

国外科技经典与前沿著作译丛

夸克： 基本粒子物理前沿

— Quarks: Frontiers in Elementary Particle Physics —

[日] 南部阳一郎 著 陈宏芳 译

中国科学技术大学出版社

国外科技经典与前沿著作译丛

夸克： 基本粒子物理前沿

—— Quarks: Frontiers in Elementary Particle Physics ——

[日] 南部阳一郎 著 陈宏芳 译

中国科学技术大学出版社

安徽省版权局著作权合同登记号:第 12121115 号

Quarks:Frontiers in Elementary Particle Physics by Y. Nambu

©1985 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved.

This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore.

World Scientific Publishing Co. Pte Ltd. & University of Science and Technology of China Press 2013.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

夸克:基本粒子物理前沿/(日)南部阳一郎著;陈宏芳译. —合肥:中国科学技术大学出版社,2013.4

书名原文:Quarks:Frontiers in Elementary Particle Physics

(国外科技经典与前沿著作译丛)

ISBN 978-7-312-03129-8

I. 夸… II. ①南… ②陈… III. 粒子物理学 IV. O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 054429 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 安徽江淮印务有限责任公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 9.75

字数 157 千

版次 2013 年 4 月第 1 版

印次 2013 年 4 月第 1 次印刷

定价 30.00 元

作者介绍

南部教授 1921 年生于东京。1952 年获东京大学科学博士学位。20 世纪 40 年代后期,在量子电动力学初始形成阶段,他是朝永教授的助手。1952 年应邀赴普林斯顿高等研究院。1958 年成为芝加哥大学的物理学教授,1974~1977 年任该大学物理系主任。

南部教授在基本粒子理论的发展中作出了许多重要贡献,其中包括引入自发对称破缺的概念。他曾获得多项奖励,其中有 1970 年的数学物理海涅曼奖(Dannie Heineman Prize)、1971 年的罗伯特·奥本海默奖(J. Robert Oppenheimer Prize)、1978 年日本政府的日本文化勋章和 1982 年美国国家科学奖章。

(南部教授还获得了 1985 年马克斯·普朗克奖章、1986 年国际理论物理中心的狄拉克奖章、1994 年美国物理学会的樱井奖(Sakurai Prize),与俄罗斯物理学家维塔利·金兹堡一起获得 1994/1995 年沃尔夫奖,2005 年获富兰克林奖章。2008 年 10 月 7 日,因发现亚原子物理学中的自发对称性破缺机制,被瑞典皇家科学院授予诺贝尔物理学奖。——译者)

前 言

基本粒子物理学的目标是发现物质的基本结构和支配它的法则。我在本书中尽可能精确、全面地来讲解它在过去 50 年中的发展及目前的认识。

幸运的是,日本曾在粒子物理领域作出过一流的贡献。现在可能没有人会不知道汤川秀树(Hideki Yukawa)和朝永振一郎(Sin-Itiro Tomonaga)的名字,不过事实是还有其他许多科学家在这个领域作出过重要贡献。这些贡献不只是一些杰出的工作,而是作为一个整体,告诉了我们基本粒子理论研究应该取的总体方向。

因为我也是在这样的传统下成长起来的,我试着向读者主要呈现物理学家们达到目前的知识所经历的思考过程,而不是惯常地陈列最新知识。当然,这就必须假定部分读者已具有了一定的专门知识,不过我想如果读者从这本书中能对研究过程得到一些概念也就足够了。

基本粒子物理学在过去 50 年中取得了巨大的进步。人们已不再认为质子和介子是基本的了;夸克已取代了它们的地位。此外,已有可能将先前曾被认为是不相关的几种作用力统一起来。更令人惊讶的是,宇宙——可想象得到的最大物体的演化历史竟然可完全与能想象得到的最小尺度的问题交织在了一起。

