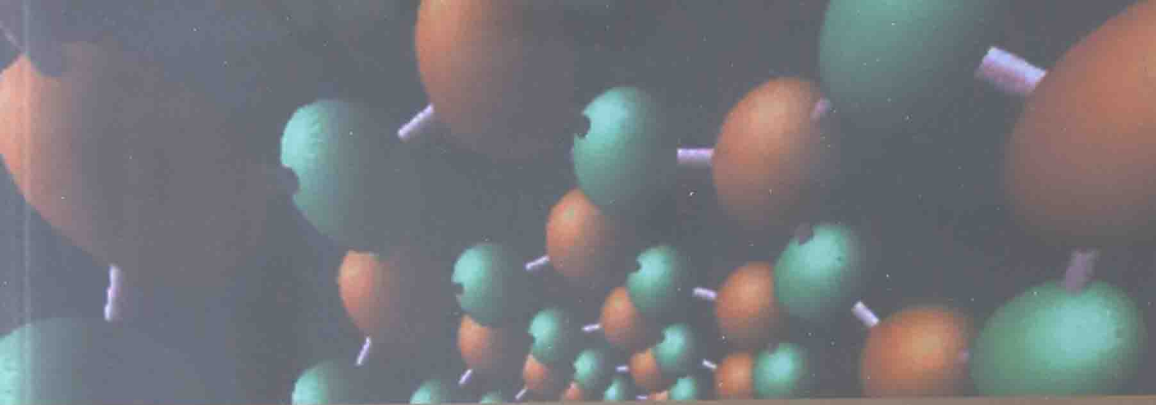




PHYSIQUE ATOMIQUE (2^e édition)

原子物理学 (下册)

2. L'atome : un édifice quantique

原子 ——一种量子构件

〔法〕B.卡尼亚克 张万愉 J-C. 裴贝-裴罗拉 著

王义道 译

郑乐民 张万愉 校



科学出版社

原子物理学

(下 册)

原子——一种量子构件

(法) B. 卡尼亚克 张万愉 J.-C. 裴贝-裴罗拉 著

王义道 译

郑乐民 张万愉 校

科学出版社

北 京

图字: 01-2015-1438 号

内 容 简 介

本书阐述近代原子物理学的基本原理和重要实验. 全书分为上、下两册. 上册论述原子和电磁辐射场的相互作用, 下册主要内容是建立在量子力学基础上的原子结构.

下册着重在量子力学基础上阐述原子内部结构, 并将有心势场中独立电子近似模型加以推广, 用以解释 X 射线谱和原子能级. 通过大量具体计算方法和光谱实验演示实例说明理论与实验的精确符合, 并将读者带向当代原子物理学的科研前沿.

本书在内容取舍和叙述风格上与国内多数同类教材显著不同, 独具特色. 密切联系应用实际, 贴近科研前沿, 启发创新思维. 本书是大学物理与相关应用学科高年级学生和研究生优良参考书. 特别对于从事原子分子光物理、量子光学等相关专业的学生与科研人员, 本书是一本很好的入门书.

© Dunod, Paris, 2007, second edition

All Rights Reserved.

The French edition, under the title of “*Physique Atomique: L’atome: un édifice quantique*”, is authored by Bernard Cagnac, Lydia Tchang-Brillet, Jean-Claude Pebay-Pérouta and published by Dunod Editeur S.A. (ISBN: 978-2-10-050461-9)

Simplified Chinese language translation rights arranged through Divas International, Paris
巴黎迪法国际版权代理 www.divas-books.com

图书在版编目(CIP)数据

原子物理学. 下. 原子: 一种量子构件/(法)卡尼亚克 (Cagnac, B.)等著;
王义遒译. —北京: 科学出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-03-043743-3

I. ①原… II. ①卡… ②王… III. ①原子物理学 IV. ①O562

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 051523 号

责任编辑: 周 丹 胡 凯 曾佳佳/责任校对: 胡小洁

责任印制: 李 利/封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 370 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

致中国同学

亲爱的中国同学：

我们这本原子物理教程的中译本是王义道教授与 Kastler-Brossel 实验室的研究组，特别是我的研究组和 Cohen-Tannoudji 研究组的诚挚友好关系的结晶。我相信，在阅读本书过程中你也会体验到这种诚挚友好的感情。

张万愉 (L. Tchang-Brillet) 帮助我们更新了已经过时的教程。她出生在中国，在巴黎的大学学习和从事科学研究的职业生涯之前，她在上海接受了小学和中学教育。她所拥有的中国和法国的双重文化，使她对本书的中文翻译工作充满热情。

