

# Die Struktur des Pomeron



*I. Y. Pomeranchuk ( 1913 –1966 )*

**SM**

**Elektroschwache WW**

$\gamma, Z^0, W^+, W^-$

**Quantenchromodynamik**

**8 Gluonen**

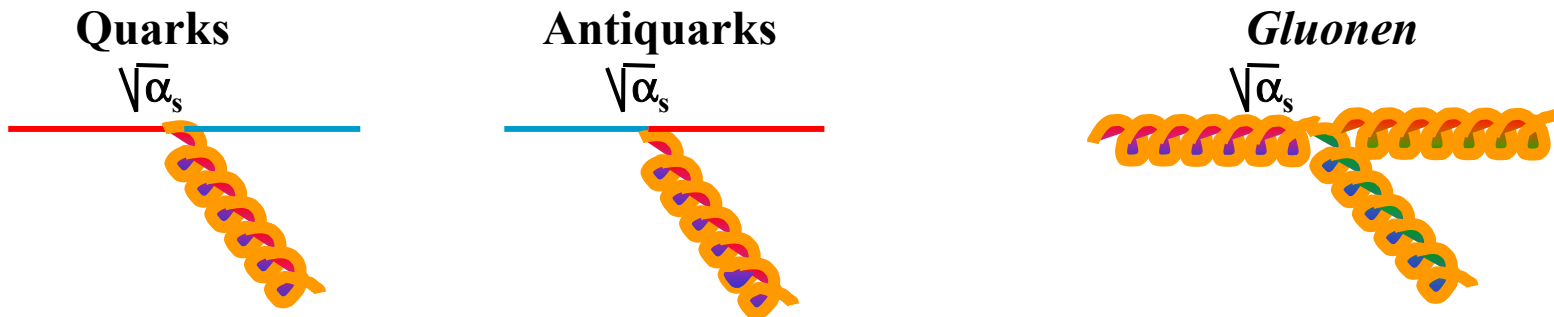
☆☆☆☆ Präzisionsmessungen und  
Test der Korrekturen höherer  
Ordnung Störungstheorie  
Grossartige experimentelle  
Bestätigung

☆☆ Die wesentlichen Grundannahmen  
sind experimentell bestätigt.  
★ Voraussagen sind nur eingeschränkt  
möglich: die QCD ist zu kompliziert für  
unsere bisherigen theoretisch-  
mathematischen Methoden --> begrenzter  
Anwendungsbereich.

→ Viel Arbeit geht in die Erweiterung  
des Anwendungsbereichs der QCD.

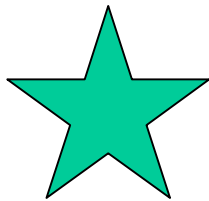
# Elemente der QCD

Alle Teilchen mit Farbladung nehmen teil:



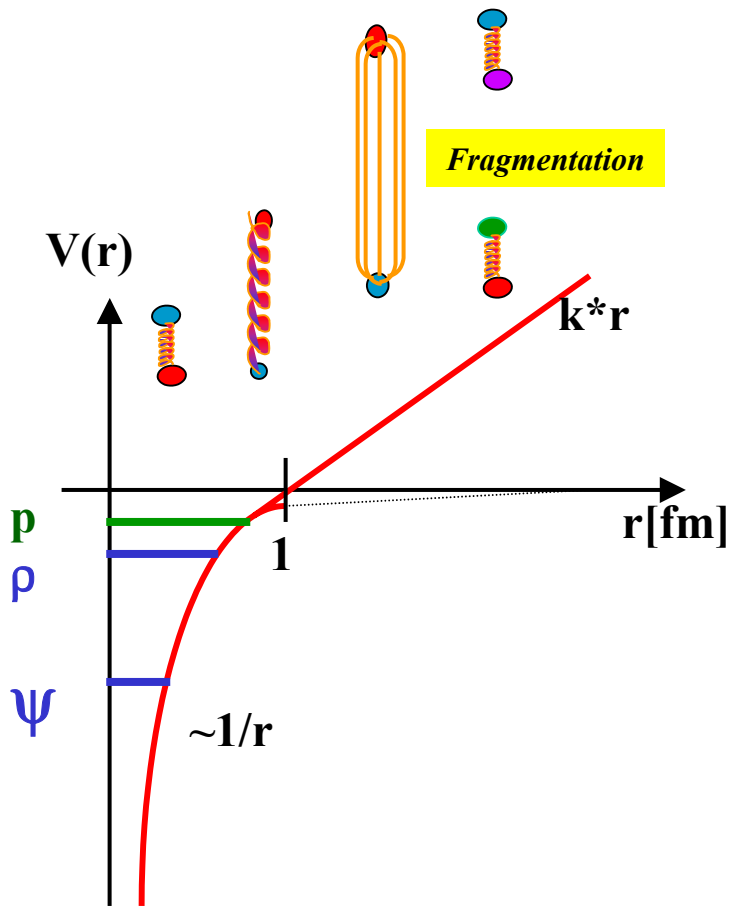
*Gluonen tragen Farbladung  $\sqrt{\alpha_s}$ . Sie wechselwirken mit sich selbst.  
Das macht den ganzen Unterschied zur QED!*

**Experimenteller Status:**



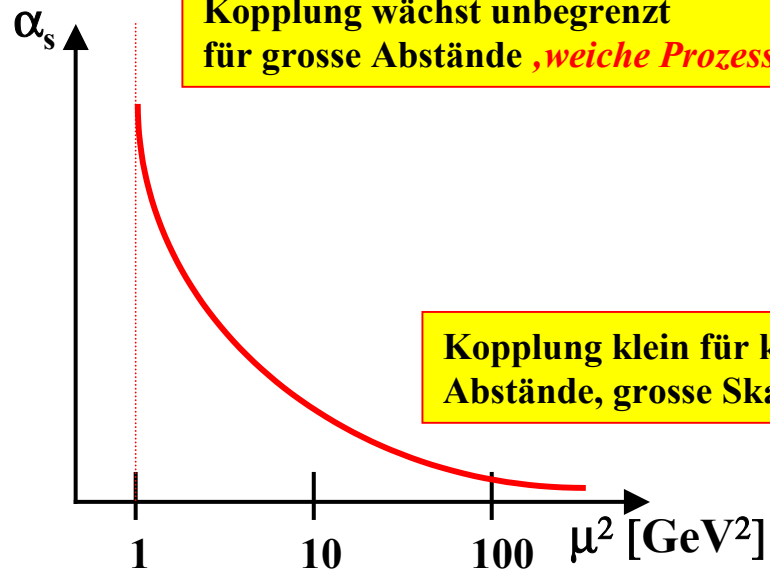
- **Gluonen existieren und haben Spin 1**
- **Gluonen tragen Farbladung: der ‚Tripelgluonvertex‘ existiert**
- **Es gibt 8 Gluonen (die Eichgruppe ist  $SU(3)_C$ )**

# Farbdipole



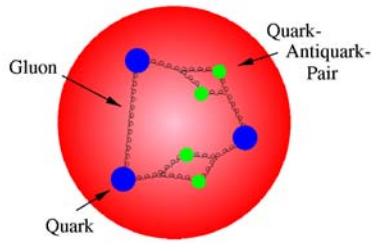
- es gibt keine freien Quarks und Gluonen
- bei grossen Abständen  $\longrightarrow$  Farbstring

$$\Delta r \sim 1/\mu$$



Störungstheorie funktioniert nur bei kleinen Abständen, grossen Skalen (>1 GeV)

# Protonen und Voraussagen der QCD

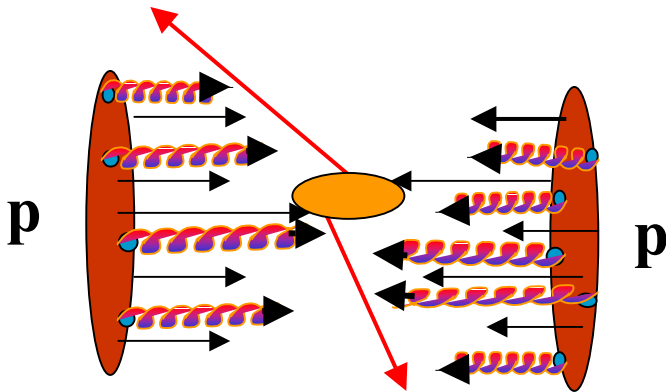


**1. Bindungszustand:** Das Proton ist ein farbloses Objekt aus drei Valenzquarks, die durch das Gluonfeld gebunden sind.

**Methode zur QCD Beschreibung: Gittereichtheorie**

**2. Parton-Partonstoesse bei hohen Energien**  
**„harte Streuprozesse“:**

Erzeugung von W's, Z<sup>0</sup>, Top, Jets

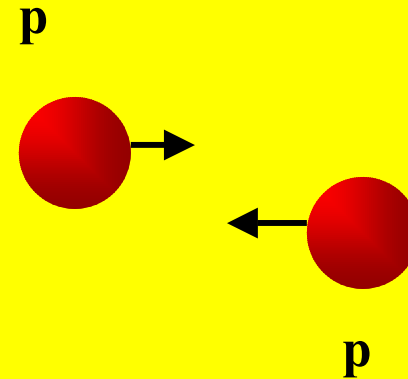


**Erfolgreiche Beschreibung durch QCD-Stoerungsrechnung:**

$$\alpha_s \ll 1$$

**3. p-p Streuung bei hohen Energien:**  
**totaler WQ und elastische Streuung**

$$\sigma_{\text{tot}} \sim \text{Im} [ A_{\text{el}} (t=0) ]$$



**Sehr aktives neues Arbeitsgebiet! Keine etablierte Methode!**

# Experimentelle Befunde zur p-p Streuung bei hohen Energien

## Wir beobachten ein einfaches universelles Verhalten!

1. Alle totalen Wirkungsquerschnitte steigen mit  $\sigma_{\text{tot}} = a s^{-\alpha} + b s^{\lambda}$  universell an!

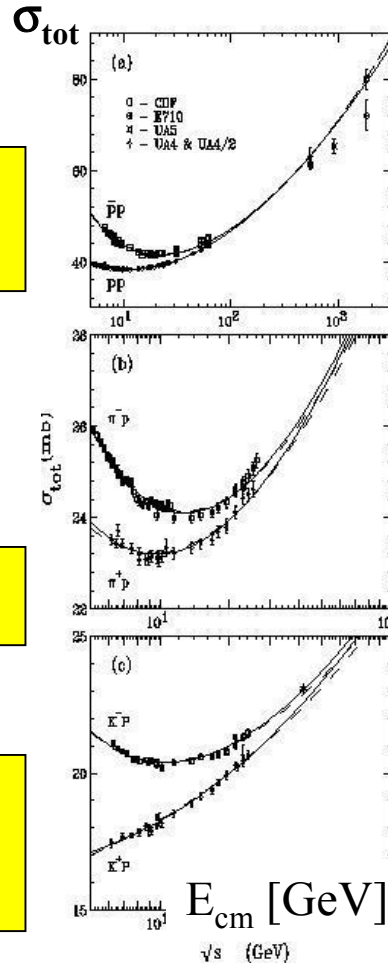
$$\sigma_{\text{tot}} = a s^{-\alpha} + b s^{\lambda}$$

2. Der diff. WQ zeigt 'Beugungsbild':  
Diffraktive Streuung

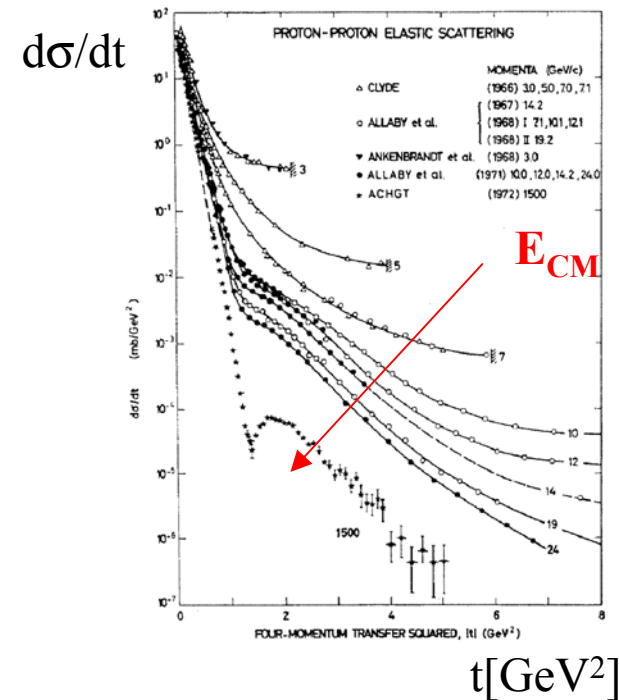
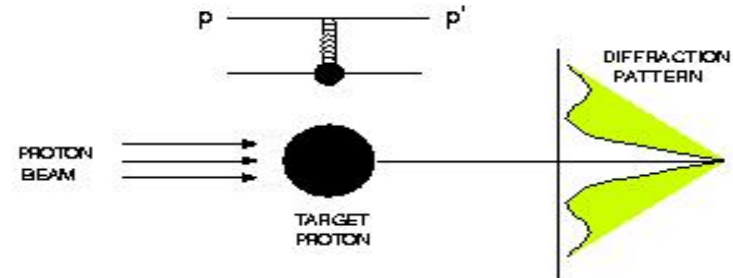
$$d\sigma/dt \sim s^{2\lambda} e^{-bt}$$

$$\lambda = 0.0808$$

Bestimmt den Anstieg



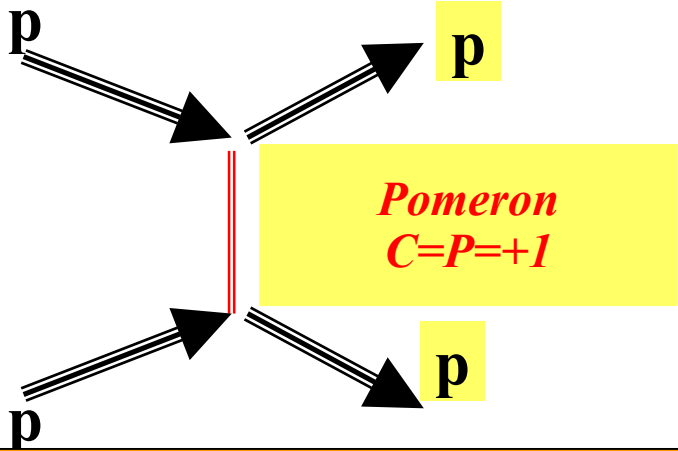
### PROTON-PROTON ELASTIC SCATTERING



1. das Proton hat diffusen Rand (Gaußprofil) 2. Es wird grösser mit s 3. Es ist grau!

