

# 改进的核密度模型与轻子-核DIS 过程中的核效应\*

高永华<sup>1,3;1)</sup> 侯召宇<sup>2,1</sup> 王艳召<sup>3</sup> 曹鹤飞<sup>1</sup> 张玮<sup>1</sup> 段春贵<sup>3</sup>

1 (石家庄学院物理研究所 石家庄 050801)

2 (石家庄铁道学院数理系 石家庄 050043)

3 (河北师范大学物理学院 石家庄 050016)

**摘要** 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,对轻子与核的DIS(深度非弹性散射)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 轻子-核DIS过程

## 1 引言

自EMC效应<sup>[1]</sup>发现以来,出现了许多解释它的理论模型<sup>[2-6]</sup>,其中Frankfurt和Strikman提出的核密度模型<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>.

该模型主要存在两个问题,其一,对于还没有实验数据或只有个别过程实验数据的大多数核,它们的核密度并不知道.为了对其核效应进行理论研究,又迫切需要知道这些核的核密度,对此已经给出了解决方法<sup>[9]</sup>,通过拟合文献<sup>[8]</sup>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(以下称它为原核密度模型)可以计算有关核过程并做出预言.其二,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描述<sup>[10]</sup>,原先给出的是其综合描述<sup>[9]</sup>,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,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,对轻子与核的DIS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 $F_2^D$ 是核质量数为 $A$ 的原子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 $\langle r^2 \rangle$ 的实验数据求出原子核等效均匀半径 $R(R^2 = (5/3) \cdot \langle r^2 \rangle)$ ,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

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

上式中 $\beta(x)$ 对每种核都是相同的, $\rho(A)$ 是用来描述核质量数为 $A$ 的原子核的核效应.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

2005-12-17 收稿

\* 国家自然科学基金(10175074)和河北省自然科学基金(A2005000535,103143)资助

1) E-mail: gaoyonghua2005@126.com

经验公式为<sup>[9]</sup>

$$\rho(A) = 0.018E^{1/2} + 0.02\ln(A). \quad (3)$$

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描述, 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[9]的核密度模型的综合核效应函数为

$$R^{A1/A2}(x, Q^2) = F_2^{A1}(x, Q^2)/F_2^{A2}(x, Q^2) = [1 + \beta(x)\rho(A1)]/[1 + \beta(x)\rho(A2)], \quad (4)$$

如果上式中核质量数为  $A2$  的原子核表示的是氘核,  $\rho(D) = 0.024$ , 由于其值很小, 因此可以近似写为

$$R^{A1/D}(x, Q^2) \approx 1 + \beta(x)\rho(A1), \quad (5)$$

文献[11]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

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

$$R_S^A(x, Q^2) = 1 + \frac{K_S(A)\beta_S(x) - 1}{0.107}\rho(A), \quad (7)$$

上式中  $R_V^A(x, Q^2)$ ,  $R_S^A(x, Q^2)$  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,  $\beta_V(x)$ ,  $\beta_S(x)$  的值反映束缚核子内价夸克和海夸克随  $x$  变化的规律,  $\rho(A)$  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, 可调比例因子  $K_V(A)$  和  $K_S(A)$  只与  $A$  有关. 因此, 核  $A$  中价夸克和海夸克的动量分布函数为

$$q_{Vf}^A(x, Q^2) = R_V^A(x, Q^2)q_{Vf}^N(x, Q^2), \quad (8)$$

$$q_{Sf}^A(x, Q^2) = R_S^A(x, Q^2)q_{Sf}^N(x, Q^2), \quad (9)$$

其中  $q_{Vf}^{A(N)}(x, Q^2)$ ,  $q_{Sf}^{A(N)}(x, Q^2)$  分别表示核质量数为  $A$

原子核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)和(7)式给出, 下标中  $f$  代表夸克味道. 其次, (6)式中  $\beta_V(x)$ ,  $\beta_S(x)$  的值以及  $K_V(A)$ ,  $K_S(A)$  的值可以通过拟合有关核过程而得到, 例如可以通过拟合轻子-核 DIS 过程的核效应实验数据来确定. 按照(8)和(9)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.

