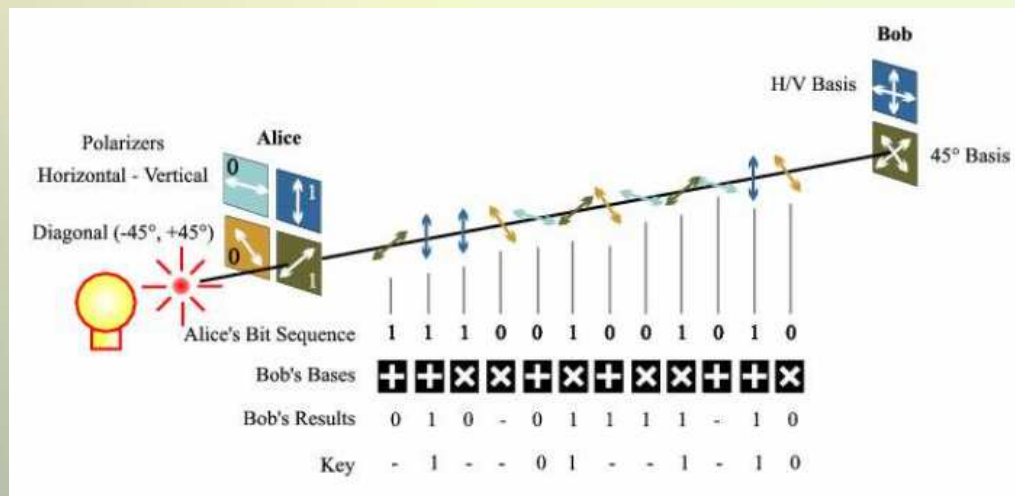
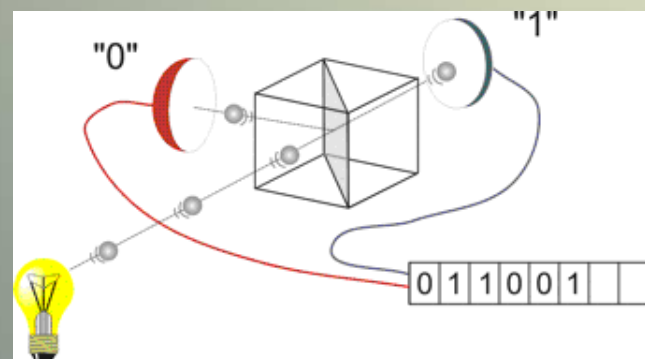


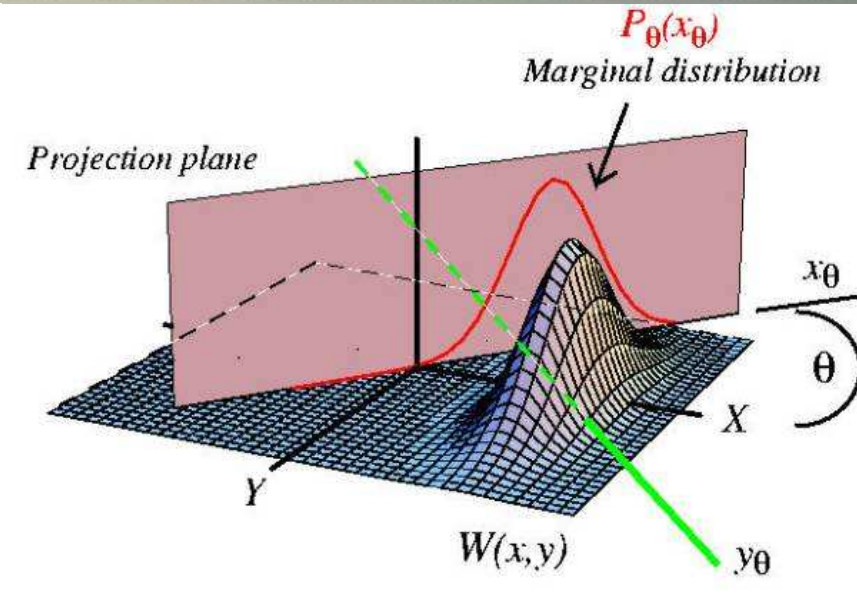
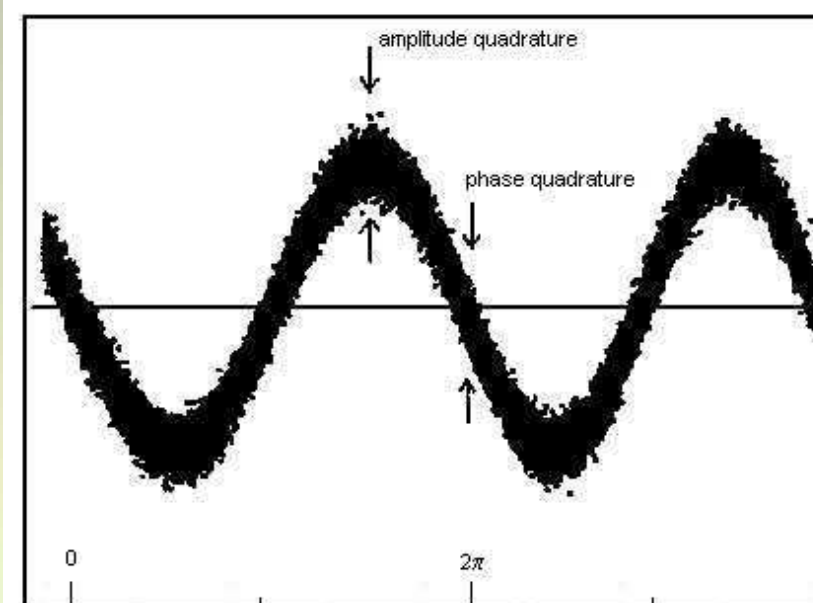
科普新知 量子光學

