

核内核子部分子的逸出及共用与核子 结构函数的核效应*

段春贵 何祯民

(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

张立刚

(武汉冶金科技大学物理教研室 武汉 430000)

薛大力 厉光烈

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在核介质中,可能存在非核子自由度. 这些非核子自由度是核内核子中逸出的部分子组成的色单态集团. 另外,由于核内部分子在核子运动方向上的不确定性,致使较小 x 的部分子的运动范围进入邻近核子,成为几个核子的共用部分子. 在考虑了部分子逸出与共用的因素后,用有效核子质量一个参数,计算了束缚核子的结构函数,所得结果和 NMC 组最新实验数据符合甚好.

关键词 部分子 核子结构函数 核效应

1982年,欧洲 μ 子实验合作组(European Muon Collaboration,简称EMC)用 μ 子在氢、氘和铁靶上做深度非弹性散射实验,发现束缚在原子核内核子的结构函数,即核内核子的夸克动量分布,与自由核子的明显不同^[1],这就是EMC效应. 它反映了核环境可以影响核子的内部结构. EMC效应发现以后,人们进行了大量的带电轻子的深度非弹性散射实验,通过测量质量为 A_1 的核的平均结构函数 $F_2^{A_1}(x)$ 与质量为 A_2 的核的平均结构函数 $F_2^{A_2}(x)$ 之比来研究核子结构函数的核效应. 最近,新 μ 子实验合作组(New Muon Collaboration,简称NMC)^[2]报告了它们测量 $F_2^{\text{He}}/F_2^{\text{D}}$, $F_2^{\text{Li}}/F_2^{\text{D}}$, $F_2^{\text{C}}/F_2^{\text{D}}$, $F_2^{\text{Ca}}/F_2^{\text{D}}$, $F_2^{\text{Ca}}/F_2^{\text{Li}}$, $F_2^{\text{Ca}}/F_2^{\text{C}}$ 的最新实验结果,其数据的覆盖范围为 $10^{-4} < x < 0.5$. 这些数据表明,对于 $R(x) = F_2^{A_1}(x)/F_2^{A_2}(x)$,如果 A_1 比 A_2 大,那么,当 $x < 0.05$ 时, $R(x)$ 比1小,称之为遮蔽区;当 $0.05 < x < 0.15$ 时, $R(x)$ 比1稍大一点儿,称之为反遮蔽区;当 $0.15 < x < 0.5$ 时, $R(x)$ 随 x 下降,该区域常称为EMC区. 此外, NMC的实验结果还指出: 结构函数之比 $R(x)$ 没有明显的 Q^2

1997-08-19收稿

*国家及河北省自然科学基金资助

依赖.

在考虑了核内部分子从核子中逸出及被邻近核子共用的因素后, 导出了束缚核子结构函数的解析表达式, 其中只包含有效核子质量一个参数, 由此得到的理论结果与 NMC 最新实验数据符合甚好.

在深度非弹性散射实验中, Bjorken 标度变量的定义为:

$$x = \frac{Q^2}{2M_N v}, \quad (1)$$

式中, M_N 是自由核子的质量. 如果忽略核环境对核子内部结构的影响, 它和核内核子中部分子的动量分数

$$z = \frac{p_{\text{parton}}}{p_N}, \quad (2)$$

(p_N 和 p_{parton} 分别是在无限大动量参照系中核内核子和核子中部分子的纵向动量) 应当是相同的. 或者说, 这个结论只对自由核子才是正确的. 实际上, 在核介质中, 核内核子中部分子的动量分数为

$$z = \frac{Q^2}{2M_N^* v}, \quad (3)$$

其中 M_N^* 是核内核子的有效质量. 由于核环境对核子内部结构的影响, 使得束缚核子的有效质量小于自由核子的质量, 因此, $z > x$. 另外, 对于核内核子中的部分子而言,

$$\begin{aligned} z &= \frac{p_{\text{parton}}}{p_N} = \frac{p_{\text{parton}}}{p_A} \left(\frac{p_N}{p_A} \right)^{-1} = \frac{Q^2}{2M_A v} \left(\frac{p_N}{p_A} \right)^{-1} \\ &\simeq \frac{1}{A} \frac{Q^2}{2M_N v} \left(\frac{p_N}{p_A} \right)^{-1} = \frac{x}{A} \left(\frac{p_N}{p_A} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

于是,

$$Ap_N < p_A. \quad (5)$$

因此, 其它的动量只有归因于核子之外的物质, 即核内非核子自由度的存在.