### 3 轻子-核 DIS 过程的核效应

按夸克-部分子模型, 核子是由点状、准自由的夸克组成的, 轻子在核子上的 DIS 可以用轻子与核子内的准弹性散射非相干叠加来描述. 在改进的核密度模型中, 质量数为  $A$  的核平均结构函数为

$$F_2^A(x, Q^2) = \sum e_f^2 x [R_V^A(x, Q^2)q_{Vf}^N(x, Q^2) + R_S^A(x, Q^2)q_{Sf}^N(x, Q^2)], \quad (10)$$

引入核质量数为  $A1$  的原子核的平均结构函数与核质量数为  $A2$  的原子核的平均结构函数之比<sup>[14]</sup>

$$R^{A1/A2}(x, Q^2) = F_2^{A1}(x, Q^2)/F_2^{A2}(x, Q^2), \quad (11)$$

$F_2^A(x, Q^2)$  是核子内价夸克动量分布几率  $q_{Vf}^N(x, Q^2)$  和海夸克动量分布几率  $q_{Sf}^N(x, Q^2)$  的组合表达式,  $R^{A1/A2}(x, Q^2)$  反映的是这两者受介质影响的综合结果.

为确定(6)和(7)式中  $\beta_V(x)$ ,  $\beta_S(x)$  的值以及  $K_V(A)$ ,  $K_S(A)$  的值, 通过计算轻子-核 DIS 过程的核效应, 与新  $\mu$  子实验合作组的实验数据<sup>[12, 13]</sup> 相比较而得到.

在确定出束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式中的  $\beta_V(x)$  和  $\beta_S(x)$  的值以及  $K_V(A)$ ,  $K_S(A)$  的值时, 自由核子中价夸克、海夸克的动量分布函数用 GRV<sup>[15]</sup> 参数化函数集, 利用(6)–(11)式, 将  $R^{C/D}$ ,  $R^{Ca/D}$ ,  $R^{Fe/D}$ ,  $R^{Pb/D}$  的实验数据作为已知, 最后找到了  $\beta_V(x)$  和  $\beta_S(x)$  值如表 1 所示, 核 C, Ca, Fe, Sn 和 Pb 的  $K_V(A)$ ,  $K_S(A)$  的值如表 2 所示.

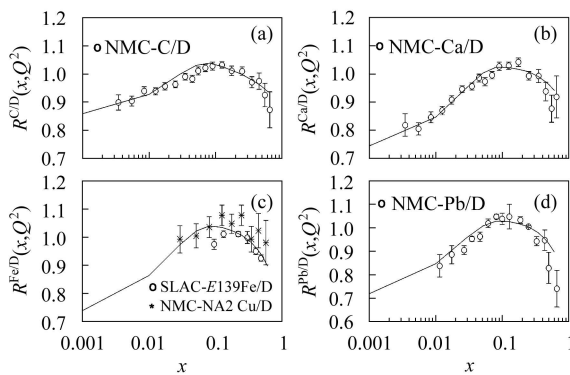
表 1  $\beta_V(x)$  和  $\beta_S(x)$  的值

$x$	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

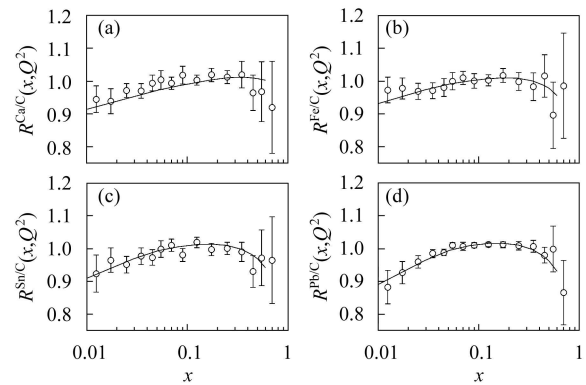
表2 5种核的 $K_V(A)$ 和 $K_S(A)$ 值

	$K_V(A)$	$K_S(A)$
$^{12}\text{C}$	0.9718	1.0930
$^{40}\text{Ca}$	1.000	1.000
$^{56}\text{Fe}$	1.000	1.000
$^{116}\text{Sn}$	1.000	1.000
$^{208}\text{Pb}$	1.000	1.000

为检验参数公式(6)和(7)的有效性,利用(6)—(11)式以及表1和表2,重新计算了核效应函数 $R^{C/D}$ ,  $R^{\text{Ca}/D}$ ,  $R^{\text{Fe}/D}$ ,  $R^{\text{Pb}/D}$ ,图1给出它们的实验数据与理论曲线;还计算了核效应函数 $R^{\text{Ca}/C}$ ,  $R^{\text{Fe}/C}$ ,  $R^{\text{Sn}/C}$ ,  $R^{\text{Pb}/C}$ ,图2给出了它们的实验数据与理论曲线.

