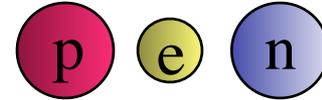


QCD, Structure Functions, Jets

- History of the Strong Interaction
- QCD / QED
- Proton-structure: structure functions
- hadronisation
- factorisation
- hadron jets

History of Strong Interactions (1)

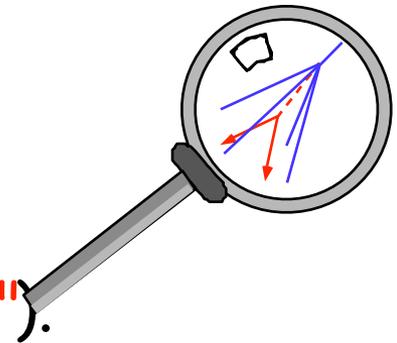
1932: discovery of **neutrons**



1933: $\vec{\mu} \cong 2.5 \frac{e}{2 m_p} \vec{\sigma} \Rightarrow$ **substructure** of the proton.

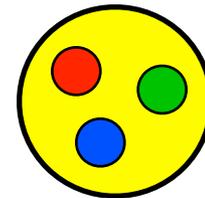


1947: discovery of π -mesons and long-living V-particles (K^0, Λ) in **cosmic rays**

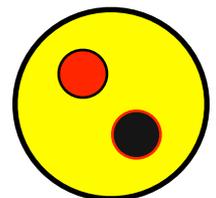


1953: V-particles produced at **accelerators**
new inner quantum number ("**strangeness**").

1964: static **quark-model** ;
new inner quantum number: **colour**



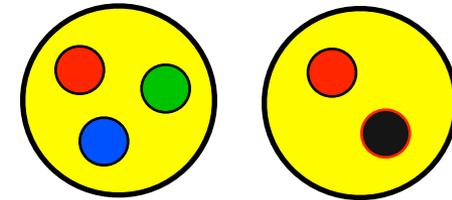
Baryon
(p, n, Λ , ...)



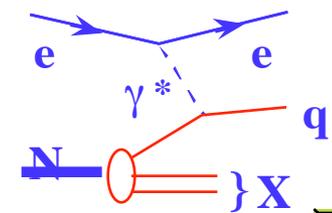
Meson
(π , K, ...)

History of Strong Interactions (2)

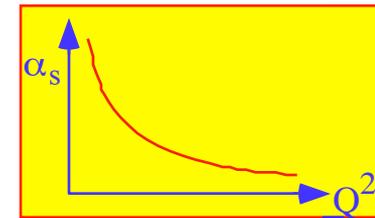
1964: Statisches **Quark-Modell**;
neue innere Quantenzahl: **Farbe**.



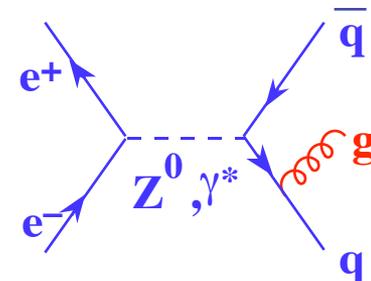
1969: Dynamisches **Partonenmodell**:



1973: Konzept der **Asymptotischen Freiheit**;
Quanten Chromo Dynamik.



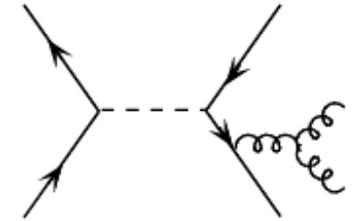
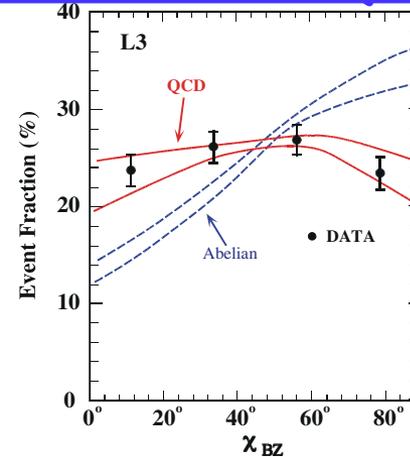
1975: **2-Jet Struktur** in e^+e^- -Vernichtung:
Bestätigung **Quark-Parton-Modell**.



1979: Entdeckung des **Gluons** in **3-Jet-**
Ereignissen der e^+e^- -Vernichtung.

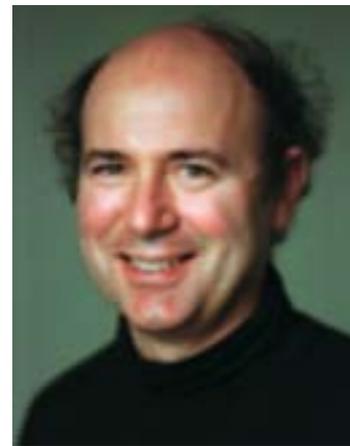
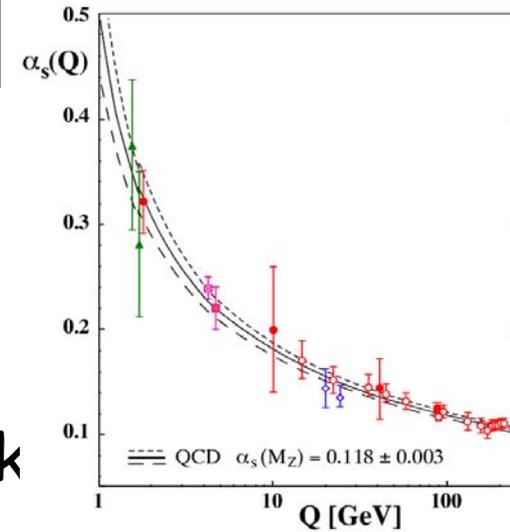
History of Strong Interactions (3)

1991: exp. Signatur der
Gluon-Selbstkopplung



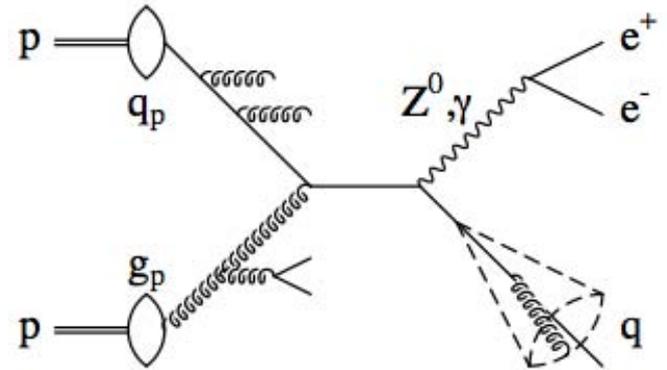
1990-2000: Bestätigung der
Asymptotischen Freiheit

2004: Nobelpreis (Konzept der A.F.) an
D. Gross, H.D. Politzer und F. Wilczek

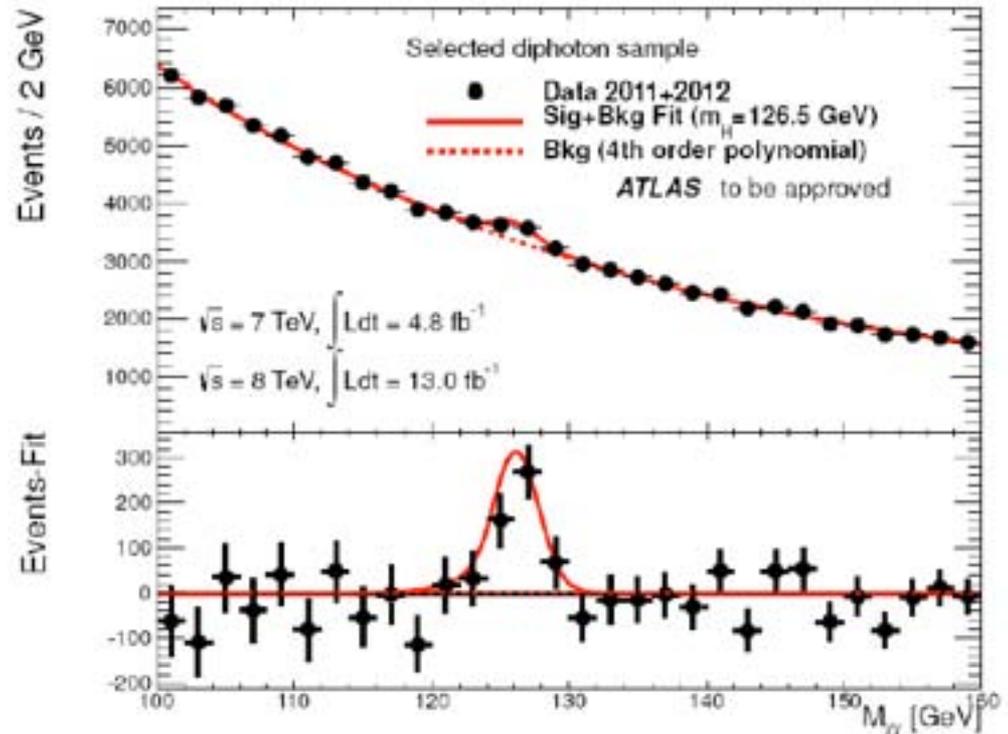
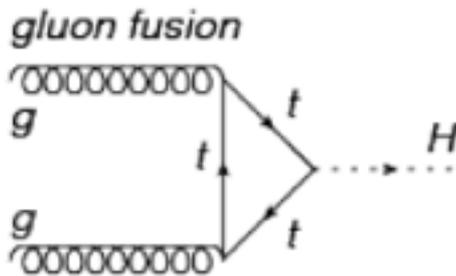


History of Strong Interactions (4)

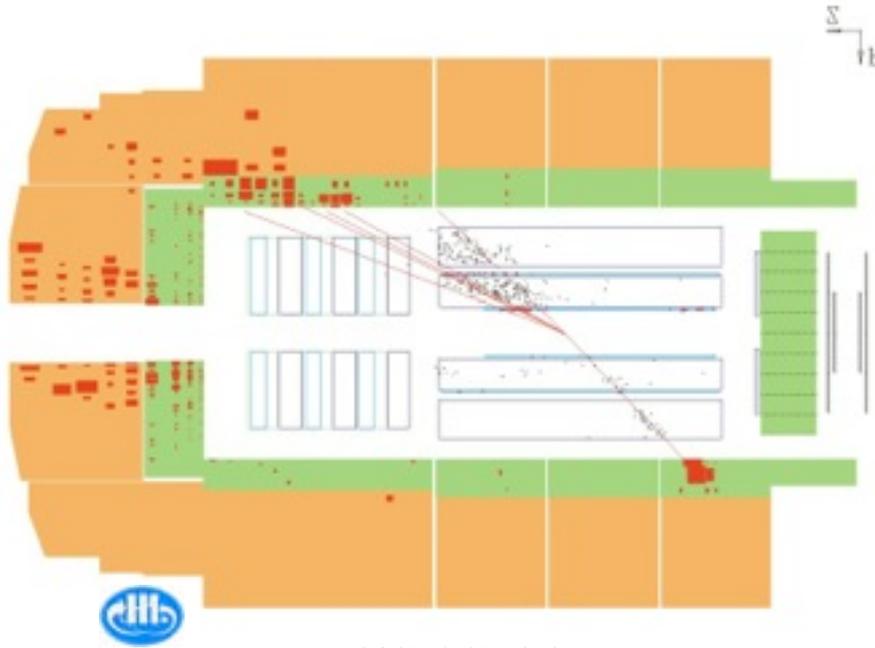
>2004: QCD als Untergrund bei der Suche nach Neuer Physik



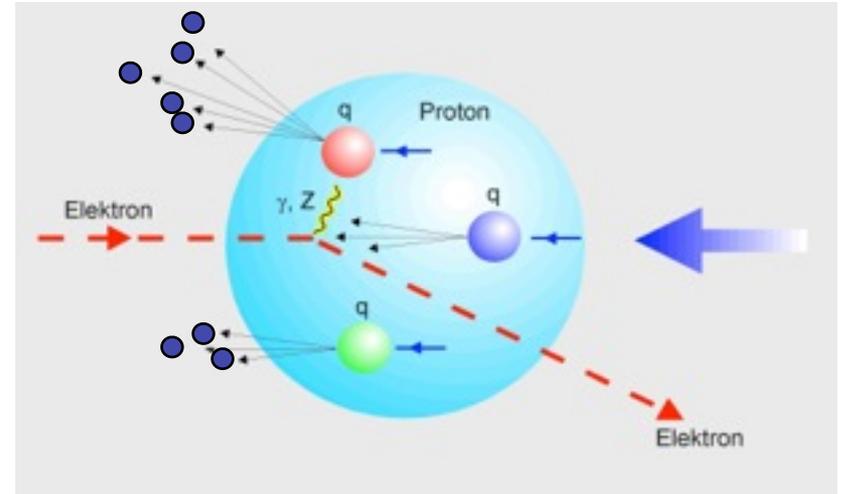
Beispiel: Higgs-Suche



Quarks im Proton: Modell und Experiment



Wirklichkeit



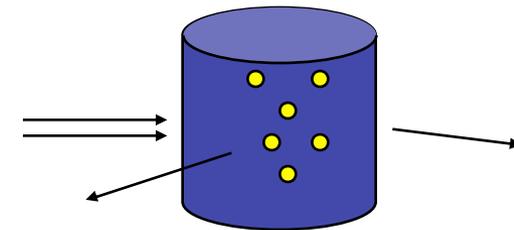
Modell, Theorie

Experiment: Registrieren vieler Ereignisse, Messung der gestreuten Elektronen

Befund: Es werden zu viele Elektronen stark abgelenkt (qualitativ ähnlich den Experimenten von Rutherford, 1911)

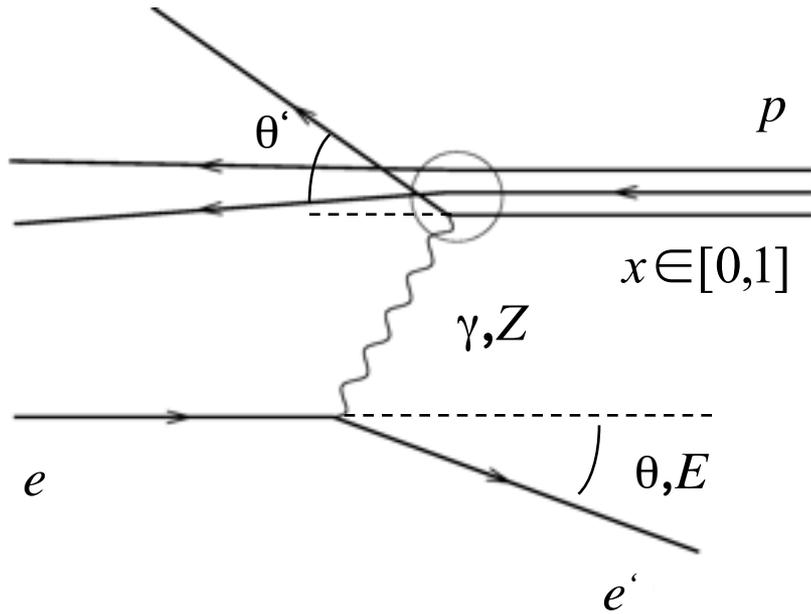
Erklärung: das Proton hat „harte“ Bestandteile, die

