

怎能只成天在力學裏打轉？物理學家不須要哲學界的人交通嗎？他們願推進“知識”的崇高理想與醫學家、史學家全無二致。大學當是一個聯合的 scholar community，人類世界如果有望，我更願說，國家如果有望，乃在於這種智識界的資源，在於知識界地“知識”此點。

我們學生不是最具潛能嗎？怎樣使這 potential 轉換？當不避難題；這使我們更有能力(more capable)，同樣的問題下回就不再是以困難呈現我們眼前了。

我們進大學不在於修習經濟學、社會學等等的學分。我們要接受知識的洗禮，我們要推觸它，要與有知識的接觸。我們當學著如何去得到它，推進它。行文至此，似乎當改題大學生之道了。

此文文字，大部得自一本加州理工學院出的小刊物，研究圖書館陳列著有。附帶把在上面看到的一些統計數字記下：加州理工學院在出那本刊物時有七百卅分大學本部生，七百九十名研究生。faculty 共有五百五十名，其中從事實際教職的有兩百五十名而已。

物理發展二十年

學術組

譯後記

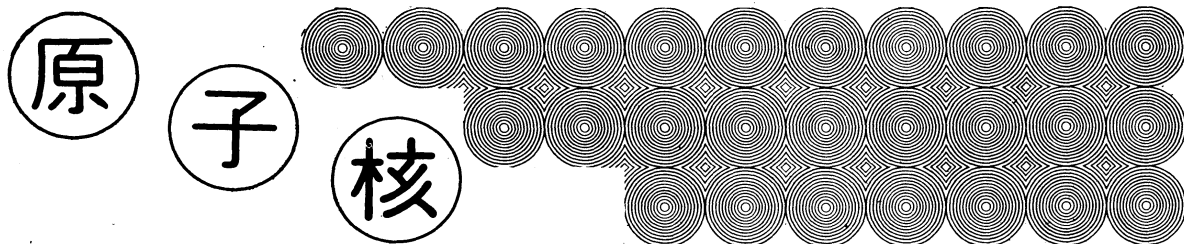
有些同學認為此一系列的文章“可讀性”不高。希望這不是譯者能力不足所造成的印象，爲了要發現自己真正的興趣，發展自己真正的才能，是否要多進入一些問題(Subjects)看看；特別是那些未經深入前可能有“枯燥”的印象的？！我們盡量把原文忠實的介紹，這些都是有一些成就的人寫就的。

此期刊出的有六篇，要特別感謝四年級同學

撥冗幫忙；及一位土木系三年級的左競同學。將原作者及譯者依刊出順序列出，作爲參攷。

原子核— D. Allan Bromley — 黃正民
等離子體物理學— Melvin B. Gottlieb — 陳英琦

晶體結晶學— James A. Ibers — 陳順強
質流學— Robert S. Marvin — 左競
光學— Aden B. Meinel — 黃智光
太陽系— A. G. W. Cameron — 李建平



引言

原子核物理始於第二次世界大戰期間；當時人們只知道這門學問有很大的應用價值，基本上的認識卻少得可鄰。二十年以後，無論是基本的了解或是實地的應用，我們都已有了重大的進展。原子核物理成爲人類了解其所置身的宇宙的先鋒。原子核物理促成了現代社會及文化的若干重大改變。

我們可以將原子核物理視爲量子物理的一支，或者更精確的說，是「強相互作用物理」(strong-interaction physics)的一支。在這門學問裏所涉及的是「重子數」(baryon number) 大於 1

的系統；換句話說，核子是被看做最基本的單位的。(註：爲免混淆，nucleus 譯爲原子核 nucleon 譯爲核子。)

原子核由有限多個核子構成，乃是研究多體問題的物理學家們最感興趣的對象。基本粒子物理學所處理的只是少數幾個物體之間的相互作用，固態物理、金屬理論或等離子體物理等則須處理非常非常多的個體。前者可以用詳細的微觀計算方法來探討，後者只有統計方法才用得上。原子核物理所遭遇的個體數目恰介乎上二者之間，遂成爲溝通微觀(microscopic)、宏觀(macrocopic)兩種探究學問的方法之間的橋樑。觀察原

子核現象可以使我們對多體問題有一完整的，一般性的了解。

唯有在原子核裏我們才能讓所有已知的自然力同時作用其中。我們可以把原子核當做一個微小的實驗室，而在裏面觀察及試驗物理學上各種基本的守恆律及對稱律。物理學家們近幾年來才體會到原子核的這個妙用；在這方面可做的事還多著呢！

