

高等学校教学用书

原子物理学

第一卷

Э. В. 史包尔斯基著

高等教育出版社

高等学校教学用书



原子物理学

第一卷

Э. В. 史包尔斯基著
周同庆等译

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國立技術理論書籍出版社(Государственное издательство технико-теоретической литературы)出版的史包爾斯基(Э. В. Шпогельский)著“原子物理學”(Атомная физика)第一卷的1951年第四版修訂補充本譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等學校教學參考書。

本書共分十一章：第一至第五章敘述量子現象發現以前關於原子問題的實驗和理論，第六至第八章敘述量子理論的初步發展和實驗根據，第九至第十一章是從實驗和理論上討論基本微粒的二象性及量子力學的初步介紹。

本書由復旦大學及華東師範大學物理系的教師們集體翻譯，翻譯工作的分配情況如下：

第一章、第十一章及附錄，謝希德譯(復旦大學)；第二章，嚴毓統譯(復旦大學)；第三章、第四章、第八章，許國保譯(華東師範大學)；第六章、第七章，江仁壽譯(復旦大學)；第五章、第九章，周同慶譯(復旦大學)；第十章，周世勛譯(復旦大學)。

原 子 物 理 學

第一卷

Э. В. 史包爾斯基著

周同慶等譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7號
(北京市書刊出版業營業許可證出字第054號)

商務印書館上海廠印刷 新华書店發行

統一書號 13010·246 開本 850×1168 1/32 印張 173/16
字數 489,000 印費 31,501—34,000 定價(4) 1.90
1964年12月第1版 1969年12月上海第9次印刷

第四版序

在第四版中，第一卷的內容根據本書在教學上應用的經驗，讀者來信的意見，及刊物上的指示，重新審查一遍。在審查中雖作了許多更改及修正，但全書的一般特徵仍和以前一樣。

莫斯科，一九五一年四月

Э. 史包爾斯基

第二版序

本書第一版發行至今已經四年了，在這時期中，我在兩所莫斯科高等學校中引用此書，因此有可能對於本書的敘述是否易於理解和結構是否合宜加以檢查。讀者來信對我也是有價值的資料，這些讀者，部分是按照本書獨立地研究原子物理學或把以前在這方面所得的零星知識加以系統學習。所有這些考察的總結，指出本書大綱和敘述的特徵是選得對的。特別是，引起普遍贊同的是實驗和理論方面問題一同考慮，並穿插輔助的章節闡明一些取自理論物理其他部門必要的知識。所有這些促使我在第二版中仍完全保持本書的特徵。

雖然如此，本書曾經極重要的改編。並不誇大地可說它在顯著程度上是重新寫過的。首先，我致力於消除所有已察覺的不準確和不明白的地方，並在不擴大內容的可能範圍內使敘述更清楚一些。在本書前半部所作的補充，幾乎完全是關於原子物理的實驗基礎，因為在第一版中某些實驗的敘述，現在看起來是太膚淺了。此外，在過去的時期中，科學發展所提出的那些問題必須較詳地闡明一下。關於這方面，例如同位素的分析問題，在第一版中祇提到一句而現在討論了幾節。本書下半部經過特別重要的改編，而最後專論原子核的部份，由於原子核物理重要性的巨大增長與大量新事實的發現，不得不大大地擴充。因此全書的篇幅也擴大了，同時爲了便於應用起見，將本書分爲兩卷較爲

適宜。

現在出版的第一卷，基本上專論原子的核型理論與量子物理的實驗基礎。它以物質的波動性質的討論為結束，而在最後一章中按照前一版建立薛定諤方程式及考察它的最簡單應用，幾乎完全限於一度的問題。這樣，本卷頗有完整性，而對於某些類型的讀者有獨立的興趣，在第二卷中則更系統地敘述量子力學的基礎，和它在原子外圍電子的結構上的應用；差不多第二卷的一半專論原子核及宇宙射線。