Sandsack



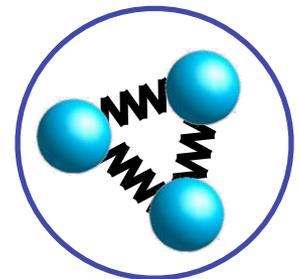
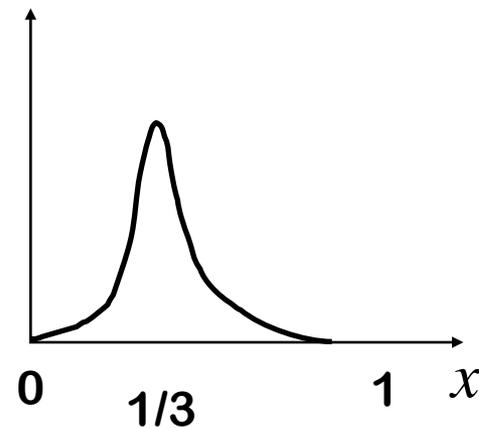
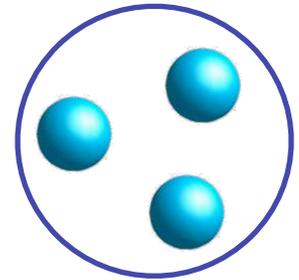
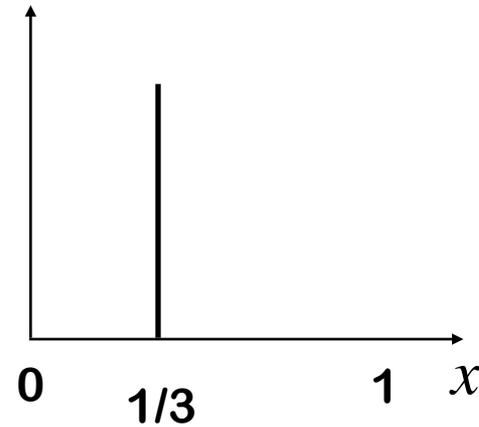
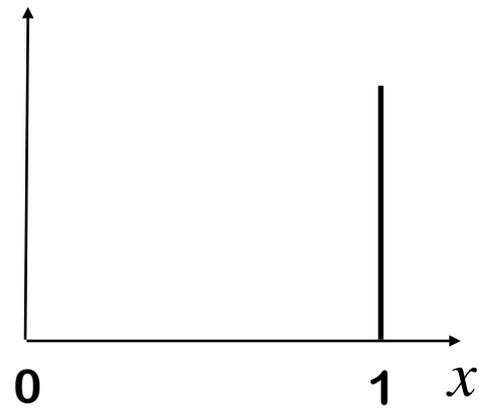
QUARKS
(Ch. Kiesling)

Quarks im Proton ?



Messung des **Streuwinkels** und der **Energie** der Elektronen (2 gegebene Größen):

Streuwinkel und **Impulsanteils x** des Stoßpartners des Elektrons am Gesamtimpuls des Protons (2 Unbekannte)

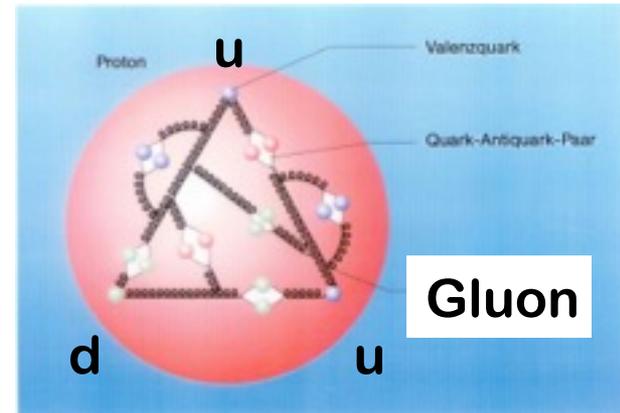


(Ch. Kiesling)

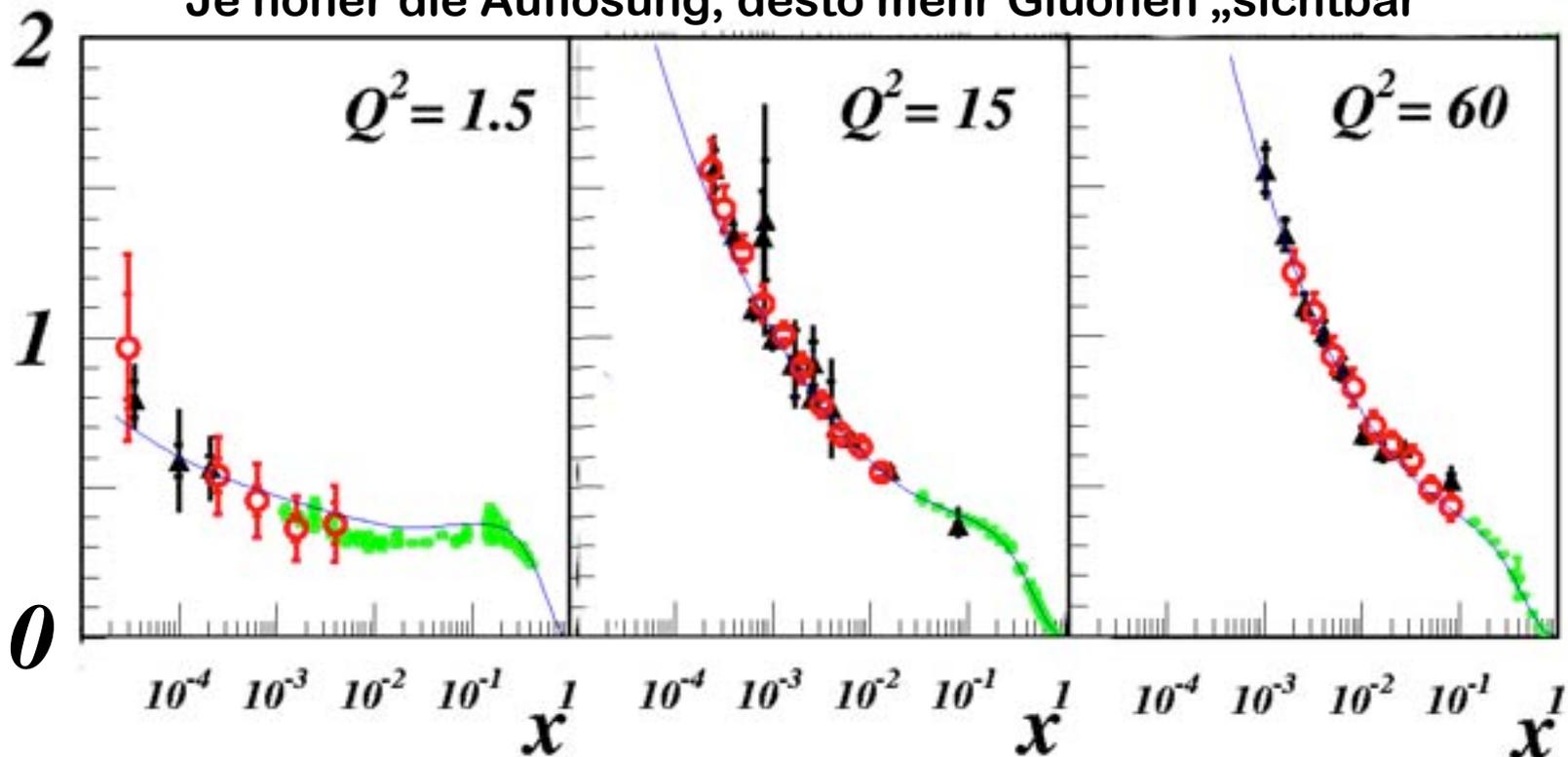
Quarks und Gluonen im Proton !

Messung des Impulsanteils zeigen ein kompliziertes „Innenleben“ des Protons:

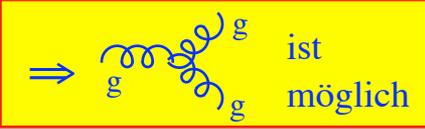
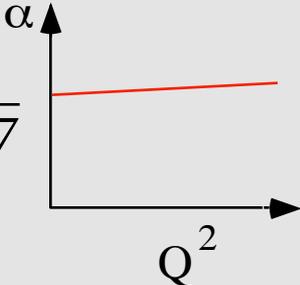
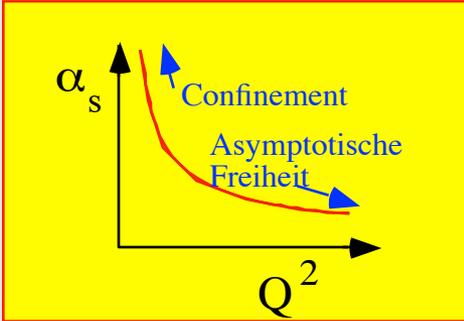
Nur die Hälfte des Impulses wird von Quarks getragen, der Rest von den „Binde-Teilchen“, den **Gluonen**



Je höher die Auflösung, desto mehr Gluonen „sichtbar“



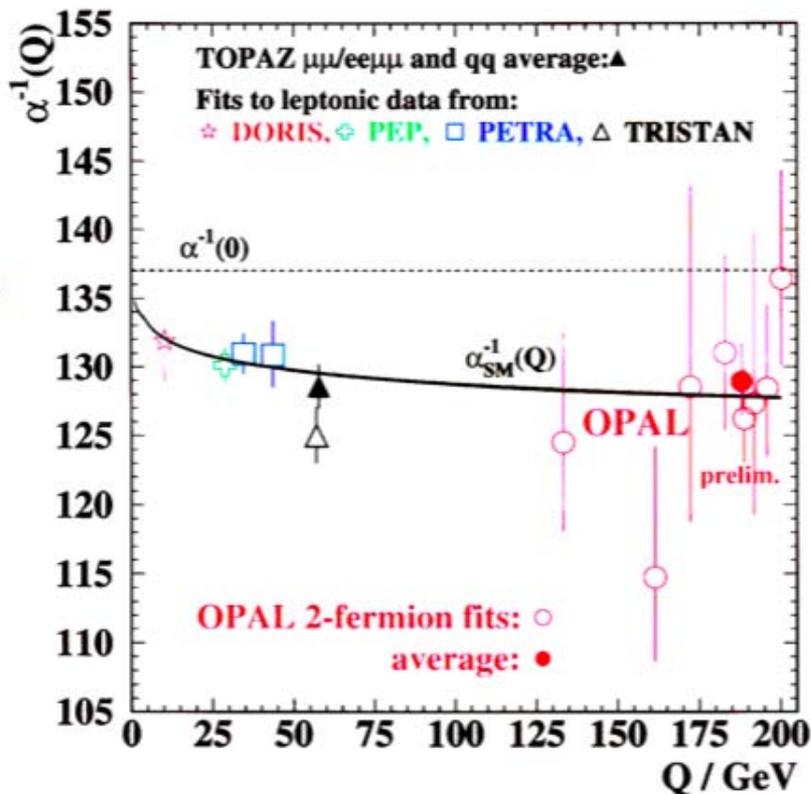
Eigenschaften der QED und der QCD:

	QED	QCD
<i>Fermionen</i>	<i>Leptonen (e, μ, τ)</i>	<i>Quarks (u, d, s, c, b, t)</i>
<i>Kraft koppelt an:</i>	<i>elektrische Ladung</i>	3 Farb-Ladungen
<i>Austausch-quantum</i>	<i>Photon (γ) (trägt keine Ladung)</i>	<i>Gluonen (g) (tragen 2 Frabladungen)</i> ⇒  ist möglich
<i>Kopplungs- "Konstante"</i>	$\alpha(Q^2=0) = \frac{1}{137}$ 	$\alpha_s(Q^2 \approx M_Z^2) \approx 0.12$ 
<i>Freie Teilchen</i>	<i>Leptonen (e, μ, τ)</i>	(Farbneutrale, gebundene Zustände von \bar{q} and q) Hadronen
<i>Theorie</i>	<i>Störungstheorie bis zur $O(\alpha^4)$</i>	<i>Störungstheorie bis $O(\alpha^3)$</i>
<i>Erreichte Präzision</i>	$10^{-6} \dots 10^{-7}$	1% ... 20%

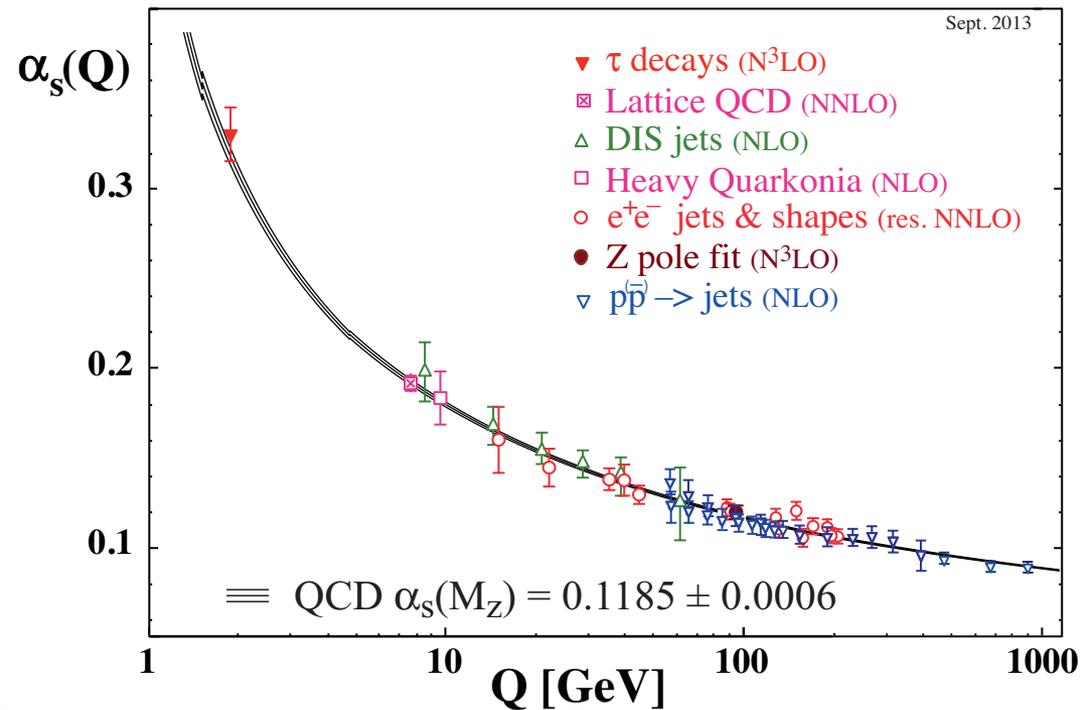
Energieabhängigkeit der Kopplungs"konstanten":

