

第四章 强子和强子间相互作用

I. 核力和Yukawa势

核力的特点

特点	核心描述	关键数值/类比	物理意义
短程性	作用范围非常有限，强度随距离急剧衰减。	力程 $\sim 10-15\text{m}$ (1 fm)。 作用强度远超电磁力；作用特征时间极短， $\sim 10^{-23}\text{s}$ 。	核力的短程性说明想让核聚变发生就必须给核子足够高的动能跨过库伦势垒——核反应的艰难所在。
电荷无关性	核力的大小与电荷无关。		表明核力与核子的电荷状态无关，是引入同位旋对称性的重要实验基础。
非中心力成分	核力不仅包含使粒子沿连线方向作用的中心力，还包含与粒子自旋相关的非中心力（如张量力）。	核力势函数包含与自旋和相对方位有关的项，例如 $S_{12}=3(\sigma_1 \cdot r^\wedge)(\sigma_2 \cdot r^\wedge) - \sigma_1 \cdot \sigma_2$ 。	非中心力的存在导致原子核的非球对称结构，对理解核子的配对和核能级至关重要。
饱和性	一个核子只与其附近有限数量的核子发生相互作用，而非与核内所有核子作用。	原子核的体积与核子数 A 成正比，意味着核密度近似为常数。	解释了原子核体积的结合能以及原子核密度大致为常数的现象。如果核力不饱和，原子核将坍缩成更致密的状态。

π 介子的预言

Hideki Yukawa* (汤川秀树) 类比电磁场，假设核力是交换 π 介子产生的，并估算了 π 介子的质量 ($m_\pi \approx 275m_e$)。

- 短程性预言重：光子无质量，可以传播很远，所以电磁力是长程力。但是核力是短程力，其交换的粒子应该是一个很重的玻色子。
- 短时性给出力程： $\Delta E \Delta t \approx 1$ ，所以可以反推出其质量量级约为 100MeV 。
- π 介子家族： π^\pm (1947 鲍威尔) 和 π^0 (1950)。

π 介子性质总结

性质	描述
种类	三种：带正电 (π^+)、中性 (π^0)、带负电 (π^-)
自旋-宇称 (J^P)	0^- (赝标量介子，真标量宇称守恒，不守恒的称为赝标量)
质量	$\pi^+/\pi^- \approx 139.57 \text{ MeV}$, $\pi^0 \approx 134.98 \text{ MeV}$
寿命	$\pi^+/\pi^- \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, $\pi^0 \approx 8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$ (极短)
主要衰变模式	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (~100%), $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ (~99%)
同位旋 (I)	$I = 1$, 构成一个同位旋三重态 ($I_3 = +1, 0, -1$)
主要作用	作为核力的传递者，是强相互作用的重要信使。

Yukawa势

标量介子用KG方程描述，取定态KG方程，有：

$$\nabla^2 \Psi(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right)$$

其解为

$$\Psi(r) = \frac{g_0}{r} \exp(-mr)$$

II. 同位旋

同位旋的引入源自于粒子的内部（与粒子的位置与运动无关）对称性。
有下面几个例子，

1. 电子和中子的相似

性质	质子 (p)	中子 (n)
质量 (MeV/c^2)	938.27203(8)	939.56536(8)
自旋 (J)	1/2	1/2
电荷 (Q)	+1	0

就是说，他们的质量差别很小，强相互作用性质类似，但是电和弱相互作用的性质不同。

2. 镜像核（总核子数相同，质子和中子数共轭，如 $_1H^3$ 和 $_2He^3$ ）

镜像核有几个相似之处：

- 能级分布相似。

- 基态结合能差异不大，且差值基本等于库伦位能差。