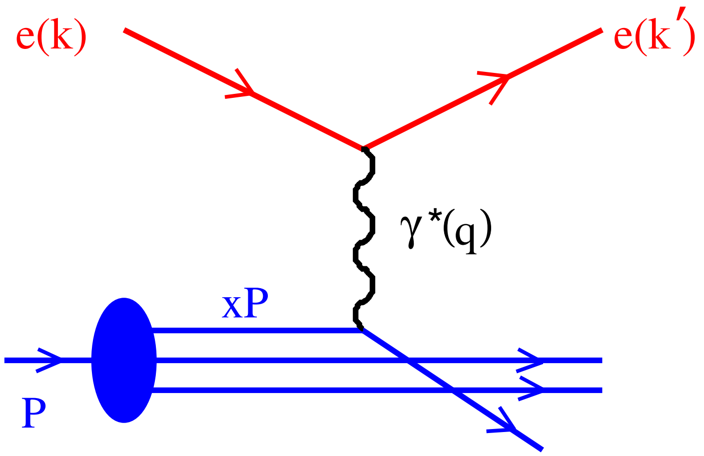
DPG 2003, 10.-13. März 2003, Aachen

Produktion Schwerer Quarks am ep-Speicherring HERA

Andreas B. Meyer

Universität Hamburg

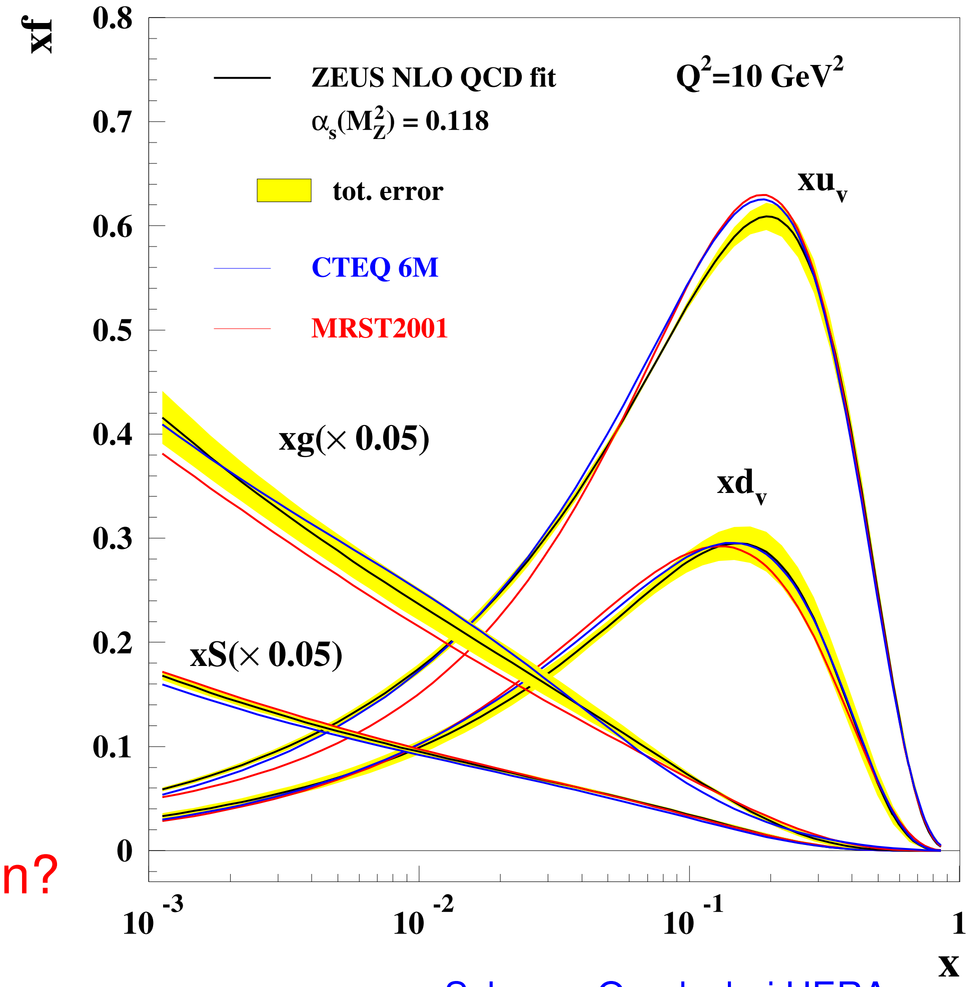
Fragestellungen — Experimentelle Techniken — Neue Ergebnisse — Ausblicke



Inklusive Streuung:

Q^2 (4-Impulsübertrag des virtuellen Photons)^2

x Impulsanteil des Partons im Proton



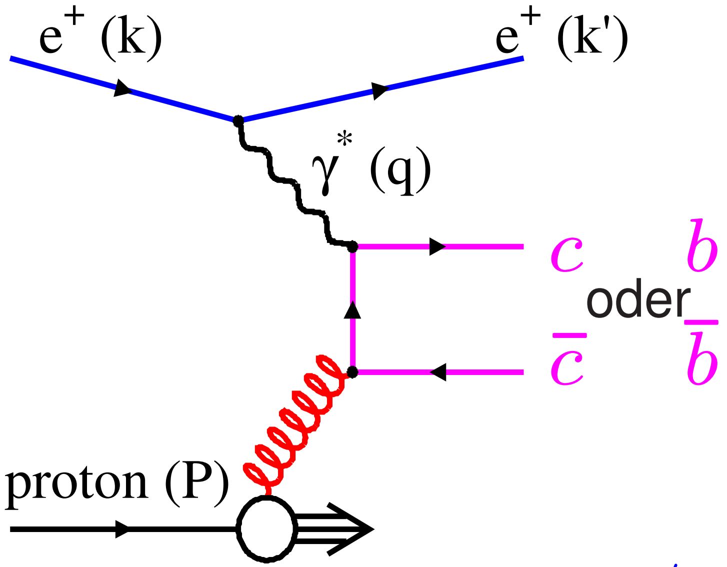
Partonverteilungen

– präzise gemessen

– kleine x: Gluonen dominant

Universalität der Partonverteilungen?

Produktion Schwerer Quarks

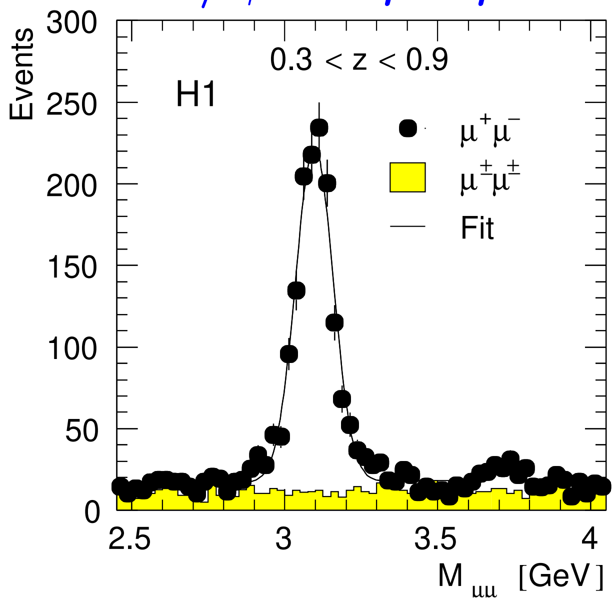


Dominanter Prozess: Boson-Gluon-Fusion

$$\gamma g \longrightarrow c\bar{c} \text{ oder } b\bar{b}$$

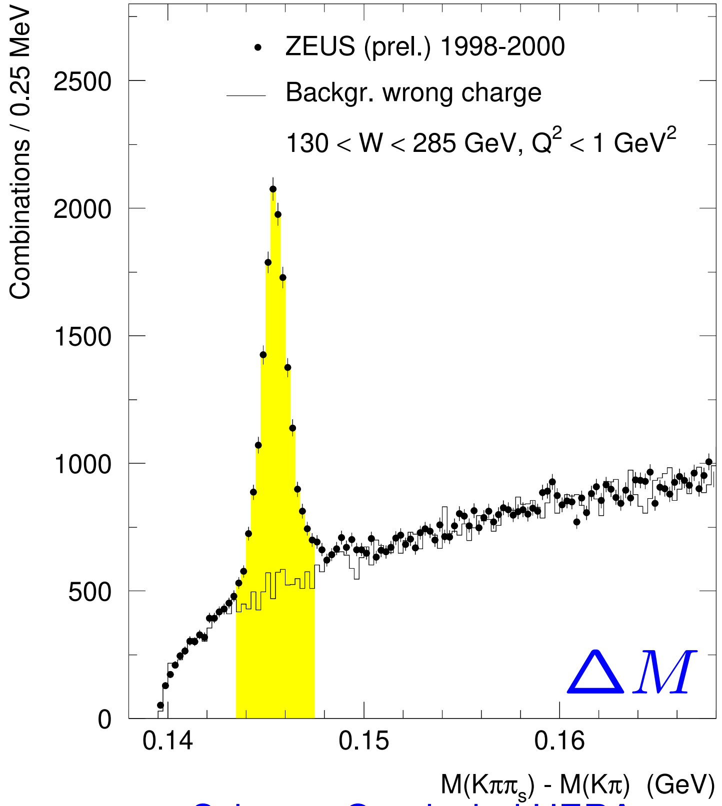
Charmanteil bei hohen Q^2: 20-30%

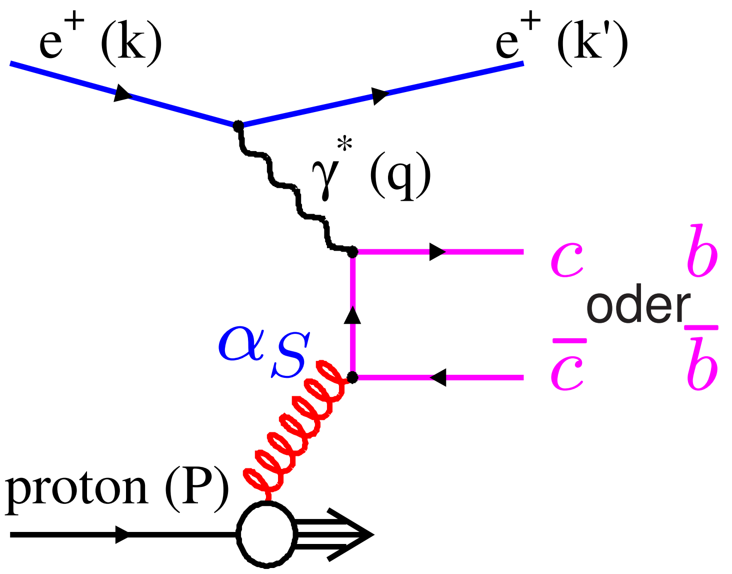
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$



$D^{*\pm} \rightarrow D^0\pi_s^\pm$

$\hookrightarrow K^\mp\pi^\pm$





Faktorisierungsansatz:

Protonstruktur

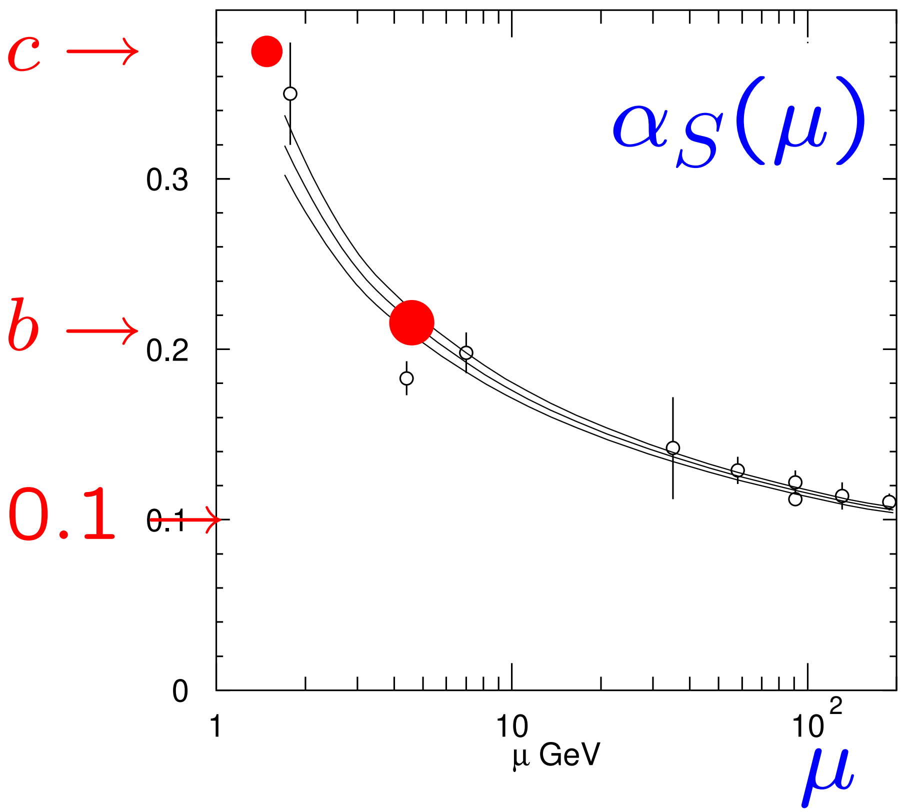
⊗ Perturbative QCD

⊗ Photonstruktur

⊗ Fragmentation

QCD: Laufende Kopplung α_S

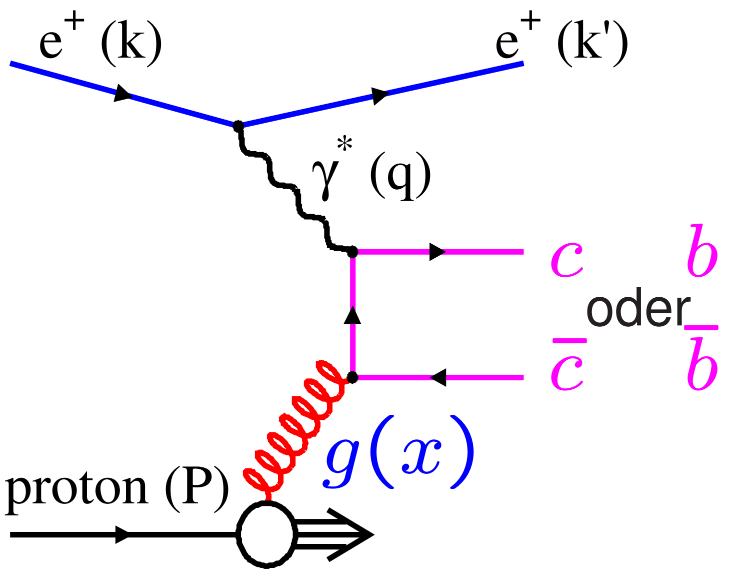
Confinement $\longleftrightarrow$ Asymptotische Freiheit



