

Die Entdeckung des Gluons

SCHLÜSSELEXPERIMENTE DER TEILCHENPHYSIK

LUKAS WITOLA

Gliederung

Physikalische Vorgeschichte

- Quarks und Partonen
- Quantenchromodynamik

Beschleuniger und Detektoren

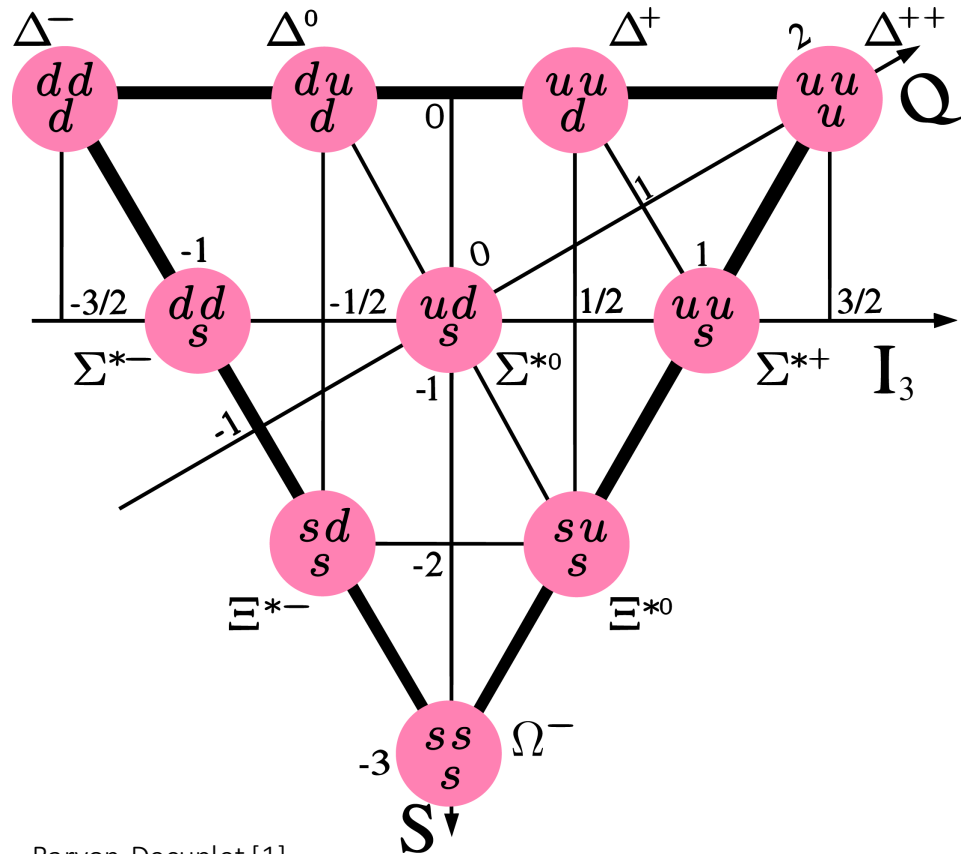
- PETRA
- JADE

Die Entdeckung des Gluons

- Hadronische Ereignisse
 - Interpretation
 - Jet-Analyse

Physikalische Vorgeschichte

Quarkmodell



Baryon Decuplet [1]

1964 Quarkmodell für Hadronen (Gell-Mann, Zweig)

- Hadronen bestehen aus elementaren Fermionen (Quarks)
- Einteilung der Hadronen nach Strangeness (S) und Isospin (I)
- Mathematisches Konstrukt!

Farbladung

Problem: Δ^{++} -Baryon

Fermion mit $S = \frac{3}{2}$

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

$\Rightarrow |\Delta^{++}\rangle$ ist symmetrisch unter Vertauschung zweier Quarks

$\Rightarrow$ Widerspruch zum Pauli-Prinzip!

*Die Wellenfunktion von Fermionen ist antisymmetrisch
bzgl. der Vertauschung zweier Teilchen*

Farbladung

Lösung: Einführung einer weiteren Quantenzahl „Farbe“ (1964 Greenberg, Han)

Jedes Quarks (Antiquark) kann in drei Farbzuständen existieren r, g, b ($\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$)

Gebundene Zustände sind farbneutral

Konstruktion einer neuen Wellenfunktion:

- $|\Delta^{++}\rangle = |uuu\rangle|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle|Farbe\rangle$
- Mit $|Farbe\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}}(|rgb\rangle - |grb\rangle + |gbr\rangle - |bgr\rangle + |brg\rangle - |rbg\rangle)$
- $|Farbe\rangle$ ist antisymmetrisch bzgl. Vertauschung zweier Farben

⇒ Pauli-Prinzip gerettet!

Anfang der Quantenchromodynamik

Partonen

1969 Nachweis der Partonen in Versuchen zur tiefinelastischen Streuung (Friedmann, Kendall, Taylor)

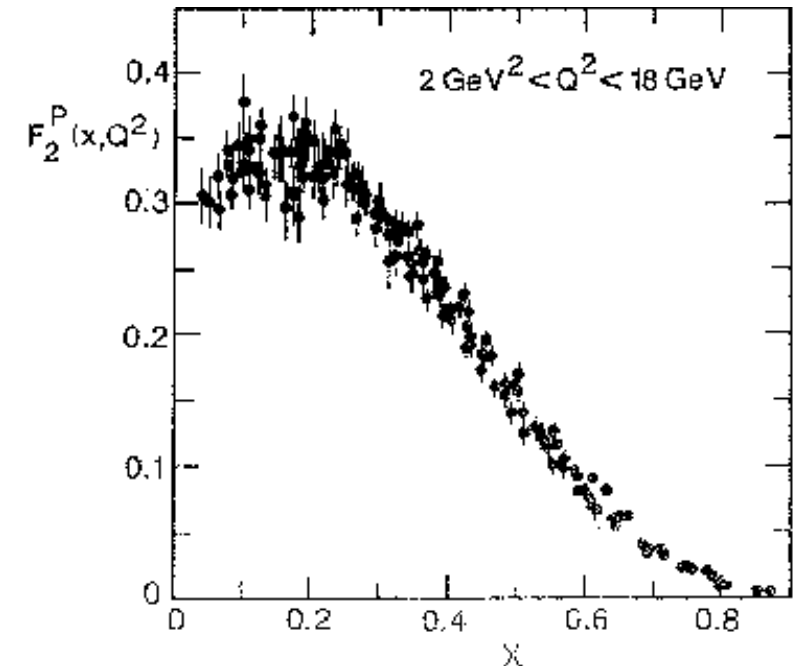
Bjorken: Erklärte Skalenverhalten des Wirkungsquerschnitts
→ Streuung an Punktteilchen

Feynman: Hadronen bestehen aus vielen freien Partonen → Skalenverhalten

Weitere Experimente am SLAC und CERN zur Vermessung der Strukturfunktion

- Peak bei $X \leq \frac{1}{3} \rightarrow$ Proton besteht aus 3 Partonen (Valenzquarks)
- Übereinstimmung von Quark- und Partonmodell

Aber zunächst keine Erklärung für fehlenden Impuls



Messung der Strukturfunktion F_2 des Protons [6]

