

核 Drell - Yan 过程中的能量丢失现象*

朱亚波¹ 杨建军² 厉光烈³

1 (徐州师范大学物理系 徐州 221009)

2 (南京师范大学物理系 南京 210024)

3 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在考虑 EMC 效应的基础上进一步考虑了入射强子的能量丢失现象,用部分子演化模型预见核 Drell-Yan 过程,效果明显改进.

关键词 EMC 效应 核 Drell-Yan 过程 部分子演化模型 能量丢失

1 引言

1983 年,欧洲 μ 子实验合作组(EMC),在轻子与原子核的深度非弹性散射实验中发现不同靶核中核子的结构函数彼此不同.这种现象被称作 EMC 效应^[1].自从 EMC 效应被揭示以来,围绕着对它的解释,人们提出了许多物理模型^[2-5],其中部分子演化模型^[5]在解释 EMC 效应上取得了一定的成功.

70 年代,斯坦福大学的 Sidey D. Drell 和 Tung - Mon Yan^[6]在研究极限区域($S \rightarrow \infty$, Q^2/S 有限)强子-强子非弹性碰撞产生大质量轻子对过程中,引用了部分子模型理论并取得了成功.后来,人们把产生大质量轻子对的过程称作 Drell - Yan 过程(简称 DY 过程)^[7].可以肯定,DY 过程提供了一个测量核内夸克结构修正的独立手段.几年前,费米实验室 E772 实验合作组^[8]发表了他们在 DY 过程的实验中测得的数据.其数据显示:靶核中平均每个核子的 μ 子对产生的散射截面与自由核子的 μ 子对产生散射截面之比(又称作 DY 比)在 x 小于 0.1 时,略小于 1;而在 $0.1 \leq x \leq 0.3$ 区域,约等于 1,即没有明显的核依赖性.这里 x 表示核子中夸克所携带的动量份数.然而,正如 Bickerstaff 所指出^[9]:尽管许多理论模型在解释 EMC 效应时效果不错,但在预见核 Drell-Yan 过程的 DY 比时,差异较大,一般都高估了 DY 比值.部分子演化模型也有此问题.

一般的 EMC 模型都高估了 DY 比,这是否意味着核 Drell-Yan 过程的核效应与深度非弹性散射过程中的核效应(即 EMC 效应)存在着某种差别呢?在这篇文章中,我们尝试着提出一个源于核 Drell-Yan 过程的能量丢失现象.认为在核 Drell-Yan 过程中,入射强子与靶核子间的持续碰撞使得入射强子的能量出现转移(即丢失),这影响了最终的

1999-05-24 收稿

* 国家自然科学基金(19775051 和 19875024)和徐州师范大学青年基金资助.

DY 比。在考虑核内 EMC 效应的同时，也考虑到入射强子的能量丢失现象，我们再用部分子演化模型预见 DY 比，取得了很好的效果。

2 部分子演化模型与核内部分子分布

设想束缚核子是自由核子进入核内演化而来，在此演化中，由于核禁闭空间的改变，使得核内部分子分布与自由核子相比出现新的变化，这导致了 EMC 效应的出现。这便是部分子演化模型的基本思想。值得强调的是部分子演化模型没有引入类似 Q^2 或 x 重新标度参数那样的可调参数，并维护核动量守恒。由文献[5]，给出部分子演化模型下的核内部分子分布函数为

$$V^A(x, Q^2) = V^N(x, Q^2) + \int_x^1 \bar{F}_{q \rightarrow q} \left(\frac{x}{y} \right) \frac{V^N(y, Q^2)}{y} dy, \quad (1)$$

$$S^A(x, Q^2) = S^N(x, Q^2) + \int_x^1 \bar{F}_{q \rightarrow q} \left(\frac{x}{y} \right) \frac{S^N(y, Q^2)}{y} dy + 6 \int_x^1 \bar{F}_{g \rightarrow q} \left(\frac{x}{y} \right) \frac{G^N(y, Q^2)}{y} dy. \quad (2)$$

