

## [ 研究新領域報導 ]

## 低輻射量子態的製備與操控

中央研究院物理所 任祥華

## 一、前言

最近在冷原子系統中量測到低輻射(subradiance)現象[1]，此現象有別於一般觀察到的固有自發輻射，或是在光與原子強交互作用下所產生的超輻射(superradiance) [2]。固有自發輻射是單顆原子（如鹼金屬原子）與光交互作用後，外圍電子受到激發到第一激發態（D1 或 D2 transitions）所產生的自發輻射，其隨時間  $t$  的耗散行為可由指數方程描述( $e^{-at}$ ) [3]，而  $a^{-1}$  是刻畫自發輻射的時間尺度。一般鉀原子(Rb)的 5P 軌域具有大約 26 奈秒的時間常數，對應  $a$  為 6 MHz，此時間尺度表徵了中性原子的獨特性質，也反應出了中性原子作為操控量子資訊的介面時，其相干性的時間侷限。

自 1954 年預測超輻射現象以來[2]，它在許多光與物質交互作用系統中已觀測得到[4]，除了原子也包含離子、分子及固態系統。這現象是由於多顆原子同時與光交互作用產生，因此在極限的情況下，當  $N$  顆原子彼此非常靠近甚至範圍少於一個波長的時候，其單一光子的衰變行為呈現  $e^{-Nat}$  [2]，也就是時間縮短  $N$  倍，形成所謂超輻射的現象。在能量守恆的情況之下，也就是不管光子跟一顆或是多顆原子交互作用，吸收與耗散的總光子能量應該相同，因此超輻射展現了極高強度的自發輻射，這可以歸因於多體物理與光交互作用後所產生的增強效果。除了它的耗散常數增強為  $N$  倍以外，在某些條件之下，也就是當一半原子被激發的時候，它的輻射強度會正比於  $N^2$  [2]，這表示當參與光相互作用的原子數目極大的時候，將會有極大強度的超輻射產生。

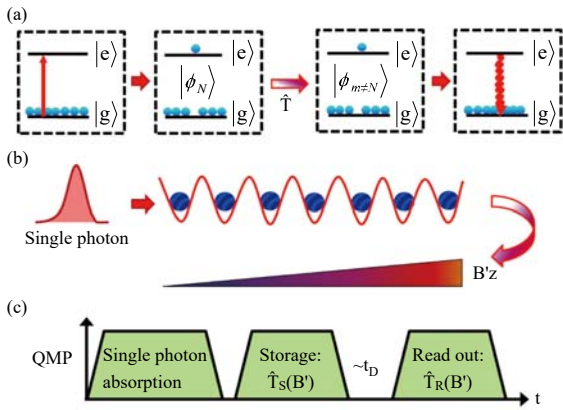
這極限的情況忽略了原子與原子彼此之間是有限的距離，因此光在與原子團相互作用時，形成光子不斷的被原子團吸收與交換，這表示光與多原子相互作用是個具有複雜性的光散射過

程。加入考慮光在原子團之間交換與反覆吸收放出的過程，更為完整描述自發輻射現象的理論推導出原子-原子長程交互作用[5]，這個長程交互作用一如誘發的偶極-偶極交互作用，所以當原子密度極低的時候，光子散射就像是獨立與單顆原子的交互作用過程，而光在原子團反覆吸收放出的機制可以忽略；相反地，當原子密度增加的時候，偶極-偶極交互作用會增強，因此有超輻射現象產生，另外誘發的能級劈裂使得光跟原子作用減弱，因此阻卻了超輻射在極高密度，也就是上述極限情況下的情形發生。

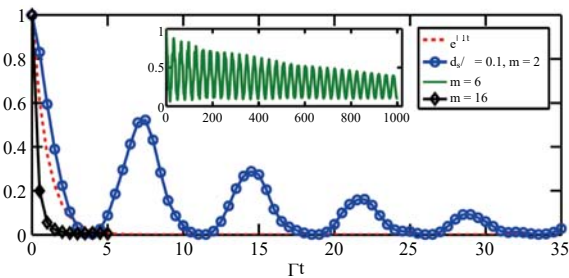
另一方面，低輻射也是光與原子團交互作用下允許產生的現象，也就是光子耗散的時間尺度極長，這可由觀測超輻射後的螢光衰變[1]得到證實，而我們也可以經由製備低輻射量子態[4]來研究低輻射衰變。低輻射量子態不但較少被清楚並有系統的的研究之外，它的應用更是具有潛力，因為它極長的時間尺度，這些量子態可以做為量子儲存的利器。以下我介紹最近我們低輻射量子態的研究，以及它的製備與操控。

