

Was ist los
bei
kleinem x ?
—
neuer Bereich
in der QCD ?

- Neue Parton Dynamik
- Hohe Parton Dichten

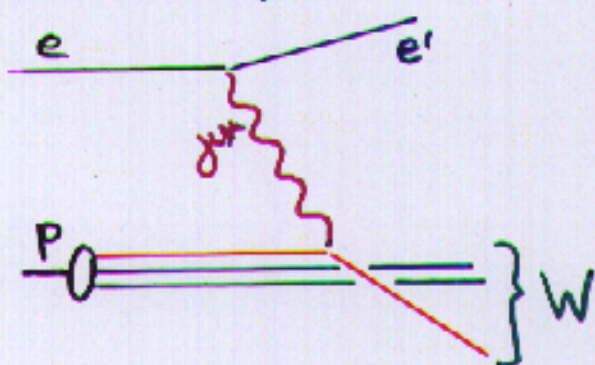
Interesse an kleinem x ?

- kleines x \longleftrightarrow hohe Energie
- kleines x \longleftrightarrow hohe Partondichten
- kleines x \longleftrightarrow hohe Anforderung an Theorie
- kleines x \longleftrightarrow hohe Anforderung an Experiment
- kleines x \longleftrightarrow neue Konzepte
- kleines x \longleftrightarrow komplexe Systeme
- kleines x \longleftrightarrow nicht-perturbativer Bereich?
- kleines x \longleftrightarrow ... Confinement ?
- kleines x \longleftrightarrow Neutrino-Astrophysik
(Measuring BFKL in ν -Telescope, hepplcoll043)
- kleines x \longleftrightarrow große Überraschungen...
- kleines x \longleftrightarrow LHC

Wer bietet mehr ?

Was ist x ?

- in $e-p$:



$$s = (e + p)^2$$

$$Q^2 = -(p_e - p_{e'})^2$$

$$y = \text{"Photonenergie"} \\ = E_\gamma / E_e \text{ (im p Ruhesyst.)}$$

$$W^2 = (\gamma^* + p)^2 = -Q^2 + ys$$

$$\frac{d\sigma^{ep}}{dy dQ^2} = \Gamma(y, Q^2) \cdot d^{\gamma^* p}(W, Q^2)$$

Photon fluß

Quark Parton Modell:

inelastische $e-p$ Streuung $\hat{=}$ elastische e -parton Streuung
mit

$$x = \frac{Q^2}{y \cdot s} = \frac{Q^2}{W^2 + Q^2}$$

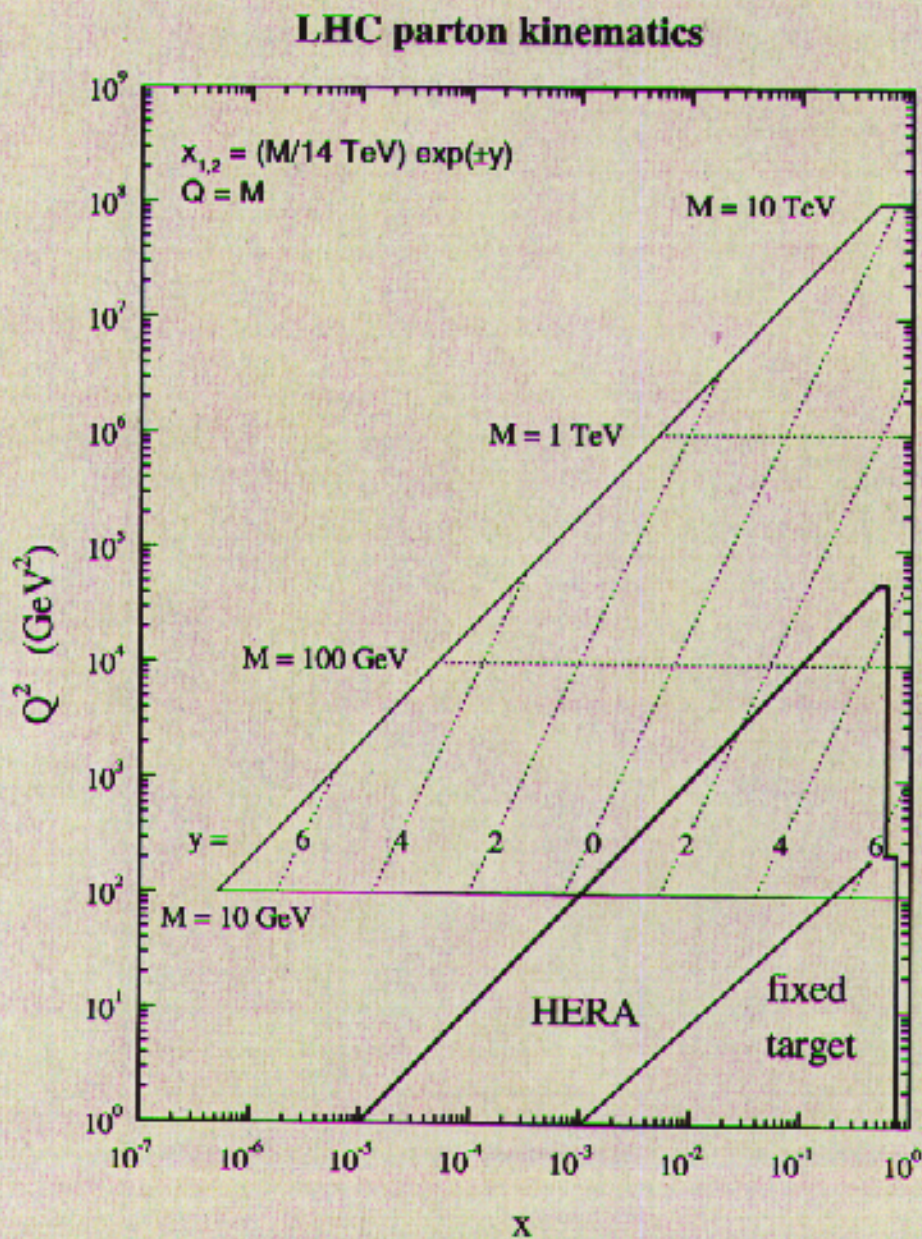
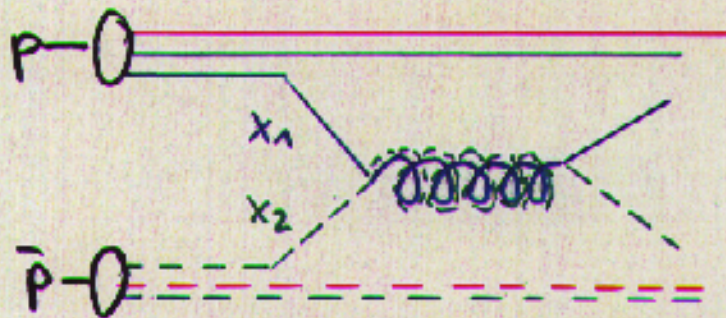
$$\Rightarrow d^{\gamma^* p}(W, Q^2) = \frac{4\pi d^2}{Q^2} F_2(x, Q^2)$$

$$F_2(x, Q^2) = \sum_i e_{q_i}^2 \cdot x q_i(x, Q^2)$$

Parton dichte!

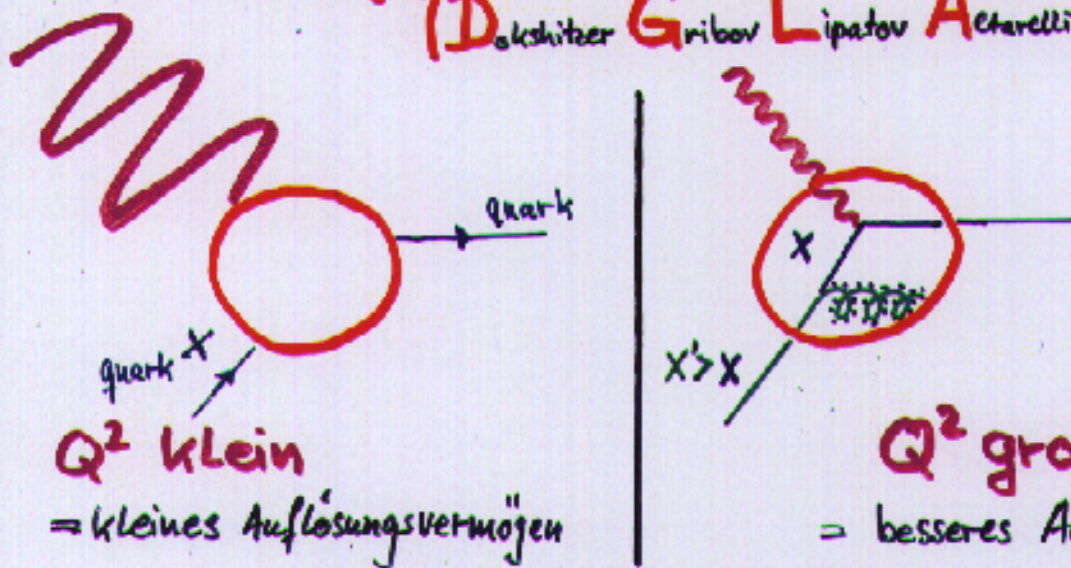
Was ist x ?

