Teilchenphysikalisches Kolloquium *29 Mai 2000*
Universität Karlsruhe

Streuexperimente zur Erforschung der Struktur der Materie: Bilanz und Perspektiven

- ☞ Was heißt „elementar“?
- ☞ Rutherfords Entdeckung des Atomkerns (1911)
- ☞ Quarks kommen aus Kalifornien (1967)
- ☞ Überraschung in Photon-Proton-Reaktionen bei HERA am DESY (1997)
- ☞ Zukunftsmusik: das THERA-Projekt

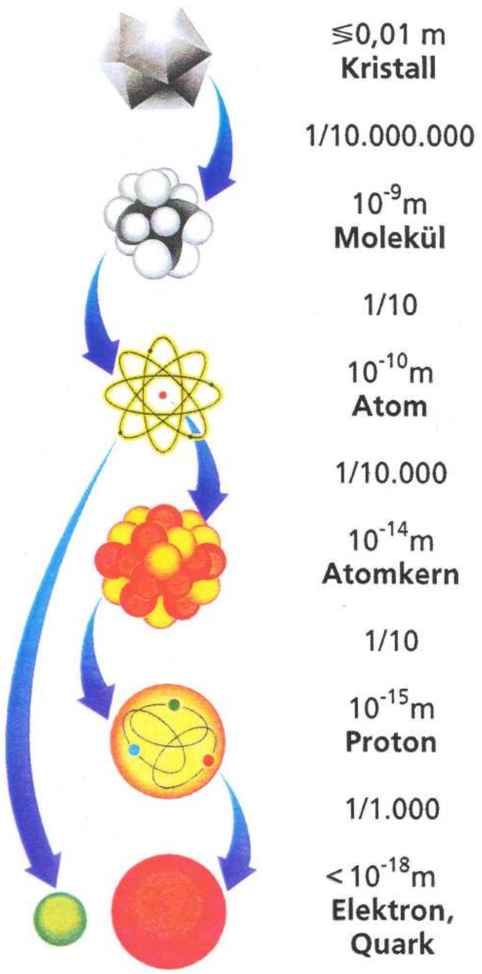
J. A. Crittenden

Physikalisches Institut
Universität Bonn

Was heißt „elementar“?

„Elementar“ ist ein Ausdruck der Ignoranz !

(und deshalb zeitabhängig)



Rutherford (1911)

Hoftstadter (1953)

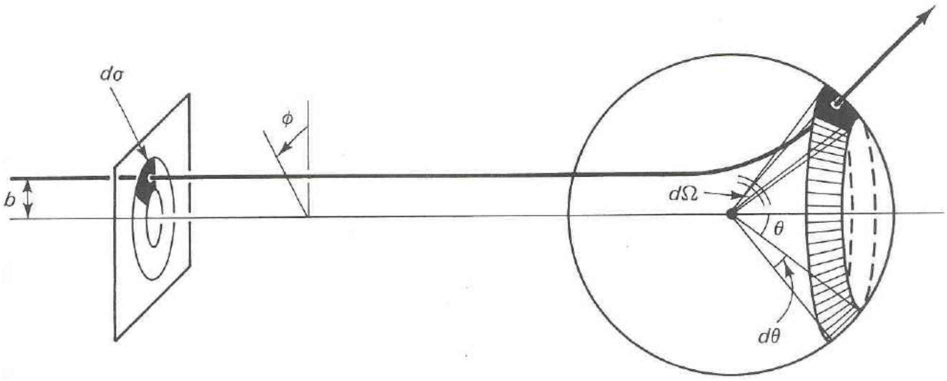
HERA am DESY (1997)

Aktuelle Grenze des Wissens:

$$10^{-18}\ m$$
$$(\simeq \frac{1}{1000}\ \mathit{Protonradius})$$

begrenzt durch erreichbare Teilchenenergien

(d.h. technologisch bedingt)



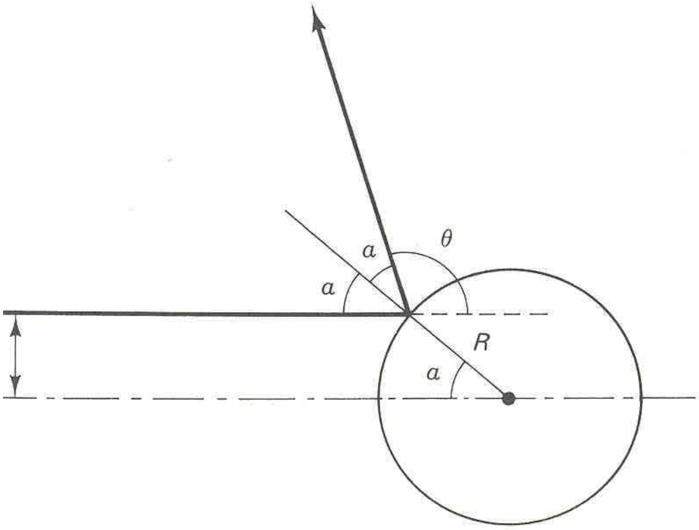
Differentieller Wirkungsquerschnitt pro Raumwinkeleinheit

$$d\sigma = F(\theta, \phi) d\Omega \qquad \text{mit } d\Omega = d(\cos\theta) d\phi$$

„Probability of single deflexion through any angle“

(E. Rutherford, Phil. Mag. Vol. xxi (1911) 669)

Beispiel: Streuung an einer harten Kugel



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = R^2/4$$

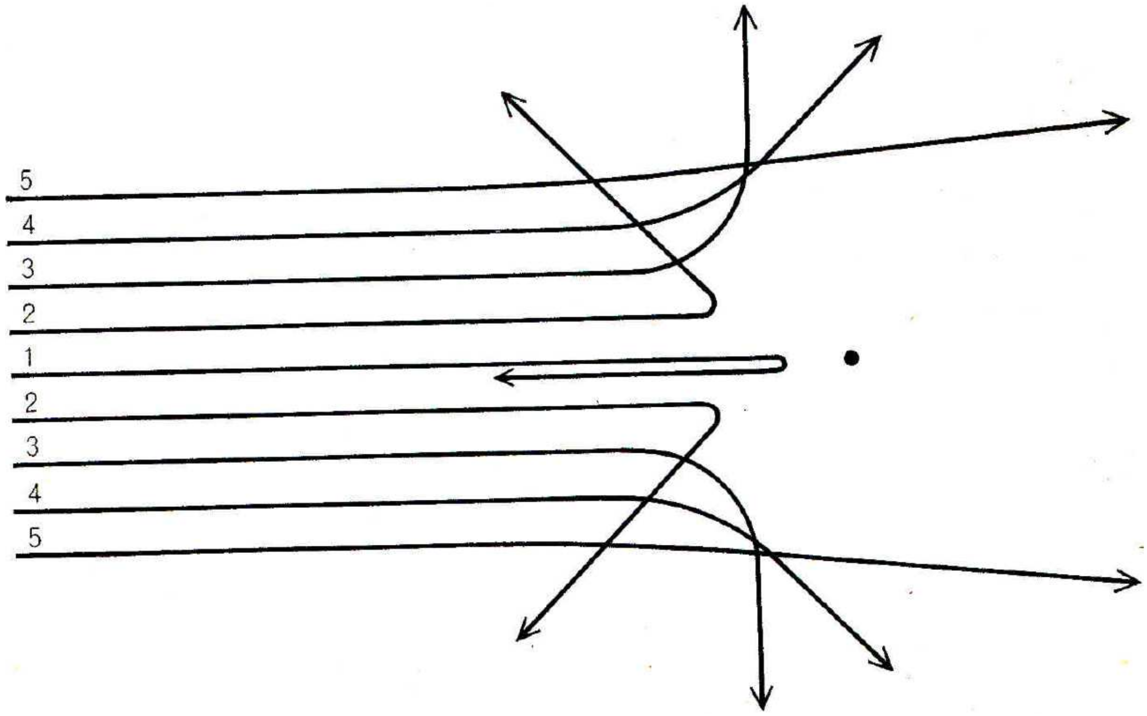
$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \pi R^2$$

