

پایه دوازدهم

آشنایی با فیزیک اتمی

خلاصه نکات عنوان

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

فصل
پنجم

۴۲۰۸۹ برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

(تست‌های ۲۰۸۹ تا ۲۱۰۴)

انرژی امواج الکترومغناطیسی

خلاصه نکات

تو شروع این فصل، می‌فوییم بینیم انرژی یه موج الکترومغناطیسی حساب و کتابش یه بوریه ...

در این فصل، نیاز به محاسبه 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:

$$E_t = n \cdot hf \quad \text{انرژی کل یک موج الکترومغناطیسی با } n \text{ فوتون}$$

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{انرژی یک فوتون}$$

مقدار پایه انرژی

E_t : انرژی کل موج الکترومغناطیسی
 E : انرژی یک فوتون (کوانتوم انرژی یا مقدار پایه انرژی)
 n : تعداد فوتون
 h : ثابت پلانک ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
 f : بسامد موج

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

$$E \propto f \quad \text{یا} \quad E \propto \frac{1}{\lambda}$$

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

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

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

کاهش بسامد و کاهش انرژی فوتون‌ها



بررسی تغییر انرژی فوتون‌ها با تغییر محیط

انرژی هر فوتون از رابطه $E = hf$ به دست 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 رابطه $v = \frac{c}{n}$ ، چون شیشه غلیظ‌تر از هوا است، سرعت نور و طول موج در آن کاهش می‌یابد.

$$\downarrow v = \frac{c}{n \uparrow}, \quad \downarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n \uparrow}$$

ثابت

با ثابت ماندن بسامد، انرژی وابسته به هر فوتون نیز ثابت می‌ماند.
 $E = h \cdot f$ (ثابت) \rightarrow انرژی هر فوتون ثابت می‌ماند. (h عددی ثابت است)

سؤال بعدی، ایده فیلی موم و پرتکلراری رو توی دل فودش داره ...

تمرین ۳ تعداد فوتون‌هایی که در یک ثانیه از یک لامپ ۶۰ واتی با نور قرمز گسیل می‌شود، کدام است؟ ($\lambda = 6600 \text{ \AA}$)

و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ و $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$3 \times 10^{21} \quad (4) \quad \frac{3}{4} \times 10^{20} \quad (3) \quad \frac{4}{3} \times 10^{20} \quad (2) \quad 2 \times 10^{20} \quad (1)$$

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:

$$E_t = nhf = \frac{nhc}{\lambda}, \quad E = 60 \text{ J}, \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad \lambda = 6600 \text{ \AA} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\Rightarrow 60 = \frac{n(6.6 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{6.6 \times 10^{-7}} \Rightarrow \text{تعداد فوتون: } n = 2 \times 10^{20} \quad (\text{گزینه ۱})$$

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

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

$\lambda = 6600 \text{ \AA} = 6600 \times 10^{-10} \text{ m}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $P = 60 \text{ W}$, $t = 1 \text{ s}$, $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

جای‌گذاری اعداد: $n = \frac{(6600 \times 10^{-10}) \times 60 \times 1}{6.6 \times 10^{-34} \times (3 \times 10^8)} = 2 \times 10^{20}$

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

رابطه انرژی فوتون با دوره \Leftarrow

$$E = hf \xrightarrow{f = \frac{1}{T}} E \propto \frac{1}{T} \rightarrow \text{رابطه معکوس}$$

رابطه انرژی فوتون با طول موج در یک محیط مشخص \Leftarrow

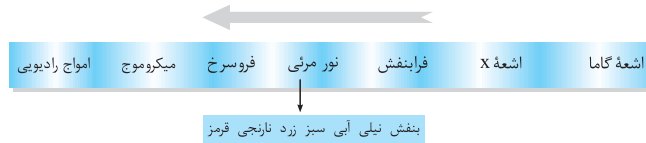
$$E = hf \xrightarrow{\lambda = \frac{c}{f}} E \propto \frac{1}{\lambda} \rightarrow \text{رابطه معکوس}$$

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 رابطه مستقیم دارد.

۲۲۰۹۰ 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 رابطه مستقیم دارد، می‌توان گفت انرژی وابسته به فوتون‌ها نیز همراه با بسامد کاهش می‌یابد.

کاهش بسامد، افزایش طول موج، کاهش انرژی فوتون‌ها



۴۲۰۹۱ اشعه 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 اشعه گاما است.

۴۲۰۹۲ (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 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌باشد.

۴۲۰۹۳ با توجه به شکل زیر، تنها گزینه (۴) ترتیب افزایش انرژی فوتون را درست نشان می‌دهد.

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

کاهش بسامد، افزایش طول موج، کاهش انرژی فوتون‌ها



۳۲۰۹۴ 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.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \xrightarrow{n \uparrow} \lambda \downarrow$$

۴۲۰۹۵ 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.

۴۲۰۹۶ برای محاسبه انرژی هر فوتون، با توجه به رابطه $E = hf$ ، ابتدا بسامد نور موردنظر را به‌دست می‌آوریم:

$$\lambda = 0.3 \text{ \AA} \xrightarrow{1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}} \lambda = 3 \times 10^{-12} \text{ m} \text{ و } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \xrightarrow{f = \frac{c}{\lambda}} \text{ بسامد : } f = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^{-12}} \text{ Hz} = 10^{20} \text{ Hz}$$

انرژی فوتون: $E = hf = 6.6 \times 10^{-34} \times 10^{20} = 6.6 \times 10^{-14} \text{ J}$ (ثابت پلانک: $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

۴۲۰۹۷ به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \boxed{12 \times 10^{-19}} = 4 \times 10^{-15} \times \frac{3 \times 10^8}{\lambda} \Rightarrow \lambda = 6 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.6 \text{ nm}$$

۴۲۰۹۸ می‌دانیم انرژی هر فوتون به محیط انتشار آن وابستگی نداشته و از رابطه $E = hf$ به دست می‌آید. برای محاسبه E_0 ، ابتدا بسامد نور مورد

نظر را به دست می‌آوریم:

$$\lambda = 0.66 \mu\text{m} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m}, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \xrightarrow{f = \frac{c}{\lambda}} \text{ بسامد: } f = \frac{3 \times 10^8}{6.6 \times 10^{-7}} \text{ Hz}$$

$$E = hf = 6.6 \times 10^{-34} \times \left(\frac{3 \times 10^8}{6.6 \times 10^{-7}} \right) = 3 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{ثابت پلانک: } h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s})$$

تذکر

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

۱۲۰۹۹ برای مقایسه انرژی دو فوتون می‌توانیم از یکی از رابطه‌های $E_0 = hf$ یا $E_0 = \frac{hc}{\lambda}$ استفاده کنیم. با توجه به مطرح شدن طول موج در این

مسئله، از رابطه دوم استفاده کرده و داریم:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow E \propto \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \frac{E_\gamma}{E'} = \frac{\lambda'}{\lambda_\gamma}$$

$$\lambda_\gamma = 5 \text{ \AA} = 5 \times 10^{-10} \text{ m}, \quad \lambda' = 172 \mu\text{m} = 172 \times 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow \frac{E_\gamma}{E'} = \frac{172 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-10}} = 2/4 \times 10^3 = 2400$$

۲۲۱۰۰ کوانتوم انرژی پرتوی B سه برابر کوانتوم انرژی پرتوی A است ($E_B = 3E_A$)، 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:

$$\begin{cases} \lambda_A - \lambda_B = 4 \text{ nm} \rightarrow \lambda_A = \lambda_B + 4 & (1) \text{ رابطه} \\ E_B = 3E_A \xrightarrow{E \propto \frac{1}{\lambda}} \frac{E_B}{E_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} = 3 \Rightarrow \lambda_A = 3\lambda_B & (2) \text{ رابطه} \end{cases}$$

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

$$\lambda_A = \lambda_B + 4 \Rightarrow 3\lambda_B = \lambda_B + 4 \Rightarrow \lambda_B = 2 \text{ nm}$$

$$\lambda_A = \lambda_B + 4 = 2 + 4 = 6 \text{ nm}$$

با توجه به این‌که کوانتوم انرژی پرتوی B، ۳ برابر A است، بنابراین بسامد پرتوی B، ۳ برابر A و طول موج B، $\frac{1}{3}$ برابر A است. این

موضوع فقط در گزینه (۲) صدق می‌کند.

