مفاهیم بنیادی در مکانیک کوانتومی

سید یاسر ایازی
با همکاری حلقه سمنان

فهرست مطالب

۱ مقدمه **۱**

۲ اصول موضوعه مکانیک کوانتومی **۳**
۱.۲ اصل حالت [۱] ۳
۲.۲ اصل برهم نهی[۲] ۳
۳.۲ اصل اندازه‌گیری [۳] ۳
۴.۲ مکتب‌های فکری مکانیک کوانتومی در مورد مساله اندازه گیری ۴
۵.۲ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ[۴] ۴
۱.۵.۲ بیان ریاضی ۴
۶.۲ اصل تکامل زمانی [۵] ۵
۷.۲ اصل کمترین کنش [۶] ۵
۸.۲ اصل تقارن‌ها و پایستگی‌ها [۷] ۵

۳ ویژگی‌های کلیدی مکانیک کوانتومی **۶**
۱.۳ ماهیت دوگانه موج ـ ذره [۸] ۶
۱.۱.۳ آزمایش دو شکاف یانگ ۷
۲.۱.۳ تداخل سازنده و مخرب ۷
۳.۱.۳ اصل برهم نهی ۸
۴.۱.۳ آزمایش ویلر: نگاه شما، واقعیت را شکل می دهد! ۹

۴ ردیابی فوتون‌ها در آزمایش دو شکاف یانگ **۱۳**
۱.۴ روش‌های ردیابی فوتون‌ها ۱۳
۲.۴ اثر ردیابی بر رفتار فوتون‌ها ۱۳

۵ روش SPDC در آزمایش‌های کوانتومی **۱۴**
۱.۵ مکانیزم SPDC ۱۴
۲.۵ نتیجه‌ی جالب ۱۵
۳.۵ عدم قطعیت ۱۵
۴.۵ اثر ناظر در مکانیک کوانتومی ۱۵
۵.۵ برهم نهی[۹] ۱۶

۱.۵.۵ تعریف برهم نهی ۱۶
۶.۵ فروپاشی تابع موج [۱۰] ۱۷
۷.۵ درهم‌تنیدگی کوانتومی [۱۱] ۱۹
۱.۷.۵ آزمایش‌های مشاهده درهم‌تنیدگی کوانتومی ۱۹
۲.۷.۵ آزمایش‌های بل [۱۲] ۱۹
۳.۷.۵ آزمایش‌های فریدمن و کلاورز ۲۰
۴.۷.۵ آزمایش آلن اسپکت ۲۱
۸.۵ تونل‌زنی کوانتومی [۱۳] ۲۱
۱.۸.۵ آزمایش‌های مشاهده تونل‌زنی کوانتومی ۲۲

۶ تفاوت‌های اساسی مکانیک کوانتومی با مکانیک کلاسیک ۲۳
۱.۶ قطعیت در مقابل احتمالات ۲۳
۲.۶ هم‌زمانی حالت‌ها ۲۳
۳.۶ تمیز ناپذیری ذرات ۲۳
۴.۶ چرا در مکانیک کوانتومی اثر ناظر وجود دارد؟ ۲۴
۱.۴.۶ ماهیت برهم‌نهی و اندازه‌گیری ۲۵
۵.۶ تعریف اثر ناظر ۲۵
۶.۶ تعریف اثر اندازه‌گیری ۲۵
۷.۶ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ ۲۵
۸.۶ نتایج مختلف ۲۵
۱.۸.۶ نقش مشاهده در واقعیت ۲۶
۲.۸.۶ واقعیت عینی ۲۶
۳.۸.۶ نتایج تجربی ۲۶

۷ اصول مورد انتظار اینشتین از مکانیک کوانتومی ۲۸
۱.۷ واقع‌گرایی [۱۴] ۲۸
۲.۷ محلی بودن [۱۵] ۲۸
۳.۷ عدم قطعیت [۱۶] ۲۹
۴.۷ اختیار [۱۷] ۲۹
۵.۷ چالش‌های مکانیک کوانتومی برای اصول اینشتین ۲۹
۱.۵.۷ آزمایش‌های کلیدی ۲۹
۶.۷ ۴. آزمایش‌های جدید ۳۰

۸ اصل علیت در فیزیک ۳۱
۱.۸ علیت کلاسیک ۳۱
۲.۸ علیت کوانتومی ۳۱
۳.۸ علیت در نسبیت ۳۱
۱.۳.۸ نسبیت زمان ۳۲
۲.۳.۸ عدم وجود زمان مطلق ۳۲
۴.۸ شروط علیت در نسبیت ۳۲

۵.۸ موجبیت ۳۲
۱.۵.۸ رابطه علت و معلول (تعریف سنتی) ۳۳
۲.۵.۸ پیش‌بینی‌پذیری ۳۳
۶.۸ موجبیت در فیزیک کلاسیک ۳۳
۷.۸ موجبیت در فیزیک کوانتومی ۳۳
۱.۷.۸ مفهوم سنتی علیت و موجبیت ۳۴
۸.۸ دیدگاه جان پیاژه در مورد درک علیت ۳۵
۹.۸ مفهوم علیت در فیزیک ۳۵
۱۰.۸ ماهیت تصادفی مکانیک کوانتومی و اصل عدم قطعیت ۳۶
۱۱.۸ درهم‌تنیدگی کوانتومی و عدم علیت ظاهری ۳۶
۱۲.۸ علیت معکوس ۳۶
۱۳.۸ نقض ناپذیری علیت در مکانیک کوانتومی ۳۷
۱.۱۳.۸ آزمایش ویلر و چالش‌های علیت ۳۷
۲.۱۳.۸ جمع بندی چالش های علیت در مکانیک کوانتومی ۳۸

۹ تفاسیر مکانیک کوانتومی **۳۹**
۱.۹ پیش‌زمینهٔ تاریخی ۳۹
۲.۹ طبیعت تفسیر ۴۰
۳.۹ مشکلات تفسیر ۴۰
۴.۹ وضعیت مشکل تفاسیر ۴۲
۵.۹ تفسیر ابزارگرایانه ۴۲
۶.۹ تفاسیر مختلف فروپاشی تابع موج در مکانیک کوانتومی ۴۵
۷.۹ تفسیر کپنهاگی [۱۸] ۴۵
۸.۹ تفسیر چند جهانی [۱۹] ۴۶
۹.۹ تفسیر تاریخ‌های سازگار [۲۰] ۴۷
۱۰.۹ تفسیر نسبی‌گرا [۲۱] ۴۸
۱۱.۹ تفسیر گروهی یا تفسیر آماری ۵۰
۱۲.۹ تفسیر بوهمی [۲۲] ۵۰
۱.۱۲.۹ مکانیک کوانتومی رابطه‌ای ۵۱
۱۳.۹ تفسیر تراکنشی ۵۱
۱۴.۹ مکانیک تصادفی ۵۲
۱۵.۹ نظریه‌های عینی فروریختن ۵۲
۱۶.۹ تفسیر فون نویمن/ویگنر: ۵۲
۱۷.۹ اصل آنتروپی مشارکتی ۵۲
۱۸.۹ ذهنهای متعدد ۵۳
۱۹.۹ نظریه‌های اطلاعاتی کوانتومی ۵۳
۲۰.۹ نظریه‌های متقارن نسبت به زمان ۵۴
۲۱.۹ نظریه‌های انشعاب مکانی ـ زمانی ۵۴

۱۰ مقایسه تفاسیر **۵۵**

۱۱ نقش زمان در مکانیک کوانتومی **۵۸**
۱.۱۱ جابجایی‌ناپذیری عملگرها در مکانیک کوانتومی ۵۹
۲.۱۱ رابطه جابجایی بین عملگرها ۵۹
۳.۱۱ اثبات $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ ۵۹
۴.۱۱ توجیه ساختاری تعریف عملگر تکانه ۶۰
۵.۱۱ وابستگی ساختاری و جابجایی‌ناپذیری ۶۰
۶.۱۱ زمان و انرژی ۶۰
۷.۱۱ نتیجه‌گیری ۶۱
۸.۱۱ زمان و انرژی در مکانیک کوانتومی ۶۱
۹.۱۱ ۱. زمان در مکانیک کوانتومی: پارامتر، نه عملگر ۶۲
۲۱۰.۱۱. رابطه عدم قطعیت انرژی—زمان ۶۲
۳۱۱.۱۱. تلاش برای تعریف عملگر زمان ۶۲
۴۱۲.۱۱. مقایسه با مکان و تکانه ۶۳
۵۱۳.۱۱. رویکردهای مدرن به زمان در کوانتوم ۶۳
۱۴.۱۱نتیجه‌گیری ۶۳

۱۲ سخن پایانی **۶۴**

چکیده

مکانیک کوانتومی به عنوان یکی از پایه‌های علم فیزیک مدرن، رفتار ذرات در مقیاس‌های زیراتمی را توضیح می‌دهد. این نظریه با معرفی مفاهیمی چون برهم نهی، دوگانگی موج ـ ذره و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، چالش‌های جدی برای درک ما از واقعیت ایجاد کرده است. در کنار این مفاهیم بنیادی، تفسیرهای فلسفی مختلفی به منظور توضیح پدیده‌های کوانتومی و نقش مشاهده‌گر در این فرآیندها توسعه یافته است. در این نوشتار به بررسی نکات کلیدی مکانیک کوانتومی و تفاسیر فلسفی مرتبط با آن می‌پردازیم، و تلاش می‌کنیم تا به سوالات بنیادی در مورد طبیعت واقعیت و نحوه تعامل مشاهده‌گر با سیستم‌های کوانتومی پاسخ دهیم. علاوه بر این تاثیر این مفاهیم جدید بر تغییر بینش فلسفی فیزیکدان ها در شناخت طبیعت مورد بررسی قرار می دهیم.

فصل ۱

مقدمه

مکانیک کوانتومی به عنوان یکی از بنیادی‌ترین نظریه‌های فیزیک مدرن، به توصیف رفتار ذرات در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند اتم‌ها و زیراتم‌ها می‌پردازد. این نظریه در اوایل قرن بیستم توسعه یافت و توانست با موفقیت پدیده‌هایی را توضیح دهد که در چارچوب فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. مکانیک کوانتومی مبتنی بر مفاهیم غیرمستقیم و گاهی انتزاعی است که در ابتدا با دیدگاه‌های سنتی ما از جهان تطابق نداشت. به عنوان مثال، مفهوم **برهم نهی** که در آن یک سیستم کوانتومی می‌تواند در چندین حالت مختلف به طور همزمان وجود داشته باشد، یا اصل **عدم قطعیت هایزنبرگ** که بیان می‌کند نمی‌توان به طور همزمان مقدار دقیق برخی جفت‌های متغیرهای فیزیکی (مانند مکان و تکانه) را تعیین کرد، از اصول بنیادی این نظریه هستند.

مبانی بنیادی مکانیک کوانتومی شامل اصولی است که پایه‌گذار این نظریه هستند. این اصول به ما کمک می‌کنند تا رفتار ذرات را در مقیاس‌های کوچک‌تر از اتم‌ها درک کنیم. به عنوان مثال، اصل عدم قطعیت بیان می‌کند که نمی‌توان به طور همزمان موقعیت و زوایای حرکت یک ذره را با دقت کامل اندازه‌گیری کرد. این مفهوم به چالش‌های فلسفی درباره واقعیت و شناخت منجر شده است.

در کنار این مفاهیم بنیادی، مکانیک کوانتومی شامل برخی پدیده‌های عجیب و غریب مانند **دوگانگی موج ـ ذره** است که بیان می‌کند ذرات می‌توانند رفتار موجی یا ذره‌ای از خود نشان دهند، بسته به نوع آزمایش انجام شده. همچنین، مفهوم **فروپاشی تابع موج** در هنگام اندازه‌گیری یکی از موضوعات اصلی مکانیک کوانتومی است که بحث‌های فلسفی فراوانی را به وجود آورده است. در حالت پیش از اندازه‌گیری، یک سیستم در برهم نهی از چندین حالت ممکن قرار دارد، اما پس از اندازه‌گیری، سیستم به یک حالت مشخص فروپاشی می‌کند.

این ویژگی‌های عجیب و غیرمستقیم باعث شده است که فیزیکدانان و فیلسوفان برای توضیح و تفسیر مکانیک کوانتومی به تفسیرهای مختلفی روی بیاورند. برخی از این تفسیرها به دنبال توضیح نقش مشاهده‌گر در فروپاشی تابع موج هستند، در حالی که برخی دیگر مانند **تفسیر چند جهانی** تلاش می‌کنند این فروپاشی را حذف کرده و همه حالت‌های ممکن را در جهان‌های موازی فرض کنند. در مجموع، مکانیک کوانتومی نه تنها انقلابی در علم فیزیک ایجاد کرد، بلکه مباحث عمیق فلسفی را نیز به همراه دارد. این نظریه با اصولی چون اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، دوگانگی موج ـ ذره و تأثیر مشاهده‌گر بر روی سیستم‌های کوانتومی، سؤالاتی اساسی درباره ماهیت واقعیت، زمان و مکان، و

همچنین نقش انسان در فرآیندهای طبیعی را مطرح می‌کند.

مباحث فلسفی مکانیک کوانتومی به بررسی پیامدهای این اصول بر فهم ما از جهان می‌پردازند. سؤالاتی مانند اینکه آیا واقعیت مستقل از مشاهده وجود دارد یا خیر، و اینکه چگونه می‌توانیم حقیقت را در دنیای کوانتومی درک کنیم، از جمله موضوعاتی هستند که در این مباحث مطرح می‌شوند. تفاسیر مختلف مکانیک کوانتومی نیز نمایانگر دیدگاه‌های متفاوتی درباره واقعیت و شناخت هستند. تفسیر کپنهاگی بر اهمیت عمل مشاهده تأکید دارد، در حالی که تفسیر بسیاری جهانی پیشنهاد می‌کند که هر بار یک مشاهده انجام می‌شود، جهان به چندین حالت مختلف تقسیم می‌شود. این تفاسیر نه تنها به فهم بهتر ما از مکانیک کوانتومی کمک می‌کنند، بلکه ما را به چالش می‌کشند تا به سؤالات بزرگ‌تری درباره وجود و حقیقت پاسخ دهیم. این نظریه با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مانند اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، دوگانگی موج ـ ذره و تأثیر مشاهده‌گر بر سیستم‌های کوانتومی، سؤالاتی بنیادی درباره ماهیت واقعیت، زمان و مکان، و نقش انسان در فرآیندهای طبیعی را مطرح می‌کند. تفاسیر فلسفی مکانیک کوانتومی به بررسی این سؤالات و چالش‌ها می‌پردازند و تلاش می‌کنند تا معنا و مفهوم عمیق‌تری از پدیده‌های کوانتومی ارائه دهند. از تفسیر کپنهاگی که بر نقش مشاهده‌گر تأکید دارد تا تفسیر چند جهانی که وجود چندین جهان موازی را پیشنهاد می‌کند، هر یک از این تفاسیر نمایانگر دیدگاه‌های متفاوتی درباره واقعیت و شناخت هستند. این بحث‌ها نه تنها به فهم بهتر ما از مکانیک کوانتومی کمک می‌کنند، بلکه به ما اجازه می‌دهند تا به سؤالات بزرگ‌تری درباره وجود، حقیقت و طبیعت انسان پاسخ دهیم. در این راستا، بررسی تفاسیر فلسفی مکانیک کوانتومی می‌تواند به ما در درک عمیق‌تر از جهان پیرامون و جایگاه خودمان در آن یاری رساند.

فصل ۲

اصول موضوعه مکانیک کوانتومی

۱.۲ اصل حالت [۱]

در مکانیک کوانتومی، حالت یک سیستم فیزیکی توسط یک **تابع موج** ψ توصیف می‌شود که شامل تمام اطلاعات مربوط به سیستم است. احتمال حضور ذره در مکان x و زمان t از روی مقدار مربعی تابع موج به دست می‌آید:

$$|\psi(x,t)|^2$$

که احتمال حضور ذره در مکان x و زمان t را می‌دهد.

۲.۲ اصل برهم نهی [۲]

هر ترکیب خطی از حالت‌های مختلف یک سیستم نیز یک حالت معتبر است. اگر ψ_1 و ψ_2 دو حالت ممکن باشند، هر ترکیب خطی از آن‌ها به صورت زیر نیز یک حالت معتبر است:

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$$

که در آن c_1 و c_2 ضرایب ثابت هستند.

۳.۲ اصل اندازه‌گیری [۳]

تا زمانی که اندازه‌گیری انجام نشود، سیستم در حالت برهم نهی قرار دارد. اما پس از اندازه‌گیری، تابع موج به یک حالت خاص **فروپاشی** می‌کند و نتیجه اندازه‌گیری به طور تصادفی و بر اساس احتمال‌های تابع موج تعیین می‌شود.

---

[۱] Wavefunction
[۲] Superposition
[۳] Postulate Measurement

۴.۲ مکتب‌های فکری مکانیک کوانتومی در مورد مساله اندازه گیری

نظریه‌های گوناگونی دربارهٔ مسئلهٔ اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی مطرح شده‌است. از این میان، سه دیدگاه شایان ذکرند:

- دیدگاه واقع‌گرایانه که اینشتین طرفدار آن بود
- دیدگاه سنتی که به تفسیر کپنهاگی هم معروف است و نیلز بور از آن حمایت می‌کرد
- دیدگاه ندانم‌گرایانه یا آگنوستیک که طرفداران آن از اظهارنظر به‌طور کلی خودداری می‌کردند.

۵.۲ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ[۴]

این اصل بیان می‌کند که نمی‌توان به طور هم‌زمان مکان و تکانه ذره را با دقت بی‌نهایت اندازه‌گیری کرد.

۱.۵.۲ بیان ریاضی

رابطه ریاضی این اصل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

که در آن:

- Δx: عدم قطعیت در اندازه‌گیری مکان ذره.
- Δp: عدم قطعیت در اندازه‌گیری تکانه ذره.
- $\hbar$: ثابت کاهیده پلانک ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$) است.

این رابطه بیان می‌کند که اگر بخواهیم مکان یک ذره را با دقت بسیار بالایی (Δx بسیار کوچک) اندازه‌گیری کنیم، عدم قطعیت در اندازه‌گیری تکانه آن (Δp) افزایش می‌یابد و بالعکس.

[۴] Principle Uncertainty Heisenberg's

۶.۲ اصل تکامل زمانی [۵]

تکامل زمانی تابع موج توسط **معادله شرودینگر** تعیین می‌شود:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$

که در آن $\hbar$ ثابت کاهش یافته پلانک و $\hat{H}$ عملگر همیلتونی است که بیانگر انرژی کل سیستم است.

۷.۲ اصل کمترین کنش [۶]

این اصل بیان می‌کند که مسیر واقعی سیستم فیزیکی مسیری است که کنش در آن کمینه می‌شود. در مکانیک کوانتومی، سیستم می‌تواند مسیرهای مختلف را به طور هم‌زمان طی کند، و تابع موج این رفتار را توصیف می‌کند.

۸.۲ اصل تقارن‌ها و پایستگی‌ها [۷]

تقارن‌های یک سیستم با پایستگی‌های فیزیکی متناظر هستند. به عنوان مثال:

- تقارن انتقالی در فضا $\rightarrow$ پایستگی تکانه
- تقارن انتقالی در زمان $\rightarrow$ پایستگی انرژی

این اصل از **قضیه نوتر** نشأت می‌گیرد که بیان می‌کند هر تقارن پیوسته با یک قانون پایستگی متناظر است.

---

[۵] Evolution Time
[۶] Action Least
[۷] Laws Conservation and Symmetries

فصل ۳

ویژگی‌های کلیدی مکانیک کوانتومی

۱.۳ ماهیت دوگانه موج‌ـ ذره [۱]

یکی از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی، **ماهیت دوگانه موج‌ـ ذره** است. این اصل بیان می‌کند که ذرات زیراتمی مانند الکترون‌ها، فوتون‌ها و دیگر ذرات بنیادی، هم خصوصیات موجی و هم خصوصیات ذره‌ای را از خود نشان می‌دهند. این ویژگی در بسیاری از آزمایش‌ها و پدیده‌های فیزیکی قابل مشاهده است و به عنوان یکی از مفاهیم کلیدی مکانیک کوانتومی مطرح است.

ماهیت ذره‌ای

ذرات مانند الکترون‌ها در برخی شرایط، مانند پرتابه‌های کلاسیک، رفتاری ذره‌مانند دارند. برای مثال، زمانی که یک الکترون با یک صفحه فلزی برخورد می‌کند و باعث ایجاد یک جریان الکتریکی می‌شود، می‌توان آن را به‌عنوان یک ذره در نظر گرفت. این رفتار ذره‌ای در اثر فوتوالکتریک که توسط **آلبرت انیشتین** توضیح داده شد، به وضوح مشاهده می‌شود. معادله مربوط به این پدیده به شکل زیر است:

$$E = h\nu$$

که در آن:

- E انرژی فوتون است.
- h ثابت پلانک است.
- ν بسامد موج نور است.

این معادله نشان می‌دهد که فوتون (ذره نور) انرژی‌ای وابسته به بسامد موج دارد و به عنوان یک ذره می‌تواند انرژی را در مقادیر گسسته منتقل کند.

---

[۱] Duality Wave-Particle

ماهیت موجی

همچنین، ذرات زیراتمی می‌توانند رفتاری موجی از خود نشان دهند. برای مثال، در **آزمایش دو شکاف یانگ**، الکترون‌ها می‌توانند از دو شکاف عبور کنند و الگوی تداخلی تشکیل دهند، که این الگو مشخصه‌ای از امواج است. به این معنا که ذراتی مانند الکترون، به هنگام عبور از دو شکاف به طور هم‌زمان از هر دو شکاف عبور می‌کنند و امواج آن‌ها با یکدیگر تداخل می‌کنند. رابطه‌ای که برای طول موج ذره در نظر گرفته می‌شود توسط **فرمول دوبروی** داده می‌شود:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

که در آن:

- λ طول موج ذره است.
- h ثابت پلانک است.
- p تکانه ذره است.

این رابطه نشان می‌دهد که هر ذره با تکانه p دارای طول موج معینی است، که بیانگر ماهیت موجی آن است.

