

双胶子交换模型中 J/ψ 的衍射产生*

阎占元^{1,1)} 段春贵² 厉光烈^{3,4}

1(华北电力大学物理教学部 保定 071003)

2(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

4(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 利用双胶子交换模型并结合重夸克偶素的色八重态产生机制,计算了 π 与 p 碰撞过程中 J/ψ 的衍射产生总截面. 结果发现:随着质心系能量的增加, J/ψ 衍射产生的总截面逐渐增大;并且,不同的 π 介子中的胶子分布函数给出的总截面偏离也逐渐加大. 计算结果与未来的实验数据比较,可以检验 π 介子中的胶子分布函数及双胶子交换模型.

关键词 衍射过程 部分子分布函数 Pomeron

1 引言

在高能强作用软过程中,带有真空量子数的 Regge 轨迹 Pomeron (IP) 起着非常重要的作用. 但是, Pomeron (IP) 的结构及它和强子相互作用的性质至今仍不清楚. 早在 1985 年, G. Ingelman 和 P. E. Schlein^[1] 就认为, Pomeron 类似于强子, 具有部分子结构(主要成分是胶子). 参与衍射过程的强子放出一个 Pomeron, 这个 Pomeron 中的部分子再去参与硬过程, 结果产生大横动量的喷注. 通过硬衍射产生过程的实验数据可以拟合出 Pomeron 的部分子分布函数. 但是, 由不同的衍射过程得到的 Pomeron 的部分子分布函数相差较大^[2]. 如何在 QCD 的框架下研究衍射问题, 一直是人们关注的课题. F. E. Low 和 S. Nussinov 认为, Pomeron 的交换可以看成处于色单态的胶子对的交换, 这样从 QCD 的角度出发就可以对衍射过程进行因子化, 这就是双胶子交换模型^[3]. 这个模型成功地解释了 DESY ep 对撞机上的实验数据^[4].

对于重夸克偶素 ($q\bar{q}$) 的产生问题, 以前人们一

直用色单态模型 (CSM)^[5], 认为与末态强子具有相同量子数的重夸克偶素对末态的贡献是领头阶的, 其他状态的贡献可以忽略, 但是计算结果总低于实验数据很多, 迫使人们考虑其他的产生机制. 1995 年, E. Braaten 和 S. Fleming 提出重夸克偶素的色八重态产生机制^[6], 它是建立在非相对论量子色动力学 (NRQCD) 基础上的. 在 NRQCD 的框架下 $q\bar{q}$ 可以写成 Fock 态的叠加,

$$|q\bar{q}\rangle = O(1) |q\bar{q}[^3S_1^{(1)}]\rangle + O(v) |q\bar{q}[^3P_J^{(8)}]g\rangle + O(v^2) |q\bar{q}[^1S_0^{(8)}]g\rangle + O(v^2) |q\bar{q}[^3S_1^{(1,8)}]gg\rangle + O(v^2) |q\bar{q}[^3P_J^{(1,8)}]gg\rangle + \dots, \quad (1)$$

NRQCD 的因子化过程是建立在两套标度基础上的: 强作用耦合常数 α_s 和夸克对之间的相对速度 v . 如果 $q\bar{q}$ 的产生只与 v 的阶次有关, 则当 $v \rightarrow \infty$ 时, 上式只剩下第一项, 恢复到色单态模型. 但是考虑到 α_s 的阶次和衰变几率, 其他过程不可忽略, 有时甚至会超过色单态的贡献. 因此, $q\bar{q}$ 可以通过色单态和色八重态两种渠道产生. 因子化过程中, NRQCD 把

2002-08-12 收稿

* 国家重点基础研究发展规划 (G20000774), 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJ952-SW-N02), 国家自然科学基金 (10175074), 河北省自然科学基金 (103143) 和华北电力大学青年科研基金项目资助

1) E-mail: zhanyuanyan@163.net

夸克对的产生和强子化过程分为两个过程,即长程过程和短程过程.短程过程是指 $q\bar{q}$ 的产生过程,可以用微扰 QCD 来计算;长程过程是指形成束缚态的过程,可以用长程矩阵元来表示,由 NRQCD 的计数规则,可以给出长程矩阵元的阶次,但是短程元的大小要由实验来确定.

