

文章编号: 1007-4627(2006)01-0006-04

非微扰 QCD 和核遮蔽效应对 K 因子的影响*

智海素^{1,3}, 侯召宇^{2,3}

(1 石家庄职业技术学院基础部, 河北 石家庄 050081;

2 石家庄铁道学院数理系, 河北 石家庄 050043;

3 河北师范大学物理学院, 河北 石家庄 050016)

摘要: 考虑非微扰量子色动力学物理真空夸克凝聚效应, 计算了碳核与碳核在质心系能量分别为 630 和 200 GeV 时碰撞 Drell-Yan 过程的 K 因子, 以及加入核遮蔽因子后非微扰效应对 K 因子的影响, 并把计算结果与没有考虑夸克凝聚非微扰效应的 K 值进行了对比。结果表明, 非微扰效应和核遮蔽效应对 K 因子影响很小。

关键词: K 因子; Drell-Yan 过程; 夸克凝聚; 非微扰量子色动力学; 核遮蔽效应

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 非微扰 QCD 对 K 因子的影响

通过轻子与核子的深度非弹性散射实验, 可测量核子的结构函数, 即核子内夸克组分的动量分布函数, 记为 $F_2(x_2, Q^2)$, 其中 x_2 为标度变量, Q^2 为四动量的转移。再考虑非微扰夸克凝聚核效应得到核子结构函数^[1]

$$\begin{aligned} F_{2NP}(x_2, Q^2) &= F_2(x_2, Q^2)R_{2NP}(x_2, Q^2) \\ &= \sum_f e_f^2 x_2 \bar{q}_f(x_2, Q^2), \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\bar{q}_f(x_2, Q^2) \equiv q_f(x_2, Q^2) R_{2NP}(x_2, Q^2). \quad (2)$$

(1)式中, $R_{2NP}(x_2, Q^2)$ 为核子内 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚非微扰修正因子, f 为强子内的夸克味道。显然, $\bar{q}_f(x_2, Q^2)$ 不同于 $q_f(x_2, Q^2)$, 它不满足部分子求和规则^[2]。因此, $F_2(x_2, Q^2)$ 不再是夸克-部分子模型中那样简单表述成夸克分数电荷平方做权重的夸克、反夸克几率分布之和, 考虑非微扰效应后 $F_2(x_2, Q^2)$ 既是 x_2 的函数又是 Q^2 的函数, 其 Q^2 依赖性来自于量子色动力学(QCD)物理真空中夸克凝聚所导致的非微扰效应, 它不同于微扰 QCD 对部分子模型修正所引起的标度破坏所对应的 Q^2 依赖性。

同理, 可以得到另一个核子结构函数

$$F_{1NP}(x_2, Q^2) = F_1(x_2, Q^2)R_{1NP}(x_2, Q^2), \quad (3)$$

其中

$$R_{1NP}(x_2, Q^2) = 1 + \frac{(1-4\kappa)}{\kappa Q^2} \left(\frac{4\pi\alpha_s \langle \bar{q}q \rangle}{3} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

以此为基础进行的 $R = \sigma_1 / \sigma_T$ 理论计算很好地和实验数据相吻合^[3]。

回顾核 Drell-Yan 过程的 α_s 级 QCD 修正, 这一修正来自于湮灭项和康普顿散射项, 即 Drell-Yan 过程的反应截面公式在朴素 Drell-Yan 过程截面的基础上增加了两个修正项。计算到 α_s 级, 对于入射强子为核子、靶也为核子的 Drell-Yan 过程 K 因子可具体表示为^[4]

$$\begin{aligned} K(x_1, x_2) &= \\ & \left(\frac{d\sigma^{DY}}{dx_1 dx_2} + \frac{d\sigma^{Ann}}{dx_1 dx_2} + \frac{d\sigma^C}{dx_1 dx_2} \right) \left(\frac{d\sigma^{DY}}{dx_1 dx_2} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

在研究核 Drell-Yan 过程时, 通常把核子内的部分子近似看作自由粒子, 即在粒子“渐进自由”性质的基础上, 采用 QCD 微扰论的方法进行分析。“渐进自由”最重要的特点是在约 10^{-14} cm 的小尺度下夸克胶子的相互作用极弱, 然而在约 10^{-13} cm 的尺度下, 夸克胶子的相互作用极强, QCD 理论成为非微扰的, 此时应该考虑非微扰的 QCD 效应。

