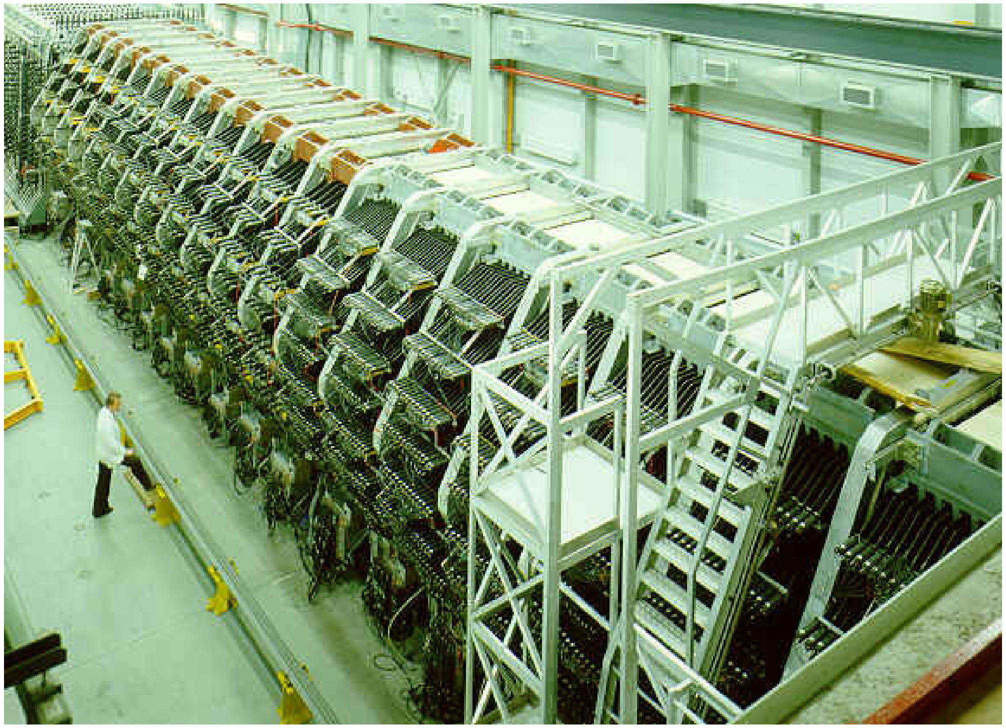
Bestimmung der Nukleonstruktur mit CDHS

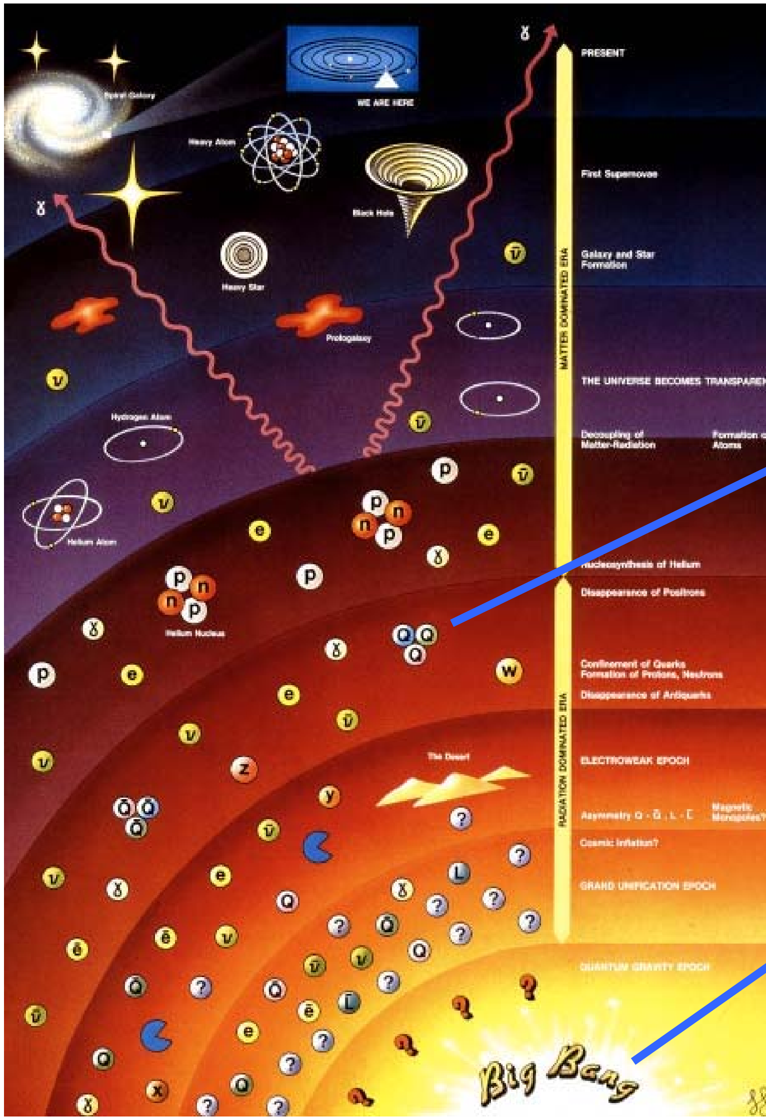


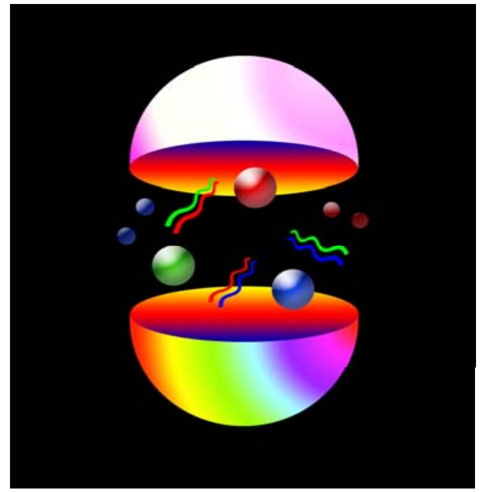
Valerie Lang

Inhaltsübersicht

- Motivation
- Neutrinostreuung
- Wirkungsquerschnitte
- CDHS Detektor
- Strukturfunktionen
- Zusammenfassung

Motivation


PRESENT
WE ARE HERE
Spiral Galaxy
Heavy Atom
Black Hole
Heavy Star
Protogalaxy
Hydrogen Atom
Helium Atom
Helium Nucleus
The Desert
First Supernovae
Galaxy and Star Formation
MATTER DOMINATED ERA
THE UNIVERSE BECOMES TRANSPAREN
Decoupling of Matter-Radiation
Formation of Atoms
Nucleosynthesis of Helium
Disappearance of Positrons
Confinement of Quarks Formation of Protons, Neutrons
Disappearance of Antiquarks
RADIATION DOMINATED ERA
ELECTROWEAK EPOCH
Magnetic Monopoles?
Cosmic Inflation?
GRAND UNIFICATION EPOCH
QUANTUM GRAVITY EPOCH
Big Bang




Urknall.exe
Start

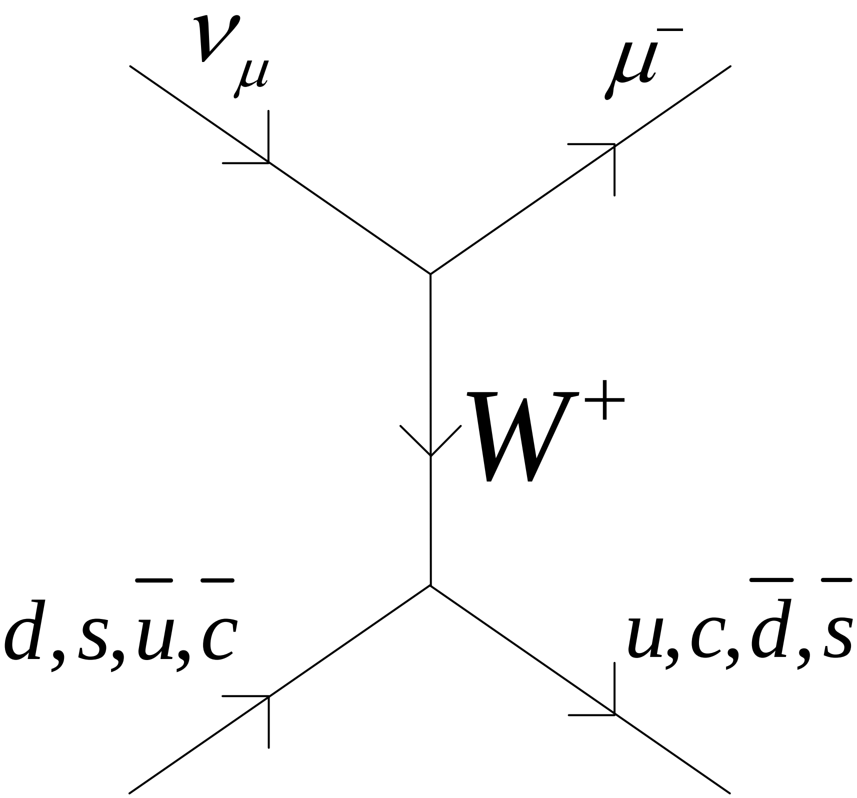
Neutrinostreuung

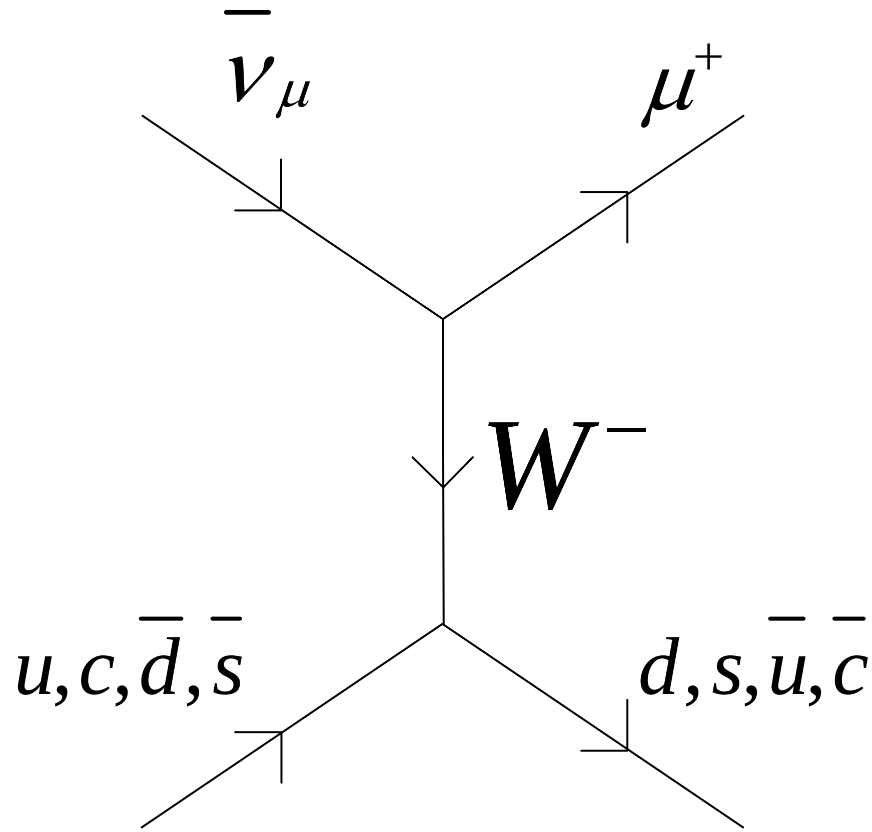
- Prozesse mit Myonproduktion:

$$\nu_\mu + Nukleon \rightarrow \mu^- + Hadronen$$
$$\overline{\nu}_\mu + Nukleon \rightarrow \mu^+ + Hadronen$$

