

含 QCD 修正的 p-A 碰撞 Drell-Yan 过程的核效应*

张玉敏 段春贵 阎占元 何祯民
(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

摘要 在微扰 QCD α_s 级近似下,采用双重 Q^2 重标度模型,计算了 p-A 碰撞 Drell-Yan 截面与 p-N 碰撞 Drell-Yan 截面之比,即核效应函数 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$. 计算结果与没有 QCD 修正的 $R(x_A, Q^2)$ 值比较,在 $0.03 \leq x_A \leq 0.3$ 之间都有不同程度的压低,与实验符合的情况有所改善.说明对核 Drell-Yan 过程核效应的研究, QCD 修正是有一定意义的,并且在计入这种修正后,双重 Q^2 重标度模型仍然是有效的.

关键词 Drell-Yan 过程 核效应 QCD 修正

1 引言

1970 年 S. O. Drell 和 T. M. Yan^[1] 在部分子模型的基础上,对强子碰撞产生轻子对过程(如图 1)给予了解释,认为,此过程是分别来自入射强子和靶强子内的正反夸克湮没成虚光子,然后虚光子再衰变成轻子对,人们称此过程为 Drell-Yan (D-Y) 过程.

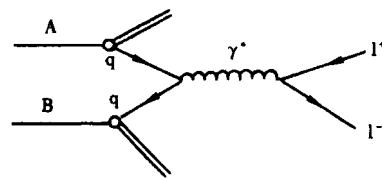


图 1 D-Y 过程的费曼图

朴素 D-Y 过程的反应截面通常表示为

$$\frac{d^2\sigma}{dx_N dx_T} = \frac{1}{3} \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2} \sum_f e_f^2 [q_f(x_N)\bar{q}_f(x_T) + \bar{q}_f(x_N)q_f(x_T)], \quad (1)$$

其中“ $\frac{1}{3}$ ”因子是考虑到只有相反颜色的夸克-反夸克对($q\bar{q}$)才能湮没成虚光子; $\frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2}$ 描述了过程 $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$ 的反应截面, $Q^2 = M^2$ 是末态轻子对的不变质量平方, e_f 是味道为 f 的夸克的电荷数; $q_f(x_{N(T)})$ 和 $\bar{q}_f(x_{N(T)})$ 分别为入射核子(靶核子)中味道为 f 的夸克和反夸克的分布函数,其中 Bjoken 无标度性变量 x 是夸克或反夸克的纵向动量分数. “ \sum_f ”

1999-07-06 收稿

* 国家自然科学基金和河北省自然科学基金资助

表示对所有味夸克求和, α 是精细结构常数. 为了研究核环境对束缚核子中的部分子分布的影响, 1990 年, E772 实验组^[2]测量了 p-A (^{12}C , ^{40}Ca , ^{56}Fe) 与 p-D 碰撞 D-Y 截面之比

$$R^{AD}(x_A, Q^2) = \int \frac{d\sigma_A}{dx_D dx_A} dx_D \bigg/ \int \frac{d\sigma_D}{dx_D dx_T} dx_D. \quad (2)$$

随着量子色动力学(QCD)理论的发展, D-Y 过程研究的一个重要方面是 D-Y 截面的 QCD 修正. 最初人们将(1)式乘上一个 K 因子来表示这种修正, 并且认为 K 因子大约为一个近于 2 的常数. 1980 年, J. Kubar 等人^[3]对 p-p 过程计算了 DIS 方案下 Drell-Yan 微分截面的 α_s 级修正, 证明把 K 因子看作一个常数处理的方法是不合理的. 刘春秀等^[4]对 p-A 碰撞 D-Y 过程的 K 因子进行了具体的计算, 表明了 K 因子是 x_N 及 x_T 的函数, 它的取值大致在 1.1—1.7 之间, 并且随着质心系能量缓慢改变. 因此, 对于具体核 D-Y 过程, 进一步认真计算 QCD 修正对其截面的影响以及对核效应函数 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 的影响是非常必要的.

