فیزیک ۳

دوازدهم

◄ جلد سوم

◄ رشته ریاضی و فیزیک

مؤلفین:

امید برزوئی

علی پیمانی

علیرضا رمضانی

احمد سیدی

مهدی شیرزاد

ناظر علمی: غلامعلی محمودزاده

مقدمه:

«همه شناخت جهان از یک واقع‌گرایی کودکانه شروع می‌شود با این باور که هرچیزی دقیقاً همان است که دیده می‌شود. فکر می‌کنیم، سبزه، سبز است. سنگ، سفت است و برف، سرد است. امّا فیزیک، درک و تجربه‌ای را برای سبزی، سفتی و سردی ایجاد می‌کند که با درکِ کودکانه اولیه بسیار فاصله دارد.» *«برتراند راسل»*

باور به افسانه‌ها: بخشی از فرهنگ عمومی

در داستانی که نقل می‌کنند، «ادموند هالی» (یار غار اسحاق نیوتون و هم او که دنباله‌دارِ هالی به نام او نامگذاری شده است)؛ از ملاقات خود با نیوتون یاد می‌کند و عنوان می‌دارد که نیوتون از فروافتادن سیبی از درخت با شگفتی به «قانون جهانی گرانش» پی برده است. ولی واقعیت این نیست.

نیوتون هیچ‌گاه از سقوط سیب تعجب نکرد. شگفتی او این بود که چرا ماه روی زمین سقوط نمی‌کند! ولی تمایل مردم، بیشتر به دانستن «علت سقوط سیب» بود تا «علت عدم سقوط ماه».

نیوتون نشان داد علت آن سقوط و علت این عدم سقوط، هر دو یکی است.

انبساط دنیای طبیعی، انقباض دنیای انسانی:

منشأ کیهان یک «مهبانگ»[1] یا انفجار بزرگ» است. طبق یافته‌های کیهان‌شناسی، دنیا در حال انبساط و تورم است. ولی در مقابل، دنیای انسانی در حال انقباض و مینیاتوری شدن است. «مارشال مک لوهان»[2] در نیمه دوم قرن بیستم، با توجه به رواج رادیو و تلویزیون و البته در زمانی که هنوز اینترنت به این درجه از رشد و نفوذ نرسیده بود، عنوانِ «دهکده جهانی» را به کار برد و جهانِ با این عظمت را در حکم یک دهکده دانست[3]. در این دهکده جهانی، «نوشتن» کاری سهل و ممتنع است. یعنی هم کاری آسان و در عین حال کاری دشوار است. به دلیل دسترسی سریع و آسان به انواع منابع و مراجع، می‌توان رهِ صدساله را یک شبه پیمود و از خیلی دستاوردهای قبل به سرعت و آسانی بهره گرفت. در مقابل در این دهکده جهانی و دنیای شیشه‌ای، کوچک‌ترین خبط و خطای نویسندگان به سرعتِ برق وباد و پیش از آن که مجال تصحیح آن پیدا شود، منتشر می‌شود تا «سیه روی شود هر که در او غش باشد!!»

چرا تألیف گروهی؟

یک تألیف «واقعاً گروهی» باید دارای مشخصه‌ای باشد که در علوم اجتماعی به آن ظهور ویژگی‌های جدید Emergence می‌گویند. یعنی چه؟ برای توضیح مطلب از یک توضیح کاملاً فیزیکی استفاده می‌کنیم.

فرض می‌کنیم دمای اتاقی که در آن درس می‌خوانید ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. از شما می‌پرسیم که این دما دقیقاً به چه معنا است؟ احتمالاً پاسخ می‌دهید که این دما حاصل حرکت مولکول‌های هوا است و به نوعی به انرژی جنبشی مولکول‌های هوا مرتبط است. حالا اگر «فقط» یک مولکول از این مولکول‌ها را انتخاب کنیم، دمای آن مولکول چند درجه است؟ و شما به درستی پاسخ خواهید داد که: یک مولکول به تنهایی، دما ندارد. اصلاً دما، برای مولکول‌های منفرد تعریف نمی‌شود. دما برای تعداد زیادی از مولکول‌ها قابل تصور است.

حالا کمی رندی می‌کنیم. واقعاً هر یک مولکول چه سهمی در دمای $25^{\circ}C$ دارد؟ اگر بخواهیم صادقانه جواب دهیم، واقعاً هیچ سهمی ندارد. در واقع اگر شما دیواری در میانه اتاق بکشید و اتاق را به دو نیمه بخش کنید، دمای هر نیمه هنوز $25^{\circ}C$ است. حالا می‌پرسیم، اگر هر مولکول به تنهایی نقشی در دمای اتاق ندارد، پس اگر تمام مولکول‌های هوا را از اتاق خارج کنیم، آیا باز

---

1. Big Bang

۲. «مارشال مک لوهان» فیلسوف و جامعه‌شناس برجسته کانادایی

۳. توضیح کامل‌تر در کتاب «مقدمه‌ای بر سیستم‌های پیچیده» نوشته «محمدرضا شعبانعلی»

هم اتاق $25^{\circ}C$ است؟ اینجاست که شما متوجه رندی ما می‌شوید و به سرعت جواب می‌دهید که این دیگر درست نیست. اگر مولکول‌های هوا نباشند، داستان متفاوت می‌شود، چون اصلاً دما به نوعی به انرژی جنبشی مولکول‌های هوا وابسته است.
درواقع دما، یک «ویژگی سطح بالا» یا «سطح کلان» است که بر اثر تک‌تک اعضای سیستم قابل مشاهده است. کافی است شما، دمای گاز را با کمیت دیگری مثل «جرم گاز» مقایسه کنید. جرم یک «ویژگی سطح پایین» است. درواقع سهم هر مولکول گاز در جرم کل گاز، سر راست و مشخص است. اگر شما اتاق را به دو نیمه مساوی تقسیم کنید، دقیقاً جرم گاز را به دو نیمه مساوی تقسیم کرده‌اید.
یک تألیف گروهی، باید چیزی مشابه یک «ویژگی سطح بالا» باشد؛ درواقع باید اثری از مجموعه بروز کند که «مساوی مجموع اثرات تک‌تک اعضاء نباشد» این‌که یک نفر درسنامه بنویسد، نفر دیگر سؤال بنویسد، احیاناً کسی هم سؤالات را حل کند و اشخاصی هم تست و جواب آن را فراهم کنند و سپس این موارد سرهم بندی شود، اصلاً شایسته و بایستهٔ یک تألیف گروهی نیست. در یک کار گروهی باید ویژگی‌هایی بروز کند که در کار تک‌تک افراد به تنهایی قابل مشاهده و ردگیری نیست.
در این کتاب‌ها، سعی کرده‌ایم تا حدّممکن، در اثر تعامل و چالش و بعضاً بحث و گفتگوهای نفس‌گیر، کتابی فراهم آوریم که واجد ویژگی‌هایی باشد که صرفاً سرجمع کار چند مؤلف نباشد؛ بلکه ویژگی تعاملی در همه بخش‌های کتاب جاری و ساری باشد.

اهداف اصلی کتاب را می‌توان در موارد زیر شماره کرد:
(۱) ارایه درسنامه‌ای دقیق، روان و بی‌پیرایه با انطباق کامل با کتاب نونگاشت درسی. گرچه مؤلفین نسبت به بعضی روش‌ها و سلیقه‌های کتاب درسی جدید، انتقاداتی دارند ولی به جدّ بر این باور هستند که مبنای اصلی باید همین کتاب درسی باشد و اساساً درگیر نمودن دانش‌آموزانِ مخاطب این کتاب با بحث‌های چالشی و اختلافی، کاری عبث و بی‌فایده می‌باشد.
(۲) حل مسایل فراوان مفهومی و محاسباتی در قالب یک شیب آموزشی منطقی.
هدف‌گیری ارائه مسایل، تعلیم فیزیک است نه خودنمایی بی‌معنا یا درگیر نمودن دانش‌آموز با مسایل بی‌هدف و پراکنده.
(۳) درگیر نمودن دانش‌آموزان با آزمون‌های تشریحی (با توجه به اهمیت بیشتری که امتحانات نهایی پیدا کرده‌اند.)
(۴) طراحی تست‌های «واقعاً تالیفی» مطابق با رویکرد جدید ارائه مطالب (خصوصاً در فصل (۳) (نوسان و موج) و فصل (۴) (برهم‌کنش امواج)) و پرهیز از ساخت تست‌های تصنّعی و تکراری.
(۵) ارائه مطالب جذّاب و خواندنی در قالب تاریخ علم، فناوری و مطالب طنزآمیز همراه با گرافیکی چشم‌نواز

این اثر در قالب سه مجلّد، به شکل زیر تنظیم شده است:
- جلد (۱): سینماتیک ـ دینامیک
- جلد (۲): نوسان و موج ـ برهم‌کنش‌های موج
- جلد (۳): آشنایی با فیزیک اتمی ـ آشنایی با فیزیک هسته‌ای

مؤلّفین نهایت سعی خود را کرده‌اند، که اثری مفید و بی‌غلط ارائه کنند. امیدواریم که سعی ما اثری خوب و شایسته را رقم زده باشد.
دراینجا بر خود لازم می‌دانیم از راهنمایی‌های ارزنده جناب استاد غلامعلی محمودزاده به عنوان معلّمی پیشکسوت و نویسنده‌ای چیره‌دست و صاحب سبک در حوزه آموزش فیزیک، قدردانی نماییم. همچنین از زحمات اعضای محترم واحد طراحی و تایپ، سرکار خانم‌ها، «سمانه‌ایمانفرد»، «حمیده نوروزی»، «ملیحه محمدی آندرس» و «رضیه صفریان» بسیار سپاسگزاریم. درخاتمه مراتب تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیریّت توانمند و محترم مجموعه وزین مبتکران **جناب آقای یحیی دهقانی** به جهت حمایت ویژه و فراهم نمودن کلیه امکانات در نشر این کتاب، ابراز می‌داریم.

