

توجیه کلاسیکی نتایج تجربی اثر فوتوالکتریک

نویسنده: حمید وثیق زاده انصاری

منبع: راسخون

مقدمه

همچنان که می‌دانیم منشأ فیزیک کوانتومی استنتاج رابطه‌ی مشهور $E=h\nu$ توسط پلانک بود. از آنجا که این استنتاج با استفاده از روابط ریاضی و مربوط به مکانیک آماری انجام می‌شود در بسیاری از کتب متن مقدماتی فیزیک جدید و فیزیک کوانتومی گنجانده نمی‌شود و به جای آن به استنتاج این رابطه از اثر فوتوالکتریک، با تکیه بر این نتیجه‌گیری که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه نتایج تجربی این اثر نیست و لذا تنها توجیه، آنی می‌باشد که منجر به رابطه‌ی $E=h\nu$ می‌گردد، پرداخته می‌شود. هدف این مقاله نشان دادن این است که حقیقتاً اینگونه نیست که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه نتایج تجربی اثر فوتوالکتریک نباشد، و درواقع به‌خوبی می‌تواند این نتایج را توجیه نماید. در حمایت از بحث ارائه شده برای توجیه نتایج اثر فوتوالکتریک، نتایج بحث را در توجیه پراکندگی رالی و توجیه مکانیسم واقعی عمل لیزر به‌کار می‌بریم.

نظریه‌ی کلاسیکی الکترومغناطیس و توجیه نتایج

نتایج تجربی مهم اثر فوتوالکتریک را می‌توان به قرار زیر دسته‌بندی کرد:

(a). اگر یک پرتو الکترونی قادر به آزاد کردن الکترون از سطح فلز باشد، شدت آن متناسب خواهد بود با جریان الکترونی ناشی از الکترون‌های آزاد شده.

(b). یک پرتو تکفام حتی اگر شدت آن به‌دلخواه افزایش یابد قادر به آزاد کردن الکترون نیست مگر این‌که فرکانس آن دارای بزرگی کمینه‌ی معینی باشد. این بزرگی به جنس فلز بستگی دارد.

(c). منحنی انرژی جنبشی الکترون آزاد شده در مقابل فرکانس پرتو تکفام آزادکننده‌ی الکترون، خطی راست است که شیب آن برای همه‌ی فلزات یکسان است.

می‌دانیم که یک موج الکترومغناطیسی متشکل از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر یکدیگر می‌باشد که در زمان و فضا تناوب دارند. بیایید ببینیم یک پرتو الکترومغناطیسی که بر سطحی فلزی فرود آمده و باعث گسیل الکترون از آن می‌شود متشکل از چیست. چون بالاجبار پرتو حجمی را اشغال می‌کند و بر مساحت سطح مقطع آن روی فلز الکترون‌های ظرفیتی بی‌شماری وجود دارد، نتیجه می‌گیریم که پرتو، همچنان‌که در شکل 1 نشان داده شده است، درواقع متشکل از امواج مجزایی است که هرکدام الکترونی را هدف گرفته‌اند. شدت پرتو درواقع تظاهری از جمع برداری دامنه‌های این امواج پرتو می‌باشد. بدین ترتیب، مورد (a) به‌آسانی توجیه می‌شود: هرچه تعداد امواجی، که هرکدام قادر به آزاد کردن الکترونی هستند، بیشتر باشد تعداد الکترون‌های آزاد شده بیشتر خواهد بود.

