



高エネルギーハドロン衝突の QCD物理

2017年 12月 5-7日

神戸大学 山崎祐司

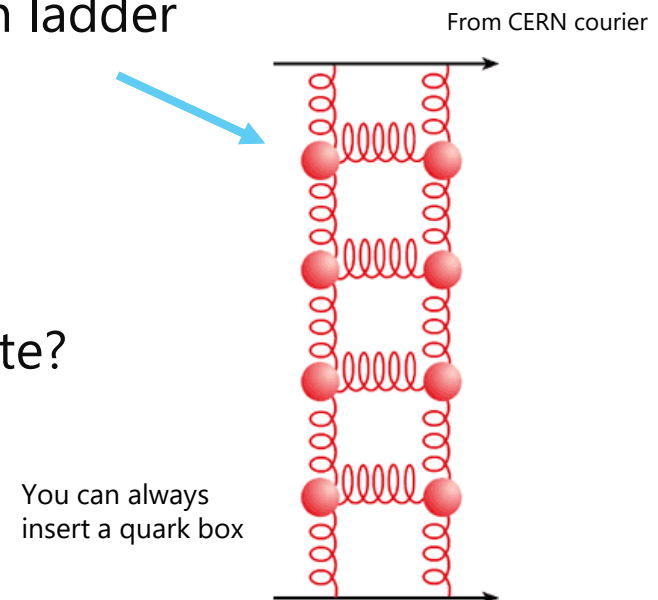
yamazaki@phys.sci.kobe-u.ac.jp

講義の内容

1. ハドロン散乱の基礎過程
ソフトな散乱とハードな散乱, 様々なプロセス
2. パarton密度
フォーマリズム, 電子・陽子散乱による測定, 解釈
3. ハードな散乱と摂動論的QCD
ジェットと破砕化, 高次の摂動計算入門, α_s 測定
4. 談話会: 「LHC 陽子散乱の理解と QCD:
トッブクオーク, 新物理探索を例にとって」
5. ソフトな散乱
全断面積, 回折散乱, 多重parton散乱
6. 回折散乱の摂動論的理解と前方の物理
回折散乱の実験・解析手法, 前方粒子生成

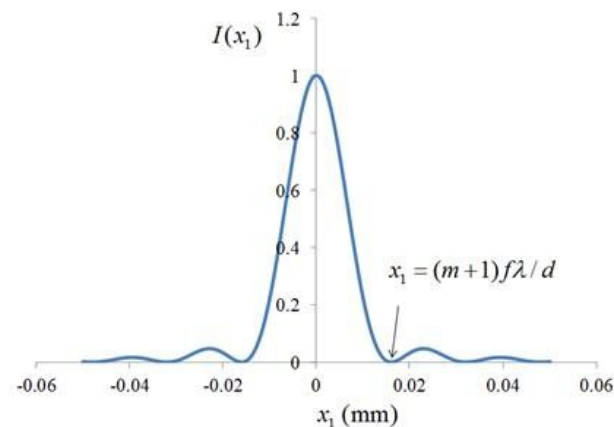
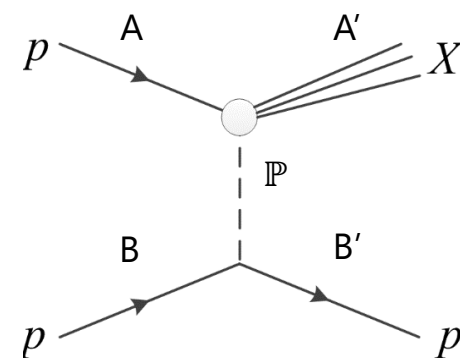
What is Pomeron, guys?

- It is a light meson-like object
 - but we know that the lightest mesons are not Pomeron
- Most likely: it is a “dressed” gluon
 - Lowest colourless gluonic object: 2-gluon state
 - Strongly interacting → becoming a gluon ladder i.e. not 100% gluonic object
- Questions:
 - Is it a particle, or just an intermediate state?
 - Partonic contents of the object?



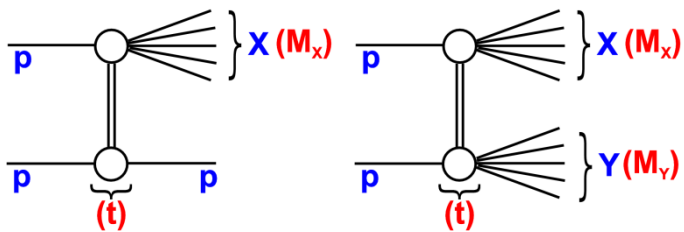
Diffraction scattering

- 弾性散乱では, proton A, B の間にカラー交換はない
- A', B', などのように, multi-hadronic state に変化 (dissociate) することがある。 $m_{A'}, m_{B'}$ は小さめ
- これは, 光学における回折とよく似ている
 - 空間分布は変わるが, 量子数は変わらない
- であれば, 交換粒子はカラーを持たない
 - それが高エネルギーでは "Pomeron" のせい, あるいはそれに似た粒子のせいと考える

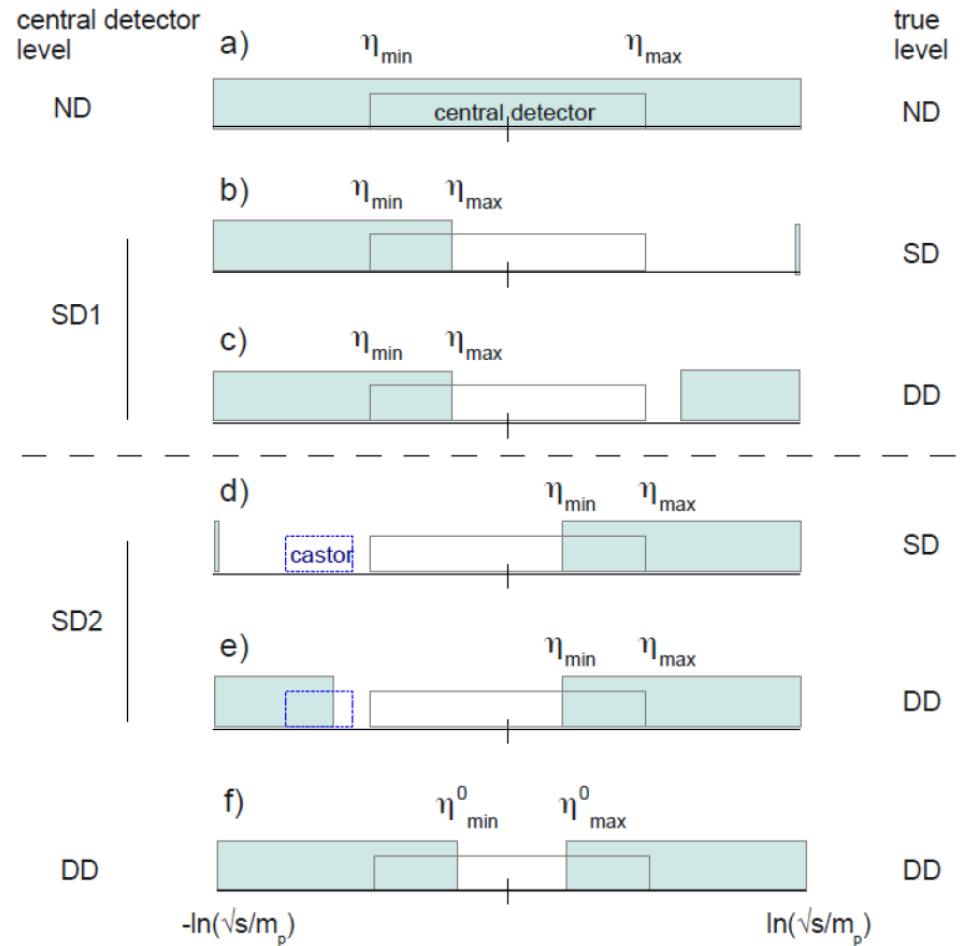


Signal of diffraction

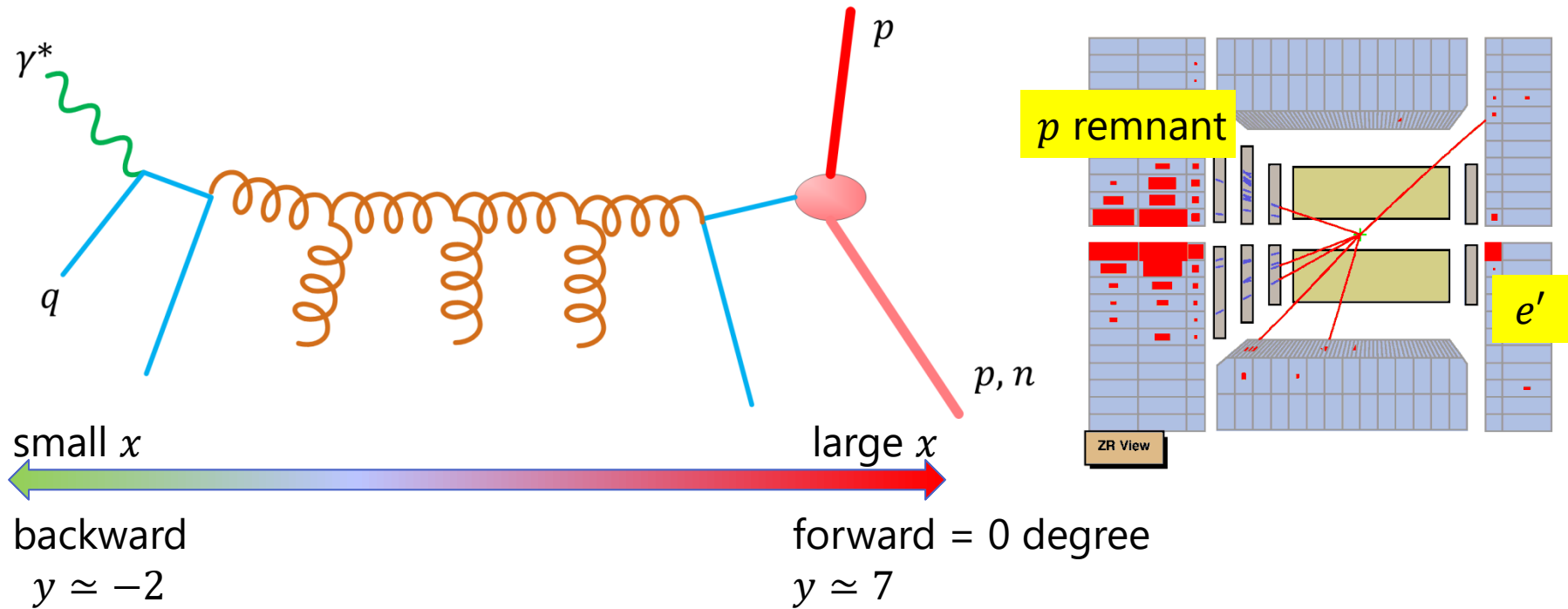
- Observation of collimated hadrons (or a proton), system A' and B' , in very forward direction
- Large Rapidity Gap (LRG) between the system A' and B'



Single diffraction Double diffraction

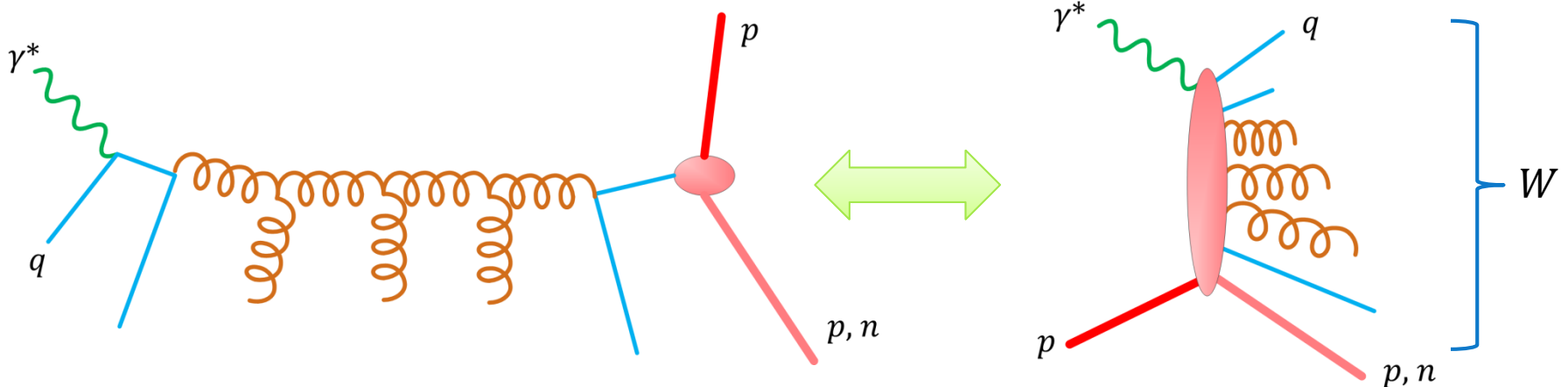


運動学の話 : Low- $x \simeq$ forward



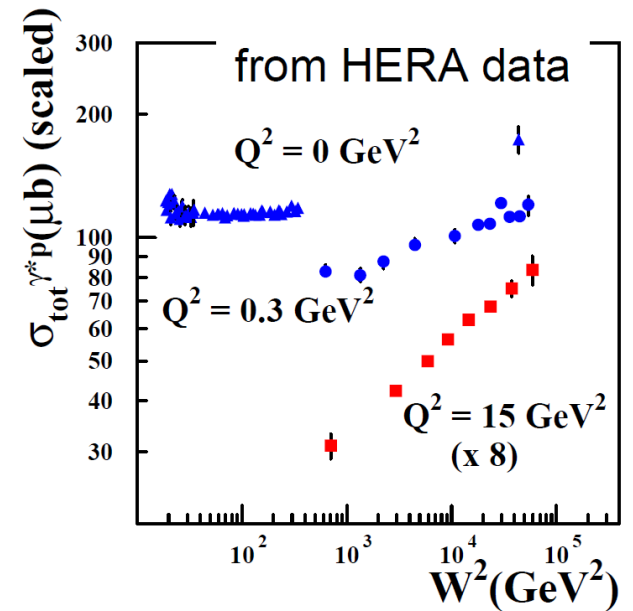
- small- x parton を陽子から取り去っても，陽子の運動量はほとんど変わらないで前方に飛ぶ
- Small- x parton は "backward" 後方に飛ぶ
 - 前方粒子，後方粒子の間の large rapidity interval がある

ep at low- x is γ^*p scattering

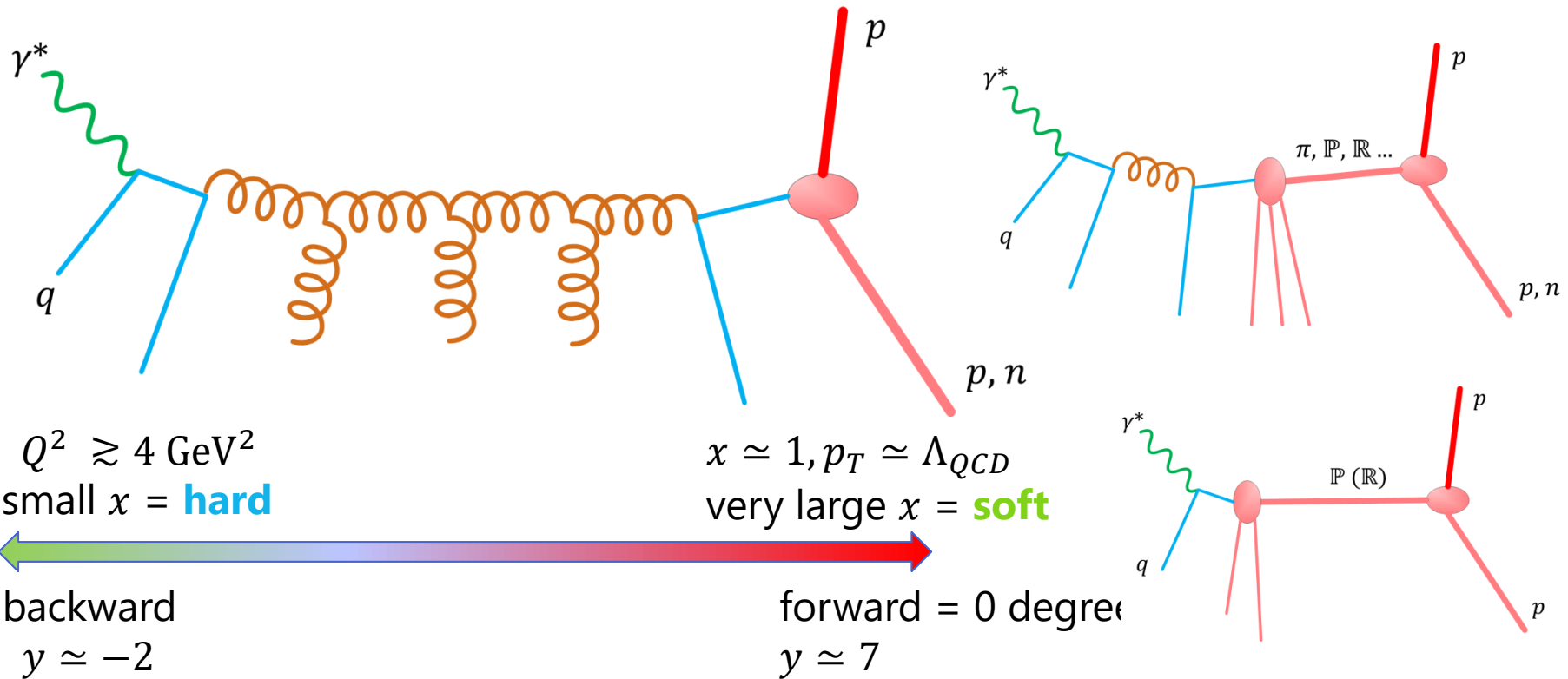


- low- $x \approx \text{low-}Q^2$, 光子はハドロンと見なせる
- γ^*p centre-of-mass energy W は lower- x で大きくなる

$$W^2 = \left(\frac{1}{x} - 1\right) Q^2 \approx \frac{Q^2}{x} \quad (x \ll 1)$$
 - low- x = larger rapidity interval
- 全断面積の増加のふるまいが photon Q^2 が大きくなるにつれどんどん早くなる。
 - 光子中のパートンが見えるようになる, つまり仮想光子は “hard” object