گریه شام و سحر، شکر که ضایع نگشت
قطره بارانِ ما، گوهر یکدانه شد

تابستان ۹۸

فهرست

عنوان | صفحه

فصل پنجم: فیزیک اتمی

مقدمه ۱۰

اثر فوتوالکتریک و فوتون ۱۱

بررسی و تحلیل معادله فوتوالکتریک ۱۴

نمودار K_m برحسب بسامد نور فرودی ۱۵

بررسی نمودار K_m فوتوالکترون‌ها برحسب طول موج نور فرودی ۱۵

طیف خطی و طیف پیوسته ۱۹

طیف گسیلی یا نشری ۱۹

طیف پیوسته ۱۹

طیف خطی ۱۹

نحوهٔ تشکیل طیف گسیلی ۲۰

رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی ۲۱

الگوهای اتمی ۲۶

الگوی اتمی تامسون ۲۶

الگوی اتمی رادرفورد ۲۷

نارسایی الگوی اتمی رادرفورد ۲۷

الگوی اتمی بور ۲۷

موفقیت‌ها و نارسایی‌های الگوی اتمی بور ۲۸

استخراج معادلهٔ ریدبرگ برای اتم هیدروژن در الگوی بور ۲۹

انرژی یونش در اتم هیدروژن ۳۰

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و الگوی اتمی بور ۳۲

موفقیت‌ها و نارسایی‌های الگوی اتمی بور ۳۳

لیزر ۳۶

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری ۳۶

خلاصهٔ فصل پنجم ۳۷

آزمون‌های تشریحی با پاسخ ۴۲

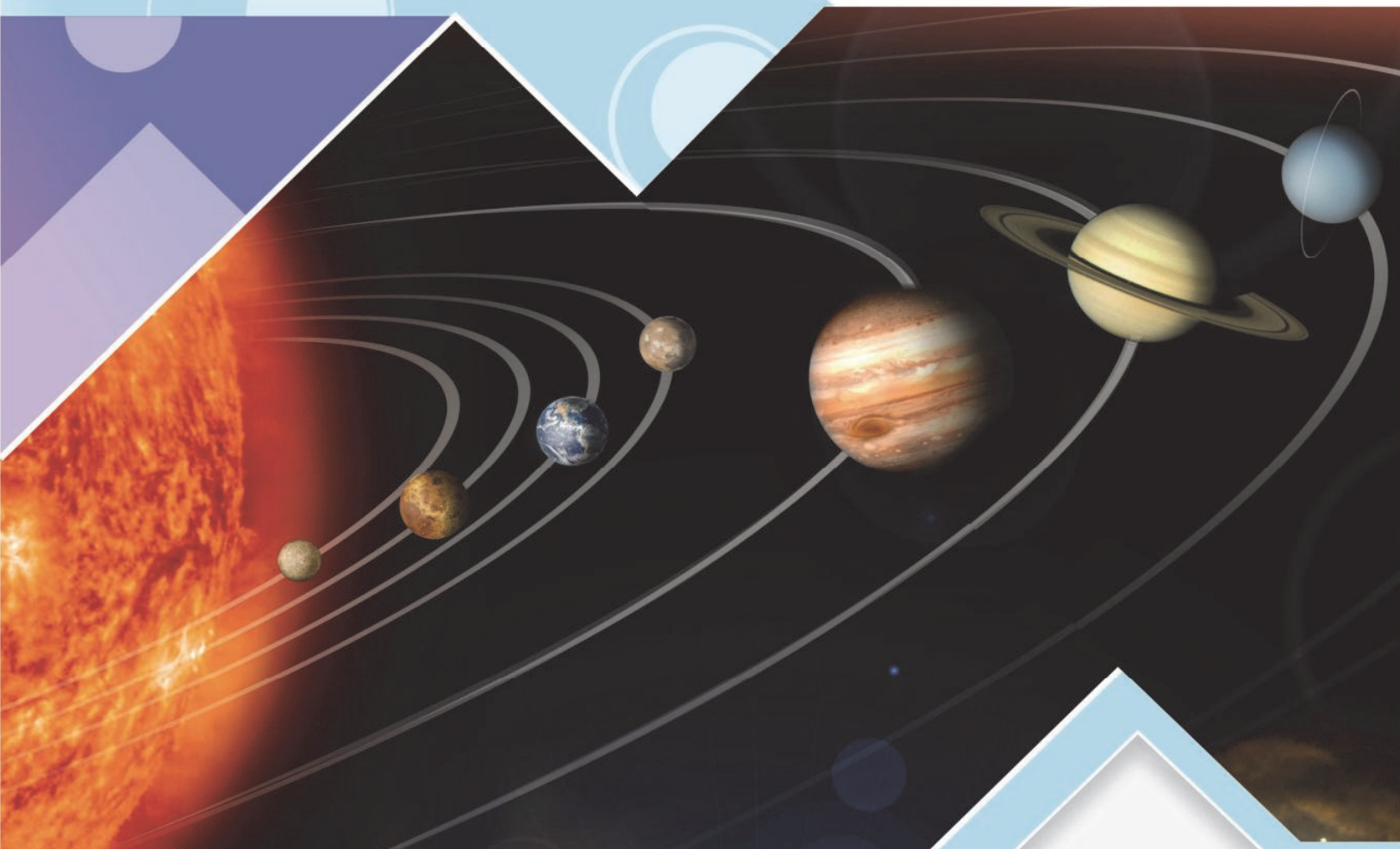
تست‌های تألیفی فصل (۵) ۵۷

پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۵) ۶۵

فهرست

عنوان | صفحه

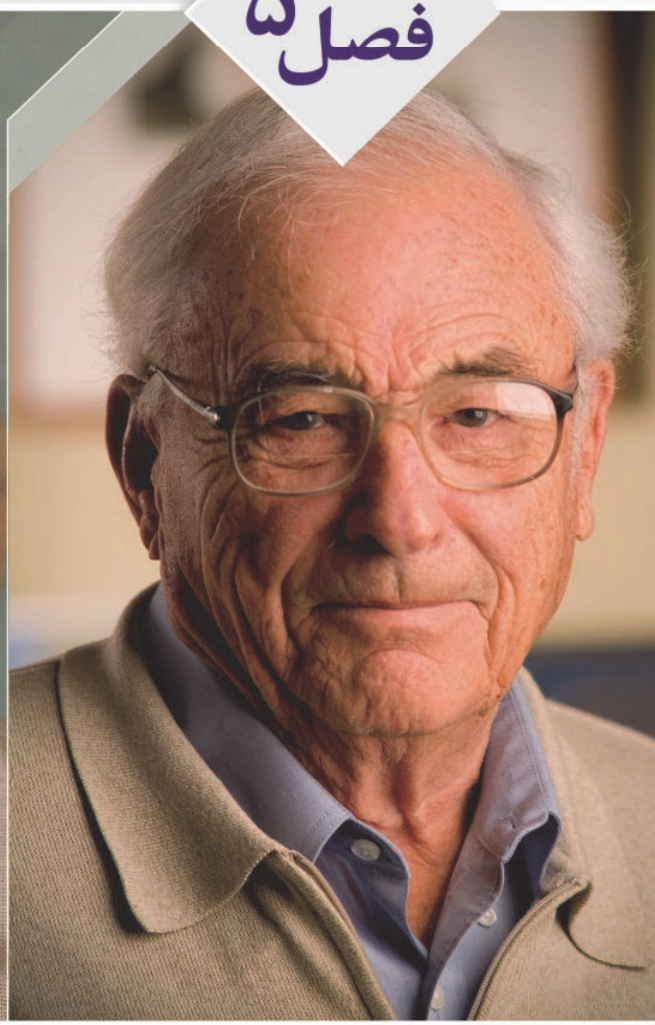
فصل ششم: آشنایی با فیزیک هسته‌ای .....
مقدمه ۸۰
ساختار هسته ۸۰
مقایسهٔ اتم و هسته ۸۰
برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل دهندهٔ اتم ۸۰
ایزوتوپ‌ها ۸۱
یکای جرم اتمی ۸۱
پایداری هسته ۸۲
انرژی بستگی هسته ۸۳
ترازهای انرژی هسته ۸۴
پرتوزایی طبیعی ۸۵
واپاشی آلفازا (α) ۸۵
واپاشی بتازا (β) ۸۵
واپاشی بتازای منفی ۸۶
واپاشی بتازای مثبت ۸۶
واپاشی گاما (γ) ۸۷
راهبرد تعیین تعداد ذره‌های آلفا و بتای گسیل شده ۹۰
نیمه عمر ۹۰
شکافت هسته‌ای ۹۲
واکنش زنجیره‌ای ۹۳
غنی‌سازی اورانیم ۹۴
راکتورهای شکافت هسته‌ای ۹۴
کندسازهای نوترونی ۹۴
گداخت (همجوشی) هسته‌ای ۹۵
خلاصهٔ فصل ششم ۹۶
مسائل تکمیلی فیزیک جدید ۱۰۰
آزمون‌های تشریحی با پاسخ ۱۰۸
تست‌های تألیفی فصل (۶) ۱۲۱
پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۶) ۱۲۸
آزمون‌های تشریحی با پاسخ تشریحی ۱۳۷
جدول تناوبی عناصر ۱۶۸