歷史簡介：

「光是什麼」這個問題自久遠以來就是人類相當重要的一個疑問，17世紀的牛頓（I. Newton）提出粒子說，惠更司（C. Huygens）則提出波動說。後來光的波動說經過19世紀初A. J. Fresnel 及T. Young等人的增益，19世紀中葉後最後統整於馬克士威爾（J. C. Maxwell）的古典電磁學方程式。光的粒子說則在20世紀初的量子物理萌芽期以新的面貌出現，包括M. Planck 及 A. Einstein相繼提出光量子的概念來解釋觀測到的實驗現象。20世紀上半世紀量子力學理論的發展（M. Born, E. Schrodinger, W. Heisenberg, P. Dirac 1902-1984, E. P. Wigner, ……）解釋了一部分光的量子效應，不過1960年代雷射的發明（C. H. Townes, A. L. Schawlow, ……）及後續的非線性光學之發展（N. Bloembergen, ……）馬上帶來了更多的挑戰，「光，特別是雷射光，的量子態到底是什麼」這個問題成為了1960-1970年間物理學家所要釐清的重要理論疑問。R. J. Glauber 在1963年提出同調態（coherent state）的概念算是率先奠定近代量子光學理論的基石，後續的雷射量子理論之發展（H. Haken, W. E. Lamb, ……）終於可以給出以下「光是什麼」這問題的近代解答：「光是光子數態的疊加，由理想雷射出來的光即是Glauber所引進的同調態」。不過故事並未就此終了，同調態光只是現在所謂古典態光（即雷射光）的量子力學描述，1970年代非古典態光（non-classical lights）如量子壓縮態光（squeezed state）的概念開始出現，量子壓縮態光的量子雜訊可以較古典態光來得更小，這是相當重要的突破。1980-1995年間有很多研究就是在實驗室中真正來產生這種量子壓縮態光，而非古典態光在精密量測上的可能應用則是當時的主要訴求之一。不過最近10年來的發展趨勢則是更進一步朝向更廣義的非古典態光如量子糾結態（quantum entangled states）及其在量子資訊等方面的應用來發展，這些研究開啟了一個不同尋常的量子光學世界（各種量子態光、量子雜訊、量子相關、……），需要許多光電科技的極限使用（雷射、非線性光學、半導體物理與技術、…），並探索著諸多未知的量子應用（量子通訊、量子密碼、量子計算、量子影像…）。



上圖：已商用化的量子亂數產生及量子密碼傳輸技術



科學原理：

光的頻率很高（ $>10^{14}\text{Hz}$ ），人眼看不到其振動波形，不過如果人真的可以看見光的電磁場在時間上的變動，則他所看到的將是如上左圖的弦波波形，而且其上還會有量子雜訊。單頻的弦波波形可以寫成 $A\cos(\omega t + \theta)$ 的數學形式， A 是振幅（amplitude）， θ 是相位（phase），所以其上的量子雜訊也可分成振幅雜訊及相位雜訊，如上左圖中的標示。

單頻的弦波波形又可以寫成 $A\cos(\omega t + \theta) = a_r \cos(\omega t) + a_i \sin(\omega t)$ ，其中 A_r 稱為實部分量， A_i 稱為虛部分量，而 $a = a_r + ia_i$ 稱為複數光場。所以光場上的量子雜訊也可分成實部分量雜訊及虛部分量雜訊，或是更一般性地，畫出複數光場雜訊的二維機率分布（如上右圖）。

理論上複數光場雜訊的二維機率分布可以有許多不同形狀，不過古典態光（雷射光）的分布是圓形的，因為一般的古典態光的雜訊都是相位無關的（實部分量及虛部分量的雜訊相同），自然界中的雜訊通常也是相位無關的。

科學家在實驗室中可以創造出相位相關的非古典態光（實部分量及虛部分量的雜訊不同），其中某個分量的雜訊較古典態光小，另外一個分量的雜訊較古典態光大，兩者乘積則維持相同（海森堡測不准原理），上右圖所示的複數光場二維機率分布即是一個例子。此時如果去量測雜訊較小的那個分量即可獲得使用古典態光所無法獲得的改進效果，可以用來增加精密量測的準確度。

科學家在實驗室中也可創造出兩道單頻光， $A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1)$ 及 $A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)$ ，並且讓這兩道單頻光間具有所謂的量子相關性（譬如 A_1 一定等於 A_2 ，雖然 A_1 與 A_2 個別來看都是隨機地分布， θ_1 和 θ_2 也可以有類似的相關性），這樣的量子態光即是所謂的量子糾結態，被用來發展新的量子應用。

科技應用：

量子光學的可能應用主要有精密量測、量子密碼傳輸、量子通訊、量子影像、量子資訊等等，已有少數技術商品化，很多都還屬學術研究階段。

參考文獻：

量子光學教科書、量子通訊或量子資訊介紹性書籍與文章。

撰稿：賴映杰 製作：王超駿、林威廷、陳巍方