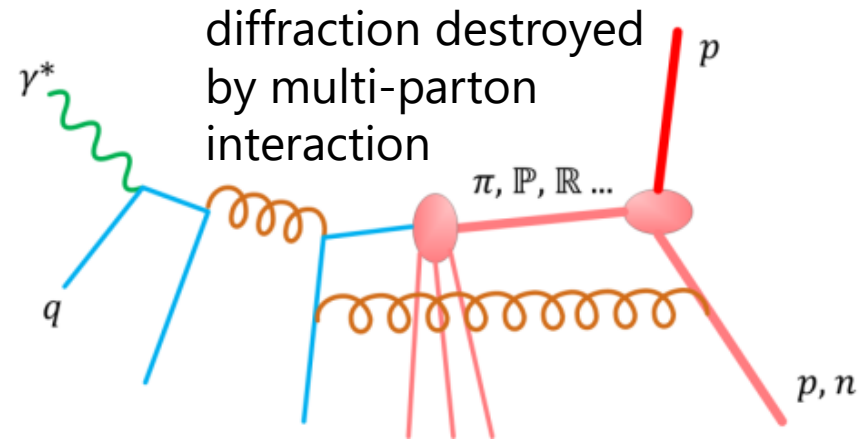
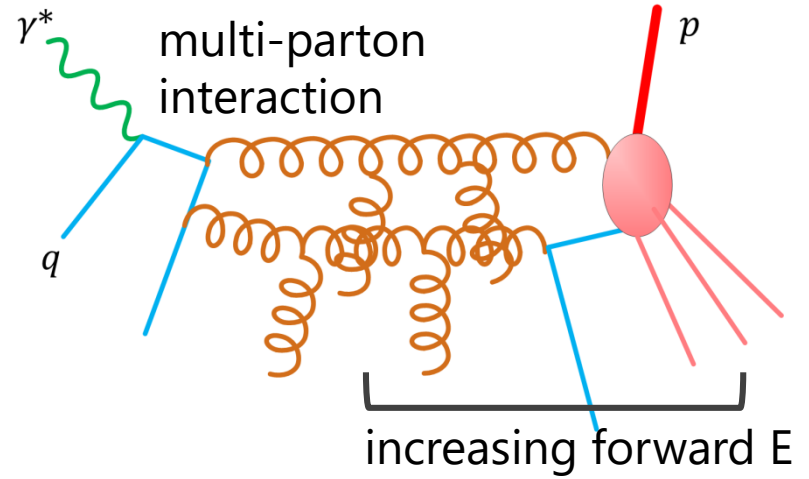
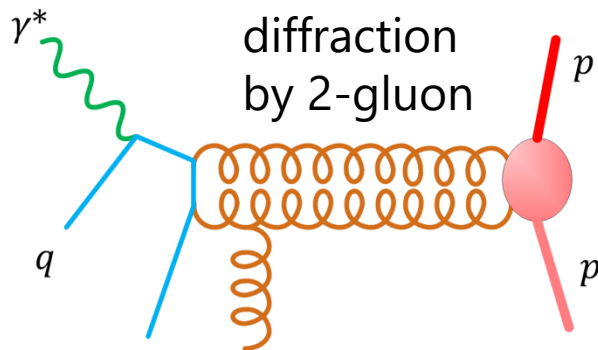
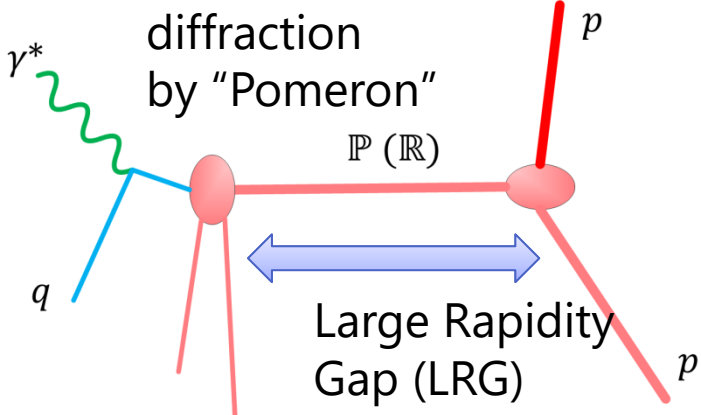
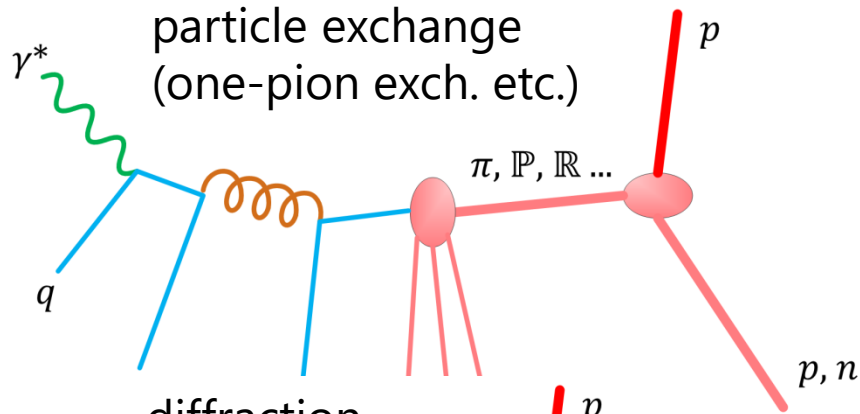


Soft or hard?



- Colourless particles appear more in forward (perhaps)
 - where is the transition, in which rapidity?

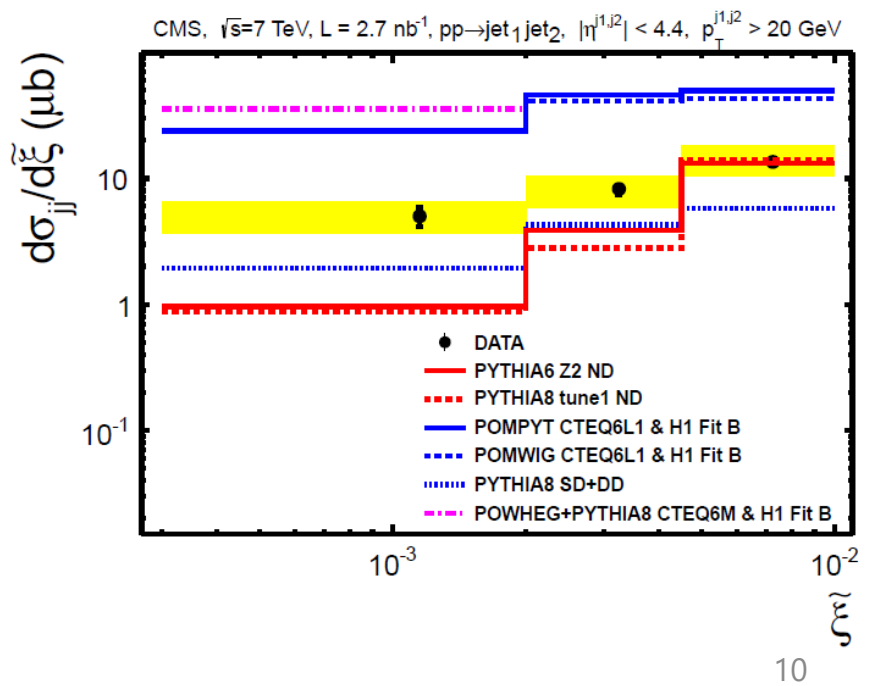
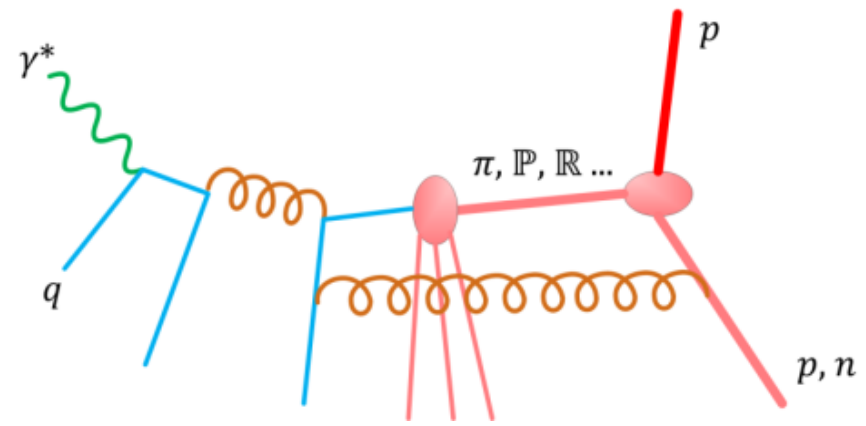
partons \times phase space = various phenomena



- where colourless,
where colourful?

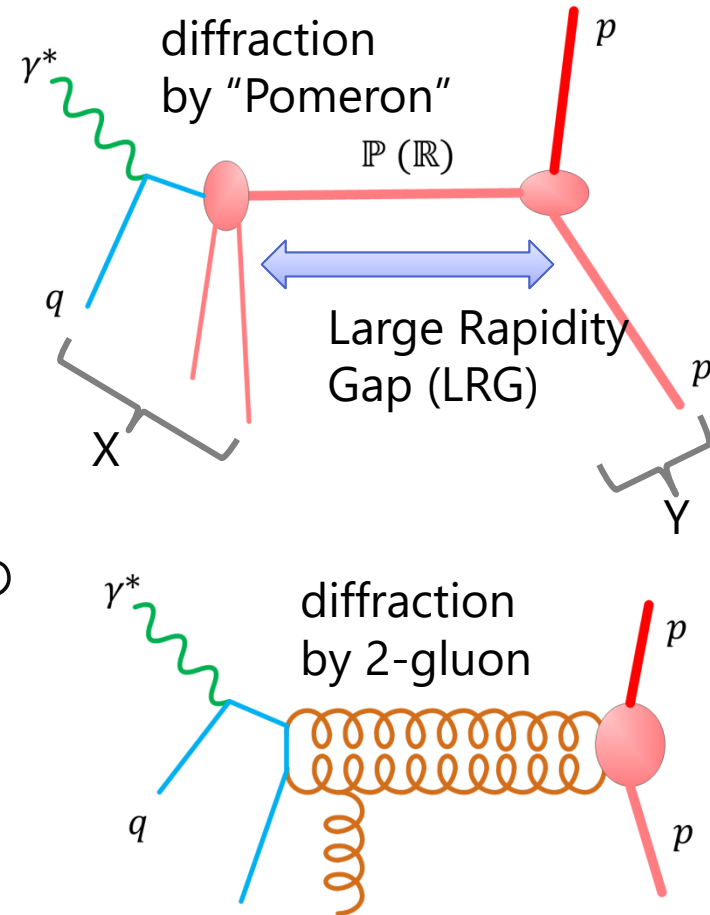
回折散乱の Gap survival probability

- 回折散乱に加えて parton(s) が交換されると, colour-singlet 状態が破壊される
- Tevatron では, 回折散乱は予想の 1/3-1/10 しか見られない
 - Pomeron flux (放出確率)
Pomeron parton densities (ポメロン構造関数) どちらも HERA 実験から求めたものを用いた場合
- LHC でも suppression as well
 - But not drastic suppression, only similar magnitude to Tevatron



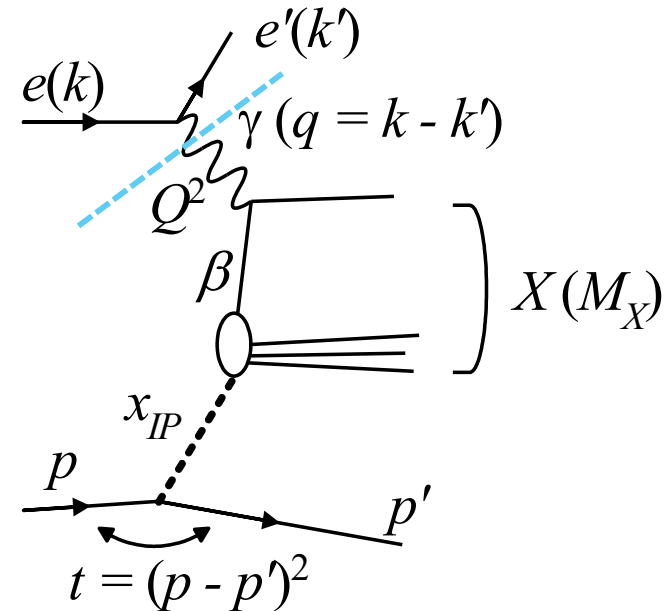
Diffraction in ep collisions: issues

- HERA での回折散乱：
 - Photon が軽いマルチハドロン状態に dissociation をおこす (X)
 - 陽子は壊れない（弾性散乱）か 同様小さい質量のマルチハドロン (Y)
- Standard view:
 - Pomeron (\mathbb{P}) が陽子から放出され、それが仮想光子と散乱し、Pomeron の深非弾性散乱が起きる
- Pomeron or 2-gluon ?
- 回折散乱は “Peripheral” つまりあまり散乱しないソフトな過程？



Diffractive DIS and diffractive PDFs

- diffractive exchange (Pomeron) のパートン構造を γ^* でさぐる
- 測定量 $F_2^{D(3)}(\beta, Q^2, x_{\mathbb{P}})$
 - t については積分
 - Diffractive process の構造関数 Pomeron の構造関数ではないことに注意
 - diffractive PDFs (DPDFs) (Diffraction という条件での陽子の構造関数) を取り出す
 - scaling violation, jets など
 - DISと同じように点線部で factorisation theorem が成り立つことを仮定)



β : long. momentum fraction of the parton in the exchange
 $x_{\mathbb{P}}$: long. momentum fraction of the exchange in the proton
 $Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2$: negative of momentum transfer squared

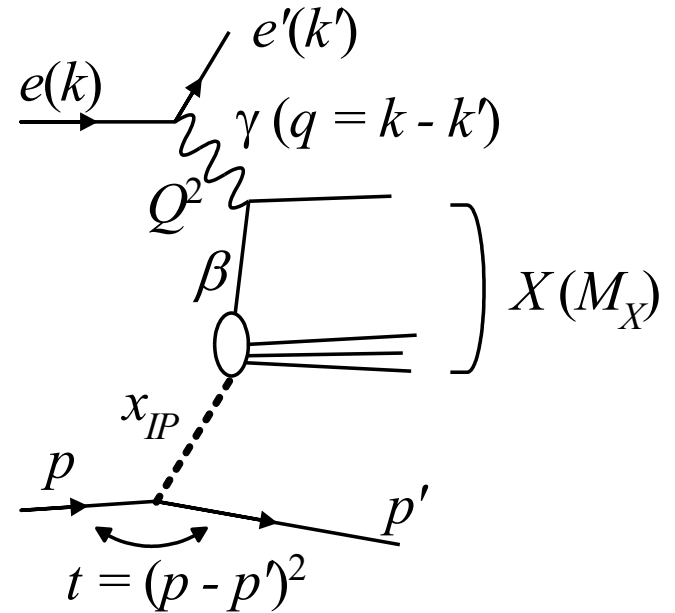
Diffractive DIS (DDIS)