現在，和第一版發刊時一樣，我當然明確地理解到編纂原子物理學教科書這個任務的困難性，原子物理學是現代物理學的最年青最重要而且也是最難的部分。

‘原子物理學’的第一版迅速地獲得了廣大範圍的讀友。願相信在第二版發行後這範圍能更加擴大。這將是對於作者為了編書所耗費的不小辛勞的最好獎勵。

莫斯科，一九四八年九月

Э. 史包爾斯基

第一版序文摘錄

近代的原子物理建築在所謂‘經典物理學’的堅固基礎上。沒有足夠的牛頓的和拉格朗日的力學智識，企圖瞭解量子力學中任何一點；或是不先熟悉麥克斯韋—洛倫茲的電磁理論而要研究輻射的量子理論問題，都是沒有希望的。另一方面，量子力學的數學方法廣泛地利用在解振動理論的問題和其他經典的數學物理問題時作出的方法。雖然因此為原子物理的認真學習所需訓練的性質已十分確定地指出，但必須估計到在理論物理，特別是理論力學的數學實踐中，原子物理的這些需要，遠非經常充分顧到的。為了盡可能地免去讀者在各書中找尋參考的必要，並且在那些書中，所求材料也還不是合乎所考情況需要的形式，在本書中引進相當廣泛的預備性質的一章‘原子結構與經典物理’。

學。對於大多數讀者，這一章想必將是很有用的，其他讀者也可以利用它作為參考。此外，在各頁的註文裏，指明各參考書，在這些書中可以獲得對於各個問題較詳細的智識，熟悉這些參考是瞭解本書教材所必要的。

本書的另一須專為聲明的特點是對於實驗的重視。沒有一個地方我是限於實驗數據的簡略表述，有如在理論物理書中慣常是那樣做的，而我描寫，這些數據怎樣得來，並處處力求給必須處理的數量關於數量級的觀念。

在材料的選擇和編排中，必須克服大的困難。如所熟知，專家們關於講原子物理時必須保持歷史發展次序的意見尚不一致。在理論家中，相當普遍的見解認為對於量子力學的敘述，一般適宜於拋棄歷史的次序而作純粹邏輯的敘述，或多或少是用教條式的方法。雖然我並不認為，在教科書中應該把理論發展的全部細節表明，特別是那些已經失去實際興趣的，——完全和歷史割斷，我看是不正確的，無論如何，從教學法觀點看是這樣的。因此在講絕對黑體輻射的第六章中闡明了十九世紀與二十世紀交接年代經典物理學的災難的原因，而在第八章中作一簡短的玻爾理論的敘述，它在目前還是（和原子的矢模型）實驗工作者的一個重要幫助，並指出為什麼此理論是有缺陷的。我認為，祇有這樣才可以使學生相信，量子力學所引導到的和日常觀念間的決裂的不可避免。

許多量子力學問題的闡明不可避免地要用到繁重的數學工具。不願已成的慣例——把計算略去，我足夠詳細地引用數學的計算。這點使不得不把完全同樣的辭句常常重複說出，類似‘我們代入’，‘我們微分一下’等等，而令敘述帶有一些拙笨的性質。但是，首先為讀者的興趣着想，我安心地放棄了過分照顧文體的美觀。

把所有計算完全地導出，不言而喻是不可能的，並且也將是教學上的大錯。在讀者的分上還留着足夠的工作量，但高年級的大學生在類

似的書的研究中已有經驗，知道必須手裏拿着鉛筆讀書的。雖然，盡人皆知的，開始研究量子力學的主要困難，並不在數學上而在題目本身的主旨：在微觀系統中進行的現象的定律的極端特殊性，不慣常性和沒有直觀性。我力求考察具體例子，用圖示及數字的數據，以這些方法輔助讀者；我不辭艱辛地使敘述成為最易瞭解，只要事實上許可與我的能力所及的話。

當然，我遠不敢自信，我已成功地克服了一切教學上的、邏輯上的及數學上的困難，這些困難因題目的新穎及缺乏已經累積的健全教學傳統而大大地加深。因此，對於一切有關希望改進的指示，我將十分地感謝。

