

5. Vorlesung

- Zusammenfassung: Die Masse des Elektrons, was wissen wir?

- 6. Masse in der starken Wechselwirkung
 - Grundzüge der starken Wechselwirkung
 - Einführung in die Quantenchromodynamik
 - Renormierung und „laufende“ Quarkmassen
 - Beziehung zur Quantenelektrodynamik
 - Protonstruktur und Protonmasse: Motivation (Übungsaufgabe)
 - Tief inelastische Streuung bei HERA
 - Proton-Strukturfunktion und Partondichten

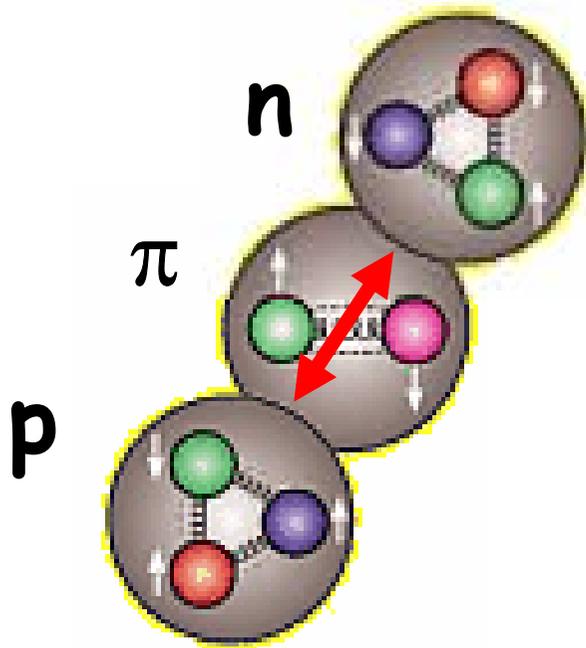
- Die Protonmasse (nächste Woche)

Starke Wechselw.: Quarks und Farbe

- starke Kraft in Kernwechselwirkungen
 - = „Austausch massiver Pionen“ zwischen Kernen
 - = residuelle Van der Waals-artige Wechselw.



Hideki Yukawa
(Nobel 1949)



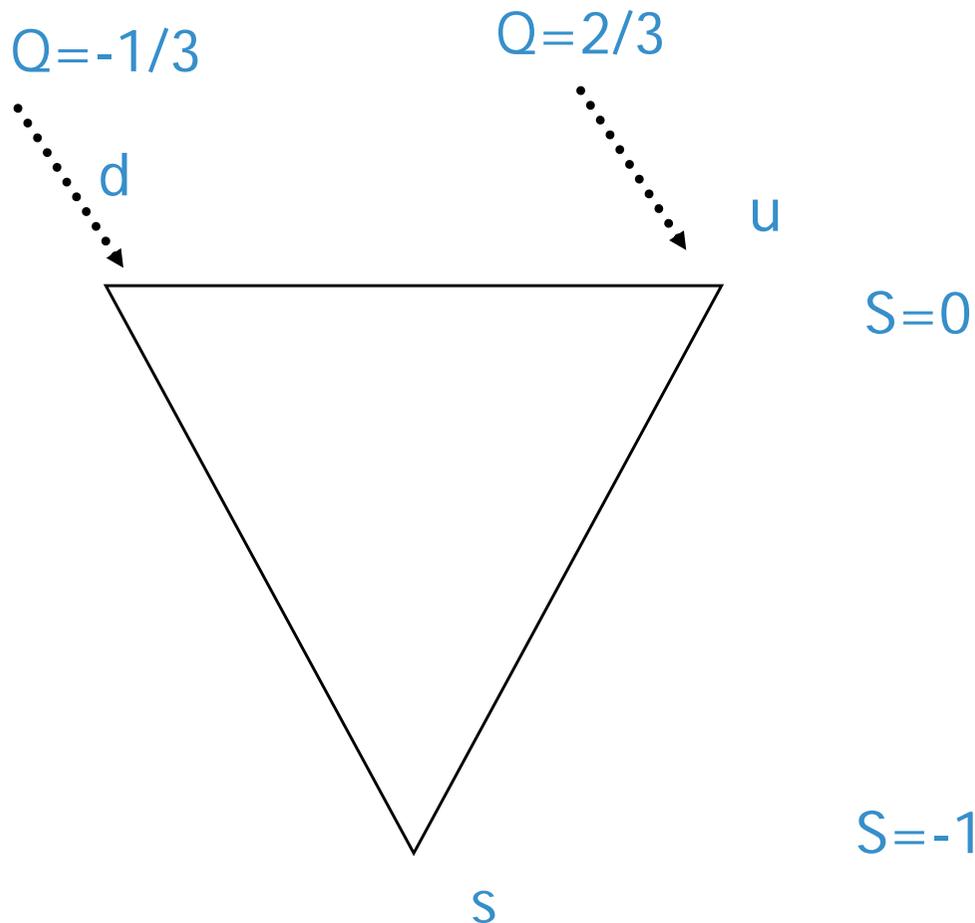
- moderne Sichtweise:
(Quanten-Chromo-Dynamik, QCD)
Austausch masseloser Gluonen
zwischen Quark-Konstituenten

„ähnlich“ zum Elektromagnetismus
(Quanten-Elektro-Dynamik, QED)

The Quark Model (1964)

arrange quarks (known at that time) into flavour-triplett

=> $SU(3)_{\text{flavour}}$ symmetry

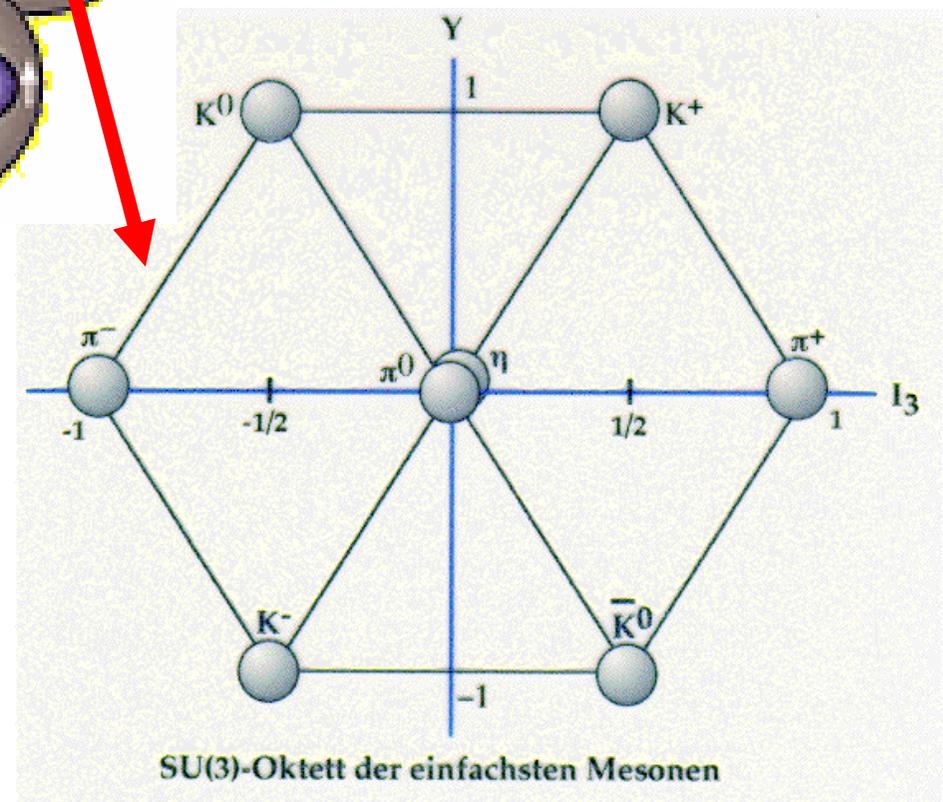
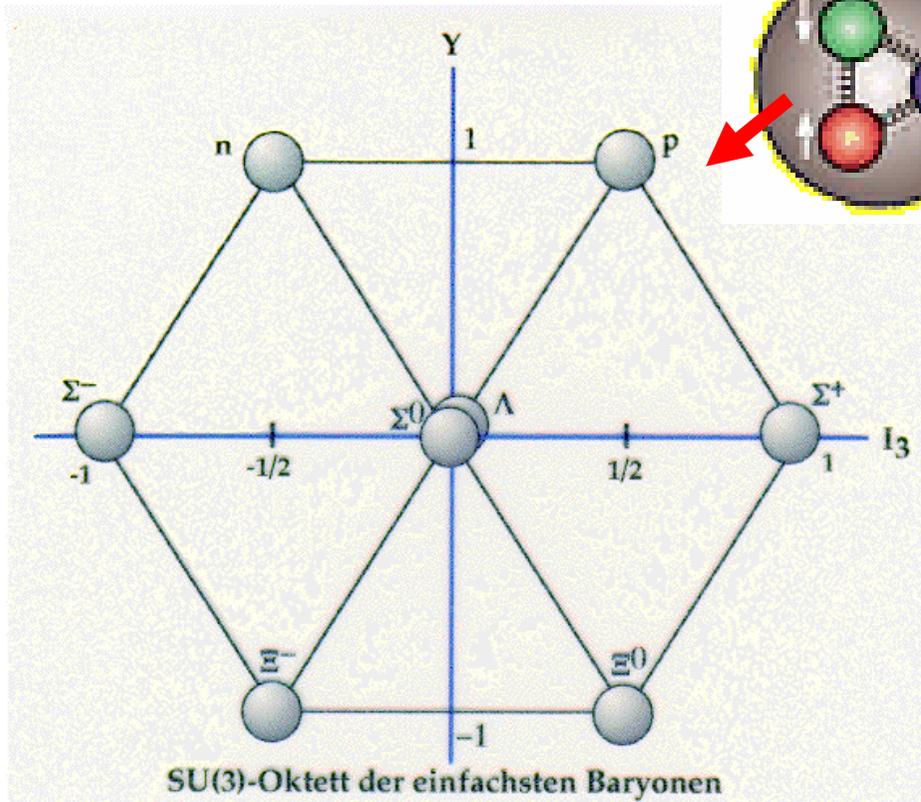
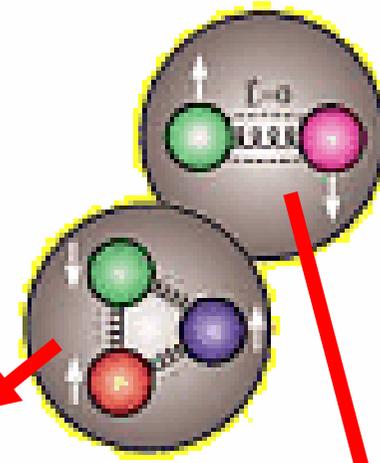


treat all known hadrons
(protons, neutrons, pions, ...)
as objects composed of
two or three such
quarks (antiquarks)