- Q^2 provides a hard scale
 - probing partonic structure
- Main task: $F_2^{D(3)}(\beta, Q^2, x_{\mathbf{P}})$
 - Structure function for diffractive processes

$$\int dt \frac{d^4 \sigma_{diff}^{ep}}{d\beta dQ^2 dx_{\mathbf{P}} dt}$$

$$\cong \frac{4\pi\alpha^2}{\beta Q^4} \left(1 - y - \frac{y^2}{2}\right) F_2^{D(3)}(\beta, Q^2, x_{\mathbf{P}})$$

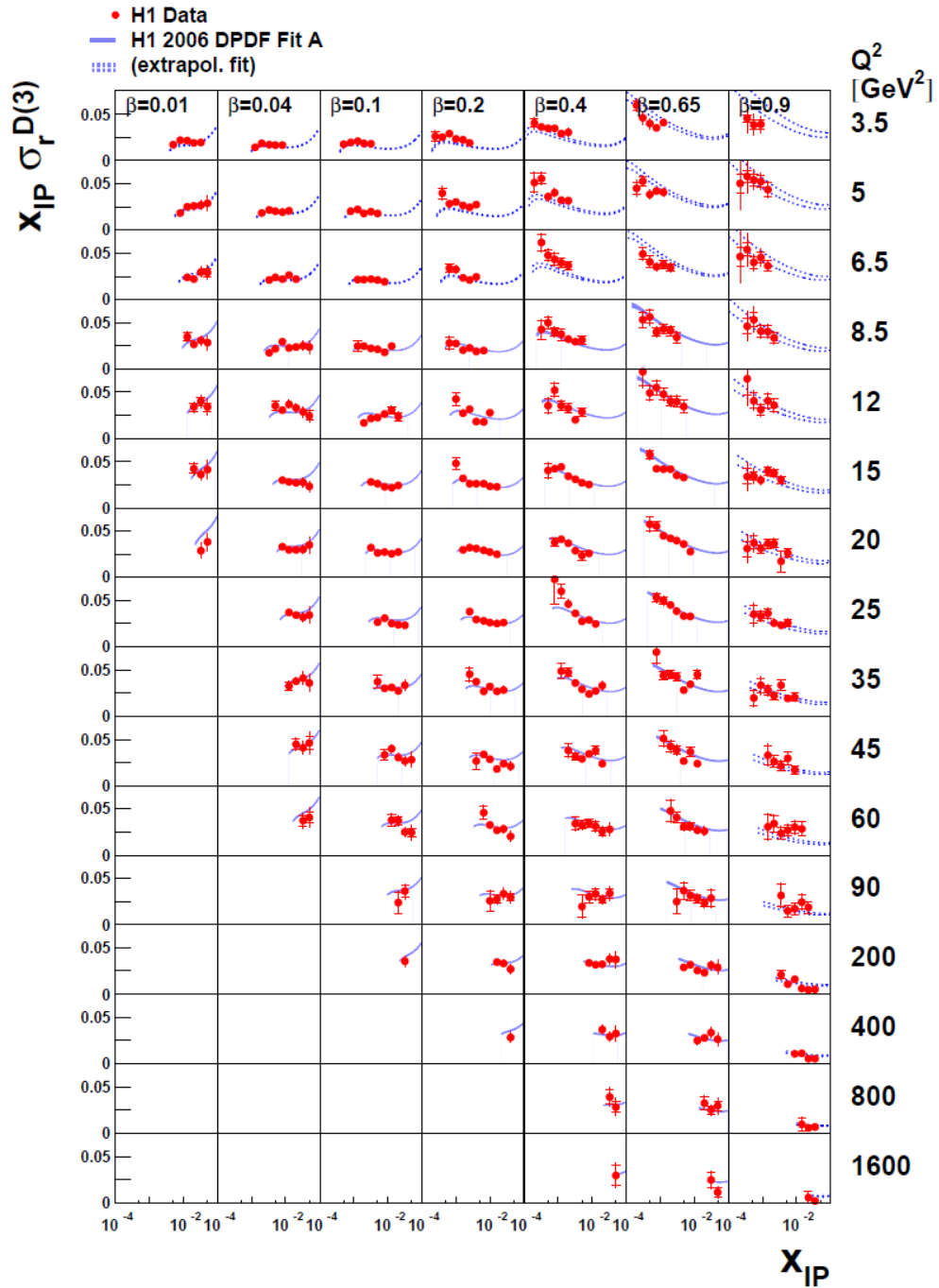
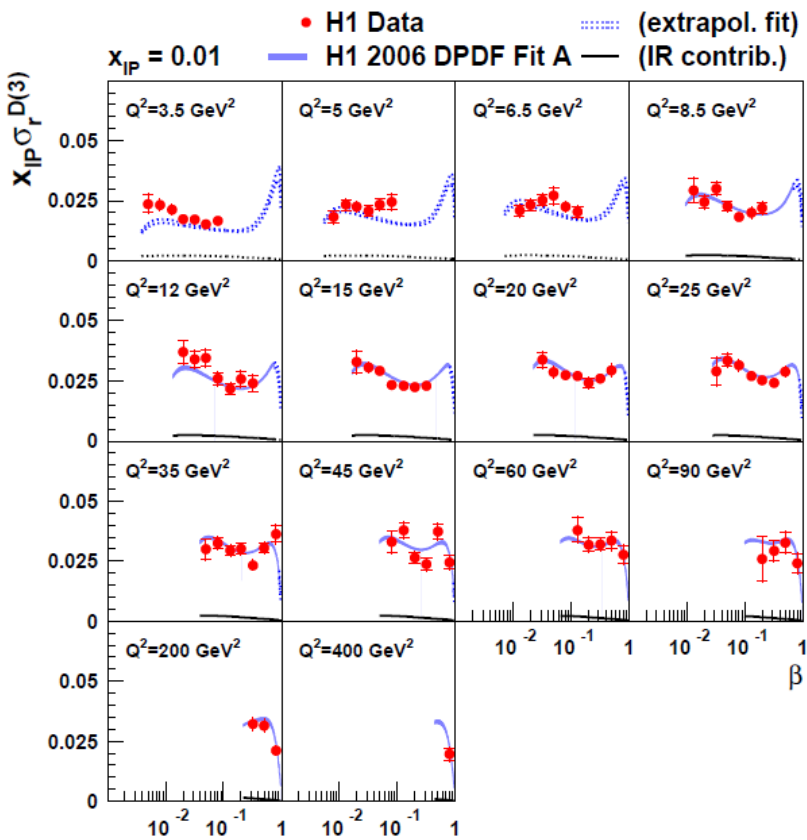
- Sensitive to quarks
- Gluons are “measured” by
 - Jet and HQ production
 - Scaling violation of DDIS using DGLAP eq.



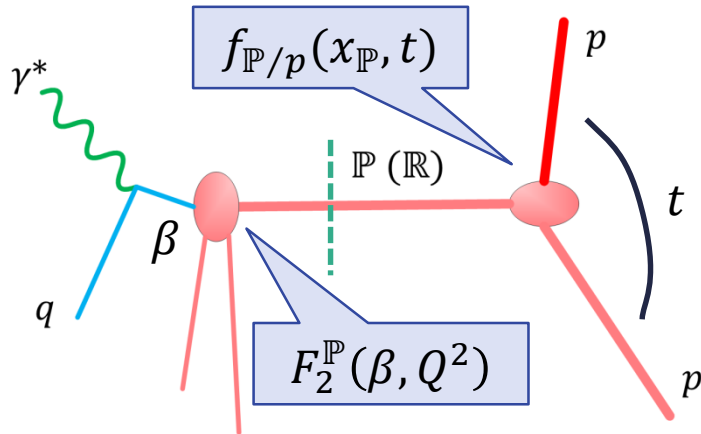
β : long. momentum fraction of the parton in the exchange
 $x_{\mathbf{P}}$: long. momentum fraction of the exchange in the proton

$F_2^{D(3)}$ from H1, ZEUS

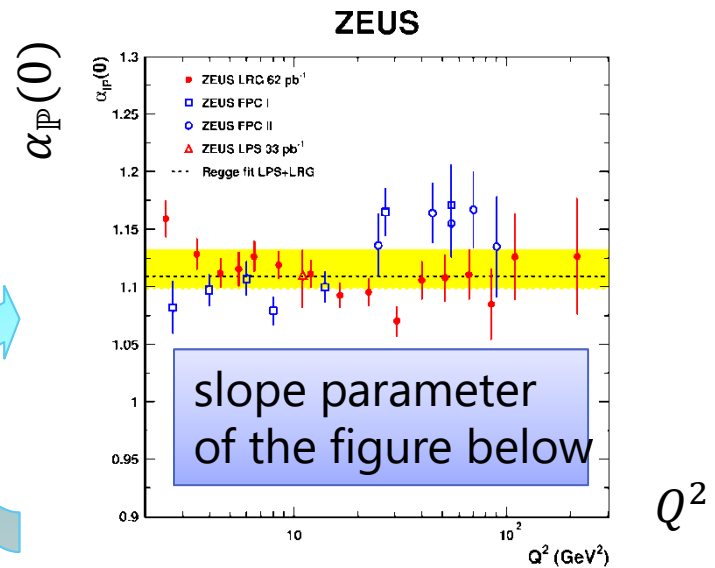
(a)



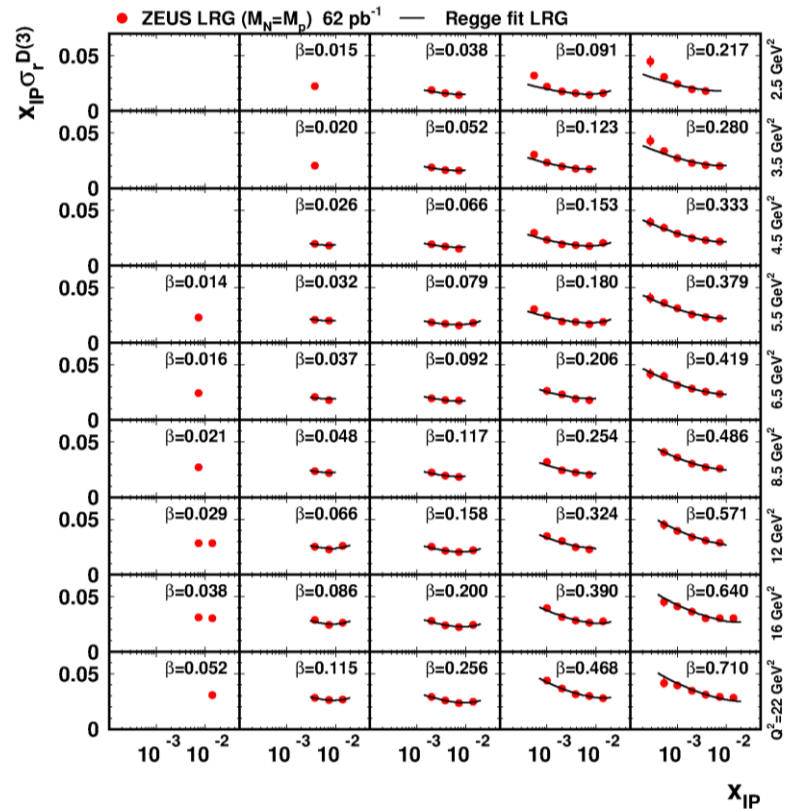
Is Pomeron a "particle" ?



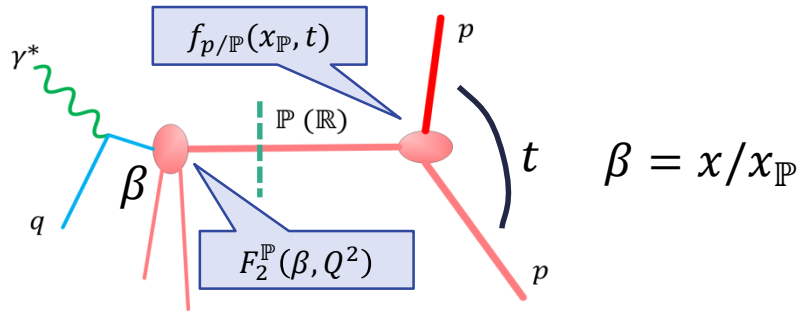
Fit by $\frac{1}{x_P^{2\alpha_{\mathbb{P}}-1}}$

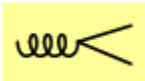


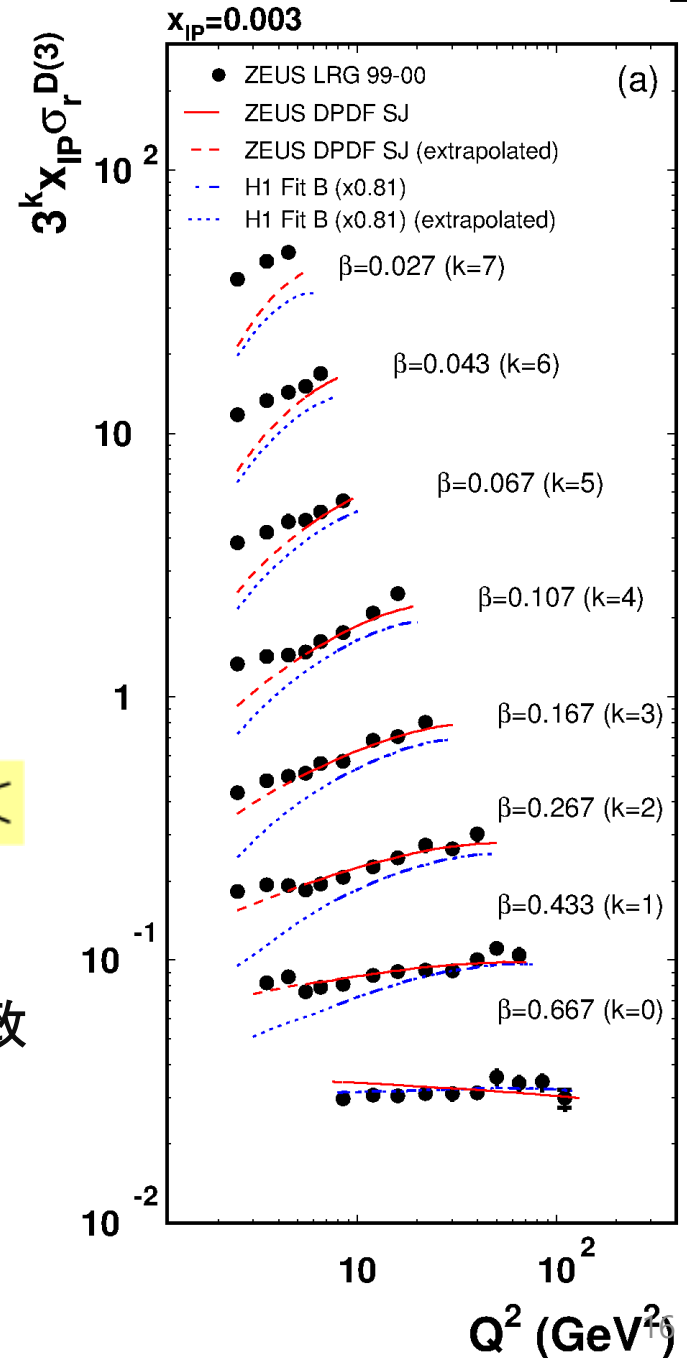
- 断面積が次の2パートに分かれると、Pomeron は粒子と見なせる
 - Pomeron flux $f_{p/\mathbb{P}}(x_{\mathbb{P}}, t)$ と
 - Pomeron の構造関数 $F_2^{\mathbb{P}}(\beta, Q^2)$
- 結構うまくいっている: 断面積の x_P に対する形状が β , Q^2 と独立
 - もし 2-glu なら, $x = \beta \times x_{\mathbb{P}}$ による $\rightarrow x_{\mathbb{P}}$ 依存性はもとのグルーオン分布から, Q^2 が高くなるとするどくなる



