

#### 4. Ein Standardmodell der Teilchen und Kräfte: die starke Wechselwirkung

- **statisches Quarkmodell**
  - ▷ anomales magnetisches Moment des Protons
  - ▷ Aufbau von Mesonen & Baryonen aus Quarks
  - ▷ Problem mit  $\Sigma^-$  Baryon
- **Konzept der Quantenchromodynamik (QCD)**
  - ▷ Struktur der QCD
  - ▷ Renormierung und ihre Konsequenzen
- **Experimentelle Untersuchungen der QCD (mit LEP)**
  - ▷ Kopplungskonstante  $\alpha_s$
  - ▷ Hadronisierung
  - ▷ Gluonspin

## Anomales magnet. Moment des Protons

Für punktförmige Teilchen, die der Dirac-Gleichung gehorchen:

Erwartung: Elektron:	$\mu_e = \frac{eh}{2m_e c}$	Messung: $1 \cdot \frac{eh}{2m_e c}$
Myon :	$\mu_\mu = \frac{eh}{2m_\mu c}$	$1 \cdot \frac{eh}{2m_e c}$
Proton :	$\mu_p = \frac{eh}{2m_p c}$	<u><math>+2.79 \cdot \frac{eh}{2m_p c}</math></u>
Neutron:	$\mu_n = 0$	<u><math>-1.91 \cdot \frac{eh}{2m_p c}</math></u>

→ Abweichung von Erwartung für Proton & Neutron läßt bereits eine Nicht-punktförmigkeit dieser Teilchen vermuten

anomalies magnet. Moment des Protons wurde ~1932 von O. Stern gemessen (obwohl Theoretiker ihm und seinen Mitarbeitern vorwarfen, sie könnten ihre Zeit mit Besseren verbringen, als diese Messung durchzuführen).

⇒ seit ~1932 Hinweis auf "Substruktur" der Nukleonen

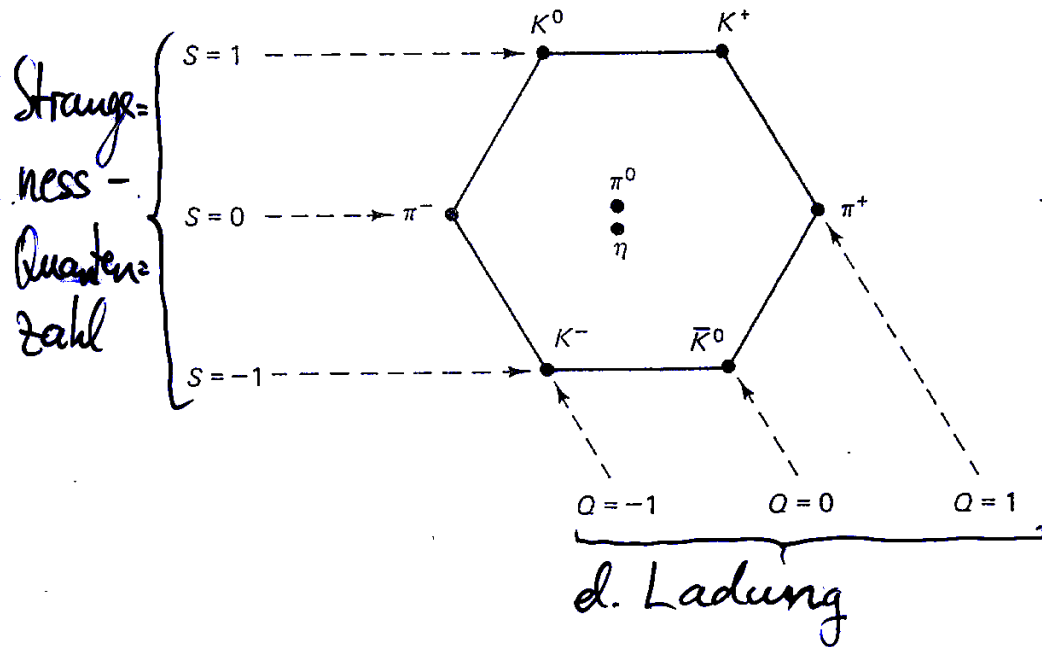
# Aufbau der Mesonen & Baryonen aus Quarks

- bis 1960: viele verschiedene Elementarteilchen mit und ohne "Strangeness" entdeckt
- 1961-1964: M. Gell-Mann und Y. Ne'eman schlagen ein Ordnungsschema vor:  
The Eightfold Way

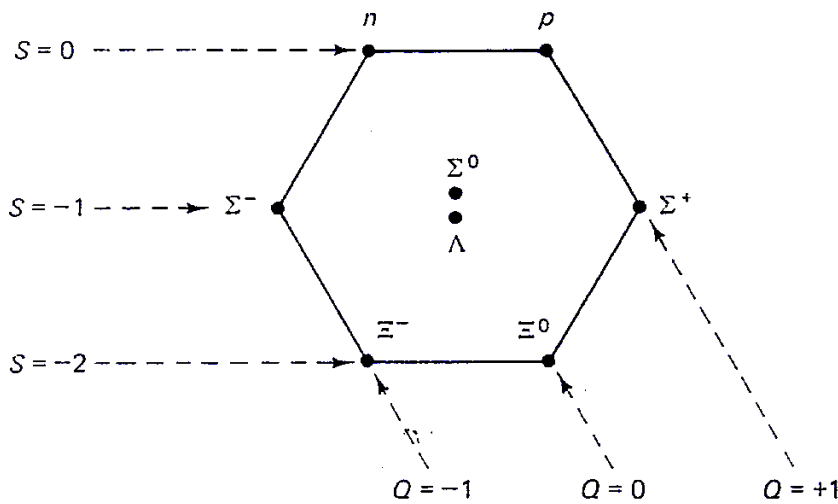
Dabei werden Mesonen wie  $\pi, K, \dots$  und Baryonen wie  $p, n, \dots$  in geometrischen Mustern angeordnet, wobei elektrische Ladung und eine sog. Strangeness-Quantenzahl als Ordnungskriterium dienen.

Zur Erinnerung: Teilchen mit Strangeness haben eine ungewöhnlich lange Lebensdauer (typ.  $10^{-8}$  s) verglichen mit den anderen Teilchen, die man in Wechselwirkungsprozessen erzeugen kann. Viele dieser Teilchen weisen Lebensdauern von weniger als  $10^{-20}$  s auf!

# Oktett - Teilchen



Mesonen mit Spin 0  
The Meson Octet



Baryonen mit Spin  $\frac{1}{2}$   
The Baryon Octet

# Statisches Quarkmodell der Teilchen

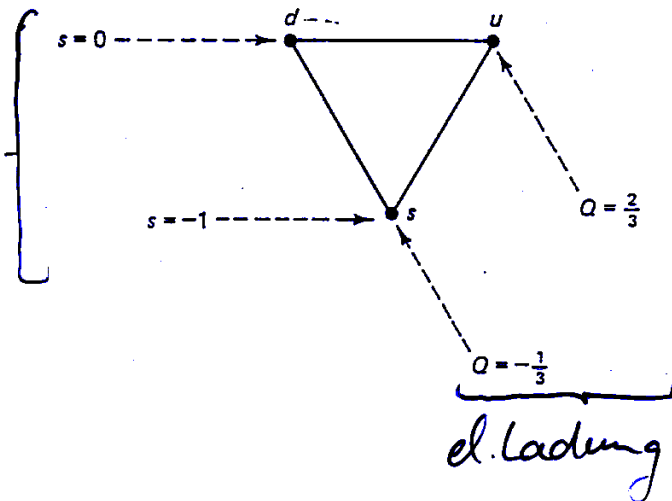
1964: M. Gell-Mann, G. Zweig:

Alle Hadronen (= Mesonen und Baryonen) sind aus noch elementareren Konstituenten aufgebaut:

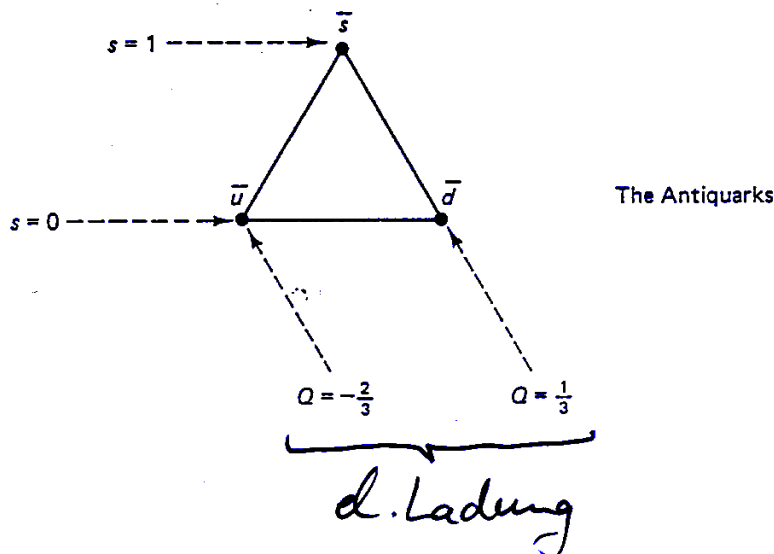
**Quarks**

mit drittelzahliger elektrischer Ladung

Strange-  
ness



Strange-  
ness



# Ursprung von 3 Quarks

(aus: H. Fritsch: Quarks)

We shall see that the number 3 plays an especially significant role in quark theory. For example, a proton consists of three quarks, and it was the number three that led Gell-Mann to introduce the expression "quark." There is a passage in James Joyce's *Finnegans Wake* that reads:

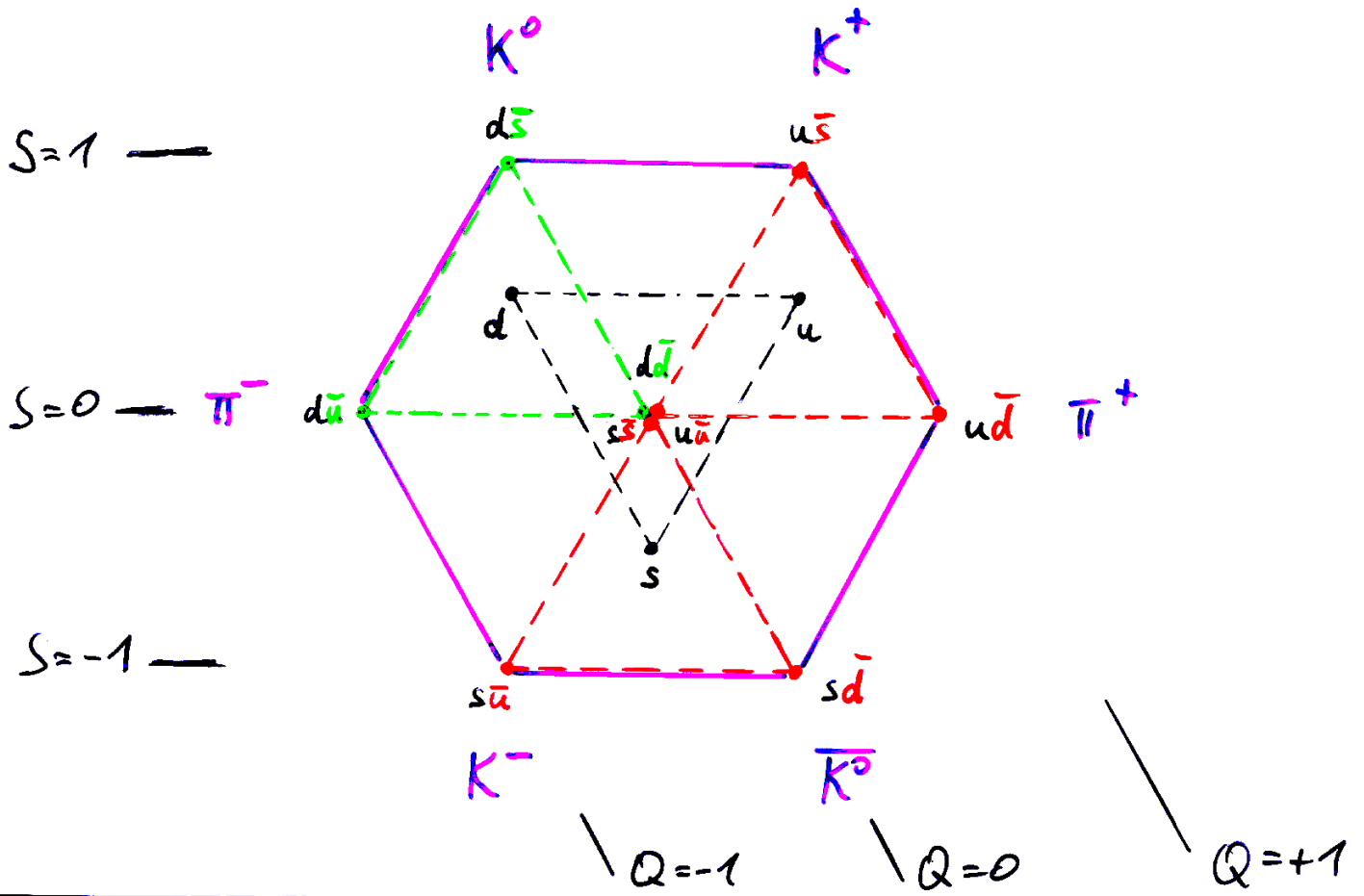
Three quarks for Muster Mark!  
Sure he hasn't got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.  
But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a  
lark  
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the  
dark  
And he hunting round for uns speckled trousers around by  
Palmerstown Park?

Joyce's novel is full of plays on words that are difficult to understand. Many of them have never been deciphered. The novel describes the life of Mr. Finn, who sometimes appears as Mr. Mark. The "three quarks" denote the three children of Mr. Finn, by whom he himself is represented from time to time. Thus the association with particle physics becomes clear. The proton is associated with Mr. Finn; under certain circumstances the proton acts as if it consisted of three quarks.\*

\*In German, the word "quark" describes a special kind of soft cheese, but it is also used for "nonsense." Note that the title of this book is "Quarks," and not "Quark."

# Aufbau der Mesonen

Jedes Meson ist aus einem Quark und einem Antiquark zusammengesetzt



- $K^0 = d\bar{s}$
- $K^+ = u\bar{s}$
- $\bar{K}^0 = s\bar{d}$
- $K^- = s\bar{u}$
- $\pi^+ = u\bar{d}$
- $\pi^- = d\bar{u}$

Quarkkombinationen im Zentrum. ergeben Mesonen als Mischungen: (Gruppentheorie der  $SU(3)$ )

- $\pi^0 = (u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$
- $\eta_8 = (u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) / \sqrt{6}$
- $\eta_1 = (u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}) / \sqrt{3}$

(phys.  $\eta$ -Mesonen sind Mischungen aus  $\eta_1$  und  $\eta_8$ )

# Gruppentheoret. Beschreibung


Transformationen des Quark-Dreiecks  $\nabla$  können durch die Gruppe  $SU(3)$  beschrieben werden. Zur Präzisierung nennt man diese Gruppe auch  $SU(3)_{\text{flavour}}$ .

