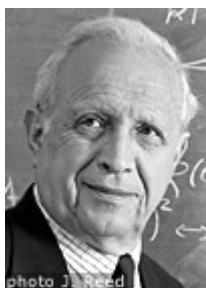


Roy J. Glauber 在光學領域中的貢獻

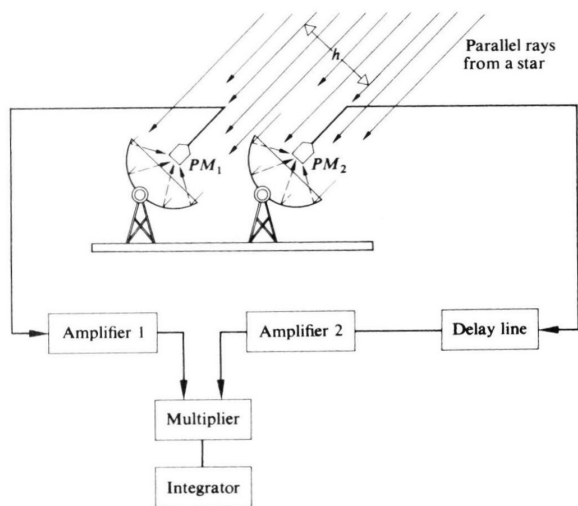
文/林佳縈



今年的物理諾貝爾獎頒發給三位在光學領域有傑出貢獻的科學家，其中一位獲得二分之一獎項的得主美國籍科學家 Roy J. Glauber，現為美國哈佛大學 (Harvard University) 物理系教授，Glauber 說明了量子理論在光學領域中一樣適用，也因此奠定量子光學理論的基礎。

Hanbury Brown and Twiss 實驗

R. Hanbury Brown 和 R. Q. Twiss 在 1952 年到 1956 年期間架設如圖一裝置的干涉儀用來觀測遠方的星體天狼星 (Sirius)。



圖一：Hanbury Brown and Twiss 實驗裝置圖。出處：Optics, Eugene Hecht。

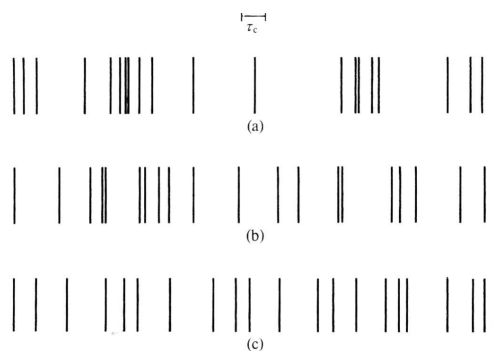
裝置中利用兩個大約相距 6 公尺的裝置對準天狼星 (Sirius) 的兩個不同部分，由天狼星所發出的光經由兩個面鏡分別收集後並且各自聚焦到兩個光電倍增

管 (photomultiplier)，為了避免兩邊讀出之電子訊號有時間差，所以在其中一個探測器前端安裝 Delay line 用以確保同時性，Hanbury Brown and Twiss 實驗主要目的為觀測兩個探測器所接收到的光個別的強度 (intensity) 變化 $\Delta I_1(t)$ 及 $\Delta I_2(t)$ 彼此之間是否有相關性 (correlation)。

$$\Delta I_1(t) = I_1(t) - \langle I_1 \rangle_T \quad (1)$$

$$\Delta I_2(t) = I_2(t) - \langle I_2 \rangle_T \quad (2)$$

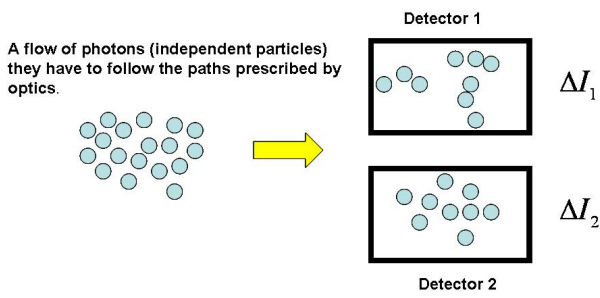
Hanbury Brown and Twiss 在實驗中觀測到光子有成對 (correlated pairs) 到達探測器的趨勢如圖二 (a)，也就是所謂的「bunching」現象，顯示 $\Delta I_1(t)$ 與 $\Delta I_2(t)$ 之間存在著顯著地正相關性 (positive correlations)。



圖二：(a) bunching, (b) random and (c) antibunching。出處：The Quantum theory of Light, Rodney Loudon。

由於光具有波粒二重性 (particle-wave duality)，如果我們試著用量子理論解釋 Hanbury Brown and Twiss 實驗觀測到的現象，利用光的粒子性來描述入射的星光，把入射的光當成由一顆顆個別獨立的粒子所組合成的粒子流，且粒子流所流經的路徑必須遵守古典的光學路徑，然後利用兩個不同的探測器來探測入

射的光子，分別得到其強度的變化為 $\Delta I_1(t)$ 及 $\Delta I_2(t)$ ，如圖三。



圖三：粒子流分別被兩個不同的探測器所探測到。

Hanbury Brown and Twiss 實驗結果顯示 $\Delta I_1(t)$ 與 $\Delta I_2(t)$ 之間有明顯的相關性，如果光是由一大群個別獨立的粒子所組成的粒子流，那麼為什麼個別獨立的粒子間存在相關性？Hanbury Brown and Twiss 實驗所得出的結果，一直等到了 1963 年，Roy J. Glauber 才提出了合理的解釋。

