

时代教育·国外高校优秀教材精选

WILEY

[美] 大卫 J. 格里菲斯 (David J. Griffiths) 著

Introduction to Elementary Particles

# 粒子物理导论

翻译版  
原书第2版

清华大学 王青 译

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



时代教育·国外高校优秀教材精选

# 粒子物理导论

Introduction to Elementary Particles

(翻译版·原书第2版)

[美] 大卫 J. 格里菲斯 (David J. Griffiths) 著

清华大学 王青 译



机械工业出版社

本书内容主要包括基本粒子物理历史介绍、基本粒子动力学、相对论运动学、对称性、束缚态、费曼算法、量子电动力学、夸克的电动力学和色动力学、弱作用、规范理论、中微子振荡等，并在最后探讨了未来可能有所发现的某些方向。

本书是物理专业高年级本科生的入门教材，也可作为物理专业低年级研究生的参考教材，同时对粒子物理实验和理论研究人员也有参考价值。

Copyright © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Introduction to Elementary Particles* (Second, Revised Edition), ISBN 978-3-527-40601-2, by David Griffiths, Published by Wiley-VCH. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-9168 号

### 图书在版编目 (CIP) 数据

粒子物理导论：翻译版：原书第 2 版/(美) 大卫 J. 格里菲斯 (David J. Griffiths) 著；王青译。—北京：机械工业出版社，2016.10

(时代教育·国外高校优秀教材精选)

书名原文：Introduction to Elementary Particles, 2nd edition

ISBN 978-7-111-54342-8

I. ①粒… II. ①大… ②王… III. ①粒子物理学-高等学校-教材  
IV. ①O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 167302 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：张金奎 责任编辑：张金奎 任正一 责任校对：张 征

封面设计：张 静 责任印制：李 飞

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23 印张 · 562 千字

0001 — 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54342-8

定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 译者序

随着 2012 年欧洲核子中心宣布粒子物理标准模型中最后一个未被发现、俗称上帝粒子的希格斯粒子的发现及 2013 年诺贝尔物理学奖被授予 20 世纪 60 年代希格斯粒子的提出人希格斯和恩格兰特，标准模型最后一块拼接板被拼接成功，因而成为一个完整被实验所验证的基础物理理论模型。基本粒子物理的研究由此进入了后标准模型时代，它的基本标志是：不管超出标准模型的新物理是否被发现，标准模型永远会作为一个为实验验证过的完整理论模型而被作为后来研究者的研究基础和出发点。在这个新时代里，标准模型作为一个成熟且经过实验检验的物理学基本理论模型已经完全达到了被纳入大学物理专业本科教学内容的标准。

实际上，随着物理学的发展和知识爆炸性的增长，哪些物理学理论应该被纳入大学本科物理专业的基础教材一直是物理学科教学所关注并在不断探讨和研究的问题。物理专业的本科四年教育目前一直被填得满满的，教完了基础的普通物理及其实验、四大力学、近代物理实验，只剩下为数不多的学时，专业教师都希望学生能早些进入具体的课题，由此比较排斥再往教学内容中填充更多基本的必修内容。但从培养有宽阔视野的物理人才的角度看，让学生对人类在自然界各个物质层面所发展的物理理论都有所了解似乎是有一定的必要性的。相应的课程按照空间尺度从大到小包括：天体物理、凝聚态物理、原子分子物理、核物理、粒子物理。对粒子物理，由于它远离现实生活，所需要的描述工具又非常高深，再加上以前标准模型仍未被实验完全证实，还存在理论模型不完全正确的可能性，因此往往在本科阶段不太详细讲授，即使涉及，也要么只是在普通物理的最后稍微涉猎一点点，要么和核物理结合在一起简要介绍一下，而针对本科生单独完整的粒子物理本科课程基本没有。为此，本书的作者大卫·格里菲斯早在 30 年前本书第 1 版前言中就特别强调：“在最近十年，尘埃落定到令人相当吃惊的程度，说基本粒子物理已经成年是合适的时候了。虽然我们还有非常多的知识要去学习，但显然现在已经有了统一和一致的理论架构，它太令人激动和重要，以致不能在研究生教学中省略或稀释为定性的现代物理的子部分。我相信把基本粒子物理放进本科生标准课程的时间到了。”从这本书的第 1 版到现在，粒子物理又有了巨大的发展，标准模型无论在理论还是实验上都已达到相当完美和完备的地步，格里菲斯当年的表述因此有了更坚实的理论和实验支撑。

随着中国国力的上升，国家对基础研究的投入也越来越多，对像基本粒子这样的最为基础的物理研究也可望国家不止在理论方面更在对应于大科学工程的实验上有大的投入，以期

在未来使中国能在物质最小的基本结构及其相互作用规律的研究方面为人类做出更大的贡献。这一方面需要高校培养更多相关物理专业人才，另一方面需要能把高深的粒子物理简化为大学甚至更低层次水平的半专业半科普作品，以便能提高全社会对基本粒子这样的物理学基础的认识水平。这些都呼唤着大学本科水平中文版粒子物理教材的出现。

