§ 12.3 强子的夸克结构与强相互作用

核子有内部结构：高能电子散射

强子共振态

1. 强子的夸克结构

将已知的强子按同位旋第三分量T_3和奇异数S在二维平面上排列，可以得到有完美对称性的分类图。所有这些图都可以由三个粒子u、d、s（以及它们的反粒子）的简单结构（图12-10）耦合而成（图12.11）。这三种粒子可被认为是构成强子的基本单元，历史上被取名为夸克，u、d和s被称为是夸克的三种味。夸克模型是1964年由盖尔曼（Murry Gell-Mann）和茨维威革（George Zweig）分别独立地提出的。

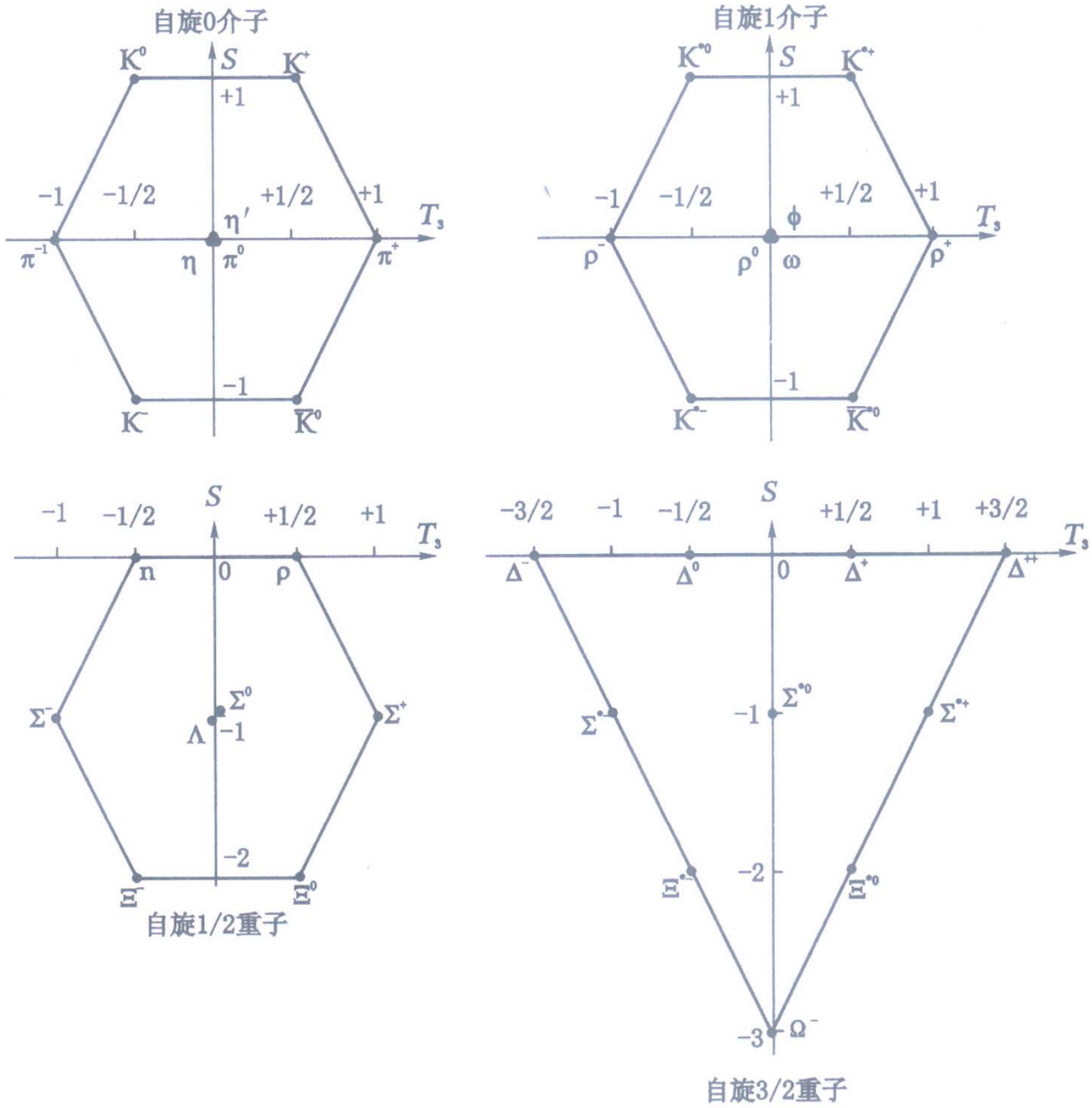


图 12-9　介子和重子在同位旋对奇异数二维图上的排列

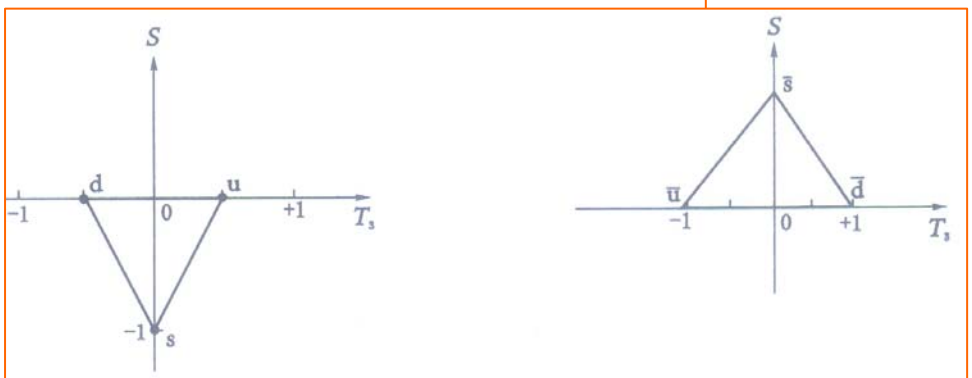


图 12-10　基本的三夸克-反夸克图

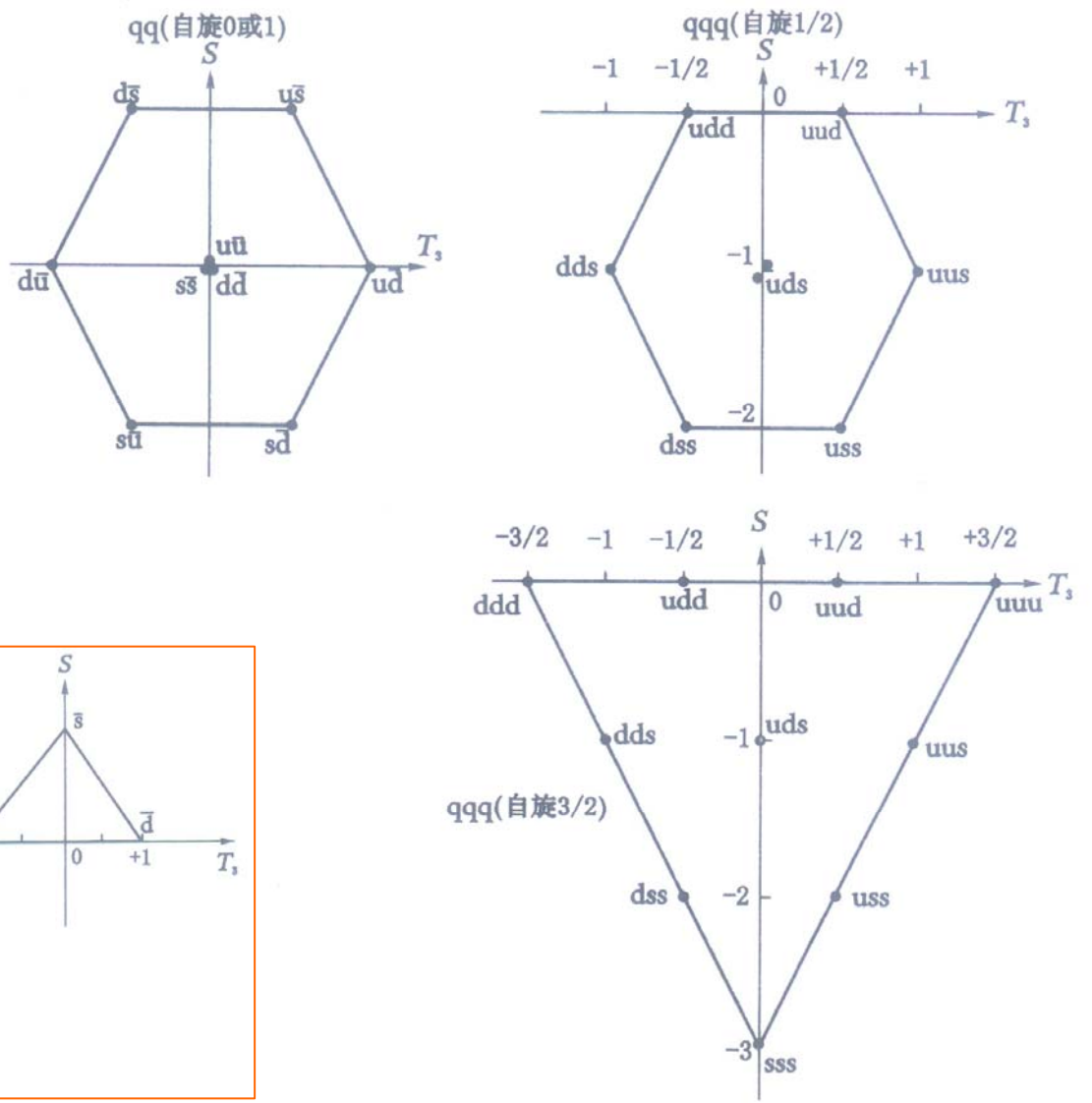


图 12-11　夸克-反夸克耦合以及三夸克耦合

从强子的夸克结构中,可以得出夸克的一些基本性质。

表12-4 夸克的基本性质

夸克	自旋	电荷（e）	同位旋（T, T_3）	重子数	奇异数
u	1/2	2/3	(1/2,1/2)	1/3	0
d	1/2	-1/3	(1/2,-1/2)	1/3	0
S	1/2	-1/3	(0,0)	1/3	-1

当把三个相同夸克（比如**uuu**）耦合成总自旋**3/2**的强子基态（**l=0**）时，出现了三个全同费米子在同一个量子态上的问题，违反了公认的泡利不相容原理。解决这个问题的办法，是引入一个新的自由度——色，夸克可以在色自由度上取不同的量子数的值：红（**R**）、蓝（**B**）和绿（**G**）比如可被认为Δ^{++}是夸克组合 $u_R u_B u_G$ 。类似的，反夸克带反色，同种色和反色相加为无色，三种色等量混合也为无色。实验上至今没有观察到带色的粒子，这就是著名的“色禁闭”现象。“色禁闭”要求我们在给出强子波函数时，色的部分必须满足特定的要求。对于重子，夸克波函数写作：

