

Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

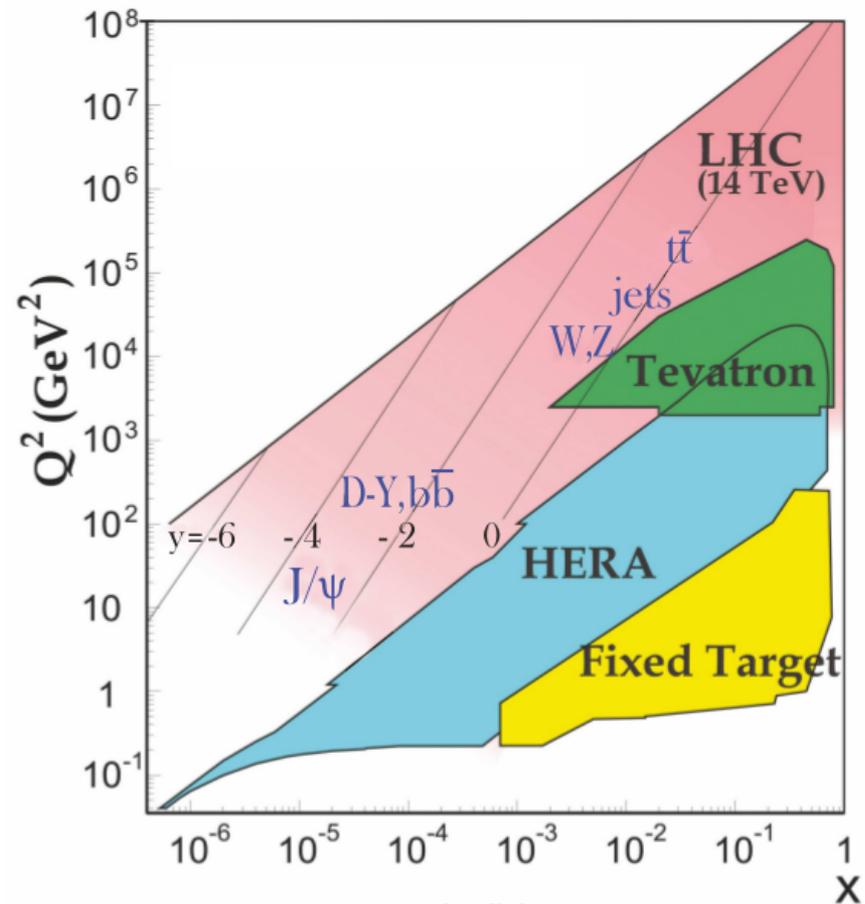
Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig

04. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY

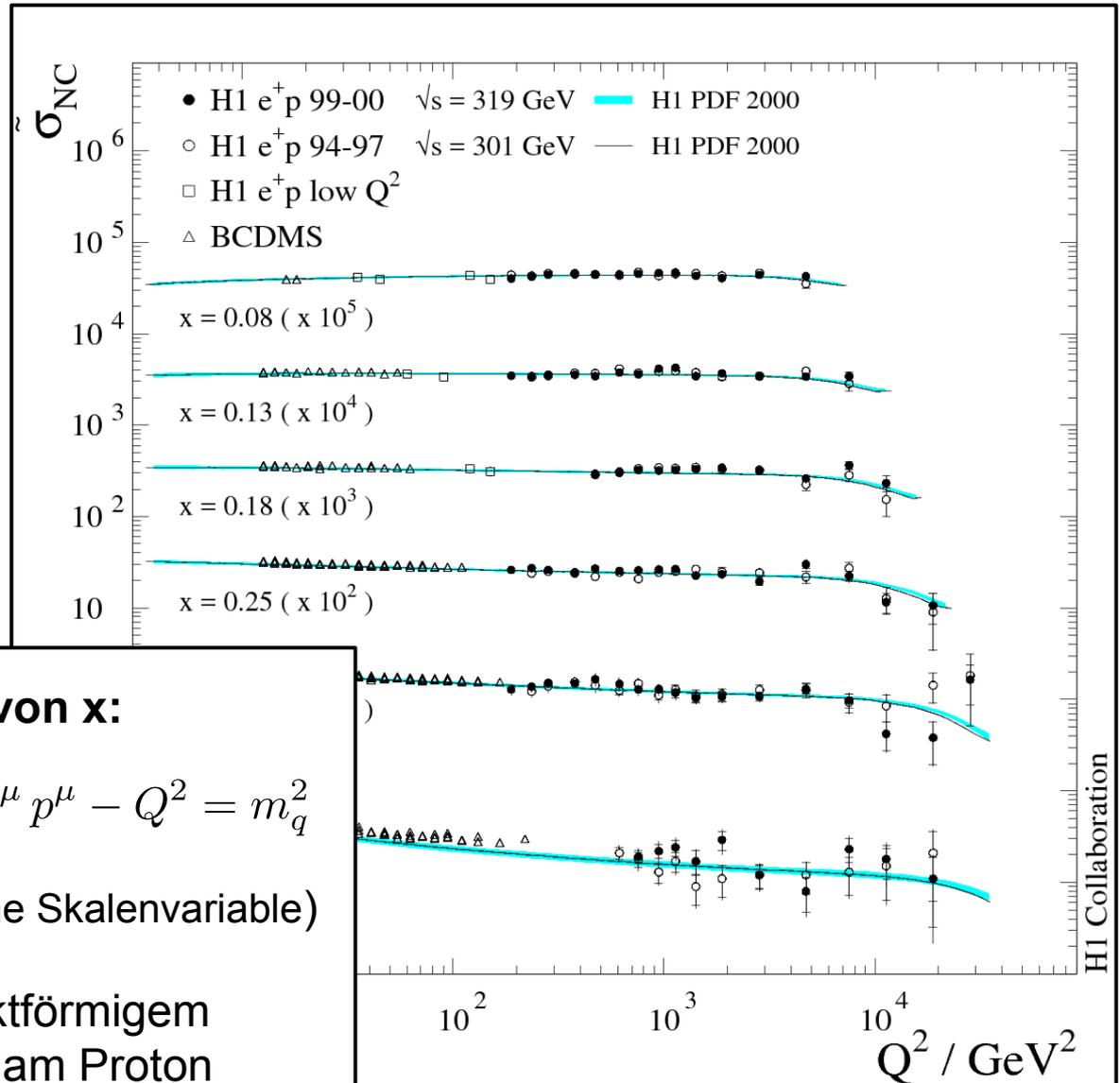


Kapitel 8.4: Struktur der Nukleonen und Partonmodell



Erinnerung: Protonstruktur (vgl VL-08 Folie 20ff)

- $\tilde{\sigma}_{\text{NC}}$: Wirkungsquerschnitt normiert auf Dirac-WQ
- Proton besteht aus punktförmigen Konstituenten



Anschauliche Bedeutung von x :

$$(x \cdot p^\mu + q^\mu)^2 = x^2 p^{\mu 2} + 2 x q^\mu p^\mu - Q^2 = m_q^2$$

$$\rightarrow x = \frac{Q^2}{2 q^\mu p^\mu} \quad (\text{Bjorken'sche Skalenvariable})$$

Elastische Streuung an punktförmigem Parton mit Impulsbruchteil x am Proton

Naives Partonmodell

- Betrachte ep -**Streuung** in “**Breit frame**”, in dem Proton unendlich großen Longitudinalimpuls besitzt:
 - Alle Massen und Transversalimpulse vernachlässigbar
 - Parton trägt Impulsbruchteil x am gesamten Protonimpuls
 - Anm.: x kann allein aus dem Anfangszustand der ep -Streuung und der Kinematik des gestreuten Elektrons bestimmt werden
- Interpretation der **Partonen als (asymptotisch freie) Quarks** mit Ladung e_i

$$\left| \begin{array}{c} \text{Diagram 1: } e \text{ scattering off a proton } P \text{ via a photon} \\ \text{Diagram 2: } e \text{ scattering off a quark } q \text{ via a photon, with momentum fraction } z_i \text{ of } P \end{array} \right|^2 = \sum_i \int_0^1 dz_i e_i^2 \cdot \left| \begin{array}{c} \text{Diagram 2} \end{array} \right|^2$$

Streuamplitude **inkohärente Summe** der
Streuamplituden an einzelnen Quarks

Partondichtefunktionen (PDFs)

- Wahrscheinlichkeit Parton i mit Impulsbruchteil im Intervall $[z_i, z_i + dz_i]$ im Proton anzutreffen gegeben durch **Partondichtefunktion** $f_i(z_i)$
- Partondichtefunktion (PDF) \rightarrow Wahrscheinlichkeitsdichte
- Normierungsbedingung:

$$\sum_i \int_0^1 z \cdot f_i(z) dz = 1$$

$$\left| \begin{array}{c} \text{Diagram 1} \\ \text{P} \end{array} \right|^2 = \sum_i \int_0^1 dz_i e_i^2 \cdot \underbrace{\left| \begin{array}{c} \text{Diagram 2} \\ \text{P} \\ z_i \text{P} \end{array} \right|^2}_{f_i(z_i)}$$

- Partondichtefunktionen nicht aus Theorie vorhergesagt \rightarrow müssen als Funktion von x gemessen werden

Strukturfunktion

$$\frac{d^2\sigma}{dE' d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \left[F_2(x) + 2 F_1(x) \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

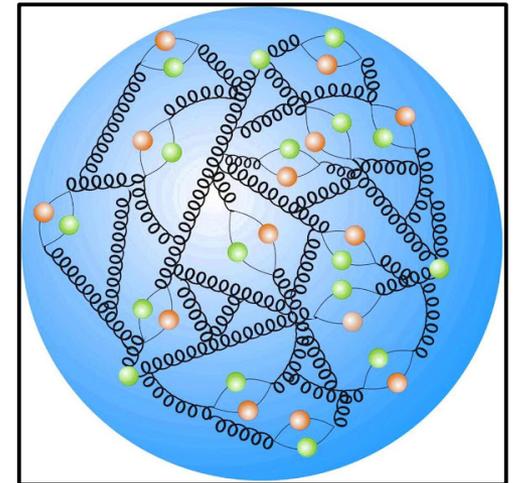
- Interpretiere $F_2(x)$ als inkohärente Summe der elementaren Einzelprozesse auf Quarkniveau (vgl [VL-08 Folie 23ff](#))

$$F_2(x) = \sum_i \int_0^1 e_i^2 \cdot z_i \cdot f_i(z_i) \cdot \delta(z_i - x) dz_i = \sum_i e_i^2 \cdot x \cdot f_i(x)$$

- Im naiven Quark-Partonmodell: **Streuung Elektron an geladenen Valenzquarks**

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \left(\frac{4}{9} u_v^p(x) + \frac{1}{9} d_v^p(x) \right) \quad (1)$$

- **Aber:** auch Abstrahlung von (ungeladenen) Gluonen möglich und Aufspaltung von Gluonen in Quark-Antiquark-Paare → **Seequarks**



(1) Index "p" steht für "Proton"

See- und Valenzquarks

- **Quarkdichtefunktionen** für Valenz- und Seequarks im Proton:

$$q^p(x) = q_v^p(x) + q_s^p(x)$$

$$\bar{q}^p(x) = \bar{q}_s^p(x) \quad (q = u, d, s, \dots)$$

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \left[\frac{4}{9} \left(u^p(x) + \bar{u}^p(x) \right) + \frac{1}{9} \left(d^p(x) + \bar{d}^p(x) \right) + \underbrace{\frac{1}{9} \left(s^p(x) + \bar{s}^p(x) \right) + \dots}_{\text{Im Grunde alle Quarkflavor im Proton möglich}} \right]^{(1)}$$

- Mit den Normierungsbedingungen:

$$\int_0^1 \left[u(x) - \bar{u}(x) \right] dx = 2$$

$$\int_0^1 \left[d(x) - \bar{d}(x) \right] dx = 1$$

$$\int_0^1 \left[s(x) - \bar{s}(x) \right] dx = 0$$

...