خلاصیت
حرفه‌ای

۴۲۱۰۱ 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:

$$\begin{cases} f_B - f_A = 2 \times 10^{15} \text{ Hz} & (1) \\ E_B = 3E_A \Rightarrow hf_B = 3hf_A \Rightarrow f_B = 3f_A & (2) \end{cases}$$

$$(1) \text{ و } (2) \Rightarrow (3f_A) - f_A = 2 \times 10^{15} \text{ Hz} \Rightarrow f_A = 10^{15} \text{ Hz}, \quad f_B = 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

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

$$f_A = 10^{15} \text{ Hz} \xrightarrow{\lambda = \frac{c}{f}} \text{ طول موج بزرگ‌تر: } \lambda_A = \frac{3 \times 10^8}{10^{15}} = 3 \times 10^{-7} \text{ m} = 300 \text{ nm}$$

$$n_B = 1.5, \quad \lambda_B = 2\lambda_A, \quad n_A = ?$$

۱۲۱۰۲ با توجه به تساوی انرژی دو دسته پرتوی A و B داریم:

$$(E_t)_A = (E_t)_B \rightarrow n_A \times h \times \frac{c}{\lambda_A} = n_B \times h \times \frac{c}{\lambda_B} \Rightarrow n_A \times \frac{1}{\lambda_A} = 1.5 \times \frac{1}{(2\lambda_A)} \Rightarrow n_A = \frac{1.5}{2} = \frac{1.5}{2} \times 10^4 = 5 \times 10^4$$

می‌دانیم انرژی هر فوتون با طول موج آن رابطه 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،

$$\frac{1.5}{2} = 5 \times 10^4 \text{ یعنی}$$

خلاصیت
حرفه‌ای

۱۲۱۰۳ 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:

$$\lambda = 6 \times 10^{-7} \text{ m}, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}, \quad E = 1.32 \text{ J}$$

$$E_t = nhf = \frac{nhc}{\lambda} \Rightarrow \frac{0.2}{1.32} = \frac{n \times (6.6 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{6 \times 10^{-7}} \Rightarrow n = \frac{0.2 \times 6 \times 10^{-7}}{10^{-34} \times (3 \times 10^8)} = 4 \times 10^{18}$$

۱۲۱۰۴ با توجه به تمرین (۳) در خلاصه نکات (۱)، گزینه (۱) صحیح است.

۲۲۱۰۵ برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

(تست‌های ۲۱۰۵ تا ۲۱۱۱)

آشنایی با الکترون‌ولت

خلاصه نکات

$$q = ne$$

مقدار پایه e ← مضرب صحیح

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

q : بار یک جسم n : تعداد الکترون‌های یک جسم e : اندازه بار الکترون، $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ یا همان کوانتوم بار (مقدار پایه)

تذکره ۱ با توجه به رابطه $\Delta U = q \cdot \Delta V$ ، یک ژول ($\Delta U = 1 \text{ J}$) برابر با تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک کولن بار الکتریکی ($q = 1 \text{ C}$) در جابه‌جایی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت ($\Delta V = 1$) است.

$$\Delta U = q \cdot \Delta V \rightarrow \text{ژول} = (1 \text{ کولن}) \times (1 \text{ ولت})$$

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

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

تذکره ۳ یک الکترون‌ولت برابر 1.6×10^{-19} ژول می‌باشد.

$$1 \text{ الکترون‌ولت} \equiv \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} eV$$

تذکره ۴ واحد h (ثابت پلانک) در SI برابر (ژول . ثانیه) است. اگر h را بر حسب (الکترون‌ولت . ثانیه) بنویسیم، انرژی فوتون بر حسب الکترون‌ولت به دست می‌آید.

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \Rightarrow h = 6.63 \times 10^{-34} \left(\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} eV \right) s = 4.14 \times 10^{-15} eV.s$$

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

$$hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}) (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}$$

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

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}) \left(\frac{1 eV}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \left(\frac{1 nm}{10^{-9} \text{ m}} \right) = 1.24 \times 10^3 eV.nm$$

نتیجه در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $1240 eV.nm$ 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 $\frac{10^{19}}{1.6}$ الکترون است.

$$q = ne \rightarrow 1 = n \times (1.6 \times 10^{-19}) \rightarrow n = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} = \frac{10^{19}}{1.6}$$

بنابراین، یک ژول برابر با تغییر انرژی تعداد $\frac{10^{19}}{1.6}$ الکترون (معادل یک کولن) در جابه‌جایی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت است. با توجه به این موضوع، گزینه (۲) عبارت نادرستی است.

۳۲۱۰۶ می‌دانیم هر الکترون‌ولت برابر 1.6×10^{-19} ژول است ($1 eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$). در این صورت هر ژول معادل $\left(\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \right)$ الکترون‌ولت می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع برای تبدیل ثابت پلانک به $eV.s$ داریم:

$$h = 6.64 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 6.64 \times 10^{-34} \times \left(\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} eV \right) .s = \frac{6.64 \times 10^{-34}}{1.6 \times 10^{-19}} eV.s = 4.15 \times 10^{-15} eV.s$$

← معادل با 1 J است.

۴۲۱۰۷ برای یافتن انرژی یک فوتون برحسب الکترون ولت، کافی است در رابطه $E = hf$ ثابت پلانک (h) برحسب $eV \cdot s$ باشد:

$$\lambda = 0.5 \mu m = 5 \times 10^{-7} m, \quad c = 3 \times 10^8 m/s, \quad h = 4.14 \times 10^{-15} eV \cdot s$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4.14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 2.484 eV$$

۴۲۱۰۸ می‌دانیم که هر الکترون ولت برابر $1/6 \times 10^{-19}$ ژول می‌باشد. بنابراین انرژی هر فوتون نور زرد برابر است با:

$$E = 2eV = 2 \times 1/6 \times 10^{-19} J = 3/2 \times 10^{-19} J$$

از طرفی می‌دانیم که یک لامپ 100 واتی در هر ثانیه 100 ژول انرژی تابش می‌کند. بنابراین انرژی تابشی توسط این لامپ در مدت 16 ثانیه برابر $E = P \times t = 100 \times 16 = 1600 J$ می‌باشد. اکنون برای محاسبه تعداد فوتون‌های تابش شده می‌توان نوشت:

$n = ?$: تعداد فوتون، $E = 3/2 \times 10^{-19} J$: انرژی پایه هر فوتون، $E_t = 1600 J$: کل انرژی تابش شده

$$E_t = nE \Rightarrow 1600 = n \times 3/2 \times 10^{-19} \Rightarrow n = \frac{1600}{3/2 \times 10^{-19}} = 5 \times 10^{21}$$

۴۲۱۰۹ **گام اول:** انرژی گسیل شده از این آنتن را در مدت زمان یک ثانیه به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow 4/8 \times 10^4 = \frac{E_t}{1} \Rightarrow E_t = 4/8 \times 10^4 J$$

گام دوم: انرژی به دست آمده را برحسب الکترون ولت به دست می‌آوریم:

$$E_t = \frac{4/8 \times 10^4}{1/6 \times 10^{-19}} = 3 \times 10^{23} eV$$

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

$$n = \frac{E_t}{hf} = \frac{3 \times 10^{23}}{4 \times 10^{-15} \times 75 \times 10^6} = 10^{30}$$

۴۲۱۱۰ **گام اول:** طبق صورت سؤال توان تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به ازای هر متر مربع $300 J/s$ است. از آنجایی که سطح مقطع استخر $16 m^2$ است، بنابراین توان متوسط $16 \times 300 = 4800 J/s$ می‌شود، به عبارت دیگر به سطح استخر که $16 m^2$ است در هر ثانیه $4800 J$ انرژی می‌رسد.

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

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow 4800 = \frac{E_t}{60} \Rightarrow E_t = 48 \times 6 \times 10^3 J$$

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 رابطه بالا hc برحسب $eV \cdot nm$ داده شده. بنابراین باید مقدار E_t را برحسب eV و مقدار λ را برحسب nm جایگذاری کنیم و داریم:

$$n = \frac{E_t \lambda}{hc} = \frac{48 \times 6 \times 10^3 \times 600}{1/6 \times 10^{-19} \times 1200} = 9 \times 10^{23}$$

۴۲۱۱۱ **گام اول:** ابتدا با توجه به بازده لامپ، مقدار انرژی نوری ایجاد شده را به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{P_{نوری}}{P_{کل}} \Rightarrow \frac{16}{100} = \frac{P_{نوری}}{100} \Rightarrow P_{نوری} = 16 W$$

به عبارت دیگر لامپ $16 W$ توان مرئی تولید می‌کند.