– "Harte" Prozesse in Störungstheorie berechenbar

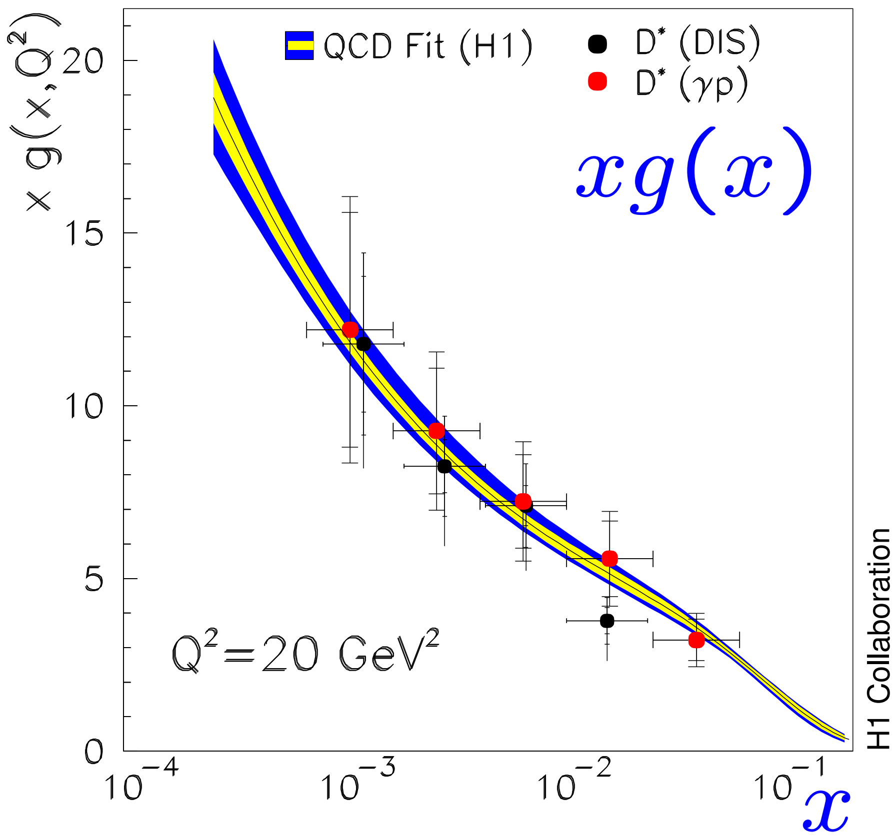
– Schwere Quarks: Mehrere Skalen verfügbar:

Q^2, p_t^2, $m_{c,b}^2$



Gluonverteilung:

Messung der $c\bar{c}$-Produktion ist direkt sensitiv



Gute Übereinstimmung mit Ergebnis aus $F_2(x, Q^2)$

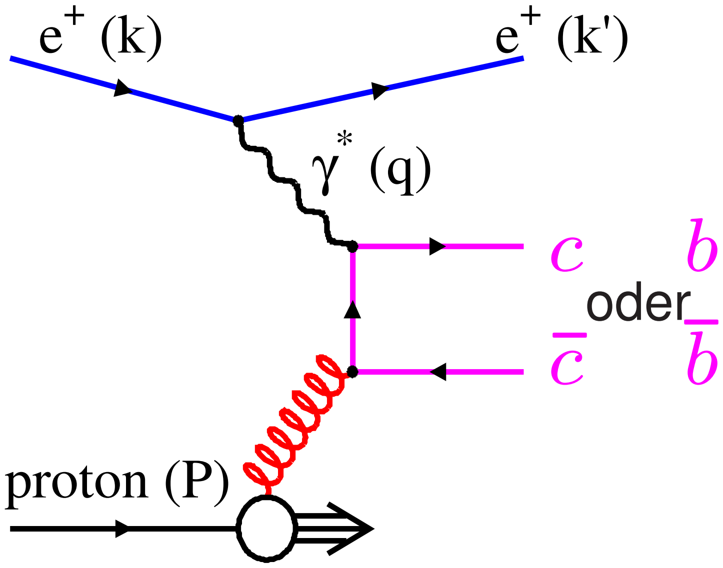
Faktorisierungsansatz:

Protonstruktur

$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation



Faktorisierungansatz:

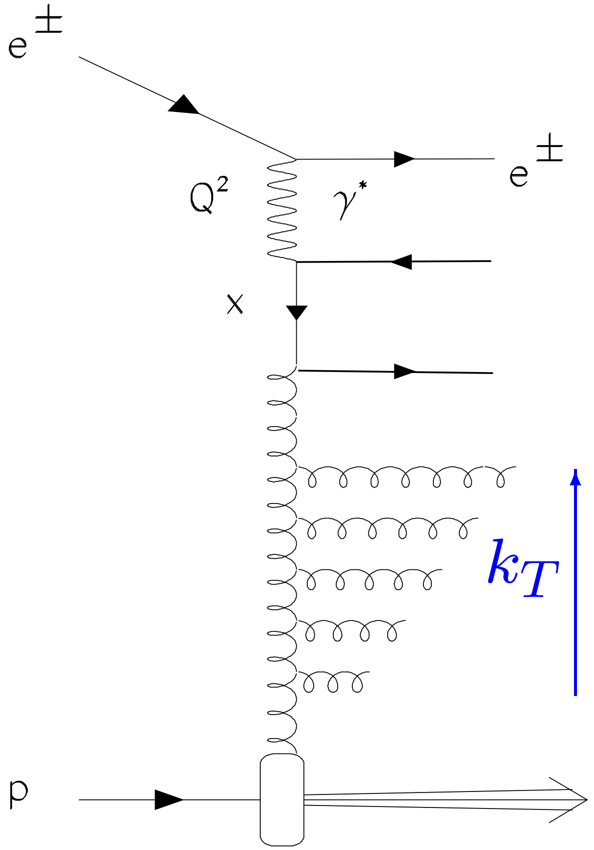
Protonstruktur

$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation

DGLAP Dokshitzer, Gribov, Lipatov, Altarelli, Parisi



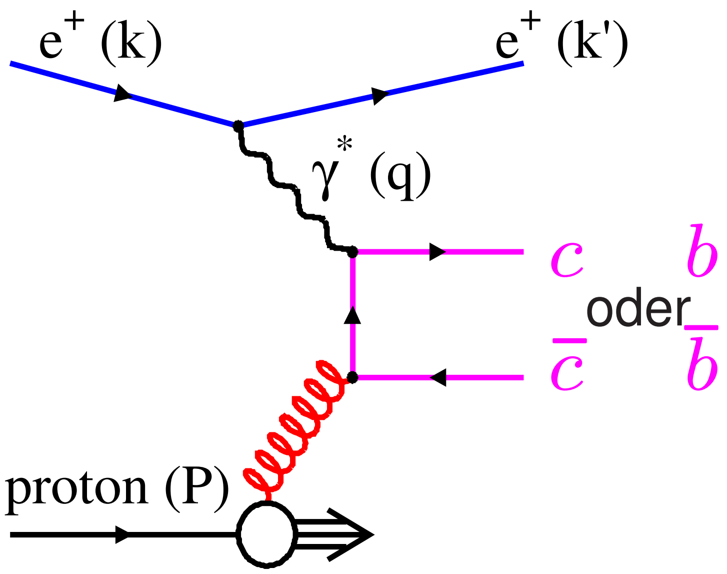
Matrix-Element

Partonen-Leiter

– Entwicklung: in $Q^2 (\sim k_t^2)$

– Gültig: bei großen Q^2 und mittleren x

– MC Programme (LO+PS) und NLO Rechnungen



Faktorisierungansatz:

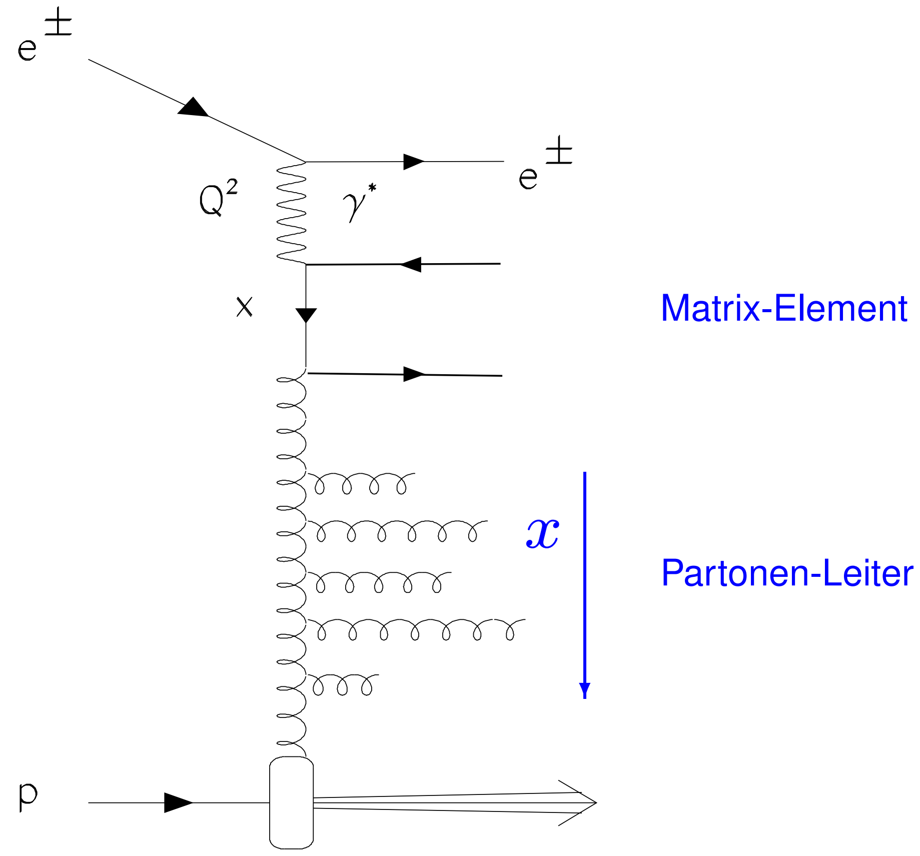
Protonstruktur

$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation

BFKL Balitsky, Fadin, Kuraev, Lipatov

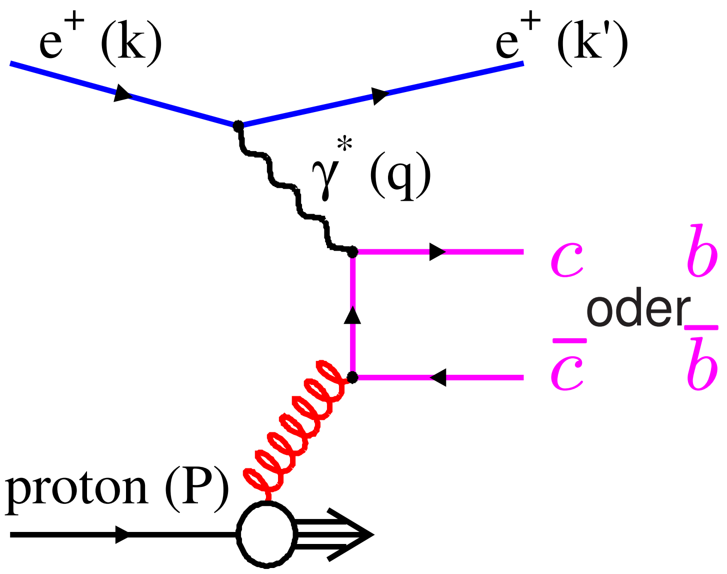


Alternativ

– Entwicklung: in x

– Gültig: bei kleinen x und mittleren Q^2

– k_t-unintegrierte Gluonverteilung



Faktorisierungansatz:

