

相互作用与耦合常数

宋孝同

在微观世界里,粒子通过各种相互作用发生结合、散射、衰变等等反应. 已知的基本相互作用可分为四类: 强作用、电磁作用、弱作用和引力作用. 标志相互作用的两个主要特征是它的力程(即作用距离)和强度. 例如引力和电磁力的力程都是无限的, 而强力和弱力的力程则很短. 它们的强度则按强、电磁、弱、引力这一次序递减. 下面主要介绍如何标志和估算各种相互作用强度的大小、为此先列出一些有用的数据(见表1).

表 1

光速	$c = 2.998 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$
普朗克常数(约化)	$\hbar = 6.582 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{sec}$
	$\hbar c = 197.329 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \approx 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$
电子静能	$m_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}$
质子静能	$m_p c^2 = 938.3 \text{ MeV}$
中子静能	$m_n c^2 = 939.6 \text{ MeV}$
π^{\pm} 介子静能	$m_{\pi^{\pm}} c^2 = 139.6 \text{ MeV}$

(1) 电磁相互作用: 在古典电磁场理论中, 两个

带电粒子之间的相互作用是通过某种连续的媒介物——电磁场来传递的. 但是在量子理论中电磁场的能量、动量是不连续变化或量子化的. 场的每一个元激发称为场的量子. 例如电磁场的量子是光子. 后来把这种场与量子的关系推广到其他物质粒子, 如电子是电子场的量子、质子是质子场的量子等等. 粒子之间的相互作用就是相应场的量子之间的相互作用. 例如电子和质子之间的电磁相互作用是通过传递光子来进行的, 如图1. 即电子所发射的光子被质子所吸收(也可以是质子发射光子而电子吸收光子) 这样在粒子之间发生了能量和动量的传递, 即发生了相互作用. 作用的强度与粒子所带电量的多少有关. 以电子与质子之间的静电库仑相互作用(假定质子是点状的)为例, 相互作用势是 $V(r) = -\frac{e^2}{4\pi r}$, 负号表示是吸引力, $\frac{1}{r}$ 描述了势随距离的变化关系, 而 $\frac{e^2}{4\pi}$ 则是从总体上标志势的强度大小的因子, 它的量纲是[能量·长度]为了比较起见, 常选用无量纲的量 $\frac{e^2}{4\pi\hbar c}$, 称为电磁耦合常数,

并用 α 表示之. α 也称为精细结构常数.

现在从氢原子的结合能估计 α 值的大小. 氢原子是最简单的电磁束缚系统, 相互作用的主要部分是静电库仑型 $\left(\frac{-e^2}{4\pi r}\right)$, 结合能的大小显然应与 α 有关. 按照非相对论量子力学的计算, 结合能

$$\Delta E_H = \frac{1}{2} \mu_H c^2 \alpha^2 \quad (1)$$

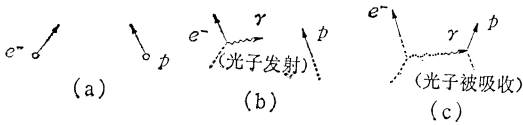


图1 通过单光子交换的电子-质子相互作用

式中 $\mu_H = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p}$ 是氢原子的约化质量. 由于 m_e 比 m_p 小得多, 因此 μ_H 近似等于 m_e . 利用氢原子基态结合能的实验值 $\Delta E = 13.6\text{eV}$, 以及 $m_e c^2 = 0.51\text{MeV}$. 从 (1) 式可以算出 $\alpha \approx \frac{1}{137}$. 精确的实验值为

$$\alpha = \frac{1}{137.036} \quad (2)$$

(2) 强相互作用: 在核物理中, 把质子和中子(统称为核子)束缚在原子核中的力称为核力, 或强相互作用力. 按照核力的 π 介子理论, 两个静止点状核子之间通过交换 π 介子的相互作用势是(常称为汤川势)

