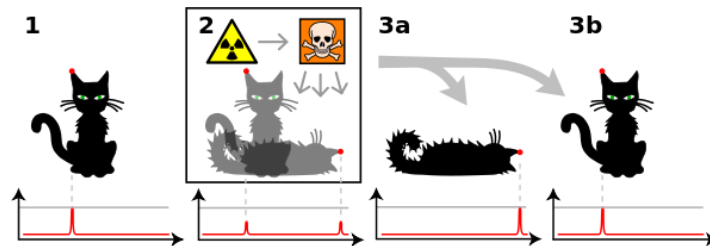


مفهوم همدوسی و ناهمدوسی



Catexperiment¹ (Schrödinger's cat; Gedankenexperiment)

The Concept of Coherence and Decoherence

"تمامی معرفت‌شناسی‌های فلسفی سنتی نامکفی بودنشان را در برابر فیزیک قرن بیستم نشان دادند."^۲

فشرده

انسان پس از قرن‌ها تلاش موفق شد در اواخر قرن هفدهم چکیده‌ی تجربیات خود با طبیعت را در شکل قوانینی به نام قوانین نیوتنی (فیزیک کلاسیک) ارائه کند، قوانینی مربوط به دنیای ماکروسکوپی که در آن نشانی از احتمالات مشاهده نمی‌شود. در مقابل او اکنون دریافته است که زیربنای چنان دنیایی را دیگری به نام دنیای میکروسکوپی (فیزیک کوانتومی) تشکیل می‌دهد، دنیایی که در آن اصولاً نشانی از قطعیت وجود ندارد. با این وصف به‌نظر می‌رسد که می‌باید میان دنیای کوانتوم و دنیای کلاسیک رابطه، نسبتی، وجود داشته باشد، چراکه در غیر این صورت ما امکان آن نمی‌یافتیم شاهد دنیایی باشیم که از مواد دنیای کوانتومی (اتم‌ها و ذرات مادون اتم‌ها) بنا شده است. به‌همین خاطر پرسش بسیار مهم و اساسی ما این است که رابطه‌ی مزبور چگونه رابطه‌ای است و گذار از دنیای کوانتومی با قوانین احتمالاتی به دنیای کلاسیک با قوانین دترمینیستی به چه شکلی می‌باشد؟ یعنی، ما می‌خواهیم بدانیم چرا دنیایی که مشاهده می‌کنیم چنان است که هست، برای مثال فرم اشیاء، مکان و سرعت آن‌ها در آن مشخص در حالی که در دنیای میکروسکوپی نامشخص و ذرات در آن می‌توانند هم‌زمان در مکان‌های مختلف باشند؟ چرا ما پدیده‌های کوانتومی را آن‌گونه که هستند در دنیای خود مشاهده نمی‌کنیم؟

پاسخ پرسش‌های ذکر شده در گرو درک دو مفهوم بسیار مهم و پایه‌ای می‌باشد: همدوسی (کوهرنس Coherence) و ناهمدوسی (دکوهرنس Decoherence). شناخت از این دو مفهوم برای دانش فلسفه و علوم پایه حیاتی است، به‌ویژه مفهوم ناهمدوسی که تا چند دهه پیش ناشناخته شده بود. مفهوم ناهمدوسی را طبیعت دنیای میکروسکوپی به انسان دیکته می‌کند. ناهمدوسی جالب‌ترین پرسش فیزیک مدرن و موضوع مهم پژوهش روز است.

در این مقاله می‌کوشم دو مفهوم همدوسی و ناهمدوسی را توضیح دهم، دو مفهومی که رابطه‌ی مستقیم با مفهوم سومی به نام 'مفهوم اندازه‌گیری' دارند. - مفهوم اندازه‌گیری مستلزم بررسی و توضیح جداگانه در فرصتی دیگر است. - لازم می‌دانم متذکر شوم که مقاله‌ی پیش‌رو بنابر طبیعت موضوع اندکی فنی و نیازمند همراهی خواننده برای تحصیل مطلب است.

