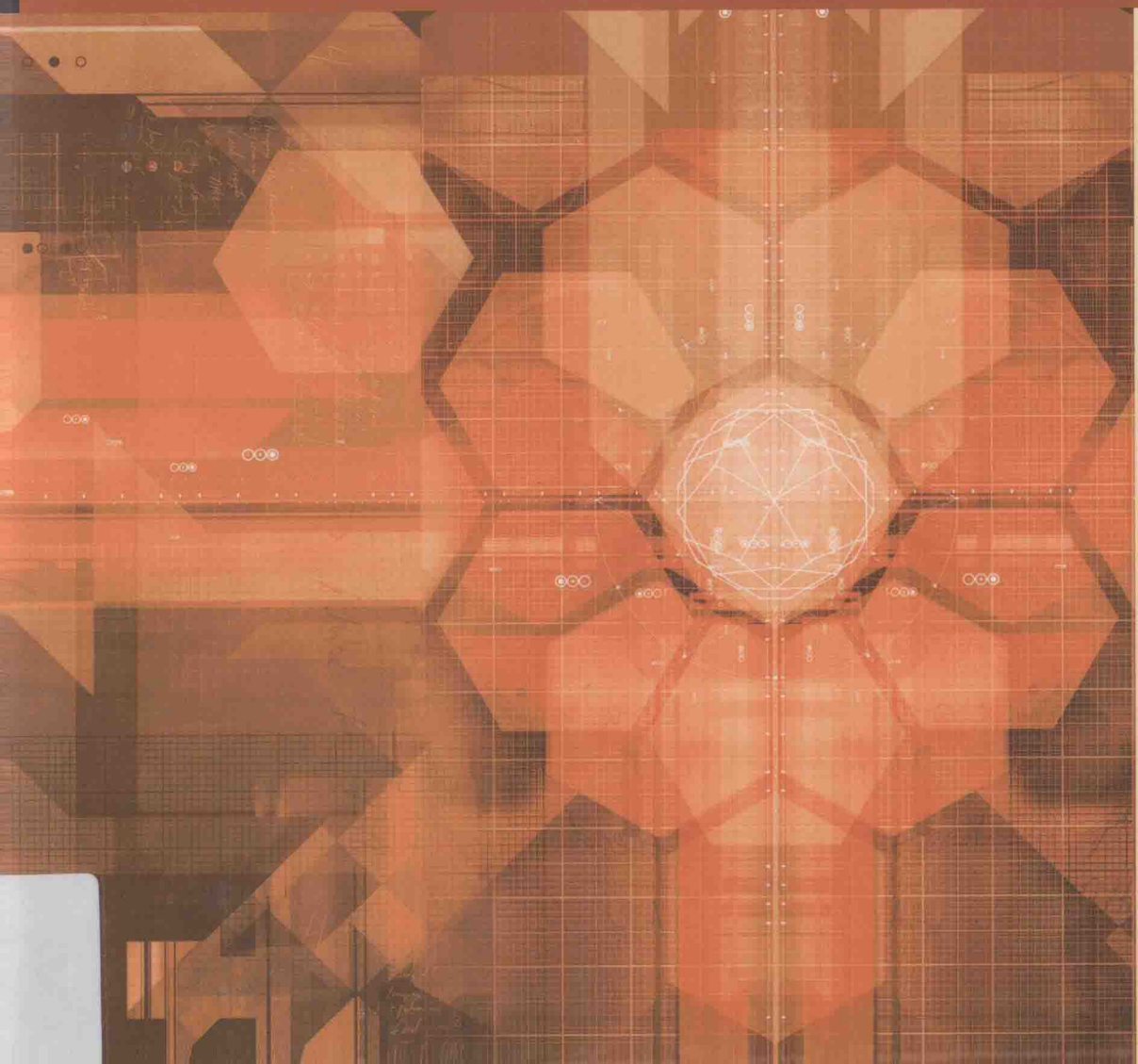


五南出版

近代物理

Modern Physics

倪澤恩 著



近代物理

Modern Physics

倪澤恩 著

五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

近代物理 / 倪澤恩著.