Quantenchromodynamik

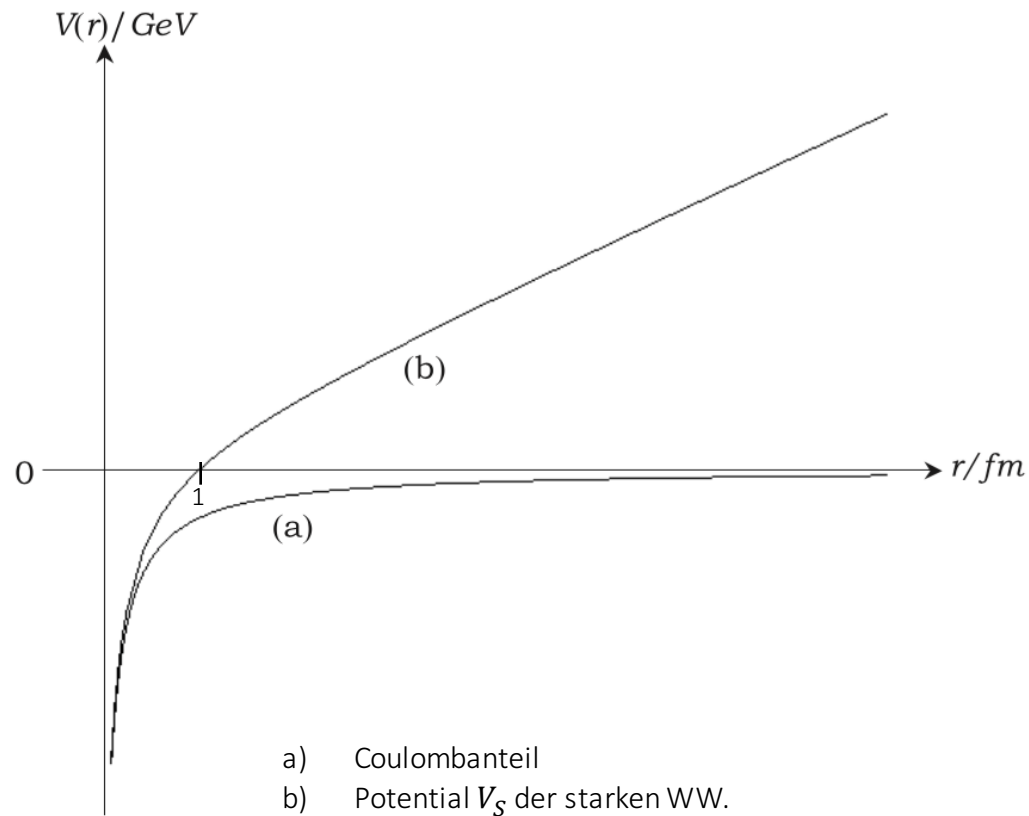
1970er Quantenchromodynamik (Leutwyler, Gell-Mann, Fritzsche)

Beschreibt Starke Wechselwirkung, Analogie zur QED

Aber zwei besondere Eigenschaften:

- Confinement → Keine Beobachtung freier Quarks möglich
- Asymptotische Freiheit → Quarks sind bei kurzen Distanzen ($r \ll fm$) und hohen Energien kaum noch gebunden
- Beides impliziert eine „laufende“ Kopplungskonstante α_s der starken Wechselwirkung

Quantenchromodynamik



$q\bar{q}$ -Potential der starken Wechselwirkung

$$V_S = -\frac{3}{4} \frac{\alpha_S}{r} + \sigma r, \sigma = \text{const}$$

- Linearer Term in $r \rightarrow$ Confinement
- Für kleine $r \rightarrow$ Asymptotische Freiheit

$$\alpha_S(Q^2) = \left(\beta_0 \ln \left(\frac{Q^2}{\Lambda^2} \right) \right)^{-1}$$

- $\lim_{Q^2 \rightarrow \infty} \alpha_S = 0$
- $r \sim \frac{1}{\sqrt{Q^2}}$
- $r > 1 \text{ fm} \Rightarrow \alpha_S \gg 1$

Quantenchromodynamik

Austauschteilchen: Gluon

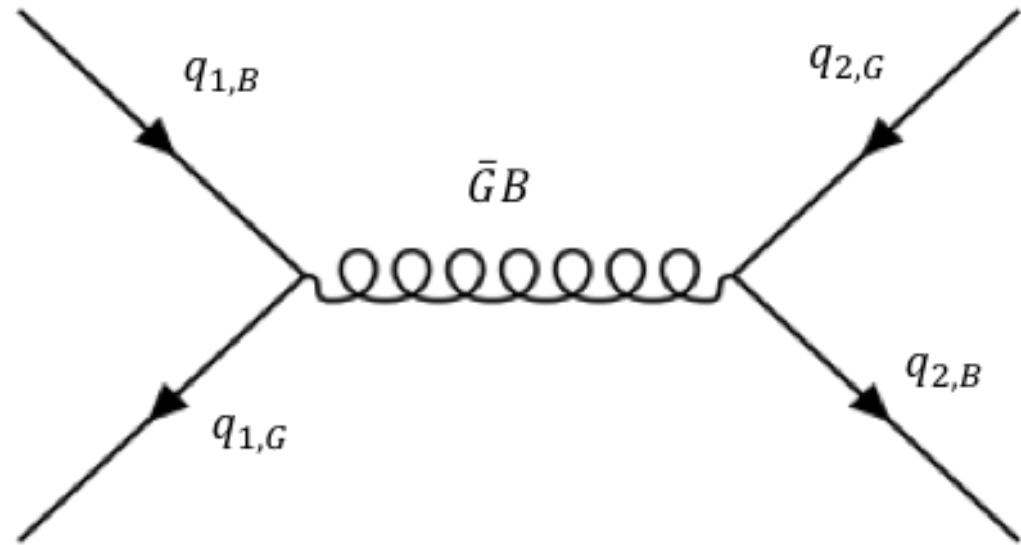
9 mögliche Gluonen, Oktett und Singulett

Oktett:

- $|R\bar{G}\rangle, |R\bar{B}\rangle, |G\bar{B}\rangle, |G\bar{R}\rangle, |B\bar{R}\rangle, |B\bar{G}\rangle$
- $\frac{1}{\sqrt{2}}(|R\bar{R}\rangle - |G\bar{G}\rangle), \frac{1}{\sqrt{6}}(|R\bar{R}\rangle + |G\bar{G}\rangle - 2|B\bar{B}\rangle)$

Singulett:

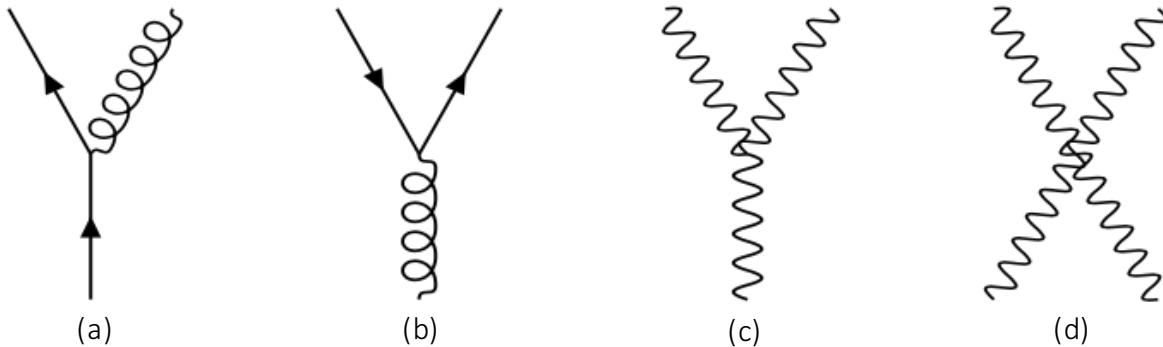
- $\frac{1}{\sqrt{3}}(|R\bar{R}\rangle + |G\bar{G}\rangle + |B\bar{B}\rangle)$
- Symmetrisch, trägt keine Farbe
- Keine Wechselwirkung
- „sieht“ nichts von der Welt und umgekehrt