● in $p\bar{p}$



$F_2(x, Q^2): \text{DGLAP}$

- QPM: F_2 von Q^2 unabhängig
- Q^2 Abhängigkeit der Strukturfunktion F_2
(Dokshitzer Gribov Lipatov Altarelli Parisi) ($\rightarrow 1972-1977$)



$$F_2 = \left| \begin{array}{c} \text{diagram 1} \\ \text{diagram 2} \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{c} \text{diagram 3} \\ \text{diagram 4} \end{array} \right|^2 + \dots$$

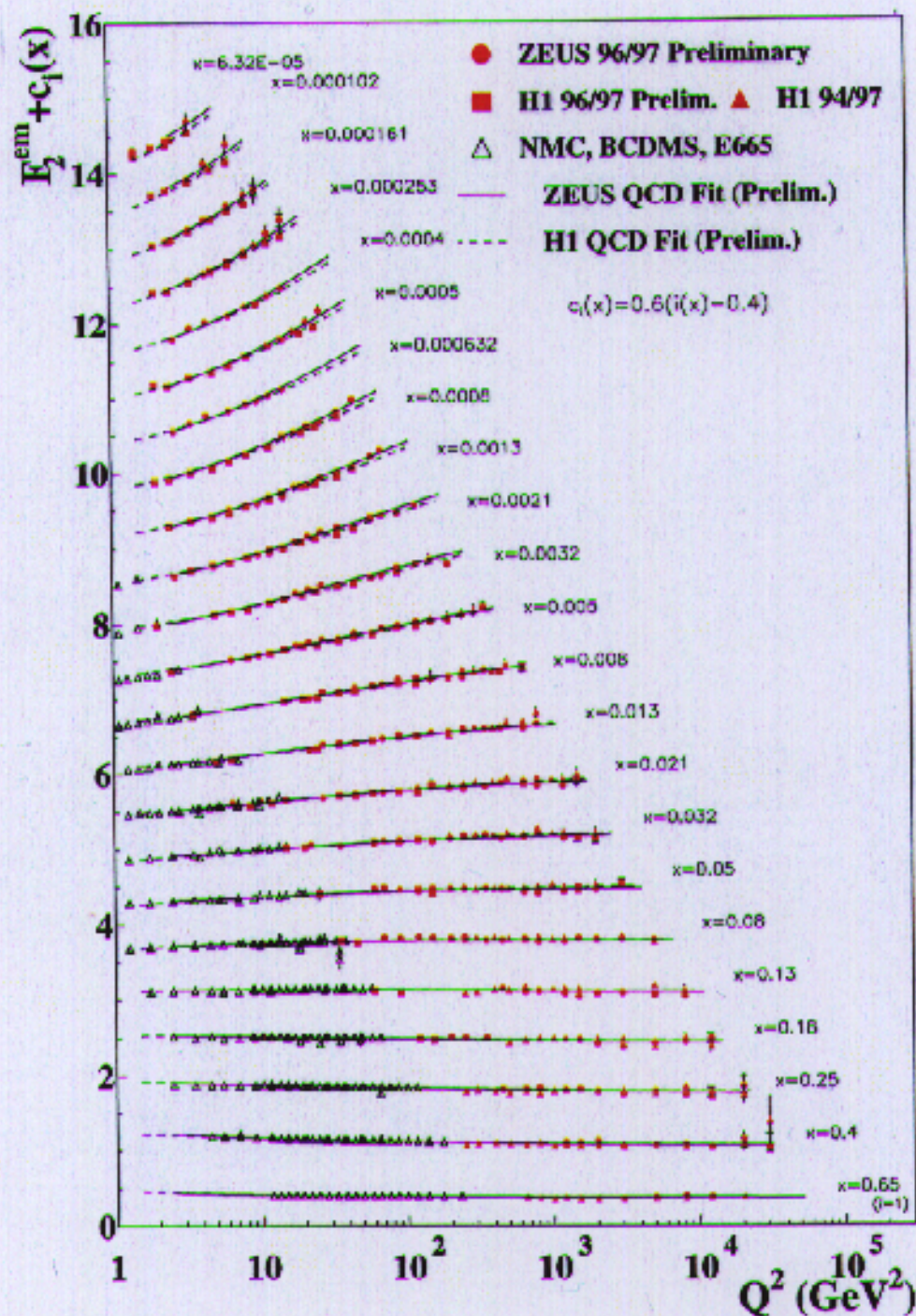
$F_2 \rightarrow Q^2$ abhängig
 \rightarrow "Skalen" verletzung!

\rightarrow Wahrscheinlichkeit Parton bei kleinem x zu finden
wächst mit Q^2

• Test der Theorie:

Q^2 -Entwicklung von $F_2(x, Q^2)$
aus geg. Verteilung bei $Q_0^2 \rightarrow F_2$ bei beliebigem Q^2

Q^2 -Abhängigkeit : $F_2(x, Q^2)$



stat.
Fehler
~ 1%.

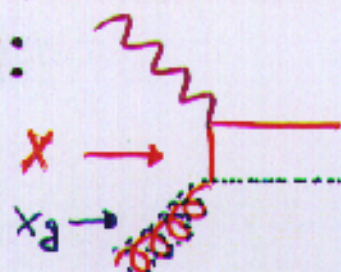
Syst.
Fehler
~ 3%.

➡ perfekte Beschreibung mit DGLAP

$0.65 \cdot 10^{-5} < x < 0.65$, $1 < Q^2 < 25\,000 \text{ GeV}^2$!

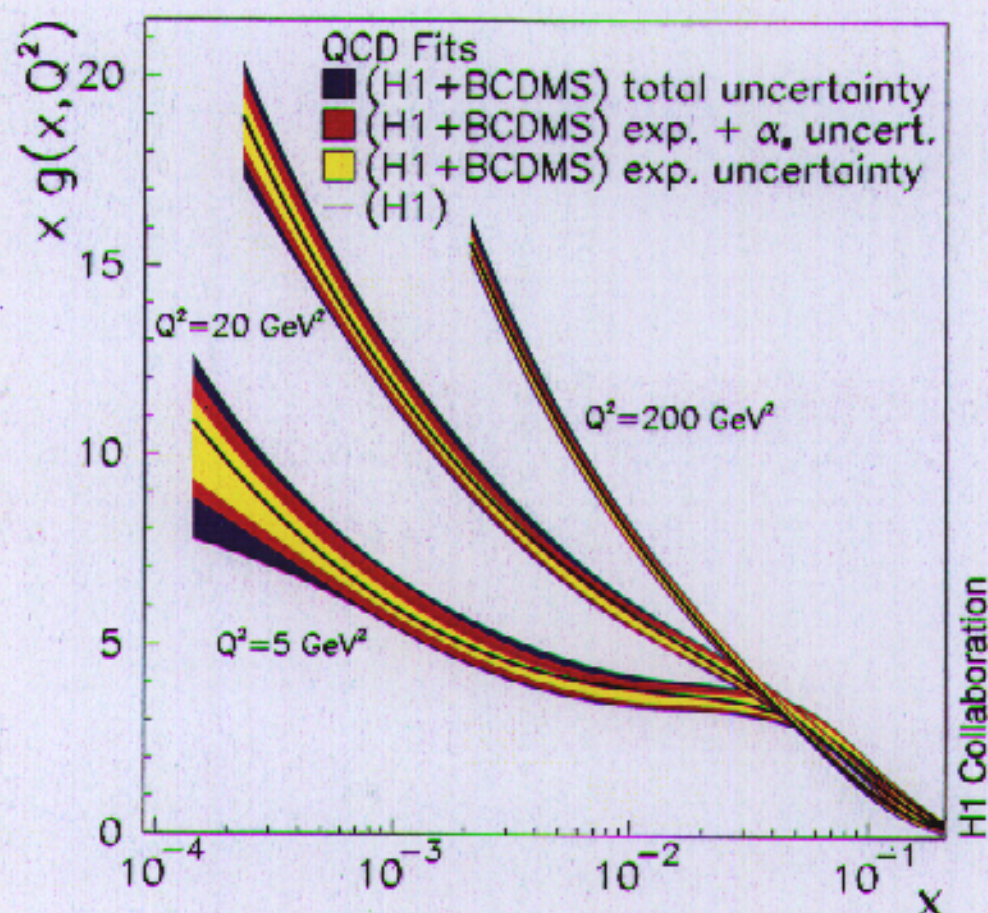
Gluon dichte bei kleinem x

● bei kleinem x :



dominant!

$$\frac{d F_2(x, Q^2)}{d \ln Q^2} = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \int_x^1 dz P_{qg}(z) x_g g(x_g, Q^2)$$



⇒ $\alpha_s(m_Z) = 0.1150 \pm 0.0017 \pm \frac{+0.0009}{-0.0005}(\text{model})$ (th)

⇒ starker Anstieg bei kleinem x !

⇒ ~30 Gluonen in $10^{-4} < x < 10^{-3}$

? Was ist los bei kleinem x ?

- DGLAP (in NLO) beschreibt inklusive Messungen
für $Q^2 \geq 1, - 1,5 \text{ GeV}^2$
und $0,6 \cdot 10^{-5} < x < 0,65$
perfekt !

- $Q^2 \leq 1 \text{ GeV}^2 \rightarrow pQCD ?$
 $\alpha_s \sim 1 ?$

→ Nix Neues bei kleinem x ?

Aber:

schwere Quarks

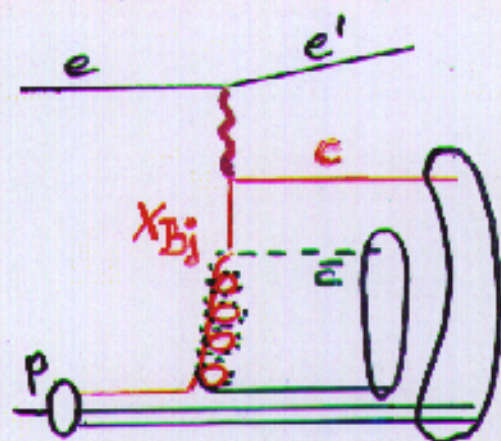
Jets

$Q^2 \rightarrow 0$

Diffraktion

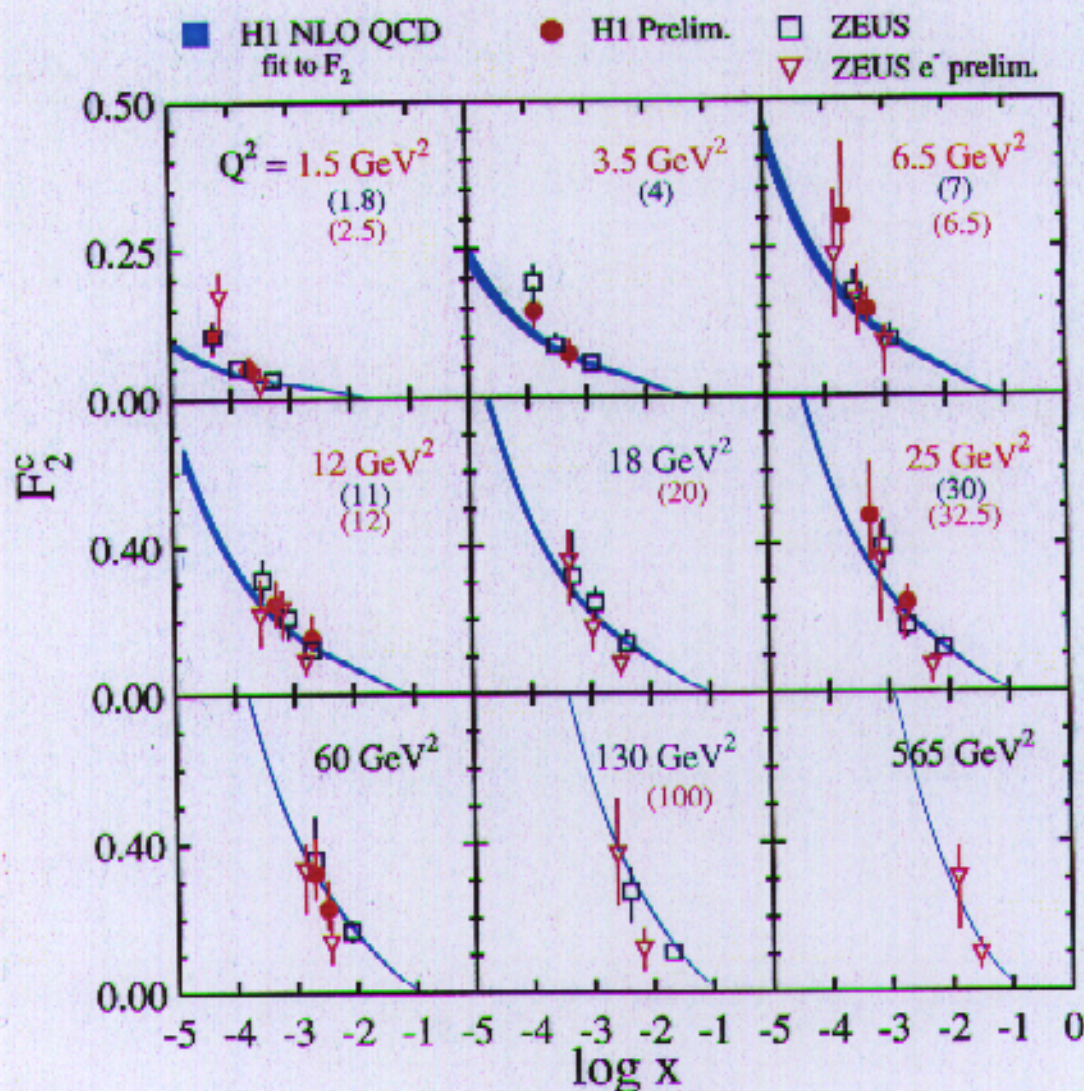
konsistentes Bild ?