„geometrischer“ Querschnitt

Teilchenfluss bekannt, gemessene Streurate $\Rightarrow$ Wirkungsquerschnitt

Einheit: 1 barn (100 fm^2) $\simeq$ Querschnitt der größten Kerne

Streuung an einer schweren Punktladung (Rutherford-Streuung)



Die Streuformel von Rutherford

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{(Q_1 Q_2)^2}{p^4 \sin^4 \theta/2}$$

Übertragener Impuls: $q = p \sin \theta/2$

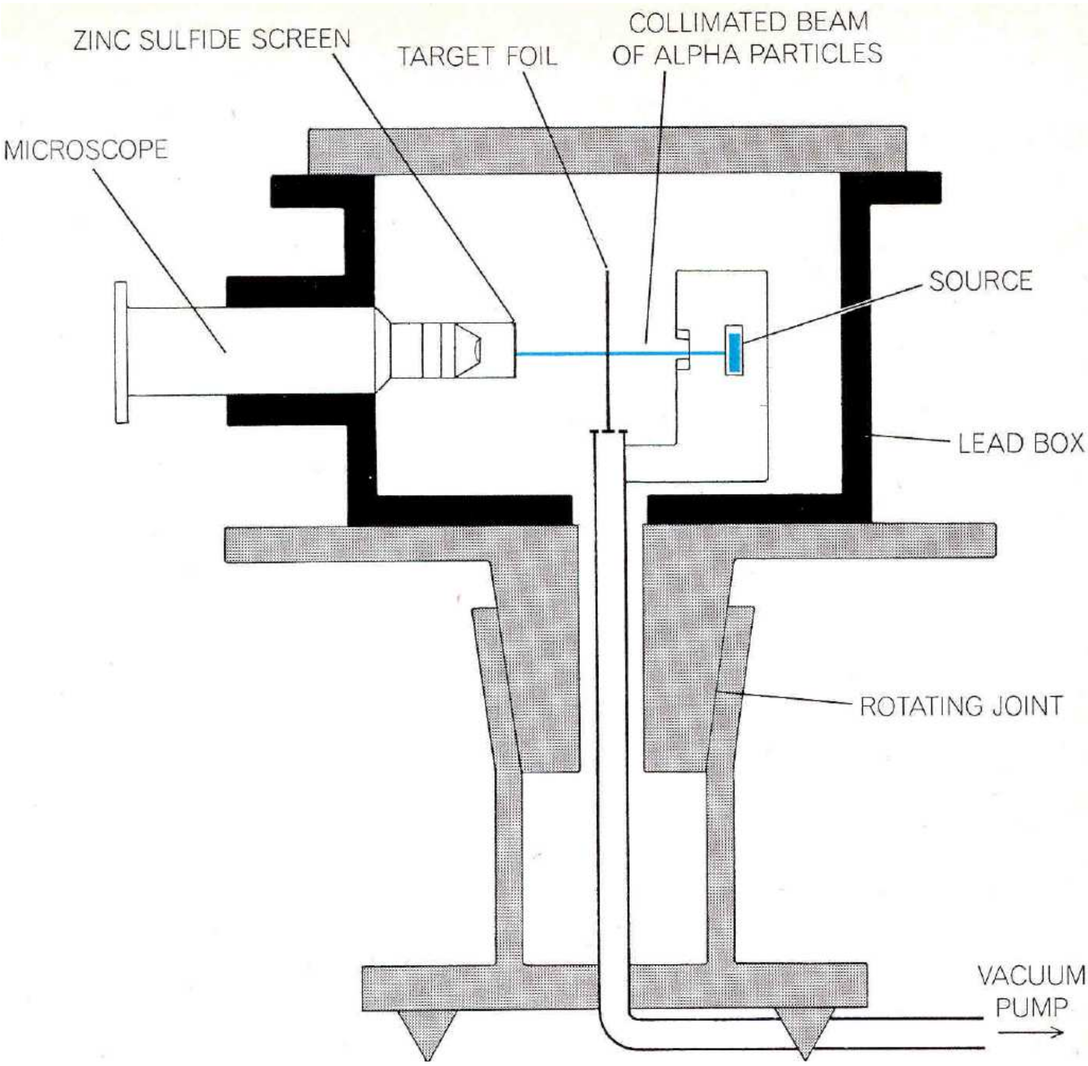
$$\frac{d\sigma}{d(q^2)} \propto \frac{1}{q^4}$$

Ernest Rutherford (1871 – 1937)

„All science is either physics or stamp-collecting“

(Nobelpreis für Chemie 1908)

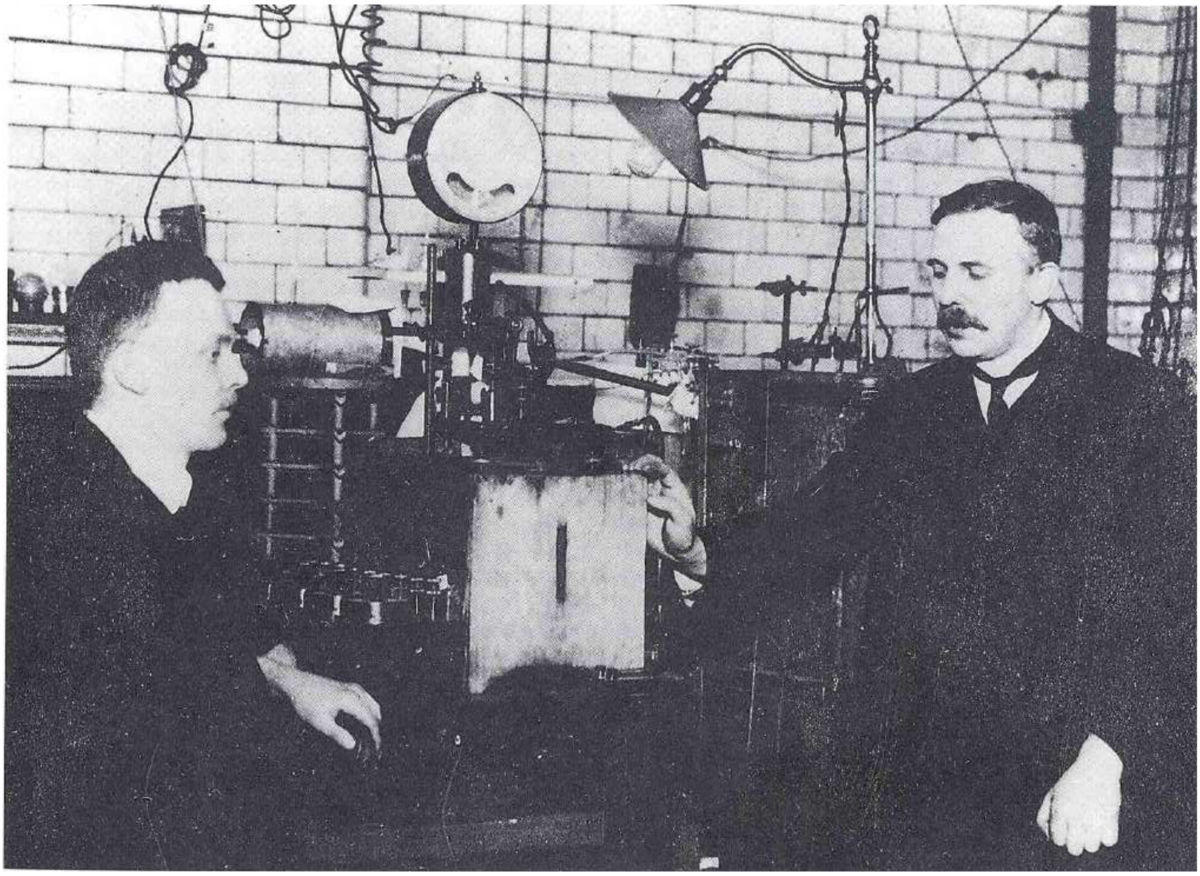
Das Rutherford-Experiment



Die Apparatur zur Untersuchung von α-Streuung an Goldfolien

($E_\alpha \simeq 0,005$ GeV)

Das Datenerfassungssystem



Hans Geiger and Ernest Rutherford
zählen α-Teilchen in Manchester

„Geiger and Marsden found, for example, that a small fraction of the α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° ...“

E. Rutherford, Phil. Mag. Vol. xxi (1911) 669

Eine Entdeckung im Inneren !

