

知識天地

高儲存效率的量子記憶體

陳應誠副研究員（原子與分子科學研究所）

二十世紀初期物理學的發展告訴我們：微觀世界的主體如電子、原子、光子等粒子遵循著巨觀世界難以理解的規律（統稱量子力學），例如一個粒子可以同時存在粒子或波的特性端看你看它的那一面向；一個粒子的狀態可以是兩個態的線性疊加態（superposition state），但是對粒子的測量會將其帶至其中之一態並存在不可避免的隨機性；一個粒子的某兩個不互易的物理量不可能同時準確量測，此即測不準關係；兩個粒子可存在某種關聯，即使相距甚遠，但是對其中之一粒子做量測，另一遠處的粒子的狀態即瞬間決定，此即量子糾纏（quantum entanglement）。儘管這些古怪的特性連當初參與量子力學發展的愛因斯坦、薛丁格等人也都覺得難以接受，甚至到今天也還有人在繼續探討，但是二十世紀末期已有許多人認知到可將這些古怪的特性當成是資源並應用於資訊科學上。隨著近年來原子與光子的操控技術漸趨於成熟，這門新興的量子資訊科學，正以很高的斜率在發展。

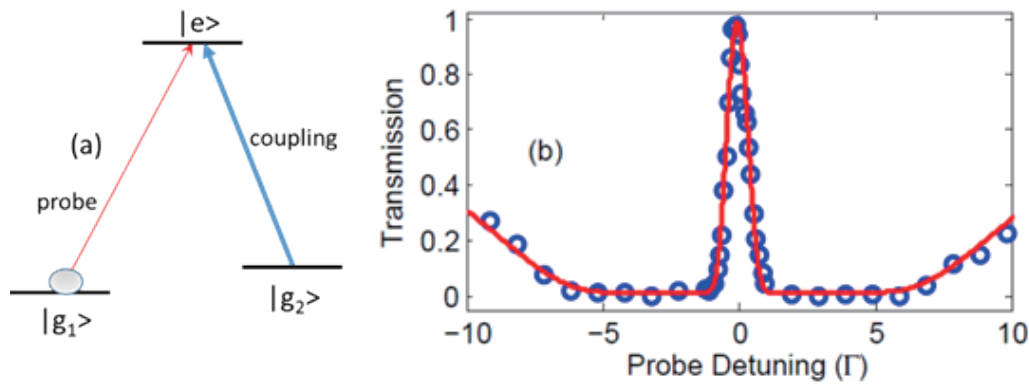
量子資訊科學包含的內容也很廣，例如處理數學運算的量子計算、應用量子原理確保數據傳輸安全的量子密鑰分配（quantum key distribution）及更一般的量子密碼術（quantum cryptography）、將一量子態在另一處重現的量子遙傳（quantum teleportation）、及量子稠密編碼（quantum dense coding）等等[1]。儘管報章雜誌關於量子資訊科學進展的聳動報導時有所聞，但是微觀世界的量子特性甚為纖細、易受環境影響而破壞，要達到全面性、大維度的量子操控還有很長的路要走，量子資訊科技的發展還只能算是在初步階段。不過，也有相對較簡單的量子密鑰分配系統已有商品化的產品，並被一些銀行採用。整體而言，不管其應用前景如何，量子資訊科學的發展終將推進人類對微觀世界更深刻瞭解與操控能力。本文要報導的是我們在此領域的一個小但重要的主題：高儲存效率的量子記憶體的研究進展。

由於其高傳遞速度、高頻寬、與較不易受環境影響的特性，光子是量子態極佳的攜帶媒介，量子訊息可編碼於光的波形、相位、偏振、與波長等，處於糾纏態的光子對也很容易利用非線性晶體產生，利用原子與光子的同調性交互作用將攜帶於光子、移動中的量子態映射至靜止的原子介質，並儲存於其中等待需要時再轉為光的元件即稱為量子記憶體。此處原子指的是廣義的原子，它可以是真正的原子或是人造原子如量子點或超導元件、甚至是固體中的原子如鑽石中的原子空缺或摻雜稀土離子的鉍酸鋰晶體等。一般電腦都有記憶體用於暫存一些0或1形式的資料供後續使用，它使得電腦的運作更有效率；可以想見的量子記憶體也可使量子資訊的處理更為便捷，和古典記憶體不同的是它必須能儲存量子世界特有的線性疊加態或糾纏態。在基於線性光學的量子計算及基於量子重複器（quantum repeater）的長距離量子通訊，量子記憶體都是一關鍵元件，最近十年其研究一直維持很高的熱度。量子記憶體的其它可能應用也不斷被提出，一個很有意思的想法是如果讓一個粒子和量子記憶體糾纏，則有可能一定程度突破測不準關係的限制，此想法已被實驗證實。