- experimentell mit hoher Genauigkeit verifiziert

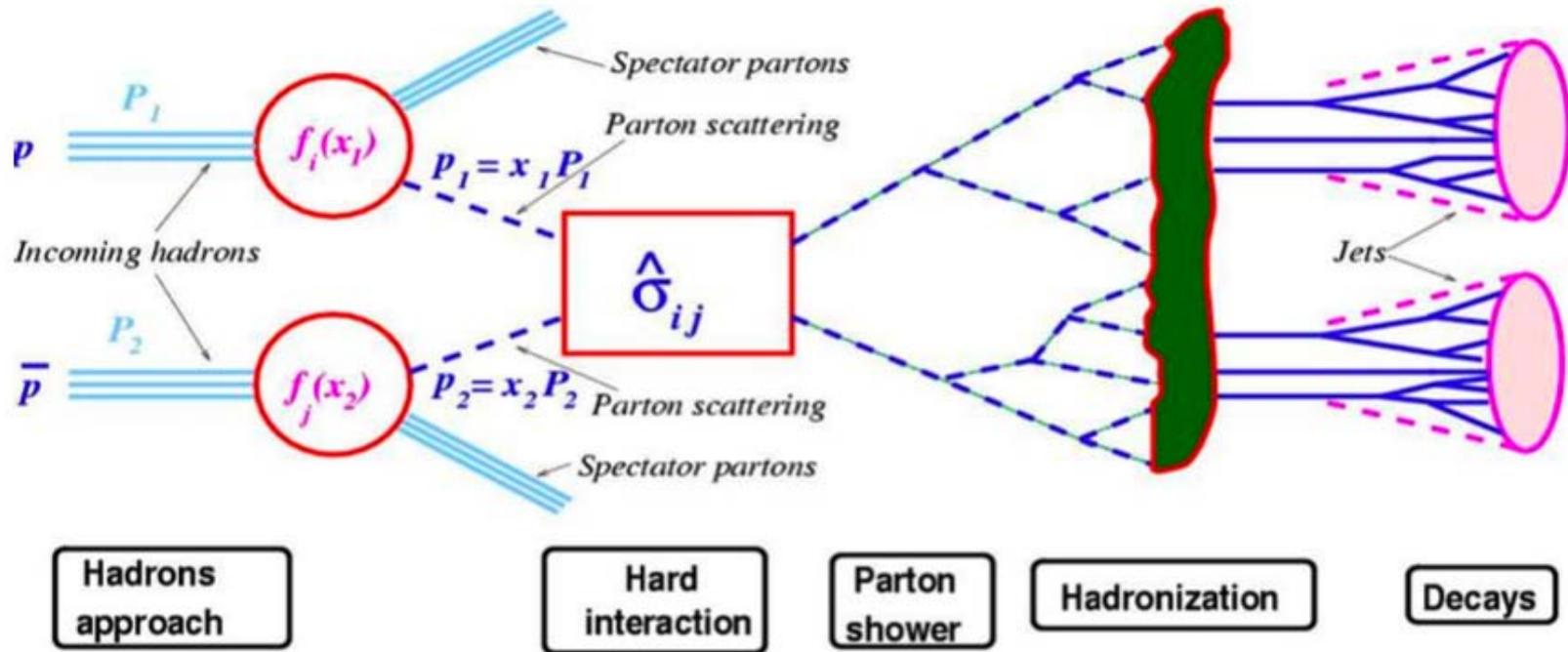
QED



QCD



Theoretische Beschreibung hadronischer Prozesse

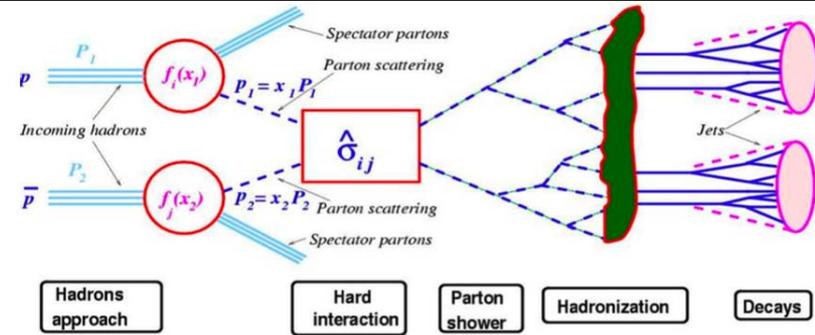


• Beschreibung der einzelnen Unterprozesse :

- $f(x, Q^2)$: Partonendichte (q, g) im Proton [pdf]
(Wahrscheinlichkeit, daß ein parton Bruchteil x des p -Impulses hat)
- $\hat{\sigma}_{ij}(Q^2)$: “harter” QCD Wirkungsquerschnitt, z.B. von $qq \rightarrow gg$; $qg \rightarrow q'g'$
- parton shower: QCD Abstrahlung $q \rightarrow qq$, $g \rightarrow gg$, $g \rightarrow qq$
- Hadronisation: Parametrisierung des Übergangs von q, g in Hadronen (Modelle!)
- Zerfälle: Parametrisierung nach Messungen und Spin-Statistik

Faktorisierungstheorem:

$$\sigma_{ij} = f_i(x_1, Q^2) f_j(x_2, Q^2) \hat{\sigma}_{ij}(Q^2)$$



sowie sequentielle Anwendung der Prozesse "Parton Shower" und "Hadronisierung".

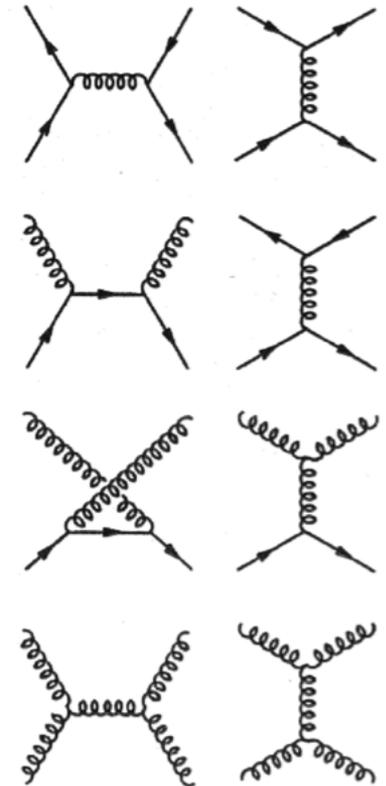
Strukturfunktionen:

$$F_2(x, Q^2) = \sum e_q^2 x f(x, Q^2)$$

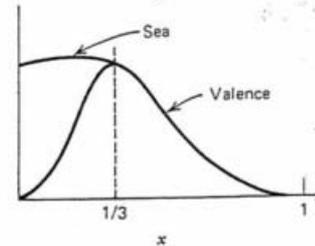
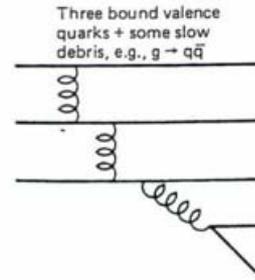
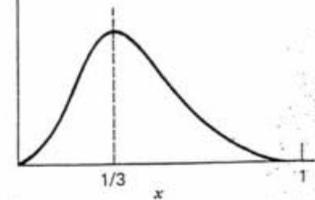
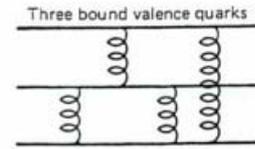
QCD Störungstheorie:

Leading order (lo) Matrixelemente
z.B. für 2→2 Prozesse:

(für Präzisionsmessungen sind next-to-leading order (nlo) oder sogar nnlo Rechnungen notwendig!)



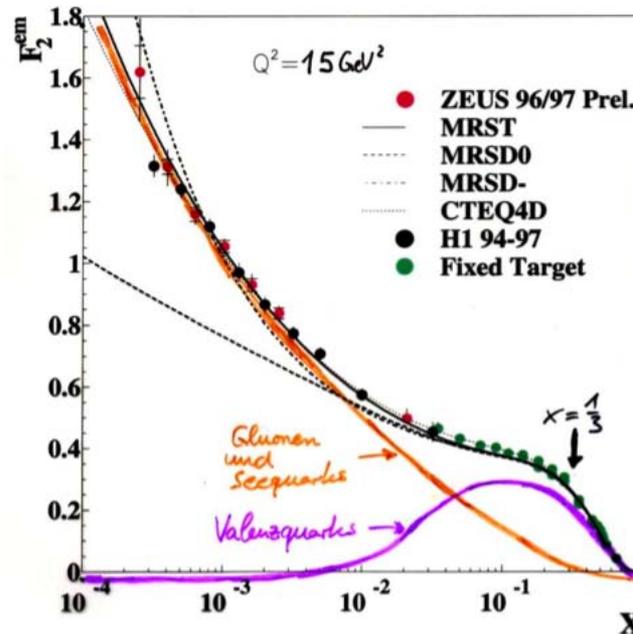
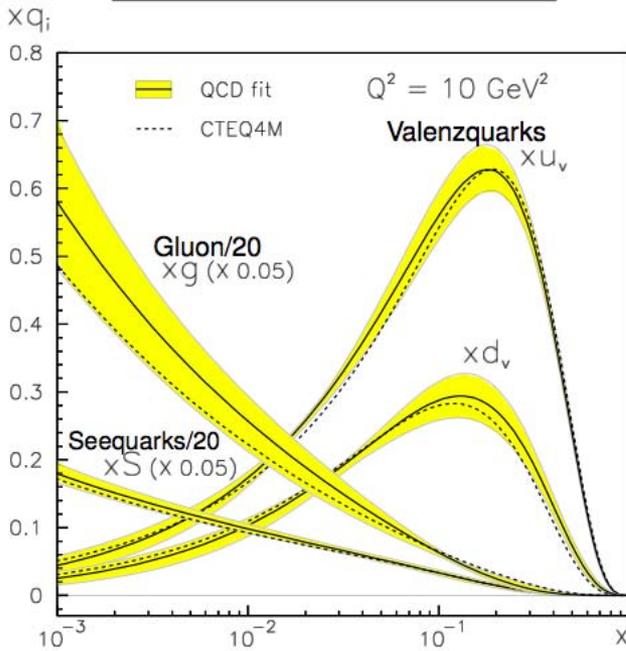
Protonstruktur



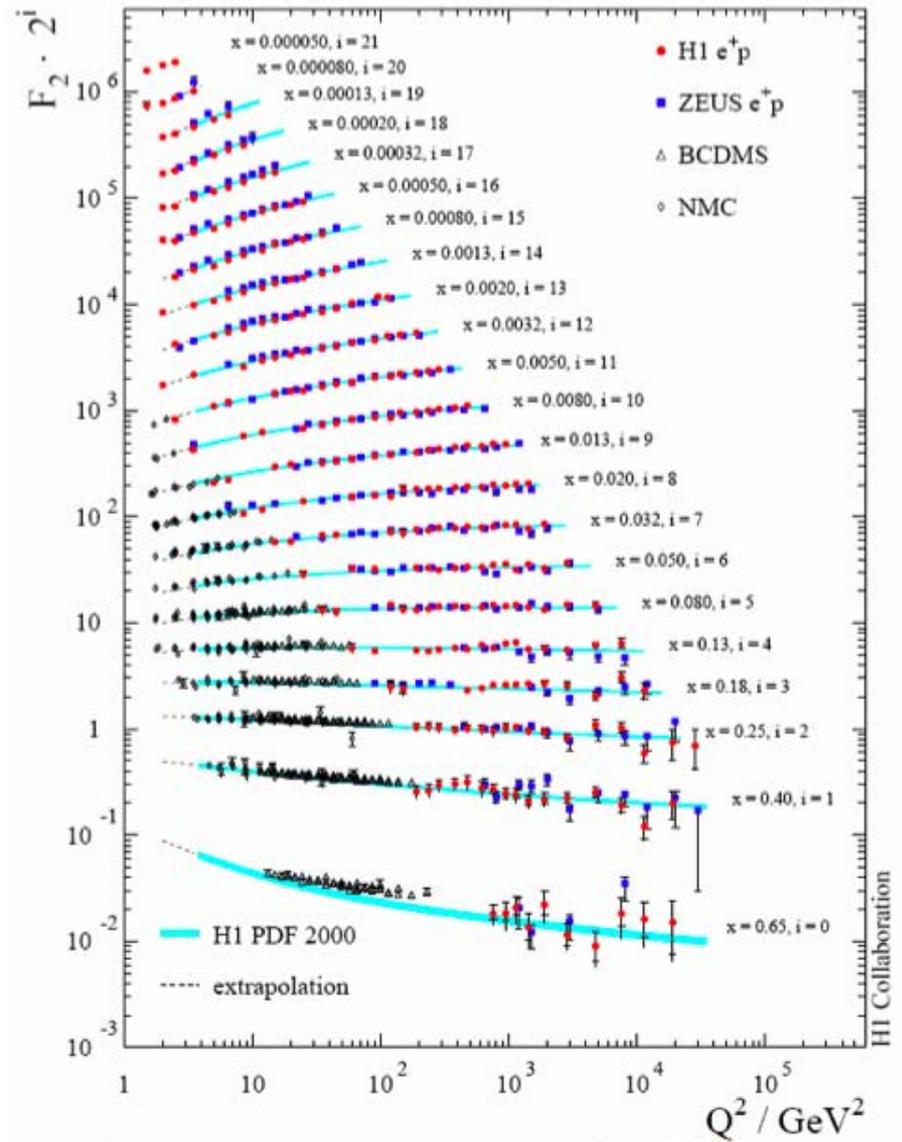
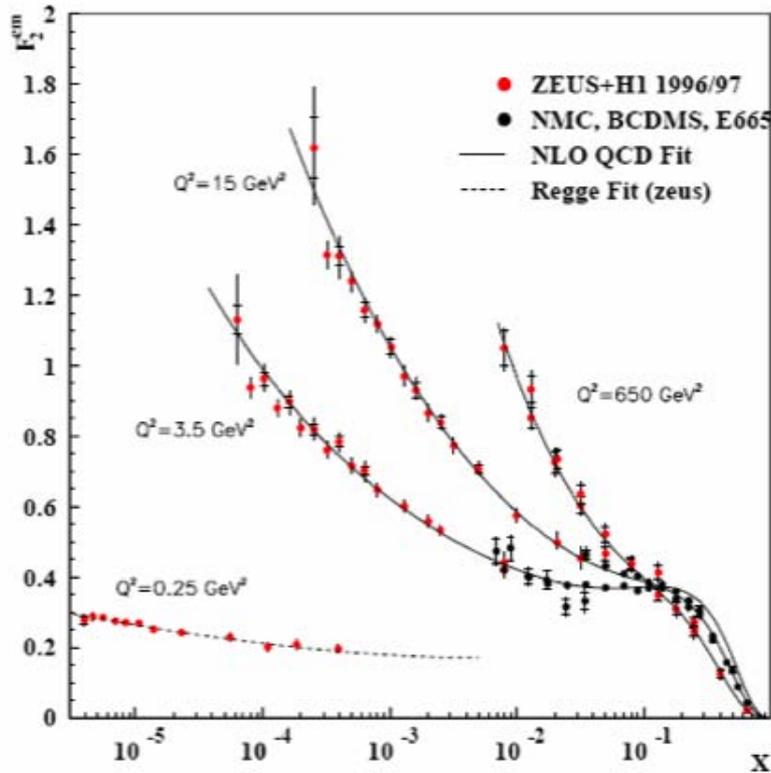
Small x

$$F_2(x) = \sum_{i=\substack{u,d,s,\dots \\ \bar{u},\bar{d},\bar{s},\dots,g}} e_i^2 x \cdot f_i(x)$$

