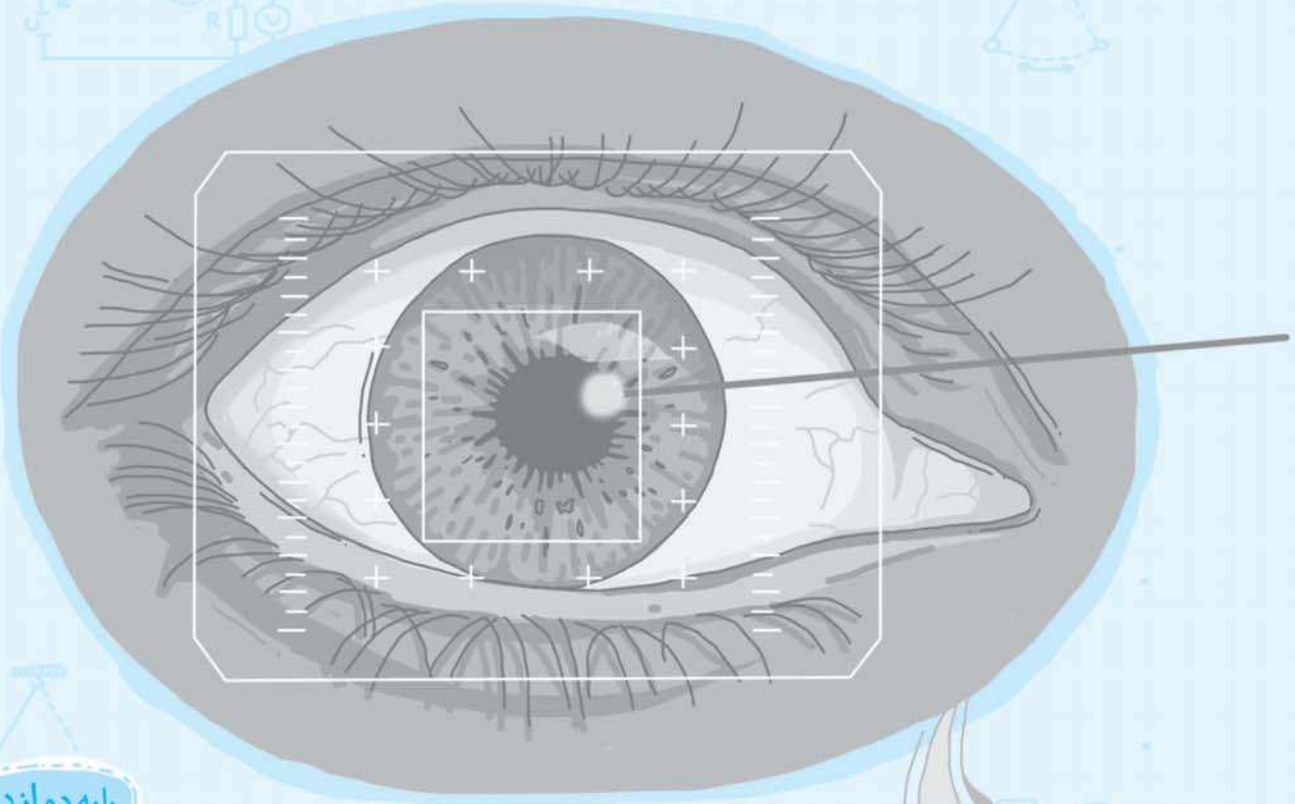


پایه دوازدهم

آشنایی با فیزیک اتمی

فصل پنجم

خلاصه نکات	عنوان	صفحه
۱	انرژی امواج الکترومغناطیسی	۵۰۷
۲	آشنایی با الکترون ولت	۵۱۰
۳	فوتوالکتریک	۵۱۲
۴	تابش گرمایی و بررسی طیف اجسام	۵۲۴
۵	رابطهٔ ریدبرگ	۵۲۷
۶	آشنایی با الگوهای اتمی تامسون و رادرفورد	۵۳۳
۷	مدل بور	۵۳۴
۸	لیزر	۵۴۲

۲۰۸۹ ۴ برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

خلاصه نکات ۱ — انرژی امواج الکترومغناطیسی (تست‌های ۲۰۸۹ تا ۲۱۰۴)

تو شروع این فصل، می‌فوایم ببینیم انرژی یه موج الکترومغناطیسی حساب و کتابش چه جوریه ...

در این فصل، نیاز به محاسبهٔ انرژی امواج الکترومغناطیسی داریم. اینشتین در تحقیقاتش، بر مبنای کارهای پلانک، فرض کرد که نور با بسامد **f** را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی (با نام فوتون) در نظر گرفت که انرژی هر فوتون و انرژی کل یک موج الکترومغناطیسی با **n** فوتون برابر است با:

$E_t = n(hf)$: انرژی کل یک موج الکترومغناطیسی با n فوتون ، $E = hf = h\frac{c}{\lambda}$: انرژی یک فوتون

(hf: مقدار پایهٔ انرژی)

E_t : انرژی کل موج الکترومغناطیسی — E : انرژی یک فوتون (کوانتوم انرژی یا مقدار پایهٔ انرژی) — n : تعداد فوتون

h : ثابت پلانک ($h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴}\ J.s$) — f : بسامد موج

نتیجه انرژی هر فوتون در خلأ با بسامد آن رابطهٔ مستقیم و با طول موج آن رابطهٔ معکوس دارد.

$$E \propto f \quad \text{یا} \quad E \propto \frac{۱}{\lambda}$$

از طرفی معمولاً در حل مسائل، مقدار h در صورت مسئله داده می‌شود.

تمرین ۱ **در امواج الکترومغناطیس، از اشعهٔ گاما تا امواج رادیویی، انرژی وابسته به فوتون‌ها (کوانتوم انرژی) چگونه تغییر می‌کند؟**

پاسخ از اشعهٔ گاما تا امواج رادیویی، بسامد کاهش یافته و انرژی وابسته به فوتون‌ها نیز کاهش می‌یابد.

کاهش بسامد و کاهش انرژی فوتون‌ها

اشعهٔ گاما | اشعهٔ X | فرابنفش | نور مرئی | فروسرخ | میکروموج | امواج رادیویی

بنفش نیلی آبی سبز زرد نارنجی قرمز

بررسی تغییر انرژی فوتون‌ها با تغییر محیط

انرژی هر فوتون از رابطهٔ $E = hf$ به‌دست می‌آید و می‌دانیم که با تغییر محیط، بسامد (f) تغییر نمی‌کند، زیرا بسامد از ویژگی‌های منبع موج است و در نتیجه انرژی فوتون‌ها نیز با تغییر محیط ثابت می‌ماند.

تمرین ۲ **اگر نور از هوا وارد شیشه شود، طول موج و انرژی وابسته به هر فوتون آن چگونه تغییر می‌کند؟**

پاسخ با توجه به رابطهٔ $v = \frac{c}{n}$، چون شیشه غلیظ‌تر از هوا است، سرعت نور و طول موج در آن کاهش می‌یابد.

$$\downarrow v = \frac{\overset{\text{ثابت}}{c}}{n\uparrow} \quad , \quad \downarrow \lambda = \frac{\overset{\text{ثابت}}{\lambda_۰}}{n\uparrow}$$

با ثابت ماندن بسامد، انرژی وابسته به هر فوتون نیز ثابت می‌ماند.

$$E = h\overset{\text{ثابت}}{f} \xrightarrow[(h \text{ عددی ثابت است})]{f \text{ ثابت بماند}}$$ انرژی هر فوتون ثابت می‌ماند.

سؤال بعدی، ایدهٔ خیلی مهم و پرتکراری رو توی دل خودش داره ...

تمرین ۳ **تعداد فوتون‌هایی که در یک ثانیه از یک لامپ ۶۰ واتی با نور قرمز گسیل می‌شود، کدام است؟** ($\lambda = ۶۶۰۰\ \mathring{A}$ و $h = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}\ J.s$ و $c = ۳ \times ۱۰^{۸}\ m/s$)

۱) ۲×۱۰^{۲۰} — ۲) $\frac{۴}{۳} \times ۱۰^{۲۰}$ — ۳) $\frac{۳}{۴} \times ۱۰^{۲۰}$ — ۴) ۳×۱۰^{۲۱}

پاسخ می‌دانیم یک لامپ ۶۰ واتی در هر ثانیه ۶۰ ژول انرژی تابش می‌کند، در این صورت تعداد فوتون‌های تابش شده در یک ثانیه برابر است با:

$$E_t = nhf = \frac{nhc}{\lambda} \ , \ E = ۶۰J \ , \ h = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}\ J.s \ , \ c = ۳ \times ۱۰^{۸}\ m/s \ , \ \lambda = ۶۶۰۰\mathring{A} = ۶/۶ \times ۱۰^{-۷}\ m$$

$$\Rightarrow ۶۰ = \frac{n(۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}) \times (۳ \times ۱۰^{۸})}{۶/۶ \times ۱۰^{-۷}} \Rightarrow \text{تعداد فوتون: } n = ۲ \times ۱۰^{۲۰} \quad \text{(گزینهٔ ۱)}$$

یه جور دیگه فکر کنیم: تعداد فوتون‌های تابیده شده از لامپ در مدت زمان t برابر است با:

$$\begin{cases} E_t = Pt \\ E_t = nhf = nh\dfrac{c}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow Pt = nh\frac{c}{\lambda} \Rightarrow n = \frac{\lambda Pt}{hc}$$

$$\lambda = ۶۶۰۰\,\text{Å} = ۶۶۰۰ \times ۱۰^{-۱۰}\,m \;,\; c = ۳ \times ۱۰^{۸}\,m/s \;,\; P = ۶۰\,W \;,\; t = ۱s \;,\; h = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}\,J.s$$

جای‌گذاری اعداد: $n = \dfrac{(۶۶۰۰ \times ۱۰^{-۱۰}) \times ۶۰ \times ۱}{۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴} \times (۳ \times ۱۰^{۸})} = ۲ \times ۱۰^{۲۰}$

با توجه به رابطهٔ $E = hf$، انرژی هر فوتون متناسب با بسامد (f) آن است.

رابطهٔ انرژی فوتون با دوره ⇐ $E = hf \xrightarrow{f=\frac{۱}{T}} E \propto \frac{۱}{T} \rightarrow$ رابطهٔ معکوس

رابطهٔ انرژی فوتون با طول موج در یک محیط مشخص ⇐ $E = hf \xrightarrow{\lambda=\frac{c}{f}} E \propto \frac{۱}{\lambda} \rightarrow$ رابطهٔ معکوس

تذکر

هنگامی که نور از یک محیط مانند هوا وارد شیشه می‌شود، سرعت آن تغییر می‌کند ولی بسامد آن ثابت مانده و در نتیجه انرژی فوتون‌های آن نیز ثابت می‌ماند، بنابراین نمی‌توان گفت انرژی فوتون با سرعت انتشار در محیط رابطهٔ مستقیم دارد.

۲ ۲۰۹۰ می‌دانیم در طیف امواج الکترومغناطیس، از فرابنفش تا موج‌های رادیویی طول موج افزایش و بسامد کاهش می‌یابد و از آن‌جایی که انرژی هر فوتون با بسامد آن رابطهٔ مستقیم دارد، می‌توان گفت انرژی وابسته به فوتون‌ها نیز همراه با بسامد کاهش می‌یابد.

کاهش بسامد، افزایش طول موج، کاهش انرژی فوتون‌ها

اشعهٔ گاما	اشعهٔ X	فرابنفش	نور مرئی	فروسرخ	میکروموج	امواج رادیویی

بنفش نیلی آبی سبز زرد نارنجی قرمز

۴ ۲۰۹۱ اشعهٔ گاما در مقایسه با سایر امواج الکترومغناطیس از جمله فرابنفش، دارای کوانتوم انرژی (انرژی هر فوتون) بزرگ‌تر و طول موج کوتاه‌تری است. در طیف امواج الکترومغناطیس، بیشترین بسامد و کم‌ترین طول موج، مربوط به اشعهٔ گاما است.

۲ ۲۰۹۲ ۱) با توجه به خلاصه نکات ارائه شده، میکروموج‌ها دارای طول موج کم‌تری نسبت به امواج رادیویی می‌باشند.

۲) از سوی دیگر بسامد میکروموج‌ها بیشتر از امواج رادیویی بوده و کوانتوم انرژی آن‌ها نیز بیشتر از امواج رادیویی می‌باشد.

۳) تندی انتشار تمام امواج الکترومغناطیسی در خلأ یکسان و برابر $۳ \times ۱۰^{۸}\,m/s$ می‌باشد.

۴ ۲۰۹۳ با توجه به شکل زیر، تنها گزینهٔ (۴) ترتیب افزایش انرژی فوتون را درست نشان می‌دهد.

دقت شود که فرابنفش (بالاتر از بنفش) انرژی‌اش از بنفش بیشتر است و فروسرخ (پایین‌تر از سرخ) انرژی‌اش از قرمز کم‌تر است.

