

深度非弹性散射中小 x 区物理新进展*

彭宏安^{1,2} 徐家胜¹

1 (北京大学物理系 北京 100871)

2(CCAST (World Laboratory) 北京 100080)

摘要 简单评述了近几年来轻子-核子(核)深度非弹性散射(I-N(A)DIS)在小 x 区的单举实验数据和唯象分析方面的进展.

关键词 深度非弹 小 x 区物理 QCD

1 简单回顾

轻子-核子深度非弹性散射(DIS)过程如图1所示,反应为

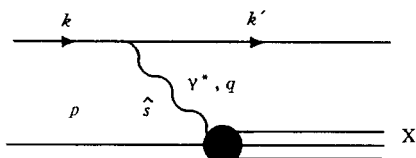


图 1

$$\gamma^* + p \rightarrow X,$$

$$x = \frac{Q^2}{\hat{s} + Q^2} \approx \frac{Q^2}{\hat{s}}.$$

其中 $Q^2 = -(k - k')^2$ 为虚光子四动量的平方, $\hat{s} = (q + p)^2$ 为虚光子-核子质心系能量平方,因此

小 x 物理对应高能物理.

近年来,很多高能物理实验中心,对小 x 区物理作了大量实验^[1]如:

DESY HERA (H1, ZEUS) $10^{-4} \sim 10^{-5} \leq x, 1.0 \text{ GeV}^2 \leq Q^2$. CERN $\mu\text{P(NMC)}$,
Fermilab TeV. (E665, ...) $10^{-4} \leq x, 0.1 \text{ GeV}^2 \leq Q^2$.

小 x 时核子的分布函数图象与特征(图2).

2 实验进展与唯象学结论

2.1 实验进展

(a) $x \leq 10^{-2}$, 随 x 减小, $xg(x, Q^2), F_2(x, Q^2)$ 剧增. HERA 已测量 $x \sim 10^{-5}$ 的 $F_2(x, Q^2)$ 和 $x \leq 10^{-4}$ 的 $F_L(x, Q^2)$, 这里 L 代表纵向部分. 由么正性限定 $\sigma_T(\gamma^* N) = 4\pi^2 \alpha F_2(x, Q^2) /$

1998-05-19收稿

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助

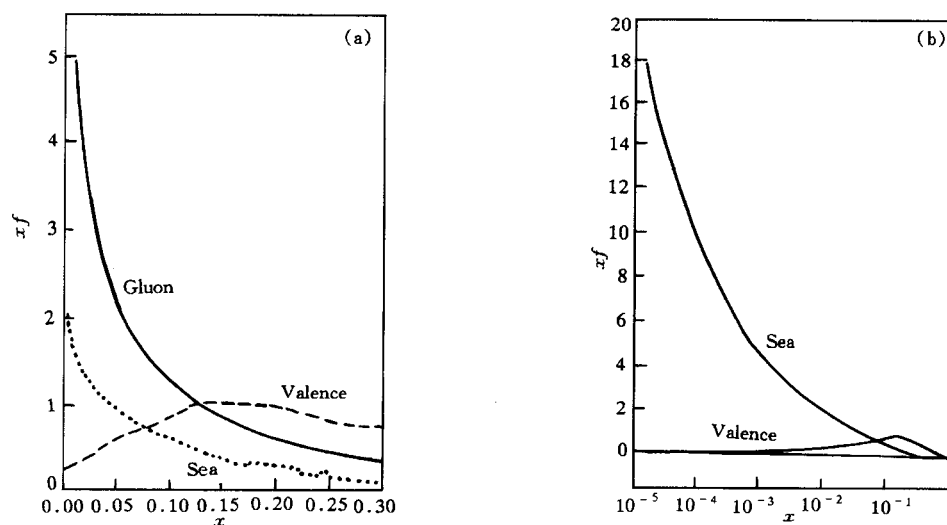


图 2 (a) $Q^2 = 10\text{GeV}^2, 0 \leq x \leq 0.3$, 核子的价, 海夸克与胶子的分布函数随 x 的变化

实线, 虚线和点线分别表示核子中胶子, 价夸克和海夸克的 NLO 分布函数随 x 的变化;

