

Von ersten Tests bis zu Präzisionsmessungen des Standardmodells ('73 – heute)

Eine Erfolgsgeschichte der Hochenergiephysik

F. Eisele

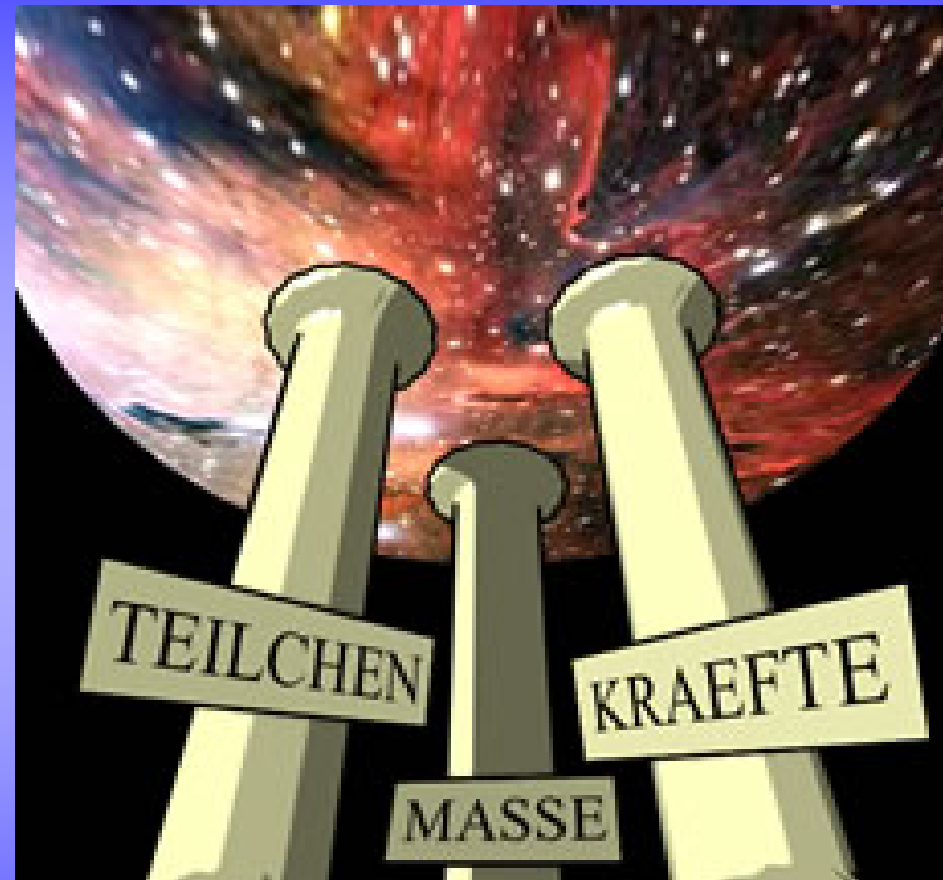
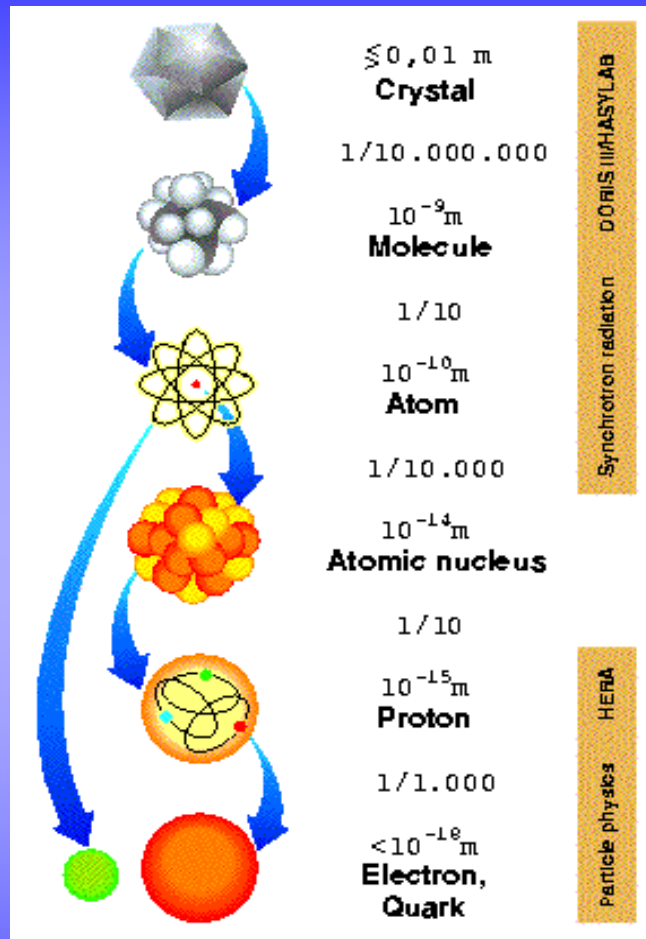
Physikalisches Institut, Universität Heidelberg

Und Dortmund war gut dabei.....

Das Standardmodell

- Bis ~ 1974 wurden sehr viele experimentelle Fakten gesammelt, es wurde immer verwirrender und nicht einfacher, sie zu erklären
 - Immer mehr 'elementare' Teilchen
 - unverstandene Wechselwirkungen (**Kernkräfte, 'schwache' Wechselwirkung**)
- Dann kam der große Durchbruch: eine Theorie, welche die fundamentalen Bausteine die daraus entstehenden Teilchen und deren fundamentale Wechselwirkungen sehr erfolgreich beschreibt
 - *Das Standardmodell*
- Dies erforderte eine Revolution in der Theorie und viele experimentellen Tests um die richtige Version der Theorie zu finden und diese rigoros zu testen

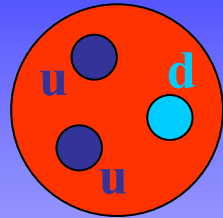
Die Zutaten: Teilchen und Kräfte



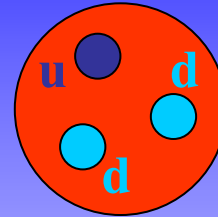
- Was sind die fundamentalen Bausteine?
- Was sind die Kräfte zwischen den Bausteinen?
- Woher bekommen Teilchen ihre Masse?

Teilchen: Hadronen (p, n, ..) sind zusammengesetzt aus Quarks

Proton

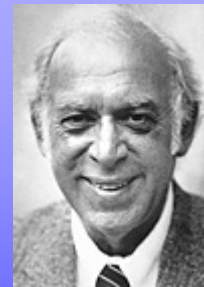
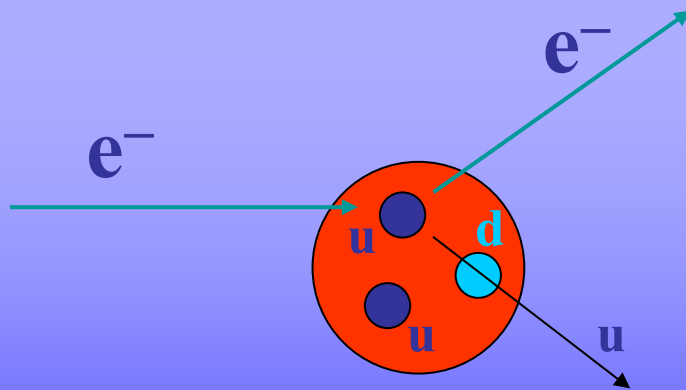


Neutron

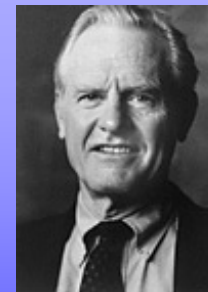


$$r < 1/1000 r_p$$
$$Q_u = + 2/3 e$$
$$Q_d = - 1/3 e$$

Streuexperimente am SLAC '69 mit Elektronen: bei hoher Auflösung (hoher Energie) streuen wir an 'punktförmigen' Partonen



Friedman



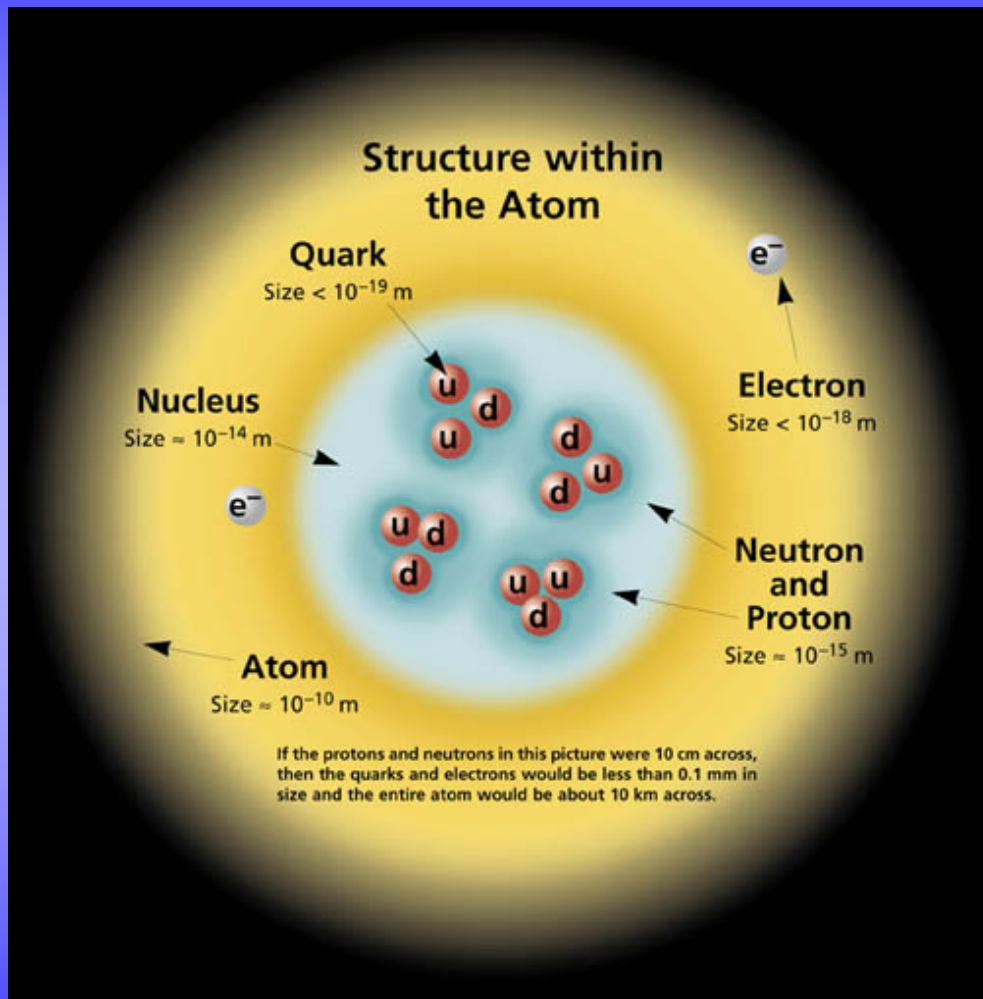
Kendall



Taylor

Nobelpreis 1990

→ Teilchenzoo erklärbar



•Wir brauchen
4 Teilchen:

Up-Quark u } Neutron und
Down-Quark d } Proton (Kerne)

Elektron e } Atomhülle
Neutrino ν_e } Fusion in der
Sonne

Die fundamentalen Kräfte

SM

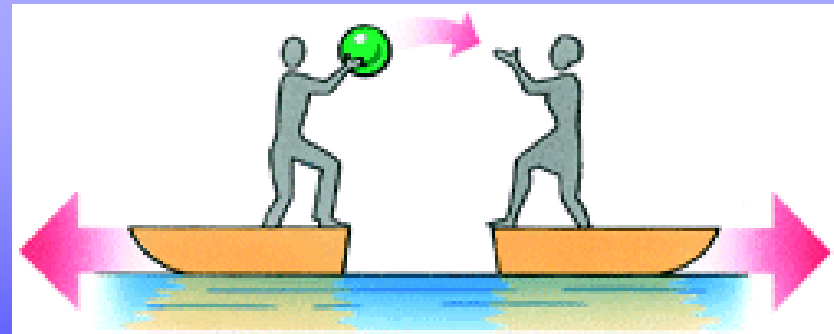
Elektroschwache WW

γ , Z^0 , W^+ , W^-

Quantenchromodynamik

8 Gluonen

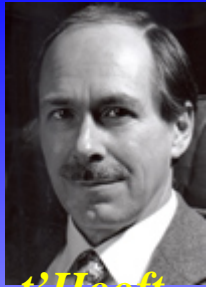
Die elektromagnetische und die schwache Kraft gehören zusammen



Alle Kräfte sind Austauschkräfte

Gravitation fehlt!

