

# 光學 – 看得見的科學 I

## Optics – the science of light

朱士維  
台大物理系

# 1-1 生活中的光學

# 在這趟旅程中，我們將會

- 觀察生活中常見的光學現象
- 了解幾何光學與波動光學的基礎
  - 光的傳播
  - 光和物質的交互作用
- 學會必須的數學工具來描述光學現象
- 熟悉並應用光學成像理論

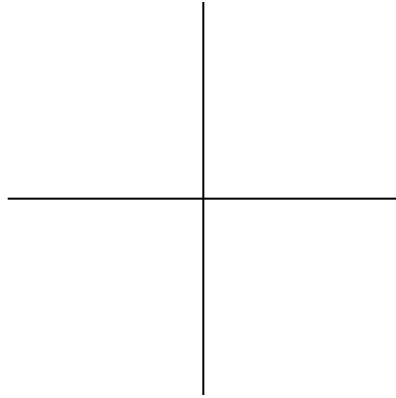
# Have Fun!!

# 課程特色

- 大量的示範實驗與生活實例
- 概念性問題和全世界同學一起投票討論

- 讓我們先來看看幾個簡單可見的光學實例

# 你/妳能解釋這個現象嗎？

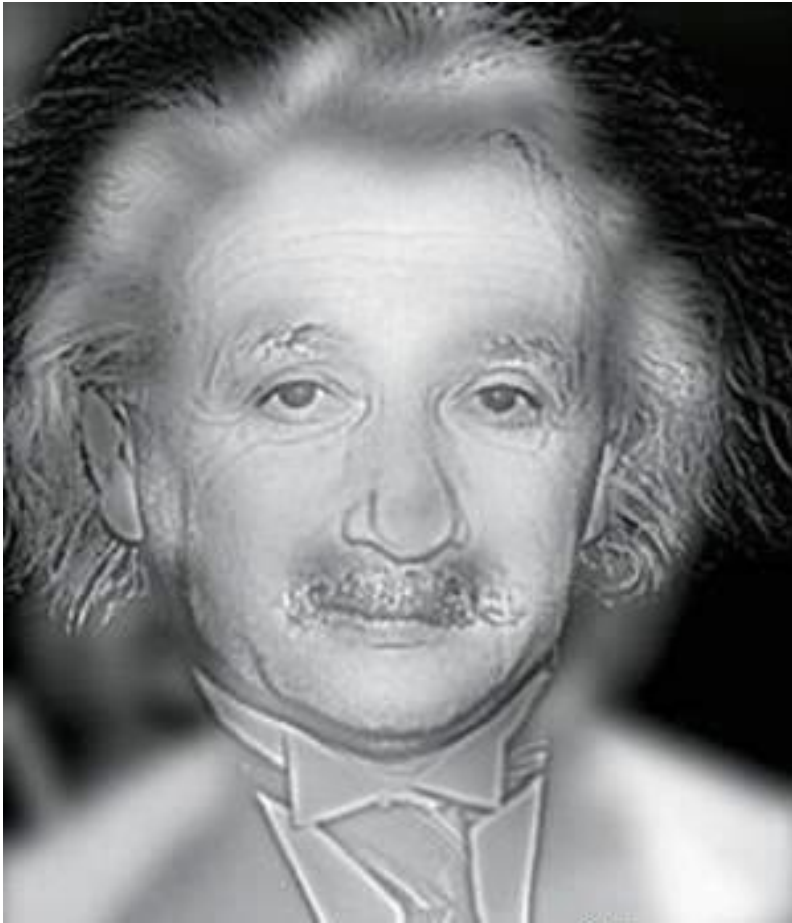


- 將你/妳的眼睛靠近這個螢幕上的十字（或是自己在紙上畫一個約十公分見方的十字），直到這個十字變的模糊看不清楚（約距離螢幕五公分左右，眼鏡不需取下）。
- 此時將眼睛微眯，請問十字圖案的橫線還是直線變比較清楚？為什麼呢？

