

## § 12.4 弱相互作用与弱电统一理论

从来没有发现过由弱作用形成的束缚态或共振态，因而没有系列的能谱供研究。

弱作用的散射或反应过程截面太小。

主要只能通过衰变过程来积累弱作用的知识。

弱衰变发生的特征：(a) 有中微子出现；(b) 夸克的味改变；(c) 衰变概率（宽度）比电磁或强衰变小得多，平均寿命约 $10^{-8}$ 秒量级。

弱作用对夸克和轻子都存在。我们在前面的章节中已经积累了不少原子核和强子的弱衰变知识，因此在这一章里，我们将更多地涉及轻子系统。

## 1. 轻子家族

至今发现了三种带电的轻子（ $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$ ）和它们的反粒子。电子和 $\mu$ 子是最轻和次轻的带电粒子，因而在电荷守恒条件下，电子必然是稳定粒子，而 $\mu$ 子衰变时必然产生电子：

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$\tau$ 轻子比 $\mu$ 子要重得多，而且比许多强子还重，因此可以有更多的衰变形式：

$$\begin{aligned}\tau^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \\ &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \\ &\rightarrow \pi^- + \nu_\tau\end{aligned}$$

轻子的各代却是严格区分的，这表现为三种轻子数（电轻子数， $\mu$ 轻子数和  $\tau$  轻子数）各自守恒。

## 容许

$$p + \mu^- \rightarrow \nu_\mu + n,$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu,$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau,$$

## 禁止

$$p + \mu^- \rightarrow \pi^0 + n,$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow e^- + \nu_e,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_e$$

## 2.弱作用分类

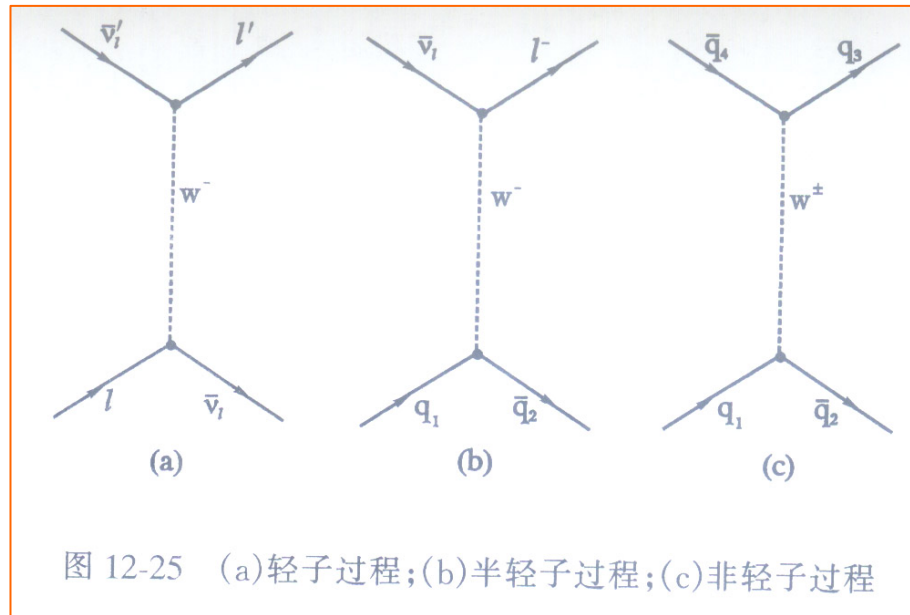
我们已经知道，弱作用是由  $W^\pm$  玻色子（电性流）或  $Z^0$  玻色子（中性流）来传递的。电性流过程可以分为三类。

