

# 原子物理發展近況

黃克寧

國立台灣大學 物理學系  
中央研究院 原子與分子科學研究所  
e-mail: knhuang@mcrpa.iams.sinica.edu.tw

張稚卿

國立新竹師範學院 自然科學教育學系  
e-mail: jcchang@nhctc.edu.tw

## 一 緒論

原子物理的傳統研究範疇為，探討原子、分子、與其離子的結構，以及研究電子、原子、分子與電磁場彼此間交互作用所產生的物理現象。原子裏電子的分佈，及其與原子核間的電磁作用，決定所有化學與生命合成物的性質。而這些電子與原子核間的交互作用，也是液體及固體中親和力的來源。事實上，原子裏電子與原子核間的電磁作用，決定大部分日常生活中，所見到的物理及化學現象，例如：日光燈的螢光、水的沸騰、電視影像管中電子束的軌跡、及各種化學反應等。因此，原子物理是銜接微觀及宏觀科學最主要的環節之一，在自然科學領域中，具極重要的地位。

在量度的精確性及發展的多元性上，原子物理更具有其獨特性。微觀的物理理論及其基本對稱性，往往是由原子物理來做高精密度的驗證。同時，原子物理也是研究化學、天文、電漿、和工業技術等的基礎。現今，原子科學家在環境污染、大氣動力學、生命科學、及能源等研究範疇中，均有極為特殊的貢獻。

### 一.一 研究領域的急速拓展

新研究工具的發明，及原子物理與應用科學的密切關係，促使原子物理的研究領域，在近年來急速地拓展。例如，計算機的應用使實驗研究者，能精確地控制儀器，並迅速擷取實驗數據。此外，雷射與同步輻射等技術的發展，開創精確光譜的研究。雷射具有高強度、單色性、高同調、以及超短脈衝等優良特性。以目前的雷射波長，極適用於低束縛能電子的研究。而與此相輔的同步輻射，提供強度大、偏極性高之連續光源，且其波長可達伽瑪射線的範圍，因此可用以研究高束縛能電子。

### 一.二 精確性與多元性

今日實驗上，已經可以產生多種原子與分子態，如極化電子、極化原子、高游離原子、多電子激發態、近似宏觀態、高角動量態等。這些系統的交互作用，及其物理化學性質，都是原子物理研究的主要領域。再加上近廿年來，真空技術、電子技術、探測技術、低溫技術、超導技術、加速器、材料科技的發展，以及精密工業的需求，更奠定了今

日原子物理朝精確性與多元性發展的方針。

### 一.三 銜接微觀與宏觀科學

原子物理在自然科學領域中，具有舉足輕重的地位的另一個主要因素，是它與其他許多基本及應用科學的密切關係。宏觀上整體的物理效應，往往取決於微觀的光子、電子、離子、原子或分子的特性與動態。原子分子碰撞研究中，使用碰撞束技術，藉以詳細研究基本碰撞過程。這對航空動力、電漿物理、太空與星際氣層、及流體工程研究等方面的進展，均有深遠的影響。

### 一.四 應用科學研究

在基本碰撞過程中的離子碰撞反應，可分為彈性散射、激發、電離、電荷轉移、以及交替反應（即化學反應）。此項研究可模擬核融合時，所產生的各種離子對器壁的反應，及宇宙中星球附近的離子碰撞反應，也可模擬金屬材料、電磁材料、或陶瓷材料受離子碰撞後的物性變化，進而製造新材料。此外，研究電子由原子某殼層轉移到另一原子殼層時，也可發現新雷射過程。

### 一.五 科技發展的先驅

由原子物理發展出來的雷射，提供了研究及實用上極佳的光源，並成為電漿診斷研究的精確工具，也使拉曼光譜成為化學分析的有效方法。原子物理與凝體研究關係密切，量子光學即橫跨這兩個領域。固體的雷射現象，提供新的研究技術，特別是調頻雷射。原子物理研究中，低能電子繞射，及其他對表面的研究，不僅提供單原子或單分子層，在二維原子分子空間交互作用的資料，也開創表面