# 比較一下大家的結果

- 請問上述實驗中，當眼睛眯起後，十字的哪一條線變比較清楚？
  1. 兩條線都變清楚
  2. 橫線變清楚
  3. 直線變清楚
  4. 兩條線都不會變清楚

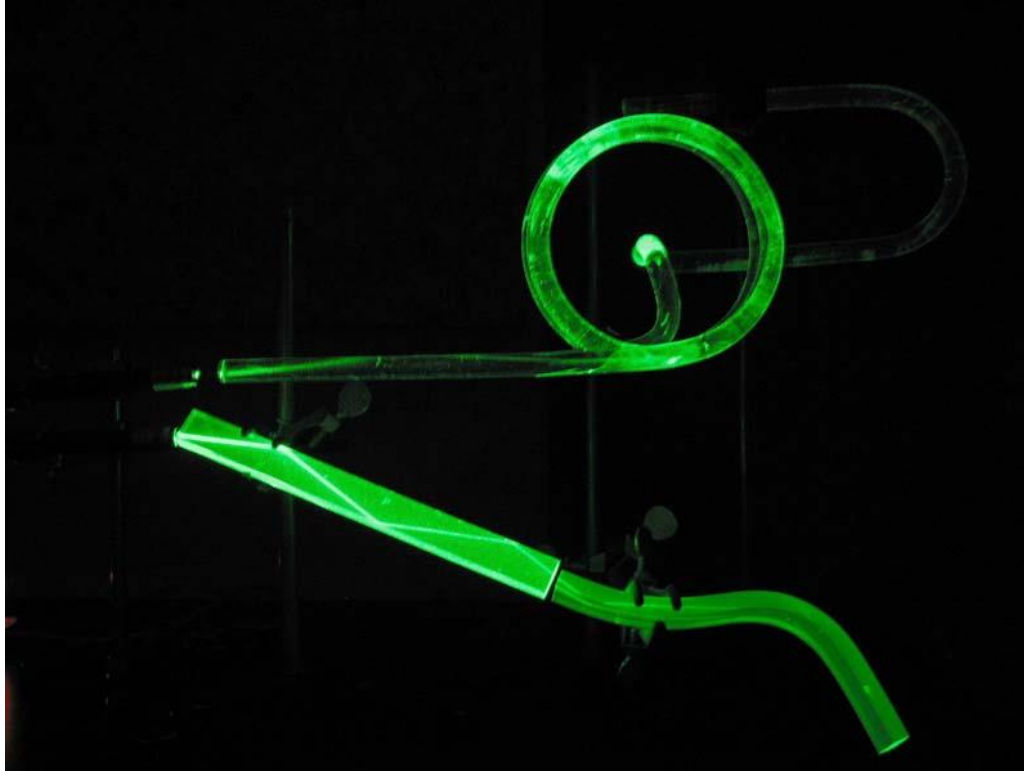
# 你/妳能解釋這個現象嗎？



- 請問你/妳看到的是愛因斯坦還是瑪麗蓮夢露？
- 如果把眼睛眯起來，或是把眼鏡取下，請問這時候你/妳看到的是誰？
- 為什麼？



# 可以自己在家試試看的遊戲



# 試試看這個！



- 找一片CD或DVD，再找一個會發光的日光燈管，大致上讓眼睛和日光燈管符合入射角等於反射角的情況，請問可以從CD或DVD的反射影像看到白色的日光燈管嗎？
- 移動頭部，使得眼睛和日光燈管的角度改變，請問能看到在CD或DVD上的日光燈管分開成好幾個不同顏色的燈管嗎？總共能看到幾個顏色？

# 自己玩玩看！

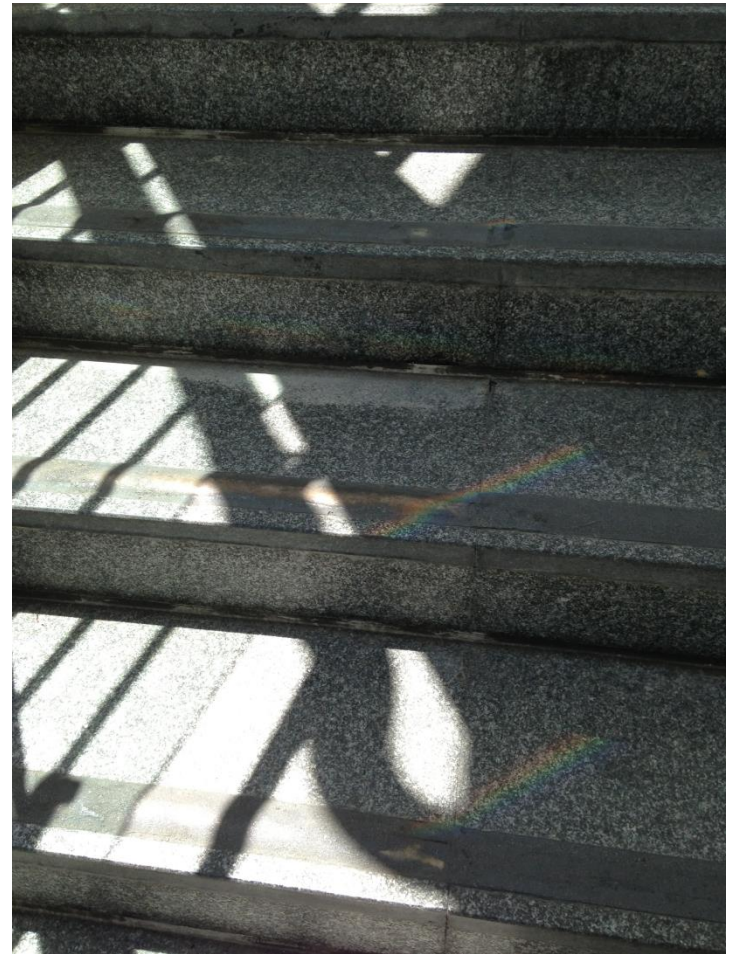
- 從CD/DVD觀察日光燈的反射光影像，能看到的在CD或DVD上的日光燈管分開成好幾個不同顏色的燈管，試試看用相機能拍的下來嗎？
- 拍下來的照片中，一隻燈管會分開變成幾個不同顏色的燈管？和眼睛看到的一樣嗎？

# 自己玩玩看！

- （注意，請不要直視雷射光！！）
- 如果能取得一隻演講用的紅光或綠光雷射筆，試試看把雷射光打在CD或DVD上，觀察反射光總共有幾個光點？
- CD和DVD能產生的反射光點數目一樣多嗎？光點之間的距離一樣遠嗎？

