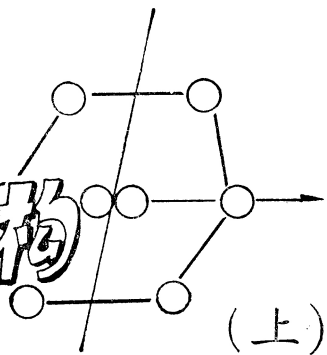


层子学说 强子结构



勾亮 郝春

层子学说已经提出十多年了。虽然层子至今还没有象电子那样单个地出现在实验者面前,但是,人们对层子学说的正确性已经深信不疑了。实际上,现代高能物理的理论和实验都离不开它。层子与轻子(即不参与强相互作用的点粒子)一起作为现阶段的基本粒子,正在扮演当今高能物理的中心角色。甚至研究早期宇宙的形成和天体的演化也要用到它。因此,对层子观念的产生,层子学说的发展以及有关的实验分析

作一个简略介绍是有益的。

一、强子谱与层子

到六十年代,已经发现了二百多种强子。对这些强子的产生和衰变质性的研究,确定了它们的性质(其中的一些列在图1)。按照这些强子的质量和性质,人们把它们分为重子和介子。重子带半整数自旋和确定的重子数 N , 并且在有重子参加的所有反应过程中重子数严格保持守恒(这里不考虑弱、电、强的大统一理论,那里重子数是不守恒的,质子也可以衰变!)而介子带整数自旋,不带重子数,对介子数没有守恒性的要求。

进一步研究发现,要确切地描述这些性质不同的强子,不仅需要与通常时空有关的一些物理量,如能量,动量,自旋,宇称等,还必须引入一些描述其内部性质的物理量。其中最重要的有两个。其一是同位旋 T , 由于强相互作用的电荷无关性,人们用 T 来描写具有相同强相互作用性质的强子的不同带电状态; 其二是奇异量 S , 用 S 来描写那些通过强相互作用成对产生,而衰变得很慢的强子的奇异性。实验表明,在强相互作用过程中,这两个量是守恒的,并且满足如下关系:

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} Y \quad (Y = S + N)$$

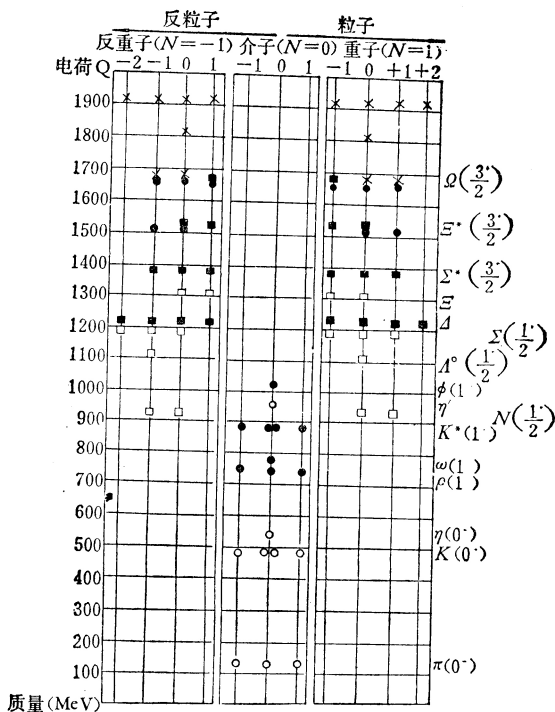


图1 图中所示的强子谱显示出明显的规律性
 ○构成自旋为0,宇称为负的介子九重态,它们分别是 π, κ, η, η' ;
 ●构成自旋为1,宇称为负的矢量介子九重态,它们分别是 $\rho, \omega, \kappa^*, \phi$;
 □构成自旋为1/2,宇称为正的重子八重态,它们分别是 N (核子), Λ^0, Σ, Ξ ;
 ■构成自旋为3/2,宇称为正的重子十重态,它们分别是 $\Delta, \Sigma^*, \Xi^*, \Omega$ 。