## 二、協同低輻射量子態

對於  $N$  個原子吸收一個光子基本上包含了  $N$  個量子態，如果吸收  $M$  個光子，則共會有  $C_M^N$  個量子組態（ $C$  是雙項式符號），這些量子態包含了超輻射跟低輻射量子態，而也可以看出當  $M$  接近二分之  $N$  的時候，完整的希爾伯特空間將會成指數增加如  $N^M$ ，這顯示出多顆光子與多顆原子交互作用下的量子複雜度，也是因為這複雜度表示了量子世界中，高容量的量子資訊操作與量子計算相對於古典物理的超越性質。用有系統的方式去研究低輻射量子態，我們提出可以操控這些量子態的相位來製備低輻射量子態[4]。如圖一，利用隨位置線性增加的外加磁場，我們可以把相位刻印到一維原子陣列中，因此而得以



圖一 N 個原子吸收一個光子後形成超輻射態，經由外加磁場梯度刻印相位製備低輻射態，待延遲時間後再以可逆轉的方式讀出量子資訊



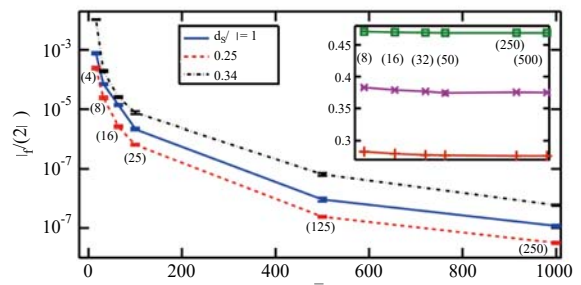
圖二 單光子低輻射量子態的時間演化，這個例子是十六個原子的一維陣列，不同的 m 表示不同的低輻射量子態，震盪週期是由兩個最主要的本徵低輻射態決定

製備不同的低輻射量子態。這些量子態是彼此正交的，我們可以寫成

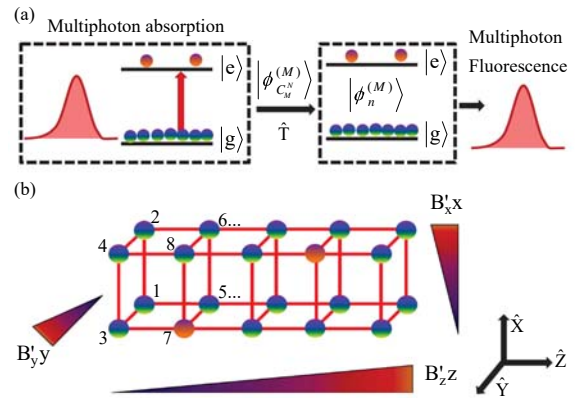
$$|\varphi_m\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mu=1}^N e^{ikr_\mu} e^{\frac{i2m\pi(\mu-1)}{N}} |e\rangle_\mu |g\rangle^{N-1}$$

藉由不同的外加磁場強度我們可以操控 m，因此操控也製備了不同的低輻射態。

在圖二中，我們看到不同的低輻射量子態隨時間的變化，這些長時間的演化代表低輻射的現象，而震盪的週期是由本徵態的虛數決定（即本徵態的頻率），插頁所顯示的是十六顆原子的一維陣列中時間演化最長的低輻射量子態，這可以看到將近一千倍的演化時間，而這極長時間的低輻射現象是因為原子陣列的彼此距



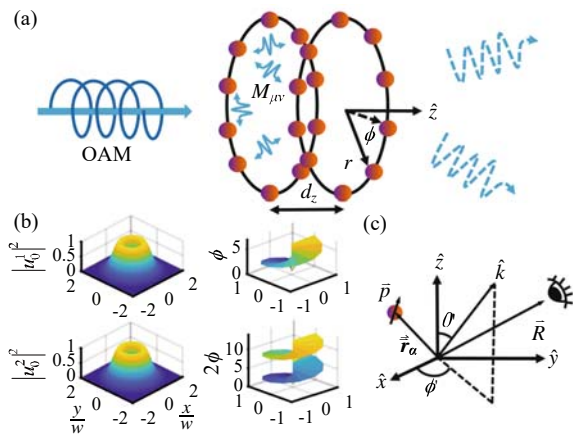
圖三 時間常數隨一維陣列原子數目增加而降低，當原子間距離是四分之一波長的時候，時間常數最低，括號裡面表示第 m 個低輻射態