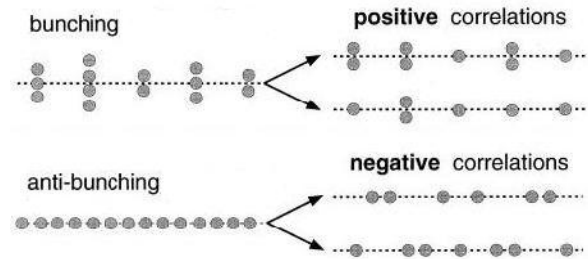
Roy J. Glauber 在光學領域中的貢獻

Roy J. Glauber 在 1963 年發表了兩篇重要的論文「1」「2」，在論文中提出光學同調性量子理論 (quantum theory of optical coherence) 的基本特徵，合理地解釋了 Hanbury Brown and Twiss 實驗中所觀測到的現象，也確切地描述出雷射所發出光和燈泡所發出的光在本質上的基本差異。

Glauber 認為所有與多光子 (multi-photon) 有關的實驗都必須建立在某些基本的概念上，一旦有一個光子被吸收，場態 (the state of field) 就會改變，因此在吸收下一個光子時，場的初始態已經與之前吸收光子時的初始態不一樣，因此當一個場態只含有 n 個光子時，場態的就只能有第 n 狀態 (nth order) 的相關性。實驗中的光學探測過程其實就是一連串光子的連續吸收過程，這一連串光子的連續吸收過程 (consecutive absorption processes) 都是建立在不同的場態上，必須利用所有可能的狀態 (orders) 間的相關性來描述。

Glauber 更進一步地指出場態可以利用同調態

(coherent states) 來表示，在某些狀況下場態可以利用同調態對角化表示 (diagonal representation)。同調態一開始是在簡諧振盪 (harmonic oscillator) 中為大家所熟知，古典上當我們把同調態引入光學領域時，我們「只」利用一階同調態 (first-order coherence) 來描述光學場，導致我們無法合理解釋 Hanbury Brown and Twiss 實驗所觀測到的現象，Glauber 則使用同調態所有可能的狀態 (orders) 間的相關性來描述光學場。因此 Glauber 可以成功地解釋 Hanbury Brown and Twiss 實驗所觀測到的「bunching」現象，此現象主要是來自於光的二階同調性 (second-order coherence)。如果 Hanbury Brown and Twiss 實驗利用雷射光來代替星光，則因為雷射缺乏二階同調性而無法觀測到「bunching」現象，若利用電子束代替星光則可觀測到負相關性 (negative correlations)，即為與「bunching」完全相反的現象「antibunching」，如圖二與圖四所示。



圖四：bunching 和 anti-bunching 示意圖。出處：M. Henny, S. Oberholzer, C. Strunk, T. Heinzl, K. Ensslin, M. Holland, C. Schönenberger, Science Vol. 284. no. 5412, pp. 296 - 298 (1999)。

由於量子效應中的不確定原理 (uncertainty principle)，使得我們在觀測上存在隨機的變化 (random variation)，這些因不確定原理而產生的量子雜訊 (quantum noise)，讓光學觀測中的準確度產生限制，在一些高精確度的頻率測量中，光的量子效應決定觀測所能擁有的精確度，Glauber 所提出的理論中對於光本質上的描述以及對於同調態充分的理解，讓壓縮態 (squeezed state) 的存在變得有可能，由於壓縮態滿足最小的不確定原理 (minimum uncertainty principle)，因此壓縮態可以使得高精確度光學測量中的量子雜訊降到最小，在量測光的頻率時能夠更加精確，這也為今

年另外兩位各得四分之一獎項的物理諾貝爾獎得主 John L. Hall 和 Theodor W. Hansch 的研究發現打下了基礎，John L. Hall 和 Theodor W. Hansch 在 Glauber 的理論基礎下發展出以雷射為主的精密光譜學 (laser-based precision spectroscopy) 研究，包含光頻梳 (optical frequency comb) 技術的發展。

Roy J. Glauber 除了闡述光學同調性量子理論 (quantum theory of optical coherence) 的基本特徵外，在他研究光學同調性量子理論的同時也發展場量子的數學形式，也正因為他在光學領域中的卓越貢獻，所以獲頒今年的物理諾貝爾獎。

參考資料

- [1] R.J. Glauber, Phys. Rev. Letters **10**, 84 (1963)
- [2] R.J. Glauber, Phys. Rev. **130**, 2529 (1963)
- [3] M. Henny, S. Oberholzer, C. Strunk, T. Heinzl, K. Ensslin, M. Holland, C. Schönberger, Science Vol. 284, no. 5412, pp. 296 - 298 (1999) .
- [4] William D. Oliver, Jungsang Kim, Robert C. Liu, Yoshihisa Yamamoto, Science Vol 284 9 (1999)
- [5] Harald Kiesel, Andreas Renz and Franz Hasselbach, Nature 418, 392-394 (25 July 2002)
- [6] Optics, Eugene Hecht.
- [7] The Quantum theory of Light, Rodney Loudon.
- [8] Lectures on quantum mechanics, Gordon Baym
- [9] Quantum Mechanics, Eugen Merzbacher.
R.J. Glauber, Phys. Rev. Letters **10**, 84 (1963)

相關連結

- [1] http://www.kva.se/KVA_Root/eng/_press/detail.asp?NewsId=693&br=ie&ver=4up
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Hanbury-Brown_and_Twiss_effect
- [3] <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/>
- [4] http://people.deas.harvard.edu/~jones/ap216/lectures/ls3/ls3_u6A/ls3_unit6A.html

- [5] <http://physics.about.com/od/physicists/a/Nobel2005.htm>
- [6] <http://memo.cgu.edu.tw/yun-ju/CGUWeb/SciKnow/PhyNews/NobelPhy2005.htm>

作者簡介

林佳縈

現為臺灣大學物理研究所碩士班學生

e-mail : r93222021@ntu.edu.tw