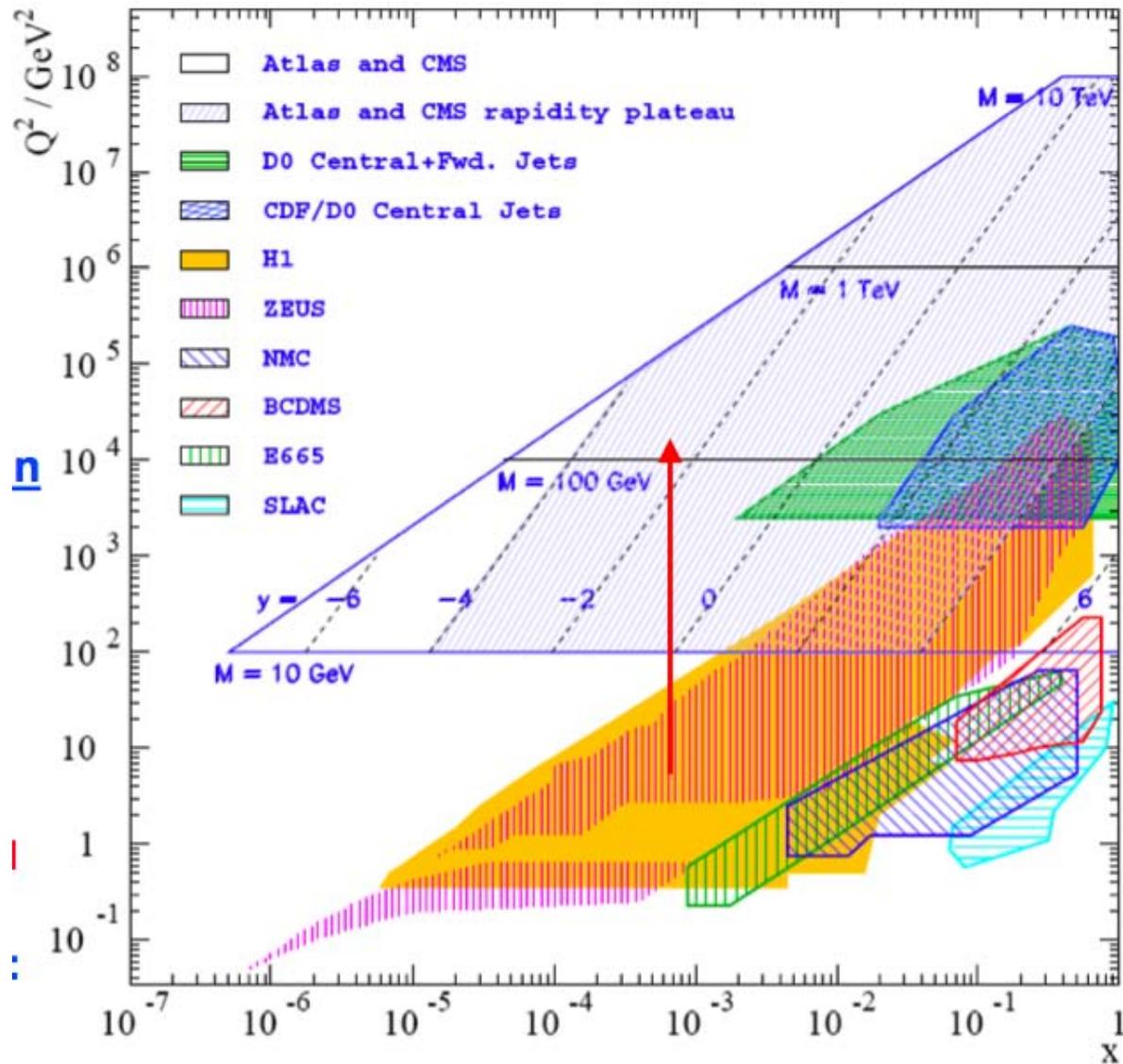
$$F_2(x) = \sum_q e_q^2 x \cdot (q(x) + \bar{q}(x))$$



Protonstruktur



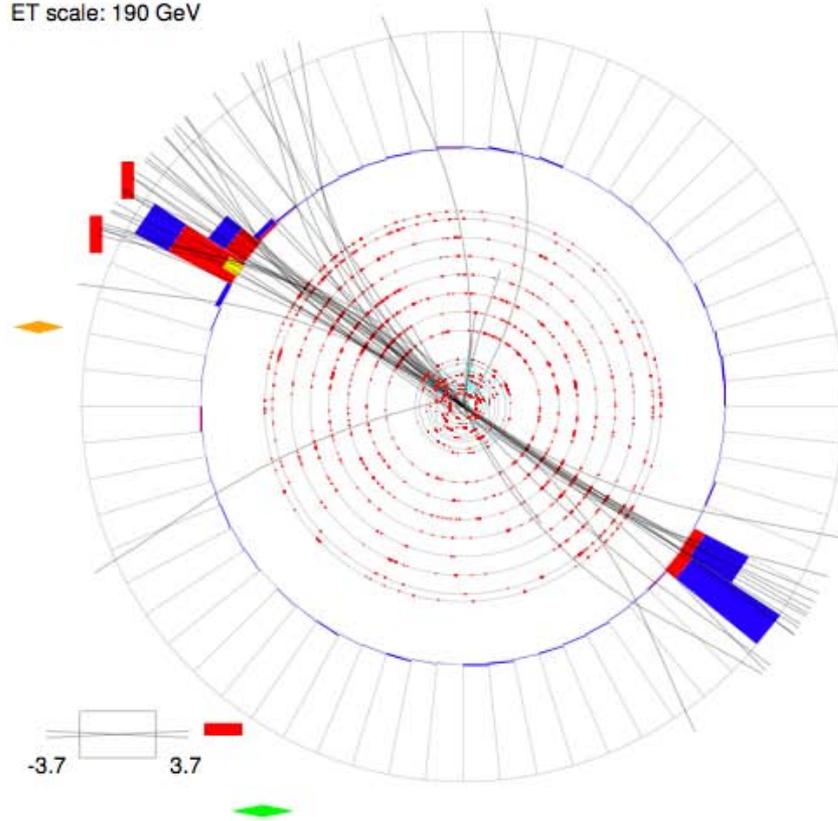
Kinematische Bereiche der Experimente



2-Jet Endzustand in Proton-Antiproton Kollision (Tevatron; D0 Detektor)

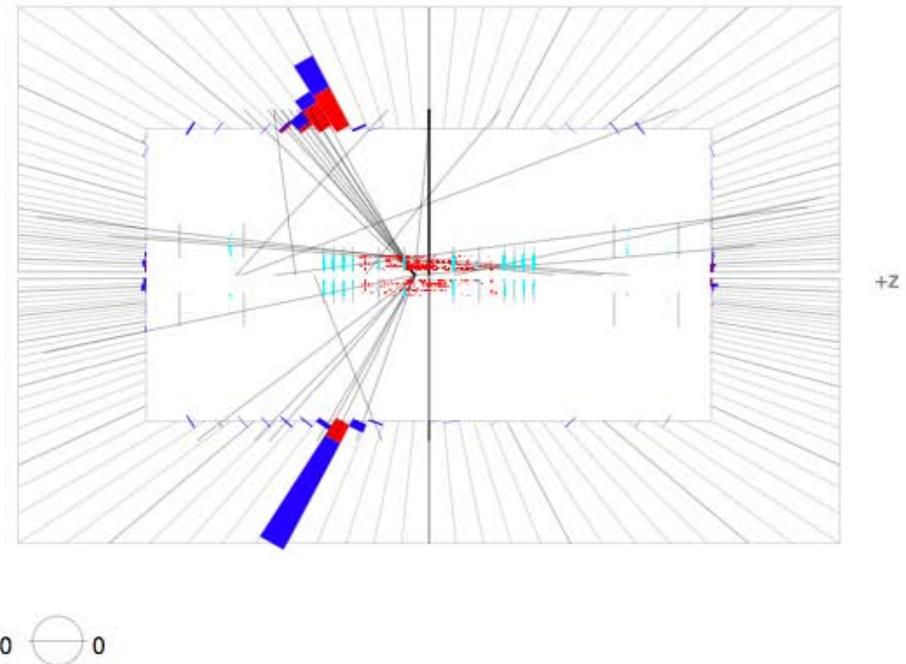
Run 162592 Event 5490755 Fri Oct 25 11:57:39 2002

ET scale: 190 GeV



Run 162592 Event 5490755 Thu Oct 24 13:54:27 2002

E scale: 303 GeV

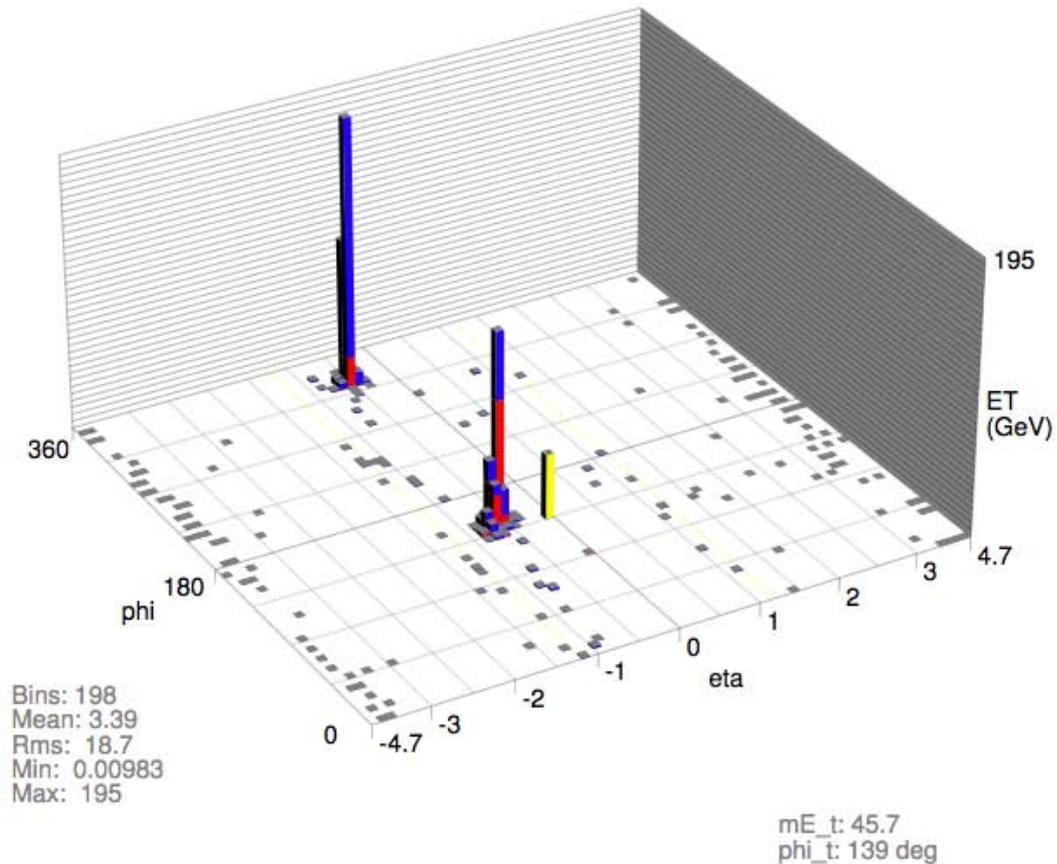


2-Jet Endzustand in Proton-Antiproton Kollision (Tevatron; D0 Detektor)

Darstellung in

φ - η -Ebene:

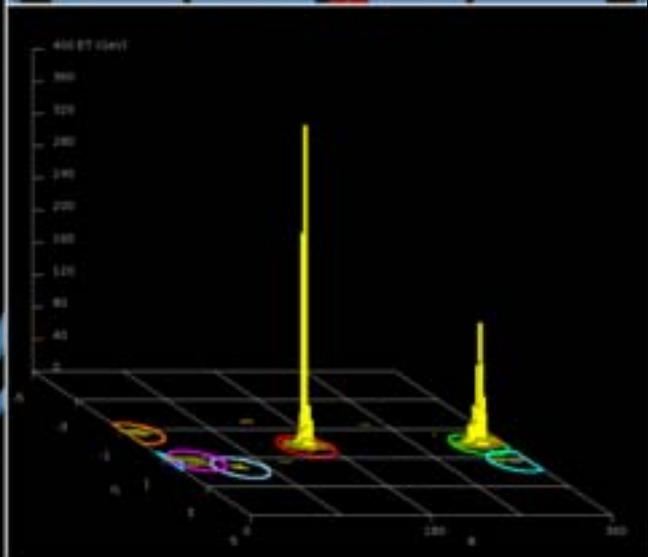
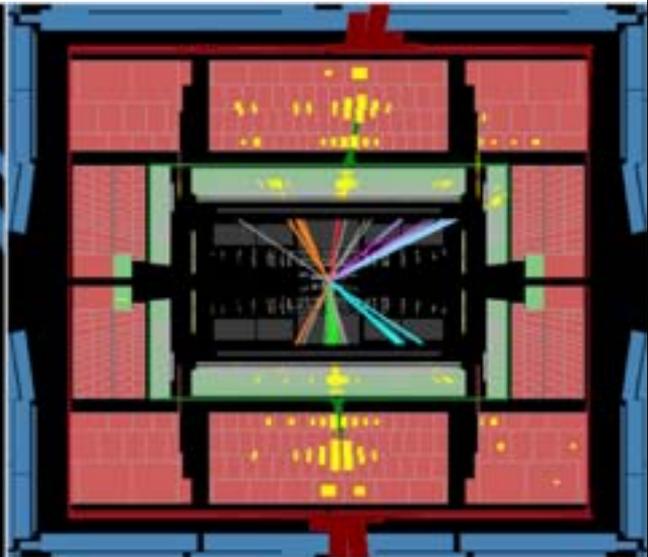
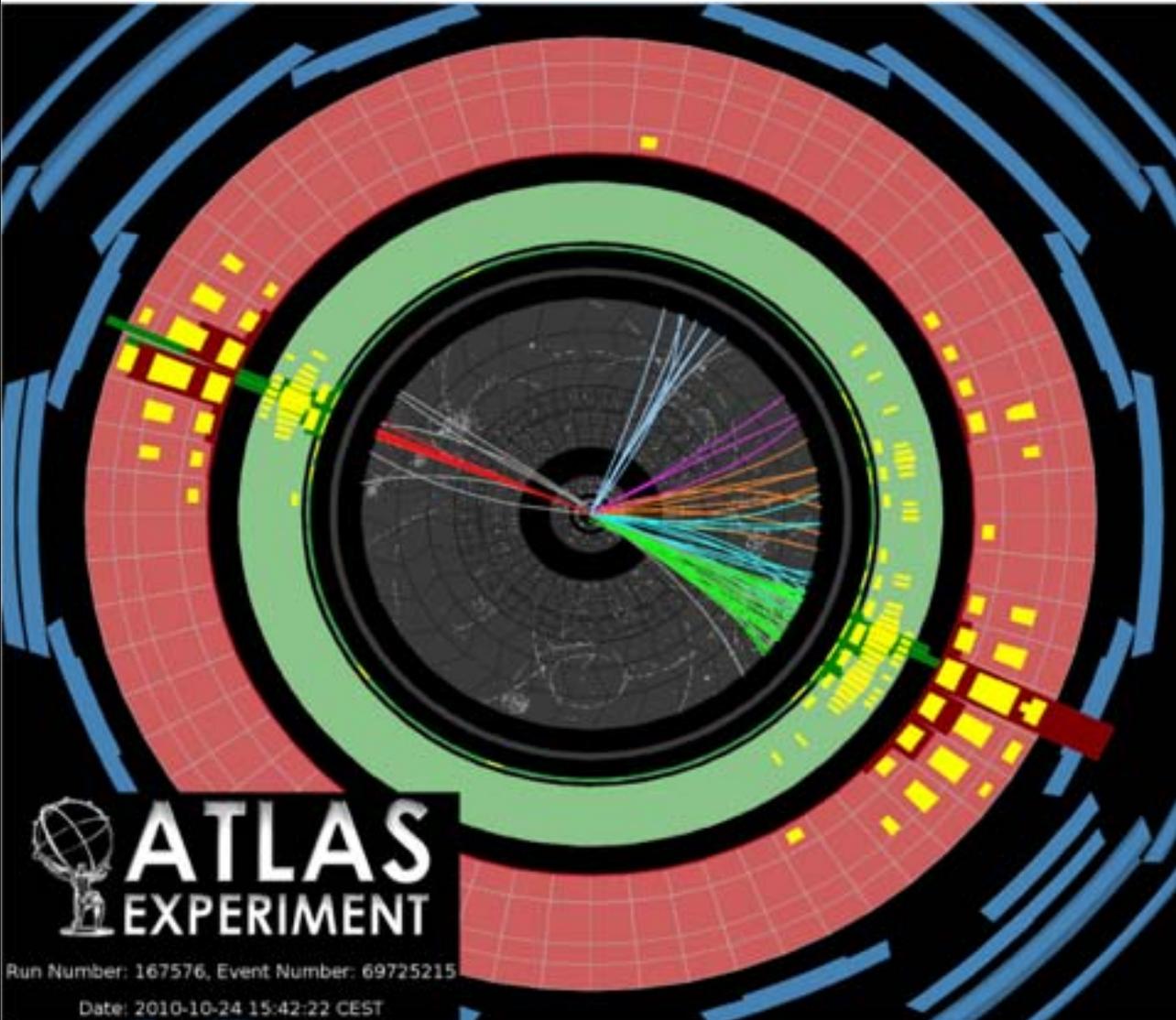
Run 162592 Event 5490755 Thu Oct 24 13:54:25 2002