(Summenregeln)

Übergang Proton ↔ Neutron:

$$u^p(x) = d^n(x) = u(x)$$

$$d^p(x) = u^n(x) = d(x)$$

$$\bar{q}^p(x) = \bar{q}^n(x) = \bar{q}(x)$$

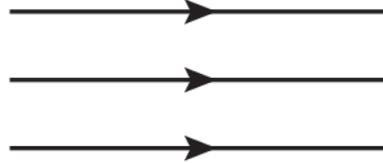
→ starker Isospin

(1) “-” der Ladung für Antiquarks in PDF absorbiert

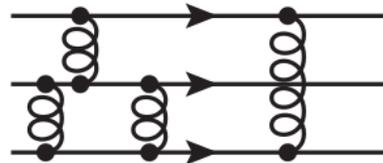
$F_2(x)$ als Funktion von x

- Einfachstes Modell: drei **unabhängige Quarks**

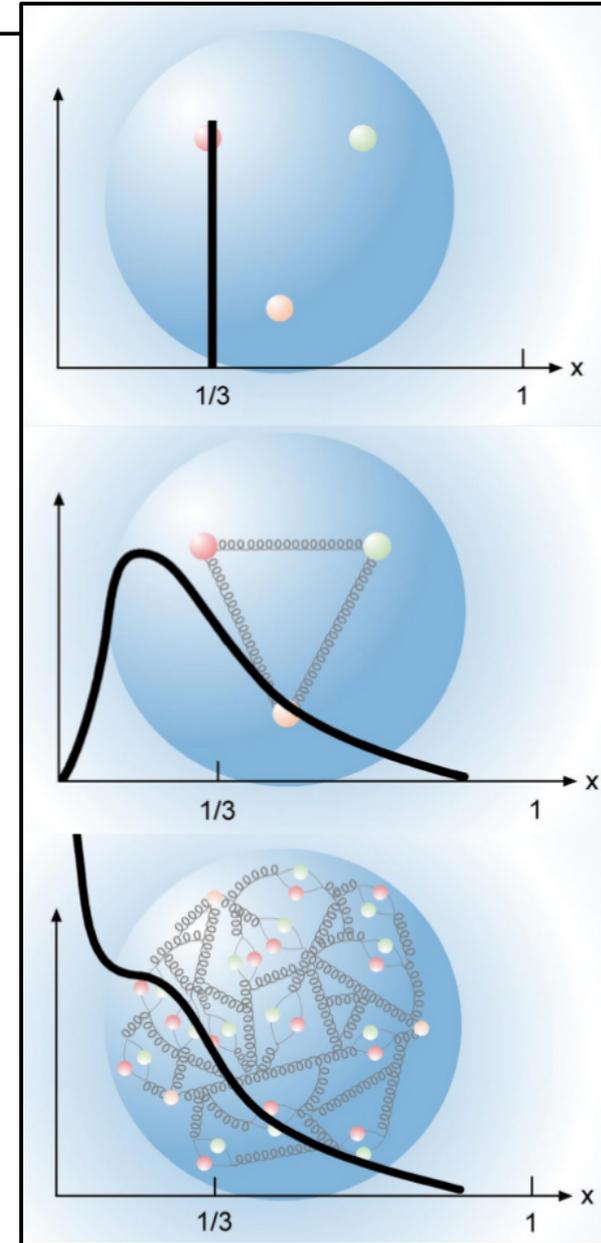
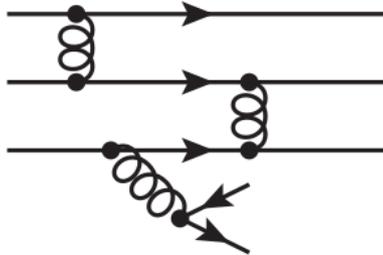
$$\rightarrow F_2(x) = \delta(1/3)$$



- Glonaustausch** zwischen Valenzquarks
→ Verschmierung

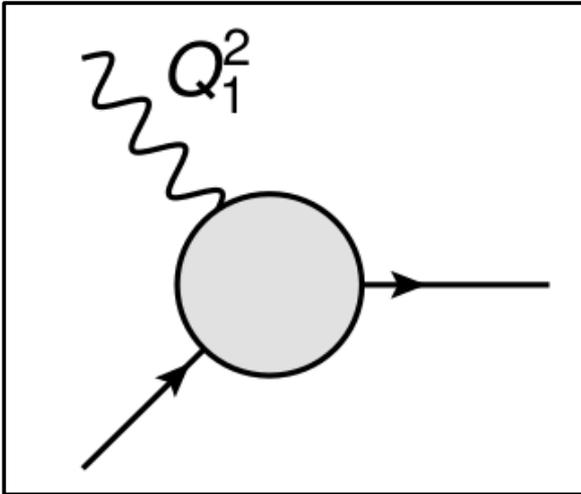


- Glonaustausch und **Glonaabstrahlung**
→ Seequarks

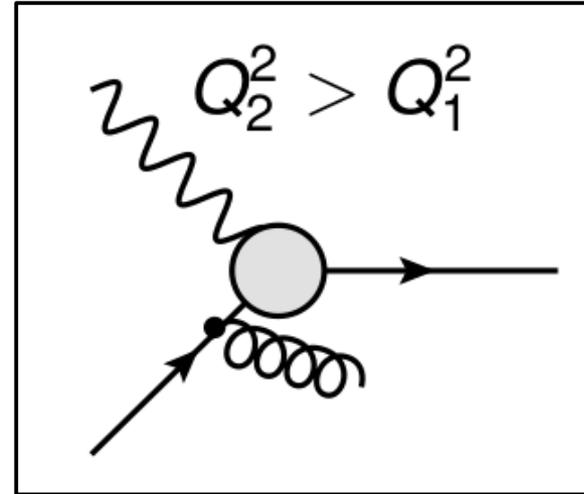


$F_2(x)$ als Funktion von Q^2

- In QCD besitzt F_2 doch (indirekte) Abhängigkeit von Q^2
- Q^2 : **Auflösung mit der in das Proton hinein “geleuchtet” wird**



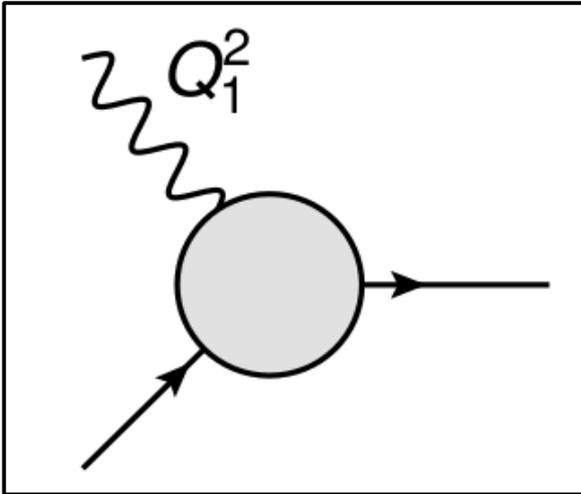
Quark mit großem x



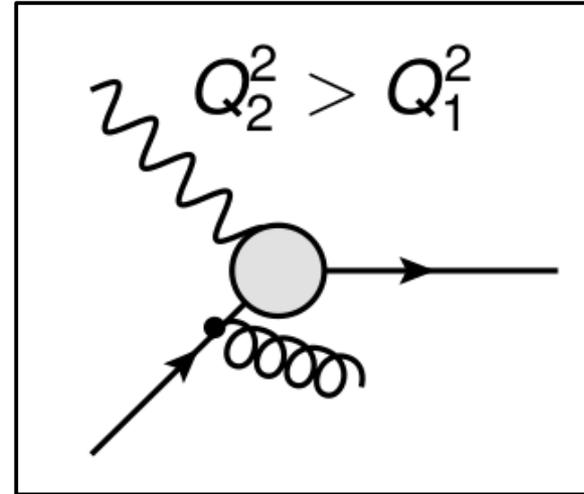
Quark mit kleinem x
(Teil des zuvor beobachteten Impulsbruch-
teils durch Gluon davon
getragen)

$F_2(x)$ als Funktion von Q^2

- In QCD besitzt F_2 doch (indirekte) Abhängigkeit von Q^2
- Q^2 : **Auflösung mit der in das Proton hinein “geleuchtet” wird**



Quark mit großem x



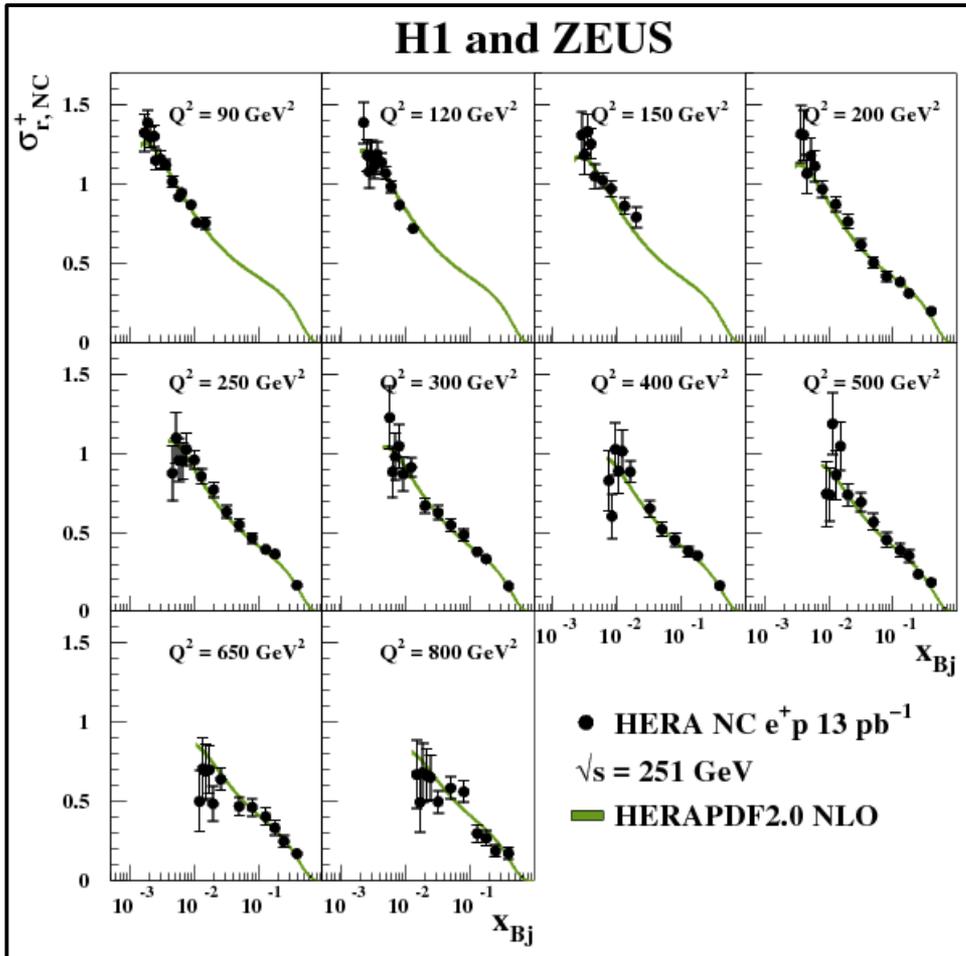
Quark mit kleinem x
(Teil des zuvor beobachteten Impulsbruchteils durch Gluon davon getragen)

In welcher Richtung erwarten Sie Skalenverletzung mehr oder weniger Gluonen mit zunehmendem Q^2 ?