Der Aufbau von Mesonen aus Quarks und Anti-quarks ist dann die Kombination von Gruppen.

(Vergleiche: Addition von Spin [Drehimpulsen] entspricht der Kombination von Repräsentanten der Gruppe  $SU(2)$ , wobei die Repräsentanten Matrizen der Dimension  $(2J+1) \times (2J+1)$  sind)

Mesonen:

$$\nabla \otimes \triangle = 3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

Oktett   $u\bar{s}, u\bar{d}, d\bar{s}, d\bar{u}, s\bar{u}, s\bar{d}$   
 $(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}, (u\bar{u}+d\bar{d}-2s\bar{s})/\sqrt{6}$

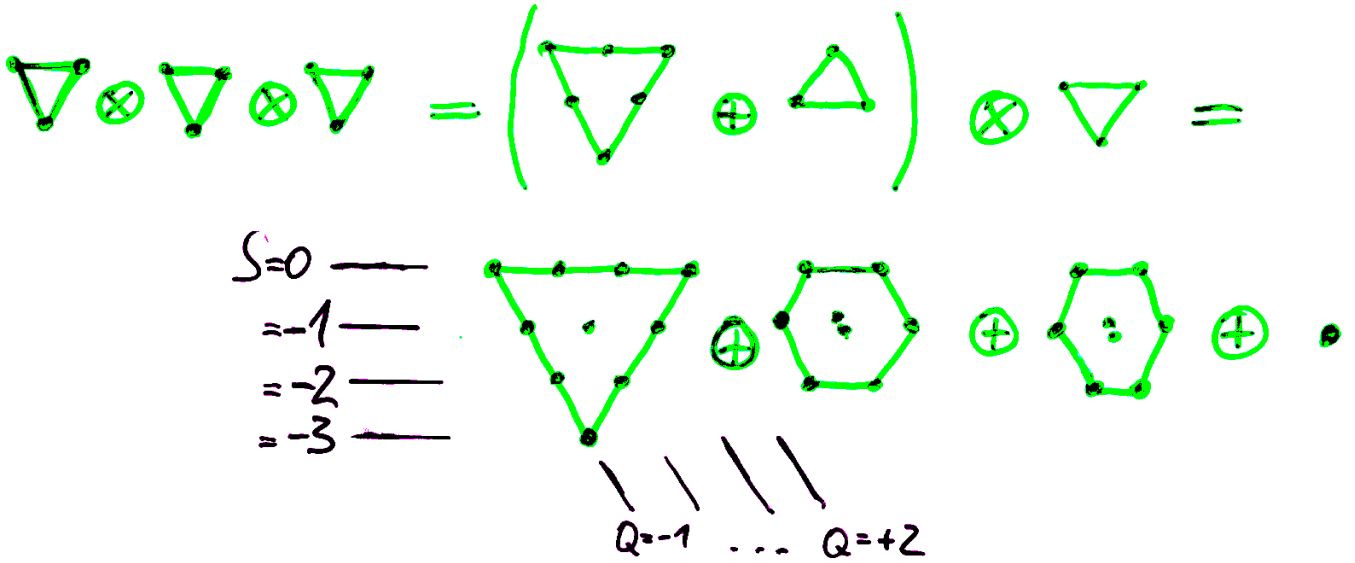
Singulett  $\bullet$   $(u\bar{u}+d\bar{d}+s\bar{s})/\sqrt{3}$



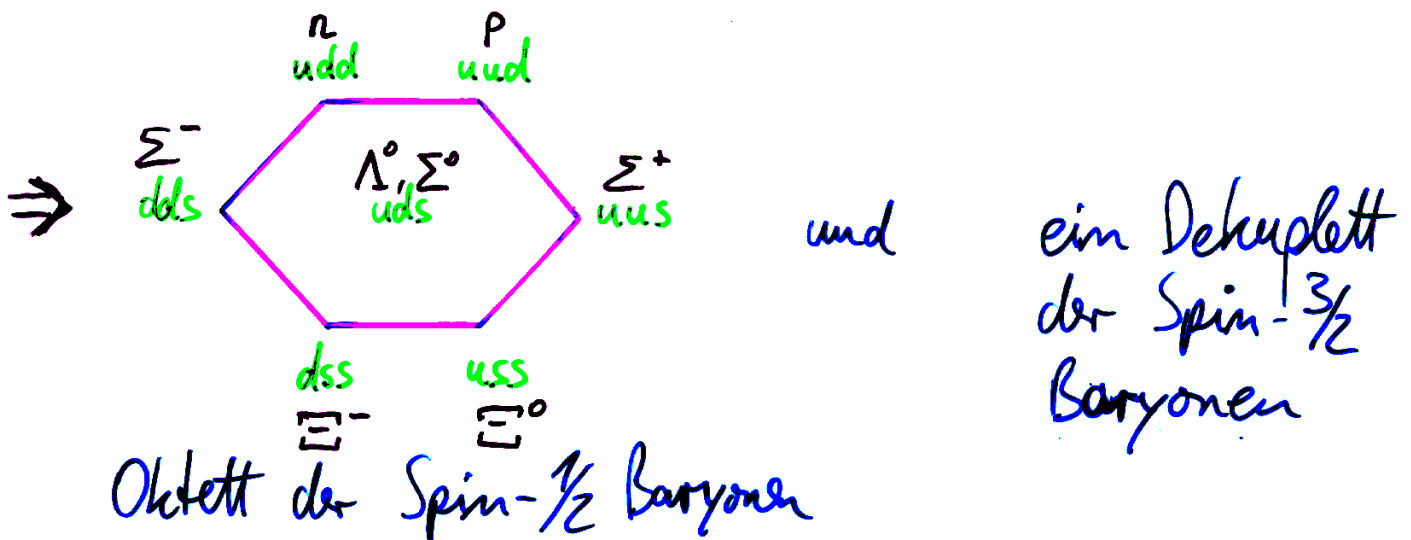
# Aufbau der Baryonen

Jedes Baryon ist aus drei Quarks zusammengesetzt. (Antibaryon aus drei Antiquarks)

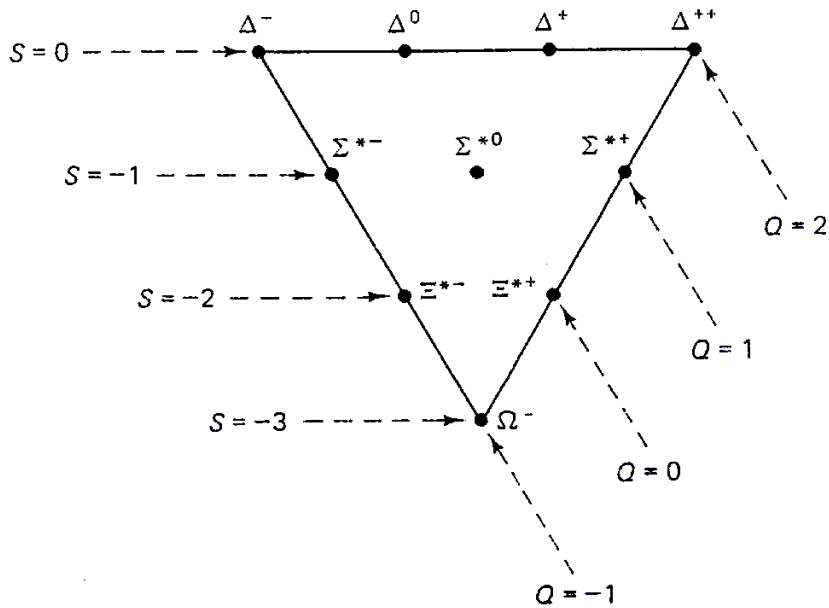
Baryon:



Um die physikalischen Teilchen zu erhalten, muß man noch die kombinierten Spins hinzufügen



# Baryonen - Dekuplett und weitere Mesonen



Baryonen mit

The Baryon Decuplet

Spin  $\frac{3}{2}$

⇒ Vorhersage des  $\Omega^-$  Baryons

Mesonen mit verschiedenen Kombinationen von Bahndrehimpuls und Spin

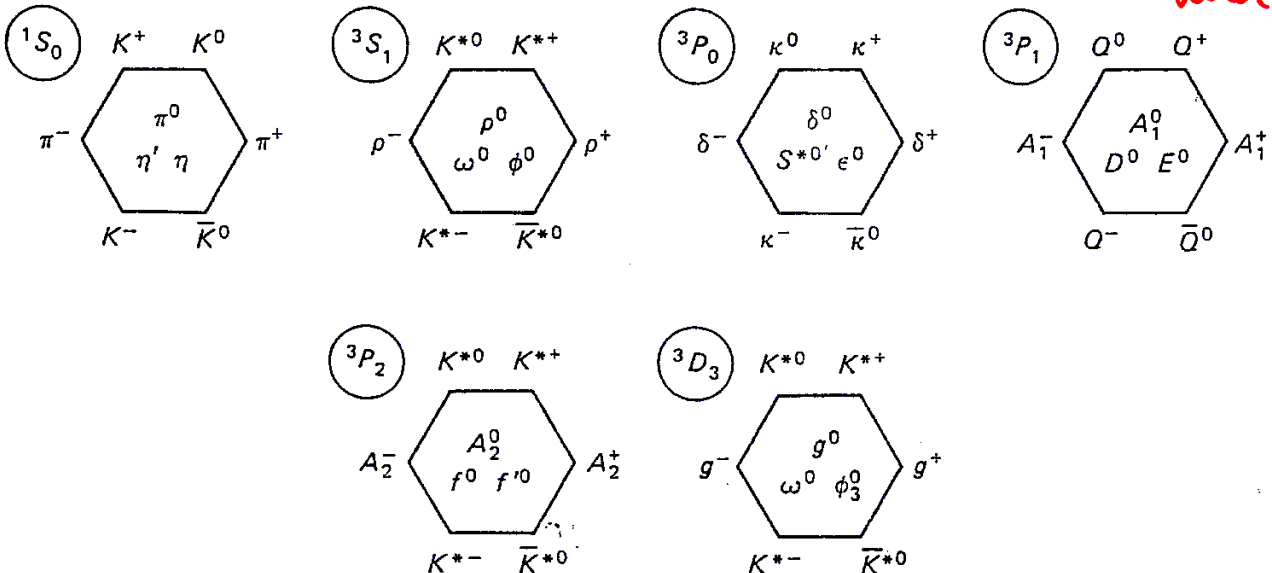
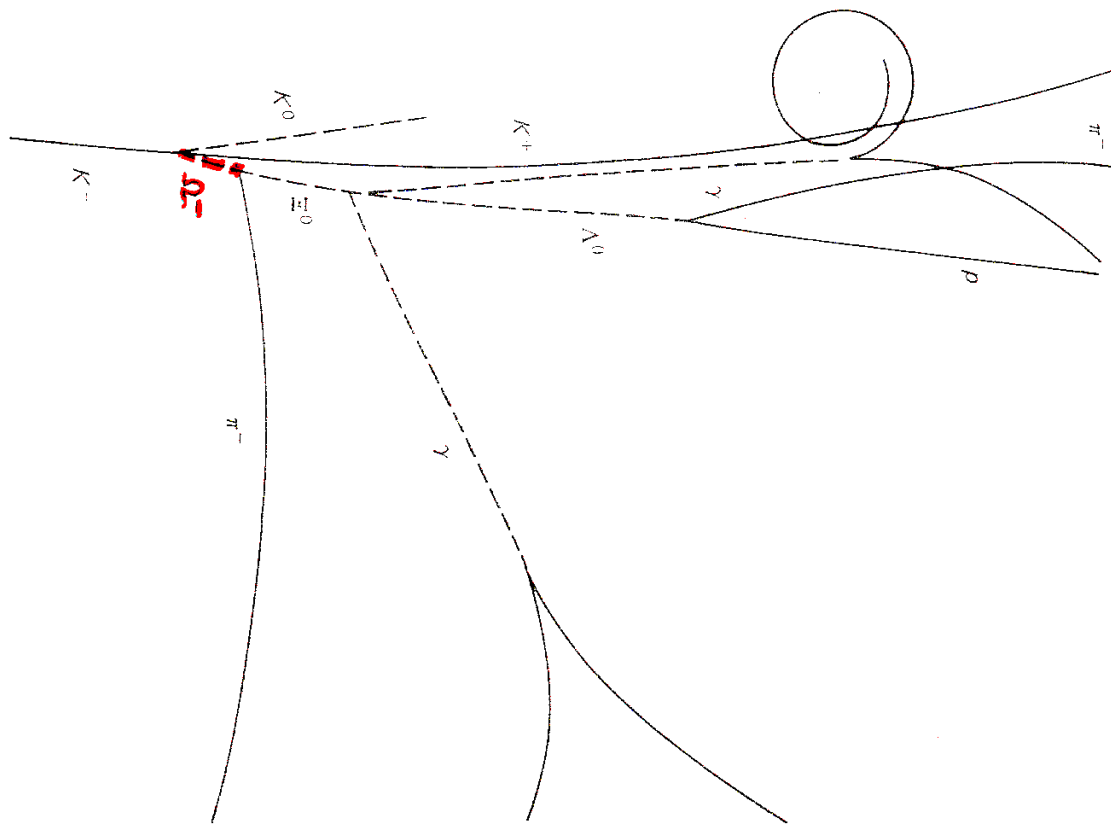
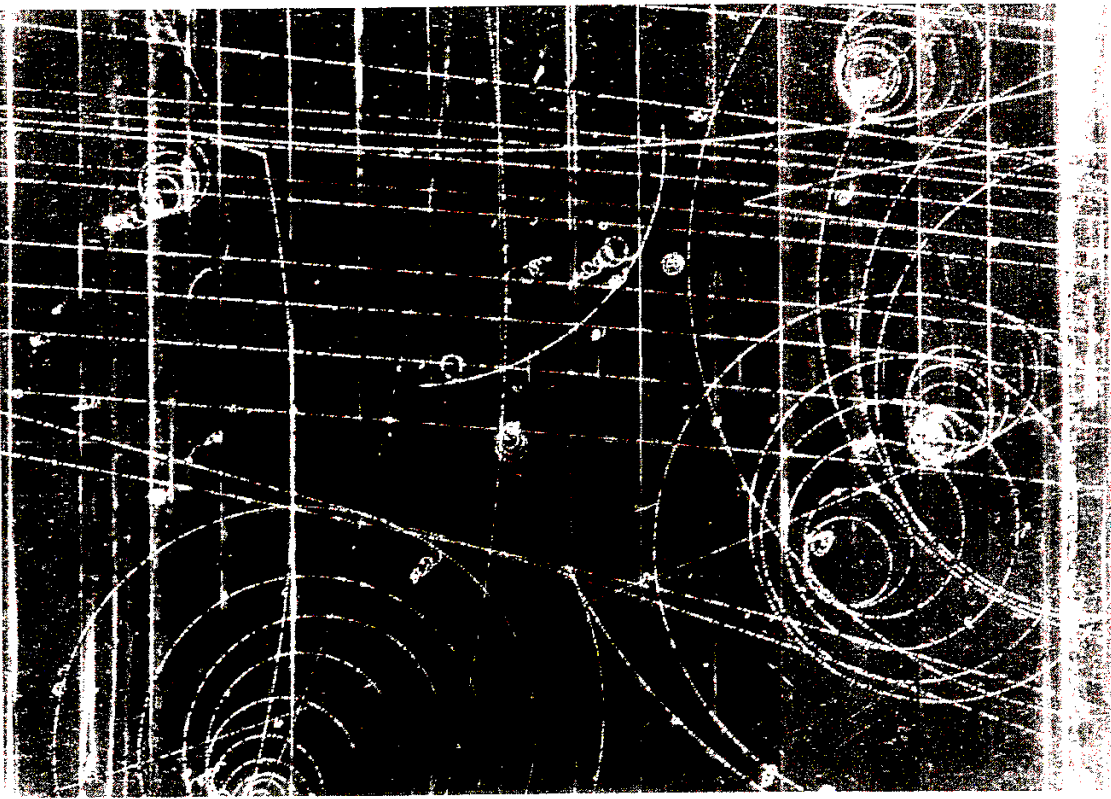