„It seems certain that these large deviations of the α particle are produced by a single atomic encounter.“

„A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.“

– E. Rutherford (1911)

„It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.“

– Mitschrift einer der letzten Vorlesungen

Das Atommodell von Niels Bohr (1913)

Das Atom ist leer!

Der Bohr'sche Radius

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{e^2\, m_e} \simeq 50.000 \text{ fm}$$

Vom Atom zum Proton

Elastische Elektron-Proton-Streuung

$$e + p \to e + p \quad (E_e = 0.2 \text{ GeV})$$

Robert Hofstadter, Stanford (1953)

Nobelpreis für Physik 1961

$$\boxed{\frac{d\sigma}{dq^2} \propto \frac{1}{q^4} F(q)}$$

<u>Befund</u>

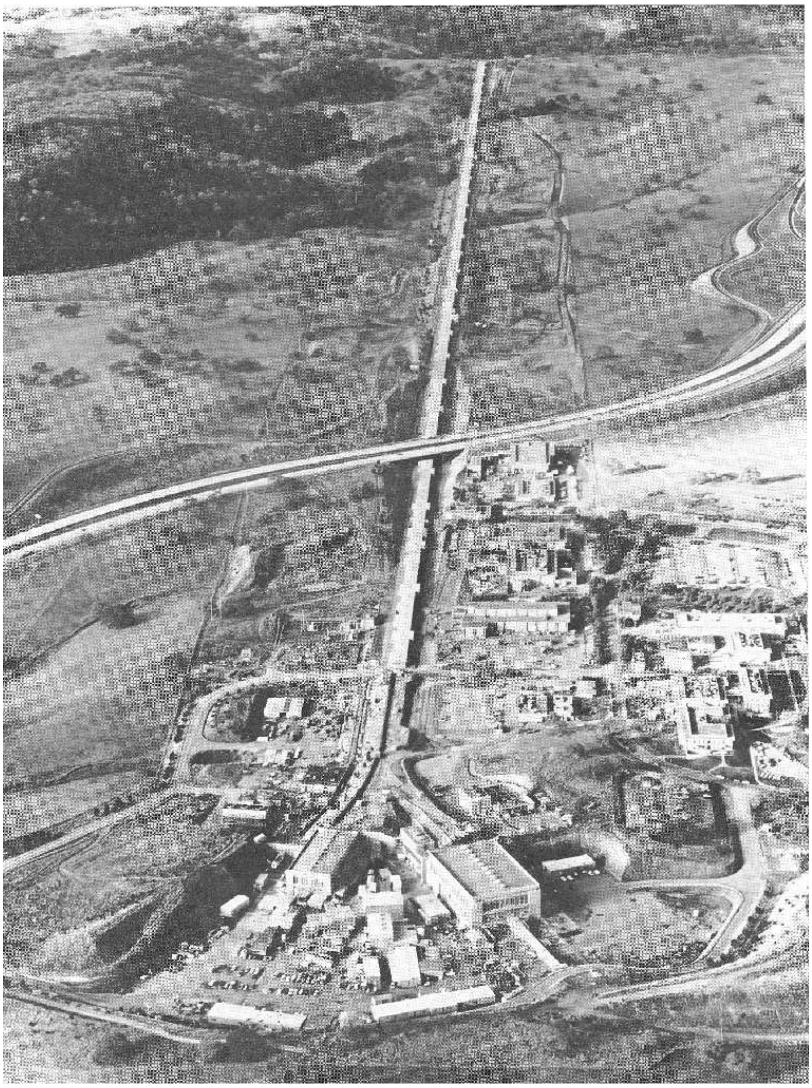
Der Formfaktor $F(q)$ fällt mit q steil ab

$\left(\text{„Dipol-Formfaktor“: } F(q) \propto \frac{1}{(m^2-q^2)^2} \right)$

Die Ladung des Protons
hat eine endliche Ausdehnung !

