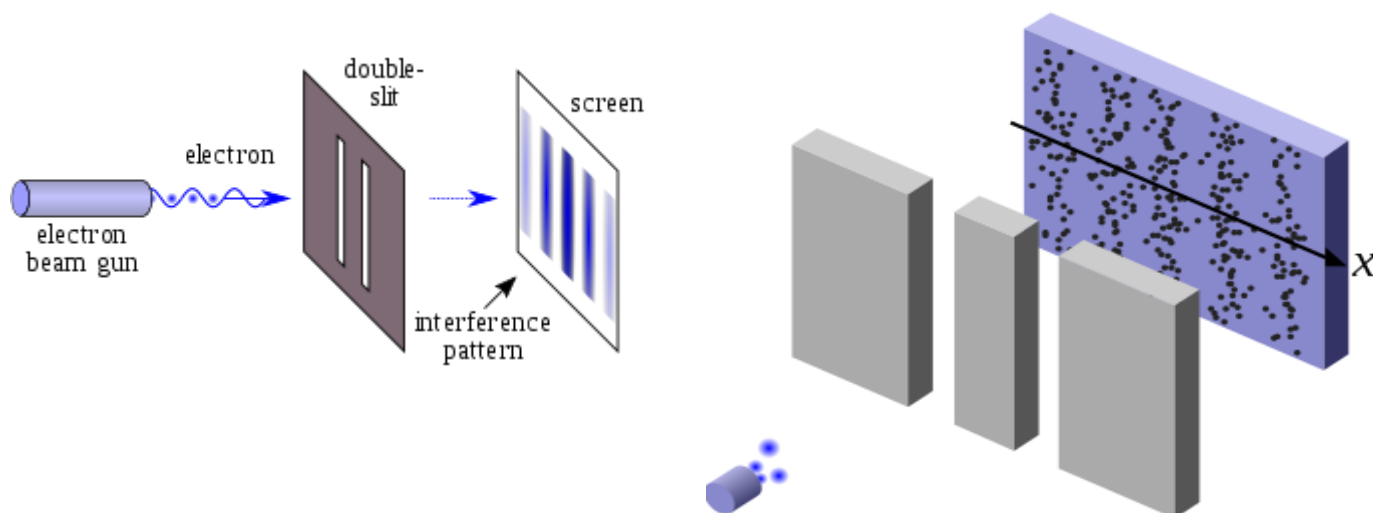
پی‌نوشت‌ها:

1- متغیرهای پنهان (از ویکی‌پدیای آلمانی)

در برخی از تفسیرهای قطعیت‌گرایانه مکانیک کوانتومی، متغیرها یا پارامترهای پنهان، کمیت‌ها و مقدارهایی هستند، که واقعیت فیزیکی دارند. با کمک این متغیرها است که از مکانیسم‌های قطعیت‌گرایانه، تصادف «خالص» در تفسیر استاندارد غیر قطعیت‌گرایانه در مکانیک کوانتومی، باید نتیجه شود.

این پارامترها از این جهت که در تفسیر استاندارد مکانیک کوانتومی ظاهر نمی‌شوند، پنهان نامیده می‌شوند و در تفسیر استاندارد با هیچ روش اندازه‌گیری‌ای نمی‌توان به آنها دسترسی داشت. در صورت وجود، این پارامترها در تفسیر استاندارد پنهان خواهند بود. این به معنای آن نیست که متغیرهای پنهان اصولاً قابل اندازه‌گیری نیستند. بدین ترتیب اساساً نمی‌توان به دست آوردن یک روش اندازه‌گیری از یک نظریه قطعیت‌گرایانه با پارامترهای پنهان را رد کرد. از سوی دیگر نظریه‌های قطعیت‌گرایانه‌ای (مانند نظریه‌ی دو بروی-بوهم) وجود دارند که دقیقاً همان پیش‌بینی‌های تجربی، مانند مکانیک کوانتومی استاندارد غیر نسبیتی را ارائه می‌دهند، به گونه‌ای که پارامترهای پنهان آنها اصولاً قابل اندازه‌گیری نیستند.

https://de.wikipedia.org/wiki/Verborgene_Variablen

2- آزمایش دوشکاف (ویکی‌پدیای فارسی)

فوتون‌ها یا ذرات ماده (مثل الکترون) زمانی یک الگوی موج تولید می‌کنند که دو شکاف استفاده می‌شود

در مکانیک کوانتومی، آزمایش دوشکاف آزمایشی است که نشان می‌دهد ماهیت ذره‌ای و موجی نور و دیگر ذرات کوانتومی از هم جدایی‌ناپذیرند. در این آزمایش یک باریکه هم‌دوس نور را به صفحه‌ای که دو شکاف باریک رویش دارد می‌تابانیم، و نور پس از گذشتن از صفحه روی پرده‌ای که در پشت است می‌افتد. ماهیت موجی نور باعث می‌شود که نورهایی که از دو شکاف می‌گذرند با هم تداخل کنند و یک الگوی تداخلی (نوارهای تاریک و روشن) بسازند؛ ولی اگر روی پرده نور را با آشکارساز بسنجیم، می‌بینیم که نور همیشه به شکل ذره (فوتون) جذب می‌شود.

