
Die Entdeckung des Gluons

Dominik Hellmann

9. November 2018

Inhaltsverzeichnis

- Historische Einordnung
 - Erste Hinweise auf Farbladung
 - Entwicklung der Theorie
- Die QCD — Theoretische Grundlagen
- DESY, PETRA und TASSO
 - Geschichtliches
 - PETRA
 - TASSO
- 3 Jet Ereignisse und die Gluon-Entdeckung
- Spin des Gluons
- Ausblick und heutige Forschung

Historische Einordnung - Teil 1

Entwicklung der Quantenchromodynamik (QCD):

- 1954: Chen Ning Yang und Robert L. Mills stellen eine Eichtheorie (nicht abelsch), die Yang-Mills Theorie auf (Grundlage für Eichtheorien der starken und schwachen Wechselwirkung)
- 1964: Murray Gell-Mann postuliert Quarks als Konstituenten von Hadronen
 - Welcher Art sind die Kräfte, die sie in diesen Teilchen binden?
 - Verhalten diese sich ähnlich zur bekannten Quantenelektrodynamik (QED)?
 - Gibt es auch Austauschteilchen, wie das Photon und eine analoge Ladung?
- Außerdem: wie erklärt sich die scheinbare Symmetrie der Wellenfunktionen der leichtesten Baryonen ($\Delta^{++}, \Delta^{-}, \dots$)

Das Δ^{++} Baryon

Die Wellenfunktion dieses Teilchens ist scheinbar symmetrisch unter Vertauschung zweier Quarks:

$$|\Delta^{++}\rangle = |l=0\rangle_{\text{Raum}} |uuu\rangle_{\text{flavor}} |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle_{\text{spin}}$$

Das steht aber im Widerspruch mit dem Pauliprinzip, da es sich um ein Fermion handelt! Lösung: Es könnte eine neue Quantenzahl "Farbe" geben (postuliert 1964 von Oscar W. Greenberg), deren Anteil an der Wellenfunktion antisymmetrisch ist

$$|\Delta^{++}\rangle = |l=0\rangle_{\text{Raum}} |uuu\rangle_{\text{flavor}} |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle_{\text{spin}} \underbrace{|rgb - grb + bgr - rbg + gbr - bgr\rangle}_{\text{antisymmetrisch}}_{\text{farbe}}$$

Ein weiterer Hinweis auf Farbladung

Die Messung des Verhältnisses

$$R = \frac{\mathcal{BR}(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\mathcal{BR}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \propto N_c \left[2 \left(\frac{2}{3} \right)^2 + 3 \left(\frac{-1}{3} \right)^2 \right]$$

$$= N_c \frac{11}{9}$$

ist sensitiv auf N_c die Anzahl der möglichen Farbladungen und Ladungen der Quarks aus denen die Hadronen hervorgehen!

- R wächst mit \sqrt{s} , da immer mehr Quarkflavor an der Wechselwirkung (WW) teilnehmen
- Zieht man eine Gerade durch das Plateau bei etwa 10 GeV so ergibt sich ein ungefährer Wert von $R = 3,3$
- Die Messungen von R sind somit konsistent mit $N_c = 3$

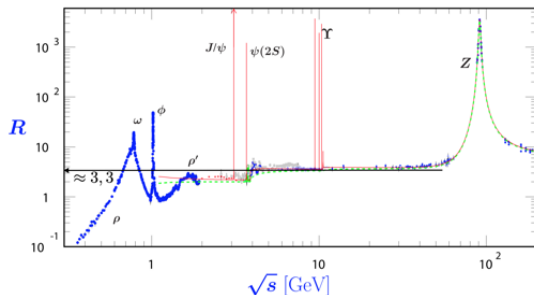


Abbildung: Die Abbildung stammt von der Webseite der PDG [1] und ist leicht angepasst.

Historische Einordnung - Teil 2

Entwicklung der QCD:

- 1972: Han-Nambu und Greenberg interpretieren Farbgruppe als Eichgruppe
- 1972: Harald Fritzsch, Murray Gell-Mann und Herrmann Leutwyler stellen Verbindung zwischen der Farbladung als Quelle einer starken Kraft und der QCD her
- 1973: Gross, Politzer und Wilczek entdecken die asymptotische Freiheit in der starken WW, das ermöglicht perturbative Rechnung mithilfe der QCD
- 1975: Richard Feynman sagt aufgrund von QCD Jets vorher
- 1978: Erstmalige Beobachtung von Jets am DESY
- 1979: Beobachtung von 3 Jet Ereignissen vorhergesagt durch QCD (John Ellis, Mary Gaillard, Graham Ross) → Entdeckung des Gluons (DESY, TASSO Kollaboration)