$\Rightarrow$ Protonradius: $R_p = 0.8$ fm

Der Linear-Beschleuniger am Stanford Linear Accelerator Laboratory

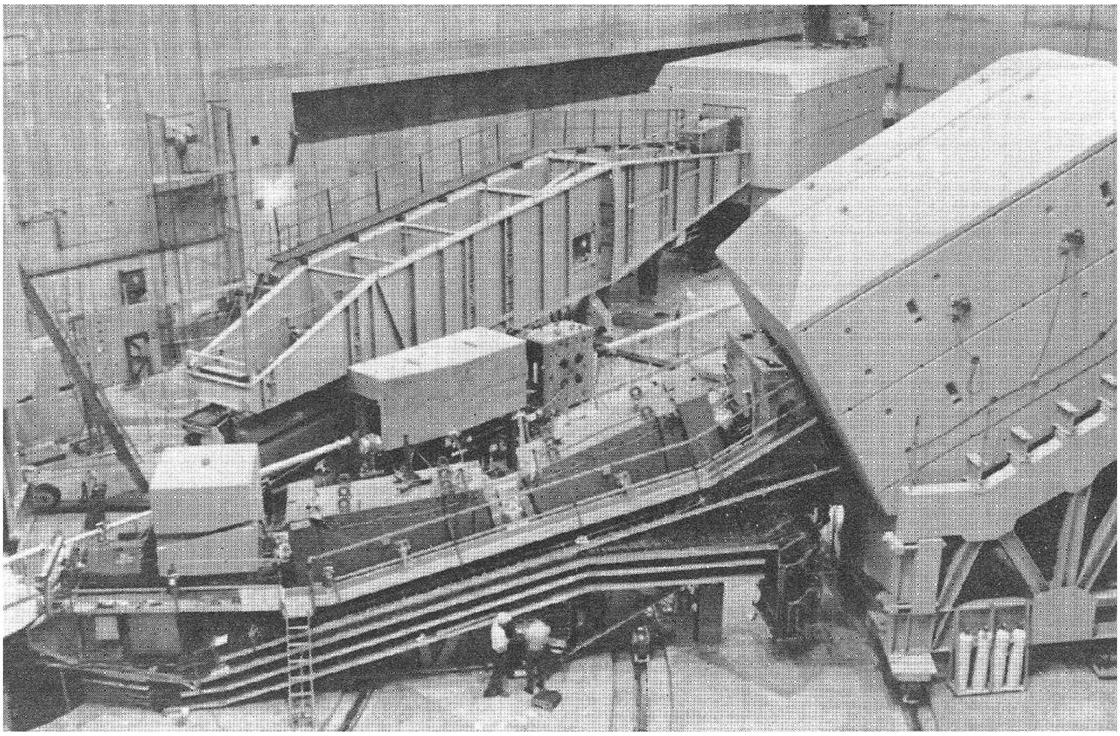


Der 2-Meilen-lange Elektronen-Beschleuniger

Inbetriebnahme: 1967

$$E_e = 20 \text{ GeV}$$

Die Spektrometer



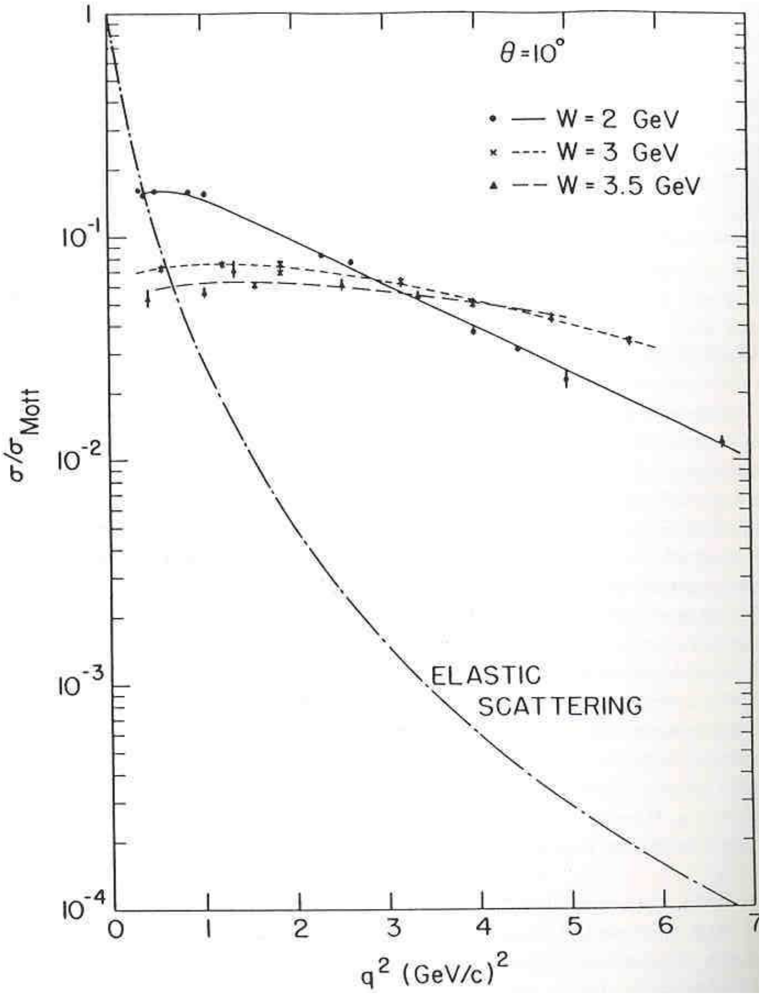
Zwei Spektrometer in End-Station A

Tiefinelastische Elektronstreuung

$$e + p \rightarrow e + X$$

Eine „inklusive“ Reaktion: $\dfrac{d\sigma}{dq^2} \propto \dfrac{1}{q^4}\, F(q,x)$

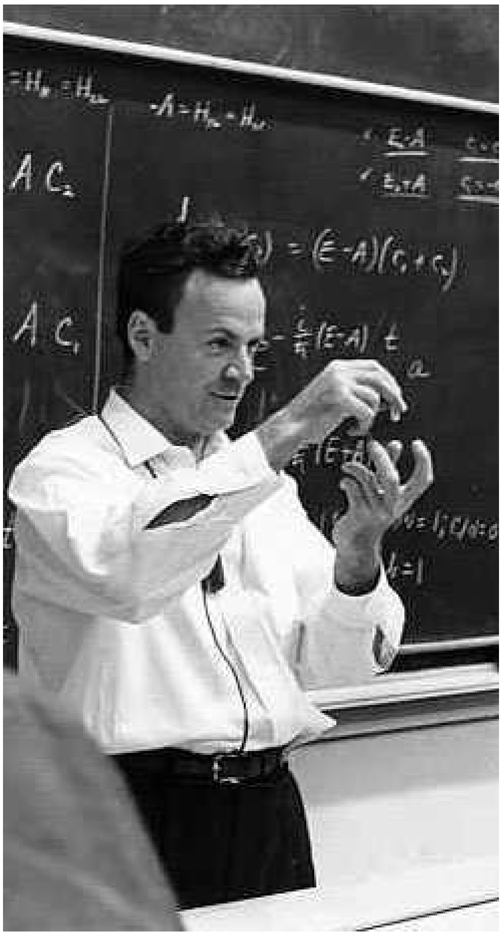
“Before these results were obtained it had been assumed that the inelastic-continuum cross sections would decrease as rapidly as the elastic cross sections when the momentum transfer was raised.” –Kendall und Panofsky, Sci. Am., Vol. 224 (1971)



$F(q,x)$ *weitgehend unabhängig von q* **!**

Richard Feynman (1918–1988)

Nobelpreis für Physik 1965



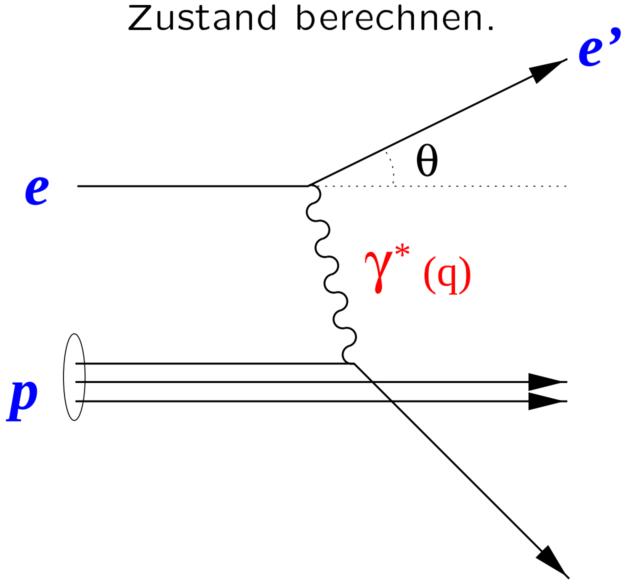
„In order to calculate correctly the probability of an event, we have to consider every way that the event could happen, not just the ways we think are the important ones!"

– QED: The Strange Theory of Matter and Light (1985)

Virtuelle Zwischenzustände

Die Rechenmethode von Feynman (1947)

Physikalische Prozesse lassen sich als Summen über alle möglichen Quantenfluktuationen im ausgetauschten Zustand berechnen.



Das negative Massenquadrat des virtuellen Photons ($-q^2$) nennt man dessen „Virtualität“ (Q^2).

Der Transversalimpuls des gestreuten Elektrons ist ein direktes Maß dieser Virtualität: $Q^2 = 4E_eE_{e'}\sin^2\theta/2$.

$$\boxed{\frac{d\sigma}{dQ^2} \propto \frac{1}{Q^4}\,F(Q^2,x)}$$

J.D. Bjorken (1967)

Für skalenfreie Streuprozesse darf $F(Q^2, x)$ von der einheitsbehafteten Variable Q^2 *nicht abhängen*.

R. Feynman (1968)

Die beobachtete Skalenfreiheit lässt die Deutung der tiefinelastischen Streuung als Überlagerung *unabhängiger elastischer Streuungen an freien Konstituenten* zu!

Die Quantenchromodynamik

Die starke Wechselwirkung, lässt sich durch eine Quantenfeldtheorie wie die elektromagnetische Kraft beschreiben, wobei die elektrische Ladung durch die Farbladung ersetzt wird.

– H.D. Gross und F. Wilczek, D.J. Politzer (1973)

„Asymptotische Freiheit“

Die Stärke der Wechselwirkung *steigt* mit Abstand !