این همه نقش عجب بر در و دیوار وجود

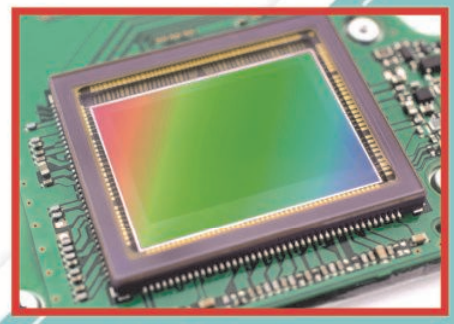
هر که فکرت نکند، نقش بود بر دیوار

فصل ۵ فیزیک اتمی



«ویلاردبویل» و «جورج اسمیت» را پدران «تصویربرداری دیجیتال» می‌دانند... کار این دو در سال ۱۹۶۹ میلادی ، با ساخت حسگر ccd آغاز شد... این دو در سال ۲۰۰۹ میلادی برنده جایزه نوبل فیزیک شدند... هر دوربین دیجیتال (مثلا در تلفن همراه) مجهز به این سنسور است.

ccd= charge_coupled_device



اساس کار حسگر ccd اثر «فوتوالکتریک» می‌باشد که توسط آلبرت اینشتین توجیه و تحلیل گردید... در حسگر ccd فوتوالکترون‌های آزاد شده در اثر تابش نور، به صورت نقطه‌های تصویری یا پیکسل تصویر می‌شوند...فوتوالکتریک از جمله اولین مشاهدات این اثر بود که تحلیلی «غیرکلاسیک و کوانتومی» داشت...

«غیاث‌الدین جمشید کاشانی» از مفاخر ایرانی ریاضیدان در قرن هشتم هجری، در ابتدای بعضی متون علمی خویش می‌نوشت: «به نام خدایی که از نسبت محیط دایره به قطر آن، آگاه است! ... مفهوم این جمله این است که فقط خداوند از مقدار دقیق π آگاه است ... عین همین بیان را می‌توان برای ثابت‌های بنیادین فیزیک عنوان کرد و مثلاً گفت: «به نام خدایی که تنها او مقدار دقیق ثابت پلانک را می‌داند»

مطابق رویکرد جدید در تعریف یکاهای اصلی، هر یکا باید براساس یک ثابت بنیادین فیزیک تعریف شود ... مثلاً تعریف جدید «متر» بر پایه قرارداد یک مقدار دقیق برای تندی نور استوار است ... مطابق با تعریف قدیم «کیلوگرم»، یکای جرم برابر با جرم استوانه‌ای با ابعاد مشخص از جنس پلاتین ـ ایریدیوم بود ... این استوانه در این سال‌ها در اثر جابه‌جایی و دست خوردن، مقدار ناچیزی از جرم خود را از دست داد ... هرچند این مقدار از دست رفته خیلی ناچیز بود ولی به هرحال شرط تغییرناپذیری یکاهای اصلی را خدشه‌دار می‌کرد ... در بیستم ماه مه ۲۰۱۹ میلادی تعریف جدید برای یکای جرم بر پایه مقدار دقیق قراردادی برای ثابت پلانک، جایگزین شد: در واقع کیلوگرم استاندارد باید چنان باشد تا مقدار ثابت پلانک دقیقاً برابر مقدار زیر گردد:

$$۶/۶۲۶۰۷۰۱۵\times۱۰^{-۳۴}\ \text{joule}-\text{second(J.S)}$$

با ثابت پلانک در این فصل آشنا می‌شویم.

$E = hf$ ← پسامد تابش

↑ انرژی تابش ↑ ثابت پلانک

مقدمه

تا اواخر قرن نوزدهم میلادی، دانشمندان، بیش‌تر پدیده‌های فیزیکی را از طریق مکانیک نیوتونی ترمودینامیک، نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول و قانون‌های فارادی و آمپر در الکتریسیته و مغناطیس توجیه می‌کردند که ما امروزه این قانون‌ها را به عنوان فیزیک کلاسیک می‌شناسیم. این قانون‌ها تا آن موقع، گسترهٔ وسیعی از پدیده‌های فیزیکی را شامل می‌شد. امّا همین قوانین، از توجیه پدیدهٔ **فوتوالکتریک** و این‌که چرا طیف گسیل‌شده از گازهای کم‌فشار، گسسته است، عاجز بودند.

چون برخی از پدیده‌هایی که دانشمندان با آن روبه‌رو می‌شدند، توسط **فیزیک کلاسیک** قابل تبیین نبود، این کار سبب تغییرات بنیادی در دیدگاه فیزیکدانان برای توضیح رفتار برخی از پدیده‌های فیزیکی گردید، به‌طوری که در دو سه دههٔ اول قرن بیستم نتایج این تلاش‌ها به نظریه‌های زیر منجر گردید:

۱- **نسبیت خاص:** این نظریه مربوط به مطالعهٔ پدیده‌ها در **تندی‌های بسیار بالا** و نزدیک به تندی نور است. بر اساس این نظریه (و برخلاف نظریهٔ نیوتون)، زمان و جرم ثابت نیست و در تندی‌های بسیار بالا برای ناظرهای مختلف، متفاوت است به‌طوری‌که محاسبه و تغییرات آن از سطح این کتاب خارج است.

۲- **نسبیت عام:** این نظریه مربوط به مطالعهٔ انحنای فضا – زمان یا هندسهٔ فضا و زمان و گرانش است.

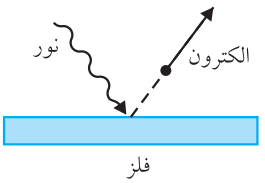
۳- **نظریهٔ کوانتومی:** نظریهٔ کوانتومی مربوط به مکانیک پدیده‌هایی است که در **ابعاد بسیار کوچک**، مانند اتم‌ها و ذره‌های تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها که ذره‌های **زیراتمی** نام دارد، می‌پردازد.

امروزه مجموعهٔ این نظریه‌ها و تئوری‌ها، فیزیک جدید نام دارد. اندکی پس از ظهور این نظریه‌ها بود که شاخه‌های دیگری مانند فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذره‌های بنیادی و کیهان‌شناسی به تدریج به‌وجود آمدند.

کسانی که فیزیک جدید را بنیان نهادند عبارتند از: شرودینگر، پلانک، دیراک، پائولی، هایزنبرگ، اینشتین، بور ...

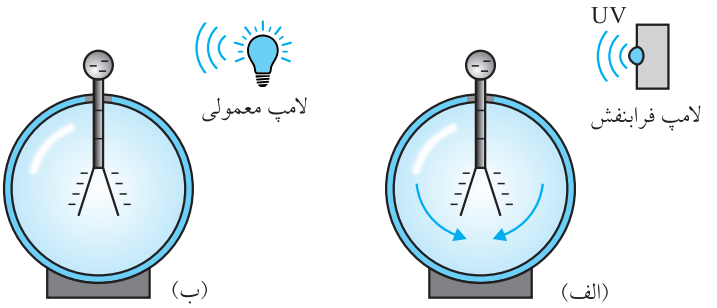
در این فصل به بررسی پدیده‌هایی می‌پردازیم که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، مثل اثر فوتوالکتریک، طیف خطی و گسیلی و جذبی از گازهای اتمی. در این فصل همچنین به معرفی الگوهای اتمی و لیزر و مبانی آن‌ها می‌پردازیم.

اثر فوتوالکتریک و فوتون



آزمایش نشان می‌دهد که اگر نور با بسامد معین و مناسب (نه هر بسامدی) بر سطحِ فلزی تابیده شود، الکترون‌ها انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

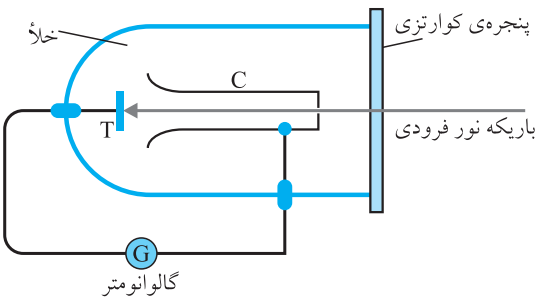
اگر بر کلاهک برق‌نما یا الکتروسکوپ با بار منفی، نور فرابنفش تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقهٔ آن کاهش می‌یابد درحالی‌که با تابش **نور مرئی**، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما رخ نمی‌دهد.



شکل الف) برهم‌کنش نور فرودی فرابنفش با کلاهک برق‌نما سبب می‌شود تا ورقه‌های آن به سرعت به هم نزدیک شوند.
شکل ب) در حالی که برهم‌کنش نور مرئی گسیل شده از یک لامپ رشته‌ای تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما به‌وجود نمی‌آورد.

آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد معین و مناسب **(مانند نور فرابنفش)** به سطح فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند، این پدیدهٔ فیزیکی را **اثر فوتوالکتریک** می‌نامند و الکترون‌های جداشده از سطح فلز را **فوتو الکترون** می‌نامند. علت این نام‌گذاری به این خاطر است که این الکترون‌ها در اثر تابش فوتون حاصل شده‌اند.

