

# 量子控制 - 人們的夢想： 從了解微觀世界到控制微觀世界

文 / 鄭王曜

摘要

本文簡介量子控制的概念及未來可能的應用。人類長久以來希望能控制物質微觀的量子狀態，尤其是波函數的控制。目前較前沿的做法，是利用脈衝雷射“整形”來控制光與物質之交互作用，進而控制反應或量子躍遷之機率。目前脈衝雷射“整形”偏向於時域(time-domain)整形，本文則提及近來人們對頻域(frequency-domain)整形的想法與做法。

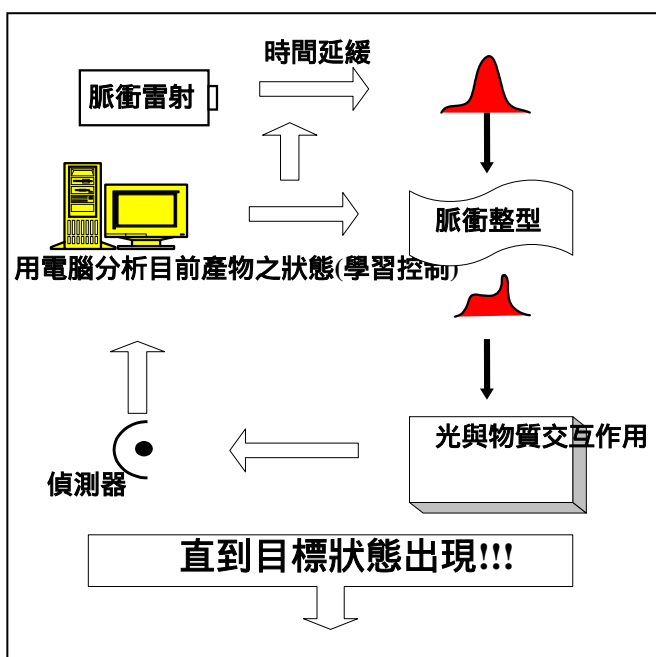
## 一、量子物理下的物質世界

不同於古典想法，量子力學對於微觀世界的觀點有以下幾個特色：1.物質可觀測的物理量是可以有不連續的(quantized)值，例如原子分子之能階，乃造物之初便已決定。2.在古典物理上共軛(conjugate)的兩個物理量，例如，被觀測物之動量與位置，時間與能量，是不可能同時被精確觀測的。即，所謂測不準原理。這樣的“物質觀”似乎無可避免的為物理學家帶來令人窘困的境地：因為如此一來，如何“描述”我們的物質世界呢？二十世紀初的物理學家們於是想出了一個辦法，既然光用位置、動量二個參數，已不足以描述物質的狀態，大不了用更複雜的“函數”來代表物質的“狀態”。(當時的想法，認為這個函數並非是物理上可量測的物理量，只是便於描述物質的狀態)。那麼這個函數必須具有下列的條件：1.它的空間分布，不可以是個發散的函數，即，他所描述的物質必須有侷限性，不可能遍佈整個宇宙。2.這個函數可以隨著時空傳播(否則要如何描述運動中之物

質)。3.必須可以線性疊加(superposition)，也就是說，他可以有干涉的效應！以上都是人類經由實驗事實與邏輯，不得不有的推論。既然這個函數與物理上的“波”具有同樣的性質(可傳播，可線性疊加, superposition)，我們就稱為波函數。

因此，在量子物理下的物質世界，物質的狀態使用“波函數”(wavefunction)來描述。但是，“波”到底是什麼意思？我們很難跟物質的粒子性質扯在一塊。因此目前主流的學派認為波函數的絕對值平方是物質被量測到的機率分布。同時，“機率”這個觀念也解釋了為何有些化學反應過程(pass-way)“可以發生”，但從未被發現。因為發生這個反應過程的機會太小之故。根據這個說法，我們可說微觀的世界是個用“機率波”描述的世界。這樣的波函數，雖不須具有唯一性，但在物體速度不快(非相對論性)之情況下，必須要解薛丁格方程式(Shrodinger equation)的解才行。這個方程式是非相對論性量子力學最基本的微分方程式，由動能算符加上位能算符所組成，觀念上頗類似古典

