

# 核子间的夸克交换机制及其所能导致的结果

孙 佶 马伯强

(北京大学技术物理系)

## 摘 要

本文探讨核内核子间的夸克交换机制所能给出的结果。计算了一核子与其周围核子发生波函数重叠及夸克交换的几率;并:(a)算出 L-A 深度非弹结构函数,与实验符合较好。(b)给出对多夸克集团模型一种可能的解释。(c)算出核内核子平均半径增大的数值。(d)预言了全核的“夸克传导性”的存在。(e)显示了夸克与强子描述的“二重性”。

## 一、引 言

近年以来,对若干核物理实验现象,存在着用强子(如核子)和用夸克来解释的两类理论。其中,如对 EMC 小组的轻子-核深度非弹的实验现象(EMC 效应),已出现了大量的、分属于上述两个方面的理论模型。今天,对 EMC 效应,已有些人把注意放在这些模型之间的关系以及它们的基础方面<sup>[1]</sup>;即力图找出这些模型所反映的更深一层的、实质性的东西。这可能是今天的任务之一。本文就是沿此方向的一个努力;我们试图从现有的模型(着重在有关夸克自由度的模型)中,找出一种可能的深一层的机制。

## 二、核子间波函数重叠及夸克交换的机制

当前流行的观点,认为在强子(如核子)内,夸克在大约 1fm 量级的区域中自由运动;而核子直径又大致与核内核子中心间的距离相等;也就是说,一个核子内的夸克密度与原核内的夸克密度颇为接近(前者只大~25%)。可是另一方面,以核子及核子间相互作用为基础的核结构与动力学理论又很成功,这使人感到惊异。Moniz 曾谈到这一点,并强调了研究强子描述与夸克描述的“二重性”的重要性<sup>[2]</sup>。

本文作者认为,研究上述的“二重性”的一种可能途径,是选取核子间波函数重叠及核

子间的夸克交换这一机制。一方面,这是以核子为单位的,夸克交换是核子间的一种动力学机制;而另一方面,这又是一种夸克效应。核子间的夸克交换这一机制本身就具有“二重性”。

EMC 效应就是通过 L-A 深度非弹散射显示出的自由核子与核内核子的不同。作者认为,夸克交换是造成此不同的一种可能的机制;因为只有核内,核子之间才有夸克交换。而这个夸克交换效应又可能由不同角度(如模型)来予以表述。

核子间波函数重叠及夸克交换的机制是有可能解释或协调几种模型的。例如,多夸克集团模型成功地解释了若干实验事实<sup>[3]</sup>,但还存在着如何理解所引入的实验上从未观察到的“多夸克集团”的尚不明确的问题(迄今所观察到的都是强子,未出现过孤立夸克或所包含的夸克多于一个强子的禁闭集团)。如果用核子间的夸克交换机制来理解,则有可能在一定程度上给以解释:通过两个核子间的夸克交换,核子的动量分配可以从一个核子的三个夸克,扩大到分配于两个核子的六个夸克之间。这一方面,在一定程度上,相当于六夸克集团那样的夸克禁闭区域的扩大;而另一方面,夸克效应限于相邻核子间的夸克交换;观察到的总是强子,没有永久性的多夸克集团,所以实验上观察不到多夸克集团。此外,在下一节中,我们还将看到,核子间的波函数重叠及夸克交换机制也可以解释核内核子的平均半径增大的模型<sup>[4]</sup>;也还可以给出一些其他效应。

根据这些考虑,本文集中研究核子间的波函数重叠及夸克交换的机制,看它能导致哪些结果、能够走多远。

波函数重叠及夸克交换机制的基本假定是:“在两个或多个核子波函数重叠的区域内,夸克为不可分辨,即,如发现一夸克,不能分辨它是属于哪个核子的。”

这个假定自然导致,在绝大多数的核子较密的核内,核子间出现夸克交换。

本节任务是求出核  $(A, Z)$  内的一个核子与其周围核子发生夸克交换的几率  $f(A, Z)$ 。(在下节联系具体过程或模型。)  $f(A, Z)$  由如下两因子组成:

(a) 所考虑的核子周围的邻近核子数。此数,当把表面效应考虑在内,为  $c_1 - c_2 A^{-\frac{1}{3}}$  ( $c_1, c_2$  为常数)。

(b) 首先,要两核子波函数重叠,它们应处于空间对称态。按泡利原理,这有(同位旋三重态)(自旋独态)与(同位旋独态)(自旋三重态)两种可能情况。

为简单起见,我们假定,核内的每个核子处于各自旋态的几率相同。在相邻的  $(p, p)$  和相邻的  $(n, n)$  的情况,同位旋为 1,空间为对称态的,只有自旋独态,权重为  $1/4$ 。在相邻的  $(n, p)$  情况,同位旋为 1 及为 0 的几率各占  $1/2$ ,此二者的自旋应分别为独态(权重  $1/4$ )及三重态(权重  $3/4$ )。

其次,还需考虑,在各情况下,交换夸克的对数。在相邻的  $(p, p)$  情况,即在  $uud$  与  $uud$  之间,同类型夸克的交换夸克对数为 5;不同类型的夸克交换被禁阻(因要求在交换后必须仍是  $(p, p)$ )。相邻的  $(n, n)$  情况的结果同此。在相邻的  $(n, p)$  情况,即  $udd$  与  $uud$  之间,同类型夸克的交换对数为 4;另外,还有不同类型的夸克(即  $u, d$  之间)的交换,导致  $np$  互易,这种交换的夸克对数也是 4。

$(A, Z)$  核内的一个核子为质子(中子)的几率为  $Z/A(N/A)$ 。

把上述几点合起,得到两个相邻核子之间发生夸克交换的几率为

其中  
核子

几个

其中

 $(c_s)$ 近化  
每个

其中

 $fm^{-1}$ 两核  
交换

一种动力  
具有“二

不同. 作者  
有夸克交

如, 多夸  
上从未观  
孤立夸克  
解释, 则有  
以从一个  
程度上, 相  
子间的夸  
夸克集团.  
解释核内

能导致哪

叠的区域

率  $f(A,$

$-c_2 A^{-\frac{1}{3}}$

$i$  (同位旋

的  $(p, p)$

$1/4$ . 在  
别为独态

$E$   $uud$  与  
求在交换  
即  $udd$   
之间的

$$c_3 \left[ \left( \frac{Z}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{N}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \cdot \frac{1}{4} \cdot 5 + \left( \frac{N}{A} \cdot \frac{Z}{A} + \frac{Z}{A} \cdot \frac{N}{A} \right) \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \right) \cdot 8 \right] \\ = \frac{21}{8} c_3 \left( 1 - \frac{11}{21} \cdot \frac{I^2}{A^2} \right) \quad (1)$$

其中,  $N/A = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{I}{A} \right)$ ,  $Z/A = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{I}{A} \right)$ .  $c_3 = c_4 c_5$ ;  $c_4$  为两个处于空间对称态的核子的波函数相重叠的几率.  $c_5$  为当两个核子的波函数相重叠时, 发生夸克交换的几率.

把  $a, b$  两部分合起, 得出核  $(A, Z)$  内的一个核子与其周围核子发生夸克交换的几率  $f(A, Z)$  为

$$f(A, Z) = c_0 \left( 1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}} \right) \left( 1 - \frac{11}{21} \frac{I^2}{A^2} \right) \quad (2)$$

其中  $c_0 = \frac{21}{8} c_3 c_1 = \frac{21}{8} c_4 c_5 c_1$ . (2) 式中用了 Bethe-Weizsäcker 公式中的  $c_5/c_V = 1.158$ .

( $c_5/c_V = c_2/c_1$  只与一个核子的相邻的核子数有关.)