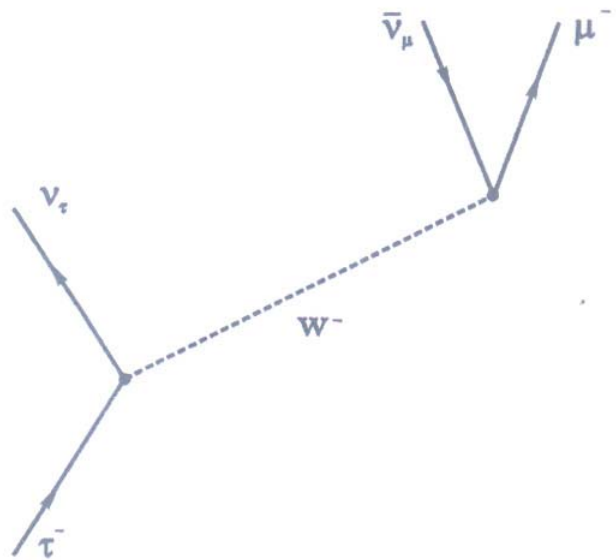
### (1) 轻子过程

如果  $W$  玻色子的两端都只与轻子连接，就称为轻子过程。

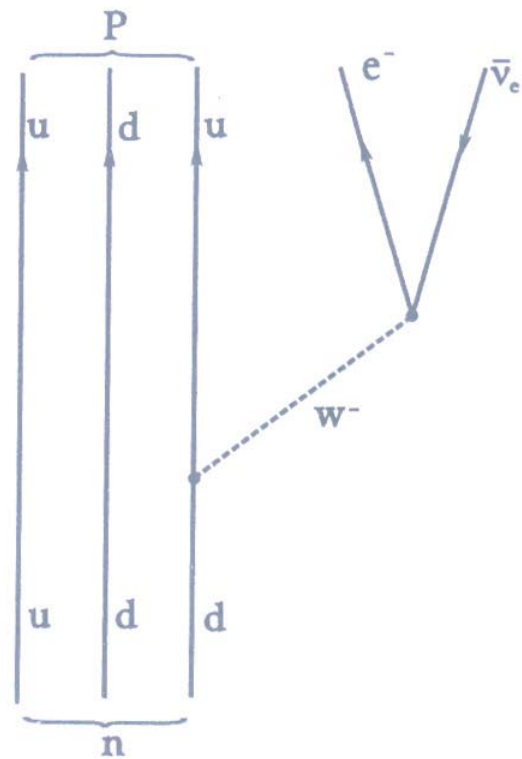
$$l + \bar{\nu}_l \leftrightarrow l' + \bar{\nu}_{l'}$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau, \quad \nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$$





(a)



(b)

图 12-26 (a)  $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$ ; (b)  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

## (2) 半轻子过程

W玻色子的一端接轻子，另一端接夸克，

$$q_1 + \bar{q}_2 \leftrightarrow l + \bar{\nu}_l$$

## (3) 非轻子过程

W玻色子的两端都接夸克，

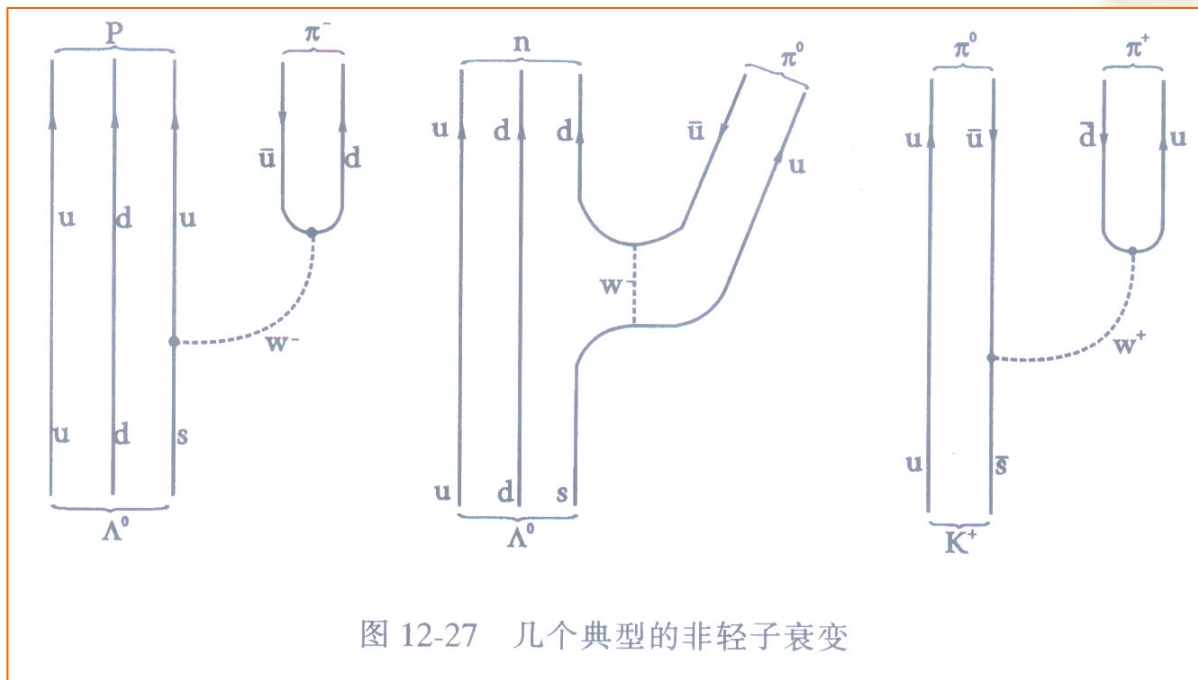


图 12-27 几个典型的非轻子衰变

$W$ 玻色子的作用顶点可表示为 $Wf_1f_2$ ，在每一个这种顶点处要求：电荷守恒；轻子数守恒（注意 $W$ 的轻子数为0）；夸克数守恒（夸克的夸克数为1；反夸克的夸克数为-1）。

