



第一推动丛书<第3辑>

Elementary Particles
and the Laws
of Physics

从反粒子到最终定律

[美]理查德·费曼 S温伯格 / 著 李培廉 / 译 湖南科学技术出版社



041
2F261



第一推动丛书(第3辑)

Elementary Particles
and the Laws
of Physics

从反粒子到最终定律

[美]理查德·费曼 S·温伯格 / 著 李培廉 / 译 湖南科学技术出版社



A1070532

Elementary Particles and the Laws of Physics

© Cambridge University Press 1987

湖南科学技术出版社通过博达著作权代理有限公司获得本书中文简体版中国大陆地区出版发行权。本书根据英国剑桥大学出版社 1999 年版本译出。

著作权登记号：18 - 2002 - 205

《第一推动丛书》 第3辑 从反粒子到最终定律

著 者：[美] 理查德·费曼 S·温伯格

译 者：李培廉

责任编辑：吴 炜 陈 刚

出版发行：湖南科学技术出版社

社 址：长沙市湘雅路280号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系：本社直销科 0731—4375808

印 刷：深圳市彩帝印刷实业有限公司
(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址：深圳市福田区车公庙天安数码城F3.8栋2楼CD座

邮 编：518034

出版日期：2003年5月第1版

开 本：889mm×1194mm 1/32

印 张：3.625

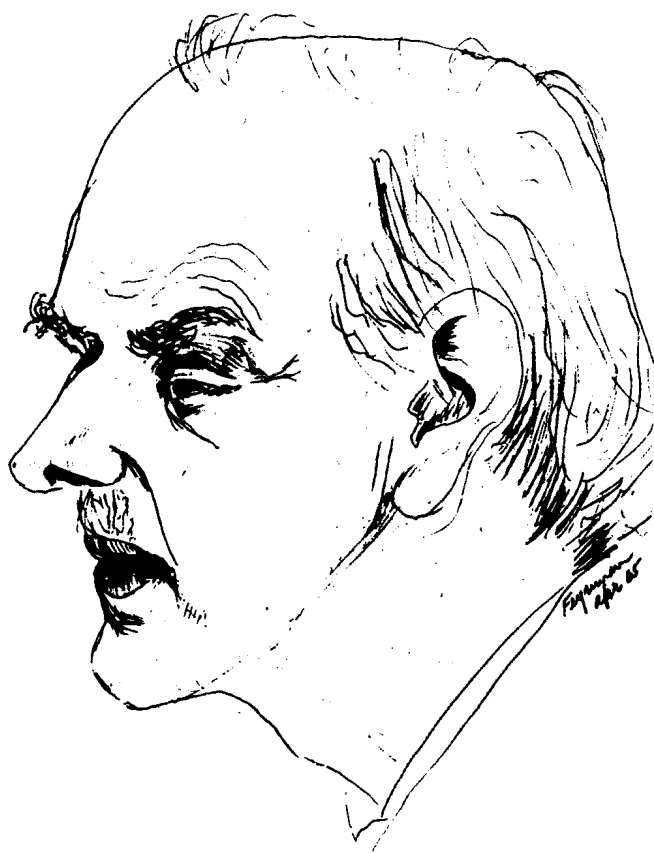
插 页：2

字 数：78000

书 号：ISBN 7-5357-3689-0/N·110

定 价：12.00元

(版权所有·翻印必究)



理查德·费曼为狄拉克画的速写



总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教



育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗，中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身



的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴涵在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会



前 言

保罗·狄拉克(Paul Dirac)是 20 世纪最杰出的物理学家之一。量子力学的发展发轫于 20 世纪之初,但正是狄拉克,他在 1925 年和 1926 年创立了一个像牛顿力学那样令人信服的理论,才使这个学科获得了它的最终形式。