کاهش بسامد، افزایش طول موج، کاهش انرژی فوتون‌ها

اشعهٔ گاما	اشعهٔ X	فرابنفش	نور مرئی	فروسرخ	میکروموج	امواج رادیویی

۳ ۲۰۹۴ با ورود نور از هوا به شیشه، با توجه به این‌که تندی نور در شیشه کم‌تر از هوا است، طول موج آن نیز کوتاه‌تر می‌شود، اما توجه داشته باشید بسامد هر فوتون و در نتیجه انرژی آن همواره ثابت است و با تغییر محیط نیز ثابت می‌ماند، زیرا بسامد از ویژگی‌های منبع موج محسوب می‌شود.

$$\lambda = \frac{\lambda_۰}{n} \xrightarrow{n\uparrow} \lambda \downarrow$$

۴ ۲۰۹۵ انرژی وابسته به هر فوتون تنها به بسامد آن بستگی دارد. با عوض شدن محیط، بسامد تغییر نمی‌کند (بسامد از ویژگی‌های منبع است) و در نتیجه انرژی هر یک از فوتون‌ها نیز ثابت می‌ماند.

۴ ۲۰۹۶ برای محاسبهٔ انرژی هر فوتون، با توجه به رابطهٔ $E = hf$، ابتدا بسامد نور موردنظر را به‌دست می‌آوریم:

$$\lambda = ۰/۰۳\,\text{Å} \xrightarrow{۱\text{Å}=۱۰^{-۱۰}m} \lambda = ۳ \times ۱۰^{-۱۲}\,m \quad \text{و} \quad c = ۳ \times ۱۰^{۸}\,m/s \xrightarrow{f=\frac{c}{\lambda}} \text{بسامد}: f = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۳ \times ۱۰^{-۱۲}}\,Hz = ۱۰^{۲۰}\,Hz$$

(ثابت پلانک: $h = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}\,J.s$)

انرژی فوتون: $E = hf = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴} \times ۱۰^{۲۰} = ۶/۶ \times ۱۰^{-۱۴}\,J$

gajmarket.com

۴ ۲۰۹۷ به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} \Rightarrow \underbrace{۲\times۱۰^{۳}}_{\text{انرژی برحسب eV}} = ۴\times۱۰^{-۱۵}\times\frac{۳\times۱۰^{۸}}{\lambda} \Rightarrow \lambda = ۶\times۱۰^{-۱۰}\,m = ۰/۶\,nm$$

۴ ۲۰۹۸ می‌دانیم انرژی هر فوتون به محیط انتشار آن وابستگی نداشته و از رابطهٔ $E = hf$ به‌دست می‌آید. برای محاسبهٔ $E_{\circ}$، ابتدا بسامد نور مورد نظر را به‌دست می‌آوریم:

$$\lambda = ۰/۶۶\,\mu m = ۶/۶\times۱۰^{-۷}\,m \quad , \quad c = ۳\times۱۰^{۸}\,m/s \xrightarrow{f=\frac{c}{\lambda}} \text{بسامد: } f = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۶/۶\times۱۰^{-۷}}\,Hz$$

$$\text{انرژی فوتون: } E = hf = ۶/۶\times۱۰^{-۳۴}\times\left(\frac{۳\times۱۰^{۸}}{۶/۶\times۱۰^{-۷}}\right) = ۳\times۱۰^{-۱۹}\,J \qquad (\text{ثابت پلانک: } h = ۶/۶\times۱۰^{-۳۴}\,J.s)$$

تذکر

برای سرعت در محاسبات، از این به بعد با داشتن طول موج، انرژی هر فوتون را از رابطهٔ $E = \frac{hc}{\lambda}$ محاسبه می‌کنیم.

۱ ۲۰۹۹ برای مقایسهٔ انرژی دو فوتون می‌توانیم از یکی از رابطه‌های $E_{\circ} = hf$ یا $E_{\circ} = \frac{hc}{\lambda}$ استفاده کنیم. با توجه به مطرح شدن طول موج در این مسئله، از رابطهٔ دوم استفاده کرده و داریم:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow E \propto \frac{۱}{\lambda} \Rightarrow \frac{E_{\gamma}}{E'} = \frac{\lambda'}{\lambda_{\gamma}}$$

$$\lambda_{\gamma} = ۵\,\mathring{A} = ۵\times۱۰^{-۱۰}\,m \quad , \quad \lambda' = ۱/۲\,\mu m = ۱/۲\times۱۰^{-۶}\,m \Rightarrow \frac{E_{\gamma}}{E'} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۶}}{۵\times۱۰^{-۱۰}} = ۲/۴\times۱۰^{۳} = ۲۴۰۰$$

۲ ۲۱۰۰ کوانتوم انرژی پرتوی B سه برابر کوانتوم انرژی پرتوی A است $(E_{\circ B} = ۳E_{\circ A})$، بنابراین طول موج پرتوی B کوتاه‌تر از A است. از طرفی اختلاف طول موج پرتوهای A و B برابر ۴ نانومتر است و می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \lambda_A - \lambda_B = ۴\,nm \rightarrow \lambda_A = \lambda_B + ۴ & \text{رابطهٔ (۱)} \\ E_B = ۳E_A \xrightarrow{E\propto\frac{۱}{\lambda}} \frac{E_B}{E_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} = ۳ \Rightarrow \lambda_A = ۳\lambda_B & \text{رابطهٔ (۲)} \end{cases}$$

در ادامه با جایگذاری رابطهٔ (۲) در (۱) داریم:

$$\lambda_A = \lambda_B + ۴ \Rightarrow ۳\lambda_B = \lambda_B + ۴ \Rightarrow \lambda_B = ۲\,nm$$

$$\lambda_A = \lambda_B + ۴ = ۲ + ۴ = ۶\,nm$$

خلاقیت حرفه‌ای ها

با توجه به این‌که کوانتوم انرژی پرتوی B، ۳ برابر A است، بنابراین بسامد پرتوی B، ۳ برابر A و طول موج B، $\frac{۱}{۳}$ برابر A است. این موضوع فقط در گزینهٔ (۲) صدق می‌کند.

۴ ۲۱۰۱ می‌دانیم موج الکترومغناطیسی با طول موج بیشتر (موج A)، بسامد و کوانتوم انرژی کم‌تری دارد $(f_B > f_A)$. با توجه به سؤال می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} f_B - f_A = ۲\times۱۰^{۱۵}\,Hz & (۱) \\ E_B = ۳E_A \Rightarrow hf_B = ۳hf_A \Rightarrow f_B = ۳f_A & (۲) \end{cases}$$

$$\text{جایگذاری (۲) و (۱)} \Rightarrow (۳f_A) - f_A = ۲\times۱۰^{۱۵}\,Hz \Rightarrow f_A = ۱۰^{۱۵}\,Hz \;,\; f_B = ۳\times۱۰^{۱۵}\,Hz$$

موج با بسامد کم‌تر، طول موج بزرگ‌تری دارد و طول موج آن برابر است با:

$$\text{بسامد کم‌تر: } f_A = ۱۰^{۱۵}\,Hz \xrightarrow{\lambda=\frac{c}{f}} \text{طول موج بزرگ‌تر: } \lambda_A = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۱۰^{۱۵}} = ۳\times۱۰^{-۷}\,m = ۳۰۰\,nm$$

۱ ۲۱۰۲ با توجه به تساوی انرژی دو دسته پرتوی A و B داریم:

$$n_B = ۱۰^{۵} \quad , \quad \lambda_B = ۲\lambda_A \quad , \quad n_A = ?$$

$$(E_t)_A = (E_t)_B \rightarrow n_A \times \cancel{h} \times \frac{\cancel{c}}{\lambda_A} = n_B \times \cancel{h} \times \frac{\cancel{c}}{\lambda_B} \Rightarrow n_A \times \frac{۱}{\lambda_A} = ۱۰^{۵} \times \frac{۱}{(۲\lambda_A)} \Rightarrow n_A = \frac{۱۰^{۵}}{۲} = \frac{۱۰}{۲}\times۱۰^{۴} = ۵\times۱۰^{۴}$$

خلاقیت حرفه‌ای ها

می‌دانیم انرژی هر فوتون با طول موج آن رابطهٔ معکوس دارد، بنابراین می‌توان گفت انرژی هر فوتون از پرتوی B نصف انرژی هر فوتون از پرتوی A است و در صورتی که انرژی یک دسته پرتو از دو نور برابر باشد، آن‌گاه تعداد فوتون‌های A (که قوی‌تر هستند) نصف تعداد فوتون‌های B است، یعنی $\frac{۱۰^{۵}}{۲} = ۵\times۱۰^{۴}$.

۲۱۰۳ **۱** در صورتی که تعداد فوتون‌های جذب شده برابر n باشد، می‌توان گفت انرژی n فوتون جذب شده توسط محیط با طول موج ۰/۶ میکرون، برابر ۱/۳۲ ژول است. در این صورت داریم:

$$\lambda = ۶\times۱۰^{-۷}\,m\ ,\ c = ۳\times۱۰^{۸}\,m/s\ ,\ h = ۶/۶\times۱۰^{-۳۴}\,J.s\ ,\ E = ۱/۳۲J$$

$$E_t = nhf = \frac{nhc}{\lambda} \Rightarrow ۱/۳۲ = \frac{n\times(۶/۶\times۱۰^{-۳۴})\times(۳\times۱۰^{۸})}{۶\times۱۰^{-۷}} \Rightarrow n = \frac{۰/۲\times۶\times۱۰^{-۷}}{۱۰^{-۳۴}\times(۳\times۱۰^{۸})} = ۴\times۱۰^{۱۸}$$

۲۱۰۴ **۱** با توجه به تمرین (۳) در خلاصه نکات (۱)، گزینهٔ (۱) صحیح است.

۲۱۰۵ **۲** برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

خلاصه نکات ۲ **آشنایی با الکترون‌ولت** (تست‌های ۲۱۰۵ تا ۲۱۱۱)

همان‌طور که می‌دانید، بار الکتریکی کمیتی کوانتومی بوده و مقدار آن مضرب صحیحی از بار یک الکترون است.

$$q = ne$$

(مضرب صحیح ← مقدار پایه)

q: بار یک جسم n: تعداد الکترون‌های یک جسم e: اندازهٔ بار الکترون، $e = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}C$ یا همان کوانتوم بار (مقدار پایه)

تذکر ۱ با توجه به رابطهٔ $\Delta U = q.\Delta V$، یک ژول $(\Delta U = ۱J)$ برابر با تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک کولن بار الکتریکی $(q = ۱C)$ در جابه‌جایی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت $(\Delta V = ۱$ ولت$)$ است.

$$\Delta U = q.\Delta V \rightarrow \text{۱ژول} = (\text{۱ کولن})\times(\text{۱ ولت})$$

تذکر ۲ یک الکترون‌ولت برابر با تغییر انرژی یک الکترون در جابه‌جایی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت است.

$$eV = (\text{یک الکترون})\times(\text{یک ولت})$$

تذکر ۳ یک الکترون‌ولت برابر $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ ژول می‌باشد.

$$\text{یک ژول} \equiv \frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}eV \qquad \text{یک الکترون‌ولت} \equiv ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,J$$

تذکر ۴ واحد h (ثابت پلانک) در SI برابر (ژول . ثانیه) است. اگر h را برحسب (الکترون‌ولت . ثانیه) بنویسیم، انرژی فوتون برحسب الکترون‌ولت به‌دست می‌آید.

$$h = ۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,J.s \Rightarrow h = ۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\left(\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}eV\right)s = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\,eV.s$$

تذکر ۵ مقدار hc در حل مسائل کاربرد بسیار زیادی دارد و برابر است با:

$$hc = (۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,J.s)(۳\times۱۰^{۸}\,m/s) = ۱۹/۹\times۱۰^{-۲۶}\,J.m$$

اگر J را بر حسب eV و m را بر حسب nm بنویسیم، خواهیم داشت:

$$hc = (۱۹/۹\times۱۰^{-۲۶}\,J.m)\left(\frac{۱eV}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,J}\right)\left(\frac{۱nm}{۱۰^{-۹}\,m}\right) = ۱/۲۴\times۱۰^{۳}\,eV.nm$$

نتیجه **در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $۱۲۴۰eV.nm$ اختیار کنیم.**

با توجه به خلاصه نکات فوق، درستی گزینه‌های (۱)، (۳) و (۴) به وضوح مشخص است. از طرفی یک ژول برابر تغییر انرژی یک کولن الکتریسیته بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت است و یک کولن الکتریسیته، معادل $\frac{۱۰^{۱۹}}{۱/۶}$ الکترون است.

$$q = ne \rightarrow ۱ = n\times(۱/۶\times۱۰^{-۱۹}) \rightarrow n = \frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}} = \frac{۱۰^{۱۹}}{۱/۶}$$

بنابراین، یک ژول برابر با تغییر انرژی تعداد $\frac{۱۰^{۱۹}}{۱/۶}$ الکترون (معادل یک کولن) در جابه‌جایی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت است. با توجه به این موضوع، گزینهٔ (۲) عبارت نادرستی است.

