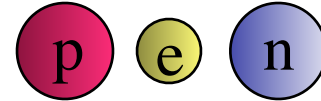


# QCD, Structure Functions, Jets

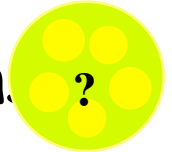
- History of the Strong Interaction
- QCD / QED
- Proton-structure: structure functions
- hadronisation
- factorisation
- hadron jets

# History of Strong Interactions (1)

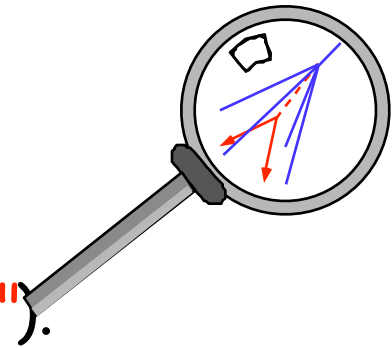
1932: discovery of **neutrons**



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

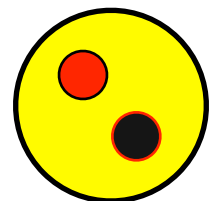
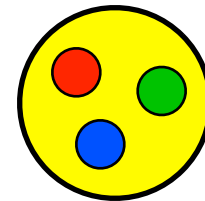


1947: discovery of  $\pi$ -mesons and long-living V-particles ( $K^0, \Lambda$ ) in **cosmic rays**



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

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

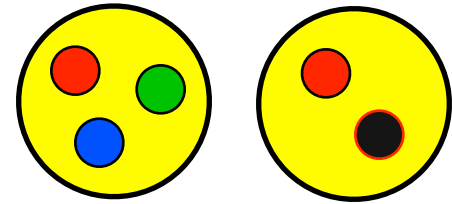


Baryon  
(p, n,  $\Lambda$ , ...)

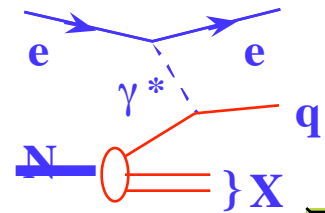
Meson  
( $\pi$ , K, ...)

# History of Strong Interactions (2)

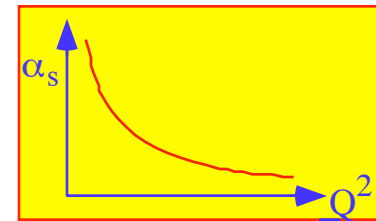
1964: Statisches **Quark-Modell**;  
neue innere Quantenzahl: **Farbe**.



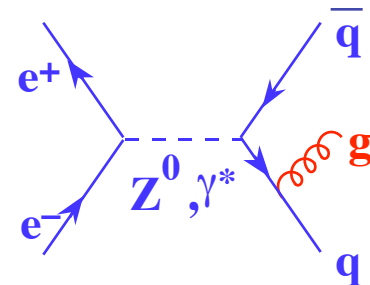
1969: Dynamisches **Partonenmodell**:



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



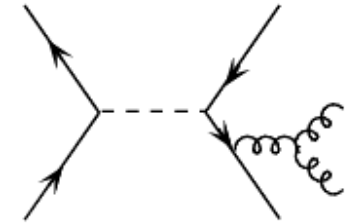
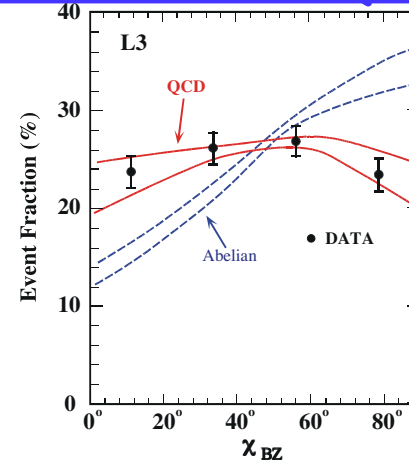
1975: **2-Jet Struktur** in  $e^+e^-$ -Vernichtung:  
Bestätigung **Quark-Parton-Modell**.



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

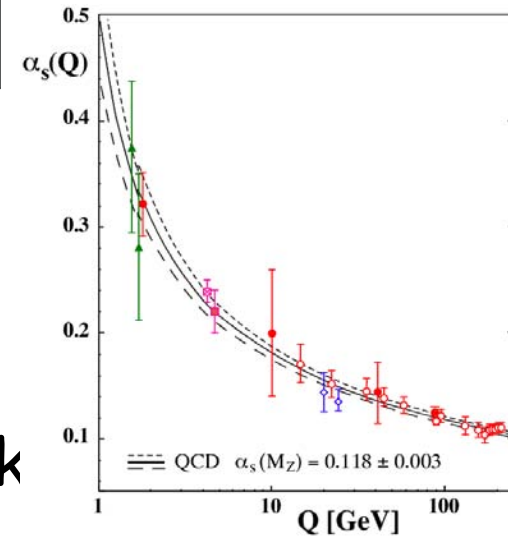
# History of Strong Interactions (3)

1991: exp. Signatur der  
Gluon-Selbstkopplung



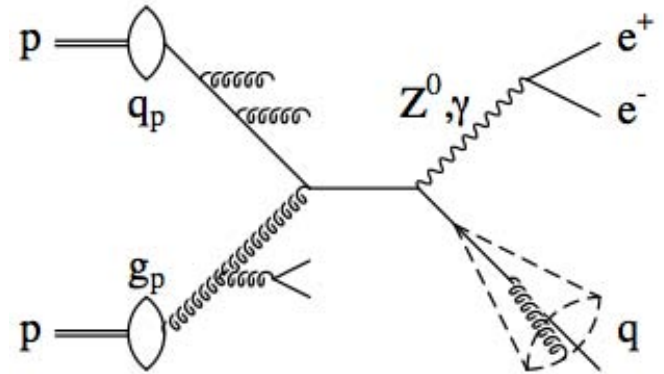
1990-2000: Bestätigung der  
Asymptotischen Freiheit

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

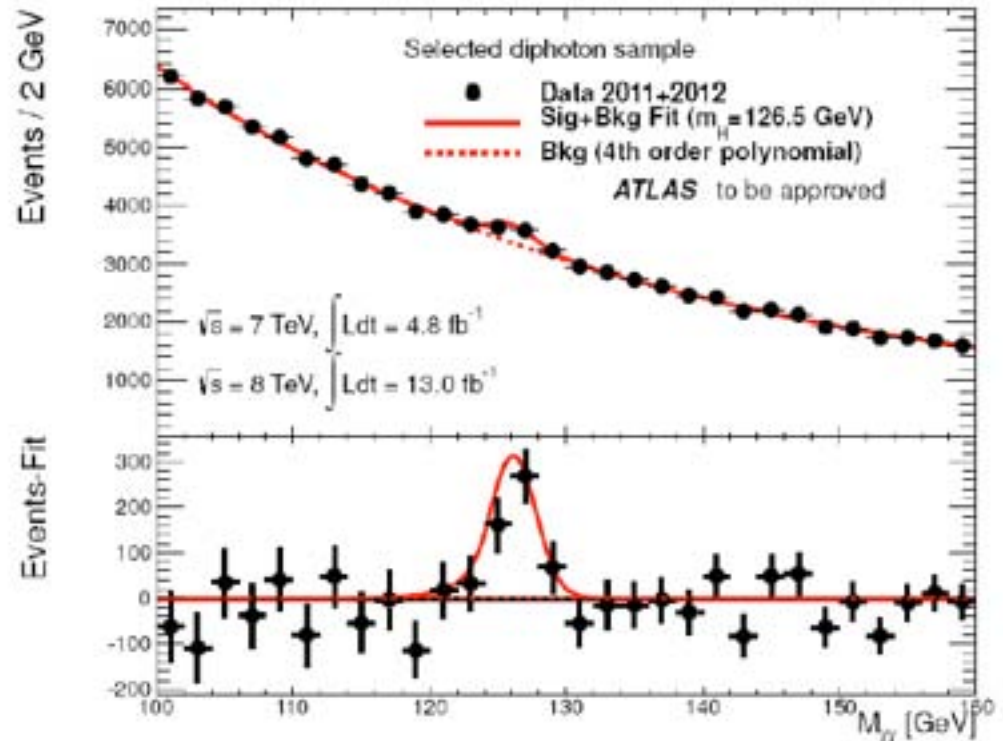
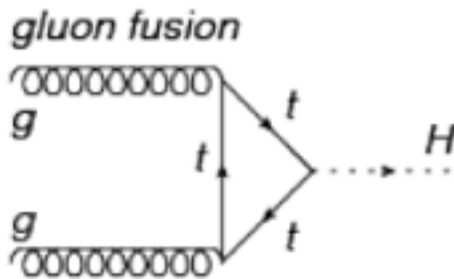


# History of Strong Interactions (4)

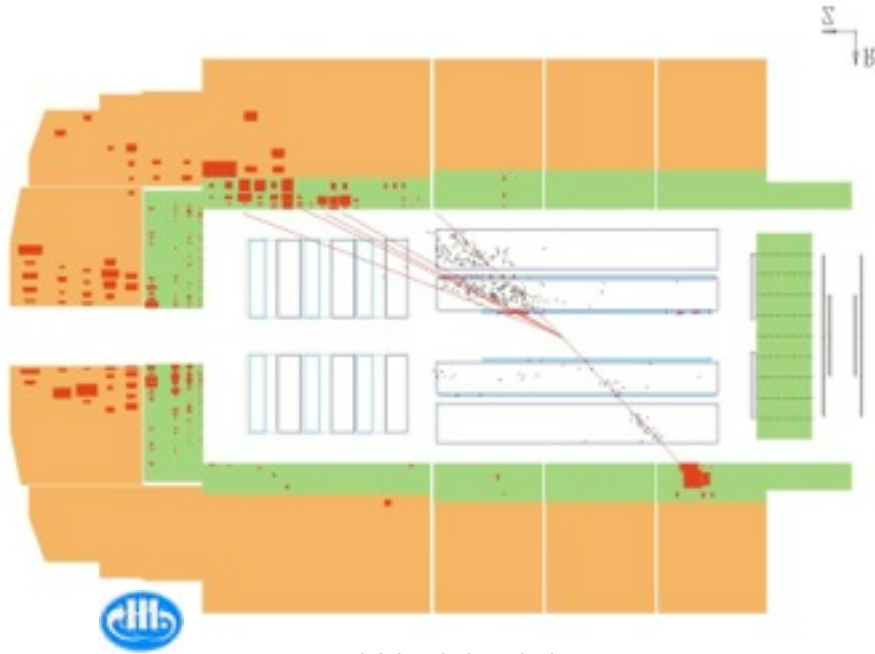
>2004: QCD als Untergrund bei der Suche nach Neuer Physik



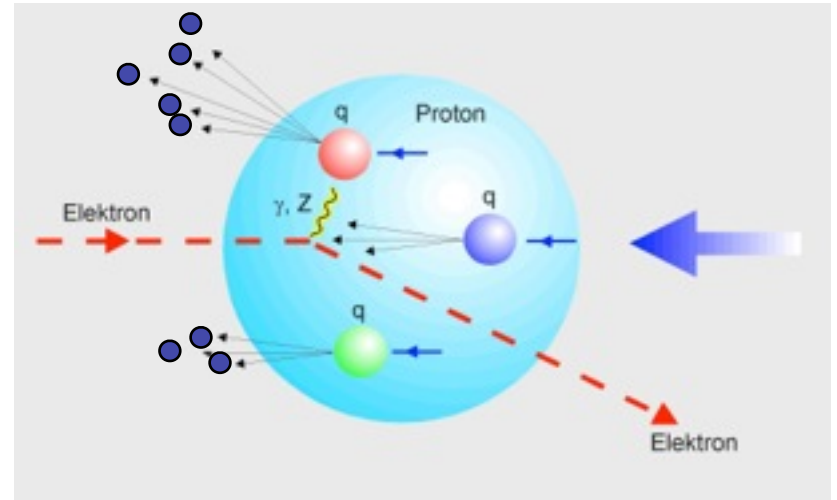
Beispiel: Higgs-Suche



# Quarks im Proton: Modell und Experiment



Wirklichkeit

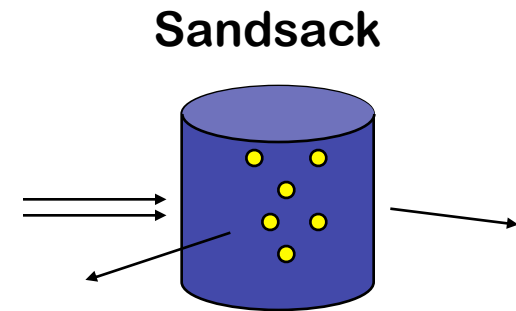


Modell, Theorie

**Experiment:** Registrieren vieler Ereignisse, Messung der gestreuten Elektronen

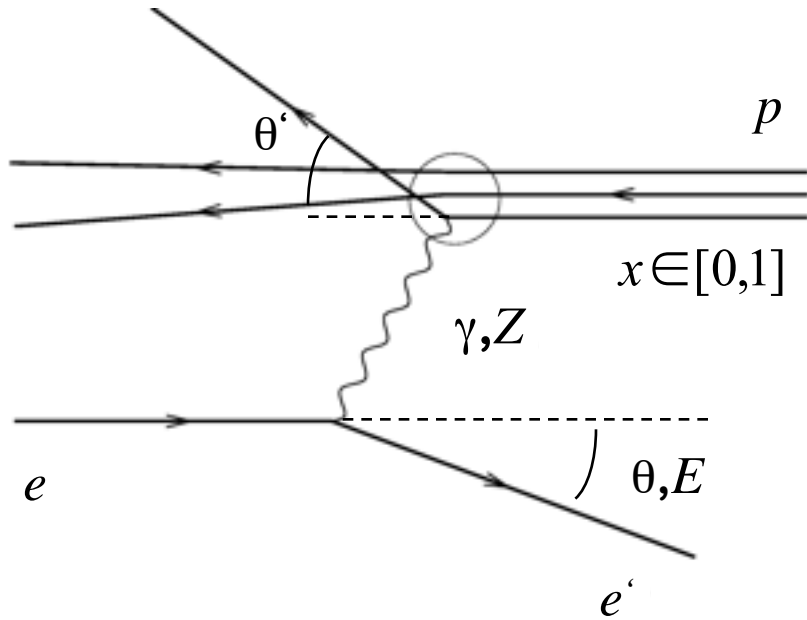
**Befund:** Es werden zu viele Elektronen stark abgelenkt (qualitativ ähnlich den Experimenten von Rutherford, 1911)

