



夸克之间的色相互作用

魏安赐



子数,即颜色同位旋 I_c 和颜色超荷 Y_c 。

夸克的某种色态和反夸克的相反色态(彼此互为补色),对应的每一色量子数互相等值异号。

二、夸克相互作用的规范场理论

按照量子场论,每种粒子都对应着与之相当的场,场是没有几何形体、但有时空广延和特征量度的物质。轻子和夸克这些自旋为 $1/2$ 的费米子所对应的场称为物质场。费米子或物质场之间的相互作用,是通过自旋为整数的玻色子所传递的。传递相互作用的玻色子所对应的场称为规范场。

物理系统的基本性质(如运动方程、能量、动量、角动量等),被拉格朗日函数(体系的动能和势能之差)所表征。在确定的时空点上,描述微观粒子状态的波函数(也是粒子所对应的场的场量)具有的一定相位,表征粒子在该时刻和位置上的波动状态。把粒子的波函数在不同时空点的各自相位,分别改变与各自时空点相关的数量 $\alpha(x_\mu) \approx \text{常量}$ 。在这种与时空坐标 x_μ 有关的可变换下,若系统的拉格朗日函数具有不变性,从而相应粒子的运动规律和场方程的形式保持不变,则该粒子及其对应的场就称为具有定域规范不变性。在定域规范变换下,与其它粒子或场没有相互作用的自由粒子或自由场的运动规律,是会改变的;而自由场和规范场发生相互作用后的运动规律却是不变的。物质场之间的相互作用,往往导致场量发生和时空坐标有关的相位变化。双方都需要再和某种相应的规范场发生相互作用,才能在必然伴随的上述相位变换下具有定域规范不变性,从而双方才能保持各自原来的物理面貌发生相互作用。因此,物质场及其相应粒子之间的相互作用,是通过规范场的媒介而实现的。规范场是传递物质场及其相应粒子相互作用的具有定域规范不变性的场。

夸克和反夸克具有质量、电荷、弱荷和强荷(色荷),可以参与引力作用、电磁作用、弱作用和强作用四种基本相互作用。本文主要介绍夸克之间的强相互作用,即色相互作用。

一、夸克的味与色

目前确认夸克共有六种,即 u, d, s, c, b, t , 它们各有对应的反夸克,夸克的种类被形象地比拟为味道。六味夸克分为三代: $(u, d), (c, s), (t, b)$ 。在强子中,同一代夸克以及不同代夸克之间,都可以通过交换中间矢量玻色子而发生弱相互作用,弱相互作用可以改变夸克的味道。但是,只在不同代的夸克之间,才有弱相互作用的混合效应。

格润伯格和盖尔曼分别于 1964 年和 1972 年提出:夸克、反夸克具有发生强相互作用的内禀属性,其表征量度是一种称为强荷或色荷的量子数。每一味夸克按其在强相互作用中的状态,可以区分为三种不同的态,称为颜色三重态。每一种态具有一种色荷,每味夸克都分别具有三种色荷,形象地比拟为颜色中的三基色——红(R)、绿(G)、蓝(B)。每味反夸克也都分别具有三种反色荷,形象地比拟为三基色的补色:青蓝(反红色 \bar{R})、洋红(反绿色 \bar{G})、淡黄(反蓝色 \bar{B})。

夸克和反夸克的每种“颜色态”,都对应两种色量

果时,他转而研究电子质子深度非弹性散射,运用流代数求和规则对实验结果作了分析,并提出标度无关性(scaling)对实验结果作出解释。流代数是抽象的数学方法,他的工作一时未能得到人们的理解。

1968年8月,正当人们对标度无关性的物理意义疑惑费解之时,费因曼来到 SLAC。实验小组向他展示深度非弹性的反常结果并告诉他布约肯用标度无关性作出的解释。费因曼很感兴趣,只用了一个晚上就解决了这个难题。他把质子看成是部分子(类点粒子)的复合体,把电子质子深度非弹性散射看成是电子与部分子发生弹性散射。经过计算,证明布约肯的标度无关函数正是部分子的动量与质子动量之比。就这

