

核子學概要及其應用

戴運軌等譯
史密斯等著

現代國民基本知識叢書 第三輯

中華文化出版事業委員會出版

現代國民基本知識叢書

第三輯

核子學概要及其應用

史密斯等著

戴運軌等譯

原 序

自吾人初次實地驗證鈾原子核之對裂可發出巨大能量以來，於茲十年餘矣。隨X射線儀器，高電壓加速器，質譜儀等之發展，關於原子之本性已為工程師們所熟知，惟自1896年 Roentgen 氏發明X射線以來繼續發展中之原子核物理學，其全貌已因鈾原子對裂之發明而完全改觀。十餘年來，初因戰時緊急需用之刺激，繼因和平利用之鼓勵，在原子核物理學領野內之成就，已獲異常廣泛之擴展。

電機工程師對於原子核物理學尤多直接關係而饒有興趣，故美國電機工程師學會於1946年設一核子科學委員會，所以處理以核子科學為主題之一切事項。尤以屬於核子科學方面與其有關係系統上之設計，特性或性能等之研究，為其主要任務。

此委員會之一課題乃為本學會出版之電機工程雜誌編撰核子科學方面之文稿。其目的並非欲使工程師們成為原子核物理學家，而使工程師們獲得充分知識，以瞭解核子科學方面之術語及工程師之工作範圍內原子核科學之應用。此等文稿今已彙編成為一單行書冊，以便於電機工程師們之易於閱讀。

核子科學委員會委員名單

主任委員	J. J. Smith	
副主任委員	W. F. Davidson	
祕書	R. C. Bergvall	
委員	W. E. Barbour, Jr.	L. W. Chubb
	R. D. Evans	H. L. Hull
	J. K. Pickard	Abe Tilles
	H. W. Bibber	J. M. Cork
	I. A. Getting	J. A. Hutcheson
	B. R. Prentice	John G. Trump
	H. W. Brackney	G. W. Dunlap
	T. S. Gray	E. H. Krieg
	Walther Richter	R. E. Watson
	L. J. Bulliet	J. R. Dunning
	M. M. Hubbard	Harry B. Marvin
	Frederick Seitz	J. T. Wilson

校 後 附 記

全書十一篇文章，由國人專家十二位譯出，譯文清秀，頗能表達真意，洵為原子核物理入門之傑出佳作。因書中專門名詞之翻譯尚無標準，為力求統一計，故在原稿中之譯名，偶有修改，以採用比較普通者為原則，尚望譯者見諒為幸。

本書使命已見原序，美國工程師皆人手一冊，認為讀核子學之捷徑。而對於原子核物理學者提供要領與披露各種應用，應有盡有，可稱全書。

本書倉卒譯成，即行付梓，容或有生硬難讀之處，尚望讀者賜教！承鄭有儀先生盡心校閱，特附誌于此。

中華民國四十五年一月

戴 運 軌

目 次

原子及原子核.....	J. J. Smith 著 陸 志 鴻 譯	 1
能量與質量之關係.....	Frederick Seitz, Jr. 著 方 聲 恆 譯	23
原子核—構造和反應.....	W.E. Shoupp & Hugh Odishaw 著 鄺 堃 厚 譯	35
原子核工程學.....	E. U. Condon 著 戴 運 軌 譯	65
原子核輻射的偵察和測定.....	G. Wesley Dunlap 著 李國鼎 楊毓東 譯	75
同位素的分離.....	G. Wesley Dunlap & R. M. Lightenstein 著 鍾 盛 標 譯	97
同位素分離中階梯串聯之應用.....	Harold C. Urey 著 謝 明 山 譯	 115
原子核反應器的基本條件.....	F. L. Friedman 著 李 博 譯	 129
高能質點加速器.....	J. R. Woodyard 著 黃 燁 譯	 159
放射線的物理及醫學觀.....	L.L. German & H.M. Rozendaal 著 吳 靜 譯	 183
動力的原子核反應器.....	Ward F. Davidson 著 方 子 衛 譯	 203
參考書籍及資料目錄		1—5