☞ Bjorken'sches Skalenverhalten

☞ Bindungszustände sind „farbneutral“

☞ Die Streuung von Farbladungen unter hohem Transversalimpuls wird mit String-Fragmentations-Effekten begleitet

Der Elektron-Proton-Speicherring HERA am DESY in Hamburg

Der erste ep-Kollider

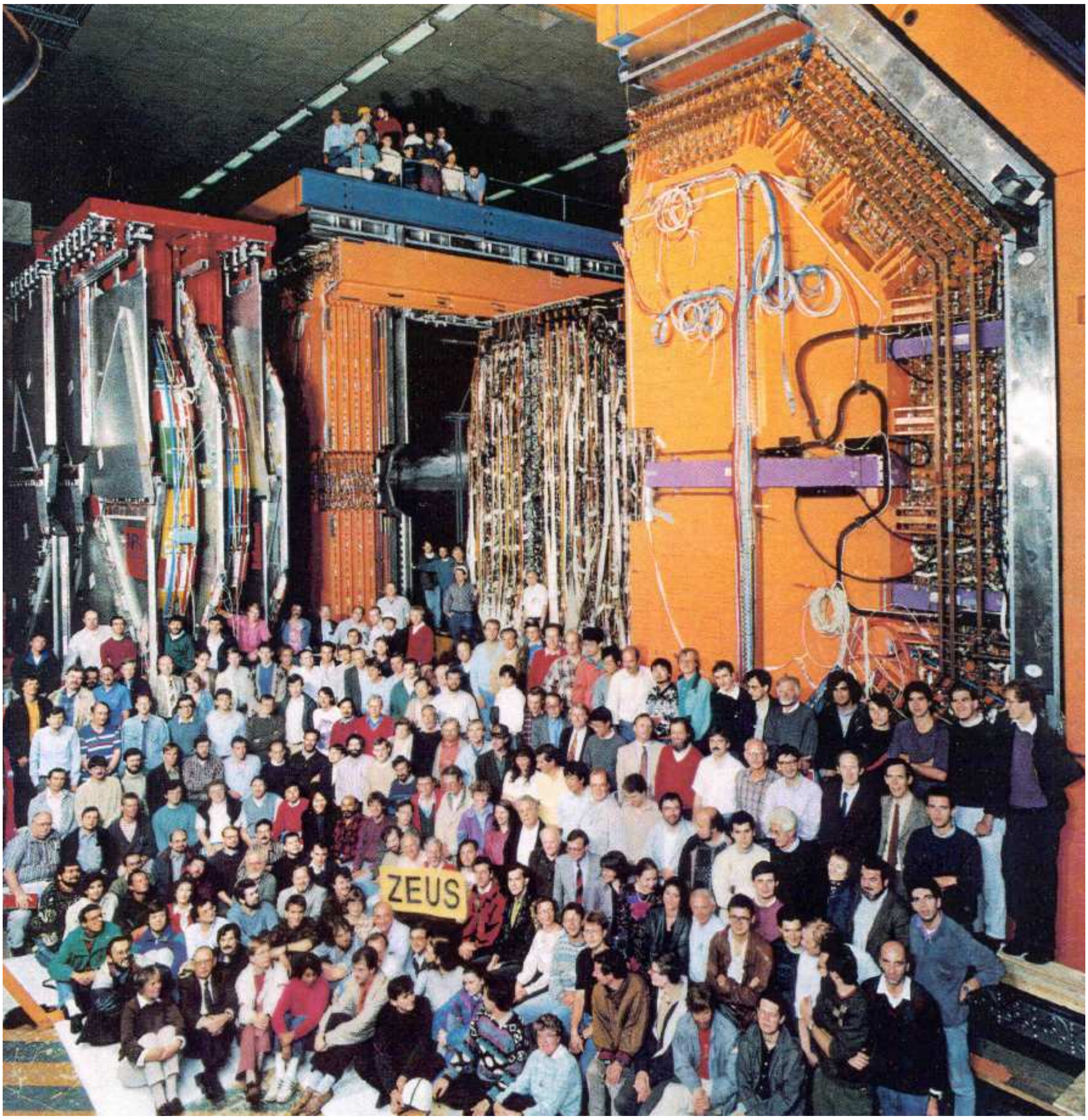
Protonenergie: 920 GeV   Elektronenergie: 27.5 GeV

Gesamtenergie im Schwerpunkt: 318 GeV

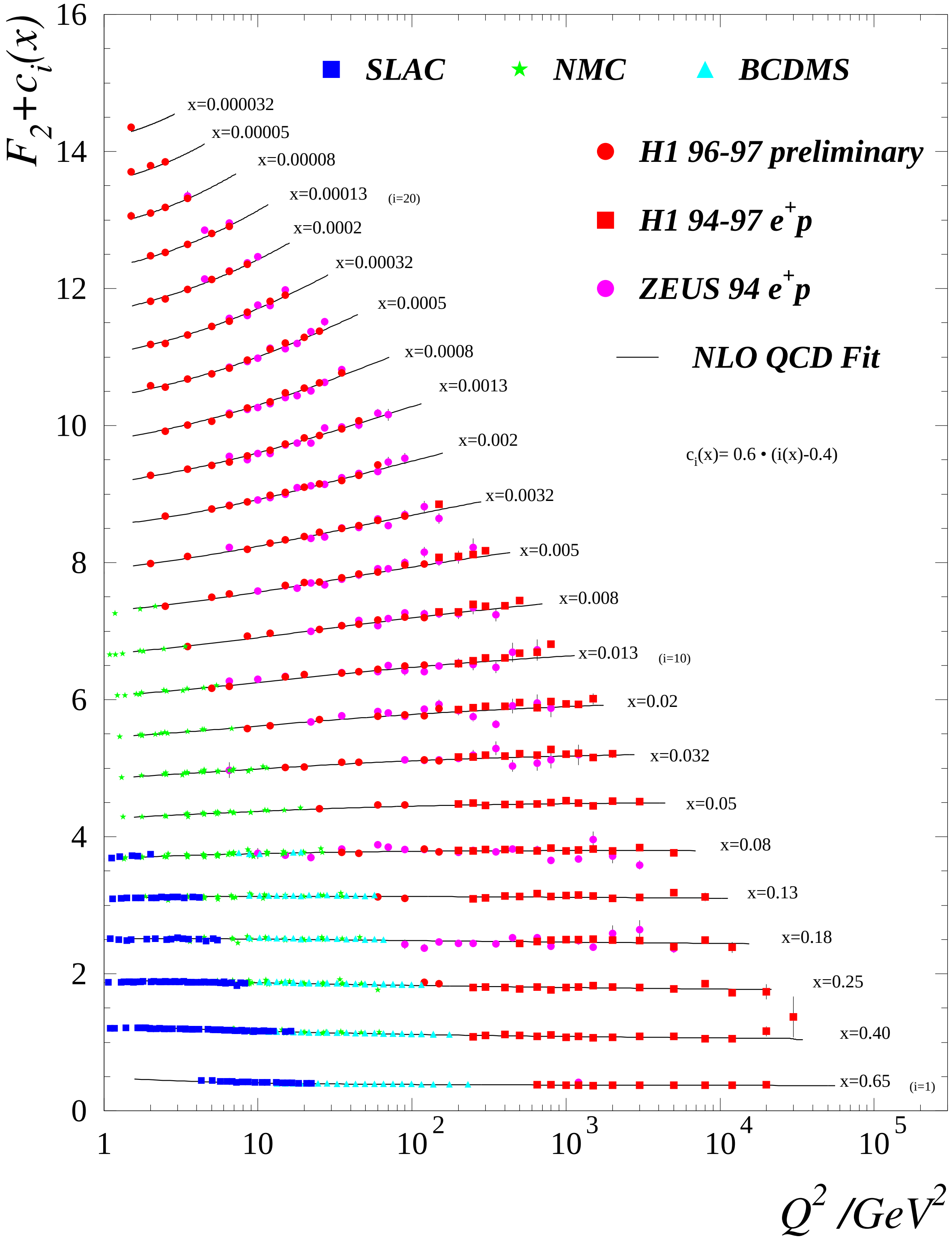
Elektronenergie im Proton-Ruhesystem: 54.000 GeV

In Betrieb seit 1992

Das ZEUS-Experiment



Aktueller Stand der Messungen von $F(Q^2, x)$ bei HERA



$\Rightarrow$ Auflösung verbessert um Faktor 30 !!