国内外粒子物理的教科书并不少，但专门针对本科学生的教科书，特别是把内容主要放在针对本科生介绍标准模型的教材却几乎没有。这当然主要是因为标准模型所需要的除基本粒子现象以外的量子场论和规范场论的高深知识很难被下放到本科水平的教材当中。格里菲斯的这本书基本解决了这个问题，书的内容既巧妙地避免了复杂深奥的场论理论与计算，又用物理学本科学生已有的知识较好地把握标准模型及其所需要的量子场论和规范场论的基本知识以比较物理的方式生动地介绍出来，并且文字流畅优美，这有赖于作者多年的教学积累及其深厚的专业和文字功底。无怪乎这本教材在美国成为本科阶段高校用得最广、最受欢迎的粒子物理教科书，笔者在翻译的过程中受益匪浅，但限于译者有限的专业水平和文字功底，书中可能会有翻译不理想、不准确甚至错误的地方，敬请各位读者批评指正。

王青

2017 于清华

# 原书 第1版前言

本书是物理专业高年级本科生的入门书。我的同事中大多数人认为这个题目对这样的读者是不合适的——数学上太高深，唯象上太零散，不牢靠的基础和不确定的未来。这个观点十年前我会同意，但在最近十年，尘埃落定到令人相当吃惊的程度，说基本粒子物理已经成年是合适的时候了。虽然我们还有非常多的知识要去学习，但显然现在已经有了一致和统一的理论架构，它太令人激动和重要，以致不能在研究生教学中省略或稀释为定性的现代物理的子部分。我相信把基本粒子物理放进本科生标准课程的时间到了。

不幸的是，这个领域的研究文献显然是本科生所无法企及的，虽然有若干极好的研究生教材，但它们要求即便不是量子场论，也是很强的高等量子力学基础。另外，虽然有很多很好的科普书和一些杰出的《科学美国人》文章，但很少专为本科生所写。本书是填补这个需求的一个努力和尝试。它起自我时不时在 Reed 学院教的一学期的粒子物理课程。学生一般有一学期的电磁学课（Lorrain 和 Corson 的水平）、一学期的量子力学课（Park 的水平）和相对较强的狭义相对论的背景。

除了其主要受众，我希望这本书将对研究生新生有用，或者作为初始教材，或作为更深入学习的准备。把这些记在心里，并致力于尽可能的完备性和可塑性，本书包含了比一个单一学期能够舒适地涵盖所更多的内容。（在我自己的课上我要求学生自己阅读第 1 章和第 2 章，从第 3 章开始教。我跳过第 5 章，聚焦于第 6 和 7 章，讨论第 8 章的头两节，然后跳到第 10 章）为帮助读者（和教师），我在每章开始安排一个简短的目的和内容、前期要求和以后角色的介绍。本书是我在斯坦福直线加速器中心学术休假期间写成的，我要感谢 Sidney Drell 教授和理论组的其他成员的热情款待。

David Griffiths

1986 年

# 原书 第2版前言

自从这本书的第1版出版以来,已经过去20多年了,书中大多数内容仍未过时,这既令人满意又使人痛苦。缺陷肯定是显见的——那时,顶夸克的存在尚未被证实,中微子一般被假定为(并无很好的理由)无质量的。而标准模型,它基本上是本书的主题,被证明令人吃惊地坚挺。这是对理论的称颂,同时也是对我们想象力的控诉。我不认为在基本粒子物理历史中有相应的时期自然界中会发生如此之少的真正的革命。中微子振荡怎样?事实上这是一个极好的故事(我已经对此题目单加了一章)。而此极端的现象与标准模型符合得如此之好以致人们几乎可以说,回顾过去(当然)如果它不是这样才是更令人惊奇的。超对称和弦理论如何?是,但这些暂且必须被看作例外(我已经加了一章,讨论现代理论的发展)。只要坚实的实验验证可以继续,标准模型(中微子有质量和混合)仍将占支配地位。

除了已经说过的新的两章,我把第1章的粒子物理历史的内容更新了,缩短了第5章,在第6章提供了(我希望)对黄金规则更引人入胜的介绍,而减掉了原第8章中大多数的电磁形状因子和标度的内容(这在深度非弹实验的解释中是十分重要的,它使夸克模型具有了安全的基础,但今天没人怀疑夸克的存在,因此技术细节不再如此重要了)。第8章剩下的部分与原第9章结合形成一个关于强子的新的一章。最后,我准备了一个完整的解题手册(从出版商Wiley那里可免费得到,但只针对——我抱歉——教师<sup>⊖</sup>)。除此之外其余内容改变相对很小。

很多人发给我建议和修正信息,或耐心地回答我的问题。我无法感谢每个人,但我将要感谢他们中那些有特别帮助的人: Guy Blaylock (UMass), John Boersma (Rochester), Carola Chinellato (Brazil), Eugene Commins (Berkeley), Mimi Gerstell (Cal Tech), Nahmin Horwitz (Syracuse), Richard Kass (Ohio State), Janis McKenna (UBC), Jim Napolitano (RPI), Nic Nigro (Seattle), John Norbury (UW - Milwaukee), Jason Quinn (Notre Dame), Aaron Roodman (SLAC), Natthi Sharma (EasternMichigan), Steve Wasserbeach (Haverford), and above all Pat Burchat (Stanford).

