

核力短程部份与长程部份的统一描述

杨新华 程檀生 钟毓澍

(北京大学物理系)

摘 要

采用相对论性的多体理论方法,在介子云口袋模型^[1]的基础上,统一计算了夸克间交换胶子与 π 介子所给出的核子间相互作用的短程与长程部份。短程部份在扣除了两个核子相对运动动能之后,得到了300 MeV左右的“软”排斥心。长程部份得到与单 π 介子交换位势(OPEP)相同的解析形式,其强度由介子云口袋模型的参数决定。如果取 $f_\pi = 93\text{MeV}$,其强度大约比OPEP低30%。

核子间的相互作用是物质结构的基本问题之一。目前普遍相信,量子色动力学(QCD)是强相互作用合适的理论形式。人们希望能从夸克层次对核子间相互作用有更深入的了解。迄今,还没有可靠的、从QCD原则出发的定量计算方法。除了个别简化的格点规范计算外,大多数这方面的工作都在模型的基础上进行。

介子云口袋模型(对手征口袋模型,其理论形式和计算结果都是类似的),是MIT口袋模型的推广。在这个模型中,包含了QCD的基本性质,即禁闭、渐近自由与手征不变性,其中同时具有夸克、胶子以及 π 介子自由度,从而有可能在夸克层次上给出核力短程和长程部份的统一描述。

为了计算两个核子的夸克间交换胶子与 π 介子的相互作用,我们采用了相对论性的多体理论方法,即将自由的夸克场、胶子场及 π 介子场都按它们的本征模式展开,构成相应的格林函数,并求出夸克-胶子以及夸克- π 介子的顶点函数。应用这些函数形式,就能够系统地计算多夸克体系的物理性质,包括核子之间的相互作用。

从夸克层次看,在零次近似下,两核子是一个六夸克体系。与分子力情形相似,在计算时,我们采用了Born-Oppenheimer近似,即计算六核子体系在两核子不同距离时的能量,减去两核子相距无穷远时的质量,从而得到核子的“有效”位势。展开到二级微扰时,六夸克体系能量可以写成

$$E(\mu, R) = \frac{1}{R} [n_i(\mu)\omega_i + n_p(\mu)\omega_p] + \frac{\alpha_s^2}{R} [n_i(\mu)E_{i,OG} + n_p(\mu)E_{p,OG} + E_{IN,OG}(\mu)] + \frac{1}{f_\pi^2} \cdot \frac{1}{R^3} [n_i(\mu)E_{i,O\pi} + n_p(\mu)E_{p,O\pi}]$$

$$+ E_{IN,0\pi}(\mu)] + \frac{4}{3} \pi B R^3 - \frac{Z_0}{R} - \frac{E_{c.m.c.}}{R} \quad (1)$$

式中第一项是夸克动能,第二项是交换胶子导致的夸克自能与相互作用能,第三项是交换 π 介子的相应能量,第四、五、六项分别是体积能、零点能和质心运动修正, μ 是描述两核子相对距离的参数。

采用夸克模型计算核力时,在六夸克能量中必须减去两核子的相对运动动能,因为这与位势无关。目前没有一个计算此项动能的可靠方法。估算指出,它大体与质心运动修正相当。减去这项动能,对计算有重要影响。对原先采用 MIT 口袋模型的计算结果^[2],在减去这项效应之后,排斥心几乎消失了^[3]。在我们的计算中,采用了拟合强子谱所得到的口袋模型参数及 Donoghue-Johnson 处理质心运动的方法,在减去这项动能之后,仍得到 300 MeV 左右的排斥心。核力短程部份的结果表示在图 1 中。排斥心的主要来源是胶子交换,但 π 介子交换也加强了排斥心的强度。