原子及原子核

J. J. Smith* 著

陸志鴻 譯

本文爲美國電機工程學會 (AIEE) 新組成之核子委員會所編十一篇短文集中之一，乃介紹近年來長足進展之原子研究之概要。此十一篇短文爲原子核理論之入門，包括原子核工程學，高能量質點之產生，同位素之分離，原子核反應堆，及健康危害等問題，爲工程師們而寫者。

吾人對於四周物質之本性與其組成，古來早有探究。古代哲學家會尋求物質構造之簡化解釋。最初之希臘哲學家以爲凡百物質之起源，始於一種單一物質。此原始物質或以爲水，或以爲空氣，或以爲土，或以爲火。

Empedocles 氏（紀元前490—430年）綜合前人見解，以爲土，空氣，火，水四者爲基本物質，而凡百物質皆由此四者組合而成。

Democritus（紀元前460—370年）謂一切物質由原子（atom，其意謂不可分割）構成，此原子有形狀，大小，與重量而無色無味無臭，然極微小而不可再行分割。彼並謂原子不斷運動，同一物質之原子有相同性質，相異物質之原子則有相異特性。

古人已熟知銅，金，銀，鐵，鉛，汞，礬，硫等，此外恐尚有數種物質亦爲古人所知。然確認此等爲元素，一如今日吾人所知之者，則尙遠在後

* J. J. Smith 爲美國紐約州舍耐克太迪城的通用電器公司研究室之助理工程師。

代。昔時哲學家由邏輯方法創造其學說而即以爲滿足，固未嘗求之於實驗以證明之。

至十九世紀初原子觀念之重要始被注意。1805年 Gay-Lussac 及 Von-Humboldt 二氏證明一容積之氧與二容積之氫相作用後成爲水。若二者中任何一者較此比例有多餘時，則不起作用而剩留。Dalton 氏亦在同一時期證明氫與氧常以 1:8 之重量比，化合而形成水。由此即易推得下之結論：即水由二個原子之氫與一個原子之氧相化合而成，而氧原子之重量爲氫原子重量之 16 倍。由同樣方式之實驗與推論，當時所知之一切基本物質即所謂元素，其原子量皆可求得。存在於自然界中之 92 種元素經過一段長期內，先後皆被發見*。

1869年 Mendelejeef 氏發見週期律後，原子理論更有一大躍進。週期律之基本概念乃謂元素之性質爲其原子量之週期函數。第一表爲最近形式之週期律表。例如表中第二行有鋰，鈉，鉀，銣，鉍等元素，此等稱爲鹼金屬，一般有極相類似之性質。在此第二行中又有銅，銀，金三元素。此羣元素之性質與前者相異，其存在至多年以後始能說明。應用此表則在某元素未被發見以前，已可預知其性質。此對於實驗化學家大有裨益，蓋預知某元素之性質後，可藉此性質爲南針以尋求該元素。

Mendelejeef 氏週期律表中當時尚有數點疑問有待於研討者。例如鈷之原子量爲 58.94，鎳之原子量爲 58.69，鈷之原子量雖大於鎳，然由其性質排列時，鈷仍須列在表中鎳之前方。又表中另一疑問乃原子量之不爲整數。然若假設一切元素皆由同樣基本質點構成者，則原子量應爲整數。例如汞之原子量爲 200.61，據周密測定，則小數部分 0.61 不可

*參考文獻名稱附在本篇之末，見 1。

能為實驗上之誤差。

此後者之疑問曾引起多數物理學家之注意。卒於 1910 年 J. J. Thomson 及 F. W. Aston 氏用質譜儀 (mass spectrometer) 求得其解答。由此儀器可測定基本質點之質量。被測物質先使變成氣體，而後於電場中加速其游子化後之分子，然後以磁場作用之使生偏轉。由此偏轉可計算質點之電荷對於其質量之比。經由他種實驗求得質點之電荷後，則其質量即可算出。Thomson 氏當研究原子量為 20.183 之最純粹氖氣時，發見其中不僅含原子質量為 20 之部份，且尚含極少量之原子質量為 22 之部份。此後者與當時所知各元素無一能相符合者。經多次研究後，始斷定氖氣中至少含有二種形態，一者原子量為 20，他者原子量為 22。此後更發見氖中尚含原子量為 21 之部份。故由質譜儀之研究，則一種元素似可含有數種形態，在化學上完全相同，而質量相差略為一單位，或為一單位之倍數。因在化學上完全相同，故此等不能以化學方法分離之。此種同一元素內之相異形態，在化學上不能相互區別者稱曰同位素 (isotope)。

