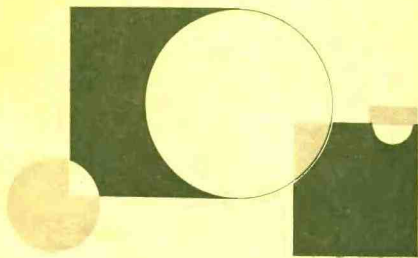


夸克、轻子与规范场

(美) 黄克孙 著



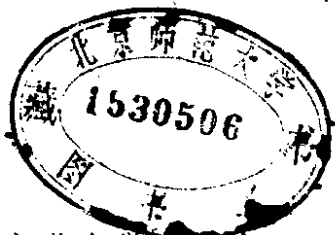
北京师范大学出版社

夸克、轻子与规范场

(美) 黄克孙 著

丁亦兵 陈崇光 许殿彦 译
孔青 杨真荣

JU11/136/09



北京师范大学出版社

夸克、轻子与规范场

(美) 黄克孙 著

丁亦兵 陈崇光 许殿彦 译
孔青 杨真荣

*

北京师范大学出版社出版发行
全国新华书店经销
中国科学院印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.5 字数: 278千

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数: 1-3 000

ISBN 7-303-00241-3/O·54

定价: 2.75 元

内容简介

本书根据世界科学出版社 (World Scientific Publishing Co. Pte Ltd) 出版的“夸克、轻子与规范场” (Quarks Leptons and Gauge Fields) 一书 1982 年版译出。

原书著者是美国麻省理工学院著名的物理学家黄克孙 (Kerson Huang) 教授。本书概括地总结了粒子物理的实验和理论的最新进展, 用统一的观点深入浅出而又全面系统地阐述了电磁相互作用、弱电统一模型和量子色动力学。对于规范场的经典理论、量子化理论、重整化理论、等效势方法以及轴矢反常现象等给出了精辟而又足够详细的讨论。

本书可以作为物理专业研究生的教材, 也可供从事高能物理的理论和实验工作者、教师及有关人员参考。

序 言

目前流行的观点认为，物质最基本的组元是夸克和轻子，它们以杨-密尔斯规范场为媒介而相互作用着（本书不考虑引力）。这意味着，相互作用的形式完全由某些内部对称群的代数结构所确定。于是，强相互作用与 $SU(3)$ 群相联系，用称为量子色动力学的规范理论来描写。弱电相互作用，如目前温伯格-萨拉姆（Weinberg-Salam）标准模型所描述的，是与 $SU(2) \times U(1)$ 群相联系的。

本书简明地介绍了上述这些思想的物理动机以及由此而建立的精确的数学形式。本书目的在于阐明这一数学形式为什么能够以及怎样帮助我们理解有关的观测现象。

不得不遗憾地指出，我未能找到一种足够简单而又易懂的方式来讨论“夸克禁闭”问题。阐述一个问题所需要的篇幅，往往由于没有充分理解它而大大增加。与其作不成熟的尝试，不如干脆完全不提。我希望本书所包括的材料足以使读者能够跟上有关这一课题的现代文献。

本书是为物理方面的研究生编写的。读者应具有一些粒子物理实验知识，熟悉量子场论包括费曼图和重整化概念。它可以做为学完量子场论后的一个学期课程的教材。事实上，本书的材料正是我于1978年在麻省理工学院（M. I. T.），1979年在中国北京高能物理所讲授这一课程的讲义的扩充与更新。关于夸克的一章是以我于1977年在智利圣地亚哥的智利大学讲学的讲义为基础写成的。

我想在此感谢 I. 萨维德（I. Saavedra），他为我提供了在

智利讲学的机会；感谢张文裕和丁肇中，他们促成了我在北京的讲学，正是在那时形成了本书的雏形。我还要感谢 M. 雅各布 (M. Jacob) 和 K. K. 菲阿 (K. K. Phua) 在本书写作过程中给我的鼓励。我特别要感谢的是我在 M. I. T 的同事们，尤其是 A. 古斯 (A. Guth)、R. 杰克夫 (R. Jackiw) 和 K. 约翰逊 (K. Johnson)，本书直接采用的很多内容都是我从他们那里学到的。

黄克孙

1982年7月29日于美国麻萨诸塞，马布里海德

目 录

序言

第一章 引言	(1)
1.1 粒子和相互作用	(1)
1.2 相互作用的规范理论	(7)
1.3 符号和约定	(14)
第二章 夸克	(17)
2.1 内部对称性	(17)
1. 同位旋	(18)
2. 规范群	(20)
3. 更一般的内部对称性: $SU(n)$	(20)
4. 么正对称性	(21)
2.2 $SU(3)$ 的表示	(23)
1. 基础表示	(23)
2. 杨图	(26)
3. 不可约表示	(28)
2.3 夸克模型	(32)
1. 夸克作为基本的三重态	(32)
2. 夸克作为基本组分	(34)
3. 权图	(36)
4. 强子的组成	(38)
2.4 色	(39)
1. 独立夸克模型	(39)
2. 色 $SU(3)$ 群	(42)
2.5 电磁和弱探针	(45)

