

改进的双重 Q^2 重标度模型*

高永华¹⁾²⁾ 何祯民²⁾ 段春贵²⁾

¹⁾ 石家庄师范专科学校物理系, 石家庄 050801)

²⁾ 河北师范大学物理系, 石家庄 050016)

(2000 年 12 月 7 日收到)

提出了改进的双重 Q^2 重标度模型, 在保持核动量守恒的条件下, 用唯象的方法找到了一套重标度参数公式, 建立了重标度参数 ξ_v , ξ_s 及 ξ_g 与原子核平均结合能之间的联系. 利用该模型所得到的束缚核子内部分子分布函数, 对核 DIS 过程, 核 Drell-Yan 过程和 J/Ψ 光生过程均给出满意的解释.

关键词: 双重 Q^2 重标度模型, 核效应, 结合能

PACC: 1235H, 1385, 2530

1 引 言

1982 年, 欧洲 μ 子实验合作组 (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与自由核子的明显不同, 这种现象被称为 EMC 效应^[1]. 连同已知的遮蔽效应与费米运动效应, 统称为核效应. 自 EMC 效应发现以后, 出现了许多核效应的理论模型^[2-4], 其中 1998 年何祯民等提出了双重 Q^2 重标度模型^[4], 该模型较好地统一解释了 C, Ca, Fe 和 Sn 四种核的结构函数在 $x > 10^{-1}$ 区域的核效应, 但在 $x < 10^{-1}$ 的区域, 理论曲线与实验数据出现了明显的偏离. 此外, 该模型所用的确定重标度参数的方法对还没有或只有个别实验过程的大多数核不适用, 无法做出理论预言. 本文提出的改进的双重 Q^2 重标度模型较好地解决了这两方面的问题.

2 双重 Q^2 重标度模型简述

双重 Q^2 重标度模型考虑到价夸克、海夸克和胶子的动量分布函数主要演化机制的不同, 对它们分别引入不同的 Q^2 重标度参数 ξ_v , ξ_s 和 ξ_g . 质量数为 A 的核中束缚核子的价夸克、海夸克和胶子的动量分布函数可分别表示为

$$q_{vi}^A(x, Q^2) = q_{vi}^N(x, \xi_v, Q^2), \quad (1a)$$

$$q_{si}^A(x, Q^2) = q_{si}^N(x, \xi_s, Q^2), \quad (1b)$$

$$G^A(x, Q^2) = G^N(x, \xi_g, Q^2), \quad (1c)$$

其中 $q_{vi}^{A(N)}(x, Q^2)$, $q_{si}^{A(N)}(x, Q^2)$ 和 $G^{A(N)}(x, Q^2)$ 分别表示原子核 A 内束缚核子或自由核子 (N) 内价夸克、海夸克 (包括反夸克) 和胶子的动量分布函数, 下标中 i 代表夸克味道. 三个重标度参数 ξ_v , ξ_s 及 ξ_g 通过核动量守恒相联系, 只有两个是独立的, 所以称为双重 Q^2 重标度模型. 按照 (1) 式, 知道了自由核子的部分子分布和核 A 的 ξ_v , ξ_s 及 ξ_g 值后, 相应的核 A 中束缚核子的部分子分布函数就能得出, 进而可以计算相关过程的核效应函数.

在文献 [4] 中确定重标度参数值的具体做法是: 对于核 A , 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, 并做实验检验, 其中表 1 给出了他们得到的 C, Ca, Fe 和 Sn 的四种核的重标度参数值. 利用这组参数不需要引入核遮蔽因子较好地统一地解释了 C, Ca, Fe 和 Sn 四种核的 DIS 过程、核 Drell-Yan 过程和 J/Ψ 光生过程中的核效应. 1999 年, 彭宏安等在文献 [5] 中对该模型的合理性给出了一定的理论论证.