科學研究的新方向。尤其是近年來科技的高度發展，使得由微觀層次所得的資料，與科技的關係更為密切，以致原子物理成為科技發展的先驅。

### 一.六 影響國家政策

此外，原子物理的研究，亦影響國家的政策，諸如，環境污染的防制，牽涉到太陽輻射對空氣分子的作用，與接著發生的光化學反應。而核爆的影響，可經由將各種不同的原子分子數據，輸入理論模型中得到。因此，原子物理不僅在科學知識的內容與基本發現上極為豐富，而且也與人類生活品質的提高，世界和平的促進有不可分割的關係。

## 二 原子物理的研究內容

### 二.一 驗證新理論

直接與我們日常生活有關的近代物理和化學，其主要理論革新在於量子力學的建立，及其後量子電動力學，與量子場論的發展。而對原子結構的精實實驗結果，導致量子電動力學與相對論量子理論的發展，以及粒子自旋，電子異常磁矩，真空極化等的發現。將來新理論物理的建立，仍然有賴原子物理作高精密度的驗證。

### 二.二 建立多體動力理論

多體系統的動力理論的確立，一直是物理學中最具挑戰性的問題之一。一般為大家所熟悉的近似法，有湯瑪斯-費米模型(Thomas-Fermi model)，哈粹-弗克理論(Hartree-Fock theory)，和多體微擾理論(many-body perturbation theory)。由此更進一步發展出來的多體理論有多組態哈粹-弗克理論(multiconfiguration Hartree-Fock theory)，與依時哈

粹-弗克理論(time-dependent Hartree-Fock theory)、組態混合法(configuration interaction method, CI)、R-矩陣方法(R-matrix method)、變分微擾理論(variational perturbation theory)、運動方程式法(equations-of-motion method)、混相近似法(random-phase approximation)、多組態混相近似法(multiconfiguration random-phase approximation)、密度泛函理論(density-functional theory)、以及近耦合法(close-coupling method)等。一般而言，兩個粒子間的相關效應，已經能計算到某個程度。而三個粒子和較高次項的相關效應，目前僅能在形式上加以處理。與高精度的實驗做比較，則必須加入量子電動力學的修正，這包含真空極化、自洽能量、和反衝效應等的修正。

此外，由於輻射物理與雷射光學的發展，需要對光子與高游離、高激發或微擾原子的交互作用，做廣泛而詳盡的研究。由同步輻射所得到的原子的新數據，則需要精確的光游離計算來解釋。近年來對制動輻射、光散射與游離也發現許多有趣的新現象。此外，極化電子原子碰撞和離子原子碰撞，與電漿研究及固態表面研究有關的原子碰撞，以及蒙地卡羅技術應用於原子分子碰撞的研究，都是目前理論方面的研究方向。

### 二.三 原子光譜分析

在實驗上，探討原子結構與特性的兩個主要研究方向，是原子光譜及原子碰撞研究。原子光譜是對原子與光子交互作用的探討。例如，由原子光譜線的位置（即頻率或波長）、寬度、強度等基本數據，可得原子結構資料，如能階、生命期、游離極限等。

以新實驗技術，例如雷射，同步輻射，電子分光儀，離子加速器束箔光譜等，我們可選擇原子樣品，及原子態，以控制不同交互作用的相對強度，來研究某一基本觀念架構。理論與實驗研究工作的相互配合，使得原子光譜研究，對原子物理及其他基礎物理的貢獻很大。

原子光譜研究的重點之一，是研討多電子原子的多體效應。多體問題遍及整個物理領域，但原子是最理想的研究對象。因為以原子核電荷為主的作用力已知，使得中心力場模型為一相當好的近似方法。因此我們可以使用微擾技術處理多電子效應，以深入瞭解多體效應，在原子結構及原子躍遷中所擔任的角色。改進理論或實驗技術，以求得更準確的光譜數據，是原子光譜研究的重要工作。對高激發多電子原子，電子相關效應需要有效處理。接近游離閾時，我們可用散射或碰撞理論來處理成群的態，這是多通道量子虧損理論(multichannel quantum-defect theory)的基礎。至於更高激發態，電子對之間的相互關聯變得很重要。複變旋轉法(complex-rotation method)以及超球狀座標方法(hyperspherical coordinate)在考慮雙激發態的能階與寬度上，分別作出相當重要的貢獻。近年來更發展出馬鞍點方法(saddle-point method)，甚至已經可以有效處理三重激發態及高度激發的空心原子(hollow atom)的問題。