圖四 多光子低輻射量子態的製備與操控

離縮短至十分之一個波長，在這個極短距離中，偶極-偶極交互作用扮演了主要的角色。在圖三中，我們增加原子的數目，研究最低時間常數對 N 的變化，我們也用不同的原子間距離研究其低輻射量子態，發現四分之一波長的時候有最低的時間常數，表示當 m 也為四分之一原子數目的時候具有最顯著的效應，當超過兩百顆原子的時候，量子態的時間達幾百個厘秒，可以作為替代的量子儲存，而在此時間尺度下的量子操控也可游刃有餘。

最後，多光子的低輻射態也可呈現多光子量子儲存的潛在發展性[6]，在圖四，在三維原子陣列中，可經由三個方向實施外加磁場梯度刻印相位，進而製備多光子低輻射量子態。同樣的，在多個不同的三維陣列組態中，仍有極低的时间常數，只是在大部分的原子距離參數中，多光子低輻射量子態的量子儲存效果不如單光子的。

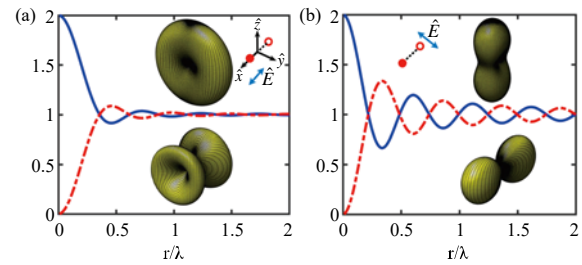


圖五 在原子環製備單光子低輻射量子態，帶有軌道角動量(OAM)的光子跟原子環相互作用，不同的量子態由不同的 OAM 決定，而光散射的模式也因不同的低輻射量子態而有不同

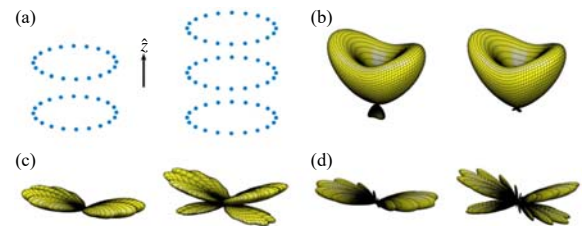
### 三、原子環的低輻射量子態

在考慮刻印相位形成低輻射量子態的研究中，我們發現可以直接使用原子環的結構，加上帶有軌道角動量的光子與其相互作用[7, 8]，很自然地低輻射量子態就會形成，不需要多餘的外加磁場梯度，增加了低輻射量子態製備與操控的方便性。如圖五，我們可以控制原子環的結構，包括它的半徑  $r$  或是距離  $dz$ ，因而控制偶極-偶極交互作用；當軌道角動量改變的時候，我們也可以看到超輻射與低輻射態的形成，並以觀測遠場的光散射模式來確認低輻射量子態的存在。

先從兩顆原子來看，在圖六中，可以看到兩個本徵值隨原子環半徑的變化，當半徑極小的時候，一個本徵值為 2 而另一個為 0，這是一般 Dicke 超輻射所預測的結果[2]，而本徵值為零代表著幾乎沒有耗散的量子態(decoherence-free)，同時也表示這個量子態幾乎沒有與原子產生交互作用。而在另一個極限，當半徑遠超過一個波長的時候，兩個本徵值同時都接近 1，代表著原子與原子間沒有太強的偶極-偶極交互作用，這個極限也表示可以忽略多體物理的效應，不管有多少個原子與光交互作用，單顆原子的物理即可描述光子衰變的過程，而量子態的協同性質在這個無相互作用的極限下也變得不重要。



圖六 兩個原子形成原子環的遠場模式以及本徵值的實部，左右兩邊代表不同的光偏振方向

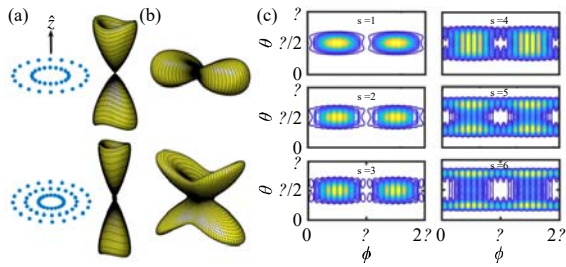


圖七 原子環沿著光子激發方向堆疊，沿著激發方向的超輻射(b)或是低輻射量子態(c, d) 散射強度增強

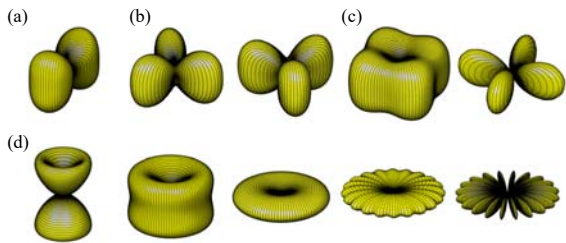
圖六也展示超輻射態散射趨向沿著光子激發的方向而低輻射態趨向橫向的方向，不同的光偏振方向也激發不同的散射模式，在這簡單的雙原子結構中，基本上沿著光偏振方向的散射強度為零，這個橫向散射的低輻射現象也已由原子團的實驗觀測得到[9]。