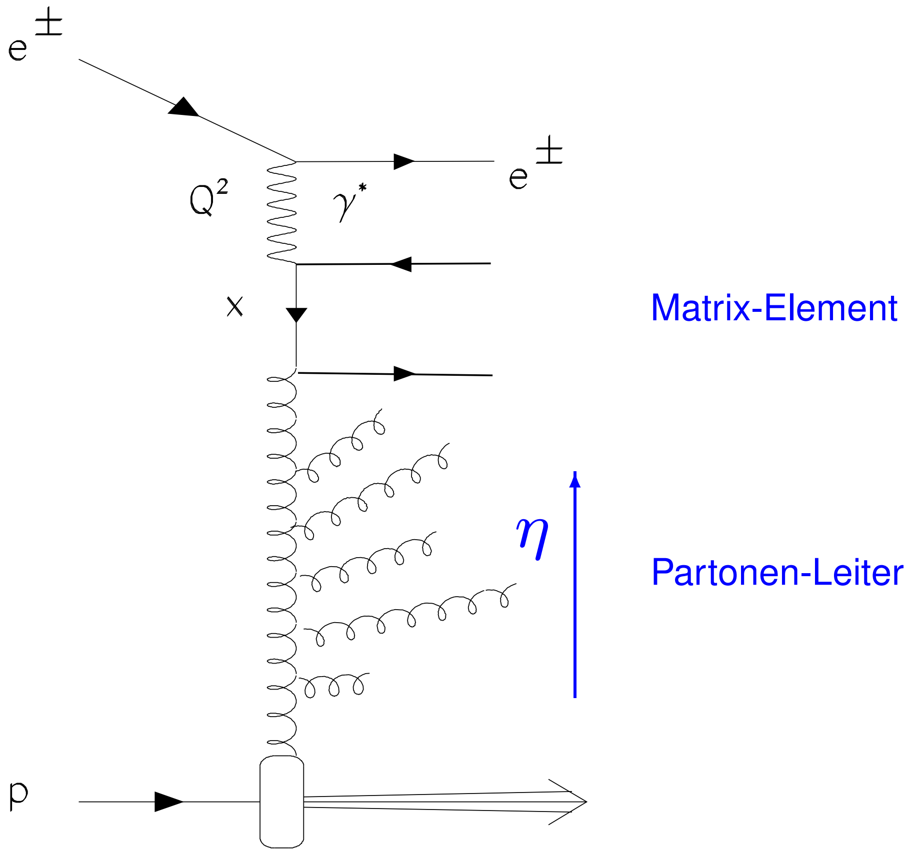
Protonstruktur

$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation

CCFM Catani, Ciafaloni, Fiorani, Marchesini

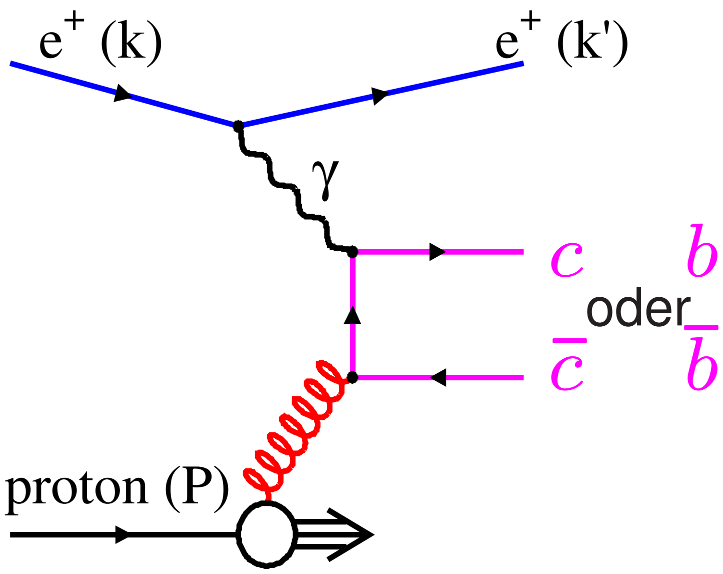


Interpolation zwischen DGLAP und BFKL

– Ordnung in Rapidität (Polarwinkel)

– MC Programm CASCADE

Können wir Effekte in den Daten sehen?

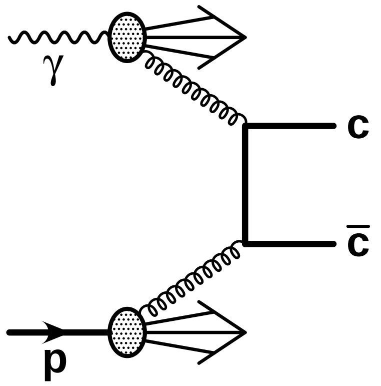


Photoproduktion ($Q^2 \sim 0$): Photon reell

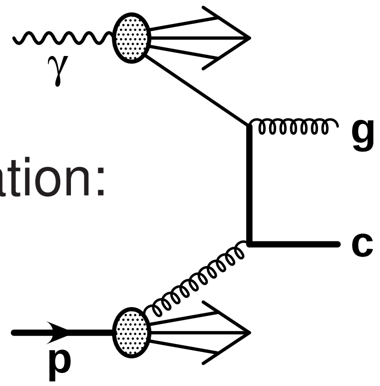
$\rightarrow$ Fluktuationen in hadronische Zustände

'Resolved-γ':

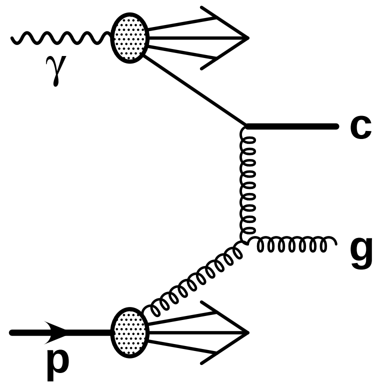
– Hadron-like:



– c-Excitation:



q-Propagator



g-Propagator

Faktorisierungsansatz:

Protonstruktur

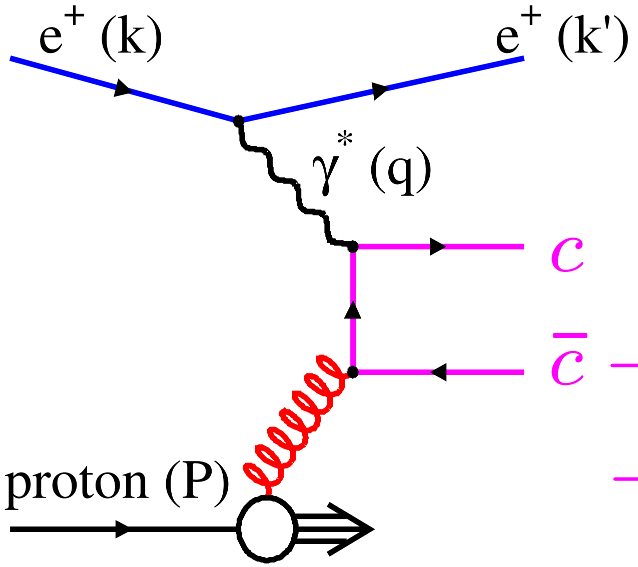
$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation

Wieviel Charm ist im Photon?

Fragmentation



c oder b

$\bar{c} \to D$ $\quad \bar{b} \to B$

$\to J/\psi$

Faktorisierungsansatz:

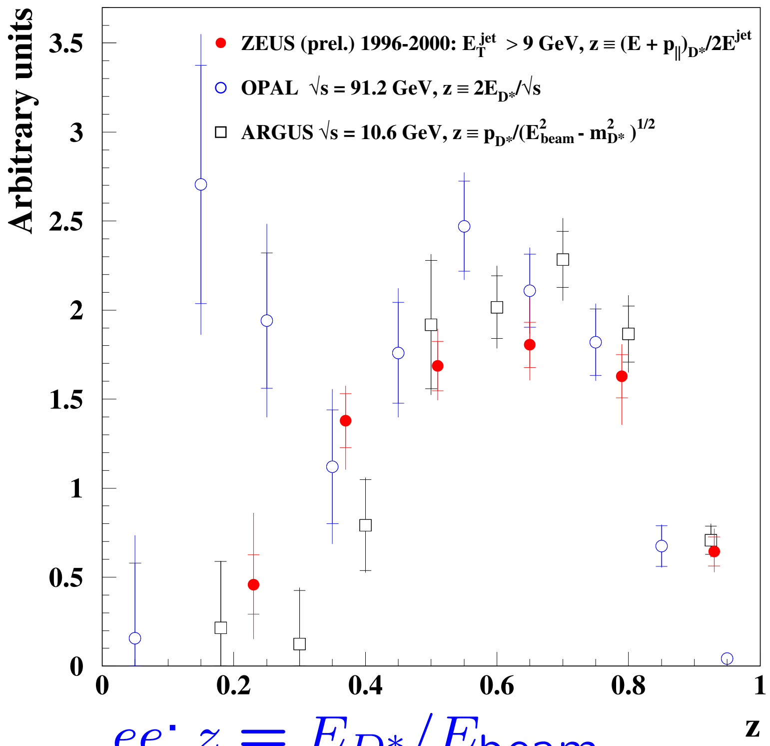
Protonstruktur

$\otimes$ Perturbative QCD

$\otimes$ Photonstruktur

$\otimes$ Fragmentation

Fragmentationsfunktion: $f(c \to D^*)$ in ep und ee



ee: $z = E_{D^*}/E_{\text{beam}}$
ep: $z = (E + p_{||})_{D^*}/2E_{\text{jet}}$

Fit an MC (LO+PS): $\epsilon_c^{\text{Peterson}} = 0.064 \pm 0.006^{+0.011}_{-0.008}$

ep in Übereinstimmung mit ee, ähnlich präzise

Physik mit Schweren Quarks bei HERA

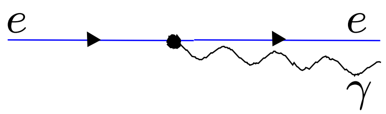
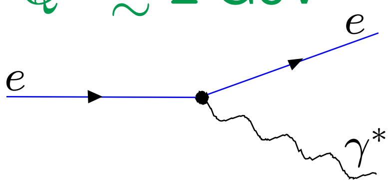
Vergleich Theorie - Experiment:

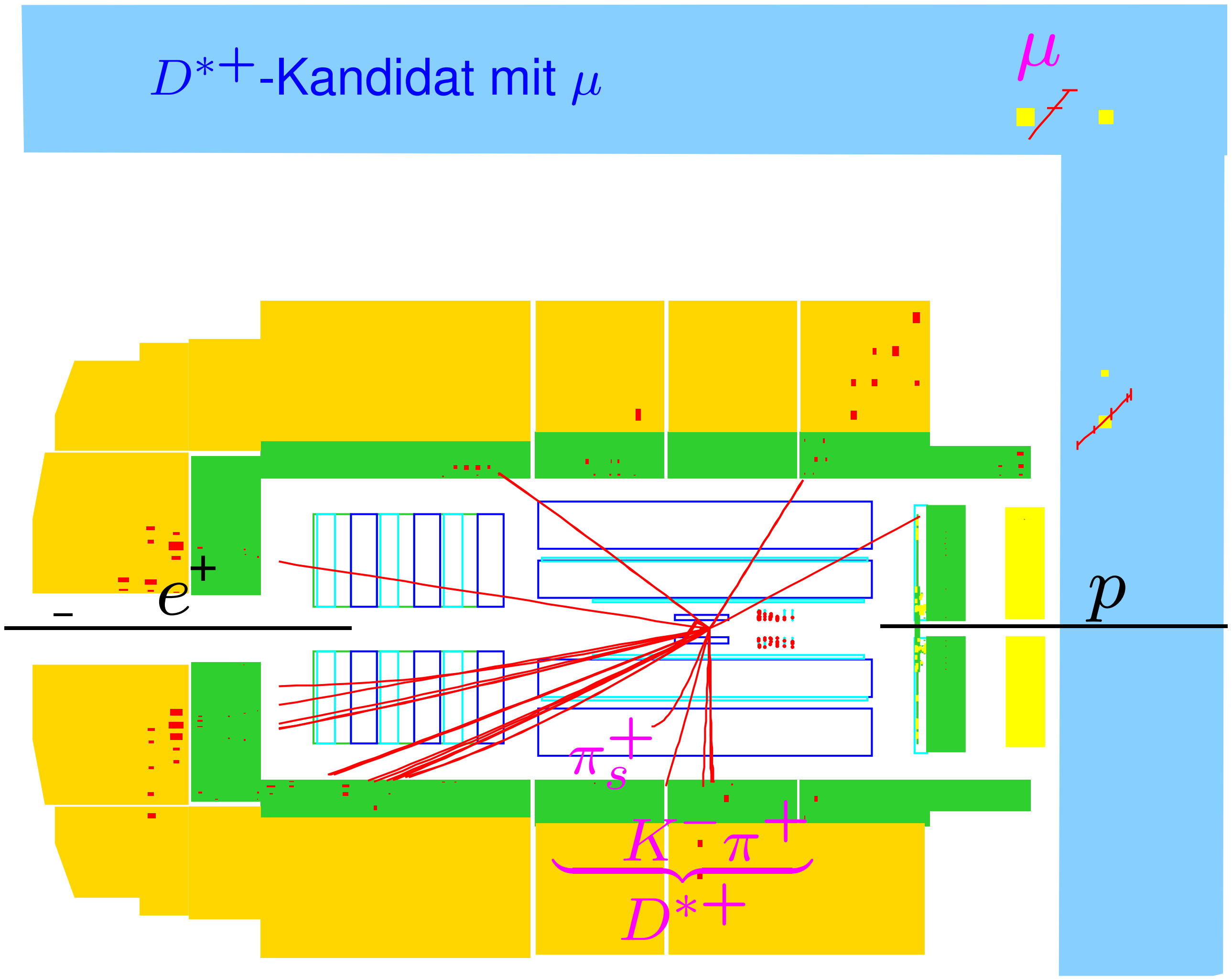
Protonstruktur $\otimes$ Photonstruktur $\otimes$ QCD-Dynamik $\otimes$ Fragmentation