Gluonaustausch zweier Quarks

Quantenchromodynamik

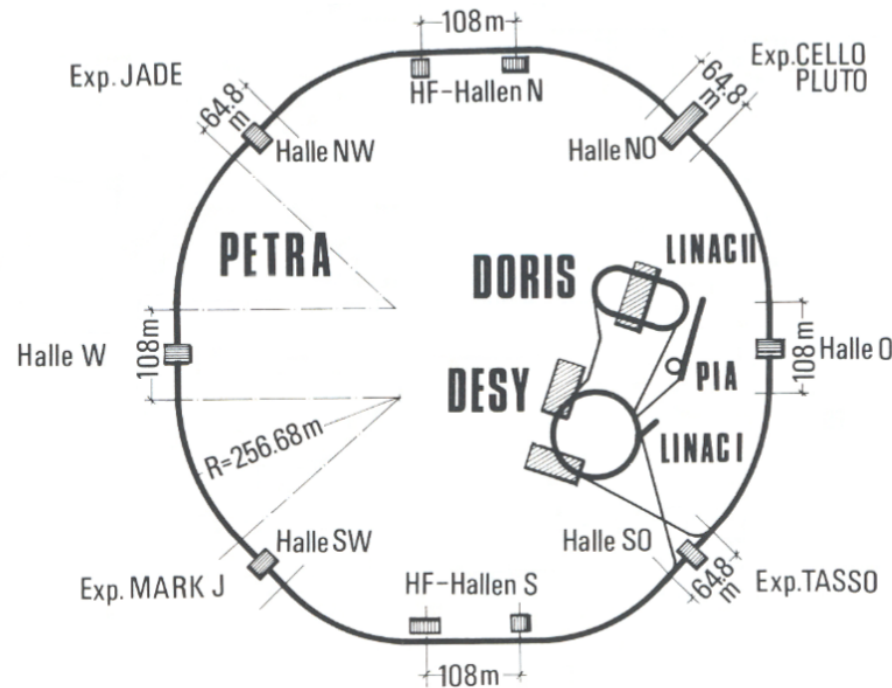
Gluonen tragen Farbladung
→ Selbstwechselwirkung



- a) Gluon Bremsstrahlung
- b) Aufspaltung in ein Quark-Antiquarkpaar
- c) , d) Selbstwechselwirkung

Beschleuniger & Detektoren

Der Beschleuniger PETRA



Der e^+e^- Beschleuniger PETRA [2]

PETRA (Positron-Electron Tandem Ring Accelerator)

Beschleuniger am DESY (Deutsches Elektron-Synchrotron)

Maximale Schwerpunktsenergie: 47 GeV

Limitiert durch Synchrotronstrahlung

- Energieverlust pro Umlauf: $\Delta E \sim \frac{\beta^4}{r} \left(\frac{E}{m_0 c^2} \right)^4$

Ziele von PETRA:

- Untersuchung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung
- Suche nach Top-Quark
- Nachweis der Gluonbremsstrahlung

Der JADE Detektor

JADE (Japan, Deutschland, England)

Vielzweckdetektor zur Messung leptonischer und hadronischer Prozesse

1979 installiert

Jet-Kammer in Heidelberg entwickelt und gebaut und war die erste ihres Typs

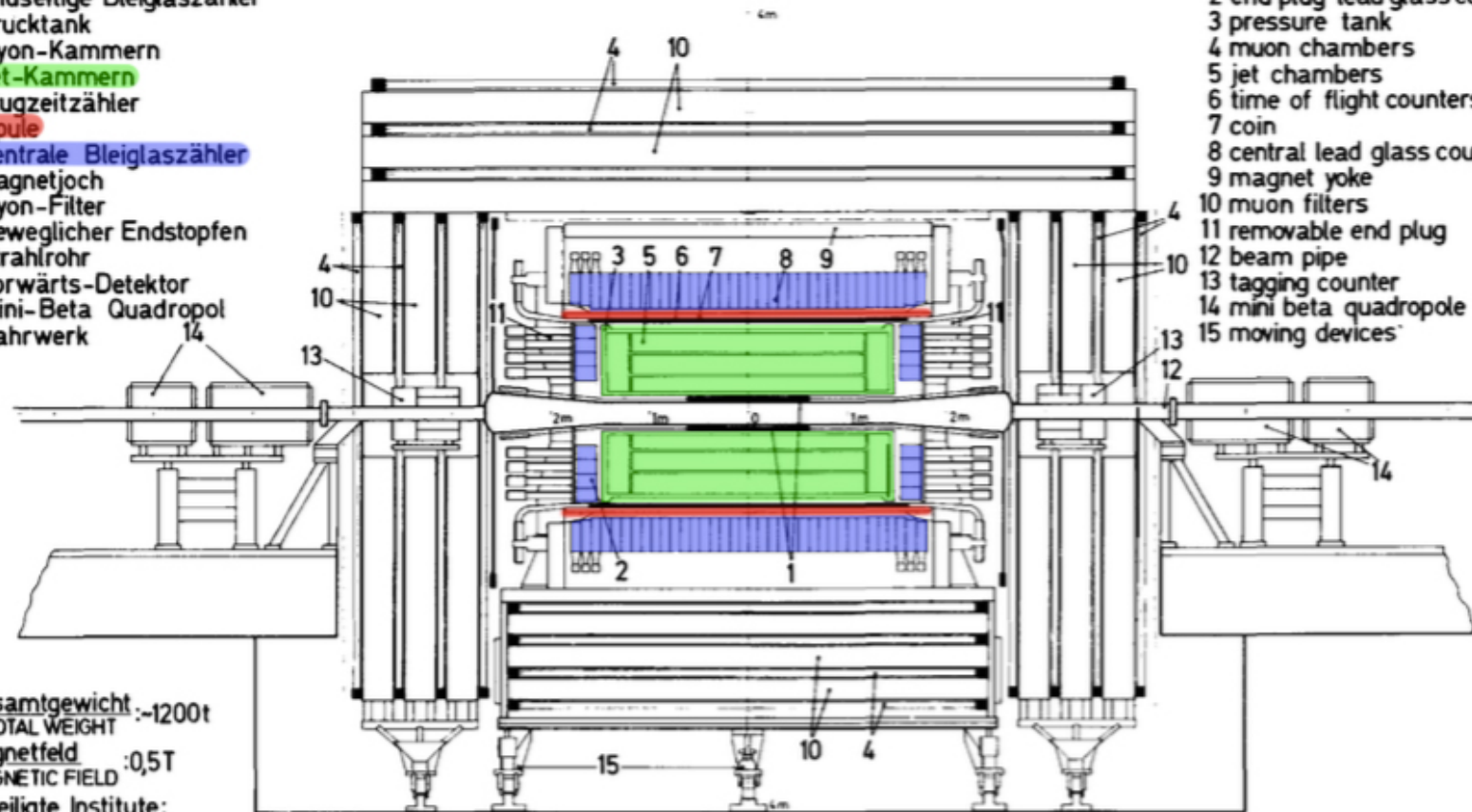


Jet-Kammer am Physikalischen Institut [4]

MAGNETDETEKTOR JADE

- 1 Strahlrohrzähler
- 2 Endseitige Bleiglaszähler
- 3 Drucktank
- 4 Myon-Kammern
- 5 Jet-Kammern
- 6 Flugzeitzähler
- 7 Spule
- 8 Zentrale Bleiglaszähler
- 9 Magnetjoch
- 10 Myon-Filter
- 11 Beweglicher Endstopfen
- 12 Strahlrohr
- 13 Vorwärts-Detektor
- 14 Mini-Beta Quadropol
- 15 Fahrwerk

- 1 beampipe counters
- 2 end plug lead glass counters
- 3 pressure tank
- 4 muon chambers
- 5 jet chambers
- 6 time of flight counters
- 7 coin
- 8 central lead glass counters
- 9 magnet yoke
- 10 muon filters
- 11 removable end plug
- 12 beam pipe
- 13 tagging counter
- 14 mini beta quadropole
- 15 moving devices