繼 Thomson 氏之後，Aston, Bainbridge 及其他數多人氏對於各種元素之原子質量曾從事於廣泛之研究。由此則自然界中約 92 種元素可分成 280 種同位素，即每種元素平均略含三個同位素。當然一部份元素之同位素有少於三個者，例如金僅有一個同位素。而他種元素亦有三個以上之同位素者，例如錫有最多之安定同位素，即有十個。安定同位素者為存在於自然界中之同位素。若將原子堆，迴旋加速器 (cyclotron)，貝他加速器 (betatron) 及其他加速器所產生之放射性同位素亦包括在內，則今日所知之同位素當在 800 個以上，且仍有陸續增多。

者。故原子量之不爲整數者，因同位素之發見而得以解釋之。然如前述鈷與鎳之例，有幾種元素在週期律表中未取其應有位置者，尙未能解釋之。至於原子序數 (atomic number) 之討論，則須先就其他數方面之研究述之。此種研究乃與原子研究相並推進者。

電 子

第一方面之研究爲1834年 Faraday 氏所發見之電解定律，此乃明示原子之電的性質。該定律謂任何化學反應中不問其含有何種元素，凡一元素之一定量常帶有同一電荷或該電荷之整數倍。例如一克之銀不問其化學反應如何，常帶有一定量之電荷。由此可明每一原子有一定量之電子負荷或其倍數，且此電荷不能分割。

第二方面之研究爲各種原子之光譜。例如以攝譜儀分析白熱氣體所發出之光時，則顯出該氣體所特有之數多明線。此種光譜有一定規律，可求得公式以計算其正確頻率，此公式可適用於大多數之原子。下示此種公式之一例：

$$\nu = RZ^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1)$$

式中 ν = 某元素之光譜內與某輝線相當之光之頻率

Z = 原子核內電荷個數

n_f 及 n_i = 整數， n_f 小於 n_i

R = Rydberg 數，對於各種原子皆爲常數

上式爲元素之線光譜公式。此外 Zeeman 氏曾發見光源置於磁場內時，此等光譜線之頻率有變化，且單一之線，分成二個或二個以上之

線。此又暗示原子與電子電荷間之關係。由此變化之大小可估計吾人所假設之電子上所帶電荷對於其質量之比。此估計與前述電解實驗所得結果極相一致。

第三方面之進展爲 J. J. Thomson 氏之成就。在陰極線管中由加熱燈絲或其他方法所產生之一串電子流通過電場內時，被加速而成爲等速度之電子流。此電子流可以已知電場與磁場作用之，使起偏轉，而計算其電荷與質量之比。由此實驗所得電荷與質量之比，在實際上與前述電解法及光譜法所得者相符合。此等明確表示電量有不可分割之質點。其後不久更有實驗方法之發明以確證此質點之存在。Thomson 及 Wilson 等氏自 1897 年開始實驗，將水之小滴由重力落下，而以電場作用之。若無電場則水滴因重力而下降，然以電場作用，使與地球之力場相平衡，則水滴可停止下降或上升。故水滴內必有電荷，並可算出其電荷量。至 1909 年 Millikan 氏用油滴以減少蒸發，而繼續其一連串之精密實驗，得知質點上之電荷常爲 4.774×10^{-10} 靜電單位或其倍數。其後經多次反復實驗後，此電荷值得以確證。今日所公認之值取爲 4.8×10^{-10} 靜電單位。

此電量之微粒與物質之原子相似，稱爲電子 (electron)。由此發見，方使原子內貌之其他部份得互相吻合，而原子之組成得瞭如指掌。首先，吾人所知者爲氫原子質量約等於電子質量之 1,800 倍。此乃由氫游子流與電子流在磁場與電場內之偏轉易於求得之。又由電解實驗亦可證實之。

