

Harte Diffraktion an ep und pp Beschleunigern (HERA, TEVATRON, LHC)

Frank-Peter Schilling (CERN/PH)

DPG-Frühjahrstagung, März 2005



Aktuelle Resultate von HERA und TEVATRON ...

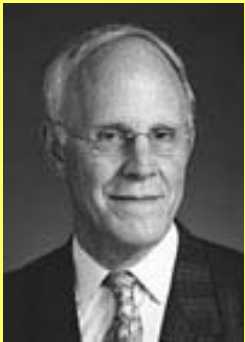


... sowie ein Ausblick auf die Planungen am LHC

QCD als Theorie der starken Kraft

Quantenchromodynamik **QCD** etabliert als Theorie der starken Wechselwirkung

Nobelpreis 2004:
Asymptotische Freiheit:
Kopplung klein
bei kurzen Abständen



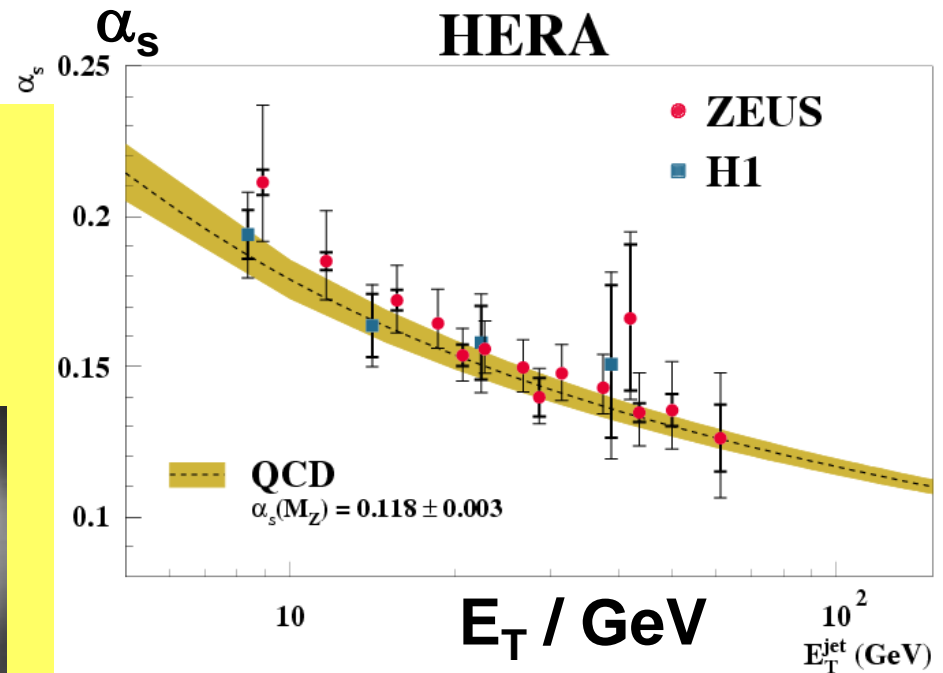
D. Gross



D. Politzer



F. Wilczek

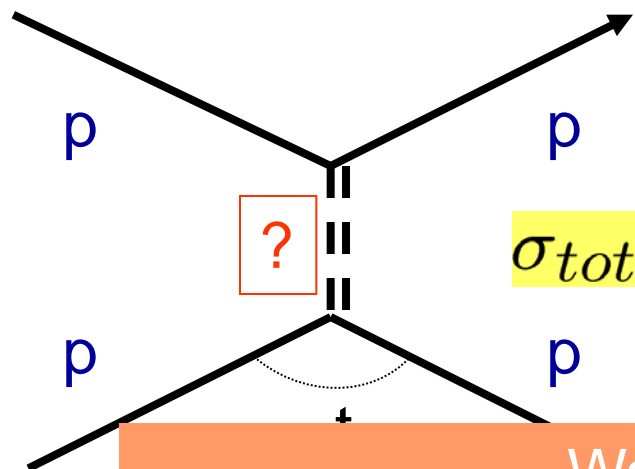


- Quark- und Gluonaustausch
- Gluonen tragen Farbladung!

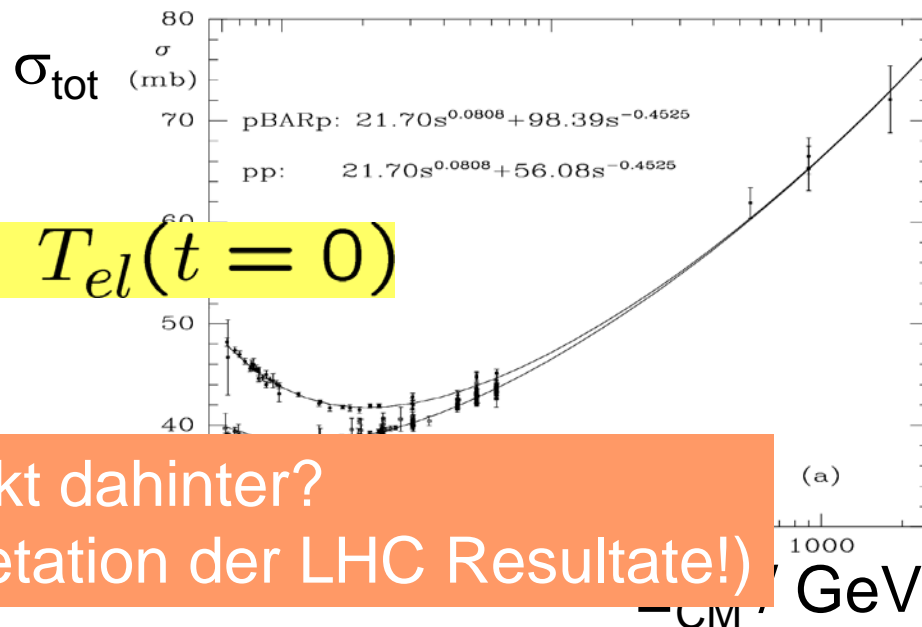
Harte Skala $\rightarrow \alpha_s$ klein \rightarrow QCD-Störungsrechnung möglich!

Protonstreuung bei hohen Energien

B) Weiche Prozesse, speziell elastische Streuung:



$$\sigma_{tot} \sim \text{Im } T_{el}(t = 0)$$



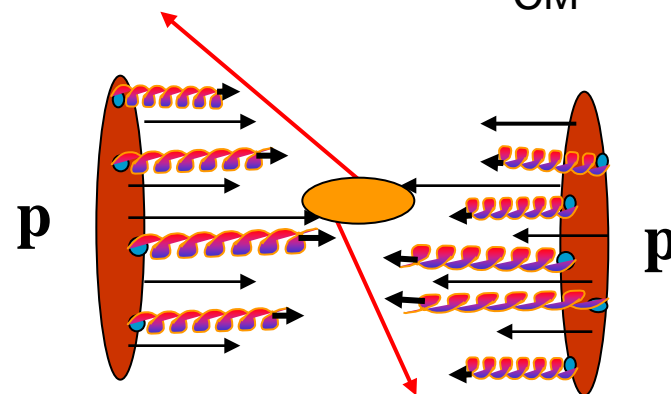
Was steckt dahinter?
(Auch wichtig für Interpretation der LHC Resultate!)

A) Harte QCD Prozesse:

Jet, W, Z, t, Produktion

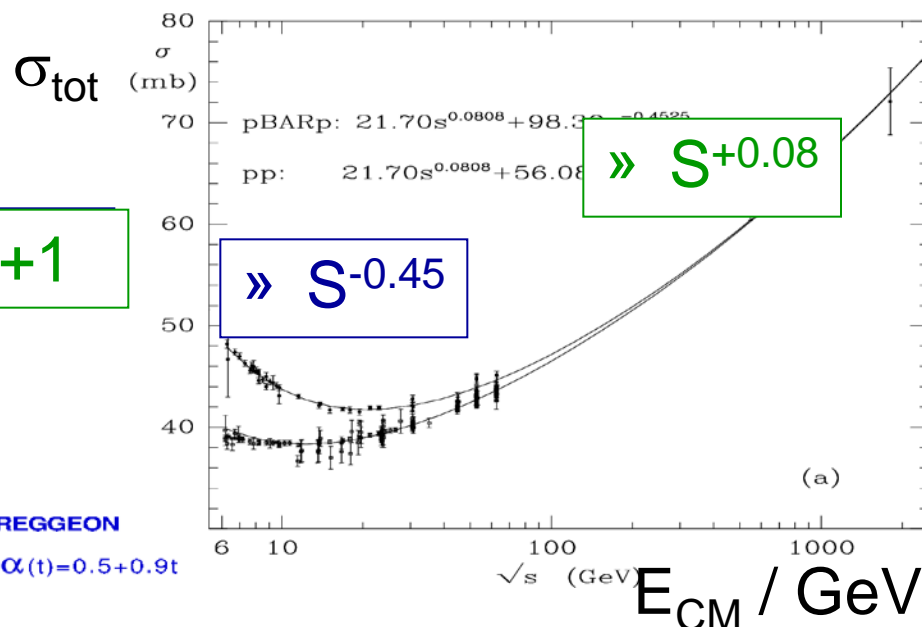
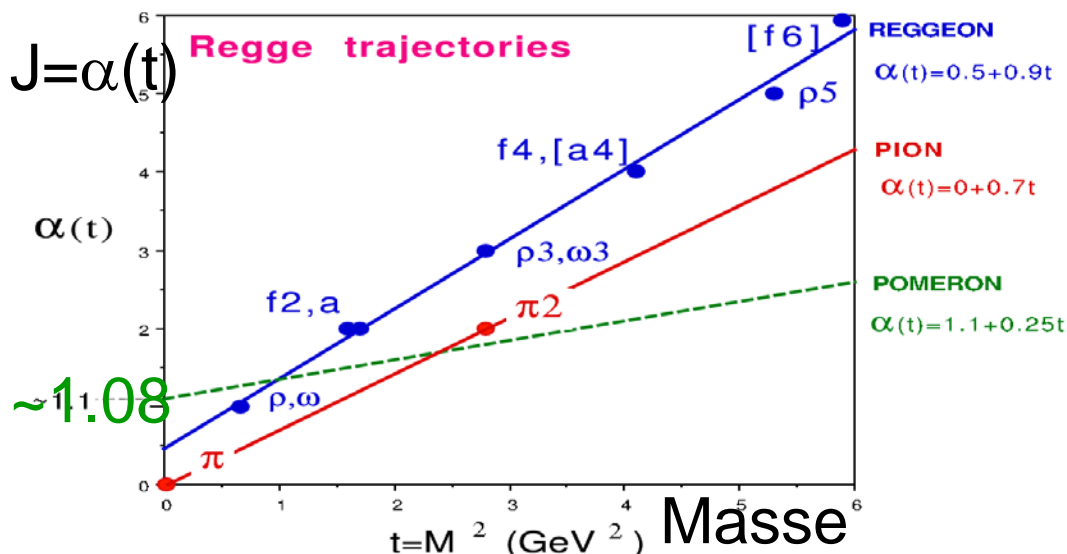
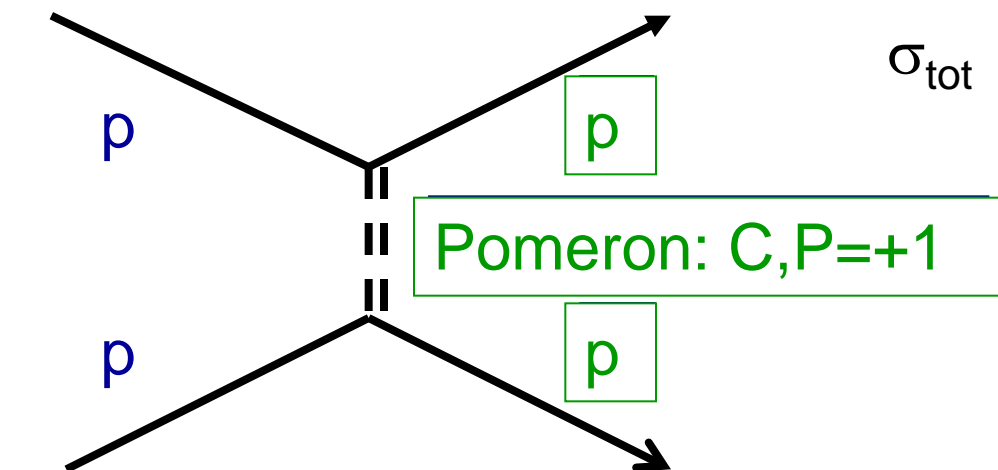
Störungsrechnung erfolgreich

Aber: nur kleiner Anteil an σ_{tot}



Protonstreuung bei hohen Energien

t-Kanal Austausch: Mesonen und deren Rotationsanregungen:



$$\alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t$$

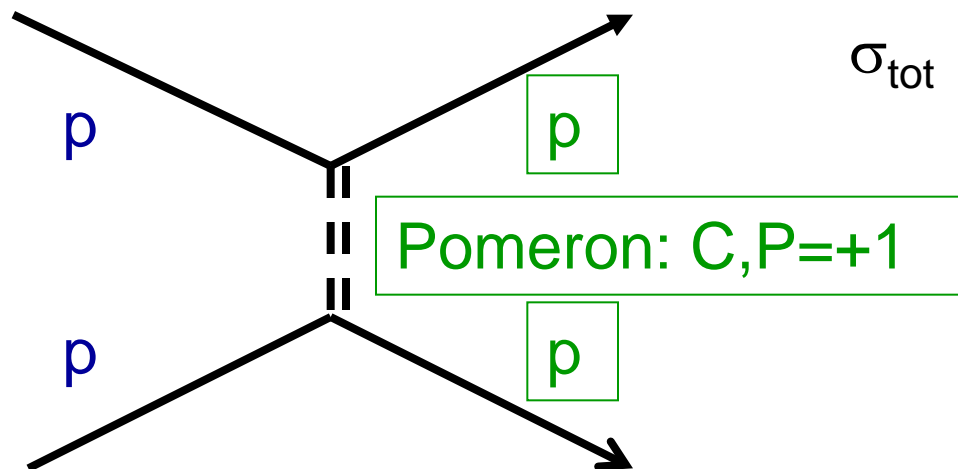
$$\sigma_{\text{tot}} \sim s^{\alpha(0)-1}$$

$E_{\text{CM}} < 20 \text{ GeV}$: Reggeon

$E_{\text{CM}} > 20 \text{ GeV}$: Pomeron

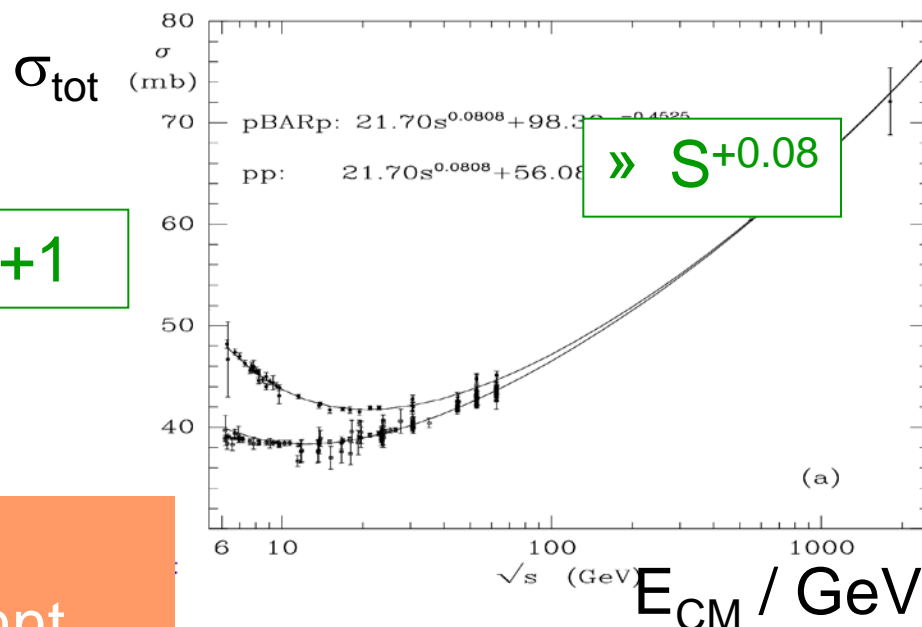
Protonstreuung bei hohen Energien

t-Kanal Austausch: Mesonen und deren Rotationsanregungen:



- Kunstname Pomeron
- Kein Austauschteilchen bekannt
- $\alpha_{\text{ip}}(t) = 1.08 + 0.25t$
- Elastische Streuung: Vakuum-QZ!