Scaling violation analysis for $g(\beta, Q^2)$ in DPDF



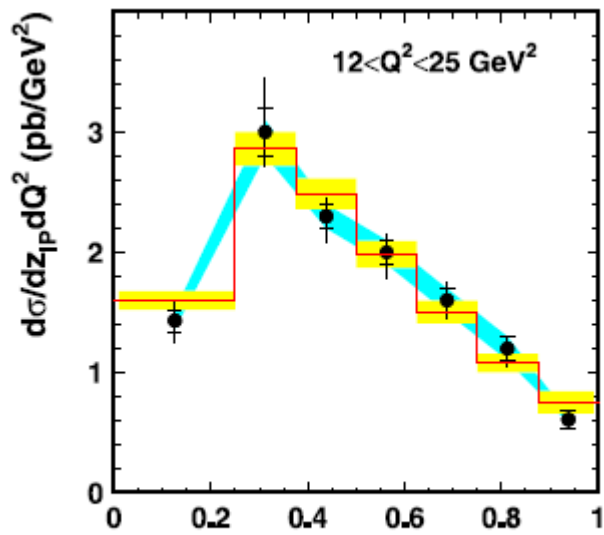
- scaling violation がほぼどこの β でも正の値
 - Quark が gluon から動的に生成されている 
 - 交換されている状態はグルーオン多く, **naïve 2-gluon picture** とも一致
- low- Q^2 で多少超過 (higher twist!):
後でもう一度



Extracted diffractive parton densities

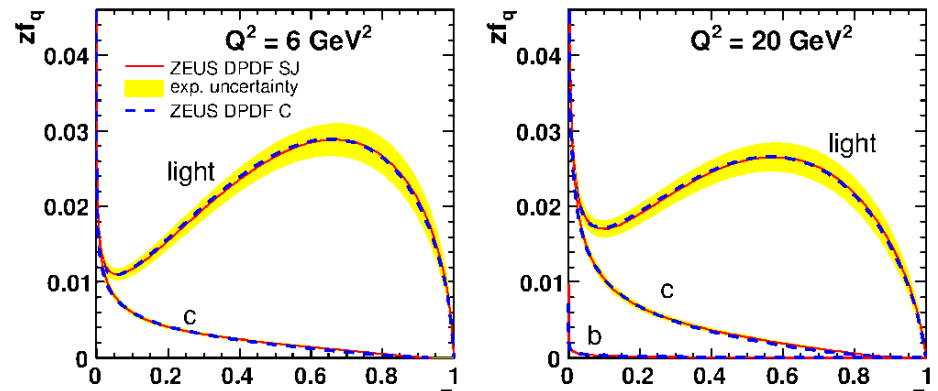
- Gluons は diffractive DIS で強い制限は難しい
- ジェット断面積を用いて制限
- $Q^2 = 10 \text{ GeV}$ で 63% が グルーオン

ZEUS dijet cross section and DPDF SJ

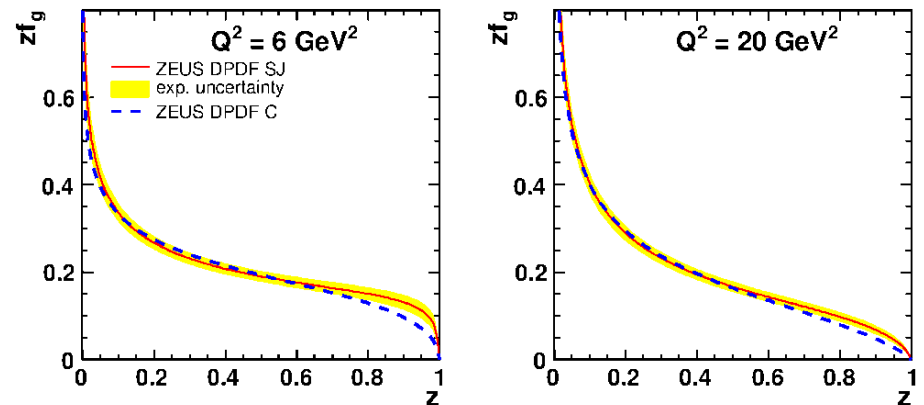


Longitudinal fraction of momentum z_{IP}^{obs} carried by the dijet system, wrt Pomeron

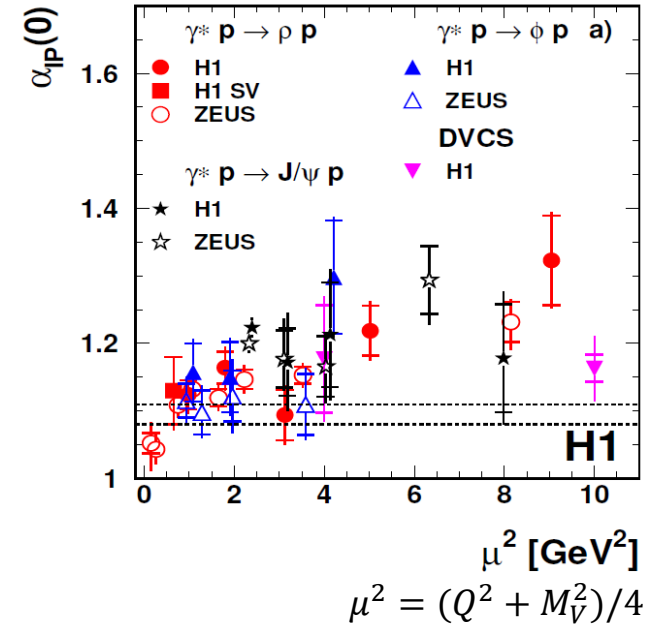
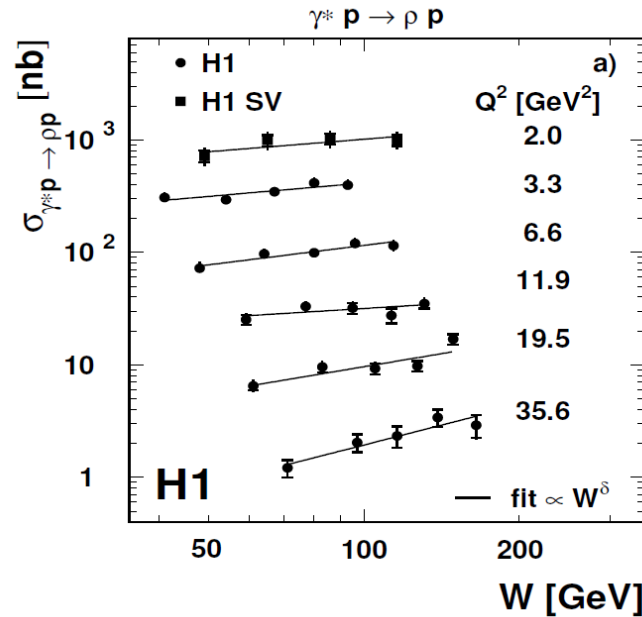
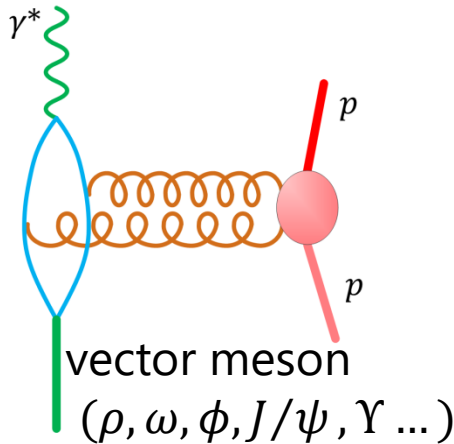
ZEUS



ZEUS

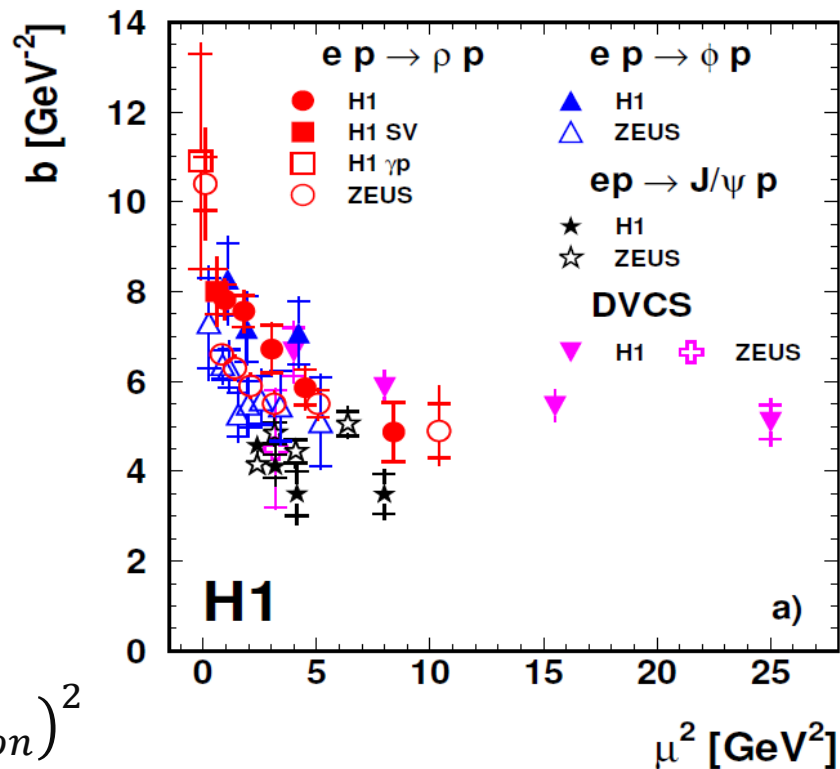
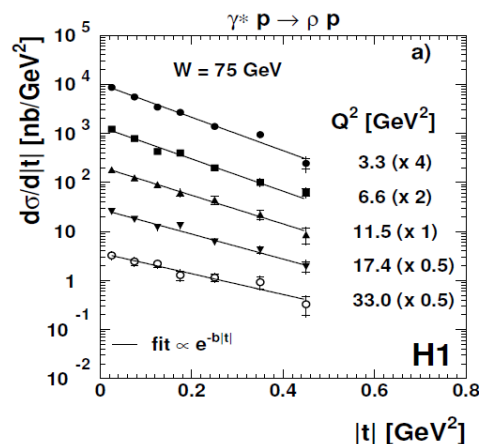
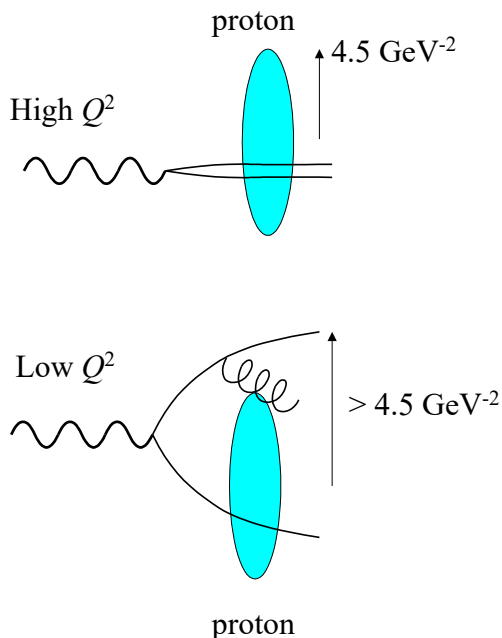


Vector meson production in $\gamma^* p$



- Vector meson 生成は higher twist (vector-meson dominance model)
- もし hard scale あれば W (γp CMS) の関数で急速に増加
 - a **very virtual photon** ($Q^2 \gg \Lambda_{QCD}$) から, あるいは
 - **VM** が重いクォークでできている場合 ($J/\psi, Y$)
- この場合は **2-gluon** でよく説明 $\sigma_{VM} \propto |g(x)|^2$
 - $\alpha_{IP}(0) \sim 1.25$ が $g(x) \propto x^{0.25}$ に対応

Forward part: t-dependence of VMs

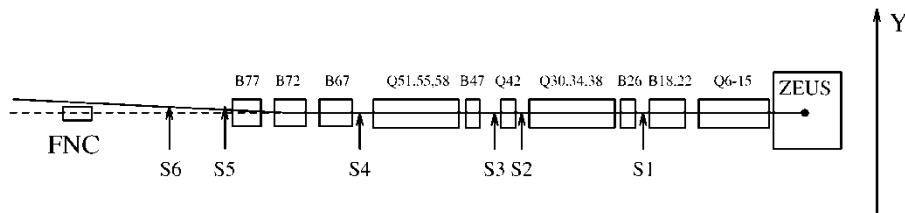
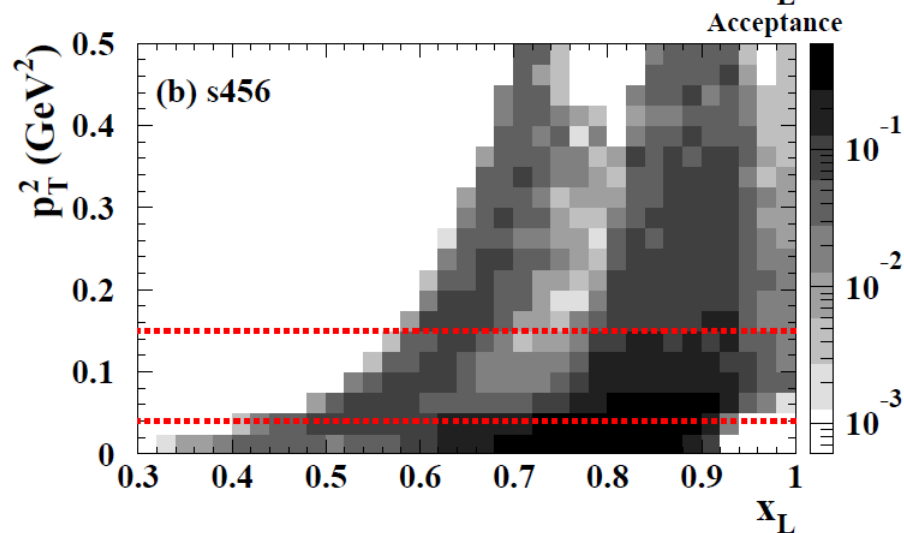
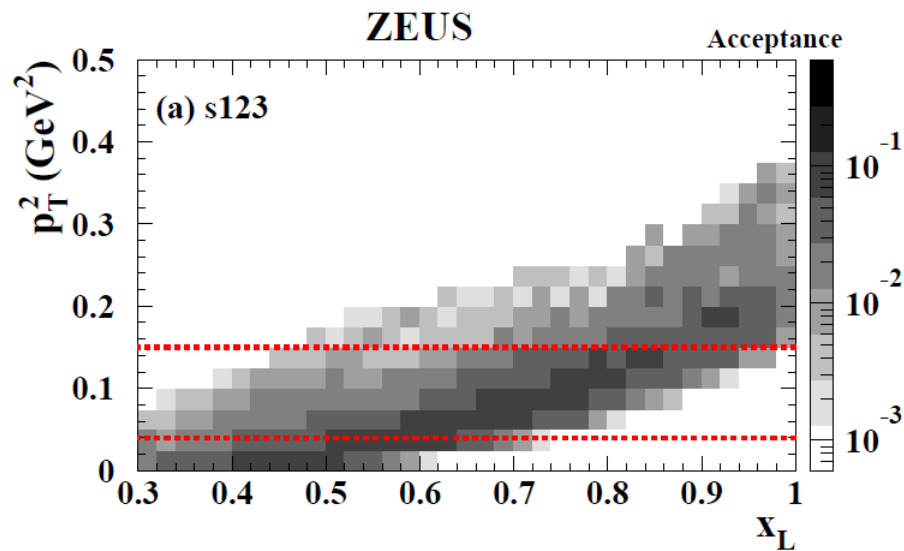