۲۱۰۶ **۳** می‌دانیم هر الکترون‌ولت برابر $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ ژول است $(۱eV = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}J)$. در این صورت هر ژول معادل $\left(\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}\right)$ الکترون‌ولت می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع برای تبدیل ثابت پلانک به $eV.s$ داریم:

$$h = ۶/۶۴\times۱۰^{-۳۴}\,J.s = ۶/۶۴\times۱۰^{-۳۴}\times\underbrace{\left(\frac{۱}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}eV\right)}_{\text{معادل با ۱J است.}}.s = \frac{۶/۶۴\times۱۰^{-۳۴}}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}}eV.s = ۴/۱۵\times۱۰^{-۱۵}\,eV.s$$

gajmarket.com

۴ ۲۱۰۷ برای یافتن انرژی یک فوتون برحسب الکترون ولت، کافی است در رابطهٔ $E = hf$ ثابت پلانک (h) برحسب $eV.s$ باشد:

$$\lambda = ۰/۵\mu m = ۵\times ۱۰^{-۷} m \ , \ c = ۳\times ۱۰^{۸} m/s \ , \ h = ۴/۱۴\times ۱۰^{-۱۵} eV.s$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۴/۱۴\times ۱۰^{-۱۵}\times ۳\times ۱۰^{۸}}{۵\times ۱۰^{-۷}} = ۲/۴۸۴ eV$$

۳ ۲۱۰۸ می‌دانیم که هر الکترون‌ولت برابر $۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}$ ژول می‌باشد. بنابراین انرژی هر فوتون نور زرد برابر است با:

$$E = ۲eV = ۲\times ۱/۶\times ۱۰^{-۱۹} J = ۳/۲\times ۱۰^{-۱۹} J$$

از طرفی می‌دانیم که یک لامپ ۱۰۰ واتی در هر ثانیه ۱۰۰ ژول انرژی تابش می‌کند. بنابراین انرژی تابشی توسط این لامپ در مدت ۱۶ ثانیه برابر $E = P\times t = ۱۰۰\times ۱۶ = ۱۶۰۰J$ می‌باشد. اکنون برای محاسبهٔ تعداد فوتون‌های تابش‌شده می‌توان نوشت:

$n = ?$: تعداد فوتون ، $E = ۳/۲\times ۱۰^{-۱۹} J$: انرژی پایهٔ هر فوتون ، $E_t = ۱۶۰۰J$: کل انرژی تابش‌شده

$$E_t = nE \Rightarrow ۱۶۰۰ = n\times ۳/۲\times ۱۰^{-۱۹} \Rightarrow n = \frac{۱۶۰۰}{۳/۲\times ۱۰^{-۱۹}} = ۵\times ۱۰^{۲۱}$$

۱ ۲۱۰۹ **گام اول:** انرژی گسیل شده از این آنتن را در مدت زمان یک ثانیه به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow ۴/۸\times ۱۰^{۴} = \frac{E_t}{۱} \Rightarrow E_t = ۴/۸\times ۱۰^{۴} J$$

گام دوم: انرژی به دست آمده را برحسب الکترون‌ولت به دست می‌آوریم:

$$E_t = \frac{۴/۸\times ۱۰^{۴}}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}} = ۳\times ۱۰^{۲۳} eV$$

گام سوم: تعداد فوتون‌های گسیل شده را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{E_t}{hf} = \frac{۳\times ۱۰^{۲۳}}{۴\times ۱۰^{-۱۵}\times ۷۵\times ۱۰^{۶}} = ۱۰^{۳۰}$$

۳ ۲۱۱۰ **گام اول:** طبق صورت سؤال توان تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به ازای هر متر مربع $۳۰۰J/s$ است. از آن‌جایی که سطح مقطع استخر $۱۶m^۲$ است، بنابراین توان متوسط $۱۶\times ۳۰۰ = ۴۸۰۰J/s$ می‌شود، به عبارت دیگر به سطح استخر که $۱۶m^۲$ است در هر ثانیه $۴۸۰۰J$، انرژی می‌رسد.

گام دوم: انرژی که در مدت یک دقیقه به سطح استخر می‌رسد را به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow ۴۸۰۰ = \frac{E_t}{۶۰} \Rightarrow E_t = ۴۸\times ۶\times ۱۰^{۳} J$$

گام سوم: تعداد فوتون‌های مورد نظر را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{E_t}{hf} = \frac{E_t}{\frac{hc}{\lambda}} = \frac{E_t\lambda}{hc}$$

دقت کنید که در رابطهٔ بالا hc برحسب $eV.nm$ داده شده. بنابراین باید مقدار E_t را برحسب eV و مقدار λ را برحسب nm جایگذاری کنیم و داریم:

$$n = \frac{E_t\lambda}{hc} = \frac{۴۸\times ۶\times ۱۰^{۳}\times ۶۰۰}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۲۰۰} = ۹\times ۱۰^{۲۳}$$

۱ ۲۱۱۱ **گام اول:** ابتدا با توجه به بازده لامپ، مقدار انرژی نوری ایجاد شده را به دست می‌آوریم:

$$\text{بازده لامپ} = \frac{P_{\text{نوری}}}{P_{\text{کل}}} \Rightarrow \frac{۱۶}{۱۰۰} = \frac{P_{\text{نوری}}}{۱۰۰} \Rightarrow P_{\text{نوری}} = ۱۶W$$

به عبارت دیگر لامپ $۱۶W$ توان مرئی تولید می‌کند.

گام دوم: انرژی که توسط لامپ در مدت ۱ ثانیه منتشر می‌شود را به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow ۱۶ = \frac{E_t}{۱} \Rightarrow E_t = ۱۶J$$

گام سوم: در فاصلهٔ یک کیلومتری از لامپ این انرژی بر سطح کره‌ای به شعاع یک کیلومتر تقسیم می‌شود. در ادامه با یک تناسب ساده قسمتی از این انرژی را که به مردمک چشمان شخص می‌رسد به دست می‌آوریم (برای کوتاه‌تر شدن، اندیس t را نگذاشته‌ایم):

$$\frac{E_{\text{مردمک}}}{E_{\text{کل}}} = \frac{A_{\text{مردمک}}}{A_{\text{کل}}} \Rightarrow \frac{E_{\text{مردمک}}}{۱۶} = \frac{۲\pi r^۲}{۴\pi R^۲}$$

دقت کنید که چون انرژی رسیده به هر دو چشم را می‌خواهیم $A_{\text{مردمک}}$ دو برابر سطح مقطع مردمک هر چشم است و $A_{\text{کل}}$ مساحت کره‌ای به شعاع $۱km$ می‌باشد.

$$\frac{E_{\text{مردمک}}}{۱۶} = \frac{۲\times \pi(۱۰^{-۳})^۲}{۴\times \pi(۱۰^{۳})^۲} \Rightarrow E_{\text{مردمک}} = ۸\times ۱۰^{-۱۲} J$$

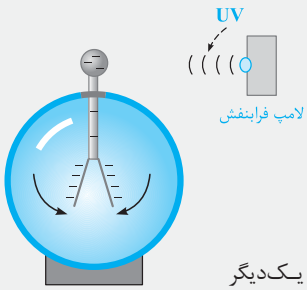
گام چهارم: در ادامه تعداد فوتون‌های مورد نظر را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{E_t}{hf} = \frac{۸\times ۱۰^{-۱۲}}{۴\times ۱۰^{-۱۵}\times ۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۰^{۱۵}} = ۱۲۵\times ۱۰^{۵}$$

۲۱۱۲ برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

خلاصه نکات ۳۰ — فوتوالکتریک (تست‌های ۲۱۱۲ تا ۲۱۶۹)

جدا کردن الکترون از سطح یک فلز به کمک تابش فوتون‌های نور بر سطح آن، **فوتوالکتریک** نام دارد. به طور مثال در شکل مقابل با تاباندن نور بر سطح کلاهک برق‌نما، الکترون از آن جدا می‌شود.



نکات مهم و کاربردی

۱) الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز در آزمایش فوتوالکتریک را **فوتوالکترون** می‌گوییم. فوتوالکترون‌ها دارای بار الکتریکی منفی بوده و در نتیجه در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منحرف می‌شوند.

۲) فوتوالکترون‌ها جزء امواج الکترومغناطیس محسوب نمی‌شوند زیرا دارای بار الکتریکی هستند.

۳) برای جدا کردن الکترون‌ها باید انرژی مصرف کنیم ولی باید دقت کنیم که انرژی لازم برای جدا کردن آن‌ها با یک‌دیگر یکسان نمی‌باشد، زیرا فاصلهٔ الکترون‌ها از سطح فلز با یک‌دیگر متفاوت است و الکترون‌های سطحی‌تر، راحت‌تر جدا می‌شوند.

۴) مطابق شکل بالا اگر به کلاهک برق‌نمایی با بار منفی پرتوهایی با انرژی زیاد مانند فرابنفش بتابد، الکترون‌ها از برق‌نما جدا شده و در نتیجه بار تیغه‌ها کم شده و فاصلهٔ آن‌ها کاهش می‌یابد. اما اگر پرتوی تابیده شده به اندازهٔ کافی انرژی نداشته باشد (مانند نور مرئی) الکترون‌ها از سطح کلاهک جدا نمی‌شوند. در نتیجه تغییری در وضعیت قرارگیری تیغه‌ها مشاهده نمی‌شود.

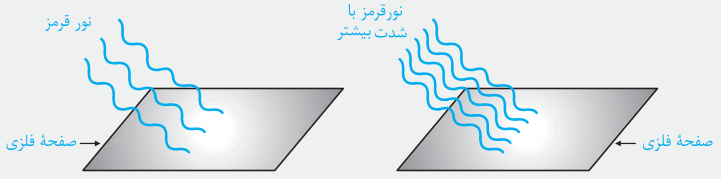
۵) جدا شدن الکترون از سطح فلز، در هر بسامدی رخ نمی‌دهد. برای رخ دادن این موضوع، بسامد هر فوتون باید از بسامدی موسوم به **بسامد آستانه** (f_0) بیشتر باشد (در این حالت فوتون حداقل انرژی لازم برای جدا کردن الکترون را دارد).

۶) متناظر با بسامد آستانه، می‌توان پارامتری به نام **طول موج آستانه** نیز تعریف کرد و داریم:

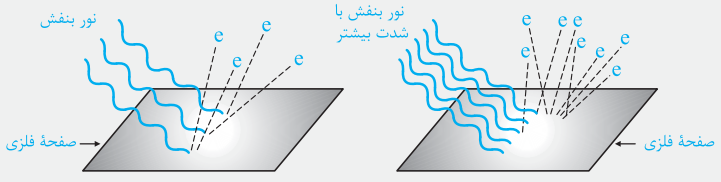
شرط رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک: $f \geq f_0$

$$\begin{cases} f = \frac{c}{\lambda} \\ f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \end{cases} \xrightarrow{\text{شرط رخ دادن فوتوالکتریک}} f \geq f_0 \Rightarrow \frac{c}{\lambda} \geq \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0$$

۷) اگر بسامد نور تابشی کم‌تر از بسامد آستانه باشد، فوتوالکتریک به ازاء هیچ شدت نوری رخ نمی‌دهد.



با نور قرمز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. — با نور قرمز با شدت بیشتر نیز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

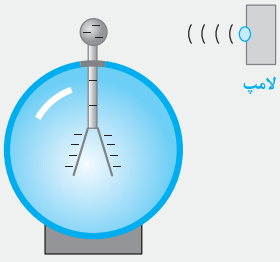


با نور بنفش فوتوالکتریک رخ می‌دهد. — با افزایش شدت نور بنفش، تعداد الکترون‌های جداشده افزایش می‌یابد.

۸) برای نوری که فوتون‌های آن دارای حداقل انرژی لازم برای وقوع پدیدهٔ فوتوالکتریک هستند، افزایش شدت نور (با ثابت ماندن بسامد) فقط سبب افزایش تعداد فوتون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها می‌شود، در حالی که انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها بدون تغییر می‌ماند.

حالا بریم با چندتا سؤال خوب، این مفاهیم رو بهتر درک کنیم ...

تمرین ۱ **مطابق شکل نشان داده شده به کلاهک یک برق‌نما با بار منفی، پرتوهایی تابانده می‌شود. کدام‌یک از گزینه‌های زیر در مورد این شکل درست است؟ (بسامد آستانهٔ فلز کلاهک، در محدودهٔ فرابنفش است.)**



۱) اگر نور مرئی تابانده شود، انحراف ورقه‌ها بیشتر می‌شود.

