

原子核中多夸克集团存在的一些征兆

马 维 兴

理论物理中心, CAST (世界实验室) 和中国科学院高能物理研究所

张 高 有

西北大学物理系

摘要: 本文指出了 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 实验电荷形状因子的类似性, ${}^3\text{He}$ 电荷密度的中空现象以及50MeV的 Π -核双电荷交换反应截面($\sigma_{DCX}(0^\circ)$)都是与传统的原子核结构理论相矛盾的. 认为这些矛盾是原子核中多夸克集团存在的明显的征兆. 夸克强子混合核模型很好地解释了观察到的现象.

按照传统的原子核物理的观点, 原子核是由相互作用着的, 类点的无结构的质子和中子组成的多核子的束缚体系. 所以, 原子核的性质是由它的组成核子决定的.

然而, 研究表明⁽¹⁾, ${}^3\text{He}$ 的实验电荷形状因子是不能用冲击近似来描述的. 为了符合实验材料, 人们引入了介子交换流⁽²⁾. 对 ${}^3\text{He}$ 的电荷形状因子, 贡献最大的介子流是图1所示的对流⁽³⁾. 对流电荷分量的算符是⁽⁴⁾

$$j_0(\mathbf{q}; \vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{iG^2}{8M^3} [F^s(q^2) \vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2 + F^v(q^2) Z_{zy}] (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q}) (\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{V}) e^{-\mu r} / 4\pi r + (1 \rightleftharpoons 2) \quad (1)$$

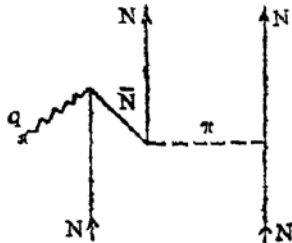


图1 对对流电荷形状因子的贡献图. 实线表示核子, \bar{N} 是反核子. 虚线表示 π 介子, 波线表示光子.

$F^s(q^2)$ 和 $F^v(q^2)$ 分别是同位旋标量和矢量形状因子, G 是耦合常数. $\vec{\sigma}$ 和 $\vec{\tau}$ 分别是核子的自旋和同位旋算符.

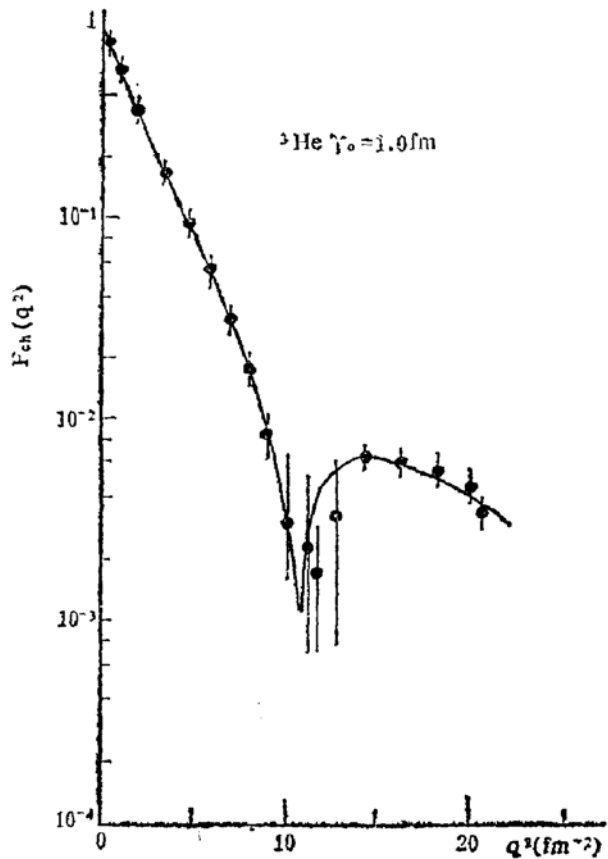


图2 ${}^3\text{He}$ 的电荷形状因子. 实线是夸克强子混合模型的预言.