**Erklärung:** das Proton hat „harte“ Bestandteile, die



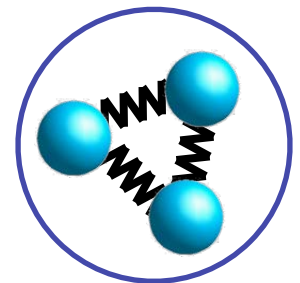
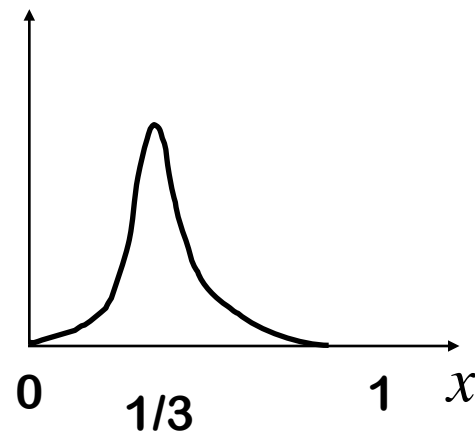
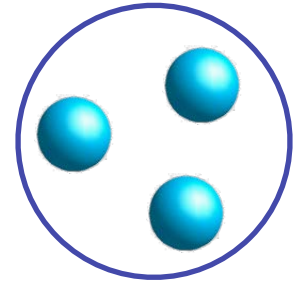
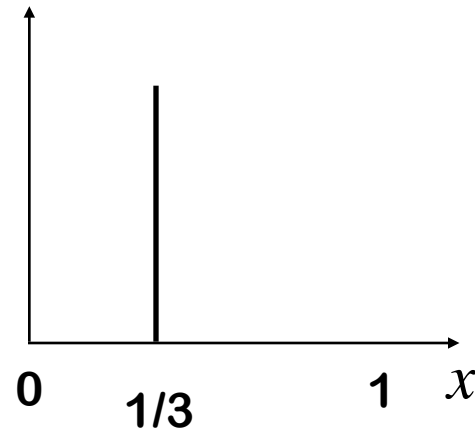
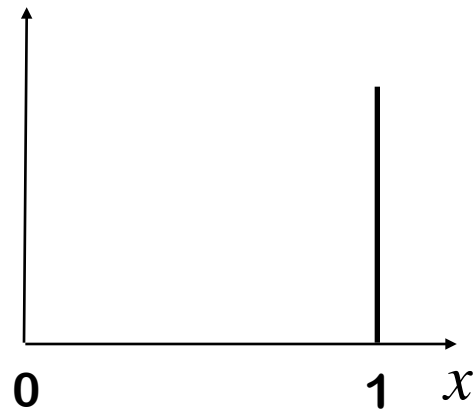
**QUARKS**  
(Ch. Kiesling)

# 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)

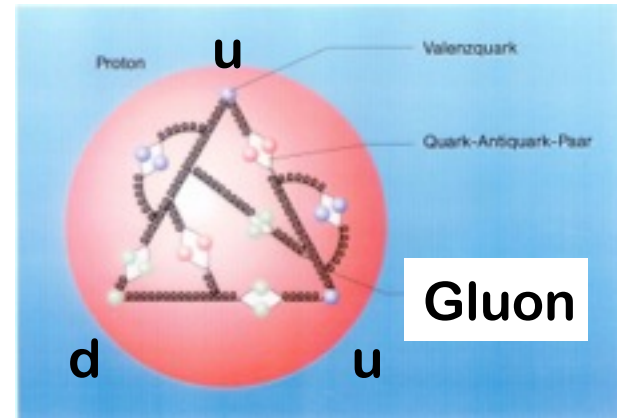


(Ch. Kiesling)

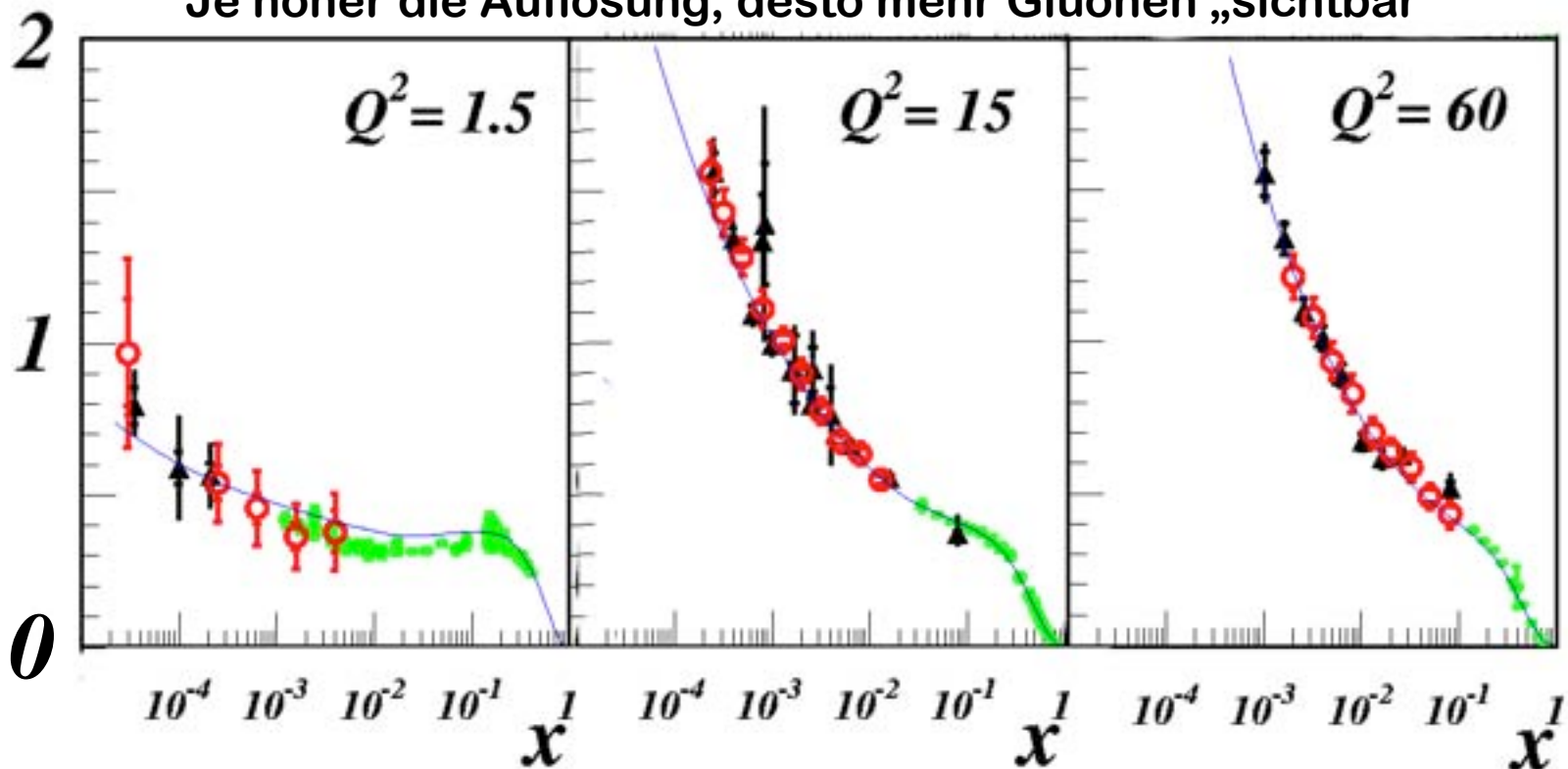
# Quarks und Gluonen im Proton !

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**

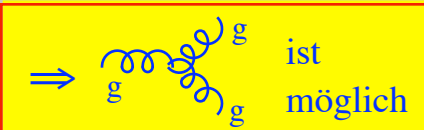
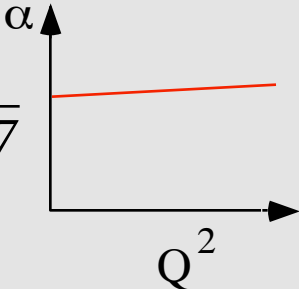
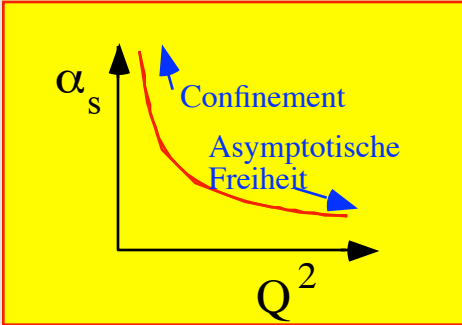


Je höher die Auflösung, desto mehr Gluonen „sichtbar“





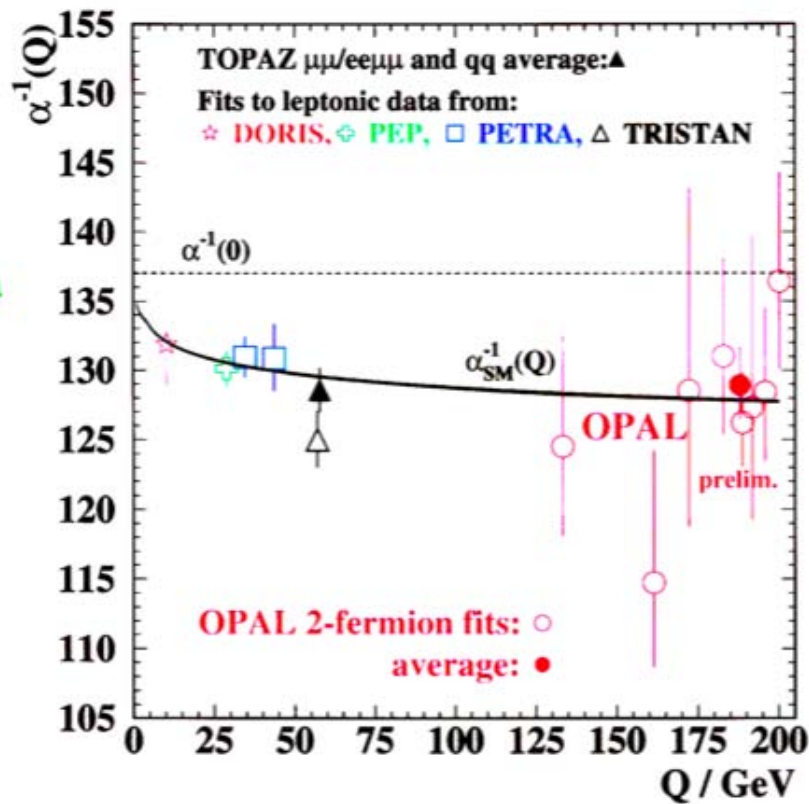
# Eigenschaften der QED und der QCD:

	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>	<b>3 Farb-Ladungen</b>
<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 $q$ ) <b>Hadronen</b>
<i>Theorie</i>	<i>Störungstheorie bis zur <math>O(\alpha^4)</math></i>	<i>Störungstheorie bis <math>O(\alpha^3)</math></i>
<i>Erreichte Präzision</i>	$10^{-6} \dots 10^{-7}$	1% ... 20%

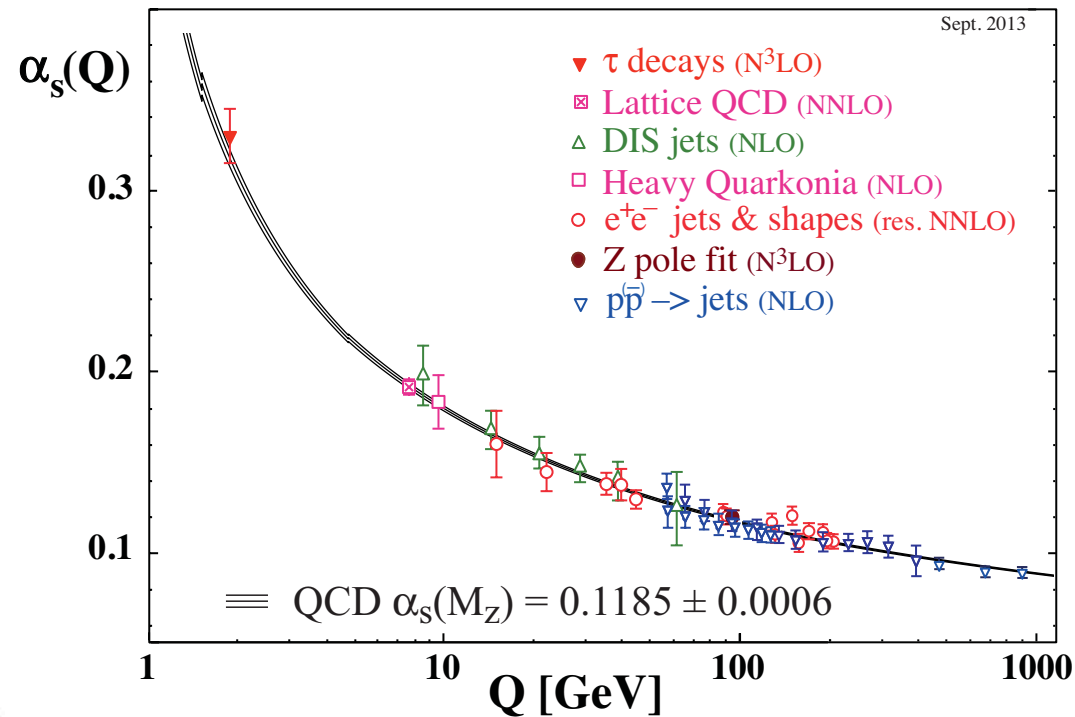
# Energieabhängigkeit der Kopplungs"konstanten":