گام دوم: انرژی که توسط لامپ در مدت 1 ثانیه منتشر می‌شود را به دست می‌آوریم:

$$P = \frac{E_t}{t} \Rightarrow 16 = \frac{E_t}{1} \Rightarrow E_t = 16 J$$

گام سوم: در فاصله 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):

$$\frac{E_{مردمک}}{E_{کل}} = \frac{A_{مردمک}}{A_{کل}} \Rightarrow \frac{E_{مردمک}}{16} = \frac{2\pi r^2}{4\pi R^2}$$

دقت کنید که چون انرژی رسیده به هر دو چشم را می‌خواهیم $A_{مردمک}$ دو برابر سطح مقطع مردمک هر چشم است و $A_{کل}$ مساحت کره‌ای به شعاع $1 km$ می‌باشد.

$$\frac{E_{مردمک}}{16} = \frac{2 \times \pi (10^{-3})^2}{4 \times \pi (10^3)^2} \Rightarrow E_{مردمک} = 8 \times 10^{-12} J$$

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

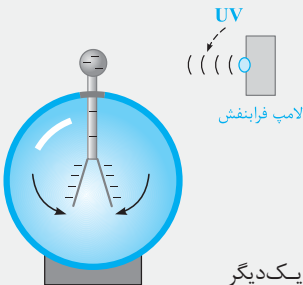
$$n = \frac{E_t}{hf} = \frac{8 \times 10^{-12}}{4 \times 10^{-15} \times 1/6 \times 10^{-19} \times 10^{15}} = 125 \times 10^5$$

۴۲۱۱۲ برای پاسخ دادن به این سؤال، ابتدا به خلاصه نکات زیر توجه کنید:

(تست‌های ۲۱۱۲ تا ۲۱۶۹)

فوتوالکتریک

خلاصه نکات



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 کلاهیک برق‌نما، الکترون از آن جدا می‌شود.

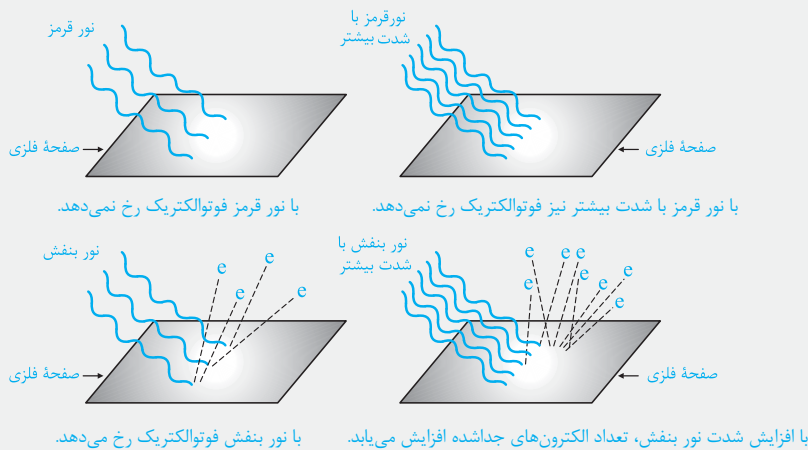
نکات مهم و کاربردی

- 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 فاصله الکترون‌ها از سطح فلز با یک‌دیگر متفاوت است و الکترون‌های سطحی‌تر، راحت‌تر جدا می‌شوند.
- ۴ مطابق شکل بالا اگر به کلاهیک برق‌نمایی با بار منفی پرتوهایی با انرژی زیاد مانند فرابنفش بتابد، الکترون‌ها از برق‌نما جدا شده و در نتیجه تیغه‌ها کم شده و فاصله آن‌ها کاهش می‌یابد. اما اگر پرتوی تابیده شده به اندازه کافی انرژی نداشته باشد (مانند نور مرئی) الکترون‌ها از سطح کلاهیک 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 پدیده فوتوالکتریک: $f \geq f_0$

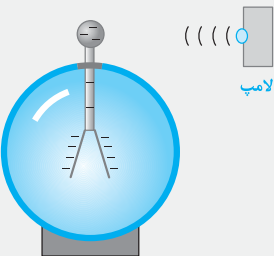
$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{c}{\lambda} \\ f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \end{array} \right. \xrightarrow[\text{فوتوالکتریک}]{\text{شرط دادن}} f \geq f_0 \Rightarrow \frac{c}{\lambda} \geq \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0$$

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



برای نوری که فوتون‌های آن دارای حداقل انرژی لازم برای وقوع پدیده 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 پندرتا سؤال فوب، این مفاهیم رو بهتر درک کنیم ...



تمرین مطابق شکل نشان داده شده به کلاهیک یک برق‌نما با بار منفی، پرتوهایی تابانده می‌شود. کدام یک از گزینه‌های زیر در مورد این شکل درست است؟ (بسامد آستانه فلز کلاهیک، در محدوده فرابنفش است).

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

پاسخ هنگامی که نور مرئی به کلاهیک برق نما تابانده می‌شود، چون بسامد آن کم‌تر از بسامد آستانه است، هیچ الکترونی از کلاهیک برق نما 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 برق نما 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.

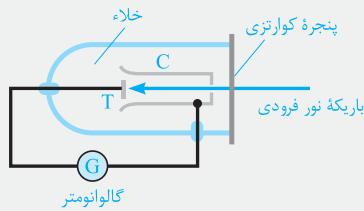
پاسخ همان‌طور که در سؤال قبل مشاهده کردید، هنگام تاباندن نور مرئی تغییر در فاصلهٔ ورقه‌ها به وجود نمی‌آید. اما با تاباندن اشعهٔ ایکس، تعدادی الکترون از کلاهیک برق نما جدا می‌شوند، در نتیجه بار مثبت کلاهیک و ورقه‌ها افزایش یافته و به دنبال آن فاصلهٔ ورقه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه جواب این سؤال گزینهٔ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

تمرین ۳: باریکهٔ نوری به صفحهٔ فلزی هدف تابانده می‌شود، اما فوتوالکترونی از سطح فلز جدا نمی‌شود. کدام یک از اقدامات زیر باعث می‌شود که پدیدهٔ فوتوالکترونیک 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 فوتوالکترونیک، باید بسامد پرتوی فرودی را افزایش دهیم و گزینهٔ (۱) صحیح است.

سولول فوتوالکترونیک: برای بررسی اثر فوتوالکترونیک 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.

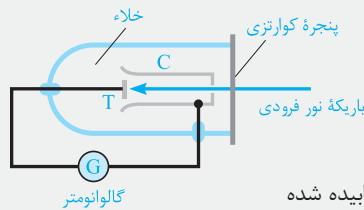


نکات مهم و کاربرد

۱) اگر بسامد تابیده شده به صفحهٔ فلزی T از حد معینی بیشتر باشد، فوتوالکترون‌ها از صفحهٔ فلزی جدا می‌شوند و گالوانومتر عبور جریان الکترونیکی 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 الکترونیکی 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. کدام یک از اقدامات زیر باعث می‌شود که گالوانومتر عبور جریان را نشان دهد؟

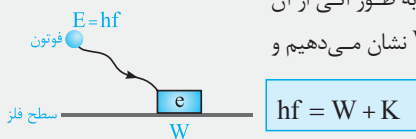


- (۱) افزایش بسامد باریکهٔ نور
 (۲) کاهش بسامد باریکهٔ نور
 (۳) افزایش شدت باریکهٔ نور تابیده شده
 (۴) کاهش شدت باریکهٔ نور تابیده شده

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 فوتوالکترونیک 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 : انرژی فوتون

W : انرژی مورد نیاز برای جدا کردن الکترون از فلز

K : انرژی جنبشی باقی‌مانده برای الکترون

تمرین ۵ فوتونی با انرژی $4/5 \text{ eV}$ بر سطح فلزی می‌تابد و فوتوالکترونی با انرژی جنبشی 1 eV از آن خارج می‌شود. انرژی صرف شده برای جدا کردن این الکترون از سطح فلز چند الکترون‌ولت است؟

(۱) $\frac{1}{3}$ (۲) ۱ (۳) $2/5$ (۴) $3/5$

پاسخ با توجه به رابطه زیر داریم:
گزینه (۴) $W = 3/5 \text{ eV} \Rightarrow K = hf - W \Rightarrow 1 \text{ eV} = 4/5 \text{ eV} - W \Rightarrow W = 3/5 \text{ eV}$
انرژی فوتون: $hf = 4/5 \text{ eV}$
انرژی جنبشی: $K = 1 \text{ eV}$
 $W = ?$

نگاه مفهومی تر: فوتونی با انرژی $4/5 \text{ eV}$ به سطح فلز برخورد کرده است و فوتوالکترونی با انرژی 1 eV از سطح فلز جدا شده است. پس چند الکترون‌ولت انرژی صرف شده برای جدا کردن الکترون از سطح فلز شده $4/5 \text{ eV} - 1 \text{ eV} = 3/5 \text{ eV}$ است؟ \Leftarrow پاسخ:

تحلیل دقیق‌تر اثر فوتوالکترونیک

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_0 نشان دهیم، این الکترون با بیشترین انرژی جنبشی از سطح فلز جدا می‌شود و داریم:

$$hf = W_0 + K_{\max} \Rightarrow K_{\max} = hf - W_0$$

انرژی فوتون hf
کم‌ترین انرژی مورد نیاز برای جدا کردن الکترون از فلز (تابع کار فلز) W_0
 K_{\max} : بیشترین انرژی جنبشی باقی‌مانده برای الکترون

تمرین ۶ فوتونی با انرژی $4/5 \text{ eV}$ بر سطح فلزی می‌تابد و فوتوالکترونی با حداکثر انرژی جنبشی 1 eV خارج می‌شود. در این صورت تابع کار فلز چند الکترون‌ولت است؟

(۱) $\frac{1}{3}$ (۲) ۱ (۳) $2/5$ (۴) $3/5$

پاسخ با توجه به رابطه مقابل، داریم:
گزینه (۴) $W_0 = 3/5 \text{ eV} \Rightarrow K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow 1 \text{ eV} = 4/5 \text{ eV} - W_0 \Rightarrow W_0 = 3/5 \text{ eV}$
حداکثر انرژی جنبشی: $K_{\max} = 1 \text{ eV}$
انرژی فوتون: $hf = 4/5 \text{ eV}$
تابع کار: $W_0 = ?$

نگاه مفهومی تر: فوتونی با انرژی $4/5 \text{ eV}$ به سطح فلز برخورد کرده است. و فوتوالکترونی با انرژی 1 eV از سطح فلز جدا شده است. چند الکترون‌ولت انرژی صرف جدا شدن الکترون از سطح فلز شده است؟ \Leftarrow پاسخ: $4/5 \text{ eV} - 1 \text{ eV} = 3/5 \text{ eV}$

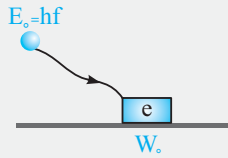
روابط مربوط به بسامد آستانه و طول موج آستانه

در شکل‌های زیر می‌خواهیم الکترون را از سطح فلز با تابع کار W_0 جدا کنیم، اگر انرژی فوتون را $E_0 = hf$ در نظر بگیریم، سه حالت زیر رخ می‌دهد:

حالت ۱	<p>$E_0 = hf < W_0$</p>	در این حالت فوتون ضعیف بوده و نمی‌تواند الکترون را جدا کند.
حالت ۲	<p>$E_0 = hf = W_0$</p>	در این حالت الکترون در آستانه جدا شدن است. * این موضوع یعنی اگر بسامد اندکی بیشتر از W_0 باشد الکترون جدا شده و اگر بسامد اندکی کم‌تر از W_0 باشد الکترون جدا نمی‌شود.
حالت ۳	<p>$E_0 = hf > W_0$</p> <p>$K_{\max} = hf - W_0$</p>	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: انرژی که صرف جدا شدن الکترون شده است.

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

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



$$hf_0 = W_0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h}$$

بسامد آستانه

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

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

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

$$\left. \begin{array}{l} \text{بسامد از بسامد آستانه بیشتر باشد: } f > f_0 \\ \text{طول موج از طول موج آستانه کم‌تر باشد: } \lambda < \lambda_0 \end{array} \right\} \text{شرط رخ دادن فوتوالکتریک:}$$

$$f > f_0 \rightarrow \frac{c}{\lambda} > \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda < \lambda_0$$

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 پدیده فوتوالکتریک بیشتر است.

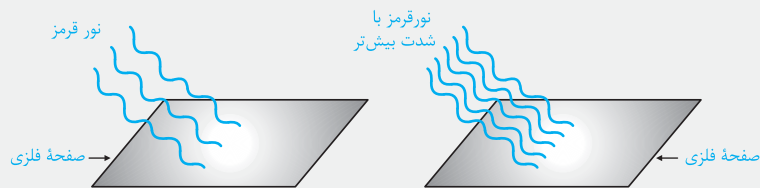
تمرین ۷ کدام عبارت در مورد پدیده فوتوالکتریک صحیح نیست؟

(تألیفی)

- (۱) در صورتی که انرژی فوتون‌های فرودی بر سطح فلز کم‌تر از تابع کار فلز باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.
- (۲) در صورتی که بسامد نور تابشی از بسامد آستانه فلز کم‌تر باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.
- (۳) در صورتی که طول موج نور تابشی از طول موج آستانه فلز کم‌تر باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.
- (۴) تعداد فوتون‌های تابشی، در رخ دادن یا ندادن پدیده فوتوالکتریک بی‌تأثیر است.

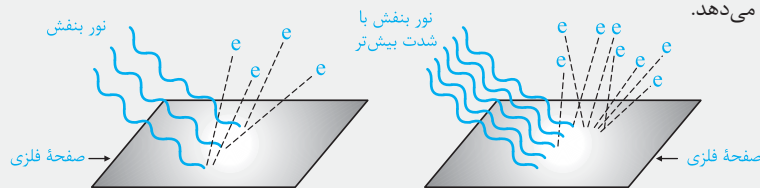
پاسخ برای پاسخ به این سؤال، به نکات زیر توجه کنید:

- (۱) پدیده 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 آستانه فلز بیشتر و طول موج تابشی از طول موج آستانه فلز کم‌تر باشد. بنابراین گزینه (۳) پاسخ این تمرین است.
- (۲) تعداد فوتون‌های تابشی در رخ دادن و یا ندادن پدیده فوتوالکتریک بی‌تأثیر است، رخ دادن پدیده 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 با شدت بیشتر نیز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. با نور قرمز فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

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



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

تمرین ۸ طول موج قطع در یک آزمایش فوتوالکتریک، ۵/ میکرون است. اگر بر فلز آن، نور تک‌رنگی با بسامد 5×10^{14} Hz بتایانیم، تابع کار فلز چند ژول است و آیا با این نور پدیده فوتوالکتریک رخ می‌دهد یا خیر؟ ($h = 6.6 \times 10^{-34}$ J.s و $c = 3 \times 10^8$ m/s) (ریاضی دافل ۹۱)

(۱) 3.96×10^{-19} و رخ می‌دهد. (۲) $3/3 \times 10^{-19}$ و رخ می‌دهد. (۳) $3/96 \times 10^{-19}$ و رخ نمی‌دهد. (۴) $3/3 \times 10^{-19}$ و رخ نمی‌دهد.

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

گام اول: برای محاسبه تابع کار این فلز داریم:

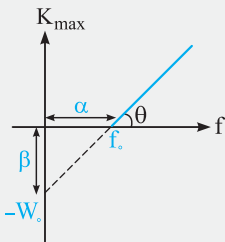
$$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow W_0 = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{5 \times 10^{-6}} \Rightarrow W_0 = 3.96 \times 10^{-19} \text{ J}$$

گام دوم: محاسبه انرژی فوتون فرودی بر فلز:

$$\text{انرژی هر فوتون} = hf = 6.6 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} = 3.3 \times 10^{-19} \text{ J} = 3/3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

با توجه به این‌که انرژی هر فوتون از W_0 کم‌تر است، بنابراین اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. بنابراین گزینه (۳) صحیح است

نمودار K_{\max} بر حسب f



با توجه به رابطه $K_{\max} = hf - W_0$ ، نمودار بیشینه 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 ($\alpha = f_0 = \frac{W_0}{h}$) را نشان می‌دهد.

۲ محل برخورد نمودار با محور قائم (عرض از مبدأ) $\beta = -W_0$ را نشان می‌دهد.

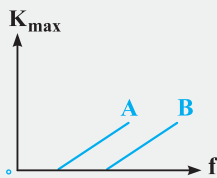
۳ شیب این نمودار برابر است با:

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow \text{شیب نمودار} = \tan \theta = h$$

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

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

تمرین ۹ در پدیده فوتوالکتریک، نمودار بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌ها بر حسب بسامد پرتوی نور فرودی برای دو فلز A و B مطابق شکل است. فلز A در مقایسه با B دارای تابع کار و طول موج آستانه است.