- 陽子の反跳を測定 $t = (p_{\text{proton}} - p'_{\text{proton}})^2$
- もし exponential で急速に落ちているなら peripheral
 - $e^{-b|t|}$ として b slope をプロット
- 結果: $b \sim 4 \text{ GeV}^{-2}$ に近づく (陽子のサイズ)
 - 反応が point-like になっている
 - VM production が "hard" な散乱であるという描像を支持

$$\mu^2 = (Q^2 + M_V^2)/4$$

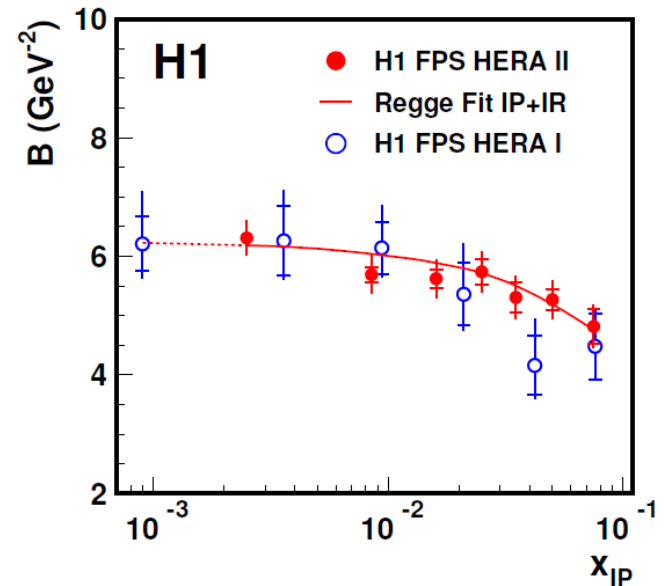
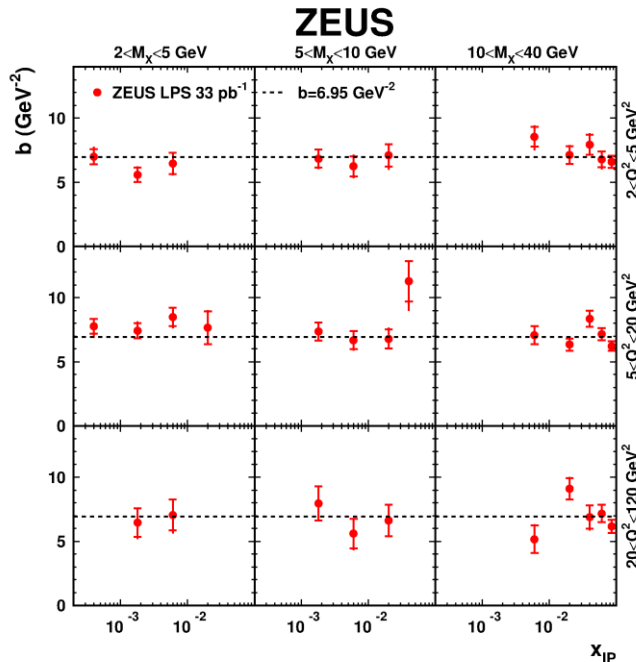
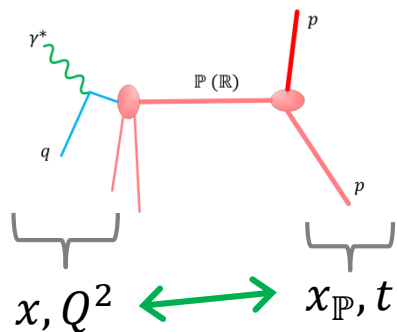
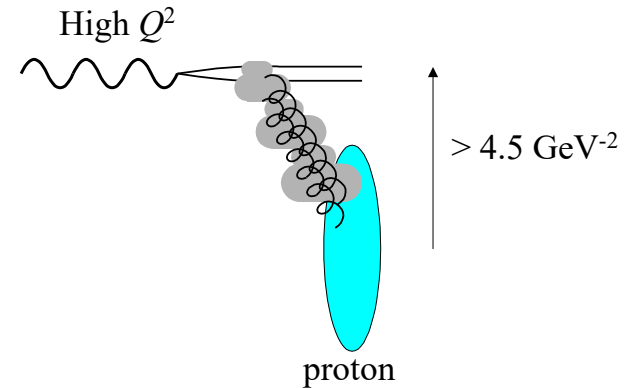
Forward proton detectors at HERA

- ZEUS LPS / H1 FPS:
 - 複雑な acceptance だが、
それでも以下の領域をカバー
 - $p_T = 0$ at $0.3 < x_L < 0.9$
 - 小さい効率だが diffractive peak ($x_L \sim 1$) も
 - $0.8 < x_L < 0.9$ は高効率
- H1 VFPS
 - very high acceptance for $0.9 < x_L < 0.97$



Is inclusive diffraction peripheral?

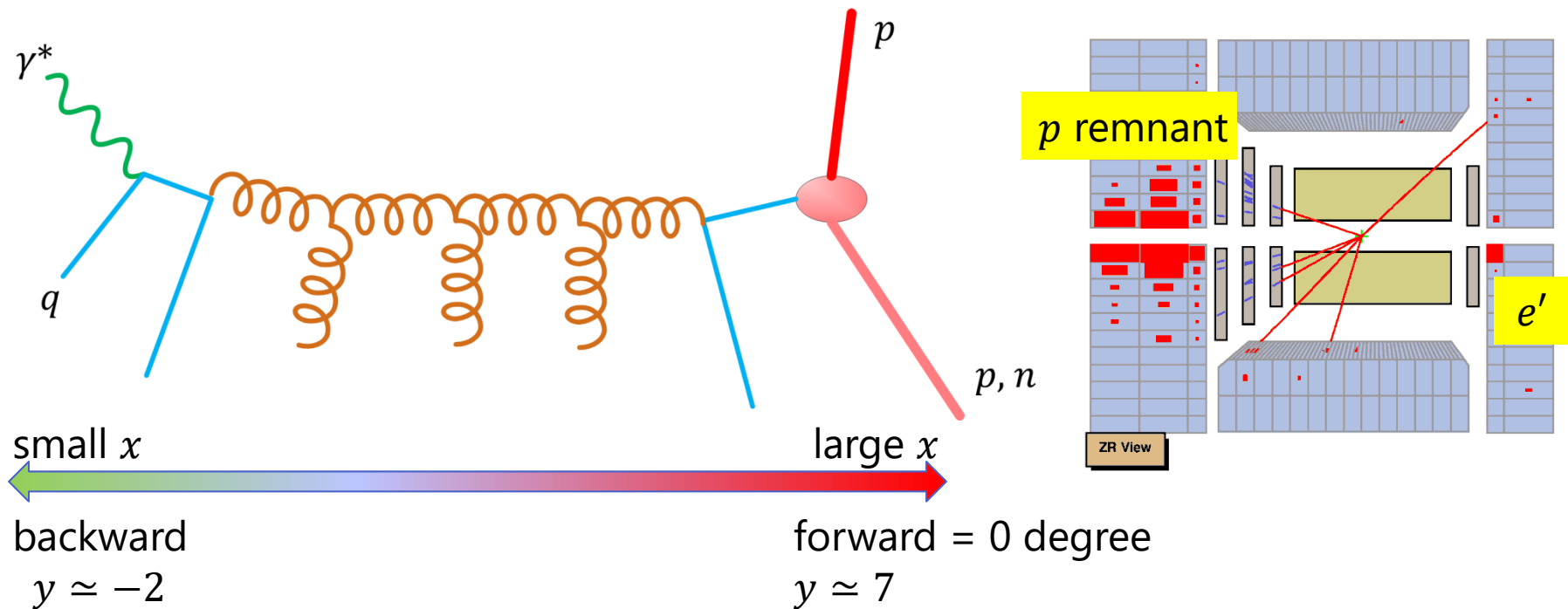
- $b \simeq 6 - 7 \text{ GeV}^{-2}$
 - 完全に点状な反応でも，完全に遠距離な反応でもない
 - Pomeron は，多少粒子っぽくない？
Meson の場合には $b > 10 \text{ GeV}^{-2}$



... but the slope is independent of Q^2
(unlike vector meson)

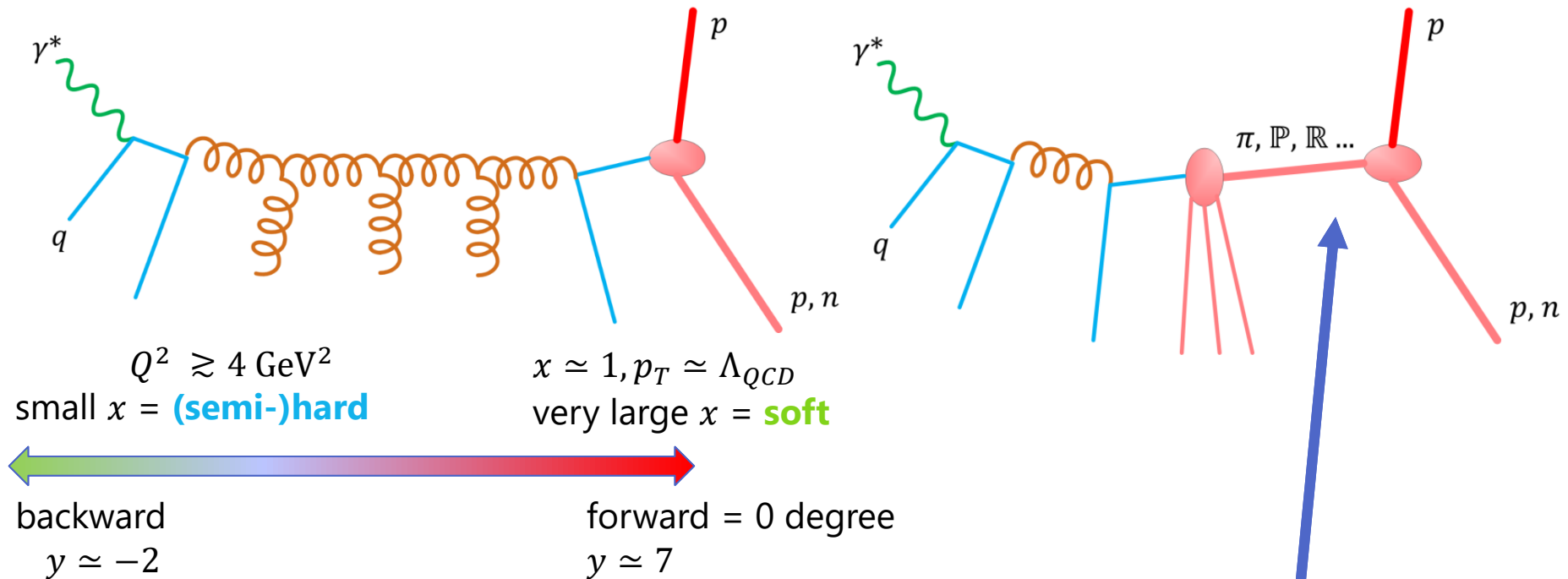
前方バリオン生成

Low- x だと rapidity interval 大きい



- Leading baryon は相対的に very forward に生成
 - high- W だから、と理解してもよい
- ということは、LB に関して言えば **DIS と pp ミニマムバイアス** はよく似ている (はず)
 - ハードな vertex の物理と (ほぼ) 無関係に生成

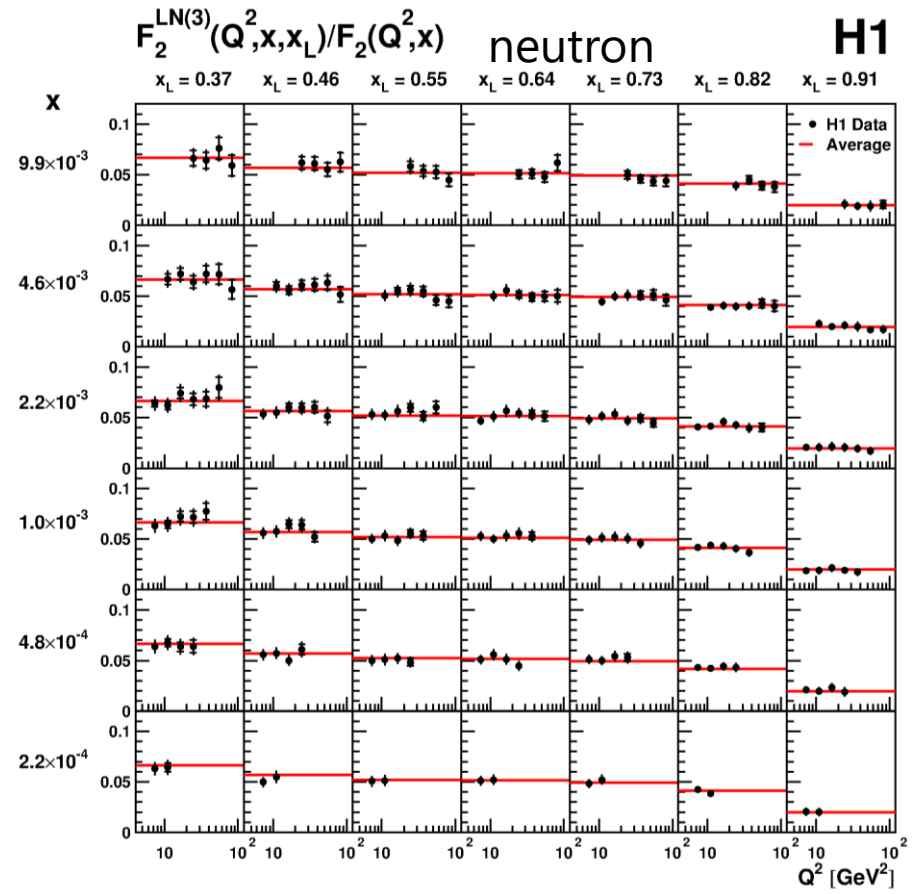
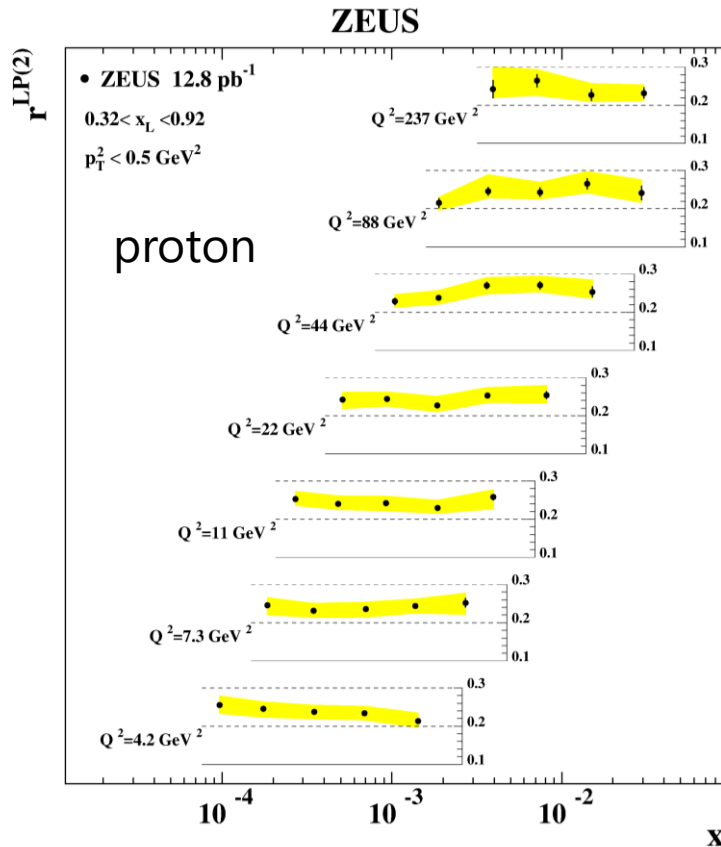
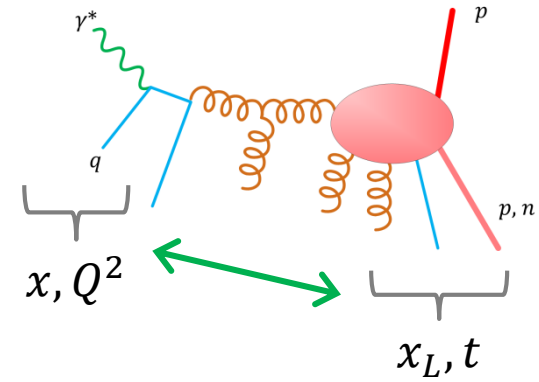
Fragmentation or one-particle exchange?