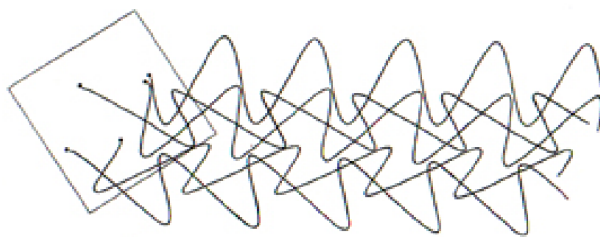


Fig. 1

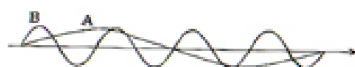


Fig. 2

حال، یکی از این موج‌ها را به صورتی که در شکل 2 به شکل موج A، در صورتی که فرکانس آن به حد کافی پایین باشد که موج قادر به آزاد کردن الکترون نباشد، یا به شکل موج B، در صورتی که فرکانس آن به حد کافی بالا باشد که موج قادر به آزاد کردن الکترون باشد، نشان داده شده است در نظر گیرید. می‌خواهیم سبب این امر را بیابیم. این «سبب» باید در نیروی ضربه‌ای که B، با فرکانس بزرگش، می‌تواند بر الکترون‌های فلز وارد آورد جستجو شود، در حالی که طبیعی است که A در فاصله‌ی زمانی‌ای درازتر نیرویی آرام‌تر بر الکترون‌ها وارد می‌آورد که گرچه باعث آشفتگی‌ها و سستی‌هایی در آنها می‌شود اما این‌ها چندان قوی و ناگهانی نیستند که باعث آزادی الکترون‌ها شوند بلکه اندازه حرکت عمدتاً بر کل اتم وارد خواهد شد و باعث تولید مقداری حرارت، که ناشی از حرکت اتم‌هاست، می‌شود. می‌توانیم این نیروی ضربه‌ای را متناسب با قدر مطلق شیب موج تصور نماییم.

در واقع این یک مورد مکانیکی است که یک ضربه‌ی شدید، که در آن اندازه حرکتی معین در زمانی کوتاه منتقل می‌شود، باعث گسستگی موضعی پیوندهای ساختمانی (یا پیوندهای مولکولی) جسم تحت ضربه می‌شود، در حالی که یک ضربه‌ی آرام، که در آن همان اندازه حرکت در زمانی دراز منتقل می‌شود، باعث گسستگی پیوندهای ساختمانی نمی‌شود بلکه اندازه حرکت به کل جسم منتقل خواهد شد.

در بحثی الکترومغناطیسی‌تر «سبب» فوق‌الذکر را می‌توانیم به این قرار بیابیم: فرض کنید که امواج A و B دارای دامنه‌ی یکسانی باشند. این موج‌ها به هدف‌های الکترونی خود با سرعتی یکسان وارد می‌شوند. بردارهای میدان مغناطیسی موج‌ها را در نظر گیرید. در فاصله‌ی زمانی‌ای ثابت تغییر در بردار میدان مغناطیسی در B بیشتر است تا در A؛ مثلاً در فاصله‌ی زمانی‌ای برابر با یک‌چهارم دوره‌ی تناوب B این بردار در B از صفر به بیشینه‌اش می‌رسد در حالی که در A اینگونه نیست. بنابراین سرعت جابه‌جایی میدان مغناطیسی نسبت به الکترون که ثابت فرض می‌شود در B بیشتر است تا در A. به عبارتی ساده‌تر وضعیت شبیه این است که در B یکی از دو قطب یک آهنربا سریع‌تر در حال حرکت باشد تا در A. واضح است که چون جابه‌جایی‌ای نسبی بین یک بار الکتریکی (یعنی الکترون) و یک میدان مغناطیسی (یعنی میدان مربوط به موج الکترومغناطیسی تشبیه شده به میدان یک آهنربا) وجود دارد نیرویی متناسب با سرعت جابه‌جایی، وارد شده بر بار الکتریکی یعنی الکترون، (که عمود بر بردار میدان مغناطیسی و بر جهت انتشار موج است) وجود خواهد داشت. روشن است که چون این سرعت جابه‌جایی در B بیشتر است، نیروی وارد بر الکترون نیز در B بیشتر است.

بدین ترتیب، مورد (b) نیز توجیه می‌شود: اولاً، چون هر کدام از موج‌ها یک الکترون را هدف گرفته است، پس شدت تمامیت پرتو، یا در واقع وجود دیگر موج‌های پرتو که الکترون‌های دیگر را هدف گرفته‌اند، نمی‌تواند هیچ نقشی در این‌که آیا یک موج منفرد قادر به آزاد ساختن یک الکترون هست یا نه داشته باشد. ثانیاً، بر طبق بحث فوق، بسته به جنس فلز یا در واقع بسته به نیروی پیوند بین الکترون و هسته‌ی اتم آن هر موج باید دارای فرکانسی کمینه، یا به عبارت دیگر باید دارای شیبی کمینه، یا به عبارت دیگر باید دارای نرخ زمانی کمینه‌ای از تغییر میدان باشد تا بتواند نیروی لازم برای آزاد کردن الکترون را اعمال کند.