本书将对构筑两种文化的桥梁做出贡献。

B. 卡尼亚克

序

本书适用于大学三、四年级学生,也适用于对量子物理基础有较高要求的工科学生。量子物理用来解释原子现象,是了解近代众多技术进展所不可缺少的知识。二年级末的学生,在掌握了大学第一阶段课程的情况下也可阅读上册的大部分内容。

本书取代 1971 年首次出版的凯格纳克 (Cagnac 的 1980 年中译本的原译名,此译本按法语发音改为卡尼亚克) 与裴贝-裴罗拉 (Pebay-Peyroula) 合著的原子物理旧教材。30 年来,就这个水准的大学教学而言,基本概念并没有深刻的变化,故这本新书仍可沿用旧教材中的大部分内容。然而,30 年中某些章节内容的重要性及其叙述方式则有了发展;此外,新近还完成了一些极其精彩的实验,其解释相对简单但可更好地说明基本概念。因此,本书对原教材做了较大的修改和完善,实际上它成了一本新著,希望它也有 30 年的生命力。

本书作者也有了变动。巴黎第六大学的张万愉 (Lydia Tchang-Brillet) 教授代替了让-克劳德·裴贝-裴罗拉 (Jean-Claude Pebay-Peyroula), 他在 12 年前已提前退休,不愿参与新著。但这本新著许多地方还是保留了他所写的内容,所以这里要衷心感谢他。

本书仍保留了原书的两册结构,以方便使用;但由于选择了新的叙述方式和扩充了某些章节的篇幅,本书便对两册内容重新做了分配。

分成这两册的基本理由与原来相同:上册仍是量子概念的入门介绍,它可在修读量子力学课程以前阅读,并为以后的研读作准备;而下册则相反,假定读者已学过介绍量子力学基本概念的课程(但还不具备深入的知识)。

因此,此上册主要描写三个基本物理量守恒定律的直接结果。这三个物理量是能量、动量和角动量(动量矩)。因此,上册将叙述原子与其外部环境交换能量、动量和角动量的所有物理现象。正是这些通常是量子化的交换引出了量子物理,并给它以实验诠释。

在这些交换中,原子的外部环境可能是运动电荷或磁场;而在多数实验中,则是与电磁辐射、光波或无线电波相互作用。因此,在上册中我们有以下考虑:① 将激光器或激光器中的受激发射现象放在重要地位;② 以具体的、尽可能简便的方式引入波的相干性概念,并由此出发来思考波与粒子(光子)的关系。同时,我们将考察引导物质粒子束的德布罗意波的干涉实验。对新近非常精彩的实验的描述使本册叙述十分丰满。

下册则不同, 我们将研究原子系统的内部结构, 我们的研究将基于量子力学. 相应的量子力学计算一般在经典著作已经详细处理了, 我们将引导读者复习这些内容. 不过我们将仅仅引述结果, 并试图从这里获得实验上的诠释. 在后面几页中读者可找到下册中处理的各种问题的提要.

本书的另一个目的是使读者自己能计算实验结果, 并给出近似处理所需要的数量级概念. 没有这种近似, 任何物理计算都会是很复杂的. 从这个考虑出发, 我们不能像理论家那样可以认为 $\hbar = c = 1$; 这也使我们面对令人烦恼的单位制问题. 法国学生习惯于使用 MKSA 有理化单位制. 所以我们将采用这种单位制. 然而许多文献和著作, 特别是原子物理学的, 常用高斯制. 因为能在不同单位制之间实现互相转换是很重要的, 我们在电磁学表述中引入了一个系数 κ , 其定义为 $\kappa^2 = \varepsilon_0 \mu_0 c^2$, 从而可以实现这种“转换”:

- 在 MKSA 制中, $\kappa = 1$, 它可简单地被忽略;
- 在高斯制 (电学单位用静电 CGS 制, 磁学单位用电磁 CGS 制) 中: $4\pi\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0/4\pi = 1$, $\kappa = c$ (这实际上已不是有理化形式了).

在附录 1 中, 给出了电磁单位制概要, 指出电磁单位表述的变化, 这是我们进行一切原子物理计算的出发点.

