

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТОМ IV

В.Б. БЕРЕСТЕЦКИЙ
Е. М. ЛИФШИЦ
Л. П. ПИТАЕВСКИЙ

КВАНТОВАЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

朗道

理论物理学教程 第四卷

量子电动力学 (第四版)

В.Б. 别列斯捷茨基 Е.М. 栗弗席兹 Л.П. 皮塔耶夫斯基 著 朱允伦译 庆承瑞校

高等教育出版社



ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТОМ IV

В.Б. БЕРЕСТЕЦКИЙ **КВАНТОВАЯ**
Е. М. ЛИФШИЦ **ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**
Л. П. ПИТАЕВСКИЙ

理论物理学教程 第四卷

LIANGZI DIANDONG LIXUE

量子电动力学 (第四版)

В.Б. 别列斯捷茨基 Е.М. 栗弗席兹 Л.П. 皮塔耶夫斯基 著 朱允伦译 庆承瑞校

俄罗斯联邦教育部推荐大学物理专业教学参考书

高等教育出版社·北京

图字：01-2007-0913 号

Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Учебное пособие для вузов в 10 томах

Copyright © FIZMATLIT ® PUBLISHERS RUSSIA, ISBN 5-9221-0053-X

The Chinese language edition is authorized by FIZMATLIT ® PUBLISHERS RUSSIA for publishing and sales in the People's Republic of China

图书在版编目 (CIP) 数据

理论物理学教程. 第4卷, 量子电动力学: 第4版 / (俄罗斯) 别列斯捷茨基, (俄罗斯) 栗弗席兹, (俄罗斯) 皮塔耶夫斯基著; 朱允伦译. -- 北京: 高等教育出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-04-041597-1

I. ①理… II. ①别… ②栗… ③皮… ④朱… III. ①理论物理学-教材②量子电动力学-教材 IV. ①O41②O413.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 277813 号

策划编辑 王超 责任编辑 王超 封面设计 王洋 版式设计 余杨
插图绘制 杜晓丹 责任校对 王雨 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 涿州市星河印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 40.25
字 数 760千字
插 页 1
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2015年3月第1版
印 次 2015年3月第1次印刷
定 价 109.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 41597-00



朗道（左）和栗弗席兹（右）

列夫·达维多维奇·朗道（1908—1968）理论物理学家、苏联科学院院士、诺贝尔物理学奖获得者。1908年1月22日生于今阿塞拜疆共和国的首都巴库，父母是工程师和医生。朗道19岁从列宁格勒大学物理系毕业后在列宁格勒物理技术研究所开始学术生涯。1929—1931年赴德国、瑞士、荷兰、英国、比利时、丹麦等国家进修，特别是在哥本哈根，曾受益于玻尔的指引。1932—1937年，朗道在哈尔科夫担任乌克兰物理技术研究所理论部主任。从1937年起在莫斯科担任苏联科学院物理问题研究所理论部主任。朗道非常重视教学工作，曾先后在哈尔科夫大学、莫斯科大学等学校教授理论物理，撰写了大量教材和科普读物。

朗道的研究工作几乎涵盖了从流体力学到量子场论的所有理论物理学分支。1927年朗道引入量子力学中的重要概念——密度矩阵；1930年创立电子抗磁性的量子理论（相关现象被称为朗道抗磁性，电子的相应能级被称为朗道能级）；1935年创立铁磁性的磁畴理论和反铁磁性的理论解释；1936—1937年创立二级相变的一般理论和超导体的中间态理论（相关理论被称为朗道相变理论和朗道中间态结构模型）；1937年创立原子核的概率理论；1940—1941年创立液氦的超流理论（被称为朗道超流理论）和量子液体理论；1946年创立等离子体振动理论（相关现象被称为朗道阻尼）；1950年与金兹堡一起创立超导理论（金兹堡—朗道唯象理论）；1954年创立基本粒子的电荷约束理论；1956—1958年创立了费米液体的量子理论（被称为朗道费米液体理论）并提出了弱相互作用的CP不变性。