Die elektroschwache Kraft



t'Hooft



Veltmann

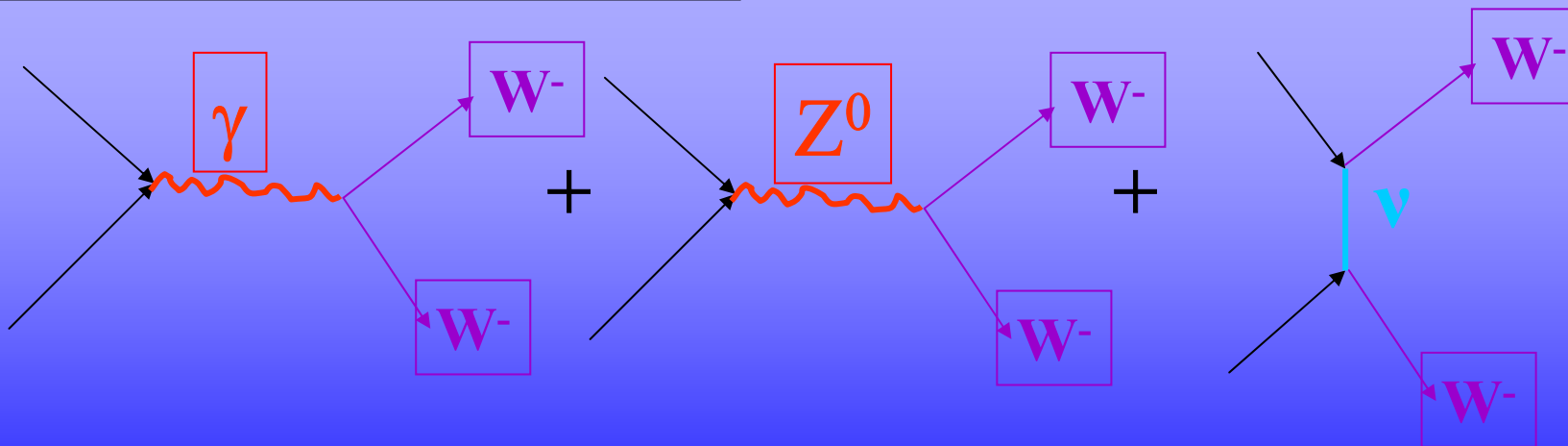


Nobelpreis '99

Theoretische Grundlagen
Der 'Eichtheorien': *Bauprinzip
aber viele Möglichkeiten*
Wir können was genau berechnen!

Nobelpreis '79

Das 'richtige' konkrete Modell
Voraussage, dass W^\pm und Z^0 Bosonen
existieren, Massen vorhergesagt



Die schwache Kraft ist schwach, weil die W und Z Teilchen schwer sind!

Die starke Kraft: QCD



D.J. Gross

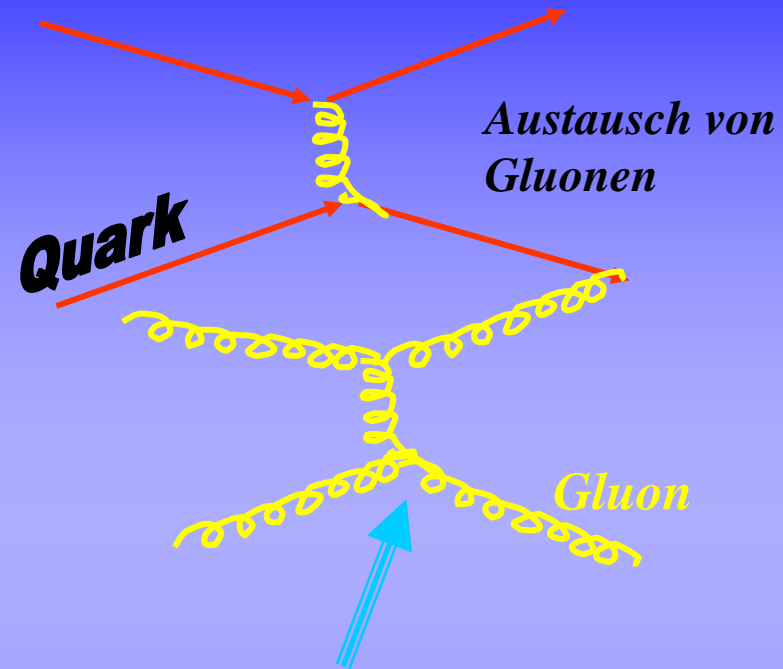


H.D. Politzer

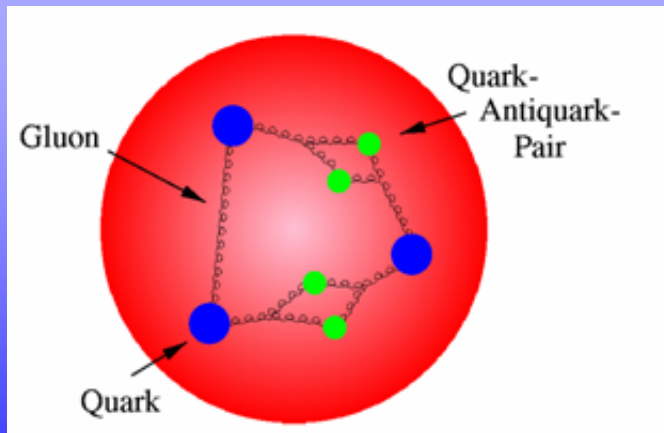


F. Wilzeck

Nobelpreis 2004

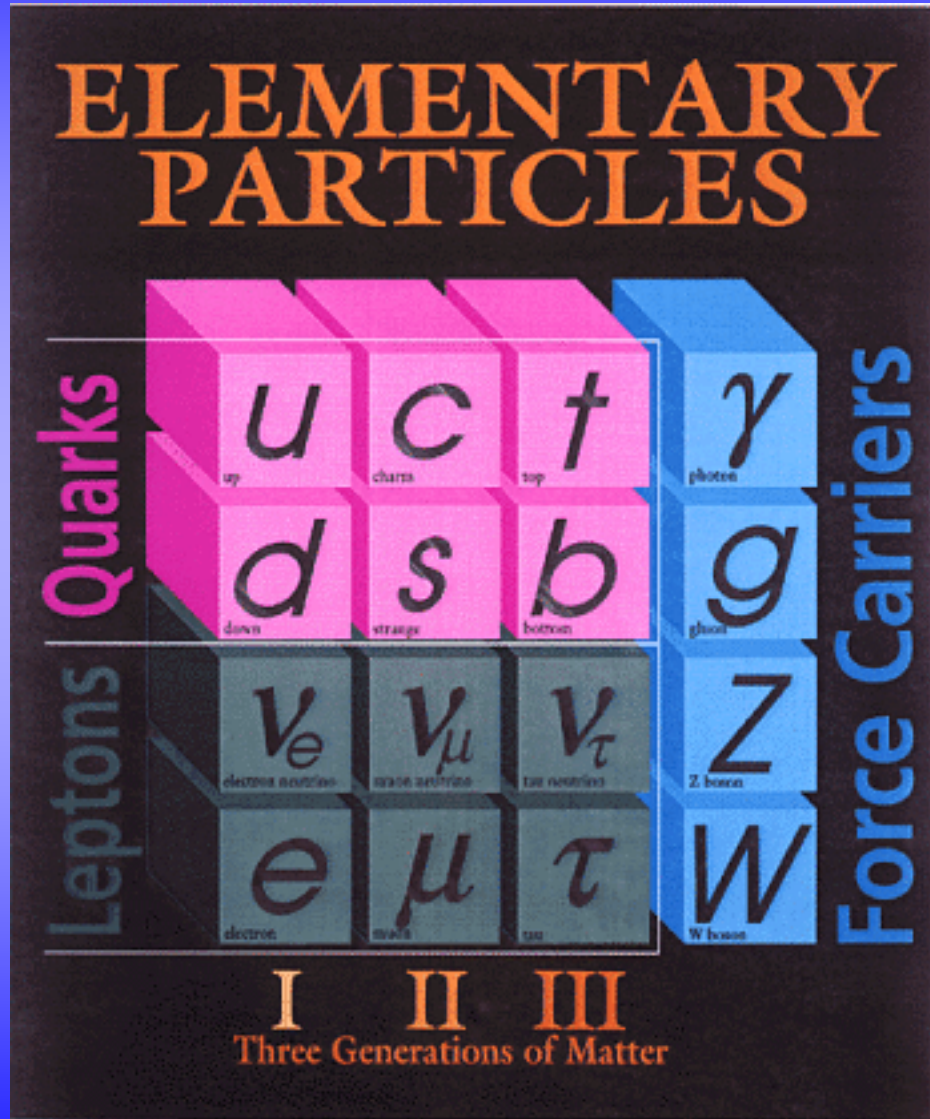


Das macht die QCD aus!
Gluonen sind 'geladen'
(im Gegensatz zu Photonen)



Unser Bild vom Proton: 3 Quarks und Gluonfeld

‘Punktförmige’ Teilchen und Austauschkräfte



- es gibt 3 Generationen von Teilchen und keiner weiss warum!

- Bauprinzip der 3 Kräfte ist gleich! (durch Austausch von Feldteilchen)
- es sind lokale Eichtheorien
- **Schwerkraft nicht dabei!**

Was ein Theoretiker schön findet: John Ellis Beijing 2004

The Basis of Particle Physics

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi$$

$$+ \psi_i \lambda_{ij} \psi_j h + h.c.$$

$$+ |D_\mu h|^2 - V(h)$$

$$+ \frac{1}{M} L_i \lambda_{ij}^\nu L_j h^2 \text{ or } L_i \lambda_{ij}^\nu N_j$$

The gauge sector (1)

The flavor sector (2)

The EWSB sector (3)

The ν -mass sector (4)

String theory

Cosmology

Future accelerators

Die experimentelle Herausarbeitung und Bestätigung des Standardmodells

1973 Entdeckung der neutralen Ströme (CERN)

1974 Entdeckung von Charm (Stanford, BNL)

Theorie könnte richtig sein

ist das Standardmodell richtig? Und welche Version hat die Natur gewählt?

1982 Entdeckung der W und Z- Teilchen (CERN)

ja, das ist sie!

Neue Beschleuniger in USA ('74) und Europa ('77) mit 15 Mal höherer Energie



Warum hohe Energie?

- Auflösung eines Mikroskops um so besser je höher die Energie ist $\Delta x \sim 1/\text{Energie}$
- Wir können Teilchen mit höherer Masse erzeugen

**Jeder wollte bei den grossen Entdeckungen dabei sein!
Aber: USA hatten damals die Nase vorn!**

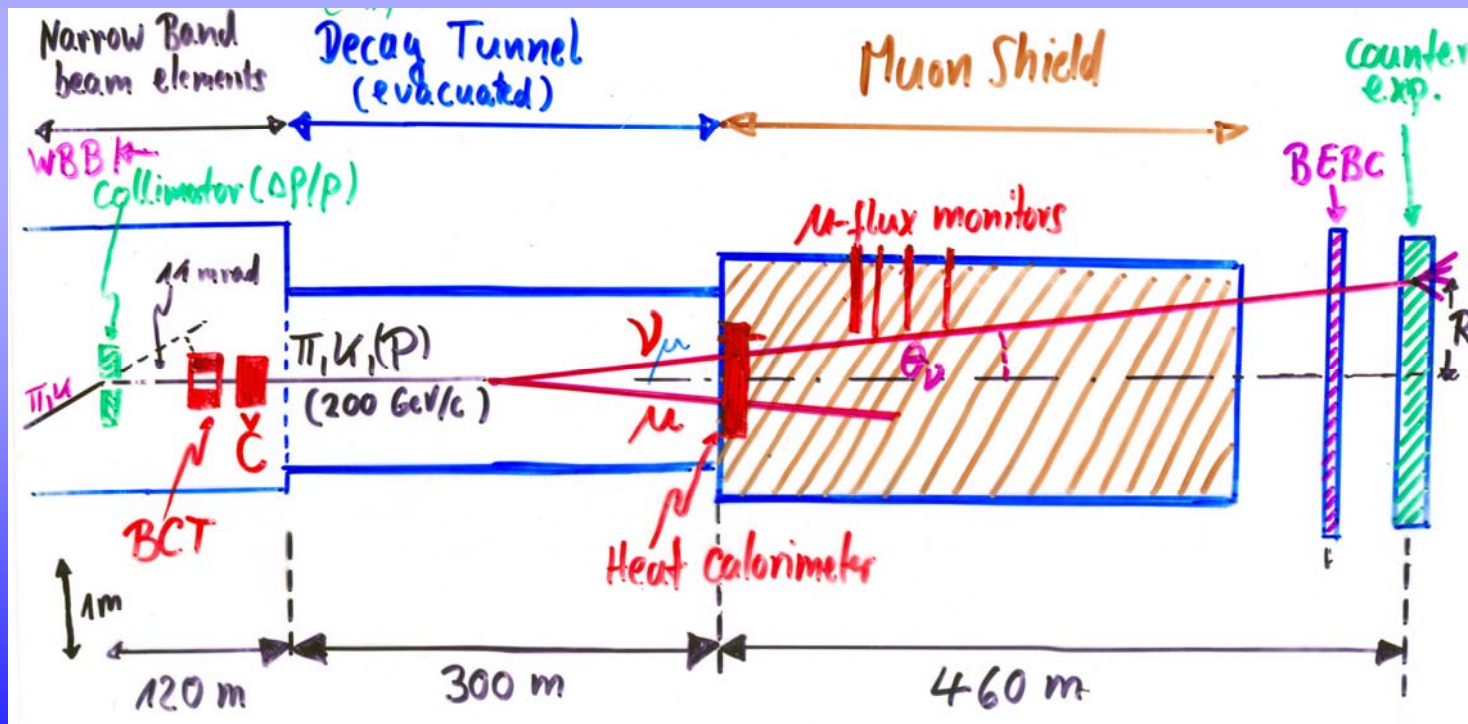
Was sollte die Dortmunder Gruppe tun?

