

# 原子核中存在多夸克集团的实验检验

马维兴

(中国科学院高能物理所,北京)

## 摘要

实验上观察到的  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  电荷形状因子的类似性,以及  $^3\text{He}$  电荷密度的中空现象是与传统的原子核结构理论的预言相矛盾的. 我们认为这个矛盾是原子核中多夸克集团存在的一个明显的征兆. 夸克强子混合核模型成功地解释了实验上所观察到的现象.

众所周知,冲击近似是不能解释  $^3\text{He}$  的电荷形状因子<sup>[1]</sup>. 为了符合实验,人们引入了介子交换流<sup>[2]</sup>. 贡献最大的介子交换流是对流<sup>[3]</sup>. 对流电荷分量的算符是<sup>[4]</sup>

$$j_0^{\pi NN} = f \cdot \frac{F_{(Q^2)}^{\pi NN} \cdot F_{(K^2)}^{\gamma \pi NN}}{Q^2 + m_\pi^2} (\sigma_1 \cdot K) \cdot (\sigma_2 \cdot Q) \\ [G^{(S)}(K^2)\tau_1 \cdot \tau_2 + G^{(V)}(K^2)\tau_{2z}] + (1 \leftrightarrow 2) \quad (1)$$

$K$  和  $Q$  分别是光子和虚  $\pi$  介子的动量,  $f$  是耦合常数.  $F_{(Q^2)}^{\pi NN}$  和  $F_{(K^2)}^{\gamma \pi NN}$  分别是  $\pi NN$  和  $\gamma NN$  顶点函数.  $\tau$  和  $\sigma$  分别是核子的同位旋与自旋算符.  $G_{(K^2)}^{(S)}$  与  $G_{(K^2)}^{(V)}$  分别是核子同位旋标量和同位旋向量形状因子<sup>[5]</sup>.

(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, 两项的贡献是相加的. 对  $^3\text{H}$  ( $T_z = -\frac{1}{2}$ ), 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传统理论中,  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  的形状因子是截然不同的. 测量  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  的电荷形状因子将是对传统理论的一个严峻的检验.

最近, Saclay 实验组测量了  $^3\text{H}$  的电荷形状因子<sup>[6]</sup>.  $^3\text{H}$  的形状因子与  $^3\text{He}$  的实验结果相比, 无论大小或者形状, 都是十分类似的. 这是对上述传统理论的一个严重的挑战. 因为几乎所有的传统理论的计算都不能同时描述  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  的实验结果<sup>[7]</sup>.

我们认为实验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没有考虑原子核中已经存在的多夸克集团效应. 原子核是核子组成的, 而核子又是由夸克构成的. 所以原子核实际上是由三个夸克的核子袋组成的. 核子袋的半径大约是  $0.9 \text{ fm}$ , 而在核物质中核子间的距离大约为  $1.2 \text{ fm}$ <sup>[8]</sup>. 因此, 核子袋之间将会有很大的重叠, 六个或更多夸克组成的集团将是核物质的重要组成部分<sup>[5]</sup>.  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  的物质密度又是十分接近于核物质的密度的<sup>[5]</sup>. 因此, 现代  $^3\text{He}$  和  $^3\text{H}$  的结构概念应该是核子和多夸克集团同时混合存在的概念. 特别是对于大动量转移或短距离现象,

一  
有  
身  
核  
袋  
的  
  
其  
  
这  
击  
和  
个  
团  
实  
明  
贡  
所  
相  
  
关  
 $^3\text{H}$   
结  
于  
  
示  
  
它  
心

夸克自由度将具有明显的重要性<sup>[9]</sup>.

基于以上考虑, 我们提出了关于原子核结构的夸克强子混合模型<sup>[5]</sup>. 我们把多核子束缚体系所占据的空间分成两部分: 内区和外区. 在内区, 核子袋相互重叠, 三个夸克的核子袋不再存在. 体系由六个价夸克或更多的价夸克组成的集团所组成. 在外区, 核子袋之间互不重叠, 体系由传统的核子所组成. 为了简单起见, 内区和外区用一个半径为  $r_0$  的球面分开. 因此原子核便是一个多夸克集团和核子的混合体系.

以两个核子的束缚体系为例, 我们的模型波函数可以写为:

$$\psi_{N_1 N_2} = \begin{cases} \mathcal{A} \psi_{N_1}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) \psi_{N_2}(\mathbf{r}_4, \mathbf{r}_5, \mathbf{r}_6) \phi_E(\mathbf{r}) & r > r_0 \\ \Phi_{6q}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_6) & r \leq r_0 \end{cases} \quad (2)$$

$\psi_{N_i(N_j)}$  是核子的内部波函数.  $\phi_E(\mathbf{r})$  是描述核子间相对运动的传统的波函数.  $\Phi_{6q}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_6)$  是六个夸克集团的波函数,

$$\Phi_{6q}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_6) = \sum_i C_i \varphi_i(6q) \quad (3)$$

其中  $C_i$  是组态为  $\varphi_i(6q)$  的六个夸克态的几率振幅, 它满足  $\sum_i |C_i|^2 = 1$ .