(b) $Q^2 = 30\text{GeV}^2, 10^{-5} \leq x \leq 1$ 价夸克和海夸克的分布随 x 的变化

Sea 和 Valence 的曲线分别表示 $Q^2 = 30\text{GeV}^2$ 时核子中海夸克和价夸克的 NLO 分布函数随 x 的变化.

$$Q^2 \leq 2\pi \log^2 s.$$

人们要问 $xg(x, Q^2)$ 在什么 x 值区域变秃变平?

(b) 衍射散射, $F_2^D(x, Q^2)$ 的测定. DESY 的 ZEUS 和 H1 实验组均在末态快度分布中测量到衍射散射 (图 3) 导致的大快度间隙 (LRG), 见图 4.

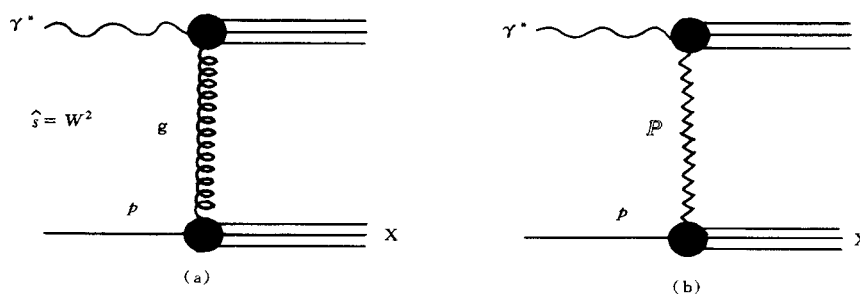


图 3 (a) 通常的部分子(胶子)交换; (b) 衍射散射-对应“Pomeron”的交换

(c) $F_L(x, Q^2)$ 的测定. γ_L^* 与 γ_T^* 在小 x 处对结构函数的贡献差异很大, 这时

$$R(x, Q^2) \equiv \frac{\sigma_L(x, Q^2)}{\sigma_T(x, Q^2)} \text{ 变化明显.}$$

(d) 核(A)上的 DIS^[2]. 由图 5 看出小 x 处 $F_2^A(x, Q^2)$ 的遮蔽和反遮蔽.

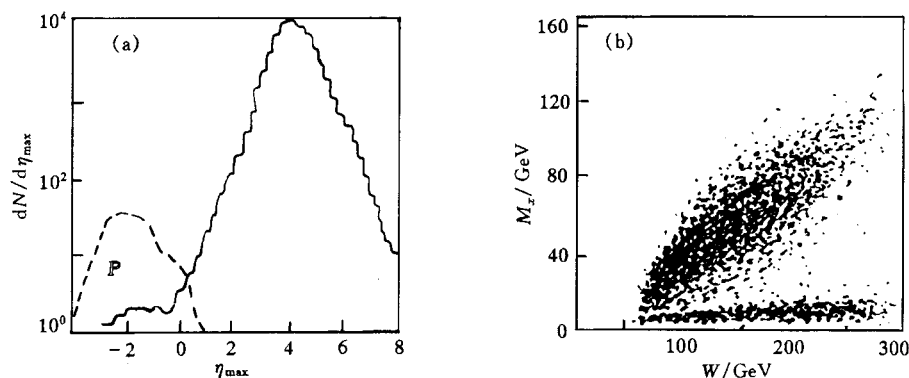


图 4 (a) $x \leq 10^{-2}$ 时 $\gamma^* + N \rightarrow X$ 的赝快度 η_{\max} 分布, (b) M_x 随 W 的分布