- 前方はハードスケールの影響が少なく， soft な物理
 - パartonではなくカラーのない状態
 (中間子，ポメロン) などがあってもよい (particle exchange model)
- 実際， どうなのか？ \Rightarrow この話題の前半

LB と光子は話しているか？

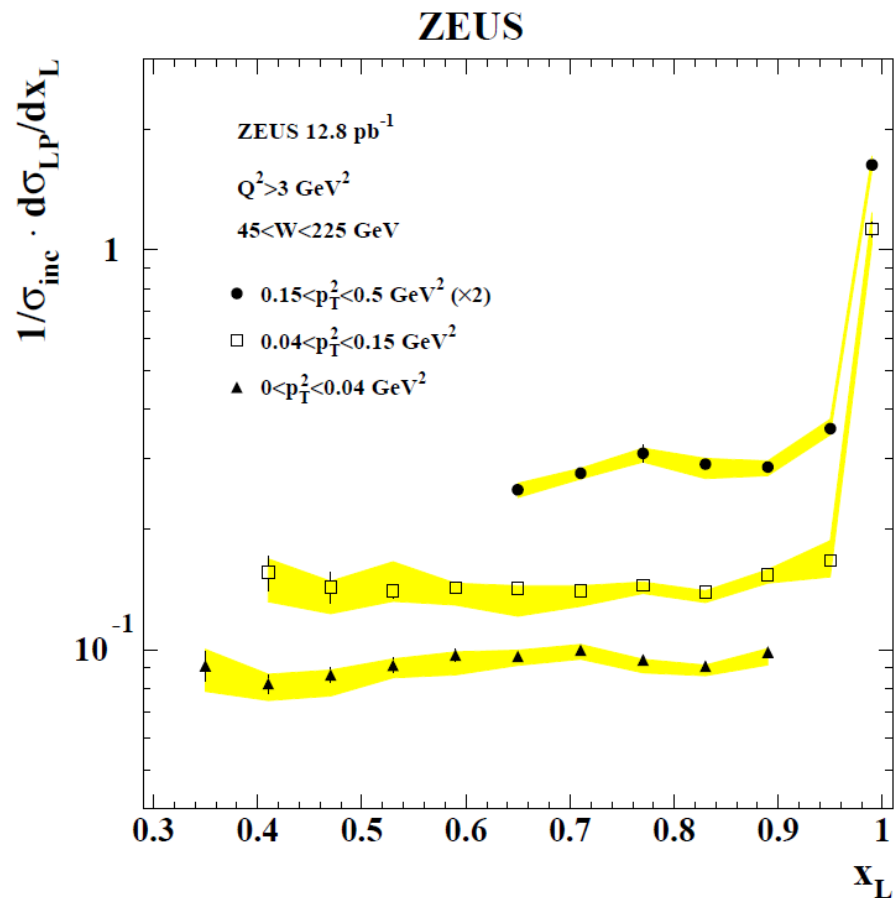
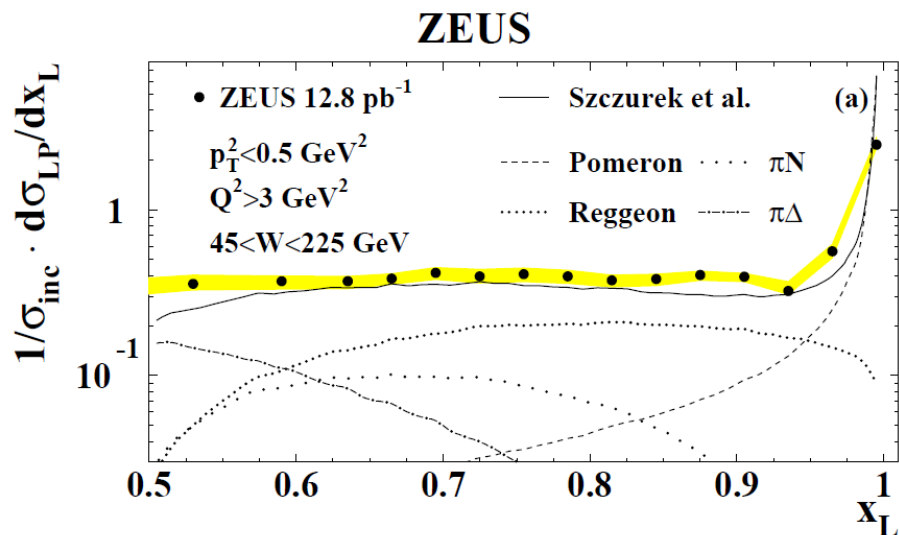
- LB の生成率は,
 x, Q^2 の依存性なし。
 - いわゆる limiting fragmentation



LHC との比較は意味がありそう

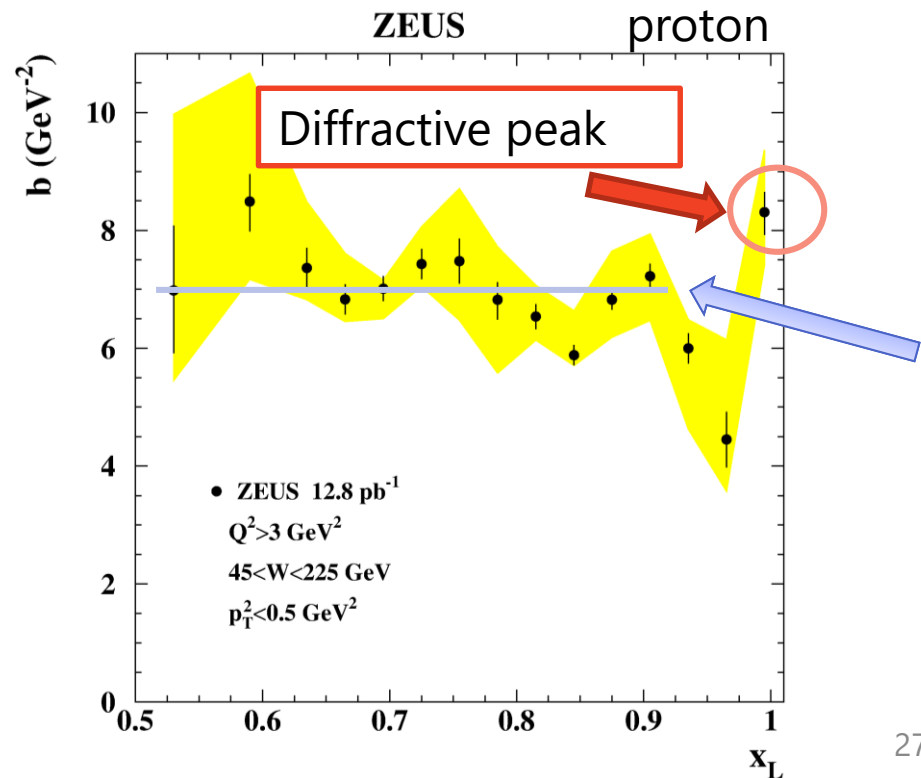
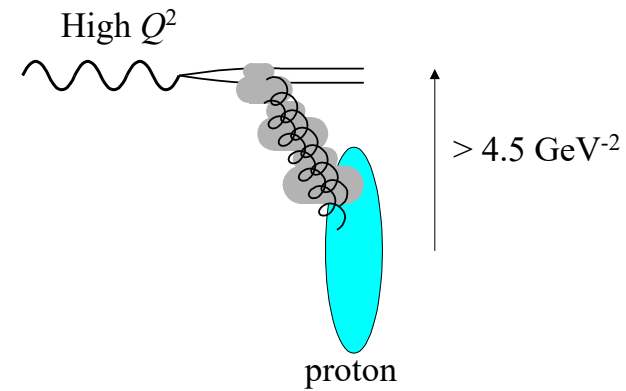
LP (proton) の縦方向スペクトラム

- $x_L = p_Z^{LB} / p_{beam}$
- 非常にフラット
 - + diffraction peak
 - Fragmentation でも
 - pariticle exchange model (Regge pole の重ね合わせ) でも説明できる



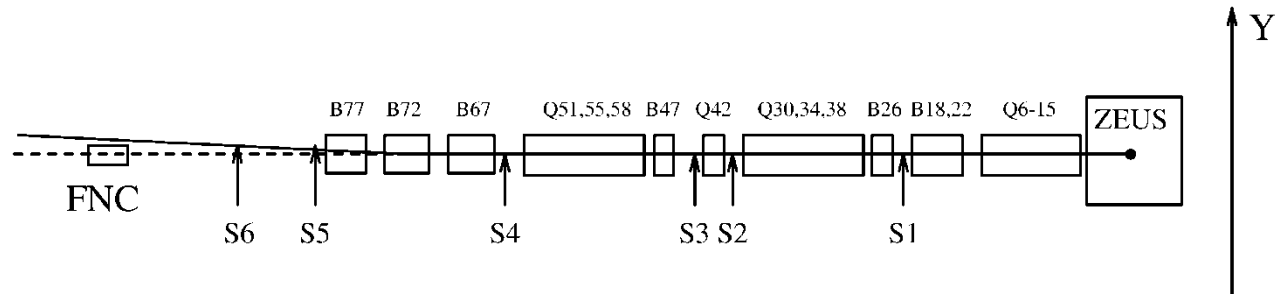
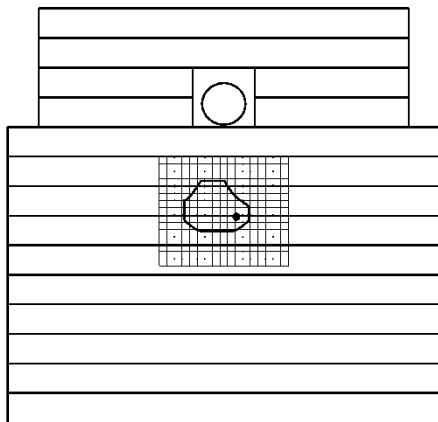
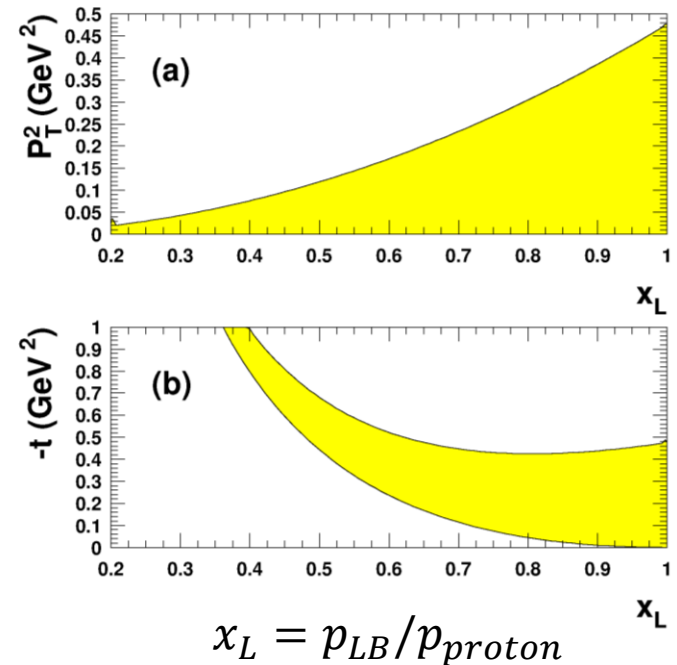
LP の横方向スペクトラム (b-slope)

- $b \sim 7 \text{ GeV}^{-2}$ ($\sigma \propto e^{-bp_T^2}$) で一定
- 陽子のサイズより若干大きい
 - 若干ペリフェラルな反応で、陽子を直接見ているわけではない：
Semi-soft な生成
- 中性子はどうか？



HERA の前方中性子検出器

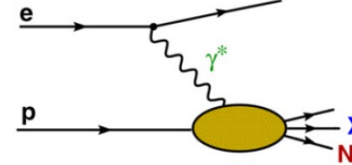
- 場所は広い
 - 陽子ビームは上方に逃がされていゑ
 - カロリメーター大きい!
- アパチャーはマグネットで制限
- Scintillator "tracker"
 - 角度の測定



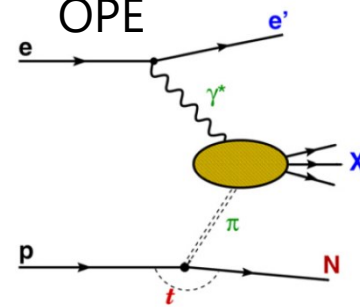
中性子の縦方向スペクトラム

- データ : DIS
 - $(Q^2 > 2$ (ZEUS) or 6 (H1) GeV^2)
- OPE (one-pion exchange) 必要
 - Fragmentation だけだと足りない
 - colour dipole model の “professional” fragmentation や、
 $\propto (1 - x_F)$ のような関数でも再現できる

fragmentation

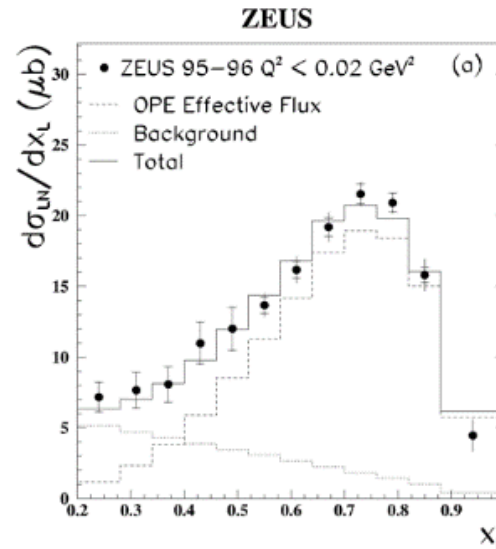
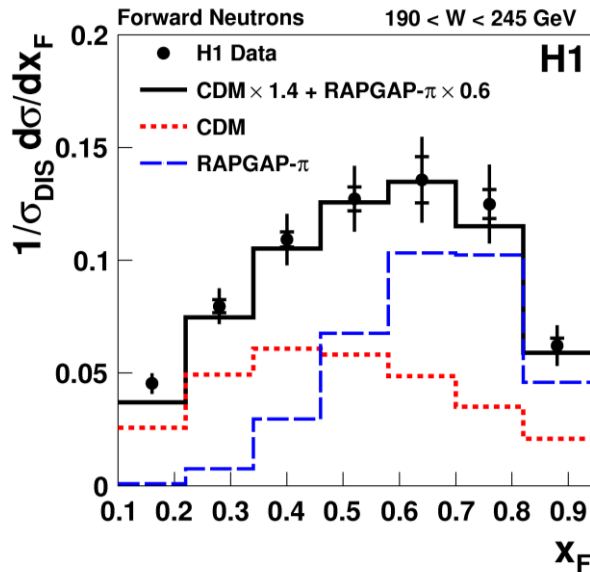


