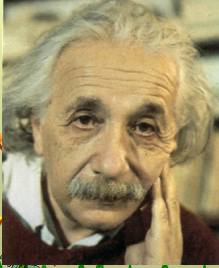


光電效應



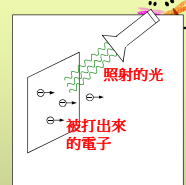
上課大綱

- 何謂光電效應？及其應用
- 光電效應的發展歷史
- 光電效應的實驗裝置與實驗過程
- 光電效應-雷納的實驗結果
- 以光是電磁波無法解釋實驗結果
- 光電效應與光的波動說矛盾
- 愛因斯坦的光子說
- 以光子說解釋光電效應，並做預測
- 密立坎以實驗驗證愛因斯坦的預測
- 光電效應證明光具有粒子性

- 黑體輻射現象必須以能量量子化才能完整解釋
- 這是特別的、唯一的現象？還是具有普遍性的？
- 是否有更明顯的相關量子現象的實驗出現？
- 光電效應！！

1.光電效應

- 什麼是光電效應？
 - 由於光的照射而從金屬表面逸出電子的現象，叫做光電效應
 - 逸出的電子：光電子
 - 光電子形成的電流：光電流
 - 光電效应有實際的應用嗎？
 - 電動門
 - 太陽能電池
 - 數位相機



1.光電效應-發展歷史

- 1887，赫茲：發現光電效應
- 1902，雷納：光電效應實驗
 - 實驗結果與「光是電磁波」
- 1905，愛因斯坦：提出
 - 光具有粒子性解釋光電效
 - 並做了理論上的預測
- 1916，密立坎：實驗
 - 實驗驗證了愛因斯坦的預
 - 預測
- 光電效應的意義
 - 光具有粒子性

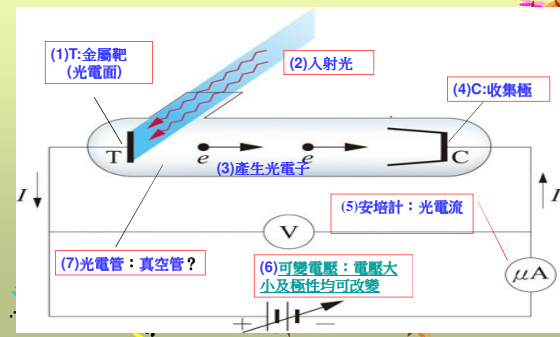
科學發展的過程：

實驗歸納結果

→ 提出理論假說解釋，並做預測

→ 實驗證實

1.光電效應-實驗裝置與實驗過程



外加電壓-極性改變

- 當電極C的電壓為正時-正向電壓
 - 光電子會被加速
 - 若加速電壓為 V ，則光電子抵達C極時所增加的動能為？
- 當電極C的電壓為負時-反向電壓
 - 會阻止光電子的運動，使光電流減小
 - 當反向電壓愈來愈大時，光電流愈來愈小
 - 當反向電壓增大到光電流為零時，此時的電壓稱為截止電壓(遏止電位)，以 $-V_s$ 表示

截止電壓 $-V_s$ 的意義

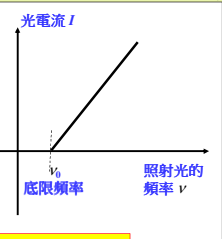
- 光電流為零，表示
 - 連具有最大動能 K_{\max} 的電子都無法抵達 C 極
- 光電子通過電位差為 V_s 的反向電場，將增加或減少多少電位能？
 - 增加 eV_s 的電位能
- 光電子的最大動能 K_{\max} 為多少？
 - $K_{\max} = eV_s$

宏觀世界與微觀世界 - 神奇的連結

- 當光電流為零時，此時伏特計上的讀數 V_s
- 從金屬靶所發射光電子的最大動能即為 $-eV_s$
- 若 V_s 為 2 伏特，表示光電子的最大動能為 -2 電子伏特

1. 光電效應-雷納的實驗結果(1)

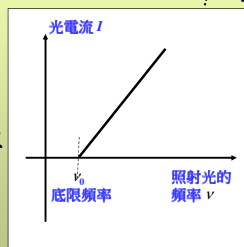
- 光電流的產生
 - 照射光的頻率必須夠大
 - 底限頻率(截止頻率) ν_0
 - 若照射光的頻率 $\nu < \nu_0$
 - 增加照射光強度？
 - 增加照射時間？
 - 底限頻率 ν_0 與什麼有關？
 - 金屬靶的材質
 - 外加電壓



ex: $\nu_0 \rightarrow$ 綠光
則以紅光照射時？

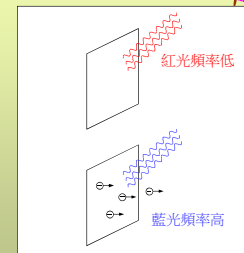
1. 光電效應-雷納的實驗結果(2)

- 若照射光的頻率 $\nu > \nu_0$
 - 照射光強度非常微弱？
 - 照射時間非常短？
 - 無論光的強度多弱，只要 $\nu > \nu_0$ ，都能立即產生光電流



ex: $\nu_0 \rightarrow$ 綠光
則以藍光照射時？

ex: $\nu_0 \rightarrow$ 綠光
則以紅光照射時？

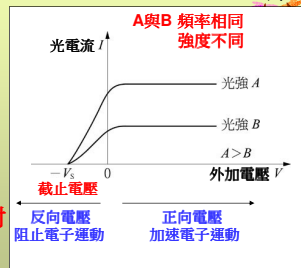


ex: $\nu_0 \rightarrow$ 綠光
則以藍光照射時？

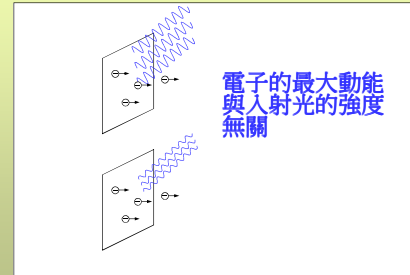
1.光電效應-雷納的實驗結果(3)

- 以不同強度的同一單色光照射同一電極

- 光電流和照射光的強度成正比
- 截止電壓 V_s (電子的最大動能)與入射光的強度無關

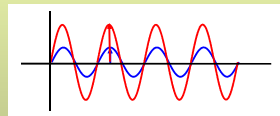


別睡了~快起來!!



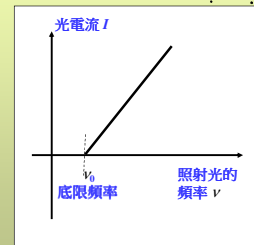
若光是電磁波-以既有的理論設法解釋

- 電磁波：
 - 電場和磁場隨時間、空間變化的波動
- 光的強度
 - 電場的振幅愈大，光的強度愈大
 - 與光的頻率無關
- 以光照射物體時
 - 照射光的能量可以累積在被照射物體上



若光是電磁波-解釋實驗結果(1)(2)

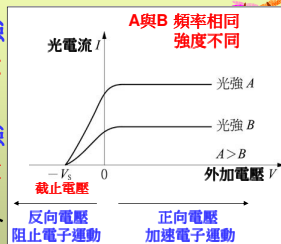
- 若照射光的頻率 $\nu < \nu_0$
 - 增加照射光強度?
 - 增加照射時間?
 - 若照射光的頻率 $\nu > \nu_0$
 - 增加照射光強度?
 - 增加照射時間?
- 與實驗結果矛盾!**
- 可，只要照射時間夠長，都可以使電子獲得足夠的動能，克服所繫的束縛，而脫出金屬形成光電子，形成光電流。



若光是電磁波-解釋實驗結果(3)

- 若照射光的強度愈強
 - 光電子所獲動能愈大
 - 形成光電流愈大
- 若照射光的強度愈強
 - 光電子所獲動能愈大
 - 截止電壓也愈大

與實驗結果矛盾!



光電效應與光的波動說矛盾!

光的波動說顯然無法解釋
光電效應!!

2.愛因斯坦的光子說(1905)-另起爐灶

- 假設電磁波是由許多光量子 (1926, 改名為光子) 所組成, 光的能量並非連續地分布在空間中
- 光子的特性
 - 每一個光子的能量 E 為
 - $E = h\nu$ h : 普朗克常數 ν : 電磁波的頻率
 - 光子的能量不能分割, 是電磁波的最小能量單位
 - 當原子放出或吸收光的能量時, 是以整個光子的能量來轉移
 - 因此能量的變化是不連續的
 - 光子具有類似粒子的性質, 光子的動量 p 為

提出假說解釋既有之實驗結果

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

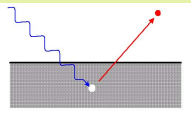
愛因斯坦, 1905
狹義相對論

愛因斯坦的光子說(1905)

- 光的強度
 - 代表在光的行進路徑上, 每單位時間內通過單位截面積的光子數目
 - 故光強愈強, 表示通過的光子的數目愈多
 - 光強愈弱, 表示通過的光子的數目愈少

3.以光子說解釋光電效應

- 當頻率為 ν 的人射光照射金屬板時, 相當於有許多能量為 $h\nu$ 的光子入射到金屬板上。
- 假設在光子和電子的交互作用過程中, 一個電子只能吸收一個完整的光子的能量。
- 電子獲得的能量
 - 部分用來脫離金屬對電子的束縛
 - 剩餘的能量則成為電子脫離金屬後的動能。



以光子說解釋光電效應

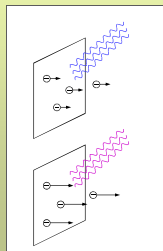
- 由於金屬中電子受到的束縛程度不盡相同, 最靠近金屬表面的電子所受的束縛力最弱, 脫離時所需的能量最小, 此最小能量稱為功函數 W 。
- 這些電子脫離金屬後具有最大的動能 K_{\max} , 其能量關係可寫成下式:
 - 愛因斯坦光電方程式

$$h\nu = W + K_{\max}$$

愛因斯坦光電方程式

- 若以強度相同, 但頻率不同的人射光照射
- 頻率愈高, 光子能量愈大
- 一個電子吸收一個光子的能量
- 因此電子的最大動能 K_{\max} 也愈大。

$$h\nu = W + K_{\max}$$



愛因斯坦光電方程式

- ~~$h\nu = W + K_{\max}$~~
- 降低入射光的頻率 ν , 則光電子的動能也隨之減小。
- 當 $K_{\max} = 0$ 時, 即沒有光電子產生, 這時所對應的光頻率即是底限頻率 ν_0 , 故

$$W = h\nu_0$$

$$K_{\max} = eV_s$$

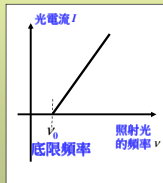
$$h\nu = h\nu_0 + eV_s$$

$$V_s = \frac{h}{e} (\nu - \nu_0)$$

以光子說解釋實驗結果(1)

- 若入射光的頻率 $\nu <$ 底限頻率 ν_0
 - $h\nu < W$ $W = h\nu_0$
 - 在光子和電子的交互作用過程中，一個光子的能量全部轉移給一個電子。
 - 即使入射光的強度再大或照射的時間再久，每個光子的能量仍然相同，電子還是只能吸收一個光子的能量。
 - 故無法產生光電效應。

$$h\nu = W + K_{\max}$$

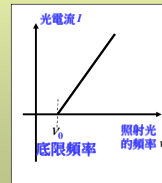


成功！！

以光子說解釋實驗結果(2)

- 若入射光的頻率 $\nu >$ 底限頻率 ν_0
 - $h\nu > W$ $W = h\nu_0$
 - 在光子和電子的交互作用過程中，一個光子的能量全部轉移給一個電子。
 - 即使光的強度微弱，仍然立即有光電子放出，形成光電流。
 - 由於電子受到光子的撞擊，立即取得能量，故光電流的產生不會有時間延遲的現象。
 - 故可立刻產生光電效應。

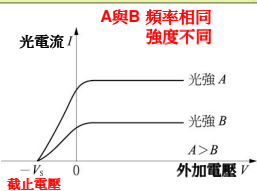
$$h\nu = W + K_{\max}$$



成功！！

以光子說解釋實驗結果(3)-1

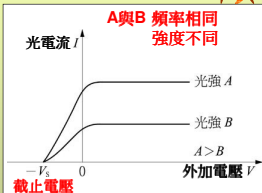
- 若入射光頻率相同，但光強增大，表示在單位時間內，入射在金屬表面上的光子數目增多。
- 光子和金屬中電子的碰撞次數也成比例增加。
- 單位時間內從金屬表面脫出的光電子數也隨之成比例增大。
- 故所形成的光電流和照射光的強度成正比。



成功！！

以光子說解釋實驗結果(3)-2

- 若入射光頻率相同，但光強增大，表示在單位時間內，入射在金屬表面上的光子數目增多。
- 但光子數目增多，每個光子能量仍然不變。
- 一個電子還是只能吸收一個光子的能量。
- 因此電子的最大動能 K_{\max} 不變。
- 截止電壓 V_s 相同，與入射光強度無關。



$$h\nu = W + K_{\max}$$

成功！！

光子說可以圓滿地解釋光電效應的實驗結果！！

那光子說就是正確的理論了嗎？

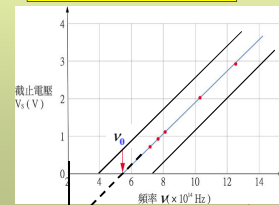
可以解釋的理論
不一定是正確的理論！

愛因斯坦光電方程式

$$hf = W + K_{\max}$$

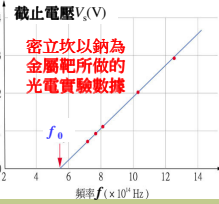
$$V_s = \frac{h}{e} (\nu - \nu_0)$$

- 截止電壓 V_s 對光頻率 ν 的關係
 - 斜直線
- 斜率： h/e
 - 提供了一種測定普朗克常數的方法
 - 與金屬靶無關
- 橫軸 (ν) 截距
 - 底限頻率 ν_0
 - 與金屬靶有關
- 縱軸 (V_s) 截距
 - $-h\nu_0/e = -W/e$
 - 與金屬靶有關
 - 功函數 W
 - 改變金屬靶？



愛因斯坦光電方程式的實驗驗證

- 密立坎不認同愛因斯坦的光子理論 → ?
- 企圖以精確的實驗數據來駁倒愛因斯坦的理論
- 密立坎對光電效應進行了前後長達十年的實驗研究，於1916年發表實驗結果
 - 實驗數據點全部落在同一直線上，完全符合愛因斯坦的光電方程式。
 - 實驗所得的普朗克常數 $h = 6.56 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，幾乎和普朗克由黑體輻射實驗數據所得者相同。
- 密立坎的實驗有力地證實愛因斯坦光電方程式的正確性。

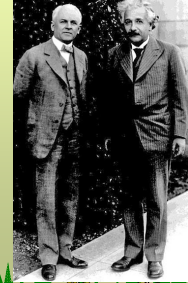


質疑的精神，
面對的態度，
實驗的重要性！

光電效應證實光具有粒子性！！

愛因斯坦解開了光電效應的困惑，獲得1921年諾貝爾物理獎。

密立坎由於油滴實驗和光電效應實驗上的成就，獲得1923年諾貝爾物理獎。

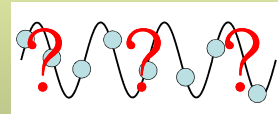


光的波粒二象性

- 光的波動性
 - 光的干涉、繞射現象...
- 光的粒子性
 - 光電效應
- 波動和粒子二象性
 - 光子或電磁波同時具有波動和粒子的性質
 - 光呈現波動性時，粒子性就無法被察覺
 - 當光的粒子性明顯時，波動性就消失
 - 粒子性和波動性不會同時顯現出來

想一想？

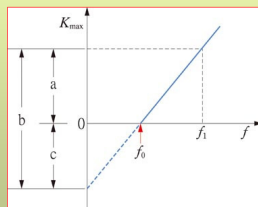
- 既然原本以為是波的光，具有粒子性
- 那麼，像電子、原子甚至棒球等原本是粒子的，會具有波動性嗎？



請待下回分解！

光電子的最大動能 K_{max} 對入射光的頻率 f 的關係圖

- (1) 此直線的斜率為何？ **想想看！！**
- (2) 當入射光的頻率為 f_1 時，圖中的 a、b、和 c 三個線段，何者是入射光子的能量？光電子的最大動能？金屬的功函數？



深度探討

- 為什麼一個電子只能吸收一個光子的能量？
- 一個電子可能吸收兩個光子以上的能量嗎？
- Google！