Neutrinostrahl am CERN SPS (ab '76)

Vorbereitung der Experimente ab '73

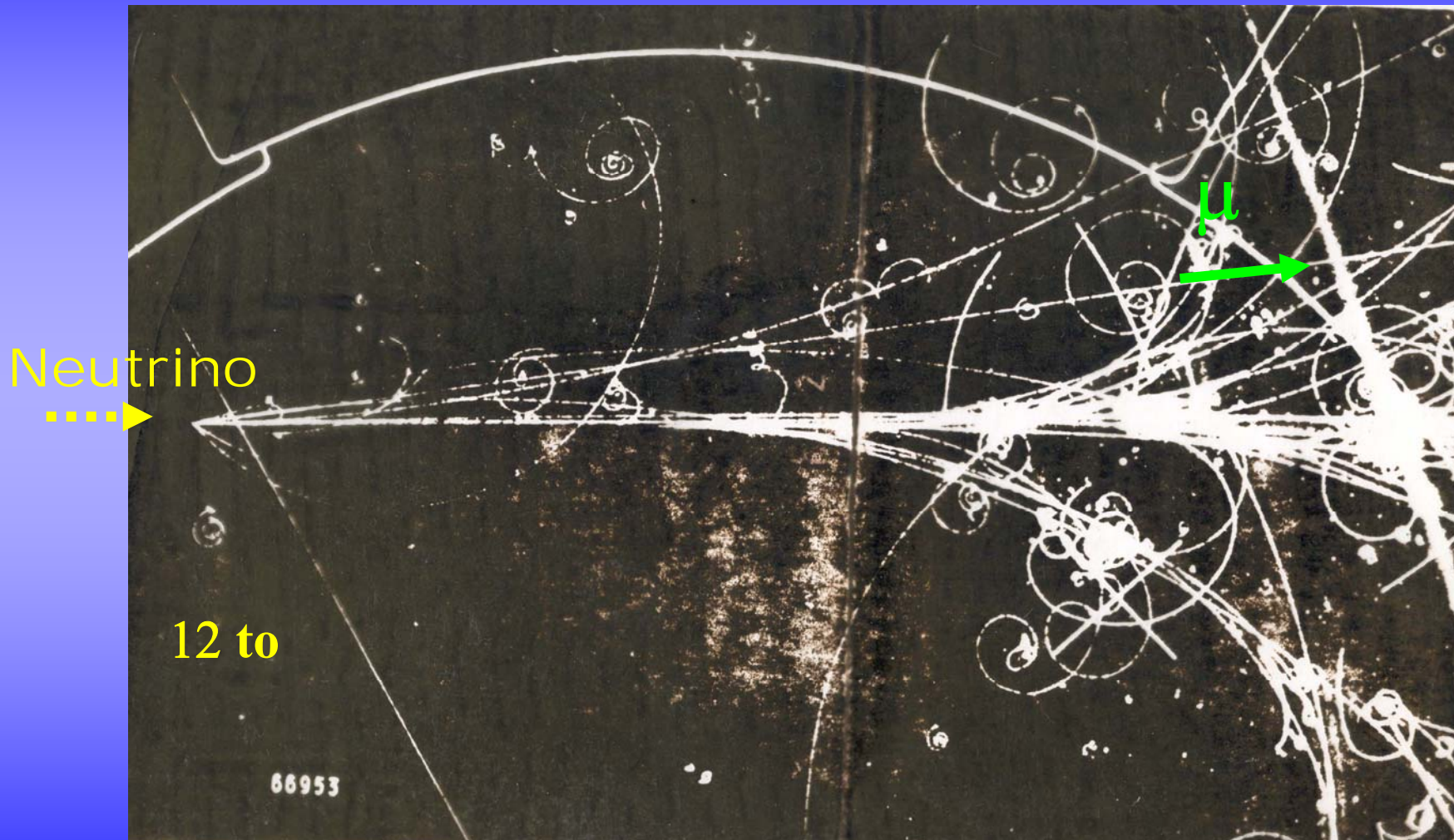
Neutrinos bleiben kaum in Materie stecken!

- ein Neutrino von 100 GeV Energie fliegt durch 2 Milliarden km Eisen bevor es stecken bleibt!
- Wir haben nur 20 m Eisen im Detektor → wir brauchen 10^{11} Neutrinos damit eines stecken bleibt!



**$3 \cdot 10^9$ ν 's
alle 8
Sekunden**

Ein Neutrinoereignis in der Blasenkammer $\nu_{\mu} + p \rightarrow \mu + \text{Hadronen}$

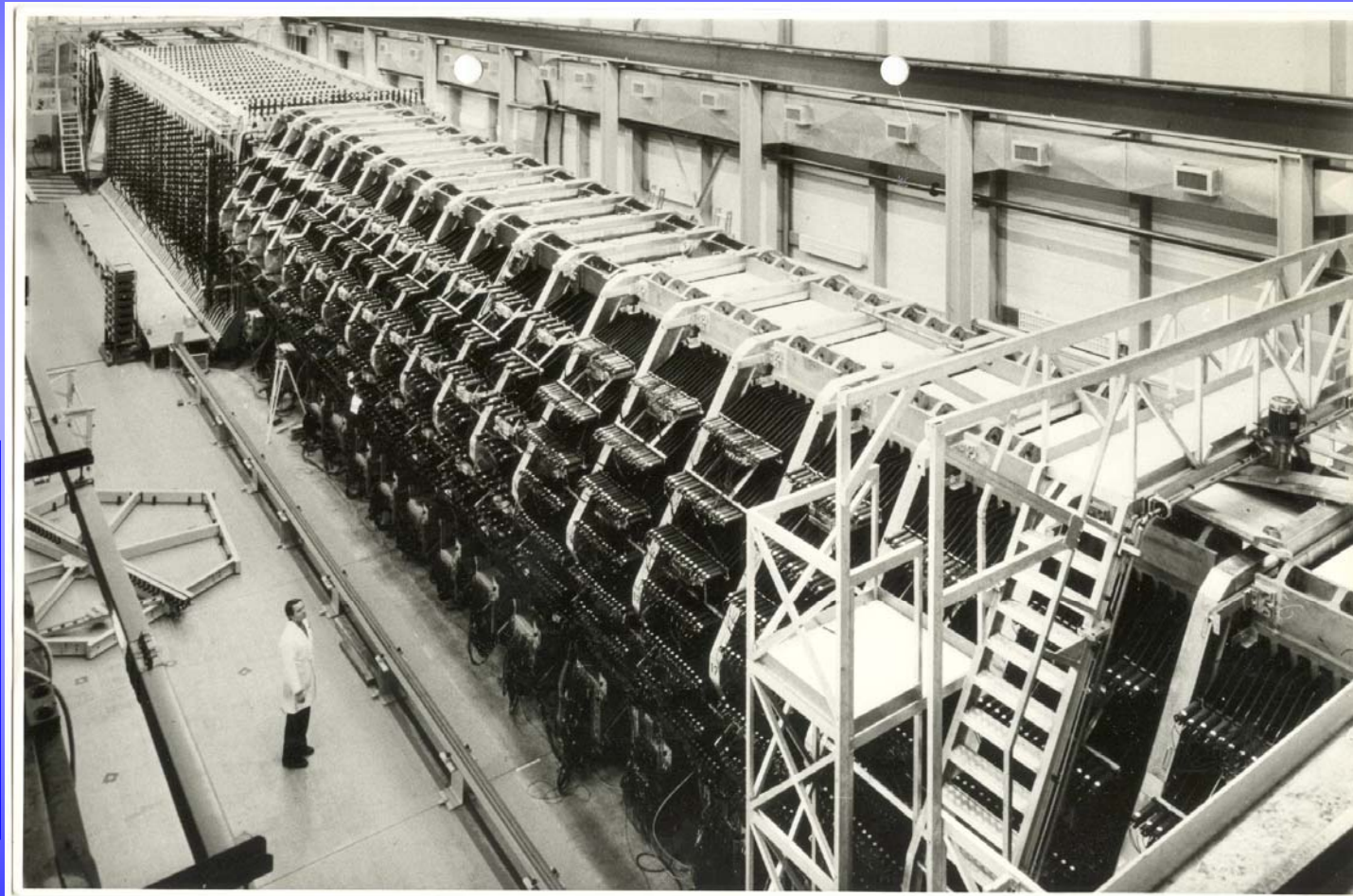


- wir brauchen i.A. nur den Myonimpuls und die Gesamtenergie aller anderen Teilchen!

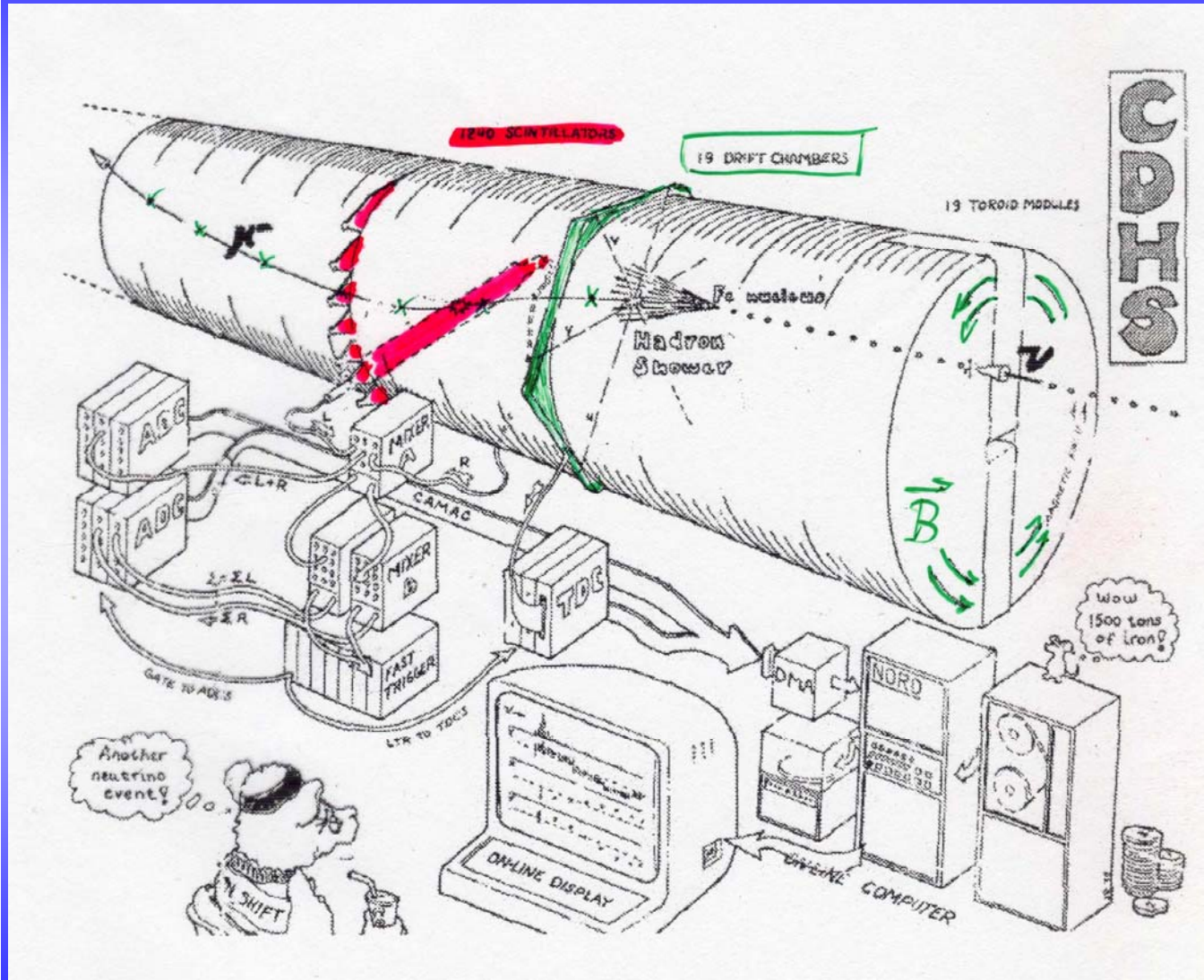
Der CDHS Neutrino Detektor

CERN-Dortmund-Heidelberg-Saclay

- 20 m lang
- 1.8 m Radius
- 1200 t Eisen
- 20 Driftkammern
- 1500 Szintillatoren
- 3000 Photovervielfacher