$c_4 c_1$  因子的严格计算需要知道核子间的全部相互作用. 我们这里用一个简单的初步近似: 即设两个核子的中心间的距离  $R$  不小于排斥心半径  $c \sim 0.5 \text{ fm}$ ; 而在排斥心之外, 每个核子被认为是自由的; 取空间波函数为高斯型. 按此

$$c_4 c_1 = \mathcal{N} \int_c^\infty \left( \frac{4\pi r_0^3}{3} \right)^{-1} \cdot 4\pi R^2 dR \iint e^{-a(r_1 + \frac{R}{2})^2} e^{-a(r_2 - \frac{R}{2})^2} \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \quad (3)$$

其中,  $\mathcal{N}$  为规一化因子. 取核子密度  $\left( \frac{4\pi r_0^3}{3} \right)^{-1}$  为  $0.16$  核子/ $\text{fm}^3$ , 由之定出  $a = 1.05 \text{ fm}^{-2}$ . 取  $c = 0.5 \text{ fm}$ . (3) 式给出,  $c_4 c_1 = 0.154$ . 由此,  $c_0 = 0.404 c_5$ .

关于  $c_5$  的值: 当两个核子的波函数相重叠时, 原来分属于两核子的一对夸克, 成为两核子所共有, 不可分辨; 但从这一对夸克的结局来看, 总是有经历直接过程 (未发生夸克交换. 见图 1(a)) 与交换过程 (发生了夸克交换. 见图 1(b)) 两种可能.

合理的看法是, 此两种过程发生的几率各占  $\frac{1}{2}$ . 所以  $c_5 = \frac{1}{2}$ .

这样, 我们定出:  $c_0 = 0.202$ .

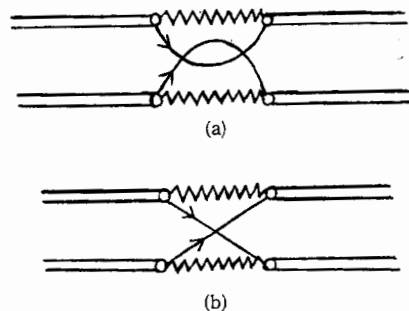


图 1 [注]这只是示意图. 实际上这一对夸克不可分辨, 这样的图是画不出来的.

### 三、核子间波函数重叠及夸克交换机制导致的若干结果

#### (一) 轻子-核深度非弹结构函数与 EMC 效应

我们的目的是通过结构函数来检验夸克交换这一机制的合理性。由于只考虑了此机制,而略去了其他效应(如费米运动),并且引入了简化的假定,因之我们并不期望在与实验的定量符合上与现有的许多模型来竞争。包含核子间夸克交换的轻子-核深度非弹,如图 2(a) 所示。

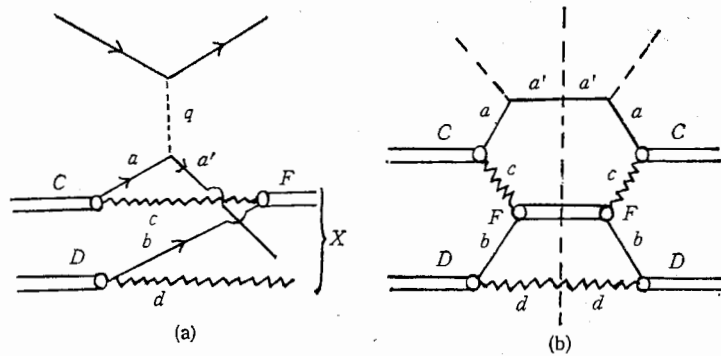


图 2

这里,我们用无穷大动量系的老式微扰论<sup>[5]</sup>。在本文,我们采用脉冲近似。对脉冲近似的适用性以及脉冲近似的修正,我们在另外的文章中专门去讨论<sup>[6]</sup>。这里为了检验核内夸克效应的一种可能的机制,我们用文献[5]的标准方法,包括其脉冲近似。