对于 π 介子中的部分子分布函数,深度非弹性散射 (DIS) 过程、Drell-Yan 过程和格点 QCD 的计算使我们对 π 介子中的夸克分布有了较好的了解,但是对于 π 介子中的胶子分布情况却了解的比较少,尤其是对于 π 介子中胶子与海夸克所占比重问题,目前仍存在较大的分歧^[7].因此,通过对相关 π 介子与其他强子碰撞的高能过程的研究,可以进一步加深人们对 π 介子中部分子分布情况的认识^[8].

本文利用双胶子交换模型,并结合重夸克偶素的色八重态产生机制,对 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程进行了研究.计算中使用 1992 年 M. Gluck, E. Reya, 和 A. Vogt (GRV)^[9] 及 1999 年 M. Gluck, E. Reya, 和 Schienbein (GRS)^[10] 给出的 π 介子中部分子的分布函数,理论计算得到的 J/ψ 衍射产生的总截面随质心系能量的增加逐渐增大,并且随着质心系能量的增加,两套 π 介子部分子分布函数给出的总截面偏离加大.依据双胶子交换模型, $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程中 J/ψ 衍射产生的总截面只与 π 和 p 的胶子分布函数有关,所以理论计算与未来实验数据的比较不但可以使我们进一步了解衍射过程的因子化过程,还可以检验 π 介子的胶子分布函数

2 计算过程

根据双胶子交换模型, $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程示意图如图 1 所示.

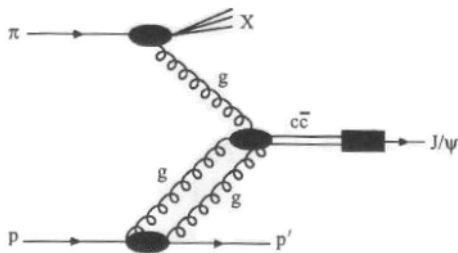


图 1 π - p 碰撞中 J/ψ 衍射产生示意图

根据 J/ψ 的色八重态产生机制的计数规则,矩阵元 $\langle 0 | \langle g^{\mu\nu} [^3S_1] | 0 \rangle$, $\langle 0 | \langle g^{\mu\nu} [^1S_0] | 0 \rangle$,

$\langle 0 | \langle g^{\mu\nu} [^3P_J] | 0 \rangle / m_c^2$, 都是 $m_c^2 v^2$ 阶,应该同时考虑这些态的贡献.但是,由于双胶子交换模型中交换的是真空量子数,所以 1S_0 和 3P_J 态对 J/ψ 的产生没有贡献,图 1 所示的过程中只有 3S_1 态对结果有贡献.图 2 中画出了 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程中最低阶费曼图.

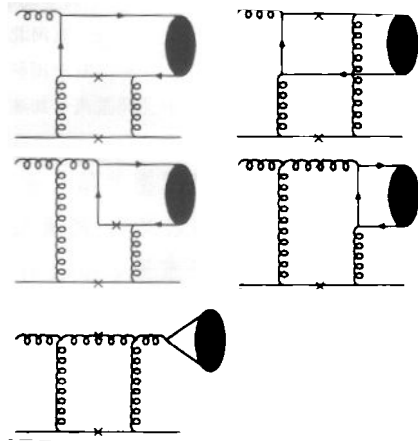


图 2 π - p 碰撞中 J/ψ 衍射产生在双胶子交换模型中的最低阶费曼图

由文献[4]中计算此类费曼图的方法,可以得到短程过程 $gp \rightarrow J/\psi p$ 的产生振幅为:

$$\text{Im. } \mathcal{A}(gp \rightarrow (c\bar{c}) [^3S_1^{(8)}] p) = F \times \left(-\frac{13}{18} \right) \delta_s^m \frac{1}{s} (sg_m - 2p_{2\mu}q_\nu - 2P_\mu p_{2\nu}) \epsilon_\mu^\alpha \epsilon_\nu^\beta \times \int \frac{dk_\perp^2}{k_\perp^2} \frac{1}{M_\psi^2} f(x', x''; k_\perp^2). \quad (2)$$

