



۸۱۰۱۰۱۵۵۸

پردازش اطلاعات کوانتومی
نام و نام خانوادگی: مهدی وجهی



تمرین ۱

بخش (الف): گزارش مختصر از مفهوم آزمایش *DoubleSlit*

مقدمه

آزمایش دوشکاف یکی از آزمایش‌های کلیدی برای درک ماهیت عجیب ذرات در سطح کوانتومی است. این آزمایش نشان می‌دهد که ذرات می‌توانند همزمان رفتارهای موجی و ذره‌ای از خود نشان دهند.

۱.۰ رفتار موجی نور

□ **نور به عنوان موج:** در ابتدای آزمایش، نور به عنوان یک موج در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که نور (به عنوان مثال، نور تک‌رنگ) به یک صفحه با دو شکاف تابیده می‌شود، امواج نور از هر دو شکاف عبور کرده و با یکدیگر تداخل می‌کنند.

□ **الگوی تداخلی:** نتیجه این تداخل، ایجاد یک **الگوی تداخلی** روی پرده پشتی است که به صورت نوارهای روشن و تاریک متناوب دیده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده ماهیت موجی نور است.

۲.۰ رفتار ذره‌ای ذرات (شن)

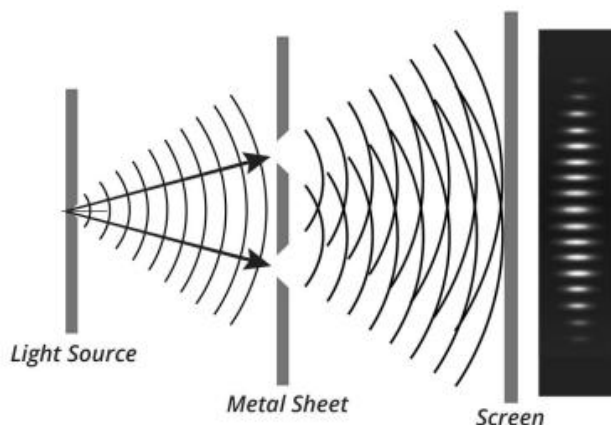
□ **ذرات به عنوان ذره:** برای مقایسه، آزمایش با ذرات ماکروسکوپی مانند دانه‌های شن انجام می‌شود. در این حالت، هر دانه شن فقط از یکی از شکاف‌ها عبور می‌کند.

□ **دو نوار مجزا:** روی پرده پشتی، تنها دو **نوار** از دانه‌های شن تشکیل می‌شود که مستقیماً پشت هر شکاف قرار دارند. این نتیجه نشان‌دهنده رفتار خالصاً ذره‌ای است.

۳.۰ رفتار عجیب اتم‌ها (مکانیک کوانتومی)

□ **اتم‌ها با یک شکاف:** اگر آزمایش با ذرات کوانتومی مانند اتم‌ها انجام شود و تنها یک شکاف باز باشد، اتم‌ها به صورت ذره‌ای رفتار کرده و یک نوار نقطه‌ای روی پرده ایجاد می‌کنند.

□ **اتم‌ها با دو شکاف:** هنگامی که هر دو شکاف باز می‌شوند، حتی اگر اتم‌ها یکی‌یکی پرتاب شوند، روی پرده پشتی یک الگوی تداخلی تشکیل می‌شود که مشابه الگوی تداخلی نور است. این پدیده نشان می‌دهد که هر اتم به نوعی از وجود هر دو شکاف آگاه است و انگار به طور همزمان از هر دو عبور می‌کند.



شکل ۱: طرح کلی آزمایش دو شکاف که دوگانگی موج-ذره را نشان می‌دهد.

۴.۰ اثر مشاهده‌گر

□ **تأثیر مشاهده:** بخش شگفت‌انگیزتر این آزمایش زمانی رخ می‌دهد که تلاشی برای مشاهده مسیر عبور اتم از شکاف‌ها صورت می‌گیرد (مثلاً با قرار دادن یک آشکارساز).

□ **ناپدید شدن الگوی تداخلی:** در کمال تعجب، به محض اینکه اتم‌ها تحت مشاهده قرار می‌گیرند، الگوی تداخلی ناپدید شده و اتم‌ها مجدداً به صورت ذره‌ای رفتار می‌کنند و تنها دو نوار مجزا روی پرده ایجاد می‌شود.

□ **نتیجه‌گیری:** این پدیده نشان می‌دهد که عمل مشاهده می‌تواند بر رفتار ذرات کوانتومی تأثیر بگذارد، گویی ذره "می‌داند" که در حال مشاهده شدن است و رفتار خود را تغییر می‌دهد.

