

快报

核子间共有夸克模型

孙 信

(北京大学)

摘 要

在核子波函数重叠区内夸克为不可分辨的假定, 导致核子间共有(包括交换)夸克模型。除由 A 相关的 EMC 数据来检验外, 此模型给出了在不同核中的核子平均半径增大的数值; 给出了不同核中的六夸克集团的百分比, 并解释了多夸克集团的形成与解体。模型还给出一种可能的新的夸克流动方式——“夸克传导性”。

本文是以强子-夸克二重性、二者间的关系、为线索提出^[1]一个核内夸克效应的模型(或机制)。本文的基本假定^[1]是: “在二个或几个核子波函数重叠的区域内, 夸克为不可分辨, 即, 如在此区域内找到一个夸克, 我们不能区分它是属于哪个核子的。”基本假定直接导致核子间共有夸克模型; 在核子波函数重叠的区域内, 出现二个或几个核子间共有(包括交换)夸克。

首先计算核子波函数重叠的几率: 考虑两个核子。取近似, 只计入空间对称波函数的贡献。由总波函数的反对称性要求只计入同位旋三重态自旋独态与同位旋独态自旋三重态二种情况。分别考虑同位旋为 1 的 (pp) 或 (nn) 及同位旋为 1、0 的几率各占 1/2 的 (np) 情况。并计入一核子周围的邻近核子数, 得出核 (A, Z) 内的一核子与其周围核子间出现波函数重叠的几率 $f_0(A, Z)$ 为

$$f_0(A, Z) = c_\alpha c_\beta (1 - 1.158A^{-\frac{1}{3}}) \left[\left(\frac{Z}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{N}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \cdot \frac{1}{4} + \left(\frac{N}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{Z}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \left(\frac{1}{8} + \frac{3}{8} \right) \right] = c_0 (1 - 1.158A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{I^2}{A^2} \right) \quad (1)$$

其中 $c_0 \equiv \frac{3}{8} c_\alpha c_\beta$, $c_\alpha (1 - 1.158A^{-\frac{1}{3}})$ 为计入表面效应后的一个核子周围的邻核子数 (c_α 为常数), c_β 为空间对称的二核子波函数间的重叠几率。

计算核子间共有夸克的几率, 还需求出核子间共有(包括交换)夸克的对数: 在要求交换夸克前后的核子都需是色单态的核子态(不包括共振态)的限制下, 在相邻的 (pp) 或 (nn) 的情况, 共有对只存在于同色同味的夸克之间, 此夸克对数为 5/3; 在 (pn), 同色同味与同色不同味的夸克对数各为 4/3, 共 8/3。这样, 核 (A, Z) 内的一个核子与其相邻核子间共有夸克的几率 $f_i(A, Z)$ 及交换夸克的几率 $f_e(A, Z)$ 分别为

$$f_j(A, Z) = c_{\alpha} c_{\beta} (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left[\left(\frac{Z}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{N}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{5}{3} + \left(\frac{N}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{Z}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \left(\frac{1}{8} + \frac{3}{8} \right) \cdot \frac{8}{3} \right] = c_j (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{11 I^2}{21 A^2} \right) \quad (2)$$

及

$$f_c(A, Z) = c_c (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{11 I^2}{21 A^2} \right) \quad (3)$$

其中 $c_j \equiv \frac{7}{8} c_{\alpha} c_{\beta}$, $c_c \equiv \frac{7}{16} c_{\alpha} c_{\beta}$. 这里 $c_c = \frac{1}{2} c_j$ 是由于在共有一对夸克的叠加中, 二夸克各属原核子的态与交换态的振幅的绝对值相同, 因之二者的几率各占 $\frac{1}{2}$.

还需计算(1)–(3)式中的 $c_{\alpha} c_{\beta}$: 设除核力的排斥心作用外, 每核子为自由核子; 其空间波函数取高斯型. 一般认为, 夸克在核子内做自由运动, 因此核子的空间波函数也就是核内夸克的空间分布函数.

$$c_{\alpha} c_{\beta} = \mathcal{N} \int_{0.5 \text{fm}}^{\infty} \rho(R) \cdot 4\pi R^2 dR \left[\int e^{-a(\mathbf{r}_1 + \frac{\mathbf{R}}{2})^2} e^{-a(\mathbf{r}_2 - \frac{\mathbf{R}}{2})^2} \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) d\tau_1 d\tau_2 \right] \quad (4)$$

