

Nobelpreiswürdige Erkenntnisse

über die

starke Wechselwirkung

durch Archäologie

an e^+e^- - Beschleunigern

7.2.2005

Otmar Biebel
LMU München



The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross

 1/3 of the prize

USA

Kavli Institute for
Theoretical Physics,
University of California
Santa Barbara, CA, USA



H. David Politzer

 1/3 of the prize

USA

California Institute of
Technology
Pasadena, CA, USA



Frank Wilczek

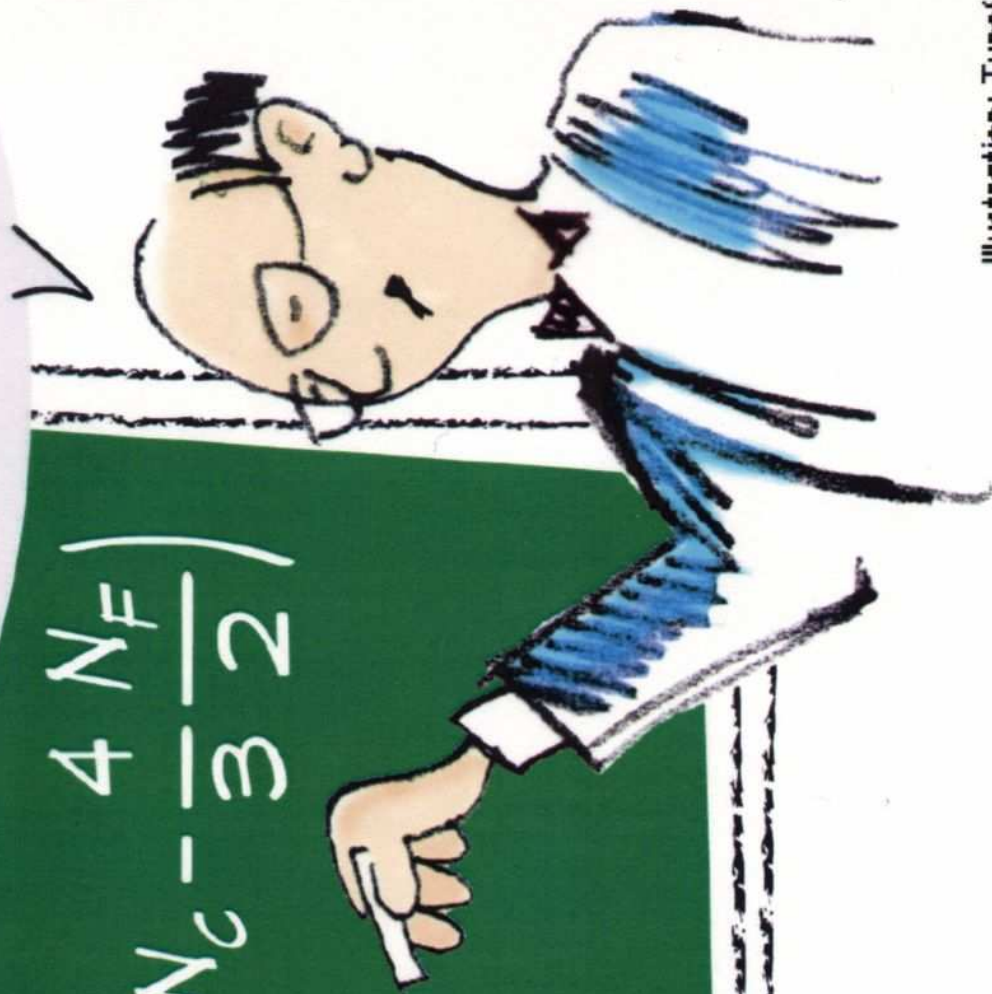
 1/3 of the prize

USA

Massachusetts Institute
of Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA

In QCD and the Standard Model
the beta function is indeed
negative!

$$\beta(g) = \frac{-g^3}{16\pi^2} \left(\frac{11}{3} N_c - \frac{4}{3} \frac{N_F}{2} \right)$$







Einleitung

● Bausteine der Materie: Fermionen

	<u>Familien</u>			<u>elekt. Ladung</u>	<u>Kräfte</u> st., em., schw., grav.
<u>Leptonen</u> :	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	- x x x
	e	μ	τ	-1	- x x x
<u>Quarks</u> :	u	c	t	+2/3	x x x x
	d	s	b	-1/3	x x x x

und ihre Anti-Teilchen

● Kräfte und Vermittler: Bosonen

<u>Theorie</u>	<u>Wechselwirkung</u>	<u>Austauschteilchen</u>	<u>relative Stärke</u>	<u>Beispiel für Wechselwirkung</u>
QCD	stark	Gluon g	1	
QED	elektromagnet.	Photon γ	1/137	
QFD	schwach	W^+, W^-, Z	10^{-14}	
...	gravitativ	Graviton G ?	10^{-40}	

● Erzeugung der Massen:

Higgs-Boson H

wird noch gesucht

Einleitung

QuantenChromoDynamik: Quantentheorie der starken Wechselwirkung

kleine Historie

1932 Entdeckung des Neutrons (Chadwick, Nobelpreis 1935)

→ Kernkraft hält Atomkern zusammen

1933 anomales magn. Moment des Protons (Stern, Estermann, Frisch)
(Nobelpreis 1943)

→ Proton hat innere Struktur

1959-64 statisches Quark-Modell (Gell-Mann, Zweig)
(Nobelpreis 1969)

1964-73 neue Quantenzahl: Farbladung d. Quarks

(Greenberg, Fritsch, Gell-Mann, Hanbury)

1971 Renormierbarkeit nicht-abelscher Theorien, z.B. QCD

('t Hooft, Veltmann, Nobelp. 1999)

1973 Konzept der asymptotischen Freiheit in QCD

(Gross, Politzer, Wilczek, Nobel. 2004)


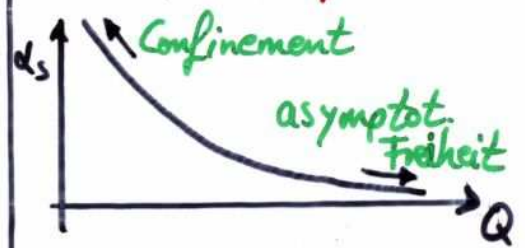
1975 Bestätigung des Quarkmodells

SPEAR-Beschleuniger: 2-Jet-Struktur

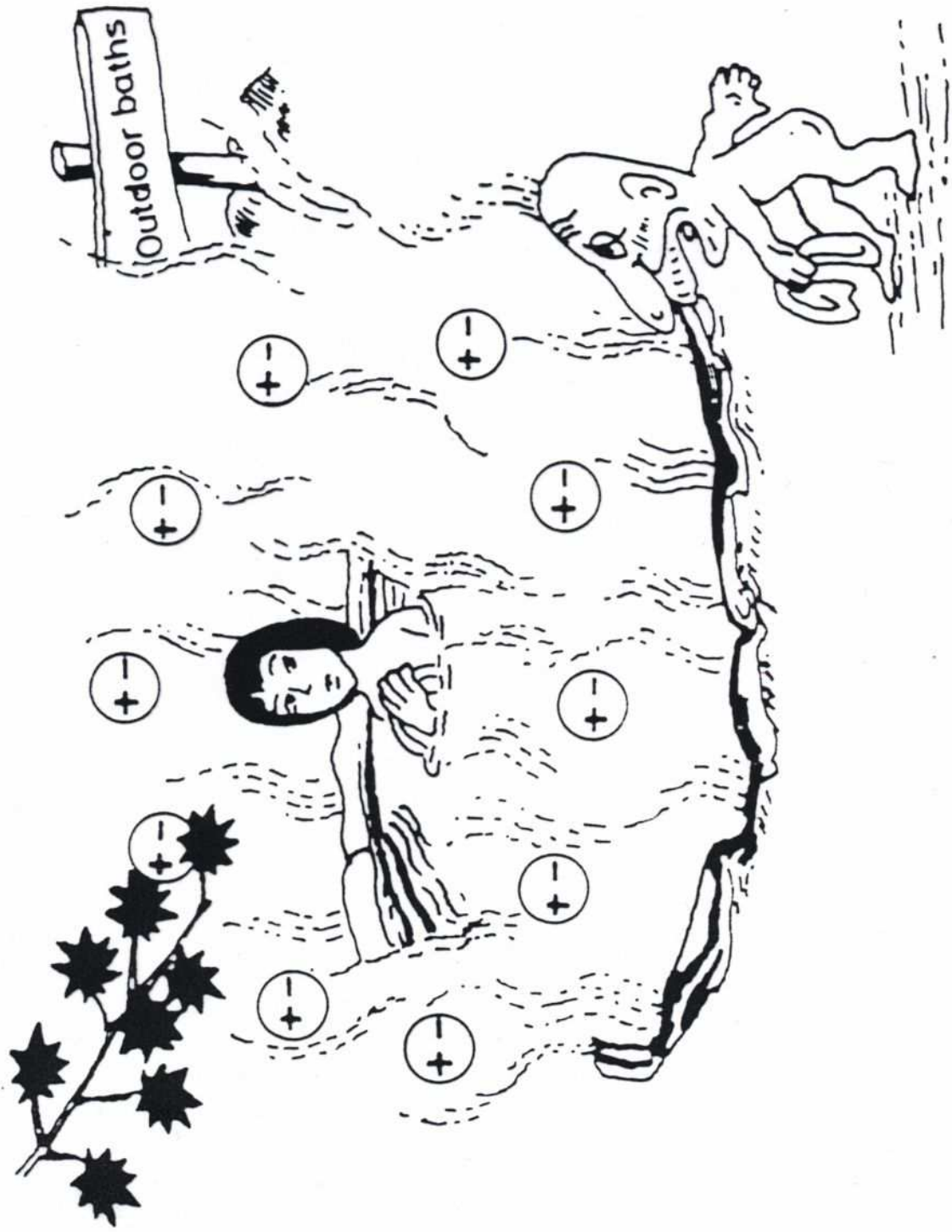
1979 Entdeckung des Gluons

PETRA-Beschleuniger: 3-Jet-Struktur

Einleitung: QED und QCD im Vergleich

	QED	QCD
elementare Fermionen	Leptonen (e, μ , τ)	Quarks (u, d, s, c, b, t)
Kraft koppelt an	elekt. Ladung (+, -)	3 Farbladungen (r, g, b)
Kraftvermittler	Photon γ (elekt. neutral)	8 Gluonen g (zweifach farbgeladen d.h. g möglich)
freie Teilchen	Leptonen	Hadronen (= Mesonen + Baryonen, farbneutrale Bindungs- zustände: Mesonen = $q\bar{q}$ Baryonen = qqq)
Kopplungsstärke	$\alpha_{em} (Q \approx 0) \approx \frac{1}{137}$ 	$\alpha_s (Q = m_Z) \approx 0.12$ 

Vakumpolarisation



Bare charge cannot be seen because of the intervening virtual pairs.

Y. Nambu : Quarks

Kopplungsstärke dem ...

... beeinflusst durch Polarisation des Vakuums

▷ großer Abstand R_1 \longleftrightarrow stärkere Abschirmung

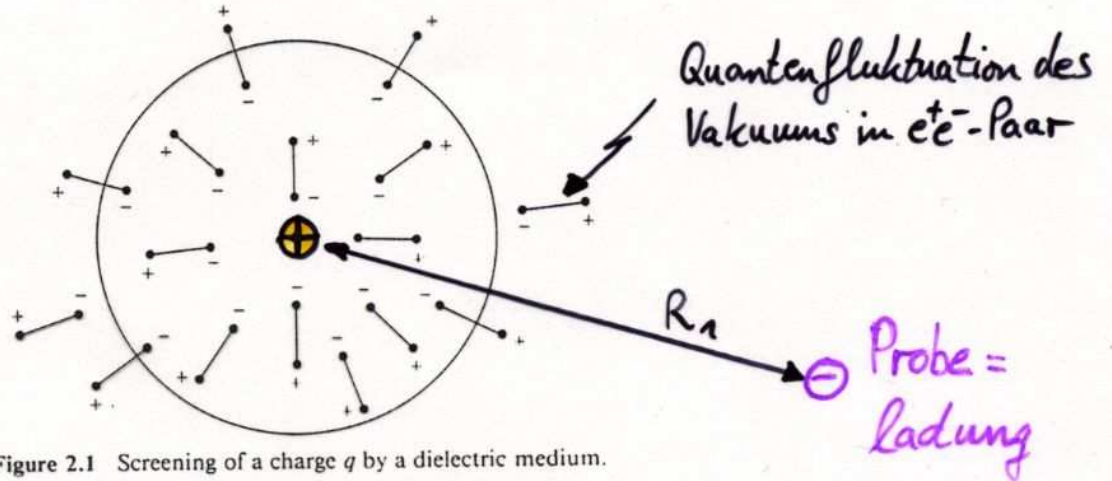
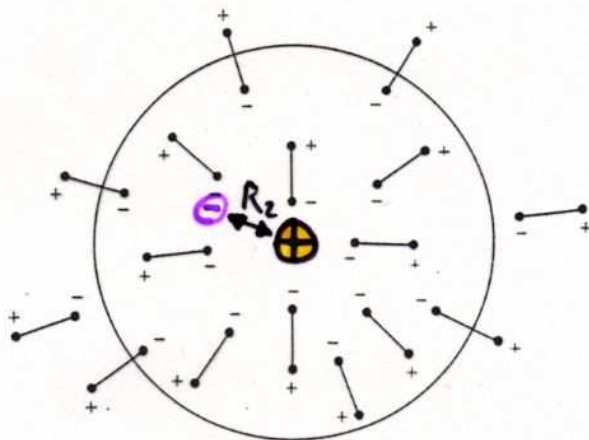


Figure 2.1 Screening of a charge q by a dielectric medium.

▷ kleinerer Abstand R_2 \longleftrightarrow geringere Abschirmung



⇒ "sichtbare" Ladung \oplus wird abstandsabhängig
⇔ "sichtbare" Ladung \oplus wird energieabhängig!

Vakuum polarisation in QED

10

Quantum electrodynamics (QED)

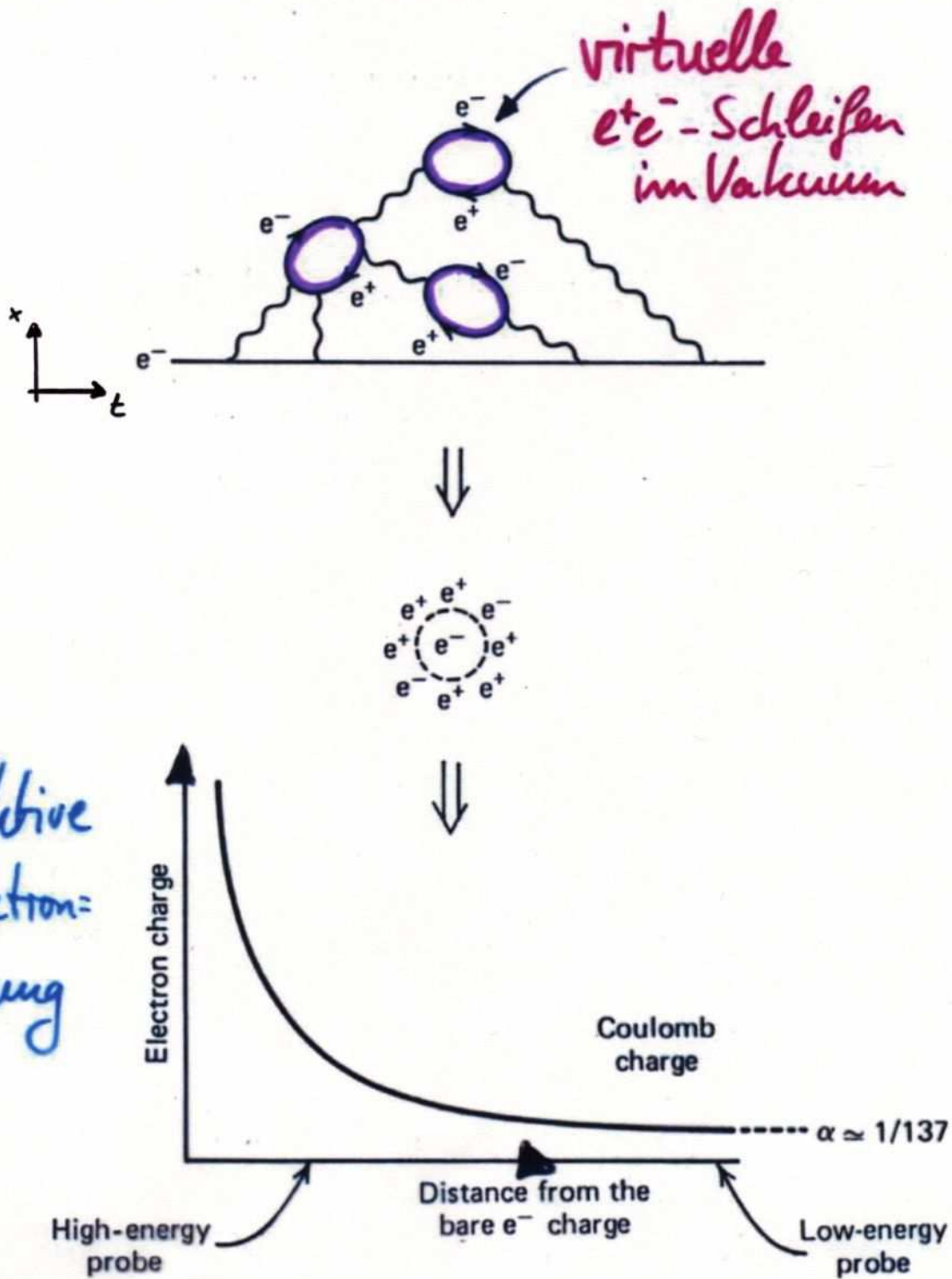
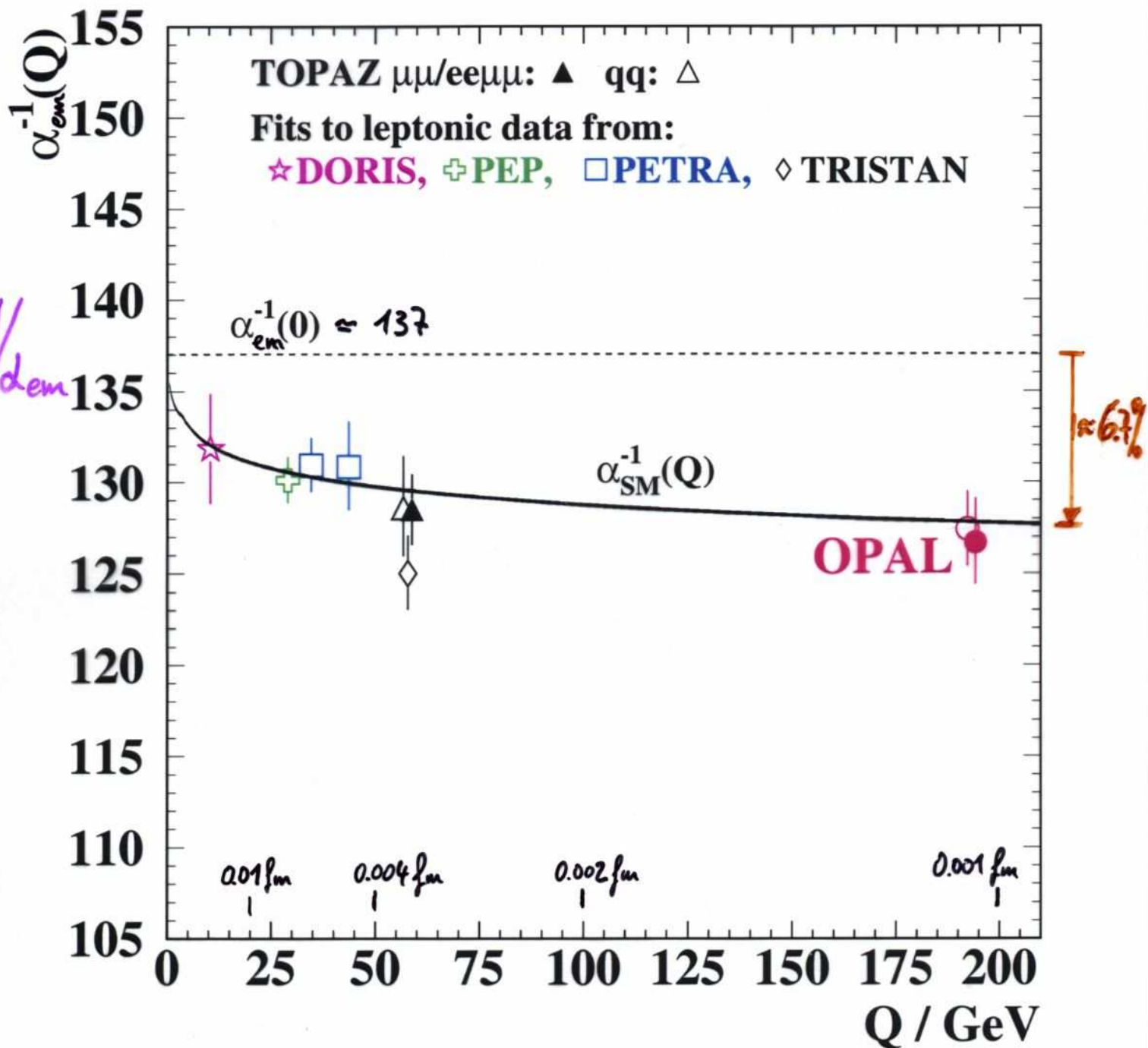


