

## شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 37

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۳۷

مترجم: الهام سروری

ویراستار و حروفچین: علی باقری کوچکسرائی

نسخه‌ی ۱۰ بهار ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

[www.Zharfa90.ir](http://www.Zharfa90.ir)

این صفحه مخصوصاً خالی گذاشته شده است.

## فصل ۳۷

# بررسی رفتار عجیب مکانیک کوانتومی

### ۱.۳۷ رفتار در مقیاس اتمی

در فصول قبل ما به بحث درباره ایده‌های اساسی لازم برای فهم پدیده‌های مهم، به‌خصوص نور یا تابش الکترومغناطیسی پرداختیم. (موضوعاتی در حوزه‌ی نظریه ماده چگال و بازتاب کامل داخلی به آینده محول می‌گردد.) مردم همواره در حال کلنجار رفتن با چیزی می‌باشند که آن را تئوری کلاسیک امواج الکتریکی می‌نامند؛ در واقع آنها به دنبال سازگارسازی نظریه خود با شمار زیادی از پدیده‌های طبیعت هستند. تا قبل از شناخت رفتار کوانتومی، مردم هیچ‌گاه برای اینکه انرژی نور از لامپ‌ها یا از فوتون‌ها<sup>۱</sup> خارج می‌گردد اهمیتی قائل نبودند.

بخشی که در اینجا با آن شروع می‌کنیم شامل کندوکاو در شکست فوری نظریه کلاسیک است، زیرا در واقع ماده از ذراتی با مقیاس اتمی ساخته شده است. مردم همواره توجه همیشگی خود را به بخش کلاسیکی طبیعت معطوف می‌کردند، زیرا این بخش تنها بخشی بود که ما قادر به درک و یادگیری آن بودیم و می‌توانستیم با به‌کاربردن نتایج ملموس کلاسیکی آن، مکانیک کلاسیک را بسازیم، اما چنین دیدگاهی در تعریف تمام بخش‌های طبیعت چندان موفق عمل نکرد. طولی نکشید که ما با رفتاری از طبیعت مواجه شدیم که متفاوت از رفتار نور بود، و این شروع ورود اشکالاتی در نظریه‌ی کلاسیک بود. البته ما همواره می‌توانیم از دامنه‌ی محدوده‌ی اتمی دور شویم و با اشکالات این حوزه مواجه نشویم، اما یک گشت‌وگذار<sup>۲</sup> کوتاه در این حوزه، ما را به سمت ایده‌ی اصلی خواص کوانتومی ماده سوق می‌دهد. در واقع با استفاده از اندیشه‌ی کوانتومی، به آشکارسازی یک سری از موضوعات می‌پردازیم که قادر به اجتناب از آنها نیستیم. حال به ارائه‌ی یک مقدمه<sup>۳</sup> از مکانیک کوانتوم می‌پردازیم.

مکانیک کوانتوم مکانیسمی است که به تفسیر رفتار ماده و جزئیات آن می‌پردازد، و به‌طور ویژه آنچه در مقیاس اتمی اتفاق می‌افتد. هر چیزی در مقیاس‌های کوچک، رفتار متفاوتی دارد نسبت به آنچه ما در زندگی روزمره خود تجربه می‌کنیم. رفتارهای کوانتومی نه موج‌گونه‌اند و نه ذره‌گونه، آنها نه شبیه توپ‌های بیلیارد رفتار می‌کنند و نه شبیه هیچ‌چیز دیگری که تا به حال دیده و یا تجربه کرده‌اید. اولین کسی که به نور نگاهی ذره‌گونه داشت، شخص نیوتون<sup>۴</sup> بود. اما خیلی زود آشکار شد که (همان‌طور

<sup>۱</sup>photons

<sup>۲</sup>excursion

<sup>۳</sup>introduction

<sup>۴</sup>Newton

### فصل ۳۷. بررسی رفتار عجیب مکانیک کوانتومی

که خواهید دید) نور مشابه موج رفتار می‌کند! اگرچه در اوایل قرن بیستم، ما شگفت‌زده شدیم از اینکه نور گاهی اوقات رفتار ذره‌گونه نیز دارد! به‌طور تاریخی رفتار الکترون را می‌توان به عنوان مثال خوبی مطرح کرد، آنچه ما انتظار داریم، پیش‌بینی رفتار ذره‌گونه توسط الکترون می‌باشد، اما چیزی که مشاهده می‌کنیم در واقع ارجع‌شمردن رفتار موجی بر ذره‌ای می‌باشد! در واقع رفتار واقعی ذره، هیچ‌یک از این دو نیست (نقطه‌ای که تسلیم می‌شویم).

یکی از خوش‌شانسی‌هایی که در این راه با آن مواجه می‌شویم، رفتار کوانتومی کاملاً یکسان همه‌ی ذرات (الکترون، پروتون، نوترون، فوتون و...) در مقیاس اتمی می‌باشد، که من تمایل دارم آنها را امواج ذره‌ای<sup>۵</sup> بخوانم. اگر چندان از این نام‌گذاری احساس رضایت نمی‌کنید، می‌توانید هرچیزی که دوست دارید بخوانید. خب! ما می‌توانیم آنچه در مورد خواص الکترون یاد می‌گیریم را روی همه‌ی ذرات اعمال کنیم (که شامل فوتون‌ها نیز می‌شوند).

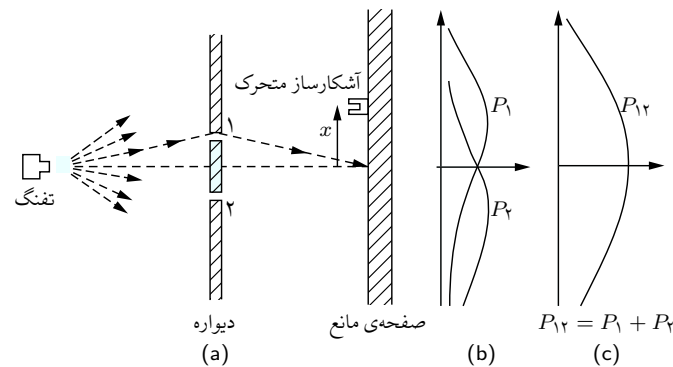
کمتر از نیمی از قرن بیستم نگذشته بود که به تدریج اطلاعات در حوزه‌ی مقیاس‌های کوچک و اتمی تجمع پیدا کرد، که این اطلاعات در حوزه‌ی چگونگی رفتار مواد در مقیاس‌های اتمی بود. این اطلاعات هر روز وضعیت را در این حوزه پیچیده‌تر می‌کرد، تا اینکه سرانجام شرودینگر<sup>۶</sup>، هایزنبرگ<sup>۷</sup> و بوهر<sup>۸</sup> در سال‌های ۱۹۲۶ و ۱۹۲۷ به این وضعیت خاتمه دادند. سرانجام آنها توانستند یک توصیف سازگار از رفتار ماده در مقیاس‌های کوچک بیان کنند. در این فصل ما اجزای اصلی این طرح را بیان می‌کنیم.

همان‌طور که می‌دانید، رفتار اتمی شبیه هیچ‌کدام از تجربه‌های روزمره و عادی ما نیست. رفتارهای اتمی بسیار ناملموس‌تر از آن هستند که بتوانیم از آنها استفاده کنیم و در واقع این رفتارهای عجیب و رازآلود، بر همگان (چه فیزیکدان‌های حرفه‌ای و چه تازه‌کارها) آشکار می‌باشد. حتی متخصصین نیز قادر به درک این رفتارهای عجیب نیستند، زیرا روش‌های کاملاً معقولی که متخصصین دوست دارند از آنها استفاده کنند، به تجربه‌ی مستقیم انسان از مقیاس‌های بزرگ برمی‌گردد؛ این در حالیست که ما به رفتار مواد در مقیاس‌های بزرگ کاملاً آگاهی داریم، در حالی که رفتار مواد در مقیاس‌های خیلی کوچک متفاوت است و از همان متدهای مقیاس‌های بزرگ پیروی نمی‌کنند. ما در تلاش برای فهم رفتارهایی هستیم که با یک مدل انتزاعی پیش می‌روند و هیچ ارتباطی با آنچه که ما از تجربه‌های روزمره و مستقیم خود داریم، ندارند.

در این فصل ما با عناصر اصلی این رفتارهای رازآلود در این پیکربندی عجیب سروکار خواهیم داشت. ما دارای این حق انتخاب هستیم که پدیده‌ها را در دنیای کلاسیک بررسی کنیم، تا با شروع از یک روش کلاسیکی، مفاهیم کوانتومی را تا زمانی تشریح کنیم که ناهماهنگی مشاهده نشود. توجیه بحث‌برانگیز مفاهیم کوانتومی با روش‌های کلاسیکی همچنان به عنوان یک راز باقی مانده است. جالب اینجاست که ما تطابق را می‌بینیم، ولی قادر به توضیح علت این تطابق رفتاری و اینکه چرا سیستم‌های کوانتومی با روش‌های کلاسیکی قابل تعمیم هستند نیستیم. در واقع ما تنها می‌توانیم در مورد اینکه چگونه این سیستم‌ها کار می‌کنند صحبت کنیم. برای تشریح چگونگی کارکرد سیستم‌های کوانتومی، من باید پایه‌های عجیب مکانیک کوانتومی را تشریح کنم.

