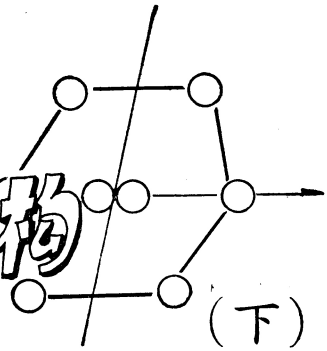


层子学说

强子结构



勾亮 郝春

三. 层子的相互作用理论

目前人们已经发现,自然界存在四种基本相互作用力:引力,弱作用力,电磁力和强作用力。并且,人们认为它们都可用规范理论来描写。它们的理论现状和力的传递者见表 II。

在能量很高的微观领域里,引力可以忽略。因此,只需研究弱作用,电磁作用和强作用。层子既参与强作用也参与电磁作用和弱作用,而轻子只参与弱作用和电磁作用。目前实验上可以把层子和轻子当做构成

世界的基本的,无结构的点粒子(在 10^{-13} cm 尺度内实验上还没发现轻子有结构),因此,层子的弱作用、电磁作用规律可以设想应当具有与轻子的弱作用、电磁作用规律具有类似的形式。现在公认的描述弱作用、电磁作用最成功的理论就是弱电统一的 $SU(2) \times U(1)$ 规范理论。下面我们分别简要地介绍一下弱电统一理论和强相互作用理论。

1. 弱电统一理论。这个理论认为传递弱作用和电磁作用的场都是规范场,并且可以用具有 $SU(2) \times U(1)$ 定域不变性的拉氏量统一地描述。传递弱作用的粒子

表 II

力	传递粒子名称	质量	自旋	理论现状
引力	引力子	0	2	引力场的量子论还没建立
弱力	中间玻色子 $\begin{cases} W^\pm \\ Z^0 \end{cases}$	$(\sim 78 \text{ GeV})$ $(\sim 90 \text{ GeV})$	1 1	弱电统一的 $SU(2) \times U(1)$ 的规范理论,目前是成功的,但还没彻底胜利
电磁力	光子 γ	0	1	
强力	胶子 g	0	1	QCD 有许多实验基础和理论根据,但还不是完整理论

表 III

电荷	层子	轻子	电荷
$2/3$ $-1/3$	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t' \\ b \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$	0 -1
相应的作用顶点	$\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \begin{array}{c} u \\ \rightarrow \end{array} & \begin{array}{c} d \\ \rightarrow \end{array} & \begin{array}{c} c \\ \rightarrow \end{array} \\ \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ g \cos \theta_c \end{array} & \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ -g \sin \theta_c \end{array} & \begin{array}{c} \downarrow W^- \\ g \end{array} \\ \hline \begin{array}{ccc} \begin{array}{c} u \\ \rightarrow \end{array} & \begin{array}{c} s \\ \rightarrow \end{array} & \begin{array}{c} c \\ \rightarrow \end{array} \\ \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ g \sin \theta_c \end{array} & \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ g \cos \theta_c \end{array} & \begin{array}{c} \rightarrow \end{array} \end{array} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ \nu_e \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ \nu_\mu \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} \downarrow W^+ \\ \nu_\tau \end{array} \rightarrow \end{array}$	

* 作用顶点是由描写粒子之间相互作用的相互作用拉氏量决定的。实线和虚线表示参与作用的粒子,交点标志发生作用的地方,因子 $g \cos \theta_c$ (或者 $g \sin \theta_c$) 表示作用的强度。所包含更复杂作用的过程都可由基本作用顶点来构成

通过黑格斯机制来获得质量。

按照这个理论,电磁作用仍通过无静止质量的光子传递,而弱作用是通过具有很重的静止质量(80—90 GeV/c²)的中间玻色子 w^\pm, Z^0 传递的。弱作用的基本形式可以用层子(或轻子)左手弱旋二重态(见表 III)和右手弱旋单态来表示。层子(或轻子)通过放出或吸收重的矢量玻色子 w^\pm, Z^0 (它们分别对应费米子改变电荷的带电流和不改变电荷的中性流)同其他费米子发生弱作用,而电磁作用保持原来的形式。表 III 中的 L 表示左手弱旋二重态,意思是层子(或轻子)的动量方向与其自旋方向形成左手系。二重态中的一对层子(或轻子)叫做层子(或轻子)的一“代”。 $d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$, $s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$, θ_c 是卡毕玻角, θ_c 反映了从 μ 层子变到 d 层子的几率与从 μ 层子变到 s 层子的几率的比,实验测到的数是 $\sin^2 \theta_c \sim 0.06$ 。

