

QCD physics at HERA

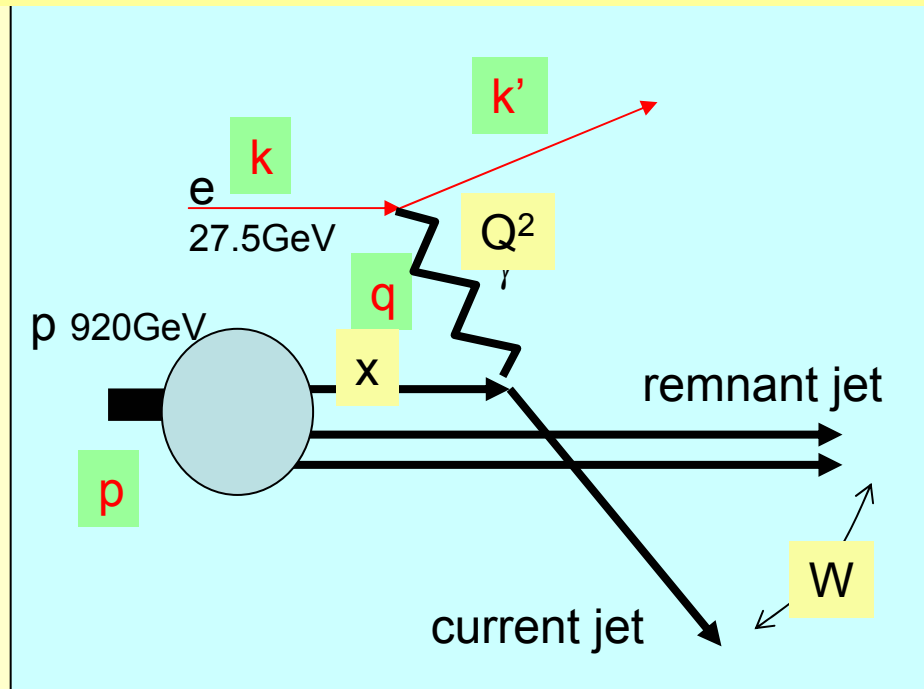
徳宿 克夫 (KEK)



HERAのほとんどの結果はQCDに関連したものだが、このトークでは3つのトピックに絞る。

- 陽子の構造関数
- ジェット生成と α_s
- インスタントン

HERA: 27.5GeV電子と920GeV陽子のコライダー



電子陽子の深非弾性散乱 (DIS) を測定

$$Q^2 = -q^2$$

$$x = Q^2 / 2p \cdot q$$

$$F_2 = \sum_f e^2 x q_f(x, Q^2)$$

$q_f(x, Q^2)$: quark distribution function

$$\frac{d\sigma_{e\pm p}^2}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} (Y_+ F_2 - y^2 F_L \mp Y_- x F_3)$$

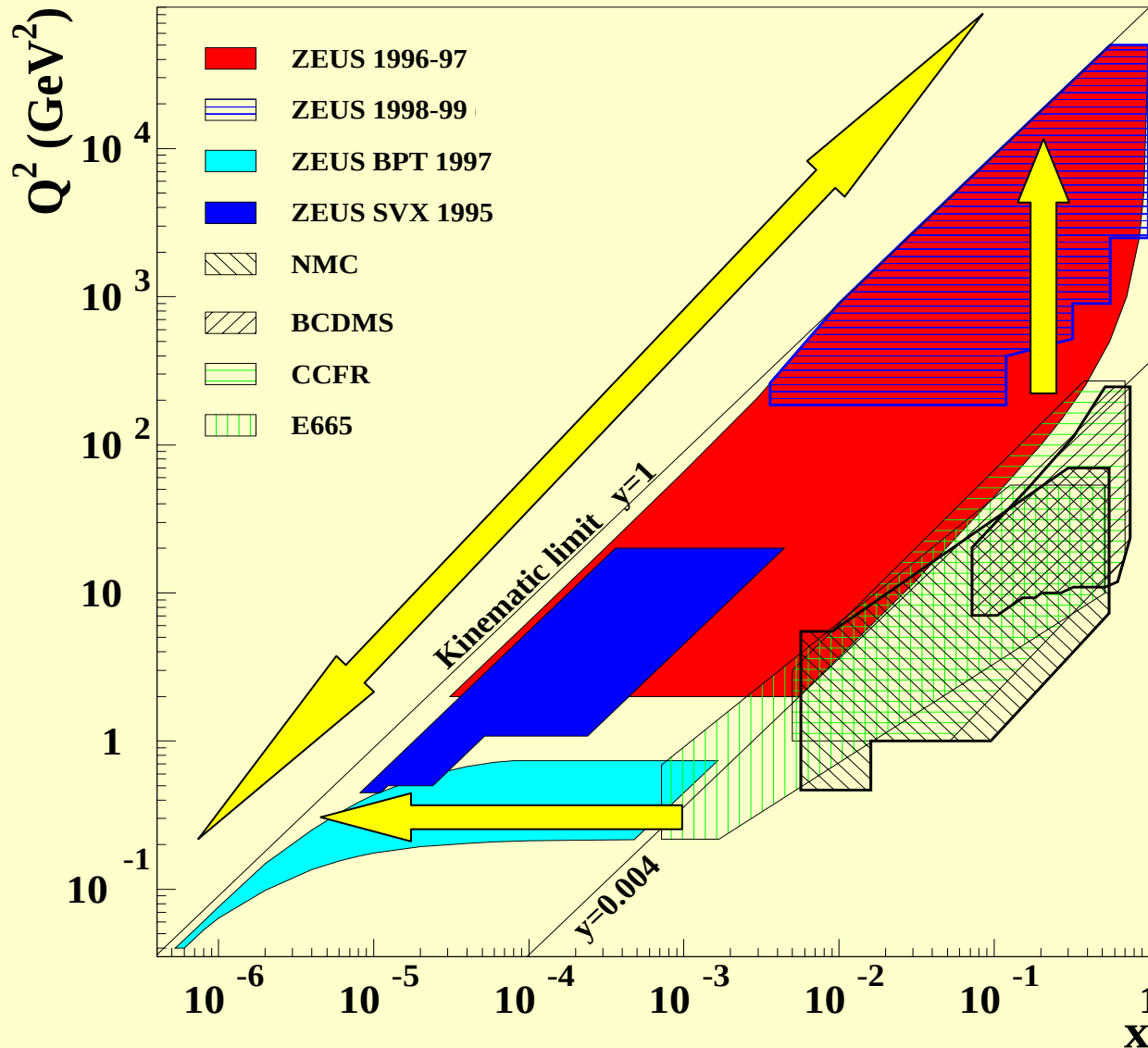
$y = Q^2 / xs$, the inelasticity parameter, $Y_{\pm} = (1 \pm (1 - y)^2)$

F_2 , F_L , and $x F_3$ are structure functions of the proton.

- F_L : longitudinal component, damped by y^2 .

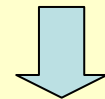
- $x F_3$: Small at $Q^2 \ll M_Z^2$,

HERAの運動学的領域



$$s=Q^2xy$$

- 2桁以上高い Q^2
- 2桁以上低い x
- 6桁以上に広い範囲の測定が可能

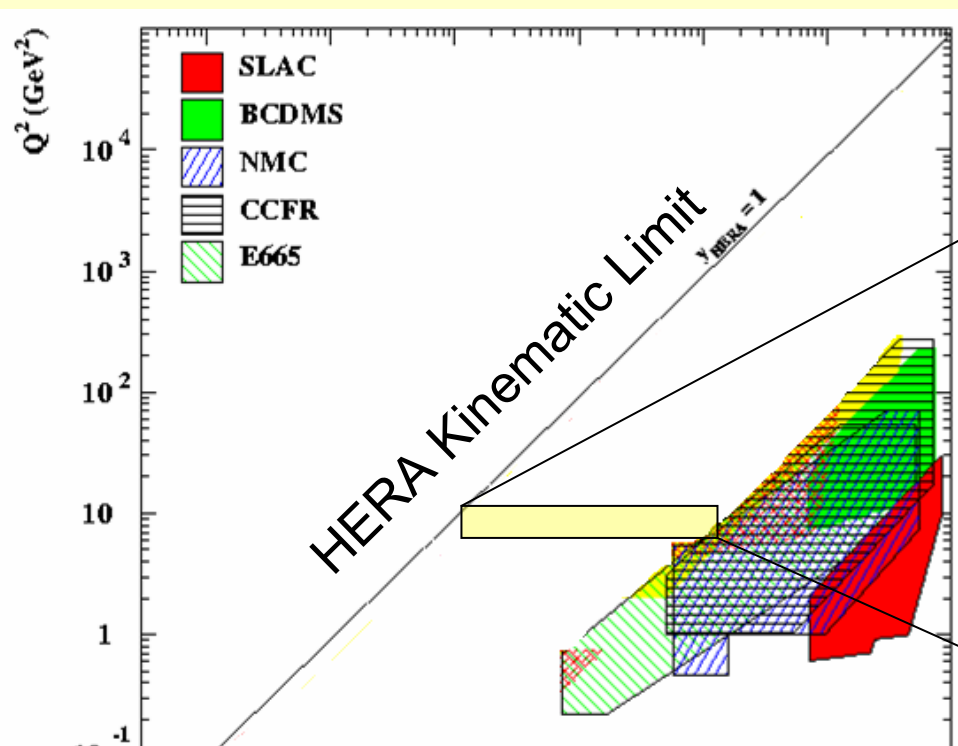


物理量がどのように運動学変数と共にどう変化していくか (evolution) を見るのに最適

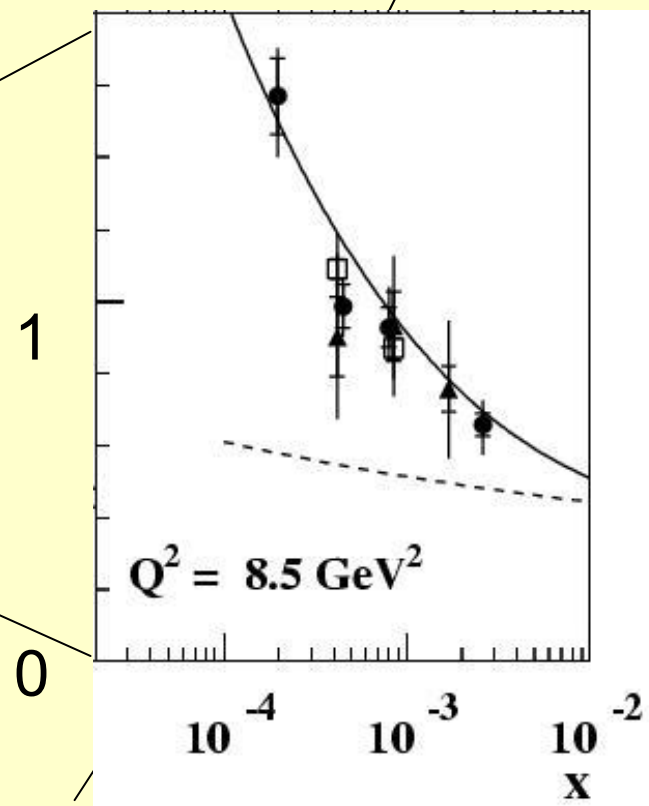
陽子の構造 (HERAの初期結果)

Gluck, Reya
and Vogt

“pQCD” : parton evolution



Early HERA data showed rapid increase of F_2 at low x .

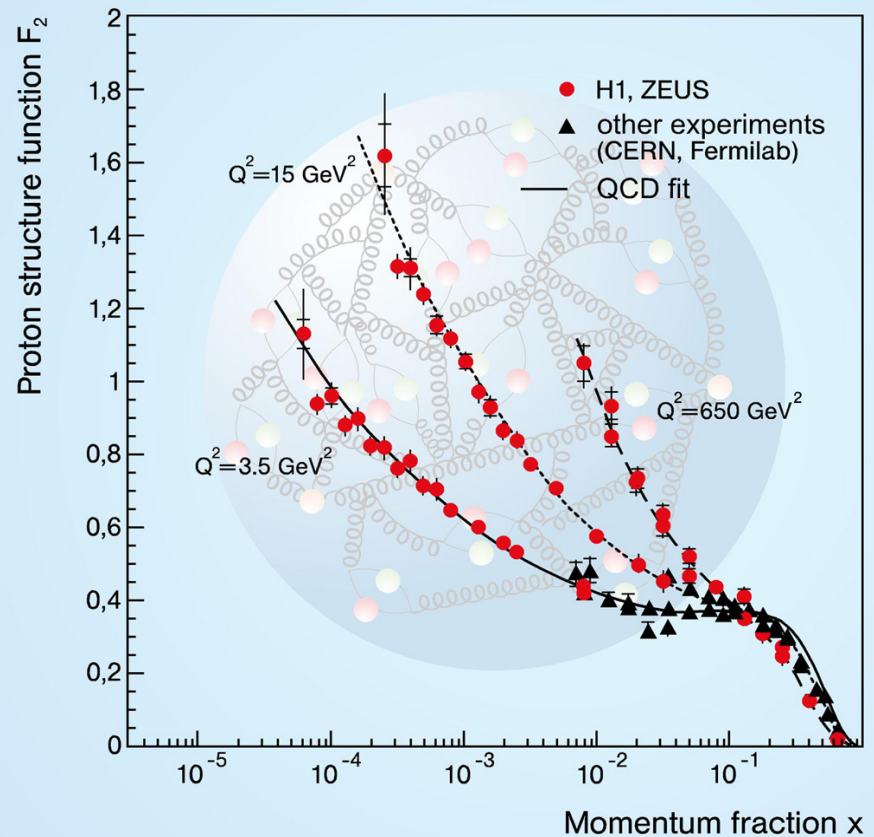
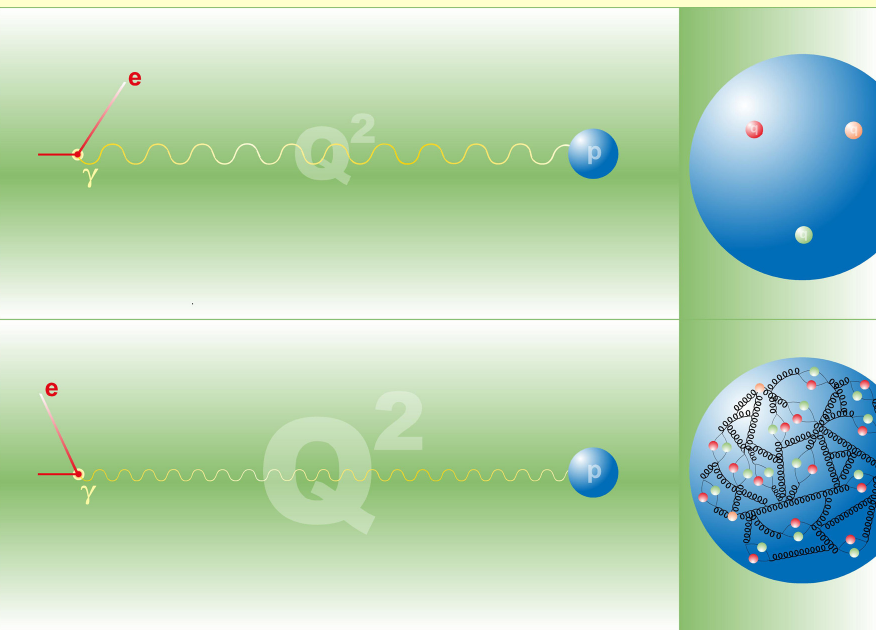


Fixed
target
data

Donnachie & Landshoff

“Hadronic”: γp の全断面積が pp と同じように振舞うと考えた場合

陽子の構造の測定



Frank Wilczek の自分の初期のQCD論文に関するコメント:

“... The most dramatic of these [tests], that protons viewed at ever higher resolution would appear more and more as field energy (soft glue), was only clearly verified at HERA twenty years later”.

http://web.mit.edu/physics/facultyandstaff/faculty_documents/wilczek_select_pubs.pdf

スケーリングの破れ

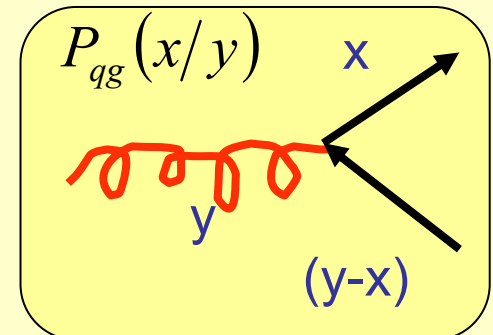
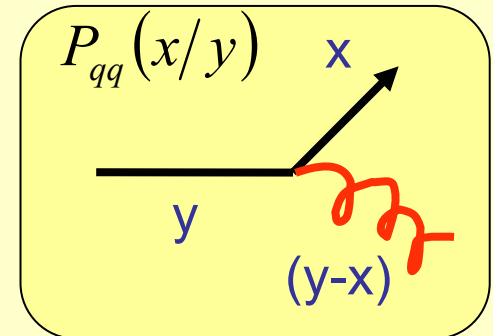
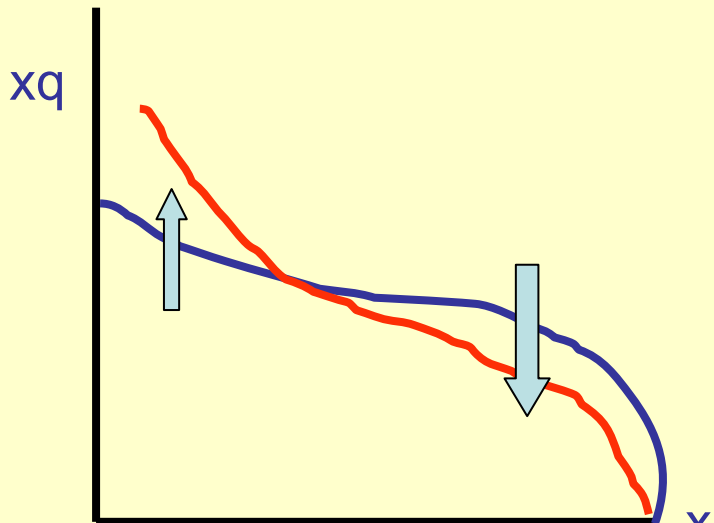
DGLAP 発展方程式 (Dokshitzer, Gribov, Lipatov, Altarelli, Parisi)

$$\frac{dF_2}{d \ln Q^2} = \sum_q e_q^2 \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \int_x^1 \frac{dy}{y} \left[P_{qq}(x/y) \cdot q(y, Q^2) + P_{qg}(x/y) \cdot g(y, Q^2) \right]$$

splitting function (known from pQCD)