$$\Psi = \Psi_{\text{spin}} \Psi_{\text{space}} \Psi_{\text{flavor}} \Psi_{\text{color}} \qquad (12.3-1)$$

其中Ψ_{color}是反对称色波函数，可用符号表示如：

$$\psi_{color}=\frac{1}{\sqrt{6}}[RGB+BRG+GBR-RBG-BGR-GRB] \qquad (12.3-2)$$

而对于正反夸克组成的介子，对称的色波函数为：

$$\psi_{color}=\frac{1}{\sqrt{6}}[R\overline{R}+G\overline{G}+B\overline{B}+\overline{R}R+\overline{G}G+\overline{B}B] \qquad (12.3-3)$$

无色的要求使我们无法构筑2夸克或4夸克态等。引入色自由度以后，夸克的种类增加了三倍，这会影响到反应过程的统计性。比如 $e^+e^- \rightarrow$强子过程会由于色自由度而使反应道增加，也就是使截面增大，这已为实验所证实。

按照量子色动力学（QCD），夸克间的相互作用是由交换胶子来实现的，胶子的静止质量为0、自旋为1。胶子所代表的相互作用就是强相互作用，也叫色相互作用、色力或色场等。强作用只发生在带色的粒子之间，色的地位如同电磁相互作用里的电荷，因此，又把色称为色荷。

夸克的色的性质在强作用中是可以被改变的，这就要求胶子也要带色，胶子本身也能与其它带色粒子（夸克和胶子）发生强相互作用。

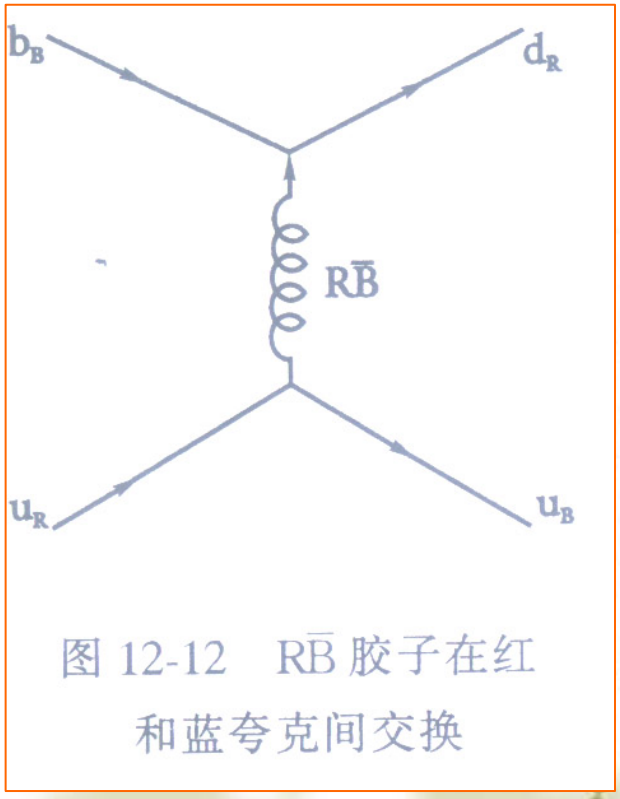


图 12-12　$R\bar{B}$ 胶子在红和蓝夸克间交换

在3色空间，应当有8种独立的胶子。胶子存在的真实性已有实验依据：三喷注现象

胶子可以转化为正反夸克对，正反夸克对也可湮没成胶子。在平衡条件下，强子内部就必然还存在附加的数目有一定涨落的正反夸克对，它们的量子数互相抵消，因而对强子的内秉物理性质（各种量子数）没有贡献。我们把这些夸克称作海夸克。与此相对应，把前面谈到的决定强子性质的夸克称作价夸克，它们也在强子的反应与衰变中表现出来。高能散射实验证明，强子内部的夸克和胶子所带的动量分别约占强子动量的一半。夸克所带的动量主要归价夸克所有，海夸克所占很少。