Theoretische Grundlagen - die QCD

Eigenschaften der Quantenchromodynamik:

- Die QCD ist die relativistische Quantenfeldtheorie der starken WW ähnlich der QED
- Ihre Ladungen werden Farbladungen genannt, es gibt rot, grün und blau und die korrespondierenden Antifarben
- Die zugrundeliegende Symmetriegruppe ist die $SU(3)_{\text{color}}$
- Die Eichbosonen der QCD sind die 8 Gluonen und entsprechen den 8 Generatoren der $SU(3)_{\text{color}}$
- Das farblose Singlett ist in der Natur nicht realisiert, da es nicht zu den Generatoren gehört

Gluonen

Eigenschaften der Gluonen:

- Sie sind masselos $m = 0$ ähnlich zum Photon der QED
- Es handelt sich bei ihnen um Vektorteilchen ($\text{Spin}^{\text{Parität}} = 1^-$)
- Anders als in der QED tragen Gluonen selber Farbladung
- Sie können somit an sich selber koppeln!

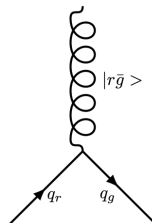
8 verschiedene Gluonen:

$$|G\rangle_1 = |r\bar{g}\rangle \quad |G\rangle_2 = |r\bar{b}\rangle \quad |G\rangle_3 = |g\bar{r}\rangle$$

$$|G\rangle_4 = |g\bar{b}\rangle \quad |G\rangle_5 = |b\bar{r}\rangle \quad |G\rangle_6 = |b\bar{g}\rangle$$

$$|G\rangle_7 = \frac{1}{\sqrt{2}}(|r\bar{r}\rangle - |g\bar{g}\rangle)$$

$$|G\rangle_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(|r\bar{r}\rangle + |g\bar{g}\rangle - 2|b\bar{b}\rangle)$$



Asymptotische Freiheit

Eine besondere Eigenschaft der QCD ist die asymptotische Freiheit:

- Bei großen Impulsüberträgen (q)/ kleinen Abständen zwischen "farbigen" Teilchen: nahezu freies Verhalten!
- Der Grund dafür ist die laufende Kopplung in der QCD $\alpha_S(q)$: $q \gg 1 \Rightarrow \alpha_S(q) \ll 1$
- Das ist bedingt durch Vakuumpolarisation um farbgeladene Teilchen herum (Anti-Screening)
→ Gluonen koppeln an sich selbst

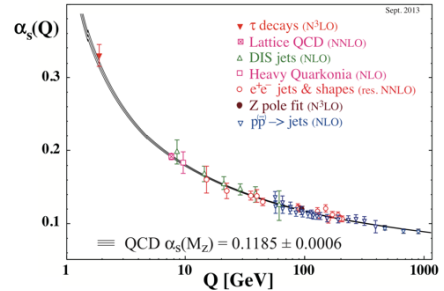
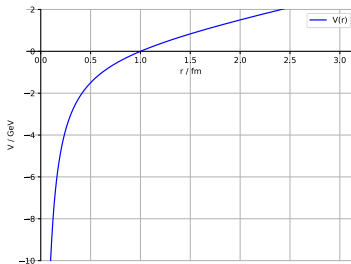


Abbildung: Particle Datagroup: Fit der laufenden QCD Kopplung [2].

Confinement

Eine weitere Besonderheit der starken WW ist das **Colorconfinement**:

- Farbgeladene Teilchen kommen in der Natur nur in farbneutralen gebundenen Zuständen vor
- Bei kleinen Entfernungen r ist $V(r)_S \propto \frac{1}{r}$
- Potential der QCD steigt bei großen Entfernungen linear mit dem Abstand
- \Rightarrow Die Kraft $F(r) = -\nabla(V_S)$ bleibt konstant bei einem Wert von etwa 1 GeV/fm
- Wenn Abstand groß genug, dann ist es energetisch favorisiert neue Teilchen im Feld zu erzeugen bis die "Nettofarbe" nach außen hin neutral ist



Hadronen Jets

Bildung von Teilchenjets bei großen Energien:

- Trennung farbgeladener Teilchen in hochenergetischen Streuprozessen führt aufgrund von Confinement zur Erzeugung vieler anderer Teilchen
- Der Endzustand muss farbneutral sein → Bindung aller so entstandenen Teilchen in Hadronen bzw. Paarvernichtung zu farbneutralen Teilchen
- Resultat: viele Teilchen sind im Detektor zu beobachten
- Der gesamte Impuls aller Hadronen entspricht den Impulsen der Quarks vor der Hadronisierung
- Auf diese Weise entstehen Teilchenbündel, die mit komplexen Algorithmen zu einem Jet zusammengefügt werden können
- "Jetphysik" war zur Zeit der Gluonentdeckung ein noch sehr neues Forschungsgebiet