(تمرین فایز ۸۶)

(۱) کم‌تر - بیشتر

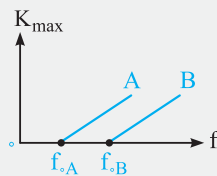
(۲) بیشتر - کم‌تر

(۳) کم‌تر - بیشتر

(۴) بیشتر - بیشتر

پاسخ با توجه به این‌که محل قطع نمودار $K_{\max} - f$ با افق، معادل بسامد آستانه می‌باشد و بسامد آستانه نیز

برابر $f_0 = \frac{W_0}{h}$ است، می‌توان گفت:



$$\Rightarrow f_{0A} < f_{0B} \xrightarrow{f_0 = \frac{W_0}{h}} \frac{W_{0A}}{h} < \frac{W_{0B}}{h} \Rightarrow W_{0A} < W_{0B}$$

در ادامه با توجه به رابطه $\lambda_0 = \frac{hc}{W_0}$ ، چون طول موج آستانه و تابع کار با هم رابطه عکس دارند، داریم:

$$W_{0A} < W_{0B} \Rightarrow \lambda_{0A} > \lambda_{0B}$$

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

نارسایی فیزیک کلاسیک در توجیه اثر فوتوالکتریک

طبق نظریه 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 دامنه 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 نظریه الکترومغناطیس ماکسول این است که، شدت نور با مربع دامنه 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.

با توجه به خلاصه نکات ارائه شده، 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 فوتوالکتریک می‌نامند. از آنجا که بار اولیه برق‌نما منفی است، جدا شدن الکترون‌ها از کلاهک، باعث تخلیه الکتریکی آن می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده گزینه (۴) صحیح است.

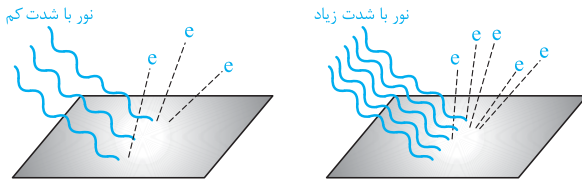
۱۲۱۱۳ در پدیده فوتوالکتریک، فوتوالکترتون‌ها دارای بار منفی‌اند، بنابراین در صورت حرکت در یک میدان مغناطیسی می‌توانند منحرف شوند و گزینه (۱) صحیح است. دقت شود که فوتوالکترتون‌ها از جنس امواج الکترومغناطیس محسوب نمی‌شوند، زیرا دارای بار الکتریکی هستند.

۲۲۱۱۴ با توجه به خلاصه نکات ارائه شده، بسامد آستانه بسامدی است که به ازاء بسامدهای بیشتر از آن، الکترون از سطح فلز جدا می‌شود و فوتوالکتریک رخ می‌دهد.

۴۲۱۱۵ با توجه به تمرین (۱) در خلاصه نکات (۳)، گزینه (۴) صحیح است.

۲۲۱۱۶ با توجه به تمرین (۲) در خلاصه نکات (۳)، گزینه (۲) صحیح است.

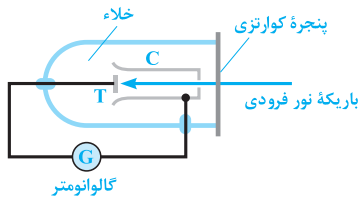
۱۲۱۱۷ همانطور که در شکل زیر نیز مشاهده می‌کنید، هنگامی که شدت نور با کوانتوم انرژی ثابت (یعنی بسامد ثابت) را بیشتر می‌کنیم، تعداد فوتون‌های نور تابشی بیشتر شده و در نتیجه تعداد الکترون‌های جدا شده از سطح فلز نیز بیشتر می‌شود.



۳۲۱۱۸ با توجه به خلاصه نکات ارائه شده، انرژی جنبشی و تندی فوتوالکترتون‌ها با افزایش شدت نور تابشی (با ثابت بودن بسامد) تغییر نمی‌کند.

۳۲۱۱۹ همان‌طور که در خلاصه نکات ارائه شده مطالعه کردید، در بسامدهای کم‌تر از بسامد آستانه پدیده 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 پدیده فوتوالکتریک رخ می‌دهد، افزایش شدت پرتوهای تابیده شده باعث افزایش تعداد فوتون‌های تابشی و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترتون‌ها می‌شود.



۳۲۱۲۰ کاربرد رایج سلول فوتوالکتریک که در شکل مقابل نشان داده شده است، تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی است. با تابش نور بر سطح الکترون، جریان الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده الکتریکی تأمین می‌شود.

۱۲۱۲۱ با توجه به تمرین (۴) در خلاصه نکات (۳)، گزینه (۱) صحیح است.

۳۲۱۲۲ هنگامی که بسامد پرتوی فرودی به اندازه کافی زیاد باشد، فوتوالکترتون‌ها از سطح فلز جدا می‌شوند. در این حالت افزایش شدت پرتوهای تابیده شده باعث افزایش تعداد فوتوالکترتون‌ها شده و باعث افزایش جریان نشان داده شده توسط گالوانومتر می‌شود.

۲۲۱۲۳ 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 ارائه شده، تندی فوتوالکترتون‌ها تغییر نمی‌کند.

۳۲۱۲۴ طبق نظریه 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 نظریه الکترومغناطیسی ماکسول شدت نور با مربع دامنه 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.

۴۲۱۲۵ طبق نظریه الکترومغناطیسی ماکسول داریم:

۳۲۱۲۶ با توجه به رابطه $K_{\max} = hf - W_0$ ، تابع کار برابر تفاضل بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترتون و انرژی فوتون فرودی است.

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

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

۱۲۱۲۷ بسامد آستانه: کم‌ترین بسامد مورد نیاز برای یک پرتو تا این پرتو بتواند الکترون را در آستانه جدا شدن از فلز قرار دهد، بسامد آستانه نام دارد. در این حالت انرژی فوتون دقیقاً برابر تابع کار است و داریم:

$$hf = W_0 \Rightarrow f = \frac{W_0}{h} \xrightarrow{\text{بسامد آستانه}} f_0 = \frac{W_0}{h}$$

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

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

۲۲۱۲۸ 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 آستانه جدا شدن از فلز قرار دهد. بنابراین داریم:

$$W_0 = 6\text{eV}, \quad h = 4 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$$

$$\text{بسامد آستانه: } f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{6}{4 \times 10^{-15}} = 1.5 \times 10^{15} \text{Hz}$$

۲۲۱۲۹ با توجه به رابطه مقابل داریم:

$$W_0 = hf_0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{2.5}{4 \times 10^{-15}} = \frac{1}{16} \times 10^{16} \text{Hz} = 625 \text{THz}$$

۲۲۱۳۰ به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases} f_{0A} = 5 \times 10^{14} \text{Hz} \Rightarrow \lambda_{0A} = \frac{c}{f_{0A}} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{14}} = 0.6 \times 10^{-6} \text{m} = 600 \text{nm} \\ f_{0B} = 2f_{0A} = 10^{15} \text{Hz} \Rightarrow \lambda_{0B} = \frac{c}{f_{0B}} = \frac{3 \times 10^8}{10^{15}} = 3 \times 10^{-7} \text{m} = 300 \text{nm} \end{cases} \Rightarrow \lambda_{0A} - \lambda_{0B} = 300 \text{nm}$$

۲۲۱۳۱ کم‌ترین بسامدی که سبب رخ دادن پدیده فوتوالکتریک می‌شود، همان بسامد آستانه است و داریم:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow f_0 = \frac{3 \times 10^8}{100 \times 10^{-9} \text{m}} = 3 \times 10^{15} \text{Hz} = 3 \times 10^6 \text{GHz}$$

۱۲۱۳۲ همان‌طور که می‌دانیم، بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های جدا شده از سطح فلز، برابر $hf - W_0$ است. حال اگر $hf = W_0$ باشد، الکترون در آستانه جدا شدن از سطح فلز قرار می‌گیرد، بدین معنا که اگر hf مقداری جزئی از W_0 بیشتر شود، پدیده فوتوالکتریک رخ می‌دهد و اگر hf مقداری جزئی کوچک‌تر از W_0 شود، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. بنابراین گزینه (۱) نادرست است.

۳۲۱۳۳ با توجه به تمرین (۷) در خلاصه نکات (۳)، گزینه (۳) صحیح است.

۳۲۱۳۴ برای افزایش احتمال رخ دادن پدیده 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.

$$hf > W_0 \quad \begin{cases} \text{برای اطمینان بیشتر از} \\ \text{برقراری نامساوی} \end{cases} \begin{cases} \rightarrow f \uparrow \\ \rightarrow W_0 \downarrow \end{cases}$$

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 پدیده فوتوالکتریک افزایش می‌یابد.