### 二.四 原子碰撞過程

原子碰撞的研究，通常是對兩孤立系統彼此碰撞的探討。而此處所謂孤立系統可以是分子、原子、光子或電子。原子碰撞與原子光譜的研究，在基本上最大不同之處，是碰撞過程對時間的強烈依

賴性。也就是兩原本孤立的系統，彼此間的作用或能態轉換，隨著時間有急速的變化。此對時間的依賴性，使得粒子間的相互關係及相對論效應益形重要。

尤其由於近年來科技的急速發展，使探測技術有長足的進步，不論是對各系統能量的解析度，或其極化程度，都能作定量的分析。此處理論與實驗的彼此激勵與精密配合，是檢驗相對論多體動力理論的最佳場所。而此類理論的建立是基礎物理上一個亟待圓滿解決的問題。

在原子碰撞中，最基本的過程是光游離與散射現象、電子原子碰撞、以及原子及其離子彼此間的碰撞。對這些基本碰撞過程的探討，是當前原子物理中最重要的課題之一。

#### 光游離

光與物質的作用，涵蓋絕大部分宏觀物理與化學現象，因此對光游離與散射的研究，是物理研究上重要的一環。一方面，同步輻射與雷射的發展，使這類研究的精確度非其他碰撞研究所能比擬。另一方面，原子的結構與光譜，亦為原子物理研究上，最為成熟的一部門。因此實驗與理論的相互配合與激勵，可研究原子受光激游離過程中相對論效應，電子相關效應，以及極化現象等。

#### 電子原子彈性及激發碰撞

電子原子的彈性及激發碰撞，長久以來一直是多體動力理論的驗證場所。實驗方面更引進了研究原子結構的新方法。單能量電子束的發展，使得原子共振現象，與能量虧損研究獲得突破。此項研究可決定不發光的原子激態的特性，因此可與前述光

譜方面的研究相輔相成。近年來實驗開始使用極化的電子與原子束，可預期地，我們對原子結構的瞭解，將更因此向前邁進一步。

### 三 原子物理的重要研究課題

#### 三.一 相對論多體動力理論

因為實驗精密度提高，在光譜學和碰撞過程中，以相對論處理的相關效應，和量子電動力學的修正已經是必須的。發展優於相對論性的哈粹-弗克理論的相對論多體動力理論，則顯得特別重要。

#### 封閉殼層原子

原子可分為兩類：一為封閉殼層的原子（closed-shell atoms）另一類為開放殼層的原子（open-shell atoms）如惰性氣體是封閉殼層的原子，其未被擾動的基態，可用單一組態描述得十分完整。其動力性質，相對地說很容易計算出來。其他封閉殼層原子，如鹼土族系列，由於其基態是由幾個組態組成，其動力性質就較難處理。例如鉍原子，由於軌域  $2s_{1/2}$ ， $2p_{1/2}$ ， $2p_{3/2}$  的能量接近簡併，其基態  $^1S_0$  不能單由組態  $(1s^2 2s^2)^1S_0$  描述得很好。這是由於在真實的情況中，雙重激發組態所造成的電子相關效應，必須被包含在內。針對這兩種封閉殼層原子發展出來的相對論多體動力理論，相對論混相近似理論，與多組態相對論混相近似理論都相當成功。對於數種物理過程的計算結果，均可從實驗上得到很好的驗證。

#### 開放殼層原子

對於簡單開放殼層原子，如鹼金屬原子，其動力性質可以從相對論哈粹-弗克理論得到很好的結

果。對於一般性開放殼層原子，例如氮原子，鉍原子等，由於複雜的運動形式，及未受擾動的基態必須混合幾個組態，其多體動力理論是最具挑戰性的問題之一。對這兩種開放殼層原子，相對論多體動力理論已經初步建立，然目前數值計算結果並不多。