Deutsches Elektron Synchrotron (DESY)

Historisches zum DESY:

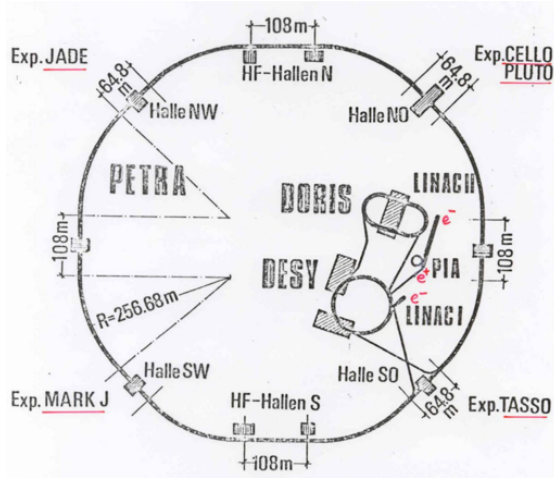
- Gründung 18.12.1959 in Hamburg als nationales Forschungszentrum für Teilchenphysik
- Gründungsvater Willibald Jentschke
- Der DESY-Beschleuniger nimmt am 25.02.1964 seine Arbeit auf
 - Höchstenergie: $E = 7,4 \text{ GeV}$
 - Umfang: $U = 300 \text{ m}$
- Kurz nach Inbetriebnahme: Planung der **Double Ring Storage Facility (DORIS)**
 - Konzept des Speicherrings damals noch sehr neu und unausgereift
 - Umfang $U = 288 \text{ m}$

Der Positron-Electron-Tandem-Ring Accelerator (PETRA)

- Planungsbeginn des e^+e^- Colliders: 1974 und Inbetriebnahme Oktober 1978
- Umfang $U = 2,3$ km \rightarrow PETRA war der größte Speicherring seiner Zeit (Reduktion von Synchrotronstrahlung)
- $13 < \sqrt{s} < 31.6$ GeV später bis zu 47 GeV (Top Quark Entdeckung? Erst viel später!)
- Insgesamt arbeiteten 5 Kollaborationen am PETRA: TASSO, JADE, MARK J, CELLO und PLUTO
- 1979: Gluonentdeckung durch die TASSO Kollaboration mithilfe eines Algorithmus zur 3 Jet Ereignis Identifizierung von Sau Lan Wu

PETRA

DESY, DORIS und PETRA im Größenvergleich



Two Arm Spectrometer Solenoid (TASSO)

Messsysteme im Überblick:

- Vermessung von geladenen Teilchen: Szintillationszähler, Proportionalkammer und eine Driftkammer mit $R = 1,22$ m und $L = 3,23$ m
- Geschwindigkeitsmessung: Flugzeitzählersystem aus 48 Szintillationszählern
 - Auflösung: $\Delta t = 350$ ps
 - Trennung von Pionen, Kaonen und Protonen möglich
- Zentraldetektor durchsetzt von homogenem Magnetfeld von $B = 0,5$ T \rightarrow Impulsmessung bis auf 2 % genau
- Photon Messung durch Argonschauerzähler
- Exzellente Teilchenidentifikation durch 3 Lagen von Schwellen-Cherenkov-, Flugzeit und Schauerzählern
- Myonenkammern stellen die letzte Lage des Detektors in jede Richtung dar

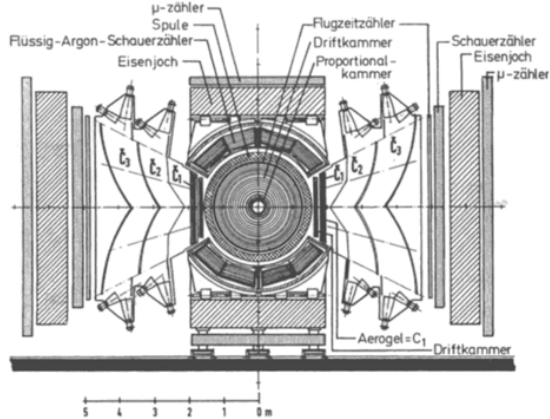


Abbildung: Abbildung aus dem Buch Teilchenphysik aus heutiger Sicht [3].

→ Zurück zur Gluonentdeckung!