—初版.—臺北市：五南，2013.12

面：*公分

I S B N: 978-957-11-7424-2 (平裝)

1.近代物理

339

102023484



5BH2

近代物理

Modern Physics

作 者 — 倪澤恩

發行人 — 楊榮川

總編輯 — 王翠華

主 編 — 穆文娟

責任編輯 — 王者香

封面設計 — 小小設計有限公司

出 版 者 — 五南圖書出版股份有限公司

地 址：106 台北市大安區和平東路二段 339 號 4 樓

電 話：(02)2705-5066 傳 真：(02)2706-6100

網 址：<http://www.wunan.com.tw>

電子郵件：wunan@wunan.com.tw

劃撥帳號：01068953

戶 名：五南圖書出版股份有限公司

台中市駐區辦公室 / 台中市市區中山路 6 號

電 話：(04)2223-0891 傳 真：(04)2223-3549

高雄市駐區辦公室 / 高雄市新興區中山一路 290 號

電 話：(07)2358-702 傳 真：(07)2350-236

法律顧問 林勝安律師事務所 林勝安律師

出版日期 2013 年 12 月初版一刷

定 價 新臺幣 560 元

誌 謝

敬以此書獻給我敬愛的家人

倪誠忠先生、倪歐瑞芬女士、貞芳、咸安、咸曄

自序

近代物理對於理工學院的各科系來說不僅是觀念甚至是計算都是必要的能力。本書的藍本是作者在大三的暑假為了自修考研究所所整理的筆記加上長庚大學的「近代物理」及「量子力學」的講義彙集而成。內容包含了相對論與量子論，在最後一章還介紹了密度矩陣理論（Density matrix theory），希望能提供有興趣的讀者些許幫助。

「知我者，謂我心憂，不知我者，謂我何求？悠悠蒼天，此何人哉！」，權且引用《詩經》作為回答安安與曄曄的提問吧！

長庚大學 電子工程學系／光電工程研究所

倪澤恩

第 1 章 近代物理的基本架構 1

1.1	近代物理的發軔	2
1.2	近代物理之前	3
1.3	近代物理的學習	6
1.4	近代物理常用的特殊函數	7
1.4.1	Hermite 多項式	8
1.4.2	Laguerre 多項式、Legendre 多項式和球諧函數	11
1.4.3	Bessel 函數	16
1.4.4	Airy 函數	18
1.4.5	Gamma 函數	19
1.5	近代物理的哲學	20
1.6	習題	22

第 2 章 基礎相對論 27

2.1	古典力學與 Galileo 轉換	28
2.2	古典物理的迷思	31

2.3	Lorentz 轉換	37
2.3.1	時間的 Lorentz 轉換	38
2.3.2	空間的 Lorentz 轉換	42
2.3.3	Lorentz 轉換的矩陣表示	44
2.4	Minkowski 空間	49
2.5	相對論動力學	53
2.5.1	速度的 Lorentz 轉換	53
2.5.2	質量的 Lorentz 轉換	54
2.5.3	相對論能量	57
2.5.4	四維動量和相對論能量的關係	59
2.5.5	四維動量的 Lorentz 轉換	61
2.5.6	光子的靜止質量為零	62
2.6	習題	64
第 3 章	古典量子理論	71

3.1	Planck 的量子論	73
3.1.1	黑體輻射	74
3.1.2	黑體輻射實驗定律	78
3.1.3	電磁輻射理論	80
3.1.4	古典和量子模型的結果	86

3.2	波動與粒子的二象性	90
3.2.1	波動的粒子性	90
3.2.2	粒子的波動性	98
3.3	Bohr 氫原子模型	102
3.3.1	Bohr 的氫原子模型	103
3.3.2	一致性原理	107
3.3.3	Bohr 理論之改進	109
3.3.4	有關 Bohr 原子模型的實驗	111
3.4	Schrödinger 方程式	114
3.4.1	Schrödinger 方程式的導入	115
3.4.2	波函數的意義	118
3.4.3	測不準原理	120
3.5	習題	129
第 4 章	量子力學的基本原理	137