charm Produktion mit $Q^2 > 0$



- Tief-inelastische Streuung
- D^* -Produktion
- Extrapolation von $G_{vis}^{D^*} \rightarrow G_{tot}^{charm}$
- Vergleich mit NLO Rechnung mit Gluon aus F_2 fit!

F_2^c in the NLO DGLAP scheme



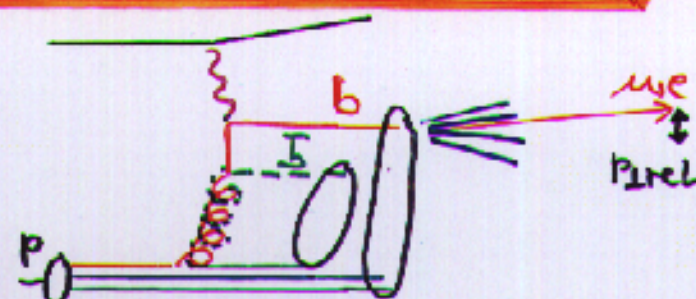
Abweichung bei kleinem x



Bottom Produktion

● $b\bar{b}$ bei HERA:

● γ -Produktion ($Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$)



H1	ZEUS
	$p_{Tb} > 5, \eta_b < 2$
Daten: $7.1 \pm 0.6(\text{stat})^{+1.5}_{-1.3} \text{ nb}$	$1.6 \pm 0.4(\text{stat})^{+0.3}_{-0.5}(\text{sys})^{+0.2}_{-0.4}(\text{ext}) \text{ nb}$
NLO Rechnung: 4.2 nb	$0.64^{+0.15}_{-0.1} \text{ nb}$
Daten/NLO: 1.7	2.5

● DIS ($2 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$)

($0.05 < y < 0.7$; $p_T(\mu) > 2 \text{ GeV}$, $35^\circ < \theta_\mu < 130^\circ$)

$$\sigma_{\text{vis}} = 39 \pm 8(\text{stat}) \pm 10(\text{sys.}) \text{ nb} \quad \text{H1 prel.}$$

$$\sigma_{\text{vis}}^{\text{NLO}} = 11 \pm 2 \text{ nb}$$

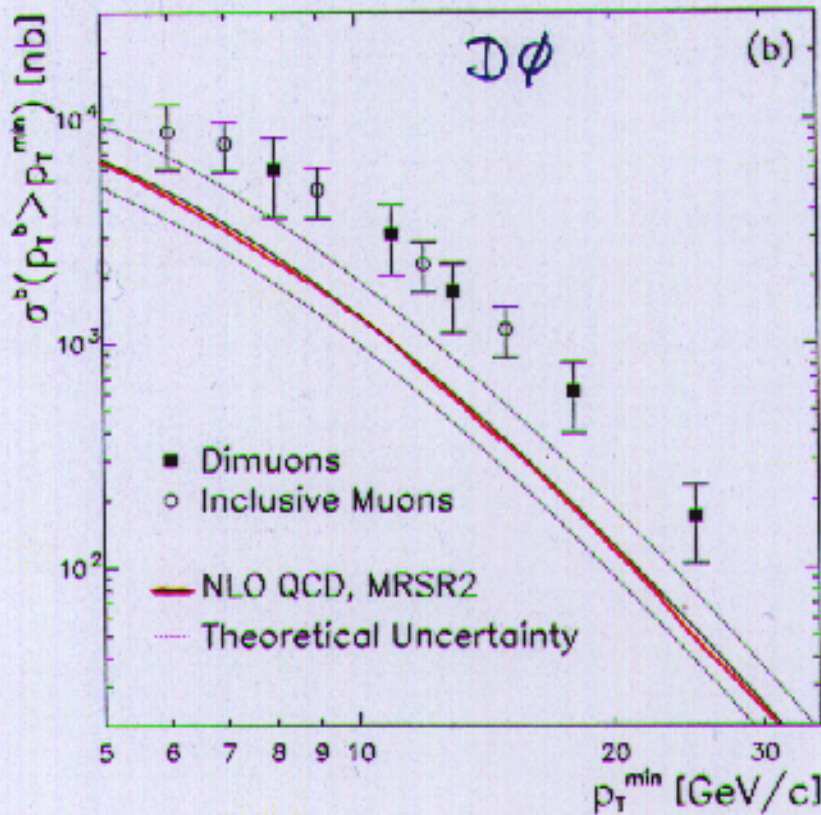
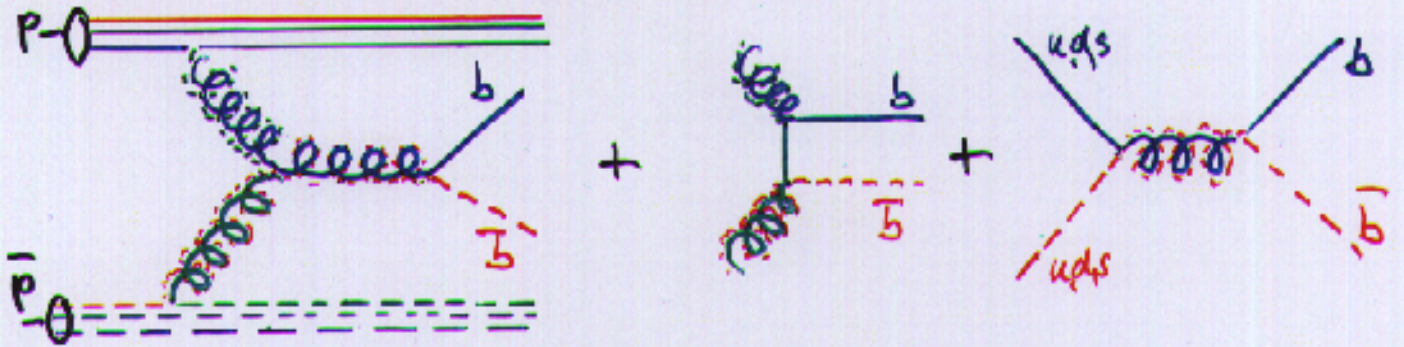
$$\sigma^{\text{H1}}/\sigma^{\text{NLO}} = 3.6$$

➔ sensitiv auf Gluondichte!

➔ ~ Faktor 2 Differenz zu NLO-Rechnungen

Bottom Produktion

• $b\bar{b}$ am Tevatron:



PLB 487,264
(2009)

- NLO
"massive"
Rechnung

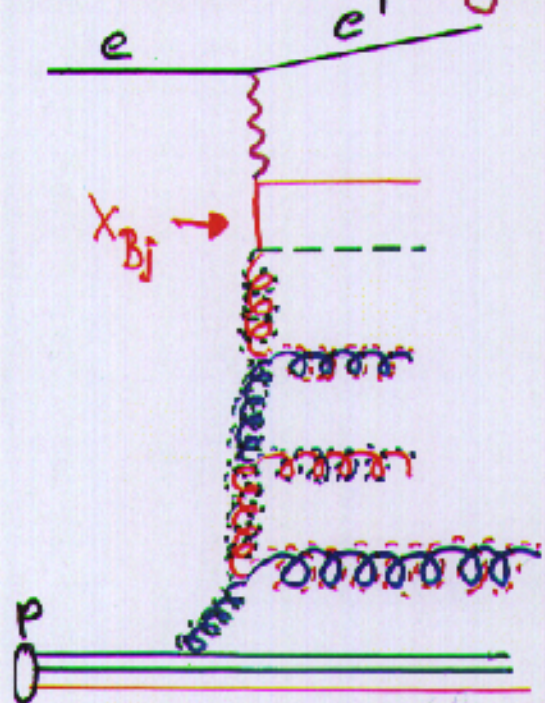
→ sensitiv auf Gluondichte !

→ > Faktor 2 Differenz zu NLO



"Forward" Jets bei HERA

- Spezielle Ereignis klasse
- Untersuchungen zur parton Dynamik



Entwicklung in x :

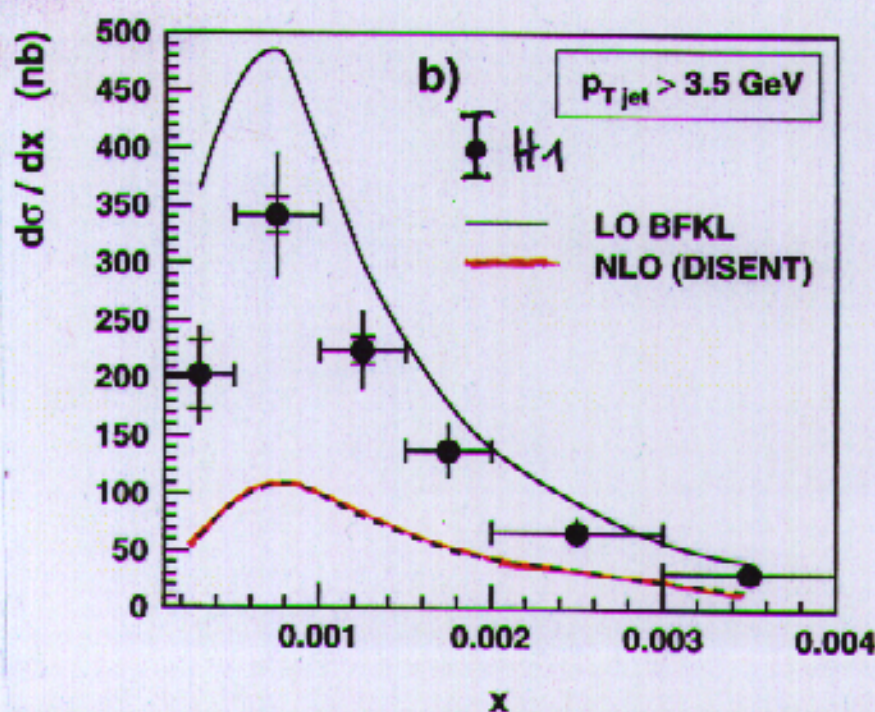
x_{Bj} klein!