# Das Pomeron

Hochenergiestreuung ist dominiert durch Austausch  
 Von Teilchen: ‚Reggetrajektorien = Teilchen und deren Rotationsanregungen‘



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

$$d\sigma/dt \sim s^{2[\alpha(t)-1]}$$

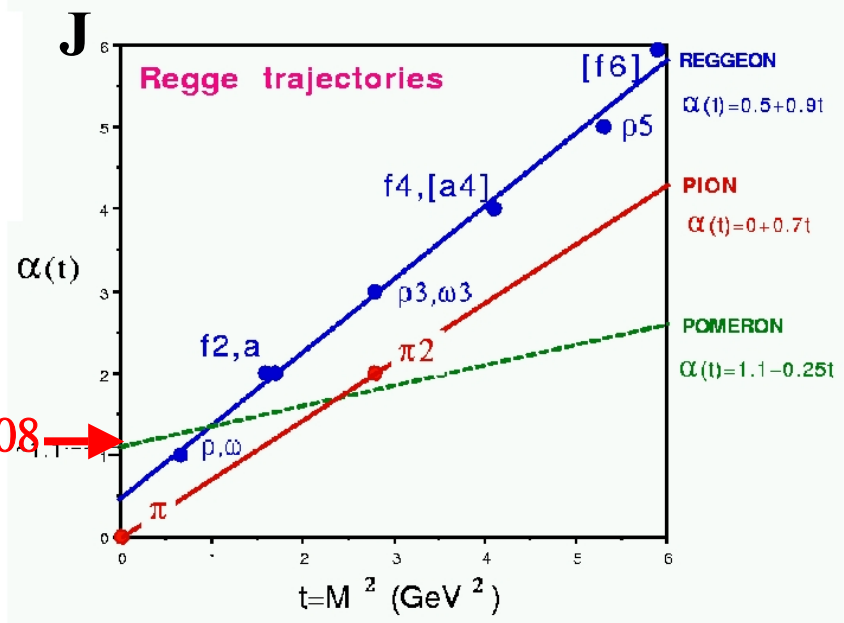
$$= s^{-0.45} \text{ für 'Reggeon'}$$

Bestimmt Abfall des  
 WQ bei kleinen Energien  
 $E_{\text{CM}} < 20 \text{ GeV}$

Ein Austauscheteilchen für die elastische p-p Streuung bei hoher Energie ist NICHT bekannt!  
 Es hätte die Quantenzahlen des Photons  $P=C = +1$  und ist farblos!  
 Kunstname : *POMERON*

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

Trajektorie



QCD: das ‚Pomeron‘ muss aus  $q\bar{q}$  oder Gluon-Gluon Zuständen bestehen!

Die besten experimentellen Möglichkeiten zur experimentellen Untersuchung dieser Fragen bietet nicht etwa der Proton-Antiproton Collider bei Chicago (Tevatron) sondern der

Elektron-Proton Speicherring HERA (DESY)

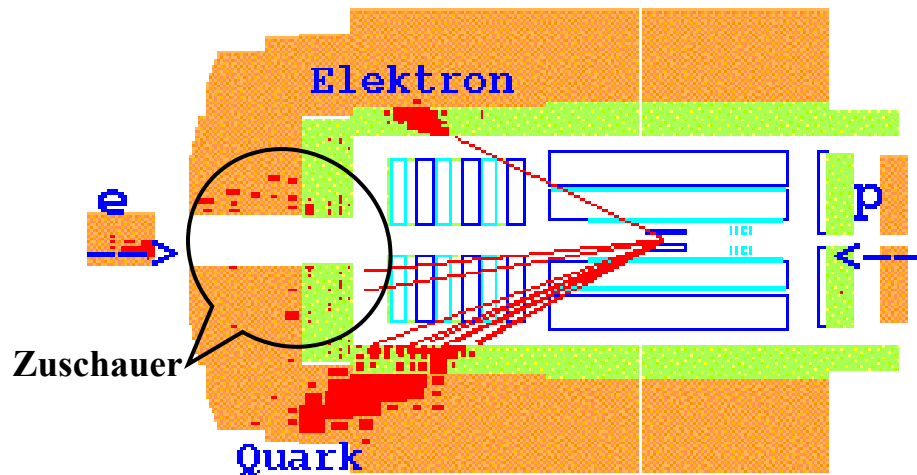


$$E_{\text{CM}} = 315 \text{ GeV}$$

- *In der tiefinelastischen ep Streuung wurde `69 die Existenz der Partonen im Proton entdeckt*

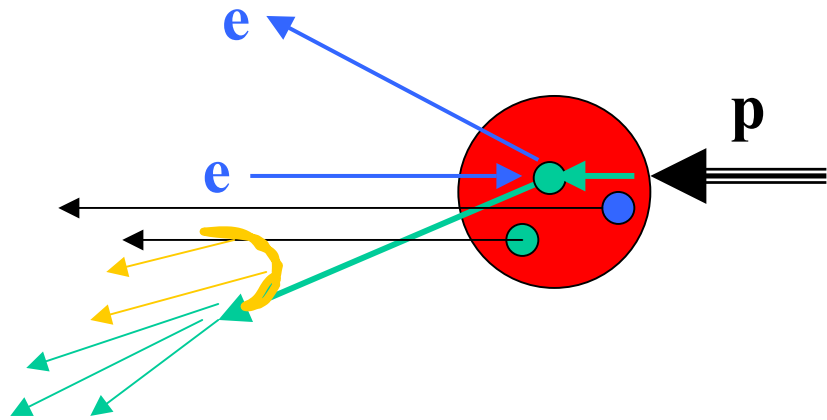


# Tiefinelastische e-p Streuung: Messung der Partonstruktur

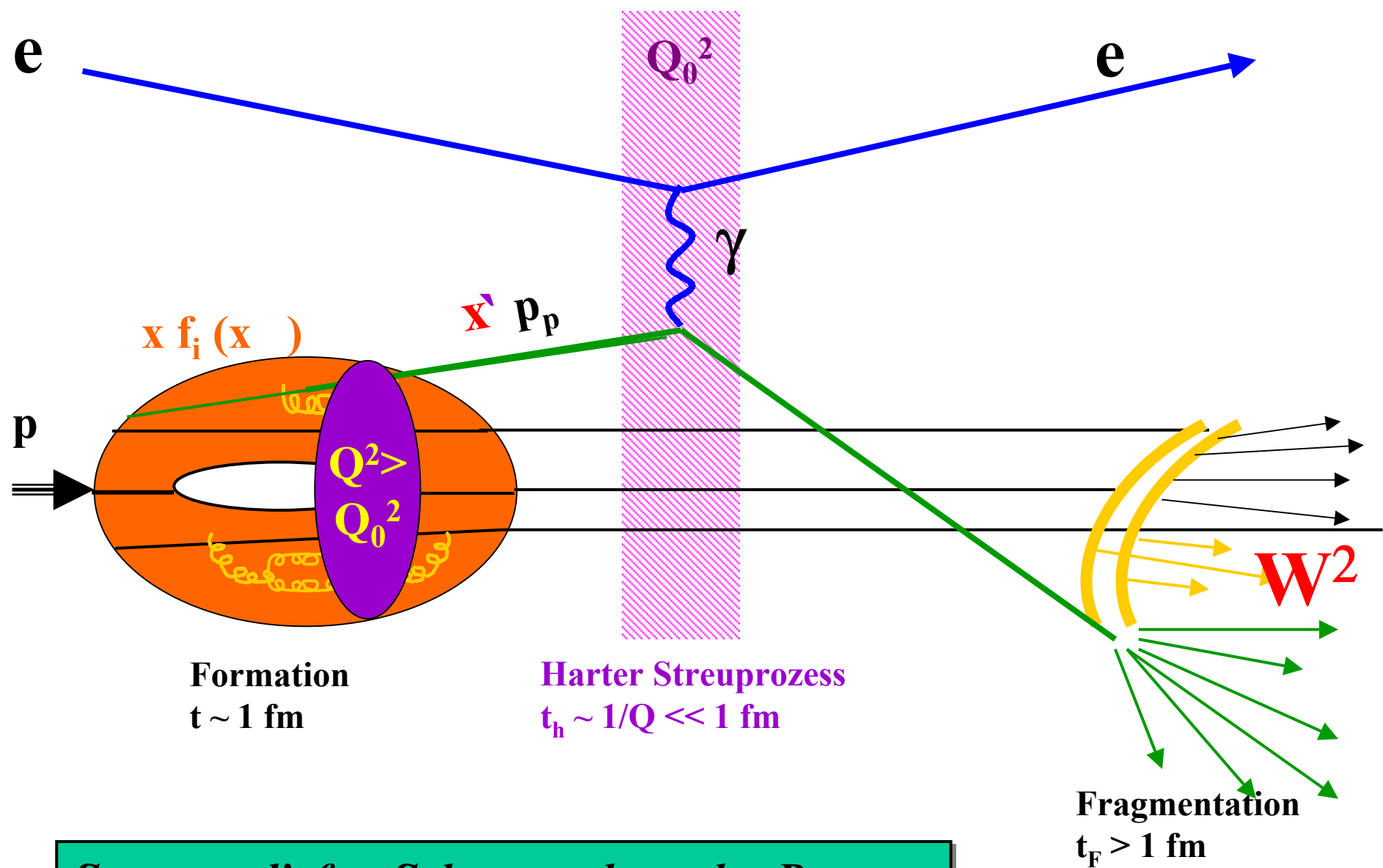


Evidenz für Streuung an punktförmigen Streuzentren ( farbigen Quarks)

- Streuung des Elektrons um grosse Winkel ( $\sim 1/\sin^4 q/2$ )
- ‚Jets‘ im Endzustand
- Hadronen in Protonrichtung: es wurde ein farbiges Parton (Quark) aus dem Proton gestreut



*Streuereignis bei HERA (H1)*



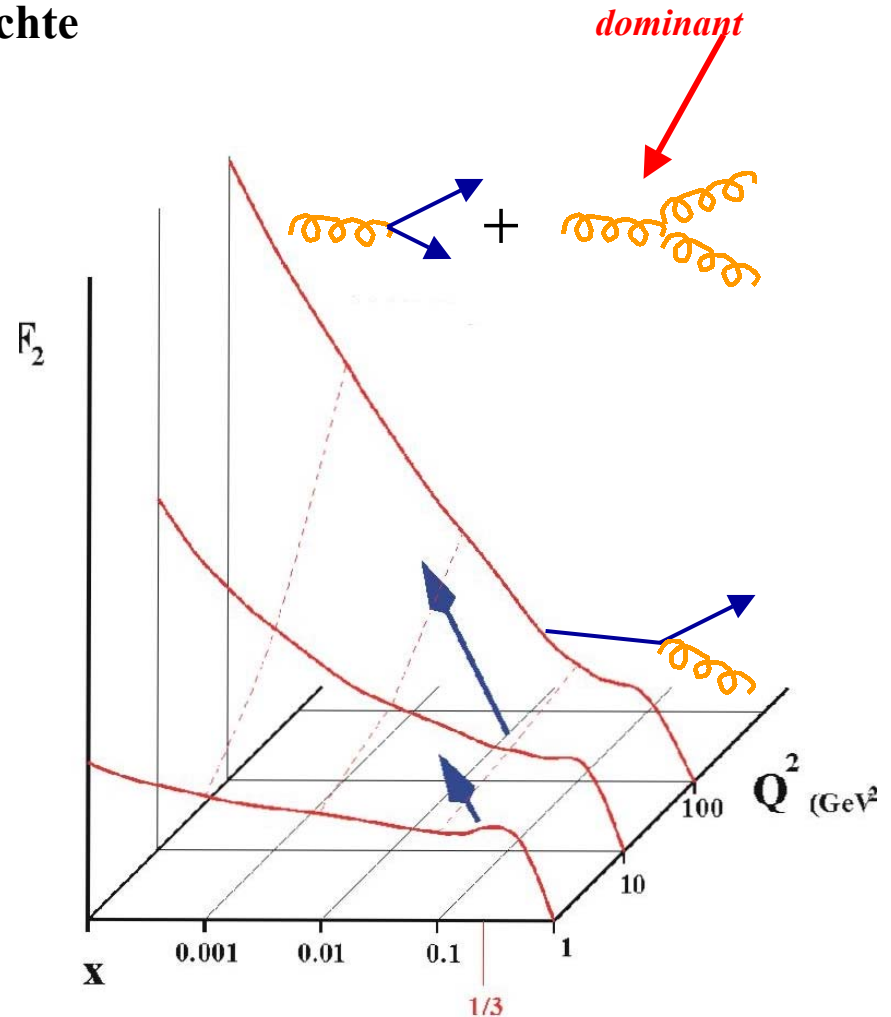
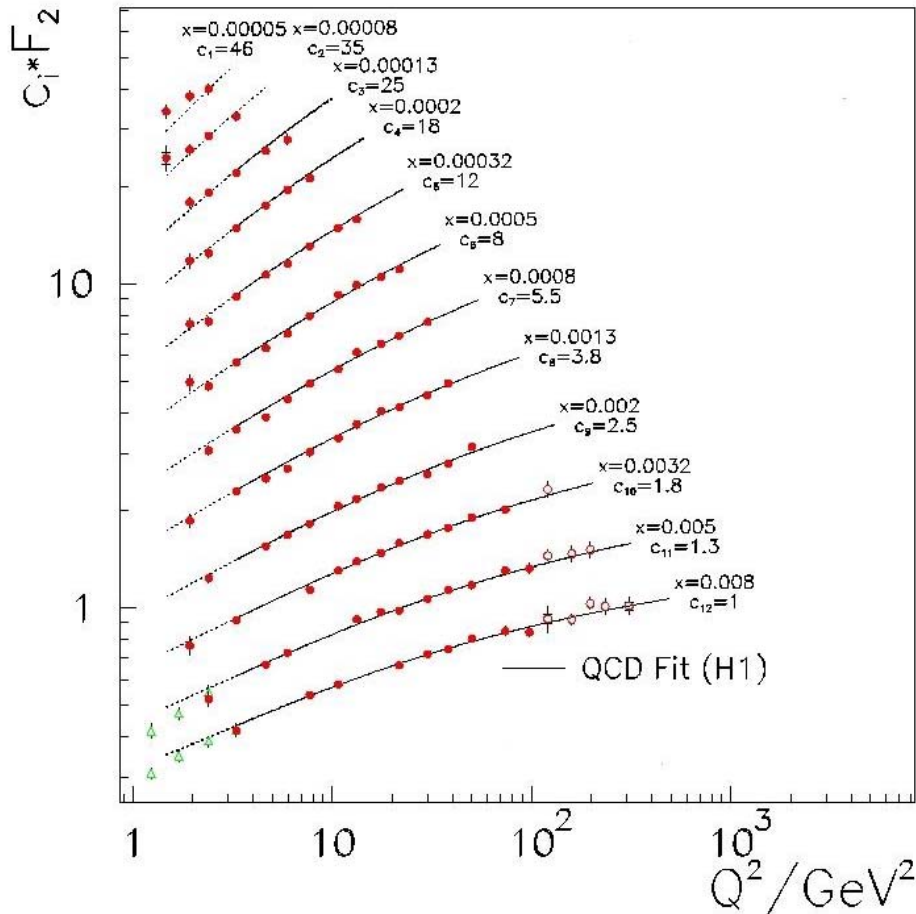
*Streuung liefert Schnappschuss der Partonverteilung mit Belichtungszeit  $\sim 1/Q \ll 1 \text{ fm}$*

