

改进的 Q^2 -重标度模型与部分子 分布函数的核效应*

姚晓霞 何祯民 段春贵

(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

厉光烈 彭宏安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039) (北京大学物理系 北京 100871)

1996-05-03 收稿

摘 要

针对原有的 Q^2 -重标度模型中存在的问题, 提出了改进的 Q^2 -重标度模型, 利用核动量守恒条件, 采取对价夸克、海夸克、胶子进行不同的 Q^2 -重标度来描述束缚核子内部分子动量分布. 利用改进的 Q^2 -重标度模型所得到的束缚核子内部分子分布函数, 对轻子-核深度非弹性散射过程, 核 Drell-Yan 过程及 J/ψ 光生过程均给出较满意的解释.

关键词 部分子分布函数, 核效应, Q^2 -重标度模型.

1 引 言

1982年, 欧洲 μ 子合作组(EMC)实验发现, 束缚在原子核中的核子的结构函数与自由核子的结构函数明显不同^[1], 这就是 EMC 效应. 自 EMC 效应发现以后, 出现了很多解释它的理论模型, 这些理论模型都可以较好地解释 EMC 效应, 但是不同的理论模型所给出的核 Drell-Yan 过程的反应截面比很不相同^[2]. 并且除了组分夸克模型与加入遮蔽因子的 Q^2 -重标度模型外, 其他模型还没有对 J/ψ 光生过程给出可能的描述.

Q^2 -重标度模型是用来解释 EMC 效应的较早的和较成功的模型之一. 该模型可以解释中等 x 区轻子-核深度非弹性散射过程(DIS 过程)和核 Drell-Yan 过程中的核效应, 对这两个过程中小 x 区核效应的解释不尽如人意. 另外当用 Q^2 -重标度模型解释胶子分布函数的核效应时, 发现理论计算明显和实验数据不符. 针对 Q^2 -重标度模型存在的问题, 我们提出改进的 Q^2 -重标度模型. 此模型能在保持核动量守恒的前提下统一地说明 DIS 过程、核 Drell-Yan 过程和 J/ψ 光生过程中的核效应. 因此我们认为新的模型是解释各类核过程中的核效应的一个更完善的模型.

* 国家自然科学基金和河北省自然科学基金及省教委资助.

本文第二节介绍了改进的 Q^2 -重标度模型; 第三节利用改进的 Q^2 -重标度模型对 DIS 过程、核 Drell-Yan 过程和 J/ψ 光生过程中的核效应给出了较满意的解释; 最后一节做了简短的结论.

2 改进的 Q^2 -重标度模型

Q^2 -重标度模型认为, 在核子内夸克通过交换胶子相互作用, 结构函数 $F_{1,2}$ 不仅与 x 有关, 而且与 Q^2 有关. 另外, 核子结构函数随 Q^2 增大而移向低动量端, 即标度无关性破坏^[4]. F. E. Close 等发现, 核子结构函数随 Q^2 的变化与 EMC 效应所反映的核内核子平均结构函数随 A 的变化趋势极为相似^[5]. 因此, 他们假定

$$F_2^A(x, Q^2) = F_2^N(x, \xi_A(Q^2)Q^2), \quad (1)$$

即在 Q^2 下束缚核子的结构函数等同于在 $\xi_A Q^2$ 下自由核子的结构函数, 这就是所谓 Q^2 -重标度模型. 在物理上, $\xi_A(Q^2) > 1$ 可解释为原子核内动量标度变小, 有效的 Q^2 变大, 或者说夸克禁闭半径变大, 按测不准关系, 部分子分布向低动量端转移.