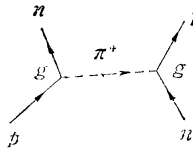


图2 通过交换 π^+ 介子的质子(p)中子(n)散射.

$$V_{\text{强}}(r) = -g^2 \frac{e^{-r/R}}{4\pi r} \quad (3)$$

式中 $R = \frac{\hbar}{m_\pi c} = \frac{\hbar c}{m_\pi c^2}$ 具有长度的量纲, 称为强作用力程. 利用表1的数据, 可知 $R \approx 1.4\text{fm}$. 显然当 r 比 R 大得多时, 相互作用几乎降到零. 故核力是短程力. 这与电磁作用是长程力(电磁作用力程 $\frac{\hbar}{m_\gamma c} \rightarrow \infty$) 性质不同. (3) 式中的 g 与库仑作用中的电荷 e 地位相当. 因此类似地可以选取无量纲的 $\frac{g^2}{4\pi\hbar c}$ 作为强作用的耦合常数. 利用与上节类似的办法也可估算它的大小. 与氢原子相当的两核子系统是由质子、中子构成的氘核. 为了能利用由库仑势导出的(1)式, 我们非常粗略地假定在氘核内部势可取为 $V(r) \approx -\frac{g^2 e^{-\langle r \rangle / R}}{4\pi r}$, 即吸引库仑势. 其中 $\langle r \rangle \approx 4\text{fm} \approx 3R$ 是氘核的平均半径. 代替(1)式, 氘核的结合能应等于

$$\Delta E_d = \frac{1}{2} \mu_d c^2 \left(\frac{g^2 e^{-3}}{4\pi\hbar c} \right)^2 \quad (4)$$

式中 $\mu_d = \frac{m_n \cdot m_p}{m_n + m_p}$ 是氘核的约化质量, 由于质子和中子的质量几乎相等, 因此 μ_d 约等于 $\frac{m_p}{2}$. 利用实

验值 $\Delta E_d \approx 2.23\text{MeV}$, 可算得 $\frac{g^2}{4\pi\hbar c} \approx 2$. 而 π 介子与核子相互作用耦合常数的精确实验值为 $\frac{g_{\pi NN}^2}{4\pi\hbar c} \approx 14.4$.

其他介子, 如 ρ, ω, \dots 与核子的耦合常数较小, 一般说来 $\frac{g^2}{4\pi\hbar c} \approx 1-10$. 总之, 它比电磁耦合常数大 10^2-10^3 倍.

自从夸克模型问世以后, 人们发展了一种新的强相互作用理论, 称为量子色动力学(简称 QCD). 它是量子电动力学(即电磁相互作用的量子场论, 简称 QED) 的推广. 在 QCD 理论中, 认为组成强子的夸克

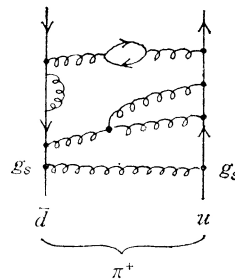


图3 $\pi^+(u\bar{d})$ 介子中几种可能的夸克胶子相互作用.

带有“色荷”, 夸克之间的相互作用是由夸克之间“色场”的量子——胶子来传递的(图3). 强子与强子之间的高能相互作用可以用处于强子内部的准自由夸克之间传递胶子来解释. 并且已得到胶子存在的实验证据. 看来 QCD 是有希望的高能强作用理论. 但是对于低能下的强作用并未彻底了解. 近来人们利用各种势模型来解释强子的、质量谱和衰变

几率, 发现在近距离上夸克之间的相互作用势接近于库仑势, 而在大距离上则接近于线性势, 这种随距离增大而上升的势称为禁闭势, 它使得夸克永远不能从强子中分离出来. 这或许是实验上至今没有发现单个自由夸克的原因. 利用夸克——反夸克构成的矢量介子衰变数据可以估算出夸克和胶子在近距离上相互作用耦合常数