# 再來一個彩色的

- 這是台北市的某捷運站，在陽光下，走廊上出現了一道道彩虹。



# 生活中的彩虹

- 猜猜看這些彩虹的成因？
- 除了雨後的天空外，你/妳的生活中有沒有地方找得到彩虹？



# 和天空有關的光學

傍晚六點，台大物理系館俯瞰台大校園



# 和天空有關的光學

觀察一：天空為什麼是藍色的呢？





# 和天空有關的光學

觀察二：雲為什麼是白色的呢？



# 和天空有關的光學

觀察三：天空的藍色為什麼越往上越深？



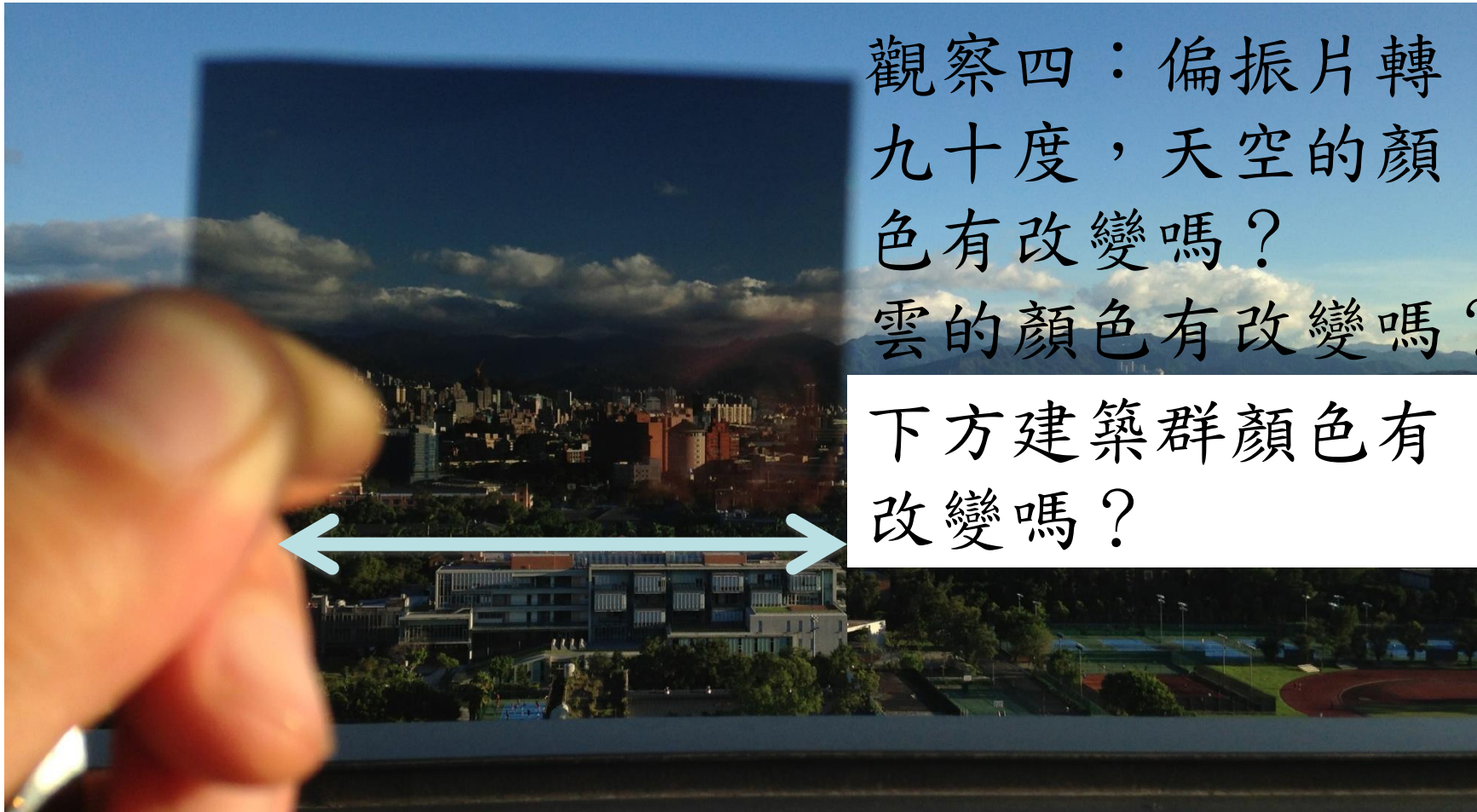


# 和天空有關的光學



觀察四：加一片  
照相常用的偏振  
片。

# 和天空有關的光學



觀察四：偏振片轉九十度，天空的顏色有改變嗎？  
雲的顏色有改變嗎？  
下方建築群顏色有改變嗎？



# 和天空有關的光學

觀察五：夕陽為何是紅色的呢？



# 來觀察一下你的螢幕

- 用一個簡易顯微鏡觀察液晶螢幕的組成

# 光學導論 第一部分

- 第一週：歷史回顧＋光的本質
- 第二週：光和物質的交互作用
- 第三到六週：幾何光學
  - 光線追蹤法 (ray-tracing)
  - ABCD 矩陣
  - 基本成像系統

# 1-2 光學的歷史回顧



# 第一周 光學的歷史回顧

- 讓我們先從一個看似簡單的問題開始
- 最近有設計師作出可以隨目光而移動的衣服...
- 請問當我們目光由左掃到右，我們能看得到房間中的物體是因為
  1. 有光線從眼睛發出到物體上
  2. 有光線從眼睛發出並從物體上反射回來
  3. 有光線從物體上射入眼睛
  4. 有光線從物體旁射入眼睛

# 最早的人造光學器具

- 三千年前亞述人的透鏡 (Nimrud lens)



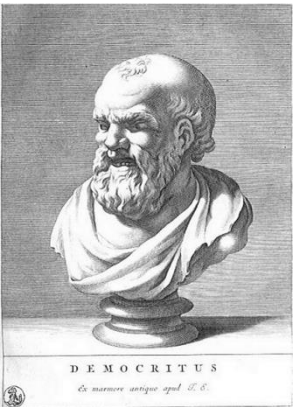
# 最早的人造光學器具

- 三千年前西周時代中國的陽燧（青銅器做成的反射凹面鏡）



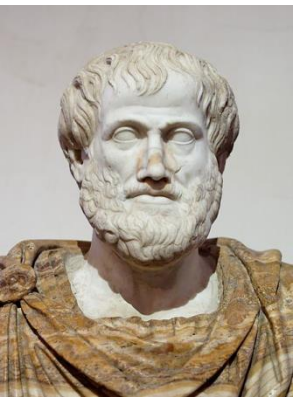
# 光學的歷史進展

- 古希臘時代



- 德謨克利特 (Democritus, 西元前460 – 370):

- 視覺是來自於原子的影像進入眼睛
    - 顏色則是來自於組成原子的不平整



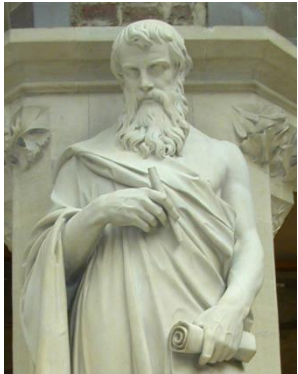
- 亞里斯多德 (Aristotle, 西元前384 – 322):

- 眼睛和物體之間存在一種傳輸影像的介質，稱為以太
    - 以太需要日光才有作用，否則會變不透明。



# 光學的歷史進展

- 歐幾里得 (Euclid, 西元前325 – 265):
  - 幾何之父
  - 光以直線前進，且入射角等於反射角
  - 視覺起源於有光線從眼睛射到所觀察的物體上
- 但我們現在知道是因為有光線從物體上反射到眼睛裡。
- 這就是世界科學的演進，推翻了從前大師的理解。這個現象在光學的領域非常常見。