用 F. E. Close 的 Q^2 -重标度模型解释 DIS 过程中的核效应时, 其适用范围是 $0.2 < x < 0.7$. 在小 x 区, Q^2 -重标度模型和实验结果出现较大的偏离(见图 1 虚线). 后来 F. E. Close 等引进了核遮蔽因子解释了小 x 区的核遮蔽效应^[6]. Q^2 -重标度模型对核 Drell-Yan 过程的解释只有在 $x > 0.1$ 时才能和实验数据比较符合, 却不能说明小 x 区的实验数据(见图 2 虚线). 当我们用 Q^2 -重标度模型解释胶子分布函数的核效应时, 发现理论计算明显和实验数据不符(见图 3 虚线).

为了在不加入遮蔽因子的情况下就能解释小 x 区域的核效应(所谓核遮蔽效应), 力求能统一地说明轻子-核深度非弹性散射过程、核 Drell-Yan 过程和 J/ψ 光生过程中的核效应, 并保持核动量守恒. 我们在 Q^2 -重标度模型的基础上提出了改进的 Q^2 -重标度模型.

改进的 Q^2 -重标度模型对价夸克, 海夸克, 胶子分别引入了不同的 Q^2 -重标度参数 ξ_V , ξ_S , ξ_G . 因此, 束缚核子中价夸克、海夸克和胶子的动量分布函数可分别表示为:

$$V^A(x, Q^2) = V^N(x, \xi_V Q^2), \quad (2)$$

$$S^A(x, Q^2) = S^N(x, \xi_S Q^2), \quad (3)$$

$$G^A(x, Q^2) = G^N(x, \xi_G Q^2). \quad (4)$$

改进的 Q^2 -重标度模型要求价夸克的重标度参数 $\xi_V > 1$. 这是从 Close 的 Q^2 -重标度模型继承过来的. 因为 Q^2 -重标度模型成功地解释了中等 x 区 DIS 中的核效应. 而这个区域, 核子中动量分布以价夸克为主.

Q^2 -重标度模型对 DIS 过程中小 x 区核遮蔽效应的解释和实验不符. 而小 x 区海夸克的分布函数远大于价夸克的分布函数, 所以小 x 区的核效应主要来源于海夸克的分布变化. 因此我们考虑重新假定海夸克的重标度参数.

何祯民等^[7]认为 $F_2(x, Q^2)$ 是核子内价夸克分布 $q_{iV}(x, Q^2)$ 和海夸克分布 $q_{iS}(x, Q^2)$ 的

组合表式, $R(x, Q^2) = F_2^A(x, Q^2) / F_2^N(x, Q^2)$ 反映这两者受核介质影响的综合结果, 并未分别反映出两者各自的变化. 他们从轻子-核深度非弹性散射及质子-核碰撞的 Drell-Yan 过程微分截面的实验结果解出了价夸克和海夸克分布函数的核效应 $R_V^A(x, Q^2)$ 和 $R_S^A(x, Q^2)$ 的大小. 从计算结果中发现, 价夸克和海夸克的核效应确实存在着明显差别, 而且在小 x 区 $R_V^A(x, Q^2)$ 随 x 的增大而减小, 从大于 1 变为小于 1, 因此价夸克动量分布“软化”. 而 $R_S^A(x, Q^2)$ 在小 x 区随 x 的增大而增大, 从小于 1 变为大于 1, 海夸克动量分布“硬化”. 故如果想利用 Q^2 -重标度模型由自由核子的海夸克动量分布得到束缚核子的海夸克动量分布, 海夸克分布函数中的 Q^2 应该乘以一个小于 1 的重标度因子. 在厉光烈等人的双 x 重标度模型中^[3], 考虑到价夸克和海夸克的相互作用方式不同, 并且为了保持核动量守恒, 对价夸克和海夸克采取了不同的重标度参数. 其中海夸克的重标度参数也小于 1. 基于以上理由, 在改进的 Q^2 -重标度模型中海夸克的重标度参数 ξ_S 应该小于 1.

束缚核子中胶子的变化是比较复杂的, 有生成也有分裂, 也就是说, 胶子的数目是难以预料的. 但由胶子分布函数核效应的实验结果分析, ξ_G 应该小于 1.

