

夸克



〔德国〕

海因茨·施贝瓦 著
沈 施 译

上海翻译出版公司

夸 克

〔联邦德国〕H·弗里兹希 著

沈 菡 译

上海翻译出版公司

内 容 简 介

本书专门阐述物质结构的夸克模型，把粒子物理学的来龙去脉和最新成就描绘得淋漓尽致，实为同类书中所鲜见。这本雅俗共赏的书在欧美流传甚广，诺贝尔奖金获得者盖尔曼、丁肇中、格拉肖等人对其评价较高。

Quarks: The Stuff of Matter

Basic Books, Inc., Publishers

New York (1983)

Translated by

Michael Roloff and Harald Fritzsch

Translation of:

Harald Fritzsch,

Quarks: Urstoff unserer Welt

Munich (1981)

夸 克

(联邦德国)H·弗里兹希著

沈·蒲·译

上海翻译出版公司

(上海武定西路1251弄20号)

新华书店上海发行所发行 上海东乃印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8 字数 140,000

1987年1月第1版 1987年1月第1次印刷

印数 1—5,000

统一书号: 13311·80 定价: 1.85元

中译本序

本世纪物理学的主要标志是量子论的建立及其在指导实践方面的应用。本世纪物理学的另一重大进展是(狭义)相对论的发现及其在原则上修改物理算法方面的成果。

量子论赋予看不见摸不着的微观世界一个基本的不连续性。被认定的微观客体——电子、光子以及质子、中子等等粒子——的一些物理量天然只存在于分立的一系列数值上。这些数值组成量谱，由排成次序的一组或多组所谓量子数来标记。量值的改变只能通过原则上不连续地突变的瞬时过程来实现。这个所谓“量子跃迁”的假定打破了本世纪以前传统物理学中一切天然过程都有连续性演变的根本概念。贯彻量子跃迁概念要求成对的经典数量概念用到微观世界里，就得有个得此失彼的不确定性，其乘积由普朗克引进的微小作用量常数 h (一九八〇年以来习用 $\hbar \equiv h/2\pi = 1.0545887 \times 10^{-27}$ 尔格秒 $= 6.582173 \times 10^{-22}$ 兆电子伏秒) 来确定。这就是本书第6~7页上按一般理解所要说明的思想。这类关系的建立及其说明通称海森堡不确定性原理。在量子论的公认数学表示中，该原理被描述成这类成对经典物理量相乘前后次序调换带来的、由作用量 h 决定的、在宏观尺度上微不足道的差别，即所谓对易关系。在今日已公认，用经典物理概念对微观世界作确切的描述必须依靠海森堡不确定性原理来理解。这个原理导致一些量子论独有的新概念。例如：能量和时间是服从海森堡原理的一对物理量。本此就能设想，在一刹那时间里可有能量近乎完全不确定的粒子，即原则上不能观测

到的所谓虚粒子的出现。在量子论中，真空空间可充满这类虚粒子。适当的能量供应能使之转化成真实粒子。对真实粒子需要花费在微观尺度上很长的时间去观测，故而它的能量值为能量守恒定律所确定。这正是本书第 28~29, 120, 128 页上据此所试图解说的内容。量子论的后果是：微观过程无严格因果律可用以作出确切预言，在给定宏观条件人们对此在原则上只能作几率性预言，即在原则上只能预言各种可能发生的微观过程出现的百分数(几率)。

相对论认定真空中光传播的速度(简称光速)相对于任何观测者(任何惯性参考系，即经典力学定律保持一样的各个坐标系中的任一个)永为常数(每秒约三十万公里，或写作 $c = 2.99792458 \times 10^8$ 米/秒)。这一假定来源于企图使电磁定律在各惯性坐标系中保持不变，即所谓狭义相对性原理，亦即所谓洛仑兹不变性。该不变性要求将时间、空间同等看待，二者成为四度一体，是在不同观测者之间可相互转换的两个部分。在相对论中，这个所谓洛仑兹坐标变换被用于一切物理学定律，即要求一切定律在洛仑兹变换下不变。这就全然改变了牛顿式的时间空间各自独立的旧概念，使牛顿时空概念在物体速度接近光速时不再近似成立。新的时定一体概念带来如下众所周知、完全不同于牛顿力学的后果：