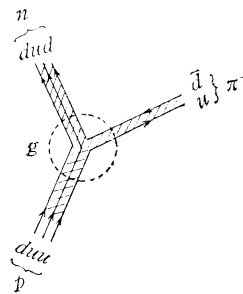


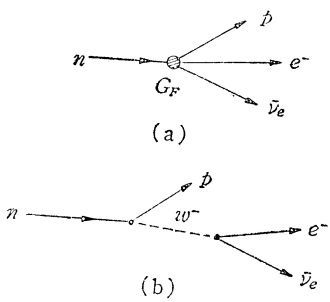
图4 夸克模型中的 π 介子核子唯象强作用顶点, 阴影线表示各种可能的夸克胶子相互作用(参见图3)

$$\alpha_s \equiv \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$$

约在 $0.2-0.5$ 之间. 但是至今还不能从内禀强作用耦合常数 α_s 导出唯象强荷 g (图4) 的大小.

(3) 弱相互作用: 这类相互作用首先是在 β 衰变这类慢变化过程中发现的. 最早的弱作用理论是费米

提出的。他认为 β 衰变是四个费米子场在空间一点上相互作用的结果。以中子 β 衰变为例,可用图 5a.来表示。形象地说,在衰变时中子一次转化为质子、电子和反中微子。这种四费米子相互作用理论,在最低级近似下,计算结果与低能实验数据完全一致。然而对于高能弱作用则不行。并且由图 7a. 表示的弱作用在量子场论中是不可重正化的,即高级图形计算结果不仅是无穷大(“发散”困难),而且发散程度愈来愈厉害,以致无法在现有的量子场论范围内加以消除。为了克服这些困难,提出一种想法,即弱作用也是通过传递某种弱介子来实现的,这样,中子 β 衰变分两阶段进行,即



中子先转化为质子和一个带负电的矢量介子 W^- ,然后 W^- 再转化为电子和反中微子,如图 5b. 这为后来的弱与电磁统一的规范理论奠定了基础。

图 5 中子 β 衰变:(a)力程为零的直接相互作用,(b)通过弱矢量介子 W^- 以及中性的 Z^0 等弱介子*。它们的质量非常大,例如 $m_W \approx 90m_p$,因此弱力的力程 $\frac{\hbar}{m_W c} \approx 10^{-16} \text{cm}$ 非常短,在一般的低能弱衰变中,完全可以看作是力程为零。即图 5b. 中的虚线收缩到一点而约化为图 5a.

假定弱作用也可以用势来近似描述,则对于零力程情况:

$$V_{弱}(r) = \begin{cases} \frac{1}{V} G_F & r = 0, \quad V \rightarrow 0 \\ 0 & r > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 G_F 表征唯象弱作用的强度,称为费米耦合常数。

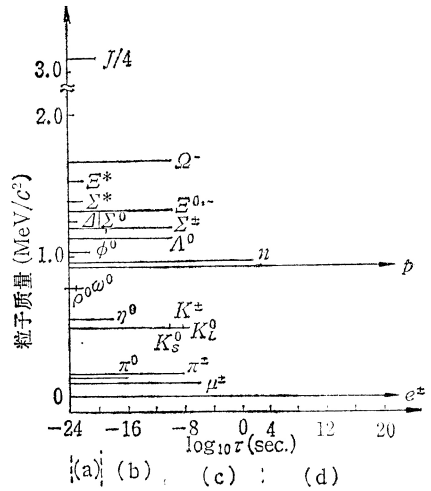


图 6 粒子衰变寿命的分布

由于自然界不存在仅由弱作用构成的束缚态,因此不能象前面两节那样用结合能来估计 G_F 的大小。但是可以利用衰变寿命。因为一个粒子的衰变寿命 τ 与支配衰变的相互作用强度有关。 G_F 愈大,衰变愈快,寿命就愈短。以中子 β 衰变为例,近似计算给出

