

第十一章 基本粒子

11.1 算出原子核中两个质子间的重力吸引力和静电排斥力。可以看出重力吸引力远不足以抵抗静电排斥力。这说明原子核能够稳固地结合着，必有更强的吸引力对抗库仑力而有余。

解：原子核中两个质子间的静电斥力势能近似为 $\frac{e^2}{R}$ ， R 是原子核半径， e 是

电子电荷绝对值。因此，两个质子间的排斥力近似地为 $F \approx \frac{e^2}{R^2}$ 。注意到

$e = 4.80 \times 10^{-10} \text{ CGSE}$, $R \approx 10^{-13} \text{ cm}$, 则 $F \approx 23.50$ (公斤力)

如果把 R 视作两质子间的距离，则它们间的重力吸引力 f 可估算如

下： $f \approx r \frac{m_p m_p}{R^2} \approx 2.85 \times 10^{-35}$ (公斤力)

由上面的结果看出，重力吸引力远不能抵消库仑斥力。原子核能稳固地存在，质子间必有强大的吸引力。这种力就是核力。

11.2 在 π 介子撞击质子的实验中，当 π 介子的实验室能量为 200 MeV 时， Δ 共振态的激发最大，求 Δ 的质量。

解： π 介子的动能 $T_\pi = 200 \text{ MeV}$

π 介子的静能 $m_\pi c^2 = 273 \times 0.511 \text{ MeV} \approx 140 \text{ MeV}$

π 介子的总能量 $E_\pi = T_\pi + m_\pi c^2 = 340 \text{ MeV}$

实验室系中 π 介子的动量是 $P_\pi = \frac{1}{c} \sqrt{E_\pi^2 - (m_\pi c^2)^2} \approx 310 \text{ MeV} / c$

质子的静能 $m_p c^2 \approx 938 \text{ MeV}$

Δ 共振粒子的总能量 E_Δ 等于 π 介子总能量和质子静能之和：

$$E_\Delta = E_\pi + m_p c^2 = 1278 \text{ MeV}$$

碰撞前质子静止。根据动量守恒定律， Δ 粒子的动量 P_Δ 等于 π 介子的动量

$P_\pi : P_\Delta = P_\pi$ 。根据狭义相对论， Δ 粒子的质量 m_Δ 由下式决定：

$$m_\Delta = \frac{1}{c^2} \sqrt{E_\Delta^2 - (cP_\Delta)^2} = 1240 \text{ MeV} / c^2$$

与 Δ 粒子的质量相联系的能量是 1240 MeV 。

11.3 在下列各式中，按照守恒定律来判断，哪些反应属于强相互作用，哪些是弱相互作用，哪些是不能实现的，并说明理由。

$$(1) p \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$$

$$(2) \Lambda^0 \rightarrow p + e^-$$

$$(3) \mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$$

$$(4) n + p \rightarrow \Sigma^+ + \Lambda^0$$

$$(5) p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$(6) p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{\Sigma}^0 + K^0$$

$$(7) K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0.$$

解：(1) 左侧重子数是+1，右侧重子数是 0，衰变前后重子数不相等。三种基本相互作用重子数都要守恒。因此，所列衰变实际上是不存在的。

(2) 左侧轻子数是 0，右侧轻子数是+1，衰变前后轻子数不相等。这种衰变方式不能实现，因为三种基本相互作用都要求轻子数守恒。

(3) 两侧 μ 轻子数都是+1，守恒。但左侧电轻子数是 0，右侧电轻子数是+2，电轻子数不守恒。这种衰变实际上也不能出现，因为三种基本相互作用要求两类轻子数分别守恒。

(4) 左侧奇异数是 0，右侧奇异数是-2。奇异数不守恒，只可能是弱相互作用。这个作用没有轻子参加。实际存在的这种类型的弱相互作用，要满足 $|\Delta s|=1$ ，而这里的 $|\Delta s|=2$ 。因此，这种过程实际上是不存在的。

(5) 光子的重子数和奇异数都是 0。 p 的重子数是+1， \bar{p} 的重子数是奇异数是-1。 p 和 \bar{p} 的奇异数都是 0。 p 和 \bar{p} 的同位旋相同。所列反应重子数和奇异数分别守恒，不可能是弱相互作用。质子 p 和反质子 \bar{p} ，通常在强作用下湮灭后转变成若干个介子。这里所列的反应，可以在电磁相互作用下实现。