اگر نور در مسیر خود از چشمه تا پرده تنها ویژگی ذره‌ای خود را نشان می‌داد، تعداد فوتون‌هایی که به هر نقطه از پرده می‌رسیدند، جمع تعداد فوتون‌هایی بود که از شکاف سمت چپ و از شکاف سمت راست آمده‌اند. به زبان دیگر، شدت نور در هر جای پرده حاصل جمع شدت وقتی است که شکاف سمت چپ را پوشانده باشیم و وقتی که شکاف سمت راست را پوشانده باشیم؛ ولی آزمایش نشان می‌دهد

که اگر هر دو شکاف را باز بگذاریم، شدت نور در بعضی جاها بیشتر و در بعضی جاها کمتر از انتظار ما خواهد بود. این پدیده نمایانگر تداخل سازنده و ویرانگر امواج نور است، و با ماهیت جمع‌شدنی ذرات نور قابل توضیح نیست. هر طور که آزمایش را تغییر دهیم که بخواهیم ببینیم که نور از کدام شکاف گذشته است، طرح تداخلی از بین می‌رود و نتیجه ذره‌ای به دست می‌آید. این پدیده نشان‌دهنده اصل مکملیت است، که می‌گوید نور می‌تواند هم ویژگی ذره‌ای و هم موجی از خود نشان دهد، ولی نمی‌توان همزمان ماهیت ذره‌ای و موجی را در یک پدیده دید.

3- فلسفه ریاضیات (ویکی‌پدیا)

فلسفه ریاضیات، شاخه‌ای از فلسفه است که به بنیادهای وجودی ریاضیات و مباحث مربوط به معرفت‌شناسی ریاضیات می‌پردازد. فلسفه ریاضی، شاخه‌ای از فلسفه است که با پرسش‌های فلسفی برآمده از علم ریاضیات سروکار دارد. از مکتب‌های فلسفه ریاضی می‌توان به منطق‌گروی، شهود‌گروی، فرمالیسم* (ویکی‌پدیای آلمانی) و واقع‌گرایی اشاره کرد.

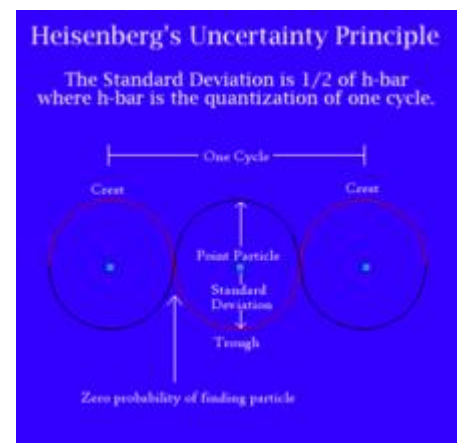
*فرمالیسم (ویکی‌پدیای آلمانی)

فرمالیسم، یک مکتب فکری پایه‌گذاری شده توسط دیوید هیلبرت در فلسفه‌ی ریاضیات در ارتباط با مبانی ریاضیات است. مسئله اصلی در اینجا چگونگی درک یک نتیجه‌ی منطقی ریاضی است. موضوع بر سر اثبات کامل بودن و متناقض نبودن سیستم‌های اصول موضوعی (** ریاضیات، تنها از روی فرم و شکل است.

** اصل موضوعی – Axiom

اصل یا بُنداشت یا بُن قانون، در فلسفه، ریاضیات، منطق و فیزیک، گزاره‌ای است که بدون اثبات و به شکل پیش فرض پذیرفته می‌شود و از روی آن سایر گزاره‌ها استخراج می‌شوند. اصل یا بدیهیات آنچنانکه در فلسفه کلاسیک تعریف شده است، گزاره‌ای است (در ریاضیات اغلب به صورت نمادین ارائه می‌شود) که پرواضح یا بدیهی است و بدون اینکه بحث یا سؤالی در مورد آن مطرح باشد، مورد پذیرش است. بنابراین، اصل می‌تواند به عنوان مبانی برای استدلال یا ادعا مورد استفاده قرار گیرد؛ آنچنان که در منطق یا ریاضیات مرسوم است. این واژه از واژه یونانی $\alpha\chi\acute{\iota}\omega\mu\alpha$ (axiōma) گرفته شده است که مفهوم کاملاً درست، مناسب، واضح یا بدیهی را منتقل می‌کند.