1. 电磁相互作用	(45)
2. 部分子模型	(48)
3. 色的证据	(51)
4. 弱相互作用	(54)
2.6 粲	(57)
1. 粲夸克	(57)
2. J/ψ 和它的家族	(59)
3. 夸克与轻子间的对应	(60)
第三章 麦克斯韦场——$U(1)$规范理论	(63)
3.1 整体规范不变性和定域规范不变性	(63)
3.2 整体规范不变性的自发破缺：戈德斯通方式	(68)
3.3 定域规范不变性的自发破缺：希格斯方式	(71)
3.4 有限能量的经典解	(74)
3.5 磁通量量子化	(75)
3.6 孤粒子解：涡旋线	(77)
第四章 杨-密尔斯场——非阿贝尔规范理论	(81)
4.1 引言	(81)
4.2 李群	(82)
1. 结构常数	(82)
2. 矩阵表示	(83)
3. 拓扑性质	(85)
4. 一般性的评注	(88)
4.3 杨-密尔斯构造	(89)
1. 整体规范不变性	(89)
2. 定域规范不变性	(91)
4.4 杨-密尔斯场的性质	(95)
1. 电场和磁场	(95)
2. 对偶张量	(96)
3. 规范群的路径表示	(97)

4.5	正则形式	(101)
1.	运动方程	(101)
2.	哈密顿量	(104)
4.6	对称性自发破缺	(105)
1.	小群	(105)
2.	希格斯机制	(109)
第五章	拓扑孤粒子	(114)
5.1	孤粒子	(114)
5.2	瞬子	(117)
1.	拓扑荷	(117)
2.	显解	(122)
5.3	磁单极	(124)
1.	拓扑稳定性	(124)
2.	磁通量量子化	(126)
3.	边界条件	(129)
4.	显解	(131)
5.	物理场	(132)
6.	来自同位旋的自旋	(135)
第六章	温伯格-萨拉姆模型	(139)
6.1	物质场	(139)
6.2	规范场	(143)
1.	规范化的 $SU(2) \times U(1)$	(143)
2.	常数的确定	(146)
3.	相互作用	(147)
6.3	一般理论	(150)
1.	质量项	(150)
2.	卡比玻角	(155)
3.	川石-增川矩阵	(155)
4.	孤粒子	(157)
6.4	评论	(159)

第七章 路径积分方法	(162)
7.1 非相对论量子力学	(162)
7.2 量子场论	(168)
7.3 外源	(171)
7.4 四维欧氏空间	(176)
7.5 路径积分的计算	(178)
7.6 费曼传播子	(180)
7.7 费曼图	(182)
7.8 玻色子圈图和费米子圈图	(187)
7.9 费米子场	(189)
第八章 规范场的量子化	(194)
8.1 正则量子化	(194)
8.2 哈密顿形式中的路径积分方法	(198)
8.3 费曼路径积分, 法捷耶夫-波波夫方法	(200)
8.4 自由麦克斯韦场	(205)
1. 洛伦兹规范	(206)
2. 库仑规范	(209)
3. 时间规范和轴规范	(211)
8.5 纯杨-密尔斯场	(213)
1. 轴规范	(214)
2. 洛伦兹规范, 法捷耶夫-波波夫鬼	(214)
8.6 θ 世界和瞬子	(216)
1. θ 世界的发现	(216)
2. 瞬子作为穿透解	(218)
3. θ 作用量	(222)
第九章 重整化	(226)
9.1 电荷重整化	(226)
9.2 量子电动力学中的重整化	(230)
1. 费曼图的发散	(230)

2.	顶角	(234)
3.	电子传播子	(235)
4.	光子传播子	(235)
5.	相乘变换	(238)
6.	重整化	(239)
9.3	规范不变性和光子质量	(241)
9.4	重整化群	(243)
1.	群不变量	(243)
2.	跑动耦合常数	(245)
3.	盖尔曼-骆函数	(246)
4.	固定点	(249)
9.5	凯兰-塞曼吉克方程	(250)
9.6	例: 零质量 ϕ^4 理论	(254)
第十章	等效势方法	(258)
10.1	对称性自发破缺	(258)
10.2	等效作用量	(258)
10.3	等效势	(261)
10.4	圈图展开	(263)
10.5	单圈等效势	(266)
10.6	重整化	(268)
1.	一般方案	(268)
2.	有质量的情况	(270)
3.	无质量的情况	(270)
10.7	维度蜕变	(272)
10.8	一个非相对论的例子	(275)
10.9	对温伯格-萨拉姆模型的应用	(277)
第十一章	轴矢反常	(281)
11.1	轴矢反常的起源	(281)
11.2	三角图	(283)