中性流的作用顶点可表示为 $Zf_1f_2$ ，由于 $Z^0$ 不带电，且不能通过 $Z^0$ 改变夸克的味，因此要求。中性流引起的衰变也可分为轻子过程，半轻子过程等。

### 3. 宇称不守恒

$W$ 玻色子对轻子的作用是 $V-A$ 型的，因而人们称电性流的理论是 $V-A$ 理论。此时，宇称不守恒达到最大。由这种作用只能产生左旋中微子或右旋反中微子

#### 4. 电弱统一和W, Z玻色子

电弱统一理论是格拉肖 (S.Glashow) 在1961年提出, 温伯格 (S.Weinberg) 和萨拉母(A.Salam)在1967年各自独立的完成的。在这个理论中, 电磁和弱作用被视为属于SU(2)xU(1)规范对称性的同一种相互作用, 通过传递 $\gamma$ 、 $W^\pm$ 和 $Z^0$ 四种玻色子来实现。理论的最重要预言是 $Z^0$ 玻色子的存在。

$$\begin{aligned} |\gamma\rangle &= \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle \\ |Z^0\rangle &= -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle \end{aligned} \quad (12.4-2)$$

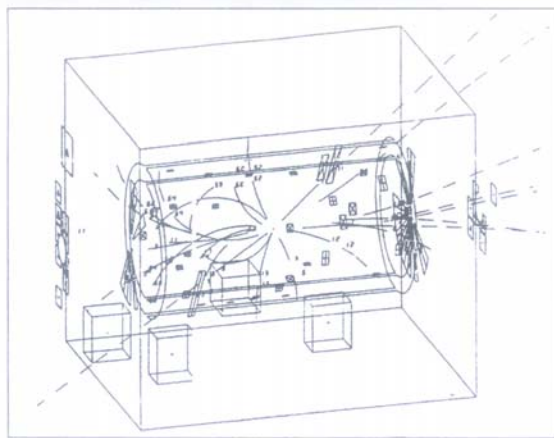
$$m_W / m_Z = |\cos\theta_W| \quad (12.4-4)$$

$$\sin^2\theta_W = 0.2319 \pm 0.0005 \quad (12.4-5)$$

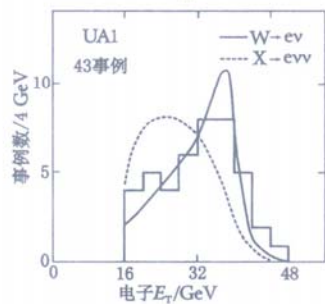
$$m_W c^2 = \left[ \frac{4\pi\alpha}{8\sin^2\theta_W} \cdot \frac{\sqrt{2}(\hbar c)^3}{G_F} \right]^{1/2} \approx 78\text{GeV} \quad (12.4-6)$$

$$m_Z c^2 = \frac{m_W c^2}{|\cos\theta_W|} \approx 89\text{GeV}$$

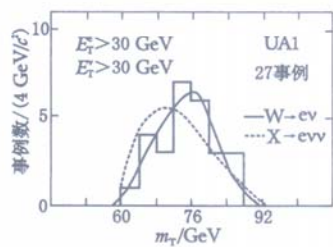




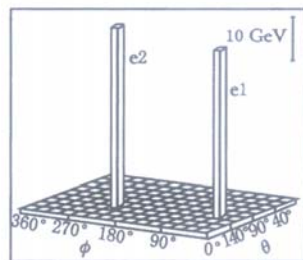
(a)



(b)



(c)



(d)

图 12-28 (a)在 CERN 的 SPS 上的一次 pp 对撞的粒子径迹重建图[引自 G. Arnison et al., Phys. Lett. **B126**, 398(1983)]。(b), (c)在  $p + \bar{p} \rightarrow W + \text{其它}$ , 然后  $W \rightarrow e + \nu$  实验中测得的电子能谱和电子加中微子总能量谱。实线表示丢失动量与电子动量相反的事例, 而虚线表示三体本底。重建的 W 玻色子质量为  $(81 \pm 2) \text{ GeV}$ [引自 G. Arnison et al., Phys. Lett. **B129**, 273(1983)]。(d)在  $p + \bar{p} \rightarrow Z^0 + \text{其它}$ , 然后  $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$  实验中测得的电子的角度和能量, 由它们重建的  $Z^0$  的质量为  $(91 \pm 2) \text{ GeV}$ [P. Bagnaia et al., Phys. Lett. **B129**, 130(1983)]