莫斯科，一九四四年

3. 史包爾斯基

目 錄

第四版序

第二版序

第一版序文摘錄

第一章 電子的電荷及質量	1
§ 1. 電子的發現	1
§ 2. 電子電荷的測定	2
§ 3. 密里根實驗的實際進行	4
§ 4. 電子在電場及磁場中的運動	9
§ 5. 在縱的靜電場中的電子	14
§ 6. 測定荷質比的實驗方法	16
§ 7. 用雙電容器法測定電子的荷質比	18
§ 8. 用縱磁場聚焦法測定電子的荷質比	20
§ 9. 帶電粒子注的聚焦和單色化	22
§ 10. 電子的質量和速度的關係	26
§ 11. 電子的質量	32
第二章 原子、同位素	37
§ 12. 引言	37
§ 13. 門得雷葉夫的元素週期系統	37
§ 14. 原子的確實質量的測定，拋物線方法	45
§ 15. 質譜儀	48
§ 16. 具有雙聚焦作用的質譜計與質譜儀	55
§ 17. 同位素的質量與成分百分數	60
§ 18. 利用基於擴散的各種方法以分離同位素	62
§ 19. 利用熱擴散方法分離同位素	68
§ 20. 利用電磁方法分離同位素	73
§ 21. 利用分餾及交換反應的方法分離同位素	77
§ 22. 利用離心方法分離同位素	79
§ 23. 氫的重同位素(重氫或氘)及重水的產生	81
第三章 原子的核型構造	86
§ 24. 粒子散射的有效截面	86

§ 25. 用電子探測原子	89
§ 26. α 粒子的性質	91
§ 27. α 粒子的散射理論	95
§ 28. 盧瑟福公式的實驗驗證	98
§ 29. 核電荷的測定	100

第四章 倫琴射線及其對於測定原子常數的應用 108

§ 30. 倫琴射線	108
§ 31. 倫琴射線的吸收	106
§ 32. 倫琴射線的散射	111
§ 33. 倫琴射線在晶體點陣中的衍射	113
§ 34. 倫琴射線衍射在實驗上的實施	119
§ 35. 倫琴譜線的波長測定	124
§ 36. 倫琴射線的光譜	126
§ 37. 莫塞萊定律	129
§ 38. 倫琴射線波長的絕對測定	133
§ 39. 阿伏伽德羅常數與電子電荷的測定	136
§ 40. 電子的荷質比	139

第五章 原子的結構與經典物理學 141

A. 經典力學與原子結構	141
§ 41. 原子模型	141
§ 42. 力學中的能量守恆定律	141
§ 43. 勢能曲線	145
§ 44. 線譜振子	148
§ 45. 振動的複數表示	152
§ 46. 頻率譜的展開	154
§ 47. 有心力。極坐標中的動能	159
§ 48. 在有心力場中的運動	161
§ 49. 開普勒的問題	162
§ 50. α 粒子在原子核的場中	168
§ 51. 折合質量	170
§ 52. 廣義坐標。系統的狀態	173
§ 53. 拉格朗日的函數。拉格朗日的方程	174
§ 54. 拉格朗日方程在有心力場中運動問題上的應用	177
§ 55. 廣義衝量	180

§ 56. 哈密頓的正則方程	182
§ 57. 哈密頓函數的物理意義	184
§ 58. 循環坐標	187
§ 59. 泊松括號, 守恆定律	189
§ 60. 在電磁場中的運動	193
§ 61. 高速運動的質點的力學	199
B. 電磁輻射的經典理論	205
§ 62. 發光的基元中心	205
§ 63. 線振子的電磁輻射	205
§ 64. 全部的與平均的振子的輻射	209
§ 65. 非諧振子的電磁輻射譜	211
§ 66. 振動的減幅	213
§ 67. 輻射阻力	215
§ 68. 傅里葉積分和連續譜	219
§ 69. 譜線的自然寬度	223
§ 70. 非週期過程的頻率譜展開的其它例子	225
§ 71. 原子的行星式的模型	230
§ 72. 軌道的磁矩和拉莫爾定理	231
§ 73. 塞曼效應	234
§ 74. 塞曼效應, 一般的情形	237
第六章 絕對黑體的輻射與能量子的假設	241
§ 75. 經典物理與熱輻射問題	241
§ 76. 空腔中的平衡的輻射	244
§ 77. 克希霍夫定律	246
§ 78. 絕對黑體的輻射規律	248
§ 79. 熱輻射定律的實驗研究	250
§ 80. 能量按自由度的均分定理	252
§ 81. 瑞利-金斯公式	255
§ 82. '紫外光的災難'	260
§ 83. 普朗克公式	262
§ 84. 能量子的假設	264
第七章 原子的能級	269
§ 85. 原子的行星模型和玻爾的量子假設	269