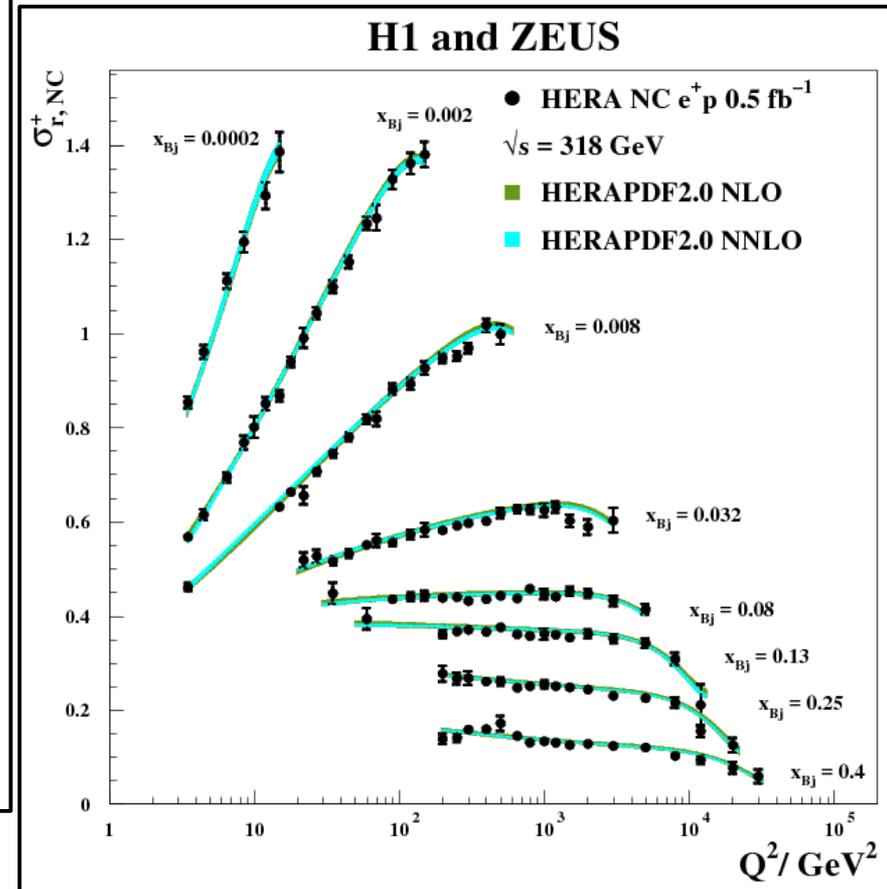


$$F_2(x, Q^2)$$

- $F_2(x)$, muß gemessen werden!



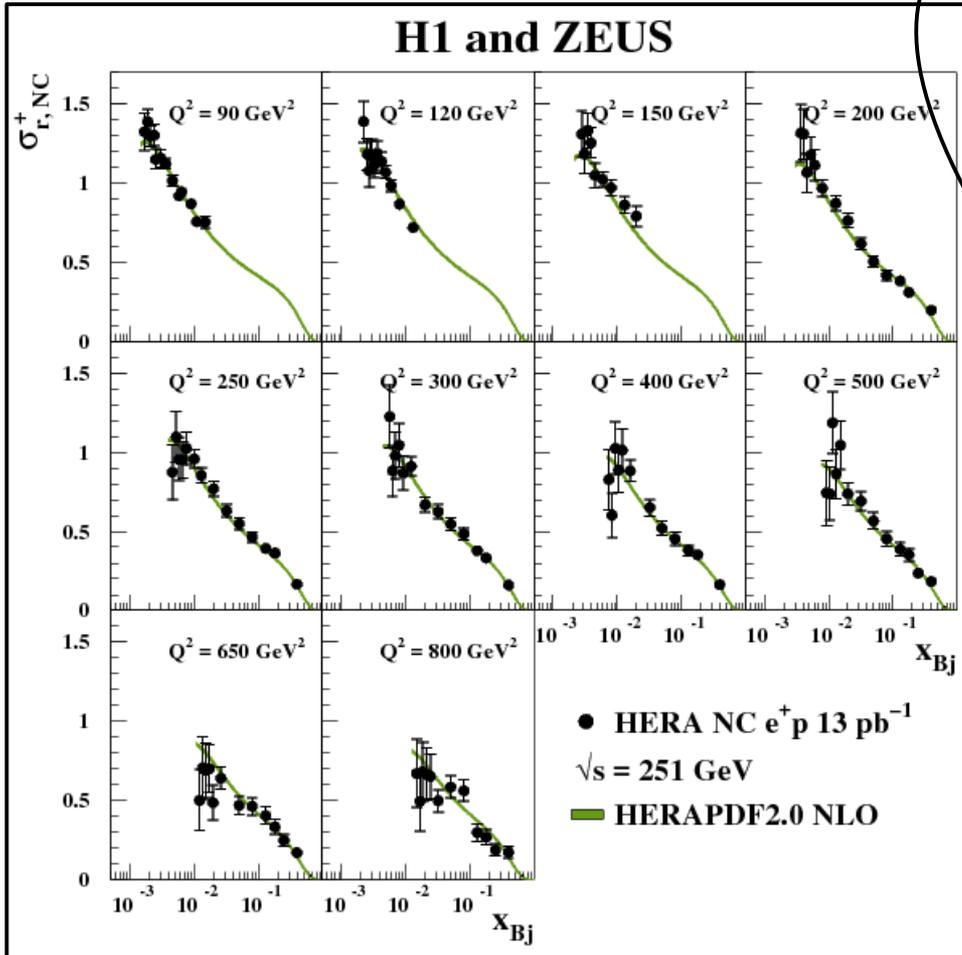
- Skalenverletzungen von $F_2(x)$ bei festen Werten von x



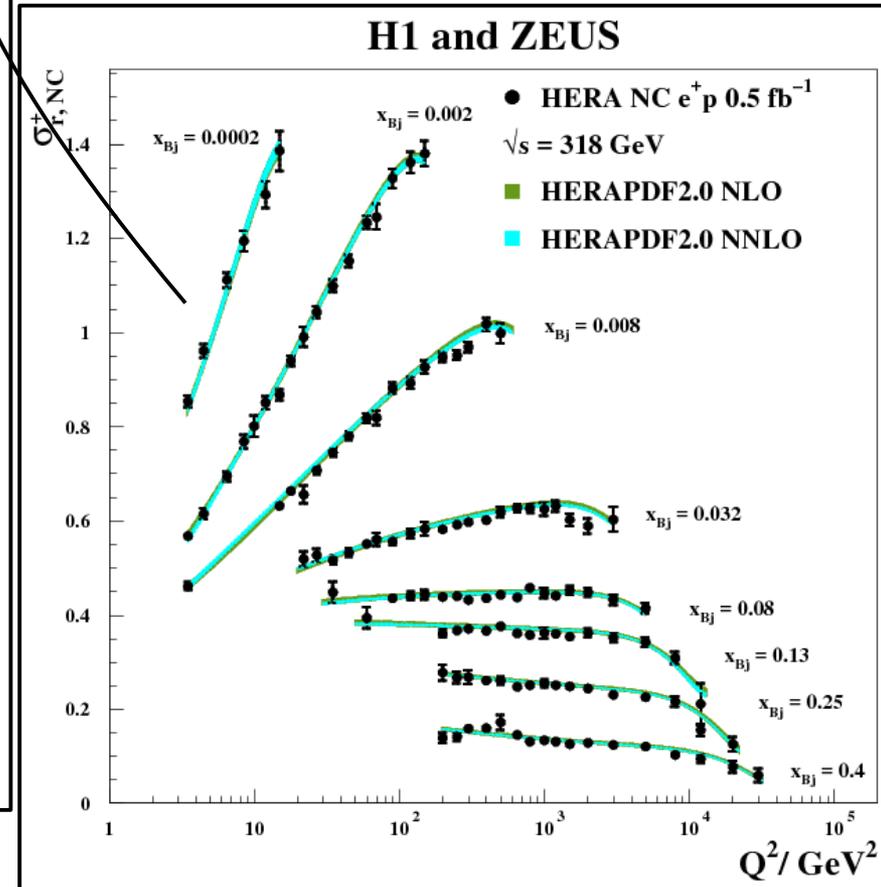
$$F_2(x, Q^2)$$

- $F_2(x)$, muß gemessen werden!

Dieses Verhalten läßt sich in der QCD vorhersagen!



- **Skalenverletzungen** von $F_2(x)$ bei festen Werten von x



Experimenteller Zugang zu Valenzquarks

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \left[\frac{4}{9} \left(u(x) + \bar{u}(x) \right) + \frac{1}{9} \left(d(x) + \bar{d}(x) \right) + \frac{1}{9} \left(s(x) + \bar{s}(x) \right) + \dots \right]$$

$$F_2^{en}(x) = x \cdot \left[\frac{4}{9} \left(d(x) + \bar{d}(x) \right) + \frac{1}{9} \left(u(x) + \bar{u}(x) \right) + \frac{1}{9} \left(s(x) + \bar{s}(x) \right) + \dots \right]$$

$$F_2^{ep}(x) - F_2^{en}(x) = x \cdot \frac{1}{3} \left[u_v(x) - d_v(x) \right]$$

$$\bar{u}(x) = \bar{d}(x) = \\ \bar{s}(x) = s(x) = \bar{q}(x)$$

- **Gesamtanteil Quarks** am Nukleonimpuls:

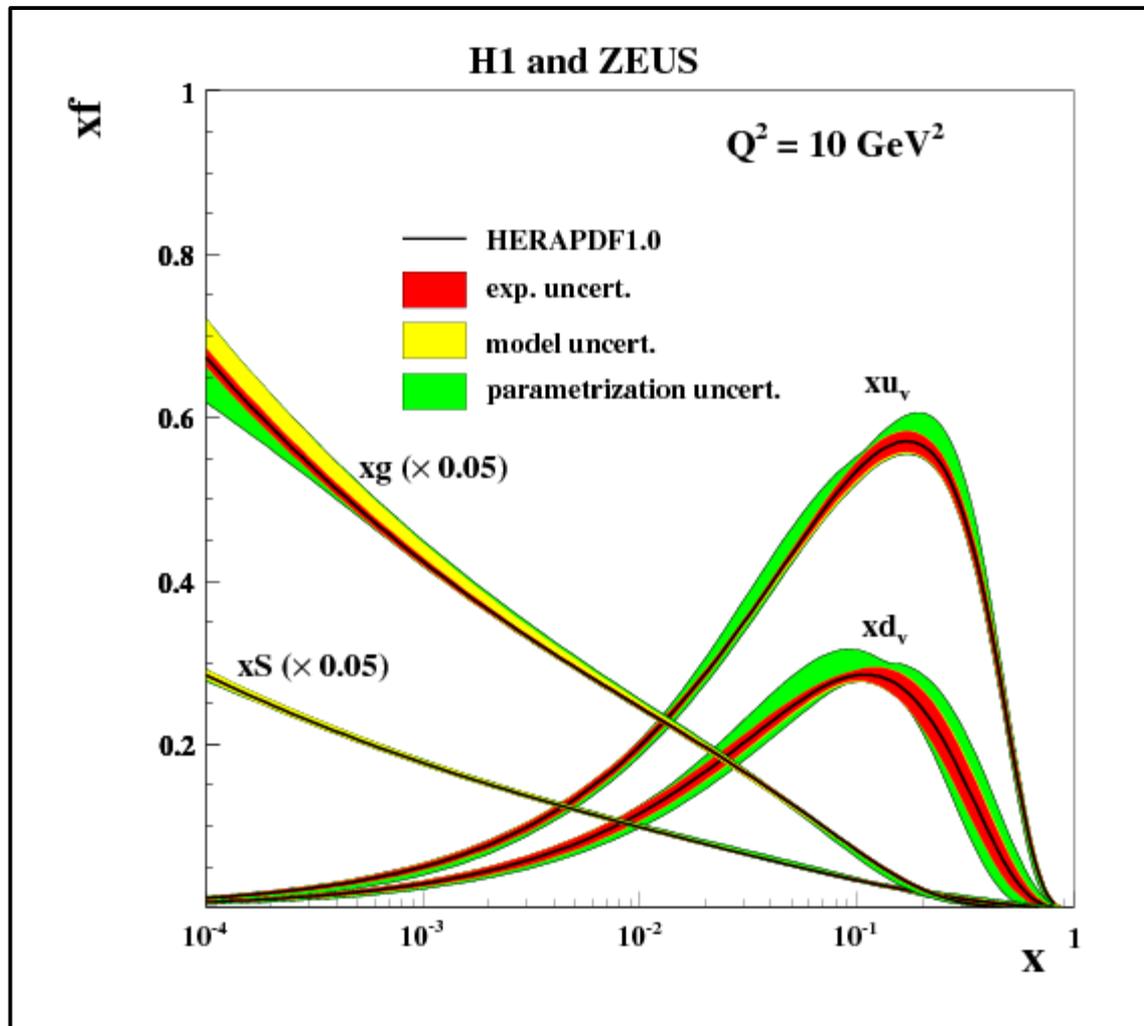
$$F_2^{eN}(x) \equiv \frac{1}{2} \left(F_2^{ep}(x) + F_2^{en}(x) \right) \\ = x \left[\frac{5}{18} \left(u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x) \right) + \frac{1}{9} \left(s(x) + \bar{s}(x) \right) \right] \\ \approx 0$$

$$\sum_i \int_0^1 x \left[q_i(x) + \bar{q}_i(x) \right] dx = \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{eN}(x) dx \approx 0.5$$

Experimenteller Befund:
50% des Nukleonimpulses
nicht durch Quarks
getragen! → Gluonen

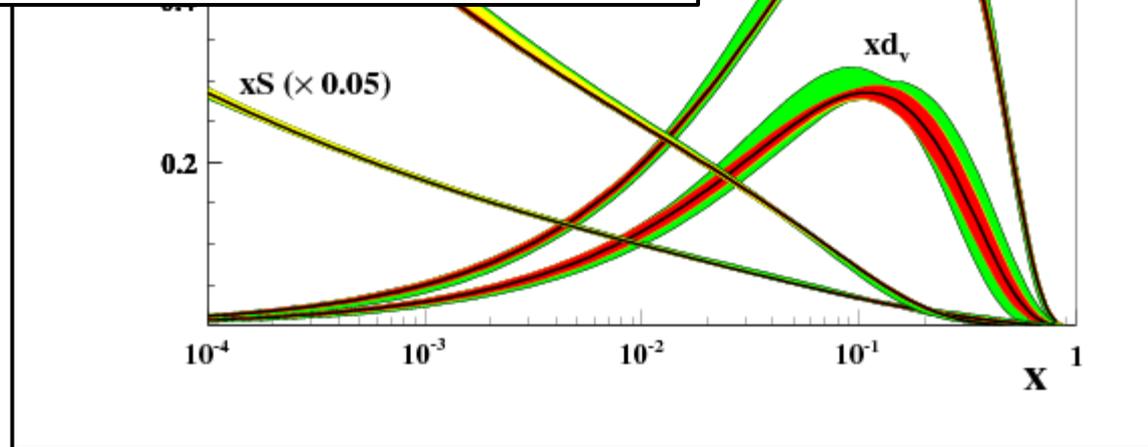
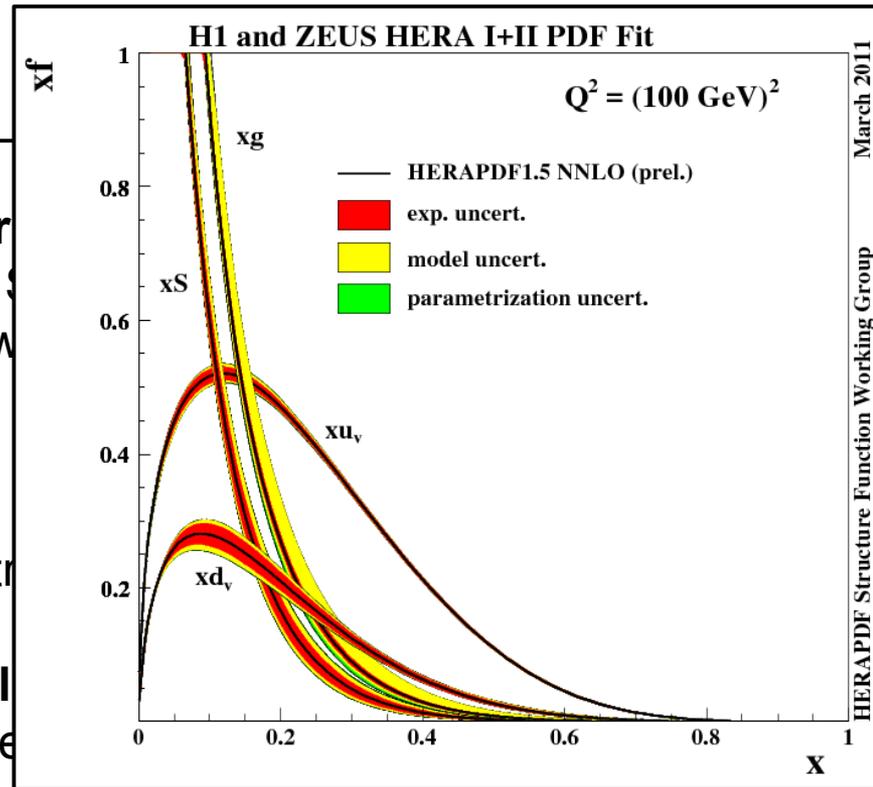
Bestimmung der PDFs

- **Wähle Parametrisierung** für $q_v(x)$, $q_s(x)$, $g(x)$ an Startskala μ^2 (\rightarrow üblicherweise von wenigen GeV)
- Quarkdichten durch Summenregeln constrained
- **“QCD-Evolution“ erlaubt Extrapolation** zu jeder anderen Skala Q^2
- Unterschiedliches Verhalten der PDFs bei “QCD-Evolution“ erlaubt **Anpassung an Daten** (z.B. Gluondichte komplett aus Skalenverletzung)



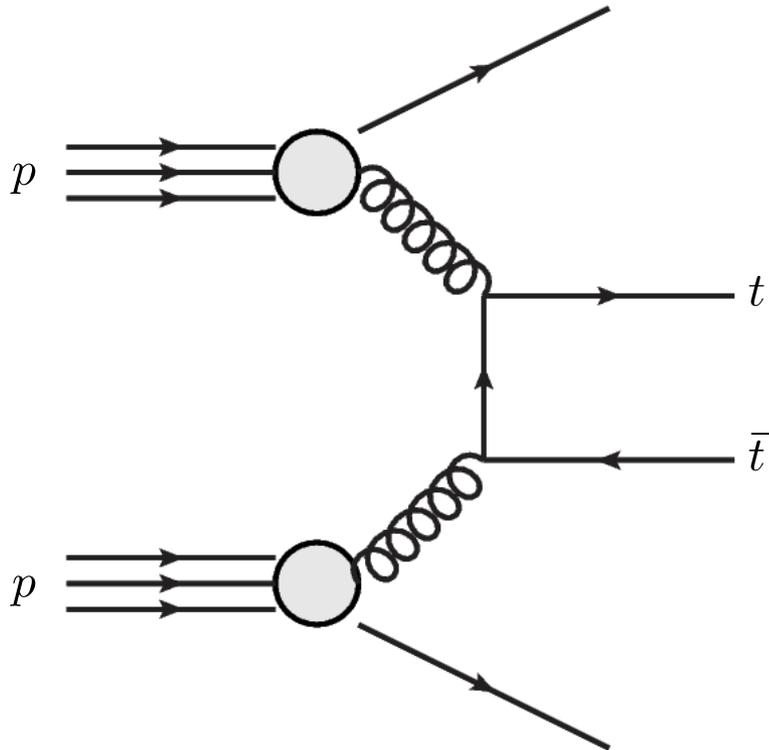
Bestimmung der

- **Wähle Parametrisierung** $q_v(x)$, $q_s(x)$, $g(x)$ an Skala μ^2 (\rightarrow üblicherweise von wenigen GeV)
- Quarkdichten durch Summenregeln konstruieren
- **“QCD-Evolution“** erlaubt **Extrapolation** zu jeder anderen Skala Q^2
- Unterschiedliches Verhalten der PDFs bei “QCD-Evolution“ erlaubt **Anpassung an Daten** (z.B. Gluondichte komplett aus Skalenverletzung)



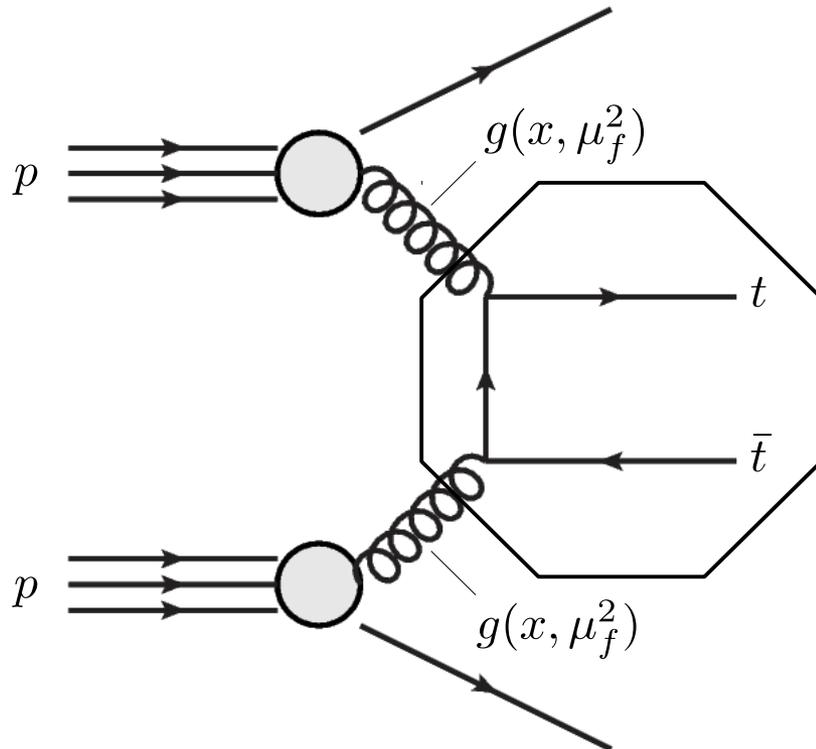
Faktorisierungstheoreme der QCD

- Bedeutung PDF gründet auf Faktorisierungstheoremen der QCD (\rightarrow **PDF universelle Eigenschaft** des Nukleons!)
- Beispiel: Produktion von Top-Quark Paaren am LHC