# Evolution der Strukturfunktionen

- Elektronen streuen nur an elektrisch Teilchen : Quarks

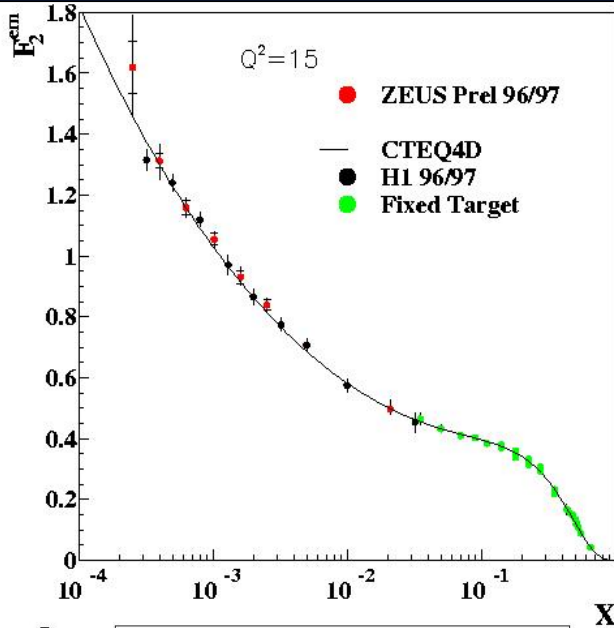
$$F_2^{ep}(x, Q^2) = \sum e_f^2 x [ q_f(x, Q^2) + \bar{q}_f(x, Q^2) ]$$

- $F_2$  ändert sich mit  $Q^2$ , weil die Auflösung besser wird: der Anstieg bei kleinem  $x$  ist proportional zur Gluondichte



# Quark und Gluonverteilungen im Proton

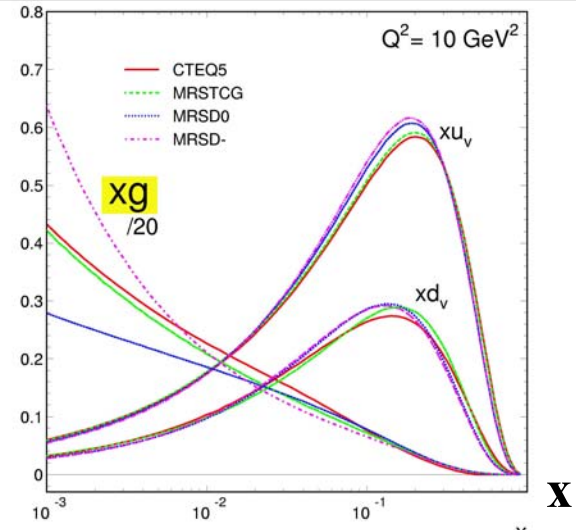
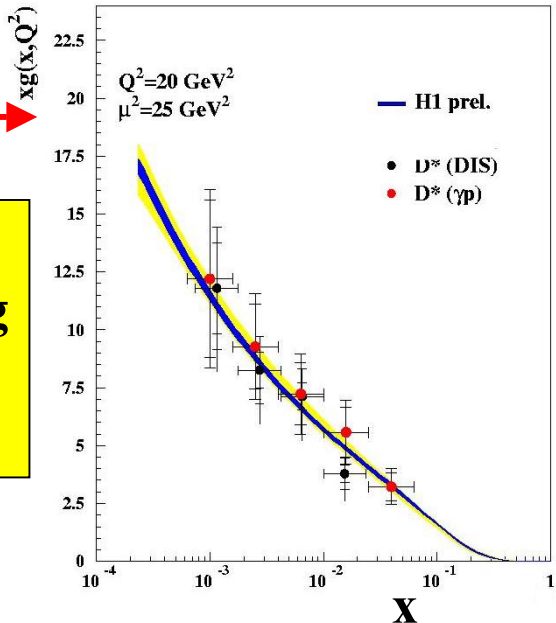
$F_2(x) \sim$   
 $x^{-\lambda}$   
 bei kleinem  $x$



- Die Quarkverteilungen sind direkt messbar: 50% des Protonimpulses!
- die Gluonverteilung kann indirekt aus den Skalenverletzungen bestimmt werden oder direkt aus 2 Jet-Ereignissen

*riesig* →

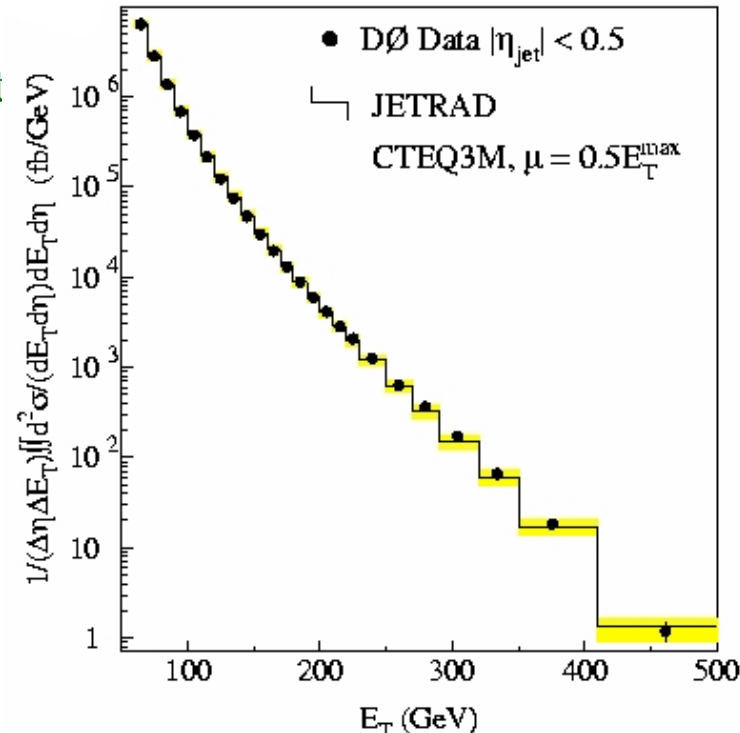
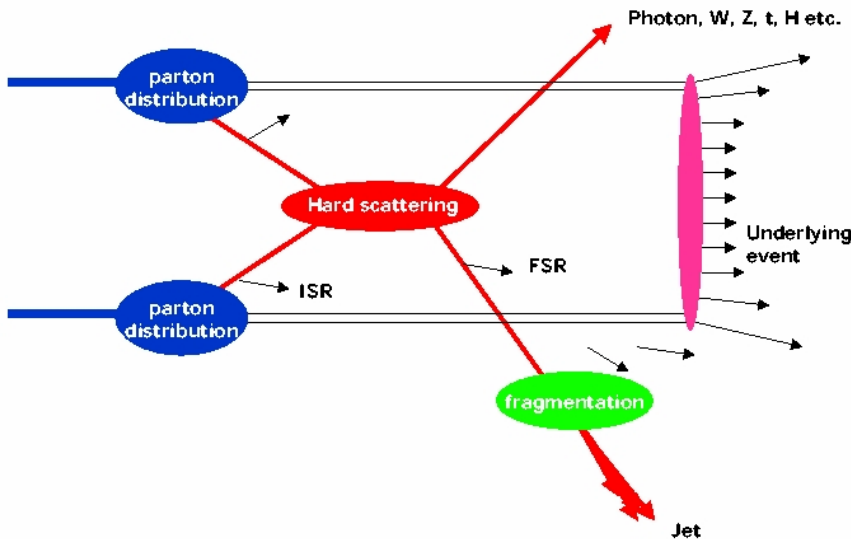
**Gluon-Verteilung**  
 $x^{-\lambda_g}$



# Die Universalität der Partonverteilungen: Ein Triumph der QCD

- **Faktorisierung:** der Wirkungsquerschnitt faktorisiert in den Wirkungsquerschnitt der Elektron-Quark oder Parton-Parton Streuung, der in Störungsrechnung vorausgesagt werden kann und die Partondichten, die exp. gemessen werden müssen
- **Universalität:** die Partondichten gelten für alle harten Streuprozesse, auch in Hadron-Hadron Streuungen (nach Korrektur auf Effekte höherer Ordnung in  $\alpha_S$ )

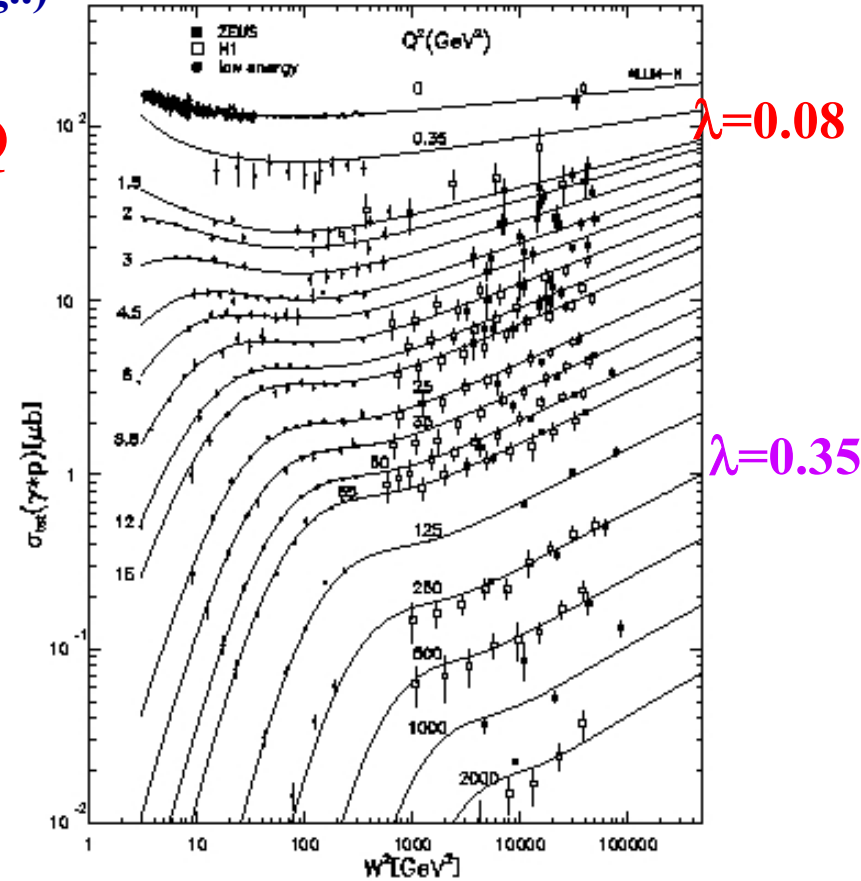
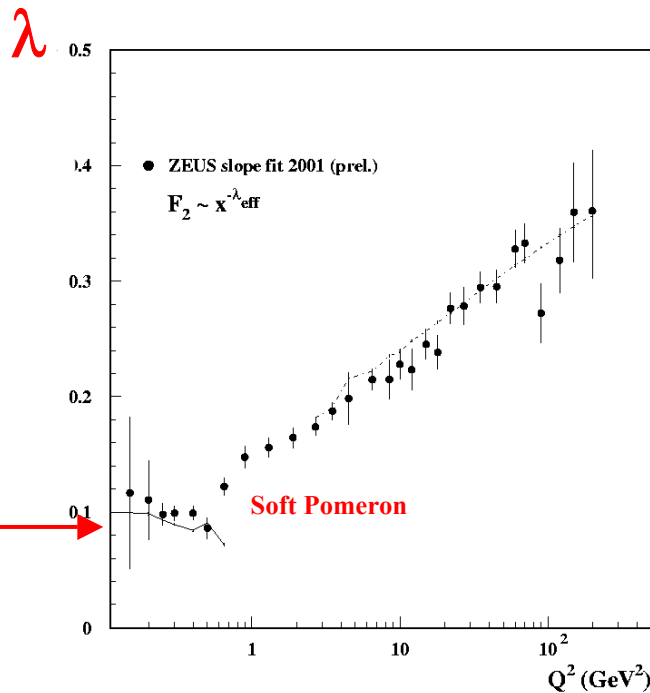
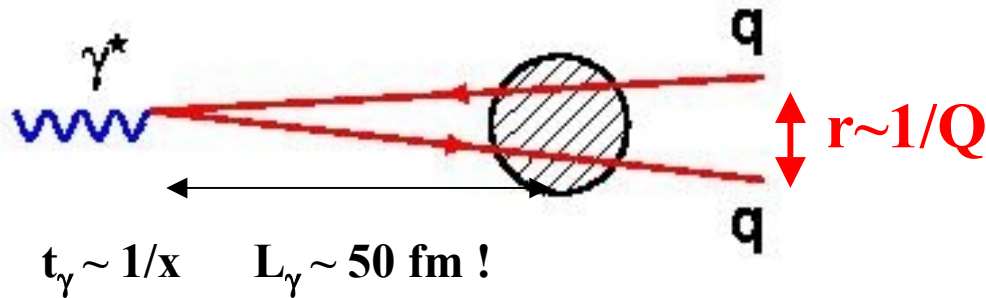
Bsp: der 2-Jet WQ in  $\bar{p}p$  Kollisionen wird vorhergesagt