بررسی اثر فوتوالکتریک



مطابق شکل مقابل، یک صفحهٔ فلزی هدف T[1] و جمع‌کنندهٔ فلزی C[2] در یک محفظهٔ شیشه‌ای قرار دارند که از بیرون به یک آمپرسنج حساس یا (گالوانومتر G) متصل شده‌اند. هرگاه نور تکفام (تک‌بسامد) را به صفحهٔ T بتابانیم و فوتوالکترون‌ها را آزاد کند، این فوتوالکترون‌ها به جمع‌کنندهٔ C می‌رسند درنتیجه گالوانومتر جریانی را آشکار می‌کند.

آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شدت **این نور**، گالوانومتر جریانی را نشان می‌دهد و اگر بسامد نور فرودی از **مقدار معینی** کمتر باشد، هر قدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد، پدیدهٔ فوتوالکتریک اتفاق نمی‌افتد و گالوانومتر جریانی را **نشان نمی‌دهد**.

همان‌طوری که در فصل سوّم این کتاب دیدیم، نور، موج الکترومغناطیسی است، بنابراین باید انتظار داشته باشیم هنگام برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد می‌کند و آن‌ها را به نوسان درمی‌آورد[3] به‌طوری‌که، وقتی دامنه نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود، انرژی جنبشی لازم برای جدا شدن از سطح فلز را پیدا می‌کنند. بر اساس دیدگاه فیزیک کلاسیکی، این پدیده باید به هر بسامدی رخ بدهد، درحالی‌که این نتیجه با تجربه سازگار نیست و اتفاق نمی‌اُفتد.

1. Target
2. Collector

۳. برای بررسی بیشتر به فصل اول کتاب فیزیک یازدهم مراجعه شود.

از طرفی دیگر، بر اساس نظریهٔ الکترومغناطیسی کلاسیکِ ماکسول، شدت نور با مجذور دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است یعنی $I \propto E^2$. بدین ترتیب انتظار می‌رود به ازای هر بسامدی معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم، باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیش‌تری از فلز خارج شوند. نتیجه‌ای که در عمل اتفاق نمی‌افتد و تجربهٔ عملی در آزمایشگاه آن را تأیید نمی‌کند.

بنابراین ملاحظه می‌شود بر اساس نتیجه‌های بالا، فیزیک کلاسیک نمی‌توانست پدیدهٔ فوتوالکتریک را توجیه کند.

اثر فوتوالکتریک نزدیک به ۲۰ سال ذهن دانشمندان را به خود مشغول کرد به‌طوری‌که به کمک مفاهیم قانون‌های فیزیک کلاسیک هرگز به نتیجه نرسید تا این‌که در سال ۱۹۰۵ آلبرت اینشتین توضیحی قانع‌کننده در این مورد ارائه داد و به خاطر آن در سال ۱۹۲۱، جایزهٔ نوبل فیزیک را دریافت کرد.

بنا به نظر اینشتین نور با بسامد f را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های مستقل انرژی به نام **فوتون** است (این نام را اولین بار گیلبرت لوئیس دانشمند آمریکایی به‌کار برد) که دارای انرژی $E = hf$ بوده و در آن h ثابت پلانک است:

$$h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\ J \cdot s$$

بر اساس نظریهٔ اینشتین، وقتی نور تک‌فام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون **فقط با یکی** از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. در این فرآیند، اگر فوتون **انرژی کافی** داشته باشد تا خروج الکترون را از فلز انجام دهد، الکترون به‌طور **آنی** از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون (hf)، صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود که آن را با W نشان می‌دهند و مابقی آن به انرژی جنبشی فوتوالکترون خارج شده تبدیل می‌شود. این نظریه اینشتین را می‌توان بر اساس قانون پایستگی انرژی به‌صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{hf = W + K} \quad \text{(قانون پایستگی انرژی و اثر فوتوالکتریک)} \qquad (۱-۵)$$

در رابطهٔ فوق، W کار یا انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح فلز و K انرژی جنبشی آن‌ها پس از جدا شدن از سطح فلز است. چون برخی از الکترون‌ها در فلز کم‌تر مقیداند، برای خارج کردن آن‌ها از فلز کار کم‌تری لازم است. بنابراین، **حداقل انرژی یا کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از سطح فلز خاص را با $W_\circ$ نشان می‌دهند و آن را تابع کار فلز می‌نامند** و در این حالت انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها بیشینه خواهد بود که با K_m نشان می‌دهیم:

$$K = hf - W \xrightarrow[K=K_m]{W=W_\circ \text{ اگر}} \mathbf{K_m = hf - W_\circ} \quad \textbf{(معادلهٔ فوتوالکتریک)} \qquad (۲-۵)$$

توجه: در فیزیک اتمی از یکای الکترون ولت (eV) استفاده می‌شود. و یک الکترون‌ولت برابر با مقدار انرژی است که به یک الکترون داده می‌شود تا بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل الکتریکی یک ولت، جابه‌جا شود. مضرب‌های دیگر این یکا keV و MeV است. طبق رابطهٔ $\Delta U = q\Delta V$ انرژی را برحسب الکترون ولت محاسبه می‌کنیم:

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |e \times \Delta V| = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} \times ۱ = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J$$

در این فصل، این مقدار انرژی را بنا به تعریف یک الکترون ولت، می‌نامیم:

$$۱eV = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J \ , \ ۱J = \frac{۱}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = ۶/۲۵ \times ۱۰^{۱۸} eV$$

در قسمت‌های قبلی دیدیم که ثابت پلانک h برابر $۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} (J \cdot s)$ است حال می‌خواهیم این ثابت فیزیکی را برحسب یکای $eV \cdot s$ به‌دست آوریم:

$$h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} J \cdot s \times \frac{۱(eV)}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} (J)} \simeq ۴/۱ \times ۱۰^{-۱۵}\ eV \cdot s$$

مثال: یک چشمهٔ نور مرئی با توان ۱۰۰W، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = ۵۵۰nm$ گسیل می‌کند:

الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت به‌دست آورید.

ب) تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه از این چشمهٔ نور گسیل می‌شود را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) $E = hf = h\frac{c}{\lambda} = \frac{۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\times۳\times۱۰^{۸}}{۵۵۰\times۱۰^{-۹}}\times\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}} = ۲/۲۵(eV)$

ب) $E = nhf = n\frac{hc}{\lambda}\ ,\ E = p\times t \Rightarrow nE_{۱} = p\times t$

$n(۲/۲۵) = ۱۰۰(\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}})\times۱ \Rightarrow n = \frac{۱۰^{۲۱}}{۱/۶\times۲/۲۵}\frac{۱۰\times۱۰^{۲۰}}{۳/۶} = ۲/۷۷\times۱۰^{۲۰}$ تعداد فوتون

برای حلّ سریع این نوع مسئله‌ها باید بتوانیم hc را برحسب یکای $(eV\cdot nm)$ محاسبه کنیم:

$h = ۴/۱\times۱۰^{-۱۵}(eV\cdot s)$

$hc = ۴/۱\times۱۰^{-۱۵}eV\cdot\cancel{s}\times۳\times۱۰^{۸}(\frac{m}{\cancel{s}})\times۱۰^{۹}(nm)$

$hc = ۴/۱\times۳\times۱۰^{۲} = ۱۲۴۲eV\cdot nm$

اکنون مسئله را به روش ساده‌ای حلّ می‌کنیم:

الف) $E = hf = h\frac{c}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{۱۲۴۲(eV\cdot\cancel{nm})}{۵۵۰(\cancel{nm})} = ۲/۲۵eV$

البته کتاب تأکید کرده هر کجا لازم باشد **hc را برابر** $(eV\cdot nm)$ ۱۲۴۰ درنظر بگیرید!

ب) $E = nh\frac{c}{\lambda} \Rightarrow p\times t = nh\frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{۱۰۰\times۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}} = n(۲/۲۵) \Rightarrow n = ۲/۷۷\times۱۰^{۲۰}$ تعداد فوتون

توجه: در تبدیل یکاها باید دقت کرد که اگر $h = ۴\times۱۰^{-۱۵}eV\cdot s$ باشد در این صورت $hc = ۱۲۰۰eV\cdot\mu m$ خواهد بود. این مطلب در پاسخ سریع به بسیاری از سؤال‌های فیزیک اتمی خصوصاً انرژی فوتون‌ها (hf) و فوتوالکترون‌ها (K_m) کاربرد دارد.

همچنین تابع کار فلزها حدود $۰/۶ \le W_۰ \le ۸$ الکترون‌ولت است که در حلّ مسئله‌ها باید به حدود آن دقت کرد. در جدول شکل زیر، تابع کار برخی از فلزها آورده شده است.

اگر به جای انرژی فوتون‌ها، توان تابشی آن داده شده باشد، می‌توان از رابطهٔ $E = p\times t = nhf$ استفاده کرد.

جدول (۵-۹) تابع کار برخی از فلزات

نام فلز	$W_۰$ (eV)
طلا	۵/۲۰
کبالت	۵/۰۱
نیکل	۴/۹۰
مس	۴/۷۰
نقره	۴/۶۴
آهن	۴/۵۰
تنگستن	۴/۵۲
روی	۴/۳۱

ایده‌های کلاسیک باید تصحیح شوند.