Azimutwinkel φ , Pseudorapidität $\eta = -\tan(\vartheta/2)$, Polarwinkel ϑ , transversale Energie $E_T = E \sin \vartheta$

The highest mass central dijet event and the highest- p_T jet collected by the end of October 2010:
 two central high- p_T jets have an invariant mass of 2.6 TeV and the highest p_T jet has p_T of 1.3 TeV.

- 1st jet (ordered by p_T): $p_T = 1.3$ TeV, $\eta = 0.2$, $\phi = 2.8$
- 2nd jet: $p_T = 1.2$ TeV, $\eta = 0.0$, $\phi = -0.5$
- Missing $E_T = 42$ GeV, $\phi = 1.5$
- Sum $E_T = 2.2$ TeV



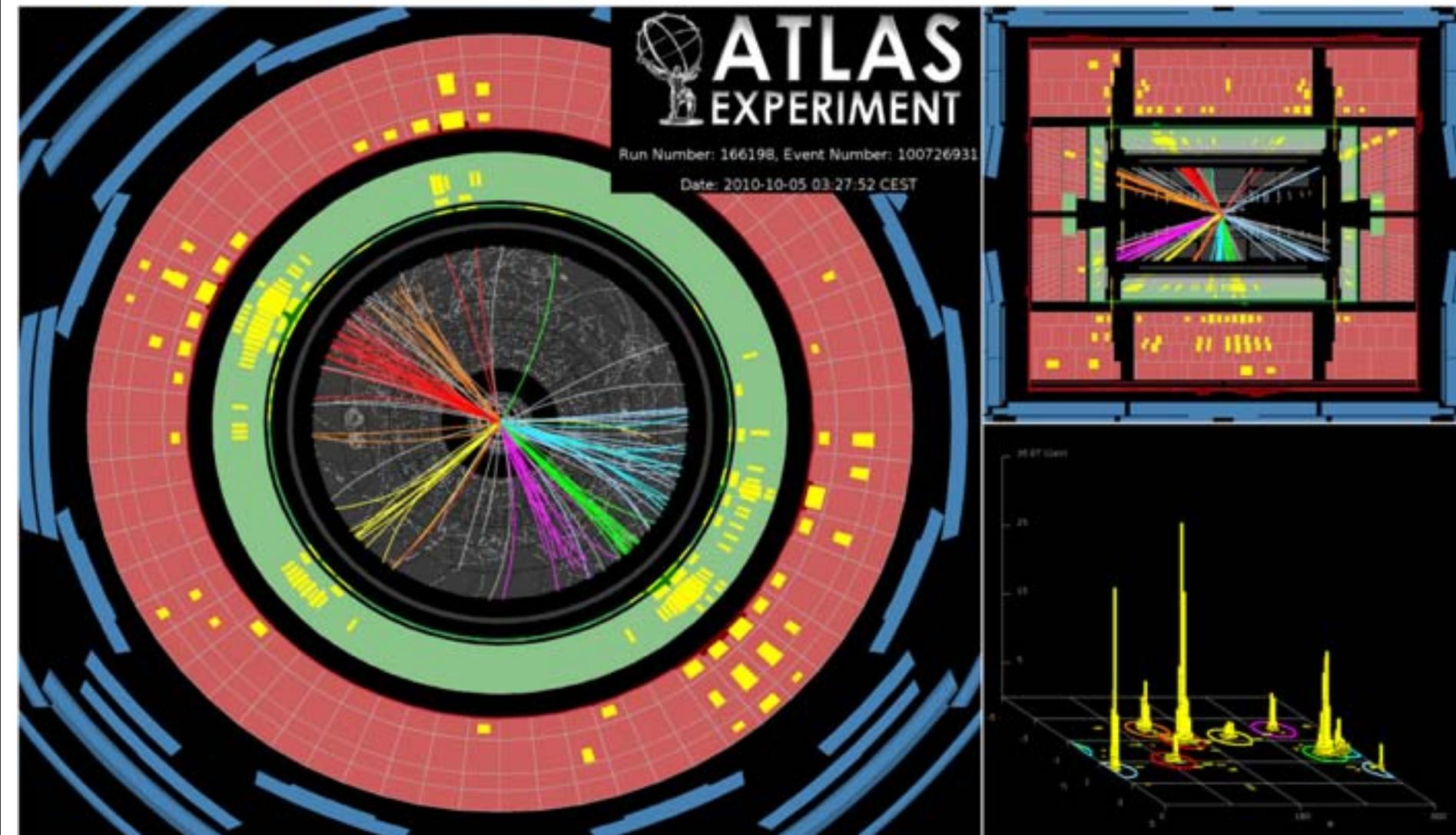
ATLAS
 EXPERIMENT

Run Number: 167576, Event Number: 69725215

Date: 2010-10-24 15:42:22 CEST

Jet momenta are calibrated according to the "EM+JES" scheme. Event collected on 8 October 2010. The highest jet multiplicity event collected by the end of October 2010, counting jets with p_T greater than 60 GeV: this event has eight.

- 1st jet (ordered by p_T): $p_T = 290$ GeV, $\eta = -0.9$, $\phi = 2.7$
- 2nd jet: $p_T = 220$ GeV, $\eta = 0.3$, $\phi = -0.7$
- Missing $E_T = 21$ GeV, $\phi = -1.9$
- Sum $E_T = 890$ GeV

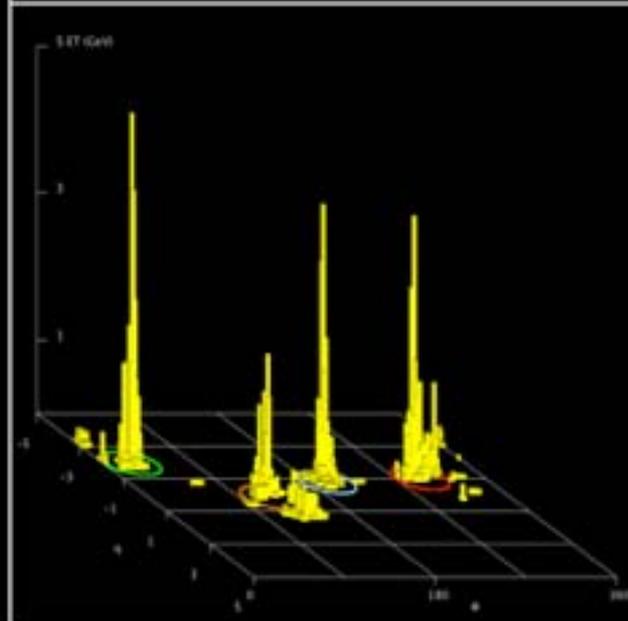
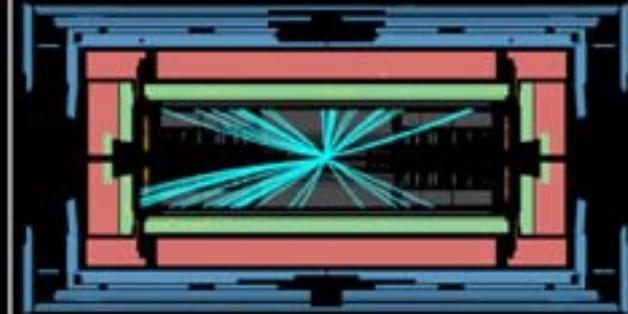
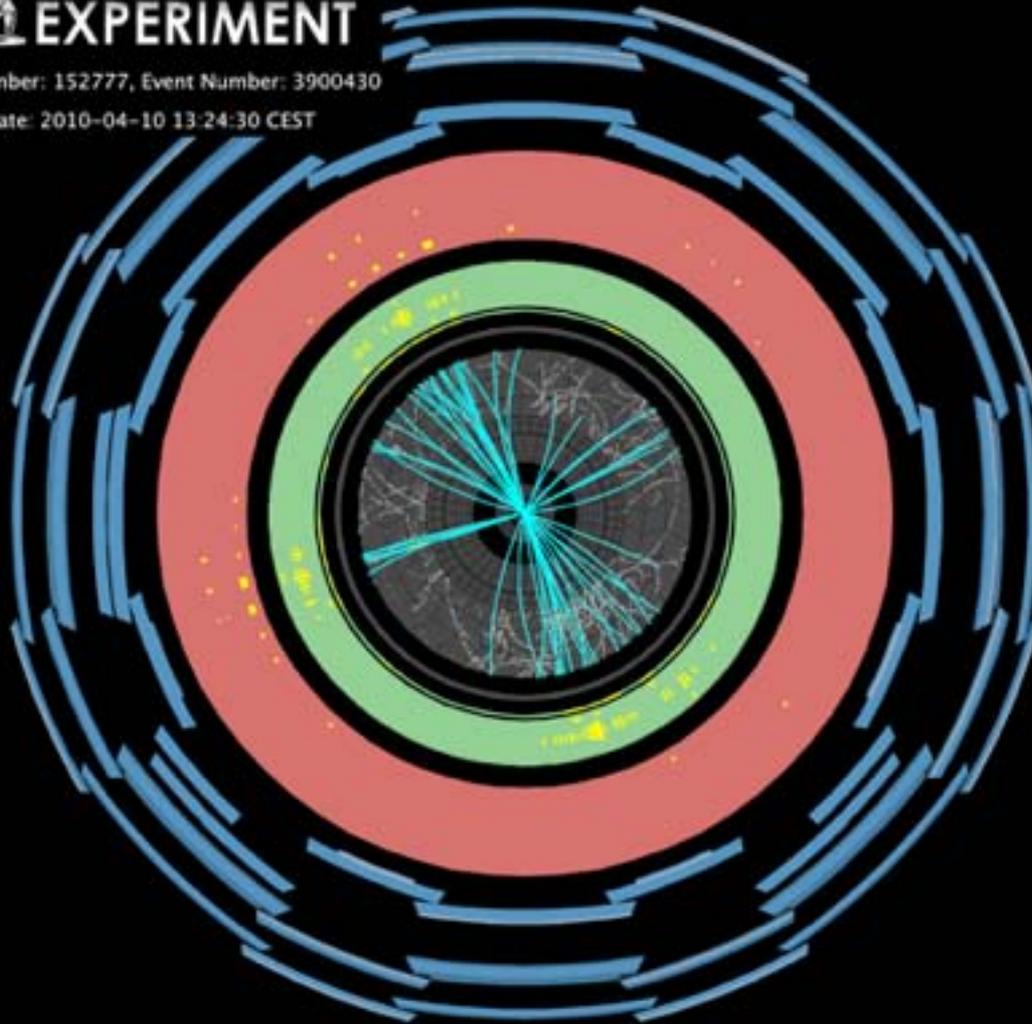


Event with four reconstructed hadronic jets. The four jets have a calibrated $p_T > 50$ GeV, and are found with the anti-kt algorithm with $R=0.6$. The highest p_T jet has a calibrated jet p_T of 144 GeV. Event collected on 10 April 2010.

 **ATLAS**
EXPERIMENT

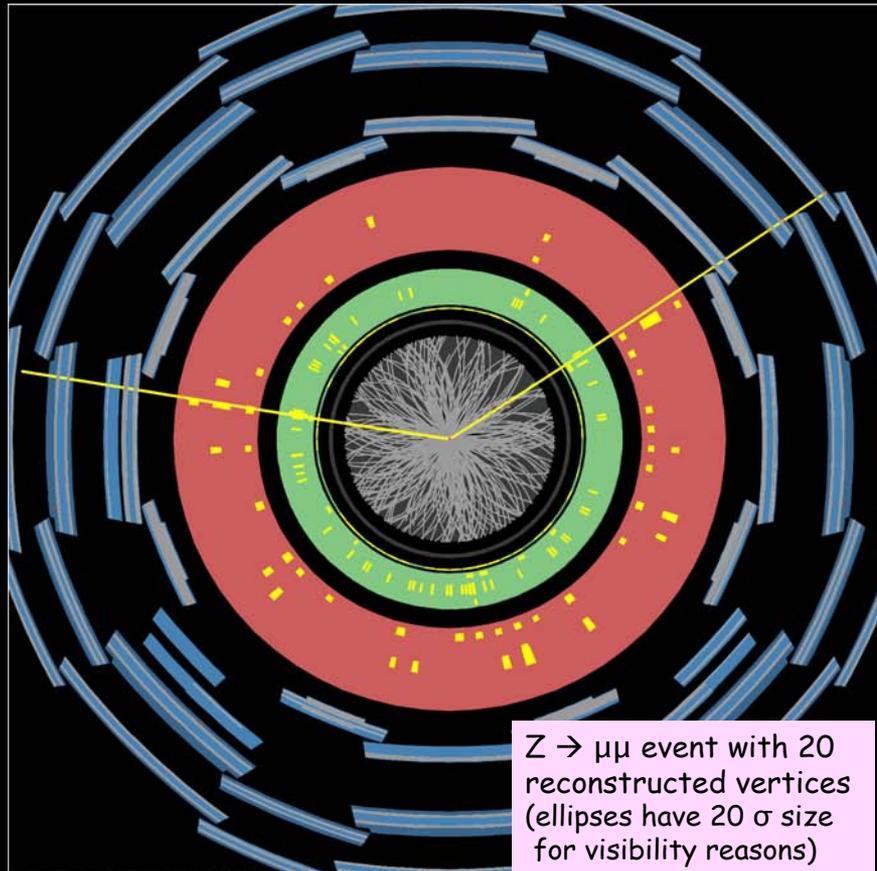
Run Number: 152777, Event Number: 3900430