在 EMC 效应发现以后, 提出了多种解释核效应的理论模型. 最近, 何祯民先生等^[5]提出了双重 Q^2 重标度模型, 该模型利用核动量守恒条件, 对价夸克、海夸克和胶子采用不同的 Q^2 重标度参数来描述束缚核子内部分子动量分布, 对轻子-核深度非弹性散射过程、核 D-Y 过程及 J/ψ 光生过程均给出了比较满意的解释. 本文在 QCD α_s 级近似下, 采用双重 Q^2 重标度模型, 计算了 p-A 碰撞 D-Y 截面与 p-D 碰撞 D-Y 截面之比 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 及没有加入 QCD 修正的 p-A 与 p-D D-Y 截面之比 $R(x_A, Q^2)$, 并与 E772 组的实验数据做了比较. 结果发现 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 与 $R(x_A, Q^2)$ 相比, 在 $0.03 \leq x_A \leq 0.3$ 之间都有不同程度的压低, 而与实验符合的情况有所改善. 表明对核 Drell-Yan 过程核效应的研究, QCD 修正是有一定意义的, 并且在计入这种修正后, 双重 Q^2 重标度模型仍然是有效的.

2 计算方法

在考虑 α_s 级 QCD 修正后, p-A 碰撞 D-Y 过程的硬子过程包括图 2 的朴素 D-Y 过程及图 3 的湮没图和图 4 的康普顿散射图. 其中湮没图包括顶角修正图(虚胶子图, 如图 3(a))以及胶子产生图(如图 3(b), 3(c)).

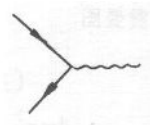


图 2 朴素 D-Y 过程

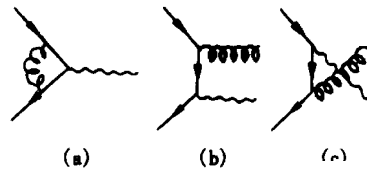


图 3 湮没图

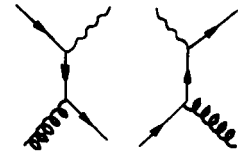


图 4 康普顿散射图

于是, p-A 碰撞 D-Y 过程微分截面可写为

$$\frac{d\sigma_A}{dx_p dx_T} = \frac{d\sigma_A^{\text{DY}}}{dx_p dx_T} + \frac{d\sigma_A^{\text{Ann}}}{dx_p dx_T} + \frac{d\sigma_A^{\text{C}}}{dx_p dx_T},$$

其中 x_p, x_A 分别定义为

$$x_p = \sqrt{\tau} e^y, x_A = \sqrt{\tau} e^{-y}, x_p x_A = \tau = Q^2/S = M^2/S,$$

其中 y 为轻子对的快度 (rapidity), M^2 为轻子对的不变质量的平方, \sqrt{S} 为入射核子和靶核内具有平均动量的束缚核子的质量中心系能量; x_p, x_A 则是湮没成 γ^* 的夸克与反夸克携带的入射核子的动量分数和束缚核子的平均动量分数. 上指标 DY, Ann, C 分别表示图 2, 图 3 及图 4 的贡献. 具体地,

$$\frac{d\sigma_A^i}{dx_p dx_A} = \int_{x_p}^1 dt_p \int_{x_A}^1 dt_A \left[\frac{d\hat{\sigma}_A^i(t_p, t_A)}{dx_p dx_A} Q_A^i(t_p, t_A) + \frac{d\hat{\sigma}_A^i(t_p, t_A)}{dx_p dx_A} Q_A^i(t_p, t_A) \right], \quad (5)$$

$$\frac{d\hat{\sigma}_A^i(t_p, t_A)}{dx_p dx_A} \equiv \frac{d\hat{\sigma}_A^i(P \leftrightarrow A)}{dx_p dx_A}, \quad (6)$$

其中 t_p, t_A 分别表示直接从入射核子与靶核内出来的夸克 (反夸克) 或胶子携带的入射核子的动量分数和靶核内束缚核子的平均动量分数, $i = \text{DY, Ann, 或 C}$. $Q_A^i(t_p, t_A)$ 是与三个过程相对应的入射核子和束缚核子内夸克 (反夸克) 或胶子的分布函数的组合. $d\hat{\sigma}_A^i/dx_p dx_A$ 表示各项子过程微分截面. 具体为

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\sigma}_A^{\text{DY}}(t_p, t_A)}{dx_p dx_A} &= \frac{4\pi\alpha^2}{9Q^2} \delta(t_p - x_p) \delta(t_A - x_A), \quad (7) \\ \frac{d\hat{\sigma}_A^{\text{Ann}}(t_p, t_A)}{dx_p dx_A} &= \frac{1}{2} C \delta(t_p - x_p) \delta(t_A - x_A) \\ &\times \left[1 + \frac{5}{3}\pi^2 - \frac{3}{2} \ln \frac{x_p x_A}{(1-x_p)(1-x_A)} + 2 \ln \frac{x_p}{(1-x_p)} \ln \frac{x_A}{(1-x_A)} \right] + \\ &\frac{1}{2} C \delta(t_A - x_A) \left[\frac{t_p^2 + x_p^2}{t_p^2 (t_p - x_p)_+} \ln \frac{2x_p(1-x_T)}{x_T(t_p + x_p)} + \frac{3}{2(t_p - x_p)_+} - \frac{2}{t_p} - \frac{3x_p}{t_p^2} \right] + (p \leftrightarrow A) + \\ &C \left[\frac{(\tau + t_p t_A)[\tau^2 + (t_p t_A)]}{(t_p t_A)^2 (t_p + x_p)(t_p + x_A)[(t_p - x_p)(t_A - x_A)]} - \frac{2\tau(\tau + t_p t_A)}{t_p t_A (t_p x_A + t_A x_p)} \right], \quad (8) \end{aligned}$$