Figure 1.11 Established meson nonets. Obviously, we are running out of letters. It is customary to distinguish different particles represented by the same letter by indicating the mass parenthetically (in  $\text{MeV}/c^2$ ), thus  $K^*(892)$ ,  $K^*(1430)$ ,  $K^*(1650)$ , and so on. In this figure the supermultiplets are labeled in spectroscopic notation (see Chap. 5). At present, there are no complete baryon supermultiplets beyond the octet and decuplet, although there are many partially filled diagrams.

# Entdeckung des $\Sigma^-$ Barions

1964:  
V.E. Barnes  
dal.



**Figure 1.10** The discovery of the  $\Sigma^-$ . The actual bubble chamber photograph is shown on the left; a line diagram of the relevant tracks on the right. (Photo courtesy Brookhaven National Laboratory.)



## Problem des $\Omega^-$ Baryons

$\Omega^-$  besteht aus drei s-Quarks  
und hat Gesamtspin  $J = \frac{3}{2}$  mit  $J_3 = \frac{3}{2}$

⇒ Wellenfunktion des  $\Omega^-$ :

$$\Psi_{\Omega^-} = \uparrow \uparrow \uparrow$$

ist **symmetrisch!** Erwartung ist eine antisymmetrische Wellenfkt. bei Austausch von identischen Fermionen

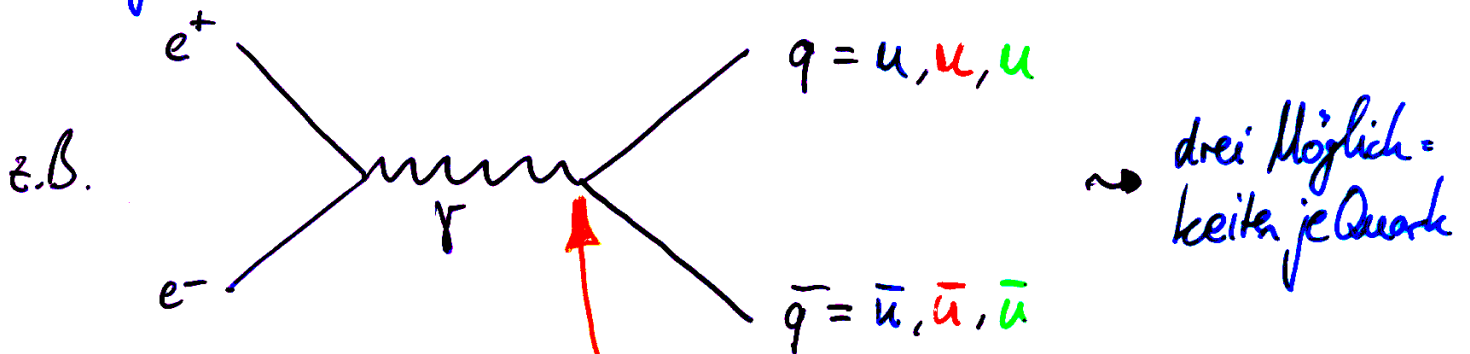
→ Pauli-Ausschlußprinzip verletzt, wenn sich die Quantenzahlen der Quarks in einer Eigenschaft unterscheiden

→ Postulat der "Farbladung" von Quarks

Man ordnet jedem der drei Quarks eine unterschiedliche neuartige Ladung zu, die es in drei verschiedenen Varianten gibt, die aber aufserhalb des Baryons (Mesons) unsichtbar ist! → Farbladg. in Analogie zur Farblehre: rot+grün+blau=weiß; rot+antirot=schwarz

# Existenz der Farbladung

viele Hinweise, z.B. aus Elektron-Positron-Vernichtung in Quark-Antiquarkes durch Abzählen der möglichen Endzustände:



Kopplungsstärke:

$\sim Q_f^2 \cdot \alpha_{em}$ , d.h. (el. Ladung)<sup>2</sup>

$$R := \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

$$\approx \frac{3 \cdot (Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2 + Q_b^2)}{Q_\mu^2}$$

$$\approx 3 \cdot \left( \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right) = \frac{11}{3} \approx 3.67$$

vgl.:  $\left[ 1 \cdot \left( \begin{matrix} u \\ \phantom{u} \end{matrix} \right) = \frac{11}{9} \approx 1.22 \right]$

# Existenz der Farbladung

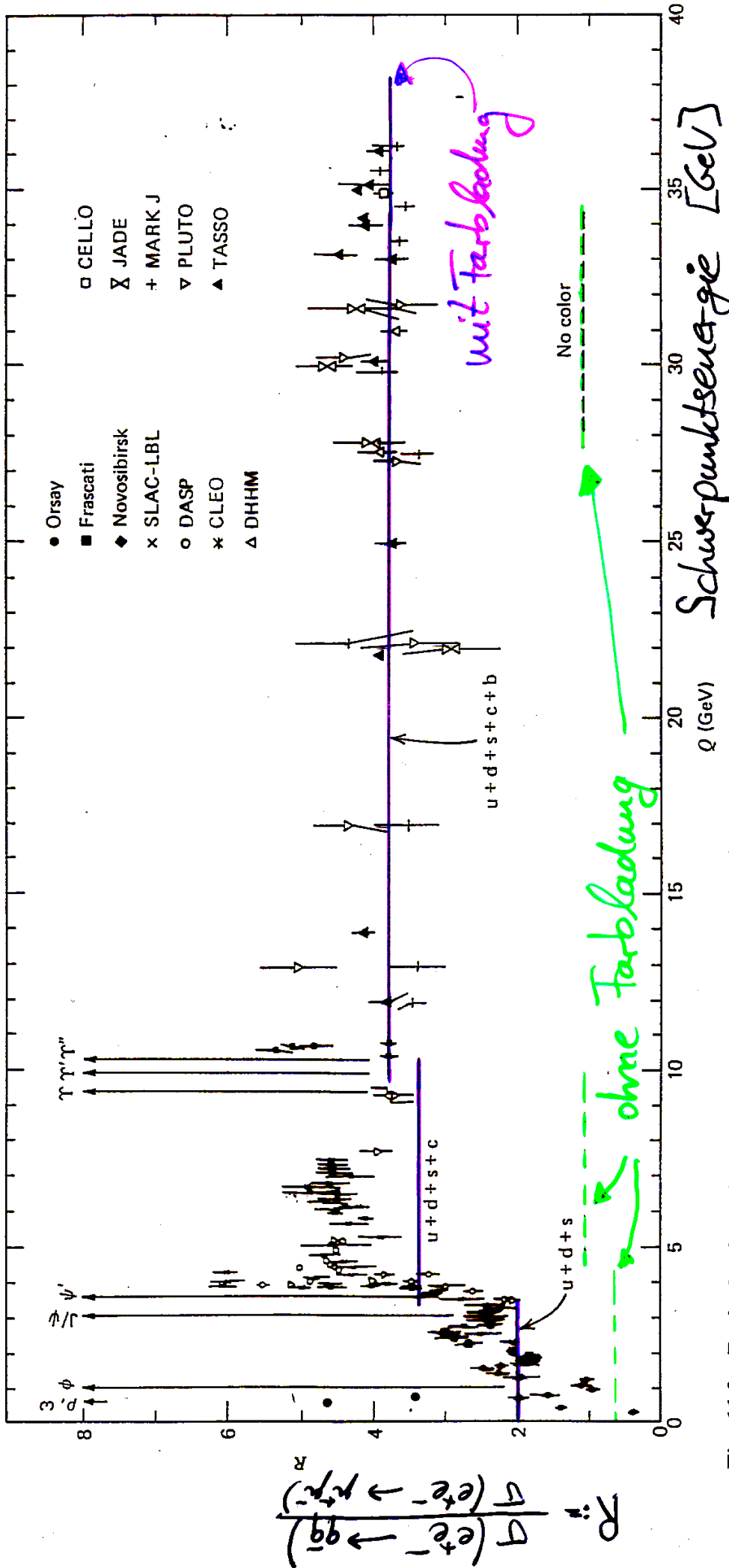


Fig. 11.3 Ratio  $R$  of (11.6) as a function of the total  $e^-e^+$  center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of narrow  $1^-$  resonances just below or near the flavor thresholds.)

# Konzept der Quantenchromodynamik QCD

- zur Erinnerung:
- electromagn. Wechselwirkung folgt aus der lokalen Eichinvarianz der Gruppe  $U(1)$
  - besitzt einen Typ der Ladung mit pos. oder negativem Vorzeichen
  - Photon ist Vermittler der electromagn. Kraft

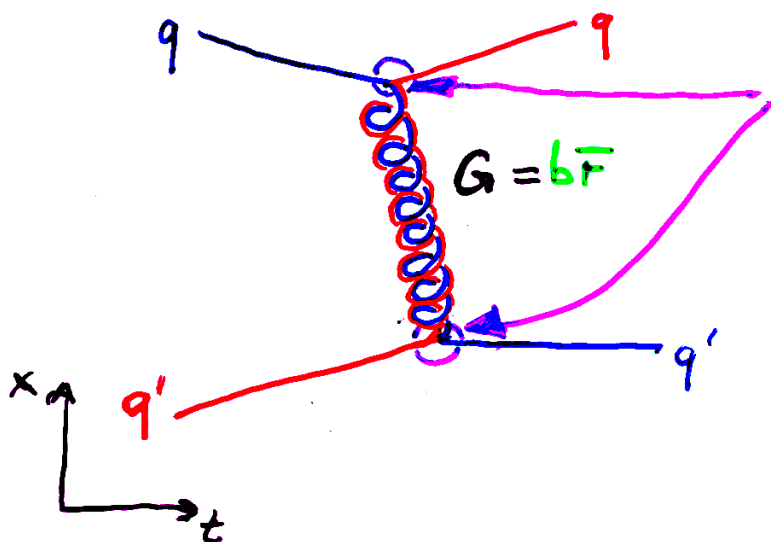
Die starke Wechselwirkung besitzt Ladungen in drei verschiedenen Ausprägungen. Sie wird aber nicht durch eine Art dreifacher QED beschrieben ( $U(1) \otimes U(1) \otimes U(1)$ ), sondern durch eine Struktur, die der  $SU(3)_{\text{colour}}$  Eichinvarianz unterliegt. (Achtung:  $SU(3)_{\text{colour}}$  und  $SU(3)_{\text{flavour}}$  haben, außer daß beide die gleiche Gruppenstruktur haben, nichts miteinander zu tun. Tatsächlich ist  $SU(3)_{\text{flavour}}$  nur eine approximative Symmetrie, die für masselose Quarks anwendbar ist, während die  $SU(3)_{\text{colour}}$  Struktur eine Eichinvarianz der QCD darstellt.)  
(exakte)

# Struktur der QCD

$SU(3)_{\text{colour}}$  führt zu acht Austauschbosonen als Vermittler der starken Kraft: Gluonen  $G$

$$G = r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{r}, b\bar{g}, \frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g}), \frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$$

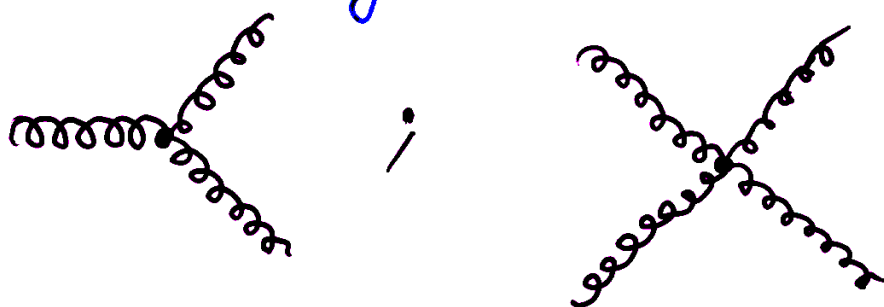
Art der Wechselwirkung:



Kopplungsstärke :=  $\frac{1}{2} g_1 g_2 \cdot d_s$   
 $\frac{1}{2} |g_1 g_2| =: C_F$   
Farbfaktor ↑

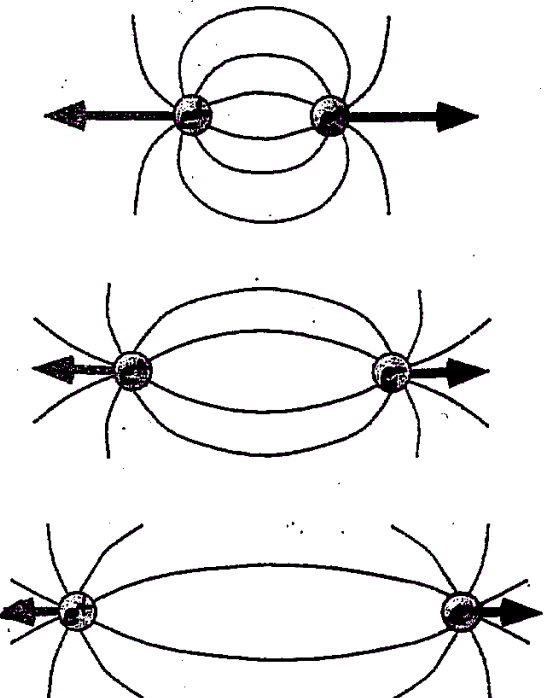
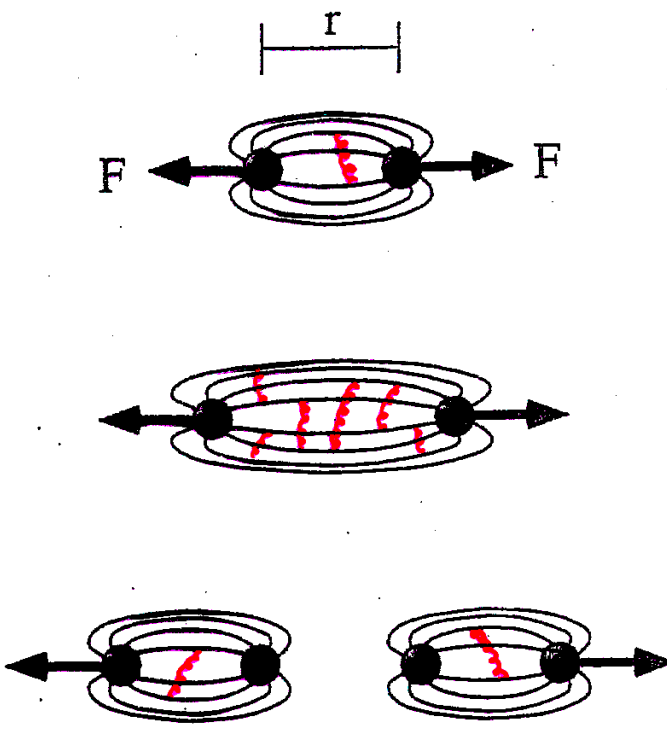
Man beachte: Gluonen tragen selbst Farbladung!