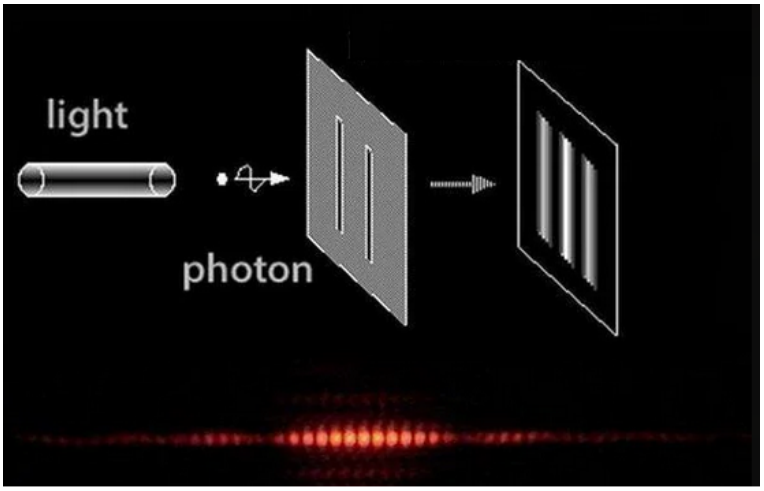
۱.۱.۳ آزمایش دو شکاف یانگ

این آزمایش در اوایل قرن نوزدهم توسط توماس یانگ انجام شد و هدف آن نشان دادن خاصیت موجی نور بود. در این آزمایش، نور از یک منبع واحد به دو شکاف باریک می‌تابد و سپس به یک صفحه نمایش می‌رسد. نتیجه این آزمایش، الگوی تداخلی است که شامل نوارهای روشن و تاریک است. این الگو نشان‌دهنده تداخل سازنده و مخرب امواج نوری است که از دو شکاف عبور کرده‌اند.

در آزمایش دو شکاف یانگ که با الکترون انحام شد، وقتی ذرات مانند الکترون‌ها از دو شکاف عبور می‌کنند، الگوی تداخلی مشابه با امواج نوری تشکیل می‌شود. این آزمایش تأیید می‌کند که الکترون‌ها همزمان رفتاری ذره‌ای و موجی دارند. این دوگانگی ذاتی در رفتار ذرات زیراتمی یکی از ویژگی‌های اصلی مکانیک کوانتومی است.

۲.۱.۳ تداخل سازنده و مخرب

- **تداخل سازنده:** وقتی دو موج در فاز (قله با قله) به هم برسند، شدت نور افزایش یافته و نوارهای روشن تشکیل می‌شود.
- **تداخل مخرب:** وقتی دو موج خارج از فاز (قله با پایین‌ترین نقطه) به هم برسند، شدت نور کاهش یافته و نوارهای تاریک ایجاد می‌شود.



شکل ۱.۳: آزمایش دو شکاف یانگ

۳.۱.۳ اصل برهم نهی

در مکانیک کوانتومی، اصل برهم نهی بیان می‌کند که یک سیستم می‌تواند در چندین حالت به طور همزمان وجود داشته باشد. در مورد آزمایش دو شکاف، این بدان معناست که یک ذره (مانند فوتون یا الکترون) می‌تواند به طور همزمان از هر دو شکاف عبور کند و در نتیجه الگوی تداخلی را ایجاد کند. این رفتار نشان‌دهنده دوگانگی موج ـ ذره است؛ یعنی ذرات می‌توانند همزمان خواص موجی و ذره‌ای داشته باشند.

اثر فاصله شکاف‌ها

فاصله بین دو شکاف نیز تأثیر زیادی بر الگوی تداخلی دارد. هرچه فاصله شکاف‌ها بیشتر باشد، تعداد نوارهای تداخلی افزایش یافته و الگوی تداخلی واضح‌تری ایجاد می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده این است که تغییر در فاصله شکاف‌ها می‌تواند بر روی نحوه تداخل امواج نوری تأثیر بگذارد.

عمق و عرض شکاف‌ها

ابعاد شکاف‌ها نیز بر روی الگوی تداخلی تأثیرگذار است. برای مثال، اگر عمق یا عرض شکاف‌ها تغییر کند، این تغییرات ممکن است منجر به تغییر در شدت و الگوی نوارهای تداخلی شود. عمق شکاف‌ها باعث پراش نور نیز می‌شود که بر روی الگوی نهایی تأثیر دارد.

۴.۱.۳ آزمایش ویلر: نگاه شما، واقعیت را شکل می دهد!

آزمایش ویلر، که به نام آزمایش انتخاب تاخیری ویلر (Wheeler's Exper- Choice Delayed iment) شناخته می‌شود، یک آزمایش فکری و عملی در مکانیک کوانتومی است که توسط جان آرچیبالد ویلر در دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد شد. این آزمایش به بررسی ماهیت دوگانه موج ـ ذره فوتون‌ها و تأثیر تصمیم‌گیری‌های مشاهده‌گر بر رفتار کوانتومی می‌پردازد، حتی اگر این تصمیم پس از عبور فوتون از سیستم گرفته شود.

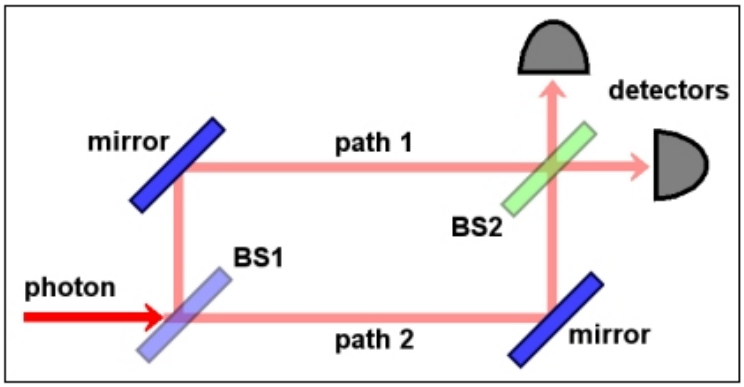
مفهوم اصلی

این آزمایش به این پرسش می‌پردازد که آیا رفتار یک فوتون (به صورت موج یا ذره) قبل از حرکت آن تعیین می‌شود یا می‌توان این رفتار را پس از شروع حرکت و حتی در لحظه آخر *انتخاب* کرد. آزمایش ویلر نشان می‌دهد که تصمیم مشاهده‌گر در لحظه آخر می‌تواند به طور بازگشتی روی حالت کوانتومی تأثیر بگذارد.

ساختار آزمایش

فیزیکدانان دانشگاه ملی استرالیا، آزمایش ذهنی تاخیر در انتخاب جان ویلر را استفاده کردند. این آزمایش در واقع به یک شی اجازه می دهد تا رفتار موجی یا ذره ای را از خود نشان دهد. قضیه از آزمایش دو شکاف یانگ شروع می شود، همان آزمایشی که برای اثبات دوگانگی موج ـ ذره بودن به کار رفت. آزمایش ویلر (شکل زیر) در واقع شکل پیشرفته تری از آزمایش دو شکاف است. ویلر در سال ۱۹۷۸ گفت: در شروع آزمایش، یکی از شکاف ها را ببندیم و بدین ترتیب فوتون فقط می تواند از همان شکاف باز عبور کند، حالا اندکی قبل از رسیدن فوتون به حسگر ما و در واقع آشکار شدن روی پرده، شکاف دوم را باز کنیم. مسلما چون پس از عبور الکترون از شکاف باز، شکاف بسته را باز کرده ایم، قطعاً فوتون تنها یک انتخاب داشته و از همان شکاف باز عبور کرده و در نتیجه خبری از الگوی تداخلی دو شکاف نیست. منطق به ما می گوید شی، یا ذره مانند است و یا موج مانند و مستقل از اندازه گیری ای است که ما انجام می دهیم. اما فیزیک کوانتوم پیش بینی می کند که اتفاقاً نتیجه دقیقاً به چگونگی اندازه گیری شما بستگی دارد و این همان چیزی است که تیم ANU به آن دست یافتند! در این آزمایش ابتدا مجموعه ای از اتم های هلیوم که به عنوان حالت چگال بوز ـ اینشتین شناخته می شوند را به دام انداختند و سپس آنها را تا زمانیکه تنها یک اتم باقی بماند، خارج کردند. این اتم منفرد از طریق دو پرتوی لیزر با جهت های انتشار مخالف، پرتاب شد و مانند نور، یک الگوی شبکه ای را درست کرد. سپس شکاف دوم به صورت تصادفی باز شد. حال اگر اتم هر دو مسیر را بپیماید، الگوهای تخریبگر یا سازنده بدست می آید. زمانیکه شبکه ی نوری دوم اضافه نمی شد، عملاً نباید هیچ تداخلی اتفاق می افتاد، اما اتفاق افتاد!! این اندازه گیری بود که موج یا ذره بودن را خلق کرد!

آزمایش از یک تداخل‌سنج ماخ ـ زندر استفاده می‌کند که شامل مراحل زیر است:



شکل ۲.۳ : آزمایش ویلر

۱. **تنظیم اولیه**: یک فوتون از یک منبع نوری منتشر شده و توسط یک تقسیم‌کننده پرتو به دو مسیر جداگانه تقسیم می‌شود.

۲. **دو مسیر ممکن**:

- اگر فوتون به صورت موج رفتار کند، در هر دو مسیر به طور همزمان حرکت کرده و الگوی تداخلی در آشکارسازها ایجاد می‌کند.
- اگر فوتون به صورت ذره رفتار کند، تنها از یکی از مسیرها عبور کرده و الگوی تداخلی مشاهده نمی‌شود.

۳. **انتخاب تأخیری**: تصمیم برای قرار دادن یا برداشتن یک تقسیم‌کننده پرتو دوم می‌تواند پس از عبور فوتون از تقسیم‌کننده اول و حتی در لحظه‌ای که فوتون تقریباً به انتهای مسیر رسیده است، گرفته شود.

نتایج

نتایج آزمایش به شرح زیر است:

- اگر تقسیم‌کننده پرتو دوم وجود داشته باشد، فوتون رفتار موجی نشان داده و الگوی تداخلی مشاهده می‌شود.
- اگر تقسیم‌کننده پرتو دوم حذف شود، فوتون رفتار ذره‌ای نشان داده و مسیر مشخصی را طی می‌کند.

نکته قابل توجه این است که تصمیم برای قرار دادن یا برداشتن تقسیم‌کننده می‌تواند در آخرین لحظه گرفته شود، اما رفتار فوتون به گونه‌ای است که گویی از ابتدا با این تصمیم سازگار بوده است.

تفسیر آزمایش

الکترون در حالیکه از همان یک شکاف باز گذشته و اندکی بعد به حسگر می رسد، با باز شدن شکاف دیگر، برمی گردد و انتخاب خود را تغییر می دهد!!! یعنی ما گذشته را تغییر دادیم! در واقع بهتر است بگوییم دیدن یا همان اندازه گیری ما، تاریخ را تغییر داد! این آزمایش ثابت می کند که همه چیز در گروی فرآیند اندازه گیری است. بنابراین در سطح کوانتومی، واقعیت وجود ندارد مگر آنکه شما به آن نگاه کنید!!

آزمایش دو شکاف یانگ نه تنها خاصیت موجی نور را تأیید کرد بلکه به شکل‌گیری نظریه‌های بنیادی مکانیک کوانتومی کمک کرد. ارتباط بین این آزمایش و اصل سوپرپوزیشن نشان‌دهنده پیچیدگی‌های دنیای کوانتومی است، جایی که مشاهده و اندازه‌گیری تأثیر عمیقی بر رفتار ذرات دارند.

ماهیت دوگانه موج‌ـذره یکی از بنیادی‌ترین اصول مکانیک کوانتومی است. این اصل نشان می‌دهد که ذرات زیراتمی می‌توانند بسته به شرایط، هم به عنوان ذره و هم به عنوان موج عمل کنند. این ویژگی منحصر به فرد، بسیاری از پدیده‌های عجیب و شگفت‌انگیز مکانیک کوانتومی را توضیح می‌دهد.

اهمیت فلسفی

آزمایش ویلر نتایج زیر را نشان می‌دهد:

۱. **واقعیت کوانتومی وابسته به مشاهده**: حالت کوانتومی فوتون تا لحظه مشاهده نهایی تعریف نمی‌شود.

۲. **تأثیر بازگشتی**: تصمیم مشاهده‌گر در لحظه آخر به نظر می‌رسد که روی رفتار گذشته فوتون تأثیر می‌گذارد. این موضوع به تفسیرهای مختلف مکانیک کوانتومی (مانند تفسیر کپنهاگ یا چندجهانی) بستگی دارد.

۳. **دوگانگی موج‌ـذره**: ماهیت موج یا ذره بودن فوتون به نحوه اندازه‌گیری بستگی دارد، نه به یک ویژگی ذاتی ثابت.

آزمایش ویلر نشان داد که حتی اگر تنها یک فوتون به سمت شکاف‌ها فرستاده شود، باز هم الگوی تداخلی مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده این است که فوتون‌ها با خودشان تداخل می‌کنند و نه با دیگر فوتون‌ها. همچنین، هنگامی که تلاش می‌شود تا مسیر فوتون‌ها را شناسایی کنیم (با استفاده از حسگرها)، الگوی تداخلی ناپدید می‌شود و فقط دو نوار روشن مشاهده می‌شود. این پدیده به "فروریزش تابع موج" معروف است.

آزمایش‌های عملی

از زمان پیشنهاد ویلر، نسخه‌های عملی این آزمایش با استفاده از فوتون‌ها، الکترون‌ها و حتی مولکول‌های بزرگ‌تر انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی را تأیید کرده‌اند.

جمع‌بندی

آزمایش انتخاب تأخیری ویلر یکی از عمیق‌ترین آزمایش‌ها در مکانیک کوانتومی است که نشان می‌دهد واقعیت در سطح کوانتومی به شدت به انتخاب‌ها و اندازه‌گیری‌های ما وابسته است. این آزمایش نه تنها جنبه‌های فنی مکانیک کوانتومی را روشن می‌کند، بلکه پرسش‌های فلسفی عمیقی درباره ماهیت واقعیت و نقش مشاهده‌گر در جهان مطرح می‌کند.

فصل ۴

ردیابی فوتون‌ها در آزمایش دو شکاف یانگ

در آزمایش دو شکاف یانگ، اگر بخواهیم حرکت فوتون‌ها را ردیابی کنیم و بفهمیم از کدام شکاف عبور کرده‌اند، باید وسیله‌ای برای آشکارسازی کنار شکاف‌ها قرار دهیم.

۱.۴ روش‌های ردیابی فوتون‌ها

- **آشکارسازهای الکترونی:** قرار دادن آشکارساز حساس جلوی شکاف‌ها که اثر عبور فوتون را ثبت کند، مانند تغییر در میدان الکتریکی یا مغناطیسی.
- **استفاده از قطبش نور:** فوتون‌ها با قطبش خاصی آماده می‌شوند و در یکی از شکاف‌ها تغییر کوچکی در قطبش ایجاد می‌شود. سپس با تحلیل قطبش فوتون خروجی می‌توان مسیر آن را تشخیص داد.
- **برهم‌کنش با محیط :(Decoherence)** فوتون هنگام عبور ممکن است با محیط اطراف برهم‌کنش کند و اطلاعات مسیرش به محیط منتقل شود. این امر باعث از بین رفتن الگوی تداخل می‌شود.

۲.۴ اثر ردیابی بر رفتار فوتون‌ها

وقتی مسیر فوتون‌ها را ردیابی کنیم، الگوی تداخل ناپدید می‌شود و به جای آن دو لکه‌ی جداگانه روی پرده مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که عمل مشاهده یا اندازه‌گیری رفتار فوتون را تغییر می‌دهد.

- بدون ردیابی $\rightarrow$ فوتون مانند **موج** رفتار می‌کند و الگوی تداخل شکل می‌گیرد.
- با ردیابی $\rightarrow$ فوتون مانند **ذره** رفتار می‌کند و الگوی تداخل از بین می‌رود.

آزمایش دو شکاف یکی از شگفت‌انگیزترین شواهد برای دوگانگی موج ـ ذره و اهمیت مشاهده در مکانیک کوانتومی است.

فصل ۵

روش SPDC در آزمایش‌های کوانتومی

تعریف SPDC

SPDC مخفف عبارت Spontaneous Parametric Down-Conversion به معنای **تولید خودبه‌خودی تبدیل پایین پارامتری** است. این فرآیند در فیزیک کوانتومی برای تولید جفت فوتون‌های به‌هم‌وابسته (درهم‌تنیده) به کار می‌رود.

۱.۵ مکانیزم SPDC

در این روش:

- یک پرتو لیزر با فرکانس بالا به یک کریستال غیرخطی (مانند BBO یا KDP) تابانده می‌شود.
- بعضی از فوتون‌های لیزر به طور خودبه‌خودی به دو فوتون با انرژی کمتر تقسیم می‌شوند.
- این دو فوتون حاصل، ویژگی‌هایی مانند انرژی، قطبش و مسیر حرکت دارند که به صورت کوانتومی به یکدیگر وابسته‌اند.

نقش SPDC در ردیابی فوتون‌ها

در نسخه‌های مدرن آزمایش دو شکاف:

- یکی از فوتون‌های تولید شده (فوتون **سیگنال**) به سمت شکاف‌ها فرستاده می‌شود.
- فوتون دیگر (فوتون **شاهد**) اطلاعاتی درباره‌ی مسیر فوتون اول در اختیار دارد.
- با اندازه‌گیری فوتون شاهد می‌توان مسیر فوتون سیگنال را (به طور غیرمستقیم) مشخص کرد.

۲.۵ نتیجه‌ی جالب

اگر اطلاعات مسیر استخراج شود، الگوی تداخل از بین می‌رود؛ و اگر اطلاعات مسیر نادیده گرفته شود، الگوی تداخل باقی می‌ماند. این پدیده پایه‌ای برای درک تأثیر مشاهده در فیزیک کوانتومی و آزمایش انتخاب تأخیری (Delayed Choice) است.

۳.۵ عدم قطعیت

همانطور که گفته شد اصل عدم قطعیت هایزنبرگ یکی از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی است که توسط ورنر هایزنبرگ در سال ۱۹۲۷ معرفی شد. این اصل بیان می‌کند که نمی‌توان به‌طور هم‌زمان مکان و تکانه یک ذره را با دقت بی‌نهایت اندازه‌گیری کرد. به نظر می رسد این اصل نه به دلیل نقص در وسایل اندازه‌گیری، بلکه به دلیل طبیعت بنیادی اندازه گیری در ذرات بسیار موچک ایجاد می شود.

تفسیر فیزیکی

اصل عدم قطعیت به طبیعت ذاتی سیستم‌های کوانتومی مربوط می‌شود. برای ذراتی مانند الکترون‌ها یا فوتون‌ها، نمی‌توان هم‌زمان به‌طور دقیق مکان و تکانه آن‌ها را مشخص کرد. در مقیاس کوانتومی، این اصل بیانگر ویژگی موج‌مانند ذرات است.

کاربردها

الکترون در اتم

در اتم‌ها، اصل عدم قطعیت باعث می‌شود که الکترون‌ها به جای حرکت در مسیرهای دقیق مانند مدارهای کلاسیکی، در نواحی احتمال توزیع شوند. این توزیع احتمالی به توابع موج وابسته است و مکان دقیق الکترون تنها پس از اندازه‌گیری مشخص می‌شود.

پدیده‌های دیگر

این اصل در پدیده‌هایی مانند تونل‌زنی کوانتومی نیز نقش دارد، جایی که ذرات می‌توانند از موانعی عبور کنند که طبق مکانیک کلاسیک عبور از آن‌ها غیرممکن است.

۴.۵ اثر ناظر در مکانیک کوانتومی

اثر ناظر به پدیده‌ای در مکانیک کوانتوم اشاره دارد که طبق آن، عمل مشاهده یا اندازه‌گیری می‌تواند وضعیت یک سیستم کوانتومی را تغییر دهد. این مفهوم نشان می‌دهد که ناظر (یا فرآیند اندازه‌گیری) نمی‌تواند از سیستم مورد مطالعه جدا در نظر گرفته شود و خود بخشی از آزمایش است.

اثر ناظر به موارد زیر اشاره دارد:

- تأثیر عمل مشاهده بر وضعیت یک سیستم کوانتومی.
- اندازه‌گیری یک سیستم می‌تواند حالت آن را تغییر دهد.
- این تغییر ناشی از تعامل ناظر و سیستم است.
- مثال کلاسیک: آزمایش دو شکاف که در آن مشاهده الکترون‌ها باعث تغییر الگوی تداخلی می‌شود.

ارتباط بین اصل عدم قطعیت و اثر ناظر

اگرچه اصل عدم قطعیت و اثر ناظر دو مفهوم متمایز هستند، اما ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. هر دو مفهوم به محدودیت‌های اساسی در اندازه‌گیری و مشاهده سیستم‌های کوانتومی اشاره دارند. اصل عدم قطعیت بیان می‌کند که محدودیت‌هایی در دقت اندازه‌گیری وجود دارد، در حالی که اثر ناظر نشان می‌دهد که خود عمل اندازه‌گیری می‌تواند سیستم را تغییر دهد.
اصل عدم قطعیت حالت خاصی از اثر ناظر است.؟؟؟؟

خلاصه تفاوت‌ها

- اصل عدم قطعیت: محدودیت‌های ذاتی در اندازه‌گیری را توصیف می‌کند.
- اثر ناظر: به تأثیر فعالیت مشاهده‌گر بر سیستم اشاره دارد.

۵.۵ برهم نهی[۱]

برهم نهی یکی از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی است که به معنای هم‌زمانی چندین حالت مختلف برای یک سیستم کوانتومی است. برخلاف مکانیک کلاسیک که در آن یک سیستم در هر لحظه در یک حالت مشخص قرار دارد، در مکانیک کوانتومی، یک سیستم می‌تواند در چندین حالت به طور هم‌زمان باشد تا زمانی که اندازه‌گیری انجام شود.

۱.۵.۵ تعریف برهم نهی

برهم نهی بیان می‌کند که وضعیت یک سیستم کوانتومی قبل از اندازه‌گیری می‌تواند ترکیبی از چندین حالت ممکن باشد. به بیان ریاضی، یک سیستم کوانتومی می‌تواند به‌صورت ترکیبی خطی از حالت‌های مختلف توصیف شود:

[۱] Superposition

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 + \cdots + c_n\psi_n$$

که در آن:

- ψ: حالت کلی سیستم است.
- $\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_n$: حالت‌های ممکن سیستم هستند.
- $c_1, c_2, \ldots, c_n$: ضرایب مختلط هستند که احتمال یافتن سیستم در هر حالت را مشخص می‌کنند.

ضرایب c_i که به عنوان *دامنه احتمال* شناخته می‌شوند، مربع قدر مطلق آن‌ها ($|c_i|^2$) احتمال مشاهده سیستم در آن حالت را هنگام اندازه‌گیری بیان می‌کند.

۶.۵ فروپاشی تابع موج [۲]

در مکانیک کوانتومی، تا زمانی که هیچ اندازه‌گیری‌ای انجام نشده است، سیستم در حالت برهم نهی قرار دارد و می‌تواند هم‌زمان در چندین حالت باشد. اما به محض اینکه اندازه‌گیری صورت گیرد، تابع موج به یکی از حالت‌های خاص فروپاشی می‌کند. این پدیده به عنوان **فروپاشی تابع موج** شناخته می‌شود. به عنوان مثال، اگر حالت یک الکترون در یک جعبه ترکیبی از چندین حالت مختلف باشد، بعد از اندازه‌گیری انرژی، الکترون در یکی از این حالت‌های خاص خواهد بود.
به طور کلی، اگر تابع موج سیستم قبل از اندازه‌گیری به صورت زیر باشد:

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 + \cdots + c_n\psi_n$$

که در آن:

- $\psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_n$ حالت‌های ممکن سیستم هستند.
- $c_1, c_2, \ldots, c_n$ ضرایب مختلط هستند که بیانگر احتمال هر حالت‌اند.