مقداری توجه به بحث الکترومغناطیسی فوق نشان می‌دهد که اگر فرکانس موج B بیش از فرکانس کمینه‌ی لازم برای آزاد کردن الکترون (یعنی فرکانس آستانه) باشد، بلافاصله پس از آزاد کردن الکترون ادامه‌ی تغییر زمانی میدان مغناطیسی باعث اعمال نیرو بر الکترون آزاد شده خواهد شد که بزرگی آن متناسب است با بزرگی فرکانس، یعنی همان‌طور که فرکانس افزایش می‌یابد به علت افزایش در سرعت تغییر میدان مغناطیسی نیروی اعمال شده بر الکترون آزاد شده نیز افزایش می‌یابد.

به این ترتیب مورد (c) نیز توجیه می‌شود، زیرا هم‌اکنون تناسب افزایش در فرکانس را با افزایش در نیروی وارد بر الکترون آزاد شده که خود متناسب با افزایش در انرژی جنبشی الکترون آزاد شده است نشان دادیم. اما چرا شیب خط مذکور در (c) برای همه‌ی فلزات یکسان است؟ زیرا همان‌طور که گفتیم افزایش فرکانس متناسب با افزایش در انرژی جنبشی الکترون «آزاد شده» است و واضح است که وقتی یک الکترون از فلز آزاد شود آنگاه مستقل از جنس فلز خواهد بود؛ به عبارت دیگر فوتوالکترون‌های آزاد شده از هر فلز ذاتاً یکسانند و با هم تفاوتی ندارند تا باعث اختلافی بین شیب‌های منحنی فلزات مختلف شوند.

ممکن است این سؤال مطرح شود که چگونه انرژی منتقل شده از یک موج الکترومغناطیسی می‌تواند به فرکانس موج بستگی داشته باشد در حالی که در بردار پوینتینگ جمله‌ای شامل فرکانس وجود ندارد. در پاسخ باید بگوییم که همان‌گونه که می‌دانیم بردار پوینتینگ متناسب با انرژی متوسط حمل شده توسط موج یا به عبارت دیگر متناسب با مساحت‌های زیر منحنی‌های مربع موج‌های A و B در شکل 2 می‌باشد که به راحتی می‌توان دید که اگر دامنه‌های آنها یکسان باشد مساحت‌های مذکور مربوطه‌ی آنها نیز یکسان خواهد بود. پس انرژی‌ای که یک موج الکترومغناطیسی می‌تواند منتقل کند و احتمالاً به فرکانس بستگی دارد غیر از کل انرژی‌ای است که موج حمل می‌کند و مستقل از فرکانس است (درواقع اولی قسمتی از دومی است).

توجیه پراکندگی رالی و مکانیسم عمل لیزر

روش فوق درباره‌ی توجیه کلاسیکی اثر فوتوالکتریک را می‌توان برای توجیه کلاسیکی این حقیقت مورد استفاده قرار داد که پراکندگی نور در صورتی که فرکانس نور افزایش یابد افزایش خواهد یافت (که تحقیق لرد رالی می‌باشد): اگر برای سادگی فرض کنیم که یک مولکول پراکننده از یک بار مثبت سنگین و یک بار منفی سبک، که بدون هیچ حرکتی نسبت به یکدیگر شبیه یک دوقطبی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است واضح است که قابل قبول خواهد بود که تصور کنیم که بدین منظور که بار منفی بتواند کمی از بار مثبت دور شده و شبیه یک فنر در هر دو سوی مرکز بار مثبت نوسان کند احتیاج به یک ضربه‌ی کمینه (یعنی اندازه حرکتی به اندازه‌ی کافی بزرگ که بر بار منفی سبک‌تر در فاصله زمانی‌ای به اندازه‌ی کافی کوچک وارد شود) دارد. واضح است که، با در نظر گرفتن بحث فوق درباره‌ی اثر فوتوالکتریک، امواج الکترومغناطیسی دارای فرکانس زیاد این ضربه را بهتر از امواج الکترومغناطیسی دارای فرکانس کم می‌توانند وارد کنند، و بنابراین، پراکندگی امواج دارای فرکانس زیاد که به وسیله‌ی این دوقطبی انجام می‌شود بیشتر است.