۲) اگر اشعهٔ ایکس تابانده شود، انحراف ورقه‌ها بیشتر می‌شود.

۳) اگر نور مرئی تابانده شود، انحراف ورقه‌ها کم‌تر می‌شود.

۴) اگر اشعهٔ ایکس تابانده شود، انحراف ورقه‌ها کم‌تر می‌شود.

gajmarket.com

پاسخ هنگامی‌که نور مرئی به کلاهک برق‌نما تابانده می‌شود، چون بسامد آن کم‌تر از بسامد آستانه است، هیچ الکترونی از کلاهک برق‌نما جدا نمی‌شود. بنابراین تغییری در انحراف ورقه‌ها دیده نمی‌شود و گزینه‌های (۱) و (۳) نادرست هستند. اما با تاباندن اشعهٔ ایکس، چون بسامد آن بیشتر از بسامد آستانه بوده و انرژی پرتو به اندازهٔ کافی زیاد است، الکترون‌ها از صفحهٔ فلزی جدا می‌شوند و بار منفی ورقه‌ها کاهش یافته و ورقه‌ها به یک‌دیگر نزدیک‌تر می‌شوند. بنابراین پاسخ گزینهٔ (۴) می‌شود.

تمرین ۲ در تمرین قبل اگر بار اولیهٔ برق‌نما مثبت بود، کدام گزینه درست است؟

۱) اگر نور مرئی تابانده شود، انحراف ورقه‌ها بیشتر می‌شود.
۲) اگر اشعهٔ ایکس تابانده شود، انحراف ورقه‌ها بیشتر می‌شود.
۳) اگر نور مرئی تابانده شود، انحراف ورقه‌ها کم‌تر می‌شود.
۴) اگر اشعهٔ ایکس تابانده شود، انحراف ورقه‌ها کم‌تر می‌شود.

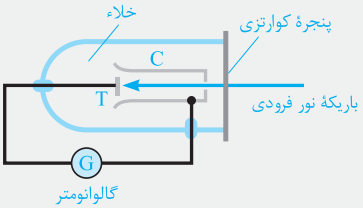
پاسخ همان‌طور که در سؤال قبل مشاهده کردید، هنگام تاباندن نور مرئی تغییر در فاصلهٔ ورقه‌ها به وجود نمی‌آید. اما با تاباندن اشعهٔ ایکس، تعدادی الکترون از کلاهک برق‌نما جدا می‌شوند، در نتیجه بار مثبت کلاهک و ورقه‌ها افزایش یافته و به دنبال آن فاصلهٔ ورقه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه جواب این سؤال گزینهٔ (۲) می‌شود.

تمرین ۳ باریکهٔ نوری به صفحهٔ فلزی هدف تابانده می‌شود، اما فوتوالکترونی از سطح فلز جدا نمی‌شود. کدام‌یک از اقدامات زیر باعث می‌شود که پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ دهد؟

۱) افزایش بسامد باریکهٔ نور
۲) کاهش بسامد باریکهٔ نور
۳) افزایش شدت باریکهٔ نور با ثابت ماندن بسامد
۴) کاهش شدت باریکهٔ نور با ثابت ماندن بسامد

پاسخ همان‌طور که گفتیم اگر بسامد پرتوی فرودی به اندازهٔ کافی زیاد نباشد، فوتون الکترون‌ها از سطح فلز جدا نمی‌شوند و در این حالت افزایش یا کاهش شدت پرتوی فرودی تغییری ایجاد نمی‌کند و برای رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک، باید بسامد پرتوی فرودی را افزایش دهیم و گزینهٔ (۱) صحیح است.

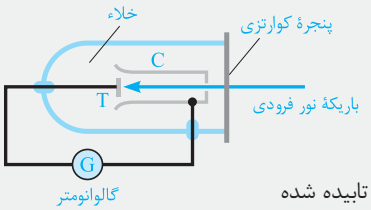
سلول فوتوالکتریک: برای بررسی اثر فوتوالکتریک طرح آزمایش ساده‌ای در شکل مقابل نشان داده شده است. در این دستگاه صفحهٔ فلزی هدف T و جمع‌کنندهٔ فلزی C درون یک محفظهٔ خلأ شیشه‌ای قرار دارند که از بیرون به یک گالوانومتر (آمپرسنج حساس) متصل شده‌اند. نور تک بسامد به صفحهٔ T می‌تابد و فوتو الکترون‌ها را آزاد می‌کند و این فوتوالکترون‌ها به جمع‌کنندهٔ C می‌رسند و در نتیجه گالوانومتر عبور جریان را نشان می‌دهد.



نکات مهم و کاربردی

۱ اگر بسامد تابیده شده به صفحهٔ فلزی T از حد معینی بیشتر باشد، فوتوالکترون‌ها از صفحهٔ فلزی جدا می‌شوند و گالوانومتر عبور جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. در این حالت با افزایش شدت تابش پرتوی فرودی تعداد فوتون الکترون‌ها افزایش یافته و گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد.

۲ اگر بسامد تابیده شده به صفحهٔ فلزی T از حد معینی کم‌تر باشد، فوتوالکترون‌ها از صفحهٔ فلزی جدا نمی‌شوند و در مدار جریان الکتریکی به وجود نمی‌آید و گالوانومتر عدد صفر را نشان می‌دهد. دقت کنید که در این حالت افزایش یا کاهش شدت تابش پرتوی فرودی تغییری در عدد نشان داده شده توسط گالوانومتر ایجاد نمی‌کند.



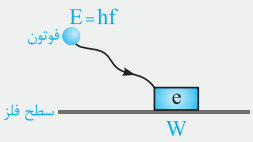
تمرین ۴ مطابق شکل، باریکهٔ نوری به صفحهٔ فلزی هدف تابانده می‌شود اما گالوانومتر جریانی را نشان نمی‌دهد. کدام‌یک از اقدامات زیر باعث می‌شود که گالوانومتر عبور جریان را نشان دهد؟

۱) افزایش بسامد باریکهٔ نور
۲) کاهش بسامد باریکهٔ نور
۳) افزایش شدت باریکهٔ نور تابیده شده
۴) کاهش شدت باریکهٔ نور تابیده شده

پاسخ همان‌طور که گفتیم اگر بسامد پرتوی فرودی به اندازهٔ کافی زیاد نباشد، فوتون الکترون‌ها از سطح فلز جدا نمی‌شوند و در این حالت افزایش یا کاهش شدت پرتوی فرودی تغییری ایجاد نمی‌کند و برای ایجاد جریان، باید بسامد پرتوی فرودی را افزایش دهیم. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بررسی انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های جدا شده

طبق نظریهٔ فوتوالکتریک اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز بر هم کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود که آن را با W نشان می‌دهیم و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج شده تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر داریم:



$$hf = W + K$$

hf: انرژی فوتون

W: انرژی مورد نیاز برای جدا کردن الکترون از فلز

K: انرژی جنبشی باقی‌مانده برای الکترون

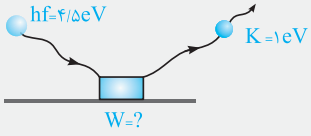
تمرین ۵ **فوتونی با انرژی $۴/۵\,eV$ بر سطح فلزی می‌تابد و فوتوالکترونی با انرژی جنبشی $۱\,eV$ از آن خارج می‌شود. انرژی صرف شده برای جدا کردن این الکترون از سطح فلز چند الکترون‌ولت است؟**

۱) $\frac{۱}{۳}$ ۲) ۱ ۳) ۲/۵ ۴) ۳/۵

پاسخ با توجه به رابطهٔ زیر داریم:

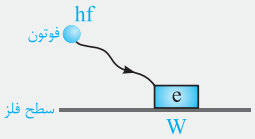
$$\begin{cases} K = ۱\,eV : \text{انرژی جنبشی} \\ hf = ۴/۵\,eV : \text{انرژی فوتون} \\ W = ? \end{cases} \Rightarrow K = hf - W \Rightarrow ۱\,eV = ۴/۵\,eV - W \Rightarrow W = ۳/۵\,eV$$ گزینهٔ (۴)

نگاه مفهومی‌تر: فوتونی با انرژی $۴/۵\,eV$ به سطح فلز برخورد کرده است و فوتوالکترونی با انرژی $۱\,eV$ از سطح فلز جدا شده است. پس چند الکترون‌ولت انرژی صرف جدا شدن الکترون از سطح فلز شده است؟ ⟸ پاسخ: $۴/۵\,eV - ۱\,eV = ۳/۵\,eV$



تحلیل دقیق‌تر اثر فوتوالکتریک

به طور کلی برخی از الکترون‌ها در فلز کم‌تر مقیداند و برای خارج کردن آن‌ها از فلز کار کم‌تری لازم است. در این حالت مقدار کمی از انرژی فوتون صرف جدا شدن الکترون از فلز می‌شود و در نتیجه انرژی جنبشی بیشتری برای الکترون باقی می‌ماند. اگر حداقل کار لازم برای جدا کردن سست‌ترین الکترون از سطح فلز را با $W_۰$ نشان دهیم، این الکترون با بیشترین انرژی جنبشی از سطح فلز جدا می‌شود و داریم:



$$hf = W_۰ + K_{max} \Rightarrow \boxed{K_{max} = hf - W_۰}$$

hf: انرژی فوتون

$W_۰$: کم‌ترین انرژی مورد نیاز برای جدا کردن الکترون از فلز (تابع کار فلز)

K_{max}: بیشترین انرژی جنبشی باقی‌مانده برای الکترون

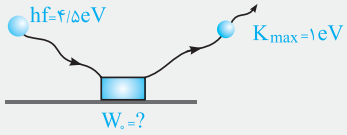
تمرین ۶ **فوتونی با انرژی $۴/۵\,eV$ بر سطح فلزی می‌تابد و فوتوالکترونی با حداکثر انرژی جنبشی $۱\,eV$ خارج می‌شود. در این‌صورت تابع کار فلز چند الکترون‌ولت است؟** (منتخب سراسری قبل از ۸۰)

۱) $\frac{۱}{۳}$ ۲) ۱ ۳) ۲/۵ ۴) ۳/۵

پاسخ با توجه به رابطهٔ مقابل، داریم:

$$\begin{cases} K_{max} = ۱\,eV : \text{حداکثر انرژی جنبشی} \\ hf = ۴/۵\,eV : \text{انرژی فوتون} \\ W_۰ = ? : \text{تابع کار} \end{cases} \Rightarrow K_{max} = hf - W_۰ \Rightarrow ۱\,eV = ۴/۵\,eV - W_۰ \Rightarrow W_۰ = ۳/۵\,eV$$ (گزینهٔ ۴)

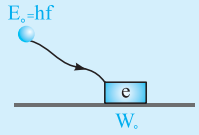
نگاه مفهومی‌تر: فوتونی با انرژی $۴/۵\,eV$ به سطح فلز برخورد کرده است. و فوتوالکترونی با انرژی $۱\,eV$ از سطح فلز جدا شده است. چند الکترون‌ولت انرژی صرف جدا شدن الکترون از سطح فلز شده است؟ ⟸ پاسخ: $۴/۵\,eV - ۱\,eV = ۳/۵\,eV$



روابط مربوط به بسامد آستانه و طول موج آستانه

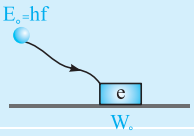
در شکل‌های زیر می‌خواهیم الکترون را از سطح فلز با تابع کار $W_۰$ جدا کنیم، اگر انرژی فوتون را $E_۰ = hf$ در نظر بگیریم، سه حالت زیر رخ می‌دهد:

حالت ۱



$hf < W_۰$: در این حالت فوتون ضعیف بوده و نمی‌تواند الکترون را جدا کند.

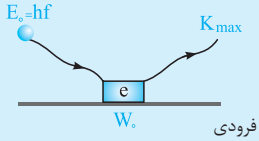
حالت ۲



$hf = W_۰$: در این حالت الکترون در آستانهٔ جدا شدن است.

* این موضوع یعنی اگر بسامد اندکی بیشتر از $W_۰$ باشد الکترون جدا شده و اگر بسامد اندکی کم‌تر از $W_۰$ باشد الکترون جدا نمی‌شود.

حالت ۳



$hf > W_۰$: در این حالت الکترون از سطح فلز جدا می‌شود.

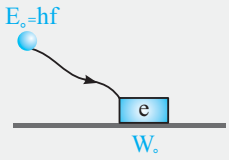
* در این حالت الکترون از سطح فلز جدا می‌شود و انرژی جنبشی آن برابر است با:

$$K_{max} = \underbrace{hf}_{\text{انرژی فوتون فرودی}} - \underbrace{W_۰}_{\text{انرژی که صرف جدا شدن الکترون شده است.}}$$

gajmarket.com

تذکر در حالت ۳، چون W_0 مربوط به سست‌ترین الکترون‌ها می‌باشد، در نتیجه انرژی جنبشی این الکترون‌ها در بین الکترون‌های جداشده، بیشتر از باقی الکترون‌ها می‌باشد، زیرا انرژی کم‌تری برای جدا کردن آن‌ها نیاز بوده و باقی انرژی به صورت انرژی جنبشی ظاهر می‌شود.