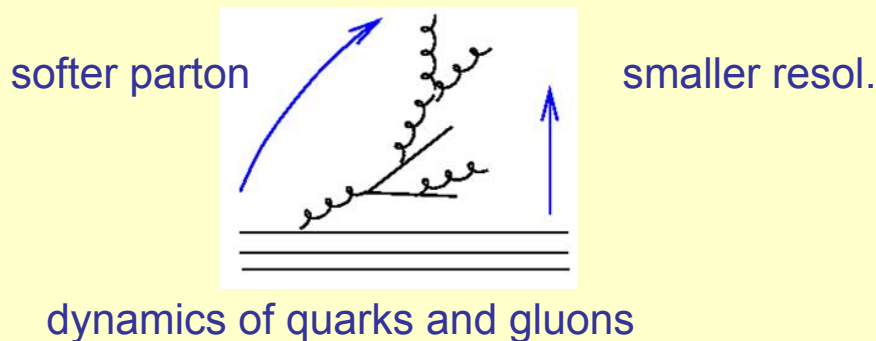
$Q^2 \rightarrow$ 大:

high- x q と g が low- x q と g に
分かれる。

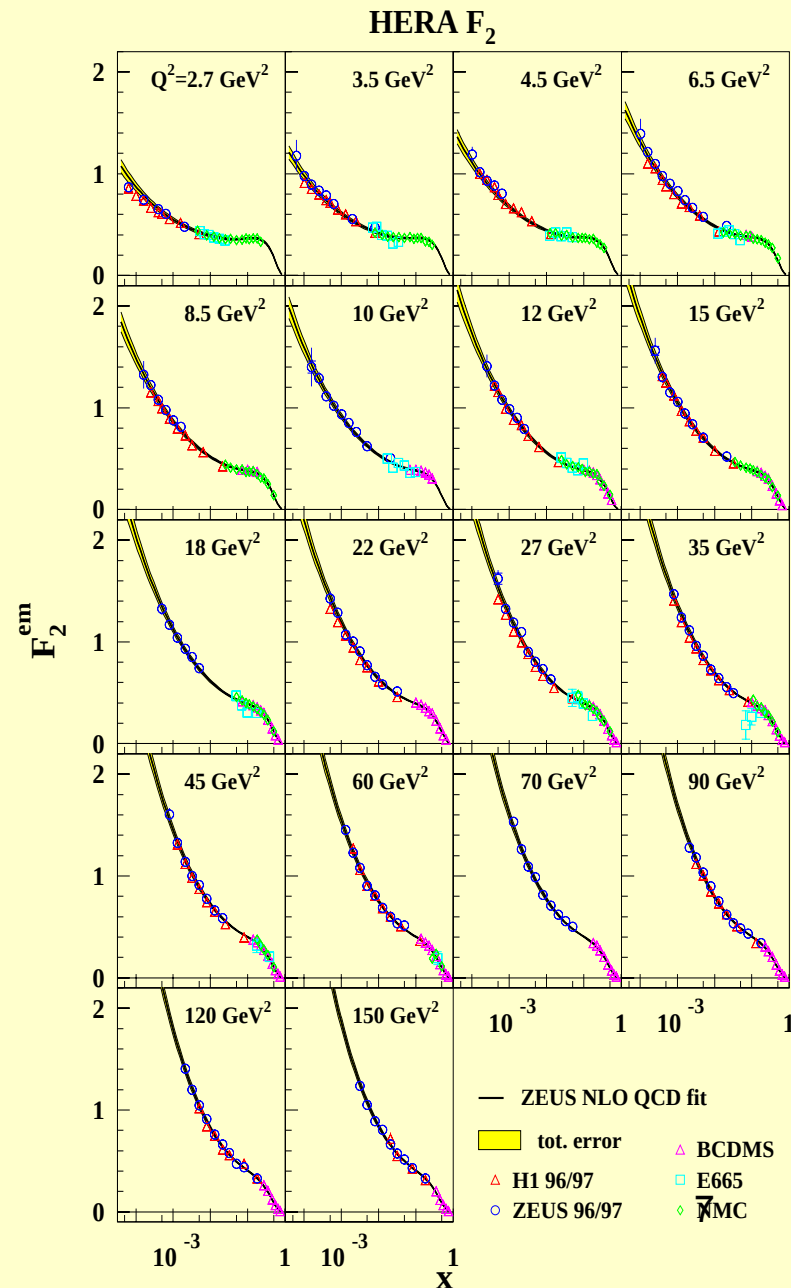


F₂ 構造関数の測定

- x が小さくなると F_2 は急激に大きくなる
 - 陽子の中にはsoft 'sea' クォークがたくさんある
- Q^2 が大きくなるにつれてその傾きは急になっている。

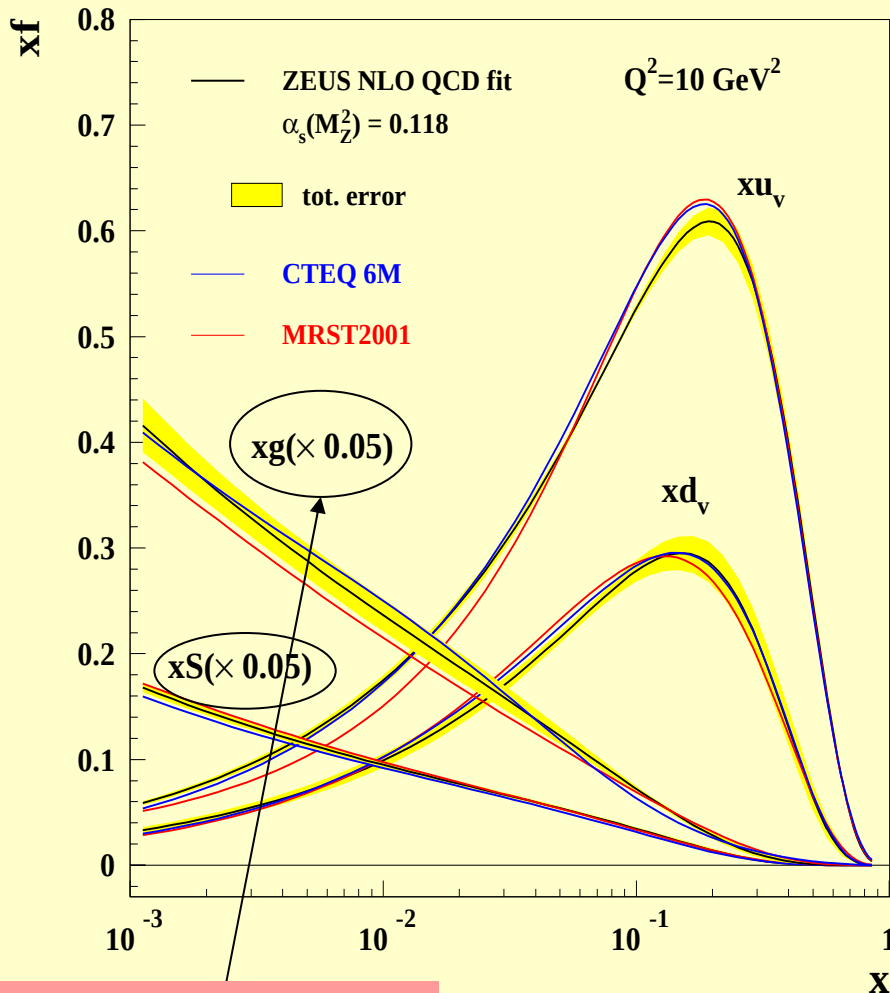


- 高い x では低エネルギーのデータとよくつながっている。
- DGLAP発展方程式を使ったNLOQCDはデータを非常に良く再現できている。

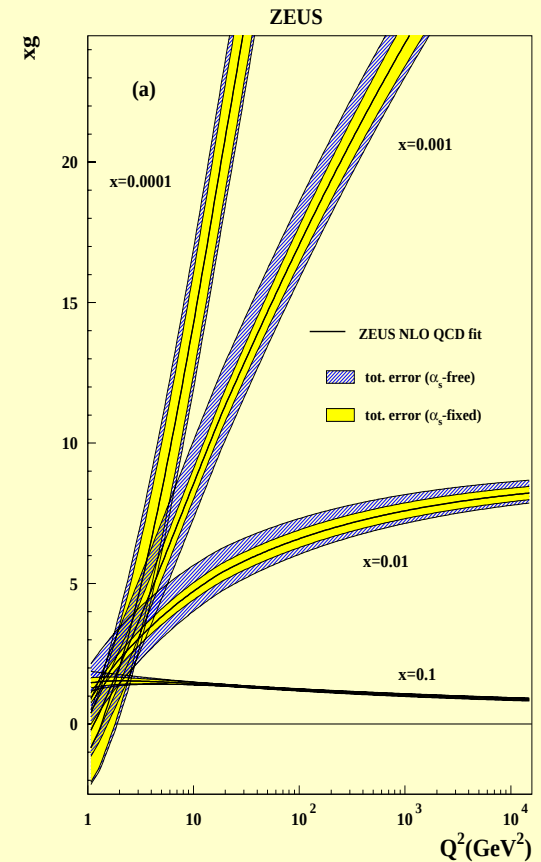


フィットから求まったパートン分布

ZEUS



Note the scale factor.
 Gluon dominant at low-x



- low-x で F_2 が大きくなったことからわかるように、陽子の中には sea quark がたくさんある。
- NLO-QCD フィットの結果は low-x ではそれよりさらにグルーオンが多いことを示す。

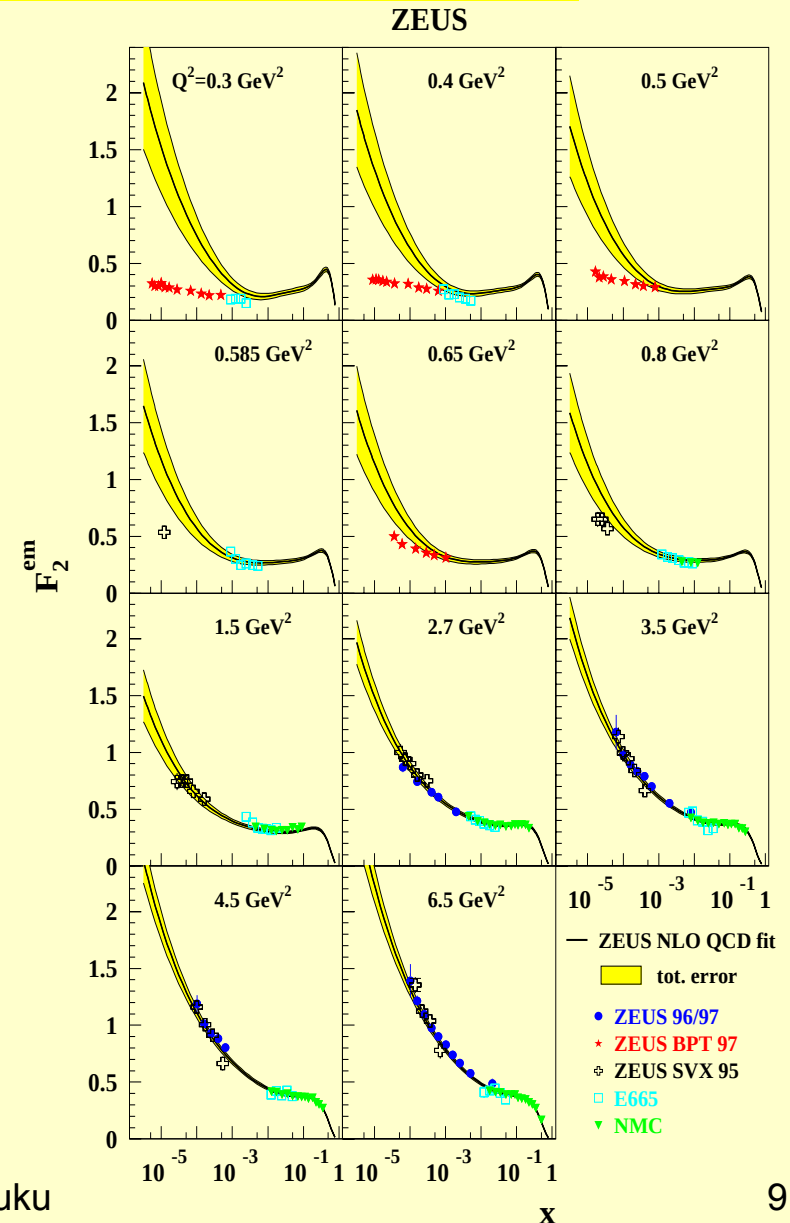
Transition from perturbative to non-p. region

- NLOQCDの限界を見るのに、 Q^2 の小さい所まで測定を進めた。
- $Q^2 \sim 1 \text{ GeV}^2$ 以下では F_2 のデータはなだらかになる傾向が見られる。
- $Q^2=0$ ではRegge的な振る舞いをする事が測定でわかっているが、そこへ向かってなだらかに移行している。

low x の F_2 は仮想光子の全吸収断面積と下式のように関係し、かつ

$$x \approx Q^2/W^2$$

$$\sigma_{tot}(\gamma^* p) \approx \frac{4\pi^2\alpha}{Q^2} F_2(W, Q^2)$$



F₂の測定 (Q²の関数として)

- スケーリングの破れ:

$$\partial F_2 / \partial \ln Q^2 \sim \alpha_s \bullet xg(x, Q^2)$$

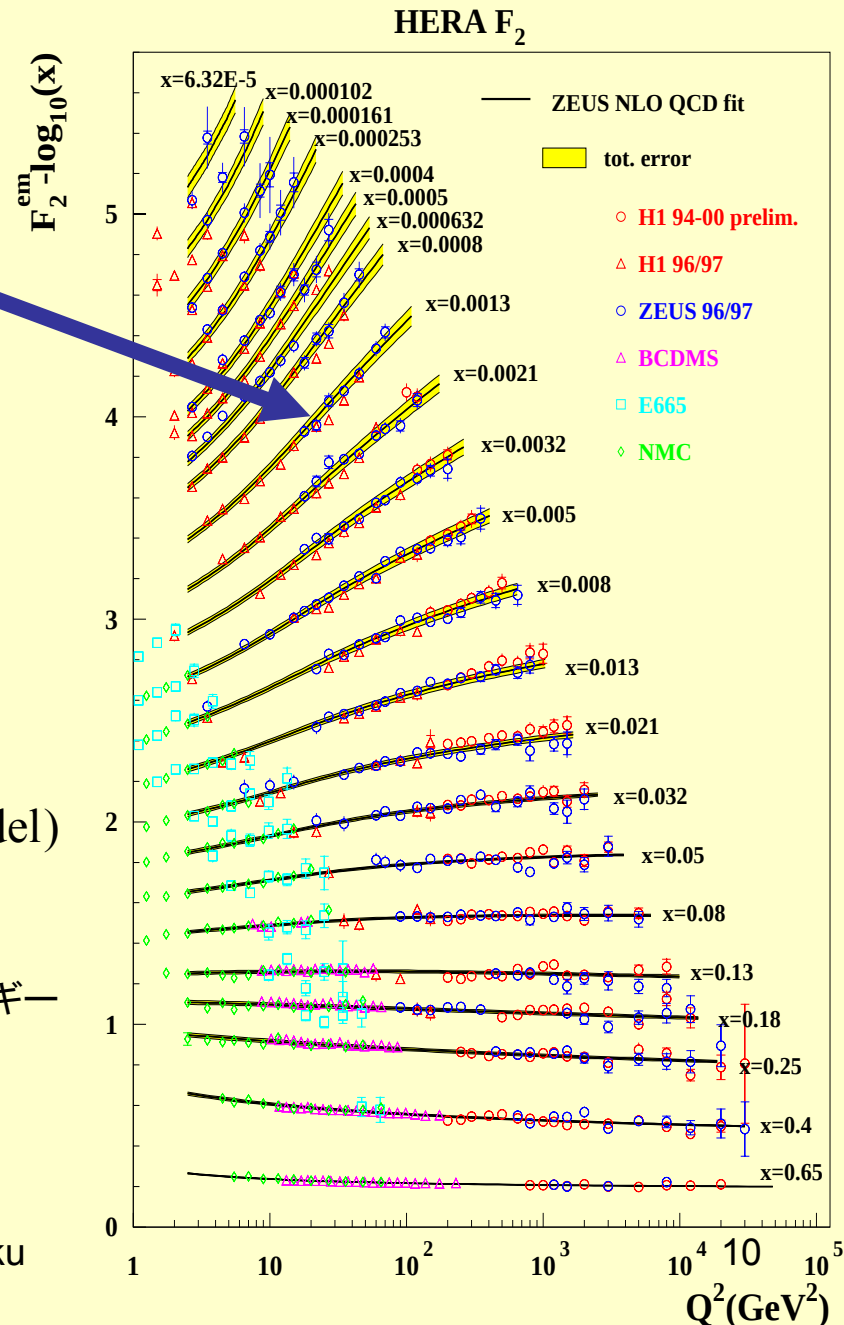
- α_s をフリーパラメータとしてF₂からパートン分布を求める:

H1: $\alpha_s = 0.1150 \pm 0.0017(\text{exp})^{+0.0009}_{-0.0005}(\text{model})$
(additionally ± 0.0005 from renormalization scale)

ZEUS: $\alpha_s = 0.1166 \pm 0.0049(\text{exp}) \pm 0.0018(\text{model})$
(additionally ± 0.0004 from renormalization scale)

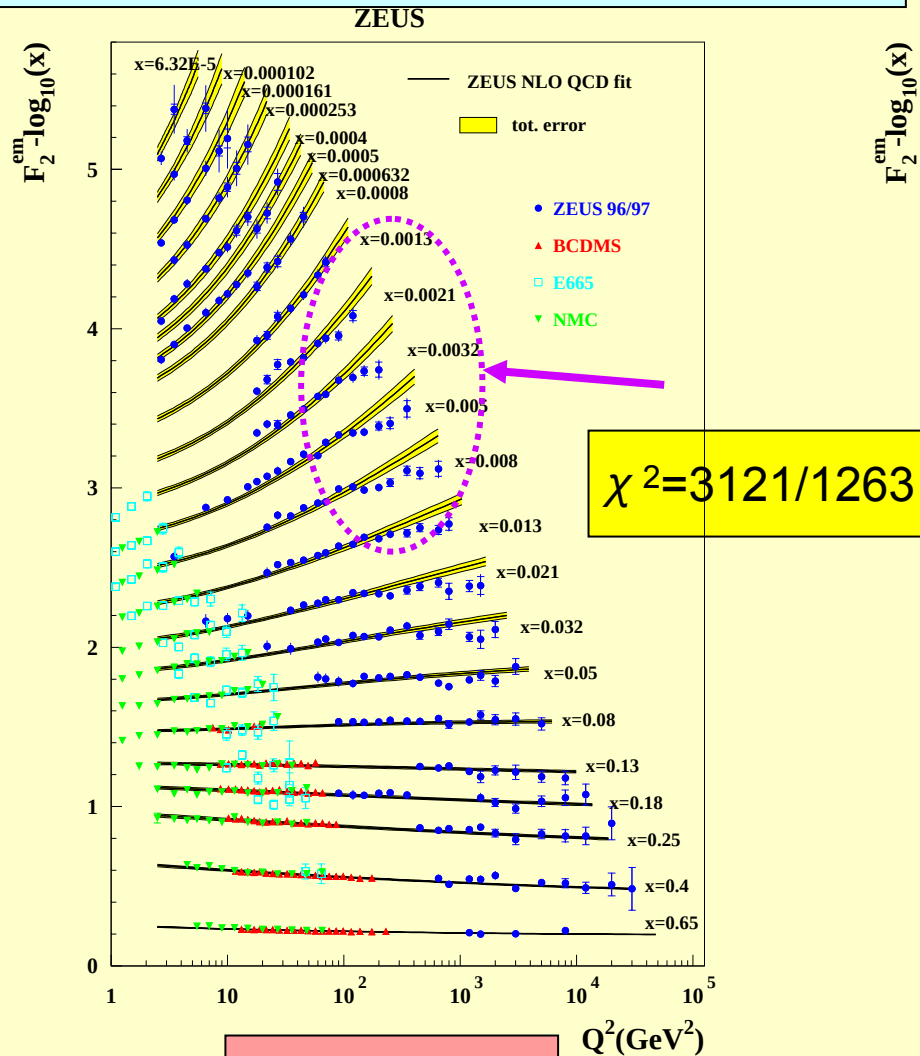
H1とZEUSの違いはおもに

- どの実験データを使うか(H1/ZEUS, 低エネルギー実験)
- エラー(特に系統誤差)をどう扱うか
- $Q^2=Q_0^2$ でのパートン分布関数の形などからきている.



α_s runningの効果が見えるか

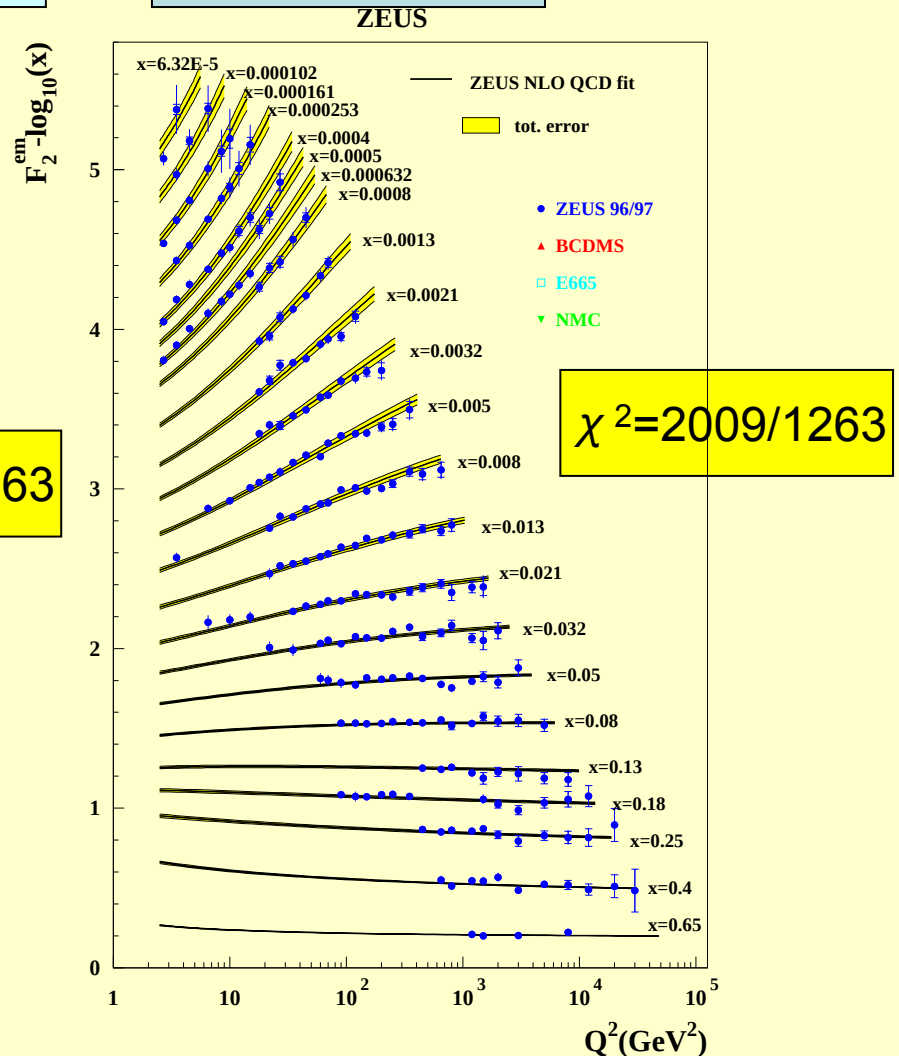
NLO-DGLAP フィットで α_s を強引に固定した場合



March 25 200

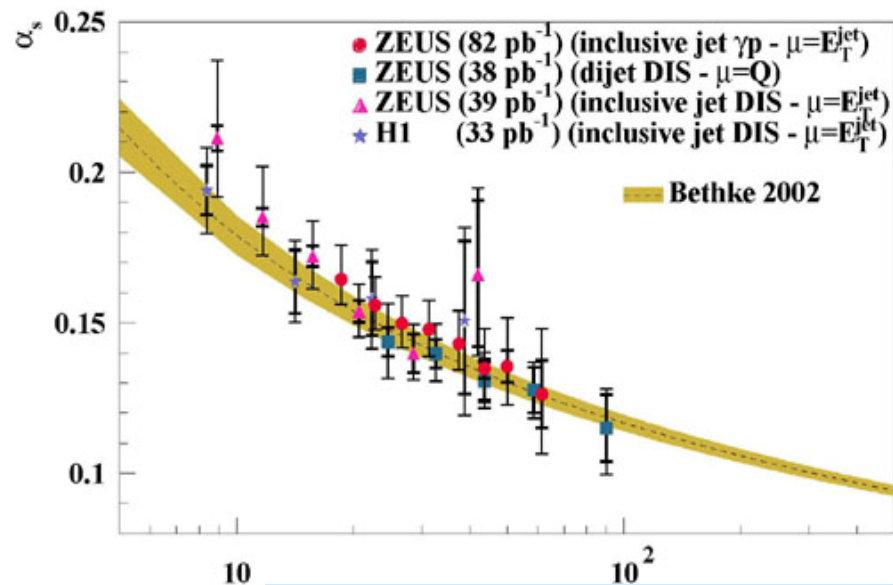
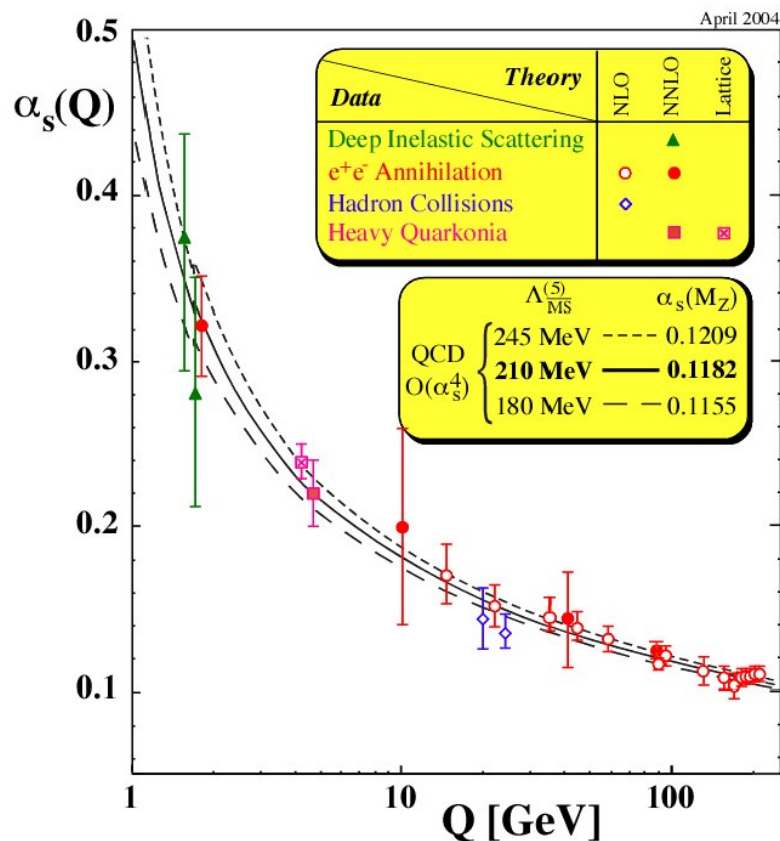
K.Tokushuku

通常のフィット



K.Nagano

強い相互作用の結合定数 α_s の測定

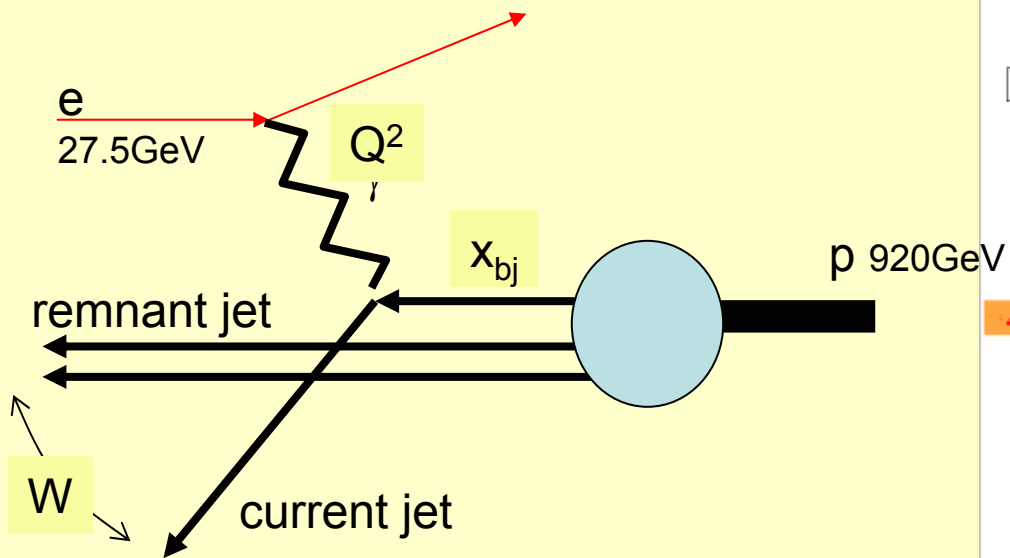


世界平均 S.Bethke hep-ex0407021

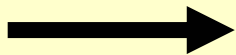
$$\alpha_s(M_Z) = 0.01182 \pm 0.0027$$

ZEUS/H1はF₂フィット以外でも
様々な方向で α_s の測定を進めて
来た

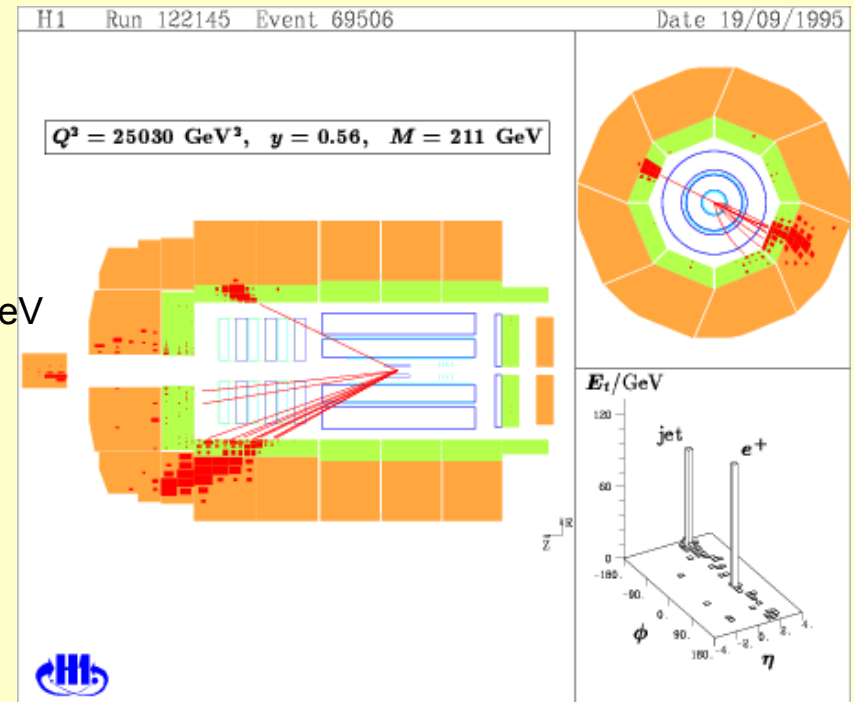
ep 衝突でのジェット生成 I



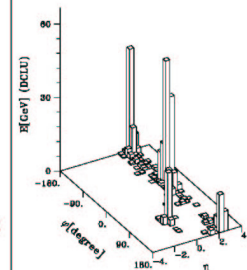
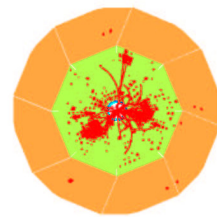
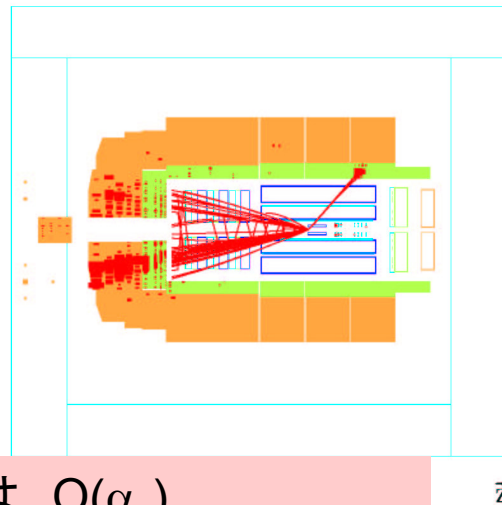
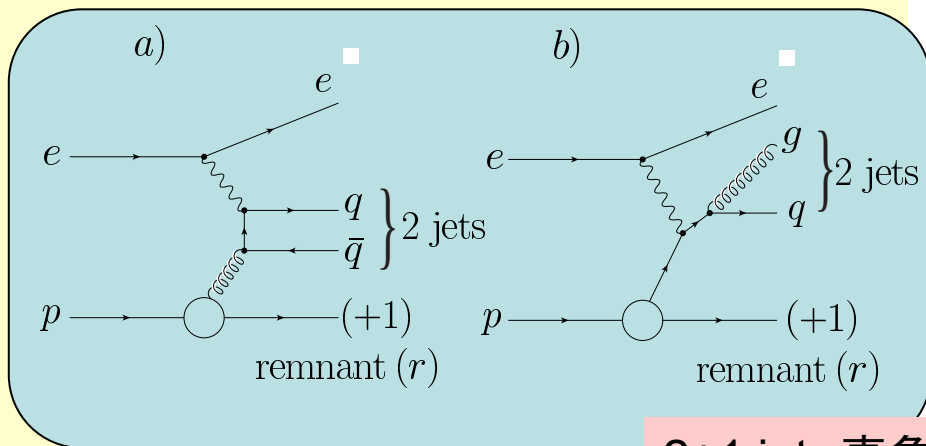
1+1 jet 事象では、ジェットは散乱されたクォークそのまま