Gesamtgewicht :~1200t
TOTAL WEIGHT

Magnetfeld :0,5T
MAGNETIC FIELD

Beteiligte Institute:
PARTICIPANTS

DESY, Hamburg, Heidelberg,
Lancaster, Manchester,
Rutherford Lab, Tokio

35152

Querschnitt durch den JADE-Detektor [2]

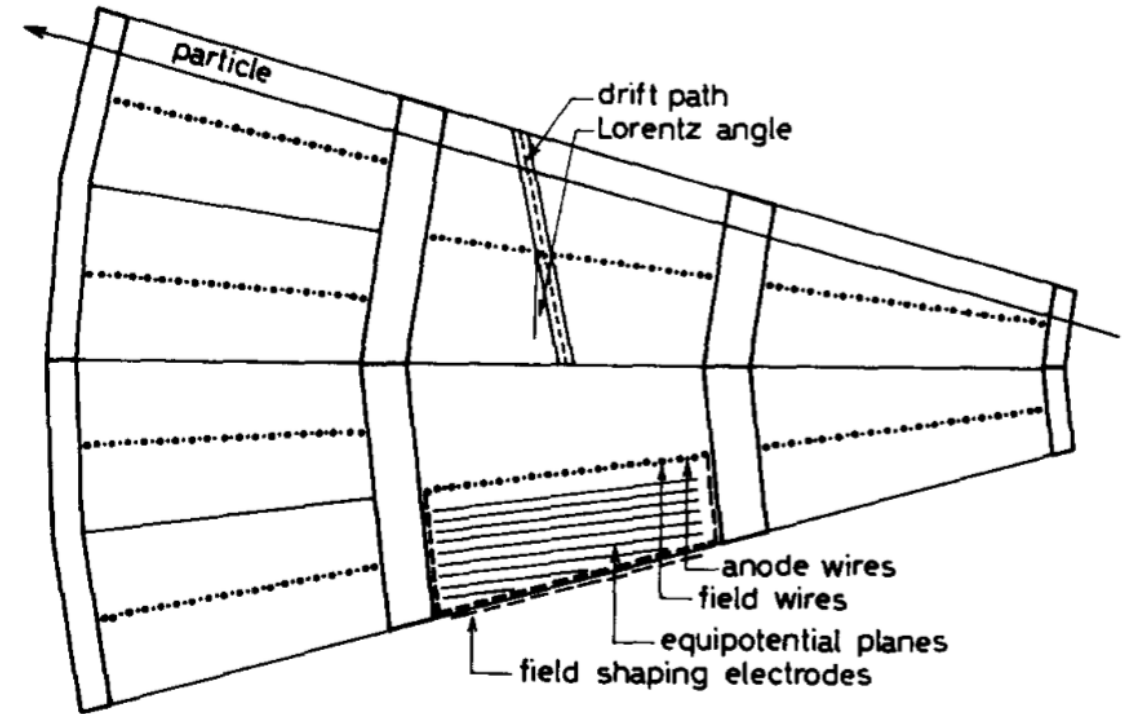
Jet-Kammer

Zylindrische Driftkammer

Möglichst homogenes E-Feld zwischen Anoden- und Kathodendrähten

Messung von r, ϕ, z aus *Drahtposition*, *Driftzeit* und *Charge Division*

- Zeitmessung: $x = \int_{t_0}^t v_D^-(t) dt$
- Driftgeschwindigkeit $v_D^-(t)$ muss bekannt sein
- Charge Division: $\frac{Q_L}{Q_R} \approx \frac{z}{L-z}$



Schnitt durch die Jet-Kammer bei JADE [2]

Bleiglas Schauerzähler

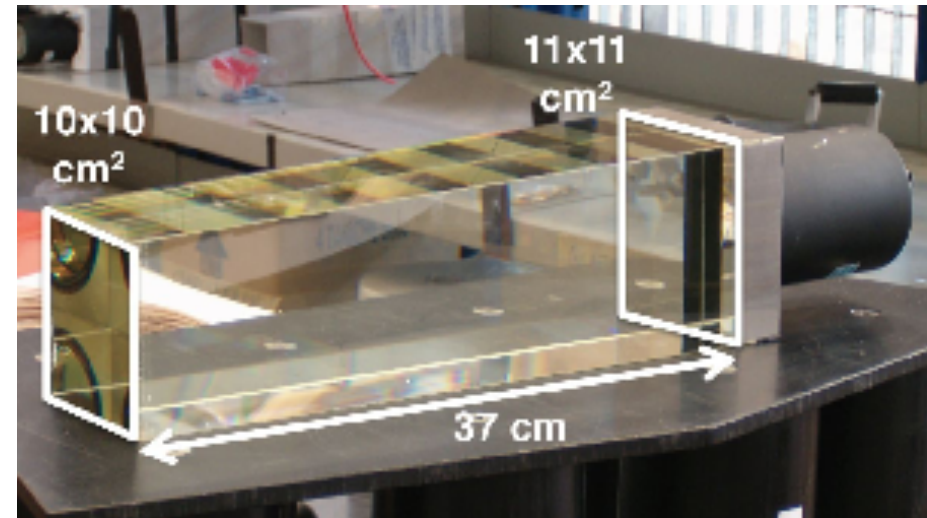
„Homogenes“ Kalorimeter

Bleiglas bremst Teilchen und erzeugt Cherenkov-Strahlung

Abgegebene Lichtmenge $\propto E_{kin}$ der Teilchen

- ~ 1000 Photonen pro GeV Schauerenergie

Durch Photomultiplier ausgelesen

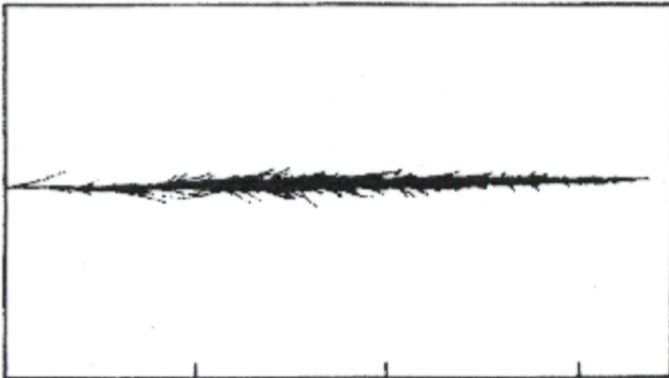


Bleiglas Kalorimeter von OPAL [7]

Bleiglas Schauerzähler

Elektromagnetische Schauer:

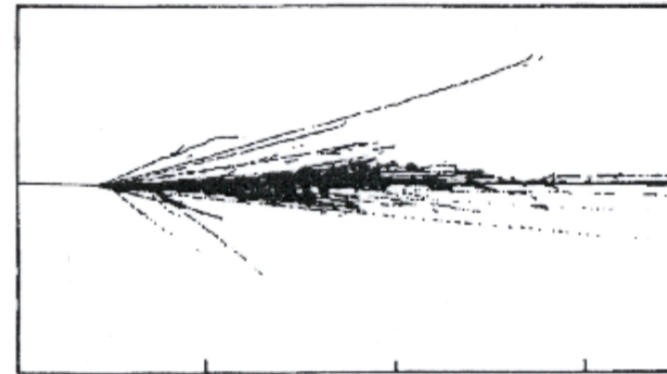
- Kaskade von e^- , e^+ und γ durch Paarbildung und Bremsstrahlung
- Bis $E < E_c = 1,022\text{MeV}$
- Strahlungslänge $X_0 \approx 2,4\text{cm}$ (in Bleiglas)



Elektromagnetischer Schauer

Hadronische Schauer

- Kaskade von π , K , p , n usw.
- Wechselwirkungslänge λ
- Energieverlust durch Stöße bis $E < E_\pi(140\text{MeV})$