Das Quark-Modell

Baryonen = qqq

Mesonen = $q\bar{q}$

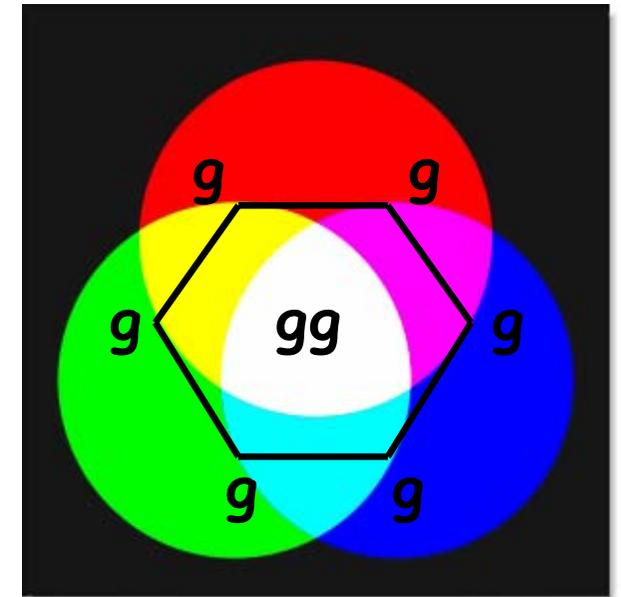
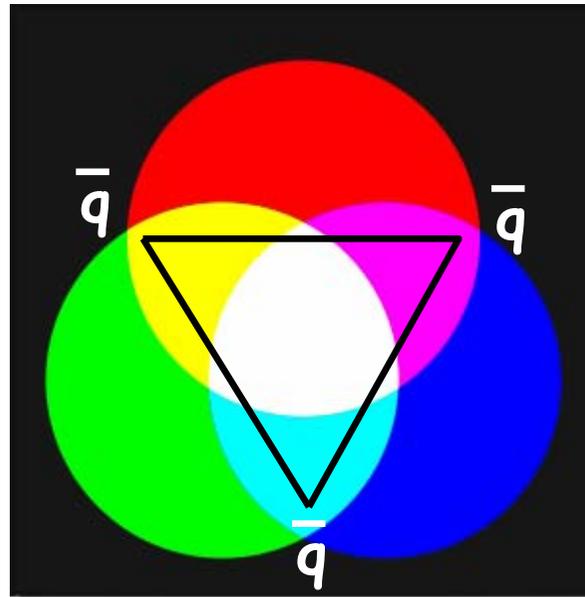
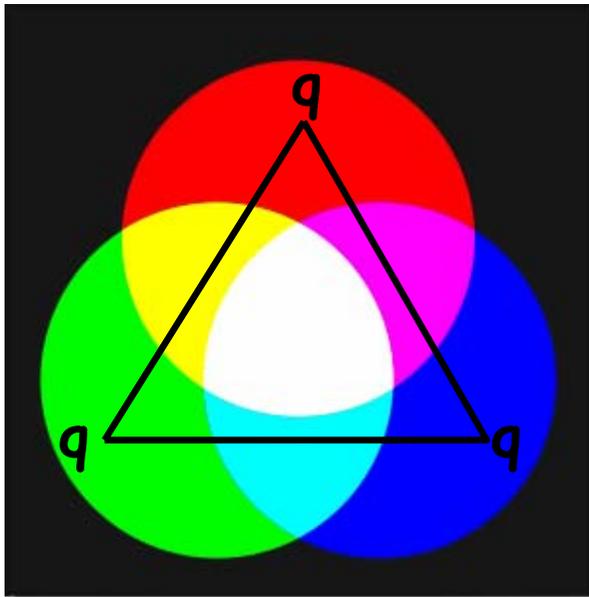


Farbe

Quark-Modell sehr erfolgreich, aber verletzt scheinbar
Quantenzahlen (Fermi-Statistik),
=> führe neuen Freiheitsgrad ein:

z.B. $|\Delta^{++}\rangle = |uuu\rangle|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$

Farbe



■ 3 Farben $\rightarrow SU(3)_{\text{colour}}$

$qqq = q\bar{q} = \text{weiss!}$

Die QCD-Lagrangedichte, (fast) wie QED

$$L_{\text{QCD}} = \underbrace{-\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu}}_{\text{Gluon-Feld-Term}} + i \underbrace{\sum_q \bar{\psi}_q^i \gamma^\mu (D_\mu)_{ij} \psi_q^j}_{\text{Quark+Wechselwirkungsterm}}$$

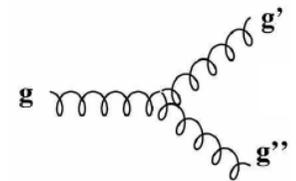
Quark-Massen-Term: $-\sum_q m_q \bar{\psi}_q^i \psi_{qi}$,

$$F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_s f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

$$(D_\mu)_{ij} = \delta_{ij} \partial_\mu + ig_s \sum_a \frac{\lambda_{i,j}^a}{2} A_\mu^a,$$

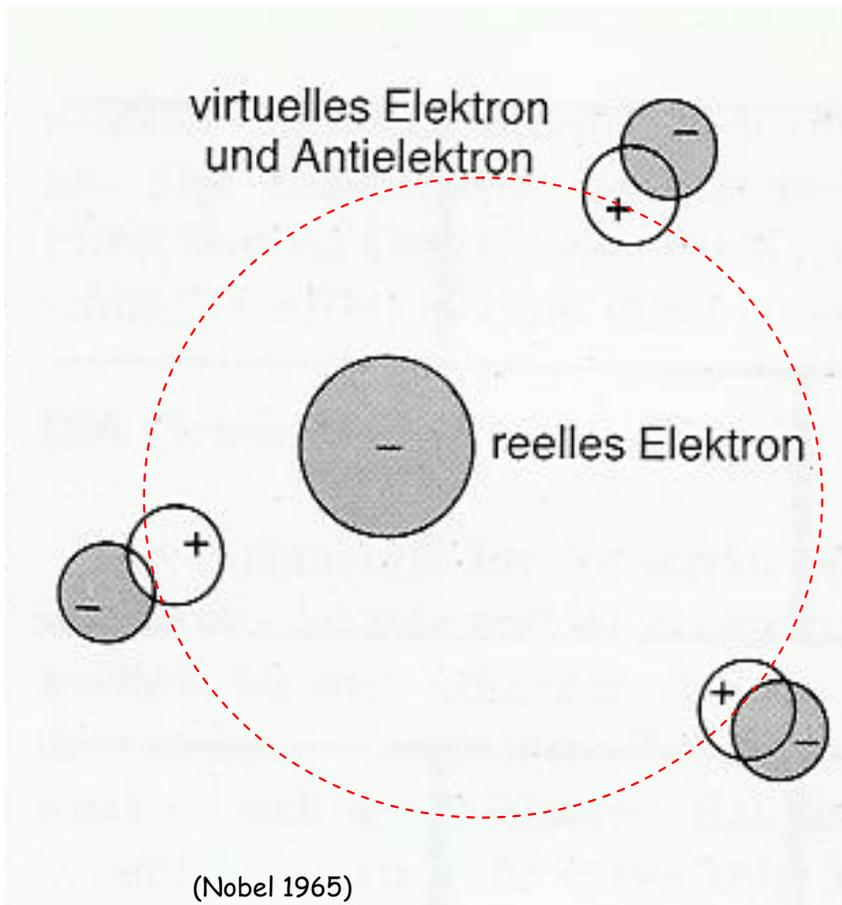
Farb-Index

Gluon-Selbstwechselwirkung!



- sieht "harmlos" aus (fast wie QED), aber hat es in sich!