<sup>۵</sup>particle waves  
<sup>۶</sup>Schrödinger

<sup>۷</sup>Heisenberg  
<sup>۸</sup>Born

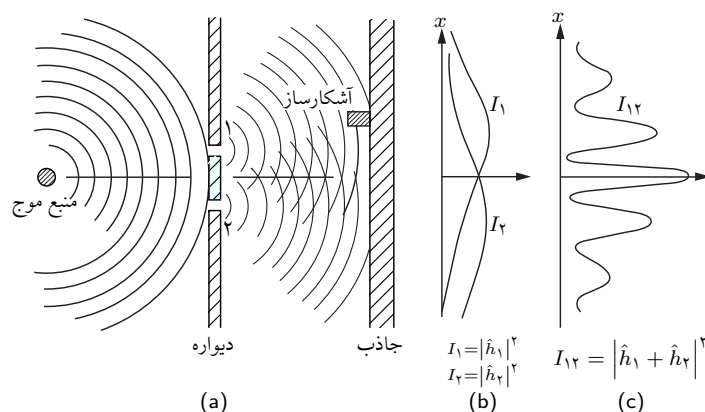


شکل ۱۰.۳۷: آزمایش تداخل با گلوله‌ها.

## ۲۰.۳۷ آزمایش با گلوله‌ها

زمانی که در تلاش برای فهم رفتارهای کوانتومی الکترون هستیم، با ساختن یک آزمایش ذهنی می‌توانیم تا حدی بر این رفتارها آگاهی پیدا کنیم. در این آزمایش ذهنی ما کار خود را با گلوله‌هایی<sup>۹</sup> شروع می‌کنیم که درک ملموسی از رفتارهای ذره‌ای به ما می‌دهند؛ همان‌گونه که موج‌های تشکیل‌شده‌ی آب الهام‌بخش رفتار موجی می‌باشند. در وهله‌ی اول ما به بررسی رفتار گلوله‌ها به عنوان نماینده رفتار ذره‌ای در دستگاهی که در شکل ۱۰.۳۷ چیده شده است می‌پردازیم. همان‌طور که می‌بینید ما در این آزمایش با تفنگی که جریانی از گلوله‌ها را شلیک می‌کند سروکار داریم. دقت پرتاب تفنگ موردنظر چندان بالا نیست و گلوله‌ها در هر زاویه‌ای به صورت تصادفی<sup>۱۰</sup> به بیرون شلیک می‌شوند. در مقابل تفنگ، دیواره‌ی فلزی<sup>۱۱</sup> را مشاهده می‌کنید که دو حفره‌ی به اندازه کافی بزرگ برای عبور کامل گلوله‌ها را دارا می‌باشد و در پشت این دیواره‌ی فلزی، یک صفحه‌ی مانع (شاید از جنس چوبی ضخیم) قرار دارد که قادر به جذب<sup>۱۲</sup> گلوله‌ها در زمانی که با آن برخورد می‌کنند می‌باشد. در روبه‌روی دیواره با یک آشکارساز<sup>۱۳</sup> روبه‌رو می‌شویم که می‌تواند جعبه‌ای حاوی شن باشد تا گلوله‌هایی که از حفره می‌گذرند، در داخل آن متوقف شوند و تجمع پیدا کنند که در صورت تمایل شما می‌توانید جعبه را خالی کنید و تعداد گلوله‌های تجمع پیدا کرده در آشکارساز را مشخص کنید. آشکارساز در جهت  $x$  آزادی حرکتی دارد (یعنی می‌تواند به جلو و عقب حرکت کند). با در نظر گرفتن چنین دستگاه آزمایشی، شما می‌توانید قادر به پاسخ این سؤال باشید که: احتمال<sup>۱۴</sup> عبور گلوله‌ها از حفره‌های دیواره‌ی فلزی و رسیدن آنها بر صفحه‌ی مانع در فاصله‌ی  $x$  از مرکز صفحه چقدر است؟ با طرح چنین سؤالی شما باید متوجه این موضوع شده باشید که ما در مورد احتمالات صحبت می‌کنیم، زیرا ما نمی‌توانیم با قطعیت در مورد هر گلوله‌ی مشخص صحبت کنیم. یک گلوله می‌تواند به‌طور اتفاقی به لبه‌ی یک حفره برخورد کند و منحرف گردد و به هر سمت دیگری برود. با صحبت کردن از پارامتر احتمال، ما این شانس را داریم که درباره‌ی تعداد گلوله‌های رسیده به آشکارساز، و سپس نسبت این تعداد از گلوله، به کل گلوله‌های رسیده به صفحه‌ی مانع<sup>۱۵</sup> در طول یک بازه‌ی زمانی مشخص بحث کنیم.

<sup>9</sup>bullets<sup>10</sup>random<sup>11</sup>armor plate<sup>12</sup>absorb<sup>13</sup>detector<sup>14</sup>probability<sup>15</sup>backstop



شکل ۳۷.۲: آزمایش تداخل با امواج آب

با توجه به هدفی که در این آزمایش دنبال می‌کنیم، آزمایش خود را در حالت ایده‌آل، با گلوله‌هایی که ایده‌آل‌اند و قابلیت شکستن و نصف‌شدن را ندارند انجام می‌دهیم؛ در واقع آزمایش را با گلوله‌های فناپذیر انجام می‌دهیم. در این آزمایش ما شاهد این هستیم که گلوله‌ها همیشه به صورت توده‌ای<sup>۱۶</sup> تجمع می‌یابند و زمانی که گلوله‌ای را در آشکارساز مشاهده می‌کنیم، همواره با یک گلوله‌ی کامل مواجه می‌شویم. همان‌طور که نمودار احتمال  $P_2$  را در شکل ۳۷.۱ مشاهده می‌کنیم  $P_2$  احتمال توزیع گلوله‌ها هنگام عبور از حفره‌ی ۲ می‌باشد. با مقایسه بخش (b) و (c) در شکل ۳۷.۱ نتیجه مهم زیر استخراج می‌گردد.

$$P_{12} = P_1 + P_2. \quad (37.1)$$

احتمال‌ها تنها با همدیگر جمع می‌گردند. احتمال توزیع، در آزمایشی که دو حفره باز باشند، برابر با جمع احتمالات مربوط به آزمایشی است که با یک حفره‌ی باز انجام می‌شود. همان‌طور که دیدید، هیچ‌گونه تداخلی<sup>۱۷</sup> برای گلوله‌هایی که نماینده رفتار ذره‌ای می‌باشد وجود ندارد.

## ۳۷.۳ آزمایش با امواج

حالا به سراغ آزمایش با امواج آب می‌رویم. همان‌طور که در شکل ۳۷.۲ می‌بینید، در این آزمایش با استفاده از یک منبع سازنده‌ی امواج دایره‌ای روی آب، به بررسی رفتار موجی می‌پردازیم. همچنان که مشاهده می‌کنید، ما دوباره از دیواره‌ای با دو حفره در روبه‌روی منبع تولید امواج استفاده می‌کنیم، در حالی که دیواره‌ی دوم مورد استفاده در آزمایش، نقش جاذب را دارد و هیچ‌گونه انعکاسی در امواج ایجاد نمی‌کند. این دیواره می‌تواند مشابه ساحل رفتار کند. مشابه قبل، یک آشکارساز که قابلیت حرکت به سمت عقب و جلو در جهت  $x$  دارد را قرار می‌دهیم. کاری که آشکارساز در این قسمت انجام می‌دهد، در واقع اندازه‌گیری شدت<sup>۱۸</sup> امواج حرکتی است. شما می‌توانید آشکارساز را مشابه یک رادار که قابلیت اندازه‌گیری ارتفاع امواج حرکتی را دارد در نظر بگیرید، اما در نظر داشته باشید که این مقیاس، کالیبره گشته و متناسب با مجذور ارتفاع حقیقی

<sup>16</sup>lump

<sup>17</sup>interference

<sup>18</sup>intensity

امواج است، و این به معنی متناسب بودن با شدت امواج می باشد. تعبیر آشکارساز از شدت امواج به صورت انرژی حمل شده توسط امواج می باشد.

اولین چیزی که در جریان آزمایش به آن دست می یابیم این است که شدت امواج می تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. اگر منبع را به مقدار بسیار کمی حرکت دهیم، متقابلاً امواج ناشی از حرکت منبع با شدت اندکی را، در آشکارساز مشاهده می کنیم، و زمانی که جابه جایی منبع بیشتر باشد، امواج حرکتی با شدت بیشتری را در آشکارساز مشاهده می کنیم.

حال به سراغ اندازه گیری شدت امواج برای مقادیر مختلف  $x$  می پردازیم (منبع تولید امواج در همه ی حالاتی که مقادیر مختلف  $x$  را آزمایش می کنیم یکسان عمل می کند). با انجام این آزمایش، ما شاهد الگوی امواج در بخش (c) شکل می باشیم.