Date: 2010-04-10 13:24:30 CEST



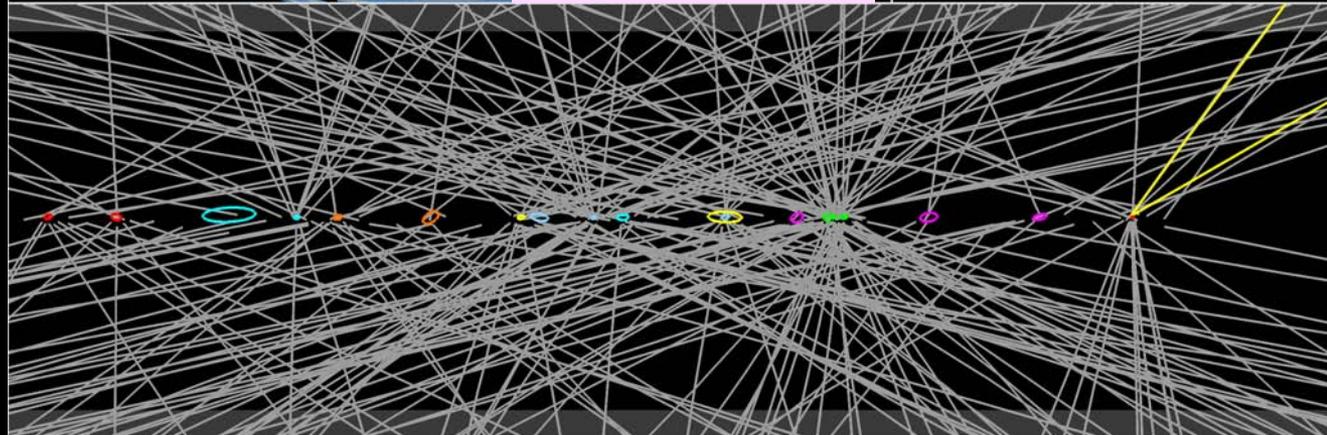
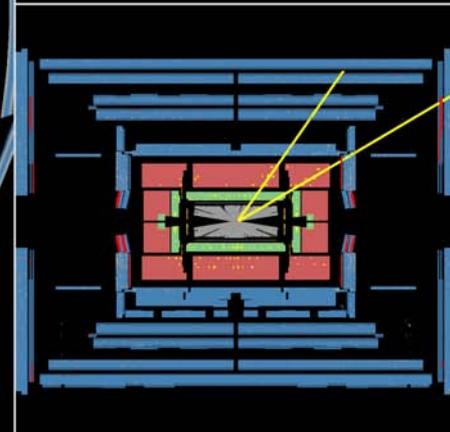
„pile-up“:

- 10-40 Kollisionen pro Strahkreuzung
- Detektoren und Elektronik müssen mit riesigen Datenmengen fertig werden
- Physikanalyse der Daten unter extrem hohen Untergrundraten

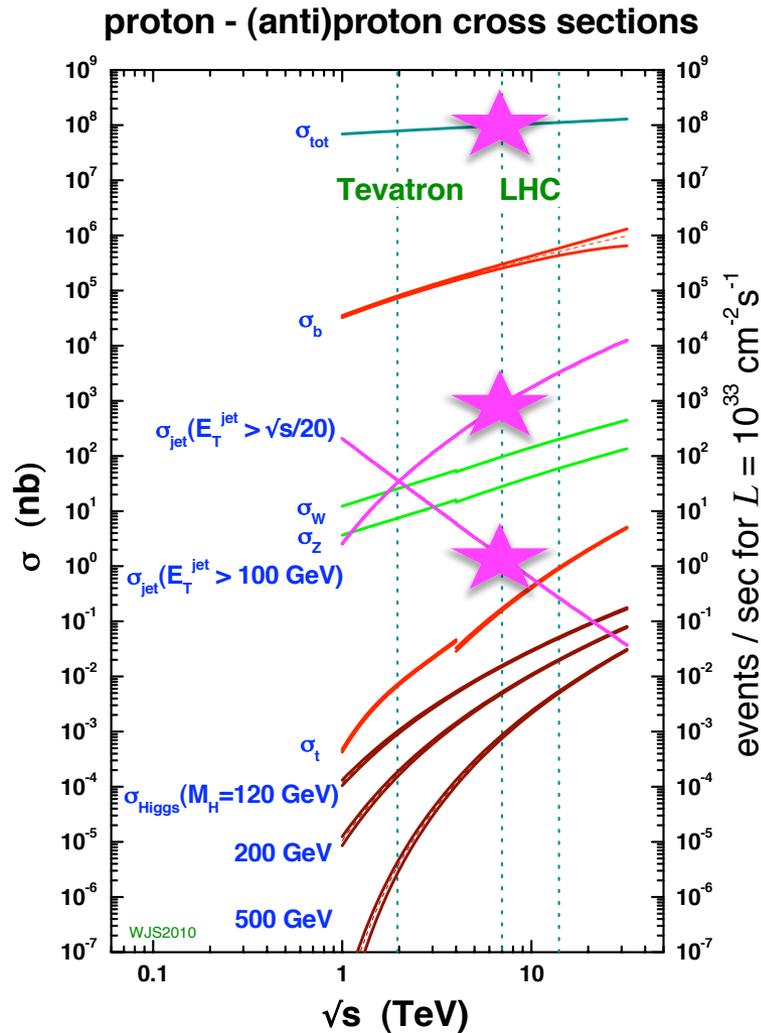


Run Number: 189280, Event Number: 1705325

Date: 2011-09-14 02:47:14 CEST



QCD- / Jet- Produktions-Querschnitte



totaler QCD Wirkungsquerschnitt

Jet W.-Querschnitt $E_T^{\text{jet}} > 100 \text{ GeV}$

Jet W.-Querschnitt $E_T^{\text{jet}} > \sqrt{s}/20$

Physik der Hadronen-Jets

Zum Vergleich von Hadronen-Jets mit analytischen QCD -Rechnungen (Quark- und Gluondynamik) muß man **auf lösbare Teilchenjets** Theorie und Praxis definieren.

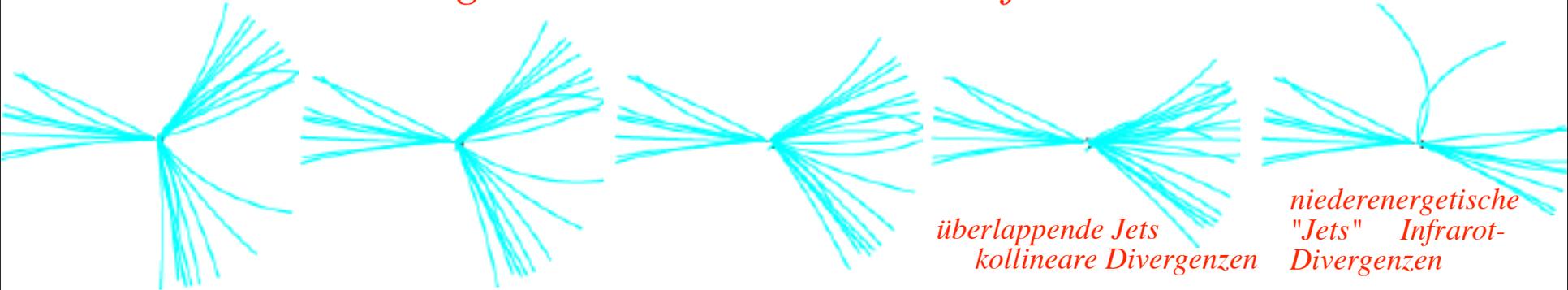


Dazu benötigt man:

- Definition eines **Auflösungskriteriums** (z.B. minimale invariante Paarmasse, minimale Winkel, minimale Energien ..)
- Vorschrift, wie man nichtauflösbare Jets **rekombiniert**.

allerdings:

Es gibt keine "natürliche" Definition von Jets !



*überlappende Jets
kollineare Divergenzen*

*niederenergetische
"Jets" Infrarot-
Divergenzen*

k_T - Algorithmus und Jetdefinition:

(meistbenutzt in e^+e^- -Vernichtung; seit LHC auch in Hadron-Kollisionen)

k_T - Algorithmus und Jetdefinition:

für jedes Objekt eines Ereignisses (Parton, Teilchen, Energie-Cluster) wird berechnet:

$$d_{ij} = \min(k_{t,i}^2, k_{t,j}^2) \frac{(\Delta R)_{ij}^2}{R^2};$$

$$d_{iB} = k_{t,i}^2$$

$$\text{mit } (\Delta R)_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$$

$k_{t,i}$: transversaler Impuls bezügl. Strahlachse

ϕ_i : azimuthaler Winkel

y : Rapidität; = $1/2 \ln [(E+p_z) / (E-p_z)]$

d_{ij} : Abstandsmass zwischen zwei Objekten i, j

d_{iB} : Abstandsmass zwischen Objekt und Strahlachse

eine Liste aller d_{ij} und d_{iB} wird erstellt. Falls der kleinste Eintrag d_{ij} ist, werden Objekte i und j kombiniert (Addition der 4er-Vektoren); falls d_{iB} der kleinste ist, wird Objekt i als „Jet“ definiert und aus der Liste entfernt.

R : „Auflösungsparameter“, bei dem Objekte i und j noch getrennt werden können.

anti- k_T - Algorithmus und Jetdefinition:

$$d_{ij} = \min(k_{t,i}^{-2}, k_{t,j}^{-2}) \frac{(\Delta R)_{ij}^2}{R^2}$$

$$d_{iB} = k_{t,i}^{-2}$$

(derzeit meist gebräuchlich am LHC, mit $R = 0.4, 0.6$)

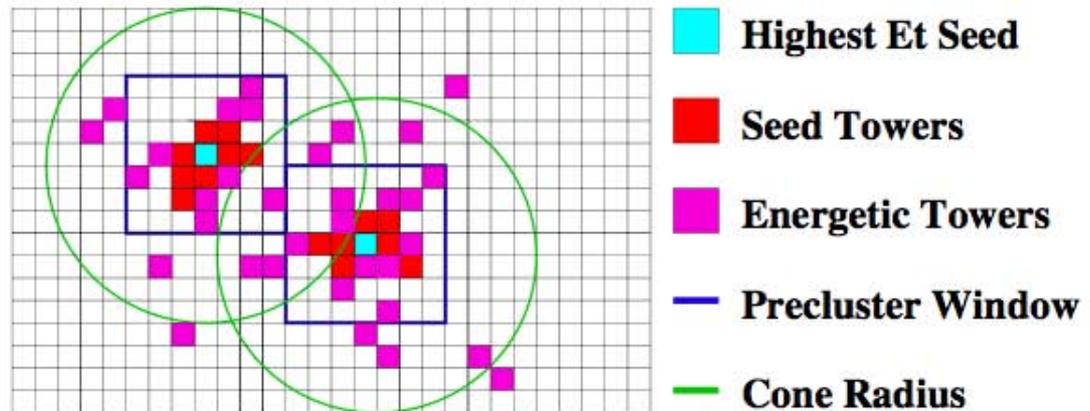
Anmerkungen zum k_T - Jetalgorithmus

- die Jetdefinition über den Auflösungsparameter $d_{ij} = 1/2 \min(E_i^2, E_j^2) (1 - \cos \theta_{ij})$ ist eine Abwandlung der Formel für die invariante Paarmasse zweier masselose Teilchen: $M_{ij}^2 = E_i E_j (1 - \cos \theta_{ij})$ --- die historisch vor Einführung des k_T Algorithmus verwendet wurde (unter dem Namen “JADE” Algorithmus).
- die k_T Jetdefinition ist infrarot und kollinear sicher, d.h. Berechnungen in QCD Störungstheorie sind möglich und verfügbar. Die Benutzung von d_{ij} anstelle der mehr intuitiven Paarmasse hat Vorteile bei der theoretischen Berechnung; u.a. können durch einen mathematischen Trick führende Beiträge zu höheren Ordnungen aufsummiert werden, was bei der JADE Definition nicht möglich war.
- der k_T Algorithmus hat sich besonders in der Analyse von Jets in der e^+e^- Vernichtung (zB bei LEP) als sehr erfolgreich erwiesen, sowohl in experimenteller wie in theoretischer Sicht.
- am Hadron Collider muss bei Adaption des k_T Algorithmus besondere Rücksicht auf die durch die weiterfliegenden Proton-Reste verursachten “remnant jets” bzw. das “underlying event” in Vorwärts-/Rückwärts-Richtung genommen werden -- geschieht über die Definition von d_{iB}

Cone-Jet Algorithmus:

- **JetClu:** CDF's Run I algorithm

- Create E_T -ordered list of calorimeter towers (seed towers: $E_T > 1$ GeV).
- Build **pre-clusters** from adjacent seed towers beginning with the highest E_T tower.
- For each pre-cluster: Calculate centroid;
iterate cone using all towers above 100 MeV
($\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} < R_{\text{cone}}$).
- **“Ratcheting”**: During the iteration no seed tower of the original pre-cluster ever leaves the cone! (Pre-clusters remain connected to cones.)
- Two overlapping stable cones are **merged** if more than 75% of the transverse energy of one of the cones is shared by the other one.
Otherwise the cones are **split** by distributing the shared energy among the cones.
(CDF-specific, iterative)
- JetClu is neither infrared safe nor collinear safe.
- Yet, JetClu is being used in CDF's Run II Level 3 trigger and for some analyses (backward compatibility).