狄拉克一开始就着手进行将量子理论与爱因斯坦的相对论(1905 年的狭义相对论)相结合的工作。这两个奇迹般的理论之间的联姻的本质以及这一结合所产生的后果从 1925 年至今经常是基本物理学的首要研究任务。对这一极重要的事业,包括在 1930 年对反物质存在的预言,狄拉克所作的贡献比其他任何人都多。

狄拉克逝世于 1984 年。剑桥的圣约翰学院(狄拉克学院)非常慷慨地捐资赞助在剑桥大学每年举行一次报告会来纪念狄拉克。本书的头两篇狄拉克纪念演讲是谈量子论与相对论的结合这一狄拉克论题的两个不同侧面的。

自二次世界大战以来,理查德·费曼(Richard Feynman)将狄拉克的相对论性的量子理论发展成为一个能对粒子与辐射的相互作用做出物理预言的普遍而又有效的方法,他在这方面所做的工作超过其他任何人。他的工作是对狄拉克工作的一个出色的补



充。他做物理研究的风格一直有广泛的影响。这里发表的他的这篇演讲就有这种风格的一点味道，他在这里阐述了作为狄拉克反物质预言基础的物理实在。

以电与磁作为一方(麦克斯韦在一个世纪以前已经将它们统一了起来)，以放射性衰变中的弱力作为另一方，这两者的统一已成为相对论性量子理论时代登峰造极的成就，斯蒂文·温伯格(Steven Weinberg)是这一统一理论的主要创始人之一。这一理论预言了一个新的粒子及其性质(其重量相当于一个重原子)，随后于1983年在日内瓦欧洲联合核子研究中心(CERN)的实验室中成功地产生了这个粒子，其性质与预言的完全一致。这是半个世纪以前狄拉克预言正电子的存在及其随后发现这一历史的回响，虽然产生一个正电子所需的能量小了100000倍。

温伯格在他的演讲中阐明了量子理论与相对论合在一起是怎样严格地限制了大自然的规律，同时对如何将爱因斯坦(1915年)的引力理论与量子理论协调一致起来作出了设想。

我们在剑桥大学的这些人是幸运的，因为这两位权威的物理学家同意来这里作演讲以纪念狄拉克。他们吸引了好几百名本科生和研究生的听众，其中有些是物理学家，有的不是。费曼和温伯格两位都很关心向非专业人士解释物理学^①，我们希望本书也会使广大的读者感兴趣。

狄拉克用下面的话来表述他的物理哲学：“物理定律应有数

① R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. Sands(1963). *Lectures in Physics*. vols. 1—3, Addison-Wesley.

R. P. Feynman(1985). *QED*. Princeton University Press.

S. Weinberg(1978). *The First Three Minutes*. Fontana. (先前曾由 Deutsch 在 1977 年出版)

S. Weinberg(1983). *The Discovery of Subatomic Particles*. Scientific American Library



学美。”^①狄拉克、费曼和温伯格他们每人都创立过漂亮的理论，它们都在实验检验中得到过轰动一时的支持。不过这些实验已经超出了这两篇报告的范围，是另一回事了。

约翰·泰勒

1987年9月

^① 见 R. H. Dalitz and R. Peierls(1986). In *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*(英国皇家学会会员传记体回忆录). vol. 32. pp. 137 ~ 186. 皇家学会。

作者简介

理查德·费曼(1918—1988)生于纽约市。他在麻省理工学院获得学士学位,并在1942年由普林斯顿大学授予博士学位,在该校他在约翰·惠勒的指导下做研究。从1942年到1946年在洛斯·阿拉莫斯实验室工作,从1946年到1951年在康奈尔大学工作,最后是加州理工学院的物理教授。由于他在电动力学上的工作,获得了1965年的诺贝尔物理学奖。