§ 86. 夫爾克與赫芝的實驗	270
§ 87. 彈性的碰撞	274
§ 88. 非彈性的碰撞, 臨界電勢	276
§ 89. 實驗方法的改善	278
§ 90. 全部激發級的同時測定	279
§ 91. 電離電勢的測定	282
§ 92. 受激原子的輻射	285
§ 93. 自發的輻射	287
§ 94. 被迫的輻射和吸收	290
§ 95. 愛因斯坦的普朗克公式的推導	292
第八章 光譜線系與氫原子的能級	295
§ 96. 巴耳末系	295
§ 97. 賴曼、帕邢與其他光譜線系 廣義的巴耳末公式	297
§ 98. 光譜項, 并合原則	300
§ 99. 圓周軌道的量子化	302
§ 100. 波爾理論	305
§ 101. 上述理論的應用, 氫的重同位素的發現	309
§ 102. 畢克林系與類氫離子的光譜	312
§ 103. 關於電子的荷質比的光譜學測定	314
§ 104. 能級圖	316
§ 105. 氫原子的邊界連續光譜	317
§ 106. 類氫原子按照波爾、索末菲的量子化	318
§ 107. 對應原理	327
§ 108. 波爾理論的危機	332
第九章 光量子	334
§ 109. 光場的起伏現象	334
§ 110. 光電效應與愛因斯坦方程	340
§ 111. 愛因斯坦方程的實驗驗證	343
§ 112. 連續倫琴光譜的短波限	346
§ 113. 普朗克常數的準確測定	347
§ 114. 表現光的粒子性質的其他實驗	349
§ 115. 光流的起伏現象	351
§ 116. 倫琴射線的散射(波動理論)	354
§ 117. 康普頓效應	359

§ 118. 康普頓效應的初步理論.....	361
§ 119. 反衝電子.....	366
§ 120. 散射的基元動作與守恒定律.....	369
§ 121. 守恒定律適用於散射的基元動作的實驗證明.....	371
第十章 波和粒子	375
§ 122. 緒論.....	375
§ 123. 均勻媒質中的平面單色波.....	375
§ 124. 波動方程.....	378
§ 125. 平面波的疊加.....	380
§ 126. 波包.....	382
§ 127. 相速度和羣速度.....	386
§ 128. 粒子和波的平行性、光的折射.....	389
§ 129. 粒子和波的平行性、多普勒效應.....	393
§ 130. 粒子和波的平行性、光柵的衍射.....	397
§ 131. 德布羅意假設.....	398
§ 132. 德布羅意波的性質.....	400
§ 133. 德布羅意假設的實驗驗證、布喇格法.....	403
§ 134. 電子波的折射和金屬的內電勢.....	408
§ 135. 德布羅意假設的實驗驗證、勞厄法和德拜、謝樂法.....	411
§ 136. 分子流的干涉現象.....	417
§ 137. 波包和粒子.....	418
§ 138. 德布羅意波的統計解釋.....	420
§ 139. 測不準關係.....	422
§ 140. 微粒的位置和動量的確定.....	425
§ 141. 測不準關係的錯誤解釋.....	431
§ 142. 測不準關係和因果律.....	435
第十一章 薛定諤方程式	441
§ 143 薛定諤方程式及其解答的物理意義.....	441
§ 144. 勢壘的反射和透入.....	448
§ 145. 一定閾度的勢壘.....	458
§ 146. 絃的振動.....	463
§ 147. 勢箱中的粒子.....	469
§ 148. 在勢阱中的電子.....	474
§ 149. 線性諧振子.....	480

§ 150. 線性振子的正常狀態和受激狀態.....	486
§ 151. 耦合振子, 范德瓦耳斯力.....	491
§ 152. 三維勢箱中的粒子.....	504
附錄	510
I 平均值的計算.....	510
II 質量和速度關係公式的推導.....	514
III 塞曼效應的經典理論.....	518
IV 起伏的均方值的公式.....	520
V 在方形勢阱中的粒子.....	525
VI 振子本徵函數的正交性和歸一化.....	528