Was ist die QCD Beschreibung?
(quarks / gluonen)



$$\alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t$$

$$\sigma_{\text{tot}} \sim s^{\alpha(0)-1}$$

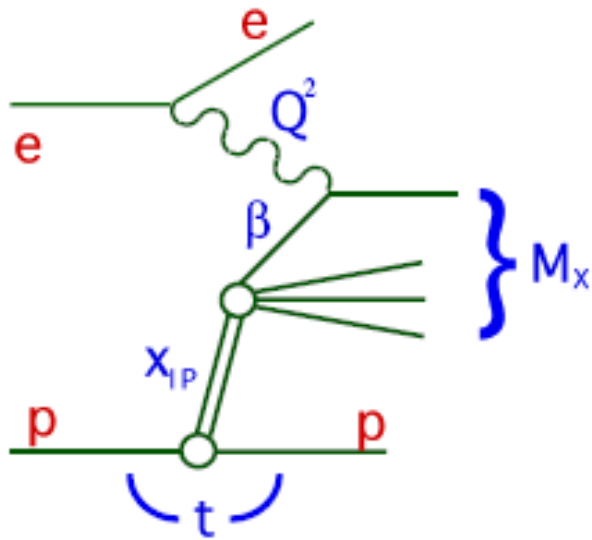
$E_{\text{CM}} > 20 \text{ GeV}$: Pomeron

Diffraction in tiefinelastischer Streuung (DIS) bei HERA

Diffraktive DIS: Kinematik

Tiefinelastische Streuung mit elastisch gestreutem Proton ...

Vorteil HERA: Punktförmiges Photon als Sonde in DIS



Q^2, x : Standard DIS Variablen $y = Q^2/sx$

x_{IP} : Impulsanteil des diffraktiven Austausches am Protonimpuls (typisch <0.05)

β : rel. Impulsanteil des am Photon streuenden Quarks, d.h. $x = x_{IP}\beta$

$t = (p - p')^2$: 4-Impulsübertrag am p Vertex

W : γp Scherpunktsenergie

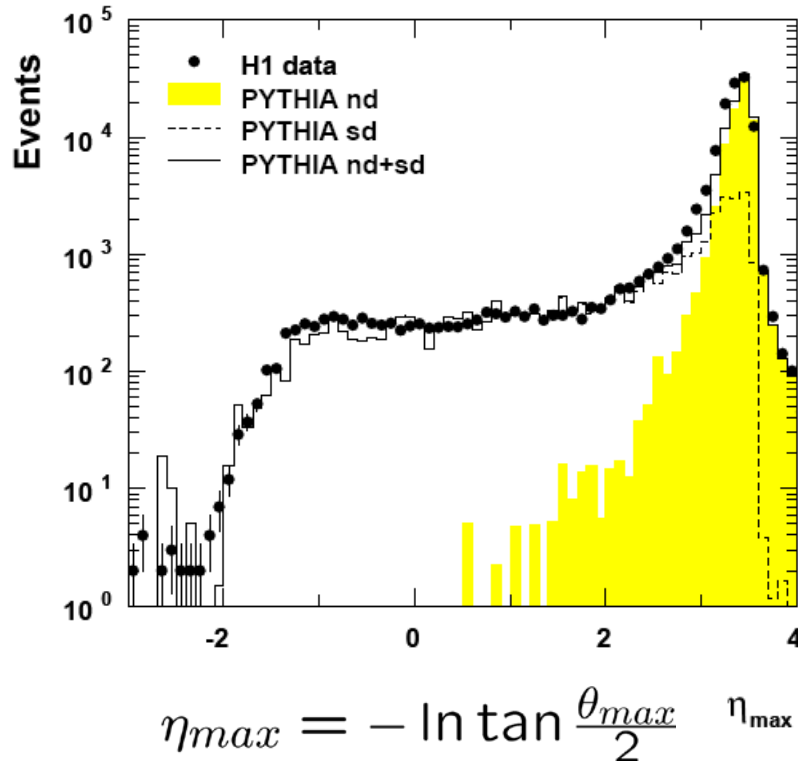
Diffraktive Strukturfunktion:

$$\frac{d^4\sigma^D}{dx_{IP} dt d\beta dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{\beta Q^4} \left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) F_2^{D(4)}(x_{IP}, t, \beta, Q^2)$$

Diffraktive DIS bei HERA: Messe Struktur des diffraktiven Austausches

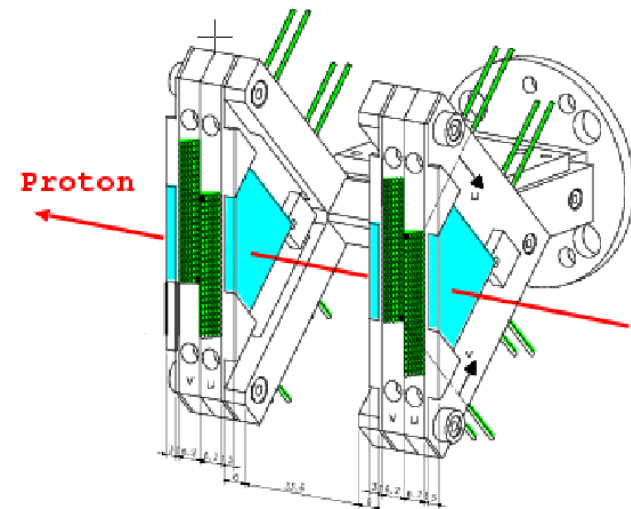
Diffraktive DIS bei HERA

Die η_{\max} Verteilung



Überschuss über nicht-diffraktivem Anteil

Vorwärts Proton Spektrometer: Direkte Messung!

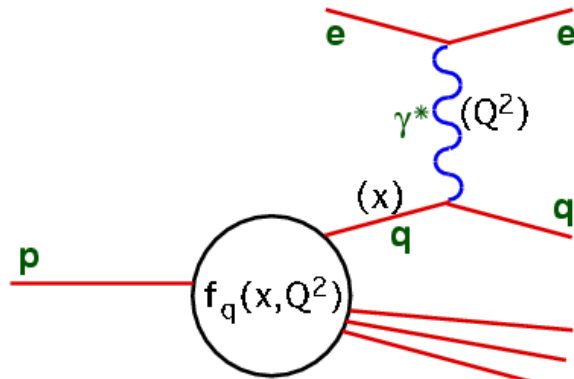


- 'Roman Pot' Detektoren
- $z \sim 100\text{m}$; sehr dicht am Strahl
- Maschinen-Dipole als Spektrometer

Messe volle p-Kinematik!

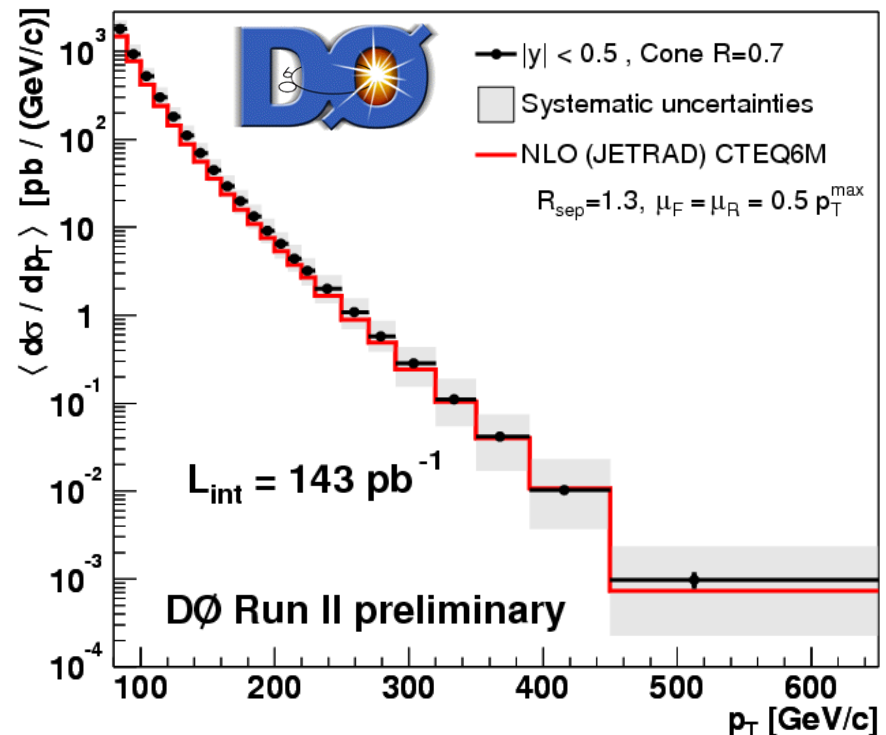
QCD Faktorisierung in DIS

Standard DIS



Faktorisierungstheorem:

$$\sigma(x, Q^2) \gamma^* p \rightarrow X \sim f(x, Q^2) \otimes \hat{\sigma}$$



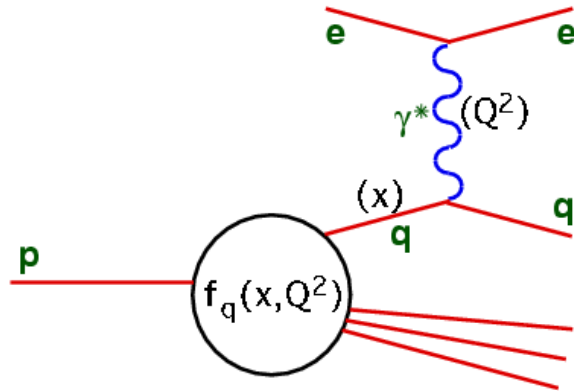
z.B.: Erfolgreiche Vorhersage des
TEVATRON Jet

Wirkungsquerschnittes basierend
auf HERA Partondichten!

→ **Partondichten sind universell!**

QCD Faktorisierung in Diffraktiver DIS

Standard DIS

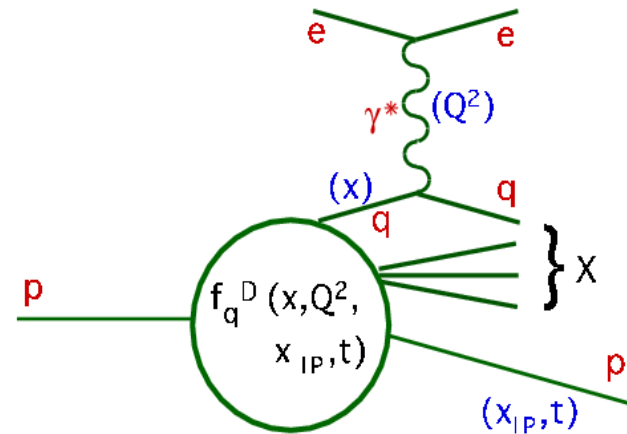


Faktorisierungstheorem:

$$\sigma(x, Q^2) \gamma^* p \rightarrow X \sim f(x, Q^2) \otimes \hat{\sigma}$$

Standard DIS → Protonstruktur!
Diffraktive DIS → Diffraktive Struktur!

Diffraktive DIS



Faktorisierungstheorem (Collins '97):

$$\frac{d^2 \sigma(x, Q^2, x_{IP}, t) \gamma^* p \rightarrow p' X}{dx_{IP} dt} \sim f^D(x, Q^2, x_{IP}, t) \otimes \hat{\sigma}$$

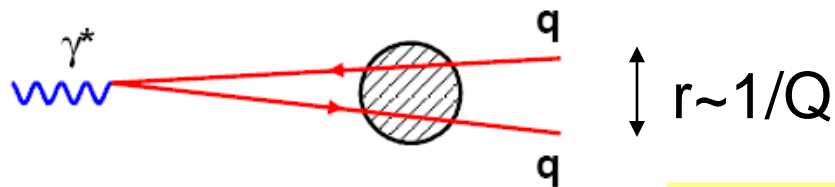
$f_i^D(x, Q^2, x_{IP}, t)$: diffraktive PDF:
Wahrsch. an Parton i zu streuen
mit Zusatzbed. dass p intakt bleibt

(Diffraktive) Partondichten universell: Final-State Vorhersagen (z.B. Jets)

NB: Faktorisierung in Diffraktion bewiesen NUR in DIS!

