

改进的核密度模型与强子-核 Drell-Yan 过程中的核效应*

高永华^{1)†} 赵志恒²⁾ 侯召宇³⁾ 曹鹤飞¹⁾ 段春贵⁴⁾ 何祯民⁴⁾

1) 石家庄学院物理研究所, 石家庄 050801)

2) 石家庄信息工程职业学院, 石家庄 050035)

3) 石家庄铁道学院数理系, 石家庄 050043)

4) 河北师范大学物理学院, 石家庄 050016)

(2006 年 1 月 14 日收到, 2006 年 2 月 22 日收到修改稿)

提出了改进的核密度模型, 用唯象的方法找到了束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式, 其中利用了核密度与原子核的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, 对强子与核的 Drell-Yan 过程的核效应给出了满意的解释, 深化了对原子核内夸克分布受核效应影响的认识.

关键词: 核密度模型, 核效应, 强子-核 Drell-Yan 过程

PACC: 1235H, 1385, 2530

1. 引言

1982 年, 欧洲 μ 子实验合作组用 μ 子在氢、氘和铁靶上做深度非弹性实验, 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]. 为解释 EMC 效应, 出现了许多核效应的理论模型^[2-5], 其中 Frankfurt 和 Strikman 提出的核密度模型^[5]是用来解释 EMC 效应的模型之一. 该模型可以解释中等 X 区域轻子-核 DIS 过程的核效应^[6].

在文献 [7] 中, 我们通过拟合文献 [6] 给出的 9 种核的核密度, 得到了核密度公式, 特别是建立了核密度与原子核平均结合能之间的联系, 利用该核密度模型(以下称为原核密度模型)可以计算有关核过程并做出预言. 对小 X 区和中等 X 区域轻子-核 DIS 过程的核效应的理论预言与实验结果符合很好. 当我们把该模型用于解释强子与核的 Drell-Yan 过程的核效应时, 考虑到在束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数主要演化方式不同, 它们在核环境中的核效应应该有不同的描述^[8], 而原先给出的是其综合描述^[7], 这是需要进一步改进的. 针对这

个问题, 本文提出了改进的核密度模型, 我们利用唯象的方法找到了束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式, 其中利用了我们先前已经建立的核密度与原子核的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, 对强子与核的 Drell-Yan 过程的核效应给出了满意的解释, 深化了对原子核内夸克分布受核效应影响的认识.

2. 改进的核密度模型

由 Frankfurt 和 Strikman 提出的核密度模型认为

$$[F_2^A/F_2^N - 1][F_2^D/F_2^N - 1] = \rho(A)\rho(D) \quad (1)$$

其中 $F_2^N = (F_2^p + F_2^n)/2$ 为自由核子的结构函数, F_2^A 和 F_2^D 是核质量数 A 的核和氘核的平均结构函数, $\rho(A)$ 和 $\rho(D)$ 是核质量数 A 的核和氘核的核密度. $\rho(A)$ 是这样得出的: 通过原子核电磁半径平方平均值 r^2 的实验数据求出原子核等效均匀半径 R ($R^2 = (5/3) \times r^2$), 进而得出 $\rho(A)$ ($\rho(A) = 3A/4\pi R^3$) 的值. 该模型认为核子结构函数的核效应是由原子核的核密度不同造成的, 因此可以把 (1) 式写为

$$[F_2^A/F_2^N - 1] = \beta(x)\rho(A), \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10175074)和河北省自然科学基金(批准号: A2005000535, 103143)资助的课题.

† E-mail: gaoyonghua2005@126.com

式中 $\beta(x)$ 对每种核都是相同的, $\rho(A)$ 用来描述核 A 的核效应. 我们已经给出的核密度 $\rho(A)$ 随原子核的平均结合能 E 和核质量数 A 变化的经验公式为^[7]

$$\rho(A) = 0.01E^{1/2} + 0.02 \ln(A). \quad (3)$$

考虑到在束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数主要演化方式不同, 对它们在核环境中的核效应应该有不同的描述, 我们通过做唯象分析可以得出束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数核效应的参数公式.