Lebensdauer von Quantenfluktuationen und Vektor-Meson-Photoproduktion

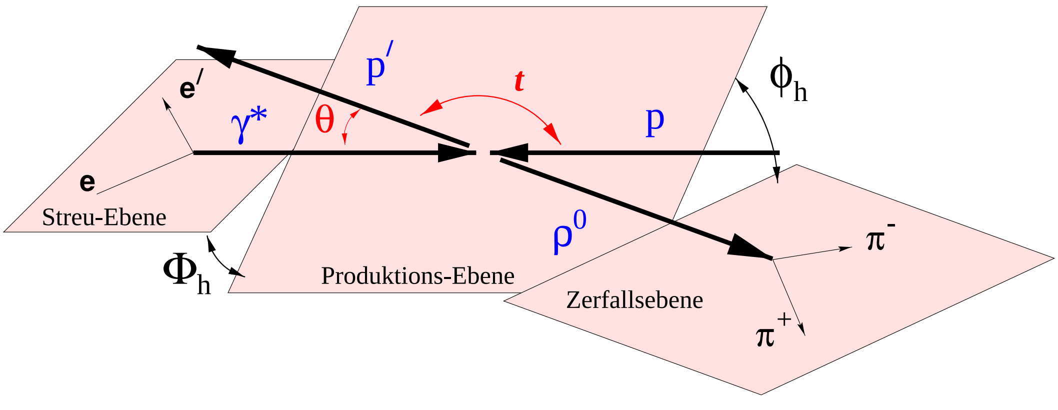
Der Elektronstrahl bei HERA liefert einen hohen Fluss von Photonen niedriger Virtualität (quasi-reelle Photonen). Diese können ebenso in Vektor-Mesonen fluktuieren, die mit dem Proton stark wechselwirken. Die Lebensdauer der virtuellen Vektormesonen lässt sich anhand der Unschärferelation berechnen.

(M. Erdmann, STMP Vol. 138 (1997))

$$\boxed{\Delta t \geq \frac{\hbar}{\Delta E}}$$

Die besondere Kinematik von HERA führt dazu, dass die Fluktuationszeiten von quasi-reelle Photonen ($Q^2 \leq 10^{-2}$ GeV^2) und Vektormesonen (Quark-Anti-Quark-Bindungszustände) bei sehr hohem Transversalimpuls ($t \leq 10$ GeV^2) viel länger sind, als die Wechselwirkungsdauer mit dem Proton in dessen Ruhesystem.

$$\gamma + p \rightarrow \rho^0 + p'$$

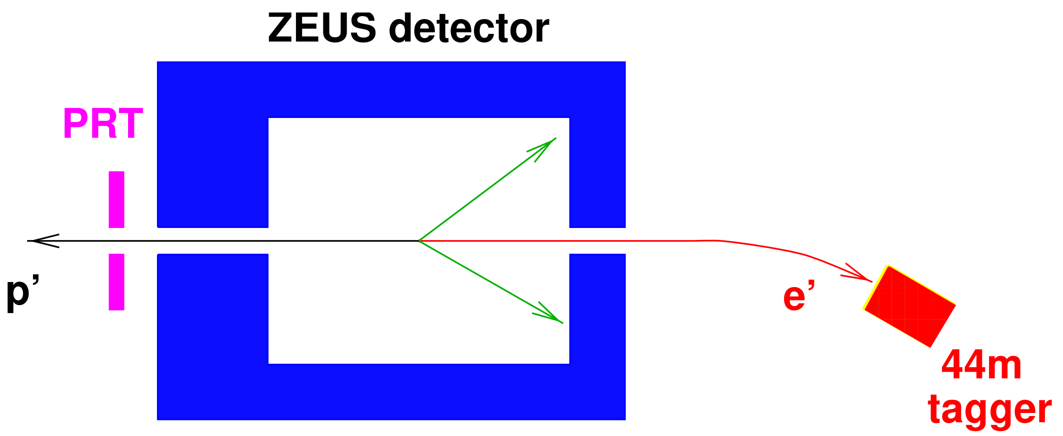


Impulstransfer $t = -P_{\text{cm}}^2 \sin^2 \theta/2$

Experimenteller Trick,
um ρ^0-Photoproduktion
bei sehr hohem Impulstransfer
zu messen

$$\gamma + p \rightarrow \rho^0 + N$$

Strahloptikmagnete werden verwendet, um Kleinwinkel-Elektronen verminderter Energie aus dem Ring hinauszulenken



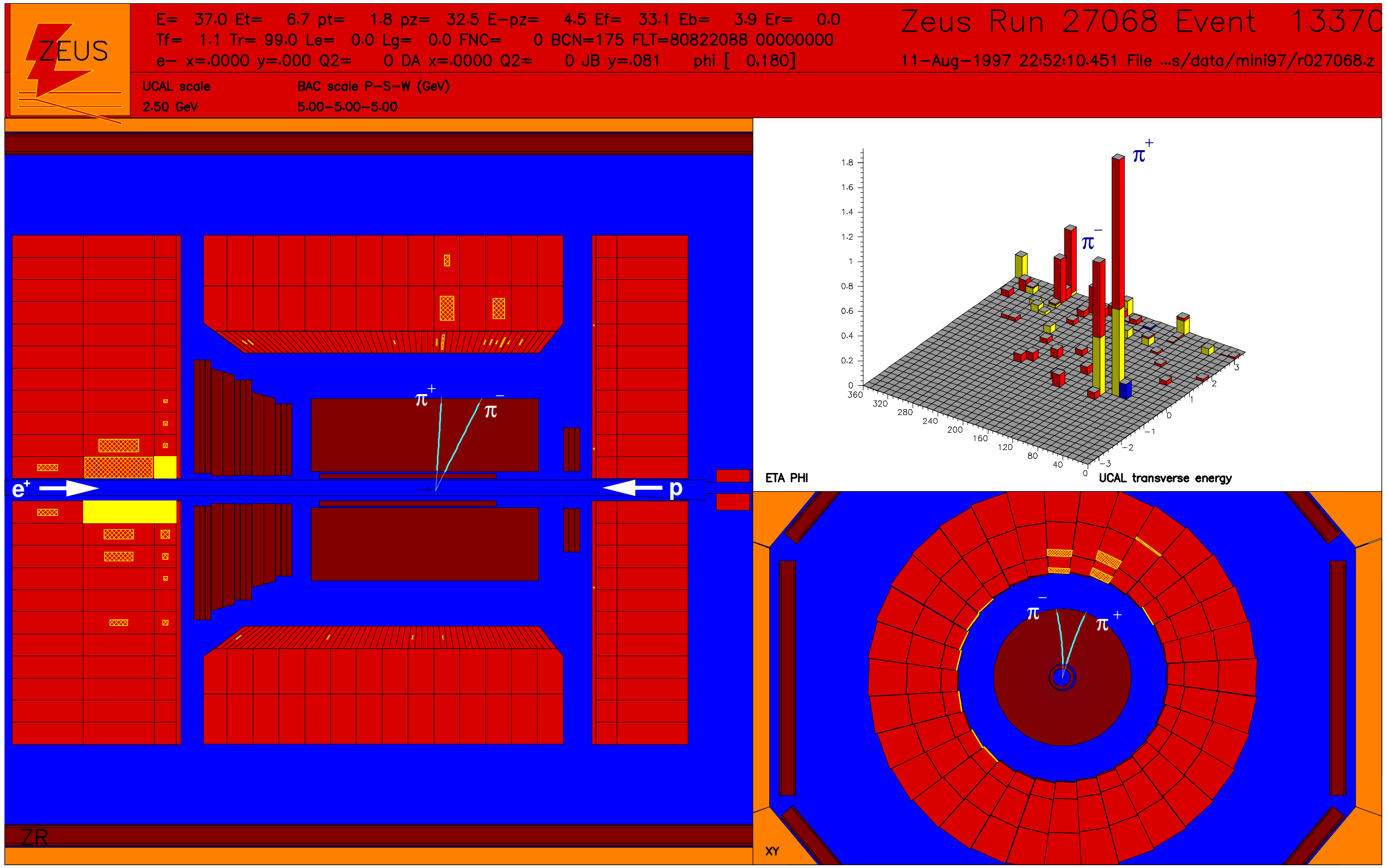
Quasi-reelle Photonen: $Q^2 < 0.01$ GeV^2