با آگاهی از مفهوم‌های نامبرده می‌توان کنه‌ی نقل قول ذکر شده در بالا از کارل فریدریش فون وایتسزکر، فیزیکدان و فیلسوف آلمانی و محقق صلح (۱۹۱۲-۲۰۰۷)، را بهتر درک کرد و به عمق مسائل معرفت‌شناسی فلسفی بیشتر پی‌برد.

پیش‌گفتار

کوهرنس Coherence یک کلمه لاتین است به‌معنای با یکدیگر در رابطه بودن، به‌یکدیگر مربوط بودن، به‌یکدیگر مرتبط بودن. کوهرنس در زبان فارسی همدوسی نامیده می‌شود. همدوسی به‌معنای هم‌چسب، متشکل از کلمه‌ی هم و فعل دوسیدن

به معنی چسبیدن، است. این مفهوم هم در دنیای کلاسیک و هم در دنیای کوانتومی کاربرد دارد ولیکن مفهوم ناهمدوسی مختص دنیای کوانتومی است. همدوسی (در علوم پایه) ویژگی خاص امواج و پیش‌فرض شکل‌گیری حالت تداخلی (interference) در آنهاست. مدت زمان همدوسی (تداخل) امواج تابع نوع امواج است، برای مثال همدوسی امواج صوتی یا الکتریکی طولانی و امواج نور کوتاه است.

در دنیایی که همدوسی ناب حاکم است (دنیای کوانتومی) تمامی کنش و واکنش‌ها بازگشت‌پذیر هستند. این گفته معنای آن دارد که در دنیای کوانتومی بی‌زمانی حاکم است. برای مثال، اگر دنیای ما دنیای همدوس نابی بود (که خوشبختانه نیست) می‌توانستیم بی‌زمانی را شاهد باشیم، چراکه در حالت همدوسی ناب هر نوع جریانی آبی بازگشت‌پذیر است و این معنایی جز فقدان گذشته و آینده ندارد. این‌که دنیای ما چنان نیست و ویژگی‌های دنیای کلاسیک را دارد و ما گذشت زمان را حس می‌کنیم (پیر می‌شویم) نتیجه‌ی عملکرد اجتناب‌ناپذیر ناهمدوسی است. برای درک این مطلب حیاتی لازم است با مفهوم‌های مهم همدوسی و ناهمدوسی آشنا شویم.

مفهوم همدوسی

گفتیم که کوهرنس به معنای با یکدیگر در رابطه بودن است. برای مثال امواج الکترومغناطیسی، امواج صوتی و یا امواج آب می‌توانند هر یک به‌نوعی کوهرنس نسبت به امواج مشابه دیگر باشند. کوهرنس یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی امواج (انرژی یا شبه ذرات) است. در این رابطه مهم است بدانیم که در نظریه کوانتوم ذره موج است و موج ذره است! همدوسی ویژگی فیزیکی یک میدان موج گسترده است که انحرافات لحظه‌ای آن در مکان‌های مختلف در طول زمان به یک شکل تغییر می‌کنند، به‌جز تغییر فاز که ثابت می‌ماند.^۲ بی‌شک همه‌ی ما مواردی از تداخل (برهم‌نهی) امواج را به‌صورت برهم‌نهی فضایی ثابت (۳بعدی) مشاهده کرده و یا در باره‌ی آنها مطالبی خوانده و شنیده‌ایم (تصویرهای ۲ تا ۹):