زمانی که تداخل امواج الکتریکی را بررسی می کردیم، به این الگو و اینکه چگونه شکل می گیرد برمی خوریم. حال در این مورد ما شاهد پراش<sup>۱۹</sup> امواج اولیه در حفره ها و امواج دایره ای جدیدی هستیم که از حفره ها خارج می شوند. اگر ما یکی از حفره ها را (مشابه قبل) ببندیم و به اندازه گیری توزیع شدت امواج در جاذب بپردازیم، در این صورت همان طور که در قسمت (b) شکل می بینید، ما شاهد الگوی ساده ای از شدت امواج می باشیم.  $I_1$  شدت امواج عبوری از حفره ی ۱ (زمانی که حفره ی ۲ بسته باشد) و  $I_2$  شدت امواج عبوری از حفره ی ۲ می باشد (زمانی که حفره ی ۱ بسته باشد).

شدت  $I_{12}$  زمانی که دو حفره باز باشند قابل مشاهده می باشد، و به طور دقیق باید گفت که به جمع دو شدت مربوط نمی گردد. در واقع ما به این مسئله تداخل دو موج می گوئیم. اگر الگوی تداخل را بررسی کنیم متوجه می شویم که در بعضی از مناطق، (جایی که  $I_{12}$  بیشترین مقدار را دارد) پیک های مربوط به امواج هم فاز با یکدیگر جمع می گردند، تا یک دامنه بزرگ، و متقابلاً یک شدت بالا را رقم بزنند. در چنین حالتی می گوئیم دو موج در تداخل سازنده<sup>۲۰</sup> با یکدیگر می باشند. چنین تداخلات سازنده ای می تواند در هر فاصله ای که آشکارساز از حفره ی ۱ و یا حفره ی ۲ دارد، اتفاق بیافتد و این شامل هر طول موجی، چه طول موج های بلند و چه کوتاه می باشد.

در مکان هایی که دو موج با اختلاف فاز  $\pi$  به آشکارساز برسند، دامنه ی دو موج از یکدیگر کم می گردند. در چنین حالتی تداخل ویرانگر<sup>۲۱</sup> رخ می دهد و ما شدت کمتری از دو موج را مشاهده می کنیم. دور از انتظار نیست اگر شاهد مقادیر کم شدت در هر فاصله ای از حفره ی ۱ تا آشکارساز باشیم، که اندازه ی این فاصله متفاوت از فاصله ی بین حفره ۲ و آشکارساز توسط یک عدد فرد از نصف طول موج می باشد. مقادیر کم  $I_{12}$  شامل تداخل ویرانگر در شکل ۲.۳۷ می باشد.

به یاد داشته باشید که ارتباط بین  $I_1$  و  $I_2$  و  $I_{12}$  بدین صورت بیان می گردد: ارتفاع لحظه ای امواج آب برای موج عبوری از حفره ی ۱ را می توانیم به صورت بخش حقیقی  $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$  بنویسیم، که در واقع "دامنه<sup>۲۲</sup>"  $\hat{h}_1$  در حالت کلی یک عدد مختلط می باشد. زمانی که ما از اعداد مختلط استفاده می کنیم، شدت امواج متناسب با میانگین مجذور ارتفاع یا  $|\hat{h}_1|^2$  می باشد. به طور مشابه، برای حفره ی ۲ نیز همین روابط برقرار می باشد. (ارتفاع موج متناسب با  $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$  و شدت موج متناسب با  $|\hat{h}_2|^2$ ) و زمانی که دو حفره باز باشد، ارتفاع امواج با یکدیگر طبق رابطه ی  $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2) e^{i\omega t}$  جمع می شوند و شدت ها نیز از قانون  $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$

<sup>19</sup>diffraction<sup>20</sup>interfering constructively<sup>21</sup>interfere destructively<sup>22</sup>amplitude

پیروی می‌کنند.

$$I_1 = |\hat{h}_1|^2, \quad I_2 = |\hat{h}_2|^2, \quad I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2. \quad (2.37)$$

متوجه خواهید شد که نتیجه کاملاً متفاوت از نتیجه به دست آمده با گلوله‌ها است (معادله‌ی (۱.۳۷)). اگر  $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$  را گسترش دهیم، می‌بینیم

$$|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2|\hat{h}_1||\hat{h}_2|\cos\delta, \quad (3.37)$$

که در آن  $\delta$  اختلاف فاز بین  $\hat{h}_1$  و  $\hat{h}_2$  است. از نظر شدت می‌توانستیم بنویسیم

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta. \quad (4.37)$$

آخرین جمله<sup>۲۳</sup> در (۴.۳۷) ”جمله‌ی تداخل“ است. شدت می‌تواند هر مقداری داشته باشد، و تداخل را نشان می‌دهد.

## ۴.۳۷ آزمایش با الکترون‌ها

حال ما همان آزمایش را این بار به وسیله‌ی الکترون تصور می‌کنیم. دستگاه آزمایش موردنظر را در شکل ۲.۳۷ به نمایش گذاشته‌ایم. آزمایش را با یک تفنگ الکترونی که شامل یک سیم تنگستن و یک جعبه‌ی فلزی محافظ سیم تنگستن با حفره‌ای روی جعبه می‌باشد، شروع می‌کنیم. زمانی که یک ولتاژ منفی به سیم وارد شود، الکترون‌های ساطع شده از سیم به سمت دیواره‌ها شتاب گرفته، و بعضی از آنها از حفره عبور می‌کنند. تمام الکترون‌های خروجی از تفنگ الکترونی، انرژی‌های یکسان (نزدیک به یکدیگر) دارند. در قسمت روبه‌روی تفنگ الکترونی، دیواره‌ای فلزی و نازک با دو حفره قرار می‌دهیم و در پشت دیواره‌ی فلزی نازک، دیواره‌ی مانع را قرار می‌دهیم. در مقابل دیواره‌ی فلزی نازک یک آشکارساز قابل حرکت قرار می‌دهیم. می‌توان از یک شمارشگر گایگر<sup>۲۴</sup>، و یا تکثیرکننده‌ی الکترون که به یک پخش‌کننده‌ی صدا متصل است به عنوان آشکارساز استفاده کرد.

لازم به تأکید است که این سیستم آزمایشی، قابل اعمال در آزمایش‌های واقعی نیست و آزمایش، صرفاً ذهنی می‌باشد و این آزمایش هیچ‌گاه با چنین روشی انجام نمی‌شود، زیرا در این روش باید سیستم آزمایشی در مقیاسی بسیار کوچک طراحی گردد که بتواند این نتایج را نشان دهد که عملاً غیرممکن می‌باشد. مزیت طراحی آزمایش‌های ذهنی در این است که می‌توان به راحتی در مورد آن فکر کرد! ما از نتایجی که از این آزمایش ذهنی حاصل می‌گردد آگاهی داریم، زیرا تعداد زیادی آزمایش در این خصوص انجام شده است. طراحی آزمایش‌های واقعی به نحوی است که مقیاس ابزارآلات موردنظر برای نمایش تأثیراتی که تصمیم به توصیف آن داریم فراهم گردد.

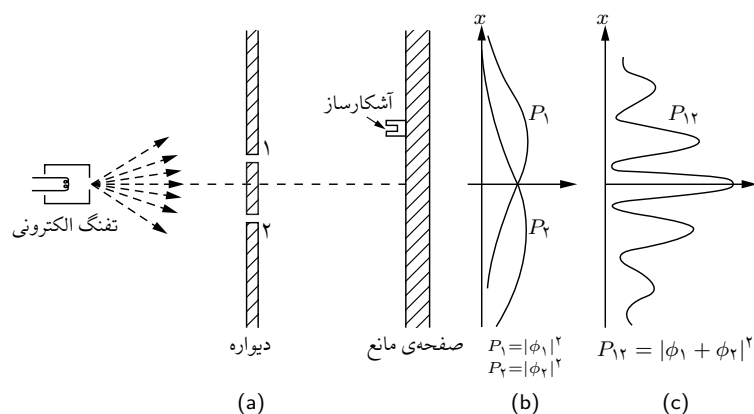
اولین چیزی که باید به آن توجه کنید این است که در آزمایش الکترونی خود، شاهد شنیدن صدای ”کلیک“ هستیم، کلیک‌های مشابه یکدیگر، و هیچ نیم‌کلیکی<sup>۲۵</sup> نداریم.

<sup>23</sup>term

<sup>24</sup>geiger

<sup>25</sup>half click





شکل ۳.۳۷: آزمایش تداخل با الکترون‌ها

باید در نظر داشته باشید که شنیدن صدای کلیک‌ها بی‌قاعده است و به صورت منظم تکرار نمی‌گردد. مثلاً این‌گونه: کلیک ..... کلیک - کلیک .... کلیک ..... کلیک ..... کلیک و غیره. این هیچ مشکلی ایجاد نمی‌کند و شمارنده‌ی گایگر به درستی در حال عمل کردن است. اگر ما به شمارش تعداد کلیک‌ها در یک بازه‌ی زمانی مشخص بپردازیم، سپس دوباره آزمایش را در همان بازه‌ی زمانی تکرار کنیم و شمارش‌ها را انجام دهیم، در این صورت اختلاف فاحشی بین دو شمارش مشاهده نمی‌کنیم. پس با این حساب می‌توان از پارامتر نرخ میانگین برای شنیدن صدای کلیک استفاده کرد. (میانگین تعداد کلیک‌ها در هر دقیقه)

به نظر می‌رسد زمانی که آشکارساز حرکت کند، نرخ شنیدن کلیک‌ها سریع و یا کند می‌گردد، اما همچنان کلیک‌ها دارای بلندی (صدا) یکسانی هستند. اگر ما دمای سیم تفنگ الکترونی را کم کنیم، نرخ کلیک‌ها افت می‌کند، اما همچنان بلندی صدای کلیک‌ها تغییری نمی‌کند. در نظر داشته باشید که حتی با در نظر گرفتن دو آشکارساز در این آزمایش، هیچ همزمانی در شنیدن صدای کلیک از دو شمارنده وجود ندارد، در واقع در هر لحظه تنها یک آشکارساز به صدا در می‌آید. (در فاصله‌های زمانی بسیار کوچک، ممکن است خطای شنیداری به ما احساسی از همزمانی دو کلیک دهد!) ما می‌توانیم نتیجه بگیریم پراکندگی الکترون‌ها همواره به صورت قله‌هایی با اندازه‌های یکسان می‌باشد.

حال زمان پاسخ‌گویی به سؤالی است که در آزمایش گلوله‌ها مطرح شد، و آن این است که احتمال نسبی اینکه یک توده‌ی الکترونی در فواصل مختلف  $x$  از مرکز صفحه، به صفحه‌ی مانع برسد چیست؟ همان‌طور که قبلاً نیز مطرح شد، احتمال نسبی، از مشاهده‌ی نرخ کلیک‌ها با عملکرد یکنواخت تفنگ به دست می‌آید. می‌توان مطرح کرد که احتمال تشکیل قله‌ای که از رسیدن الکترون‌ها به مکان‌های مشخص  $x$  تشکیل می‌شود، متناسب با نرخ میانگین کلیک‌ها در آن نقطه‌ی مشخص می‌باشد. نتایج آزمایش قابل توجه می‌باشد و شاهد  $P_{12}$  در بخش c شکل ۳.۳۷ می‌باشد. بله! الکترون این‌گونه شگفت‌انگیز رفتار می‌کند.

## ۵.۳۷ تداخل امواج الکترون

حال وقت آن رسید که شکل ۳.۳۷ را آنالیز کنیم و از رفتار الکترون سردر بیآوریم! هر الکترون قابلیت این را دارد که تنها از یک حفره عبور کند و روی صفحه‌ی مانع، به یکی از قله‌های تشکیل شده از الکترون پیوندد.

قضیه A: یک الکترون قادر است تنها و تنها از یک حفره عبور کند (حفره ۱ یا حفره ۲) با فرض قضیه A می‌توانیم تمام الکترون‌هایی که به صفحه‌ی مانع می‌رسند را به دو دسته تقسیم کنیم: (۱) الکترون‌هایی که از حفره ۱ عبور می‌کنند و (۲) الکترون‌هایی که از حفره ۲ عبور می‌کنند. سپس آنچه که ما انتظار مشاهده‌ی آن را داریم، از جمع تأثیرات عبور الکترون‌ها از حفره ۱ و عبور سایر الکترون‌ها از حفره ۲ می‌باشد. حال به سراغ آزمودن انتظارات خود در آزمایش می‌رویم. در اولین اقدام ما به سراغ اندازه‌گیری الکترون‌هایی می‌رویم که از حفره ۱ عبور می‌کنند، در حالی که حفره ۲ را بسته و آشکارساز ۲ هیچ صدای کلیکی را ثبت نمی‌کند و نرخ کلیک‌ها تنها شامل  $P_1$  می‌گردد. نتایج اندازه‌گیری به وسیله‌ی منحنی  $P_1$  در بخش (b) شکل ۳.۳۷ به نمایش گذاشته شده است. نتیجه‌ی مشاهده کاملاً معقول به نظر می‌رسد! به همین روش احتمال توزیع برای الکترون‌های عبوری از حفره ۲ یعنی  $P_2$  نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد. نتایج این بخش نیز در شکل ۳.۳۷ نشان داده شده است.

$P_{12}$  مربوط به زمانی است که هر دو حفره باز باشد و به وضوح ما شاهد این هستیم که  $p_{12}$  هیچ نشانی از جمع  $P_1$  و  $P_2$  و احتمال مربوط به هر کدام از حفره‌ها به تنهایی، ندارد. این منحنی  $P_{12}$  کاملاً مطابق با آنچه که در آزمایش امواج آب دیدیم می‌باشد، آنچه که آن را تداخل نامیدیم.

$$P_{12} \neq P_1 + P_2. \quad \text{برای الکترون‌ها} \quad (۵.۳۷)$$

چگونه چنین نقش تداخلی برای ذرات شکل می‌گیرد؟ شاید فرض اینکه هر قله‌ی توزیع احتمال الکترون ناشی از یکی از حفره‌هاست، فرض درستی نباشد، زیرا در صورت درستی این فرض ما شاهد جمع احتمال‌ها برای  $P_{12}$  می‌باشیم، در حالی که  $P_{12} \neq P_1 + P_2$  شاید رفتار الکترون‌ها پیچیده‌تر از آنچه فکر می‌کنیم باشد (شاید الکترون‌ها می‌توانند نصف شوند یا شاید...) اما نه، چنین چیزی ممکن نیست! چون الکترون‌ها همواره خودشان را به یکی از قله‌های احتمال توزیع الکترون می‌رسانند. خوب، ممکن است بعضی از الکترون‌ها از حفره ۱ عبور کنند در حالی که الکترون‌های دیگری که در اطراف هستند به سمت حفره ۲ تغییر جهت بدهند و این اتفاق چندین بار در طول آزمایش و به وسیله‌ی انواع مسیرهای پیچیده اتفاق بیافتد، سپس زمانی که ما حفره ۲ را می‌بندیم این شانس را تغییر داده و الکترونی که از حفره ۱ خارج شده، سرانجام خود را به صفحه‌ی مانع برساند. اما باید توجه داشت که زمانی که آزمایش با دو حفره باز انجام می‌گردد، شاهد تعداد کمی الکترون در بعضی از نقاط صفحه مانع هستیم، در حالی که زمانی که یکی از حفره‌ها باز باشد، در همان نقطه شاهد تعداد زیادی الکترون می‌باشیم. توجه داشته باشید که در مرکز الگوی تداخل، شاهد  $P_{12}$  ای می‌باشیم که بیش از دو برابر  $P_1 + P_2$  می‌باشد و این جای تفکر دارد که زمانی که یکی از حفره‌ها بسته باشد، تعداد الکترون‌های خروجی از حفره دیگر کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که توضیح دربارۀ الکترون‌هایی که هر دو رفتار را دارند و در مسیری پیچیده‌تر از آن چیزی که ما فکر می‌کنیم حرکت می‌کنند سخت می‌باشد.

این کاملاً مرموز و عجیب به نظر می‌رسد. بسیاری از مردم در تلاش برای توضیح منحنی  $P_{12}$  و توضیح رفتار عجیب تک الکترون‌ها در هنگام عبور از حفره‌ها می‌باشند، در حالی که هیچ‌کدام موفق نبودند. هیچ‌کدام نتوانسته‌اند در شرایطی که ما نسبت به  $P_1$  و  $P_2$  آگاهی داریم، توجیحی برای منحنی  $P_{12}$  داشته باشند.

جای شگفتی است که ریاضیات مربوط به  $P_1$  و  $P_2$  و  $P_{12}$  از قواعد بسیار ساده‌ای پیروی می‌کنند.  $P_{12}$  کاملاً مشابه  $I_{12}$  در شکل ۲.۳۷ می‌باشد و بسیار ساده است. آنچه روی صفحه مانع اتفاق می‌افتد را می‌توان به وسیله‌ی دو عدد مختلط  $\hat{\phi}_1$  و  $\hat{\phi}_2$  (که تابعی از  $x$  می‌باشند) تفسیر کرد. زمانی که تنها حفره ۱ باز باشد، رابطه‌ی مجذور قدر مطلق  $\hat{\phi}_1$  به صورت  $P_1 = |\hat{\phi}_1|^2$  و به همین ترتیب زمانی که تنها حفره ۲

باز باشد، رابطه به صورت  $P_2 = |\hat{\phi}_2|^2$  و ترکیب تأثیر این دو، زمانی که دو حفره باز است فقط به صورت  $P_{12} = |\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2|^2$  است. ریاضیات به کاررفته در  $P_{12}$  کاملاً مشابه ریاضیات مربوط به امواج آب می‌باشد (دیدن چنین نتایج ساده‌ای که از یک بازی پیچیده با الکترون‌هایی که روی صفحه‌ی مانع عقب و جلو می‌روند و مسیرهای عجیب و غریبی را دربرمی‌گیرند، سخت است و جای تعجب دارد). نتیجه‌گیری: الکترون‌ها هنگام گذر از حفره‌ها به صورت ذره‌ای عمل می‌کنند و زمانی که به صفحه‌ی مانع می‌رسند، توزیع احتمال آنها مشابه توزیع شدت امواج می‌باشد. این جملات به ما این ذهنیت را می‌دهد که بگوییم الکترون‌ها رفتاری دوگانه دارند؛ گاهی اوقات رفتار ذره‌ای دارند و گاهی اوقات همچون موج رفتار می‌کنند؛ در ضمن زمانی که ما با امواج کلاسیکی سروکار داشتیم، شدت را به صورت متوسط مربع دامنه‌ی موج در هر زمان تعریف کرده، و از اعداد مختلط به عنوان یک ترفند ریاضی برای تجزیه و تحلیل بهتر استفاده کردیم. اما در مکانیک کوانتوم دامنه باید به صورت اعداد مختلط تعریف شود و تنها با بخش حقیقی، کاری پیش نمی‌رود و این نکته دقیقی است که باید به آن توجه کنیم، زیرا در غیر این صورت فرمول‌ها کاملاً یکسان به نظر می‌آیند.