Alternative Sichtweise: DIS im Proton-Ruhesystem

Photon γ^* fluktuiert in partonische Zustände qq, qqg, \dots
lange vor der Wechselwirkung mit dem Proton:



$$\tau_\gamma \sim 1/x \quad L_\gamma \sim 50 \text{ fm!}$$

$$\sigma^{\gamma p}(x, Q^2) \sim \int d^2r \int d\alpha |\Psi(\alpha, r)|^2 \hat{\sigma}(x, r^2)$$

Dipol-Wellenfunktion

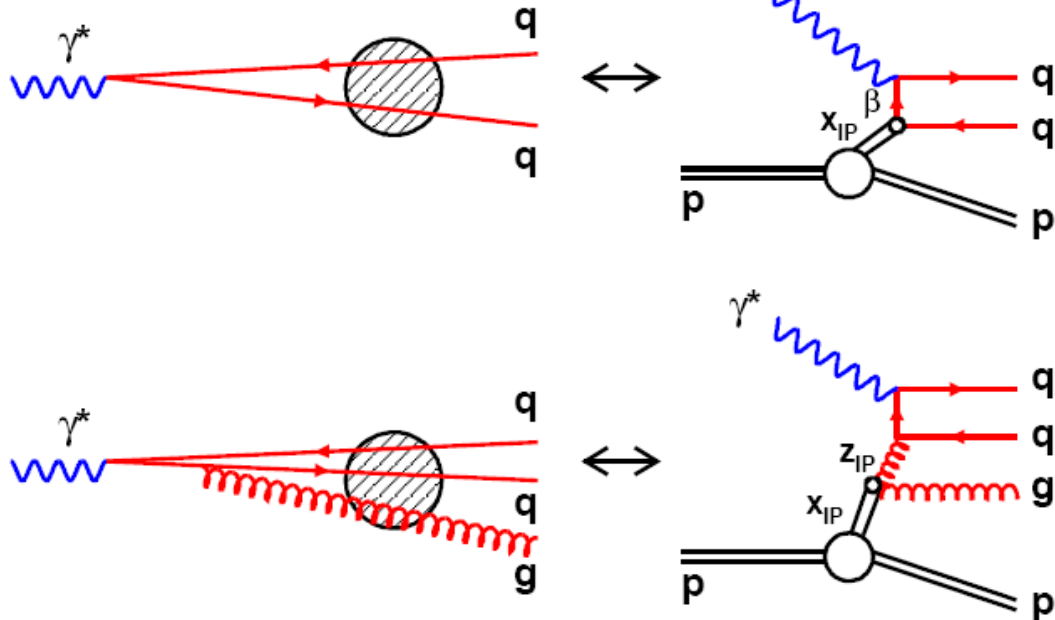
Dipol-p WQ

- DIS ist der totale WQ eines qq Farbdipoles mit dem Proton bei hohen Energien
- Die Grösse des Dipols kann über Q^2 gesteuert werden ('selbstgemachtes Hadron')
- Für kleine Dipole (grosse Q^2): Störungstheorie anwendbar!

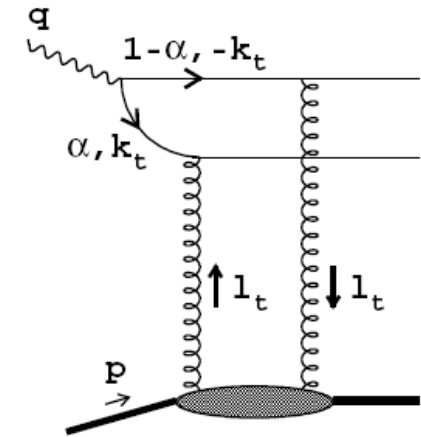
Diffraction im Proton-Ruhesystem

Proton-Ruhesystem

'Infinite momentum frame'



Diffraktion: Der Anteil des totalen WQ bei dem der Dipol als Farb-Singlet aus der WW hervorgeht!



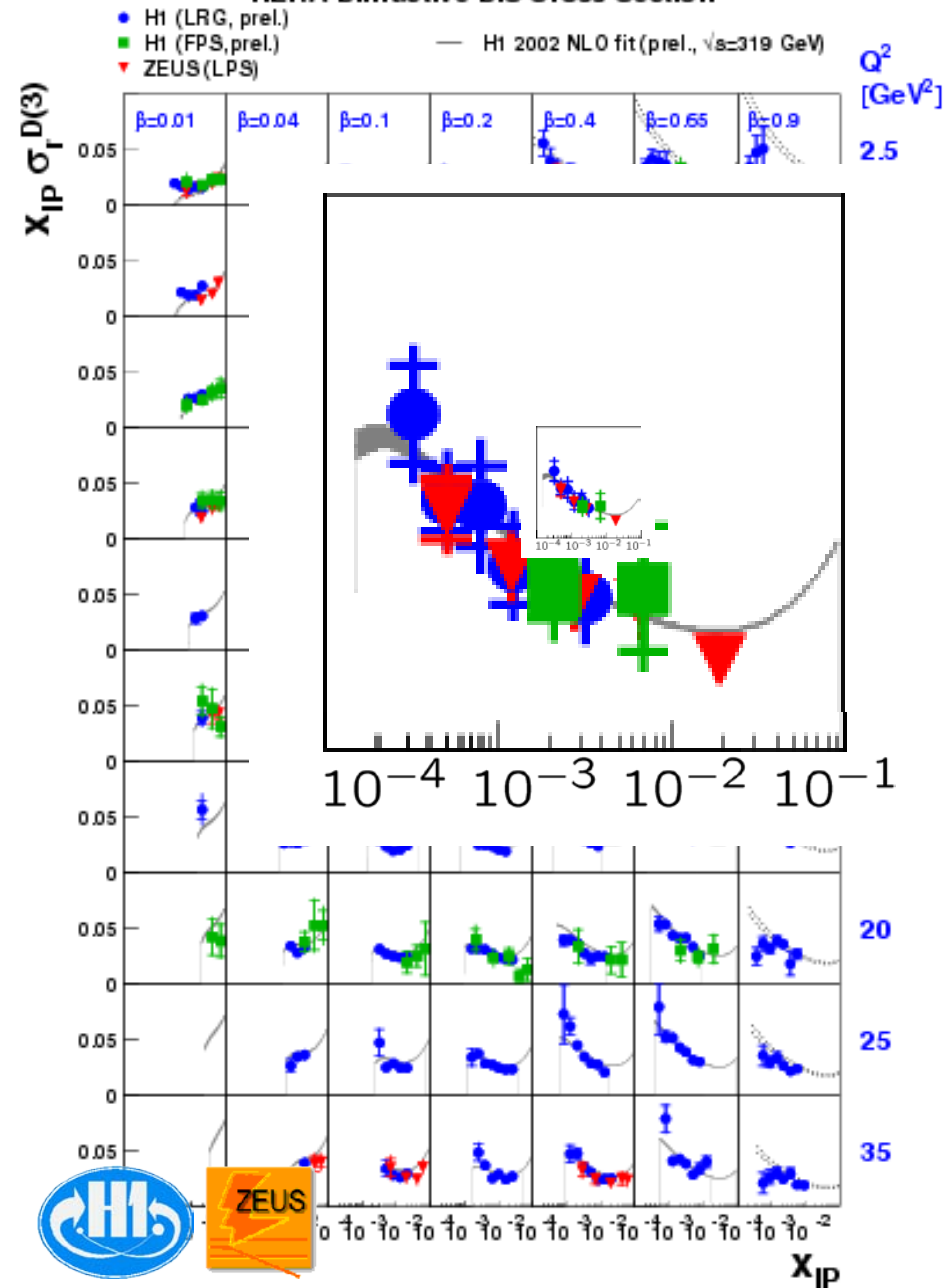
'Berechnung' des Dipol-Wirkungsquerschnittes:

- a) Perturbativ: Einfachste Partonkonfiguration: 2-Gluon Austausch
- b) Nicht-perturbativ: Farbneutralisierung durch das weiche Gluonfeld des Protons

Die 'Wahrheit' liegt zwischen diesen Extremen ...

HERA Diffractive DIS Cross Section

F₂^D Messungen



3-Dimensionale Strukturfunktion
 $F_2^{D(3)}$ (Ausschnitt)
 → Präzise Messungen

Gesamter kinematischer Bereich:
 $1.5 < Q^2 < 2000 \text{ GeV}^2$
 $10^{-2} < \beta < 0.9$
 $4 \cdot 10^{-5} < x_{IP} < 0.05$

Gute Übereinstimmung zwischen
 'Roman Pot' und 'Rapidity Gap'
 Messungen!

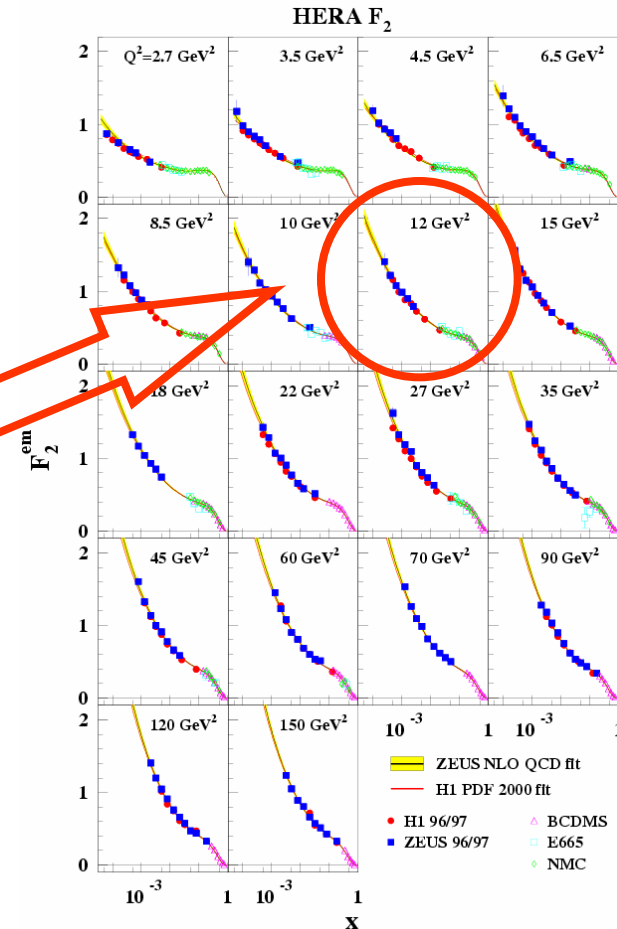
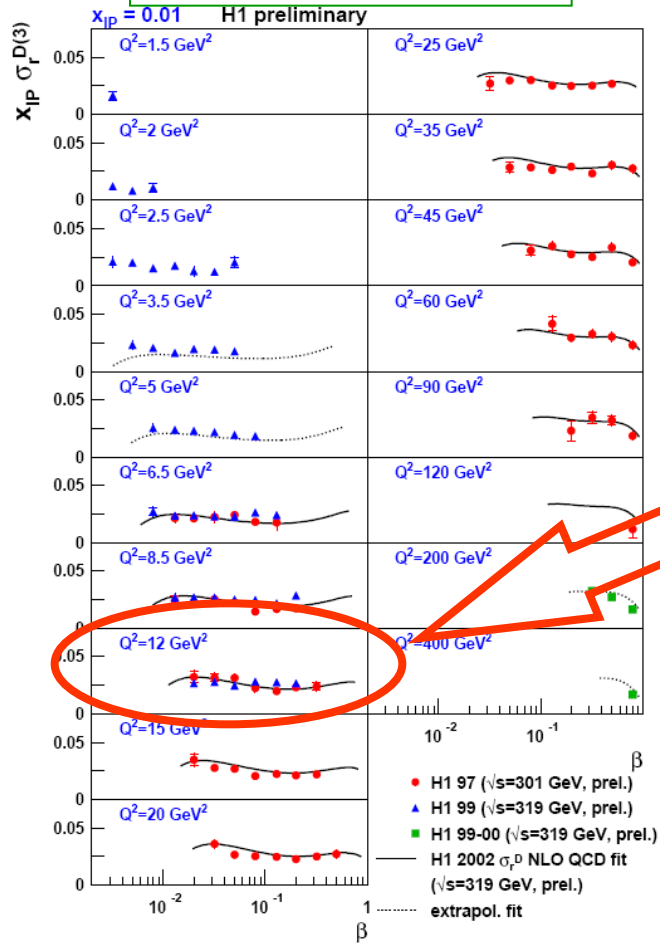
Charakteristischer Anstieg mit
 $s_{\gamma^*p} = W^2 \gg 1/x_{IP}$
 Aus Fit: $\alpha_{IP}(0) \sim 1.2 > 1.08$

Vergleich F_2^D mit F_2 : β -Abhängigkeit

Diffraktiv vs β :



Proton vs x :



Nur schwache β Abhängigkeit ...

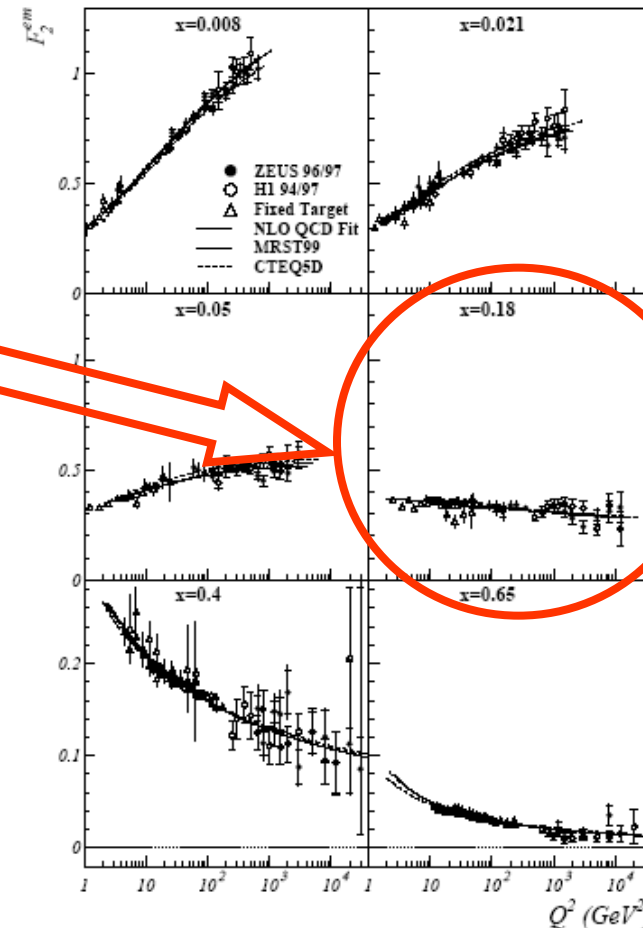
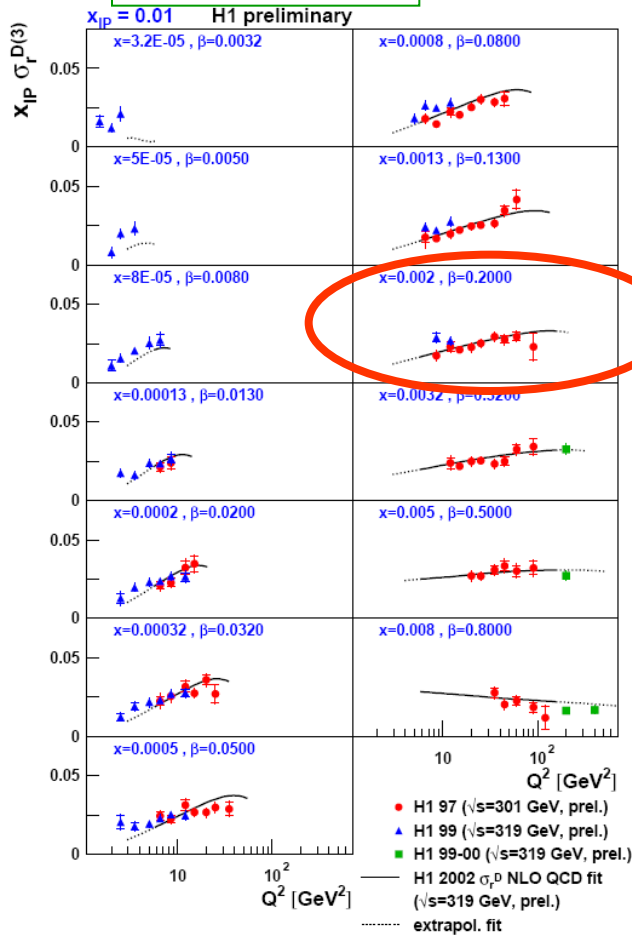
$$F_2^D \sim \sum_i e_i^2 (q_i^D + \bar{q}_i^D)$$