2. 夸克模型中的反应与衰变

(1)强相互作用不能改变夸克的味，而只能将夸克重新组合；

(2)夸克和反夸克可以成对的产生或湮没，与正负电子的情形类似；

(3) 弱作用可以改变夸克的味，同时发射或吸收玻色子，如：

$$u \to d + W^{+} \qquad \bar{u} \to \bar{d} + W^{-}$$

$$s \to u + W^{-} \qquad \bar{s} \to \bar{u} + W^{+}$$

它们的逆过程也成立。但是通过中性玻色子来改变夸克的味是禁止的，比如 $s \to d + Z^0$ 是不成立的，中性过程只能是夸克对的产生或湮没如 $Z^0 \to u + \bar{u}$ 。

$$\pi^+(u\bar{d}) + p(uud) \to \pi^0(u\bar{u}) + \Delta^{++}(uuu)$$

的基本过程是，$d + \bar{d} \to u + \bar{u}$ 即一对正负夸克的湮没和另一对正负夸克的产生。

由于强作用不改变夸克的味，因此一些守恒定律，如奇异数、重子数守恒等，在反应的夸克模型中自然满足。

在 $e^+e^- \to \text{hadrons}$ 反应中，一般是正负电子先湮没成虚光子，光子再变成若干对正负夸克。

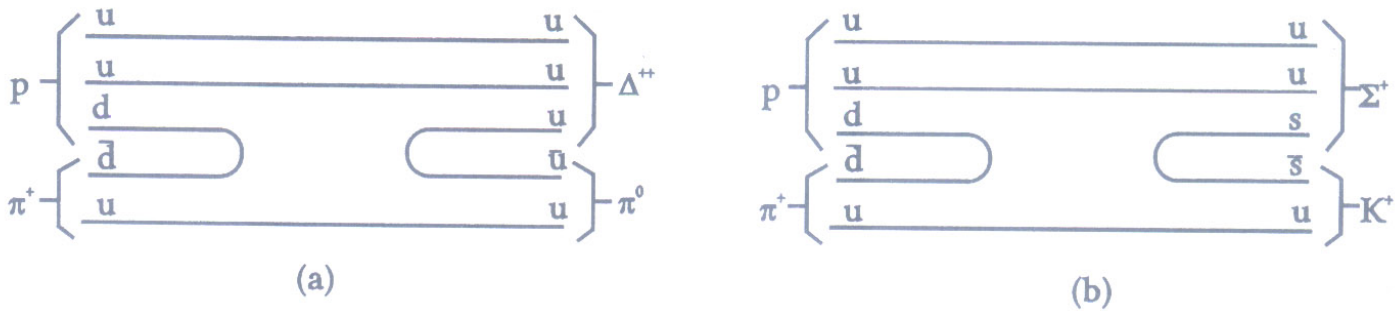


图 12-13　反应的夸克结构

(a)$\pi^+ + p \rightarrow \pi^0 + \Delta^{++}$　(b)$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$

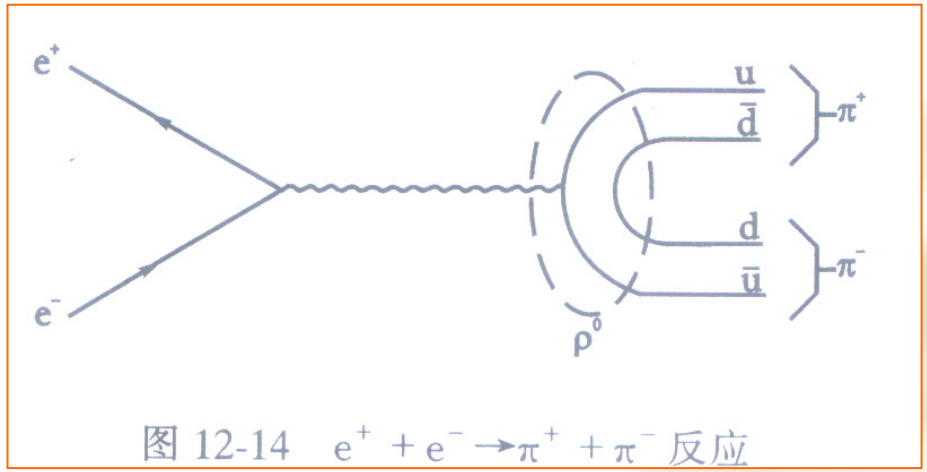


图 12-14　$e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ 反应

强子可以通过强相互作用、电磁相互作用或弱相互作用衰变。

强衰变过程是夸克重组和正负夸克对产生的过程。图12-15给出了一个典型的例子。强衰变中一个重要的现象是，如果初态的夸克完全湮没成胶子，末态再重新产生其它夸克对，即初末态夸克被“隔离”开，这样的强过程相对与有夸克连接的过程被大大压低。这种由于夸克“隔离”而压低强衰变的规则被称为茨威格（Zweig）规则。