"Forward" Jet (proton Richtung)

$$x_{jet} = \frac{E_{jet}}{E_{proton}}$$

groß!

- Verlangte: $0,5 < \frac{E_{jet}^2}{Q^2} < 2$! → Entwicklung in Q^2 unterdrückt!



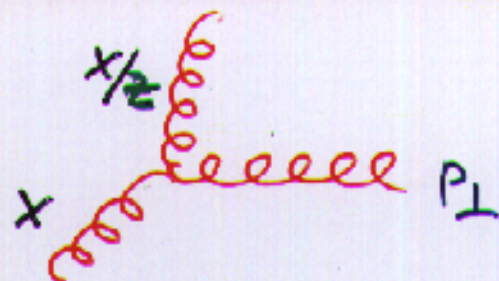
standard QCD

~ Faktor 2 zu klein!

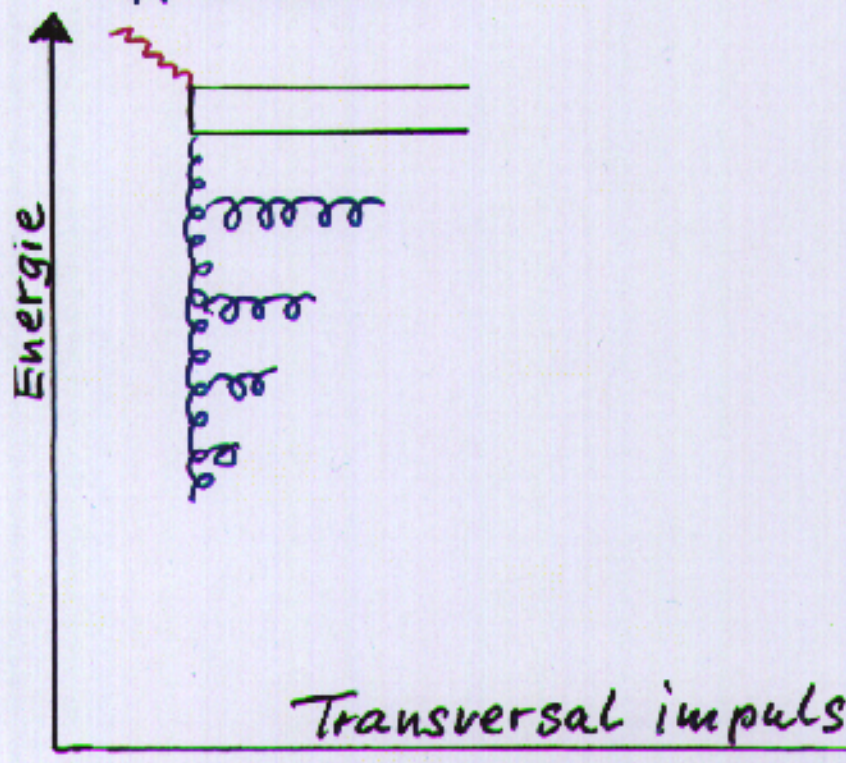
QCD - Kaskade

● Gluon Abstrahlung

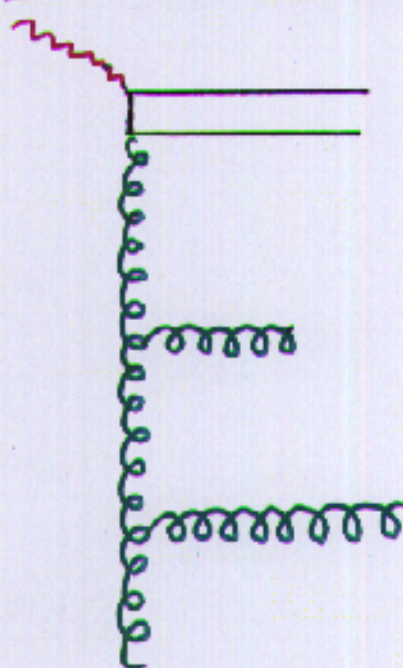
$$\sim \frac{1}{p_{\perp}^2} \cdot \frac{1}{z}$$



keine lineare Approximation



"Small x" Approx.
k_⊥-Faktorisierung



DGLAP

- keine linearen Singularitäten faktorisiert in Parton dichten
- Entwicklung in p_{\perp}^2, Q^2
- $\sigma \approx \int dz \hat{\sigma}(z) f(z, Q^2)$

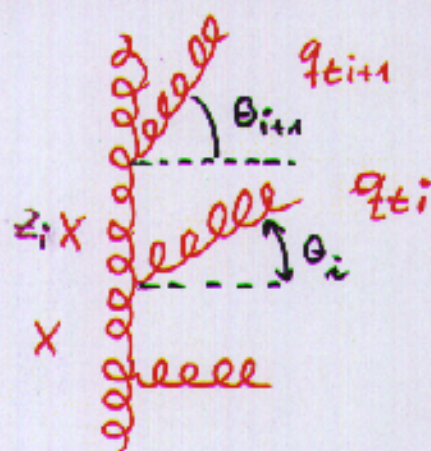
Balitski Fadin Kuraev Lipatov

- k_⊥-Abhängigkeit der Parton dichten
- Entwicklung in x
- $\sigma \approx \int dz dk_{\perp} \hat{\sigma}(k_{\perp}) F(x, k_{\perp})$

CCTM - Gleichung

- **C**atani **G**iafaloni **F**iorani **M**archesini (1988-1990)
- Vereinheitlichung von DGLAP und BFKL
- Berücksichtigung von Interferenz Effekten bei multi-Gluon Abstrahlung

➔ Emissionswinkel ansteigend / abfallend (angular ordering)



$$q_t = \frac{P_{\perp}}{1-\epsilon}$$

$$\theta_{i+1} > \theta_i$$

$$\rightarrow q_{ti+1} > z_i q_{ti}$$

➔ Ordnung in q_t (DGLAP) $\hat{=}$ Ordnung in Emissionswinkel

➔ **Aber:**

Für $z \rightarrow 0$, keine Einschränkung in q_t !
Entwicklung in Energie!

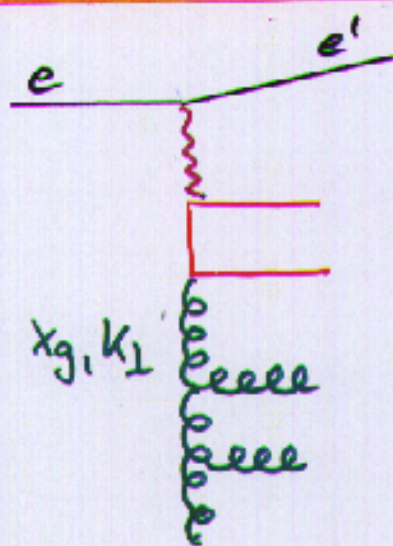
➔ **un-integrierte Gluondichte:**

$$\mathcal{A}(x_g, k_{\perp}, \bar{q})$$

➔ zusätzlich max. "Winkel" \bar{q}

CCFM-Gluon: woher nehmen?

H.J. + G. Salam EPJC 2004



$$d = \int \frac{dk_{\perp}^2}{k_{\perp}^2} dx_g \mathcal{A}(x_g, k_{\perp}, \bar{q}) \hat{d}(x_g, k_{\perp}, \hat{s})$$

- obere Grenze für Gluon-Abstrahlung \bar{q} durch quark-box bestimmt.
 $\bar{q} \sim \hat{s} \sim$ Skala in DGLAP

● Bestimmung von $\mathcal{A}(x_g, k_{\perp}, \bar{q})$

- Gluon-Start-Verteilung (ähnlich wie bei DGLAP fits)
- QCD Entwicklung via CCFM
- Fit an F_2
- Bestimmung der freien Parameter (2 freie Parameter, DGLAP braucht mehr)

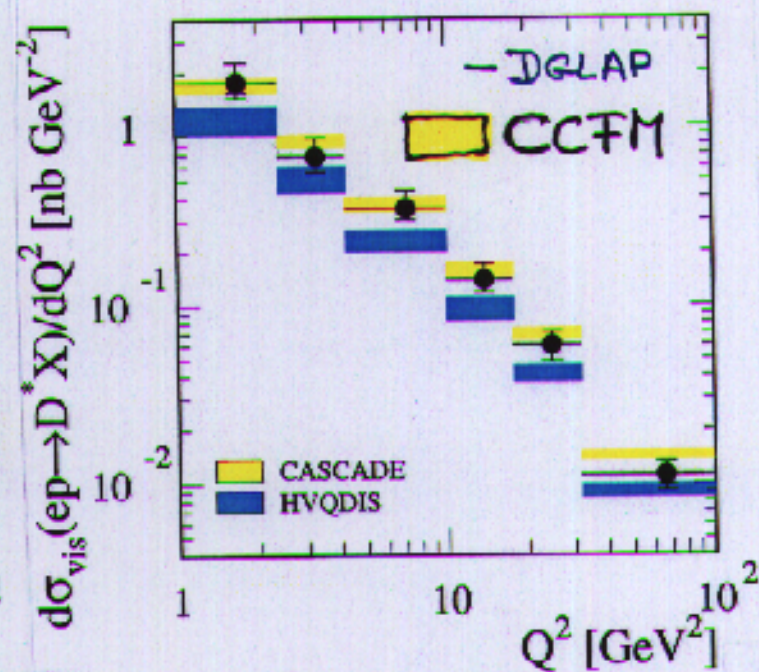
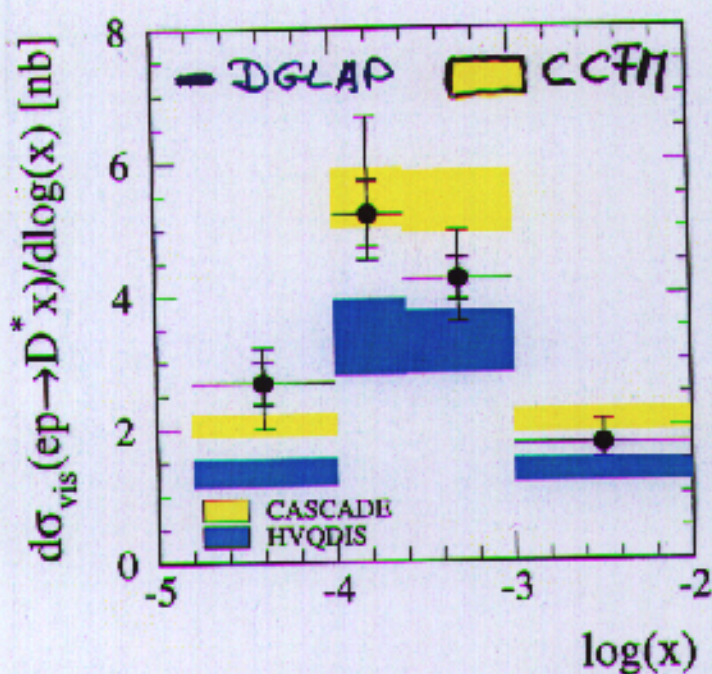
→ kompliziert wegen \bar{q} !