بعد از انجام اندازه‌گیری، تابع موج سیستم به یکی از حالت‌های ممکن ψ_i فروپاشی می‌کند و سیستم دیگر در حالت برهم نهی قرار ندارد. احتمال اینکه سیستم در حالت ψ_i مشاهده شود برابر است با:

$$P(\psi_i) = |c_i|^2$$

این فروپاشی تابع موج تنها در لحظه‌ای اتفاق می‌افتد که اندازه‌گیری صورت گیرد و تا پیش از آن، سیستم در ترکیبی از حالت‌های ممکن قرار دارد.

---
[۲] Collapse Wavefunction

مثال معروف: گربه شرودینگر

یکی از معروف‌ترین مثال‌های توضیح‌دهنده برهم نهی، **آزمایش ذهنی گربه شرودینگر** است. این آزمایش یکی از شناخته‌شده‌ترین مثال‌های مکانیک کوانتومی است که توسط **اروین شرودینگر** در سال ۱۹۳۵ پیشنهاد شد. این آزمایش برای نشان دادن مفهوم **برهم نهی** و **فروپاشی تابع موج** در مکانیک کوانتومی ارائه شده است.

شرح آزمایش

در این آزمایش، یک گربه درون جعبه‌ای بسته قرار داده شده است که در کنار آن:

- یک اتم رادیواکتیو،
- یک آشکارساز متصل به سم،
- و یک بطری سم قرار دارد.

اگر اتم رادیواکتیو تجزیه شود، آشکارساز سم را آزاد کرده و گربه را می‌کشد. اما طبق قوانین مکانیک کوانتومی، قبل از اندازه‌گیری، اتم در حالت برهم نهی قرار دارد؛ یعنی هم تجزیه شده و هم تجزیه نشده است. به همین دلیل، تا زمانی که جعبه باز نشود و مشاهده‌ای انجام نشود، گربه به‌طور هم‌زمان در حالت زنده و مرده قرار دارد.

برهم نهی و فروپاشی تابع موج

طبق اصول مکانیک کوانتومی، حالت کلی سیستم (اتم و گربه) به‌صورت ترکیبی از دو حالت ممکن توصیف می‌شود:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\psi_{\text{زنده}} + \psi_{\text{مرده}} \right)$$

که در آن:

- $\psi_{\text{زنده}}$: حالت گربه زنده است.
- $\psi_{\text{مرده}}$: حالت گربه مرده است.

به محض اینکه جعبه باز شود و مشاهده‌ای صورت گیرد، تابع موج سیستم فروپاشی می‌کند و گربه یا زنده است یا مرده.

آزمایش گربه شرودینگر به‌خوبی نشان می‌دهد که چگونه قوانین مکانیک کوانتومی می‌توانند منجر به پدیده‌های عجیب و غیرقابل تصور در دنیای ماکروسکوپی شوند. این آزمایش بر این نکته تأکید دارد که در دنیای کوانتومی، مشاهده و اندازه‌گیری نقش مهمی در تعیین وضعیت سیستم‌ها دارند.

تفاوت با مکانیک کلاسیک

در مکانیک کلاسیک، یک سیستم فیزیکی همیشه در یک حالت مشخص و معین قرار دارد. اما در مکانیک کوانتومی، سیستم‌ها تا زمان اندازه‌گیری در ترکیبی از حالت‌های مختلف قرار دارند و تنها پس از انجام اندازه‌گیری به یک حالت معین فروپاشی می‌کنند.

۷.۵ درهم‌تنیدگی کوانتومی [۳]

درهم‌تنیدگی کوانتومی یک پدیده بنیادی در مکانیک کوانتومی است که به ارتباط عمیق بین ذرات مختلف اشاره دارد. این پدیده به این معناست که وضعیت یک ذره می‌تواند به طور آنی بر وضعیت ذره دیگری تأثیر بگذارد، حتی اگر این دو ذره فاصله زیادی از هم داشته باشند. به عبارت دیگر، اگر یکی از ذرات درهم‌تنیده اندازه‌گیری شود، وضعیت ذره دیگر به طور فوری مشخص می‌شود، بدون توجه به فاصله‌ای که بین آن‌ها وجود دارد.

درهم‌تنیدگی کوانتومی زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند ذره در یک سیستم کوانتومی با یکدیگر برهمکنش کرده و به گونه‌ای مرتبط شوند که حالت کوانتومی هیچ یک از آن‌ها نتواند به طور مستقل توصیف شود. این ارتباط می‌تواند شامل ویژگی‌هایی مانند اسپین، مکان و تکانه باشد. برای مثال، اگر دو الکترون در یک حالت درهم‌تنیده قرار داشته باشند و اسپین یکی از آن‌ها اندازه‌گیری شود، اسپین الکترون دیگر نیز به طور آنی مشخص خواهد شد.

درهم‌تنیدگی کوانتومی از نظر نظریه‌پردازان مانند آلبرت اینشتین به عنوان "عمل شبح‌وار در فاصله" توصیف شده است. اینشتین و همکارانش در پارادوکس EPR به بررسی این پدیده پرداختند و متوجه شدند که درهم‌تنیدگی می‌تواند اطلاعات را به شکلی منتقل کند که با اصول فیزیک کلاسیک سازگار نیست. این پدیده اساساً نشان‌دهنده وجود نوعی ارتباط غیرمحلی بین ذرات است. برای مثال، اگر دو الکترون در حالت درهم‌تنیده باشند و یکی از آنها اندازه‌گیری شود، وضعیت چرخش (spin) الکترون دوم بلافاصله مشخص خواهد شد، حتی اگر این دو الکترون کیلومترها از یکدیگر فاصله داشته باشند۱

۱.۷.۵ آزمایش‌های مشاهده درهم‌تنیدگی کوانتومی

چندین آزمایش تجربی وجود دارد که وجود درهم‌تنیدگی کوانتومی را تأیید کرده است:

۲.۷.۵ آزمایش‌های بل [۴]

جان بل در سال ۱۹۶۴ رابطه‌ای ریاضی ارائه داد که می‌توانست پیش‌بینی‌های نظریه کوانتومی را با نظریه‌های محلی مقایسه کند. آزمایش‌هایی که بعداً انجام شدند، نقض نابرابری بل را نشان دادند و بدین ترتیب وجود نا موضعیت را تأیید کردند.

---

[۳] Entanglement Quantum

[۴] Bell 's Theorem

قضیه بل

قضیه بل توسط فیزیکدان ایرلندی، جان استوارت بل، در سال ۱۹۶۴ مطرح شد. این قضیه به‌دنبال بررسی این موضوع است که آیا می‌توان یک تفسیر محلی از واقعیت (واقعیت محلی) را با استفاده از نظریه‌های متغیرهای پنهان توضیح داد یا خیر. بل با استفاده از نامعادلاتی به نام "نامعادلات بل" نشان داد که اگر مکانیک کوانتومی درست باشد، باید برخی از پیش‌بینی‌های آن با نتایج تجربی همخوانی داشته باشد که نمی‌توانند توسط نظریه‌های محلی توضیح داده شوند.

شرح آزمایش

آزمایش بل شامل دو ذره درهم‌تنیده است که به دو آزمایشگر (معمولاً با نام‌های آلیس و باب) ارسال می‌شوند. هر آزمایشگر می‌تواند یکی از چندین تنظیمات اندازه‌گیری را انتخاب کند. بر اساس نظریه کوانتومی، وضعیت اندازه‌گیری شده توسط آلیس باید بلافاصله بر وضعیت اندازه‌گیری شده توسط باب تأثیر بگذارد، حتی اگر این دو ذره فاصله زیادی از یکدیگر داشته باشند.

نتایج آزمایش

اگر همبستگی اندازه‌گیری‌ها بین آلیس و باب بیشتر از مقداری خاص باشد (که به نام نابرابری بل شناخته می‌شود)، این نشان‌دهنده نقض واقعیت محلی است. در واقع، نتایج آزمایشات مختلف نشان داده‌اند که پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی با نتایج تجربی همخوانی دارند و بنابراین فرضیه وجود یک واقعیت پنهان محلی رد می‌شود.

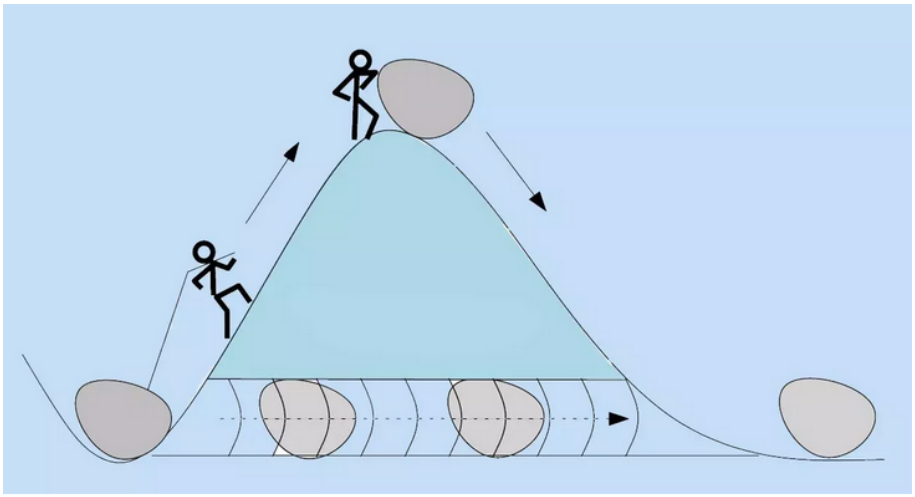
اهمیت و تأثیرات

آزمایش بل نه تنها به تأیید مکانیک کوانتومی کمک کرده است بلکه سوالاتی عمیق درباره ماهیت واقعیت و ارتباطات در سطح کوانتومی را مطرح کرده است. این آزمایش‌ها به ما نشان می‌دهند که جهان به گونه‌ای عمل می‌کند که با تصورات کلاسیک ما از واقعیت سازگار نیست و مفاهیم جدیدی را برای درک پدیده‌های طبیعی نیاز داریم.

در نهایت، آزمایش بل نقطه عطفی در فیزیک کوانتومی است که به ما کمک می‌کند تا درک بهتری از رفتار ذرات زیراتمی و ارتباطات غیرمحلی بدست آوریم.

۳.۷.۵ آزمایش‌های فریدمن و کلاورز

در سال ۱۹۷۲، این دو فیزیکدان با اندازه‌گیری قطبش فوتون‌هایی که قبلاً با یکدیگر برهمکنش داشته‌اند، موفق شدند وجود درهم‌تنیدگی کوانتومی را به طور تجربی اثبات کنند.



شکل ۱.۵: تونل زنی

۴.۷.۵ آزمایش آلن اسپکت

در سال ۱۹۸۲، آلن اسپکت آزمایشی انجام داد که دقت بیشتری داشت و وجود درهم‌تنیدگی را با قطعیت بالاتری تأیید کرد. او نشان داد که رفتار فوتون‌های درهم‌تنیده مطابق با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی است.

این آزمایش‌ها نه تنها وجود درهم‌تنیدگی کوانتومی را تأیید کردند بلکه همچنین چالش‌هایی برای نظریه‌های کلاسیک فیزیک مانند نظریه نسبیت اینشتین ایجاد کردند، زیرا اطلاعات به نظر می‌رسد سریع‌تر از سرعت نور منتقل می‌شود.

۸.۵ تونل‌زنی کوانتومی [۵]

تونل‌زنی کوانتومی یک پدیده بنیادی در مکانیک کوانتومی است که به توانایی یک ذره برای عبور از یک مانع پتانسیل اشاره دارد، حتی زمانی که انرژی آن به اندازه کافی برای عبور از آن مانع در فیزیک کلاسیک نیست. این پدیده به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ به وجود می‌آید و می‌تواند در مقیاس‌های میکروسکوپی مشاهده شود.

تونل‌زنی کوانتومی به معنای عبور ذرات بنیادی از سدهای پتانسیل است که در حالت کلاسیک، این عبور غیرممکن به نظر می‌رسد. به عنوان مثال، اگر یک ذره در یک چاه پتانسیل قرار داشته باشد و انرژی کافی برای عبور از دیواره چاه نداشته باشد، طبق مکانیک کلاسیک نمی‌تواند از آن خارج شود. اما در دنیای کوانتومی، این ذره می‌تواند با احتمال مشخصی از طریق تونل زدن از دیواره چاه عبور کند.

این پدیده در چندین فرآیند طبیعی و تکنولوژیکی نقش دارد، از جمله:

[۵] Tunneling Quantum

- **واپاشی رادیواکتیو**: ذرات آلفا می‌توانند با تونل زدن از هسته اتم خارج شوند، حتی اگر انرژی لازم برای عبور از سد پتانسیل هسته را نداشته باشند.
- **واکنش‌های هسته‌ای**: تونل‌زنی کوانتومی در فرآیندهای همجوشی هسته‌ای در ستارگان، مانند خورشید، نیز مشاهده می‌شود.

۱.۸.۵ آزمایش‌های مشاهده تونل‌زنی کوانتومی

چندین آزمایش تجربی وجود دارد که وجود تونل‌زنی کوانتومی را تأیید کرده‌اند:

- **آزمایش‌های دانشگاه گریفیث**: محققان با استفاده از «آتوساعت» (attoclock) زمان لازم برای عبور الکترون‌ها از اتم هیدروژن را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که زمان تونل‌زنی کمتر از ۸.۱ آتوثانیه است.
- **میکروسکوپ‌های تونلی**: پژوهشگران با استفاده از تونل‌زنی کوانتومی موفق به ساخت میکروسکوپ‌هایی شدند که امکان مشاهده تک‌تک اتم‌ها را فراهم کردند.
- **تحقیقات در ابرهای بین ستاره‌ای**: پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تونل‌زنی کوانتومی ممکن است در واکنش‌های شیمیایی در ابرهای گاز و غباری بین ستاره‌ها نقش داشته باشد.

تونل‌زنی کوانتومی نه تنها یک مفهوم نظری مهم است بلکه کاربردهای عملی زیادی نیز دارد، از جمله در فناوری‌های نیمه‌رسانا و الکترونیکی مثل دیودهای تونلی و ترانزیستورهای وابسته به میدان.

کاربردهای مکانیک کوانتومی

مکانیک کوانتومی پایه‌گذار بسیاری از فناوری‌های مدرن است:

- **ترانزیستورها و مدارهای الکترونیکی**: اساس کامپیوترها و دستگاه‌های الکترونیکی مدرن.
- **لیزرها**: استفاده در مخابرات نوری، پزشکی و صنایع مختلف.
- **MRI (تصویربرداری تشدید مغناطیسی)**: فناوری مورد استفاده در تشخیص بیماری‌ها.
- **رمزنگاری کوانتومی**: ارتباطات امن با استفاده از اصول کوانتومی.

فصل ۶

تفاوت‌های اساسی مکانیک کوانتومی با مکانیک کلاسیک

۱.۶ قطعیت در مقابل احتمالات

در مکانیک کلاسیک، با دانستن شرایط اولیه سیستم می‌توان آینده آن را دقیقاً پیش‌بینی کرد. اما در مکانیک کوانتومی، تنها می‌توان احتمالات وقوع حالت‌های مختلف را تعیین کرد.

۲.۶ هم‌زمانی حالت‌ها

در مکانیک کلاسیک، سیستم همیشه در یک حالت مشخص است، اما در مکانیک کوانتومی، سیستم می‌تواند در چندین حالت به طور هم‌زمان باشد (اصل برهم نهی).

۳.۶ تمیز ناپذیری ذرات

تمیز ناپذیری ذرات در مکانیک کوانتومی به معنای عدم توانایی در تشخیص و تفکیک ذرات یکسان است. این ویژگی به ویژه در مورد ذرات بنیادی مانند الکترون‌ها و فوتون‌ها که از نظر خواص ذاتی یکسان هستند، صادق است.

در مکانیک کوانتومی، وقتی دو یا چند ذره یکسان (مانند الکترون‌ها) در یک سیستم قرار می‌گیرند، نمی‌توان آن‌ها را به طور مستقل توصیف کرد. به عبارت دیگر، وضعیت یک ذره نمی‌تواند به طور جداگانه از وضعیت سایر ذرات توصیف شود. این ویژگی به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و رفتار تابع موج ذرات است.

به همین دلیل، اگر دو الکترون در یک سیستم وجود داشته باشند، نمی‌توان گفت که کدام الکترون در کدام موقعیت قرار دارد؛ بلکه تنها می‌توان احتمال حضور آن‌ها را تعیین کرد.

جمع بندی تفاوت با مکانیک کلاسیک

در مکانیک کلاسیک:

- **قابلیت تمایز**: می‌توانیم دو ذره مشابه را بر اساس موقعیت یا سرعت آن‌ها شناسایی کنیم. برای مثال، اگر دو گلوله مشابه در یک جعبه باشند، می‌توانیم بگوییم که کدام گلوله در کجا قرار دارد.
- **توصیف مستقل**: هر ذره می‌تواند به طور مستقل توصیف شود و وضعیت آن به راحتی قابل پیش‌بینی است.

در مکانیک کوانتومی:

- **عدم قابلیت تمایز**: دو ذره مشابه نمی‌توانند از یکدیگر تمیز داده شوند. برای مثال، اگر دو الکترون با هم برهمکنش کنند، نمی‌توان گفت که کدام یک از آن‌ها کدام رفتار را نشان می‌دهد.
- **توصیف وابسته**: وضعیت هر ذره به وضعیت سایر ذرات وابسته است و نمی‌توان آن‌ها را به طور مستقل توصیف کرد.

این تمیز ناپذیری نه تنها بر روی ویژگی‌های بنیادی فیزیک تأثیر می‌گذارد بلکه موجب بروز پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی نیز می‌شود که در آن وضعیت یک ذره بلافاصله بر وضعیت دیگری تأثیر می‌گذارد، حتی اگر فاصله زیادی بین آن‌ها وجود داشته باشد.
به طور خلاصه، تمیز ناپذیری ذرات یکی از ویژگی‌های کلیدی مکانیک کوانتومی است که تفاوت‌های اساسی با فیزیک کلاسیک ایجاد می‌کند و موجب تغییر در نحوه تفکر ما درباره‌ی طبیعت ماده و تعاملات آن می‌شود.

۴.۶ چرا در مکانیک کوانتومی اثر ناظر وجود دارد؟

در فیزیک کلاسیک، مشاهده و اندازه‌گیری معمولاً تأثیری بر روی پدیده‌ها ندارند و می‌توان آن‌ها را بدون تغییر در وضعیتشان بررسی کرد. اما در مکانیک کوانتومی، ناظر بخشی از سیستم است و عمل مشاهده خود باعث تغییر در وضعیت سیستم می‌شود. طبق نظریه‌های موجود، ذهن ناظر می‌تواند بر روی ذرات تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، هنگامی که ناظر توجه خود را به یک الکترون معطوف می‌کند، آن الکترون به حالت قابل مشاهده‌ای تبدیل می‌شود و در غیاب این توجه، ممکن است دوباره به حالت انرژی یا احتمالی خود بازگردد.
اثر ناظر در مکانیک کوانتومی نه تنها چالش‌هایی برای فهم واقعیت عینی ایجاد می‌کند بلکه همچنین سوالات عمیقی درباره ماهیت واقعیت و رابطه بین ذهن و ماده مطرح می‌کند. این پدیده نشان‌دهنده پیچیدگی‌های دنیای زیراتمی است که با قوانین فیزیک کلاسیک قابل توضیح نیستند.

۱.۴.۶ ماهیت برهم‌نهی و اندازه‌گیری

همانطور که گفته شد در مکانیک کوانتومی، ذرات می‌توانند در حالت‌های مختلف به صورت همزمان وجود داشته باشند، که به این حالت‌ها برهم‌نهی می‌گویند. وقتی ناظر اقدام به اندازه‌گیری می‌کند، این برهم‌نهی فرو می‌ریزد و ذره به یکی از حالت‌های ممکن تبدیل می‌شود.

۵.۶ تعریف اثر ناظر

اثر ناظر به تأثیر عمل مشاهده یا اندازه‌گیری بر روی وضعیت یک سیستم کوانتومی اشاره دارد. این پدیده نشان می‌دهد که چگونه عمل مشاهده می‌تواند حالت‌های کوانتومی را تغییر دهد و به یک حالت خاص تبدیل کند.

۶.۶ تعریف اثر اندازه‌گیری

اثر اندازه‌گیری به فرآیند خاصی اشاره دارد که در آن یک کمیت فیزیکی (مانند موقعیت یا تکانه) اندازه‌گیری می‌شود. این عمل باعث می‌شود که حالت سیستم از یک برهم‌نهی احتمالی به یک حالت خاص کاهش یابد.

۷.۶ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

یکی از پیامدهای مهم اثر اندازه‌گیری، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است که بیان می‌کند نمی‌توان همزمان موقعیت و تکانه یک ذره را با دقت دلخواه اندازه‌گیری کرد. این اصل به وضوح نشان‌دهنده تأثیر اندازه‌گیری بر روی سیستم است.

۸.۶ نتایج مختلف

در حالی که اثر ناظر بیشتر به تأثیر مشاهده بر روی سیستم اشاره دارد، اثر اندازه‌گیری به نتایج خاصی که از این عمل به دست می‌آید مربوط می‌شود. به عبارت دیگر، اثر ناظر ممکن است شامل جنبه‌های فلسفی و نظری باشد، در حالی که اثر اندازه‌گیری بیشتر بر روی جنبه‌های عملی و تجربی متمرکز است.

به طور خلاصه، اثر ناظر و اثر اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی به هم مرتبط هستند و هر دو بر تأثیر مشاهده بر روی سیستم‌های کوانتومی تأکید دارند، اما هر کدام جنبه‌های خاص خود را دارند که باید در نظر گرفته شوند.

۱.۸.۶ نقش مشاهده در واقعیت

۲.۸.۶ واقعیت عینی

برخی نظریه‌ها پیشنهاد می‌کنند که واقعیت عینی وجود ندارد مگر اینکه ناظری برای مشاهده آن وجود داشته باشد. این موضوع باعث شده است که برخی فیزیکدانان به بررسی رابطه بین ذهن و ماده بپردازند و این سؤال را مطرح کنند که آیا ناظر حتماً باید انسانی باشد یا ابزارهای غیرآگاه نیز می‌توانند نقش ناظر را ایفا کنند.

۳.۸.۶ نتایج تجربی

آزمایشات مختلف نشان داده‌اند که هر جا ناظری برای اندازه‌گیری وجود داشته باشد، آن چیز به وجود می‌آید و در غیاب اندازه‌گیری، ماده به یک انرژی نادیدنی تبدیل می‌شود. این نکته نشان‌دهنده این است که عمل مشاهده نه تنها یک عمل فیزیکی بلکه یک عمل تأثیرگذار بر واقعیت است.