4.1	Schrödinger 方程式	139
4.2	量子力學的波函數	140
4.3	Dirac 符號	142
4.3.1	Dirac 符號說明	142
4.3.2	算符的矩陣表示	144

4.3.3	基底變換	146
4.4	量子力學的算符與狀態向量	155
4.4.1	量子力學的三項原理	160
4.4.2	量子力學的三個基本性質	161
4.4.3	幾個量子力學狀態向量的重要定理	163
4.4.4	Schrödinger 方程式的矩陣型式	168
4.5	Hilbert 空間	169
4.6	Heisenberg 測不準原理	174
4.6.1	Heisenberg 測不準原理的証明	174
4.6.2	Cauchy Schwarz 不等式	176
4.6.3	有關 Heisenberg 測不準原理的應用	177
4.7	特殊位能的 Schrödinger 方程式	181
4.7.1	三維無限高位能	184
4.7.2	步階位能	188
4.7.3	位能障	193
4.7.4	方井位能	200
4.8	三個典型的特殊位能	207
4.8.1	無限位能井	208
4.8.2	Coulomb 位能	211
4.8.3	簡諧振盪	218
4.9	二階系統的能量交換過程	230
4.10	習題	235

第 5 章 角動量 247

5.1 角動量算符	250
5.1.1 角動量算符在直角座標的表象	250
5.1.2 總角動量算符和階梯算符	254
5.1.3 角動量算符在球座標的表象	257
5.2 角動量的本徵值	258
5.3 軌道量子數與磁量子數	264
5.4 角動量的耦合	268
5.5 向量模型	271
5.6 習題	274

第 6 章 原子的量子力學 277

6.1 中心力場	280
6.2 單電子原子波函數之一般解	286
6.3 電子自旋的引入	293
6.3.1 磁矩與角動量	294
6.3.2 殼層模型	301
6.4 多電子原子與 Hartree 理論	303

6.4.1	光譜記號	305
6.4.2	中心力場與軌域耦合	310
6.4.3	Hartree 理論	318
6.5	Zeeman 效應	319
6.5.1	不正常 Zeeman 效應	323
6.5.2	正常 Zeeman 效應	332
6.5.3	Stern-Gerlach 實驗	337
6.6	原子分子科學中三種常用的單位	337
6.7	習題	339
 第 7 章 微擾理論		345
7.1	和時間無關的微擾理論	347
7.1.1	和時間無關的非簡併微擾理論	347
7.1.2	和時間無關的簡併微擾理論	353
7.2	和時間相關的微擾理論	370
7.3	Hellmann-Feynman 理論	373
7.4	Koopmans 理論	375
7.5	Virial 理論	377
7.5.1	Euler 理論的證明	377
7.5.2	Hyper-Virial 理論的證明	378

7.5.3	Virial 理論的證明	379
7.5.4	Virial 理論的應用	381
7.6	習題	382
 第 8 章 統計力學基本概念		 397
8.1	相空間	399
8.1.1	相空間的基本概念	399
8.1.2	相空間的基本意義	402
8.2	Lagrange 乘子	404
8.3	基礎統計分布	408
8.3.1	全同粒子	409
8.3.2	統計力學的三個基本分布函數	414
8.4	幾個統計物理的應用	422
8.4.1	古典統計之平均能量	422
8.4.2	自由 Fermion 氣系統	424
8.4.3	Bose-Einstein 凝結	427
8.5	習題	430

第 9 章 密度矩陣理論 437

9.1 純粹態與混合態	439
9.2 密度算符	441
9.3 密度算符與最大可能訊息	448
9.4 密度算符及其基本性質	450
9.5 Liouville 方程式	452
9.6 量子 Boltzmann 方程式	455
9.7 算符期望值的運動方程式	458
9.8 習題	463

參考資料 475

索 引 477

第一章

近代物理的基本架構

1 近代物理的發軔

2 近代物理之前

3 近代物理的學習

4 近代物理常用的特殊函數

1.1 近代物理的發軔

對科學稍微有認識的人都知道「絕對溫度」(Absolute temperature)的單位是 Kelvin，其實，Kelvin 並不是人名，而是著名的英國數學家物理學家 William Thomson 的爵位名稱 Lord Kelvin，我們也許可以從這裡開始談近代物理發軔的肇端。

1884 年 William Thomson 在美國的 Johns Hopkins University 發表了一系列的演說，稱為 Baltimore lectures。1900 年，他在 Dynamical Theory of Heat and Light 一書中，發表了一篇名為「Nineteenth-Century Clouds」的文章，也就是後來大家所熟知的「烏雲說」。文中他用了「Dark clouds」的字眼，暗示物理科學中只剩下 Michelson-Morley 實驗 (Michelson-Morley experiment) 和黑體輻射 (Black body radiation) 「兩個小問題」尚未解決，殊不知「第一個小問題」引出了相對論 (Theory of relativity)；「第二個小問題」引出了量子論 (Quantum theory)。這兩個理論搖撼了古典物理嚴謹的華廈，但是，也有一說，是 William Thomson 解救了整個物理學。