从表 III 可看出,二重态里的轻子即实验观察到的物理粒子,而层子左手弱旋二重态并不像轻子那样,它是两种味道层子的混合,这种混合由卡毕玻角 θ_c 描述。这个差别说明轻子与层子并不完全对称,其原因是轻子参与的反应过程,要保持电子轻子数和 μ 子轻子数各自守恒,所以它们不能混合。而层子并没这个要求,是允许混合的。除非中微子有静止质量(还有待进一步的实验证实),那么轻子二重态也就可能混合。

由于许多中微子实验结果与弱电统一理论预言相符,特别是实验上观察到它所预言的中性流(由 Z^0 传递的弱作用)而获得了巨大成功。首先提出这个理论的作者格拉肖,温伯格和萨拉姆由于这个工作的成绩而获得了 1979 年诺贝尔物理学奖。这个理论既保持了实验上证实是正确的电磁作用的理论形式,又确定了以前不清楚的弱作用理论形式,从而克服了以前弱作用唯象理论破坏么正性和不可重整(不能消去计算中

出现的无穷大)的困难。

另一个值得注意的特点,这个理论只有一个未确定参数,这就是反映电磁作用耦合常数和弱作用耦合常数之间关系的温伯格角 θ_w , $\sin^2 \theta_w = e^2/g^2$, e 和 g 分别是电磁作用耦合常数(或电荷)和弱作用耦合常数。这个参数可以通过对弱作用中性流过程(例如 $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$)的截面测量确定下来。最新实验的数据是 $\sin^2 \theta_w = 0.23 \pm 0.02$ 。利用这个参数可把中间玻色子质量确定下来, $M_{w^\pm} = 37.3/\sin \theta_w \text{ GeV} \sim 80 \text{ GeV}$, $M_{Z^0} = M_w/\cos \theta_w \sim 90 \text{ GeV}$ 。因此,这个理论能否取得最后胜利,还要看将来的实验能否观察到具有这样质量的 w^\pm, Z^0 以及它们引起的效应。

最后,还有一个不清楚的问题,如果把表 III 中的所有层子(包括三种颜色)和轻子电荷加起来,就得到 $(2/3 - 1/3) \times 3(\text{代}) \times 3(\text{色}) + (-1) \times 3(\text{代}) = 0$ 。只要层子的“代”数与轻子的代数相等就会保持这个关系。这个关系是使这个理论能成立所必需的。因为在对 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 的实验解释中,理论计算出现了抵消不掉的无穷大,如果有上面的关系就可以自然地消掉这个无穷大,使理论与实验符合。这是偶然的还是必然的?也许这里面隐藏着更深刻的原因。

2. 层子的强相互作用理论。由轻子与核子的深度非弹性散射实验知道,束缚层子的强相互作用力具有渐近自由的性质(散射中交换动量越大,强子里层子越接近自由)。为了描写这样的强相互作用,人们把规范理论与层子的三种颜色自由度结合起来,认为强相互作用可由具有定域 $SU_c(3)$ 规范变换不变性的拉氏量来描写,这就是量子色动力学,记作 QCD。 $SU_c(3)$ 中的 c 表示颜色。这里的“色”可与量子电动力学中的“电”相对应。量子电动力学中的“电”的意思是,物体由于带电而相互作用;而量子色动力学中的“色”的意思是,层子或胶子由于带色而彼此产生强相互作用。在 QCD 里,层子和反层子组成的强子是无色的。

电磁作用通过矢量光子来传递,而层子之间的强作用则通过八种矢量胶子来传递(胶子存在的证据见下一节)。虽然在传递相互作用方面胶子与光子充当相同角色,但是它们却存在着重要的区别(见图 7)。光子不带电荷,它们之间不能直接作用(见图 7a),因而带电体之间的相互作用显示出库仑力($\sim 1/r^2$)的行为(见图 8)。而胶子是带色荷的,因此胶子之间可直接相互作用。理论分析表明,这个性质使得它能描写强作用力的渐近自由的行为(见图 8)。