这项工作中的一部分是我在斯坦福和SLAC学术休假时完成的,我要特别感谢Patricia和Michael Peskin使之得以实现。

David Griffiths

2008年

⊖ 教师在线注册获取地址: <http://www.wiley-vch.de/publish/en/books/ISBN3-527-40601-8>

# 公式和常数

## 粒子数据

质量单位  $\text{MeV}/c^2$ , 寿命单位秒, 电荷用质子电荷为单位。

### 轻子 (自旋 1/2)

代	味	电荷	质量*	寿命	主要衰变
第一	$e$ (电子)	-1	0.510 999	$\infty$	—
	$\nu_e$ (电子中微子)	0	0	$\infty$	—
第二	$\mu$ (缪子)	-1	105.659	$2.197\ 03 \times 10^{-6}$	$e\nu_\mu\bar{\nu}_e$
	$\nu_\mu$ (缪子中微子)	0	0	$\infty$	—
第三	$\tau$ (陶子)	-1	1 776.99	$2.91 \times 10^{-13}$	$e\nu_\tau\bar{\nu}_e, \mu\nu_\tau\bar{\nu}_\mu, \pi^-\nu_\tau$
	$\nu_\tau$ (陶子中微子)	0	0	$\infty$	—

\* 中微子质量极其微小, 对大多数情形可以被取为零; 细节见第 11 章。

### 夸克 (自旋 1/2)

代	味	电 荷	质 量*
第一	d(下)	-1/3	7
	u(上)	2/3	3
第二	s(奇异)	-1/3	120
	c(粲)	2/3	1 200
第三	b(底)	-1/3	4 300
	t(顶)	2/3	174 000

\* 轻夸克质量是推算的, 不准确; 对介子和重子中的有效质量见第 5 章。

### 媒介粒子 (自旋 1)

力	媒介粒子	电荷	质量	寿命	主要衰变
强	$g$ (8 个胶子)	0	0	$\infty$	—
电磁	$\gamma$ (光子)	0	0	$\infty$	—
弱	$W^\pm$ (带电)	$\pm 1$	80 420	$3.11 \times 10^{-25}$	$e^+\nu_e, \mu^+\nu_\mu, \tau^+\nu_\tau, cX \rightarrow$ 强子
	$Z^0$ (中性)	0	91 190	$2.64 \times 10^{-25}$	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, q\bar{q} \rightarrow$ 强子

### 重子 (自旋 1/2)

重子	夸克组分	电荷	质量	寿命	主要衰变
$N \begin{cases} p \\ n \end{cases}$	uud	1	938.272	$\infty$	—
	udd	0	939.565	885.7	$p e \nu_e$
$\Lambda$	uds	0	1115.68	$2.63 \times 10^{-10}$	$p\pi^-, n\pi^0$
$\Sigma^+$	uus	1	1189.37	$8.02 \times 10^{-11}$	$p\pi^0, n\pi^+$
$\Sigma^0$	uds	0	1192.64	$7.4 \times 10^{-20}$	$\Lambda\gamma$
$\Sigma^-$	dds	-1	1197.45	$1.48 \times 10^{-10}$	$n\pi^-$
$\Xi^0$	uss	0	1314.8	$2.90 \times 10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$
$\Xi^-$	dss	-1	1321.3	$1.64 \times 10^{-10}$	$\Lambda\pi^-$
$\Lambda_c^+$	udc	1	2286.5	$2.00 \times 10^{-13}$	$pK\pi, \Lambda\pi\pi, \Sigma\pi\pi$



重子 (自旋 3/2)

重子	夸克组分	电荷	质量	寿命	主要衰变
$\Delta$	uuu, uud, udd, ddd	2, 1, 0, -1	1232	$5.6 \times 10^{-24}$	$N\pi$
$\Sigma^*$	uus, uds, dds	1, 0, -1	1385	$1.8 \times 10^{-23}$	$\Lambda\pi, \Sigma\pi$
$\Xi^*$	uss, dss	0, -1	1533	$6.9 \times 10^{-23}$	$\Xi\pi$
$\Omega^-$	sss	-1	1672	$8.2 \times 10^{-11}$	$\Lambda K^-, \Xi\pi$

赝标介子 (自旋 0)

介子	夸克组分	电荷	质量	寿命	主要衰变
$\pi^\pm$	$u\bar{d}, d\bar{u}$	1, -1	139.570	$2.60 \times 10^{-8}$	$\mu\nu_\mu$
$\pi^0$	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	0	134.977	$8.4 \times 10^{-17}$	$\gamma\gamma$
$K^\pm$	$u\bar{s}, s\bar{u}$	1, -1	493.68	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu\nu_\mu, \pi\pi, \pi\pi\pi$
$K^0, \bar{K}^0$	$d\bar{s}, s\bar{d}$	0	497.65	$\left\{ \begin{array}{l} K_S^0: 8.95 \times 10^{-11} \\ K_L^0: 5.11 \times 10^{-8} \end{array} \right.$	$\pi\pi$ $\pi\nu_e, \pi\mu\nu_\mu, \pi\pi\pi$
$\eta$	$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$	0	547.51	$5.1 \times 10^{-19}$	$\gamma\gamma, \pi\pi\pi$
$\eta'$	$(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})/\sqrt{3}$	0	957.78	$3.2 \times 10^{-21}$	$\eta\pi\pi, \rho\gamma$
$D^\pm$	$c\bar{d}, d\bar{c}$	1, -1	1869.3	$1.04 \times 10^{-12}$	$K\pi\pi, K\mu\nu_\mu, K\nu_e$
$D^0, \bar{D}^0$	$c\bar{u}, u\bar{c}$	0	1864.5	$4.1 \times 10^{-13}$	$K\pi\pi, K\nu_e, K\mu\nu_\mu$
$D_s^\pm$	$c\bar{s}, s\bar{c}$	1, -1	1968.2	$5.0 \times 10^{-13}$	$\eta\rho, \phi\pi\pi, \phi\rho$
$B^\pm$	$u\bar{b}, b\bar{u}$	1, -1	5279.0	$1.6 \times 10^{-12}$	$D^* l\nu_l, D l\nu_l, D^* \pi\pi\pi$
$B^0, \bar{B}^0$	$d\bar{b}, b\bar{d}$	0	5279.4	$1.5 \times 10^{-12}$	$D^* l\nu_l, D l\nu_l, D^* \pi\pi$