حال بیایید ببینیم لیزر چگونه کار می‌کند. لیزری گازی را در نظر بگیرید که با تخلیه‌ی الکتریکی‌ای که در آن صورت می‌گیرد مولکول‌های موجود در آن تحریک شده و تابش می‌کنند. بسته به نوع گاز و دیگر شرایط، تابش این مولکول‌ها محدوده‌ی مشخصی از طیف الکترومغناطیسی را شامل می‌شود. با توجه به این‌که طول موج‌های امواج الکترومغناطیسی (این محدوده از طیف) در قیاس با ابعاد لوله‌ی لیزر بسیار کوچک است مسلماً در این محدوده از طیف، طول موج یا طول موج‌هایی یافت می‌شود که با توجه به فاصله‌ی ثابت شده‌ی دو آینه‌ی لیزر از یکدیگر پس از انعکاس‌های متوالی متعدد از آینه‌ها و تولید تداخل‌های سازنده‌ی متوالی قادر به تقویت خود می‌باشد، در حالی که در طول موج‌های دیگر تداخل ویرانگر و در نتیجه عدم تقویت امواج را خواهیم داشت. پس وضعیت به‌طور ساده این‌گونه است: هر مولکول گاز در لوله (پس از تحریک شدن) شروع به تابش موجی الکترومغناطیسی با طول موجی مشخص (که همانی است که قرار است تقویت شود) در همه‌ی جهات و در همه‌ی صفحات قطبش می‌نماید. پرتوهایی از این تابش که عمود بر آینه‌ها هستند پس از انعکاس از آینه‌ها بر روی خود برمی‌گردند و باعث تقویت خود می‌شوند. با توجه به سرعت بسیار زیاد امواج الکترومغناطیسی می‌توانیم مولکول را همچون چشمه‌ای که در زمان تقویت موج به صورت بلاانقطاع در حال گسیل همان طول موج با همان شدت است در نظر گیریم. به این ترتیب پرتو به‌خصوص فوق طی رفت و برگشت‌های متوالی و تداخل‌های سازنده به شدت

تقویت می‌شود. البته، صفحات فطیش اتفاقی گوناگونی از این پرتو به این ترتیب تقویت می‌شود. حال، اگر یکی از این آینه‌ها به گونه‌ای باشد که اجازه‌ی خروج از لوله را به این پرتو به شدت تقویت شده بدهد، پرتو لیزری متشکل از یک طول موج به خصوص اما با صفحات قطبش گوناگون در بیرون از لوله خواهیم داشت که مربوط به فقط یک مولکول تحریک شده می‌باشد. مسلماً مولکول‌های بی‌شماری این گونه به تقویت این طول موج ویژه خواهند پرداخت، لذا پرتو لیزری واقعی ما در بیرون لوله پرتوی متشکل از امواجی بی‌شمار شبیه امواج نشان داده شده در شکل 1 خواهد بود که هر کدام مربوط به صفحه‌ی قطبشی خاصی از یکی از مولکول‌های بی‌شمار گاز در لوله (به عنوان چشمه‌های تولیدکننده‌ی امواج الکترومغناطیسی) می‌باشد. روشن است که هر چه طول لوله بیشتر باشد تعداد چشمه‌های تولیدکننده‌ی امواج، یعنی مولکول‌های تحریک شده، بیشتر خواهد بود و لذا تعداد امواج تشکیل دهنده‌ی پرتو لیزری در بیرون از لوله (که مربوط به این مولکول‌های بسیار بیشتر می‌باشند) بالتبع بیشتر خواهد بود و لذا شدت پرتو لیزری بیشتر خواهد بود.