译者前言

对于比较熟悉中国原子物理学教材的读者来说,这本下册《原子——一种量子构件》的感觉似乎与上册《原子与辐射的电磁相互作用》不同。上册的多数内容对他们是比较陌生的,而下册则至少从目录标题上来看,多数还是比较熟悉或似曾相识的。但是,这种印象未必反映实际情况,只要稍为深入地读了这本书,就会发觉本书和国内多数原子物理学教材,甚至包括“近代物理学”的教材,在内容和叙述方式上还是有很多差别,是具有不少突出特点和优点的,所以很值得推荐给国内从事原子物理学教学的同行以及从事与原子物理学密切相关的学科教学和科学研究的学者与学生们。

在笔者看来,下册保持了上册“译者前言”中提到的两个显著特点,即一是鲜明地展示了原子物理学发展演变的历史径迹;二是联系实际,这里又含有两重意思:一是指教材的叙述不过于抽象和理论化,是从实际问题出发的;二是紧密结合物理学前沿进展和实际应用。对这两个特点,这里不准备像在上册前言中那样多加叙述,因为读过上册的人是会有具体体会的。这里需要指出的是,这本下册与国内多数原子物理学教材相比还有一个特点,即其内容的丰富性和深入性。这种丰富与深入又是和科学研究的实际和前沿密不可分的:一方面,在理论计算和实验处理的方法上,叙述了比较接近于研究工作实际所用的概念;另一方面,介绍了当下前沿研究的课题、方向和可能的应用。因此,本书有助于学生和学者比较容易和迅速地投入与原子物理学有关的科学研究第一线,较快掌握科学前沿的动向和内容。

这里随便举些例子。比如,本书所述的对原子结构的量子力学计算方法远较国内一般同类教材更为详细、具体和深入。当然本书是安排在学生具有一定的量子力学基础知识之后才能学习的。因此对于国内大学生来说,本书是一本介于本科与研究生水平的教材。正因如此,书中就能具体处理像弱、强和中等磁场下的原子能级,给出塞曼效应、帕邢-巴克效应和中等场效应,并能叙述和应用维格纳-埃克特定理来进行处理。这些内容对中国学生都是新的、陌生的。另外,像二能级原子量子相互作用的拉比振荡解、磁共振布洛赫微分方程的导出与求解等,都是原子物理学的重要基础,可是国内一般教材大多语焉不详,而本书则给出了详尽的说明。对于像X射线速度谱实验方法的描写、里德伯原子与电子偶素、 μ 子素、介原子等奇特类氢系统的介绍,对学生也是很有启发和引导性的。

还要指出,中国学生学习中的一个普遍弱点是对问题缺乏深度思考。在这方面,本书也提供了一些范例。比如,描述单个原子的参量与方程和描述原子集体的参量

与方程之间有什么样的联系, 这些联系是怎样建立起来的, 在什么条件下它们可以通用. 这些问题在理论和实际上都很有意义, 值得思考; 本书的处理很能引导读者来思索, 来回答, 从而促使学生对物理问题产生兴趣, 触发深度思考. 书中这类例子比比皆是.

应该说, 任何对物理问题的深度思索常会使人引发哲学思考, 尤其是对不少与量子力学相关的问题. 法国原子物理学派是十分重视哲学的, 这是他们的一个优点. 我们从所附的“深入阅读参考书目”中专门列有“量子物理的哲学思考”一栏 (共 5 本书) 就可看出来. 这对中国学生也是很有启示意义的.

从这套上、下两册原子物理学教材, 我们可以看到法国是非常重视原子物理学教学的. 这固然与近半个世纪以来原子物理学又出现了重大进展有关, 但更根本的是法国重视物理学的基础研究, 不以它们的分支是否对尖端技术和实际应用具有重要意义作为价值判断而有所取舍. 正因为这样, 法国就会出现具有世界影响的原子物理学派. 继 1966 年的 Kastler 和 1997 年的 Cohen-Tannoudji 之后, 同一大学与研究所的 S. Haroche 于 2012 年又因腔内电动力学和光子的无破坏检测等量子光学工作而获得诺贝尔奖. 从这里可以看到他们对物理学和原子物理学的贡献. 而本书作者正是这个学派的成员.

总之, 我们相信, 这是一本对我们十分有价值的教学参考书和科研入门指导书.

最后, 译者十分感谢郑乐民教授和本书原作者之一张万愉教授的仔细审校, 没有他们的大量工作和耐心劳动, 译文的质量就无法保证. 译者也感谢曾谨言教授对一些章节的审阅和讨论, 以及科学出版社编辑对本书出版所做的重要贡献.