\mathbf{R} 为二核子中心间距离, \mathcal{N} 为规一因子, $a = 3.3 \text{fm}^{-2}$ (由核子电荷半径定出); $\rho(R) = \rho_0 / (1 + e^{\sqrt{a}(R-R_0)})$, $R_0 = A^{\frac{1}{3}} r_0 / [1 + (\pi/a^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{3}} r_0)^2]^{\frac{1}{2}}$; $\rho_0 = 0.17/\text{fm}^3$, $r_0 = 1.12 \text{fm}$. 由(4)得出 $c_{\alpha} c_{\beta} \approx 0.388$ (对中重核), $c_{\alpha} c_{\beta} = 0.308$ (对 He^4).

这样, 基本假定导致“核子间共有夸克模型”: 在波函数重叠区内, 出现核子间共有(包括交换)夸克. 共有夸克使核内的核子已不是完全的核子; 但由于共有夸克的几率较小(见(2)), 原子核仍可看成由核子组成, 而把共有夸克看成核内夸克效应. 基本假定实际是对夸克部分解除禁闭的一种假定; 不同的假定导致不同的模型^[2]; 本文的特点之一是取最少限度的假定.

以下给出“共有夸克模型”所得出的一些, 初步结果^[1]:

模型的实验检验 我们用本文模型, 取标准方法即无穷大动量坐标系的老式微扰论^[3], 计算了轻子-核深度非弹结构函数 $F_2^A(x, A, Z)$. 计算图1的过程, 给出核子C的结构函数. 当 q^2 大时, 对 x 积分后得

$$(\nu W_2(\nu, Q^2))_{\text{exch}} = \frac{1}{4(2\pi)^3} \int \frac{d^2 \mathbf{k}_{\perp} d^2 \mathbf{l}_{\perp}}{x^2 (1-x)^3} \Psi_C^2(\mathbf{k}_{\perp}, x) \Psi_D^2(\mathbf{l}_{\perp}, x) \Psi_F^2(\mathbf{k}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}, x) N(\mathbf{k}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}, x)$$

其中 $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$. 式中各符号按文献[3]的惯例. $F_2^A(x, A, Z)$ 应为

$$F_2^A(x, A, Z) = [1 - f_c(A, Z)] (\nu W_2)_{\text{free}} + f_c(A, Z) (\nu W_2)_{\text{exch}}.$$

取渐近近似, 得

$$F_2^A(x, A, Z) / F_2^D(x) = 1 - c_c (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{11}{21} \cdot \frac{I^2}{A^2} \right) + c_c (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{11 I^2}{21 A^2} \right) x^{-1} (1-x)^6 \quad (5)$$

(5)式的理论值及其与实验数据^[4]的比较, 由图2给出.

核内核子的膨胀 由于与邻核子共有夸克, 核内-核子C中的夸克将有部分时间处于其邻

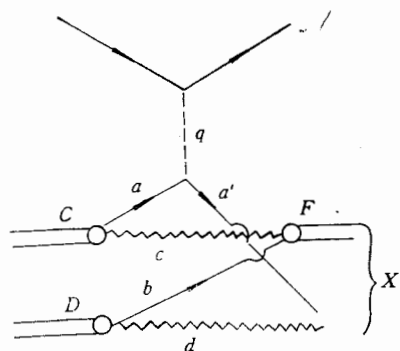


图 1

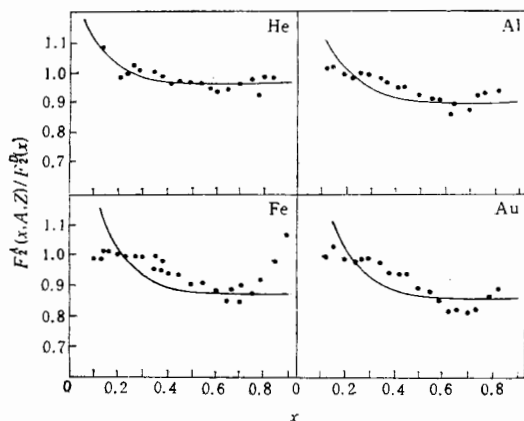


图 2

核子中,所以核子 C 的平均半径应是

$$\bar{r} = [1 - f_c(A, Z)]r_0 + f_c(A, Z)r_n \quad (6)$$

r_n 为 C 的邻核子中的夸克离 C 的中心的平均距离;可合理地取 $r_n \approx 2 \times 1.12\text{fm}$. 由 (6) (3) 得出

原子核	${}^4\text{He}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{197}\text{Au}$
$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{\bar{r} - r_0}{r_0}$	5.6%	16.1%	18.2%	20.5%

这些值可以和别的文献[5]相比较.