Vergleich F_2^D mit F_2 : Q^2 -Abhängigkeit

Diffraktiv:



Proton:



Positive Skalenverletzungen bis höchste β

$$\frac{dF_2^D}{d \log Q^2} \sim \alpha_s \otimes g^D$$

QCD fit und Diffraktive Partondichten

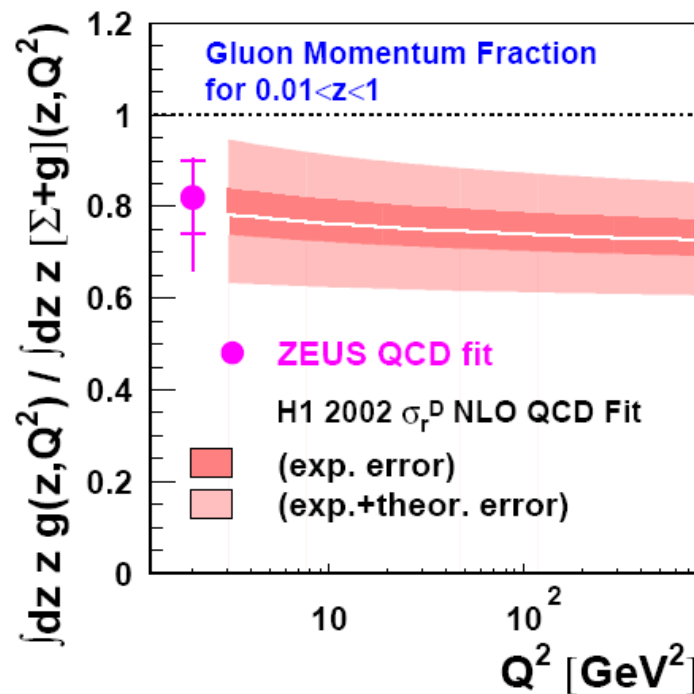
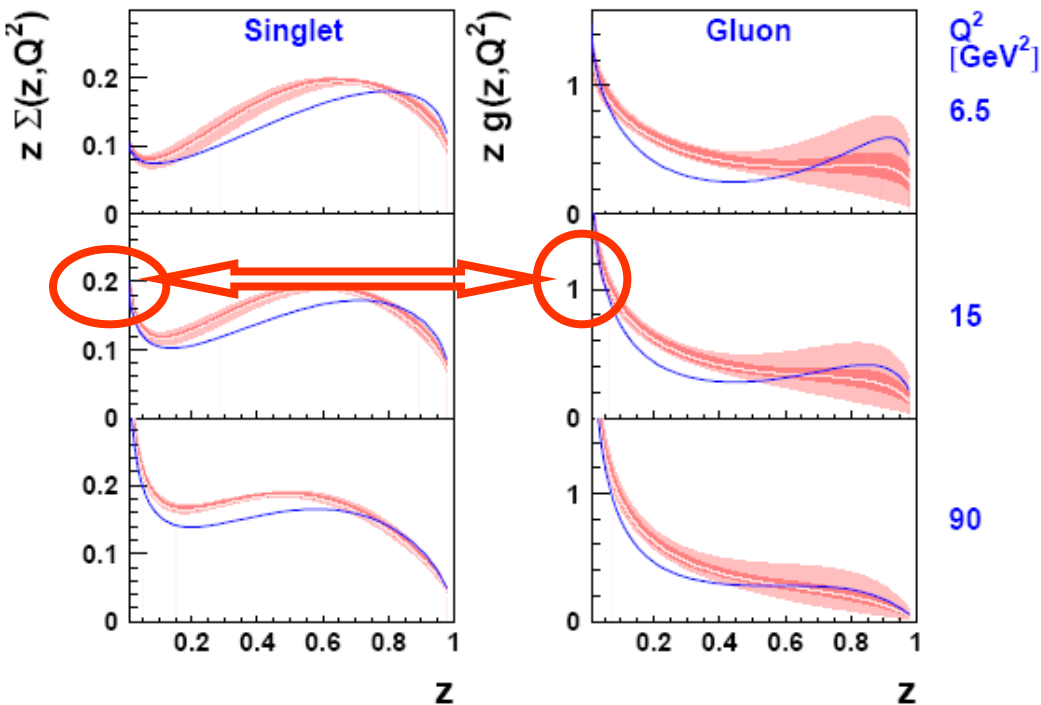
Diffraktive pdf's extrahiert aus
DGLAP NLO QCD Anpassung:



Gluon-dominiert!

H1 2002 σ_r^D NLO QCD Fit

H1 preliminary



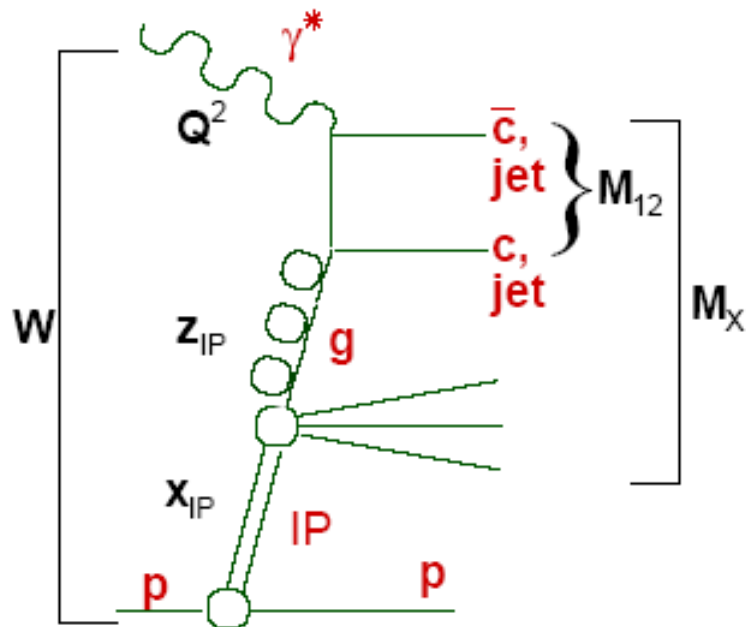
Gluonen tragen 75% 15%
des Impulses (bei $Q^2 \sim 10$)!

Diffraktive Endzustände: Jets, Charm

Diffraktive Dijets und Charm in DIS

Test der QCD Faktorisierung:

Beschreiben Vorhersagen basierend auf diffraktiven pdf's auch Endzustände in diffraktiver DIS, z.B. Jets, Charm?



W : γ^*p Schwerpunktsenergie

M_X : Masse des diffraktiv produzierten Systems

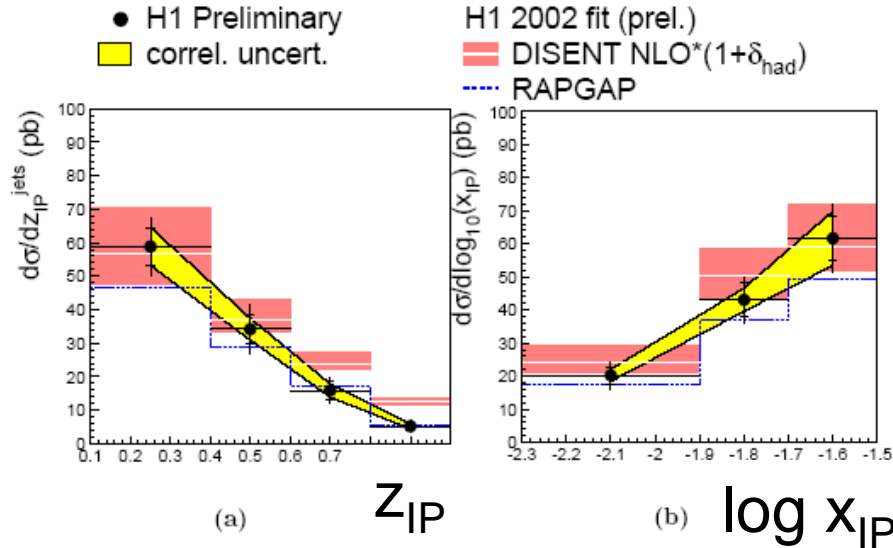
M_{12} : inv. Masse der beiden Jets

z_{IP} : Impulsbruchteil des diffraktiven Austausches der in den harten Prozess eingeht

Hohe Sensitivität auf diffraktive Gluondichte!