力學中之漢彌敦量(Hamiltonian)。有趣的是，這個微分方程式告訴我們，即使我們的觀察物處於穩定的狀態(steady state)，波函數的相位仍會隨著時間做週期變化。要注意，波的相位，決定了“干涉”的結果。當二個波函數形成破壞性干涉時，即表示物質處於此狀態(state)之機率為零。或說，不可能發現物質處於此狀態。同理，當二個波函數形成加強性干涉時，即表示物質處於此狀態(state)之機率大增。



圖一：量子控制中，學習控制的想法。

## 二、何謂量子控制

到了二十一世紀，人們已經認為物質的本質不再是天生不變，如，人們可以用脈衝雷射光來改變物質之波函數，使得原本不容許的狀態變化(transition)，變得可以了，原本不會有的化學反應過程，變得發生了；原本無法控制的波函數變化，變得可以控制了；甚至可以直接“量測”波函數！這些藉由控制波函數的技術來隨心所欲的達到我

們想要的目標狀態(target state)，我們稱之為量子控制。為什麼人類可以有辦法控制物質之微觀狀態呢？這主要因非線性光學的發展及成熟的雷射脈衝控制技術。非線性光學告訴我們物質與光交互作用時，物質的反應不須只正比於入射之電磁波(光)，同時可以有更高的泛音( $2\omega$ ,  $3\omega$ 等 higher harmonics)，再加上若光強度非常強，一方面激發電子躍遷到較高能階之狀態，但由於飽和吸收之故，一方面又騷擾已躍遷之電子回基態，造成波函數之振幅調制，使得原先的能階因光強而“分裂”(AC stark effect)。因此基本上，非線性光學效應造成了能階的改變。另一方面，當雷射光具有各種頻率，而且各頻率間彼此的關聯是固定的(correlated, or, mode locked)，當同時與物質做交互作用時，可以使波函數處於混合狀態(mixed state)，因此整個系統來說，可以看成物質(原子分子)結構似乎改變了。

量子控制為近幾年新流行的名詞，其實並未有很明確的定義。基本上，只要能控制微觀之量子狀態，都叫量子控制：如，分子、有機物生化反應的控制、原子波函數的控制、半導體表面載子光譜的控制、固態晶格動力學(picosecond-scale lattice dynamics)之研究、共振腔量子電動力學(cavity QED)之研究等。目前量子控制主要的進展，在於控制原子分子的微觀狀態，因此本篇文章將主要著重於原子分子之量子控制。

## 三、量子控制的發展歷史

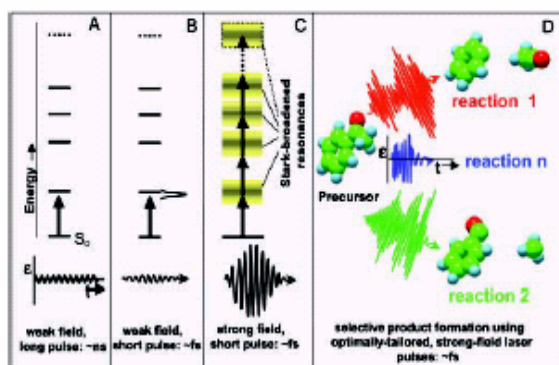
雖然量子控制相關實驗近年來成為“科學”(Science), “自然”(Nature)等著名科學雜誌上非常熱門的話題，但實際上量子控制之想法起源甚早，在1984年，諾貝爾物理獎得主，也是非線性光學大師 N. Bloembergen 即有此想法，但由於當時對雷射的控制技術並不成熟，因此當時並未獲得人們重