当然,理论和实验是携手同行的。目前的加速器能量已是旧时的回旋加速器能量的百万倍以上,它需要几千人来运行以及政府的巨大支持。研究人员仍在梦想着下一代更高能量的加速器。如果我们很幸运,并且世界能和平,这些梦想最终将会变为现实。日本在理论方面作出了很大贡献,希望在实验上也能有同样大的贡献。

当我完成这本书的时候,汤川博士去世了。仿佛一个时代已经跟他一起流逝了。如果这本书能为对基本粒子物理学的发展有兴趣

的年轻读者起到引导作用,那我将感到很幸运。在这个英文版中,我对原文作了少量的更新。

最后,我要感谢里卡多·莱维塞迪(Riccardo Levi-Setti)教授和山内(Taiji Yamanouchi)博士为本书中的一些插图提供了素材。

南部阳一郎

1985年2月于芝加哥

目 录

前言	(i)
第 1 章 什么是基本粒子	(1)
1.1 一些可能尚没有答案的问题	(1)
1.2 一些不变的东西	(2)
1.3 那是真实的吗	(3)
第 2 章 夸克与轻子	(6)
2.1 夸克——还没找到的、非同寻常的基本粒子	(6)
2.2 重粒子、轻粒子与中间质量的粒子	(7)
2.3 粒子有多大	(10)
2.4 从散射实验中学到的东西	(10)
第 3 章 寻找夸克	(13)
3.1 质子和中子的结构	(13)
3.2 寻找具有分数电荷的粒子	(14)
第 4 章 各种加速器	(17)
4.1 自然的奥妙——撞击越强,产生的共振越强	(17)
4.2 加速器的工作原理	(18)
4.3 对撞束——回击的威力	(20)
第 5 章 汤川理论的诞生	(23)
5.1 由原子到原子核	(23)
5.2 汤川的介子理论	(25)
5.3 相对论量子力学	(26)
5.4 导致“介子”的想法	(30)
5.5 20 世纪 30 年代	(30)
第 6 章 新粒子的出现	(32)
6.1 库仑势和汤川势	(32)
6.2 π 介子	(34)

6.3	由两种介子理论到缪子的发现	(36)
6.4	V 粒子激动人心地登场	(37)
6.5	尝试各种办法	(39)
第 7 章	基本粒子的秩序和守恒定律	(41)
7.1	盖尔曼-中野-西岛法则	(41)
7.2	想法的关键	(44)
7.3	强相互作用与同位旋守恒	(45)
7.4	π 和核子的 3-3 共振	(46)
第 8 章	宇称与守恒律	(50)
8.1	宇称是什么	(50)
8.2	宇称不守恒	(52)
8.3	CP 破坏	(54)
8.4	时间反演下所有的自然规律都不变吗	(56)
第 9 章	强子的复合模型	(57)
9.1	由基本粒子能推出什么	(57)
9.2	费米和杨的复合模型	(57)
9.3	在基本粒子物理世界中的“基本”和“复合”	(58)
9.4	坂田模型	(60)
第 10 章	夸克模型	(64)
10.1	夸克模型和坂田模型有什么不同	(64)
10.2	夸克模型中的重子	(65)
10.3	所预言的 Ω^- 粒子的发现	(67)
第 11 章	夸克模型的演化	(69)
11.1	夸克组成的复合物	(69)
11.2	与原子核类比	(70)
11.3	夸克有了色和味	(72)
11.4	九夸克模型	(72)
11.5	是否存在带色的强子	(73)
11.6	夸克带整数电荷的可能性	(74)
11.7	意外地出现了 J/ Ψ 粒子	(75)

