

波粒二元性

光的波粒二元性

牛頓

牛頓的雙三棱鏡實驗發現了光的光譜、光與色的關係，他也因此提出光的微粒說。

牛頓的一生：<http://web2.nmns.edu.tw/PubLib/NewsLetter/91/180/11.htm>

惠更斯

指出波前上的每一個點都可以看成新的波源，如此可以解釋光的直進、反射與折射。這是光的波動說的成功。

波的重疊性原理

線性微分方程式

一個波可以在時空中存在，是因為它滿足了所該具有之（波動）方程式的那個定律，幾乎所有的物理定律都可以用物理量之間的方程式加以表達出來。兩個波的疊加便是原

非線性波的範例：孤立子（孤粒子）

干涉與繞射



波粒二元性

新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook

iGoogle

Yahoo!奇摩

駁客記事臺北市立建...

自修室座位預約-查詢

夢駁林

百度一下，你就知道

維基百科 - 維基百科

歡迎光臨「2011年...

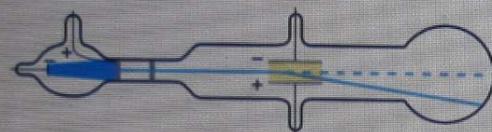


電子的發現

電的發現：雷雨天戶外放風箏的富蘭克林

陰極射線

J.J. Thompson 湯普森的陰極射線管實驗 (1897)，讓他確認電子是具有質量的物質，原子不是物質的最小單位



http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson

康卜頓效應

X-光的波長會因為撞擊到電子而被其吸收一部分而改變，同時電子也獲得動能。光子的能量與其波長（頻率）的關係再次確認，並且動量守恆與能它守恆同時要滿足。

波爾模型與原子光譜

波爾模型：詳見原子的結構單元

電子在原子中所表現的行為，決定了原子的光譜。



上午 11:19

2011/4/23



1.3 MEGA PIXELS

波粒二元性 新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕駛客記事臺北市立建... 自修室座位預約-查詢 夢駕林 百度一下，你就知道 维基百科 - 维基百科... 歡迎光臨「2011年... 其他語種

電子繞射與中子繞射

電子繞射

晶體的電子繞射實驗

湯普森：更高能量的電子繞射

中子繞射

德布洛利的物質波 (1926)

希望與恐懼 

迪拉克回憶在二十世紀前面的二十年，理論學家陷於希望與恐懼的雙重感受中。主要就是波與粒是觀念上不相容的兩樣東西。

光電效應是它無法避免的起點

愛因斯坦是第一個必須面對這個之題的人，它的光電效應公式

$E = h\nu$

E 是粒子屬性的量、 ν 是波屬性的量

德布洛利的想法

上午11:19
2011/4/23



ASUS

1.3 MEGA
PIXELS

波粒二元性 新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕駛記事臺北市立建... 自修室座位預約-查詢 夢駝林 百度一下，你就知道 维基百科 - 维基百科... 歡迎光臨「2011年... 其他書籤

德布洛利的想法

$$E = mc^2$$

$$E = mc^2 = h\nu$$

$$mc = h\nu / c$$

光子的速度是 c ，因此 光子動量 $p = h\nu/c$

利用 $c = \lambda v$ ，則

$$p = h / \lambda$$

到此為止都還在光子的層次上討論，但德布洛利主張這個關係對於所有的物質也是對的。

動量與波長的關係

$$p = h / \lambda$$

愛因斯坦認同，但哥本哈根學派不然。物質波被哥本哈根學派批評為誤導量子理論。

電子波的證實

Davisson 與 Germer 把低速電子打到鎳晶體而觀察到繞射現象

第一個博士論文諾貝爾獎

1929



上午 11:19
2011/4/23

波粒二元性 新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕客記事臺北市立... 自修室座位預約-查詢 夢駝林 百度一下，你就知道 維基百科 - 維基百科 歡迎光臨「2011年...」 其他書籤

互補原理 (Complementary Principle)

波爾所提出，主張當物質以波的行為表現時，粒子特性消失不表現，反之亦然。

波與粒子如同物質世界的兩種極端的表象，原來宇宙不只有粒子與波，而是介於之間，同時具有不同程度的表現的東西。

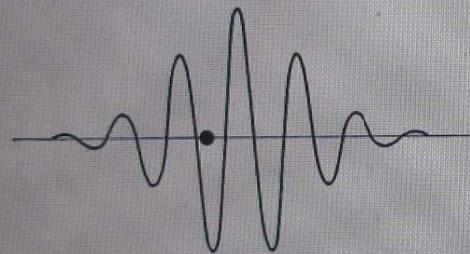


Figure 5-2 A very schematic picture of a wave function and its associated particle. The particle must be at some location where the wave function has an appreciable amplitude.