→ Gluonen können untereinander in Wechselwirkung treten:





# Elektrisches und Farb-Feld

QED	QCD
<p><i>Elektrische Ladungen:</i>            Kraft <math>F \propto 1/r^2</math>            Energiedichte <math>\propto 1/r</math></p>	<p><i>Farbladungen:</i>            Kraft <math>F \propto \text{const.}</math>            Energiedichte <math>\propto r</math></p>
 <p>Energiedichte zwischen Ladungsträgern nimmt ab.</p>	 <p>Energiedichte steigt an, bis ein neues Quark-Antiquark-Paar aus dem Vakuum erzeugt wird.</p>

Zieht man zwei Farbladungen auseinander, so schnürt sich das Farbfeld zu einem dünnen Schlauch, String genannt, zusammen.  
 Stringspannung:  $\kappa \approx 1 \text{ GeV/fm}$

# Stärke der starken Wechselwirkung

wird bestimmt durch Kopplungskonstante  $\alpha_s$   
dabei ist zu beachten: **Die Rolle des Vakuums!**  
Das Vakuum ist nicht wirklich "leer", sondern besitzt eine komplizierte Struktur. z.B. läßt sich das Vakuum durch eine (elektr.) Ladung polarisieren. Im Fall elektrischer Ladungen wirkt Vakuum polarisation wie ein Dielektrikum und schirmt die "nackte" Ladung  $Q$  ab. Effekt z.B. meßbar als Lamb-shift.

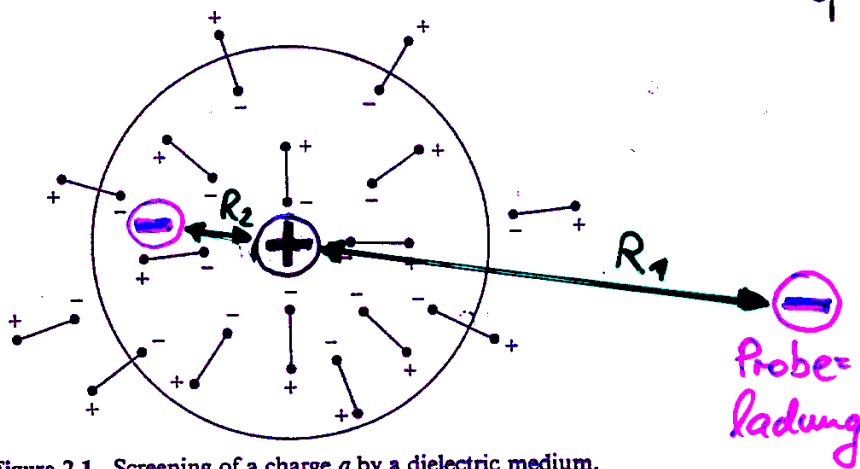
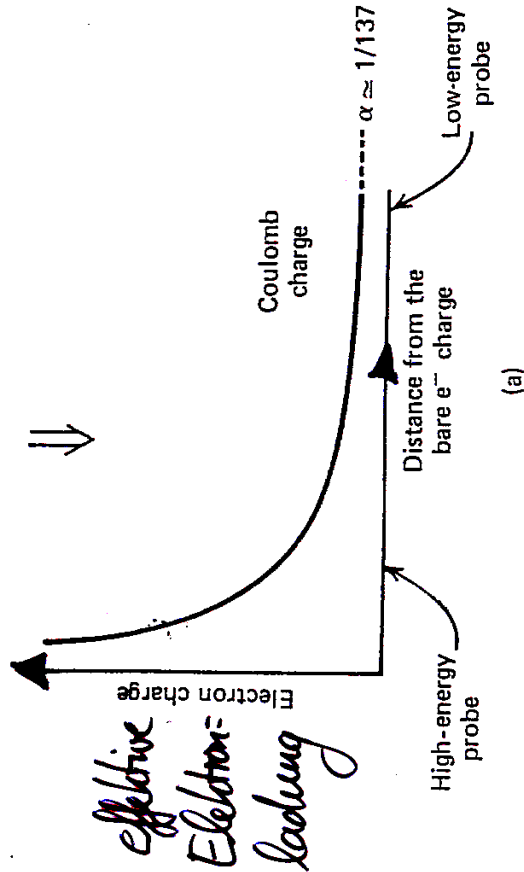
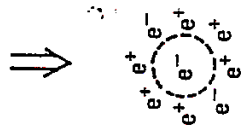
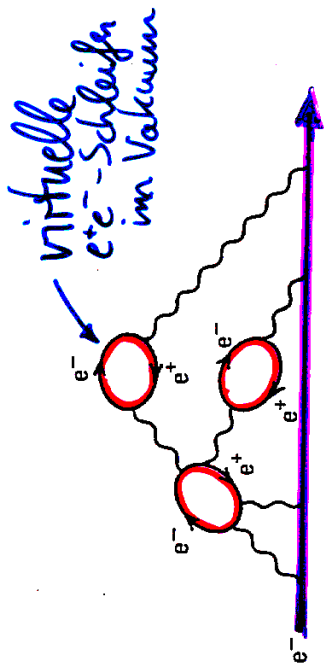


Figure 2.1 Screening of a charge  $q$  by a dielectric medium.

Bei großem Abstand  $R_1$  wirkt die Abschirmung stärker als bei kleinen Abständen  $R_2 < R_1$

↓  
sichtbare Ladung wird abstandsabhängig  
→ Energieabhängigkeit!

Quantum electrodynamics (QED)



Quantum chromodynamics (QCD)

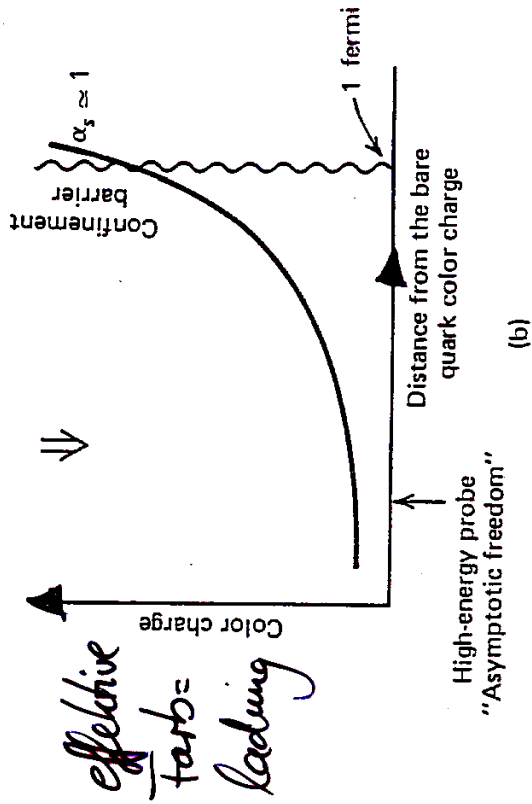
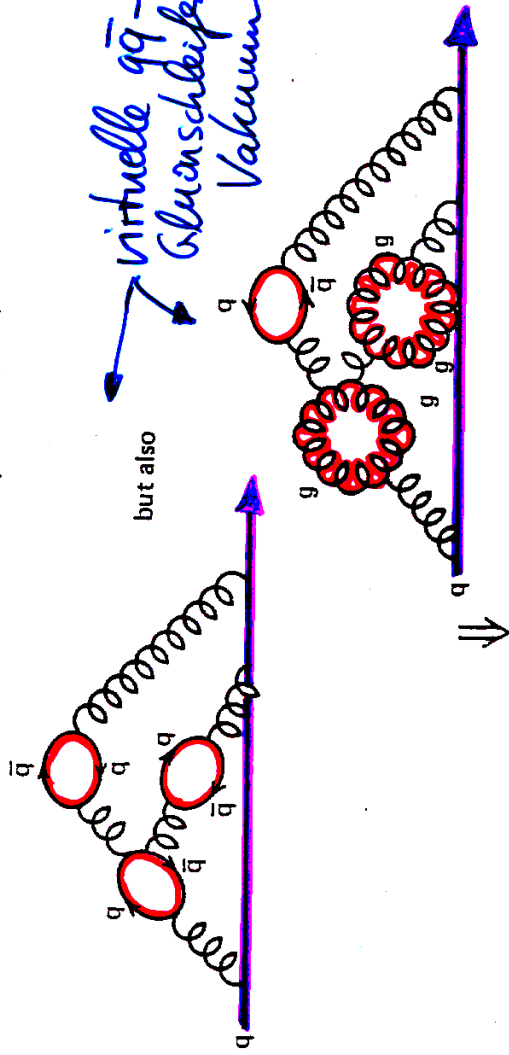


Fig. 1.5 Screening of the (a) electric and (b) color charge in quantum field theory.

# Vakuumpolarisation für Farbladungen

In diesem Fall verhält sich das Vakuum wie eine "paramagnetische Substanz" (Permeabilität  $\mu > 1$ ).

⇒ eine freie Farbladung wird durch Vakuumpolarisation "verstärkt" (Anti-Abschirmung)

sichtbare Farbladung wächst mit  
zunehmendem Abstand ( $\hat{=}$  abnehmender  
Energie)

Kopplungsstärke hängt von (sichtbarer) Ladung ab

$$\text{z.B. } \alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \quad ; \quad \alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$

⇒ Kopplungsstärke ist abstandsabhängig !  
" ist energieabhängig !

- gilt für jede Ladung, die das Vakuum polarisieren kann, insbesondere auch für electromagn. Kopplungskonstante  $\alpha_{em}$  !

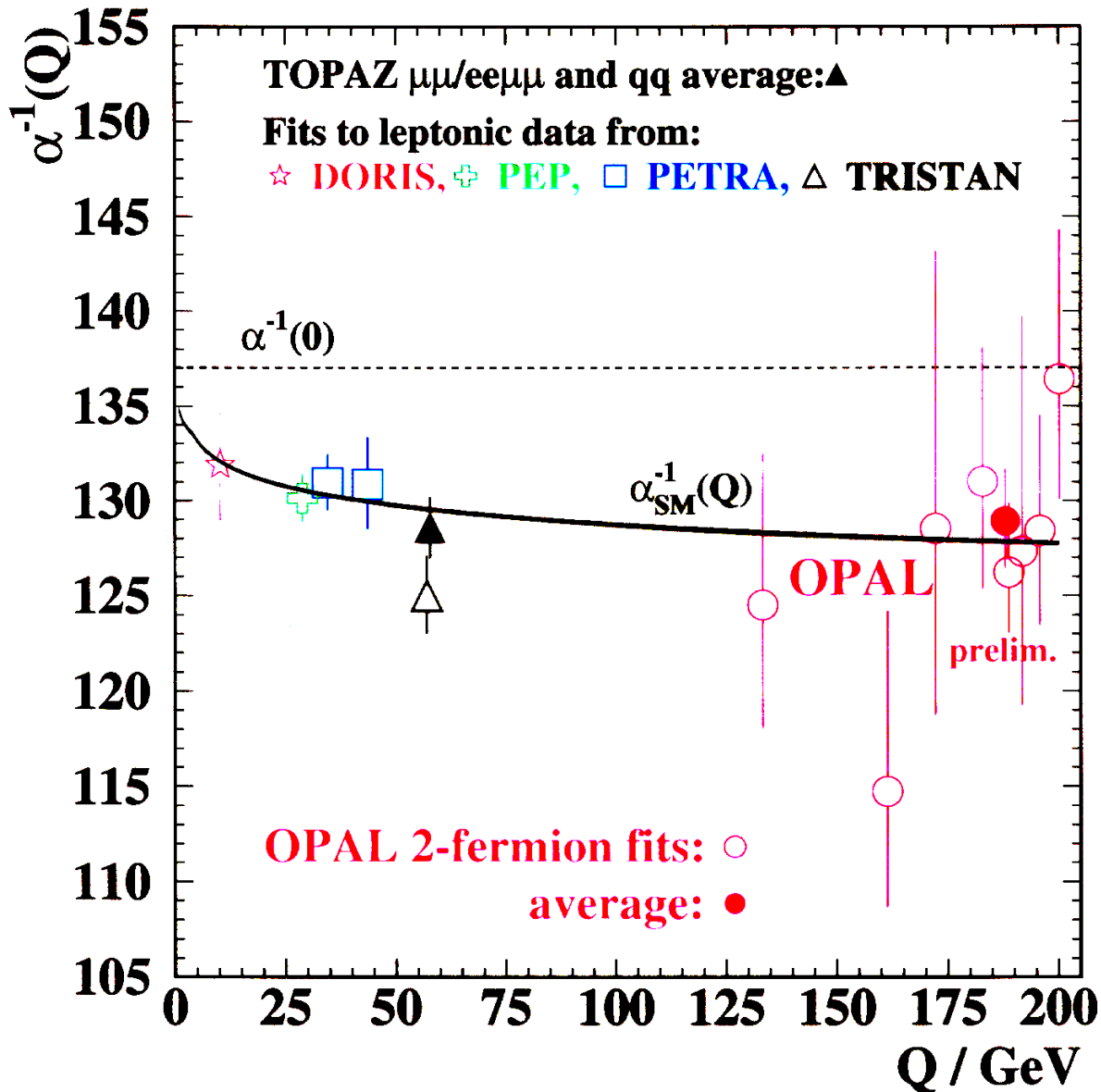


Figure 8: Fitted values of  $1/\alpha_{em}$  as a function of  $Q$ , which is  $\sqrt{s}$  for the OPAL fits. The open circles show the results of fits to OPAL data at each centre-of-mass energy, the closed circle the result of the combined fit in which  $\alpha_{em}$  runs with a slope corresponding to its fitted value. The OPAL results at 130–189 GeV are from [8–10]. Values obtained by the TOPAZ experiment [18] and from fits to measurements of leptonic cross-sections and asymmetries at the DORIS, PEP, PETRA and TRISTAN  $e^+e^-$  storage rings [19] are also shown. All measurements rely on assuming the Standard Model running of  $\alpha_{em}$  for  $Q_{lumi}$  below 5 GeV. The solid line shows the Standard Model expectation, with the thickness representing the uncertainty, while the value of  $1/\alpha_{em}(0)$  is shown by the dashed line.