نتیجه‌گیری بخش اول

آزمایش دوشکاف جوهره دوگانگی موج-ذره را به تصویر می‌کشد، که یکی از اصول بنیادین مکانیک کوانتومی است. این آزمایش چالش‌های عمیقی در درک ما از واقعیت فیزیکی در مقیاس‌های کوچک ایجاد می‌کند.

بخش (ب): گزارش مختصر از مفهوم قضیه Bell

قضیه بل یکی از عمیق‌ترین و شگفت‌انگیزترین مفاهیم در فیزیک مدرن است که درک ما از **واقعیت** را به چالش می‌کشد. این قضیه نشان می‌دهد که جهان در سطح کوانتومی با شهود روزمره ما سازگار نیست.

۵.۰ پارادوکس فیلترهای پلاریزه

آزمایش با سه فیلتر پلاریزه نور (مانند شیشه‌های عینک آفتابی) شروع می‌شود:

□ فیلتر A و فیلتر C با اختلاف زاویه 90° درجه نسبت به هم قرار می‌گیرند. در این حالت، نوری که از فیلتر A عبور می‌کند، توسط فیلتر C کاملاً مسدود می‌شود.

□ پدیده عجیب: وقتی فیلتر B با زاویه 45° درجه بین دو فیلتر دیگر قرار می‌گیرد، به طور غیرمنتظره‌ای مقداری از نور از کل مجموعه عبور می‌کند. این پدیده به خودی خود عجیب است، زیرا یک فیلتر اضافی به جای مسدود کردن نور بیشتر، باعث عبور نور شده است.

۶.۰ تناقض اعداد و متغیرهای پنهان

شگفتی اصلی در اعداد و احتمالات نهفته است:

□ **واقعیت کوانتومی:** آزمایش‌ها نشان می‌دهند که احتمال عبور یک فوتون از دو فیلتر که با هم زاویه θ دارند، برابر با $\cos^2(\theta)$ است. این یعنی بین فیلتر A و C (اختلاف 90° درجه)، احتمال عبور 0% است، اما بین A و B (اختلاف 45° درجه)، احتمال عبور 50% است.

□ **نظریه متغیرهای پنهان:** پیش از قضیه بل، برخی فیزیکدانان (مانند اینشتین) معتقد بودند که این رفتار احتمالی به دلیل وجود "متغیرهای پنهان" است؛ یعنی هر فوتون از قبل ویژگی‌های مشخصی دارد که تعیین می‌کند از کدام فیلتر عبور خواهد کرد. این دیدگاه "واقع‌گرایی محلی" (Local Realism) نامیده می‌شود.

۷.۰ پارادوکس نمودار ون

ویدیو با استفاده از نمودارهای ون نشان می‌دهد که ایده "متغیرهای پنهان" با نتایج آزمایش‌ها در تضاد است:

□ فرض کنید دایره A نمایانگر تمام فوتون‌هایی باشد که ویژگی عبور از فیلتر A را دارند و دایره‌های B و C نیز به همین ترتیب.

□ بر اساس نتایج آزمایش‌ها، تعداد فوتون‌هایی که از A عبور کرده ولی توسط C مسدود می‌شوند (ناحیه $A \cap C^c$) باید ۵۰٪ باشد.

□ اما اگر این ناحیه را به دو بخش تقسیم کنیم، جمع این دو بخش از نظر ریاضی هرگز به ۵۰٪ نمی‌رسد و همیشه کمتر از آن است.

□ نتیجه: این تناقض عددی نشان می‌دهد که فرض وجود "پاسخ" قطعی برای هر سه فیلتر به طور همزمان، از نظر ریاضی غیرممکن است.

۸.۰ درهم‌تنیدگی کوانتومی و نتیجه‌گیری نهایی

برای از بین بردن هرگونه شک و راه‌گریز (loophole)، آزمایش قضیه بل با استفاده از فوتون‌های درهم‌تنیده انجام می‌شود.

□ نتایج این آزمایش‌ها نیز همان تناقض عددی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که اندازه‌گیری یک ذره به صورت آنی بر ذره دیگر تأثیر می‌گذارد.

□ قضیه بل ثابت می‌کند که "واقع‌گرایی محلی" نادرست است. این یعنی حداقل یکی از دو فرض زیر باید غلط باشد:

۱. واقع‌گرایی (Realism): این ایده که اشیاء ویژگی‌های مشخصی دارند، حتی زمانی که اندازه‌گیری نمی‌شوند.

۲. محلیت (Locality): این ایده که هیچ تأثیری نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور منتقل شود.

□ این قضیه به ما می‌گوید که جهان در بنیادی‌ترین سطح خود یا "واقعی" (به معنای کلاسیک) نیست یا "محلی" نیست، که هر دو نتیجه‌گیری، درک ما از واقعیت را عمیقاً دگرگون می‌کند.