۳۲۱۳۵ به نامساوی‌های مقابل توجه کنید: $f > f_0 \rightarrow \frac{c}{\lambda} > \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda < \lambda_0$

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:

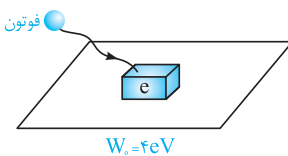
$$\text{تابع کار: } W_0 = 4\text{eV}, \quad h = 4 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}, \quad c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W_0} = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{4} = 3 \times 10^{-7} \text{m} = 300 \text{nm}$$

۴۲۱۳۶ طول موج آستانه را برای این سه فلز به دست می‌آوریم، اگر $\lambda = 600 \text{nm}$ ، از طول موج آستانه هر کدام از این سه فلز کم‌تر باشد، پدیده فوتوالکتریک برای آن فلز رخ می‌دهد:

$$\begin{cases} \text{A فلز: } \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 \times 10^8 \times 4.14 \times 10^{-15}}{2.26} = 549 \text{nm} < 600 \text{nm} \\ \text{B فلز: } \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 \times 10^8 \times 4.14 \times 10^{-15}}{4.24} = 292 \text{nm} < 600 \text{nm} \\ \text{C فلز: } \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 \times 10^8 \times 4.14 \times 10^{-15}}{4.37} = 284 \text{nm} < 600 \text{nm} \end{cases}$$

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 پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.



به جور دیگه فکر کنیم: ابتدا انرژی فوتون فرودی با طول موج $\lambda = 600 \text{ nm}$ را به دست می آوریم، هر کدام از سه فلز که تابع کارش کم تر از انرژی فوتون فرودی باشد، پدیده فوتوالکتریک در آن رخ می دهد:

$$E_0 = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4/14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{6 \times 10^{-7}} = 2/07 \text{ eV}$$

همان طور که مشاهده می کنید تابع کار هر سه فلز بیشتر از انرژی فوتون فرودی است و در هیچ یک از سه فلز فوتوالکترون از سطح گسیل نمی شود.

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

همان طور که در سؤال های قبل نیز بیان کردیم، برای افزایش احتمال رخ دادن پدیده فوتوالکتریک، استفاده از فوتون های قوی تر (افزایش بسامد یا

کاهش طول موج) و استفاده از فلز با تابع کار کم تر، روش های مؤثری است و در نتیجه گزینه (۲) صحیح است. دقت شود که افزایش تعداد فوتون های فرودی با افزایش شدت نور و هم چنین افزایش زمان تابش نور، در رخ دادن یا ندادن پدیده فوتوالکتریک مؤثر نمی باشند.

از طرفی طول موج نور زرد بزرگ تر از طول موج نور سبز می باشد، بنابراین با نور زرد نیز فوتوالکتریک رخ نمی دهد.

بسامد آستانه این فلز (f_0) ، ۱۰ درصد کم تر از بسامد نور بنفش است، یعنی اگر بسامد نور بنفش را x در نظر بگیریم، بسامد آستانه فلز برابر $0/9x$ است. حال اگر این عمل را با نور قرمز انجام دهیم، خواهیم داشت:

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{f_{\text{قرمز}}}{f_{\text{بنفش}}} = \frac{\lambda_{\text{بنفش}}}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{0/4}{0/7} = \frac{4}{7} \Rightarrow f_{\text{قرمز}} = \frac{4}{7} f_{\text{بنفش}} = \frac{4}{7} x < 0/9x$$

از آن جایی که بسامد نور فرودی در حالتی که از نور قرمز استفاده شده است از بسامد آستانه فلز کم تر است، پدیده فوتوالکتریک برای نور قرمز رخ نمی دهد.

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

(۱) اگر بسامد فوتون های تابشی بر سطح فلز را نصف کنیم، باز هم پدیده فوتوالکتریک رخ نمی دهد.

(باز هم فوتوالکتریک رخ نمی دهد). $f_2 = \frac{1}{3} f_1 < f_0$ در حالت دوم $\xrightarrow{\text{بسامد نصف شود}} f_1 < f_0$ در حالت اول

(۲) بسامد آستانه از ویژگی های فلز است و به بسامد نور فرودی بستگی ندارد.

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

همانطور که قبلاً بیان شد، با افزایش بسامد یا کاهش طول موج و همچنین با کاهش تابع کار، احتمال وقوع پدیده فوتوالکتریک افزایش می یابد. **۴ ۲۱۴۱**

در ادامه به بررسی گزینه ها می پردازیم:

(۱) در این گزینه، طول موج و تابع کار هر دو افزایش یافته اند، بنابراین این گزینه صحیح نیست، زیرا هیچ کدام از عوامل دلخواه ما را دارا نمی باشد.

(۲) در این گزینه تابع کار کاهش، ولی طول موج افزایش یافته است، پس در این گزینه لزوماً فوتوالکترون گسیل نمی شود، زیرا تنها دارای یکی از عوامل دلخواه ما است. توجه شود که بسته به میزان تغییرات W_0 و λ ، امکان وقوع پدیده فوتوالکتریک در این حالت وجود دارد ولی چون در صورت مسأله، قید لزوماً ذکر شده است، پس این گزینه نمی تواند صحیح باشد.

(۳) در این گزینه با ثابت ماندن طول موج، تابع کار افزایش یافته است، بنابراین ممکن است دیگر پدیده 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 این که در حالت اول فوتوالکتریک رخ داده است، در این گزینه نیز لزوماً الکترون گسیل می شود.

با توجه به رابطه $K_{\text{max}} = hf - W_0$ مشخص می شود که بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون ها به بسامد نور تابشی و W_0 (جنس فلز) بستگی دارد. **۱ ۲۱۴۲**

با توجه به رابطه $K_{\text{max}} = hf - W_0$ ، بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون ها به بسامد و تابع کار فلز بستگی داشته و تابع کار فلز نیز به جنس فلز بستگی دارد و مستقل از شدت نور تابشی می باشد. بنابراین با افزایش شدت تابش نور، K_{max} و W_0 هر دو ثابت می ماند. **۱ ۲۱۴۳**

در بسامدهای کم تر از بسامد آستانه پدیده فوتوالکتریک رخ نمی دهد و افزایش و کاهش شدت پرتوهای تابیده شده در این حالت اثری ندارد. بنابراین گزینه های (۱) و (۲) نادرست هستند.

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

گام اول: ابتدا انرژی هر یک از فوتون هایی که به سطح فلز برخورد می کنند را به دست می آوریم: **۲ ۲۱۴۶**

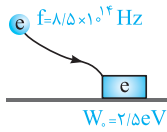
$$hf = W + K \Rightarrow hf = 7 + 6 = 13 \text{ eV}$$

گام دوم: در حالت دوم فوتونی با این انرژی به الکترونی برخورد می کند و 5 eV از انرژی فوتون صرف جدا شدن الکترون از فلز می شود. بنابراین انرژی جنبشی باقی مانده برای الکترون برابر است با:

$$K = hf - W = 13 - 5 = 8 \text{ eV}$$

۱۲۱۴۷

با توجه به شکل زیر، اگر پرتویی با بسامد $۸/۵ \times ۱۰^{۱۴}$ Hz به فلزی با تابع کار $۲/۵$ eV بتابد، فوتوالکترون‌هایی از سطح فلز جدا می‌شود که بیشینه انرژی جنبشی آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:



بسامد : $f = ۸/۵ \times ۱۰^{۱۴}$ Hz ، تابع کار فلز ، $W_0 = ۲/۵$ eV ، ثابت پلانک ، $h = ۴ \times ۱۰^{-۱۵}$ eV.s ، $K_{\max} = ?$

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow K_{\max} = ۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۸/۵ \times ۱۰^{۱۴} - ۲/۵ = ۰/۹$$
 eV

کافیست بتوانیم رابطه K_{\max} را به شکل زیر بازنویسی کنیم: **۴۲۱۴۸**

$$K_{\max} = hf - W_0 = hf - hf_0 = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) = (۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^۸) \left(\frac{1}{۰/۱ \times ۱۰^{-۶}} - \frac{1}{۰/۲ \times ۱۰^{-۶}} \right) = ۶$$
 eV

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^۸}{۲۰۰ \times ۱۰^{-۹}} = ۶$$
 eV

گام اول: انرژی فوتون فرودی را به دست می‌آوریم: **۱۲۱۴۹**

$$K_{\max} = hf - W_0 = ۶ - ۴/۲ = ۱/۸$$
 eV

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

$$K_{\max} = 1/8 \times 1/6 \times 10^{-19}$$
 J

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

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

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 \Rightarrow 1/8 \times 1/6 \times 10^{-19} = \frac{1}{2} (۹ \times 10^{-31}) v^2 \Rightarrow v = ۸ \times 10^5$$
 m/s