# Der $\gamma^* p$ Wirkungsquerschnitt bei hohen Energien

Ein anderer Blickpunkt auf die tiefinelastische Streuung: Proton-Ruhesystem

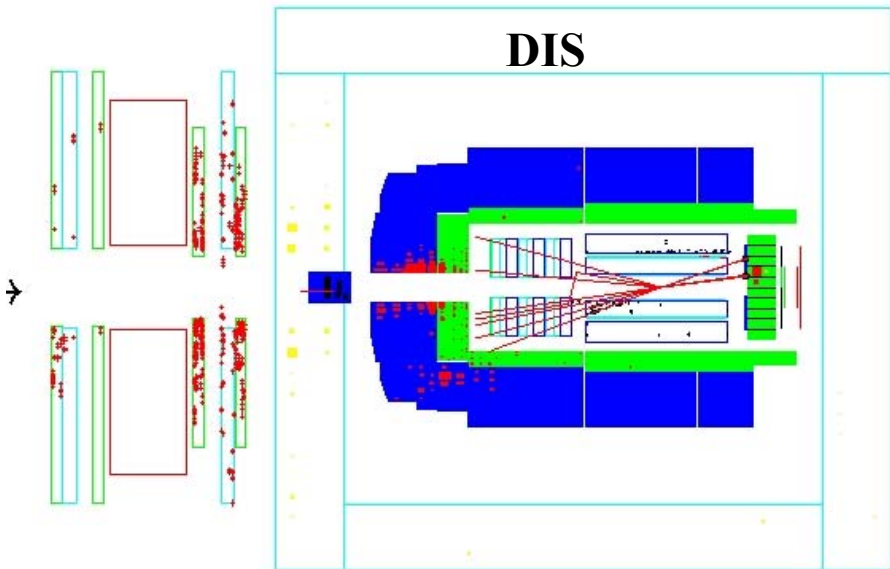
$\gamma$  ist Überlagerung partonischer Zustände (qq,qqg..)



$$\sigma_{\gamma^*p}(W^2) \sim F_2(W^2, Q^2)/Q^2 \sim W^{2\lambda}$$

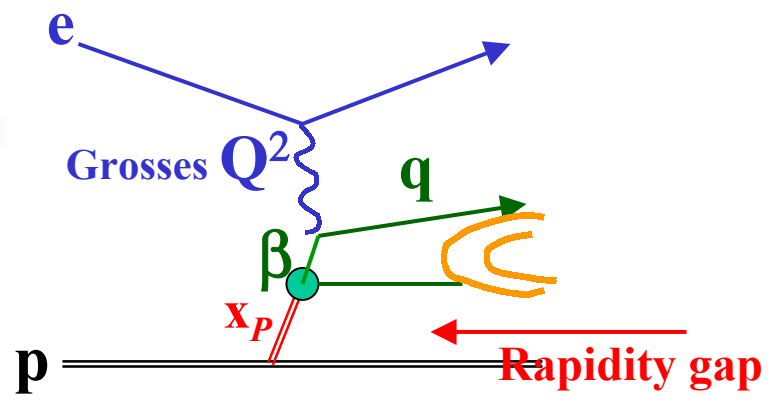
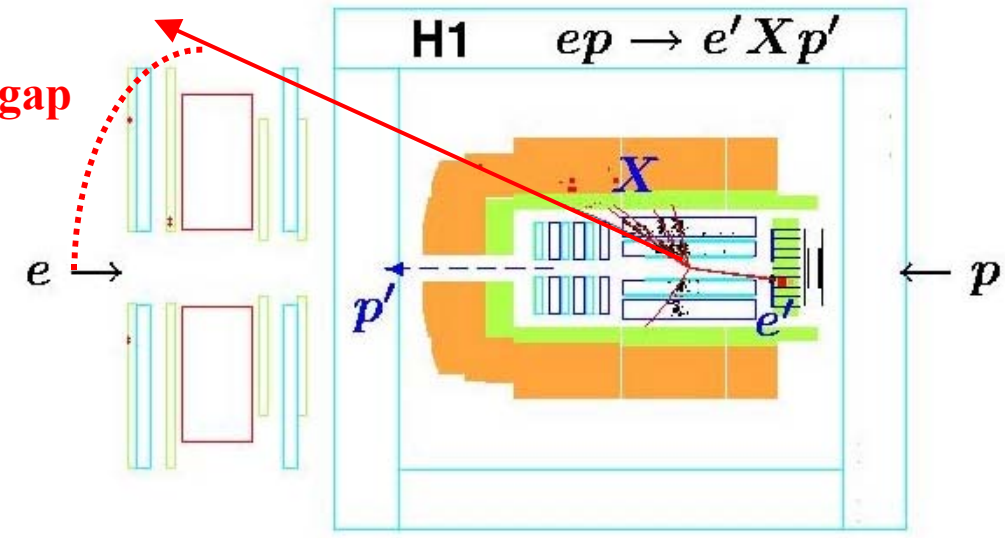
$W^2 = Q^2/x$  : kleines  $x \rightarrow$  hohe Energie!

- In der tiefinelastischen Streuung bei kleinem  $x$  messen wir den totalen Wirkungsquerschnitt eines **Farbdipols** ( $q\bar{q}$ ) mit dem Proton bei hohen Energien ( $E_{\text{CM}} < 300 \text{ GeV}$ )
- Die transversale Ausdehnung  $r$  des Dipols kann über die Wahl von  $Q^2$  gesteuert werden...hohe  $Q^2 \rightarrow$  kleine Ausdehnung ( wir können uns unser ‚Hadron‘ basteln)
- bei grosser Ausdehnung (1 fm) steigt der WQ an wie der des p-p WQ's (weiches Pomeron)
- für kleine Ausdehnungen des Dipols steigt er viel stärker an  
 $\rightarrow$  **es gibt kein universelles Pomeron als Trajektorie**



**Diffraktive Streuung**

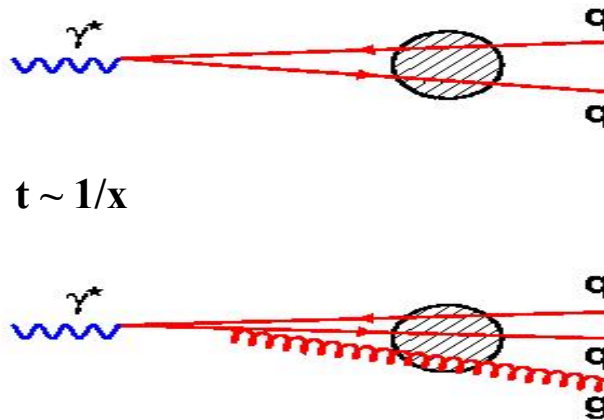
1. elastisch gestreutes Proton!  
*(wäre am besten)*
2. keine ‚Vorwärtsenergie‘  
(rapidity gap Ereignis)  
ca. 10% aller Ereignisse



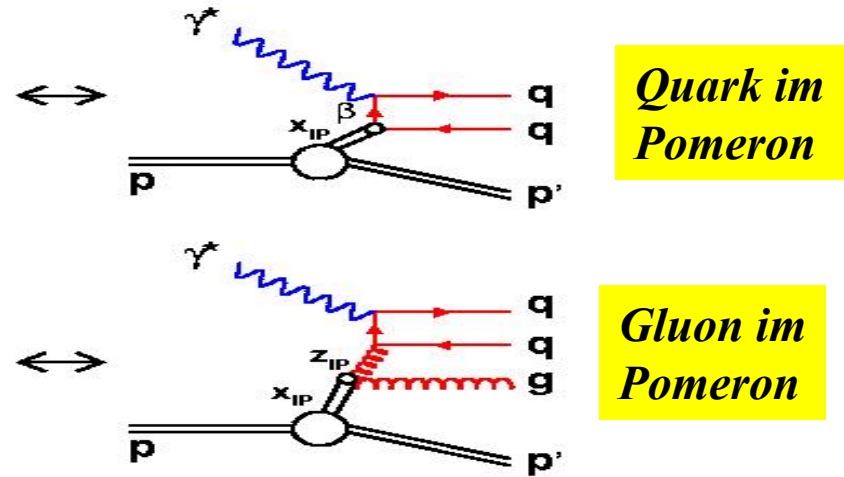


# Beschreibung diffraktiver Prozesse bei HERA

## Proton Ruhesystem



## Proton ‚infinite momentum frame‘



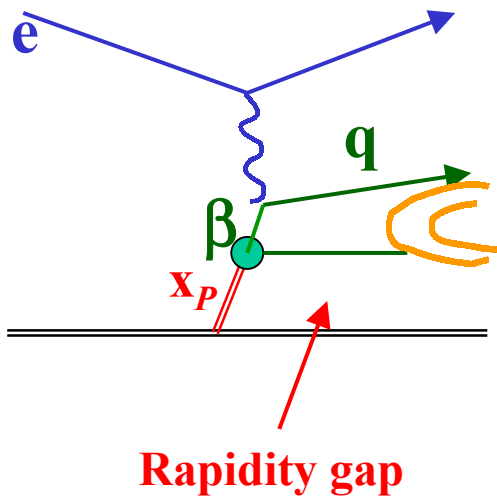
- Das Photon fluktuiert lange vor der Wechselwirkung mit dem Proton in ein  $q\bar{q}$  oder  $q\bar{q}g$  System: einen ‚Farbdipol‘
- entscheidend für den Wirkungsquerschnitt ist der Transversalimpuls der Partonen: wird über  $Q^2$  gesteuert

- die Streuung des Elektrons bei hohem  $Q^2$  löst die Partonstruktur des Pomerons auf. Wir können die ‚diffraktiven‘ Quark- und Gluonimpulsverteilungen messen

**--> wir untersuchen bei HERA die diffraktive Streuung von künstlichen Hadronen variabler Ausdehnung.**

# Elektronstreuung am Pomeron

- messe diffraktive Strukturfunktion  $F_2^D(\beta, Q^2, x_p)$  in der inklusiven Streuung: Quarkstruktur des Pomerons



## Experimentelle Befunde:

1.  $F_2^D(\beta, Q^2, x_p) = x_p^{-2[\alpha(t)-1]} * F_2^D(\beta, Q^2)$   
**Pomeronfluss \* Quarkverteilung im Pomeron**
  2.  $\alpha(0) = 1.16 \pm 0.03 \neq 1.08$  ! (nicht das soft Pomeron)
2. Wir streuen an punktförmigen Partonen
- Skalenverhalten
  - Jets