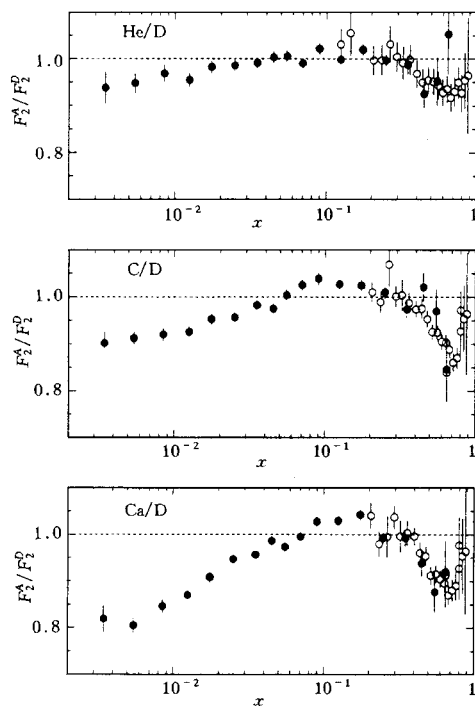


图 5 $\frac{F_2^A(x, Q^2)}{F_2^D(x, Q^2)}$ 随 x 的变化.

● NMC^[2]; ○ SLAC^[2].

2.2 唯象学结论

2.2.1 到现今为止, DIS 实验数据表明在 $x \geq 3 \times 10^{-5}$ 区间, 部分子分布随 Q^2 的演化仍然可用 DGLAP(A-P 方程) 方程很好地描述.

2.2.2 核子上的 DIS 中明显测到衍射散射的贡献, 而且证实小 Q^2 ($2-3 \text{ GeV}^2$) 的(软)衍射机制与大 Q^2 ($Q^2 \geq 10 \text{ GeV}^2$) 时的(硬)衍射机制明显不同.

2.2.3 核(A)上的 DIS 在小 x 时有遮蔽效应且随 Q^2 缓变.

3 理论进展

3.1 靶静止系中的时-空描述方案

在核子(核)DIS 中取靶静止($P = 0$)系, 采用时-空描述方案讨论小 x 时不同运动学区间的各种过程, 比用 Feynman-Bjorken 的 P_{∞} 系描述有更加清晰的物理图象, 更便于直观上的理解(图 6).

(a) 对 γ^* (Q^2) 理解有根本的变化, 不再将它简单地看作探针, 而是看作与核子(核)相互作用的物理态.

$$\begin{aligned}
 |\gamma^* \rangle_{\text{phys.}} &= \psi_{\gamma} \cdot |\gamma^* \rangle + \psi_{q\bar{q}} |q\bar{q} \rangle \\
 &+ \psi_{q\bar{q}g} |q\bar{q}g \rangle + \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

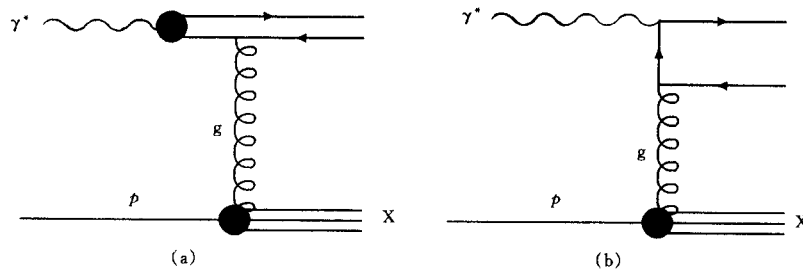


图 6 同一个胶子交换图

(a)、(b) 分别对应在 $P = 0$ 系和在 P_∞ 系看 γ^* 与核子的相互作用.