گام اول: ابتدا بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها را به دست می‌آوریم: **۲۲۱۵۰**

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{1}{2} (10^{-30}) (۴ \times 10^5)^2 = ۸ \times 10^{-20}$$
 J = $\frac{۸ \times 10^{-20}}{1/6 \times 10^{-19}}$ eV = ۰/۵ eV

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

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{۴ \times 10^{-15} \times ۳ \times 10^۸}{۴۰۰ \times 10^{-9}} = ۳$$
 eV

گام سوم: تابع کار فلز را به دست می‌آوریم:

$$hf = W_0 + K_{\max} \Rightarrow W_0 = hf - K_{\max} = ۳ - ۰/۵ = ۲/۵$$
 eV

گام چهارم: بسامد آستانه را به دست می‌آوریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{۲/۵}{۴ \times 10^{-15}} = \frac{۵}{۸} \times 10^{۱۵}$$
 Hz

۱۲۱۵۱

$$\begin{cases} \text{تابع کار فلز: } W_0 = ۲ \text{ eV} \xrightarrow{W_0 = hf_0} hf_0 = ۲ \text{ eV} \\ \text{انرژی پرتوی فرودی: } hf \xrightarrow{f = 4f_0} hf = 4hf_0 = 4 \times ۲ = ۸ \text{ eV} \end{cases}$$

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

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow K_{\max} = ۸ - ۲ = ۶ \text{ eV} = ۶ \times 1/6 \times 10^{-19} \text{ J} = ۹/۶ \times 10^{-19} \text{ J}$$

مشابه با نست قبل داریم: **۲۲۱۵۲**

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

$$\text{حالت ۱: } K_{\max} = h \times f_1 - hf_0 \quad (۱)$$

$$\text{حالت ۲: } ۳K_{\max} = h \times ۲f_1 - hf_0 \quad (۲)$$

$$\frac{(۲)}{(۱)} \Rightarrow ۳ = \frac{۲f_1 - f_0}{f_1 - f_0} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2} f_1$$

با استفاده از رابطه $K_{\max} = hf - W_0$ می‌توان نوشت: **۱۲۱۵۳**

$$K_۲ = ۴K_۱ \Rightarrow hf_۲ - W_0 = ۴(hf_۱ - W_0) \Rightarrow hf_۲ - W_0 = ۴hf_۱ - ۴W_0 \Rightarrow hf_۲ = ۴hf_۱ - ۳W_0 \Rightarrow f_۲ = ۴f_1 - \frac{۳W_0}{h}$$

همان‌گونه که می‌بینید، بسامد در حالت دوم باید مقداری کم‌تر از ۴ برابر شده باشد ($f_۲ < ۴f_۱$) .

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

$$f_۲ > f_۱ \Rightarrow \frac{f_۲}{f_۱} > ۱ \Rightarrow k > ۱$$

بنابراین $۱ < k < ۴$ می‌باشد.

یادداشت ریاضی: $c = a - b$ → چهار برابر شود. a چهار برابر شود.

$c = a - b$ → اگر بخواهیم c چهار برابر شود. a باید کم‌تر از چهار برابر شود. برابر شود.

گام اول: ابتدا به کمک نسبت بیشینه تندی فوتوالکترون‌های گسیل شده، نسبت انرژی جنبشی آن‌ها را به دست می‌آوریم: ۲۲۱۵۴

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 \Rightarrow \frac{K_{\gamma}}{K_1} = \left(\frac{v_{\gamma}}{v_1}\right)^2 \xrightarrow{v_{\gamma}=4v_1} \frac{K_{\gamma}}{K_1} = \left(\frac{4v_1}{v_1}\right)^2 = 16$$

گام دوم: حالا با توجه به سؤال قبل داریم:

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

گام اول: طبق رابطه $\lambda = \frac{c}{f}$ ، چون c ثابت است، با دو برابر شدن طول موج پرتو فرودی بسامد آن نصف می‌شود. بنابراین داریم: ۲۲۱۵۵

$$hf = W_0 + K_{\max} \Rightarrow \begin{cases} \text{حالت (۱): } hf = W_0 + (\lambda \times 10^{-19}) \\ \text{حالت (۲): } h \frac{f}{\gamma} = W_0 + (1/6 \times 10^{-19}) \end{cases}$$

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

$$\frac{W_0 + (\lambda \times 10^{-19})}{\gamma} = W_0 + (1/6 \times 10^{-19}) \Rightarrow W_0 + (\lambda \times 10^{-19}) = \gamma W_0 + (3/2 \times 10^{-19}) \Rightarrow W_0 = 4/8 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{4/8 \times 10^{-19}}{1/6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 3 \text{ eV}$$

گام اول: تابع کار فلز را به دست می‌آوریم: ۲۲۱۵۶

$$W_0 = hf_1 - K_{\max 1} = \frac{hc}{\lambda_1} - K_{\max 1} = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{300 \times 10^{-9}} - 0.5 = 3/5 \text{ eV}$$

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

$$hf_{\gamma} = K_{\max \gamma} + W_0 = 1/5 + 3/5 = 4/5 \text{ eV} \Rightarrow 4 \times 10^{-15} f_{\gamma} = 4/5 \Rightarrow f_{\gamma} = \frac{1}{5} \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda_{\gamma} = \frac{c}{f_{\gamma}} = \frac{3 \times 10^8}{\frac{1}{5} \times 10^{15}} = \frac{12}{5} \times 10^{-7} \text{ m} = \frac{1200}{5} \text{ nm} = 240 \text{ nm}$$

گام سوم: طول موج نور فرودی در حالت اول 300 nm و در حالت دوم 240 nm است و به اندازه 60 nm کاهش یافته است.

گام اول: بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل شده از فلز A را به دست می‌آوریم: ۲۲۱۵۷

$$(K_{\max})_A = hf - W_{0A} = \frac{hc}{\lambda} - W_{0A} = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{200 \times 10^{-9}} - 4 = 2 \text{ eV}$$

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

$$(K_{\max})_B = hf = W_{0B} = \frac{hc}{\lambda} - W_{0B} = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{200 \times 10^{-9}} - 2 = 4 \text{ eV}$$

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

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

با توجه به داده‌های سؤال و روابط زیر داریم: ۱۲۱۵۸

$$\lambda_{0A} = 300 \text{ nm} = 3 \times 10^{-7} \text{ m}, \lambda_{0B} = 400 \text{ nm} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}, f_{\text{نور}} = 1/5 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow \frac{K_{\max A}}{K_{\max B}} = \frac{hf - W_{0A}}{hf - W_{0B}} \xrightarrow{W_0 = hf_0 = h \frac{c}{\lambda_0}} \frac{K_{\max A}}{K_{\max B}} = \frac{h \left(f - \frac{c}{\lambda_{0A}} \right)}{h \left(f - \frac{c}{\lambda_{0B}} \right)} = \frac{1/5 \times 10^{15} - \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^{-7}}}{1/5 \times 10^{15} - \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}}} = \frac{1/5 \times 10^{15} - 10^{15}}{1/5 \times 10^{15} - 0.75 \times 10^{15}} \Rightarrow \frac{K_{\max A}}{K_{\max B}} = \frac{0.5 \times 10^{15}}{0.75 \times 10^{15}} = \frac{2}{3}$$

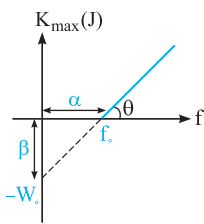
به موارد زیر توجه کنید:

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

(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.

با توجه به خلاصه نکات (۳)، نمودار بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برحسب بسامد نور فرودی به صورت نمودار B است. ۲۲۱۵۹

۱۲۱۶۰ در نمودار $K_{\max} - f$ ، عرض از مبدأ و شیب نمودار برابر است با:



$$W_0 = 6/4 \times 10^{-19} \text{ J}, \quad h = 6/4 \times 10^{-34} \text{ J.s}, \quad e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad K_{\max} = hf - W_0$$

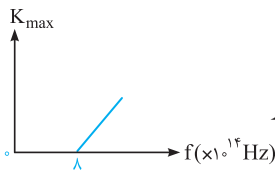
$$\text{شیب: } \tan \theta = h = 6/4 \times 10^{-34}$$

$$\text{طول از مبدأ} = \alpha = f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{6/4 \times 10^{-19}}{6/4 \times 10^{-34}} = 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\text{عرض از مبدأ} = \beta = W_0 = 6/4 \times 10^{-19}$$

۱۲۱۶۱ هر یک از گزینه‌ها را جداگانه بررسی می‌کنیم:

(۱) با توجه به نمودار مقابل داریم:



$$\text{طول از مبدأ نمودار: } f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow 8 \times 10^{14} = \frac{W_0}{4 \times 10^{-15}} \Rightarrow W_0 = 3/2 \text{ eV}$$

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

(۲) با توجه به رابطه $K_{\max} = hf - W_0$ ، 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 رابطه مستقیم دارند. یعنی اگر f افزایش یابد، K_{\max} نیز افزایش می‌یابد، بنابراین گزینه (۲) نادرست است.

