

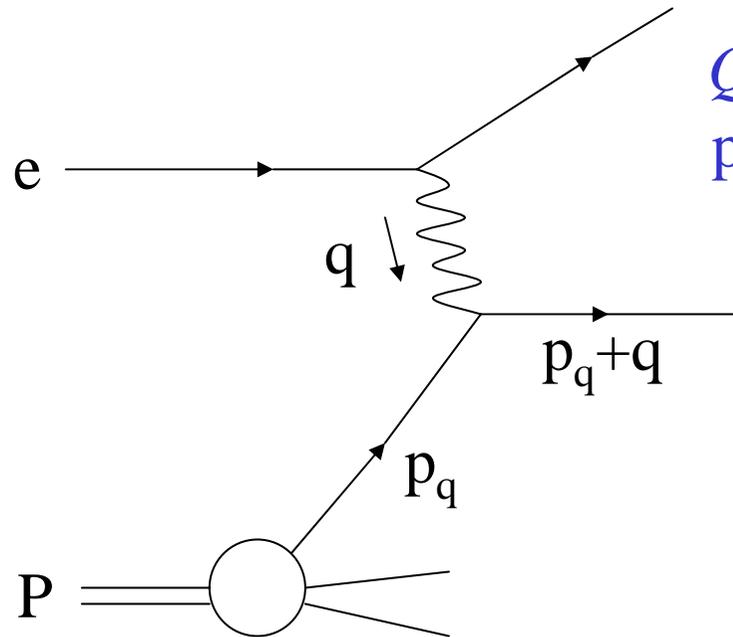
摂動QCDとSmall- x の物理

クォーク物理学研究室

前田達成

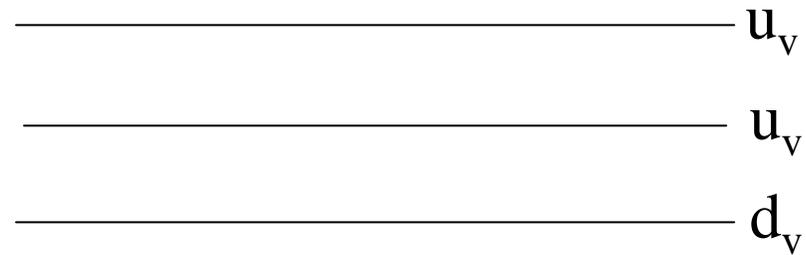
Introduction

陽子の内部はどうなっているのか？



$Q^2 = -q^2$: $\mathcal{O}(Q^{-1})$ の長さの分解能

$p_q = xP$: 運動量比 Bjorken- x $0 < x < 1$



電子・陽子散乱断面積 を測る