Fig. 1.5 Screening of the (a) electric

Elektromagn. Kopplung vs. Abstand

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$$



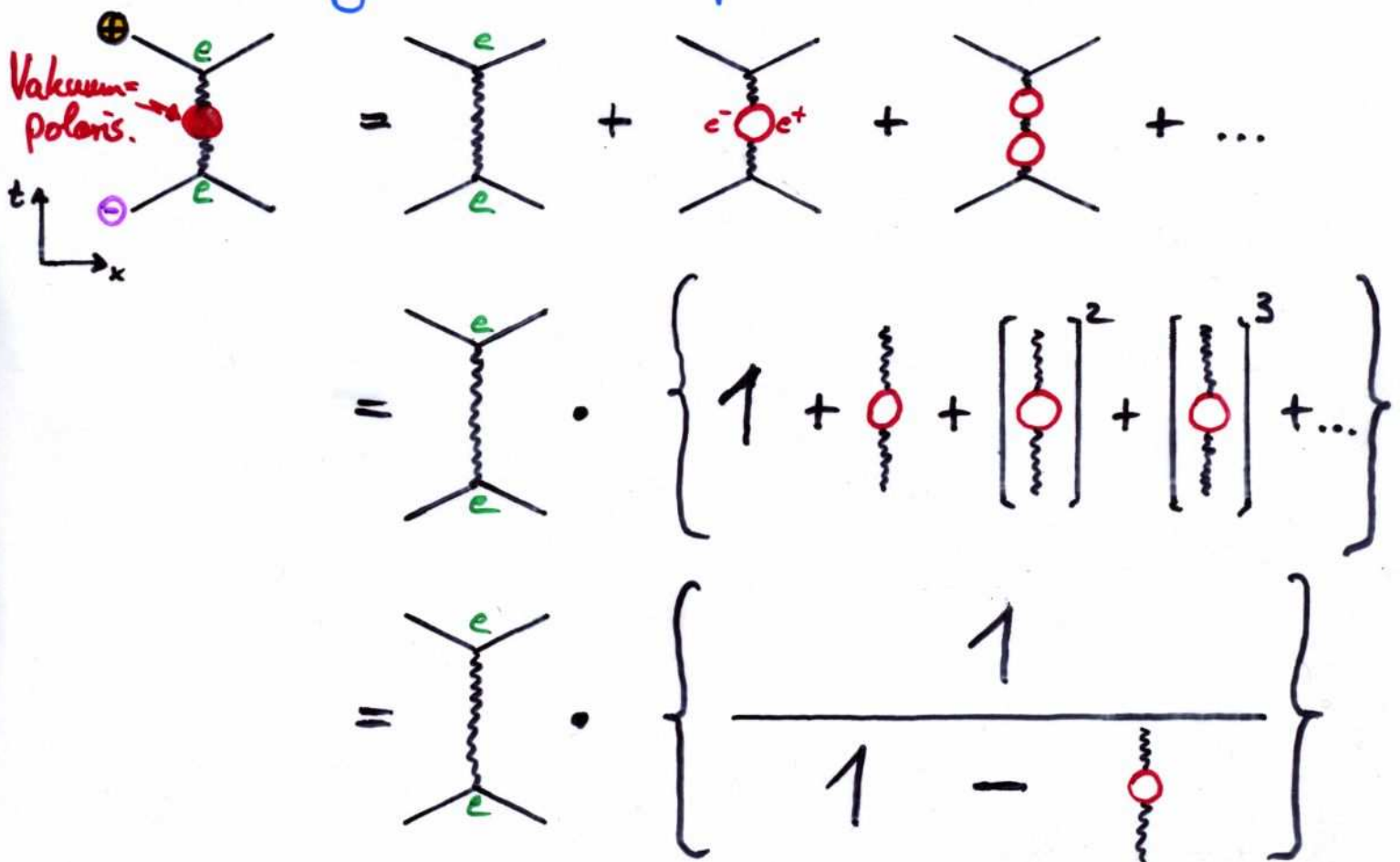
\Rightarrow elektr. Ladung $e = e(Q^2)$

Vakuum polarisation & β -Funktion der QED

- Energieabhängigkeit der elektr. Ladung: β -Funktion

$$Q \cdot \frac{\partial e(Q)}{\partial Q} = \beta_{\text{QED}}(e)$$

- Berechnung aus Vakuum polarisation (Beispiel: Streuprozess)



$$\Rightarrow e^2(Q) = e^2(\mu) \cdot \frac{1}{1 - \frac{e^2}{12\pi^2} \ln \frac{Q^2}{\mu^2}}$$

$$\Rightarrow Q \cdot \frac{\partial e}{\partial Q} = \beta_{\text{QED}}(e) = +\frac{e^3}{12\pi^2} + \dots$$

→ Ladung e wächst mit Energie Q!

Vakuum polarisation in QED und QCD

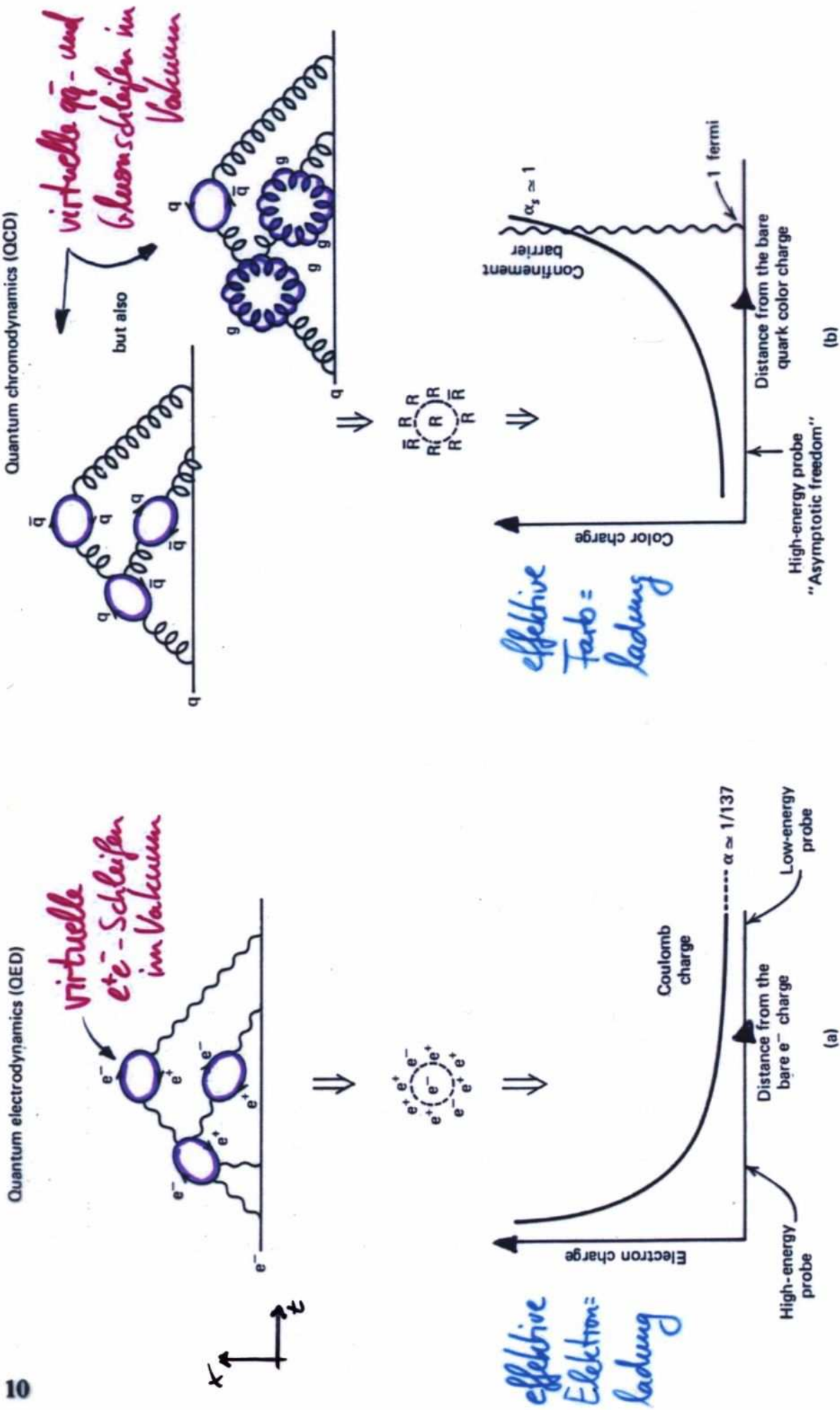


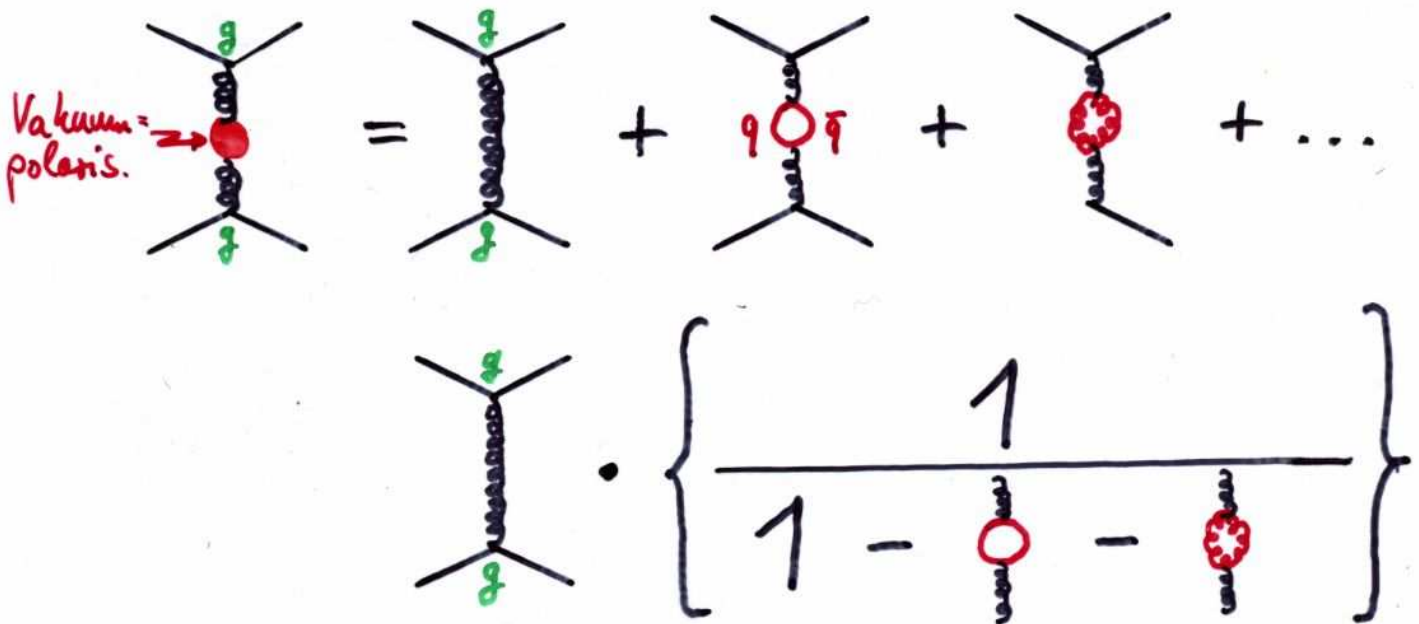
Fig. 1.5 Screening of the (a) electric and (b) color charge in quantum field theory.

Vakuum polarisation & β -Funktion der QCD

- Energieabhängigkeit der Farbladung: β -Funktion

$$Q \cdot \frac{\partial g(Q)}{\partial Q} = \beta_{\text{QCD}}(g)$$

- Berechnung aus Vakuum polarisation



$$\Rightarrow g^2(Q) = g^2(\mu) \cdot \frac{1}{1 - \frac{g^2}{16\pi^2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{N_F}{2} \cdot \ln \frac{Q^2}{\mu^2} + \frac{g^2}{16\pi^2} \cdot \frac{11}{3} \cdot N_C \cdot \ln \frac{Q^2}{\mu^2}}$$

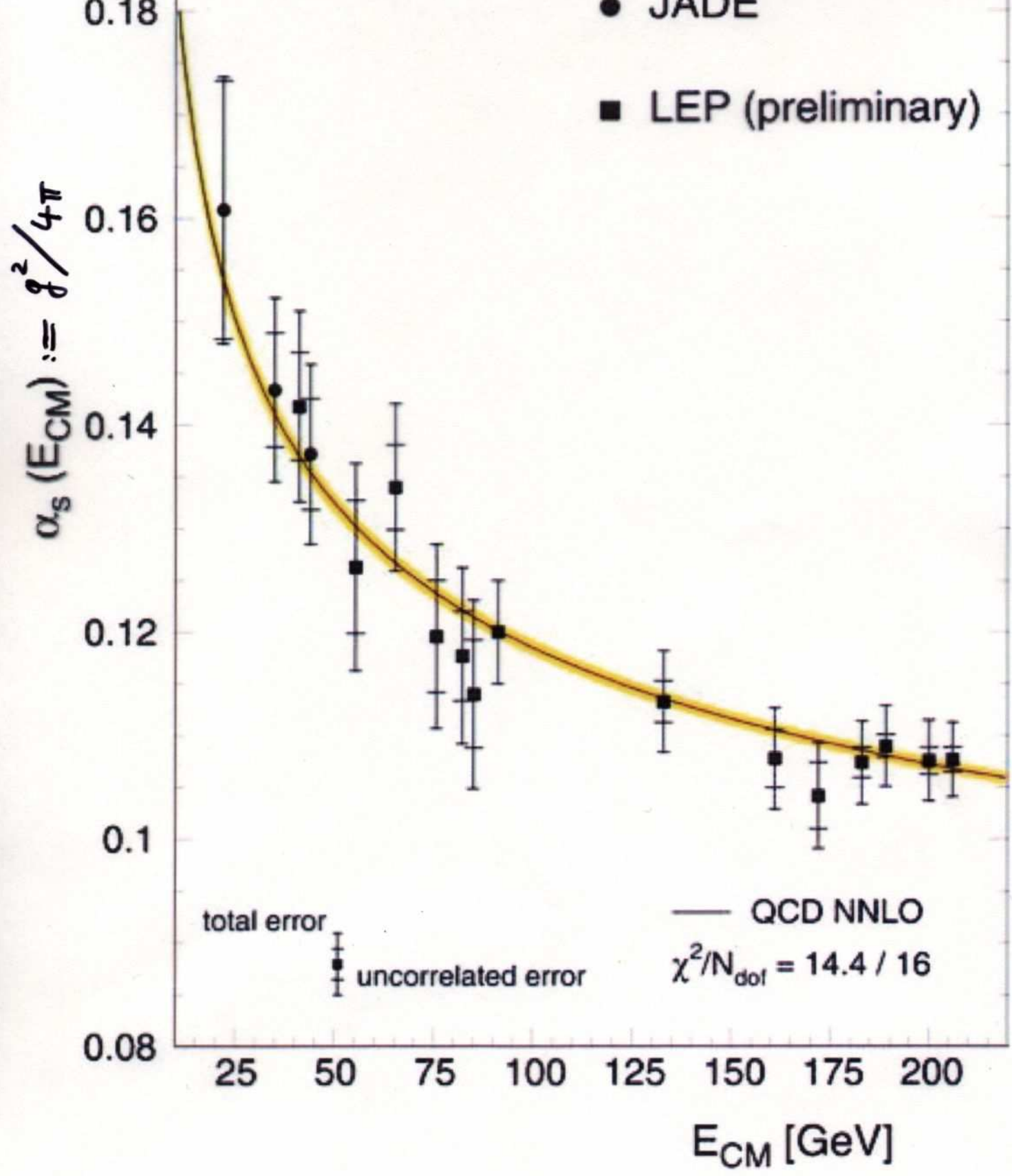
$$\Rightarrow Q \cdot \frac{\partial g}{\partial Q} = \beta_{\text{QCD}}(g) = -\frac{g^3}{16\pi^2} \cdot \left(\frac{11}{3} N_C - \frac{4}{3} \frac{N_F}{2} \right)$$

> 0 $N_F = 6$ Quarks
 $N_C = 3$ Farbladungen

- \rightarrow Farbladung g nimmt ab mit Energie Q !
- \rightarrow Kopplungsstärke $\alpha_s := \frac{g^2}{4\pi}$ nimmt ab mit Q !

QCD-Kopplungsstärke α_s vs. Energie

$$\alpha_s := \frac{g^2}{4\pi}$$



LEP- und PETRA-Beschleuniger

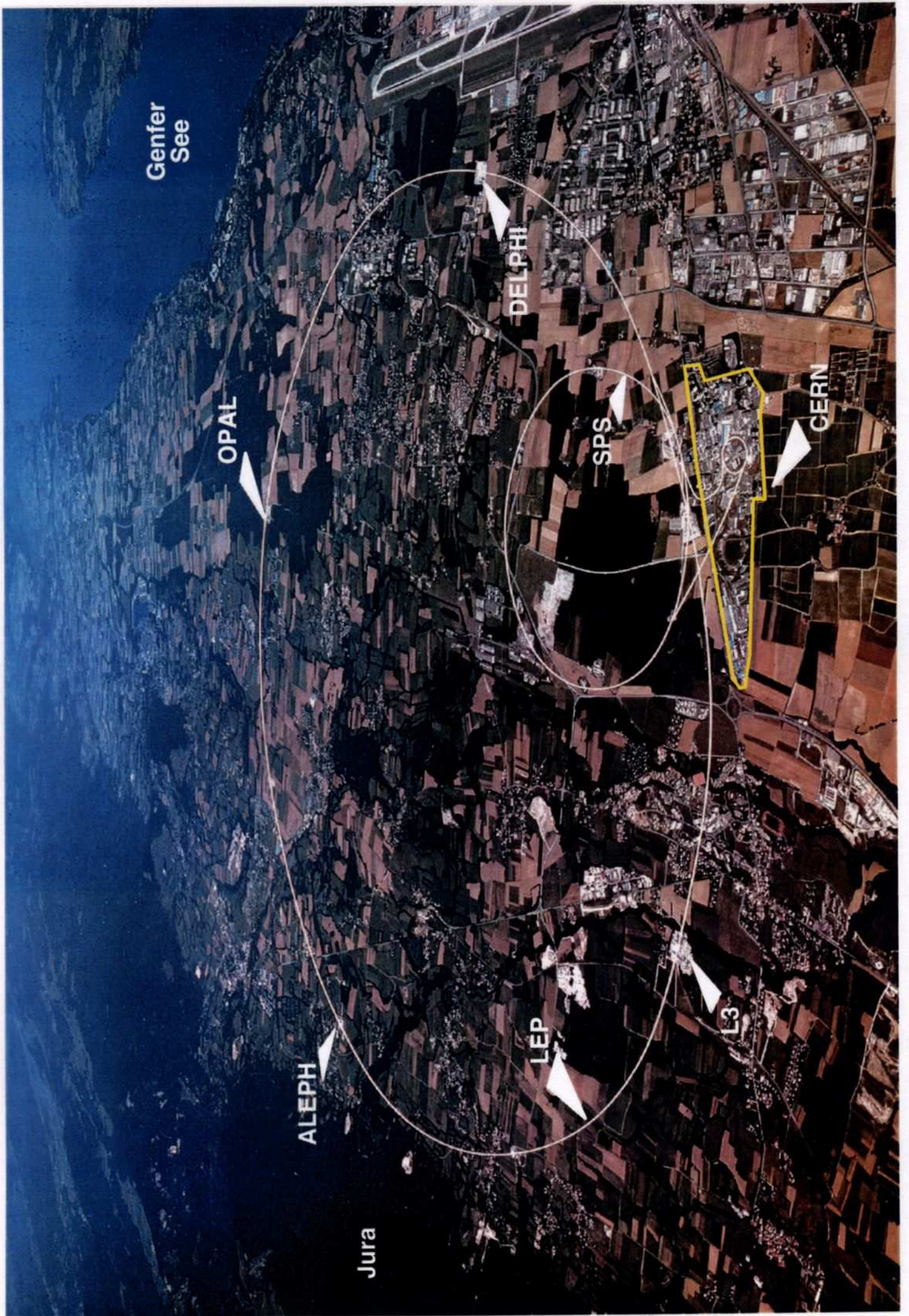
e^+e^- Ringbeschleuniger

● LEP @ CERN :

- ▶ ~27 km Umfang
- ▶ 4 Detektoren (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL)
- ▶ Meßzeit: 1989 - 2000
- ▶ Schwerpunktsenergie: 91 ... 209 GeV

● PETRA @ DESY :

- ▶ ~2 km Umfang
- ▶ 4 Detektoren (JADE, MARK J, PLUTO¹² → CELLO, TASSO)
- ▶ Meßzeit: 1979 - 1986
- ▶ Schwerpunktsenergie: 12 ... 47 GeV