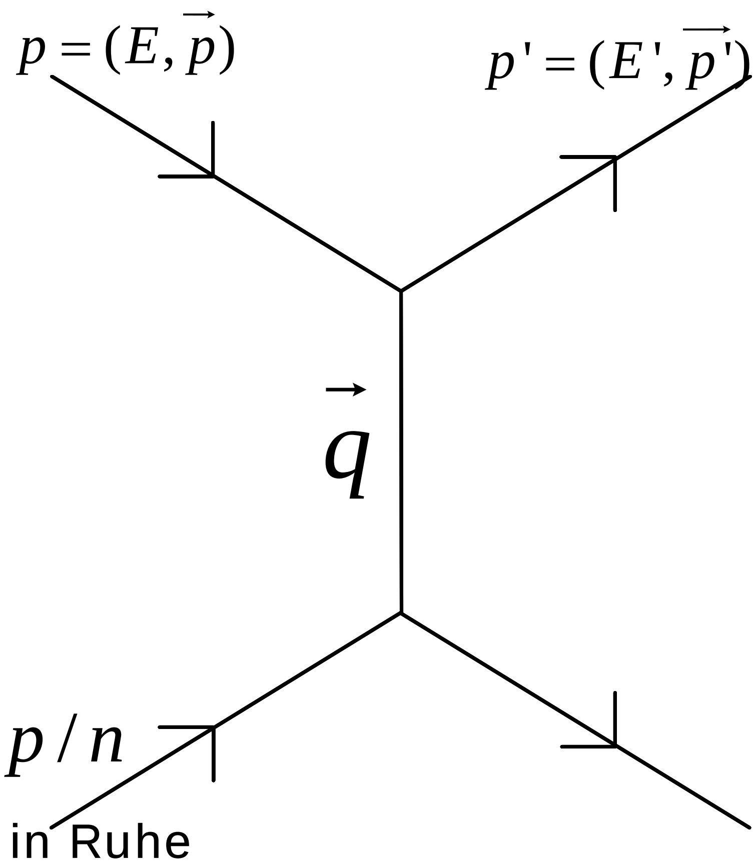
- In CDHS: Suche nach entstandenen Myonen

Streuprozesse





Wirkungsquerschnitte



$$q^2 = (p - p')^2$$

$$= -4E \cdot E' \cdot \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = -Q^2$$

WQ - Elastische Streuung punktförmiger Teilchen

- $$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4} \cdot \frac{E'}{E} \cdot \{\ldots\}$$
- Strahlteilchen = Spin ½ Teilchen

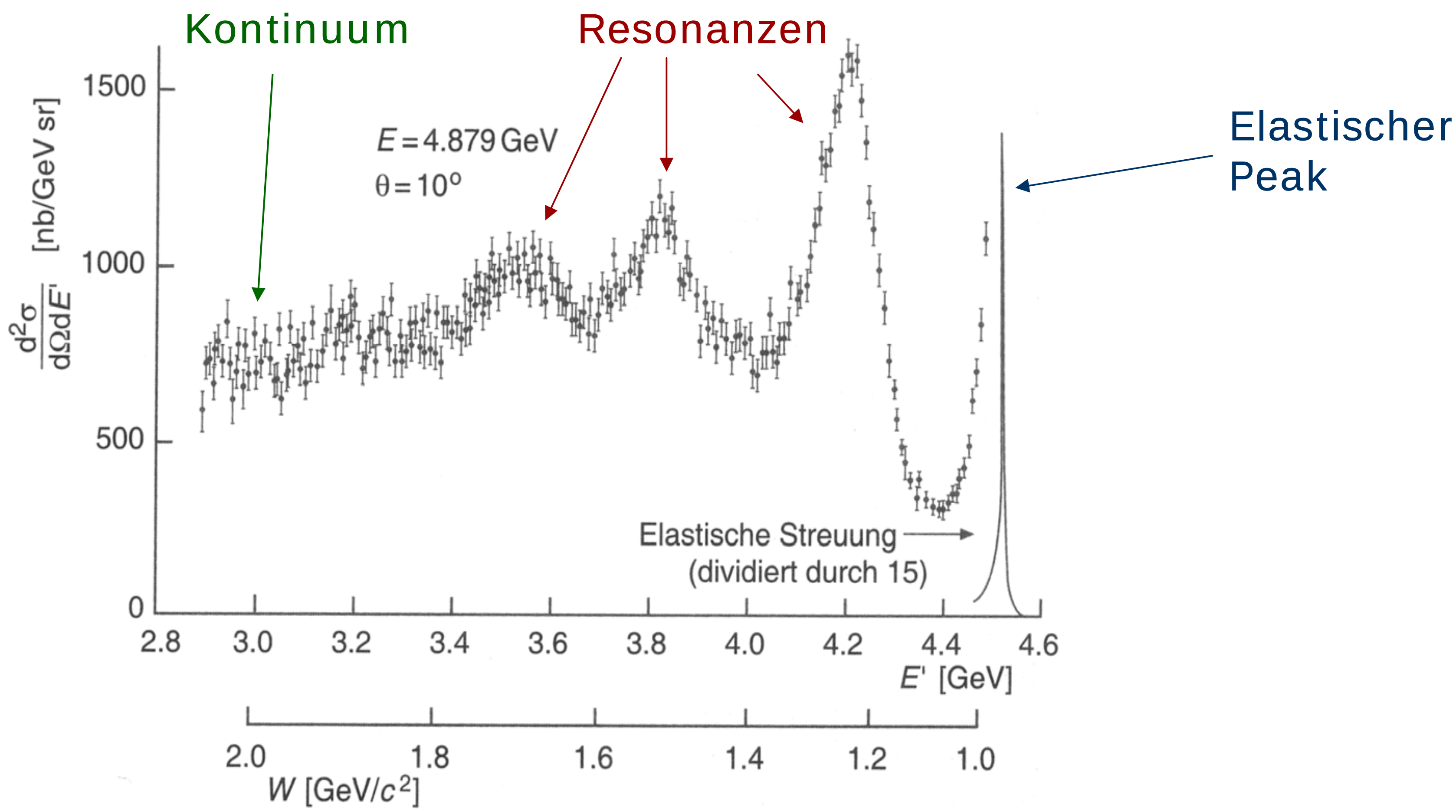
$$\{\ldots\} = \cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$$

- Strahl- und Targetteilchen = Spin ½ Teilchen

$$\{\ldots\} = \cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) + \frac{Q^2}{2M^2}\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$$

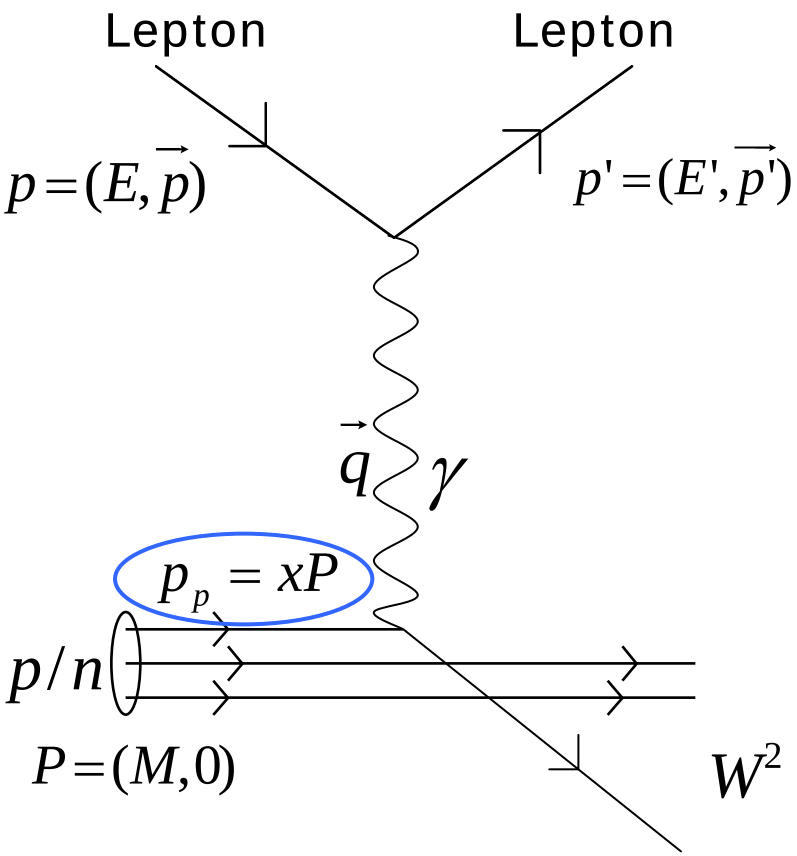
-> Wechselwirkung der magnetischen Momente der Stoßteilchen