(1)式表明, 对于 ${}^3\text{He}(T_z = \frac{1}{2})$, 同位旋标量项和向量项的符号相同, 所以两项的贡献是相加的. 对于 ${}^3\text{H}(T_z = -\frac{1}{2})$ 同位旋标量项和向量项的符号相反, 两项是相互抵消的. 因此在冲击近似加上介子交换流的理论中, ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子将对传统理

论的一个严峻的检验。

最近Saclay实验组测量了 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子 (6) ，结果如图2和图3中的实验点所示。 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子无论在大小或形状上都是十分相似的。这是对上述传统理论的一个很大的挑战。几乎所有的冲击近似加上介子交换流的计算都不能同时描述Saclay的实验结果 (6) 。

我们认为实验结果与传统理论的矛盾是原子核中夸克自由度存在的一个明显的信号。传统理论失败的原因在于它没有考虑原子核中已经存在的多夸克集团效应。 J/ψ 粒子的发现表明了核子本身是有内部结构的，核子是由三个价夸克，海夸克和胶子所组成的。所以实际上原子核是由三个夸克组成的核子集团所组成的。核子集团的半径大约是 9.9fm ，而在核物质中核子间的距离大约为 1.2fm (7) ，因此核子集团间一定会有很大的重叠，六个夸克或更多的夸克组成的集团将是核物质的重要组成部分 (5) 。 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的物质密度又是十分接近于核物质的密度 (6) ，所以 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的结构的合理的概念应当是核子和多夸克集团同时混合存在的概念。特别是在短距离或对大动量转移现象，夸克自由度将具有十分重要的作用。

基于以上的考虑，我们曾提出了原子核结构的强子夸克混合模型 (5) 。在这个模型中，多核子体系所占据的空间被分成内区和外区两部分。在内区，由于核子相互重叠，三个夸克组成的核子已不再存在，体系由六个或更多的夸克所组成的集团所组成。在外区，核子不再重叠，体系由传统的核子所组成。它可用传统的核物理理论来描述。为了简单起见，内区和外区用一个半径为 r_0 的球面来分开。所以在此模型中原子核是一个多夸克的集团（内区 $r \leq r_0$ ）和核子（外区 $r > r_0$ ）的混合体系。