Diffraktive Dijets in DIS

H1 Diffractive DIS Dijets



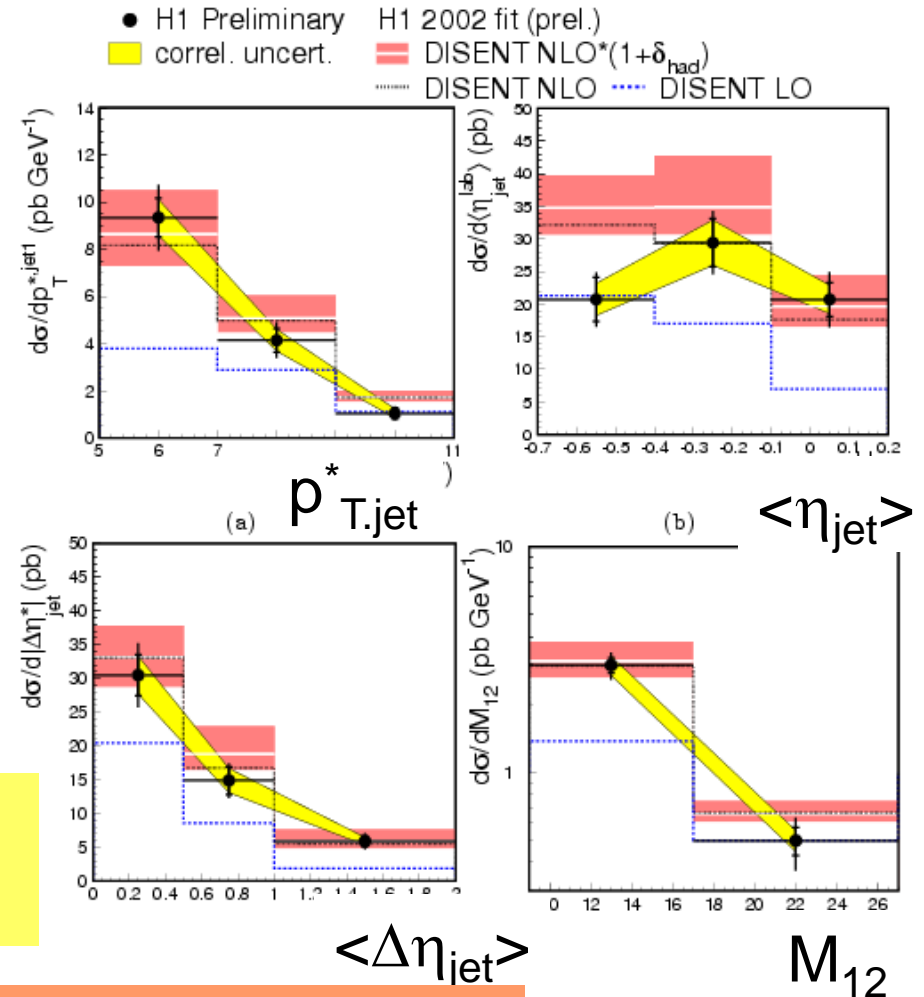
$$4 < Q^2 < 80 \text{ GeV}^2$$

$$x_{\text{IP}} < 0.03$$

$$E_{\text{T,jet}}^*(1,2) > 5(4) \text{ GeV}$$

NLO Rechnung basierend
auf H1 diffraktiven pdf's

H1 Diffractive DIS Dijets

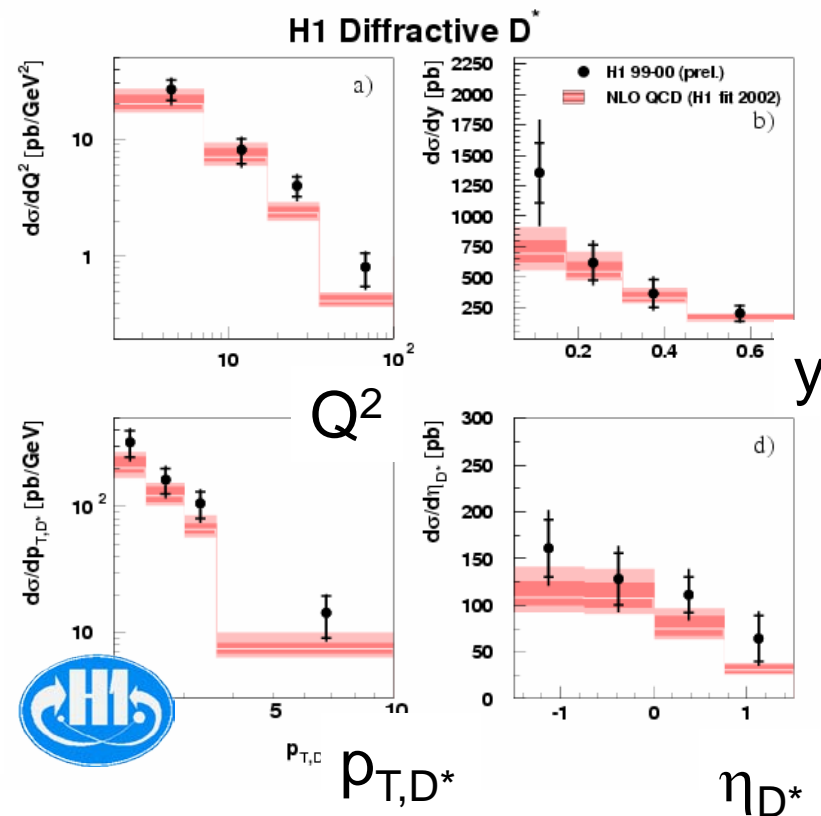
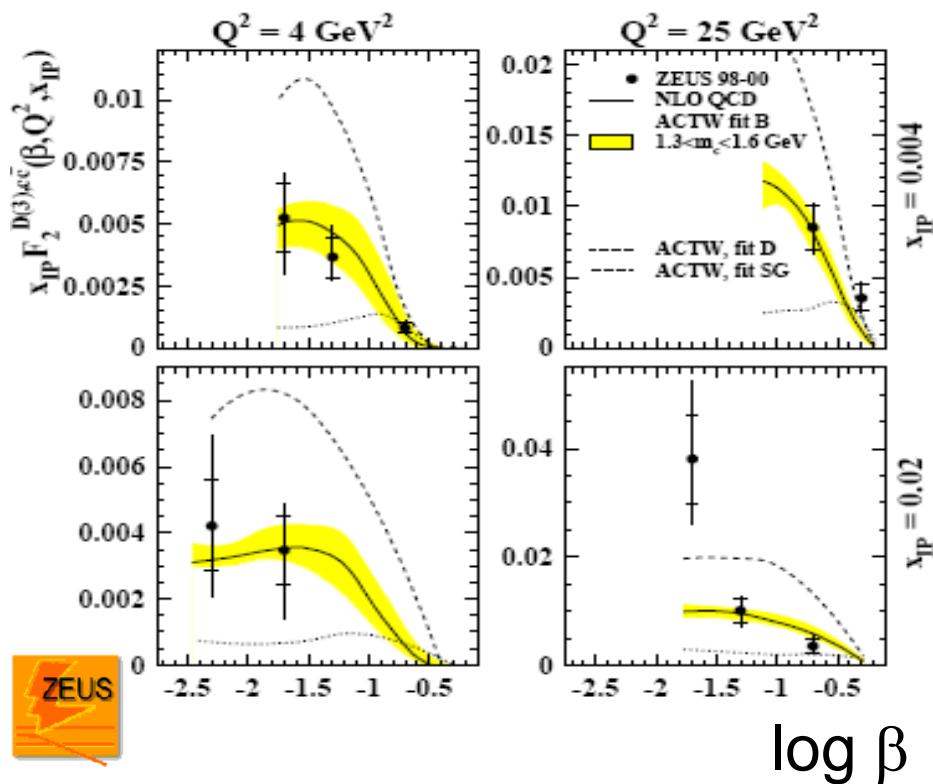


Konsistent mit QCD Faktorisierung!

Diffraktive Charmproduktion in DIS

Charm-Strukturfunktion $F_2^{D,c}$

D^* Wirkungsquerschnitt

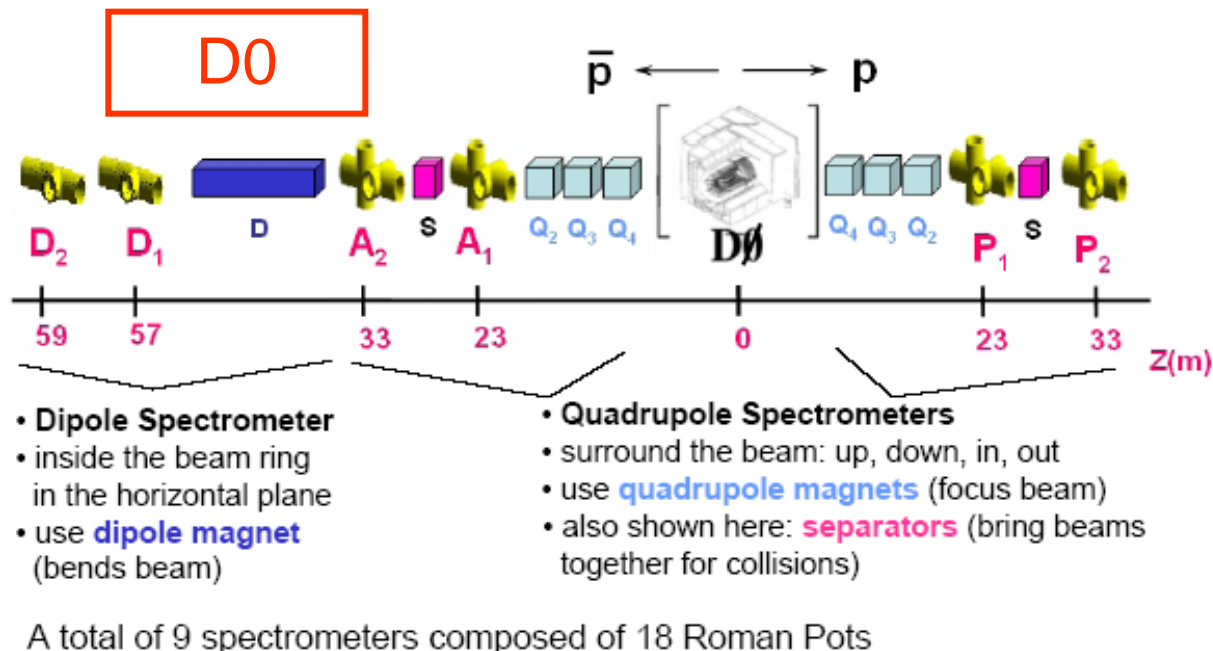
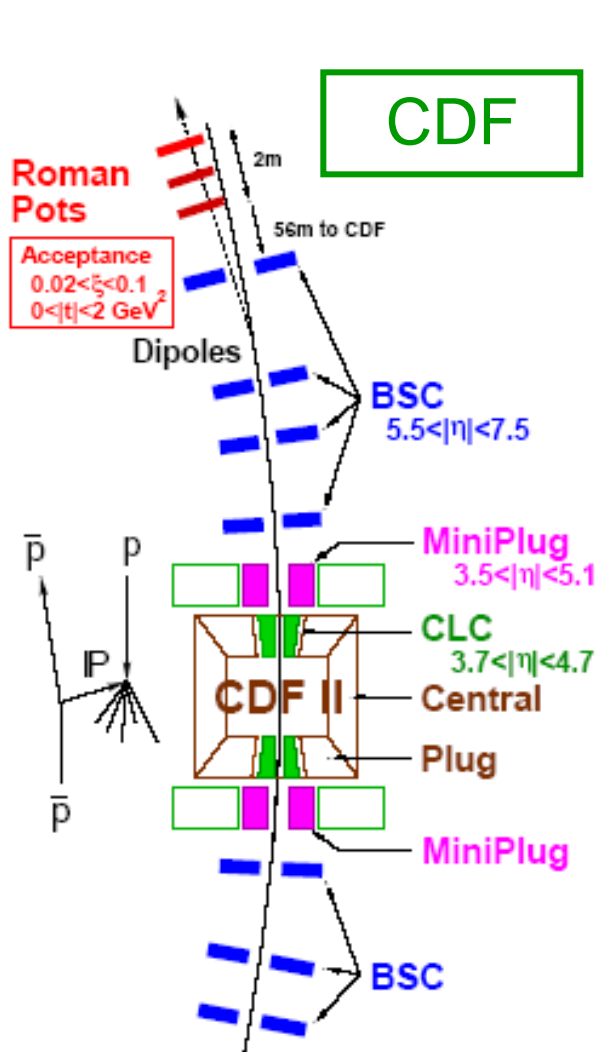


NLO Rechnungen basierend auf diffraktiven pdf's

Konsistent mit QCD Faktorisierung!

Diffraktion am Tevatron

'Roman Pots' am Tevatron Run 2



D0: Erstmals Roman Pots für Run 2

CDF: Roman Pots wie Run I
Neu: 'Beam Shower Counters' (BSC) und 'MiniPlug' Calorimeter für größere Akzeptanz: $5.1 < \eta < 7.5$



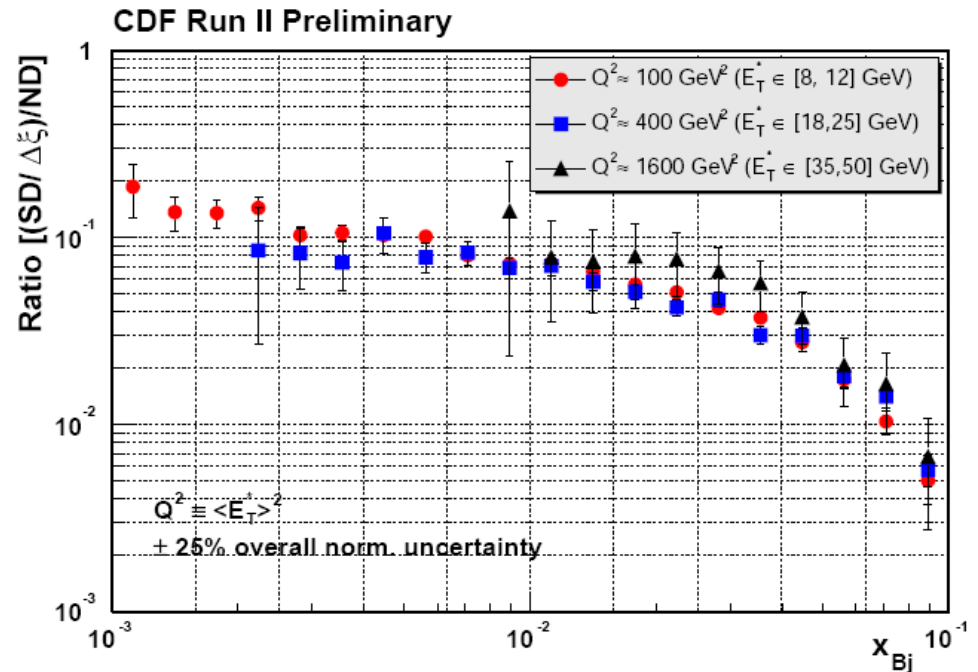
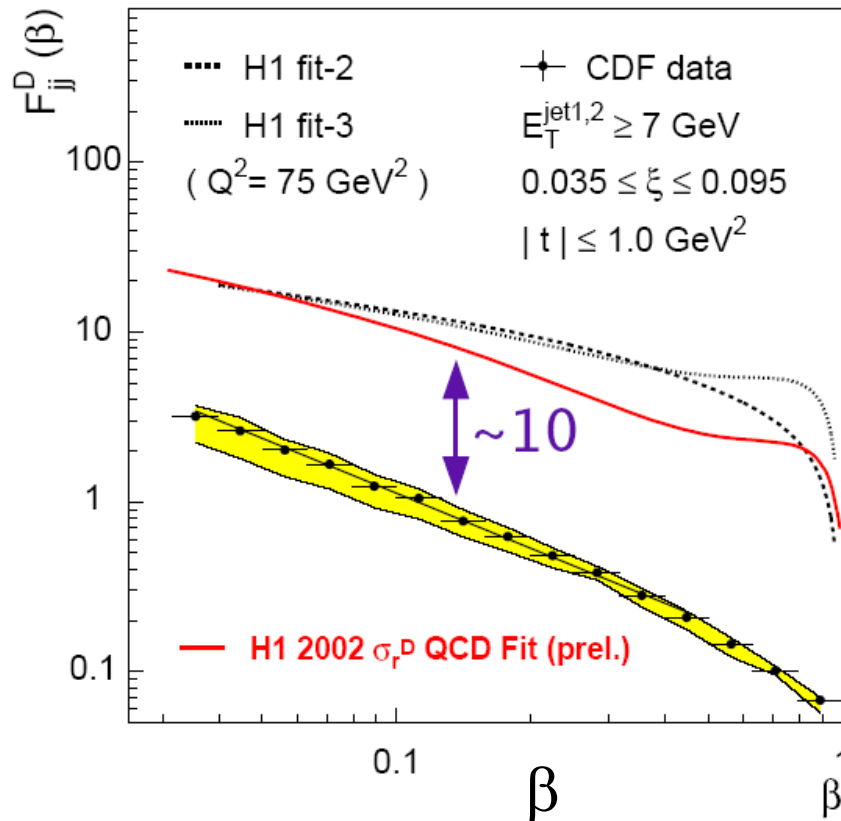
Diffraktive Dijets am TEVATRON

$$\bar{p}p \rightarrow \bar{p} + \text{jet} + \text{jet} + X$$

Effektive Strukturfunktion F_{jj}^D

$$F_{jj}^D(\beta, p_T^2) = \frac{4}{9} [q(\beta, p_T^2) + \bar{q}(\beta, p_T^2)] + g(\beta, p_T^2)$$

Messung liegt Faktor ~ 10
Unter Vorhersage aus HERA
Diffraktiven pdf's!
→ Faktorisierung gebrochen!



• Mit Run-2 Daten bestätigt!
• Keine E_T Abhängigkeit

Raten diffraktiver Prozesse

Verhältnis diffraktiv / nicht-diffraktiv:

Diffrautive W production $q\bar{q} \rightarrow W, gq \rightarrow Wq$

$$R_W[\frac{SD}{ND}] = [1.15 \pm 0.51(stat) \pm 0.20(syst)]\%$$

$(p_T^e > 20 \text{ GeV}/c, |\eta^e| < 1.1, E_T > 20 \text{ GeV}, \xi < 0.1)$

Diffrautive dijet production $gg \rightarrow gg, qg \rightarrow qg$

$$R_{jj}[\frac{SD}{ND}] = [0.75 \pm 0.05(stat) \pm 0.09(syst)]\%$$

$(E_T^{jet} > 20 \text{ GeV}, 1.8 < |\eta^{jet}| < 3.5, \eta_1 \eta_2 > 0, \xi < 0.1)$

Diffrautive $b\bar{b}$ production $gg \rightarrow b\bar{b}, q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}$

$$R_{b\bar{b}}[\frac{SD}{ND}] = [0.62 \pm 0.19(stat) \pm 0.16(syst)]\%$$

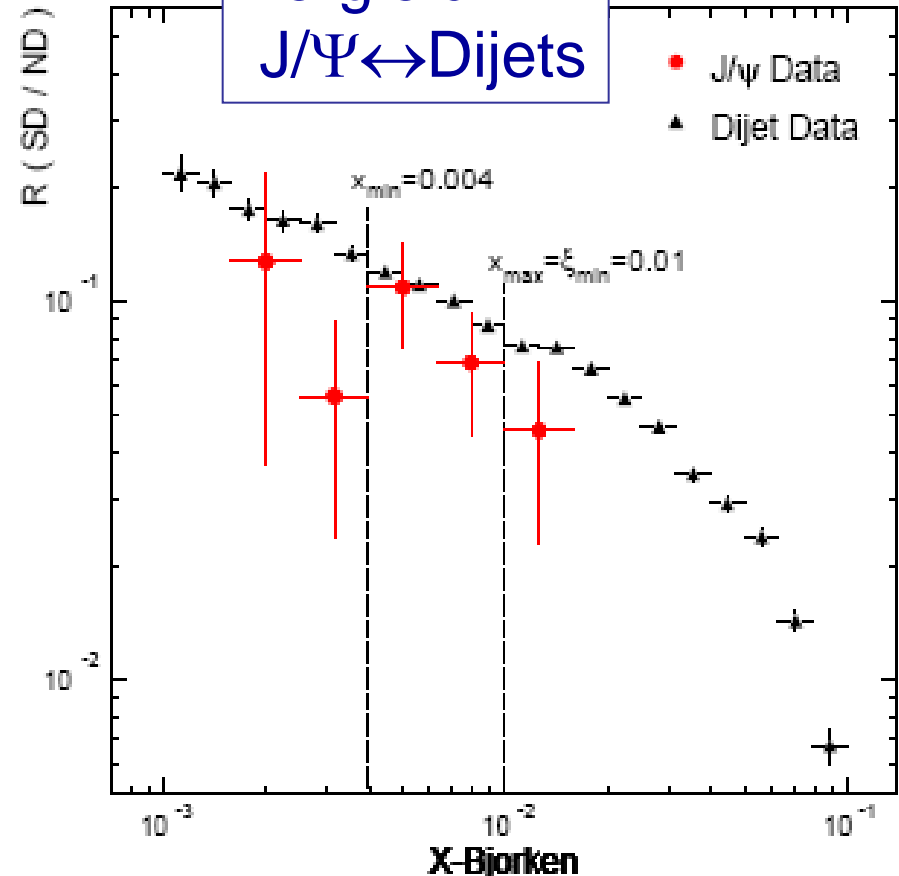
$(p_T^e > 9.5 \text{ GeV}/c, |\eta^e| < 1.1, \xi < 0.1)$

Diffrautive J/ψ production $gg \rightarrow J/\psi(g)$

$$R_{J/\psi}[\frac{SD}{ND}] = [1.45 \pm 0.25(stat \oplus syst)]\%$$

$(p_T^\mu > 2 \text{ GeV}/c, |\eta^\mu| < 1.0, \xi < 0.1)$

Vergleich
 $J/\psi \leftrightarrow$ Dijets



Verhältnisse Diffraktiv / Nicht-Diffraktiv $\sim 1\%$ (HERA: 5-10%)!