به طور کلی، اثر ناظر در مکانیک کوانتومی نشان‌دهنده ارتباط عمیق بین مشاهده و واقعیت است. این پدیده هنوز موضوعی برای تحقیق و بحث‌های فلسفی باقی مانده و چالش‌هایی برای فهم ما از دنیای زیراتمی ایجاد کرده است.

اصل عدم قطعیت از دیدگاه فیزیکی و فلسفی

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بیان می‌کند که نمی‌توان همزمان مقادیر دقیق مکان و تکانه یک ذره را اندازه‌گیری کرد:

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \tag{۱.۶}$$

۱. اثر اندازه‌گیری و ذات جهان

می‌توان بیان کرد که:

> اثر اندازه‌گیری جزئی از ذات جهان است و ما آن را از داخل این جهان مشاهده می‌کنیم، نه از خارج آن.

به عبارت دیگر، هر اندازه‌گیری همواره با برهم‌کنشی با سیستم همراه است و این برهم‌کنش خود باعث محدودیت در دقت شناخت می‌شود. در مکانیک کوانتومی، حتی در حد نظری، مشاهده یک ذره بدون برهم‌کنش با آن امکان‌پذیر نیست، زیرا ذره ماهیتی موجی و برهم‌کنش‌پذیر دارد.

۲. مکانیک کوانتومی به عنوان ابزار شناخت

مکانیک کوانتومی ابزاری برای شناخت جهان است. از دیدگاه کانت:

- **پدیده‌ها (Phenomena)**: آنچه ما تجربه و اندازه‌گیری می‌کنیم.
- **ذات اشیاء به خودی خود (Noumena)**: غیرقابل دسترسی و فراتر از تجربه مستقیم.

در کوانتوم، آنچه اندازه‌گیری می‌کنیم، ویژگی‌های قابل مشاهده‌ی تابع موج است، و ذات واقعی ذره پیش از اندازه‌گیری، در بسیاری از تفاسیر (مثل تفسیر کپنهاگی) تعریف‌نشده باقی می‌ماند.

۳. نقش ثابت پلانک

ثابت پلانک $\hbar$ تعیین‌کنندهٔ حد بنیادی عدم قطعیت است. از دیدگاه ریاضی:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar, \tag{۲.۶}$$

که نشان‌دهنده‌ی ناهم‌ساز بودن عملگرهای مکان و تکانه است.

از دیدگاه فیزیکی و فلسفی، $\hbar$ معیاری است برای «دانه‌دانه بودن جهان» و محدودیت شناختی که از داخل جهان تجربه می‌کنیم.

۴. جمع‌بندی

- اصل عدم قطعیت نه تنها محدودیت ریاضی–فیزیکی است، بلکه بازتابی از محدودیت شناختی جهان از دیدگاه داخل جهان است.
- اثر اندازه‌گیری نمونه‌ای از اصل عدم قطعیت است، ولی اصل عدم قطعیت بنیادی‌تر و مستقل از ابزارهای ماست.
- به بیان کانتی، مکانیک کوانتومی ابزار شناخت جهان است، ولی ذات جهان (Noumena) فراتر از شناخت مستقیم باقی می‌ماند.

فصل ۷

اصول مورد انتظار اینشتین از مکانیک کوانتومی

آلبرت اینشتین به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین فیزیکدانان تاریخ، نظرات و انتظارات خاصی درباره مکانیک کوانتومی داشت که با چالش‌های اساسی مواجه بود. اصولی که او به آن‌ها اعتقاد داشت و در نظریات کوانتومی با آن‌ها مشکل داشت، شامل موارد زیر است:

۱.۷ واقع‌گرایی [۱]

اینشتین معتقد بود که اشیاء دارای ویژگی‌های مشخصی هستند حتی زمانی که اندازه‌گیری نمی‌شوند. به عبارت دیگر، او بر این باور بود که باید مقادیر مشخصی برای ویژگی‌های فیزیکی وجود داشته باشد، حتی اگر ما آن‌ها را مشاهده نکنیم. این اصل به‌ویژه در تضاد با ایده‌های مکانیک کوانتومی است که می‌گوید ذرات تا زمانی که اندازه‌گیری نشوند، فاقد مقادیر مشخص هستند.

۲.۷ محلی بودن [۲]

اینشتین به اصل محلی بودن اعتقاد داشت که به این معناست که هیچ تأثیری نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور منتقل شود. او این مفهوم را "عمل شبحوار در فاصله" نامید و نسبت به نتایج تجربی مکانیک کوانتومی که نشان‌دهنده تأثیرات غیرمحلی بودند، شک و تردید داشت. او بر این باور بود که چنین تأثیراتی با نظریه نسبیت خاص در تضاد است.

---

[۱] Realism
[۲] Locality

۳.۷ عدم قطعیت [۳]

اینشتین همچنین نسبت به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ انتقاد داشت. او اعتقاد داشت که باید بتوان همزمان مکان و تکانه یک ذره را با دقت دلخواه تعیین کرد و این محدودیت‌ها به‌نوعی ناشی از نقص در نظریه‌های موجود هستند.

۴.۷ اختیار [۴]

اینشتین بر این باور بود که انتخاب‌های ما در آزمایش‌ها باید آزادانه باشند و تحت تأثیر متغیرهای پنهان قرار نگیرند. او معتقد بود که اگر مکانیک کوانتومی درست باشد، برخی از اصول بنیادی مانند اختیار نقض می‌شوند.

۵.۷ چالش‌های مکانیک کوانتومی برای اصول اینشتین

نظرات اینشتین درباره مکانیک کوانتومی نه تنها چالش‌هایی برای این نظریه ایجاد کرد، بلکه منجر به بحث‌های عمیق و مناظراتی با دیگر فیزیکدانان مانند نیلز بور شد. این مباحثات همچنان در دنیای فیزیک مدرن تأثیرگذار هستند و به توسعه تفسیرهای جدید از مکانیک کوانتومی کمک کرده‌اند. مکانیک کوانتومی به‌طور مداوم اصولی که اینشتین به آن‌ها اعتقاد داشت را به چالش کشیده است. این اصول شامل واقع‌گرایی، محلی بودن، عدم قطعیت و اختیار هستند. آزمایش‌های مختلفی برای بررسی این اصول طراحی شده‌اند که نتایج آن‌ها به‌طور قابل توجهی با پیش‌بینی‌های اینشتین در تضاد است.

۱.۵.۷ آزمایش‌های کلیدی

۱. آزمایش بل

آزمایش بل به‌ویژه برای بررسی درهم‌تنیدگی کوانتومی طراحی شده است. این آزمایش نشان می‌دهد که اگر دو ذره در هم تنیده شوند، اندازه‌گیری وضعیت یکی از آن‌ها بلافاصله بر وضعیت دیگری تأثیر می‌گذارد، حتی اگر فاصله زیادی بین آن‌ها وجود داشته باشد. نتایج نشان داده‌اند که همبستگی اندازه‌گیری‌ها بالاتر از حد نابرابری بل است، که به معنای نقض واقع‌گرایی محلی است و فرضیه وجود یک واقعیت پنهان محلی را رد می‌کند.

---

[۳] Principle Uncertainty
[۴] Freedom

۲. آزمایش EPR (اینشتین ـ پودولسکی ـ روزن)

این آزمایش فکری که توسط اینشتین و همکارانش طراحی شد، به بررسی درهم‌تنیدگی و مفهوم واقعیت در مکانیک کوانتومی پرداخته است. اینشتین ادعا کرد که مکانیک کوانتومی نمی‌تواند توصیف کاملی از واقعیت ارائه دهد و باید یک نظریه جایگزین وجود داشته باشد.

۳. آزمایش‌های تأخیری ویلر

این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که تصمیمات اندازه‌گیری می‌توانند بر رفتار ذرات تأثیر بگذارند، حتی پس از اینکه ذرات از یکدیگر جدا شده‌اند. این نتایج به چالش کشیدن مفهوم محلی بودن کمک می‌کند، زیرا نشان می‌دهد که اطلاعات می‌توانند بدون تأخیر بین ذرات منتقل شوند.

۶.۷ ۴. آزمایش‌های جدید

آزمایش‌های جدیدی که در سطح جهانی انجام می‌شوند، با استفاده از داده‌های تصادفی ایجاد شده توسط کاربران، سعی در بررسی نظریه‌های واقع‌گرایی محلی دارند. این آزمایش‌ها به دنبال تأیید یا رد فرضیات اینشتین هستند و نشان داده‌اند که مکانیک کوانتومی به نقض واقع‌گرایی محلی می‌پردازد.

نتایج این آزمایش‌ها به وضوح نشان‌دهنده چالش‌هایی برای اصول مورد انتظار اینشتین از مکانیک کوانتومی هستند. با نقض **واقع‌گرایی** و **محلی بودن** ، مکانیک کوانتومی تصویری جدید و غیرقابل تصور از جهان را ارائه می‌دهد که با تصورات کلاسیک سازگار نیست.

فصل ۸

اصل علیت در فیزیک

علیت در فیزیک به معنای رابطه‌ای است که بین یک رویداد (معلول) و یک یا چند رویداد دیگر (علت) وجود دارد. این مفهوم به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: **علیت کلاسیک** و **علیت کوانتومی**.

۱.۸ علیت کلاسیک

در فیزیک کلاسیک، اصل علیت به این صورت تعریف می‌شود که هر حادثه یا رویداد معلول یک یا چند علت است. اگر وضعیت فعلی یک سیستم را بدانیم، می‌توانیم با استفاده از قوانین فیزیکی، رفتار آینده آن را پیش‌بینی کنیم. این دیدگاه به‌ویژه در نظریه‌های نیوتنی و لاپلاس مشهود است، جایی که فرض بر این است که جهان تحت قوانین تغییرناپذیر قرار دارد و همه چیز قابل پیش‌بینی است.

به طور خلاصه اگر بخواهیم اصل علیت و تاثیر علت و معلول را بیان کنیم می گوییم یک جسم یر جسم دیگر تاثیر گذاشت اگر وضعیت حرکتی آنرا تغییر دهد. این بدان معناست که هرگونه تاثیری قابل تحویل به تغییر در حرکت جسم با اجزا آن است.

۲.۸ علیت کوانتومی

در مکانیک کوانتومی، مفهوم علیت با چالش‌هایی مواجه است. در این سطح، رفتار ذرات به‌طور قطعی قابل پیش‌بینی نیست و احتمال‌ها جایگزین قطعیت می‌شوند. به‌عنوان مثال، در سطح زیر اتمی، ممکن است یک علت منجر به چندین معلول مختلف شود و این امر باعث می‌شود که علیت به شکلی متفاوت از فیزیک کلاسیک تفسیر شود.

۳.۸ علیت در نسبیت

در نسبیت، مفهوم علیت به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اصول بنیادی این نظریه قرار می‌گیرد. این تأثیر به چندین جنبه کلیدی مرتبط است:

۱.۳.۸ نسبیت زمان

در نظریه نسبیت خاص، زمان به‌عنوان یک بعد چهارم در کنار سه بعد فضایی در نظر گرفته می‌شود. این بدان معناست که زمان برای ناظران مختلف می‌تواند متفاوت باشد. به‌عبارت دیگر، دو ناظر که با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند، ممکن است رویدادها را در ترتیب‌های متفاوتی مشاهده کنند. این پدیده می‌تواند مفهوم علیت را پیچیده کند، زیرا ترتیب وقوع یک رویداد ممکن است بسته به چارچوب مرجع ناظر متفاوت باشد.

۲.۳.۸ عدم وجود زمان مطلق

در نسبیت خاص، هیچ زمان مطلقی وجود ندارد که بتوان آن را به‌عنوان معیار برای تعیین علت و معلول استفاده کرد. این امر باعث می‌شود که تعریف سنتی علیت—که بر اساس تقدم زمانی علت بر معلول استوار است—به چالش کشیده شود.

۴.۸ شروط علیت در نسبیت

- **سرعت نور به‌عنوان حداکثر سرعت:** طبق نظریه نسبیت، هیچ اطلاعات یا سیگنالی نمی‌تواند با سرعتی بیشتر از سرعت نور حرکت کند. این محدودیت به این معناست که اگر یک رویداد (علت) در یک نقطه از فضا رخ دهد، تأثیر آن (معلول) نمی‌تواند بلافاصله در نقاط دورتر مشاهده شود. بنابراین، ممکن است فاصله زمانی بین علت و معلول برای ناظران مختلف متفاوت باشد.
- **همبستگی بوسیله نیرو:** در چارچوب نظریه نسبیت هر همبستگی و تاثیری میان دو روبداد باید در قالب یکی از نیروهای موجود در طبیعت باشد.

۵.۸ موجبیت

موجبیت [۱] یکی از مفاهیم اساسی در علوم و فلسفه است که نه تنها به روابط علت و معلول اشاره دارد بلکه به پیش‌بینی‌پذیری و ساختار بنیادی جهان نیز مرتبط است. با وجود چالش‌هایی که در دنیای کوانتومی وجود دارد، مفهوم موجبیت همچنان موضوع مهمی برای بحث و بررسی باقی مانده است. این مفهوم در فلسفه و علم به‌ویژه در فیزیک و متافیزیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زیر به برخی از جنبه‌های کلیدی موجبیت اشاره می‌شود:

[۱] Determinism

تعریف موجبیت

۱.۵.۸ رابطه علت و معلول (تعریف سنتی)

موجبیت به این معناست که هر معلولی باید علتی داشته باشد. این رابطه به‌طور سنتی به‌عنوان یک اصل بنیادی در علوم مختلف، از جمله فیزیک، شناخته می‌شود.

۲.۵.۸ پیش‌بینی‌پذیری

در فیزیک کلاسیک، اگر وضعیت فعلی یک سیستم را بدانیم، می‌توانیم با استفاده از قوانین فیزیکی، رفتار آینده آن را پیش‌بینی کنیم. این اصل موجبیت به‌ویژه در نظریه‌های نیوتنی و لاپلاس مشهود است.

موجبیت در فیزیک

۶.۸ موجبیت در فیزیک کلاسیک

در این حوزه، اصل موجبیت به‌طور واضحی بیان شده است. لاپلاس معتقد بود که اگر کسی تمام نیروهای مؤثر بر یک سیستم را بداند، می‌تواند آینده آن را پیش‌بینی کند.

۷.۸ موجبیت در فیزیک کوانتومی

موجبیت در فیزیک کوانتومی به‌طور قابل توجهی با مفهوم کلاسیک آن متفاوت است. این تفاوت‌ها ناشی از ویژگی‌های خاص رفتار ذرات در مقیاس کوانتومی و محدودیت‌های نظریه‌های کلاسیک است.

در مکانیک کوانتومی، مفهوم موجبیت با چالش‌هایی مواجه است. برخی تفسیرها، مانند تفسیر کپنهاگی، به نوعی ناموجبیتی را پیشنهاد می‌کنند، در حالی که تفسیرهای دیگر مانند تفسیر متغیرهای پنهان سعی دارند موجبیت را حفظ کنند.

مفهوم موجبیت

موجبیت به معنای این است که رویدادهای خاصی که به‌طور مستقیم تحت تأثیر رویدادهای دیگر قرار دارند قابل پیش بینی و متعین باشند. در فیزیک کلاسیک،سیستم های فیزیکی با شرایط اولیه مشخص متعین و قابل پیش‌بینی هستند، اما در فیزیک کوانتومی، مشخص و معین بودن سیستم انکان پذیر نیست.

چالش های موجبیت در فیزیک کوانتومی

۱ـ دوگانگی موج ـ ذره

ذرات می‌توانند هم رفتار موجی و هم رفتار ذره‌ای از خود نشان دهند. این دوگانگی موجب می‌شود که پیش‌بینی دقیق رفتار ذرات دشوار باشد.

۲ـ تابع موج

هر سیستم کوانتومی با تابع موج توصیف می‌شود که اطلاعات مربوط به وضعیت آن سیستم را ارائه می‌دهد. احتمال مشاهده یک حالت خاص از طریق مربع قدر مطلق تابع موج محاسبه می‌شود.

۳ـ عدم قطعیت

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بیان می‌کند که نمی‌توان همزمان موقعیت و تکانه یک ذره را با دقت کامل اندازه‌گیری کرد. این عدم قطعیت به موجبیت در سطح زیراتمی تأثیر می‌گذارد و باعث می‌شود که پیش‌بینی‌های کلاسیک ناکافی باشند.

۱.۷.۸ مفهوم سنتی علیت و موجبیت

در تعریف سنتی علیت یک سازوکار مشخص دارد و با تعیّن،یا موجبیت همبسته است. در این تعریف که از زمان ارسطو رایج شده علت مقدم بر معلول است و هیچ معلولی نیست که در گذشته علتی نداشته باشد. پیر لاپلاس، ریاضیدان، فیزیکدان و فیلسوف فرانسوی که مدافع سرسخت جبرگرایی و علیت بود اصل علیت عمومی را این چنین تعریف می کند: "میان رخدادهای اکنون و رخدادهای گذشته اتصال ژرفی وجود دارد، اتصالی که بر این اصل استوار است: چیزی نمی تواند بدون علتی که مقدم بر آن باشد وجود داشته باشد" لاپلاس این تعریف از علیت را از لایبنیتس میگرفت که می گفت همانقدر که ۲×۲=۴ حتمی است، وقوع رخداد ها نیز قطعی خواهد بود.

علیت به معنای سنتی همان تصور عامیانه نزد مردم از زنجیره علل است.دلیل این برداشت باستانی و عامیانه ، توسط پژوهشگران علوم شناختی و رواشناسان —مثل جان پیاژه— بررسی شده است که ما به نوعی در ذهن خود این زنجیره عِلّی را میسازیم. به طور کلی، پیاژه معتقد بود که درک علیت یک فرایند تدریجی است که با رشد شناختی کودک همراه است. او تأکید کرد که کودکان از طریق تعامل با محیط خود و تجربیات مستقیم، مفهوم علیت را شکل می‌دهند و این فرآیند تحت تأثیر مراحل مختلف رشد شناختی قرار دارد.

۸.۸ دیدگاه جان پیاژه در مورد درک علیت

جان پیاژه، روانشناس سوئیسی، در نظریه‌ی خود درباره‌ی رشد شناختی، به بررسی مفهوم علیت و درک آن توسط کودکان پرداخته است. او مراحل مختلف رشد شناختی را شناسایی کرد و نشان داد که چگونه کودکان از طریق تعامل با محیط خود، به تدریج مفهوم علیت را درک می‌کنند.

مراحل درک علیت

مرحله حسی_حرکتی (۰ تا ۲ سالگی)

در این مرحله، کودکان علیت را به صورت ابتدایی تجربه می‌کنند. آن‌ها درک می‌کنند که اعمالشان می‌تواند تأثیراتی بر روی اشیاء داشته باشد، اما این درک هنوز به صورت غیر منطقی و سحری است.

مرحله پیش‌عملیاتی (۲ تا ۷ سالگی)

در این مرحله، کودکان شروع به ایجاد ارتباطات بین رویدادها می‌کنند، اما هنوز نمی‌توانند به طور منطقی نتیجه‌گیری کنند. آن‌ها ممکن است فکر کنند که یک عمل خاص همیشه منجر به یک نتیجه خاص می‌شود، بدون اینکه درک عمیق‌تری از روابط علت و معلولی داشته باشند.

مرحله عملیات عینی (۷ تا ۱۱ سالگی)

در این مرحله، کودکان قادر به تفکر منطقی‌تر هستند و می‌توانند روابط علی و معلولی را بهتر درک کنند. آن‌ها می‌توانند آزمایش‌هایی انجام دهند و نتایج را تحلیل کنند، که نشان‌دهنده‌ی پیشرفت قابل توجهی در فهم علیت است.

مرحله عملیات صوری (۱۱ سالگی به بعد)

در این مرحله، نوجوانان قادر به تفکر انتزاعی و فرضی هستند. آن‌ها می‌توانند فرضیه‌هایی درباره‌ی روابط علی ایجاد کنند و آن‌ها را آزمایش کنند. این توانایی به آن‌ها اجازه می‌دهد تا مفاهیم پیچیده‌تر علیت را درک کنند.

۹.۸ مفهوم علیت در فیزیک

اصل علیت، که بیان می‌کند هر رویدادی علتی دارد و علت آن پیش از معلول رخ می‌دهد، یکی از اصول بنیادی فیزیک کلاسیک است. به طور کلی، علیت در فیزیک مفهومی اساسی است که در فیزیک کلاسیک به وضوح قابل مشاهده است، اما در مکانیک کوانتومی، تفسیر این اصل به شکلی

چالش‌برانگیزتر می‌شود. پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی نشان‌دهنده وجود روابط غیرمحلی در جهان کوانتومی هستند، اما این به معنای نقض علیت یا انتقال سریع‌تر از نور نیست. علیت در تفسیرهای مختلف مکانیک کوانتومی به شکل‌های متفاوتی ظاهر می‌شود. در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم که آیا اصل علیت در مکانیک کوانتومی نقض می‌شود یا خیر.

۱۰.۸ ماهیت تصادفی مکانیک کوانتومی و اصل عدم قطعیت

مکانیک کوانتومی به‌طور اساسی مبتنی بر احتمالات است. وقتی یک سیستم کوانتومی در حالت تداخل (superposition) قرار دارد، نتایج ممکن برای اندازه‌گیری‌ها با استفاده از تابع موج توصیف می‌شود. تا زمانی که اندازه‌گیری انجام نشود، سیستم در حالتی نامعین قرار دارد که تنها احتمالات مختلف برای نتایج ممکن قابل تعیین است. علاوه بر این اصل عدم قطعیت هایزنبرگ نشان می‌دهد که نمی‌توان همزمان موقعیت و سرعت یک ذره را با قطعیت تعیین کرد. این محدودیت‌ها به نوعی به تفسیرهای غیرعادی از علیت منجر شده‌اند و برخی دانشمندان استدلال کرده‌اند که این عدم قطعیت‌ها ممکن است نیاز به بازنگری در مفهوم سنتی علیت داشته باشند.

این وضعیت ممکن است به نظر برسد که اصل علیت نقض شده است، زیرا حتی با داشتن اطلاعات کامل از شرایط اولیه سیستم، نمی‌توان نتیجه نهایی را با قطعیت پیش‌بینی کرد. اما علیت به‌طور کامل از بین نمی‌رود؛ بلکه نتیجه‌ها از طریق احتمالات کوانتومی تعریف می‌شوند که نشان‌دهنده نوعی عدم قطعیت ذاتی است.

۱۱.۸ درهم‌تنیدگی کوانتومی و عدم علیت ظاهری

درهم‌تنیدگی کوانتومی یکی از پدیده‌های کوانتومی است که چالش‌هایی برای علیت ایجاد می‌کند. در این پدیده، دو ذره درهم‌تنیده به شکلی به یکدیگر وابسته می‌شوند که نتایج اندازه‌گیری یکی از آنها به‌طور لحظه‌ای بر دیگری تأثیر می‌گذارد، حتی اگر فاصله زیادی بین آن‌ها وجود داشته باشد.