第一推动丛书<第3辑>

从反粒子到最终定律

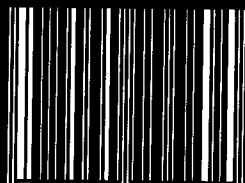
S·温伯格1933年出生,1954年毕业于康奈尔大学。1979年因弱电统一理论与格拉肖和萨拉姆分享当年诺贝尔物理学奖。他是美国科学院院士、文学和科学院院士,英国皇家学会外籍会员,国际天文学会会员,美国哲学和科学史学会会员,美国中世纪学会会员。曾任美国军备控制和裁军机构顾问,美国防御分析研究所顾问等职。他的《广义相对论与引力论》、《最初三分钟》等书曾风行世界。

Elementary Particles and the Laws of Physics

□责任编辑/吴 炜 陈 刚

□装帧设计/谢 颖

ISBN 7-5357-3689-0



9 787535 736895 >

N·110 定价: 12.00 元



目 录

> 前言	1
> 第一章 存在反粒子的理由 理查德·费曼	1
> 第二章 物理学的最终定律 S·温伯格	40
> 附录 真与美的追求者：狄拉克	70



第一章 存在反粒子的理由

理查德·费曼

这篇报告的标题不够全面，因为实际上我想谈两个方面的问题：首先是谈为什么会有反粒子，第二是谈自旋与统计之间的联系。在我年轻时，狄拉克是我心目中的英雄。他突破性地开创了一种研究物理的新途径。他敢于直接猜想一个方程的形式，随后再试图对它进行解释。这个方程我们今天就称之为狄拉克方程，麦克斯韦当年却只是靠了大量的“齿轮系统”^①才获得了以他的名字命名的方程的。

到这里来我感到非常荣幸。我应该接受这个邀请，毕竟他始终都是我心目中的英雄，而且我自己能来这儿作纪念他的报告是一件再好不过的事。

狄拉克以其电子的相对论性方程，用他的话来说，成为将量

^① 为了解释电磁现象及其规律，麦克斯韦建立了以太的流体动力学模型，由于其不足以说明电场与磁场的相互转换而被他放弃。接着他建立了以太的第二个模型，这个模型在空间处处布有齿轮和滚珠轴承。利用这个模型他不仅揭示了当时所知的全部电磁现象，还预言了电磁波的存在。所谓麦克斯韦齿轮系指的就是这个以太模型。但麦克斯韦并不满足，他进一步建立了以太的第三个模型，一个更为形式的、数学的模型，一直被人们沿用至今。——译者注



保罗·狄拉克

理查德·费曼

子力学与相对论嫁接到一起的第一人。起初他认为方程所要求的自旋，或者说内禀角动量是关键，而自旋正是相对论量子力学的基本推论。然而，在解决了这个方程中所出现的负能疑难之后，终于证明了，将量子力学与相对论结合起来所必需的关键思想是存在反粒子。一旦你有了这个思想，正如泡利(Pauli)和韦斯科夫(Weisskopf)所证明了的，你就可以对任意自旋的粒子同样来做了，因此我想从另一条路出发，试图来说明，如果你想将量子力学与相对论结合到一起，为什么就必须有反粒子。

沿着这种路线进行，我们就能解释这个世界另一个巨大的秘密，这就是泡利不相容原理。泡利不相容原理是说，如果你取一对自旋为 $\frac{1}{2}$ 的粒子的波函数，然后交换这两个粒子，则你所得的波函数是原来的波函数前加一个负号。不难证明，如果大自然是非相对论性的，那么如果事情开头是那个样子，则永远会是那



个样子，因而问题就被推回到创生本身，而只有上帝才知道那是怎样完成的。有了反粒子，那么粒子与其反粒子的偶产生就有了可能，例如电子与正电子偶的产生。这时令人难解的谜就是，如果我们产生一对电子与正电子，那么这个刚刚产生的电子为什么对身边早已存在的电子必须是反称的呢？也就是说，为什么它不能进入与已经在那儿的电子相同的状态呢？因此，由于粒子与反粒子的存在，我们就可以提一个非常简单的问题：如果产生两对电子与正电子，并且来比较两种湮灭过程的几率振幅，一种是产生后就直接湮灭，一种是所产生的电子相互交换后再湮灭，那么这两种湮灭的几率振幅为什么要相差一个负号？