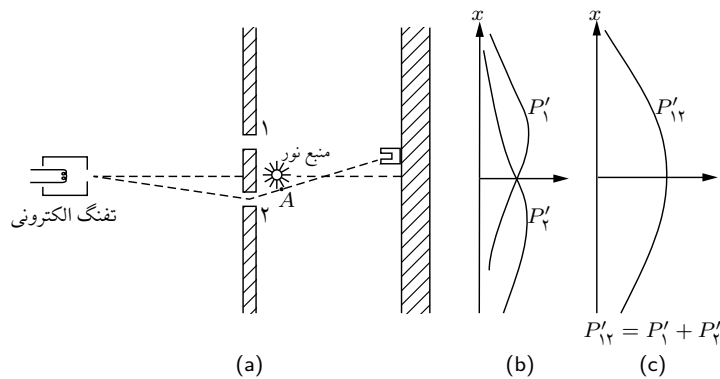
احتمال رسیدن الکترون، زمانی که دو حفره باز باشد به سادگی بیان می‌شود، هرچند که برابر با  $P_1 + P_2$  نمی‌باشد و این تنها، چیزی است که ریاضیات به ما می‌گوید، اما شمار زیادی از این رفتارهای زیرکانه در طبیعت نهفته می‌باشند که ما تمایل داریم چند نمونه از آنها را برای شما به تصویر بکشیم. نخست چون تعداد الکترون‌هایی که به یک نقطه‌ی خاص در صفحه‌ی مانع می‌رسند، متناسب با الکترون‌های عبوری از حفره ۱ به علاوه تعداد الکترون‌های عبوری از حفره ۲ در آن نقطه خاص نمی‌باشد، قضیه  $A$  بدون شک زیر سؤال می‌رود و نقض می‌گردد. درستی اینکه الکترون‌ها تنها و تنها قادرند از یک حفره عبور کنند زیر سؤال می‌رود، اما می‌توان فرضیه را با یک آزمایش دیگر بررسی کرد.

## ۶.۳۷ تماشای الکترون‌ها

حال با استفاده از آزمایش، شروع به کندوکاو می‌کنیم و همان‌گونه که در شکل ۴.۳۷ مشاهده می‌کنیم، به دستگاه الکترونی خود یک منبع قوی نور، درست در پشت دیواره‌ی فلزی و بین دو حفره اضافه می‌کنیم. همان‌طور که می‌دانید، بارهای الکتریکی قادر به پراکندگی نور می‌باشند! و زمانی که الکترون در حال عبور از مسیر یکی از حفره‌هاست، به چشمه‌ی نور می‌رسد و بعضی از فوتون‌های نور را به سمت چشم ما منحرف می‌کند و یک فلش نوری مشاهده می‌گردد، در حالی که آشکارساز در مسیری که فلش نوری اتفاق می‌افتد قرار گرفته است! در چنین شرایطی ما قادریم بدانیم الکترون کجا می‌رود. اگر به عنوان مثال همان‌طور که در شکل می‌بینید، از مسیر مربوط به حفره ۲ عبور کند، ما شاهد فلشی از نور در اطراف نقطه‌ی  $A$  خواهیم بود. با این ترفند، در صورتی که الکترون نصف شده و از دو حفره عبور کند، شاهد فلش به صورت همزمان در مجاورت هر دو حفره خواهیم بود و صحت فرضیه ما به اثبات می‌رسد. به سراغ آزمایش می‌رویم!

چیزی که مشاهده می‌کنیم: همزمان که شاهد شنیدن صدای کلیک از آشکارساز الکترونی می‌باشیم، ما یک فلش نوری در اطراف حفره ۱ و یا ۲ مشاهده می‌کنیم، اما هیچ‌گاه شاهد دو فلش در یک زمان نبودیم و نتایج کاملاً منطبق با آنچه قبلاً مشاهده کردیم بود. (یعنی بدون اینکه موقعیت آشکارساز مهم باشد) با مشاهدات صورت گرفته، زمانی که به مشاهده الکترون‌ها و اینکه از حفره ۱ و یا ۲ عبور می‌کند می‌نشینیم، از نقطه نظر آزمایشگاهی، درست بودن فرضیه  $A$  ضروری به نظر می‌رسد.

### فصل ۳۷. بررسی رفتار عجیب مکانیک کوانتومی



شکل ۴.۳۷: یک آزمایش الکترون متفاوت

پس چه چیز اشتباهی بین بحث‌های ما و فرضیه  $A$  وجود دارد؟ چرا  $P_{12}$  کاملاً متناسب با  $P_1 + P_2$  نیست؟ به آزمایش برمی‌گردیم. اجازه بدهید دوباره به سراغ آزمایش کنونی مربوط به الکترون برویم و به درک آنچه الکترون‌ها انجام می‌دهند بپردازیم! برای هر مکانی (موقعیت برحسب  $x$ ) از آشکارساز، ما تعداد الکترون‌های رسیده به آن موقعیت را شمرده‌ایم و همچنین با تماشای فلش‌های نوری، نسبت به مسیری که الکترون از آنجا عبور می‌کند نیز آگاهی داریم. چیزهایی که نسبت به آنها آگاهی داریم را می‌توانیم به این روش ثبت کنیم: یک طبقه‌بندی دو ستونه که هرگاه فلشی در اطراف حفره ۱ مشاهده کردیم و صدای کلیک را شنیدیم، یک شماره به ستون ۱ اضافه و زمانی که کلیک با توجه به فلش نوری در اطراف حفره ۲ شنیدیم، به شماره‌ی ستون ۲ اضافه می‌کنیم. این‌گونه هر الکترونی که به آشکارساز می‌رسد در یکی از دو ستون ثبت می‌گردد (کدام یک از حفره ۱ عبور کرده و کدام یک از حفره ۲). به اعداد ثبت‌شده در ستون ۱ احتمال  $P'_1$  را نسبت می‌دهیم که مربوط به الکترونی است که از حفره ۱ گذر می‌کند و به آشکارساز رسیده است و به اعداد ثبت‌شده در ستون ۲ احتمال  $P'_2$  را نسبت می‌دهیم (احتمال مربوط به الکترون‌هایی که از حفره ۲ می‌گذرند). حال اگر این اندازه‌گیری برای مقادیر مختلف  $x$  دوباره تکرار گردد، منحنی مربوط  $P'_1$  و  $P'_2$  که در قسمت (b) شکل ۴.۳۷ مشاهده می‌کنید، به دست می‌آید.

خب، جای تعجب وجود ندارد! ما برای  $P'_1$  چیزی کاملاً شبیه زمانی که حفره ۲ را مسدود می‌کنیم، در نظر گرفتیم (همچنین  $P'_2$ ) زمانی که ما به تماشای الکترون‌ها می‌نشینیم، در واقع آنها رفتار خود را کاملاً با آنچه ما انتظار داریم تطابق می‌دهند! چه حفره‌ها باز باشند و چه بسته، زمانی که الکترون‌ها از حفره ۱ بگذرند همان توزیعی را دارند که در روش قبل شاهد آن بودیم و این مشاهده کاملاً برای الکترون‌های عبوری از حفره ۲ نیز صادق است.

حال سؤال این است که آنچه ما در حال حاضر برای احتمال کل، یعنی احتمالی که الکترون از طریق هر مسیری خود را به آشکارساز برساند در اختیار داریم چیست؟ ما در آزمایش قبلی این اطلاعات را به دست آوردیم، حتی زمانی که وانمود کردیم فلش‌های نوری را نگاه نمی‌کنیم، ما کلیک‌های آشکارساز را با یکدیگر جمع و به دو دسته تقسیم کردیم و تنها به ازای هر کلیک، به تعداد کلیک‌های هر ستون اضافه کردیم و همان‌طور که مشاهده کردید، احتمال برای الکترونی که از هر کدام از حفره‌ها عبور می‌کند و به صفحه مانع می‌رسد به صورت  $P'_1 + P'_2 = P'_{12}$  به دست آمد؛ اگرچه ما در این آزمایش در مشاهده اینکه الکترون از کدام حفره عبور می‌کند موفق بودیم، اما با این مشاهده ما دیگر قادر به مشاهده منحنی تداخلی  $P_{12}$  نبودیم و تنها

شاهد منحنی  $P'_{12}$  بودیم که هیچ نشانی از تداخل ندارد، حال اگر آزمایش را بدون اینکه به تماشای مسیر الکترون بنشینیم تکرار کنیم، در اینصورت دوباره منحنی  $P_{12}$  نمایان می‌گردد. ما می‌توانیم نتیجه بگیریم که زمانی که به مشاهده الکترون‌ها بنشینیم، توزیع الکترون‌ها روی صفحه، متفاوت از زمانی خواهد بود که به الکترون‌ها نگاه نمی‌کنیم. ممکن است علت این امر به وجود منبع نور برگردد و به نوعی ایجادکننده اختلال باشد، شاید چون الکترون‌ها به دلیل حساسیتی که دارند در طی فرآیند پراکندگی<sup>۲۶</sup> ضربه‌ای (تکانه‌ای) از جانب نور به الکترون وارد می‌شود که باعث تغییر حرکت الکترون می‌گردد. همان‌طور که می‌دانید میدان الکتریکی نور، روی بار، اثر کرده و باعث اعمال نیرو به الکترون می‌گردد و به هر حال، وجود نور تأثیر عمیقی روی الکترون‌ها می‌گذارد و تلاش برای مشاهده الکترون‌ها، حرکت آنها را تحت شعاع قرار می‌دهد! هنگام پراکندگی فوتون‌ها، ضربه (تکانه) وارد شده به الکترون‌ها از جانب فوتون‌ها، حرکت الکترون را به اندازه کافی تحت تأثیر و تغییر قرار می‌دهد، پس الکترون نخواهد توانست به علت اختلال ایجاد شده به محلی برود که  $P_{12}$  در بیشترین مقدار خود باشد و به جای آن  $P_{12}$  کمترین مقدار را خواهد داشت و این دلیل مشاهده نکردن اثر تداخلی موج می‌باشد.