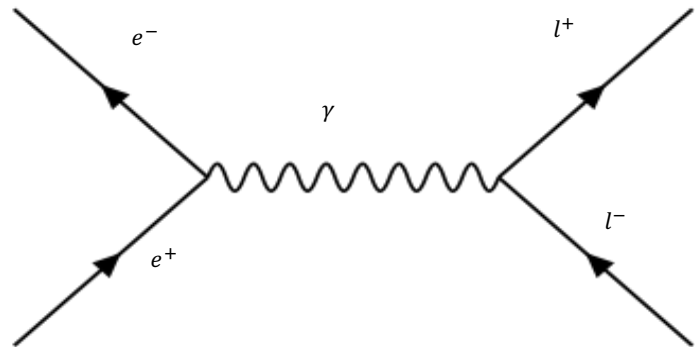
Hadronischer Schauer

Die Entdeckung des Gluons

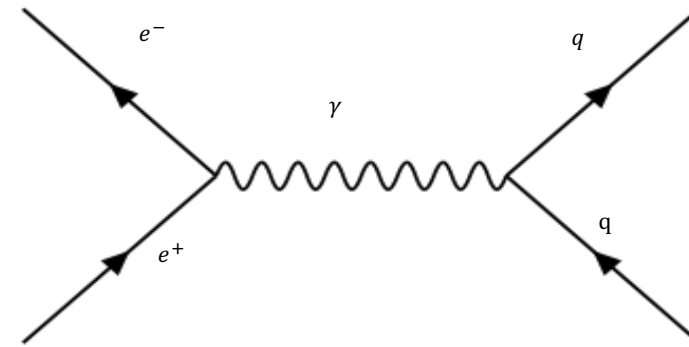
Ereignisse in der e^+e^- -Annihilation

Zwei Klassen von e^+e^- Reaktionen

- Hadronen
- Leptonen + Photonen



Reaktion $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$

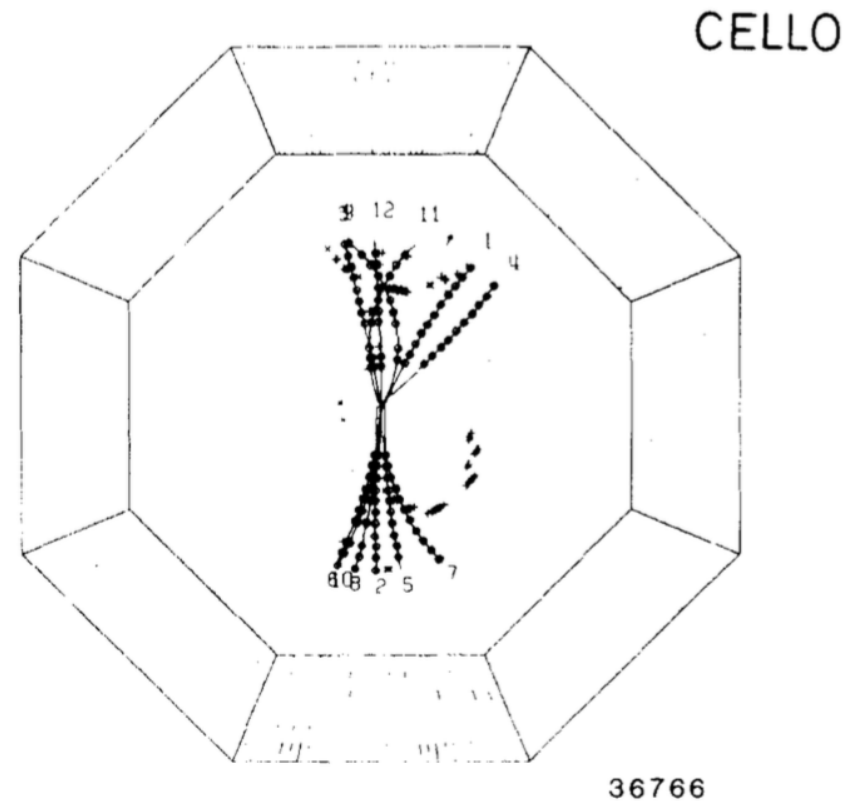


Reaktion $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Hadronen}$

Hadronische Ereignisse bei PETRA

Meisten hadronischen Ereignisse zwei „back-to-back“ Jets

Jet: „Gruppe von Teilchen, die sich in ungefähr die selbe Richtung bewegen.“



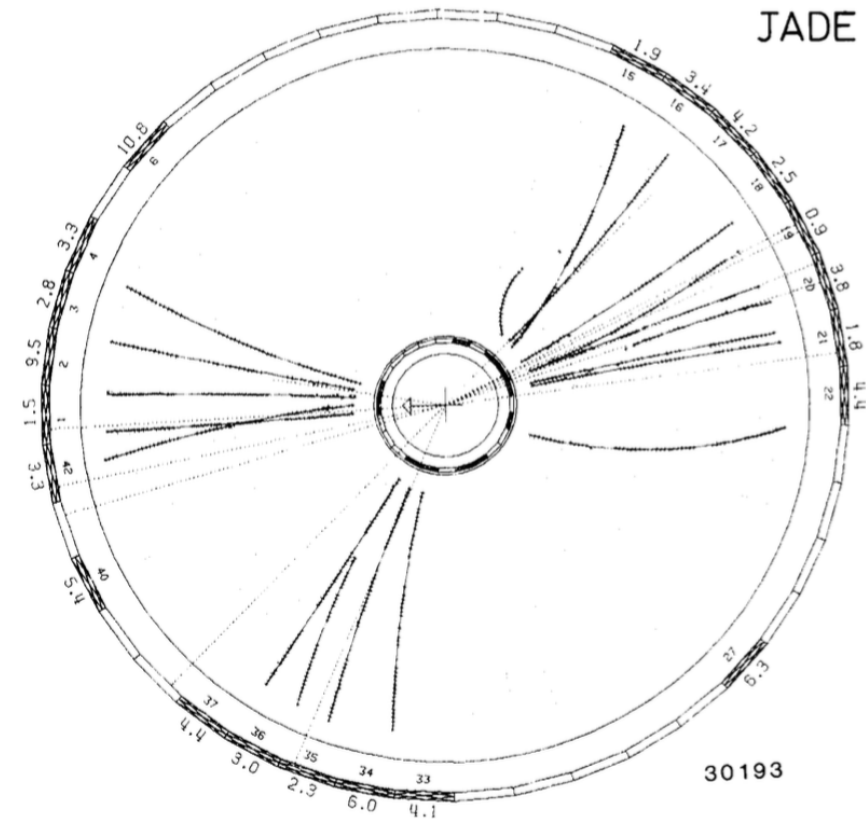
Zwei-Jet-Event bei CELLO [2]