其次，由週期律表知不問原子如何組成，各週期間之原子序數有 2, 8, 8, 18, 18 等的階段 (steps)。第一表中第一列的階段爲 2，終於氫。第二

列的階段爲8, 終於氟。第三列的階段爲8, 終於氯。第四列的階段爲18, 終於溴。第五列的階段爲18, 終於碘。

此原子序數的階段, 確與原子內之電子數有關聯。1912年頃 Rutherford 氏創說原子有較重之中心核, 負有一定電荷, 其外有與此正電荷相等個數之電子環繞而迴轉於核之周圍。Bohr 氏承襲此假說, 並更假定此等電子在核周迴轉之角運動量爲 h (planck 常數) 之整數倍。由此假設, Bohr 氏得用普通力學方法算出某種“定態” (stationary states)。假定電子不起輻射時之軌道即爲此種狀態。電子自此種狀態中之一者入於他者時, 假定其起輻射。此輻射之頻率 ν 爲

$$E_1 - E_2 = h\nu \quad (2)$$

式中 E_1 爲電子原有能量, E_2 爲其最後能量。 E_1 及 E_2 爲電子在原子內之能量階級 (energy levels)。

彼由此等假設求得各種元素之線光譜公式, 如(1)式所示。其 Rydberg 常數 R 爲

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3} \quad (3)$$

式中 m 爲電子質量, e 爲電子之電荷。式中各常數值由從來實驗結果爲已知者。代入上式後所得 R 值與由光譜實驗所得之值極相一致。

(1) 式中表示原子中心核之電荷數 Z 爲原子核之重要性質。此電荷數爲各元素之特性。原子核上之電荷數稱爲該元素之原子序數, 而原子量則爲原子核之總重量。

以上所述諸種發見以外, 同時尚有下列各方面之研究。

X 及 γ 射線

1895年 Roentgen 氏用陰極射線管實驗時，發見陰極射線（此為以高速前進之電子羣）衝擊於適當標的（target，在 Roentgen 管內為玻璃，但在今日之 X 射線管內則為一種重金屬）時，可發出輻射。此輻射之穿透力頗強，使密封於黑紙內之照相軟片感光。

1896年 Becquerel 氏發見鈾礦石有同樣性質，放出射線，亦使密封於黑紙內之軟片感光。居里夫婦經一連串之試驗後，卒自鈾礦石內提出鐳，並發見其能放出更強有力之射線。

Roentgen 氏就彼所發見之射線稱為“X射線”。此射線不因磁場或電場而起偏轉。由鐳中所發出射線之研究，知其含有三種不同之射線。其中一者與 X 射線之性能相似，即不因電場或磁場而起偏轉。然其他二者則受一定之磁場或電場作用時，起相反之偏轉。此二者中之一者已確證其為高速電子羣，自放射性物質中發出時稱為 β 質點。另一者已證明其為較電子更重之微粒，稱為 α 質點。其質量極接近於氦原子之質量，此後已確證其為氦原子核。

使此等質點受磁場與電場之作用而求出其電荷與質量時，可測定該質點之速度，由此可知此等質點所具有之能量。此能量與當時所知者相較，有驚人之高值。例如鐳中放出 α 質點之能量略為五百萬電子伏特〔一電子伏特（electron volt）為一個電子通過於電位差一伏特間而加速時所獲得之能量〕。

其他天然之放射性物質如鈾與釷被發見後，此等資源所放出之高能質點即供物理學家利用以探究原子內層之核心即所謂原子核。以

前探究原子核之嘗試皆歸失敗，蓋當時可被利用之能量過小，不能穿透入於核心之故。

Rutherford 氏即着手用放射性元素所放出之高能量質點進行實驗，以求原子核之大小。即由薄金箔上 α 質點之散射 (scattering) 以求之。據實驗結果，則原子核直徑不大於 10^{-13}cm ，此較原子直徑為甚小。原子直徑則由以前估計，約為 10^{-8}cm 左右。

Rutherford 氏所試驗之氣體中，大多與彼之計算散射公式恰相符合。惟對於氮，則彼發見其與公式大有偏差。蓋與入射質點之方向成直角而散射之高能量質點數過多，超出於能解釋之範圍以外。且起反應時所放出之質點上所有動能較入射 α 質點者更高。且又顯示一新現象。據研究結果，則氮原子核受高能量 α 質點所撞擊時，蛻變為氧及一帶正電荷質點（即氫游子）。此質點即稱為質子 (proton)，可能將反應時所生能量中之一部份帶出。此不久即為雲室 (cloud chamber) 實驗所證明。此實驗明示，此種型式之反應確可發生。古代煉丹家曾夢想將一元素變為他元素，此夢想至此始告實現。此實驗並證明質子即氫原子核為構成較重原子核（此時指氦及氮）成分之一。質子之發見實始於此。自從 Rutherford 氏最初成功於氮原子核之擊破以來，不久即有其他各種元素為 α 質點所擊破。於是吾人之研究遂入於完全之新領域矣。