这里， $V^{A(N)}$ ， $S^{A(N)}$ 和 G^N 分别表示质量数为 A 的束缚核子(A)或自由核子(N)中价夸克，海夸克和胶子的分布函数。相应的动量分布为：

$$k_A^V(x, Q^2) = xV^A(x, Q^2), \quad (3)$$

$$k_A^S(x, Q^2) = xS^A(x, Q^2), \quad (4)$$

许多结果表明，用(3)式和(4)式所给出的核内部分子动量分布，解释 EMC 效应的实验数据效果很好^[5,10]。遗憾的是，用部分子演化模型预见核 Drell-Yan 过程，却高估了 DY 比，见图 1 中点线。

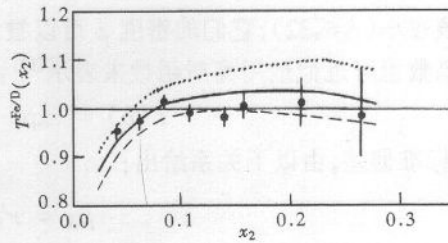
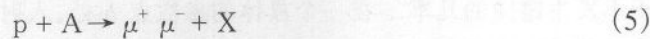


图 1

..... 0.0, — 0.2, - - - 0.4, ● ⁵⁶Fe, E772.

3 核 Drell-Yan 过程中的能量丢失现象

用部分子模型可以相当好地描述质子与原子核 A 相互碰撞产生大质量 μ 子对的过程，即 Drell-Yan 过程。



在核 Drell-Yan 过程中，入射质子 p 的一个夸克(反夸克)与原子核 A 内束缚核子中的一个反夸克(夸克)进行电磁湮没作用，生成 μ 子对。相应的微分散射截面^[11]为：

$$\frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2} = K \frac{4\pi\alpha^2}{9M^2} \sum_i e_i^2 [q_i^p(x_1) \bar{q}_i^A(x_2) + \bar{q}_i^p(x_1) q_i^A(x_2)]. \quad (6)$$

式中， α 是精细结构常数， K 是量子色动力学(QCD)修正因子，其数值接近 $2^{[12]}$ ， $q_i^{p(A)}$ (x) 和 $\bar{q}_i^{p(A)}$ (x) 是入射质子(原子核)内味为 i 的夸克与反夸克的分布函数。 $x_{1,2}$ 与 x_F (费曼

标度变量)和 $M(\mu$ 子对质量)的关系是

$$x_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{x_F^2 + \frac{4M^2}{s}} \pm x_F \right) \quad (7)$$

并且

$$x_1 - x_2 = x_F, \quad (8)$$

$$x_1 \cdot x_2 = M^2/s, \quad (9)$$

而费曼标度变量 x_F 被定义为

$$x_F = 2p_l/\sqrt{s}. \quad (10)$$

\sqrt{s} 是入射质子与靶核系统的质心系能量, p_l 代表虚光子的纵向动量.

现在,转向考虑初始状态下,核 Drell-Yan 过程中入射质子的能量丢失问题. 一个入射质子在初始状态下与原子核 A 中的 n 个核子进行连续碰撞的几率(含有碰撞参数)可表示为

$$P(b, n) = \frac{A!}{n!(A-n)!} [T(b) \cdot \sigma_{in}]^n [1 - T(b)\sigma_{in}]^{A-n}, \quad (11)$$

这里, σ_{in} 是核子-核子间非弹性、非衍射碰撞截面, 约为 $30\text{mb}^{[13]}$; b 是碰撞参数; $T(b)$ 是束缚核子的厚度函数(与碰撞参数 b 有关), 其具体形式与原子核的大小有关. 如果被碰原子核较小 ($A \leq 32$), 它们的密度 ρ 可以被表示成空间坐标下的高斯函数形式, 相应地, 厚度函数也可近似地用高斯函数来表示^[13]:

$$T(b) = \exp(-b^2/2\beta_A^2)/2\pi\beta_A^2, \quad (12)$$

β_A 是标准偏差, 由以下关系给出:

$$\beta_A = r'_0 A^{1/3}/\sqrt{3}, \quad (13)$$

这里, r'_0 是原子核的标准均方根半径参数, $r'_0 = 1.05\text{fm}^{[13]}$, 于是

$$\beta_A = 0.606 A^{1/3}, \quad (14)$$

如果被碰原子核的质量数 $A > 32$, 可以通过截断密度分布^[13]将厚度函数表示成

$$T(b) = \frac{3}{2\pi R_A^3} \sqrt{R_A^2 - b^2} \theta(R_A - |b|). \quad (15)$$

式中, $R_A = r_0 A^{1/3}$ 是原子核的半径, r_0 取 1.2fm .

在(11)式中, 右端第一个因子代表入射质子与原子核 A 中 n 个核子进行连续碰撞的组合数; 第二个因子是相应的 n 次碰撞的具体几率, 第三个因子表示与其余 $(A-n)$ 个核子不发生碰撞的几率. 在一个具体的参数点 b 处, 入射质子与原子核 A 发生非弹性碰撞的总几率为

$$\frac{d\sigma_{in}^{p-A}}{db} = \sum_{n=1}^A P(n, b) = 1 - [1 - T(b)\sigma_{in}]^A \quad (16)$$

从上式可得到总的散射截面

$$\sigma_{in}^{p-A} = \int db |1 - [1 - T(b)\sigma_{in}]^A|. \quad (17)$$

令

$$P(n) = \frac{\int db P(n, b)}{\sum_{n=1}^A \int db P(n, b)}, \quad (18)$$

表示入射质子与原子核 A 中 n 个核子进行连续碰撞但不含有碰撞参数 b 的几率,它是归一化的,即

$$\sum_{n=1}^A P(n) = 1. \quad (19)$$

有了上面的碰撞几率的定义后,现在具体描述入射质子与原子核的碰撞.设想在高能环境下核子-核子碰撞可区分为“软”碰撞和“硬”碰撞.“软”碰撞只改变入射质子的能量,“硬”碰撞伴有粒子的湮没和产生.在核 Drell-Yan 过程中若一个入射质子与原子核 A 中 n 个核子进行 n 次碰撞后才产生 μ 子对,则前 $n-1$ 次碰撞属于“软”碰撞,第 n 次碰撞才是“硬”碰撞.于是当“硬”碰撞发生时,入射质子与原子核质心系能量已改变为

$$\sqrt{s'} = \sqrt{s} - (n-1) \frac{d\sqrt{s}}{dn}, \quad (20)$$

这里 $d\sqrt{s}/dn$ 表示每次“软”碰撞中,入射质子的能量丢失.令 r_s 表示入射质子能量丢失前后系统的质心系能量比

$$r_s = \sqrt{s}/\sqrt{s'} \quad (21)$$

则费曼重标变量 x'_F 被表示为

$$x'_F = \frac{2p_1}{\sqrt{s'}} = \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{s'}} \cdot \frac{2p_1}{\sqrt{s}} = r_s x_F, \quad (22)$$

于是(6)式所代表的核 Drell-Yan 过程微分散射截面应重新表示为

$$\frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2} = K \cdot \frac{4\pi\alpha^2}{9M^2} \sum_i e_i^2 [q_i^p(x'_1) \bar{q}_i^A(x'_2) + \bar{q}_i^p(x'_1) q_i^A(x'_2)], \quad (23)$$

$$x'_{1,2} = r_s \cdot x_{1,2}, \quad (24)$$

考虑到各种连续“软”碰撞的影响,由(23)式得核 Drell-Yan 过程中 μ 子对产生的平均散射截面为

$$\left\langle \frac{d^2\sigma^{p-A}}{dx_1 dx_2} \right\rangle = \sum_{n=1}^A P(n) \frac{d^2\sigma}{dx_1 dx_2}. \quad (25)$$