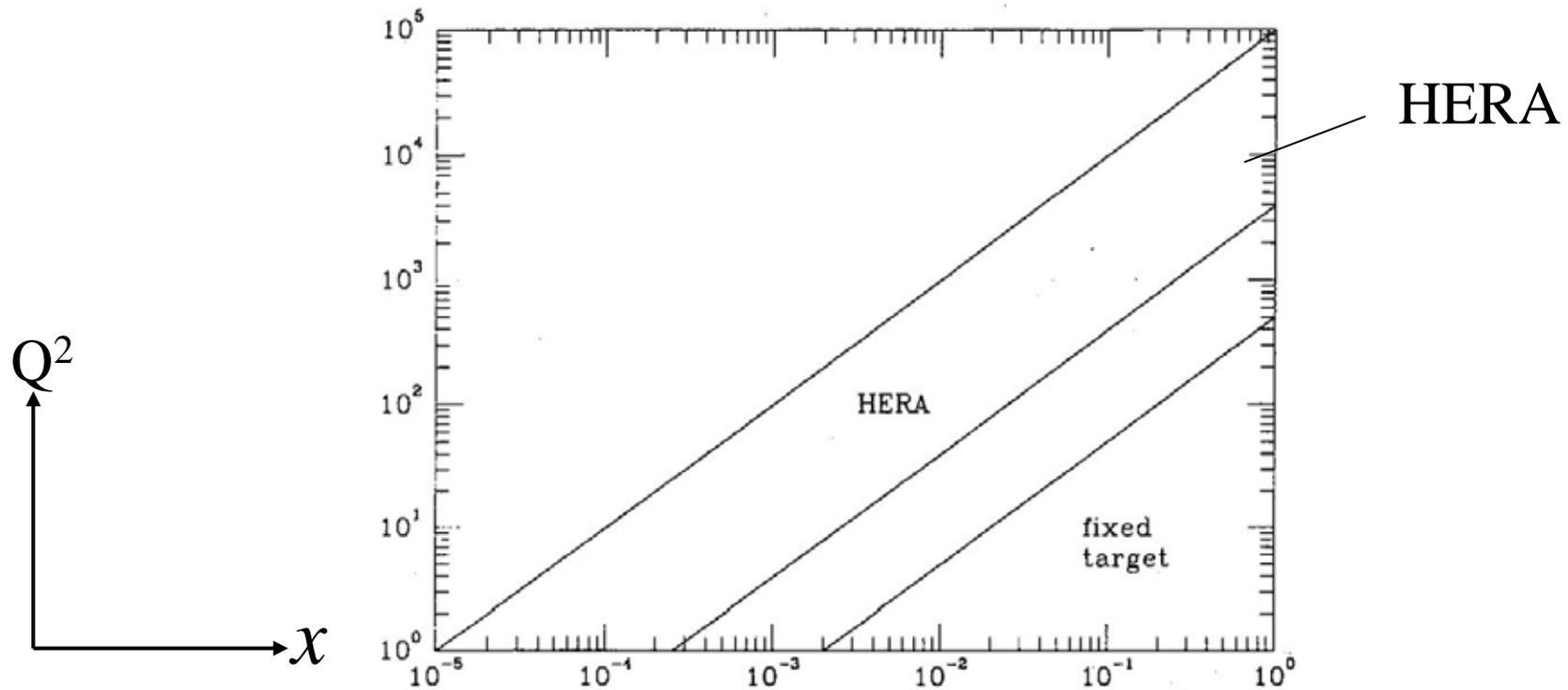
$\sim F_2$

陽子の形状を表す構造関数 $F_2(x, Q^2)$

内包粒子の数に比例する函数

uudの3つのクォークは、
 $g, u_s, d_s, c_s \dots$ の海の中
に存在する。

Introduction



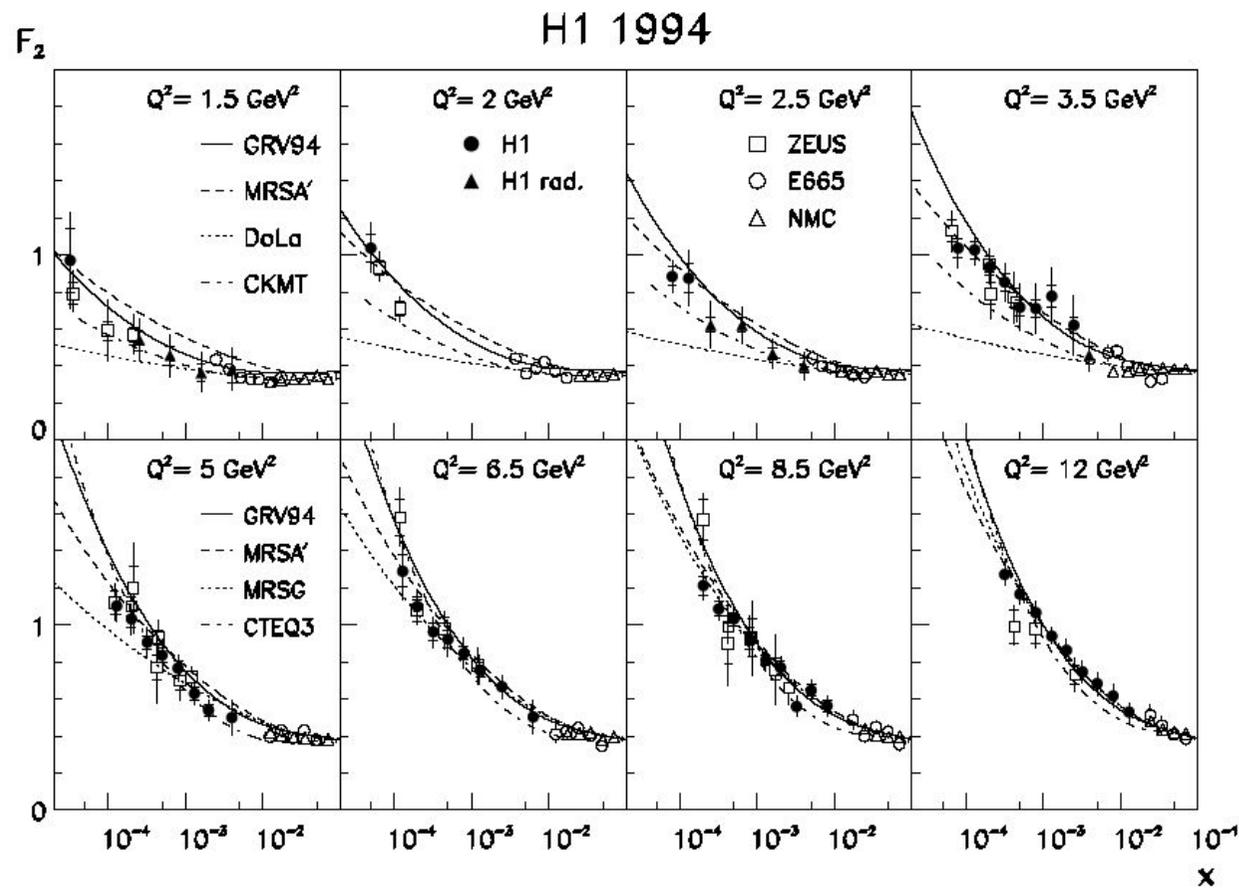
HERAでリサーチ可能な変数の領域

$$Q^2 < 10^5, x > 10^{-5}$$

Introduction

$x < 10^{-2}$ の領域で F_2 は強い上昇を示す。