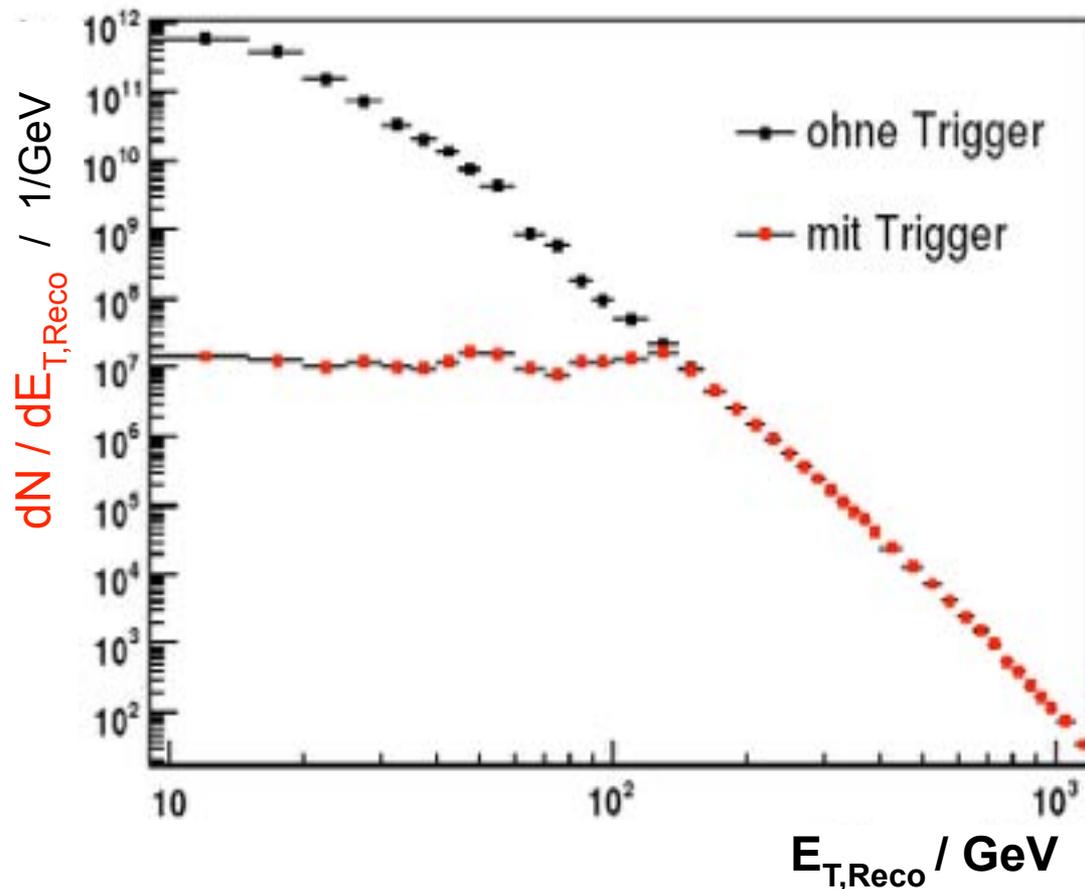
Anmerkungen zum Cone - Jetalgorithmus

- der Cone-Algorithmus ist historisch der am längsten und meist benutzte Jetalgorithmus in der Analyse von Hadron Kollisionen (Tevatron).
- seine Definition und Anwendung ist i.w. durch experimentelle Randbedingungen (Zellgröße hadronischer Kalorimeter) und technischer Details bestimmt; in der Vergangenheit hat daher auch jedes Experiment (zB CDF und D0 am Tevatron) leicht verschiedene Variationen des Cone-Algorithmus benutzt.
- der Cone-Algorithmus ist weder infrarot noch kollinear sicher, kann daher nicht für QCD Präzisionsstudien verwendet werden.
- wegen der langen exp. Erfahrung mit dem Cone-Algorithmus wird dieser auch weiterhin am Tevatron dominant (und zT auch am LHC) benutzt werden; hier besonders für technische Studien (z.B. Isolation von Leptonen, Ereignisklassifizierung, jet tagging etc).

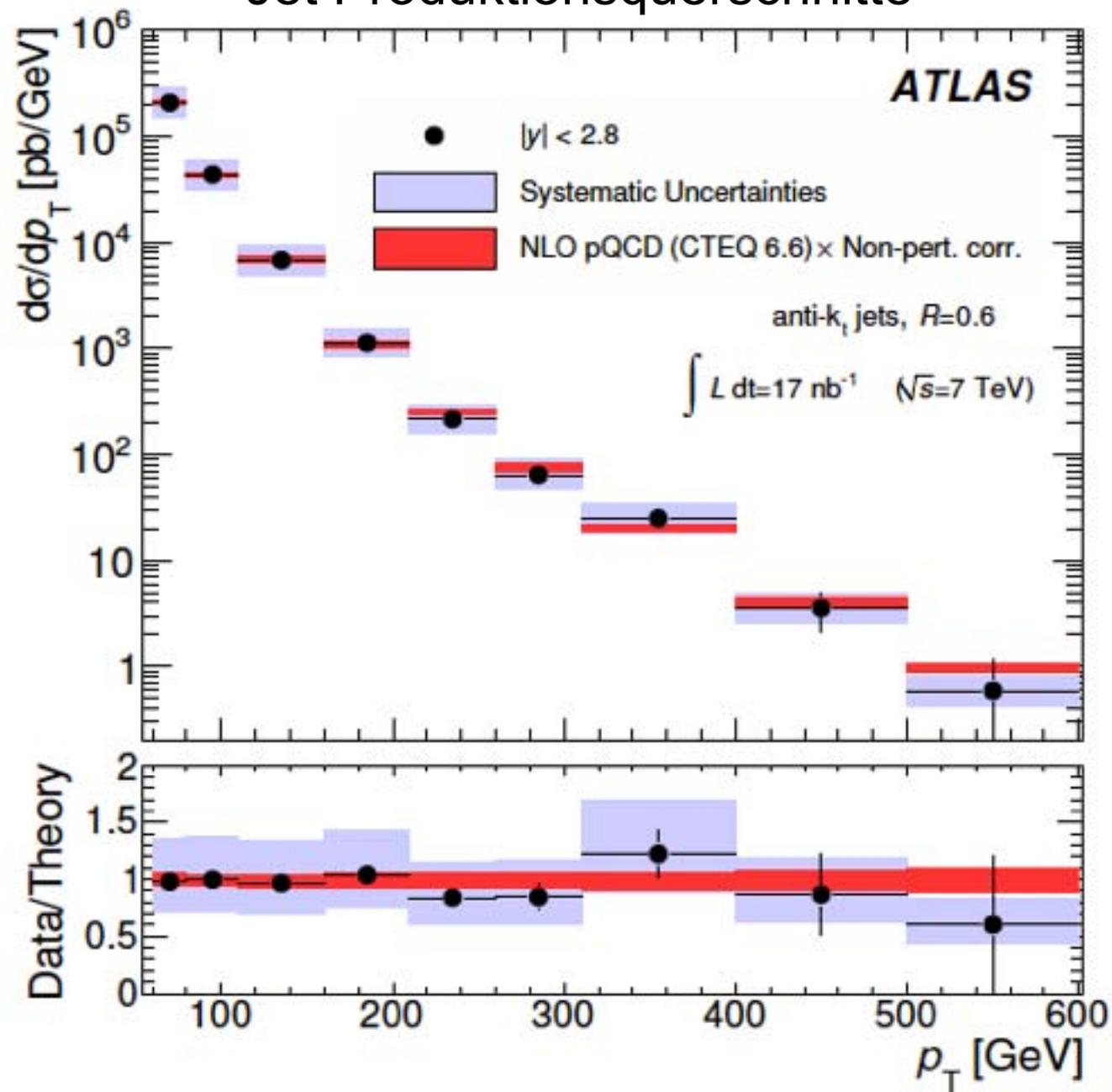
Jet-Wirkungsquerschnitt am LHC

- Studie: Single-Jet-Spektrum nach einer Laufzeit von etwa 1 Jahr (10^7 s), bei niedriger Luminosität ($L = 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$): $\int L dt = 1 \text{ fb}^{-1}$

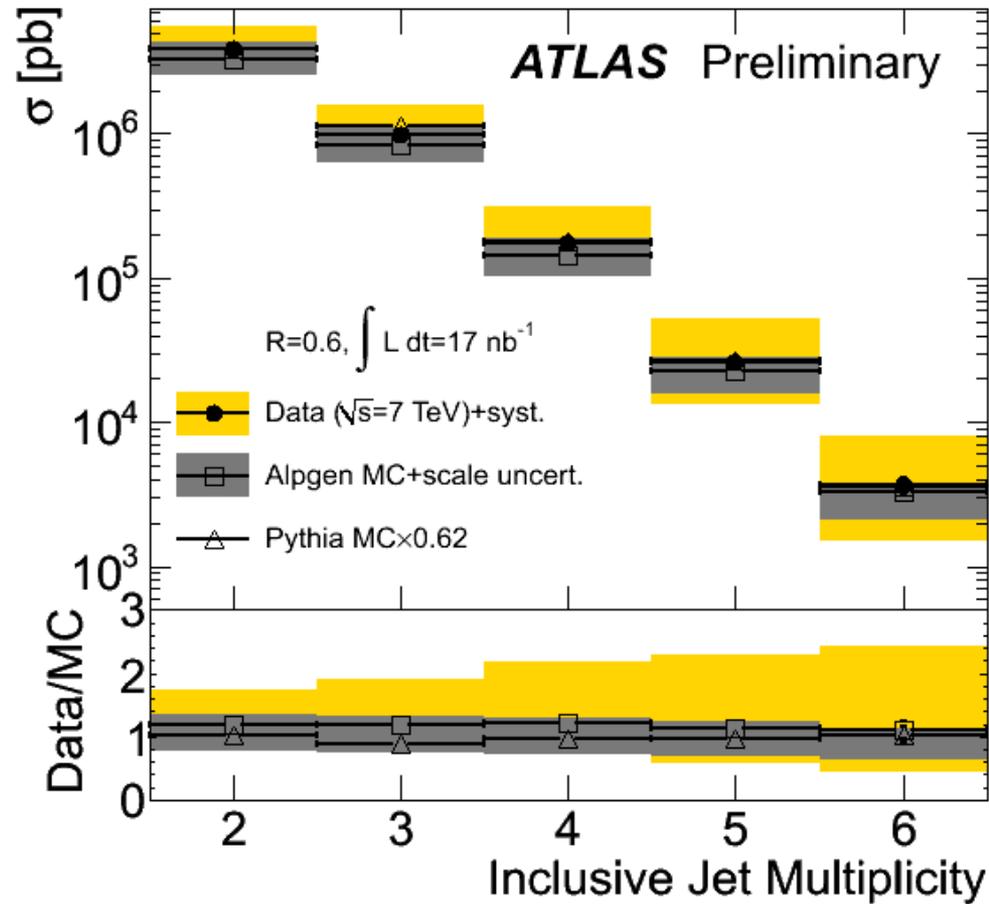
- Messung bis 1 TeV
sehr früh möglich
- Unsicherheiten:
 - Jet-Energieskala
 - Energieauflösung
 - Triggereffizienzen
 - Luminosität