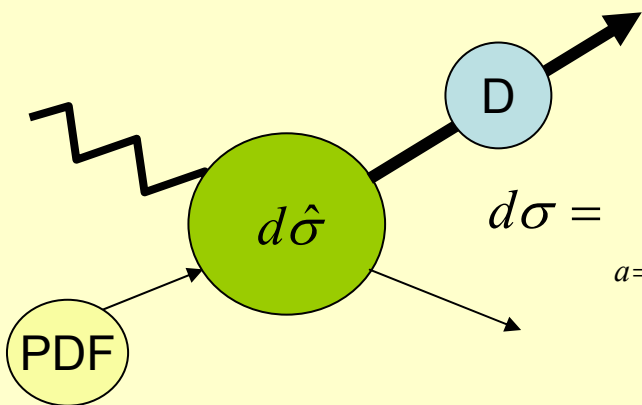
ジェットのPtは、電子のPtとバランスしているだけ。
→よってこの場合 (Jet の測定 ~ Inclusive F_2 測定)



ep 衝突でのジェット生成 II



2+1 jet 事象は、 $O(\alpha_s)$
陽子内のグルーオン分布や、
グルーオンの放射の研究が出来る



$$d\sigma = \sum_{a=q,\bar{q},g} \int dx f_a(x, \mu_F; \alpha_s) \underbrace{d\hat{\sigma}(xP, \mu_F; \mu_R; \alpha_s(\mu_R)_s)}_{\text{Hard scattering cross section}} \underbrace{D(z, \mu_F; \alpha_s)}_{\text{Fragmentation Function}}$$

source parton distribution

それぞれの項で α_s への依存度があるので、様々な方法で α_s の測定が可能になる。
ジェットの研究では、Fragment functionの部分はハドロン補正として扱う。

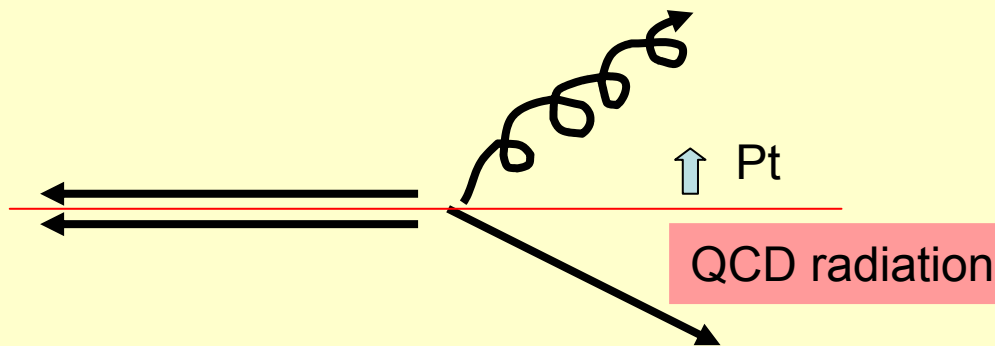
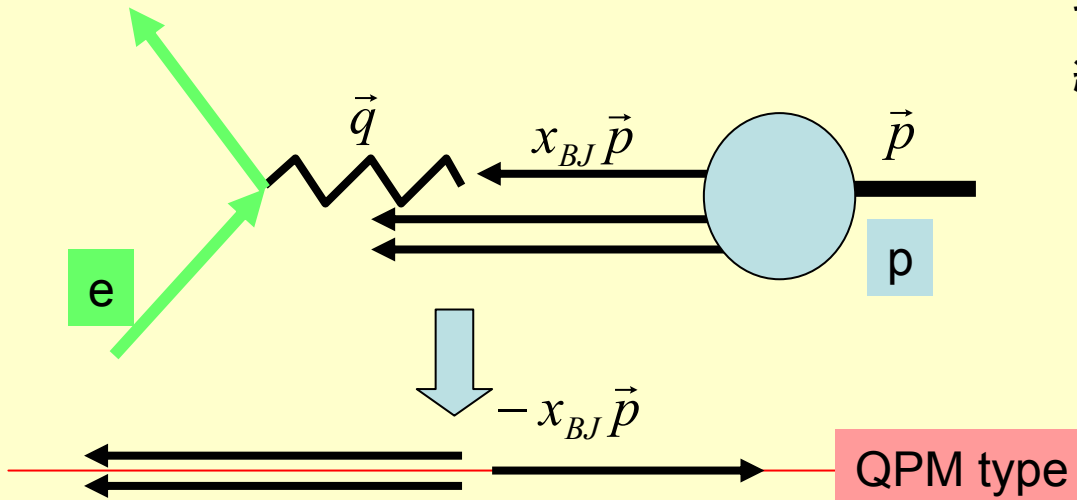
$$d\sigma = \sum_{a=q,\bar{q},g} \int dx f_a(x, \mu_F; \alpha_s) d\hat{\sigma}(xP, \mu_F; \mu_R; \alpha_s(\mu_R)_s) (1 + \delta_{had})$$

DISでのジェット生成

DISでは、ローレンツ系としてBreit frameを使うのが便利。この系は $2x_{BJ}\vec{p} + \vec{q} = 0$

で定義され、仮想光子は
純粹にspace-like.

$$\vec{q} = (0, 0, 0, -2x_{BJ}P)$$



Breit frameではカレントクォークとレムナントクォークが良く分離する。QPMの事象では、カレントクォークが180度反射するので、 P_t を持たない。QCDによるグルーオン輻射があったときのみ P_t がでる。

DISでのジェット生成

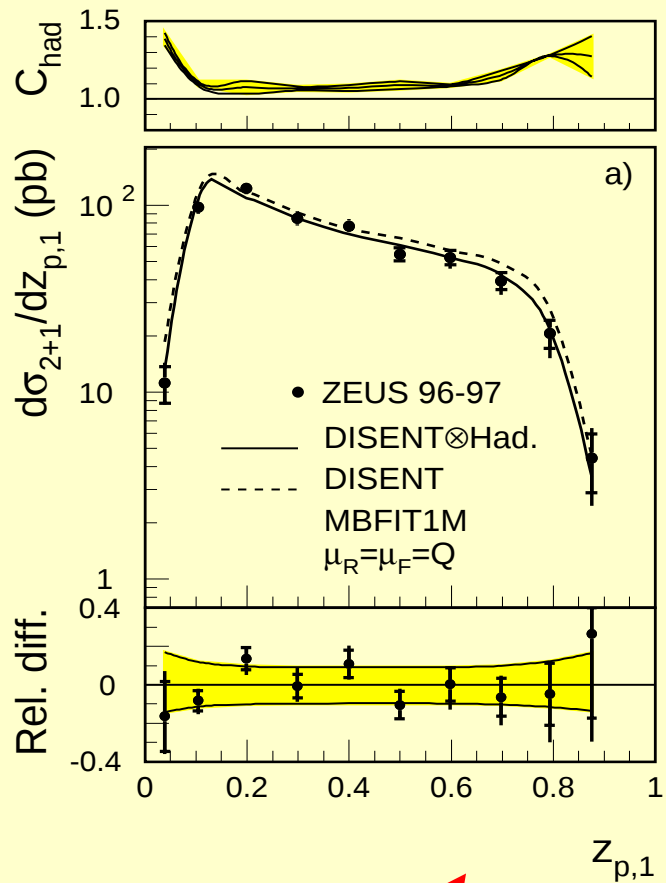
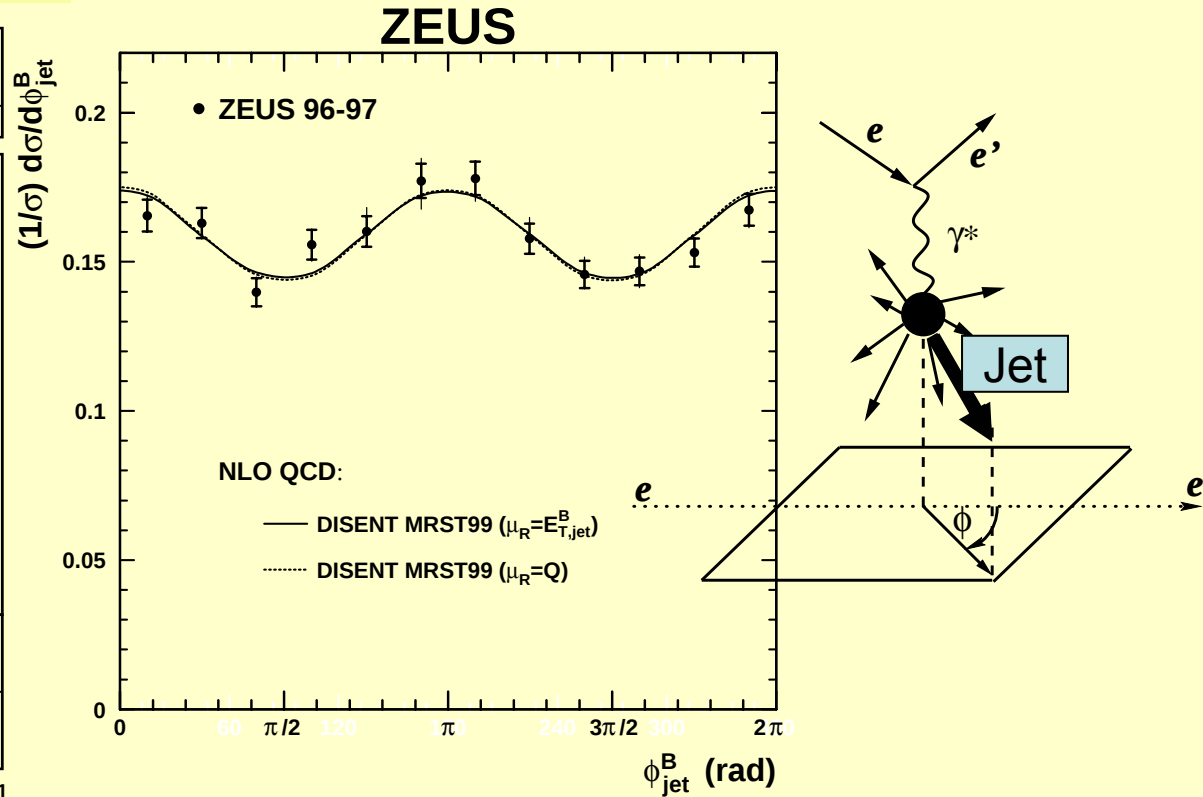


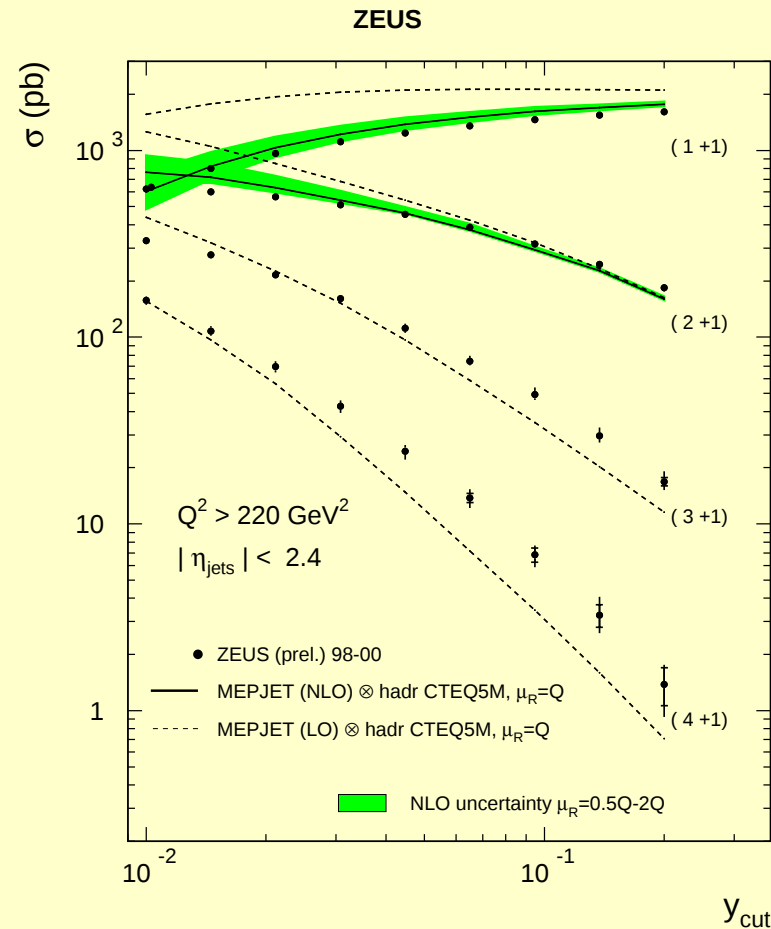
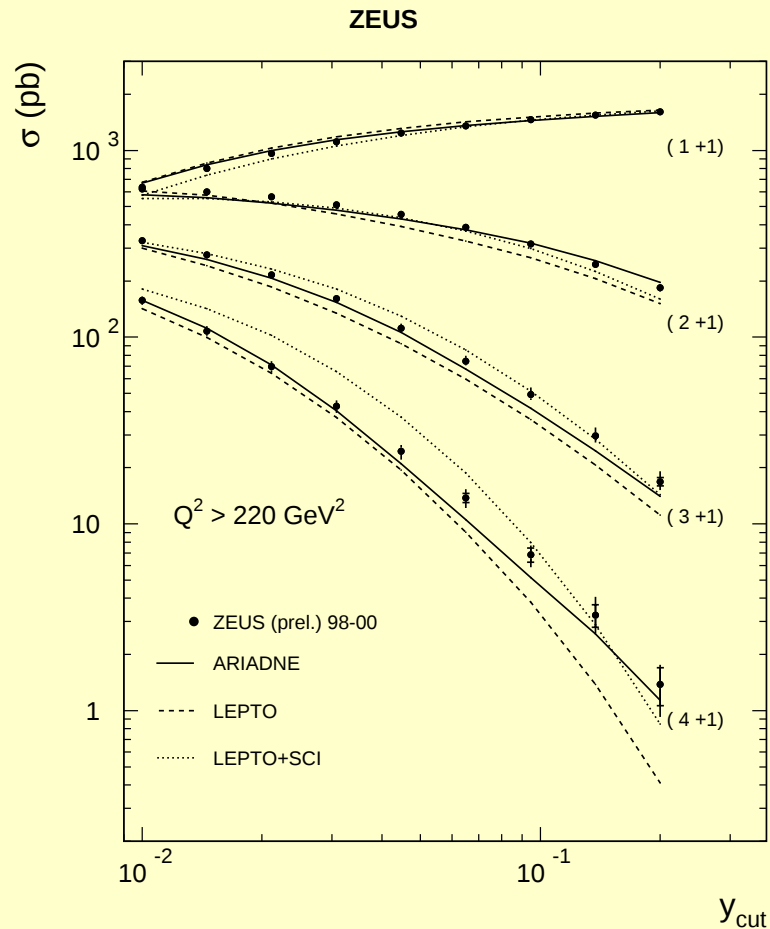
Diagram illustrating the kinematics of a quark and a gluon jet. The angle between the quark jet (black line) and the gluon jet (red line) is θ^* . The energy fraction carried by the quark jet is given by the equation:

$$z = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta^*)$$



2ジェットの角分布はNLO-QCDでよく再現できている。
→ QCD行列要素の確認

ジェットの多重度

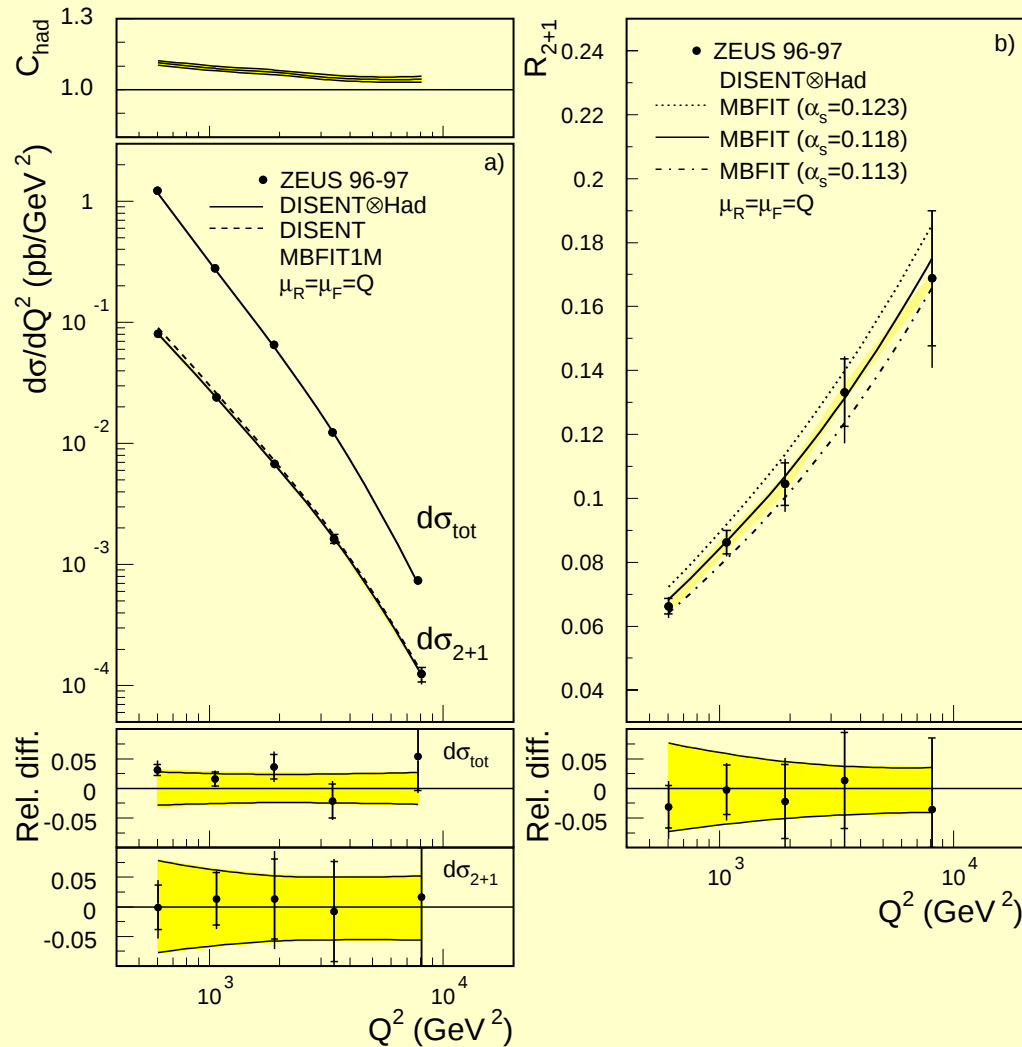


パートンシャワーを入れたMCはジェットの多重度を良く再現している。

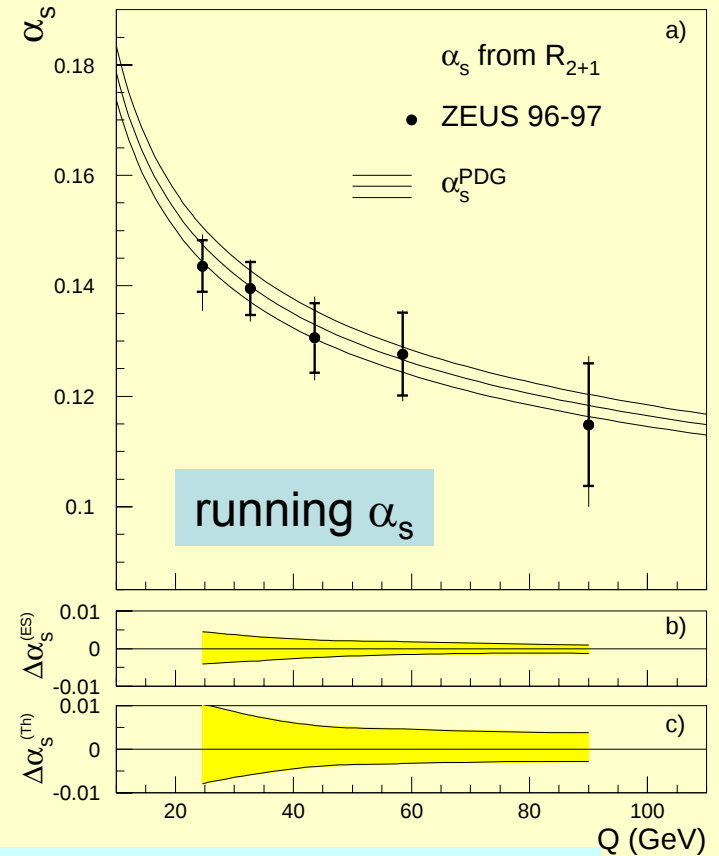
NLO-QCD も 2+1 jets の分布を良く再現している --> α_s の古典的な測定が可能

Di-jet in DIS

ZEUS



ZEUS



2+1ジェット事象の断面積と全断面積の比を取ることで、実験及び理論の不定性が相殺でき精度が上がる

$$\alpha_s(M_z) = 0.1166 \pm 0.0019(stat.)^{+0.0024}_{-0.0033}(exp.)^{+0.0057}_{-0.0044}(th.)$$

March 25 2005

K.Tokushuku

PLB 507 (2001) 70-88

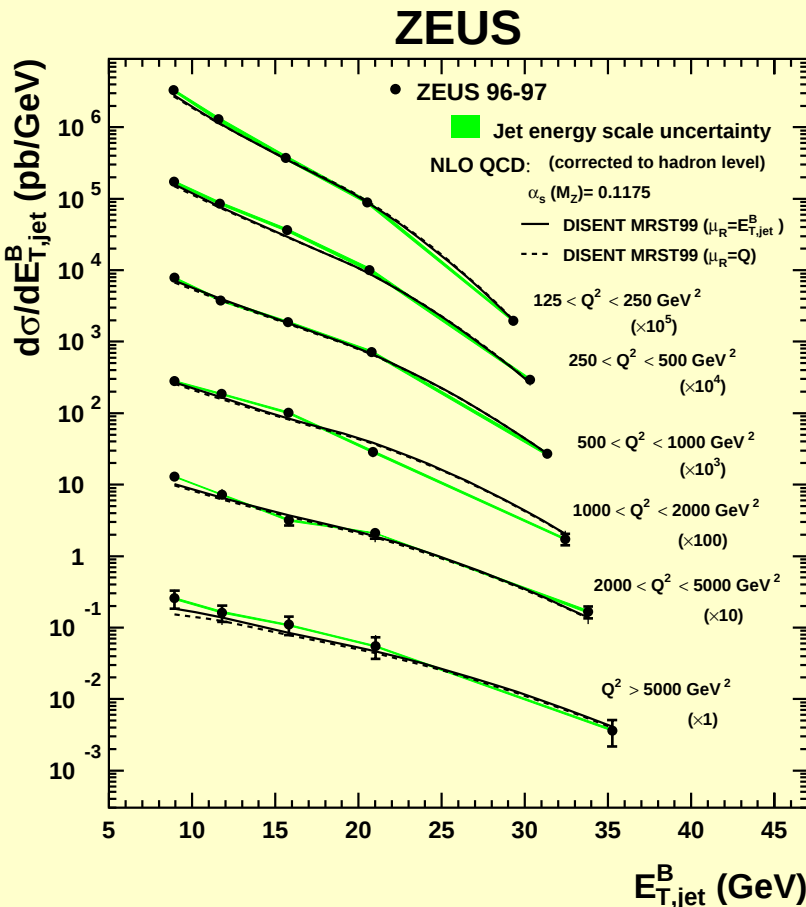
18

Breit frame での Inclusive ジェット断面積

$$d\sigma = \sum_{a=q,\bar{q},g} \int dx f_a(x, \mu_F; \alpha_s) d\hat{\sigma}(xP, \mu_F; \mu_R; \alpha_s(\mu_R)_s) (1 + \delta_{had})$$

NLO 計算が存在

近年では(ZEUSも含めて)、違った値の α_s でのPDFが使えるようになった。



式の各項が既知 →
測定した各点の断面積から
それぞれの点での α_s を測定可能

ダイジェットを選ぶ条件をきめる
不定性がない分、こちらの方が
理論の不定性を減らすことができる。

Etjet cross section in Breit frame.

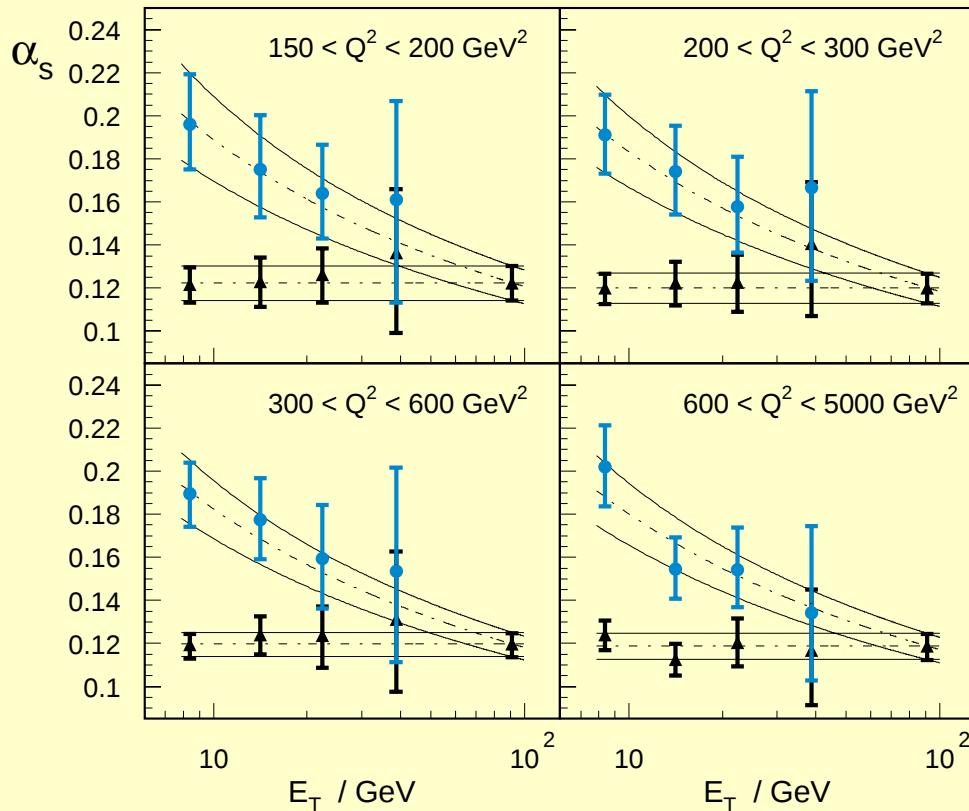
Jet Production in DIS

running α_s

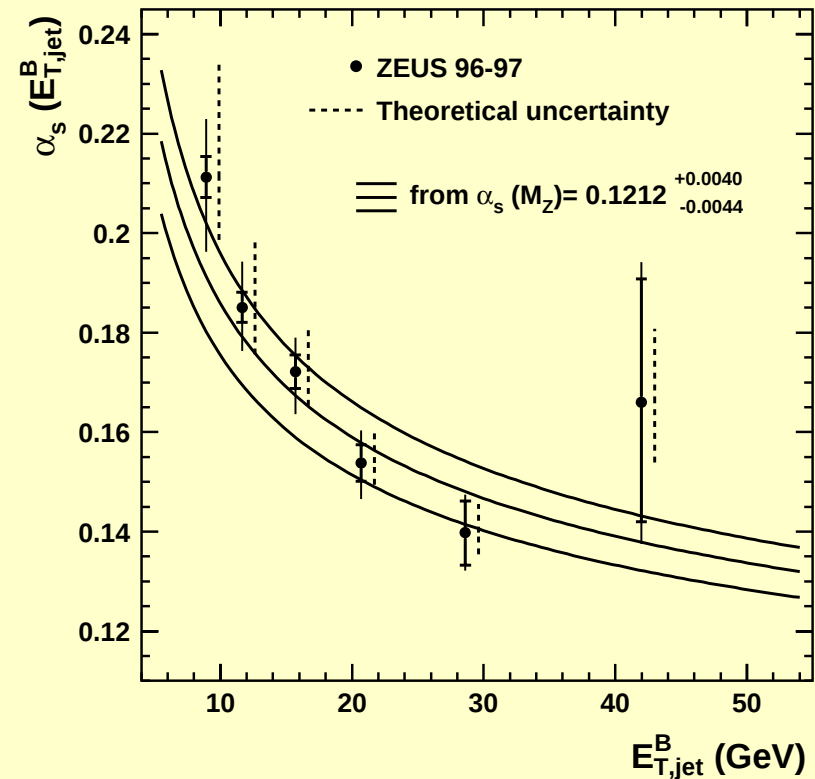
α_s from inclusive jet cross section
for CTEQ5M1 parton densities
inclusive $k_{\perp}$ algorithm

H1

● $\alpha_s(E_T)$
▲ $\alpha_s(M_Z)$



ZEUS



$$\alpha_s(M_Z) = 0.1186 \pm 0.0030(\text{exp.})^{+0.0039}_{-0.0045}(\text{th.})^{+0.0033}_{-0.0023}(\text{PDF})$$

H1: E.P.J.C19 (2001) 289

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1212 \pm 0.0017(\text{stat.})^{+0.0023}_{-0.0031}(\text{exp.})^{+0.0028}_{-0.0027}(\text{th.})$$

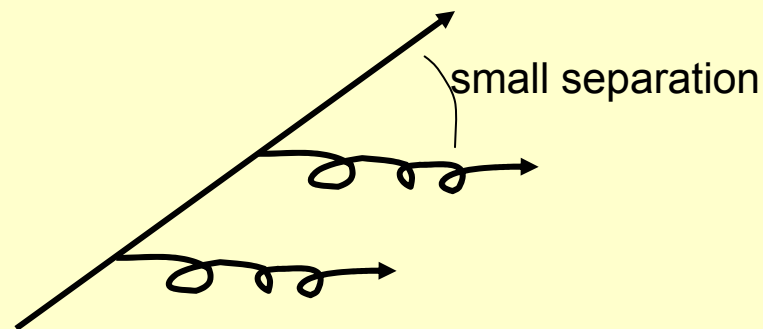
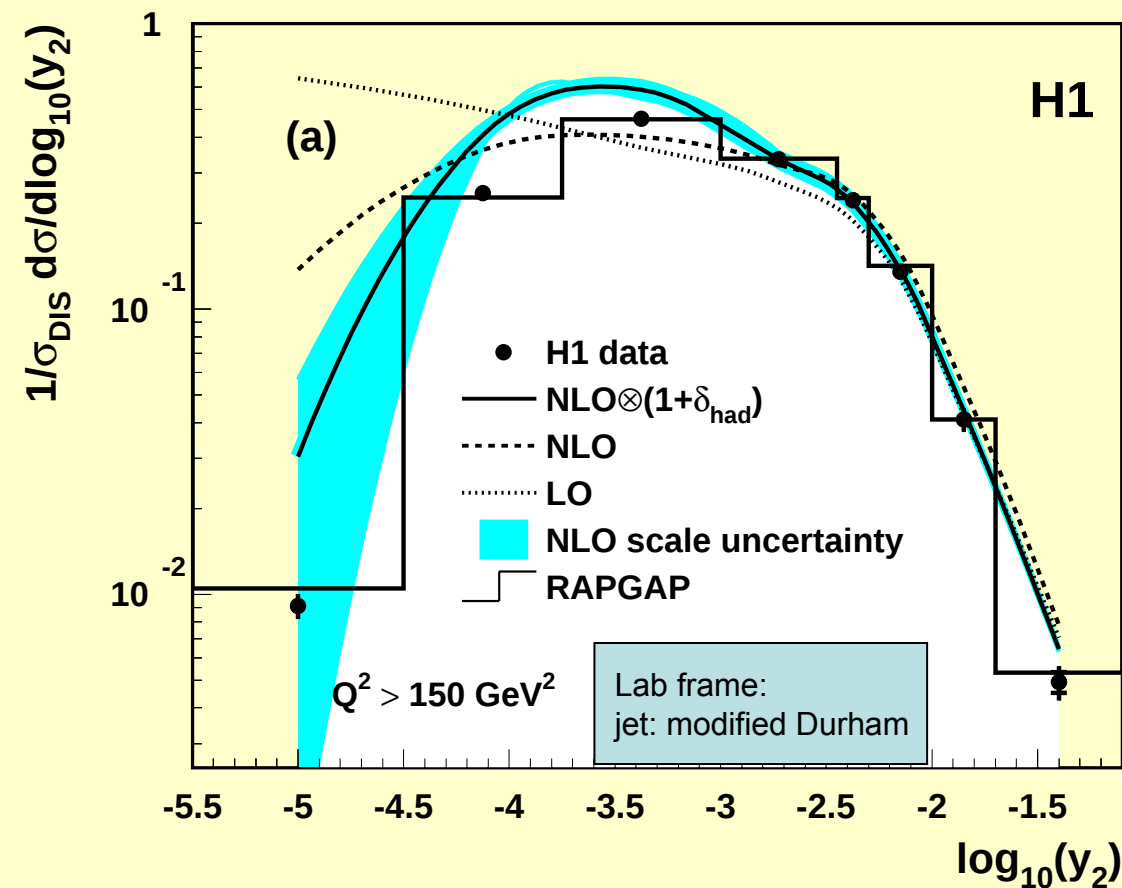
ZEUS PLB547(2002) 164

March 25 2005

K.Tokushuku

20

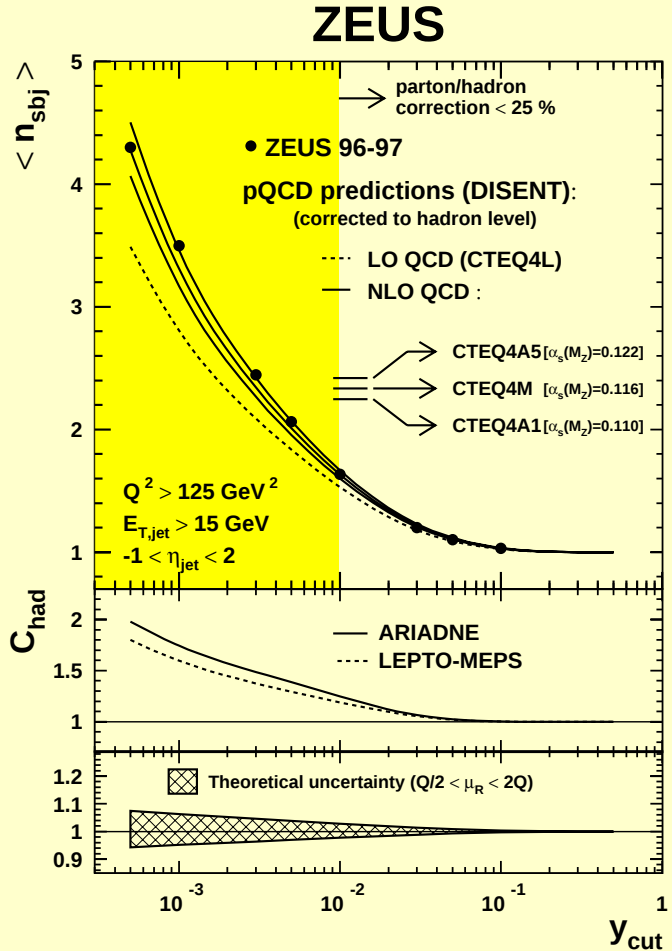
Jet Production in DIS (sub-jet)