$$\tau_n = \frac{60\pi^2 \hbar^7 c^6}{G_F^2 (\Delta m)^5}$$

其中 $\Delta m = m_n - m_p = 1.3 \text{ MeV}/c^2$ 是中子质子的质

表 2

衰变	$\Delta \rightarrow N + \pi$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$	$\eta^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
过程示意图				
衰变几率	$w_{强} \sim \frac{g^2}{4\pi\hbar c}$ ~ 10	$w_{电磁}^{(1)} \sim \frac{e^2}{4\pi\hbar c}$ $\sim 10^{-2}$	$w_{电磁}^{(2)} \sim \left(\frac{e^2}{4\pi\hbar c}\right)^2$ $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$	$w_{弱} \sim \left(\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3}\right)^2$ $\sim 10^{-11}$
衰变寿命比	1	10^3	$10^5 - 10^6$	10^{12}

量差。利用实验值 $\tau_n \approx 10^3 \text{sec}$ 。可算得 $G_F \approx 1.3 \times 10^{-4} \text{MeV} \cdot \text{fm}^3$ 。而无量纲的耦合常数选为

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} \approx 1 \times 10^{-5} \quad (6)$$

它比电磁耦合常数 α 小七百多倍。

除上述三种相互作用外,自然界中还存在第四种

相互作用——引力作用。虽然它是我们在日常生活中经常能感觉到的相互作用,并且主宰着天体的运行,但

* W^\pm 和 Z^0 等传递弱作用的规范玻色子的发现证实了 1967 年提出的弱、电统一规范理论是符合事实的,这些成就分别获得了 1981 和 1984 年诺贝尔物理学奖金。

在粒子物理中却可以忽略（至少到目前是如此）。例如两个质子之间的引力相互作用和静电库仑相互作用能之比为

$$\text{引力能: 静电能} = \frac{G^2 m_p^2}{r} : \frac{e^2}{r} \approx 1:10^{-36}$$

这表明引力相互作用与其他三种相互作用相比是极微弱的，因此除了极特殊的情况，如宇宙大爆炸的初期，可以不必考虑它的影响。总之我们得到的强、电磁、弱三种耦合常数之比为（详细总结见表3.）

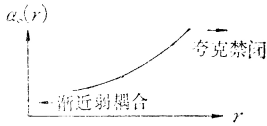


图7 QCD 耦合常数

$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$$

随夸克之间距离的变化关系

$$\approx 1:10^{-2}:10^{-3}:10^{-4}$$

(4) 衰变寿命与相互作用: 按照量子理论, 衰变寿命 τ 与衰变几率 ω 成反比, 而衰变几率通常与两个因素有关。一是衰变矩阵元, 它又与相互作用强度及相互作用的细节有关。在不考虑相互作用细节的情况下, 耦合常数愈大, 衰变几率愈大。二是释放能量: 即初态与末态的静能差, 或称 Q 值, Q 值愈大, 衰变几率也愈大。在中子 β 衰变中, Q

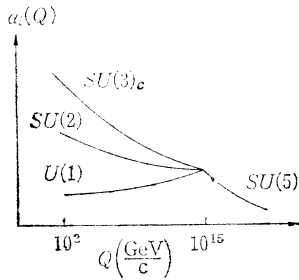


图8 SU(5) 大统一理论中耦合常数的变化关系

$= (m_n - m_p)c^2$, 而 ω 与 $G_F^2 \cdot Q^5$ 成正比。

从现有的粒子寿命分布图6上, 可以看出寿命集中分布在四个区域内, 它们分别对应于强衰变(a), 电磁衰变(b), 弱衰变(c)和稳定粒子(d)。

在表2中我们列出几个典型的衰变, 利用前面给出的耦合常数值, 分别估算了它们的寿命比, 而实验值为

$$\tau_{\Delta} \approx 10^{-23} \text{秒}, \tau_{\Sigma^0} \approx 10^{-20} \text{秒}; \tau_{\Lambda^0} \approx 10^{-10} \text{秒},$$

$$\tau_{\Sigma^+} \approx 10^{-17} \text{秒}; \tau_{\pi^+} \approx 10^{-8} \text{秒}$$