# 光學的歷史進展

- 墨經 (戰國時期，約西元前388年):
  - 「目以火見」
  - 眼睛因光線的存在而能看見
  - 並未清楚描述視覺與光線的交互作用

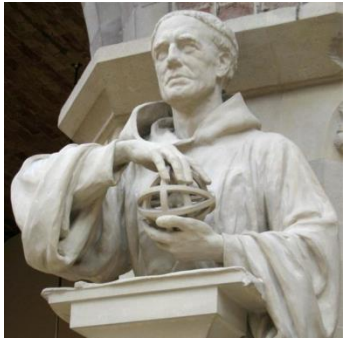


圖片來自 wikipedia

# 中世紀



- 海什木 (Alhazan, 965 – 1040) :
  - 建立了幾何光學，被稱為光學之父
  - 看的見是因為有光從物體走到眼睛



- 培根 (Bacon, 1214 – 1294) :
  - 強調以實驗瞭解自然科學的重要性
  - 解釋了放大鏡與眼鏡的折射原理。

# 文藝復興時期



- 克普勒 (Kepler, 1571 – 1630)
  - 克普勒三大行星運動定律
  - 解釋望遠鏡的機制
  - 解釋視覺如何產生以及配合解剖學說明瞳孔, 角膜, 視網膜各自的功能
  - 在眼鏡發明三個世紀後, 終於正確解釋它的機制
- 笛卡爾 (Descartes, 1596 – 1650)
  - 奠定西方現代哲學理性基礎：我思故我在
  - 解析幾何之父（笛卡爾座標系）
  - 發表折射定律
  - 認為光是一種粒子，以太是傳遞光的介質，且顏色是來自以太粒子的自轉速度。





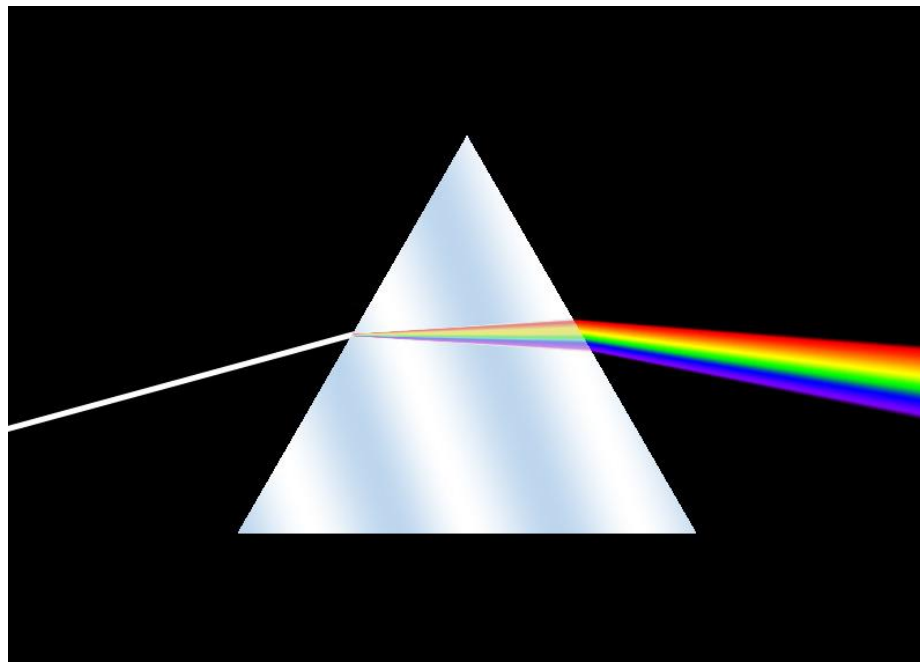
# 隨堂測驗

- 請問到文藝復興時期，人類已知的光學特性包括
  1. 反射定律
  2. 折射定律
  3. 光的繞射
  4. 光的干涉
  5. 光電效應

# 1-3 光的本質究竟是？(1)

# 猜猜看，光的本質是什麼？

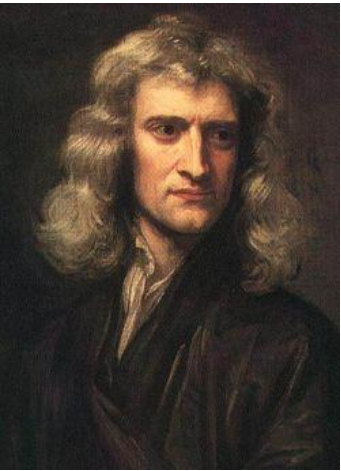
- 三稜鏡分光實驗是牛頓在光學上的重要成就之一，請問經由此實驗，牛頓推論光的本質是一種
  1. 波動
  2. 粒子
  3. 以上兩者皆是
  4. 以上兩者皆不是



# 科學革命時期



- 惠更斯 (Huygens, 1629 – 1695)
  - 光的波動理論(1690)
  - 以太是由微小的彈性粒子組成, 且每一個以太都可以視作是一個新的點波源



- 牛頓 (Newton, 1643 – 1727)
  - 光是微小粒子, 具有引力並遵守古典運動定律
  - 用三稜鏡可以把白光分開成七彩顏色
  - 發明反射式望遠鏡

# 18-19世紀的近代光學



- 楊格 (Young, 1773 - 1829)
  - 光的干涉實驗證明光具有波動特性
  - 推翻了牛頓的光粒子理論
  - 被選為十大最美的科學實驗之一



- 菲涅耳 (Fresnel, 1788 - 1827)
  - 光具有繞射現象
  - 可用光的波動性解釋



# 想想看...

- 為了要證明光具有波動的性質，科學家們進行了光的干涉實驗。
- 生活中最常見的波動大概就是水波，水波也有干涉現象。
- 除了干涉現象之外，你還能不能舉出其他特性是光波和水波都具備的，來說明光真的具有波動的特性？