Faktorisierungstheoreme der QCD

- Bedeutung PDF gründet auf Faktorisierungstheoremen der QCD (\rightarrow **PDF universelle Eigenschaft** des Nukleons!)
- Beispiel: Produktion von Top-Quark Paaren am LHC

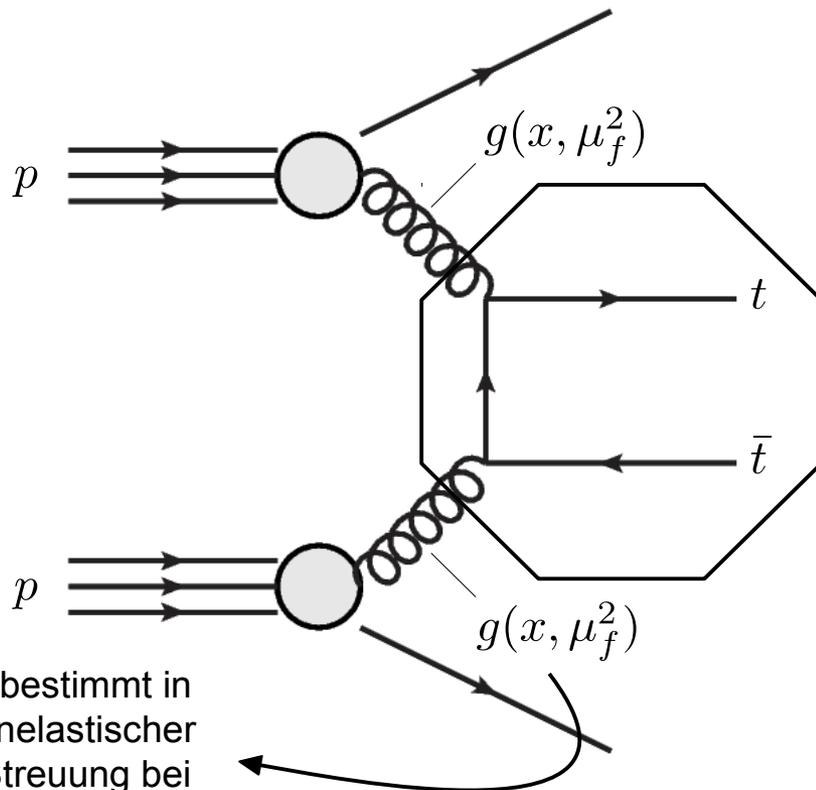


Harter Streuprozess (=Matrixelement):

- Üblicherweise divergiert das Integral über den Phasenraum (sowohl im UV als auch im IR-Bereich)
- **UV-Divergenzen:** Renormierung ab einer vorgegebenen Skala μ_r (\rightarrow absorbiere Divergenz in gemessene Größe, z.B. Ladung oder Masse)
- **IR-Divergenzen:** Faktorisierung ab einer vorgegebenen Skala μ_f (\rightarrow absorbiere Divergenz in gemessene PDF)

Faktorisierungstheoreme der QCD

- Bedeutung PDF gründet auf Faktorisierungstheoremen der QCD (\rightarrow **PDF universelle Eigenschaft** des Nukleons!)
- Beispiel: Produktion von Top-Quark Paaren am LHC



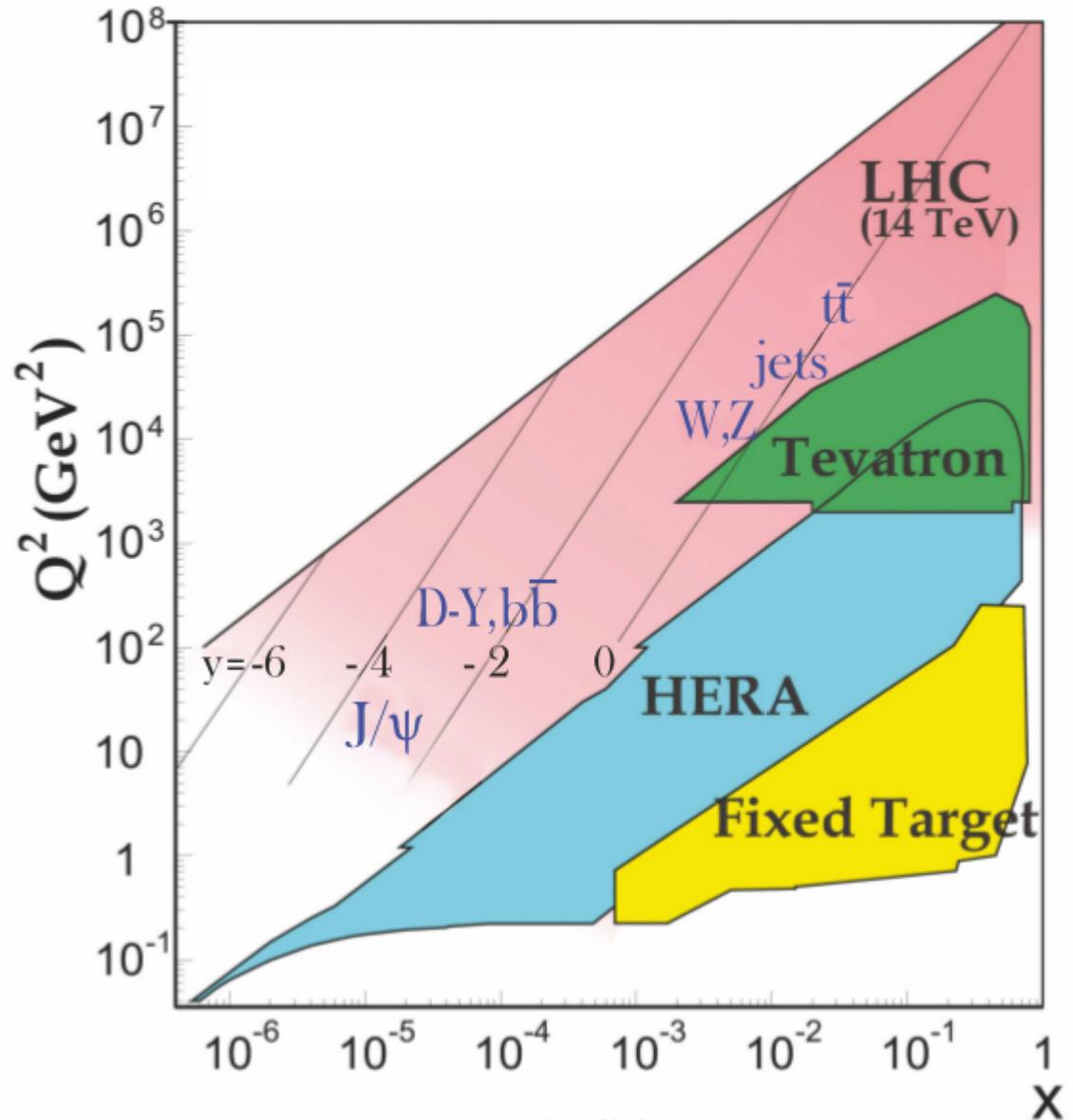
z.B. bestimmt in tief-inelastischer ep-Streuung bei HERA

Harter Streuprozess (=Matrixelement):

- Üblicherweise divergiert das Integral über den Phasenraum (sowohl im UV als auch im IR-Bereich)
- **UV-Divergenzen:** Renormierung ab einer vorgegebenen Skala μ_r (\rightarrow absorbiere Divergenz in gemessene Größe, z.B. Ladung oder Masse)
- **IR-Divergenzen:** Faktorisierung ab einer vorgegebenen Skala μ_f (\rightarrow absorbiere Divergenz in gemessene PDF)

Extrapolation HERA – LHC

- **Abgedeckter Phasenraum** zur Bestimmung der PDFs bei HERA und LHC
- Bereich in $x \sim \text{OK}$, Evolution in Q^2 erforderlich
- Auch eigene PDF Bestimmungen bei LHC möglich (\rightarrow kombinierte Anpassungen an Daten aller Experimente, die rechts gezeigt sind)

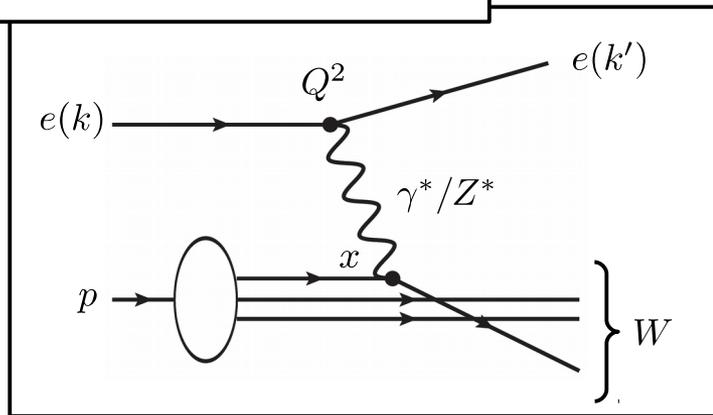


Kapitel 9: Elektroschwache Physik

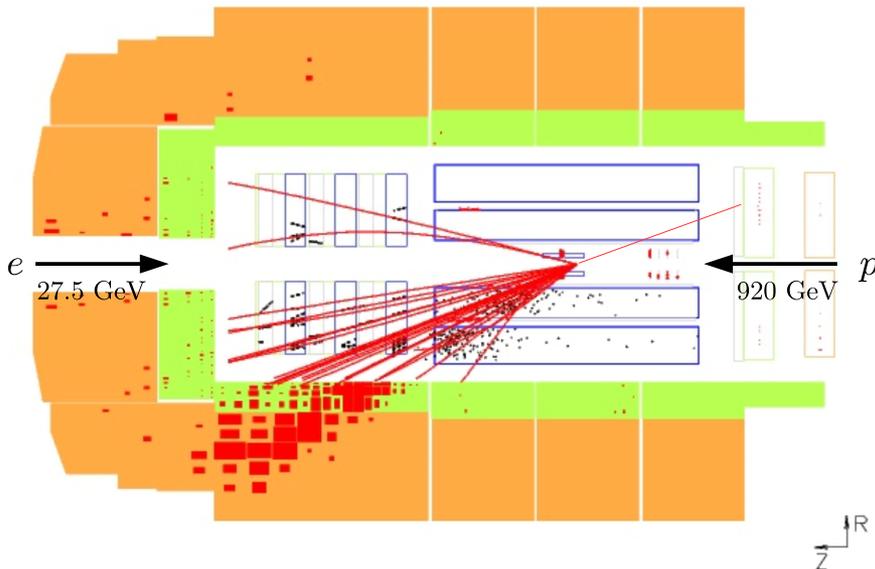
Kapitel 9.1: Eigenschaften der elektro- schwachen Wechselwirkung

