

# 原子中多光子過程的新發展

劉威志

國立台灣師範大學物理系

e-mail: wcliu@phy03.phy.ntnu.edu.tw

原子在強雷射光中，可以吸收許多個光子而進行多光子過程，產生複雜的高度非線性反應。本文介紹多光子過程中，在多光子解離及高次諧波生成最近的發展。

原子與光的交互作用一直是近代物理的重要研究課題。在一般情況下，光的強度並不高，如此只須要考慮原子中的電子和單一光子的交互作用，就足以解釋絕大多數原子與光的各種反應。隨著雷射的發明及雷射光強度的急速增加，我們開始有能力探究原子在強雷射光下的行為。當雷射光的強度愈來愈強時，也就是說光子的密度愈來愈高，原子中的電子和多個光子作用的機會就愈大。在這種情況下，原子中的電子和多個光子的非線性交互作用就愈加重要而不能忽略。

現今在實驗室中不難產生強度高達  $10^{12}\sim 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> 的雷射光。原子中的電子在這樣的強雷射光下，可能吸收數個、數十個，甚至上百個光子，而帶有很高的能量。這高能量的電子可能就此離開原子而解離。這現象稱為多光子解離(multiphoton ionization)。高能量的電子也可能重新回到原子，落回基態，而放出一高能量的光子。此光子的頻率為原雷射光頻率的整數倍。這現象稱為高次諧波生成(high harmonic generation)。過去二十年來，物理學家對這兩個複雜的現象作了許多研究<sup>[1,2]</sup>，使我們對原子與光的非線性交互作用有更深入的了解。然而新的發現層出不窮。強雷射光和物

質的作用在許多領域都可見有趣的現象。從雷射手術到引發核子融合都是引人注目的應用。以下簡介在這兩方面的最新發展。

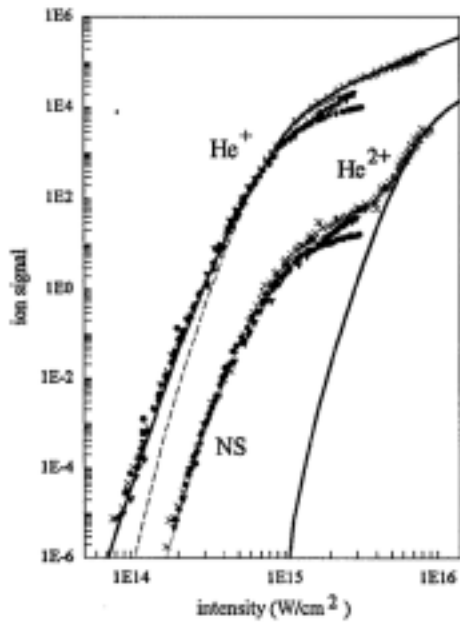
## 一、雙電子原子的多光子解離

了解電子的行為是研究物質特性的基礎。在許多常見的情況下，我們只需考慮單獨一個電子的運動或軌域，就足以描寫物質的特性。例如在建構週期表的時候，僅需要考慮最外層的電子即可。但是電子不見得總是如此孤僻，電子集體行動的時候，會引發各種複雜的現象。超導現象就是個重要的範例。即使只有兩顆電子在一起互動的時候，也可能呈現繁複迷人的現象。

由過去20年來的努力，我們對單獨電子在弱雷射場和強雷射場中的反應都已有相當程度的了解。然而對於多電子系統而言，情況就複雜許多，有許多特殊的情形須要更進一步的研究和解釋。隨著近代雷射技術的迅速進步，我們可以使原子暴露在極強極短的雷射光下，雷射光電場的極值甚至可以比原子核的電場還要強。在這樣極端的環境下，電子很快地被雷射光從原子核拉開。這看來簡單的解離過程事實上蘊含了光子與電子、電子與電子之間複