Genfer See

OPAL

DELPHI

SPS

CERN

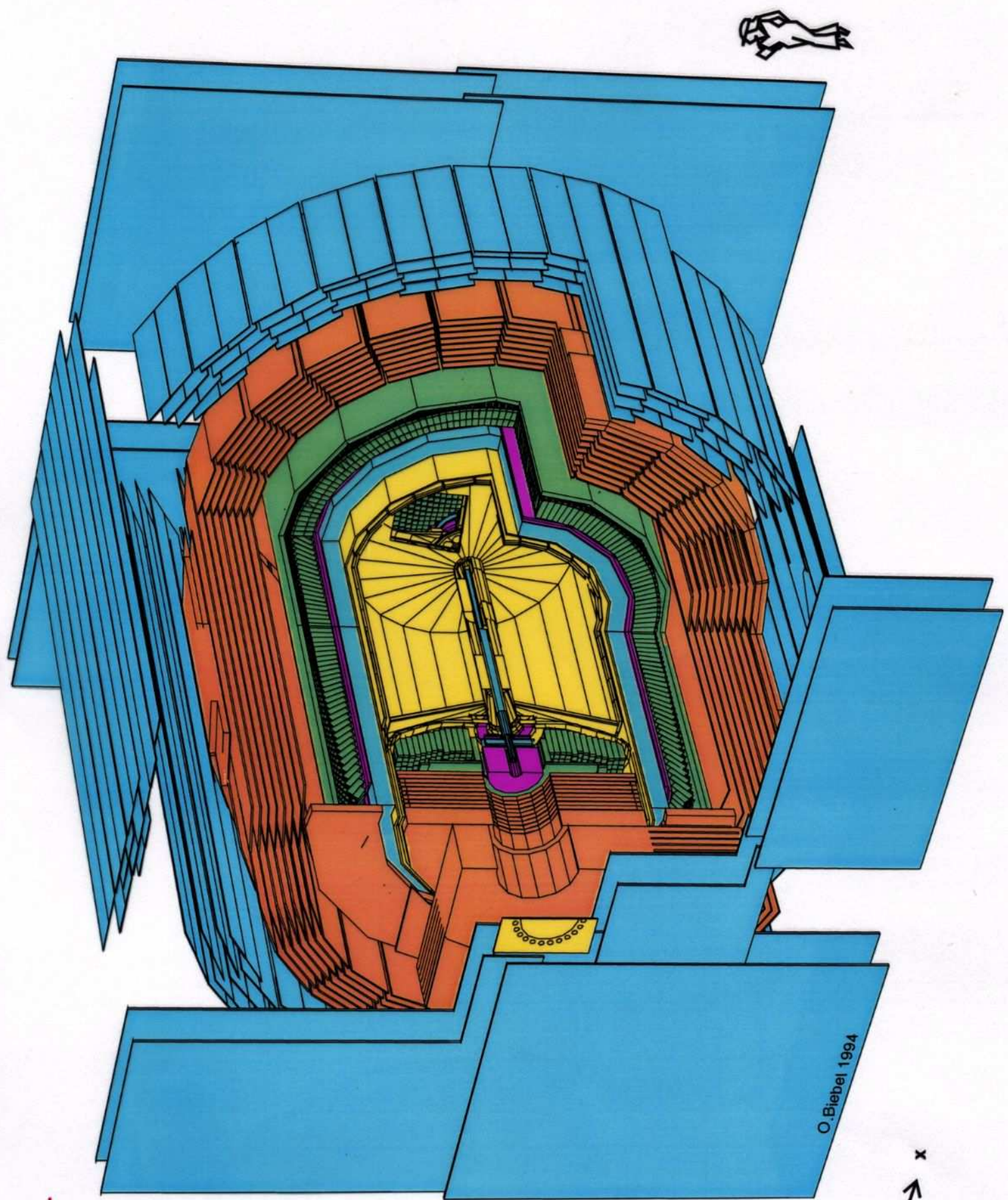
ALEPH

LEP

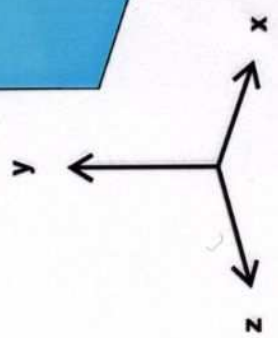
L3

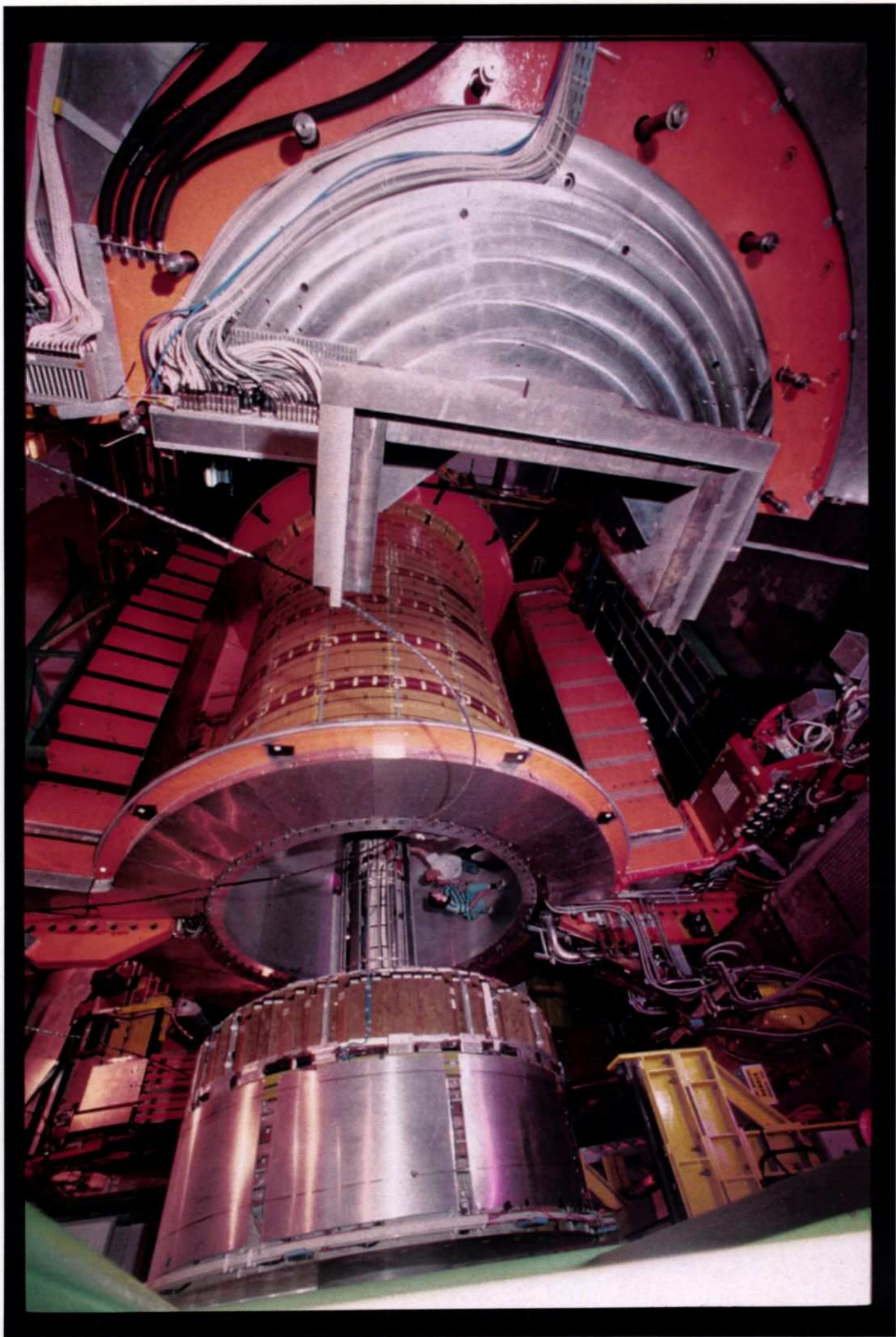
Jura

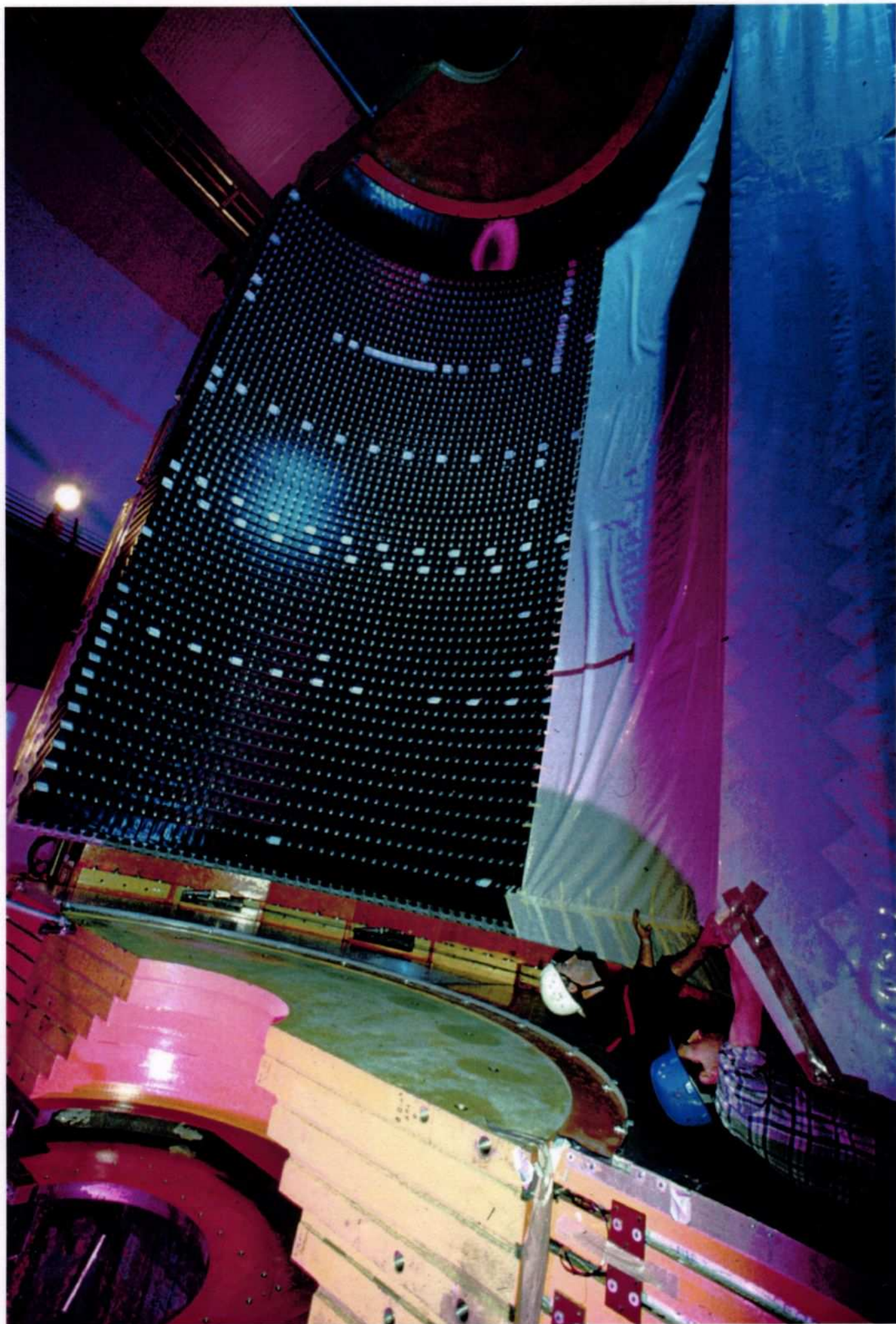
OPAL



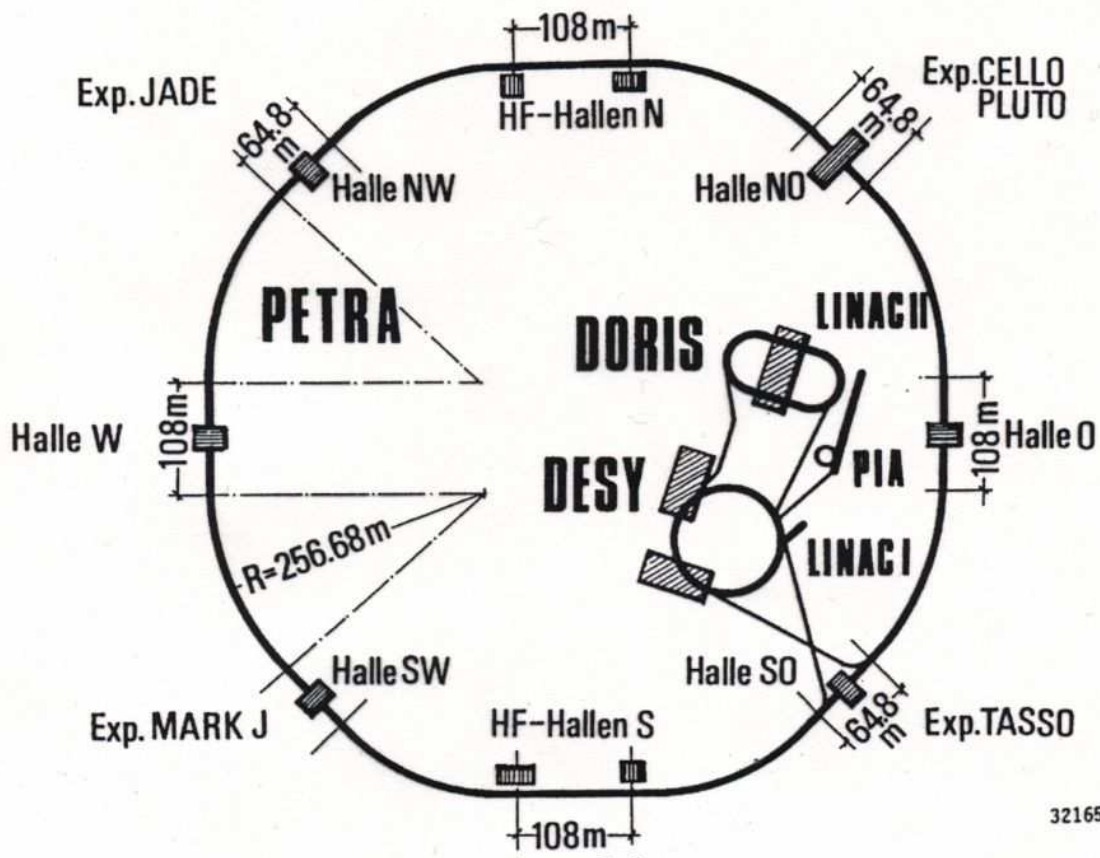
O. Biebel 1994











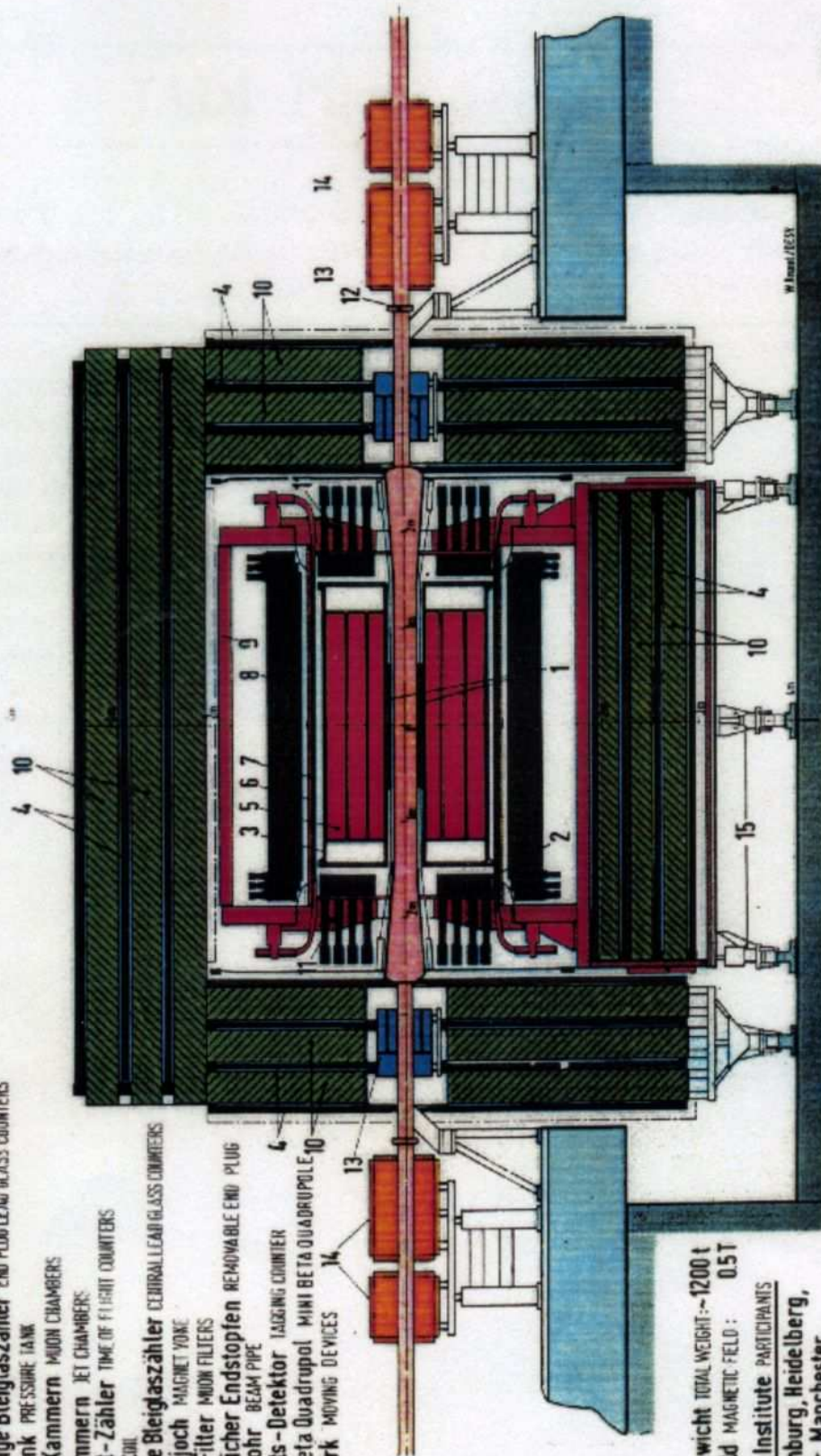
32165

Figure 3.1: An overview of the PETRA collider and its system of pre-accelerators DESY, DORIS and PIA is given. The positions of the four interaction points are also shown with the names of the respective experiments.

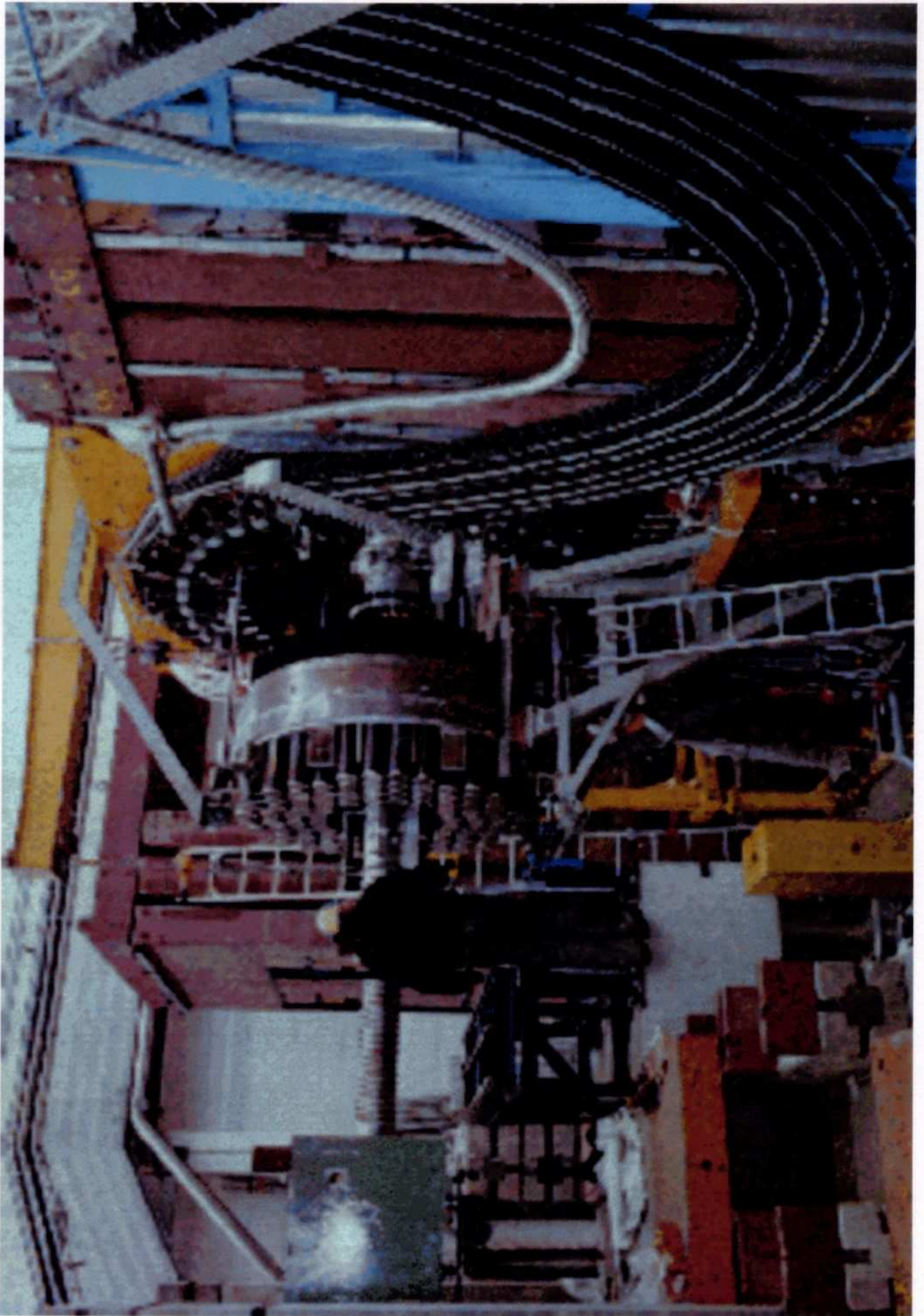
MAGNETDETEKTOR **JADE**

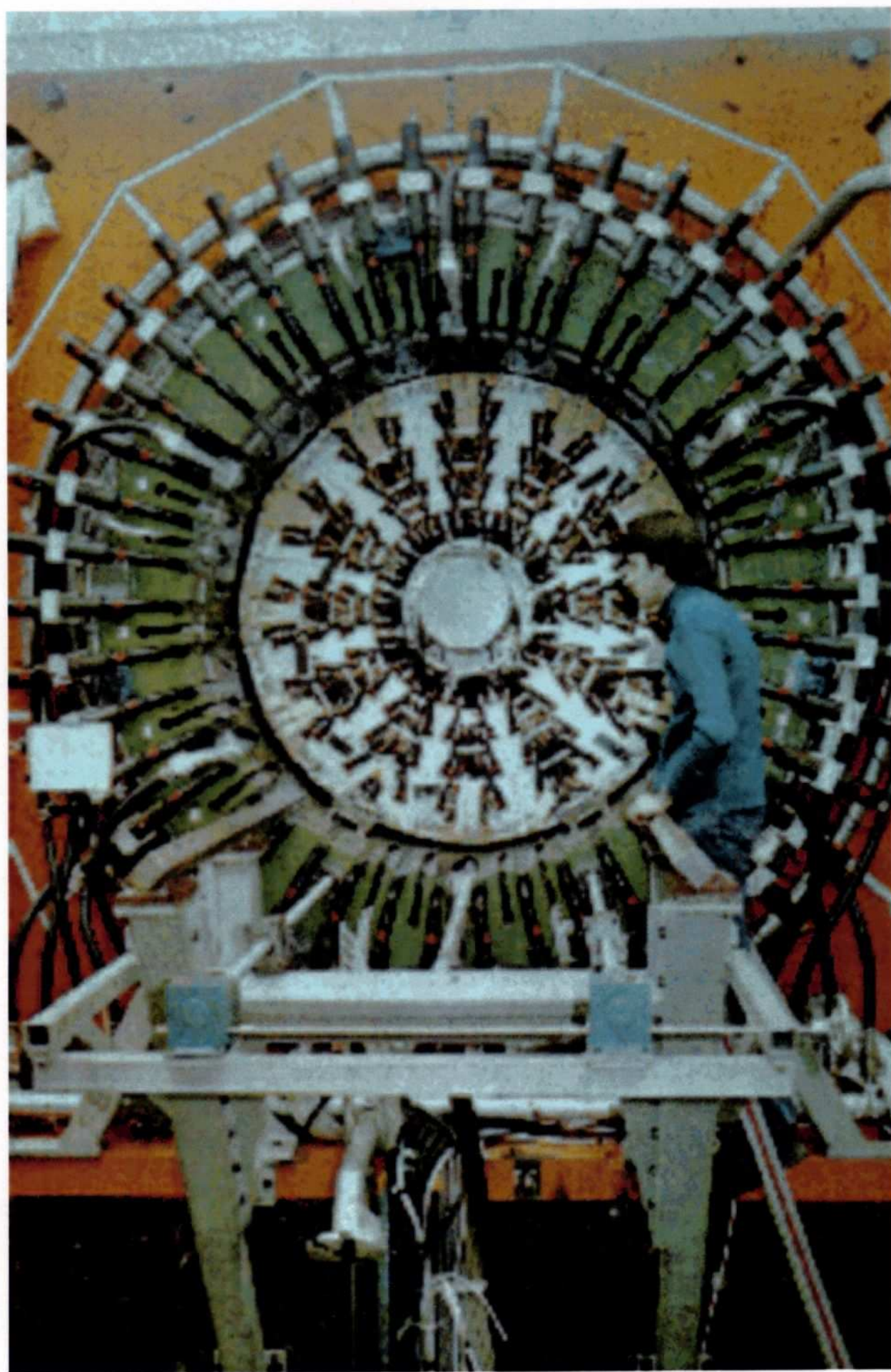
MAGNET DETECTOR

- 1 Strahlrohrzähler BEAM PIPE COUNTERS
- 2 Endseitige Bleiglaszähler END PLUG LEAD GLASS COUNTERS
- 3 Drucktank PRESSURE TANK
- 4 Myon-Kammern MUON CHAMBERS
- 5 Jet-Kammern JET CHAMBERS
- 6 Flugzeit-Zähler TIME OF FLIGHT COUNTERS
- 7 Spule COIL
- 8 Zentrale Bleiglaszähler CENTRAL LEAD GLASS COUNTERS
- 9 Magnetjoch MAGNET YOKE
- 10 Myon-Filter MUON FILTERS
- 11 Beweglicher Endstopfen REMOVABLE END PLUG
- 12 Strahlrohr BEAM PIPE
- 13 Vorwärts-Detektor FORWARD DETECTOR
- 14 Taggering Counter TAGGING COUNTER
- 15 Mini-Beta Quadrupol MINI BETA QUADRUPOLE
- 16 Fahrwerk MOVING DEVICES