表 1 四种核的重标度参数值

	C ¹²	Ca ⁴⁰	Fe ⁵⁶	Sn ¹¹⁹
ξ_v	1.30	1.35	1.41	1.57
ξ_s	0.70	0.67	0.62	0.45
ξ_g	0.86	0.81	0.76	0.58

* 河北省自然科学基金 (批准号: 100144) 资助的课题.

但是,仔细对照就会发现,上述理论计算得出的曲线只在 $x > 10^{-1}$ 的区域与实验数据符合较好,在 $x < 10^{-1}$ 的小 x 区,理论曲线与实验数据出现明显偏离(详见本文第 4 节).此外,对于还没有或只有个别过程实验数据的大多数核,上述模型确定重标度参数的做法不适用,而为了对有关核过程进行理论研究,又迫切需要知道这些核的重标度参数值.本文对这两方面的问题进行研究,提出了改进的双重 Q^2 重标度模型.

3 改进的双重 Q^2 重标度模型

在改进的双重 Q^2 重标度模型中,对价夸克,海夸克和胶子的动量分布函数仍分别引入不同的 Q^2 重标度参数 ξ_v , ξ_s 和 ξ_g . 束缚核子中价夸克,海夸克和胶子的动量分布函数仍用(1)式给出.这是从双重 Q^2 重标度模型继承过来的.对原模型重点在以下两个方面做了改进:一是重新精细调整 C, Ca, Fe 和 Sn 四种核的重标度参数,使得理论曲线与实验数据不仅在 $x > 10^{-1}$ 的区域符合,而且在 $x < 10^{-1}$ 的小 x 区符合情况明显改善;二是用唯象的方法找到了一套重标度参数公式,特别是建立了重标度参数 ξ_v , ξ_s 及 ξ_g 与原子核平均结合能之间的联系.利用这套公式很容易给出 $A \geq 12$ 的所有核的重标度参数值,从而对相关过程的核效应做出预言.具体说来,我们从以下几个方面进行了探索.

首先,重标度参数值应当满足动量守恒条件.对于自由核子,其动量守恒条件为

$$\int_0^1 \left[\sum_i q_{vi}^N(x, Q^2) + \sum_i q_{si}^N(x, Q^2) + G^N(x, Q^2) \right] x dx = 1, \quad (2)$$

而对于核质量数为 A 的束缚核子而言,该条件应为

$$\int_0^1 \left[\sum_i q_{vi}^A(x, Q^2) + \sum_i q_{si}^A(x, Q^2) + G^A(x, Q^2) \right] x dx = 1, \quad (3)$$

将(1)式代入上式得到

$$\int_0^1 \left[\sum_i q_{vi}^N(x, \xi_v, Q^2) + \sum_i q_{si}^N(x, \xi_s, Q^2) + G^N(x, \xi_g, Q^2) \right] x dx = 1. \quad (4)$$

三个重标度参数 ξ_v , ξ_s 和 ξ_g 通过(4)式相联系.因此,用参数公式求得的核 A 的重标度参数值只有满足(4)式才是可以接受的.可见,核动量守恒条件为寻找和检验参数公式提供了一个重要判据.

其次,表 1 给出的四种核的重标度参数值,是寻找和检验参数公式的出发点和重要参考.由于表 1 所给出的参数值,是拟合实验数据(包括该 DIS 过程, Drell-Yan 过程和 J/ψ 光生过程)而得到的,因此,这套参数值有一定的可靠性.但是,由于关于核效应的实验数据存在较大的误差,拟合实验数据确定参数时,有一定的不确定范围^[4];另外,对自由核子用 GRV^[6]参数化函数集,对原子核内核子再用双重 Q^2 重标度模型,核子的(自由和束缚)动量分布函数随 Q^2 变化非常慢,适当调整重标度参数值,并不会明显影响核动量守恒.这两个因素的存在,使得参数值又有一定的可调性.基于重标度参数值的可靠性和可调性这两个特点,我们把表 1 的参数值重新做了精细调整,使得理论计算的核效应曲线与实验数据符合得更好(特别是在 $x < 10^{-1}$ 的区域),同时把新调整的参数值作为寻找和检验参数公式的重要依据.