在 1-A 深度非弹中,被击核子 C 与其邻核子 D 交换夸克,成为包含核子 F 的若干强子 X。质量为 M 的核子 C(D) 分成动量为  $xP$  及  $\mathbf{k}_\perp(l_\perp)$ 、质量为  $m$  的夸克及动量为  $(1-x)P$ ,  $-\mathbf{k}_\perp(-l_\perp)$ , 质量为  $\lambda$  的核心。

$$P_C = P_D = \left( P + \frac{M^2}{2p}, \mathbf{O}_\perp, P \right)$$

$$P_a = \left( xP + \frac{(\mathbf{k}_\perp^2 + m^2)}{2xP}, \mathbf{k}_\perp, xP \right)$$

$$P_c = \left( (1-x)P + \frac{(\mathbf{k}_\perp^2 + \lambda^2)}{2(1-x)P}, -\mathbf{k}_\perp, (1-x)P \right)$$

$$P_{a'} = \left( xP + \frac{(\mathbf{k}_\perp + \mathbf{q}_\perp)^2 + m^2}{2xP}, \mathbf{k}_\perp + \mathbf{q}_\perp, xP \right)$$

$$P_F = \left( P + (M^2 + (l_\perp - \mathbf{k}_\perp)^2)/2P, (l_\perp - \mathbf{k}_\perp), P \right)$$

图 2(a) 中的  $P_b, P_d$  类同于  $P_a, P_c$ , 只需做代换  $\mathbf{k}_\perp \rightarrow l_\perp$ 。

把图 2(a) 的所有末态加起来,导致图 2(b) 的计算。当包入了所有的时间顺序后,给出了核子 C 的结构函数。当  $q^2$  大时,对  $x$  积分后,得

$$rW_2(\nu, Q^2) = \frac{1}{4(2\pi)^3} \int \frac{d^2\mathbf{k}_\perp d^2l_\perp}{x^2(1-x)^3} \Psi_C^2(\mathbf{k}_\perp, x) \Psi_D^2(l_\perp, x) \Psi_F^2(\mathbf{k}_\perp, l_\perp, x) N(\mathbf{k}_\perp, l_\perp, x) \quad (4)$$

一

其

函

所

变

其

变

(v

函

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其

变

所

变

其中,  $x = Q^2/2M\nu$

$$\psi_C(\mathbf{k}_\perp, x) = \phi_C(\mathbf{k}_\perp, x)[M^2 - (\mathbf{k}_\perp^2 + m^2)/x - (\mathbf{k}_\perp^2 + \lambda^2)/(1-x)]^{-1}$$

$$\psi_D(\mathbf{l}_\perp, x) = \phi_D(\mathbf{l}_\perp, x)[M^2 - (\mathbf{l}_\perp^2 + m^2)/x - (\mathbf{l}_\perp^2 + \lambda^2)/(1-x)]^{-1}$$

$$\psi_F(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{l}_\perp, x) = \phi_F(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{l}_\perp, x)[M^2 + (\mathbf{l}_\perp - \mathbf{k}_\perp)^2 - (\mathbf{l}_\perp^2 + m^2)/x - (\mathbf{k}_\perp^2 + \lambda^2)/(1-x)]^{-1}$$

其中  $\phi$  为顶角函数, 它在最低阶费曼图计算中为相互作用常数.  $N(\mathbf{k}_\perp, \mathbf{l}_\perp, x)$  为  $x$  的缓变函数.

(4) 式的  $\nu W_2(\nu, Q^2)$  是发生夸克交换时的、核 ( $A, Z$ ) 内的核子  $C$  的结构函数, 写如  $(\nu W_2)_{ex}$ ; 自由核子的结构函数写如  $(\nu W_2)_f$ . 实验测得的、核 ( $A, Z$ ) 内的核子的结构函数应为

$$F_2^A(x, A, Z) = [1 - f(A, Z)](\nu W_2)_f + f(A, Z)(\nu W_2)_{ex}$$

在  $x$  大的渐近极限上,

$$(\nu W_2)_{ex}(x) \sim x^{-2}(1-x)^9$$

$$(\nu W_2)_f(x) \sim \sqrt{x}(1-x)^3$$

所以

$$F_2^A(x, A, Z)/F_2^p(x) = 1 - C_0(1 - 1.158A^{-\frac{1}{3}})\left(1 - \frac{11}{21} \frac{I^2}{A^2}\right) + c_0(1 - 1.158A^{-\frac{1}{3}})\left(1 - \frac{11}{21} \frac{I^2}{A^2}\right)x^{-2.5}(1-x)^6 \quad (5)$$