実験室系で見た場合
 NLO QCD の予想は
 $y_{\text{cut}} \sim 10^{-3}$ 程度の
 微小分離されたジェットまで
 よくデータを再現できている。

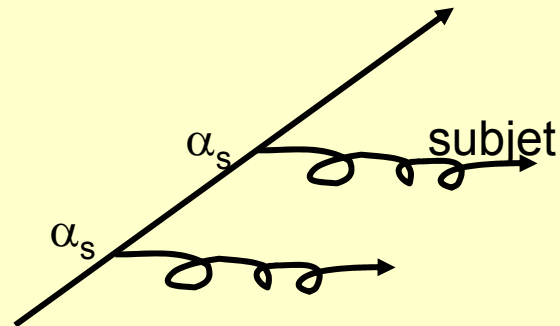
このように小さなジェットまでNLOが記述できるので、ジェットの
 内部構造の研究にも応用できる。

サブジェットの多重度



Lab frame:
jet: Kt inside jet

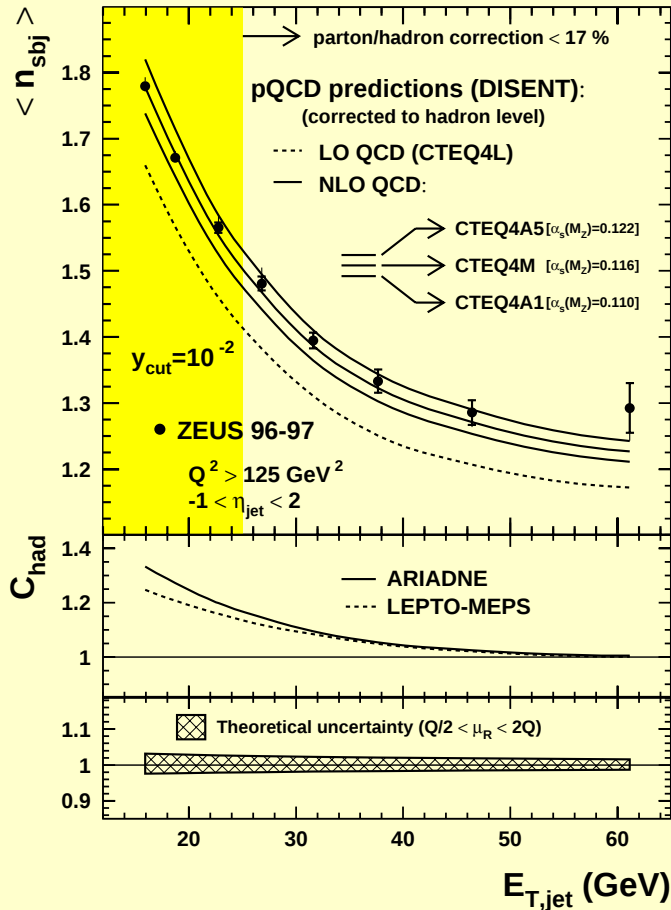
α_s が大きくなるにつれて、ハードパートンがより多く放出される。ジェットの形状から α_s が測定できる。
ZEUSでは2つの方向で解析
-> ジェットの形状
-> サブジェット: (re-apply jet algorithm inside a jet, using smaller y_{cut} .)



NLO では実験室系で3 jetまで出せる。
非摂動効果(左図 C_{had})を小さく押えるために、 $y_{\text{cut}} > 0.01$ の領域のみ使う。

サブジェットの多重度

ZEUS



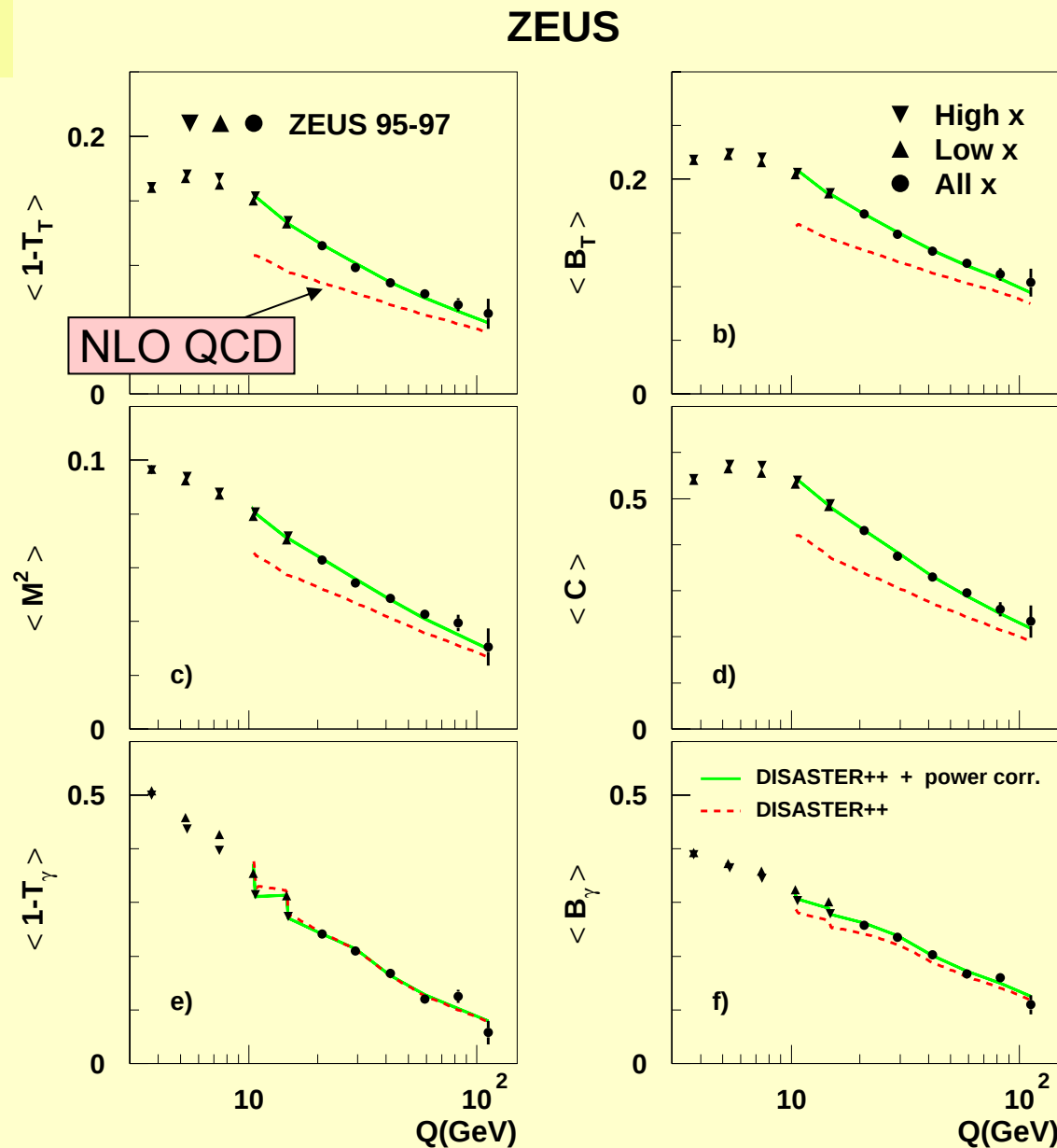
$$\alpha_s(M_z) = 0.1187 \pm 0.0017(\text{stat.})^{+0.0024}_{-0.0009}(\text{exp.})^{+0.0093}_{-0.0076}(\text{th.})$$

α_s from Event Shape

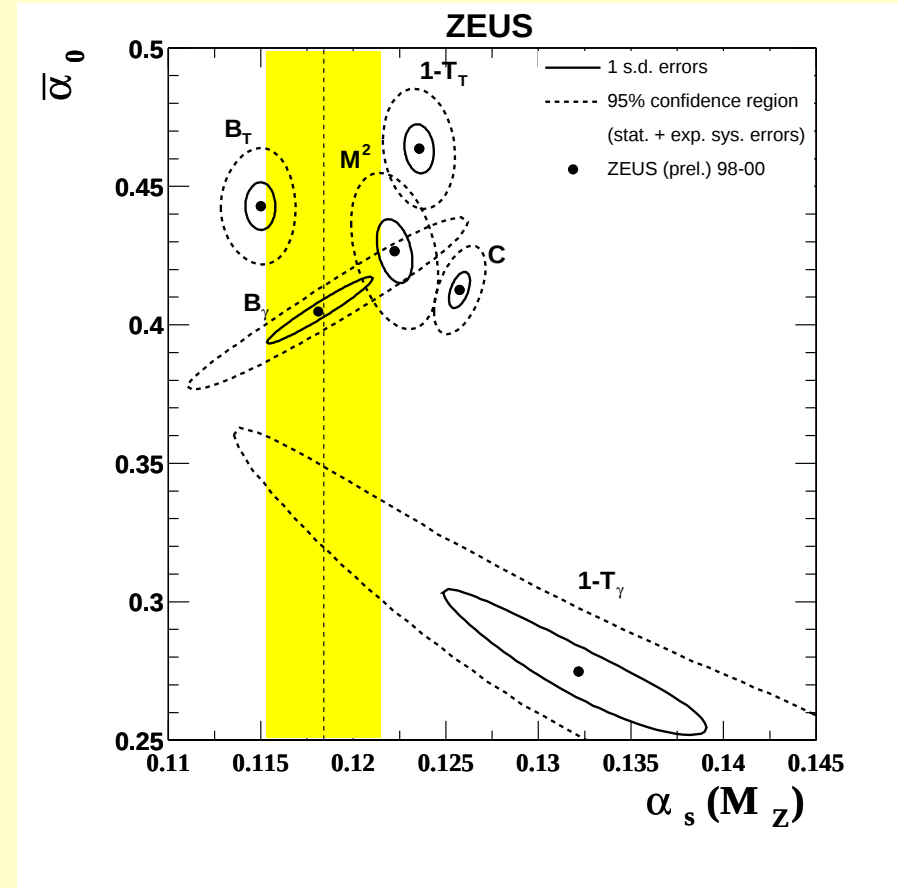
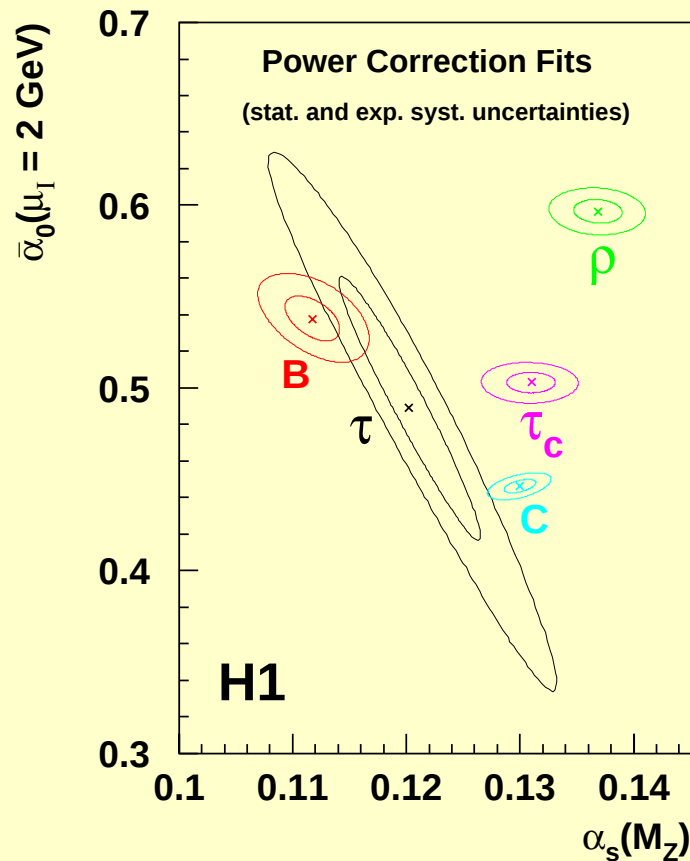
Event-shape 変数 (Thrust, Jet mass, Jet broadening,...) から α_s を求めることも、古くから $e+e$ -衝突でも行われてきた。系のエネルギーが増すとEventの形状が細くなっていく具合を見て α_s を求める。

しかし以前から非摂動効果が大きいという問題があり、MCでその分を見積もる必要があった。

近年DokshitzerとWebberにより、非摂動部分を $1/Q$ のべき乗で書け(power correction)、すべてのEvent-Shape変数で共通の2つのパラメータ (α_s and $\overline{\alpha_0}$) で決められるという提案が出た。



α_s from Event Shape



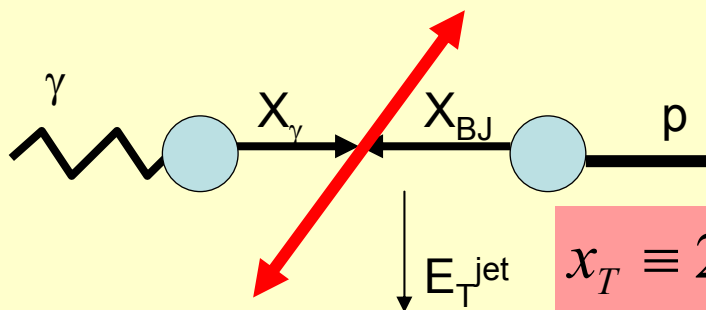
LEPではある程度うまく行っているが、HERAでは残念ながら、異なるEvent-Shape変数で求めた α_s and $\bar{\alpha}_0$ が収束しない。
 $\times$ 依存性がNLOQCDだけでは完全に記述できていないのも問題