# Renormierung

Ein mathematisches Verfahren, mit Problemen bei der Behandlung der Vakuum polarisation umzugehen (konkret: Absorption von Unendlichkeiten in sog. physikalischer Ladung und Masse eines Teilchens)

Renormierung muß für jede Energieskala  $\mu$  (Abstand) durchgeführt werden, aber **Berechnungsergebnis für meßbare Größe  $R$  muß von Renormierungsskala unabhängig sein!**

mathematisch:

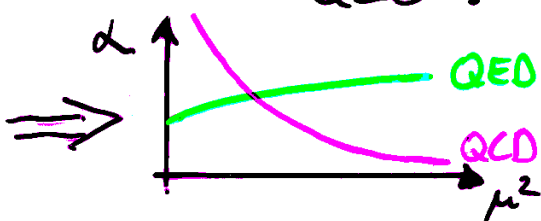
$$\mu^2 \frac{d}{d\mu^2} R \stackrel{!}{=} 0$$

⇒ Bedingungen für renormierte Kopplung (und Massen):  
**Renormierungsgruppengleichung**

$$\mu^2 \frac{\partial \alpha}{\partial \mu^2} = -\beta_0 \alpha^2 - \beta_1 \alpha^3 - \dots$$

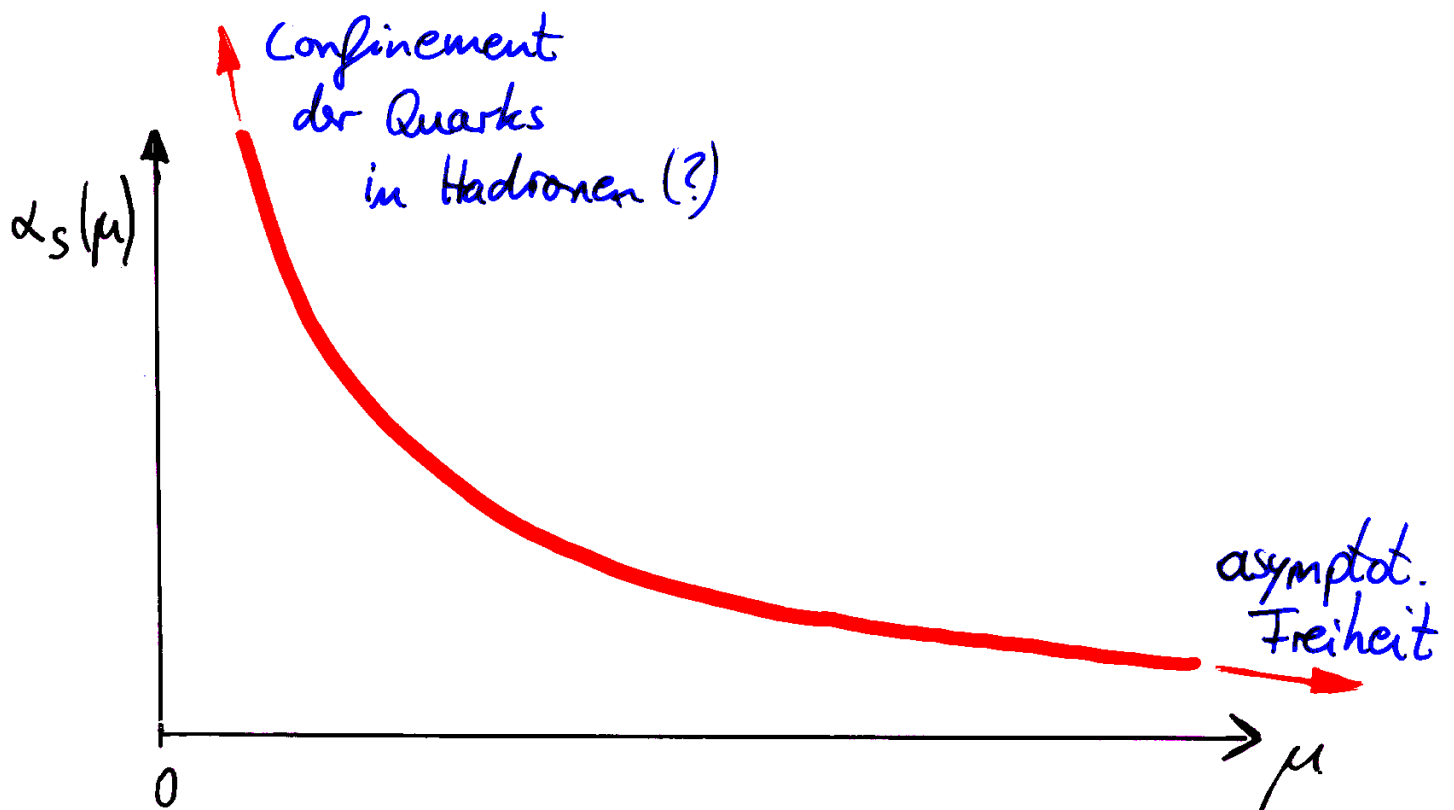
QED:  $\beta_0 = -\frac{4}{12\pi} \approx -0.11$

QCD:  $\beta_0 = \frac{33 - 2n_f}{12\pi} \stackrel{(n_f=5)}{\approx} +0.61$



Zahl der Quarks, die als Schleifen beitragen

## Energieverhalten von $\alpha_s$



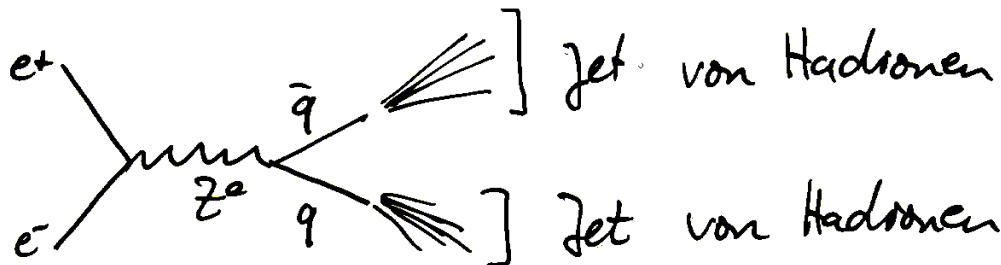
- **asymptotische Freiheit:** Für sehr geringe Abstände ( $\cong$  hohe Energie) verhalten sich Quarks wie "freie" Teilchen
- **Confinement:** Bei geringen Energien ( $\cong$  große Abstände) sind Quarks in Hadronen "eingesperrt"  
(noch nicht aus QCD-Theorie folgerbar)

# Experimentelle Untersuchung der QCD am LEP

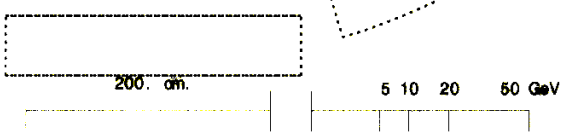
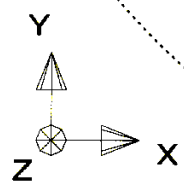
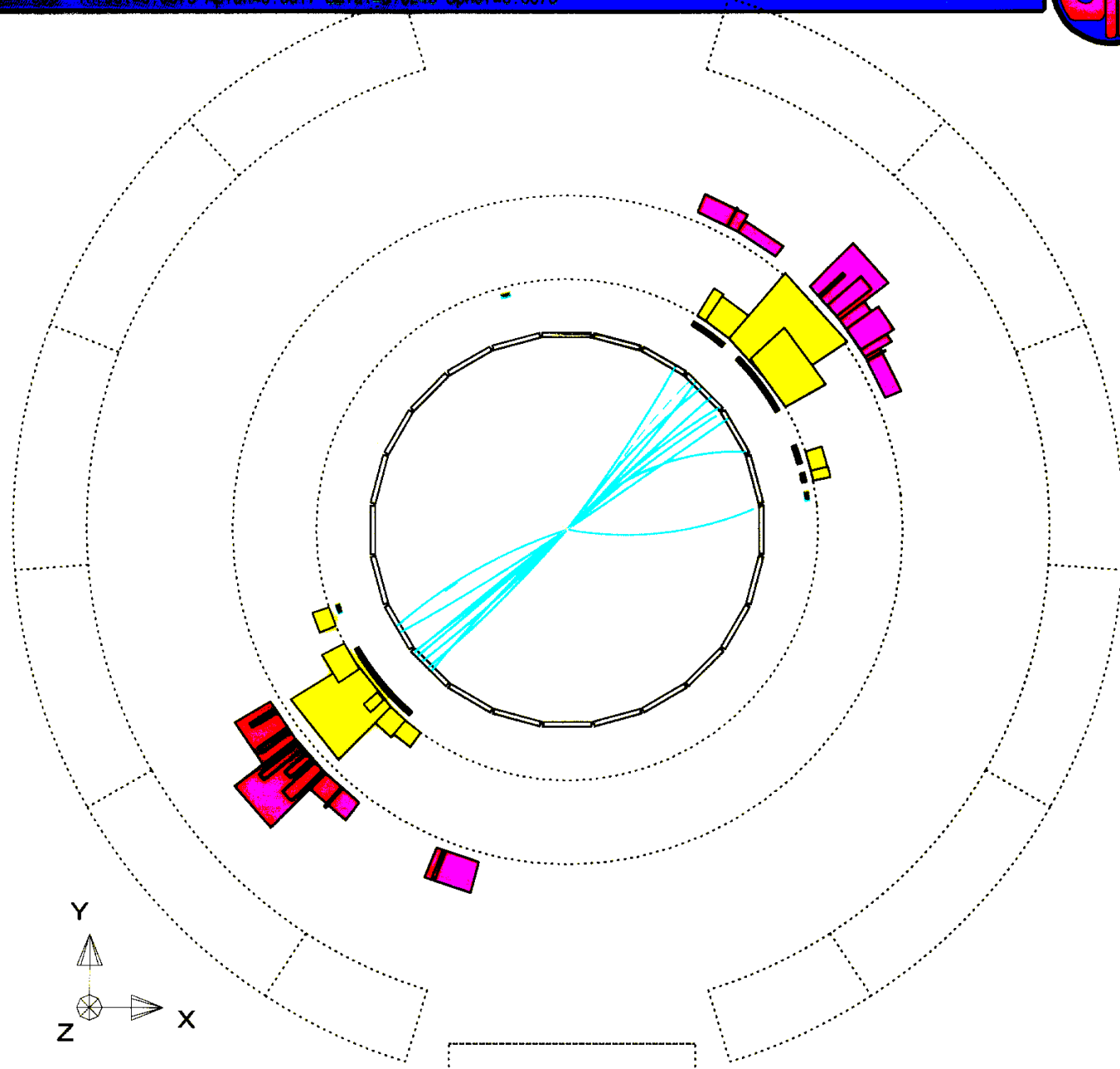
$e^+e^-$  Vernichtung gut zur Untersuchung der starken Wechselwirkung geeignet:

- ▷ großer Wirkungsquerschnitt für  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$
- ▷ einfacher Endzustand (nur  $q\bar{q}$ ) und wenige konkurrierende Untergrundprozesse