4- اصل عدم قطعیت (ویکی‌پدیای فارسی)

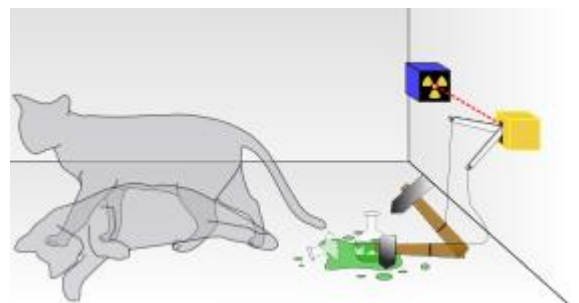


بیان تصویری اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

اصل عدم قطعیت (Uncertainty principle): در مکانیک کوانتومی را ورنر هایزنبرگ، فیزیکدان آلمانی، در سال ۱۹۲۶ فرمول‌بندی کرد.

در فیزیک کوانتومی، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، اظهار می‌دارد که جفت‌های مشخصی از خواص فیزیکی، مانند مکان و تکانه، نمی‌تواند با دقتی دلخواه معلوم گردد. به عبارت دیگر، افزایش دقت در کمیت یکی از آن خواص مترادف با کاهش دقت در کمیت خاصیت دیگر است. این عبارت به دو روش گوناگون تفسیر شده‌است. بنا بر دیدگاه هایزنبرگ، غیرممکن است که همزمان سرعت و مکان الکترون یا هر ذره دیگری با دقت یا قطعیت دلخواه معین شود. بنا بر دیدگاه گروه دوم، که افرادی چون بالنتین در آن قرار دارند، این عبارت راجع به محدودیت دانشمندان در اندازه‌گیری کمیت‌های خاصی از سیستم نیست، بلکه امری است راجع به طبیعت و ذات خود سیستم چنان‌که معادلات مکانیک کوانتومی شرح می‌دهد. در مکانیک کوانتوم، یک ذره به وسیلهٔ بستهٔ موج شرح داده می‌شود. اگر اندازه‌گیری مکان ذره مد نظر باشد، طبق معادلات، ذره می‌تواند در هر مکانی که دامنهٔ موج صفر نیست، وجود داشته باشد و این به معنی عدم قطعیت مکان ذره است. برای به دست آوردن مکان دقیق ذره، این بستهٔ موج باید تا حد ممکن «فشرده» شود، که یعنی، ذره باید از تعداد زیادی موج سینوسی که به یکدیگر اضافه شده‌اند (بر روی هم جمع شده‌اند) ساخته شود. از طرف دیگر، تکانهٔ ذره متناسب با طول موج یکی از این امواج سینوسی است، اما می‌تواند هر کدام از آن‌ها باشد. بنا بر این هر چقدر که مکان ذره -به واسطهٔ جمع شدن تعداد بیشتری موج- با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود، تکانه با دقت کمتری معین می‌شود (و بر عکس). تنها ذره‌ای که مکان دقیق دارد، ذرهٔ متمرکز در یک نقطه است، که چنین موجی طول موج نامعین دارد (و بنا بر این تکانهٔ نامعین دارد). از طرف دیگر تنها موجی که طول موج معین دارد، نوسان منظم تناوبی بی‌پایان در فضا است که هیچ مکان معینی ندارد. در نتیجه در مکانیک کوانتومی، حالتی نمی‌تواند وجود داشته باشد که ذره را با مکان و تکانهٔ معین شرح دهد. اصل عدم قطعیت را می‌توان بر حسب عمل اندازه‌گیری، که شامل فروپاشی تابع موج نیز می‌شود، بازگویی کرد. هنگامی که مکان اندازه‌گیری می‌شود، تابع موج به یک برآمدگی با پهنای بسیار کم فروپاشیده می‌شود، و تکانهٔ تابع موج کاملاً پخش می‌شود. تکانهٔ ذره به مقداری متناسب با دقت اندازه‌گیری مکان، در عدم قطعیت باقی می‌ماند. مقداری باقی‌ماندهٔ عدم قطعیت نمی‌تواند از حدی که اصل عدم قطعیت مشخص کرده‌است، کمتر شود، و مهم نیست که فرایند و تکنیک اندازه‌گیری چیست. این بدین معنی است که اصل عدم قطعیت مربوط به اثر مشاهده‌گر است.

5- گریه شرودینگر (ویکی‌پدیای فارسی)



آزمایش گریهٔ شرودینگر: مفاهیم عمیق فلسفی مکانیک کوانتومی توجه دانشمندان زیادی را به خود جلب کرده‌است.

گریهٔ شرودینگر یک آزمایش فکری است که در سال ۱۹۳۵ از سوی اروین شرودینگر، فیزیکدان اتریشی، ابداع شد. این آزمایش که گاهی به صورت پارادوکس تعریف می‌شود، نشان می‌دهد که اگر قوانین مکانیک کوانتومی بر اشیای عادی و روزمره اعمال شود، چه اتفاقی می‌افتد.