首先, 分析原核密度模型的综合核效应函数, 然后将其推广到束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数的核效应描述上, 给出它们的核效应参数公式. 在文献 7 的核密度模型的综合核效应函数为

$$\begin{aligned} R^{A_1/A_2}(x, Q^2) &= F_2^{A_1}(x, Q^2) / F_2^{A_2}(x, Q^2), \\ &= [1 + \beta(x)\rho(A_1)] / [1 + \beta(x)\rho(A_2)], \quad (4) \end{aligned}$$

如果上式中 A_2 是氘核, $\rho(D) = 0.024$, 由于其值很小, 因此可以近似写为

$$R^{A_1/D}(x, Q^2) \approx 1 + \beta(x)\rho(A_1). \quad (5)$$

文献 9 对(5)式的合理性, 利用有效场理论给出了一定的理论论证.

将(5)式推广到束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数的核效应描述上, 并考虑到价夸克与海夸克的差异, 写出它们的核效应参数公式为

$$R_V^A(x, Q^2) = 1 + \frac{\beta_V(x) - 1}{0.107} \rho(A), \quad (6a)$$

$$R_S^A(x, Q^2) = 1 + \frac{\beta_S(x) - 1}{0.107} \rho(A), \quad (6b)$$

式中 $R_V^A(x, Q^2), R_S^A(x, Q^2)$ 分别是束缚核子内价夸克和海夸克的动量分布函数的核效应函数, $\beta_V(x), \beta_S(x)$ 是由束缚核子内价夸克和海夸克决定的量, $\rho(A)$ 用来描述核 A 的综合核效应, 其值由(3)式给出, 这是从原核密度模型继承过来的. 因此, 核 A 中价夸克和海夸克的动量分布函数为

$$q_V^A(x, Q^2) = R_V^A(x, Q^2) q_V^N(x, Q^2), \quad (7a)$$

$$q_S^A(x, Q^2) = R_S^A(x, Q^2) q_S^N(x, Q^2), \quad (7b)$$

其中 $q_V^{A(N)}(x, Q^2), q_S^{A(N)}(x, Q^2)$ 分别表示原子核 A 内束缚核子和自由核子(N)内价夸克和海夸克的动量分布函数, $R_V^A(x, Q^2), R_S^A(x, Q^2)$ 由(6)式给出, 下标中 f 代表夸克味道.

其次(6)式中 $\beta_V(x), \beta_S(x)$ 的值可以通过拟合有关核过程而得到, 例如可以通过拟合强子-核 Drell-Yan 过程的核效应实验数据来确定. 通过反复探索, 我们给出了它们的值如表 1 所示. 按照(7)式, 知道了自由核子的部分子分布函数和核中价夸克和海夸克的核效应函数 $R_V^A(x, Q^2)$ 和 $R_S^A(x, Q^2)$ 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.

表 1 $\beta_V(x)$ 和 $\beta_S(x)$ 的值

x	0.0010	0.0100	0.0293	0.0512	0.0805	0.1244	0.1765	0.2451	0.3439	0.4390	0.5000	0.6000
$\beta_V(x)$	1.0606	1.0576	1.0516	1.0451	1.0370	1.0259	1.0143	1.0010	0.9843	0.9691	0.9589	0.9398
$\beta_S(x)$	0.7289	0.7983	0.9039	0.9713	1.0089	1.0184	1.0249	1.0583	1.0933	1.0882	1.1094	1.1027

其中

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \sigma^{P-A}(x, x_1, Q^2)}{dx dx_1} \\ &= \frac{1}{3} \frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \sum_f e_f^2 \left\{ \left[q_V^P(x, Q^2) + q_S^P(x, Q^2) \right] \right. \\ & \quad \times \left[\bar{q}_S^A(x_1, Q^2) + \bar{q}_V^A(x_1, Q^2) \right] \\ & \quad \times \left[q_V^A(x_1, Q^2) + q_S^A(x_1, Q^2) \right] \left. \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \sigma^{P-D}(x, x_1, Q^2)}{dx dx_1} \\ &= \frac{1}{3} \frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} \sum_f e_f^2 \left\{ \left[q_V^P(x, Q^2) + q_S^P(x, Q^2) \right] \right. \\ & \quad \times \left[\bar{q}_V^D(x_1, Q^2) + \bar{q}_S^D(x_1, Q^2) \right] \\ & \quad \times \left[q_V^D(x_1, Q^2) + q_S^D(x_1, Q^2) \right] \left. \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