- experimentell mit hoher Genauigkeit verifiziert

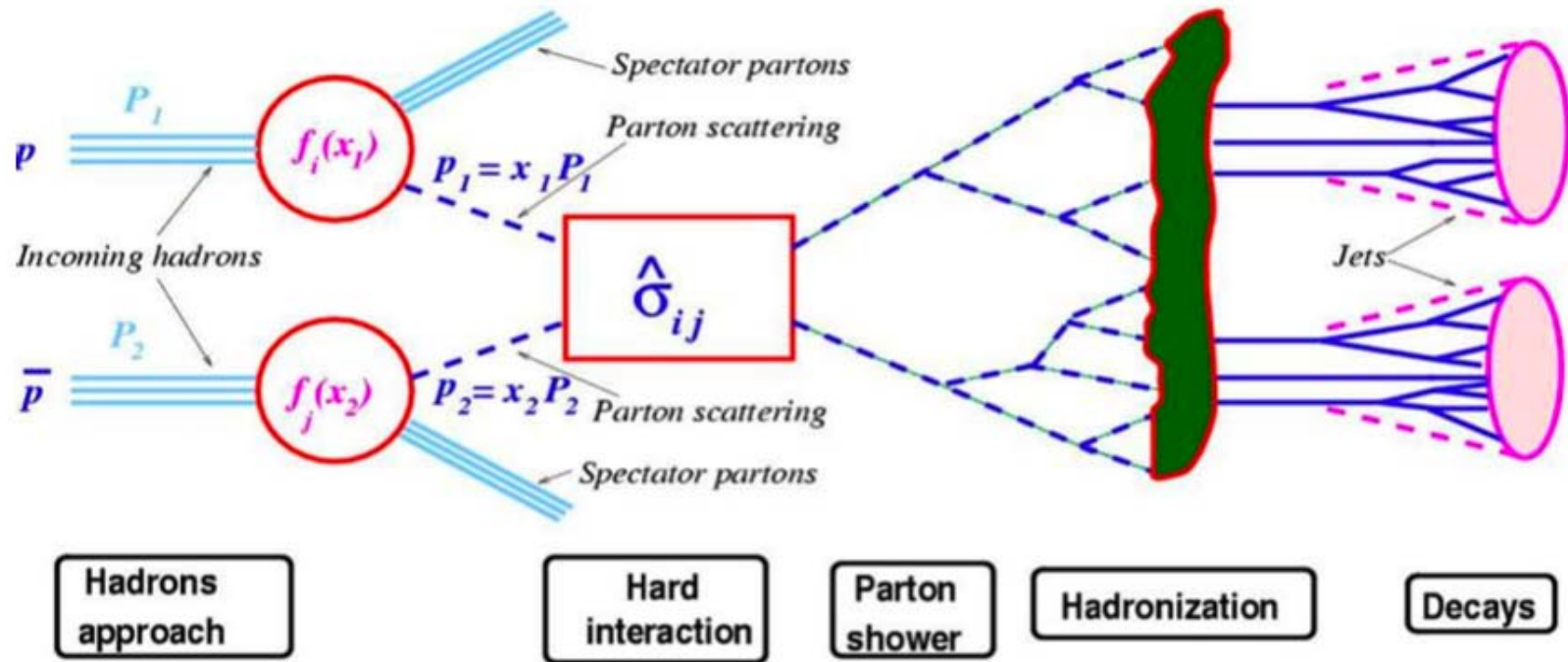
QED



QCD



# Theoretische Beschreibung hadronischer Prozesse

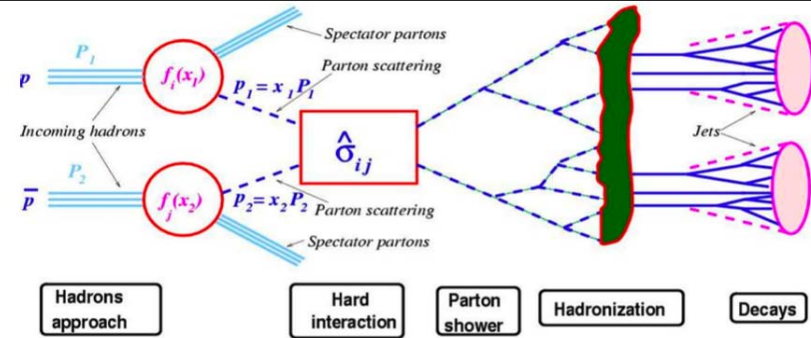


## • Beschreibung der einzelnen Unterprozesse :

- $f(x, Q^2)$  : 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".

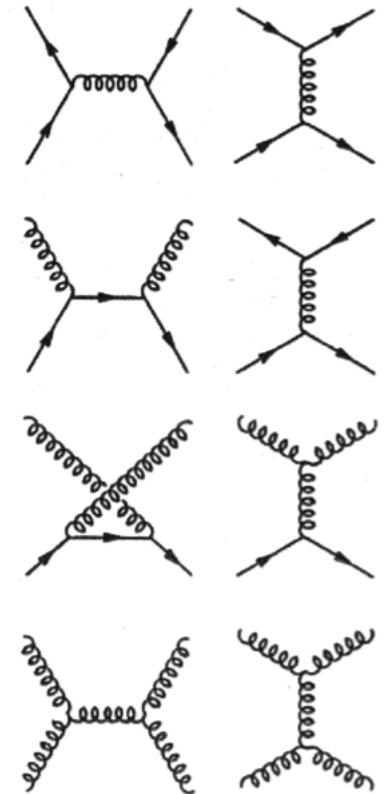
# Strukturfunktionen:

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

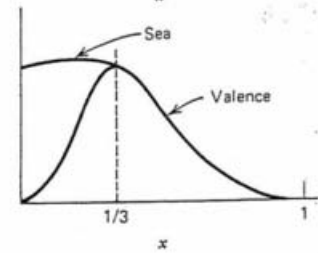
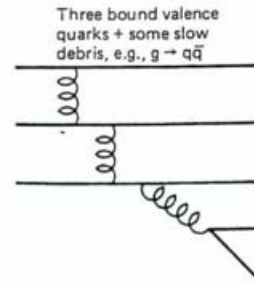
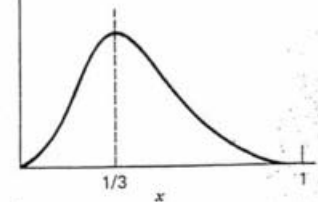
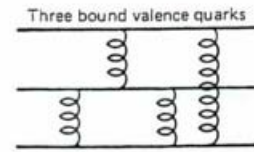
# QCD Störungstheorie:

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

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



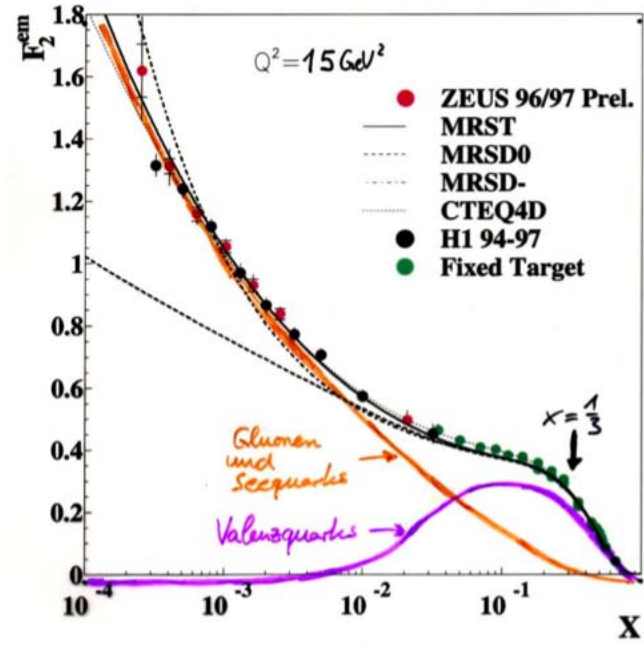
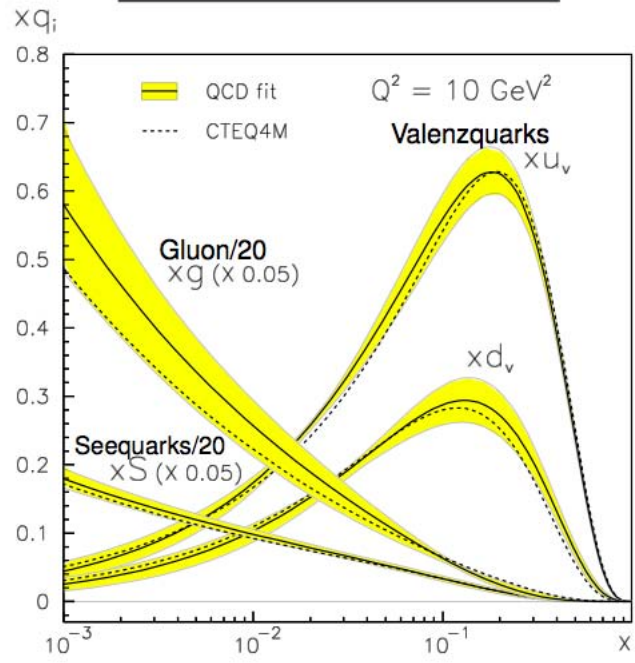
# Protonstruktur



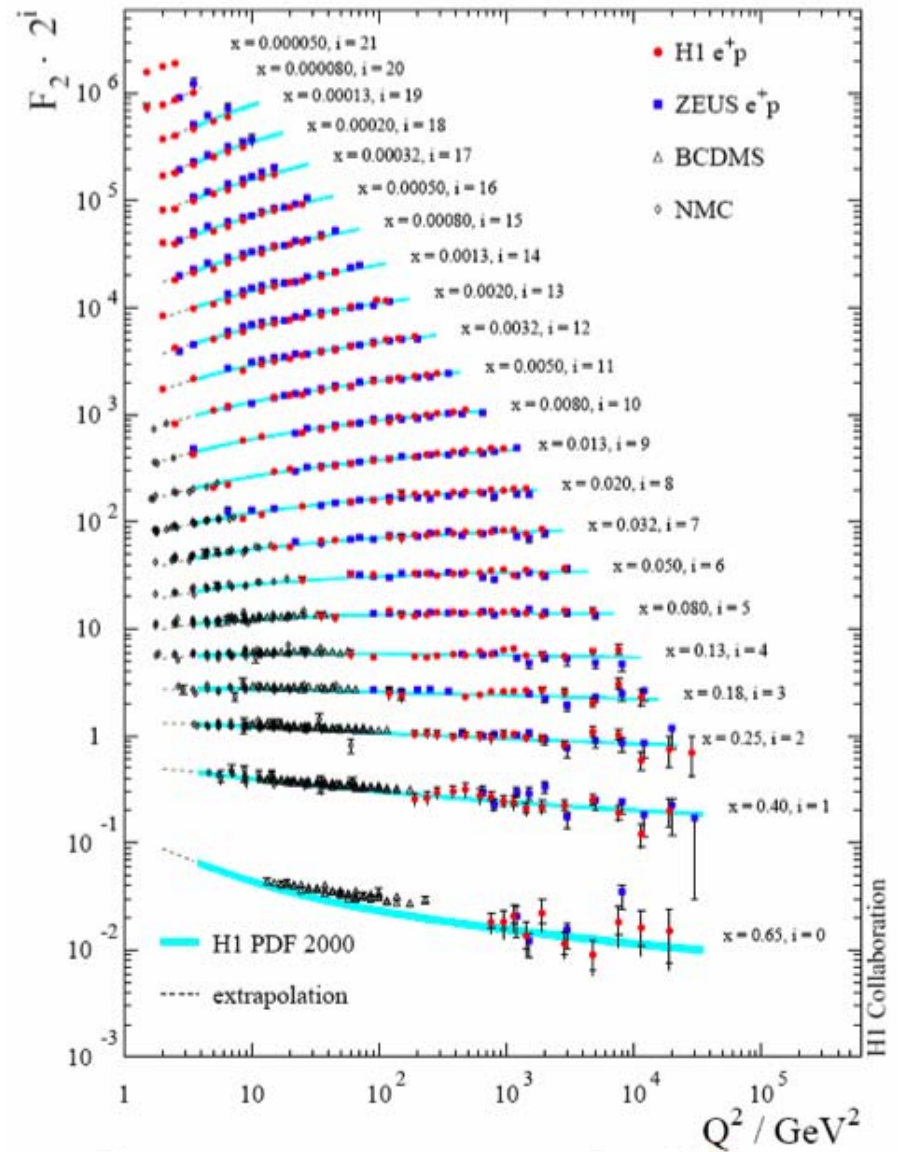
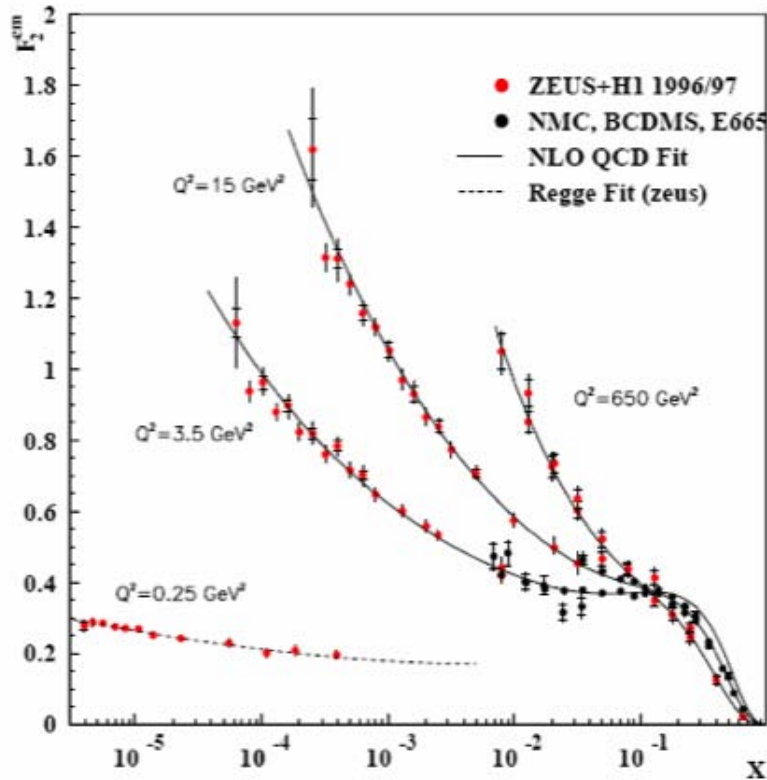
Small x