改进的 Q^2 -重标度模型将根据以上原则确定 ξ_V , ξ_S , ξ_G . 由于三者通过核动量守恒相联系, 所以实际上只有两个自由参数. 具体做法是, 先适当选取 ξ_V , ξ_S 解释轻子-核 DIS 过程; 用核 Drell-Yan 过程检验 ξ_V , ξ_S 取值是否合理; 然后根据核动量守恒条件确定 ξ_G , 再去解释 J/ψ 光生过程.

我们用改进的 Q^2 -重标度模型去拟合实验数据时, 对 C 和 Sn 的 Q^2 -重标度参数 ξ_V , ξ_S , ξ_G 的取值见表 1.

表 1

A	ξ_V	ξ_S	ξ_G
Sn	3.0	0.4	0.1217
C	1.4	0.7	0.1751

物理上, $\xi_V > 1$ 可以解释为: 束缚核子变胖, 按测不准关系, 价夸克动量分布函数向 x 小的方向移动, 即所谓价夸克动量分布“软化”. ξ_S 和 ξ_G 小于 1 可以理解为: 在小 x 区域, 海夸克和胶子是核子中的主要成分. 根据测不准关系, x 足够小的海夸克和胶子的空间分布范围会大于核子的尺寸而溢出, 而来自于相邻核子的这些海夸克和胶子的空间分布发生重叠. 这些海夸克与胶子可以融合组成为稍大 x 的海夸克和胶子^[8], 导致海夸克和胶子分布适度“硬化”. 当然, 这个问题仍需要从理论上进一步深入研究.

在改进的 Q^2 -重标度模型中, 束缚核子的结构函数和胶子分布函数分别为:

$$F_2^A(x, Q^2) = F_2^N(\xi_V, \xi_S, x, Q^2) \\ = x \left[\frac{5}{18} V^N(x, \xi_V Q^2) + \frac{2}{9} S^N(x, \xi_S Q^2) + \frac{4}{9} C^N(x, \xi_S Q^2) \right] \quad (5)$$

和

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

于是束缚核子的结构函数和胶子分布函数的核效应的 R 值分别为:

$$R_0^{A/D}(x) = F_2^A(x, Q^2) / F_2^D(x, Q^2), \quad (7)$$

和

$$R_G^{A/D}(x) = G^A(x, Q^2) / G^D(x, Q^2). \quad (8)$$

另外, 在改进的 Q^2 -重标度模型中, 质量数为 A 的靶核和氘核的核 Drell-Yang 过程散射截面比为:

$$T^{A/D}(x) = \left[\int \frac{d^2\sigma^{P-A}(x, x_b, \xi Q^2)}{dx dx_b} dx \right] / \left[\int \frac{d^2\sigma^{P-D}(x, x_b, \xi Q^2)}{dx dx_b} dx \right] \quad (9)$$

其中,

$$\frac{d^2\sigma^{P-A}}{dx dx_b} = \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \right) \sum e_f^2 [q_f^P(x) \bar{q}_f^A(x_b, \xi_v, \xi_s, Q^2) + \bar{q}_f^P(x) q_f^A(x_b, \xi_v, \xi_s, Q^2)], \quad (10)$$

$$\frac{d^2\sigma^{P-D}}{dx dx_b} = \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \right) \sum e_f^2 [q_f^P(x) \bar{q}_f^D(x_b, Q^2) + \bar{q}_f^P(x) q_f^D(x_b, Q^2)]. \quad (11)$$

3 改进的 Q^2 -重标度模型对三类核过程的解释

对自由核子的核子结构函数 $F_2^N(x, Q^2)$ 采用 Marfin-Tung 的最新拟合结果^[9], 并且取 $\Lambda = 0.191 \text{ GeV}^2$, $Q_0^2 = 4 \text{ GeV}^2$. 利用改进的 Q^2 -重标度模型计算了 Sn 核与 D 核及 C 核与 D 核 DIS 过程的 $R_Q(\text{Sn}/\text{D})$, $R_Q(\text{C}/\text{D})$, 计算结果如图 1 实线所示.

