

高等学校教学用书

原子物理学

第二卷 第一分册

Д. В. 史包尔斯基著

高等教育出版社

中国科学院图书馆藏

量子物理学

第二版 第一分册

李正 沈元洪 编

高等教育出版社

13.82

高等学校教学用书



原子物理学

第二卷 第一分册

Э. Е. 史包尔斯基著
周同庆等译

高等教育出版社

53.82
~~11.222~~



原 子 物 理 学

第二卷 第二分册

Д. В. 史包尔斯基著

盧 鶴 紱 等 譯

高 等 教 育 出 版 社

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社(Гостехиздат)出版的皮包尔斯基(Д. В. Шпоэльский)著的“原子物理学”(Атомная Физика)第二卷的1951年版譯出。原書經苏联高等教育部审定为高等学校教学参考書。

第二卷中文譯本暫分为上、下兩册出版。上册包括第十二至十七章,內容講解量子力学基础,以及其在原子光譜方面的应用。

翻譯工作的分配情况如下:周同庆譯第十二、十三与十七章;厲世勋譯第十四章;許国保譯第十五章;謝希德譯第十六章。

原 子 物 理 学

第二卷 第一分册

Д. В. 皮包尔斯基著

周同庆等譯

高等教育出版社出版(北京市东城区内务部街7号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第4号)

商务印书馆上海厂印刷 新华书店发行

统一书号18010·369 开本850×1168 1/32 印张105/16

字数245,000 印数8,401—10,400 定价(8) 1.20

1958年2月第1版 1959年1月上海第4次印刷

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的史包尔斯基 (Э. В. Шполский) 著的“原子物理学” (Атомная Физика) 第二卷的 1951 年版譯出。原書經苏联高等教育部审定为高等学校教学参考書。

第二卷中文譯本暫分为两个分册出版。第二分册包括第十八章至第二十四章及附录, 內容講解原子核物理及宇宙射綫。

翻譯工作的分配情况如下: 江仁寿譯第十八及十九章; 盧鶴絨譯第二十、二十二、二十三章及附录; 許国保譯第二十一章; 謝希德譯第二十四章。

372/2704

原 子 物 理 学

第二卷 第二分册

Э. В. 史包尔斯基著

卢 鶴 絨 等 譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內東風寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 054 号)

上海新华印刷厂印刷 新华書店發行

統一書号 13010·672 开本 850×1168 1/32 印張 15 7/16

字數 371,000 印數 1—8,000 定价(4) 1.70

1959年10月第1版 1959年10月上海第1次印刷

第三版序

为了出第三版,“原子物理学”第二卷又作了重要的修改。但是,各部分所作的更改,性質不同。本書上半部(即第二卷第一分册部分)改变很多,已使叙述的方法改进并使其更加准确,但是对于本書的計劃和内容性質,不加改变。在上半部中,只添了一节,在这节里,对于氢原子能級的移动这样一个有趣而又原則上重要的問題,作了簡短的討論。

本書的后半部(即第二卷第二分册)專門講原子核,修改得更深入。其中章节的次序,各章中材料的分布及叙述方法都有所改变。我完全沒有这样嘗試,在本書中添入許許多多的最新事实:物理学的这个領域發展得如此迅速,使得这种任务几乎不能实现。修改的目的主要是將材料在邏輯性上組織得更严密些,并在这部書的初淺性質所允許的条件下,改进它的叙述方法。講到新数据的采用,那些最重要的新事实(超速粒子的核反应,介子的新形式及它們之間的相互轉变等等)自然也要載在此書中。第二十四章“宇宙綫”,仍如前一版那样,由 A. O. 伐森貝尔格整理。出版社編輯 B. A. 雷希考夫采夫对于我的帮助也很大,衷心表示感謝。

作者希望“原子物理学”第二卷的新版,在很大程度上能滿足許多开始研究近代物理学这个最重要的領域的苏联讀者的要求。

В. 史包尔斯基

莫斯科,八月,一九五一年。

目 录

第三版序	5
------------	---

第十二章 量子力学基础

§ 153. 引言.....	1	§ 164. 力学量的某些确定数值的几 率.....	30
§ 154. 线性算符.....	2	§ 165. 平均值.....	33
§ 155. 线性算符的本征值和本征函 数.....	6	§ 166. 计算平均值的例子.....	36
§ 156. 自轭算符.....	10	§ 167. 公共的本征函数.....	38
§ 157. 自轭算符的本征函数的正交 性.....	12	§ 168. 海森伯的不等式.....	42
§ 158. 按照正交函数的展开.....	14	§ 169. 一般的薛定谔方程.....	45
§ 159. 波函数.....	18	§ 170. 几率的密度和流量.....	49
§ 160. 叠加原理.....	19	§ 171. “纯态”与混合态.....	52
§ 161. 量子力学的基本算符.....	20	§ 172. 定态.....	56
§ 162. 量子化.....	25	§ 173. 爱伦费斯脱的定理.....	58
§ 163. 自由粒子.....	27	§ 174. 运动方程.....	65
		§ 175. 守恒定律.....	69