11.3	辐射修正	(288)
11.4	手征流的反常发散	(289)
11.5	轴矢反常的物理解释	(291)
11.6	反常的抵消	(296)
11.7	特霍夫特原理	(301)
第十二章	量子色动力学	(308)
12.1	一般性质	(308)
1.	拉格朗日密度	(308)
2.	费曼规则	(309)
3.	夸克-胶子相互作用	(312)
4.	胶子的自相互作用	(313)
12.2	色回磁比	(317)
12.3	渐近自由	(320)
1.	跑动耦合常数	(320)
2.	真空作为磁介质	(323)
3.	尼尔森-休斯公式	(327)
12.4	π 介子作为戈德斯通玻色子	(328)
1.	低能范围	(328)
2.	手征对称性: 一个理想化的极限	(329)
3.	PCAC (部分守恒轴矢量流假设)	(332)
4.	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 衰变	(334)
5.	扩充到 π 介子八重态	(335)
12.5	$U(1)$ 疑难	(337)
12.6	QCD中的 θ 世界	(339)
1.	欧氏作用量	(339)
2.	轴矢反常和指标定理	(341)
3.	手征极限: θ 世界的坍缩	(344)
4.	夸克质量矩阵	(345)
5.	强 CP 破坏	(349)
结束语	(353)

第一章 引 言

1.1 粒子和相互作用

“一尺之棰，日取其半，万世不竭”

中国古代的一位博学家^[1]在这一名言中设计了一个假想实验。对于物理学家们为探索物质的终极结构在实验室里真正做的实验而言，这一假想实验是一个最恰当的比喻。

从现代意义上的物理学诞生以来的三个世纪内，这种“日取其半”的实验我们只做了大约六十天（达到了 10^{-16} 厘米）。在三十天左右时（约 10^{-8} 厘米），我们遇到了物质的第一个粒状结构，这就是原子。起初看来，原子似乎是不可分的，但众所周知，后来证明它可以进一步分成电子和原子核，原子核本身又可分裂成核子。现在，我们正处在核子的组分——夸克有可能得到肯定的证实的阶段。种种迹象表明，再分割过程还会继续下去。到目前为止，这位古代博学家看来仍然是正确的。

从实验的观点看，粒子，不管是弹子球、光子还是 Δ 超子，都是可探测的一份能量和动量。在我们的认识的每个阶段，总把某些粒子指定为“基本粒子”。这指的是，在我们的理论中它们是一些最基本的相互作用的单元。随着实验知识的扩充，我们常常不得不修正我们的看法。作这些修正的必要性取决于我们在这些理论上所加的严格要求，即原则上，它们必须能定量地预言出所有可能的实验结果。

幸运的是，在任何阶段，我们总是能够把某些粒子暂时看做


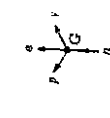
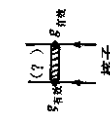
基本粒子而不危及我们改变想法的权力。其原因在于，按照量子力学，把那些激发能远高于所研究能区的量子态忽略，是一个很好的近似。例如，当能量远低于 1MeV 时，一个原子核可以唯象地当做一个质点来处理。自从原子物理的时代开始以来，我们已经发现了很多层次的亚结构。但值得注意的是，从那个时代知道的一些动力学原理（后来被综合成相对论定域量子场论^[2]），至今仍然在起作用。

实验上已观测到的粒子之间的相互作用，按其显著不同的强度分成四类：引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用。它们的简略回顾列在了表 1.1 中。

按照流行的理论观点，弱相互作用和电磁相互作用是一种统一的相互作用的低能表现形式，而强相互作用起源于一种潜藏的称为“颜色”的荷；它被永远禁闭在核子以及其它强相互作用粒子内部的夸克所携带。人们假定，所有这三种相互作用都与电动力学中熟知的情况类似，以最小耦合方式，通过交换矢量介子而传递。我们甚至还能推测到，所有这三种相互作用实际上都是单一的一种“大统一”的相互作用的低能表现形式，但这种统一只有当能量高达 10^{17}GeV 以上时才能直接显示出来。不幸的是，由于完全缺乏实验信息，人们还讲不出任何关于引力相互作用微观方面的可靠的知识。在把所有的相互作用综合在一起的终极统一的理论中，引力可能是重要的，但是本书不打算对它进行什么讨论。

把粒子从理论上分类的基础是假定在彭加勒 (Poincaré) 变换下，即洛仑兹 (Lorentz) 变换和时空平移下，物理定律是不变的。一个粒子，不管它是基本的还是组合的，都被定义为量子场的一个状态。在彭加勒群元素的作用下，这个状态按照确定的不可约表示变换。这意味着，粒子有确定的质量和自旋，而且与每个粒子相联系都有一个相同质量、相同自旋的反粒子^[3]。定域