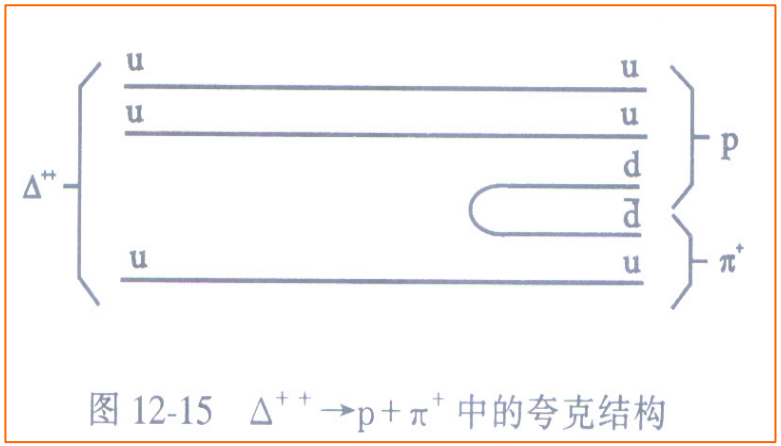


图 12-15 $\Delta^{++} \to p + \pi^+$ 中的夸克结构

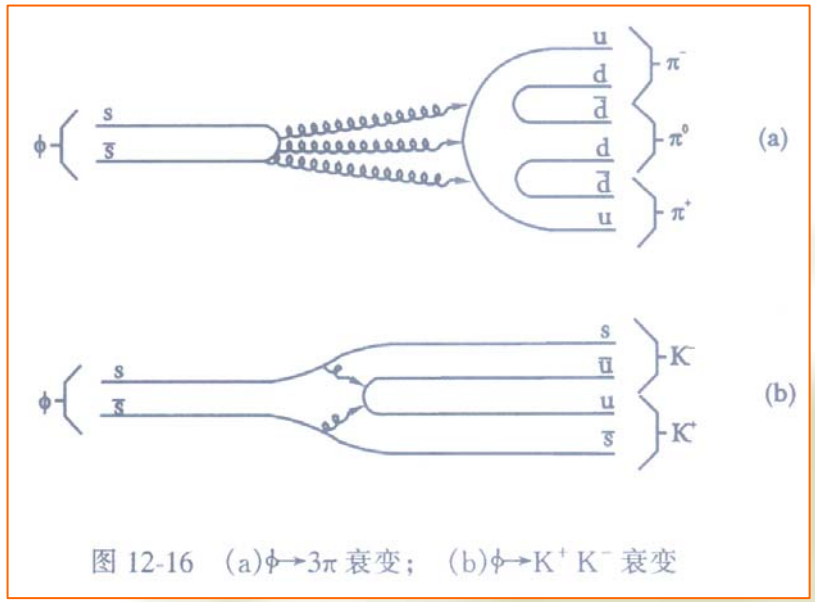


图 12-16 (a)$\phi \to 3\pi$ 衰变； (b)$\phi \to K^+ K^-$ 衰变

强子的电磁衰变包含正反夸克湮没成光子和夸克辐射光子的过程，光子又可变成正反轻子对。

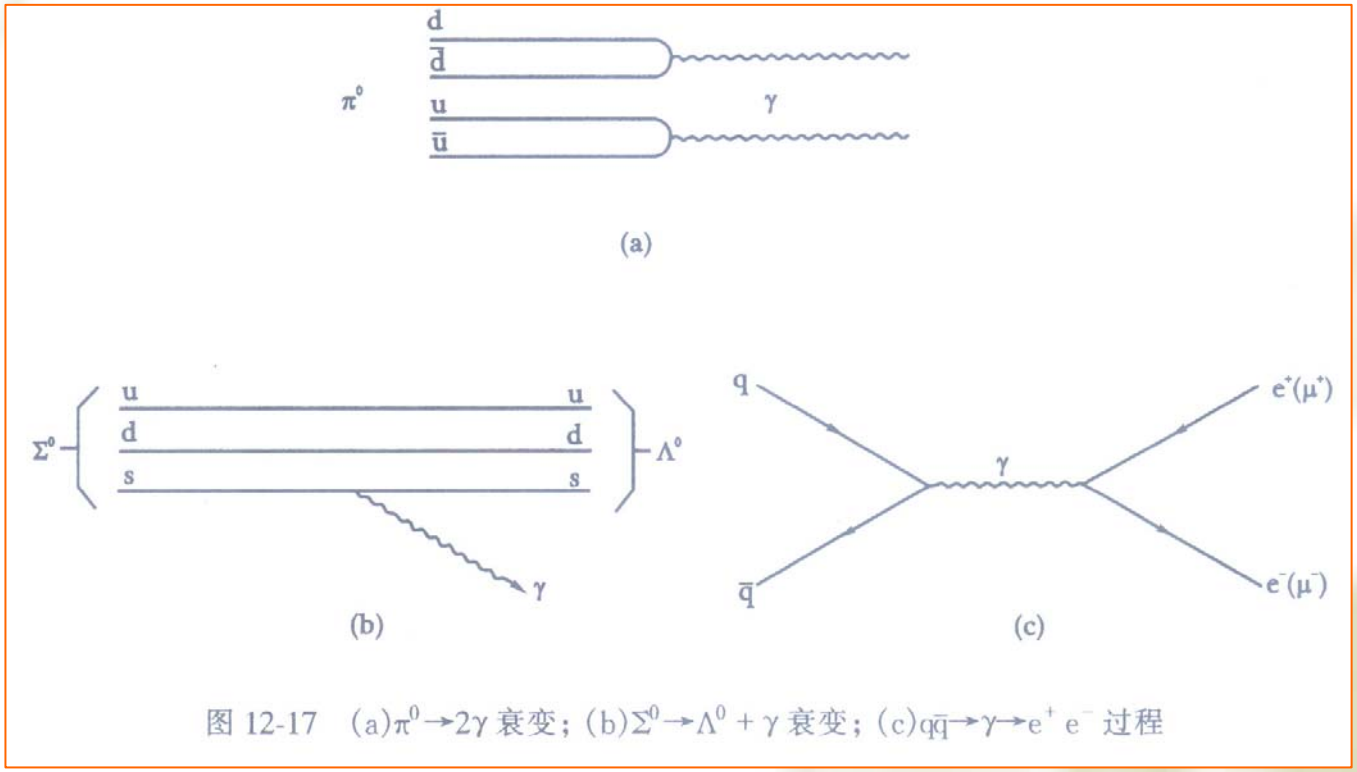


图 12-17　(a)$\pi^0 \to 2\gamma$ 衰变；(b)$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$ 衰变；(c)$q\bar{q} \to \gamma \to e^+ e^-$ 过程

弱衰变可以改变夸克的味，其中基本的过程是夸克发射玻色子，W玻色子又衰变到轻子对（e ν_e，μ ν_μ ）或被其它夸克吸收。图13-18给出了熟悉的中子和π介子的弱衰变过程，它们的末态出现轻子而初态只有强子，因而也被称为半轻子过程。图12-19给出了Σ^+的几种弱衰变，其中由于包含较多的W玻色子（较多的弱作用顶点）因而概率小得多。

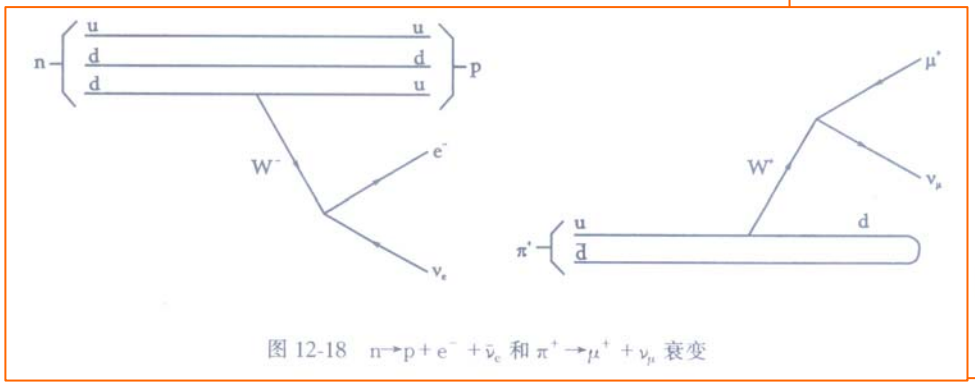


图 12-18 $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$ 和 $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ 衰变

