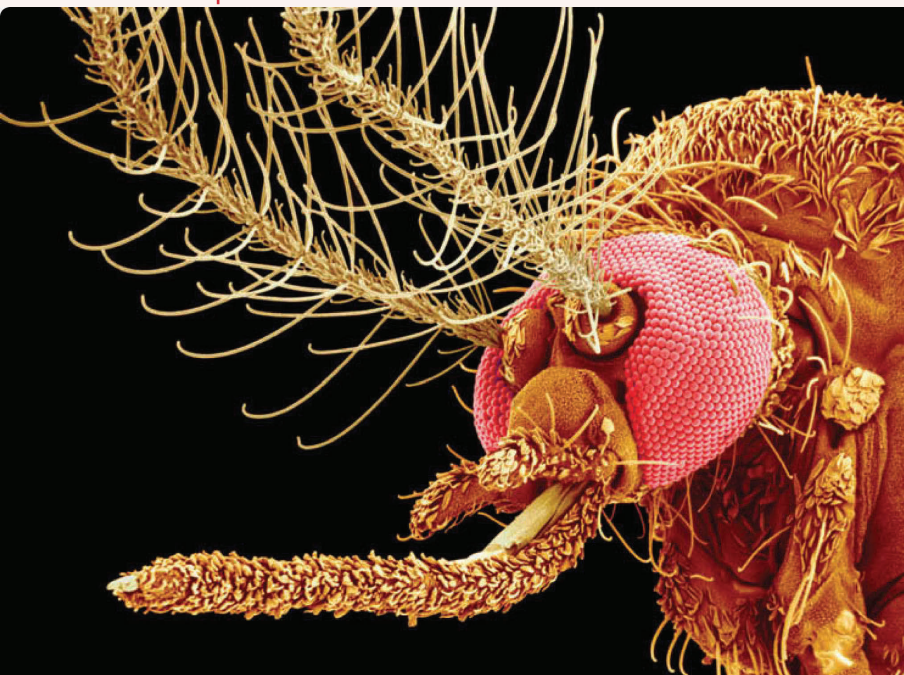


آشنایی با رفتار موجی - ذره‌ای نور



این عکس نمای بسیار بزرگ شده از یک حشره را نشان می‌دهد که با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده است. در قرن بیستم، فیزیک‌پیشگان از این کشف که ذرات می‌توانند نظیر امواج رفتار کنند، شگفت‌زده شدند. در واقع، در این کتاب خواهیم دید که به هر ذره در حال حرکتی نظیر الکترون طول موجی وابسته است. میکروسکوپ به کار رفته برای این عکس از طول موج الکترون بهره گرفته است که از طول موج نور مرئی بسیار کوچک‌تر است. دلیل تمایز استثنایی جزئیات این عکس همین طول موج کوچک الکترون است.

توانایی نشان دادن اثرهای تداخلی یکی از ویژگی‌های اساسی امواج است. در آزمایش مشهور ینگ، نور از دو شکاف نزدیک به هم می‌گذرد و نقشی از فریزهای روشن و تاریک را روی پرده تشکیل می‌دهد. نقش فریزها گواهی مستقیم بر این است که بین امواج نوری که از هر شکاف خارج شده‌اند تداخل صورت گرفته است. یکی از شگفت‌انگیزترین کشف‌های فیزیک در قرن بیستم این است که ذرات نیز می‌توانند نظیر امواج اثرهای تداخلی نشان دهند. مثلاً، شکل ۱ صورتی مشابه آزمایش ینگ را نشان می‌دهد که با فرستادن باریکه‌ای از الکترون‌ها بر دو شکاف انجام شده است. در این آزمایش، پرده نظیر یک صفحه تلویزیون است و وقتی الکترون به آن برخورد کند می‌درخشد. قسمت الف شکل نقشی را مشخص می‌کند که اگر هر الکترون دقیقاً مثل یک ذره عمل می‌کرد با گذشتن از یکی از شکاف‌ها و برخورد به صفحه انتظار داریم که دیده شود.