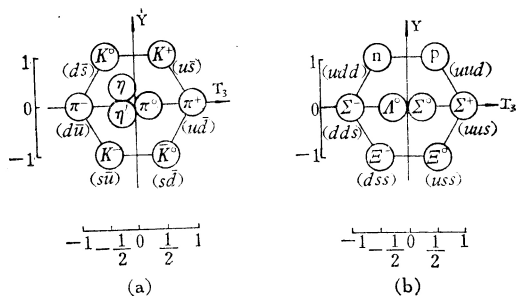


图2 介子九重态,重子八重态和重子十重态

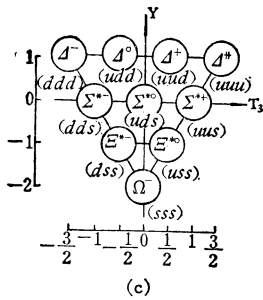


图2 介子九重态, 重子八重态和重子十重态

(3/2⁺)重子的位置可分别由图(2a), 2(b), 2(c)来表示。

大家知道,有心力场中角动量守恒对应物理规律的空间旋转不变性。与此类似,强相互作用中同位旋守恒,奇异量守恒对应着强相互作用规律具有SU(3)群变换不变性。

根据强相互作用规律的SU(3)群变换不变性和图2所示强子谱的规律,就可以假设有三种(以u, d, s标志)层子和它们的反粒子存在。如果认为介子是由正反层子对,重子是由三个层子(反重子由三个反层子)构成的束缚态,就可推出图2所示的介子九重态,重子八重态、十重态。并可推出每个强子所含的层子成份(由图2中的括号标出)。通常标这些层子为价层子,还可推出实验测到的强子之间的质量关系。

显然,要使由层子构成的强子具有实验测量到的量子数,还必须对层子规定一些适当的量子数。例如,要使所有重子(由三层子构成)和介子(由正反层子对构成)都具有整数电荷,则层子必须带分数电荷(当采用一套层子时)。要构成具有半整数自旋的重子,则层子的自旋必须为1/2。类似地考虑可以定出层子的其他量子数。到目前为止,人们认为有表I所列性质的一些层子存在。

值得指出的是,在层子学说提出时,重子十重态中的Ω⁻还没发现。但是,事隔不久,实验上果然发现了Ω⁻,并且发现Ω⁻的性质与理论预言的完全相符。

当人们用层子学说研究强子的电磁跃迁和弱衰变现象时,发现如果认为这些现象是由强子里的层子的电磁跃迁和弱衰变引起的,则可以很好地解释实验现象。

直到1974年底J/ψ粒子发现以前,考虑到层子构成的高角动量束缚态,所发现的强子都可用u, d, s以及它们的反粒子来构成,并且,除了强作用过程以外,层子学说也可以给低能弱作用及电磁作用现象以统一的解释。

1974年11月发现了大质量长寿命的J/ψ粒子。说质量大,寿命长是跟原来的强子相比较而言的。因为J/ψ粒子的自旋为1,故不能是重子或轻子。计算结果表明也不会是重子或轻子构成的束缚态,因为这样

其中Q是电荷, T₃是同位旋第三分量, Y是超荷。利用这个公式,可从图1标出的N, Q和T₃求出相应的S,也就得到了Y。

用强子的这些量子数,在以Y为纵轴,以T₃为横轴的平面坐标中,可以找到它们的适当位置。0⁻介子, (1/2⁺),

表I 层子种类和它的性质

层子种类	符号	质量比	电 荷	重子数	自 旋
上	u	1*	2/3	1/3	1/2
下	d	2.5	-1/3	1/3	1/2
奇异	s	50	-1/3	1/3	1/2
粲	c	375	2/3	1/3	1/2
底	b	1125	-1/3	1/3	1/2
顶	t?	3375	2/3	1/3	1/2

* 通常估计 m_u ~ 4MeV. t? 其存在的证据还不足。

束缚态的寿命太短。因此,它必为介子。作为介子,它比通常老的1⁻介子的质量要大3—4倍。

粒子的寿命一般决定于它的衰变作用的强弱和它的质量大小。衰变作用强则反应速度快,寿命短,衰变粒子的质量大则允许可能衰变的终态的粒子种类(或衰变道)多,衰变几率就大,寿命就短。如果认为J/ψ粒子仍由原来老的层子构成,实验测到的J/ψ粒子寿命比预期的要大一万倍。因此,人们认为J/ψ粒子是由更重的第四种c层子构成的。由它的衰变性质可确定它就是c \bar{c} 的束缚态。

引进u, d, s, 三种层子之后,经过十年,又发现了第四种层子,这使人们想到,随着实验的发展,层子的种类还会增多。果然1977年人们又发现了更重的1⁻介子Y,它使人们认识第五种层子b, Y是b \bar{b} 的束缚态。

第五种层子提出后,人们根据层子的弱相互作用规律推测有第六种层子(t)存在,以便它与b层子构成弱流,这点与重轻子和它的中微子ν_c构成的弱流相对应,保持层子和轻子对称的特征。为子描述层子种类不断增加的情况,人们引进新的物理量——“味”,不同种类层子对应不同味。表I中的层子种类就是层子味。有时把与层子味有关的动力学称做量子味动力学,如弱电统一理论有时也称量子味动力学,记做QFD。