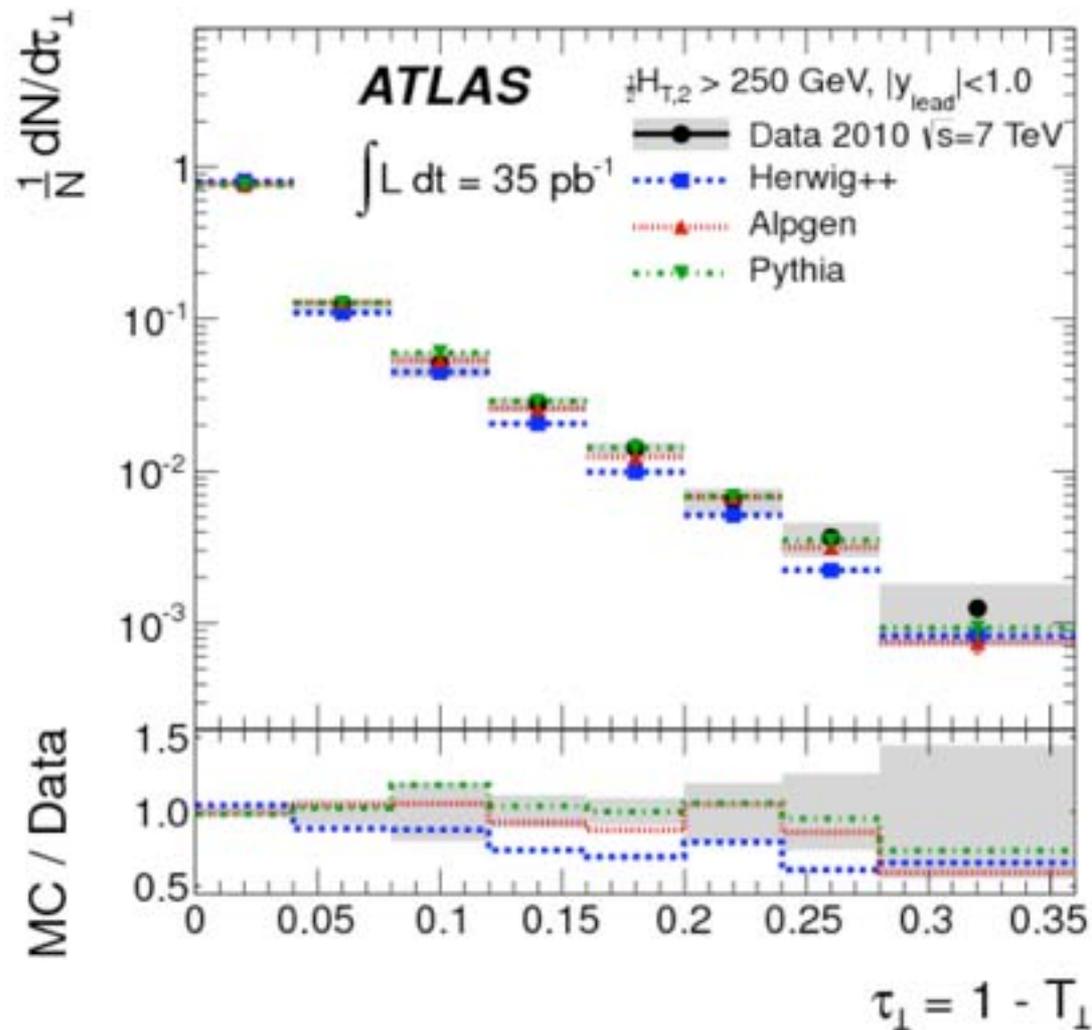
Jet Produktionsquerschnitte



Jet Multiplizitäten



Measurement of event shapes at large momentum transfer

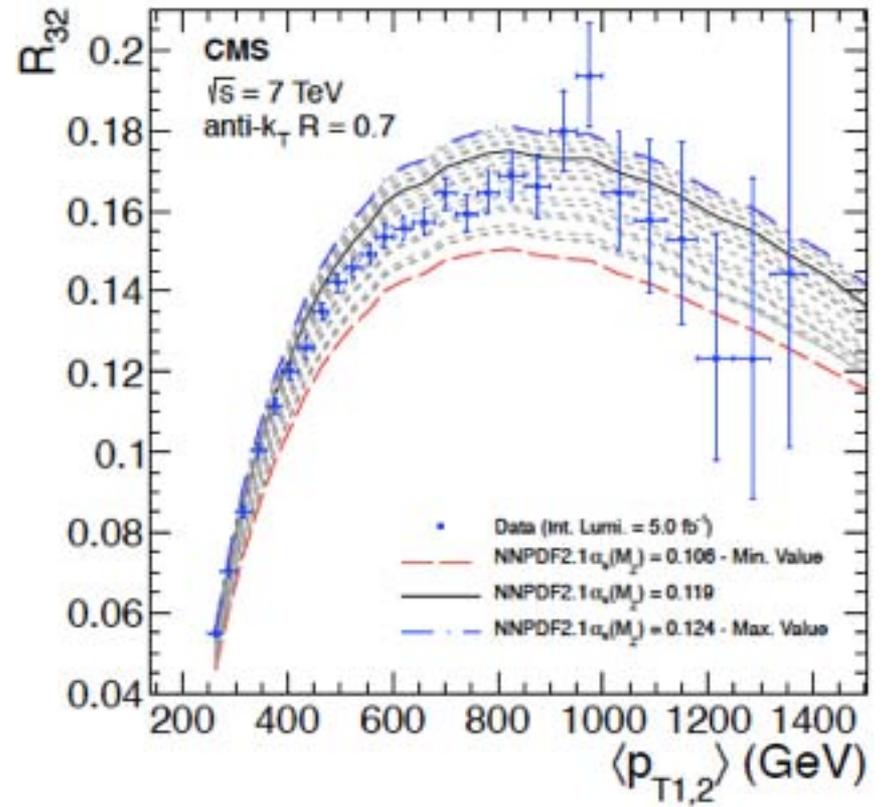
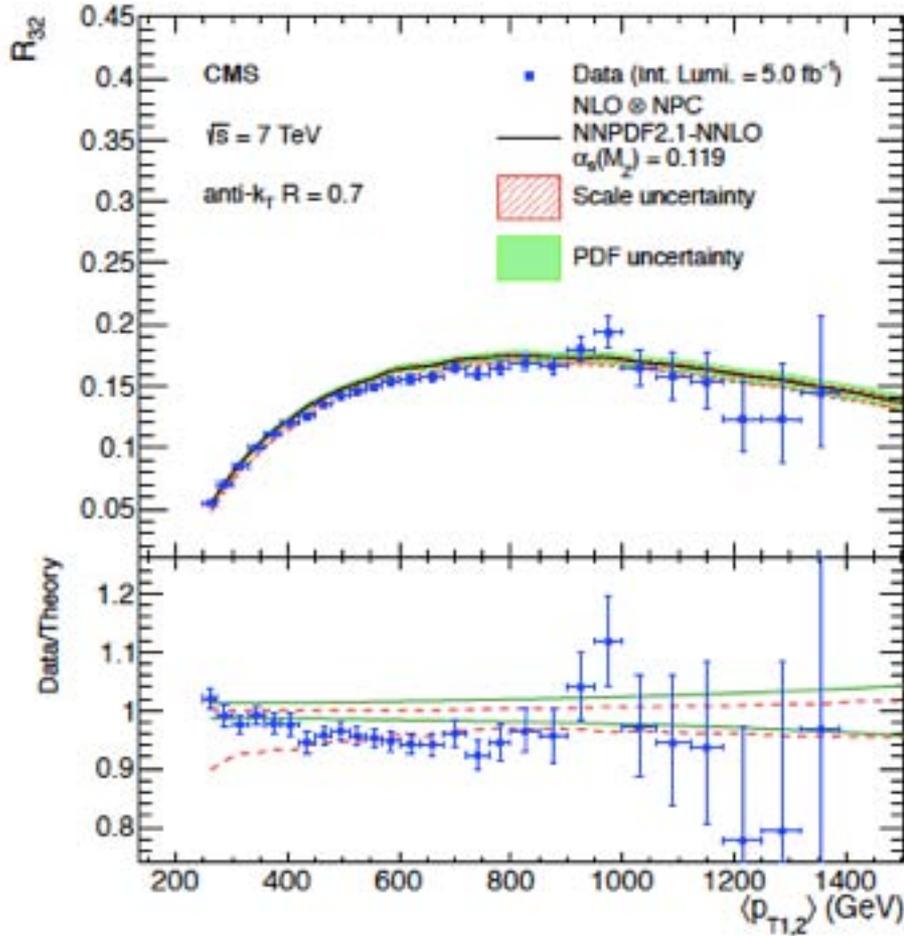


[Eur. Phys. J. C \(2012\) 72: 2211](#)

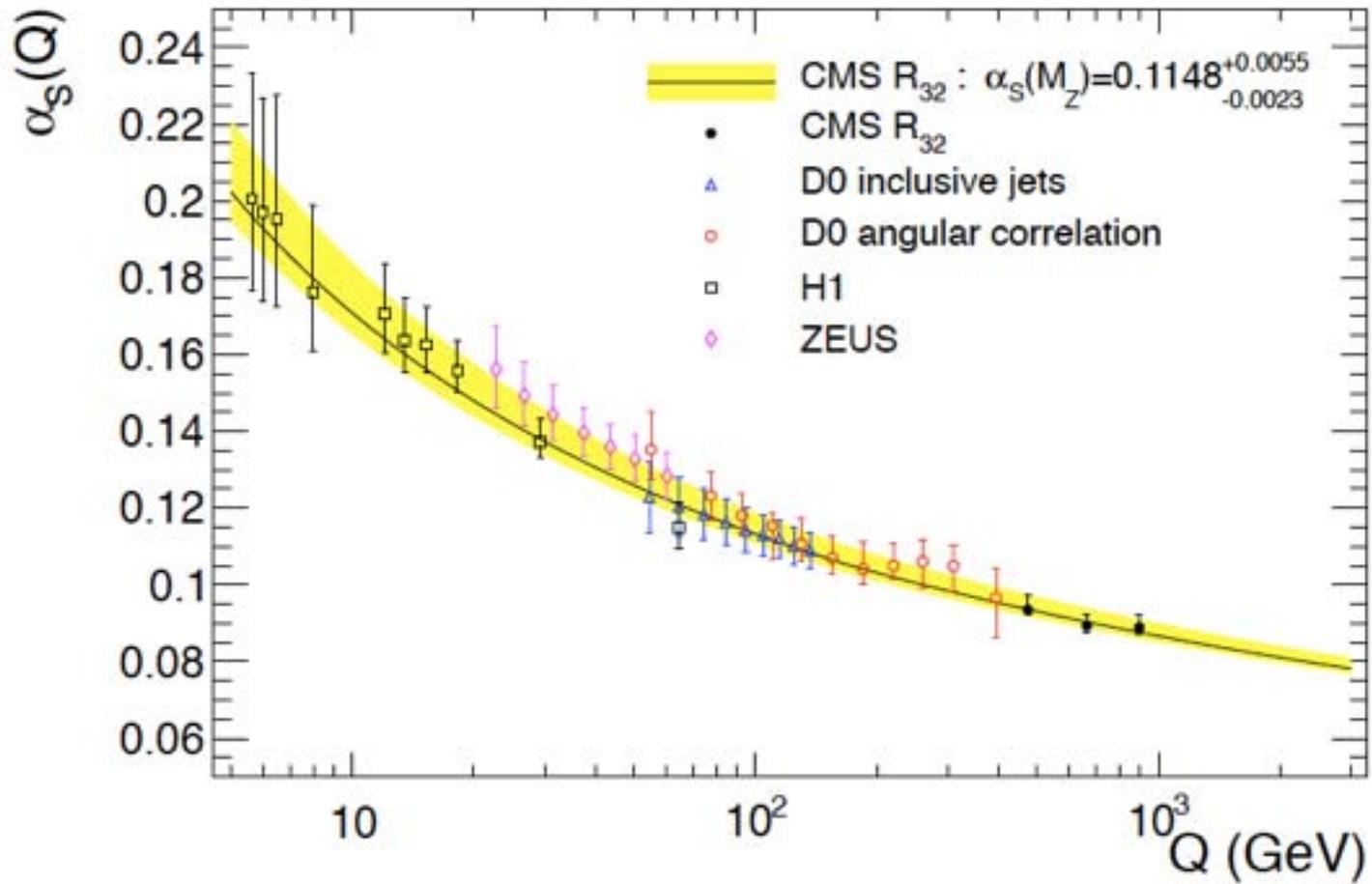
Measurement of the ratio
of the inclusive 3-jet cross section
to the inclusive 2-jet cross section
and first determination
of the strong coupling constant in the TeV range

- measurement of $R_{32} = R_{3\text{jet}}/R_{2\text{-jet}}$ as function of $Q = p_{T1,2} = (p_{T,1}+p_{T,2})/2$
- use anti- k_T algorithm with $R=0.7$
- most exp. uncertainties cancel in ratio
- comparison to QCD predictions (NLO) as function of coupling strength $\alpha_s(Q)$

R_{32} as function of $p_{T1,2}$

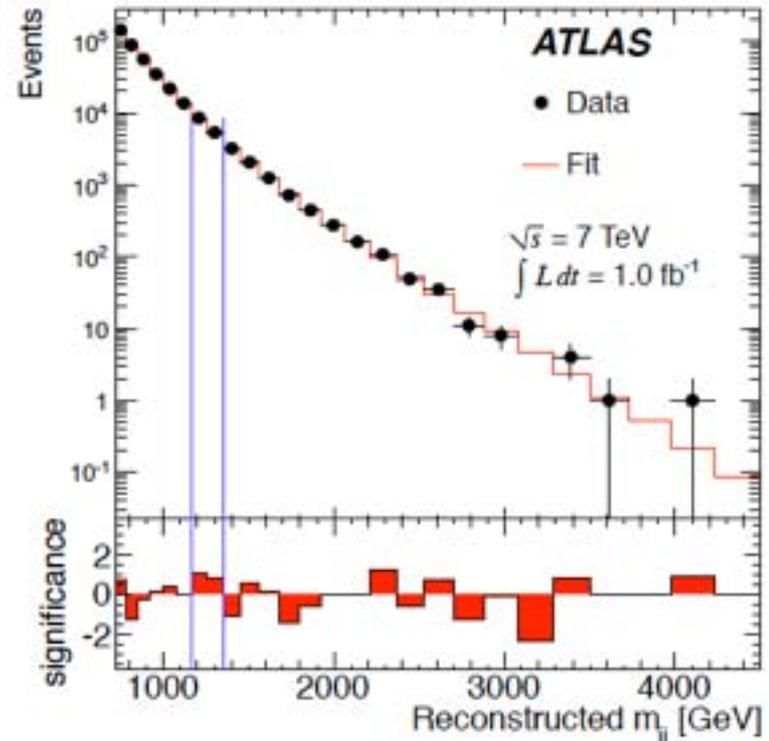
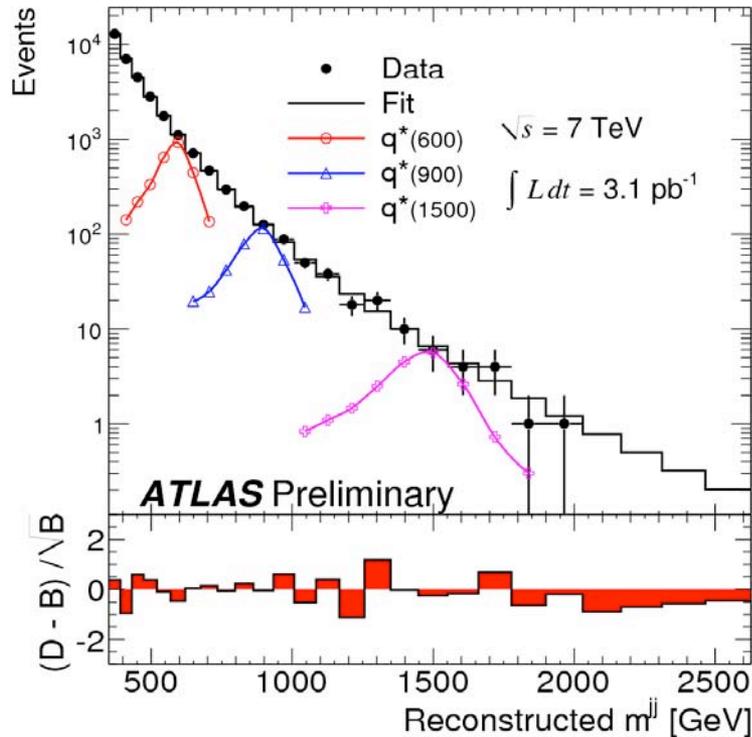


arXiv:1304.7498



$\langle p_{T1,2} \rangle$ range (GeV)	Q (GeV)	$\alpha_s(M_Z)$	exp.	PDF	scale
420–600	474	0.1147	± 0.0015	± 0.0015	+0.0057 -0.0000
600–800	664	0.1132	± 0.0018	± 0.0025	+0.0039 -0.0000
800–1390	896	0.1170	± 0.0024	± 0.0021	+0.0048 -0.0003

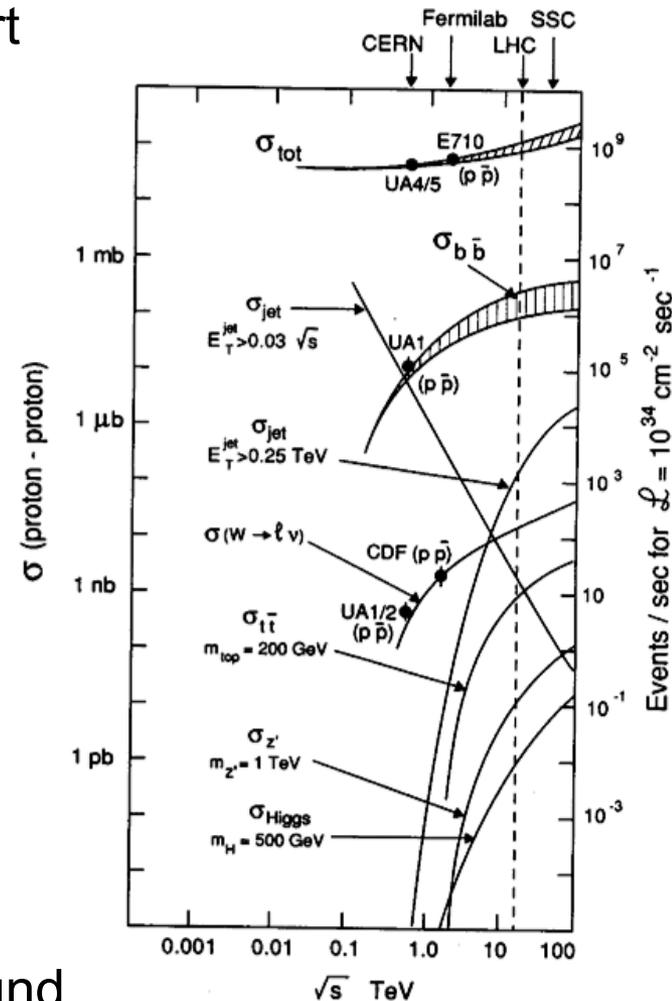
Jet Paar-Massen und Suche nach neuen schweren Teilchen: excited Quarks



Produktion angeregter Quarks ausgeschlossen
 im Massen-Intervall $0.3 < m < 3 \text{ TeV}$
 (Tevatron limit: 0.8 TeV)

Zusammenfassung

- QCD (d.h. die Starke Wechselwirkung) dominiert bei weitem die Reaktionsraten an Tevatron und LHC (σ_{tot} in nebenstehender Graphik)
- neben dezidierten QCD Studien wie der Bestimmung von α_s ist die genaue Kenntnis der QCD Prozesse unabdingbar für das Finden und die Vermessung neuer physikalischer Effekte am LHC (e.g. Higgs, SUSY, large extra dimensions).
- QCD beschreibt die Dynamik von Quarks und Gluonen. Die Beschreibung von Hadronen ist nur durch Zuhilfenahme von Hadronisierungsmodellen möglich.
- alternativ werden Hadronenjets definiert und analysiert; Jets können theoretisch mit Quarks und Gluonen assoziiert und berechnet werden.



Literaturempfehlungen

- Ellis, Stirling, Webber: “QCD and Collider Physics”, Cambridge Monographs,
- A QCD primer, G. Altarelli, CERN School 2001, <https://cdsweb.cern.ch/record/619179/files/p65.pdf>
- Quantum Chromodynamics, M.H.Seymour, 2004 European School of High-Energy Physics, hep-ph/0505192
- Measurement of inclusive jet and dijet cross sections ..., ATLAS Collaboration, arXiv:1009.5908v2, [Eur.Phys.J. C71 \(2011\) 1512](#)
- Measurement of the ratio of the inclusive 3-jet cross section to the inclusive 2-jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and first determination of the strong coupling constant in the TeV range; CMS collab., arXiv:1304.7498.

nächste Vorlesungen:

09.12.2013: Top-Quark Physik

16.12.2013: Higgs Physik (I)