

§ 4.3.3. 核力的主要性质

核力主要性质是：

- (1) 核力是短程力，其有效力程小于 **3fm**。
- (2) 核力和自旋有关，并且具有相当大的交换力成分。
- (3) 自旋平行的三重态相互作用中还包括非中心力(方向相关)和自旋-轨道耦合力(动量相关力)的作用。
- (4) 核力有排斥芯，即当两核子的距离小于 **0.4fm** 时有很强的排斥势，阻止两核子继续接近。
- (5) 核力近似地具有电荷无关性质，即当两核子处于相同的自旋和宇称态时，其核作用势相同，不管这两个核子是 **np**，**pp** 还是 **nn**。

对于自旋三重态，其势函数可以写成

$$V = V_C(r) + V_T(r)S_{12} + V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$$

对于自旋单态，只有中心势 $V_C(r)$ 一项，其余两项为零。自旋单态的 $V_C(r)$ 与三重态的不一样。

§ 4.3.4. 核力介子场理论简介

1935年，汤川秀树建立核力的介子场论。他认为核子-核子间的相互作用是由于交换介子而引起的，并且由力程预言介子的质量介乎电子质量和核子质量之间，是电子质量的200多倍。实验上，首先探测到的质量在电子和核子之间的粒子是 μ 子，其质量

$$m_{\mu} = 206.6m_e = 105.66\text{MeV}/c^2$$

但 μ 子与核子的作用很弱，不是核力这种强作用所交换的粒子。1947年，泡威尔(Powell)等从实验上发现了汤川预言的介子，称 π 介子。带有正、负电荷和不带电的三种 π 介子分别记作 π^+ 、 π^- 和 π^0 。 π 介子的质量经实验测定是

$$m_{\pi^{\pm}} = 273.3m_e = 139.6\text{MeV}/c^2$$

$$m_{\pi^0} = 264.2m_e = 135.0\text{MeV}/c^2$$

相距为 r 的两个核子之间的核力作用势取为

$$V = -g \Phi = -\frac{g^2}{r} \exp\left(-\frac{m_{\pi}c}{\hbar} r\right)$$

其中 g 表示相互作用强度，相当于电磁相互作用中的电荷 e ，负号表吸引力。这个势函数称为汤川势函数。 π 介子的康普顿波长 λ_c 除以 2π 记作，

$$\tilde{\lambda}_c = \frac{\lambda_c}{2\pi} = \frac{\hbar}{m_{\pi}c} \approx 1.4\text{fm}$$

表示了核力的作用距离。势函数随 r 的增大很快地趋近于零。表示了核力是短程力。 λ_c 可以作为核力的力程。

电磁作用常数 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ ，而核子—介子场作用常数由实验推得 $\frac{g^2}{\hbar c} \approx 15$ 。核力比电磁力的作用强得多。

核子与介子场作用产生的介子被邻近的核子所吸收就是核子间的碰撞。高能 n - p 散射所表现的交换力就可以了解为交换荷电 π 介子的作用，就是中子变为质子，质子变为中子的作用。可以把物理上的核子，看作是裸核子态及裸核子外围绕有 π 介子云态的叠加。具体地说，质子可以看成是裸质子、 π^+ 介子云围绕着裸中子、 π^0 介子云围绕着裸质子以及裸核子外有多个 π 介子态的叠加。

2. 单π介子交换势（OPEP）

可以指出的是，由于核子和π介子场的作用是强作用，当两核子相距很近时，可以交换许多介子，目前还难以处理这种问题。当两核子相距较远时，相互作用主要通过交换一个介子实现。这时推得的相互作用势称为单π介子交换势 **OPEP**（**One Pion Exchange Potential** 的缩写）：

$$V_{\text{OPEP}} = g^2 \frac{m_\pi c}{12M^2 \hbar} \boldsymbol{\tau}(1) \cdot \boldsymbol{\tau}(2) \left[\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 + S_{12} \left(1 + \frac{3}{x} + \frac{3}{x^2} \right) \frac{e^{-x}}{x} \right] \quad (4.4-7)$$