$\Rightarrow$ Test der Faktorisierungsannahme und aller Komponenten

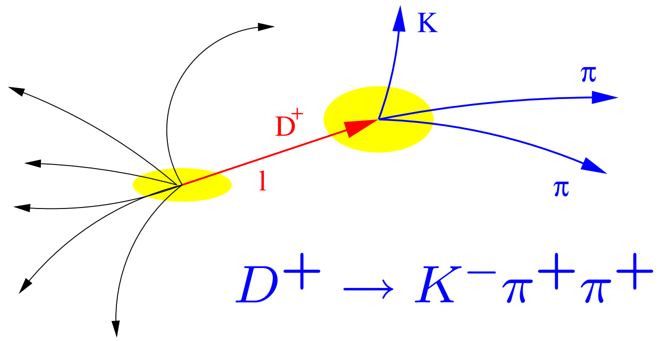
$\Rightarrow$ Präzises quantitatives Verständnis $\Rightarrow$ sichere Vorhersagen

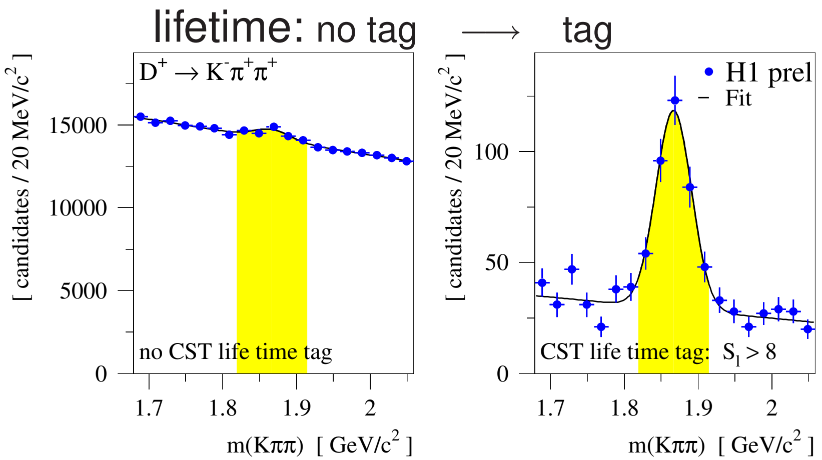
- Partonverteilungen und Fragmentation
- Parton-Entwicklung in pQCD: DGLAP und CCFM

$Q^2 \longrightarrow$			$Q^2 \sim 0$	$Q^2 \gtrsim 2$ GeV^2
m_q $\downarrow$				
$\sim$ 1.5 GeV	c	•	D^{*+}, Jets, J/ψ	D^+
$\sim$ 4.75 GeV	b	●	$D^*\mu$, $B \to \mu X$	$B \to \mu X$



D^+-Rekonstruktion

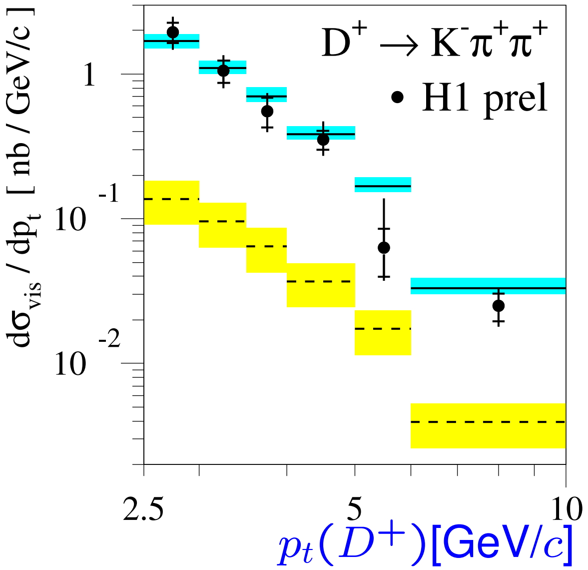


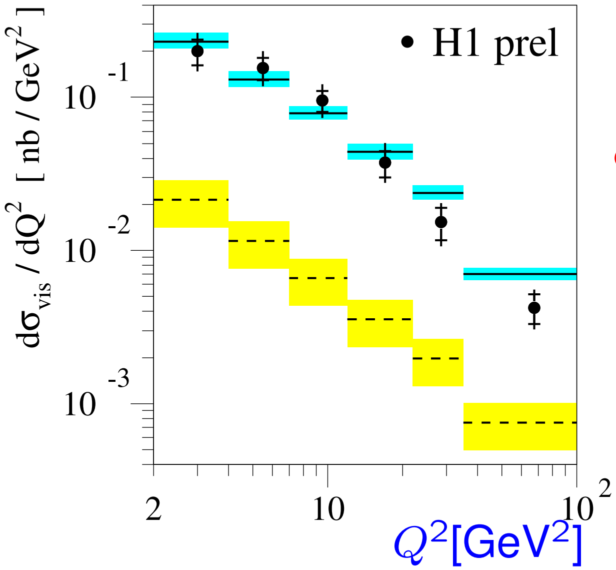


HERA: $E_e = 27.5$ GeV, $E_p = 920$ GeV, $\sqrt{s} = 320$ GeV

D-Meson Produktion

$Q^2 > 2$ GeV^2: Skala: Q^2

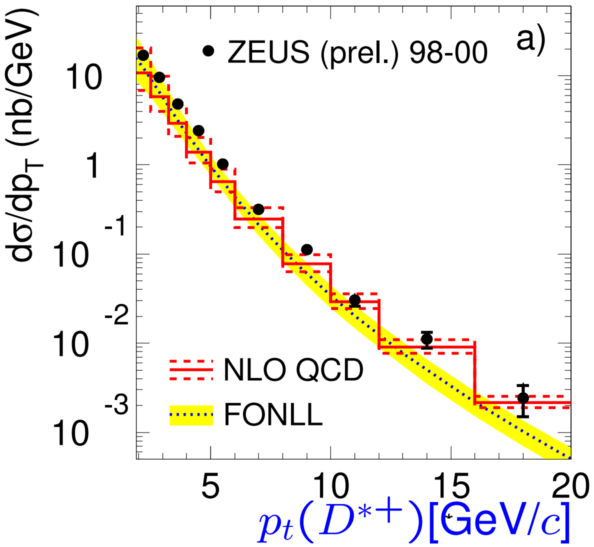


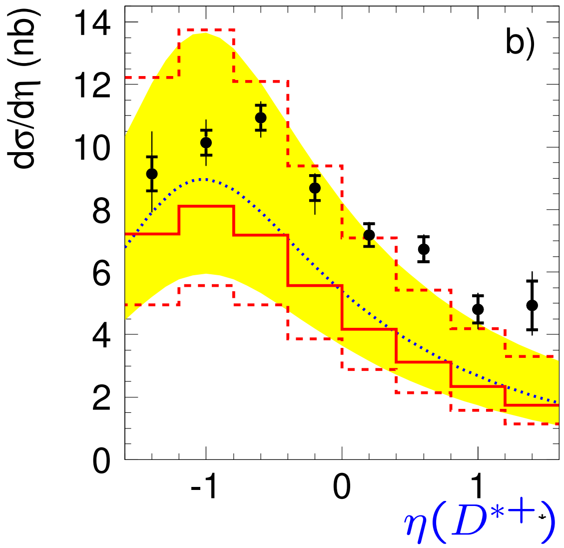


$D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$

- DGLAP (LO+PS):
  Verteilungen korrekt beschrieben

$Q^2 \sim 0$: Skalen: m_c, p_t

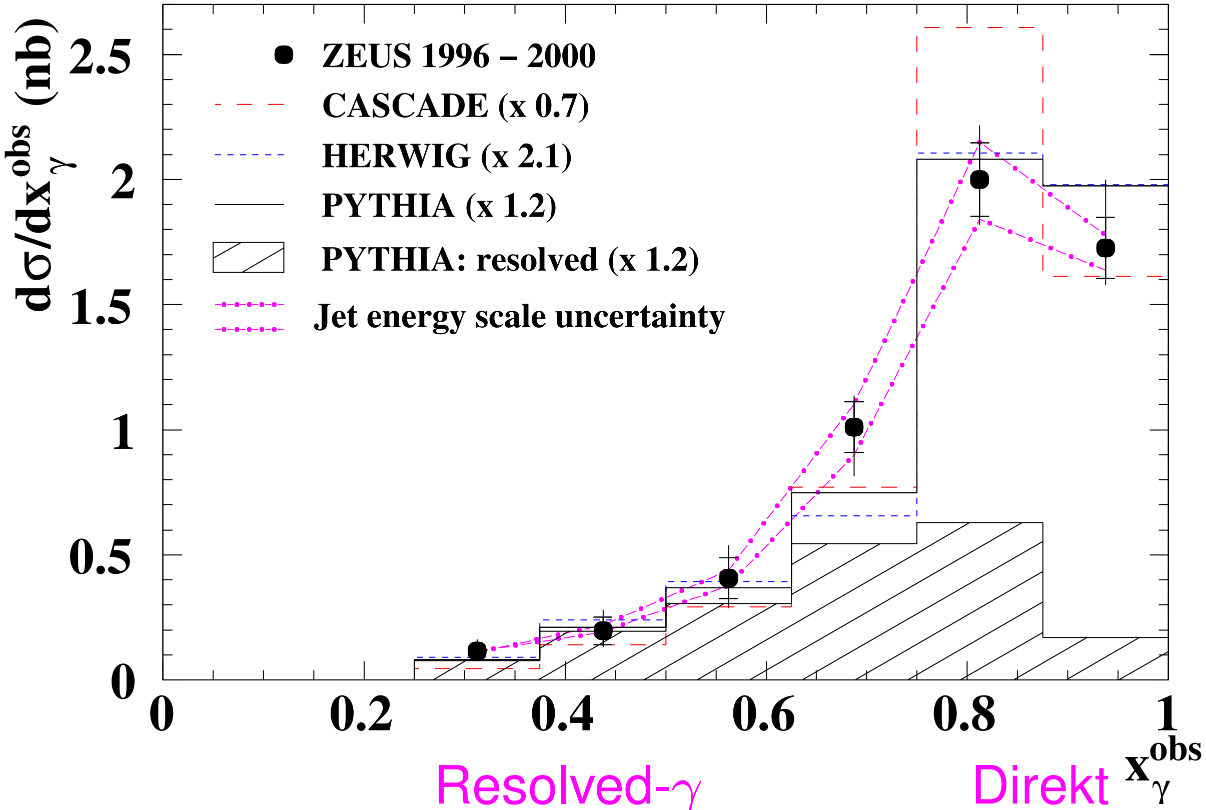




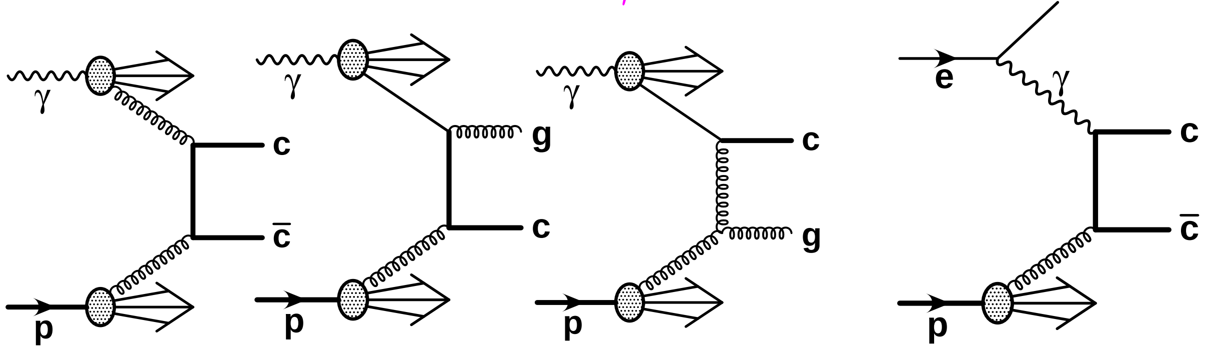
$D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$
$\hookrightarrow K^-\pi^+$