WQ – Tiefinelastische Nukleonstreuung mit Leptonen



-> Kontinuum: quasielastische Streuung an Partonen

WQ – Tiefinelastische Nukleonstreuung



- W = invariante Masse

$$W^2 = (P+q)^2 = M^2 + 2Pq + q^2$$
$$= M^2 + 2M\nu - Q^2$$

  - Mit: $\nu = \dfrac{Pq}{M} = E - E'$ im Laborsystem

- Definiere: Bjorkensche Skalenvariable

$$x = \frac{Q^2}{2Pq} = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

- Inelastischer Prozess

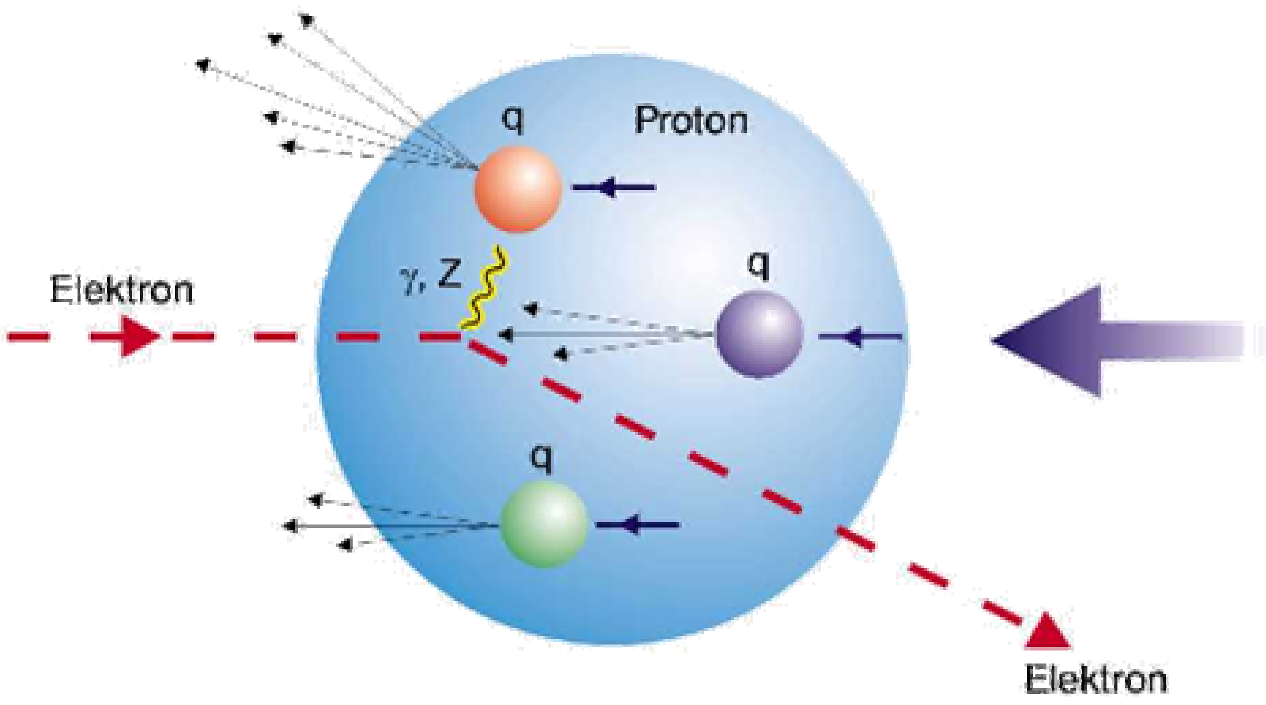
<=> W>M

<=> 2Mv-Q^2>0

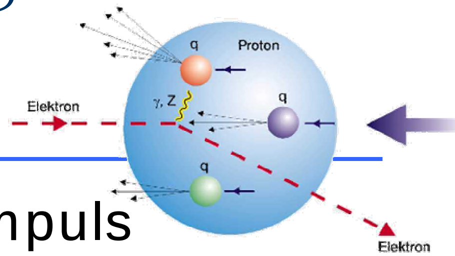
<=> 0<x<1

WQ – Quasielastische Streuung von Leptonen am Parton

- $p_p = xP$ mit p_p Partonimpuls, P Nukleonimpuls
- $m_p = xM$ mit m_p Partonmasse, M Nukleonmasse



WQ – Quasielastische Streuung von Leptonen am Parton



- $p_p = xP$ mit p_p Partonimpuls, P Nukleonimpuls
- $m_p = xM$ mit m_p Partonmasse, M Nukleonmasse

=> Wirkungsquerschnitt:

Partonladung

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4}\frac{E'}{E} e_i^2 \left(\cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) + \frac{Q^2}{2x^2M^2}\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right)$$

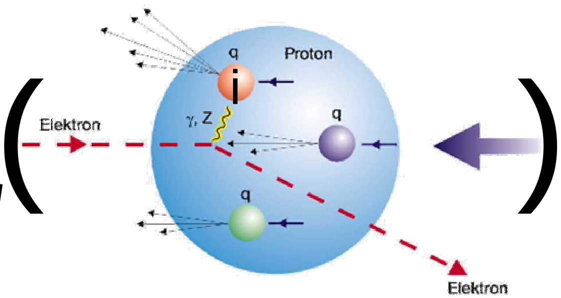
- Wahrscheinlichkeit, Parton mit relativem 4er Impulsanteil in [x, x+dx] zu finden: $q_i(x)dx$

=> $$\frac{d^2\sigma}{dQ^2dx} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4}\frac{E'}{E} e_i^2 q_i(x) \cdot \left(\cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) + \frac{Q^2}{2x^2M^2}\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right)$$

WQ – Tiefinelastische Streuung am Nukleon

- Summe über alle im Nukleon vorhandenen Partonen

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2dx} = \sum_i \Bigg($$



$$\Bigg)$$

WQ – Tiefinelastische Streuung am Nukleon

- Summe über alle im Nukleon vorhandenen Partonen

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2dx} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4}\frac{E'}{E}\left(\sum_i e_i^2 q_i(x)\cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) + \sum_i e_i^2 q_i(x)\frac{Q^2}{2x^2M^2}\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right)$$

- Definiere:

$$F_2(x) = x\sum_i e_i^2 q_i(x)$$

$$F_1(x) = \frac{1}{2}\sum_i e_i^2 q_i(x)$$

=> $$\frac{d^2\sigma}{dQ^2dx} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4}\frac{E'}{E}\left(\frac{F_2}{x}\cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) + 2F_1\frac{Q^2}{2x^2M^2}\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right)$$

WQ – Tiefinelastische Streuung am Nukleon

- Definiere: $y = \frac{\nu}{E} = \frac{E - E'}{E}$ relativer Energieübertrag

=> $Q^2 = 2MExy$; $\frac{E'}{E} = 1 - y$; $\sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{Q^2}{4EE'} = \frac{Mxy}{2E'}$

und $\cos^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = 1 - \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \approx 1$ für Neutrinos

- Damit: $$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi\alpha}{Q^4}\left((1-y)\frac{F_2}{x} + \frac{y^2}{2}\frac{2xF_1}{x}\right)$$

- Außerdem: $dQ^2 = 2MEx \cdot dy$

=> $$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = 2ME\frac{4\pi\alpha}{Q^4}\left((1-y)F_2(x) + \frac{y^2}{2}2xF_1(x)\right)$$

WQ – Tiefinelastische Streuung am Nukleon mit Neutrinos

- Vorher: Streuung mit Leptonen, d.h. elektromagnetische Wechselwirkung

$$\frac{d^2\sigma}{dxdy} = 2ME \cdot 4\pi\alpha \cdot \frac{1}{Q^4}\left((1-y)F_2(x) + \frac{y^2}{2} 2xF_1(x) \right)$$

Kopplung

Propagator

weitere Strukturfunktion

- Jetzt: Streuung mit Neutrinos, d.h. schwache Wechselwirkung

$$\frac{d^2\sigma^{\nu,\bar{\nu}}}{dxdy} = 2ME \cdot \frac{G^2}{2\pi} \frac{1}{\left(1+Q^2/m_W^2\right)^2}\left((1-y)F_2^{\nu,\bar{\nu}} + \frac{y^2}{2} 2xF_1^{\nu,\bar{\nu}} \pm \left(y - \frac{y^2}{2} \right) xF_3^{\nu,\bar{\nu}} \right)$$

  - Mit G = Fermi Kopplungskonstante und m_W = Masse des W-Bosons

- $F_2^{\nu,\bar{\nu}} = 2xF_1^{\nu,\bar{\nu}}$ Callan-Gross Relation für Spin ½ Teilchen;

$$F_2^{\nu,\bar{\nu}}(x) = q(x) + \bar{q}(x) \quad ; \qquad xF_3^{\nu,\bar{\nu}}(x) = q(x) - \bar{q}(x)$$

WQ - Neutrinostreuung

- $$\frac{d^2\sigma^{\nu,\bar{\nu}}}{dxdy} = \frac{G^2 M E_\nu}{\pi} \frac{1}{\left(1+Q^2/m_W^2\right)^2} \left((1-y) F_2^{\nu,\bar{\nu}} + \frac{y^2}{2} 2x F_1^{\nu,\bar{\nu}} \pm \left(y - \frac{y^2}{2} \right) x F_3^{\nu,\bar{\nu}} \right)$$
- Verständnis von F_3: Transformation ins Quarkbild:
$$q(x) = x\left(u(x) + d(x) + s(x) + c(x)\right)$$
$$\bar{q}(x) = x\left(\bar{u}(x) + \bar{d}(x) + \bar{s}(x) + \bar{c}(x)\right)$$

=> $$\frac{d^2\sigma^{\nu}}{dxdy} = \frac{G^2 M E_\nu}{\pi} \left[q + (1-y)^2 \bar{q} \right]$$

d.h. Erklärung des $(1\text{-}y)^2$ Faktors erklärt F_3.

WQ – Neutrinostreuung – Charged current events

- Mögliche Stoßprozesse mit W-Austausch:

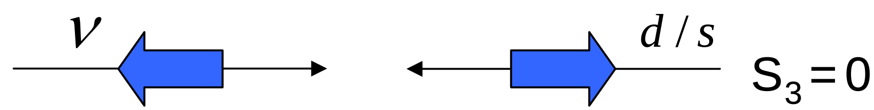
$$\nu_\mu + d/s/\bar{u}/\bar{c} \rightarrow \mu^- + u/c/\bar{d}/\bar{s}$$

$$\bar{\nu}_\mu + u/c/\bar{d}/\bar{s} \rightarrow \mu^+ + d/s/\bar{u}/\bar{c}$$

- Beachte Händigkeiten:
  - Neutrino: linkshändig
  - Antineutrino: rechtshändig

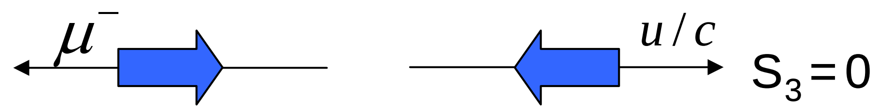
Für Neutrinos:

Vor dem Stoß:

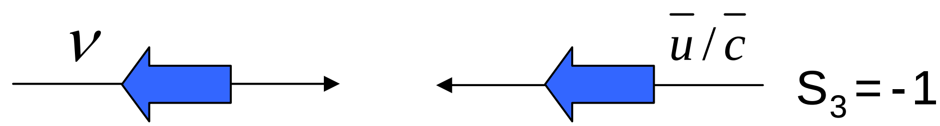


Nach dem Stoß:

Quarks

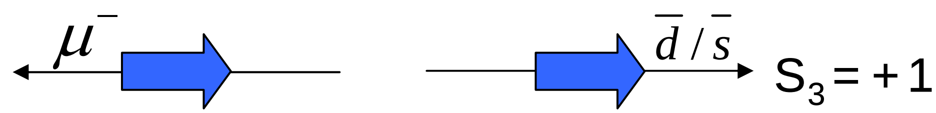


Vor dem Stoß:



Nach dem Stoß:

Antiquarks



-> unterdrückt

WQ – Neutrinostreuung

- Streuung von ν mit Antiquarks um 180°: unterdrückt mit $(1+\cos\theta)^2$
- Im Laborsystem: $\sim(1-y)^2$

$$=> \frac{d^2\sigma^{\nu\to p}}{dxdy} = \frac{G^2}{\pi} 2ME_\nu x\left[d + s + (1-y)^2\left(\bar{u}+\bar{c}\right)\right]$$

- Fürs Neutron: Isospin-Symmetrie:

Proton Neutron

$$u^p(x) \to d^n(x)$$

$$d^p(x) \to u^n(x)$$

$$s^p(x) \to s^n(x)$$

$$c^p(x) \to c^n(x)$$

- Isoskalares Target -> Nukleon

$$\frac{d^2\sigma^{\nu\to N}}{dxdy} = \frac{1}{2}\left(\frac{d^2\sigma^{\nu\to p}}{dxdy} + \frac{d^2\sigma^{\nu\to n}}{dxdy}\right)$$

$$= \frac{G^2}{\pi} ME_\nu\left[q + (1-y)^2\bar{q}\right]$$

=> xF_3 berücksichtigt Teilchenhändigkeiten

Nukleonstruktur - Strukturfunktionen

$$\frac{d^2\sigma^{\nu,\bar{\nu}}}{dxdy} = \frac{G^2 m_N E_\nu}{\pi} \frac{1}{\left(1+Q^2/m_W^2\right)^2} \left((1-y) F_2^{\nu,\bar{\nu}} + \frac{y^2}{2} 2xF_1^{\nu,\bar{\nu}} \pm \left(y - \frac{y^2}{2} \right) xF_3^{\nu,\bar{\nu}} \right)$$

Messgrößen:
Teilchenfluss,
Ereignisrate

Aus: E_ν, E_μ und
Streuwinkel

Aus: E_ν und E_μ

Wollen wir
haben!!