# 18-19世紀的近代光學

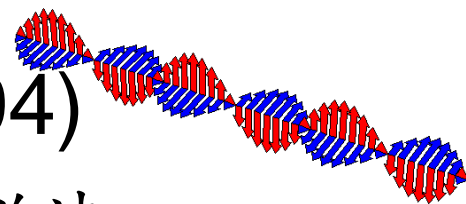


- 馬克士威爾 (Maxwell, 1831 – 1879)

- 推導出了電磁波理論
- 推論光就是一種電磁波
- 統一了光，電，磁三種看起來似乎無關的物理現象
- 預測無線電波的存在

- 赫茲 (Hertz, 1857 – 1894)

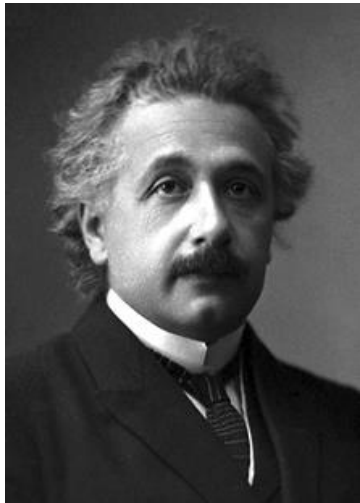
- 實驗證實了天線發射電磁波



# 20世紀的現代光學



- 普朗克 (Planck, 1858 – 1947)
  - 為解釋黑體輻射，提出能量為不連續的量子理論
  - 1918 諾貝爾物理獎



- 愛因斯坦 (Einstein, 1879 – 1955)
  - 為解釋光電效應，提出光的粒子說
  - 1921諾貝爾物理獎



# 20世紀的現代光學

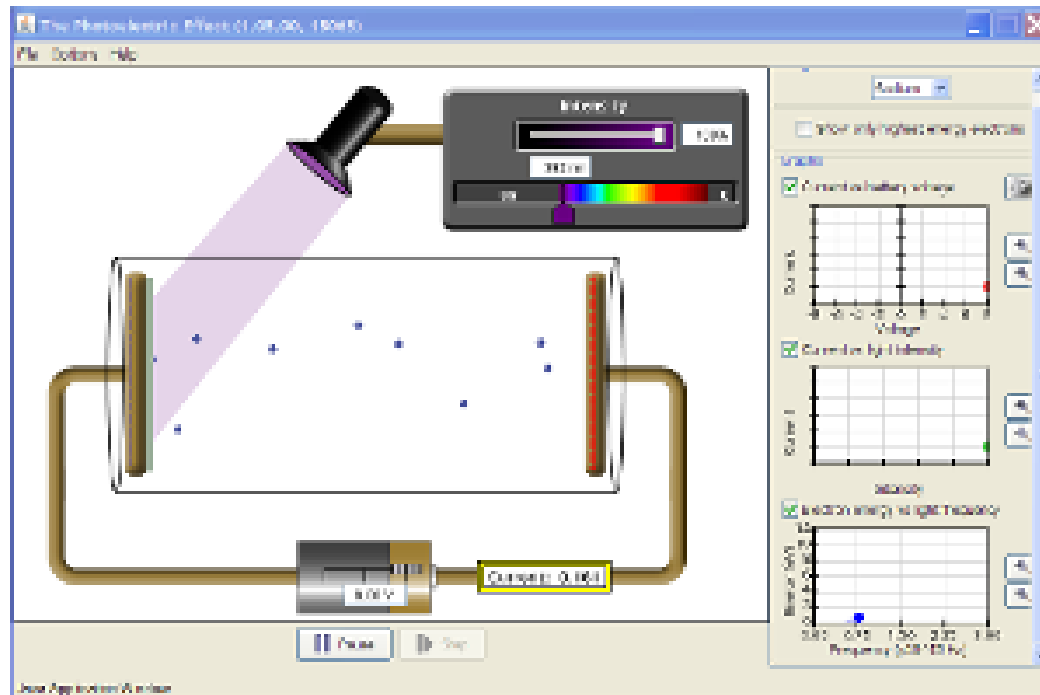


- 密立根 (Millikan, 1868 – 1953)
  - 以實驗證明Einstein的光電效應解釋
  - 起源於不相信光的粒子論解釋
  - 1923 諾貝爾物理獎

圖片來自wikipedia

# 20世紀的現代光學

## Photoelectric Effect 光電效應



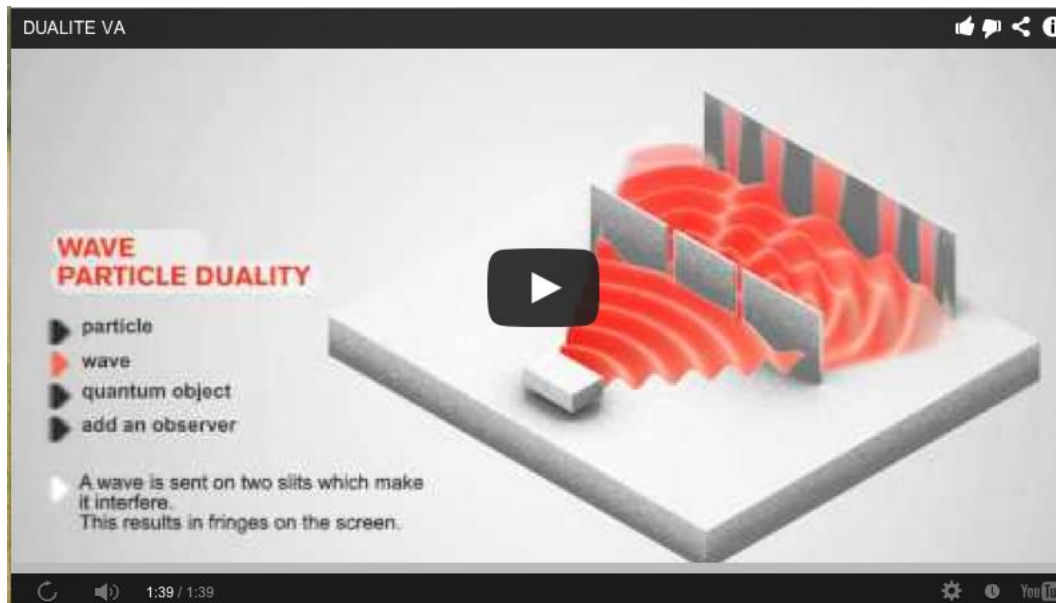
有趣的線上模擬光電效應

[http://phet.colorado.edu/zh\\_TW/simulation/photoelectric](http://phet.colorado.edu/zh_TW/simulation/photoelectric)

