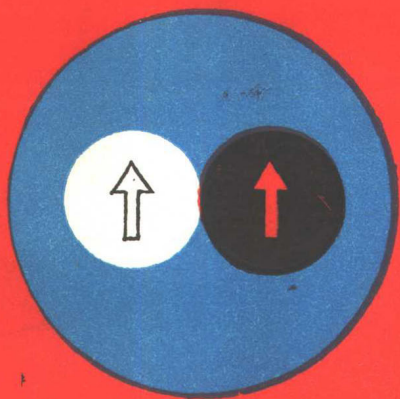
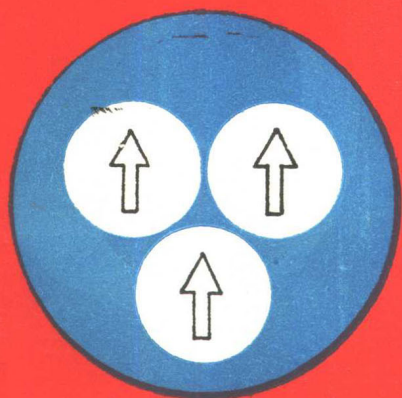


【西德】哈罗德·弗里茨著 东方晓 杜东生 周威建 薛丕友译 杜东生校



夸克

● 物质的基元



夸 克

物质的基元

[西德]哈罗德·弗里茨 著
东方晓 杜东生 周咸建 薛丕友 译
杜东生 校

高等教育出版社

内 容 简 介

本书根据美国 Basic Books, Inc 出版的 H·弗里茨 著 Quarks: the Stuff of matter(《夸克(物质的基元)》)一书的 1983 年英译本译出。

现在物理学家们普遍认为质子、中子、介子等不是不可分的“基本粒子”，它们是由更基本的物质基元“夸克”组成的。但是长期以来，一般的读者认为夸克是一种神秘莫测的东西，加之有关夸克的理论带有深奥的数学，往往望而生畏。H·弗里茨在本书中，以通俗的语言，详尽地介绍了有关夸克的历史发展线索，夸克理论的主要内容，以及有关夸克研究的物理思想。由于语言生动，科学内容讲解深入浅出，既适合于攻读物理学的读者，也适合于一般的读者。本书的主要内容有：电和磁的统一理论，强相互作用，夸克，量子色动力学，颜色的色电禁闭，胶子，弱相互作用，弱电统一理论等。

本书的适用面比较广泛，适合于大学生、教师以及一般科技人员阅读，也适用于具备高中文化水平的党政干部阅读，特别适合用作理工科基础物理课程现代物理部分的参考书。

夸 克 物质的基元

[西德] 哈罗德·弗里茨 著

东方晓 杜东生 周咸建 薛丕友 译

杜东生 校

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 7.125 字数 170 000

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数 00 001—1 980

ISBN 7-04-000764-9/O·681

定价 2.35元

译者的话

本世纪六十年代中期,在物理学中发生了一场革命,质子、中子、介子等不再是不可分割的“基本粒子”了,它们是由更基本的组元“夸克”组成的,夸克从而成了原子核物理和基本粒子研究的重要对象。可以毫不夸张地说,当今的基本粒子物理就是夸克物理。

本书作者H·弗里兹(Harald Fritzsch)积极参加了这一研究。他用通俗的语言,以“夸克”为主线,向人们介绍了今天掌握的有关基本粒子物理学的知识。虽然人们目前还无法把夸克孤立出来进行观察,但物理学家通过研究极高能量下基本粒子过程,已获得很多间接的信息。夸克之间的相互作用动力学已被认为是一种美妙的强作用理论了。以夸克、轻子为组元的弱电相互作用统一理论的成功,更激励着人们去探索一个统一理论来解释整个物理世界。

本书由浅入深系统阐述了现代粒子物理学的主要内容,介绍了统一场论的尝试及发展远景,并对世界各国最大加速器和实验室概况也作了描述。由此不但使读者了解近二十年中粒子物理学中最重要发现的历史,而且看到了物理学基础研究的前沿和当代工程技术发展的密切关系。