$$F_2(x, Q^2) \sim x^{-}$$



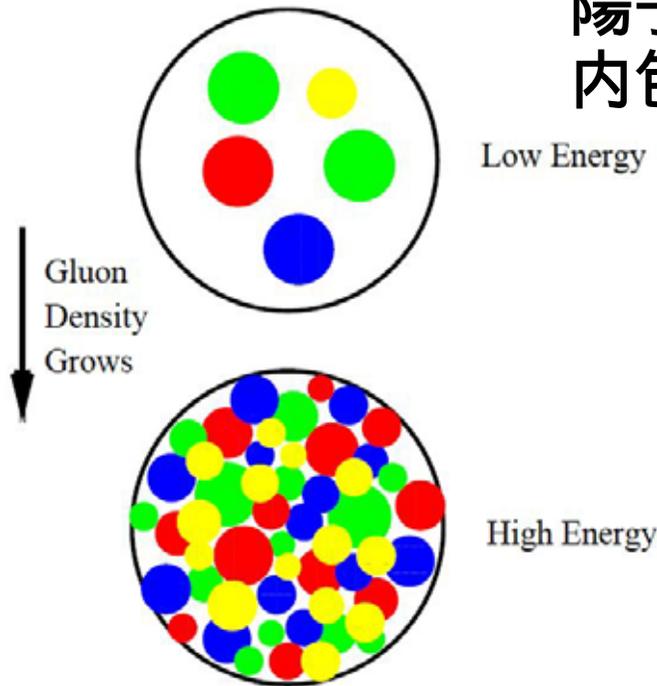
hep-ex/9603004

Introduction

構造関数 F_2 の上昇傾向はいつまでつづく？

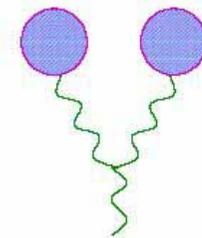
$$F_2(x, Q^2) \sim x^{-}$$

陽子が加速され、エネルギーが増加することで
内包粒子 (small- x) の密度が上がる。



飽和！ (ユニタリティーの回復)