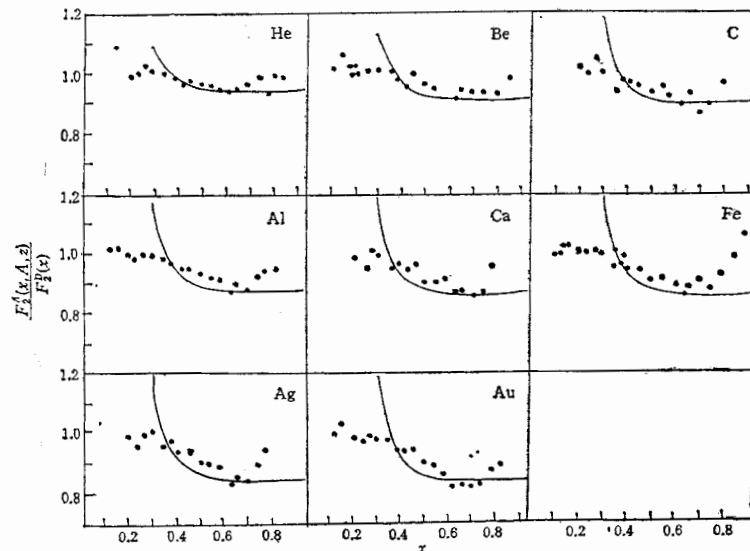


图 3 —— 本文理论 ● 实验数据 [7]

理论计算的结果, (5) 式, 与实验数据 [7] 的比较, 由图 3 及图 4 给出. 在  $x \sim 0.35 - 0.75$  的范围内, 理论与实验符合较好. 但本文未计入费米运动, 也未考虑 Regge 行为, 在  $x < 0.35, x > 0.75$  区域内是偏离实验的. 在本文的简单近似处理下, 不能希望得到更

虑了此机  
望在与实  
非弹, 如

脉冲近  
为了检验

若干强  
动量为

后, 给出

,  $x$ ) (4)

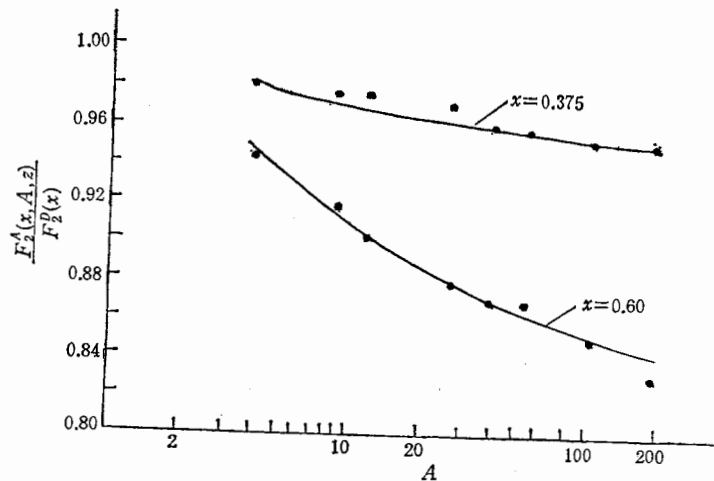


图4 结构函数的A相关

—本文理论 ●实验数据 [7]

好的定量结果。本文的目的并不在于再提出一个模型,而是,如前所讲,试图寻找某些现有模型的深一层的可能的机制,也包括对夸克与强子描述的“二重性”的尝试探讨。

现在,我们再对以下四个方面,做简单的、以定性为主的讨论:

### (二) 夸克交换机制与多夸克集团模型

多夸克集团模型的提出,是由于有些实验现象可以解释为,在核内,存在着夸克不严格地限于一个核子之内的迹象。例如,夸克的动量分布可以有一定的比例扩大到分配于两个核子的六个夸克之间等。但多夸克集团模型引入了实验上从未观察到过的多夸克集团。在这里,试用核内核子间夸克交换机制来解释多夸克集团模型:当两个核子很靠近时,它们的波函数有重叠、出现夸克交换,这时两核子不是完全独立的,它们共有,比如,一对夸克;这样的两个核子也可以看成一个瞬间的或部分的(因波函数的重叠、夸克交换都只有一定的几率)六夸克集团。夸克交换机制不同于通常多夸克集团模型的叙述在于:这里是以核子为单位的,出现“多夸克集团”是有条件的暂时的,没有永久性的多夸克集团,不论夸克交换前或交换后,总是三个夸克禁闭为一个核子;当两个核子间的距离增大时,波函数重叠与夸克交换的几率都将逐渐减小,直到两核子完全独立。这也可以解释为什么实验上观察到的总是强子(如核子),而观察不到多夸克集团。

本文只从轻子-核深度非弹检验了夸克交换这一机制。还需要从各方面来检验此机制,看它是否都能说明多夸克集团模型所能解释的各实验事实。

### (三) 核子间波函数重叠及夸克交换与核内核子半径增大模型

设只考虑两核子间共有及交换一对夸克的情况。我们看一核子C,由于核子间波函数的重叠,将有两个夸克是它原来的,而第三个夸克将在部分时间是C原来的、部分时间为核子C与邻核子D所共有的。这造成核子C的平均半径 $\bar{r}$ 的增大。即

$$\bar{r} = \frac{2}{3} r_0 + \frac{1}{3} r_3 \quad (6)$$

$r_0$  是自由核子半径,  $r_3$  是第三个夸克的平均位置(以  $C$  的中心为原点), 利用(2)式, 应有

$$r_3 = [1 - f(A, Z)]r_0 + f(A, Z)r_n \quad (7)$$

$r_n$  是  $C, D$  二核子共有的夸克的平均位置(以  $C$  的中心为原点), 近似地可取  $r_n \approx 2r_0$ .  $f(A, Z)$  和(2)式的  $f(A, Z)$  不同在于, 这里  $r_n$  是  $C, D$  两核子所共有的夸克的位置, 这包括第二节所说的直接过程与交换过程两种情况在内. 因之, 在这里, 前述的  $c_3$  应改取为 1, 即(2)式的  $f(A, Z)$  中的  $c_0$ , 在计算半径增大时, 应换为  $c'_0 = \frac{21}{8} c_4 c_1 = 0.404$ .

$$f(A, Z) = c'_0 (1 - 1.158 A^{-\frac{1}{3}}) \left(1 - \frac{11}{21} \frac{I^2}{A^2}\right) = 2f(A, Z) \quad (2')$$

由(2')、(6)、(7), 得出各原子核内的核子平均半径, 比自由核子增大的百分比

$$\left(\frac{\Delta r}{r_0} \equiv \frac{\bar{r} - r_0}{r_0} \times 100\%\right)$$

原子核:	He <sup>4</sup>	Be <sup>9</sup>	C <sup>12</sup>	Al <sup>27</sup>	Ca <sup>40</sup>	Fe <sup>56</sup>	Al <sup>107</sup>	Au <sup>197</sup>
$\Delta r/r_0$	3.6%	5.9%	6.6%	8.3%	8.9%	9.4%	10.1%	10.6%

#### (四) 夸克交换导致遍及全核的夸克传导性

夸克交换可直接导致这样的过程: 例如, 核子  $A$  和其邻核子  $B$  交换一对夸克; 而核子  $B$  又和它的邻核子  $C$  交换一对夸克; 依此类推. 这样, 从一个核子出发, 夸克可以通过交换, “传导”至核内所有的核子. 即核内出现了遍及全核的夸克传导性. 这是夸克交换直接导致的又一个可能的核内的夸克效应.