本书适于高中生、大学生以及相当于高中文化程度以上并对当代粒子物理这门前沿科学有兴趣的人们阅读。也适用于各级领导干部阅读,以开阔其眼界。

本书是根据1983年美国出版的英译本译出的。其中,序言,引言及1—4章由杜东生译(薛丕友校),第5章由周咸建译(东方晓校),6—10章由薛丕友译(杜东生校),11—17章由东方晓译

(周成建校),第18章至结尾由周成建译(东方晓校)。全书由杜东生总校。

最后,译者感谢石寅生同志的支持,全书中的诗都是由他译出的。译者还感谢方光银同志,他把原书德文版的内容简介译成了中文,为我们改写译稿中的内容介绍提供了很大帮助。

译 者

作者简介

H·弗里茨(Harald Fritzsche)1943年生于德国兹韦考(Zw-
ickau)。他在莱比锡(Leipzig)长大并读完大学。1971年获慕尼黑工学院博士学位。1972—1976年在美国加州理工学院从事粒子物理研究工作。1976—1979年为欧洲核子研究中心访问学者。1980年至今为慕尼黑大学理论物理教授和慕尼黑马克斯-普朗克物理学会科学家。

序

自从有记载以来,也许比这更早,人类一直为世界观的探索所困扰。最早的谜涉及到昼夜循环,四季变幻和实用科学。而实用科学减少了人类莫明其妙的恐惧和确保了大自然的恩赐。但是,当时实用性较少的科学也是卓越的;我们远古祖先中的幻想家们常常面对夜晚的星空和物质在其自然环境中的千姿百态冥思苦想,他们在探索大自然内在的一致性的研究中提出了许多模式。

其实,存在着一种启动自然界的秘诀,而这个秘诀要靠人类的智慧去解开。这种信念直到十六世纪初由于科学的成就才为人们所接受。自然哲学和实用技艺的结合才逐渐加快了前进步伐,因为科学导致发明创造,而发明创造又反过来为科学提供越来越强有力的手段。

弗里茨(H.Fritzsche)教授这本关于粒子物理学状况的书,扼要地讲述了这个领域的现代思想;这一现代思想是一系列意外事件的顶峰,在这些事件中,剧烈的观念上的革命和平稳的、非戏剧性的进步沿着无知和理解之间的整个前沿交替出现。这本书试图以通俗的语言来描述过去几十年中发生的事情。由于在1920—1930年间发生的相对论和量子力学革命,到了1940年,物理学已经变得相当令人满意了。下一步发展是战后把新技术(在一些明智的政府的赞许下)应用于建造强有力的设备——粒子加速器。开辟微观宇宙丰富多彩的领域使之可以观测应当归功于这些新的装置。

在这篇概述中,集中讨论观念的演变和实验结果的进展是非常适宜的。在加速器领域和粒子探测器领域中一系列出色的发明

创造是理论和实验的意外发现的基础。重要的发展包括廿世纪五十年代初E·D·克朗(Ernest D·Courant)和H·S·施奈德(Hartland S.Snyder)发明的新加速器原理——强聚焦原理;由此产生了一系列的加速器,最先出现的是R.R.威尔逊(Robert R. Wilson)的康奈尔(Cornell)电子同步加速器和布鲁克海文(Brookhaven)交变梯度同步加速器(AGS),此后,欧洲核子研究中心(CERN,有时也简称西欧中心)的超高能质子同步加速器(SPS)和费米实验室的(Fermilab)达到了这类加速器的顶峰(见书中照片)。G·奥内尔(Gerard O'Neill),L·琼斯(Laurence Jones),和B·里奇特(Burton Richter)的开创性思想给我们带来了碰撞束,派特拉(PETRA),电子-正电子-质子对撞机(PEP)和交叉储存环(ISR)等对撞机就是例子。费米实验室的R·威尔逊大胆采用超导技术,从而为我们在一万亿电子伏(1000 GeV)能区打开了一个窗口。在粒子探测器的发展中,引人注目的事件是D·格莱色尔(Donald Glaser)发明泡室和G·恰巴克(Georges Charpak)发明了一系列用电子学方法记录粒子在其轨迹上精确位置的装置。粒子物理学家们发明了构成现代计算机基础的数字电路。反过来,又从商用科学计算机的迅猛发展中得到巨大好处。始终令人感到惊讶的是,建造如此复杂的技术装备竟是我们理解夸克禁闭和胶子的存在等如此抽象的概念的必需的因素。