矢量介子 (自旋 1)

介子	夸克组分	电荷	质量	寿命	主要衰变
$\rho$	$u\bar{d}, (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}, d\bar{u}$	1, 0, -1	775.5	$4 \times 10^{-24}$	$\pi\pi$
$K^*$	$u\bar{s}, d\bar{s}, s\bar{d}, s\bar{u}$	1, 0, -1	894	$1 \times 10^{-23}$	$K\pi$
$\omega$	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$	0	782.6	$8 \times 10^{-23}$	$\pi\pi\pi, \pi\gamma$
$\psi$	$c\bar{c}$	0	3097	$7 \times 10^{-21}$	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, 5\pi, 7\pi$
$D^*$	$c\bar{d}, c\bar{u}, u\bar{c}, d\bar{c}$	1, 0, -1	2008	$3 \times 10^{-21}$	$D\pi, D\gamma$
$Y$	$b\bar{b}$	0	9460	$1 \times 10^{-20}$	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$

自旋 1/2

泡利矩阵:

$$\sigma_x \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i\epsilon_{ijk} \sigma_k, \quad (\mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\sigma})(\mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\sigma}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + i\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b}),$$

$$\sigma_i^+ = \sigma_i = \sigma_i^{-1}, \quad e^{i\boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{\sigma}} = \cos\theta + i(\hat{\boldsymbol{\theta}} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \sin\theta$$

狄拉克矩阵:

$$\gamma^0 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \gamma^i \equiv \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ -\sigma_i & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^{0+} = \gamma^0, \gamma^{i+} = -\gamma^i, \gamma^0 \gamma^{\mu+} \gamma^0 = \gamma^\mu$$

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}, \quad g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\gamma^5 \equiv i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \{\gamma^\mu, \gamma^5\} = 0, \quad (\gamma^5)^2 = 1$$

(对相乘规则和求迹定理见附录 C。)

狄拉克方程:

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

$$(\not{p} - mc)u = 0, \quad (\not{p} + mc)v = 0, \quad \bar{u}(\not{p} - mc) = 0, \quad \bar{v}(\not{p} + mc) = 0,$$

$$\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger \gamma^0, \quad \bar{\Gamma} \equiv \gamma^0 \Gamma^\dagger \gamma^0, \quad \not{a} \equiv a_\mu \gamma^\mu$$

### 费曼规则

	外线	传播子
自旋 0:	无	$\frac{i}{q^2 - (mc)^2}$
自旋 1/2:	入射粒子: $u$	$\frac{i(\not{p} + mc)}{q^2 - (mc)^2}$
	入射反粒子: $\bar{v}$	
	出射粒子: $\bar{u}$	
	出射反粒子: $v$	
自旋 1:	入射: $\epsilon_\mu$ 出射: $\epsilon_\mu^*$	无质量: $\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}$
		有质量: $\frac{-i[g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / (mc)^2]}{q^2 - (mc)^2}$

(对顶角因子见附录 D。)

## 基本常数

普朗克常数:	$\hbar = 1.054\ 57 \times 10^{-34}$ Js $= 6.582\ 12 \times 10^{-22}$ MeVs
光速:	$c = 2.997\ 92 \times 10^8$ m/s
电子质量:	$m_e = 9.109\ 38 \times 10^{-31}$ kg = 0.510 999 MeV/c <sup>2</sup>
质子质量:	$m_p = 1.672\ 62 \times 10^{-27}$ kg = 938.272 MeV/c <sup>2</sup>
电子电荷(大小):	$e = 1.601\ 28 \times 10^{-19}$ C $= 4.803\ 20 \times 10^{-10}$ esu
精细结构常数:	$\alpha = e^2/\hbar c = 1/137.036$
玻尔半径:	$a = \hbar^2/m_e e^2 = 5.291\ 77 \times 10^{-11}$ m
玻尔能量:	$E_n = -m_e e^4/2\hbar^2 n^2 = -13.605\ 7/n^2$ eV

经典电子半径:	$r_e = e^2/m_e c^2 = 2.817\ 94 \times 10^{-15}\text{ m}$
QED 耦合常数:	$g_e = e \sqrt{4\pi/\hbar c} = 0.302\ 822$
弱耦合常数:	$g_w = g_e/\sin\theta_w = 0.629\ 5;$ $g_z = g_w/\cos\theta_w = 0.718\ 0$
弱混合角:	$\theta_w = 28.76^\circ (\sin^2\theta_w = 0.231\ 4)$
强耦合常数:	$g_s = 1.214$