視。在 1990 年時 Professor Rabit 提出了具體的量子控制的想法，並使用於碳氫鍵之漢彌敦量中；在 1992 年，Professor Rabit 繼續在 Physical Review Letters 期刊上提出學習控制(learning control)的想法，文章標題為：“教導雷射來控制分子”(Teaching lasers to control molecule)。在這篇文章中指出，人們可藉由觀察光與分子交互作用所產生的訊號(如螢光、解離量等等)，迅速分析此訊號(guided by time-dependent Schrodinger equation)，與人們所要的目標狀態(target state)做比較，便可以回授給雷射，“告訴”雷射如何改變其參數來讓分子達到我們想要的狀態。這樣的控制方法，被稱為“學習控制”(learning control)。在量子控制實驗的進展上，1992 年，E. D. Potter 等人，發現碘原子與氙(Xe)原子化合成 XeI 分子的反應，可經由脈衝延遲(相對於幫浦脈衝)而達到控制中間態過程的目的。在 1995 年，L. Zhu 等人則發現，對於雷射相位的改變，HI 分子有不同的電子游離閾值(ionization threshold)。在 1996 年，A. Shnitman 等人，甚至可以利用連續波雷射(CW laser)控制鈉分子不同之解離態。其方法是，利用另一不同頻率的光去“干擾”鈉雙光子躍遷之波函。這個實驗，甚至不需要二道雷射光有相干性(coherent)。到了 1997 年以後，由於雷射控制技術的長足進展，分子之量子控制實驗越來越成熟，如，C. J. Bardeen 等人於 1997 年成功最佳化染料之螢光訊號，證實學習控制的觀念是可行的。1998 年 A. Assion 等人利用可電壓調整折射率之空間分布之液晶(liquid crystal spatial light modulator, SLM)來“整型”脈衝，並利用電腦從事前述之學習控制，成功地證實了可利用脈衝整型控制化學變化的過程與產物。在 2000 年，J. Kunde 等人展示了利用脈衝整型及回授控制，可以控制半導體之非線性特性。在 2001 年的“科學”雜誌中，量子控制分子已可做到十分精緻，

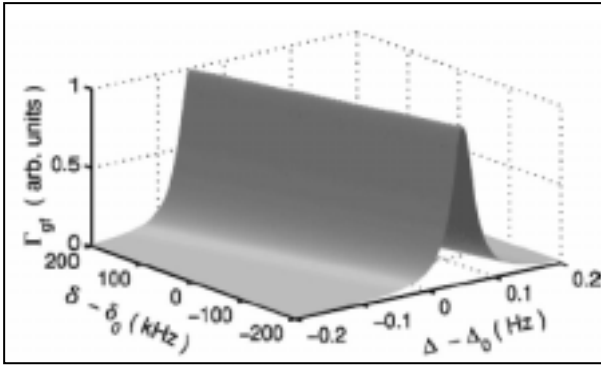
S. M. Hurley and A. W. Castleman Jr. 首度證實量子控制實驗，不但可選擇要切斷何種鍵結，也可選擇要形成何種鍵結！(bonds are not only selectively broken but also selectively formed)人類愈來愈接近造物主所做的事！

#### 四、未來量子控制的可能發展

毋庸置疑的，未來量子控制的技術將朝更精緻的物質波包控制來發展，尤其是原子的控制。在控制的方法上，將由學習控制轉變為回授控制。學習控制在於是否達成我們所要的產物；回授控制則希望永久保持於某個我們所要的狀態(state)。這個狀態甚至不需要是固有的狀態(eigen state)。1998 年，T. C. Weinacht 等人曾成功的利用量子控制的方法，探測鉀原子在電子處於接近連續之高能階下(Rydberg state)之波函數形狀。這證實了人們可藉由實驗把“波函數”描繪出來。在 1998 年，D. Meshulach 等人則成功地證實，經由波函數的破壞性干涉，可以使即使原本存在的鉀原子電子能階，



圖二：利用短而且高能量之脈衝雷射，造成能階之增寬與分裂(AC stark effect)，並藉由脈衝整型控制化學反應及產物。圖 D 之紅色球為氧原子；綠色球為碳原子；藍色球為氫原子。(Science 292, 709 (2001))