توصیف

فرض کنید گریه‌ای در جعبه‌ای در بسته زندانی است. در این جعبه یک شیشه گاز سیانور، یک چکش، یک حسگر پرتوزا و یک منبع پرتوزا نیز وجود دارد. ذرات پرتوزا به صورت نامنظم تابش می‌کنند و به همین دلیل برای آن‌ها نیمه عمر در نظر می‌گیرند. حال فرض کنید حسگر و چکش طوری تنظیم شده باشند که در صورت تابش موج پرتوزا بین ساعت ۱۲ و ۱۲:۰۱، چکش شیشه حاوی گاز را شکسته و گریه بمیرد. اگر در ساعت ۱۲:۰۱ در جعبه را باز کنید چه خواهید دید؟ اگر از طریق فرمول نیمه عمر منبع، احتمال تابش بین ساعت ۱۲ و ۱۲:۰۱ را ۵۰٪ پیش‌بینی کنید. گریه داخل جعبه در هنگام برداشتن در جعبه ۵۰٪ مرده‌است و ۵۰٪ زنده است. اما وقتی در جعبه را برمی‌دارید خواهید دید که گریه یا مرده یا زنده است. نمی‌توان گفت ۵۰٪ سلولهای بدن گریه مرده‌اند و ۵۰٪ آن‌ها زنده‌اند. در فاصله یک لحظه، احتمال به یقین تبدیل خواهد شد. این امر کاملاً متضاد با مکانیک کوانتومی می‌باشد. همان‌طور که گفتیم هیچگاه نمی‌توان موقعیت یک سیستم را به دقت اندازه‌گیری نمود. اما در این مثال کاملاً این امر ممکن شده است.

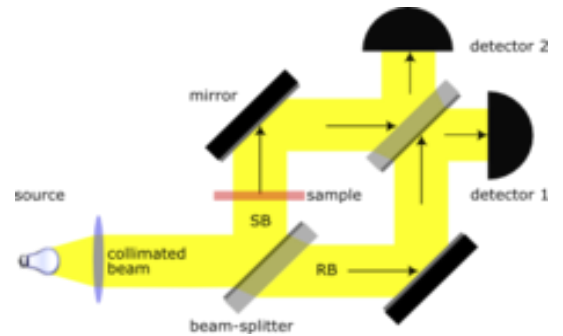
این گونه پارادوکس‌ها در مکانیک کوانتومی بسیار زیادند. اما با این همه مکانیک کوانتومی در پیش‌بینی نتایج بسیاری از آزمایش‌ها به‌طور درخشانی موفق بوده‌است و زمینه تقریباً تمامی علم و فن نوین است. بر رفتار ترانزیستورها و مدارهای مجتمع که جزء اساسی وسایلی نظیر تلویزیون و رایانه‌اند، فرمان می‌راند و نیز بنیاد شیمی و زیست‌شناسی نوین می‌باشد.

شرح کپنهاک از مکانیک کوانتوم اشاره بر این دارد که بعد از مدتی گریه به‌طور هم‌زمان هم مرده‌است و هم زنده. هنوز وقتی به داخل جعبه نگاه می‌کنیم، گربه را می‌بینیم که یا زنده‌است یا مرده نه هر دوی این‌ها. این آزمایش آنچه را که او به عنوان مشکل از تفسیر کپنهاک از مکانیک کوانتومی اعمال شده به اشیاء روزمره را نشان می‌دهد، که تضاد با عقل سلیم است.

6- تداخل سنج ماخ-زندر (ویکی‌پدیای فارسی)

تداخل سنج ماخ-زندر (به انگلیسی: Mach-Zehnder) نوعی تداخل سنج است که برای تعیین نسبت اختلاف فاز بین دو باریکه هم‌راستا که از یک منبع نوری همدوس هستند بکار می‌رود. این تداخل سنج به ویژه برای اندازه‌گیری اختلاف فاز اندکی که بین دو باریکه نور به وسیله یک نمونه یا تغییر در طول یا پیمایش یکی از آن‌ها بوجود آمده‌است بکار می‌رود. از این دستگاه در آیرودینامیک و فیزیک پلاسما و انتقال گرما در اندازه‌گیری تغییر فشار، چگالی و دمای گازها استفاده می‌شود. این دستگاه به افتخار دو فیزیکدان لودویگ ماخ (به انگلیسی: Ludwig Mach) و لودویگ زندر (به انگلیسی: Ludwig Zehnder) نام‌گذاری شده‌است. مشابه تداخل سنج مایکلسون، تداخل سنج ماخ-زندر بر مبنای دو پرتوی تداخل‌کننده با دامنه شکافته شده موج فرودی است. دو موج در دو مسیر مختلف با اختلاف راه مهاجرت می‌کنند (شکل ۴-۳۰-ب). قرار دادن یک شیء شفاف در یک بازوی تداخل سنج اختلاف راه نوری بین دو باریکه را عوض می‌کند. این اختلاف باعث تغییر الگوی تداخلی می‌شود که تعیین بسیار دقیق ضریب شکست نمونه و تغییرات موضعی آن را ممکن می‌سازد؛ لذا تداخل سنج ماخ-زندر می‌تواند به عنوان یک [ضریب] شکست سنج حساس در نظر گرفته شود.