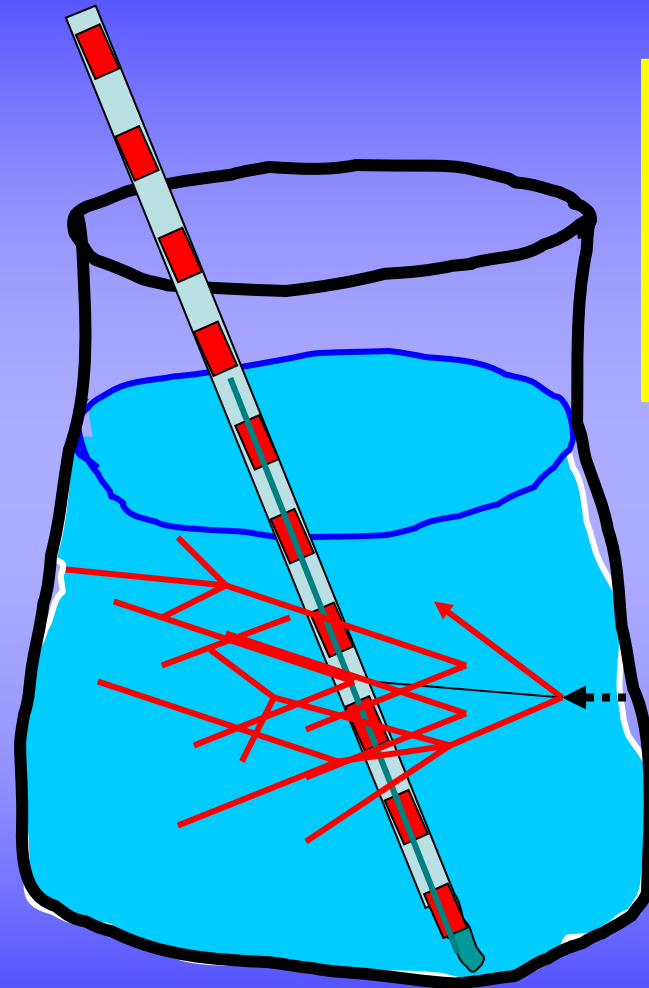


Der elektronische Neutrinodetektor



- Eisenwalze (Baustahl) magnetisiert in einzelnen Scheiben (5cm oder 15 cm dick) 1200 Tonnen
- misst Myonen (Magnetspektrometer)
- misst Gesamtenergie (Kalorimeter)

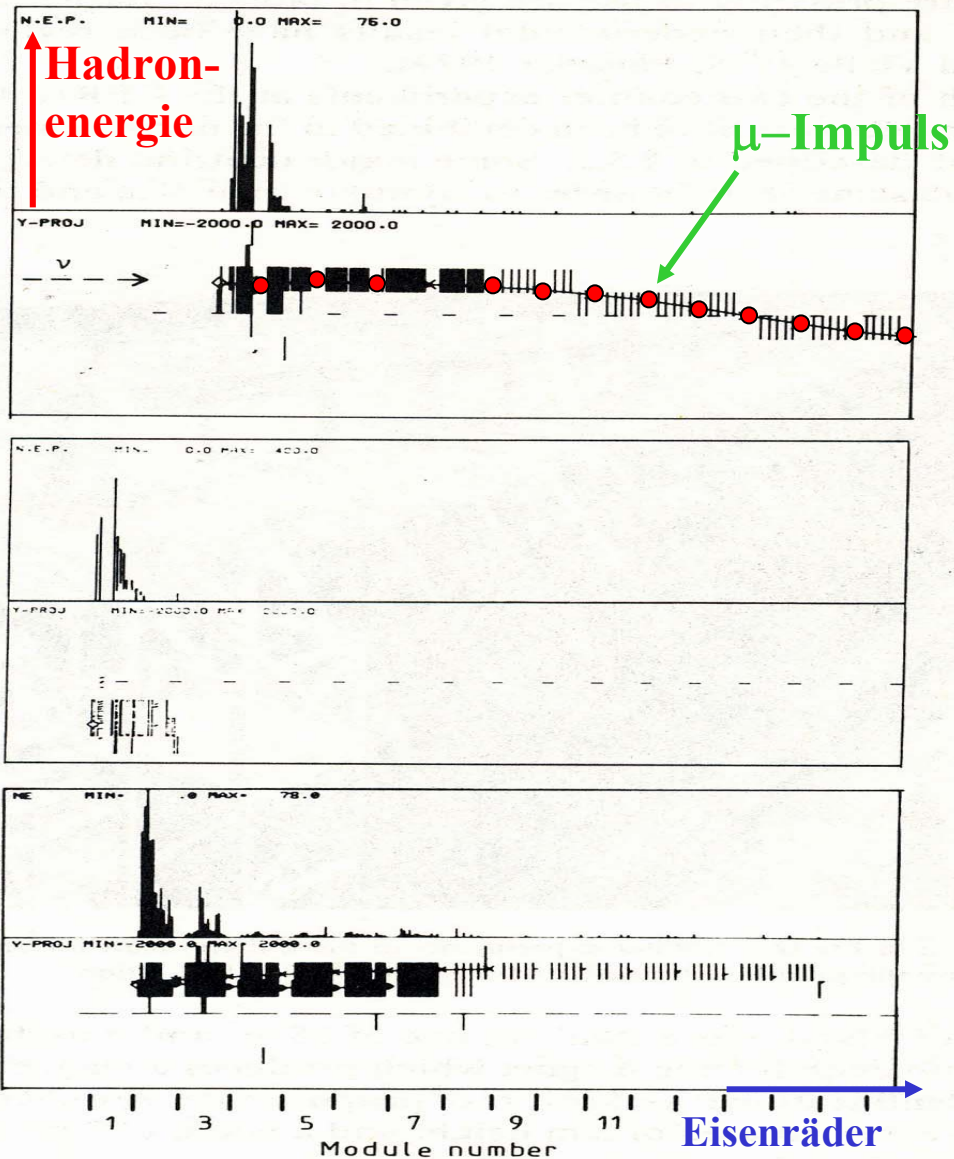
Was ist ein Kalorimeter?



- absorbiere alle entstandenen Teilchen
- messe Temperaturerhöhung' als Mass für die gesamte Energie

V

Neutrinoereignisse im Detektor



$\nu + p \rightarrow \mu + X$
(bekannt)

$\nu + p \rightarrow \nu + X$
(neu - 'neutrale Ströme')

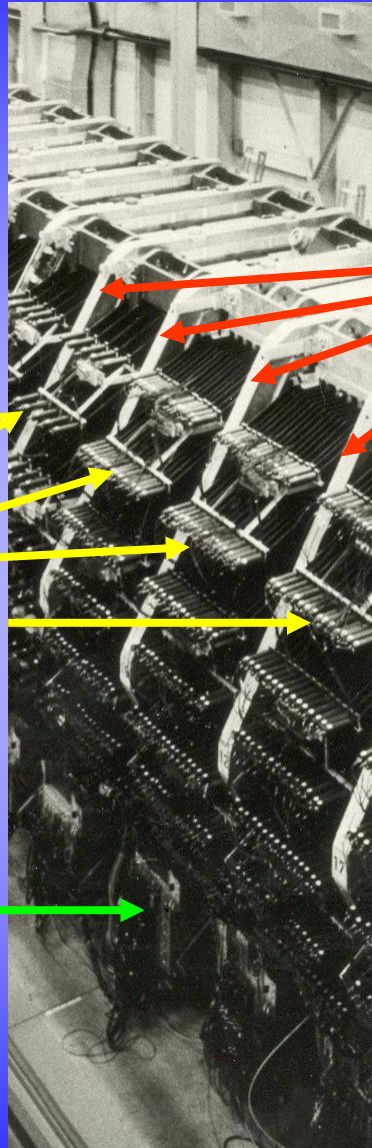
$\nu + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$
(neu - Charm)

