

统一描述 EMC 效应, 核 Drell-Yan 过程和 J/ ψ 光生过程的一个简单模型

朱亚波

(中国矿业大学物理教研室 徐州 221008)

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要

通过引入一个用来描述核遮蔽与反遮蔽效应的海夸克和胶子的重组因子, 结合 x 重新标度模型, 在保持核动量守恒的条件下, 统一描述 EMC 效应, 核 Drell-Yan 过程和 J/ ψ 光生过程, 获得满意的结果。

关键词 EMC 效应, 核 Drell-Yan 过程, J/ ψ 光生过程.

1 引 言

自从 1982 年欧洲 μ 子实验合作组通过 μ 子在氢、氘和铁靶上做深度非弹性散射实验发现 EMC 效应以后^[1], 核内可能存在夸克-胶子效应已受到核物理学界的广泛关注. 近年来, 围绕着对 EMC 效应的解释, 人们提出了许多理论模型, 如夸克集团模型^[2], Q^2 或 x 重新标度模型^[3], 组分夸克模型^[4] 和分子演化模型^[5] 等. 上述模型在解释 EMC 效应方面均获得一定的成功, 但是, EMC 效应的物理本质究竟是什么, 目前尚无定论. 八十年代中期, Bickerstaff 等^[6] 利用不同的 EMC 效应理论模型给出的夸克分布计算了铁核与氘核的 Drell-Yan 过程微分散射截面之比, 结果发现, 不同的模型所预言的结果相差很大. 由此, 随着核 Drell-Yan 过程实验技术精度的提高, 核 Drell-Yan 过程已成为检验各种 EMC 效应理论模型优劣的一个重要手段.

厉光烈等^[7] 指出: 在考虑费米运动修正和核束缚能效应的基础上, 进一步引入 x 重新标度机制, 可以较好地解释 EMC 效应, 但是, 核动量出现不守恒. 针对这个问题, 我们在 x 重新标度模型基础上, 引入了一个用来描述核遮蔽与反遮蔽效应的海夸克和胶子的重组因子, 在保持核动量守恒的前提下, 计算了铁核与氘核平均结构函数比, 铁和钙等核与氘核的 Drell-Yan 过程微分散射截面比, 以及与 J/ ψ 光生过程有关的锡核对碳核的胶子分布比, 结果均与实验符合较好.

2 重组因子与 x 重新标度模型

在小 x 区域, 核内核子中的海夸克和胶子有可能逸出核子与邻近核子中的海夸克和胶子发生空间重叠, 并相互作用, 导致核内海夸克与胶子重新分布, 从而出现实验上已观测到的核遮蔽与反遮蔽效应. 为了描述这种核遮蔽与反遮蔽效应, 对海夸克和胶子的动量分布引入一个重组因子:

$$R(x, A) = \begin{cases} \lambda_A & x > x_n \\ \lambda_A \left[1 - K_A \frac{\Delta V_A(x)}{V_A(x)} \right] & 0 < x \leq x_n \end{cases}, \quad (1)$$

这里, $\Delta V_A / V_A$ 是文献 [7] 给出的空间重叠因子:

$$\frac{\Delta V_A(x)}{V_A(x)} = 1 - \frac{4}{3} m_N x r_N(A), \quad (2)$$

$$r_N(A) = r_N [1 + 0.562 \ln(2 - A^{-1/3})], \quad (3)$$

x_n 是根据 $\Delta V_A(x) / V_A(x) = 0$ 定出的发生核遮蔽效应的 x 临界值, m_N 和 r_N 分别是自由核子的质量与半径, 在计算中取 $r_N = 0.85 \text{ fm}$.

采用引入重组因子的 x 重新标度模型, 核内核子中价夸克、海夸克和胶子的分布函数可分别给出为:

$$q_V^A(x, Q^2) = q_V^N(\delta_A \cdot x, Q^2); \quad (4)$$

$$q_S^A(x, Q^2) = R(x, A) \cdot q_S^N(\delta_A \cdot x, Q^2); \quad (5)$$

$$G^A(x, Q^2) = R(x, A) \cdot G^N(\delta_A \cdot x, Q^2). \quad (6)$$

其中 q_V^N, q_S^N, G^N 是自由核子中价夸克、海夸克及胶子的分布函数, 其具体形式取自文献 [8]. 应当指出: 考虑到核动量守恒, 上述方程组中的三个参数 (x 重新标度参数 δ_A 和重组因子中的两个参数 λ_A, K_A) 中只有两个是可调的, 它们可以通过拟合 EMC 效应, 核 Drell-Yan 过程和 J / ψ 光生过程的实验数据来确定.