Jet Production in photoproduction

光子・陽子反応でのジェット生成は、
プロトン内のパートン

と

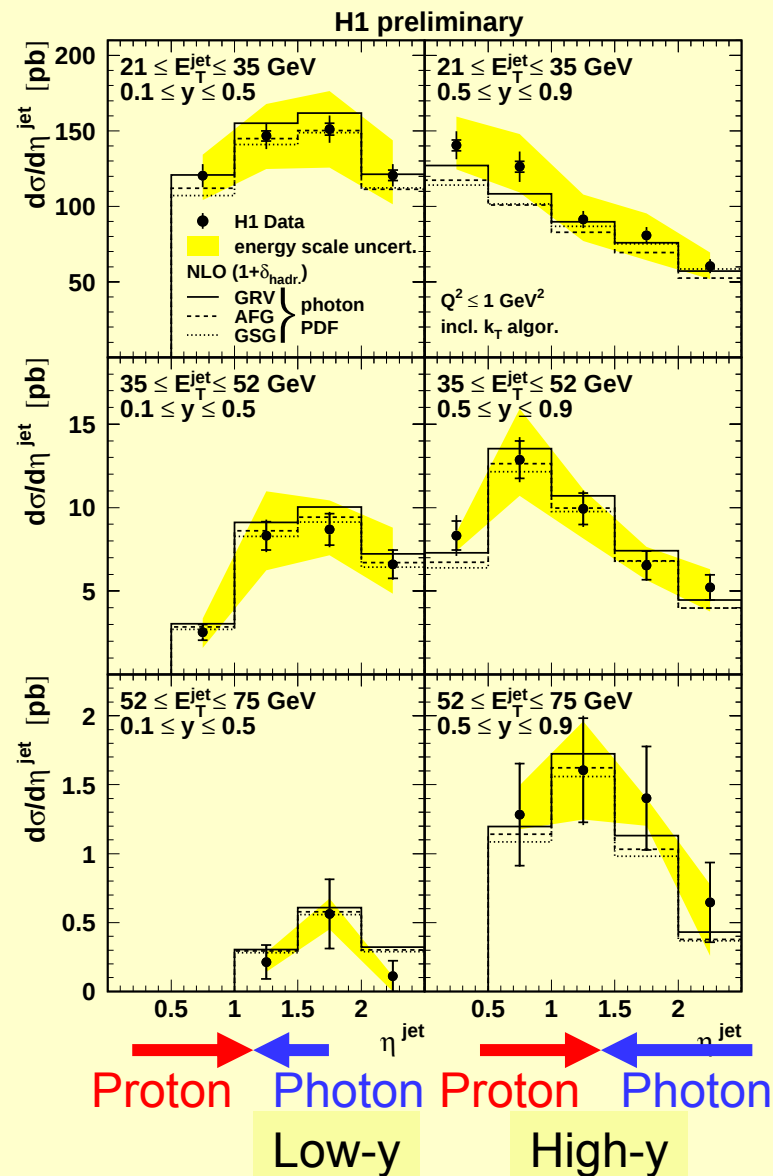
光子内のパートン(あるいは光子自身)
の散乱と考えることができる。



$$x_T \equiv 2E_T^{\text{jet}} / W_{\gamma p}$$

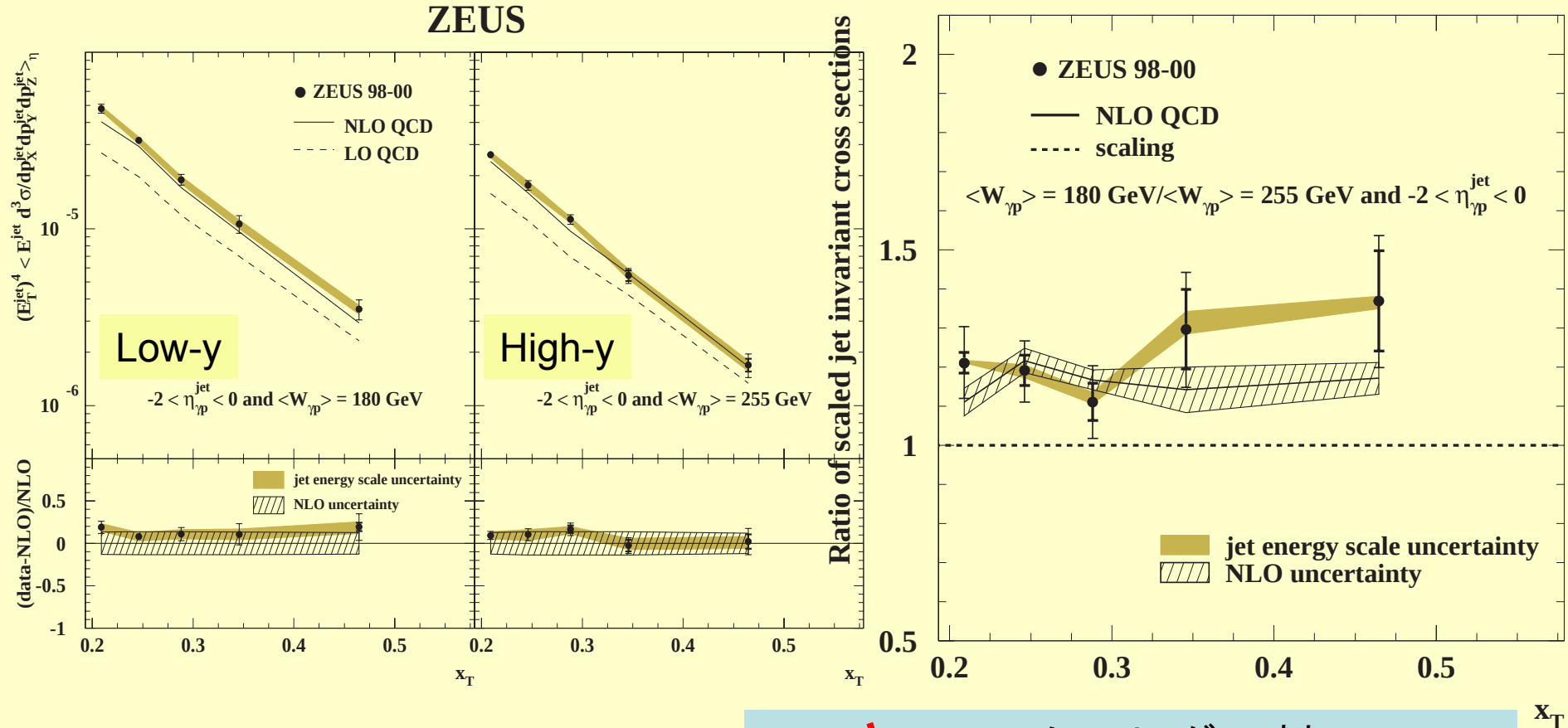
2つの異なった γp 重心エネルギーでジェット
を測定した場合、ナイーブなQPMでは、断
面積は x_T にスケールする。

<-- QCDではPDFもMEも、見ているエネ
ルギーで変わる。 → スケーリングの破れ



Jet Production in photoproduction

ZEUS

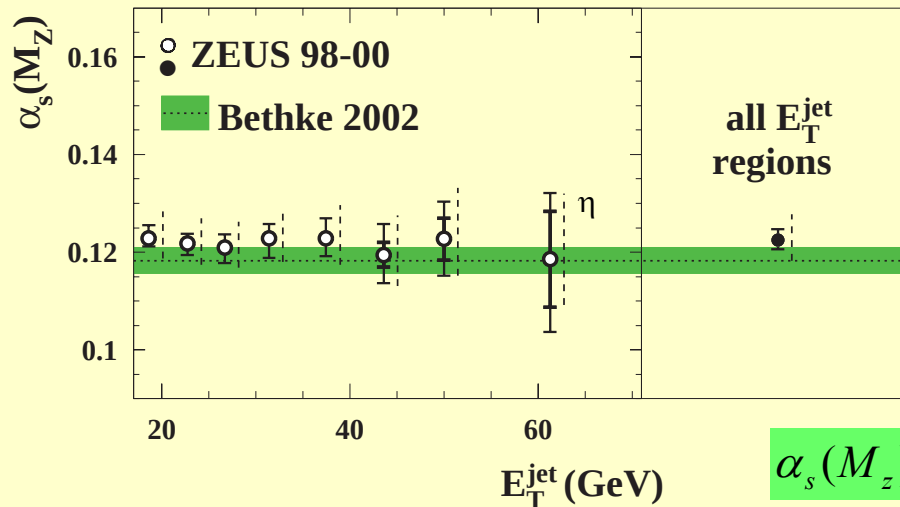


Ratio $\neq 1$ <-- スケーリングの破れ
 : γp jet ジェットでは初めての観測

NLO-QCD は(ppと違って)データを良く再現

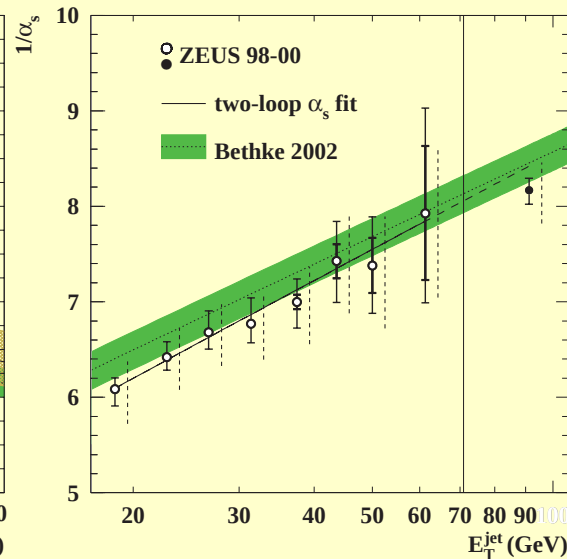
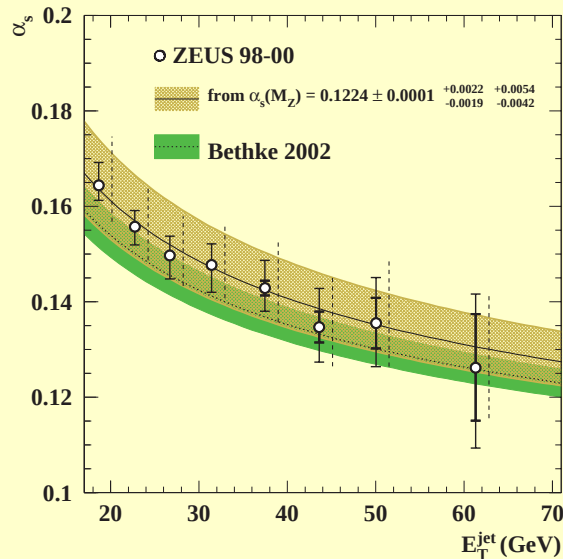
Jet Production in photoproduction

ZEUS



α_s determination using MRST99 PDFs
(similar method as DIS inclusive jet)

$$\alpha_s(M_z) = 0.1224 \pm 0.0001(\text{stat.})^{+0.0022}_{-0.0019}(\text{exp.})^{+0.0054}_{-0.0042}(\text{th.})$$



March 25 2005

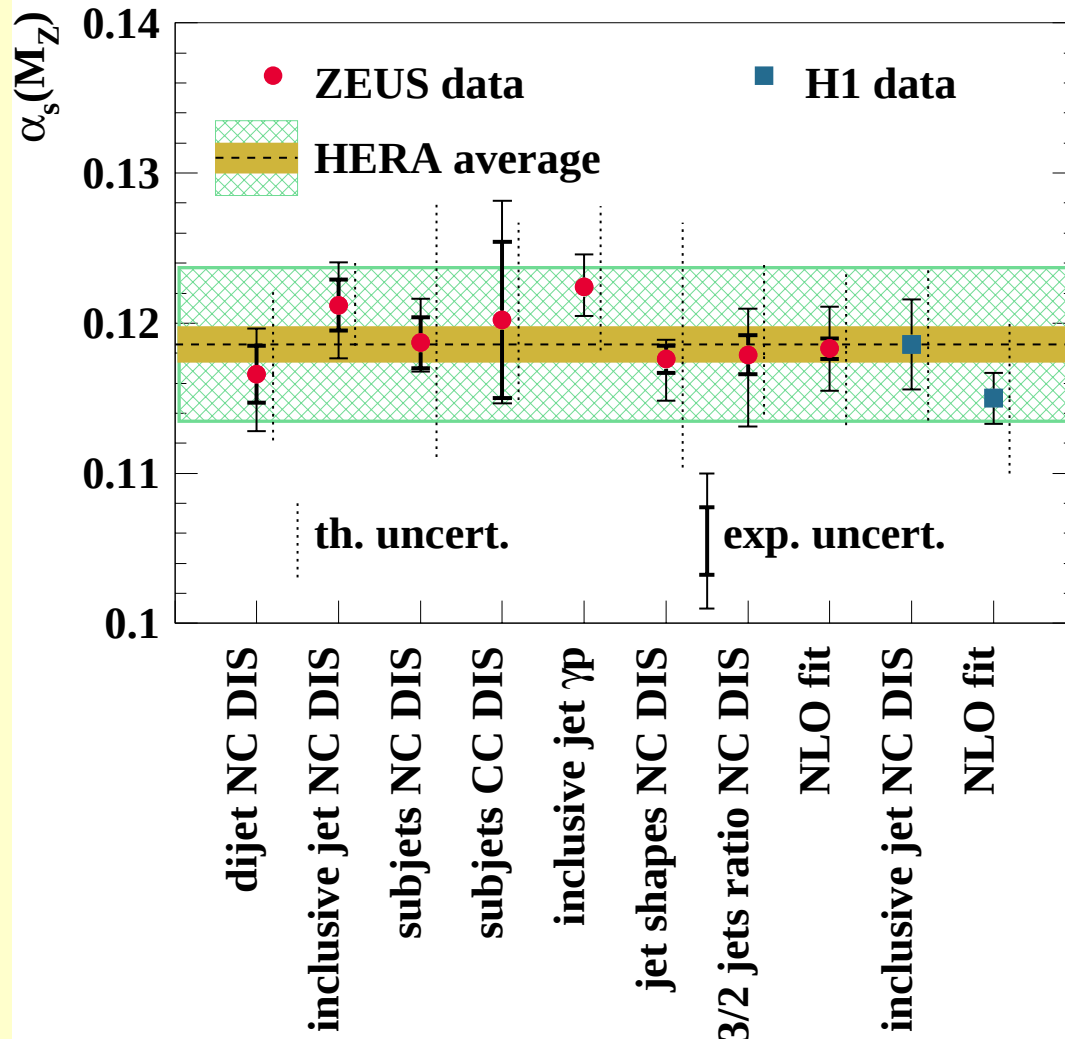
K.Tokushuku

28

α_s のまとめ

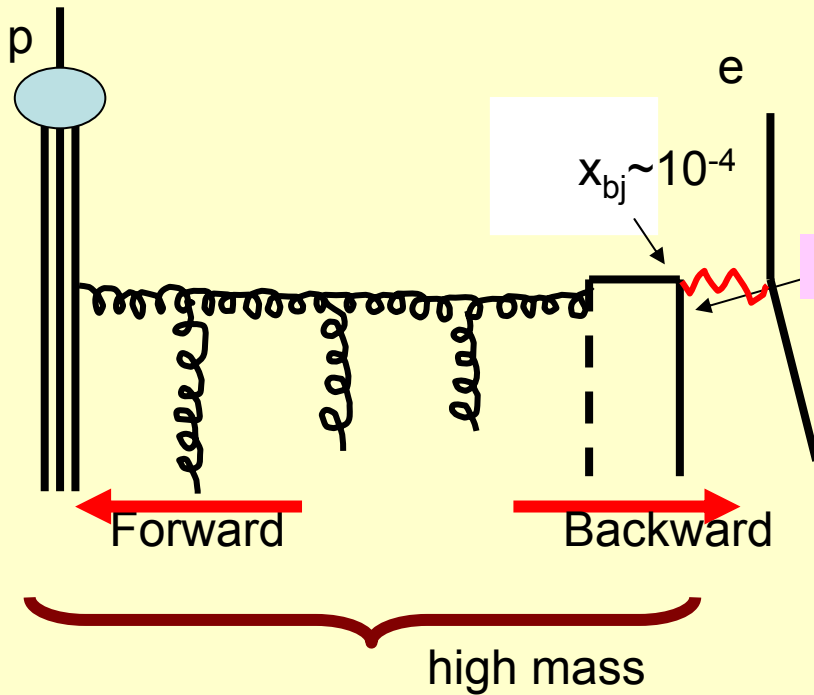
Bethke2004: 0.01182 ± 0.0027

HERA平均: $0.01186 \pm 0.0011(\text{exp.}) \pm 0.0050(\text{th.})$



- HERA全体の平均を取る際、実験の不定性には互いの相関を考慮してある。理論の不定性はすべてが同じ方向に動くとして計算。(過大に見積もっている)
- いずれの測定も誤差の範囲で一致している。
- 世界平均の遜色ない精度
- 理論の不定性が下がることを期待したい(NNLO)

low-xでの多重パートン放出



How is the parton evolution at low-x?
How initial state parton radiation looks like?

fixed order pQCD:

NLO ($\sim \alpha_s^2$) : not enough

カレントジェット領域以外の場所での
エネルギーフローやジェットも観測
してこれらのMCモデルと比較

3 different types of QCD evolution

DGLAP : Pt ordering

CCFM : angular ordering

BFKL : x ordering

MC models

Parton Shower in Lepto

CASCADE

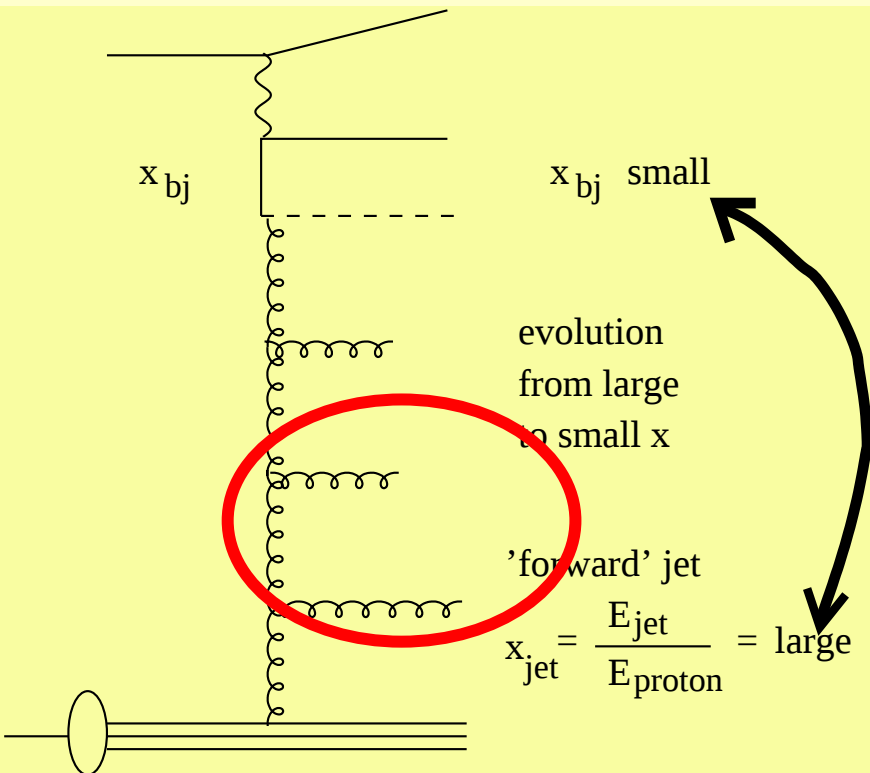
(Colour Dipole Model)

あるいは 分解光子反応

新粒子・新プロセス

RAPGAP

Forward Jets



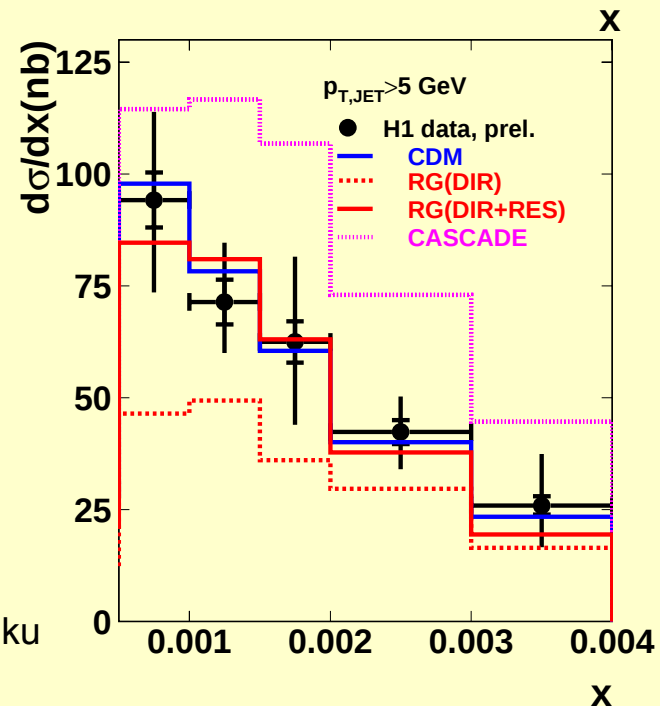
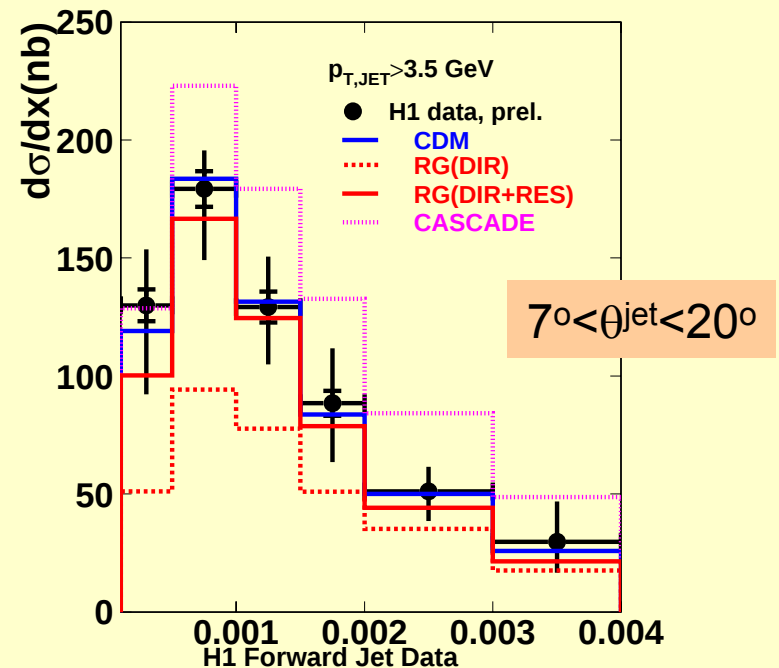
Forward Jet production

- Too small for **simple PS (DGLAP)**.
- **Cascade (CCFM)** overestimates.
- **Colour dipole** and Resolved photon model describe the data.