به این بازیکن فوتبال توجه کنید. اگر او ضربهٔ نرمی به توپ بزند، توپ با سرعت کم (یا با انرژی جنبشی کم) به حرکت درمی‌آید. اگر او ضربهٔ محکمی به توپ بزند، توپ با سرعت زیاد (یا با انرژی جنبشی زیاد) به حرکت درمی‌آید. به نظر شما این ایدهٔ عرفی در دنیای ریز هم صادق است؟

در آزمایش فوتوالکتریک، اگر **شدت نور** را افزایش دهیم، «**تعداد بیش‌تری الکترون**» کنده می‌شوند، ولی «انرژی جنبشی آن‌ها بی‌تغییر می‌ماند». انگار که بازیکن فوتبال هنگام زدن ضربهٔ محکم، به جای این‌که به یک توپ ضربه بزند، به چند توپ ضربه‌های ملایم وارد می‌آورد.

بعضی ضربه‌ها هیچ اثری ندارند!

آن‌چه که بیش از همه عجیب است، بستگی انرژی الکترون‌های کنده شده با «**فرکانس نور تابشی**» است. اگر فرکانس از حدی کم تر شود، هر قدر هم شدت نور را افزایش دهیم، هیچ الکترونی از سطح فلز جدا نمی‌شود. این حداقل فرکانس را اصطلاحاً «فرکانس آستانه» می‌گویند و وابسته به جنس فلز است. مثلاً برای فلز سدیم این فرکانس آستانه برابر مقدار $f_{\circ} = ۴/۳۹ \times ۱۰^{۱۴}\,Hz$ است. اگر فرکانس نور تابشی از این مقدار کوچک‌تر باشد، هر قدر هم شدت تابش افزایش یابد، هیچ الکترونی از سطح فلز کنده نمی‌شود.

نیاز به مدل جدید

آیا تا به حال به گرم شدن آب داخل یک کتری روی اجاق گاز توجه کرده‌اید؟ انرژی حرارتی به‌طور تقریباً یکنواخت بین مولکول‌های آب پخش می‌شود و دمای آب به‌طور تقریباً یکنواخت بالا می‌رود. هنگام تابش نور روی سطح یک فلز هم به نظر می‌رسد باید همین اتفاق بیفتد. یعنی انرژی تابش بین الکترون‌های بی‌شماری پخش شود، به‌طوری که سهم انرژی هر الکترون بسیار ناچیز باشد.

پس برای آن‌که انرژی یک الکترون به حدی برسد تا بتواند از سطح فلز فرار کند، به انباشت انرژی نیاز است.

محاسبات سادهٔ کلاسیک نشان می‌دهند که اگر مدل بالا درست باشد، می‌باید بین لحظهٔ آغاز تابش نور و لحظهٔ آغاز جدا شدن الکترون‌ها از سطح فلز، تأخیر زمانی قابل توجهی (چند دقیقه تا چند ساعت) وجود داشته باشد. حال آن‌که تا آخرین حدّ دقت اندازه‌گیری زمان (نانوثانیه)، هیچ تأخیر زمانی بین آغاز تابش و جدا شدن الکترون‌ها مشاهده نمی‌شود. انگار که انرژی تابش به جای پخش شدن بین الکترون‌ها، به‌طور مستقیم الکترون‌های منفرد را نشانه می‌گیرد. روشن است که برای فهم این مشاهده، به مدل جدیدی احتیاج داریم.

بررسی و تحلیل معادله فوتوالکتریک

در این رابطه گفتیم که $W_{\circ}$ را تابع کار فلز می‌نامند که به **جنس فلز** بستگی دارد. و اگر بسامد نور فرودی (f) از حدّ معینی کم‌تر باشد این فوتون‌ها انرژی لازم برای جدا کردن الکترون‌ها از سطح فلز را نخواهند داشت.

کم‌ترین بسامد نور فرودی که بتواند الکترون را از سطح فلز جدا کند، مربوط به حالتی است که انرژی جنبشی فوتوالکترون در لحظهٔ جدا شدن از سطح فلز، برابر **صفر** باشد. این بسامد را با $f_{\circ}$ نشان داده و به آن «**بسامد آستانه اثر فوتوالکتریک**» گفته می‌شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$K_m = hf - W_{\circ}$$

$$K_m = \circ \Rightarrow f = f_{\circ} \Rightarrow hf_{\circ} = W_{\circ} \Rightarrow f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} \qquad (۳-۵)$$

از رابطهٔ (۵-۳) می‌توان طول **موج آستانه** ($\lambda_{\circ}$) را که طول موج متناظر با $f_{\circ}$ است به‌دست آورد:

$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \lambda_{\circ} = \frac{c}{f_{\circ}}$$

$\lambda_{\circ}$ را معمولاً با یکای نانومتر (nm) بیان می‌کنند بنابراین باید دقت نماییم تا تبدیل واحدها را از ابتدا درست جایگزین کنیم تا دچار اشکال محاسباتی نگردیم:

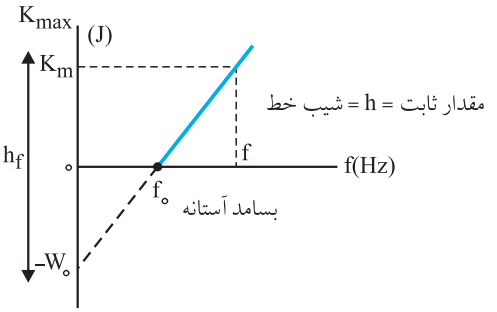
$$\lambda_{\circ}\ (\text{nm}) = \frac{c}{f_{\circ}}\left(\frac{\text{nm}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{s}}\right) \Rightarrow \lambda_{\circ}\ (\text{nm}) = \frac{۳\times۱۰^{۸}\times۱۰^{۹}\ \text{nm}}{f_{\circ}(\frac{۱}{\text{s}})} \Rightarrow \lambda_{\circ}\ (\text{nm}) = \frac{۳\times۱۰^{۱۷}}{f_{\circ}}$$

نتیجه این‌که اگر $f \geq f_{\circ}$ باشد اثر فوتوالکتریک اتفاق می‌اُفتد و اگر $f < f_{\circ}$ باشد، این اثر رخ نمی‌دهد.

همچنین اگر طول موج نور فرودی $\lambda \leq \lambda_{\circ}$ باشد این اثر رخ می‌دهد ولی اگر $\lambda > \lambda_{\circ}$ باشد اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

در حالت‌های فوق به ازای $f = f_{\circ}$ بسامد آستانه و $\lambda = \lambda_{\circ}$ **طول موج** آستانهٔ متناظر با $f_{\circ}$ نام دارد که به آن **طول موج قطع** هم گفته می‌شود.

نمودار K_m برحسب بسامد نور فرودی (f)



دیدیم که رابطهٔ ماکزیمم انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد نور فرودی رابطهٔ خطی به‌صورت $K_m = hf - W_{\circ}$ است بنابراین نمودار K_{max} نسبت به f خط راستی می‌شود که عرض از مبدأ آن $W_{\circ}$ و شیب آن h است.

چون شیب K_{max} نسبت به f فرودی ثابت و برابر h است بنابراین نمودار K_{max} برای تمام فلزات نسبت به f، به‌صورت خط موازی با شیب ثابت h خواهد بود.

K_{max} را می‌توان به‌صورت‌های زیر نیز نوشت که:

$$K_m = hf - W_{\circ}\ ,\ W_{\circ} = hf_{\circ}\ ,\ f = \frac{c}{\lambda}\ ,\ f_{\circ} = \frac{c}{\lambda_{\circ}}$$

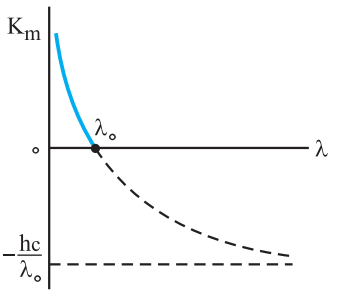
$$K_m = hf - W_{\circ} = hf - hf_{\circ} = h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_{\circ}} = hc\left(\frac{۱}{\lambda} - \frac{۱}{\lambda_{\circ}}\right)$$

$$K_m = ۱۲۴۰(\text{eV}\cdot\text{nm})\left(\frac{۱}{\lambda} - \frac{۱}{\lambda_{\circ}}\right) \qquad (۴-۵)$$

در این رابطه λ و $\lambda_{\circ}$ دارای یکای nm هستند.

میکرون $۱\mu = ۱۰^{۳}\text{nm}\ ,\ ۱\text{nm} = ۱۰^{-۹}\text{m}\ ,\ ۱\text{nm} = ۱۰^{-۳}\mu$

بررسی نمودار K_m فوتوالکترون‌ها برحسب طول موج نور فرودی (λ)



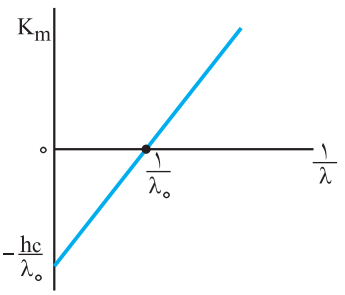
$$K_m = hf - W_{\circ} = h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_{\circ}} \Rightarrow K_m = hc\left(\frac{۱}{\lambda} - \frac{۱}{\lambda_{\circ}}\right)$$

اگر $\lambda = \lambda_{\circ} \Rightarrow K_m = ۰$

اگر $\lambda = ۰ \Rightarrow K_m \to \infty$

اگر $\lambda \to \infty \Rightarrow K_m = -\frac{hc}{\lambda_{\circ}} = -W_{\circ}$

بررسی نمودار K_m فوتوالکترون‌ها برحسب وارون طول موج نور فرودی $(\frac{۱}{\lambda})$



$$K_m = hf - W_{\circ} = hc\left(\frac{۱}{\lambda} - \frac{۱}{\lambda_{\circ}}\right)$$

اگر $\frac{۱}{\lambda} = \frac{۱}{\lambda_{\circ}} \Rightarrow K_m = ۰$

اگر $\frac{۱}{\lambda} = ۰ \Rightarrow K_m = -\frac{hc}{\lambda_{\circ}}$

اگر $\frac{۱}{\lambda} \to \infty \Rightarrow K_m \to \infty$

ملاحظه می‌شود رابطهٔ K_m برحسب $\frac{۱}{\lambda}$، خطی است.