粒子與波的統合與機率解釋

如果粒子也有波，那麼我們馬上面臨一個問題，即該波的振幅是什麼意義？

粒子的能量是正比於粒子的類數，而波的能量則是振幅平方。兩種觀點同樣表現能量，這樣的共通點暗示了一個物質波之重要的物理意義上的解釋。

也就是說，振幅大粒子多，更精確地講是振幅的平方與粒子數目多少成正比。另一個重要的點是，由於只能談數目多少，而無更進一步關於個別粒子位置或運動方向等的資訊，因此就必須引入統計機率的觀念。這一點，（由波恩提出）在薛丁格提出他的波方程式而建立了量子力學之後，協助了對方程式解出來的波是什麼的詮釋，量子力學在有了波的機率振幅解釋後，更加完備。

波粒二元性與測不準原理

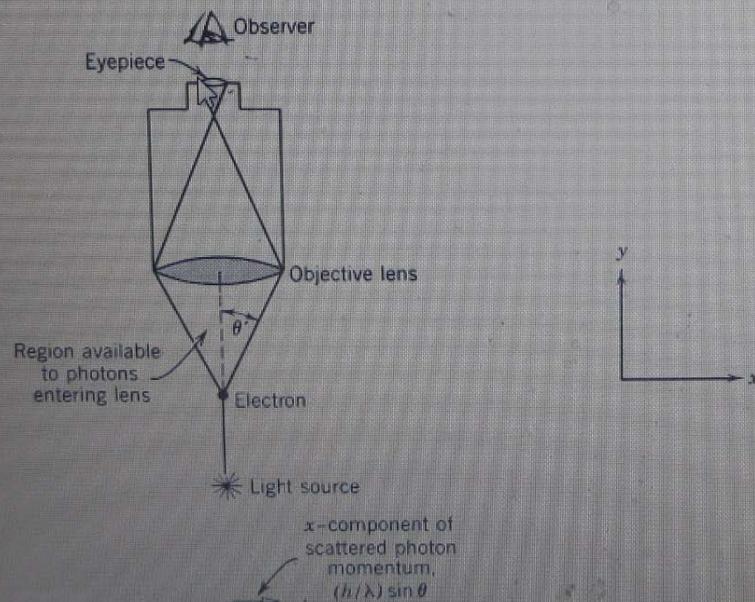
利用德布洛利物質波的觀念，再加上一些波的基本通性，就可以推論出測不準原理所陳述的結論。而測不準原理的結論在物理上是具有重要的位階。
 （我們常講有沒有物理意義，“物理意義”是什麼？把一個過程用一個符合事實的簡單物理律或物理量）