(1) 静止物体的质量是其所含(潜在)能量的量度，能量数值等于质量乘以光速平方，因而微小质量也含有巨大能量。

(2) 一切能量都相当于质量，质量数值等于能量除以光速平方，因而运动着的物体比起静止时附加有(动态)质量。

(3) 以光速在真空中运动的东西(辐射量子)，其质量全

部来自动能，因而无所谓静止质量，俗称无质量粒子。有静止质量的物质粒子，其运动速度永远达不到光速。

(4) 一物体裂成几部分，如果裂块质量之和小于(反之，大于)原物体质量，则释放出(反之，需外界供给)能量。相反，几个物体合而为一，如果原物体质量之和大于(反之，小于)合成物的质量，则也释放出(反之，需外界供给)能量。

这些后果正是本书中讨论可观测粒子质量及其转变反应时(例如第3, 14, 20, 28~29, 34, 120页上)所能解说的理论根据。实践表明情况确是如此。

把量子论和相对论生硬地并在一起，进一步导致全然违背经典概念的新理论认识。相对论本身当然不能预期有虚粒子概念的引入，量子论本身也不能导致能量转换原理的出现。混在一起却成为现阶段(当今)理论物理学的这种无法避免嗜下的营养。但是，应该指出，晚近对量子论基本概念的研究越来越清楚地表明，用几率对量子论进行物理解释不可避免地要出现以非局域性方式变化的数量，回到物理学家们早已废弃的瞬时超距作用理论，故而是违背相对论精神的。因此，最早把量子论和相对论富有成效地拼在一起的狄拉克，在去世前不久(于一九七三年)就着重指出：“我们所能建立的理论是非局域性的，对此当然不能感到满足。我认为应该说，量子论与相对论的调解问题尚待解决。物理学家们目前使用的概念是不恰当的，只是以形式性方式应用这些概念已变得很人为的了。……我感到，如果我们只是应用数学规则，就完全不能有明确的物理概念，这不是物理学家所能感到满意的。……我们必然要期待看到有基本特征的未来发展。”当代理论面临的这种根本性困难至今仍未有克服。处于这种混沌

情况下，要想全然单靠使用从日常经验建立的语言发展出来的经典物理学语言，以自圆其说的方式来描述、解说层层深入的微观世界是极其困难的，本书也不能例外。尽管如此，为公众适当披露当前物理学家们对微观世界的深入认识，还是很有必要的。因此可以说，这本书的成就是难能可贵的。

全然违背经典概念最突出的新认识是：真实粒子从真空中产生（例如，虚粒子变成真实粒子）及真实粒子在真空中湮灭（例如，真实粒子变成虚粒子）。利用这项能量在真空和实物之间的转换概念才能说明经典概念无法解说的粒子共生和湮灭的实验事实。这赋予真空以非常复杂的性质（虚结构），至今还远未澄清。但是，在创造能有实效、非来自日常经验，因而很难说有真凭实据的物理学语言方面，当前人们只能做到这一点。本书作者显然不惜承担责任，把这类新认识的广泛应用生龙活现地讲得很具体〔例如：在第120页上把虚粒子定义为一种志愿粒子(would-be particle, 愿意是, 但还不是)，无确定质量，仅在短时间、并在微小空间里存在着；第152~153页上关于色力弦的增进；第154~155页上关于形成喷注的所谓夸克碎裂(quark fragmentation)；第155~157页上提及至少间接地第一次“看到了”夸克等等〕，就难免冒言过其实的风险了。可是，这也正说明本书有其独到之处，供人鉴赏。

为了贯彻用真空虚粒子概念来作物理说明，本书大量采用对比方式，从当前成效最显著的QED引出有待进一步检验的QCD，并强调光子不带电而胶子带色这一要点，从而得以解说QED及QCD的正反差异。这就给带色粒子（夸克及胶子）不能自由存在的假定找到了一个借口（为了防止真空爆