第 12 章	粲及其追随者	(76)
12.1	J/Ψ 显现出自然的深奥	(76)
12.2	J/Ψ 粒子的“真正身份”	(77)
12.3	第四种夸克 c 完成了夸克模型	(80)
12.4	又一次被自然击败	(81)
12.5	至少六种轻子及五种夸克	(83)
第 13 章	由弦连在一起的夸克	(84)
13.1	一个悖论	(84)
13.2	强子的弦模型	(86)
13.3	什么是弦	(90)
第 14 章	什么是部分子	(91)
14.1	强子是“软”的	(91)
14.2	无限小的点粒子	(92)
14.3	费恩曼的“部分子模型”	(93)
14.4	与夸克模型的比较	(94)
第 15 章	朝永的重整化理论	(96)
15.1	粒子物理正忙于追逐“新现象”	(96)
15.2	量子电动力学	(96)
15.3	无限的“自能”	(97)
15.4	重整化理论——放弃一些东西的行动	(99)
第 16 章	QCD——量子色动力学	(101)
16.1	由介子理论到色动力学	(101)
16.2	什么是规范场	(101)
16.3	色的动力学	(102)
16.4	胶子——将夸克粘在一起的“胶”	(102)
16.5	渐近自由	(104)
16.6	威尔逊的“格点理论”	(106)
第 17 章	对称性的自发破缺	(107)
17.1	什么叫对称性	(107)
17.2	对称性自发破缺	(108)
17.3	对称性自发破缺的遗迹	(110)

17.4	超导性	(110)
17.5	夸克质量的起源	(111)
第 18 章	弱相互作用的“倾斜”结构	(114)
18.1	上帝的“错误”	(114)
18.2	什么是弱相互作用	(115)
18.3	弱相互作用的规律	(116)
18.4	必定有一个“粲夸克”	(117)
第 19 章	温伯格-萨拉姆理论	(120)
19.1	超越汤川介子理论	(120)
19.2	W 玻色子	(120)
19.3	弱电统一	(124)
19.4	与超导电性的比较	(125)
第 20 章	统一场论	(127)
20.1	“三种力”的统一	(127)
20.2	难以置信的能量——但并非完全荒唐可笑	(128)
20.3	爱因斯坦没有完成的梦	(129)
20.4	三种力的统一和粒子的统一	(130)
第 21 章	大统一的计划	(131)
21.1	终极问题	(131)
21.2	乔治-格拉肖统一理论	(132)
21.3	还有在夸克和轻子下一层次的粒子吗	(133)
21.4	一个令人惊奇的结论——所有的物质都是不稳定的	(134)
21.5	粒子理论与宇宙学的汇合	(135)
21.6	瞬间创造物质和宇宙的秘密	(136)
术语表		(137)
索引		(140)

第 1 章 什么是基本粒子

1.1 一些可能尚没有答案的问题

大多数人,甚至那些对物理学没有兴趣的,都会听到过“基本粒子”这个词。例如,在《朝日新闻》中有一个以“基本粒子”命名的专栏。当然,报纸上的《基本粒子》栏目和我们在物理中谈到的基本粒子没有一点关系,然而选择这样的栏目名字必定是由于它是一个奇妙的吸引人的词。为什么它这么引人注意?这一定是因为,由汤川秀树的介子理论开创的日本的粒子理论的传统使民众感到自豪。

汤川理论诞生时,我还是一个高中生。我在大学主修物理时,“基本粒子”这个词已用得相当普遍了。因此,我和几个同学就一起找到我们的教授表示我们希望学基本粒子理论。

“要素”(element)这个词在化学中称为元素,是用来表示构建化学物质的基本的“积木块”;“元素”意味着所有物质都是由它构成的,而任何东西都不能构成它。这个理念可能在人类开始思考周围的环境时就很自然地形成了。不过,现代科学中元素的概念受到古希腊的自然哲学很深的影响。

那么,什么是真正的基本元素呢?这个问题可以从两方面来表述。首先,是否真的存在一种东西是基本元素?其次,如果真的有这样的东西可作为基本元素,那它是什么?显然,基本粒子物理学的目的就是要回答这些问题。

但是问题不是那么容易回答的。人们甚至不知道是否真的有这样的答案。在现代自然科学形成之前,亚里士多德(Aristotele)提出了一种理论,认为土、水、空气和火是基本元素。在西方,人们仍然说自然界对人类的影响,特别是那些由雨、雷、地震等造成的灾难,就是由“基本元素”引起的。