Die Dortmunder Mannschaft



und die Kollaborateure

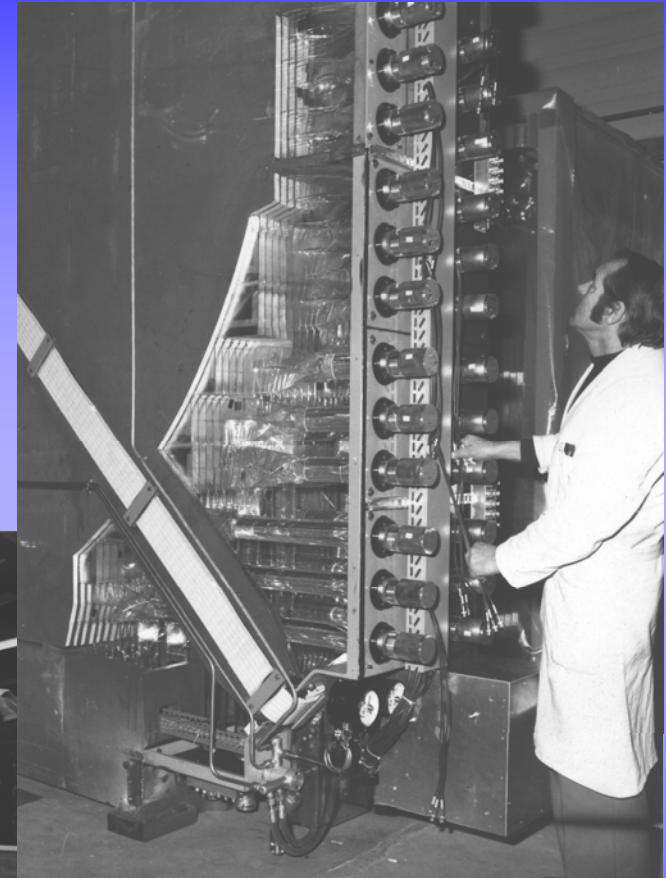
Kalorimeterbau in Dortmund



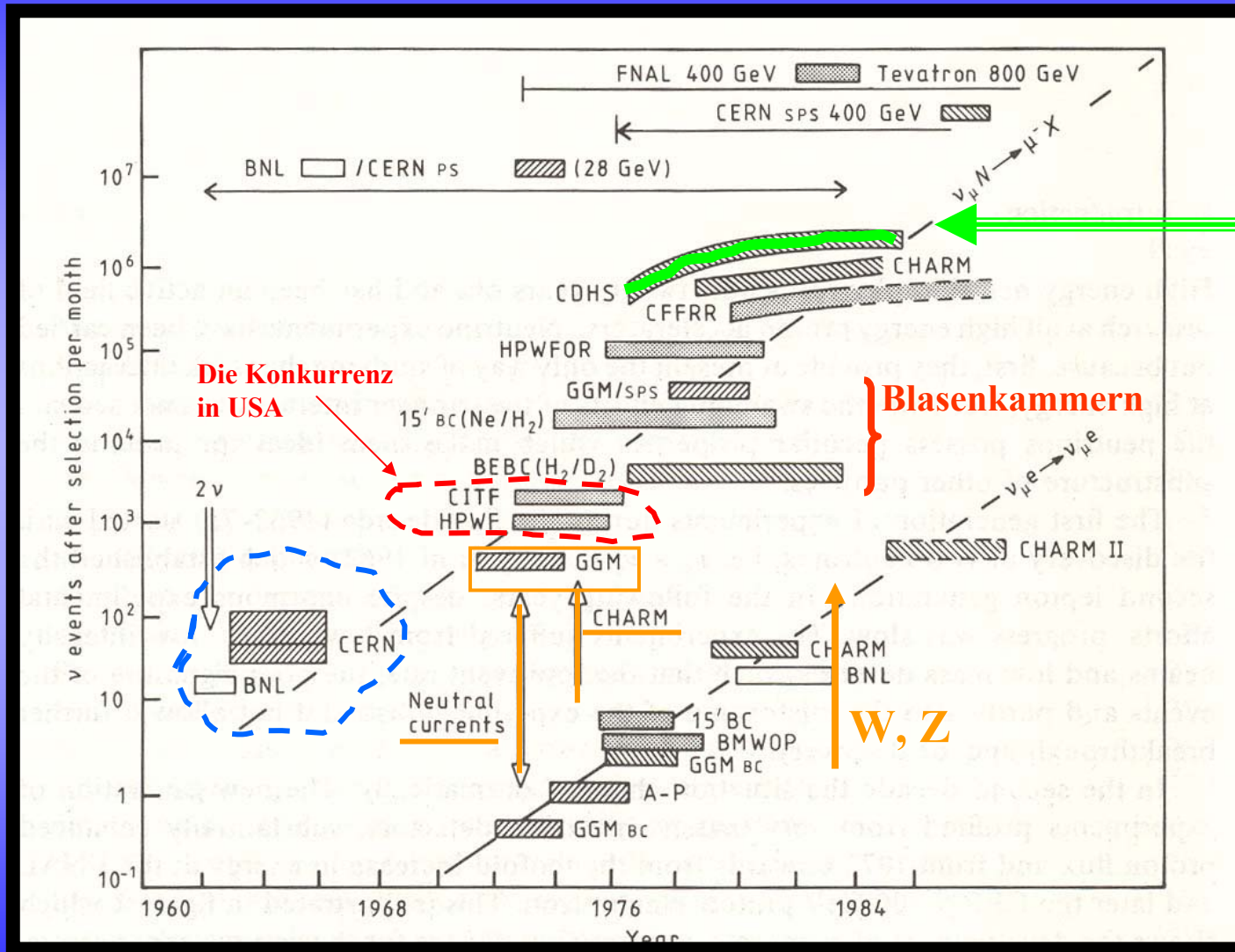
*Driftkammern
(Myonspur)*

Photovervielfacher

Elektronik



Historie der Neutrinoexperimente



Ein Riesenschritt

Das erste Resultat: die Konkurrenz lag falsch!

VOLUME 39, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

22 AUGUST 1977

Is There a High- γ Anomaly in Antineutrino Interactions?

M. Holder, J. Knobloch, J. May, H. P. Paar, P. Palazzi, D. Schlatter,
J. Steinberger, H. Suter, H. Wahl, and E. G. H. Williams
CERN, Geneva, Switzerland

and

F. Eisele, C. Geweniger, K. Kleinknecht, G. Spahn, and H.-J. Willutzki
Institut für Physik der Universität, Dortmund, Federal Republic of Germany

and

W. Dorth, F. Dydak, V. Hepp, K. Tittel, and J. Wotschack
Institut für Hochenergiephysik der Universität, Heidelberg, Federal Republic of Germany

and

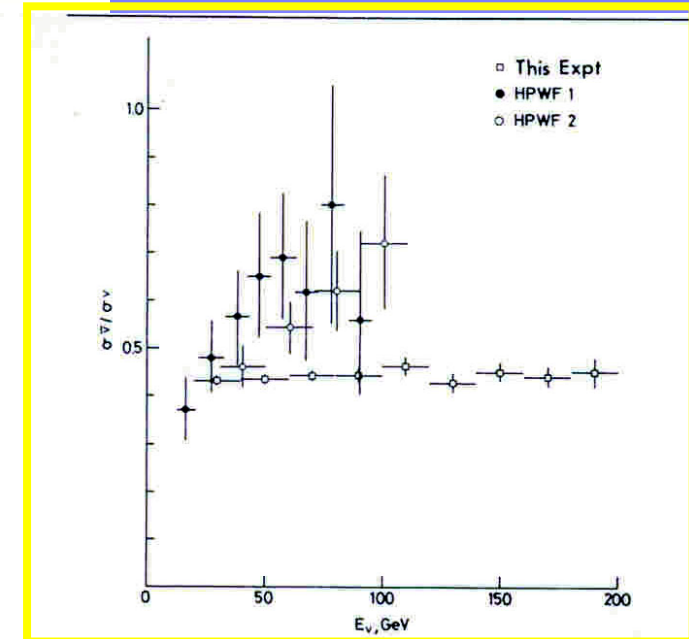
P. Bloch, B. Devaux, M. Grimm, J. Maillard, B. Peyaud,
J. Rander, A. Savoy-Navarro, and R. Turley
Département de Physique des Particules Élémentaires, Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay, France

and

F. L. Navarra
Istituto di Fisica dell'Università, Bologna, Italy
(Received 12 July 1977)

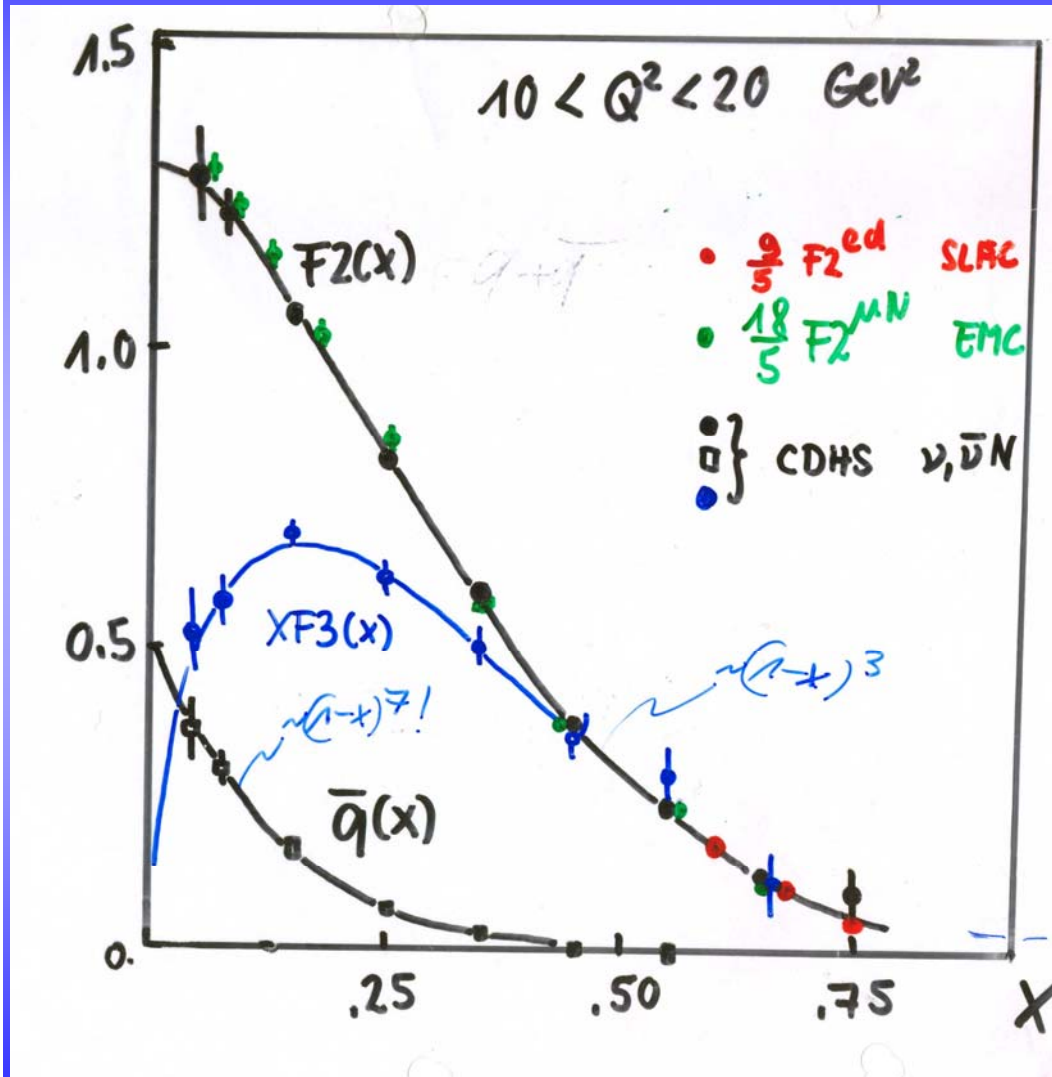
Accepted without review at the request of E. Picasso under policy announced 26 April 1976

We have analyzed data taken in the CERN narrow-band neutrino and antineutrino beams with regard to the "high- γ anomaly" observed by previous experiments at Fermilab. At neutrino energies between 30 and 200 GeV, the $\bar{\nu}$ and ν charged-current cross-section ratios and muon-inelasticity distributions disagree with the earlier results. In particular, there is no evidence for energy-dependent effects in the antineutrino data which constitute an important aspect of the alleged anomaly.



- Statistik gross
- Systematik viel besser

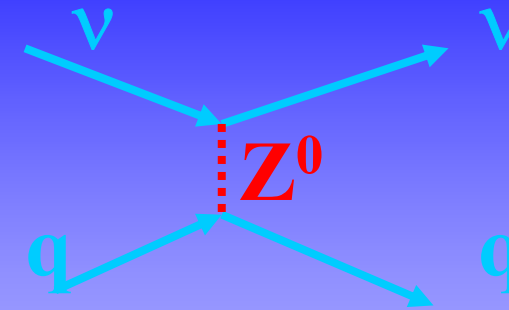
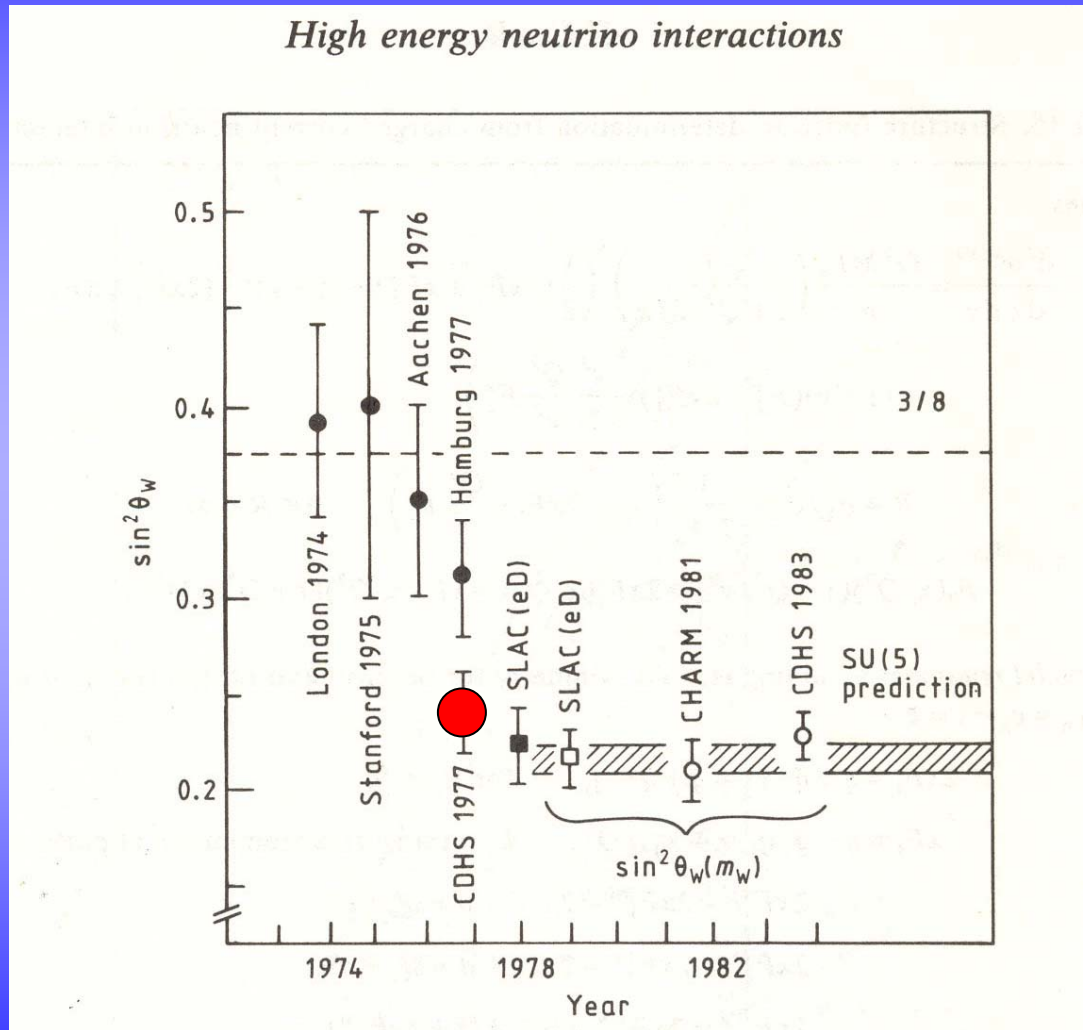
Ergebnisse (1): Neutrinos streuen an Quarks