样,费因曼从深度非弹性散射和标度无关性找到了部分子模型的重要证据。

费因曼的部分子模型和盖尔曼的夸克模型有异曲同工之妙,他们从不同角度用不同方法达到了相同结论。人们很快就明白了,原来部分子和夸克是一回事。

电子质子深度非弹性散射实验还表明,盖尔曼在 1962 年提出的电中性粒子“胶子”有可能存在。1971 年韦斯柯夫和库提提出,正是这样“胶子”在夸克间传递强相互作用,才使夸克组成强子。接着,1973 年创立了量子色动力学,1979 年丁肇中小组首先找到了支持胶子存在的证据。由 SLAC-MIT 实验引起的一系列新进展,使物理学进入了一个新的时代。

粒子 颜色	夸 克			反 夸 克		
	红 (R)	绿 (G)	蓝 (B)	青蓝 (\bar{R})	洋红 (\bar{G})	淡黄 (\bar{B})
I_c	1/2	-1/2	0	-1/2	1/2	0
Y_c	1/3	1/3	-2/3	-1/3	-1/3	2/3



夸克场对应于“颜色”三重态的定域规范变换,包含八种独立变换,对应八种规范场,称为色场或胶子场.其量子是静质量和电荷为零、自旋为1的胶子(gluon),

以符号 g 表示.夸克之间的强相互作用,是通过胶子场传递的,也可说成是通过交换胶子而实现的.

胶子也具有色荷.八种胶子分别带有不同的复合“颜色”,由红、绿、蓝三种基色和青蓝、洋红、淡黄三种“反基色”的各种可能的组合所形成.组合共有九种,其中六种是每种基色与另一种不互补的反基色的组合: $G\bar{R}$ 、 $B\bar{R}$ 、 $R\bar{G}$ 、 $B\bar{G}$ 、 $R\bar{B}$ 、 $G\bar{B}$.另外三种是每种基色与其对应的互补反基色的组合: $R\bar{R}$ 、 $G\bar{G}$ 、 $B\bar{B}$.色量子数彼此抵消为零的互补组合的状态可以任意,但只需选择其中三种.一种是 $(R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B})/\sqrt{3}$,三种基色与其补色的贡献相同,这种组合与无色等效,可以去除;另外两种是

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(R\bar{R} - G\bar{G}) \text{ 和 } \frac{1}{\sqrt{6}}(R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}).$$

加前六种,共对应八种分别带有不同复合颜色的胶子.

三、夸克间色相互作用的主要性质

1. 夸克间的强相互作用与其味道无关,只与其颜色有关.每味夸克都以相同的方式和其它夸克发生“味盲”的色相互作用.

2. 夸克和胶子在近距离上的内禀强耦合常数 α_s , 和唯象强荷 g_s 的平方成正比.

$$\alpha_s = g_s^2 / 4\pi\hbar c \approx 0.2 - 0.5$$

3. 胶子不直接和电磁场及弱中间玻色场相互作用.

4. 夸克交换胶子后,不改变味道,但可以改变颜色.胶子是没有味道的,夸克在和胶子作用时不改变味道.前六种胶子带有由单一的基色和不互补的反基色合成的复合颜色,当夸克之间以相同的色荷交换这六种胶子之一时,就会改变颜色;例如,任何味道的红

夸克,可以放射一个 $R\bar{G}$ 色胶子而变为相同味道的绿夸克.第七种和第八种胶子带有由若干基色和互补的反基色按不同比例合成的复合颜色,当夸克之间以具有一定比例关系的不同色荷交换第七种或第八种胶子时,都不改变颜色.

5. 在强相互作用中,夸克和所传递的胶子的味、色量子数分别守恒.每个夸克的每一味量子数(如电荷、自旋、同位族、重子数等),在传递胶子前后都分别相等.每个夸克在吸收胶子前(或发射胶子后)的某一色量子数,与吸收(或发射)的胶子的同一色量子数的代数和,等于这个夸克在吸收胶子后(或发射胶子前)的该色量子数.