# 20世紀的現代光學



- 德布羅意 (de Broglie)
  - 應用量子理論詮釋光的波動粒子共存性
  - 1929 諾貝爾物理獎



很漂亮的概念影片 <http://www.toutestquantique.fr/#dualite>

# 1-4 光的本質究竟是？(2)

# 光究竟是什麼？

- 光是電磁能量的一種
- 光的能量藉由“光子”來傳遞
  - 屬於粒子行為，例如光照產生陰影
- 光的能量藉由波動傳遞
  - 屬於波動行為，例如干涉和繞射
- 量子力學整合了兩種不同的觀點
  - 波動-粒子二元性



# 有趣的類比

光	↔	人
波動	↔	背面
粒子	↔	正面

- 佛說般若波羅密，即非般若波羅密，是名般若波羅密

# 光的粒子特性

- 光子



- 質量 = 0

- 速度  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

- 而且永遠以光速前進，不會停下來

# 光的粒子特性

- 根據特殊相對論,一個不具質量的粒子在光速下仍然能夠具有能量以及動量!
- 能量  $E = pc$ 
  - $p$ : 動量
  - $c$ : 光速 =  $3 \times 10^8$  m/s

# 光的粒子特性

- 根據Planck解釋黑體輻射，光必須要具有不連續的能量  $E = hf$ 
  - $h$  是普朗克常數  $= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J sec}$
  - $f$  是光的頻率
  - 結合特殊相對論，光子動量  $p = h/\lambda$
  - 這裡就開始有波動與粒子同時存在的感覺

# 光的波動特性

由真空中的Maxwell  
方程式開始

得到波動方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = m_0 e_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



$$\nabla^2 \mathbf{E} = m_0 e_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = m_0 e_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

在後面波動光學的章節處會有清楚的推導，或請見台大易富國教授講解影片

[http://case.ntu.edu.tw/CASTUDIO/index.php?speech\\_ID=560&page=2#Playing](http://case.ntu.edu.tw/CASTUDIO/index.php?speech_ID=560&page=2#Playing)

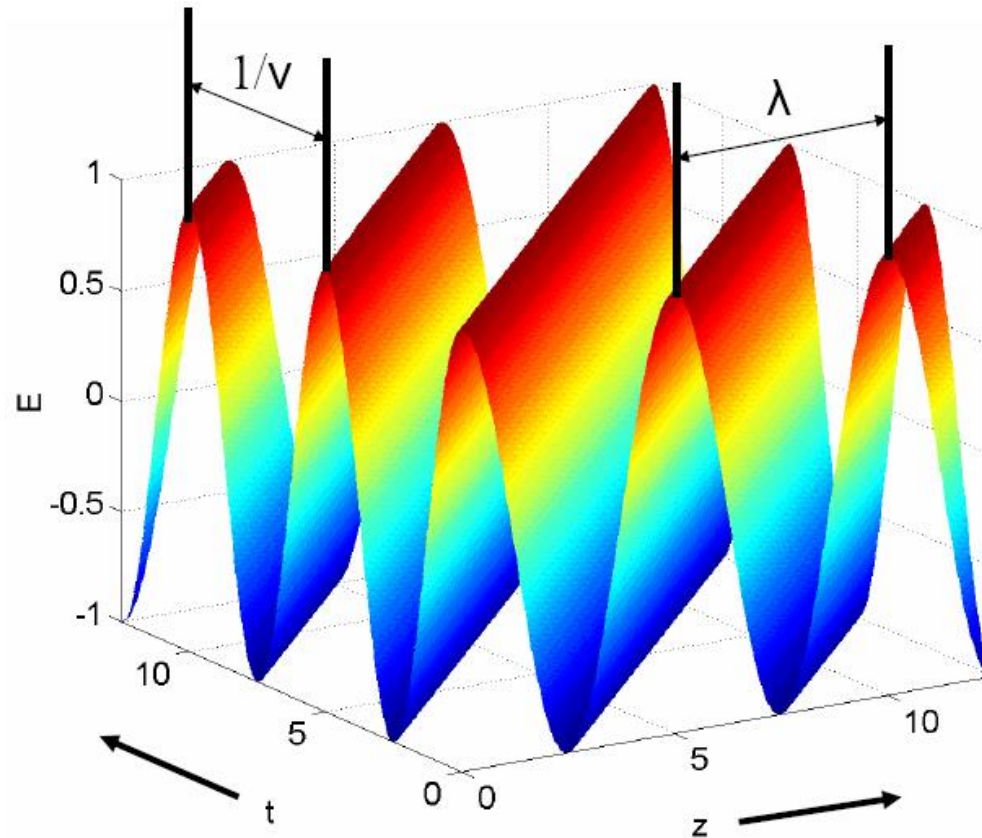


# 光的波動特性

- 以一組假設解代入  $\mathbf{E}(x, t) = E_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - ft\right)\right)$
- 得到  $f^2 / \lambda^2 = \frac{1}{m_0 \epsilon_0} = c^2 = \left(3 \times 10^8 \text{ m/s}\right)^2$
- 這個數字和 Fizeau 與 Foucault 所量得的光速非常接近！
  - 光速之所以用  $c$  這個代號，是取拉丁文中的 *celeritas* -- 非常快速之意