→ Vorhersagen für Prozesse bei kleinem x !



charm Produktion zum II.

- D^* Produktion in tief-inelastischer Streuung
- Vergleich mit NLO-Rechnung mit Gluon aus DGLAP-fit an F_2
- Vergleich mit k_T -Faktorisierung mit (un-integriertem) Gluon aus CCFM fit an F_2

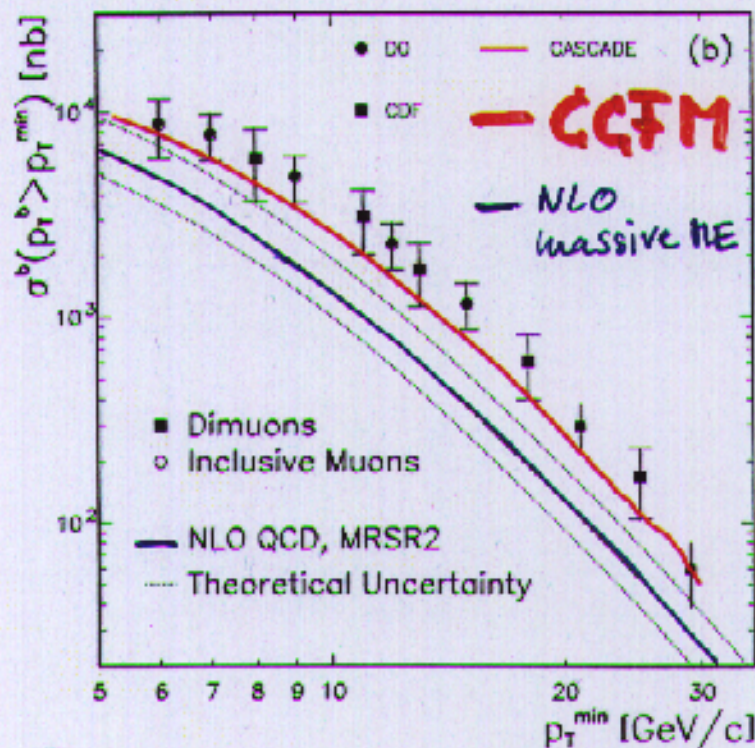


- DGLAP bei kleinem x , Q^2 zu klein!
 → höheres Gluon bei kleinem x erforderlich
 → inkompatibel mit F_2 !

→ gute Beschreibung mit CCFM!

bottom Produktion zum II.

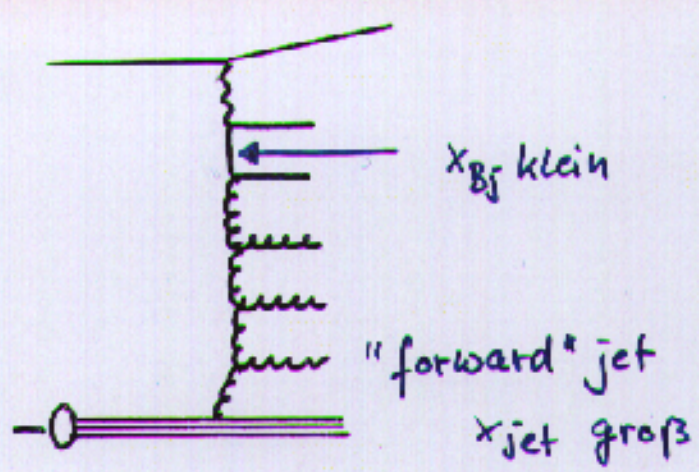
- HERA : Photo produktion (Daten/NLO ~ 2)
- ➔ Verbesserung mit CCFM: ok innerhalb d. Fehler!
- HERA: $b\bar{b}$ mit $Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$ (Daten/NLO $\sim 3,5$)
- ➔ Verbesserung mit CCFM:
 $\text{Daten/CCFM} = 2,5$ 😞
- $b\bar{b}$ am Tevatron: (Daten/NLO ~ 2)



ähnliches Ergebnis:
 k_T -Fakt. + BFKL
 P. Hägler et al.
 PRD 62(074002) 2000

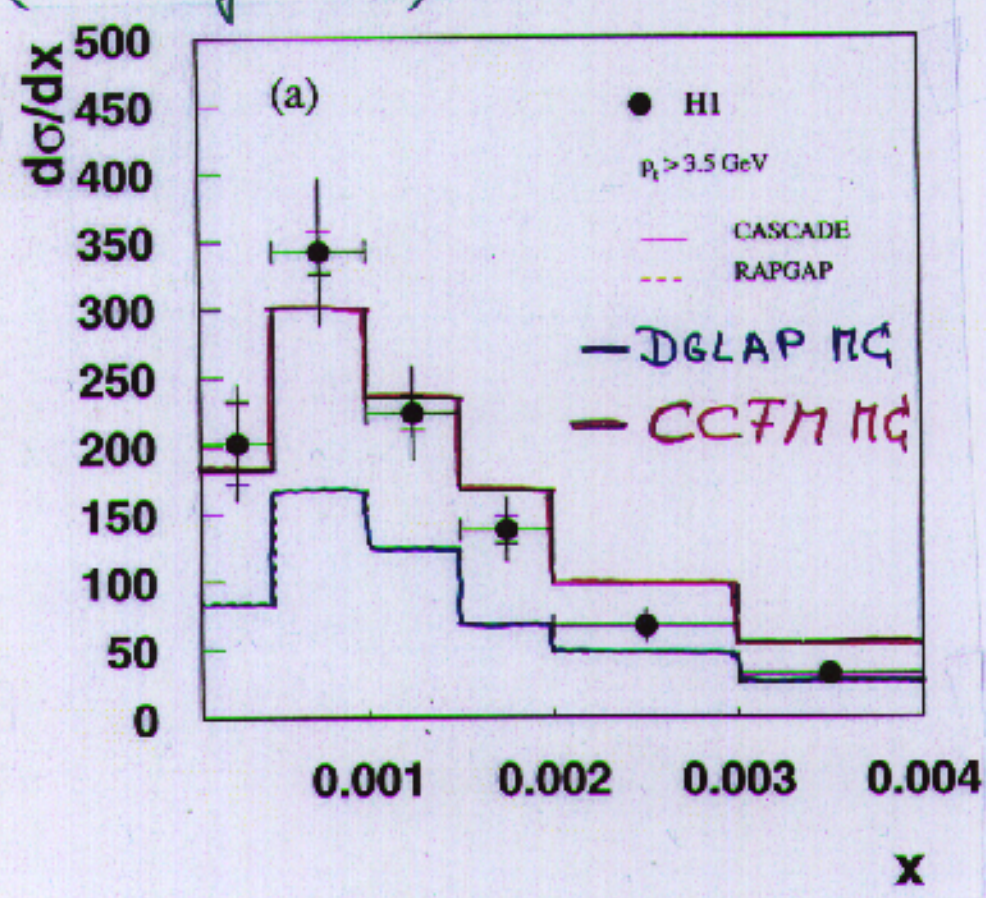
- ➔ enorme Verbesserung mit CCFM
- ➔ Ende der $b\bar{b}$ -Krise? 😊

"Forward" Jets zum II.



- $0,5 < \frac{p_T^2}{Q^2} < 2$
unterdrückt DGLAP
- spezieller Prozess zur Physik bei kleinem x_{Bj}

- Vergleich mit k_T -Faktorisierung und (un-integriertem) Gluon aus CCFM fit an F_2 !



→ Gute Beschreibung bei kleinem x



Zusammenfassung I

- neue, präzise Messungen → Detailstudien des hadronischen Endzustandes

- Prozesse bei kleinem x , z.B.

- charm
- bottom
- fwd. Jets

nicht gut beschrieben mit DGLAP + NLO Rechnung!

- "neue" Entwicklungsgleichung

CCTM ↔ "angular ordering"

↔ DGLAP + BFKL

↔ k_T -Faktorisierung

↔ "un"-integrierte Gluondichte

→ signifikant bessere Beschreibung der HERA Daten !

→ mit CCTM Gluon von HERA

Lösung der $b\bar{b}$ -Krise am Tevatron !

? Was ist mit $Q^2 \rightarrow 0$ und Diffraction ?