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

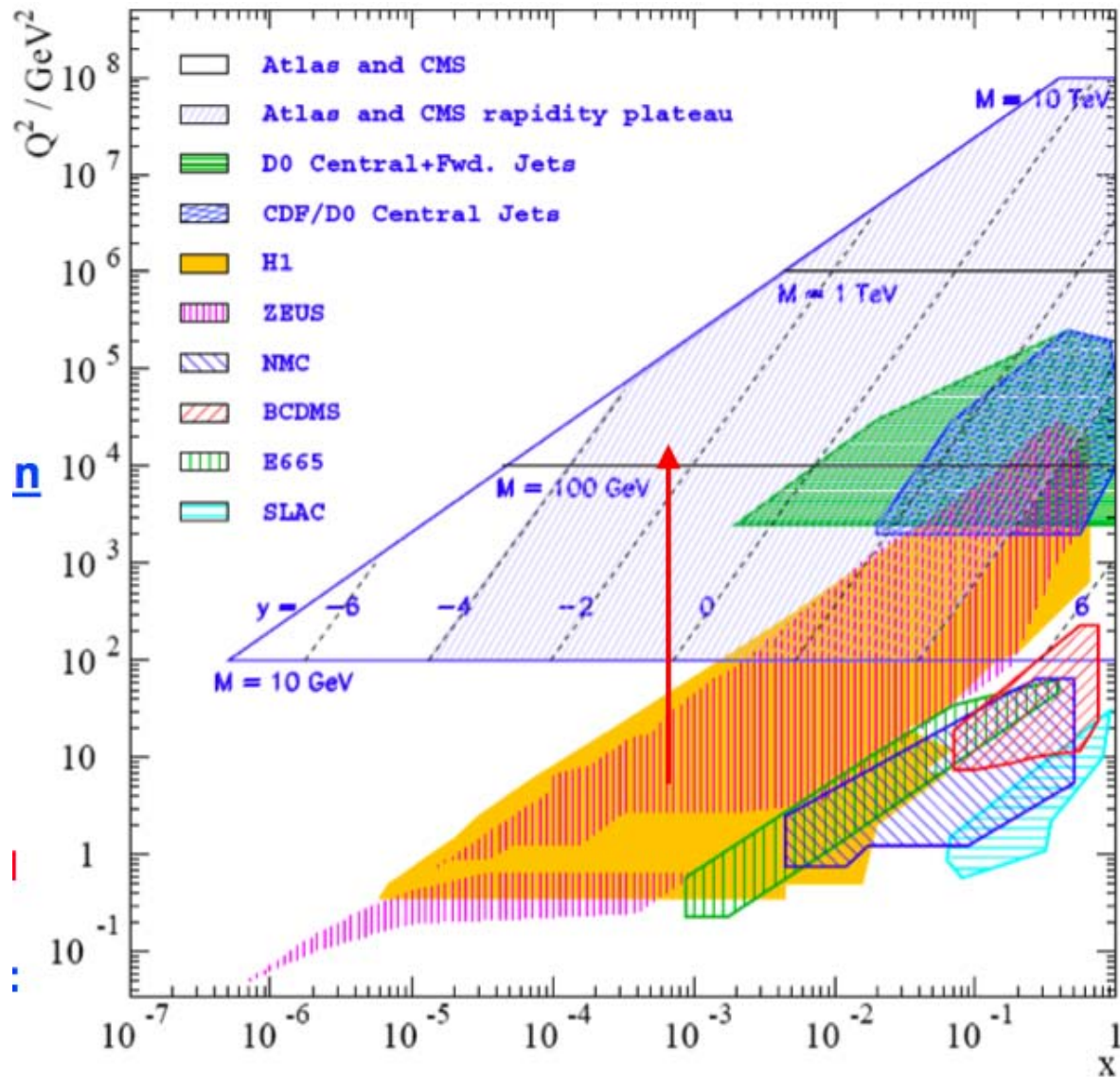
$$F_2(x) = \sum_q e_q^2 x \cdot (q(x) + \bar{q}(x))$$



# Protonstruktur



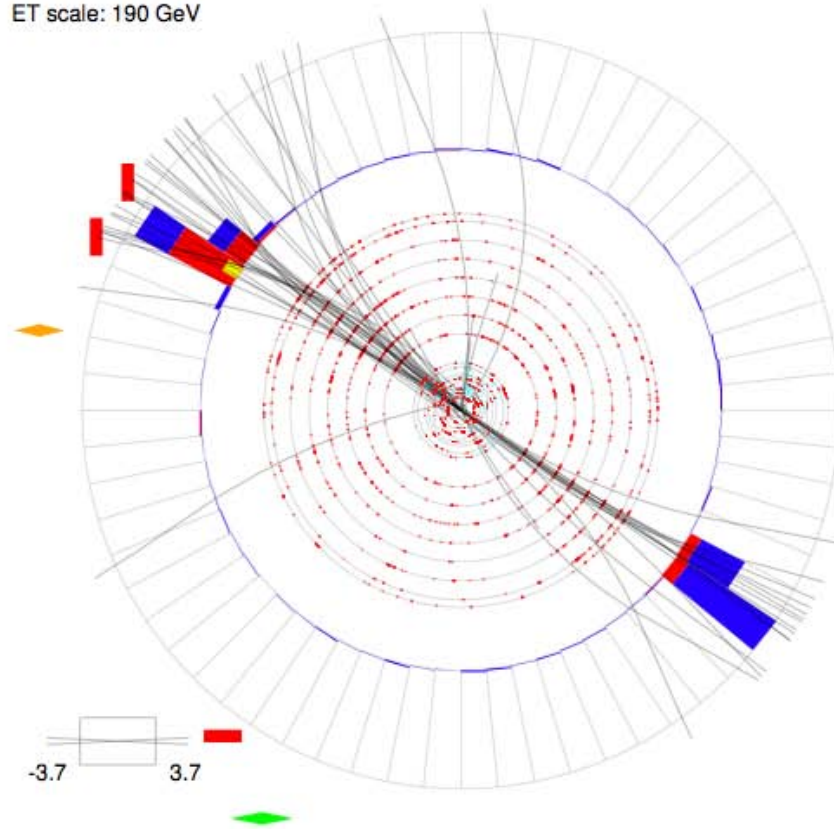
# Kinematische Bereiche der Experimente



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

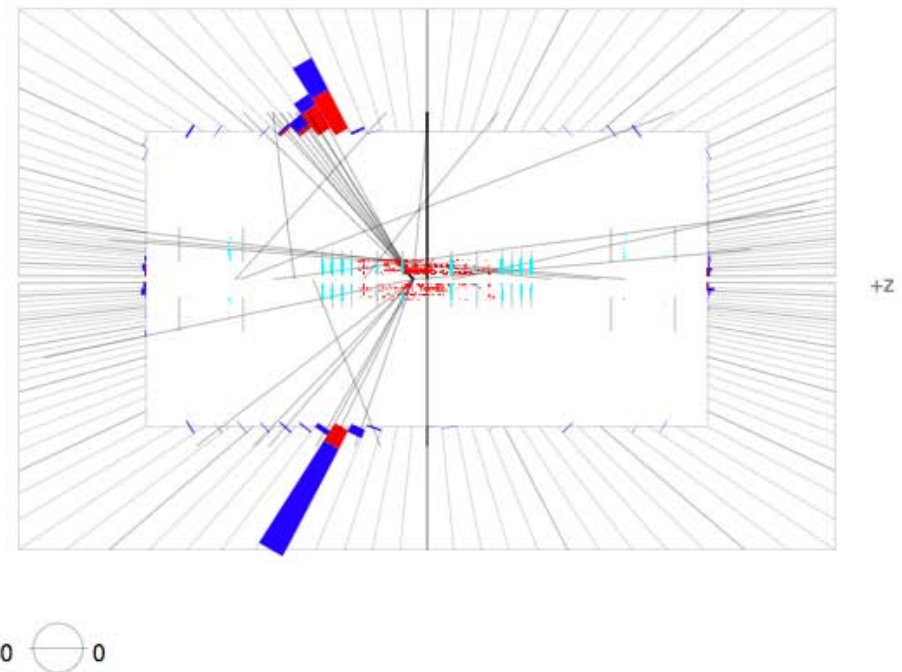
Run 162592 Event 5490755 Fri Oct 25 11:57:39 2002

ET scale: 190 GeV



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

E scale: 303 GeV



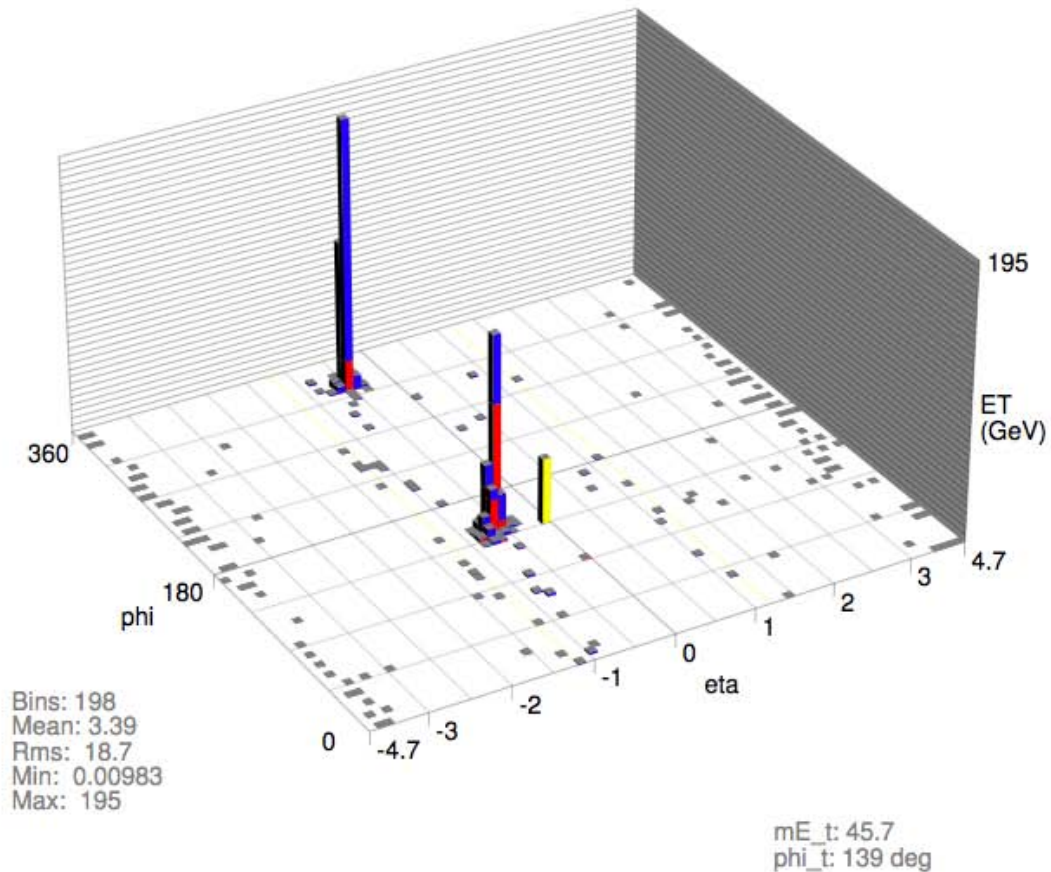


# 2-Jet Endzustand in Proton-Antiproton Kollision (Tevatron; D0 Detektor)

Darstellung in

$\varphi$ - $\eta$ -Ebene:

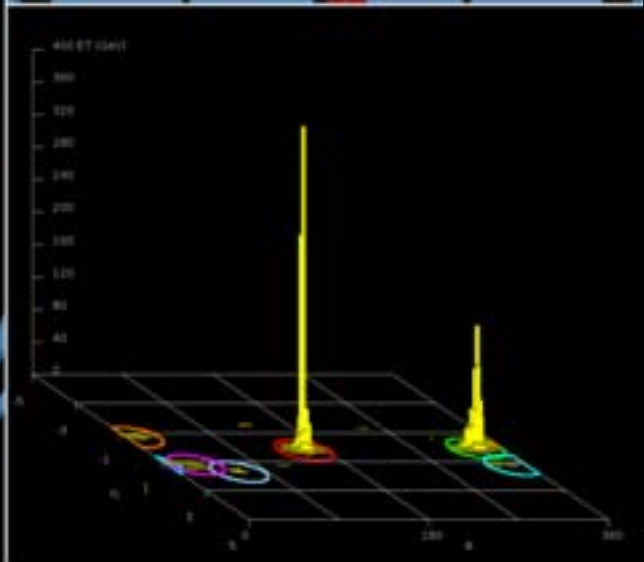
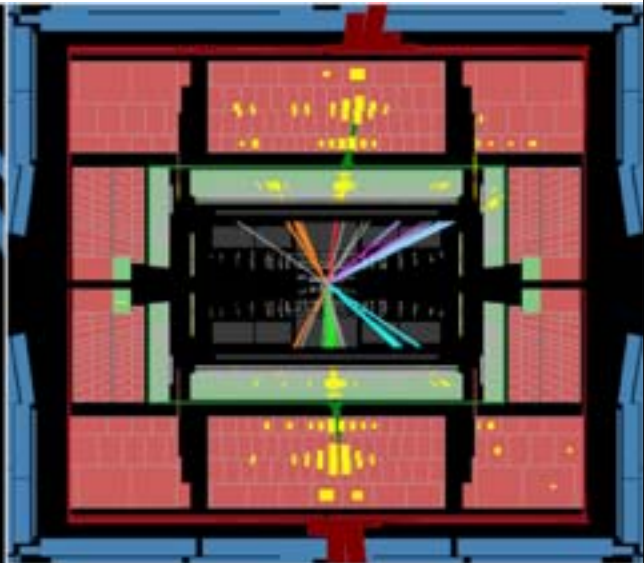
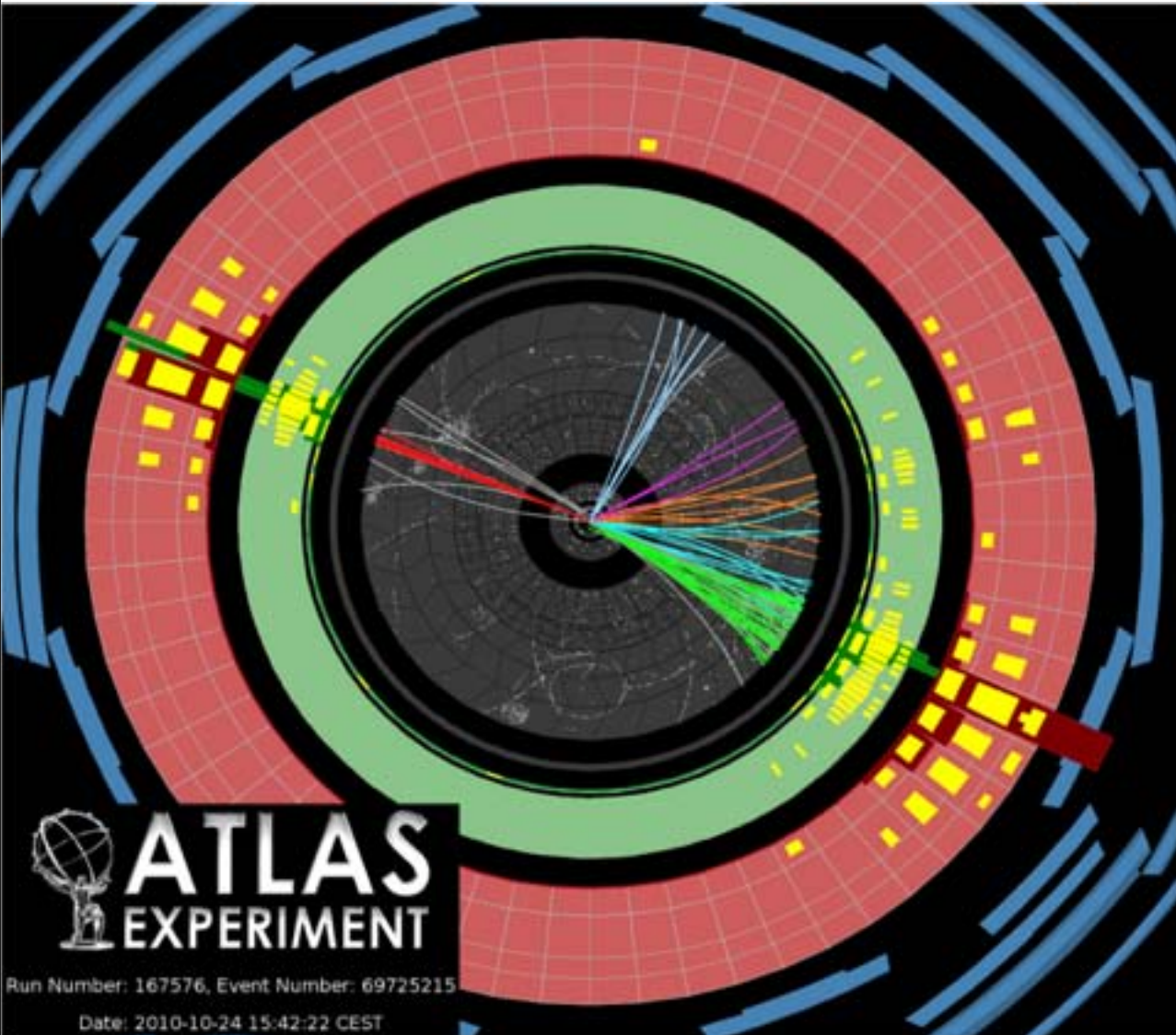
Run 162592 Event 5490755 Thu Oct 24 13:54:25 2002



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

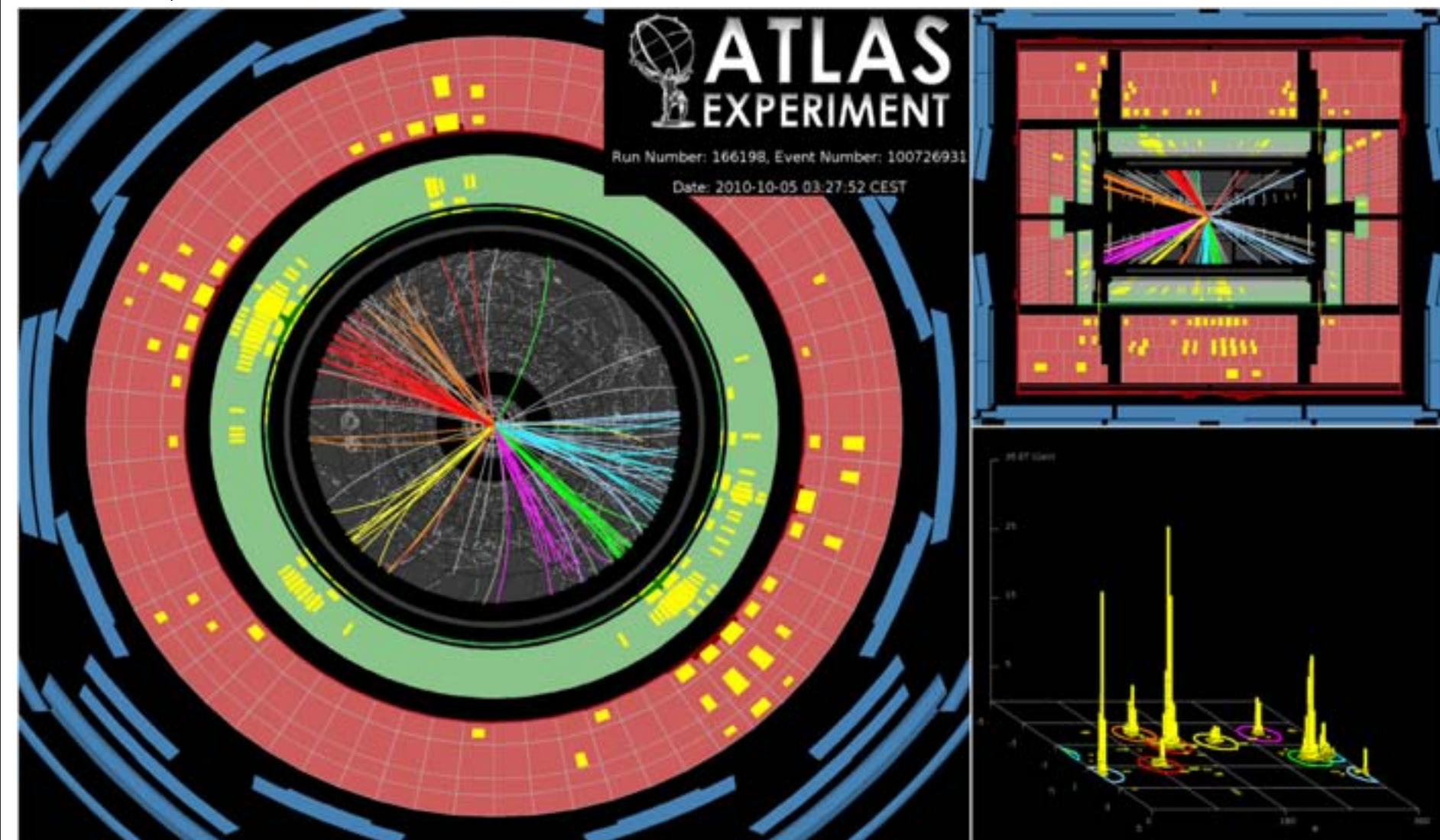
The highest mass central dijet event and the highest- $p_T$  jet collected by the end of October 2010:  
two central high- $p_T$  jets have an invariant mass of 2.6 TeV and the highest  $p_T$  jet has  $p_T$  of 1.3 TeV.

- 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



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

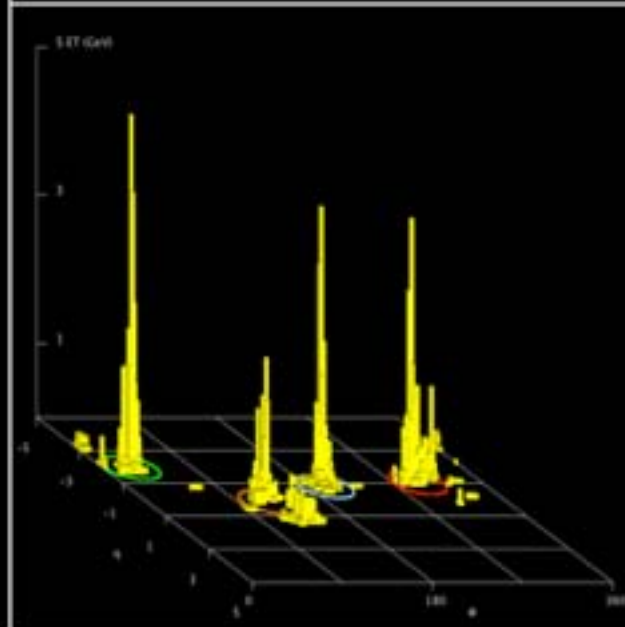
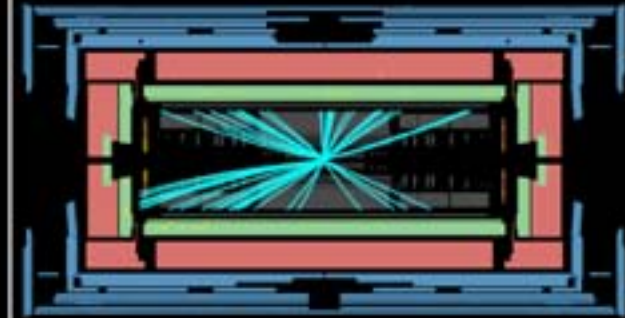
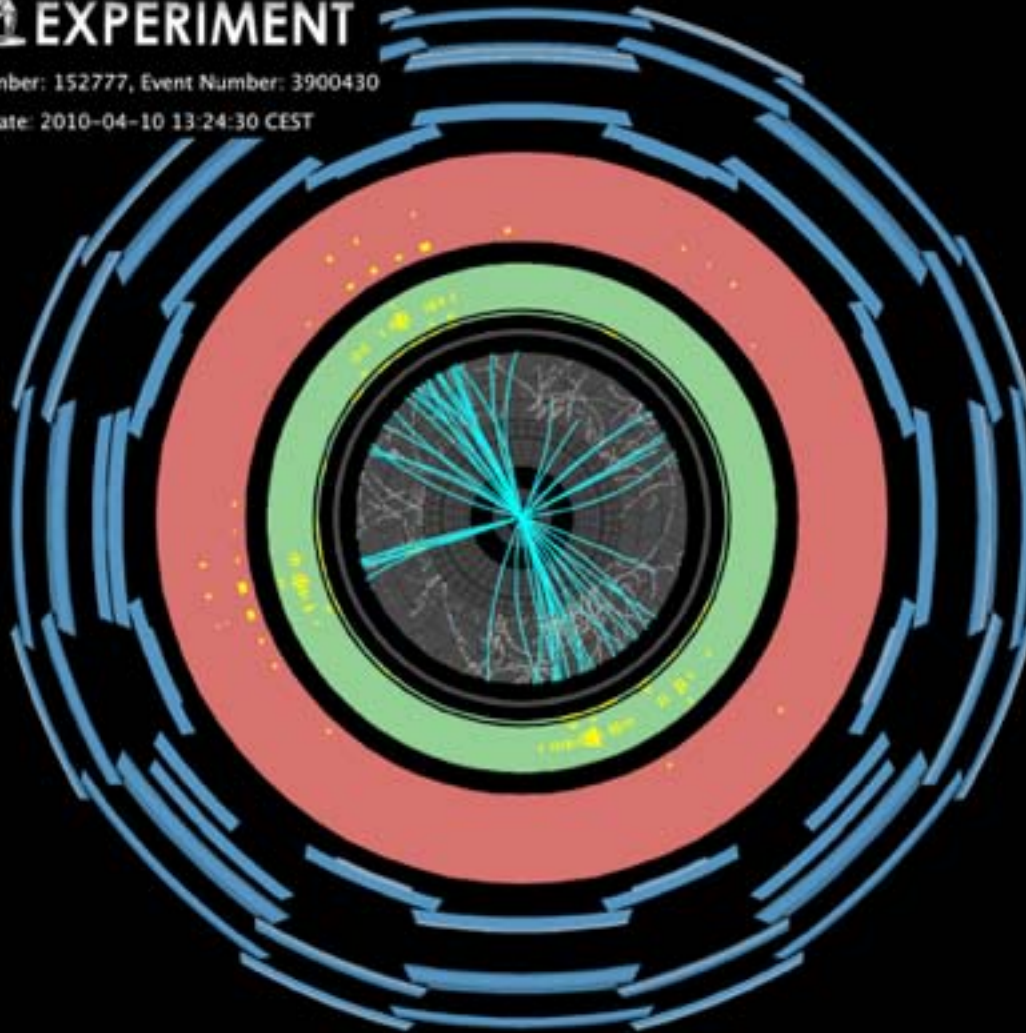


Event with four reconstructed hadronic jets. The four jets have a calibrated  $p_T > 50$  GeV, and are found with the anti-kt algorithm with  $R=0.6$ . The highest  $p_T$  jet has a calibrated jet  $p_T$  of 144 GeV. Event collected on 10 April 2010.