譯名對照表

第一章 電子的電荷及質量

§ 1. 電子的發現

電荷不連續的結構的發現是法拉第電解定律的結果。讓我們把引到這個發現的推斷過程，回想一下。

根據法拉第定律，如將相同的電量通過不同的電解質，則自單價離子的溶液分解出的物質的量與離子的原子量成正比。如果電量恰好能分出一克原子的某種離子（即是物質質量的克數等於它的原子量，例如 107.88 克的銀，35.45 克的氯等），那麼在任何其他含有單價離子的電解質中，它也分出一克原子的離子。因為電解質中的電流是由離子的運動所引起，所以我們可以表述已確立的事實，斷言在任何一克原子的單價離子本身永遠帶有相同的電量，它和這些離子的本質沒有關係。這個電量叫做法拉第常數 F ，等於 96491 庫倫或 2.392×10^{14} 絕對靜電單位。如果現在把電流通過雙價離子的溶液，則發現一個法拉第的電荷被半克原子的二價離子攜帶着，而在三價的電解質中是被三分之一的克原子。或者，換句話說，一克原子的雙價離子本身帶有兩倍的法拉第電荷，而一克原子的三價離子帶有三倍。因為從另一方面，根據阿伏伽德羅定律，一克原子的任何物質永遠含有同量的粒子數 N ，又因為我們有完全的根據可以假定一克原子所帶的全部電荷是均勻地分佈在所有這些 N 個粒子中，所以每個單價離子所帶的電荷將有完全確定的數值 e ，等於：

$$e = \frac{F}{N}. \quad (1.1)$$

每個雙價離子所帶的電荷是：

$$2e = \frac{2F}{N}.$$

一般地說， k 價離子則為：

$$ke = \frac{kF}{N}.$$

所以，我們見到不同離子本身可以帶有 $e, 2e, 3e, \dots$ 的電荷，但並不遇到帶有等於 $1.5e$ 或 $2.5e$ 的離子。由此推出的結論，在亥姆霍茲為紀念法拉第所發表的演說詞中，特別清楚地被表示出：‘如果我們接受元素的原子的存在，則我們也不可避免以下的結論，——即正的和負的電量乃分成一定的基本數量，它們就作為電量的原子’。

氣體通電的研究對認識電的原子性質起了特別重要的作用，尤其是，稀薄氣體中放電的研究，和由此發生的陰極射線的性質的研究指出：自由狀態的，和一般物質的原子脫離聯系的負電原子，可以很容易地得到；對這些帶負電的電原子，歷史正給以電子的名稱。

§ 2. 電子電荷的測定

用尋找個別粒子的電荷的方法來直接證明電荷的分立性，及首先準確地測定電子電荷的數值，是在 1911 年被密里根完成的。在 1912 年 A. Ф. 越飛 (Иоффе) 用和密里根類似的方法，完成了測定由光的作用而放出的電子 (光電效應) 的電荷。

密里根所用的實驗方法，在於直接測量很小油滴的電荷。讓我們想像這小油滴是在水平裝置着的電容器的極板之間。如果在電容器的極板上沒有施以電場，則油滴會自由下落，由於油滴的線度甚小，它將以等速下降，因為重量 mg 是和根據斯托克斯定律等於

$$F = 6\pi\eta av_g \quad (2.1)$$

的空氣阻力相平衡；其中 v_g 是降落的速度， η 是空氣的黏滯係數， a 是小滴的半徑。

$$mg = 6\pi\eta av_p, \quad (2.2)$$

這一個條件使我們能夠計算小滴的半徑。實際上，我們用 σ 表示小滴物質的密度，用 ρ 表示空氣的密度。那麼當考慮到重量為 $mg = \frac{4}{3} \times \pi a^3 \sigma g$ 的球在空氣中下降時，根據阿基米德原理，還有方向向上等於 $\frac{4}{3} \pi a^3 \rho g$ 的力作用於其上。我們可以把方程式 (2.2) 重寫為：

$$\frac{4}{3} \pi a^3 (\sigma - \rho) g = 6\pi\eta av_p,$$

由此得：

$$a = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\eta^{1/2} v_p^{1/2}}{(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}}. \quad (2.3)$$