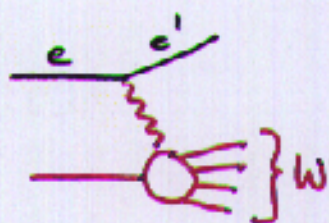
$d(\gamma^* p \rightarrow X) \text{ versus } Q^2$

● Q^2 - Abhängigkeit

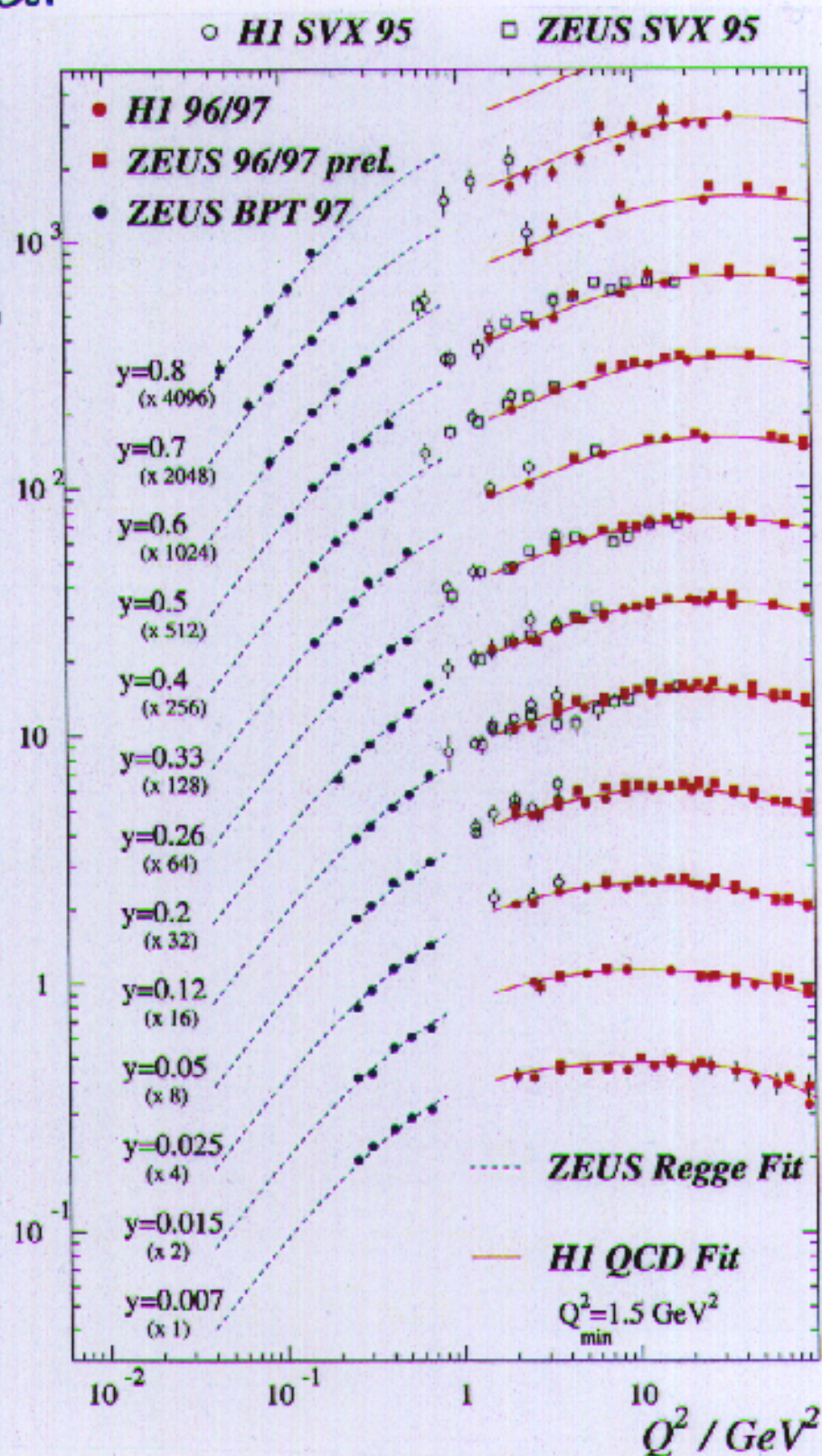
$$d(\gamma^* p) \sim \frac{F_2(x, Q^2)}{Q^2}$$

und

$$y \sim \frac{W^2}{s}$$



$$F_2(x=Q^2/sy, Q^2)$$



● Q^2 groß:

→ pQCD

→ DGLAP

● Q^2 klein ($Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$)

→ npQCD

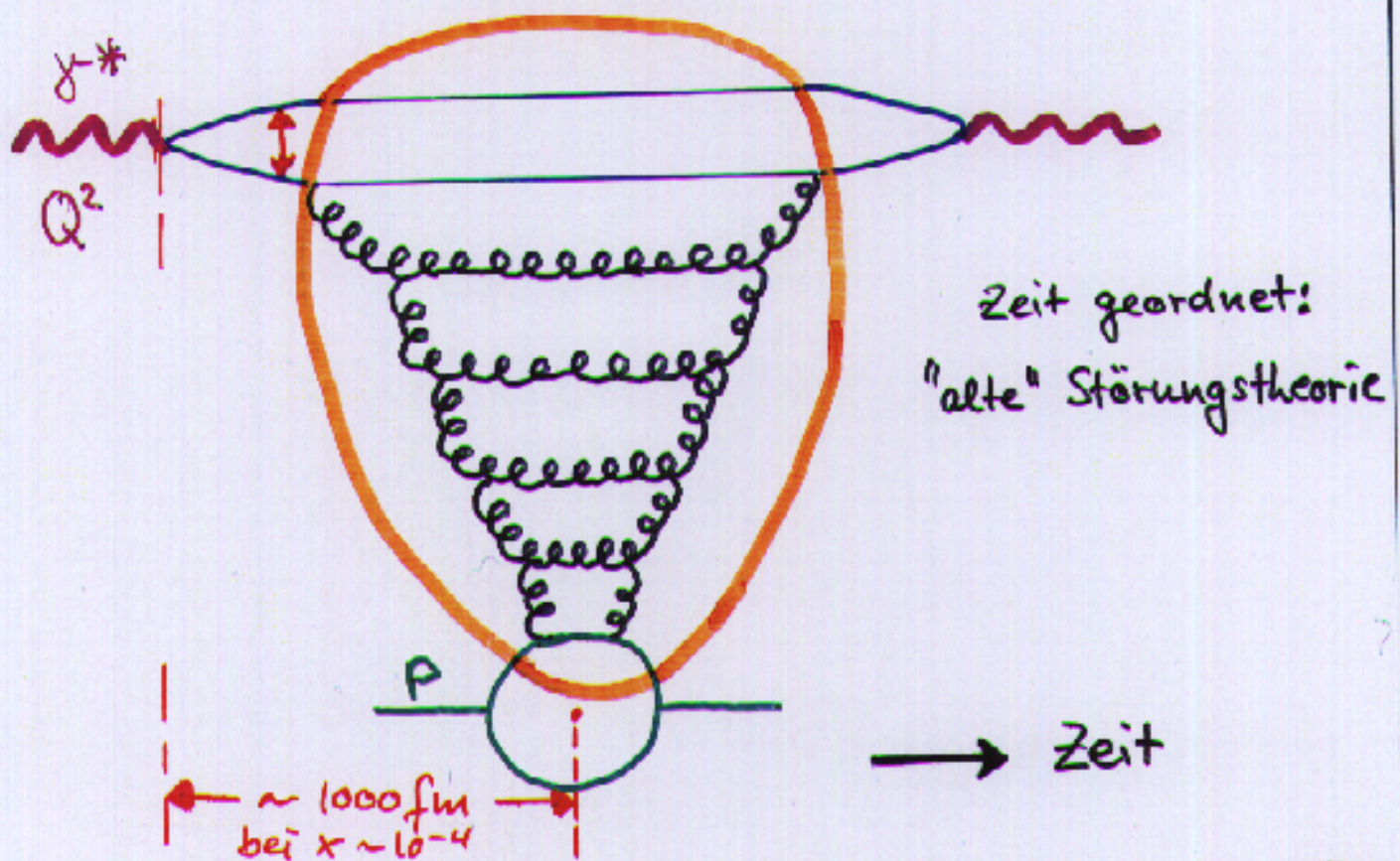
→ Regge

→ phen. Fit

⇒ konsistente Beschreibung ?

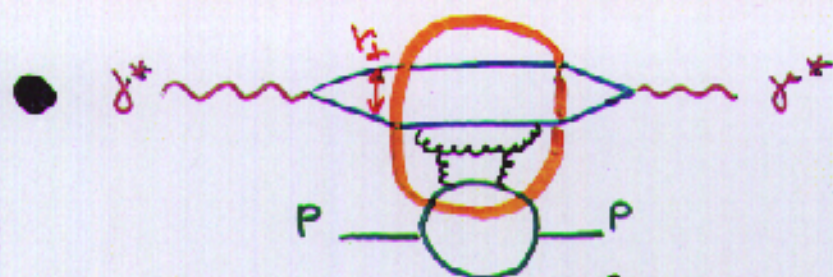
Farb - Dipol - Bild

- im Proton-Ruhe-System



- $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}$ lange vor Wechselwirkung mit Proton!
- $q\bar{q}$ -Dipol wechselwirkt mit Target!
- entscheidend ist transversale Ausdehnung:
 $k_{\perp} \sim \frac{1}{k_{\perp}}$ (ala Heisenberg $\Delta x \Delta p \geq \hbar$)
 $(\rightarrow k_{\perp}$ -Faktorisierung?)
- intuitives Bild:
 großer Dipol (kleines k_{\perp}) \rightarrow großer W.Q.
 kleiner Dipol (großes k_{\perp}) \rightarrow kleiner W.Q.

Farb-Dipol-Bild II



$$d(x, Q^2) = \int \psi^* \hat{G}(x, k_\perp) \psi \, dz \, d\vec{r}_\perp$$

Dipol-p W.Q.

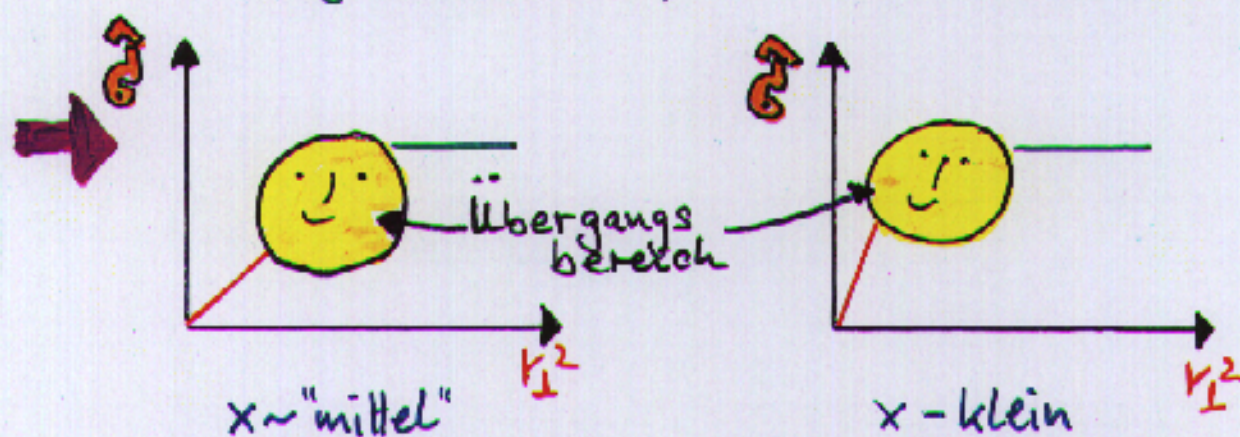
→ ψ = Wellenfunktion aus QED bekannt!


→ Was ist $\hat{G}(x, k_\perp)$?

