

深度非弹性散射中的大快度间隔 事件与雷吉子*

周宇峰¹ 彭宏安² 刘连寿¹

1(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

2(北京大学物理系 北京 100871)

摘要 分析了 HERA 实验上 ep 电荷交换过程的最大快度分布的实验结果. 利用雷吉唯象理论计算了在这个过程中 \mathbb{P}_ρ (位于 ρ^+ 轨迹的雷吉子) 交换的贡献. 并用 π 介子云模型计算了同一过程中 π^+ 交换的贡献. 运用 Monte Carlo 方法模拟了末态粒子的最大快度分布. 结果表明, 单独考虑哪一种交换过程都不能很好地解释实验结果, 而当同时计入两者的贡献时, 理论预言与实验数据符合较好.

关键词 雷吉子 大快度间隔 π 交换

1 引言

近年来, 在 ZEUS 和 H1 实验组发现的大快度间隔现象 (LRG) 引起了人们的极大兴趣^[1]. 这一现象不能用标准的深度非弹性散射 (DIS) 理论来解释. 在标准的深度非弹性散射理论中, 一个带色的夸克被轻子放出的虚光子击中, 在被击中的夸克与质子中剩余的双夸克之间有色场存在, 由此产生的末态粒子会遍及两者之间的快度区域, 不会产生大快度间隔. 而实验上却观察到了约占总事例数 10% 的大快度间隔事例. 目前, 人们普遍认为: 在大快度间隔事件中, 被交换的是一个色单态客体. 其中最有可能的色单态候选者是玻密子 (\mathbb{P}), 即具有真空量子数的雷吉轨迹. 基于玻密子交换的 I-S 模型^[2]和 D-L 模型^[3]的计算结果都能与实验数据较好的符合. 由于 \mathbb{P} 只是众多雷吉轨迹中的一条轨迹, 人们自然会考虑其他的雷吉子 (reggeon) 如 \mathbb{R}_ρ (位于 ρ^+ 轨迹的 reggeon) 在深度非弹性散射中的贡献. 由于 \mathbb{P} 轨迹的截距比其它 reggeon 大很多, 因此相应的反应截面也大 2—3 个量级, 所以 reggeon 交换的贡献常被 \mathbb{P} 掩盖了. 然而, 由于 reggeon 与 \mathbb{P} 具有的量子数可能不同 (\mathbb{P} 带有真空量子数, 而 reggeon 的量子数随不同的 Regge 轨迹而不同, 如 \mathbb{R}_ρ 的量子数对应于 ρ^+ 介子). 因此 \mathbb{P} 交换与 reggeon 交换可能对应于不同的物理过程. 在 ep 碰撞朝前衍射

1998-06-05 收稿

* 国家自然科学基金, 国家教委博士点基金资助

散射中, \mathbb{R}_ρ 交换会产生朝前快中子, 而相应的 \mathbb{P} 交换则产生朝前质子. \mathbb{R}_ρ 交换过程属于电荷交换过程, 在电荷交换过程中, 由于 \mathbb{P} 交换无贡献 (其电荷为零), \mathbb{R}_ρ 的影响可能变得重要起来. 最近, 由于 ZEUS 实验组上安装了朝前中子量能器 (FNC)^[4], 可以对朝前快中子进行测量, 这为 \mathbb{R}_ρ 性质的研究提供了良好的机会. 文献 [5] 中, 已对 \mathbb{R}_ρ 交换截面作了初步计算. 本文在其基础上进一步讨论 \mathbb{R}_ρ 交换的末态粒子分布, 尤其是最大快度 η_{\max} 分布, 并计算了相应过程中 π^+ 交换的贡献. 结果表明, 单独考虑那一种机制都不能解释实验结果. 只有同时将两者的贡献计入, 理论才能与实验拟合较好.