在我们的夸克强子混合模型中,  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  的电荷形状因子为<sup>[5]</sup>

$$F_{\text{ch}}(q^2) = F_{\text{ch}}^{I.A.}(q^2) + F_{\text{ch}}^{\text{Pair}}(q^2) + F_{\text{ch}}^{6q}(q^2) + F_{\text{ch}}^{9q}(q^2) \quad (4)$$

这里  $F_{\text{ch}}^{I.A.}(q^2)$  和  $F_{\text{ch}}^{\text{Pair}}(q^2)$  分别是外区中冲击近似和对流对形状因子的贡献.  $F_{\text{ch}}^{6q}(q^2)$  和  $F_{\text{ch}}^{9q}(q^2)$  分别是内区中六个夸克集团和九个夸克集团的贡献. 由于内区是多夸克集团, 对流的贡献  $F_{\text{ch}}^{\text{Pair}}(q^2)$ , 大大地被减少了. 实际上在夸克模型中对对流的计算也表明<sup>[10]</sup>:  $F_{\text{ch}}^{\text{Pair}}(q^2)$  对  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  形状因子的贡献不仅是十分类似的, 而且也是很小的. 所以  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  的理论形状因子自然是十分相似的. 这正是 Saclay 的实验结果.

事实上, 按公式 (4), 应用 Los Alamos 关于  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  的超软心波函数, 我们计算了  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  的电荷形状因子  $F_{\text{ch}}(q^2)$ <sup>[5]</sup>. 计算结果表明: 他们的是十分类似的, 而且我们的模型也能同时地、很好地解释 Saclay 关于  ${}^3\text{He}$  和  ${}^3\text{H}$  电荷形状因子的实验结果.

更有兴趣的是多夸克集团效应也成功地解释了长期以来使人困惑不解的, 如图 1 所示的  ${}^3\text{He}$  的电荷密度的中空现象<sup>[11]</sup>.  ${}^3\text{He}$  的电荷密度可以简单地写成

$$\rho_{r_0}(\mathbf{r}) = \left\langle \phi({}^3\text{He}) \left| \sum_i e_i \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \right| \phi({}^3\text{He}) \right\rangle \quad (5)$$

它依赖于参数  $r_0$ . 其中  $\phi({}^3\text{He})$  是  ${}^3\text{He}$  的波函数. 计算夸克强子混合模型中  ${}^3\text{He}$  的中心密度  $\rho_{r_0 \rightarrow 0}(r=0)$  和传统理论中  ${}^3\text{He}$  的中心密度  $\rho_{r_0=0}(r=0)$  之比, 我们得到

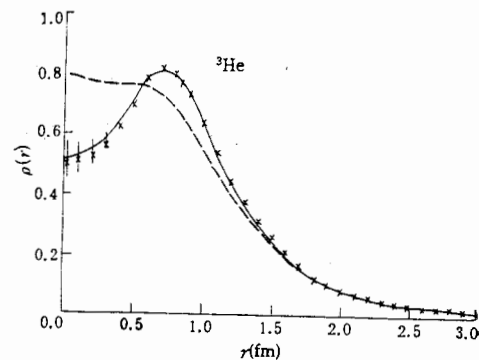


图 1  ${}^3\text{He}$  的电荷密度. 实线是本文夸克核子混合模型的结果, 实验点来自文献 [11], 虚线是传统理论的结果<sup>[10]</sup>

$$\rho_{r_0 \neq 0}(r=0) = [1 - p_{6q} - p_{9q}] \cdot \rho_{r_0=0}(r=0) \quad (6)$$

其中  $\rho_{6q}$  和  $\rho_{9q}$  分别是六夸克和九夸克集团的几率。在  $r_0 = 1.0 \text{ fm}$  时, 它们的值分别为 15% 和 1%<sup>[9]</sup>。

(6)式说明: 由于原子核中多夸克集团的形成引起了  ${}^3\text{He}$  中心电荷密度的减少, 产生了实验上所观察到的中空现象。

实际上, 对 (4) 式作傅氏变换, 我们便得到了  ${}^3\text{He}$  的电荷密度  $\rho_{r_0}(r)$ 。其结果以及与实验材料的比较表示在图 1。在图 1 中, 我们也用虚线表明了传统理论对电荷密度的预言<sup>[10]</sup>。显然, 实验强烈地支持了夸克强子混合核模型。

结论是:  ${}^3\text{He}$  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, 以及夸克强子混合核模型对这些实验现象的成功的解释, 说明了原子核中多夸克集团的可能存在。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] J. S. McCarthy et al., *Phys. Rev. Lett.*, **25**(1970), 885; R. C. Arnild et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 1429.
- [ 2 ] C. Hajduk et al., *Nucl. Phys.*, **352A**(1981), 413; E. Hadjimichael et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 583; *Phys. Rev.*, **22C**(1983), 837.
- [ 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.*, **458A**(1986), 461.
- [ 6 ] F. D. Juster et al., *Sacay, Preprint*, No. 2305(1985).
- [ 7 ] H. Hajduk et al., *Nucl. Phys.*, **405A**(1983), 581.
- [ 8 ] L. S. Kisslinger, Workshop on perspectives in Nuclear Physics at Intermediate Energies, Trieste, March, 25-29, 1985.
- [ 9 ] L. S. Kisslinger et al., *Phys. Lett.*, **146B**(1984), 163.
- [ 10 ] M. Beyer et al., *Phys. Lett.*, **122B**(1983), 1.
- [ 11 ] J. L. Friar et al., *Phys. Rev.*, **24C**(1981), 665.

## EXPERIMENTAL TEST FOR EXISTENCE OF MULTIPLE QUARK CLUSTERS IN NUCLEI

MA WEIXING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

### ABSTRACT

The similarity of the charge form factors observed experimentally between  ${}^3\text{He}$  and  ${}^3\text{H}$  and the central hole of  ${}^3\text{He}$  charge density are in conflict with traditional nuclear structure theory. We claim that these conflicts are strong signals for the existence of multiple quark clusters in nuclei. Hybrid Quark Hadron Model successfully explain the experimental phenomena.

散  
集  
倾  
场。  
在  
调  
以

铁  
出,  
们  
会  
走