مثال: یک لامپ حاوی گاز کم‌فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج $589\,nm$ گسیل می‌کند.

الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را برحسب ژول و همچنین الکترون‌ولت بیان کنید.

ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ $5/0\,W$ است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

پاسخ: الف)

$$f=\frac{c}{\lambda}=\frac{3\times10^{8}(\frac{m}{s})}{589\times10^{-9}(m)}=5/093\times10^{14}Hz$$

$$E=hf=6/63\times10^{-34}(J\cdot s)\times(5/093\times10^{14}(\frac{1}{s}))=3/37\times10^{-19}J$$

$$E=hf=\frac{hc}{\lambda}=\frac{1240(eV\cdot nm)}{589(nm)}=2/11eV$$

یا می‌توانیم مستقیماً انرژی به‌دست آمده برحسب یکای ژول را به الکترون‌ولت تبدیل کنیم:

$$E=\frac{3/37\times10^{-19}(J)}{1/6\times10^{-19}}=2/11eV=hf$$

ب) تعداد فوتون $n=8/9\times10^{20}\Leftarrow 2/11)=n\Rightarrow \frac{5\times60}{1/6\times10^{-19}}eV=nhf\Rightarrow p=\frac{E}{t}\Rightarrow E=p\times t=nhf$

مثال: توان باریکهٔ نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون $5/0\,mw$ است. اگر توان ورودی این لیزر $50/0\,W$ باشد،

الف) بازده لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول‌موج باریکهٔ نور خروجی $633\,nm$ باشد، شمار فوتون‌هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.

پاسخ: الف)

$$Ra=\frac{p_{\text{خروجی}\,2}}{p_{\text{ورودی}\,1}}=\frac{5\times10^{-3}}{50}=10^{-4}\times100=0/01\%$$

ب) فوتون‌های لیزری از توان خروجی دستگاه حاصل می‌شود یعنی مربوط به توان $5mW$ است.

$$E=nhf=nh\frac{c}{\lambda}\Rightarrow p_2\times t=n\frac{hc}{\lambda}\Rightarrow\frac{5\times10^{-3}\times1}{1/6\times10^{-19}}=n(\frac{1240eV\cdot nm}{633nm})\Rightarrow n=1/59\times10^{16}$$ تعداد فوتون

مثال: شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود $1360\frac{W}{m^2}$ است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر $1m^2$، مقدار انرژی $1360J$ می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به ازای هر متر مربع حدود $300\frac{W}{m^2}$ باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول موج متوسط فوتون‌ها را $570\,nm$ فرض کنید.

پاسخ: وقتی در سطح زمینی به ازای هر متر مربع شدت تابشی متوسط $300\frac{W}{m^2}$ باشد، طول موج متوسط فوتون‌ها $570\,nm$ فرض شده است، پس خواهیم داشت:

$$I=\frac{\bar{p}}{A}\Rightarrow300=\frac{\bar{p}}{1}\Rightarrow\bar{p}=300\Rightarrow E=p\times t=nhf=n\frac{hc}{\lambda}$$

مسئله را هم در SI که یکای انرژی ژول است و هم برحسب eV می‌توان حل کرد:

$$\frac{300\times1}{1/6\times10^{-19}}=n(\frac{1240}{570})\Rightarrow1/8750\times10^{21}=n(2/175)\Rightarrow n=\frac{1/8750\times10^{21}}{2/175}=8/62\times10^{20}$$ تعداد فوتون

مثال: حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر $2/28\,eV$ است.

الف) طول موج آستانه برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چه‌قدر است و با مراجعه به شکل ۵-۶ کتاب درسی این فصل معلوم کنید این طول موج مربوط به چه رنگی است؟

ب) آیا فوتون‌هایی با طول موج $680\,nm$ قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

پاسخ: الف) طول موج آستانه یعنی بلندترین طول موج برای اثر فوتوالکتریک:

$$W_0=hf_0=h\frac{c}{\lambda_0}\Rightarrow2/28=\frac{1240}{\lambda_0}\Rightarrow\lambda_0=543/8(nm)$$

که مربوط به نور سبز است.

ب) چون طول موج $\lambda = ۶۸۰\,nm$ بلندتر از طول موج آستانه $(\lambda_۰)$ است، پس انرژی لازم را برای جدا کردن الکترون از سطح فلز نخواهد داشت. یعنی برای طول موج‌های $\lambda > \lambda_۰$ اثر **فوتوالکتریک** رخ نمی‌دهد.

مثال: تابش فرابنفشی با طول‌موج $۲۰۰\,nm$ بر سطح تیغه‌ای از جنس نیکل با تابع کار $۴/۹۰\,eV$ تابیده می‌شود. بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح نیکل را حساب کنید. $(m_e = ۹/۱۱\times۱۰^{-۳۱}\,kg)$

پاسخ:

$$K_m = hf - W_۰ = h\frac{c}{\lambda} - W_۰ \Rightarrow K_m = \frac{۱۲۴۰}{۲۰۰} - ۴/۹ = ۶/۲ - ۴/۹ = ۱/۳\,(eV)$$

برای پیدا کردن **بیشینه تندی** فوتوالکترون‌ها باید K_m را برحسب ژول نوشته و V را به‌دست آوریم.

$$K_m = ۱/۳\times\left(\frac{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}{۱}\right) = ۲/۰۸\times۱۰^{-۱۹}\,J$$

$$K_m = \frac{۱}{۲}mV_m^{۲} \Rightarrow V_m = \sqrt{\frac{۲K_m}{m}} = \sqrt{\frac{۲\times۲/۰۸\times۱۰^{-۱۹}}{۹/۱۱\times۱۰^{-۳۱}}} = \sqrt{۴۵/۶۶\times۱۰^{۱۰}} \Rightarrow V_m = ۶/۷۵\times۱۰^{۵}\,\frac{m}{s}$$

مثال: مطابق جدول (۵-۱)، تابع کار طلا برابر $۵/۲۰\,eV$ است. بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید. ثانیاً طول موج آستانه (طول موج متناظر با $f_۰$) را برحسب nm به‌دست آورید.

پاسخ: می‌دانیم بسامد کمینهٔ نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح فلز طلا برابر بسامد آستانه $f_۰$ است. پس داریم:

$$W_۰ = hf_۰ \Rightarrow f_۰ = \frac{W_۰}{h} = \frac{۵/۲۰}{۴/۱۰\times۱۰^{-۱۵}} = ۱/۲۷\times۱۰^{۱۵}\,Hz$$

فوتون‌هایی که بسامد آن‌ها بیش‌تر از $f_۰ = ۱/۲۷\times۱۰^{۱۵}\,Hz$ باشد، انرژی کافی برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا را دارند.

ب) $$\lambda_۰ = \frac{c}{f_۰} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\,(m/s)}{۱/۲۷\times۱۰^{۱۵}\,(\frac{۱}{s})} \simeq ۲/۳۶\times۱۰^{-۷}\,m \simeq ۲/۳۶\times۱۰^{-۷}\times۱۰^{۹}\,nm \simeq ۲۳۶\,nm$$

مثال: طول موج آستانه برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معینی برابر $۲۵۴\,nm$ است:

الف) تابع کار این فلز برحسب الکترون‌ولت چه‌قدر است؟

ب) توضیح دهید آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda < ۲۵۴\,nm$ رخ می‌دهد یا نه؟

پ) طول موج‌های $\lambda > ۲۵۴\,nm$ چه اتفاقی رخ می‌دهد؟

$(h = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\,eV\cdot s)$

پاسخ: الف)

$$W_۰ = hf_۰ = \frac{hc}{\lambda_۰} \Rightarrow W_۰ = \frac{۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\times۳\times۱۰^{۸}\times۱۰^{۹}}{۲۵۴}$$

$$W_۰ = \frac{۱۲/۴۲\times۱۰^{۲}}{۲۵۴} = \frac{۱۲۴۲\,(eV)}{۲۵۴\,(nm)} = ۴/۸۸\,eV$$

ب) برای طول موج‌های کوتاه‌تر از $۲۵۴\,nm$، اثر فوتوالکتریک اتفاق می‌اُفتد چون طول موج‌های کم‌تر از $\lambda_۰$ دارای بسامد بیش‌تر درنتیجه انرژی بیش‌تر برای جدا کردن الکترون از سطح فلز را دارند.

پ) برای طول موج‌های $\lambda > ۲۵۴\,nm$، طبق رابطهٔ $f = \frac{c}{\lambda}$، بسامد و انرژی فوتون‌های مربوط به آن کم‌تر از بسامد آستانه بوده و درنتیجه الکترون از سطح فلز جدا نخواهد شد. یعنی اثر فوتوالکتریک برای این حالت اتفاق نمی‌اُفتد.