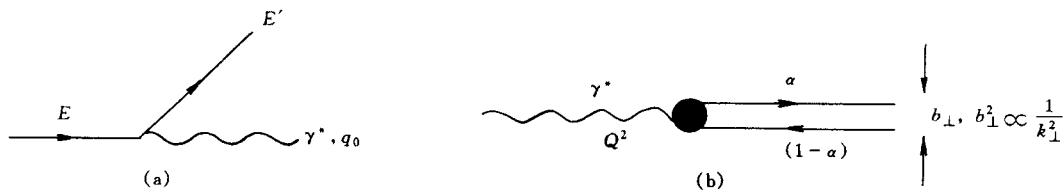


图 7 (a) γ^* 的寿命取决于 x 和相干长度 (b) $q\bar{q}$ 中不同的 b_\perp 和 α 值所对应完全不同的作用方式 α 和 $(1 - \alpha)$ 为 q, \bar{q} 的纵向动量分数.

(b) γ^* 的 Fock 态的最低阶 $|q\bar{q}\rangle$ 态的图形描述 (图 7).

$$\tau_{\gamma^*} \sim \frac{1}{E_{cy} - E_c} \approx \frac{2\nu}{Q^2} = \frac{1}{m_N x}, \quad (2)$$

$$l_{\gamma^*} \sim \frac{1}{m_N x} = \begin{cases} 1 \text{ fm} & x = 0.2 \\ 200 \text{ fm} & x = 10^{-3} \end{cases} \quad (3)$$

γ^* 的 (也即是 $q\bar{q}$) 的相干长度 $l \sim \frac{1}{m_N x}$ 是一个极具特征的量. x 越小, γ^* 的寿命就越长, 由它涨落形成的 $|q\bar{q}\rangle, |q\bar{q}g\rangle, \dots$ 态寿命才有可能越长. $|q\bar{q}\rangle$ 态几率振幅:

$$\psi_{q\bar{q}}(x, Q^2, L/T) = \sum_{\lambda_1, \lambda_2} \int \frac{e^2 d^2 K_\perp}{16\pi^3} \int_0^1 d\alpha \psi_{\lambda_1, \lambda_2}^{L/T}(k_\perp, \alpha). \quad (4)$$

(c) γ^* 涨落中成 ($q\bar{q}$) 态的几种典型图象 (图 8). 其中 $l_{q\bar{q}}$ 是相干长度. 值得注意, 不同的 ($q\bar{q}$) 组态 (即 x 大小, α 与 $(1 - \alpha)$ 值的对称度, $q\bar{q}$ 间的横向动量 k_\perp^2 大小和 γ^* 是横向 (T) 还是纵向 (L) 极化) 与核子 (核) 作用效应完全不同.

3.2 “大” Q^2 时朝前 $\gamma_L^* + p \rightarrow V_L$ (or γ_L^*) + p 过程和 PQCD 衍射机制

“大” Q^2 时 γ_L^* 的 Fock 态 $|q, \bar{q}\rangle$ 的波函数 $\psi_{q\bar{q}}^L$ 大 k_\perp^2 的几率大, 而大 $k_\perp^2 \leftrightarrow$ 小 b_\perp^2 . 另外对应纵光子 γ_L^* , $q\bar{q}$ 对纵向动量分布相当多是 $\gamma_L^* \implies \alpha \simeq (1 - \alpha) \simeq \frac{1}{2}$. 这时 $\gamma_L^* + p \rightarrow V_L + p$ 过程的振幅由三部分相乘而成 (图 9):