可以看到, 用改进的 Q^2 -重标度模型去拟合核子结构函数的核效应, 在不加遮蔽因子的情况下, 只是对价夸克, 海夸克采取了不同的 Q^2 -重标度参量, 就得到了与实验数

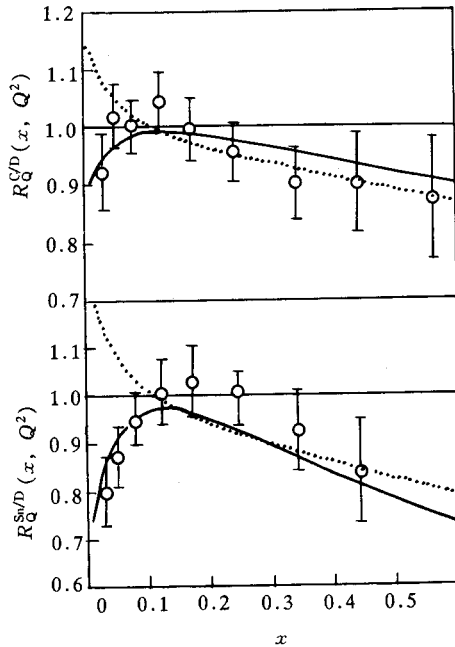


图 1

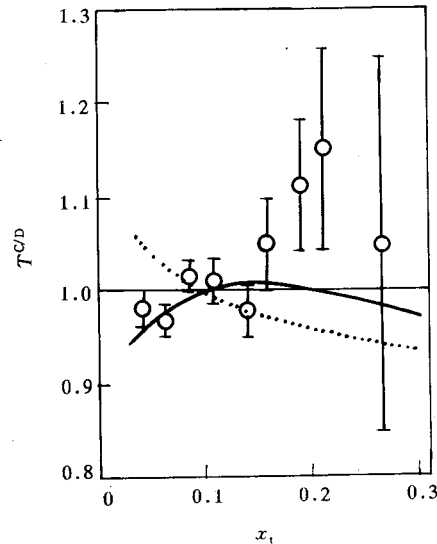


图 2

据符合相当好的结果: 在小 x 区自动出现了核遮蔽效应, R_0 值偏离 1 的程度随原子核质量数 A 的增加而增大, 符合 EMC 组的实验结果; 在中等 x 区的结果和 F. E. Close 的 Q^2 -重标度模型基本一致, 并和实验数据相吻合. 所以我们认为, 改进的 Q^2 -重标度模型可以更好地和较全面地解释核子结构函数的核效应.

由于不同的理论模型给出的核 Drell-Yan 过程的微分截面比很不相同^[2]. 因此对核 Drell-Yan 过程的正确解释成为检验模型正确性的一个重要的依据. 为了进一步检验改进的 Q^2 -重标度模型, 我们利用它计算了原子核 C 和 D 的核 Drell-Yan 过程的散射截面比 $T^{A/D}$ (与实验相对应, 计算中 x 的积分范围取为: $x \geq x_i$, $0.025 \leq x_f \leq 0.30$, $4\text{GeV} \leq M \leq 9\text{GeV}$, $M \geq 11\text{GeV}$, 质心系总能量为 40GeV), 计算结果如图 2 实线所示.

从图 2 可以看到, 改进的 Q^2 -重标度模型的计算结果基本上反映了核 Drell-Yan 过程的实验事实, 扭转了原有的 Q^2 -重标度模型的曲线与实验数据走向相反的趋势. 也就是说改进的 Q^2 -重标度模型在对核 Drell-Yan 过程的解释中要优于 Q^2 -重标度模型.