# 重要推論

1. 光是一種電磁波
2. 所有的電磁波都以光速前進



# 光是一種電磁波

- 可見光與我們身體發出的紅外線還有宇宙背景輻射本質上是一樣的！！

## The Nobel Prize in Physics 2006

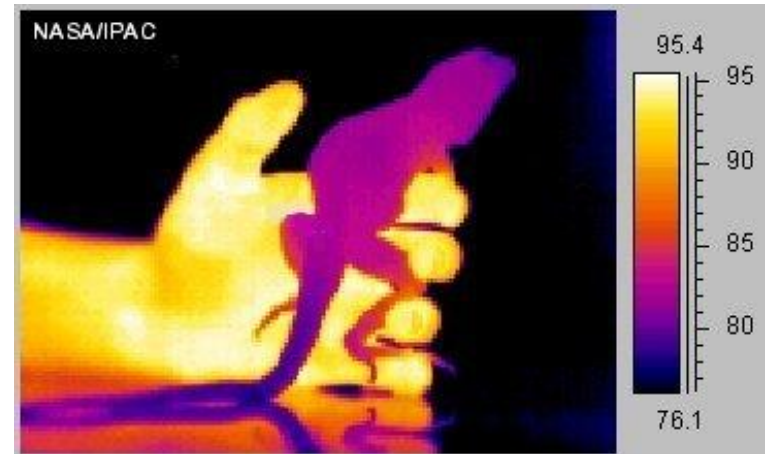


Photo: P. Izzo  
John C. Mather



Photo: J. Bauer  
George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006 was awarded jointly to John C. Mather and George F. Smoot *"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"*



[http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic\\_classroom/cosmic\\_reference/whatisir.html](http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/cosmic_reference/whatisir.html)

# 電磁波光譜

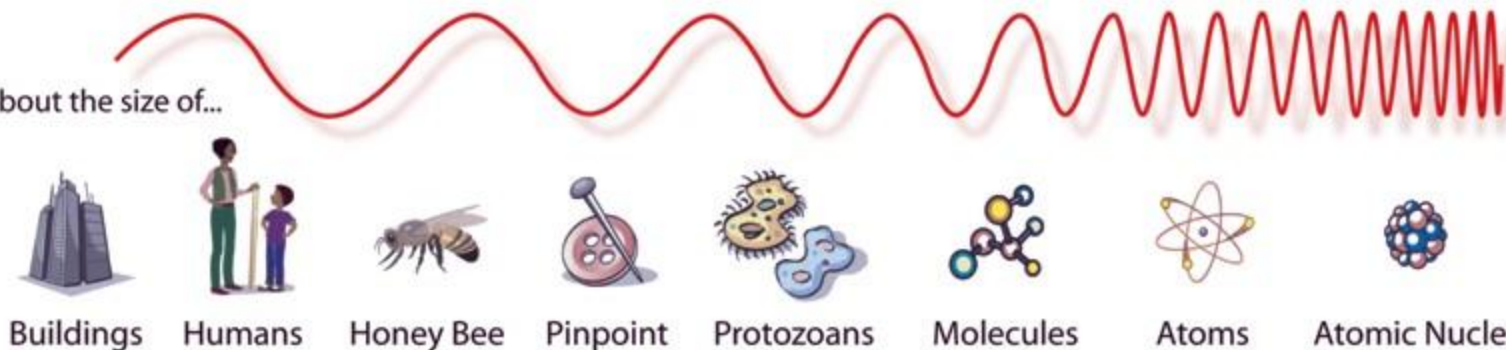
Penetrates  
Earth  
Atmosphere?



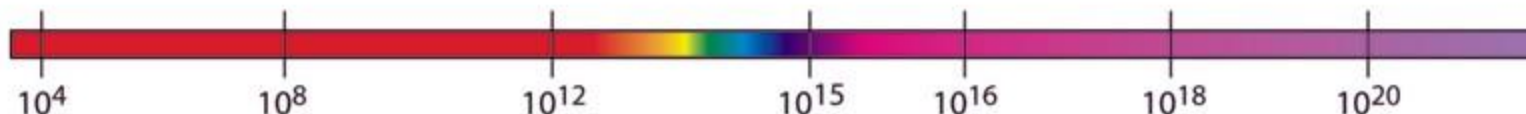
Wavelength  
(meters)



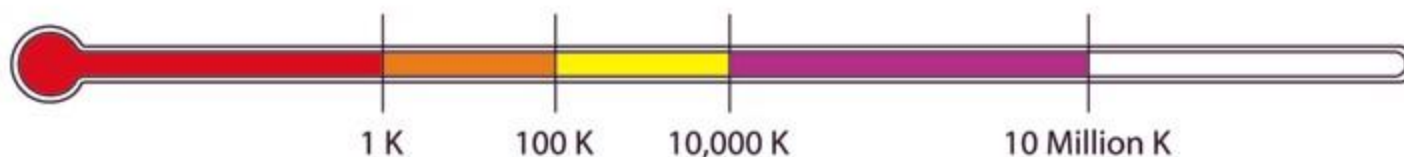
About the size of...



Frequency  
(Hz)



Temperature  
of bodies emitting  
the wavelength  
(K)