式中的第 3 项为第 2 项的 p-A 交换项, $1/(t-x)_+, 1/[(t_p-x_p)(t_A-x_A)]_+$ 分别定义为

$$\begin{aligned} \int_x^1 dt \frac{f(t)}{(t-x)_+} &= \int_x^1 dt \frac{f(t) - f(x)}{t-x}, \\ \int_{x_p}^1 dt_p \int_{x_A}^1 dt_A \frac{f(t_p, t_A)}{[(t_p - x_p)(t_A - x_A)]_+} \\ &= \iint \frac{dt_p dt_A [f(t_p, t_A) - f(t_p, x_A) - f(x_p, t_A) + f(x_p, x_A)]}{(t_p - x_p)(t_A - x_A)}, \quad (10) \end{aligned}$$

(9) 式中的常数 C 为

$$C = \frac{16\alpha^2 \alpha_s(Q^2)}{27Q^2},$$

其中 $\alpha_s(Q^2)$ 为强作用耦合常数^[6]

$$\frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} = \frac{2}{\beta_0 \ln(Q^2/\Lambda^2)} - \frac{2\beta_1 \ln \ln(Q^2/\Lambda^2)}{\beta_0^3 [\ln(Q^2/\Lambda^2)]^2},$$

$$\beta_0 = 11 - 2f/3, \quad \beta_1 = 102 - 38f/3,$$

f 为强子内夸克味道数, 对于自由核子取 $f=3$, 在 QCD 领头阶近似的条件下取 $\Lambda_{\text{LO}} =$

232MeV.

$$\frac{d\hat{\sigma}_A^C}{dx_p dx_A} = \frac{3}{8} C\delta(t_A - x_A) \left[\frac{x_p^2 + (t_p - x_p)^2}{2t_p^3} \ln \frac{2x_p(1-x_A)}{x_A(t_p+x_p)} + \frac{1}{2t_p} - \frac{3x_p(t_p-x_p)}{t_p^3} \right] + \frac{3}{8} C \left[\frac{x_A(\tau+t_p t_A)(\tau^2+(\tau-t_p t_A)^2)}{t_p^3 t_A^2 (t_p x_A + t_A x_p)(t_A+x_A)(t_A-x_A)_+} + \frac{\tau(\tau+t_p t_A)(t_p t_A^2 x_p + \tau(t_p x_A + 2t_A x_p))}{(t_p t_A)^2 (t_p x_A + t_A x_p)^3} \right]. \quad (13)$$

$Q_A^i(t_p, t_A)$ 的具体形式为

$$Q_A^{DY}(t_p, t_A) = Q_A^{Am}(t_p, t_A) = \sum_f e_f^2 [q_f^p(t_p, Q^2) \bar{q}_f^A(t_A, Q^2)], \quad (14)$$

$$\tilde{Q}_A^{DY}(t_p, t_A) = \tilde{Q}_A^{Am}(t_p, t_A) = \sum_f e_f^2 [\bar{q}_f^p(t_p, Q^2) q_f^A(t_A, Q^2)], \quad (15)$$

$$Q_A^C(t_p, t_A) = \sum_f e_f^2 g^p(t_p, Q^2) (q_f^A(t_A, Q^2) + \bar{q}_f^A(t_A, Q^2)), \quad (16)$$

$$\tilde{Q}_A^C(t_p, t_A) = \sum_f e_f^2 (q_f^p(t_p, Q^2) + \bar{q}_f^p(t_p, Q^2)) g^A(t_A, Q^2). \quad (17)$$