内包粒子 (グルーオン) の
再結合として理解できる。



内包の限界！

どのような理論的アプローチが可能か？

本修士論文では、摂動QCDに基づいたSmall-Bjorken- x における構造関数 F_2 の漸近的振る舞いに関するレビューを行い、現状の問題点について考察する。

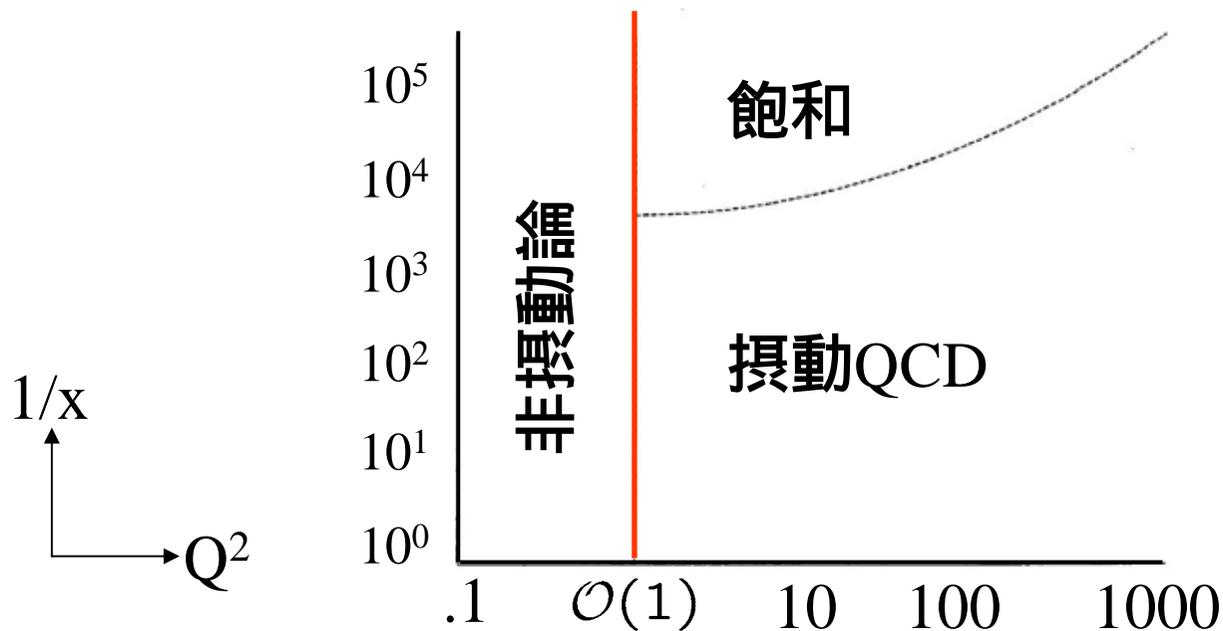
摂動QCD

摂動QCDは、物理量 を結合定数 α_s の冪級数で評価する。

$$\sigma\left(\frac{Q^2}{\mu^2}, \alpha_s(Q^2)\right) = 1 + a\alpha_s^2(Q^2) \ln \frac{Q^2}{\mu^2} + b\alpha_s^2(Q^2) + (\alpha_s^4)$$

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{1}{\beta_0 \ln Q^2/\Lambda^2}$$

クォーク同士が非常に近距離のとき、本質的に相互作用しない自由な粒子として振舞う。(漸近的自由)



Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov (BFKL)方程式

$$\frac{dG(x, Q^2)}{d \ln(1/x)} = \int d^2 k_T K G(x, Q^2)$$

$G(x, Q^2)$: 内包粒子の運動量分布 (分布函数)

