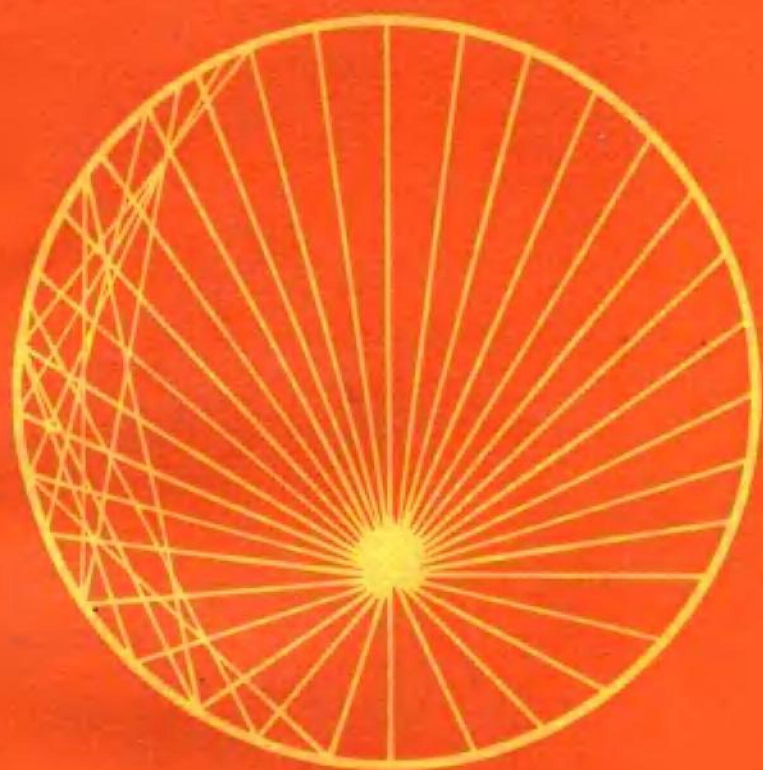




理论物理第七册

量子力学

(乙 部)

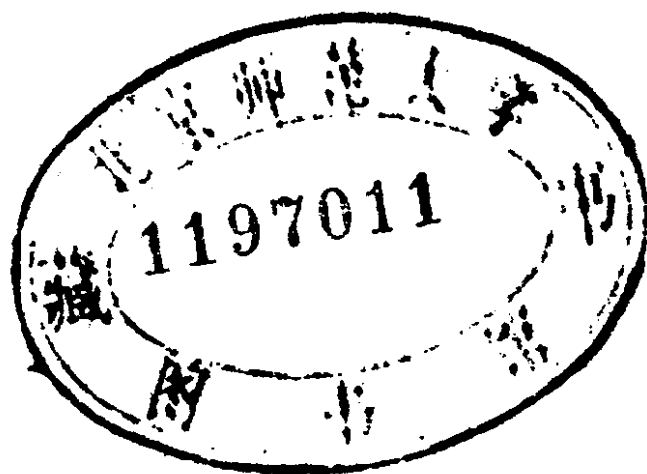
吴大猷

241/10

理论物理第七册
量子力学 (乙部)

吴大猷 著

丁山 1163/05



科学出版社

1983

内 容 简 介

本书为著名物理学家吴大猷先生的著述《理论物理》(共七册)的第七册。《理论物理》是作者根据多年所从事的教学实践编写的一部比较系统全面的大学物理学教材。本书第六册是量子力学的甲部。本册是量子力学的乙部,包括电子的相对论(Dirac)方程,经典场及量子化场,旋量和群论。在多数章节之后附有习题或附录供读者研讨。

本书根据台湾联经出版事业公司出版的原书翻印出版,作者对原书作了部分更正,李政道教授为本书的出版写了序言,我们对原书中一些印刷错误也作了订正。

理论物理第七册

量子力学(乙部)

吴大猷 著

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年9月第一版 开本, 850×1168 1/32
1983年9月第一次印刷 印张, 16 5/8 插页, 精 2 平 4

统一书号, 13031·2287

本社书号, 3127·13-3

定价: 布面精装 4.70 元
压膜平装 4.00 元

序言

吳大猷先生是國際著名的學者，在中國物理界，是和嚴濟慈、周培源、趙忠堯諸教授同時的老前輩。他的這一部《理論物理》，包括了“古典”至“近代”物理的全豹。1977年初，在台灣陸續印出。這幾年來對該省和東南亞的物理教學界起了很大的影響。現在中國科學院，特別是由於盧嘉錫院長和錢三強、嚴東生副院長的支持，決定翻印出版，使全國對物理有興趣者，都可以閱讀參考。