化學反應時有關係之能量不過數個電子伏特 (ev)，而原子核反應時有關係之能量，則與其有天壤之別〔例如達數百萬電子伏特 (mev)〕。因之吾人須創造一種儀器以產生高能量質點，其能量可高於鐳所發生者。於是質點加速器遂以問世，以供研究原子核反應之用。最著名者為

迴旋加速器^{*}，乃加利福尼亞州柏克萊 (Berkeley) 地方加州大學之 Lawrence 氏所創製者。其後繼續改進，產生能量逐步增高。最近 Lawrence 氏之加速器為 184 吋同步迴旋加速器 (synchro-cyclotron)，可產生二億電子伏特 (200 mev) 之重氫核 (deuteron，為重氫之原子核，其質量數為 2)。有此高能量後始可將週期律表中任意元素之核擊破而起蛻變。昔時 Rutherford 氏僅能使輕元素之原子核起蛻變，蓋當時所能利用之能為鐳中射出之質點，其能量甚有限也。由此方法擊破原子後，則原子之同位素個數大增，如第二表所示。其中大部份之同位素為放射性而不存在於自然界中。

其他之基本質點

1920年代初，對於原子之觀念乃根據 Rutherford 氏實驗，以為原子核是小核心，內含質子以構成核內電荷。又另含電的中性之組成物，以補足已知元素之原子序數與其原子量間之差數。因當時所知之兩種基本質點為質子與電子，故假定核之原子序數與原子質量間之差數為等數之電子與質子之組合。然於1932年頃劍橋大學之 Chadwick 氏發見另一種質點，即稱中子 (neutron)。以前亦曾有徵象顯示無電荷質點之存在。例如 α 質點遇鈹等輕元素時，發出有強穿透力之放射線。此放射線於雲室內觀察時，僅見單一跡線由某點放出，而無返回質點之發見。質點跡線之缺乏，或由於 γ 射線 (極短之 X 射線) 之結果，或由於無電荷質點之結果。無電荷質點在雲室內不生跡線。Chadwick 氏經精密實驗後，知其不可能由於 γ 射線之結果。若假定有無電荷質點即彼所謂

* 迴旋加速器及他種加速器之原理說明，另詳於後篇。

中子者存在，且假定其質量略等於質子之質量時，則能量與動量之不滅定律可以滿足。中子之存在今已確定無疑矣。

電子，質子與中子為今日原子核理論上所確認之基本質點。原子核內有 Z 個質子，而 Z 即為核之電荷數。若一元素之原子量為 A ，則核內有 $A-Z$ 個中子。蓋一個中子之質量略等於一個質子之質量。例如汞之符號可寫為 $_{80}\text{Hg}^{200}$ ，其意謂汞之原子核內含80個質子與120個中子，汞之總原子量略為200。在週期律表中原子序數較原子量更為重要。汞有七個同位素，其原子量自196至204，然此等皆為汞，而原子序數皆為80。鉑之原子序數為78，其同位素之原子量自196至198。然鉑之同位素可以化學方法與汞之同位素相分離。蓋鉑之同位素皆有鉑原子之化學特性，而汞之同位素則皆有汞原子之特性。原子序數相異而原子量相同之元素例如 $_{78}\text{Pt}^{196}$ 與 $_{80}\text{Hg}^{196}$ 稱為同重素 (isobar)。有相同原子序數而原子量相異之元素例如 $_{80}\text{Hg}^{196}$ 與 $_{80}\text{Hg}^{200}$ ，則稱為同位素。