目前,虽然有许多实验支持量子色动力学,但还不能说强相互作用的理论问题已经解决了。因为能用 QCD 分析的实验,还只限于强子的高能散射或者说层子之间距离小(交换动量大)的渐近自由区域。在这个区域,由于作用比较弱,可运用微扰 QCD 来处理,理论可以与实验比较。对低能大距离作用很强的区域,不

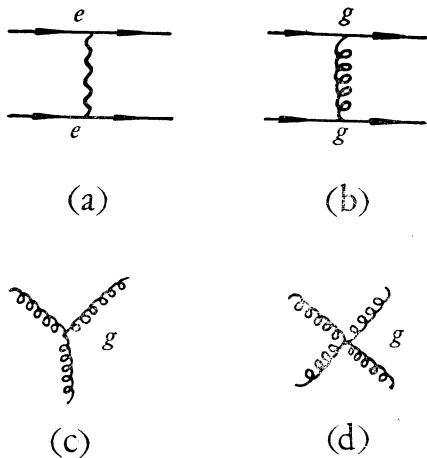


图 7 QED 与 QCD 相互作用形式的对比,其中图 (c)、(d) 所表示的胶子之间的直接作用在 QED 中是没有的,由于存在这两种相互作用形式,产生了渐近自由

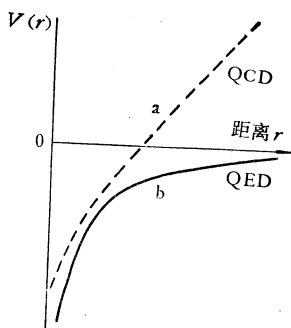


图8 QED与QCD束缚势, a 线表示渐近自由和禁闭

能运用通常场论中的微扰方法,所以QCD还无能为力。比如强子谱,层子禁闭等问题。对这类问题,目前只有一些与QCD性质相一致的模型理论(如口袋模型,弦模型等)。这就是QCD还不是一个完整理论的道理。今后,除在实验上还要定量检验微扰QCD外,研究QCD如何解决大距离强耦合的问题是非常重要的。

四. 层子学说和强子结构

运用层子部分子模型(见79年第2期第6页),可以解释一些与强子有关的高能散射实验。但仔细研究就会发现,简单的层子部分子模型是不够的,强子里不仅有反映它的量子数的价层子(重子有三个价层子,反重子有三个反价层子,介子有一个价层子,一个反价层子),而且还有许多动量很小的正反层子对构成的‘海’;强子里的层子并不完全处在自由状态,它们之间存在由胶子传递的强相互作用。由于高能散射实验正好接近强作用的渐近自由区,可以运用微扰QCD来计算强相互作用效应。下面我们将会看到,考虑了层子之间的强作用和强子里有海层子的存在,层子学说可以很好地解释强子参与的高能散射实验。这样的实验可以概括为如下三种类型:

1. 轻子与强子的深度非弹性散射实验 前面已经提到,这个实验提供了强子里存在着层子的重要证据。如果认为在大传递动量下层子处自由状态,则层子学说可以对观察到的标度无关性给予解释。但是,事实上,实验结果并不显示严格的标度无关性,大约有20%的偏差。理论上如何解释呢?人们自然想到这可能是由于层子之间并不是处在彼此绝对无作用的自由状态所造成的。应用微扰QCD计算层子之间(由胶子传递的)强作用对层子部分子模型的修正,并与最新的 ν_e 与核子深度非弹性散射实验比较,表明观察到的标度无关性的破坏与微扰QCD的计算结果是符合的。这就表明在轻子与核子深度非弹性散射过程中,层子确实在发射和吸收传递强相互作用的胶子。

胶子的存在还有一个证据。由层子部分子模型和实验可以求出强子里所有层子的动量之和。结果表明,它并不等于强子的动量,对轻子与核子深度非弹性散射来说,只是核子动量的一半。那一半哪儿去了?人们认为这一定是被不参与电磁作用和弱作用的成份带走了(否则,如果是被参与电磁作用和弱作用的某种

成份带走,已被许多实验证实的层子部分子模型就不对了),这种成份就是只参与强作用的胶子。

人们运用层子部分子模型研究核子结构函数时还发现,中子的结构函数与质子结构函数之比是2/3。中子结构函数与质子结构函数的差别,实际上是由于中子和质子所含的层子成份不同而引起的。可是在 $x \rightarrow 0$ 时,也就是层子带很小动量的情况,实验结果表明,中子结构函数与质子结构函数之比趋于1,即几乎相等。这就意味着,当 $x \rightarrow 0$ 时,由udd层子构成的中子的结构函数与由uud层子构成的质子的结构函数是相同的。如果认为核子里不仅存在价层子,而且还存在着许多动量很小的正反层子对构成的海,那么在 $x \rightarrow 0$ 时海层子的贡献就占压倒优势,因而就淹没了核子所含的价层子的不同所导致的结构函数之不同,就可以解释这个现象。根据这种观点,当研究 $x \rightarrow 0$ 处的现象时,就必须考虑海层子的贡献。

