زدایش پسینی[1]

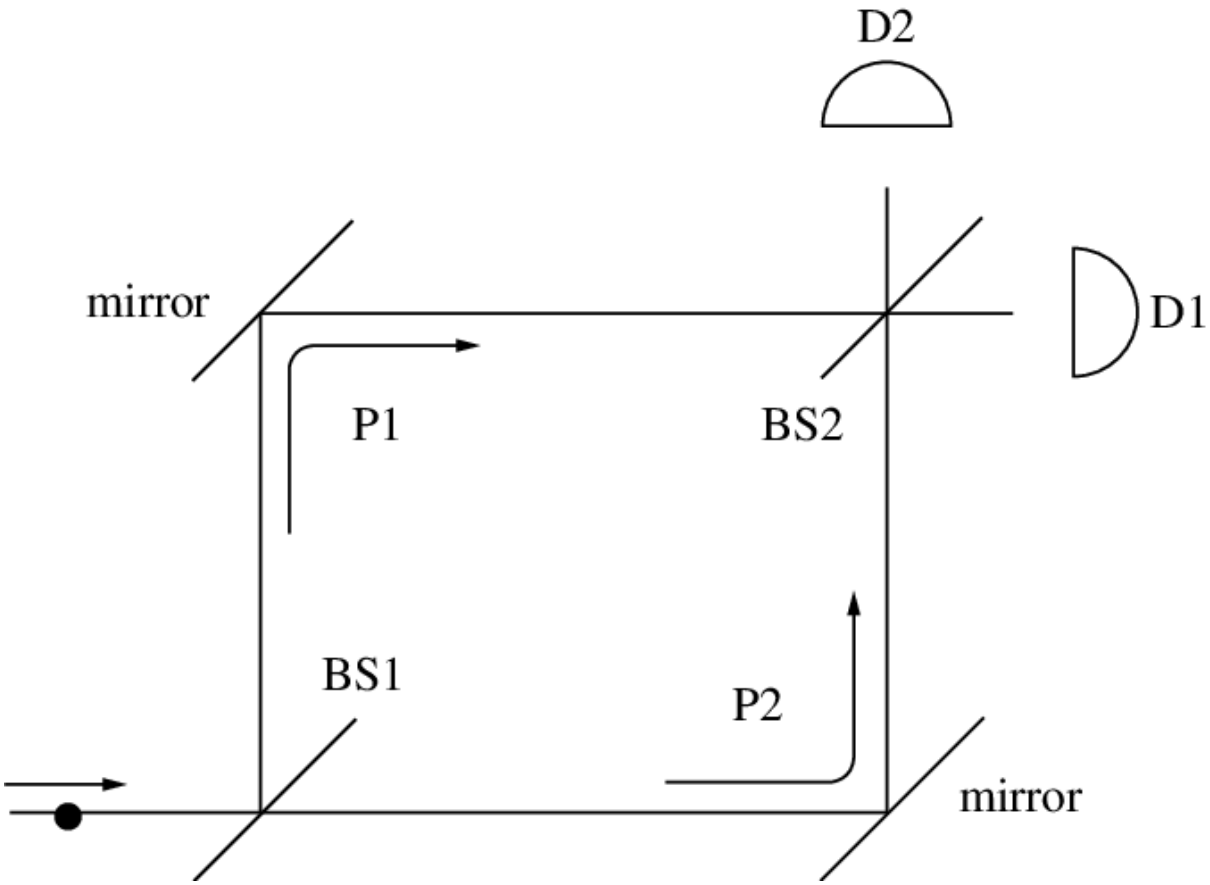
فرهنگ لران

دانش‌کده‌ی فیزیک
دانش‌گاه صنعتی اصفهان

۱۴۰۳/۸/۲۶

[1] Delayed-choice quantum eraser

یادآوری: آزمایش گزینش پسینی.



فوتونی (بسته‌موج) از سمت چپ به شکافنده‌ی ۱ (Beam Splitter) می‌تابد. اگر شکافنده‌ی ۲ (BS2) تعبیه نشده باشد، بسته-موج با احتمال برابر وارد مسیر ۱ یا ۲ می‌شود و یکی از دو آشکارساز D1 یا D2 روشن می‌شود. اگر شکافنده‌ی ۲ تعبیه شده باشد و کسی بسته‌موج را رصد نکند، آن‌گاه آن‌چه که در آشکارسازها می‌بینیم طرح تداخل است. مثلا D1 همواره در ناحیه‌ی تاریک قرار دارد و D2 در ناحیه‌ی روشن.

این آزمایش نشان می‌دهد که اگر شکافنده‌ی ۲ از چیدمان آزمایش حذف شود، بسته‌موج پس از عبور از شکافنده‌ی ۱، مسیری را برمی‌گزیند و فقط از یک راه عبور می‌کند. اما اگر شکافنده‌ی ۲ بخشی از چیدمان آزمایش باشد، آن‌گاه پس از عبور هر بسته‌موج از شکافنده‌ی ۱، D2 روشن می‌شود ولی D1 خاموش می‌ماند.