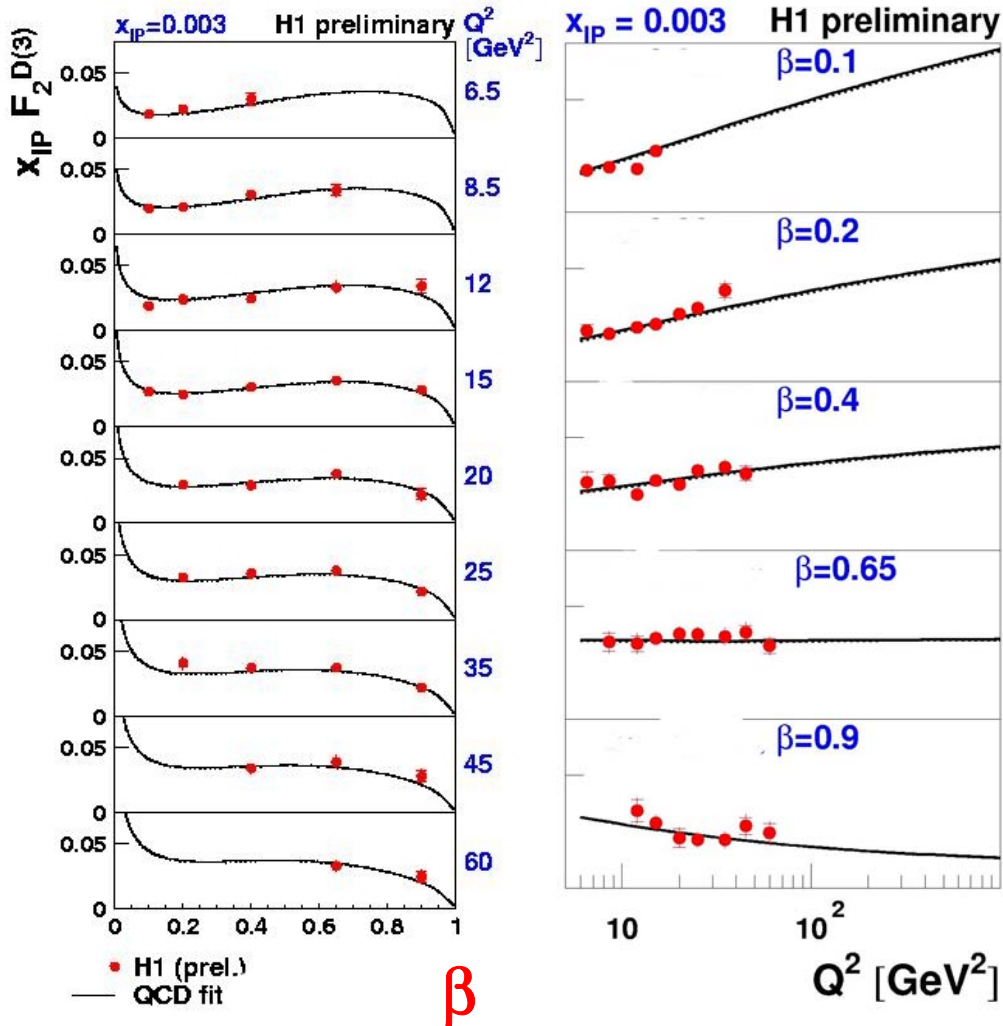
**Resolved Pomeron Modell:** die Wellenfunktion des Protons enthält eine ‚Pomeronkomponente‘, die man sich als zusammengesetztes ‚Teilchen‘ vorstellt. Das Elektron streut an den Quarks im ‚Pomeron‘.

**Der Flussfaktor passt allerdings nicht zum soft Pomeron der p-p Streuung!**

# Die diffraktiven Partonverteilungen

$$F_2^D(\beta, Q^2)$$

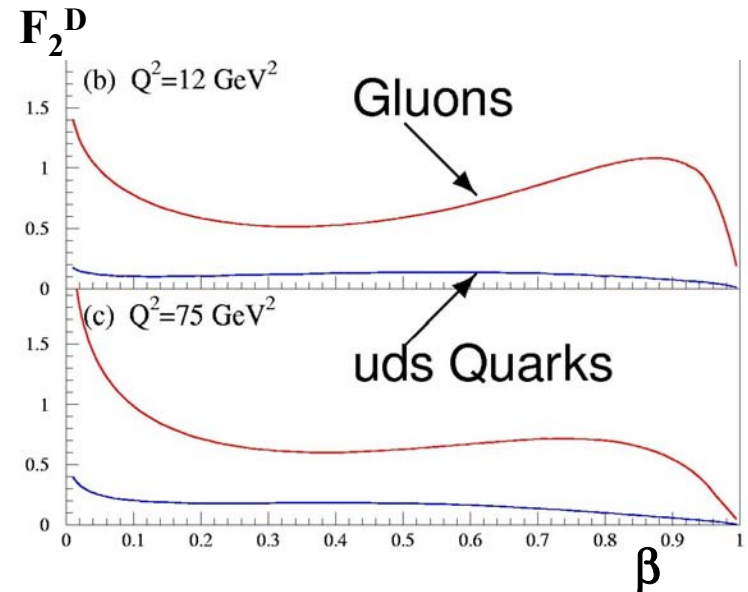
Example results at  $x_P = 0.003$



- näherungsweise Skalenverhalten !
- Anstieg von  $F_2^D$  mit  $Q^2$  auch bei grossem  $\beta$

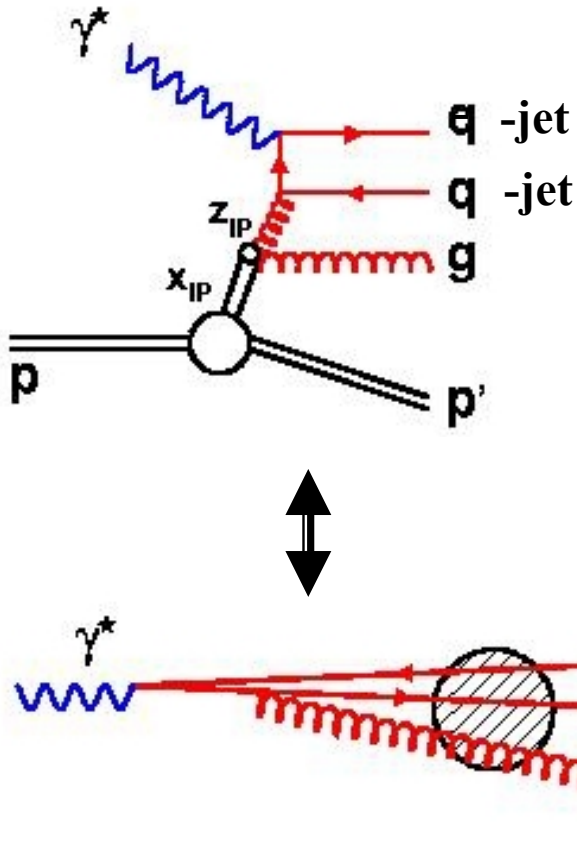
**QCD Analyse der Skalenverletzungen:**  
Das Pomeron ist *dominiert von Gluonen* (80 % des Impulses).

Die Gluonen tragen hohe Impulse  $\beta$   
Ich sehe mit  $e^-$  nur die rel. unwichtigen Quarks!

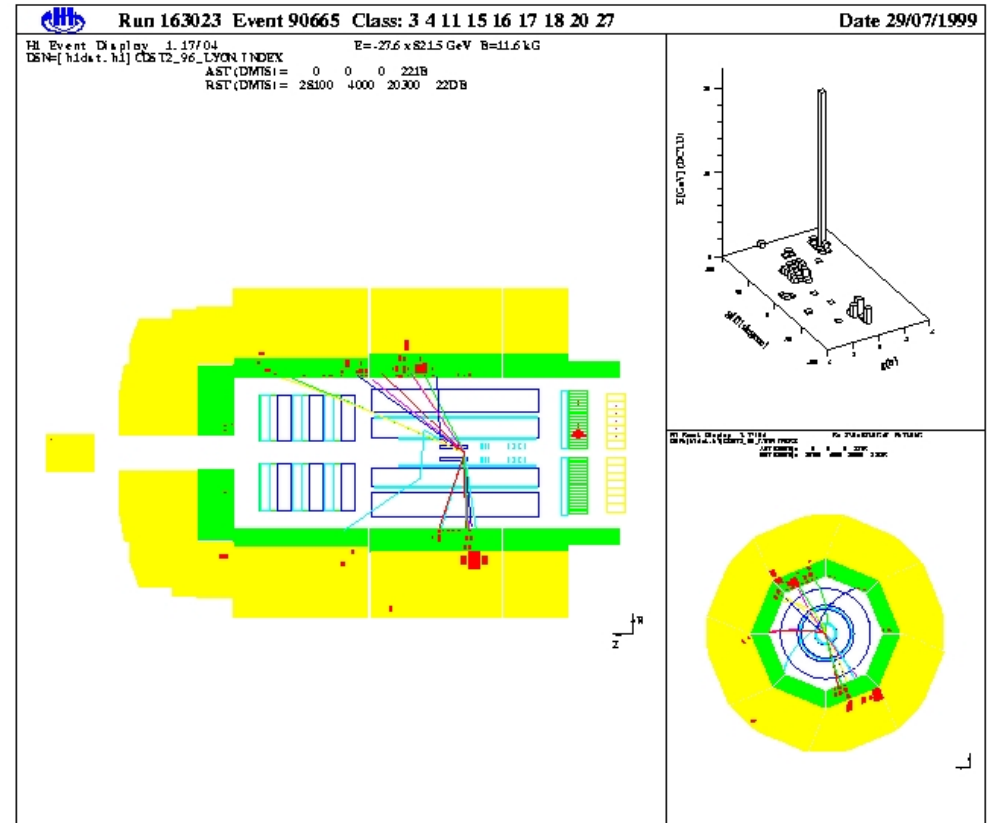


# Die direkte Messung der Gluonverteilung

Ereignisse mit 2 Jets messen direkt  
Die Gluonen im Pomeron!

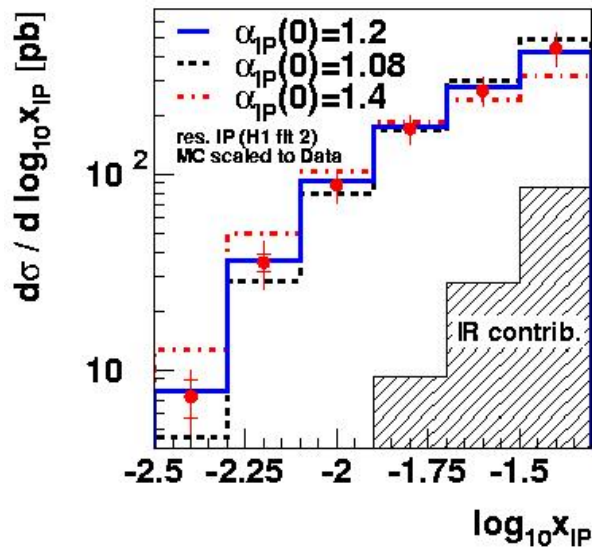


Gluon dominiertes Pomeron?  
qqg Fluktuationen des Photons dominieren.



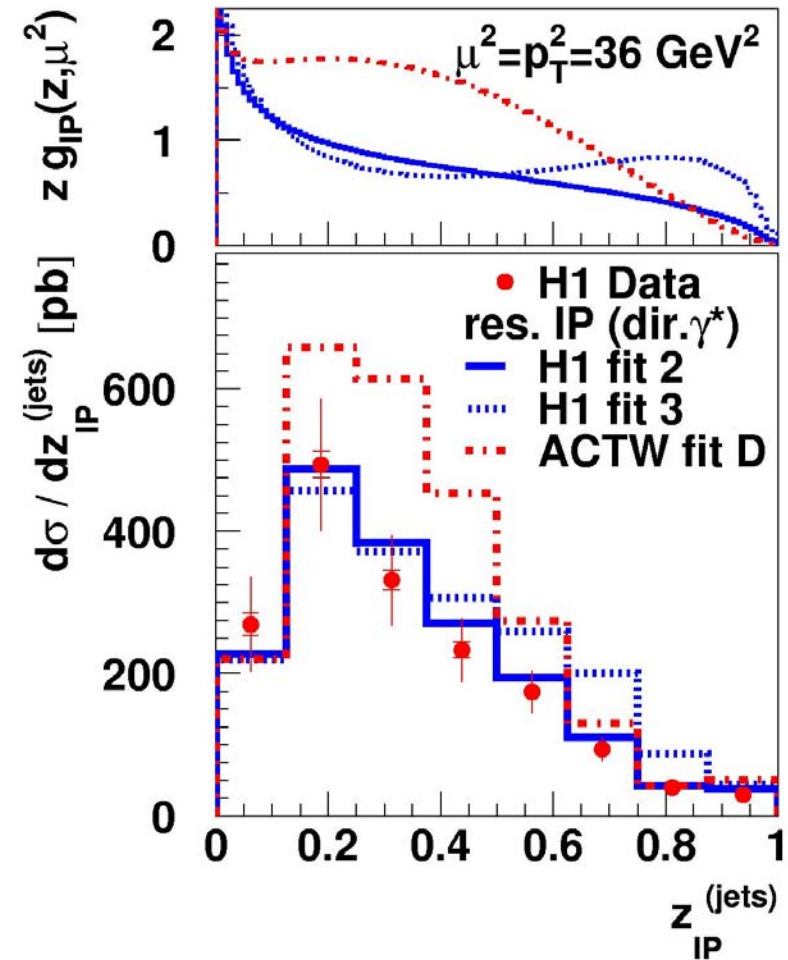
Faktorisierung? die diffraktiven Partonverteilungen  
sollten universell sein für alle Prozesse. Finden wir  
Dieselbe Gluonverteilung?

