第二十二章

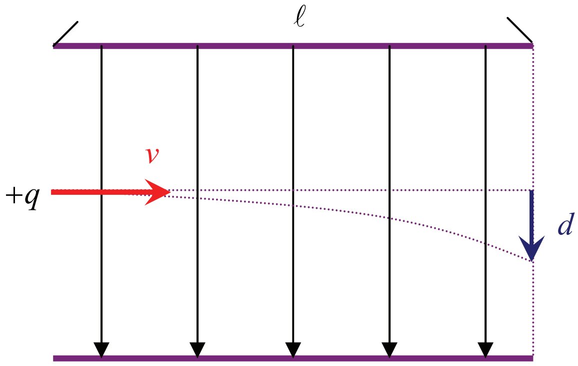
P.6

220102 **電子的荷質比實驗：**

1.預備工作：在進入湯木生真正的實驗之前，需要有些預備知識，包括：

(1)帶電質點在電場中的運動　與　(2)帶電質點在磁場中的運動。

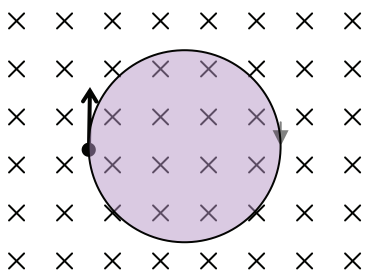
【方法一】：帶電質點在均勻電場中的運動



$$S = \frac{1}{2}at^2$$

$$d = \frac{1}{2}\left(\frac{qE}{m}\right)\left(\frac{\ell}{v}\right)^2$$

【方法二】：帶電質點在磁場中的運動

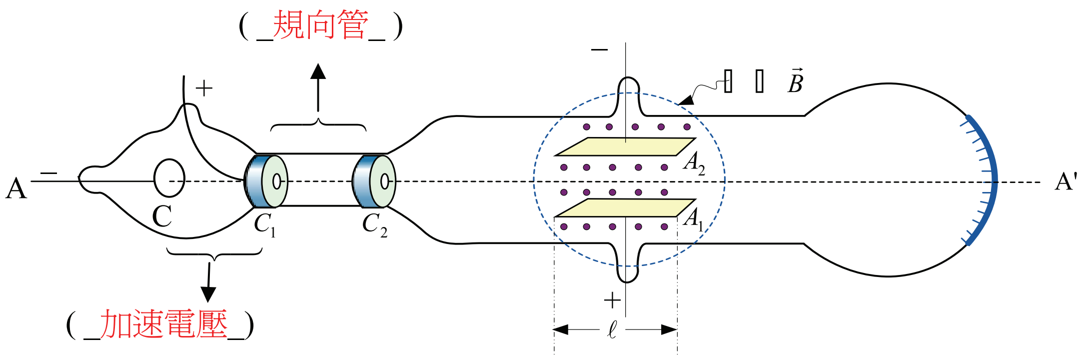


$$R = \frac{mv}{qB}$$

2.利用方法<一>、方法<二>，要得出荷質比，還差一個物理量未知--____v___。要如何量出呢?