看到了這部巨著，聯想起在1945年春天，我初次在昆明遇見吳老師，很幸運地得到他在課內和課外的指導，從“古典力學”學習起至“量子力學”，其經過就相當於唸吳老師的這套叢書，由第一冊開始，直至第七冊。在昆明的這一段時期是我一生學物理過程中的大關鍵，因為有了紮實的根基，使我在1946年秋入芝加哥大學，可立刻參加研究院的工作。

1933年吳老師得密歇根大學的博士學位後，先留校繼續研究一年。翌年秋回國在北大任教，當時他的學生中有馬仕俊、郭永懷、馬大猷、虞福春等，後均致力物理研究有成。抗戰期間，吳老師隨北大加入西南聯大。這一段時期的生活是相當艱苦的，但是中國的學術界，還是培養和訓練了很多優秀青年。下面的幾

段是錄自吳老師的《回憶》一書：

“組成西南聯大的三個學校，各有不同的歷史。……北京大學規模雖大，資望也高，但在抗戰時期中，除了有很小數目的款，維持一個‘北京大學辦事處’外，沒有任何經費作任何研究工作的。在抗戰開始時，我的看法是以爲應該爲全面抗戰，節省一切的開支，研究工作也可以等戰後再作。但抗戰久了，我的看法便改變了，我漸覺得爲了維持從事研究者的精神，不能讓他們長期的感到無法工作的苦悶。爲了培植及訓練戰後恢復研究工作所需的人材，應該在可能情形下，有些研究設備。西南聯大沒有此項經費，北大也無另款。……我知道祇好儘自己個人的力量做一點點工作了。……請北大在崗頭村租了一所泥牆泥地的房子做實驗室，找一位助教，幫着我把三稜柱放在木製架上拼成一個最原始形的分光儀，試着做些‘拉曼效應’的工作。

“我想在二十世紀，在任何實驗室，不會找到一個拿三稜柱放在木架上做成的分光儀的了。我們用了許多腦筋，得了一些結果。……

“1941年秋，有一位燕京大學畢業的黃昆，要來北大當研究生隨我工作，他是一位優秀的青年。我接受了他，讓他半時作研究生，半時作助教，可以得些收入。那年上學期我授‘古典力學’，下學期授‘量子力學’。班裏優秀學生如楊振寧、黃昆、黃授書、張守廉等可以說是一

個從不易見的羣英會。……

“1945年日本投降前，是生活最困難的時期。每月發薪，紙幣滿箱。因為物價飛躍，所以除了留些做買菜所需外，大家都立刻拿去買了不易壞的東西，如米、炭等。……我可能是教授中最先擺地攤的，……抗戰初年，託人由香港、上海帶來的較好的東西，陸續的都賣去了。等到1946年春復員離昆明時，我和冠世的東西兩個手提箱便足夠裝了。”

就在1946年春，離昆明前吳老師還特爲了我們一些學生，在課外另加工講授“近代物理”和“量子力學”。當時聽講的除我以外，有朱光亞、唐敖慶、王瑞駢和孫本旺。

在昆明時，吳老師爲了北京大學的四十週年紀念，寫了《多原分子的結構及其振動光譜》一書，於1940年出版。這本名著四十多年來至今還是全世界各研究院在這領域中的標準手冊。今年正好是中國物理學會成立的五十週年，科學出版社翻印出版吳大猷教授的《理論物理》全書，實在是整個物理界的一大喜事。

李政道

1982年8月

寫於瑞士日內瓦

總序

若干年來，由於與各方面的接觸，筆者對台灣的物理學教學和學習，獲有一個印像：（一）大學普通物理學課程之外，基層的課程，大多強納入第二第三兩學年，且教科書多偏高，量與質都超過學生的消化能力。（二）學生之天資較高者，多眩於高深與時尚，不知或不屑於深厚基礎的奠立。（三）專門性的選修課目，琳琅滿目，而基層知識訓練，則甚薄弱。

一九七四夏，筆者擬想以中文編寫一套筆者認為從事物理學的必須有的基礎的書。翌年夏，得褚德三、郭義雄、韓建珊（交通大學教授）三位之助，將前此教學的講稿譯為中文，有（1）古典力學，包括 Lagrangian 和 Hamiltonian 力學，（2）量子論及原子結構，（3）電磁學，（4）狹義與廣義相對論等四冊。一九七六年春，筆者更成（5）熱力學，氣體運動論與統計力學一冊。此外將有（6）量子力學一冊，稿在整理中。