第三,通过建立重标度参数与原子核结合能的联系,寻找参数公式.重标度参数 ξ_v , ξ_s 和 ξ_g 描述的是束缚核子与自由核子分布函数的差异,是一种核效应;在核物理学中,原子核的结合能也是描述束缚核子与自由核子的差异,也是一种核效应.它们是从不同侧面描述着自由核子组成核时产生的核效应,因此,我们推测,它们之间应当有某种联系.

在核物理学中,Weizsacker 根据原子核的液滴模型给出了一个结合能半经验公式^[7]

$$B(Z, A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2/A^{1/3} - a_{\text{sym}}(N - Z)^2/A + B_p, \quad (5)$$

其中

$$a_v = 15.67 \text{ MeV}, a_s = 17.23 \text{ MeV},$$

$$a_c = 0.72 \text{ MeV}, a_{\text{sym}} = 23.29 \text{ MeV},$$

$$a_p = 12 \text{ MeV}, B_p = \begin{cases} a_p A^{1/2} & \text{偶偶核} \\ 0 & \text{奇 } A \text{ 核} \\ -a_p A^{1/2} & \text{奇奇核} \end{cases} \quad (6)$$

(5)式前两项仅与强相互作用有关,这部分结合能平均到每个核子,即原子核的平均结合能的强相互作用部分 E 与核的质量数 A 之间的关系为

$$E = 15.67 - 17.23A^{-1/3}, \quad (7)$$

(7)式开方后得

$$E^{1/2} = (15.67 - 17.23A^{-1/3})^{1/2}, \quad (8)$$

(8)式求倒数后得

$$E^{-1/2} = (15.67 - 17.23A^{-1/3})^{-1/2}. \quad (9)$$

考察调整后的 C, Ca, Fe 和 Sn 四种核的重标度参数

值和(8)(9)二式得出： ξ_v 随核 A 的变化趋势与(8)式中 $E^{1/2}$ 随核 A 的变化趋势比较接近； ξ_s 和 ξ_g 随核 A 的变化趋势与(9)式中 $E^{-1/2}$ 随核 A 的变化趋势比较接近。这反映了重标度参数与结合能的联系。因为强相互作用对结合能的贡献远远大于库仑相互作用的贡献，所以在寻求重标度参数与平均结合能的联系时，我们只考虑(7)式描述的部分。

经过以上三个方面的思考、推断和反复探索，得到了一套参数公式：

$$\xi_v = 0.4255 E^{1/2} + 0.020 \ln(A), \quad (10a)$$

$$\xi_s = 2.3074 E^{-1/2} - 0.065 \ln(A), \quad (10b)$$

$$\xi_g = 2.8700 E^{-1/2} - 0.080 \ln(A). \quad (10c)$$

当我们用改进的双重 Q^2 重标度模型研究核过程的核效应时，利用参数公式(10)，很容易求出质量数 $A \geq 12$ 的核的重标度参数值。对 C, Ca, Fe, Sn, W 和 Pb 核，得到的重标度参数值如表 2 所示。三个重标度参数值随核质量数 A 的变化曲线如图 1。

表 2 六种核的重标度参数值

	C ¹²	Ca ⁴⁰	Fe ⁵⁶	Sn ¹¹⁹	W ¹⁸⁴	Pb ²⁰⁸
ξ_v	1.2640	1.4612	1.5024	1.5798	1.6171	1.6268
ξ_s	0.6470	0.4679	0.4289	0.3509	0.3100	0.2990
ξ_g	0.8069	0.5851	0.5368	0.4405	0.3900	0.3764