Abschirmung der elektrischen Ladung



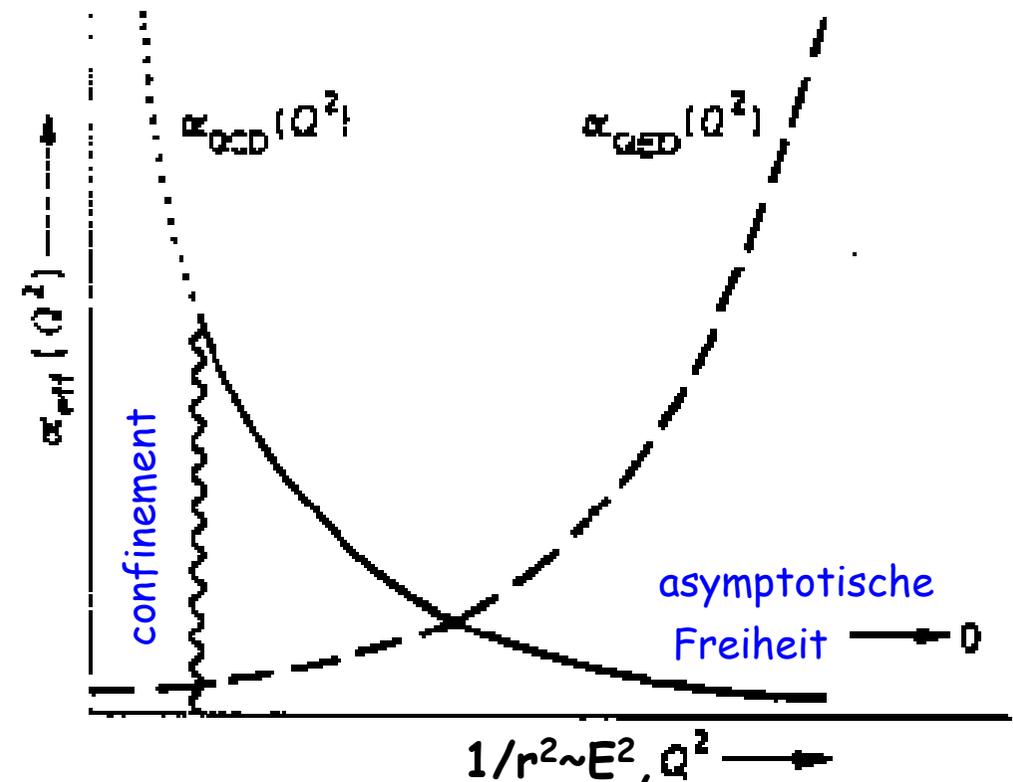
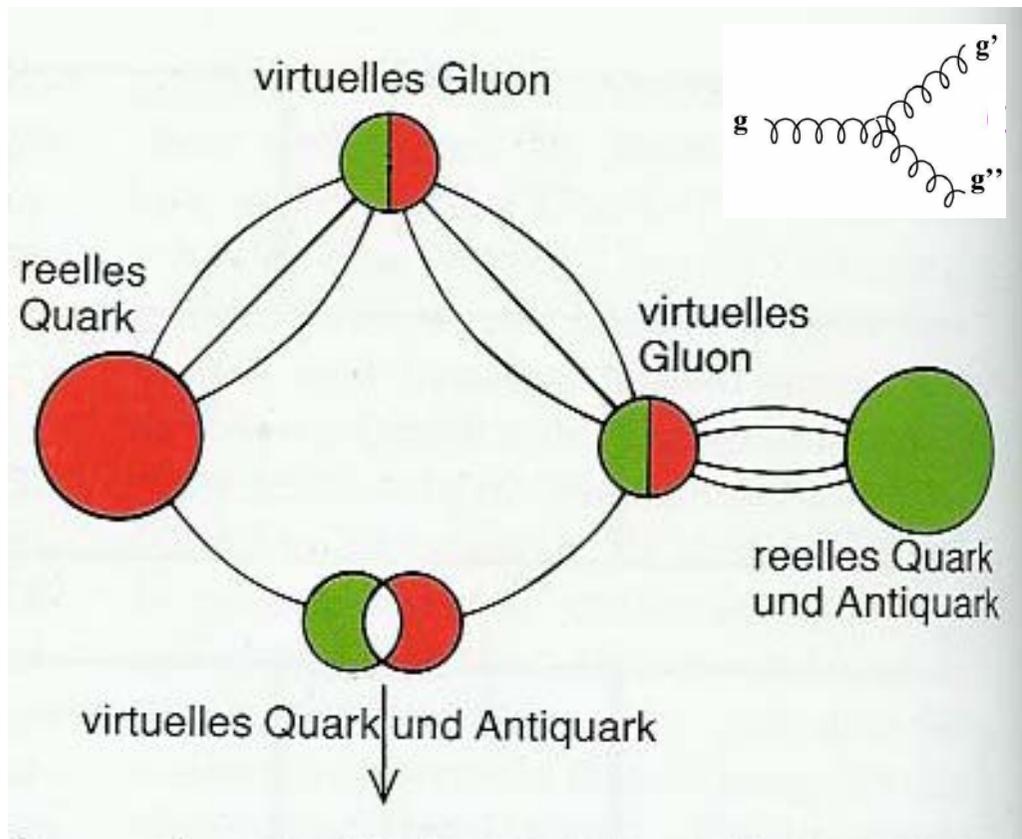
- elektrische Ladung polarisiert Vakuum \rightarrow virtuelle Elektron-Positron-Paare
- Positronen schirmen Elektron-Ladung teilweise ab
- effektive Ladung/Kraft
 - wird geringer bei großen Entfernungen/kleinen Energien (Abschirmung)
 - wird größer bei kleinen Entfernungen/großen Energien



22.5.09
Sin-Itoro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman

QCD: Anti-Abschirmung der Farbladung!

- Quark-Antiquark-Paare \rightarrow Abschirmung
- Gluonen tragen Farbe \rightarrow gg Paare \rightarrow Anti-Abschirmung!



Die laufenden Kopplungskonstanten

QED:

laufende e/m Kopplungskonstante:

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(Q_0^2)}{1 - \alpha/3\pi \ln(Q^2/Q_0^2)}$$

(siehe 3. Vorlesung)

$\alpha(0) \sim \alpha(2m_e)$ endlich

QCD:

laufende starke Kopplungskonstante:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(Q_0^2)}{1 + \alpha_s (33 - 2N_F)/12\pi \ln(Q^2/Q_0^2)}$$

N_F = Zahl der Quark-Flavour

alternativ:

laufende starke Kopplungskonstante:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{(11 - 2/3 N_F) \ln(Q^2/\Lambda^2)}$$

$\Lambda \sim 300 \text{ MeV}$
= "Energieskala,
bei der $\alpha_s \rightarrow \infty$ "



The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross

1/3 of the prize
USA

Kavli Institute for
Theoretical Physics,
University of
California
Santa Barbara, CA,
USA

b. 1941



H. David Politzer

1/3 of the prize
USA

California Institute
of Technology
(Caltech)
Pasadena, CA, USA

b. 1949



Frank Wilczek

1/3 of the prize
USA

Massachusetts
Institute of
Technology (MIT)
Cambridge, MA,
USA

b. 1951

Vergleich QED / QCD

Electromagnetismus

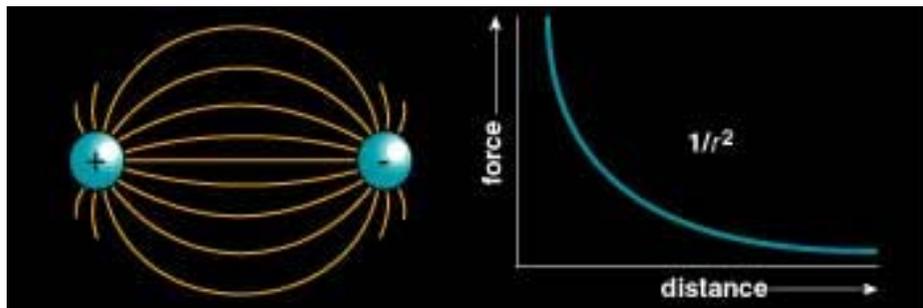
QED

1 Sorte Ladung (q)
Kraft vermittelt von **Photonen**
Photonen sind *neutral*
 α ist fast konstant

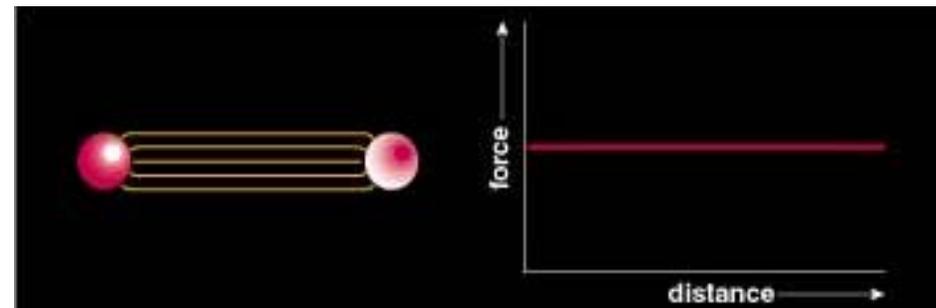
starke Wechselwirkung

QCD

3 Sorten Ladung (r, g, b)
Kraft vermittelt von **Gluonen**
Gluonen sind *geladen* (eg. rg, bb, gb)
 α_s hängt stark vom Abstand ab