3 对 EMC 效应的解释

对于轻子与原子核的深度非弹性散射, 当采用引入重组因子的 x 重新标度模型, 并考虑到费米运动和核束缚能效应时, 原子核的结构函数为:

$$F_{2A}(x, Q^2) = \int_x^A dz \cdot f(z) F_2^{N(A)}\left(\frac{x}{z}, Q^2\right), \quad (7)$$

$f(z)$ 是核内核子费米运动几率分布, $F_2^{N(A)}$ 是核内核子结构函数,

$$F_2^{N(A)} = \sum_f e_f^2 x [q_f^A(x, Q^2) + \bar{q}_f^A(x, Q^2)]. \quad (8)$$

原子核的平均结构函数为:

$$F_2^A(x, Q^2) = \frac{1}{A} \left[F_{2A}(x, Q^2) - \frac{1}{2} (N-Z) \cdot (F_2^n(x, Q^2) - F_2^p(x, Q^2)) \right], \quad (9)$$

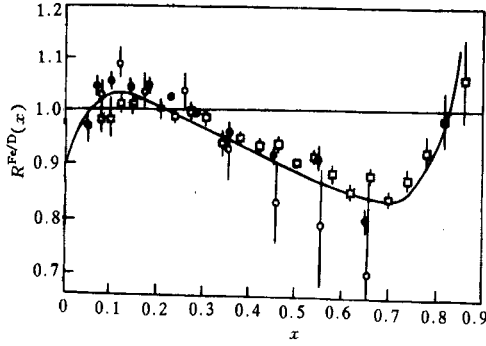


图 1 $R^{Fe/D}$ 的理论值与实验值的比较

- SLAC 1983 Fe/D;
- BCDMS 1986 Fe/D;
- EMC 1986 Cu/D.

式中, A , N 和 Z 分别代表原子核的质量数, 中子数和质子数, F_2^p (F_2^n) 表示自由质子 (中子) 的结构函数.

为了与实验数值进行比较, 定义比值:

$$R^{A/D}(x, Q^2) = F_2^A(x, Q^2) / F_2^D(x, Q^2), \quad (10)$$

考虑到氘核结合能甚小, 其内核子几乎处于自由状态, (10) 式中的 F_2^D 常代之以自由核子结构函数. 将 (4), (5) 两式代入 (8) 式, 再通过 (7) 式, (9) 式和 (10) 式计算出铁与氘的平均结构函数比 $R^{Fe/D}$. 计算中, 铁的 δ_A , K_A 的取值见表 1. 计算结果见图 1 所示的连续曲线, 从与实验点的比较来看, 理论结果与实验结果符合甚好. 图 1 中实验点取自文献 [9].

4 解释核 Drell-Yan 过程

高能强子束流入射到原子核靶上, 产生大质量的轻子对, 该轻子对的产生过程, 体现出与核环境相关的核效应, 这便是核 Drell-Yan 过程^[10]:

$$h + A \rightarrow \mu^+ \mu^- + X.$$

在入射强子束流与靶核的相互作用过程中, 由于靶核内核子间的束缚能远小于入射强子的能量, 故强子与原子核的碰撞可视为其与核内所有核子碰撞的非相干性叠加. 根据强子与强子碰撞的反应截面, 得出强子在原子核 A 内每个核子上的平均散射截面^[13]:

$$\frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2} = K(x_F, Q^2) \frac{4\pi\alpha^2}{9M^2} \cdot \sum_f e_f^2 [q_f^h(x_1, Q^2) \bar{q}_f^A(x_2, Q^2) + \bar{q}_f^h(x_1, Q^2) q_f^A(x_2, Q^2)], \quad (11)$$

式中, α 是精细结构常数, M 为轻子对的质量, $q_f^{h(A)}(x)$ 和 $\bar{q}_f^{h(A)}(x)$ 是强子 (原子核) 内, 味为 f 的夸克与反夸克的动量分布几率, $K(x_F, Q^2)$ 是量子色动力学 (QCD) 修正因子, 其数值接近 2. 令:

$$H^{hA}(x_1, x_2, Q^2) = \sum_f e_f^2 [x_1 q_f^h(x_1, Q^2) x_2 \bar{q}_f^A(x_2, Q^2) + x_1 \bar{q}_f^h(x_1, Q^2) x_2 q_f^A(x_2, Q^2)], \quad (12)$$

于是 (11) 式可简写为:

$$\frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2} = K(x_F, Q^2) \frac{4\pi\alpha^2}{9M^2 x_1 x_2} H^{hA}(x_1, x_2, Q^2). \quad (13)$$

考虑到:

$$M^2 = s x_1 x_2, \quad (14)$$

则将 (13) 式进一步写为:

$$\frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2} = K(x_p, Q^2) \frac{4\pi\alpha^2}{9s x_1^2 x_2^2} H^{hA}(x_1, x_2, Q^2), \quad (15)$$

式中 s 代表在入射强子与靶核质心系中系统总能量的平方.

