

سوال از فوتون‌ها: «کجا بودین؟!»

فیزیک‌پیشگان نسخه‌ی جدیدی از آزمایش معروف دو-شکاف را طراحی کرده‌اند. این آزمایش محققان را قادر می‌سازد پدیده‌ای را مشاهده کنند که به نظر عجیب و غریب می‌رسد. این پژوهش‌گران آزمایش دو-شکاف‌ای را در طول یکی از مسیرهای آزمایش دو-شکاف‌های بزرگ دیگر تعبیه کرده و به نتیجه‌ی جالبی دست یافته‌اند: فوتون‌هایی که بخشی از این اسباب را پیموده‌اند نه به سیستم داخل شده‌اند و نه از آن خارج شده‌اند. شاید بتوان این اثر را با اتکا به تفسیر کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌ای که اولین بار در سال ۱۹۶۴ از مکانیک کوانتوم شده بهتر درک کرد.


 **تصویری هنری از آزمایش معروف دو-شکاف**

به گزارش انجمن فیزیک ایران، شاید ساده‌ترین و کامل‌ترین نمایش دوگانگی موج-ذره آزمایش مشهور دو-شکاف باشد. ذراتی همچون فوتون‌ها و الکترون‌ها (که به شکل پراکنده گسیل می‌شوند) با عبور از دو-شکاف همانند امواج رفتار می‌کنند و زمانی که به شکل منفرد بر روی پرده آشکارسازی می‌شوند، الگوی تداخلی را پدید می‌آورند.

در آخرین نسخه‌ای از این آزمایش که توسط لو ویدمن ([Lev Vaidman](#)) و همکارانش ارائه شده، از تداخل‌سنج ماخ-زئر به عنوان اسباب دو-شکافی و از فوتون‌ها به عنوان ذرات استفاده کرده‌اند. تداخل‌سنج اپتیکی از یک شکافنده‌ی پرتو استفاده می‌کند: پرتوهای فوتونی را به دو مسیر تقسیم می‌کند، سپس آن‌ها را ترکیب کرده و به یک آشکارساز ارسال می‌کند. اختلاف در طول هر یک از این مسیرها چگونگی بازترکیب و تداخل پرتوها را تعیین می‌کند. این اختلاف شدت اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

سه مسیر ممکن

در این آزمایش یک تداخل‌سنج ماخ-زئر داخلی در یکی از مسیرهای تداخل‌سنج بیرونی قرار گرفته است، طوری که پرتوی بازترکیب‌شده به مسیر خود در طول اسباب خارجی ادامه می‌دهد و به آشکارساز می‌رسد (شکل زیر را ببینید). بنابراین یک فوتون سه مسیر پیش‌روی خود از منبع تا آشکار ساز دارد. هدف آزمایش پی‌بردن به این نکته است که فوتون‌ها کدام مسیر را برای رسیدن به آشکارساز انتخاب می‌کنند. این یک «اندازه‌گیری ضعیف» نامیده می‌شود و با قوانین مکانیک کوانتومی سازگاری دارد چون شامل اندازه‌گیری مسیر هیچ فوتون خاصی نیست.

 **در فرمول‌بندی بردار دوحالتی، احتمال یافتن یک فوتون با موج پیش‌رونده از منبع (به رنگ قرمز) و یک موج پس‌رونده از آشکارساز (به رنگ سبز) تعریف می‌شود. تنها اگر هر دو این‌ها غیرصفر باشند یک فوتون یافت می‌شود.**

پژوهشگران به منظور انجام اندازه‌گیری‌های خود، تمامی آینه‌های تداخل‌سنج را به شکل جزئی به ارتعاش

و داشته‌اند (هر یک در فرکانسی متفاوت). چنانچه یک آینه به ارتعاش درمی‌آید، طول مسیر هر نوری که از آن آینه بازتابیده می‌شود تغییر می‌کند. این باعث می‌شود تا اختلاف فاز (زمانی که پرتو بازترکیب می‌شود) دگرگون شده و شدت در آشکارساز تغییر کند. چون هر آینه در فرکانس منحصر بفردی ارتعاش می‌کند، با اندازه‌گیری نوساناتی که در شدت آشکارسازی شده (در یک فرکانس ویژه) وجود دارد نشان از این دارد که فوتون‌ها با آینه‌ی ویژه‌ای تماس داشته‌اند.

پژوهشگران دو مسیر را در طول تداخل‌سنج داخلی چنان آرایش داده‌اند که وقتی بازترکیب می‌شوند به شکل مخرب تداخل کنند. بنابراین هیچ نوری نمی‌تواند تداخل سنج داخلی را ترک کند. ممکن است این انتظار را داشته باشیم که تنها نوسانی که در شدت آشکارسازی شده وجود دارد ناشی از آینه‌ای باشد که تداخل سنج داخلی را دور زده، اما این با آنچه پژوهشگران یافته‌اند، مطابقت ندارد.