□ تداخل امواج نوری

□ تداخل امواج کوانتومی

نقش شامل تصویری از هر شکاف خواهد بود. قسمت ب نقشی را نشان می‌دهد که در واقع دیده می‌شود و از فریزهای روشن و تاریکی تشکیل شده و یادآور پدیده‌ای است که وقتی امواج نور از دو شکاف بگذرند ایجاد می‌شود. نقش فریزها بر آن دلالت دارند که الکترون‌ها اثرهای تداخلی مربوط به امواج را نشان داده‌اند. ولی الکترون چگونه می‌تواند نظیر امواج نشان داده شده در شکل (الف) رفتار کند؟ و این‌ها چگونه امواجی هستند؟ پاسخ به این پرسش‌های اساسی بعداً در این فصل مورد بحث قرار خواهند گرفت. فعلاً فقط می‌خواهیم بر این مفهوم تأکید کنیم که الکترون به‌راستی در بعضی شرایط می‌تواند به صورت موج عمل کند و به عنوان یک ذره مادی مجزا به حساب نمی‌آید. به عبارت دیگر، الکترون ماهیتی دوگانه نشان می‌دهد، هم ویژگی‌های ذره گونه و هم ویژگی‌های موج گونه.

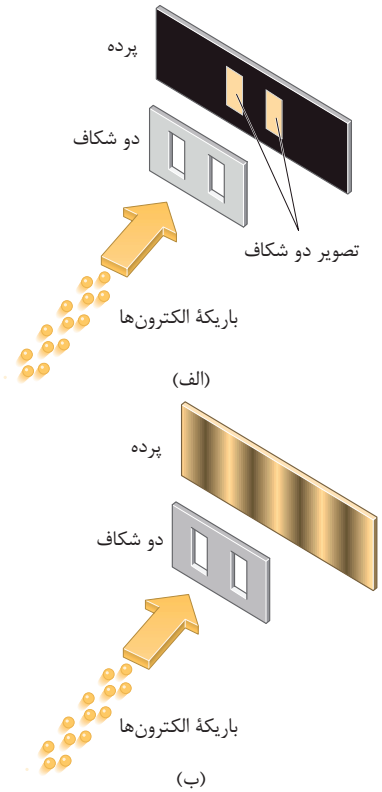
پرسش جالب دیگری مطرح می‌شود: اگر ذره‌ای می‌تواند ویژگی‌های موج گونه نشان دهد، آیا امواج نیز ویژگی‌های ذره گونه نشان می‌دهند؟ همان‌طور که در سه بخش بعدی نشان خواهیم داد پاسخ مثبت است. در واقع، آزمایش‌هایی که رفتار ذره گونه امواج را نشان داده‌اند در شروع قرن بیستم قبل از آزمایش‌هایی که ویژگی‌های موج گونه الکترون‌ها را نشان می‌دهند انجام گرفته‌اند. فیزیک‌پیشگان اکنون مفهوم دوگانگی موج - ذره را به عنوان بخشی اساسی از طبیعت پذیرفته‌اند:

امواج می‌توانند ویژگی‌های ذره گونه و ذرات می‌توانند ویژگی‌های موج گونه نشان دهند.

بخش ۲ با بحث امواج الکترومغناطیسی که از جسم سیاه کامل تابش می‌شوند حکایت جالب توجه دوگانگی موج - ذره را شروع می‌کند. شروع این بخش با تابش جسم سیاه ضرورت دارد، زیرا این اولین حلقه در زنجیره نشانه‌های تجربی است که به فهم امروزی ما از دوگانگی موج - ذره منجر شدند.

۲. تابش جسم سیاه و ثابت پلانک

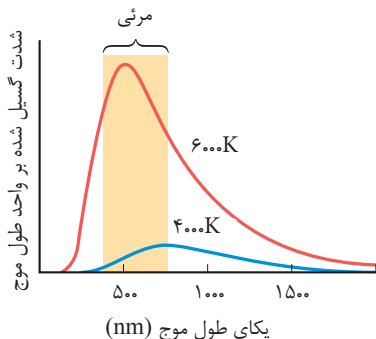
تمام اجسام، صرف‌نظر از اینکه گرم باشند یا سرد، به طور مداوم امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کنند. مثلاً درخشش اجسام خیلی داغ را می‌بینیم زیرا آن‌ها در ناحیه مرئی طیف، امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کنند.