شما ممکن است نظر بدهید که می‌توانیم از منبع نوری قوی استفاده نکنیم و آزمایش را با منبع نوری که شدتش کم باشد تکرار کنیم و با استفاده از امواج نوری ضعیف که قابلیت ایجاد اختلال مؤثری در الکترون‌ها را ندارند کار را دنبال کنیم مطمئناً زمانی که منبع نور را کم و کمتر کنیم در نهایت موج به اندازه کافی ضعیف خواهد بود که اثر قابل ملاحظه‌ای روی الکترون‌ها نداشته باشد. بسیار خوب؛ بیایید امتحان کنیم. اولین چیزی که مشاهده می‌کنیم فلش‌های نوری پراکنده شده به وسیله عبور الکترون‌ها شدت کمتری نمی‌یابند و همه‌ی فلش‌های نوری شدت یکسانی دارند. تنها چیزی که در رویکرد جدید مشاهده می‌گردد این است که گاهی با ضعیف‌ساختن منبع شاهد شنیدن صدای کلیک هستیم در حالی که هیچ فلش نوری مشاهده نشده است! الکترونی عبور کرده بدون آنکه ما آن را مشاهده کنیم. آنچه که ما مشاهده می‌کنیم این است که نور نیز رفتاری مشابه الکترون‌ها دارد ما نسبت به اینکه نوری به صورت موج رفتار می‌کند آگاهی داشتیم و حال به نتیجه می‌رسیم که می‌تواند رفتار گسسته نیز داشته باشد چیزهایی که توانایی پراکندگی یا رسیدن به صفحه مانع را دارند و آنها را فوتون می‌خواندیم زمانی که شدت منبع نوری را کاهش دهیم تغییری در شدت هر فوتون مشاهده نمی‌کنیم بلکه تأخیر در نرخ انتشار آنهاست. آزمایش نشان می‌دهد زمانی که منبع نوری ما کم‌شدت شده باشد بعضی از الکترون‌ها بدون اینکه شناسایی شوند عبور می‌کنند و این مسئله به این برمی‌گردد که در لحظه‌ی عبور الکترون از حفره هیچ فوتونی برای برهم‌کنش وجود نداشته است.

به نظر کمی دلسردکننده می‌آید! اگر این فرضیه که با دیدن هر الکترون ما یک فلش نوری دریافت کنیم و این آگاهی وجود داشته باشد که الکترون‌های مشاهده شده در واقع الکترون‌هایی هستند که در آنها دستکاری شده است درست باشد، ممکن است پیشنهاد کنید آزمایش را با منبع نوری با شدت کم دوباره تکرار کنیم اما این بار سه دسته‌بندی برای الکترون‌های رسیده به آشکارساز داریم آنها که از حفره ۱ عبور می‌کنند تعدادشان در ستون ۱ ثبت می‌گردد آنها که از حفره ۲ عبور می‌کنند در ستون ۲ ثبت می‌گردند و آنهایی که هیچ فلش نوری را دریافت نمی‌کنند و تنها شاهد شنیدن کلیک هستیم آنها را در ستون ۳ ثبت می‌کنیم. زمانی که به محاسبه‌ی احتمالات می‌نشینیم به این نتایج می‌رسیم که: الکترون‌هایی که از حفره ۱ عبور کردند احتمال مشابه  $P'_1$  و الکترون‌هایی که از حفره ۲ عبور کرده‌اند احتمال مشابه  $P'_2$  را دارند (پس به نظر می‌آید الکترون‌هایی که یا از حفره ۱ و یا از حفره ۲ عبور می‌کنند احتمال مشابه  $P'_{12}$  داشته باشند) و قسمت جالب توجه اینکه الکترون‌هایی که با هیچ فلش نوری همراه نبودند توزیعی موج‌گونه درست مشابه منحنی

$P_{12}$  شکل ۲.۳۷ دارند و اگر الکترون را تحت نظر نداشته باشیم تداخل ظاهر می‌گردد.

قابل درک است زمانی که الکترونی مشاهده نگردد پای هیچ فوتون دستکاری‌کننده‌ای نیز وسط نیست و زمانی که الکترون را تماشا کنیم فوتون، الکترون را دستکاری می‌کند و همواره شاهد مقدار یکسان و مشخصی از این آشوب در الکترون‌ها هستیم زیرا که فوتون‌های نور همواره هم‌شدت می‌باشند و آنقدر تأثیرگذار هستند که بتوانند اثر تداخلی را به کلی از بین ببرند.

آیا واقعاً راهی برای مشاهده الکترون‌ها بدون ایجاد هیچ‌گونه تداخلی وجود ندارد؟ در فصل قبل اشاره کردیم که تکانه فوتون‌ها متناسب با معکوس طول موج آنهاست. به‌طور دقیق‌تری می‌توان گفت که ضربه وارده به الکترون‌ها حین پراکندگی فوتون‌ها به سمت چشمان ما وابسته به تکانه فوتون می‌باشد. پس اگر بخواهیم شاهد الکترون‌ها بدون هیچ اختلالی باشیم به جای اینکه شدت نور را تغییر دهیم باید روی فرکانس فوتون‌ها تمرکز کنیم (در واقع باید طول موج فوتون‌ها را افزایش دهیم). خب نور مناسب برای این آزمایش می‌تواند نور مرئی در محدوده فروسرخ باشد همچنین می‌توانیم از امواج رادیویی نیز بهره ببریم و به تماشای آن با ابزارآلاتی که قابلیت آشکارسازی امواجی با طول موج بالا را دارند نشست. با استفاده از یک نور ملایم می‌توان از اختلالات وارده بر الکترون چشم‌پوشی کرد.

به سراغ آزمایشی با نوری با طول موج بالا می‌رویم. در نگاه اول به نظر هیچ‌چیز تغییر نکرده است و نتایج مشابه قبل است سپس اتفاق غیرمنتظره‌ای به وقوع می‌پیوندد. اگر به یاد داشته باشید قبلاً در بحث میکروسکوپ اشاره شد که طبیعت موجی نور در مورد اینکه دو نقطه چقدر می‌توانند به یکدیگر نزدیک شوند ما را محدود می‌کند. فاصله‌ی بین دو نقطه در سطح میکروسکوپی از مرتبه‌ی طول موج نور می‌باشد پس هنگامی که نور با طول موجی بلندتر از مرتبه‌ی فاصله‌ی دو حفره به وسیله‌ی الکترون پراکنده می‌گردد شاهد یک فلش بزرگ فازی خواهیم بود. در این حالت ما دیگر نمی‌توانیم در مورد اینکه الکترون از کدام حفره گذشته است صحبت کنیم، فقط می‌دانیم که الکترون به یک نقطه‌ای در صفحه مانع رسیده است و اینکه دقیقاً کجاست را نمی‌دانیم و تنها با نوری در چنین محدوده فرکانسی می‌توانیم مطمئن باشیم که ضربه وارده بر الکترون آنقدر ناچیز بوده که منحنی  $P'_{12}$  به صورت  $P_{12}$  درآید، تنها در این صورت ما قادر به مشاهده اثر تداخل خواهیم بود و این تنها برای طول موج‌هایی بزرگتر از مرتبه فاصله‌ی دو حفره برقرار می‌باشد، درحالی که ما شانس برای پیش‌بینی موقعیت دقیق الکترون نداریم و در این حالت تداخل نور به حداقل مقدار خود می‌رسد و شاهد منحنی  $P_{12}$  در شکل ۳.۳۷ خواهیم بود.

این آزمایش نشان می‌دهد که کم‌کردن اختلال به منظور دیدن اثر تداخل همراه با تعیین دقیق اینکه الکترون از کدام حفره عبور کرده است غیرممکن است. این قضیه برای اولین بار توسط هایزنبرگ پیشنهاد شد که: از این پس قوانین جدید طبیعت تنها مطابق برخی محدودیت‌های اساسی در توانایی‌های تجربی ما که قبلاً به رسمیت شناخته شده است مطرح می‌گردد. هایزنبرگ پیشنهاد یک اصل کلی یعنی اصل عدم قطعیت خود را بیان کرد که بدین شرح است: طراحی آزمایشی که مشخص کند الکترون از کدام حفره گذشته است در حالی که کمترین اختلال به الکترون وارد شود تا بتوانیم الگوی تداخل را مشاهده کنیم غیرممکن است. اگر یک دستگاه قادر به تعیین این باشد که الکترون از کدام حفره می‌گذرد در این صورت نمی‌تواند آنقدر دقیق باشد که هیچ‌گونه اختلالی در الگوی تداخل ایجاد نکند. تا کنون هیچ‌کس راهی برای اجتناب از اصل عدم قطعیت نیافته است. پس ما این اصل را به عنوان سنگ‌بنای طبیعت فرض می‌کنیم.