第十三章 在有心力场中的运动

§ 176. 动量矩.....	74	§ 183. 类氢原子的正常态.....	96
§ 177. 动量矩的性质.....	77	§ 184. 开普勒问题。一般情形	103
§ 178. 动量矩平方的本征函数和本 征值.....	81	§ 185. 价电子的模型.....	114
§ 179. 动量矩投影算符的本征函数 和本征值.....	84	§ 186. 碱金属的光谱线系.....	120
§ 180. 在有心力场中各状态的描写	85	§ 187. 在有心力场中的两个电子.....	127
§ 181. 空间量子化.....	89	§ 188. 有关简单(非简并性的)本征 值的微扰理论.....	130
§ 182. 圆形的表示.....	91	§ 189. 氢原子的正常态.....	134

第十四章 辐射

§ 190. 变更常数法.....	139	§ 194. 玻尔磁子.....	161
§ 191. 光的吸收与发射.....	142	§ 195. 在磁场中的电子.....	165
§ 192. 爱因斯坦系数的计算.....	148	§ 196. 简单塞曼效应理论.....	168
§ 193. 选择定则.....	152		

第十五章 电子的自旋

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| § 197. 旋磁电子的假设..... 172 | § 206. 氢原子能级的位移..... 211 |
| § 198. 斯坦恩和盖拉赫实验... 175 | § 206. 咸金属的双重线..... 213 |
| § 199. 磁性机械效应..... 178 | § 207. 总动量矩的量子数..... 214 |
| § 200. 自旋与谐振..... 180 | § 208. 反常塞曼效应..... 218 |
| § 201. 相对论性的二级波方程 184 | § 209. 反常塞曼效应的理论. 弱磁
场..... 219 |
| § 202. 狄喇克方程..... 187 | § 210. 反常塞曼效应的理论. 强磁
场..... 226 |
| § 203. 电子的本征磁矩和自旋的存
在..... 191 | |
| § 204. 精细结构的公式..... 200 | |

第十六章 多电子的原子

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| § 211. 氢的光谱. 仲氢与正氢 220 | § 219. 原子的磁性..... 265 |
| § 212. 交换简并..... 231 | § 220. 等电子离子的光谱..... 268 |
| § 213. 氢的问题..... 237 | § 221. 门捷列夫周期系统理论 271 |
| § 214. 一极近似的能量..... 242 | § 222. 门捷列夫元素系统的个别周
期的构造..... 275 |
| § 215. 泡利原理..... 246 | § 223. 伦琴射线谱..... 280 |
| § 216. 氢的基态和三重态..... 251 | § 224. 伦琴谱的能级略图..... 282 |
| § 217. 周期表中第二类原子的光谱
..... 256 | § 225. 伦琴能级的直接测定... 287 |
| § 218. 复杂光谱的某些规律性 263 | |

第十七章 受激的原子

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| § 226. 光致激发与共振荧光... 291 | 振现象..... 302 |
| § 227. 多级激发..... 294 | § 232. 受激态的存在时间..... 306 |
| § 228. 热能激发..... 297 | § 233. 能级的宽度. 自电离..... 309 |
| § 229. 第二种碰撞..... 298 | § 234. 光谱线的强度..... 313 |
| § 230. 敏化荧光现象..... 299 | § 235. 亚稳状态..... 316 |
| § 231. 第二种碰撞传递能量时的共
同现象..... 302 | § 236. 禁戒跃迁..... 321 |

目 录

第十八章 原子核的一般特性

§ 237. 某些預备知識.....	325	§ 244. 結合能量.....	358
§ 238. 核的自旋.....	332	§ 245. 結合能量的半經驗公式.....	367
§ 239. 核的自旋和統計法.....	335	§ 246. 基本粒子.....	374
§ 240. 核的磁偶極矩.....	339	§ 247. 氘核.....	377
§ 241. 核的四極矩.....	349	§ 248. 氘核的理論.....	381
§ 242. 核的壽命和半徑.....	350	§ 249. 核力对于自旋的依賴.....	388
§ 243. 核的中子-質子构造.....	354	§ 250. 核力的本質.....	389