به نظر می‌رسد که درهم‌تنیدگی نقض علیت را نشان می‌دهد، اما این ارتباط نمی‌تواند برای انتقال اطلاعات سریع‌تر از نور استفاده شود. بنابراین، اصل علیت به معنای انتقال اطلاعات سریع‌تر از نور نقض نمی‌شود.

۱۲.۸ علیت معکوس

یکی از جنجالی‌ترین مباحث در مکانیک کوانتومی، **علیت معکوس** است. این نظریه پیشنهاد می‌کند که آینده می‌تواند بر گذشته تأثیر بگذارد. برخی فیزیکدانان، مانند دیوید پرایس، استدلال کرده‌اند که اگر حالت‌های کوانتومی واقعی باشند، ممکن است علیت معکوس امکان‌پذیر باشد. این ایده می‌تواند به توضیح پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی کمک کند، جایی که ذرات به طور غیرمحلی بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند.

علاوه بر این برخی از محققان بوسیله آزمایش‌های جان ویلر نشان دادند که فوتون‌ها می‌توانند به گونه‌ای عمل کنند که گویی آینده را پیش‌بینی می‌کنند یا اینکه آینده بر رفتار آنها تأثیر می‌گذارد. این

نتایج به چالش‌های فلسفی عمیقی منجر شده‌اند که آیا علیت در دنیای کوانتومی اساساً وجود دارد یا خیر.

۱۳.۸ نقض ناپذیری علیت در مکانیک کوانتومی

بر اساس نتایج آزمایش‌های نابرابری بل (Bell's inequality)، مکانیک کوانتومی بدون متغیرهای پنهان غیرمحلی تایید شده است. با این حال، به نظر من این نتایج به معنای نقض علیت نیستند، زیرا برای نقض علیت رابطه علت و معلولی کلاسیکی که به معنای تغییر در حرکت جسم است نقض نمی شود و بدین معنا همبستگی بین دو رویداد از طریق نیرویی غیر از ۴ نیروی موجود در طبیعت شکل نمی گیرد. علاوه بر این اطلاعات نیز با سرعتی بالاتر از سرعت نور منتقل نمی شود، که بدین معناست که هر دو شرط اصل علیت کلاسیکی برقرار است.

۱.۱۳.۸ آزمایش ویلر و چالش‌های علیت

آزمایش ویلر، که به عنوان **آزمایش گزینش تأخیری** شناخته می‌شود، به چالش‌های عمیق فلسفی و علمی در مورد مفهوم علیت در دنیای کوانتومی می‌پردازد. این آزمایش نشان می‌دهد که چگونه تصمیمات آینده می‌توانند بر نتایج گذشته تأثیر بگذارند، که به نظر می‌رسد نقض‌کننده اصل علیت باشد. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، جان ویلر، یک آزمایش فکری را پیشنهاد کرد که نتیجه‌ی این سوال بود: اگر آزمایشی طراحی شود که محققان بتوانند پارامترهای آن را پس از رها شدن فوتون، اما قبل از رسیدن به حسگر، تغییر دهد، آیا فوتون می‌تواند در میانه‌ی راه، رفتارش را تغییر دهد؟ او چنین سوالی را در مورد نوری که از یک اختروش (هسته‌های فعال و به شدت نورانی کهکشان‌های دوردست) و از طریق لنز گرانشی به زمین می‌رسد، مطرح کرد: آیا نور می‌توانست رفتار خود را به صورت موج یا ذره، بسته به اینکه دانشمندان اینجا در زمین، چگونه می‌خواهند آن را اندازه‌گیری کنند، تغییر دهد؟

دانشمندان در این پژوهش جدید، این ایده‌های جسورانه‌ی ویلر را اثبات کرده‌اند، اما به جای اندازه‌گیری نور یک اختروش، نوری که از ماهواره به زمین منعکس می‌شود، اندازه‌گیری کرده‌اند. در این آزمایش، یک پرتوی لیزر از یک تقسیم‌کننده پرتو [۲] ارسال شد که کمک می‌کرد ماهواره در مدار پایینی زمین بچرخد و نور خود را به زمین منعکس کند. همانطور که نور به زمین بازمی‌گشت، محققان وقت داشتند تا انتخاب کنند که تقسیم‌کننده‌ی دوم فعال شود یا نه؟ بنابراین آنها دقیقا توانستند ایده‌های ویلر را آزمایش کنند: آیا نور توانست بفهمد که آنها چه انتخابی کرده‌اند و رفتار متناسب با آن را انجام دهد؟ بله! دانشمندان گزارش دادند که نور درست مانند پیش‌بینی آزمایش فکری ویلر ، رفتار موج مانند یا ذره مانند خود را بسته به نحوه‌ی آزمایش نشان می‌دهد!

در اینجا جزئیات بیشتری در مورد چگونگی این تأثیرات ارائه می شود.

---

[۲] baem splitter

توضیح آزمایش ویلر

ساختار آزمایش

آزمایش ویلر شامل ارسال فوتون‌ها از طریق یک دستگاه است که دارای دو شکاف است. ناظر می‌تواند تصمیم بگیرد که آیا یکی از شکاف‌ها را ببندد یا باز بگذارد، حتی پس از اینکه فوتون‌ها از شکاف‌ها عبور کرده‌اند.

نتایج غیرمنتظره

اگر ناظر تصمیم بگیرد که یکی از شکاف‌ها را ببندد، الگوی تداخلی که معمولاً برای دو شکاف مشاهده می‌شود، ناپدید می‌شود. این نشان می‌دهد که فوتون‌ها به نوعی «آگاه» هستند که کدام شکاف باز است و بر اساس آن رفتار خود را تغییر می‌دهند.

نتایج آزمایش ویلر به گونه‌ای تفسیر شده‌اند که نشان می‌دهند فوتون‌ها می‌توانند به نوعی از آینده به گذشته تأثیر بگذارند. این ایده به مفهوم علیت معکوس اشاره دارد، جایی که معلول ممکن است قبل از علت خود قرار گیرد.

برخی محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند که این آزمایش نشان‌دهنده نقض اصل علیت است، زیرا ناظر با تصمیم‌گیری در مورد چگونگی اندازه‌گیری فوتون‌ها، بر رفتار آنها در گذشته تأثیر می‌گذارد. این امر باعث ایجاد سوالاتی درباره اینکه آیا علیت به معنای سنتی آن هنوز معتبر است یا خیر، می‌شود.

آزمایش ویلر نه تنها چالش‌های جدی برای مفهوم علیت ایجاد کرده بلکه به بحث‌های عمیق‌تری درباره ماهیت واقعیت و روابط علت و معلول در دنیای کوانتومی منجر شده است. این آزمایش نشان می‌دهد که ممکن است نیاز باشد تا فهم ما از علیت را بازتعریف کنیم تا با ویژگی‌های عجیب و غریب مکانیک کوانتومی سازگار شود.

۲.۱۳.۸ جمع بندی چالش های علیت در مکانیک کوانتومی

- **عدم قطعیت هایزنبرگ**: طبق اصل عدم قطعیت، نمی‌توان همزمان موقعیت و سرعلت یک ذره را با دقت مشخص کرد. این محدودیت‌ها به نوعی مفهوم علیت را پیچیده‌تر می‌کنند.
- **درهم‌تنیدگی کوانتومی**: در این حالت، دو یا چند ذره به‌گونه‌ای با یکدیگر مرتبط هستند که تغییر در وضعیت یکی از آنها بلافاصله بر دیگری تأثیر می‌گذارد، حتی اگر فاصله زیادی بین آنها وجود داشته باشد. این پدیده باعث می‌شود که رابطه علت و معلول به شکل سنتی آن قابل توجیه نباشد.
- **علیت معکوس**: برخی از تفسیرهای جدید پیشنهاد می‌کنند که آینده ممکن است بر گذشته تأثیر بگذارد، که این موضوع به چالش‌های فلسفی عمیق‌تری منجر شده است.

فصل ۹

تفاسیر مکانیک کوانتومی

یک تفسیر مکانیک کوانتومی، [۱] مجموعه‌ای از گزاره‌هایی است که در آن کوشش می‌شود تا توضیح داده شود که چگونه مکانیک کوانتوم می‌تواند درک ما را از طبیعت بالا ببرد. اگر چه مکانیک کوانتوم برای درستی یافته‌هایش آزمایش‌های سخت را از سر می‌گذارند، بسیار از این آزمایش‌ها تفسیرهای گوناگونی دارند.

یک تفسیر از مکانیک کوانتومی عبارت است از مجموعه‌ای از عبارات که تلاش دارند توضیح دهند که مکانیک کوانتومی چگونه ما را به درکی از طبیعت می‌رساند. اگرچه مفاهیم مکانیک کوانتومی با آزمایش های سخت‌گیرانه و دقیق مورد تأیید قرار گرفته‌اند، اما برای بسیاری از این آزمایشها می‌توان تفاسیر متفاوتی ارائه کرد. مکاتب فکری رقیبی وجود دارند که از نظر مسائلی مانند اینکه: "آیا مکانیک کوانتومی به صورت پدیده‌ای قطعی (در مقابل تصادفی و احتمالاتی) قابل درک است؟" یا اینکه: "چه عناصری از مکانیک کوانتومی را می‌توان واقعی دانست؟" با هم اختلاف نظر دارند. با ادامه روند ابراز علاقهٔ شدید فیزیکدانها به این موضوع، این پرسش مورد توجه خاص متخصصان "فلسفهٔ فیزیک" قرار گرفته‌است. آن‌ها معمولاً با تعیین معنی فیزیکی نهادهای ریاضی تئوری، یک تفسیر از مکانیک کوانتومی را به عنوان تفسیری از بیان ریاضی مکانیک کوانتومی در نظر می‌گیرند.

۱.۹ پیش‌زمینهٔ تاریخی

تعریف عبارات مورد استفاده توسط پژوهشگران در نظریهٔ کوانتوم (مانند توابع موجی و مکانیک ماتریسی) طی مراحل پرشماری تکامل یافته‌است. برای نمونه، "شرودینگر" در ابتدا تابع موجی مربوط به الکترون را مربوط به چگالی بار الکتریکی جسمی می‌دانست که در حجم گسترده و احتمالاً نامحدودی از فضا پراکنده شده‌است. "ماکس بورن" آن را به سادگی با یک توزیع احتمالاتی مربوط می‌دانست. اینها دو تفسیر متفاوت از تابع موجی هستند. در یکی از آنها، تابع موجی مربوط است به یک میدان مادی و در دیگری مربوط است به یک توزیع احتمالاتی (به بیان دقیق‌تر، احتمال اینکه یک کوانتوم از بار الکتریکی در هر نقطهٔ خاصی از ابعاد فضایی واقع شده باشد).

[۱] An interpretation of quantum mechanics

در کنار یک رویکرد کاملاً "ابزار گرایانه" که هرگونه نیاز به توضیح را رد می‌کند (دیدگاهی که در این نقل قول معروف از "دیوید مرمین" بیان شده‌است: "خفه شو و محاسبه کن"، هرچند اغلب به اشتباه به "ریچارد فاینمن" نسبت داده می‌شود) به‌طور سنتی، "تفسیر کوپنهاگ" شایع‌ترین تفسیر در میان فیزیکدانها بود. با این وجود، "تفسیر دنیاهای متعدد" هم در حال به دست آوردن مقبولیت است. یک نظرسنجی جنجالی از ۷۲ کیهان‌شناس و نظریه‌پرداز میدان کوانتومی برجسته، که در نشریهٔ "فیزیک نامیرایی" در سال ۱۹۹۴ منتشر شد، نشان داد که ٪از آنها، از جمله "استیون هاوکینگ" و دو برندهٔ جایزهٔ نوبل، "مورای گل‌ـ مان" و "ریچارد فینمن"، از تفسیر دنیاهای متعدد پشتیبانی می‌کردند. به علاوه، تفسیر ابزارگرایانه به وسیلهٔ پیشنهاد هایی برای آزمایش های قابل تحریف که ممکن است روزی باعث تمایز تفاسیر شوند، به چالش کشیده شده‌است. آزمایشهایی مانند اندازه‌گیری هوشیاری در هوش مصنوعی. چنین چالشی را محاسبات کوانتومی هم می‌توانند ایجاد کنند.

۲.۹ طبیعت تفسیر

کم و بیش همهٔ تفاسیر از مکانیک کوانتومی در دو ویژگی اشتراک دارند: نخست اینکه آن‌ها تفاسیر "فرمولاسیون" هستند، یعنی تفاسیری از مجموعه‌ای از معادلات و فرمولها برای تولید نتایج و پیش‌بینی‌ها. دوم اینکه آن‌ها تفاسیری از "پدیده‌شناسی" هستند، یعنی تفاسیری از مجموعه‌ای از مشاهدات، که هم شامل مشاهداتی می‌شوند که از راه پژوهش تجربی به دست می‌آیند و هم مشاهدات "ذهنی" که رسمیت کمتری دارند (این حقیقت که انسانها همواره جهان را به صورت بدون ابهام می‌بینند در تفسیر مکانیک کوانتومی اهمیت دارد). ویژگی‌هایی که در میان تفاسیر متفاوتند عبارتند از "هستی‌شناسی" و "معرفت‌شناسی". این مباحث با این موضوع ارتباط دارند که نظریهٔ تفسیر شده واقعاً در مورد چه چیزی است. یک پدیده ممکن است تحت یک تفسیر با دید هستی‌شناسی نگریسته شود و تحت تفسیر دیگر با دید معرفت‌شناسی. برای نمونه "اختیار" (در مقابل جبر) را می‌توان به وجود واقعی یک "شاید" در جهان (هستی‌شناسی)، یا به محدودیت دانسته‌ها و تواناییهای پیش‌بینی مشاهده‌گر (معرفت‌شناسی) نسبت داد. تفاسیر را می‌توان به صورت کلی به دو دسته تقسیم کرد: آنهایی که بیشتر متمایل به هستی‌شناسی هستند (یعنی واقع‌گرایی") و آنهایی که به سمت ضد واقع‌گرایی تمایل دارند. بعضی از رهیافتها تمایل دارند که از ارائه هرگونه تفسیر از پدیده یا فرمولاسیون خودداری کنند. اینها را می‌توان به عنوان ابزارگرا توصیف کرد. رهیافتهای دیگر تغییراتی را در فرمولاسیون پیشنهاد می‌کنند و بنابراین به بیان دقیق، آن‌ها بیشتر نظریه‌های جایگزین هستند تا تفاسیر. در برخی از موارد، مانند "مکانیک بوهمین"، می‌توان در این مورد بحث کرد که آیا یک رهیافت با یک فرمولاسیون استاندارد معادل است یا نه.

۳.۹ مشکلات تفسیر

مشکلات تفسیر شامل نکاتی در مورد توصیف درست مکانیک کوانتومی هستند. از جمله:

۱. وجود چیزهایی که به نظر می‌آید فرایندهایی غیر قطعیتی و برگشت ناپذیر باشند.

۲. پدیدهٔ "گرفتاری"، و به ویژه همبستگی بین رویدادهای دوردست که در نظریهٔ کلاسیک مورد انتظار نیستند.

۳. مکمل بودن توصیفهای پیشنهادشده برای واقعیت

۴. طبیعت انتزاعی و ریاضی توصیف.

۵. نقش ایفا شده به وسیلهٔ مشاهده‌گرها و فرایند اندازه‌گیری

۶. نرخ شتابان افزایش پیچیدگی توصیفهای کوانتومی با افزایش اندازهٔ سیستم

اولاً، ساختار ریاضی پذیرفته شده برای مکانیک کوانتومی بر اساس ریاضیات نسبتاً انتزاعی بنا نهاده شده‌است، مانند "فضاهای هیلبرت" و عملگرها بر روی آن فضاها. از طرف دیگر، در مکانیک و الکترومغناطیس کلاسیک، ویژگی‌های جرم نقطه‌ای یا ویژگی‌های میدان با اعداد یا توابعی حقیقی توصیف می‌شوند که بر روی مجموعه‌های دو یا سه بعدی تعریف شده‌اند. اینها دارای معانی مستقیم فضایی هستند و به نظر می‌رسید در این نظریه‌ها نیاز کمتری به ارائهٔ تفسیر فضایی برای آن اعداد یا توابع وجود داشته باشد.

به علاوه، فرایند اندازه‌گیری می‌تواند نقشی اساسی را در مکانیک کوانتومی ایفا کند و این نکته‌ای است که بحثهای داغی در مورد آن صورت گرفته‌است. به نظر می‌آید که دنیای اطراف ما در حالت خاصی باشد. اما مکانیک کوانتومی این موضوع را با با توابع موجی بیان می‌کند که احتمال همهٔ مقادیر را تعیین می‌کنند. به صورت کلی، تابع موجی به تمام مقادیر ممکن هر کمیت فیزیکی، مانند موقعیت، احتمالهایی غیر صفر را تخصیص می‌دهد. پس ما چگونه می‌توانیم یک ذره را در موقعیت خاصی ببینیم در صورتی که تابع موجی آن در سراسر فضا پراکنده‌است؟ توصیف مستقیم برای توصیف چگونگی وقوع پیامدهای خاص از احتمالات، مفهوم اندازه‌گیری را معرفی کرد. بر اساس این نظریه، توابع موجی با هم برهمکنش دارند و بر طبق قوانین مکانیک کوانتومی در طول زمان تکامل می‌یابند، تا زمانی که یک اندازه‌گیری انجام شود که در آن زمان، سیستم یکی از مقادیر ممکن خود را با احتمالی که به وسیلهٔ تابع موجی مشخص می‌شود اختیار می‌کند. همانگونه که با "آزمایش شکاف دوگانه" نشان داده شده‌است، اندازه‌گیری می‌تواند به صورتهایی عجیب و غریب با حالت سیستم برهمکنش داشته باشد. پس فرمولاسیون ریاضی مورد استفاده برای توصیف تکامل زمانی یک سیستم غیر نسبیتی، دارای دو نوع تبدیل متضاد است:

تبدیلهای برگشت‌پذیر که به وسیلهٔ "عملگرهای واحدی" در فضای حالت توصیف می‌شوند. این تبدیلها با پاسخهای معادلهٔ "شرودینگر" مشخص می‌شوند. تبدیلهای برگشت‌ناپذیر و غیر قابل پیش‌بینی که به وسیلهٔ تبدیلهای ریاضی پیچیده‌تر توصیف می‌شوند. از جملهٔ آن‌ها می‌توان تبدیلهایی را نام برد که یک سیستم بر اثر اندازه‌گیری دستخوش آن‌ها می‌شود.

یک پاسخ مسئلهٔ تفسیر، شامل ایجاد گونه‌ای از تصویر قابل درک، با حلّ گونهٔ دوم تبدیل است. از راه راه‌حلهای صرفاً ریاضی می‌توان به این هدف رسید، مانند آنچه که به وسیلهٔ تفاسیر "دنیاهای متعدد" و "تاریخهای سازگار" ارائه می‌شود. علاوه بر ویژگی‌های غیر قابل پیش‌بینی و برگشت‌ناپذیر بودن فرایندهای اندازه‌گیری، عناصر دیگری از مکانیک کوانتومی وجود دارند که آن را به روشنی از فیزیک کلاسیک متمایز می‌کنند و در هیچ نظریهٔ کلاسیکی حضور ندارند. یکی از اینها، پدیدهٔ "گرفتاری" است، آنگونه که در پارادوکس EPR نشان داده شده‌است، که ظاهراً "اصول علت و معلولی موضعی" را نقض می‌کند. مانع دیگری برای تفسیر، پدیدهٔ "مکمل بودن" است که به نظر می‌رسد اصول اولیهٔ "منطق گزاره‌ای" را نقض می‌کند. مکمل بودن می‌گوید که هیچ تصویری منطقی

وجود ندارد (که از منطق گزاره‌ای کلاسیک پیروی کند و) که به صورت هم‌زمان بتوان از آن برای توصیف و تحلیل همهٔ ویژگی‌های یک سیستم کوانتومی S استفاده کرد. این امر معمولاً به این صورت بیان می‌شود: "گزاره‌های مکمل A و B وجود دارند که هر یک می‌توانند S را توصیف کنند، ولی نه به صورت همزمان. مثالهایی از A و B عبارتند از گزاره‌هایی که از یک توصیف موجی S استفاده می‌کنند و گزاره‌هایی که از یک توصیف ذره‌ای S استفاده می‌کنند. عبارت آخر، بخشی از فرمولاسیون اصلی "نیلز بوهر" است، که غالباً با خود اصل مکمل بودن معادل در نظر گرفته می‌شود. مکمل بودن معمولاً این نکته را القا نمی‌کند که منطق کلاسیک اشتباه می‌کند (اگرچه "هیلاری پوتنام" در مقالهٔ خود "آیا منطق، تجربی است؟" این نظر را دارد). بلکه مکمل بودن به این معنی است که ترکیب ویژگی‌های فیزیکی S (مانند موقعیت و ممان، که هر دو دارای مقادیر در محدوده‌های مشخصی هستند) با استفاده از پیوندهای گزاره‌ای، از قوانین منطق گزاره‌ای کلاسیک پیروی نمی‌کند. آنگونه که امروزه به خوبی دانسته شده‌است، منشأ مکمل بودن در جابجایی‌ناپذیر بودن عملگرهاییست که ذرات قابل مشاهده را در مکانیک کوانتومی توصیف می‌کنند. از آنجا که پیچیدگی یک سیستم کوانتومی با افزایش درجه‌های آزادی آن به صورت نمایی بالا می‌رود، این امکان وجود ندارد که توصیفهای کوانتومی و کلاسیک را با هم تداخل داد تا فهمید که تقریبهای کلاسیک چگونه زده می‌شوند.

۴.۹ وضعیت مشکل تفاسیر

چون فیزیک کلاسیک و زبان غیر ریاضی نمی‌توانند از نظر دقت با ریاضیات مکانیک کوانتومی برابری کنند، هر چیز خارج از فرمولاسیون ریاضی لزوماً دارای دقت محدود است. به علاوه، وضعیت هستی‌شناسی دقیق هر تفسیر جای بحث فلسفی دارد. به عبارت دیگر، اگر ما ساختار فرمولی X مکانیک کوانتومی را با ساختار فرمولی Y تفسیر کنیم (از راه معادل بودن ریاضی دو ساختار)، وضعیت Y چگونه‌است؟ این همان پرسش قدیمی "حفظ پدیده‌ها" است که به ظاهر جدیدی درآمده‌است. برخی از فیزیکدانها، مانند "اشر پرس" و "کریس فوکس" بحث می‌کنند که یک تفسیر، چیزی نیست به جز یک معادل بودن رسمی بین مجموعه‌هایی از قواعد برای عمل کردن بر روی داده‌های تجربی. به این ترتیب، آن‌ها اینگونه القا می‌کنند که اصولاً به پرداختن به تفسیر نیازی نیست.