关于夸克传导性, 我们将在以后另做定量计算. 但我们可以立即看到两点特征: (a), 第二节给出  $c_0 = 0.202$ , 夸克交换发生的几率不很大; 比如, 对 Fe<sup>56</sup> 为 0.14, Al<sup>27</sup> 为 0.12, Au<sup>197</sup> 为 0.16 等等. 从核内一点出发的夸克传导将较快地衰减. (b) 由(3)式可知, 发生夸克交换的几率与核内核子密度成正比; 因之夸克传导性也将随核子密度而增大; 在超密核物质中将比在普通核中为大.

#### (五) 夸克交换与夸克及强子描述的“二重性”

在上边第二节中讲过, 我们可以用夸克交换机制来研究夸克与强子描述的二重性; 例如, 对 EMC 效应的以核子为基础模型和以夸克为基础模型.

i) 核子间的夸克交换机制可以看成是以核子为基础的; 此机制是一种核子间的动力学机制; 夸克交换可认为是核子间的一种可能的相互作用.

ii) 夸克交换也是一种夸克自由度的机制. 例如, 它把夸克间的动量分配, 从一个核子的三个夸克扩大到分配于, 比如, 两个核子的六个夸克之间; 可看成是出现了短暂的“多夸克集团”. 等等.

从以上五个方面看, 强子(如核子)间的波函数重叠及夸克交换, 可能是核内的一个值得注意的机制.

某些现

不严重  
分配于  
夸克集  
靠近  
如, 一  
交换都  
于: 这  
集团,  
大时,  
为什么

此机

波函  
-时间

## 参 考 文 献

- [ 1 ] F. E. Close, *Nucl. Phys.*, **A446**(1985), 273c.;  
R. P. Bickerstaff & G. A. Miller, *Phys. Lett.*, **166B**(1986), 409.
- [ 2 ] E. J. Moniz, Proc. of the Niels Bohr Centennial Conference, Copenhagen, Denmark, May, 1985, p585.
- [ 3 ] H. Faissner, et al., *Phys. Lett.*, **130B**(1983), 321; *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 900.  
S. Date, *Prog. Theo. Phys.*, **70**(1983), 1682.  
C. E. Carlson, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 261.
- [ 4 ] P. Mathieu & P. J. S. Watson, *Phys. Lett.*, **148**(1984), 473.  
A. W. Hendry, D. B. Lichtenberg, *Phys. Lett.*, **136B**(1984), 433.  
J. Dias de Deus, et al., *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 697.
- [ 5 ] S. Weinberg, *Phys. Rev.*, **150**(1966), 1313;  
J. F. Gunion, S. J. Brodsky & Blankenbecler, *Phys. Rev.*, **D8**(1973), 287.  
D. Drell, D. Levy & T. M. Yan, *Phys. Rev.*, **187**(1969), 2159; **D1**(1970), 1035.
- [ 6 ] 马伯强, 孙信, “对脉冲近似运动学修正的研究”高能物理与核物理, 待发表.
- [ 7 ] R. G. Arnold, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 727.

RESULTS OBTAINED FROM THE MECHANISM OF QUARK  
EXCHANGES BETWEEN NUCLEONS IN NUCLEI

SUN JI MA BAIQIANG

(Beijing University)

## ABSTRACT

The probabilities of overlappings of wave functions and of quark exchanges of a nucleon with its surrounding nucleons in nuclei are calculated. We obtain the deep inelastic 1-A structure functions which agree well with experimental data. An explanation on multiquark cluster model is given. Values of average radius of a nucleon in various nuclei are obtained and the model of swollen nucleon is explained. “Quark conductivity” through nucleus is predicted and “duality” of quark and hadron description is shown.

欧  
能  
作  
所  
大  
很  
与  
核  
加  
的  
态  
唯  
析  
势  
收