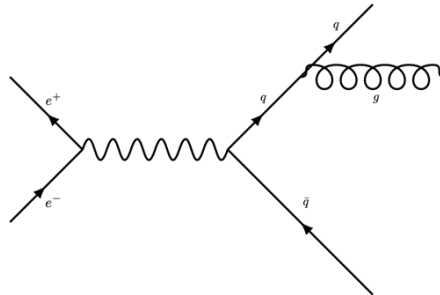
Jet Rekonstruktion — 1970er

Cone-Algorithmus entwickelt von Weinberg und Stermann [4]:

- Damals war das vorherrschende Jetbild im Detektor vor allem 2 Back-to-Back Jets
- Finde also 2 Ansammlungen von Energiedeponierungen entlang einer Achse im Detektor, die bis auf einen Bruchteil ϵ die gesamte Strahlenergie ergeben
 - Finde Hauptjetachse \rightarrow Maximiere Impulse entlang dieser Achse (Thrust) oder Minimiere Impulse transversal dazu (Sphericity)
 - ϵ sollte dabei keine Extremalwerte wie 0 oder 1 annehmen
 - Falls doch so wird entweder kein Jet rekonstruiert oder der "Jet" ist zu allgemein gefasst
- Für beide Energiedeponierungen wird dann der Parameter δ festgelegt, der den halben Öffnungswinkel des Cones (Kegel) darstellt

Gluon Bremsstrahlung

- Neben impliziten Hinweisen fehlte der Teilchenphysik noch ein echter Beweis für die Existenz von Gluonen
- Vorschlag (John Ellis): Beobachte Gluon Bremsstrahlung an e^+e^- -Beschleunigern
- Vorteile dieser Methode:
 - einfachster Feynmangraph höherer Ordnung als $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$
 - wenn Transversalimpuls des Gluons groß genug ($p_T \gg 0,3 \text{ GeV}$), dann bildet sich ebene 3 Jet Struktur aus



Methode der TASSO-Kollaboration

Die im Folgenden beschriebene Analyse wurde für verschiedene Schwerpunktsenergien $\sqrt{s} = (13; 17; 27, 4; 27, 7; 30; 31, 6)$ GeV von der TASSO Kollaboration (Sau Lan Wu, Björn Wiik, et al.) durchgeführt:

1. Analyse der Verteilung der Impulse transversal p_T zur Hauptjetachse
2. Untersuche asymmetrische Breite der beiden Jetachsenschenkel und deren mittlere transversalen Impulse
3. Bestimme Anzahl der Ereignisse, die vom kollinearen $q\bar{q}$ Muster abweichen und stattdessen in einer Ebene liegen und 3 Jet Struktur besitzen

1. Analyse der p_T^2 -Verteilung

- Zuerst muss die Hauptjetachse bestimmt werden:
 - Maximiere $\sum_{j=1}^N |p_{||}|$
- Danach wird die Verteilung der Impulse transversal zur Hauptjetachse vermessen
- Nach diesem Schritt vergleicht man die gemessenen Werte mit Vorhersagen aus naiven $q\bar{q}$ -Modellen

Die für die Simulation verwendeten Modelle beinhalten keine Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung!

1. Analyse der p_T -Verteilung

Vergleich der Impulsverteilung mit verschiedenen Monte-Carlo Simulationen (Breiten: $\sigma_q = 0,3$ GeV und $\sigma_q = 0,45$ GeV)

- $\sigma_q = 0,3$ GeV: Heisenbergsche Unschärferelation $\Delta x \Delta p \approx \hbar \approx 200$ MeV/fm
- Bei niedrigen Energien stimmen Daten und Quark-Partonen Monte-Carlo ($\sigma_q = 0,3$ GeV) überein
- Bei hohen Energien existiert diese Übereinstimmung nur mit angepasster Verteilung ($\sigma_q = 0,45$ GeV)
- das widerspricht dem naiven Modell, da dieses die Annahme einer **energieunabhängigen** Verteilung zugrundelegt

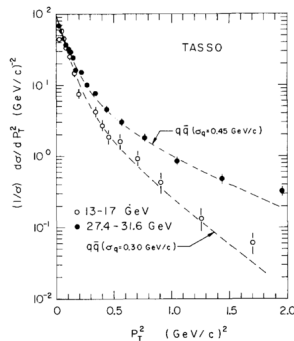


Abbildung: Abbildung aus dem original Papier [5].