在长程部份,由于胶子禁闭在口袋中,两个口袋分离时,交换胶子对核子相互作用没有贡献。但两个口袋可以通过在表面交换 π 介子而相互作用。这种作用是两个口袋距离的函数,从而形成“有效位势”。我们采用与短程部份相同的理论形式,求出两个口袋时空点之间的格林函数,与顶点函数相结合,可以得到这项作用的解析形式。经过计算,可以得到以下形式的有效位势:

$$V(d) = \frac{1}{3} \cdot A \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \left[(\sigma_1 \cdot \sigma_2) + \left(1 + \frac{3}{\mu d} + \frac{3}{(\mu d)^2} \right) \hat{s}_{12} \right] m_\pi c^2 \frac{\exp(-\mu d)}{\mu d} \quad (2)$$

图 1 不同 (T, M_T, S, M_S) 道的短程有效核位势。实线、虚线及点划线分别代表 $(0, 0, 1, 1)$ 、 $(0, 0, 1, 0)$ 及 $(1, 0, 0, 0)$ 道

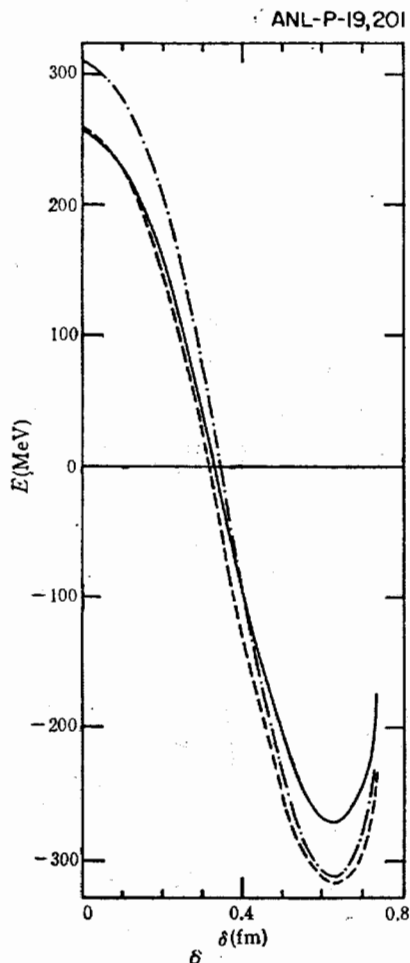
其中 $\mu \equiv m_\pi c / \hbar$, d 是两核子间的距离。这正是 OPEP 的形式,但现在常数 A 是由口袋模型参数给出的。拟合强子谱给出口袋半径为 $0.913 f_m$ 。当取 $f_\pi = 93 \text{ MeV}$ 时,

$$A = 0.0564,$$

这小于 OPEP 的 0.081。但当改进介子云口袋模型的 g_A 结果时, f_π 应取 77.13 MeV, 此时 $A = 0.082$, 与 OPEP 接近。

我们也研究了自能的可能影响。由于缺乏公认的可靠结果,对自能贡献大小无法作出定量的肯定结论,但试探性计算表明它们对最后结果影响不大。

此项研究的详细结果,将发表在 Physical Review C.



参 考 文 献

- [1] A. W. Thomas, *Adv. in Nucl. Phys.*, Vol. 13(1983), 1.
- [2] C. E. Detar, *Phys. Rev.*, D17(1978), 302, 323; D19(1979), 1451.
- [3] C. W. Wong, 'Topic in Nuclear Physics' (Springer-Verlay, 1980) 112, Edited by T. T. S. Kuo and S. S. M. Wong.
- [4] J. F. Donoghue and K. Johnson, *Phys. Rev.*, D21(1980), 1975.

UNIFIED DESCRIPTION OF SHORT RANGE AND LONG
RANGE NUCLEAR FORCE

YANG XINHUA CHENG TANSHEG ZHONG YUSHU

(Department of Physics, Beijing University)

ABSTRACT

Based on the cloudy bag model, the short range and long range nuclear force due to the exchange of gluons and pions between quarks are calculated in a unified way by using relativistic many-body theory. After subtracting the kinetic energy of the relative motion of two nucleons, the "soft" repulsive core appears in the short range. Its strength is about 300MeV. For the long range part, an explicit formula which is the same as the one-pion-exchange-potential (OPEP) is derived. Its strength is determined by the parameters of the cloudy bag model. If f_π is chosen to be 93MeV, the strength is 30% lower than that of OPEP.