Ladungsändernd

Neutraler Strom (NC, neutral current)



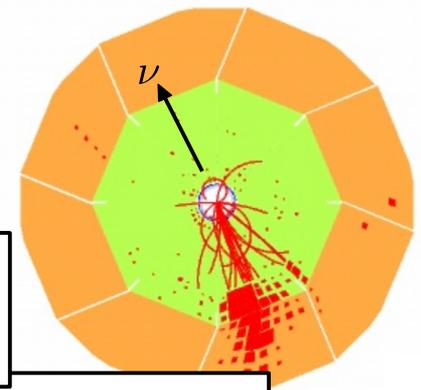
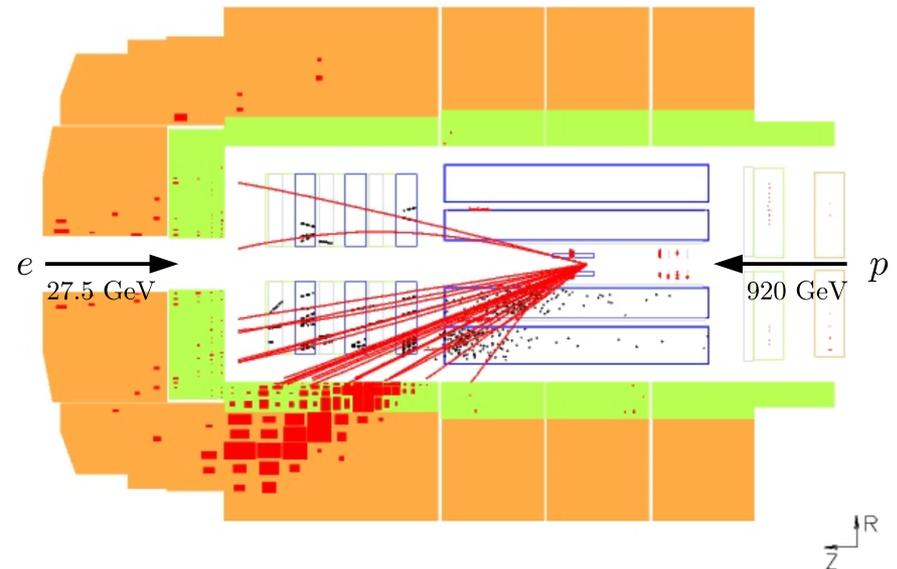
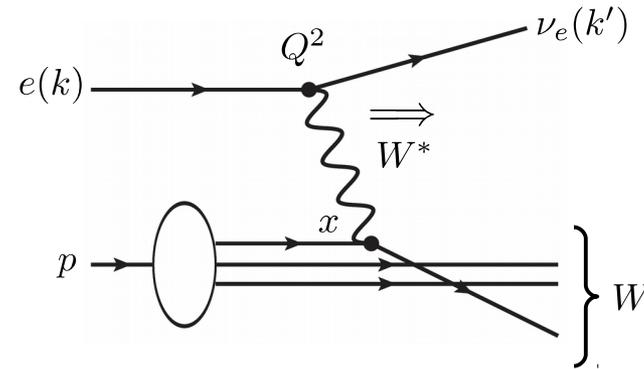
- Austausch eines **Z-Bosons** oder **Photons**
- Ladungserhaltender Austausch
- Bezeichnung als neutraler Strom (engl. neutral current)
- Existenz des Z-Bosons aus elastischer Neutrino-Streuung



Ladungsändernd

- Austausch eines W^+ - oder W^- -Bosons
- Ladungsverändernder Austausch
- Bezeichnung als geladener Strom (engl. charged current)
- Klare Signatur z.B. in tiefinelastischer Streuung

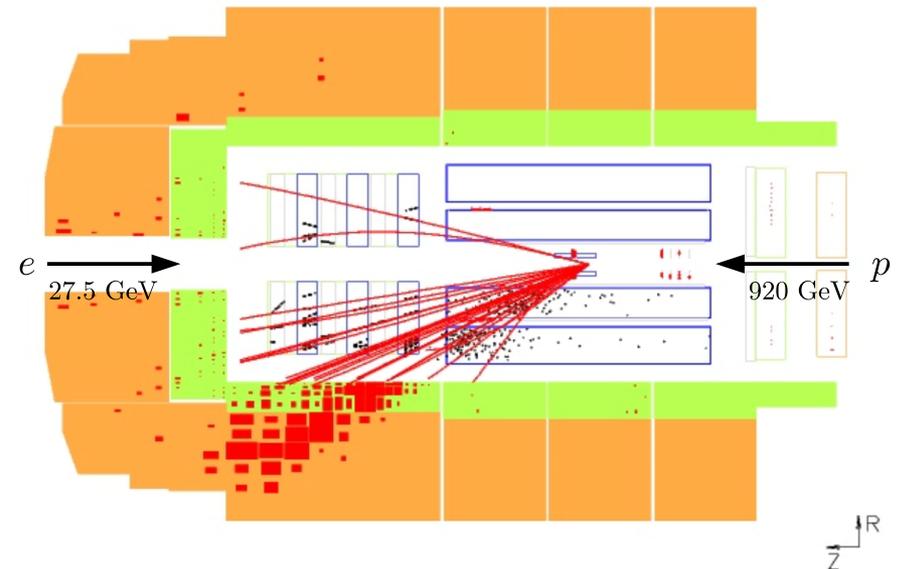
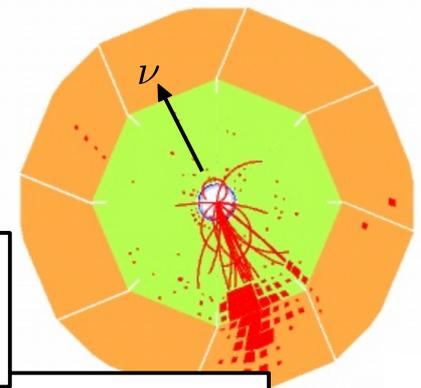
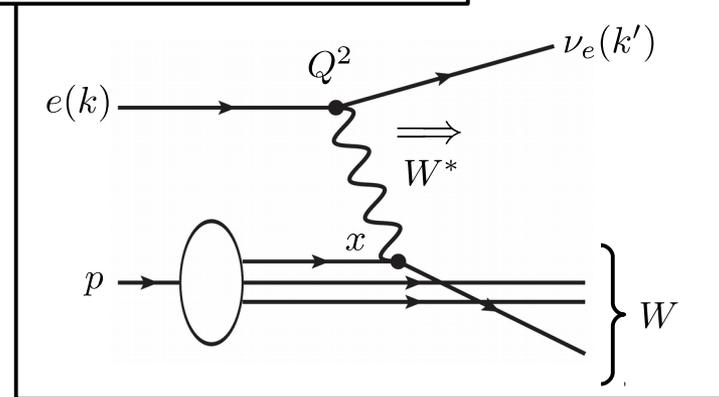
Geladener Strom
(CC, charged current)



Ladungsändernd

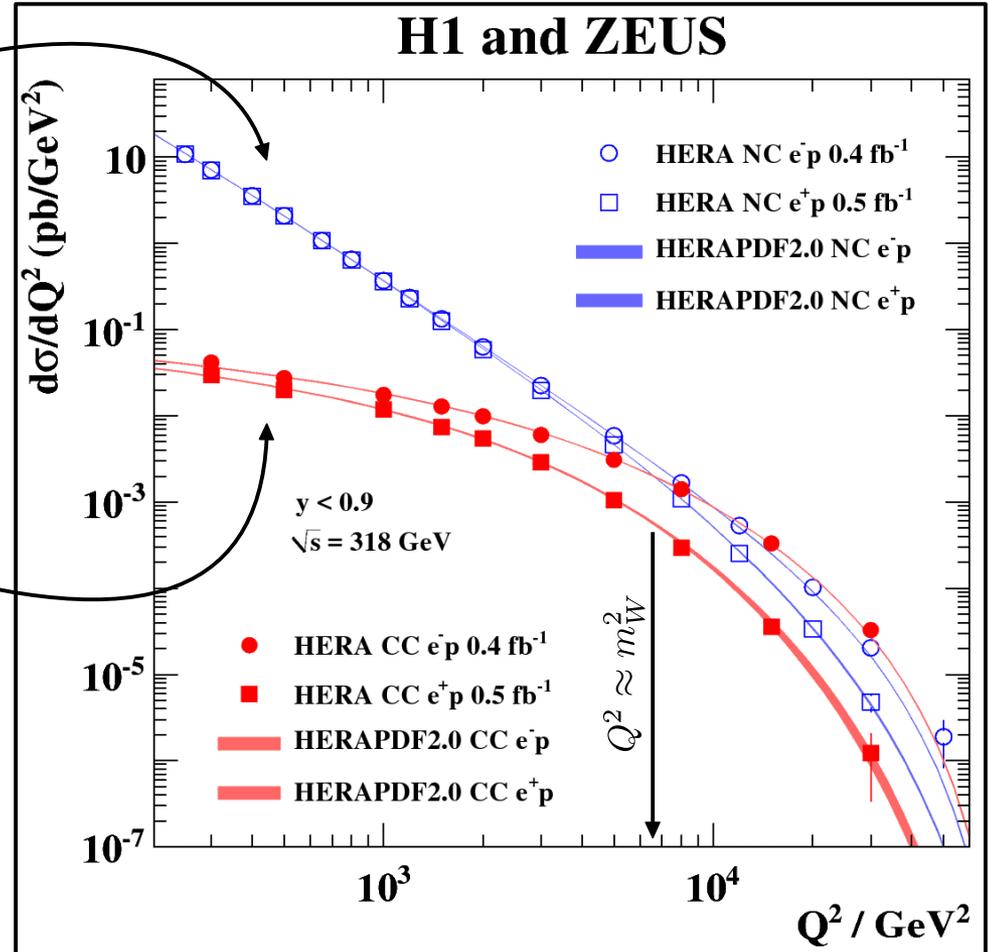
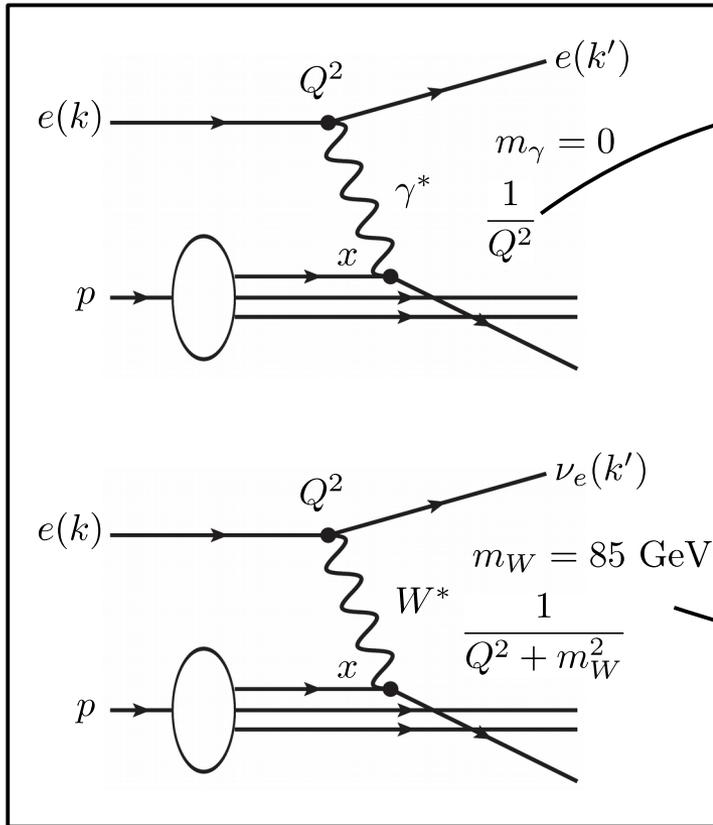
- Austausch eines W^+ - oder W^- -Bosons
- Ladungsverändernder Austausch
- Bezeichnung als geladener Strom (engl. charged current)
- Klare Signatur z.B. in tiefinelastischer Streuung