1. Analyse der p_T -Verteilung - Ergebnisse

Resultate:

- Transversalimpulsverteilung verändert sich mit steigendem \sqrt{s}
- die mittleren Impulse variieren von $\langle p_T^2 \rangle(E_{\text{low}}) = (0,15 \pm 0,02) \text{ GeV}$ zu $\langle p_T^2 \rangle(E_{\text{high}}) = (0,27 \pm 0,02) \text{ GeV}$

Mögliche Erklärung:

- neue Quark-Flavor nehmen am untersuchten prozess bei hohen Energien teil (u,d,s,c,b bereits berücksichtigt!!)
- es werden Feldquanten der starken WW abgestrahlt (Gluonen)

→ Die Existenz neuer Quarkflavor bei den betrachteten Schwerpunktsenergien ($m_{\text{top}} \approx 173 \text{ GeV} \gg \sqrt{s}!$) stand damals im Widerspruch mit Messungen anderer Kollaborationen

2. Untersuchung der Jetbreiten

Der erste Analyse Schritt weist auf die Existenz von Gluonen hin. Im zweiten Schritt soll das nun weiter überprüft werden:

- Wenn $\alpha_S \ll 1$, dann ist Gluonabstrahlung ein seltener Prozess
- Es wird also vornehmlich die Verbreiterung eines der beiden auftretenden Jets zu beobachten sein
- Zu zeigen ist dann, dass es sich bei den auftretenden Asymmetrien **nicht** um stat. Fluktuationen handelt

→ Identifiziere schmale und breite Jets pro Ereignis und analysiere die Impulsverteilungen pro Jet

2. Untersuchung der Jetbreiten

Vorgehensweise:

- Teile Jetachse in zwei Hälften
- Konstruiere Ebene orthogonal zur Achse
- Messe p_T transversal zur Jetachse für jede Seite einzeln und kategorisiere nach schmalen und breiten Jets
- Vergleiche mit den bereits bekannten Monte-Carlo Simulationen der Modelle $\sigma_q = 0,3 \text{ GeV}$ und $\sigma_q = 0,45 \text{ GeV}$

Das dabei entstehende Bild zeigt eine leichte Asymmetrie der Jetbreite bei kleinen \sqrt{s} und eine starke für große \sqrt{s}

2. Untersuchung der Jetbreiten

- Bei kleinen Energien stimmt der Fit mit dem Quark-Partonen Modell ($\sigma_q = 0,3 \text{ GeV}$) gut mit der gemessenen Verteilung überein
- Für große Energien muss wieder zu dem angepassten Modell mit der Breite $\sigma_q = 0,45 \text{ GeV}$ der p_T Verteilung übergegangen werden
- Durchgezogene Linie: $\sigma_q = 0,3 \text{ GeV}$; gestrichelte Linie: $\sigma_q = 0,45 \text{ GeV}$

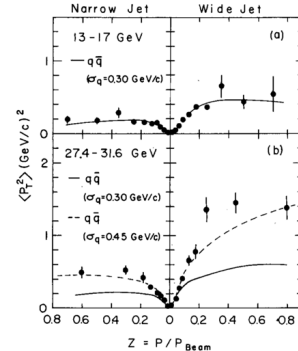


Abbildung: Abbildung aus [5].

2. Untersuchung der Jetbreiten - Ergebnisse

Resultate:

- Die Quark-Parton Modelle, die in der Analyse verwendet werden können die Form der "Möwen Plots" reproduzieren
- Es ist aber wie schon im ersten Schritt notwendig gewesen die Verteilung für große Energien anzupassen → Hinweise auf QCD und Gluonen
- Diese neuen Variablen bestätigen also das schon im ersten Schritt beobachtete Verhalten der Jetereignisse

Noch ist allerdings nicht bewiesen, dass sich ein 3. Parton im Endzustand befindet
→ zeige, dass Struktur der Ereignisse signifikant von der kollinearen Form von 2 Jet Ereignissen abweicht

3. Identifiziere ebene statt kollineare Ereignisse

Warum ebene Ereignisse?

- 4-Impulserhaltung: Bei 3 Teilchen im Endzustand liegend deren Impulse in einer Ebene
- Hadronisierung von Quarks und Gluonen erfolgt Azimuth-Symmetrisch um die jeweiligen Jetachsen herum
- Die Jets sollten also auch in einer Ebene liegen

Wie wird die Abweichung von der Kollinearität gemessen?

→ konstruiere Hadron-Impulstensor:

$$M_{ik} = \sum_{j=1}^N p_{j,i} p_{j,k} \quad i, k = x, y, z; \quad N = \# \text{Hadronen}$$

Aus M_{ik} kann nun die Ereignisebene bestimmt werden!