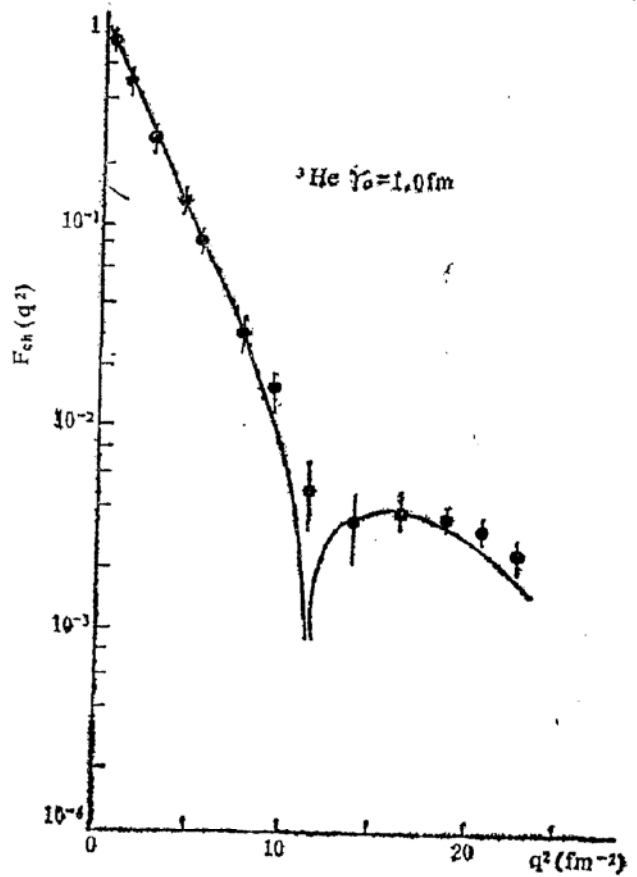


图3 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子。实线是夸克强子模型的预言。

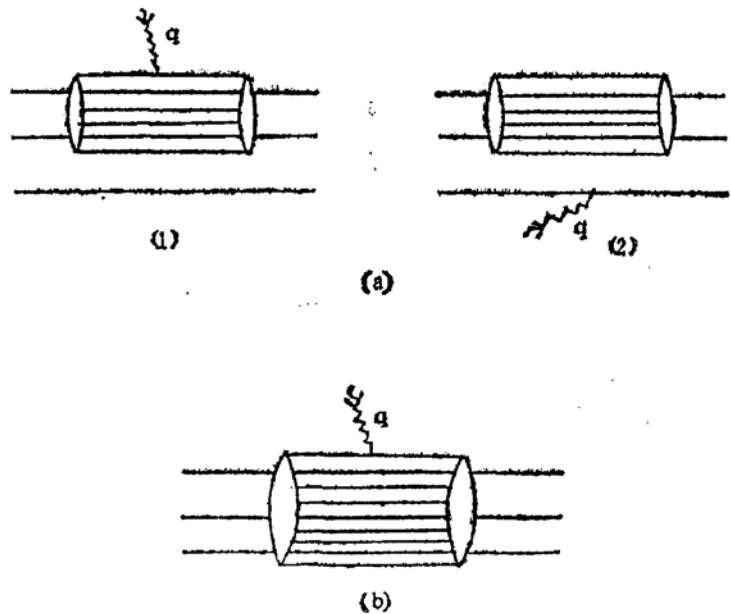


图4 多夸克集团对电荷形状因子的贡献：(a) 六夸克集团，(b) 九夸克集团。

在夸克强子混合核模型中， ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子为 (5)

$$F_{ch}(q^2) = F_{ch}^I(q^2) + F_{ch}^{II}(q^2) +$$

$$F_{ch}^{0q}(q^2) + F_{ch}^{2q}(q^2) \quad (2)$$

这里 $F_{ch}^{1q}(q^2)$ 和 $F_{ch}^{2q}(q^2)$ 分别是外区中冲击近似和对流 (图1) 的贡献。而 $F_{ch}^{0q}(q^2)$ 和 $F_{ch}^{2q}(q^2)$ 分别是内区中六个夸克 (图4a) 和九个夸克集团 (图4b) 的贡献。由于内区是多夸克的集团, 对流的贡献, $F_{ch}^{1q}(q^2)$, 被大大地减少了 (不到1%)。所以 (2) 式所预言的 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的电荷形状因子自然就是十分相似的。这正是 Saclay 的实验。

如图2和图3中的实线所示, 我们的定量计算很好地同时地解释了 Saclay 的 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 的实验材料。更有兴趣的是 (2) 式的付氏变换解释了长期以来使人们困惑不解的 ${}^3\text{He}$ 电荷密度的中空现象⁽⁷⁾。

原子核中多夸克集团存在的另一个很强烈的信号是来自 50 MeV 的 Π -核双电荷交换反应。低能 ΠN 电荷交换散射主要是 S 波 P 波散射⁽⁸⁾。在入射能量为 50 MeV 时, 由于 S 波和 P 波的相互抵消, 向前的 ΠN 截面 ($\sigma_{scx}(0^\circ)$) 几乎是零。因此如果认为涉及到两个核子的双电荷交换反应是通过两步过程进行的, 那么向前的双电荷交换反应的截面, $\sigma_{Dex}(0^\circ)$ 应该更接近于零。

实验已经证明, 50 MeV 的 Π -核单电荷交换反应的向前截面 ($\sigma_{scx}(0^\circ)$) 的确是很小很小的⁽⁸⁾。这说明了我们对单电荷交换反应的截面却呈现了很大的向前峰, $\sigma_{Dex}(0^\circ)$ 又相当大⁽⁹⁾, 与我们前面的理论预言相矛盾。

G. A. Miller 认为⁽¹⁰⁾ 低能时大的向前的双电荷交换反应截面是原子核中多夸克集团存在的一个明显的结果。因为双电荷交换反应涉及了两个核子, 而这两个核子在大部分时间里处在互不重叠的分离状态, 即传统的两核子系统。这时双电荷交换反应是由核子的效应来决定的, 对低能向前的截面没有贡献。然而在另一些时间内, 两个核子相互靠近进而重叠, 形成了六个夸克集团, 传统的两个核子不再存在。双电荷交换是在六个夸克的集团上进行的, 它将对反应截面作出贡献。而且 Gibbs 也曾指出⁽⁸⁾ 两步过程的双