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

假如 \hbar 很小，就沒有測不準的限制了。

波爾的電子顯微鏡思考實驗



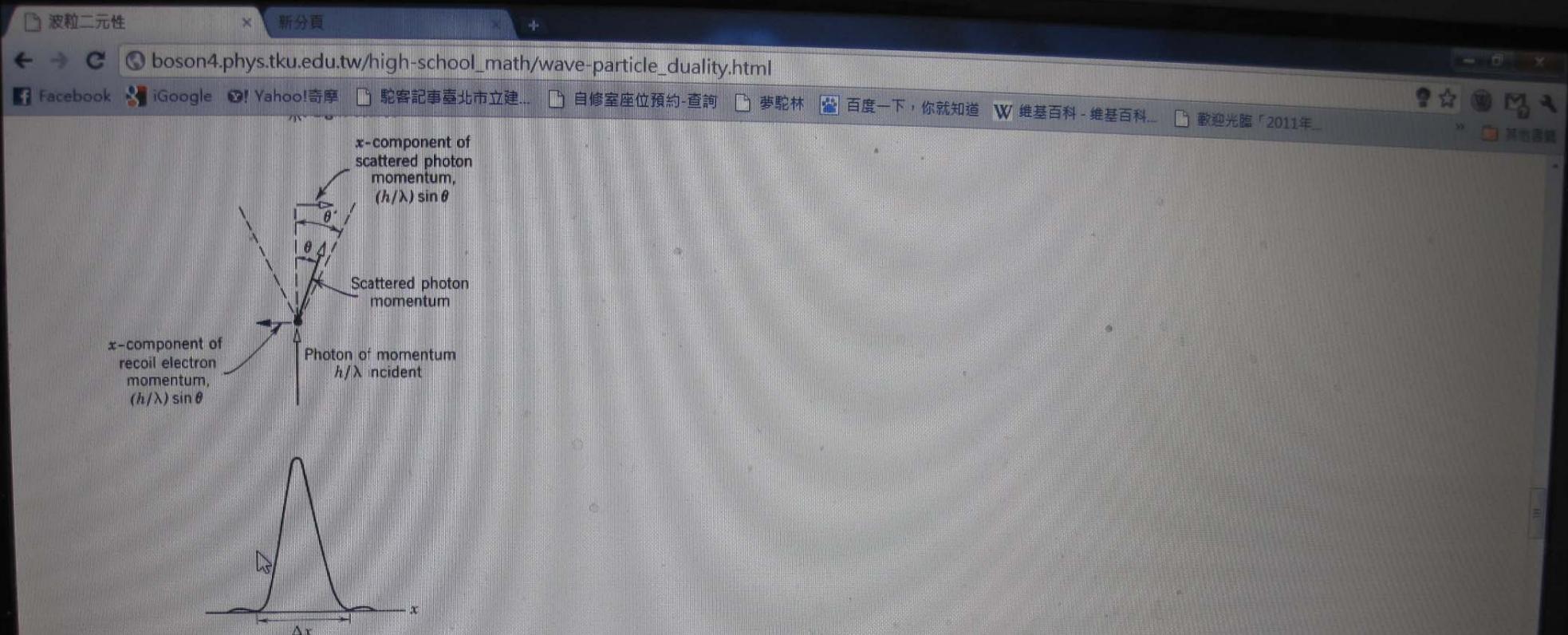


Figure 3-6 Bohr's microscope thought experiment. *Top:* The apparatus. *Middle:* The scattering of an illuminating photon by the electron. *Bottom:* The diffraction pattern image of the electron seen by the observer.

動量誤差從 $+ p \sin \theta$ 到 $- p \sin \theta$

$$\Delta p_x = 2 p \sin \theta = (2h / \lambda) \sin \theta$$

而顯微鏡的鑑別率可看成是單狹縫繞射的主峰寬度

$$\Delta x = \lambda \sin \theta$$

兩個乘在一起





1.3 MEGA

波粒二元性 新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕駛記事臺北市立建... 自修室座位預約-查詢 夢駭林 百度一下，你就知道 維基百科 - 維基百科 歡迎光臨「2011年... 其他選項

薛丁格方程式

如果物質也有波，那這個波滿足什麼樣的方程式？

薛丁格是興趣及能力都很廣博的科學家。漢密頓力學能同時處理光線的問題與力學的向，他結合了幾個的要素來建立新的波動力學，其中包含了物質波、光子能量公式、漢密頓力學等。

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

經過一番嘗試之後，他得到流傳後世的方程式(1926)：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x, t) + V(x) \Psi(x, t).$$

http://en.wikipedia.org/wiki/Schr%C3%B6dinger_equation



薛丁格方程式的一種合理化的推導（虛數的出現）

四個要滿足的基本要素

- (1) 符合德布洛利的 $\lambda = h/p$ 以及愛因斯坦的 $v = E/h$
- (2) 滿足 $E = p^2/2m + V$
- (3) 線性方程式（疊加原理）
- (4) 位能為常數（即外力為零）時，假設物質波是具有固定波長與頻率的正弦行進波



波粒二元性 新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕駛員臺北市立建... 自修室座位預約-查詢 夢駝林 百度一下，你就知道 維基百科 - 维基百科 歡迎光臨「2011年... Derivation [edit]

Short heuristic derivation

Schrödinger's equation can be derived in the following short heuristic way. [citation needed] [edit]

Assumptions

1. The total energy E of a particle is

$$E = T + V = \frac{p^2}{2m} + V.$$

This is the classical expression for a particle with mass m where the total energy E is the sum of the kinetic energy T , and the potential energy V (which can vary with position, and time). p and m are respectively the momentum and the mass of the particle.