- Es gibt 3 Valenzquarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen drittelzahlige elektrische Ladung (durch Vergleich mit Myonexperimenten)
- Neutrinos messen Impulse von Quarks und Antiquarks getrennt

Impulsverteilungen der Quarks im Nukleon

Ergebnisse (2): elektroschwache Wechselwirkung

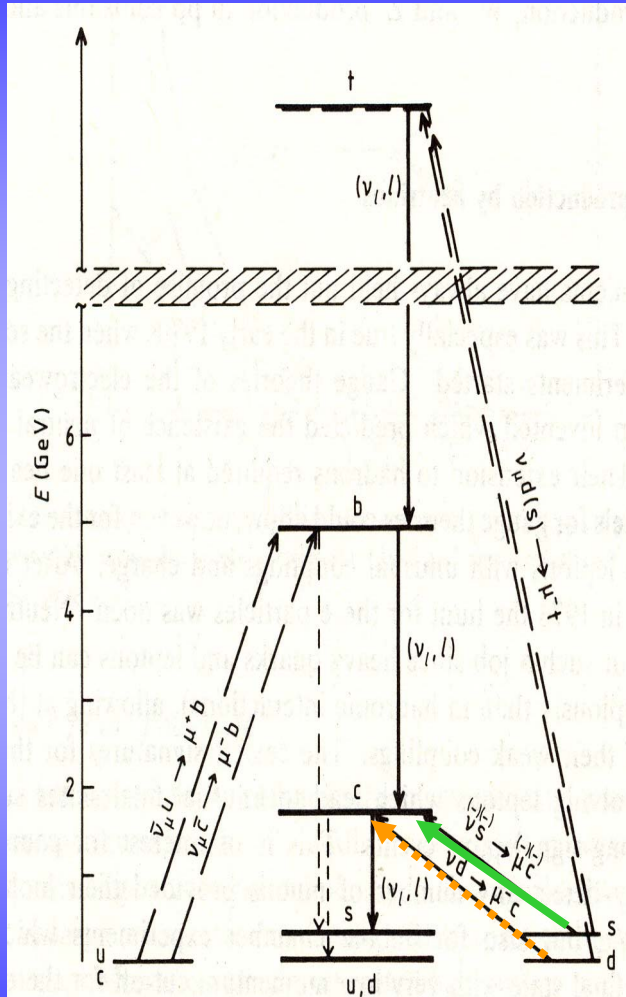


- erste 'richtige' Messung der Stärke der neutralen Ströme: $\sin^2 \theta_W$

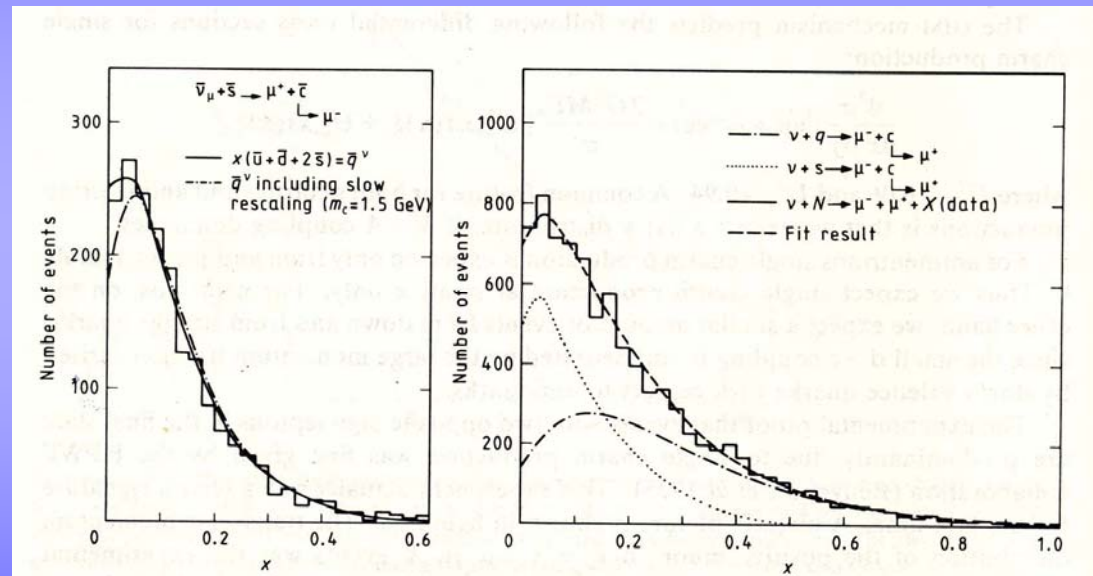
→ Massen von W und Z vorhergesagt
 $m_W \approx 80 \text{ GeV}$
 $m_Z \approx 90 \text{ GeV}$

→ zeigt, wie das Standardmodell weiter entwickelt werden muss → GUT

Ergebnisse (3): elektroschwache Wechselwirkung



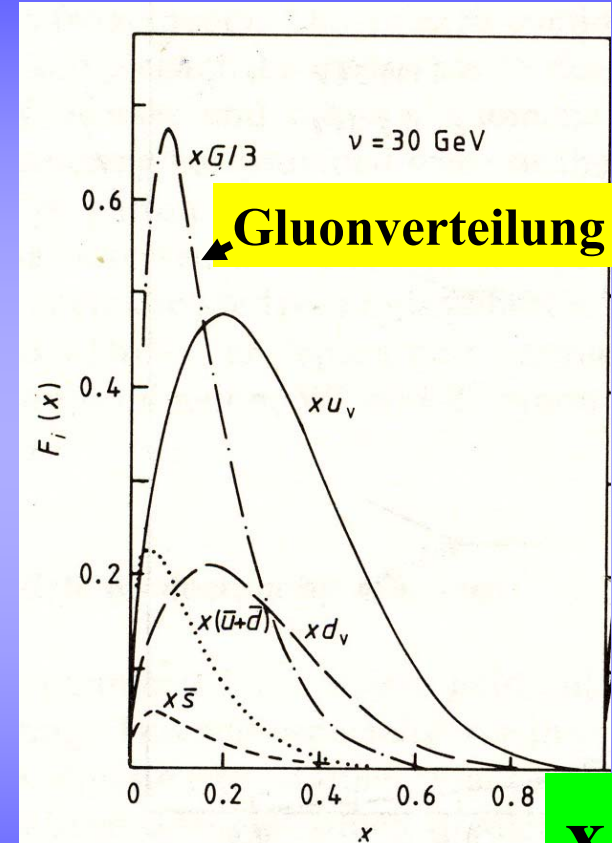
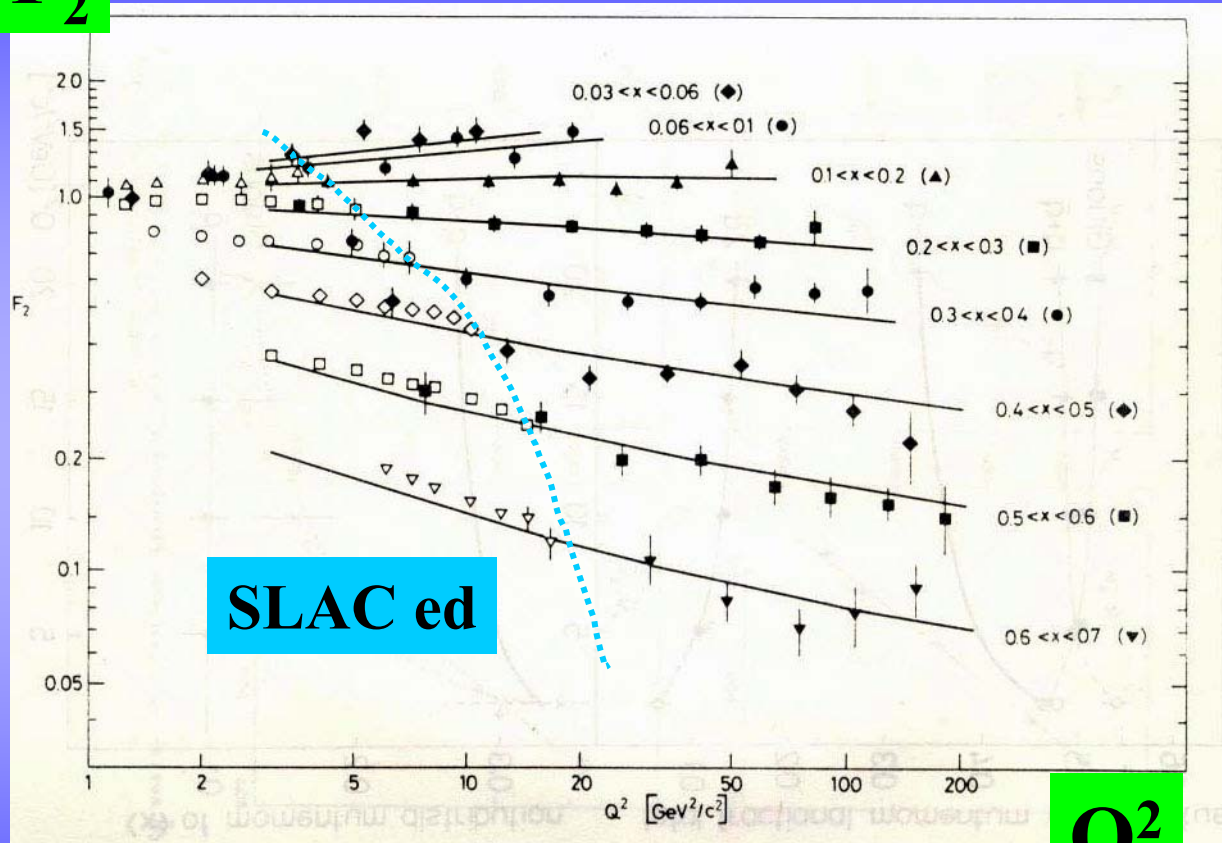
• Neutrinos erzeugen Charm wie vom Standardmodell vorhergesagt



*Für Experten:
Bestätigung des GIM mechanismus*

Ergebnisse (4): erste erfolgreiche Tests der Theorie der starken Kraft (QCD)