朗道于1946年当选为苏联科学院院士，曾3次获得苏联国家奖；1954年获得社会主义劳动英雄称号；1961年获得马克斯·普朗克奖章和弗里茨·伦敦奖；1962年他与栗弗席兹合著的《理论物理学教程》获得列宁奖，同年，他因为对凝聚态物质特别是液氦的开创性工作而获得了诺贝尔物理学奖。朗道还是丹麦皇家科学院院士、荷兰皇家科学院院士、英国皇家学会会员、美国国家科学院院士、美国国家艺术与科学院院士、英国和法国物理学会的荣誉会员。



“朗道十诫”石板*

1958年苏联原子能研究所为庆贺朗道50岁寿辰，送给他的刻有朗道在物理学上最重要的10项科学成果的大理石板，这10项成果是：

1. 量子力学中的密度矩阵和统计物理学（1927年）
2. 自由电子抗磁性的理论（1930年）
3. 二级相变的研究（1936—1937年）
4. 铁磁性的磁畴理论和反铁磁性的理论解释（1935年）
5. 超导体的混合态理论（1934年）
6. 原子核的概率理论（1937年）
7. 氦II超流性的量子理论（1940—1941年）
8. 基本粒子的电荷约束理论（1954年）
9. 费米液体的量子理论（1956年）
10. 弱相互作用的CP不变性（1957年）

*Бессараб М. Я. Ландау: Страницы жизни. Москва: Московский рабочий, 1988.

叶甫盖尼·米哈伊洛维奇· 栗弗席兹 (1915–1985) 小传

A. Ф. 安德烈耶夫, A. С. 博洛维克-罗曼诺夫, В. Л. 金兹堡, Л. П. 戈里科夫, И. Е. 加洛辛斯基, Я. Б. 泽尔道维奇, М. И. 卡甘诺夫, Л. П. 皮塔耶夫斯基, Е. Л. 费因贝格, И. М. 哈拉特尼科夫 (俄文原载 *Успехи Физических Наук*, Том.148, вып.3, 1986, Март. 英文译文原载 *Soviet Physics Uspekhi* 29, 294–295, 1986. 译者为 J. G. Adashko)

苏联物理学在 1985 年 10 月 29 日因杰出理论物理学家叶甫盖尼·米哈伊洛维奇·栗弗席兹院士的去世而蒙受了重大的损失。

栗弗席兹 (Е. М. Лифшиц) 1915 年 2 月 21 日生于哈尔科夫。1933 年毕业于哈尔科夫工学院。1933—1938 年在哈尔科夫物理技术研究所工作, 自 1939 年起他在苏联科学院物理问题研究所工作直至生命结束。栗弗席兹在 1966 年被选为苏联科学院通讯院士, 1979 年被选为院士。

栗弗席兹的科学活动开始得很早。作为 Л. Д. 朗道院士的第一批学生, 他 19 岁就与朗道合作发表了一篇关于在碰撞中电子对产生理论的论文。这篇文章至今仍然没有失去意义, 它包含量子场论现代相对性协变技术的很多方法上的特征。特别是, 该文还透彻地考虑了推迟效应。

现代铁磁理论的基础是朗道-栗弗席兹方程, 该方程描述了铁磁体中磁矩的动力学。1935 年他关于此问题的一篇论文成为磁性现象物理学的最著名的论文之一。推导该方程的同时, 还发展了铁磁共振理论以及铁磁体磁畴结构的理论。

1937 年栗弗席兹在关于电子在磁场中的玻尔兹曼动力学方程的论文中发展了很多年以后 (20 世纪 50 年代) 在等离子体理论中广泛采用的漂移近似方法。

1939年他发表的关于在碰撞中氘离解的论文成为量子力学准经典近似方法应用的一个经典范例。

紧随Л. Л. 朗道院士的工作, 发展二级相变理论最重要的一步是栗弗席兹关于在此类相变中晶体的对称性即其空间群变化的论文(1941年)。多年以后, 该文的结果得到了广泛的应用, 并且以此为基础所创立的术语“栗弗席兹判据”与“栗弗席兹点”已成为现代统计物理必不可少的一部分。