若原子核 A 的质量数为 A , 质子数为 Z 对于入射强子流为质子的情况:

$$\begin{aligned} H^{pA}(x_1, x_2, Q^2) &= \frac{1}{54} x_1 [4u_v^p(x_1, Q^2) + d_v^p(x_1, Q^2)] \cdot x_2 S^A(x_2, Q^2) \\ &+ \frac{1}{54A} x_1 \cdot S^p(x_1, Q^2) \cdot [(A + 3Z)x_2 u_v^A(x_2, Q^2) \\ &+ (4A - 3Z) \cdot x_2 d_v^A(x_2, Q^2) + 2x_2 A S^A(x_2, Q^2)]. \end{aligned} \quad (16)$$

对于入射强子流为中子的情况:

$$\begin{aligned} H^{nA}(x_1, x_2, Q^2) &= \frac{1}{54} x_1 [u_v^n(x_1, Q^2) + 4d_v^n(x_1, Q^2)] \cdot x_2 S^A(x_2, Q^2) \\ &+ \frac{1}{54A} x_1 \cdot S^n(x_1, Q^2) \cdot [(A + 3Z)x_2 u_v^A(x_2, Q^2) \\ &+ (4A - 3Z) \cdot x_2 d_v^A(x_2, Q^2) + 2x_2 A S^A(x_2, Q^2)]. \end{aligned} \quad (17)$$

这里, 只考虑了 u, d, s 三种味的夸克.

定义积分比值:

$$T^{A/D}(x_2, Q^2) = \frac{\int \frac{d^2\sigma^{hA}}{dx_1 dx_2} \cdot dx_1}{\int \frac{d^2\sigma^{hD}}{dx_1 dx_2} \cdot dx_1} = \frac{\int \frac{H^{hA}(x_1, x_2, Q^2)}{x_1^2} \cdot dx_1}{\int \frac{H^{hD}(x_1, x_2, Q^2)}{x_1^2} \cdot dx_1}, \quad (18)$$

为了与实验进行比较, (18) 式中的积分范围根据文献 [11] 给出的动力学范围确定, 具体为: $\sqrt{s} = 40$, $4 < M < 9$ 和 $M > 11$, $x_1 - x_2 > 0$. 分别计算了 C, Fe, Ca, W 等核与氘核的 Drell-Yan 比值, 结果见图 2, 理论曲线与实验数据符合较好. 图上的实验数据取自文献 [11], 计算中的参数取值见表 1.

5 对 J / ψ 光生过程解释

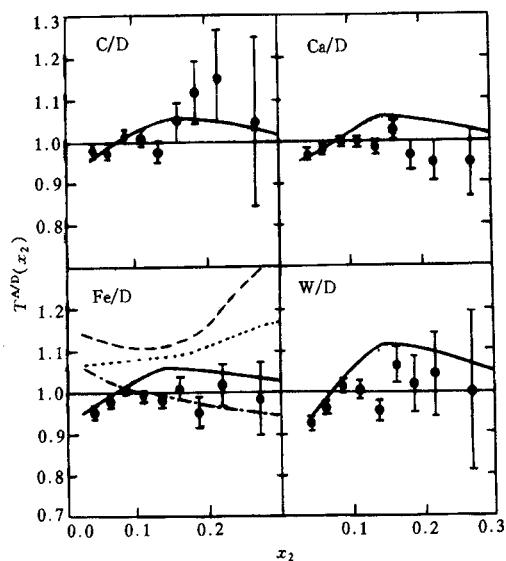
最近 NMC 实验合作组, 用 μ 子在 Sn 和 C 靶上做了 J / ψ 光生过程实验^[12]. 他们的实验结果表明 $R_{in}^{Sn/C}(x)$ 的平均值为 1.13 ± 0.08 , 而 R_{in} 正反映了 Sn 和 C 核内胶子贡献的比, 即:

$$R_{in}^{Sn/C}(x) = G_{Sn}(x) / G_C(x). \quad (19)$$

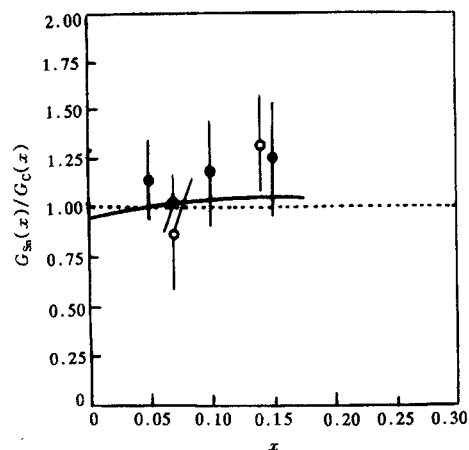
图 3 是 $R_{in}^{Sn/C}(x)$ 的理论值与实验值的比较, 图上实线是我们根据 (6) 式和 (19) 式作出的 Sn 和 C 胶子分布比的理论曲线. J / ψ 光生过程实验说明: 核内确实存在着胶子分布的核效应, 即束缚核子中的胶子与自由核子中的胶子的动量分布不同. 理论曲线也说明了这个事实. 计算中参数取值见表 1 (在研究中, 我们发现参数 δ_A 和 K_A 对 Q^2 依赖很弱).

表 1

参数	C	Ca	Fe	Sn	W
δ_A	1.025	1.025	1.025	1.03	1.03
K_A	0.18	0.18	0.2	0.3	0.3

图 2 $T^{N/D}$ 的理论值与实验值的比较

--- π 盈余模型; ... 夸克集团模型;
- · - Q^2 重新标度模型; 一 本文的模型.

图 3 $G_{Sn}(x)/G_C(x)$ 的理论值与实验值的比较

○ 200 GeV; ● 280 GeV.

6 结 论

通过引入重组因子考虑小 x 区域的核遮蔽与反遮蔽效应, 结合 x 重新标度模型, 在保证核动量守恒条件下, 解释了 EMC 效应, 并检验了核 Drell-Yan 过程, J/ψ 光生过程, 结果与实验都符合得甚好. 这表明引入重组因子的 x 重新标度模型是描述 EMC 效应的一个简单的较好的模型.

本文得到了杨建军副教授的热情帮助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] J. J. Aubert *et al.*, *Phys. Lett.*, **B123**(1983)275.
- [2] C. E. Carlson, T. J. Havens, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)261.
- [3] F. E. Close, R. G. Roberts, G. G. Ross, *Phys. Lett.*, **B129**(1983)346.
- [4] W. Zhu, J. G. Shen, *Phys. Lett.*, **B235**(1990)170.
- [5] J. J. Yang *et al.*, *Can. J. Phys.*, **70**(1992)114; G. L. Li *et al.*, *Phys. Rep.*, **242**(1994)505.
- [6] R. P. Bickerstaff, M. C. Birse, G. A. Miller, *Phys. Rev.*, **D33**(1986)3228.

- [7] G. L. Li, Z. J. Cao, C. S. Zhong, *Nucl. Phys.*, **A509**(1990)757.
- [8] M. Gluck, E. Reya, A. Vogt, *Z. Phys.*, **C67**(1995)433.
- [9] EMC and BCDMS Collab., *CERN Courier* **27**(1987)2.
- [10] Badier *et al.*, *Phys. Lett.*, **B104**(1981)335;
A. S. Ito *et al.*, *Phys. Rev.*, **D23**(1981)604;
M. Binkley *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976)571.
- [11] D. M. Alde *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990)2479.
- [12] NMC, P. Amouduz *et al.*, *Nucl. Phys.*, **B371**(1992)553.
- [13] I. R. Kenyon, *Pep. Prog. Phys.*, **45**(1982)1261.

A Simple Model Describing EMC Effect, Nuclear Drell-Yan Process and Inelastic J/ψ Production

Zhu Yabo

(Physics Division, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008)

Li Guanglie

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

Received 17 December 1996

Abstract

A recombination factor is employed which can describe the nuclear shadowing and antishadowing effects in the small x region. Based on the consideration of the nuclear momentum conservation, a unified description of the EMC effect, nuclear Drell-Yan process and inelastic J/ψ production is given in terms of the x -rescaling model with the recombination factor.

Key words EMC effect, nuclear Drell-Yan process, inelastic J/ψ production.