### 三.二 奇異原子

奇異原子是指除一般含電子的原子外，受庫侖作用力束縛的粒子系統，例如，positronium( $e^+e^-$ )、muonium( $\mu^+e^-$ )、muonic hydrogen( $p^+\mu^-$ )、muonic helium( $\alpha\mu^-e^-$ )，或一般而言，將上述系統通稱為 muonic 原子或 hydronic 原子。以 muonic 原子為例，由於  $\mu^-$  粒子與電子的質量差別，及遮蔽效應的結果，其  $\mu^-$  粒子軌域較電子軌域小上好幾百倍。研究與原子核有相當大疊合的  $\mu^-$  粒子軌域，有助於瞭解原子核的大小與形狀、同位素能階移、同素質能階移、原子核磁偶矩原子核的激發現象等。而研究與原子核或電子軌域只有些微重疊的  $\mu^-$  粒子軌域，提供了對量子電動力學一個詳盡的驗證方法。並且可以決定  $\mu^-$  粒子的質量與磁矩，以測試宇稱不變性(CPT invariance)。研究與電子軌域有大幅重疊的  $\mu^-$  粒子軌域，可決定電子分佈情形。因此，在這方面有很多值得做的研究。

### 三.三 原子中弱中性電流之宇稱不守恆效應

原子物理中對弱作用效應的研究有很多種，其中最有趣的是重金屬氣體的光旋效應。雖然許多實驗與理論結果已經發表，原子躍遷中宇稱不守恆的效應仍不十分明確。在 Tl、Pb 與 Bi 等元素的基

態中，最值得探討的躍遷是磁偶極(M1)躍遷。宇稱不守恆作用力的效應，使得原子波函數含微量相反宇稱。因此 M1 躍遷轉變成電偶極(E1)和 M1 的躍遷混合。而 E1 振幅，即  $\text{Im}(E1)/M1$ ，決定光旋的大小。相對論效應與相關效應，在決定不同宇稱混合態中十分重要。這方面的實驗與數值計算，在近年來頗受重視。

### 三.四 雷射光譜

高強度、單色性、高同調、超短脈衝

因傳統光源強度有限，在研究上造成許多限制。而雷射因具有高強度、單色性、高同調以及超短脈衝等特性，可以選擇性激發原子到不同的能態，甚或可以將原子激發到傳統光源無法激發到的能態。因而能對原子能階，及其相互作用，瞭解得更為精確，更為透徹。

高解析力、準確性和靈敏性

雷射光譜由於其高解析力準確性和靈敏性，在物理科學上的影響甚為重要。傳統雷射光譜學的發展，主要在可見光的範圍。目前 VUV 雷射，以及紅外線，遠紅外線雷射的發展，使得雷射光譜學及其應用更顯得重要。而與同步輻射光源的結合，更可開創新的研究領域。

多光子過程

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。如此一來，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  $10^{12}\sim 10^{15}$

$W/cm^2$  的雷射光。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，即所謂多光子解離(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，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，使我們對原子與光的非線性交作用有更深入的瞭解。

### 三五 同步輻射

#### 強度大、偏極性高的連續光譜

近卅年來，同步輻射光源的興起，取代了大部分的放電光源。這種光源也是國內學術研究的主要發展方向之一。目前雷射的波長  $M$ ，僅適用於低束縛能電子的研究，而同步輻射則提供強度大，偏極性高的連續光譜，且其波長可達  $\gamma$  射線範圍。

#### 吸收光譜

早在六十年代，物理學家使用紫外線同步輻射於稀有氣體，發現其游離連續區，具豐富的不連續共振。第一個以同步輻射得到的原子吸收光譜，為氦在  $2000\text{\AA}$  的系列自動游離態。此發現對電子相關效應的瞭解極重要，因為它是最簡單的雙激發電子之間相關效應的例子。

#### 光電能譜、歐皆能譜、螢光能譜

利用同步輻射及光電子能譜技術，是研究電子分佈及相對論性多體動力理論的重要工具。這是因為相對論及電子相關效應，對光電子的角分佈有非常靈敏的影響。其他可利用同步輻射優點的技術，