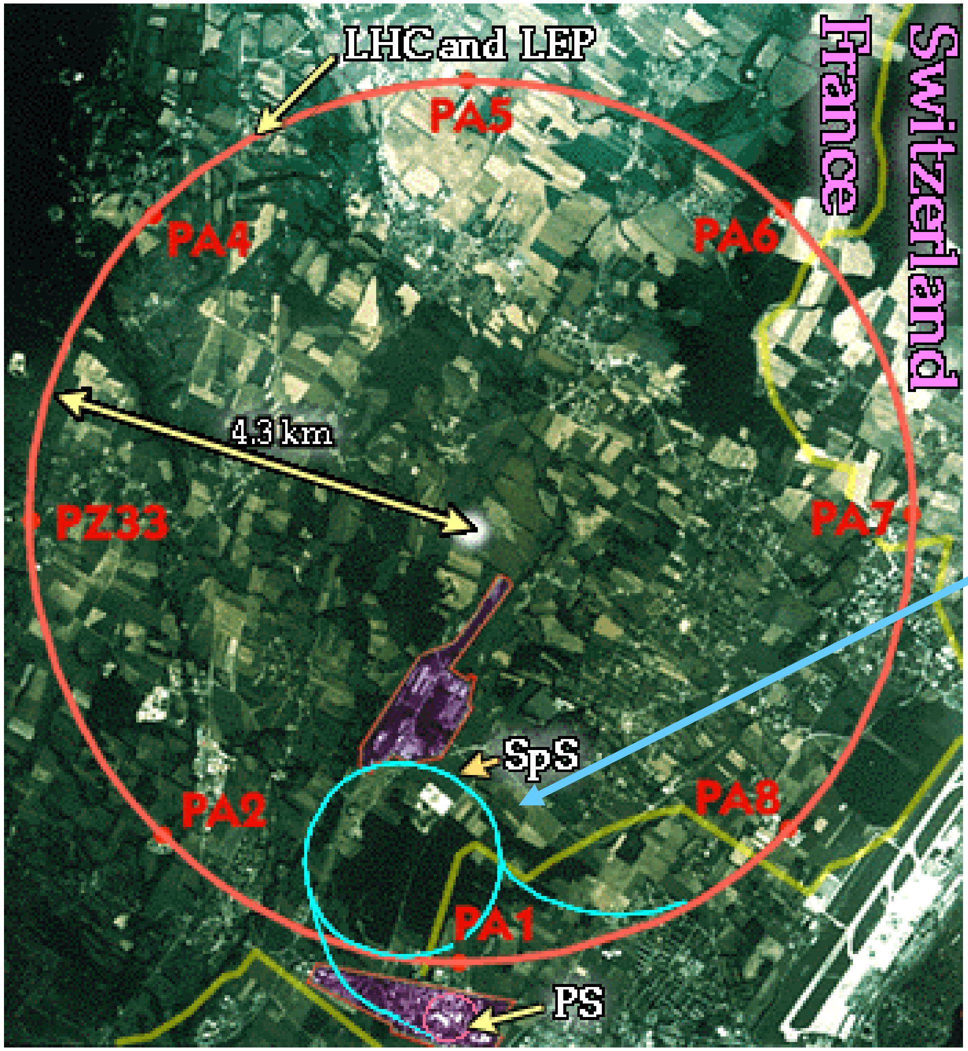
$E_\nu \approx E_{Hadr.} + E_\mu$

Hadronische
Kalorimeter

Aus: Myonimpuls
-> Driftkammern

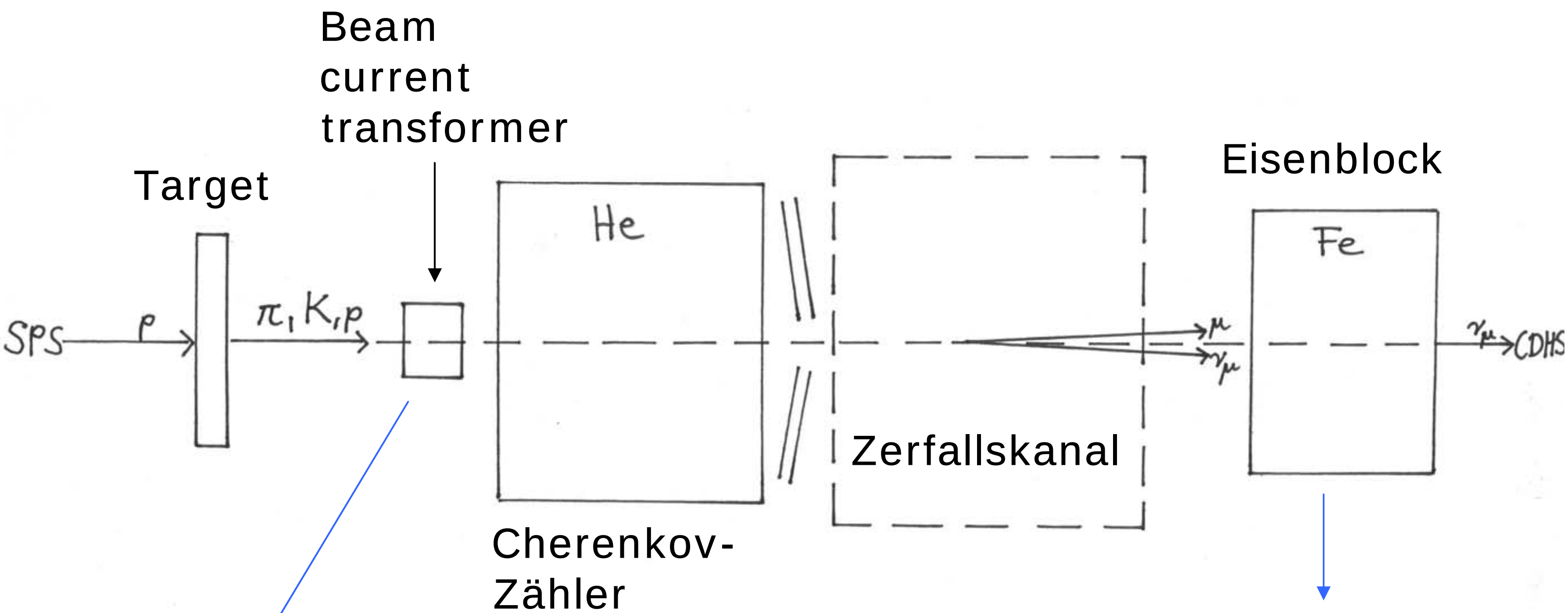
Flugbahn des Myon
-> Szintillatoren,
Driftkammern