在 Drell-Yan 过程中, 考虑 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚核效应对

收稿日期: 2005 - 10 - 08; 修改日期: 2005 - 12 - 30

* 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(A2005000535)

作者简介: 智海素(1969-), 女(汉族), 河北元氏人, 副教授, 硕士, 从事粒子物理研究; E-mail: zhihs@sjzpt.edu.cn

核子结构函数的影响, 含有非微扰效应的 $Q_A^n(t_1, t_2)$ 上角标 $n=DY, Ann$ 或 C , 分别表示 Drell-Yan 项(DY)、湮没项(Ann)、康普顿散射项(C); 下角标

A 表示碰撞核子内夸克(反夸克)和胶子的动量分布函数的组合^[5], $Q_A^n(t_1, t_2)$ 具体表达式为

$$Q_A^{DY}(t_1, t_2) = Q_A^{Ann}(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 q_f(t_1, Q^2) \bar{q}_f(t_2, Q^2) R_{1NP}(x_2, Q^2) R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (6)$$

$$\tilde{Q}_A^{DY}(t_1, t_2) = \tilde{Q}_A^{Ann}(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 \bar{q}_f(t_1, Q^2) q_f(t_2, Q^2) R_{1NP}(x_2, Q^2) R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (7)$$

$$Q_A^C(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 g^1(t_1, Q^2) [q_f(t_2, Q^2) + \bar{q}_f(t_2, Q^2)] R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (8)$$

$$\tilde{Q}_A^C(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 [q_f(t_1, Q^2) + \bar{q}_f(t_1, Q^2)] g^2(t_2, Q^2) R_{1NP}(x_2, Q^2). \quad (9)$$

2 计入核遮蔽和 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚核效应后 K 因子的修正

E772 合作组证实 Drell-Yan 横截面上两个不同核靶显示出核遮蔽效应^[6], 在核靶深度非弹性散射 EMC 效应的测量中^[7], 在标度无关的区域也观察到了核遮蔽效应。因为核遮蔽效应在极小的部分子核环境之中是重要的, 核遮蔽因子可以表示成

$$H_\alpha(x, Q^2, A) = \begin{cases} 1 - k_\alpha(A^{1/3} - 1), & x < x_0 \\ 1 - k_\alpha(A^{1/3} - 1) \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_n} \right) \left(\frac{1}{x_A} - \frac{1}{x_n} \right)^{-1}, & x_0 \leq x \leq x_n \\ 1, & x > x_n \end{cases} \quad (10)$$

其中, 下角标 $\alpha=v, s$ 和 g 分别表示价夸克、海夸克和胶子; $x_n = \frac{1}{2} R_n m_n$, $x_0 = \frac{1}{2} R_A m_n$, R_n 是核子半径; k_α 代表遮蔽强度, 它可以由实验拟合得到。从公式(10)看到, 在核环境中胶子分布将随着大的质量数 A 和胶子遮蔽强度 k_g 逐渐增大。所以它也许是预期的那个 K 因子在核遮蔽区域将依赖于 A 和 k_g , 显然这是由胶子康普顿散射贡献的。

同时计入核遮蔽效应和非微扰效应, 得到 $Q_A^n(t_1, t_2)$ 具体表示如下:

$$Q_A^{DY}(t_1, t_2) = Q_A^{Ann}(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 q_f(t_1, Q^2) H_s \bar{q}_f(t_2, Q^2) R_{1NP}(x_2, Q^2) R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (11)$$

$$\tilde{Q}_A^{DY}(t_1, t_2) = \tilde{Q}_A^{Ann}(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 \bar{q}_f(t_1, Q^2) H_s q_f(t_2, Q^2) R_{1NP}(x_2, Q^2) R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (12)$$

$$Q_A^C(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 g^1(t_1, Q^2) [H_s q_f(t_2, Q^2) + H_s \bar{q}_f(t_2, Q^2)] R_{2NP}(x_2, Q^2), \quad (13)$$

$$\tilde{Q}_A^C(t_1, t_2) = \sum_f e_f^2 [q_f(t_2, Q^2) + \bar{q}_f(t_2, Q^2)] H_s g^2(t_1, Q^2). \quad (14)$$

由于考虑到碰撞核子的夸克(反夸克)和胶子的动量分布函数会受到核遮蔽和 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚非微扰效应的影响, 因此在(11)–(14)式中, 加入了遮蔽因子 H_α 和非微扰修正项。