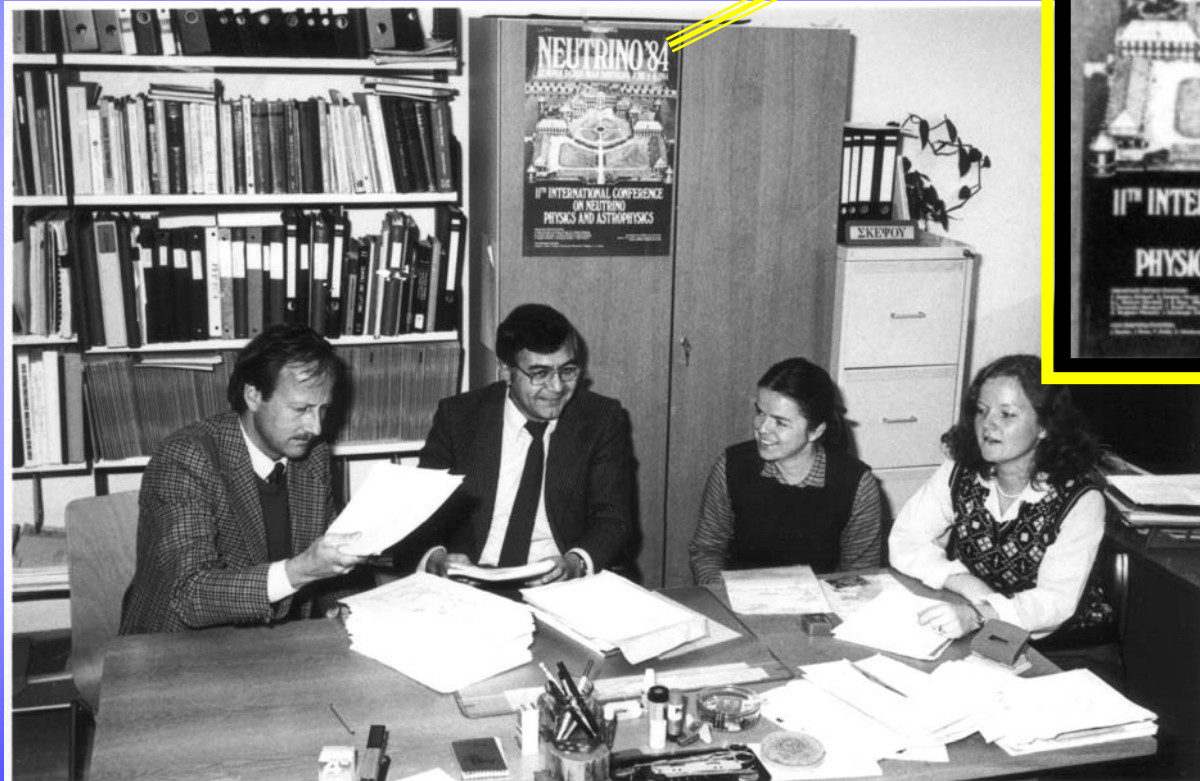
F_2



Messung der Stärke der QCD Wechselwirkung: $\Lambda = 0.5 \pm 0.2$ GeV

Glück & Reya

Neutrino '84 in Dortmund*

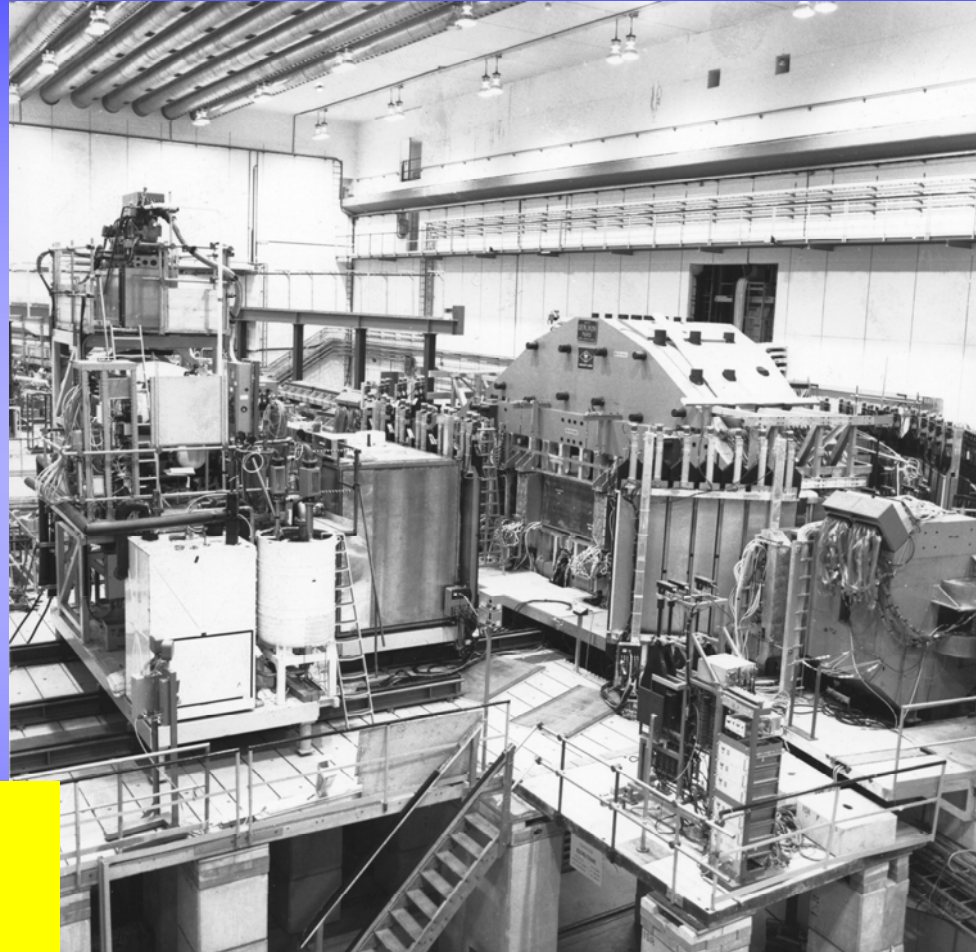
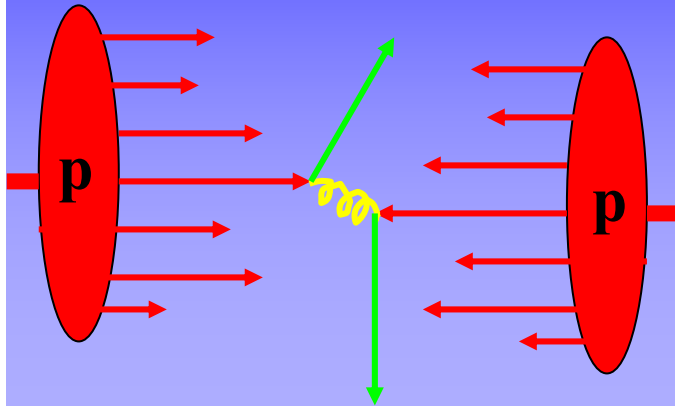


* *Nordkirchen*

.. has put Dortmund on the map of high energy physics (J. Steinberger)

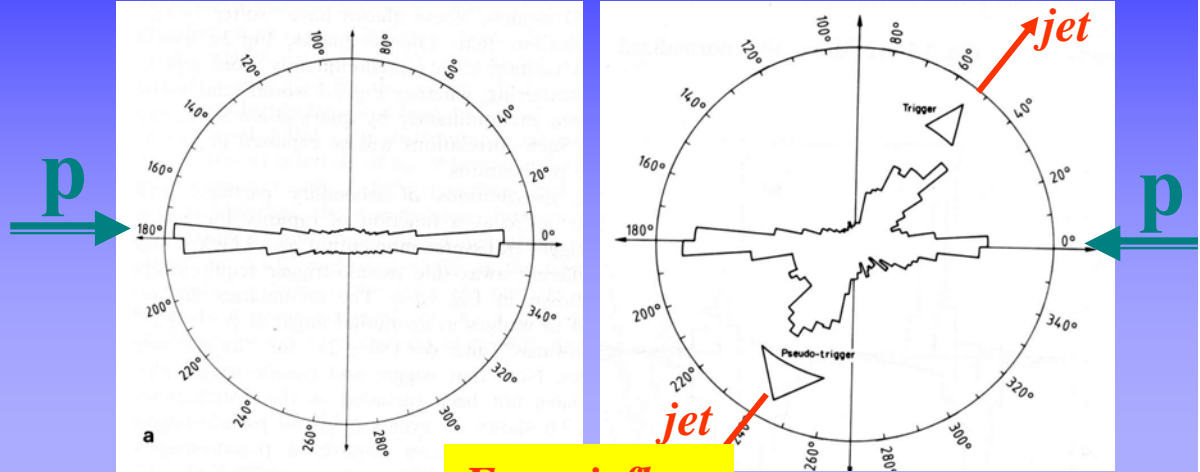
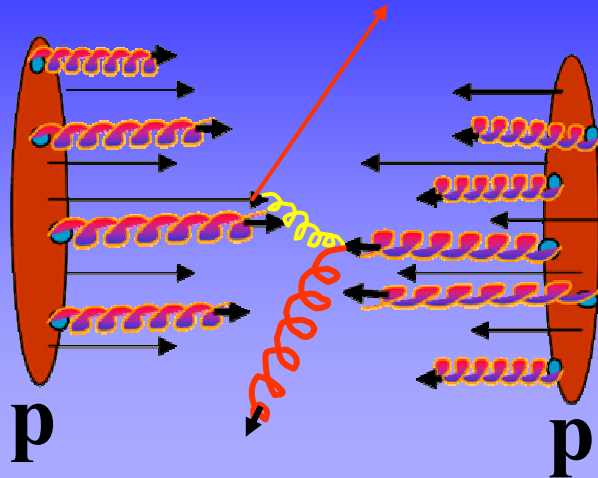
Quarks und QCD bei Stößen von Protonen

D. Wegener & Co

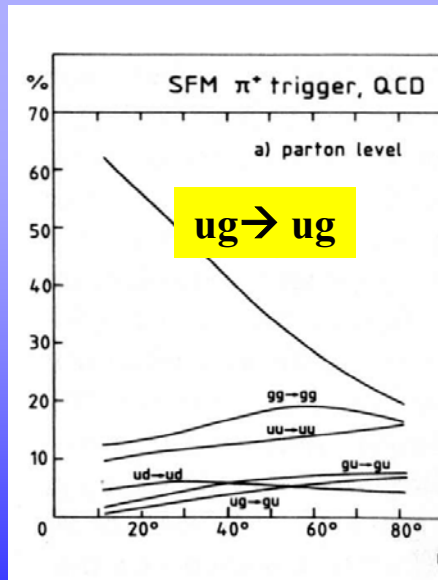


ISR Speicherring (CERN)
Split Field Magnet
30 GeV Schwerpunktsenergie

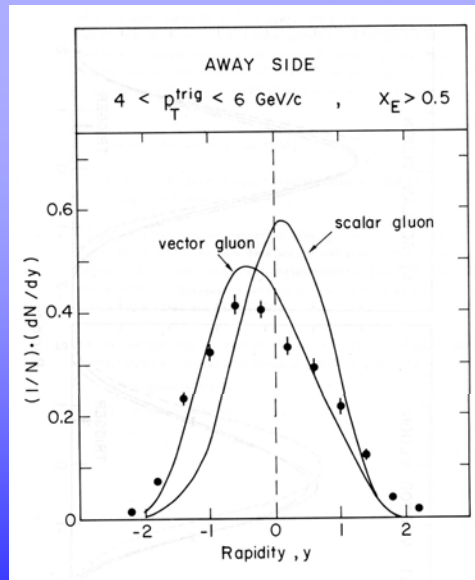
Harte Streuprozesse in pp am ISR ('80-'87)



Energiefluss



Streuanteile: viele Stösse mit Gluonen



Spin des Gluons = 1

- Es muss Stösse zwischen Partonen geben: qq, qg, gg
 - wir erwarten 'Jets' von Teilchen
 - wir erwarten Gluon-Gluon Stösse
- ➔ **Alles wurde nachgewiesen!**