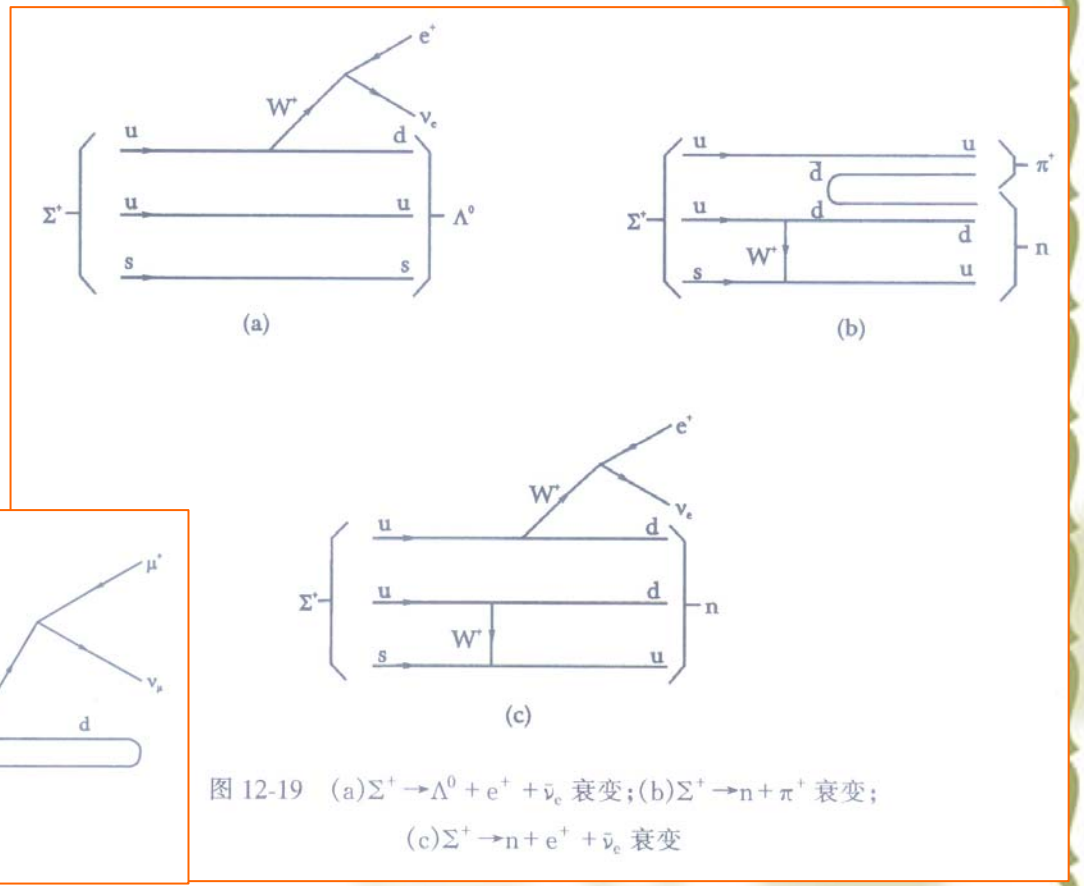


图 12-19 (a)$\Sigma^+ \to \Lambda^0 + e^+ + \bar{\nu}_e$ 衰变；(b)$\Sigma^+ \to n + \pi^+$ 衰变；(c)$\Sigma^+ \to n + e^+ + \bar{\nu}_e$ 衰变

3. 粲、底和顶

（1）粲夸克

较早的夸克模型只包括u,d和s三种夸克。为了解释奇异粒子衰变中的一些反常现象，格拉肖等人（Glashow, Iliopoulis和Maiani）于1970年提出了第四种夸克——粲（charm 或c）夸克。c夸克的粲量子数 $C=1$，而所有其它夸克的 $C=0$。强和电磁相互作用中C量子数守恒，而在弱相互作用中C量子数可以改变（也是通过发射或吸收W玻色子）。c夸克的地位与u夸克类似，它的电荷为 $\frac{2}{3}e$，奇异数$S=0$，可以通过c将s夸克转变到d夸克 $s \xleftarrow{W} c \xleftarrow{W} d$ 。1974年，在SLAC的电子对撞和Brookhaven的质子质子对撞中发现了一个非常窄的共振，它的物理宽度只是当时的探测能量分辨率的约1/100。这个新的共振态当时被SLAC组称为Ψ粒子，而被Brookhaven组称为J粒子，现在普遍被称为J/Ψ或Ψ粒子。J/Ψ的能量是3097MeV, 宽度只有0.087MeV。单从能量上看，J/Ψ很容易衰变到等强子道，宽度应该在100MeV左右，而实际上却小了约3个量级。

很快人们认识到J/Ψ是粲偶素（charmonium）。如图12-20(a)(b)所示，J/Ψ到非粲粒子的衰变由于维格规则而压低很多。可以有更高的共振态Ψ‘（3686）、Ψ“（4040）、Ψ“‘（4415）等，它们可以在不违反维格规则的条件下衰变到其它粲粒子（如图12-20(c)）。