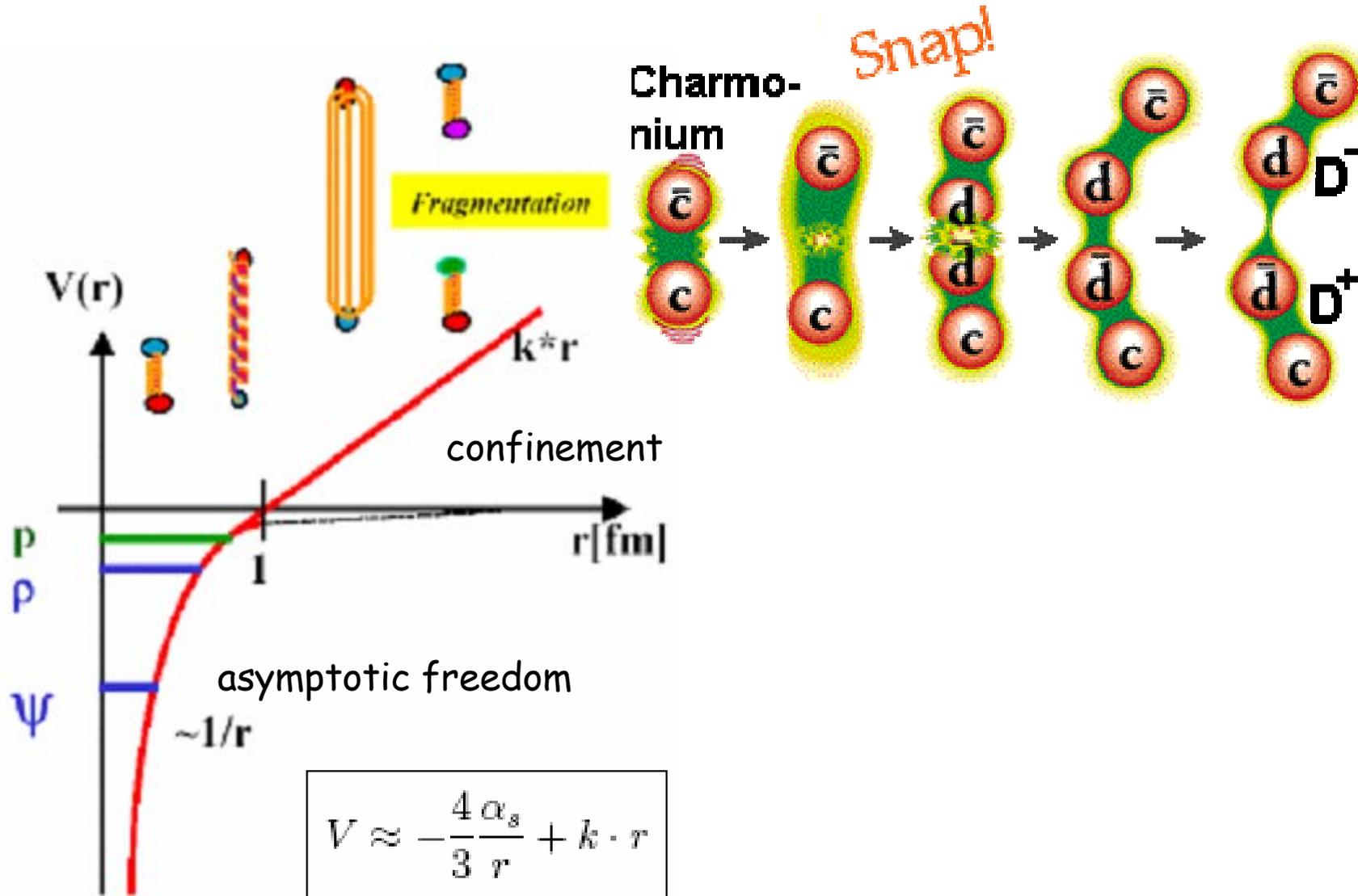


confinement-Grenzfall:



- Die zugrundeliegenden Theorien sind formal fast identisch!

The effective potential for $q\bar{q}$ interactions

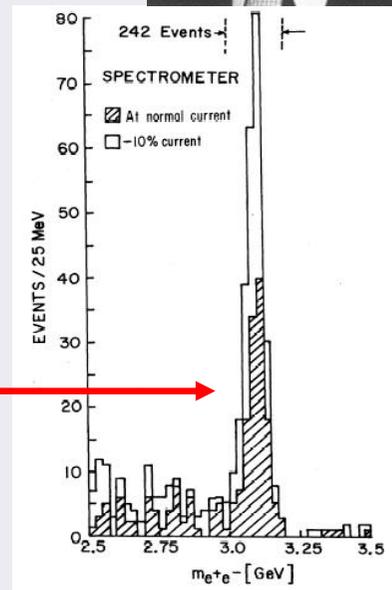
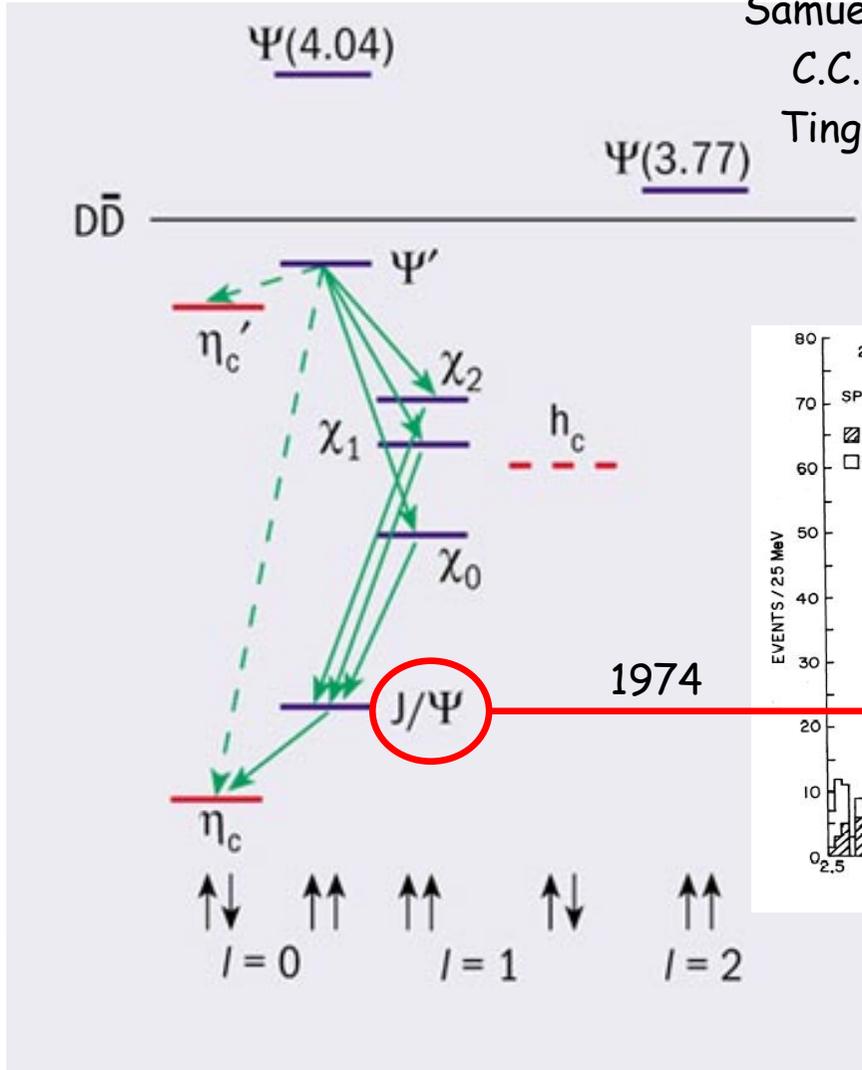
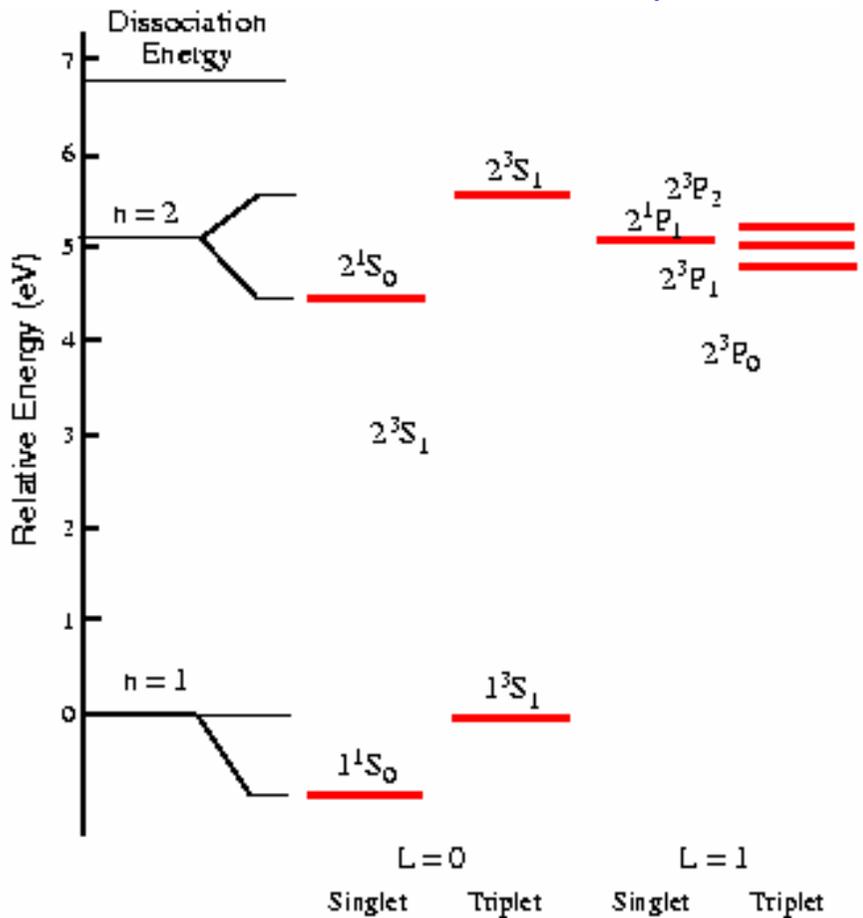




Heavy Quark Spectroscopy

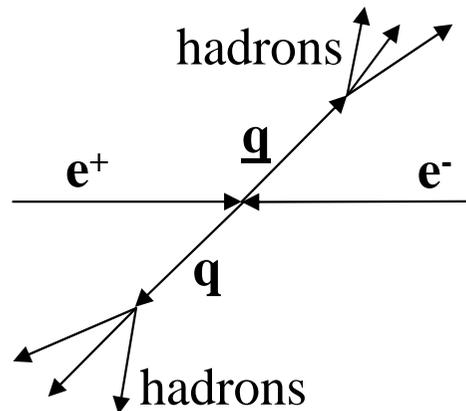
Charmonium = bound system
of $c\bar{c}$ quark pair

Positronium = bound e^+e^- system



How to detect Quarks and Gluons?