2 \mathbb{R}_ρ 交换程式

\mathbb{R}_ρ 交换曾在 πN 相互作用过程中讨论过^[6], 在以下过程:

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + N \quad (1)$$

中, 只有 ρ^+ 轨迹的 reggeon (\mathbb{R}_ρ) 能够被交换. 在 Regge 唯象理论中, s 道螺旋度振幅为^[7]:

$$\mathcal{A}_{H_i}(s, t) \xrightarrow{s \gg m_N^2} \left(\frac{-t}{2m_N^2} \right)^{\frac{1}{2m}} \left(\frac{1 - e^{-i\pi\alpha_\rho(t)}}{\sin\alpha_\rho(t)} \right) \left(\frac{s}{2m_N^2} \right)^{\alpha_\rho(t)} \gamma_\pi(t) \gamma_{\mu_2\mu_4}(t), \quad (2)$$

其中 \mathcal{A}_{H_i} 为 s 道螺旋度振幅, s 是质心系能量的平方, m_N 是核子质量, t 是四动量转移的平方, $\alpha_\rho(t)$ 是 ρ^+ 的 Regge 轨迹. $\gamma_\pi, \gamma_{\mu_2\mu_4}(t)$ 分别是 $\mathbb{R}_\rho \pi\pi$ 和 $\mathbb{R}_\rho NN$ 顶点的耦合常数. m 定义为:

$$m \equiv |\mu_2 - \mu_4|. \quad (3)$$

其中 μ_2, μ_4 是初态质子和末态中子的螺旋度, 见图 1. 因为在衍射过程中 $|t|$ 非常小, 可将其取为零. 由此得出 \mathbb{R}_ρ 交换的微分截面和总截面分别为:

$$\frac{d\sigma}{dt}(s, t) = \frac{1}{64\pi s k^2} \frac{1}{2} \sum |\mathcal{A}_{H_i}(s, t)|^2, \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{tot}} = 2\beta_\rho^2 \left(\frac{s}{2m_N^2} \right)^{\alpha(0)-1} \quad (5)$$

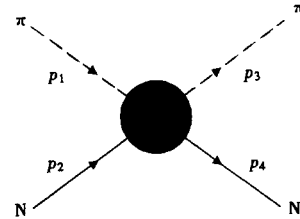


图1 $\pi+N \rightarrow \pi+N$ 散射过程

其中 $k \equiv p_{\text{c.m.}}^\pi$ 是 $\pi-N$ 系中 π 介子的动量, β_ρ 是 \mathbb{R}_ρ 与轻夸克 (u, d 夸克) 之间的耦合常数. 从 $\pi-N$ 唯象学可知 β_ρ 可被取为^[4]:

$$\beta_\rho(t)|_{t=0} = 2.07 \text{GeV}^{-1}. \quad (6)$$

$\alpha_\rho(t)$ 可被近似为:

$$\alpha_\rho(t) = \alpha_\rho(0) + \alpha_\rho' t, \quad (7)$$

其中 $\alpha_\rho(0) \approx 0.5$, $\alpha_\rho' \approx 0.9 \text{GeV}^{-2}$. \mathbb{R}_ρ 的有效传播子可写成:

$$D_\rho(t) = 2\beta_\rho^2 F_N(t) \left(\frac{s}{2m_N^2} \right)^{\frac{1}{2}(\alpha_\rho(t)-1)} \left(\frac{1 - e^{-i\pi\alpha_\rho(t)}}{\sin\pi\alpha_\rho(t)} \right), \quad (8)$$

其中 $F_N(t)$ 为形状因子. 它可被参数化为如下形式:

$$F_N(t) = \frac{4m_N^2 - 2.8t}{4m_N^2 - t} \left(\frac{1}{1 - \frac{t}{0.7}} \right)^2, \quad (9)$$