我们认为, 在核介质中, 核子内的海夸克和胶子会形成暂时的色单态集团而逸出核子, 在核内核子间传递动量, 这种从核子中逸出的色单态集团不属于任何核子, 是核内非核子自由度. 考虑到这种形成色单态集团的过程只与核子内的色分布有关, 而与海夸克的动量分数无关, 因此, 可以假设在这种色单态集团中, 海夸克和胶子的动量分布与核子中的海夸克和胶子的动量分布相同, 只是两种分布的归一化方式不同. 在无限大动量参照系内, 定义 β , 使 $A\beta p_N$ 表示核内非核子自由度 (即从核子中逸出的色单态集团) 的总动量. 按照上面的假设, 可以得到逸出的海夸克的动量为 $AS\beta / (G + S)$, 逸出的海夸克的动量分布为 $A\beta P_S(x) / (G + S)$, 这里, G 和 S 分别是核子内胶子和海夸克所携带的核子的总动量分数, $P_S(x)$ 是核子中海夸克的动量分布函数.

此外, 还应注意, 在核介质中, 核内部分子在核子运动方向上的位置具有很大的不确定性, 这种不确定性取决于核内部分子的动量分数 z . 当核内部分子的纵向尺度大于两

核子之间的距离 d_0 时, 即当 $\frac{1}{z p_N} > d_0 \frac{M_N^*}{p_N}$ 或等价地 $z < \frac{1}{d_0 M_N^*}$ 时, 该部分子的运动范围就会进入邻近核子, 从而参与邻近核子内部分子的演化. 由于从物理上无法分辨该部分子是属于哪一个核子, 所以称之为核子的“共用部分子”. 显然, z 越小, 部分子的纵向不确定性就越大, 共用它的核内核子就越多. 用 $n_A(z)$ 来描述动量分数为 z 的部分子被原子核内多少核子共用, $n_A(z)$ 的数值可以用几何方法直接获得¹⁾. 值得注意的是, 对于价夸克而言, 由于其带有核子的量子数, 因此它既不可能逸出核子, 也不可能被邻近核子共用.

考虑以上因素, 可以得到原子核的动量 P_A 的表达式:

$$p_A = p_N \int dz \left\{ \frac{A}{n_A(z)} [zg(z) + zs(z)] + Azv(z) \right\} + A\beta p_N = A(1 + \beta - \delta)p_N, \quad (6)$$

其中 $v(z)$, $s(z)$, $g(z)$ 分别是自由核子中价夸克, 海夸克和胶子的分布函数, 并且,

$$\delta \equiv \int dz \frac{n_A(z) - 1}{n_A(z)} [zg(z) + zs(z)], \quad (7)$$

根据(1)和(3)式, 在深度非弹性散射过程中, 束缚核子中部分子的真实标度变量应为

$$z = \frac{x}{z_0}, \quad (8)$$

式中, $z_0 = M_N^* / M_N$. 当不考虑 $x > 0.6$ 区域中的费米运动效应时, 可以认为实验探测到的只是核内核子的平均有效质量 M_N^* . 因此, 和从原子核结构分析得到的 $M_N^* \propto A^{1/3}$ ^[3] 相类似, $z_0 = 0.941 + 0.074A^{1/3}$ ^[4]. 于是,

$$\beta = \delta + \frac{1}{z_0} \frac{M_A}{AM_N} - 1. \quad (9)$$

在考虑了核内核子部分子的逸出和共用的因素之后, 可以得到质量数为 A 的, 同位旋标量靶核的平均结构函数:

$$\begin{aligned} F_2^A(x, Q^2) = & \frac{1}{1 - \delta(Q^2) + \beta(Q^2)} \left\{ \frac{5}{18} \frac{1}{z_0} p_v \left(\frac{x}{z_0}, Q^2 \right) \right. \\ & + \frac{5}{18} \frac{1}{n(x/z_0)} \frac{1}{z_0} p_s^{\text{ud}} \left(\frac{x}{z_0}, Q^2 \right) + \frac{1}{9} \frac{1}{n(x/z_0)} \frac{1}{z_0} p_s^s \left(\frac{x}{z_0}, Q^2 \right) \\ & \left. + \frac{\beta(Q^2)}{G(Q^2) + \mathcal{S}(Q^2)} \left[\frac{5}{18} \frac{1}{z_0} p_s^{\text{ud}} \left(\frac{x}{z_0}, Q^2 \right) + \frac{1}{9} \frac{1}{z_0} p_s^s \left(\frac{x}{z_0}, Q^2 \right) \right] \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

其中, $p_s^{\text{ud}}(x)$ 是 u, d, \bar{u} 和 \bar{d} 这四种海夸克的动量分布, p_s^s 是 s 和 \bar{s} 海夸克的动量分布, 分母 $1 - \delta + \beta$ 的引入是因为要对整个核的动量进行归一. 上式中, 由于在给定自由核子的部

1) 薛大力, 博士论文(中国科学院高能物理研究所, 1996)

分子分布函数后, δ 和 β 可以通过 (7) 和 (9) 式确定, 因此, z_0 或 M_N^* 是这种方法的唯一参数.

为了和 NMC 最新实验结果相比较, 利用 (10) 式计算了不同原子核平均核子结构 $F_2^A(x)$ 之比值 $R(x)$, $\partial(F_2^{\text{Li}} / F_2^{\text{D}}) / \partial(\ln Q^2)$ 和 $\partial(F_2^{\text{C}} / F_2^{\text{D}}) / \partial(\ln Q^2)$. 在计算中, 自由核子的夸克-胶子分布函数取自文献 [5], 计算结果与实验数据的比较如图 1、2 所示. 显见, 我们的结果与实验数据符合甚好.

总之, 在考虑了原子核内核子中部分子逸出和共用的基础上, 只用有效核子质量一个参数就得到了与 NMC 最新实验符合甚好的结果, 这意味着, 在核介质中, 非核子自由度中