第十九章 核物理学的实验方法

A. 快速粒子的观测和计数方法

§ 251. 粒子计数法.....	397	查.....	406
§ 252. 快速粒子径迹的照相。中子的值			

B. 带电粒子的加速器

§ 253. 静电发电机.....	411		421
§ 254. 迴旋加速器.....	414	§ 256. 同步加速器及穩相加速器...	430
§ 255. 电子的加速。电子迴旋加速器...		§ 257. 綫型加速器.....	435

第二十章 核反应

§ 258. 核反应的一般特征.....	439	§ 264. 核俘获粒子.....	462
§ 259. 反应能的确定.....	442	§ 265. 能級的寬度及共振.....	464
§ 260. 能量守恒定律及动量守恒定律的 同时应用.....	445	§ 266. 中子所致的核反应.....	471
§ 261. 有效截面.....	450	§ 267. 質子及氘核所致的反应.....	474
§ 262. 組合核.....	453	§ 268. α 粒子所致的反应.....	481
§ 263. 核作为量子力学的体系.....	457	§ 269. 超高能的核反应.....	484
		§ 270. 核的光致裂变.....	489

第二十一章 放射性

A. 放射性变化的规律

§ 271. 放射过程的一般特性.....	492	§ 274. 遞次变化的理論.....	501
§ 272. 放射蜕变的簡單定律.....	494	§ 275. 放射性的單位.....	508
§ 273. 放射蜕变定律的統計性.....	497	§ 276. 热效应.....	509

§ 277. 放射族.....	512
-----------------	-----

B. 放射性辐射与物质的相互作用

§ 278. α 粒子的射程.....	516		530
§ 279. β 粒子的射程和能量.....	523	§ 282. 正电子的性质和狄喇克理论.....	533
§ 280. γ 射线的吸收和散射.....	527	§ 283. 电子偶的形成.....	536
§ 281. 在 γ 射线的吸收中正电子的产生.....			

C. 放射变化的类型

§ 284. α 蜕变.....	542	§ 290. 正电子放射性与互俘获.....	564
§ 285. 伴随 α 蜕变的 γ 射线。原子核能级.....	545	§ 291. 简单的和复杂的 β 能谱.....	569
§ 286. β 蜕变.....	549	§ 292. 稳定的同量异位素.....	571
§ 287. β 射线谱.....	550	§ 293. γ 辐射.....	572
§ 288. 中微子.....	553	§ 294. γ 射线的内转换.....	577
§ 289. 容许的和禁戒的 β 过程.....	561	§ 295. 同量异位素的跃迁.....	584

第二十二章 中子

§ 296. 中子的发现.....	590	§ 300. 慢中子的吸收及散射.....	605
§ 297. 中子的质量、自旋及磁矩.....	592	§ 301. 中子衍射.....	614
§ 298. 中子源.....	596	§ 302. 中子的一些光学性质.....	622
§ 299. 快中子的衍射性散射.....	599		

第二十三章 原子核的分裂与原子能的利用

§ 303. 重原子核分裂的发现.....	625	§ 310. 超铀元素.....	648
§ 304. 原子核分裂的理论.....	631	§ 311. 核的链式反应.....	654
§ 305. 分裂的激活能.....	635	§ 312. 减速剂的应用。核反应器(炉).....	658
§ 306. 自发分裂.....	640		658
§ 307. 实现分裂的各种方法.....	641	§ 313. 铀的产生。核能的应用.....	664
§ 308. 核分裂的产物.....	643	§ 314. 在大自然中核能的作用.....	668
§ 309. 在分裂中解放的中子.....	645		

第二十四章 宇宙射线

§ 315. 引言.....	676	§ 321. 簇射.....	703
§ 316. 基本的实验数据.....	677	§ 322. 高速粒子和物质的相互作用.....	710
§ 317. 地球磁场对初级宇宙射线的作用(地磁效应).....	685	§ 323. 级联簇射的形成.....	713
§ 318. 电离能量损失.....	694	§ 324. 软性和硬性部分.....	716
§ 319. 用威尔逊云室和照像片观测高速带电粒子.....	697	§ 325. 介子.....	718
§ 320. 正电子的发现.....	704	§ 326. μ 介子的性质.....	722
		§ 327. μ 介子寿命的测量.....	726
		§ 328. 介子和核的相互作用.....	733

§ 329. π 介子的發現.....	735
§ 330. 在實驗室的加速器中 π 介子的人 為製造.....	739
§ 331. 带电 π 介子的質量和壽命...	741
§ 332. 中性介子.....	744