因此,在考虑了 QCD 修正后, p-A 与 p-D D-Y 过程的微分截面之比为

$$R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2) = \int \left(\frac{d\sigma_A^{DY}}{dx_p dx_A} + \frac{d\sigma_A^{Am}}{dx_p dx_A} + \frac{d\sigma_A^C}{dx_p dx_A} \right) dx_p \Big/ \int \left(\frac{d\sigma_D^{DY}}{dx_p dx_T} + \frac{d\sigma_D^{Am}}{dx_p dx_T} + \frac{d\sigma_D^C}{dx_p dx_T} \right) dx_p. \quad (18)$$

对于束缚核子中的部分子分布函数,我们采用双重 Q^2 重标度模型^[5]. 此模型对价夸克,海夸克和胶子分别引入不同的 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可分别表示为

$$V^A(x, Q^2) = V^N(x, \xi_v Q^2), \quad (19a)$$

$$S^A(x, Q^2) = S^N(x, \xi_s Q^2), \quad (19b)$$

$$G^A(x, Q^2) = G^N(x, \xi_g Q^2), \quad (19c)$$

其中 3 个参数通过核动量守恒相联系,只有两个是独立的,此模型给出了一系列核的 ξ_v , ξ_s 和 ξ_g 值(如表 1)

其中自由核子的分布函数,采用 GRV^[6] 的 DIS 方案 LO 下给出的结果.

3 结果与讨论

在考虑 DIS 方案下 α_s 级 QCD 修正后,利用双重 Q^2 重标度模型分别计算了 ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ 三种核的核效应函数 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$, 并与没有 QCD 修正的 $R(x_A, Q^2) = \left(\int \frac{d\sigma_A^{DY}}{dx_p dx_A} dx_p \right) \Big/ \left(\int \frac{d\sigma_D^{DY}}{dx_p dx_T} dx_p \right)$ 做了对照. 为了与 E772 合作组的实验数据^[2] 进行比较,计算中 x_N 的积分范围由下列条件所限制: $x_N \geq x_{T(A)}$, $0.025 \leq x_{T(A)} \leq 0.30$, $4\text{GeV} \leq M \leq 9\text{GeV}$, $M \geq 11\text{GeV}$, $\sqrt{S} = 40\text{GeV}$.

计算结果表明在 $0.03 < x_A < 0.3$ 区域, R_{QCD} 比 R 确实有所压低. 曲线如图 5 所示,图

表 1

A	ξ_v	ξ_s	ξ_g
${}^{12}_6\text{C}$	1.30	0.70	0.86 ²
${}^{40}_{20}\text{Ca}$	1.35	0.67	0.81 ²
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	1.41	0.62	0.76 ²
${}^{119}_{50}\text{Sn}$	1.57	0.45	0.58 ²

中虚线表示没有 QCD 修正的 R , 实线表示含 QCD 修正的 R_{QCD} . 表 2 中具体给出了不同 x_A 区域中, $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 相对 $R(x_A, Q^2)$ 的压低幅度

^{12}C		
x_A	下降幅度	幅度变化情况
0.03—0.18	0.23%—0.035%	逐渐减小
0.19—0.23	0.036%—0.068%	逐渐增加
0.24—0.30	0.065%—0.048%	逐渐减小
^{40}Ca		
x_A	下降幅度	幅度变化情况
0.03—0.18	0.24%—0.057%	逐渐减小
0.19—0.23	0.059%—0.11%	逐渐增加
0.24—0.30	0.10%—0.082%	逐渐减小
^{56}Fe		
x_A	下降幅度	幅度变化情况
0.03—0.17	0.27%—0.078%	逐渐减小
0.18—0.23	0.079%—0.15%	逐渐增加
0.24—0.30	0.14%—0.11%	逐渐减小

从表 2 可以看出, 在 $0.03 \leq x_A \leq 0.3$ 区内, 核质量数 A 越大, R 值下降的幅度越大, 即核质量数 A 越大, 核效应越明显.

在较小 x 区 (对于较轻质量的核 ^{12}C 和 ^{40}Ca , 在 $0.03 \leq x_A < 0.18$ 区; 对于较重质量的核 ^{56}Fe , 在 $0.03 \leq x_A$

< 0.17 区.) $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 下降的幅度随 x_A 的增加逐渐减小. 这主要是因为在这一区域, 海夸克和胶子对康普顿项和湮没项的贡献较大, 而随着 x_A 的增大, 海夸克和胶子的密度随之减小, 海夸克、胶子对康普顿项和湮没项的贡献随之减小, 又由于随 x_A 的增大, 核效应的影响也逐渐变弱, 从而使康普顿项和湮没项的贡献都有所减小, 这样使得 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 的分子、分母与原来相比变化越来越不明显, 因此 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 的下降幅度逐渐减小.