以上我们看到层子学说对强子谱以及强子的电磁跃迁和弱衰变现象以统一解释是很成功的。但是,还存在一个严重的问题。就是上述层子学说在对重子的描述中出现了自旋和统计的矛盾。例如,由三个自旋为1/2的全同的s层子构成的自旋为3/2的重子Ω⁻。要使三个自旋为1/2的层子构成自旋为3/2的自旋态,必须使三个自旋为1/2的层子处在自旋相互平行的对称态。另外Ω⁻是三个s层子构成的最低能态,其轨道角动量必为0,即Ω⁻是关于三个s层子的空间坐标为

1) 从图中所示各种粒子的带电状态数可求出每个粒子的同位旋T和它的第三分量T₃。例对Δ⁺粒子带电状态数, N = 4, 根据 N = 2T + 1, 4 = 2T + 1, T = 3/2

T₃ = T - 1, T - 2, ..., -T, T₃ = 3/2, 1/2, -1/2, -3/2, 它对应的带电状态分别为 Δ⁺⁺, Δ⁺, Δ⁰, Δ⁻。同理可求得各个粒子的T,

对称的量子态。这样，计及自旋和空间变量在内， Q^- 是三个 s 层子的对称态，这就违反了全同费米子（这里是 s 层子）必须组成反对称量子态的要求，为了解决这个困难，对每种味道的层子都引进新的自由度——三种颜色，通称红，黄，蓝。使 Q^- 在新的自由度中处于反对称态，也就是处在色单态，这样，计及空间、自旋和颜色三部分后，描述重子的整个量子态就是反对称的了。解决了自旋和统计的矛盾。这样，表 I 中的每种层子还可取三种不同的颜色。

当然，对每种味道层子引进三种颜色的正确性还有其他根据。例如，在用层子部分子模型解释 e^+e^- 湮灭到强子的截面与湮灭到 $\mu^+\mu^-$ 截面的比值 R ，以及在解释 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 的实验时，都说明对每种味道引进三种颜色的正确性。它的重要用处在后面还可看到。

颜色是对层子引进的，强子并不需要颜色，因此强子必无色。为此，只需规定三种不同颜色合成无色以及正反层子带有正反颜色，并且正反色合成无色。

二、层子存在的两个重要证据

层子学说在解释强子谱和其他一些实验现象上是非常成功的。但是，至今还没有一个人真正地观察到单个层子，那么人们要问层子到底存在不存在？从以下两个实验结果，我们可以体会到在什么意义上可以说层子是存在的。

①轻子对核子里层子的探测 这个实验是与卢瑟福应用 α 粒子轰击原子核来探测原子结构相类似的实验。

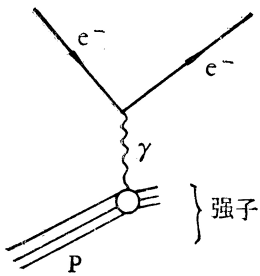


图3 e^- 核子深度非弹实验

为什么选择轻子作为探测核子结构的粒子呢？因为轻子是不参与强作用的，是只参与弱作用和电磁作用的点粒子（最新实验指出在 10^{-13} cm 尺度内仍可看成点粒子）。因此，它能深入到强子里头。这样，无论在理论上还是在实验上既是可行的又是方便的。

最初在斯坦福直线加速器中心的实验的原理如图 3 所示。实验是对给定初态能量为 20 GeV 的电子束流，测量跟质子散射后的电子能量 ν' 和它与质子的散射角 θ 。这样就测到了实验室系里电子传递给质子的能量 ν 和传递给质子的四动量平方 q^2 。因而就测到了电子跟质子的深度非弹性散射截面 $d\sigma/d\nu dq^2$ 。

如果认为电子是跟具有一定大小的带电整体——质子的散射，根据量子电动力学和劳仑兹协变分析，这个微分截面由质子的结构函数 $W_{1,2}(\nu, q^2)$ 决定。就是说，这个微分截面是与 ν, q^2 有关的。但是，在这个能量下的实验结果表明并不是如此，而只是与一个无量

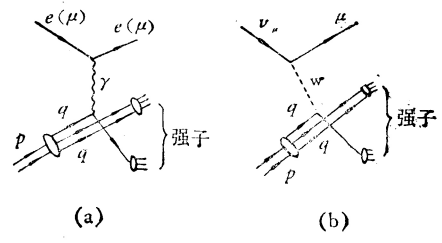


图4 (a),(b)分别对应电磁作用和弱作用过程

纲的量 $x = -\frac{q^2}{2m_N \nu}$ 有关。这就是所谓的标度无关性。进一步分析表明，这个现象说明电子并不是跟带电的整体——质子的散射，实际上是与质子里的处于自由状态的点状组份的弹性散射。如果认为这些点状组份就是自旋为 1/2 的层子，则称作层子部分子模型。在轻子与核子里的层子弹性散射情况下，这个微分截面就只与层子的运动状态有关。分析表明，此时无量纲的量 x 就表示层子所带动量与核子动量之比（或称核子的动量分数）。此时， $m_N W_1(\nu, q^2) \rightarrow F_1(x)$ ， $\nu W_2(\nu, q^2) \rightarrow F_2(x)$ ， $F_2(x) = 2xF_1(x)$ 。因此，研究轻子跟核子的深度非弹问题归结为研究结构函数 $F_2(x)$ 。按照层子部分子模型，轻子跟核子深度非弹散射归结如图 3 所示的过程。并且， $F_2(x)$ 可用层子具有动量分数为 x 的几率来表示。