附 录

VII. 某些积分的計算.....	754
VIII. 两个电荷間相互作用的靜电能	755
IX. 似穩态及虛能級.....	759
X. 相对論电子的冲量守恒.....	766
XI. 偶極和四極輻射.....	769

§ 333. 其它类型的介子.....	746
§ 334. 初級宇宙射綫和原子核相互作用 时所产生的現象.....	747
§ 335. 宇宙射綫的起源.....	751

XII. 态的字称(偶性).....	773
XIII. 輕核質量表.....	777
XIV. 同位素表.....	781
XV. 重要的原子常数.....	807
XVI. 門捷列夫的元素周期表.....	812

第十二章 量子力学基础

§ 153. 引言

在第一卷中我們研究了量子理論的實驗基础,并建立了薛定諤方程,把它应用到最簡單問題的解算上。第一卷的內容,就这样構成关于原子物理学和量子力学的初步知識。現在我們將有系統地对于量子力学作較詳細的認識。

掌握量子力学体系是有几分困难的,这是由于它的异乎寻常的数学工具,以及和它相关的一些觀念的特殊性。讀者从前几章的學習中所獲得的知識,对于掌握这个体系是有幫助的。而且到一定的阶段,我們必然重新遇到薛定諤方程,但他已以不同的面貌出現。这个新的面貌,不仅从邏輯的和諧性的角度看是重要的,而且因为它使量子力学应用範圍的扩大和普遍化有了新的可能性。

在前章建立薛定諤方程时,我們受到微粒具有波性这一事实的指导。对于量子力学体系的構成,我們从不同的方面入手。

指导性的观点,將是使量子力学的合理組織尽可能接近經典力学的組織。所謂“經典力学”已在極大範圍的現象中証实了它的应用价值,即使从这一点看,也就已經可以理解这种企圖的原因了。此外,根据对应原理,我們預期,宏观体系的力学必須是微觀的量子力学的極限情形:在我們可以令普朗克常数等于零的那些情形中,量子力学的定律和結果必然自动地轉变为經典力学的定律。因此我們自然地預料,經典力学的基本觀念和方程对应于量子力学中的某些重要的觀念和方程。当然这將是新的觀念,比經

典力学的观念的普遍性更大,因为后者不适用于極小粒子的运动。

§ 154. 綫性算符

为了發展量子力学的体系,綫性算符的数学观念是必要的。假如应用某种法則从函数 $u(x_1, x_2, \dots)$ 得到那些同样的独立变量^①的另一函数 v , 那末可用 u 和相当的算符的乘积形式作为符号来表示。例如,假如函数 $v(x)$ 是经过求微商的手續从函数 $u(x)$ 得来,那末可以如此写:

$$v = \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} u. \quad (154.1)$$

在此情形下, $\frac{d}{dx}$ 是个算符,被应用到函数 u 上。第二个例子:假如函数 v 系以独立变量 x 乘 u 得来(此处 x 代表独立变量的任意一个),那末可以写成

$$v = xu = xu. \quad (154.2)$$

x 是用独立变量相乘时的算符。以 F 表示算符,我們將写

$$Fu = v. \quad (154.3)$$

假如任意两个算符 F 和 G 分別地作用在函数 u , 然后把結果相加,那末可把它写成式子

$$Fu + Gu = (F + G)u.$$

对調等式的左右兩端,

$$(F + G)u = Fu + Gu, \quad (154.4)$$

我們可把它看作是算符之和的定义。例如若 $F = x$ 及 $G = \frac{d}{dx}$, 則

$$(F + G)u = \left(x + \frac{d}{dx}\right)u = xu + \frac{du}{dx}.$$

① 在量子力学中引起兴趣的,还有另外一些算符,它們把一些变量(例如笛卡兒坐标)的函数換变为另外一些变量(例如分動量)的函数。但在本書中,我們將遇不到这样的算符。

算符的乘积是用来称呼这样的算符,它作用在函数 u 时,把它改变为函数 v ,而这个結果也可經相乘的算符因式連續作用的方法得到:假如算符 K 是 F 和 G 的乘积,那末它的意思就是

$$Ku = F(Gu). \quad (154.5)$$

例如,从所考察的算符 x 和 $\frac{d}{dx}$, 可以組成算符乘积

$$K = x \frac{d}{dx},$$

有如下的意义:

$$Ku = x \left(\frac{du}{dx} \right) = xu'.$$

同一算符繼續重复 n 次,是用算符的幂的形式写下

$$F^2u = F(Fu), \quad F^3u = F[F(Fu)],$$

$$\left(\frac{d}{dx} \right)^2 u = \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right) = \frac{d^2u}{dx^2}.$$

