中華科學叢書第十九種

氦與多體物理

著者：吳家瑋

臺灣中華書局印行

需要全本请访问 www.ertongbook.com

氫與多體物理

著者：吳家瑋

臺灣中華書局印行

中華民國六十一年十一月初版
中華科學叢書第十九種

氣與多體物理（全一冊）

定價：新臺幣叁拾元正

著者 吳家瑋

中華科學叢書編輯委員（以姓氏筆劃爲序）
伍法岳　沈君山　沈慶春　李天培
林多樑　吳京生　吳家瑋　吳錦鉉
夏道師　浦大邦　許翼雲　趙曾珏
劉　鎏　劉全生　鄭伯昆　錢致榕
瞿樹元

發行人 臺灣中華書局股份有限公司代表 熊鈍生
臺北市重慶南路一段九十四號

印刷者 臺灣中華書局印刷廠
臺北市雙園街六〇巷九〇號

發行處 臺灣中華書局
臺北市重慶南路一段九十四號

版權所有
不准翻印

中華科學叢書序

近代物理學，可溯源於十九世紀末年之氣體導電，X光，放射性等之研究。六十餘年來，基本物理中劃時代之發展，如一九〇〇年之量子論，一九〇五年之相對論，一九一三年之原子結構理論，一九二四——一九二八年間之量子力學，一九三幾年之原子核物理，一九三九年之原子核分裂。一九四六年介子之發現，及近十餘年來之基本粒子物理及物理學中之對稱定律等。常言「一日千里」，實不足以形容物理學發展之迅速。即從事一部門物理研究工作之學者，對其他部門之新發展亦時感脫節。故各國各部門科學皆有專書及期刊，由各門專家著述，對各部門工作之結果及發展之情形，作綜合性之報告、檢討及分析。此類著作，不僅便利同儕而已。

年來國人對科學及技術於建國之重要，了解漸深，一般青年，對科學、工程技術之興趣亦日趨濃厚。然限於環境，時或有望洋興嘆之感。增強在臺學校中科學教程，固爲一基本工作，但以中文著述，介紹科學之新發展，爲學校課外之補充讀物實爲一極重要、極有意義之事。

HWL607/12

我國留美學者：伍法岳、沈君山、沈慶春、李天培、林多楳、吳京生、吳家瑋、吳錦鋐、夏道師、浦大邦、劉鎏、劉全生、錢致榕、瞿樹元諸先生有鑑於此，曾決定從事科學叢書之編譯，各就其專長，選定寫作部門，目前除計劃於近期內陸續出版關於**基本粒子、天文漫談、物理定律的特性、半導體裝置、現代物理**等等外，尚有**液態氦、高能加速器**等陸續出版，並擬擴大科學部門，廣邀各方面學者專家從事著述。

叢書編輯委員會諸君，皆年青學者，學有專長，茲能熱心從事著述，**爲我國科學教育及青年效勞**；而中華書局亦以服務精神發行科學叢書。筆者年來對我國科學教育，未嘗忘懷，祇以力不從心，無善可述，茲聞此叢書行將陸續出版，謹向國人介紹，並致個人欽佩喜慰之感。

吳　大　猷

一九六六年十月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

著者序

一九六五年，我在研究院的學業進入最後階段，手頭似乎有了些時間，決定寫一本有關液態氦的小冊子。初稿在忽忙中完成，看了甚不滿意，再三修改，愈搞愈糟；一怒之下，把它撕了，決意重頭寫過。誰知道畢業乃是啓業，離開研究院後工作更多，六年來從華盛頓大學搬到加州，又從加州搬到芝加哥，去年又在伊利諾大學「訪問」經年，中間未曾嘗到過空閑的滋味。

在加州時，與錢致榕談起這本書，覺得講到液態氦不能不先談談氣態氦及氦原子，又不能不提理論上相類的量子液體，因此這本小冊子的範圍一再擴充，如今書名祇得用個統稱的「氦」字。當時遭遇到的困難，最大的是經常須用到低溫的觀念；這些觀念當然不能說是人所熟知。恰巧看到孟德孫的絕對零點之探究那本小書，錢致榕與我都覺得是可譯之書；而我更覺得可藉此書來灌輸低溫學的概念，於是索性把氦撇開，與錢兄合作把它翻譯了。這又是氦給耽誤下來的一個原因。

中學畢業後沒多久就從香港來美國；屈指一算，出國已近十六年。當時高中程度的國文，至今已給洋化得不三不四。辭不達意處，尚請讀者們包涵。

科學研究生涯，精神時間都很緊張，難免忽視了對

家中老小的責任，謹以此書獻給父母妻兒，聊示歉意。我在研究院那幾年裏，甚至在畢業以後，仍不斷得到導師芬伯格的指導和鼓舞；飲水思源，這本書同時也獻給芬伯格教授 (Prof. Eugene Feenberg)。