Geladener Strom (CC, charged current)



Außerdem “**leptonuniversell**” \rightarrow
gleiche Kopplung an $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
zentrale Schlußfolgerung aus der
Theorie (\rightarrow s. nächste VL)

Massive Vermittlerteilchen

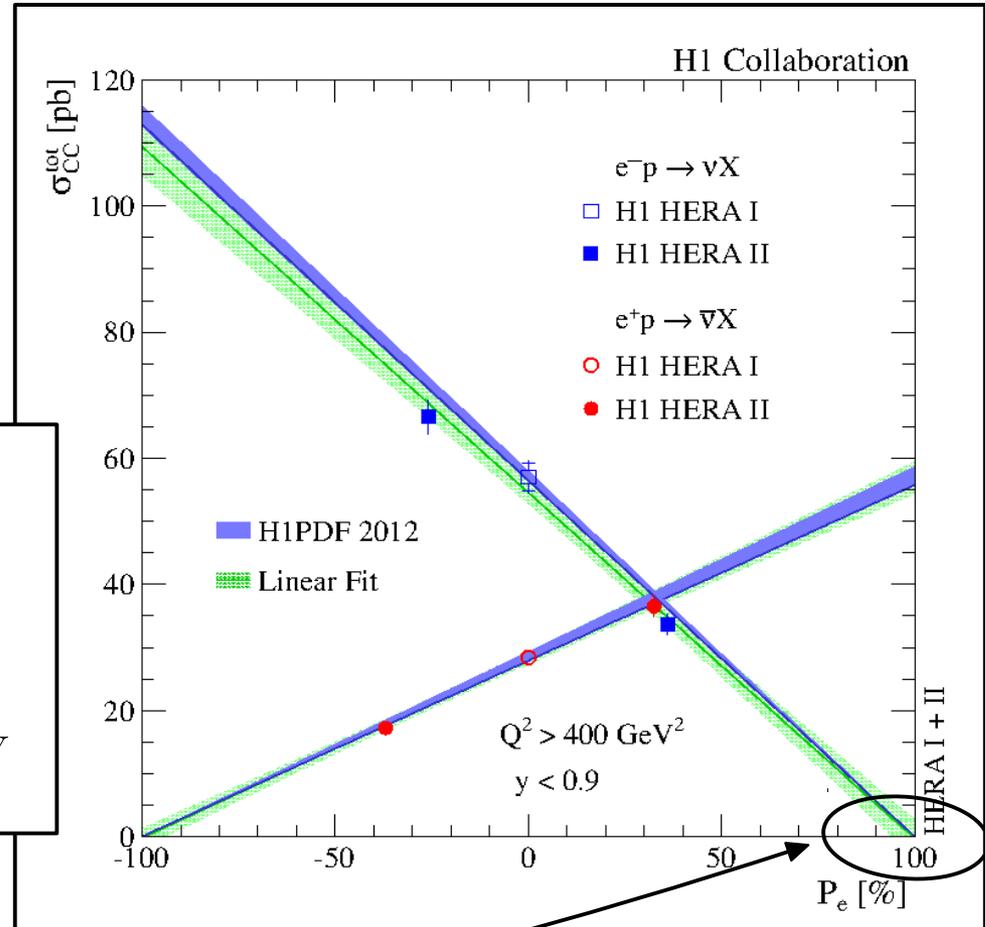
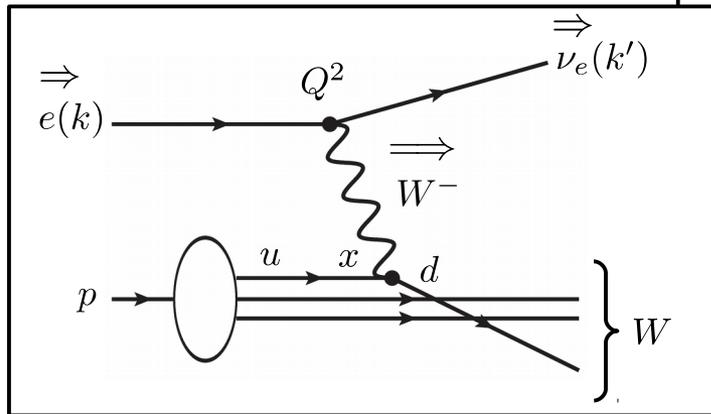


Maximal paritätsverletzend

- W -Boson koppelt nur an **linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen**

→ Maximal paritätsverletzend

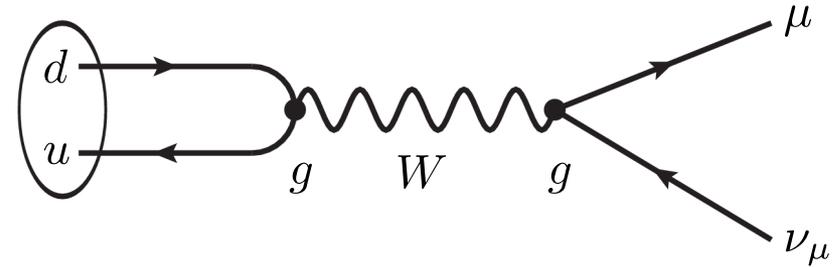
Bsp.: rechtshändiges Elektron



Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- Zerfallsbreite des π^- :

$$\Gamma_{\pi^-} \propto -g^2 \frac{g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2 + i\epsilon}$$



W-Boson Propagator

Schwache Kopplung an Vertizes

- Für den Zerfall im Ruhesystem des Pions gilt $q^2 \rightarrow 0$ und

$$\Gamma_{\pi^-} \propto \frac{g^2}{m_W^2} \propto G_F$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \left(\frac{g}{2\sqrt{2}} \right)^2 \frac{(\hbar c)^3}{(m_W c^2)^2} \quad (\text{Fermi-Konstante})$$

Was erwarten Sie für das Verhältnis der Zerfallsbreiten

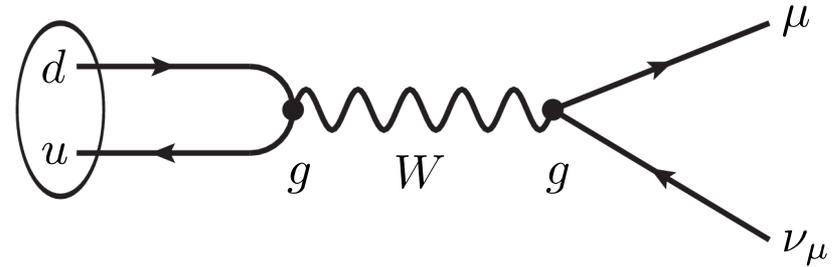
$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$



Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes** Verhältnis:

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



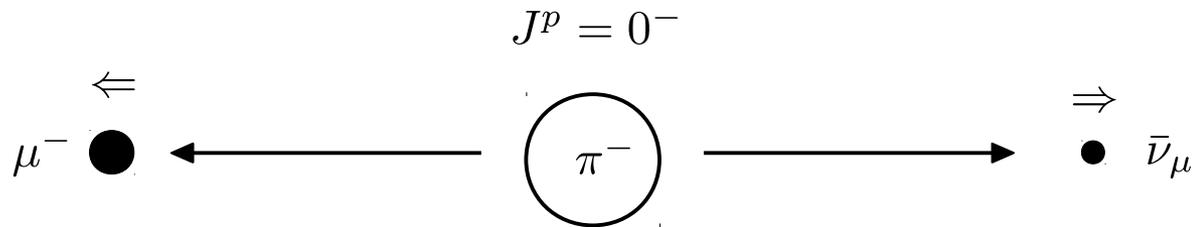
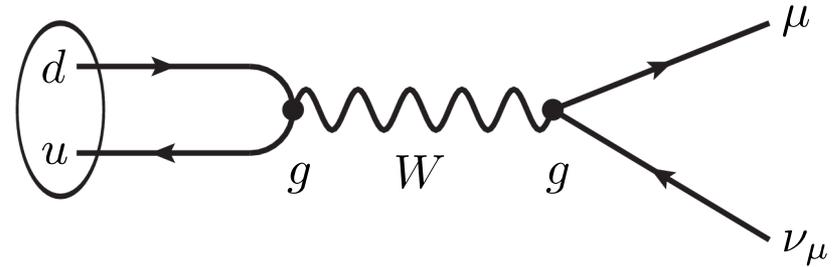
Wie erklären Sie sich dieses Resultat?



Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



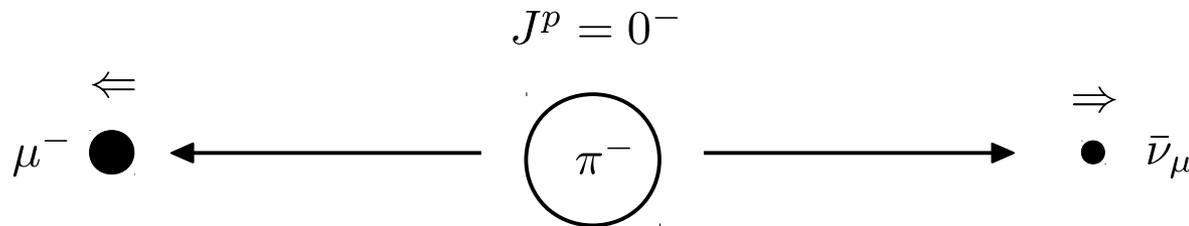
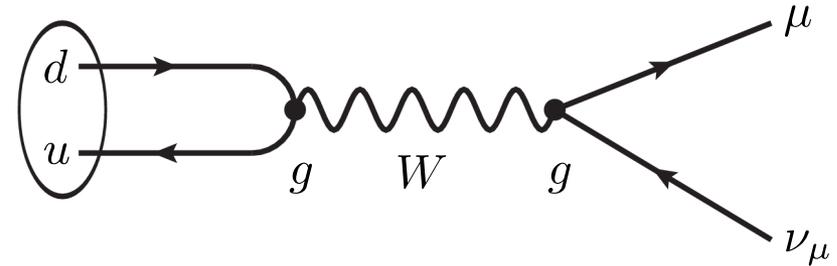
Rechtshändiges Elektron
(s. [Folie 18](#) \rightarrow W^- koppelt
nicht an rechthändige μ^-)