• pQCD → $d \sim \frac{1}{k_\perp^2} \cdot xg(x, Q^2)$ k_\perp groß


→ $\hat{G}(x, k_\perp) \sim k_\perp^2 \cdot xg(x, Q^2)$ k_\perp klein

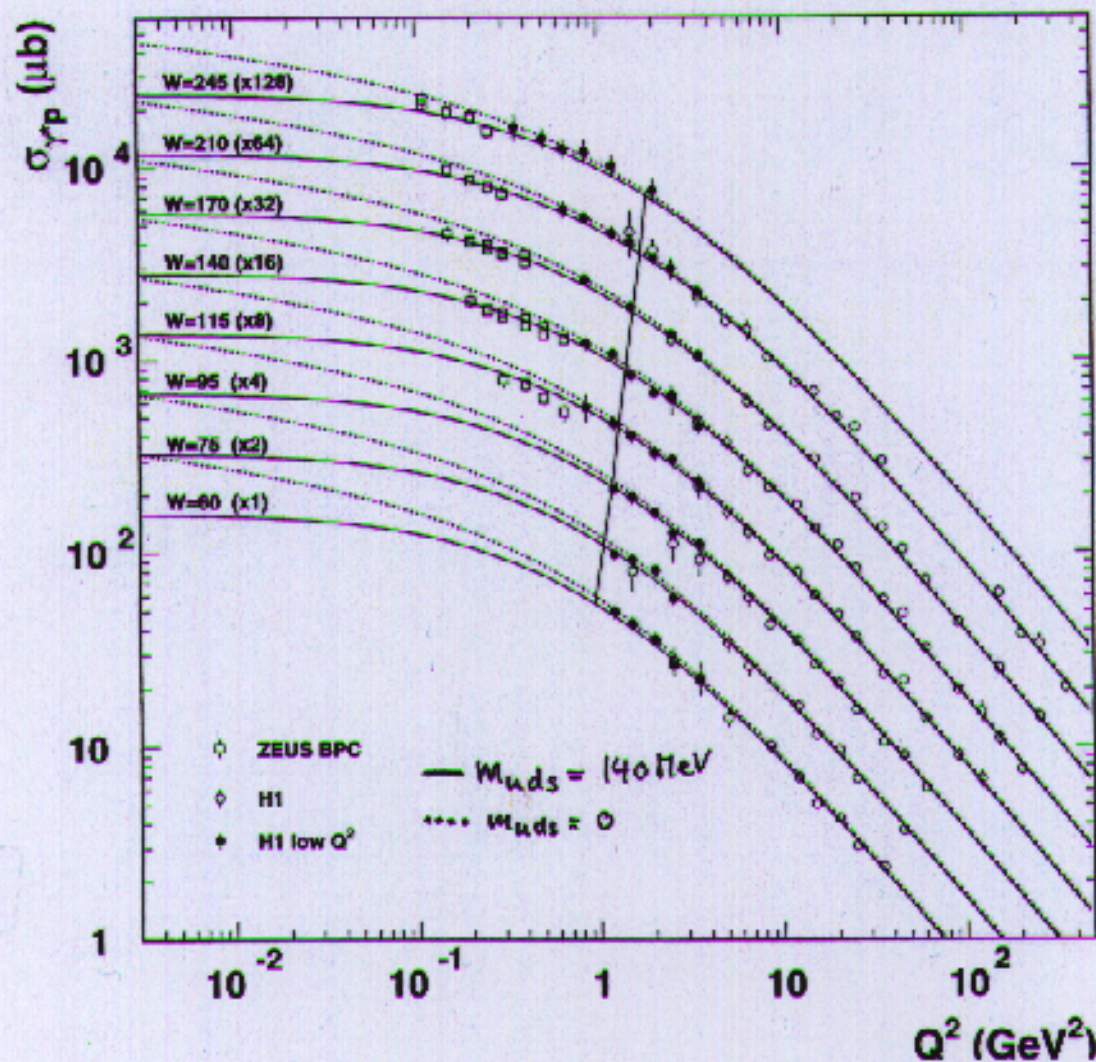
• k_\perp groß (k_\perp klein) → hadronischer WQ



→ Modellannahmen nötig für  Übergangsbereich (Sättigung des Dipol WQ)

Übergang zu $Q^2=0$ zum II.

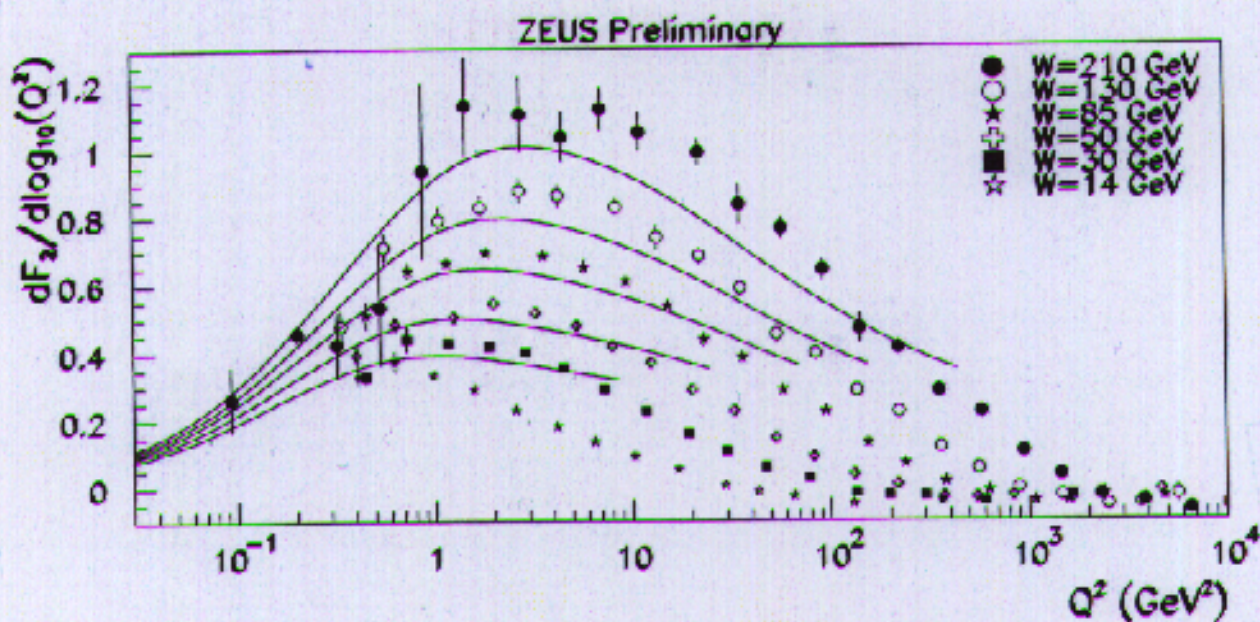
- 3 Parameter bestimmen  im Modell von Wüsthoff - Golec-Biernat \rightarrow durch Fit an F_2
 - $Q^2 \rightarrow 0$: Dipol-Größe $r_1 \sim \frac{1}{Q}$: klein \rightarrow groß!
- \rightarrow **Sättigungsbereich**



\Rightarrow intuitives Modell mit Sättigung
erfolgreich auch für $Q^2 \rightarrow 0$

Übergang zur Photoproduktion

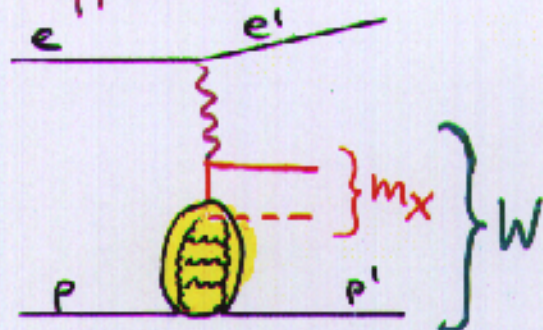
- Wo findet Übergang genau statt?
- übersetze Verhalten von $G(\gamma^*p) \rightarrow F_2$
 $G(\gamma^*p) \sim \frac{F_2}{Q^2}$
- Q^2 groß: $\frac{dF_2}{d \ln Q^2} \approx \int dz P(z) \frac{x}{z} g(\frac{x}{z}, Q^2)$
 Q^2 klein: $G(\gamma p) \sim \text{const} \rightarrow \frac{dF_2}{d \ln Q^2} \sim Q^2$



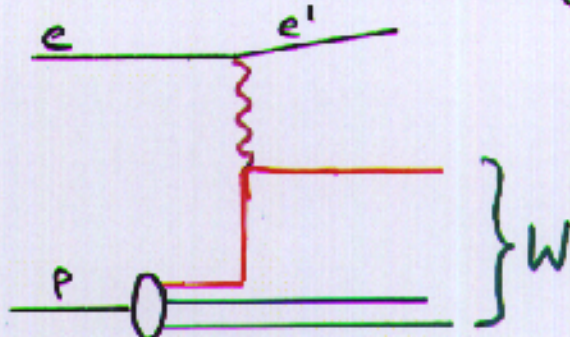
- ist Übergang zu $Q^2 = 0 \hat{=}$ Übergang zum Bereich hoher Partondichten?
- gleicher Mechanismus bei Sättigung der pdf bei hohem Q^2 ?

Diffraktion: was ist das ?

● Diffraktion:



standard e-p Streuung



- unter kleinem Winkel, elastisch gestreutes Proton mit charakteristischer Energieverteilung !
 - oder
 - Bereich in Rapidität ohne Teilchennachweis !
 - oder
 - charakteristische Verteilung der im Detektor sichtbaren Masse m_x !
- $\sim 10\%$ aller tief-inelastischen Ereignisse sind diffraktiv !

→ W Abhängigkeit von Diffraktion ?