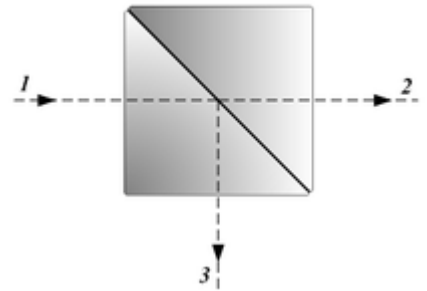
اگر شکافنده‌های پرتو B1، B2 و آینه‌های M1، M2 کاملاً موازی باشند، اختلاف راه بین دو پرتوی شکافته شده به زاویه فرودی α بستگی ندارد چون اختلاف راه بین دو پرتوی ۱ و ۳ دقیقاً با طول راه پرتوی ۴ بین M2 و B2 جبران می‌شود (شکل ۴-۳۰-الف). به تعبیر دیگر امواج تداخل‌کننده در یک تداخل سنج متقارن (بدون حضور نمونه) اختلاف راه یکسانی را در مسیر ثابت (مسیر خط‌چین در شکل ۴-۳۰-الف) تجربه می‌کنند؛ بنابراین بدون حضور نمونه، اختلاف راه کل صفر است؛ این اختلاف راه در حضور نمونه‌ای با ضریب شکست n در یک بازوی تداخل سنج برابر $\Delta s = (n-1)L$ می‌شود.



تداخل‌سنج ماخ-زندر

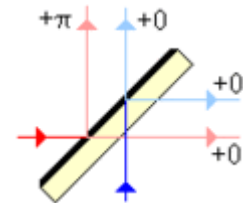
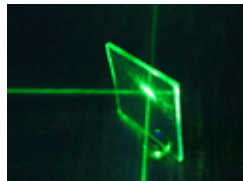
7- تقسیم کننده پرتو (ویکی پدیای فارسی)

تصویر یک تقسیم کننده پرتو.
 ۱- پرتو برخورد کننده
 ۲- نیمی از پرتو منتقل شده
 ۳- نیمی از پرتو بازتاب شده



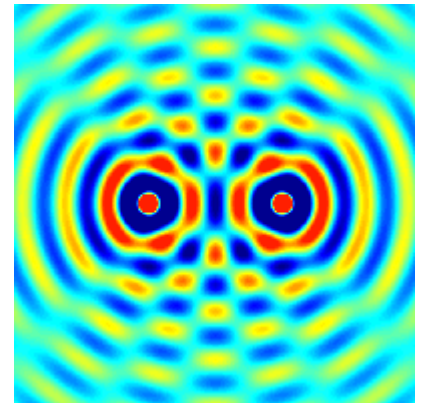
تقسیم کننده پرتو یک ابزار نوری است که پرتو نور را به دو قسمت تقسیم می کند. این وسیله در تداخل سنجی کاربرد دارد. این وسیله در متداول ترین حالت از چسباندن دو منشور ساخته می شود. تقسیم کننده پرتو اگر شامل یک صفحه شیشه ای با دی الکتریک بازتابنده باشد که روی آن قرار دارد باعث ایجاد اختلاف فاز π یا 0 می شود.

اختلاف فاز در تقسیم کننده پرتو با دی الکتریک بازتابنده است که روی آن قرار دارد.



8- تداخل امواج (ویکی پدیای فارسی)

در فیزیک تداخل یا اندرزنش موج پدیده ایجاد موجی با شکل دامنه جدید هنگام گذر همزمان دو موج یا بیشتر از یک نقطه است. اندرزنش دو موج با بسامد و دامنه یکسان به تشکیل موج ایستا می انجامد.



اندرزنش (interference) و برهم نهش (superposition) موجها خیلی وقتها به یک معنی بکار می روند که برآمده از نزدیکی این دو مفهوم به یکدیگر است. بنابر اصل برهم نهی میزان جابجایی در نقطه برهم نهی، برابر با جمع جبری میزان جابجایی هر موج است. در صورتی که جابجایی موجها در آن نقطه از لحاظ جبری هم علامت باشد نتیجه موجی با دامنه بزرگتر خواهد بود که به آن برهم نهی سازنده می گویند. اگر مختلف علامت باشد نتیجه موجی با دامنه کوچکتر (یا حتی با دامنه صفر) خواهد بود که برهم نهی ویرانگر می گویند.

برهم نهی دو موج در یک منبع آب

9- علیت معکوس (ویکی پدیای فارسی)

علیت رابطه بین یک رویداد (علت) و رویدادی دوم (اثر یا معلول) است که در آن، رویداد دوم نتیجه رویداد نخست است. این نیز به بُن و بُر شناخته می شود.

تعریف علت و معلول

اگر وجود الف و ب را با یکدیگر مقایسه کنیم و ببینیم که الف موجودی است که تحقق موجود دیگر، یعنی ب، موقوف بر آن است، وجود الف را علت و وجود ب را معلول می گوئیم.

علیت معکوس: به هر کدام از پدیده‌های فرضی یا فرآیندهایی می‌گویند که علیت را معکوس می‌کند و اجازه می‌دهد که یک معلول، پیش از روی دادن علت‌اش، اتفاق بیفتد.