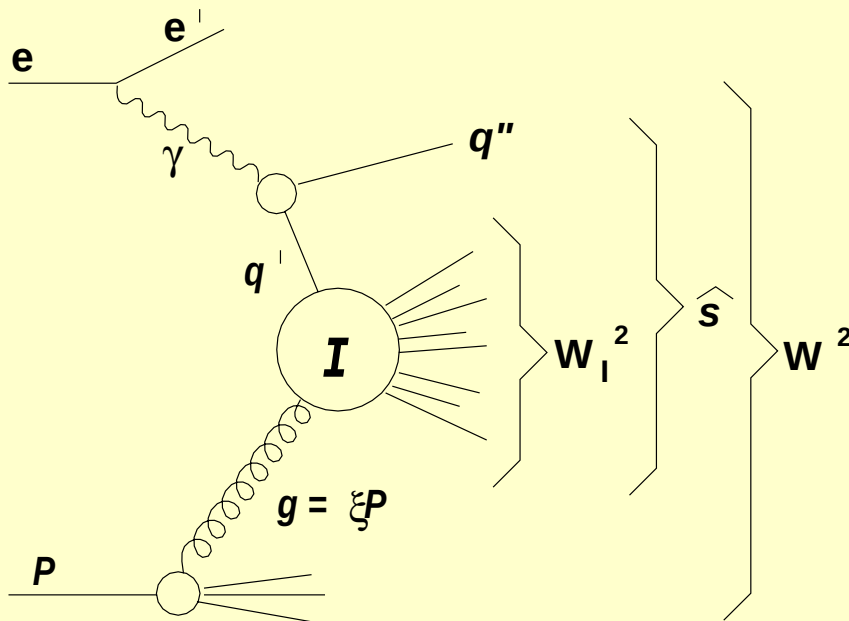
March 25 2005

K.Tokushuku

H1 Forward Jet Data



Instanton



$$q + g \xrightarrow{I} \sum_{n_f} (q_R + \bar{q}_R) + ng$$

$$q + g \xrightarrow{\bar{I}} \sum_{n_f} (q_L + \bar{q}_L) + ng$$

QCD複雑な真空構造を持ち、2つの真空状態間のトンネル遷移(インスタントン)が起こりえる。この場合カイラリティが破れる。

Ringwald と Schrempp はDISでのインスタントン遷移を計算した。計算は q' と g で決まるinstanton size (ρ)の領域によって大きな不定性を持つが $\sigma \sim 100 \text{ pb}$ 程度になりうる。

カイラリティの測定はほとんど不可能なので、探索はEventの形状を見て行っている。

- Many quark and gluons --> fireball like
- Flavour democratic --> many K

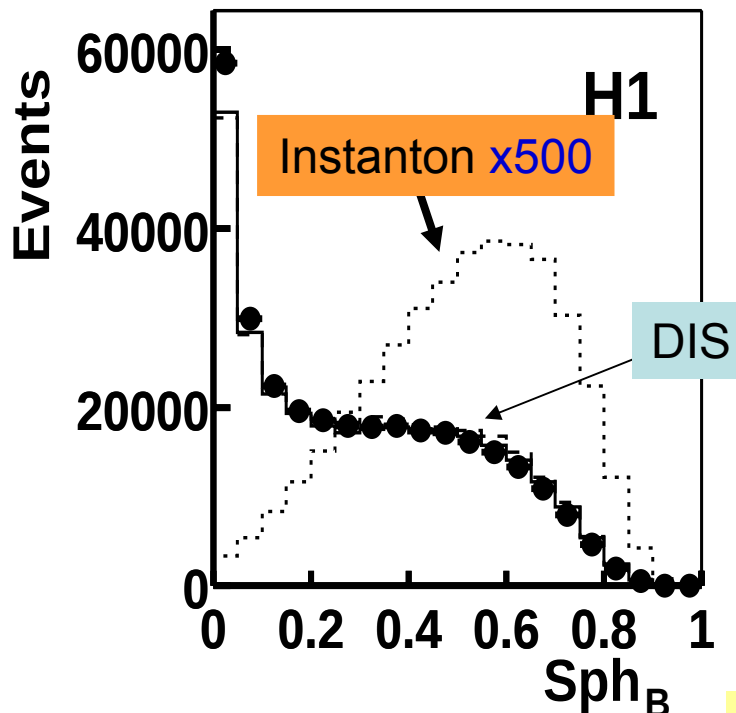
Instanton

Instanton 事象は“丸い”eventが多くなるが、断面積は通常のDISに比べて圧倒的に小さい。

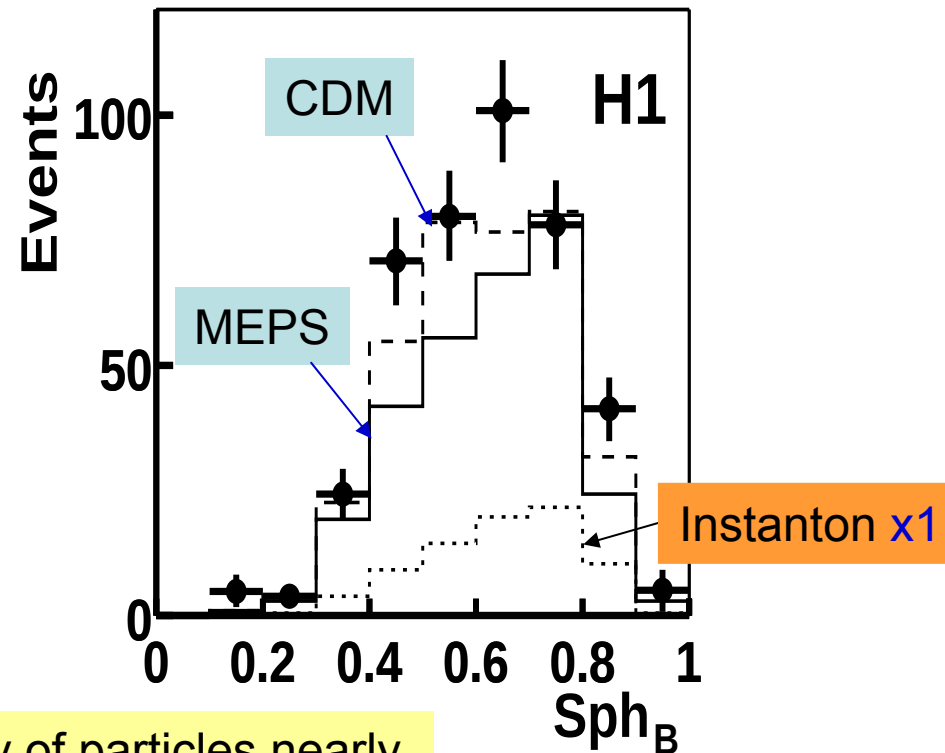
様々なカットをかけることにより、Instanton事象の割合を増やす。しかし残念ながら、カットをかけた後に残る通常のDIS事象の見積がモデルによって大きく異なる。

One example

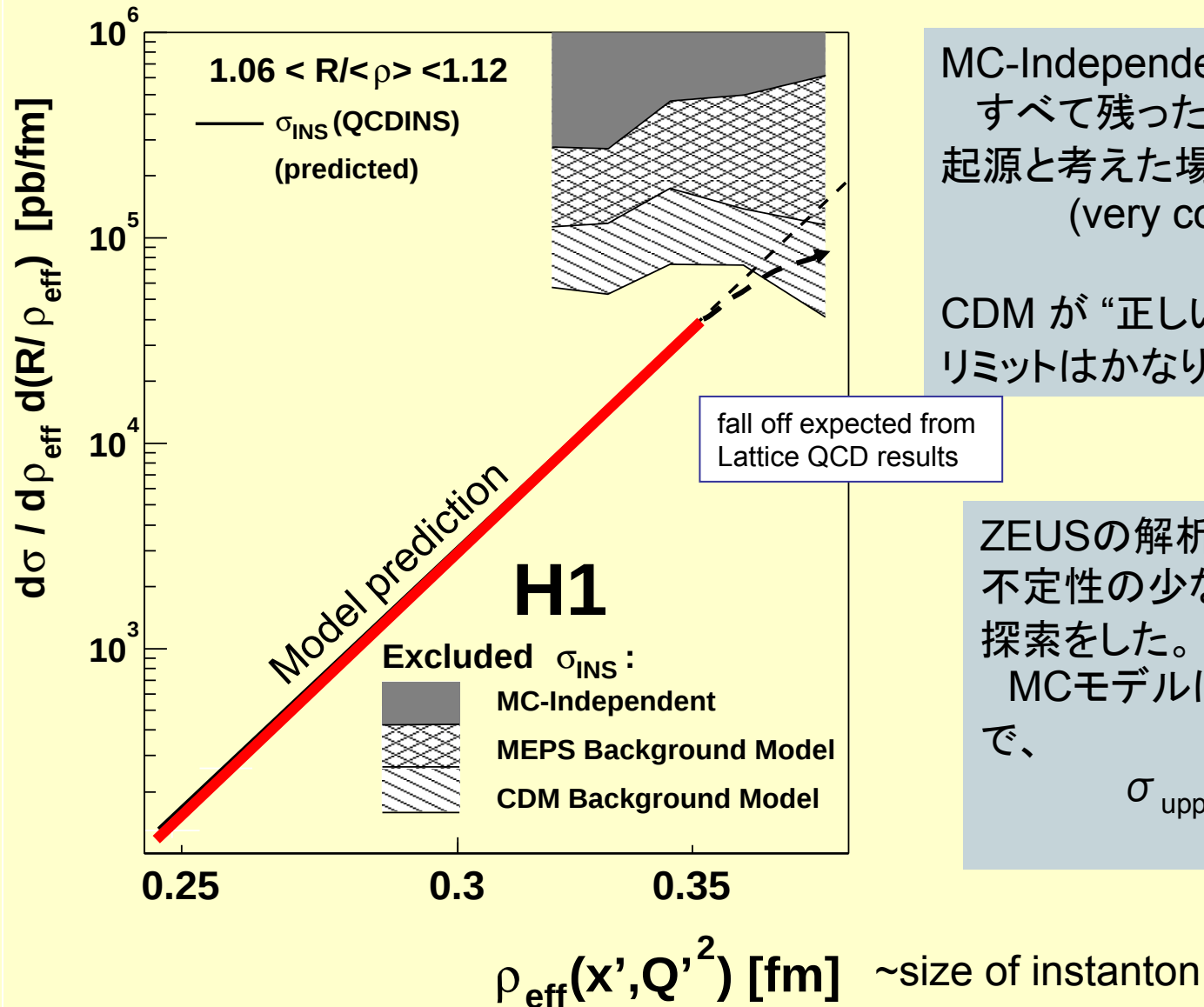
After Enrichment cuts.



Sphericity of particles nearly
l-rest frame



Instanton



MC-Independent:
すべて残った事象がインスタントン
起源と考えた場合
(very conservative)

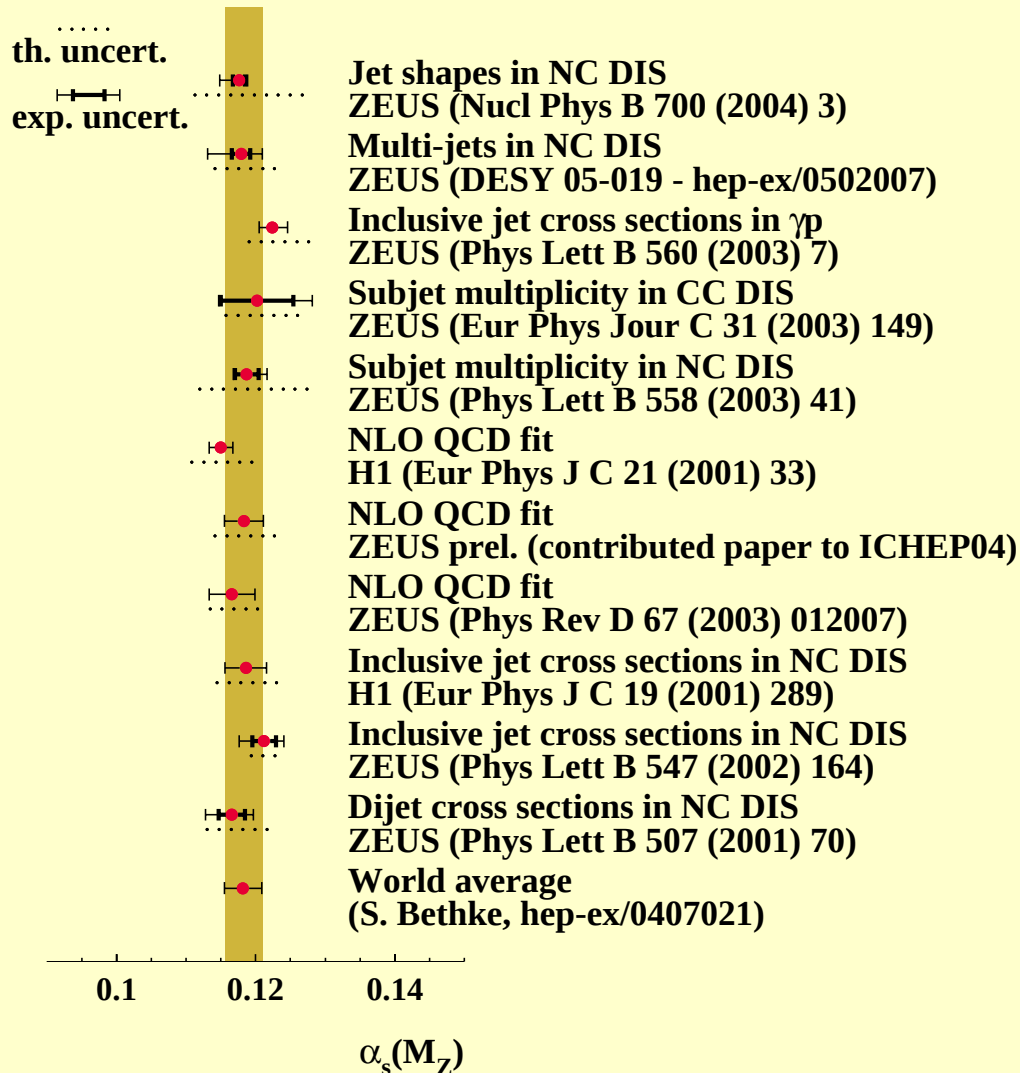
CDM が“正しい MC” なら、実験の
リミットはかなり理論に迫ってきている

ZEUSの解析では、より理論の
不定性の少ない高い Q^2 事象で
探索をした。

MCモデルによらないリミット
で、

$$\sigma_{\text{upper limit}} \sim 2 \sigma (\text{theory})$$

まとめ



- HERAのコライダー実験では、広い範囲の運動学領域を一度に測定できる。
 - QCD 発展を見るのに非常に最適
- 陽子の構造関数を広い範囲測定できた。
 - 低い x でF2の急激な増加
 - DGLAP NLOQCDで $Q^2 \sim 1 \text{ GeV}^2$ 以上を良くフィットできる。
 - たくさんのLow- x グルーオンの存在
- F2フィットや様々なジェット測定から強い相互作用の結合定数(α_s)を精度良く求めることができた。すべての値は誤差の範囲で互いに一致した。
 - 強い相互作用の普遍性
- 低い x 領域での多重パートン生成の研究も進んでいる。
 - 様々なパートン発展法のテスト
- 非摂動的な遷移(インスタントン)の探索も行われている。発見に至るまでの道筋はまだ遠いが、過去10年間で通常のDIS事象に関する知識が非常に増えたことを考えると、今後に期待したい。