$$m_W c^2 = 80.41 \pm 0.10 \text{ GeV},$$

$$m_Z c^2 = 91.187 \pm 0.007 \text{ GeV} \quad (12.4)$$

## § 12.5 对称性与守恒定律

粒子物理是对称性与守恒定律最为丰富的领域。在前面个别讨论的基础上，我们在这一节中给出比较系统的有关对称性的知识。

自然界中的对称性是和守恒定律相联系的，这一点可用内特尔(Noether)定理来表述：如果运动规律在某一变换下具有不变性，则必然相应地存在一个守恒定律。

对称性根源于自然界中某些绝对量的不可测量性。比如，空间的绝对位置、绝对方向不可测量，绝对时间不可测量等。

对称性可分为时空对称性和内秉对称性，前者对应于经典的时空变换，而后者指在粒子内秉的广义坐标上的变换，没有经典对应。

对称变换又可分为连续变换和分立变换。连续变换对应的是相加性守恒量（即总体量是各部分的该量之和，如能量、动量、电荷、奇异数等），而分立变换对应的是相乘性守恒量（即总体量是各部分的该量之积，如宇称等）。

表 12-10 对称性与守恒定律

	对称性	守恒量	适用范围		
			强作用	电磁作用	弱作用
连续变换	空间平移	动量 $p$	Y	Y	Y
	空间转动	角动量 $J$	Y	Y	Y
	时间平移	能量 $E$	Y	Y	Y
	电荷规范变换	电荷 $Q$	Y	Y	Y
	重子数规范变换	重子数 $B$	Y	Y	Y
	电轻子数规范变换	电轻子数 $L_e$	Y	Y	Y
	$\mu$ 轻子数规范变换	$\mu$ 轻子数 $L_\mu$	Y	Y	Y
	$\tau$ 轻子数规范变换	$\tau$ 轻子数 $L_\tau$	Y	Y	Y
	同位旋空间转动	同位旋 $I$	Y	N	N
	绕同位旋 3 分量转动	同位旋 3 分量	Y	Y	N
	奇异数规范变换	奇异数 $S$	Y	Y	N
	粲数规范变换	粲数 $C$	Y	Y	N
	底数规范变换	底数 $D$	Y	Y	N
	分立变换	正反粒子变换	C 宇称	Y	Y
空间反射		宇称 $P$	Y	Y	N
时间反演			Y	Y	N
G 变换		G 宇称	Y	N	N
全同粒子变换		变换性质	Y	Y	Y

(1) 正负粒子变换（又叫电荷共轭变换） $C$ ，是指在一个系统中，将全部粒子转换成它们各自的反粒子。在 $C$ 变换下，粒子的所有内秉相加性量子数（如 $Q$ 、 $B$ 、 $L_e$ 、 $S$ 等）都改变符号，而时间、空间、动量、角动量等不变。在 $C$ 变换下，电磁场强度也要变号，因而光子具有负的 $C$ 宇称。凡是内秉相加性量子数皆为 $0$ 的中性粒子，称为纯中性粒子，它们的反粒子就是它们本身（如光子、 $\pi^0$ 、 $\rho^0$ 、 $\eta$ 等）。对于非纯中性粒子，由于相加性量子数不为 $0$ （正反粒子不相同），为了满足守恒关系，正反粒子必须成对产生或湮没。由多个粒子组成的系统，其 $C$ 变换特性不仅与各粒子本身的 $C$ 量子数有关，而且与系统的时空结构有关系。比如对于一对正反粒子组成的系统，其 $C$ 量子数为 $(-1)^{l+s}$ ，与两粒子的轨道量子数 $l$ 和总自旋 $s$ 有关。

(2) **G变换**，指**C变换**和绕同位旋第二轴转动**180°**变换的乘积：

$$G = CI_2(180^\circ)$$

由于许多粒子不是**C**的本征态，计算**C**量子数不方便，这时往往采用**G**宇称。同一组同位旋多重态具有相同的**G**宇称，比如 $\pi^+$ 、 $\pi^-$ 和 $\pi^0$ 的**G**宇称都是**-1**。**G**宇称可视为是**C**宇称的推广，但仍然不是所有粒子均具有确定的**G**宇称。