Gesamtgewicht TOTAL WEIGHT: ~1200 t
 Magnetfeld MAGNETIC FIELD: 0.5 T
 Beteiligte Institute PARTICIPANTS
 DESY, Hamburg, Heidelberg,
 Lancaster, Manchester,
 Rutherford Lab., Tokio





OPAL & JADE - Detektoren

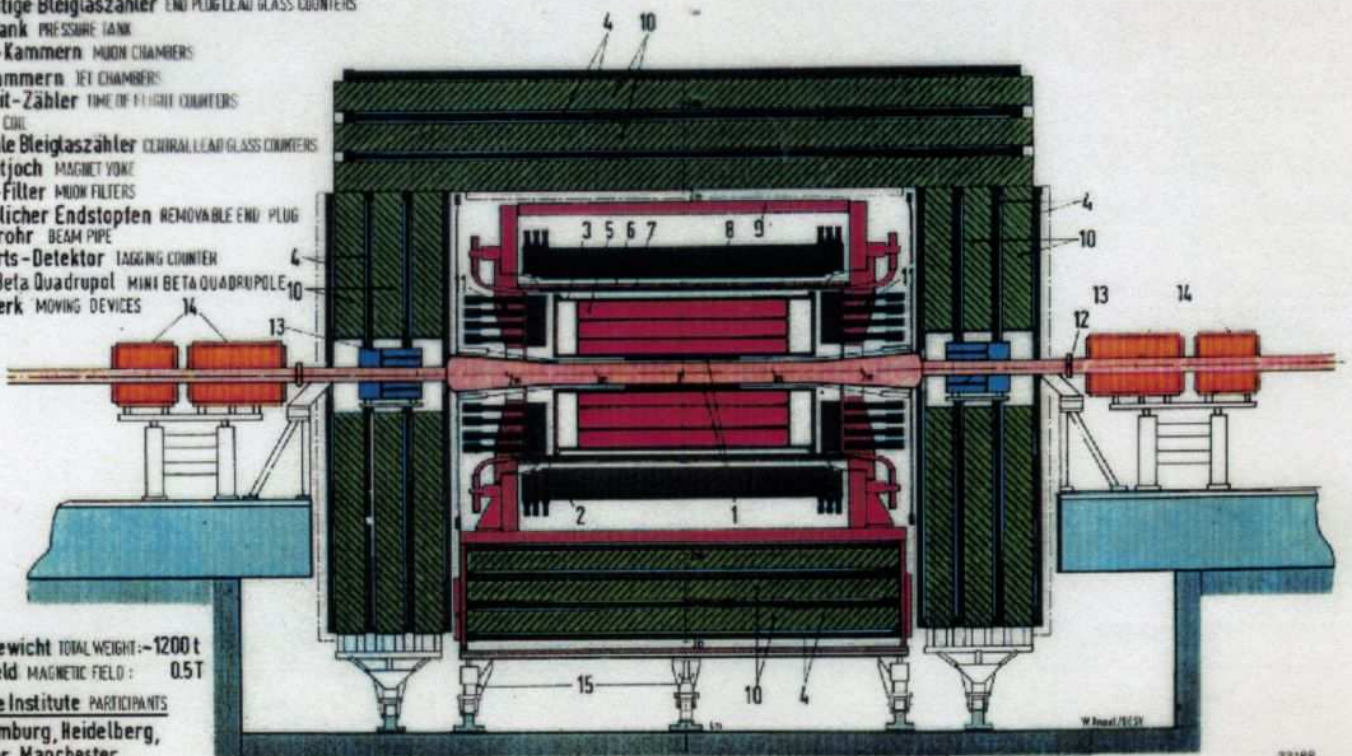
- Detektoren mit sehr ähnlichem Aufbau
 - + Jetkammer f. Spuren geladener Teilchen
 - + Bleiglasblöcke f. Energie electromagn. wechselwirkender Teilchen
 - + Solenoidspule innerhalb des Bleiglas-Kalorimeters
 - + B-Feld $\sim 0.45 \text{ T}$

"JADE \cong Prototyp f. OPAL"

MAGNETDETEKTOR **JADE**

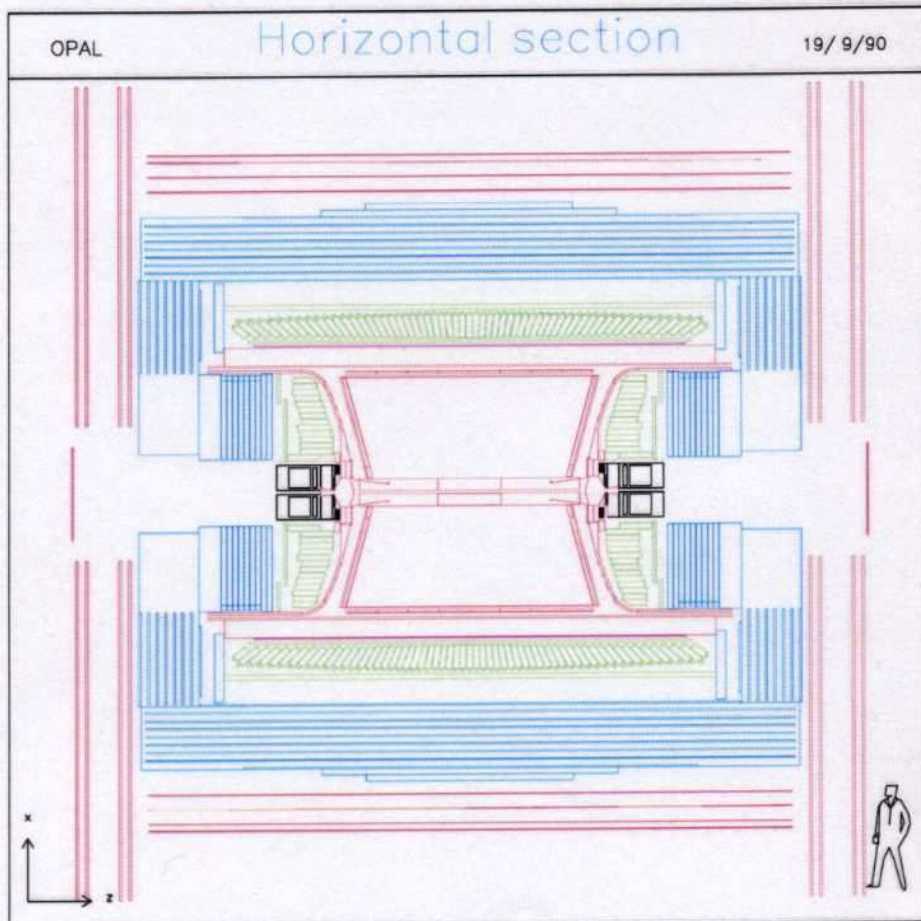
MAGNET DETECTOR

- 1 Strahlrohrzähler BEAM PIPE COUNTERS
- 2 Endseitige Bleiglaszähler END PLUG LEAD GLASS COUNTERS
- 3 Drucktank PRESSURE TANK
- 4 Myon-Kammern MUON CHAMBERS
- 5 Jet-Kammern JET CHAMBERS
- 6 Flugzeit-Zähler TIME OF FLIGHT COUNTERS
- 7 Spule COIL
- 8 Zentrale Bleiglaszähler CENTRAL LEAD GLASS COUNTERS
- 9 Magnetjoch MAGNET YOK
- 10 Myon-Filter MUON FILTERS
- 11 Beweglicher Endstopfen REMOVABLE END PLUG
- 12 Strahlrohr BEAM PIPE
- 13 Vorwärts-Detektor TAGGING COUNTER
- 14 Mini-Beta Quadrupol MINI BETA QUADRUPOLE
- 15 Fahrwerk MOVING DEVICES



Gesamtgewicht TOTAL WEIGHT: ~1200 t
 Magnetfeld MAGNETIC FIELD: 0.5 T
 Beteiligte Institute PARTICIPANTS
 DESY, Hamburg, Heidelberg,
 Lancaster, Manchester,
 Rutherford Lab., Tokio

33168



Ähnlichkeit von OPAL und JADE

gleiches Konzept, aber unterschiedl. Größe

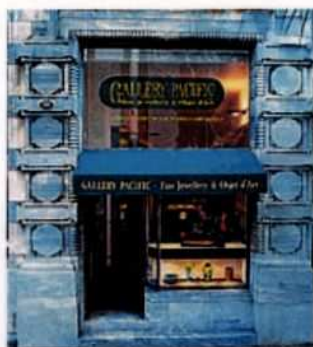
	Parameter		JADE	OPAL
Dimensions	overall length		8 m	12 m
	overall height		7 m	12 m
Tracking system	dimension	length	2.4 m	4 m
		outer radius	0.8 m	1.85 m
	transv. momentum resolution $\sigma(p_t)/p_t$	A_t	0.04	0.02
		B_t	0.018	0.0015
	spatial resolution	$r - \phi$	180 μm (110 μm)	135 μm
		z	1.6 cm	100—350 μm
	double hit resolution		7.5 mm (2 mm)	2.5 mm
	gas composition argon/methane/isobutane		88.7%/8.5%/2.8%	88%/9.4%/2.6%
	gas pressure		4 bar	4 bar
	max. no. of hits reachable in		48	159
	at least 8 hits reachable in		$0.83 \cdot 4\pi$	$0.73 \cdot 4\pi$
magnetic field		0.48 T	0.435 T	
Electromagnetic calorimetry	energy resolution $\sigma(E)/E$	A_c	0.015	0.002
		B_c	0.04	0.063
	solid angle coverage		90%	98%
	angular resolution		7 mrad	2 mrad
	barrel	radial extent	1—1.4 m	2.5—2.8 m
		length	3.6 m	7 m
		polar angle covered	32°—148°	36°—144°
		radiation depth	12.5 X_0 (15.7 X_0)	24.6 X_0
	granularity		8.5 $\times 10 \text{ cm}^2$	10 $\times 10 \text{ cm}^2$
	endcap	outer radius	0.9 m	1.8 m
polar angle covered		11°—32°/148°—169°	11°—36°/144°—169°	
radiation depth		9.6 X_0	22 X_0	
granularity		14 $\times 14 \text{ cm}^2$	9 $\times 9 \text{ cm}^2$	



GALLERY PACIFIC

ONE OF A KIND.

Our discovery can be yours



Reward yourself and visit us first, the Gallery Pacific in the centre of Auckland. New Zealand's finest selection of Opals, fine traditional Maori Carvings, Black Pearls and Jade. Open Monday to Sunday. Tax Free to International travellers.

105 QUEEN STREET, AUCKLAND, NEW ZEALAND. PHONE & FAX 09 308 9231.

あなた御自身の為にまずお訪ね下さい。

月曜日から土曜日まで営業。

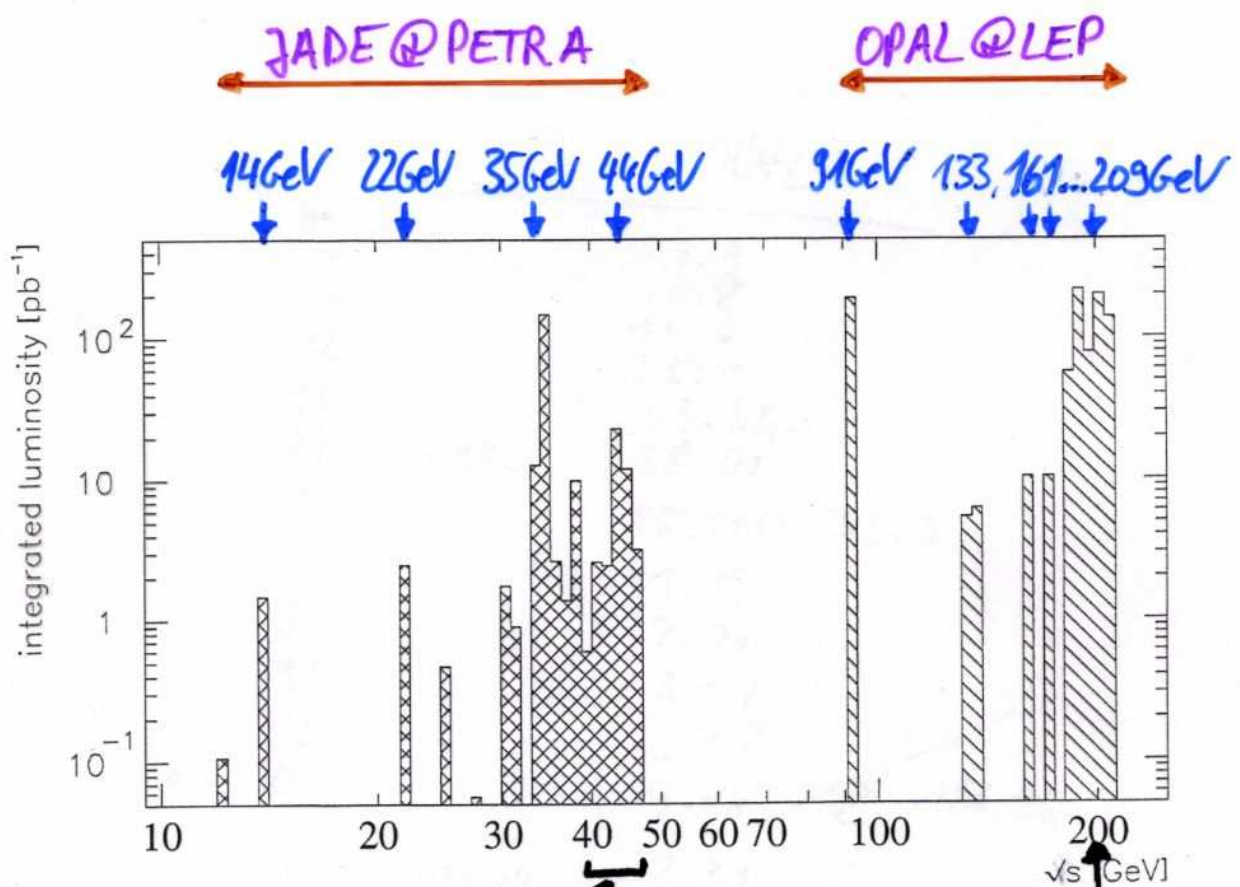
オークランド中心にあるギャラリーパシフィックへ。

免税価格でお求め頂けます。

日本人スタッフが、お待ちしております。

The World of Opal and Jade

Integrierte Luminosität



Energiescan für top-Quarksuche

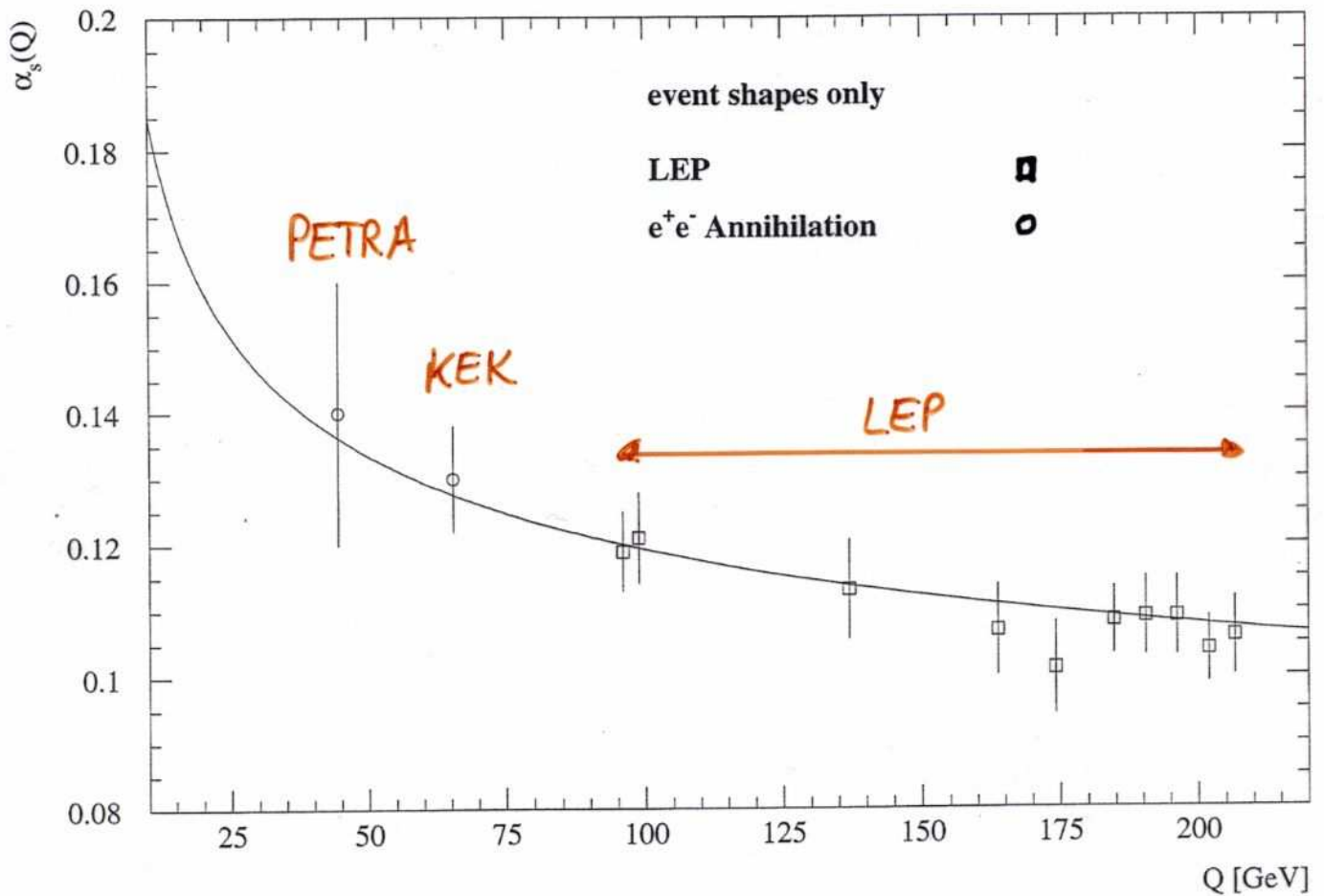
höchste Energie für Higgs- und SUSY-Suche + ...

Warum Reanalyse d. JADE-Daten?

- Elektroschwaches Standard Modell ?
→ Daten "ausgequetscht"
- Starke Wechselwirkung \leftrightarrow QCD ?
→ Fortschritte der Theorie
seit dem Start von LEP !
→ neue, aussagekräftigere Tests der QCD
bei PETRA-Energien !

Reanalyse-Team-Mitglieder zw. 1996 und heute:
S. Bethke, O.B., M. Blumenstengel, S. Kluth,
P.A. Morilla Fernández, C. Pahl, P. Pfeifenschneider,
J.E. Olsson, J. Schieck

LEP & KEK & PETRA zum Laufen von α_s



$\Rightarrow \alpha_s$ @ PETRA energies important
for details of running

Aber: Geht's heute genauer als zu PETRA-Zeiten?

Fortschritte der QCD seit PETRA

- Neue Observable

Jet broadening

Durham/Cambridge Jetfinde-Algorithmen

....