نتیجه‌گیری عجیب و غریب

در واقع شدتی که آشکارسازی شده در فرکانس همین آینه‌ی بیرون از تداخل‌سنج داخلی نوسان می‌کند اما این شدت در فرکانس‌های آینه‌های تداخل سنج داخلی نیز نوسان می‌کند. با این وجود این شدت در فرکانس آینه‌هایی که نور را به داخل یا خارج تداخل‌سنج داخلی معطوف می‌دارند، نوسان نمی‌کند. با این اوصاف به یک نتیجه‌گیری عجیب و غریب می‌رسیم: برخی از فوتون‌ها که توسط آشکارساز دریافت می‌شوند از تداخل‌سنج داخلی عبور کرده‌اند، اما هرگز به آن داخل نشده و هرگز آن را ترک نکرده‌اند!

محققان بر این باورند که این نتایج به تفسیر خلاف عرف از نظریه‌ی کوانتوم (فرمول‌بندی بردار دوحالتی) اعتبار می‌بخشد. این تفسیر اولین بار در سال ۱۹۶۴ توسط یاکیر آهارانوف ([Yakir Aharonov](#)), پیتربرگمن (Peter Bergmann) و جوئل لیبوویتز (Joel Lebowitz) پیشنهاد شده بود. بر اساس این فرمول‌بندی، احتمال یافتن یک ذره در یک مکان ویژه حاصل ضرب دو بردار است: یکی پیش‌رونده در زمان از طرف منبع و یکی پس‌رونده در زمان از سوی آشکارساز.

یک فوتون تنها و تنها زمانی با یک آینه تماس پیدا می‌کند که هر دوی این امواج در آن نقطه غیرصفر باشند. تداخل‌سنج داخلی سبب می‌شود تا هر موجی که این تداخل‌سنج را ترک می‌کند عیناً صفر باشد. موجی که به سمت جلو پیش می‌رود، در خروجی صفر است و بنابراین هیچ فوتونی نمی‌تواند آنجا یافت شود. موجی که به سمت عقب به سوی تداخل‌سنج پیش می‌شود در مسیر ورود به تداخل‌سنج داخلی صفر خواهد بود. پس هیچ فوتونی نمی‌تواند اینجا یافت شود. با این وجود در درون تداخل‌سنج داخلی هم موجی که به سمت جلو پیش می‌رود و هم آن که به سمت عقب می‌رود غیر صفرند بنابراین فوتون‌ها قادرند از بازوها عبور کنند (شکل را ببینید).

مشاهدات و توضیحات

ویدمن تاکید می‌کند که فرمول‌بندی بردار دوحالتی در واقع پیش‌گویی‌های متفاوتی از رهیافت مکانیک کوانتومی (که توسط اروین شرودینگر در دهه‌ی ۱۹۲۰ ارائه شده) به دست نمی‌دهد. با این وجود به نظر می‌رسد نتایج این آزمایش به شدت متضاد با منطق است و منطقی‌سازی آن با استفاده از روش سنتی دشوار است. به گفته‌ی ویدمن: «می‌توانید ثابت‌ها را تعریف کنید و می‌توانید مشاهداتی را درباره‌ی آنچه

با استفاده از فرمول‌بندی بردار دوحالته بدست می‌آید را داشته باشید.» «اما این چیزی نخواهد بود که مکانیک کوانتوم استاندارد نتواند در پایان آن را توضیح دهد.»

به بیان اونا هاستن ([Onur Hosten](#)) از دانشگاه ایلینوی در اوربانا شامپاین که در این آزمایش شرکت نداشته است، چه آزمایش را با استفاده از فرمول‌بندی دوحالته در نظر بگیرید و چه با استفاده از رهیافت مکانیک کوانتومی سنتی، این اثر با این حقیقت ایجاد می‌شود که انجام یک اندازه‌گیری ضعیف به ناچار سیستم را مختل می‌کند. نوسانات آینه‌ها به خودی خود طول مسیرها را تغییر می‌دهد، بنابراین تداخل مخرب کاملی که بین دو مسیر از تداخل‌سنج داخلی وجود دارد را به هم زده و به توابع موج این اجازه را می‌دهد تا به بیرون نشت کنند. با این وجود احتمال نشت یک فوتون به بیرون به شکل موثر صفر است زیرا احتمال با مجذور تابع موج متناسب است و بسیار سریع‌تر از خود تابع موج تمایل به صفر شدن دارد. به گفته‌ی هاستن: «از نظر من، درک این‌که چرا چنین نتایجی حاصل می‌شود واقعاً بسیار جذاب است» وی می‌افزاید: «اما این نیز جالب هست که یک اندازه‌گیری ضعیف پاسخ‌های نگران‌کننده‌ای را می‌دهد.»

نتایج این پژوهش در مجله‌ی فیزیکال ریویو لیترز انتشار می‌یابد و پیش‌چاپ آن بر روی پایگاه [arXiv](#) قرار دارد.

درباره‌ی نویسنده: تیم وگان ([Tim Wogan](#)) نویسنده‌ی علمی از انگلستان است.

منبع: [physicsworld](#)

زینالوند فرزین