与 \mathbb{P} 的情形类似, reggeon 也可看成具有部分子结构的实体, 即它可以出现在硬衍射如图 2. 相应的截面可通过 \mathbb{R}_ρ 的有效传播子和耦合常数求出, 这种做法是与 \mathbb{P} 结构的 D-L 模型^[3]相类似的. 在电荷交换光生夸克对过程:

$$\gamma^* + p \rightarrow N + q_u + \bar{q}_d \quad (10)$$

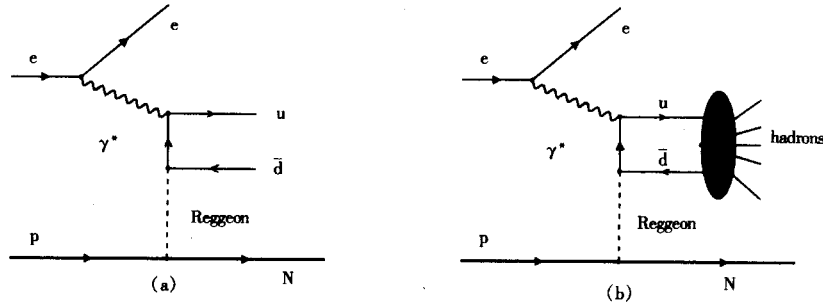


图 2 (a) DIS 中的 \mathbb{R}_ρ 交换过程; (b) \mathbb{R}_ρ 交换中 u, d 夸克的强子化

中, 反应的不变振幅可表示为:

$$M = D_\rho(t) \left[Q_u \bar{u}_u(k) \gamma_\mu \frac{i(\not{q}' - \not{k}')}{(q' - k')^2} \gamma_\rho v_d(k') + Q_d \bar{u}_u(k) \gamma_\rho \frac{i(\not{q} - \not{k}')}{(q - k')^2} \gamma_\mu v_d(k') \right] \times \bar{u}_d(p') \gamma_\rho u_u(p), \quad (11)$$

其中 $Q_u = \frac{2}{3}e$, $Q_d = -\frac{1}{3}e$ 是 u, d 夸克的电荷. 相应的反应截面 $\sigma_{\gamma^* p}^T$ 为:

$$\sigma_{\gamma^* p}^T(s, Q^2) = \frac{1}{4q_{s12}\sqrt{s}} \int \sum M^2 (2\pi)^4 \delta^4(p + q - p' - k - k') \times \frac{d^3 p'}{(2\pi)^3 2E_{p'}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3 2E_k} \frac{d^3 k'}{(2\pi)^3 2E_{k'}}. \quad (12)$$

由此可以计算出它对质子结构函数 $F_2(x, Q^2)$ 的贡献. 在等效光子近似下有:

$$F_2(x, Q^2) = \frac{Q^2}{4\pi^2 \alpha_{em}} \sigma_{\gamma^* p}^T(s, Q^2). \quad (13)$$

3 π 介子云模型中的 π^+ 交换

近年来,运用介子云模型^[8]来解释在 NMC 实验组上观察到的 Gottfried Sum Rule 破坏现象^[9]取得了很大的成功. 在介子云模型中,质子被看成由 π 介子云和云内的核子组成,质子通过交换 π 介子与其它粒子相互作用. 在 ep 碰撞的电荷交换过程中,人们普遍相信 π^+ 交换的贡献是主要的. DIS 中 π 交换过程如图 3(a)、(b). π 交换对质子结构函数的贡献可因子化为^[10]:

$$\frac{dF_2^p}{dt dz} = f_{\pi N}(z, t) F_2^\pi(x_\pi, Q^2), \quad (14)$$

其中, $f_{\pi N}(z, t)$ 为劈裂函数,即在质子中找到 π 介子的几率. F_2^π 是 π 介子结构函数 z 是中子与

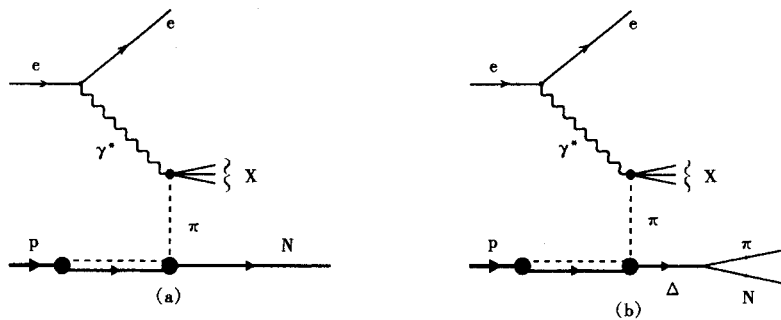


图3 π 交换过程中直接(a)和间接(b)的朝前中子产生
图底部与实线平行的虚线代表 π 介子云.