CERN



- SPS: Super Proton Synchrotron
  - Protonenergien bis 400GeV
  - Umfang 7km

Neutrinostrahlen für CDHS



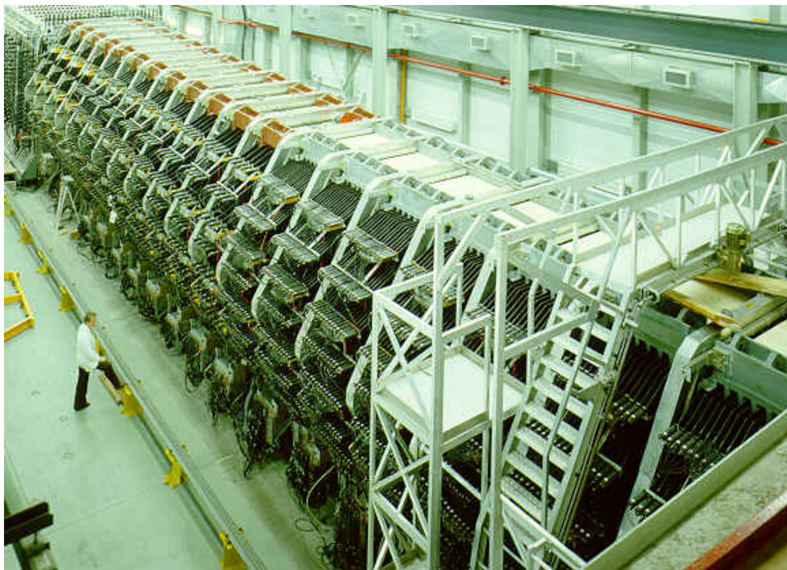
Absoluter Teilchenfluss

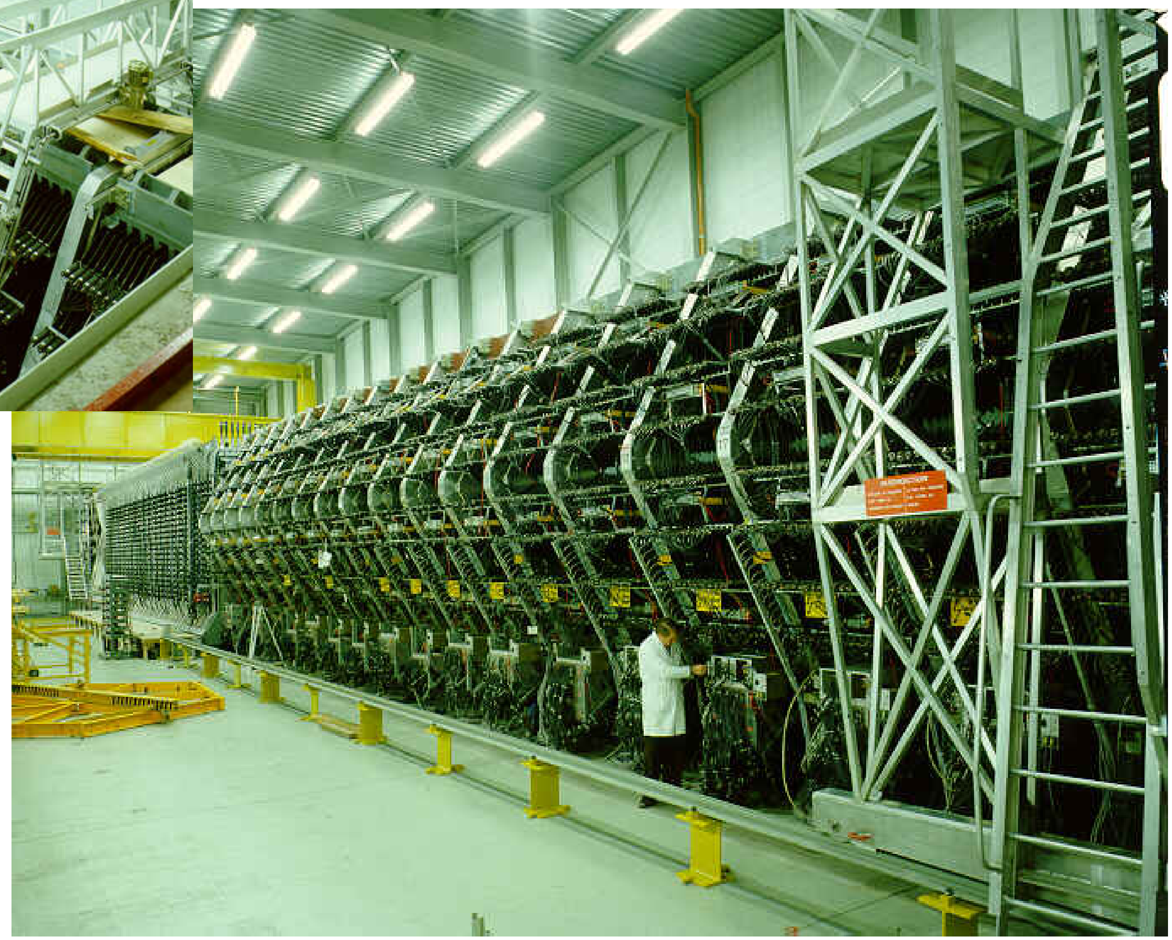
Verhältnis Pionen zu Kaonen

Absoluter Teilchenfluss

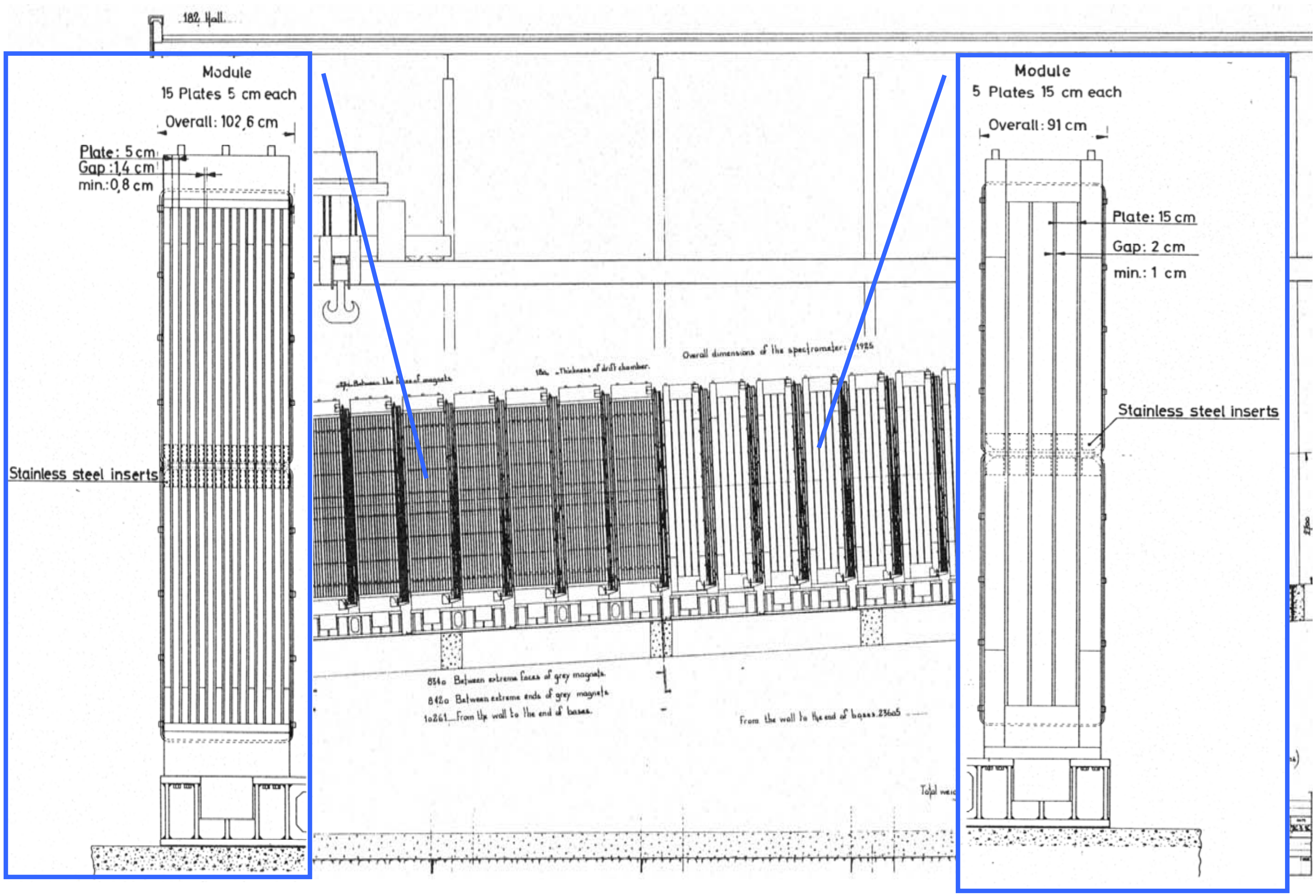
Und: Teilchen-absorption

CDHS – CERN Dortmund Heidelberg Sarclay

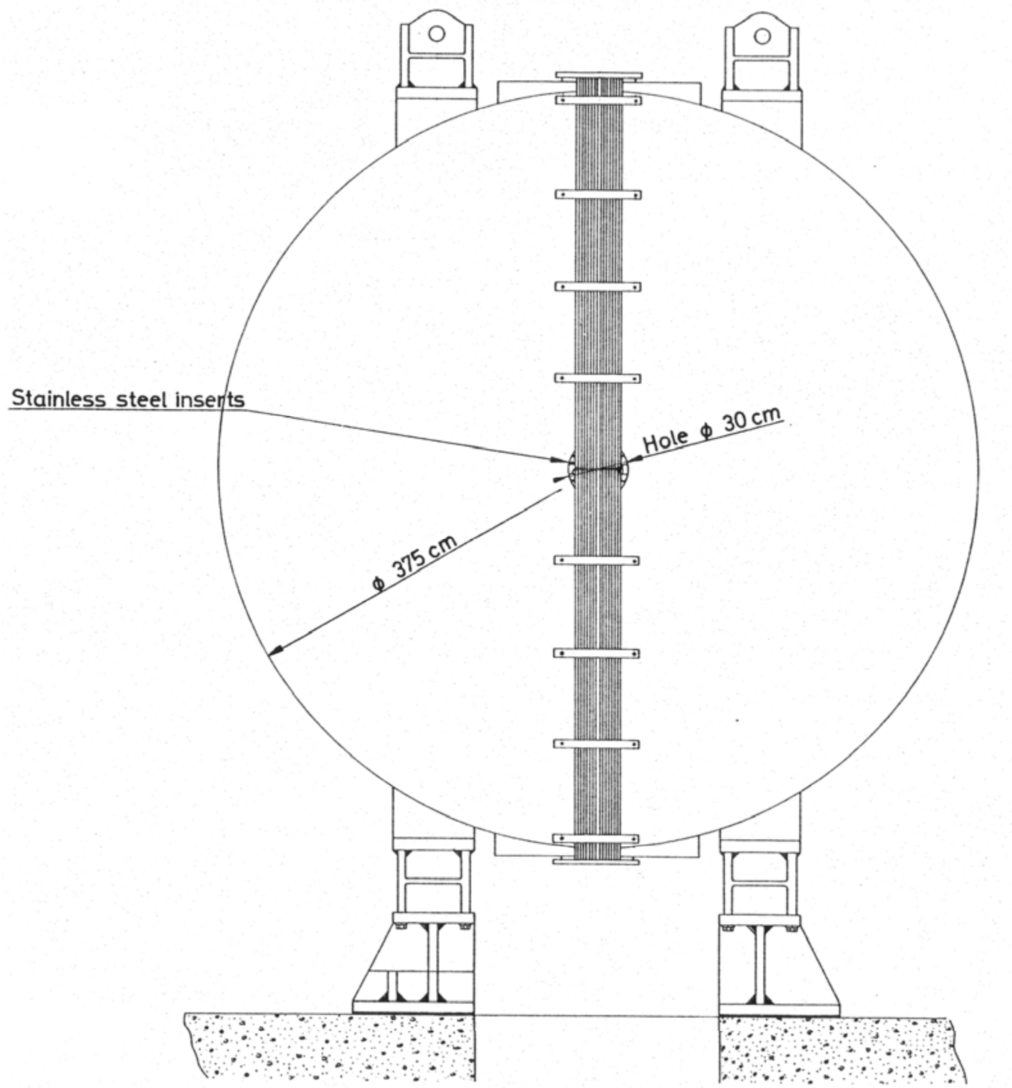




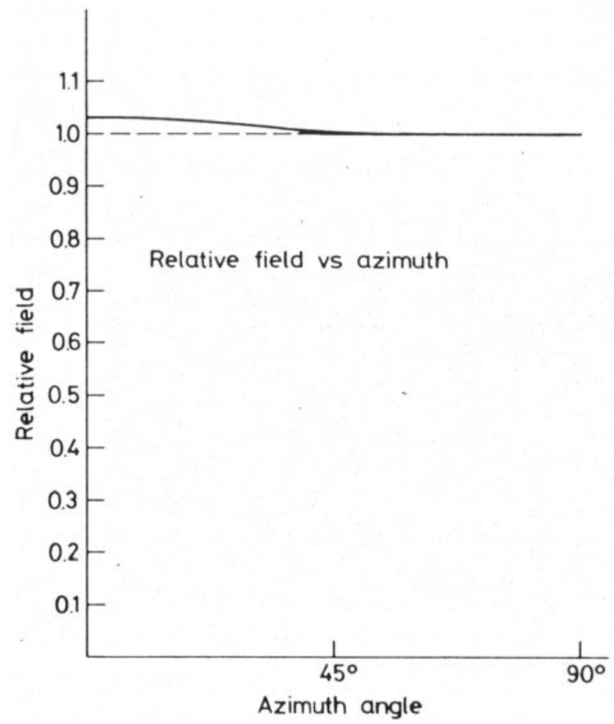
CDHS – CERN Dortmund Heidelberg Sarclay



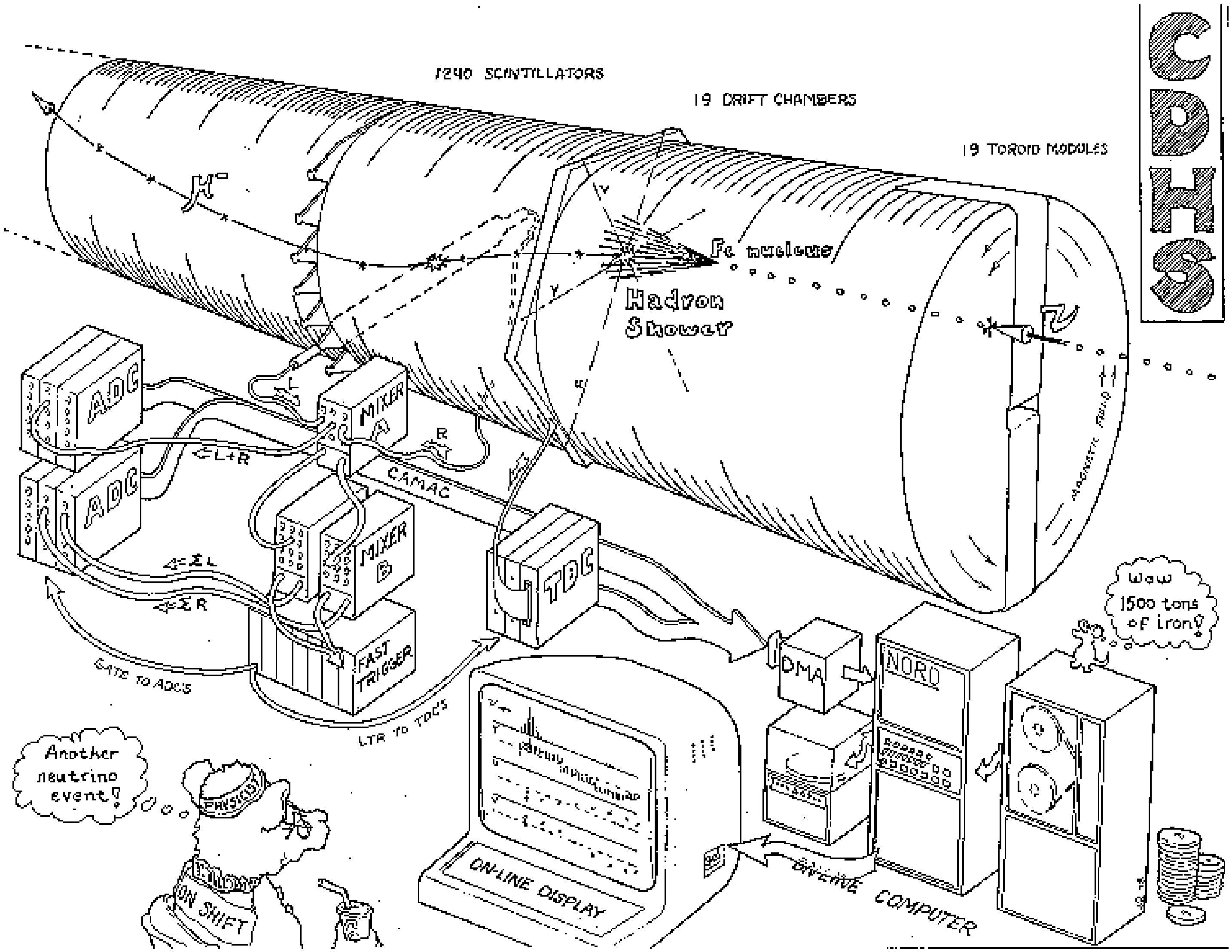
Frontansicht eines Modules von CDHS



Magnetfeld im Eisen:

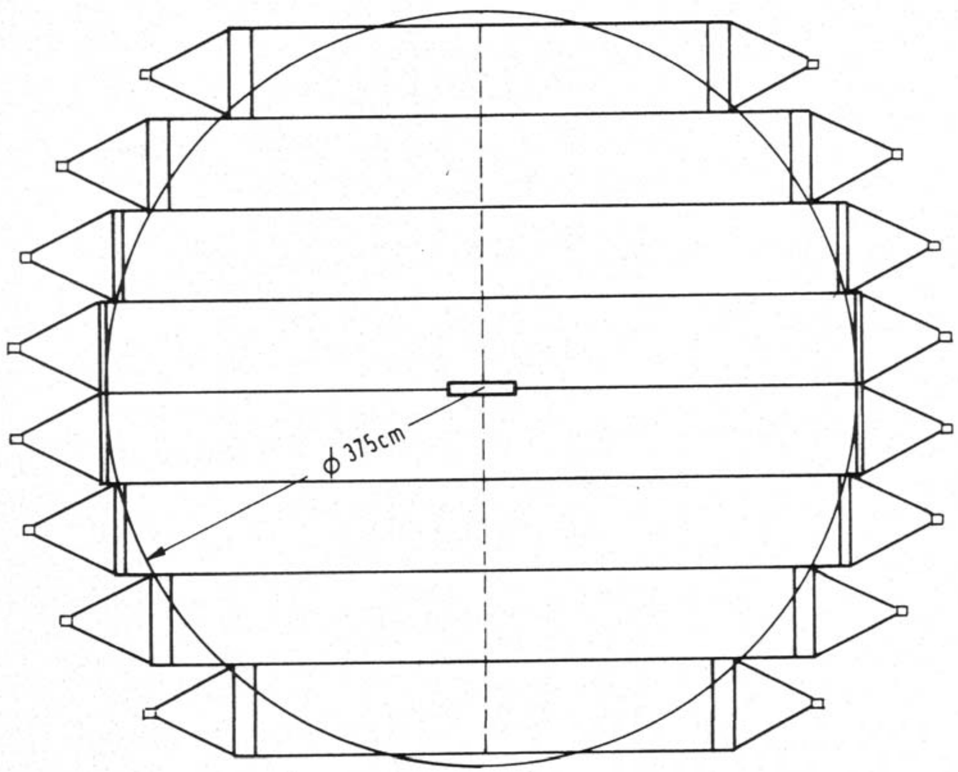


Was passiert bei CDHS?