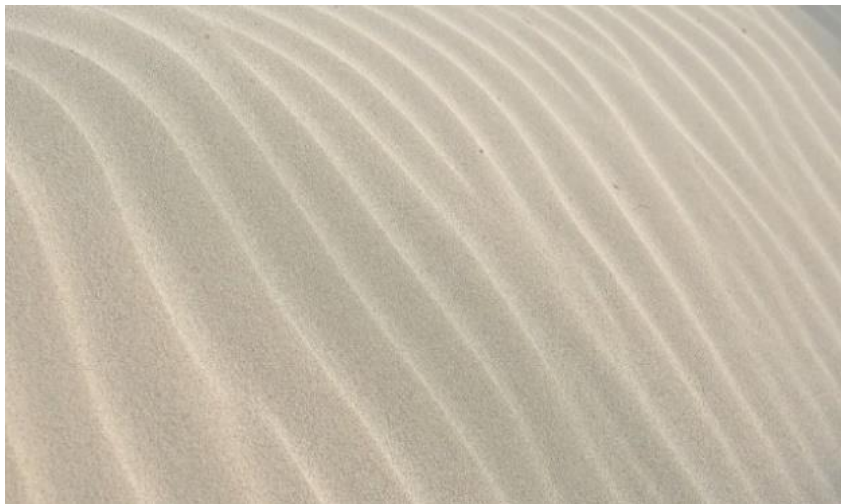
تصویر ۲: موج در آب^۴



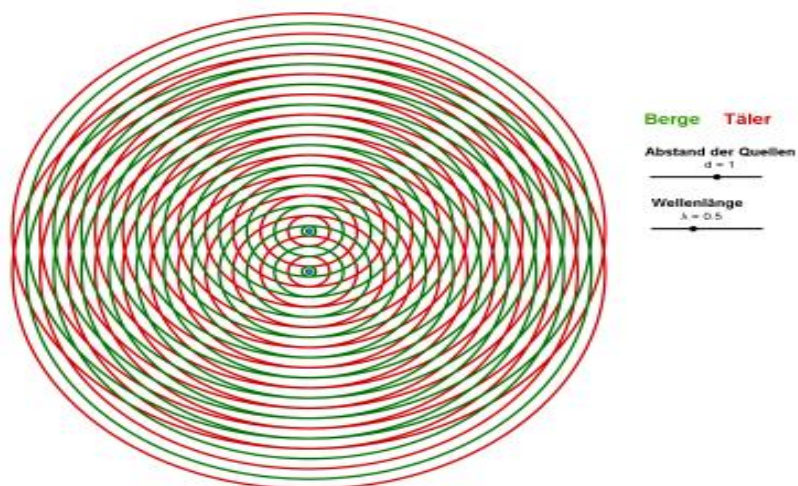
تصویر ۳: حالت موجی زیبا (ایسلند)^۵



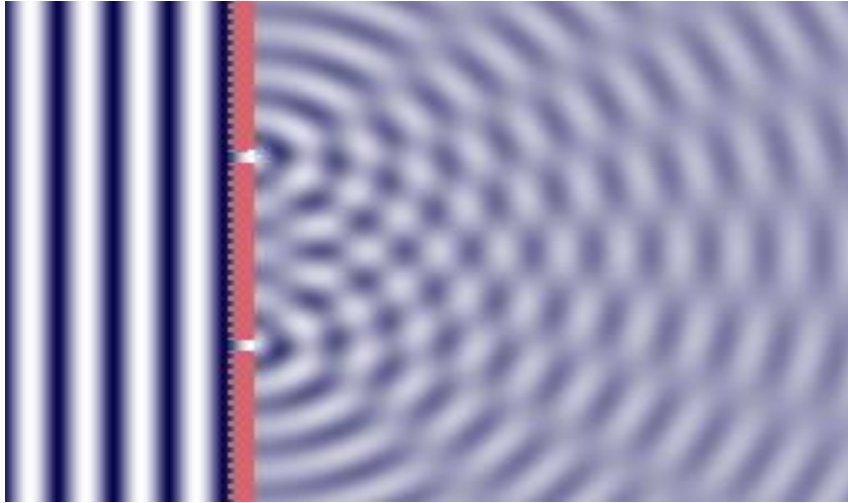
تصویر ۴: موج در ماسه^۴



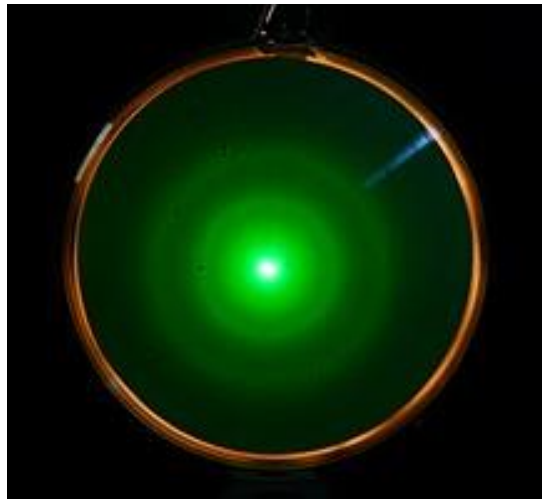
تصویر ۵: موج در شن^۵



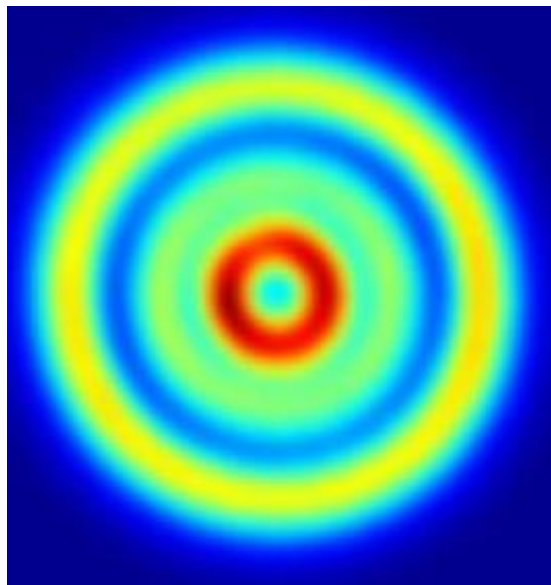
تصویر ۶: تداخل (برهم‌نهی) امواج^۶



تصویر ۷: پراش (تفرُّق) و تداخل امواج^۹



تصویر ۸: پراش الکترون^{۱۰}

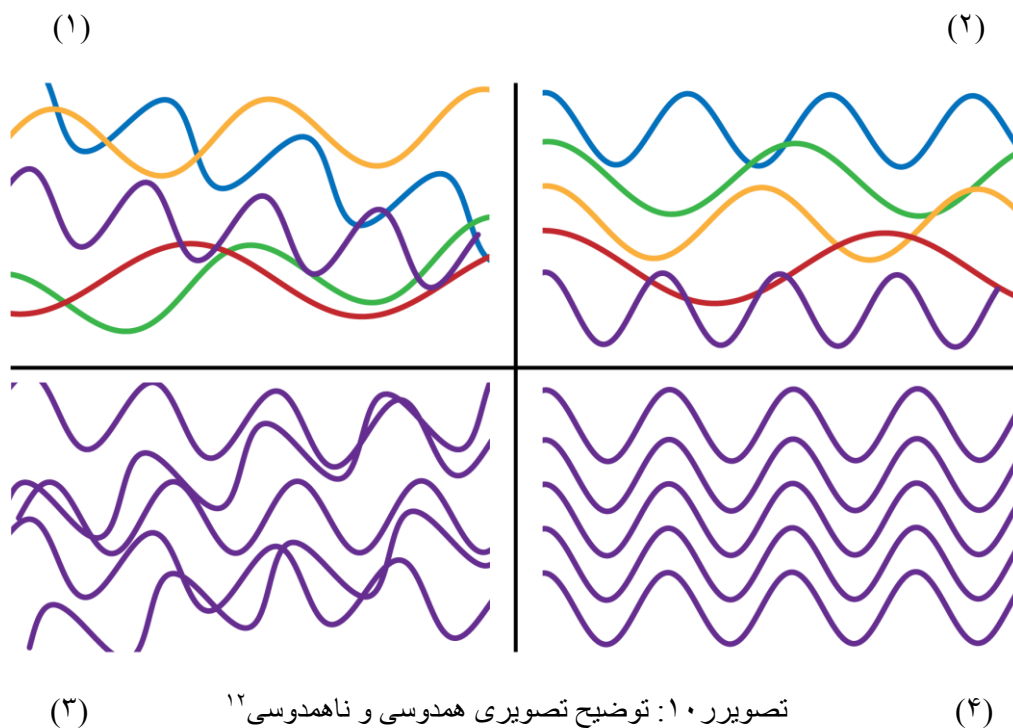


تصویر ۹: اولین تصویر (۲۰۱۳) از ابرهای الکترونی MBI-Berlin^{۱۱}

امواج فیزیکی واقعی، بعکس بیان ریاضی آنها (منحنی سینوسی نامحدود)، از نظر زمان و فضا محدود و چنانچه از یک منبع تولید شده باشند همدوس، یعنی دارای بسامدهای (فرکانس‌های) یکسان، و اگر از دو منبع مختلف باشند اغلب دارای بسامدهای مختلف هستند. در صورت همدوسی کامل دو منبع، تداخل ایجاد شده به‌خاطر امواج همدوس حالت ایستاده، موج ایستاده، را دارد. در مقابل امواجی که برای مثال از خورشید و یا از یک لامپ الکتریکی منتشر می‌شوند همدوس نیستند و تداخل امواجشان نظم خاصی ندارد. مشخصه‌ی دو موج همدوس که در یک مکان بهم می‌رسند آن است که دامنه‌ی (Amplitude) آنها باهم جمع می‌شود.

همدوسی در بخش‌های علمی - فنی‌ای که برهم‌نهی امواج - مانند امواج الکترومغناطیسی و یا امواج ماده (Matter waves) مثل ذرات الکترون - در آنها نقش بازی می‌کند از اهمیت بالایی برخوردار است، برای مثال در اپتیک، تکنیک لیزر، طیف سنجی کوتاه مدت (Short-time Spectroscopy) و تشدید مغناطیسی (Magnetic resonance) یا در پردازش سیگنال‌ها، برای مثال در پردازش سیگنال‌های ثابت شده از مغز (آنالیز الکتروانسفالوگرافی بر اساس تغییراتی که بدنبال ضایعات مغزی اتفاق می‌افتد). در این میان اشعه لیزر در حین برخورداری از شرایط همدوسی، یعنی تک‌فرکانسی (به‌معنای همدوسی زمانی*) و نامتغییر بودن جبهه‌ی موج (به‌معنای همدوسی فضایی*)، به‌خاطر نور همدوس باریک و پر قدرت از جایگاه شایان توجهی در تحقیقات علمی - فنی برخوردار است. بی‌تردید بسیاری از دست‌آوردهای مهم دهه‌های اخیر بدون یاری