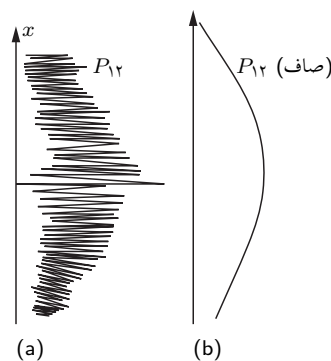
کامل‌شدن مکانیک کوانتومی که ما می‌شناسیم و به کمک آن اتم‌ها را تشریح می‌کنیم در گرو اصل عدم قطعیت می‌باشد. از آنجا که مکانیک کوانتوم نظریه موفقی است می‌توان اصل عدم قطعیت را اصل



مستحکمی در نظریه کوانتوم دانست اما اگر روشی وجود داشته باشد که خدشه‌ای در اصل عدم قطعیت ایجاد کند در آن صورت مکانیک کوانتوم نتایج متناقض نشان می‌دهد که باید به عنوان یک نظریه معتبر از طبیعت دور انداخته شود.

خب تکلیف فرضیه  $A$  چیست؟ بالآخره درست است یا نه؟! الکترون از حفره ۱ عبور می‌کند یا حفره ۲؟ جواب این سؤال را از آزمایشی می‌توان یافت که با روشی معین و خاص انجام می‌شود در حالی که هیچ ناسازگاری با آنچه فکر می‌کنی نداشته باشد! چیزی که ما باید بگوییم این است که اگر شخصی به تماشای حفره بنشیند یا به‌طور دقیق‌تری اگر قطعه‌ای از دستگاه باشد که قدرت تشخیص این را داشته باشد که الکترون از درون کدام حفره عبور می‌کند، در این صورت می‌توانیم بگوییم الکترون تصمیم می‌گیرد که یا از حفره ۱ یا ۲ عبور کند! اما زمانی که هیچ تلاشی برای تشخیص مسیر الکترون انجام ندهیم و هیچ عامل اختلال‌گری را در آزمایش وارد نکنیم می‌توان گفت که الکترون تنها از یک حفره عبور نمی‌کند. این استدلال منطقی مصداق راه‌رفتن بندبازی روی طناب بندبازی است در حالی که در آرزوی تشریح موفقیت‌آمیز طبیعت هستیم.

اگر حرکت همه‌ی مواد از جمله الکترون‌ها باید به‌صورت موج تشریح گردد پس تکلیف گلوله‌ها در اولین آزمایش چیست؟ چرا هیچ‌گونه الگوی تداخلی مشاهده نمی‌گردد؟ این بحث به طول موج گلوله‌ها بازمی‌گردد طول موج‌هایی که بسیار کوچک هستند قابلیت ایجاد الگوی تداخل را به خوبی ندارند، در واقع حتی با داشتن کوچکترین و دقیق‌ترین آشکارسازها نیز ما موفق به تشخیص ماکسیم‌ها و مینیم‌های الگو نخواهیم شد. آنچه ما مشاهده می‌کنیم نوعی میانگین<sup>۲۷</sup> است که منحنی کلاسیکی می‌باشد. در شکل ۵.۳۷ تلاش کردیم طرح‌واره‌ای رسم کنیم از آنچه برای اجرام بزرگ مقیاس اتفاق می‌افتد. قسمت  $x$  توزیع<sup>۲۸</sup> احتمال پیش‌بینی‌شده برای گلوله‌ها با استفاده از مکانیک کوانتوم را نشان می‌دهد، با فرض اینکه افت‌وخیزهای سریع در الگوی تداخل مربوط به امواجی با طول موج‌های کوتاه می‌باشد. آشکارساز فیزیکی اگرچه فاصله‌ی بین افت‌وخیزهای<sup>۲۹</sup> منحنی احتمال را افزایش می‌دهد ولی چون نمی‌توان به‌طور دقیق این افت‌وخیزها را اندازه گرفت پس اندازه‌گیری‌های ما یک منحنی با رفتار نرم<sup>۳۰</sup> را نشان می‌دهد (قسمت (b))



شکل ۵.۳۷: الگوی تداخل با گلوله‌ها: (a) واقعی (شماتیک)، (b) مشاهده‌شده.

<sup>27</sup>average

<sup>28</sup>distribution

<sup>29</sup>wiggles

<sup>30</sup>smooth

## ۷.۳۷ اصل اول مکانیک کوانتوم

حال نتیجه‌گیری‌های اصلی آزمایش‌های خود را به صورت خلاصه بیان می‌کنیم. ما می‌توانیم خلاصه خود را با در نظر گرفتن آزمایش به صورت ایده‌آل و در حالی که هیچ عامل نامشخص خارجی در آزمایش نفوذ ندارد به شکل ساده‌تری در نظر بگیریم. به طور دقیق می‌توان گفت یک آزمایش ایده‌آل آزمایشی است که تمام شرایط اولیه و نهایی آن به طور کامل مشخص باشد آنچه ما آن را یک رویداد<sup>۳۱</sup> می‌خوانیم به طور کلی فقط یک مجموعه خاص از شرایط اولیه و نهایی است (به عنوان مثال الکترونی از تفنگ خارج می‌گردد، به آشکارساز می‌رسد و هیچ چیز دیگری رخ نمی‌دهد).

### خلاصه

۱. احتمال یک رویداد در یک آزمایش ایده‌آل به صورت مربع قدر مطلق مقدار عدد مختلط  $\phi$  مشخص می‌گردد که دامنه‌ی احتمال خوانده می‌شود.

$$\begin{aligned} P &= \text{احتمال}, \\ \phi &= \text{دامنه‌ی احتمال}, \\ P &= |\phi|^2. \end{aligned} \quad (۶.۳۷)$$

۲. زمانی که یک رویداد به چندین روش متناوب اتفاق بیافتد دامنه‌ی احتمال هر رویداد از جمع دامنه‌ی احتمال هر روش به صورت جداگانه به دست می‌آید. در این حالت با تداخل روبه‌رو می‌شوید.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 + \phi_2, \\ P &= |\phi_1 + \phi_2|^2. \end{aligned} \quad (۷.۳۷)$$

۳. اگر آزمایشی با توانایی تشخیص و تعیین یک مسیر و یا هر مسیر پیشنهادی دیگری انجام شود در این صورت احتمال آن رویداد از جمع احتمالات برای هر مسیر پیشنهادی به دست می‌آید و الگوی تداخل از بین می‌رود.

$$P = P_1 + P_2. \quad (۸.۳۷)$$

سؤالی که هنوز ممکن است پرسیده شود این است که این چگونه کار می‌کند؟ چه مکانیسمی پشت این قانون وجود دارد؟ هیچ‌کس تا کنون هیچ مکانیسمی را پشت این قانون نیافته است و هیچ‌کس بیش از آنچه که توضیح دادیم نیافته است و تا کنون هیچ‌کس هیچ دیدگاه عمیق‌تری ارائه نداده است و برای آنچه که شاهدیم هیچ ایده‌ای درباره مکانیسم اصلی این نتایج مورد بحث وجود ندارد. ما تمایل داریم روی تفاوت اساسی و مهم فیزیک کلاسیک و مکانیک کوانتوم تأکید کنیم. ما درباره‌ی احتمال اینکه الکترون به مسیر مشخصی برسد صحبت کردیم و بیان کردیم که با استفاده از آرایش آزمایشگاهی، حتی در بهترین حالات، پیش‌بینی آنچه دقیقاً اتفاق می‌افتد ناممکن است. زمانی که دست به تلاش برای

<sup>31</sup>event



پیش‌بینی دقیق آنچه در یک محیط معین اتفاق می‌افتد می‌زنیم، فیزیک مسئله از دست ما خارج می‌گردد. ما در مورد پیش‌بینی آنچه که در آینده در یک محیط معین اتفاق می‌افتد آگاهی نداریم و اکنون می‌دانیم که انجام این عمل غیرممکن است و تنها چیزی که قابل پیش‌بینی می‌باشد احتمال‌های مختلف یک رویداد است. به نظر می‌رسد این یک ایده‌آل‌گرایی شتاب‌زده برای درک رفتار طبیعت است و یا ممکن است یک عقب‌نشینی به نظر برسد اما تا کنون هیچ‌کس روشی برای اجتناب از آن را نیافته است!