- DGLAP (NLO):
  – Form in etwa ok
  – Normierung etwas zu niedrig

Charm: Zwei-Jet-Ereignisse



Resolved-γ Direkt



$Q^2 \sim 0 \qquad M_{jj} > 18\text{GeV}$

$\gamma p \rightarrow D^{*\pm} + jj + X$

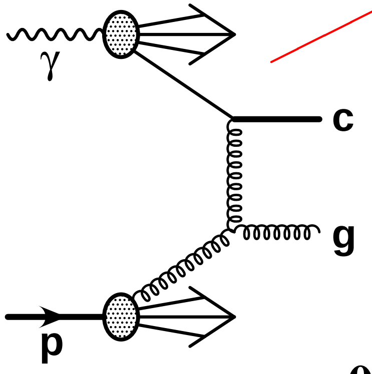
$$x_\gamma^{\text{obs}} = \frac{\sum_{j_1,j_2}(E_T^j e^{-\eta^j})}{2yE_e}$$

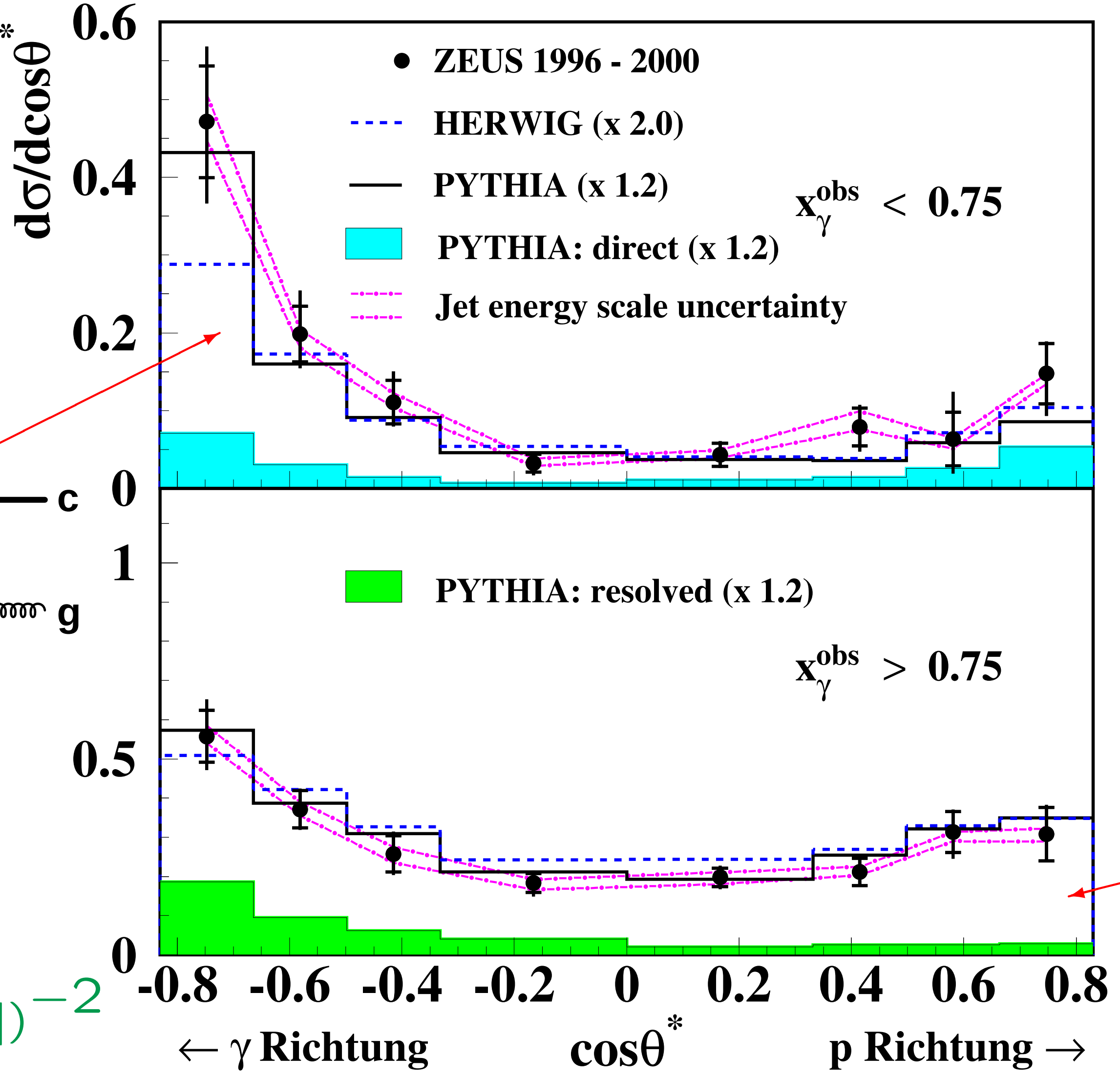
Impulsanteil des Partons aus dem Photon

Resolved-γ: $x_\gamma \lesssim 0.75$

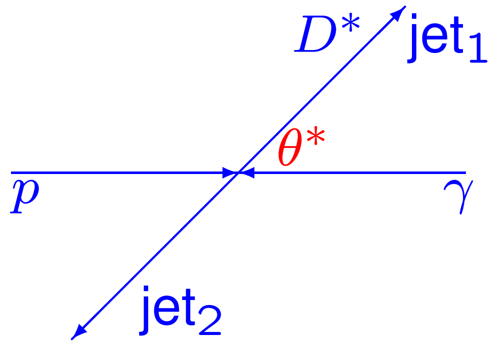
- Signifikante Beiträge von Resolved-γ, insbesondere c-Excitation

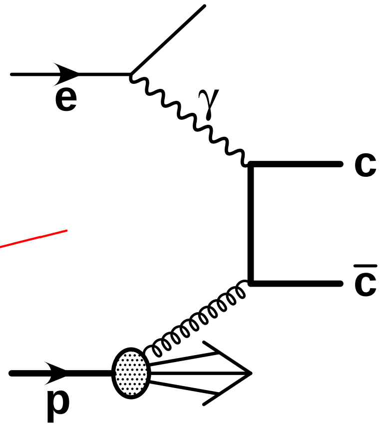
Charm: Zwei-Jet-Winkelverteilungen





$\theta^* = \measuredangle(p, D^*\text{-Jet})$:





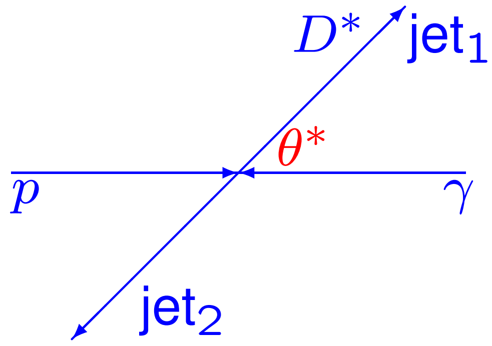
g-Austausch:
$\propto (1 - |\cos\theta^*|)^{-2}$

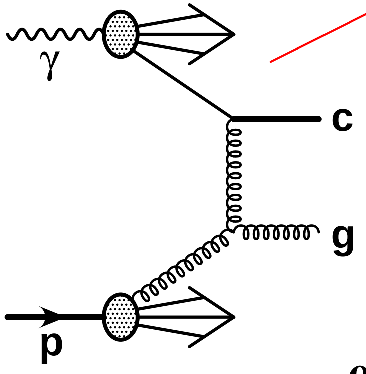
q-Austausch:
$\propto (1 - |\cos\theta^*|)^{-1}$

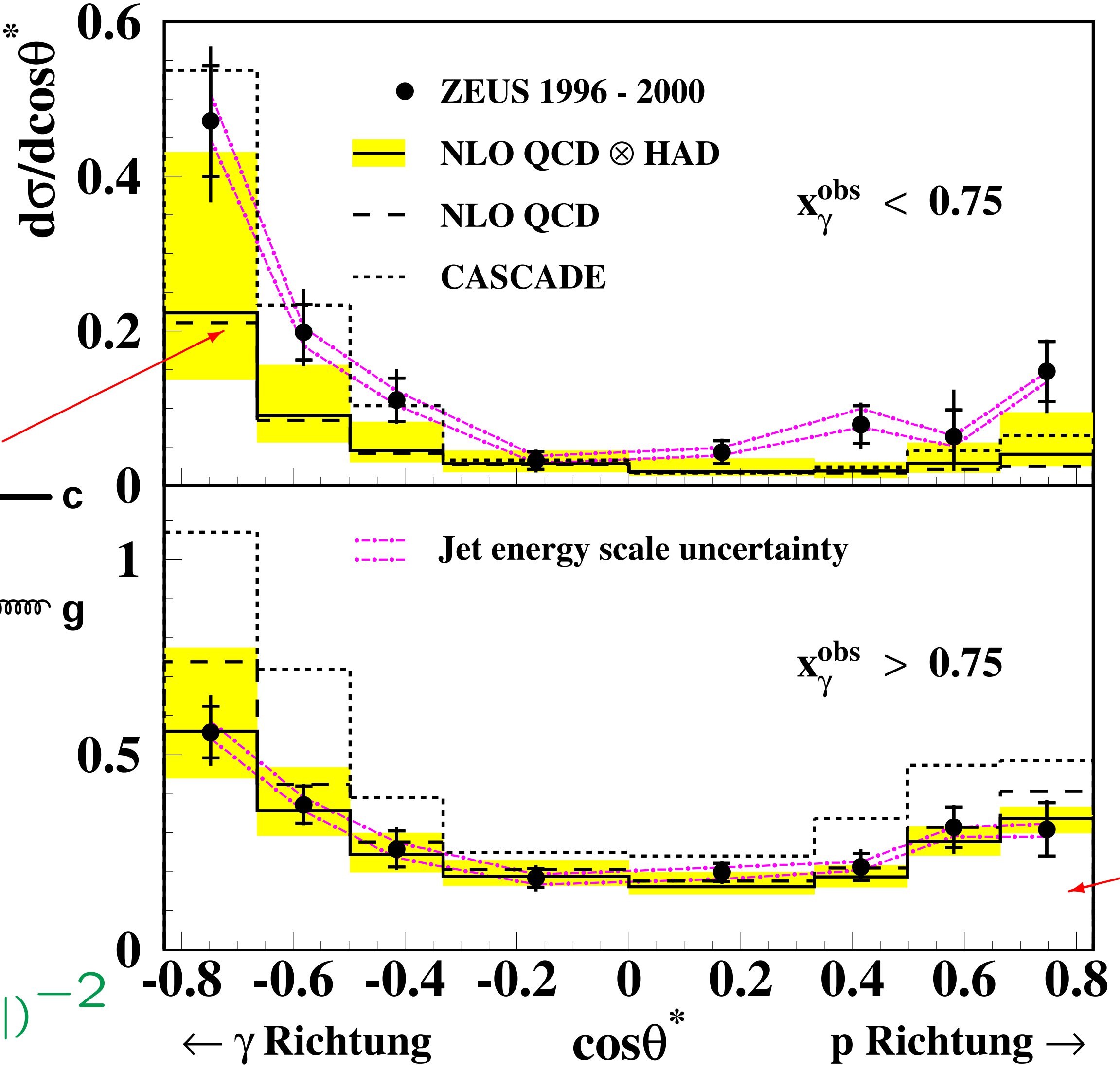
- D^* in Photon-Richtung: Charm-Quark kommt aus dem Photon
- Steiler Anstieg: Gluon-Austausch-Signatur

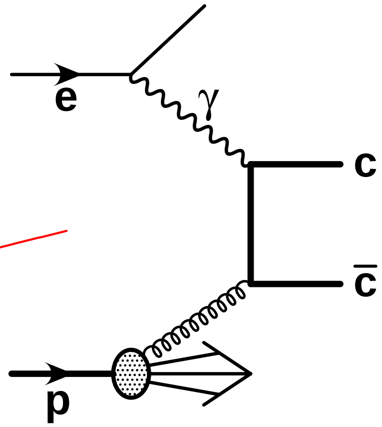
Charm: Zwei-Jet-Winkelverteilungen

$\theta^* = \measuredangle(p, D^*\text{-Jet})$:









g-Austausch:

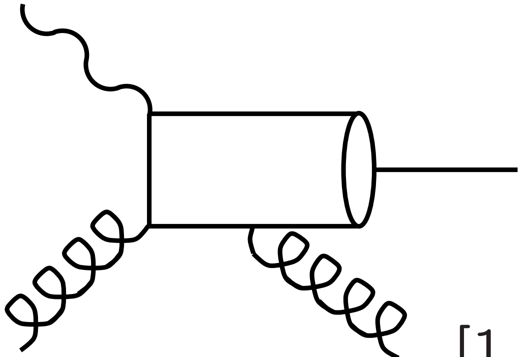
$\propto (1 - |\cos\theta^*|)^{-2}$

q-Austausch:

$\propto (1 - |\cos\theta^*|)^{-1}$

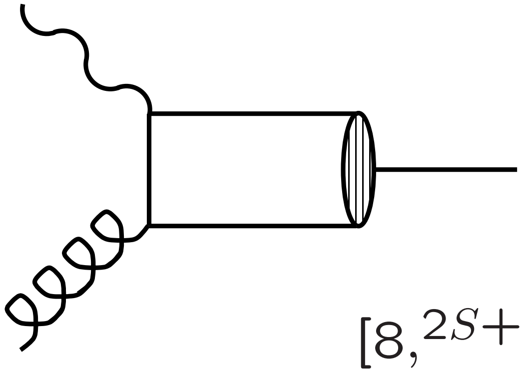
- DGLAP (NLO): Form ok, $x_\gamma < 0.75$: Normierung zu niedrig
- CCFM: Form in etwa ok, $x_\gamma > 0.75$: Normierung zu hoch

J/ψ ist farblos



Colour Singlet(CS)

$c\bar{c} \rightarrow J/\psi$ + Gluon



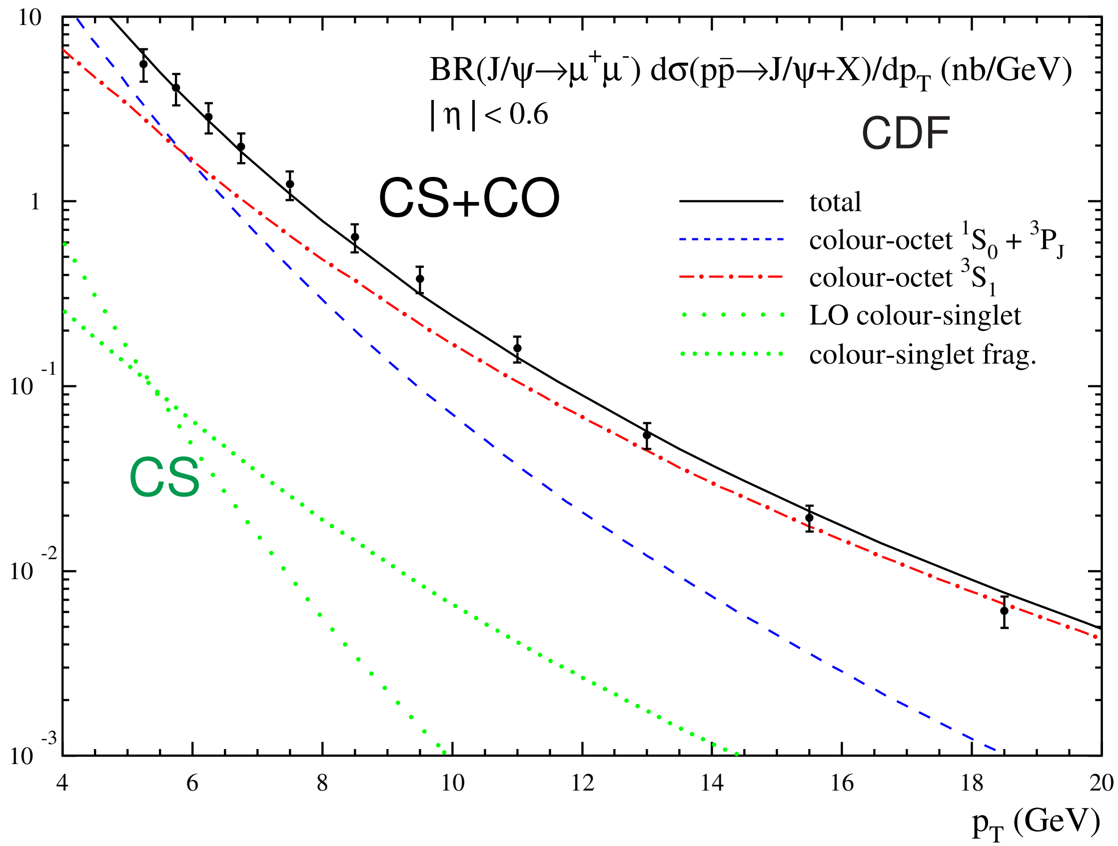
Colour Octet(CO)

$c\bar{c} \rightarrow J/\psi$ + weiche Gluonen

NRQCD+Faktorisierung:

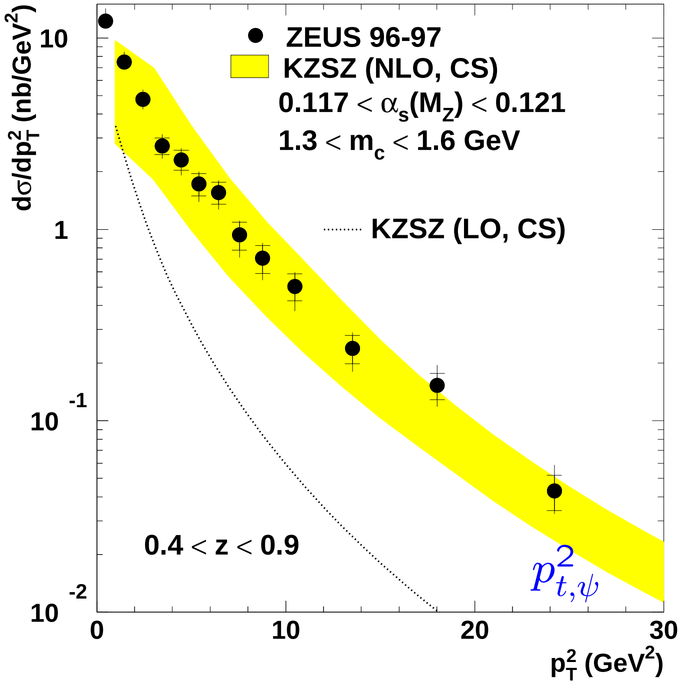
$$\sigma_{J/\psi X} = \sum \hat{\sigma}(\gamma p \rightarrow c\bar{c}[n]X) \times \text{LDME}[n])$$

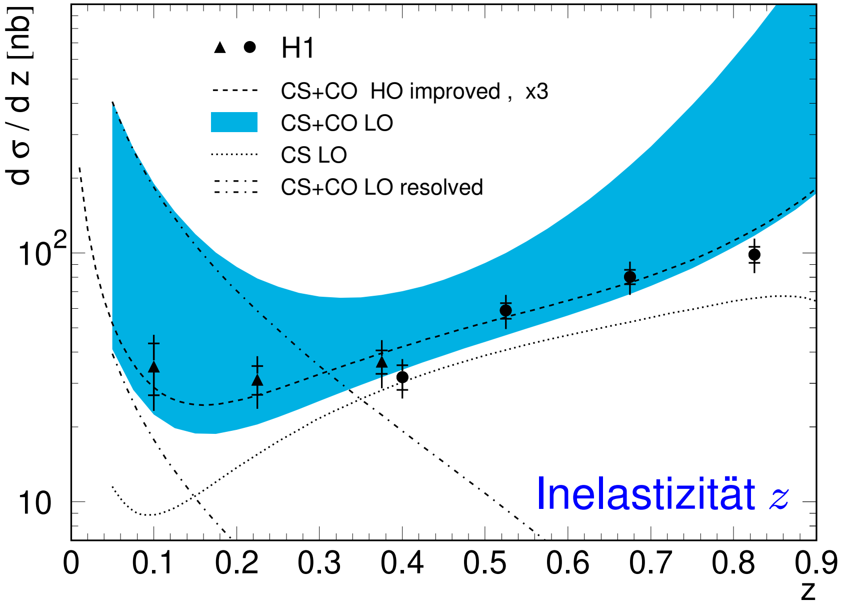
LDME aus NRQCD-Fit an $p\bar{p}$-Daten



Sind die LDME universell? Tevatron → HERA

J/ψ – Photoproduktion





$Q^2 \sim 0$

- Colour Singlet:
  - NLO (für Photoproduktion verfügbar): ok
  - LO: zu steil in $p^2_{t,\psi}$

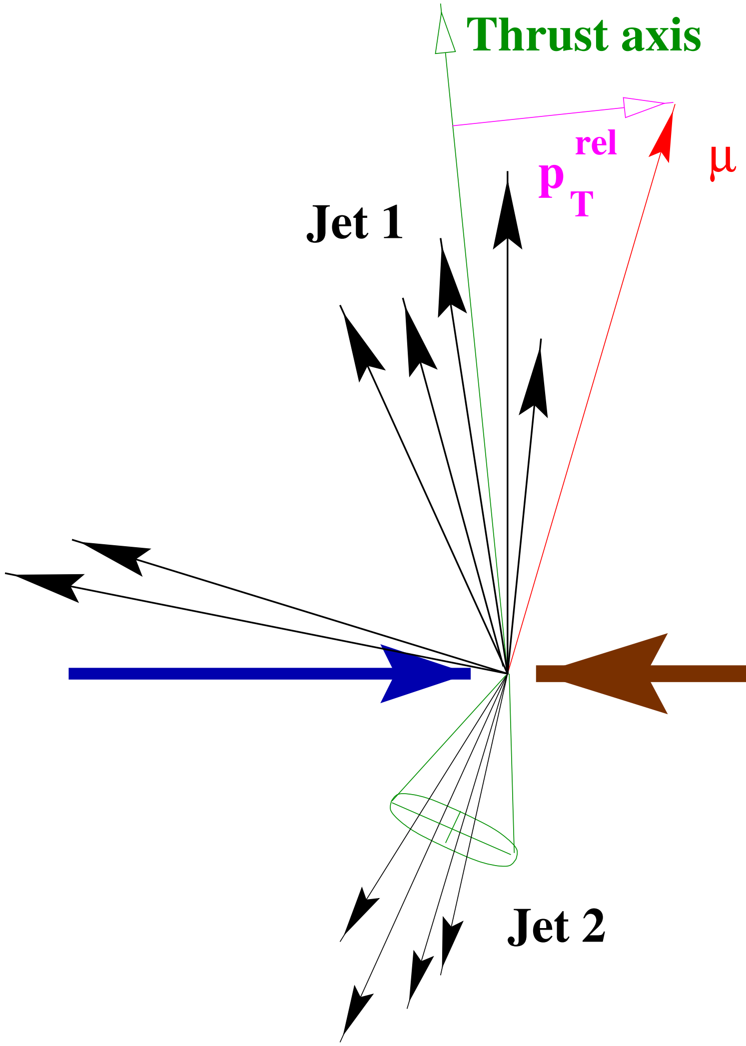
$\Rightarrow$ NLO Korrekturen sind entscheidend
$\Rightarrow$ Kein Hinweis auf Colour-Octet-Beiträge

- NRQCD CS+CO (LO):
  - Gute Beschreibung in z
    (bei Annahme kleiner LDME)

$z = E^*_\psi / E^*_\gamma$

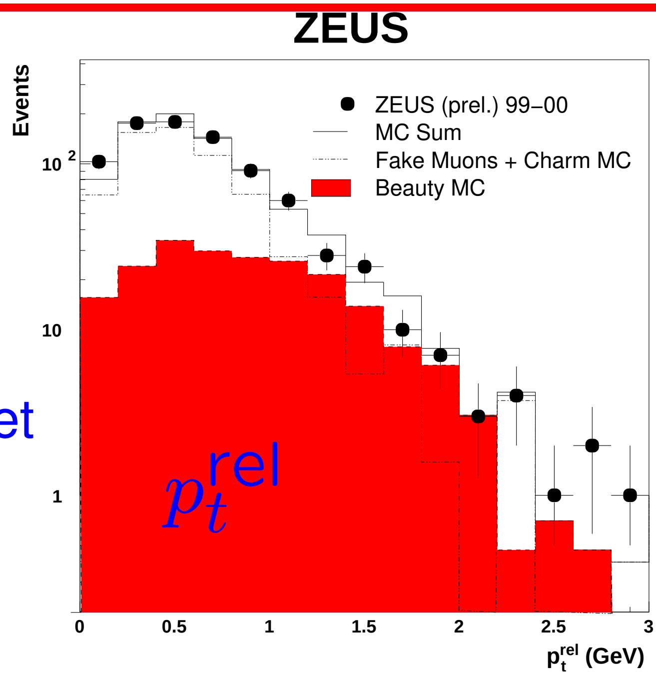
$\sigma(b\bar{b})$: Faktor $\sim$ 200 kleiner als $\sigma(c\bar{c})$