3 结果讨论

计算时以部分子模型为基础, 考虑 QCD 的 α_s 级微扰修正, 取夸克凝聚的标准唯象值 $\langle \bar{q}q \rangle = -(0.25 \text{ GeV})^3$ ^[8], $x_1 = 0.5$, 在质心系能量分别取

630 和 200 GeV 时, 分下面两种情况计算碳核与碳核 D-Y 过程的 K 因子并进行讨论。计算过程中, 把小数点后面的有效数字取到第 10 位, 表中显示前 9 位有效数字。

3.1 仅考虑非微扰 QCD $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚核效应对 K 因子的修正

把含非微扰 QCD 修正的 K 因子记为 K_R , 未考虑非微扰修正的 K 因子记为 K_0 。 \bar{K}_R 和 \bar{K}_0 分别为 x_2 所对应的区间段内的平均值, $(\bar{K}_R - \bar{K}_0)/\bar{K}_0$

为 x_2 区间段内 \bar{K}_R 相对于 \bar{K}_0 的平均变化幅度。计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$, 质心系能量 $\sqrt{s}=200$ GeV, 微扰和非微扰下的 K 因子
平均值和相对于 \bar{K}_0 的变化平均幅度

x_2	\bar{K}_R	\bar{K}_0	$(\bar{K}_R - \bar{K}_0)/\bar{K}_0/(\%)$
$3 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	1.762 926 57	1.795 261 90	-1.801 148
$7 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	1.460 588 66	1.466 215 76	-0.383 783
0.000 6-0.01	1.240 400 22	1.240 804 84	-0.032 609
0.02-0.1	1.202 767 61	1.202 769 45	-0.000 153
0.2-0.9	1.258 916 59	1.258 916 58	-0.000 000

表 2 $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$, 质心系能量 $\sqrt{s}=630$ GeV, 微扰和非微扰下的 K 因子
平均值和相对于 \bar{K}_0 的变化平均幅度

x_2	\bar{K}_R	\bar{K}_0	$(\bar{K}_R - \bar{K}_0)/\bar{K}_0/(\%)$
$3 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	1.290 197 86	1.290 576 08	-0.029 307
$7 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	1.260 155 88	1.260 349 13	-0.015 333
0.000 6-0.01	1.179 598 26	1.179 620 76	-0.001 876
0.02-0.1	1.166 472 82	1.166 472 94	-0.000 010
0.2-0.9	1.219 275 77	1.219 275 78	-0.000 000

3.2 同时计入核遮蔽与非微扰 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚核效应后的 K 因子

在核遮蔽情况下, 核内存在大量的价夸克、海夸克和胶子, 在小 x 段海夸克多于价夸克, 海夸克起主要作用。核子内部分子纵向线度大于核子间距, 那么来自相邻核子的部分子相互重叠并发生相互作用, 使较小 x 区域内的部分子融合成较大 x 的

部分子, 从而导致核遮蔽效应。这里我们把核遮蔽效应下的 K 因子计为 K_{Z0} , 把同时计入核遮蔽与非微扰 $\langle \bar{q}q \rangle$ 凝聚核效应的 K 因子计为 K_{ZR} , \bar{K}_{Z0} 和 \bar{K}_{ZR} 分别是 x_2 所对应的区间段内的 K_{Z0} 和 K_{ZR} 的平均值, $(\bar{K}_{ZR} - \bar{K}_{Z0})/\bar{K}_{Z0}$ 为 x_2 区间段内 \bar{K}_{ZR} 相对于 \bar{K}_{Z0} 的平均变化幅度。结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$, 质心系能量 $\sqrt{s}=200$ GeV, 考虑核遮蔽效应后的微扰和非微扰下的 K 因子
平均值和相对于 \bar{K}_{Z0} 的变化平均幅度

x_2	\bar{K}_{ZR}	\bar{K}_{Z0}	$(\bar{K}_{ZR} - \bar{K}_{Z0})/\bar{K}_{Z0}/(\%)$
$3 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	1.766 471 99	1.791 941 63	-1.421 342 9
$7 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	1.464 445 61	1.461 333 46	0.212 966 5
0.000 6-0.01	1.243 954 48	1.235 182 03	0.710 215 5
0.02-0.1	1.204 265 52	1.202 168 18	0.174 463 0
0.2-0.9	1.265 607 42	1.265 185 75	0.033 328 8