圖三：脈衝雷射之二個參數重複率(repetition rate,  $\Delta$ )及偏頻頻率(offset frequency,  $\delta$ )對銣原子雙光子躍遷率 $\Gamma_{gr}$ 之影響。由此可見，適當的雷射光條件可改變原子的躍遷條件，甚至從不會躍遷到很強的躍遷。Phys. Rev. A **63**, 011402 (2001)

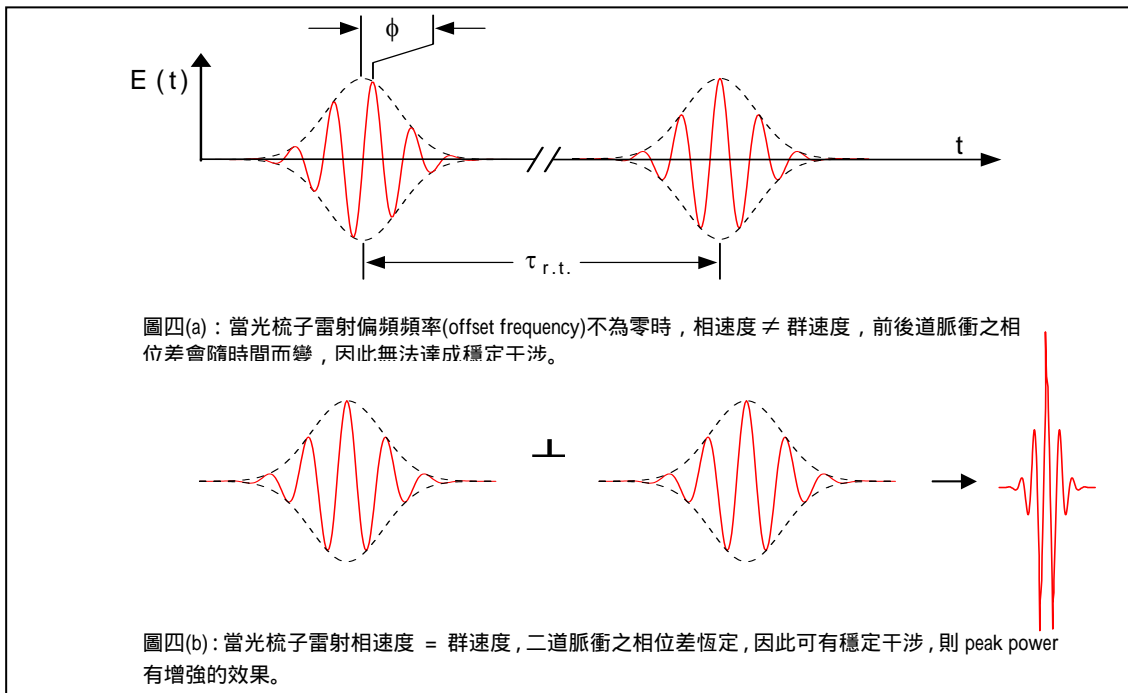
無法有躍遷產生。2001年，T. H. Yoon 等人由理論上證明，人們無須對脈衝整形，只要適當的調整脈衝的相位及每單位時間與物質做交互作用的次數(重複率)，亦可以對波函數當干涉做控制。

### 五、量子控制銣原子與脈衝雷射相位控制

如前所述，更精緻的物質波包控制，希望把波函數永遠控制在我們需要的狀態上，例如，使用頻率間隔、頻率間之相位固定之所謂光梳子雷射(comb laser)，與經由雷射冷卻之銣原子做交互作用，適當的調整雷射之參數使銣原子某雙光子躍遷有最大之躍遷機率，即，令波函數有加強性量子干涉，並經由回授控制的方法，控制雷射系統之絕對頻率，亦即同時控制了狀態明確、穩定的光子。實現這個想法的重要性如下：