吳　家　瑋

一九七一年於西北大學

已出版之中華科學叢書

書名	著譯者	册別	新臺幣
基本粒子	楊振寧著 林多棋錢相譯	全一册	12.00
天文漫談	沈君山著	全一册	16.00
霓射與雷射	李天培譯	全一册	12.00
半導體裝置	李述中譯	全一册	18.00
甚麼是相對論	李榮章王華譯	全一册	12.00
物理定律的特性	林多棋譯	全一册	18.00
火箭推動淺說	夏道師著	全一册	12.00
現代物理	錢相林多棋譯	全一册	21.50
分子軌道	丁陳漢蓀譯	全一册	25.00
天文新語	沈君山著	全一册	17.50
化學反應如何發生	易定博譯 潘可傳	全一册	22.50
漫談晶體	伍法岳譯 張青芝	全一册	17.00
強靱的材料	葉湘濤編譯	全一冊	14.00
反物質與宇宙論	韓建珊譯	全一冊	17.00
博戲的理論與應用	趙愼餘譯	全一冊	15.00
形與流——帶阻力的流體力學	曹家政譯	全一冊	20.00

氦與多體物理目錄

著者序

第一章　氦是最簡單的元素，有什麼大學問可做？…… 1

第二章　氦原子的底細 ……10

微粒運動之描述——波動函數 ……11

波動函數之計算——薛定格方程 ……16

氦原子的結構 ……20

週期表與氦原子的結構 ……28

氦原子與氦原子間的作用力 ……33

第三章　氣態氦够不够理想？ ……45

用熱力學看理想氣體 ……47

用分子運動論看理想氣體 ……57

用統計力學看理想氣體 ……66

非理想氣體 ……75

氦態氣 ……84

第四章　二十四紀目睹怪現象 ……91

低溫之致取 ……92

氦之液化與固化 ……99

液態氦的怪現象 …… 101

雙流模型 …… 111
理想玻色氣體 …… 117
蘭道理論 …… 125
微觀計算 …… 133
第五章 氦氏家族面面觀 …… 138
理想費米氣體 …… 140
液態氦三與費米液體 …… 146
稀化氦三氦四溶液 …… 155
固態氦與固態氫 …… 163
氦單層與氦薄膜 …… 171
第六章 量子液體衆生錄 …… 179
庫侖體系 …… 180
核體系 …… 186
英漢對照表 …… 193

第一章　氦是最簡單的元素，有什麼大學問可做？

西遊記開宗明義用了兩句詩：「混沌未分天地亂，茫茫渺渺無人見。」接着就用了三四百字把那天地萬物的來龍去脈交代了當。我們讀科學的人幻想能力沒有小說家豐富，膽子也沒有那麼大，對萬事的因果祇能慢慢細心揣摩，不敢胡猜。猜的人本事固然不小，猜來的理論可常玄而不實，到頭來難免仍是落得個「混沌未分天地亂」。尙好人類先天的求知慾望強，後天的生存需求高，不容得他止於猜測。近數百年來，由覺而知，由知復覺，已經把他觀察的對象由切身事物再三擴展，居然眞的走入「茫茫渺渺無人見」的境界了。欲知今日科學茫茫渺渺之一斑，讀者們祇須見諸本叢書中的天文漫談與基本粒子二種。

氦這東西既不茫茫，又不渺渺。打開任何一本初級的化學教科書，或走入任何中學的化學實驗室，我們立刻可以找到一張化學元素週期表。表上分成一格格，備列許多種元素的學名；學名旁邊有個數字，由左至右，由上而下逐漸增加，代表的是每種元素原子核裏所含質子的數量，叫做「原子序數」(atomic number)。原子的

需要全本请访问 www.ertongbook.com

結構，粗枝大葉地來說，有原子核與電子；原子核在中央，小而重，內部有不帶電荷的中子和帶正電的質子，二者的數量相仿。核子外圍有很輕巧的，帶負電荷的電子，數量與質子正巧相等。所以原子序數高的元素，其原子必由許多中子、質子與電子組成，結構相當複雜，原子序數特別低的元素，結構理應特別簡單；譬如說，氫的原子序數是 1，原子核內只有一粒質子，連中子都沒有；核外只有一粒電子，一家二口，生活非常簡單。抱了這種觀念看週期表，氫後跟着的就是氦，原子序數是 2：核子中有兩粒質子，兩粒中子，外圍有兩粒電子，共是六口；雖比氫原子多了三倍，却比鈾之類擁有二三百口的大家族容易料理得多！事實上氫家人丁雖稀，也有它的難言之隱：電子喜歡成羣結黨，它們的結社方式，我們等到下章再細說，在這兒暫且提一提大致情形。最近核子處，須有兩粒電子，才能組成第一層，第二層需要八粒。氫原子既然只有一粒電子，組不成層，難怪它要到處亂逛，尋找對象。倘若遇到一粒外層缺了一粒電子的原子，例如另一粒氫原子，或一粒氟或氯的原子，那正好一拍兩合，依化學作用明媒正娶。由此可見，氫原子個人來說，固然極其簡潔，但是總有家室相隨，累贅不淺。反之，氦原子外層已自有兩粒電子，一家團圓，與世無涉，倒也清閒。這般說來，氦是最簡單的元素了，有什麼大學問可做？