شکل ۱ (الف) اگر الکترون‌ها به صورت ذرات مجزا بدون هیچ خواص موجی رفتار کنند، از یک شکاف یا شکاف دیگری می‌گذرند و به پرده برخورد می‌کنند و باعث درخشیدن آن می‌شوند و تصویرهای دقیق شکاف را ایجاد می‌کنند. (ب) در واقع، پرده نقش فریزهای روشن و تاریکی را، مشابه وقتی که باریکه‌ای از نور به کار رود و بین امواج نوری خارج‌شده از هر شکاف تداخل به وجود آید، نشان می‌دهد.

www

□ طیف جسم سیاه



شکل ۲ تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از جسم سیاه کامل دارای شدت بر واحد طول موج است و همان طور که شکل نشان می دهد، از طول موجی به طول موج دیگر تغییر می کند. در دمای بالاتر، شدت بر واحد طول موج بیشتر است و بیشینه در طول موج کوتاه تری مشاهده می شود.



رابرت میلیکان (۱۹۵۳ - ۱۸۷۸، ایالات متحده آمریکا).

شاید وی بهترین آزمایشگر عصر خود بود. از جمله کارهای او می توان تعیین مقدار دقیق ثابت پلانک با استفاده از اثر فوتوالکتریک (که به خاطر آن جایزه نوبل ۱۹۲۳ را دریافت کرد) و اندازه گیری بار الکترون (با بهره گیری از دستگاه مشهور قطره که خود او طراحی کرده بود) را نام برد.

خورشید ما، که دمای سطح آن حدود 6000 K است زرد به نظر می رسد در حالی که ستاره سردتر منکب الجوزا در صورت فلکی جبار به دلیل دمای سطحی کمتر 2900 K ، قرمز - نارنجی به نظر می آید. ولی، در دماهای به نسبت کمتر، اجسام سردتر فقط نور مرئی ضعیفی تابش می کنند و در نتیجه درخشنده به نظر نمی رسند. بدون تردید بدن انسان، در 310 K نور مرئی کافی گسیل نمی کند تا در تاریکی با چشم غیر مسلح دیده شود. ولی بدن در ناحیه فروسرخ طیف امواج الکترومغناطیسی تابش می کند و این امر را می توان با وسایل حساس به فروسرخ آشکار کرد.

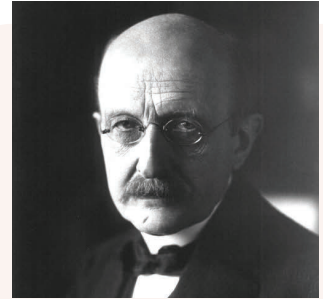
در یک دمای معین، شدت امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از یک جسم در گستره مرئی، فروسرخ و دیگر ناحیه های طیف از طول موجی به طول موج دیگر تغییر می کند. شکل ۲ نشان می دهد که شدت بر واحد طول موج برای جسم سیاه که یک گسیل کننده کامل است، چگونه به طول موج بستگی دارد.

یک جسم سیاه کامل در دمای ثابت تمام تابش الکترومغناطیسی تاییده به آن را جذب و بازگسیل می کند. دو منحنی در شکل ۲ نشان می دهند که در یک دمای بالاتر بیشینه شدت گسیل شده بر واحد طول موج افزایش می یابد و به سمت طول موج های کوتاه تر، یعنی به طرف ناحیه مرئی طیف منتقل می شود. با توجه به شکل این دو منحنی، ماکس پلانک فیزیک دان آلمانی (۱۹۴۷-۱۸۵۸) قدم اول به طرف فهم امروزی ما از دوگانگی موج - ذره را برداشت.

پلانک در سال ۱۹۰۰ با استفاده از مدلی که یک جسم سیاه را به صورت تعداد زیادی نوسانگرهای اتمی نشان می دهد که هر یک امواج الکترومغناطیسی را گسیل و جذب می کنند منحنی های جسم سیاه را محاسبه کرد. برای سازگار کردن منحنی های نظری و تجربی، پلانک فرض کرد که انرژی یک نوسانگر اتمی فقط می تواند مقدارهای گسسته $E = 0, hf, 2hf, \dots$ را داشته باشد. به عبارت دیگر او فرض کرد:

$$E = nhf \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

که در آن f بسامد ارتعاش (برحسب هرتز) و h صفر یا عددی صحیح است.



ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷، آلمان).