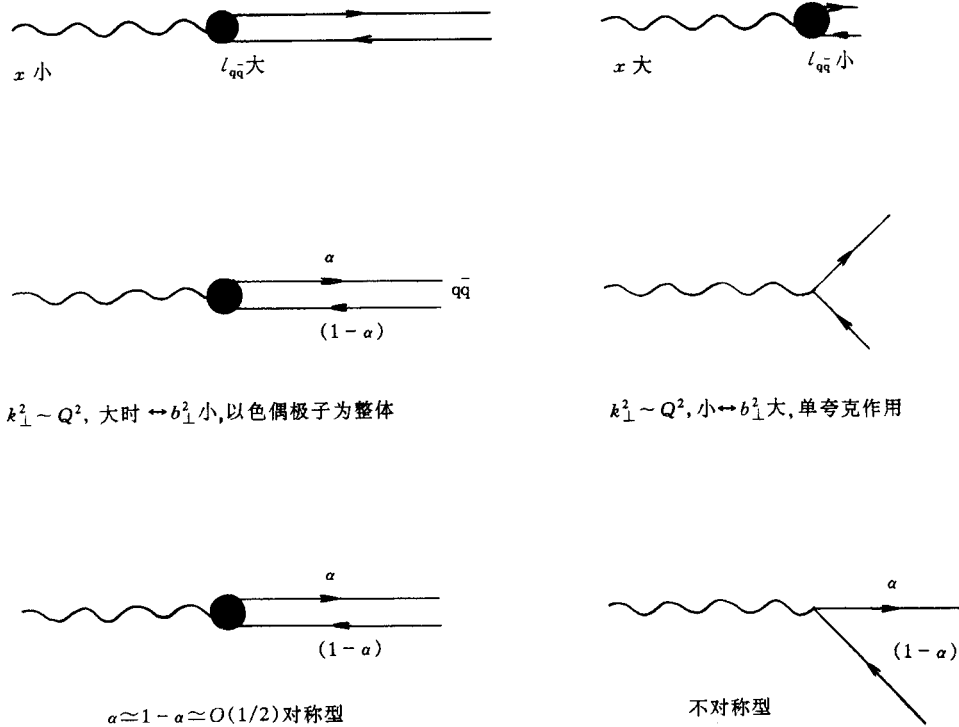


图8 在 $P=0$ 系看小 x 时 $q\bar{q}$ 对在不同运动学区间的图象

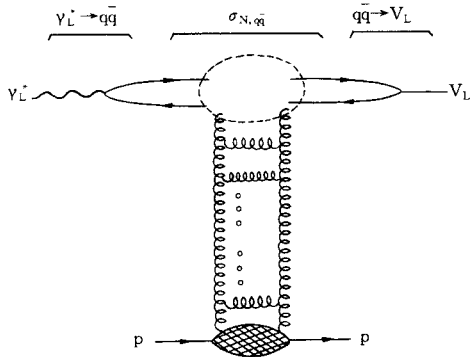


图9 用 PQCD 讨论“大” Q^2 , 小 x (δ 非常大) 时的朝前 $\gamma_L^* + N \rightarrow \gamma_L^* (V) + N$ 过程, 相应的振幅及其分解

它们是 $\gamma_L^* \rightarrow q\bar{q}$, $\sigma_{N,q\bar{q}}$ 和 $q\bar{q} \rightarrow V_L (\gamma_L^*)$

对于 $t = 0$ (朝前) 情形经过计算得出:

$$\sigma_{N,q\bar{q}}(b^2) = \frac{2\pi^2}{3} [b^2 \alpha_s(Q^2) \bar{x} g(\bar{x}, Q^2)],$$

$$\bar{x} = (\hat{s}b^2)^{-1}, Q^2 = b^{-2}, \quad (5)$$

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma^* P \rightarrow VP}^L}{dt} \right|_{t=0} = \frac{12\pi^3 \Gamma_V m_V \eta_V \alpha_s(Q^2)}{\alpha_{em} N_c^2 Q^6} \times$$

$$\left| \left(1 + i \frac{\pi}{2} \frac{d}{d \ln x} \right) xg(x, Q^2) \right|^2. \quad (6)$$

值得注意, 微分截面正比于 $xg(x, Q^2)$ 的平方是一显著特征. 此计算与相应实验数据见图 10.