王义道

2012 年 10 月

2015 年 1 月修订

附录 1 适用于各种单位制的电磁学公式汇编

所有公式都是有理化的, 但我们从与单位有关的系数 ε_0 , μ_0 和光速 c 出发, 引进一个系数 κ , 有

$$\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = \kappa^2$$

• 在 MKSA 单位制中, 有

$$\kappa = 1 \quad 4\pi\varepsilon_0 = \frac{1}{9 \times 10^9} \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \quad (\kappa \text{ 可忽略})$$

• 用 CGS 静电单位制中的电单位, 和 CGS 电磁单位制中的磁单位, 即在高斯单位制中:

$$\kappa = c \quad 4\pi\varepsilon_0 = 1 \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 1$$

场的定义:

$$\vec{f} = q\vec{E} + \frac{1}{\kappa}q\vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{洛伦兹力})$$

麦克斯韦方程组:

$$(I) \begin{cases} \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{\kappa} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad \text{一般解} \begin{cases} \vec{E} = -\nabla V - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \end{cases}$$

$$(II) \begin{cases} \nabla \times \vec{B} - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\kappa} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\mu_0}{\kappa} \vec{j} \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \end{cases}$$

若采用洛伦兹规范:

$$\nabla \cdot \vec{A} + \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\kappa} \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

由此可推得两个势的传播方程 (它们证实了 ε_0 , μ_0 和 κ 之间的关系):

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{A} - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\kappa^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\frac{\mu_0}{\kappa} \vec{j} \\ \nabla^2 V - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\kappa^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \rho \end{cases}$$

传播方程的普遍解是推迟势:

$$\vec{A}(t, \vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi\kappa} \iiint \frac{\vec{j}(t - r/c)}{r} dV$$

$$V(t, \vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(t - r/c)}{r} dV$$

静态 (稳恒) 情况:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi\kappa} \iiint \frac{\vec{j} \times \vec{r}}{r^3} dV \quad \text{或} \quad \frac{\mu_0}{4\pi\kappa} \int \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (\text{拉普拉斯定律}) \\ \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho \vec{r}}{r^3} dV \quad \text{或} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \vec{r}}{r^3} \quad (\text{库仑定律}) \end{array} \right.$$

dV 表示体积 $dx dy dz$.

所用符号表

拉丁字母

a	正弦函数的振幅 某种线度或长度 椭圆的半长轴 相干长度 a_c
A	磁矢势 正弦函数的振幅 傅里叶振幅 $A(\omega)$ 自发发射概率 A_{21} 原子质量数
A	原子质量 (在 CGS 制中近似等于 A , 在 MKS 制中近似等于 $A/1000$)
b	碰撞参量 某种长度
B	磁感应矢量, 通常称为磁场 (我们从不用磁场强度矢量 H) 受激吸收或发射概率 B_{12}, B_{21} 正弦函数的振幅
c	光速
C	库仑定律中的常数 [$W(r) = C/r$] 磁化率的居里常数 ($\chi_M = C/T$) 悬丝的扭转常量 ($\Gamma = C\alpha$) 电容
d	微分
d	距离 (例如网板之间的距离)
D	电感应矢量 概率密度 某种距离
D	单位横截面上的粒子束流量 ($N = DtS$)
e	元电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$
e	自然对数的底 $e=2.718$ (指数函数)

E	原子态的总能 (代数值) 电场矢量的模
$\mathcal{E}$	正弦电场振幅
f	某种函数 量纲为1的分数 焦距
$\mathbf{f}$	力矢量
$\mathbf{F}$	力系的和矢量
F	力矢量的模 某种函数
$\mathcal{F}$	统计函数 傅里叶变换
g	朗德因子 一次通过的增益
G	统计权重或简并度 总增益
h	普朗克常量 ($\hbar = h/2\pi$)
H	哈密顿算符
i	-1 的平方根, 虚数的底 计数指标 入射角
I	电流 转动惯量
$\mathbf{j}$	电流密度矢量 计数指标
J	原子总角动量量子数
k	玻尔兹曼常量 k_B 或 k 波矢量 $k = 2\pi/\lambda$ 整数
K	吸收系数 (光学厚度为 Kl) 比例系数
l	某种长度
L	发光率 某种长度 (例如腔长) 相干长度 L_c

	瑞利长度 $L = \pi\omega_0^2/\lambda$
$\mathcal{L}$	角动量或动量矩
m	某种质量
	电子质量 m_e
	磁量子数
M	某种质量 (例如原子、原子核等)
	磁化强度矢量的分量
$\mathcal{M}$	磁矩矢量的分量
n	单位体积中的原子数 (原子密度或布居数)
	主量子数
	计数指标
N	整数 (量纲一或每秒原子数)
	单位法线矢量
$\mathcal{N}$	阿伏伽德罗常量
O	坐标原点
p	动量矢量及其分量 (的数值)
	电偶极矩矢量
	计数指标
	能级布居数
P	功率
	电介质极化矢量
$\mathcal{P}$	抽运概率
q	粒子的电荷
	物体或电容器的电荷
	计数指标
Q	一个系统的电荷 (例如核、离子、电容器等)
	谐振腔或电路的品质因数
	原子束总流量 (每秒通过的原子数)
	热量
r	径矢, 两点间的距离
	圆或球的半径
R	径矢, 两点间的距离
	圆或球的半径
	氢原子光谱的里德伯常量
	理想气体常量 $R = \mathcal{N}k_B$