 **ATLAS**  
EXPERIMENT

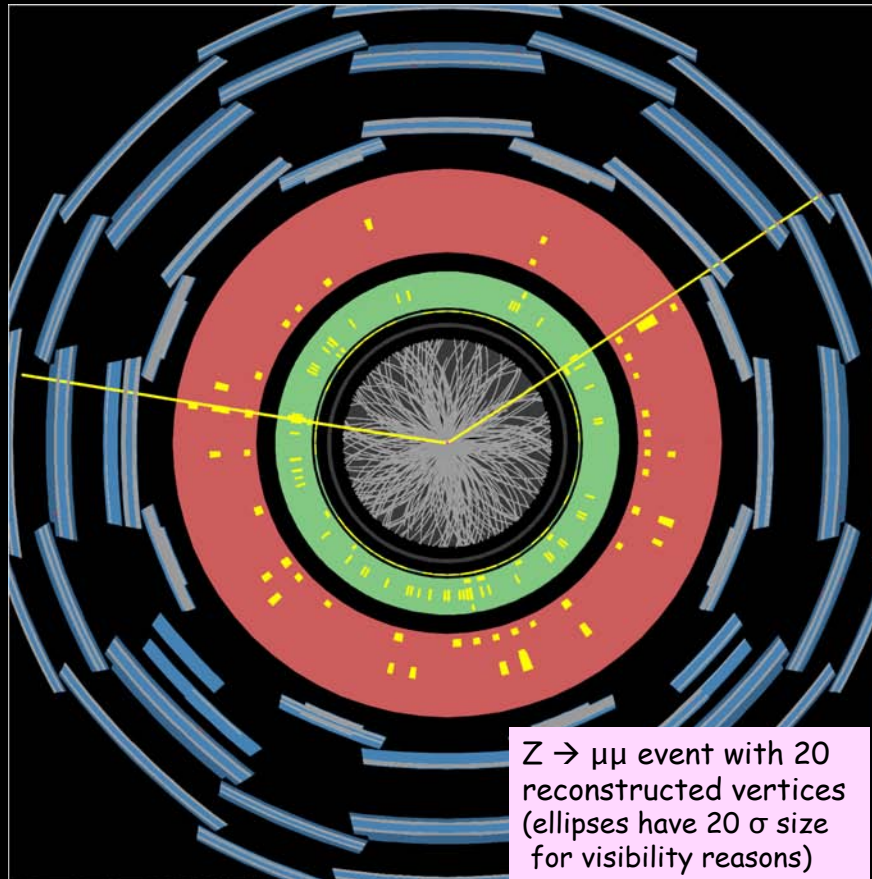
Run Number: 152777, Event Number: 3900430

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



# „pile-up“:

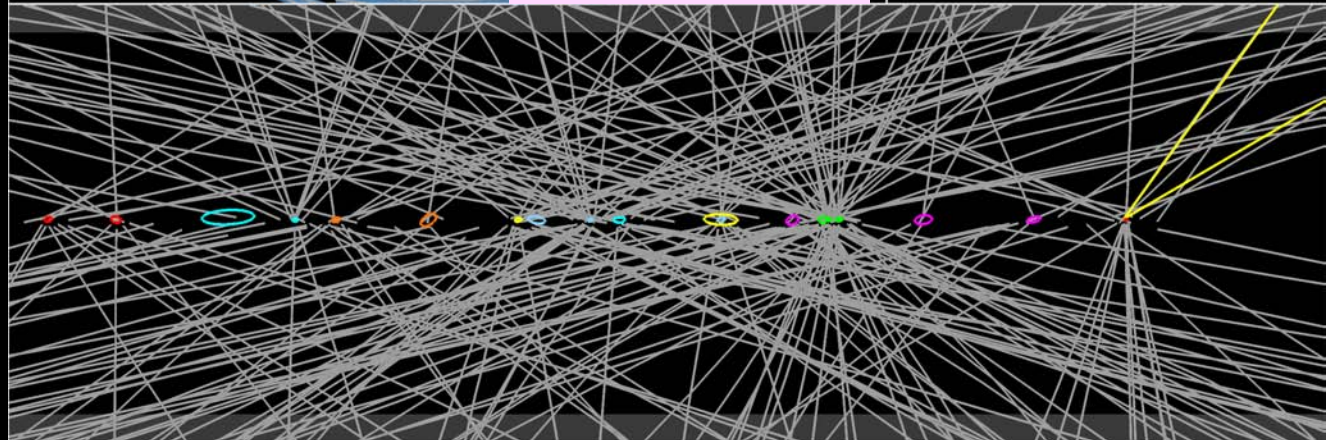
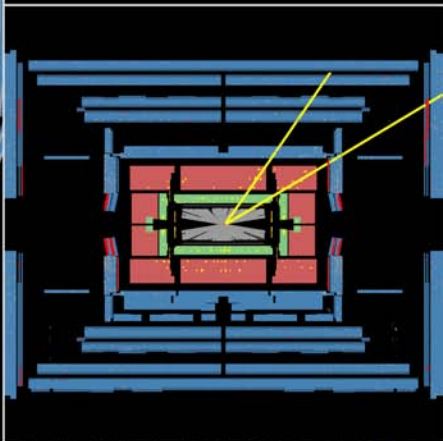
- 10-40 Kollisionen pro Strahkreuzung
- Detektoren und Elektronik müssen mit riesigen Datenmengen fertig werden
- Physikanalyse der Daten unter extrem hohen Untergrundraten



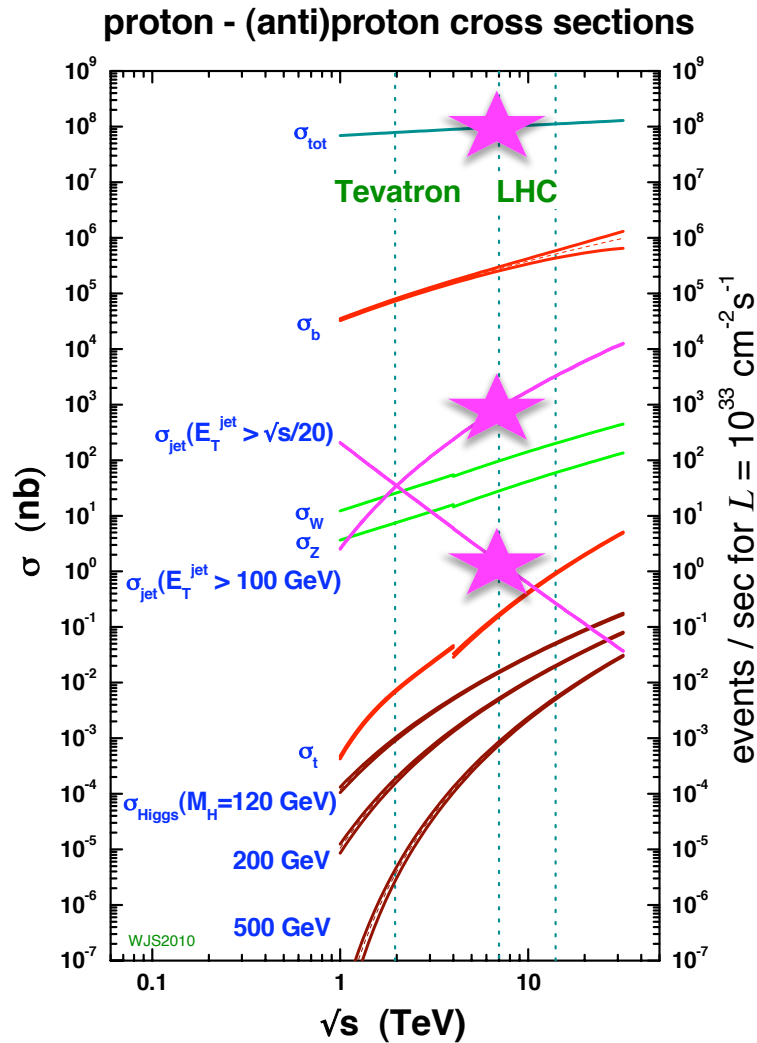
Z → μμ event with 20 reconstructed vertices (ellipses have 20 σ size for visibility reasons)

**ATLAS**  
EXPERIMENT

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.

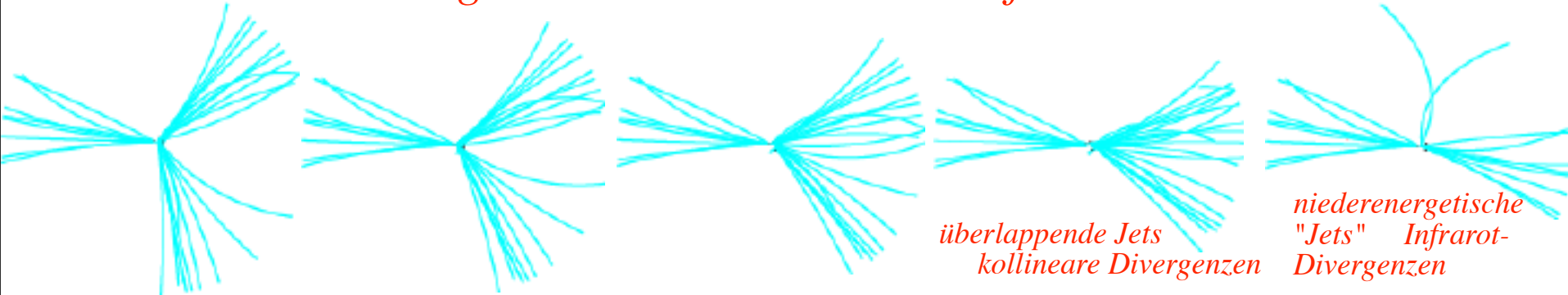


Dazu benötigt man:

- 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 !*



$k_T$  - 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

$\phi_i$  : 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  $R = 0.4, 0.6$ )

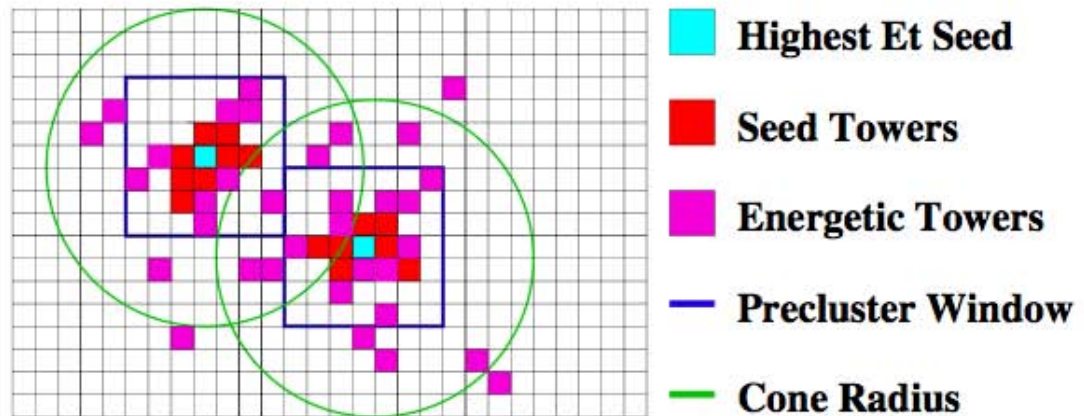
# Anmerkungen zum $k_T$ - Jetalgorithmus

- 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).



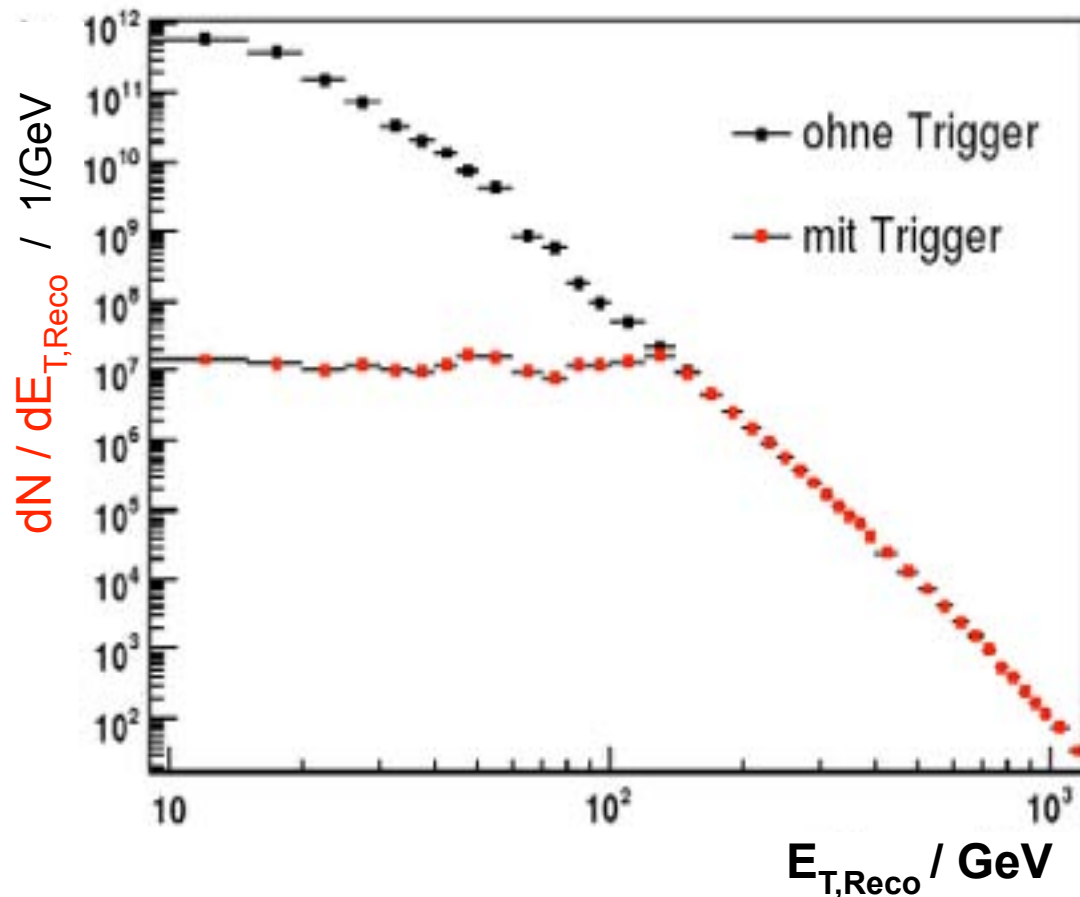
# Anmerkungen zum Cone - Jetalgorithmus

- 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).