表 1.1 四种类型的相互作用

相互作用	引力	弱	电磁	强
表现形式	天体力学	β 放射性	日常世界	结合原子核
量子观点	 <p>引力子 质量1 质量2</p>	 <p>光子 电荷1 电荷?</p>	 <p>S 有效 核子</p>	
静 势	$-\frac{\gamma m_1 m_2}{r}$ <p>r = 源之间的距离</p>	—	$\frac{q_1 q_2}{4\pi r}$	$-\frac{g^2}{4\pi r}$ $\frac{\hbar}{\mu c} \sim 10^{-15} \text{厘米}$
耦合强度	$\frac{\gamma m_p^2}{\hbar c} = 5.76 \times 10^{-38}$ <p>m_p = 质子质量</p>	$G m_e^2 = 1.01 \times 10^{-5}$	$\frac{e^2}{4\pi \hbar c} = \frac{1}{137.036}$ <p>e = 电子电荷</p>	$\frac{g^2}{4\pi \hbar c} \approx 10$

场论中微观因果性的假设更进一步包含自旋和统计之间的一种联系：有整数自旋的粒子是玻色子，有半整数自旋的粒子是费米子[4]。人们还要求粒子间的相互作用在彭加勒群下不变，这给可能的定域量子场论加上了一些非平庸条件[6]。

除了彭加勒不变性这种时空对称性外，还有一些内部对称性，它们和粒子态不依赖于时空的变换有关。相互作用对内部对称群的不变性给出标志粒子态的另外一些量子数，象电荷、重子数和同位旋等。

图 1.1 给出了部分已知粒子的一份清单，按照质量、自旋、内部量子数以及它们参加的相互作用类型把它们分了类。

“强子”是指那些参加强相互作用的玻色子和费米子，“轻子”是指不参加强相互作用的费米子[注 a]。强子中，“介子”是重子数为零的玻色子，而“重子”是重子数不为零的费米子[注 b]。所有这些粒子中（除了图 1.1 中没有画出的光子）只有电子和核子与我们的日常经验有关。人们或许还可以更进一步，把作为生成太阳能的重要催化剂的中微子包括进来，而 μ 子则是上帝的恩赐[注 c]。所有别的粒子最初都是在高能加速器中产生的。

有两个鲜明的特点应该提一提。其一，所有的轻子似乎都是类点粒子，它们的“半径”上限的最新实验值是 10^{-16} 厘米[6]。对于 τ 子，这一点特别值得注意，因为它比质子还要重一倍左右。其二是强子态的数量急剧增长。正如哈格栋(Hagedorn)[7]指出的，强子态密度对质量的关系图（如图 1.2 所示）暗示着一

[注 a] 迄今观测到的所有玻色子除光子外都参加强相互作用。历史上，轻子的命名是因为它们是轻的，但随着 τ 子的发现，这一点不再正确了。

[注 b] 所有的重子都是费米子，而所有的介子都是玻色子，其所以如此的原因在于相对论场论中重子数守恒，即拉氏量中费米场必须以双线形形式出现，而玻色场可以线性地出现。

[注 c] 拉比(I. I. Rabi)曾问道：“谁安排了这一切？”

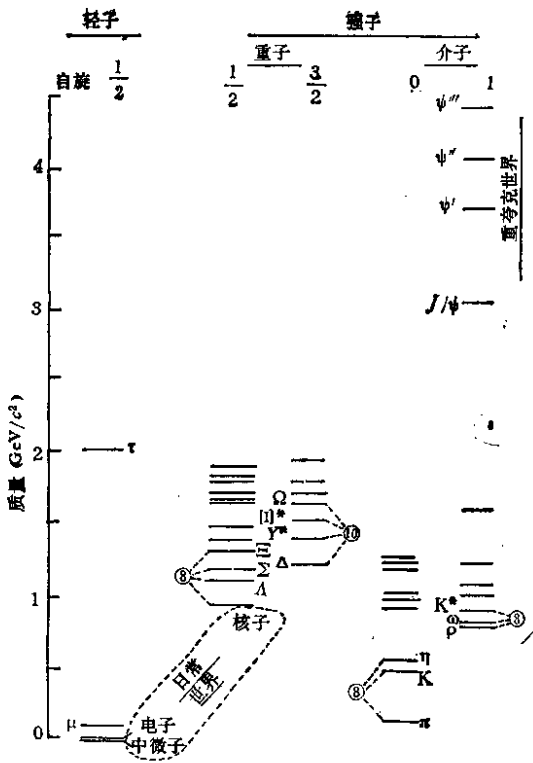


图 1.1 粒子质量谱