原子核的形態 与 形態

原子核內部物質的密度大體均勻一致（約為240百萬公噸每立方厘米），使我們相信原子核的半徑的立方應正比於原子數。但是Robert Hofstadter等人作了許多精密的電子彈性散射（electron elastic scattering）實驗的結果，找到了某些有系統的偏差。他們發現質量輕的原子核猶可說是均勻的，而質量很重的原子核核心密度就較周圍低，表示其質子間有相互排斥的靜電作用存在。最近的實驗還有了更重要的發現：所有的原子核都帶有一層「中子暈輪」（neutron halo），也就是說原子核裏中子分佈的範圍要比質子大。現在，極高能量（500—750 MEV）的電子散射實驗可以精確的量出原子核裏電荷分佈密度沿著軸方向的變化情形。量度的結果與「殼層模型」（shell model）所預測者不盡相符，顯出我們對原子核內部深處構造的探測還在起步的階段！

原子核的結構

一九四〇年代末期，由於儀器的發展和技巧的進步，加上「曼哈坦計劃」（Manhattan Project）中所獲得的若干啓示，人們開始有系統地探求有關原子核的知識，而不再如同早期所作的雜亂無章。

到了一九四九年，原子核物理學家們已經收集了一大堆彼此之間無關連的資料，其中最引人注目是「幻數」（magic number）的存在——就是說，如果原子核中質子或中子的數目達到2, 8, 20, 50, 82, 或126，則原子核的結構便特別穩定；這使我們回想到化學元素中惰性氣體的形成。於是人們便處心積慮地想把原子模型裏的殼層理論(shell theory)搬過來應用，然而許許多多的企圖都失敗了，一直等到一九四九年Maria Mayer及J. Hans D. Jensen 兩人分別注意到了原子核的「自旋——軌道相互作用」(spin-orbital interaction)之後，方才扭開了整個問題的關鍵。

(一) 殼層模型 (Shell model)

引進自旋——軌道相互作用的觀念以後，殼層模型立刻有了很大的成就。幻數不再是神奇的了，它只是由殼層模型推算出來的某些能量間隙 (energy gap) 造成的結果。殼層模型指出偶數個的中子或質子會將他們各自的自旋 (spin) 及軌道 (orbital) 的角動量成對的配在一起，使得整個原子核的自旋角動量為零。若原子核裏質子（中子）的數目為奇數而中子（質子）的數目為偶數，則該原子核整個的自旋角動量便等於那一個多出來，不成雙的質子（中子）個自的自旋角動量。同時，幻數附近的原子核的激發能譜 (excitation spectra)，可以解釋成此一不成雙的核子跑到較高的殼層所引起的能量改變，此時其餘的核子構成一個不動的核心，對於能量的變化不起影響。

殼層模型固然成就非凡，但是它把原子核裏的核子看得太獨立，顯然將事實過於簡化了，所以接著就被一些有限度的考慮到核子之間相互作用的模型取代。在這些新的殼層模型中考慮到了最外一層的「價核子」(valence nucleon)，因而解決了若干從前懸而未決的問題。

然而有許多問題仍然存在，尤其是原子核的「電四極矩」(electric quadrupole moment) 的存在，簡直無法用價核子的理論來解釋。一九五〇年James Rain Water 提議考慮價核子以外的核心核子，他說除了核子恰能填滿殼層的情形外，原子核的形狀非為圓球體。這種核子有集體運動的觀念，開啓了另一個紀元。

(二) 集體模型 (Collective model)

最原始的集體模型由Aage Bohr與Ben Motelson 在哥本哈根的地方發展出來。核力中作用範圍短的部分喜歡原子核是圓球形的，作用範圍長的部分則不喜歡圓球形，一旦兩種力達成協調便決定了原子核平衡狀態的形狀。

集體模型推論原子核有各種「轉動態」(rotational state) 和「振動態」(vibrational state)，實驗中果然找到了 $E_J = A J(J+1)$ 的轉動性能譜和 $E_n = (n+1/2)\hbar\omega$ 的振動性能譜。

(三) 兩種模型間的相互關係

原始的集體模型很快的混合殼層模型的觀念而加以擴充。新的模型中決定核子軌道的位能不再是球形對稱，其確實的形狀乃是用Hartree-Fock 方式的技巧來決定，以便能與核子的分佈情形相符。