۵.۹ تفسیر ابزارگرایانه

هر نظریهٔ علمی مدرن، حداقل به یک توصیف ابزارگرایانه نیاز دارد که فرمولاسیون ریاضی را با آزمایشهای تجربی و پیش‌بینی ارتباط می‌دهد. در مورد مکانیک کوانتومی، رایج‌ترین توصیف ابزارگرایانه عبارت است از ادعای نظم آماری بین فرایندهای آماده‌سازی حالت و فرایندهای اندازه‌گیری. یعنی، اگر اندازه‌گیری یک کمیت دارای مقدار حقیقی به دفعات، و همواره با شرایط اولیهٔ یکسان انجام شود، نتیجه عبارت است از یک توزیع احتمالاتی کاملاً مشخص که با اعداد حقیقی همخوانی دارد. به علاوه، مکانیک کوانتومی ابزاری محاسباتی را برای تعیین ویژگی‌های آماری این توزیع، مانند میانگین آن، فراهم می‌آورد. محاسبات اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی یک سیستم ،S یک فضای هیلبرت

H را بر مجموعهٔ اعداد مختلط فرض می‌کنند. وقتی سیستم S در یک حالت خالص آماده شده باشد، این وضعیت با برداری در H ارتباط دارد. کمیتهای قابل اندازه‌گیری با عملگرهای هرمیتی ارتباط دارند که بر روی H عمل می‌کنند: اینها را "قابل مشاهده‌ها" می‌گویند. اندازه‌گیری پیاپی یک قابل مشاهدهٔ A، هنگامی که S در حالت □ آماده شده‌است، توزیعی از مقادیر را تولید می‌کند. مقدار مورد انتظار این توزیع با رابطهٔ □□□A□□□ داده می‌شود. با روشن شدن چگونگی ارتباط دادن حالت اولیه با یک بردار حالت هیلبرت، و نیز چگونگی ارتباط دادن کمیت اندازه‌گیری‌شده با یک قابل مشاهده (یعنی یک عملگر مشخصی هرمیتی)، این روش ریاضی، راهی ساده و مستقیم را برای محاسبهٔ یک ویژگی آماری یک آزمایش فراهم می‌آورد. به عنوان مثالی از چنین محاسباتی، احتمال یافتن یک سیستم در یک حالت خاص |□ □□ □⟩، با محاسبهٔ مقدار مورد انتظار "عملگر تصویر" دارای رتبهٔ (۱ ـ (rank به دست می‌آید:

(۱.۹)

: بدین ترتیب، احتمال با عدد غیر منفی‌ای داده می‌شود که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\Pi = |\phi\rangle\langle\phi| \tag{۲.۹}$$

$$P = \langle|\phi|\Pi|\phi\rangle = |\langle\phi|\phi\rangle|^2 \tag{۳.۹}$$

با استفادهٔ نامناسب از زبان، یک توصیف ابزارگرایانهٔ صرف ممکن است به عنوان یک تفسیر نام برده شود، اگرچه از آنجا که ابزارگرایی به روشنی از هرگونه نقش توضیحی خودداری می‌کند، این استفاده گمراه‌کننده‌است. ابزارگرایی تلاشی نمی‌کند که پرسش "چرا" را پاسخ دهد.

خلاصه‌ای از تفاسیر رایج مکانیک کوانتومی

دسته‌بندی که انیشتین آن را پذیرفت

یک تفسیر (یعنی یک توضیح معنایی ریاضیات رسمی مکانیک کوانتومی) را می‌توان با برخورد آن با بعضی از موضوعات که انیشتین به آن‌ها اشاره کرده شناسایی کرد. برخی از این موضوعات عبارتند از:

- واقع‌گرایی
- کامل بودن
- واقع‌گرایی موضعی
- قطعیت

برای توضیح این ویژگی‌ها، ما باید واضحتر از نوع تصویری صحبت کنیم که یک تفسیر فراهم می‌آورد. ما یک تفسیر را به عنوان یک تناظر بین عناصر یک فرمولاسیون ریاضی M و عناصر یک ساختار تفسیرکنندهٔ I در نظر می‌گیریم، که در آن:

فرمولاسیون ریاضی M تشکیل شده‌است از فضای هیلبرت متشکل از بردارهای "کت"، عمگرهای خود الحاقی عمل‌کننده بر فضای بردارهای کت، وابستگی زمانی یکتای بردارهای کت، و عملیات اندازه‌گیری. در این مبحث، یک عملیات اندازه‌گیری تبدیلی است که یک بردار کت را به یک توزیع احتمالاتی تبدیل می‌کند. ساختار تفسیرکنندهٔ I تشکیل شده‌است از حالتها، انتقال بین حالتها، عملیات اندازه‌گیری و احتمالاً اطلاعات دربارهٔ توسعهٔ فضایی این عناصر. یک عملیات اندازه‌گیری، عملیاتی است که یک مقدار را نتیجه می‌دهد و ممکن است باعث یک تغییر حالت در سیستم شود. اطلاعات فضایی به وسیلهٔ حالتهایی نشان داده می‌شود که به صورت توابعی از فضای پیکربندی نشان داده می‌شوند. انتقالها می‌توانند قطعی یا احتمالاتی باشند یا ممکن است حالتهای بی‌شماری وجود داشته باشند.

جنبهٔ اساسی یک تفسیر این است که آیا عناصر I به عنوان واقعیت فیزیکی تفسیر می‌شوند یا نه. بنابراین، دیدگاه صرفاً ابزارگرایانه نسبت به مکانیک کوانتومی که در بخش قبل توضیح داده شد اصولاً یک تفسیر نیست. این به این دلیل است که این دیدگاه هیچ ادعایی دربارهٔ عناصر واقعیت فیزیکی ندارد. استفادهٔ کنونی از واقع‌گرایی و کامل بودن ریشه در مقالهٔ سال ۱۹۳۵ دارد که در آن، انیشتین و دیگران پارادوکس EPR را معرفی کردند. در آن مقاله، مؤلفان عنصر مفاهیم واقعیت و کامل بودن یک نظریهٔ فیزیکی را پیشنهاد کردند. آن‌ها عنصر واقعیت را به صورت کمیتی توصیف کردند که مقدار آن را می‌توان قبل از اندازه‌گیری یا ایجاد هرگونه اغتشاشی در آن، با قطعیت تعیین کرد. آن‌ها همچنین یک نظریهٔ کامل فیزیکی را نظریه‌ای تعریف کردند که در آن، هر عنصر واقعیت فیزیکی توسط نظریه در نظر گرفته شده‌است. در یک دیدگاه معنایی نسبت به تفسیر، یک تفسیر در صورتی کامل است که هر عنصر از ساختار تفسیرکننده در ریاضیات وجود داشته باشد. واقع‌گرایی نیز ویژگی هر یک از عناصر ریاضیات است. یک عنصر در صورتی واقعی است که با چیزی در ساختار تفسیرکننده تناظر داشته باشد. برای نمونه، در برخی از تفاسیر مکانیک کوانتومی (مانند تفسیر دنیاهای متعدد) گفته می‌شود که بردار کت مربوط به حالت سیستم با عنصری از واقعیت فیزیکی متناظر است. این در حالی است که در سایر تفاسیر اینگونه نیست. قطعیت یک ویژگی است که تغییرات حالت در نتیجهٔ گذر زمان را توصیف می‌کند. یعنی حالت در در یک لحظهٔ آینده تابعی از حالت در حال حاضر است. به دلیل امکان عدم وجود یک انتخاب واضح یک پارامتر زمانی، ممکن است همیشه کاملاً روشن نباشد که آیا یک تفسیر خاص قطعیتی است یا نه. به علاوه، یک نظریه ممکن است دو تفسیر داشته باشد که یکی از آن‌ها قطعیتی است و دیگری نیست. واقع‌گرایی موضعی دو جنبه دارد:

مقدار حاصله از یک اندازه‌گیری متناظر است با مقدار یک تابع در فضای حالت. به عبارت دیگر، آن مقدار یک عنصر از واقعیت است. اثرات اندازه‌گیری، دارای سرعتی در پخش هستند که از یک حد کلی بالاتر نمی‌رود (مانند سرعت نور). برای اینکه این امر منطقی به نظر بیاید، عملیات اندازه‌گیری در ساختار تفسیرکننده باید موضعی باشند.

"جان بل" یک فرمولاسیون دقیق واقع‌گرایی موضعی را بر حسب "نظریهٔ متغیر موضعی پنهان" ارائه کرد. ترکیب نظریهٔ بل با آزمایشهای تجربی، انواع ویژگی‌هایی را که یک نظریهٔ کوانتومی می‌تواند داشته باشد محدود می‌کند. برای نمونه، نظریهٔ بل اینگونه القا می‌کند که مکانیک کوانتومی نمی‌تواند

هم واقع‌گرایی موضعی را اقناع کند و هم "قطعیت خلاف واقعیت" را.

۶.۹ تفاسیر مختلف فروپاشی تابع موج در مکانیک کوانتومی

یکی از پرسش‌های اصلی در مکانیک کوانتومی این است که چه چیزی باعث فروپاشی تابع موج می‌شود. مفهوم **فروپاشی تابع موج** یکی از جنجالی‌ترین مباحث در مکانیک کوانتومی است. هنگامی که اندازه‌گیری بر روی یک سیستم کوانتومی انجام می‌شود، حالت این سیستم که قبل از اندازه‌گیری در حالت **برهم نهی** قرار دارد، ناگهان به یک حالت مشخص فروپاشی می‌کند. این تغییر ناگهانی، موضوع بحث‌های فراوان و تفسیرهای مختلفی شده است که در ادامه به بررسی مهم‌ترین آن‌ها می‌پردازیم.

۷.۹ تفسیر کپنهاگی [۲]

تفسیر کپنهاگی توسط **نیلز بور** و **ورنر هایزنبرگ** پیشنهاد شد و به عنوان مشهورترین تفسیر مکانیک کوانتومی شناخته می‌شود. تفسیر کپنهاگ، تفسیر استاندارد مکانیک کوانتومی است که توسط "نیلز بوهر" و "ورنر هایزنبرگ"، هنگامی که آن‌ها در حدود سال ۱۹۲۷ در کپنهاگ همکاری داشتند، فرمول‌بندی شد. بوهر و هایزنبرگ تفسیر احتمالاتی تابع موج را که در ابتدا توسط "ماکس بورن" پیشنهاد شده بود گسترش دادند.

این تفسیر بر این اصل استوار است که تا زمانی که اندازه‌گیری انجام نشود، سیستم کوانتومی در حالت برهم نهی باقی می‌ماند و عمل **اندازه‌گیری** باعث فروپاشی تابع موج و تعیین یکی از حالت‌های ممکن سیستم می‌شود.

تفسیر کوپنهاگ، سؤالاتی مانند "قبل از اینکه من موقعیت این ذره را اندازه‌گیری کنم این ذره کجا بود؟" را بی‌معنی می‌دانند. فرایند اندازه‌گیری به صورت تصادفی دقیقاً یکی از احتمالات ممکنی را که تابع موجی حالت آن‌ها را اجازه می‌دهد بر می‌گزینند. چگونگی این انتخاب هم با احتمالات متناظر با هر حالت ممکن تطابق دارد. بر اساس این تفسیر، برهمکنش یک مشاهده‌گر یا یک وسیله که خارج از سیستم کوانتومی است سبب فروریختن تابع موجی می‌شود. پس به قول هایزنبرگ: "واقعیت در مشاهدات است، نه در الکترون".

تفسیر کپنهاکی 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 کپنهاکی خود را ملزم به اظهارنظر دربارهٔ واقعی یا ذهنی بودن تابع موج نمی‌داند (دیدگاه ندانم‌گویی). مثالی از دیدگاه ندانم‌گویی را در گفتهٔ فون وایتسکر می‌توان دید که در کنفرانسی در کمبریج گفت که دیدگاه کپنهاکی متفاوت با گزارهٔ «چیزی را که نمی‌توان دید وجود ندارد» است. به گفتهٔ او دیدگاه کپنهاکی می‌گوید: «چیزی را که می‌توان دید حتماً وجود دارد. ولی دربارهٔ چیزی که نمی‌توان دید آزادیم هر فرضی بکنیم و این آزادی را برای فرار از تناقض‌ها به کار ببریم.»

[۲] Interpretation Copenhagen

در دیدگاه ذهنی، تابع موج تنها یک ابزار ریاضی برای محاسبهٔ احتمال رویدادهاست. این دیدگاه شبیه رویکرد تفسیر هنگردی است.
در نظرسنجی‌ای که در کارگاه مکانیک کوانتومی در سال ۱۹۹۷ انجام شد، تفسیر کپنهاکی پذیرفته‌ترین تفسیر از مکانیک کوانتومی بود. و پس از آن تفسیر دنیاهای چندگانه قرار داشت.
نکات کلیدی:

- سیستم قبل از اندازه‌گیری در ترکیبی از حالت‌ها قرار دارد.
- مشاهده نقش کلیدی در تعیین وضعیت سیستم دارد.

مشکلات: این تفسیر این سوال فلسفی را مطرح می‌کند که چگونه عمل مشاهده می‌تواند وضعیت سیستم را تغییر دهد.

۸.۹ تفسیر چند جهانی [۳]

تفسیر چند جهانی توسط **هیو اورت** در سال ۱۹۵۷ ارائه شد. در این تفسیر، فروپاشی تابع موج اصلاً رخ نمی‌دهد؛ بلکه تمام حالت‌های ممکن سیستم به‌طور هم‌زمان در جهان‌های موازی مختلف محقق می‌شوند. با هر اندازه‌گیری، جهان به چندین جهان موازی تقسیم می‌شود.
تفسیر دنیاهای متعدد، تفسیری از مکانیک کوانتومی است که در آن، یک تابع موجی فراگیر همواره از قوانین قطعیتی و برگشت‌پذیر یکسانی پیروی می‌کند. به خصوص، هیچ فروریختگی تابع موجی مربوط به اندازه‌گیری وجود ندارد (غیرقطعیتی و برگشت‌ناپذیر). ادعا می‌شود که پدیده‌های مربوط به اندازه‌گیری با "همبستگی‌زدایی" توضیح داده می‌شوند. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که حالتها با محیط برهمکنش کرده و "گرفتاری" به وجود می‌آورند و به دفعات، جهان را به تاریقهای جایگزینی تقسیم می‌کنند که همراه با هم قابل مشاهده نیستند. به این ترتیب جهانهایی متمایز در درون یک "مجموعه از جهانها" ایجاد می‌شوند. —تفسیر دنیاهای چندگانه یکی از تفسیرهای مکانیک کوانتومی است. این تفسیر را به این نام‌ها نیز می‌خوانند: فرمول‌بندی حالت نسبی، نظریهٔ تابع موج جهانی و دنیاهای موازی.[۱] تفسیر دنیاهای چندگانه در سال ۱۹۲۶ میلادی و زمانی مطرح شد که اروین شرودینگر نشان داد که از منظر ریاضیات، دنیای زیر اتمی دارای تصویری است که تار و مبهم دیده می‌شود.[۲]
تفسیر دنیاهای چندگانه، فروکاهی تابع موج را نمی‌پذیرد و این فروکاهیِ ظاهری را با سازوکار واهمدوسی کوانتومی توضیح می‌دهد. برخی می‌گویند که با این تفسیر همهٔ پارادوکس‌های مکانیک کوانتومی، از جمله پارادوکس EPR[۳][۴] حل می‌شوند، زیرا هرکدام از نتیجه‌های ممکن برای یک رویداد در «جهان جداگانه‌ای» رخ می‌دهد. به زبان دیگر، شمار بسیار زیادی (شاید بی‌نهایت) جهان وجود دارد و هرآنچه می‌توانست در دنیای ما رخ دهد (و رخ نداده‌است) در جهان (های) دیگری رخ داده‌است.
طرفداران این تفسیر می‌گویند که تفسیر دنیاهای چندگانه پاسخی به این پرسش است که «چگونه می‌توان با معادله‌های تعین‌گرایانهٔ مکانیک کوانتومی، پدیده‌های تصادفی (مانند واپاشی تصادفی

[۳] Interpretation Many-Worlds

اتم‌های پرتوزا) را توضیح داد؟» پیش از آن، رویدادها به شکل جهان‌خط‌های تکی دیده می‌شدند؛ ولی تفسیر دنیاهای چندگانه رویدادها را به شکل درخت‌هایی از جهان‌خط‌ها که شاخه‌شاخه شده‌اند می‌بینند.

فرمول‌بندی حالت‌های نسبی را هیوْ اِورِت[۵] در سال ۱۹۵۷ بار آورد. در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ برایس دویت این فرمول‌بندی را به نام دنیاهای چندگانه خواند و آن را همه‌گیر کرد. رهیافت واهمدوسی به تفسیر مکانیک کوانتومی پس از آن توسعه داده شد و دسته‌ای از تفسیرها را به وجود آورد. این تفسیر هم‌اکنون همراه با تفسیر کپنهاکی و دیگر تفسیرهای واهمدوسانه یکی از مهم‌ترین تفسیرهای مکانیک کوانتومی است.

به زبان هیو اورت، دستگاه اندازه‌گیری «د» و سیستم کوانتومی «س» یک سیستم ترکیب‌شده را می‌سازند. پیش از اندازه‌گیری، هرکدام در حالت‌های خوش‌تعریف (و البته وابسته به زمان) قرار دارند. اندازه‌گیری به این معنی است که بگذاریم س و د با هم برهم‌کنش کنند. پس از این که س و د برهم‌کنش داشتند، دیگر نمی‌توان آن‌ها را با حالت‌های مستقلی توصیف کرد. به گفتهٔ اِورِت، تنها توصیف بامعنی از این وضعیت به کمک حالت‌های نسبی است: مثلاً حالت نسبی س اگر حالت د را بدانیم، یا حالت نسبی د وقتی حالت س را بدانیم.

به زبان دویت، حالت س پس از رشته‌ای از اندازه‌گیری‌ها با برهم‌نهی حالت‌های کوانتومی‌ای به دست می‌آید که هرکدام نمایندهٔ تاریخچهٔ متفاوتی از اندازه‌گیری‌ها روی س هستند.

نکات کلیدی:

- هیچ فروپاشی تابع موجی وجود ندارد.
- تمام حالت‌های ممکن به‌صورت هم‌زمان در جهان‌های مختلف اتفاق می‌افتند.

مشکلات: این تفسیر فرضیه وجود بی‌نهایت جهان‌های موازی را مطرح می‌کند که از نظر شهودی دشوار است.

۹.۹ تفسیر تاریخ‌های سازگار[۴]

تفسیر تاریخ‌های هم‌خوان توسط فیزیکدانانی مانند **رابرت گریفشس** توسعه داده شد. این تفسیر به جای فروپاشی تابع موج، بر توالی‌های ممکن از حالت‌های سیستم تمرکز می‌کند. در این تفسیر، فروپاشی تابع موج معنای دقیقی ندارد و یکی از تاریخ‌های ممکن محقق می‌شود.

تفسیر تاریقهای سازگار، تفسیر کپنهاگ را تعمیم می‌دهد و تلاش می‌کند که تفسیری طبیعی را از کیهان‌شناسی کوانتومی ارائه دهد. این نظریه بر اساس یک معیار سازگاری است که اجازه می‌دهد که تاریخچهٔ یک سیستم به گونه‌ای توصیف شود که احتمال هر تاریخچه از قانون جمع‌پذیری احتمالات کلاسیک پیروی کند. ادعا شده‌است که این تفسیر با معادلهٔ شرودینگر سازگار است. برطبق این تفسیر، هدف نظریهٔ کوانتوم ـ مکانیکی این است که احتمالات نسبی تاریخچه‌های جایگزین مختلف (برای نمونه، یک ذره) را پیش‌بینی کند.

نکات کلیدی:

[۴] Interpretation Histories Consistent

- فروپاشی تابع موج جایگزین توالی تاریخ‌های ممکن می‌شود.
- این تفسیر به احتمال و آمار تکیه دارد.

مشکلات: این تفسیر همچنان سوالات باز زیادی در مورد چگونگی تعیین تاریخ‌های هم‌خوان باقی می‌گذارد.

۱۰.۹ تفسیر نسبی‌گرا [۵]

تفسیر نسبی گرا یا نسبیت گرایانه [۶] یکی از تفسیرهای مهم مکانیک کوانتومی است که توسط هیوگرت فون آوپ [۷] و **کارلو روولی**در سال ۱۹۵۷ مطرح شد. این تفسیر سعی می کند مکانیک کوانتومی را با نسبیت خاص آینشتین سازگار کند.

براساس این تفسیر حالت کوانتومی یک سیستم تنها نسبت به مشاهده‌گر یا سیستم دیگری که با آن تعامل دارد مشخص می‌شود. در این تفسیر، فروپاشی تابع موج به عنوان یک پدیده مطلق وجود ندارد.

این تفسیر سعی دارد تا با استفاده از اصول نظریه نسبیت خاص، برخی از مشکلات و پارادوکس‌های موجود در مکانیک کوانتومی را حل کند.

در این تفسیر، رووِلی بر این باور است که وضعیت یک سیستم کوانتومی نمی‌تواند به‌طور مطلق توصیف شود، بلکه تنها در رابطه با یک مشاهده‌گر خاص و در یک چارچوب مرجع خاص معنی‌دار است. به عبارت دیگر، موقعیت و حرکت ذرات به‌طور نسبی و وابسته به مشاهده‌گر تعریف می‌شود. این دیدگاه به نوعی با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ همخوانی دارد، زیرا تأکید می‌کند که اطلاعات ما درباره یک سیستم کوانتومی به نوعی محدود است و نمی‌توانیم همه جنبه‌های آن را به‌طور همزمان و دقیق اندازه‌گیری کنیم.

همچنین، تفسیر رووِلی به رد امواج احتمالی و تکیه بر واقعیت‌های تجربی تأکید دارد و سعی می‌کند تا توضیحاتی برای پدیده‌های پیچیده‌ای مانند آشفتگی کوانتومی ارائه دهد. این تفسیر به‌دنبال ایجاد یک چارچوب نظری است که بتواند مکانیک کوانتومی را با نظریه نسبیت خاص سازگار کند و در عین حال به چالش‌های موجود در این زمینه پاسخ دهد.

با این حال، مانند هر تفسیر دیگری در مکانیک کوانتومی، تفسیر رووِلی نیز با انتقادات و چالش‌هایی مواجه است و هنوز به‌طور کامل پذیرفته نشده است

اصول اصلیاین تفسیر عبارتند از:

۱. دور زدن مسئله اندازه گیری در مکانیک کوانتومی: در این تفسیر، مسئله اندازه گیری و وجود ناظر خارجی نادیده گرفته می شود.

۲. تعریف جدید موقعیت و حرکت: در این تفسیر، موقعیت و حرکت ذره به صورت نسبیتی تعریف می شوند، به این معنی که موقعیت و سرعت همواره نسبت به یک مرجع معین مشخص می شوند.