رابطهٔ بسامد آستانه: همان‌طور که می‌دانید، بسامد آستانه بسامدی است که برای بسامدهای کم‌تر از آن، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. در این بسامد، الکترون در آستانهٔ جدا شدن از سطح فلز است و انرژی فوتون با تابع کار فلز برابر است.



بسامد آستانه: $hf_0 = W_0 \Rightarrow \boxed{f_0 = \frac{W_0}{h}}$

رابطهٔ طول موج آستانه: طول موج متناظر با بسامد آستانه را طول موج آستانه می‌نامند و رابطهٔ مربوط به آن برابر است با:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \xrightarrow{f_0 = \frac{W_0}{h}} \Rightarrow \boxed{\lambda_0 = \frac{hc}{W_0}}$$

توجه به بسامد آستانه و طول موج آستانه، به ترتیب بسامد قطع و طول موج قطع نیز گفته می‌شود.

شرط رخ دادن فوتوالکتریک:

بسامد از بسامد آستانه بیشتر باشد: $f > f_0$

طول موج از طول موج آستانه کم‌تر باشد: $f > f_0 \rightarrow \frac{c}{\lambda} > \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda < \lambda_0$

نتیجه به طور کلی هر چه بسامد فوتون شلیک شده بیشتر باشد (انرژی فوتون شلیک شده نیز در این حالت بیشتر است) و تابع کار فلز کم‌تر باشد، (الکترون راحت‌تر جدا شود) احتمال رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک بیشتر است.

تمرین ۷ **کدام عبارت در مورد پدیدهٔ فوتوالکتریک صحیح نیست؟** (تألیفی)

۱) در صورتی‌که انرژی فوتون‌های فرودی بر سطح فلز کم‌تر از تابع کار فلز باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

۲) در صورتی‌که بسامد نور تابشی از بسامد آستانهٔ فلز کم‌تر باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

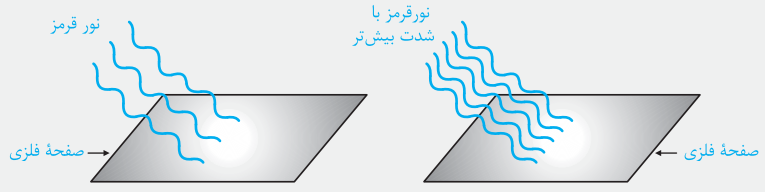
۳) در صورتی‌که طول موج نور تابشی از طول موج آستانهٔ فلز کم‌تر باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

۴) تعداد فوتون‌های تابشی، در رخ دادن یا ندادن پدیدهٔ فوتوالکتریک بی‌تأثیر است.

پاسخ برای پاسخ به این سؤال، به نکات زیر توجه کنید:

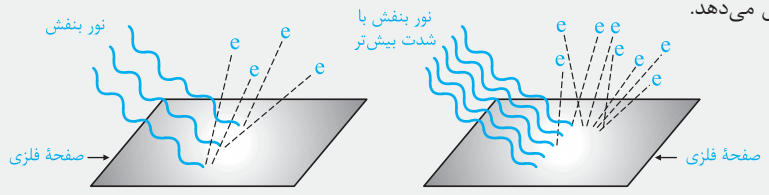
۱) پدیدهٔ فوتوالکتریک هنگامی رخ می‌دهد که انرژی فوتون‌های فرودی بر فلز بیشتر از تابع کار فلز باشد، به عبارت دیگر باید بسامد نور تابشی از بسامد آستانهٔ فلز بیشتر و طول موج تابشی از طول موج آستانهٔ فلز کم‌تر باشد. بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ این تمرین است.

۲) تعداد فوتون‌های تابشی در رخ دادن و یا ندادن پدیدهٔ فوتوالکتریک بی‌تأثیر است، رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک به انرژی هر فوتون بستگی دارد، یعنی اگر برای یک نور مشخص مانند قرمز، فوتوالکتریک رخ ندهد، با افزایش شدت همین نور قرمز نیز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.



با نور قرمز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. — با نور قرمز با شدت بیشتر نیز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

۳) اگر با تاباندن پرتوهایی به سطح یک فلز پدیدهٔ فوتوالکتریک روی دهد، افزایش تعداد فوتون‌های تابشی با افزایش شدت نور، تعداد الکترون‌های جدا شده از سطح جسم را افزایش می‌دهد.



با نور بنفش فوتوالکتریک رخ می‌دهد. — با افزایش شدت نور بنفش، تعداد الکترون‌های جدا شده افزایش می‌یابد.

تمرین ۸ **طول موج قطع در یک آزمایش فوتوالکتریک، ۰/۵ میکرون است. اگر بر فلز آن، نور تک‌رنگی با بسامد $5\times10^{14}\ Hz$ بتابانیم، تابع کار فلز چند ژول است و آیا با این نور پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ می‌دهد یا خیر؟ $(h=6/6\times10^{-34}\ J.s \text{ و } c=3\times10^{8}\ m/s)$** (ریاضی داخل ۹۱)

۱) $3/96\times10^{-19}$ و رخ می‌دهد. ۲) $3/3\times10^{-19}$ و رخ می‌دهد. ۳) $3/96\times10^{-19}$ و رخ نمی‌دهد. ۴) $3/3\times10^{-19}$ و رخ نمی‌دهد.

پاسخ برای پاسخ دادن به این سؤال، گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

گام اول: برای محاسبهٔ تابع کار این فلز داریم:

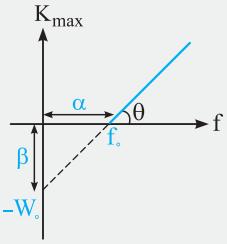
$$f_\circ=\frac{W_\circ}{h}\Rightarrow W_\circ=hf_\circ=\frac{hc}{\lambda_\circ}=\frac{6/6\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{0/5\times10^{-6}}\Rightarrow W_\circ=3/96\times10^{-19}\,J$$

گام دوم: محاسبهٔ انرژی فوتون فرودی بر فلز:

$$\text{انرژی هر فوتون}=hf=6/6\times10^{-34}\times5\times10^{14}=33\times10^{-20}\,J=3/3\times10^{-19}\,J$$

با توجه به این‌که انرژی هر فوتون از $W_\circ$ کم‌تر است، بنابراین اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است

نمودار K_{max} برحسب f



با توجه به رابطهٔ $K_{max}=hf-W_\circ$، نمودار بیشینهٔ انرژی جنبشی بر حسب بسامد در SI به صورت شکل مقابل است:

نکات مهم و کاربردی

۱ محل برخورد نمودار با محور افقی (طول از مبدأ) بسامد آستانه $(\alpha=f_\circ=\frac{W_\circ}{h})$ را نشان می‌دهد.

۲ محل برخورد نمودار با محور قائم (عرض از مبدأ) $\beta=-W_\circ$ را نشان می‌دهد.

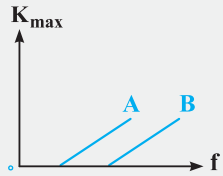
۳ شیب این نمودار برابر است با:

$$\text{شیب نمودار}=\tan\theta=h\Rightarrow K_{max}=hf-W_\circ$$

۴ مقدار شیب این نمودار، یک عدد ثابت بوده و برای انواع فلزها یکسان است.

تو تمرین بعد، یه کم روی نمودار مسلط‌تر می‌شیم ...

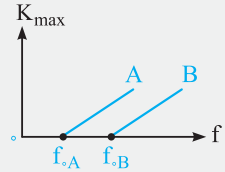
تمرین ۹ **در پدیدهٔ فوتوالکتریک، نمودار بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد پرتوی نور فرودی برای دو فلز A و B مطابق شکل است. فلز A در مقایسه با B دارای تابع‌کار ..... و طول موج آستانهٔ ..... است.** (تجربی خارج ۸۶)



۱) کم‌تر ـ بیشتر ۲) بیشتر ـ کم‌تر

۳) کم‌تر ـ کم‌تر ۴) بیشتر ـ بیشتر

پاسخ با توجه به این‌که محل قطع نمودار $K_{max}-f$ با افق، معادل بسامد آستانه می‌باشد و بسامد آستانه نیز برابر $f_\circ=\frac{W_\circ}{h}$ است، می‌توان گفت:



$$\Rightarrow f_{\circ A}<f_{\circ B}\xrightarrow{f_\circ=\frac{W_\circ}{h}}\frac{W_{\circ A}}{h}<\frac{W_{\circ B}}{h}\Rightarrow W_{\circ A}<W_{\circ B}$$

در ادامه با توجه به رابطهٔ $\lambda_\circ=\frac{hc}{W_\circ}$، چون طول موج آستانه و تابع کار با هم رابطهٔ عکس دارند، داریم:

$$W_{\circ A}<W_{\circ B}\Rightarrow\lambda_{\circ A}>\lambda_{\circ B}$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

نارسایی فیزیک کلاسیک در توجیه اثر فوتوالکتریک

طبق نظریهٔ الکترومغناطیس کلاسیک نور یک موج الکترومغناطیس است و هنگامی‌که با سطح فلز برخورد می‌کند، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F}=-e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد می‌کند و آن‌ها را به نوسان وامی‌دارد. به این ترتیب هنگامی‌که دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود، انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد، در حالی‌که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

از طرفی، یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که، شدت نور با مربع دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است $(I\propto E^2)$. به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

gajmarket.com

با توجه به خلاصه نکات ارائه‌شده، با تاباندن پرتوی فرابنفش بر سطح فلز برق‌نما، تعداد قابل توجهی الکترون از صفحه جدا خواهد شد. این پدیده را **فوتوالکتریک** و الکترون‌های جدا شده از سطح را **فوتوالکترون** می‌نامند. از آنجا که بار اولیهٔ برق‌نما منفی است، جدا شدن الکترون‌ها از کلاهک، باعث تخلیهٔ الکتریکی آن می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده گزینهٔ (۴) صحیح است.

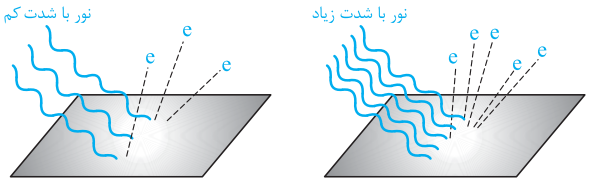
۲۱۱۳ **۱** در پدیدهٔ فوتوالکتریک، فوتوالکترون‌ها دارای بار منفی‌اند، بنابراین در صورت حرکت در یک میدان مغناطیسی می‌توانند منحرف شوند و گزینهٔ (۱) صحیح است. دقت شود که فوتوالکترون‌ها از جنس امواج الکترومغناطیس محسوب نمی‌شوند، زیرا دارای بار الکتریکی هستند.

۲۱۱۴ **۲** با توجه به خلاصه نکات ارائه‌شده، بسامد آستانه بسامدی است که به ازاء بسامدهای بیشتر از آن، الکترون از سطح فلز جدا می‌شود و فوتوالکتریک رخ می‌دهد.

۲۱۱۵ **۴** با توجه به تمرین (۱) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۴) صحیح است.

۲۱۱۶ **۲** با توجه به تمرین (۲) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۲) صحیح است.

۲۱۱۷ **۱** همانطور که در شکل زیر نیز مشاهده می‌کنید، هنگامی که شدت نور با کوانتوم انرژی ثابت (یعنی بسامد ثابت) را بیشتر می‌کنیم، تعداد فوتون‌های نور تابشی بیشتر شده و در نتیجه تعداد الکترون‌های جدا شده از سطح فلز نیز بیشتر می‌شود.

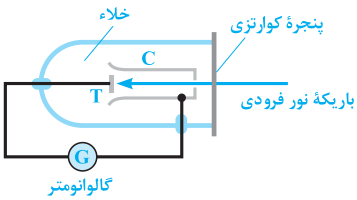


۲۱۱۸ **۳** با توجه به خلاصه نکات ارائه‌شده، انرژی جنبشی و تندی فوتوالکترون‌ها با افزایش شدت نور تابشی (با ثابت بودن بسامد) تغییر نمی‌کند.

۲۱۱۹ **۳** همان‌طور که در خلاصه نکات ارائه‌شده مطالعه کردید، در بسامدهای کم‌تر از بسامد آستانه پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و افزایش و کاهش شدت پرتوهای تابیده شده در این حالت اثری ندارد. بنابراین گزینه‌های (۱) و (۲) نادرست هستند.

اما در بسامدهای بیشتر از بسامد آستانه که پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ می‌دهد، افزایش شدت پرتوهای تابیده شده باعث افزایش تعداد فوتون‌های تابشی و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها می‌شود.