Jets!



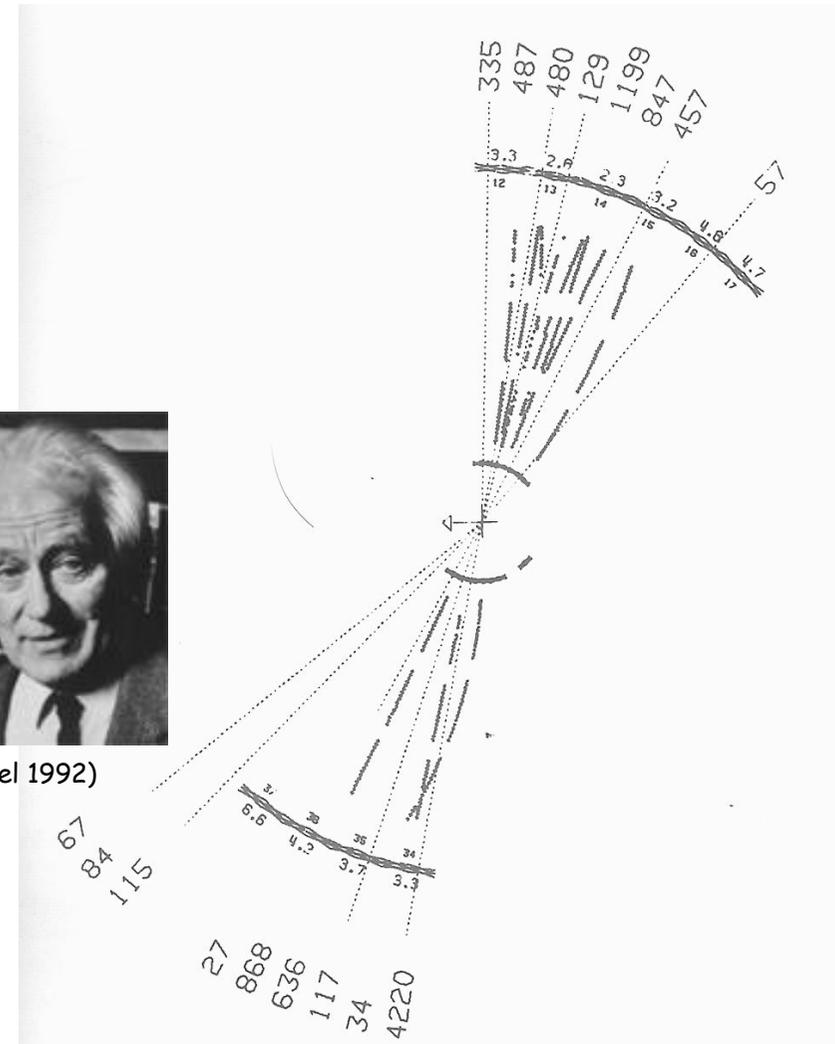
Example of the hadron production in e^+e^- annihilation in the JADE detector at the PETRA e^+e^- collider at DESY, Germany.

- cms energy 30 GeV.
- Lines of crosses - reconstructed trajectories in drift chambers (gas ionisation detectors).
- Photons - dotted lines - detected by lead-glass Cerenkov counters.
- Two opposite jets.

Georges Charpak

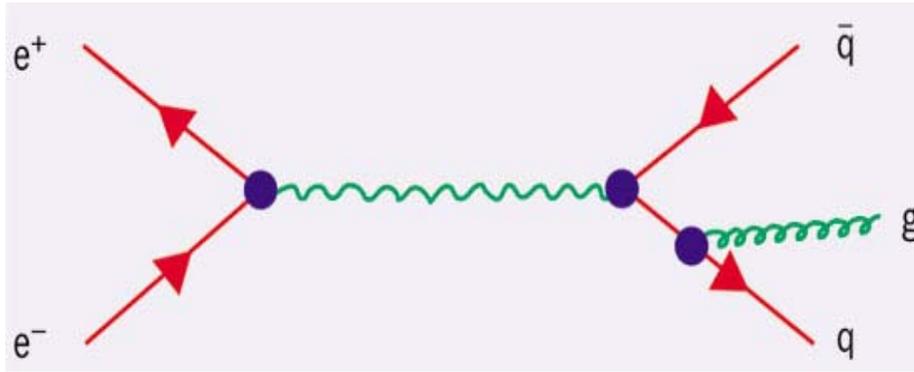


(Nobel 1992)



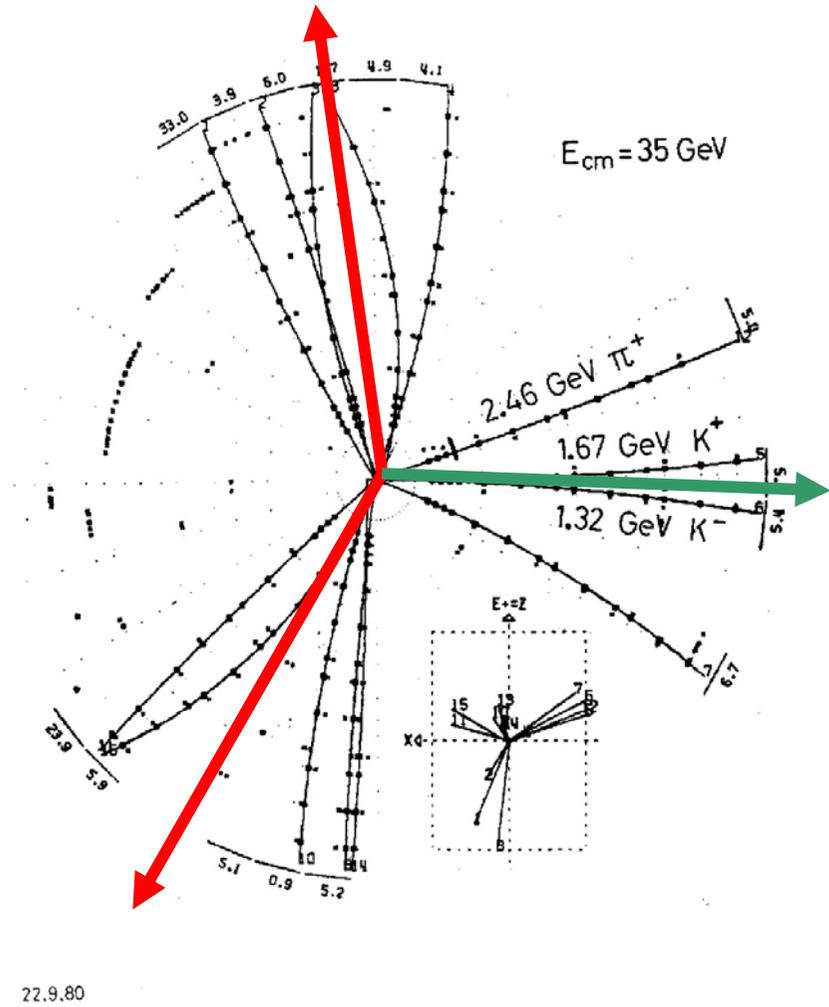
Discovery of the Gluon (1979)