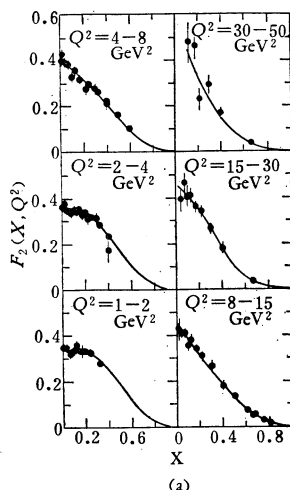


图9(a) 实验测量到的不同 Q^2 的 $F_2(X, Q^2)$ 随 X 改变的曲线

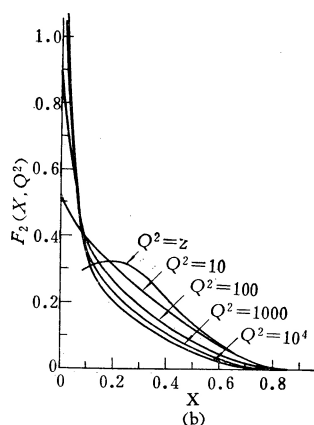


图9(b) QCD理论曲线

表现为 x 小处 $F_2(X, Q^2)$ 增加, x 大处 $F_2(X, Q^2)$ 减少。

为了检验QCD,人们还在实验上测量了不同 Q^2 (Q 代表动量交换)的结构函数 $F_2(X, Q^2)$ 随 X 改变而变化的情况(见图9a)。从图中可以看出,在 x 小处 $F_2(X, Q^2)$ 随 Q^2 增加而上升;在 x 大处($x \rightarrow 1$), $F_2(X, Q^2)$ 随 Q^2 增加而下降。结构函数 $F_2(X, Q^2)$ 既然与 Q^2 有关,这就破坏了标度无关性,说明不能不考虑层子的强相互作用。人们认为,当 Q^2 增加,强相互作用不仅使层子发射胶子,而且当发射的胶子的能量大到足以产生正反层子对时,就产生动量比较小的正反层子对,从而增加了海层子的成份。传递动量越高,这种胶子产生的小动量正反层子对就越多。其效果就是增加了小动量层子的百分比,减少了大动量层子的百分比,

根据这种观点,运用微扰 QCD 很好地解释了这种现象(见图 9b)。这也是对 QCD 的支持。

2. 高能 e^+e^- 湮没实验 实验上测量 e^+e^- 碰撞后产生强子的事例数和产生 $\mu^+\mu^-$ 事例数以及它们的角分布。这样,就可得到 e^+e^- 湮没变成强子的截面和 e^+e^- 湮没变成 $\mu^+\mu^-$ 对的截面的此例 R 。实验结果如图 10a 所示。按照层子部分子模型,强子是这样产

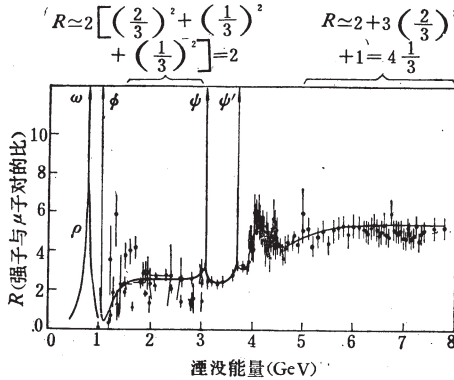


图 10(a) R 的实验曲线

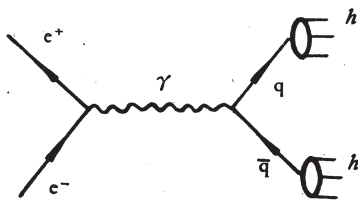


图 10(b) e^+e^- 湮没变到强子的机制示意图

生的: e^+e^- 首先湮没变成光子,光子再转化为正反层子对,这个正反层子对形成许多强子(见图 10(b)). e^+e^- 湮没变成的光子也可转化为 $\mu^+\mu^-$ 对。运用 QCD 可以求出 R 近似值:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \sum_i |Q_i|^2$$