جستن از اشعه همدوس لیزر امکان‌پذیر نبودند، برای مثال کشف امواج گرانشی در ۱۴ سپتامبر سال ۲۰۱۵ و برای اولین بار در تاریخ بشر بعد از یک قرن از ارائه‌ی نظری آن در سال ۱۹۱۵ از جانب آلبرت اینشتین.

* توضیح مفهوم‌های بکاربرده شده به زبان تصویری با شرح کوتاهی برای هر یک از آنها (تصویر ۱۰):^{۱۲}



- (۱) امواج در این شکل نه طول موج و نه جهت انتشار مشترک دارند. آنها از نظر زمانی و فضایی ناهمدوس هستند.
- (۲) امواج در این شکل دارای جهت مشترک، طول موج مختلف، لذا از نظر زمانی ناهمدوس اما فضایی همدوس هستند.
- (۳) امواج در این شکل تک‌رنگ، دارای طول موج مساوی، اما در جهات مختلف، لذا از نظر فضایی ناهمدوس هستند.
- (۴) امواج در این شکل هم طول موج و هم جهت انتشار مشترک دارند. آنها از نظر زمانی و فضایی همدوس هستند.

تعریف دو مقوله‌ی مرتبط با مفهوم همدوسی

زمان همدوسی: حداکثر اختلاف زمان اجرا که در آن بسته‌های امواج هنوز در محل برخوردشان تولید برهم‌نهی می‌کنند.
طول همدوسی: مساوی طول مسیر نوری است که در زمان همدوسی طی می‌شود.