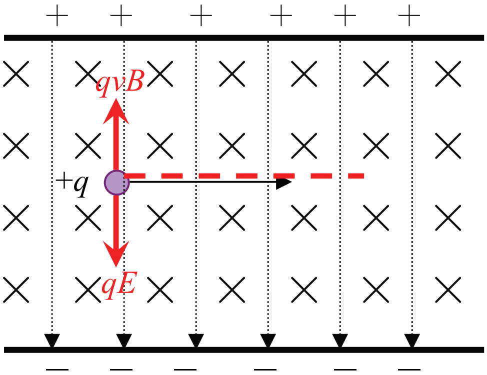
P.7

3.湯木生的實驗裝置：



4.湯木生實驗的兩大步驟：

(1)速度選擇器(velocity selector)----求出初速　【湯木生實驗成功的關鍵!!】



$qvB : qE$

$\therefore v = \frac{E}{B}$

Wow！Nobel Prize！

(2)再利用<方法一>或<方法二>求出 q/m[e/m]值：

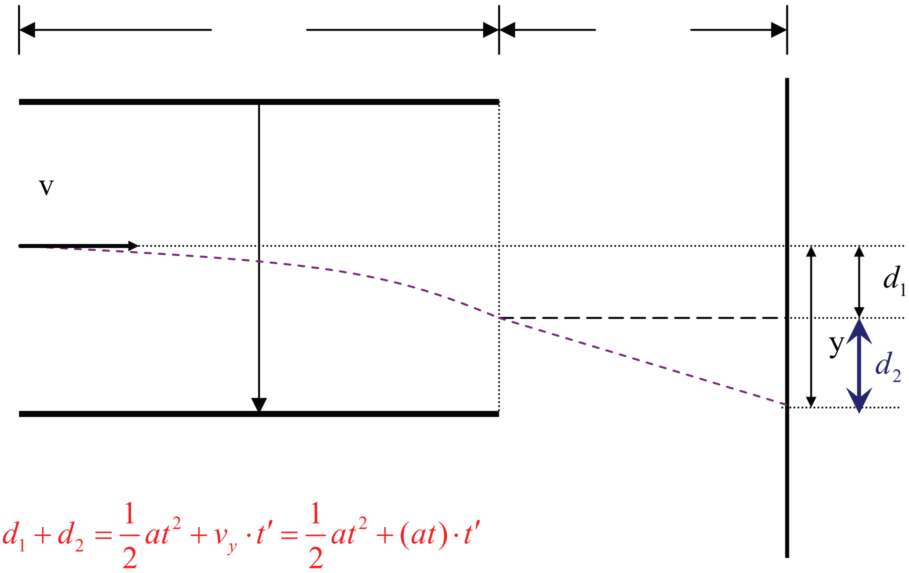
【方法一】：

$$\frac{q}{m} = \frac{2dv^2}{E\ell^2}$$

【方法二】：

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$$

P.8



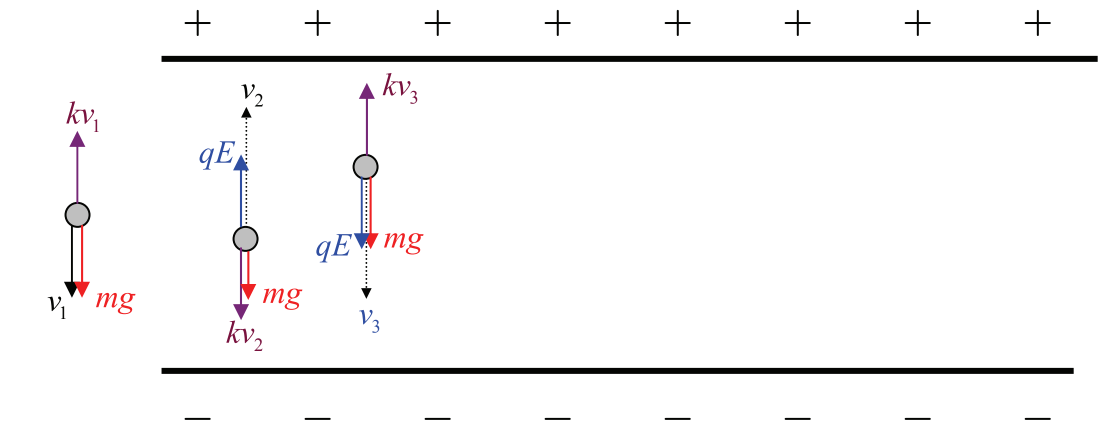
$$y = d_1 + d_2 = \frac{1}{2}at^2 + v_y \cdot t' = \frac{1}{2}at^2 + (at) \cdot t'$$

$$= \frac{1}{2}(\frac{qE}{m})(\frac{\ell}{v})^2 + (\frac{qE}{m})(\frac{\ell}{v})(\frac{D}{v})$$

$$= \frac{qE\ell}{mv^2}(\frac{\ell}{2} + D)$$

P.12

3.實驗原理：利用「等速度運動---合力=0」的觀念



（看同一油滴）

$$\begin{cases} mg = kv_1 \\ mg + kv_2 = qE \\ mg + qE = kv_3 \end{cases}$$

m,q,k 三個未知數, 三條方程式

P.13

4.貢獻：❶湯木生量出荷質比 $\dfrac{e}{m} = 1.76\times10^{11}$ 庫侖/公斤

❷米立坎做了數千次實驗，得出電量爲$e = 1.6\times10^{-19}$的整數倍，推論電子電量 $e = 1.6\times10^{-19}$ 庫侖。又可決定電子的質量 =________9.1×10^{-31}________公斤

❸質子質量是電子的 1840 倍，故質子質量 =________1.67×10^{-27}________公斤

❹得知電子電量，由法拉第電解定律的實驗分析可知 1 莫耳電量約 96500 庫侖，亞佛加厥數也首次被確定(N=$\dfrac{96500}{1.6\times10^{-19}} = 6.0\times10^{23}$)。

P.18

2.布拉格公式：

$PS_1 - PS_2 = n\lambda$

$2d\sin\theta = n\lambda$

※繞射角(diffraction angle，掠射角，布拉格角，並不等於入射角，與入射角互餘)

P.24

- 人體的某一器官也可視爲黑體：_瞳 孔_

P.26

備註：

(1) 希臘字母「ν」代表頻率，亦可用「f」代表頻率。ν 的唸法:_[nju]_。

(2) h稱為蒲朗克(卜朗克)常數，$h = 6.626 \times 10^{-34}$ J‧S。(與 ℓ 的單位相同)

(3) 電磁振子能量改變的變化量必為 $h\nu$ 的整數倍。

(4) 『量子』的意義：能量是不連續的，類似一個一個的粒子。

P.29

(1)光子的能量：

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{12400(\text{ev})}{\lambda(\text{Å})}$$

$$E = mc^2 = mc \cdot c = pc$$

P.30

(2)光子的動量

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow \lambda \times p = h$$

❹光壓(光子亦具有古典物理中粒子的特性)：【光壓常見的三種特例】：$p = \frac{F}{A} = \frac{\Delta p}{A\Delta t}$

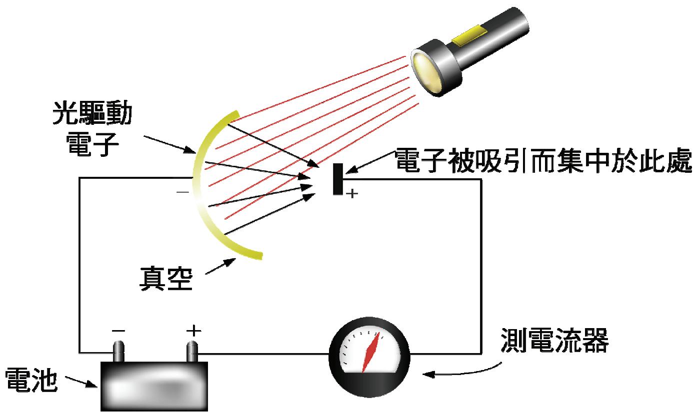
(1)完全透過：$\Delta P_{動量} = 0$，$P_{壓力} = 0$

(2)完全吸收(黑體)：$\Delta P = P \quad P = \frac{P}{A\Delta t} = \frac{E}{A\Delta tc} = \frac{I}{c}$

(3)完全反射：$\Delta P = 2P \quad P = \frac{2P}{A\Delta t} = \frac{2E}{A\Delta tc} = \frac{2I}{c}$

P.34

220408 **光電效應方程式：**



1.「光電效應」的意義：落紅不是無情物，化作春泥更護花！

光子不是無情物，化作游離和動能！

2.愛因斯坦的光電方程式：$\boxed{\text{光子光能→電子動能}}$

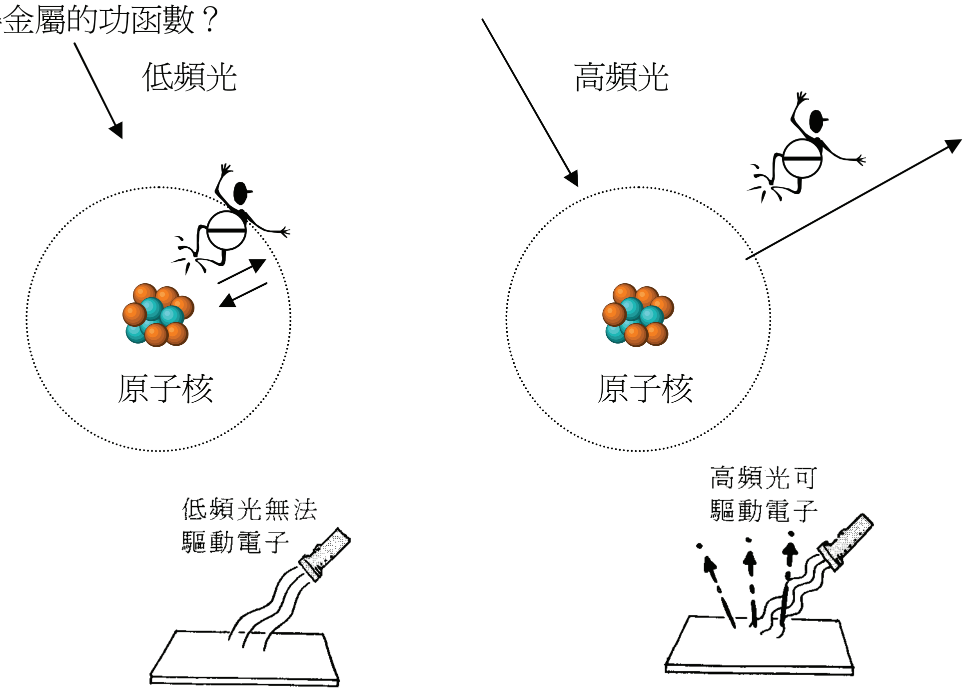
$h\nu = e\varphi + E_k$

P.36

220411 3.光電效應的思考邏輯：

光電方程式的意義，基本精神是『能量守恆定律』，但要以實驗驗證，需要量出❶________ $e\varphi$ ________及❷__________ E_k __________。

4. 如何求得金屬的功函數？



❶逐漸增加光的頻率，記錄恰測得電流時的頻率，即可換算出該金屬的功函數(游離能)。

❷恰打出電子，表示電子的動能=_____0____。

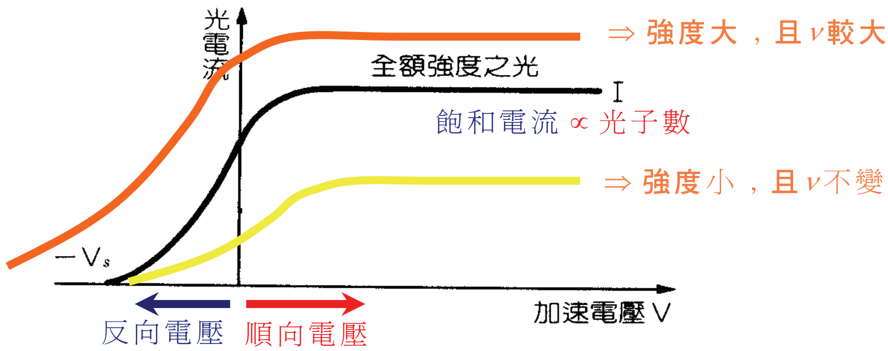
【基本公式】：

$$h\nu_0 = e\varphi + 0$$

P.37

重力位能	電位能
→減少的動能轉換成增加的重力位能 $\frac{1}{2}mV_e^2 = mgH$ $\Rightarrow V_0 = \sqrt{2gh}$	→減少的動能轉換成增加的電位能 $E_k = U_9 = qV$ $\Rightarrow E_k = eV_3$

P.38

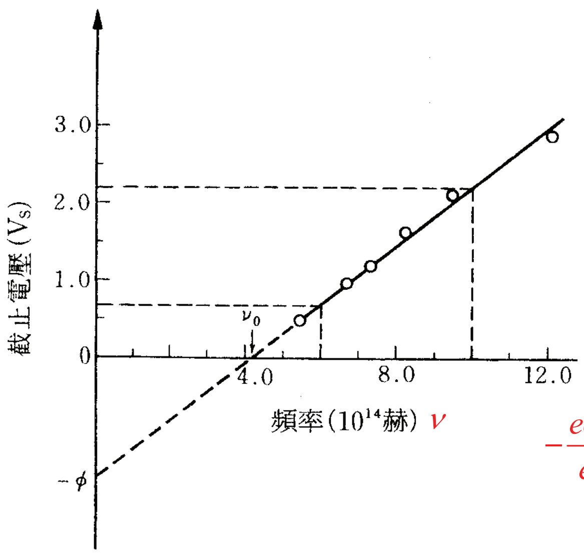


P.39

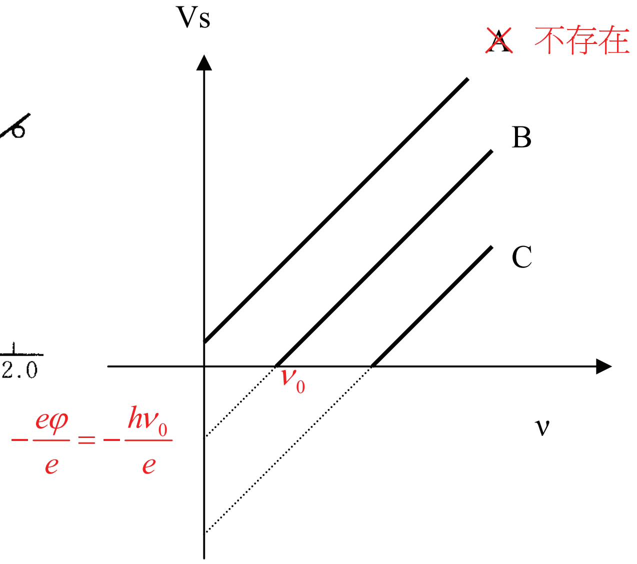
220414 9.再看「光電方程式」(各種排列組合)：

$$
\left[
\begin{aligned}
& h\nu = e\varphi + E_k \\
& h\nu = h\nu_0 + eV_s \\
& h\frac{c}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0} + eV_s
\end{aligned}
\right.
$$

10.光電方程式的圖形意義： $h\nu = h\nu_0 + eV_s \Rightarrow V_s = \frac{h}{e}\nu - \frac{h\nu_0}{e}$ $y=mx+k$



愛因斯坦光電方程式的驗證。



(1) x 軸：頻率 ， 真正的意義代表______光子能量________。 $E = h\nu$

(2) y 軸：截止電壓 ， 真正的意義代表______電子最大動能________。 $E_k = eV_s$

(3) 斜率： $m = \frac{h}{e}$ $\sum$ measure by Millikan

(4) x 軸截距： ν_0

(5) y 軸截距：$-\dfrac{h\nu_0}{e}=-\dfrac{e\varphi}{e}$

(6)　不同的金屬：斜率相同，但截距不同。

P.40

4. .可見光的光子能量：$\dfrac{12400}{7000}\sim\dfrac{12400}{4000}$
$\Rightarrow 1.8\sim 3.1(\text{e.v.})$

P.49

2. 基本分析：碰撞後的光子，能量變__小__，頻率變__小__，波長變__大__。

3. 可計算出：
波長的變化量=
$$\Delta\lambda=\frac{\text{h}}{\text{mc}}(1-\cos\theta)=0.0243(1-\cos\theta)\text{Å}$$
$$\Delta\lambda\max=0.486\text{Å}\fallingdotseq 0.05\text{Å}$$

P.50

進階思考問題(2)：
同樣都是光，爲何一個會消失，一個只是能量變少？
【$\boldsymbol{\lambda\cdot p=h}$, X 光粒子性強】

進階思考問題(3)：
X 光的能量比可見光大很多，能否打出電子?
【不一定】

進階思考問題(4)：
爲何不用可見光而要用 X 光呢？
$$\Delta\lambda_{\text{MAX}}=0.05\text{Å}$$
$$\Rightarrow 5\text{Å}\to 5.05\text{Å}$$
$$5000\text{Å}\to 5000.\cancel{05}\text{Å}$$

進階思考問題(5)：
晶體內部會不會產生康普頓(康卜吞)效應?
【不會，撞到束縛緊密的內層電子→湯木生散射】
進階思考問題(6)：
二維彈性碰撞，有 4 個未知數，3 個方程式，爲何康普頓(康卜吞)可以解出答案?
$$\Delta\lambda=\frac{\text{h}}{\text{me}}(1-\cos\theta)\Rightarrow \textbf{未解出！}$$

	光電效應	康普頓（康卜吞）效應
不同之一：入射光的種類不同	可見光（＋紫外光）	X光
不同之二：結果不同	光子消失	波長變大
不同之三：撞到的東西不同	價電子（金屬）	束縛鬆散的外層電子（石墨）
不同之四：關心的東西不同	電子（V_S）	光子
相同處：	證明了光具有粒子性	

第二十二章　詳解

範例 01：

【解答】1. (A)(D)　2. (B)

解題思路

(B)湯木生實驗只能量出 q /m

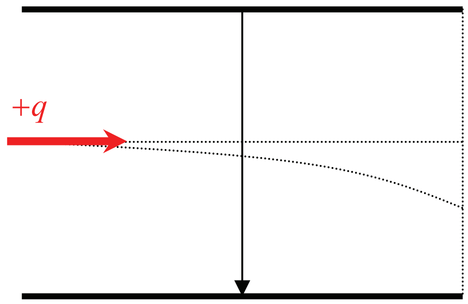
範例 02：

【解析】

$$\ell = \frac{1}{2}at^2$$

$$\ell = \frac{1}{2}(\frac{qE}{m})(\frac{L}{v})^2$$

$$\frac{q}{m} = \frac{2dv^2}{EL^2} = \frac{2d(\frac{E}{B})^2}{EL^2}$$



範例 03：

【解析】

1.

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{\sqrt{2mE_k}}{qB} = \frac{\sqrt{2m(qV)}}{qB} = \sqrt{\frac{m}{q}}\frac{\sqrt{2V}}{B}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{B^2r^2}$$

2.

$$v = \frac{qBr}{m} = \frac{2V}{Br}$$

3.

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{\pi Br^2}{V}$$

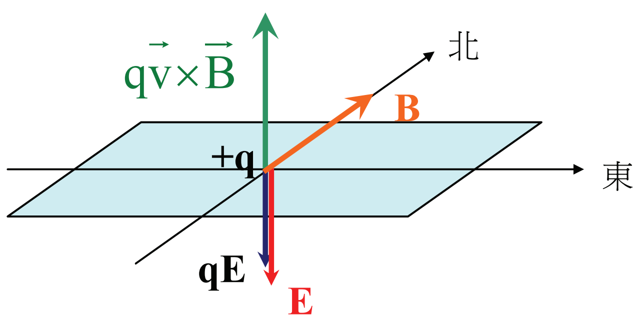
範例 04：

【解答】(B)(C)

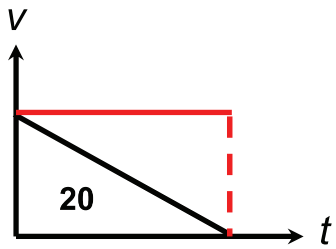
範例 05：

【解答】(B)

【解析】



$q\vec{E}=q\vec{v}\times\vec{B}$ （與 q 無關，even 正負）



範例 06：

【解答】40cm

範例 07：

【解析】

(A)電子電量是不連續的，即爲量子化 (量子化=不連續，爲基本單位的倍數)(D)湯木生量荷質比 e/m，米立坎量出電子電量 e，兩者可算出電子質量 m

範例 08：

【解析】

電量中以 6.653×10^{-19} 最小，以此爲準，計算其他電量對此電量的比值：

$8.204\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=1.25\fallingdotseq0.25\times5$

$11.50\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=1.74\fallingdotseq0.25\times7$

$13.13\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=2.00\fallingdotseq0.25\times8$

$16.48\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=2.51\fallingdotseq0.25\times10$

$18.08\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=2.74\fallingdotseq0.25\times11$

$19.71\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=3.00\fallingdotseq0.25\times12$

$22.89\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=3.49\fallingdotseq0.25\times14$

$26.13\times10^{-19}\div6.653\times10^{-19}=3.92\fallingdotseq0.25\times16$，求得平均電子電量爲 1.641×10^{-19} C

範例 09：

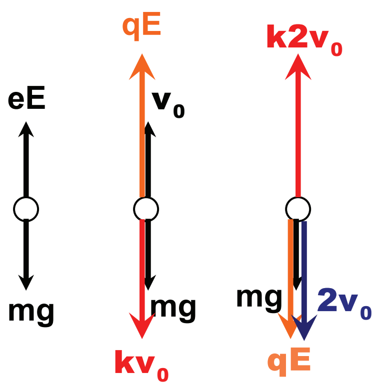
【解析】

$$\begin{cases} mg=eE \\ mg=kv_0=qE \\ mg+qE=k2v_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} eE+kv_0=qE \\ eE+qE=k2v_0 \end{cases}$$

$eE+qE=2qE=-2eE$

$\therefore q=3e$



範例 10：

【解析】

1.

$E_k = hv$

$eV = hv \quad \therefore v = \frac{eB}{h}$

$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{eB}$

2.

$\lambda = \frac{hc}{eV} = \frac{6.626\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{1.6\times10^{-19}\times20000} = \frac{12400}{20000}$

$= 0.62(\text{Å})$**(最短)**

範例 11：

【解析】

$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$

$\therefore \lambda = \frac{2hc}{mv^2} = \frac{2\times6.624\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{9.11\times10^{-31}\times(3\times10^{7})^2} = 4\text{Å}$

範例 12：

【解析】

(C)光柵＝多狹縫(高中講單狹、雙狹，大學程度會講三狹、五狹、多狹)

(E)利用 X 光照射晶體產生康普頓效應，而非光電效應

範例 13：

【解析】

X 光波長約 0.1 埃至 10 埃 (cp.可見光在 4000 埃~7000 埃)。原子晶體間隔約在數埃。利用 X 光才可對晶體產生繞射，因此，X 光成爲研究原子結構的利器。

範例 14：

【解析】

$(1) 2\times3\text{Å}\times\sin30^2 = 1\times\lambda \quad \therefore \lambda = 3\text{Å}$

$(2) 2\times3\text{Å} = \sin\theta = 2\times\lambda \quad \therefore \sin\theta = 1$

$\theta = 90^\circ$ **入射角**$=0^\circ$ **不合**

範例 15：

【解析】

$(1) x = d\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}d$

$(2) 2x\sin 45^\circ = 1\lambda$

$\therefore 2(\frac{\sqrt{2}}{2}1\text{Å})\frac{\sqrt{2}}{2} = \lambda$

$\therefore \lambda = 1\text{Å}$

範例 16：

【解析】

1.

$$D = \frac{M}{V} = \frac{4\frac{58.46}{6\times10^{23}}}{(2d)^3} = 2.165\ {}^{g}\!/\!{}_{cm^3}$$

(**看一個**unit cell)

2.

$d = 1.55\text{Å}$

$2\times1.55\times\sin 16^\circ = 1\lambda$

範例 17：

【解析】

(B)僅與 T 有關

(D) $E \propto T^4$

範例 18：

【解答】(A)(B)(D)

範例 19：

【解析】

1.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.5}{200}} = \frac{\pi}{10}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{10}{\pi}$$

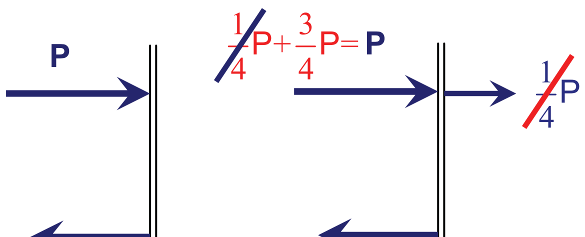
$$U_z = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\times200\times0.2^2 = 4J$$

2.

$$E = h\nu = hf = 6.626\times10^{-34}\times\frac{10}{\pi}$$

$\fallingdotseq 2\times10^{-33}J$

範例 20：



【解答】(E)

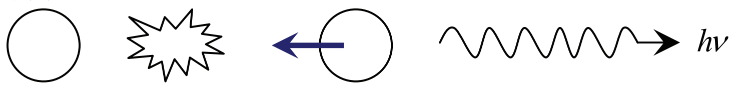
【解析】

$$\Delta P_A = \frac{3}{2}P \quad \Delta P_B = \frac{5}{4}P$$

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{\Delta P_A}{\Delta P_B} = \frac{\frac{3}{2}P}{\frac{5}{4}P} = \frac{12}{10} = \frac{6}{5}$$

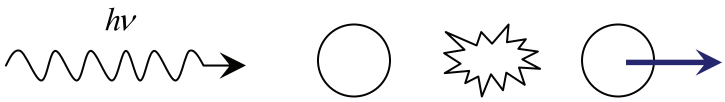
範例 21：

【解析】

1. 

$$P_{原} = P_{光} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

$$E_k = \frac{P^2}{2m} = \frac{h^2\nu^2}{2mc^2}$$

2. 

$$P_{原} = P_{光} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

$$E_k = \frac{P^2}{2m} = \frac{h^2\nu^2}{2mc^2}$$

範例 22：

【解析】

$$E = \frac{12400}{5000} = 2.48(ev) \times 1.6 \times 10^{-19} J/ev = 4 \times 10^{-19} J$$

(1) $\dfrac{8 \times 10^{-13} J/s}{4 \times 10^{-19} J/個光子} = 2 \times 10^{6} 個光子/s \quad \Rightarrow \dfrac{1}{2 \times 10^{6}} s/個光子$

(2) $\dfrac{3 \times 10^{8} m/s}{2 \times 10^{6} 個光子/s} = 150 \quad m/個光子$

範例 23：

【解析】

1.BCD

2.D

範例 24：

【解析】

$h\nu = e\varphi + E_k$

$6.6\times10^{-34}\times\nu = (1.9+1.5)\times1.6\times10^{-19} \quad \Rightarrow \nu = \dfrac{3.4\times1.6\times10^{-19}}{6.6\times10^{-34}} = 8.2\times10^{14}\ Hz$

範例 25：

【解析】

1. $h\nu = e\varphi + E_k = (3.0+0)ev \quad \Rightarrow \lambda = \dfrac{12400}{3.0ev} \fallingdotseq 4133\,\mathring{A} \fallingdotseq 4.13\cancel{3\times}10^{-7} = 4.1\times10^{-7}\,m$

2. $h\nu = e\varphi + E_k \quad \Rightarrow \dfrac{12400}{2000} = 4.2 + E_k$

   $E_k = 6.2 - 4.2 = 2eV = 2\times1.6\times10^{-19}\,J$

範例 26：

【解答】(A)(C)