در حال حاضر ذکر چند نکته در مورد عدم آگاهی از پیش‌بینی‌های دقیق وجود دارد که می‌توان گفت: شاید کارکرد داخلی خاصی در الکترون‌ها وجود دارد، وجود یک سری متغیرهای درونی که تا کنون از آنها هیچ اطلاعی نداریم و ممکن است دلیل عدم پیش‌بینی‌های دقیق ما ناشی از این مسئله باشد، اگر بتوانیم به‌طور دقیق‌تری به الکترون نگاه کنیم می‌توانیم در مورد اینکه کجاست نیز حرف زد که البته تا کنون غیرممکن است. اما همچنان مشکل وجود دارد! فرض کنید که در داخل الکترون نوعی مکانیسم خاص وجود دارد که تعیین‌کننده‌ی پایان حرکت الکترون باشد! این مکانیسم همچنین باید تعیین کند که الکترون با این روش از درون کدام حفره می‌گذرد، اما شما نباید فراموش کنید که آنچه که در درون الکترون وجود دارد هیچ‌گونه وابستگی به آنچه ما انجام می‌دهیم به‌خصوص به اینکه کدام حفره بسته و کدام حفره باز باشد ندارد. ما احتمال  $P_1$  را برای الکترونی که حفره ۱ را انتخاب کرده پیدا می‌کنیم و همچنین اگر الکترون حفره ۲ را انتخاب کرده باشد ما احتمال  $P_2$  را می‌یابیم و ضرورتاً جمع احتمال  $P_1 + P_2$  برای الکترونی که از درون دو حفره می‌گذرد به‌دست می‌آید. به نظر می‌رسد که هیچ راه فراری برای خلاصی از احتمالات وجود ندارد! تأیید تجربی این مسئله وجود دارد و هیچ‌کس تا این زمان نتوانسته تکه گمشده پازل فهم این مطلب را پیدا کند بنابراین فعلاً ما مجبوریم که خودمان را با محاسبه احتمالات محدود کنیم و تنها چیزی که می‌توان گفت این است که طبیعت این‌گونه رفتار می‌کند.

## ۸.۳۷ اصل عدم قطعیت

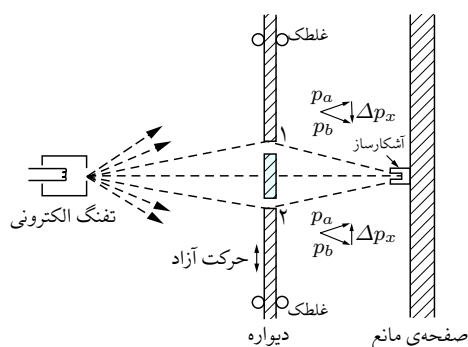
اصل عدم قطعیت<sup>۳۲</sup> هایزنبرگ بیان می‌کند: اگر شیئی را در معرض اندازه‌گیری قرار دهید به‌طوری که شما بخواهید مؤلفه  $x$  آن را همراه با تکانه الکترون با عدم قطعیت  $\Delta p$  تعیین کنید، شما هرگز قادر به اندازه‌گیری همزمان هر دو مؤلفه نخواهید بود و موقعیت این ذره با دقت  $\Delta x \geq \hbar/2\Delta p$  به‌دست می‌آید. رابطه عدم قطعیت با ضرب اندازه حرکت و موقعیت لحظه‌ای ذره در حالی که بزرگتر از  $\hbar/2$  است به‌دست می‌آید. این یک مورد خاص از اصل عدم قطعیت است که به‌طور کلی در قسمت‌های قبلی معرفی شده است. بیانیه کلی‌تر به این صورت است که ما به هیچ روشی نمی‌توانیم تجهیزاتی را طراحی کنیم که هر دو مؤلفه متناوب را در یک زمان مشخص بدون اینکه الگوی تداخل را تخریب کنیم تعیین نماید.

اجازه دهید صحت مشاهدات را برای یک مورد خاص که با اصل هایزنبرگ ارتباط دارد نشان دهیم. آزمایش شکل ۳.۳۷ را مورد اصلاح قرار می‌دهیم به‌طوری که همان آزمایش را با دیواره‌ی حفره‌داری انجام می‌دهیم که متشکل از یک صفحه‌ی نصب‌شده روی غلطک<sup>۳۳</sup> می‌باشد، به‌طوری که غلطک آزادانه بالا و پایین می‌رود (در جهت  $x$  همان‌طور که در شکل ۶.۳۷ می‌بینید وجود دارد). اگر با دقت به مشاهده حرکت صفحه بنشینیم می‌توانیم از اینکه الکترون از درون کدام حفره عبور کرده است آگاهی بیابیم. تصور کنید این اتفاق زمانی می‌افتد که آشکارساز در نقطه‌ی  $x = 0$  واقع شده باشد. انتظار ما این است که الکترون با عبور

<sup>32</sup>uncertainty principle

<sup>33</sup>rollers

### فصل ۳۷. بررسی رفتار عجیب مکانیک کوانتومی



شکل ۳۷.۶: آزمایشی که در آن ضخامت دیواره اندازه‌گیری می‌شود.

از حفره ۱ به سمت پایین منحرف گردد و به وسیله‌ی صفحه به آشکارساز برسد! از آنجا که مؤلفه عمودی تکانه الکترون در حال تغییر است صفحه باید یک حرکت برابر در جهت مخالف داشته باشد. اگر الکترون از میان حفره پایینی عبور کند صفحه یک ضربه رو به پایین احساس می‌کند و زمانی که از حفره بالایی عبور کند شاهد ضربه‌ای رو به بالا به صفحه خواهیم بود. واضح است که برای هر موقعیتی از آشکارساز، تکانه دریافت شده به وسیله صفحه، مقادیر متفاوتی هنگام پیمایش از حفره ۱ و ۲ خواهد داشت. بنابراین بدون اینکه هیچ اختلالی در الکترون به وجود بیاوریم و تنها با تماشای صفحه می‌توانیم از مسیر الکترون آگاه شویم.

حال به منظور انجام این کار ضروری است قبل از اینکه الکترون از مسیری عبور کند نسبت به تکانه صفحه آگاهی داشته باشیم. زمانی که قبل از رسیدن الکترون به صفحه، تکانه‌ی آن را اندازه می‌گیریم در واقع می‌توانیم تغییرات اندازه حرکت را پس از برخورد الکترون به صفحه هم به دست آوریم اما در نظر داشته باشید که مطابق اصل عدم قطعیت ما نمی‌توانیم همزمان اطلاعات دقیقی نیز از موقعیت صفحه به دست آوریم. اما اگر آگاهی دقیقی نسبت به موقعیت صفحه نداشته باشیم در این صورت نمی‌توانیم در مورد کجایی دو حفره نیز به طور دقیق صحبت کنیم در این حالت برای هر الکترونی که از مسیری عبور می‌کند مکان‌های مختلفی وجود دارد که این بدین معناست که مرکز الگوی تداخل برای هر الکترون موقعیتی متفاوت دارد! الگوی تداخل باید عاری از هرگونه اختلالی باشد و هیچ‌گونه اختلالی در تغییر موقعیت الگو نباید وجود داشته باشد. بررسی و تعیین دقیق و کارآمد اندازه حرکت صفحه که از اندازه‌گیری پس‌زنی صفحه با توجه به حفره‌ای که از آن عبور کرده است به دست می‌آید دست بزنیم عدم قطعیت در اندازه‌گیری موقعیت  $x$  پا به عرصه می‌گذارد و با توجه به اصل عدم قطعیت این عدم قطعیت به اندازه‌ای کافی خواهد بود که الگوی تداخل مورد مشاهده را با توجه به بالا پایین رفتن آشکارساز در جهت  $x$  از نقطه‌ای در ماکسیمم به نزدیکی مینیمم برساند. چنین انتقال تصادفی در الگوی تداخل به اندازه‌ای برجسته خواهد بود که ما را از مشاهده الگوی تداخل بی‌نصیب کند.

در واقع اصل عدم قطعیت محافظ مکانیک کوانتوم است. هایزنبرگ این اصل را به رسمیت می‌شناخت و امکان اندازه‌گیری همزمان موقعیت و اندازه حرکت سیستم با دقت بالا را زیر سؤال برد و در صورتی که این اندازه‌گیری همزمان امکان‌پذیر باشد چارچوب کوانتوم فرو خواهد ریخت! بنابراین ما پیشنهاد هایزنبرگ مبنی بر امکان‌پذیر نبودن اندازه‌گیری همزمان را می‌پذیریم. مردم همواره سعی در پیدا کردن راهی برای اندازه‌گیری با دقت بالا می‌باشند ولی تا کنون هیچ‌کس موفق به اندازه‌گیری دقیقی برای هیچ الکترونی، توپی، صفحه‌ای

یا هر چیز دیگری نشده است. مکانیک کوانتوم در لبه‌ی پرتگاه است اما دقیق بودن قابل صرف نظر نیست.

Summary / no Lecture (Quantum Behaviour)

1. The probability of an event (in ideal experiment - no uncertain external disturbances) is absolute square of complex quantity called probability amplitude.
2. When event can occur in several alternative ways, the prob. amp. is the sum of a prob. amp. for each way considered separately.
3. If an experiment, capable of determining which alternative is actually taken, is performed, the interference is lost & the prob. becomes the sum of the prob. for each alternative.

---

Call Prob. Amp.  $\varphi$ :  
 Call Prob.  $P$ .

1.  $Prob = |\varphi|^2$
2. If two alternatives  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$  so  $P = |\varphi_1 + \varphi_2|^2$
3. In the case 3. above:  $P = |\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2 = P_1 + P_2$