6. 胶子和夸克反夸克对可以相互转化.强子中决定其性质的味道和数目都完全确定的少数夸克或反夸克,称为价夸克或价反夸克.每个强子中所有价夸克乃至价反夸克的每种色量子数的代数和都为零,它们色性质的总和为无色;但是它们的每种味量子数的代数和不一定为零,它们味性质的总和不一定是无味的.在强子中,被夸克或反夸克不断放出和吸收的胶子,处于统计平衡状态,数目是不确定的.胶子可以转化为夸克-反夸克对,夸克-反夸克对又可以湮没为胶子.由胶子转化成的夸克-反夸克,称为海夸克或微夸克,每个海夸克-海反夸克对在强子中并不结合成小集团.海夸克、海反夸克的个数不确定,并随强子激发能的增高而增加.海夸克与海反夸克数目相等,它们味、色性质的总和是“无色无味”的.平均起来,各种味道的海夸克(或海反夸克)数目相等,三种颜色的海夸克(或海反夸克)数目相等.价夸克、海夸克和胶子在强子中的分布是分散的.高能强子内部,价夸克和胶子的动量分别约占强子动量的一半,海夸克的动量约占强子动量的5%左右.

7. 在低能情况下,夸克间主要是色磁作用.胶子引起的色相互作用,可以分为色“电”作用和色“磁”作用两项.虽然强子中夸克间相关于色荷的色“电”作用并不小,但强子之间的色电作用却可以忽略不计.夸克、反夸克及胶子的运动,使它们的色荷形成色流.而相关于色流的色“磁”作用是低能情况下夸克间的主要作用;胶子自旋平行时互相排斥、反平行时互相吸引.

8. 胶子间可以发生直接相互作用

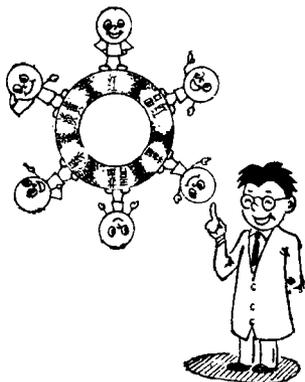
(1) 胶子具有自相互作用, 它对应非线性项。它的表现形式之一就是胶子“真空极化”: 一个胶子可以分裂成两个胶子, 然后又重新结合成一个胶子。

(2) 胶子间直接的色相互作用, 可以形成胶子-胶子束缚态, 称为胶球, 它是色荷为零的色单态。在这种由两个或三个胶子组成的可以单独存在的复合粒子中, 没有价夸克, 但有价胶子。最轻胶球的质量在 $1-2.5\text{GeV}/c^2$ 之间。胶球的基本性质和中性介子相似, 但其衰变行为又和中性介子不同。

(3) 一个夸克和一个胶子可以通过交换胶子而互相吸引。如, 红夸克 R 和第二种胶子 $B\bar{R}$ 通过交换第一种胶子 $G\bar{R}$, 而分别变为绿夸克 G 和第四种胶子 $B\bar{G}$ 。