還包括歐皆(Auger)電子能譜及螢光能譜，這些對光激發後原子的反激發過程，都可做更詳盡的研究。

### 三六 協和效應和量子拍現象

能階交叉(level crossing)、漢諾效應(Hanle effect)、調制激發螢光(modulated pumping fluorescence)、伽瑪射線級聯光子效應( $\gamma$ -ray cascade photon correlation)等實驗技術、以及近年來無反置雷射的研究，都包含了激發-協和的原子系統，並對其所發螢光的偏極化性質作測量，以確定此協和系統的演化過程。在這些協和效應中，量子拍的現象在觀念上最為簡單，且最為基本。

雖然量子拍的觀念與量子力學的發展同樣長久，但直到最近才能對此現象有深入的瞭解。這是因為直到最近利用短而強的脈衝，有效的激發原子系統，並測量快速調制的訊號。典型的量子拍實驗中，原子經由某種激發過程如光游離，電子碰撞游離，束箔激發等，而被激發至一協和激發態，此後，這協和激發態可經由歐皆過程，或放出光子來釋放能量，也可再次被激發或離化。

這項技術有助於觀察分佈緊密的量子態之間些微的能量差。因此，精細結構、超精細結構、蘭姆能移(Lamb shift)等可被量度得極為精確。

### 三七 碰撞過程的研究

#### 極化相關效應

典型碰撞實驗中我們量度碰撞截面積和角分佈。所有極化的現象都平均掉了。隨著極化粒子(如電子、原子、或離子)的發展，我們可以研究某一極化的個別躍遷振幅，和不同極化振幅間的干

涉作用。配合高功率光源的使用，如雷射和同步輻射，極化研究可以提供原子豐富的資料。另外，對物理定律的對稱原理和不變性的精密測試也甚有助益。

### 碰撞和共振現象

電子原子和電子分子散射研究，給予碰撞理論最豐富的測試基礎，也提供很多原子結構的知識。由於高解析電子槍的發展有重大的突破，使得共振研究變為可能。而單能量電子之能量耗損光譜的解析度，可達到與光學光譜相當的解析度。這有助於決定不放光能階的測定。

### 三.八 低溫原子之研究

隨著雷射冷卻技術之發展，低溫原子的研究在近年來急速發展。低溫原子的低動能特性，提供了科學研究上的多方面應用。包含玻色-愛因斯坦凝結(Bose-Einstein condensation, BEC)、原子光學、原子干涉儀、量子干涉、與高精密度光譜等。這些研究不僅提供了我們對物質世界更深入的認識，也開啟了新技術的契機。量子電腦的可能性正逐步浮現，人類的未來勢必深深受到這些研究的影響。

### 雷射冷卻技術

相較於傳統的低溫技術，雷射冷卻可以在室溫下進行，且降溫過程迅速，提供了研究者非常有利的工具。目前的已可以將原子溫度降低到  $300 \mu\text{K}$ ，雖然技術上還只能產生  $10^7 - 10^9$  個原子，以經足供大多數的原子物理實驗所需的樣本。

### 玻色-愛因斯坦凝結

1924 年印度物理學家玻色及愛因斯坦共同提出玻色-愛因斯坦凝結之預測。當原子溫度降到極低，以致原子的德布羅意波長接近原子間的距離時，眾多原子會同時落入同樣的能量最低的「基態」，而形成一個新的物態，此時可以用單純的凝體理論來預測物質的行為。

1995 年銩原子首次被冷卻而證實玻色-愛因斯坦凝結，隨後鈉原子也得到了相同的成果。這引起了科學界對這種新的物質型態的興趣。BEC 可以用來製造原子雷射，也就是一到類似雷射光的原子束只是雷射中所發射的光子改換成原子。也可以用來探測一些物理性質，例如物質的超流性。

### 原子捕獲

將兩道同源的雷射光相對照射於原子，當雷射頻率略低於原子躍遷頻率時，都卜勒效應使得原子有機會吸收雷射光而躍至激態，當原子由激態經自發輻射回到基態時，因為放出的能量大於吸收雷射的能量，而損失動能。如果再加上磁光陷阱(magneto-optical trap)，就可以成功的將原子捕獲。