- Summierung große logarithmischer Terme für verschiedene Observable

→ bessere Beschreibung v. Regionen, in denen



große Beiträge liefern

- Neue Ansätze zur Hadronisierung
z.B. Energiepotenz-Korrekturen ($\sim \frac{1}{\sqrt{s}}$)

QCD - Vorhersagen

- **NLO** für Event shape-Observable \mathcal{F}

kumulativer Wirkungsquerschnitt $R(\mathcal{F})$:

$$R(\mathcal{F}) = 1 + A(\mathcal{F}) \cdot \alpha_s + B(\mathcal{F}) \cdot \alpha_s^2$$

- **NLLA** mit log. Näherung für $L \equiv \ln 1/\mathcal{F}$

$$R(\mathcal{F}) = C(\alpha_s) \cdot \exp[G(\alpha_s, L)] + \text{Rest}$$

mit Koeff.-fkt $C(\alpha_s) = 1 + C_1 \cdot \alpha_s + C_2 \cdot \alpha_s^2 + \dots$




	leading logs.	next-to-leading logs.	subleading logs.	non-log terms	
$G(\alpha_s, L) =$	$G_{12} \alpha_s L^2$	$+ G_{11} \alpha_s L$		$+ \alpha_s \mathcal{O}(1)$	$= \mathcal{O}(\alpha_s)$
	$+ G_{23} \alpha_s^2 L^3$	$+ G_{22} \alpha_s^2 L^2$	$+ G_{21} \alpha_s^2 L$	$+ \alpha_s^2 \mathcal{O}(1)$	$= \mathcal{O}(\alpha_s^2)$
	$+ G_{34} \alpha_s^3 L^4$	$+ G_{33} \alpha_s^3 L^3$	$+ G_{32} \alpha_s^3 L^2$	$+ \dots$	$= \mathcal{O}(\alpha_s^3)$
	$+ \dots$	$+ \dots$	$+ \dots$	$+ \dots$	\vdots
	$L \cdot g_1(\alpha_s L)$	$+ g_2(\alpha_s L)$	$+ \dots$	$+ \dots$	

\Rightarrow **Kombination von NLO + NLLA!**

z.B. durch Abstimmung der $\ln(R)$ -Ausdrücke
($\ln R$ -matching)

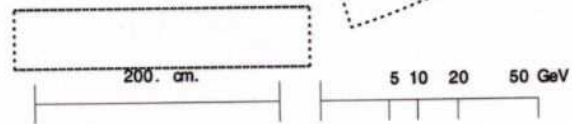
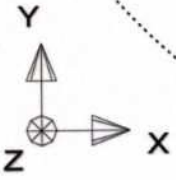
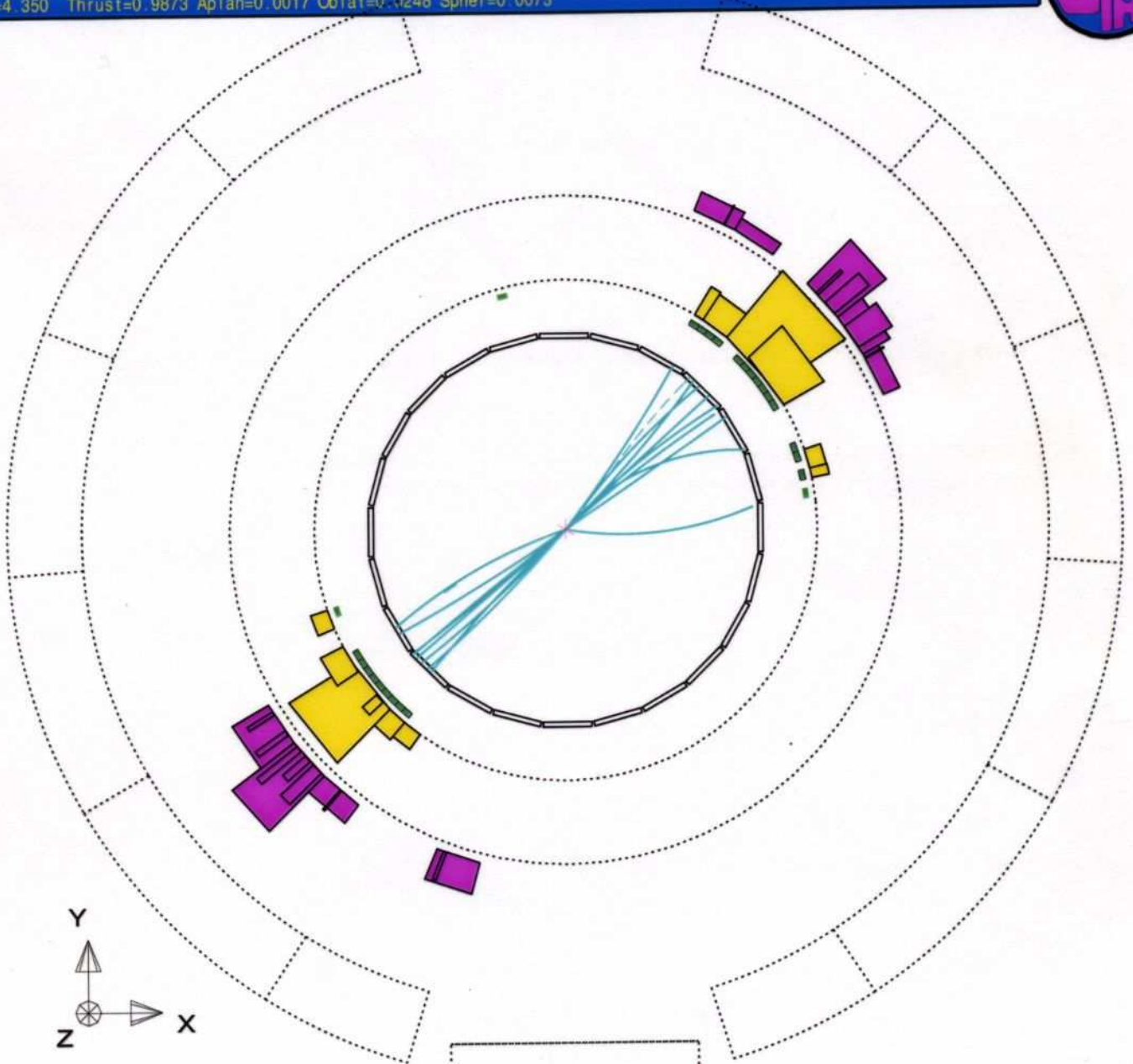
Observable für d_S -Bestimmung

- häufig genutzt: "Event shape"-Observable
(messen Verteilung d. Teilchen, Impulse, Energien im Endzustand von $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$)

F				
Thrust	max. Longitudinal-Impuls	1	$\geq \frac{2}{3}$	$\geq \frac{1}{2}$
C-Parameter	$\langle \sin^2 \theta_{ij} \rangle$, $\theta_{ij} = \angle(\text{Teilchen})$	0	$\leq \frac{3}{4}$	≤ 1
Jetmasse (je Hemisphäre)	$\sqrt{(\sum E_i)^2 - (\sum \vec{p}_i)^2} / \sqrt{s}$	0	$\leq \frac{1}{3}$	$\leq \frac{1}{2}$
Jet Broadening (je Hemisphäre)	$\langle \frac{p_i}{2\sqrt{s}} \cdot \sin \angle(\vec{p}_i, \vec{\text{Thrust}}) \rangle$	0	$\leq \frac{1}{2\sqrt{3}}$	$\leq \frac{1}{2\sqrt{2}}$
Jetraten	$\frac{\#(\text{3-jet})}{\#(\text{2-jet}) + \#(\text{3-jet}) + \dots}$	2-Jet	3-Jet	n-Jet
⋮				

typ.: Event shapes $\sim d_S$
 n-Jetraten $\sim d_S^{n-2}$

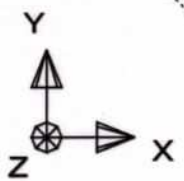
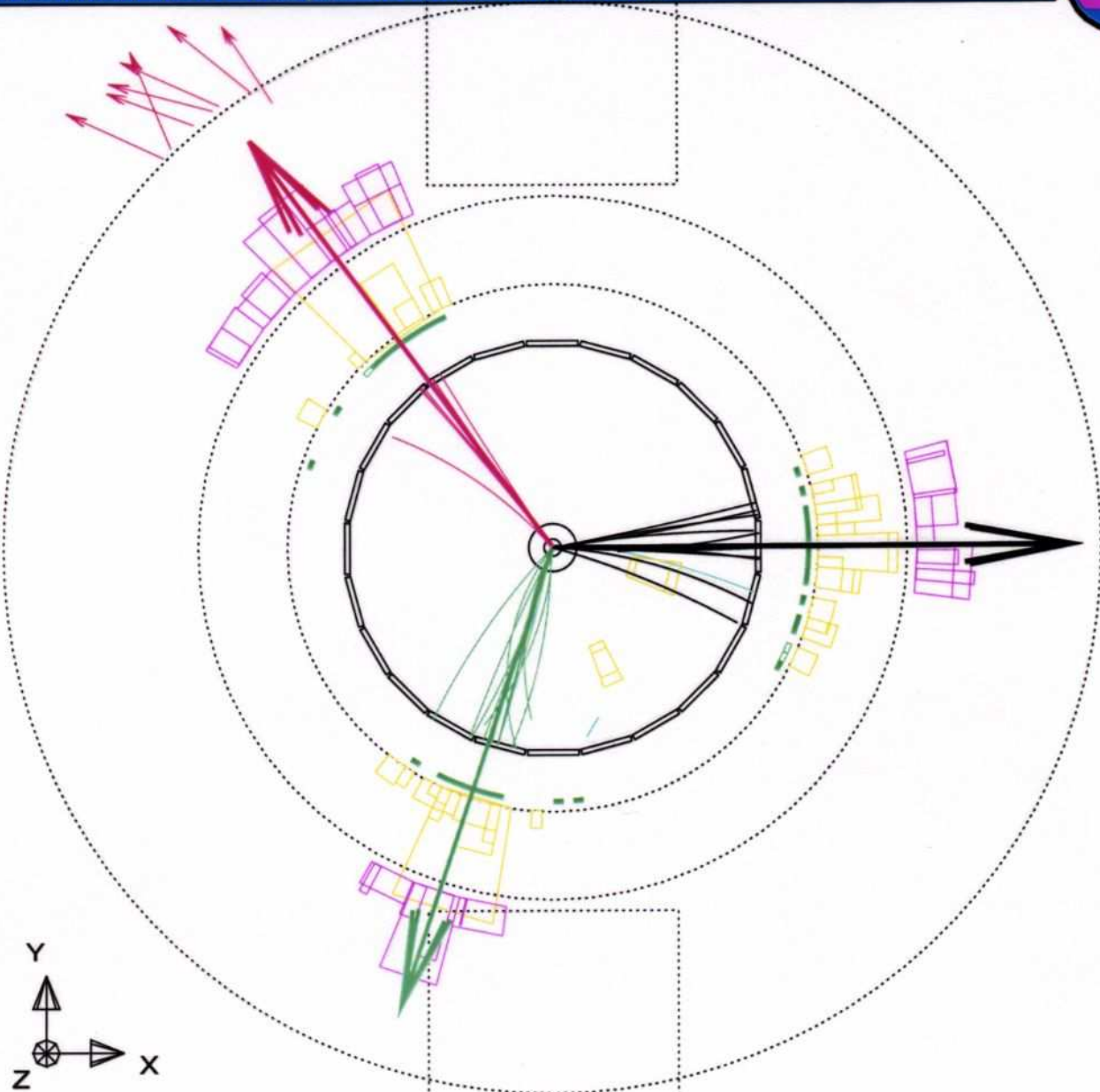
Run: event 4093: 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Surp= 73.3) Ecal(N= 25 SurE= 32.6) Hcal(N=22 SurE= 22.6)
 Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.60) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SurE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

$$\sqrt{s} = 205 \text{ GeV}$$

Run: event 13998: 3409 Date 000628 Time 095142 Ctrk(N= 39 Sump=119.9) Ecal(N= 54 SumE=104.9) Hcal(N=27 SumE= 43.6)
 Ebeam 102.70 Evis 190.2 Emiss 15.2 Vtx (-.03, .04, 2.45) Muon(N= 3) Sec Vtx(N= 4) Fdet(N= 0 SumE= .0)
 Bz=4.028 Bunchlet 1/1 Thrust= .7139 Aplan= .0341 Oblat= .3763 Spher= .6405

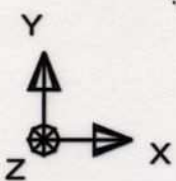
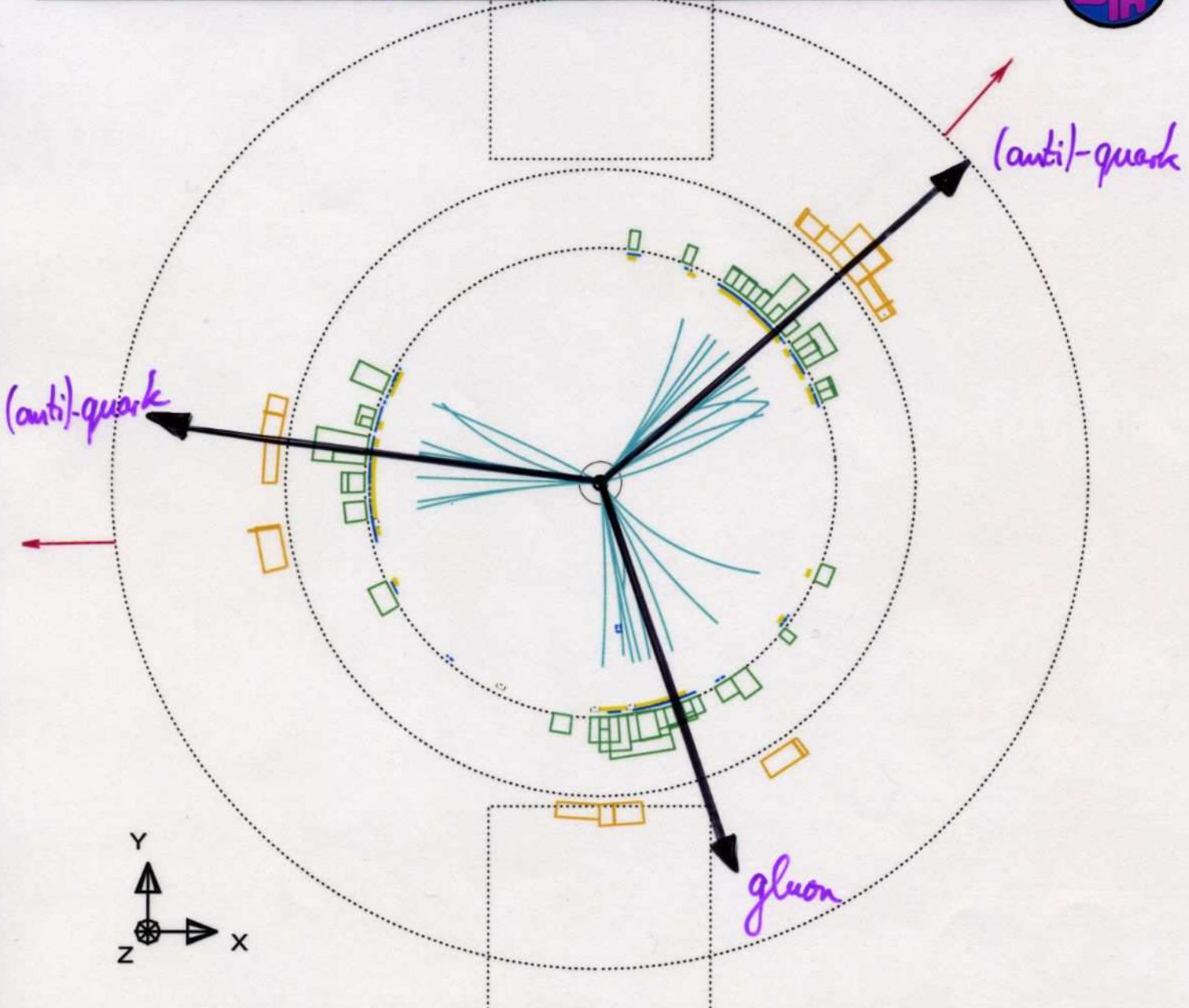


200. cm.

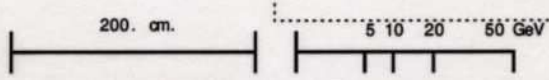
5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (.0000, .0000, .0000)

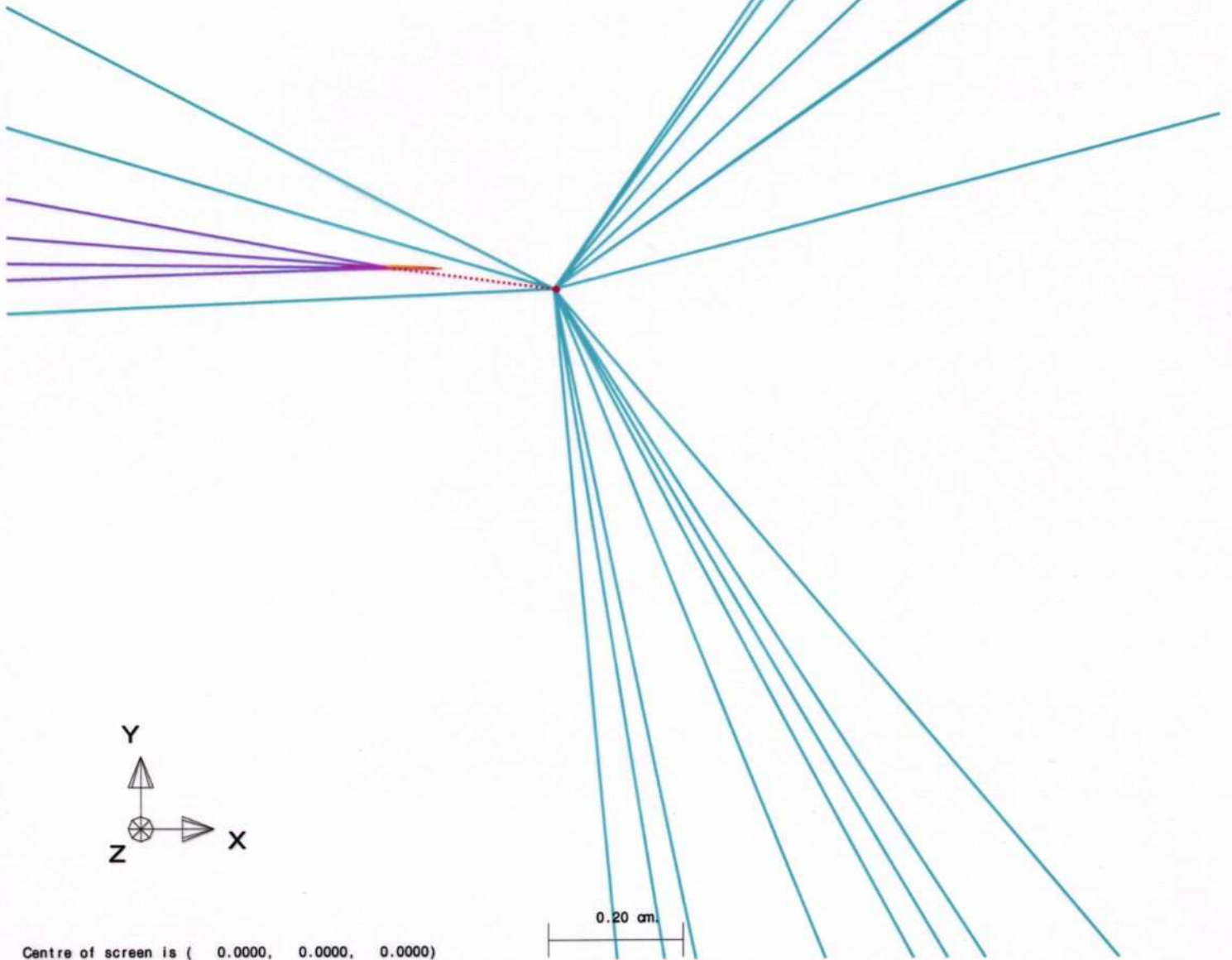
Run: event 2513: 61702 Date 910910 Time 85656 Ctrk(N= 37 Sump= 65.7) Ecal(N= 55 SumE= 44.8) Hcal(N=19 SumE= 8.6)
 Ebeam 45.613 Evis 90.2 Emiss 1.1 Vtx (-0.09, 0.10, -0.22) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.6788 Aplan=0.0381 Oblat=0.4248 Spher=0.6273



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

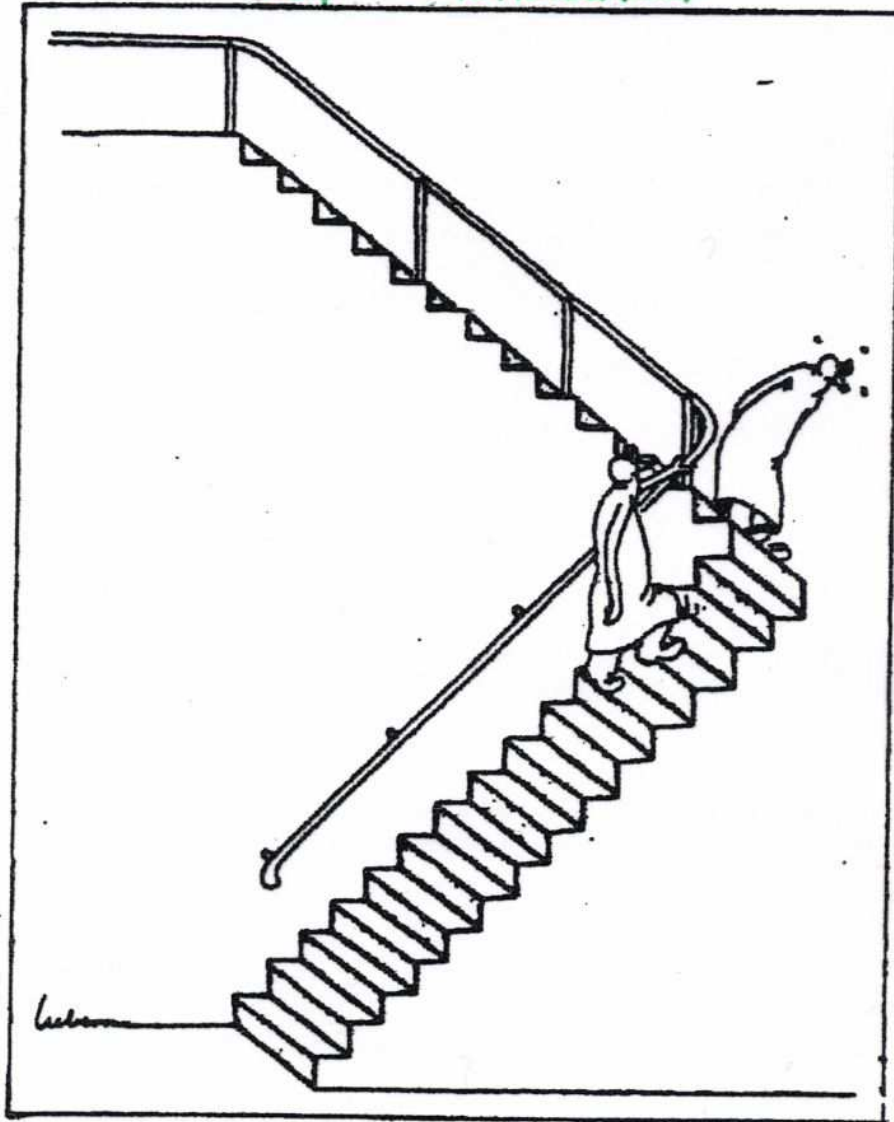


Run event 2513: 61702 Date 910910 Time 85656 Ctrk(N= 37 Sump= 65.7) Ecal(N= 55 SumE= 44.8) Hcal(N=19 SumE= 8.6)
Ebeam 45.613 Evis 90.2 Emiss 1.1 Vtx (-0.09, 0.10, -0.22) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 3) Pdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.6788 Aplan=0.0381 Oblat=0.4248 Spher=0.6273



Hadronisierung

Theorie: u, d, s, \dots \rightarrow q, \bar{q}, g ... Partonschauer
Aufsummierung
von logs.;
...