图1  $R^{A/D}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值的比较

由图可见,改进的核密度模型,在给出束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式后能很好地解释实验结果.该模型比原核密度模型相比更细致、更合理.

图2  $R^{A/C}(x, Q^2)$ 的理论值与实验值的比较

## 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,对轻子与核的DIS过程,在拟合核效应函数 $R^{C/D}$ ,  $R^{\text{Ca}/D}$ ,  $R^{\text{Fe}/D}$ ,  $R^{\text{Pb}/D}$ 的实验数据的过程中,确定出了束缚核子内价夸克和海夸克的核效应的参数公式中的 $\beta_V(x)$ 和 $\beta_S(x)$ 的值以及 $K_V(A)$ ,  $K_S(A)$ 的值,然后又很好地解释了核效应函数 $R^{\text{Ca}/C}$ ,  $R^{\text{Fe}/C}$ ,  $R^{\text{Sn}/C}$ ,  $R^{\text{Pb}/C}$ 的实验数据,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)和(7),虽然对轻子-核DIS过程的实验数据给出了满意的解释,但在其他核过程的有效性还有待做进一步检验和修正.

## 参考文献(References)

- EMC Collab, Aubert J J et al. Phys. Lett., 1983, **B123**: 275
- Close F E, Roberts R G, Ross G G. Phys. Lett., 1983, **B129**: 346
- Jaffe R L et al. Phys. Lett., 1984, **B134**: 449
- Close F E et al. Phys. Rev., 1985, **D31**: 1004
- LI Guang-Lie et al. Nucl. Phys., 1990, **A509**: 757
- HE Zhen-Min et al. Eur. Phys. J., 1998, **C34**: 301
- Frankfurt L L, Strikman M I. Phys. Rep., 1988, **160**: 235
- Gomez J et al. Phys. Rev., 1994, **D49**: 4308
- GAO Yong-Hua, DUAN Chun-Gui, HOU Zhao-Yu et al. HEP & NP, 2004, **28**(3): 290(in Chinese)  
(高永华, 段春贵, 侯召宇等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(3): 290)
- ZHENG Qiao, HOU Zhao-Yu, GAO Yong-Hua et al. HEP & NP, 2004, **28**(7): 711(in Chinese)  
(郑乔, 侯召宇, 高永华等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(7): 711)
- CHEN J W, Detmold W. Phys. Lett., 2005, **B625**: 165
- NMC Cllab, Amaudruz P et al. Nucl. Phys., 1995, **B441**: 3
- NMC Cllab, Arneodo M et al. Nucl. Phys., 1996, **B481**: 3
- GAO Yong-Hua, HE Zhen-Min, DUAN Chun-Gui. Acta Phys. Sin., 2001, **50**(6): 1028(in Chinese)  
(高永华, 何祯民, 段春贵. 物理学报, 2001, **50**(6): 1028)
- Gluck M, Reya E, Vogt A. Z. Phys. Rev., 1995, **C67**: 433

# Improved Nuclear Density Model and the Nuclear Effect in the l-A DIS Process \*

GAO Yong-Hua<sup>1,3;1)</sup> HOU Zhao-Yu<sup>2,1</sup> WANG Yan-Zhao<sup>3</sup> CAO He-Fei<sup>1</sup>  
ZHANG Wei<sup>1</sup> DUAN Chun-Gui<sup>3</sup>

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

2 (Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Railway College, Shijiazhuang 050043, China)

3 (Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

**Abstract** In this paper, an improved nuclear density model is presented. The formulas of nuclear effect parameters  $R_V^A(x, Q^2)$  and  $R_S^A(x, Q^2)$  for the valence quark distribution and sea quark distribution in nucleus are derived, in which the connection between the nuclear density and the mean binding energy in nucleus is used. In terms of this model, the experimental data of the averaged nucleon structure function ratio of DIS process in l-A are well explained.

**Key words** nuclear density model, nuclear medium effect, DIS process

---

Received 17 December 2005

\* Supported by NSFC (10175074) and Natural Science Foundation of Hebei Province of China (A2005000535, 103143)

1) E-mail: gaoyonghua2005@126.com