Akzeptanz des Taggers

$22 < E_{e'} < 25$ GeV

$\Rightarrow \gamma p$-Schwerpunkstenergie $\simeq 100$ GeV

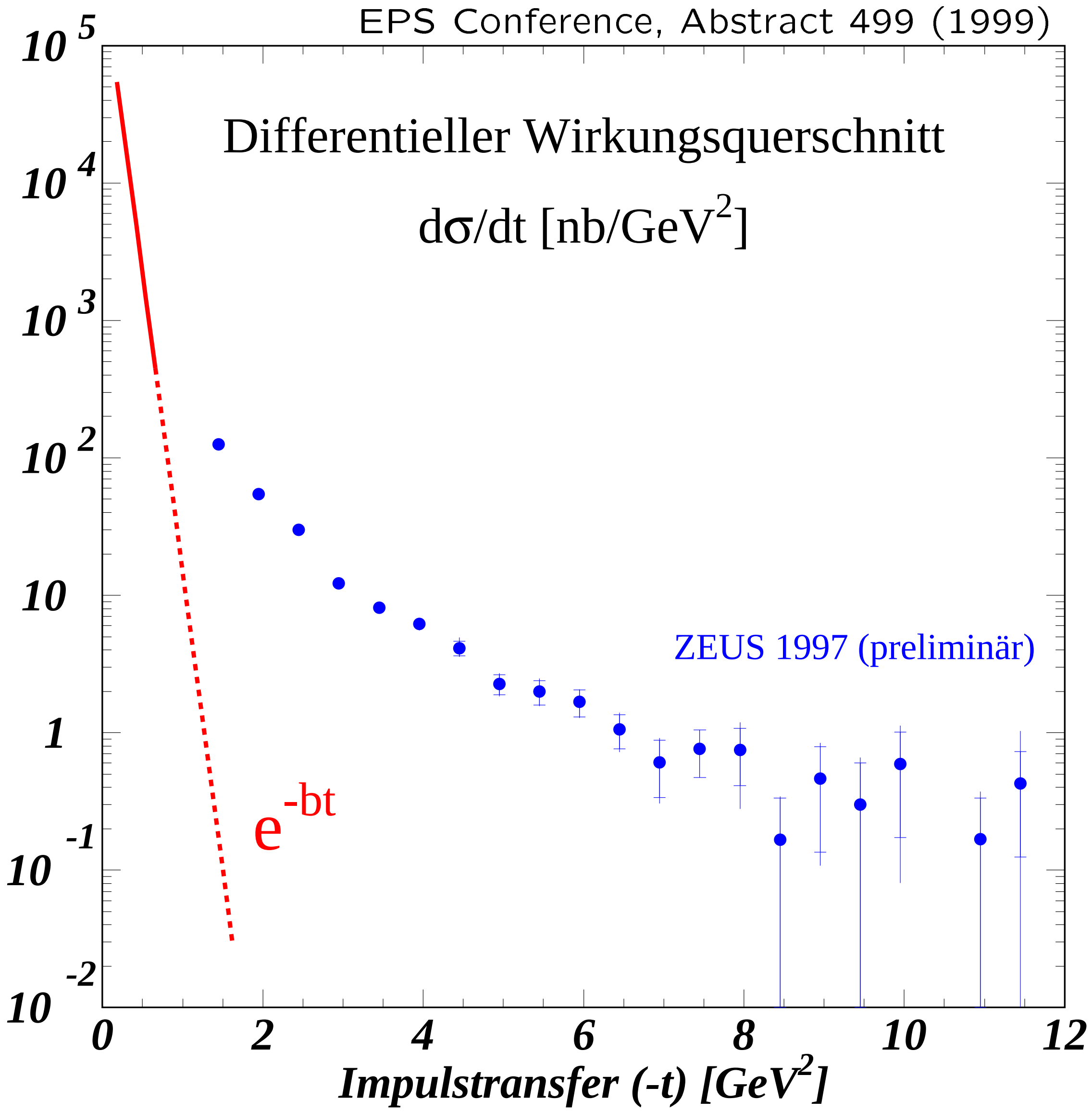
Kandidatereignis für diffraktive ρ^0 Photoproduktion bei hohem $|t|$



$e^+p \to e^+N\,\rho^0 \to e^+N\,\pi^+\pi^-$ $\qquad$ $M_{\pi^+\pi^-} = 0.78$ GeV, $t = -10.0$ GeV^2, $W = 81$ GeV

Diffraktive ρ^0-Photoproduktion (I)

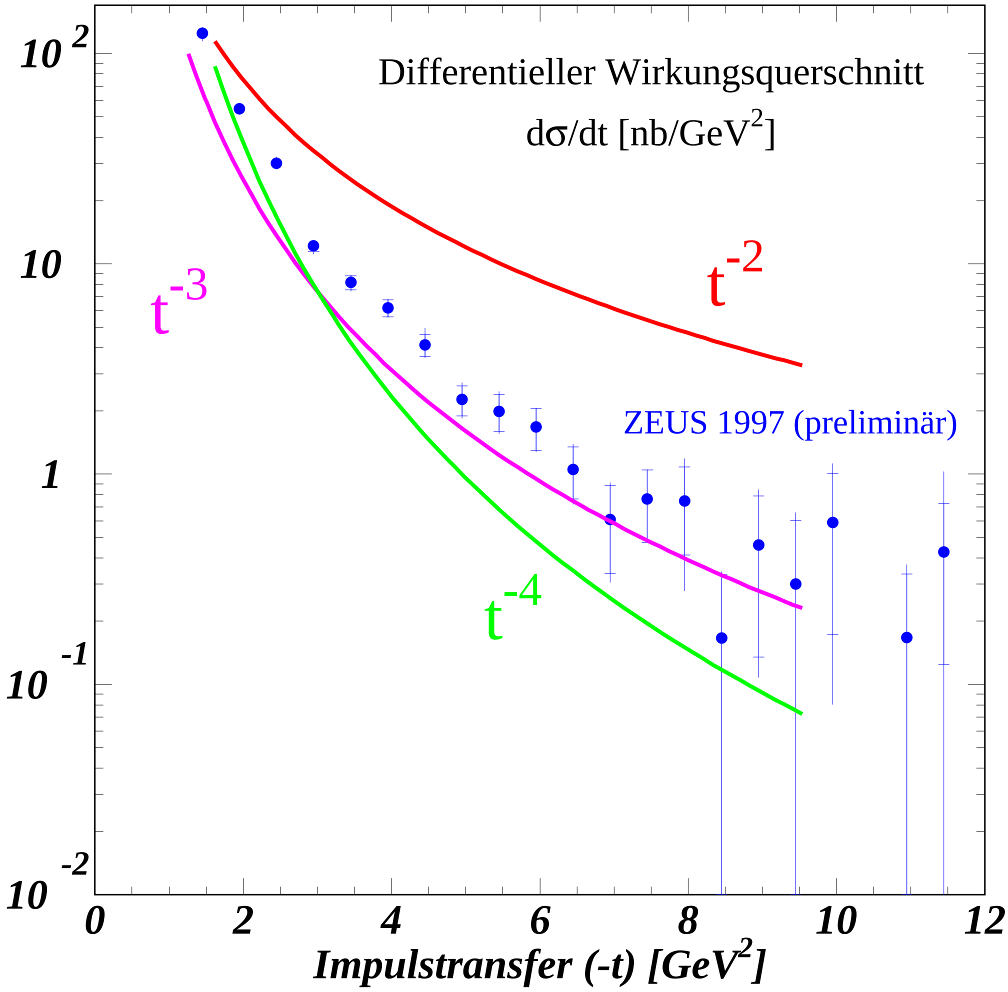
$$\gamma + p \rightarrow \rho^0 + N$$



Rutherford: „... a single hard scatter ...“

Diffraktive ρ^0-Photoproduktion (II)

$$\gamma + p \rightarrow \rho^0 + N$$



$$\boxed{\frac{d\sigma}{dt} \propto \frac{1}{t^2} F(t), \qquad F(t) \propto \frac{1}{t}}$$