4 计算结果

引入 DY 比:

$$T^{AD}(x_2) = \frac{\int dx_1 \langle d^2\sigma^{p-A}/dx_1 dx_2 \rangle}{\int dx_1 d^2\sigma^{p-D}/dx_1 dx_2}. \quad (26)$$

上式中, $d^2\sigma^{p-D}/dx_1 dx_2$ 代表质子与氘核碰撞的 Drell-Yan 过程微分散射截面.另外,为了考虑小 x 区域的核遮蔽效应,由文献[14]引入胶子和海夸克的核遮蔽因子.

$$R_{\text{sh}}^A(x) = \begin{cases} 1 + a \ln A \ln(x/0.08) & x \leq 0.08 \\ 1 + b \ln A \ln(x/0.08) \ln(x/0.24) & 0.08 < x < 0.3. \end{cases} \quad (27)$$

这里的参量 a, b 分别取值为 0.025 和 0.02. 在具体计算 Fe^{56} 的 DY 比中, (26) 式中积分限由文献[8]中实验的动力学区域决定, 即 $x_1 - x_2 > 0$ 和 $0.025 \leq x_1 \leq 0.30$, 自由核子分布由文献[15]给出, 束缚核子动量分布由本文的(3)式, (4)式给定. 计算中, 分别让 $d\sqrt{s}/dn = 0.0, 0.2, 0.4 \text{ GeV}$, 结果见图 1. 从结果可以看出, 考虑了能量丢失现象后, 部分子演化模型对核 Drell-Yan 过程的预见大为改善.

5 总结

在深度非弹性散射中, 核效应是 EMC 效应; 而核 Drell-Yan 过程中的核效应除应包含 EMC 效应外, 还受到入射质子的能量丢失现象的影响, 当把 EMC 效应和能量丢失现象结合起来预见 DY 比时, 效果有了明显改善. 同样, 我们认为在 J/ψ 光生过程中也存在着能量丢失问题.

参考文献 (References)

- 1 EMC, Aubert J J et al. Phys. Lett., 1983, **B123**:275
- 2 Carlson C E, Havens T J. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**:261
- 3 Close F E, Roberts R G, Ross G G. Phys. Lett., 1983, **B129**:346
- 4 ZHU W, Shen J G. Phys. Lett., 1990, **B235**:170
- 5 YANG J J et al. Can. J. Phys., 1992, **70**:114
- 6 Drell S D, Yan T M. Phys. Rev. Lett., 1970, **25**:316
- 7 Badier et al. Phys. Lett., 1981, **B104**:335; Ito A S et al. Phys. Rev., 1981, **D23**:604 Binkley M et al. Phys. Rev. Lett., 1976, **37**:571
- 8 Alde D M et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **64**:2479
- 9 Bickerstaff R P, Birse M C, Miller G A. Phys. Rev., 1986, **D33**:322
- 10 SHEN H Q et al. Chinese Journal of Nuclear Phys., 1993, **15**:74
- 11 Kenyon I R. Rep. Prog. Phys., 1982, **45**:1261
- 12 Stirling W J, Whalley M R. J. Phys., 1993, **G19**:D1
- 13 WONG C Y. Phys. Rev., 1984, **D30**:961; WONG C Y. Introduction to High Energy Heavy Ion Collisions, Singapore: World Scientific, 1994, 249
- 14 CHAO WeiQin, LIU Bo. Z. Phys., 1996, **C72**:291
- 15 GLuck M, Reya E, Vogt A. Z. Phys., 1995, **C67**:433

Energy Loss In Nuclear Drell-Yan Process *

ZHU YaBo¹ YANG JianJun² LI GuangLie³

1 (Department of Physics, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221009, China)

2 (Department of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing 210024, China)

3 (Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract We study an additional effect of energy loss of the projectile nucleons in nuclear Drell-Yan process. With consideration of EMC effect and the energy loss effect, we predict the DY ratio on the parton evolution model. A better prediction is given.

Key words EMC effect, nuclear Drell-Yan process, parton evolution model, energy loss effect

Received 24 May 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19775051 and 19875024) and the Young Scientist Fund of Xuzhou Normal University