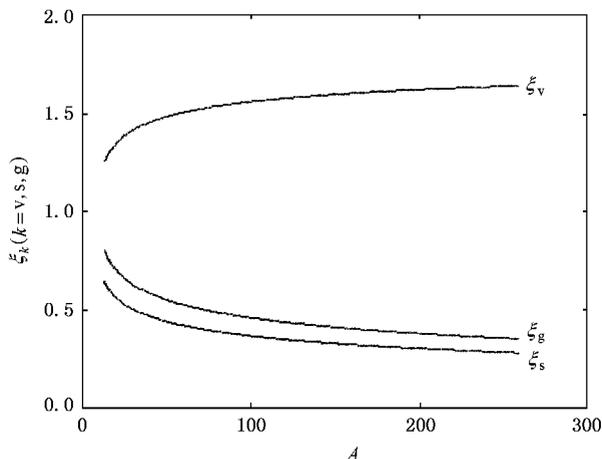


图 1 重标度参数值随核质量数 A 的变化曲线

参数公式(10)式的适用范围需要说明。对于 $A < 12$ 的轻核，原子核的液滴模型只给出结合能平均结果，没有显示出各核起伏，即没有给出各核的结合能的确切值；另外，对于 $A < 12$ 的轻核，核效应并不明显且没有重标度参数值可供参照；再者，人们的注意力越来越集中于研究重核碰撞时的核效应，迫切要知道重核的重标度参数值。考虑到上述三方面

后，在寻找参数公式(10)式时，没有涉及质量数 $A < 12$ 核的重标度参数问题。

4 新旧模型的实验检验

用原来的双重 Q^2 重标度模型(以下简称旧模型)和改进的双重 Q^2 重标度模型(以下简称新模型)对核 DIS 过程、核 Drell-Yan 过程的 J/Ψ 光生过程等三类核过程进行计算，自由核子中价夸克、海夸克和胶子的动量分布函数用 GRV^[6] 参数化函数集；对原子核 A 内的核子，旧模型用表 1 中的参数值，新模型用参数公式(10)式给出的表 2 中的参数值，再将这些参数值代入(1)式，便可得出相应的动量分布函数。我们不仅重新计算了旧模型曾计算过的下面定义的 $R^{C/D}$, $R^{Ca/D}$, $R^{Fe/D}$, $R^{Sn/D}$, $T^{C/D}$, $T^{Ca/D}$, $T^{Fe/D}$ 与 $R_g^{Sn/C}$ 等核效应函数，还增加计算了 $R^{Ca/C}$, $R^{Fe/C}$, $R^{Sn/C}$, $R^{Pb/C}$, $T^{W/C}$ 等核效应函数。计算结果与实验数据对照，便可对这两个模型做出检验。

4.1 轻子-核 DIS 过程的 $R^{A1/A2}(x, Q^2)$

在夸克-部分子图像中，核子是由点状准自由的夸克组成的。轻子在核子上的深度非弹性散射可以用轻子与核子内夸克的准弹性散射的非相干叠加来描写。在双重 Q^2 重标度模型或改进后的模型中，质量为 A 的核的平均结构函数为

$$F_2^A = F_2^N(\xi_v, \xi_s, x, Q^2) = \sum_i e_i^2 x \{ q_{vi}^N(x, \xi_v, Q^2) + q_{si}^N(x, \xi_s, Q^2) + \bar{q}_{si}^N(x, \xi_s, Q^2) \}, \quad (11)$$

式中 e_i 是味为 i 的夸克的电荷数， $q_{vi}^N(x, \xi_v, Q^2)$ 和 $q_{si}^N(x, \xi_s, Q^2)$ 、 $\bar{q}_{si}^N(x, \xi_s, Q^2)$ 是核内味为 i 的价夸克和海夸克和反海夸克的动量分布函数，通常用质量为 A_1 的核的平均结构函数 F_2^{A1} 与质量为 A_2 的核的平均结构函数 F_2^{A2} 之比

$$R^{A1/A2}(x, Q^2) = F_2^{A1}(x, Q^2) / F_2^{A2}(x, Q^2) \quad (12)$$

来研究核子结构函数的核效应。

图 2 给出了 $R^{C/D}$, $R^{Ca/D}$, $R^{Fe/D}$, $R^{Sn/D}$ 的实验数据与理论曲线，虚线是旧模型的结果，实线是新模型的结果。可见，在 $x < 10^{-1}$ 的小 x 区，新模型能更好地解释实验结果。最近，新 μ 子实验合作组^[8]报告了它们测量的 $R^{Ca/C}$, $R^{Fe/C}$, $R^{Sn/C}$, $R^{Pb/C}$ 的最新实验结果，其数据的覆盖范围为 $0.01 < x < 0.8$ 。图 3 给出了相应的实验数据与理论曲线，虚线及实线的意义与图