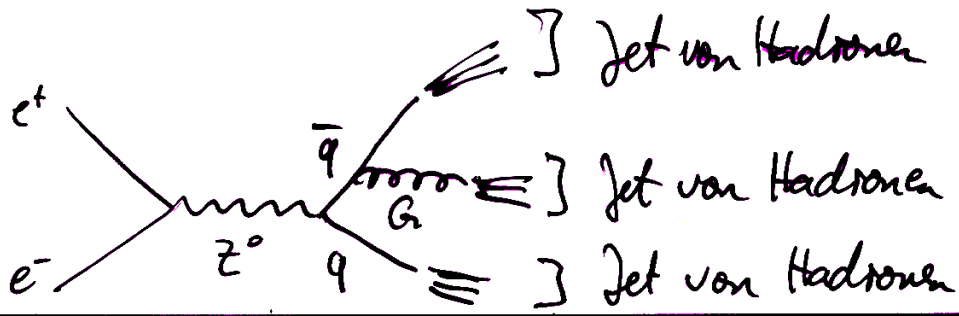




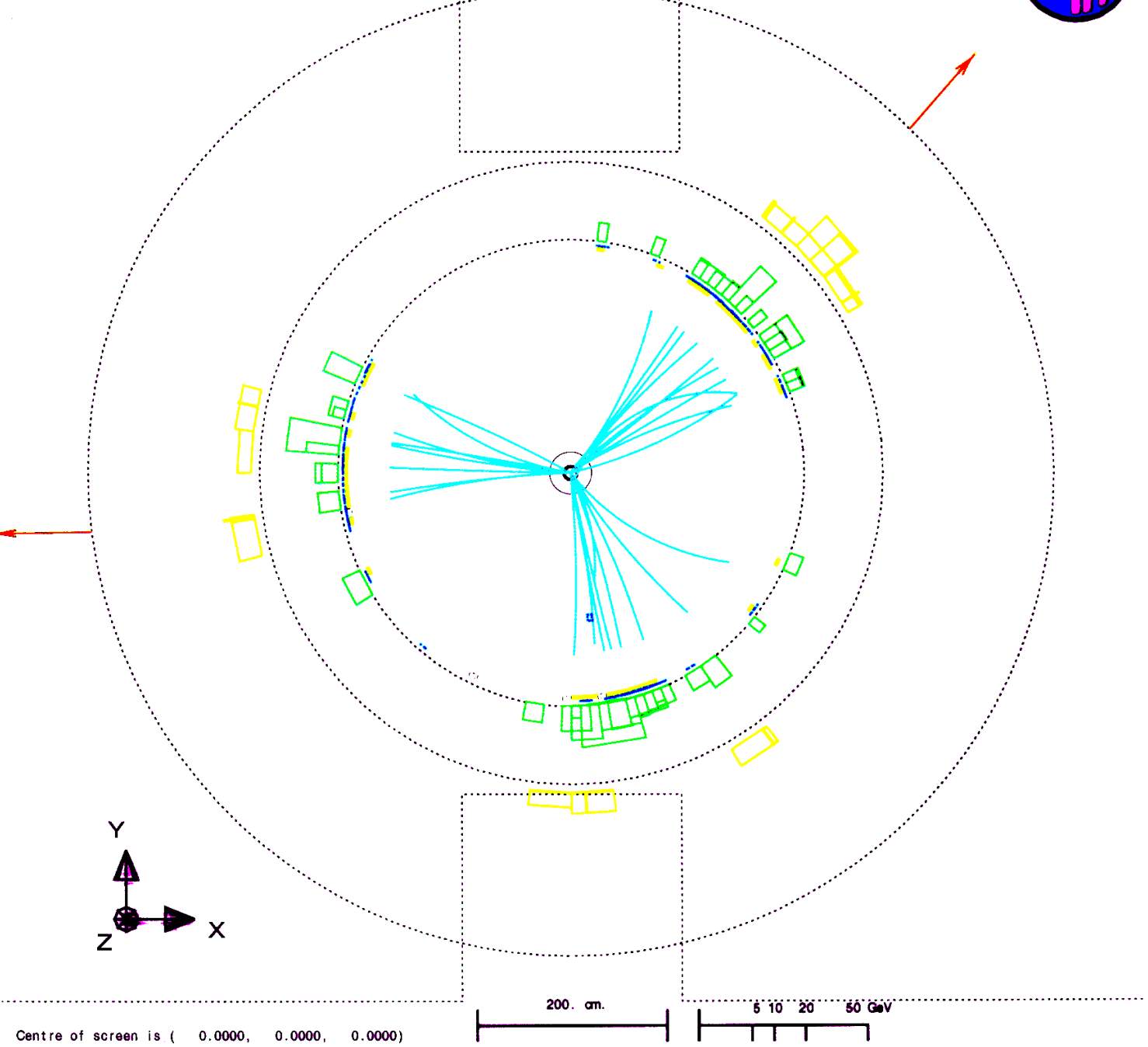
Run: event 4093; 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrb(N= 39 Sum= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)  
 Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emisc -8.6 Vtx ( -0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Sz=4.358 Thrust=0.8873 Apian=0.0017 Cflat=0.0246 Spher=0.0073



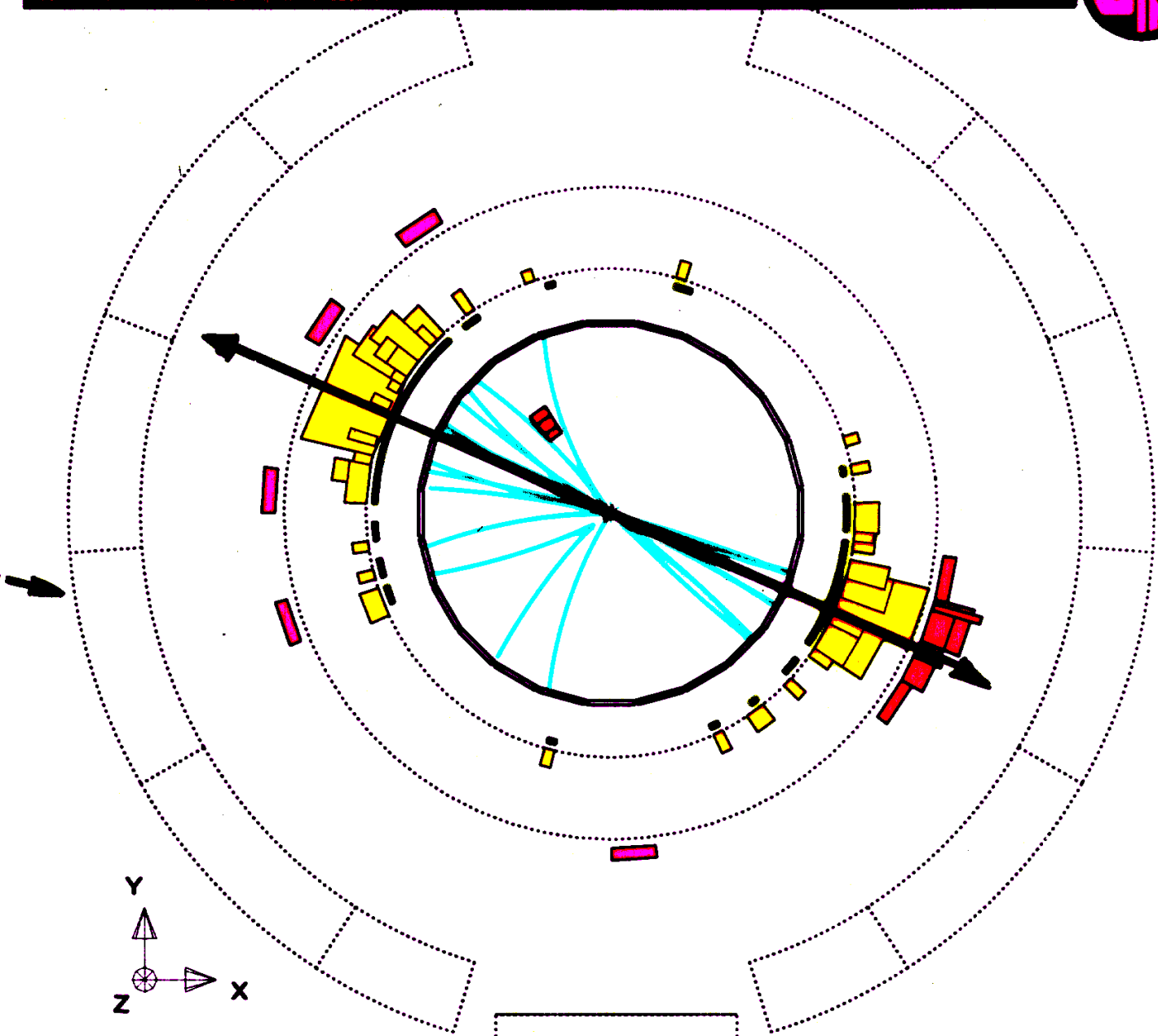
Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



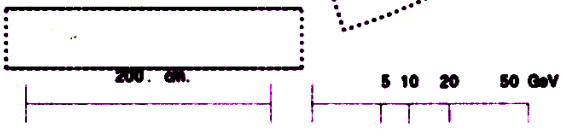
Run: event 2513: 61702 Date 910910 Time 85656 Ctrk(N= 37 Surp= 65.7) Ecal(N= 55 SurE= 44.8) Hcal(N=19 SurE= 8.6)  
 Ebeam 45.613 Evis 90.2 Emiss 1.1 Vtx ( -0.09, 0.10, -0.22) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SurE= 0.0)  
 Bz=1.350 Thrust=0.6788 AcJan=0.0391 Calat=0.4248 Spher=0.6273



Beam Energy: 200 GeV (200.000 GeV) Beam Size: 0.000000 Beam Size: 0.000000  
 Event Energy: 200.000 GeV Beam Size: 0.000000 Beam Size: 0.000000  
 Beam Energy: 200.000 GeV Beam Size: 0.000000 Beam Size: 0.000000

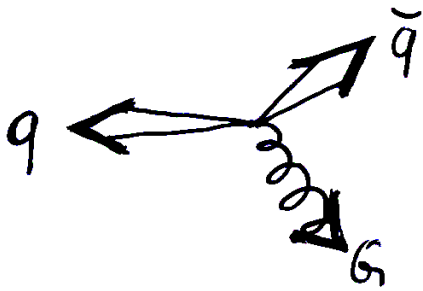


Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

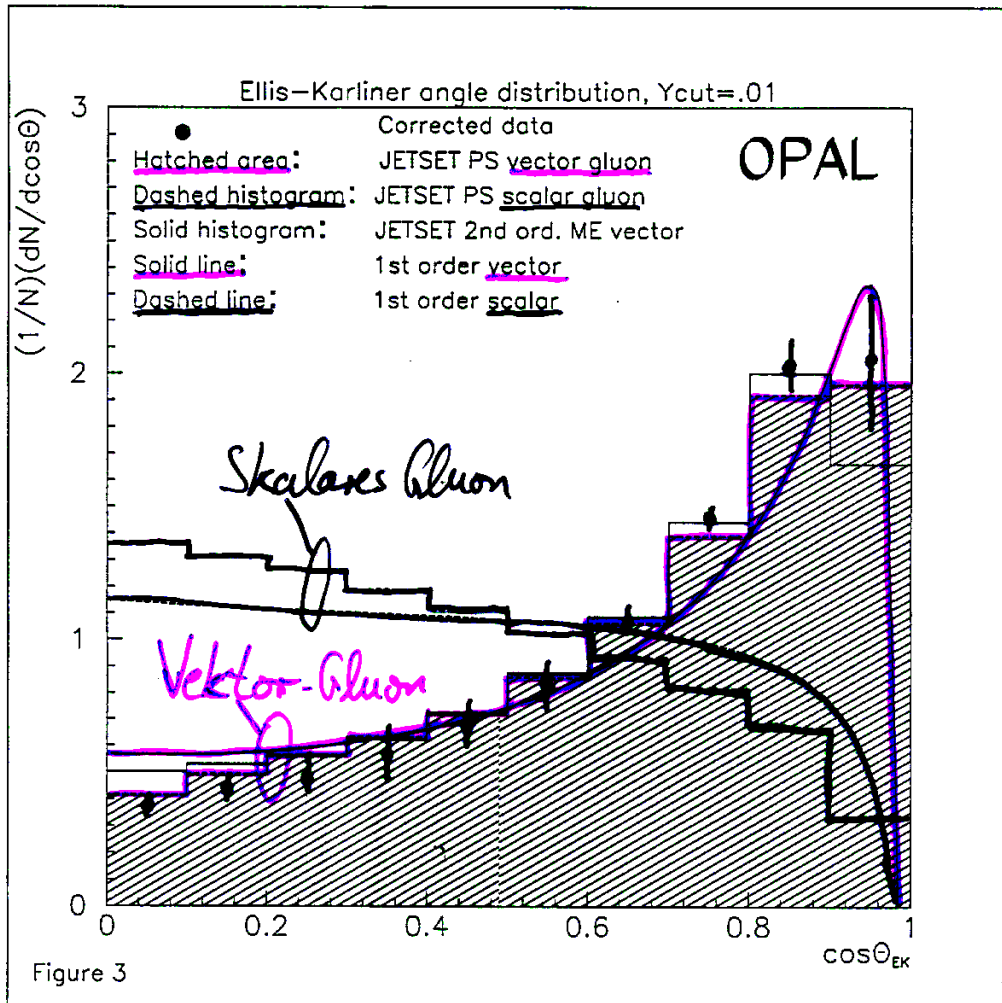
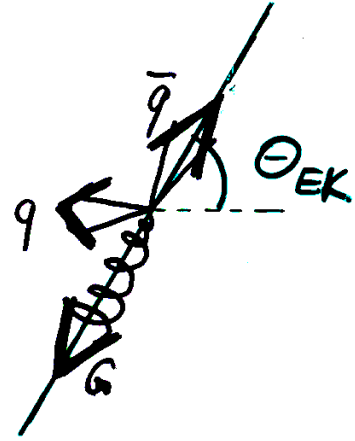




# Gluonen Spin



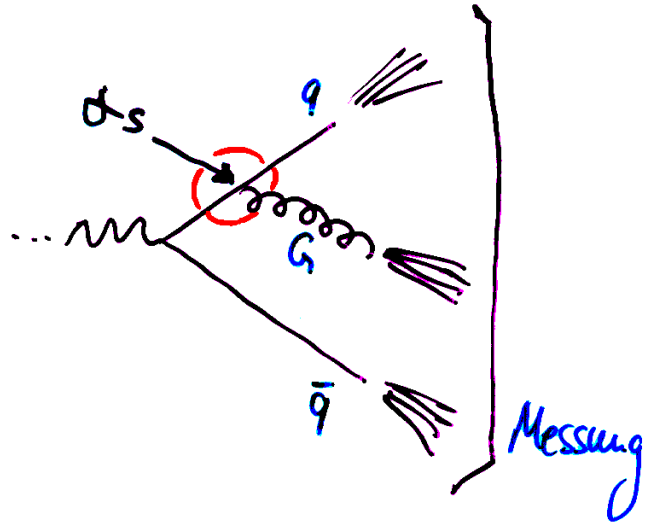
Boost  
(Lorentz-Transformation)



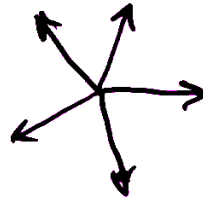
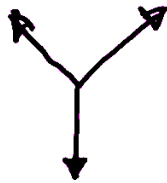
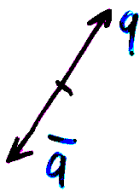
⇒ Gluon ist Teilchen mit Spin 1

# Bestimmung von $\alpha_s$ : Verfahren

- indirekter Zugang zu  $\alpha_s$






- statistische Messung: unterschiede Häufigkeit von  $m_{\leftarrow}$  und  $m_{\rightarrow}$   $\rightarrow$  durch  $\alpha_s$  gegeben
- Meßgrößen nutzen beispielsweise die Topologie des Endzustandes:



$\Rightarrow$  [ sogenannte "event shapes"  
auf räumliche Verteilung der Quarks & Gluonen  
sensitive Meßgrößen

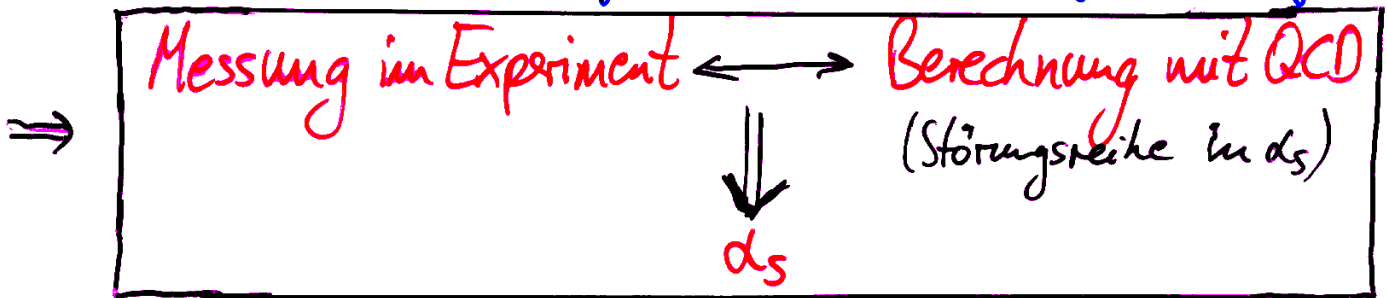
# Topologie - Meßgrößen

Beispiele:

$F$				
Thrust	max. Longitudinal-impuls	1	$\geq \frac{2}{3}$	$\geq \frac{1}{2}$
G-Parameter	$\overline{\sin^2 \Theta_{ij}}$ $\Theta_{ij}$ : Winkel zw. Teilchen	0	$\leq \frac{3}{4}$	$\leq 1$
Jetraten	$\frac{\#(\text{3-jet})}{\#(\text{1-jet}) + \#(\text{2-jet}) + \dots}$ proportional $\alpha_s^{n-2}$	2-jetartig	3-jetartig	n-jetartig

•  
•  
•

→ jedes registrierte Ereignis → eine Zahl (z.B. Thrust = 0.78)  
 → mit vielen Ereignissen → Verteilung der Meßgröße



Aber warum so viele verschiedene Meßgrößen?