新的集體模型起初只是用來處理中級及重級的原子核，一九五七年 A. E. Litherland 等人發現即使很輕的原子核亦能表現集體運動的特性。當時這種輕級原子核已能用殼層模型做精確計算，所以自然有人想到以此來比較殼層模型及集體模型。一九五六年 Eric Paul 強調兩種模型對於 F^{19} 的計算非常一致，因而引發了 Philip Elliott 及 Brian Flowers 的動機；他們把殼層模型裏的波動方程式 (wave function) 做了適當混合之後，居然也能算出原子核集體運動。

以上可以見出殼層模型和集體模型的關係非常密切，但是兩者畢竟不是一回事。殼層模型不能顯示重級原子核的集體運動特性，同時也無法預測原子核的總能量與核子的不同組態 (configuration) 的混合情形。

針對著殼層模型的這些缺點而作修正的一共有三家理論。Brueckner 考慮到了核子間作用力的高次項，而在一般的殼層模型裏只考慮到一次項。另外兩種理論分別採用了研究超導體與等離子體振動的類似技巧。

(四) 新的集體模型

過去幾年來，許多出乎意外的實驗結果，使得人們在應用集體模型時必須採用更微觀的處理。Michel Baranger 和 Krishna Kumar 就做了一番微觀的研究以預測鐵同位素原子核的靜態與動態的性質。一九六七年在 Yale, Brook haven 及 Oak Bridge 做的實驗證實兩式的預言非常正確。他們是先假設核子與核子間的作用如何如何，然後以此為基礎而導出所有的理論，這種處理原子核現象的方法較以前基本，因此開拓了一個非常有前途的新紀元。

(五) 光學模型 (Optical model)

光學模型最初是一九四九年由 Robert Serber 等人用來解釋氘核轟擊 (deuteron bombardment) 所產生的中子流的強度。此一模型假設入射物體所遭遇到的位能具有實數及虛數兩部分，以包含可能發生的反射、折射及吸收等作用。目前光學模型已有了高度的發展，並證實為一種表示原子核間相互作用的最便利的方法。

最新的發展有二，其一是在光學模型的位能的主要項之外，加入自旋——軌道相互作用的位能以解釋原子核的極化現象。其二是在位能裏加入代表「同旋」(isospin) 的項以反映質子間位能較深而中子間位能較淺的這個事實。

(六) 類同旋狀態 (isospin-analog states)

在原子核物理裏，同旋是一個老觀念了。它是原子核特有的一種量子數而為原子所沒有的。一九三二年 Werner Heisenberg 提出同旋的觀念，到了一九三七年由 Eugene Wigner 充分發揮以確定核力與電荷無關的性質與同旋之間的連帶關係。然而接下去的二十五年間一般都相信同旋的公式只能用於質量很輕 ($Z \leq 10$) 的原子核，直到一九六一年 Bruce French 和 Malcolm Macfarlane 方才擺脫了舊的觀念而倡議同旋亦可適用於重原子核。這個觀念甫一提出便受到重大的鼓勵，因為同一年裏 C. A. Anderson 和 Calvin Wong 發現重級原子核具有「類同量狀態」(isobaric-analog state)。

一九六四年 John Fox 等人研究質子散射裏的共振現象，果然發現了重原子核的類同旋狀態。近來此一領域的研究工作有一大部分是用來研究「同量態」(isobaric state) 的本身及其在探測原子核的結構上的應用。

核反應 (Nuclear reaction)

在一九四八年以後的十年間，對於原子核的反應及散射的研究，用的都是能量相當低 (通常小於 5 MEV) 的入射物。當時利用角動量量子理論以分析實驗結果的角相依性質，對於原子核動力學 (nuclear dynamics) 曾有巨大的貢獻。

隨著入射物能量的增加以及能量鑑別 (energy resolution) 能力的改進，使得我們可以將反應後的複合狀態 (compound state) 分解為各個單一狀態 (single state)，因此核反應研究的方法也就從詳盡的微觀分析轉變到與光學類似的宏觀方法 (如 Fraunhofer 繞射和 Fresnel 繞射等等)。

一九六〇年 Torlief Ericson 引進了統計學上處理相關性 (correlation) 的技巧，以計算核反應居間態 (intermediate state) 的平均能量寬度 (average energy width) 和生命期 (lifetime)。最近的許多發展，使我們能夠知道這些居間態的生命期確實有系統地為激發能量和原子序的函數。

一九五二年 Stuart Butler 發表了一篇有關「直接轉移反應」(direct transfer reaction) 的論文 (入射物與靶之間互相交換一個或少數幾個核子的現象，叫做直接轉移反應)，以此為基礎，隨後的發展證實這種反應是可以供給原子核構造知識的一個大富源。現在對於輕入射物 ($A \leq 4$) 的這類反應我們已經十分了解，可是對於較重的入射物所引起的反應，則無論就實驗或理論