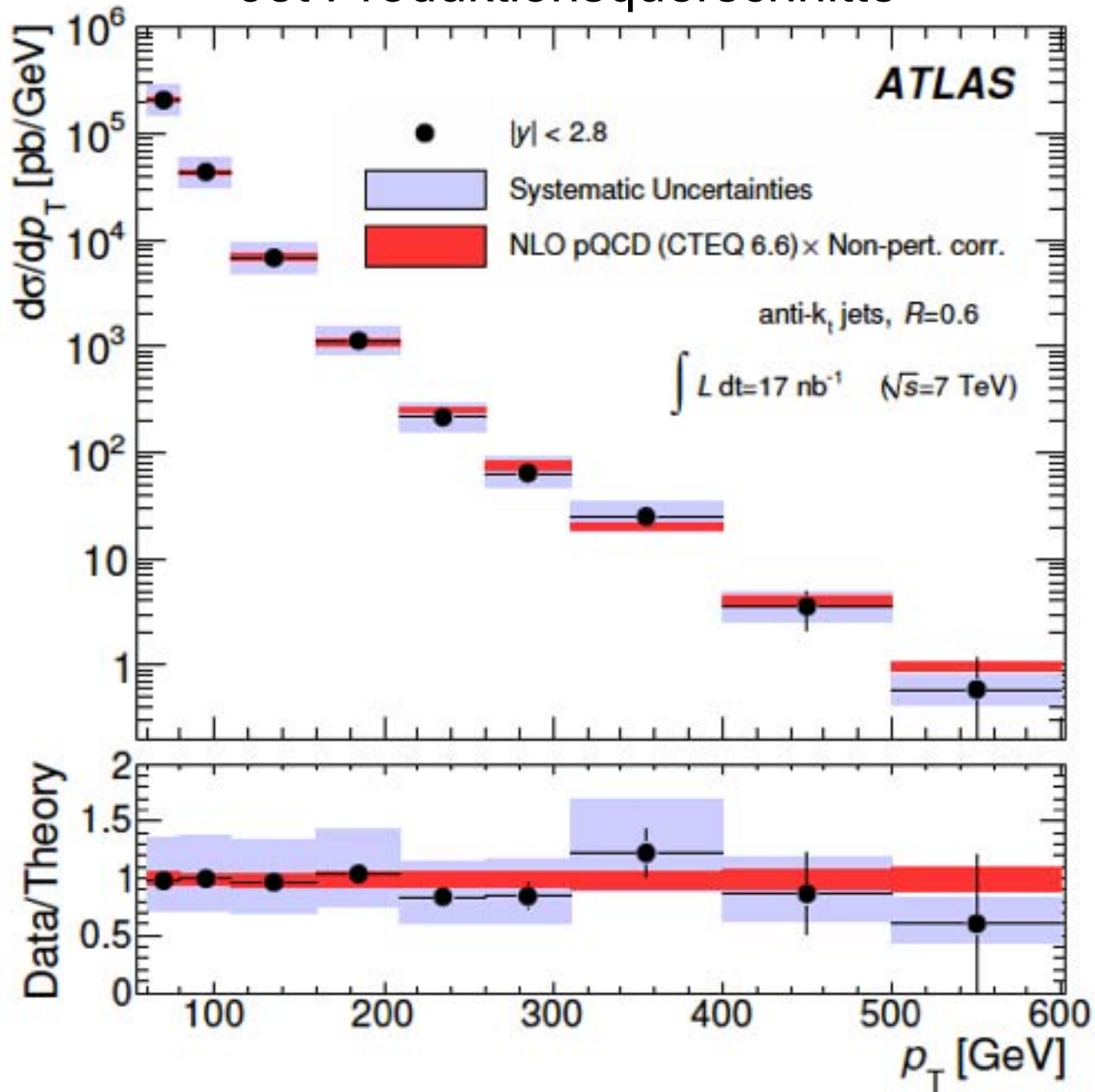
# Jet-Wirkungsquerschnitt am LHC

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

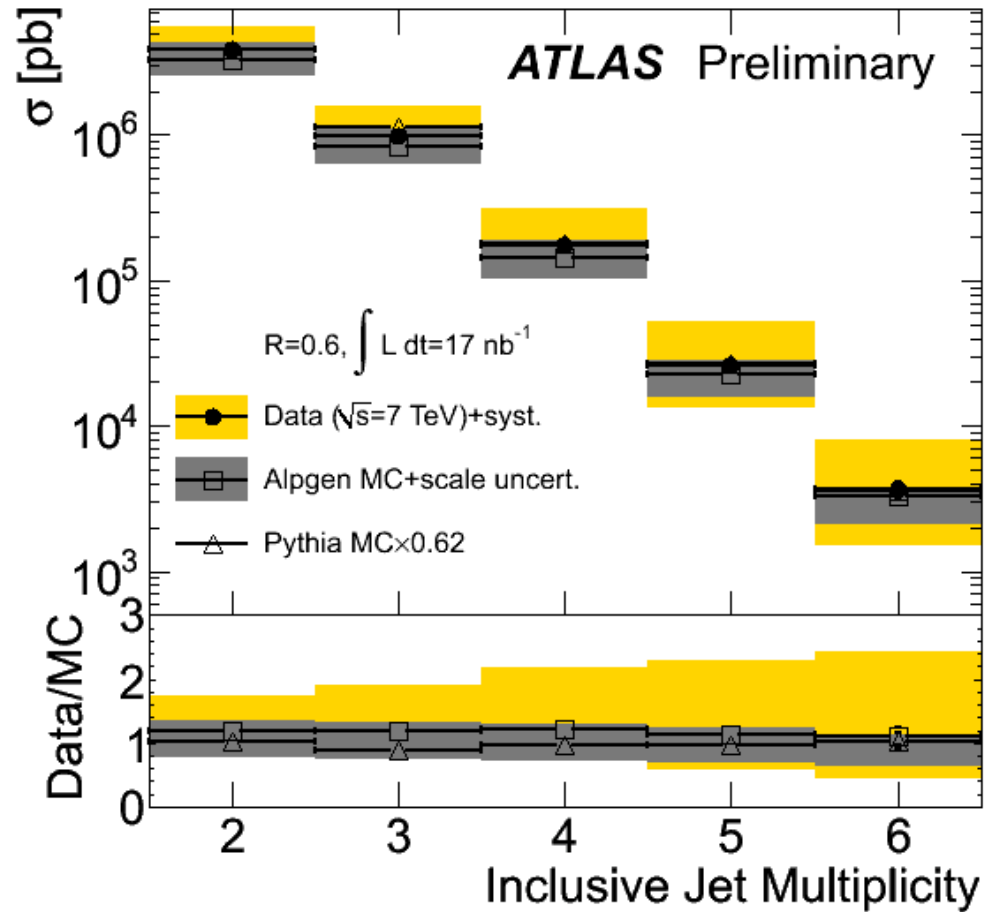
- Messung bis 1 TeV  
sehr früh möglich
- Unsicherheiten:
  - Jet-Energieskala
  - Energieauflösung
  - Triggereffizienzen
  - Luminosität