雜的交互作用。

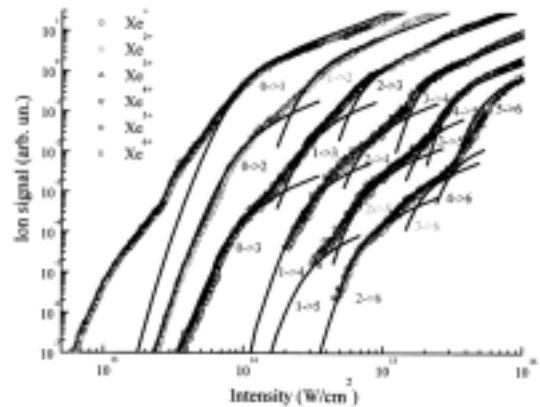
例如氦原子在強雷射場中的雙電子解離，亦即兩個電子同時被剝離原子核。1994年，Walker等人發表了氦原子在強雷射場中雙電子解離的實驗結果（見圖一）<sup>[3]</sup>。其中 $\text{He}^+$ 是單電子解離的產物， $\text{He}^{2+}$ 是雙電子解離的產物。由圖一中可以看出， $\text{He}^{2+}$ 實驗結果



圖一 氦在線性偏極化、100 fs、780 nm 的雷射光下，所解離出的氦離子數量。實線是由單獨電子依序解離模型計算所得。段線是由強電場穿隧模型計算所得。（from Ref. [3]）

和由單獨主動電子 (single active electron, SAE)、依序解離 (sequential ionization) 的理論模型所預測的結果有很大的差距。雙電子解離率完全不能由單獨電子獨立運動來解釋，應是非依序解離 (non-sequential ionization) 的結果。類似的非依序解離現象也在其他惰性氣體中觀測到。圖二是 Laroche 等人測量 Xe 原子多電子非依序解離的實驗結果<sup>[4]</sup>。

有幾個理論被用來解釋實驗結果，各描繪出



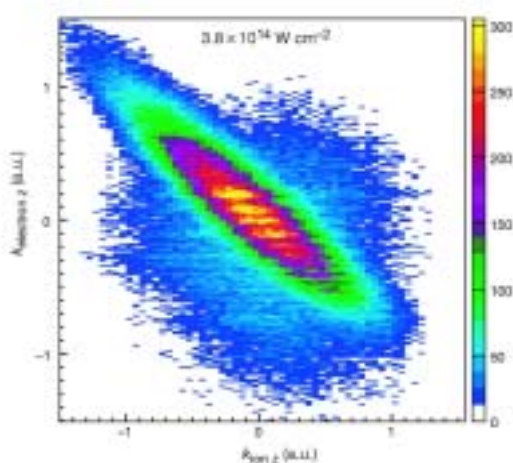
圖二 Xe 在線性偏極化、Ti-Sapphire 雷射光下（波長 800 nm），多光子解離出的 Xe 離子數量。實線是由強電場穿隧模型計算所得。（from Ref. [4]）

不同的物理圖像。其中廣為人知的一個模型是“重碰撞” (rescattering) 模型<sup>[5,6]</sup>。它描述氦原子中的一個電子被強雷射光快速解離，又被雷射光拉回原子而碰撞另一個電子，結果是兩個電子同時解離。在此模型中，兩個解離電子應是高度關聯的 (highly correlated)。另一模型建議第一個電子被強雷射光快速解離時，另一個電子所受原子核吸引力急劇變化，而被強雷射光“搖晃” (shake-off) 解離<sup>[7]</sup>。在此模型中，兩個解離電子應是互相獨立的。

在此我們難以得到一個簡單的答案，因為高度關聯電子的動態現象是相當困難的問題。對原子中的電子而言，經過一個世紀的努力，我們已經發展出有力的技術，對其中的關聯現象有相當的了解。然而對在強雷射場中的原子電子而言，情形就大不相同了。這是動態系統，而不是穩定態系統，強雷射場又破壞了原子本身的對稱性，使得即使是單獨主動電子在原子電場及強雷射場中的動態行為，都是計算物理上的重大挑戰。微擾方法不能適用於這種情況。隨著計算機速度的驚人進展，直到最近，