Hadronische Ereignisse bei PETRA

1979 erstmals Schwerpunktsenergien von über 27GeV

Erstes Drei-Jet-Ereignis bei TASSO

Kurze Zeit später bei allen Experimenten

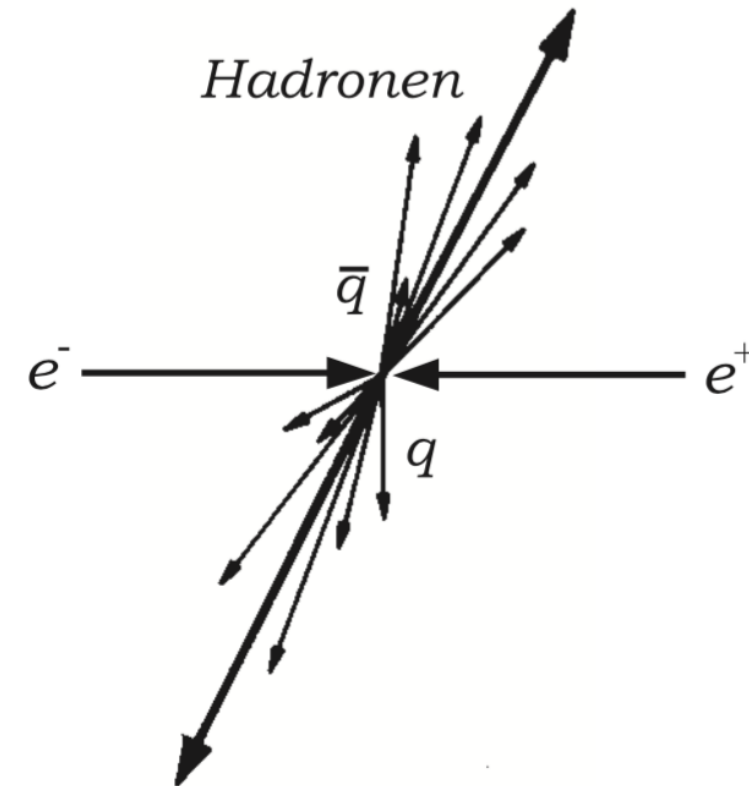


Drei-Jet-Event bei JADE [2]

Interpretation

Zwei-Jet-Ereignisse:

- Produktion von $q\bar{q}$ -Paar mit hohen kinetischen Energien
- Hadronisieren nach kurzer Zeit
- Hadronen fliegen nahezu in Richtung der Quarks
⇒ Geringer Transversalimpuls



Skizze zur Reaktion $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Hadronen}$ [2]

Interpretation

Drei-Jet-Ereignisse:

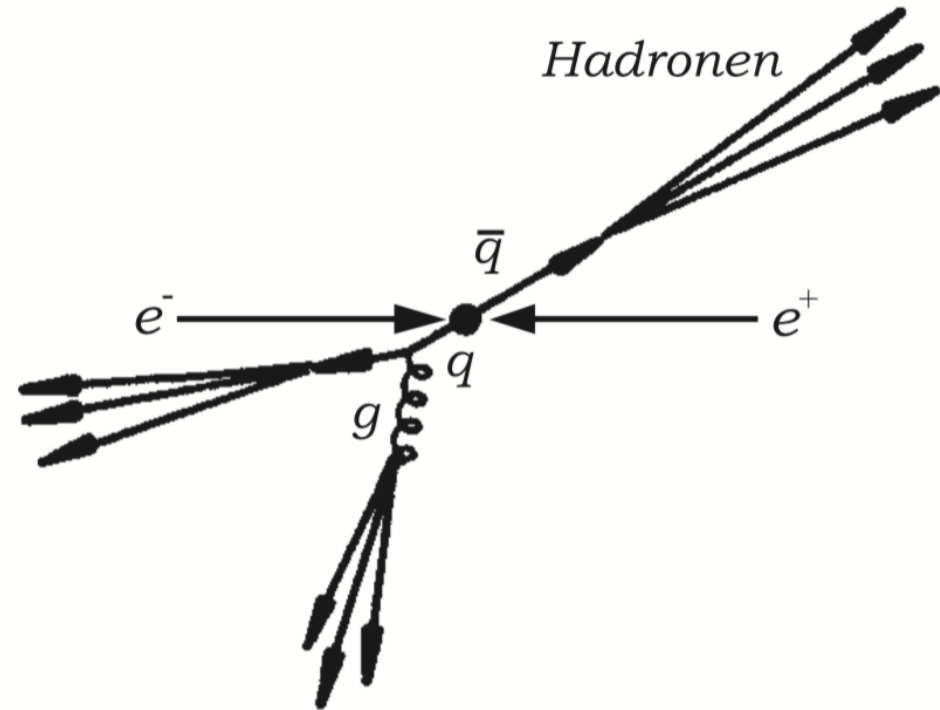
- Dritter Jet aus Gluonbremsstrahlung
- Auch Gluon hadronisiert

Weiche Bremsstrahlung

- Kleiner Winkel, geringe Energie
- Zwei Jets, einer verbreitert

Harte Bremsstrahlung

- Großer Winkel, hohe Energie
- Drei deutlich getrennte Jets



Skizze zur Reaktion $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g \rightarrow \text{Hadronen}$ [2]

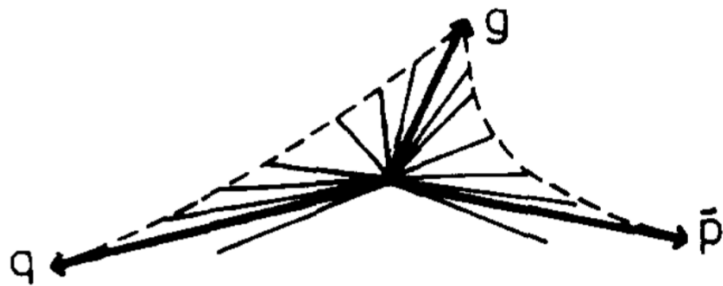
Jet-Analyse

Vergleich von Monte-Carlo Simulation und experimentellen Daten

Simulationen auf Basis verschiedener Hadronisationsmodelle

Lund-Modell

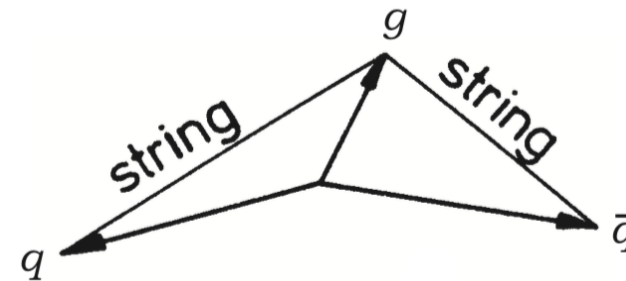
- Partonen durch Farbstrings verbunden
- Farbstring zwischen Quarks wird über Gluon gezogen → Ein Jet wird zum Gluon hingezogen



Skizze zum Lund-Modell [3]

Hoyer-Modell

- Gluon wird als Quark behandelt
- Zwei separate Farbstrings zwischen qg und $\bar{q}g$
- Keine Beeinflussung der Quarks durch Gluon



Skizze zum Modell von Hoyer [3]

Jet-Analyse

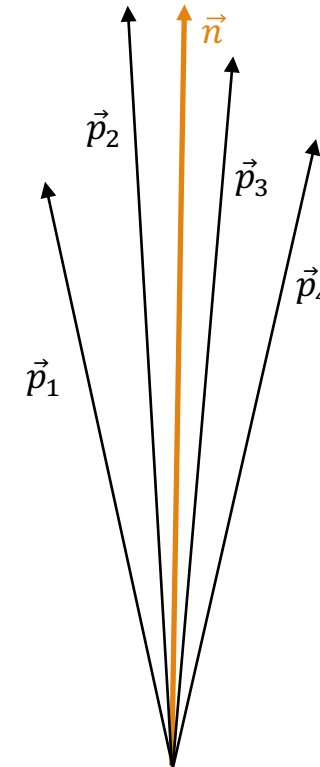
„Wie entscheidet man ob ein jetartiges Ereignis vorliegt?“