مثال: تابع کار فلز روی برای $۴/۳۱\,eV$ است، نوری با طول موج λ بر سطح این فلز می‌تابد. اگر برهم‌کنش فوتون‌های نور فرودی با اتم‌های سطح این فلز، سبب خارج شدن فوتوالکترون‌ها از سطح آن شود:

الف) بلندترین طول موجی را پیدا کنید که سبب گسیل فوتوالکترون می‌شود.

ب) اگر نوری با طول موج $۲۲۰\,nm$ با سطح این فلز برهم‌کنش کند، بیشینهٔ انرژی جنبشی و تندی فوتوالکترون‌ها را به‌دست آورید.

$h = ۴\times۱۰^{-۱۵}\,(eV\cdot s)$ و جرم الکترون $m = ۹/۱\times۱۰^{-۳۱}\,kg$.

پاسخ: الف) دیدید که منظور از بلندترین طول موج برای گسیل فوتوالکترون‌ها، یعنی طول موج آستانه λ_0 است بنابراین کافی است در رابطهٔ طول موج آستانه قرار دهیم:

$$W_0 = hf_0 = h\frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} = \frac{4\times10^{-15}\times3\times10^{8}\times10^{9}}{4/31}$$

$$\lambda_0 = \frac{1200}{4/31} = 278/4 \simeq 278\,nm$$

ب) با توجه به رابطهٔ (۵-۴) خواهیم داشت:

$$K_m = hf - W_0 = h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_0} = hc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)$$

$$K_m = 1200(eV\cdot nm)\left(\frac{1}{220} - \frac{1}{254}\right)$$

$$K_m = \frac{1200(eV\cdot \cancel{nm})}{220(\cancel{nm})} - \frac{1200(eV\cdot \cancel{nm})}{254(\cancel{nm})} \simeq 5/45 - 4/72 = 0/73\,eV$$

اگر $h = 4\times10^{-15}$ باشد مقدار $hc = 1200(eV\cdot nm)$ خواهد بود.

(این نکته در حل بسیاری از سؤال‌های این قسمت کمک بزرگی می‌کند.)

اگر $h = 4/14\times10^{-15}$ باشد، تقریباً مقدار $hc = 1240(eV\cdot nm)$ خواهد بود.

بیشینه تندی فوتوالکترون‌ها را با استفاده از انرژی جنبشی K_m به‌دست می‌آوریم:

$$K_m = \frac{1}{2}mV_m^{2} \Rightarrow V_m = \sqrt{\frac{2K_m}{m}} = \sqrt{\frac{0/73\times1/6\times10^{-19}}{9/1\times10^{-31}}}$$

$$V_m = \sqrt{\frac{73\times16\times10^{9}}{9/1}} = \sqrt{\frac{73\times16}{91}\times10^{10}} = 3/58\times10^{5}\,\frac{m}{s}$$

مثال: طول موج آستانه برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معینی ۲۵۴nm است:

الف) تابع کار این فلز برحسب الکترون‌ولت چه‌قدر است؟

ب) توضیح دهید که آیا اثر فوتوالکتریک به ازای طول موج‌های کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از ۲۵۴nm مشاهده خواهد شد؟

پاسخ: الف)

$$\lambda_0 = 254\,nm, W = hf_0 = h\frac{c}{\lambda_0} = \frac{1240(eV\cdot nm)}{254(nm)} = 4/88(eV)$$

توجه: محاسبهٔ hc برحسب $(eV\cdot nm)$ در قسمت درسنامه انجام گرفته، برای تبدیل این یکاها می‌توانید به همان‌جا مراجعه نمایید.

ب) اثر فوتوالکتریک به ازای طول موج‌های $\lambda \le 254nm$ که انرژی آن‌ها از انرژی طول موج‌های ۲۵۴nm بیش‌تر است، مشاهده می‌شود ولی به ازای طول موج‌های $\lambda > 254nm$ که انرژی این طول‌موج‌ها کم‌تر از انرژی طول موج آستانهٔ $\lambda_0 = 254\,nm$ است، مشاهده نمی‌شود و به ازای طول موج‌های ۲۵۴nm، آستانهٔ مشاهدهٔ اثر فوتوالکتریکی برای این فلز معین است.

مثال: در پدیده فوتوالکتریک برای فلز روی،

الف) بلندترین طول موجی را پیدا کنید که سبب گسیل فوتوالکترون‌ها می‌شود.

ب) وقتی نوری با طول موج ۲۲۰nm با سطح این فلز برهم‌کنش کند، بیشینه تندی فوتوالکترون‌ها چه‌قدر است؟

$(m_e = 9/1\times10^{-31}kg)$

پاسخ: الف) مطابق جدول (۵-۱) تابع کار فلز روی $W_0 = 4/31eV$ است و بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترون می‌شود، همان طول موج آستانه (λ_0) یا طول موج قطع است بنابراین λ_0 برای فلز روی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$W_0 = hf_0 = h\frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} = \lambda_0 = \frac{۱۲۴۰}{۴/۳۱} \simeq ۲۸۸nm$$

ب)
$$K_m = hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{۱۲۴۰(eV \cdot \cancel{nm})}{۲۲۰(\cancel{nm})} - ۴/۳۱ = ۱/۳۳(eV)$$

$$K_m = \frac{۱}{۲}mV_m^{۲} \Rightarrow V_m = \sqrt{\frac{۲K_m}{m}} = \sqrt{\frac{۲\times(۱/۳۳\times۱۰^{-۱۹})}{۹/۱\times۱۰^{-۳۱}}}$$

$$V_m = ۵/۳۸\times۱۰^{۵}\frac{m}{s}$$

طیف خطی و طیف پیوسته

می‌دانیم تمام جسم‌ها در هر دمایی که باشند از خود موج‌های الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن **تابش گرمایی** می‌گویند به‌طوری که در دماهای پایین پرتوی فروسرخ و در دماهای بالاتر، پرتوی فرابنفش گسیل می‌شوند.

طیف: به مجموعه طول‌موج‌های الکترومغناطیسی، طیف گفته می‌شود.

طیف گسیلی یا نشری

اگر نور حاصل از یک چشمهٔ نور مستقیماً و بدون عبور از محیطی شفاف وارد منشور شده و طیف آن تشکیل شود، طیف حاصل گسیلی یا نشری نامیده می‌شود.

طیف پیوسته

موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از **جامدهای ملتهب و مذاب** آن‌ها شامل گستره‌ای **پیوسته** از طول موج‌هاست به‌طوری که هیچ فاصله‌ای بین طول موج‌ها وجود ندارد و به‌صورت یک نوار رنگینی پیوسته است که به آن **طیف پیوسته** می‌گویند.

علت تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، در اثر **برهم‌کنش قوی** بین اتم‌های سازندهٔ آن جسم است.

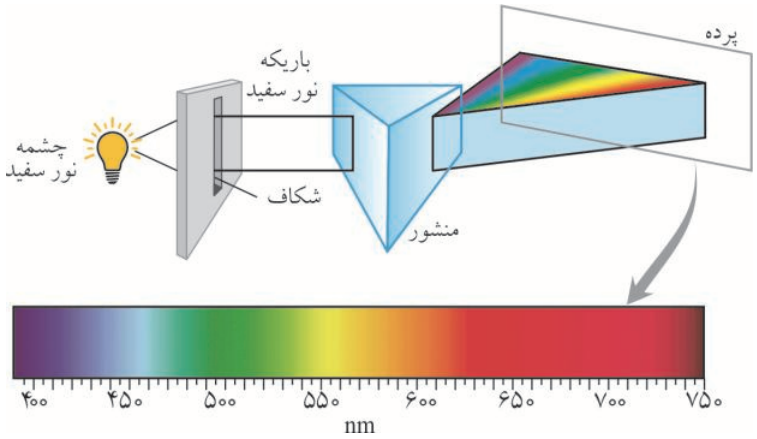
طیف گسیلی جسم جامد فقط **به دمای** آن بستگی دارد و به جنس آن **بستگی ندارد**، بنابراین تمام جسم‌های جامد دارای طیف پیوستهٔ یکسان دارند و به همین جهت از این طیف **نمی‌توان** برای شناسایی **عنصرها** استفاده کرد.

طیف خطی

طیف حاصل از گازهای کم‌فشار و رقیق را طیف خطی می‌نامند، مانند طیف حاصل از تابلوهای نئون و لامپ‌های جیوه‌ای که درون این لامپ‌ها گازی رقیق و کم‌فشار قرار دارد.

این طیف برای اتم‌های هر گاز **منحصر به فرد** است و اطلاعات مهّمی دربارهٔ **نوع** و **ساختار** اتم‌های هر گاز به‌دست می‌دهند چون اتم‌های گاز، از برهم‌کنش قوی در جامدات آزاد هستند به همین جهت به جای طیف پیوسته، طیف گسسته یا **خطی** را گسیل می‌کنند که تنها از چند **خط رنگی** جدا از هم تشکیل یافته‌اند که **هر خط** معرف یک **طول موج** معینی است.

این خط‌ها، هم از نظر **تعداد** و هم از نظر **طول موج** برای عنصرهای مختلف **با هم تفاوت** دارد.



طیف گسیلی پیوستهٔ نور سفید از رشتهٔ داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که کـه گسـترهٔ طول موج آن از حدود (۴۰۰nm نور بنفش) تا حدود (۷۵۰nm نور قرمز) است.