(A) 應用價值：

一但光子的狀態明確且穩定，其應用便非常廣泛、重要：在去年的 Physical Review Letter 之一篇文章中，成功的將光梳子雷射頻率鎖在美國國家標準局之銣原子鐘頻率及碘穩頻 Nd:YAG 雷射上，示範了這世紀製造出“光鐘”的可能性。但實驗的難度，幾乎沒什麼國家可重複，因此光梳子雷射的重要性難以推廣。如今，若光梳子雷射之每個模之絕對頻率可以鎖在量子控制下之銣原子雙光子躍遷之頻率上，將是本世紀手提式光鐘的濫觴。



圖四(a)：當光梳子雷射偏頻頻率(offset frequency)不為零時，相速度  $\neq$  群速度，前後道脈衝之相位差會隨時間而變，因此無法達成穩定干涉。

圖四(b)：當光梳子雷射相速度 = 群速度，二道脈衝之相位差恆定，因此可有穩定干涉，則 peak power 有增強的效果。



圖五：目前最新發展的超寬頻脈衝雷射，大大增加了量子控制的精緻性。圖中為此種鎖模脈衝雷射經過三稜鏡所分出的各種顏色的光，想像一支雷射可以製造出接近彩虹的光。照片攝自美國國家標準實驗室，JILA, Ye/Hall Group.

1. 當光子的相位是穩定的，則在時間軸上，二台超短脈衝雷射是可以做穩定干涉的。例如當加強性干涉發生時，最大光強度(peak power)會成為原來的四倍強，將是目前研究超高諧波非線性光學(high harmonic nonlinear optics)的利器。甚至五、六台此種雷射若造成穩定之加強性干涉，則其最大光強度足以高到在瞬間激發金屬表面成為電漿態，可作為各種電漿研究及應用之用(如桌上型 x-ray)。
2. 藉由二所述之穩定干涉方法可達到  $10^{-18}$  秒之超短脈衝(atto-second)。而此種方法所造成之超短脈衝，比起之前用 hollow waveguide tube 之非線性特性(4-wave mixing)而產生高諧波的方法，有更

好之同調性(coherent)。因此亦有更廣泛的用途。

3. 量子控制而造成之相位可控制之超短脈衝雷射可應用於產生高同調之 THz 光源。而我們知，THz 光源是目前國防、通訊及光譜學很重要的光源。
4. 量子通訊(quantum communication)，首重光之傳送與接收間量子狀態之明確。而在 feedback control 之量子控制下之原子波函數，正可應用於量子通訊中，光之量子狀態的產生及檢驗。
5. 量子控制為以光學方法研發量子電腦的基本技術。亦為培養台灣下一代諾貝爾獎得主所必備的技術。

(B) 學術上的貢獻：

1. 原子波包之明確、穩定是理論物理學家所喜歡的。我們若想藉由實驗了解光與物質之交互作用，並且理論可計算，則原子之狀態必須隨時保持不變才行，也因此需要有 feedback control 式之控制。因此我們可說，藉此方法量子控制原子，是研究原子波函數及研究原子與光交互作用的新技術。
2. 原子波函數客觀且靈敏，非常適合用以回授控制雷射。因此對 feedback control 而言，在整個回授系統中，不但原子的狀態明確，光子的狀態也將明確且穩定。這樣的光子非常適於應用到其他高精密的量子光學實驗。因此我們可說，量子控制光子，亦是未來研究量子光學的利器。

目前除了美國國家標準局正以銣原子從事此類實驗外，世界上尚無其他此種方式之“量子控制”在進行。我們在目前提的計畫中將選用銣原子，好處是：

1. 之前已有二個研究群探討鎖模超短脈衝雷射與銣原子之交互作用，因此藉脈衝雷射觀察銣原子雙光子躍遷是沒有問題的。

2. 目前時間標準定義在銣原子的基態超精細躍遷上，因此，當進行量子控制時，對於光子狀態的定義，將會更明確，有利於未來量子電腦的研究。所以此實驗的結果，在計量工程上亦同時會有重要貢獻。