炸)。从七十年代末开始，这类见解正在流行，本书是代一表作。

我同意本书作者所说“现代物理学的基本思想十分简洁，完全能为外行人所领会”。本书旨在使广大读者理解当代物理学家们对“一切物质在根本上是怎样组成的”所取得的最新认识及其中存在的未决疑难。他为达到这一目的最早做出了理应受到广泛欢迎的贡献。可以说，哈拉尔德·弗里兹希是第一位参予其事的粒子物理学家，他把同事们一直未肯坦白直说的激动人心的故事相当忠实地公诸于世。^{*}就这一点而论，已足以使我愿意把这本书推荐给读者。

卢鹤绂 于 上海

一九八五年一月

* 夸克理论创始人盖尔曼对本书的评价是：“基本粒子是筑成一切物质的块块，对它们的研究是全部自然科学的基础。近几十年来，在理解基本粒子体是怎样动作的这一方面我们大有进展。我们之之那些得幸有机缘参予做出导致这项发现的惊险深奥的人们不应该把这个激动人心的故事留为已有，秘而不宣。我的朋友和合作者哈拉尔德·弗里兹希在他的《夸克》一书中，把这个故事公布给广大读者，并使他们易于接受。”

英译本序

人类自有历史记载以来，总是与一种世界观联系着；推测起来，有记载以前很久，即便如此的了。人们最早的疑惑，涉及到昼夜的交替、季节的更替，乃至实践中遇到的科学问题；这种实用性的科学，使人们减弱盲目的恐惧心理，保证从自然界获取慷慨的赐予。至于应用颇为稀罕的纯科学项目，也是相当重要的。我们古代祖先中的那些幻想家，研究美妙的星空、自然环境中无限多样物质的性状，并在对自然界潜在的条理性的探索中建立起一些理论雏型。

人们相信，事实上存在一把适用于物理世界的钥匙，它赋予人类以思维的方法；这种信念是以十六世纪科学初始阶段的丰硕成果为基础的。自然哲学与实践技术的结合，加快了信任感确立的进程，因为科学引导人们创造再创造，转而为科学本身提供越来越有力的研究工具。

弗里兹希教授的这本阐述粒子物理的书，总结了当今关于该领域研究课题的一些看法。这些流行的观念在一系列发展事件中可谓登峰造极；在该事件系列中，激烈的智力革命迅速地、但并非戏剧性地推进着，遍及介于知与不知之间的整个前沿阵线。本书企图为非专业人员描绘出过去几十年中的发展事件。及至一九四零年，物理学因一九二零～一九三零年之间相对论和量子力学中所爆发的革命而变得光彩夺目。接下去的发展是，战后把新技术用于制造有效的测试仪器和粒子加速器（得到一些受感化的政府机构的允许）。人们完

全意识到：由此打开了一个可供观测的丰富灿烂的领域。

书中集中评述基本概念及实验的演变过程是适当的。理论上和实验上带根本性意义的成就是加速器和粒子探测器两方面的卓越创新。值得注意的进展是：发明了新颖加速原理，此即由欧内斯特·D·库兰特(Ernest D.Courant)和哈特兰·S·斯奈特(Hartland S.Snyder)于五十年代初期引入强聚焦加速原理；据此建造了不少加速器。最早是罗伯特·R·威尔逊(Robert R. Wilson)创制的康奈尔电子同步加速器、布鲁海文交变梯度质子同步加速器(AGS)，后来有欧洲核子研究中心的超级质子同步加速器(SPS)和费密实验室的质子同步加速器。这些加速器的照片都收入了本书。由杰勒德·奥尼尔(Gerard O'Neill)、劳伦斯·琼斯(Laurence Jones)和伯顿·里克特(Burton Richter)的一些开创性思想得以制造对撞机，联邦德国的电子-正电子对撞机(PETRA)和质子-质子对撞机(ISR)、美国的电子-正电子对撞机(PEP)便是其中几例。费密实验室的罗伯特·R·威尔逊大胆地应用超导电性，从而达到1000GeV的能量窗口。至于粒子探测器方面，亦有所进展，其中突出的事例有：唐纳德·格拉泽(Donald Glaser)发明泡室，乔吉斯·查帕克(Georges Charpak)研制成粒子径迹精确定位的电子存贮器。粒子物理学家创制了数字电路，从而奠定了现代计算机的根基；反过来，他们从广泛应用的科学计算机的蓬勃发展又中又得益匪浅。人们之所以会觉得无限惊奇，是因为建成上述那么复杂的技术性装置，竟是鉴定如同夸克禁闭或胶原子的现实性这样抽象的概念正确与否的必要条件。