PETRA at DESY: look for

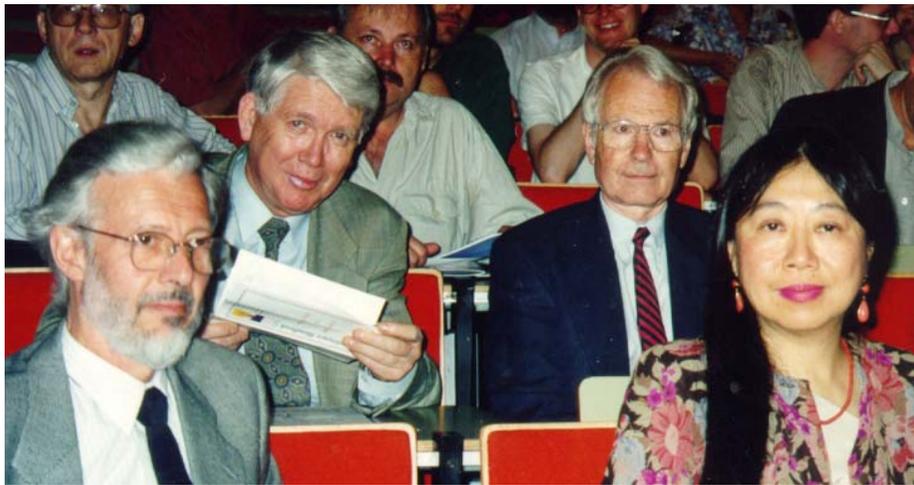


Björn Wiik

Paul Söding



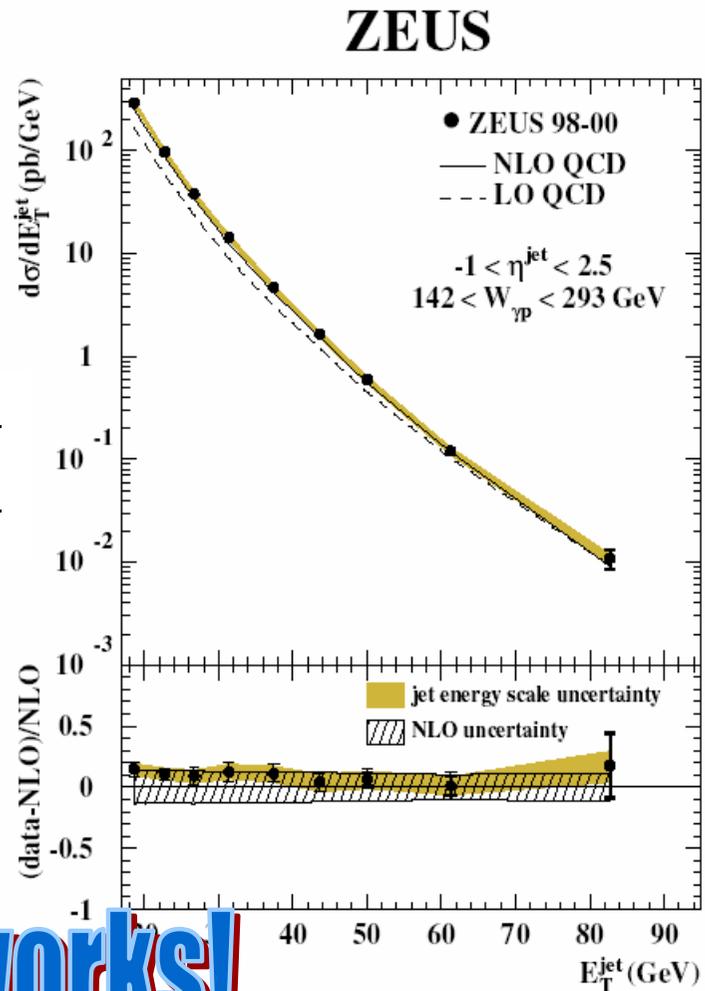
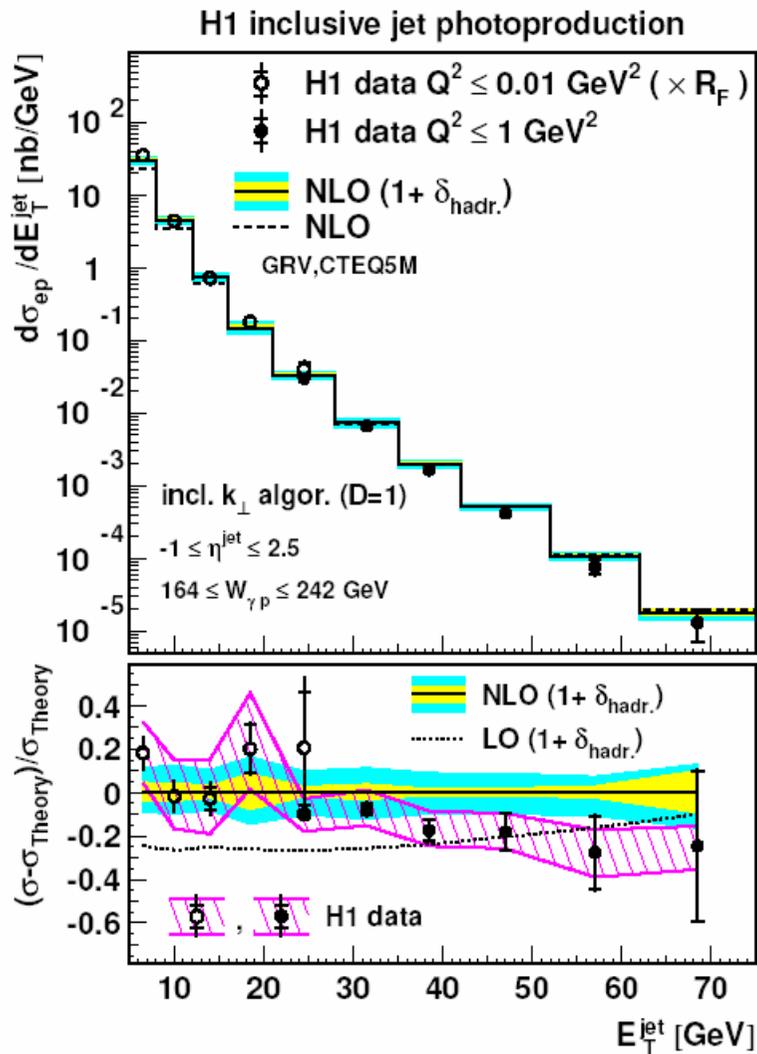
TASSO event picture



Günter Wolf

Sau Lan Wu

Jets in ep interactions (HERA)

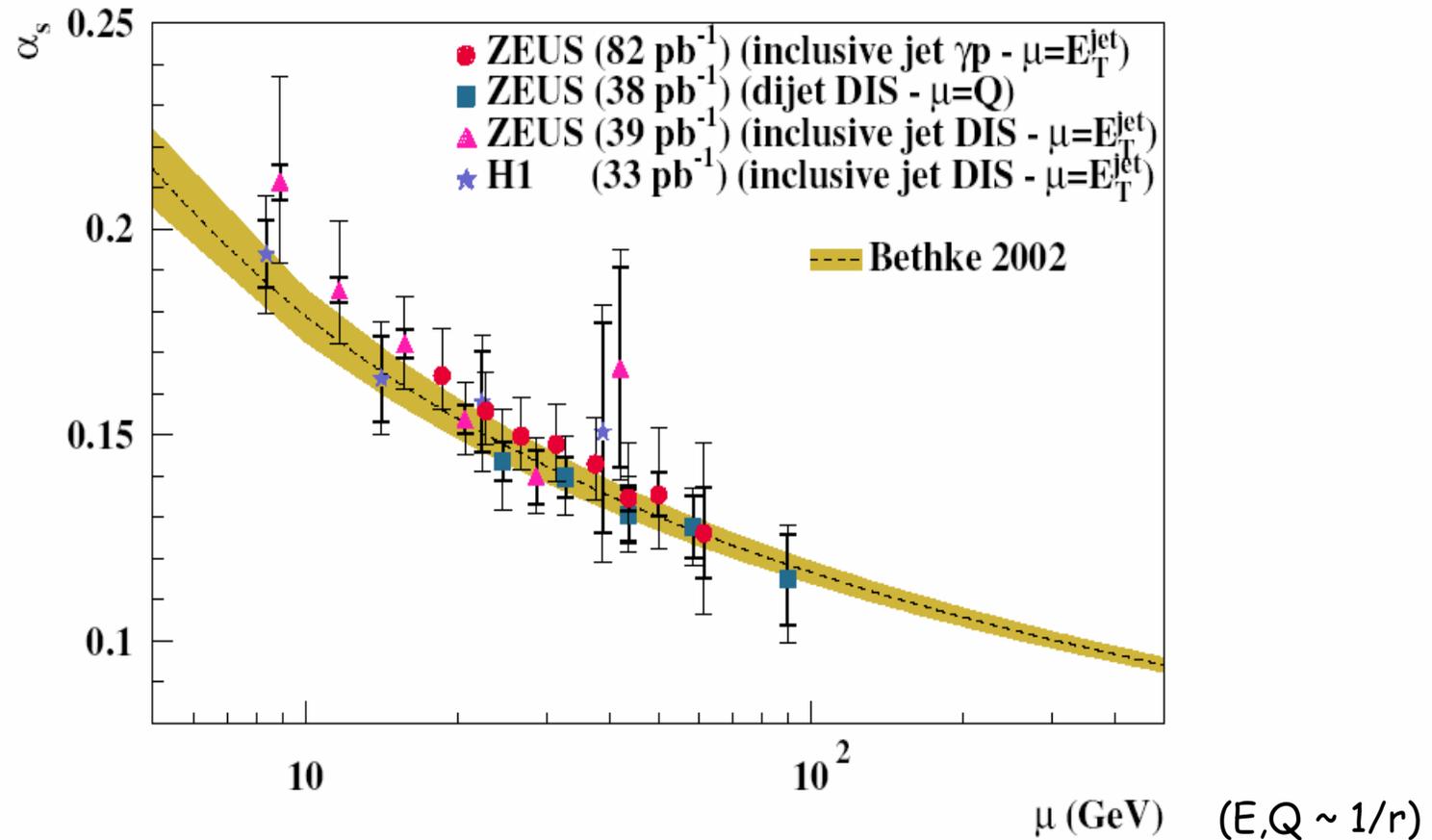


QCD works!