Diffraktive W^s und Z Bosonen

Sample	Gap Fraction (%) Diffractive/All (*)	Probability that Background would fluctuate to the Data in the (0,0) bin for W and Z Data	
W cent	$1.08 + 0.19 - 0.17$	1×10^{-14}	7.7σ
W fwd	$0.64 + 0.18 - 0.16$	6×10^{-8}	5.3σ
W All	$0.89 + 0.20 - 0.19$	3×10^{-14}	7.5σ
Z	$1.44 + 0.62 - 0.54$	5×10^{-6}	4.4σ

**Diffraktiver Anteil
~1.0-1.5%**

Bisheriges Fazit zur Faktorisierung

- QCD-Faktorisierungstheorem in diffraktiver DIS
 - Diffraktive Partondichten bestimmt aus DGLAP NLO QCD Anpassung an F_2^D Daten
- Erfolgreiche Beschreibung von Endzuständen in diffraktiver DIS
 - Diffraktive Dijets
 - Diffraktive D^* Produktion

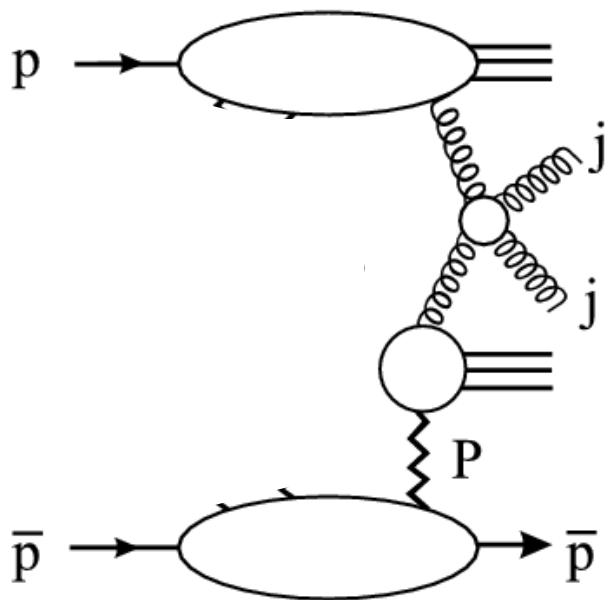
Faktorisierung erfolgreich in diffraktiver DIS!

- Vorhersage diffraktiver Raten am Tevatron scheitert!
 - HERA Diffraktive PDF's+Faktorisierung: viel zu hohe WQ!

Faktorisierung HERA vs TEVATRON gebrochen!

Ursachen und Modelle der Faktorisierungsbrechung

Hauptunterschied **TEVATRON** vs **DIS**:
2 vs **1** Hadronen im Anfangszustand!



$$\sigma \sim f_i^D(x, \mu^2, x_{\mathbb{P}}, t) \otimes \hat{\sigma}_i^{jj}$$

$$\sigma \sim f_i^D(x, \mu^2, x_{\mathbb{P}}, t) \otimes \hat{\sigma}_i^{jj} \otimes |S|^2$$

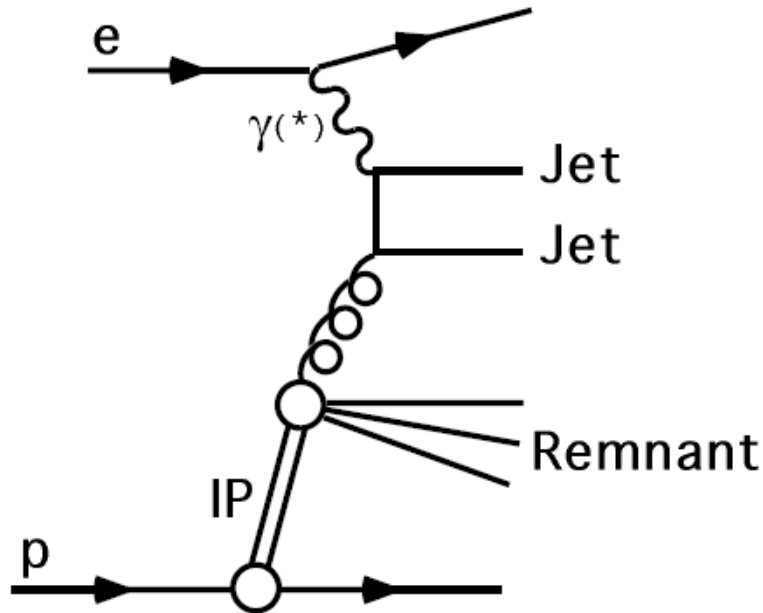
- Das Faktorisierungstheorem von Collins gilt **nicht** fuer Hadron-Hadron Streuung!
- **Unterdrückungsfaktor** $|s|^2$ beinhaltet weiche Physik! – Phänomenologische Modelle existieren ...

Zusätzliche Wechselwirkungen zwischen den Remnants können Rapidityslücke zerstören: 'Survival Probability' (Bjorken)

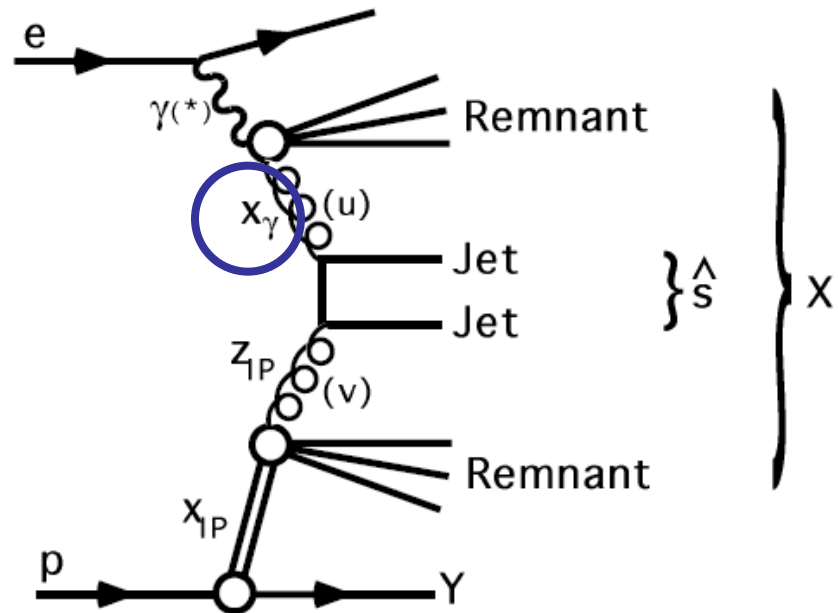
**Jets in Photoproduktion bei
HERA: Schlüssel zum Verständnis
der Faktorisierungsbruchung?**

Jets in Diffraktiver Photoproduktion ($Q^2 \sim 0$) bei HERA

DIS oder direkter Prozess



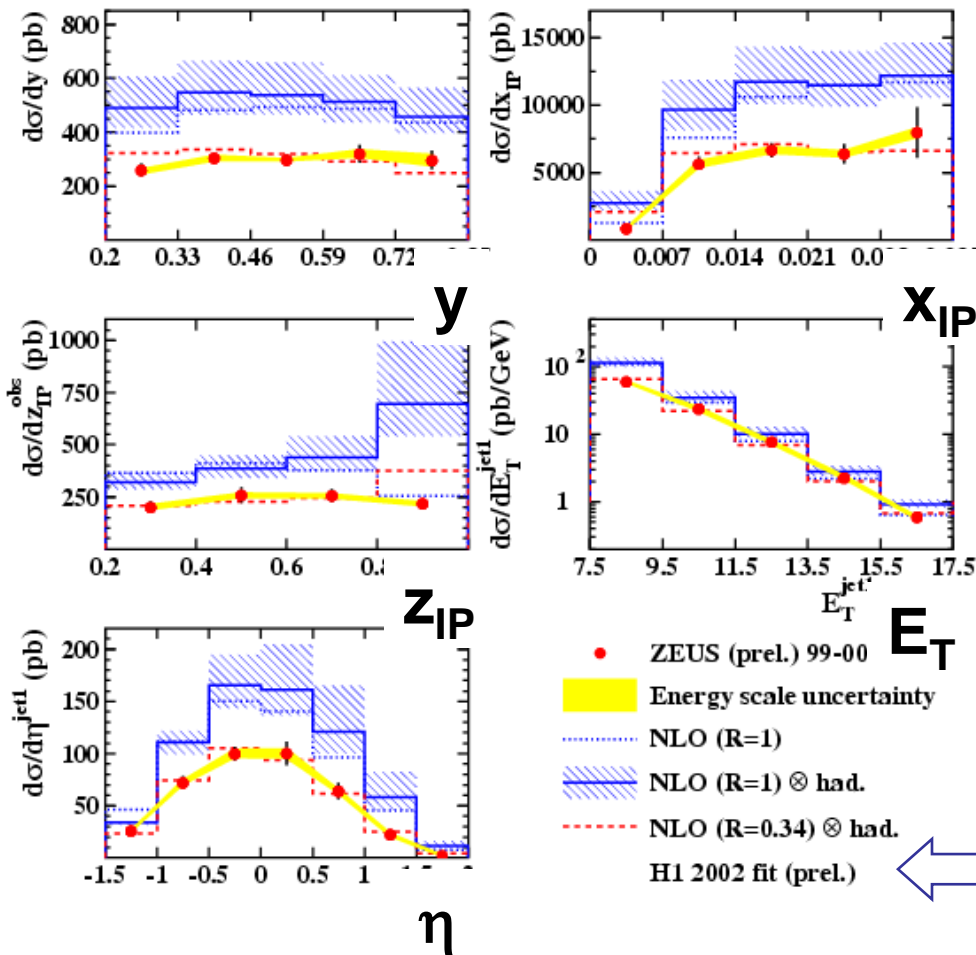
'resolved' Prozess



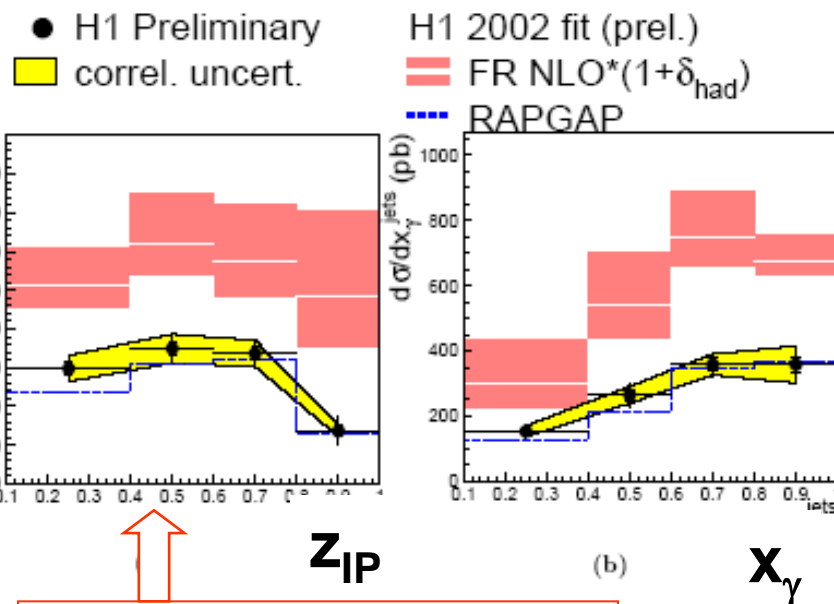
- Resolved γp ähnelt Proton-Proton
- Studium der Unterdrückung in einem Experiment!