## 六、結語

量子光學，一直是科學中迷人的一部份。二十世紀是個“玩光子”的世紀，二十一世紀的人們，或許會發現這將是一個“玩波函數”的世紀。

## 參考資料：

- [1] Robert W. Boyd, “Nonlinear Optics”, Academic Press, New York, chapter 5 (1992).
- [2] J. L. Herek, W. Wohlhwwn, R. J. Cogdell, D. Zeidler and M. Motzkus: *Nature* **30**, 533 (2000).
- [3] R. J. Levis, G. M. Menkir, and H. Rabitz, “Selective bond dissociation and rearrangement with optimally tailored, strong-field laser pulses”, *Science* **292**, 709 (2001).
- [4] S. M. Hurley and A. W. Castleman Jr., “Keeping reactions under quantum control”, *Science* **292**, 648 (2001).
- [5] T. Brixner, N. H. Damrauer, P. Niklaus, *et al.* “Photosensitive adaptive femtosecond quantum control in the liquid phase”, *Nature* **414**, 57 (2001).
- [6] H. Rabitz, R. de Vivie-Riedle, M. Motzkus, and K. Kompa, “Whither the future of controlling quantum phenomena?”, *Science* **288**, 824 (2000).
- [7] A. Assion, T. Baumert, M. Bergt, T. Brixner, B. Kiefer, V. Seyfried, M. Strehle, and G. Gerber, “Control of chemical reactions by feedback- optimized phase-shaped femtosecond laser pulses”, *Science* **282**, 919 (1998).
- [8] R. Zare, “Laser control of chemical reactions”, *Science* **279**, 1875 (1998).
- [9] L. Zhu, V. Kleiman, X. Li, S. P. Lu, K. Trentelman, and R. J. Gordon, “Coherent laser control of the product distribution obtained in the photoexcitation of HI”, *Science* **270**, 77 (1995).
- [10] E. D. Potter, J. L. Herek, S. Pedersen, Q. Liu, and A. H. Zewail, “Femtosecond laser control of a chemical reaction”, *Nature* **355**, 66 (1992).
- [11] W. S. Warren, H. Rabitz, and M. Dahleh “Coherent control of quantum dynamics: The dream is alive”, *Science* **259**, 1581 (1993).
- [12] R. S. Judson, “Teaching lasers to control molecules”, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1500 (1992).
- [13] R. Bartels, S. Backus, E. Zeek, *et al.* “Shaped-pulse optimization of coherent emission of high-harmonic soft X-rays”, *Nature* **406**, 164 (2000).
- [14] W. P. Schleich, “Quantum control: Sculpting a wavepacket”, *Nature* **397**, 207 (1999).

- [15] T. C. Weinacht, J. Ahn, P. H. Bucksbaum, “Controlling the shape of a quantum wavefunction”, *Nature* **397**, 233 (1999).
- [16] D. Meshulach and Y. Silberberg, “Coherent quantum control of two-photon transitions by a femtosecond laser pulse”, *Nature* **396**, 239 (1998).
- [17] C. Rose-Petruck, R. Jimenez, T. Guo, A. Cavalleri, C. W. Siders, F. Raksi, J. A. Squier, B. C. Walker, K. R. Wilson and C. P. J. Barty, “Picosecond -milliangstrom lattice dynamics measured by ultrafast x-ray diffraction”, *Nature* **398**, 310 (1999).
- [18] M.O. Scully and S.Y. Zhu, “Quantum optics - Quantum control of the inevitable”, *Science* **281**, 1973 (1998).
- [19] T. H. Yoon, A. Marian, J. L. Hall, and J. Ye, “Phase-coherent multi-level two-photon transitions in cold Rb atoms: Ultrahigh resolution spectroscopy via frequency stabilized femtosecond laser”, *Phys. Rev. A* **63**, 011402 (2001).

---

---

### 作者簡介

鄭王曜，國立清華大學物理博士，現任職國立東華大學物理系助理教授。研究專長：原子分子物理、光電物理、非線性光學、量子光學。

Email: [wycheng@mail.ndhu.edu.tw](mailto:wycheng@mail.ndhu.edu.tw)