(3) **CPT守恒**。在中性**K**介子的衰变中发现了少量的**CP**不守恒现象。但人们仍然相信，**CPT**守恒是严格成立的。在量子场论中，**CPT**守恒可以从理论上得到严格的证明，并被称为**CPT**定理。它的表述是：任何一种定域相互作用的哈密顿量，如果满足洛伦兹变换下的不变性，则该相互作用在**CPT**联合作用下是不变的。因此，**CP**守恒在弱作用中的破坏，就意味着**T**对称性在弱作用中也是破坏的。根据**CPT**守恒，可以推出：正反粒子具有相同的质量和寿命，它们的磁矩大小相等而符号相反。对这些物理量的测量，也提供了实验检验**CPT**定理的途径。至今的实验数据表明，**CPT**定理在误差范围内是严格成立的。

## § 12.6 标准模型及其发展

### 1. 标准模型

标准模型是目前人们用来描写“基本”粒子和它们的相互作用的比较成熟的规范量子场论理论（它被称为模型只是由于历史的原因），它的内容包括：

#### (A) “基本”粒子

(1) 自旋 $1/2$ 的费米子：三代轻子及其反粒子；三代夸克及其反粒子。

(2) 自旋 $1$ 的规范玻色子：四种弱电玻色子；八种胶子。

(3) 自旋 $0$ 的希格斯玻色子。

#### (B) 相互作用

(1) 弱电统一理论——EW。

(2) 强作用的量子色动力学——QCD。

至今为止，标准模型与实验符合得很好，因此人们有理由相信它是在相当范围内成立的基本理论。但标准模型在诸多基本的方面仍存在问题。

标准模型面临的最大困难可能是质量问题。在标准模型中，具有规范不变性的拉格朗日量不含质量项，也就是说，出现在规范理论中的费米子和玻色子原则上都没有质量，这显然与实验不符；而如果人为的加入质量项，又必然要破坏规范不变性。解决这个矛盾的办法，是引入至少一种特殊的自旋为0的玻色子场，称为希格斯(higgs)场。规范玻色子和费米子场可以与希格斯场发生作用而获得质量。

在希格斯场存在的情况下，物理真空（场能量的最低点）将偏离规范对称点。也就是说，拉格朗日量本身具有规范不变性，但在真空点附近规范对称性是破缺的，在真空基础上获得的粒子可以具有质量。这样就同时照顾到了规范对称性和质量。但这样解决问题，不是从物理原理出发，而更象是一种技术手法。由于质量在任何理论中都具有核心地位，希格斯玻色子的存在与否，就成了涉及整个理论框架的关键问题。对希格斯场的描写有较大的任意性，这给实验带来了很大的困难。希格斯玻色子的质量被预言在 $4 \text{ GeV}/c^2$ 到 $1 \text{ TeV}/c^2$ 之间。目前实验已排除了大约小于 $100 \text{ GeV}/c^2$ 的质量区。欧洲核子中心(CERN)正在建造一台价值23亿美元的大强子对撞机(LHC)，将采用pp对撞，对撞能量将达到 $2 \times 7 \text{ TeV}$ ，亮度 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。它的首要目标，就是寻找希格斯玻色子。LHC预计在2006年后投入运行，中国政府已经投入了一些经费，支持中科院高能物理所和北京大学、中国科技大学、南京大学等参与LHC上物理工作的合作。显然，如果在LHC上找不到希格斯粒子，则目前看起来很美观的规范场理论框架将不得不重新考虑。



如果希格斯玻色子存在，则规范场理论具有基本的合理性因而因当在标准模型的基础上继续发展。目前仍有许多基本问题是标准模型无法解答的，比如：

(1) 粒子的代。目前发现的轻子和夸克都是三代。在标准模型的计算中为了抵消掉非正常项，要求费米子成代出现，但并不限制只有三代。

(2) 标准模型中仍然有许多的参量需要由实验确定，比如相互作用的耦合常量 ( $e, g, g_s$ )，电弱混合角 ( $\theta_w$ ) 以及费米子（夸克和轻子）的质量、希格斯玻色子的质量等。

(3) 标准模型的对称性有明显的缺陷。比如弱作用可以改变夸克的味，因此夸克的三代之间可以相互转变；但目前没有发现任何作用可以改变轻子的代，这种夸克与轻子的不对称性在标准模型中无法解释。又比如左旋费米子在标准模型里是SU(2)双重态，而右旋费米子却是单态。还有费米子和玻色子在理论中的地位有明显区别；电弱统一而与强作用不统一，引力场还没有量子理论等等。

以上讲到的这些缺陷的存在，并不降低标准模型的地位。首先，标准模型在至少**100GeV**以下能区与实验符合很好，与历史上任何别的理论相比，它的适用范围是空前的。另外，标准模型提供了理论的完美性，它同时包含了相对论和量子理论的成就，并以其规范性而在数学上自恰，这就使它一方面为未来理论的发展提供了应当遵守的基本框架，另一方面又具有很强的预言实验的能力。因此，认为标准模型是人类对物质世界认知历史上的一个重要台阶是不过分的。