用來度量一個量子記憶體性能的參數有很多，例如描述儲存前後量子態相似程度的保真度（fidelity），描述有多少量子態可被同時儲存的容量，描述儲存前後剩下多少能量比率的儲存效率，以及儲存時間等。這些參數的好壞和所用的物理系統的特性與光與原子交互作用的具體機制有關，其數值最近幾年都被顯著的改善，我們的研究著重在提升儲存的效率。

我們的量子記憶體是基於稱為電磁波導致透明效應（electromagnetically induced transparency, EIT）的機制[2]，參考圖一，在一個二能階原子系統（基態 g_1 及激發態 e ），當雷射光（稱為探測光）頻率調至原子躍遷頻率附近，光會被原子吸收；但如用另一雷射光（稱為耦合光）耦合激發態至另一基態（ g_2 ）形成一個 Λ 型三能階系統，原子與兩道光線的耦合會形成一暗態並導致探測光吸收顯著減少甚至變透明，此即EIT效應，該暗態是基態 g_1 和 g_2 的線性疊加，在耦合光甚強的極限此暗態即為 g_1 。伴隨著吸收的減少，原子介質在探測光頻率附近的折射率隨頻率也呈劇烈改變，其整體效應是讓呈脈衝形式的探測光群速度顯著減少，該群速度約正比於耦合光強度，在實驗室很容易可將群速度減至真空光速的 10^{-6} 以下，此即慢光（slow light）效應。當耦合光強度被逐漸減少至零的地步，群速

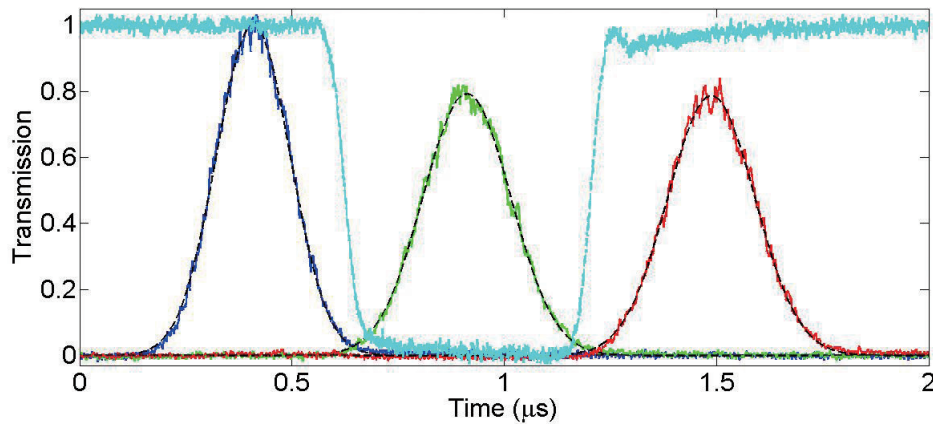
度會漸減至零，而暗態中基態 g_2 對 g_1 的成分比值也漸增加，可以說探測光已轉化成原子團的兩個基態的一種集體激發，它和耦合光的一些波前干涉訊息也映入原子團的空間分佈中；當耦合光再度打開時，它和原子團中的該集體激發作用會再形成原探測光放出，簡單的講也可以說處與 g_2 態的原子吸收了耦合光放出了探測光再回到 g_1 態，在適當的極限下，這樣的過程是同調且可逆的並對任何量子態的光子均適用，因此EIT介質可當成量子記憶體。



圖一、(a) Λ 型三能階電磁導致透明系統的示意圖。(b) 實驗上一個代表性的EIT光譜數據，此例子原子團光學密度為446，代表探測光在躍遷頻率中心穿透率是 $e^{-446} \sim 2 \times 10^{-194}$ ，亦即約完全吸收，但是在EIT效應下，其穿透率可接近1。

要知道量子記憶體儲存效率的極限在哪裡，則必須對EIT介質透明程度不完美的來源有所瞭解，主要因素有二：一為原子系統的基態去同調率（decoherence rate）通常不為零，去同調率代表的是暗態在兩個基態間線性疊加的相對相位衰減速率，有限的基態去同調率會造成透明度的下降；另一為EIT透明窗口的頻譜是有限的、因此總有光脈衝的一些頻譜成分是位於部分吸收處。要減少第一個因素，必須減少各種造成有限基態去同調率的成因，例如耦合光與探測光的相對同調性必須很好；原子團溫度越低越好並讓兩道光夾角儘量小以減小光譜的都普勒展寬（Doppler broadening）；環境的磁場不管是直流還是交流的都要控制越小越好，以減少因磁場造成的Zeeman位移之不均勻度；此外，原子密度也不能太高，以免原子間的碰撞率太高。我們實驗所用的物理系統是雷射光冷卻的超冷鉀原子團（溫度約 $100 \mu\text{K}$ 、數量可達 10^{10} ），對上述各種因素都有多年經驗累積，可經常性的將基態去同調率控制在激發態自發輻射率的 10^{-4} 的程度。要增加EIT的頻寬，則必須增加原子團的光學密度（optical depth, OD, 正比於原子團密度乘以長度）及耦合光強度，理論分析表明理想狀況儲存效率將隨OD的增加以 $1-38/\text{OD}$ 的速率趨近於100%。在先和我們有合作關係的清大實驗組利用OD達160的冷原子團將EIT機制的量子記憶體儲存效率推至78%，這是此機制當時的最高世界紀錄[3]。