对多夸克集团的若干解释 按本模型,在核内,由于核子间的共有夸克,一个核子已失去严格定义.按作者的观点,共有夸克的二个核子就是一般认为的六夸克集团(其他多夸克集团类此);即“多夸克集团”是通过核子间的波函数叠加、共有夸克而形成的.按此,本模型可直接给出核内各多夸克集团的百分比.(2)式给出的核 (A, Z) 内二个核子共有夸克的几率也就是六夸克集团出现的几率或存在的百分比.这样得到

原子核	${}^4\text{He}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{197}\text{Au}$
6 夸克集团的百分比	7.3%	20.8%	23.6%	26.6%

可与别的文献[6,2]比较.需指出,本文给出的是理论值(而不是由实验调定的经验值).

此外,本模型还能对多夸克集团的形成与解体给出定性解释:在核子组成核时出现核子间共有夸克,按本模型就认为是多夸克集团形成了;相反,当二核间距离逐渐增大时,核子间重叠与共有夸克的几率都逐渐减少,直至二核子完全独立,即多夸克集团解体.这样我们就解释了:为什么实验显示多夸克集团似乎只存在于原子核内,至今未能找到单独的多夸克集团;以及为什么从核内分离出来的总是强子,而找不到多夸克集团.

本文模型,在核子波函数重叠区外,夸克完全禁闭在核子内;而在重叠区内,二核子间共有一对或几对夸克,其主要部分是共有一对同色的夸克.这样,本模型和多夸克口袋模型、混合(hybrid)夸克强子模型^[2,6]都不同.本模型是个反映强子与夸克关系的模型;强子总处于重要地位.

夸克“传导性”与核内的夸克流动方式 在本模型,除核子波函数重叠区外,夸克都束缚于一个核子内.因之如核内各核子间的重叠区不连通,应没有全核的夸克流动性.但核子间的夸克交换却导致夸克的另一种“流动”方式:如核子 A 与其邻核子 B 交换一对夸克,而 B 又和它的邻核子 C 交换一对夸克;依此类推.夸克可通过这种方式“传导”至全核.作者把夸克的这种可能的流动方式称为“夸克传导性”.

夸克传导性的定量处理将在以后给出.这里需说明的是:夸克传导性是除夸克流通(如在强子内部、全核色传导^[7]等)和隧道效应之外的另一种夸克流动方式.

本模型还需用于各具体问题来进一步检验与发展.

马伯强参加了深度非弹结构函数的推算工作,附此志谢.

参 考 文 献

- [1] 孙信,北京大学核物理理论组科学报告(1984, 12),未发表.
- [2] C. W. Wong, *Phys. Rep.*, **136**(1986), 1.及文中所引文献.
- [3] J. F. Gunion, S. J. Brodsky & Blankenbecler, *Phys. Rev.*, **D8**(1973), 287; D. Drell, D. Levy & T. M. Yan, *Phys. Rev.*, **187**(1969), 2159.
- [4] R. G. Arnold et al, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 727.
- [5] J. V. Noble, *Phys. Rev. Lett.*, **46**(1981), 412; M. Jandel, G. Peters, *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 1117; P. Mathieu et al, *Phys. Lett.*, **148**(1984), 473.
- [6] L. S. Kisslinger, *ALP Conf. Proc.*, 5110, 1984.
- [7] D. Nachtmann & H. J. Piener, *Z. Phys.*, **C21**(1984), 277.

JOINT POSSESSING AND EXCHANGE OF QUARKS BETWEEN NUCLEONS

SUN JI

(Peking University)

ABSTRACT

The assumption of indistinguishability of quarks in the region of overlapping of nucleon wave functions leads to the model of joint possessing of quarks between nucleons. Besides the examination by the data of A -dependent EMC effect, the model gives the increments of average nucleon radii in various nuclei; the percentage ratios of 6-quark cluster in various nuclei; and explains the formation and dissociation of multi-quark clusters. A new possible type of fluidity of quark——“conductivity” in nuclei is predicted by the model.