علیت معکوس، در اصل، آزمایشی فکری در فلسفه ذهن است که با استفاده از عنصرهای علم فیزیک، تلاش می‌کند این سؤال را بررسی کند که: آیا آینده، می‌تواند حال را تحت تاثیر قرار دهد و آیا حال می‌تواند بر روی گذشته تاثیرگذار باشد؟ همچنین ملاحظه‌های فلسفی سفر در زمان نیز، گاهی به موضوعهایی چون علیت معکوس اشاره می‌کنند، هر چند که سفر به گذشته، دقیقاً هم‌معنای با علیت معکوس نیست.

نظریه‌های فیزیکی مجاز کمی وجود دارند که گاهی اوقات، به گونه‌ای تفسیر می‌شوند که علیت معکوس از آن برداشت می‌شود. این بخشی از فیزیک پنداشته نمی‌شود، چرا که در فیزیک، تمایز بین علت و معلول، در بنیادی‌ترین سطح، بررسی نمی‌شود.

10- تفسیر کپنهاگی (برگرفته از سایت بیگ بنگ)

بور و هایزنبرگ در سال ۱۹۲۷ روی مسائل تعبیری مکانیک کوانتومی تا حدی به توافق رسیدند و همچنین کنفرانس سولوی مواضع آنها را مستحکم‌تر کرد و تعبیر آنها به عنوان تعبیر سنتی و یا تعبیر کپنهاگی مورد پذیرش اکثر فیزیک‌دانان قرار گرفت. تفسیر کپنهاگی یکی از تفسیرهای مکانیک کوانتومی است. این تفسیر مجموعه‌ی دیدگاه‌هایی را درباره‌ی 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؟» از آنجا که تفسیر کپنهاگی مجموعه‌ای از دیدگاه‌های فیزیک‌دانان و فیلسوفان گوناگون است، تعریف ثابتی از آن وجود ندارد. دیدگاه‌های گوناگونی به تفسیر کپنهاگی نسبت داده شده‌اند. اثر پرز گفته است که نویسندگان مختلف دیدگاه‌های بسیار گوناگون و گاه متناقضی را به عنوان تفسیر کپنهاگی بیان می‌کنند.

پایه‌های تفسیر کپنهاگی

یک سیستم به طور کامل با یک تابع موج (علامت پسی یونانی) توصیف می‌شود. تابع موج نمایانگر دانش مشاهده‌گر درباره‌ی سیستم است. (هایزنبرگ) توصیف طبیعت ذاتاً احتمالاتی است. احتمال یک رویداد متناسب است با مربع اندازه‌ی تابع موج نشان‌دهنده‌ی آن رویداد. (ماکس بورن) اصل عدم قطعیت هایزنبرگ می‌گوید که نمی‌توان مقدار همه‌ی ویژگی‌های سیستم را همزمان دانست؛ ویژگی‌هایی که به دقت معلوم نیستند، با احتمالات توصیف می‌شوند.

اصل مکملیت: ماده از خود دوگانگی موج-ذره نشان می‌دهد. هر آزمایشی می‌تواند یکی از این دو ماهیت ماده را نشان دهد، ولی نشان دادن همزمان این دو ماهیت شدنی نیست. (نیلز بور) تفسیر کپنهاگی می‌گوید که چیزی به نام تابع موج وجود واقعی ندارد و تابع موج تنها یک مفهوم مجرد است (دیدگاه ذهنی). شاید هم بتوان گفت که دست‌کم تفسیر کپنهاگی خود را ملزم به اظهارنظر درباره‌ی واقعی یا ذهنی بودن تابع موج نمی‌داند (دیدگاه ندانم‌گویی). مثالی از دیدگاه ندانم‌گویی را در گفته‌ی فون وایتسکر می‌توان دید که در کنفرانسی در کمبریج گفت که دیدگاه کپنهاگی متفاوت با گزاره‌ی «چیزی را که نمی‌توان دید وجود ندارد» است. به گفته‌ی او دیدگاه کپنهاگی می‌گوید: «چیزی را که می‌توان دید حتماً وجود دارد. ولی درباره‌ی چیزی که نمی‌توان دید آزادیم هر فرضی بکنیم و این آزادی را برای فرار از تناقض‌ها به کار ببریم».

در نظرسنجی‌ای که در کارگاه مکانیک کوانتومی در سال ۱۹۹۷ انجام شد، تفسیر کپنهاگی پذیرفته‌ترین تفسیر از مکانیک کوانتومی بود. و پس از آن تفسیر دنیاهای چندگانه قرار داشت. همه‌ی روایت‌ها از تفسیر کپنهاگی به طور رسمی یا روش‌شناسانه به فروگاهی تابع موج باور دارند که یعنی ویژه‌ی مقدارهای مشاهده‌نشده در مشاهده‌های بعدی دیده نخواهند شد. به زبان دیگر، طرفداران تفسیر کپنهاگی از همان روزهای آغازین مکانیک کوانتومی هیچ‌گاه فروگاهی را انکار نکردند، برخلاف طرفداران تفسیر دنیاهای چندگانه.