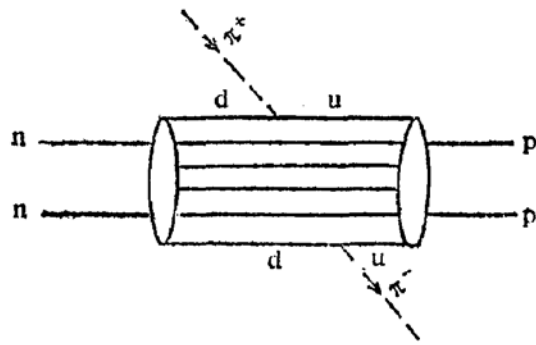


图5 在六夸克集团上的双电荷交换过程。虚线表示 π 介子, d 和 u 分别表示 d 夸克和 u 夸克。

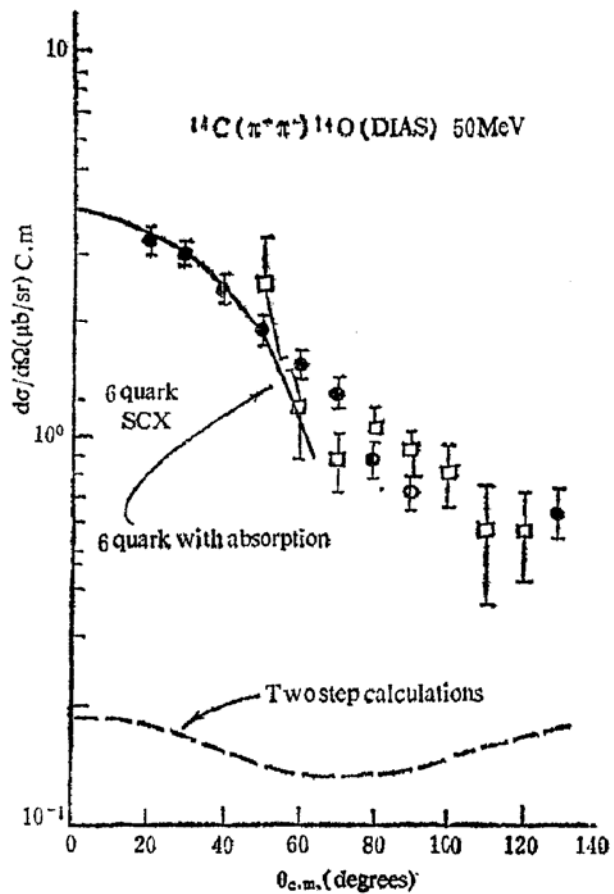


图6 六夸克集团对双电荷交换反应的预言。虚线是传统的两步过程的结合。

电荷交换反应主要发生在间距小于 1 fm 的核子对上。核子的半径是 0.9 fm, 因此反应发生时, 核子对一定是处在重叠的状态, 即双电荷交换反应是在六夸克集团上发生的。

在夸克模型中, Miller 计算了图5所示的六夸克集团对 50 MeV 的 ${}^{14}\text{C}(\Pi^+, \Pi^-){}^{14}\text{O}_{g.s.}$ 反应的贡献。Miller 的理论结果, 以及与实验材料的比较表示在图6中。图6中的虚线

也表示了传统的两步机制的理论结果。显然,六夸克的结果符合了实验材料而两步机制的理论实验矛盾。

以上的讨论表明:原子核中存在着多夸克集团,六个夸克集团效应成功地解释了 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{H}$ 电荷形状因子的类似性, ${}^3\text{He}$ 电荷密度的中空现象和50MeV双电荷交换反应的向前截面。因此,传统的核结构的概念应该改变,原子核应该是夸克自由度和核子自由度同时存在的夸克核子混合体。

多夸克集团的存在也为原子核物理的发展展示出了新的前景,同时也给我们原子核物理学家提出了研究夸克核物理的任务。这是当前核物理研究的重大动向。

参 考 文 献

1. J. S. McCarthy et al., Phys. Rev. Lett. 25(1970)885; R. C. Arnold et al., Phys. Rev. Lett. 40(1978) 1429
2. C. Hajduk et al., Nucl. Phys. A352 (1981)413; E. Hadjimichael et al., Phys. Rev. Lett. 48(1982)583, Phys. Rev. C22(1983)887
3. E. Hadjimichael et al., Phys. Rev. C22(1983)831.
4. M. Chemtob, Mesons in Nuclei Vol. 2 (M. Rho and D. Wilkison, Eds) p-495.
5. L. S. Kisslinger and Ma Wei-hsing et al., Nucl. Phys. A548 (1986) 461; F. D. Juster et al., Saclay, Preprint No. 2305(1985).
6. H. Hajduk et al., Nucl. Phys. A405 (1985)581.
7. L. S. Kisslinger, Workshop on Perspectives in Nuclear Physics et Intermediate Energies Trieste, March, 25-29, 1985; Ma Wei-hsing, Physica Energiae Fortis Et Physica Nuclearis, to be Published.
8. W. R. Gibbs et al., Workshop on DCX Reaction, Los Alamos National Laboratory 1985, Jan.
9. I. Navon et al., Phys. Rev. Lett. 52(1984)105.
10. G. A. Miller, Phys. Rev. Lett. 53(1984)2008.