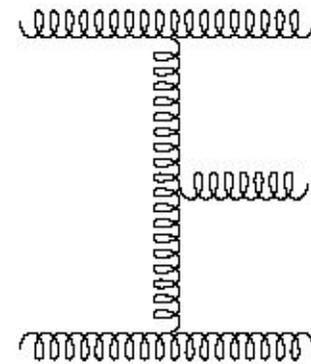
$G \sim F_2$ for small- x

$$K = {}_s K_1 + {}_s^2 K_2 + \dots$$

グルーオン輻射プロセスを摂動論的に計算して微分積分方程式を解く。

$$\downarrow \quad {}_s \ln 1/x$$

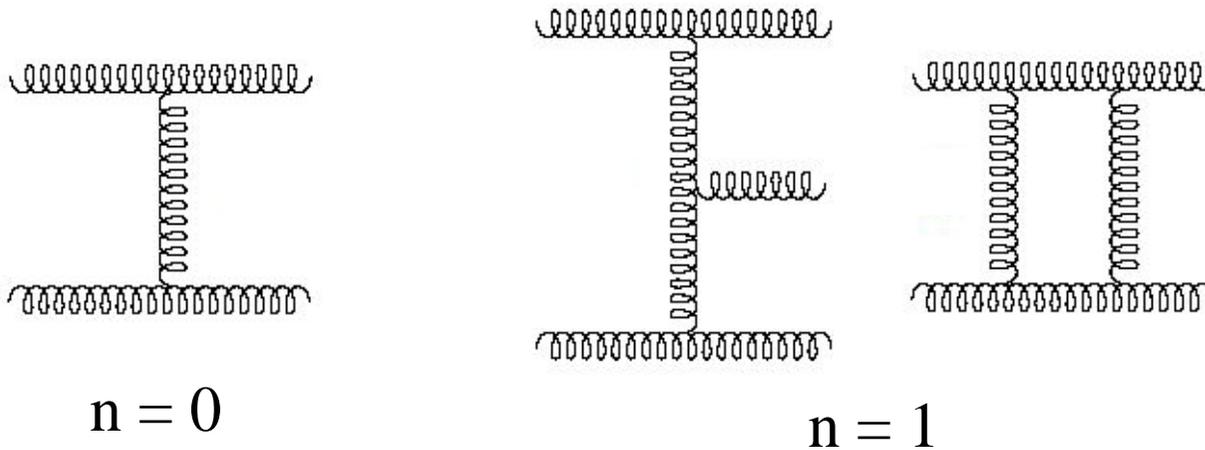
これは単純な摂動計算ではない！



Leading Order

$$F_2 \sim G = \sum_{n=0}^{\infty} A_n s^n (\ln 1/x)^n + \sum_{n=0}^{\infty} B_n s^{n+1} (\ln 1/x)^n + \dots$$

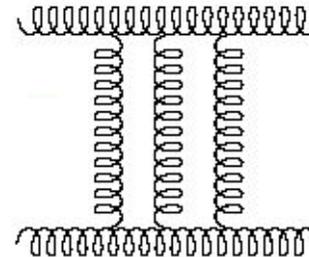
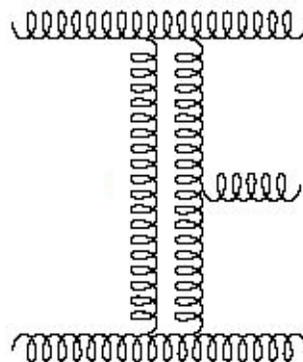
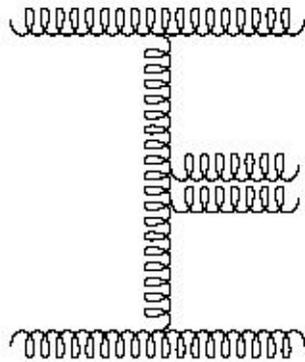
Leading Log Series $\sum_{n=0}^{\infty} A_n s^n (\ln 1/x)^n$