۲۱۲۰ **۳** کاربرد رایج سلول فوتوالکتریک که در شکل مقابل نشان داده شده است، تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی است. با تابش نور بر سطح الکترود، جریان الکتریکی مورد نیاز مصرف کنندهٔ الکتریکی تأمین می‌شود.



۲۱۲۱ **۱** با توجه به تمرین (۴) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۱) صحیح است.

۲۱۲۲ **۳** هنگامی‌که بسامد پرتوی فرودی به اندازهٔ کافی زیاد باشد، فوتوالکترون‌ها از سطح فلز جدا می‌شوند. در این حالت افزایش شدت پرتوهای تابیده شده باعث افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها شده و باعث افزایش جریان نشان داده شده توسط گالوانومتر می‌شود.

۲۱۲۳ **۲** بسامد موج مورد آزمایش ثابت است، چون طول موج آن ثابت است. بنابراین با افزایش شدت همین نور، تعداد الکترون‌های جدا شده از سطح افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با توجه به خلاصه نکات ارائه‌شده، تندی فوتوالکترون‌ها تغییر نمی‌کند.

۲۱۲۴ **۳** طبق نظریهٔ الکترومغناطیس کلاسیک، نور یک موج الکترومغناطیس است و هنگام برخورد آن با سطح فلز، میدان الکتریکی موج مورد نظر می‌تواند باعث جدا شدن الکترون‌ها از سطح فلز شود و در هر بسامدی این پدیده می‌تواند رخ دهد. بنابراین عبارت (الف) توسط فیزیک کلاسیک توجیه می‌شود و عبارت (ب) توجیه نمی‌شود.

از طرف دیگر طبق نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول شدت نور با مربع دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است. به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی به سطح فلز را افزایش دهیم الکترون‌ها با انرژی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند. بنابراین عبارت (ج) نیز توجیه نمی‌شود.

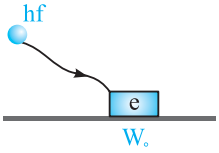
۲۱۲۵ **۴** طبق نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول داریم:

$$I \propto E^2 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2 \xrightarrow{E_2 = 2E_1} \frac{I_2}{I_1} = 4$$

۲۱۲۶ **۳** با توجه به رابطهٔ $K_{max} = hf - W_0$، تابع کار برابر تفاضل بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون و انرژی فوتون فرودی است.

$$W_0 = hf - K_{max}$$

۲۱۲۷ **۱** **بسامد آستانه:** کم‌ترین بسامد مورد نیاز برای یک پرتو تا این پرتو بتواند الکترون را در آستانهٔ جدا شدن از فلز قرار دهد، بسامد آستانه نام دارد. در این حالت انرژی فوتون دقیقاً برابر تابع کار است و داریم:



در آستانهٔ جدا شدن: $hf = W_0 \Rightarrow f = \frac{W_0}{h} \xrightarrow{\text{بسامد آستانه}} f_0 = \frac{W_0}{h}$

طول موج آستانه: طول موج متناظر با بسامد آستانه را طول موج آستانه می‌نامیم و مقدار آن برابر است با:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \xrightarrow{f_0 = \frac{W_0}{h}} \frac{W_0}{h} = \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W_0}$$

۲ ۲۱۲۸ تابع کار یک فلز، حداقل انرژی مورد نیاز جهت جدا کردن سست‌ترین الکترون از سطح آن است و بسامد آستانه، حداقل بسامدی است که یک فوتون می‌تواند با آن بسامد، سست‌ترین الکترون را در آستانهٔ جداشدن از فلز قرار دهد. بنابراین داریم:

$W_{\circ} = 6eV \ , \ h = 4 \times 10^{-15} eV.s$

بسامد آستانه: $f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} = \frac{6}{4 \times 10^{-15}} = 1/5 \times 10^{15} Hz$

۲ ۲۱۲۹ با توجه به رابطهٔ مقابل داریم:

$W_{\circ} = hf_{\circ} \Rightarrow f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} = \frac{2/5}{4 \times 10^{-15}} = \frac{1}{16} \times 10^{16} Hz = 625THz$

۲ ۲۱۳۰ به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases} f_{\circ A} = 5 \times 10^{14} Hz \Rightarrow \lambda_{\circ A} = \frac{c}{f_{\circ A}} = \frac{3 \times 10^{8}}{5 \times 10^{14}} = 0/6 \times 10^{-6} m = 600nm \\ f_{\circ B} = 2f_{\circ A} = 10^{15} Hz \Rightarrow \lambda_{\circ B} = \frac{c}{f_{\circ B}} = \frac{3 \times 10^{8}}{10^{15}} = 3 \times 10^{-7} m = 300nm \end{cases} \Rightarrow \lambda_{\circ A} - \lambda_{\circ B} = 300nm$$

۳ ۲۱۳۱ کم‌ترین بسامدی که سبب رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک می‌شود، همان بسامد آستانه است و داریم:

$f_{\circ} = \frac{c}{\lambda_{\circ}} \Rightarrow f_{\circ} = \frac{3 \times 10^{8}}{100 \times 10^{-9} m} = 3 \times 10^{15} Hz = 3 \times 10^{6} GHz$

۱ ۲۱۳۲ همان‌طور که می‌دانیم، بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح فلز، برابر $hf - W_{\circ}$ است. حال اگر $hf = W_{\circ}$ باشد، الکترون در آستانهٔ جدا شدن از سطح فلز قرار می‌گیرد، بدین معنا که اگر hf مقداری جزئی از $W_{\circ}$ بیشتر شود، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ می‌دهد و اگر hf مقداری جزئی کوچک‌تر از $W_{\circ}$ شود، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. بنابراین گزینهٔ (۱) نادرست است.

۳ ۲۱۳۳ با توجه به تمرین (۷) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۳) صحیح است.

۳ ۲۱۳۴ برای افزایش احتمال رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک، می‌توان از دو روش زیر استفاده کرد:

۱) می‌توان از فلز الکترون‌دهنده‌تر استفاده کرد، بدین معنا که تابع کار فلز کم‌تر باشد و به عبارت بهتر، فوتون راحت‌تر الکترون را جدا کند.

۲) می‌توان از پرتوی فرودی قوی‌تر استفاده کرد، بدین معنا که بسامد پرتوی فرودی (انرژی هر یک از فوتون‌های فرودی) بیشتر باشد.

شرط رخ دادن فوتوالکتریک: $hf > W_{\circ}$ ← برای اطمینان بیشتر از برقراری نامساوی ← $f \uparrow$ و $W_{\circ} \downarrow$

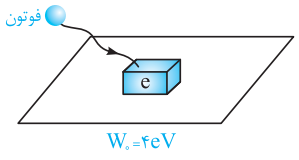
تذکر

افزایش بسامد نور مورد آزمایش، معادل است با کم کردن طول موج نور مورد آزمایش. بنابراین با کم کردن طول موج نور مورد آزمایش نیز احتمال رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک افزایش می‌یابد.

۳ ۲۱۳۵ به نامساوی‌های مقابل توجه کنید:

شرط رخ دادن فوتوالکتریک: $f > f_{\circ} \rightarrow \frac{c}{\lambda} > \frac{c}{\lambda_{\circ}} \Rightarrow \lambda < \lambda_{\circ}$

بنابراین فوتوالکتریک برای طول موج‌های کم‌تر از طول موج آستانه رخ می‌دهد، این موضوع یعنی بلندترین طول موجی که فوتوالکتریک در آن رخ می‌دهد، همان طول موج آستانه است:



تابع کار: $W_{\circ} = 4eV \ , \ h = 4 \times 10^{-15} eV.s \ , \ c = 3 \times 10^{8} m/s$

$\lambda_{\circ} = \frac{hc}{W_{\circ}} = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^{8}}{4} = 3 \times 10^{-7} m = 300nm$

۴ ۲۱۳۶ طول موج آستانه را برای این سه فلز به دست می‌آوریم، اگر $\lambda = 600nm$، از طول موج آستانه هر کدام از این سه فلز کم‌تر باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک برای آن فلز رخ می‌دهد:

$$\begin{cases} A \text{ فلز}: \lambda_{\circ} = \frac{hc}{W_{\circ}} \Rightarrow \lambda_{\circ} = \frac{3 \times 10^{8} \times 4/14 \times 10^{-15}}{2/26} \simeq 549nm < 600nm \\ B \text{ فلز}: \lambda_{\circ} = \frac{hc}{W_{\circ}} \Rightarrow \lambda_{\circ} = \frac{3 \times 10^{8} \times 4/14 \times 10^{-15}}{4/24} \simeq 292nm < 600nm \\ C \text{ فلز}: \lambda_{\circ} = \frac{hc}{W_{\circ}} \Rightarrow \lambda_{\circ} = \frac{3 \times 10^{8} \times 4/14 \times 10^{-15}}{4/37} \simeq 284nm < 600nm \end{cases}$$

همان‌گونه که مشاهده می‌کنید طول موج $600nm$، از طول موج آستانه هر سه فلز بزرگ‌تر است، یعنی با طول موج $600nm$ برای هیچ‌یک از ۳ فلز پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

gajmarket.com

یه جور دیگه فکر کنیم: ابتدا انرژی فوتون فرودی با طول موج $\lambda = ۶۰۰\,nm$ را به‌دست می‌آوریم، هر کدام از سه فلز که تابع کارش کم‌تر از انرژی فوتون فرودی باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک در آن رخ می‌دهد:

$$E_۰ = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^{۸}}{۶ \times ۱۰^{-۷}} = ۲/۰۷\,eV$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید تابع کار هر سه فلز بیشتر از انرژی فوتون فرودی است و در هیچ‌یک از سه فلز فوتوالکترون از سطح گسیل نمی‌شود.

۳ ۲۱۳۷ با توجه به تمرین (۸)، در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۳) صحیح است.

۲ ۲۱۳۸ همان‌طور که در سؤال‌های قبل نیز بیان کردیم، برای افزایش احتمال رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک، استفاده از فوتون‌های قوی‌تر (افزایش بسامد یا کاهش طول موج) و استفاده از فلز با تابع کار کم‌تر، روش‌های مؤثری است و در نتیجه گزینهٔ (۲) صحیح است. دقت شود که افزایش تعداد فوتون‌های فرودی با افزایش شدت نور و هم‌چنین افزایش زمان تابش نور، در رخ دادن یا ندادن پدیدهٔ فوتوالکتریک مؤثر نمی‌باشند.

از طرفی طول موج نور زرد بزرگ‌تر از طول موج نور سبز می‌باشد، بنابراین با نور زرد نیز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

۴ ۲۱۳۹ بسامد آستانهٔ این فلز $(f_۰)$، ۱۰ درصد کم‌تر از بسامد نور بنفش است، یعنی اگر بسامد نور بنفش را x در نظر بگیریم، بسامد آستانهٔ فلز برابر $۰/۹x$ است. حال اگر این عمل را با نور قرمز انجام دهیم، خواهیم داشت:

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{f_{\text{قرمز}}}{f_{\text{بنفش}}} = \frac{\lambda_{\text{بنفش}}}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{۰/۴}{۰/۷} = \frac{۴}{۷} \Rightarrow f_{\text{قرمز}} = \frac{۴}{۷} f_{\text{بنفش}} = \frac{۴}{۷} x < ۰/۹x$$

از آن‌جایی که بسامد نور فرودی در حالتی که از نور قرمز استفاده شده است از بسامد آستانهٔ فلز کم‌تر است، پدیدهٔ فوتوالکتریک برای نور قرمز رخ نمی‌دهد.

۳ ۲۱۴۰ برای پاسخ به این سؤال، با توجه به این‌که در ابتدا فوتوالکتریک رخ نداده است، به نکات زیر توجه کنید:

۱) اگر بسامد فوتون‌های تابشی بر سطح فلز را نصف کنیم، باز هم پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

در حالت اول: $f_۱ < f_۰$ $\xrightarrow{\text{بسامد نصف شود}}$ در حالت دوم: $f_۲ = \frac{۱}{۲} f_۱ < f_۰$ (باز هم فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.)

۲) بسامد آستانه از ویژگی‌های فلز است و به بسامد نور فرودی بستگی ندارد.

با توجه به نکات فوق، گزینهٔ (۳) صحیح است.

۴ ۲۱۴۱ همانطور که قبلاً بیان شد، با افزایش بسامد یا کاهش طول موج و همچنین با کاهش تابع کار، احتمال وقوع پدیدهٔ فوتوالکتریک افزایش می‌یابد.

در ادامه به بررسی گزینه‌ها می‌پردازیم:

۱) در این گزینه، طول موج و تابع کار هر دو افزایش یافته‌اند، بنابراین این گزینه صحیح نیست، زیرا هیچ‌کدام از عوامل دلخواه ما را دارا نمی‌باشد.

