

量子力學



本書特色

- ◆ 奠定量子力學清晰的數學基礎
- ◆ 強調量子力學重要的六個公設
- ◆ 以狄拉克符號貫通波動與矩陣力學
- ◆ 從量子化條件 $[\hat{X}, \hat{P}] = i\hbar$ 建立能量與角動量量子化
- ◆ 自運算子的合成掌握角動量的加法
- ◆ 呈現積分運算如何由內積與公設進入量子力學
- ◆ 以運算子的固有向量為空間基底表明簡易的微擾論
- ◆ 完整討論軌道—自旋耦合精細結構與齊曼效應
- ◆ 說明全同粒子狀態為何需具備嚴格對稱性
- ◆ 每章皆提供有解練習題以進一步體會書中理論

滄海
www.tsanghai.com.tw

ISBN 978-986-5647-91-9



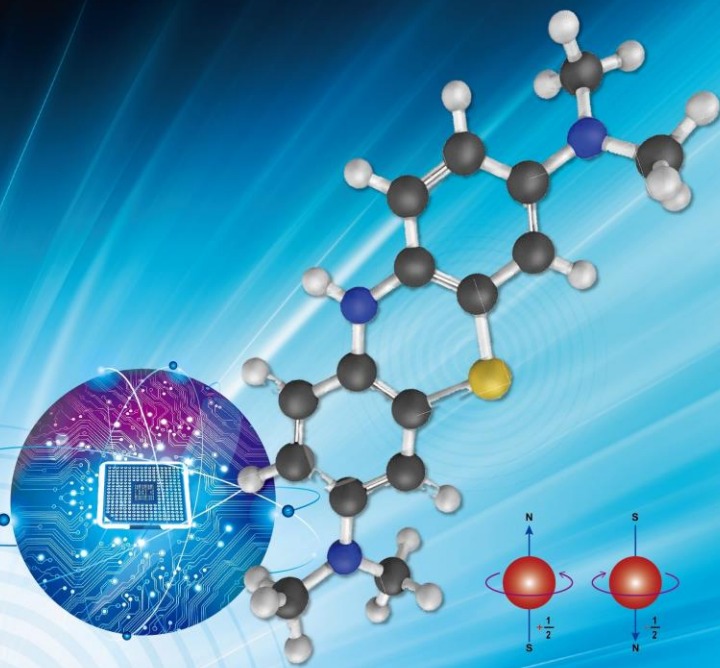
9 789865 647919

量子力學

姚
珩
著



PH0142



量子力學

姚 珩

$$[\hat{X}, \hat{P}] = i\hbar$$



滄海圖書
Tsang Hai Publishing



序言

早在兩千多年前希臘亞里斯多德便完成第一本名為《物理學》的著作，今天量子力學則為近代物理學的核心內容，兩者內涵差異不可同日而語，但都是以尋找變化中物質世界背後的「秩序」為目標。前者企圖根據物體的特性本質來描述現象，後者則是以抽象的數學語言與原理來詮釋周遭。兩者使用的方法迥異，但堅持世界為有序的理想與統合自然的決心，卻無一絲改變。

若稱所謂現代的高科技，即是量子物理之技術應用，殆無疑義，量子力學是全球物理研究所裡最重要的必修課，化學、電機、材料及光電等所亦無法等閒視之。對此門課的學習與付出，必可收其廣大成效。

如果同學在學習過程中感到困難，通常不是因材料難懂，而是因更簡單的、基本的知識尚未明白，自然也就無法了解眼前理論為何如此呈現。雖說如此，但這些基礎內容，卻常被傳授者忽略，而學生則尚無能力去選擇與判斷哪些為相關的基礎知識。此外，學生為了獲得速效，習慣以最少時間得到最高回饋，而不願花太多精力在基礎知識的培養，使得學習路上充滿坎坷，既得不到學習的樂趣，學後又幾乎遺忘大半。

這也是為何優秀教師願意投入時間傳授最關鍵的基礎內容，以奠定學生正確的思考，培植學生深厚的實力。當他們根基穩固之後，將毋需他人指導，即可自行延伸推演，解決問題，茁壯成長，超越前人。

量子力學基本的數學語言是運算子 (operator)，能量與角動量的狀態是右向量 (ket)，這是本書所言的數學基礎；物理學家詮釋自然所使用的基本原理在微觀世界中稱為量子公設，則是涵蓋全書的根本法

則。若同學把量子理論隨時試著與這些數學基礎與公設結合，將發現量子理論是清晰與簡潔的。

物理的現象是科學家關心的對象，理論必須以實驗為依歸標準，於微觀世界裡除了氫原子與電子自旋外，書中對軌道-自旋耦合、精細結構、齊曼效應與氦原子，皆有清楚的探討。對變分法、WKB 近似法與量子散射亦有所觸及，基本上這些已包含了量子力學中許多重要的主題。

題目與練習是了解理論無法或缺的學習步驟，但它不是漫無目的之大量解題，而是要掌握與熟練少數重要有意義的題目。本書在每章理論陳述之後，均提供具有代表性且不艱澀的有解練習題，讓同學對理論能有進一步的體會。其中部分題目不妨可先行試解，然後再對照書中解法，將是項有趣的活動，其效果亦不容小覷。