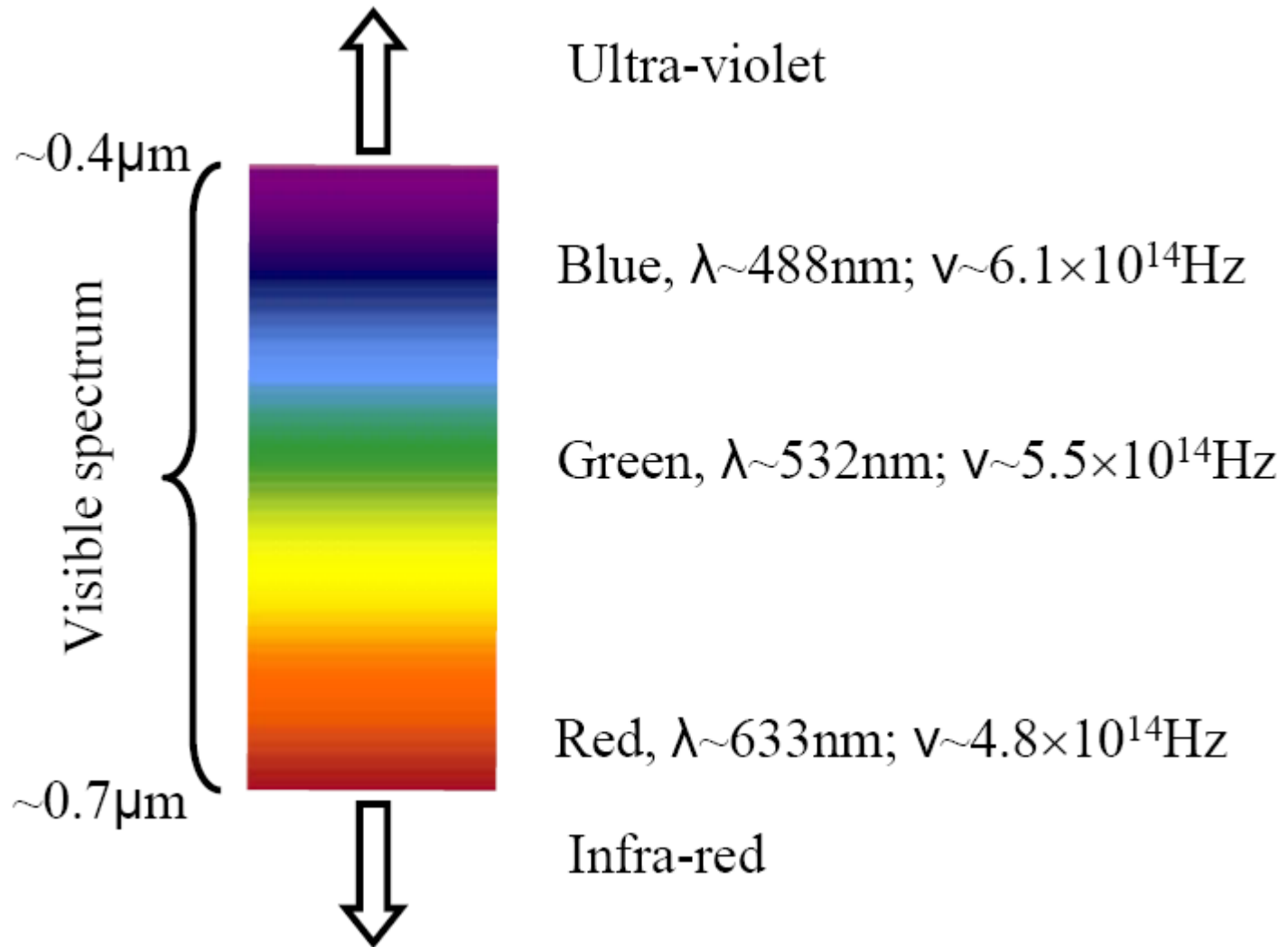
# 電磁波波長與交互作用尺度



wikipedia

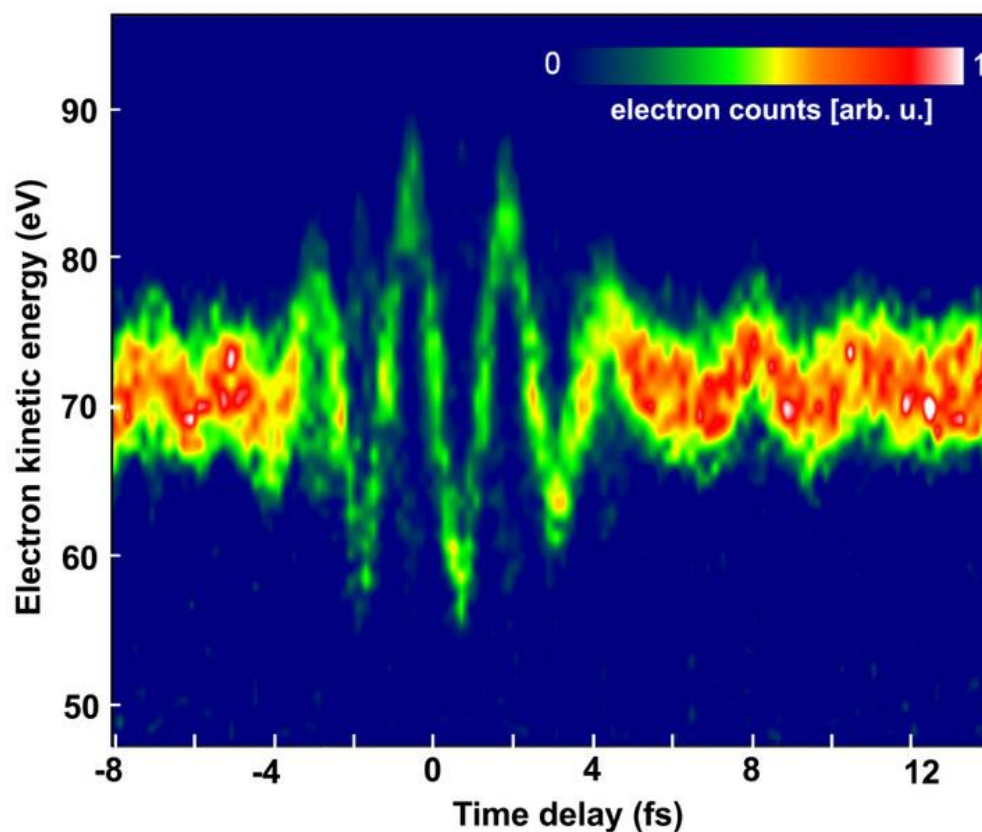


# 可見光光譜



# 最新進展

- 世界上首次直接觀察到光的波動



F. Krausz, "Direct Measurement of Light Waves" Science 305, p. 1267 (2004)

# 隨堂測驗

- 請問一個波長1000 nm的光子，其能量和動量分別是一個波長500 nm光子的幾倍？

能量

動量

1. 2倍

4倍

2. 2倍

2倍

3. 0.5倍

2倍

4. 0.5倍

0.5倍

5. 0.5倍

0.25倍