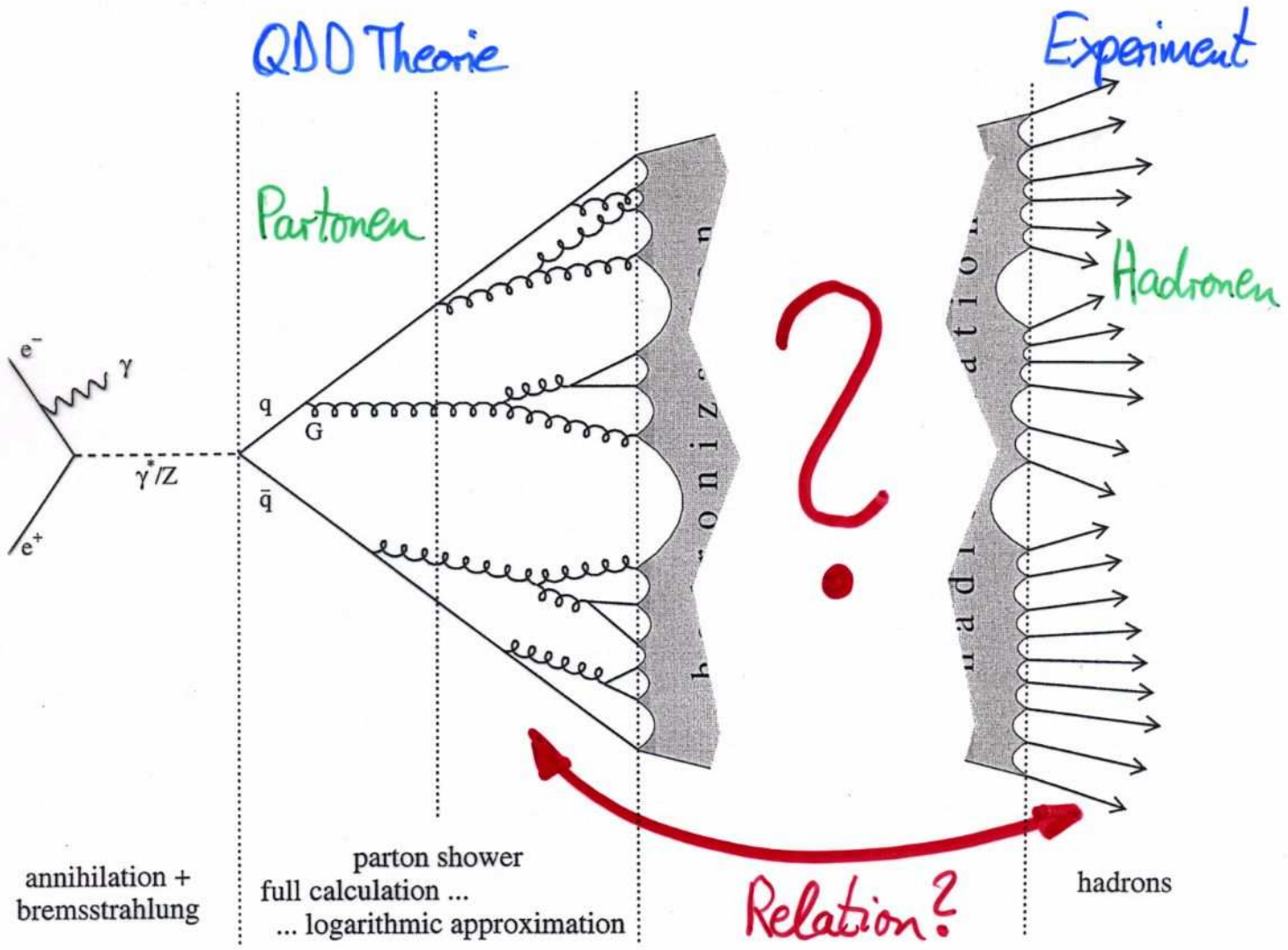


?

Experiment: 
Hadronen ... Rekonstr.
v. Zerfällen
und v. Jets

Hürden zw. Experiment & Theorie

- Hadronisierung



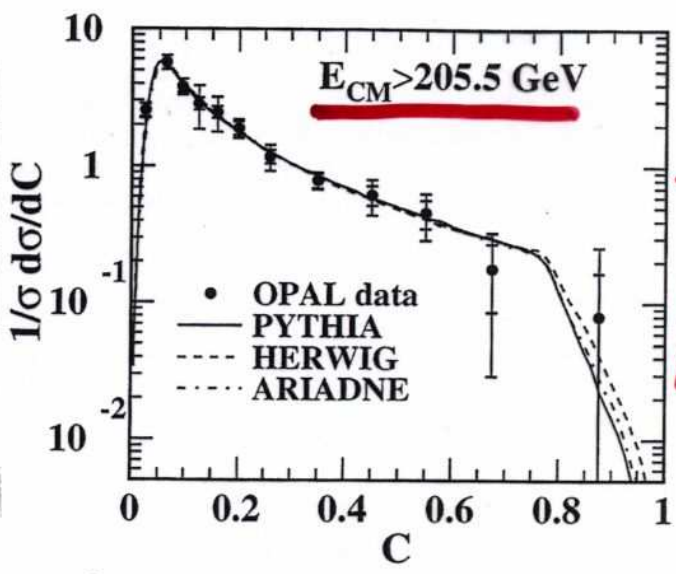
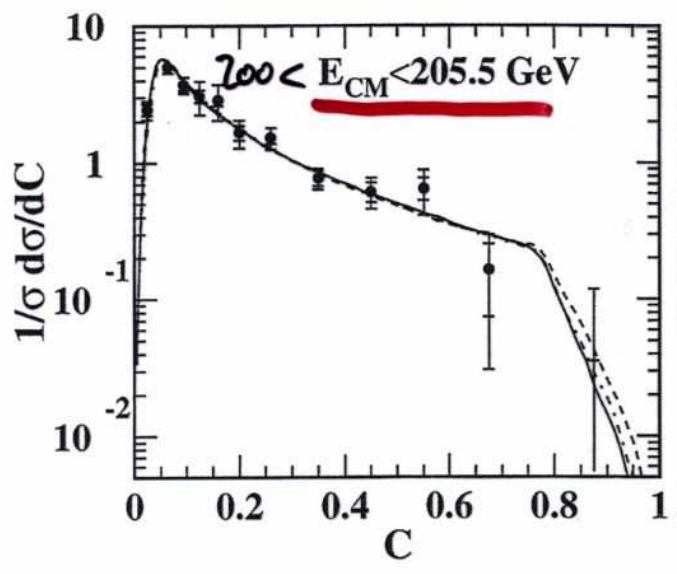
- phänomenolog. Modelle erforderlich
- + Parameterjustage
- + Untersuchung d. Hadronisierung

Experimentelle Behandlung d. Hadronisierung

Hadronisierung beinhaltet kleine Energieskalen

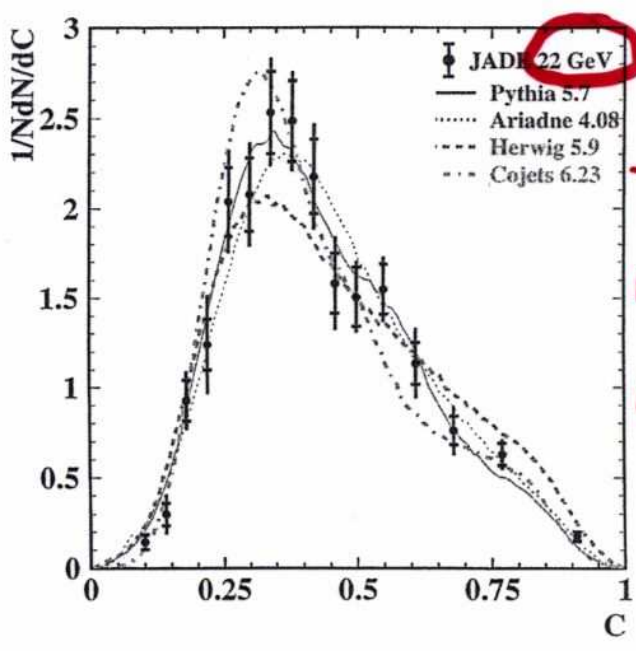
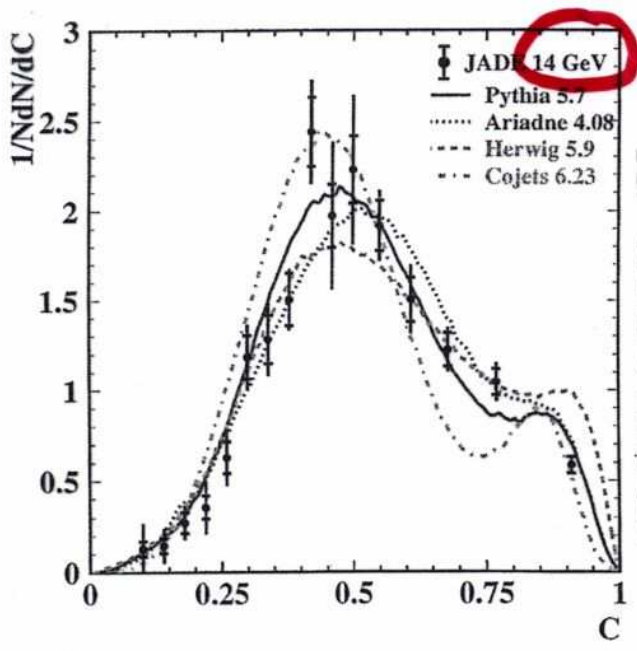
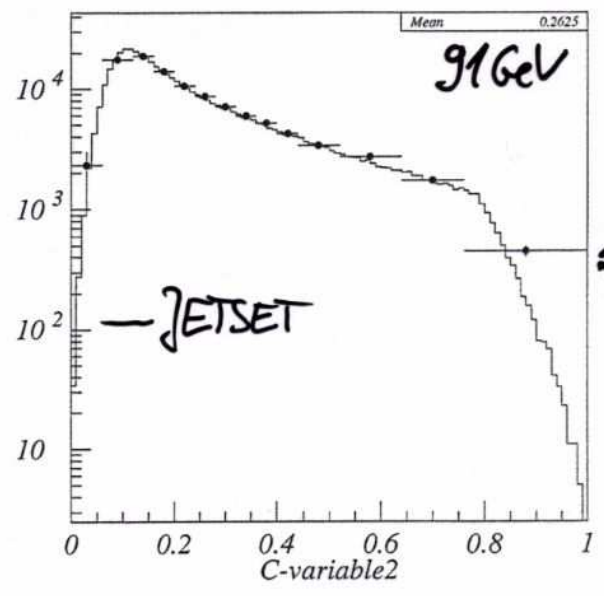
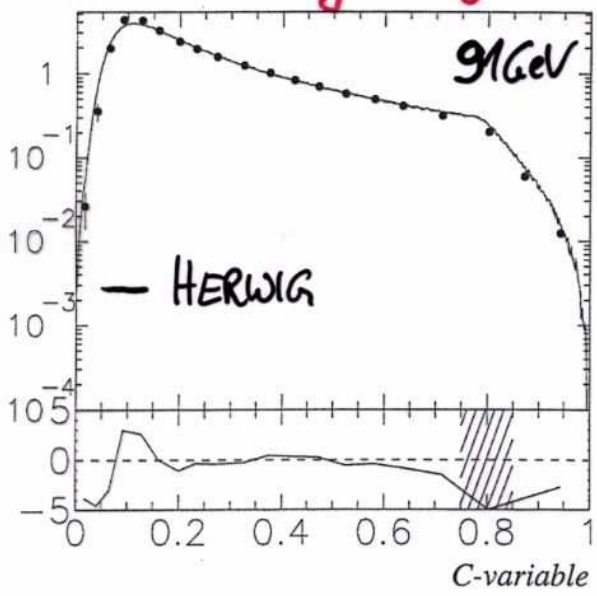
- nicht perturbativ berechenbar
- benötigt phänomenolog. Modelle
(JETSET | PYTHIA | HERWIG | ARIADNE | COJETS | ...)
- Modellparameter ?
aus Justage mittels LEP-Daten von $\sqrt{s} = 91 \text{ GeV}$
- erhebliche Unsicherheiten für α_s -Bestimmung

Test der phänomenolog. Hadronisierungsmodelle



Test zu höheren Energien ✓

▶ Parameterjustage mit Daten bei $\sqrt{s} = 91 \text{ GeV}$



Test zu niedrigeren Energien ✓

Kein Weg führt daran vorbei ... Renormierung



Alright Ruth, I about got this one renormalized

COPYRIGHT JFCARTIER 1984

(Nambu: "Quarks")

Renormierung:

- für endliche Resultate erforderlich ~~renormieren~~
- führt eine Energieskala μ ein $\leadsto \alpha_s(\mu^2)$
- keine offensichtliche Relation $\mu^2 \leftrightarrow (\sqrt{s})^2 \equiv Q^2$

$$\rightarrow \mu = x_\mu \cdot Q$$

$$\text{und } x_\mu = ? \quad \left(\begin{array}{l} \text{Renormierungs-} \\ \text{skalenfaktor } x_\mu \end{array} \right)$$

übliche Wahl $x_\mu = 0.5 \dots 2.0$

\Rightarrow Unsicherheit durch Wahl von x_μ

Weitere (praktische) Hürden

Rettung & Reaktivierung der JADE-Daten

- "Last minute" (P. Novilla Fernández, P. Pfeifenschneider, J. Olsson, S. Bethke und andere)

+ Auffinden der alten JADE-Tapes

(Suche bei DESY, Heidelberg, Berkeley)

+ dazu passende JADE-Detektorsimulation

(teilweise schon JETSET 6.3, aber nur f. 35 & 44 GeV)

+ Auffinden d. zugehörigen Luminositäts-Infos

+ Aneignen der Kenntnisse ehemaliger "Jadistas"

+ Reproduktion veröffentlichter JADE-Ergebnisse

⇒ "state of the art" α_3 -Bestimmung

Weitere (praktische) Hürden

z.B.: **Luminositäts-Infos**

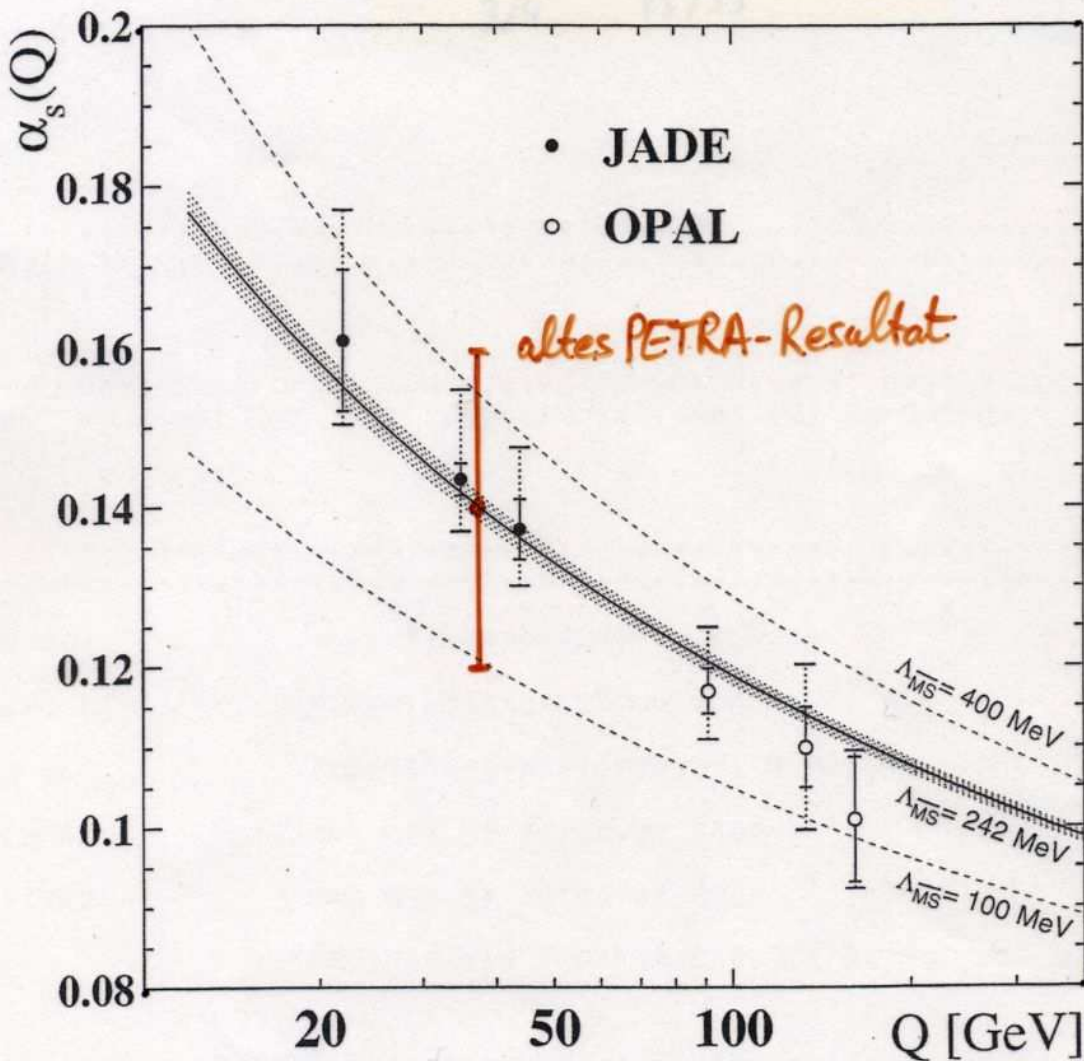
- Original-Magnetbänder nicht auffindbar
- Ausdruck beim Aufräumen in Papierstapel entdeckt
- von Sekretärin in Computer übertragen ...

RUNS		BEAM	BARREL	LUMINOSITY
13856	13864	20.840	0.474029E+02 +-	0.779300E+01
13865	13872	20.855	0.538850E+02 +-	0.831464E+01
13873	13885	20.870	0.719484E+02 +-	0.961450E+01
13886	13895	20.885	0.694769E+02 +-	0.945461E+01
13896	13906	20.900	0.579792E+02 +-	0.864303E+01
13907	13919	20.915	0.516098E+02 +-	0.816022E+01
13920	13931	20.930	0.555588E+02 +-	0.847264E+01
13932	13941	20.945	0.465800E+02 +-	0.776333E+01
13942	13953	20.960	0.285056E+02 +-	0.607743E+01
13954	13963	20.975	0.609841E+02 +-	0.889545E+01
13964	13973	20.990	0.519744E+02 +-	0.821787E+01
13974	13980	21.005	0.442404E+02 +-	0.758717E+01
13981	13989	21.020	0.508176E+02 +-	0.813734E+01
13990	13998	21.035	0.678519E+02 +-	0.940937E+01
13999	14009	21.050	0.770938E+02 +-	0.100368E+02
14011	14021	21.065	0.667339E+02 +-	0.934461E+01
14022	14031	21.080	0.497930E+02 +-	0.807749E+01
14032	14043	21.095	0.524870E+02 +-	0.829892E+01
14044	14054	21.110	0.499324E+02 +-	0.810010E+01
14055	14065	21.125	0.667339E+02 +-	0.777275E+01

•
•
•
weitere ~ 10 Seiten

JADE & OPAL zu α_s

- vergleichbare Detektoren
- gleiche Event shape-Observable (T, B_w, B_T, M_H, Y_{23})
- gleiche Theorievorhersagen ($\ln R$ -matched)
- vergleichbares Studium syst. Unsicherheiten



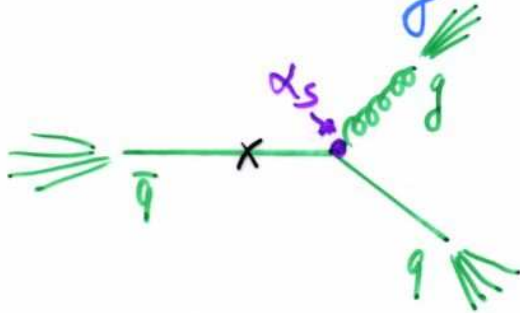
P.A. Morilla Fernández et al., EPJC 1 (1998) 461
and JADE Collab.

⇒ α_s läuft!