## 2. 大统一理论

**GUTs(grand unified theoies):** 将弱电理论与强作用的量子色动力学统一起来。

所谓统一，是指在高得多的能量下，相互作用可以遵从统一的规范对称性，具有相同的作用强度和同一组规范玻色子。但在较低能量下，对称性发生自发破缺，表现为对称性、强度和交换玻色子都不同的几种相互作用。

当我们在前面比较相互作用的强度时，都是以目前实验室的测量为基础的，相互作用的耦合常量（比如电磁作用里的常量 $e$ 或  $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0\hbar c)$ ）也是按现有的数据定出来的。

耦合常量实际上是巡行耦合常量（**running coupling constant**），随能量变化，只是变得很缓慢。由于高能下的作用对应于近距离的作用，所以能量尺度的问题也就是空间尺度的问题。比如考虑一个电子的静电作用，在一般的测量中（如密里根油滴实验），作用虚光子的波长较大，感受到的是较大范围的电子的存在，作用强度由电荷量 $e$ 决定。但在极高能散射实验中，动量转移大，虚光子波长很短，可以感受到极小尺度的电子，此时电子的有效电荷会增大。这种变化主要发生在极短的距离处。比如在 $10^{-3}\text{fm}$ 处（动量转移约 $200\text{GeV}/c$ ），有效电荷量增加约1%；在 $10^{-9}\text{fm}$ 处，有效电荷增加约2%，而在 $1\text{fm}$ 之外，有效电荷量都是 $e$ 。

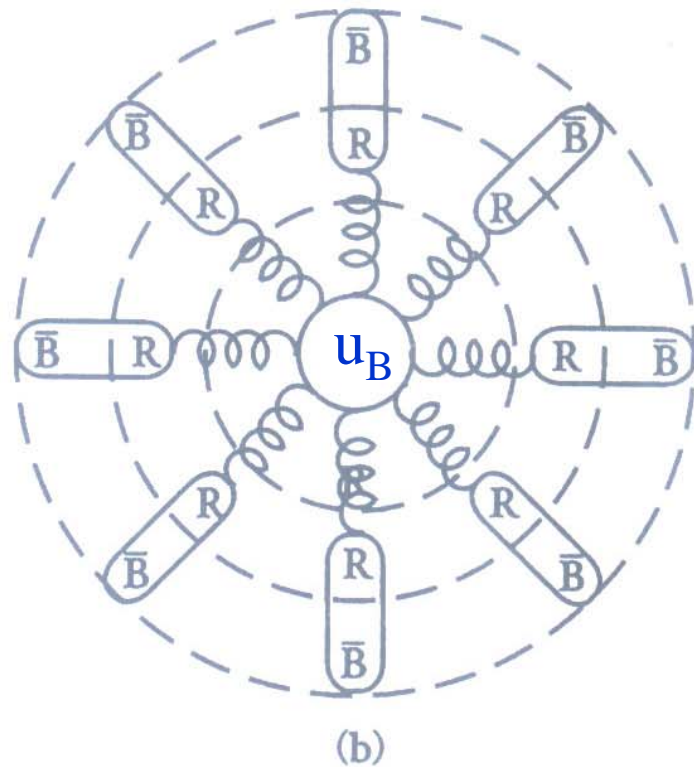
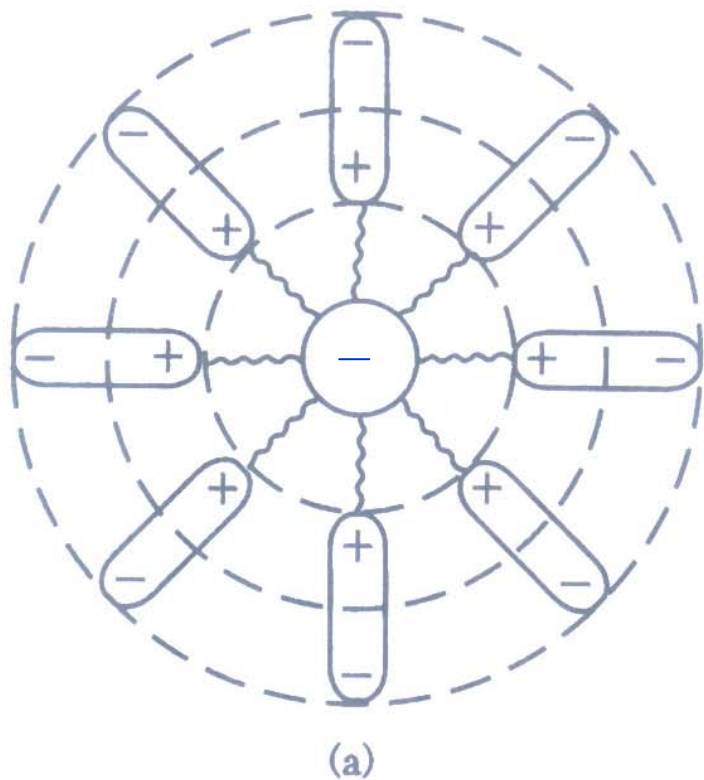