# Hadronisierung - ein prinzipielles Problem

- Wie entstehen aus Quarks & Gluonen letztlich Hadronen?  
Bisher nicht berechenbar → phänomenologische Modelle

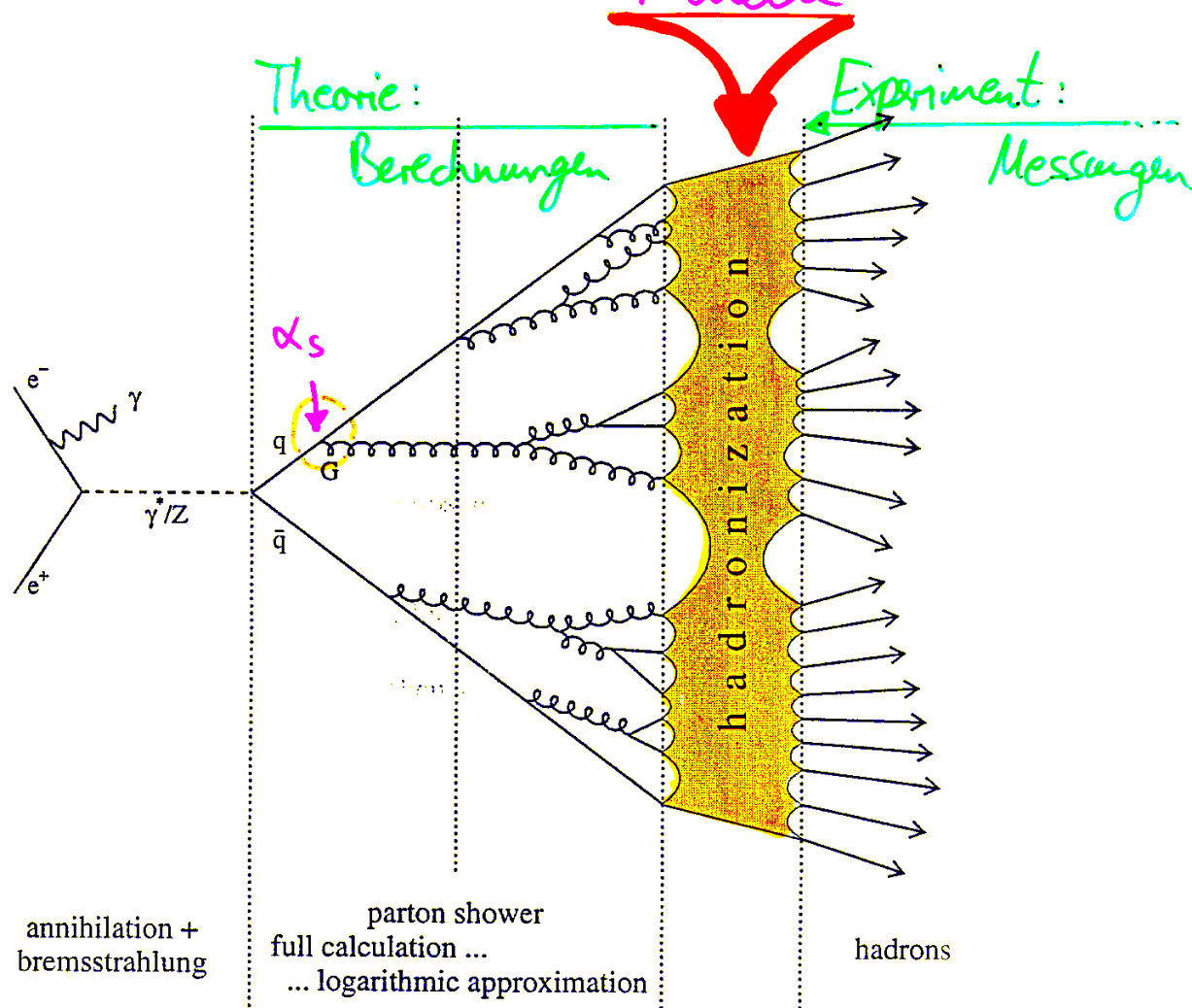


Fig. 3. Schematic representation of an  $e^+e^-$  annihilation process into hadrons.

Hadronisierung  $\leadsto$  jede Meßgröße  $F$  individuell betroffen  
 $\leadsto$   $\alpha_s$  aus  $F$  betroffen

$\hookrightarrow$  viele verschiedene  $F$  ( $\leadsto \alpha_s$ ) messen

$\Rightarrow$  Mittelung aller  $\alpha_s(F)$  reduziert Hadronisierungseinfluß



# Zwei verbreitete Hadronisierungsmodelle

## String-Modell

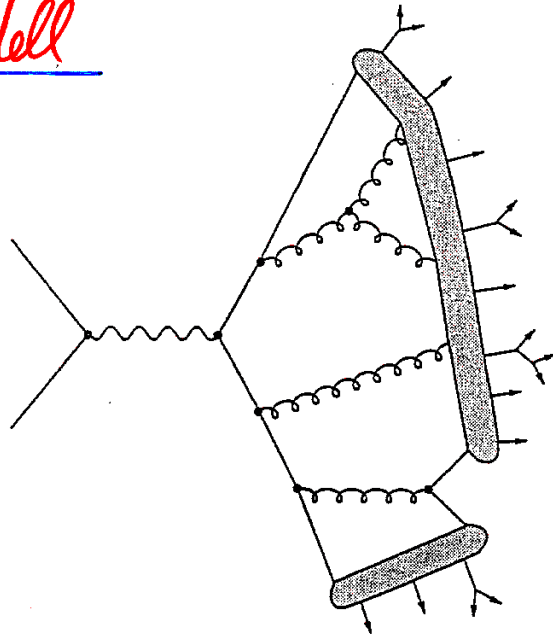


Fig. 5.14. Parton shower with string hadronization model for  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ .

Zwischen Quarks und Antiquarks bildet sich ein String, der beim Auseinanderziehen unter Bildung neuer  $q\bar{q}$ -Paare zerfällt, bis sich Hadronen aus den Resten bilden, wenn die Energie zum Zerreiß nicht mehr genügt.

## Cluster-Modell

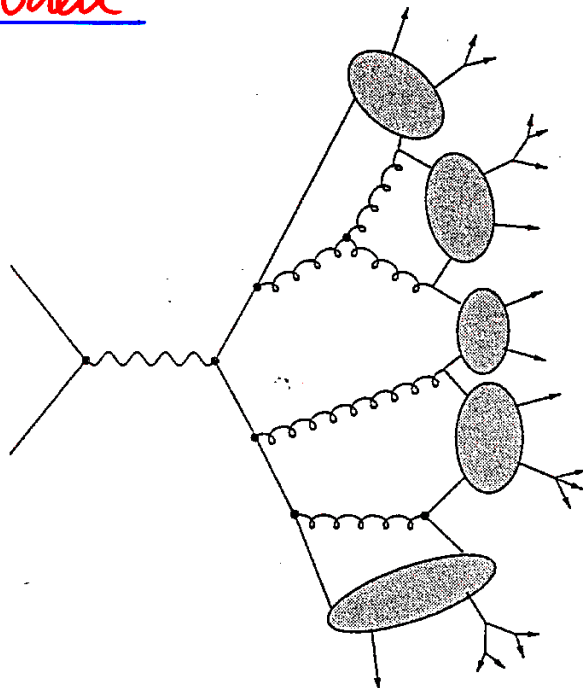


Fig. 5.15. Parton shower with cluster hadronization model for  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ .

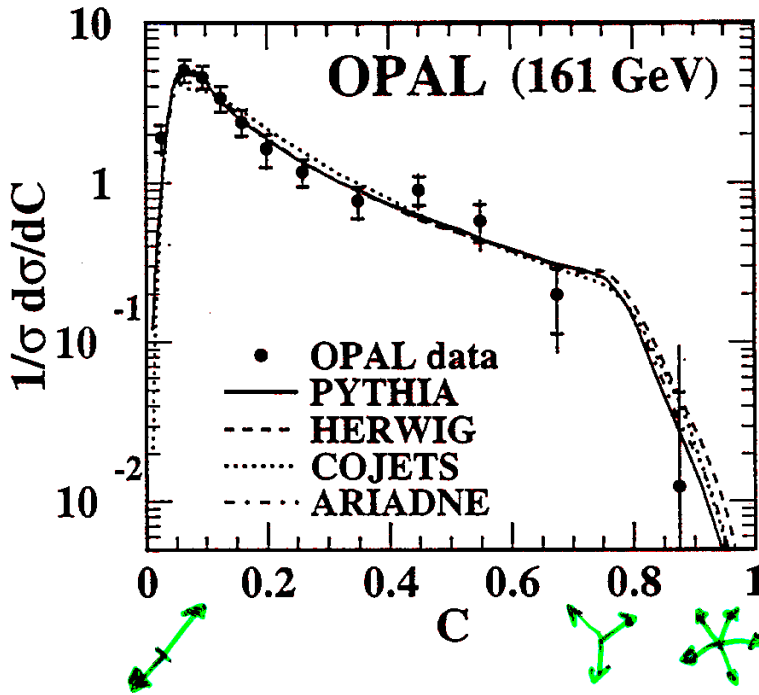
Quarks und Antiquarks bilden farbneutrale Cluster, die quasi superschwere Teilchen ohne festen Massenwert darstellen, welche dann in die bekannten Teilchen zerfallen.

# Vergleich: Messung - Modell

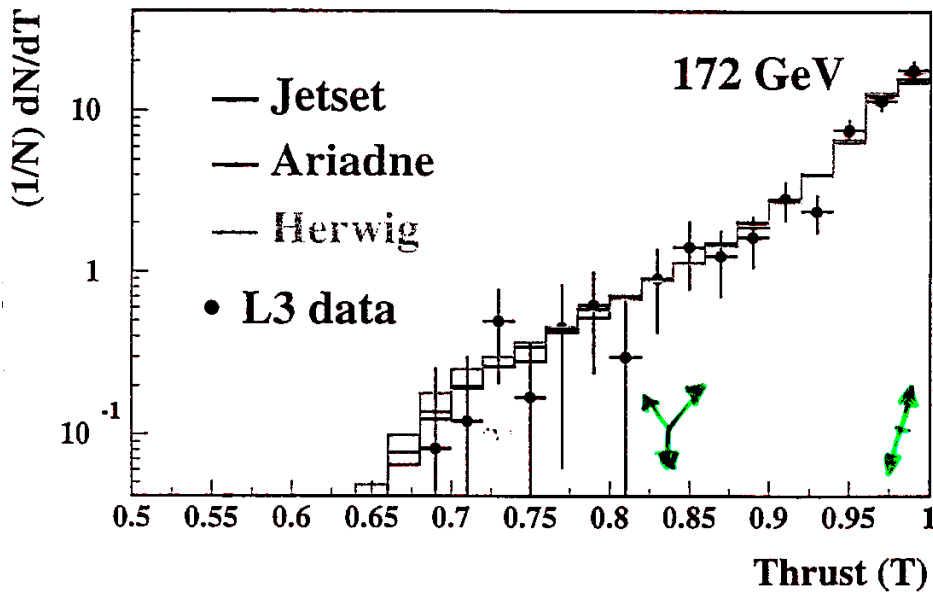
- phänomenolog. Hadronisierungsmodelle:  
umfangreiche Computerprogramme (~ 10000 Zeilen) +  
Parameter als Monte-Carlo-Simulation + QCD-Theorie

● Vergleich:

▷ C-Parameter



▷ Thrust



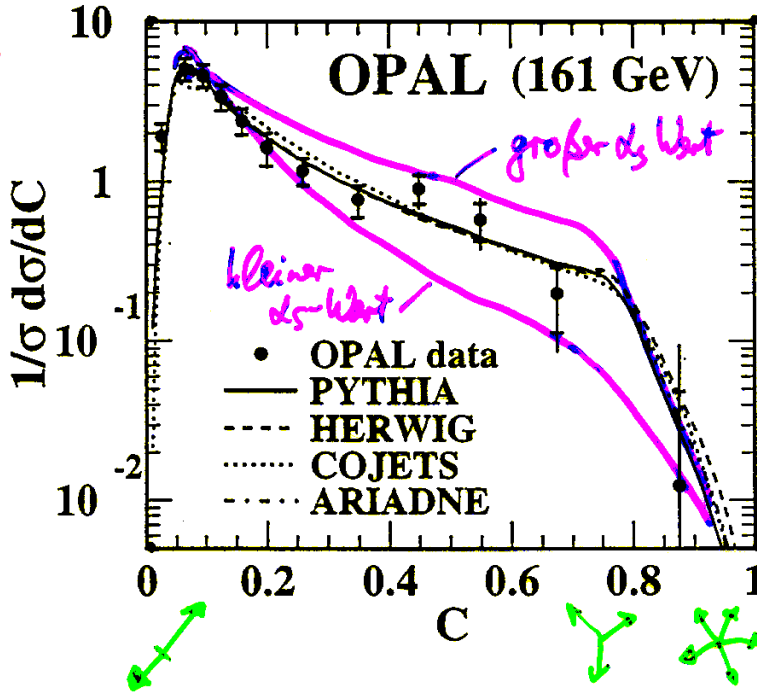
⇒ Modelle beschreiben Daten erstaunlich gut!