其中 p_2, q 和 P_ψ 分别为质子,胶子和 J/ψ 的四动量, $s = (q + p_2)^2$, ϵ_μ^α 和 ϵ_ν^β 分别是质子中的胶子和 J/ψ 的极化矢量,

$$f(x', x''; k_\perp^2) = \frac{\partial G(x', x''; k_\perp^2)}{\partial \ln k_\perp^2}. \quad (3)$$

$G(x', x''; k_\perp^2) \approx xg(x, \bar{Q}^2)$, $g(x, \bar{Q}^2)$ 为质子中胶子的部分子分布函数, $x = x' - x''$, x' 和 x'' 分别为质子中两个胶子的动量分数, $F = \frac{3\pi}{2} g_s^3 m_c s$, 计算中取 $M_\psi = 2m_c$, $m_c = 1.5\text{GeV}$ 是粲夸克的质量.

应用 NRQCD 的因子化方法可以得到:

$$\frac{d\sigma(gp \rightarrow J/\psi p)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{169\pi^4 m_c}{32 \times 27} \times \frac{\alpha_s(Q^2)^3 \langle 0 | \langle g^{\mu\nu} [^3S_1] | 0 \rangle}{M_\psi^4} \times [xg(x, \bar{Q}^2)]^2. \quad (4)$$

最后, $\pi + p \rightarrow p + J/\psi + X$ 过程中 J/ψ 衍射产生的总截面可表示为

$$\sigma(\pi + p \rightarrow p + J/\psi + X) = \frac{1}{b} \frac{169\pi^4 m_c}{32 \times 27} \frac{\alpha_s(Q^2)^3 \langle 0 | \chi_8^{J/\psi} [^3 S_1] | 0 \rangle}{M_\psi^8} \times \int_{x_{\min}}^1 dx_1 g_\pi(x_1, \overline{Q^2}) [xg(x, \overline{Q^2})]^2, \quad (5)$$

其中 $x = M_\psi^2/[x_1 E_{c.m.}(\pi p)]$, 衍射过程中一般 $x \leq 0.05$, 所以 $x_{\min} = 20 M_\psi^2/E_{c.m.}^2(\pi p)$.

3 计算结果与讨论

利用上面给出的公式, 计算了 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程的总截面, 计算中 $b = 4.5 \text{GeV}^{-2}$ 是该过程中 J/ψ 衍射产生的斜度^[1], 矩阵元 $\langle 0 | \chi_8^{J/\psi} [^3 S_1] | 0 \rangle = 1.12 \times 10^{-2} \text{GeV}^{3/2}$, π 的胶子分布函数取 GEV(LO)92^[8] 和 GRS(LO)99^[9] 的结果, p 中的胶子分布用 GRV98^[12] 给出的结果. 图 3 中画出 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程中 J/ψ 衍射产生的总截面随 π 与 p 的质心系能量 $E_{c.m.}(\pi p)$ 在 $100 \leq E_{c.m.}(\pi p) \leq 300 \text{GeV}$ 范围内的变化曲线, 其中实线是用 GRV(LO)92 给出的 π 介子的胶子分布函数计算的结果, 虚线是 GRS(LO)99 给出的 π 介子的胶子分布函数计算的结果. 从图中可以看出: J/ψ 衍射产生的总截面随质心系能量的增加逐渐增大, 并且, 随着质心系能量的增加, 两套 π 介子部分子分布函数给出的总截面偏离加大.