3.3 PQCD 的 Glauber 散射

$\gamma^* + A$ DIS 过程中小 x 处遮蔽效应与衍射散射密切相关^[2]. 均来自核 A 内属于同一碰撞参数内不同核子上的相干多重散射——PQCD 的 Glauber 散射. 从 F-Bj 的 P_{∞} 系对遮

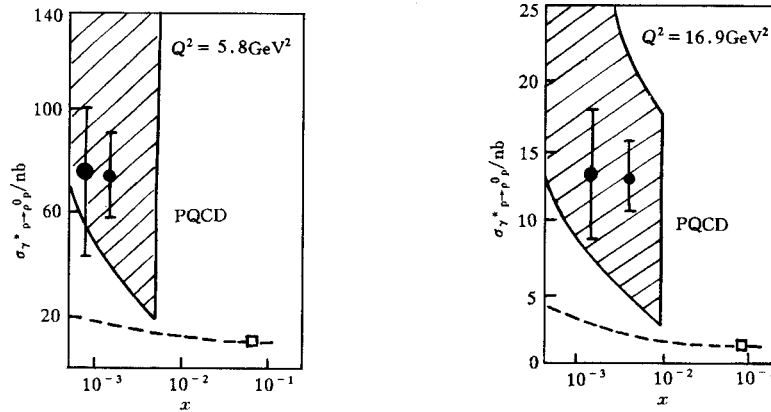


图 10 由 PQCD 算得的 $\left. \frac{d\sigma_{\gamma^* p p^0}^L}{dt} \right|_{t=0}$ 对 x 的分布 (阴影区) 的试验的比较

虚线是用 Donnachie-Landshoff 软 IP 得出的结果; ZEUS 组; \square NMC 组.

蔽的理解 (图 11), 不易看出它与衍射散射的关系. 在靶 A 静止系, 由图 8 可见: x 大时, l_{qq} 小, 故不存在衍射和遮蔽. x 小时, l_{qq} 大, 可达 $10^1 - 10^2$ fm, 相干长度可以远比核 A 的直径大, 这时 $(q\bar{q})$ 可当作整体——色偶极子而穿透核 (A).

小 x 时 ($x \leq 10^{-3}$), 由 PQCD 的 Glauber 相干多重散射程式得出的核 A 内部分子分布函数与唯象学结果相洽. 当 x 很小时 $\gamma^* - \text{ADIS}$ 中, 除开对应单个核子的不相干散射 (图 12(a)), 外, 还有两次相干散射 (图 12(b)) (甚至更高次) 的贡献, 这些相干散

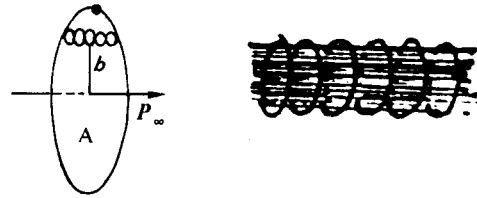


图 11 当 x 小时核内相同 b 值的核子间胶子密度太大而相互融合导致遮蔽

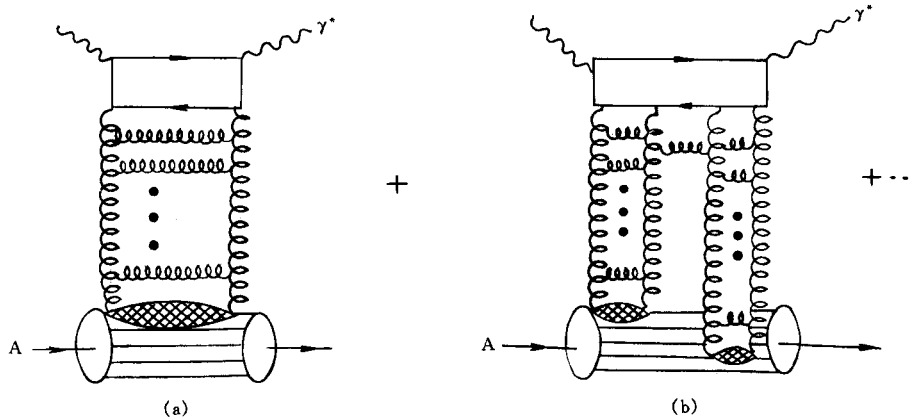


图 12 当 x 小时, $\gamma^* - \text{A}$ DIS 中的非相干散射 (a) 和相干散射 (b)

射图一方面引起小 x 处核(A)的遮蔽现象,同时它又对衍射散射有直接贡献.