其中 $x = \frac{m_\pi c}{\hbar} r = r / \lambda_c$ ， M 是核子质量 $M = \frac{1}{2}(m_p + m_n)$ ， $\boldsymbol{\tau}$ 是同位旋算符。单π介子交换势主要是交换力和张量力。核子-核子作用势函数的长程部分（ $r > 3\text{fm}$ ），主要是单π介子交换的贡献。

核力除了单π介子交换作用外，还有两π介子交换、三π介子交换等多个π介子交换的作用。要导出多个π介子交换势函数非常困难，甚至是不可能的。但是，实验表明，多个π介子往往有很强的关联，能形成亚稳态，可以当作短寿命的玻色子。于是，可以用这种玻色子的单玻色子交换势代替多个π介子交换势。

由交换质量较大的玻色子（ $400 \text{ MeV}/c^2 \sim 700 \text{ MeV}/c^2$ ）可以导出表示核子-核子势的中程（ $1\text{fm} \sim 3\text{fm}$ ）作用的吸引力，如一般中心力和自旋-轨道耦合力。

由交换更大质量 ($770 \text{ MeV}/c^2 \sim 1000 \text{ MeV}/c^2$) 的矢量介子, 还可以得到核心附近 ($r < 1 \text{ fm}$) 核子势的性质。结果是在核心附近可能产生很强的排斥作用, 即核子-核子势函数可能存在排斥芯。

单玻色子交换势函数中的耦合常数 g 要由核子-核子散射实验来确定, 因此介子场论仍是半唯象的。现在, 对于表示核子-核子势长程部分的 V_{OPEP} 已经比较肯定, 由 V_{OPEP} 得到的结论能和大量的实验结果相符。目前应用的唯象核子-核子势函数的尾巴 (长程部分) 具有 V_{OPEP} 的形式。

核力的介子场论依然是一种唯象的理论。后面我们会看到, 从根本上理解核力, 还离不开夸克-胶子间强相互作用的概念。

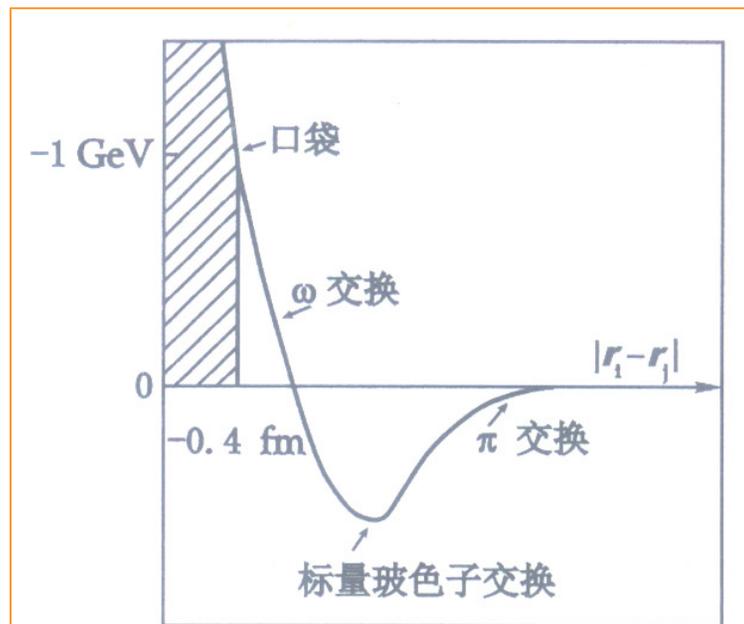


图 8-31 核子-核子相互作用势^②

习 题

- 4-1. 两质子相距 2 fm , 分别计算它们的库仑能和万有引力势能。
- 4-2. 如果 $r_N = 2 \text{ fm}$, 试由 (4.1-13) 式定出球形直角势阱的深度 V_0 。
- 4-3. ${}^3\text{H}$ 和 ${}^3\text{He}$ 的结合能之差是多少? 如果用库仑能来解释这一差值, 估算质子在 ${}^3\text{He}$ 中的平均距离是多大?
- 4-4. 试证明 (4.1-27) 式与 (4.1-26) 式是等价的。