- optisches Theorem: $\sigma_{tot} \leftrightarrow \sigma_{elastisch}$

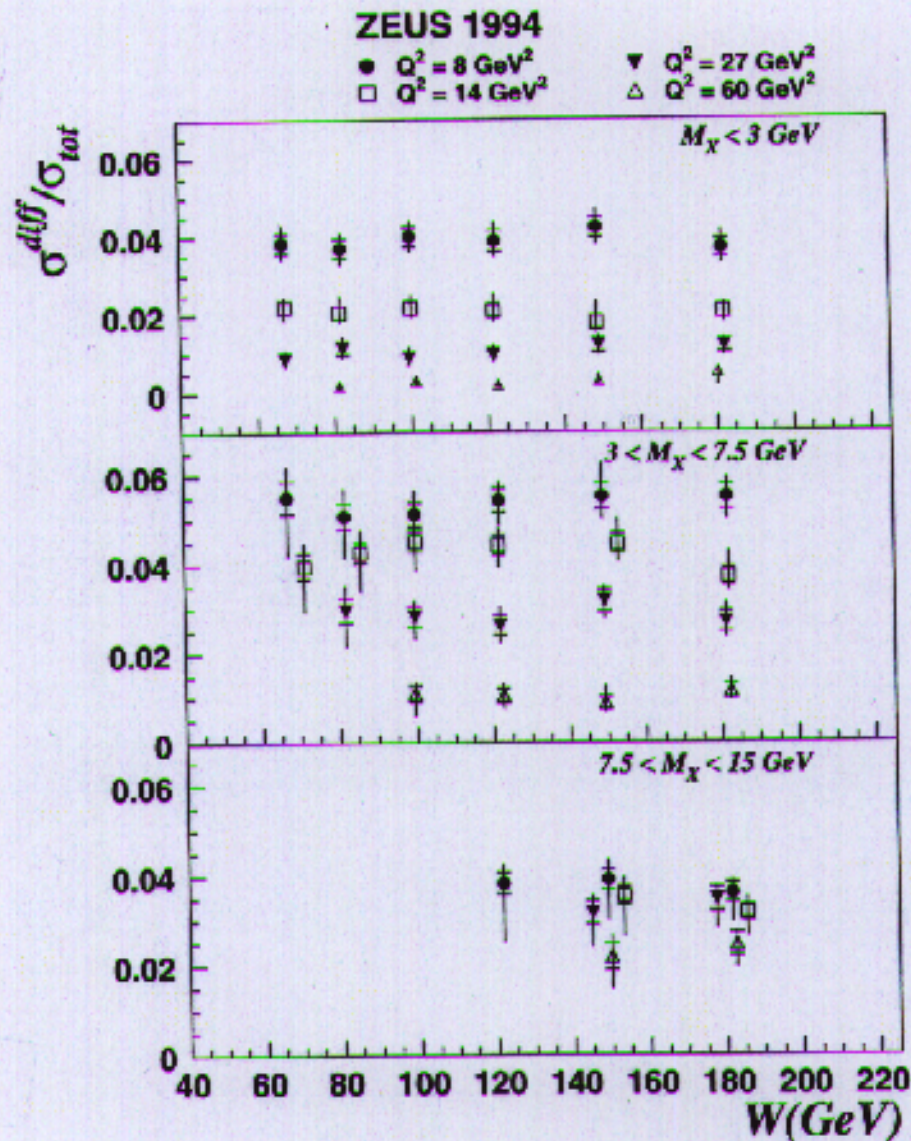
$$\sigma_{tot}(W^2) \sim \text{Im}(f(W^2, 0)) \sim W^{2\lambda}$$

auch für γ^* ?

$$\sigma^{Diff} \sim (W^2)^{2\lambda} \quad (m_x \text{ fest})$$

$$\rightarrow \frac{\sigma^{Diff}}{\sigma_{tot}} = W^{2\lambda} \quad ?$$

W Abhängigkeit von Diffraction



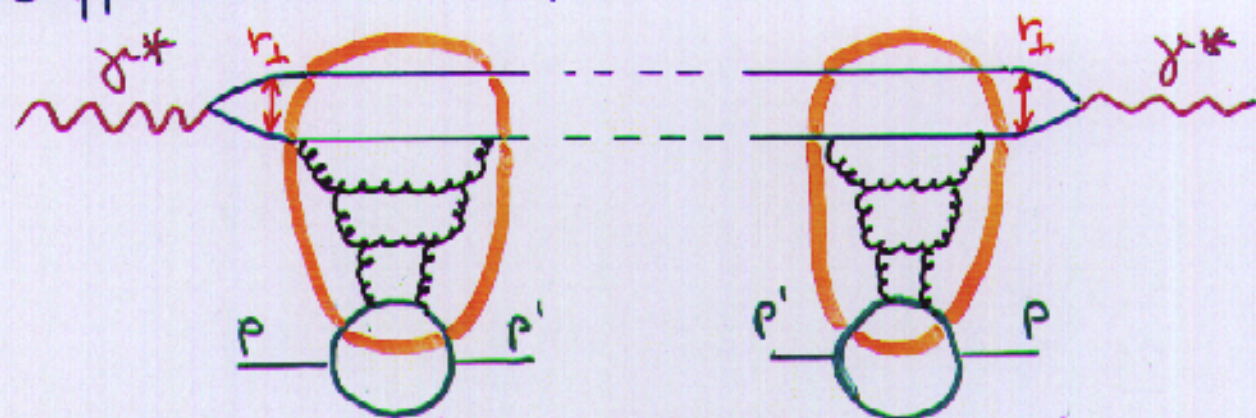
→ $\frac{\sigma_{\text{Diff}}}{\sigma_{\text{tot}}} \sim \text{unabhängig von } W$!

→ widerspricht naiver Erwartung aus optischen Theorem



Farb-Dipol-Bild III

● Diffraction im Dipol-Bild



$$\frac{d\sigma}{dt} = \int 4 \hat{\sigma}(x, r_1) \hat{\sigma}(x, r_1) dx dr_1$$

➔ Diffraction $\sim \hat{\sigma}(x, r_1)^2$

➔ Vergleich Diffraction \leftrightarrow nicht-Diffraction
mehr Info's über $\hat{\sigma}$:

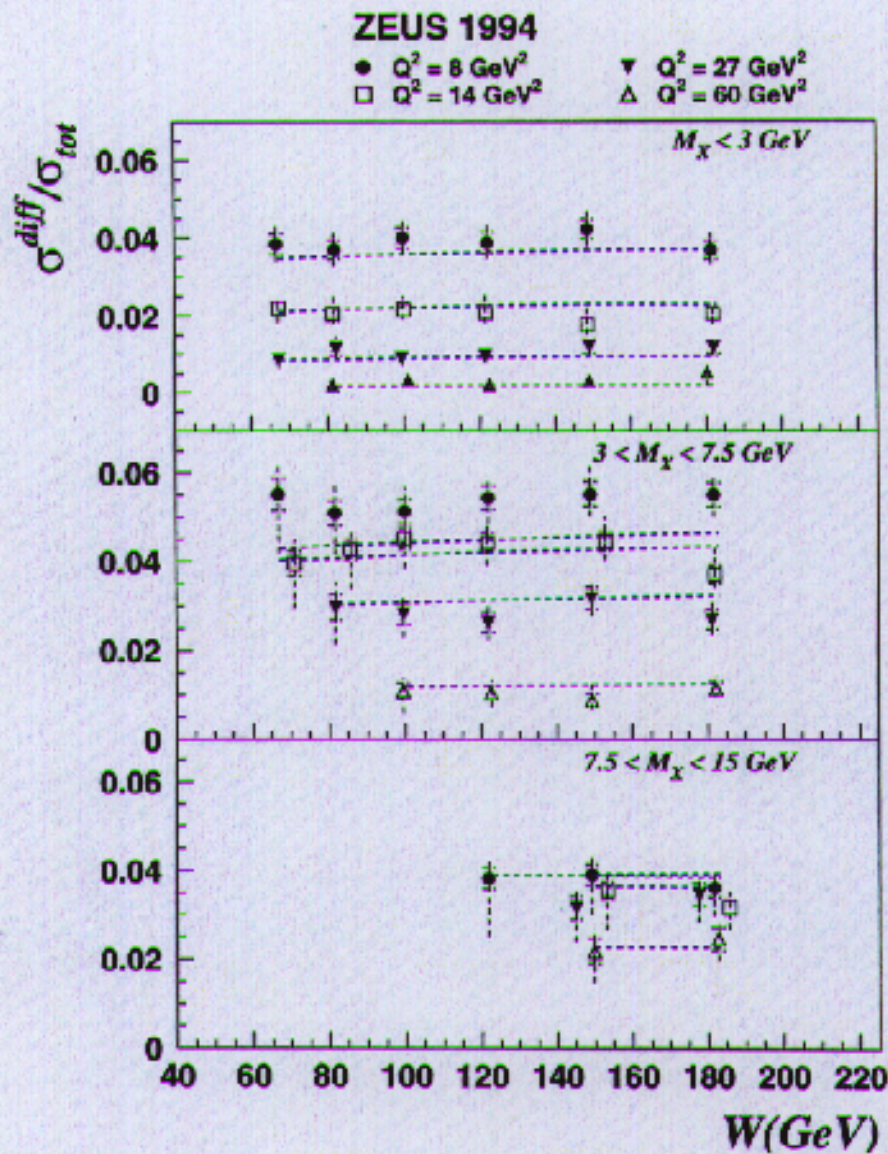
➔ interessant ist Übergangsbereich von

- pQCD \rightarrow hadronischen W.Q.
- Sättigung des Dipol W.Q.

➔ pheno. Parameterisierung:

z.B. Ansatz mit x abhängiger
Sättigung a la
Wüsthoff + Golec-Biernat !

Diffraction zum II.



— Modell
Wüsthoff +
Golec-Biernik
mit
Sättigung

- ➔ Ansatz mit Sättigung erfolgreich!
- ➔ in Diffraction anderer Bereich in t_{\perp}
(verglichen mit nicht-Diffraction)
- ➔ sensitiv auf Übergangsbereich!
"neuer Blickwinkel in Diffraction?"

Zusammenfassung II

- Neue Messungen im Übergangsbereich $Q^2 \rightarrow 0$
- keine pQCD Vorhersagen, da d_s groß.
- Modellansatz: Farb-Dipol-Bild
 - von pQCD Bereich (r_1^2 klein, Gluondichte, Äquivalenz zu k_T -Faktorisierung)
 - zu Extrapolation in nichtpert. Bereich (mit Model für Sättigung)
- intuitives Bild → gute Beschreibung für $Q^2 < 10$
- Erfolgreich auch für Diffraction:
 - Verbindung $\sigma_{tot} \leftrightarrow \sigma_{diff}$!
 - $\sigma_{diff} / \sigma_{tot}$ Energieabhängigkeit ok!
- Übergang zu $Q^2 \rightarrow 0$
 - Übergang zu hohen Partondichten
 - neuer Bereich in QCD
 - Übergang zu Sättigung



Ende

- Physik bei kleinem x (hoher Energie) sehr vielfältig !
- neues, besseres Verständnis im perturbativen und nicht perturbativen Bereich
Verbindung in "intuitivem" Dipol-Bild möglich !
- erste Schritte zu umfassenden Verständnis von hadronischen Wechselwirkungen und Aufbau der Materie !



und jetzt ?

Zukunft

- präzise Messungen nach HERA upgrade:
 - unintegrierte Gluondichte
 - schwere Quarks
 - jets, Diffraction, Parton Dynamik
- einmalige Chancen von Lepton-Proton nutzen:
 - Kontrolle von k_{\perp} , Dipol-Größe
- Neben aspekt:
Ohne Verständnis von "low x"
 - schlechte Karten für LHC (siehe TEVATRON)

● Höhere Energien wünschenswert

→ **THERA** (TESLA * HERA: 500 x 920)

→ **LEP-LHC**

→ kinematik unterschiedlich

→ unterschiedliche Fragestellungen

→ Beobachtung von
Sättigungseffekten und ?

Viel Neues in Sicht!