Good agreement with NLO over six orders of magnitude, dominant uncertainty due to theory

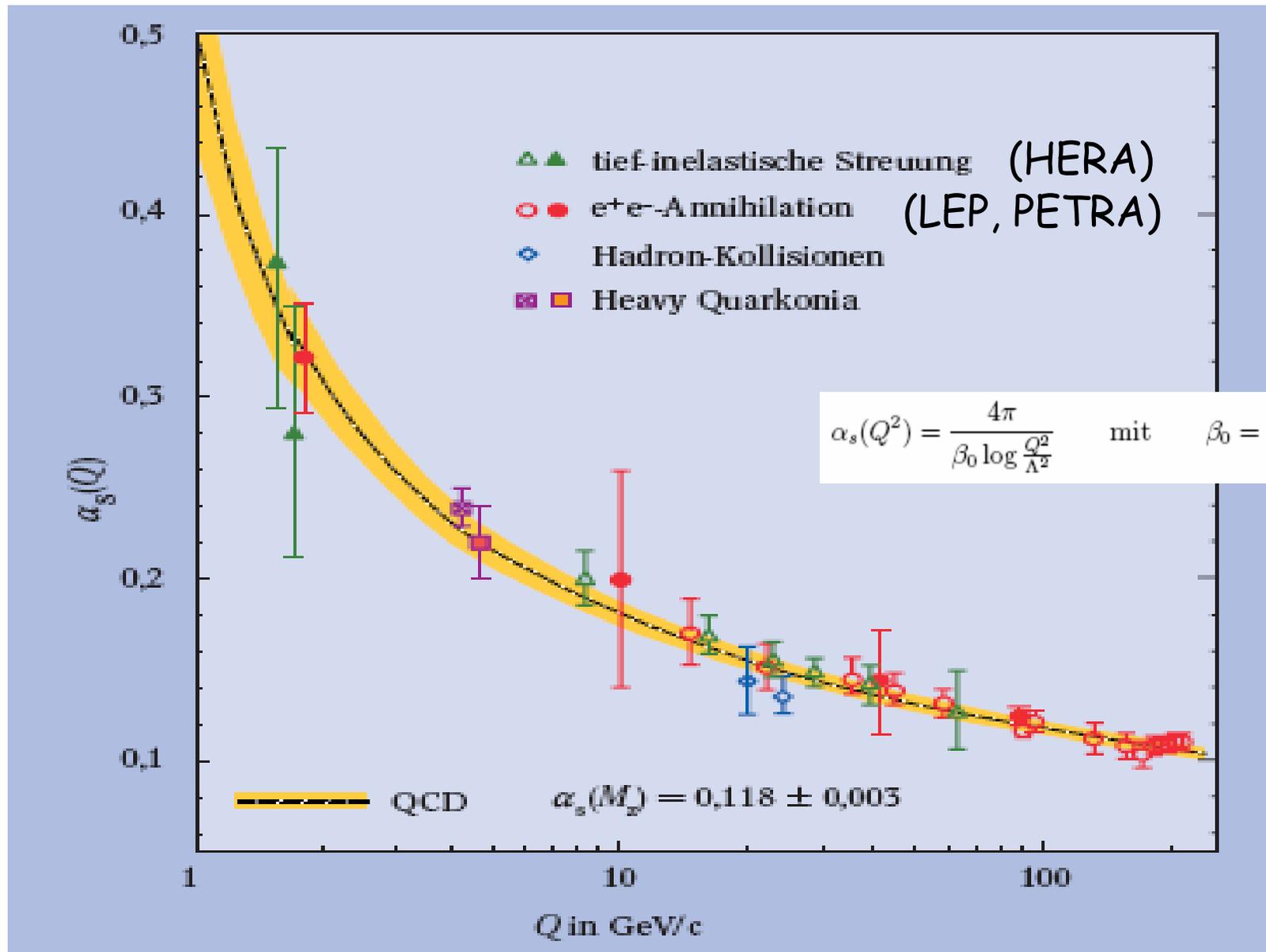
Running coupling α_s from jet production

HERA



Good agreement with expected running of α_s
Consistent and competitive measurement of α_s between HERA and LEP

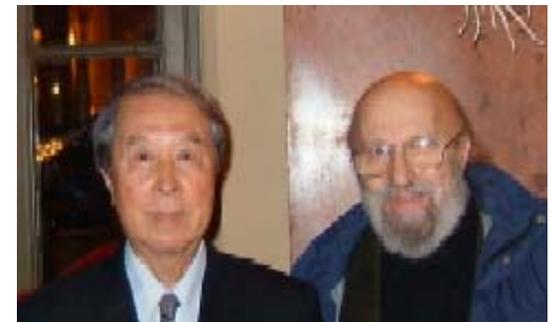
Running coupling α_s from other measurements



HERA =
currently
best
place
to study
QCD!

Das Proton: Einleitung

- Im Gegensatz zum Elektron: Proton ist **zusammengesetztes** Teilchen
-> **Proton-Masse = Summe der Energien der Konstituenten und/oder Felder im Proton, prinzipiell berechenbar!**
(analog zu Aufgabe 1 und 2)
- Atome, Moleküle, Kerne, ... : Masse ist im wesentlichen = Summe der Massen der Konstituenten, mit kleinen Korrekturen aufgrund der Bindungsenergie/Felder (siehe z.B. Aufgabe 3)
- **Proton: Neu: Masse wird dominiert von Feld/Bindungseffekten.**
Viele verschiedene Darstellungsmöglichkeiten (Näherungen):
 - NUR Feldenergie oder
 - NUR effektive Quarkmassen oder
 - Kombination von "nackten" Quarkmassen + Bewegungsenergie + Gluon-Felder
(dynamische Energie der Gluonen)



Yoichiro
Nambu

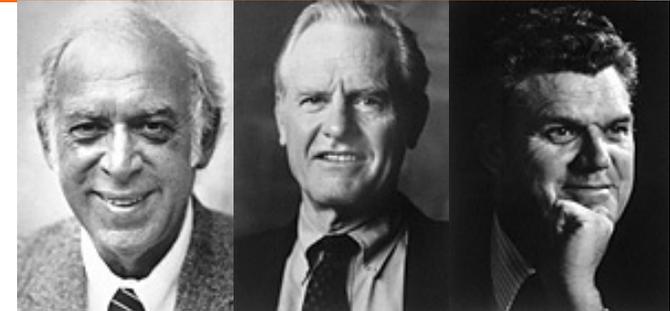
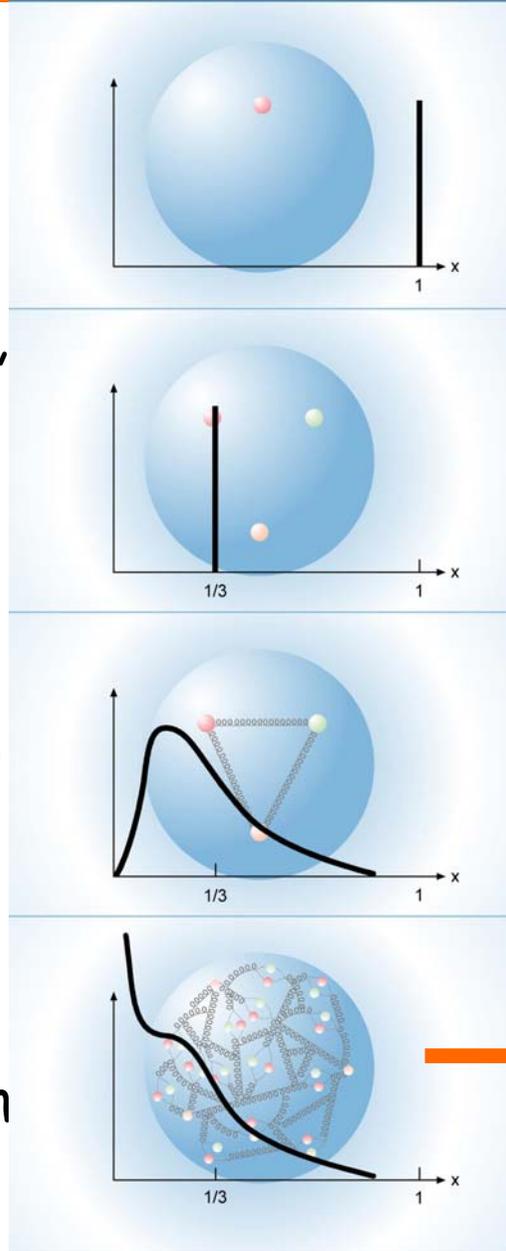
Giovanni
Jona-Lasinio

(Nobel 2008)

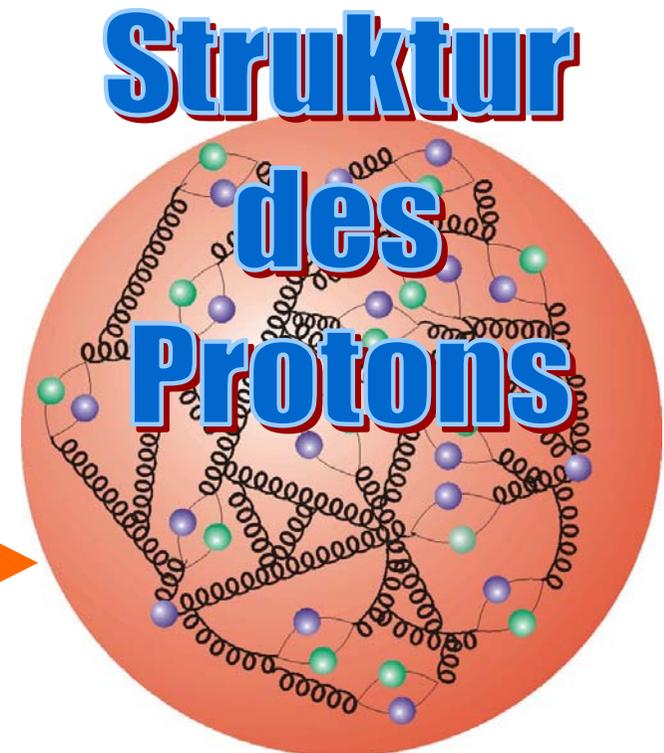
18

Auflösung der Proton-Struktur

- $E \sim \text{MeV}$
sehe Proton als Ganzes
- statisches Quarkmodell,
Valenzquarks
($m \sim 350 \text{ MeV} \sim \Lambda_{\text{QCD}}$)
- $E \sim m_p \sim 1 \text{ GeV}$
Auflösung der Valenzquarks
und ihrer Bewegung
- $E \gg 1 \text{ GeV}$
Auflösung des Quark- und
Gluon-"See"s