(6) 反应前奇异数是 0，反应后是+2，奇异数不守恒。奇异粒子只在强相互作用过程中产生，并且要求奇异数守恒。因此，上列反应不可能实现。

$$(7) K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0.$$

$$\text{衰变后静能 } E_{\text{后}} = 548.2 \text{ MeV}$$

$$\text{衰变前静能 } E_{\text{前}} = 497.8 \text{ MeV}$$

因此，从能量守恒考虑，这种衰变方式实际上并不存在。

11.4 对重子 p 、 n 、 Λ^0 、 Σ 、 Σ^0 、 Σ^- 、 Ω^- ，从它的有关量子数来考虑，试认出是那三个层子构成的。

解：重子由三个层子按不同的组合构成，这三个层子是 u 、 d 、 s 。 s 层子是

奇异层子。奇异重子中一定要有奇异层子 s ，非奇异重子中不能有 s 存在。三个层子的性质如下表所示。

按照简单的规则把三个层子结合起来就构成重子。例如，质子 p 和介子 Λ^0 ，它们的性质可列成下面的表。质子不是奇异粒子，它一定不包括 s ，除了同位旋 I 之外，将构成质子的每个层子的各种量子数分别相加，应该等于质子的相应量子数。这样，可以确认质子是由两个 u 层子和一个 d 层子构成的。类似地可以断定 Λ^0 由 u 、 d 、 s 构成。因此，题中给出的重子的层子成分可开列如下：

$$p(uud), n(udd), \Lambda^0(uds), \Sigma^+(uus), \Sigma^0(uds), \Sigma^-(dds), \Omega(sss)$$

Λ^0 和 Σ^0 都是由 u 、 d 、 s 构成，但它们是 u 、 d 、 s 的不同组合。

层子是费米子，自旋是 $\frac{1}{2}$ 。实验给出 Ω 的自旋是 $\frac{3}{2}$ ，奇异数是 -3 。因此， Ω^- 一定是三个 s 层子构成。但是，三个 s 层子的自旋必须平行，这违背泡里原理。为了解决类似的矛盾，提出了层子有“颜色”自由度，每个层子皆有自己的“色荷”。 Ω 中的三个 s 层子，尽管自旋平行，但因它们具有不同的“色荷”，泡里原理是容许的。

把重子中的各个层子换成相应的反层子，则重子就成了相应的反重子。

11.5 认出下列介子的成分：

$$\pi^+, \pi^0, \pi^-, K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0, \eta^0, \eta'$$

解：介子有一个层子和一个反层子构成。把层子的量子数（同位旋除外）变号就得相应的反层子的量子数。与上题类似，上述介子的层子成分可开列如下：

$$\pi^+(u\bar{d}), \pi^-(d\bar{u}), K^+(u\bar{s}), K^0(d\bar{s}), K^-(s\bar{u}), \bar{K}^0(s\bar{d})$$

π^0, η^0, η' 的结构较为复杂：

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}),$$

$$\eta^0 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}),$$

$$\eta' = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

而且后两者的成分尚有混合。

11.6 试讨论下列三式：

$$(1) \Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$(2) \rightarrow n + \pi^-$$

$$(3) \nu_e + p \rightarrow n + \mu^+$$

讨论：(1) Σ^- 的质量比 n 与 e^+ 的质量之和大的多。从能量角度考虑衰变似乎可以产生。但是， Σ^- 的奇异数 $s = -1$ ，右侧奇异数是 0，奇异数的改变 $\Delta S = 1$ 。奇异粒子衰变成强子和轻子，要克服 $\Delta Q = \Delta S$ ， ΔQ 是奇异粒子和强子间的电荷改变。在这个衰变式中， $\Delta Q = -1 = -\Delta S$ 因此是不能实现的过程。

(2) 奇异粒子只在强作用过程中协同产生，只在弱作用过程中衰变。奇异粒子的产生和衰变服从如下的选择定则：

$$\Delta S = \begin{cases} 0, & \text{(对奇异粒子的强产生)} \\ \pm 1, & \text{(对奇异粒子不产生 } \mu \text{ 和 } e \text{ 的弱衰变)} \\ \Delta Q = \Delta S, & \text{(奇异粒子衰变为强子和轻子),} \end{cases}$$

ΔQ 是过程中奇异粒子与强子间的电荷改变。

本例中，左侧奇异数是 -2，右侧奇异数是 0。奇异数改变 $\Delta S = 2 \neq \pm 1$ 。因此，这个过程实际不能实现。

(3) 电轻子数，左侧是 +1，右侧是 0，不相等。 $\bar{\mu}$ 轻子数，左侧是 0，右侧是 -1，不相等。此反应违背轻子数守恒定律，用任何一种方式的基本相互作用都不能实现。