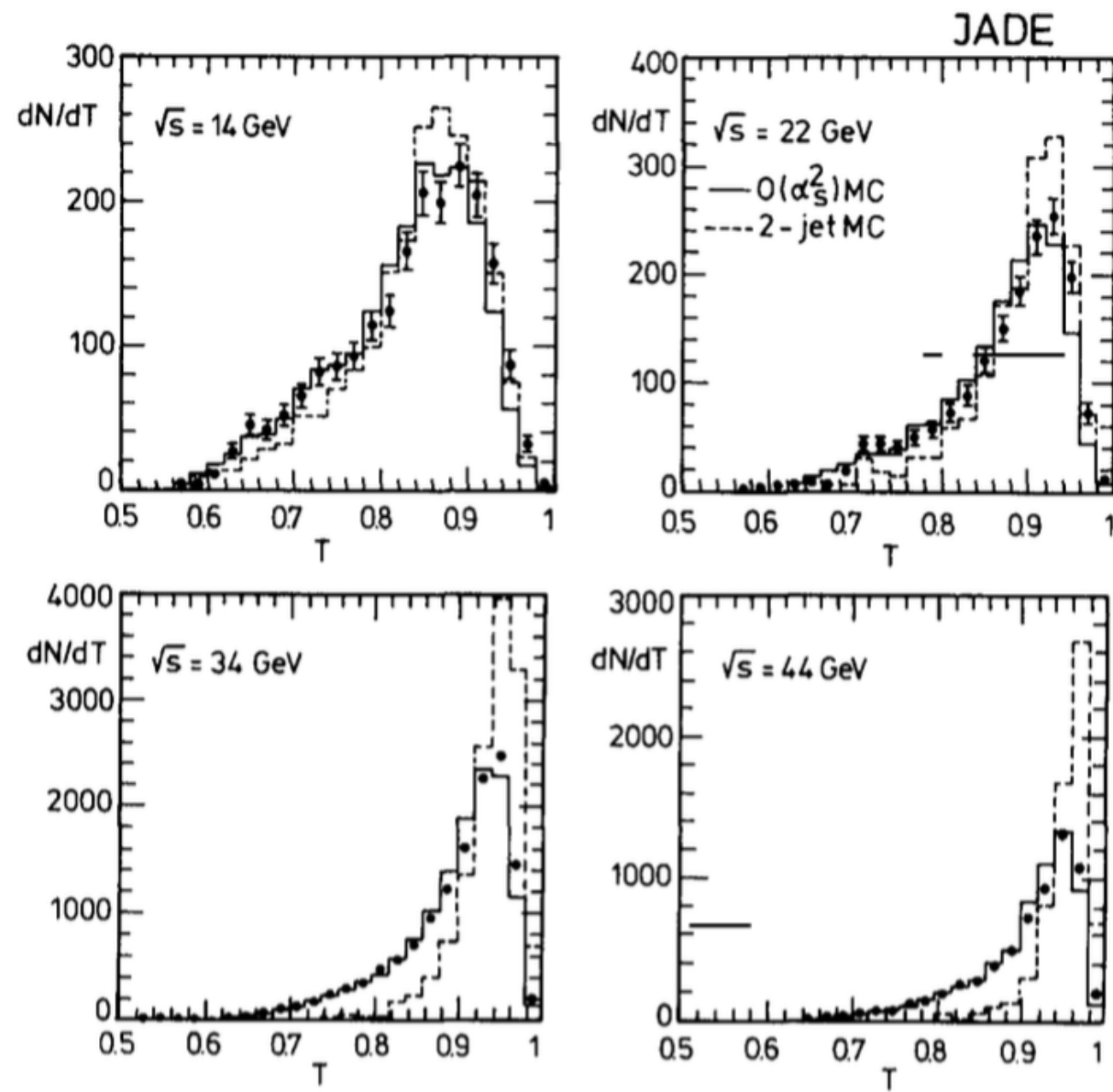
Definiere Event-Shape-Variablen

Zwei-Jet-Ereignisse:

$$\text{Thrust: } T = \max_{\vec{n}} \left(\frac{\sum_i \vec{p}_i \vec{n}}{\sum_i |\vec{p}_i|} \right)$$

- $\vec{p}_i$ Impulsvektor des i-ten Hadrons
- $\vec{n}$ wird variiert bis T maximal
- $\vec{n}$ beschreibt Jetachse





Thrust-Verteilung bei JADE für verschiedene Schwerpunktsenergien [3]

Jet-Analyse

Drei-Jet-Ereignisse:

$$\text{Triplexity: } T_3 = \max \frac{|\sum_{i_1} \vec{p}_{i_1}| + |\sum_{i_2} \vec{p}_{i_2}| + |\sum_{i_3} \vec{p}_{i_3}|}{\sum_{all} |\vec{p}_i|}$$

Jetachse parallel zu $\vec{p} = \sum_{i_j} \vec{p}_{i_j}$

i_1, i_2 und i_3 laufen über drei nichtüberlappende Sätze S_j von Teilchen

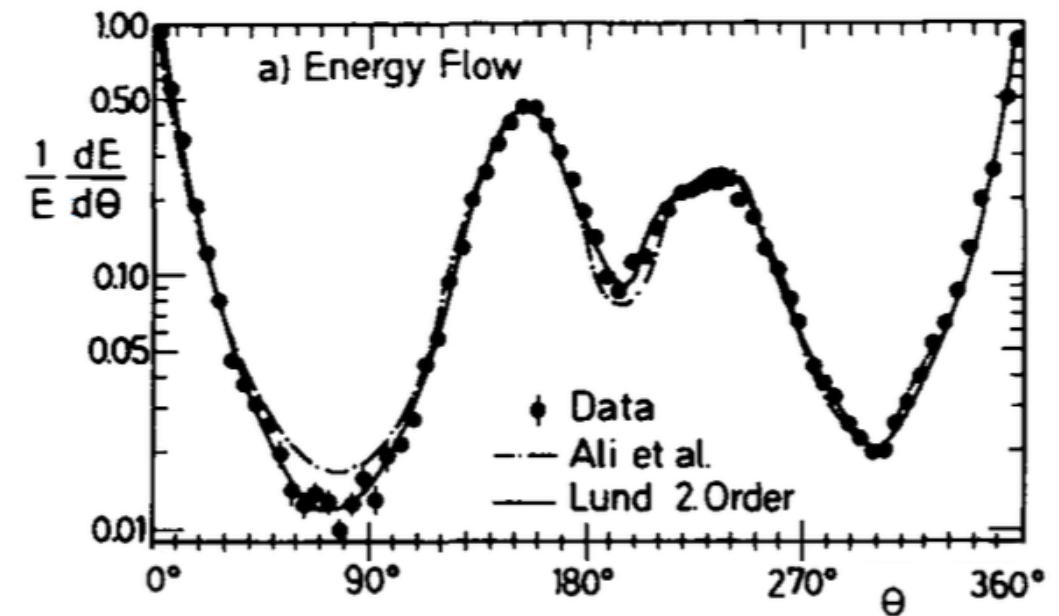
S_j sind die Sätze bei denen T_3 maximal ist

Jet-Analyse

Asymmetrien in Energieverteilung in
Eventebene bei Drei-Jet-Ereignissen

String-Effekt: Einfluss des Gluons auf andere
Teilchen

→ Bestätigung des Lund-Modells



Energieverteilung eines bei JADE registrierten Drei-Jet-Ereignisses [3]