Next Leading Order

$$F_2 \sim G = \sum_{n=0}^{\infty} A_n s^n (\ln 1/x)^n + \sum_{n=0}^{\infty} B_n s^{n+1} (\ln 1/x)^n + \dots$$

Next Leading Log Series $\sum_{n=0}^{\infty} B_n s^{n+1} (\ln 1/x)^n$



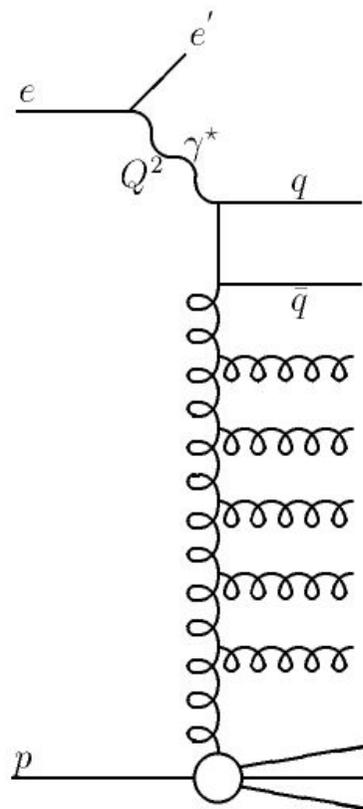
All $n = 1$ pattern

Ladder diagram

光子は輻射過程の最後の粒子を叩く(small- x を担う)