## 转化因子

1 Å	= 0.1 nm	= $10^{-10}\text{ m}$
1 fm	= $10^{-15}\text{ m}$	
1 barn	= $10^{-28}\text{ m}^2$	
1 eV	= $1.602\ 18 \times 10^{-16}\text{ J}$	
1 MeV/c <sup>2</sup>	= $1.782\ 66 \times 10^{-30}\text{ kg}$	
1 C	= $2.997\ 92 \times 10^{-9}\text{ esu}$	

# 目 录

译者序	
原书第 1 版前言	
原书第 2 版前言	
公式和常数 粒子数据	
引言	1
第 1 章 基本粒子物理历史介绍	9
1.1 经典时代 (1897—1932)	9
1.2 光子 (1900—1924)	10
1.3 介子 (1934—1947)	12
1.4 反粒子 (1930—1956)	14
1.5 中微子 (1930—1962)	16
1.6 奇异粒子 (1947—1960)	20
1.7 八重态 (1961—1964)	23
1.8 夸克模型 (1964)	26
1.9 十一月革命及其以后 (1974—1983 和 1995)	29
1.10 矢量中间玻色子 (1983)	32
1.11 标准模型 (1978—2012) <sup>⊙</sup>	33
第 2 章 基本粒子动力学	42
2.1 四种力	42
2.2 量子电动力学 (QED)	43
2.3 量子色动力学 (QCD)	47
2.4 弱作用	51
2.4.1 中性	51
2.4.2 带电	53
2.4.3 夸克	54
2.4.4 W 和 Z 的弱耦合和电磁耦合	56
2.5 衰变和守恒定律	57
2.6 统一方案	60
第 3 章 相对论运动学	64
3.1 洛伦兹变换	64
3.2 四矢量	66
3.3 能量和动量	69
3.4 碰撞	71
3.4.1 经典碰撞	72
3.4.2 相对论碰撞	72
3.5 例子和应用	73
第 4 章 对称性	82
4.1 对称性、群和守恒定律	82
4.2 角动量	85
4.2.1 角动量的相加	87
4.2.2 自旋 1/2	89
4.3 味对称性	92
4.4 分立对称性	97
4.4.1 宇称	97
4.4.2 电荷共轭	102
4.4.3 CP	103
4.4.4 时间反演和 TCP 定理	107
第 5 章 束缚态	116
5.1 薛定谔方程	116
5.2 氢原子	118
5.2.1 精细结构	119
5.2.2 兰姆位移	121
5.2.3 超精细分裂	122
5.3 正电子偶素	123
5.4 夸克偶素	125
5.4.1 粲偶素	126
5.4.2 底偶素	127
5.5 轻夸克介子	129
5.6 重子	131

5.6.1 重子波函数 .....	132	9.7.2 弱同位旋和超核 .....	250
5.6.2 磁矩 .....	137	9.7.3 电弱混合 .....	252
5.6.3 质量 .....	139	<b>第 10 章 规范理论</b> .....	259
<b>第 6 章 费曼算法</b> .....	144	10.1 经典粒子力学的拉格朗日体系 .....	259
6.1 衰变和散射 .....	144	10.2 相对论场论中的拉氏量 .....	260
6.1.1 衰变率 .....	144	10.3 局域规范不变性 .....	262
6.1.2 截面 .....	145	10.4 杨-米尔斯理论 .....	265
6.2 黄金规则 .....	148	10.5 色动力学 .....	268
6.2.1 衰变的黄金规则 .....	149	10.6 费曼规则 .....	270
6.2.2 散射的黄金规则 .....	151	10.7 质量项 .....	272
6.3 玩具理论的费曼规则 .....	153	10.8 对称性自发破缺 .....	274
6.3.1 $A$ 的寿命 .....	155	10.9 希格斯机制 .....	276
6.3.2 $A+A \rightarrow B+B$ 散射 .....	156	<b>第 11 章 中微子振荡</b> .....	283
6.3.3 高阶图 .....	157	11.1 太阳中微子问题 .....	283
<b>第 7 章 量子电动力学</b> .....	163	11.2 振荡 .....	285
7.1 狄拉克方程 .....	163	11.3 证实 .....	287
7.2 狄拉克方程的解 .....	166	11.4 中微子质量 .....	289
7.3 双线性协变量 .....	170	11.5 混合矩阵 .....	290
7.4 光子 .....	172	<b>第 12 章 最后：下面是什么？</b> .....	294
7.5 QED 的费曼规则 .....	175	12.1 希格斯玻色子 .....	294
7.6 例子 .....	177	12.2 大统一 .....	297
7.7 喀什米尔穹门 .....	180	12.3 物质/反物质不对称性 .....	300
7.8 截面和寿命 .....	183	12.4 超对称、弦和额外维 .....	302
7.9 重整化 .....	188	12.4.1 超对称 .....	302
<b>第 8 章 夸克的电动力学和色动力学</b> .....	199	12.4.2 弦 .....	303
8.1 $e^+e^-$ 碰撞中的强子产生 .....	199	12.5 暗物质/暗能量 .....	304
8.2 电子-质子弹性散射 .....	202	12.5.1 暗物质 .....	304
8.3 色动力学的费曼规则 .....	206	12.5.2 暗能量 .....	305
8.4 色因子 .....	209	12.6 结论 .....	306
8.4.1 夸克和反夸克 .....	210	<b>附录</b> .....	310
8.4.2 夸克和夸克 .....	211	附录 A 狄拉克 Delta 函数 .....	310
8.5 QCD 中的对湮灭 .....	213	附录 B 衰变率和截面 .....	313
8.6 渐进自由 .....	216	B.1 衰变 .....	313
<b>第 9 章 弱作用</b> .....	224	B.2 截面 .....	314
9.1 带电轻子的弱作用 .....	224	附录 C 泡利和狄拉克矩阵 .....	315
9.2 缪子衰变 .....	226	C.1 泡利矩阵 .....	315
9.3 中子衰变 .....	230	C.2 狄拉克矩阵 .....	315
9.4 $\pi$ 介子衰变 .....	235	附录 D 费曼规则 (树图) .....	316
9.5 夸克的带电弱作用 .....	237	D.1 外线 .....	316
9.6 中性弱作用 .....	240	D.2 传播子 .....	317
9.7 电弱统一 .....	247	D.3 顶角因子 .....	317
9.7.1 手征费米子态 .....	247	<b>索引</b> .....	320