本書將把近代物理分成兩個部份，分別是相對論及量子論。基本上，兩者是可以分開研讀的，也就是雖然我們把相對論安排在前面，但是，其實是可以跳過相對論，直接學習量子論的。

在進入近代物理之前，我們先簡單的把古典物理的發展歷史說明一下，並列出一些和近代物理有比較直接關係的數學特殊函數 (Special functions) 和方程式。

1.2 近代物理之前

在許多地方都可以查閱得到古典物理的發展過程，所以我們無意在此作冗長的陳述，只有簡單的列出一些在 1900 年科學家普遍已經知道的現象。要注意的是古典物理有一些限制，諸如要求質點的速度要遠小於光速；物體的大小必須遠小於分子、原子的大小。

古典物理的中心思想就是符合 Galileo 轉換（Galilean transformation，G.T）或是滿足 Galileo 不變性（Galilean invariance）的 Newton 定律（Newton's law）

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}, \quad (1.1)$$

其中 $\vec{F}$ 為作用力； m 為質點的質量； $\vec{r}$ 為質點的位移向量； t 為時間；而 Galilean 轉換會在第二章做說明。

除了以 Isaac Newton 為代表所提出的古典力學之外，最受重視的應屬 James Clerk Maxwell 所建立的所謂 Maxwell 方程式（Maxwell's equations），

E

$$\text{即} \quad \begin{cases} \nabla \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathcal{H}} = \vec{\mathcal{J}} + \frac{\partial \vec{\mathcal{D}}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{\mathcal{D}} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{\mathcal{B}} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

且 Lorentz 力 (Lorentz force) 爲 $\vec{\mathcal{F}} = q(\vec{\mathcal{E}} + \vec{v} \times \vec{\mathcal{B}})$, 其中 $\vec{\mathcal{E}}$ 爲電場強度 (Electric field intensity); $\vec{\mathcal{B}}$ 爲磁通密度 (Magnetic flux density); $\vec{\mathcal{H}}$ 爲磁場強度 (Magnetic field intensity); $\vec{\mathcal{J}}$ 爲電流密度 (Current density); $\vec{\mathcal{D}}$ 爲電通密度 (Electric flux density); ρ 爲電荷密度 (Charge density); $\vec{v}$ 爲電荷 q 的運動速度; ϵ_o 爲真空介電常數 (Vacuum dielectric constant) 或絕對電容率 (Absolute permittivity); $\vec{\mathcal{P}}$ 爲電極化強度 (Polarization); μ_o 爲絕對磁導率 (Absolute permeability); $\vec{\mathcal{M}}$ 爲磁極化強度 (Magnetization)。

電場強度 $\vec{\mathcal{E}}$ 和電通密度 $\vec{\mathcal{D}}$ 的關係爲

$$\begin{aligned}
 \vec{\mathcal{D}} &= \epsilon_o \vec{\mathcal{E}} + \vec{\mathcal{P}} \\
 &= \epsilon_o \vec{\mathcal{E}} + \epsilon_o \chi_e \vec{\mathcal{E}} \\
 &= \epsilon_o (1 + \chi_e) \vec{\mathcal{E}} \\
 &= \epsilon_o \epsilon_r \vec{\mathcal{E}} \\
 &= \epsilon \vec{\mathcal{E}}, \tag{1.3}
 \end{aligned}$$

其中 ϵ_r 爲相對介電常數 (Relative dielectric constant) 或相對電容率 (Relative permittivity); χ_e 爲電極化率 (Electric susceptibility)。

磁場強度 $\vec{\mathcal{H}}$ 和磁通密度 $\vec{\mathcal{B}}$ 的關係爲

$$\begin{aligned}
 \vec{\mathcal{B}} &= \mu_o \vec{\mathcal{H}} + \vec{\mathcal{M}} \\
 &= \mu_o \vec{\mathcal{H}} + \mu_o \chi_m \vec{\mathcal{H}}
 \end{aligned}$$