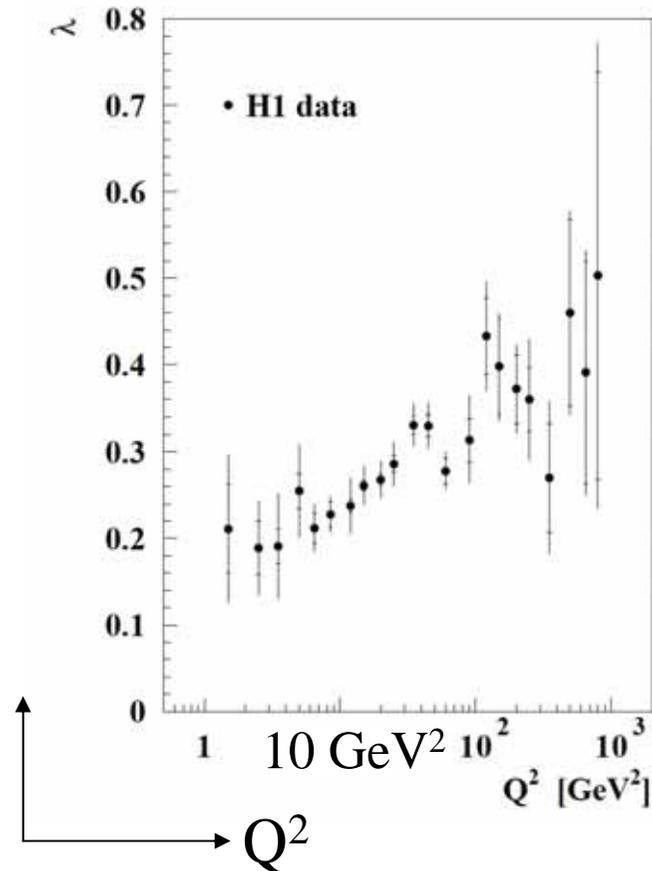
strong ordering

$$x_1 \gg x_2 \gg \dots \gg x_n$$



ladder diagram

実験との比較



hep-ex/9603004

$$F_2(x, Q^2) \sim x^{-\lambda}$$

Leading Log Series $s^{-\lambda} (\ln 1/x)^n$

~ 0.5 for $\sim 10 \text{ GeV}^2$

Next Leading Log Series $s^{-\lambda-1} (\ln 1/x)^n$

$\sim 0.13-0.18$

'99 V.S.Fadin

への補正は30%

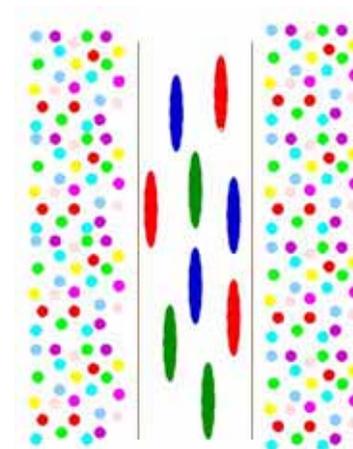
この大きな補正の起源はどこにあるか？

Saturation Scaleの見積もり

$$\sigma_{gg}(Q^2) \cdot n(x, Q^2) \sim \frac{\alpha_s}{Q^2} \cdot \frac{xG(x, Q^2)}{\pi R^2}$$

: gluon-gluon cross-section

n : gluon density



ローレンツ収縮

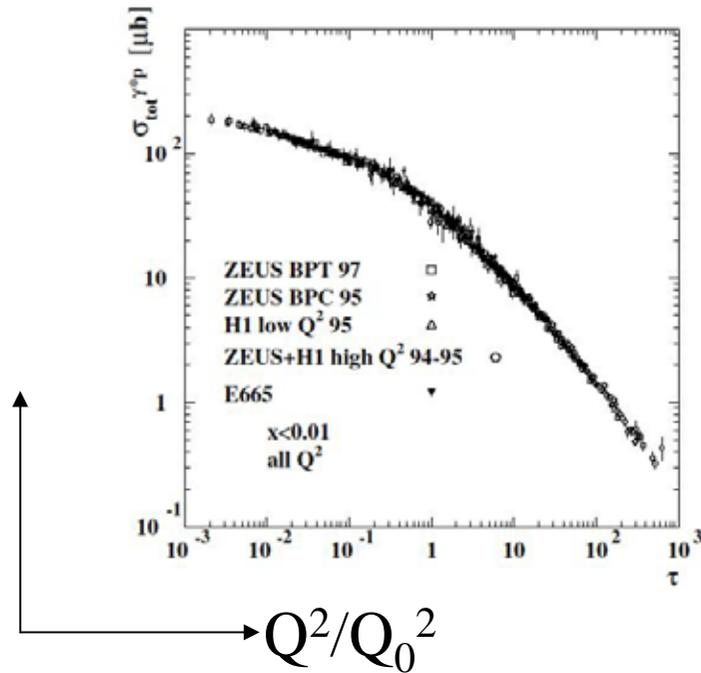
$$\sigma_{gg} \cdot n \sim \mathcal{O}(1) \longrightarrow Q_s^2 \sim \alpha_s \frac{xG(x, Q_s^2)}{\pi R^2}$$

F_2 の成長を緩和するScale

$$\frac{dG}{d(\ln 1/x)} = \alpha_s K \otimes G - \alpha_s G \otimes G \quad \text{非線形の効果}$$

$Q^2 \gg Q_s^2$ のとき従来のBFKLを再現

現象論への応用



は Q^2 にScaleする

Phys.Rev.Lett.86.956
'00 at HERA

BFKL従来型

$$G(x, Q^2) \sim \exp\{A + B \ln Q^2 + C(\ln Q^2)^2\}$$

Q^2 でScaleしない

従来型+非線形

$$G(x, Q^2) \sim \exp\{-D \ln Q^2\}$$

函数型が実験データと合う

まとめと今後

飽和のメカニズムも含めたBFKL方程式の統一的理解が求められる。

Open Question

- ・ 高エネルギーの現象は、small- x の領域を伴うため単純な摂動計算で物理量を評価することができない。そのためBFKL方程式の解の安定性には議論の余地がある。

- ・ 結合定数は十分小さいか $\alpha_s(Q_s) \ll 1$?

HERA , RHIC $Q_s \sim 1-2$ GeV marginal ,at most !

- ・ 非線形項 $\alpha_s G \otimes G$ を含む Next Leading Order の寄与はどれくらいか?