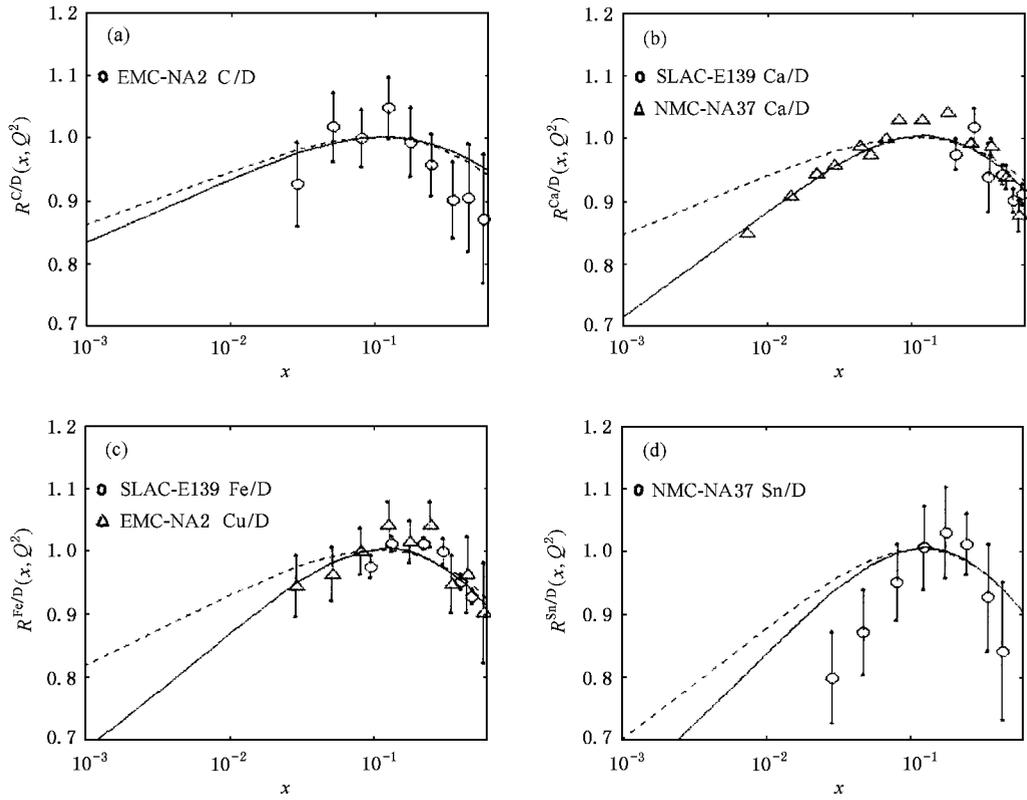


图2 $R^{A/D}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值的比较

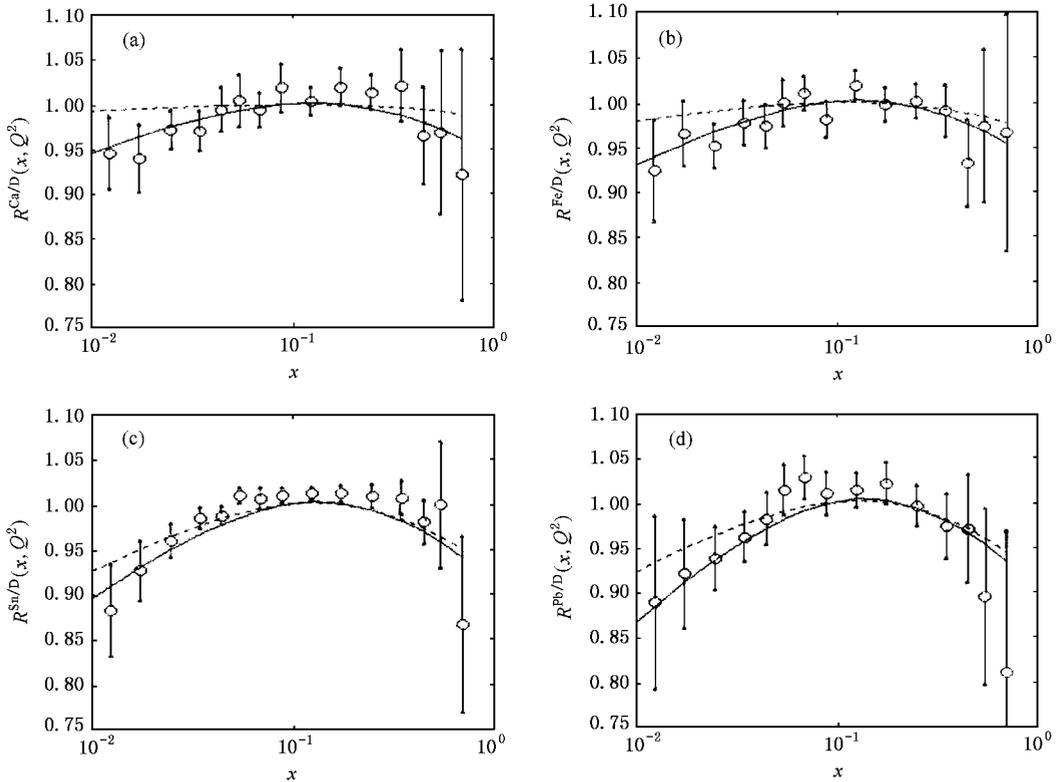


图3 $R^{A/C}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值的比较

2 相同.从图可见,在 $x < 10^{-1}$ 的小 x 区,新模型明显优于旧模型.

4.2 P-A 碰撞的 Drell-Yan 过程

高能强子 h 与原子核 A 相互碰撞产生大质量轻子对的 Drell-Yan 过程

$$h + A = l^+ l^- + X, \quad (13)$$

实际上是 h 中的一个夸克(反夸克)与 A 中的束缚核子中的一个反夸克(夸克)进行电磁湮没作用,生成轻子对.质子 P 打击质量数为 A 的核和氘核的核 Drell-Yan 过程截面比为

$$T^{AD}(x_l, x_t, Q^2) = \left[\int \frac{d^2 \sigma^{P-A}(x, x_t, Q^2)}{dx dx_t} dx \right] / \left[\int \frac{d^2 \sigma^{P-D}(x, x_t, Q^2)}{dx dx_t} dx \right] \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \sigma^{P-A}(x, x_t, Q^2)}{dx dx_t} = & \frac{1}{3} \frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \sum_i e_i^2 \{ [q_{vi}^P(x, Q^2) \\ & + q_{si}^P(x, Q^2)] \bar{q}_{si}^A(x_t, Q^2) \\ & + \bar{q}_{si}^P(x, Q^2) [q_{vi}^A(x_t, Q^2) \\ & + q_{si}^A(x_t, Q^2)] \}, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \sigma^{P-D}(x, x_t, Q^2)}{dx dx_t} = & \frac{1}{3} \frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \sum_i e_i^2 \{ [q_{vi}^P(x, Q^2) \\ & + q_{si}^P(x, Q^2)] \bar{q}_{si}^D(x_t, Q^2) \\ & + \bar{q}_{si}^P(x, Q^2) [q_{vi}^D(x_t, Q^2) \\ & + q_{si}^D(x_t, Q^2)] \}, \quad (16) \end{aligned}$$

式中 α 是精细结构常数, M 是轻子对的不变质量, $q_{vi}^{R(A)}$ 、 $q_{si}^{R(A)}$ 和 $\bar{q}_{si}^{R(A)}$ 是入射质子(原子核)内味为 i 的价夸克、海夸克和反海夸克的动量分布函数.