به زبان ساده‌تر، پذیرندگان تفسیر کپنهاگی می‌گویند که تابع موج، احتمال همه‌ی پیشامدهای ممکن برای یک رویداد را در خود دارد. ولی وقتی که یکی از این پیشامدهای کم و بیش هم‌احتمال رخ داد، پیشامدهای دیگر به کلی از بین می‌روند. مثلاً اگر الکترونی از یک آزمایش دوشکاف بگذرد، احتمال‌های مختلفی هست که هرچایی روی پرده‌ی آشکارساز فرود بیاید. ولی وقتی الکترون یک جا فرود آمد، دیگر هیچ احتمالی برای فرودآمدنش در جاهای دیگر باقی نمی‌ماند. در تفسیر دنیاهای چندگانه، الکترون روی همه‌ی جاهایی که احتمالی برای فرودآمدنش هست فرود می‌آید، ولی این فرودها در دنیاهای متفاوتی رخ می‌دهند. در دیدگاه ذهنی، تابع موج تنها یک ابزار ریاضی برای محاسبه‌ی احتمال رویدادهاست. این دیدگاه شبیه رویکرد تفسیر هنگردی است. دستگاه‌های اندازه‌گیری دستگاه‌هایی کلاسیک‌اند و ویژگی‌های کلاسیک را مانند مکان و تکانه می‌سنجند.

اصل همخوانی بور و هایزنبرگ: توصیف مکانیک کوانتومی از سیستم‌های بزرگ باید به تقریب با توصیف فیزیک کلاسیک یکی باشد. نکته قابل ذکر این است که تعبیر کپنهاگی یک تعبیر یگانه‌ی کامل مشخص نیست و فیزیک‌دانان طراز اولی که این تعبیر را پذیرفتند، همه‌ی اجزای آن را به یک درجه قبول نداشتند و بین آنها نیز حداقل از لحاظ اولیاتی که برای بعضی از اصول قائل بودند، اختلاف نظر بود.

11- نظریه کیسول (کورپاسل) (corpuscle) (ویکی‌پدیای آلمانی)

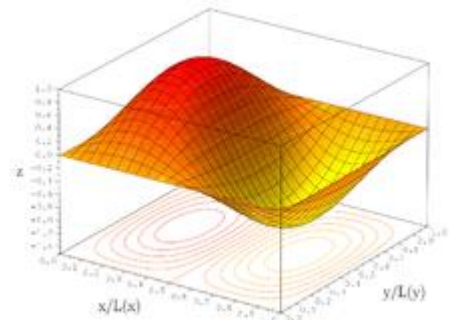
بر اساس نظریه‌ی فیزیکی کیسول (نظریه تابش یا بالیستیک نور) که به ویژه به آیزاک نیوتن نسبت داده می‌شود، نور از کوچکترین ذرات یا کیسول (کورپاسل) تشکیل یافته است. تئوری کیسول در قرن نوزدهم توسط نظریه موجی نور جایگزین شد، اما از زمان نظریه‌ی فوتون توسط آلبرت انیشتین در سال 1905، دوباره ویژگی ذره‌ای (korpuskular) به عنوان بخشی از ویژگی‌های نور، در نظر گرفته می‌شود.

12- کوانتوم (ویکی‌پدیای فارسی)

اصطلاح **کوانتوم** (quantum) در فیزیک به کمترین مقدار ممکن از یک کمیت، مقدار پایه یا یک کوانتم آن کمیت می‌گویند. یک کمیت **کوانتیده** تنها می‌تواند مقدارهایی گسسته، یعنی مضرب صحیحی از کوانتوم آن کمیت را اختیار کند. برای نمونه، مقدار بار الکتریکی یک جسم که در اثر مالش باردار شده، همواره مضرب صحیحی از بار الکتریکی یک الکترون می‌باشد. هیچگاه مقدار بار الکتریکی یک جسم $5/3$ برابر بار الکتریکی یک الکترون نخواهد بود. در اینجا به مقدار بار الکتریکی یک الکترون، بار پایه یا یک کوانتم بار می‌گویند و بار الکتریکی جسم نیز کمیتی کوانتیده است.

13- تابع موج (ویکی‌پدیای فارسی)

تابع موج (Wave function): در مکانیک کوانتومی برای هر ذره یا سامانه فیزیکی، یک تابع مختلط می‌باشد که دربرگیرنده حالات ممکن ذره یا سامانه در فضا است.