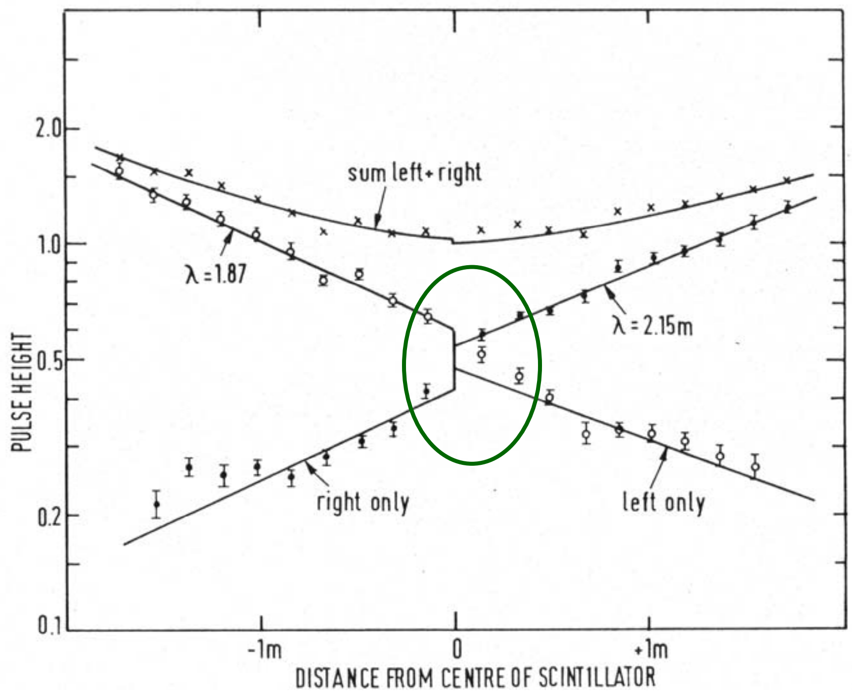


Hadronische Kalorimeter

- Szintillatorebene:



- Szintillatorsignale:



Strukturfunktionen

$$F_2 = \frac{\frac{\pi}{G^2 m_N E_\nu}\left[\frac{d^2\sigma^\nu}{dxdy} + \frac{d^2\sigma^{\bar{\nu}}}{dxdy}\right]}{1+(1-y)^2}$$

$$2xF_1 = F_2$$

$$xF_3 = \frac{\pi}{G^2 m_N E_\nu}\left[\frac{d^2\sigma^\nu}{dxdy} - \frac{d^2\sigma^{\bar{\nu}}}{dxdy}\right] \Big/ \left(1-(1-y)^2\right)$$

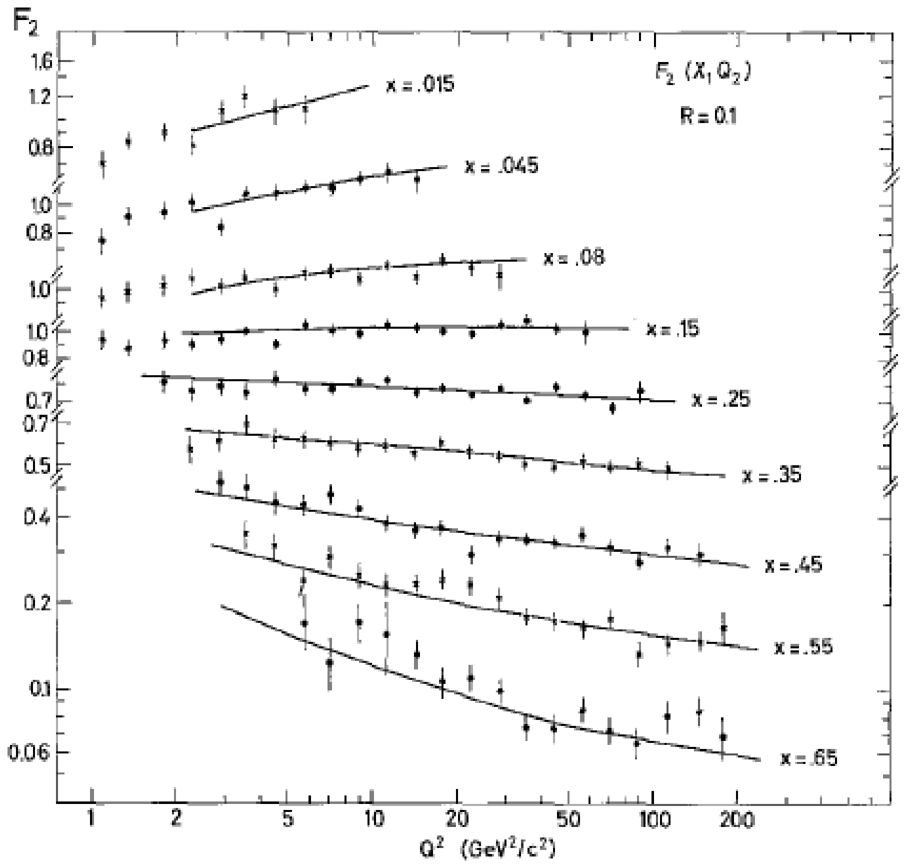
Messwerte:

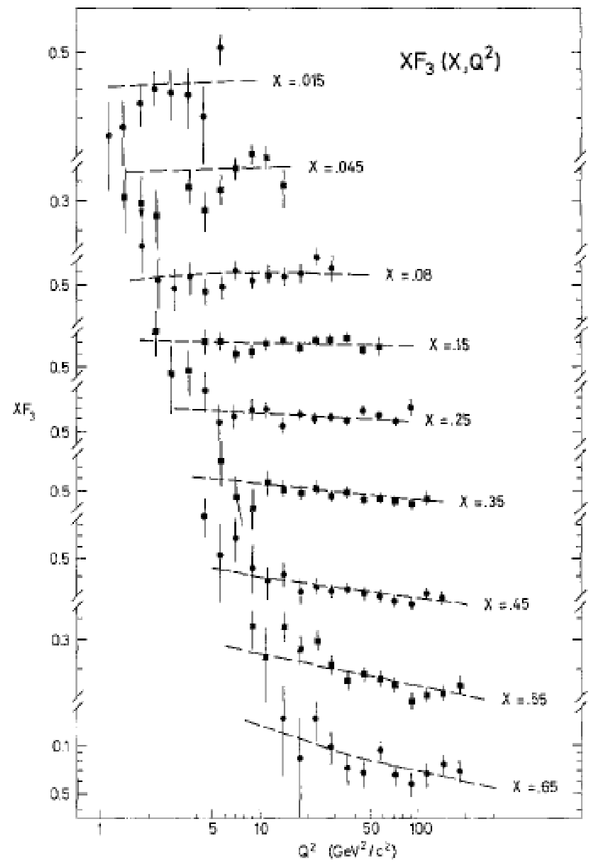
Wirkungsquerschnitte

Neutrinoenenergien

Relativer Energieübertrag

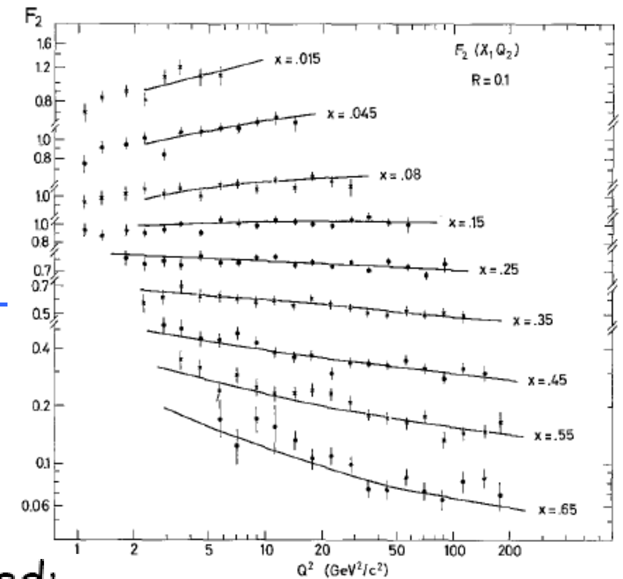
Strukturfunktionen in Abhängigkeit von Q^2