当然,今天没有人会认为土、水、空气和火真的是基本元素。自然科学是要求有实证的,这会迫使我们真的将物质分割到可达到的最小成分。但

是,即使我们真的照字面意义这样做了,也不可能分到底。如果我们用刀来割东西并用显微镜来仔细检查,我们也永远不能得到任何像基本构成的东西。 $1\mu\text{m}$ 大小的颗粒仍然有一定的形状且似乎还有内部结构;但我们用刀和显微镜很难再达到更小的尺度了。毕竟刀也是由基本元素构成的,所以不可能使刀刃比构成它的基本元素更尖锐。因此,我们需要刀刃比要检查的东西更尖(小),这样我们又回到了问题的起点。

直到 19 世纪,化学科学有了很快的进展,原子的概念诞生了。古希腊哲学家德谟克利特(Democritus)提出理论,物质是由不可再改变的元素,即原子(atom)(atom = a-tom = 不可分,即不可再分的)组成的,不过化学中说的原子是从化学反应的研究中自然持有的。此发现的过程完全不是我前面讲的那样单纯的机械分割的观念,而是基于根本不同的原则。我们下面就来讨论这些原则。

1.2 一些不变的东西

如果我们将几种化学物质 A,B,C,D,⋯混在一起,并发生了化学反应,例如:



等等,我们要找出混合这些物质后生成的产物所遵循的规律。为了这个目的,我们就来看看在这些反应中有什么模式。

由这些实验的结果,我们发现了物质的质量在反应前后是保持不变的。也就是说,如果我们改变对上面这些方程的释义并把物质 A,B 等看成是物质 A,B 等的质量,那些方程就变成普通的数学方程了。

这样我们就发现了自然的一个守恒律——质量守恒定律。物质间可以发生反应且完全改变它们的特征,但有某些量是保持不变的。这就是守恒律的重要性。

现在假设在更详细地研究了上述反应后,我们得知以下几点:为了使反应(1)发生,A 和 B 必须以质量比 1:2 的比例混合。就是说,如果我们将等质量的 A 和 B 混合,则总会有一半的 A 剩下来。同样,在反应(2)中物质 A,B,E 和 F 也是有固定的质量比例的,即参加反应物质的质量有一定的整

数比例关系。

在19世纪,化学正是循着对上述问题的思索而发展的。现在每个人都知道这些问题的答案,那就容易再顺着想下去:如果在许多反应中有些物质可以用最小的整数表示,那是不是所有的物质都是由这些最小单元构成的呢?这些整数的比例是否就意味着在反应中的物质是由这些基本单元组成的呢?那么,我们就把这基本单元称作“原子”,并试着把这种新理论用到其他方面去……

在现实中,化学要复杂得多。不只有一种原子;氢原子是最轻的,还有许多更重的原子(元素),它们的质量差不多是氢原子的整数倍,但却不能把它们粉碎成氢原子。如果我们再深入地研究,就会发现原子质量间并不是完全的整数关系,甚至也并没严格地遵循质量守恒。这样就开始引起一系列的问题了。

1.3 那是真实的吗

关于这些原子的存在有什么问题呢?对做化学实验的人,在他们的思想中物质是毫无疑问地以各种元素存在的。氢、氮、碳等是可以单独存在,且可以分辨的。但原子就完全不同了,我们甚至都说不出原子有多大。我们也不能用我们的眼睛看到它——我们似乎也没有远离德谟克利特的原子概念。

不过这是有很大区别的。首先,化学上关于原子的概念是基于一个定量的定律,并可以用实验证明。其次,随着研究的进展,从许多不同方面开始可以证明原子的存在。人们可以知道原子的大小,从某种意义上讲可以用我们的眼睛看到原子。

例如,粒子穿过气泡室时留下的径迹,可以给出一种“幻觉”:我们真正看到了原子。当一个人被告知原子的大小约为 10^{-8} cm 时,他一定认为不可能看到一个原子,这些径迹一定是一种幻觉。难道真是这样的吗?