利用平行處理技巧,物理學家們才有能力以超級計算機直接攻擊雙電子原子為雷射光解離的問題<sup>[9]</sup>。

最近 Weber 等人的實驗發展,給雙電子原子解離問題一些新的線索。他們的實驗試圖驗證電子關聯性的確是雙電子原子解離現象的要角(見圖三)<sup>[9]</sup>。新實驗技術可以描繪雙電子原子解離時電



圖三 Ar 在 220 fs、800 nm 的雷射光下解離,所產生的離子與電子的動量關聯。水平軸是 Ar<sup>+</sup>離子在雷射極化方向的動量;垂直軸是電子在雷射極化方向的動量。(from Ref. [9])

子與離子動量的分佈。由於動量守恆,離子的動量  $k_{ion} = -(k_{e1} + k_{e2})$ 。因此如果知道離子及一電子的動量,就可以推知兩電子的動量。圖三中清楚地顯示離子與電子的動量分佈存在高度關聯,也就是說兩電子的動量分佈存在高度關聯。這實驗結果支持“重碰撞”模型的預測,而且提示我們要瞭解物質與雷射光的交互作用,就必須深入探討電子間的複雜舞蹈<sup>[10]</sup>。

電子關聯性一直是原子物理的中心課題。這幾年來在這方面的發展,使我們對多電子系統在強雷射光下的關聯性反應有更清晰地認識。對其他系統中電子關聯性的研究,如原子團(cluster of atoms)

或在表面的原子等,也是有力的激勵。特別我們希望能對在強雷射場下,原子團或在表面的原子關聯地解離及加熱的動態現象,有更進一步的研究。在這些系統中,原子可以被雷射光迅速加熱而產生極小規模的核子融合<sup>[11,12]</sup>!

## 二、高次諧波生成與超短脈衝雷射

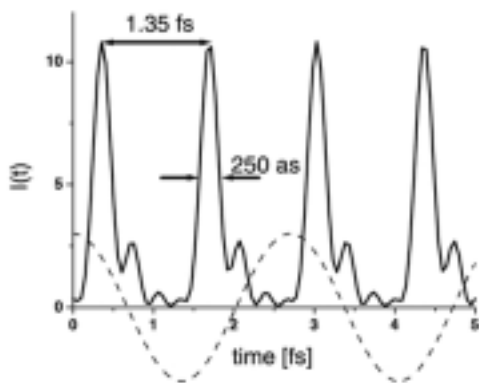
超短脈衝雷射是我們能用來探索物質狀態變化的最快速的工具。到目前為止,超短脈衝雷射可以探測短至飛秒(1 飛秒 fs =  $10^{-15}$  s)時間範圍的反應,並能用來解析物理、化學、及生物反應變化的過程。1999 年的諾貝爾化學獎頒給 Zewail,就是因為他利用飛秒雷射脈衝來研究化學變化的貢獻。通常我們先以一激發(pump)脈衝來激發被探測的系統,等待一段極短地時間,再以一探測(probe)脈衝來偵測系統的動態反應。在這樣的實驗架構下,雷射脈衝的長度就決定了我們所能探測的最高時間解析度。因此自雷射發明以來,科學家一直在努力研究產生更短的雷射脈衝,以探索更快的各種物質反應。

現今,使用各種精巧的技術,超短脈衝雷射技術已經可以產生小於 10 飛秒的雷射脈衝(在可見光及紅外光範圍)。如此的雷射脈衝僅僅包含數個光波振動週期,也有相當大的頻寬。對於探索化學反應,飛秒範圍的雷射脈衝或許已經足夠。然而,某些基本的原子反應過程,如內層電子躍遷或解離等,發生於更短的時間內,牽涉到更高的能量。我們需要更短的雷射脈衝來探測這些反應。