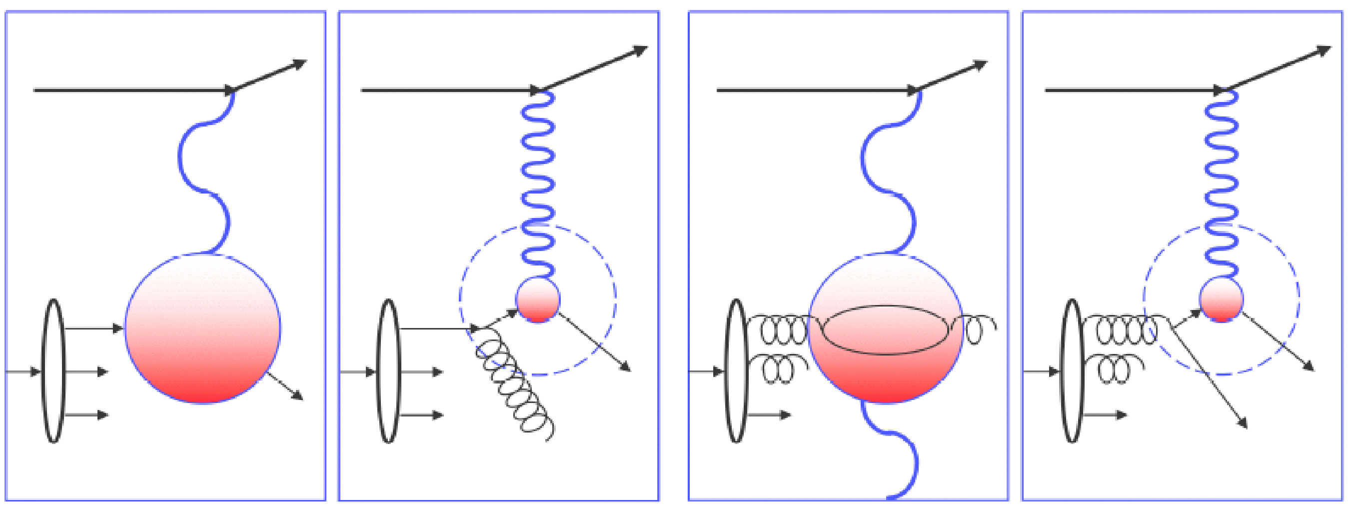


- Konstante Strukturfunktion => punktförmiges Target -> Quarks
- Skalenverletzung -> QCD

Skalenverletzung

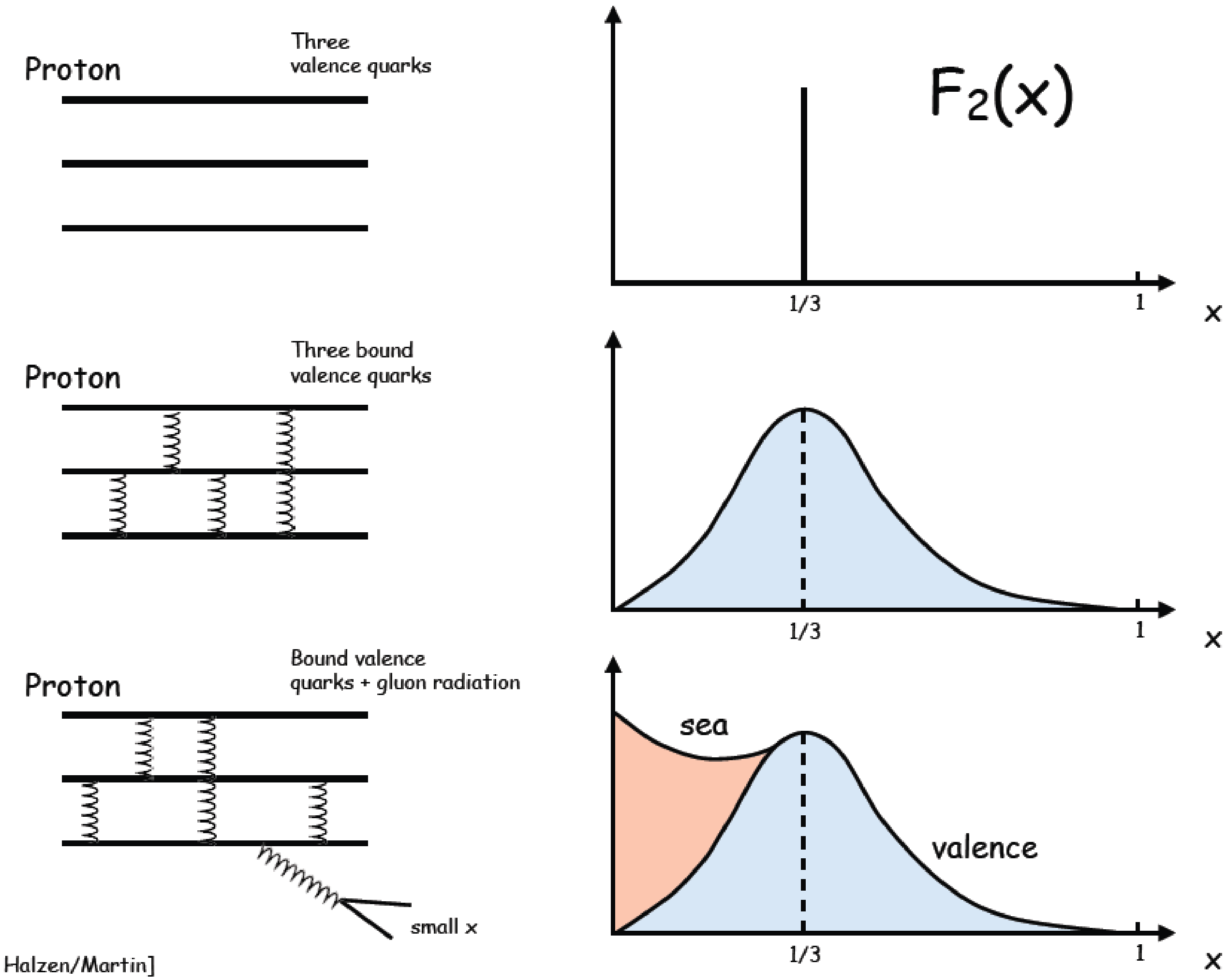


- Proton quark dominated: $Q^2 \uparrow \Rightarrow F_2 \downarrow$ for fixed x
- Proton gluon dominated: $Q^2 \uparrow \Rightarrow F_2 \uparrow$ for fixed x



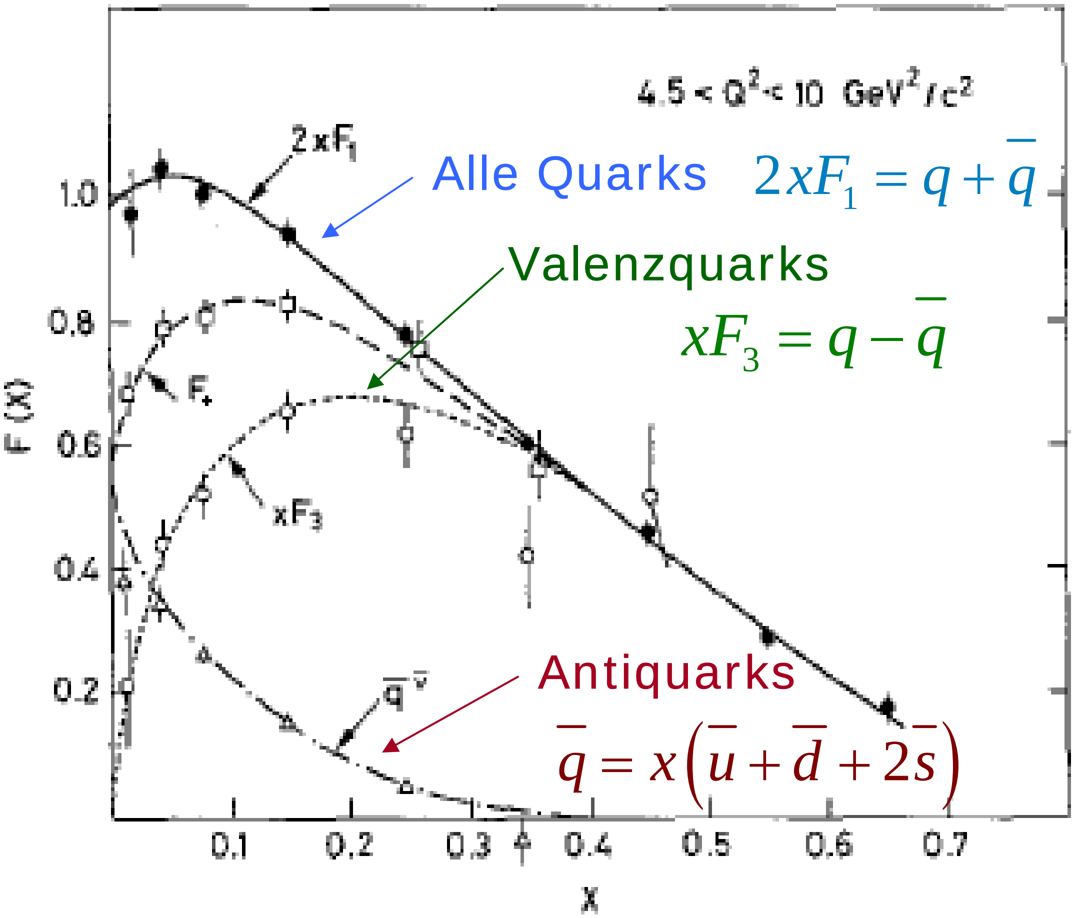
=> CDHS - Experiment bestätigt QCD!