NB: Gesamtfehler durch Renormierungsskala dominiert

Weitere kombinierte JADE & OPAL-Studien zu Jets

- Sensitivität auf α_s in



- Algorithmus zur Definition der Jets erforderlich
- # Jets hängt von Auflösungsparameter γ_{cut} ab
- Studium der

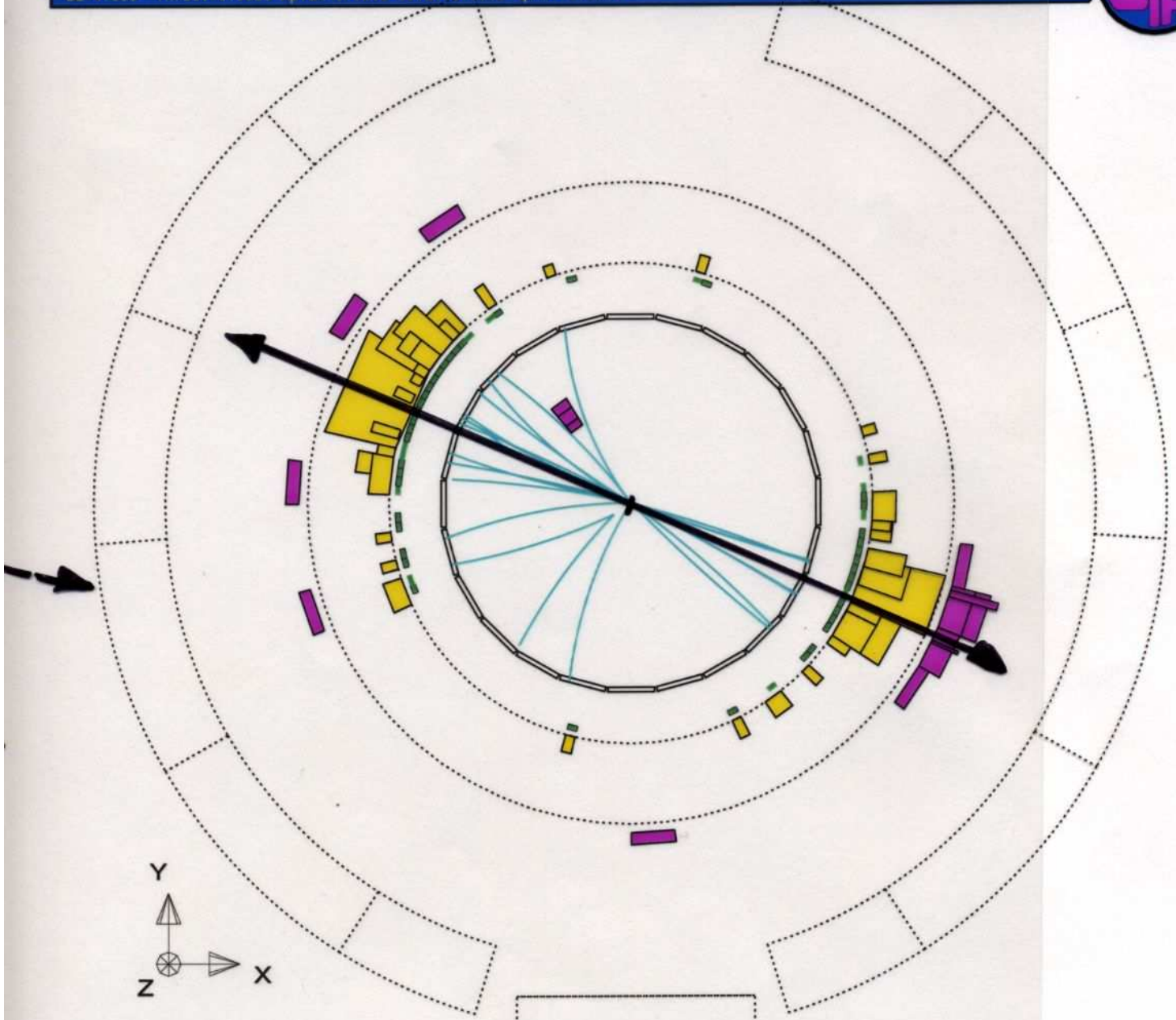
▷ **differentiellen Jetrate:**
(Durham & Cambridge Algorithmen)

$$D_2(\gamma_{cut}) \hat{=} \begin{cases} \text{Änderung} \\ \text{der \#2-Jets} \\ \text{mit } \gamma_{cut} \end{cases} \\ = \mathcal{A}_D(\gamma_{cut}) \cdot d\alpha_s + \dots$$

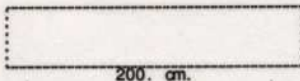
▷ **mittleren Jetanzahl:**
(Durham & Cambridge Algorithmen)

$$N(\gamma_{cut}) = 2 + \mathcal{A}_N(\gamma_{cut}) \cdot d\alpha_s + \dots$$

Run:event 2419: 67143 Date 910723 Time 112832 Ctrk(N= 26 Sump= 47.4) Ecal(N= 50 SumE= 73.1) Hcal(N=13 SumE= 7.6)
Ebeam 45.623 Evis 89.3 Emiss 2.0 Vtx (-0.10, 0.16, -0.10) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9320 Aplan=0.0202 Oblat=0.0532 Spher=0.0554

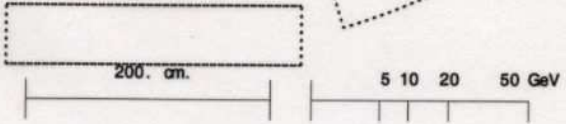
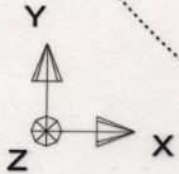
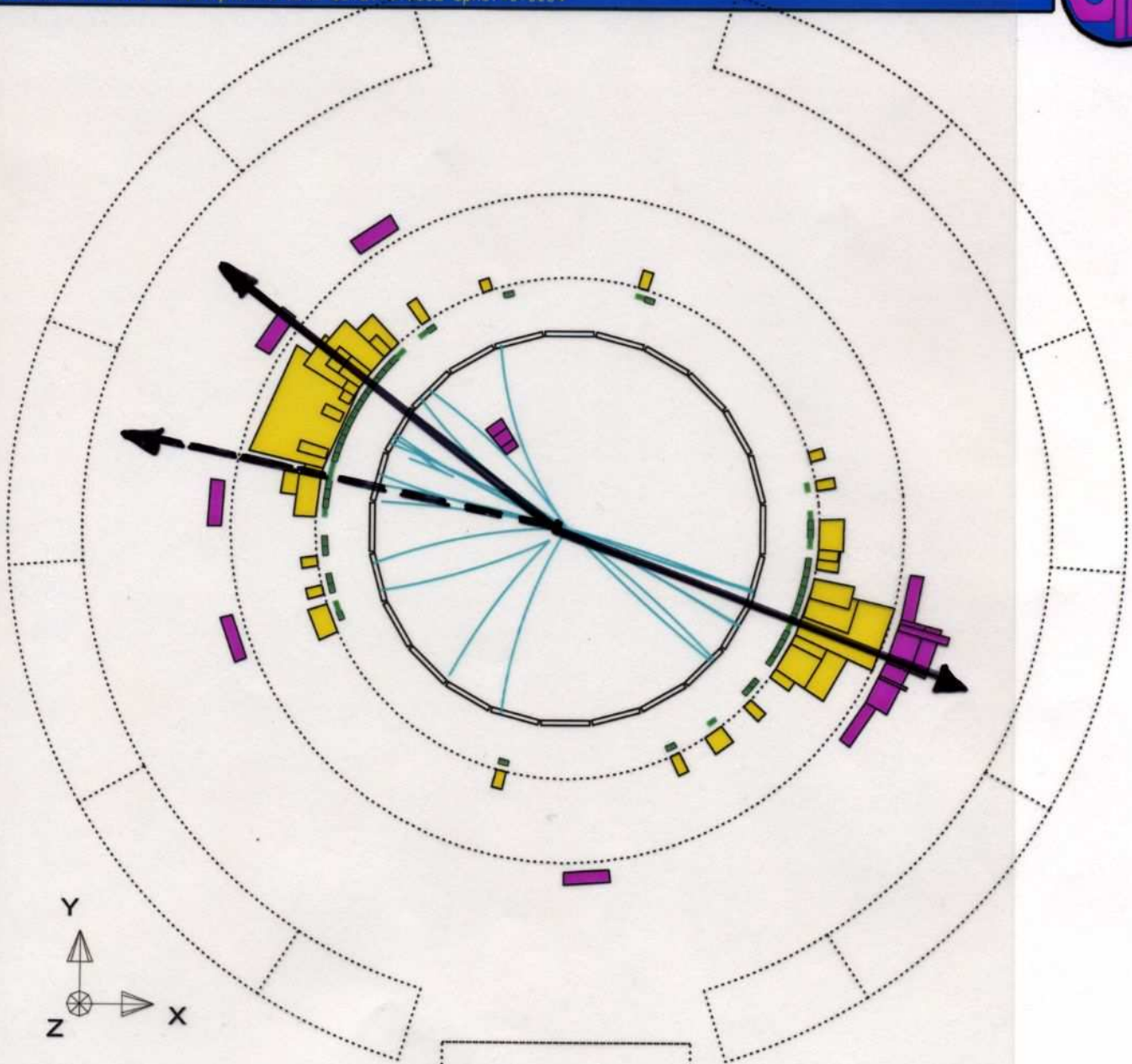


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



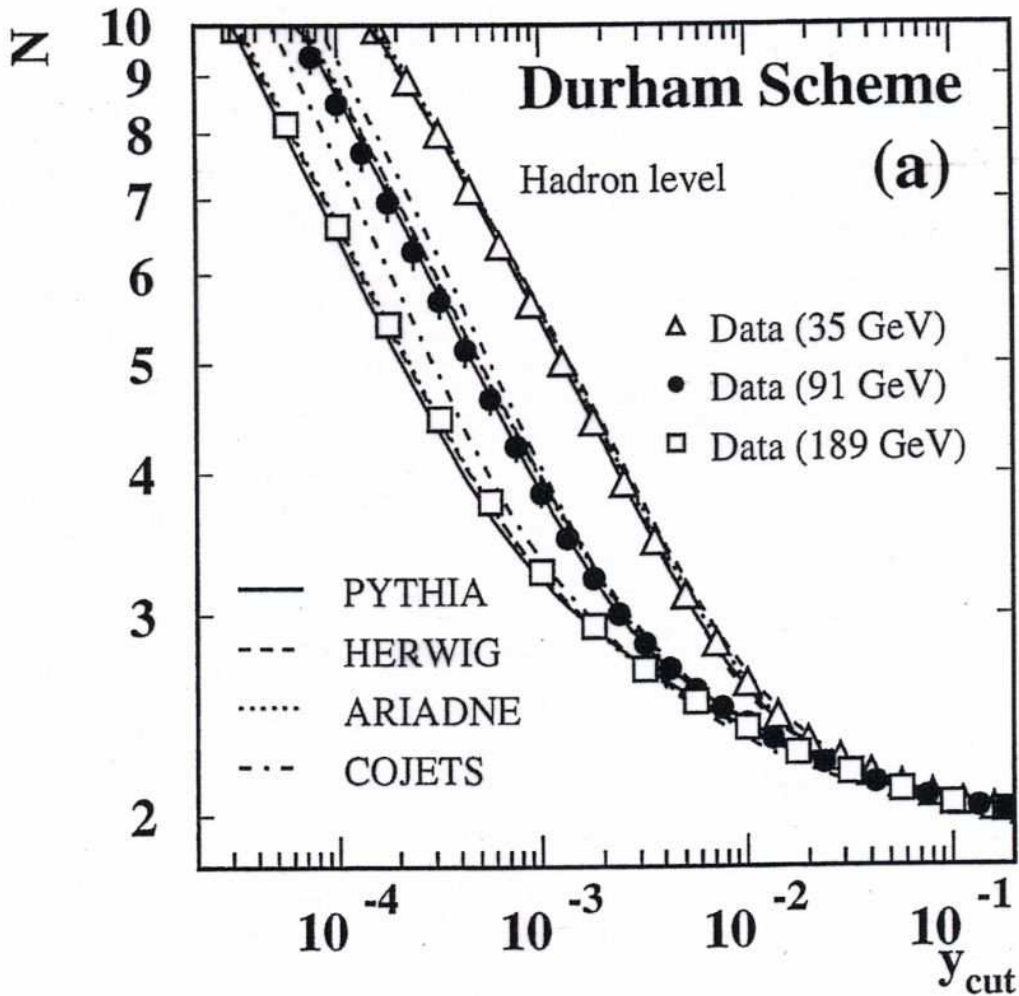
5 10 20 50 GeV

Run event 2419: 67143 Date 910723 Time 112832 Ctrk(N= 26 Surp= 47.4) Ecal(N= 50 SumE= 73.1) Hcal(N=13 SumE= 7.6)
 Ebeam 45.623 Evis 89.3 Emiss 2.0 Vtx (-0.10, 0.16, -0.10) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9320 Aplan=0.0202 Oblat=0.9532 Spher=0.0554



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

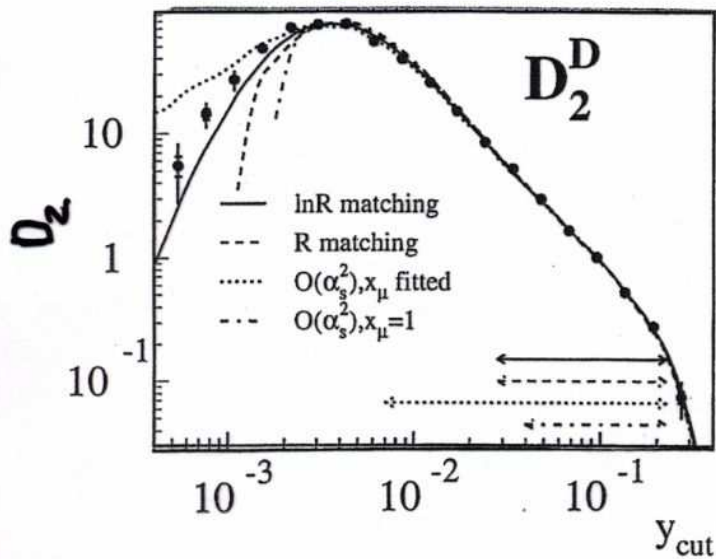
Mittlere Jetanzahl



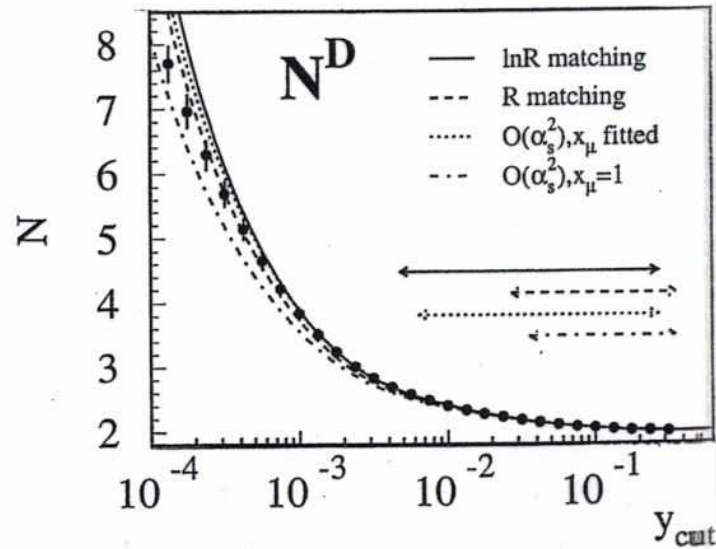
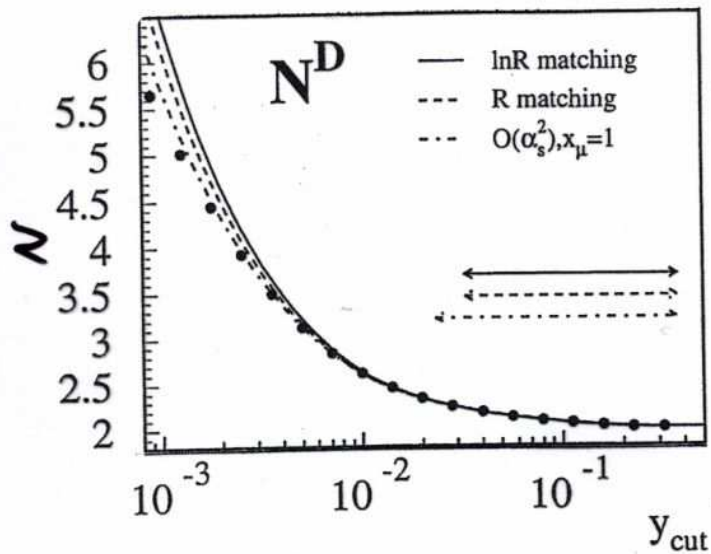
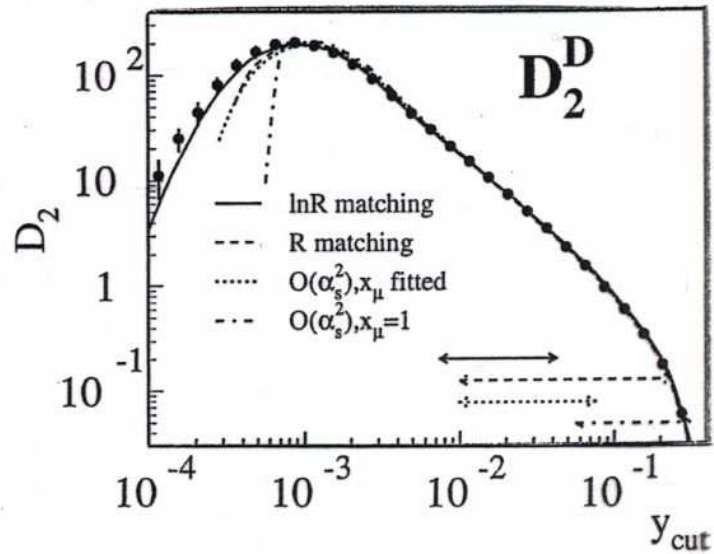
\Rightarrow Skalenabhängigkeit von α_s

Anpassungen für diff. 2-Jetrate u. mittlere Jetanzahl

35 GeV

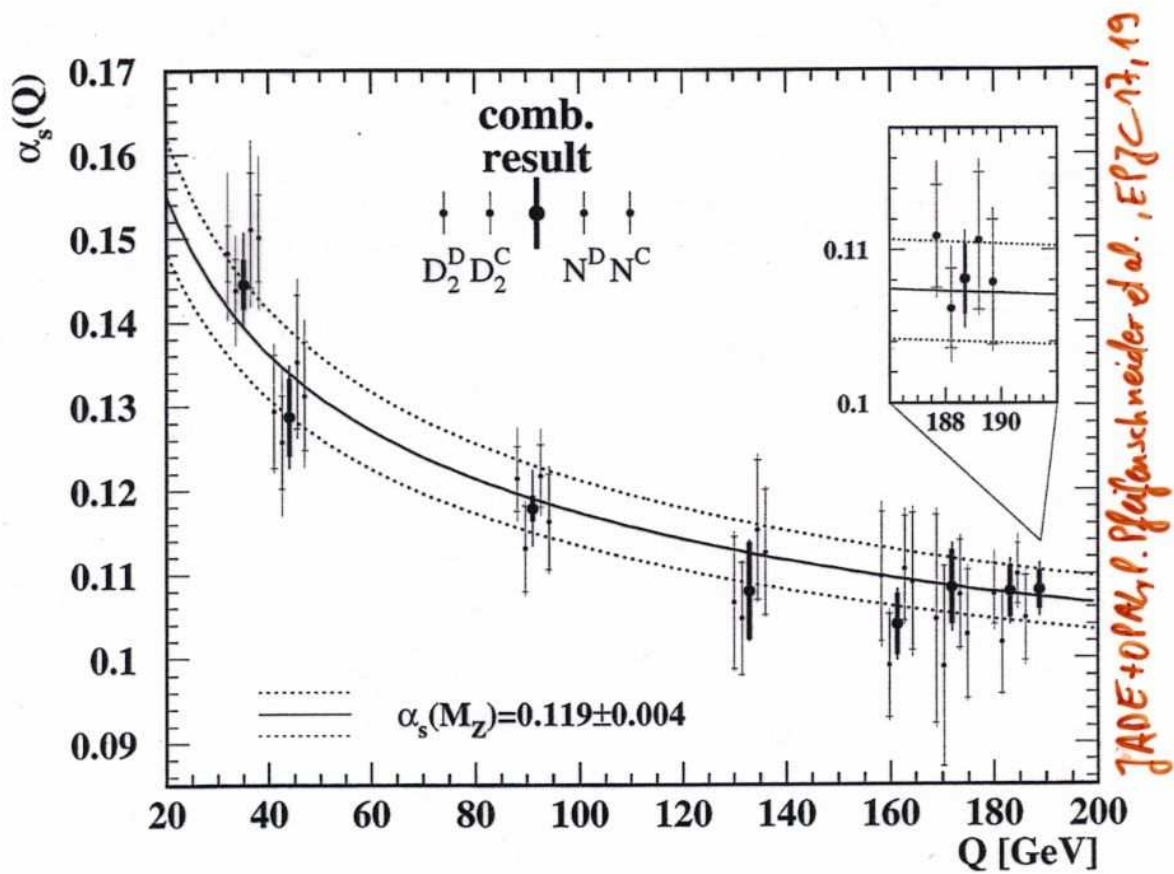


91 GeV



α_s aus D_2 und N

- homogene Analyse d. JADE & OPAL - Daten



⇒ kombiniertes Ergebnis:

$$\alpha_s(M_Z^2) = 0.1187 \pm \begin{matrix} 0.0034 \\ 0.0019 \end{matrix}$$

$$\chi^2/dof = 7.9/7$$

Reaktivierung der JADE-Detektor-Simulation!

einige Komplikationen

- FORTRAN 4 + SHELTRAN + MORTRAN
Programm-Code
- Code sehr spezif. für ehemaligen DESY-Zentralrechner (IBM)
- Variablen * 1, * 2, * 4
- Byte-Ordnung im Wort: 1-2-3-4 vs. 4-3-2-1
- numerische Präzision
- ...

Trotz allem: Es geht!