這些冊的深淺不一。筆者對大學及研究所的物理課程，擬有下述的構想：

第一學年：普通物理（力學，電磁學為主）；微積分。

第二學年：普通物理（物性，光學，熱學，近代物理）；高等微積分；中等力學（一學期）。

第三學年：電磁學（一學年）及實驗；量子論（一學年）。

第四學年：熱力學（一學期）；狹義相對論（一學期）；量子力學（引論）（一學年）。

研究院第一年：古典力學（一學期）；分子運動論與統計力學（一學年）；量子力學（一學年）；核子物理（一學期）。

研究院第二年：電動力學（一學年）；專門性的課目，如固體物理；核子物理，基本粒子；統計力學；廣義相對論等，可供選修。

上列各課目，都有許多的書，各有長短。亦有大物理學家，集其講學精華，編著整套的書，如 Planck, Sommerfeld, Landau 者。Landau-Lifshitz 大著既深且博，非具有很好基礎不易受益的。Sommerfeld 書雖似較易，然仍是極嚴謹有深度的書，不宜輕視的。筆者本書之作，是想在若干物理部門，提出一個綱要，在題材及著重點方面可作為 Sommerfeld 書的補充，為 Landau 書的初階。

筆者深信，如一個教師的講授或一本書的講解，留給聽者或讀者許多需要思索、補充、擴展、涉獵、旁通的地方，則聽者讀者可獲得較多的益處。故本書風格，偏於簡練，課題範圍亦不廣。偶以習題的方式，引使讀者搜索，擴大正文的範圍。

筆者以為用中文音譯西人姓名，是極不需要且毫無好處之舉。故除了牛頓，愛因斯坦之外，所有人名，概用西文。*

* 商務印書館出版之中山自然科學大辭典中，將 Barkla, Blackett, Lamb, Bloch, Brattain, Townes 譯為巴克納，布拉克，拉目，布勞克，布勞頓，湯里士，錯誤及不準確可見。

本書得褚德三，郭義雄，韓建珊三位交通大學教授之助，單越（清華大學）教授的校閱，筆者特此誌謝。

吳大猷

一九七七年元旦

本册前言

本書第六册量子力學的甲部，述量子力學的矩陣力學，波動力學的發展，量子力學的結構，及其對原子，分子理論的應用，本册為量子力學的乙部，述相對論的電子方程式，古典場及量子化場，旋量和群論。這些課題的選擇，是基於若干的考慮的。

相對論（狹義的）和量子力學係目前物理學的兩大基石。在上册（第六册）中，我們所用的 Schrödinger 方程式（含時間的），是不滿足相對論的基本要求的（Lorentz 不變性）。故求一個滿足相對論要求的量子力學，實係必要。早在 1926 年，E. Schrödinger, O. Klein, W. Gordon, V. Fock 等氏即獲得這樣的一個方程式，但旋即知道不適用於電子。1928 年 P. A. M. Dirac 創立他的理論，成功的應用於電子的問題（如氫原子的理論），且預告了有正電子的可能性。1933 年 C. D. Anderson 發現了正電子，使 Dirac 理論獲得極強（可謂無可置疑的）的證驗。

然由於 Dirac 的正電子理論的成功，却引致另一重大的發展，原來正電子的理論的本身，已不再是“一個粒子”而是一個“多粒子”的系統的問題。這和 1905 年愛因斯坦提出的電磁場的量子理論，同樣的需要場和量子化的場的理論。單獨一個場的

量子化，是無根本的困難的。然電子和電磁兩個有交互作用的場的理論——所謂量子電動力學——便遇到極基本性的困難。理論中出現無限大的量，經1940，1950年代許多物理學家的努力，仍頑固的未被消除。Dirac 氏以為這似示我們在極基本階層上未得適宜的觀念，故很可能需要另外我們尚未知道的數學工具，來處理它。這樣的問題，或者需等待時機成熟，又出來了愛因斯坦，Heisenberg, Dirac 一樣的人。但“場”的觀念，可能仍可保留下去的。

相對論的基本要求——Lorentz 不變性——似乎仍將繼續的為自然界的一個對稱原理。處理對稱性的最適宜數學工具，便是群論——尤其是群的表現 (representation theory)。

本冊是希望從上述的觀點，作一個入門的導論。第一、第二章由歷史上發展的觀點，導致 Klein-Gordon 和 Dirac 的相對論電子的量子力學方程式。第三章述 Dirac 方程式理論的展開。第四章述 Dirac 方程式在 Lorentz 變換下的性質。第五章述 Dirac 方程式在氫原子問題的應用。

本冊的第貳部是述場的觀念，第六章先將古典場的觀念表以 Lagrangian 及 Hamiltonian 形式，並應用之於電磁場。第七章述多體系統在量子力學中的表象形式，及多體系統對置換 (permutation) 的對稱性。第八章述場的量子化的數學形式，並以 Klein-Gordon 方程式的 ψ ，電磁場的勢 A_μ ，Dirac 方程式的 ψ ，為例。第九章述量子化的電磁場對輻射躍遷機率（自發輻射）的應用，關於量子化場的敘述，祇止於此，量子電動力學