质子的光锥动量之比, x_π 是 π^+ 与电子系统的 Bjorken 变量,它满足关系: $x_\pi = x / (1 - z)$. 劈裂函数具有如下形式^[10]:

$$f_{\pi N}(z, t) = \frac{2g_\pi^2}{16\pi^2} \frac{|t|}{(m_\pi^2 - t)^2} G_1^2(t)(1 - z). \quad (15)$$

在文献 [10] 中,为了实现对 π 交换的雷吉化,在因子 $(1 - z)$ 上加上了指数因子: $1 + 2\alpha'_\pi |t|$, 成为 $(1 - z)^{1 + 2\alpha'_\pi |t|}$. 其中 α'_π 是 π - Regge 轨迹的斜率, $\alpha'_\pi \approx 1$. 已有文献指出上述雷吉化只在 $(1 - z)$ 很小或 $|t|$ 非常大的情况下才重要^[10, 11]. 在 π 交换过程中,由于 $z \approx 0.7 - 0.9$, $|t| \leq 0.2 \approx 0.4 \text{ GeV}^2$ ^[10], 雷吉化的影响是很小的,可忽略不计. 同时也为了和下文中采用在壳 π 介子结构函数相一致,我们选用因子 $(1 - z)$ 代替 $(1 - z)^{1 + 2\alpha'_\pi |t|}$, 实际计算中两者给出几乎相同的结果. π NN 耦合常数 g_π 取为 $g_\pi^2 / 4\pi = 13.75$. m_π 是 π 介子质量, $G_1(t)$ 为形状因子,它可参数化为 $\exp[(t - m_\pi^2) / (2\Lambda^2 x_\pi)]$, 其中截断参数 $\Lambda (= 1.10 \text{ GeV})$ 可由对实验数据的拟合得到. 在这样选择了形状因子和截断参数之后,其给出的 Gottfried Sum Rule 为: $S_G = 0.224$, 在质子中找到 π^+ 的几率约为 0.11. 这都与 NMC 实验数据拟合较好^[9]. 过程图 3(b) 中的劈裂函数具有不同的形式^[10]. 从文献 [10] 可知它的贡献比图 2 要小得多,作为一种近

似, 将其贡献忽略不计. π 介子结构函数 $F_2^\pi(x, Q^2)$ 可通过对实验数据的拟合得到^[4, 10]:

$$F_2^\pi(x, Q^2) = \frac{2}{3} f(Q^2) [\alpha \exp(2\sqrt{L}) / L + b\sqrt{x}]. \quad (16)$$

其中 $L = (4\pi / \beta_0) \ln(c / \alpha_s) \ln(d / x)$, $f(Q^2) = Q^2 / (e + Q^2)$, $\alpha_s = 4\pi / (\beta_0 \ln(Q^2 / \Lambda_{\text{QCD}}^2))$. $c = 0.59, d = 0.31, e = 0.12 \text{ GeV}^2$. 由以上分析不难看出, π 交换的贡献显然比 \mathbb{R}_ρ 要大得多. 首先是 π 交换的耦合常数比 \mathbb{R}_ρ 大, 它们的比值 $g_\pi^2 / g_\rho^2 = 32.3$. 其次, 从 (14) 和 (16) 可以看出, 随着质心系能量 s 的升高, π 交换的截面是增大的, 而 \mathbb{R}_ρ 由于其截距小于 1, 其截面是减小的. $\sigma \sim s^{\alpha_\rho(0)-1} = s^{-0.5}$. 由此也可看出, π 介子云模型中的 π 交换是与 π 介子轨迹的 reggeon 交换完全不同的, 由于 π -reggeon 的截距更小, 其截面下降得比 \mathbb{R}_ρ 还要快得多, 其贡献完全可以忽略. 在 高能反应中, reggeon 交换和普通的粒子交换是不同的物理概念, 相应的计算方法 (模型) 也有所不同. 在 Regge 理论的计算中 reggeon 交换相当于相干地交换具有相同量子数的一系列粒子 (它们位于同一条 Regge 轨迹), 因此在本文中对 π 介子交换和 ρ^+ -reggeon 的计算可以被认为是同时考虑了 π 介子和与 ρ 具有相同量子数的一系列粒子的相干交换, 并进行了相应的比较分析.