计算发现, 在 $E_{c.m.}(\pi p) = 200 \text{GeV}$ 时总截面约为 3nb , 所以在 DESY HERA 上可以对这一过程进行

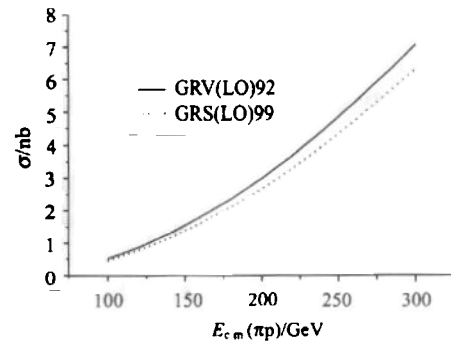


图 3 总截面随质心系能量的变化曲线

研究. 需要指出的是由于因子化过程中的许多不确定因素(例如 m_c, Λ_s , 因子化重整化标度和部分子分布函数的选取等), 会造成实验得到的总截面与本文的结果不同, 但是总截面随 $E_{c.m.}(\pi p)$ 的变化趋势仍会对了解衍射的因子化过程起到重要的作用^[14].

在 $E_{c.m.}(\pi p) = 300 \text{GeV}$ 时, 两套 π 介子胶子分布函数得到的总截面相差 11%, 所以对 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程的实验研究会进一步加深对 π 介子的胶子分布函数的了解.

总之, 在色八重态产生机制下, 利用双胶子交换模型, 计算了 $\pi + p \rightarrow p' + J/\psi + X$ 过程的总截面随质心系能量 $E_{c.m.}(\pi p)$ 的变化, 发现: 随质心系能量的增加, 用不同 π 介子的胶子分布函数得到的总截面之间差别逐渐增大. 所以对这一过程的高能实验研究可以进一步了解 π 介子中的胶子分布函数并有效检验双胶子交换模型.

参考文献 (References)

- 1 Ingelman G, Schlein P E. Phys. Lett., 1995, **B152**:256
- 2 YAN Z Y, DUAN C G, ZHANG Y M et al. HEP&NP, 2000, **24**(10): 915 (in Chinese)
(阎占元, 段春贵, 张玉敏等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(10): 915)
- 3 Nussinov S. Phys. Rev. Lett., 1975, **34**:1286; Low F E. Phys. Rev., 1975, **D14**:163
- 4 H1 Collaboration, Aid S. Nucl. Phys., 1996, **B472**:3
- 5 Berger E L, Jones D. Phys. Rev., 1981, **D23**:1521
- 6 Bodwin G T, Braaten E, Iepage G P. Phys. Rev., 1996, **D51**:1125
- 7 Michael K. Hep-ph/01007011
- 8 DUAN C G, WANG X L, HE Z M et al. HEP&NP, 2001, **25**(9):807 (in Chinese)
(段春贵, 王秀莲, 何植民等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(9): 807)
- 9 Gluck G, Reya E, Vogt Z. Phys., 1992, **C53**:615
- 10 Gluck G, Reya E, Schienbein I. Eur. Phys. J., 1999, **C10**:313
- 11 ZEUS Collaboration, Derrick M et al. Phys. Lett., 1995, **B350**:120
- 12 Beneke M, Kramer M. Phys. Rev., 1997, **D55**:R5269
- 13 Gluck G, Reya E, Vogt A. Eur. Phys. J., 1998, **C5**:461
- 14 Ryskin M G, Roberts R G, Martin A D et al. Z. Phys., 1996, **C76**: 231

Diffractive ψ Production through Double Gluon Exchange Model in π and p Collision

YAN Zhan-Yuan^{1,1)} DUAN Chun-Gui² LI Guang-Lie^{3,4}

1(Department of Applied Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

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

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

4(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract Using double gluon exchange model and the heavy quarkonium color octet production mechanism, the diffractive cross sections of ψ in the π a-p collision process are calculated and discussed. The results show that the diffractive total cross section of ψ increases with the increasing center of mass energy. Furthermore, the discrepancy of the total cross section calculated with different gluon distribution functions also increases with the increasing center of mass energy. Comparing the calculated results with the future experiment data, the gluon distribution function of π and double gluon exchange model could be examined.

Key words diffractive process, distribution function, Pomeron

Received 12 August 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G20000774), CAS Knowledge Innovation Project (CJJCX2-SW-N02), Natural Science Foundation of China (10175074) and Natural Science Foundation of Hebei Province (103143) and The Youth Foundation of North China Electric Power University

1) E-mail: zhanyuanyan@163.net