<u>Spekulative Frage</u>

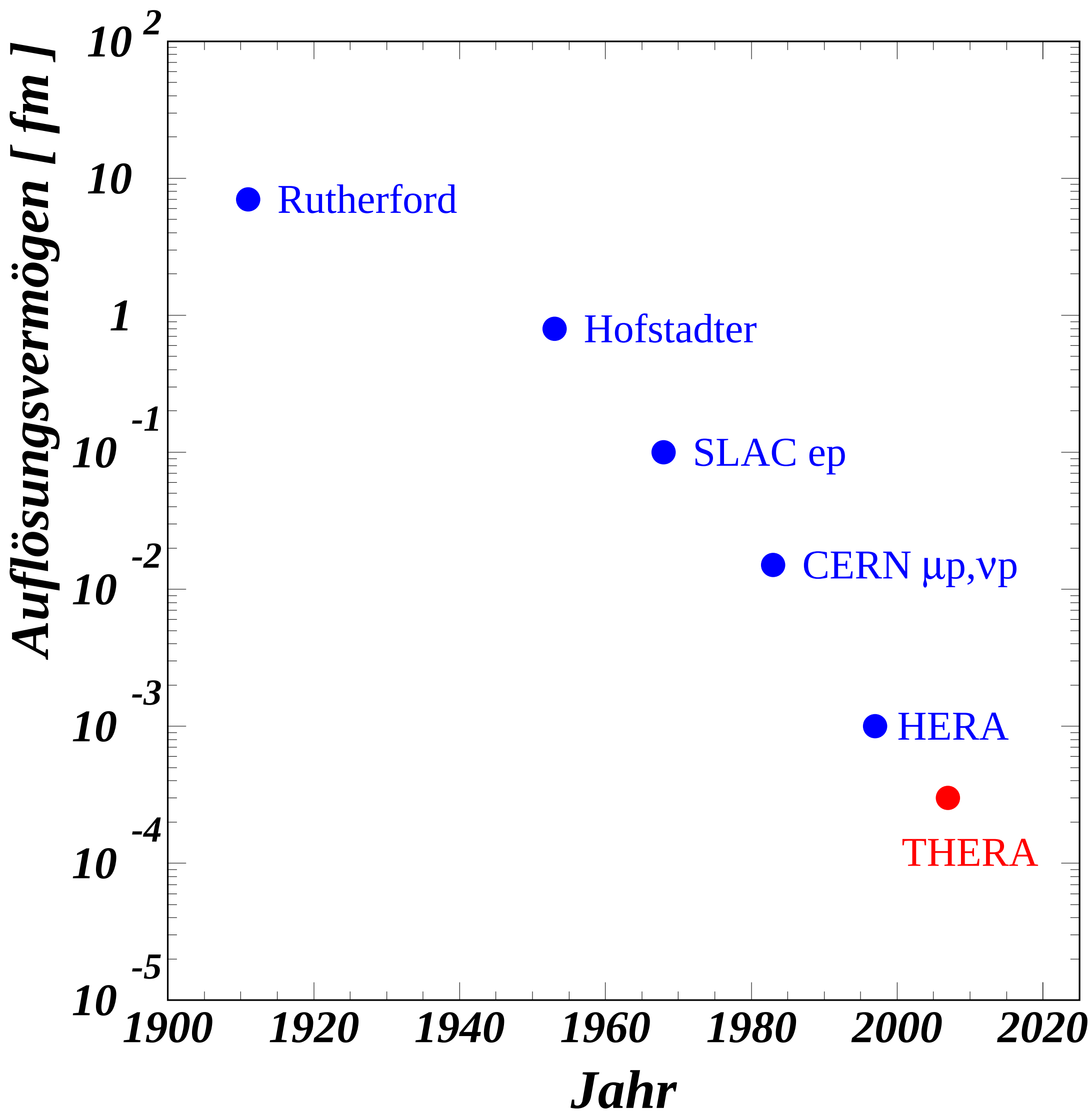
Gibt es ein kleines, farbloses Streuzentrum im Proton?

Das THERA-Projekt

(http://www.ifh.de/thera)

TESLA (e) + HERA (p)

	HERA	THERA
E_e	27.5 GeV	400 GeV
E_p	920 GeV	920 GeV
E_{cm}	318 GeV	1210 GeV



Die nächste Definition von „elementar“!

Brodsky-Lepage über exklusive Prozesse

SLAC-PUB-2294
March 1979
(T/E)

EXCLUSIVE PROCESSES AND THE EXCLUSIVE-INCLUSIVE CONNECTION
IN QUANTUM CHROMODYNAMICS

Stanley J. Brodsky*
Stanford Linear Accelerator Center
Stanford University, Stanford, California 94305

and

G. Peter Lepage**
Laboratory of Nuclear Studies
Cornell University, Ithaca, New York 14853

PR article 1980

1. Introduction

Although the structure of large momentum transfer inclusive reactions is now well understood in perturbative quantum chromodynamics, exclusive processes involving large transfer of momentum have received relatively little attention since they involve detailed, explicit features of hadronic wavefunctions. On the other hand, the dimensional counting[1,2] ansatz, which is based on the premise that the high momentum tail of wavefunctions can be computed from the first iteration of a scale-invariant Bethe-Salpeter kernel, leads to a number of successful predictions for form factors, hadron scattering and photoproduction at large angles, as well as the $x \to 1$ dependence of the structure functions.

In brief, the dimensional counting rules are:

(a) (Spin-averaged) form factors at $|t| >> M^2$ (Fig. 1a)

$$F_H(t) \sim \frac{1}{t^{n-1}} \qquad (1.1)$$

where n = number of constituent fields in H.

(b) Large angle scattering at $s >> M^2$, t/s fixed (Fig. 1b)

$$\frac{d\sigma}{dt}(AB \to CD) \sim \frac{1}{s^{n-2}} f(t/s) \qquad (1.2)$$

where n = total number of constituent fields in A,B,C and D.

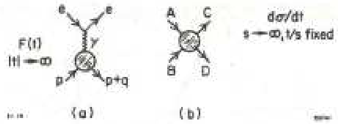


Fig. 1. Hadronic form factors and fixed angle exclusive scattering.

(c) Structure functions at $Q^2 >> M^2$, $\mathcal{M}^2 = \frac{1-x}{x} Q^2$ fixed:

$$F_{2H}(x,Q^2) \sim (1-x)^{2n_s-1}$$

where n_s = number of spectator fields in H.[3]

In each case the minimum number of fields dominates the asymptotic behavior. The rules follow simply from tree graphs in any renormalizable field theory if the four-momentum of each hadron is partitioned among its constituents.[1]

A comparison of the counting rule prediction $t^{n-1}F_H(t) \to$ const. for F_π, G_{M_p}, G_{M_n}, and F_D is shown in Figs. 2 and 3.

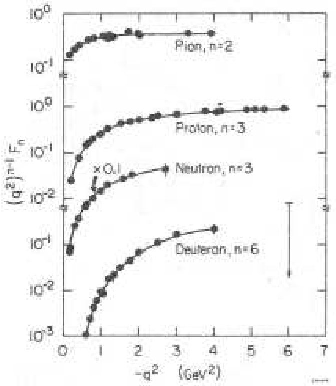


Fig. 2. Hadronic form factors multiplied by $(q^2)^{n-1}$. (From Ref. 5.)

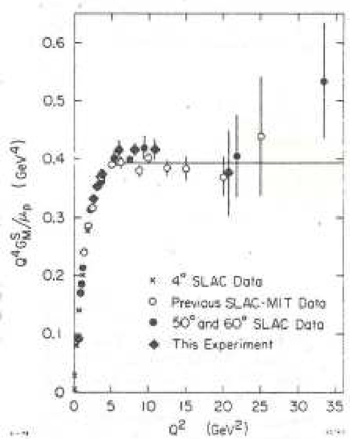


Fig. 3. The proton form factor G_M multiplied by $(Q^2)^2$. (From Ref. 6.)