# 引言

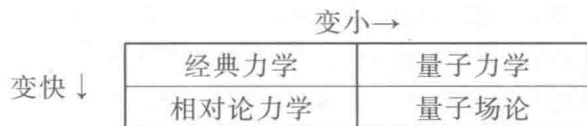
## 基本粒子物理

基本粒子物理从最基础或者说在最小线度上回答了“物质是如何组成”的问题。典型的实例是物质在亚原子尺度上由一些相互之间有很大空隙的微小组分组成。更特别的是这些微小的组分来自一小类不同的类型（电子、质子、中子、 $\pi$ 介子、中微子等），它们被天文数量级复制形成我们周边的物质。这些复制品是绝对完美的复制品——不是像从同一总装线上下来的福特车那样仅仅“非常相似”，而是完全不可区分。你无法在一个电子上贴注身份标签，或在其上画一个点——如果你做了一个，就等于做了所有的。这个全同性质在宏观世界没有相应的类似物。（在量子力学里它反映在泡利不相容原理中。）这极大简化了基本粒子物理的任务：我们不必担心大的或小的电子，新的或旧的电子了——电子就是电子。虽然不非得是那么容易。

因此我的第一项工作就是给你介绍各种基本粒子——如果你看戏的话就是剧中的演员。我可以简单地把它们罗列出来，然后告诉你它们的性质（质量、电荷、自旋等），但在这种情形下更好地是从历史的角度解释每个粒子是怎样开始登上舞台的。这将赋予它们特点与人性，使他们更容易被记忆和观赏。而这些故事中的有些部分本身就很有趣。

一旦在第1章介绍了这些粒子，接下来“它们之间如何相互作用？”这个问题就会直接或间接地占据本书剩下的部分。你在研究两个宏观物体时如果想知道它们如何相互作用，你就会通过把它们放置于各种分开的距离测量两者之间的力。那是一种确定相互作用的方法，如库仑用来确定两个带电沥青球之间的电排斥定律，以及卡文迪许用来测量两块铅重物的引力。但你无法用镊子夹起一个质子或将一个电子绑在一条绳的末端；它们太小了。从实用的角度，我们不得不采取不那么直接的方法来探测基本粒子的相互作用。结果显示，几乎所有我们的实验信息来自三个方面：①散射事例，其中我们使一个粒子撞击另外一个，并记录（例如）偏转角；②衰变，其中一个粒子自动解体，而我们检测其碎片；③束缚态，其中两个或更多粒子黏在一起，我们研究这个复合物体的性质。毋庸置疑，从这样的间接证据来确定相互作用规律不是一项简单的工作。一般的过程是猜测一个相互作用的形式，并将实验数据与理论预期的结果进行比较。

这样猜测的体系（更高雅的称呼叫“模型”）是由某些一般的原理作为指导，特别是狭义相对论和量子力学。在下图我画出了四个现实的力学机制：



日常生活的世界当然由经典力学所控制。但对那些运动很快（速度和光速可比拟）的物体，经典规则需要由狭义相对论来修正，而对那些很小（粗略说线度和原子可比拟）的

物体，经典力学要由量子力学所取代。最后，对那些既快又小的物体，我们需要把相对论和量子原理结合起来的理论：量子场论。现在基本粒子极其微小，典型地又很快。因此，基本粒子物理自然落入到量子场论所主导的领域。

请观察力学的种类与特殊力的定律的差别。例如牛顿的万有引力定律描写一种特殊的（引力）相互作用，而牛顿的运动三定律定义了一个（经典力学）力学系统，它们（在其适用范围）控制所有的相互作用。力的定律告知你手头的力是什么；而力学则告知你怎样用力去决定运动。基本粒子动力学的目标是在量子场论的框架下，猜测一组力的定律，正确地描述粒子的运动行为。

然而，这个行为的某些一般特征与相互作用的具体形式无关，而是直接来自相对论或量子力学，或两者的结合。例如，在相对论中，能量和动量总是守恒的，但（静止）质量不是。因此  $\Delta \rightarrow p + \pi$  衰变是完全可接受的，即使  $\Delta$  比  $p$  与  $\pi$  加起来重。这样一个过程在经典力学中将是不可能的，因为那里质量是严格守恒的。更有甚之，相对论允许粒子具有零（静止）质量——在经典力学中无质量粒子的想法是完全没有意义的——我们将会看到，光子和胶子是没有质量的。