所有这些问题很久以前就用一种漂亮的方式解决了，按照狄拉克的精神，用一堆符号和算符来处理是最简单的。我打算回溯到麦克斯韦的“齿轮”时代，尽我的可能来告诉你一种看待这些问题的方式，这样它们或许显得不那么神秘。对我们已经知道的结果，我并没增添什么新东西，下面所讲的只是阐释。所以我们在此首先来说明，为什么必须有反粒子。

相对论和反粒子

在通常的非相对论量子力学中，当初始态处于 ϕ_0 的粒子受到一扰动势 U 的作用之后，它的状态将发生改变。取 $\hbar=1$ ，则粒子最终处于态 χ 的几率幅，在差一个相因子不定的情况下，由 χ 在 $U\phi_0$ 上的投影给出。实际上，我们有：

$$\text{Amp}_{\phi_0 \rightarrow \chi} = -i \int d^3x \chi^* U \phi_0 = -i \langle \chi | U | \phi_0 \rangle. \quad (1)$$

表达式 $\langle \chi | U | \phi_0 \rangle$ 是狄拉克用来标记几率振幅的刁矢 (bra) 和刁



矢(ket), 不过这种符号我不会太常用。我将假定这个公式在过渡到相对论性量子力学时仍然成立。

现在假设有两个扰动, 一个作用于时刻 t_1 , 另一个作用于稍晚一点的时刻 t_2 , 而我们想知道, 这第二个扰动将粒子恢复到初始状态 ϕ_0 的几率振幅。记时刻 t_1 时的扰动为 U_1 , t_2 时刻的扰动为 U_2 。我们需要表达下述两个相继操作的结果: 扰动 U_1 的作用从 t_1 到 t_2 演化, 以及扰动 U_2 的作用——这可以用微扰论来完成。自然, 可能发生的最简单的过程就是直接从 ϕ_0 过渡到 ϕ_0 , 其几率振幅 $\langle \phi_0 | \phi_0 \rangle = 1$ 。这是微扰展开中的最低阶的首项。接下来的一项对应于微扰 U_1 把态 ϕ_0 变到某个能量为 E_m 的中间态 ψ_m , 这个态持续 $(t_2 - t_1)$ 的时间, 接着第二个扰动 U_2 把它变回 ϕ_0 。必须对所有可能的中间态求和。那么由态 ϕ_0 开始最终又回到同一态 ϕ_0 的总几率振幅为:

$$\text{Amp}_{\phi_0 \rightarrow \phi_0} = 1 - \sum_m \langle \phi_0 | U_2(x_2) | \psi_m \rangle \times \exp(-iE_m(t_2 - t_1)) \langle \psi_m | U_1(x_1) | \phi_0 \rangle. \quad (2)$$

(为简单起见, 我假设了没有从 ϕ_0 到 ϕ_0 的一阶几率振幅; 就是说, $\langle \phi_0 | U_1 | \phi_0 \rangle = 0$, $\langle \phi_0 | U_2 | \phi_0 \rangle = 0$ 。)如果我们用平面波来作中间态 ψ_m , 并将几率振幅 $\langle \phi_0 | U_2 | \psi_m \rangle$ 和 $\langle \psi_m | U_1 | \phi_0 \rangle$ 展开, 我们就得:

$$\text{Amp}_{\phi_0 \rightarrow \phi_0} = 1 - \int d^3x_1 d^3x_2 \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3 2E_p} b^*(x_2) \times \exp\{-i[E_p(t_2 - t_1) - \mathbf{p} \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)]\} a(x_1). \quad (3)$$

这里

$$a(x_1) = U_1(x_1) \phi_0(x_1) \sqrt{2(E_p)},$$

$$b(x_2) = U_2(x_2) \phi_0(x_2) \sqrt{2(E_p)},$$