OPE



DESY-14-035

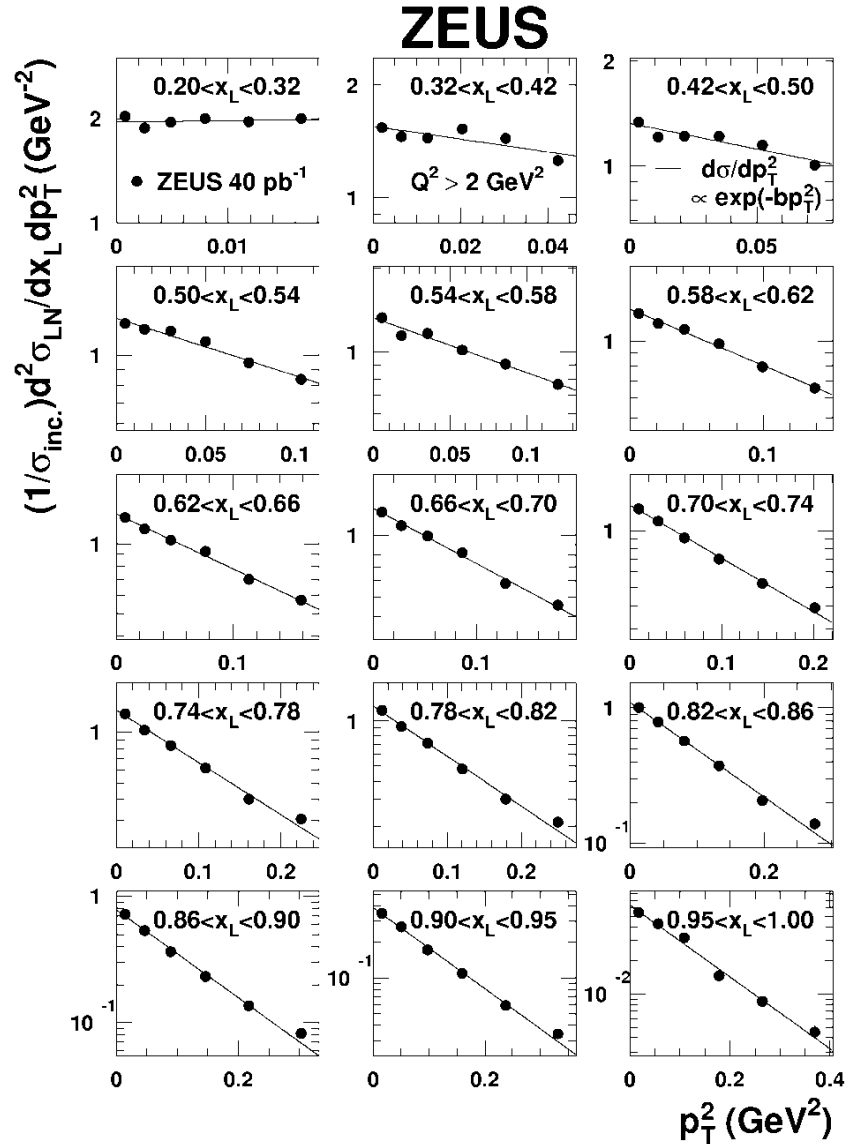
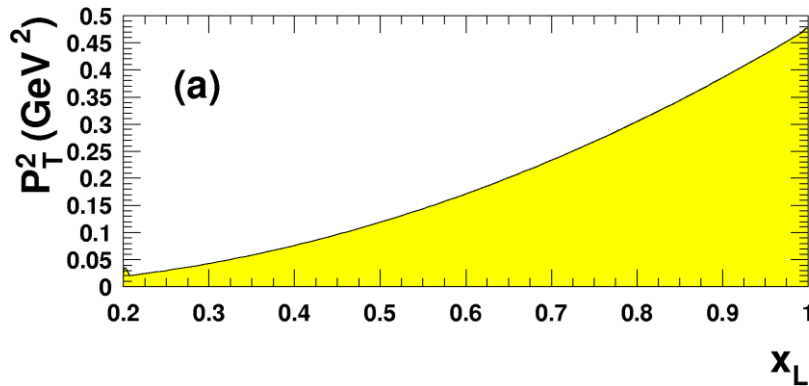
Nucl.Phys.B637(2002)3



p_T distributions vs x_F

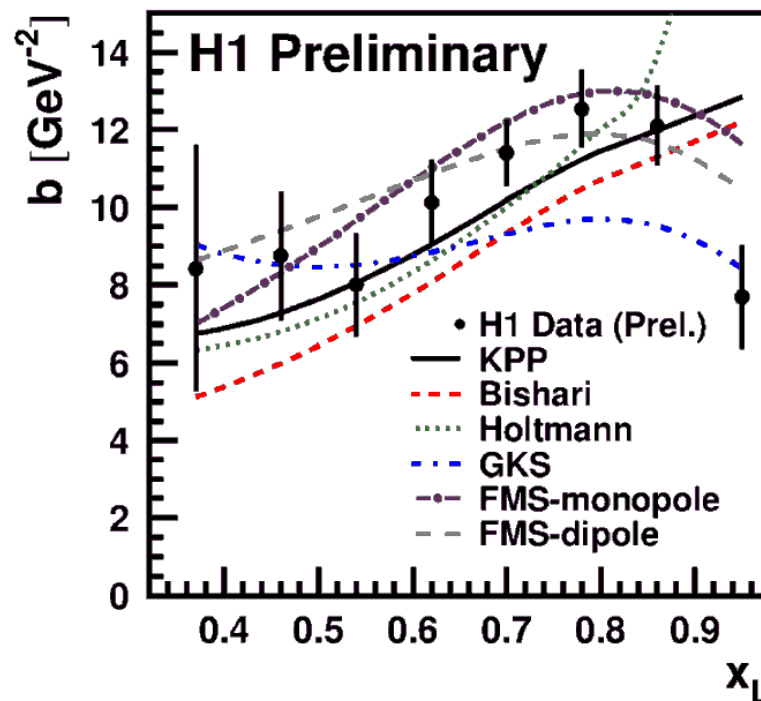
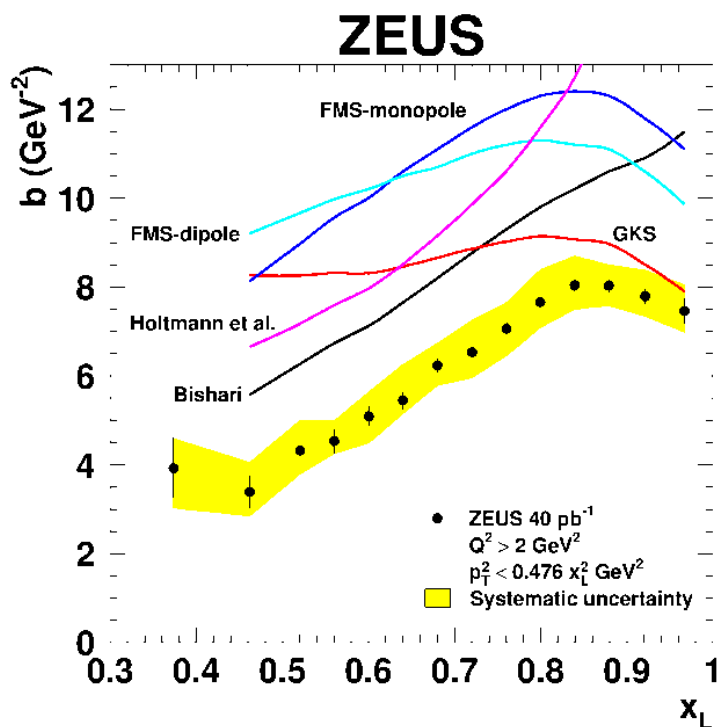
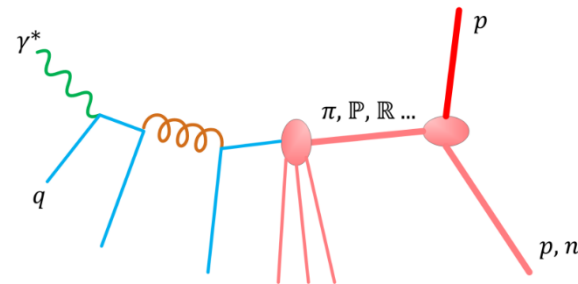
- $x_L = x_F$
- Acceptance:
 $p_T < 0.69x_F \text{ GeV}$
- 現象論的には単一の exponential で記述できる

$$\frac{d\sigma}{dp_T^2} = a \exp(-bp_T^2)$$



Neutron の b-slope vs x_L

- 平均的には proton と同様 $b \sim 7 \text{ GeV}^{-2}$ 程度
- ただし比較的強い x_L 依存性がある
 - pion flux $f_{\pi/p}$ のふるまいで説明でき、
OPE をサポートするもう一つの証拠

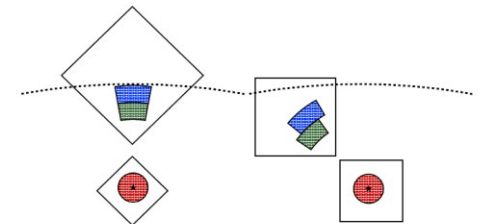
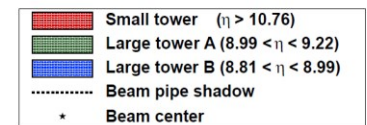
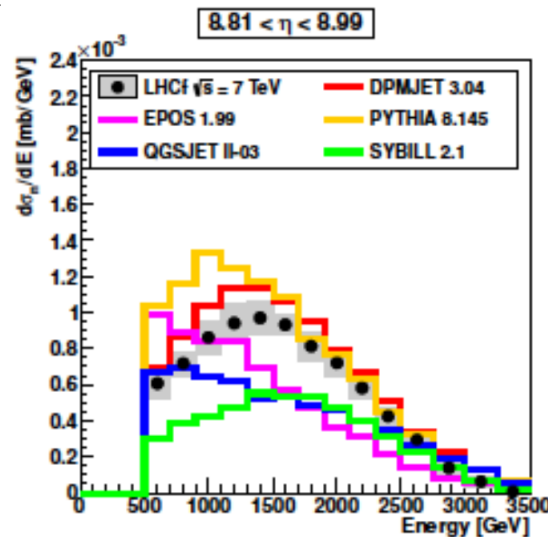
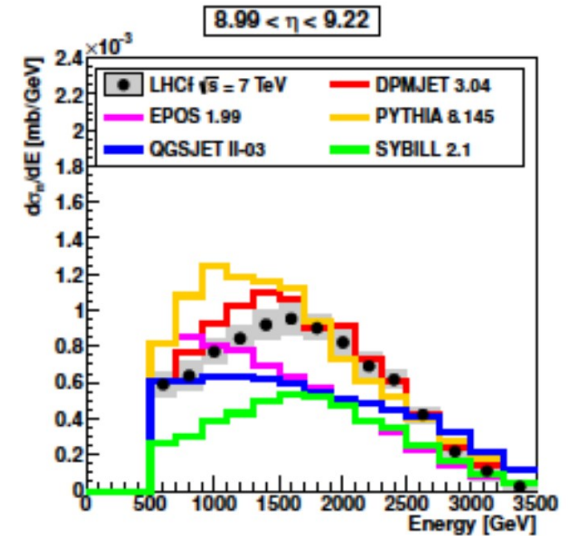
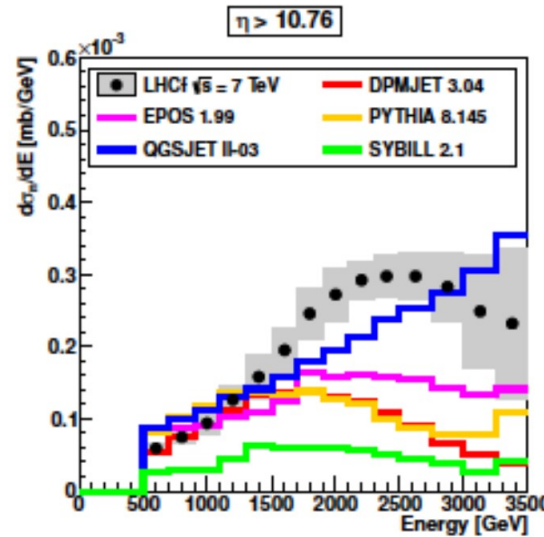


まとめ

- HERA のデータは One Pion Exchange モデルでよく記述
 - Fragmentation model だけでは記述できない
- High x_F の kinematic limit に近いところでは、**量子数保存**のほうが parton-hadron duality より重要であることを示していると思われる。
 - Diffraction でも Pomeron-based model のほうが pQCD 計算より再現性がよいことが多い。

NEUTRON: LHCF との比較

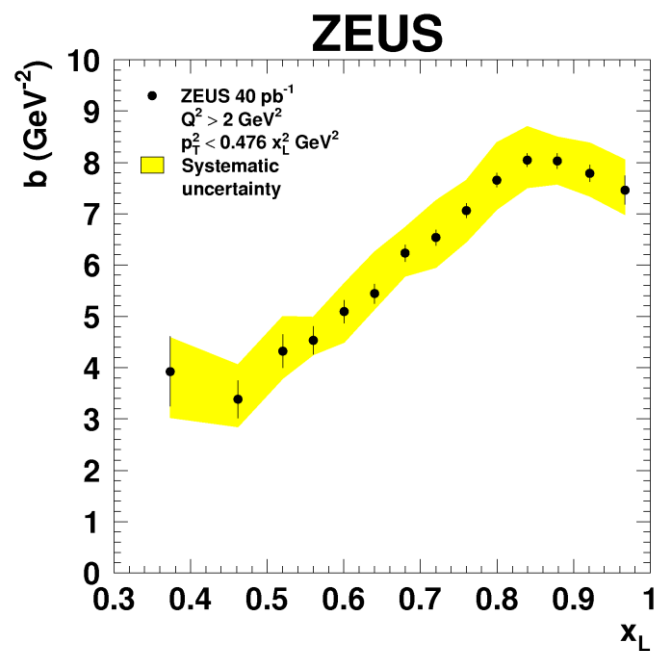
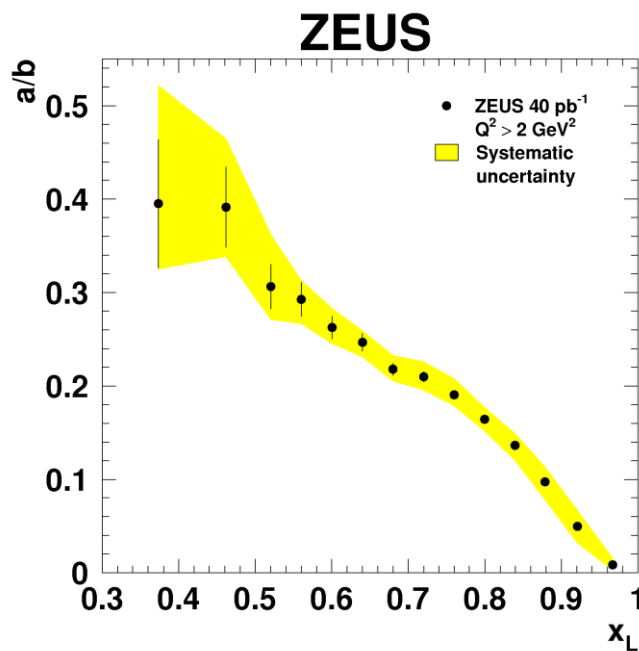
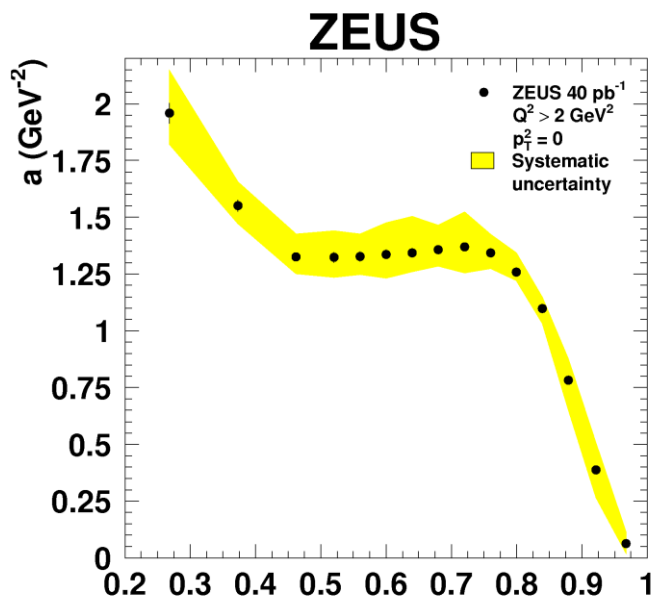
- Self-trigger: threshold 以上はバイアスなしの測定
- 3つの散乱角領域
- 前方では $x_F = 1$ に比較的多数のイベント
- Many models predict the flat behaviour:
 - QGSJET II-03
 - EPOS 1.99
 - PYTHIA 8.145



From Doctoral Thesis by K. Kawade

HERA 測定の a and b パラメータ

- $a/b = \text{"total" } d\sigma/dx_F$
- $x_F \sim 0.8$ で少しふくらみ
OPE とと思われる成分
- $x_F \simeq 1$ ではほぼゼロ



LHCf と HERA の kinematic range 比較

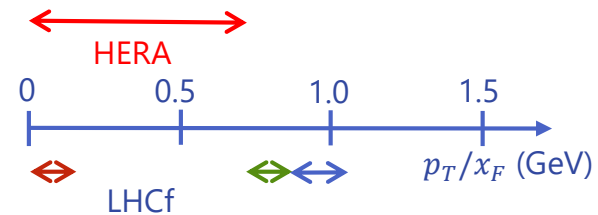
- 予断を避けるため，できるだけ同じ kinematic region で比較したい
- 生成断面積の形が (p_T^2, x_F) の関数として同じと仮定
 - normalisation はもちろん異なるので，適当に合わせた