我們在原分所的實驗室，在經年累月的改善中，已將冷原子團的光學密度推至1000以上（最新的紀錄達1800），這是冷原子團光學密度之最高世界紀錄[4]。不過，事情的發展往往不是單線的，伴隨著光學密度的提高，也讓一些複雜的非線性光學現象變顯著，反而有可能引入一些間接的機制讓儲存效率或保真度變差，必須另外費思量壓抑非線性效應的產生。真實的原子通常不會是簡單的三能階系統，先前我們是利用鉀原子的 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 譜線（即所謂 D_2 譜線）去實現三能階系統，但因原子核自旋的超精細結構，在距離耦合光約251MHz附近仍存在一個躍遷，由於光學密度愈大時須用更強的耦合光增加EIT頻寬，但耦合光非共振的驅動上述能階的程度也增加，它等效增加基態 g_2 的去同調率，使儲存效率在很高的光學密度時再度往下掉。我們解決此問題的辦法是改用鉀原子的 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{1/2}$ 譜線（即所謂 D_1 譜線）、並且用光抽運（optical pumping）方法將原子趕至最高磁量子數的Zeeman能階，對相同圓偏振的耦合與探測光因躍遷的選擇律下，整個系統變成簡單的三能階系統而幾乎完全消除上述問題。圖二顯示我們得到93%的儲存效率的數據，這是就我們所知基於各種機制的量子記憶體儲存效率的最高紀錄。



圖二、藍色、綠色、紅色線分別是入射光、慢光及被儲存550ns再取出的光脈衝，慢光及儲存再取出的脈衝能量分別為入射脈衝的94.3(0.3)%、93.0(0.3)%，淺藍色線是在儲存及再取出情況下耦合光的強度開關情形，原子團的光學密度約1220(114)。

不過，這並非故事的全部，其實耦合光也可能非共振式的驅動探測光的躍遷，一道光扮演兩個角色和探測光一起造成四波混頻，產生一個不同頻率的光並造成探測光的放大，乍聽之下，探測光的放大提高其效率不是件好事嗎？天底下沒有免費的午餐，理論分析指出該放大也伴隨著真空擾動與自發輻射引起的量子雜訊，在增益越大情況下，量子記憶體的保真度也單調的遞減，因此必須避免四波混頻的形成[5]，我們先前的另一研究，部分證實了該預測[6]。除光學密度因素外，四波混頻效應程度也決定於兩個基態間距和激發態自發輻射律的比值，該比值越大則效應越小，幸運的是鉍原子是所有穩定的鹼金屬族原子中該比值最大的。根據計算，在光學密度1000四波混頻造成探測光的放大約1.5%，雖不大但仍有效應，所幸四波混頻要成立還須滿足所謂相位匹配的幾何安排，在耦合與探測光夾角稍大時也可壓抑該效應，不過這也要犧牲了一些基態去同調律及儲存時間，但是用光偶極阱或光晶格及更冷的原子團也有辦法把犧牲掉的代價再賺回來，只是須付出更高的實驗代價。

這個研究讓我體會到了一些更一般的道理。多年前當我們一開始進行這方面的研究時就已估計推進光學密度至1000以上是可能的，經多年的堅持與努力的確也達成，做研究必須有一定信念與堅持。而當一個物理量推至一極致，你也成為一定程度的先驅者，會有一些迷惑處也會有一些有趣的新發現，畢竟這是在探索一個前人未到達過的新疆域。另外，要去實現一些量子資訊科學的應用，在物理上的限制必須深入研究，惟有瞭解問題的所在才可能想出辦法解決它。而量子資訊科技，對物理系統的要求極高，往往必須將相關的物理與技術推至極限，才有實際應用的可能，這也呼應我前面已提到的一點：不管其應用前景如何，量子資訊科學的發展終將推進人類對微觀世界更深刻瞭解與操控能力。

參考文獻

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, "Quantum computation and quantum information", Cambridge University press, 2000.
- [2] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Marangos, Rev. Mod. Phys. 77, 633(2005).
- [3] Y.-H. Chen, M.-J. Lee, I.-C. Wang, S. Du, Y.-F. Chen, Y.-C. Chen, and I. A. Yu, Phys. Rev. Lett., 110, 083601(2013).
- [4] Y.-F. Hsiao, H.-S. Chen, P.-J. Tsai, and Y.-C. Chen, Phys. Rev. A, 90, 055401(2014).
- [5] N. Lauk, C. O'Brien, and M. Fleischhauer, Phys. Rev. A, 88, 013823(2013).
- [6] Y.-F. Hsiao, P.-J. Tsai, C.-C. Lin, Y.-F. Chen, I. A. Yu, and Y.-C. Chen, Opt. Lett. 39, 3394(2014).