3.4 部分子分布函数的演化方程(图 13)

3.4.1 DGLAP 演化方程

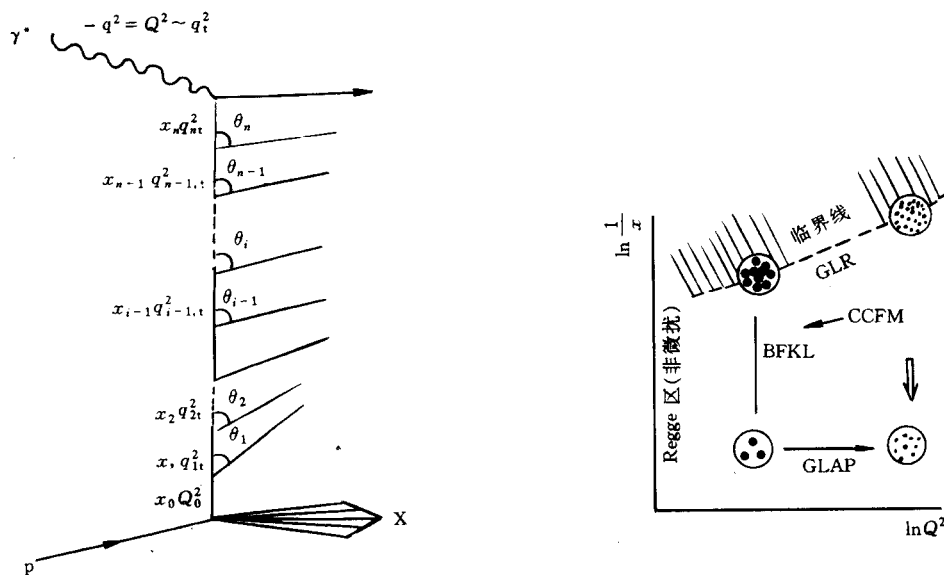


图13 γ^* -N的DIS中部分子的演化图

要求对横向动量 q_i^2 为强编序:

$$q_i^2 \gg q_n^2 \gg \dots \gg q_n^2 \gg \dots \gg Q_0^2 = \frac{1}{R_p^2}, \quad (7)$$

$$x_B \ll x_n \ll \dots \ll x_i \ll \dots \ll x_0 \quad (8)$$

适用于 $\alpha_s \ll 1$, $\alpha_s \ln \frac{1}{x} \ll 1$, $\alpha_s \ln q^2 \approx 1$ 区.

3.4.2 BFKL 演化方程^[3]

不存在微分方程形式. 要求对 x_i 强编序:

$$q^2 \gg Q_0^2, \quad x < x_0 \approx 10^{-2} - 10^{-3}, \quad (9)$$

$$x_B \ll x_n \ll \dots \ll x_i \ll \dots \ll x_0. \quad (10)$$

其中 q_n^2 大于或小于 $q_{(i-1)}^2$ 均可. 适用于 $\alpha_s \ll 1$, $\alpha_s \ln q^2 \ll 1$, 而 $\alpha_s \ln \frac{1}{x} \approx 1$ 区. 目前只在

$LL\left(\frac{1}{x}\right)$ A 时有统一认同的表述程式.

3.4.3 $LL(q^2)$ A + $LL\left(\frac{1}{x}\right)$ A 演化

又称 DLA, 要求对 q_i^2 和 x_i 均为强编序:

$$q_i^2 \gg q_m^2 \gg \cdots \gg q_n^2 \gg \cdots \gg Q_0^2 = \frac{1}{R_p^2}, \quad (11)$$

$$x_B \ll x_n \ll \cdots \ll x_i \ll \cdots \ll x_0 \quad (12)$$

适用于 $\alpha_s \ll 1$, $\alpha_s \ln q^2 \approx 1$, $\alpha_s \ln \frac{1}{x} \approx 1$ 区.