当用 ν_μ 来探测核子结构时，得到了类似结果，还可以测出核子里的层子数是 3。无论是电子通过电磁作用跟核子的深度非弹散射，还是中微子通过弱作用跟核子的深度非弹散射，都可用层子部分子模型来解释。概括轻子跟核子深度非弹实验，我们可以得到如下结论：

1. 实验虽然没找到从核子里打出的自由层子（或单个层子），但是在轻子跟核子深度非弹实验中，轻子碰到了层子。
2. 很高能量（确切地说，是传递给核子的动量很大）的轻子探测到相距很近的层子之间的强相互作用是很弱的，实际上彼此几乎处在无作用的自由状态。可是实验并没找到单个层子，却探测到许多强子，这是什么缘故呢？人们推测，当相距很近，相互作用很弱的层子被轻子碰撞而彼此远离时，它们之间的作用就增强，把层子拉住，使得层子仍囚禁在强子里（有时称做层子禁闭）。因而层子之间的强作用可能具有渐近自由的性质。

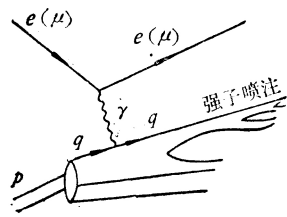


图5 没打出层子，而是更多强子，层子禁闭示意图

3. 那么，被轻子碰撞的层子获得的能量是如何释放的呢？人们推测，在层子彼此远离时如果增加的势能足以产生新的强子，就以产生

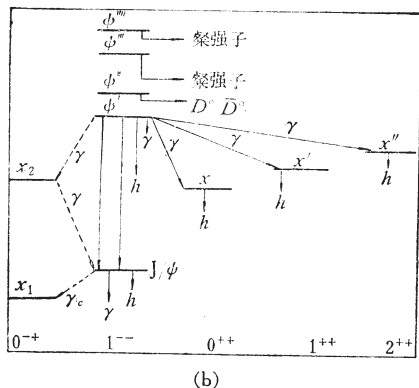
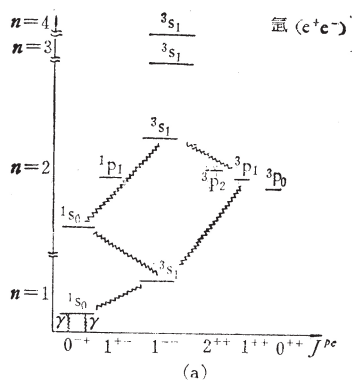


图6 由 $c\bar{c}$ 层子构成的粲偶素谱系
 γ 表示光子, h 表示强子

新的强子的方式释放能量(见图5)。假使层子获得很高能量,那么就会沿着层子运动方向形成许多强子。

如果末态强子果真是这样形成的,那么产生的强子必须都沿着层子的运动方向,实验结果确实如此。末态强子的分布不是各向同性的随机分布,都是集中在某些特殊的方向,显示出强子喷注现象。这些强子喷注带来了强子内部情况的信息。一般认为一个喷注就代表强子里某个运动着的成分存在。而喷注的方向和张开的立体角反应了这种成份的某些运动状态。因而在某种意义上讲,喷注现象也是层子存在的证据。

②粲偶素谱系($c\bar{c}$ 束缚态) 自旋为1,宇称为负的 J/ψ 粒子发现后,实验上又发现了由 $c\bar{c}$ 构成的其他不同自旋和宇称的一系列粒子,通称粲偶素。研究发现, $c\bar{c}$ 构成的粲偶素谱系与 e^+e^- 构成的束缚态氦的谱系非常相似(见图6)。

这就说明由2个自旋1/2的 e^+e^- 构成的束缚态所可能取的量子态,粲偶素也存在这些态。可是 e^+ , e^- 是人们已观察到的,其存在是确凿无疑的。把粲偶素与氦类比,人们不难想像构成粲偶素的 c 层子可能是存在的。单个的 c 层子之所以还没观察到,可能是由于动力学原因。接着又发现了 c 层子同 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$, 构成的 $D^0(c\bar{u}), D^+(c\bar{d}), F(u\bar{s})$ 粒子。这也为层子的存在提供了新证据。

(待 续)