---

[۵] Interpretation Relational
[۶] interpretation Relativisitic
[۷] Hugprt von Aup

۳. رد کردن وجود امواج احتمالی: در این تفسیر، امواج احتمالی مکانیک کوانتومی رد می شوند و به جای آن، تابع موج فقط برای توصیف میدان نسبیتی مرتبط با ذره استفاده می شود.

۴. تاکید بر قوانین حفظ: این تفسیر بر قوانین حفظ مانند حفظ انرژی، چرخش و دیگر کمیت های بنیادی در سطح کوانتومی تاکید می کند.

۵. حالت کوانتومی یک سیستم نسبی است و به مشاهده‌گر وابسته است.

در مجموع، تفسیر نسبی گرا سعی می کند مکانیک کوانتومی را با اصول نسبیت خاص آینشتین سازگار کند و همچنین مسائلی مانند اندازه گیری را حل کند. این تفسیر همچنین سعی می کند برخی مشکلات و پارادوکس های مکانیک کوانتومی مانند پارادوکس گربه شرودینگر را حل کند. با این حال، این تفسیر نیز مانند دیگر تفسیرها با انتقاداتی روبرو است. برخی معتقدند که این تفسیر نمی تواند همه جنبه های مکانیک کوانتومی را توضیح دهد و برخی پدیده ها مانند آشفتگی کوانتومی را نادیده می گیرد.

در هر صورت، تفسیر نسبی گرا یکی از تلاش های مهم برای همگام سازی مکانیک کوانتومی با نسبیت خاص است و نقش مهمی در تکامل فهم ما از نظریه کوانتومی داشته است. البته هنوز هم بحث ها و تلاش ها برای یافتن یک تفسیر جامع و کامل برای مکانیک کوانتومی ادامه دارد.

انتقادات به تفسیر نسبی گرا

علی رغم تلاش های تفسیر نسبی گرا برای حل مشکلات مکانیک کوانتومی، این تفسیر نیز با انتقادات و چالش هایی روبرو است:

۱. نادیده گرفتن مسئله اندازه گیری: برخی معتقدند که نادیده گرفتن مسئله اندازه گیری در این تفسیر، یک ضعف اساسی است. اندازه گیری یک جنبه مهم و اساسی از مکانیک کوانتومی است که نمی توان آن را نادیده گرفت.

۲. تعریف نسبی گرایانه موقعیت و حرکت: برخی منتقدان معتقدند که تعریف نسبی گرایانه موقعیت و حرکت در این تفسیر، با اصول اساسی مکانیک کوانتومی مانند اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در تناقض است.

۳. رد امواج احتمالی: رد کردن امواج احتمالی در این تفسیر، با تجربیات و آزمایش های مکانیک کوانتومی که نشان دهنده رفتارهای احتمالی هستند، در تناقض است.

۴. ناتوانی در توضیح برخی پدیده ها: برخی معتقدند که این تفسیر نمی تواند برخی پدیده های مهم مکانیک کوانتومی مانند آشفتگی کوانتومی را توضیح دهد.

با وجود انتقادات، تفسیر نسبی گرا یکی از تلاش‌های مهم برای سازگار کردن مکانیک کوانتومی با نظریه نسبیت خاص است. این تفسیر سعی می‌کند تا با ارائه یک دیدگاه نسبی‌گرایانه به موقعیت و حرکت، برخی از مشکلات و پارادوکس‌های مکانیک کوانتومی را حل کند. با این حال، همانطور که دیدیم، این تفسیر نیز با انتقاداتی روبرو است و نمی‌تواند همه جنبه‌های مکانیک کوانتومی را به طور کامل توضیح دهد.

۱۱.۹ تفسیر گروهی یا تفسیر آماری

تفسیر گروهی، که به آن تفسیر آماری هم گفته می‌شود، را می‌توان به صورت یک تفسیر کمینه‌گرا در نظر گرفت. به این صورت که این تفسیر کمترین فرضها را راجع به ریاضیات استاندارد می‌کند. این تفسیر، تفسیر آماری بورن را تا بالاترین حد توسعه می‌دهد. این تفسیر بیان می‌کند که تابع موجی برای یک سیستم تک (برای نمونه، یک ذرهٔ تک) قابل به‌کارگیری نیست، بلکه یک کمیت آماری انتزاعی است که تنها برای گروهی از سیستم‌ها یا ذراتی قابل به‌کارگیری است که مشابه هم آماده شده باشند. احتمالاً برجسته‌ترین حامی این تفسیر، انیشتین بوده‌است:

"تلاش برای فهم توصیف کوانتوم_ مکانیکی به عنوان توصیف کامل سیستم‌های تکی به تفاسیر نظری غیرطبیعی می‌انجامد که اگر تفسیری را قبول کنیم که می‌گوید توصیف برای گروهی از سیستم‌ها است و نه برای یک سیستم تک، آن تفاسیر غیرطبیعی کاملاً غیرضروری خواهند شد." ـ انیشتین در کتاب "آلبرت انیشتین، فیلسوف و دانشمند"

در حال حاضر، برجسته‌ترین حامی تفسیر گروهی، "لسلی بالنتاین" است. او استاد دانشگاه "سیمون فریزر" و نویسندهٔ کتاب "Quantum Mechanics، Modern A Development" است. یک آزمایش نشان‌دهندهٔ تفسیر گروهی در کلیپ ویدئویی "آکیرا تونومورا" نشان داده شده‌است. از این آزمایش "شکاف دوگانه" با گروهی از الکترون‌های تکی روشن است که چون تابع موجی کوانتوم_ مکانیکی (مجذور شده) الگوی تداخل کامل شده را توصیف می‌کند، باید یک گروه را توصیف کند.

۱۲.۹ تفسیر بوهمی[۸]

تفسیر بوهمی توسط **دیوید بوهم** ارائه شد و بر این فرض استوار است که ذرات همواره مسیرهای مشخصی دارند. این تفسیر بر اساس نظریهٔ مکانیک کوانتومی "لوییس دوبروی" بنا نهاده شده است که بعدها به وسیلهٔ "دیوید بوهم" توسعه داده شد تا آزمایشها را در بر گیرد.

بر اساس این تفسیر تابع موج نقشی هدایت‌گر دارد و باعث حرکت ذرات در مسیرهای مشخص می‌شود، بدون اینکه نیاز به فروپاشی تابع موج باشد ذرات، که همواره دارای موقعیت هستند، به وسیلهٔ تابع موجی هدایت می‌شوند. تابع موجی بر طبق معادلهٔ موج شرودینگر تکامل می‌یابد و هیچ‌گاه فرو نمی‌ریزد. این نظریه در یک فضا ـ زمان تک اتفاق می‌افتد و غیر موضعی و قطعیتی است. تعیین هم‌زمان موقعیت و سرعت یک ذره با محدودیت اصل عدم قطعیت مواجه‌است. این نظریه به عنوان یک نظریهٔ "متغیر پنهان" در نظر گرفته می‌شود و با در برگرفتن غیر موضعی بودن، در نامعادلهٔ بل هم صدق می‌کند. چون ذرات همواره دارای موقعیتهایی قطعی هستند، مسئلهٔ اندازه‌گیری حل شده‌است. فروریختن هم به صورت پدیده‌شناسی توضیح داده می‌شود.

---

[۸] Interpretation Bohmian

۱.۱۲.۹ مکانیک کوانتومی رابطه‌ای

ایدهٔ اساسی مکانیک کوانتومی رابطه‌ای، که بعد از نسبیت خاص آمد، این است که مشاهده‌گرهای مختلف می‌توانند برای یک سری از وقایع، توضیحهای مختلفی داشته باشند. برای نمونه، برای یک مشاهده‌گر در نقطهٔ مشخصی از زمان، یک سیستم می‌تواند در یک "حالت ویژه" ی تک و فرو ریخته باشد، در حالی که برای یک مشاهده‌گر دیگر در همان زمان، آن سیستم ممکن است در حالتی باشد که از جمع دو یا چند حالت به وجود آمده باشد. بنابراین اگر قرار است که مکانیک کوانتومی، یک نظریهٔ کامل باشد، مکانیک کوانتومی رابطه‌ای بحث می‌کند که مفهوم "حالت"، نه خود سیستم مشاهده شده را، بلکه رابطه، یا همبستگی، بین سیستم و مشاهده‌گرهای سیستم را توصیف می‌کند. بردار حالت مکانیک کوانتومی مرسوم، تبدیل می‌شود به توصیفی از همبستگی چند درجهٔ آزادی در مشاهده‌گر، نسبت به سیستم مشاهده شده. با این وجود، مکانیک کوانتومی رابطه‌ای هم این را قبول دارد که این موضوع برای همهٔ اشیای فیزیکی مصداق دارد، چه آن شیء هوشیار باشد و چه ماکروسکوپیک. هر "رویداد اندازه‌گیری" به سادگی به عنوان یک برهمکنش فیزیکی معمولی دیده می‌شود و این اثباتی است برای نوعی از همبستگی که در بالا ذکر شد. پس محتوای فیزیکی نظریه، لازم نیست به خود اشیا، بلکه باید به رابطهٔ بین آن‌ها مربوط باشد. همانند توضیح "دیوید بوهم" از نسبیت خاص، یک رهیافت مستقل رابطه‌ای به مکانیک کوانتومی هم بسط یافت که در آن یک رویداد آشکارسازی به عنوان ایجاد رابطه‌ای بین میدان کوانتیزه شده و آشکارساز در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، ابهام ذاتی مربوط به اعمال اصل عدم قطعیت هایزنبرگ هم به وجود نخواهد آمد.

نکات کلیدی:

- ذرات مسیرهای دقیق و مشخصی دارند.
- تابع موج تنها نقش هدایت‌کننده دارد.

مشکلات: این تفسیر به اندازه سایر تفسیرها مورد توجه قرار نگرفته و توضیح آن برای سیستم‌های ماکروسکوپی دشوار است.

۱۳.۹ تفسیر تراکنشی

تفسیر تراکنشی از مکانیک کوانتومی (TIQM) که به وسیلهٔ "جان کریمر" ارائه شد، تفسیری از مکانیک کوانتومی است که از "نظریهٔ جذب‌کنندهٔ ویلر ـ فینمن" الهام گرفته‌است. این تفسیر، برهمکنشهای کوانتومی را بر حسب موج ایستای ایجاد شده به وسیلهٔ امواج "عقب‌مانده" (پیش‌رونده در زمان) و "پیشرفته" (عقب‌رونده در زمان) توصیف می‌کند. مؤلف این‌گونه بحث می‌کند که این تفسیر، از مشکلات فلسفی مربوط به تفسیر کپنهاگ و نقش مشاهده‌گر جلوگیری کرده و تناقض‌های کوانتومی مختلفی را حل می‌کند.

۱۴.۹ مکانیک تصادفی

در سال ۱۹۶۶ "ادوارد نلسون" استاد دانشگاه پرینستون تفسیر و استخراجی کاملاً کلاسیک را از معادلهٔ موج شرودینگر، مشابه "حرکت براونی" پیشنهاد کرد. ملاحظاتی شبیه این قبلاً هم توسط افرادی مانند "فورث" (۱۹۳۳)، "فینس" (۱۹۵۲) و "والتر وایزل" (۱۹۵۳) چاپ شده بودند و در مقالهٔ نلسون به عنوان مرجع آمده بودند. به تازگی "پاوون" کار بیشتری بر روی تفسیر تصادفی انجام دادهاست. یک رهیافت تصادفی جایگزین هم توسط "رومن تکسوف" پیشنهاد شدهاست.

۱۵.۹ نظریه‌های عینی فروریختن

نظریه‌های عینی فروریختن از این نظر که تابع موجی و فرایند فروریختن را از نظر هستی‌شناسی، عینی می‌دانند با تفسیر کوپنهاگ متفاوتند. در نظریه‌های عینی، فروریختن به صورت تصادفی ("موضعی شدن خودبخودی") یا هنگامی اتفاق می‌افتد که به یک آستانهٔ فیزیکی رسیده شود و مشاهده نقشی در آن ندارد. پس این نظریه‌ها واقع‌گرایانه، غیر قطعی، و فاقد متغیر پنهان هستند. مکانیزم فروریختن به وسیلهٔ مکانیک کوانتومی استاندارد بیان نمی‌شود، که اگر قرار باشد این رهیافت درست باشد، این مکانیزم باید توسعه یابد. این به این معنی است که فروریختن عینی، بیشتر یک نظریه‌است تا یک تفسیر. نمونه‌هایی از این نظریه‌ها عبارتند از نظریهٔ جیراردی– ریمینی – وبر و تفسیر "پن روز".

۱۶.۹ تفسیر فون نویمن/ویگنر:

جان فون نویمن در مقالهٔ خود ("پایه‌های ریاضی مکانیک کوانتومی") مسئلهٔ اندازه‌گیری را عمیقاً بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که همهٔ دنیای فیزیکی تحت پوشش معادلهٔ شرودینگر است (تابع موجی فراگیر). از آنجا که برای فروریختن تابع موجی به چیزی "خارج از محاسبه" نیاز بود فون نویمن نتیجه‌گیری کرد که فروریختن در نتیجهٔ هوشیاری آزمایش‌کننده اتفاق می‌افتد. بعدها این دیدگاه توسط اوژن ویگنر توسعه یافت، با این وجود دیدگاهی است که فیزیکدانهای بسیار اندکی آن را قبول دارند. گونه‌های تفسیر فون نویمن عبارتند از: پژوهش ذهنی کاهش

این اصل که هوشیاری سبب فروریختن می‌شود، نقطهٔ تقاطع مکانیک کوانتومی و مسئلهٔ ذهن/جسم است و پژوهشگران در تلاشند که رویدادهای هوشیاری را بیابند که با رویدادهای فیزیکی همبستگی داشته باشند. رویدادهایی که بر طبق نظریهٔ کوانتومی باید در بر دارندهٔ فروریختن تابع موجی باشند. ولی تا کنون نتیجهٔ قاطعی به دست نیامده‌است.

۱۷.۹ اصل آنتروپی مشارکتی

این نظریه که "جان آرچیبالد ویلر" آن را ارائه داده‌است می‌گوید که هوشیاری در به وجود آمدن هستی دارای نقش بوده‌است.

فیزیکدانهای دیگری هم گونه‌های خاص خود را از تفسیر فون نویمن توسعه داده‌اند، فیزیکدانهایی مانند:

Participat- the and Mechanics Quantum Universe: ("Mindful "هنری استاپ
Encounters Physics Enigma: (Quantum :بروس روزنبلوم و فرد کانتر Observer") ing
Consciousness)

۱۸.۹ ذهنهای متعدد

تفسیر ذهنهای متعدد از مکانیک کوانتومی با این ایده که تفاوت بین دنیاها باید در سطح ذهن یک مشاهده‌گر ایجاد شود، تفسیر دنیاهای متعدد را توسعه می‌دهد. منطق کوانتومی

منطق کوانتومی را می‌توان نوعی از منطق گزاره‌ای دانست که برای درک حالتهای غیرعادی مربوط به اندازه‌گیری‌های کوانتومی، به ویژه آنهایی که مربوطند به ترکیب عملیات اندازه‌گیری متغیرهای مکمل، مناسب است. این زمینهٔ تحقیقاتی و و نام آن ریشه در مقالهٔ سال ۱۹۳۶ "گرت برکهوف" و "جان فون نویمن" دارند. این دو تلاش کردند که برخی از ناسازگاریهای ظاهری منطق بولین کلاسیک را با حقایق مربوط به مشاهده و اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی آشتی دهند.

۱۹.۹ نظریه‌های اطلاعاتی کوانتومی

نظریه‌های اطلاعاتی کوانتومی

رهیافتهای اطلاعاتی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

هستی‌شناسیهای اطلاعات، مانند bit" from "it از ویلر. این رهیافتها به عنوان احیای مجدد "مجرد گرایی" توصیف شده‌اند تفاسیری که در آنها، مکانیک کوانتومی به جای خود جهان، دانش یک مشاهده‌گر را از جهان توصیف می‌کند. این رهیافت مشابهتهایی با تفکر بوهر دارد. فروریختن (که به آن، "کاهش" هم گفته می‌شود)، معمولاً به عنوان مشاهده‌گری توصیف می‌شود که از یک اندازه‌گیری در حال به دست آوردن اطلاعات است، تا یک رویداد عینی. این رهیافتها به عنوان مشابه ابزارگرایی ارزیابی شده‌اند.

حالت، یک ویژگی عینی یک سیستم تکی نیست، بلکه اطلاعاتی است که از دانستن چگونگی آماده‌سازی سیستم به دست آمده‌است و می‌توان از آن برای پیش‌بینی اندازه‌گیری‌های آینده استفاده کرد.... یک حالت کوانتوم ـ مکانیکی، که خلاصه‌ای است از اطلاعات مشاهده‌گر دربارهٔ یک سیستم فیزیکی تکی، هم از راه قوانین دینامیکی تغییر می‌کند و هم هرگاه که مشاهده‌گر از راه فرایند اندازه‌گیری، دربارهٔ سیستم اطلاعات کسب می‌کند. وجود دو قانون برای تکامل بردار حالت... تنها زمانی مشکل‌ساز خواهد بود که اعتقاد بر این باشد که بردار حالت، یک ویژگی عینی سیستم است... "کاهش یک بستهٔ موجی" در هوشیاری مشاهده‌گر اتفاق می‌افتد. این ناشی از هیچ فرایند فیزیکی یکتایی نیست که آنجا اتفاق می‌افتد، بلکه تنها به این دلیل است حالت، یک ساخت مشاهده‌گر است و نه یک ویژگی عینی سیستم فیزیکی. تفاسیر "کیفیتی" از نظریهٔ کوانتومی

نخستین بار، "وان فراسن" در سال ۱۹۷۲ در مقالهٔ خود The to Approach Formal "A Science" of Philosophy به تفاسیر کیفی از مکانیک کوانتومی اشاره کرد. اما هم‌اکنون این عبارت برای توصیف مجموعه‌ای گسترده‌تر از مدل‌ها به کار می‌رود که که از این رهیافت بیرون آمدند. دائرةالمعارف فلسفهٔ استانفورد چند نسخه را توصیف می‌کند:

نسخهٔ کپنهاگ تفاسیر کوخن- دیکس ـ هیلی تفاسیر کیفی اولیه بر اساس کار کلیفتون، دیکسون و باب

۲۰.۹ نظریه‌های متقارن نسبت به زمان

چند نظریه پیشنهاد شده‌اند که معادلات مکانیک کوانتومی را به گونه‌ای تغییر می‌دهند که نسبت به وارونگی زمانی، متقارن باشند. این ویژگی سبب "علیت پس‌رونده" می‌شود: دقیقاً به همان ترتیبی که رویدادهای گذشته رویدادهای آینده را تحت تأثیر قرار می‌دهند، رویدادهای آینده هم می‌توانند رویدادهای گذشته را تحت تأثیر قرار دهند. در این نظریه‌ها، یک اندازه‌گیری تنها نمی‌تواند حالت سیستم را به صورت کامل تعیین کند (که این امر، این نظریه‌ها را به نظریهٔ متغیر پنهان تبدیل می‌کند). اما با انجام دو آزمایش در زمانهای متفاوت، می‌توان حالت دقیق سیستم را در همهٔ زمانهای مابین تعیین کرد. بنابراین، فروریختن تابع موجی تغییری فیزیکی برای سیستم محسوب نمی‌شود، بلکه تغییری است در دانش ما نسبت به آن به دلیل آزمایش دوم. به روشی مشابه، این نظریه‌ها گرفتاری را به عنوان توهمی ناشی از نادیده گرفتن علیت پس‌رونده، و نه به عنوان یک حالت فیزیکی واقعی توضیح می‌دهند. نقطه‌ای که در آن به نظر می‌آید که دو ذره گرفتار شده‌اند، نقطه‌ای است که هر ذره متأثر از اتفاقاتی است که در آینده برای ذرهٔ دیگر رخ می‌دهند.

۲۱.۹ نظریه‌های انشعاب مکانی ـ زمانی

این نظریه‌ها شبیه تفسیر دنیاهای متعدد هستند. تفاوت عمده این است که تفسیر انشعاب مکانی ـ زمانی فرض می‌کند که انشعاب تاریخ، به جای نتیجه‌ای از تکامل جداگانهٔ اجزاء مختلف یک بردار حالت، آیندهٔ توپولوژی مجموعهٔ رویدادها به همراه روابط علّی آن‌ها است. در تفسیر دنیاهای متعدد، این توابع موجی هستند که انشعاب می‌زنند، در حالی که در تفسیر انشعاب مکانی ـ زمانی، خود توپولوژی مکان ـ زمان انشعاب می‌زند. این نظریه دارای کاربردهایی در قضیهٔ بل، محاسبات کوانتومی و گرانش کوانتومی است. همچنین این نظریه شباهتهایی هم با نظریه‌های متغیر پنهان و تفسیر گروهی دارد. در این نظریه، ذرات دارای چندین مسیر تعریف‌شده در سطح میکروسکوپیک هستند. اینها را تنها می‌توان به صورت تصادفی و در سطحی بالاتر، به همراهی تفسیر گروهی مورد بررسی قرار داد.

تفاسیر دیگر

علاوه بر تفاسیر عمده‌ای که در بالا بحث شدند، شماری از تفاسیر دیگر هم پیشنهاد شده‌اند که اثر علمی چندانی ایجاد نکرده‌اند. دامنهٔ این تفاسیر از پیشنهادهای فیزیکدانهای عمده تا ایده‌های پنهان "عرفان کوانتومی" است.

فصل ۱۰

مقایسه تفاسیر

در هر صورت، مکانیک کوانتومی یکی از موفق‌ترین نظریه‌های علمی است که توانسته است پدیده‌های گوناگون در مقیاس اتمی و زیراتمی را توضیح دهد. درک عمیق‌تر این نظریه و یافتن یک تفسیر جامع برای آن، می‌تواند گام‌های بزرگی در درک عمیق‌تر این نظریه و یافتن یک تفسیر جامع برای آن، می‌تواند گام‌های بزرگی در پیشرفت دانش بشری باشد. تلاش‌های نظری و تجربی در این زمینه همچنان ادامه دارد و امید است که در آینده شاهد پیشرفت‌های بیشتری در این حوزه باشیم.

لازم به ذکر است که انتقادات و چالش‌های موجود به تفسیرهای مختلف مکانیک کوانتومی، نشان‌دهنده پیچیدگی‌های این نظریه و نیاز به تحقیقات بیشتر است. هر چند این انتقادات می‌تواند باعث پیشرفت بیشتر در فهم ما از مکانیک کوانتومی شود، اما نباید باعث شک و تردید در اعتبار این نظریه شود که توانسته است بسیاری از پدیده‌های طبیعی را با دقت فوق‌العاده‌ای توصیف و پیش‌بینی کند.