3. Identifiziere ebene statt kollineare Ereignisse

Benötigte Größen:

- $\Lambda_1 < \Lambda_2 < \Lambda_3$ Eigenwerte von M_{ik}
- $\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3$ Einheits-Eigenvektoren von M_{ik} zu den Λ_l

Bedeutung:

- \hat{n}_3 gibt, da er Eigenvektor zum größten Eigenwert ist, die Hauptjetachse an
- Die \hat{n}_2 - \hat{n}_3 Ebene ist die Ereignisebene \Leftrightarrow Der Großteil aller Impulse liegt in dieser Ebene
- \hat{n}_1 steht orthogonal auf der Ereignisebene

Daraus lassen sich nun skalare Größen konstruieren, die messen wie planar die beobachteten Ereignisse sind:

- $\langle p_T^2 \rangle_{out} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{p}_j \cdot \hat{n}_1)^2 \rightarrow$ wie stark ragen die Hadronimpulse aus der Ereignisebene?
- $\langle p_T^2 \rangle_{in} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{p}_j \cdot \hat{n}_2)^2 \rightarrow$ wie stark weichen die Hadronimpulse **in** der Ebene von der Hauptachse ab?

3. Identifiziere ebene statt kollineare Ereignisse

- Zu sehen ist nur ein kleiner Anstieg von $\langle p_T^2 \rangle_{out}$ von kleinen nach großen Energien
- $\langle p_T^2 \rangle_{in}$ ist bei kleinen Energien noch gut durch das $q\bar{q}$ -Modell beschrieben
- bei hohen Energien liefern beide Modelle jedoch nur noch schlechte Übereinstimmung mit dem gemessenen $\langle p_T^2 \rangle_{in}$!
- Durchgezogene Linie: $\sigma_q = 0,3 \text{ GeV}$; gestrichelte Linie: $\sigma_q = 0,45 \text{ GeV}$

→ Ein 3. Teilchen im Endzustand ist sehr wahrscheinlich → überprüfe Anzahl der 3 Jet Ereignisse

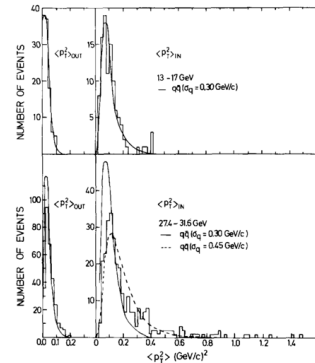


Abbildung: Abbildung aus [5].

3. Identifiziere ebene statt kollineare Ereignisse - 3 Jets im Detektor

Bei hohen transversalen Impulsen eines 3. farbgeladenen Teilchens sollte aus ebenen Ereignissen sogar ebene 3 Jet Ereignisse werden.

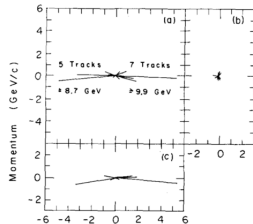


Abbildung: Die Abbildung stammt aus der Originalveröffentlichung [5].

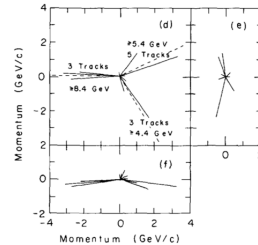


Abbildung: Die Abbildung stammt aus der Originalveröffentlichung [5].

3. Identifiziere ebene statt kollineare Ereignisse - Ergebnisse

Resultate:

- Es wurde bei höheren Energien ein deutlicher Exzess von ebenen Ereignissen gegenüber den erwarteten statistischen Fluktuationen gemessen
- Diese Tatsache deutet auf ein 3. farbgeladenes Teilchen im Endzustand hin, dass bei großen Energien zu 3 Jet Ereignissen führt
- Die Produktion eines neuen Quarkflavors ist auch durch andere PETRA Experimente nahezu ausgeschlossen
- Häufiges Auftreten erst bei hohen Energien ist typisch für Bremsstrahlung durch Feldquanten

Aus der relativen Häufigkeit der Prozesse lässt sich auch α_S bestimmen:

$$\alpha_S \approx \frac{\#3\text{JetEreignisse}}{\#2\text{JetEreignisse}} \approx 0.1$$

3 Jet Ereignisse sind gefunden → was nun?

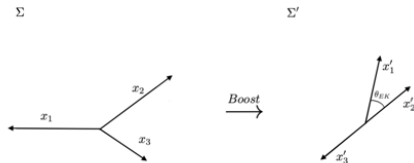
Stand der damaligen Forschung:

- Die Messungen stimmen sehr gut mit den Vorhersagen der QCD überein
- Das Gluon gilt als gefunden
- In der QCD ist das notwendigerweise ein Vektorteilchen (Spin 1)
- Das ist eine extrem wichtige Größe und muss experimentell überprüft werden
- Dazu muss eine mit dem Spin des Gluons korrelierte Größe gefunden und gemessen werden

Spin Messung

Vorschlag zur Vermessung des Gluon Spins von John Ellis und Inga Karliner [6]:

- Transformiere 3 Jet Ereignisse in das Ruhesystem der beiden niederenergetischsten Jets (Boost) (Σ')
- Laborsystem (Σ): $x_i = \frac{2E_i}{\sqrt{s}}$, $x_1 > x_2 > x_3$
- Das Gluon ist am wahrscheinlichsten x_2 oder x_3
- Messe den Winkel θ_{EK} in Σ'
- Diese Messung wird dann mit Simulationen für verschiedene Gluon Spins (0,1,2) verglichen



Drehimpulsgymnastik

Motivation:

- Das virtuelle Photon aus der e^+e^- -Annihilation trägt Spin 1 \rightarrow also muss auch der Endzustand Spin 1 tragen
- Hat das Gluon selber Spin 1, dann werden sich im System Σ' die Quarks so ausrichten, dass sich ihr Spin gerade aufhebt
- Der wahrscheinlichste Zustand ist der, wenn θ_{EK} sich gerade der 1 nähert
- Das lässt sich in 1. Ordnung Störungstheorie QCD berechnen und mit den Modellen für skalare (und tensorielle) Gluonen vergleichen
- Nur der Wirkungsquerschnitt für Vektor-Gluonen wird groß für $\theta_{EK} \rightarrow 0 \Rightarrow \cos \theta_{EK} \rightarrow 1$

Die Spinmessung

1980 wurde durch die TASSO Kollaboration eine Messung des Differentiellen Wirkungsquerschnittes durchgeführt:

- Die Messung zeigt die beste Übereinstimmung mit dem Vektorfall
- Aufgrund der Detektorakzeptanz ist kein starker Anstieg des Wirkungsquerschnittes (WQS) bei $\cos \theta_{EK} \rightarrow 1$ zu sehen
- Dieser Umstand wurde allerdings bereits in den Simulationen berücksichtigt
- Das Gluon trägt also Spin 1 wie erwartet!

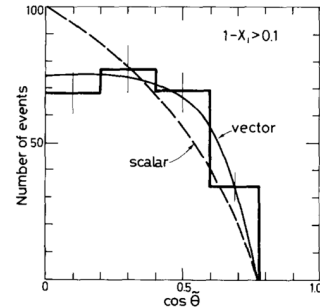


Abbildung: Die Abbildung ist aus dem original Papier [7] entnommen.

Eine zweite Messung des Spins

In einer zweiten Messung durch die SLD Kollaboration wird auch der Fall tensorieller Gluonen betrachtet:

- Die durchgezogene, gestrichelte und fein gestrichelte Linie stehen für Vektor, Skalar und Tensor
- Deutlich Favorisiert ist hier wieder der Vektorfall
- Der verwendete Detektor hatte eine bessere Akzeptanz im Vergleich zur ersten Messung \Rightarrow ein Anstieg des WQS ist zu erkennen

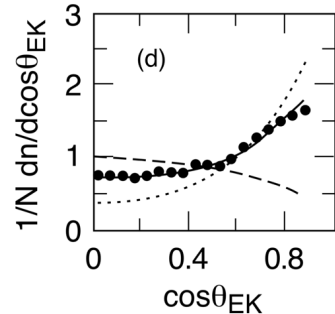


Abbildung: Die Abbildung stammt aus einem Papier [8] der SLD Kollaboration.

Zusammenfassung

- Das Gluon wurde 1979 erstmals von der TASSO Kollaboration am DESY beobachtet und bestätigte die in den Jahrzehnten zuvor aufgestellte QCD
- Die ebene 3 Jet Struktur trat signifikant häufiger auf, als durch stat. Fluktuationen erklärbar
- Der Spin des Gluons wurde ein Jahr später mithilfe des Ellis-Karliner Winkels und der bekannten Ereignisanalyse entwickelt
- Dadurch galt die ohnehin schon als sicherer Kandidat geltende QCD als entgültig bestätigt

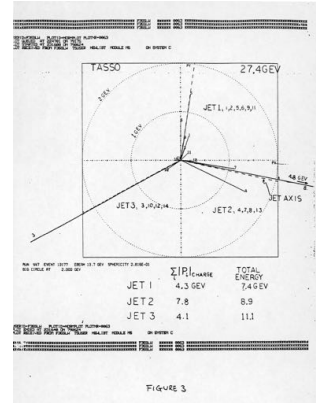


Abbildung: Das erste 3 Jet Ereignis ausgedruckt von Sau Lan Wu.