而言，都還處於幼稚階段。

新的同位素和元素

四十億年來，地球上元素的種類一直是九十二種，直到一九四七年方才增加為九十六種。一九六一年 Glenn Seaborg 等人在 Berkeley 把元素的數目增加到一〇三種；迄至一九六七年九月，G. N. Flerov 等人在 Dubna 已做出了第一〇四及第一〇五種元素。後來發現的這些元素的生命期越來越短，使人覺得似乎已不可能有新的元素存在了，可是根據殼層模型的計算，當質量更形加大時，這種趨勢可以扭轉，而可能存在 Z 為 114, 126, 184, 298 及 310 等元素。

一九四八年時，已知的同位素約有五百種，到了一九六八年這數目已經將近一千六百。Flerov 估計，用 3-GeV 的鈾離子轟擊鈾原子核，至少將產生五千種同位素。詳細的情形可參考 Flerov 自己繪製的圖表。

雖然原子核質量的半經驗公式 (Semiempirical nuclear-mass formula) 早在一九三五年便由 Carl F. von Weiz Saecker 提出，其後並經不斷的改進，但是一直等到一九六六年這公式才被推廣應用到很不穩定的原子核上，並且算出其相對於「強相互作用衰變」(decay by strong interaction) 的不穩定性。

高能原子核物理

原子核物理學總是迫不及待的想要採用最新的加速器以從事研究。目前的數百 MeV 級與 GeV 級的能量，已可用來探測原子核的內部構造。現在大家努力鑽研的重要問題是有關原子核裏核子動量分佈的情形，以及核子之間「相關現象」(correlation) 或稱「成束現象」(clustering)，對於原子核的影響程度的大小。0 從 1 GeV 的質子及 α 粒子的實驗已有證據顯示，輕級原子核的核子有形成類氦物的成束現象，而中級和重級原子核的表層核子則有形成 α 粒子的成束現象。過去沒有可信的證據顯示原子核裏有二體力(two body force) 以外的作用力存在。如今新的高能量的實驗可以直接估計三體相互作用(three-body interaction) 或多體相互作用(many-body interaction) 在原子核裏所佔的比重是在怎樣的限度以下。

高能量或低能量的 π 介子的散射作用，可用來研究原子核的內部構造。目前這方面的研究尚在搖籃時期，可是前途無量。正在 Los Alamos 興建的介子工廠 meson factory 將為原子核物

理開啓一個新紀元。現在的「宇宙級加速器」(Cosmotron) 終必為介子工廠所取代。

一個微型實驗室

如前所述，原子核是唯一的能有各種自然力同時作用其間的多體系統，我們可以把它當做一個無以倫比的微型實驗室，以觀察各種基本的守恒律和對稱原理。

最為大家所熟悉的一個粒子就是有關弱相互作用裏的「宇稱守恒」(conservation of parity) 的問題。一九五六年李政道和楊振寧注意到儘管大家做了很多有關原子核 β ——衰變的實驗，但是沒有一個涉及宇稱守恒。由兩氏的提議，吳健雄等人度量排列整齊的鈷——60 原子核的衰變電子的角相依情形，結果確定弱相互作用裏有很嚴重的違反宇稱守恒律的現象。

一九六七年 V. M. Lobashov 等人量出強相互作用亦有一點違反宇稱守恒律的情形。

也許有人要問：弱相互作用下是否也有違反「輕子守恒」(lepton-conservation) 的現象存在呢？一九六七，一九六八年間吳先生和她的手下研究鈣——48 的雙重 β 衰變(double-beta decay)，確定其違反輕子守恒的弱相互作用與不違反者相比，程度低於 10^{-3} 。繼續研究不去，當可將這個上限的數字縮小，或者也許就能找出違反輕子守恒的程度為若干了。

過去十年來有若干人嚐試去測驗「時光倒流不變性」(time-reversal invariance) 的精確度。然而迄今為止所能做到的也不過是為違反時光倒流不變性的程度，找出一個相當小的上限罷了。

最後我們談到質子電荷 e 的數值隨時間變化的可能性。一九三七年 P. A. M. Dirac 說 e^+ 可能隨著宇宙的年齡 t 而改變。最近 Freeman Dyson 所做的有關 Re-187 到 Os-187 的 β 衰變的實驗，證實自從我們這個世界的原子核形成以來（可能是三十億年吧！） e^+ 的數值比 Dirac 所說的要較安定三百倍。Asher Peres 也提供了 e^+ 值安定的證據。他說：只要是 e^+ 作一個很小的變化，則 $A = 238$ 的衆同量素(isobar) 裏，最穩定的一個就不會是 U-238 而可能變為 Pu-238 或者 Cm-238。只有透過原子核物理才能夠觀察。如此久遠而緩慢的變化。