4 强子化

以上讨论了 \mathbb{R}_ρ 和 π 交换的单举性质, 若要得到末态粒子的分布, 则需考虑强子化过程的影响. 已有理论指出^[10], 反应产生的末态粒子与出射中子之间的快度间隔可估计为 $\Delta\eta \sim \ln(1/(1-z))$, 由于在 π 交换过程中 z 的平均值在 0.7—0.9 左右, 相应于 $\Delta\eta \sim 1$, 所以对 LRG 贡献不大. 我们用 Monte Carlo 方法模拟了反应后末态粒子的最大快度 η_{max} 分布. 利用 LUND 模型的 MC 产生器 JETSET7.4 和 PYTHIA5.7^[12] 模拟强子化过程和 $\gamma^* - \pi$ 相互作用, 如图 2 (b), 图 3 (a):

$$q_u + q_d \rightarrow \text{hadrons}, \quad (17)$$

$$\pi^+ + \gamma^* \rightarrow \text{hadrons}. \quad (18)$$

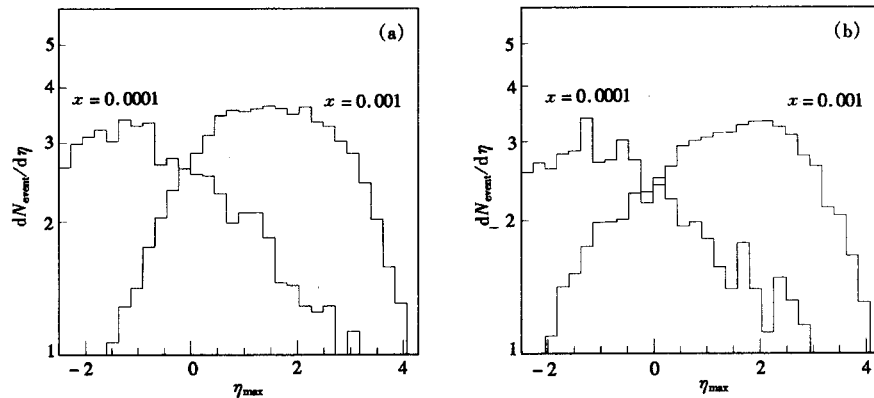
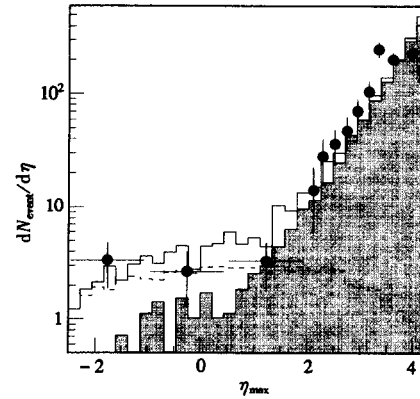


图4 \mathbb{R}_ρ 交换在不同 x, Q^2 下的 η_{max} 分布

(a) $Q^2 = 10 \text{ GeV}$; (b) $Q^2 = 50 \text{ GeV}$.