	镜面反射系数 R_A, R_B
	电阻
s	自旋量子数
S	某种表面
	粒子束或波束的横截面
t	时间或寿命
T	热力学温度
	周期
	光谱项
	相干寿命 T_c
$\mathcal{T}$	功
u	能量密度
	单位矢量
	旋转坐标系中磁化强度的横向分量
U	内能
	静电势
v	速度矢量的模
	旋转坐标系中磁化强度的横向分量
V	静电势或电动势
	速度矢量
	体积
w	微弱能量
	高斯光束的腰 w_0
	高斯光束 $w(z)$
W	某种能量; 特别是势能 $W(r)$
x, X	坐标
y, Y	坐标
z	坐标
Z	坐标
	元素的原子序数
	配分函数 (统计上的)

希腊字母

α	精细结构常数 $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$
	角

	单位长度的增益 $\alpha(\nu)$
	一种粒子的名称 (氢原子核)
β	玻尔磁子
	角
	一种粒子的名称 (放射性 β^+ 和 β^-)
γ	旋磁比
	一段电磁辐射的名称, 指 γ 射线
Γ	力矩, 或一个力系的合力矩
δ	微分, 增量
	激光器的平衡布居数差
Δ	拉普拉斯算符
	线宽 (频率或波长)
ε	与单位 ε_0 有关的常量 (在 CGS 制中 ε_0 由 $1/4\pi$ 代替)
	量纲一的相对介电常数 ε_r
	圆锥曲线的偏心率
	任意非常小量
η	量纲一的分数: 量子效率; 腔的填充因子
θ	角; 特别是球坐标中的维度
Θ	德拜温度
κ	与单位 $\kappa^2 = \varepsilon_0\mu_0c^2$ 有关的常量
	(在 MKSA 制中 $\kappa = 1$; 在 CGS 制中 $\kappa = c$)
λ	波长
Λ	康普顿波长 $\Lambda = h/mc$
μ	与单位 μ_0 有关的常量 (在 CGS 制中 $\mu_0 = 4\pi$)
	量纲一的相对磁导率 μ_r
	双体系统的约化质量
ν	频率
ϖ	压力
	概率
π	3.1416
	波的偏振记号 (偏振面与磁场平行)
ρ	单位频率间隔的能量密度 ρ_ν
	电荷密度
	密度
	径矢量的特殊值
σ	一种统计率的平均平方偏差

	相互作用有效截面
	圆偏振波的偏振记号; σ^+ 和 σ^-
Σ	求和符号
τ	时间常量 (例如寿命、弛豫时间等)
φ	角, 特别是球坐标中的经度
	正弦函数的相位
ϕ	归一化线形 $\phi(\nu)$
Φ	磁通量
	两个正弦函数之间的相位差
χ	角
	电极化率或磁化率
ψ	角
	粒子或原子的波函数
ω	转动的角速度 $\omega = v/R$
	正弦函数的角频率 $\omega = 2\pi\nu$
Ω	立体角
	宏观转动的角速度

目 录

致中国同学

序

译者前言

上册目录

附录 1 适用于各种单位制的电磁学公式汇编

所用符号表

第 11 章 有心势中无自旋的单个电子	1
11.1 引言, 复习	1
11.1.1 玻尔模型的描述	1
11.1.2 圆运动的特征参量	3
11.2 氢原子的量子研究, 库仑场	4
11.2.1 薛定谔方程	4
11.2.2 角向部分研究, 球谐函数	5
11.2.3 径向部分研究	8
11.2.4 主要结果, 能级	10
11.3 氢原子中电子出现的概率	12
11.3.1 归一化问题	13
11.3.2 径向概率	14
11.3.3 角向概率	16
11.4 与实验的比较	18
11.4.1 氢原子谱	18
11.4.2 类氢系统	20
11.5 非库仑有心势情况 (l 简并的解除)	26
11.5.1 贯穿轨道态与非贯穿轨道态	26
11.5.2 具有一个外层电子的原子的量子模型	27
11.5.3 对钠原子的应用	29
第 12 章 有心势中独立电子近似, 电子组态	32
12.1 近似的必要性	32
12.1.1 一个复杂原子中的各种相互作用	32
12.1.2 有心力场近似	33