Q_i 是第 i 味层子的电荷数(以质子电荷为单位)。3 因子表示层子有三种颜色。当 e^+e^- 质心系能量达到 $\sim 2.5 \text{ GeV}$ 时, u, d, s 层子都可激发,它们的电荷数 Q_i 分别是 $2/3, -1/3, -1/3$ 。

$$R = 3 \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right] = 2.$$

当能量达到 5 GeV 时, c 层子和衰变为强子的重轻子 τ 都激发,它们对 R 的贡献分别是 $3 \times (2/3)^2 = 4/3$ 和 $1^2 = 1$ 。此时 $R = 2 + 4/3 + 1 = 10/3$ 。与图 10(a) 所示的结果符合很好。但是,当能量达到 b 层子阈时 R 增长不明显,这是因为 b 层子的电荷为 $-1/3$,对 R 只贡献 $1/3$ 因子的缘故。

如果某个(未知的)中性强子的质量为 m ,则 e^+e^- 湮没能量达到 mc^2 时, R 就会出现峰值。 J/ψ 粒子家

族就是这样发现的。采用与 QCD 渐近自由力的性质相一致的线性势,运用非相对论量子力学,可以较好地解释这个家族的性质。

e^+e^- 能量再提高,湮没产生的层子对就在其各自运动方向上转化为许多强子,表现为两个方向相反的强子喷注。但是,由于色禁闭,不会跑出单个层子。

在湮没能量很高时,产生的正反层子能够再辐射出一个与层子运动方向偏离比较大的胶子,此时就形成了三个强子喷注。这些现象在实验上已经看到, QCD 理论和实验基本一致。

3. 强子-强子散射产生轻子对 实验上,首先测量了散射末态产生的 $\mu^+\mu^-$ 对的事例数以及它的质心系不变质量。轻子是不参与强相互作用的,强子与强子碰撞是怎样产生轻子对的呢?人们认为是由图 11 所示的 Drell-Yan 机制产生的。即一个强子里的层子与另一强子里的反层子(如果是核子,就是海里的反层子)湮没成光子,光子再产生正反轻子对。

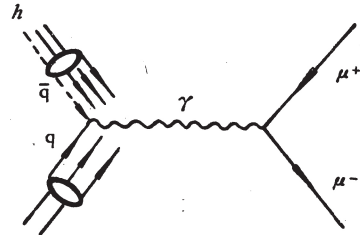


图 11 强子-强子碰撞产生轻子对的 Drell-Yan 机制示意图

这个实验,由于在 3.1 GeV 和 9.5 GeV 的能量发现了突然增多的 $\mu^+\mu^-$ 事例而首先发现了 J/ψ 和 Υ 粒子。这个实验还能够测量深度非弹性实验不能测量的反价层子分布函数。因为核子无反价层子,介子含反价层子,但由于介子不稳定,不能做靶,因此,无法用轻子与它的散射来测量它的反价层子的分布函数。但是,应用已测量到的核子的价层子分布函数,可以在核子与介子散射中测量到介子的反价层子的分布函数。

根据 Drell-Yan 机制,产生 μ 对的质心动量应当严格沿着入射粒子束的方向。但是实验测量到的结果却有偏离。人们认为这是由于正反层子湮没前,某个层子发射胶子引起的。是否是这样,就需要用微扰 QCD 去分析实验,看理论与实验是否符合。

从图 11 所示的 Drell-Yan 机制可以看到,这个过程刚好与 e^+e^- 湮没产生强子的过程相反。在 e^+e^- 湮没产生强子的过程中,层子的颜色把产生强子的截面提高到无色的三倍,而强子与强子散射产生轻子对时,要求初态湮没的正反层子对必须是色单态(因为光子无色),这就使得产生轻子对的截面压低到无色的

1/3. 并且,由于核子里没有反价层子,因此,产生轻子对的截面还要更低一些. 根据现在实验上 μ 对产生的数据看,考虑层子的颜色要比不考虑颜色好. 但是理论与实验到底符合不符合,还需要认真仔细地考虑

QCD 的影响. 这是目前人们在继续研究的问题.

虽然用层子学说统一解释高能强子现象获得了很大的成功,但是,为什么层子不能从强子里打出来? 它还不能给出令人信服的解答. (全文完)