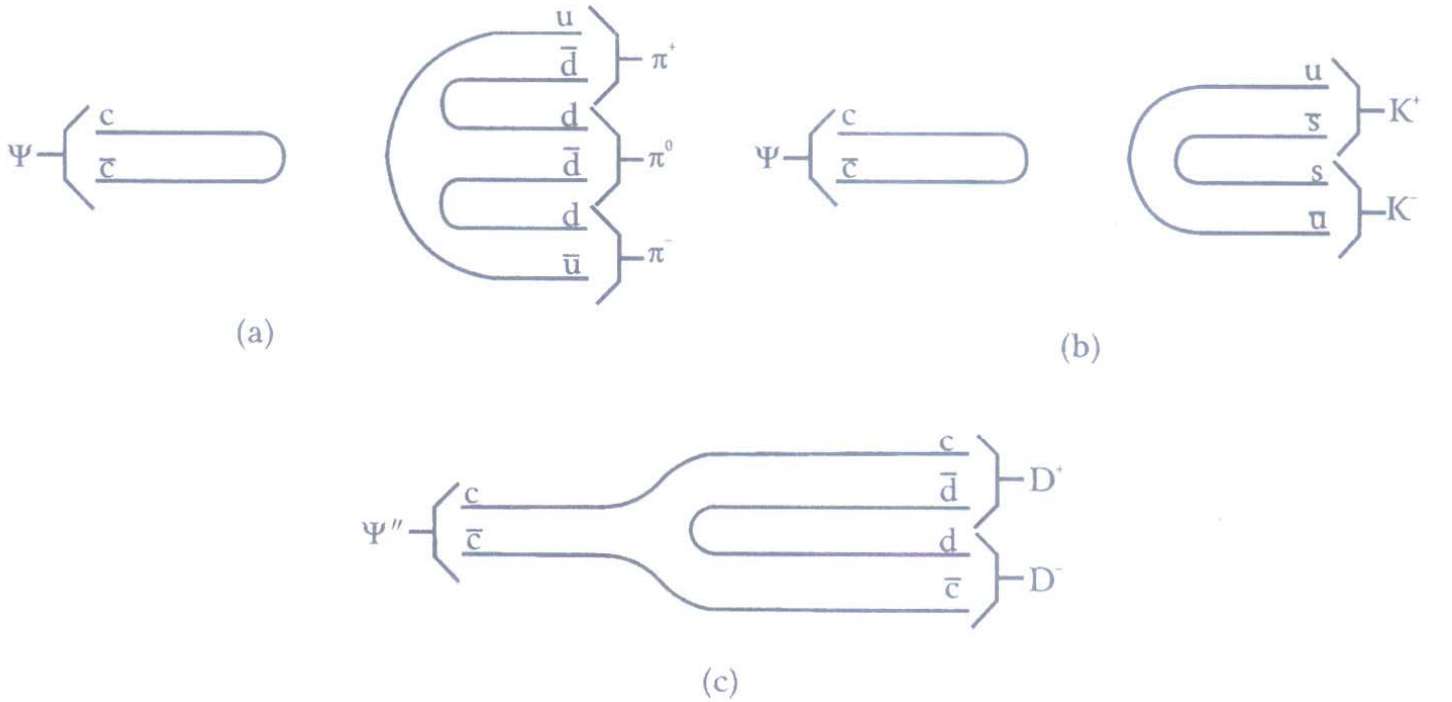


图 12-20　(a),(b)由维格规则压低的 $c\bar{c}$ 两种衰变;(c)维格规则容许的 $c\bar{c}$ 衰变

c夸克可与u、d夸克结合形成D介子，与s夸克结合形成F介子（图12-21(a)）。同样可以组合成带c夸克的重子（图12-21(b)(c)）。可以想象这些介子和重子都还有相应的更高能量的共振态。带粲的粒子（共振态）统称为粲素，它们有的已经在实验上发现（如$D^{\pm}, D^{0}, \overline{D}^{0}, F^{\pm}$（又称 $D_s^{\pm}$），$\Lambda_c^{+}, \Sigma_c, \Xi_c \Omega_c^{0}$等），有的还没有被观察到。粲自由度的研究还有大量的空白。我国北京的正负电子对撞机是目前世界上研究粲物理最有利的设施,目前正在升级。

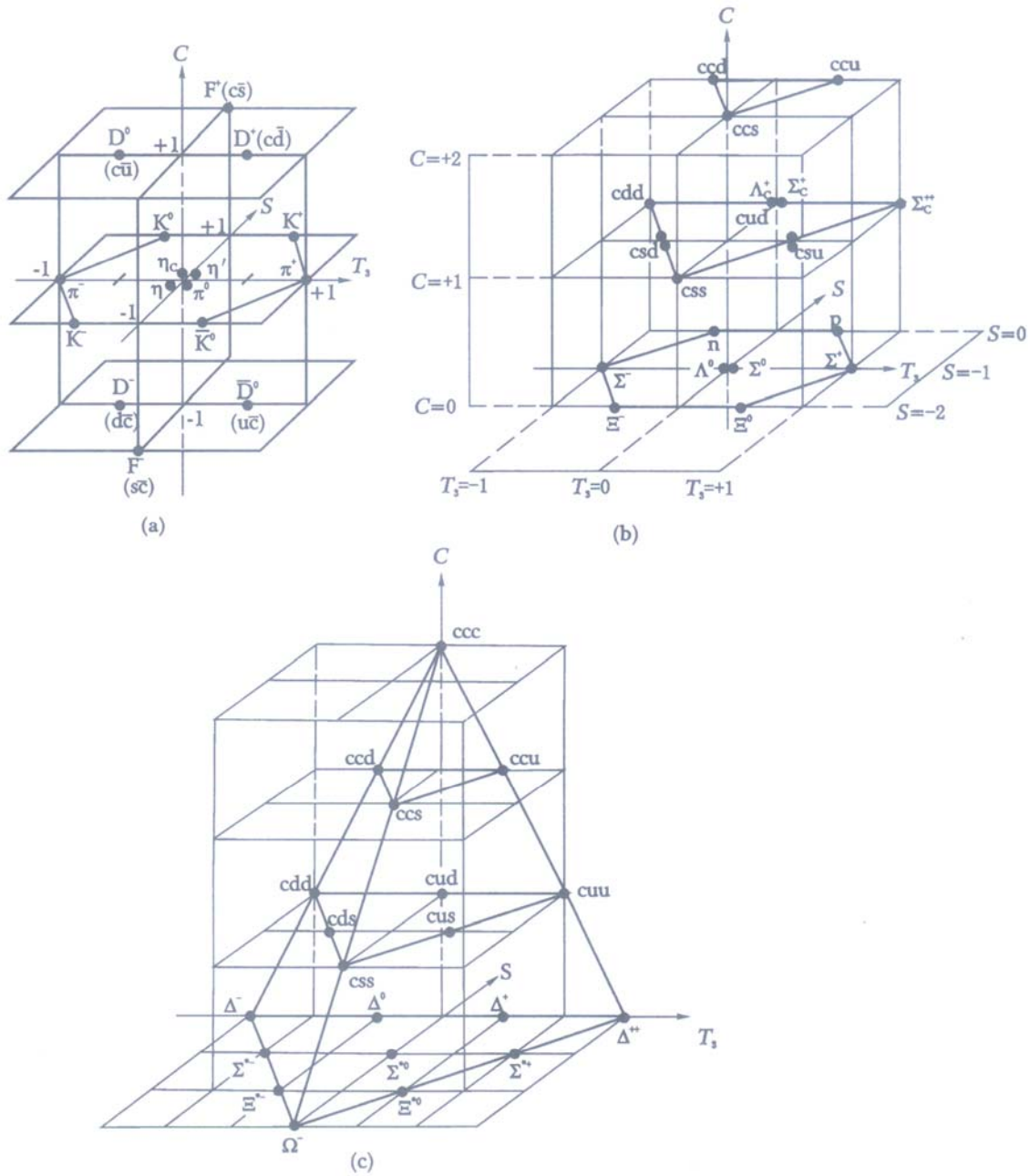


图 12-21　由 u,d,s,c 组成的可能的介子和重子

(a)自旋为 0 的介子　(b)自旋为 1/2 的重子　(c)自旋为 3/2 的重子

（2）底夸克和顶夸克

1977年，在美国fermilab的pp对撞实验和德国DESY的对撞实验中，发现了一个新的窄共振，它的能量9460MeV，宽度只有0.052MeV。与J/ψ的情况类似，这里发现的是一种新的夸克偶素：正反底夸克（bottom）的组合，被记作ϒ。底夸克偶素也有若干更高的共振态。图12-22给出了自旋为1的夸克偶素的能级图，它们在结构上很相似。实验上也已经发现了b与u或d夸克组成的介子 $B^{\pm}$、B^{0} 和 $\overline{B}^{0}$ ，b和s夸克组成的介子 $\overline{B}_{s}^{0}$ 和 B_{s}^{0}，以及含b夸克的重子。显然b物理还是基本未开垦的领域。由于理论预言CP不守恒在带b的系统中会表现得更明显，因而人们对b物理表现出特别的兴趣。在美国的SLAC和日本的KEK都正在建造b工厂，酝酿着重大的新发现。

b夸克的电荷是 $-\frac{1}{3}e$ ，与（u、d）和（c、s）比较，可以看出这是第三代夸克的一个成员，人们相信它应当有一个带电荷的伙伴——顶夸克。寻找顶夸克的努力持续了近20年。1994年，Fermilab宣布发现了顶夸克，它的质量高达约174GeV。顶粒子的产生需要极高能量的对撞机，美国的Fermilab和欧洲的LEP（及其后续者LHC）将是世界上研究顶物理的主要设施。