مفهوم ناهمدوسی

فقدان حالت همدوسی دکوهرنس Decoherence، ناهمدوسی، نامیده می‌شود. ناهمدوسی به معنای از دست دادن همدوسی کوانتومی است. ناهمدوسی بیان از نبود یک رابطه‌ی فازی تعریف شده میان امواج دارد، حالتی که در آن امواج دارای فرکانس و اختلاف فازهای گوناگون هستند. در این‌جا نه دامنه‌ی امواج (Amplitude) بلکه جمع شدت (Intensities) آن‌ها (قدر مطلق مربع دامنه‌ها) مدنظر است. چنانچه اختلاف برای مثال در فرکانس‌ها باشد می‌توان با دو یا چندبرابر کردن فرکانس، میان امواج مربوطه همدوسی ایجاد کرد. از این امکان از جمله در فناوری رادار بهره‌برداری می‌شود.

گفتیم که دنیای کوانتوم عاری از مفهوم زمان است و اضافه می‌کنیم که ذرات، مانند ذرات الکترون، در این دنیا غیر قابل تفکیک از یکدیگر هستند. اما در دنیای کلاسیک هر چیزی عمر خاص خود را دارد و قابل تشخیص از یکدیگر هستند. پرسش‌هایی که در این رابطه می‌توان مطرح کرد عبارتند از: چرا چیزها، از جمله ما انسان‌ها، در دنیای کلاسیک که از ذرات کوانتومی (اتم‌ها و ذرات مادون اتم‌ها) تشکیل شده‌اند ویژگی‌های دنیای کوانتومی را ندارند؟ چه چیزی باعث یک چنان تغییر اساسی می‌شود؟ گذار از دنیای کوانتومی به دنیای مادی (دنیای کلاسیک) به چه شکلی است؟

توجه داریم که یک سیستم کوانتومی، برای مثال یک الکترون، وقتی از خواص کوانتومی ناب (دکوهرنس) برخوردار است که در دنیای کوانتومی خود محصور باشد. یعنی، کاملاً بدور از هر شکل قابل تصویری از محیط و کنش و واکنش با آن باشد؛ صد در صد مجزا از محیط بیرونی باشد! چنین حالتی برای الکترون در دنیای ما دست‌یافتنی نیست، چرا که حتی در بهترین حالت (دور از هر شیء‌ای) الکترون را امکان گریز از تاتر تابش پس زمینه کیهانی (فوتون‌های تابش پس زمینه کیهانی، فسیل‌های باقیمانده از دورانی که از عمر کیهان تنها حدود ۳۸۰ هزار سال می‌گذشت) و یا میدان گرانشی در پهنای کیهان نیست. نبود امکان گریز از کنش و واکنش با محیط دقیقاً همان چیزی است که آن را دکوهرنس (ناهمدوسی) می‌نامیم؛ دقیقاً به معنای تاثیر محیط بر سیستم کوانتومی و بعکس. کنش و واکنش سیستم کوانتومی با محیط را نمی‌توان به هیچ‌وجه حذف نمود! در واقع ناهمدوسی، آن عنصر تاثیرگذار (رابط) میان دنیای کوانتومی و دنیای کلاسیک و عامل اصلی (بنیادی) برای شکل‌گیری هر آنچه در کیهان مشاهده می‌کنیم است.

ناهمدوسی علت درهم‌تنیدگی کل اجزای کیهان باهم به شکل یک سیستم واحد، کیهان کوانتومی درهم‌تنیده مبتنی بر قوانین طبیعی، است. علتی که باعث از بین رفتن ویژگی‌های سیستم‌های کوانتومی و بوجود آمدن ویژگی‌های کلاسیک، مانند فرم و مکان و سرعت مشخص آن، می‌شود. به عبارت دیگر، دکوهرنس بیان از چگونگی پروسه‌ی گذار از دنیای کوانتومی به دنیای کلاسیک توسط کنش و واکنش‌های اجتناب‌ناپذیر با محیط دارد. یعنی، ماده و خواص کلاسیکی ماده در رابطه با فعل و انفعالات میان سیستم‌های کوانتومی و محیط بوجود می‌آیند.