در نهایت، هنوز هیچ تفسیر جامع و کاملی برای مکانیک کوانتومی وجود ندارد که بتواند همه جنبه‌های آن را توضیح دهد. تلاش‌ها برای یافتن یک چنین تفسیری همچنان ادامه دارد و تفسیرهای جدید و متفاوتی نیز ارائه می‌شوند. هر تفسیر نقاط قوت و ضعف‌های خاص خود را دارد و انتخاب یک تفسیر خاص بستگی به اهداف و نیازهای محقق دارد. پیشرفت در درک عمیق‌تر مکانیک کوانتومی و یافتن یک تفسیر جامع برای آن، نیازمند تلاش مستمر و همکاری گسترده میان دانشمندان و محققان این حوزه در سراسر جهان است. این روند پیچیده و طولانی‌مدت است، اما می‌تواند به افق‌های تازه‌ای در دانش بشری بگشاید.

یج‌ترین تفاسیر مکانیک کوانتومی در جدول زیر خلاصه شده‌اند. برخی از آن‌ها مانند تفسیر کپنهاگی بر اهمیت مشاهده تاکید دارند، در حالی که تفسیرهای دیگر، مانند تفسیر چند جهانی، سعی دارند که به کلی از مفهوم فروپاشی پرهیز کنند. انتخاب یکی از این تفسیرها تا حد زیادی به دیدگاه فلسفی افراد بستگی دارد، چرا که تاکنون هیچ آزمایش قطعی برای تأیید یا رد آن‌ها وجود نداشته است. هیچ‌گونه شواهد تجربی وجود ندارد که باعث تمایز این تفاسیر شود. تا این حد، نظریهٔ فیزیکی پابرجاست و با خودش و با واقعیت سازگاری دارد. مشکلات زمانی رخ می‌دهند که کسی تلاش کند که نظریه را تفسیر کند. با این وجود، طراحی آزمایشهایی که تفاسیر مختلف را می‌آزمایند زمینهٔ تحقیقاتی فعال است. بیشتر این تفاسیر دارای نسخه‌های مختلف هستند. برای نمونه، از آنجا که افراد پرشماری در توسعه و بحث دربارهٔ تفسیر کوپنهاگی نقش داشته‌اند، مشکل است که تعریف

دقیقی از آن ارائه شود. بر طبق گفتهٔ بوهر، مفهوم حالت فیزیکی مستقل از شرایط مشاهدهٔ تجربی آن معنایی ندارد که به خوبی تعریف شده باشد. بر طبق گفتهٔ هایزنبرگ، تابع موجی یک احتمال را نشان می‌دهد و نه یک حقیقت عینی را در زمان و مکان. بر اساس تفسیر کوپنهاگی، تابع موجی زمانی فرو می‌ریزد که یک اندازه‌گیری انجام می‌شود. هم ذره و هم تابع موجی راهنما، حقیقی هستند ذره دارای تاریخ یکتاست، ولی امواج تاریخ چندگانه دارند. اما کاربرد منطق کوانتومی کمتر از نظریهٔ تاریقهای منسجم است مکانیک کوانتومی به عنوان راهی برای پیش‌بینی مشاهدات، یا یک نظریهٔ اندازه‌گیری شناخته می‌شود. از این حقیقت نتیجه می‌شود که پاپر به درستی قطعیت ضد واقعیت و موضعی بودن، هر دو، اعتقاد داشت. جای بحث دارد که آیا تفسیر پاپر را می‌توان به عنوان تفسیری از مکانیک کوانتومی در نظر گرفت (که پاپر این ادعا را دارد) یا باید آن را اعمال تغییراتی به مکانیک کوانتومی دانست (که بسیاری از فیزیکدانها این اعتقاد را دارند)، و اگر مورد دوم صحیح باشد، آیا این تغییرات به روش تجربی رد شده‌اند یا نه. پاپر در این مورد نامه‌نگاریهای طولانیی با انیشتین، بل و... داشت. مشاهده‌گرها تابع موجی فراگیر را به مجموعه‌هایی متعامد از آزمایشها جداسازی می‌کنند. اگر تابع موجی حقیقی باشد، این تفسیر تبدیل می‌شود به تفسیر دنیاهای متعدد. اگر تابع موجی کمتر از واقعیت و بیشتر از اطلاعات صرف باشد، زورک آن را "تفسیر وجودی" می‌نامد. در تفسیر تراکنشی، فروریختن بردار حالت به عنوان تکمیل تراکنش بین ساطع‌کننده و جذب‌کننده تفسیر می‌شود. تفسیر تراکنشی، غیر موضعی است. مقایسهٔ تاریخ بین سیستم‌ها در این تفسیر معنی به خوبی تعریف‌شده‌ای ندارد. هر برهمکنش فیزیکی به عنوان یک رویداد فرو ریزش، نسبت به سیستم‌های درگیر و نه فقط مشاهده‌گرهای ماکروسکوپیک یا هوشیار، شناخته می‌شود. حالت یک سیستم به مشاهده‌گر، یعنی به چارچوب مرجع مشاهده‌گر، بستگی دارد.

تفسیر	نکات کلیدی	مشکلات
تفسیر کپنهاگی	• سیستم قبل از اندازه‌گیری در حالت برهم نهی است. • عمل مشاهده باعث فروپاشی تابع موج می‌شود.	• مشاهده به عنوان عاملی تأثیرگذار بر سیستم فیزیکی مطرح است.
تفسیر چند جهانی	• هیچ فروپاشی تابع موجی رخ نمی‌دهد. • تمام حالت‌ها در جهان‌های موازی تحقق می‌یابند.	• فرضیه وجود بی‌نهایت جهان‌های موازی دشوار است.
تفسیر تاریخ‌های هم‌خوان	• فروپاشی تابع موج معنای دقیقی ندارد. • توالی تاریخ‌های ممکن به‌عنوان گزینه‌های هم‌خوان مطرح می‌شود.	• نحوه انتخاب تاریخ‌های هم‌خوان مبهم است.
تفسیر نسبی‌گرا	• حالت سیستم به مشاهده‌گر وابسته است. • فروپاشی تابع موج یک پدیده مطلق نیست.	• توضیح رابطه بین مشاهده‌گر و سیستم دشوار است.
تفسیر بوهمی	• ذرات همواره دارای مسیر مشخصی هستند. • تابع موج نقش هدایت‌گر دارد.	• تفسیر کمتر مورد توجه است و برای سیستم‌های ماکروسکوپی پیچیده است.

جدول ۱.۱۰: مقایسه تعدادی از تفاسیر مکانیک کوانتومی

فصل ۱۱

نقش زمان در مکانیک کوانتومی

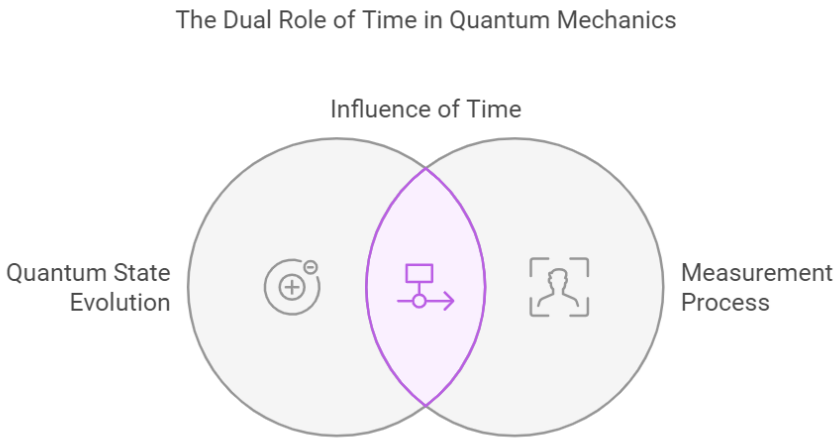
در مکانیک کوانتومی، زمان نقشی اساسی و چندوجهی ایفا می‌کند که برای درک رفتار سامانه‌های کوانتومی ضروری است. این سند به بررسی اهمیت زمان در مکانیک کوانتومی پرداخته و تأثیرات آن بر تحول حالت‌های کوانتومی، فرآیند اندازه‌گیری و طبیعت بنیادی واقعیت را مورد بحث قرار می‌دهد.

در مکانیک کوانتومی، زمان اغلب به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود که تحول حالت‌های کوانتومی را کنترل می‌کند. معادله شرودینگر که از مبانی نظریه کوانتومی است، نشان می‌دهد که تابع موج یک سامانه کوانتومی چگونه در طول زمان تحول می‌یابد. این معادله بیان می‌کند که حالت یک سامانه کوانتومی در هر لحظه مشخص، به حالت آن در لحظات پیشین بستگی دارد و بر اهمیت زمان در پیش‌بینی رفتار آینده تأکید می‌کند. برخلاف مکانیک کلاسیک که زمان را مطلق و یکنواخت می‌پندارد، مکانیک کوانتومی رابطه پیچیده‌تری بین زمان و ماهیت احتمالی حالت‌های کوانتومی ارائه می‌دهد.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم زمان در مکانیک کوانتومی، نقش آن در فرآیند اندازه‌گیری است. هنگامی که یک اندازه‌گیری انجام می‌شود، تابع موج فرو می‌ریزد و سامانه به یک حالت معین می‌رسد. این فروپاشی آنی است و سؤالاتی را درباره ماهیت خود زمان ایجاد می‌کند. زمان‌بندی اندازه‌گیری‌ها می‌تواند بر نتایج تأثیر بگذارد و به پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی منجر شود، جایی که حالت‌های دو ذره با وجود فاصله‌ای که آنها را جدا می‌کند، همبسته می‌شوند. این موضوع شهود کلاسیک ما درباره زمان و محلی بودن را به چالش می‌کشد.

علاوه بر این، مفهوم زمان در مکانیک کوانتومی به شکلی پیچیده با نظریه نسبیت مرتبط است. در مکانیک کوانتومی نسبیتی، زمان به عنوان بخشی از یک چارچوب چهاربعدی فضازمان در نظر گرفته می‌شود که در آن، جدایی بین فضا و زمان کمتر مشخص است. این تعامل بین مکانیک کوانتومی و نسبیت منجر به تحقیقات مداوم درباره گرانش کوانتومی و تلاش برای یافتن نظریه‌ای یکپارچه شده که این دو ستون بنیادی فیزیک را با هم آشتی دهد.

در نتیجه، زمان عنصری بنیادی در مکانیک کوانتومی است که بر تحول حالت‌های کوانتومی، فرآیند اندازه‌گیری و درک ما از جهان تأثیر می‌گذارد. ماهیت پیچیده آن مفاهیم کلاسیک را به چالش می‌کشد و همچنان الهام‌بخش جستجوهای عمیق فلسفی و علمی درباره ساختار واقعیت است.



۱.۱۱ جابجایی‌ناپذیری عملگرها در مکانیک کوانتومی

در مکانیک کوانتومی، کمیت‌های فیزیکی با عملگرهای خطی بر روی فضای هیلبرت نمایش داده می‌شوند. رفتار و خواص این عملگرها، از جمله جابجاپذیری یا جابجایی‌ناپذیری آن‌ها، تأثیر مستقیمی بر قابل‌مشاهده بودن هم‌زمان آن کمیت‌ها دارد. هدف این نوشتار بررسی رابطه جابجایی بین عملگرها، اثبات رابطه $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$، و تحلیل ماهیت زمان در مقایسه با سایر کمیت‌هاست.

۲.۱۱ رابطه جابجایی بین عملگرها

برای دو عملگر $\hat{A}$ و $\hat{B}$، رابطه جابجایی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$$

اگر $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$ باشد، این دو عملگر **جابجاپذیر** هستند و می‌توانند بردارهای ویژه‌ی مشترک داشته باشند. در غیر این صورت، نمی‌توان آن‌ها را همزمان با دقت دلخواه اندازه‌گیری کرد و رابطه عدم قطعیت میان آن‌ها برقرار خواهد بود.

۳.۱۱ اثبات $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$

در نمایش مکان:

- عملگر مکان: $\hat{x}\psi(x) = x\psi(x)$

- عملگر تکانه: $\hat{p}\psi(x) = -i\hbar\frac{d}{dx}\psi(x)$

اکنون رابطه جابجایی را بررسی می‌کنیم:

$$[\hat{x},\hat{p}]\psi(x) = \hat{x}\hat{p}\psi(x) - \hat{p}\hat{x}\psi(x)$$

$$= -i\hbar x\frac{d}{dx}\psi(x) + i\hbar\left(\psi(x) + x\frac{d}{dx}\psi(x)\right) = i\hbar\psi(x)$$

در نتیجه:

$$[\hat{x},\hat{p}] = i\hbar$$

۴.۱۱ توجیه ساختاری تعریف عملگر تکانه

تعریف $\hat{p} = -i\hbar\frac{d}{dx}$ از تقارن‌های بنیادی ناشی می‌شود. عملگر انتقال مکان:

$$\hat{T}(\epsilon)\psi(x) = \psi(x-\epsilon) = e^{-\epsilon\frac{d}{dx}}\psi(x)$$

و از طرفی در مکانیک کوانتومی:

$$\hat{T}(\epsilon) = e^{-\frac{i\epsilon\hat{p}}{\hbar}} \Rightarrow \hat{p} = -i\hbar\frac{d}{dx}$$

یعنی عملگر تکانه مولد تقارن انتقال در فضا است.

۵.۱۱ وابستگی ساختاری و جابجایی‌ناپذیری

از آنجا که $\hat{p}$ به صورت مشتق نسبت به x تعریف می‌شود، ذاتاً به $\hat{x}$ وابسته است. این وابستگی ساختاری به‌طور مستقیم باعث می‌شود که این دو عملگر جابجاپذیر نباشند. بنابراین، رابطه عدم قطعیت بین مکان و تکانه:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

نه‌تنها از ساختار ریاضی، بلکه از محدودیت‌های بنیادی در اطلاعات کوانتومی ناشی می‌شود.

۶.۱۱ زمان و انرژی

بر خلاف مکان و تکانه، در مکانیک کوانتومی استاندارد:

- **زمان** یک **پارامتر** است، نه عملگر.
- **انرژی** به‌صورت هامیلتونی $\hat{H}$ تعریف می‌شود.

رابطه:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(t) = \hat{H}\psi(t)$$

نشان می‌دهد که زمان مستقل است و تابع موج نسبت به آن تحول می‌یابد. برخلاف $[\hat{x}, \hat{p}]$، رابطه $[\hat{t}, \hat{H}]$ به صورت عملگری قابل تعریف نیست، چون عملگری به نام $\hat{t}$ وجود ندارد.

رابطه عدم قطعیت زمان–انرژی

گرچه زمان عملگر نیست، ولی رابطه‌ای به شکل:

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$$

وجود دارد که به تفسیر فیزیکی وابسته است (مثلاً طول عمر حالت ناپایدار ⚛ نوسان انرژی). اما این رابطه **نتیجه مستقیم رابطه جابجایی نیست**.

۷.۱۱ نتیجه‌گیری

جابجایی‌ناپذیری عملگرها نشانه‌ی وابستگی ساختاری آن‌ها و منجر به اصل عدم قطعیت می‌شود. عملگر تکانه به‌عنوان مولد انتقال مکانی تعریف می‌شود و از تقارن‌های فضا ناشی می‌شود. زمان در مکانیک کوانتومی استاندارد، عملگر نیست و بنابراین رفتار آن با انرژی متفاوت است.

منابع پیشنهادی برای مطالعه بیشتر:

- *Mechanics Quantum to Introduction* Griffiths،
- *Mechanics Quantum Modern* Sakurai،
- *Development Modern A Mechanics: Quantum* Ballentine،

۸.۱۱ زمان و انرژی در مکانیک کوانتومی

در مکانیک کوانتومی، زمان رفتاری متفاوت از کمیت‌هایی مانند مکان و تکانه دارد. برخلاف آن‌ها، زمان در فرمول‌بندی استاندارد این نظریه به‌صورت یک **پارامتر** در نظر گرفته می‌شود، نه یک عملگر. این تفاوت بنیادی موجب می‌شود که نتوان رابطه جابجایی‌ای مانند $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ برای زمان و انرژی تعریف کرد، هرچند مفهومی از عدم قطعیت بین این دو وجود دارد.

۹.۱۱ ۱. زمان در مکانیک کوانتومی: پارامتر، نه عملگر

در مکانیک کوانتومی استاندارد، زمان t یک پارامتر خارجی است که تحول سیستم کوانتومی بر حسب آن توصیف می‌شود. تابع موج $\psi(t)$ نسبت به زمان تکامل می‌یابد و هامیلتونی $\hat{H}$ (که انرژی سیستم را نمایش می‌دهد) حاکم بر این تحول است:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(t) = \hat{H}\psi(t)$$

در این معادله، زمان چیزی نیست که یک عملگر روی تابع موج اعمال کند. در مقابل، کمیت‌هایی مانند مکان و تکانه دارای عملگر هستند که مستقیماً روی $\psi(x)$ عمل می‌کنند.

۱۰.۱۱ ۲. رابطه عدم قطعیت انرژی–زمان

گرچه رابطه جابجایی بین زمان و انرژی به‌صورت عملگری تعریف‌پذیر نیست، اما رابطه‌ای شبیه به اصل عدم قطعیت برای این دو کمیت وجود دارد:

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$$

این رابطه نه از جابجایی عملگرها، بلکه از تحول زمانی سیستم ناشی می‌شود. برای مثال:

- اگر یک حالت خاص انرژی مشخص (ویژه‌مقدار دقیق) داشته باشد، در زمان تغییر نمی‌کند و طول عمر آن بی‌نهایت است.
- در مقابل، اگر حالت ترکیبی از چند انرژی باشد (عدم قطعیت در انرژی)، تابع موج در زمان نوسان می‌کند و طول عمر حالت محدود می‌شود.

بنابراین، این نوع عدم قطعیت بر پایه مفاهیم دینامیکی و تحول زمانی است، نه ساختار جبری عملگرها.

۱۱.۱۱ ۳. تلاش برای تعریف عملگر زمان

در دهه‌های ابتدایی نظریه کوانتومی، برخی فیزیک‌دانان (مانند پاولی) تلاش کردند تا عملگری برای زمان تعریف کنند. اما پاولی نشان داد که برای بسیاری از سیستم‌های فیزیکی نمی‌توان عملگری $\hat{T}$ یافت که با هامیلتونی چنین رابطه‌ای داشته باشد:

$$[\hat{T}, \hat{H}] = i\hbar$$

مگر اینکه:

- طیف انرژی $\hat{H}$ پیوسته و بدون کران باشد (از $-\infty$ تا $+\infty$)،

- که در سیستم‌های فیزیکی واقعی معمولاً برقرار نیست (مثلاً برای ذرات پایدار با انرژی مثبت).

در نتیجه، در مکانیک کوانتومی معمول، زمان به‌عنوان پارامتر باقی می‌ماند.

۱۲.۱۱ ۴. مقایسه با مکان و تکانه

کمیت‌ها	عملگر دارد؟	جابجایی‌پذیر؟	عدم قطعیت	ماهیت
مکان و تکانه	بله	خیر	ریاضی (دقیق)	ناشی از ساختار فضای هیلبرت
انرژی و زمان	انرژی: بله، زمان: نه	تعریف‌ناپذیر	مفهومی، تقریبی	از تحول زمانی سیستم

۱۳.۱۱ ۵. رویکردهای مدرن به زمان در کوانتوم

در نظریه‌های پیشرفته‌تر مانند:

- نظریه میدان‌های کوانتومی (QFT)
- نظریه‌های کوانتومی باز (Open Quantum Systems)
- مدل‌های پارامتریک یا عملگر زمان در فضاهای خاص

مفاهیمی از زمان به‌صورت پارامترهای دینامیکی یا حتی عملگرهای مؤثر ظاهر می‌شوند. اما این موارد هنوز در چارچوب مکانیک کوانتومی معمول رایج نیستند.

۱۴.۱۱ نتیجه‌گیری

در مکانیک کوانتومی استاندارد، زمان پارامتری است که تحول سیستم بر حسب آن بیان می‌شود و عملگری ندارد که با انرژی رابطه جابجایی داشته باشد. در نتیجه، رابطه عدم قطعیت زمان—انرژی برخلاف مکان—تکانه، مفهومی و وابسته به تحول زمانی سیستم است، نه نتیجه ساختار جبری عملگرها.

فصل ۱۲

سخن پایانی

مکانیک کوانتومی یکی از پیشرفته‌ترین نظریه‌های فیزیک است که دیدگاه‌های ما نسبت به طبیعت و واقعیت را تغییر داده است. این نظریه پایه‌گذار بسیاری از فناوری‌های مدرن است که در زندگی روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اصل عدم قطعیت و اثر ناظر دو مفهوم بنیادی در مکانیک کوانتوم هستند که درک ما از جهان میکروسکوپی را شکل می‌دهند. در حالی که این دو مفهوم متفاوت هستند، هر دو به محدودیت‌های ذاتی در مشاهده و اندازه‌گیری سیستم‌های کوانتومی اشاره دارند. درک عمیق این مفاهیم برای پیشرفت در زمینه‌های مختلف فیزیک کوانتومی و کاربردهای آن ضروری است.

مباحث فلسفی مکانیک کوانتومی به چالش‌های عمیق و بنیادینی می‌پردازد که این نظریه علمی در فهم ما از جهان میکروسکوپی ایجاد کرده است. این مباحث نه تنها به بررسی اصول علمی، بلکه به تحلیل پیامدهای فلسفی آن‌ها نیز می‌پردازند. در این راستا، مفاهیمی چون اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، دوگانگی موج‌ـذره و نقش مشاهده‌گر، سؤالاتی اساسی درباره ماهیت واقعیت، زمان و مکان، و همچنین نقش انسان در فرآیندهای طبیعی را مطرح می‌کنند. این چالش‌ها به ما امکان می‌دهند تا به تفکر عمیق‌تری درباره شناخت و حقیقت بپردازیم. تفاسیر مختلفی از مکانیک کوانتومی وجود دارد که هر یک نمایانگر دیدگاه‌های متفاوتی درباره واقعیت و شناخت هستند. از تفسیر کپنهاگی که بر اهمیت عمل مشاهده تأکید دارد تا تفسیر چند جهانی که وجود چندین جهان موازی را پیشنهاد می‌کند، هر یک از این تفاسیر به نوعی به درک ما از جهان کمک می‌کنند. در نهایت، مباحث فلسفی مکانیک کوانتومی نه تنها درک ما از علم را غنی‌تر می‌کنند، بلکه به ما یادآوری می‌کنند که پرسش‌های بزرگ درباره وجود و حقیقت همچنان در کانون تفکر انسانی قرار دارند. این مباحث ما را به چالش می‌کشند تا به جستجوی پاسخ‌های عمیق‌تر ادامه دهیم و جایگاه خود را در کیهان بهتر بشناسیم.

کتاب‌نامه

[۱] W. Heisenberg، (۱۹۲۷). Über den anschaulichen Inhalt der quanten- theoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik، ۴۳ (۳-۴)، ۱۷۲-۱۹۸.

[۲] J. Wheeler، A.، W. Zurek، H. (Eds.). (۱۹۸۳). Quantum theory and measurement. Princeton University Press.