栗弗席兹1944年发表的一篇论文在探测超流氦的一个重要物理现象(次声)方面起了决定性作用。该文表明, 次声可以由一个温度交变的加热器有效地激发。这正是两年后在实验中观察到次声所用的方法。

栗弗席兹在1954—1959年间对凝聚体之间相互作用的分子力理论开辟了一条崭新的途径。这个理论是建立在这些力是由于介质中电磁场的量子涨落与热涨落产生应力的表现这一深刻的物理思想的基础上的。沿着这个思路他发展了很优美普遍的理论, 其中相互作用力用电动力学材料性质(例如复介电率)来描述。栗弗席兹的这个理论刺激了很多研究并被实验证实。这项研究使他获得了1958年的罗蒙诺索夫奖。

栗弗席兹在现代物理的一个最重要的分支——引力理论作出了基本的贡献。他进入这个领域的研究是从1946年一篇关于爱因斯坦引力理论的宇宙解的稳定性的论文开始的。他将微扰区分为几个确定的类: 描写密度变化的标量, 描写涡旋运动的矢量, 以及描写引力波的张量。这个分类方法至今在宇宙起源的分析中仍有决定性的意义。此后, 栗弗席兹致力于解决极为困难的该理论奇异性的普遍性质的问题。经过多年的努力终于使他1972年在与B. A. 别林斯基以及И. М. 哈拉特尼科夫合作的一篇文章中对这个问题给出了完全的解, 这篇文章使该作者荣获1974年的朗道奖。他们发现奇异性有复杂的振荡特性并可以形象地表示为在空间的两个方向收缩, 又同时在第三个方向膨胀。收缩与膨胀按照一定的规律随时间变化。这些结果引起专家们巨大的反响, 根本上改变了人们关于相对论坍缩的观念, 并引出了一系列至今仍有待解决的数学物理问题。

栗弗席兹毕生的事业是著名的朗道-栗弗席兹《理论物理学教程》。他为这套教程工作了将近50年(《统计物理》的第一版写于1937年, 弹性理论的新版则是在他最后得病之前)。这套教程的绝大部分是由他和他的老师与朋友Л. Л. 朗道一起写成的。在一场汽车交通事故使得朗道不再能继续工作以后, 栗弗席兹和朗道的学生一起完成了这套教程的出版工作。以后, 他根据最新的科学进展继续修订已经写成的部分。即使在医院里, 他仍然和来访的朋友讨论教程中以后应该添加的论题。

这套理论物理学教程是闻名世界的。它被完整地翻译成六种语言。有的

卷翻译成十种以上的语言。1972年朗道与栗弗席兹由于该教程当时已出版的部分而荣获列宁奖。

《理论物理学教程》是栗弗席兹作为学者与教师的一个里程碑。这套教程教育了许多代的物理学家，现在仍在教育并将继续教育后代的物理学家。

作为一个多面手的物理学家，栗弗席兹还成功地研究了一些应用问题。他在1954年获得了苏联国家奖。

栗弗席兹将其巨大的劳动和精力奉献给了苏联科学期刊出版事业。从1946年到1949年以及从1955年直至去世他一直担任苏联《实验与理论物理杂志》(ЖЭТФ) 的责任主编。他对科学的忠诚，原则性以及极端细心极大地帮助了该杂志，并使其进入世界上最好的科学期刊行列。

栗弗席兹的一生完成了大量的工作。他将作为一个杰出的物理学家与学者留在我们的记忆里。他的名字将永远活在苏联物理学的历史里。

第三版序言

在《量子电动力学》目前的第三版中,对第二版中已经发现的一些错误和不妥之处进行了修订,并使有些文字更加确切。

我非常感谢对本书提出意见的读者。还要特别感谢 В. И. Коган, А. И. Никишов 和 В. И. Ритус。

Л. П. 皮塔耶夫斯基

1988年9月

第二版序言

《理论物理学教程》这一卷的第一版曾以《相对论性量子理论》的书名分两部分(1968年与1971年)出版。除基本内容——量子电动力学外,第一版还在一些章节里论述了弱相互作用理论和强相互作用理论的某些论题。现在看来包括这些章节是不适宜的。强相互作用和弱相互作用理论正在新的物理思想基础上飞快发展,这一领域内的变化非常迅速,因此,对这部分理论做系统论述为时尚早。由于这个原因,我们在这一版里只讲述量子电动力学,相应地我们改了本卷的书名。