結 論

原子核物理已經相當成熟，以致於現在所面臨的問題都是十分深入的。所幸新的實驗和理論的技術都有了相當的進展，使我們有能力去追尋

這些問題的解答。許多問題仍將懸而未決——每一步新的發展所帶來的新問題的總是比它所解決的舊問題多，這也就是一個健康進步的研究領域的象徵。

主要的新儀器現在才開始應用在世界各地的研究中心裏；新的儀器產生的數據約較以前精確了兩個數量級(two order)，重大的進步是可以預期的。

原子核的作為一個微型實驗室以研究基本物

理的功用，最近才為人們所體認，將來這方面的工作一定會做得更多，而且更精緻。

許多設計來供原子核研究用的超高能量的電子和質子加速器的出現，將為原子核物理開啓一扇明窗，提供一連串空前的探測工具。我們研究原子核多體問題的工作已經上軌道了，然而未來二十年裏仍有著漫長的途徑待我們去達成。（取材自 Physics Today, 29-36, 5, 1968）

等離子體物理學 PLASMAS

離態物理之受到重視是近二十年來的事，在此以前，人類並未將它列為正統物理的一部份。離態物理起源於對氣體放電現象之研究，不外乎游離、激發、再組合及一些有關原子碰撞的問題。直到 Irving Langmuir 發現離態物體中的靜電振動現象之後，離態物理才開始走上一段新的里程。據 Langmuir 的解釋，靜電振動係粒子的集體運動(Collective motion)所造成。離態粒子的集體運動產生與電場或磁場的交互作用，這是離態與一般流體最大的區別。

早期的離態物理研究者主要是天文物理學家與地球物理學家。一九三〇年代，Edward Appleton 藉對游離層的研究，確立電磁波在離態物質中傳佈的性質。其後 Sydney Chapman 和 Vincenzo Ferraro 又提出離子流與地磁交互作用的理論。1934年 Willard Bennett 又預測(pinch effect)的存在，這是25年以後多數實驗家競相探究的問題。1941年 Hannes Alfvén 的「Cosmical Electrodynamics」才對波的性質作了最完善的敘述。離子體的動力論可能開始得更早，1934年 Lev Landau 導出 collision integral 的近似公式即 Fokker - Plank approximation。隨後 Chapman 與 Thomas Cowling 的「The Mathematical Theory of Nonuniform Gasses」證明 Boltzmann Equation 可適用於離態物質。1945~1946年，Landau 與 A. A. Vlasov 分別提出不考慮碰撞的 Boltzmann equation，雖然此方程式欠缺嚴謹的證明，但卻是離態物理發展中不可或缺的基礎。

1950年，有人提出利用熱離子體與磁場交互作用以達成可控制的融合反應的可能性，使離子物理的研究大受激勵。數年之後，科學家又發現太陽產生的等離子體對星際太空的重要影響。於是這一方面的研究更受到廣泛的重視。

等離子體理論

在本質上，離態物理是一種多體問題，其中的基本交互作用早已為人類所知，而且量子效應亦可忽略。故統計力學原可很輕易的應用於離態系統。但是因為離態的交互作用力可伸展到很長的距離，所以就有許多種型式的集體運動可能發生，便使問題顯得較為複雜。但過去十年中，經由多體問題的研究已經導出一種略加修改的 Boltzmann equation，亦即前述之 Fokker - Plank equation。此方程式再加上馬克士威方程式可以總括離態的一切性質，因此離態物理的動力學是建立在一個六度空間上。此外尚有兩個很適切的假說可以使問題更為簡化。假如 characteristic distance 大於 Debye length

$$\left(\frac{1}{r_a^2} = \sum_a \frac{4\pi e_a^2 n_a}{K T_a} \quad n: \text{密度} \quad T: \text{溫度} \right)$$

振動頻率小於 $(4\pi e^2 n/m)^{1/2}$ 則任何運動皆必須維持 quasineutrality。假如距離大於 gyro-radius，頻率小於 gyrofrequency，則 Boltzmann equation 可以用 guiding center approximation 處理。用這種近似方法能決定在何種情況之下，流體理論可以適用。並且也預測了低頻率 drift wave 存在，後者已有實驗予以證實。