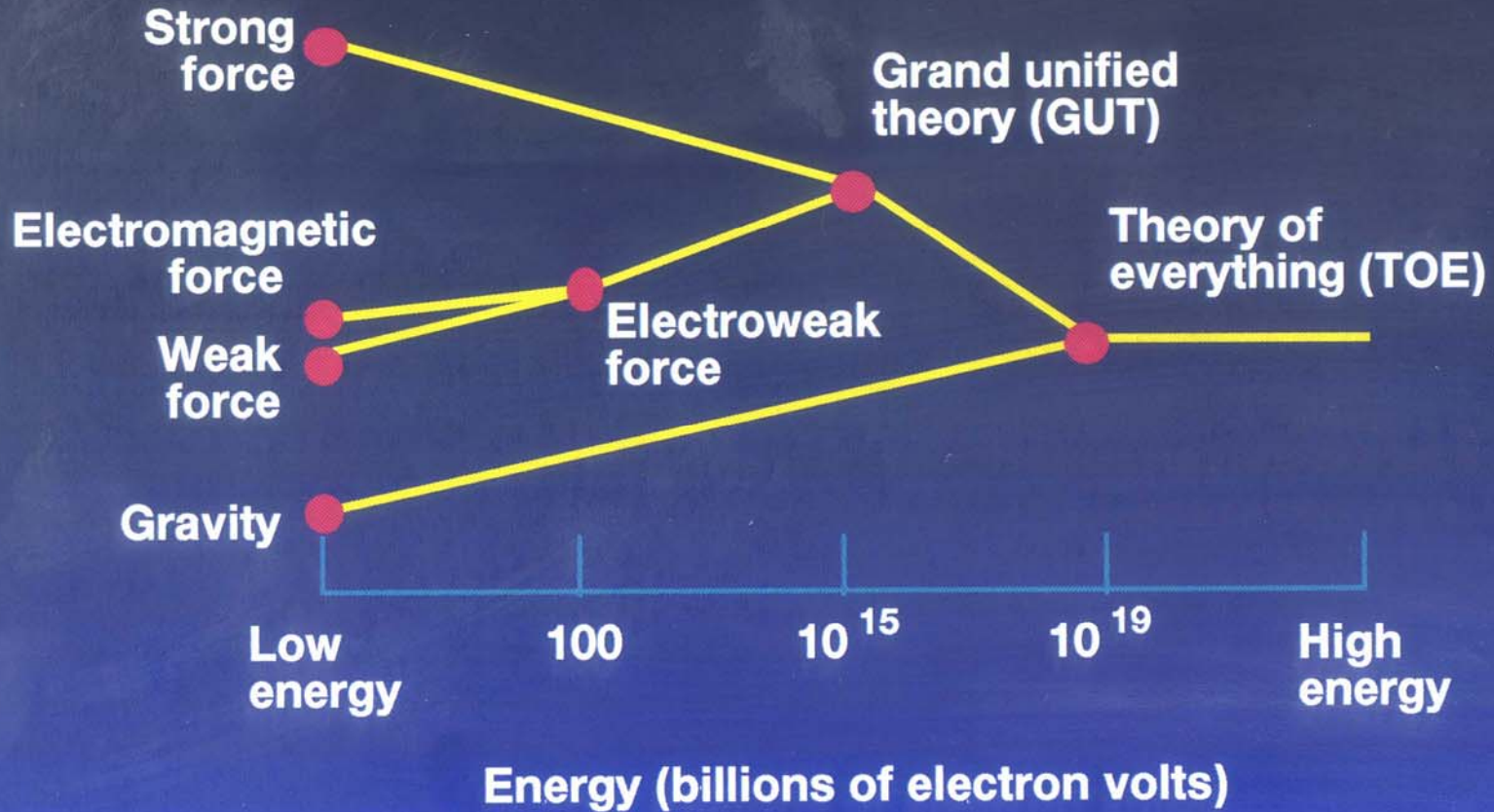
图 12-29 示意图(a)一个待测的电子被虚  $e^+e^-$  对所包围；  
 (b)一个 R 夸克发射虚  $R\bar{B}$  胶子使其 R 色被弥散到更大范围