$x_\gamma = 1$: direkt
 $x_\gamma < 1$: resolved

ZEUS



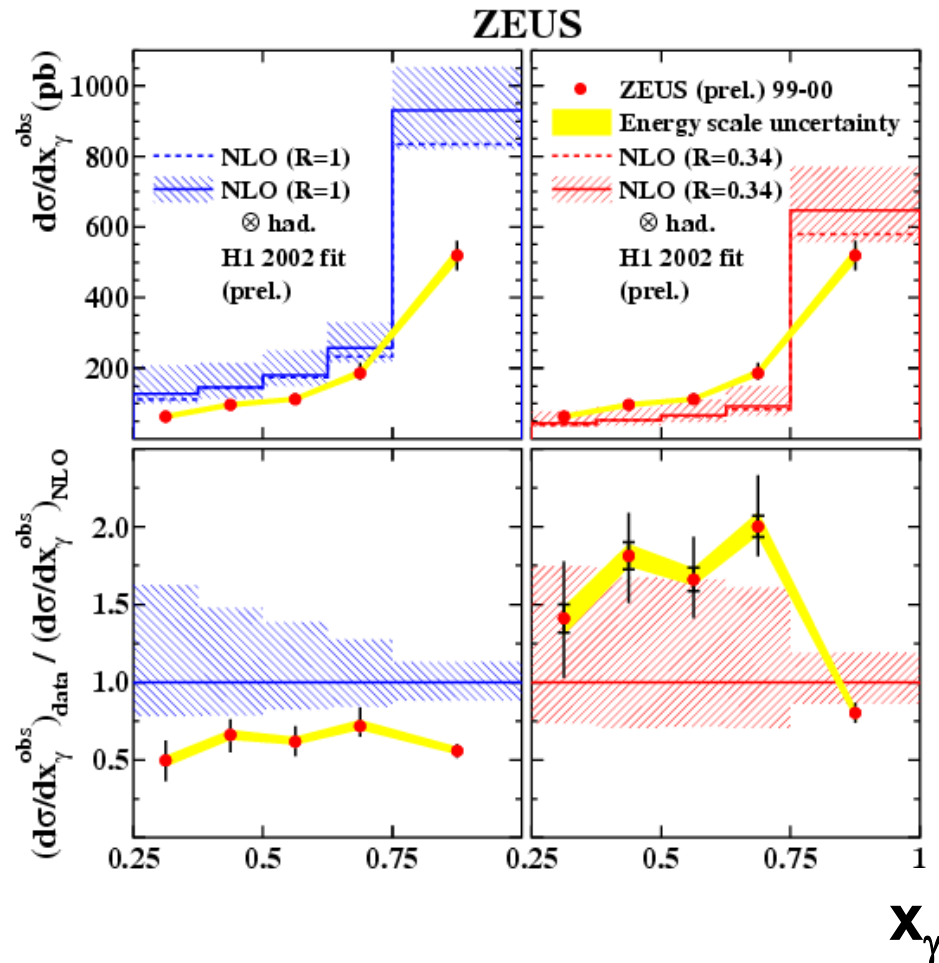
H1 Diffractive γp Dijets



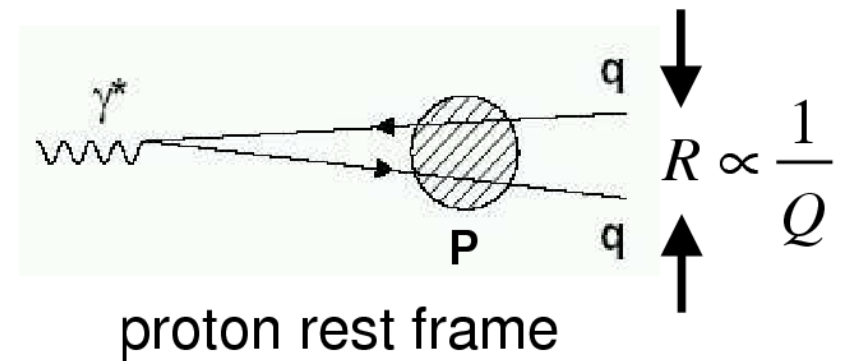
$Q^2 < 0.01 \text{ GeV}^2$; $x_{IP} < 0.03$
 $E_{T,1(2)} > 5(4) \text{ GeV}$

$Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$; $x_{IP} < 0.035$
 $E_{T,1(2)} > 7.5(6.5) \text{ GeV}$

Daten/NLO ~ 0.5 ! Faktorisierung gebrochen!



Wie ist die Abhängigkeit von x_γ ?
Sind auch direkte Prozesse unterdrückt?



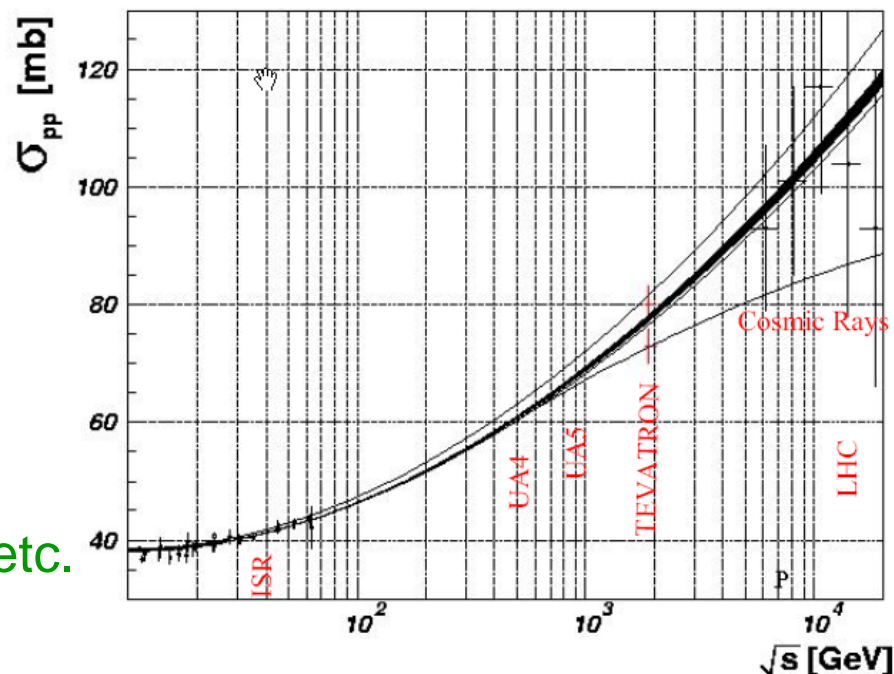
Hängt die Unterdrückung bei HERA nur von der 'Grösse' des Photons ab?

**Unerwartet: Daten bevorzugen Unterdrückung von resolved und direkt!
Bisher nicht verstanden ...**

Planungen am LHC

Diffraction am LHC: Motivation

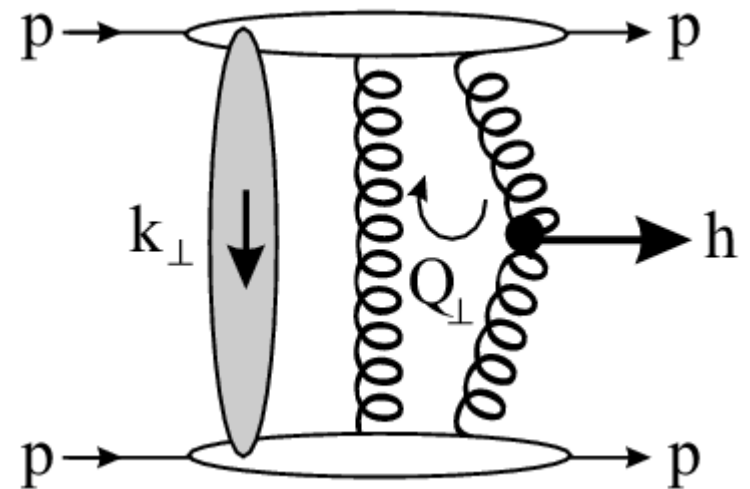
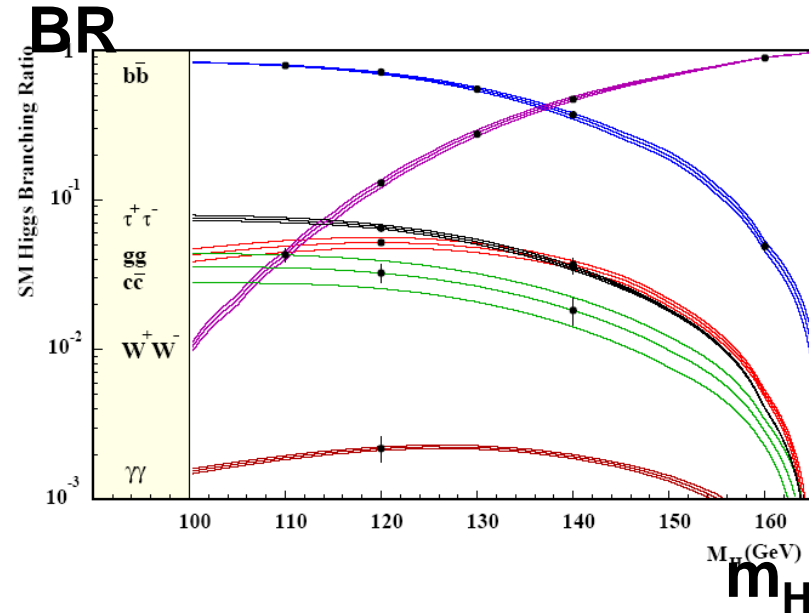
- Totaler Wirkungsquerschnitt
- Elastische Streuung
- Harte Diffraction
 - Diffraktive Strukturfunktion und Faktorisierungsbrechung
 - Diffraktive **Jets**, W^{\pm} , J/Ψ , b , t , γ etc.
- Diffraction als 'Gluonfabrik'
- Diffraktive Higgs-Produktion
- Physik bei kleinem x : Parton-Saturation, QCD-Dynamik etc.



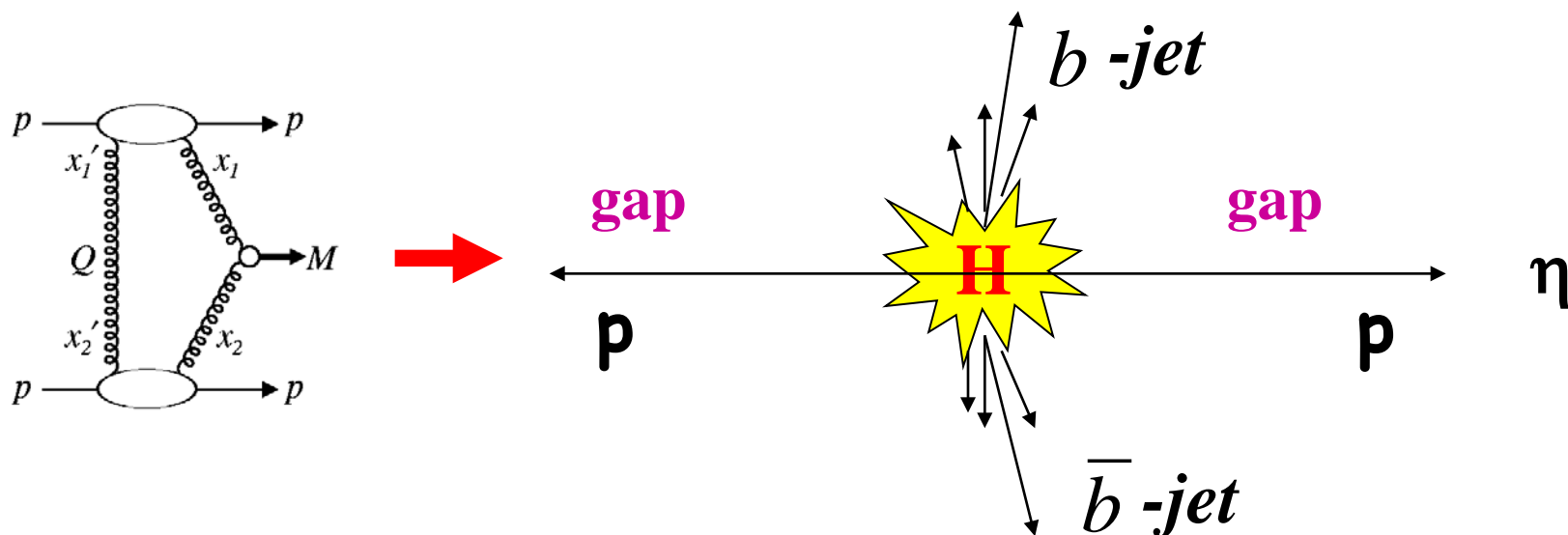
Viel Motivation diese Forschung am LHC fortzusetzen
(einzige Möglichkeit nach Ende von HERA/TEVATRON)

Diffraktive Higgs-Produktion

- Leichtes SM Higgs $m_H < 130$ GeV experimentell schwierig am LHC:
 - Dominanter Zerfall $H \rightarrow b\bar{b}$:
 - überwältigender QCD Untergrund
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$ Herausforderung ... (BR, S/B)
- Neue Möglichkeit: $pp \rightarrow p + H + p$ mit doppeltem Proton-Tag ('exclusive double pomeron exchange')
 - ($J_z=0$, P gerade) – Auswahlregel unterdrückt QCD Untergrund!
 - Higgsmasse aus Proton 4-Vektoren rekonstruierbar (fehlende Masse)

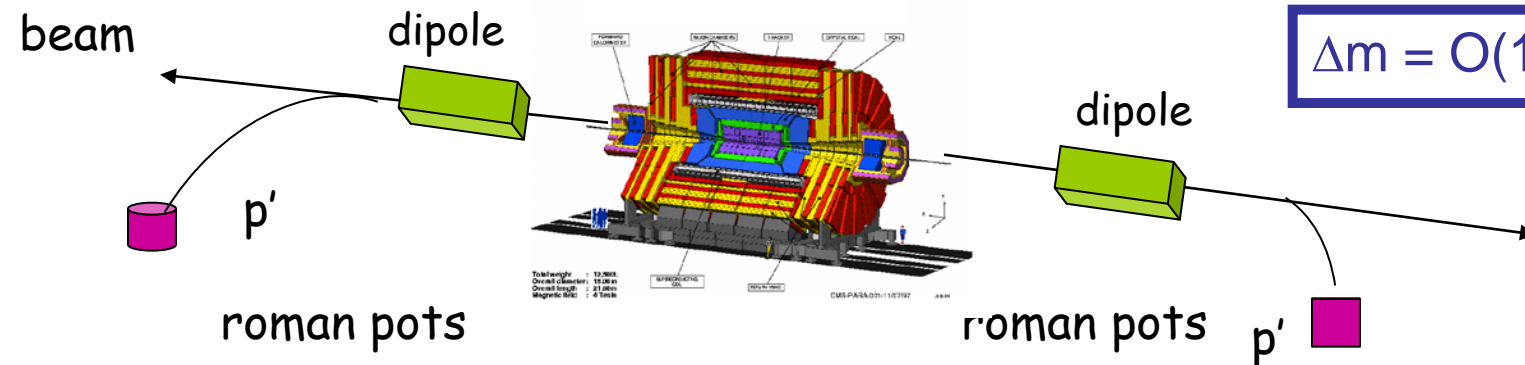


Diffraktive Higgs-Produktion

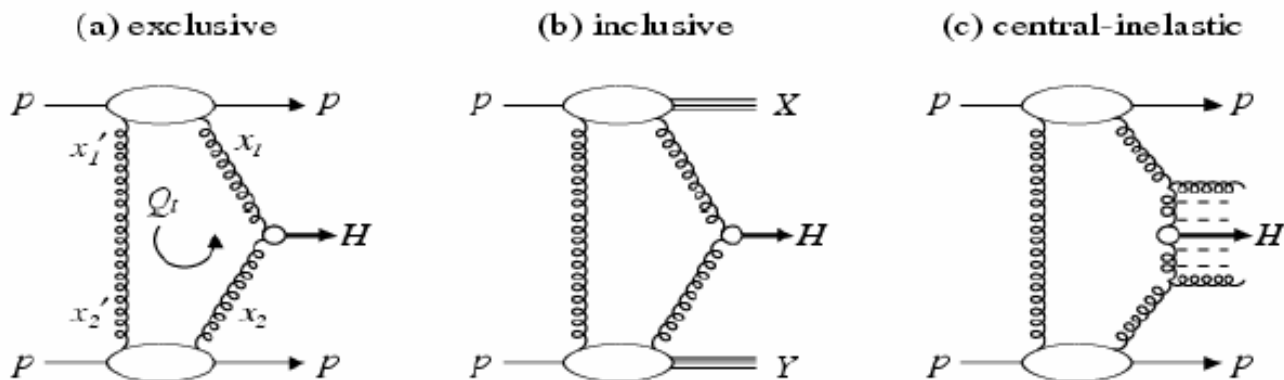


$$m_H^2 = (p_1 + p_2 - p'_1 - p'_2)^2$$

$$\Delta m = O(1.0 - 2.0) \text{ GeV}$$



Diffraktive Higgs-Produktion



Nicht-Exklusiver Kanal: Höherer Wirkungsquerschnitt, aber auch höherer Untergrund!