3. 强子-核 Drell-Yan 过程的核效应

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

$$h + A = l^+ l^- + X, \quad (8)$$

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 Drell-Yan 过程截面比为

$$T^{A/D}(x_1, Q^2) = \frac{\int \frac{d^2 \sigma^{P-A}(x, x_1, Q^2)}{dx dx_1} dx}{\int \frac{d^2 \sigma^{P-D}(x, x_1, Q^2)}{dx dx_1} dx}, \quad (9)$$

式中 α 是精细结构常数, M 是轻子对的不变质量, $q_{vf}^{(A)}$, $q_{sf}^{(A)}$ 和 $\bar{q}_{sf}^{(A)}$ 是入射质子(原子核)内味为 f 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^[10]相比较,对 $T^{A/D}(x_t, Q^2)$, 计算的动力学范围为 $x \geq x_t$, $0.025 \leq x_t \leq 0.30$, $4\text{GeV} \leq M$

$\leq 9\text{GeV}$ 和 $M \geq 11\text{GeV}$, 质心系总能量为 40GeV . 在计算中, 自由核子中价夸克、海夸克的动量分布函数用 GRV^[11] 参数化函数集; 对原子核 A 内的核子, 用 (7) 式给出其价夸克、海夸克的动量分布函数. 计算 $T^{A/D}(x_t, Q^2)$ 的结果如图 1 所示.