۲) در این گزینه تابع کار کاهش، ولی طول موج افزایش یافته است، پس در این گزینه لزوماً فوتوالکترون گسیل نمی‌شود، زیرا تنها دارای یکی از عوامل دلخواه ما است. توجه شود که بسته به میزان تغییرات $W_۰$ و λ، امکان وقوع پدیدهٔ فوتوالکتریک در این حالت وجود دارد ولی چون در صورت مسأله، قید لزوماً ذکر شده است، پس این گزینه نمی‌تواند صحیح باشد.

۳) در این گزینه با ثابت ماندن طول موج، تابع کار افزایش یافته است، بنابراین ممکن است دیگر پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ ندهد.

۴) در این گزینه، طول موج و تابع کار هر دو کاهش یافته است، یعنی هر دو عامل دلخواه ما موجود است، پس با توجه به این‌که در حالت اول فوتوالکتریک رخ داده است، در این گزینه نیز لزوماً الکترون گسیل می‌شود.

۱ ۲۱۴۲ با توجه به رابطهٔ $K_{max} = hf - W_۰$ مشخص می‌شود که بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به بسامد نور تابشی و $W_۰$ (جنس فلز) بستگی دارد.

۱ ۲۱۴۳ با توجه به رابطهٔ $K_{max} = hf - W_۰$، بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به بسامد و تابع کار فلز بستگی داشته و تابع کار فلز نیز به جنس فلز بستگی دارد و مستقل از شدت نور تابشی می‌باشد. بنابراین با افزایش شدت تابش نور، K_{max} و $W_۰$ هر دو ثابت می‌مانند.

۳ ۲۱۴۴ در بسامدهای کم‌تر از بسامد آستانه پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و افزایش و کاهش شدت پرتوهای تابیده شده در این حالت اثری ندارد. بنابراین گزینه‌های (۱) و (۲) نادرست هستند.

۴ ۲۱۴۵ با توجه به تمرین (۶) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۴) صحیح است.

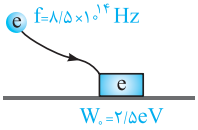
۲ ۲۱۴۶ **گام اول:** ابتدا انرژی هر یک از فوتون‌هایی که به سطح فلز برخورد می‌کنند را به دست می‌آوریم:

$$hf = W + K \Rightarrow hf = ۷ + ۶ = ۱۳\,eV$$

گام دوم: در حالت دوم فوتونی با این انرژی به الکترونی برخورد می‌کند و $۵\,eV$ از انرژی فوتون صرف جدا شدن الکترون از فلز می‌شود. بنابراین انرژی جنبشی باقی‌مانده برای الکترون برابر است با:

$$K = hf - W = ۱۳ - ۵ = ۸\,eV$$

۲۱۴۷ **۱** با توجه به شکل زیر، اگر پرتویی با بسامد $8/5\times10^{14}\,Hz$ به فلزی با تابع کار $2/5\,eV$ بتابد، فوتوالکترون‌هایی از سطح فلز جدا می‌شود که بیشینهٔ انرژی جنبشی آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$f=8/5\times10^{14}\,Hz\ ,\ W_0=2/5\,eV\ ,\ h=4\times10^{-15}\,eV.s\ ,\ K_{max}=?$$

$$K_{max}=hf-W_0\Rightarrow K_{max}=4\times10^{-15}\times8/5\times10^{14}-2/5=0/9\,eV$$

۲۱۴۸ **۴** کافیست بتوانیم رابطهٔ K_{max} را به شکل زیر بازنویسی کنیم:

$$K_{max}=hf-W_0=hf-hf_0=hc\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right)=(4\times10^{-15}\times3\times10^{8})\left(\frac{1}{0/1\times10^{-6}}-\frac{1}{0/2\times10^{-6}}\right)=6\,eV$$

۲۱۴۹ **۱** **گام اول:** انرژی فوتون فرودی را به دست می‌آوریم:

$$E=hf=\frac{hc}{\lambda}=\frac{4\times10^{-15}\times3\times10^{8}}{200\times10^{-9}}=6\,eV$$

گام دوم: بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیلی را به دست می‌آوریم:

$$K_{max}=hf-W_0=6-4/2=1/8\,eV$$

گام سوم: K_{max} را برحسب ژول به دست می‌آوریم:

$$K_{max}=1/8\times1/6\times10^{-19}\,J$$

گام چهارم: بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های خارج شده از فلز را به دست می‌آوریم:

$$K_{max}=\frac{1}{2}mv_{max}^2\Rightarrow1/8\times1/6\times10^{-19}=\frac{1}{2}(9\times10^{-31})v^2\Rightarrow v=8\times10^{5}\,m/s$$

۲۱۵۰ **۲** **گام اول:** ابتدا بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها را به دست می‌آوریم:

$$K_{max}=\frac{1}{2}mv_{max}^2=\frac{1}{2}(10^{-30})(4\times10^{5})^2=8\times10^{-20}\,J=\frac{8\times10^{-20}}{1/6\times10^{-19}}\,eV=0/5\,eV$$

گام دوم: انرژی فوتون مورد نظر را به دست می‌آوریم:

$$E=hf=\frac{hc}{\lambda}=\frac{4\times10^{-15}\times3\times10^{8}}{400\times10^{-9}}=3\,eV$$

گام سوم: تابع کار فلز را به دست می‌آوریم:

$$hf=W_0+K_{max}\Rightarrow W_0=hf-K_{max}=3-0/5=2/5\,eV$$

گام چهارم: بسامد آستانه را به دست می‌آوریم:

$$f_0=\frac{W_0}{h}=\frac{2/5}{4\times10^{-15}}=\frac{5}{8}\times10^{15}\,Hz$$

۲۱۵۱ **۱**

$$\begin{cases}\text{تابع کار فلز}: W_0=2eV\xrightarrow{W_0=hf_0}hf_0=2eV\\ \text{انرژی پرتوی فرودی}: hf\xrightarrow{f=4f_0}hf=4hf_0=4\times2=8eV\end{cases}$$

حال با توجه به رابطهٔ $K_{max}=hf-W_0$، می‌توان نوشت:

$$K_{max}=hf-W_0\Rightarrow K_{max}=8-2=6\,eV=6\times1/6\times10^{-19}\,J=9/6\times10^{-19}\,J$$

۲۱۵۲ **۲** مشابه با تست قبل داریم:

$$K_{max}=hf-W_0=hf-hf_0$$

$$\begin{cases}\text{حالت ۱}: K_{max}=h\times f_1-hf_0 & (1)\\ \text{حالت ۲}: 3K_{max}=h\times2f_1-hf_0 & (2)\end{cases}$$

$$\frac{(2)}{(1)}\Rightarrow3=\frac{2f_1-f_0}{f_1-f_0}\Rightarrow f_0=\frac{1}{2}f_1$$

۲۱۵۳ **۱** با استفاده از رابطهٔ $K_{max}=hf-W_0$ می‌توان نوشت:

$$K_2=4K_1\Rightarrow hf_2-W_0=4(hf_1-W_0)\Rightarrow hf_2-W_0=4hf_1-4W_0\Rightarrow hf_2=4hf_1-3W_0\Rightarrow f_2=4f_1-\underbrace{\frac{3W_0}{h}}_{\text{ثابت}}$$

همان‌گونه که می‌بینید، بسامد در حالت دوم باید مقداری کم‌تر از ۴ برابر شده باشد $(f_2<4f_1)$.

البته دقت کنیم که برای افزایش بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها، باید بسامد نور تابیده شده را افزایش دهیم.

$$f_2>f_1\Rightarrow\overbrace{\frac{f_2}{f_1}}^{k}>1\Rightarrow k>1$$

بنابراین $1<k<4$ می‌باشد.

یادداشت ریاضی:

$c=a-b\xrightarrow{\text{a چهار برابر شود.}}$ c بیش از چهار برابر می‌شود.

$c=a-b\xrightarrow[\text{برابر شود.}]{\text{اگر بخواهیم c چهار}}$ a باید کم‌تر از چهار برابر شود.

gajmarket.com

۲۱۵۴ ۳ **گام اول:** ابتدا به کمک نسبت بیشینهٔ تندی فوتوالکترون‌های گسیل شده، نسبت انرژی جنبشی آن‌ها را به دست می‌آوریم:

$$K_{max}=\frac{1}{2}mv_{max}^2 \Rightarrow \frac{K_2}{K_1}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 \xrightarrow{v_2=4v_1} \frac{K_2}{K_1}=\left(\frac{4v_1}{v_1}\right)^2=16$$

گام دوم: حالا با توجه به سؤال قبل داریم:

$$K_{max}=hf-W_0 \xrightarrow[\text{۱۶برابر شود}]{\text{اگر بخواهیم } K_{max}} hf \text{ باید کم‌تر از ۱۶برابر شود} \Rightarrow 1<k<16$$

۲۱۵۵ ۲ **گام اول:** طبق رابطهٔ $\lambda=\frac{c}{f}$، چون c ثابت است، با دو برابر شدن طول موج پرتو فرودی بسامد آن نصف می‌شود. بنابراین داریم:

$$hf=W_0+K_{max} \Rightarrow \begin{cases} (1)\text{حالت}: hf=W_0+(8\times10^{-19}) \\ (2)\text{حالت}: h\frac{f}{2}=W_0+(1/6\times10^{-19}) \end{cases}$$

گام دوم: در عبارت به دست آمده در حالت (۲) مقدار hf را از حالت (۱) جای‌گذاری می‌کنیم و داریم:

$$\frac{W_0+(8\times10^{-19})}{2}=W_0+(1/6\times10^{-19}) \Rightarrow W_0+(8\times10^{-19})=2W_0+(3/2\times10^{-19}) \Rightarrow W_0=4/8\times10^{-19}J=\frac{4/8\times10^{-19}}{1/6\times10^{-19}}eV=3eV$$

۲۱۵۶ ۲ **گام اول:** تابع کار فلز را به دست می‌آوریم:

$$W_0=hf_1-K_{max_1}=\frac{hc}{\lambda_1}-K_{max_1}=\frac{4\times10^{-15}\times3\times10^8}{300\times10^{-9}}-0/5=3/5eV$$

گام دوم: طول موج نور فرودی را در حالت دوم به دست می‌آوریم:

$$hf_2=K_{max_2}+W_0=1/5+3/5=5eV \Rightarrow 4\times10^{-15}f_2=5 \Rightarrow f_2=\frac{5}{4}\times10^{15}Hz$$

$$\lambda_2=\frac{c}{f_2}=\frac{3\times10^8}{\frac{5}{4}\times10^{15}}=\frac{12}{5}\times10^{-7}m=\frac{1200}{5}nm=240nm$$

گام سوم: طول موج نور فرودی در حالت اول ۳۰۰nm و در حالت دوم ۲۴۰nm است و به اندازهٔ ۶۰nm کاهش یافته است.

۲۱۵۷ ۲ **گام اول:** بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل شده از فلز A را به دست می‌آوریم:

$$(K_{max})_A=hf-W_{0A}=\frac{hc}{\lambda}-W_{0A}=\frac{4\times10^{-15}\times3\times10^8}{200\times10^{-9}}-4=2eV$$

گام دوم: مراحل طی شده در گام قبل را برای فلز B تکرار می‌کنیم:

$$(K_{max})_B=hf=W_{0B}=\frac{hc}{\lambda}-W_{0B}=\frac{4\times10^{-15}\times3\times10^8}{200\times10^{-9}}-2=4eV$$

گام سوم: طبق رابطهٔ $K=\frac{1}{2}mv^2$ برای به دست آوردن نسبت تندی فوتوالکترون‌های مورد نظر داریم:

$$\frac{(K_{max})_B}{(K_{max})_A}=\frac{(v_{max})_B^2}{(v_{max})_A^2} \Rightarrow \frac{(v_{max})_B}{(v_{max})_A}=\sqrt{\frac{4}{2}}=\sqrt{2}$$

۲۱۵۸ ۱ با توجه به داده‌های سؤال و روابط زیر داریم:

$$\lambda_{0A}=300nm=3\times10^{-7}m \ , \ \lambda_{0B}=400nm=4\times10^{-7}m \ , \ f_{نور}=1/5\times10^{15}Hz$$

$$K_{max}=hf-W_0 \Rightarrow \frac{K_{max\,A}}{K_{max\,B}}=\frac{hf-W_{0A}}{hf-W_{0B}} \xrightarrow{W_0=hf_0=h\frac{c}{\lambda_0}} \frac{K_{max\,A}}{K_{max\,B}}=\frac{h\left(f-\frac{c}{\lambda_{0A}}\right)}{h\left(f-\frac{c}{\lambda_{0B}}\right)}=\frac{1/5\times10^{15}-\frac{3\times10^8}{3\times10^{-7}}}{1/5\times10^{15}-\frac{3\times10^8}{4\times10^{-7}}}$$

$$=\frac{1/5\times10^{15}-10^{15}}{1/5\times10^{15}-0/75\times10^{15}} \Rightarrow \frac{K_{max\,A}}{K_{max\,B}}=\frac{0/5\times10^{15}}{0/75\times10^{15}}=\frac{2}{3}$$

خلاقیت در هندسه

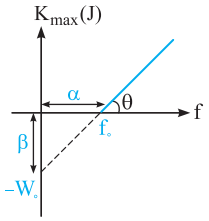
به موارد زیر توجه کنید:

۱) اگر $\lambda_{0B}>\lambda_{0A}$ باشد، W_0 برای B لزوماً کم‌تر از A است $\left(W=\frac{hc}{\lambda_0}\right)$.