其中一種產生更短的雷射脈衝的方法,是利用高次諧波生成的非線性特性。若以超短脈衝雷射來生成高次諧波,這高次諧波會形成更短的脈衝。如

前所述，當很強的雷射光照射原子時，原子中的電子可能吸收多個光子的能量而解離。稍後電子可能又為雷射光帶回原子核，回到基態而放出一高頻的光子。此高頻光子的能量是先前吸收的多個光子能量的和。因為週期振動的雷射光達到最強時，電子最可能吸收多個光子，而後可以產生較高頻的光子。所以最高頻的高次諧波主要是由雷射光在其振動周期達到最強時產生，因此高頻的高次諧波會形成比原入射光更短的脈衝。此方法據預估可以產生短至 0.1 飛秒的紫外光或 X 光雷射脈衝<sup>[13]</sup>。Drescher 等人利用這原理，已在實驗室中成功產生 1.8 fs 的 X 光雷射脈衝<sup>[14]</sup>。

另一種利用高次諧波生成的特性來產生超短脈衝雷射的方法，是利用高次諧波的時間相干性。疊加數個高次諧波使其在時域(time-domain)互相



圖四 由五個諧波疊加所產生的光強度隨時間的變化。所產生的脈衝半高寬為 0.25 fs. (from Ref. [16])

干涉，而產生一系列極短的雷射脈衝<sup>[15]</sup>。Paul 等人在實驗中用 800 nm 的 Ti-Sapphire 雷射激發 Ar 原子，生成高次諧波。再用高次諧波疊加干涉，已經可以產生 0.25 飛秒的超短脈衝(見圖四)<sup>[16]</sup>。這兩種產生超短脈衝雷射的技術，都是利用高次諧

波生成的特性。可以說明多光子過程及高次諧波生成有廣泛的應用潛力。

在產生超短雷射脈衝的實驗中，真正的困難往往在於測量所產生的雷射脈衝有多短。因為此時已經沒有更短的時間標準可以比較。超短雷射脈衝是我們目前探索極快速反應的重要工具。只要我們一直好奇：在這短短時間中，發生了什麼？超短雷射脈衝的研究就會繼續進展，告訴我們更多秘密。

#### 參考文獻

1. "Atoms in Intense Laser Fields", ed. by M. Gavrila (Academic Press) (1992).
2. N. B. Delone and V. P. Krainov, "Multiphoton Processes in Atoms", 2<sup>nd</sup>. Ed. (Springer) (1999).
3. B. Walker, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1227(1994).
4. S. Laroche, A. Talebpour, and S. L. Chen, J. Phys. B **31**, 1201(1998).
5. K. J. Schafer, B. Yang, L. F. DiMauro, and K. C. Kulander, Phys. Rev. Lett. **70**, 1599(1993).
6. P. Corkum, Phys. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993).
7. D. N. Fittinghoff, P. R. Bolton, B. Chang, and K. C. Kulander, Phys. Rev. Lett. **69**, 2642(1992).
8. K. T. Taylor, *et al.*, Laser Phys. **9**, 98 (1999).
9. Th. Weber, *et al.*, Nature **405**, 658(2000).
10. K. Burnett, Nature **405**, 631(2000).
11. K. W. D. Ledingham, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 899(2000).
12. T. E. Cowan, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 903(2000).
13. K. J. Schafer and K. C. Kulander, Phys. Rev. Lett. **78**, 638(1997).
14. M. Drescher, *et al.*, Science **291**, 1923(2001).
15. P. Salières, A. L'Huillier, P. Antoine, and M. Lewenstein, in "Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics", B. Bederson, H. Walther, Eds. Vol. 41 (Academic Press) (1999).
16. P. M. Paul, *et al.*, Science **292**, 1689(2001).