# 2-Jet Wirkungsquerschnitt in der diffraktiven DIS



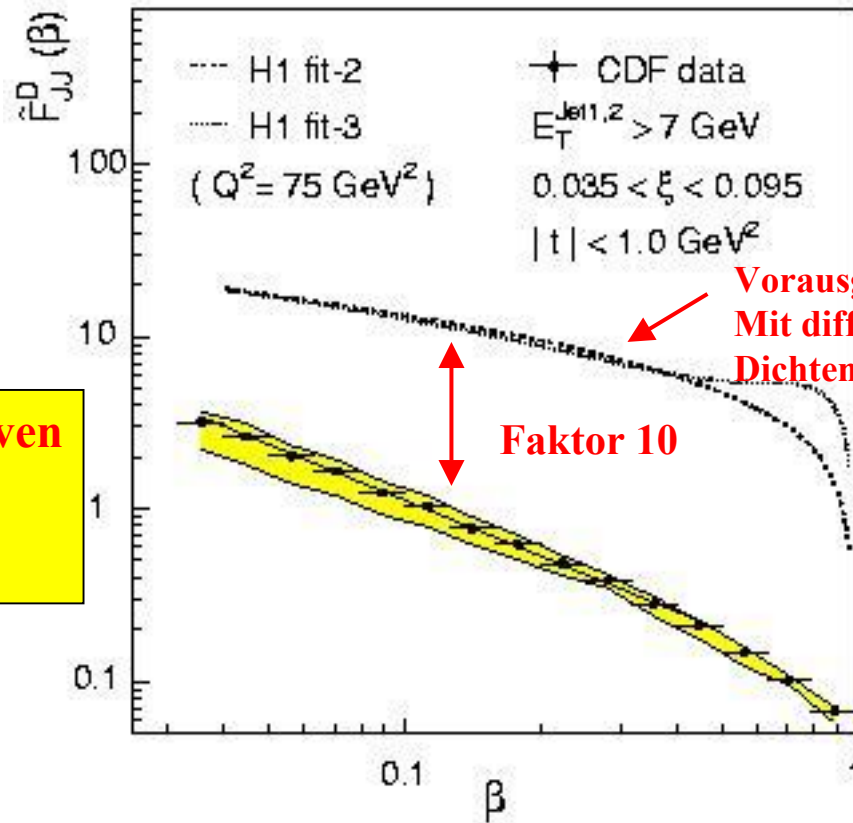
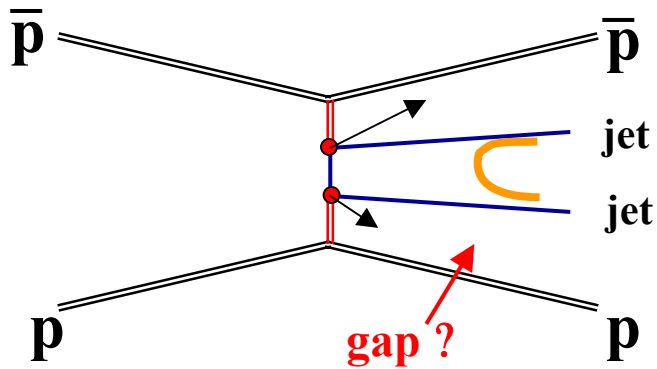
- Der 2-Jet Wirkungsquerschnitt faktorisiert ebenfalls in denselben Pomeronflussfaktor und eine Partondichte  $\alpha(0)=1.2$
- er wird durch dieselbe Partondichte (Gluondichte) beschrieben wie die inklusive Streuung
- **Das Pomeron ist Gluon-dominiert**
- qqg Fluktuationen im Photon dominieren

## H1 Diffractive Dijets



Für die tiefinelastische Streuung gilt Faktorisierung!  
(inzw. auch theoretisch gezeigt)

# Diffraktive Partondichten in $\bar{p}$ -p Kollisionen (Tevatron)

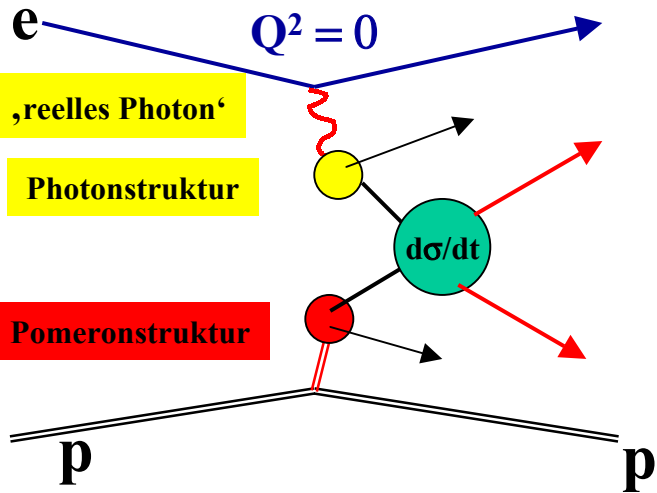


**Der Wirkungsquerschnitt in diffraktiven hadronischen Prozessen faktorisiert nicht! ????????**

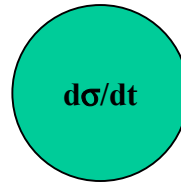
- Mehrere Modelle können das erklären
- **Mehrfachwechselwirkungen durch die ‚Zuschauer‘ zerstören das rapidity gap oder**
  - **die Farbneutralisierung durch weiche Gluonen hängt vom Partonenzustand und der Schwerpunktsenergie ab..**

**Diffraktive Prozesse in Hadronreaktionen sind schwieriger zu beschreiben. Was zerstört die Faktorisation? → HERA  $\gamma p$**

# Warum gilt die Faktorisierung nicht? Diffraktive $\gamma p$ Prozesse



$\gamma p$ : das Hadronlabor bei HERA.



Parton-Parton Wirkungsquerschnitt: QCD

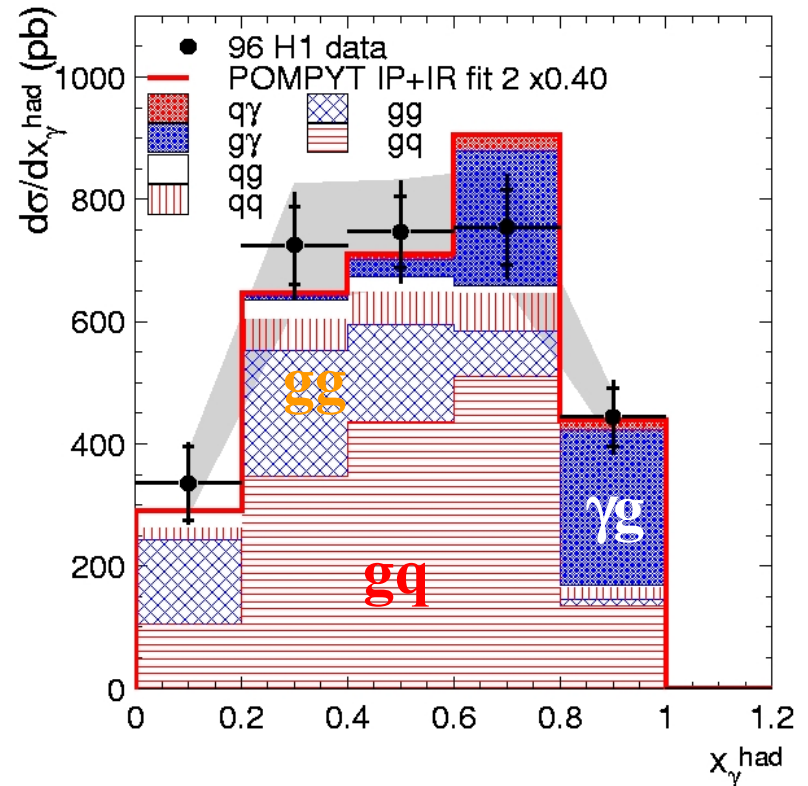
$gg \rightarrow gg, qg \rightarrow qg, qq \rightarrow qq$ .

Und direkter Prozess:  $\gamma g \rightarrow qq$

*Die Prozesse können getrennt werden!*

**Vorläufige Ergebnisse:**

- keine Faktorisierung: Skalenfaktor  $S = 0.5$  unabhängig vom Subprozess!
- Form des WQ wird sehr gut durch die diffraktiven Partondichten aus der DIS beschrieben.



# Wesentliche experimentelle Erkenntnisse

**Das ‚Pomeron‘ besteht überwiegend aus Gluonen**

**In den hadronischen Fluktuationen des Photons dominieren qqq- Zustände**

- **Der Anstieg des  $\gamma p$  - Wirkungsquerschnitts bei hoher Energie ist NICHT universell sondern hängt von der Grösse des ‚Hadrons‘ ab.**
- **Die Wechselwirkung kleiner Farbdipole kann in guter Näherung perturbativ berechnet werden**
- **Die diffraktive Gluondichte ist universell für Prozesse der tiefinelastischen Streuung, sie kann aber nicht die diffraktive Hadron-Hadronstreuung Voraussagen**

**Das Teilchenmodell des Pomerons (resolved Pomeron model) beschreibt die Daten bei HERA sehr gut, wenn der Flussfaktor von  $Q^2$  abhängen darf!**

***Einige Pflöcke wurden eingeschlagen und müssen von jeder theoretischen Beschreibung respektiert werden***



# Das Pomeron als Teilchen (Trajektorie)

*Ist das Pomeron also ein gebundener Zustand (eine Regge-trajektorie) aus ‚Glueballs‘, der bei diffraktiven Prozessen ausgetauscht wird?*

*Experiment: der Achsenabschnitt  $\alpha(0)$  der ‚Trajektorie‘ ändert sich mit  $Q^2$  bzw. der Ausdehnung des Hadrons.*

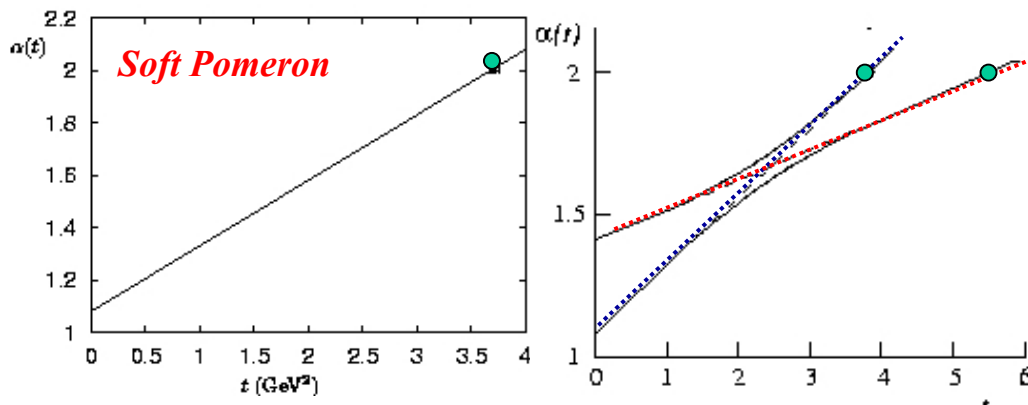
*Es kann nicht eine universelle Pomerontrajektorie geben!*

**Modell von Donnachie und Landshoff (98): Es gibt 2 Pomerontrajektorien**

**soft Pomeron:  $\alpha_S(t) = 1.008 + 0.25 * t$**

beschreibt im Wesentlichen die WW grosser Hadronen ( pp, p $\pi$ ,  $\gamma$ p ( $Q^2=0$ ))  
 $\sigma_{\gamma p}(W^2, Q^2)$  bei hohem  $Q^2$

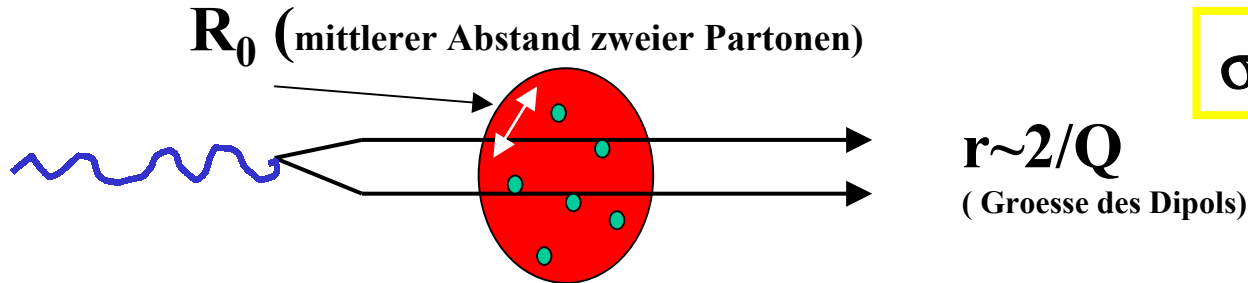
**hard Pomeron:  $\alpha_H(t) = 1.44 + 0.10 * t$**



**Modell beschreibt alle Daten im jetzigen Energiebereich zufriedenstellend und ist sehr ökonomisch!**

# Farbdipolmodelle

Die Wechselwirkung eines Farbdipols mit dem Proton beschreibt die tiefinelastische und die diffraktive Streuung bei kleinem  $x$



$$\sigma^{\gamma^*P}(x, Q^2) = \sigma^{\gamma^*P}(W^2, \bar{r})$$

$$\sigma_{T,L}(x, Q^2) = \int d^2\mathbf{r} \int_0^1 d\alpha |\Psi_{T,L}(\alpha, \mathbf{r})|^2 \hat{\sigma}(x, r^2),$$

*DIS ( $F_2$  bei kleinem  $x$ )*

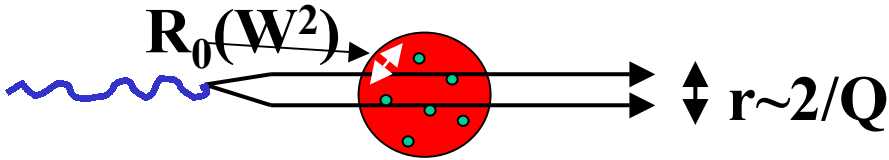
Dipol WF im  
Photon

Dipol-p Wirkungs-  
querschnitt

$$\left. \frac{d\sigma_{T,L}^D}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{16\pi} \int d^2\mathbf{r} \int_0^1 d\alpha |\Psi_{T,L}(\alpha, \mathbf{r})|^2 \hat{\sigma}^2(x, r^2).$$