Rechtshändiges
Antineutrino ✓

Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes** Verhältnis:

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



Rechtshändiges Elektron
(s. [Folie 18](#) \rightarrow W^- koppelt
nicht an rechthändige μ^-)

Rechtshändiges
Antineutrino ✓

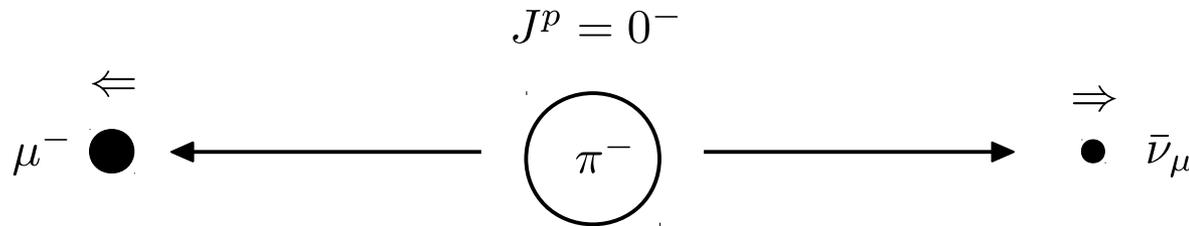
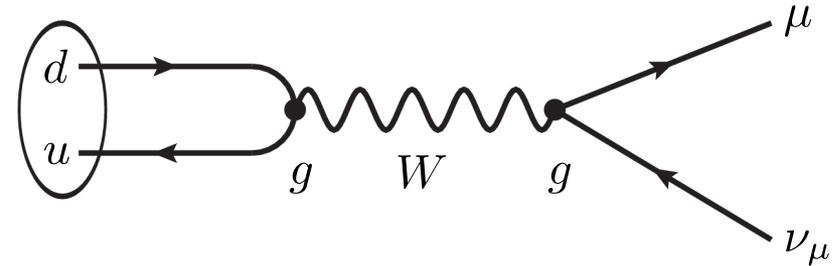
Wie erklären Sie sich dieses
Resultat?



Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



Rechtshändiges Elektron
(s. [Folie 18](#) → W^- koppelt
nicht an rechthändige μ^-)

Rechtshändiges
Antineutrino ✓

Wie erklären Sie sich dieses
Resultat?

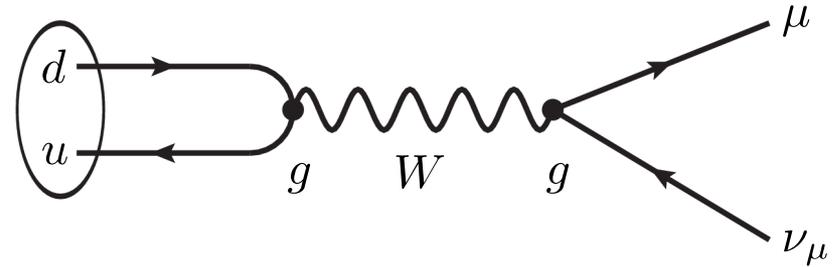
Erinnerung ([VL-16 Folie 9f](#)): für $m_\ell > 0$
Helizität \neq Chiralität



Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



$$|\ell_{h=+1}\rangle = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{p}{E+m}\right) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{p}{E+m}\right) |\ell_R\rangle$$

$$\approx \frac{1}{2} (1 - \beta) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} (1 + \beta) |\ell_R\rangle$$

$$\beta_\ell = \frac{m_\pi^2 - m_\ell^2}{m_\pi^2 + m_\ell^2}$$

$$\beta_\mu \approx 0.27$$

$$\beta_e \approx 0.99997$$

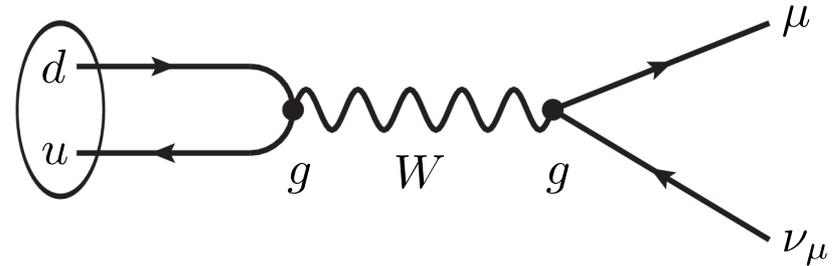
- **Berechnetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2}\right)^2 \approx 1.28 \cdot 10^{-4}$$

Paritätsverletzung im Zerfall des Pions

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = 1.2344(30) \cdot 10^{-4}$$



$$|\ell_{h=+1}\rangle = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{p}{E+m}\right) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{p}{E+m}\right) |\ell_R\rangle$$

$$\approx \frac{1}{2} (1 - \beta) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} (1 + \beta) |\ell_R\rangle$$

$$\beta_\ell = \frac{m_\pi^2 - m_\ell^2}{m_\pi^2 + m_\ell^2}$$

$$\beta_\mu \approx 0.27$$

$$\beta_e \approx 0.99997$$

- **Berechnetes Verhältnis:**

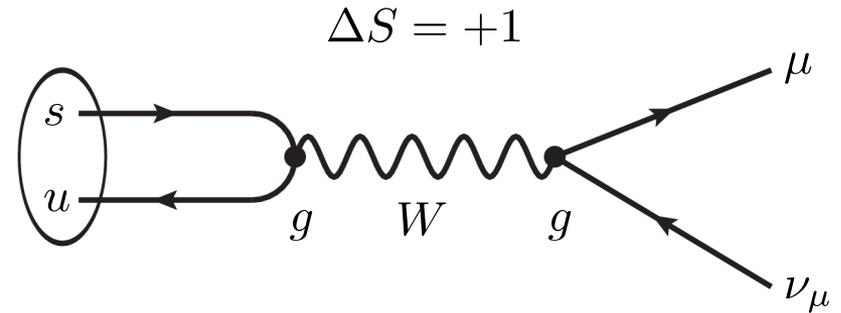
$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2}\right)^2 \approx 1.28 \cdot 10^{-4}$$

Vergleiche
Übungsblatt 5 Aufgabe 3

Flavorändernd

- Zerfallsbreite des K^- :

$$\Gamma_{K^-} \propto -g^2 \frac{g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2 + i\epsilon}$$



Was erwarten Sie für das
Verhältnis der Zerfallsbreiten

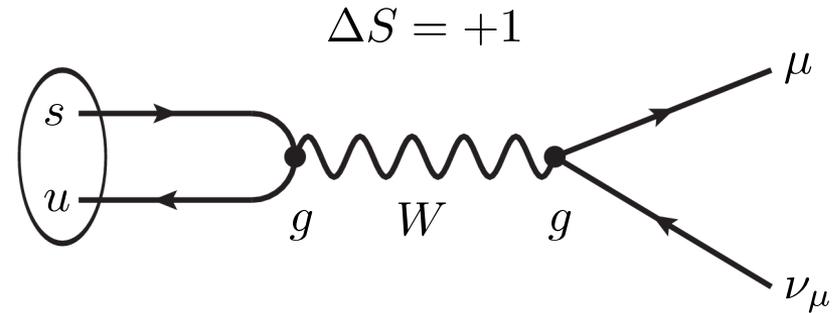
$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$



Flavorändernd

- Zerfallsbreite des K^- :

$$\Gamma_{K^-} \propto -g^2 \frac{g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2 + i\epsilon}$$



- Erwartetes Verzweigungsverhältnis:

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \frac{m_\pi^3}{m_K^3} \left(\frac{m_K^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 \approx 16$$

Matrizelement für Pion und Kaon in der Tat "gleich" (vgl. Folie 19), aber Phasenraum größer für Kaon-Zerfall

Was erwarten Sie für das Verhältnis der Zerfallsbreiten

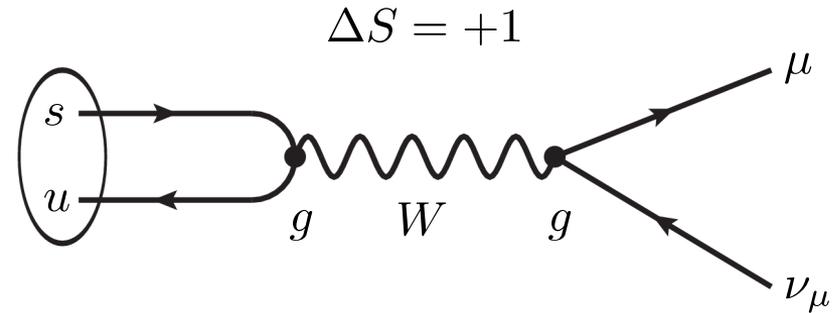
$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$



Flavorändernd

- **Zerfallsbreite des K^- :**

$$\Gamma_{K^-} \propto -g^2 \frac{g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2 + i\epsilon}$$



- **Erwartetes Verzweigungsverhältnis:**

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \frac{m_\pi^3}{m_K^3} \left(\frac{m_K^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 \approx 16$$

Matrizelement für Pion und Kaon in der Tat "gleich" (vgl. [Folie 19](#)), aber Phasenraum größer für Kaon-Zerfall

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} \approx 1.34$$

Was erwarten Sie für das Verhältnis der Zerfallsbreiten

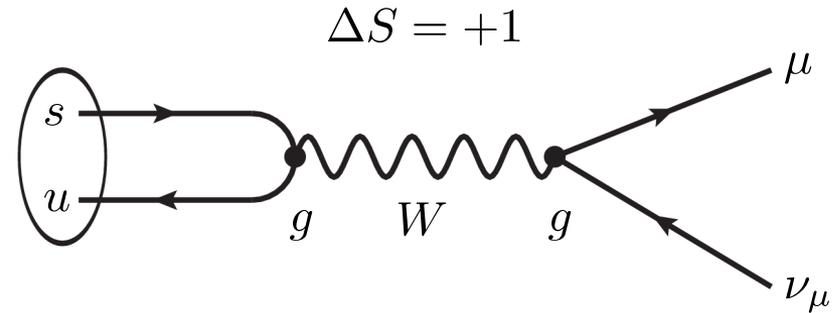
$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$



Flavorändernd

- **Zerfallsbreite des K^- :**

$$\Gamma_{K^-} \propto -g^2 \frac{g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2 + i\epsilon}$$



- **Erwartetes Verzweigungsverhältnis:**

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \frac{m_\pi^3}{m_K^3} \left(\frac{m_K^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 \approx 16$$

Matrizelement für Pion und Kaon in der Tat "gleich" (vgl. [Folie 19](#)), aber Phasenraum größer für Kaon-Zerfall

- **Tatsächlich beobachtetes Verhältnis:**

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} \approx 1.34$$

Wie es zu dieser Diskrepanz kommt klären wir in den [nächsten 1-2 VL](#)

Was erwarten Sie für das Verhältnis der Zerfallsbreiten

$$\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$



KW-26-28

9 Elektroschwache Physik

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung

10 Moderne Teilchenphysik

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern

10.2 Neutrino-physik

10.3 Astroteilchenphysik

11 Offene Fragen der Teilchenphysik

11.1 Grenzen des SM

11.2 Teilchenphysik und Kosmologie



KW-29

KW-30