4. 强相互作用与夸克动力学

强相互作用是发生在色荷之间的，由胶子来传递。描写这种作用的理论是量子色动力学（**quantum chromodynamics** 或**QCD**）。**QCD**是一种规范量子场理论，它要求夸克的运动规律（拉格郎日量）满足**SU(3)**规范不变性，由此导出由**8**种胶子传递的色相互作用场。

强作用的特征首先是强度大。

典型过程中的截面值：强过程（比如反应）的总截面是10^{-2}b量级；电磁过程（比如反应）的总截面是10^{-4}b量级；弱过程（比如反应）的总截面是10^{-14}b量级；

不同衰变过程的寿命：强衰变的典型寿命是10^{-23}秒；电磁衰变的典型寿命是10^{-16}秒；弱衰变的典型寿命是10^{-8}秒。

直接比较典型距离上力的相对大小（表12-5）。由这些比较，可以看出四种相互作用强度在粒子过程中的明显区别，其比例关系大致为强:电磁:弱:引力=10^{2}:1:10^{-10}:10^{-36}。

表12-5 相互作用强度相对比较（取电磁作用强度为1）

比较关系	引力	弱作用	电磁作用	强作用	
				基本作用	剩余作用
两u夸克相距 $\begin{cases}10^{-18}\,\mathrm{m}\\3\times10^{-17}\,\mathrm{m}\end{cases}$	10^{-41}	0.8	1	25	——
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	——
原子核中的两个质子	10^{-36}	10^{-7}	1	——	20

这里给出的比例关系是基于目前的核和粒子物理实验的，如果把能量提高许多，观察更小距离处的情况，则强度关系会发生很大变化，甚至出现几种力统一的现象。

色禁闭和渐近自由:

夸克总是结合成无色的强子出现。然而，高能量下的深度非弹散射又揭示了夸克群体在近距离上几乎是自由运动的。

电磁作用: 通过交换光子来实现。光子本身不带电，不参与电磁作用，也就不影响带电粒子本身的状态和电磁场的分布。

强作用的渐近自由: 夸克发射带色的胶子后，自身的色要改变，并且夸克与胶子还要发生作用引起更多的胶子交换。这样，看起来就好象夸克把自身的色荷弥散到了强子尺度（**0.5—1.0 fm**）的空间，对于进入这个空间的其它夸克而言，就如同进入了一个色荷球一样，感受到的作用大大降低了。

强作用的“色禁闭”：当两个电荷通过交换光子相互作用时，各自在空间形成的电场的分布并不改变，总的电场就是两个点电荷场在空间的叠加，不受光子的影响（见图**12-23**），作用力（正比于力线的密度）因而随距离的增加而很快减小。两个夸克间的色作用却不是单夸克色场的简单叠加，作用中交换的胶子会改变色场的分布，使外部的色场被抵消，场集中在两个夸克之间，作用力与距离无关。

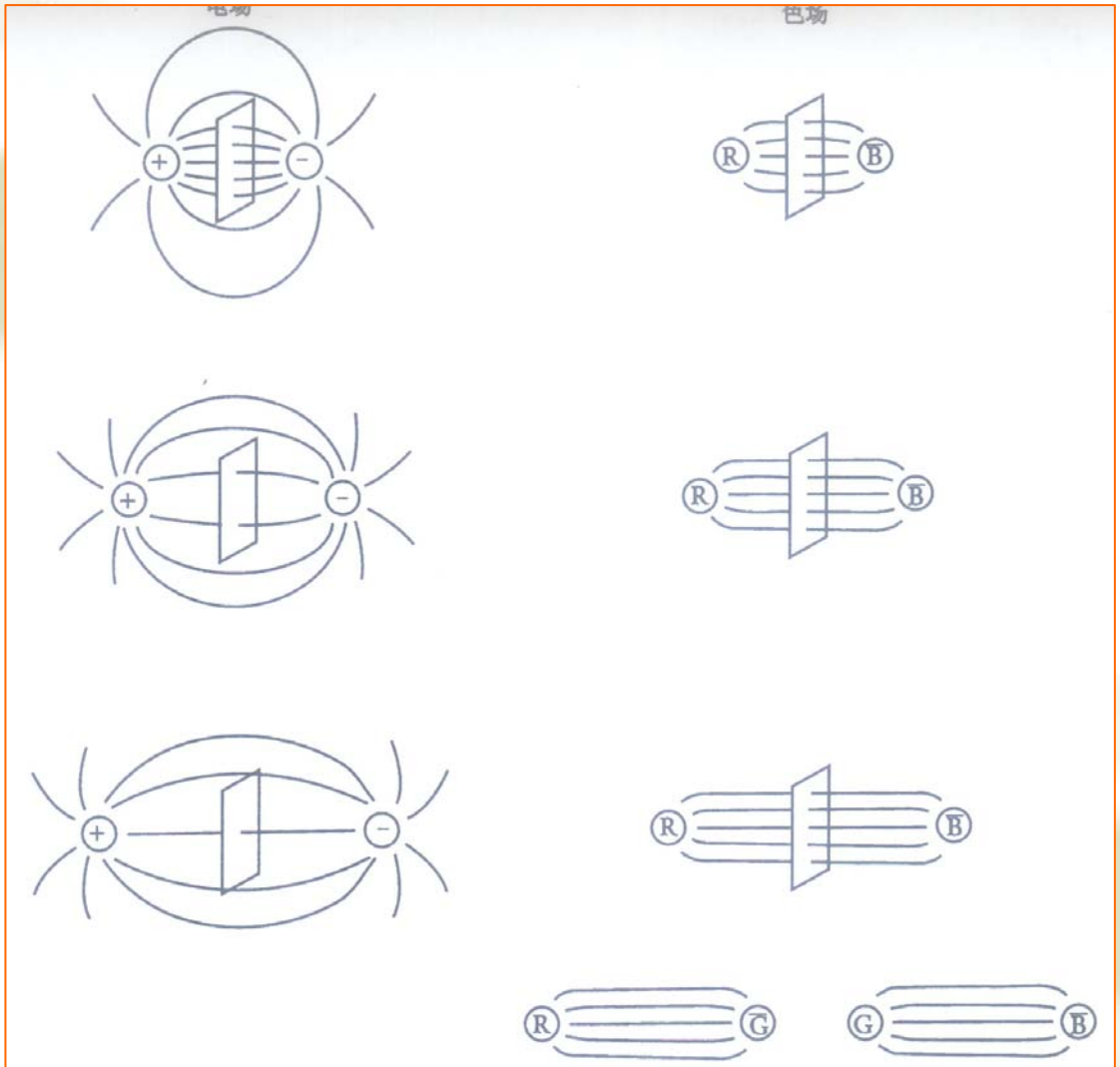
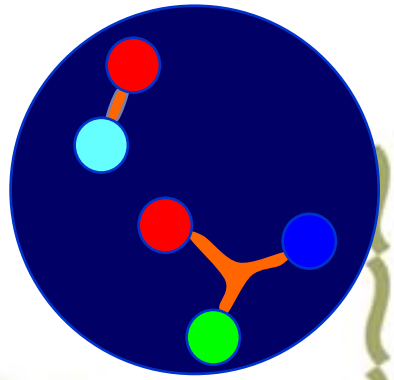