۲) با توجه به یکسان بودن فوتون تابشی، آن‌که W_0 کم‌تری دارد، فوتون راحت‌تر و با انرژی بیش‌تر از سطحش جدا می‌شود و در نتیجه $(K_{max})_B>(K_{max})_A$ می‌باشد و در نتیجه گزینه‌های (۳) و (۴) نمی‌تواند صحیح باشد، زیرا نسبت $(K_{max})_A$ به $(K_{max})_B$ باید از یک کوچک‌تر باشد.

۲۱۵۹ ۲ با توجه به خلاصه نکات (۳)، نمودار بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد نور فرودی به صورت نمودار B است.

۱ ۲۱۶۰ در نمودار $K_{max} - f$، عرض از مبدأ، طول از مبدأ و شیب نمودار برابر است با:



$K_{max} = hf - W_0$ ، $e = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C$ ، $h = ۶/۴ \times ۱۰^{-۳۴} J.s$ ، $W_0 = ۶/۴ \times ۱۰^{-۱۹} J$: تابع کار

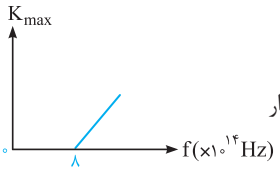
$\tan\theta = h = ۶/۴ \times ۱۰^{-۳۴}$: شیب

$\alpha = f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{۶/۴ \times ۱۰^{-۱۹}}{۶/۴ \times ۱۰^{-۳۴}} = ۱۰^{۱۵} Hz$ = طول از مبدأ

$\beta = W_0 = ۶/۴ \times ۱۰^{-۱۹}$ = عرض از مبدأ

۱ ۲۱۶۱ هر یک از گزینه‌ها را جداگانه بررسی می‌کنیم:

۱) با توجه به نمودار مقابل داریم:



$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow ۸ \times ۱۰^{۱۴} = \frac{W_0}{۴ \times ۱۰^{-۱۵}} \Rightarrow W_0 = ۳/۲ eV$: طول از مبدأ نمودار

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

۲) با توجه به رابطهٔ $K_{max} = hf - W_0$، با افزایش فرکانس، K_{max} نیز افزایش می‌یابد، ولی K_{max} متناسب با بسامد نور فرودی نیست. متناسب بودن یعنی اگر فرکانس ۲ برابر شود، K_{max} نیز دو برابر شود که این اتفاق نمی‌افتد. می‌توان گفت K_{max} و f با یک‌دیگر رابطهٔ مستقیم دارند. یعنی اگر f افزایش یابد، K_{max} نیز افزایش می‌یابد، بنابراین گزینهٔ (۲) نادرست است.

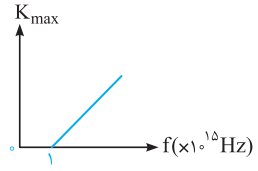
۳) به ازای طول موج‌های بزرگ‌تر از ۳۷۵ nm، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و این گزینه نادرست است.

$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۸ \times ۱۰^{۱۴}} = \frac{۳}{۸} \times ۱۰^{-۶} m = ۳۷۵ nm$

$\lambda > ۳۷۵ nm \rightarrow$ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

۴) به ازای بسامدهای کم‌تر از $f_0 = ۸ \times ۱۰^{۱۴} Hz$، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و این گزینه نیز نادرست است.

۳ ۲۱۶۲ با توجه به نمودار مقابل داریم:



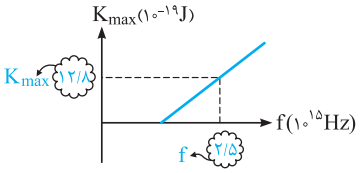
$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow ۱ \times ۱۰^{۱۵} = \frac{W_0}{۴ \times ۱۰^{-۱۵}} \Rightarrow W_0 = ۴eV$ = طول از مبدأ = بسامد آستانه

در ادامه با داشتن تابع کار می‌توان نوشت:

$K_{max} = ۲eV$

$K_{max} = hf - W_0 \Rightarrow ۲ = ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times f - ۴ \Rightarrow ۴ \times ۱۰^{-۱۵} f = ۶ \Rightarrow f = ۱/۵ \times ۱۰^{۱۵} Hz$

۲ ۲۱۶۳ **گام اول:** ابتدا اطلاعات مطرح شده در نمودار را از آن استخراج می‌کنیم:



$K_{max} = hf - W_0 \rightarrow \frac{۱۲/۸ \times ۱۰^{-۱۹}}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۲/۵ \times ۱۰^{۱۵} - W_0 \Rightarrow W_0 = ۲eV$

محاسبهٔ K_{max} برحسب الکترون ولت

گام دوم: در ادامه پس از یافتن W_0، K_{max} در $f = ۸ \times ۱۰^{۱۴} Hz$ برابر است با:

$K_{max} = hf - W_0 = ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۸ \times ۱۰^{۱۴} - ۲ = ۱/۲ eV$

۱ ۲۱۶۴ **گام اول:** ابتدا به کمک اطلاعات مشخص شده روی نمودار، تابع کار فلز را به دست می‌آوریم:

$K_{max} = hf - W_0 \Rightarrow W_0 = hf - K_{max} \Rightarrow W_0 = ۴ \times ۱۰^{-۱۵}(۲ \times ۱۰^{۱۵}) - \frac{۸ \times ۱۰^{-۱۹}}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = ۳eV$

دقت کنید که یکای K_{max} را به الکترون ولت تبدیل کرده‌ایم.

گام دوم: در ادامه مقدار K_{max} را برای حالتی که نوری با طول موج ۳۰۰ nm به فلز می‌تابد به دست می‌آوریم:

$K_{max} = hf = W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^{۸}}{۳۰۰ \times ۱۰^{-۹}} - ۳ = ۱eV = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J$

gajmarket.com

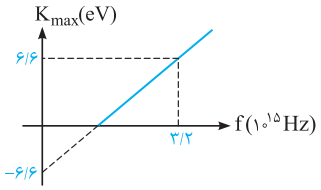
۲ ۲۱۶۵ ابتدا دقت شود که در این سؤال h برحسب J.s ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانید، K_{max} از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$K_{max} = hf - W_\circ$$

$$h = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}\ J.s$$

تابع کار: $W_\circ = hf_\circ = ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴} \times ۱/۶ \times ۱۰^{۱۵} \Rightarrow$ عرض از مبدأ : $-W_\circ = -\dfrac{۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴} \times ۱/۶ \times ۱۰^{۱۵}}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = -۶/۶\,eV$

بنابراین گزینه‌های (۳) و (۴) نمی‌توانند صحیح باشند.



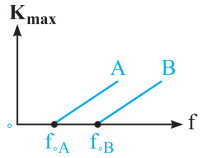
در ادامه با جایگذاری $f = ۳/۲ \times ۱۰^{۱۵}\ Hz$، بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها را به دست می‌آوریم (به نمودارهای رسم شده در گزینه‌ها توجه شود):

$$K_{max} = hf - W_\circ = \frac{۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}}{۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} \times ۳/۲ \times ۱۰^{۱۵} - ۶/۶ = ۶/۶ eV$$

بنابراین نمودار رسم شده در گزینهٔ (۲) صحیح است.

۱ ۲۱۶۶ با توجه به تمرین (۹) در خلاصه نکات (۳)، گزینهٔ (۱) صحیح است.

۲ ۲۱۶۷ با توجه به شکل مقابل، ابتدا تابع کار دو فلز A و B را با هم مقایسه می‌کنیم:



رابطهٔ (۱): $f_{\circ A} < f_{\circ B} \xrightarrow{W_\circ = hf_\circ :\ \text{تابع کار}} W_{\circ A} < W_{\circ B}$

بنابراین تابع کار فلز A کم‌تر از فلز B است. در نتیجه اگر نوری بتواند در فلز B پدیدهٔ فوتوالکتریک ایجاد کند، در فلز A هم می‌تواند باعث رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک شود.

از طرفی می‌دانیم که با تابش نوری به بسامد $۱/۵ \times ۱۰^{۱۵}\ Hz$ بر فلز B، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ داده است. پس تابع کار فلز B برابر است با:

(انرژی نور ورودی) > (تابع کار فلز): شرط رخ دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک

رابطهٔ (۲): $W_{\circ B} < hf \Rightarrow W_{\circ B} < ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۱/۵ \times ۱۰^{۱۵} = ۶ eV$

اکنون با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲) داریم: $W_{\circ A} < W_{\circ B} < ۶eV \Rightarrow W_{\circ A} < ۶eV$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است. حال به بررسی سایر گزینه‌های این سؤال می‌پردازیم:

۱) برای به‌دست آوردن محدودهٔ طول موج آستانهٔ فلز A می‌توان نوشت:

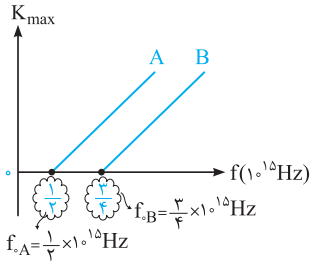
$$W_{\circ A} = hf_{\circ A} = h\frac{c}{\lambda_{\circ A}} \xrightarrow[h = ۴ \times ۱۰^{-۱۵}\ eV.s]{W_{\circ A} < ۶eV} ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{\lambda_{\circ A}} < ۶ \Rightarrow \lambda_{\circ A} > ۲ \times ۱۰^{-۷}\ m = ۲۰۰ nm$$

بنابراین طول موج آستانهٔ فلز A باید بیشتر از ۲۰۰ nm باشد.

۳) به ازای طول موج‌های کم‌تر از ۲۰۰nm، یعنی بسامدهای بیش‌تر از $۱/۵ \times ۱۰^{۱۵}\ Hz$ $\left(f = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۲ \times ۱۰^{-۷}} = ۱/۵ \times ۱۰^{۱۵}\ Hz\right)$، برای هر دو فلز پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ می‌دهد، چون $W_{\circ A} < W_{\circ B}$ بوده و به ازای این بسامد در فلز B فوتوالکتریک رخ می‌دهد، بنابراین در فلز A نیز این پدیده رخ خواهد داد.

۴) چون بسامد آستانه برای دو فلز را نداریم، امکان مقایسهٔ آن که چه‌قدر با بسامد کم‌تر از $۱/۵ \times ۱۰^{۱۵}\ Hz$ اختلاف دارد، را نداریم. بنابراین نمی‌توان اظهارنظر کرد.

۴ ۲۱۶۸ با توجه به رابطهٔ مربوط به بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها می‌توان نوشت:



$$K_{max} = hf - W_\circ \xrightarrow{W_\circ = hf_\circ} K_{max} = hf - hf_\circ = h(f - f_\circ)$$

مقایسهٔ K_{max} در فرکانس $۱۰^{۱۵}\ Hz$: $\dfrac{(K_{max})_A}{(K_{max})_B} = \dfrac{h(f - f_{\circ A})}{h(f - f_{\circ B})} = \dfrac{۱۰^{۱۵} - \frac{۱}{۲} \times ۱۰^{۱۵}}{۱۰^{۱۵} - \frac{۳}{۴} \times ۱۰^{۱۵}}$

$$\Rightarrow \frac{(K_{max})_A}{(K_{max})_B} = \frac{۱ - \frac{۱}{۲}}{۱ - \frac{۳}{۴}} = \frac{\frac{۱}{۲}}{\frac{۱}{۴}} = ۲$$

۱ ۲۱۶۹ برابر بودن تندی فوتوالکترون‌ها، برابری K_{max} را نتیجه می‌دهد. در ادامه با توجه به رابطهٔ $K_{max} = hf - W_\circ$ می‌توان نوشت:

$$K_{max} = hf - \overset{hf_\circ}{W_\circ} = h(f - f_\circ)$$

$$K_{max_A} = K_{max_B} \Rightarrow h(f_A - ۰/۵) = h(f_B - ۱) \Rightarrow f_B - f_A = ۰/۵ \Rightarrow f_B > f_A \Rightarrow \frac{f_B}{f_A} > ۱ \Rightarrow$$

گزینهٔ (۱) می‌تواند صحیح باشد.

* به نظر شما چرا باید $\dfrac{f_B}{f_A} < ۲$ باشد؟ (البته بدون در نظر گرفتن این مورد نیز گزینهٔ صحیح به دست آمد).