ناهمدوسی در نظریه کوانتوم یک پدیده، یک مفهوم، بسیار اساسی و تعیین کننده است. ناهمدوسی سبب محو کامل یا ناقص حالت‌های کوانتومی می‌شود. این مفهوم در نیمه‌ی دوم قرن بیستم از جانب ایچ. دیتر زه H. Dieter Zeh، فیزیکدان نظری آلمانی (۱۹۳۲-۲۰۱۸)، مطرح، بررسی^{۱۳} و در دهه‌های اخیر از جمله از جانب وُسیچ ایچ. زورک Wojciech H. Zurek، فیزیکدان نظری لهستانی - آمریکائی (- ۱۹۵۱*)، توسعه داده شده^{۱۴} و اکنون یکی از مسأله‌های پایه‌ای بسیار مهم علم فیزیک است. ناهمدوسی بیان از شکل‌گیری برگشت‌ناپذیر خواص کلاسیکی ماده از سیستم‌های کوانتومی دارد، خواصی که از کنش و واکنش اجتناب‌ناپذیر سیستم‌های کوانتومی با محیط حاصل می‌شود. ناهمدوسی در تعامل یک سیستم بسته‌ی کوانتومی با محیط رخ می‌دهد. نظریه کوانتوم مدعی است که در لحظه‌ی تعامل (بی‌درنگ) هم حالت سیستم بسته و هم حالت محیط به شکل برگشت‌ناپذیری تغییر می‌کنند.

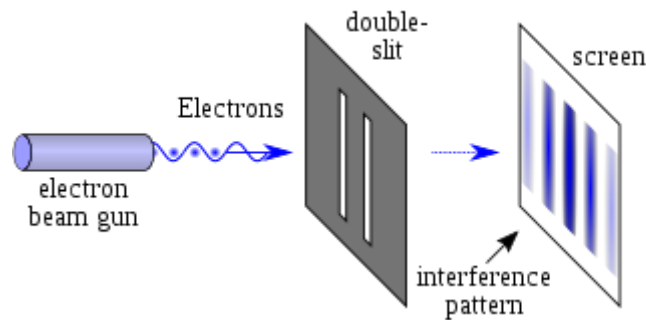
از جنبه‌های مهم ناهمدوسی به ۴ مطلب اشاره می‌کنم:

- ۱- زمان ناهمدوسی بسیار کوتاه است و به همین خاطر گاهن در نظریه کوانتوم صحبت از جهش کوانتومی می‌شود.
- ۲- ناهمدوسی در شکل‌گیری فضا-زمان کلاسیکی در گرانش کوانتومی از اهمیت بسزایی برخوردار است.
- ۳- بازگشت‌ناپذیری یکی از ویژگی‌های بسیار مهم ناهمدوسی به‌شمار می‌آید. (از یاد آنتروپی در طول زمان).
- ۴- ناهمدوسی در طراحی رایانه‌های کوانتومی از اهمیت عملی بالایی برخوردار است. با این حال تجزیه سریع (زمان بسیار کوتاه ناهمدوسی) یکی از مهمترین مسائل آن می‌باشد.

مکانیسم انتقال

دگرگونی خواص فیزیکی دنیای کوانتومی به خواص فیزیکی دنیای کلاسیک را می‌توان با بنیادی دانستن نظریه کوانتوم توضیح داد. با این استدلال که قوانین نظریه کوانتوم محدودیت خاصی را برای اندازه‌ی سیستم‌ها (بزرگی یا کوچکی آن‌ها)

قائل نیستند. یعنی، قوانین نظریه کوانتوم در اصل محدود به سیستم‌های میکروسکوپی نمی‌شوند. با این حال ماهیت پدیده‌های کوانتومی آزمایش‌هایی مانند آزمایش دو شکاف (تصویر ۱۱) و یا آزمایش ذهنی Gedankenexperiment شرودینگر، معروف به «گره شرودینگر» (تصویر ۱)، ما را با این پرسش مواجه می‌کنند که چگونه می‌توان رفتار کلاسیکی سیستم‌های ماکروسکوپی را در محدوده‌ی نظریه کوانتوم توضیح داد؟ به‌خصوص وقتی (بی‌واسطه) به‌هیچ‌وجه روشن نیست چه معنای فیزیکی را می‌توان به حالت برهنه‌ی کوانتومی در استفاده از آن برای یک سیستم ماکروسکوپی قائل شد.^{۱۶} بی‌شک آنچه در این رابطه تعیین‌کننده است مسئله‌ی کنش و واکنش‌های غیرقابل اجتناب ساختارهای کوانتومی مانند فوتون یا الکترون با محیط (ابزار اندازه‌گیری) می‌باشد.