在中等 x 区 (对于较轻质量的核 ^{12}C 和 ^{40}Ca , 在 $0.19 \leq x_A < 0.23$ 区; 对于较重质量的核 ^{56}Fe , 在 $0.18 \leq x_A < 0.23$ 区.) 核效应较小, p-D 过程的康普顿项与湮没项贡献之和比 p-A 过程中这两项的贡献稍大些, 随着 x_A 的增加, p-D 这两项的贡献比 p-A 碰撞的增加的快, 所以 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 下降的幅度有所增加.

在 $0.24 \leq x_A \leq 0.3$ 区内, 由于价夸克的影响和积分条件的限制使得 $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 下降的幅度逐渐减小.

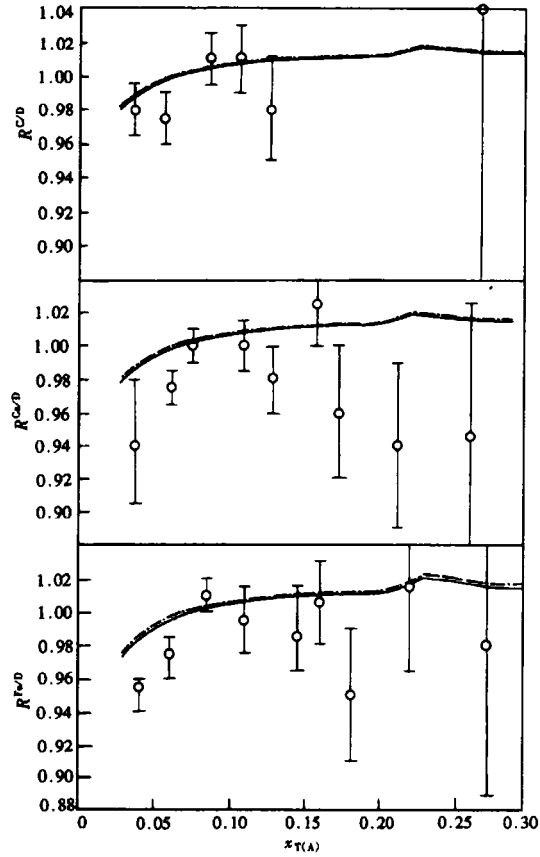


图 5 p-A 碰撞 D-Y 过程的核效应函数

总之,在考虑 QCD 的 α_s 级修正项后,在 $0.03 \leq x_A \leq 0.3$ 区域内, $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ 的值与没有 QCD 修正的 $R(x_A, Q^2)$ 值相比,对不同的核靶与不同的 x_A 区域,都有不同程度的压低,压低幅度在 0.035%—0.27% 之间,与实验数据符合的情况有所改善.这说明,研究核 D-Y 过程的核效应时, QCD 修正的影响是有一定意义的,并且在计入这种修正后,双重 Q^2 重标度模型仍然是有效的.

参考文献 (References)

- 1 Stroynowski R. Phys. Rep., 1981, **71**(1):1
- 2 Alde D M et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **64**:2479
- 3 Kubar-andre J, Meunier J C, Plaut G. Nucl. Phys., 1980, **B175**:251
- 4 LIU ChunXiu et al. High Energy Phys. and Nucl. (in Chinese), 2000, **24**(2):131
(刘春秀等.高能物理与核物理,2000, **24**(2):131)
- 5 HE ZhenMin, YAO XiaoXia, DUAN ChunGui et al. Eur. Phys. J., 1998, **C4**:301
- 6 Gluck M, Reya E, Vogt A. Z. Phys., 1995, **C67**:433

Nuclear Effect in p-A Drell-Yan Process with QCD Corrections*

ZHANG YuMin DUAN ChunGui YAN ZhanYuan HE ZhenMin
(Physics Department, Hebei Teachers' University, Shijiazhuang 050016, China)

Abstract Taking into account perturbative QCD α_s -order approximation, using double Q^2 rescaling model, the cross section ratios of Drell-Yan process in p-A collision to p-D collision are calculated. Comparing these results with the ratios without QCD corrections, it shows the nuclear effect functions $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ are suppressed by different extent for different nucleus, in different ranges of $x_{A(T)}$. Comparing with the E772 experiment data, $R_{\text{QCD}}(x_A, Q^2)$ are better fitted than $R(x_A, Q^2)$. It is shown that the QCD corrections are interesting in studying the nuclear effect of D-Y process. After taking into account of α_s -order corrections, double Q^2 -rescaling model is still effective.

Key words Drell-Yan process, nuclear effect, QCD correctin

Received 6 July 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China and Hebei Natural Science Foundation