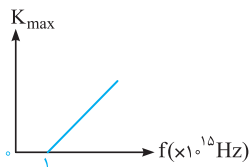
(۳) به ازای طول موج‌های بزرگ‌تر از 375 nm ، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و این گزینه نادرست است.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \times 10^8}{8 \times 10^{14}} = \frac{3}{8} \times 10^{-6} \text{ m} = 375 \text{ nm}$$

$\lambda > 375 \text{ nm} \rightarrow$ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

(۴) به ازای بسامدهای کم‌تر از $f_0 = 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد و این گزینه نیز نادرست است.

۳۲۱۶۲ با توجه به نمودار مقابل داریم:



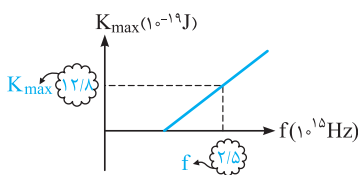
$$\text{بسامد آستانه} = \text{طول از مبدأ} = f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow 1 \times 10^{15} = \frac{W_0}{4 \times 10^{-15}} \Rightarrow W_0 = 4 \text{ eV}$$

در ادامه با داشتن تابع کار می‌توان نوشت:

$$K_{\max} = 2 \text{ eV}$$

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow 2 = 4 \times 10^{-15} \times f - 4 \Rightarrow 4 \times 10^{-15} f = 6 \Rightarrow f = 1/2 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

۳۲۱۶۳ گام اول: ابتدا اطلاعات مطرح شده در نمودار را از آن استخراج می‌کنیم:



$$K_{\max} = hf - W_0 \rightarrow \frac{12/8 \times 10^{-19}}{1/6 \times 10^{-19}} = 4 \times 10^{-15} \times 2/5 \times 10^{15} - W_0 \Rightarrow W_0 = 2 \text{ eV}$$

محاسبه K_{\max} برحسب الکترون ولت

گام دوم: در ادامه پس از یافتن K_{\max} ، W_0 در K_{\max} ، $f = 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ برابر است با:

$$K_{\max} = hf - W_0 = 4 \times 10^{-15} \times 8 \times 10^{14} - 2 = 1/2 \text{ eV}$$

۱۲۱۶۴ گام اول: ابتدا به کمک اطلاعات مشخص شده روی نمودار، تابع کار فلز را به دست می‌آوریم:

$$K_{\max} = hf - W_0 \Rightarrow W_0 = hf - K_{\max} \Rightarrow W_0 = 4 \times 10^{-15} (2 \times 10^{15}) - \frac{8 \times 10^{-19}}{1/6 \times 10^{-19}} = 3 \text{ eV}$$

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 300 nm به فلز می‌تابد به دست می‌آوریم:

$$K_{\max} = hf = W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{4 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{300 \times 10^{-9}} - 3 = 1 \text{ eV} = 1/6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

۲۲۱۶۵ ابتدا دقت شود که در این سؤال h برحسب J.s ارائه شده است. همان طور که می‌دانید، K_{max} از رابطه زیر به دست می‌آید:

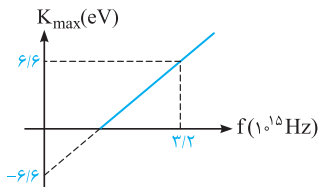
$$K_{max} = hf - W_0$$

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$W_0 = hf_0 = 6.6 \times 10^{-34} \times 1.6 \times 10^{15} \Rightarrow -W_0 = -\frac{6.6 \times 10^{-34} \times 1.6 \times 10^{15}}{1.6 \times 10^{-19}} = -6.16 \text{ eV}$$

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

در ادامه با جایگذاری $f = 3/2 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ، بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها را به دست می‌آوریم (به نمودارهای رسم شده در گزینه‌ها توجه شود):

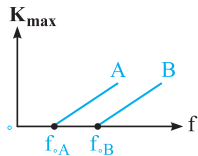


$$K_{max} = hf - W_0 = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{1.6 \times 10^{-19}} \times 3/2 \times 10^{15} - 6.16 = 6.16 \text{ eV}$$

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

۲۲۱۶۶ با توجه به تمرین (۹) در خلاصه نکات (۳)، گزینه (۱) صحیح است.

۲۲۱۶۷ با توجه به شکل مقابل، ابتدا تابع کار دو فلز A و B را با هم مقایسه می‌کنیم:



$$f_{0A} < f_{0B} \xrightarrow{W_0 = hf_0} W_{0A} < W_{0B} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

از طرفی می‌دانیم که با تابش نوری به بسامد $1/5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ بر فلز B، پدیده فوتوالکتریک رخ داده است. پس تابع کار فلز B برابر است با:

(انرژی نور ورودی) < (تابع کار فلز): شرط رخ دادن پدیده فوتوالکتریک

$$W_{0B} < hf \Rightarrow W_{0B} < 4 \times 10^{-15} \times 1/5 \times 10^{15} = 6 \text{ eV} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$W_{0A} < W_{0B} < 6 \text{ eV} \Rightarrow W_{0A} < 6 \text{ eV}$$

اکنون با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲) داریم:

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

(۱) برای به دست آوردن محدوده طول موج آستانه فلز A می‌توان نوشت:

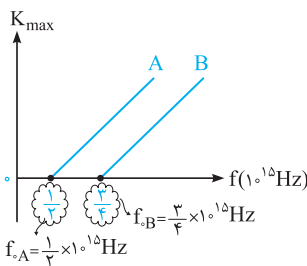
$$W_{0A} = hf_{0A} = h \frac{c}{\lambda_{0A}} \xrightarrow{W_{0A} < 6 \text{ eV}} 4 \times 10^{-15} \times \frac{3 \times 10^8}{\lambda_{0A}} < 6 \Rightarrow \lambda_{0A} > 2 \times 10^{-7} \text{ m} = 200 \text{ nm}$$

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

(۳) به ازای طول موج‌های کمتر از ۲۰۰ nm، یعنی بسامدهای بیش‌تر از $1/5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ، $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^{-7}} = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ، برای هر دو فلز پدیده فوتوالکتریک رخ می‌دهد، چون $W_{0A} < W_{0B}$ 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 مقایسه آن که چه قدر با بسامد کمتر از $1/5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ اختلاف دارد، را نداریم. بنابراین نمی‌توان اظهار نظر کرد.

۲۲۱۶۸ با توجه به رابطه مربوط به بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها می‌توان نوشت:



$$K_{max} = hf - W_0 \xrightarrow{W_0 = hf_0} K_{max} = hf - hf_0 = h(f - f_0)$$

$$10^{15} \text{ Hz} \text{ در فرکانس } K_{max} \text{ مقایسه } \Rightarrow \frac{(K_{max})_A}{(K_{max})_B} = \frac{h(f - f_{0A})}{h(f - f_{0B})} = \frac{10^{15} - \frac{1}{3} \times 10^{15}}{10^{15} - \frac{3}{4} \times 10^{15}}$$

$$\Rightarrow \frac{(K_{max})_A}{(K_{max})_B} = \frac{1 - \frac{1}{3}}{1 - \frac{3}{4}} = \frac{\frac{2}{3}}{\frac{1}{4}} = \frac{8}{3}$$

۲۲۱۶۹ برابر بودن تندی فوتوالکترون‌ها، برابری K_{max} را نتیجه می‌دهد. در ادامه با توجه به رابطه $K_{max} = hf - W_0$ می‌توان نوشت:

$$K_{max} = hf - W_0 = h(f - f_0)$$

$$K_{max_A} = K_{max_B} \Rightarrow h(f_A - 1/5) = h(f_B - 1) \Rightarrow f_B - f_A = 4/5 \Rightarrow f_B > f_A \Rightarrow \frac{f_B}{f_A} > 1 \Rightarrow \text{گزینه (۱) می‌تواند صحیح باشد.}$$

* به نظر شما چرا باید $\frac{f_B}{f_A} < 2$ باشد؟ (البته بدون در نظر گرفتن این مورد نیز گزینه صحیح به دست آمد).