战后的加速器提供了足够的能量去探测原子核的内部深处。最初的结果是令人十分吃惊的;各种新粒子,挣脱了原子核强大力场的束缚,被发现了。它们的数量急剧增加,以致于在给它们命名时我们陷入了用完全希腊字母的极度危险之中。正如弗里茨教授清楚而详尽地叙述的那样,对这些新粒子性质的规律性的认识提供了它们内部结构的线索。这些性质是非常微妙的和难以测量

的，弄清它们需要精心安排探测仪器和极其聪明的谋划，这本身就是一个极好的故事。

作为亚结构组元的夸克，本书故事中的主角，最初是由逻辑推测提出来的。它的真实性甚至连最初提出夸克假设的人也半信半疑。关键性的实验是“深度非弹性散射”，在这类实验中，质子内部又小又硬的东西首先被电子和中微子“探针”探测到，这表明夸克是真实存在的。重要的验证来自 μ 子对实验，这是完全不同的过程，但却对参与碰撞的质子的夸克组元提供了相同的数字信息。但是，建立夸克理论的最后的、决定性的因素是廿世纪七十年代中期新夸克——粲夸克和底夸克的发现。在这个故事中，展示出了理论和实验之间的奇妙的交互作用，实验促进了理论发展，而理论又提出了新的实验，并对它做出解释。

值得注意的是，在天文学中也有类似的情况，在那里，新型的观测导致关于宇宙的形式，结构，历史和机制的戏剧性结论。在最后一章，弗里茨教授给了我们一个诱人的暗示，即两个学科——微观世界和宇宙起源的宇宙论是如何利用大统一理论把二者统一起来的。

这里所讲的故事显然还在展开。这本书中的综述还可能会有种种意外。正如弗里茨教授所指出的，我们已经到了一个关节点（如本书所述），这里，在理论与实验互相影响、交替前进的历史中，我们急需更高能量的新的实验事实。目标是清楚的和诱人的：建立一个能完美解释宇宙是如何演化的完美而又自洽的理论。然而，回首往事，我们可以重温 J·布罗诺斯基 (Jacob Bronowski) 的美丽词句：

廿世纪的物理学是一部不朽的巨著。人类集体的创造力建立起来的丰功伟绩，就是古埃及的金字塔，伊里亚特 (Iliad) 史诗，传统民歌和雄伟的大教堂等人类文明的精华也不能与之伦比。那些

相继建立这些物理观念的人们是我们时代的先驱英雄。(参阅书
The Ascent of Man, 1973)

新的世界观一旦形成, 它将使科学家们能够理解我们的宇宙的运转和历史, 一直追溯到一切都由之开始的原始火球, 并且还将使科学家们能够解释现今所观察到的一切, 以及预言宇宙将来的发展。这本书承担了将这一过程通俗地介绍给一般民众的重要任务, 毕竟民众已为这种研究付出了代价。

国立费米加速器实验室主任

L·莱德曼 (Leon M. Lederman)

伊利诺斯州 巴脱维亚

一九八二年十月

目 录

国立费米加速器实验室主任 L·莱德曼

(Leon M·Lederman) 的序	1
引言	1
I. 窥探原子内部	11
II. 电和磁的统一理论	21
III. 强相互作用	28
IV. 究竟有多少种基本粒子?	32
V. 介子, 重子和夸克	44
VI. 在加州做了质子 X 射线透视	52
VII. 新的奇异夸克	61
VIII. 带粲的粒子和新力	72
IX. 红、绿、蓝色夸克	88
X. 量子色动力学 (QCD) —— 一种强子理论	99
XI. 颜色的色电禁闭	111
XII. 色磁力	120
XIII. 夸克的精细结构	125
XIV. PETRA 加速器上的惊人发现: 夸克变成 “可见的”	130
XV. 打碎质子	139
XVI. 用什么方法“看到”胶子	150
XVII. 轻子和夸克的弱相互作用	161
XVIII. 弱电过程的统一理论	170

