

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



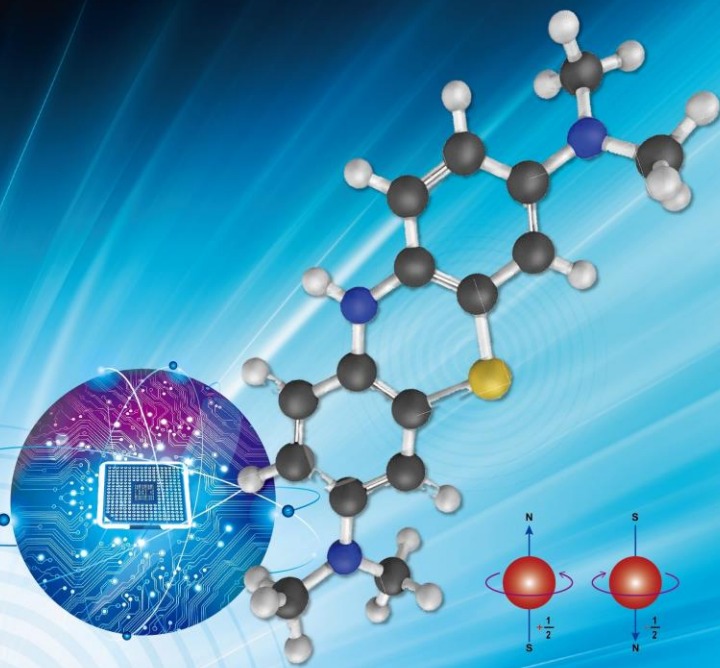
9 789865 647919

量子力學

姚
玠
著



PH0142



量子力學

姚 玠

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



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，兩者內容差異不可同日而語，但都是以尋找物質世界裡變化現象背後的「秩序」為目標。前者企圖根據物體的本性來描述，後者則是以抽象的數學原理來詮釋。兩者使用的方法迥異，但堅持世界為有序的理念與統合自然的決心，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主要的必修課，化學、材料、電機及光電等系所亦無法等閒視之。對此門課的學習與付出，必可獲得可觀的回饋。

如果同學在學習過程中感到困難，通常不是因材料難懂，而是因為更簡單基本的知識尚未明白，自然也就無法了解眼前理論為何這般呈現。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，習慣想以最少時間得到最大收穫，而不願花太多力量在基礎知識的培養上，使得學習之路充滿坎坷，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，培養學生深厚的實力。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，則是涵蓋全書的基本法則。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。

自然現象是物理學家關心的對象，理論必須以實驗為依歸，在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、齊曼效應與氫原子能階，皆有完整的探討。對變分法、WKB 近似法與量子散射亦有所觸及，基本上這已包含了量子力學大部分的主要課題。

題目與練習是了解理論無法或缺的學習過程，但它不是漫無目標的大量解題，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、附有清晰解題步驟的練習題，讓同學對理論能有進一步的體會。

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引導學生，以及如何使用關鍵方式來從事思考，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 87 堂個人所講授的量子力學開放課程服務學子（網址：<http://ocw.lib.ntnu.edu.tw/course/view.php?id=613>）。多年來學生對學習後的效果都給予極大肯定，對量子理論的迷惘得以逐步消除，對未來專業的研究能力也更具信心。

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