这一版除对第二版做了大量校勘外,还做了一系列重要的增补,其中有:计算韧致辐射截面的算符方法,光子产生粒子对的概率和磁场中光子衰变概率的计算,高能条件下散射振幅渐近形式,强子对电子非弹性散射过程和电子-正电子对转变成强子。

关于符号。本书与本教程其余各卷一样,我们仍用戴“帽”的字母表示算符。对于四维矢量与矩阵矢量 γ^μ 的乘积(在本书第一版中用戴帽字母表示)没有引入专门的符号,这类乘积是很明显的。

遗憾的是,В. Б. 别列斯捷茨基未能参加这一版的修订,他于1977年去世了。但是上面所指出的增补有一部分是由我们三位作者早先共同拟定的。

我们诚恳感谢所有对本书第一版提出宝贵意见的读者。

我们要特别感谢 В. П. Крайнов, Л. Б. Окун, В. И. Ритус, М. И. Рязанов 和 И. С. Шапиро。

Е. М. 栗弗席兹, Л. П. 皮塔耶夫斯基

1979年7月

第一版序言 (摘录)

按照《理论物理学教程》的总体计划,这一卷专门讲述广泛含义的相对论性量子理论:即所有与光速有限性相联系的现象的理论,包括全部辐射理论。

理论物理学的这一部分内容现在还远没有完成,甚至在其赖以建立的物理原理方面也是如此,强相互作用和弱相互作用理论则更是如此。量子电动力学近二十年来尽管取得了辉煌的成就,但其逻辑结构仍不能令人满意。

在材料的选择方面,我们只考虑那些确信是足够可靠的成果。结果很自然,本书的大部分内容属于量子电动力学。我们力图给出现实的阐述,强调指出理论所采用的物理假设,而不去深入论证它,在理论发展的现阶段,这些论证任何情形下也纯粹只是形式上的。

在讨论理论的具体应用时,我们不想包罗数目巨大的所有有效效应,而只选择其中最基本的部分,附带给出包含更为详细的研究的原始文献。在进行冗长的一般计算时,我们常常略去一些中间步骤,但尽量指出所用方法上的一切新颖之处。

与本教程的其余各卷相比,本卷在阐述时假定读者有更高程度的学识水平。我们假定读者在学习理论物理学的过程中已经达到了量子场论的水平,而不需要给出预备性的材料。

本书是在我们的导师 Л. Д. 朗道没有直接参加的情况下写成的。但是我们力求遵循他对待理论物理的态度和方法,这种态度和方法是他经常教导我们并贯彻在本教程其余各卷中的。我们常常自问:朗道会如何处理这个或那个问题?以力求从我们与他多年的合作中获得激励和启发。

我们要感谢 В. Н. Байер,在编写 §90 和 §97 时他给了我们很大的帮助;我们还要感谢 В. И. Ритус 在 §101 的写法上所给予的巨大帮助。我们感谢帮助我们进行了若干计算的 Б. Э. Мейерович。我们还要感谢 А. С. Компанейц,

他给我们提供了 1959/60 学年度 Л. Л. 朗道在国立莫斯科大学讲量子电动力学时他自己的课堂笔记。

В. В. 别列斯捷茨基

Е. М. 栗弗席兹

Л. П. 皮塔耶夫斯基

1967 年 6 月

一些符号

四维符号

四维张量指标用希腊字母表示: λ, μ, ν, \dots , 它们的取值为 $0, 1, 2, 3$.

采用的四维度规为 $(+ - - -)$. 度规张量为 $g_{\mu\nu}$ ($g_{00} = 1, g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$).