# Vergleich: Messung - Modell

- phänomenolog. Hadronisierungsmodelle:  
umfangreiche Computerprogramme (~ 10000 Zeilen) +  
Parameter als Monte-Carlo-Simulation + QCD-Theorie

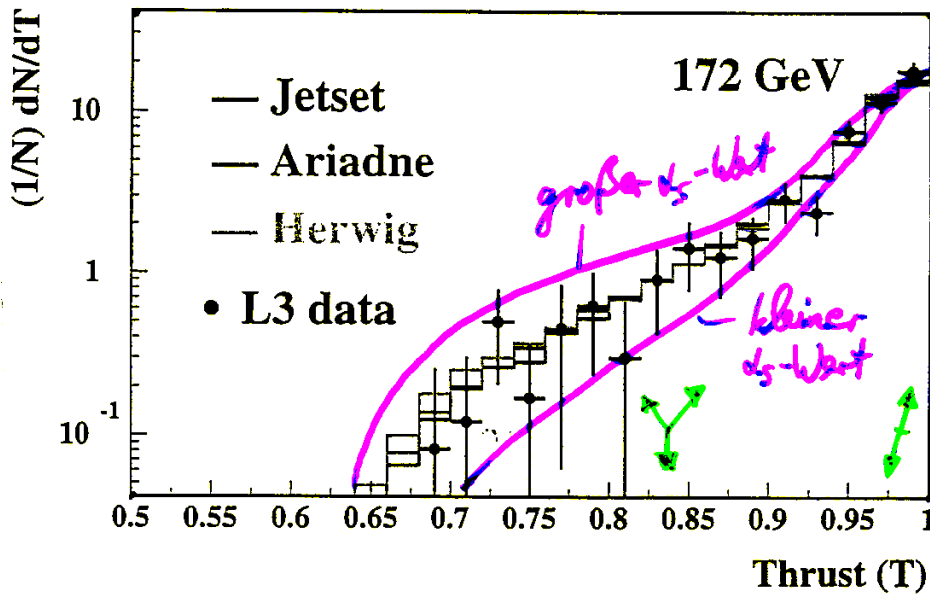
• Vergleich:

▷ C-Parameter



α<sub>s</sub>-Bestimmung  
durch Anpassung  
der QCD-Rechnung  
mit α<sub>s</sub> als  
Parameter

▷ Thrust



⇒ Modelle beschreiben Daten erstaunlich gut!

# Energieabhängigkeit der Kopplungskonst. $\alpha_s$

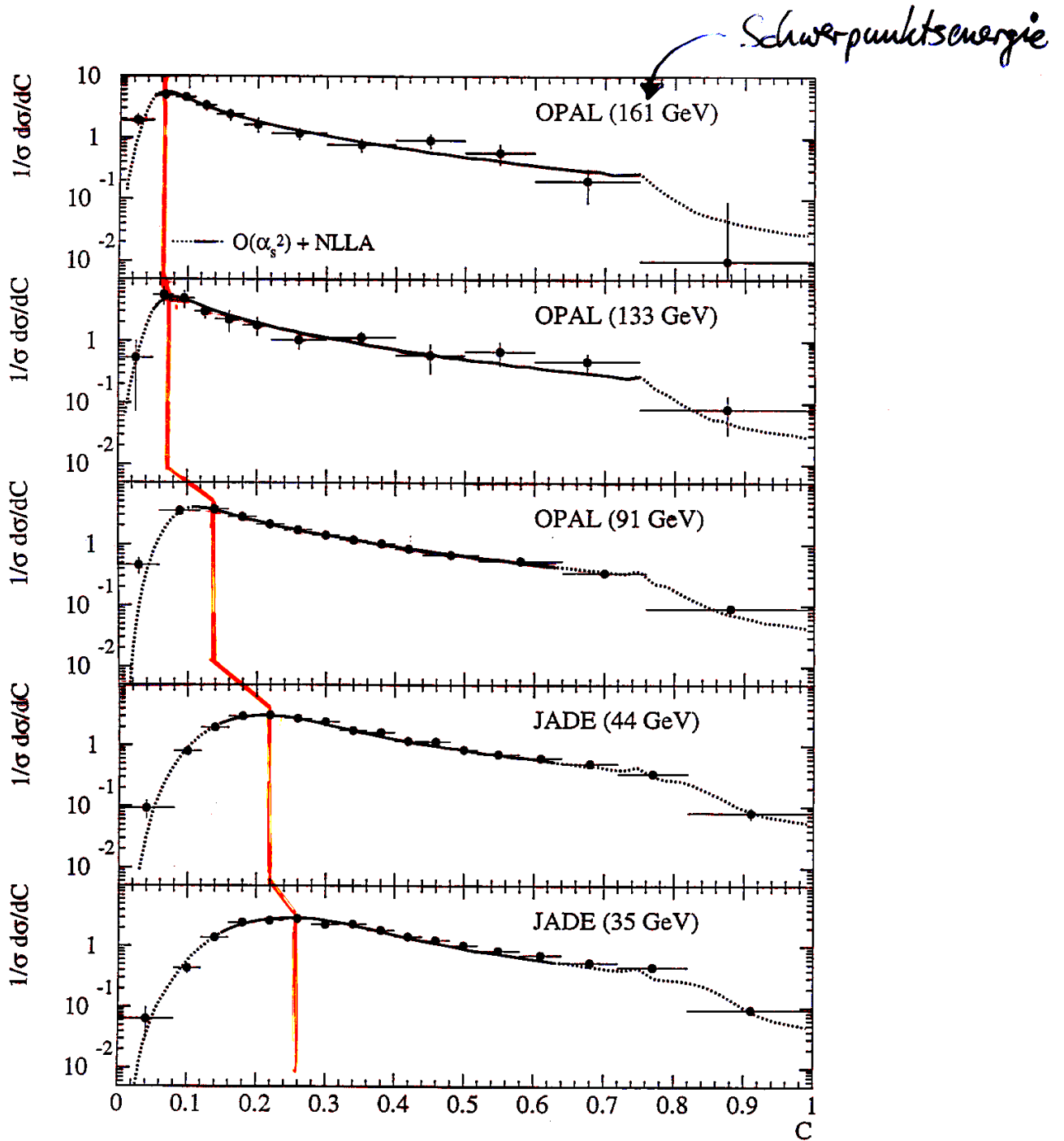
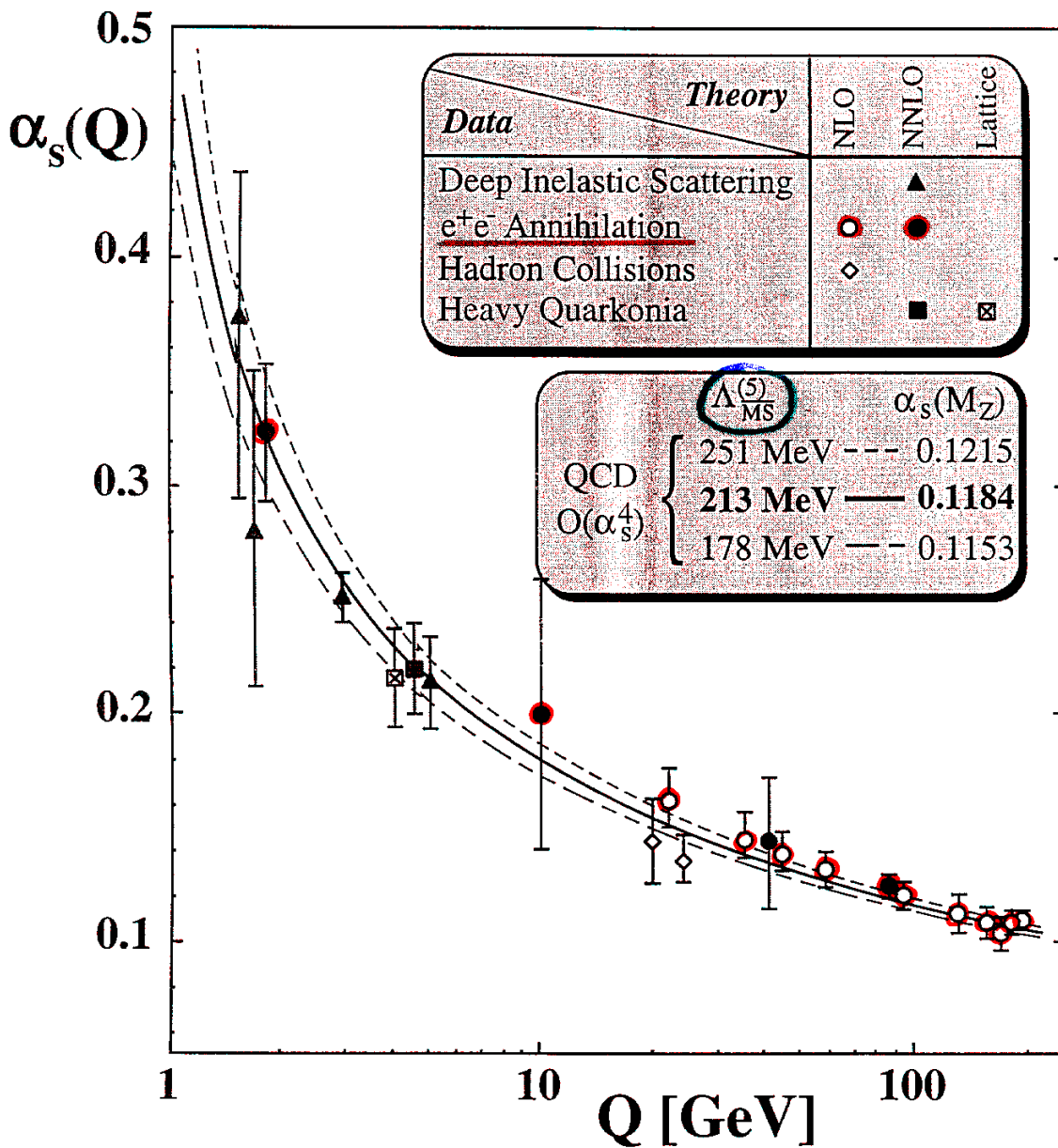


Fig. 20. Distributions of C-parameter as measured between 35 and 161 GeV. The fit results of  $\ln R$ -matched  $NLLA + \mathcal{O}(\alpha_s^2)$  predictions are superimposed as dotted curves where the solid line indicates the fit range. Data are taken from Ref. [104, 129, 130, 139].

# Übersicht der $\alpha_s$ -Bestimmungen



Energieverhalten der Kopplungsstärke  $\alpha_s$  wie von QCD erwartet!

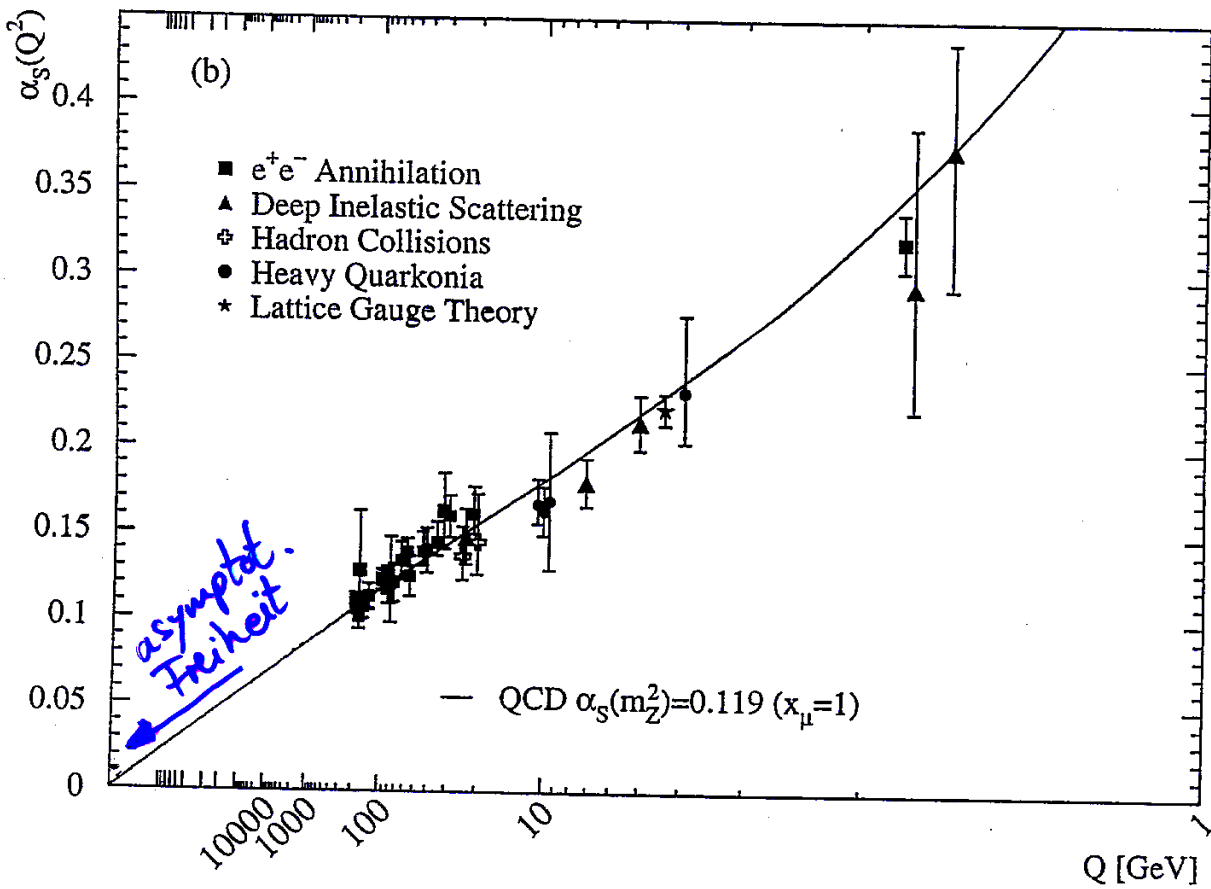
Kurve ist Lösung der Renormierungsgruppengleichung der QCD:

$$\alpha_s(Q) = \frac{1}{\beta_0 \ln(Q^2/\Lambda_{\overline{MS}}^2)} \cdot [1 + \text{Korrekturen}]$$

↑  
anzupassender Parameter

# Asymptotische Freiheit

für  $\infty$ -hohe Energien verhalten sich Quarks wie freie Teilchen, da die Kopplungskonst.  $\rightarrow 0$



asymptot. Freiheit wird im Rahmen der erreichbaren Energien experimentell bestätigt

## Status der QCD

- Kopplungskonst.  $\alpha_s$  energieabhängig ✓
- asymptotische Freiheit ✓
- Stärke der Kopplung :  $\alpha_s(Q=m_Z) \approx 0.12$  ✓
- Existenz von drei Farbladungen ✓
- Existenz des Gluons ✓
- Existenz der Gluon-Gluon-Kopplung ✓
- 
- 
- 

⇒ QCD scheint eine korrekte Beschreibung der starken Wechselwirkung zu geben, obwohl sie das Entstehen und die Existenz von Hadronen <sup>(noch)</sup> nicht aus grundlegenden Prinzipien erklären kann.