Die nächste Generation von Experimenten: Kalorimeterbau in Dortmund

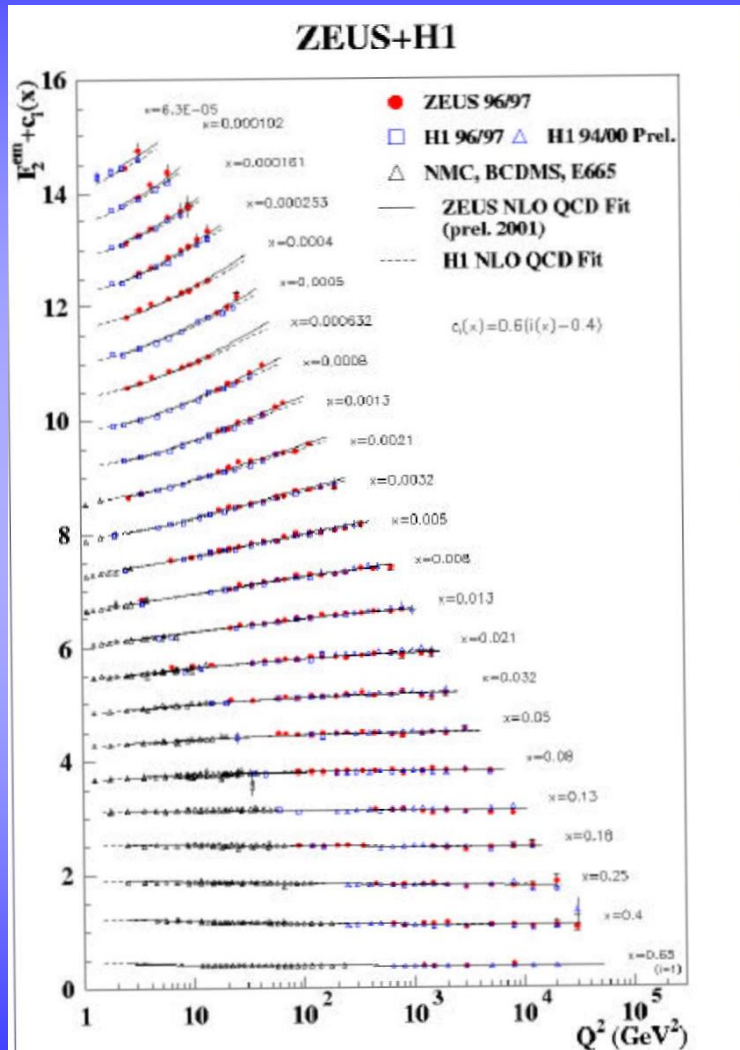


**Experiment
H1 DESY
400 Physiker**

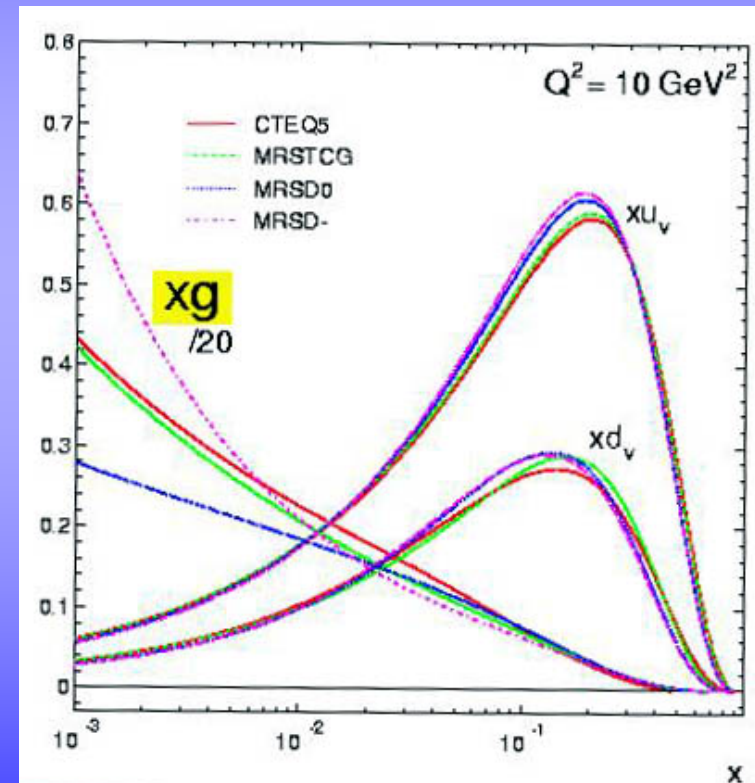
**Experiment
NA31
CP-Verletzung**



Präzisionsmessungen der Partondichten bei HERA und QCD Tests (D. Wegener et. al.)



**Partondichten bei HERA
Basis für Voraussagen für
LHC- Experimente**

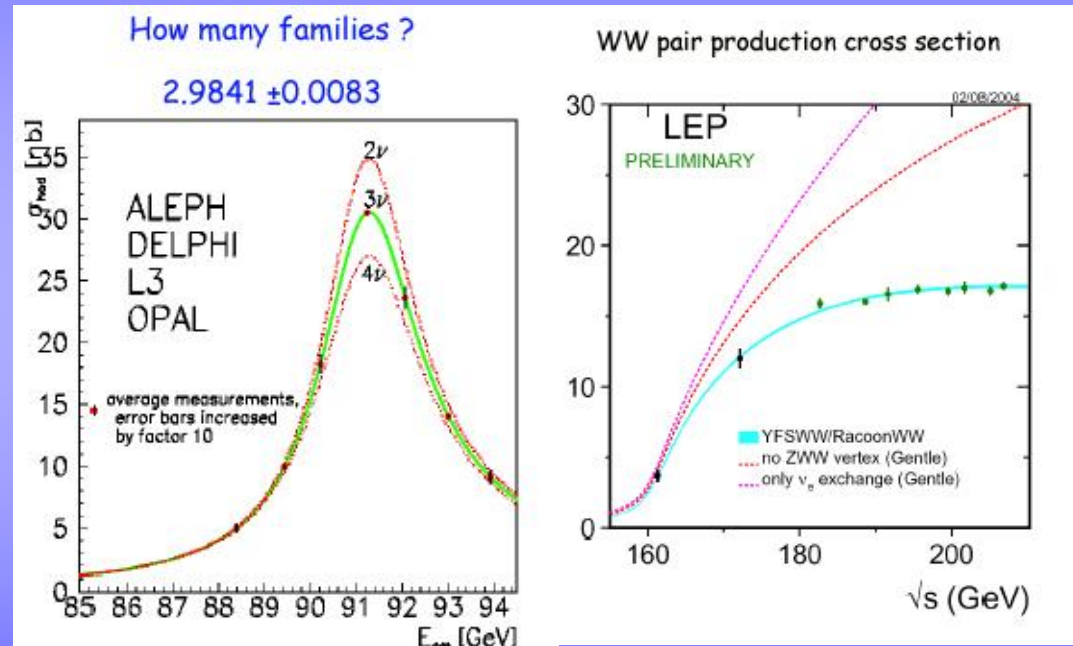


$\alpha_S = 0.115 \pm .003$

Präzisionsmessungen der Elektroschwachen Theorie bei LEP



*Die Feldquanten der schwachen Wechselwirkung
Entdeckt 1982 am CERN (Nobelpreis 1984)*

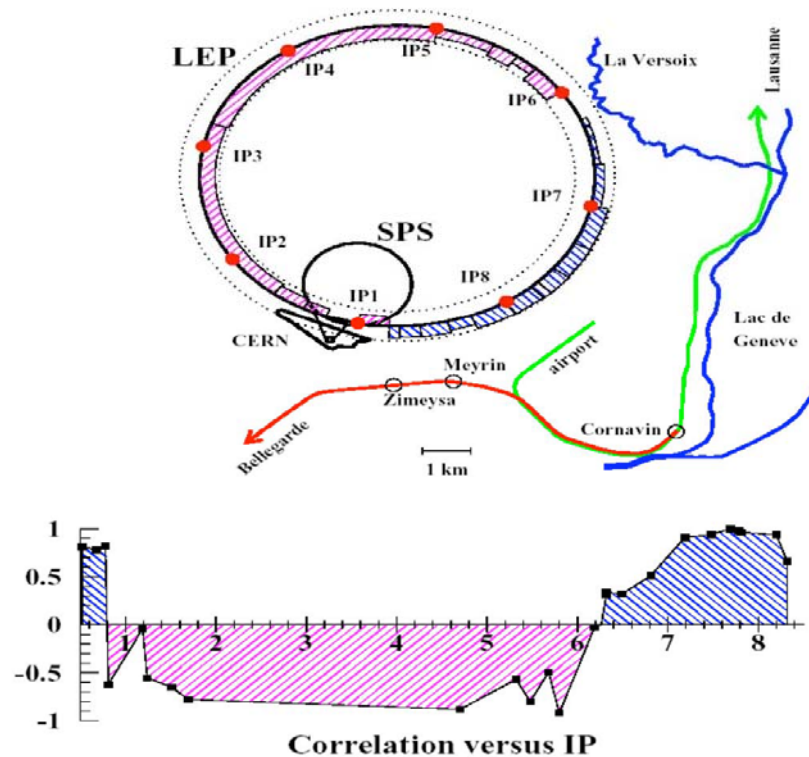


**Z^0 -Resonanz: es gibt
nur 3 Neutrinos!
 m_Z ?**

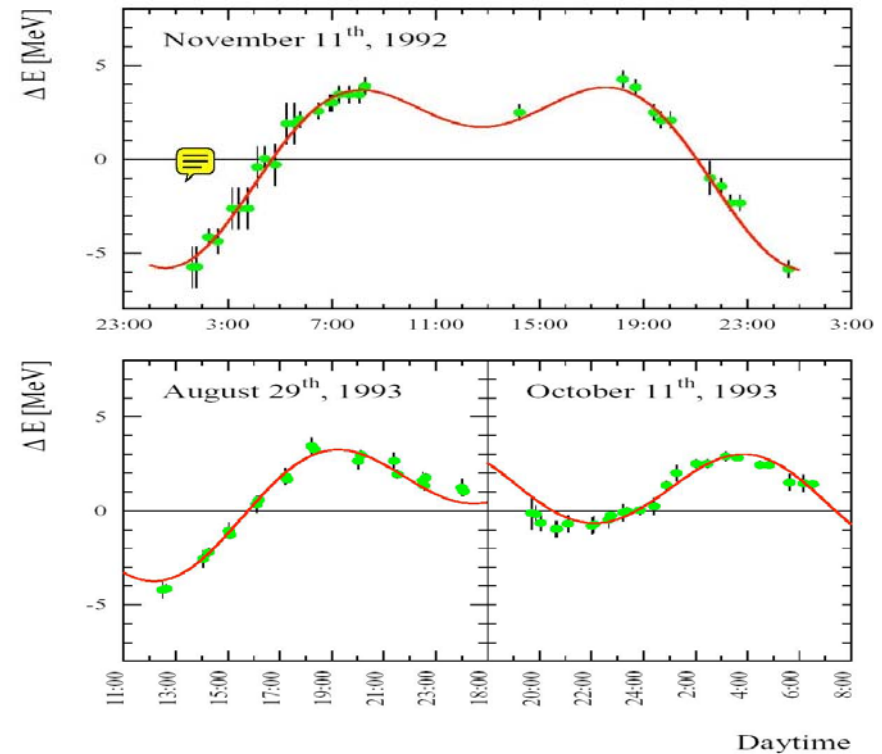
**W-Bosonen: sie koppeln an
 Z^0 und Photon wie vorher-
gesagt**

Präzision: $M_Z = 91187.5 \pm 2.1 \text{ MeV}$ ($2 \cdot 10^{-5}$)

External effect : The "TGV effect"



External effect : The terrestrial tides

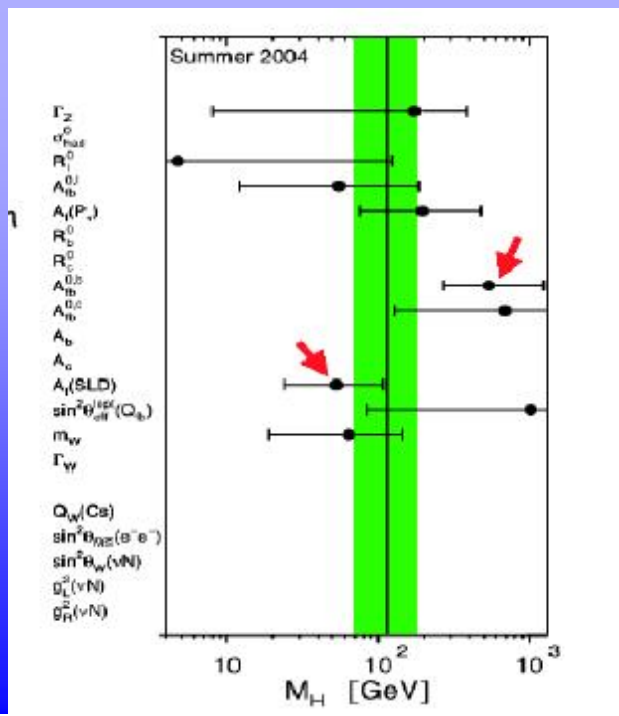


Test der elektroschwachen Theorie (2)



• **Masse des Top Quarks wurde vorhergesagt (später gefunden am Fermilab USA)**

➔ **Test der Theorie in höherer Ordnung**



• **noch nicht gefunden wurde das Higgsteilchen**

➔ **Wir wissen nicht, wie die Teilchen Masse bekommen!**

Aber:

Auch die Higgsmasse ist bereits eingeschränkt worden!

$M_{\text{higgs}} = 117 +67 - 45 \text{ GeV}$

➔ **Sie sollte ganz nahe liegen, war aber für LEP noch nicht erreichbar ➔ LHC**

Zusammenfassung

- **Das Standardmodell wurde sehr genau getestet: es ist ein Riesenerfolg und beschreibt bisher (fast) alle experimentellen Messungen**
warum sind die Teilchenphysiker dennoch nicht glücklich?

- **zu vieles ist unverstanden!**
 - warum gibt es 3 Generationen von 'elementaren' Teilchen?
 - warum haben sie diese Massen?
 - warum verstehen wir die Schwerkraft nicht?
 - warum verstehen wir 95% der Energiedichte im Universum nicht???

- **der Klärung dieser Fragen werden wir hoffentlich am nächsten CERN-Beschleuniger, dem Large Hadron Collider ab 2007 näher kommen..... Und Dortmund wird dabei sein**