2. Einstein's light quanta hypothesis of 1905, which asserts that the energy E of a photon is proportional to the frequency ν (or angular frequency, $\omega = 2\pi\nu$) of the corresponding electromagnetic wave:

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

3. The de Broglie hypothesis of 1924, which states that any particle can be associated with a wave, and that the momentum p of the particle is related to the wavelength λ (or wavenumber k) of such a wave by:

$$p = \frac{\hbar}{\lambda} = \hbar k,$$

Expressing p and k as vectors, we have

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}.$$

4. The three assumptions above allow one to derive the equation for plane waves only. To conclude that it is true in general requires the superposition principle, and thus, one must separately postulate that the Schrödinger equation is linear.

Expressing the wave function as a complex plane wave

[edit]

Schrödinger's idea was to express the phase of a plane wave as a complex phase factor:

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = A e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)}$$

and to realize that since

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi = -i\omega \Psi$$

上午 11:20
2011/4/23

任务栏图标：开始、IE、WPS Office、Word、Excel、PowerPoint、记事本、控制面板、我的电脑、我的文档。

波粒二元性

新分頁

boson4.phys.tku.edu.tw/high-school_math/wave-particle_duality.html

Facebook iGoogle Yahoo!奇摩 駕客記事臺北市立建... 自修室座位預約-查詢 夢駝林 百度一下，你就知道 维基百科 - 维基百科 歡迎光臨「2011年...」

$$E\Psi = \hbar\omega\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\Psi$$

and similarly since

$$\frac{\partial}{\partial x}\Psi = ik_x\Psi$$

and

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\Psi = -k_x^2\Psi$$

we find:

$$p_x^2\Psi = (\hbar k_x)^2\Psi = -\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\Psi$$

so that, again for a plane wave, he obtained:

$$p^2\Psi = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)\Psi = -\hbar^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi = -\hbar^2 \nabla^2\Psi$$

And, by inserting these expressions for the energy and momentum into the classical formula we started with, we get Schrödinger's famed equation, for a single particle in the 3-dimensional case in the presence of a potential V :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2\Psi + V\Psi$$

實數波與複數波

繩波、水波、電磁波，它們的振幅可以被觀察到

問：光子的薛丁格方程式長得什麼樣子？

答：參見網路上的分析 http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/wave_equations.html





複數(物理)量與實數(物理)量有什麼不同？複數出現 OK 嗎？

只有實數的物理量才能被測量到，例如，實數的長度值，可以用尺來量。

量子力學裏有所謂的 "可觀量 (Observable)" 這樣的量。它們是由只會造成實數期望值的 Hermitian Operator 所給出的。

思考與討論：自然界裏有什麼是複數的？

想一想，所有我們可以度量的東西都必須是 "正" 的，至少也只能是零。負值的概念，來自於因為訂了零作為參考點，抑或是衍生自比較。（例如，）不管我們在自然界會不會測量到負的量，有了負數可以讓原有的正實數更加方便，更多為了瞭解自然界而建立的數學模型可以更方便地被我們處理。

在純數學上，虛數來自一個簡單的需求，即一個數的平方會得到是負的值。與負值一樣，不管在自然界我們會不會測量到虛數的量，有了虛數就可以讓原來的實數更方便，同樣地，會有更多為了瞭解自然界而建立的數學模型，可以更方便地被人類求解出來，而達到預測自然的目的。



波函數的機率解釋與量子力學的建立完成

[量子物理複習](#)

機率詮釋 vs. 隱藏變數、EPR 思考實驗與貝爾不等式

<http://www.phy.ncu.edu.tw/dcc/History/Struggle%20of%20Titans.htm>





量子力學與路徑積分

古典力學的作用量 (Action) 與

最小作用量原理

動能減位能，是作用量

$$\exp\left(\frac{i}{\hbar} S\right)$$

費曼圖

波？粒？弦！

重力小是因時空是 11 維 (10+1)

Introduction to quantum mechanics : http://en.wikipedia.org/wiki/Introduction_to_quantum_mechanics#Schr%C3%B6dinger_wave_equation