XIX. 物理学到达尽头了吗?	179
XX. 高能物理学的未来规划.....	193
结束语	198
附录	199
小词典——名词解释	201
参考文献	207

引 言

本世纪物理学家们正在完成非凡的业迹。借助于理论和实验的发现，他们已经能够解释宇宙——从最大尺度的宏观宇宙到最小尺度的微观世界的细节。现代天文学家通过对距地球很远的星球和星系的观测可以复述出宇宙产生的最初几分钟，即几十亿年之前所发生的事情。他们还发现了新的，以前想象不到的东西——脉冲星，类星体，和黑洞。在能谱的另一端，粒子物理学家正在研究非常小的客体的结构，它们是如此之小，以致于一个原子都显得非常巨大。在这样小的世界里，也发现了一些新奇的東西——其中最奇特的要算是夸克了，它是本书的主题。

虽然近代物理学中不平凡的发现需要依靠巨大的社会资助，但物理学家们却一直未能很成功地把他们的专门知识介绍给对此有兴趣的和提供了资助的公众。本书的目的之一就是表明，任何一个具有初等物理知识的人都可以理解物理学家们在最近三十年所完成的业迹。遵循物理学家们常用的工作方法，提出理论，做实验，有时提出机敏的猜测，读者可以发现，现代粒子物理学决不是象他们想象的那样令人望而生畏。应当承认，之所以望而却步，是因为对其中的概念和过程不熟悉，不习惯。不过，一旦你习惯了它们，你将会发现，虽然不能说物理学的一切方面都是一望而知，但基本上是简单的，有秩序的，而且也是容易理解的。我希望读者在沿着这些发现的足迹漫游之后，能够分享物理学家们在做出这些发现时的激动和欣喜。

大约在五百年前，在人类为满足其对宇宙本性无止境的好奇

心所进行的长期探索中，增添了一种新的规范——人们开始用严格的实验来验证他们的科学假设。四百年前G·伽里略(Galileo Galilei)在研究自由落体时进行了第一批可验证的实验，从而开辟了现代科学的新纪元。与伽里略从比萨(Pisa)斜塔上投掷石头相比，我们用巨大的粒子探测器来透视物质的心脏似乎提供了量级完全不同的东西。然而，在这两类实验背后的原则和由这些实验发现所激起的惊喜则是相同的：当我们做实验的时候，我们向自然界提出问题，并且迫使自然界给出答案。答案常常是相当复杂的，我们在理解它时往往有许多困难。然而，有时答案比我们预料的要简单。当真知卓识突然出现时，新的思想就诞生了——这是科学的最伟大的时刻，此时它变得象艺术杰作一样壮丽无比。

本世纪初，两种新的理论，量子力学和相对论，对物理学的发展产生了革命性的影响。1905年，当A·爱因斯坦(Albert Einstein)还是伯尔尼(Bern)联邦专利局职员时首先提出了相对论。这个理论改变了我们关于时空的整个观念。古典的时空观在数学上首先由I·牛顿(Isaac Newton)概括的，并且我们每天都仍然在使用它。但是当我们被迫不得不以象光速(每秒三十万公里)那样的速度考虑问题时，古典的时空观就不适用了。相对论的结果之一是，任何东西的运动速度都不能超过光速；另一个结果是质量不守恒。^{*} 通常情况下，我们假定一个物体的质量是其各部分质量之和。如果我们取两个钢球，每个质量是一千克，并且把它们放在一起，我们便可预料整个系统的质量为两千克。但当考虑相对论时情况就不同了。相对论告诉我们，质量可以消失也可以产生。例如，我们可以取一个中子和一个质子(这些粒子后面将详细讨论到)构成所谓的氘核。我们发现，氘核的质量比质子和中子的质量