從當學生開始，個人即深深體會，一門課講授的成敗與一本書品質的優劣，決定於取材內容和呈現方法。授課或下筆前，如何選取核心課題來帶領引導，以及如何使用關鍵方式從事思考，此種抉擇態度可培養出學生的特殊風格與視野。本書每章總以重要的量子現象與問題切入，以根本和有效的公設及運算子數學方法為依據，捨去次要瑣碎的課題及太過技巧性的計算，讓同學能在有限時間裡，集中力量奠定好未來紮實的研究基礎。

書中的陳述與內容在台灣師大課堂已實行近三十年，學校也精心製作了八十七堂個人所講授的量子力學開放課程服務學子（網址：ocw.lib.ntnu.edu.tw/course/view.php?id=613）。多年來學生對基礎養成的效果都正面看待，對量子力學結構的困惑日趨降低，對未來專業的建立也燃起信心。

感謝明真、惠芬、怡如與秀麗長期及昔日的協助，感激滄海企劃達穎與編輯佳玲，對本書的促成與用心。期望大家的付出，對年輕學子能有所助益。

姚弌

2018 年春 加州爾灣



目錄

Chapter 1 量子觀念的歷史回顧 1

1-1	黑體輻射——能量的不連續性	2
1-2	光電效應——輻射之粒子性	9
1-3	原子光譜	12
1-4	矩陣力學的誕生	14
1-5	波動力學的誕生	17
1-6	不確定原理——古典物理的限制	20
1-7	有解練習題	21

Chapter 2 量子力學的數學基礎 25

2-1	向量空間和基底	26
2-2	內積和正交	30
2-3	線性運算子與厄米特運算子	34
2-4	運算子之矩陣表示與特殊矩陣	40
2-5	基底的改變對向量表示的影響及其相關性	49
2-6	基底的改變對運算子矩陣表示的影響	52
2-7	運算子之固有值與固有向量	54
2-8	矩陣的對角化——如何使運算子的表示最簡單	58
2-9	量子力學中兩個最重要的數學基本定理	60
2-10	有解練習題	66
	• 練習題	76

Chapter 3 量子力學公設 79

3-1	物理狀態	80
3-2	物理量	82
3-3	物理量的測量結果	90



3-4	測量結果的可能性	92
3-5	測量後之狀態	94
3-6	狀態函數的運動方程式	95
3-7	有解練習題	100
	• 練習題	114

Chapter 4 無限位能井、疊合原理與可交換的物理量 117

4-1	質點在無限位能井中的波函數	118
4-2	平均值的時間變化及運動不變量	126
4-3	不可交換的物理量及不確定原理	128
4-4	疊合原理	131
4-5	可交換運算子的完全集 (C.S.C.O.)	136
4-6	有解練習題	140
	• 練習題	151

Chapter 5 位能井、位能障礙與簡諧振子 153

5-1	一維問題下波函數的行為	154
5-2	束縛態——有限對稱位能井	156
5-3	位能障礙 (共振散射、穿隧效應)	162
5-4	原子核在 α 衰變下之半衰期	168
5-5	簡諧振子	173
5-6	線性位能	186
5-7	有解練習題	191
	• 練習題	199

Chapter 6 量子力學中的角動量 201

6-1	角動量之定義及其交換關係	202
6-2	角動量的量子化與固有值	204
6-3	角動量在位置空間中之形式及其固有函數	214
6-4	自旋——空間量子化	223
6-5	量子力學結構基礎的回顧	228
6-6	有解練習題	229
	• 練習題	237

Chapter 7	氫原子	239
7-1	兩互相作用的粒子所成的系統——二體問題	240
7-2	單一質點在中心力位能作用下的穩定態	242
7-3	氫原子之能階與波函數	245
7-4	氫原子之體積與徑向機率密度	256
7-5	量子力學裡的積分如何出現	262
7-6	有解練習題	263
	• 練習題	269
Chapter 8	角動量的合成	271
8-1	兩自旋角動量的合成	273
8-2	任意兩角動量的加法——Clebsch-Gordan 係數	279
8-3	C-G 係數的應用 (L-L 和 L-S 耦合)	292
8-4	有解練習題	295
	• 練習題	302
Chapter 9	穩定態之微擾理論	303
9-1	與時間無關的微擾理論	304
9-2	無退化狀態的微擾	306
9-3	有退化狀態的微擾	312
9-4	外加電場下的斯塔克效應	316
9-5	精細結構	321
9-6	齊曼效應	328
9-7	有解練習題	334
	• 練習題	348
Chapter 10	尋求穩定態能量與波函數的近似法——變分法與 WKB 法	351
10-1	變分法	352
10-2	氫原子的基態	357
10-3	WKB 近似法之基本形式	362
10-4	WKB 之連接公式	368
10-5	WKB 所描述之波函數與能量量子化	374
10-6	有解練習題	376
	• 練習題	385

Chapter 11 躍遷——與時間有關的微擾理論	387
11-1 躍遷意義與微擾條件的引入	388
11-2 單頻諧波微擾	394
11-3 電磁輻射的選擇律	401
11-4 齊曼效應中的躍遷與譜線	404
11-5 有解練習題	407
• 練習題	417
Chapter 12 全同粒子系統	419
12-1 對全同粒子系統的描述	420
12-2 排列運算子	422
12-3 對稱化公設	426
12-4 氦原子的激發態	430
12-5 有解練習題	434
• 練習題	444
Chapter 13 散射	445
13-1 散射截面積	446
13-2 部分波法	449
13-3 Bom 近似法	460
13-4 有解練習題	465
• 練習題	471
附錄	473
A-1 物理常數	473
A-2 特殊函數	474
A-3 積分表	481
A-4 C-G 係數	483
參考書目	485
索引	487