یک نمونه تابع موج سه‌بعدی کوانتمی

14- مکانیک بوهمی (De Broglie–Bohm theory)

مکانیک بوهمی یا **تئوری دو بروی-بوهم** یا **تفسیر بوهمی** یا **تفسیر علی** یک تفسیر از مکانیک کوانتومی است. این تئوری به افتخار لویی دو بروی و دیوید بوهم نامگذاری شده است. این تئوری قطعی و به صورت علی غیر محلی بودن را می‌پذیرد. (ویکی‌پدیای فارسی)

<https://ijpr.iut.ac.ir/article-1-1064-fa.pdf>

در سال ۱۹۵۲ دیوید بوهم نظریه‌ی ای را ارائه نمود که به عنوان مکانیک بوهمی شناخته شده است. مکانیک بوهمی یک نظریه علی برای توصیف سیستم‌های کوانتومی است که به عنوان یک فرمول‌بندی رقیب در کنار فرمول‌بندی کپنهاگی رواج یافته است. در این نظریه، سیستم کوانتومی نه تنها از موج، بلکه از ذره نیز تشکیل شده است. در مدل بوهم ذرات بر روی مسیرهایی خوش تعریف حرکت می‌کنند و آثار کوانتومی به کمک یک نیروی کوانتومی که تابع موج به ذرات وارد می‌کند توضیح داده می‌شود. در نظریه بوهم احتمال به صورت ذاتی در نظر گرفته نمی‌شود بلکه مشخصات تصادفی پدیده‌های کوانتومی به کمک شرایط اولیه تصادفی (جهل در مورد وضعیت اولیه ذره) توضیح داده می‌شود. مکانیک «دوبروی-بوهم» توصیف کاملی برای تمام پدیده‌های کوانتومی غیر نسبیتی ارائه می‌دهد و برخی پدیده‌ها که در تعبیر کپنهاگی راز آمیز جلوه می‌کنند مانند گذارهای اتمی و فرآیند اندازه‌گیری - در فرمول‌بندی «دوبروی-بوهم» توضیح بسیار ساده و قابل فهمی پیدا می‌کنند [۶-۲] در این مقاله قصد داریم یک نظریه قطعیتی جدید، شبیه نظریه بوهم، برای توصیف سیستم‌های کوانتومی معرفی نماییم. در این مدل نیز به ذرات، نیرویی وابسته به تابع موج وارد می‌شود. اما شکل این نیرو با نیروی کوانتومی در مدل بوهم متفاوت می‌باشد. به دلیل شباهت ساختار این مدل با مکانیک بوهمی، مقایسه آن با مکانیک بوهمی می‌تواند ساختار اصلی آن را با وضوح بیشتری مشخص کند...

15- اندازه گیری ضعیف چیست؟

فرآیند اندازه گیری احتمالاً راز اصلی مکانیک کوانتومی است. این نظریه دقیقاً توضیح می‌دهد، که پژوهش‌گران از برهم کنش یک سیستم کوانتومی با یک وسیله‌ی اندازه‌گیری و یا بخش دیگری از جهان ماکروسکوپی (کلان مقیاس)، یعنی اندازه‌گیری‌ها، چه مقدارهای اندازه‌گیری شده‌ای را می‌توانند انتظار داشته باشند. اما نظریه در مورد چگونگی انجام دقیق این برهم کنش چیزی نمی‌گوید. علاوه بر این، نظریه نیازمند به جهان کلان مقیاس است، جهانی که برپایه قوانین مکانیک کوانتومی عمل نکرده و در فرآیند اندازه‌گیری با سیستم کوانتومی برهم کنش انجام می‌دهد. به همین دلیل جایگزینی کامل مکانیک کلاسیک با نظریه‌ی کوانتومی به مثابه‌ی توصیف دقیق‌تر و بهتر طبیعت ممکن نیست.

تنها 20 سال است که فرآیند اندازه‌گیری، خود موضوع تحقیق است. نظر این بود که خود دستگاه اندازه‌گیری را به عنوان یک سیستم کوانتومی در نظر گرفت که از خارج به کمک وسیله‌های دیگر اندازه‌گیری بررسی می‌شود. به این ترتیب مفهوم «اندازه‌گیری ضعیف» امکان‌پذیر شد.

معمولاً اندازه‌گیری یک دخالت جدی و مهم در یک سیستم کوانتومی است. اثرات ویژه‌ی کوانتومی، یعنی درهم‌تنیدگی و تداخل امواج، در فرآیند اندازه‌گیری ناپدید می‌شوند. اما تحقیقات در مورد فرآیند اندازه‌گیری نشان دادند، که اگر در اندازه‌گیری به اندازه کافی «غیر دقیق و مبهم»، خطای اندازه‌گیری به اندازه کافی بزرگ باشد، سیستم ناپدید نخواهد شد. چنین اندازه‌گیری‌ای، اندازه‌گیری ضعیف نامیده می‌شود. دستیابی به اطلاعات یک سیستم کوانتومی بدون از بین بردن اثرات کوانتومی امکان‌پذیر است.

16- نوسان‌ساز انتقال فاز <https://lamtakam.com/dictionaries/en/293295/phase%20shift%20oscillator>

به انگلیسی Phase-shift oscillator

17- استدلال دورانی

استدلال دورانی را می‌توان شکل ویژه‌ای از مغالطه مصادره به مطلوب دانست و زمانی رخ می‌دهد که برای اثبات نتیجه از مقدمه‌ای استفاده شود که درستی آن مقدمه وابسته به درستی نتیجه است.