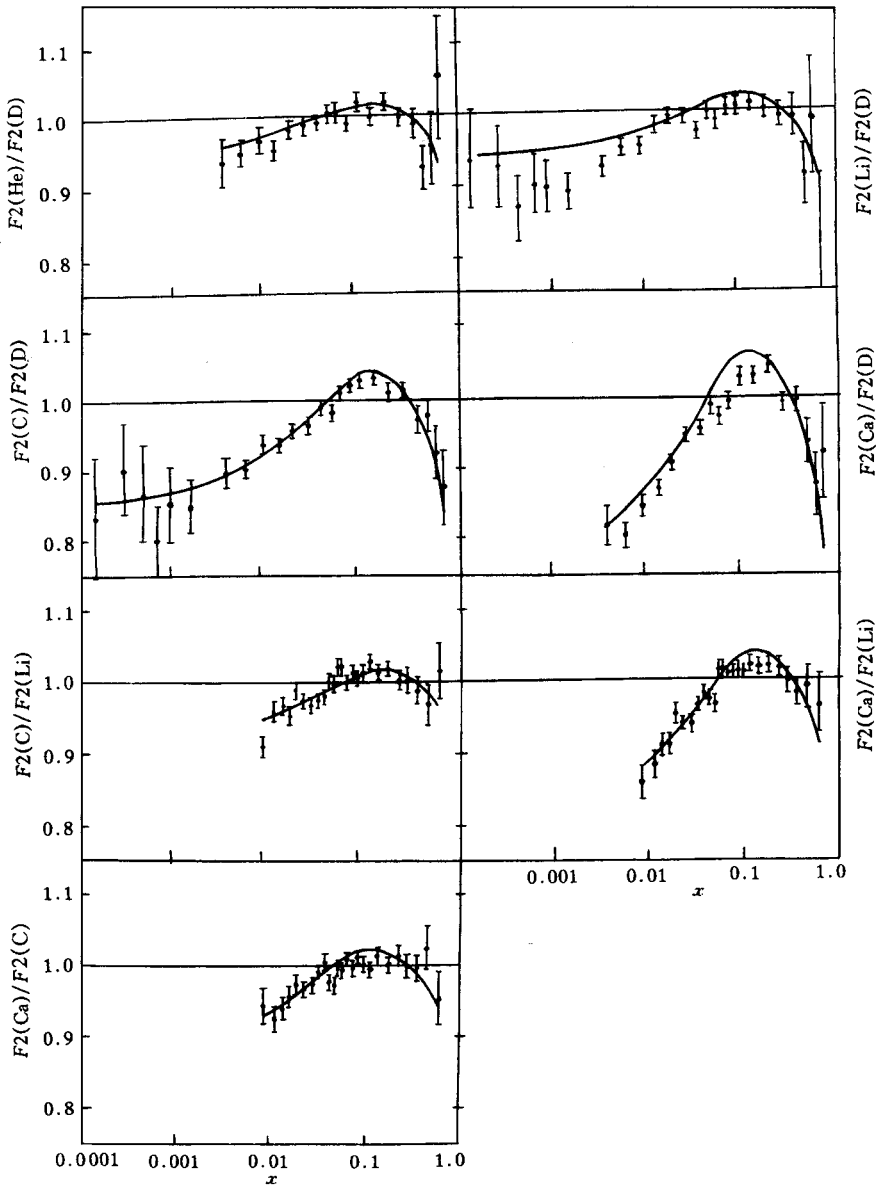


图 1

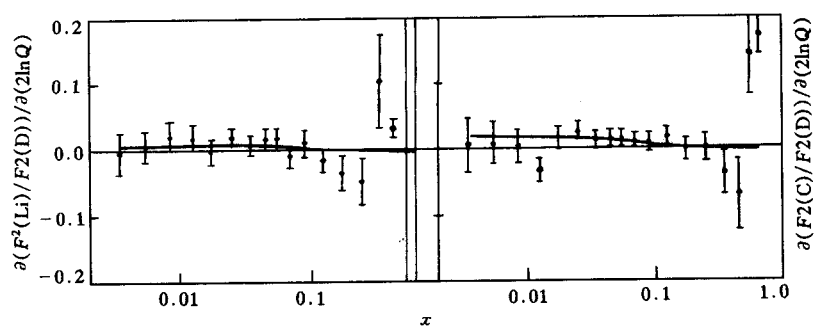


图 2

的部分子动量分布至少对于轻质量的核,例如 D, He, Li, C, Ca, 和自由核子中部分子的动量分布相类似. 对于较大质量的核,由于目前缺少这方面的精确实验,无法对这种方法作出检验. 另外,原子核内部分子逸出核子的微观机制是什么,如何区分逸出的部分子和共用的部分子等,都是需要进一步考虑的问题.

参 考 文 献

- [1] EMC Collab. Aubert J J et al. Phys. Lett., 1983, **123B**:275
- [2] NMC Arneodo M et al. Nucl. Phys., 1992, **441B**:3,12
- [3] Migdal A. in Theory of Finite Fermi Systems and Applications to Atomic Nuclei (Wiley, New York,1967)
- [4] Garcia Canal C A et al. Phys. Rev. Lett. 1984,**53**:1430
- [5] Gluck M, Reya E, Vogt A. Z. Phys., 1995, **67C**:433

Leakage and Overlap of the Partons Inside Nucleon and the Nuclear Effect on the Nucleon Structure Function^{*}

Duan Chungui He Zhenmin

(Physics Department, Hebei Teachers' University, Shijiazhuang 050016)

Zhang Ligang

(Physics Department, Wuhan Metallurgy Technology and Science University, Wuhan 43000)

Xue Dali Li Guanglie

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract In the nuclear medium, there are the non-nucleonic components. The leak-out partons, which form some colour-singlet parton clusters, are the origin of the non-nucleonic components. Meanwhile, the small x partons become co-used by several nucleons because the partons' longitudinal size extends over more than one nucleon. The nucleon effective mass can be successfully used as the only free parameter to adjust the structure function ratios recently measured by NMC.

Key words the partons, nucleon structure function, the nuclear effect

Received 19 August 1997

^{*} Supported by the National Natural Science Foundation of China and Hebei Province