强作用的耦合常量也发生类似的变化，但变化的方向却正好相反。比如一个 $u_R$ 夸克可以发射等虚胶子使自己的 $R$ 色荷被弥散开去（图12-29(b)），从而使近距离处的有效作用降低， $u_R$ 本身变成 $u_B$ 或 $u_G$ 夸克（ $u_R \rightarrow u_B + R\bar{B}, u_R \rightarrow u_G + R\bar{G}$ ）。

在一定的能量下，不同相互作用的耦合常量可能变得相等从而无法区分。不同模型下定量计算的结果很不一样。在大约100GeV时，电磁和弱相互作用统一，而在约 $10^{15}$ GeV能区，强和电弱作用统一。引力的统一问题更加复杂，而且只能在更高的能量下实现。

# Unifying the Four Forces of Nature

*Super Collider*

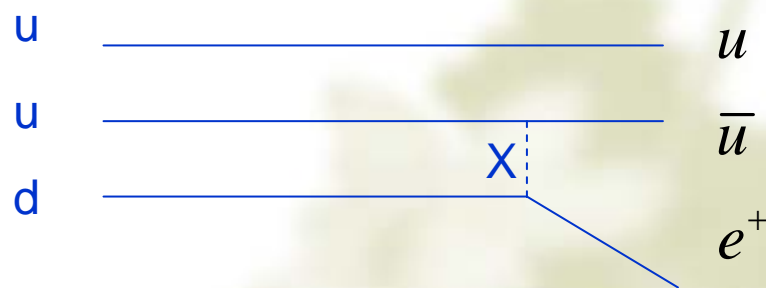
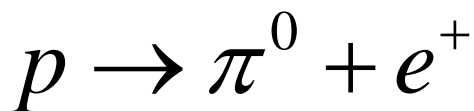


**GUT**的基本思想，是将所有的费米子（轻子和夸克）当成一组粒子来考虑，也就是将色的三维空间和电弱的二维空间扩展成统一的五维空间，费米子的运动方程至少满足**SU(5)**对称性。**SU(5)**的多重态可以表示为比如  $((\nu_e, e^-), (\bar{d}_R, \bar{d}_G, \bar{d}_B))_L$ ，前面两个是**SU(2)**双重态，后三个是**SU(3)**三重态，都采用左旋粒子（下标**L**）是为了保持所需的对称性。**SU(5)**对称性所导致的相互作用应由**24**个规范玻色子来代表，除了已有的**12**个（ $\gamma, W^\pm, Z^0$  和**8**个胶子）外，其它是**6**个带色和带 **$-e/3$** 电荷 ( $Y_R, Y_G, Y_B$ )或 **$4e/3$** 电荷( $X_R, X_G, X_B$ )的玻色子及其反粒子，被称为**Y**粒子或**X**粒子。



**GUT**可以提供一些重要的预言。

轻子和夸克实际上是同类粒子，可以相互转化，轻子数和重子数不再分别守恒，而需要统一考虑（**B—L**守恒）。这时，夸克可以通过发射一种**X**粒子直接衰变成轻子（ $q \rightarrow X + l$ ）。这种过程的出现，使得质子可以衰变。按照**X**粒子的质量为 $10^{15}\text{GeV}$ ，可以估算出质子的寿命是 $10^{31}$ 年量级。人们尚未观察到质子衰变，说明质子的寿命还要长得多，但如果超过 $10^{33}$ 年，则会造成**GUT**若干预言之间的巨大矛盾。所以**GUT**竟管有理论上的吸引力，但目前看来仍有较大的缺陷。



## 包罗一切的理论(TOE)

在标准模型的基础上，理论物理学家已经在试图构造包括所有相互作用和基本粒子，并且具有完整的对称性和时空变换特性的包罗一切的理论TOE (**theories of everything**)，其中典型的如超对称和超弦理论。

超对称理论将费米子和玻色子等价看待，每个费米子都对应一个玻色子，反之亦然。所以夸克对应自旋为整数的标量夸克 (**squark**)，而光子对应自旋是 $1/2$ 的光微子 (**photino**)，胶子对应胶微子 (**gluino**) 等等。超对称理论有许多优越性，比如它自然地包含了标准模型，可以容纳引力场，可以解释天体物理中的某些疑难问题等等。目前已利用超对称理论进行了许多定量计算和预言，实验上也已经把寻找超对称粒子作为重要课题（比如**LHC**的物理目标）。

在超弦理论中，粒子被视为一条弦，而不是一个点。理论在高维空间中表示，可以导出所有的粒子和相互作用。

客观规律问题？

简单性问题？

天地有大美而不言，四时有明法而不议，万物有成理而不说。圣人者，原天地之美而达万物之理。是故至人无为，大圣不作，观于天地之谓也。

《庄子》