

# 重夸克偶素的强子跃迁理论

邝宇平

(清华大学现代应用物理系)

我们知道宏观物体是由分子、原子组成的。原子是由电子和原子核组成的。原子核又是由原子和中子组成的。人们对物质微观结构和微观运动基本规律的不断深入的研究，推动着物理学不断向前发展。近代粒子物理（又称高能物理）的研究，发现质子、中子和与它们相似的超子等（统称为重子）以及与它们有强相互作用的介子（介子和重子统称为强子）还有更深一层的内部结构。它们是由一种称为夸克的更基本的粒子所组成的。已经知道的夸克有以下几种：

u c t （所带电荷为质子电荷的  $2/3$ ），

d s b （所带电荷为质子电荷的  $-1/3$ ），

其中 u, d, s, b 等夸克的存在已有明确的实验根据，t 夸克存在的实验证据还不直接，尚需进一步的实验研究。这些夸克中 u, d, s 是比较轻的，它们的质量  $m_u, m_d, m_s$  不超过  $10^4 \text{MeV}/c^2$ 。c, b, t 是比较重的。实验给出  $m_c \approx 1.5 \text{GeV}/c^2$ ， $m_b \approx 5 \text{GeV}/c^2$ 。  $m_t$  尚无准确的测量结果，根据现有的实验推断，很可能  $m_t > 45 \text{GeV}/c^2$ 。在粒子物理中常称 u, d, s 为轻夸克，c, b, t 为重夸克。目前还不能肯定是否还存在更重的夸克，这问题有待粒子物理的进一步发展来回答。

进一步的研究发现夸克还有一个内部自由度，称为“颜色”。每种夸克带有三种不同的“颜色”。重子是由三个夸克组成的“无色”的束缚态。介子是由一个夸克和一个反夸克组成的“无色”的束缚态。

是什么力将夸克束缚为强子呢？这是粒子物理要研究的基本问题之一。十多年来，理论和实验方面的研究使人们认识到，这个将有“颜色”的夸克束缚成“无色”的强子的强相互作用力，很可能是由“颜色”自由度的规范场传递的。

物理

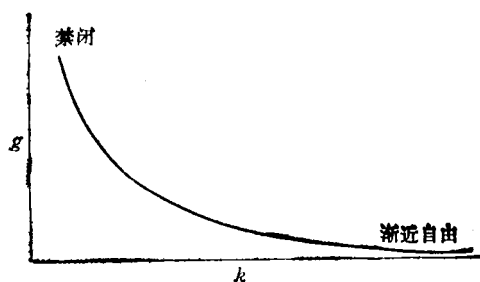


图1 QCD 有效耦合常数  $\bar{g}$  随能量尺度  $k$  的变化关系

这种规范场本身也带有“颜色”，它的量子称为胶子。这样的强相互作用理论称为量子色动力学（简称 QCD）。目前许多实验和理论结果的比较都定性地显示出 QCD 的正确性。但定量地检验 QCD 仍是一个正在研究的问题，需要进一步的理论和实验工作。

由于胶子本身带有“颜色”，夸克附近的胶子云对夸克的“色”荷有反屏蔽作用。这使得 QCD 的有效耦合常数  $\bar{g}$  随能量尺度的不同而明显不同。理论计算给出的  $\bar{g}$  随能量尺度  $k$  的变化关系如图 1 所示。在  $k \rightarrow \infty$  时， $\bar{g} \rightarrow 0$ ，这性质称为渐近自由。它意味着在能量尺度很高时，QCD 可以用微扰论来处理。在  $k$  小时， $\bar{g}$  很快变大。在这区域中，QCD 表现为强耦合的理论，不能用微扰论进行计算，处理这类问题是很困难的。格点规范理论的计算指出，在  $k \rightarrow 0$  时， $\bar{g}$  要趋于无穷大。这意味着要将带“颜色”的夸克和胶子从强子中拉出来需要花无穷多的能量。因此，在实际问题中不可能发现自由夸克和自由胶子，只能发现束缚在“无色”的强子中的夸克和胶子。这称为“色”禁闭。目前还没有关于“色”禁闭在连续时空中的严格理论证明。“色”禁闭究竟是由“色”电场还是由“色”磁场所贡献也还不清楚。我们的强作用理

论 QCD 是夸克和胶子层次的理论。由于“色”禁闭要与实验作比较,理论必须从夸克、胶子的层次计算到强子的层次,这使得定量检验 QCD 很困难。人们一方面希望通过尽量高能量的强子反应来检验渐近自由区域的 QCD,一方面希望通过尽量简单的低能强子系统来检验强耦合区域的 QCD。