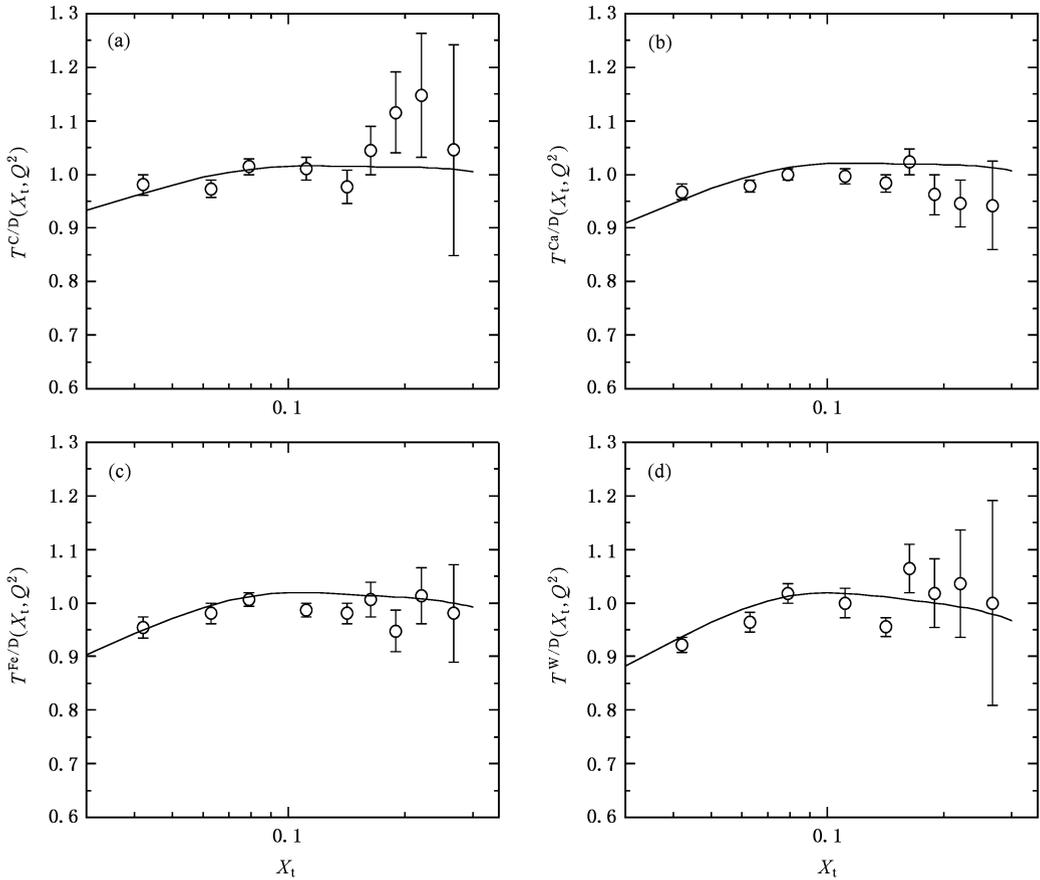


图 1 $T^{A/D}$ 的理论值与实验值的比较

由图 1 可以看出, 用改进的核密度模型计算 $T^{A/D}$, 其理论值与实验值符合得很好.

4. 结 论

本文提出了改进的核密度模型, 用唯象的方法找到了束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式, 其中利用了我们先前建立的核密度与原子核

的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, 对强子与核的 Drell-Yan 过程的核效应, 加深了对原子核内夸克分布受核效应影响的认识.

需要说明的是, 本文给出的束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式 (6) 式, 虽然对强子与核的 Drell-Yan 过程的核效应给出了满意的解释, 但在其他核过程的有效性还有待做进一步检验和修正.

[1] Aubert J J, EMC Collab 1983 *Phys. Lett. B* **123** 275
 [2] Close F E, Roberts R G, Rose G C 1983 *Phys. Lett. B* **129** 346
 [3] Li G L, Cao Z J, Zhong C S 1990 *Nucl. Phys. A* **509** 757
 [4] He Z M, Yao X X, Duan C G, Li G L, Peng H A 1998 *Eur. Phys. J. C* **4** 301
 [5] Frankfurt L L, Strikman M I 1988 *Phys. Rep.* **160** 235

- [6] Gomez J , Arnold R G , Bosted P E , Chang C C 1994 *Phys. Rev. D* **49** 4308 (in Chinese) [郑 乔、侯召宇、高永华 张本爱 2004 高能物理与核物理 **28** 711]
- [7] Gao Y H , Duan C G , Hou Z Y , He Z M 2004 *HEP & NP* **28** 290 (in Chinese) [高永华、段春贵、侯召宇、何祯民 2004 高能物理与核物理 **28** 290]
- [8] Zheng Q , Hou Z Y , Gao Y H , Zhang B A 2004 *HEP & NP* **28** 711
- [9] Chen J W , Detmold W 2005 *Phys. Lett. B* **625** 165
- [10] Alde D M , E772 Collab 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2479
- [11] Gluck M , Reya E , Vogt A 1995 *Z. Phys. C* **67** 433

Improved nuclear density model and the nuclear effect in P-A Drell-Yan process^{*}

Gao Yong-Hua^{1)†} Zhao Zhi-Heng²⁾ Hou Zhao-Yu³⁾ Cao He-Fei¹⁾ Duan Chun-Gui⁴⁾ He Zhen-Min⁴⁾

1) *Institute of Physics , Shijiazhuang College , Shijiazhuang 050801 , China*)

2) *Shijiazhuang Information Engineering Vocational College , Shijiazhuang 050035 , China*)

3) *Department of Mathematics and Physics , Shijiazhuang Railway College , Shijiazhuang 050043 , China*)

4) *Department of Physics , Hebei Normal University , Shijiazhuang 050016 , China*)

(Received 14 January 2006 ; revised manuscript received 22 February 2006)

Abstract

In this paper we present an improved nuclear density model. We have found the nuclear effect parameters' formula $R_V^A(x, Q^2)$ and $R_S^A(x, Q^2)$ for the valence quark distribution and sea quark distribution in the nucleus, in which we have used the relation between the nuclear density and the mean binding energy in nucleus. By using the model, we can well explain the experimental data of the of Drell-Yan process in P-A.

Keywords : nuclear density model , nuclear medium effect , Drell-Yan process

PACC : 1235H , 1385 , 2530

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10175074) and the Natural Science Foundation Hebei Province (Grant Nos. A2005000535 , 103143)

[†] E-mail : gaoyonghua2005@126.com