Jet-Analyse

Vergleich der experimentellen Daten mit Theorievorhersagen

Skalarboson, $Spin = 0$

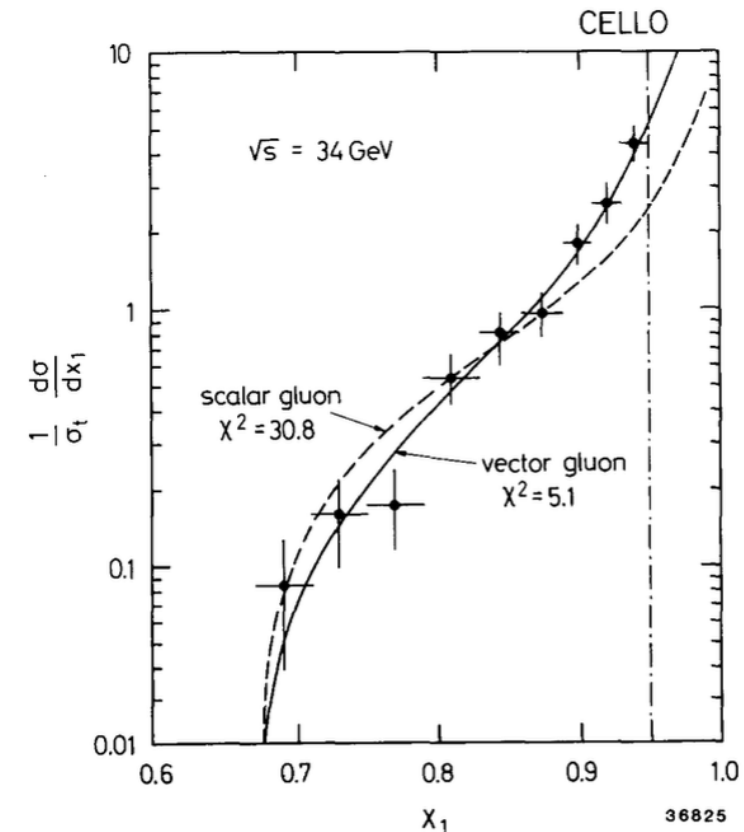
- $\frac{1}{\sigma_0} \left(\frac{d\sigma}{dx_1 dx_2} \right) \sim \frac{x_3^2}{(1-x_1)(1-x_2)} + \text{zykl. Permut. von } 1, 2, 3$

Vektorboson, $Spin = 1$

- $\frac{1}{\sigma_0} \left(\frac{d\sigma}{dx_1 dx_2} \right) \sim \frac{x_1^2 + x_2^2}{(1-x_1)(1-x_2)} + \text{zykl. Permut. von } 1, 2, 3$

$x_1 > x_2 > x_3$ Energien der Jets

→ Gluon ist Vektorboson



Differentieller Wirkungsquerschnitt für Gluonen
Bremsstrahlung [2]

Jet-Analyse

Bestimmung der Kopplungskonstante α_S :

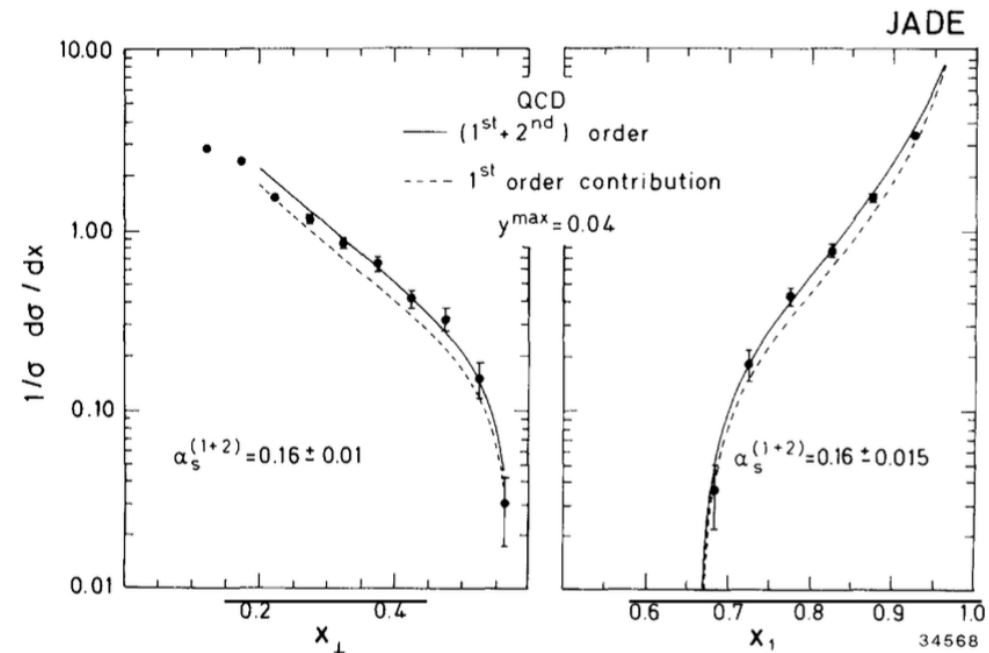
Im Prinzip einfach $\alpha_S \sim \frac{\text{Rate 3-Jet-Events}}{\text{Rate 2-Jet-Events}}$

Aber:

- Events gehen ineinander über (harte, weiche Gluon Bremsstrahlung)
- Hadronisationsmodell muss gewählt werden

Bei JADE:

- Lund-Modell + Korrekturen 2. Ordnung
- $x_1 = \frac{2}{\sqrt{s}} E_1$
- $x_\perp = \frac{2}{\sqrt{s}} (E_{2,\perp} + E_{3,\perp})$



x_1 und $x_\perp$ Verteilungen mit QCD-Fits [2]

Table 3.1
List of experimental results on the quark–gluon coupling constant α_s published by the Collaborations at PETRA.
The symbol * means that the systematic error is not given in the original publication

Coll.	Values of α_s	Order	Method of analysis	Date of receipt by journal	Ref.
MARK J	$0.23 \pm 0.02 \pm 0.04$	First order	Oblateness distribution	November 1979	[3.32]
JADE	$0.17 \pm 0.04 \pm *$	First order	Planarity distribution	December 1979	[3.7]
TASSO	$0.17 \pm 0.02 \pm 0.03$	Partial second order	Sphericity and aplanarity distribution	May 1980	[3.10]
PLUTO	$0.15 \pm 0.03 \pm 0.02$	First order	Cluster analysis and parton thrust (x_1) distribution	October 1980	[3.21]
PLUTO	$0.20 \pm 0.02 \pm *$	First order	Energy–energy correlation	November 1980	[3.33]
CELLO	$0.16 \pm 0.01 \pm 0.03$	First order	Thrust and oblateness distribution	April 1982	[3.34]
CELLO	$0.21 \pm 0.01 \pm *$	First order	Energy–energy correlation	May 1982	[3.35]
CELLO	$0.15 \pm 0.02 \pm *$	First order	Energy–energy correlation asymmetry	May 1982	[3.35]
JADE	$0.16 \pm 0.015 \pm 0.03$	Second order	Cluster analysis and parton thrust (x_1 and $x_\perp$) distributions	September 1982	[3.36]
CELLO	See text and reference	First order	Various methods of analysis	October 1982	[3.37]
MARK J	$0.13 \pm 0.01 \pm 0.02$	Second order	Energy–energy correlation asymmetry	May 1983	[3.38]

Ergebnisse für α_s bei $\sqrt{s} = 30 \text{ GeV}$ der verschiedenen Kollaborationen [2]

Zusammenfassung

PETRA hat ein Forschungsziel erreicht: Entdeckung des Gluons

Eigenschaften der Gluonen konnten bestimmt werden

- Vektorboson Spin = 1
- Kopplung an Quarks

Stärke der Kopplung konnte bestimmt werden

Prüfung von QCD Vorhersagen

Quellenverzeichnis

1. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baryon-decuplet-small.svg#/media/File:Baryon-decuplet-small.svg>
2. Sau Lan Wu, e^+e^- physics at petra—the first five years, Physics Reports, Volume 107, Issue 2, 1984, Pages 59-324
3. B. Naroska, e^+e^- physics with the jade detector at petra, Physics Reports, Volume 148, Issues 2–3, April 1987, Pages 67-215
4. <https://www.mpp.mpg.de/forschung/experimental/jade/jadeMedien/jadeMedienBilder/jadeBildergalerie/bildobjekte/medium/57.jpg>
5. J. Heintze, The jet-chamber of the JADE experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 196, Issue 1, 1 May 1982, Pages 293-297
6. <https://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/skript/img1420.gif>
7. <http://inspirehep.net/record/1123800/files/>