Strukturfunktionen in Abhängigkeit von x - Erwartung

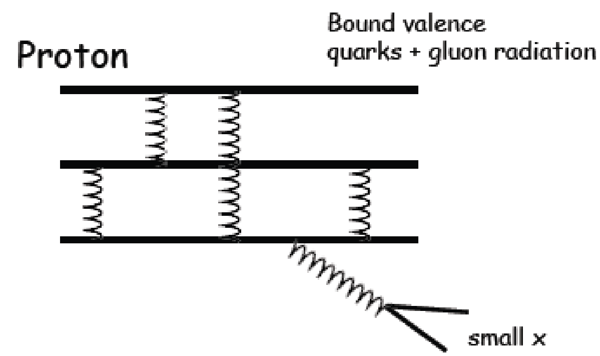


[see e.g. Halzen/Martin]

Strukturfunktionen in Abhängigkeit von x – Experiment CDHS

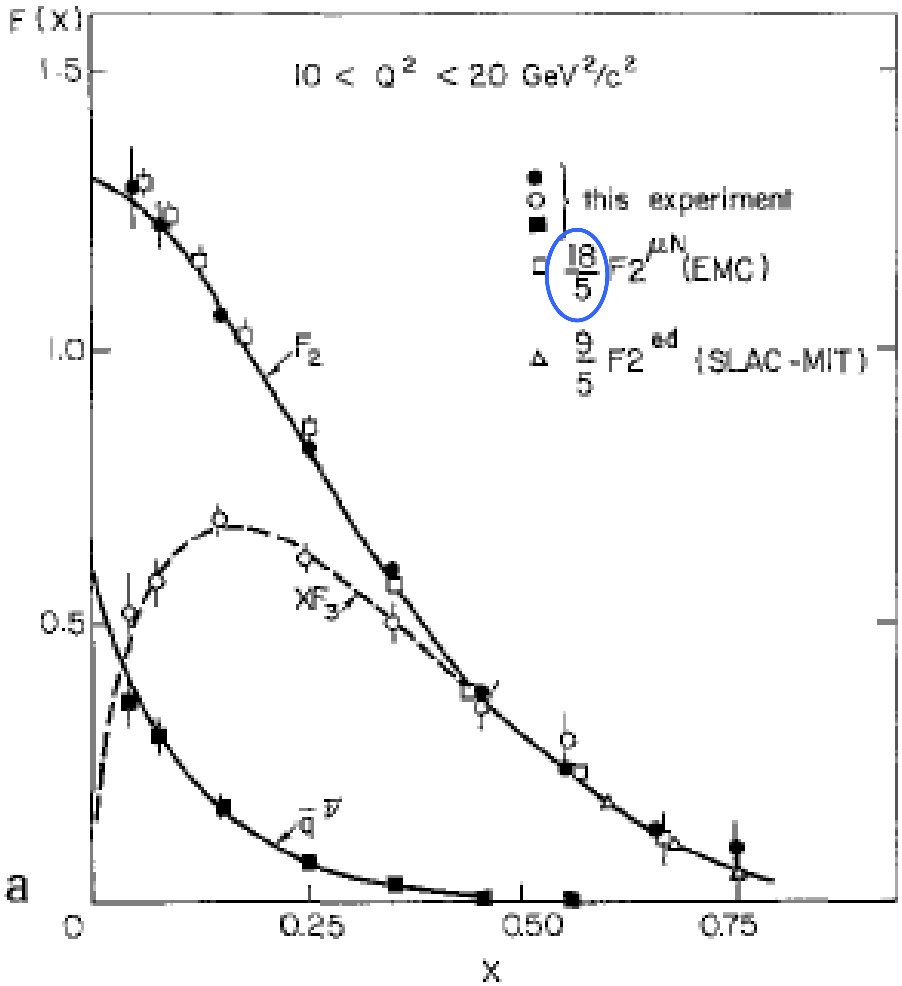


- Experiment entspricht Erwartung für:



Direkter Blick ins Innere des Nukleons
...mit der Brille der schwachen WW

Vergleich mit Strukturfunktionen aus Leptonstreuung



- Schwache WW

$$F_2 = q + \bar{q}$$

- Elektromagnetische WW

$$F_2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sum_i e_i^2\left(q_i + \bar{q}_i\right)\right)_p + \left(\sum_i e_i^2\left(q_i + \bar{q}_i\right)\right)_n\right]$$

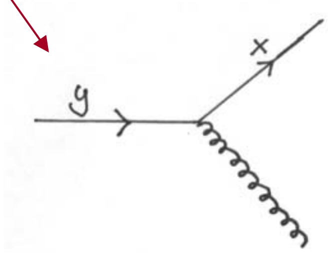
$$= \frac{5}{18}\left(q + \bar{q}\right)$$

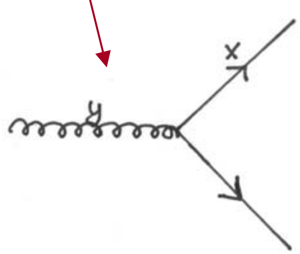
- Einziger Unterschied: Faktor 5/18 bzw.18/5:
  - Aus drittelzahliger Ladung der Quarks

Gluonverteilung

- Altarelli-Parisi Gleichungen

$$\frac{dq(x,Q^2)}{d\ln Q^2} \propto \int_x^1 q\left(y,Q^2\right)\cdot P_q\left(y\to x\right) + g\left(y,Q^2\right)\cdot P_g\left(y\to x\right)dy$$

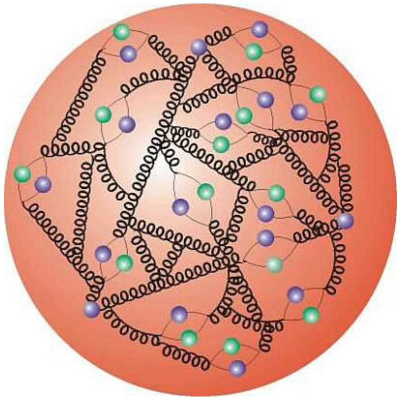




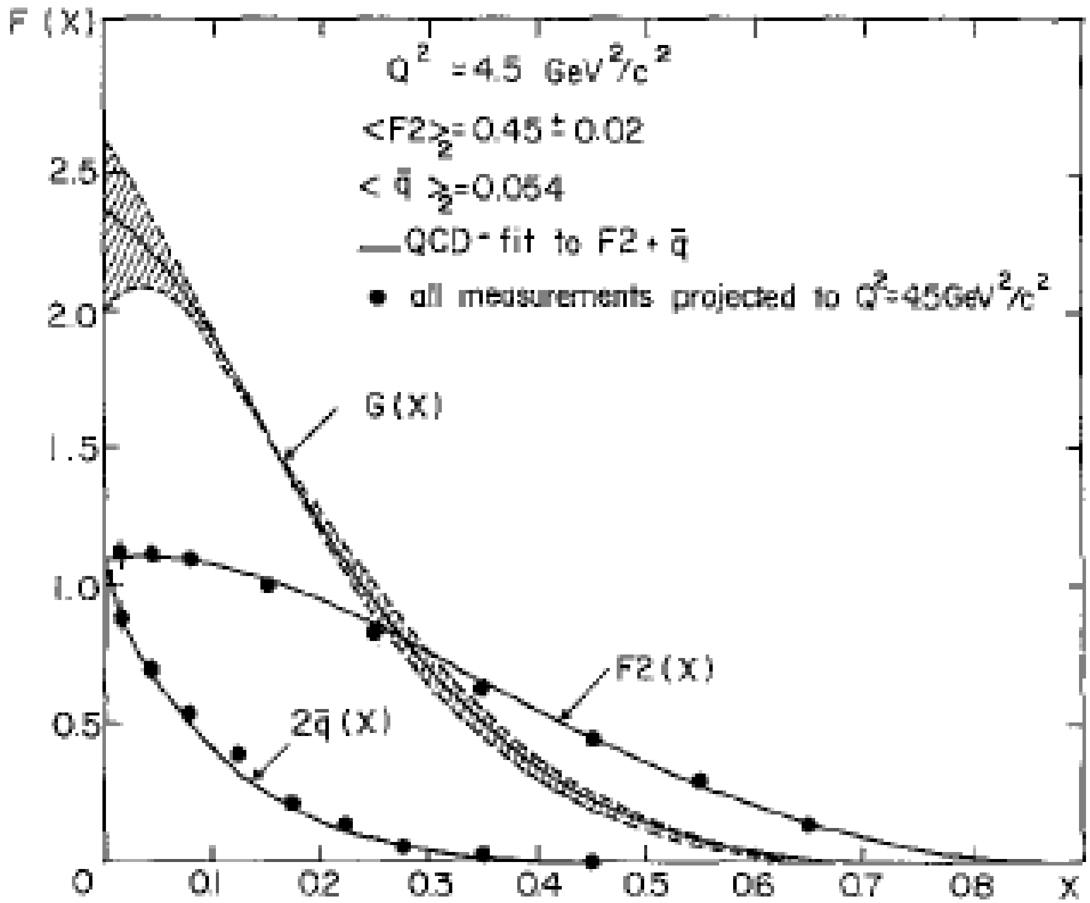
Aus: F_2 und $\bar{q}$

Aus: $\frac{dF_2}{d\ln Q^2}$ und $\frac{d\bar{q}}{d\ln Q^2}$

=> Gluonverteilung!!



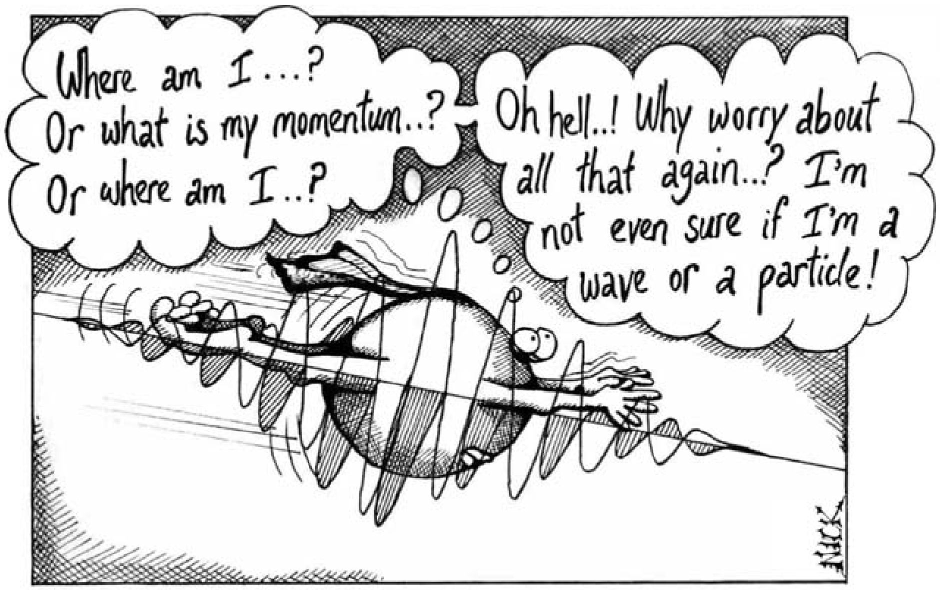
Gemessene Gluonverteilung: CDHS



- Erste Messung der Gluonverteilung überhaupt!

Zusammenfassung

- Nukleonen bestehen aus:
  - Valenzquarks
  - Seequarks
  - Gluonen
- Dominant bei kleinen x:
  - Gluonen
  - Seequarks -> entstehen aus Gluonen
- Dominant bei großen x:
  - Valenzquarks
- QCD beschreibt alle diese Phänomene korrekt.



Ende

Vielen Dank fürs Zuhören!