• 这里指的是静止质量不守恒。——译者注

之和稍微少一点。

相对论改变了我们的时空观，而量子论使我们关于自然界现象的认识产生了革命性的变化。在量子理论〔由M·玻恩(Max Born), W·海森堡(Werner Heisenberg), P·约当(Pascual Jordan), 和其他人在廿世纪廿年代发展的〕范畴内，我们不可能做具有绝对确定性的断言，只能做具有某种可能性的断言。例如，我们知道在某个时间范围内中子衰变成质子和其他粒子。然而，要精确地预言一个特定的中子在什么时间衰变是不可能的。具体地说，这意味着譬如一千个中子在十一分钟内将有一半衰变掉了，但我们说不出是哪一半衰变。如果我们再等十一分钟，只有五百个的一半——二百五十个中子还活着，如此等等。因此，量子理论的规律允许我们对相当多的事情(例如刚谈到的中子)做出断言。单个中子的衰变几率并不随时间增加；中子并不“衰老”。它的衰变几率在任何十一分钟期间内都是相同的，即百分之五十。这有点象在轮盘赌中输赢一样：每个人都可以计算取胜机会的大小，但无人能保证他将取胜。

批评家们多次企图把量子理论的不确定性解释成是由于我们对一些基本过程的无知造成的。可以设想中子是一个相当复杂的物理系统，当某一组事件发生时这个系统将破裂。对导致衰变原因的无知可能会使外部的观察者大胆地用几率的术语去猜测。然而，某个幸运的物理学家借助于合适的显微镜或许能达到超出几率猜测的地步进而以绝对的确定性来讨论中子衰变。

然而，今天我们认识到，这种无知并不是因为我们没有能力观察在基本量子过程中真正发生的事情，而是因为量子理论的定律对我们的预言能力确立了一个绝对的极限。我们将永远处于不能预言一个特定的中子在什么时候衰变的地位。在这个意义上，量子力学的极限正象相对论确立光速为最高速度极限一样严格。当

然,不能超出量子理论允许的范围以更大的确定性去预言,这一点使许多物理学家,包括量子理论的奠基人,均感到困惑。爱因斯坦就曾以其著名的格言来表达他的怀疑,“我决不相信上帝会与自然玩掷骰子。”

但是另一方面,今天几乎所有的物理学家都接受量子理论,这是因为量子理论在解释原子、原子核、和基本粒子动力学方面取得了巨大成功的缘故。需要借助于几率来解释量子力学,这表明完全建筑在我们对宏观世界的经验基础上的概念有根本的局限性。只要看一看石块的平均大小比单个原子至少大 10^9 (十亿)倍就会使我们懂得为什么在将从宏观经验中产生的概念翻译成基本粒子术语时会有某些困难。如果我们想把空间、时间和速度的宏观概念用在象电子一样微小的东西上,量子力学的几率解释是我们不得不接受的折衷方案。

例如,量子理论告诉我们,我们不能同时确定一个特定的基本粒子(如质子)的位置和速度。在宏观世界我们碰不到这类问题。每个人都知道当我们说一辆汽车以每小时三十公里的速度穿过纽约时代广场指的是:在该观测时刻这辆汽车具有那个速度并处于那个位置上。我们可以用雷达(它的波与光波类似,但有较长的波长)测量汽车的速度。雷达波射到汽车上并反射回到我们这里,对反射的雷达波作出分析,将向我们提供关于这辆车的速度的信息。这辆汽车的位置也可以用普通光来确定,严格说来,我们的眼睛接收光讯号后经大脑分析也可获得这辆车位置的信息。这样的讯号,不管是雷达还是光讯号,是由特殊形式的能量和动量组成的。

雷达,光或其他形式的电磁波穿过空间传递动量和能量。例如,从背后射到汽车上的雷达讯号将把能量动量传给它而使其加速。因此,汽车的速度将增加。然而,雷达波促使汽车加速的动量是如此之小,以至于我们可以忽略它。由于在宏观世界中我们可