算符乘积的特点,在于它一般說来并不滿足換位定則(对易律),使得

$$FG \neq GF.$$

算符 x 和 $\frac{d}{dx}$ 正可作为不可对易的算符的例子。的确,

$$x \frac{d}{dx} u = xu', \quad (154.6)$$

$$\frac{d}{dx} (xu) = \frac{d}{dx} (xu) = u + xu', \quad (154.7)$$

所以 $\left(\frac{d}{dx} x - x \frac{d}{dx} \right) u = u \neq 0$ 。

相反的,算符 x_1 和 x_2 或算符 $\frac{\partial}{\partial x_1}$ 和 $\frac{\partial}{\partial x_2}$ 是可对易的算符,因为

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} u(x_1, x_2) = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_1} u(x_1, x_2) = \frac{\partial^2 u}{\partial x_2 \partial x_1} = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}.$$

在那些情形中,当算符 FG 作用的结果所得函数,和算符 GF 作用的结果,除差一负号外,完全相同,使得

$$FG = -GF,$$

则此两算符称为反对易的。

用常数 c 乘一算符,即算符 cF ,是在 F 作用于 u 的结果上乘以 c ,

$$(cF)u = cFu.$$

为了更好地掌握前面所叙述的,我们建议读者作下面的练习:

练习: 1. 证明算符 x 和 $\frac{\partial}{\partial y}$, y 和 $\frac{\partial}{\partial x}$, x 和 $\frac{\partial}{\partial x}$, 并一般地“独立变量”的和“对其它独立变量求微商”的算符都是可反对易的。

2. 证明,对函数 $\sin x$ 以算符 $\left[\left(\frac{d}{dx}\right)x\right]^2$ 作用的结果是 $\sin x + 3x \cos x - x^2 \sin x$,而以算符 $\left[x\left(\frac{d}{dx}\right)\right]^2$ 对那同一函数作用的结果是 $x \cos x - x^2 \sin x$ 。

3. 证明, (a) $\left(\frac{d}{dx} + 1\right)^2 u = \frac{d^2 u}{dx^2} + 2\frac{du}{dx} + u$,

因而

$$\left(\frac{d}{dx} + 1\right)^2 = \frac{d^2}{dx^2} + 2\frac{d}{dx} + 1.$$

$$(b) \left(\frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2}\right)^2 u(x_1, x_2) = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + 2\frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2},$$

因而

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2}\right)^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + 2\frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}.$$

4. 证明, $\left(\frac{d}{dx} + x\right)^2 u = \frac{d^2 u}{dx^2} + 2x \frac{du}{dx} + x^2 u + u$ 。

注意

$$\left(\frac{d}{dx} + x\right)^2 \neq \frac{d^2}{dx^2} + 2\frac{d}{dx} x + x^2,$$

为此计算前面不等式右边部分的算符作用于函数 u 的结果。

5. 証明,

$$(F+G)(F-G) = F^2 - G^2 - (FG - GF),$$

$$(F-G)(F+G) = F^2 - G^2 + (FG - GF),$$

所以因式分解

$$F^2 - G^2 = (F+G)(F-G)$$

只对于可对易的算符成立。

有些算符, 作用于任何函数后, 所得函数并無改变。例如, 从 (154.6) 和 (154.7) 我們得

$$\left(\frac{d}{dx} x - x \frac{d}{dx} \right) u = u.$$

这样的算符称为么正的或“算符單元”:

$$\frac{d}{dx} x - x \frac{d}{dx} = 1. \quad (154.8)$$

根据所叙述的势必得出, 我們可像代数运算那样处理算符, 但同时記住, 它們的乘积一般講是不可对易的, 因此必須严格地区别以算符从左边相乘[参考(154.6)]或从右边相乘[参考(154.7)]的两种情形。

例子 利用算符代数, 証明, 假如

$$FG - GF = 1, \quad (154.9)$$

那末

$$FG^2 - G^2F = 2G.$$

为了証明, 我們用 G 从左边乘 (154.9)

$$GFG - G^2F = G; \quad (154.10)$$

从右边相乘

$$FG^2 - GFG = G. \quad (154.11)$$

把(154.10)和(154.11)相加, 我們得

$$FG^2 - G^2F = 2G.$$

令 $F = \frac{d}{dx}$, $G = x$ 。根据 (154.8),