首先我要賣一個關子，來談談「科學方式」。

科學上，什麼叫做「做學問」？研究必須有對象。自然科學的對象大至宇宙，小至基本粒子，研究的是物質

的特性和相互影響。行爲科學的對象包括大小不等的社會團體，研究的是人與人間的關係。若要有個開端，得從息息相關的花花世界中，單獨劃分出一部份來分析；這單獨的部份構成一個「體系」(system)。譬如說，我們若要研究人造衛星在太陽系統中的行徑，祇須把太陽系統拿出來小心計算；太陽系統與銀河中千萬星球未嘗不互生作用，但是這些作用對太陽系統內的小衛星來說，並沒有多大影響，我們在確定研究對象時大可忽視。在這例中，太陽系統就是我們的體系。拿行爲科學來說，研究的對象也得先予孤立。譬如說，在臺灣開辦工廠、公司的人須大致懂得省內的經濟情況；臺北市的經濟固然與全省有無可避免的關連，可是在市區內開設計程車公司的人却不必注意這些關連，他的研究對象或「體系」可以限於臺北市。體系之確定是科學研究的第一步。

體系既定，觀察開始。所謂觀察有兩方面，一是實驗式的觀察，一是理論式的觀察。做實驗工作的人比較注重測量，他的責任和興趣在乎用精確的方式來斷定體系的特性，然後作有系統的記錄及分析。做理論工作的人比較注重推想，他的工作須依憑多種體系所呈的實驗成果，用歸納法來尋找萬物的通性，寫下幾條定律，然後試看他的研究對象有沒有這些通性，合不合這些定律。實驗者與理論者互相扶持，彼此牽引，最終的目標同是要把宇宙間的眞理統化，簡化。

上述這一套科學方式並不拘於某一種體系。處理龐大複雜、茫茫渺渺的體系時須用這套方式，研究微小簡單，毫不足道的體系時也須用這套方式。讀者們看這叢

書中任何一本小冊子時，碰到的大同小異，不外是這一套方式。從了解到接受，從接受到熟悉，從熟悉到應用，這套方式正是科學精神的基礎；這基本的訓練遠較認識三兩個體系爲重要。抱了這種態度，每個體系都有「做大學問」的價值；這價值不在「學問」那兩個字上，而在明白學問應該怎樣去「做」。靜觀中國一般科學教育，最缺乏的似乎就是科學方式；學生們苦讀窮記，考試時能背善默，對答如流；制度上鼓勵的是強記力和小聰明。到教育完成後，做起研究或應用工作來却未必人人出色；當年死背出來的東西已還了給課本及題解，運用的方法則沒有學到，到頭來落得個兩手空空，未老先衰。或說國人在國際上科學地位日益提高，可見得受這教育制度約束後的人，仍能自覓補救；然而因受制度之累，無法自拔，終身埋沒之士有多少，我們又從何算起？我在討論氦本身的研究價值前，先把這科學精神的大前題捧出來，爲的是使本末分明，免涉避重就輕之嫌。

氦是最簡單的元素，有什麼大學問可做？上面這段指出的是，若要學習科學方式，以任何體系爲媒介都可以，但是並沒有直接回答：在千千萬萬個體系中，爲什麼我們要把氦選出來做文章？

其實我們要討論的並不是單粒的氦原子，而是由億萬粒氦原子合組成的「氦體系」(helium system)。全本書中祇有下一章裏那幾節談的是單獨的氦原子，目的也祇是爲了要討論成羣的氦，不能不先明白每粒的個別性質。我們注重的是在大量氦原子組成團體後所呈的「巨觀」或「宏觀」性質 (macroscopic properties)，所用的

物理叫做「多體論」(many body theory)，或稱「多粒子理論」。因爲處理大量粒子時須用統計方法，同時因爲對付微粒運動必需量子力學，所以多粒子理論也可稱爲「量子統計力學」(quantum statistical mechanics)。這十多年來，多體論的形式與應用都已上了軌道，無論在固態物理、核子物理、天文物理、原分子物理等等都缺不了它的份。最近有人開始動了「相對論性多體論」的念頭，竟在覬覦高能物理的地盤。