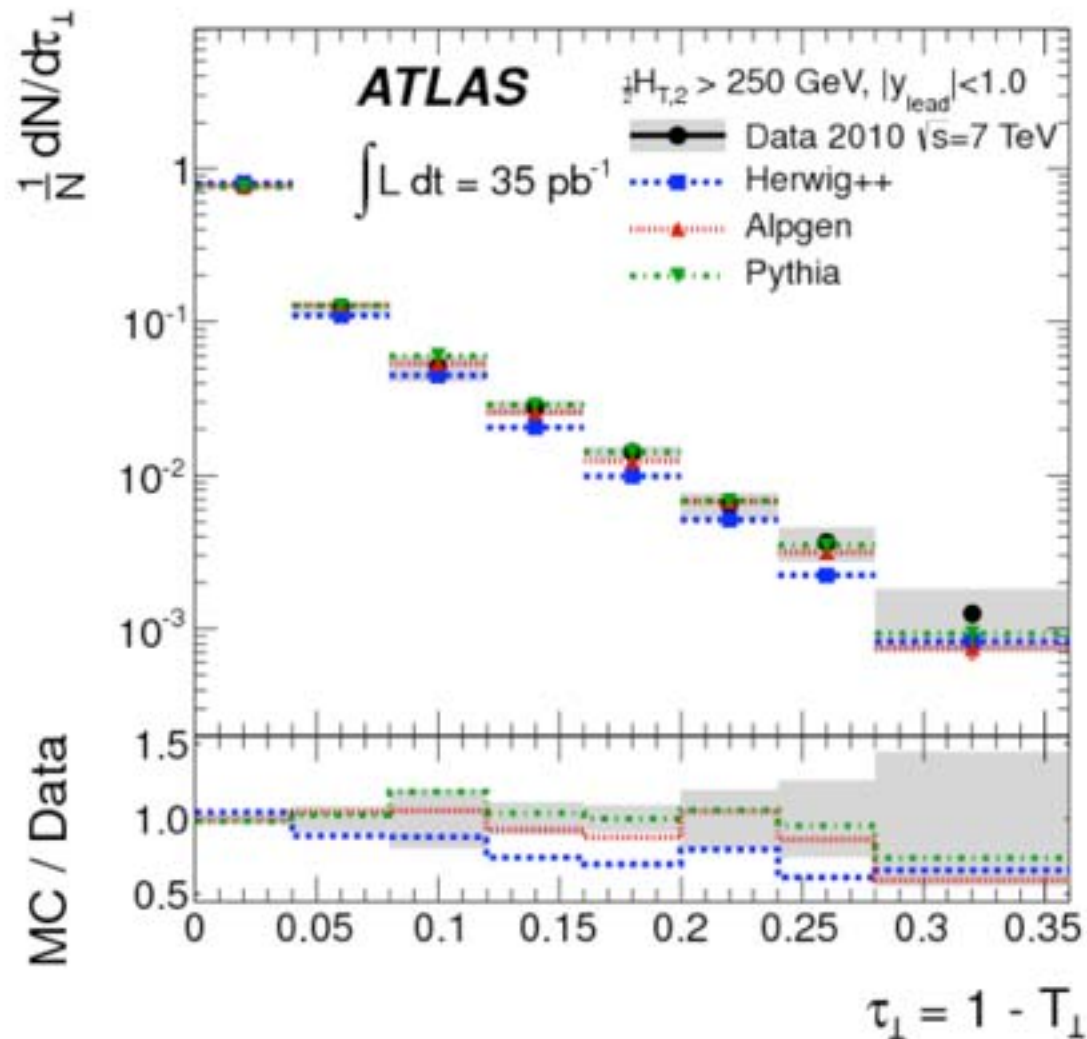
# Jet Produktionsquerschnitte



# Jet Multiplizitäten



# Measurement of event shapes at large momentum transfer



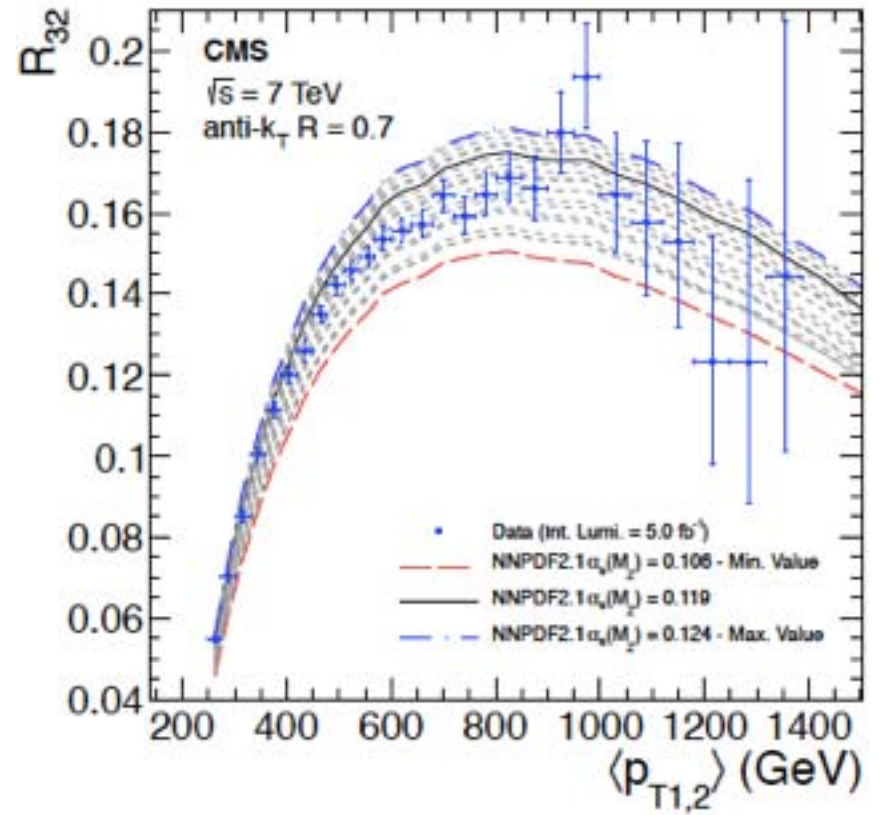
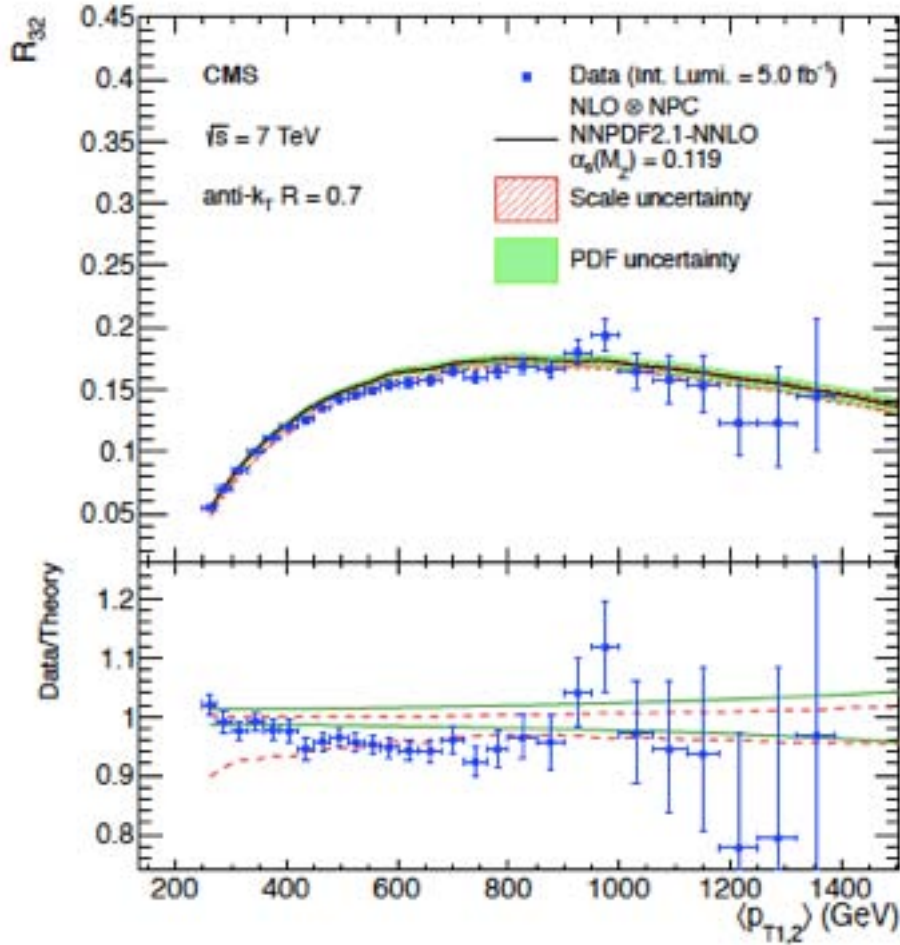
[Eur. Phys. J. C \(2012\) 72: 2211](https://arxiv.org/abs/1112.4268)



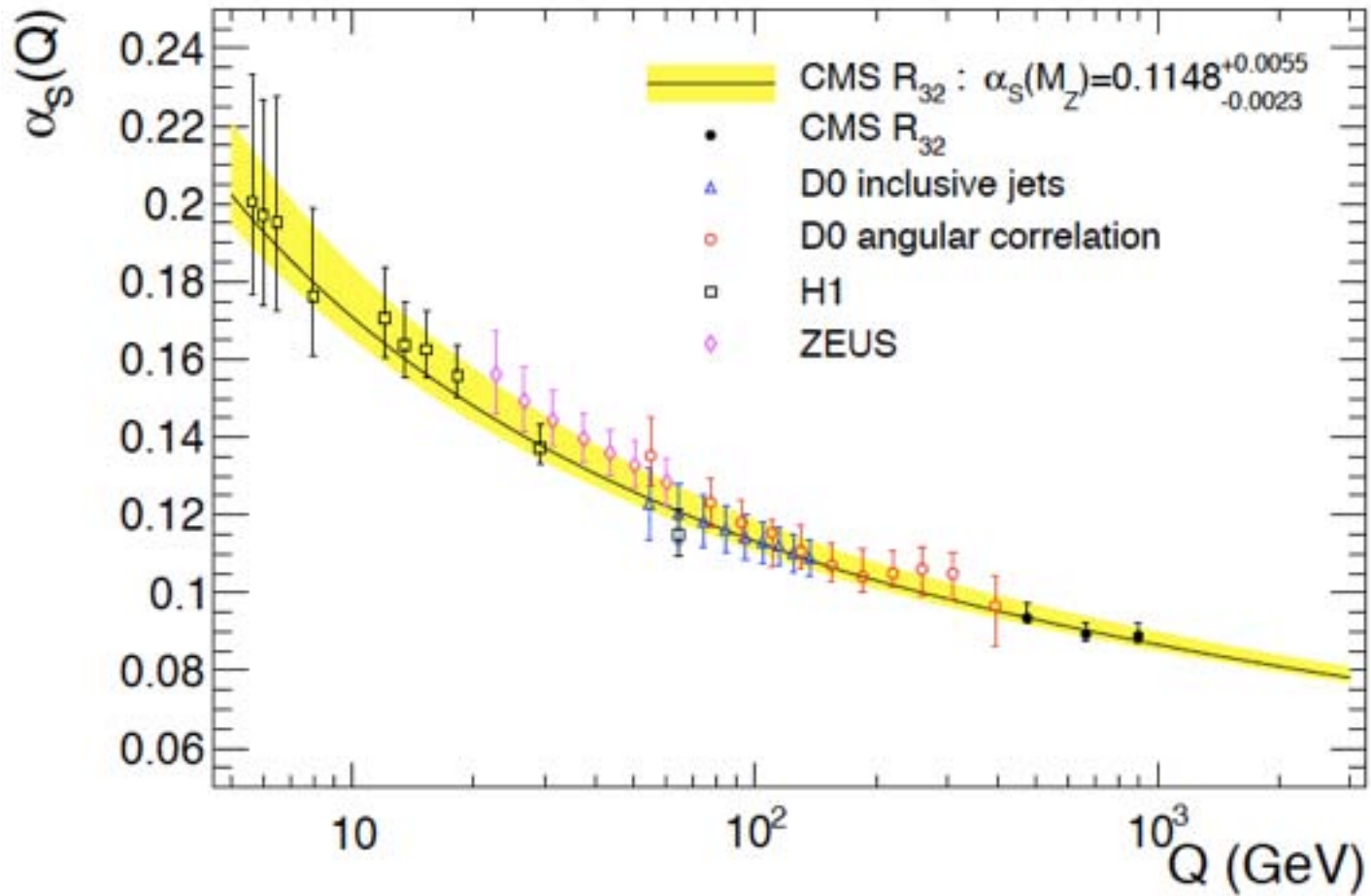
Measurement of the ratio  
of the inclusive 3-jet cross section  
to the inclusive 2-jet cross section  
and first determination  
of the strong coupling constant in the TeV range

- 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 $p_{T1,2}$

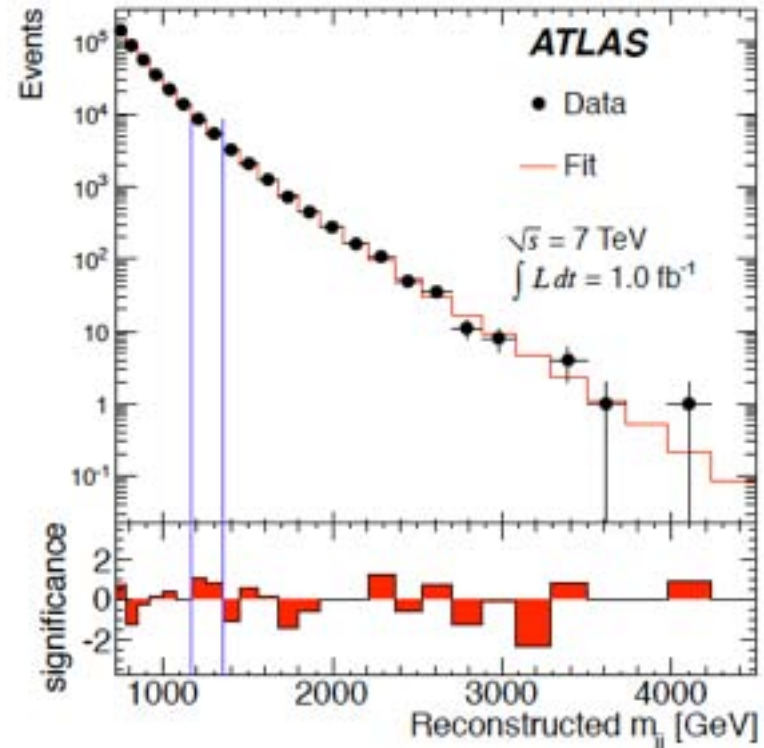
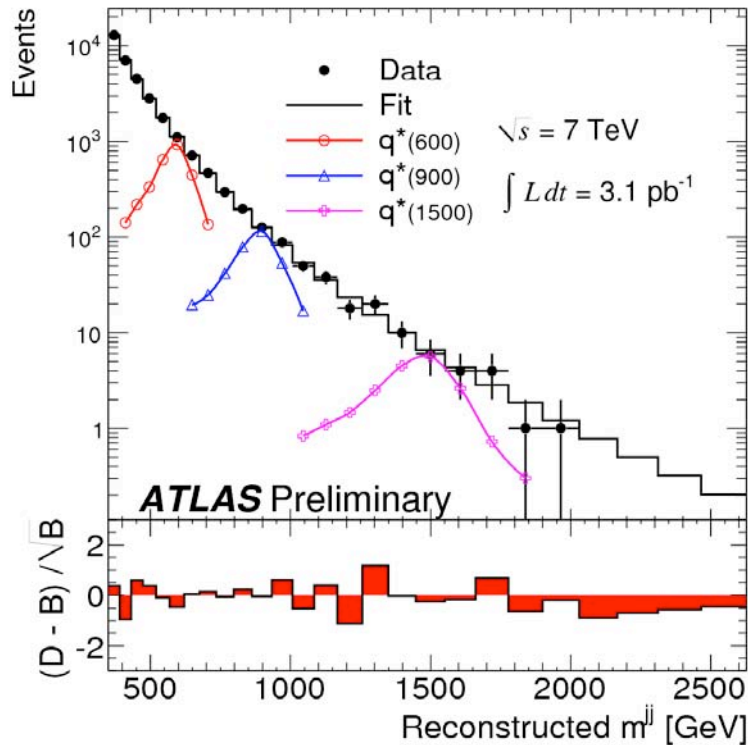


arXiv:1304.7498



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

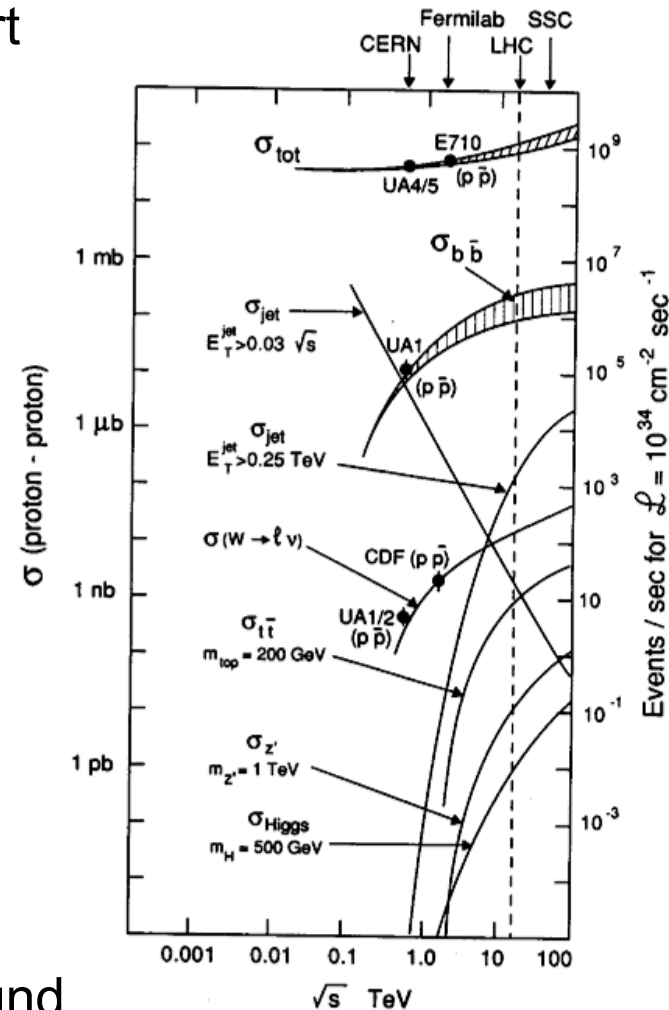
# Jet Paar-Massen und Suche nach neuen schweren Teilchen: excited Quarks



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 ( $\sigma_{\text{tot}}$  in nebenstehender Graphik)
- neben dezidierten QCD Studien wie der Bestimmung von  $\alpha_s$  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)