آزمایش گزینش پسینی به این معنا است که آزمایش را بدون شکافنده‌ی ۲ آغاز کنیم و مدت زمانی بعد از آن که انتظار داریم بسته‌موج از شکافنده‌ی ۱ گذر کرده باشد، تصمیم بگیریم که شکافنده‌ی ۲ را سر جای ش بگذاریم یا نه. آزمایش نشان می‌دهد که اگر تا رسیدن بسته‌موج به آشکارسازها، از تعبیه‌ی شکافنده‌ی ۲ خودداری کنیم، این یا آن آشکارساز روشن می‌شود یعنی بسته‌موج این یا آن مسیر را برگزیده است. اما اگر ناگهان تصمیم دیگری بگیریم و شکافنده‌ی ۲ را سرجای ش بگذاریم، طرح تداخل ظاهر می‌شود. انگار که بسته‌موج، در پاسخ به تصمیم ناگهانی ما گذشته‌ی خودش، یعنی رفتار ش در لحظه‌ی گذر از شکافنده‌ی ۱ را اصلاح می‌کند.

زدایش پسینی

در آزمایش دوشکافی با الکترون‌ها، برای تعیین آن که الکترون از کدام شکاف گذر کرده است، آشکارساز ساده‌ای را به کار می بریم: اگر «الکترون پرتابی» از شکاف بالایی گذر کرد، «الکترون مشاهده‌گر» در حالت اسپین-بالا قرار می‌گیرد و اگر الکترون پرتابی از شکاف پایینی گذر کرد، الکترون مشاهده‌گر در حالت اسپین-پایین می‌نشیند. پس از هر پرتاب، ما الکترون مشاهده‌گر را، دست‌نخورده، در جایی بایگانی می‌کنیم. پس با هر پرتاب، الکترونی به بایگانی ما افزوده می‌شود که دارای خبر آن آزمایش است. خبری که ما هنوز از آن بی‌خبر ایم.

در این آزمایش طرح تداخلی به روی پرده نمی‌افتد. آن‌چه می‌بینیم نظیر عبور ذره‌ای از این یا آن شکاف است.

ما بعدا می‌توانیم الکترون‌های بایگانی را یک به یک در راستای بالا-پایین بیازماییم و شماره‌ی آن‌ها را با ترتیبی که نقطه‌های روی پرده روشن شده اند مطابقت بدهیم تا بدانیم کدام نقطه‌ی روشن نتیجه‌ی گذر الکترون پرتابی از شکاف بالایی و کدام نقطه نظیر گذر از شکاف پایینی است. این امکان، با برداشت ما از آزمایش دوشکافی سازگار است؛ دیدن و دانستن، مخلّ تداخل است!

ولی می‌توانیم الکترون‌های بایگانی را در یک راستای افقی، مثلا چپ-راست هم بیازماییم. آن‌گاه، اسپین هر الکترون بایگانی با احتمال برابر به سوی چپ یا به سوی راست پدیدار می‌شود.

یادآوری: حالت بالا و حالت پایین، هم‌ارز برهم‌نهی حالت چپ و حالت راست اند. این دو برهم‌نهی که از یک‌دیگر مستقل اند با رابطه‌ی زیر بیان می‌شوند.

$$\text{بالا} = \text{چپ} + \text{راست} \qquad \text{پایین} = \text{چپ} - \text{راست}$$

پس اگر الکترون بایگانی در حالت چپ یافته شد، ما نخواهیم دانست که الکترون پرتابی نظیر آن، از کدام شکاف آمده است زیرا

$$\text{چپ} = \text{بالا} + \text{پایین}$$

پس با چنین انتخابی، ما اخبار بایگانی می‌زداییم. نه طرح تداخلی دیده‌ایم و نه از رفتار ذره‌ی پرتابی باخبر ایم!

ناامید نشویم. ما می‌دانیم که هر الکترون بایگانی نظیر کدام نقطه‌ی روشن است. پس می‌توانیم توزیع نقطه‌های روشن نظیر حالت چپ را از توزیع نقطه‌های روشن نظیر حالت راست جدا کنیم. هر کدام از این توزیع‌ها نظیر آزمایشی است که مشاهده نشده باشد، و همان‌طور که انتظار داریم، در هر کدام از این دو توزیع، طرح تداخل پدیدار می‌شود.

پس توزیع نقطه‌های روشن به روی پرده، در عمل حامل دو توزیع مکمل است. هر کدام از آن‌ها نتیجه‌ی آزمایشی است که ما از درون ش بی‌خبر باشیم، و هر دو «بر روی هم» نتیجه‌ی آزمایشی است که ما از درون آن باخبر ایم.

این توضیح خوبی است اما با تعبیر موجی-ذره‌ای نمی‌خواند. در آن روایت، هر الکترون پرتابی، یا ذره‌ای است که از یکی از شکاف‌ها گذر کرده یا موجی است که از هر دو شکاف می‌تابد. ولی اگر چنین است، طرح تداخلی نهفته در توزیع نقطه‌های روشن از کجا می‌آید؟

انگار که الکترون‌ها، حتی پس از پایان آزمایش هم گذشته را در واکنش به تصمیم ما اصلاح می‌کنند. برای بحث بیش‌تر این مطلب را ببینید.