纵然我们能看到面前的一本书,但我们不能简单地讲,这本书存在是因为它的尺寸大。进入并刺激我们大脑的是由书反射的光,而不是书本身。一个带电粒子进入气泡室,会使室中的液体被激发和电离;这些离子形成气泡的中心,而当气泡变得足够大时,它们反射光,就可看到了。虽然在气泡

室中看到径迹所包含的过程比看到一本书相对要复杂得多,但难道能说它们有什么根本的差别吗?

要回答这个自古以来哲学家们就曾问过的“什么叫存在”的问题,我们必须从思考那些最单纯的,像上面提到的问题着手。科学家关于这些问题的态度是相当平常的;这些问题只是常识性逻辑的简单推广。

如果我们对一本书的存在有疑问,我们就会试着去接触它。假如还有怀疑,我们就可能会问在它附近的人能否看到它。我们做了各种可想到的试验并且没有发现矛盾,那就会得出结论:书是真实的。当然,一旦说服了我们自己相信书的存在,我们就再也意识不到这类问题了。

设想一下,当我们遇到某些完全新的事物——例如 UFO,我们会有怎样的行动。我们将会遵循上面列出的步骤,一步步地去确认。在最终的验证过程中,原子的真实性正是以同样的方式建立的。如果我们假定原子有如此这般的特性,并且通过所有的可实行的试验确认了它的这些特征,我们就会相信原子的存在。我们做的试验越多,对原子特征的认识就越精确。我们也能改变或补充原子理论,而不放弃原子存在的概念。如果我们的理论不是很好,一些不自洽的情况就会出现,从而我们只能尴尬地对理论做一些修补。如果这些修补需要一个接一个地加上,那这个理论就很可能是错的,我们最好还是彻底放弃这个理论。另一方面,如果我们采用了正确的理论,那我们就可能一个接一个地揭开一些奥秘。这很像做填字游戏;我们先从看上去容易的那点开始,试出一些字。即使在几个点上似乎成功了,但后面可能会出现许多不一致之处。我们要改一下填的字,但仍不成功。接着我们会突然灵机一动,于是其他的就都迎刃而解了。

当一个物理上的理论达到这一步,我们就开始在理论上相信这是正确的和现实的。但由于物理不是一个封闭的学科而是会有变化和发展的,这种平静的情况不会持续很长时间。当我们遇到在理论结构上出现矛盾的情况时,先前的理论就变得没有用了。这样,我们就要再一次重复我们的努力,不过我们一定要记住旧的理论已经受过许多的测试,它不可能是完全错的。因为旧的理论在新的情况下没有用了,所以我们必须建立一个新的结构,它包含了可适用于特定条件下的旧理论。

原子,仍被确认为化学界中的基本粒子;但当我还是学生时,大家都相信汤川介子是真正的基本粒子。今天,一般的公众都知道夸克(quark)和轻子

这些名词。如果你问当代的物理学家,他一定会说这些是真正的“基本粒子”。

那这些夸克和轻子是什么呢?它们与原子和介子有什么关系?这本书的目的就是要来回答这些问题,在此过程中我们将了解 20 世纪物理发展的历史。

下面我们不再以年代的次序来讲述,而是将从现代开始并回顾过去。

第 2 章 夸克与轻子

2.1 夸克——还没找到的、非同寻常的基本粒子

这个有点怪异的名字是由夸克理论的创建人之一盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 命名的。我以后会详细谈到这个粒子的起源。夸克目前被认为是“基本”粒子的一种, 不过它仍然没有完全逃脱虚构的范畴。

前面我曾说过, “基本粒子”这个词是指物质最基本的组成成分。当我说夸克还没有完全逃脱虚构的范畴时, 我是很谨慎和保守的, 因为夸克理论能解释目前已知的所有现象。我这样说的意思是, 对夸克的存在, 我们还没有达到像对质子和电子的存在那样毫无异议的阶段。