طیف‌های گسیلی و خطی برای نئون و جیوه

نکات مهمّ

۱– طیف خطی یک طیف ناپیوسته است.

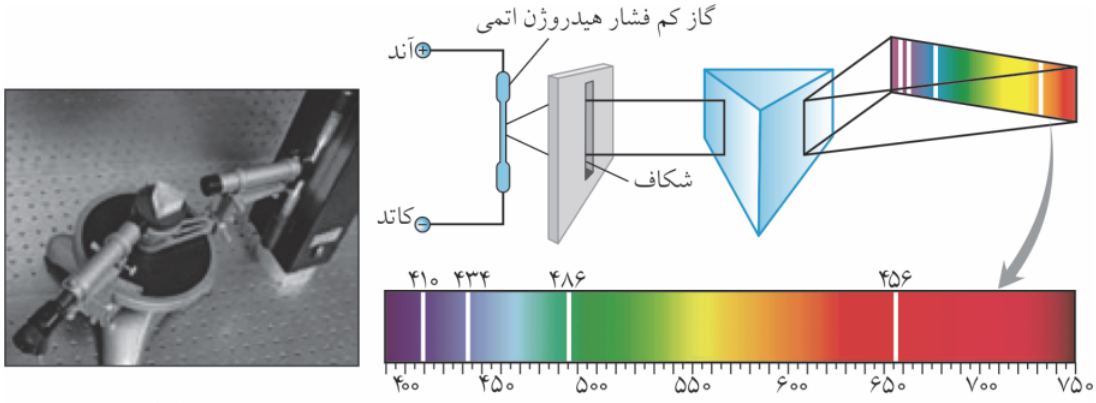
۲– گازهای کم‌فشار و رقیق طول موج‌های معینی را گسیل می‌کنند که از ویژگی‌های هر گاز، است به عبارت دیگر طیف خطی هیچ دو گازی شبیه هم نیست.

۳– طیف خطی حاصل از گازهای رقیق و کم‌فشار و **رنگ نور** گسیل شده از آن‌ها به **نوع گاز بستگی** دارد.

نحوهٔ تشکیل طیف گسیلی

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز، نظیر هیدروژن، هلیوم و نئون معمولاً از لامپ‌های بلند شیشه‌ای که حـاوی مقـداری گاز **رقیق و کم‌فشار** است استفاده می‌شود که دو الکترود، آند و کاتد که در دو طرف این لامپ قرار دارد. به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیهٔ الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ برانگیختـه شده شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، به **نـوع گـاز درون** لامپ بستگی دارد.

از میان طیف‌های گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی، هم به لحاظ تاریخی و هم از جنبهٔ نظری اهمیّت خاصی دارد. طیف خطی گاز هیدروژن در ناحیهٔ مرئی، شامل چهار خط رنگی مجزا از هم است که محل آن‌ها مطابق شکل زیر است:



(ب) (الف)

بالمر، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج شناخته شده مربوط به طیف گسیلی هیدروژن اتمی با دقت خوب از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶(\mu m)\frac{n^۲}{n^۲-۴} \quad \text{(معادلهٔ بالمر)} \qquad (۳-۵)$$

که در آن n عددی صحیح و $n \geq ۳$ است:

$$n=۳ \Rightarrow \lambda_۱ = ۳۶۴/۵۶\frac{۳^۲}{۳^۲-۴} \Rightarrow \lambda_۱ = ۲۵۶/۲۰nm \quad \text{خط قرمز}$$

$$n=۴ \Rightarrow \lambda_۲ = ۳۶۴/۵۶\frac{۴^۲}{۴^۲-۴} \Rightarrow \lambda_۲ = ۴۸۶/۰۸nm \quad \text{خط نیلی}$$

$$n=۵ \Rightarrow \lambda_۳ = ۳۶۴/۵۶\frac{۵^۲}{۵^۲-۴} \Rightarrow \lambda_۳ = ۴۳۴/۰۰nm \quad \text{خط آبی}$$

$$n=۶ \Rightarrow \lambda_۴ = ۳۶۴/۵۶\frac{۶^۲}{۶^۲-۴} \Rightarrow \lambda_۴ = ۴۱۰/۱۳nm \quad \text{خط بنفش}$$

بعدها دانشمند سوئدی به نام **رابرت ریدبرگ** برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن رابطهٔ بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n > n' \quad \text{(رابطهٔ بالمر – ریدبرگ)} \qquad (۴-۵)$$

در رابطهٔ فوق R ثابت ریدبرگ نام دارد و مقدار آن تقریباً برابر $R = ۰/۰۱۱(nm)^{-۱}$ است درنتیجه λ برحسب (nm) به‌دست خواهد آمد.

رشتهٔ خطهای طیف گسیلی هیدروژن اتمی[۱]

در رابطهٔ (۵-۴) ملاحظه شد که رابطهٔ (بالمر – ریدبرگ) به‌صورت $\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$ است $(n > n')$. حال اگر الکترون از مدارهای بالاتر به مدارهای پایین‌تر بیاید، طول موج‌های خاص را تابش یا گسیل می‌کند که هر کدام از این طول‌موج‌ها مربوط به ترازوها و مدارهای خاص و معینی است و توسط دانشمندان و فیزیک‌دانان خاص مورد تجربه و آزمایش قرار گرفته و به نام خود آن فیزیکدانان نام‌گذاری شده است.

$$\frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n > n'$$

رشتهٔ لیمان – طول موج‌های فرابنفش

$$n'=۱ \;,\; n>۱ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right)$$

رشته بالمر – در ناحیهٔ فرابنفش و نور مرئی

$$n'=۲ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n>۲$$

رشته پاشن – در ناحیهٔ فروسرخ

$$n'=۳ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n>۳$$

رشته براکت – در ناحیهٔ فروسرخ

$$n'=۴ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۴^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n>۴$$

رشته پفوند – در ناحیهٔ فروسرخ

$$n'=۵ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda} = R\left(\frac{۱}{۵^۲} - \frac{۱}{n^۲}\right) \;,\; n>۵$$

۱. منظور از هیدروژن اتمی، تودهٔ گازی متشکل از اتم‌های هیدروژن است. هرگاه گاز هیدروژن رقیق و کم‌فشار تحت ولتاژ بسیار قوی قرار گیرد، مولکول‌های $H_۲$ به اتم‌های هیدروژن شکسته می‌شوند.

جدول (۵-۲) رشتهٔ خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطهٔ ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیهٔ طیف
لیمان	۱۹۰۶-۱۹۱۴	۱	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۱^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۲,۳,۴,...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۲^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۳,۴,۵,...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۳^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۴,۵,۶,...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۴^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۵,۶,۷,...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۵^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۶,۷,۸,...	فروسرخ

خوب است بدانید:

اخیراً یکی از فیزیک‌دان‌های معاصر به نام هِمفری که در زمینهٔ طیف تابشی هیدروژن اتمی تحقیق کرده است طول موج‌های دیگری در ناحیهٔ فروسرخ کشف کرده که به سری همفری معروف است و این طول موج‌ها به ازای $n'=۶$ در رابطهٔ ریدبرگ به‌دست می‌آید:

رشتهٔ همفری، در ناحیهٔ فروسرخ $n'=۶ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۶^۲}-\frac{۱}{n^۲})\ ,\ n>۶$

نکات مهمّ:

۱- با توجه به جدول طول موج‌های بالا، می‌توان دریافت که طول موج‌های تابشی از رشتهٔ لیمان تا پفوند از طول موج‌های کوتاه‌تر به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود.

۲- از میان طول موج‌های فوق، فرابنفش مربوط به رشتهٔ لیمان و بالمر و نور مرئی مربوط به رشتهٔ بالمر است.

۳- بلندترین طول موج هر رشته به ازای $n=n'+۱$ در همان رشته محاسبه می‌شود:

$$n=n'+۱ \Rightarrow \frac{۱}{\lambda_{max}}=R(\frac{۱}{n'^۲}-\frac{۱}{(n'+۱)^۲})$$

۴- کوتاه‌ترین طول موج مربوط به هر رشته به ازای $n\to\infty$ در همان رشته است یعنی:

$$n\to\infty \Rightarrow \frac{۱}{\lambda_{min}}=R(\frac{۱}{n'^۲}-\frac{\overset{\circ}{۱}}{\infty}) \Rightarrow \frac{۱}{\lambda_{min}}=R(\frac{۱}{n'^۲})$$

۵- برای تعیین طول موج kاُمین خط یک رشتهٔ معین، کافی است در رابطهٔ ریدبرگ به جای $n=n'+k$ قرار دهیم.

مثال: بلندترین و کوتاه‌ترین طول موج در رشتهٔ بالمر را به‌دست آورید $(R=۰/۰۱۱(nm)^{-۱})$

پاسخ: در رشتهٔ بالمر $n'=۲$ و بلندترین طول موج، به ازای $n=n'+۱=۳$ به‌دست می‌آید. پس با استفاده از رابطهٔ (۵-۴) داریم:

$$\frac{۱}{\lambda_{max}}=R(\frac{۱}{۲^۲}-\frac{۱}{۳^۲})=۰/۰۱۱(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۹})=۰/۰۱۱(\frac{۵}{۳۶}) \Rightarrow \lambda_{max}=\frac{۳۶}{۰/۰۱۱\times۵}=۶۵۴/۵nm$$

که این طول موج در محدودهٔ نور مرئی و مربوط به نور نارنجی است.

همچنین کوتاه‌ترین طول موج رشته بالمر، متناظر با $n\to\infty$ است یعنی: