

科學研究的態度與方法—— 從光折變效應的發現談起

曹培熙

台大物理系

臺大醫學院光電生物醫學研究中心

大綱

- 0.光折變現象的特點
- 1.光折變效應的發現
- 2.面對「壞消息」的科學態度與方法
- 3.光折變效應的後續研究
- 4.密立根測量基本電荷的方法與態度
- 5.結論與啟示

光折變現象的特點

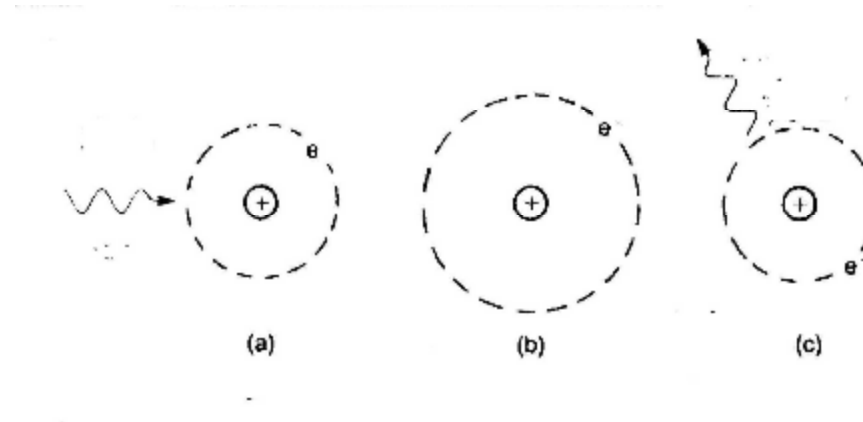
- 1.光束會聚程度夠強才會發生
- 2.建立穩定光束圖案所需的時間與光強度有關——光越強，所需時間越短
- 3.晶體可以記住先前建立的光束圖案
- 4.已經記憶的圖案會由於照光而抹除
- 5.產生此現象所需的光強度隨光波波長變化(此次簡單的示範實驗未涉及此特點)

光折變效應的發現

- 原來的研究計畫——研究題材的選擇
背景：雷射發明(1960)
實現二倍頻光波的產生(1961)
研究目標：提升從基頻光產生二倍頻光的轉換效率
- 實現原目標所需的條件——基頻光強度夠高；材料的轉換係數儘量增大

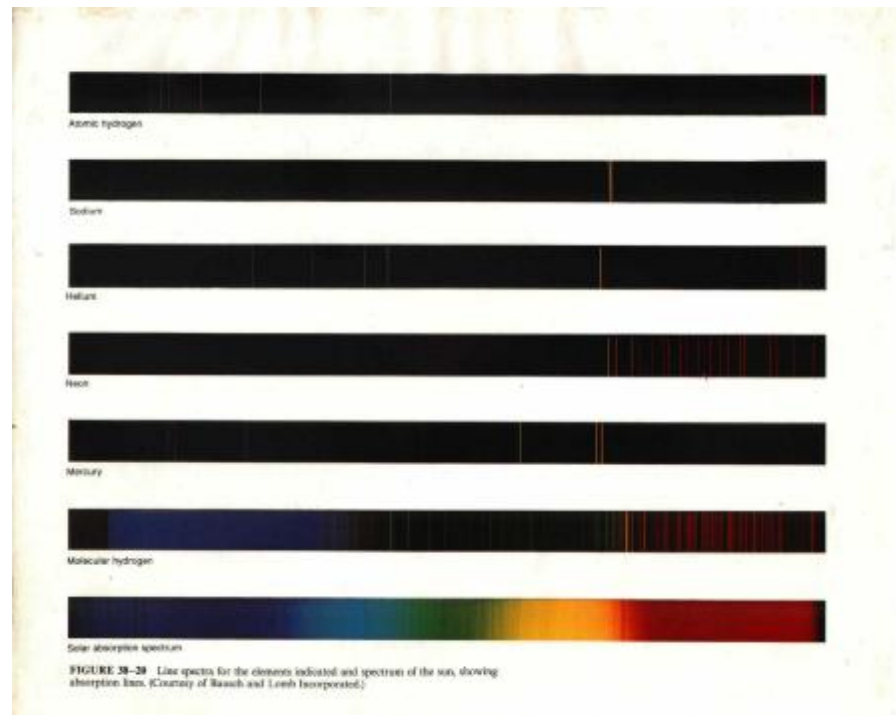
傳統光源產生光的機制

- 光源物質得到能量(吸收電能、光能、熱能、化學能等)，然後以電磁波(光子)的形式釋出能量：例如

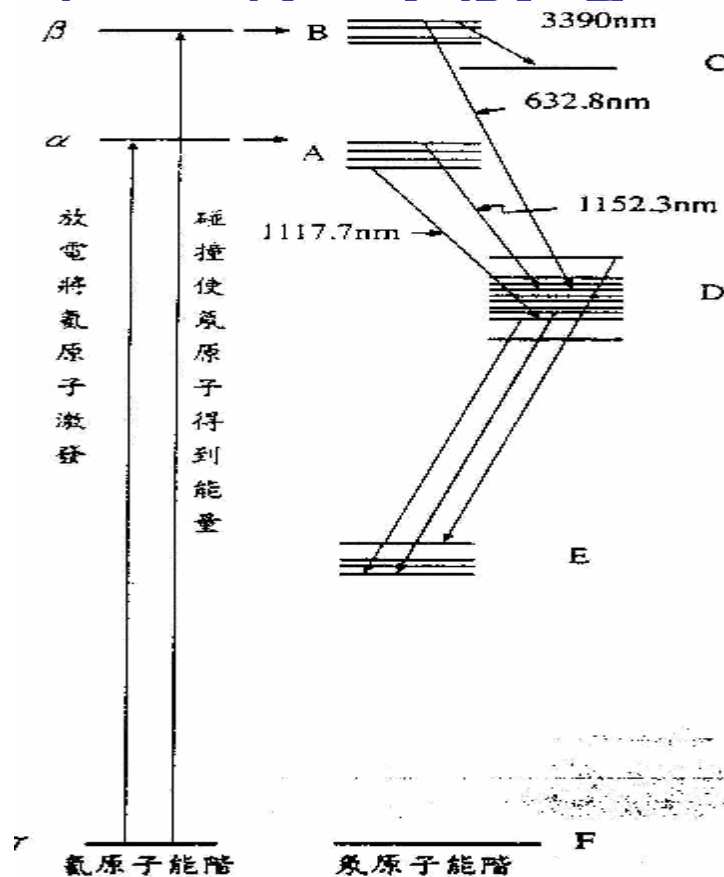


微觀物質吸收能量與發射光波的特殊條件

- 熾熱物體之外，每種原子、分子只吸收和發射特定波長的電磁波，因而各有特徵光譜

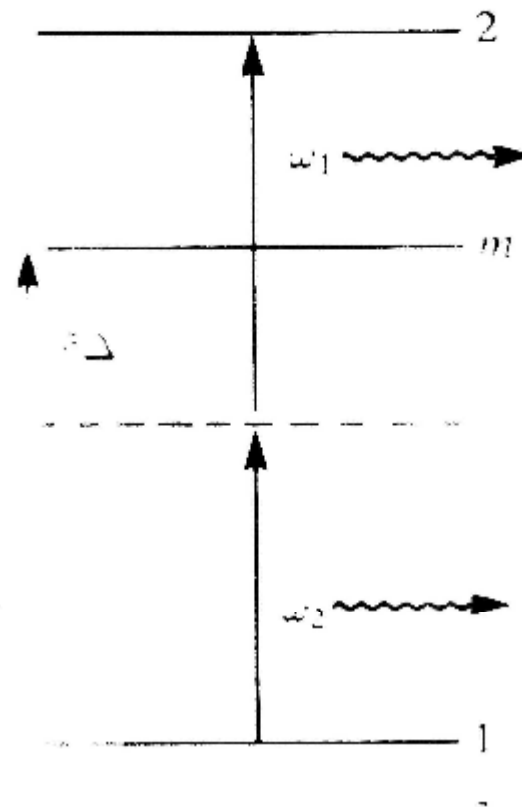


特徵光譜透露的訊息：微觀粒子的分立能階——不同的原子「蓋出不一樣的樓層結構」



產生二倍頻光的一個條件： 雙光子吸收

- 1.兩個光子同時到達一個「原子」；
 - 2.兩光子能量和，等於該原子兩能階的能量差。
 - 基本條件：光須夠強，
所以要用雷射光束。
- (光強度=每秒照射在每
 mm^2 的光子數 \times 每個光
子的能量)



摘水果與二倍頻

◎摘水果

樹上有成熟的水果，張三摘不到。

李四恰好來到。兩人疊羅漢摘到水果。

分析：張三、李四同時來到樹下；疊羅漢後的高度足以摘到水果。

◎二倍頻

兩個基頻光子同時到達晶體中的一個原子，

那原子同時吸收兩個光子，躍遷到適當的高能階。

隨後，原子發射一個倍頻光子，恢復低能階狀態。

◎夠強的光束中，才會有一個以上的光子同時抵達同一原子，所以要用雷射光產生二倍頻光。

光折變效應的發現

- 發現者：**Ashkin**等(1966)
- 當時已知鉕酸鋰(LiNbO_3)與鈦酸鋇(BaTiO_3)之類晶體的轉換係數相當大
- 打算實地測試轉換效率
- 實現原目標所需的條件：
入射光會聚成很強的光束

光折變效應的發現： 光「破壞」帶來壞消息

現象：

◎晶體像柱面透鏡般將光散開，

因而不可能產生二倍頻

(光束破壞了二倍頻環境)

◎因而最初將這現象稱為：光破壞。

面對壞消息的科學態度與方法

- 初步研究：找出會產生該效應的狀況
檢視晶體：其形狀沒有改變
推測：柱面透鏡效應是因為——
雷射光使晶體內的折射率發生變化，而且分布不均勻所致。
✖該組研究人員並未因而氣餒，反而透徹地繼續研究造成這效應的條件。

光折變效應

- ◎同一研究機構的其他後續研究重要發現之一：這個效應會留存(記憶)於晶體中
- ◎該機構的報導引起廣泛注意，發展出利用光折變效應的許多實驗與器件，其中最受注意的一項是用它儲存資訊。

光折變效應的後續研究

◎光電學術界許多人繼續探討：

發生光折變的原因

◎研究的部分成果：

發現更多光折變材料及條件；

了解產生光折變的微觀機制；

光折變效應與材料可應用於

光記錄、光訊號處理、光計算

(想一想：可用於記錄的其他材料及現象)

光折變效應的啟示

意義：折射率因照光而改變，且隨光強度變化，所以也是一種**非線性光學現象**，而且不需要用脈波就能產生。

啟示：面對意料之外的不利結果時，不妨有條理地繼續探索，**研究其原因**，而不要立刻黯然放棄。

密立根油滴實驗

- 目的：測量重要的基本常數——基本電量(並確認其「量子化」——所有電荷皆為其整數倍)
- 背景：
 - ◎法拉第於1840年發現電解定律
 - ◎Loschmidt於1865年計算出Avogadro數
 - ◎當時分子觀念已相當成功，可配合以上數據算出基本電量。
 - ◎但1840至1900之間，以太觀念主導著物理界的思考，所以沒有把它當作電荷量子化的證據。

密立根油滴實驗

※實驗規劃——觀測帶電體的運動

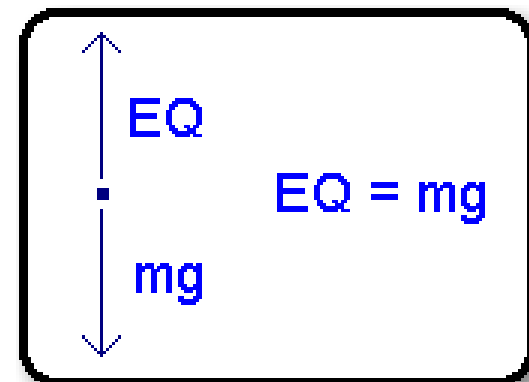
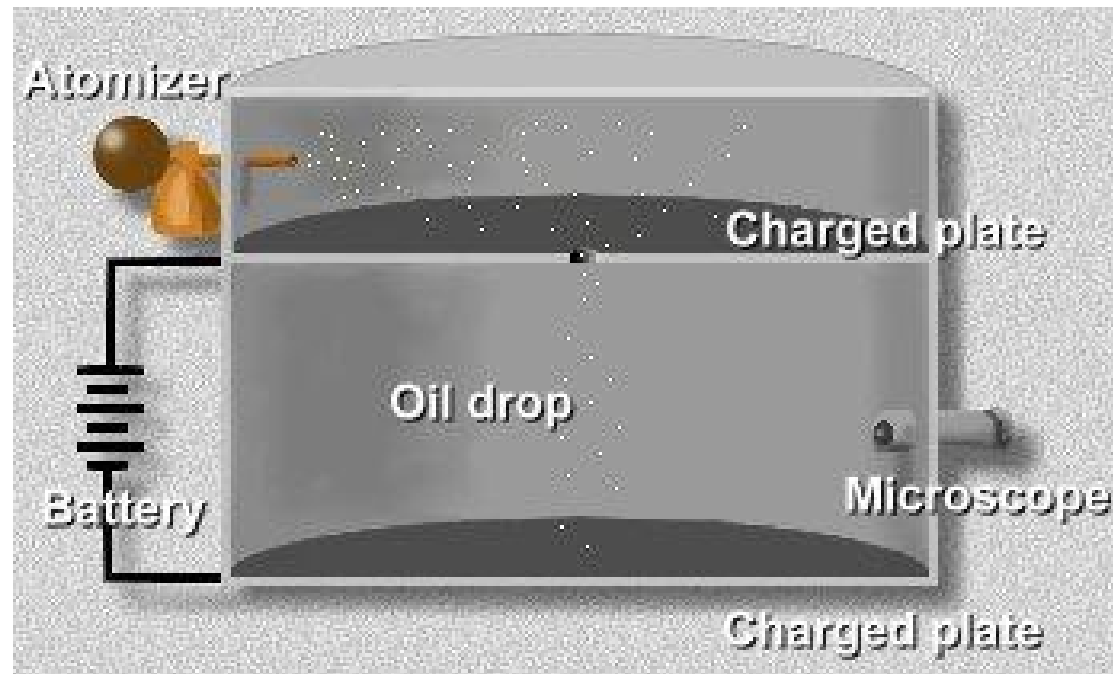
◎讓油滴帶電

◎觀測受靜電力、重力與粘滯力的油滴運動——
其終端速度含有電荷與油滴半徑的資訊

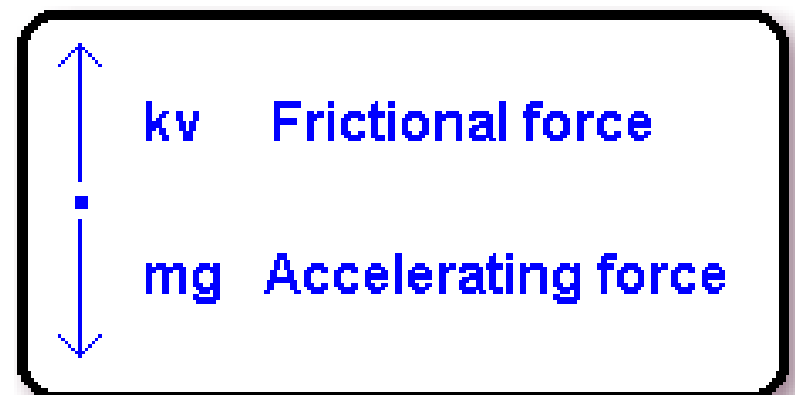
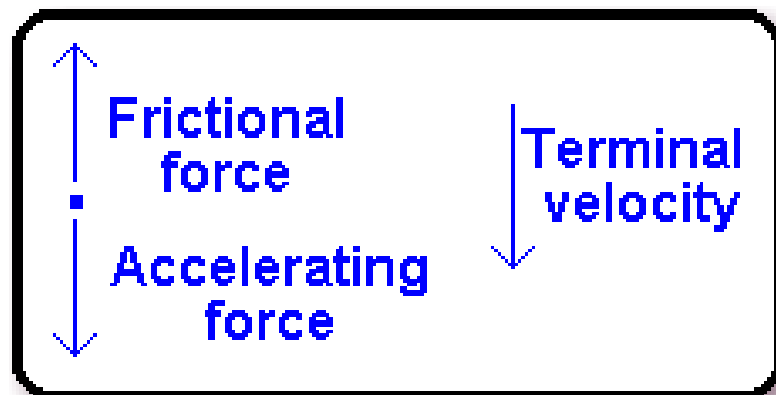
◎觀測只受重力與粘滯力的油滴運動——
其終端速度含有油滴半徑的資訊◎由這兩份
資訊得到油滴電荷

◎由電荷差的最大公約數算出基本電量

密立根油滴實驗



$E = V/d$
 hence $Q = dmg/V$



油滴實驗中需要的數據

◎電量Q由加電場E時的終端速度

$$v = QE/k = Q\mathbf{E}/(6\pi\eta\mathbf{r})$$

求出，E的數值可以由實驗裝置獲得，
還需要空氣的粘滯係數 η 與油滴半徑 r 。

◎根據未加電場時的終端速度

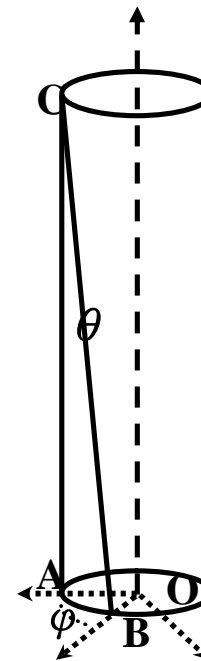
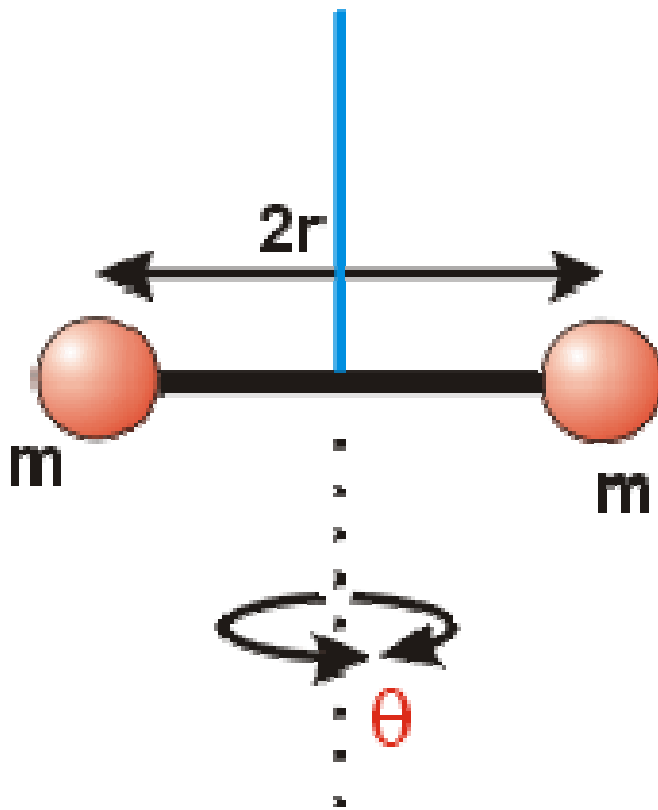
$$v' = mg/k = (4\pi/3)g\rho r^3/(6\pi\eta r),$$

若知道油的密度 ρ 及空氣的粘滯係數，
可求出油滴半徑。

密立根的實驗精神

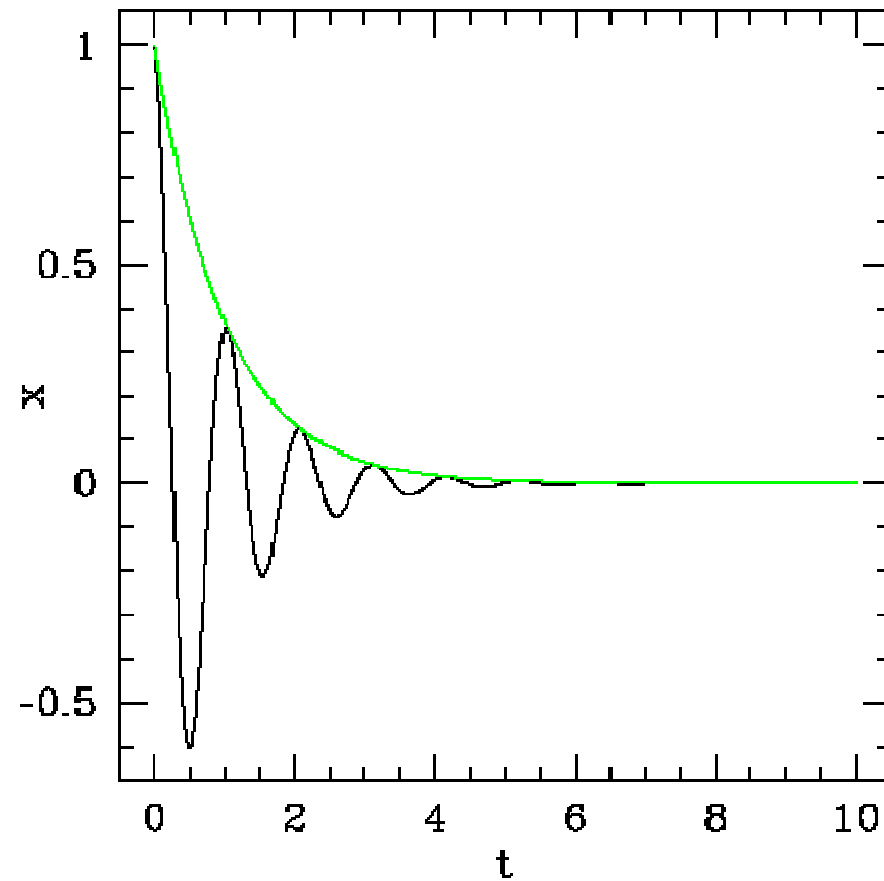
- ◎實驗裝置作過多次改良，儘量消除對於油滴的干擾。
- ◎自行測定粘滯係數等等必要的參數。
- ◎詳實紀錄實驗狀況及數據。
- ◎反覆檢討取得數據的過程，剔除操作中有不可靠因素（如溫度沒有保持固定等）的數據。
- ◎用扭秤測粘滯係數
- ◎計算粘滯係數時，需要扭秤懸線的剛性係數。
- ◎用相同的懸線，懸掛其他物體，測剛性係數。

扭秤(扭擺)—用以測出重力定律、 靜電定律、粘滯力等的裝置



輕微阻力下的振盪

以扭秤測黏滯係數的依據



現代實驗的典型數據

Voltage (V)	Charge (C)	Change in Charge (C)
391.49	4.005×10^{-18}	
407.80	3.845×10^{-18}	-1.602×10^{-19}
376.43	4.165×10^{-18}	$+3.204 \times 10^{-19}$
337.49	4.646×10^{-18}	$+4.806 \times 10^{-19}$
362.49	4.326×10^{-18}	-3.204×10^{-19}
376.43	4.165×10^{-18}	-1.602×10^{-19}
391.49	4.005×10^{-18}	-1.602×10^{-19}
362.49	4.326×10^{-18}	$+3.204 \times 10^{-19}$
349.54	4.486×10^{-18}	$+1.602 \times 10^{-19}$
407.80	3.845×10^{-18}	-6.408×10^{-19}
425.53	3.685×10^{-18}	-1.602×10^{-19}

油滴實驗的結果(發表於1910年)

- ◎電荷是量子化的
- ◎基本電量為 1.6×10^{-19} 庫侖(以現代術語表示)。

密立根對於初步結果的檢討

- ◎與根據電解定律求出者略有不符
- ◎誤差來源：空氣的粘滯係數有誤差

粘滯係數誤差的來源

- 測粘滯係數需要用到扭秤懸線的扭轉係數
- 扭轉係數與線的長度、直徑有關
- 測扭轉係數時，扭秤所掛物體重量，與測粘滯係數時不同，因而懸線的長度、直徑不同，不能採用相同的扭轉係數。

密立根實驗的啟示

◎實驗狀況的設計與操作要有周全的考慮。

◎細心的操作、紀錄之外，要加上逐步改進。

◎物理學各領域的知識要合併應用。

結語1：物理實驗的基本要求

- ◎營造有利於達成實驗目的之條件
- ◎分析實驗雜訊、誤差及其來源，設法降低誤差程度與雜訊
- ◎做好儀器的校準
- ◎確認相關器件的規格與參數的數值
- ◎了解相關理論及儀器原理
- ◎細心找出量化規則

結語1：物理實驗的基本要求(續)

- 建立量化規則時，要配合誤差分析，製作最能反映實驗狀況的實驗數據曲線(或數值分布圖)，獲得適當的數學表示式，並與相關理論相比較，詮釋數據的意義。若無理論可對照，數學表示式的精確性更形重要。氫原子光譜Balmer譜線系的通式為其經典代表(它成為Bohr原子模型以及量子論的線索)。

Angstrom(1868 , Uppsala) :

氫原子光譜線的可見光區波長

$$\lambda = 6562.10, 4860.74, 4340.10, 4101.20 \times 10^{-7} \text{ mm}$$

H_{α}

H_{β}

H_{γ}

H_{δ}

Johann Jakob Balmer (1885) :

$$\lambda = (9/5, 4/3, 25/21, 9/8) h, \quad h = 3645.6 \times 10^{-7} \text{ mm}$$

$$=(9/5, 16/12, 25/21, 36/32) h$$

$$=(3^2/5, 4^2/12, 5^2/21, 6^2/32) h$$

$$=(3^2/[3^2-2^2], 4^2/[4^2-2^2], 5^2/[5^2-2^2], 6^2/[6^2-2^2])h$$

$$\text{通式 : } \lambda = (m^2/[m^2-2^2])h$$

結語2：可能與不可能

- 觀測條件(包括環境條件、被觀測的系統狀況、觀測器材)不恰當時，不可能得到某些結果；改變條件會呈現那些結果。
- 不論如何改變觀測條件，不能將違背基本原理的事項，從不可能變成可能：永動機(違背能量守恆-----違背熱力學第一定律)、時光倒流(違背因果律-----違背熱力學第二定律)。

結論與啟示

※研究遇到阻礙或失敗時，要進行下一步的探索，而不是黯然放棄。

※原理的探討可以促進對於相關機制與應用的研究和發展

歡迎各位來當台大物理系的正式學生，
欣賞更多、更有趣的
物理學知識及實驗！