通过计算 (13) 式和将 (14) 式对 t, z 积分, 可以得到 \mathbb{R}_ρ 和 π 交换对质子结构函数的贡献, 它们的比值 $F_{2(\rho\text{-exchange})}^P / F_{2(\pi\text{-exchange})}^P$ 即是两过程的微分截面之比. 在 $x = 10^{-3}$, $Q^2 = 10\text{GeV}^2$ 时约为 0.028. 通过 Monte Carlo 模拟, 得到了不同 x, Q^2 下 \mathbb{R}_ρ 交换的 η_{\max} 分布, 如图 4. 可以看出, η_{\max} 分布的峰值在 -2.0 到 2.0 之间, 随着 x 的减小 η_{\max} 的分布向小 η_{\max} 区移动. 从 FNC 的实验结果来看, 具有朝前快中子事件的 η_{\max} 分布与 DIS 中的 η_{\max} 分布是相似的, 也存在 LRG 现象. 由于 \mathbb{P} 交换不会产生朝前快中子, FNC 中的大快度间隔现象 (约占总事件数的 3%) 不能用 \mathbb{P} 交换来解释. 从前面的分析可知, \mathbb{R}_ρ 交换是一个可能的来源. 从图 4 可以看出 \mathbb{R}_ρ 交换的确能够产生 LRG 事件. 在图 5 中同时给出了 \mathbb{R}_ρ 交换, π 交换, 和 FNC 测量的 η_{\max} 分布. 由于在 $\eta_{\max} > 4.3$ 时, 实验数据属于 ‘Artifact’, 其数值受到加速器管壁效应的强烈影响. 为了避免这种复杂性, 我们将模拟限制在赝快度区间 $-2.5 < \eta_{\max} < 4.3$ 之内. 从图 5 可以清楚地看到, 单独的 π 交换或 \mathbb{R}_ρ 交换过程都不能解释实验结果, 只有当同时计入两者的贡献时, 理论才能与实验符合较好.

图 5 η_{\max} 分布

误差的实心点为 FNC 实验数据阴影部分为 π^+ 交换的 η_{\max} 分布; 虚线为 \mathbb{R}_ρ 交换的 η_{\max} 分布; 实线为二者之和.

5 结 论

本文讨论了电荷交换过程中 \mathbb{R}_ρ 的贡献, 计算了 \mathbb{R}_ρ 交换和 π 交换的截面; 通过 Monte Carlo 模拟给出了末态粒子的 η_{\max} 分布, 并与 FNC 的实验结果作了比较分析. 指出必需同时考虑 \mathbb{R}_ρ 和 π 的贡献, 理论才能与实验很好附合. 这说明, 在 DIS 中, \mathbb{R}_ρ 的贡献是不可忽略的, 尤其在电荷交换过程中, 其贡献更为突出.

参 考 文 献

- 1 Derrick M et al (ZEUS Collaboration). Phys. Lett., 1993, **B315**:481; Ahmed T et al (H1 Collaboration). Nucl. Phys., 1994, **B429**:477
- 2 Ingelman, Schlein P E. Phys. Lett., 1985, **B152**:256
- 3 Dommachie A; Landshoff P V. Nucl. Phys., 1988, **B303**:643
- 4 ZEUS Collaboration. Phys. Lett., 1996, **B384**:288
- 5 Peng Hongan, Zhao Shihua, Qiao Congfeng. Commu. Theor. Phys., 1997, **28**:339
- 6 Rarita W et al. Phys. Rev., 1968, **165**:615
- 7 Collins P D B. An Introduction to Regge Theory and High Energy Physics. Cambridge University Press, 1977
- 8 Holtman H, Szczurek A, Speth J, Nucl. Phys., 1996, **A569**:631
- 9 N M C Collaboration, Amaudruz P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**:2712
- 10 Kopeliovich B, Povh B, Potashnikova I. Z. Phys., 1996, **C73**:125

11 Przybycien M, Szczurek A, Ingelman G. DESY, 96—073

12 Sjöstrand T. Comp. Phys. Comm., 1994, 82:74

Large Rapidity Gap Events and Reggeon in DIS*

Zhou Yufeng¹ Peng Hongan² Liu Lianshou¹

1(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079)

2(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The experimental results on maximum pseudo-rapidity η_{\max} distribution in the charge exchange process $e + p \rightarrow e + n + X$ is discussed in this paper. The contributions of reggeon from regge phenomenology and π^+ -exchange from pion cloud model is calculated. The results show that neither the \mathbb{R}_p -exchange nor the pion cloud model alone can explain the experimental data well, but after considering both these two processes together, by using Monte Carlo simulation, a good agreement between theoretical results and experimental data is found.

Key words reggeon exchange, large rapidity gap, pion exchange

Received 5 June 1998

* Supported by NSFC and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China