由夸克及其反夸克所组成的介子又称为重夸克偶素。 $c$  夸克及其反夸克  $\bar{c}$  组成的偶素称为  $\psi$  族;  $b$  夸克及其反夸克  $\bar{b}$  组成的偶素称为  $Y$  族。由于质量大,重夸克及反夸克在偶素中的运动是非相对论的。于是它们之间的相互作用可以近似地用一个瞬时作用势能来描述,束缚态(偶素)的性质也可以近似地用薛定谔方程来计算。这有点类似于原子物理中的计算,大大降低了束缚态计算的困难程度。因此人们认为重夸克偶素是研究强子结构和强相互作用理论的理想体系,它相当于强子物理中的“氢原子”。不过重夸克偶素可研究的内容比氢原子要丰富得多。可以研究它们的能谱和它们的各种衰变过程,包括从高能级跃迁到低能级放出光子或轻强子的过程,以及重夸克偶素完全衰变为轻强子的过程等等。由高能级跃迁到低能级放出轻强子的过程称为强子跃迁过程。对  $\psi$  族和  $Y$  族来说,强子跃迁是它们的重要衰变方式,是理论与实验结合得较好的结合点。图 2 给出了  $Y$  族的一些主要的强子跃迁过程。不过一般强子跃迁中放出的轻强子能量较低,约为几百 MeV,因而属于强耦合范围的 QCD 问题,不能用微扰理论进行计算。所以,从理论上定量计算强子跃迁过程是相当困难的,人们长期没有找到好的计算办法。

1977 年, Gottfried<sup>[1]</sup> 建议用多极矩展开的方法来处理这类问题。在多极矩展开中,展开参量是体系的线度  $a$  和放出的粒子的动量  $k$  的乘积。重夸克偶素的线度  $a$  是很小的,强子跃迁中放出的轻强子能量又只有几百 MeV,因此用多极矩展开来处理强子跃迁是个好的近似。在这以后有不少人对此进行探讨<sup>[2]</sup>。从多极矩展开的观点来看,强子跃迁可分为两步,第一步

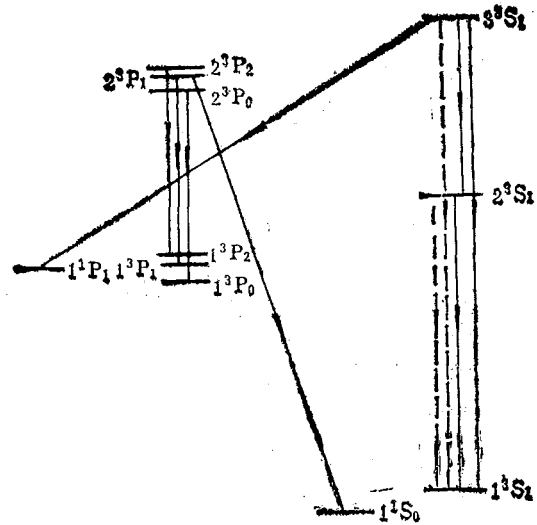


图 2  $Y$  族的一些主要强子跃迁过程(图中标定能级的符号与原子物理中的通用符号相同。图中实线表示放出两个  $\pi$  介子的过程,虚线表示放出一个  $\eta$  介子的过程)

是重夸克偶素在跃迁过程中放出两个或两个以上胶子(形成“无色”态)。第二步是这些胶子较变为轻强子。在这两步中都还存在着计算上的困难。第一步中的主要困难是放出第一个胶子后的中间态很复杂,无法用 QCD 第一原理来计算。第二步中的困难是低能胶子转变为轻强子的过程属于典型的强耦合 QCD 问题,没有好的处理办法。1981 年作者和美国康乃尔大学颜东茂合作,提出了一个合理的模型来描述第一步中的中间态,并且在这样的处理下第二步中的困难也得到简化,于是第一次给出了定量计算强子跃迁几率的可行方法<sup>[3]</sup>。用此方法对  $Y$  族中各种强子跃迁的几率作了大量的预言。其后在国际上陆续作出了  $Y(2s) \rightarrow Y(1s) + \pi^+ + \pi^-$ ,  $Y(3s) \rightarrow Y(1s) + \pi^+ + \pi^-$ ,  $Y(3s) \rightarrow Y(2s) + \pi^+ + \pi^-$  等几率的实验测量,所得结果与上述理论预言值符合很好(见表 1)。我们预言的理论值并不灵敏地依赖于所取的中间态的具体模型<sup>[4]</sup>。因此,实验结果与理论预言的相符是很能说明问题的。目前国际上有关的实验室还准备验证其它预言结果。

$\psi$  族和  $Y$  族中各种能级的状态大部分已在实验中发现。尚未发现的一个重要的态是  $^1P_1$  态。 $^1P_1$  态的重要性在于一旦测得它的能级