多體論雖在大處着眼，却在小處着手；目的是從微觀 (microscopic) 的粒子運動來求取巨觀體系的特性。這些特性在實驗室中可以測量得到（如目標是天文體系則須全憑觀察)。若我們研究的對象是日常屢見的體系，譬如說：氣體、液體、固體等，而不是微於原子 (sub-atomic) 的體系，則這些特性素來可用熱力學(thermodynamics)來描述。且舉一例：氣體的熱動力變數(thermodynamic variables) 有壓力 (P)、體積 (V)、與溫度(T)。三者中祇有兩者是獨立的；這也就是說 P、V 和 T 可用一條方程式來表明它們的關係，這條方程式是這種氣體的「物態方程式」(equation of state)。每種氣體所呈的 PVT 關係不同，其物態方程式是獨有的；但是物態方程式一旦斷定後，這種氣體的全部性質都跟着定形：很多一眼看來風馬牛不相干的性質，如聲速、比熱、熱膨脹率等等，都可以憑了熱力學從 PVT 關係中獲得。熱力學是巨觀的理論，來自直接經驗，對直接經驗中看不到、猜不着的物質微觀結構並不過問，可以說是一種最富成就的現象理論 (phenomenological theory)。對近代的統

計力學或多體論來說，它的地位雖非一脈嫡傳的始祖，却是啓蒙督勵的導師良友。

單就氣體來說，幾百年來觀察結果之綜合，受了熱力學的分析，在上世紀已有了很充份的了解。到十九世紀末葉時，原子論初次露面，古典統計力學把牛頓定律與統計法合併使用，倒也能把氣體的熱力學性質解釋得頭頭是道。正巧那時候物理學似乎告了一個段落，一般做物理的人覺得萬物眞理已在手頭，從此祇須在數學上下些功夫，一切問題可憑已知的原則解答。這看法也無可厚非：古典力學由伽利略、牛頓、拉格朗日、哈密頓逐步啓發，至此外表內質都已趨完美；電磁學與光學又給馬克斯威扎扎實實地一網打盡；物理界中雖然上下左右還有個把漏洞，但是看來並無大疵。可是世紀轉易，萬象皆新，蓋棺論定的人落得了一場泡影：實驗者技巧及工具上的進步，使許多本來觀察不到的現象變成了測量的對象，而測量的結果與古典物理計算的答案迥異。（至此好好的理論才給戴上了一頂「古典」的帽子。其實以日常生活來說，古典物理並不古；工程學上所用的理論十之八九是物理學命名爲古典的。我們日見的現象，古典物理幾乎全能解釋。可是人類的觀察能力，單憑四肢五官，實在太過薄弱，看見的祇是眞理的渺影。若以日常經驗之認識自滿，不令大自然眞相畢露，當然是太近視了。「古典」二字，或寓譏誨之意。）

二十世紀初，二三十年代間，「現代物理」迅速地取代了古典理論。所謂取代並非把古典物理全部擯棄——學問的發展史上，新知總由舊識導引，祇有舊理論中的

假設及未經直接證明的基本觀念才會給澈底改革。現代物理新創的基本觀念可分二端：一是相對論，一是量子論。相對論談的是時間與空間：萬象顯露時所用的背景。量子論研究的是物質本身：萬象之引致。兩者的對象不同；若把大自然中的千變萬化看成戲劇，則前者談的是舞臺，後者看的是演員。今日物理學者的目標，一是把這兩套東西個別磨鍊與考驗；一是把它們配合起來，構成統一的理論。我們在這本書中所討論的祇是量子論。

量子論中的力學與古典力學有基本上，類近哲學化的差異。譬如說，牛頓的力學定律告訴我們如何計算粒子運動的路線：祇要知道某粒子的質量、所受的作用力及在某一時間的位置與速度，我們就能解些微分方程，把這粒子的來龍去脉搞得清清楚楚。這也就是說我們能够知道這粒子在任何時間的位置與速度。量子力學却沒有這般肯定，在量子力學裏，有一條定理叫做測不準原理(uncertainty principle)，說是位置與速度（其實是位置與「動量」）組成一雙「共軛力學變數」(conjugate dynamical variables)，而共軛力學變數永無同時被確定的可能：在我們測量粒子運動時，若把位置量得十分準確，對速度之測量勢必非常模糊；反之亦然。嚴格地來說，「牛頓坐在樹下動也不動」這句話在量子力學上就失去了意義，因爲這句話裏的牛頓位置已給確定在「樹下」，速度又給確定爲零；這同時確定一雙共軛變數是測不準原理不能容許的事。但是從樹上掉下來的蘋果分明看見牛頓坐在那兒動也不動，看準了他的腦壳子一掉就中，這

需要全本请访问 www.ertongbook.com