在量子力学中一个物理系统由其状态  $s$  描写（在薛定谔体系中由波函数  $\Psi_s$  代表，在狄拉克理论中用右矢  $|s\rangle$  代表）。一个物理过程，例如散射或衰变，是由从一个态到另一个态的跃迁构成。但在量子力学中结果不是完全由初始条件唯一确定的；所有我们可以期望的计算，通常是计算一个给定跃迁发生的概率。这个不确定性会被反映在观测到的粒子行为上。例如，带电  $\pi$  介子衰变成一个缪子加一个中微子，而偶尔它也会衰变成一个电子加一个中微子。原来的  $\pi$  介子没有差别；它们都是全同的。这只是自然界中一个粒子可以走各种路径的现实表现。

最后，相对论和量子力学的结合带来一些它们自己单独无法带来的额外产物：存在（具有与粒子本身同样的质量和寿命；但相反的电荷）反粒子，这是对泡利不相容原理（它在非相对论力学中是简单的人为假设）和所谓 TCP 定理的一个证明。关于这些以后我将告诉你们更多；我在这里谈到它们的目的是强调这些不是个别的模型，而是力学系统本身的特征。如不是根本性的革命外，它们是触碰不到的。顺便说一下，量子场论所有的荣耀是其难度和深度，但不必惊慌：费曼发明了一种漂亮又直观且容易学习的体系；我们将在第 6 章谈及它。（从基础的量子场论来推导费曼规则是一件极困难的事，它很容易消耗掉现代研究生教程的最好部分，但这个需求在这里和我们无关。）

在 20 世纪 60 年代和 70 年代，出现了一个描写除引力外所有已知基本粒子相互作用的理论。（如同我们所介绍的，引力在普通粒子作用过程中太弱以至无法产生任何有意义的效应。）这个理论——或更准确地，这个相关理论集合，依据两类基本粒子（夸克和轻子），结合量子电动力学，格拉肖-温伯格-萨拉姆针对电弱过程的理论和量子色动力学——最后被称作标准模型。没人假设它是此事的最后结果，但至少我们现在在玩一副完整的扑克。1978 年以来标准模型一直与所有实验检测相符，使其获得“正统”的地位。另外它具有吸引人的美学特征：所有基本相互作用都从一个基本原理——局域规范不变性的要求导出。似乎肯定未来的发展将涉及标准模型的扩展，而不是把它抛弃。这本书也可以叫作“标准模型介绍”。

就像这另外的书名所建议的，这是一本关于基本粒子理论的书，它很少涉及实验方法和

仪器设备。这些是很重要的内容，可以把它们组合起来形成像书一样的教材，但它会使读者分散注意力干扰理论本身的清晰和优美。我鼓励你们阅读本书内容的实验方面，我将一次次地指导你们去一些特殊的可达到的地方。现在我将简短地回答两个极明显的实验问题。

### 怎样产生基本粒子？

电子和质子没问题；它们是普通物质的稳定组分。要产生电子只要加热一块金属，电子就被蒸腾出来了。如果你想要一束电子，你只要在附近安装一个带正电的平板来吸引它们，在板上戳个洞；穿过洞的电子就形成了束流。这样一个电子枪就是显像管或示波器或电子加速器的初始器件（见图 0.1）。

要获得质子你就要电离氢原子（换句话说，剥离其电子）。事实上，如果你用质子做靶，你甚至不必关心电子；由于它们太轻以至于一束高能入射粒子就将会把它们打出来。因此一桶氢原子基本上就是一桶质子。对更例外的粒子有三种主要的来源：宇宙线、核反应和粒子加速器。

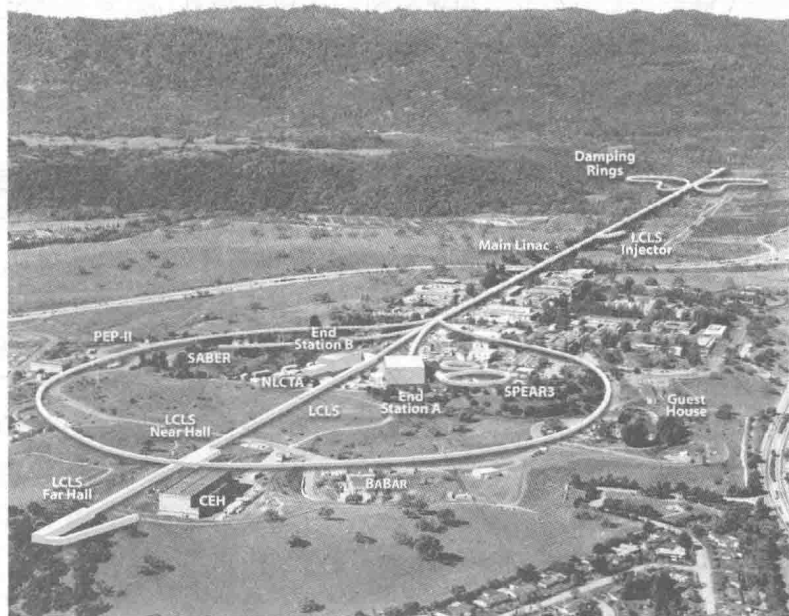


图 0.1 斯坦福直线加速器中心。图中直线部分是加速器本身。

- **宇宙线：**地球被来自外太空的高能粒子（主要是质子）持续轰击。这些粒子的来源仍是一个谜；无论如何，当它们在大气上层击中原子时会产生次级粒子雨（当它们到达地面时多数为缪子和中微子），它们会一直洒向我们。作为基本粒子的产生源，宇宙线有两个优点：它们是自由的，其能量可以很巨大——远大于我们可能在实验室产生的能量。但也有两个主要的缺点：它们撞击任何合理体积探测器的碰撞率都很低，且是完全不可控制的。因此宇宙线实验需要耐心和运气。