因此给出寿命比为 $1:10^3:10^5-10^6:10^{13}$, 与表2中最末一行对照, 除弱衰变一项相差较大外, 其余基本符合。如果考虑到上面的估计没有计及衰变的 Q 值以及其他因素的影响, 这一结果已相当令人满意。

(5) 弱电统一、渐近自由及其他问题

对于图7b, 中由有质量的弱矢量介子 W^\pm 传递的弱作用也可写成汤川势的形式

$$V_W(r) = \frac{g_W^2}{4\pi r} e^{-r/R_W}; \quad R_W = \frac{\hbar}{m_W c} \quad (7)$$

表 3

相互作用	媒介子	耦合常数	力程
唯象的强作用 (强子之间)	$\pi, \rho, \omega \dots$	$\frac{g^2}{4\pi\hbar c} \sim 1-10$	$\frac{\hbar}{m_{\pi} c} \sim 10^{-13} \text{cm}$
色作用 (夸克之间)	胶子	$\frac{g_s^2}{4\pi\hbar c} \sim 0.2-0.5$	∞
电磁作用	光子	$\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \sim 10^{-4}$	∞
弱作用	—	$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} \sim 10^{-5}$	0
	W^\pm, Z^0	$\frac{g_W^2}{4\pi\hbar c} \approx \frac{e^2}{4\pi\hbar c}$ (弱电统一)	$\frac{\hbar}{m_W c} \sim 10^{-16} \text{cm}$
引力作用	引力子 (?)	$\frac{G^2 m_p^2}{\hbar c} \sim 10^{-34}$	∞

这里 g_W , 与 G_F 不同, 称为内禀弱耦合常数。在弱电统一规范理论中, g_W 的地位与电荷 e 相当, 大小也与 e 差不多。这可由(5)与(7)的比较中看出, 因为(5)和(7)描述的是同一个相互作用, 从(5)和(7)可得 $G_F = g_W^2 \cdot R_W^2$, 因此

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = \left(\frac{g_W^2}{\hbar c} \right) \left(\frac{R_W}{R_p} \right)^2; \quad R_p = \frac{\hbar}{m_p c}$$

R_p 是质子的康普顿波长。如果 $m_W \approx 100 m_p$, 则

$$\left(\frac{R_W}{R_p} \right)^2 \approx 10^{-4}$$

这给出 $\frac{g_W^2}{4\pi\hbar c} \approx 10^{-3}$, 它的确与 $\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \approx 10^{-4}$ 有相同的量级。即内禀弱耦合常数与电磁耦合常数非常接近。这正是弱作用与电磁作用统一的必要条件之一。在弱电统一理论中, 弱作用与电磁作用只是同一种相互作用的不同分量, 表观上(由 G_F 表征)的弱作用之所以比电磁作用弱得多, 仅仅是由于弱玻色子 W^\pm 非常重的缘故。

前面提到, 对于构成强子的夸克相互作用, 夸克-胶子耦合常数 $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$ 在 $0.2-0.5$ 之间, 表明 α_s 并不是一个不变的常数, 而是一个与交换的胶子能量、动量有关的变动“常数”。QCD 理论预言, 随着胶子传递的能量、动量愈大(按照测不准关系, 这相应于两个夸克之间相对距离愈小), α_s 愈小, 夸克之间的耦合愈弱, 这就是在深度非弹实验中显示出的“夸克在强子内部几乎是自由的”——渐近自由(图7)。实际上在 QED 理论中早就发现电磁耦合常数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c}$ 也是与交换光子能量、动量有关的变动“常数”, 但是在 QED 情况下, α 的变动情况却好与 α_s 的相反, 这种差别是由于光子不带电荷而胶子却带有“色荷”所造成的。在图8中表示出在 SU(5) 大统一理论中弱、电、强三种耦合常数随能量动量传递变化的关系曲线。