$\longrightarrow$ Verwende semileptonische B-Zerfälle



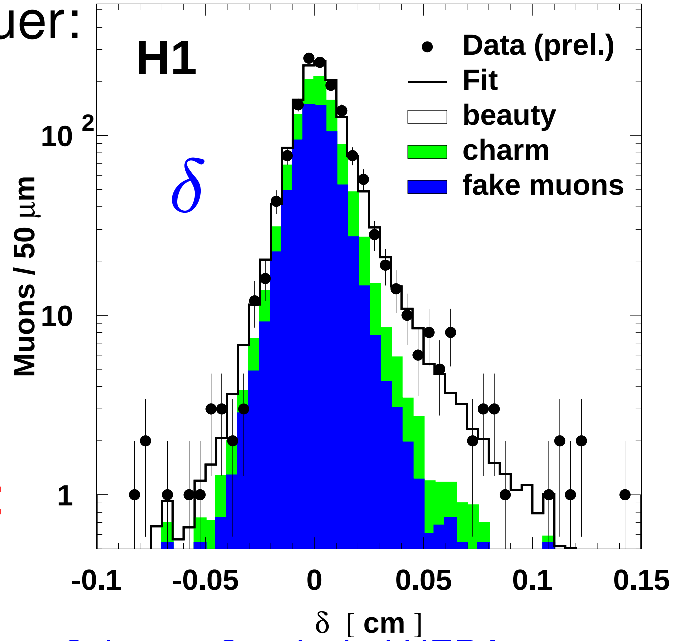
- Hohe B-Masse:

p_t des μ relativ zum Jet



- Lange B-Lebensdauer:

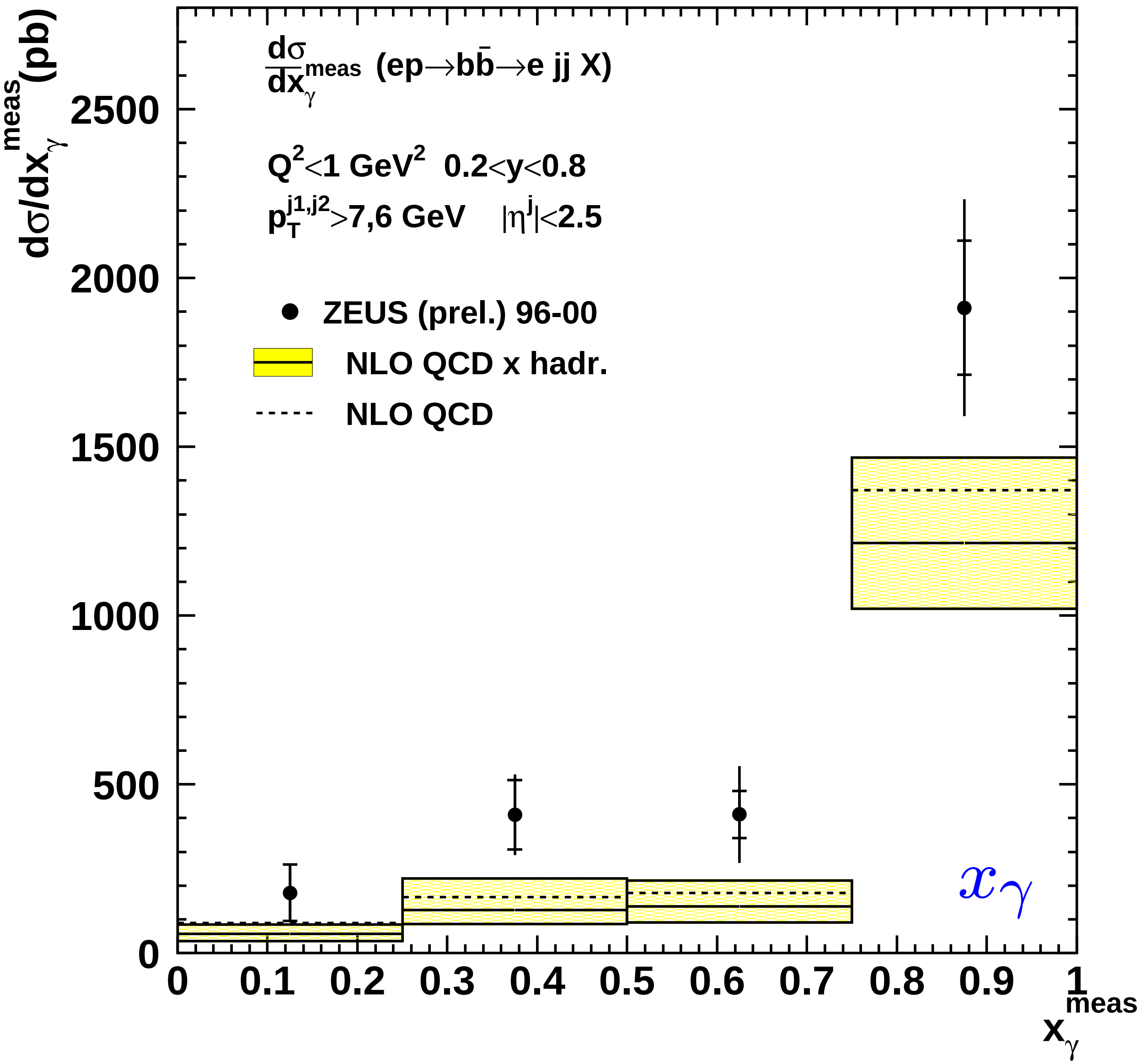
μ Impakt-Parameter



Bisherige Ergebnisse:

σ(Daten)/σ(NLO) $\sim$ 3

$Q^2 \sim 0$ **ZEUS** $b\bar{b} \to jjX$

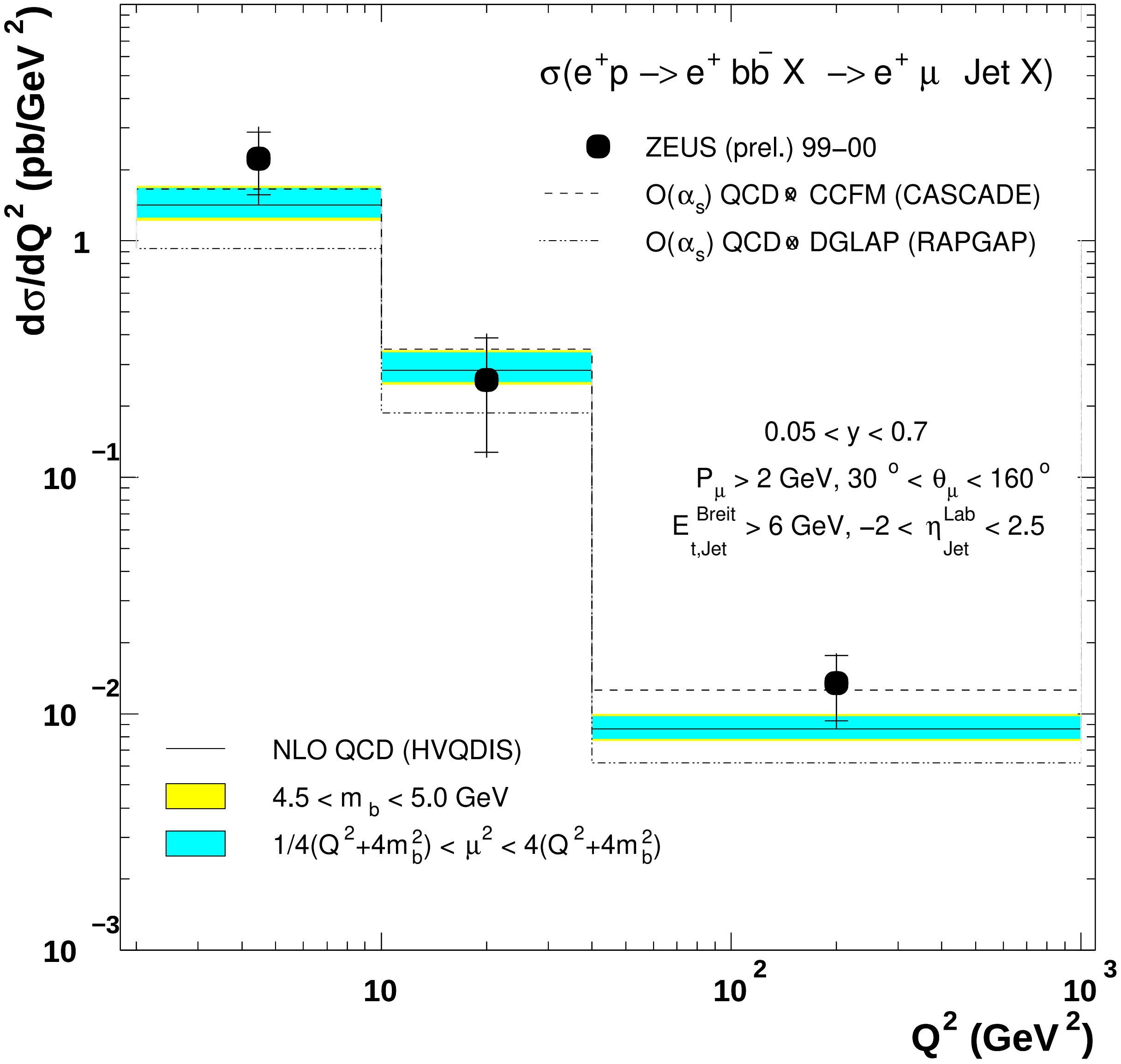


- Erste differentielle Messungen
- DGLAP (NLO):
  - niedriger als Daten
  - Unsicherheit groß

ZEUS: $\sigma^{\mathrm{vis}} = (733 \pm 61 \pm 104)$ pb
NLO (Frixione et al): $\sigma^{\mathrm{vis}} = (381^{+117}_{-78})$pb

- Deutlicher Beitrag von
  'Resolved-γ' $\longleftrightarrow$ Charm

$Q^2 > 2$ GeV^2 $\qquad ep \to b\bar{b} \to ej\mu X$



$\sigma^{\text{vis}} = (38.7 \pm 7.7^{+6.1}_{-5.0})$ pb

- DGLAP (NLO):
  - ok innerhalb der Fehler

  NLO (Harris et al): $\sigma^{\text{vis}} = (28^{+5.3}_{-3.5})$pb

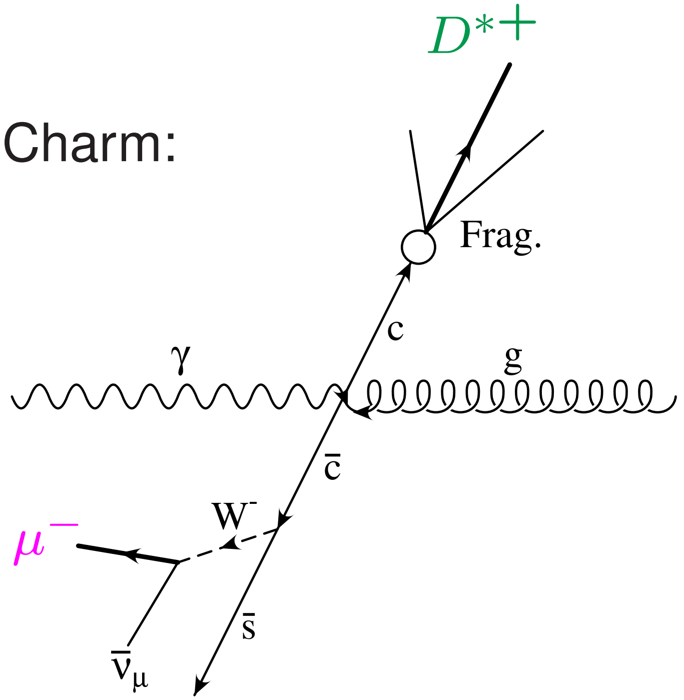
- CCFM:
  - Gute Beschreibung

  CASCADE-MC: $\sigma^{\text{vis}} \approx 35$pb

- DGLAP (LO+PS):
  - Zu niedrig

γg-Schwerpunktsystem:

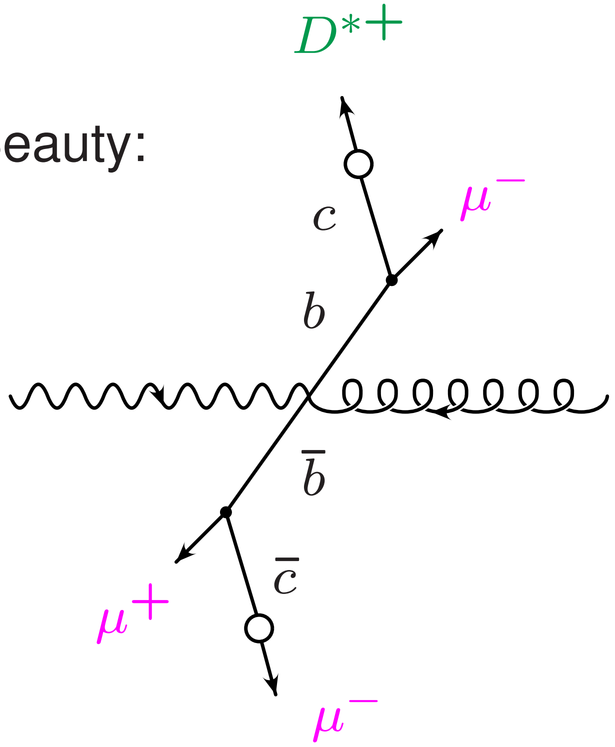
Charm:



$\Delta\Phi \approx 180°$

$Q(D^*) \neq Q(\mu)$

Beauty:



$\Delta\Phi \approx 0° \quad ; Q(D^*) \neq Q(\mu)$

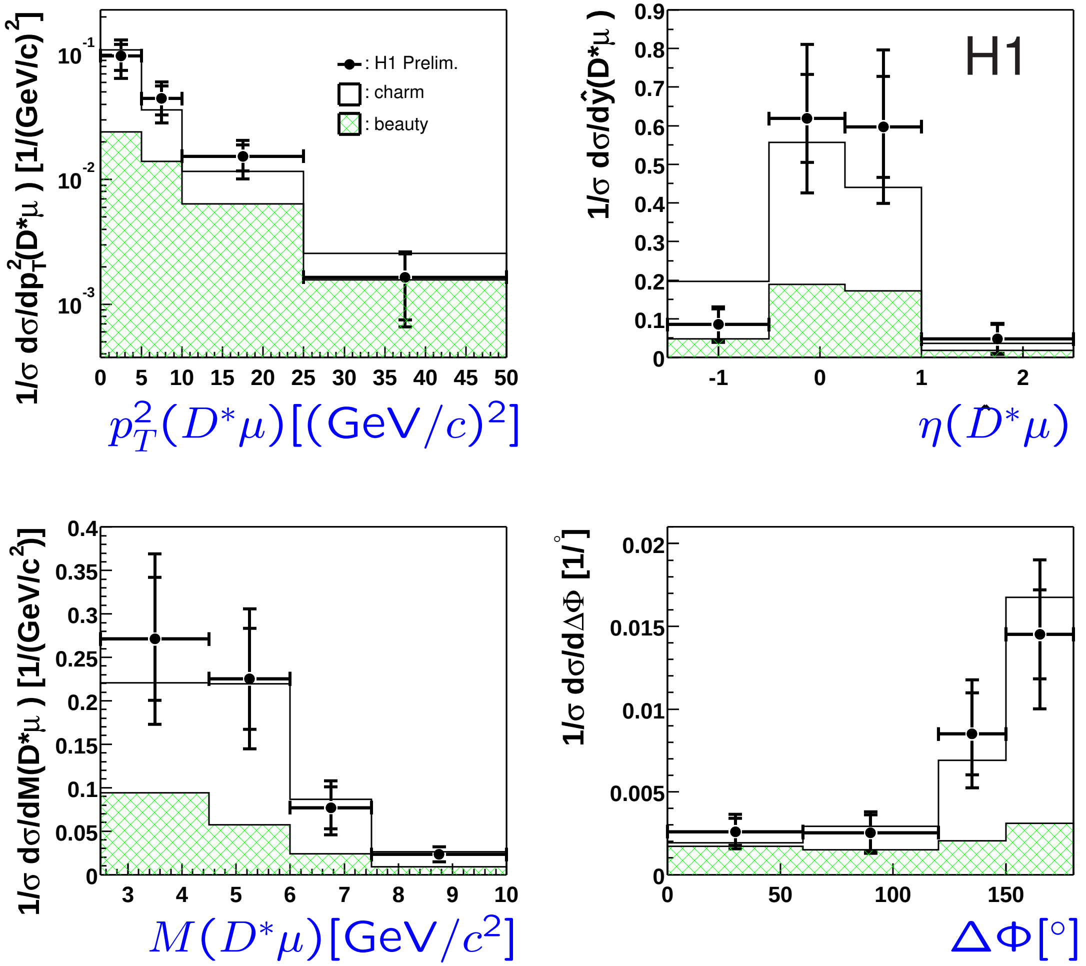
$\Delta\Phi \approx 180°; Q(D^*) \neq Q(\mu)$

$\Delta\Phi \approx 180°; Q(D^*) = Q(\mu)$

c- und b-Trennung mithilfe von Ladungs- und Winkelkorrelationen

$D^*\mu$ – Korrelationen

Heavy-Flavour Double-Tag



Beide Quarks gemessen:

$\rightarrow$ Details des Produktionsprozesses

$\rightarrow$ Effekte höherer Ordnung?

$\sigma(ep \rightarrow eb\bar{b}X)$:

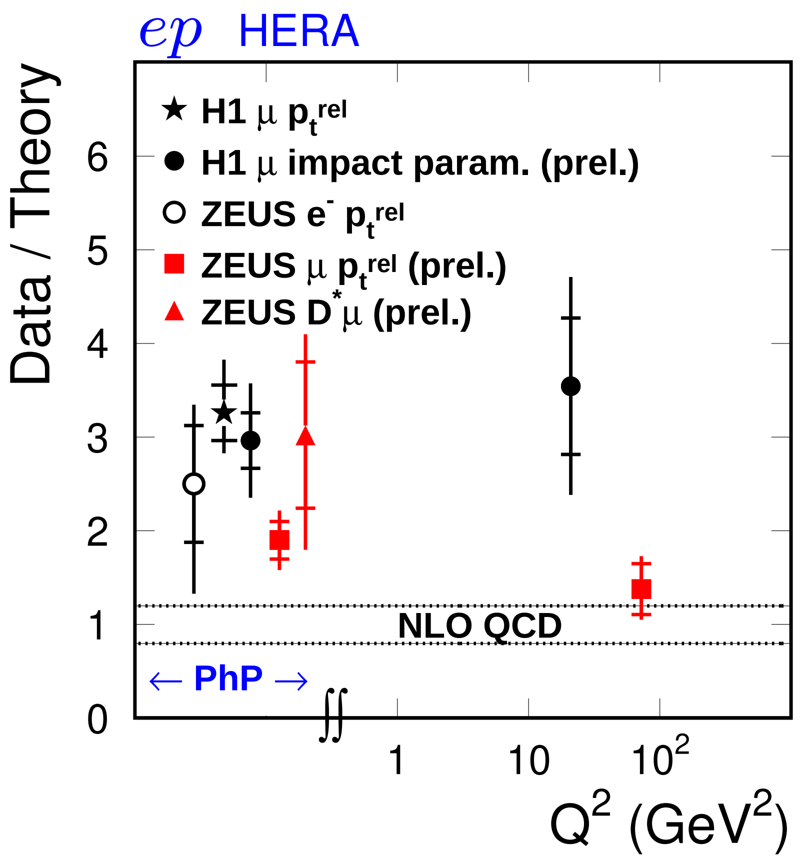
ZEUS: $15.1 \pm 3.9^{+3.8}_{-4.7}$ pb

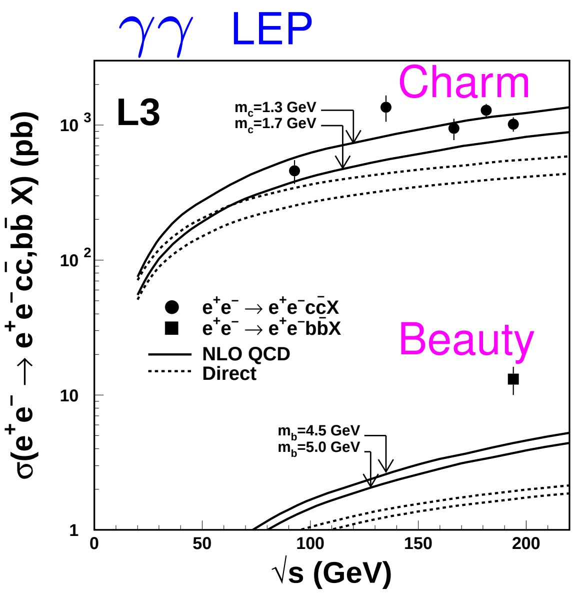
NLO (Frixione et al): $5.7^{+1.7}_{-1.1}$ pb

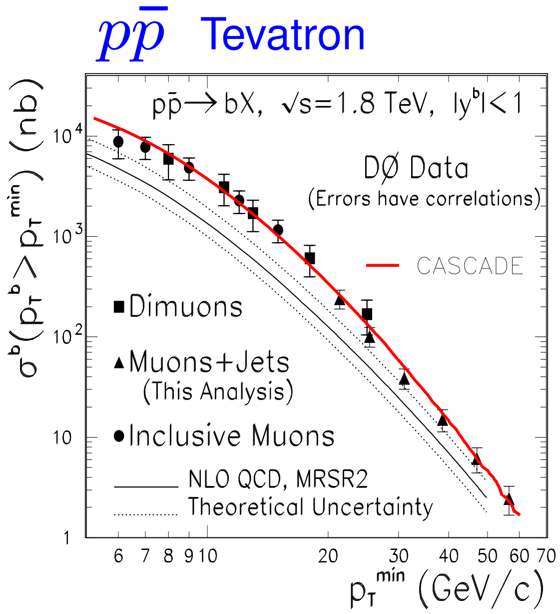
- Faktor $\sim$ 3 über NLO-Erwartung
  - – große statistische Unsicherheit
  - – bestätigt bisherige b-Ergebnisse

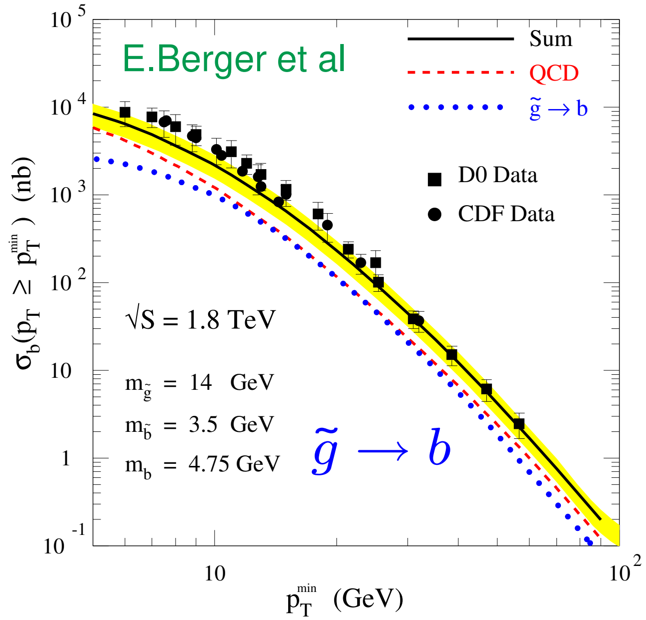
Figuren: LO Monte Carlo, Wirkungsquerschnitte normiert

Übersicht: Beauty-Produktion









- Daten höher als Erwartung (ZEUS DIS ok)

  ! Unterschiedliche kinematische Regionen und Modelle !

- Tevatron, LEP: NLO-Erwartung ähnlich zu niedrig

  $p\bar{p}$: Verbesserte Rechnungen sind näher an Daten

Zusammenfassung

HERA-I:

Zentrale Beiträge zum quantitativen Verständnis der starken Wechselwirkung

- QCD modelliert Daten recht erfolgreich
  - Protonstruktur $\otimes$ Photonstruktur $\otimes$ QCD-Dynamik $\otimes$ Fragmentation
  - Viele Freiheitsgrade: Physik mit schweren Quarks gibt Aufschluß

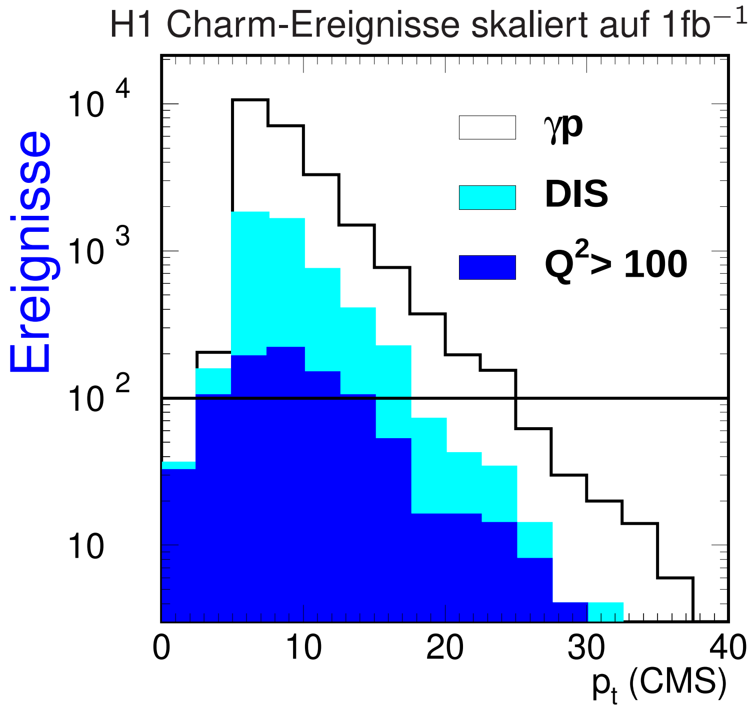
- Charm:
  - Wirkungsquerschnitte adäquat beschrieben
  - Photonstruktur: Signifikanter Beitrag von Charm-Quarks im Photon
  - Charmonium: NLO-Rechnungen sind entscheidend

- Beauty:
  - NLO niedriger als Daten (ZEUS, DIS ok), ähnlich wie $p\bar{p}$ und $\gamma\gamma$

HERA-II:

- Faktor 10 in Luminosität
- verbesserte Detektoren
  (z.B. Vertex, Trigger)

Neue Horizonte in Präzision und Verständnis!



ZEUS Microvertex-Detektor