9. 夸克间的色相互作用随其距离的增大而增强。

夸克本身的裸色荷很小。虽然夸克周围的真空色荷的极化引起屏蔽效应, 减弱夸克裸色荷对周围的影响, 但是胶子的自相互作用引起反屏蔽效应, 加强夸克裸色荷对周围的影响, 相当于增加了夸克的有效色荷。并且反屏蔽效应超过屏蔽效应。随着夸克之间距离的增大, 反屏蔽效应增强, 夸克的有效色荷和强相互作用有效耦合常数急剧增加, 从而夸克间的强相互作用迅速增强。在 高能范围探测到的强子深处, 夸克之间的距离小于 10^{-14}cm , 动量交换很大, 有效色荷和强作用有效耦合常数很小, 彼此间的结合作用能也很小, 并且几乎是不随距离变化的恒量, 相互作用势接近于库仑势。夸克之间的相互吸引作用很微弱, 结合得相当松弛, 互相自由飞绕。因为高能下探测粒子的德布洛意波长较短, 可以和电磁波中波长较短的紫外线相比拟, 所以高能下显现的夸克在强子内各自独立运动的“自由”状态称为“紫外自由”; 也称为渐近自由, 这是因为该状态只能逐渐趋近, 而不能真正达到。当夸克之间的距离介于 10^{-14}cm 和 10^{-13}cm 之间时, 其结合的势能随距离的增大而近似线性增加, 相互作用势接近线性势。在低能范围探测到的强子边缘处, 分别处于强子直径两端的夸克之间的距离, 约为强子线度的数量级 10^{-11}cm 。这时, 夸克的有效色荷和强作用有效耦合常数很大, 相互作用势能随距离的增大而无限增大, 从而已经极其巨大, 以致夸克互相刚性地紧密束缚而整体运动。因为低能下探测粒子的德布洛意波长较长, 可以



和电磁波中波长较长的红外线相比拟, 所以低能下显现的夸克互相强烈吸引而彼此紧密束缚的不自由状态, 称为“红外奴役”。

10. 夸克间的强相互作用具有饱和性。一定数目的夸克以及反夸克, 在放出很大的结合能后, 组成固有能量相对很小的无色强子。在这种无色组合中的夸克, 彼此之间的强相互作用已经饱和; 即同这种无色组合以外的任何一个额外的单个夸克或反夸克, 都不能再紧密结合了, 从而强子中不能容纳后者。

11. 在强子内部唯象强荷平方 g^2 的第一级近似下, 由胶子引起的总的相互作用能, 和强子中夸克与反夸克数 N 同强子半径 R 的比值 N/R 成正比。

12. 重夸克组成的强子内的势能

在重夸克 $c\bar{c}$ 或 $b\bar{b}$ 组成的强子中, 势能

$$U(r) = U_c(r) + U_s(r)$$

与自旋无关的有心位势 $U_c(r)$ 通常被表示为一个库仑部分 $(\infty - \frac{1}{r})$ 和一个囚禁部分 (∞r) 之和

$$U_c(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_c}{r} + \frac{r}{a^2}$$

为了与实验数据相符, 假定参数

$$\alpha_c = 0.39, a = 2.34\text{GeV}^{-1}$$

短程的库仑位势是由于一个单胶子交换产生的, 囚禁位势是由于多重胶子交换所产生的。与自旋有关的位势 $U_s(r)$ 依赖于矢径 r 的取向和自旋组态, 它包含自旋-轨道相互作用、自旋-自旋相互作用和张量相互作用的贡献。

粒子物理的实验和理论, 对夸克之间的色相互作用, 进行了比较充分的探索和揭示; 但是还有许多问题尚未解决。例如, 夸克之间相互作用势能的形式假定为

$$U(r) = -\frac{K_1}{r} + K_2 r \quad (K_1, K_2 \text{ 为常数}),$$

带有唯象的性质, 还没有从理论上导出其精确表达式; 至今还不能从强作用耦合常数 α_s 定出唯象强荷 g_s 的大小; 对于大距离 ($>10^{-13}\text{cm}$) 的强作用, 其强度和耦合常数 α_s 变得很大, 不能使用微扰论进行计算; 强子中真空抗色性的缘由和机制, 还不十分清楚; 高能正负电子对撞的强子簇射三喷注, 虽然间接显示胶子存在的迹象, 但是实验上至今还没有寻见到胶子存在的直接证据; ... 这些问题有待于今后从实验上和理论上进一步探讨和解决。在实验方面, 努力提高高能正负电子对撞、高能质子-(反)质子对撞和高能轻子 (尤其是中微子) 对核子的深度非弹性散射的能量量级, 以进一步显现夸克间色相互作用的详情细节。在理论方面, 进一步完善和发展量子色动力学 (QCD) 和旨在统一电磁作用、弱作用、强作用的大统一理论, 从理论上进一步阐明和诠释夸克色相互作用的基本性质及其同其它基本相互作用的联系。