تصویر ۱۱: رفتار فوتون‌ها یا ذراتی مانند الکترون در آزمایش دو شکاف^{۱۶}: این آزمایش به‌شکل غیرقابل انکاری ماهیت جدائی‌ناپذیر ذره - موجی نور و دیگر ذرات کوانتومی، مثل الکترون، را نشان می‌دهد.**

بررسی‌های نظری و تجربی نشان دادند که غیرممکن است بتوان تاثیر محیط از جمله و به‌ویژه تاثیر ابزار اندازه‌گیری بر سیستم‌های کوانتومی را حذف نمود. تاثیر ابزار اندازه‌گیری (به‌عنوان محیط) بر سیستم‌های کوانتومی، هر چند که اندازه‌گیری با ظریف‌ترین امکانات صورت‌گیرد (برای مثال تنها محدود به یک تک ذره نور، فوتون، شود) باز غیرقابل اغماض و تعیین‌کننده است. لازم به تاکید است که در اندازه‌گیری سیستم‌های کوانتومی به‌هیچ‌شکلی امکان برحذر بودن از کنش و واکنش و تاثیرگذاری دو سویه میان سیستم‌های کوانتومی و ابزار اندازه‌گیری نیست. به این معنا که در نتیجه‌ی چنان کنش و واکنش‌هایی تغییراتی اجتناب‌ناپذیر و بازگشت‌ناپذیر در هر دو بخش صورت می‌گیرد. یعنی ما هرگز شانس آن نداریم یک سیستم کوانتومی را آن‌گونه که هست مشاهده کنیم. این یک واقعیت غیرقابل انکار حاصل از ناهمدوسی است. ما هیچ راهی جز پذیرفتن آن نداریم و لازم است آن را همواره در سنجش‌ها و ارزیابی‌ها مدنظر داشته باشیم. در مقابل در اندازه‌گیری یک سیستم مکانیکی کلاسیک غیرنسبیتی تاثیر ابزار اندازه‌گیری بر آن در محدوده‌ی دقت اندازه‌گیری قابل چشم‌پوشی است. یعنی، در این‌جا نیازی (الزامی) به تفکیک میان سیستم و ابزار اندازه‌گیری (محیط) نیست. اما از آن‌جا که در مکانیک اتمی تاثیر ابزار اندازه‌گیری هم‌عرض (!) تاثیر ذرات کوانتومی (مانند اتم یا فوتون) است ناچاریم تغییرات اجتناب‌ناپذیر و بازگشت‌ناپذیر میان آن‌ها در حین اندازه‌گیری را بپذیریم و بدانیم که میان سیستم کوانتومی و ابزار اندازه‌گیری همواره تنیدگی ایجاد می‌شود. به بیان دیگر، ابزار در این‌جا خود بخشی از دینامیک می‌شود!^{۱۷}

توضیحات بیشتر در این‌باره، از آن‌جمله رفتار ذرات فوتون یا الکترون با ابزار آزمایش، را که با مفهوم اندازه‌گیری رابطه‌ی مستقیم و تنگاتنگی دارد به فرصتی دیگر محول می‌کنیم.

پرسش بی‌پاسخ:

گفته می‌شود که پیش از مهبانگ حالت کوانتومی ناب (همدوسی کامل) حاکم بوده است. در این‌صورت به این پرسش چه پاسخی می‌توان داد: تلنگر اولیه و یا همان محیط لازم اولیه برای کنش و واکنش (ناهمدوسی) برای شکل‌گیری دنیای مادی از دنیای کوانتومی چه بوده و به چه شکلی بوده است؟

**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 گذشته‌است، 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.^{۱۸}