現在讓我們想像在電容器的極板上施以電勢差，選擇電勢差的值和方向，使受到電場作用的油滴上升。用 v_E 表示這個上升的速度，和下降時一樣，這個速度也是均勻地進行，我們可寫為：

$$\mathcal{E}e - mg = 6\pi\eta av_E, \quad (2.4)$$

其中 $\mathcal{E}$ 是在電容器內的電場強度。由 (2.2) 和 (2.4) 我們得到：

$$e = \frac{6\pi\eta a}{\mathcal{E}} (v_p + v_E),$$

或用第 (2.3) 式，以 v_p 來表示不能直接測量的油滴半徑 a ，

$$e = 9\sqrt{2} \frac{\pi v_p^{1/2} \eta^{3/2}}{\mathcal{E}(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} (v_p + v_E). \quad (2.5)$$

電容器極板間空氣的離子化（例如，用倫琴射線），可以改變油滴的電荷。如果那時電場的值仍和以前相同，則油滴的速度改變成 v'_E ；我們得到：

$$e_1 = 9\sqrt{2} \frac{\pi v_p^{1/2} \eta^{3/2}}{\mathcal{E}(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} (v_p + v'_E).$$

將此式和 (2.5) 相合，我們得到：

$$\Delta e = e - e_1 = 9\sqrt{2} \frac{\pi v_p^{1/2} \eta^{3/2}}{\mathcal{E}(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} (v_E - v'_E). \quad (2.6)$$

改變電荷幾次，我們可以對同一個油滴進行許多次的測量。

§3 密里根實驗的實際進行

用絕緣的承墊物 JJ 把仔細磨光了的電容器極板 P_1 和 P_2 (圖1) 支持在一定的距離，而且彼此準確地平行。上面的極板 P_1 的中部具有一小孔 O ；利用圓筒 C 中噴霧器擴散用來作實驗的小油滴，可通過 O

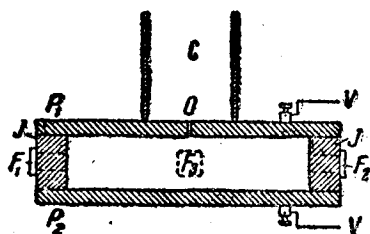


圖1. 密里根電容器的簡圖。

而進入電容器。我們知道，當液體分散時形成帶有電荷的小滴，所以在電容器中下降的已是帶電的小滴。一般地用經過 F_1 孔的弧燈把小滴照亮，而用通過 F_2 孔的顯微鏡來進行觀察。因為進行觀察的方向是和照亮的光束垂直，所以在顯微鏡的視場中，選出的小滴宛如在黑暗背景上的一顆小明星（在超倍顯微鏡中看就是這樣）。 F_2 窗作為光束的出口，因為倘光被器壁所吸收，光將在器內引起不均勻的加熱及氣流，因而會妨礙觀

察的方向是和照亮的光束垂直，所以在顯微鏡的視場中，選出的小滴宛如在黑暗背景上的一顆小明星（在超倍顯微鏡中看就是這樣）。 F_2 窗作為光束的出口，因為倘光被器壁所吸收，光將在器內引起不均勻的加熱及氣流，因而會妨礙觀

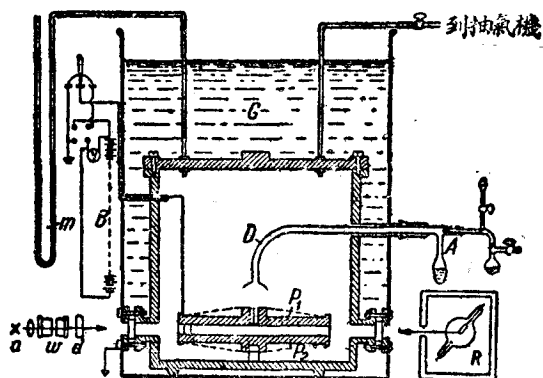


圖2. 密里根實驗裝置簡圖： a 是光源； w, d 是吸收熱射線的濾器。
 P_1, P_2 是電容器， AD 是供應油滴的噴霧器； G 是油池（恆溫器）； B 是電池； m 是流體氣壓計； R 是檢流計。