图 12-23　两个点电荷或色荷间的场随距离的变化

（横截面上的力线密度与力的强度成正比）



向强子注入能量的结果，不是使夸克分开，而是产生新的强子。能量足够高时，这个过程可以持续下去，直到动能被充分耗散，这就是强子簇射（喷注）。夸克由于动能增加而强子化的过程，在**fm**量级的范围内就完成了，因而在实验中并不能直接观察到夸克的分离现象。

动力学计算：

$$V(r) = kr - V_0$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}r^2} + [kr - V_0]u(r) = Eu(r) \qquad (12.3-2)$$

$$E_n = |a_n|\left(\frac{k^2\hbar^2}{2m}\right)^{1/3} - V_0 \qquad (12.3-3)$$

$a_1 = -2.3381$ $a_2 = -4.0879$ $a_3 = -5.5206$ $a_4 = -6.7867$

$a_5 = -7.9441$

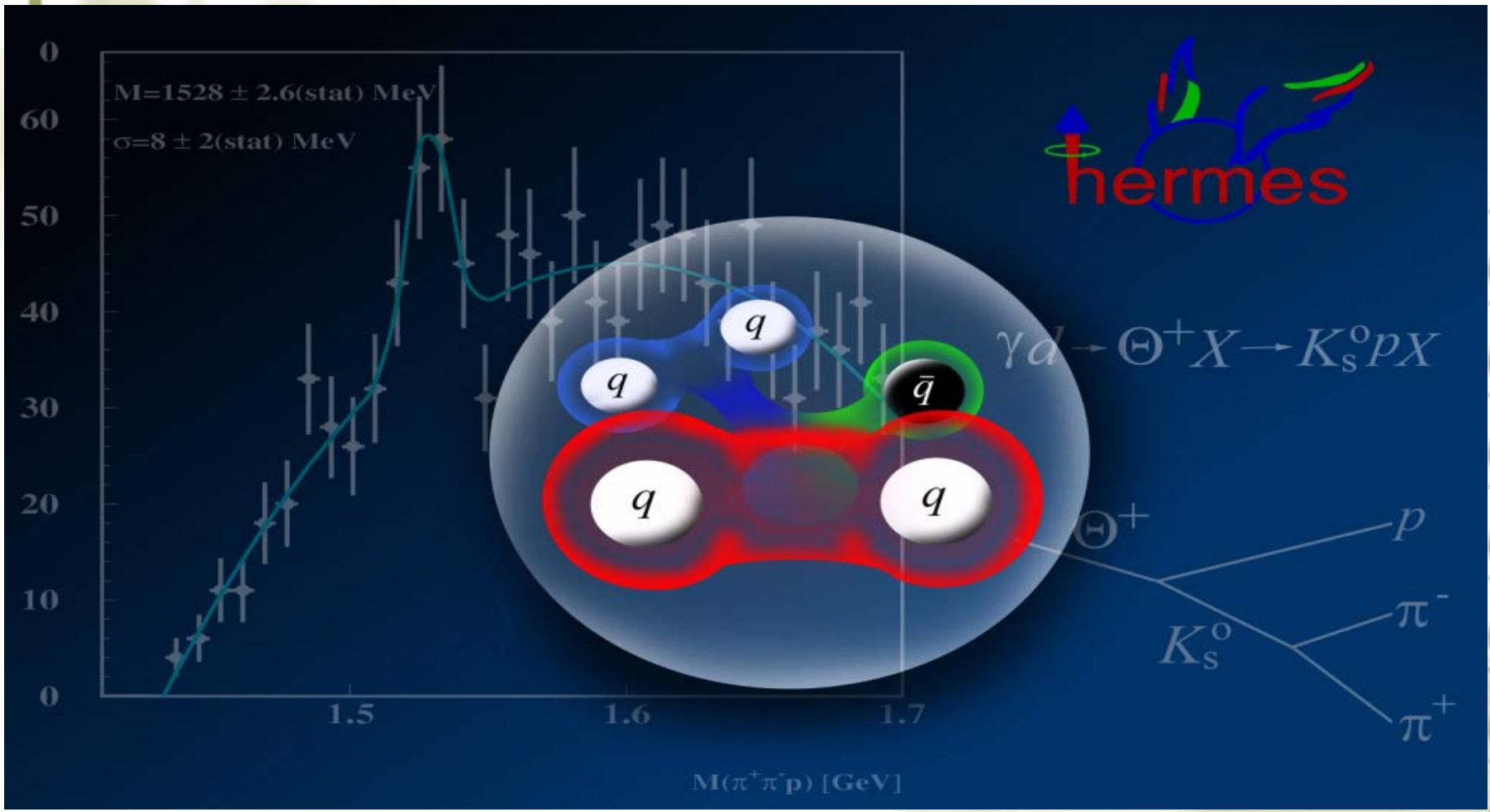
薛定谔方程中的质量，实际上吸收了许多复杂的因素，我们把它称为组分夸克质量

$$m_b c^2 \approx \tfrac{1}{2} m_T c^2 \approx 4.7\text{GeV}$$
$$m_c c^2 \approx \tfrac{1}{2} m_\psi c^2 \approx 1.5\text{GeV}$$
$$m_s c^2 \approx \tfrac{1}{2} m_\phi c^2 \approx 0.5\text{GeV}$$

$$m_u c^2 \approx m_d c^2 = \tfrac{1}{2} m_\rho c^2 \approx 380\text{MeV}$$
$$m_u c^2 \cong m_d c^2 = \tfrac{1}{3} m_n c^2 \approx 310\text{MeV}$$

$$m_u c^2 \cong m_d c^2 \approx 350\text{MeV}$$

至今人们只观察到正反夸克组成的介子和三夸克组成的重子，但原则上其它色单态也可能存在。比如**6**夸克的共振态已经被一些理论模型所预言，但经过近二十年的努力还没有在实验中确认。胶子原则上也可组合出色单态（胶子球），目前已发现了一些可能的对象，但还需要进一步确认。



Pentakuarks