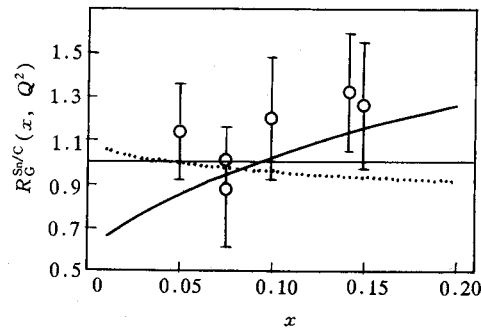


图 3

1992 年, NMC 组给出胶子分布函数的核效应的最新实验结果并澄清了以前的实验数据. 目前胶子分布函数的核效应成为人们的研究热点之一. 图 3 给出了改进的 Q^2 -重标度模型计算的 Sn 核和 C 核的胶子分布函数之比 $R_0(\text{Sn}/\text{C})$. 可以看到理论曲线和 NMC 的实验结果是基本相符的.

4 结 论

无论是深度非弹性散射、核 Drell-Yan 过程还是 J/ψ 光生过程, 都已成为人们研究核内夸克-胶子分布的重要实验手段. 通过这三类实验测得核子的部分子分布函数的核效应是否一致自然成为人们所关心的问题. 由于部分子分布函数的普适性和因子化定理, 能成功解释深度非弹性散射过程中核效应的模型也应该能很好的预言核 Drell-Yan 过程和 J/ψ 光生过程. 通过上面的工作, 可以看到改进的 Q^2 -重标度模型较好地做到了这一点. 这可能意味着改进的 Q^2 -重标度模型认为价夸克、海夸克和胶子的相互作用方式不同, 需要在动量守恒的基础上对三者采用不同的重标度参数的想法是有道理的. 尽管这个模型的理论基础还需要进一步探索, 但它确实反映了束缚核子内部分子分布的实验事实.

参 考 文 献

- [1] J. J. Aubert *et al.*, *Phys. Lett.*, **B123**(1983)275.
- [2] D. M. Alde *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990)2479.
- [3] G. L. Li, Z. J. Cao, C. S. Zhong, *Nucl. Phys.*, **A509**(1990)757;
G. L. Li, K. F. Liu, G. E. Brown, *Phys. Lett.*, **B213**(1988)531.
- [4] R. P. Bickerstaff *et al.*, *Phys. Rev.*, **D33**(1986)3229.

- [5] F. E. Close, R. G. Roberts, G. G. Ross, *Phys. Lett.*, **B129**(1983)346; R. L. Jaffe, *et al.*, *Phys. Lett.*, **B134**(1984)449; F. E. Close *et al.*, *Phys. Rev.*, **D31**(1985)1004.
- [6] F. E. Close, R. G. Roberts., *Phys. Lett.*, **B213**(1988)91.
- [7] 段春贵、何祯民、彭宏安, 河北师范大学学报, **19** 卷 2 期(1995)35.
- [8] S. Kumano, *Phys. Lett.*, **B298**(1993)171.
- [9] J. G. Morfin, W. K. Tung, *Z. Phys.*, **C52**(1991)13.

Improved Q^2 -Rescaling Model and the Nuclear Effect of Parton Distribution Functions

Yao Xiaoxia He Zhenmin Duan Chungui

(Department of Physics, Hebei Teacher's University, Shijiazhuang 050016)

Li Guanglie

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

Peng Hongan

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Received 3 May 1996

Abstract

Considering that the original Q^2 -rescaling model has some shortcomings in explaining the experimental data, we propose an improved Q^2 -rescaling model in which, in order to compensate for the loss of nuclear momentum, we employ different Q^2 -rescaling parameters for momentum distributions of valence quark, sea quark and gluons. By using improved Q^2 -rescaling model, We can well explain the experimental data of the EMC effect in the whole x region, the nuclear Drell-Yan process and J/ψ photoproduction process.

Key words parton distribution functions, nuclear effect, Q^2 -rescaling model.