範例 27：

【解析】

$\mathrm{h}\nu = \mathrm{e}\phi + \mathrm{E_k}$

$\dfrac{\mathrm{hc}}{\lambda} = \dfrac{\mathrm{hc}}{\lambda_o} + \mathrm{E_k}$

$\Rightarrow \mathrm{E_k} = \dfrac{12400}{4000} - \dfrac{12400}{6660}$

$= 3.1 - 1.86$

$= 1.24$

範例 28：

【解析】

$\mathrm{h}\nu = \mathrm{e}\phi + \mathrm{E_k}$

$\mathrm{E_k} = \dfrac{\mathrm{hc}}{\lambda} - \mathrm{W}$

$\mathrm{E_k}' = \dfrac{\mathrm{hc}}{\lambda} - \mathrm{W} - \mathrm{eV}$

範例 29：

【解答】：E

近代物理又考光電效應。

hc/λ=eφ+T

3hc/2λ=eφ+3T
兩式相減 2T= hc/2λ，T= hc/4λ

範例 30：
【解析】
1.
$$h\nu = e\phi + E_k$$
$$\frac{12000}{4000} = 2.0 + eV_s$$
$$E_k = eV_s = 1.1 - 2.0 = 1.1\text{eV}$$
$$\Rightarrow V_s = 1.1\text{V}$$
2.
$$E_k = 1.1\text{eV}$$
3.
$$\frac{12400}{3000} = 2.0 + eV_s$$
$$\Rightarrow eV_s = 4.1 - 2.0 = 2.1\text{eV}$$
$$\Rightarrow V_s = 2.1\text{V}$$

範例 31：
【解析】
$$\frac{4\times10^{-3}\ \text{c}/\text{s}}{1.6\times10^{-19}\ \text{c}/\text{電子}} = 2.5\times10^{16}\ \text{c}/\text{電子} \Rightarrow 2.5\times10^{16}\ \text{光子}/\text{s}$$

$$2.5\times10^{16}\ \text{光子}/\text{s} \times \frac{12400}{4000}\ \text{e.V.}/\text{p光子} \times 1.6\times10^{-19}\ \text{J}/\text{e.V.}$$
$$= 2.5\times10^{16} \times 3.1 \times 1.6\times10^{-19}$$
$$= 12.4\times10^{-3}\ \text{J}/\text{s}$$

範例 32：
【解析】
$$h\nu = e\phi + E_k$$
$$\begin{cases} \dfrac{hc}{\lambda} = e\phi + eV_s \\ \dfrac{hc}{\frac{\lambda}{2}} = e\phi + 3eV_s \end{cases} \qquad \therefore e\phi = \frac{hc}{2\lambda} \quad V_s = \frac{hc}{2e\lambda}$$

範例 33：

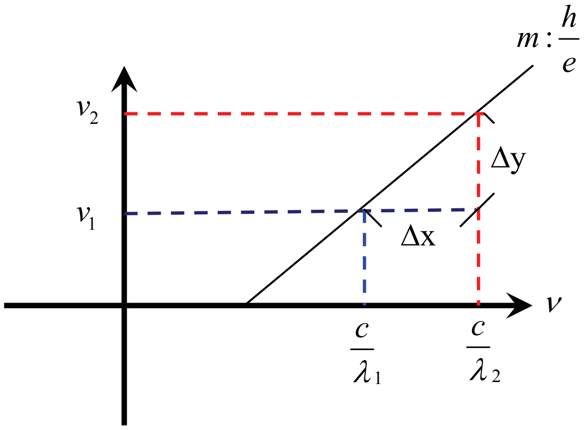
【解析】

$h\nu = e\phi + E_r$

$$\begin{cases} \dfrac{hc}{\lambda_1} = e\phi + eV_1 \\ \dfrac{hc}{\lambda_2} = e\phi + eV_2 \end{cases}$$

$$\therefore \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} = eV_1 - eV_2$$

$$\frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(V_1 - V_2)}$$



範例 34：

【解析】

利用低限頻率量功函數，利用截止電壓量電子動能

(A)強度=光子數=影響光電流之大小

(B)照題意列式

$h\nu = h\nu_e + E_k \quad \therefore E_e = h\nu - h\nu_e$

(C)非「正比」，只能說「線性增加」

(E)電子動量=

$$P_{電} = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2m(h\nu - e\phi)}$$

$$= \sqrt{2m(\frac{hc}{\lambda} - e\phi)}$$

$$P_{光} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

範例 35：

【解答】(B)(C)(D)(E)

範例 36：

【解析】

$h\nu = e\phi + E_k$

$E_k = h\nu - e\phi$

範例 37：

【解答】(A)(B)(C)

範例 38：

【解析】

(1) A>B>C>D

(2) B>A>D>C

(3) B>A>D>C

範例 39：

【解析】

(!) C>B>A

(2) C>B>A

(3) A>B>C

(4) A>B>C

(5) m= h/e

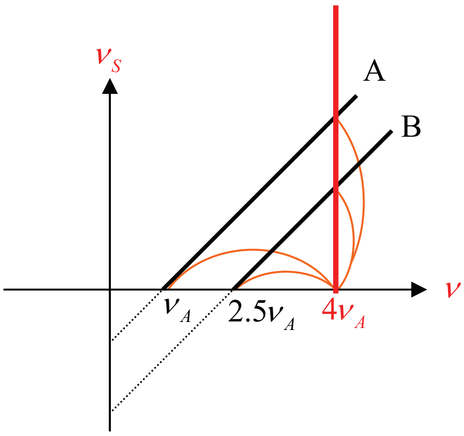
範例 40：

【解析】

$$h\nu = e\phi + E_k$$

$$\begin{cases} h4\nu_A = h\nu_A + E_{kA} \\ h4\nu_B = h\dfrac{5}{2}\nu_A + E_{kB} \end{cases}$$

$$\frac{E_{kA}}{E_{kB}} = \frac{3h\nu_A}{1.5h\nu_B} = \frac{2}{1}$$



範例 41：

【解析】

$$h\nu = e\phi + E_k$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} + eV_s = \frac{hc}{\lambda} + e\frac{kQ_s}{R}$$

$$Q_s = \frac{hc(\lambda_0 - \lambda)R}{\lambda\lambda_0 ek}$$

範例 42：

【解析】

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\theta)$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 5000 + \frac{0.05}{1840\times 4}$$

$$= 5000 + 0.0009\text{Å}$$

範例 43：

【解析】

$E = 1600\text{eV}$

$\lambda = \dfrac{12400}{1600} = 7.75\text{Å}$

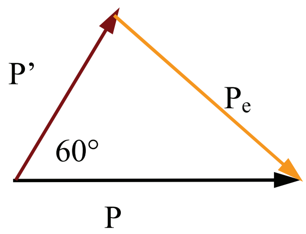
$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 7.75 + 0.05 = 7.80\text{Å}$

$E' = \dfrac{12400}{7.80} = 1590\text{eV}$

範例 44：

【解析】

1.



$\Delta\lambda = 1.01\lambda - \lambda = 0.01\lambda = \dfrac{h}{mc}(1 - \cos 60^\circ)$

$\Rightarrow \lambda = \dfrac{50h}{mc}$

$P = \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{mc}{50}$

2.

$E = pc = \dfrac{mc^2}{50}$

範例 45：

【解答】(A)(D)

範例 46：

【解答】(A)(E)

【解析】

(C) $\lambda_1 = \lambda$

(D) $\lambda_2 = \lambda + \dfrac{\mathrm{h}}{\mathrm{m_0 c}}(1-\cos\theta)$

範例 47：

【解答】(E)

【解析】

(A)碰撞

(B)束縛鬆散

(C)部份

(D)光速皆 C

(E)無關

範例 48：

【解析】

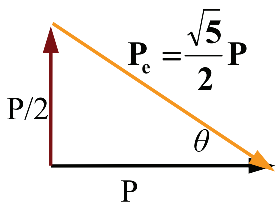
$$\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2} = \frac{1-\cos 60^\circ}{1-\cos 90^\circ} = \frac{\frac{1}{2}}{1} = \frac{1}{2}$$

範例 49：

【解析】

(1) $\Delta\lambda = 2\lambda - \lambda = \lambda = \dfrac{h}{m_0 c}(1-\cos 90°) = \dfrac{h}{m_0 c} = 0.0243\,\mathring{\mathrm{A}}$ (≒60 萬 e.v.)

(2) $\mathrm{E_k} = \mathrm{E} - \mathrm{E}' = \dfrac{hc}{\lambda} - \dfrac{hc}{2\lambda} = \dfrac{hc}{(\frac{h}{m_0 c})} - \dfrac{hc}{(\frac{2h}{m_0 c})} = \dfrac{1}{2} m_0 c^2$

(3) 

$\tan\theta = \dfrac{\frac{p}{2}}{p} = \dfrac{1}{2}$

(討論) $p_e = \dfrac{\sqrt{5}}{2} p \qquad p = \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{h}{(\frac{h}{mc})} = mc$

$$\mathrm{E_k} = \cancel{\frac{p_e}{2m}} = \frac{\frac{5}{4} p^2}{2m} = \frac{\frac{5}{4} m^2 c^2}{2m} = \cancel{\frac{5}{8} mc^2}$$

(相對論) $\mathrm{E_k} = mc^2 - m_0 c^2 = \sqrt{m_0{}^2 p^4 + p^2 c^2} - m_0 c^2 = \sqrt{m_0 c^2 + \frac{5}{4} m_0{}^2 c^2 c^2} - m_0 c^2 = \frac{3}{2} m_0 c^2 - m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 c^2$

$$E=mc^2 \Rightarrow \frac{3}{2}m_0c^2 \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}c^2 \Rightarrow 1-\frac{v^2}{c^2}=\frac{4}{9} \quad \therefore \frac{v^2}{c^2}=\frac{5}{9} \quad \therefore v=\frac{\sqrt{5}}{3}c \fallingdotseq 0.7c \geq 0.4c$$

範例 50：

【解答】(E)

【解析】

$0^0 < \theta < 45$

範例 51：

【解析】

1.

P_e**最大** $\Rightarrow E_k$**最大** $\Rightarrow$ **光子**ΔE**最大**

$\Rightarrow \Delta\lambda \uparrow \Rightarrow \theta = 180^\circ$

$$P_e = P + P' = \frac{h}{\lambda} + \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{(\frac{h}{mc})} + \frac{h}{(\frac{3h}{mc})} = \frac{4mc}{3}$$

2.

$$d = 2R = 2\frac{mv}{qB}$$

$$= \frac{2(\frac{4}{3}mc)}{eB} = \frac{8mc}{3eB}$$