战后建造起来的加速器提供足以探测原子核深部的高能量粒子。最初的探测结果就颇令人诧异。发现了一些新粒子，

严重地破坏了核内的强作用力场。新发现粒子的种类急剧增加，在命名它们时，出现希腊字母不够用的“危机”。弗里兹希教授在书中详尽而清晰地描述了这些情况，系统地说明了各种微观客体的性质，从而披露了物质基本结构的线索。微观客体的性质神秘莫测、难于测量，因此需要配置一些精致的探测仪器，并设计精巧的探测方案。所有这些，即构成本书的主要情节。

本书的主角是夸克。起初，夸克以逻辑性猜测的身份出现；其现实性尚有疑问，甚至仅作为假设而已。但在一些关于“深度非弹性散射”的决定性实验中，用电子探针和中微子探针最早探测到质子内部有小而坚实的客体存在，从而表明了夸克的现实性。重要的证据还来自 μ 子对的实验，这是一些完全不同的反应进程；但殊途同归，同样提供了关于碰撞质子的夸克组元的数据信息。事实上，导致夸克理论建立的最后关键性一着是：在七十年代中期发现了新的夸克——粲夸克和底夸克。本书展现出理论与实验之间的奇妙联系：实验促进了理论发展，而理论为实验作出启示，并解释了实验结果。

注意一下天文学领域里出现的类似效应是有益的；在那里，用新的观测方法得出关于物理宇宙的形态、结构、历史以及机理的一些引人注目的结论。在后面的章节，弗里兹希教授给我们以逗人的暗示：利用大统一理论，对微观世界的探索，与关于宇宙起源的宇宙论竟会并合一起。

这里勾勒的轮廓在书中有明晰的展示；而书中综合性的描绘更可能引起读者叹为观止。正如弗里兹希教授所指出的那样，在理论和实验相互促进、上下推动的历史发展过程中，我们已经到了急需新的高能资料的时刻。前景在望，而且是

那么撩人心扉：待到建立起一个能圆满地解释宇宙工作机理的完美协调的理论，便是抵达历史旅程的目的地。然而回顾往昔，我们可以引述雅各布·勃罗诺斯基(Jacob Bronowski)的绝妙言辞：

二十世纪的物理学是一件传世不朽的作品。但这项由人类共同奉献的创造性成果，并非是一些可与其等量齐观的纪念碑，亦非金字塔或大教堂，更非罗马式叙事诗，抑或什么脍炙人口的民间歌谣。建树一个又一个物理学新概念的，乃是当代一系列冲锋陷阵的勇士。

一旦成功，新的世界观将使科学家们通晓宇宙的工作机理、追溯到火球（一切物质均由火球起源）形成时刻这宇宙的整个发展进程，解释目前的全部观测结果，预言宇宙往后的演变形式。本书承担了以适合于广大公众理解的方式说明上述问题的重要使命，而那些读者毕竟是该领域研究工作的“出钱施主”。

费密实验室主任

利昂·莱德曼

于 伊里诺斯 巴塔维亚

一九八二年十月

目 录

引 言	(1)
1 原子一瞥	(12)
自旋——量子理论的特征之一	(17)
电子偶素——一种新的粒子体系	(19)
2 电磁统一理论	(25)
麦克斯韦方程组	(27)
虚光子	(28)
狄拉克方程和正电子	(29)
长寿命的正电子偶素	(30)
3 强相互作用	(32)
强相互作用的载荷子	(33)
微扰论和强度参量	(34)
4 有多少种基本粒子?	(37)
物理学中的能量“危机”	(39)
粒子“动物园”	(43)
质子稳定吗? ——论重子数“守恒”	(46)
轻子的组合	(49)
探索到最后,乃是夸克	(50)
5 介子和重子; 夸克	(53)
同位旋——一种新的对称性	(53)
同位旋和夸克	(56)