3.4.4 CCFM 统一演化方程^[4]

要求对图 13 辐射胶子角 θ_i 为强编序:

$$\frac{Q}{x_B} \gg \theta_n \gg \cdots \gg \theta_i \gg \cdots \gg \theta_1. \quad (13)$$

其中 $\theta_i \approx \frac{q_i}{x_i}$ 是第 i 个部分子相对于最头一个部分子方向的夹角. 适用于 $\alpha_s \ll 1$. 它同时与 DGLAP 和 BKKL 平滑过渡 (图 13).

4 结论与热点

4.1 目前 DGLAP 演化较好, 无需在演化方程中加非线性项 (GLR)

4.2 小 x 时用时-空图象更为直观方便. 有一大类过程可以用 pQCD 讨论

4.3 热点问题

1. 关于衍射散射 (所谓 \mathbb{P}) 的机制? \mathbb{P}_{BFKL} 的么正性修正和它是否已在现今唯象学中显示出作用?

2. 演化中的由两个 (甚至多个) 部分子融合引起的非线性项何时出现?

3. 甚小 x 处核子内是否存在“热斑”或出现其它新物理的探索.

4. 小 x 处原子核内分布函数? HERA 中关于 $\gamma^* + A$ DIS 的研究.

参 考 文 献

- 1 H1 Collab., Adloff C et al. Nucl. Phys., 1997, **B497**:3; H1 Collab., Aid S et al. Nucl. Phys. 1997, **B470**:3; 1993, **B407**:515; ZEUS Collab., Breitweg J et al. Phys. Lett., 1997, **B407**:432; ZEUS Collab., Derrick D et al. Z. Phys., 1996, **C69**:607; 1996, **C72**:399; Phys. Lett., 1993, **B316**:412; NMC Collab., Arneodo M et al. Phys. Lett., 1995, **B364**:107; E665 Collab., Adams M R et al. Phys. Rev., 1995, **D54**:3006; H1 Collab., Adloff C et al. Phys. Lett., 1997, **B393**:452
- 2 Hoyer P. “Workshop on DIS & QCD”, PARIS, 1995, 127; Arneodo M. Phys. Rep., 1994, **240**:301; Arneodo M et al. “Future physics at HERA” (Proc. of Workshop 1995 / 96), p887; Frankfurt L. et al. hep-ph/9702216
- 3 Kuraev E A et al. Sov. Phys. JETP., 1977, **45**:199; Balitsky Ya Ya et al. Sov. Nucl. Phys., 1978, **28**:822; Lipatov L N. Phys. Rep., 1997, **286**:131
- 4 Ciafaloni M. Nucl. Phys., 1987, **B296**:249; Catani S et al. Phys. Lett., 1990, **B234**:389, Nucl. Phys., 1990,

B336:12; *ibid.*, 1991, **B361**:645; Catani S et al. Nucl. Phys., 1994, **B427**:475; Camici G et al. Phys.Lett., 1996, **B386**:341; *ibid.*, 1997, **B412**:396; Nucl. Phys., 1997, **B496**:305; Bottazzi G et al. Nucl. Phys., 1997, **B505**:366

New Progresses in Deep Inelastic Scattering in Small x Region *

Peng Hongan^{1,2} Xu Jiasheng¹

1(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2(*CCAST (World Laboratory), Beijing 100080*)

Abstract Recent data on lepton-nucleon (nucleus) deep inelastic scattering at low Bjorken x region and diffractive mechanism are reviewed in the light of new theoretical and experimental progresses with particular attention to target rest system scheme.

Key words DIS, small x region physics, QCD.

Received 19 May 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China and Doctoral Foundation of National Education Committee of China