Heutige Jetphysik

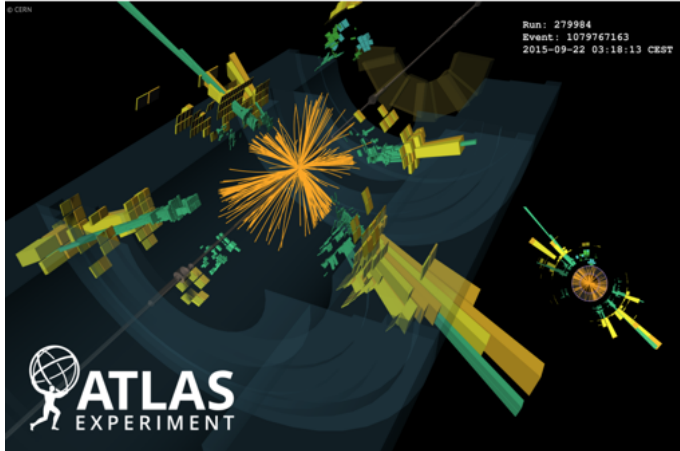


Abbildung: Ein ATLAS Eventdisplay [9].

Heutige Jetphysik

- Heutige Beschleuniger Ereignisse Umfassen oftmals viel mehr als 2 Jets
 - Sphericity ist keine gute Größe mehr!
- Rekonstruktionsalgorithmen benötigt, die effizient und zuverlässig viele Teilchen Jets zuordnen
 - Infrarot stabil: Hinzufügen/Entfernen von niederenergetischen Teilchen → keine Veränderung des zugeordneten Jets
 - Kollinear stabil: Aufspalten eines Impulses in 2 kollineare Impulse → keine Veränderung des zugeordneten Jets
 - Fast alle Cone-Algorithmen erfüllen diese Voraussetzung **nicht!**
- Sequentielle Cluster Algorithmen (z.B.: anti- k_t , k_t , Camebridge/Aachen) als Alternative:
 - Alle Infrarot und Kollinear stabil

Heutige Jetphysik

Sequentielle Cluster Algorithmen (Skizze):

- Basieren auf Energie- und Raumabstandsmaß: $d_{i,j} = \min(p_i^k, p_j^k) \Delta R_{i,j} / R$ und $d_i = p_i^k$
 - $\Delta R_{i,j} = \sqrt{(\eta_i - \eta_j)^2 + (\Phi_i - \Phi_j)^2}$: Abstand der Teilchen i,j in $\eta - \Phi$ -Ebene
 - p_j : Impuls von Teilchen j
 - R, k sind wählbare Parameter des Algorithmus
- Berechne $d_{i,j}$ und d_i für alle Hadronen des Ereignisses
- Ist $d_{i,j} < d_i$ dann füge i und j zu einem Jet zusammen \rightarrow neue $d_{i,j}$, d_i zur Liste hinzufügen
- Andernfalls ist das betreffende "Teilchen" ein vollständiger Jet und wird aus der Liste entfernt

Heutige Forschung und Ausblick

Einige die QCD betreffende offene Fragen sind heute:

- Welche Eigenschaften hat das Quark-Gluon Plasma, welches die ersten Sekundenbruchteile nach dem Urknall der vorherrschende Materiezustand war
 - Erforschung durch Schwerionenkollisionen unter anderem am LHC
 - Gibt es Farbsupraleitung in diesem Zustand? (Bildung von Quark-Cooperpaaren durch Gluonen)
- Wie tragen Valenzquarks, Seequarks und Gluonen gemeinsam zum Protonenspin bei?
- Wie lässt sich mithilfe der QCD das Confinement exakt erklären?
- Existieren Glueballs?
- ...

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Particle Data Group, 51. *Plots of Cross Sections and Related Quantities*, (2018),
URL: <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-cross-section-plots.pdf>.



G. Dissertori S. Bethke und G. Salam, *Quantum Chromodynamics*, Chin. Phys. C **38** (2014) S. 090001.



Siegfried Bethke und Dieter Rein, *Teilchenphysik aus heutiger Sicht*, Springer, 1998,
ISBN: 978-3-642-80423-6.



G. Sterman und S. Weinberg, *Jets From Quantum Chromodynamics*, Phys. Rev. Lett. **39** (1977) S. 1436.



TASSO Kollaboration, *Evidence for planar events in e^+e^- annihilation at high energies*, physics letters **86B** (1979) S. 243.



John R. Ellis und I. Karliner, *Measuring the Spin of the Gluon in e^+e^- Annihilation*, Nucl. Phys. B **148** (1979) S. 141.



R. Brandelik et al., *Evidence for a Spin One Gluon in Three Jet Events*, Phys. Lett. B **97** (1980) S. 453.



K. Abe et al., *A Study of the orientation and energy partition of three jet events in hadronic Z^0 decays*, Phys. Rev. D **55** (1997) S. 2533.



ATLAS Kollaboration, *ATLAS event at 13 TeV - Multijet Exotics Search Event Display - 2015 data*, 2018,
URL: <https://cds.cern.ch/record/2113241?ln=en>.