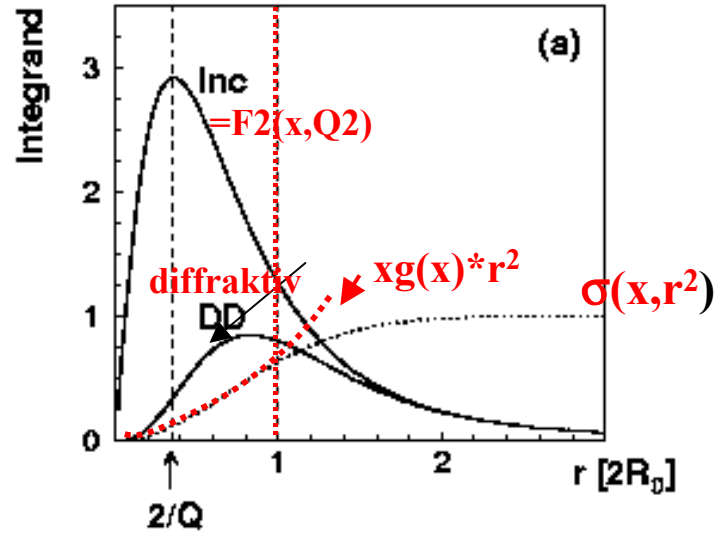
*Diffraktion ( $F_2^D$ )*

*Wie sieht der Dipol-Proton Wirkungsquerschnitt aus?*



$\sim 0.4 \text{ fm}$   
 $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$   
*proton*

$$\hat{\sigma}(x, r^2) = \sigma_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4R_0^2(x)}\right) \right\}$$



**Saturationsmodell für den Dipol-p Wirkungsquerschnitt** (Golec-Biernat-Wüsthoff 99)

$r < 2R_0$  *quadratischer Anstieg durch Gluonevolution (pertubativ berechenbar) : ok für kleine Dipole und inklusive Streuung*

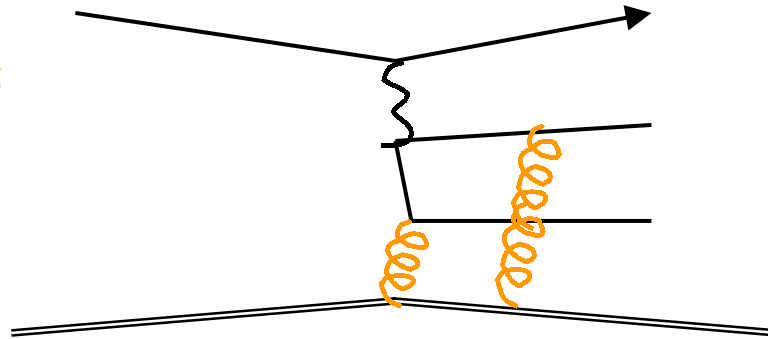
$r > 2R_0$  *Wirkungsquerschnitt wird konstant, d.h. das Proton ist schwarz für grosse Dipole. Dieser Teil ist eine Modellannahme!*

**Für Diffraktion kann man definitiv nicht nur pertubativ rechnen, für grosse Dipole (z.B. Hadronen) dominieren nichtpertubative Effekte**

# „Berechnung“ des Dipolwirkungsquerschnitt

a) Wie weit kommt man mit einem rein perturbativen Ansatz?

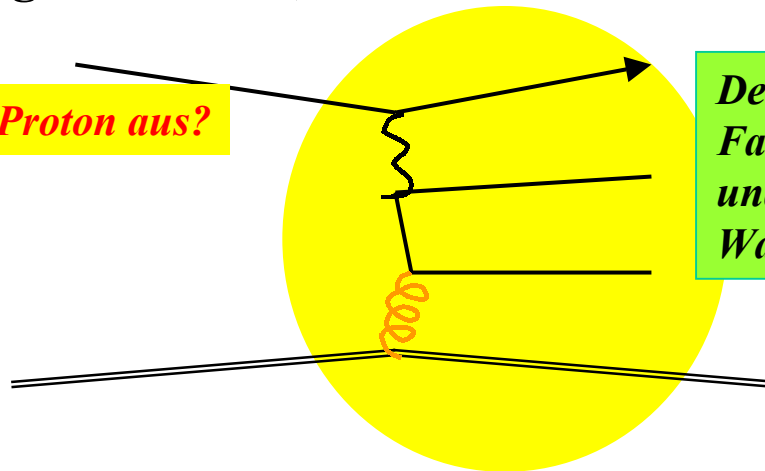
**2-Gluon Austausch:**



*Das ist die einfachste Möglichkeit einen farblosen Austausch zu realisieren. Gut für kleine Dipole?*

b) Farbneutralisierung durch das ‚weiche‘ Gluonfeld des Protons

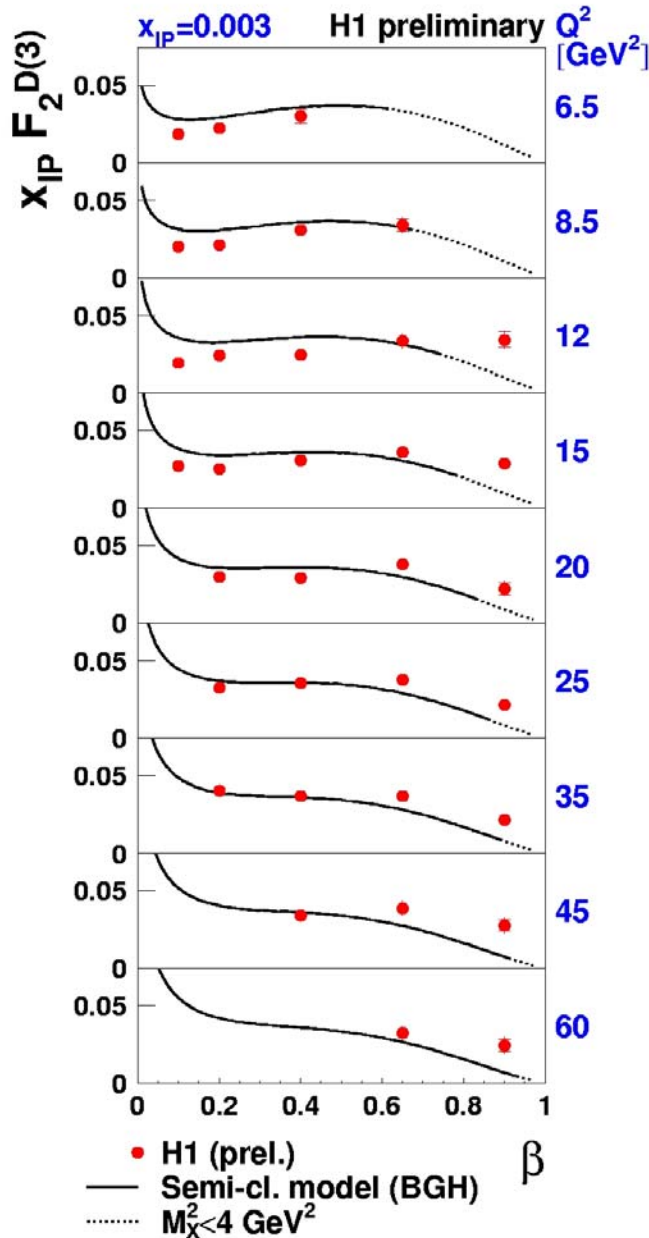
*Wie sieht das Farbfeld im Proton aus?*



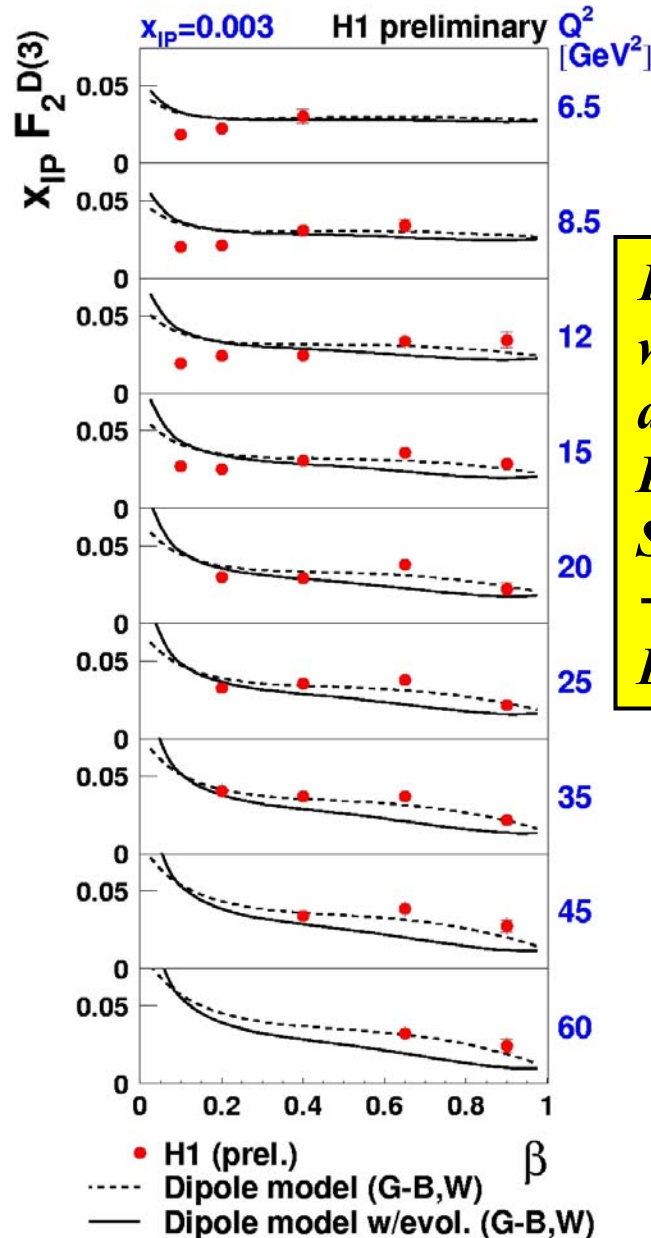
*Der qq Farbdipol wird am weichen Farbfeld des Protons gestreut und mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit neutralisiert*

*Man sollte eigentlich meinen, dass das Experiment zwischen diesen ‚extremen‘ Möglichkeiten diskriminieren kann. Lets see →*

## 'Semi-classical'



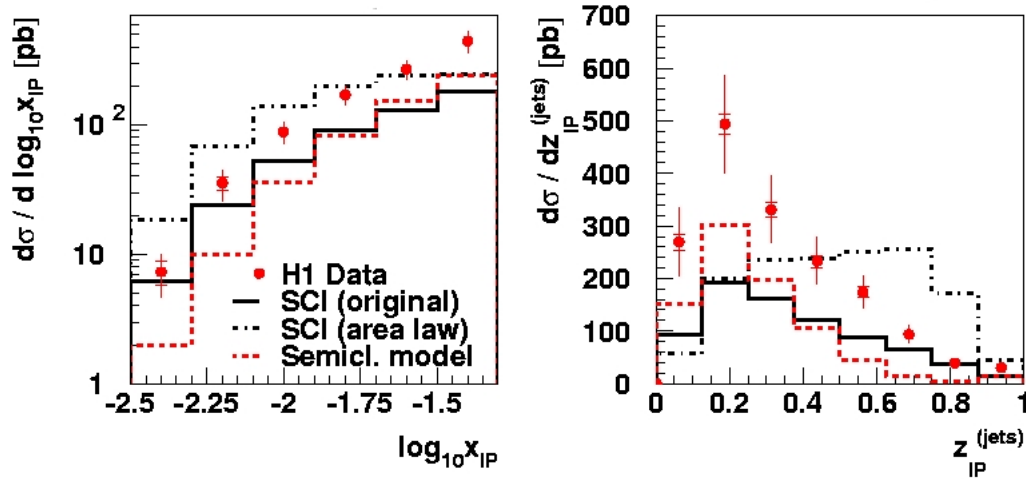
## 'Saturation'



*Freie Parameter  
werden an  $F_2(x, Q^2)$   
angepasst  
Diffraktive Verteilungen  
Sind vorhergesagt.  
→ brauchbare  
Beschreibungen.*

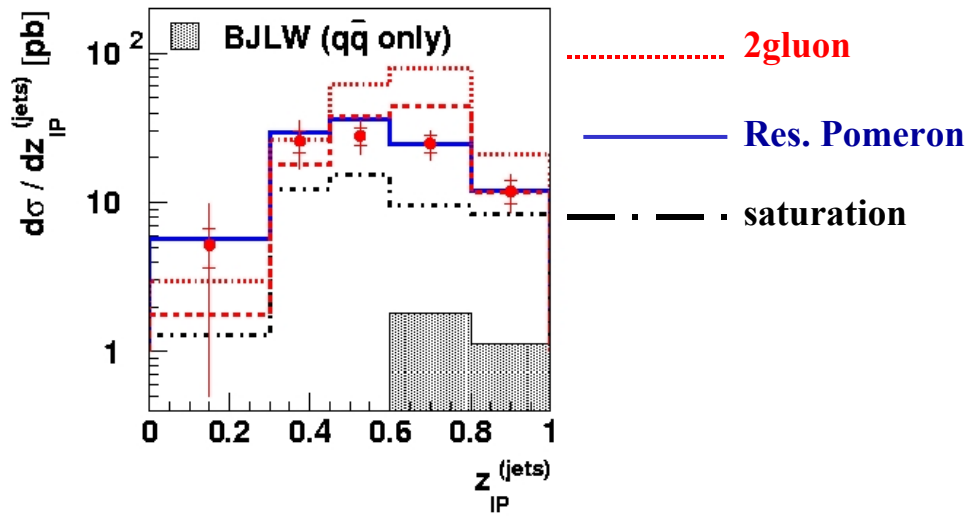
# Diffraktive Zwei-Jet Ereignisse

Modelle mit Farbneutralisierung durch weiche Gluonen (nichtperturbativ)