——電子與電磁場的交互作用場——是需要更多的準備基礎，才能作有效的敘述的，故作者決將那一個大部門，留候他日，不在本冊中作嘗試了。

第參部則作旋量 (spinor) 和群論的導論。旋量是 Dirac 理論的基本量——是 Lorentz 變換所需的“波函數”。通常的量子力學書中，多視 Dirac 波函數為一個 4-分量的波函數而不引入旋量，這是犧牲了數學上的正確性。第十章企圖對旋量作一個簡介，希望對習量子力學者介紹普通書中不常敘述的課題。

群論是數學中的美麗、深邃、重要的一大部門。本書當然不是講群論的數學，即是講群論在物理上的應用，也做不到。作者祇是覺得在量子力學中一再着重 Dirac 的方程式的 Lorentz 不變性，而不更稍深入的探索 Lorentz 群的表現 (representation) 和 Dirac, Klein-Gordon, Maxwell 方程式的關係，是一種欠缺。故決定嘗試為習量子力學的物理學生，介紹群論的表現理論和物理 (場論) 的關係。

第十一章述群的若干基本觀念和定義；第十二章述線性變換中的單位模 $[SC_2]$ 和么正單位模 $[SU_2]$ 群，和 Lorentz 群，三維空間轉動群 R_{3p} 的關係，第十三章述群的表現論，同態，同構 (homomorphism, isomorphism)，表現的可約與不可約性等定理，並以 $[SU_2]$, $[SC_2]$ 群為例。此章從數學觀點，述群的代數的許多基本定理。第十四章則略舉群的表現理論對量子力學的應用。為便利讀者計，本章重複的將第十三章若干基本定理綜合一下，以之應用於對稱群 (所謂點群, point group) 之一，

C_{3h} 群為例作闡明，第十五章述連續及無限小變換群，第十六章述群的表現理論在 Klein-Gordon, Dirac 及 Maxwell 場方程式的應用，使我們可以從另一觀點——群論——對本冊第一，二，三章相對論量子方程式，第八章的場論，第十章的旋量等，獲得更廣的視野和較深的瞭解。

作者知道本冊關於群論的部分，多著重轉動群及 Lorentz 群，略及置換群 (symmetric group) 及無限小變換群，而未對“點群”作較多的敘述。作者的主要目的，係引入群論和相對論量子力學方程式和場論的關係；這是本冊的結構的基本構想。點群雖在原子，分子，晶體等問題極為重要，但作者覺得對這些課題，和場論等的相對論觀點等，無統一相連，故祇在第十四章略述 C_{3h} 一個群，未作更多的敘述。這或者使一些讀者失望，但祇好留候他日了。

吳大猷

一九七九年八月

參考文獻

第一章

第二章

P. A. M. Dirac: The Principles of Quantum Mechanics

W. Pauli: Die Allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik, (在 Handbook of Physics, 第五卷內的一章)

第三章

A. S. Davydov: Quantum Mechanics

R. H. Good, Reviews of Modern Physics, 27, 187 (1955)

第四章

W. Pauli, 見第二章

第五章

H. A. Bethe 與 E. E. Salpeter: Quantum Mechanics of One-and Two-Electron Atoms

W. Pauli, 見第二章

第六章

本書第三冊電磁學, 第七章

第七章

Dirac, 見第二章; (關於 Fock 表象)

第八章

J. M. Jauch 與 F. Rohlich, The Theory of Photons and
Electrons.

A. S. Davydov, Quantum Mechanics

第九章

W. Heitler: Quantum Theory of Radiation

第十章

W. L. Bade 與 H. Jehle, Reviews of Modern Physics,
Vol. 25, 714 (1953), 一文

第十一, 至第十六章

M. Hamermesh, Group Theory and Its Application to
Physical Problems (1971)

V. I. Smirnov, Linear Algebra and Group Theory (1961)

E. P. Wigner, Group Theory and Its Applications to
The Quantum Mechanics of Atomic Spectra (1928,
1959)

壹

相對論量子力學

目 錄

壹 相對論量子力學

第一章 電子之相對論理論——Klein-Gordon 方程式	1
1. 引言	1
2. Klein-Gordon 方程式	3
3. Klein-Gordon 方程式的近似式	7
4. 氫原子的 Klein-Gordon理論	8
習題	13
第二章 Dirac 之理論——自由電子	15
1. Dirac 方程式	15
2. 自由電子 Dirac 方程式之解	21
3. 負能態的特性	26
(1) 動量與速度的離異	26
(2) 顫動 (Zitterbewegung)	27
(3) Schrödinger 的奇, 偶算符理論	31
(4) Klein 的理論: 電子由正能態至負能態的躍遷	35
(5) 正電子的“洞”的理論 (hole theory)	39