四维矢量的分量为: $a^\mu = (a^0, \mathbf{a})$.

为简化公式书写, 四维矢量的分量指标常常略去不写^①, 这时四维矢量的标量积简写成 (ab) 或 ab : $ab \equiv a_\mu b^\mu = a_0 b_0 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$.

四维径矢为 $x^\mu = (t, \mathbf{r})$. 四维体积元为 d^4x .

对四维坐标的微分算符为 $\partial_\mu = \partial/\partial x^\mu$.

反对称四维单位张量为 $e^{\lambda\mu\nu\rho}$, 且 $e^{0123} = -e_{0123} = +1$.

四维 δ 函数为 $\delta^{(4)}(\mathbf{a}) = \delta(a_0)\delta(\mathbf{a})$.

三维符号

三维张量指标用拉丁字母 i, k, l, \dots 表示, 它们的取值为 x, y, z .

三维矢量用黑体字母表示.

三维体积元为 d^3x .

算符

算符用斜体字母上加符号 $\hat{\quad}$ 来表示^②.

两个算符的对易子或反对易子写成: $\{\hat{f}, \hat{g}\}_\pm = \hat{f}\hat{g} \pm \hat{g}\hat{f}$.

转置算符为 \tilde{f} .

① 这种写法广泛应用于现代文献, 这是为了解决字母数目和物理需要之间的矛盾而引入的, 务请读者特别注意.

② 然而, 为简化公式书写, 在自旋矩阵上不加这个符号, 而且在算符的矩阵元表示中也略去此符号.

厄米共轭算符为 \hat{f}^+ .

矩阵元

算符 \hat{F} 由初态 i 到终态 f 的矩阵元为 F_{fi} 或 $\langle f|\hat{F}|i\rangle$.

记号 $|i\rangle$ 为态的抽象符号, 它与表示波函数的具体表象无关. 记号 $\langle f|$ 为终态 (“复共轭”) 的符号^①.

相应地, 用 $\langle s|r\rangle$ 表示一组量子数为 r 的状态展开成量子数为 s 的另一组状态的叠加时的展开系数: $|r\rangle = \sum_s |s\rangle\langle s|r\rangle$.

球张量的约化矩阵元为: $\langle f||F||i\rangle$.

狄拉克方程

狄拉克矩阵为 γ^μ , 且 $(\gamma^0)^2 = 1$, $(\gamma^1)^2 = (\gamma^2)^2 = (\gamma^3)^2 = -1$. 矩阵 $\alpha = \gamma^0\gamma$, $\beta = \gamma^0$. 在旋量表象与标准表象中的表示为: (21.3), (21.16), (21.20).

$\gamma^5 = -i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$, $(\gamma^5)^2 = 1$; 见 (22.18).

$\sigma^{\mu\nu} = \frac{1}{2}(\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu)$; 见 (28.2).

狄拉克共轭: $\bar{\psi} = \psi^*\gamma^0$.

泡利矩阵: $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, 定义见 §20.

四维旋量指标为 α, β, \dots 和 $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dots$, 取值为 1, 2 和 $\dot{1}, \dot{2}$.

双旋量指标为 i, k, l, \dots , 取值为 1, 2, 3, 4.

傅里叶展开式

三维展开式:

$$f(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{k})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \frac{d^3k}{(2\pi)^3}, \quad f(\mathbf{k}) = \int f(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} d^3x,$$

四维展开式与此类似.

单位

除非特别说明, 本书均采用相对论单位, 在相对论单位中 $\hbar = 1$, $c = 1$, 在此单位制中, 基本电荷的平方为 $e^2 = 1/137$.

原子单位: $e = 1$, $\hbar = 1$, $m = 1$. 在原子单位中 $c = 137$. 长度、时间和能量的原子单位分别是: \hbar^2/me^2 , \hbar^3/me^4 和 me^4/\hbar^2 (量 $Ry = me^4/2\hbar^2$ 称为里德伯).

通常的单位为绝对 (高斯) 单位制.