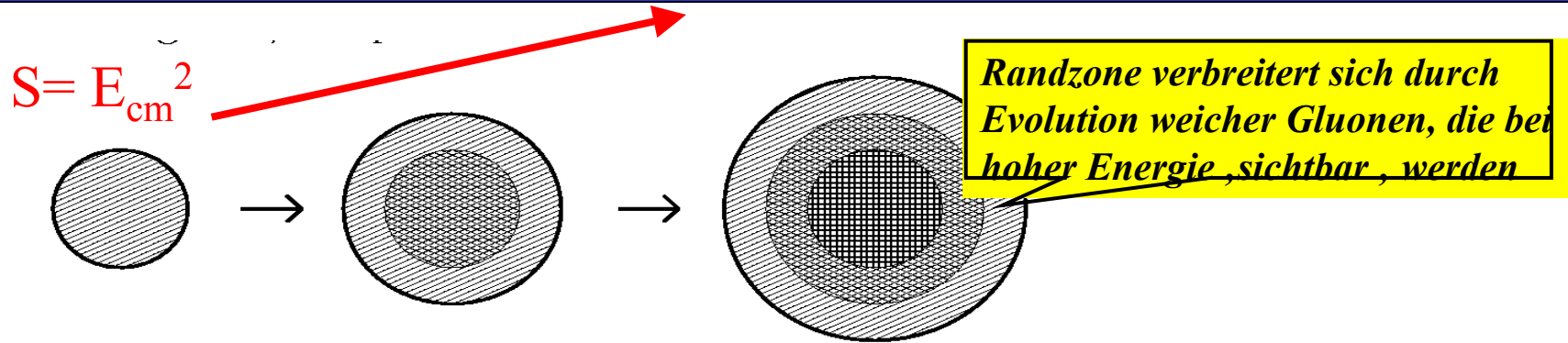
- Modelle zeigen näherungsweise Faktorisierung in  $x_{Pom}$
- Normierung stimmt nicht (Faktoren 2), die differentiellen Verteilungen meist ganz gut
- qqg-Zustände im Photon sind Dominant

Farbdipolmodelle: 2gluon-austausch und ‚saturation‘



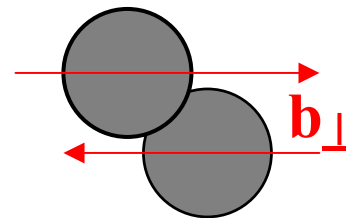
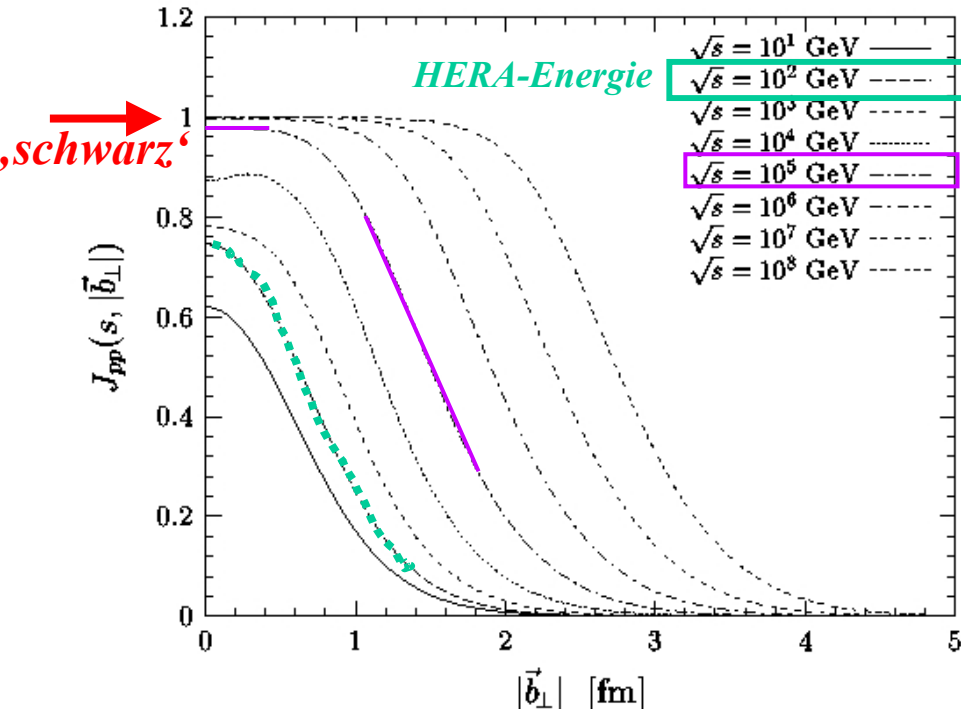
Das simple resolved Pomeron Modell stimmt bisher am besten! Aber es gibt Fortschritte im grundlegenden Verständnis und Verbesserungen in den Vorhersagen (NLO...)

# Wie sieht das Proton aus?

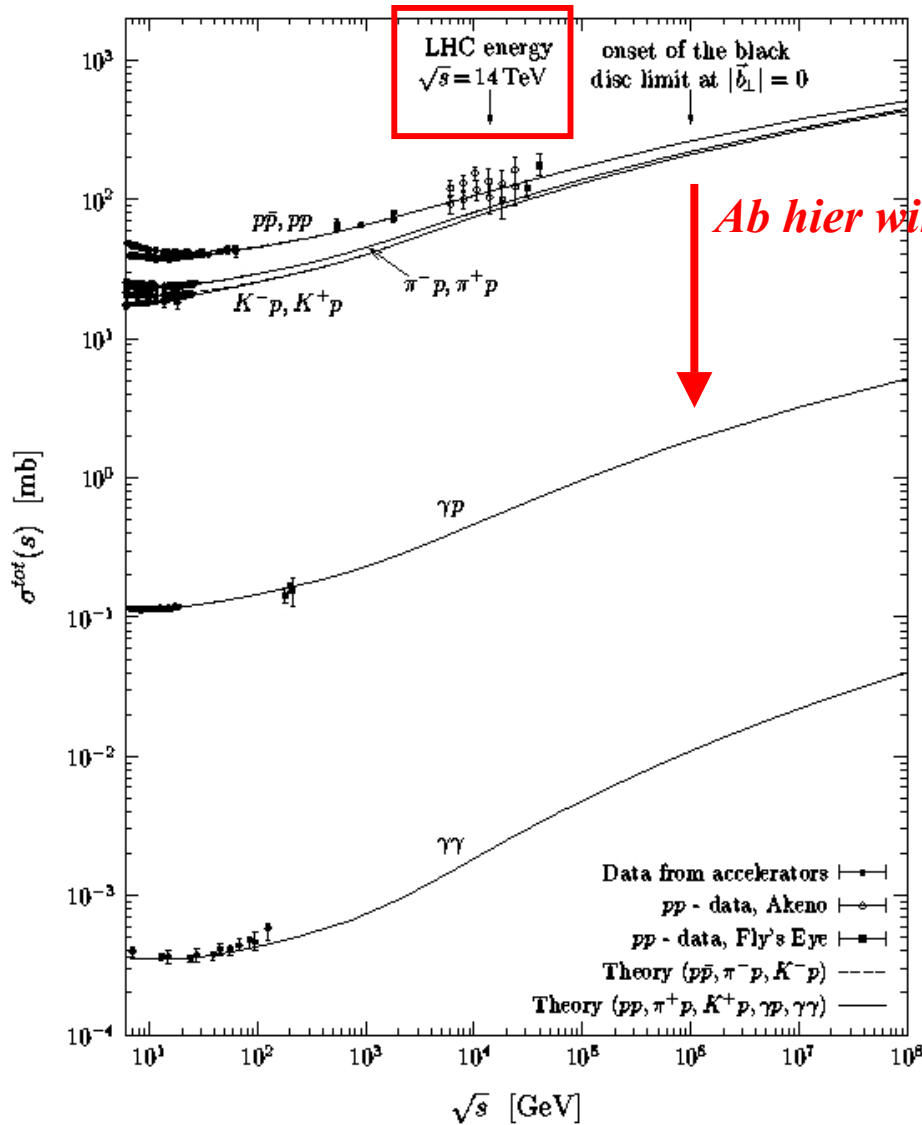


**Das Proton wird schwärzer und grösser mit zunehmender Schwerpunktsenergie**

Profilfunktion



**Modell von Pirner, Shoshi, Steffen, 2002**  
*Synthese vieler erfolgreicher Konzepte: versucht alle Prozesse (Hadron-Hadron und HERA) zu beschreiben durch Überlagerung perturbativer und nichtperturbativer Beiträge (Saturationmodell für Dipol-Dipol WW mit weichem und hartem Anteil, Energieabhängigkeit entspr. 2-Pomeronmodell)*



*Ab hier wird das Proton im Zentrum schwarz (in diesem Modell)  
 Bei anderen Modellen passiert das schon im TeV (LHC) - Bereich.*



# Eine Heidelberger ‚Baustelle‘: das ‚Odderon‘

Quantenzahlen  
einfachste Darstellung

Experimentelle Daten:

QCD Beschreibungen:

*Pomeron*

$C=P= +1$

2 Gluonen

dominant

muss beschrieben  
werden

*Odderon*

$C=P= -1$

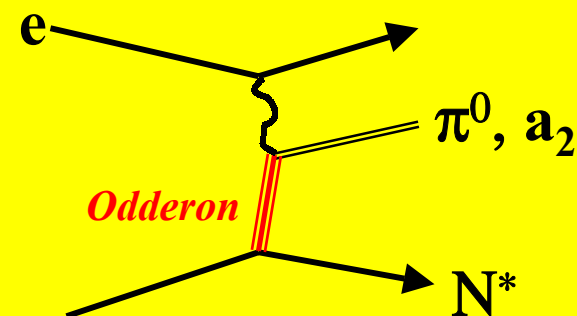
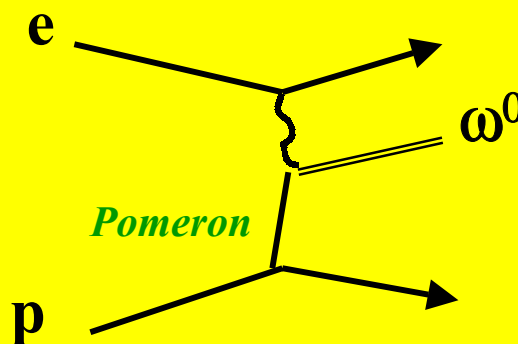
3 Gluonen

wird nicht  
gebraucht  
, unvermeidbar  
auch da‘!

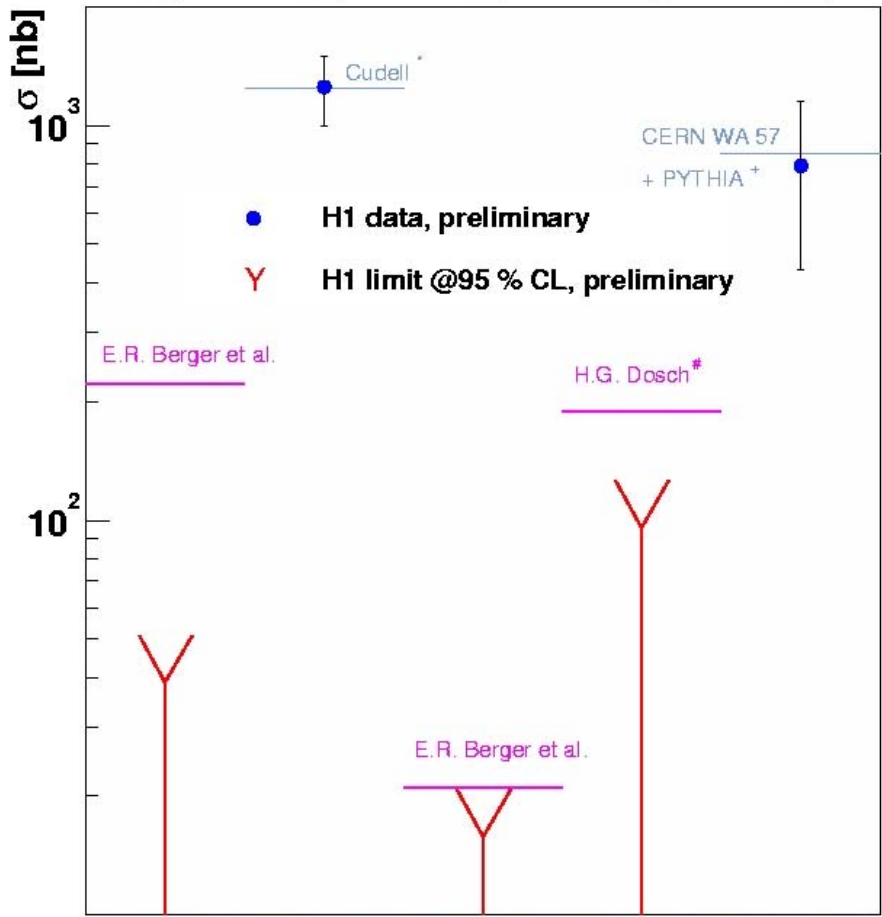
Dosch, Nachtmann, Meier und Mitstreiter: *auf der Suche nach dem Odderon bei HERA!*

*Bisher: upper limits unterhalb der Vorhersagen!*

Methode: diffraktive Erzeugung einzelner Mesonen bei HERA



	$\pi^0$ (135)	$\omega$ (782)	$f_2$ (1275)	$a_2$ (1318)	$\omega \pi^0$
C =	+1	-1	+1	+1	-1
	2 $\gamma$	3 $\gamma$	4 $\gamma$	4 $\gamma$	5 $\gamma$



Pomeron signale sind da wie erwartet



Odderon-Signale fehlen bisher

?

\* Cudell et al.: Phys.Rev. D61 (00), 034019; Schuler, Sjostrand: Nucl.Phys. B407 (93), 539  
 + CERN WA 57: Nucl.Phys. B243 (84), 1; extrapolated to HERA energies