为与实验结果^[9]相比较,对 $T^{AD}(x_l, Q^2)$, 计算的动力学范围取为 $x \geq x_t$, $0.025 \leq x_t \leq 0.30$, $A \text{ GeV} \leq M \leq 9 \text{ GeV}$ 和 $M \geq 11 \text{ GeV}$, 质心系总能量为 40 GeV . 新旧模型的计算 $T^{AD}(x_l, Q^2)$ 的结果如图 4, 虚线及实线的意义与图 2 相同.从图可见,新模型比旧模型与实验数据符合得更好.这在 $x < 10^{-1}$ 的小 x 区尤为明显.

4.3 J/Ψ 光生过程

用轻子打核靶的 J/Ψ 光生过程可以测量核子内的胶子分布函数.1992 年, NMC 实验合作组用 μ 子在 Sn 和 C 靶上做了 J/Ψ 光生实验^[10]. 他们的实

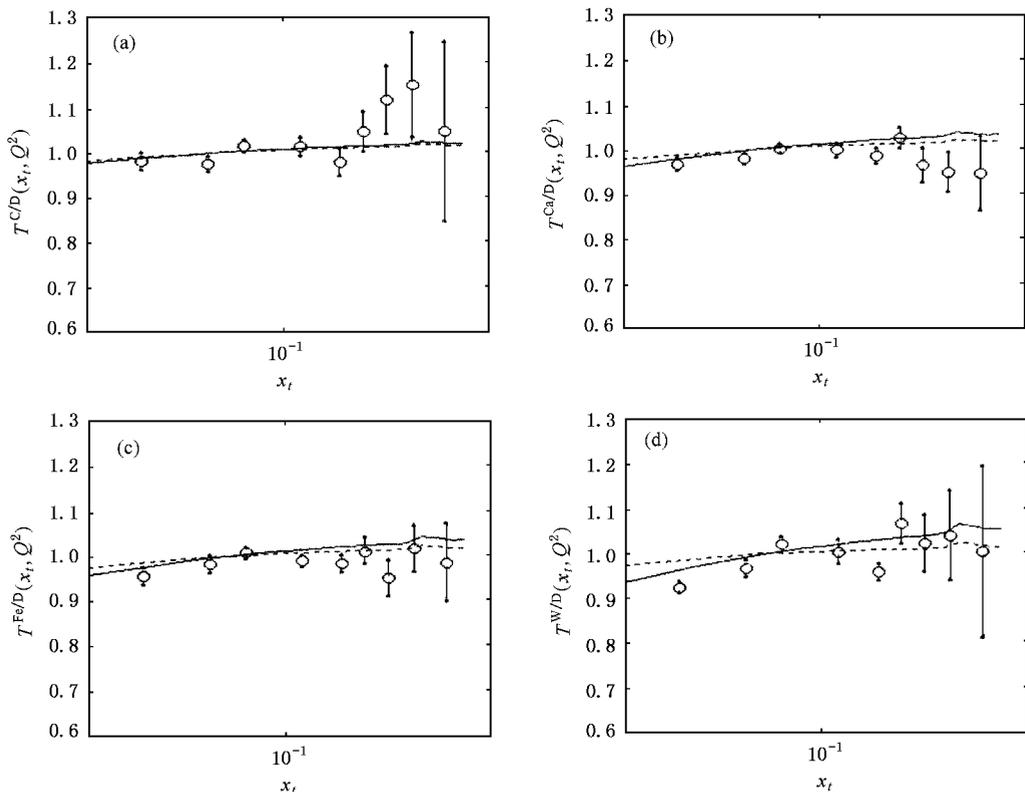


图 4 T^{AD} 的理论值与实验值的比较

验结果表明 Sn 和 C 核内胶子分布函数之比

$$R_g^{Sn/C}(x, Q^2) = G_{Sn}(x, Q^2) / G_C(x, Q^2) \quad (17)$$

的平均值为 1.13 ± 0.08 . 图 5 给出了 $R_g^{Sn/C}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值. 其中实线与虚线的意义同图 2. 由图可见, 在图示的 x 区段内, 新模型略优于旧模型.