在圖七中，我們用二十個原子排列的原子環來研究其散射性質，超輻射態 ( $l = 1$  軌道角動量) 明顯地當原子環堆疊在光子激發方向的時候，往前的散射強度因而增強，雖然是在傾斜的角度上。其他的低輻射態[(c),  $l = 9$ ]及[(d),  $l = 10$ ]顯示出橫向的散射以外，隨著堆疊的原子環增多，往前方的散射強度也增加了，形成一如蝴蝶展翅的散射模式。

另外，在圖八中，一樣使用二十顆原子的原子環，只是往半徑  $r$  的方向堆疊。超輻射一樣的增強了往前的散射強度 (如圖八(a))，可是不同的低輻射量子態卻會隨著原子環數目的增加，從橫向的散射轉變為有傾斜角度的散射 (如圖八(b), (c))，而低輻射態也轉變為超輻射態。此外，低輻射量子態也會出現多個散射的峰，峰的



圖八 原子環沿著光子激發方向的橫向堆疊。沿著激發方向的超輻射(a)  $l = 1$  軌道角動量，兩環(上圖)跟三環(下圖)，與橫向或有傾斜角度的(b)  $l = 5$ ，兩環(低輻射)跟三環(超輻射) 散射，及(c)  $l = 9$ ，散射強度隨不同的原子環數目  $s$



圖九 單原子環使用圓偏振光子激發。(a)兩顆原子， $l = 1$ ，(b)三顆原子， $l = 1, 2$ ，(c)四顆原子， $l = 1, 2$ ，(d)二十顆原子， $l = 1, 2, 5, 9, 10$

數目為原子的數目  $N$ 。這表示了低輻射量子態除了作為量子儲存以外，它的散射模式也提供探究原子環結構的信息。

最後，在圖九中，使用圓偏振的光子激發原子環，更為對稱的散射模式是可以預期的，由二十顆原子的遠場散射可以看到，隨著操控不同的光軌道角動量  $l$ ，超輻射態轉變為低輻射態的過程也伴隨著往前散射轉變為橫向散射；更為清楚的  $N$  個散射峰在時間常數最低的低輻射量子態 ( $l = 10$ ) 出現，這些獨特的超輻射或低輻射遠場散射性質除了可以作為製備量子態的指南以外，更可做為將來高容量量子化軌道角動量的量子信息操控與儲存[7]。

## 四、結論

我們提供了製備低輻射量子態的方法，不管是在一維或是三維的原子陣列結構中，使用外加磁場梯度控制其刻印的相位，我們得以產生不同的低輻射量子態。另外，使用原子環狀結構，加上帶有軌道角動量的光子與其相互作用，我們得以產生更多富有獨特散射性質的低輻射量子態。我們使用的製備方法並不侷限在中性原子系統中，包括量子點、超導元件、或固態系統如奈米光子波導結構等，這些都能實現低輻射量子態的製備與操控，經由操控其相位或是激發光子的軌道角動量，將會對大尺度的糾纏態、量子閘應用或是量子計算有所助益。

## 致謝

感謝科技部補助 MOST-106-2112-M-001-005-MY3，及科技部補助助理研究學者的經費 No. 106-2811-M-001-130。也感謝中研院原分所張銘顯與陳應誠研究員的合作與討論、及理論中心的 ECP1 (Experimental Collaboration Program)。

## 參考文獻

- [1] W. Guerin, M. O. Araújo and R. Kaiser, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 083601 (2016).
- [2] R. H. Dicke, *Phys. Rev.* **93**, 99-110 (1954).
- [3] M. O. Scully and M. S. Zubairy, *Quantum Optics* (Cambridge University Press, 1997).
- [4] H. H. Jen, M.-S. Chang and Y.-C. Chen, *Phys. Rev. A* **94**, 013803 (2016).
- [5] R. H. Lehberg, *Phys. Rev. A* **2**, 883-888 (1970).
- [6] H. H. Jen, *Phys. Rev. A* **96**, 023814 (2017).
- [7] H. H. Jen, M.-S. Chang and Y.-C. Chen, *Scientific Reports* **8**, 9570 (2018).
- [8] H. H. Jen, *Scientific Reports* **8**, 7163 (2018).
- [9] S. L. Bromley, *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 11039 (2016).