- **核反应：**当放射性核衰变时，会辐射各种粒子——中子，中微子，以及习惯称之为的  $\alpha$  射线（实际上， $\alpha$  粒子是两个中子加两个质子的束缚态）， $\beta$  射线（实际上是电子或正电子）和  $\gamma$  射线（实际上是光子）。



• **粒子加速器**：把电子或质子加速到很高能量，让它们撞击靶（见图 0.1）。通过巧妙地安置吸收材料和磁铁，可以将所希望研究的粒子从撞击碎片中分离出来。如今，已能用这种方法产生很强的二次正电子、缪子、 $\pi$  介子、K 介子、B 介子、反质子和中微子束流，反过来这些也可以被用来撞击另一个靶。稳定粒子——电子、质子、正电子和反质子——甚至可以被送进巨大的储存环，在其中强有力的磁铁引导下，它们在一定时间内以高速持续地转圈，等待被提取并用于需要的地方<sup>[1]</sup>。

一般来说，你希望产生的粒子越重，则所需碰撞的能量必须越高。这是为什么，历史上较轻的粒子被首先发现，而随着时间推移，加速器变得越来越强大，越来越重的粒子也被发现了。结果表明如果你将两个高速粒子对头相碰，将获得巨大的相对能量，这与让一个粒子去撞击一个静态靶形成鲜明对照。（当然这要求更精确的瞄准！）由于这个原因，很多当代实验都涉及来自交叉储存环的碰撞束流；如果粒子错过了首次碰撞，它们还可以在下一圈再试。事实上，可以把电子和正电子（或质子和反质子）放在同一个环中，让带正电的绕一个方向环绕，而带负电的反向环绕。不幸的是，当一个带电粒子加速时会产生辐射，因而损失能量。环形运动的情形（它当然涉及加速运动）叫**同步辐射**，它强烈地限制了对高能电子储存环的储存效率（同样的能量下更重的粒子加速较少，因此对重粒子而言同步辐射不是太大的问题）。由于这个原因电子散射实验会逐渐转到直线对撞机，而储存环将会持续被用于产生质子和更重的粒子。

还有另一个原因为什么物理学家总是推崇高的能量：一般来说，碰撞的能量越高，两个粒子相互走得越近。因此如果你要研究很短距离的相互作用，你就需要很高能量的粒子。在量子力学里，一个动量为  $p$  的粒子具有波长  $\lambda$ ，它由德布罗意公式  $\lambda = h/p$  决定，其中  $h$  是普朗克常数。对长波长（低动量），你只能期望鉴别相对大的结构；为了探究一些极小的物体，你需要相对短的波长，也就是高的动量。如果你喜欢，可以考虑用如下测不准原理实现 ( $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ )，要使  $\Delta x$  小， $\Delta p$  必须大。不管你怎么看，结果都是一样的：探索小距离你需要高能量。

世界上一个非常强大的加速器是费米实验室的 Tevatron（见图 0.2），它最大的束流能量接近 1TeV。Tevatron（质子-反质子对撞机）1983 年开始运行；它的后继者超级超导对撞机（SSC）从 1983 年开始建造，到 1993 年项目被美国国会终止了。其结果是，很长一段时间没可能有基础研究的进展。这种干早期在 2008 年结束，当时位于欧洲核子中心的大型强子对撞机（LHC）开始获取数据（见图 0.3）。LHC 的束流能量超过 7TeV，人们希望在这个新的能区将包含希格斯粒子<sup>⊙</sup>，可能的超对称粒子，或最好有什么完全没被预料到的东西<sup>[2]</sup>。还不清楚 LHC 之后将会有有什么，很可能是被建议的国际直线对撞机（ILC）。<sup>⊙</sup>加速器变得如此巨大（SSC 原来有 87km 周长），没有太多的空间用于进一步的扩张。可能我们正在逐步接近加速器时代的末端，粒子物理为获得更高能量的信息将转向天体物理和宇宙学。或许有人会有聪明的新想法能往基本粒子里注入能量。<sup>⊙</sup>

⊙ 希格斯粒子已在 2012 年在 LHC 上被发现，它的质量大约 126GeV。——译者注

⊙ 或者国内学者提出的 CEPC（环形正负电子对撞机）。——译者注

⊙ 从宏观上看，所涉及的能量并不是那么大——总体上看，1TeV ( $10^{12}$ eV) 只是  $10^{-7}$  焦耳；问题是怎样把这些能量转移到粒子上。没有任何物理定律妨碍你这样做，但没人能找到一个不用巨大（昂贵）的机器的方式实现它。