以略去如此小的贡献，使我们在某个特定时间能够同时确定这辆汽车的精确速度和准确位置。十六世纪初，物理学家们正是基于这种可能性才建立起完整的经典力学。

然而，经典力学的原理对基本粒子是不适用的。对一个原子或一个基本粒子的位置和速度的测定，向我们提出了一个深刻的问题。例如，让我们来考虑位于空间某点的质子。为了从实验上确定质子的位置，我们把光投射到它上面。质子将反射光波；分析这些波的反射，我们可以得出关于这个粒子位置的某些结论。然而，与汽车的情形不同，这个质子被光子打中后将剧烈地改变其速度。如果在光波撞击之前质子是静止的，那么现在由于光波已经把能量动量传给了它使它在某个方向上运动。由于这个原因，要同时精确地确定质子的速度和位置是不可能的。

在某种意义上说，速度和位置的概念是互补的。一个基本粒子的位置可以以极大的精确度被确定下来，但是，正是固定它的位置导致了它的速度的不确定。当我们精确地固定一个粒子的速度时将发生相反的情况。一旦我们这样做了，我们对其位置只能给出很差的估算。

海森伯在本世纪二十年代首先认识到了各种物理量例如速度和位置之间互补关系的重要性。他发现，不确定性的各种范围之间存在着完全确定的关系。物理量的这些不确定性是受一个常数支配的，这个常数是由M·普朗克 (Max Planck) 在本世纪初确定的。这个量称为普朗克常数，并用 h 表示，它对物理学有着根本的重要性。它的数值为 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ 瓦特·秒²。这个数值对不熟悉物理学的读者用处不大。我提到它只是想表明这个常数是多么的小，它说明了为什么在宏观世界可以忽略量子力学的不确定性。我们简直觉察不到它。例如，对一辆汽车的位置和速度也存在一个量子力学的不确定性，但这个不确定性是非常小的，比一个原子

的半径还要小得多，因而我们可以忽略它。经典力学仍然支配着宏观世界，在这个宏观世界中，普朗克常数可以看做是零。

然而，普朗克常数对我们理解原子结构却是极端重要的。量子理论与相对论结合使我们能够理解原子的构造。今天，我们可以毫不含糊地说，原子的物理已经弄清楚了。还有一些细节需要推敲，不过这已无关大局了。这就是为什么从1950年起物理学基础研究转向原子的组份和象电子、质子一类的基本粒子。更确切地说，我们应当称“所谓”的基本粒子，因为质子，如我们将要看到的，远不是基本的。在高能物理学中，特别是1969年之后，人们已经做出了许多重要的和惊人的发现，而今天，物理学家们看来正处于向彻底理解物质世界的跃进的前夕。本书描述的是过去十年中的重大成就，这些成就使物理学发生了根本改变。二十世纪七十年代的这些成就，很可能象二十年代量子理论的成就一样，对未来物理学的发展是非常重要的。不管怎样，大多数物理学家认为，过去十年中取得的某些重要进展是值得向广大公众介绍的。

本书开头先简单地概述本世纪初原子物理学的状况，然后叙述粒子物理学的起源。然而，本书的主要目的是向读者介绍作为物质基本组元的夸克的概念。虽然这不是一本关于粒子物理学发展史的书，却常常在介绍新概念和新思想的同时重温历史的进程。

由于这本书的总的论题是高能物理学和亚原子核物理学，因此，如果不提一下正在做实验的那些主要实验室，这个介绍会是不完整的。高能物理学家探索非常高的能量下的物理现象，这里的能量比起我们在原子物理学和原子核物理学中已经熟悉的能量要高得多。在某种意义上说，高能物理学是在极端情况下检验我们的理论，直到这些理论不再成立的能量为止，此时未知的自然规律将显示出来。在高能实验中，粒子，例如质子和电子，被加速到很高的能量，它们基本上以光速运动。例如，现代电子加速器可以把