为什么对此会有稍微的怀疑? 因为, 虽然假定夸克有一些已知粒子所没见过的特性, 但还没有人观察到很像它的粒子。看来不可能从物质中取出夸克并确认它的特征。而相反, 其他已知的粒子是可以取出来的, 并能对它们进行测量。核子和电子, 一开始只是根据守恒定律等而从理论上构建的, 但它们逐渐就被分离了出来, 并且其质量和电荷也得到了测量。

事实上, 如果夸克是独立存在的, 它就应该很容易被识别出来。因为假定它带有 $2/3$ 或 $1/3$ 单位电荷, 即它的电荷是电子或质子电荷的 $2/3$ 或 $1/3$ 。所有目前知道的元素是电子或原子核, 具有电子电荷 e 的零或整数 ($\pm 1, \pm 2, \dots$) 倍, 所以无论检验任何物质, 它的电荷总是 e 的整数倍。

另一个重要的事是电荷守恒定律。尽管粒子间发生反应, 一种粒子可以变为另一种, 或粒子交换它们的电荷, 但总电荷数总是不变的。这是我上面提到过的守恒律的一个典型例子, 如果这是对的, 那就不难想象有一个带有最小可能电荷量的基本成分。而且, 不只是一种物体具有最小电荷。电子、质子, 以及许多其他不同质量和特性的物质都具有 $\pm e$ 电荷。

与对所有已知粒子都有效的规则相反, 理论上夸克有史无前例的 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 电荷。就是说, 最基本的电荷单位不是 e 而是 $\pm e/3$ 。如

果真是这样,那么是不是意味着那些带有电荷 $\pm e$ 的粒子,如电子和质子,就不是基本粒子而是由夸克组成的复合物?

这个问题的答案是:质子确实是由三个夸克组成的复合粒子。事实上,夸克理论正是在构思质子是一个复合粒子的过程中诞生出来的。另一方面,电子不是由夸克组成的,它仍然是基本的。

2.2 重粒子、轻粒子与中间质量的粒子

前面我提到了电子和夸克是基本粒子,电子是一种轻子。名字“lepton(轻子)”源自希腊文,即轻的粒子。其他轻子还有各种中微子(ν)和缪子(μ)。不过,除了电子以外,其他轻子在日常生活中都不会出现。轻子的电荷只能是 $\pm e$ 或0。

与轻子相对的“重”粒子是什么?重粒子(重子)的希腊文是“baryon”,质子和中子都属于这类。众所周知,质子或氢原子核的质量约是电子质量的1800倍。中子(n)也是一种重子,数个质子和中子聚集在一起构成原子核;原子核把电子云拉在它的周围而构成中性原子。

由于质子和中子是原子核的组成成分,它们总称为核子(N)。除了核子外,重子还有 Λ (lambda)粒子、 Σ (sigma)粒子,以及其他一些不稳定粒子。现在认为重子不是基本粒子,而是由三个夸克构成的。

在重子和轻子之间有“介子(meson)”或“中间粒子”。这些介子包括汤川博士预言的 π (pion)。正如“介子”字面上的意思, π 的质量是电子质量的270倍,约是质子质量的 $1/7$ 。

然而,对粒子用质量来分类实在是没什么意义。有许多介子具有与重子差不多的质量,缪子是轻子,却和 π 的质量差不多。近来发现的轻子叫 τ (tau),它的质量比质子还重(图2.1)。

重子和介子统称为“强子”(hadron)。强子在希腊文中的意思是“强的粒子”,因为它们间的相互作用强。强相互作用或强力不同于电磁力或引力;将核子束缚在一起的核力,就是它的一种显示。两个核子间的力可看作是由核子间交换介子引起的;一个发射一个介子而另一个将它吸收。由于这种交换的频率很高,核力比电磁力要强得多。

按照夸克理论,重子是由三个夸克构成的(图2.2),而介子是由两个夸