“夸克”——如此难以接受	(59)
6 在加利福尼亚——质子被照射	(62)
SLAC 开始工作	(63)
维系世界万物的胶子	(66)
洞察核子内部结构的中微子	(67)
7 一种新的奇异夸克	(71)
奇异数——一种新的量子数	(72)
核子的奇异“亲戚”	(74)
构成重子的“八重法”	(78)
搜索 Ω^-	(81)
夸克和轻子... ..	(82)
8 携带粲数的粒子和新作用力	(84)
介子的弱衰变	(84)
发现了中性流	(86)
在寻找新粒子的路途上	(90)
粲粒子	(94)
新物质上场了!	(99)
9 红夸克、绿夸克和蓝夸克	(100)
夸克的三“色”	(101)
色和味	(103)
色和粲	(106)
“色”被验证了!	(111)
10 QCD——一门新颖的强子理论	(113)
QED 的色相似理论	(115)
真空并非空空如也	(119)
库仑定律失效了!	(121)
QED 更完善一些	(122)

真空激发	(125)
夸克和胶子是受禁闭的	(127)
11 颜色的色电禁闭	(128)
色; 磁和电	(128)
库仑定律的色相似律	(130)
把夸克拉开	(131)
渐近自由和红外奴役	(135)
核力是什么?	(136)
12 色磁力	(139)
电子间的磁作用力	(139)
磁学中的一个实例	(140)
忽视磁作用力的重夸克	(141)
13 夸克的精细结构	(144)
电子怎么是基本的?	(145)
夸克的精细结构	(146)
14 PETRA 上惊鸿一片	(150)
真空探索	(150)
PETRA 存贮环的妙用	(152)
夸克变成“可见”的了!	(154)
15 击碎质子	(158)
更多的夸克喷注	(158)
夸克-夸克的强烈散射	(163)
夸克之间的作用力	(164)
16 如何“观看”胶子?	(168)
J/ψ 衰变中的胶子	(169)
寻找另一种夸克	(172)
I 衰变中的三个喷注	(174)

胶子的切致辐射	(176)
17 轻子和夸克的弱相互作用	(179)
高能问题	(180)
电磁作用和弱作用的统一	(182)
弱作用理论	(185)
宇称问题	(186)
弱作用和宇称破缺	(187)
18 弱电统一理论	(190)
奇迹般的质量生成	(191)
再谈电磁作用和弱作用的统一	(194)
弱同位旋双重态	(196)
再添加一种夸克	(197)
W玻色子露面了!	(199)
19 物理学到达终点了吗?	(201)
强作用和弱电作用的统一	(202)
巨大的质量尺度	(205)
再论重子数“守恒”	(210)
另外一些统一理论	(212)
20 高能物理学前景	(219)
跋	(225)
补遗	(226)
术语简释	(228)
译后记	(238)

引 言

本世纪，物理学家取得意外的成就。利用理论上和实验上的发现，他们得以解释宇宙的一些细节——从太空最遥远的地方到物质深处最细小的粒子。现代天文学家凝望着远离地球的星体、星系，从而领悟出，在十亿年之前宇宙诞生后的短短几分钟内发生了哪些现象。他们还发现了以往想象不到的新客体——脉冲星、类星体和黑洞。而在研究领域的另一端，基本粒子物理学家正探索着那么微小的客体的构造；对于这些细微客体来说，只不过是原子的尺寸，就似乎显得浩瀚无比。在极细微的层次里，同样发现了奇妙的新客体，而最奇妙的是夸克。夸克正是本书的讨论课题。

近一时期，尽管在物理学中作出这些非凡发现需要大量的社会投资；但是，物理学家们还未十分有效地把他们的专业知识，传播给对此颇感兴趣、并且提供资金的公共大众。本书的目的之一是为了表明：凡具备物理学基本知识的人，都能理解过去三十年中物理学家所取得的研究成果。按照物理学家的推理思路、实验手段，以及有时采取巧妙的猜测方式，读者就会明白，现代粒子物理并非如他们原先所想象的那么神秘莫测。无可否认，令人望而生畏的是

8710500