表 4 $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$, 质心系能量 $\sqrt{s}=630$ GeV, 考虑核遮蔽效应后的微扰和非微扰下的 K 因子
平均值和相对于 \bar{K}_{Z0} 的变化平均幅度

x_2	\bar{K}_{ZR}	\bar{K}_{Z0}	$(\bar{K}_{ZR} - \bar{K}_{Z0})/\bar{K}_{Z0}/(\%)$
$3 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	1.291 444 92	1.289 179 52	0.175 724
$7 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	1.262 456 14	1.257 405 32	0.401 686
0.000 6-0.01	1.182 117 57	1.175 575 20	0.556 525
0.02-0.1	1.167 915 30	1.166 389 41	0.130 822
0.2-0.9	1.225 250 99	1.224 882 34	0.030 097

由表 1—表 4 数据分析可知:

(1) 非微扰 QCD 效应对 K 因子的修正仍有很微弱的影响。当质心系动量分布 x_2 小时, K 因子变化相对较明显。随着 x_2 的增大, 变化越来越小。超过某一 x_2 值后, K_R 与 K_0 趋向于相同的值, 非微扰效应不再起任何作用。

(2) 非微扰效应与核-核相互作用的质心系能量有关, 质心系能量越小, 非微扰 QCD 作用相对越大。

(3) 比较两种情况可知, 非微扰效应在两种情况下对 K 因子影响规律不同。前者在小 x_2 段, 非微扰效应使 K 因子变小, 而后者只有在小能量时 ($\sqrt{s}=200 \text{ GeV}$) 的起始段 ($x_2=3 \times 10^{-5}—6 \times 10^{-5}$)

使 K 因子变小, 其他各 x_2 值处均使 K 因子变大。

通过计算, 我们可以看到: QCD 物理真空夸克凝聚非微扰效应对 K 因子值的影响很弱。之所以这样, 是因为在朴素 Drell-Yan 过程产生的截面中, 非微扰效应起着重要的作用, 就像部分子分布函数所反映的那样, 而在 QCD 修正项中, 康普顿散射和湮灭项份量很小, 朴素 Drell-Yan 截面加 QCD 修正项与朴素 Drell-Yan 截面的比值将非微扰项抵消, 因而在 K 因子中只有很微弱的影响。另外, 这种非常微弱的影响和能量的大小有关, 能量越大影响越小。普通情况下和考虑核遮蔽情况下的非微扰效应对 K 因子影响的趋势稍有不同, 其作用机制和原因有待于进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] Ashman J. Phys Rev, 1997, **D56**: 5 330.
 [2] Yang Jianjun, Ma Baqiang, Li Guanglie. Phys Lett, 1998, **B423**(1-2): 162.
 [3] Dasu S, de Barbaro P, Bodek A, *et al.* Phys Rev, 1994, **D49**: 5 641; Tao L H, Andivahis I, Anthony P, *et al.* Z Phys, 1996, **C70**: 387.
 [4] Kubar J, Bellac M L E, Meunier J L, *et al.* Phys Lett, 1991, **C4**: 2 762.
 [5] Hou Zhaoyu, Zheng Qiao, Duan Chungui, *et al.* Commun Theor Phys, 2000, **34**: 377.
 [6] Alde D M, Baer H W, Carey T A, *et al.* Phys Rev Lett, 1990, **64**: 2 479.
 [7] CERN NA2/EMC, Aubert J J, Basscompierre G, Becks K H, *et al.* Phys Lett, 1985, **B152**: 433.
 [8] Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I. Nucl Phys, 1979, **B147**: 448.

Non-perturbative QCD and Nuclear Shadowing Effect on K-factor*

ZHI Hai-su^{1,3}, HOU Zhao-yu^{2,3}

(1 Basic Education Department, Shijiazhuang Professional Technology, Shijiazhuang 050081, China;

2 Mathematics and Physics Department, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China;

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

Abstract: Considering quark condensate contributions from the QCD vacuum, the non-perturbative effect on the K-factor is investigated for the C-C collision Drell-Yan process with and without nuclear shadowing respectively, at the center-of-mass energy $\sqrt{s}=630$ and 200 GeV . Comparison of the results indicates that both the non-perturbative effect and the nuclear shadowing effect pose a weak influence on the K-factor.

Key words: K-factor; Drell-Yan process; quark condensation; non-perturbative QCD; nuclear shadowing

* Foundation Item: Natural Science Foundation of Hebei Province(A2005000535)