表1  $\Upsilon$ 族强子跃迁几率的理论值与实验值比较

| 反 应   | Cornell 模型           |       | BGT 模型               |       | 实验值            |
|---|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------|
|   | $\Gamma(\text{keV})$ | BR(%) | $\Gamma(\text{keV})$ | BR(%) | BR(%)          |
| $\Upsilon(2s) \rightarrow \Upsilon(1s)\pi\pi$     | 7                    | 27    | 6                    | 25    | $27.3 \pm 1.9$ |
| $\Upsilon(3s) \rightarrow \Upsilon(1s)\pi^+\pi^-$ | 0.2                  | 1     | 0.6                  | 3     | $3.6 \pm 0.3$  |
| $\Upsilon(3s) \rightarrow \Upsilon(2s)\pi^+\pi^-$ | 0.4                  | 2     | 0.3                  | 2     | $2.2 \pm 0.5$  |
| $\Upsilon(2s) \rightarrow \Upsilon(1s)\eta$       | 0.009                | 0.04  | 0.006                | 0.03  | $< 0.2$        |

\* 理论计算中夸克与反夸克间的势能采用了 Cornell 和 Buchmüller-Grunberg-Tye 两种势模型,以便比较。表中列出的实验值是各实验室数据的平均值。

就可以对 QCD 禁闭是由“色”电场还是“色”磁场贡献的问题作出有制定性的结论。因此近年人们对  $^1P_1$  态的寻找十分关注。我们用上述理论对  $\psi(1^1P_1)$  和  $\Upsilon(1^1P_1)$  的各种可能产生过程的几率作了计算。指出一些实验上可行的寻找  $^1P_1$  的过程<sup>[9]</sup>。这对实验工作有指导意义。其中  $\psi(2s) \rightarrow \psi(1^1P_1) + \pi^0$  的过程很有希望在我国新建成的北京正、负电子对撞机上被发现。目前在西欧中心 (CERN) 和美国康乃尔大学等已作了一些寻找  $\psi(1^1P_1)$  和  $\Upsilon(1^1P_1)$  的初步实验,所得结果也都与我们的预言一致。要得到可靠的结果还需要进一步的实验工作。最近在美国 SLAC 又作出了  $\psi'' \rightarrow J/\psi + \pi^+ + \pi^-$  的新实验,结果与我们的理论也是一致的。

我们建立起来的定量计算重夸克偶素强子跃迁的方法及所作的预言得到了实验的有力支持,成为研究强子跃迁的有效理论方法。目前 (上接第 628 页)

激光照排系统的研制,一部分参加遥感技术研究),同学们感到很有收获,使用单位也感到满意。另外,我们为低年级大学生开办了实验数据的微机处理、彩色照相洗印技术以及物理实验方面的学习班,也受到同学的欢迎。这些活动要求参加的人很多,但由于名额上限制,只能吸收部分人参加。试点过程中,也发现存在一些问题。这个组织原本应是学生自己的组织,我们只参加指导与协助,但学生流动性较大,不易形成领导核心,一些积极分子也受到出国热的冲击。另外,为低年级学生办班还需要经费上的支持。我们正在考虑解决这些问题的办法。目前一

我们仍在这方面进行更深入、广泛的研究,进一步完善理论体系和扩大其应用。

### 参 考 文 献

- [1] K. Gottfried, in Proc. Intern. Symp. on Lepton and Photon Interactions at High Energy, Hamburg 1977, edited by F. Gotbrod (DESY, Hamburg); K. Gottfried, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 598.
- [2] G. Bhanot et al., *Nucl. Phys.*, **B155**(1979), 208; M. E. Peskin, *Nucl. Phys.*, **B156**(1979), 365; G. Bhanot and M. E. Peskin, *Nucl. Phys.*, **B156**(1979), 391; T. M. Yan, *Phys. Rev. D*, **22**(1980), 1652; K. Shizuya, *Phys. Rev. D*, **23**(1981), 1180.
- [3] Y. P. Kuang and T. M. Yan, *Phys. Rev. D*, **24**(1981), 2874.
- [4] D. S. Liu and Y. P. Kuang, *Z. Phys. C*, **37**(1987), 119.
- [5] Y. P. Kuang et al., in Proc. Second Intern. Conf. on Hadron Spectroscopy (April 16—18, 1987, KEK, Tsukuba, Japan), 213—221; Y. P. Kuang et al., *Phys. Rev. D*, **37**(1988), 1210; Y. P. Kuang, in Proc. Heavy Flavour Physics Symp. (Aug. 11—20 BIMP and Peking Univ., Beijing, China).

些高等学校正酝酿成立院校科协组织,也许同院校科协联合起来举办这类活动是一条出路。

5. 我国已有相当一部分物理人才在生产第一线工作,有的作出了很大成绩。物理学会如何把这一部分物理工作者组织起来开展活动也是一个值得研究的问题。我们在 1987 年成立了厂矿技术工作委员会筹备组,意图是促进这些物理学工作者之间的横向联系和交流,并根据他们在知识更新和业务提高上的需要开展活动。我们还期望这个组织能成为研究所、高等学校与企业之间的桥梁。但由于发展这方面会员的工作进展缓慢,以及缺乏得力干部,筹备组活动尚未有效开展。(北京市物理学会秘书组)