近來科學家試圖捕獲的原子更擴展到費米原子，將原子在低溫時的面貌一一呈現，幫助我們更深入瞭解微觀的量子世界。

### 三.九 電漿診測

原子物理在應用科學上，研究課題種類很多，現僅討論與熱核融合有關的研究。熱核融合研究中，原子物理所扮演的角色是再重要不過了。其應用範圍包括電漿形成，能量損失機制，電漿診測等。在此我們僅就電漿診測做一說明。

每一種電漿實驗必定配合一些抽取樣品，探測電漿性質的方法，而這些觀察到的效應，均有診斷的意義。事實上，經由量度技術的發展，以及相應理論的詮釋，可以看出電漿研究的進展情形。

#### 診斷宏觀特性

診斷方法一般建立在與電漿狀況，及其固有特性有關的現象上。量度電漿參數的方法有很多，許多宏觀量度的技巧，被用來量度巡迴電流、電壓、光度、壓力變化、動能傳送、和電磁場的時空分佈。

#### 診斷微觀特性

另一個主要的診斷方法，為研究電漿的微觀性質。使電漿離子化的高能過程，也會造成中性和帶電成份的激發態，並產生反激發輻射。電漿中帶電粒子的相互碰撞，也會產生自由-自由，與自由-束縛躍遷輻射。因此，一般而言，熱電漿產生的輻射，涵蓋的電磁光譜範圍很廣。由研究光譜線和連續輻射的強度，可得知電漿所處的狀態，而電漿的狀態可決定激發態的密度。光譜線形狀、都卜勒效應、與斯達克擴展(Stark broadening)等也是研究的課題。因其與輻射中原子或離子所在的環境有關，特別是壓力與溫度的不同極為重要。這些光譜的研究，都是不干擾電漿的探測。

另一種重要的診斷技巧，與電磁輻射在電漿中傳遞、衰減、與散射有關。利用傳統的光或雷射光的時空分辨干涉儀、微波傳遞與共振、電漿的制動輻射、與同步輻射，也都是研究範圍。

#### 粒子測量

電漿診斷一般的目的，是量度離子、電子、及中性粒子的分佈，與其附隨的電磁場，而以此確定電漿系統的物理狀態。因此，有各種不同的診斷技巧，直接量度電漿中粒子的成分。這些技巧包含，量度電漿系統內或漏出之離子和電子，以及藉著粒子或類粒子與電漿中粒子作用的間接量度。

## 四 結論

總而言之，原子物理銜接著微觀與宏觀科學，與許多基礎及應用科學間都有非常密切的關係。在基礎科學的研究上，原子物理的研究，無可置疑，是極具貢獻的。除此之外，原子物理研究也可應用於環境保育、熱核融合、生物醫學、量測學、表面科學、同位素分離、材料科學、微電子技術、光電技術等。對航空動力學、電漿物理、太空與星際氣層、及流體工程研究等方面的進展，也都有有深遠的影響。

尤其是六十年代能源危機發生後，各國都投入大量人力、物力競相發展新能源。加上生活水準的提高，使人們注意居住環境的污染問題，這些發展使得控制熱核融合、燃料科技、及環境保育等研究益形重要。另外在國防工業上，精密電子材料、同位素分離技術等，一直是重要的研究課題。也由於這些研究發展的影響，造成近年來，原子物理研究領域急速的拓展。今日，原子物理研究所具的多元性與精確性，實非其他科學領域所能比擬。

目前國內科學人力與資源有限，在基礎研究中，適宜發展儀器設備投資較小者，而原子物理研究是最恰當的研究領域之一。配合同步輻射研究中心及凝態科學研究中心的運作，定可強化國內基礎

科學的研究。尤其是從事這分面的研究人員，可學習到廣泛的知識與實驗技術，並可把這些層次的科學研究技術，帶到其他研究領域，收到支援及開發新科技的目的。進而使科學在國內生根，並發揮人力與資源的最大功效。