^① 这种符号是狄拉克引入的.

常量

光速 $c = 2.998 \times 10^{10}$ cm/s.

基本电荷^① $|e| = 1.602 \times 10^{-19}$ C.

电子质量 $m = 9.110 \times 10^{-31}$ kg.

普朗克常量 $\hbar = 1.055 \times 10^{-34}$ J · s.

精细结构常数 $\alpha = e^2/\hbar c, 1/\alpha = 137.04$.

玻尔半径 $\hbar^2/me^2 = 5.292 \times 10^{-11}$ m.

电子的经典半径 $r_e = e^2/mc^2 = 2.818 \times 10^{-15}$ m.

电子的康普顿波长 $\hbar/mc = 3.862 \times 10^{-13}$ m.

电子的静质量 $mc^2 = 0.511 \times 10^6$ eV.

能量的原子单位 $me^4/\hbar^2 = 4.360 \times 10^{-18}$ J = 27.21 eV.

玻尔磁子 $|e|\hbar/2mc = 9.274 \times 10^{-24}$ J/Wb/m².

质子质量 $m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg.

质子的康普顿波长 $\hbar/m_p c = 2.103 \times 10^{-16}$ m.

核磁子 $|e|\hbar/2m_p c = 5.051 \times 10^{-27}$ J/Wb/m².

μ 子和电子的质量比 $m_\mu/m = 2.068 \times 10^2$.

在引用本教程其它各卷的章节和公式时, 卷号与书名的对应关系为:

第一卷: 《力学》, 俄文第五版, 中文第一版;

第二卷: 《场论》, 俄文第八版, 中文第一版;

第三卷: 《量子力学 (非相对论理论)》, 俄文第六版, 中文第一版;

第八卷: 《连续介质电动力学》, 俄文第四版, 中文第一版;

第十卷: 《物理动理学》, 俄文第二版, 中文第一版.

^① 本书中 (除第十四章外) 粒子电荷的符号 e 中包含正负号, 因而, 对电子 $e = -|e|$.

目 录

叶甫盖尼·米哈伊洛维奇·栗弗席兹 (1915—1985) 小传	i
第三版序言	iv
第二版序言	v
第一版序言 (摘录)	vi
一些符号	viii
绪论	1
§1 相对论范围的不确定度关系式	1
第一章 光子	5
§2 自由电磁场的量子化	5
§3 光子	10
§4 规范不变性	12
§5 量子理论中的电磁场	14
§6 光子的角动量和宇称	15
§7 光子的球面波	18
§8 光子的极化	23
§9 双光子系统	28
第二章 玻色子	33
§10 零自旋粒子的波动方程	33
§11 粒子和反粒子	37

§12	真中性粒子	41
§13	C, P, T 变换	43
§14	自旋为 1 的粒子的波动方程	49
§15	具有最高整数自旋的粒子的波动方程	53
§16	粒子的螺旋性状态	55
第三章	费米子	61
§17	四维旋量	61
§18	旋量与四维矢量的联系	63
§19	旋量的反演	67
§20	旋量表示的狄拉克方程	72
§21	狄拉克方程的对称形式	74
§22	狄拉克矩阵代数	79
§23	平面波	83
§24	球面波	86
§25	自旋和统计的联系	90
§26	电荷共轭和旋量的时间反演	93
§27	粒子和反粒子的内禀对称性	98
§28	双线性式	100
§29	极化密度矩阵	104
§30	二分量费米子	109
§31	自旋为 $3/2$ 的粒子的波动方程	113
第四章	外场中的粒子	117
§32	外场中电子的狄拉克方程	117
§33	按 $1/c$ 的幂展开	121
§34	氢原子能级的精细结构	125
§35	在有心对称场中的运动	127
§36	在库仑场中的运动	131
§37	在有心对称场中的散射	138
§38	极端相对论情形中的散射	140
§39	库仑场中散射的连续谱波函数	142
§40	平面电磁波场中的电子	146
§41	自旋在外场中的运动	149
§42	中子在电场中的散射	154