用上述方式之符號例如 $_{80}\text{Hg}^{200}$ 時，其數字80即表示原子序數 Z ，而數字200稱為質量數 A ，即為核內質子與中子之總個數，近似上，略等於該同位素之物理學的原子量。該同位素之正確原子量為200.028，其與質量數之相差表示原子之結合能。此差數常稱為“質量欠缺” (mass defect)。又所謂“緊束分數” (packing fraction) 者乃此原子量與核內質子及中子二者質量總和之差數以後者除得之值。此對於質量與能量之關係上頗為重要，當於本書內另篇述之。

基本質點中除電子，質子與中子外尚有他種質點須一述者。此排列如第三表。陽電子 (positron) 乃於 Chadwick 氏發見中子後不久，1932年為 Anderson 氏所發見者。其質量與電子同。在磁場或電場內

之偏轉與電子時之方向相反。其所以未與電子同時發見者乃因其壽命甚短。其發見與宇宙射線之研究有關係。宇宙射線中有極高能量。使此種質點偏轉時須用極強有力之電磁石，故待強力磁場可以利用後，方能確認正電荷徑路之曲率方向。此種質點關於宇宙射線方面，並關於質量之創造與毀滅之實驗的確證方面，頗饒興趣，當於本書內另篇論之。

其他另有一種微粒稱為微中子 (neutrino)，雖曾假定其存在，然迄今尙未能如他種微粒時，用雲室實驗或其他實驗等直接方法以確認之。僅由理論上之需要假定其存在耳。例如鐳中放出之 β 射線，其能量 E 有最大值 1.2 mev，若將其能量分佈繪成曲線，則由該分佈曲線可知最大多數之微粒有能量 0.2mev，而平均能量約為 0.34mev。然由理論上之推察，則原子核每次破裂時所生能量當相等。因說明此能量之損失，故假定此能量為微中子所吸取。此種微粒若果存在，則必不帶電荷，蓋此在雲室內不起游離化。且此種微粒必極微小，其質量恐亦極小，蓋此微粒極易於穿透物質。今假設有此種微粒後則有下之便利：即質量與能量不減定律及動量不減定律可應用於原子蛻變。

宇宙射線之可能存在，乃自1900年以來已被公認，然其研究至近年始為物理學家所深切注意者。驗電器 (electroscope) 雖經任何周密絕緣，然由於空氣中之游離化質點而徐徐放電。若以鉛或其他適當材料之厚層包掩此驗電器時，則放電速率可減小。此可證明地球面上有某種型式之貫穿性輻射，故有此結果。最初曾假定上述現象由於地球表面上微量放射性物質所放出之輻射所致。若依此假設，則地球表面上方高處之輻射強度，當迅速降低。然據 Kolhorster 及 Hess 等氏之周密實驗，則地面上方高處之射線強度不但未減小，反而增加。故彼等

據實驗結果斷定此射線來自地球外方。若果如此，則其能量較之當時所知任何能量之源必更巨大。蓋此射線可穿過地面上全部氣層。由更進一步之研究可證實此說。據今日之觀察，則原宇宙射線 (primary cosmic rays) 中含有來自太陽系外之質子，每質點之平均能量約為 10^{10} 電子伏特，其最大能量為 15×10^{10} 電子伏特。鐳中放出質點之最大能量為 10×10^6 電子伏特。加速器所可達之最大能量，例如柏克萊之同步迴旋加速器所產生能量為 3×10^8 電子伏特。由此觀之，則宇宙射線質點中所含能量之大，可以知矣。且由實驗更知地球表面下方深600呎以上之處，亦可測得宇宙射線。宇宙射線之研究為極有趣味之要務，今尙在多方研究中，以求更充分明瞭其生成機構。

當研究宇宙射線途中，曾發見另一種新質點，稱為介子 (meson)。此可有正電荷亦可有負電荷，其質量約為電子之二百倍。即其質量在電子與質子之間。介子乃1936年 Anderson 氏研究宇宙射線所產生之游離化時而發見之者。介子之壽命極短，約百萬分之一秒，衰變後成為陽電子或電子。質量0.11之介子衰變成爲質量0.0005之電子時，發出相當量之能。當再推進宇宙射線之研究時，遭遇其他現象，使不得不再假設中性介子 (neutral meson)。此爲無電荷質點，其質量約爲0.11質量單位。此亦由於理論上之推定而假設之者也。蓋與微中子時同樣，因須使滿足於質量能量及動量之不滅定律，故有此假設。然此亦未能由實驗以確證之。