در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های متعدد مهمی دربارهٔ ترمودینامیک و انکس‌های فیزیکی و شیمیایی منتشر کرد. از کارهای او در زمینهٔ توزیع طیف تابشی، که به نظریهٔ کوانتومی انجامید، با اهدای جایزهٔ نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینهٔ موضوع‌های مذهبی و فلسفی بود. درست در آستانهٔ دورانی که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، زندگی شخصی وی با تراژدی آمیخته شد. همسرش در سال ۱۹۰۹ فوت کرد. در سال ۱۹۱۶ پسر بزرگش در عملیاتی در جنگ جهانی اول کشته شد و دخترهای دوقلوی وی در سال‌های ۱۹۱۷ و ۱۹۱۹ مردند. هر چند او سرانجام دوباره ازدواج کرد، ولی سوگوارانه نوشت: «هیچ فردی به هنگام تولد حق بی چون و چرایی برای شادی، موفقیت، و نیک‌بختی در زندگی ندارد»، و اینکه شخص راهی جز این ندارد که «شجاعانه در میدان زندگی مبارزه کند و در برابر ارادهٔ قدرت برتری که بر او فرمان می‌راند به آرامی تسلیم شود». پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهار سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد. حتی بازنشستگی هم نتوانست پلانک را از غم و اندوه بیشتر محافظت کند. پسرش اروین، تنها فرزند بازمانده از نخستین ازدواجش، در تلاشی که در سال ۱۹۴۴ برای ترور هیتلر صورت گرفت گرفتار آمد و در ۱۹۴۵ توسط گشتاپو به طور وحشیانه‌ای اعدام شد. خانهٔ پلانک در حومهٔ برلین، در حملهٔ هوایی متفقین با خاک یکسان شد. هر چند وی شخصاً از این حمله جان سالم به در برد، ولی تمام داشته‌های شخصی و از جمله کتابخانه‌اش نابود شد.

ثابتی است که اکنون ثابت پلانک نامیده می‌شود.^۱ به طور تجربی معلوم شده است که ثابت پلانک دارای مقدار زیر است:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

مشخصهٔ بارز فرض پلانک این بود که انرژی یک نوسانگر اتمی فقط می‌تواند مقدارهای گسستهٔ (hf ، $2hf$ ، $3hf$ و غیره) را داشته باشد و انرژی‌های بین این مقدارها مجاز نیستند. وقتی انرژی سامانه‌ای فقط می‌تواند مقدارهای کاملاً مشخصی داشته باشد و هیچ انرژی بین آن‌ها وجود نداشته باشد، گفته می‌شود که انرژی کوانتیده است. این کوانتیدگی انرژی بر اساس فیزیک کلاسیک آن زمان نامنتظره بود. ولی به زودی معلوم شد که کوانتیدگی انرژی مفاهیمی بسیار گسترده و با ارزش دارد.

پایستگی انرژی مستلزم آن است که بنابر مدل پلانک انرژی حمل شده توسط امواج الکترومغناطیسی تابشی باید مساوی انرژی از دست داده توسط نوسانگرهای اتمی باشد. مثلاً فرض کنید که نوسانگری با انرژی $3hf$ موج الکترومغناطیسی گسیل کند. بنابر معادلهٔ ۱، کوچک‌ترین مقدار مجاز بعدی برای انرژی نوسانگر برابر $2hf$ است. در چنین موردی انرژی به دست آمده توسط موج الکترومغناطیسی دارای مقدار hf است که مساوی مقدار انرژی از دست داده توسط نوسانگر است. بنابراین، مدل پلانک برای تابش جسم سیاه گویای این نظر است که انرژی الکترومغناطیسی به صورت مجموعه‌ای از مقدارهای گسسته یا بسته‌های انرژی وجود دارد و انرژی یک بسته مساوی hf است. اینشتین پیشنهاد کرد که نور شامل چنین بسته‌هایی از انرژی است.

۳. فوتونها و اثر فوتوالکتریک

می‌دانیم که نور یک موج الکترومغناطیسی است و چنین موج‌هایی نقش‌های پیوسته از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. پس دور از انتظار نیست که

۱. اکنون معلوم شده که انرژی یک نوسانگر هماهنگ برابر است با $E = (n + \frac{1}{2})hf$ ، جملهٔ اضافی $1/2$ در بحث حاضر اهمیتی ندارد.