Jerome I. Friedman Henry W. Kendall Richard E. Taylor
(Nobel 1990)



Proton-Struktur und Proton-Masse

■ Strategien:

1. Das ganze Proton: $\text{Masse} = \text{Energiedichte} \times \text{Volumen}$? (semi-klassisch, Übungsaufgabe)

2. Statische Valenzquarks:

Protonmasse = Summe der "effektiven" Valenzquarkmassen? (nächste Vorlesung)

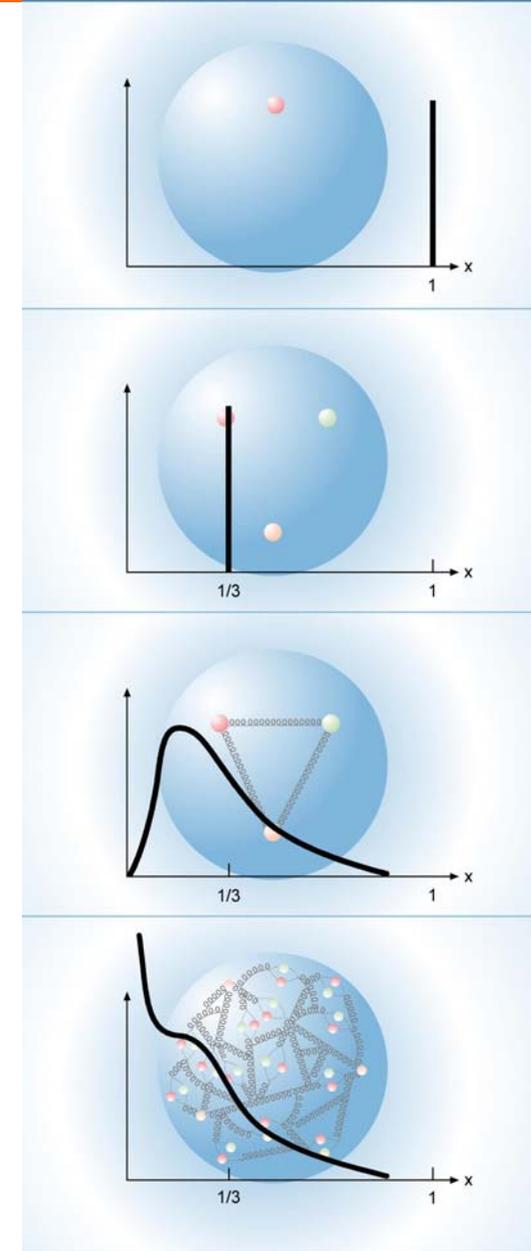
3. Dynamische Valenzquarks:

Berücksichtigung von "effektiven" Quark-Quark-Wechselwirkungen \rightarrow nächste Vorl.

4. Vollständige Quantenchromodynamik:

Berechnung der Proton-Masse aus Dynamik der (See-)Quarks und Gluonen

\rightarrow brauche Verständnis der Protonstruktur!



Wie bestimmt man die Protonstruktur?

Mikroskop:

niedrige Auflösung

-> kleines Instrument

hohe Auflösung

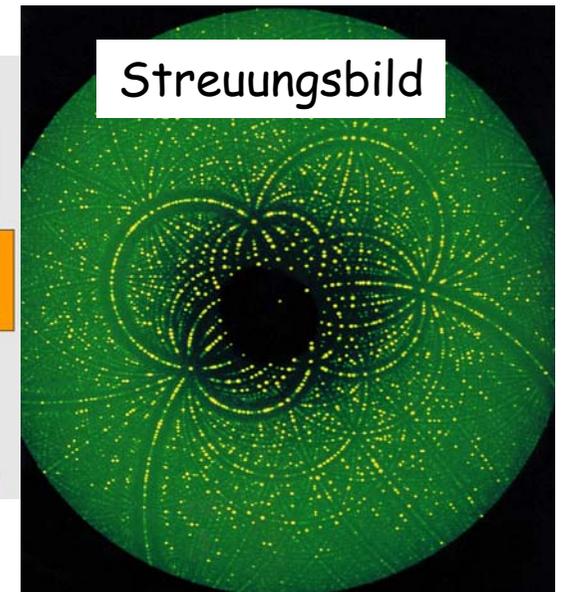
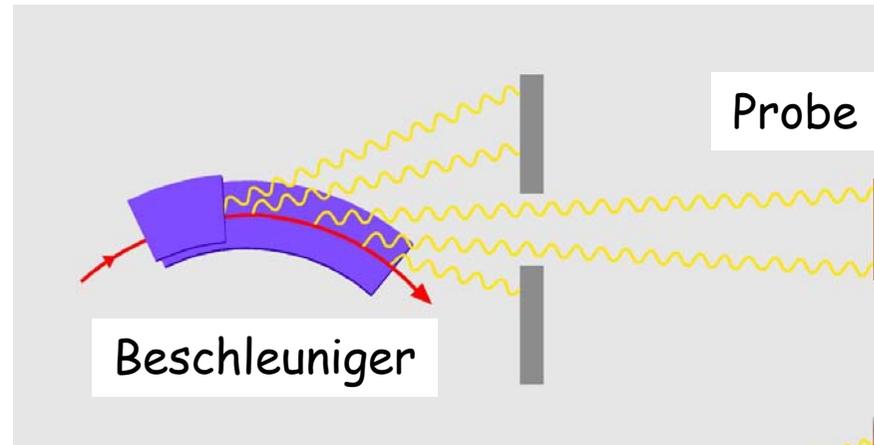
-> großes Instrument

**HERA =
gigantisches
Elektronen-
Mikroskop**



Wie vermisst man die Struktur eines Objekts?

z.B. Röntgen-
Strahlung
(Hasylab)
 $E \sim \text{keV}$

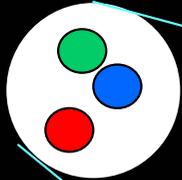
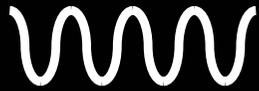


-> Struktur eines
Biomoleküls

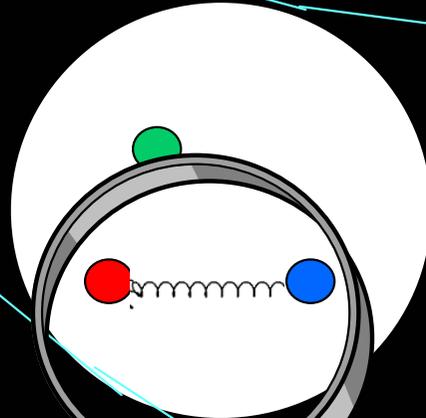


Im Proton

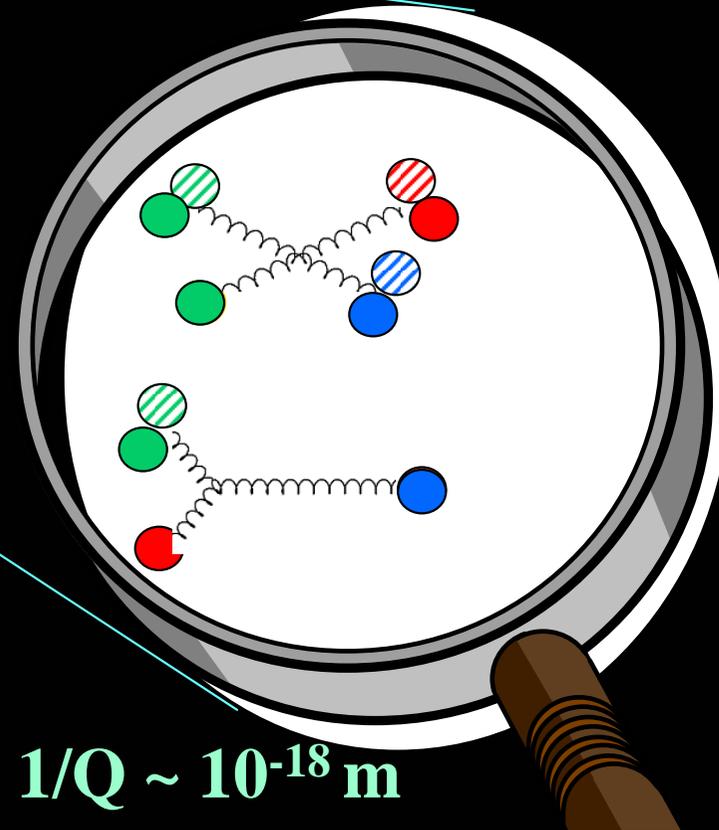
kleines Q^2 (λ gross)



mittleres Q^2 (mittleres λ)



grosses Q^2 (λ klein)



Heisenberg'sche Unschärferelation erlaubt Erzeugung von Gluonen und $q\bar{q}$ -Paaren für kurze Zeit.

Bei immer größerer Auflösung emittieren die quarks Gluonen, die wieder Gluonen emittieren, die Quarks emittieren, die

bei höchstem Q^2 , $\lambda \sim 1/Q \sim 10^{-18}$ m

Deep Inelastic ep Scattering at HERA