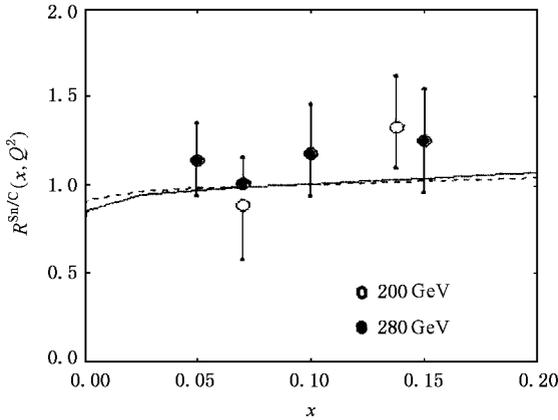


图 5 $R_g^{Sn/C}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值的比较

5 结 论

本文提出了改进的双重 Q^2 重标度模型. 该模型首先对原双重 Q^2 重标度模型的重标度参数做了精细调整, 然后寻找到一个重标度参数的经验公式, 其中建立了重标度参数与核平均结合能的联系. 利用该公式可以求出质量数 $A \geq 12$ 的所有核的重标度参数值, 进而对有关过程的核效应做出预言. 从图 2—图 5 可以看出, 利用改进的双重 Q^2 重标度模型得到的理论结果与相应实验数据的符合程度均优于原双重 Q^2 重标度模型. 所以我们认为, 该模型可以较好地、较全面地描述原子核内部分子分布函数的核效应.

[1] EMC J. J. Aufer *et al.*, *Phys. Lett.*, **B123**(1983) 275.
 [2] F. E. Close, R. G. Roberts, G. G. Ross, *Phys. Lett.*, **B129**(1983), 346.
 [3] C. E. Carlson, T. J. Havens, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983) 261.
 [4] Z. M. He *et al.*, *Eur. Phys. J.*, **C4**(1998) 301.
 [5] H. A. Peng *et al.*, *Commun. Theor. Phys.* (Beijing, China), **32**(1999) 443.

[6] M. Gluck, E. Reya, A. Vogt, *Z. Phys.*, **C67**(1995) 433.
 [7] F. J. Yang *et al.*, *Nuclera physics* (Fudan University, Shanghai, 1993), p. 16 [in Chinese] 杨福家等, 原子核物理学(复旦大学出版社, 上海, 1993), p. 16].
 [8] M. Arneodo *et al.*, *Nucl. Phys.*, **B481**(1996) 3.
 [9] D. M. Alde *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990) 2479.
 [10] NMC P. Amoudruz *et al.*, *Nucl. Phys.*, **B371**(1992) 553.

IMPROVED DOUBLE Q^2 RESCALING MODEL^{*}

GAO YONG-HUA¹⁾ HE ZHEN-MIN²⁾ DUAN CHUN-GU²⁾

¹⁾ *Department of Physics, Shijiazhuang Teachers' College, Shijiazhuang 050801, China*

²⁾ *Department of Physics, Hebei Teachers' University, Shijiazhuang 050016, China*

(Received 7 December 2000)

ABSTRACT

In this paper we present an improved double Q^2 rescaling model. Based on this condition of the nuclear momentum conservation, we have found a Q^2 rescaling parameters' formula of the model, where we have established the connection between the Q^2 rescaling parameter ξ_i ($i = v, s, g$) and the mean binding energy in nucleus. By using this model, we could explain the experimental data of the EMC effect in the whole x region, the nuclear Drell-Yan process and J/Ψ photoproduction process.

Keywords : double Q^2 rescaling model, nuclear effect, binding energy

PACC : 1235H, 1385, 2530

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant No. 100144), China.