- Rechnungen von diversen Theorie-Gruppen
- Hauptproblem: Normierung, 'Survival probability'

Konsenz:

Exklusiver Kanal $pp \rightarrow p H p$: 3-10 fb

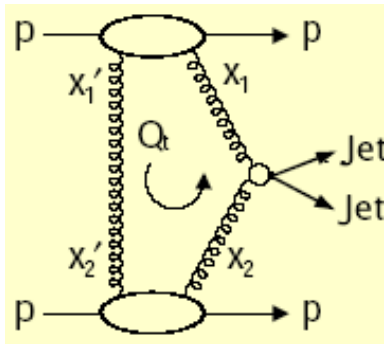
Inklusiver Kanal $pp \rightarrow p+X+H+Y+p$: 50-200 fb

Beispiel: $m_H = 120$ GeV, $L = 30 \text{ fb}^{-1}$, $\sigma = 3$ fb (Khoze, Martin, Ryskin)
 \rightarrow 90/10 Ereignisse vor/nach Schnitten, **Signal/Untergrund: 3!**

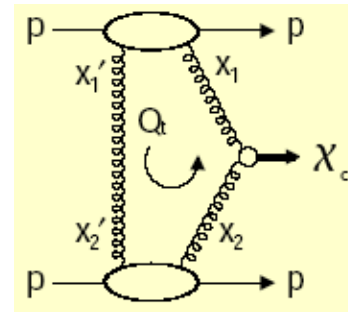


Kalibration der Modelle am Tevatron

Wirkungsquerschnitt faktorisiert \rightarrow Ersetze h durch jj oder $\chi_{c/b}$

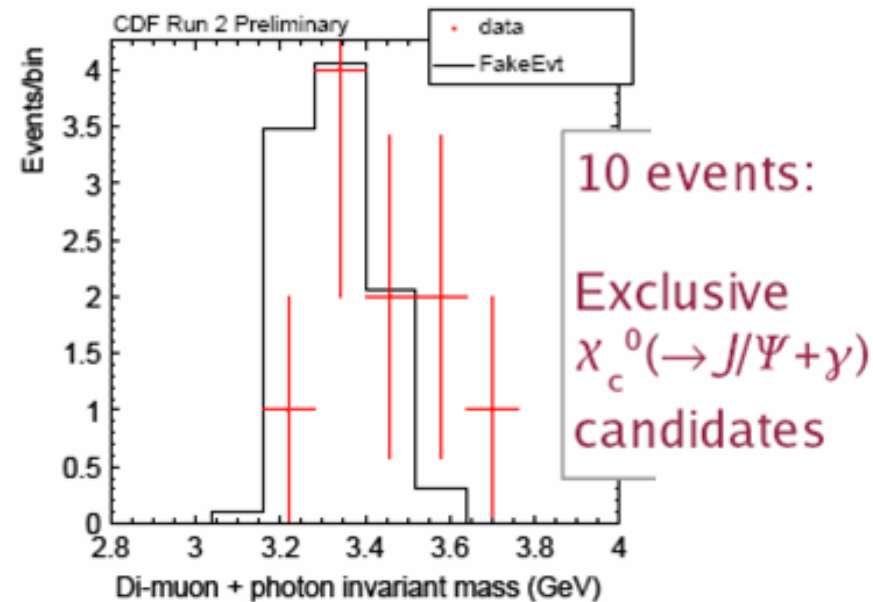
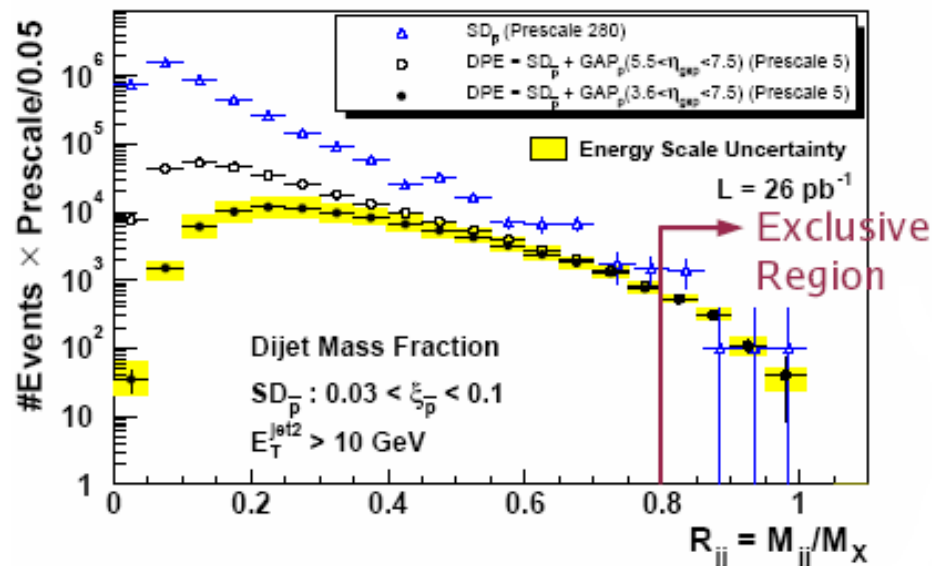


Exklusive Dijets



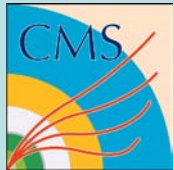
X_c Produktion

CDF Run II Preliminary



Konsistent mit Khoze, Martin, Ryskin Modell

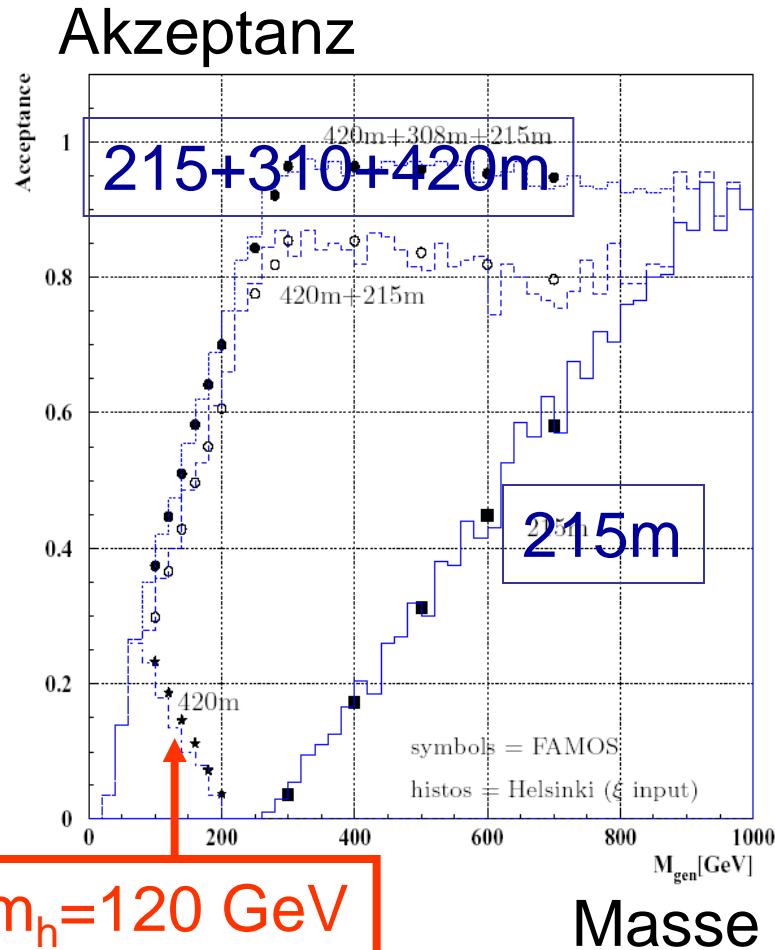
Mehr Daten nötig ...

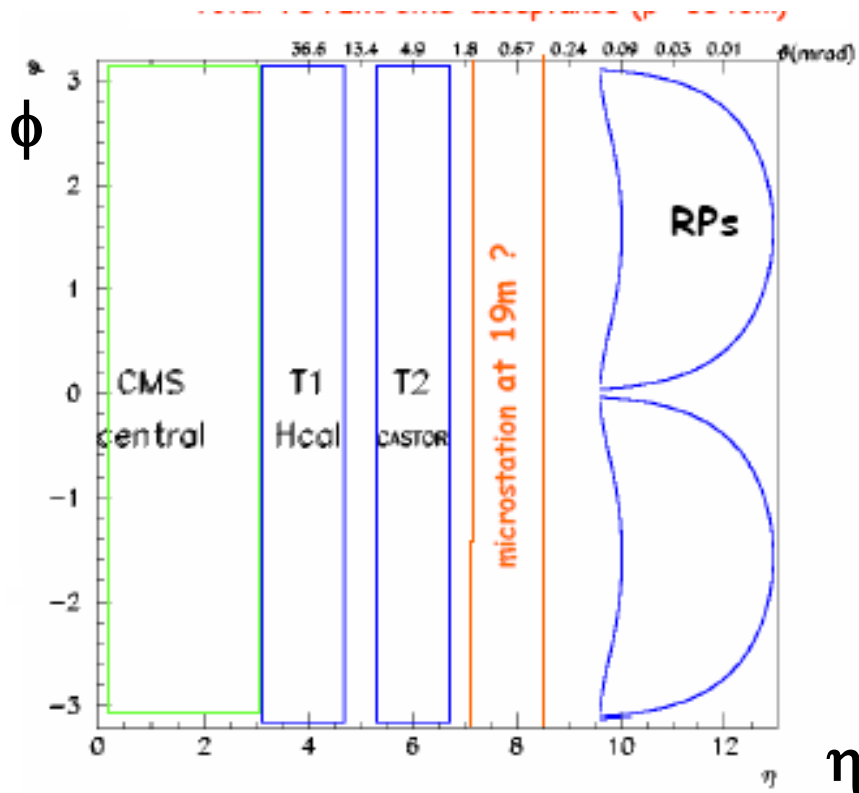


Planungen der LHC Experimente: CMS+TOTEM



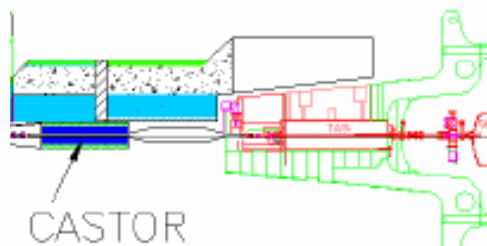
- Roman Pots bei $z=150$ und 215m
- Zusätzliche Detektoren bei grossen η
- A) Totaler WQ und elastische Streuung:
 - Datennahme mit spezieller LHC Optik für hohe Roman Pot Akzeptanz $\beta^*=1540\text{m}$, $L=10^{28}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (einige Tage!)
- B) Harte Diffraktion (incl. diff. Higgs)
 - Standard LHC Betrieb, $L>10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - geringere Akzeptanz für Roman Pots
 - Higgs: Pots bei $z=300$ / 400m nötig (kalter Ring)
 - L1 trigger nur fuer $z<200\text{m}$!
 - Selektion über Rapiditätslucke: viele WW pro Bunchcrossing!





$< \eta < 4.7$

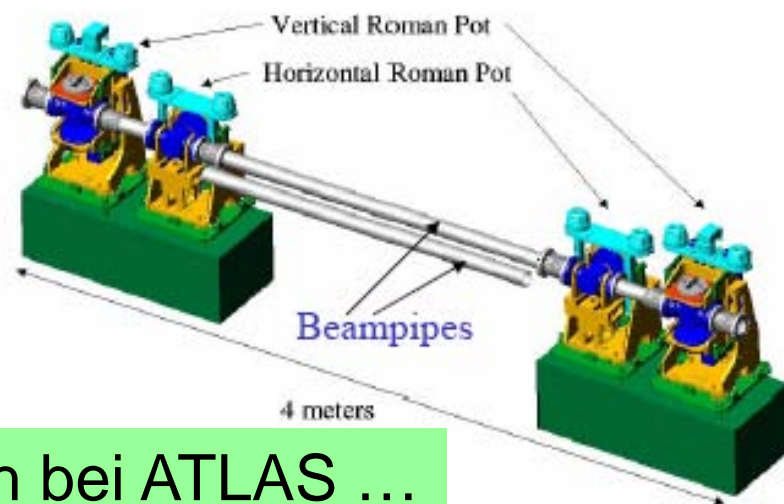
$< \eta < 6.5$



Roman Pot Prototyp



CMS+TOTEM: Detektor mit der bisher grössten Akzeptanz an Hadron-Collider! Grosse η wichtig für kleine x !



Ähnliche Planungen auch bei ATLAS ...

Zusammenfassung

Diffraktion bei HERA:

- Pomeron 'Intercept' $\alpha_{\text{IP}}(0) \sim 1.2 > 1.08!$ (kein 'weiches' Pomeron)
- Faktorisierungstheorem für diffraktive DIS
- Präzise F_2^D Daten, beschrieben durch diffraktive Partondichten
- Erfolgreiche Vorhersage von Endzuständen in DIS
- Faktorisierung gebrochen in Photoproduktion (Faktor 2)

• Diffraktion am TEVATRON:

- Faktorisierung gebrochen (Faktor 5-10)

• Diffraktion am LHC

- Vielfältige physikalische Motivation (z.B. diffraktive Higgsproduktion)
- CMS/TOTEM und ATLAS Planungen in vollem Gange

Verständnis der weichen und elastischen Hadronstreuung auch wichtig fuer die Interpretation der LHC Ergebnisse!