- HERA coverage

$$p_T < 0.69x_F \quad (p_T \text{ in GeV})$$

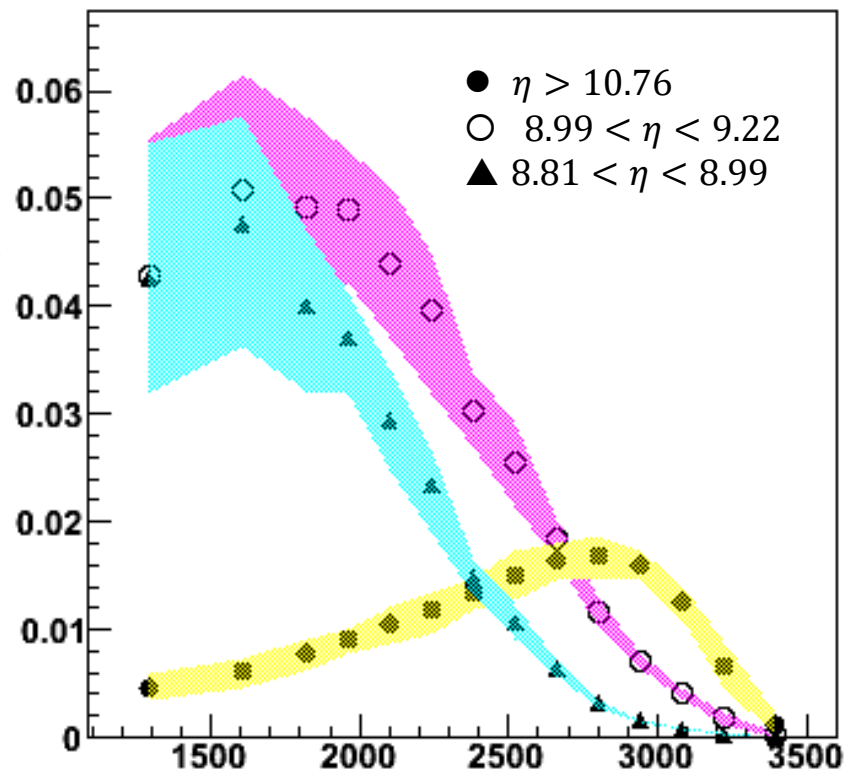
- LHCf coverage

1. $p_T < 0.149x_F$: HERA acceptance 内
2. $0.693x_F < p_T < 0.873x_F$: HERA のすぐ外
3. $0.873x_F < p_T < 1.045x_F$: かなり外挿

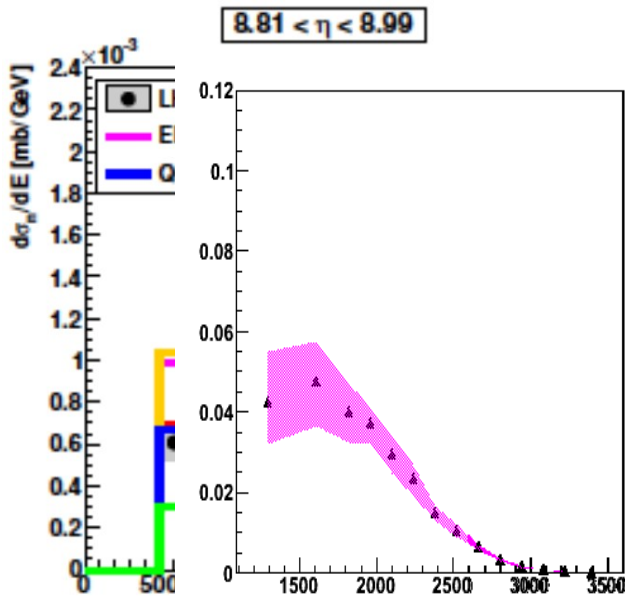
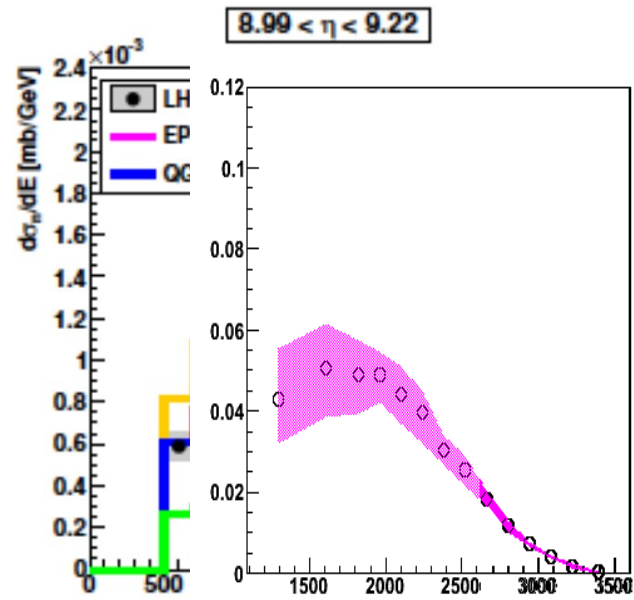
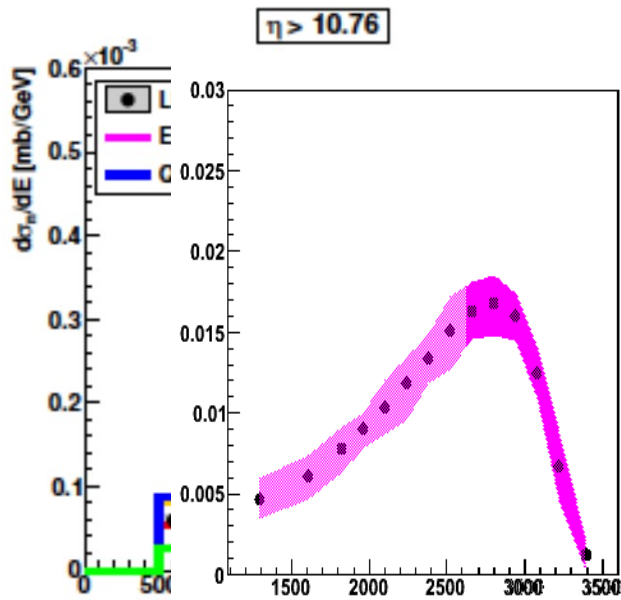


a/b パラメータで計算した LHCf 領域の断面積

- エラーの計算
 - stat + syst
 - a, b パラメータの相関なし
- high- x_F 漸近的にゼロに近づいていることは変わらない
- ただし、ピーク的位置は両者そっくりなのでは？



両者の比

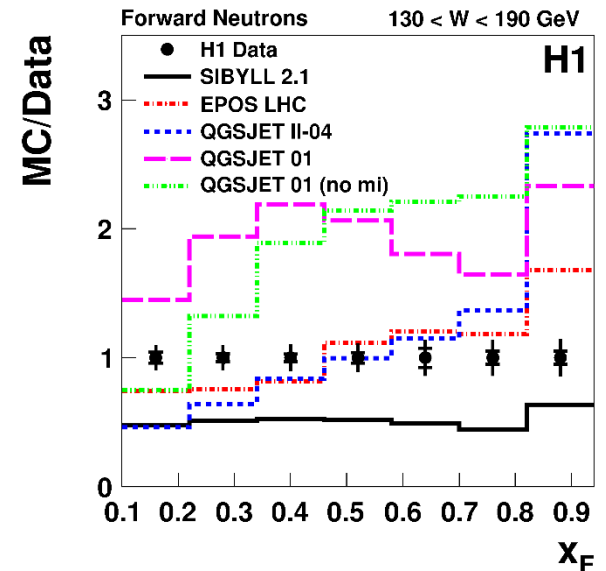
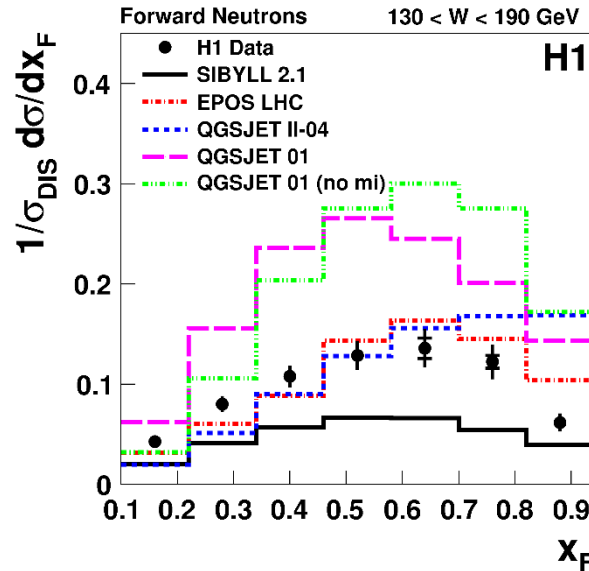
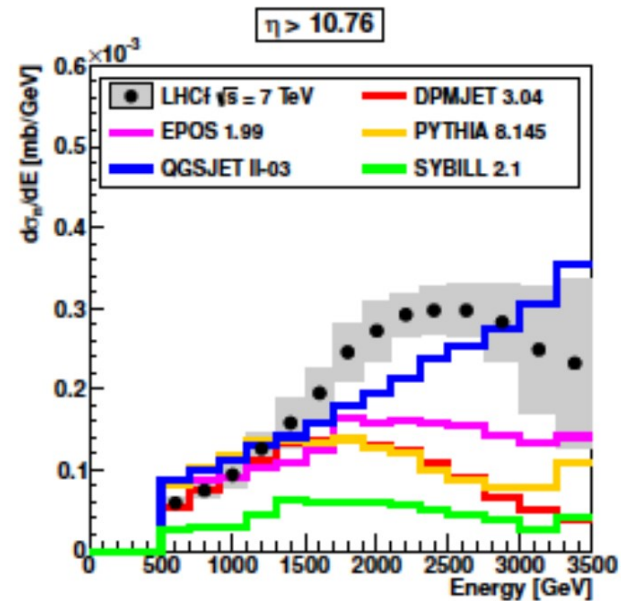


- Medium- x_F のふるまいをよく再現
 - 特にピークの位置と高さをなかなかよく再現
- Low- x_F : 多少異なる
 - この領域ではスロープが小さく, exponential 近似がよくないと思われる

H1 の最近の結果: モデルとの直接比較

H1prelim-14-011

spectrum → ratio to data



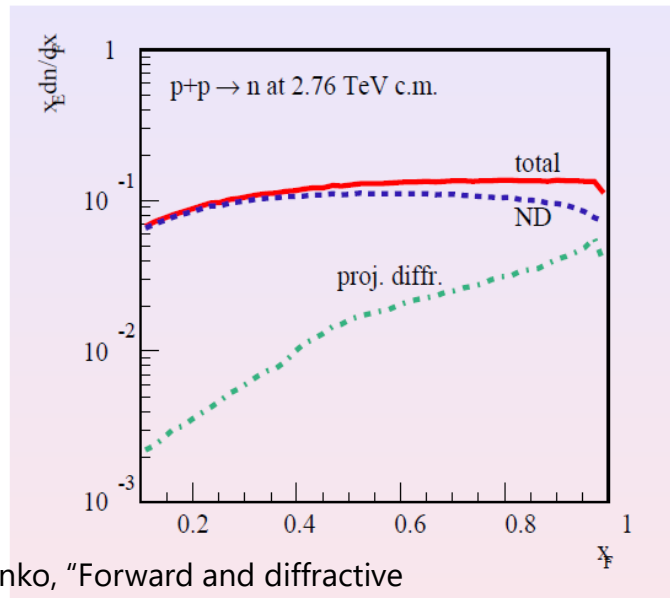
- low x_F では, LHCf データとモデルとの関係は, H1 データとモデルとの関係とよく似ている
 - e.g. EPOS がよく合っていて, QGSJET II-04 は少々ハード
- High x_F : どのモデルも H1 data よりハードな傾向

LHCf vs HERA summary

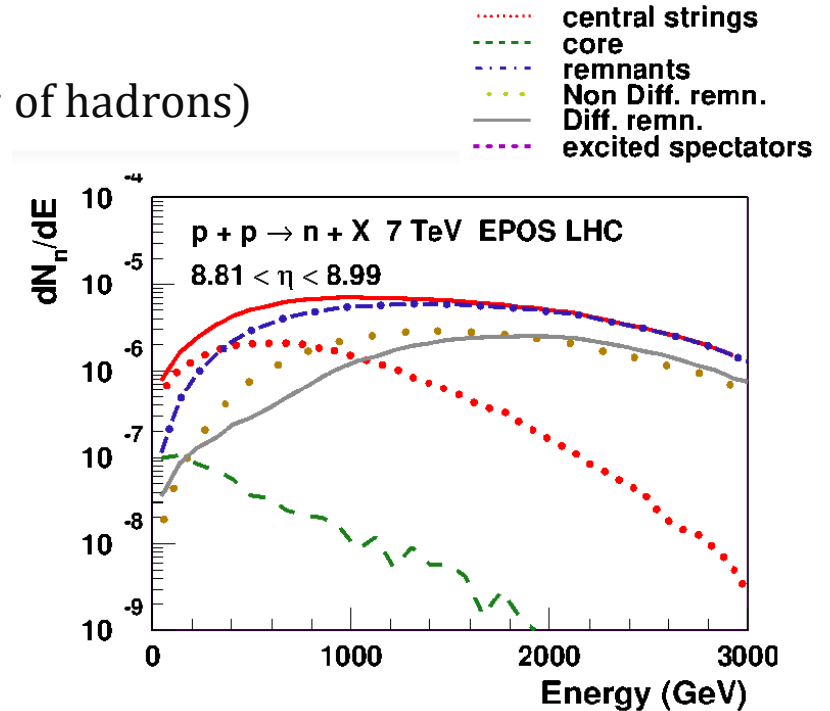
- HERA データは漸近的に $x_F = 1$ でゼロ
 - LHCf のほうが，ハードな傾向
- Low- x_F ではよく似ている
 - HERA parameterisation のほうが，low- x_F ではモデル計算よりよく LHCf データを再現
- ところで，モデルはなぜハードな傾向を示す？

モデルの High- x_F スペクトラム

- high- x_L が平らな原因（特に very forward bin）：
 - non-diffraction (ND) shape がハードな傾向
 - HERA ではうまくいっていない (cf. H1 の比較)
 - the projectile diffraction (diffractive remnants) が、一役買っている
 $pp \rightarrow N^* + Y, N^* \rightarrow n + (\text{small \# of hadrons})$

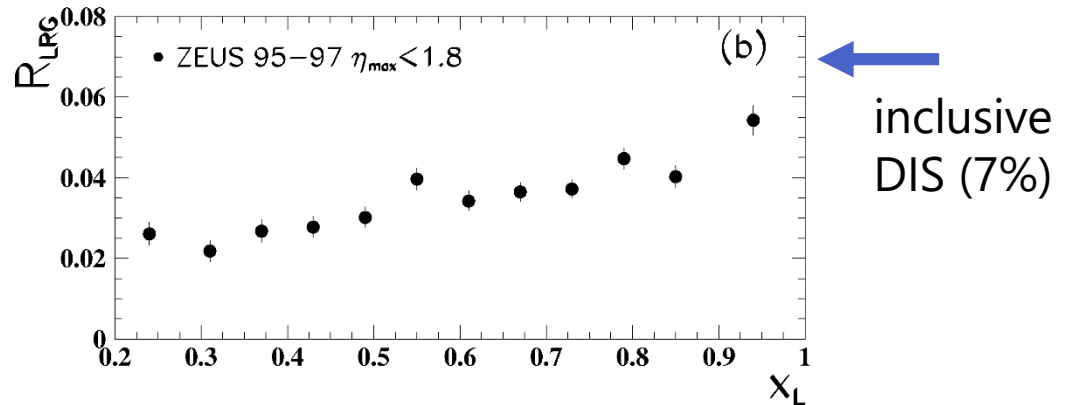


S. Ostapchenko, "Forward and diffractive production in QGSJET-II", High-Energy Scattering at Zero Degrees (HESZ2013), Nagoya Univ., March 2013



T. Pierog, "EPOS and 0 degree particle production", HESZ2013

HERA の neutron イベントと rapidity gap



- LRG (Large Rapidity Gap) のあるイベントのある割合：
inclusive DIS の $2/3 \sim 1/2$
- LRG イベントのうち，
 - proton の弾性散乱 からの diffraction では neutron 出ない
 - proton diffractive dissociation からは neutron 出る
→ inclusive diffraction より少ないことはあり得る
 - LRG の割合が x_F とともに上昇しており，neutron が diffractive にできているせいぶんはあると考えられるが，neutron のうち数パーセントで，おもなメカニズムではなさそう
- LHC pp 散乱では diffraction 多い？（少ないとされている）

まとめ

- HERA neutron データは $OPE + \alpha$ で記述できる
 - pQCD model はあまりよくない

- **High- x_F** : LHCf HERA より高め

Models \simeq LHCf $>$ HERA

- diffractive remnant が LHC で多め？
HERA ではそれほどでもなさそう？

- **Low- x_F** : LHCf と HERA よく合っている

LHCf \simeq HERA \neq Models

- HERA parameterisation 結構よい