→ Jetzt: Neubestimmung von $\alpha_s(14 \dots 22 \text{ GeV})$ möglich!

z.B. $\alpha_s(22 \text{ GeV}) = 0.151 \pm 0.015$ (vorläufig)

Monte Carlo

DATE 18/11/99 TIME 23.08.22

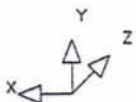
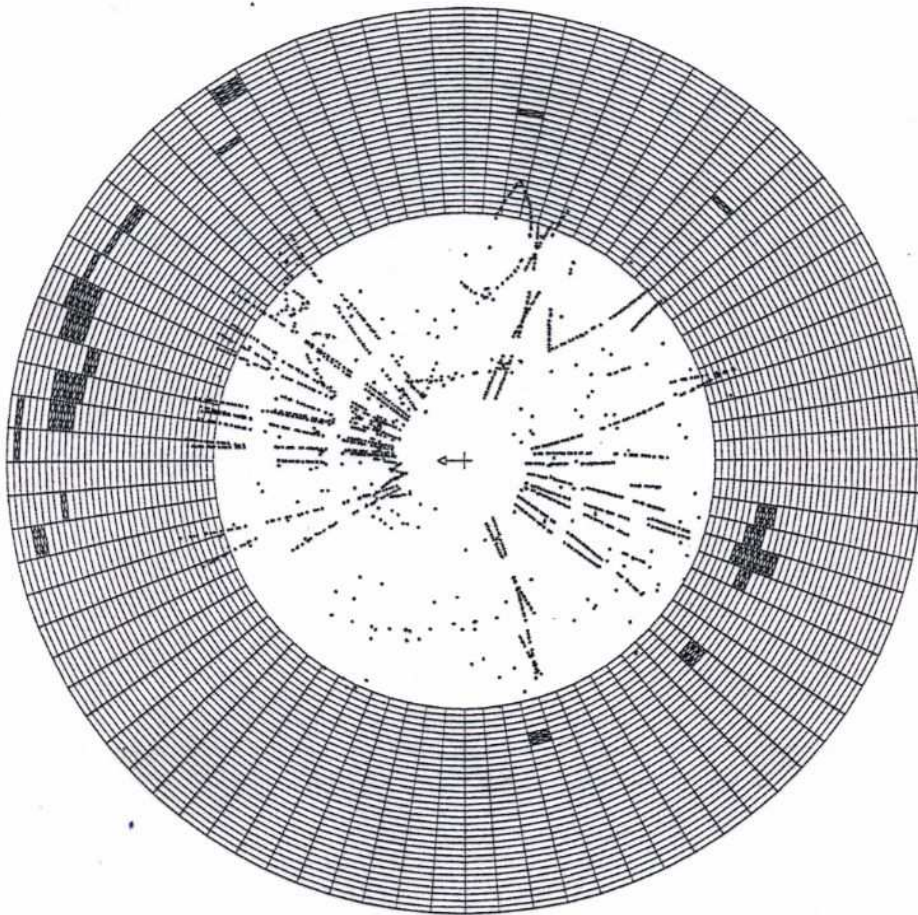
DSN mcjode.bos

BEAM 17.500 GEV FIELD -4.849 KG TALC 0039 DATE 18/11/99 TIME 23.08.22
T1A 0802 T1P 4101 T2C 0089 CAMAC TIME 1. 1. 1 17/ 5/198

MONTE CARLO

R-FI PERSPECTIVE

0 1 1
IDHITS 831
ELGTOT 17559 JADE
MUHITS 0
LGCYL 17235
LGCAPS 0 324
FWCAPS 0 0



QCD bei 14.6eV

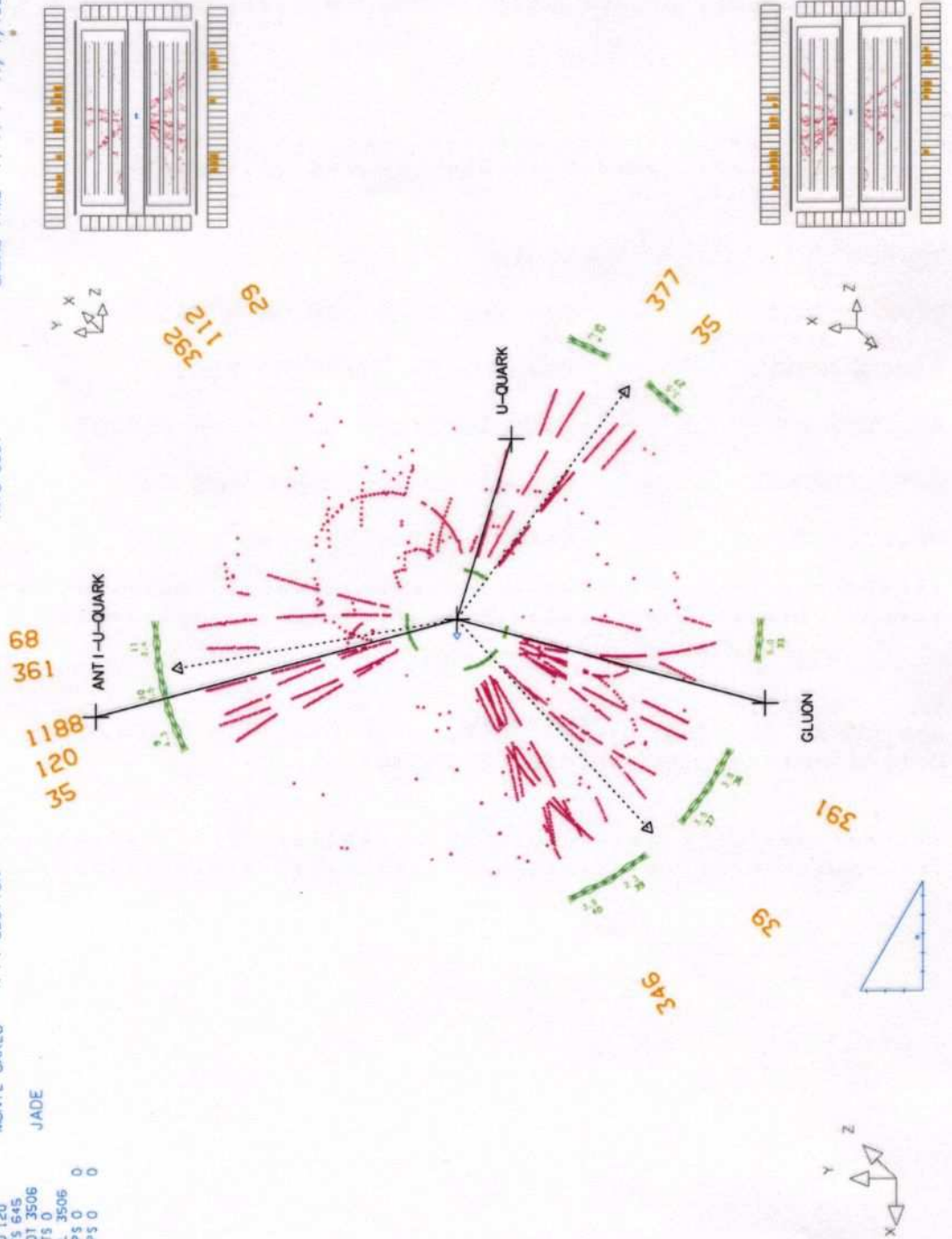
DSN mc14b

0 120 120
 IDHITS 645
 ELCTOT 3506
 MUHITS 0
 LCCYL 3506
 LCCAPS 0
 FWCAPS 0

MONTE CARLO R-F1 SECTION

JADE

BEAM 7.000 GEV FIELD -4.849 KG TALC 0032 DATE 01/11/00 TIME 11.49.22
 TRIG 0001 CAMAC TIME 1. 1. 1 17/ 7/1981



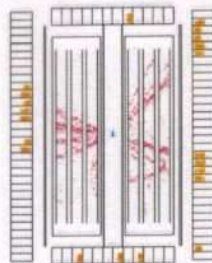
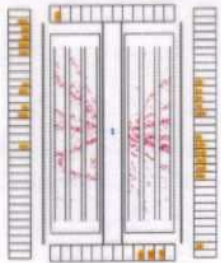
DSN mc14b

0 393 393
IDHITS 891
ELGTOI 4601
MUHITS 0
LGCYL 3765
LGCAPS 682 154
FVCAPS 0 0

MONTE CARLO R-FI SECTION

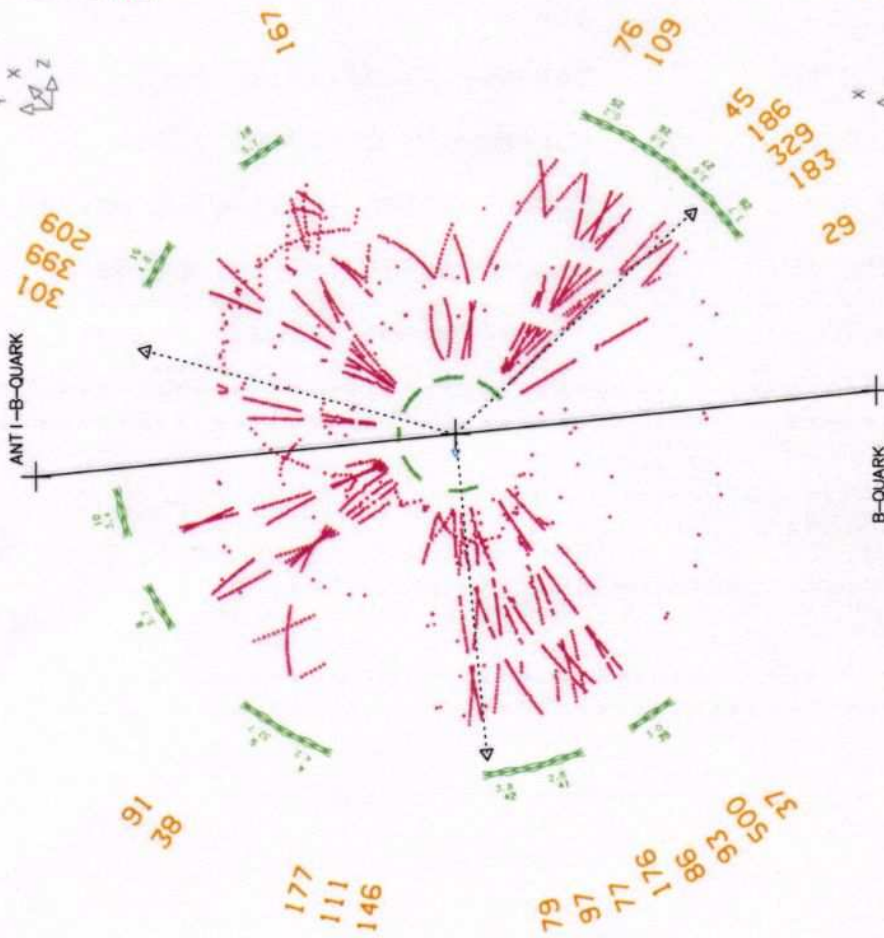
JADE

BEAM 7.000 GEV FIELD -4.849 KG TALC 0039 DATE 01/11/00 TIME 11.44.01
TRIG 0201 CAMAC TIME 1. 1. 1 17/ 7/1981

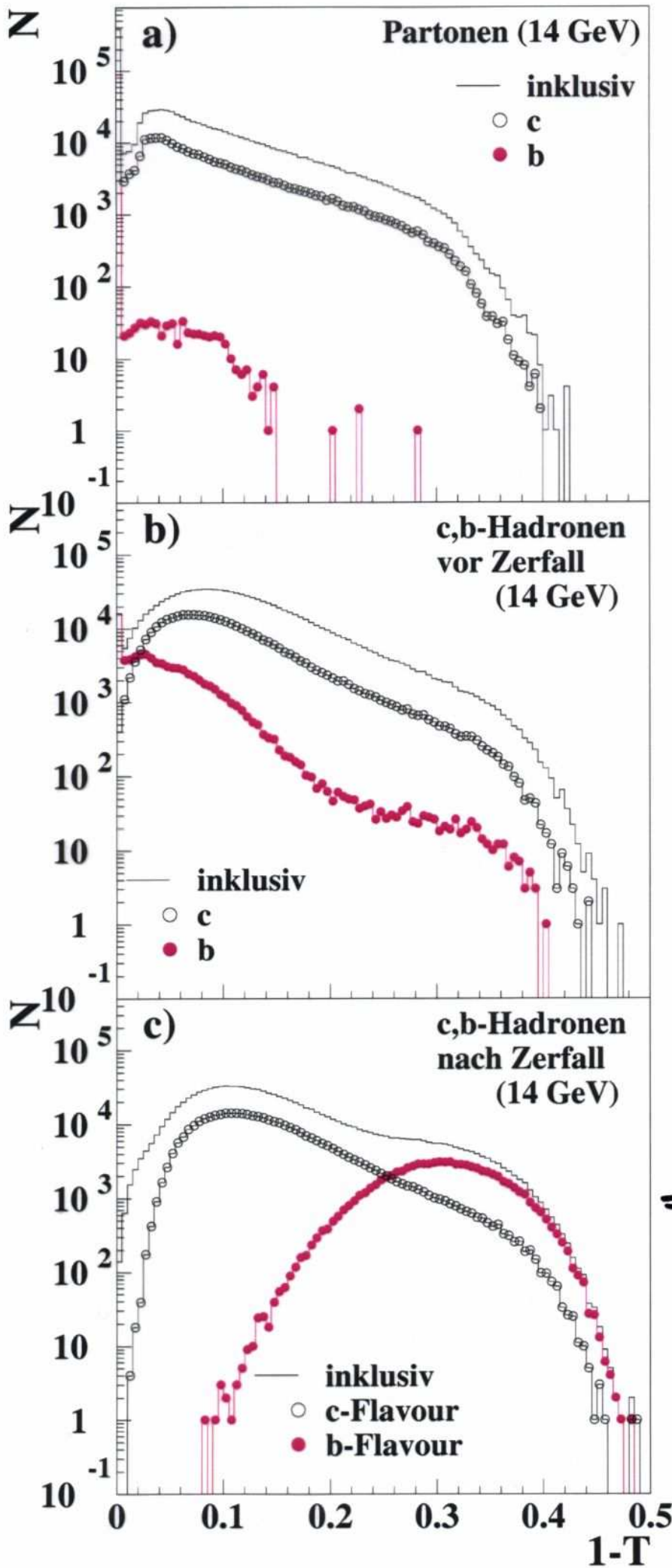


ANTI-B-QUARK

B-QUARK



Schwierigkeiten
der QCD bei 14 GeV

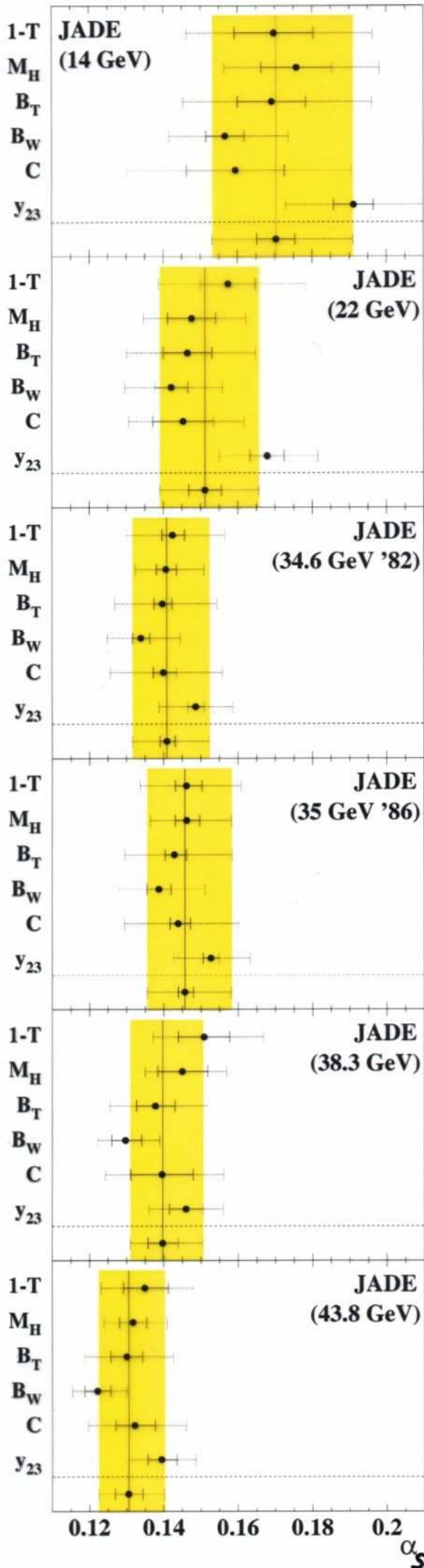


⇒ schwere b-Hadronen
verzerren Verteilungen
→ Behandlung wie
Untergrund

	$1 - T$	M_H	B_T	B_W	C	y_{23}
Fitbereich	0.12-0.32	0.30-0.50	0.16-0.30	0.10-0.20	0.34-0.72	0.010-0.200
$\alpha_S(14.0 \text{ GeV})$	0.1697	0.1758	0.1691	0.1566	0.1594	0.1912
$\chi^2/d.o.f.$	<i>3.6/6</i>	<i>3.6/4</i>	<i>1.6/5</i>	<i>3.0/4</i>	<i>10.0/5</i>	<i>5.8/7</i>
$\cos \theta_T$	± 0.0017	± 0.0037	± 0.0060	± 0.0029	± 0.0052	± 0.0034
p_{miss}	± 0.0028	± 0.0043	± 0.0016	± 0.0010	± 0.0009	± 0.0011
p_{bal}	± 0.0023	± 0.0034	± 0.0021	± 0.0023	± 0.0016	± 0.0020
E_{vis}	± 0.0007	± 0.0012	± 0.0023	± 0.0012	± 0.0011	± 0.0005
$N_{\text{ch}} \geq 7$	-0.0010	$+0.0014$	$+0.0003$	$+0.0002$	-0.0015	-0.0001
Spuren/Cluster	$+0.0003$	$+0.0002$	-0.0037	-0.0011	-0.0068	-0.0054
Datenversion 5/88	$+0.0114$	$+0.0058$	$+0.0013$	$+0.0015$	$+0.0052$	$+0.0017$
Fitbereich	± 0.0029	± 0.0109	± 0.0102	± 0.0060	± 0.0189	± 0.0042
Fit + Experiment	± 0.0106	± 0.0095	± 0.0092	± 0.0051	± 0.0131	± 0.0054
MC-Statistik	± 0.0029	± 0.0028	± 0.0026	± 0.0014	± 0.0026	± 0.0015
$b - 1\sigma$	-0.0060	-0.0029	-0.0044	-0.0015	-0.0063	-0.0016
$b + 1\sigma$	$+0.0049$	$+0.0026$	$+0.0036$	$+0.0019$	$+0.0050$	$+0.0021$
$\sigma_q - 1\sigma$	$+0.0058$	$+0.0021$	$+0.0047$	$+0.0025$	$+0.0060$	$+0.0031$
$\sigma_q + 1\sigma$	-0.0055	-0.0019	-0.0048	-0.0022	-0.0060	-0.0029
$\epsilon_c - 1\sigma$	$+0.0090$	$+0.0041$	$+0.0071$	$+0.0023$	$+0.0134$	$+0.0037$
$\epsilon_c + 1\sigma$	-0.0073	-0.0023	-0.0067	-0.0012	-0.0125	-0.0027
$\epsilon_b - 1\sigma$	-0.0021	$+0.0007$	-0.0016	-0.0001	-0.0008	< 0.0001
$\epsilon_b + 1\sigma$	$+0.0019$	-0.0005	$+0.0014$	$+0.0001$	$+0.0004$	-0.0001
$Q_0 - 1\sigma$	-0.0035	-0.0040	$+0.0018$	-0.0014	-0.0044	-0.0038
$Q_0 + 1\sigma$	$+0.0046$	$+0.0032$	$+0.0011$	$+0.0013$	$+0.0062$	$+0.0027$
JETSET 6.3(JADE)	$+0.0231$	$+0.0102$	$+0.0222$	$+0.0082$	$+0.0208$	-0.0021
$\chi^2/d.o.f.$	<i>3.3/6</i>	<i>3.3/4</i>	<i>3.0/5</i>	<i>11.1/4</i>	<i>9.5/5</i>	<i>10.2/7</i>
ARIADNE 4.08	-0.0298	-0.0088	-0.0223	-0.0112	-0.0435	-0.0235
$\chi^2/d.o.f.$	<i>6.4/6</i>	<i>5.4/4</i>	<i>2.2/5</i>	<i>1.6/4</i>	<i>9.6/5</i>	<i>1.9/7</i>
HERWIG 5.9	-0.0249	-0.0213	-0.0249	-0.0209	-0.0204	-0.0297
$\chi^2/d.o.f.$	<i>4.8/6</i>	<i>1.6/4</i>	<i>5.1/5</i>	<i>4.5/4</i>	<i>19.8/5</i>	<i>3.7/7</i>
Hadronisierung	$+0.0198$ -0.0191	$+0.0126$ -0.0124	± 0.0169	± 0.0113	$+0.0275$ -0.0270	± 0.0161
mod. $\ln(R)$ -Matching	$+0.0029$	$+0.0033$	$+0.0130$	$+0.0069$	$+0.0125$	$+0.0012$
R -Matching	$+0.0017$	$+0.0028$	-0.0004	$+0.0024$	-0.0013	-0.0135
mod. R -Matching	$+0.0015$	$+0.0015$	$+0.0074$	$+0.0021$	$+0.0067$	$+0.0017$
Renormierungsskala	$+0.0175$ -0.0132	$+0.0156$ -0.0112	$+0.0194$ -0.0148	$+0.0116$ -0.0083	$+0.0139$ -0.0103	$+0.0124$ -0.0025
höhere Ordnungen	$+0.0175$ -0.0132	$+0.0156$ -0.0112	$+0.0194$ -0.0148	$+0.0116$ -0.0083	$+0.0139$ -0.0103	$+0.0124$ -0.0076
Gesamtfehler	$+0.0266$ -0.0234	$+0.0224$ -0.0194	$+0.0269$ -0.0238	$+0.0170$ -0.0150	$+0.0312$ -0.0292	$+0.0205$ -0.0179

Tabelle 6.5: Ergebnisse für $\alpha_S(14.0 \text{ GeV})$ aus der Anpassung von $\mathcal{O}(\alpha_S^2)$ +NLLA-Vorhersagen mit dem $\ln(R)$ -Matching an die differentiellen Verteilungen der Topologievariablen. Gezeigt sind statistische und systematische Fehler sowie das $\chi^2/d.o.f.$ Die vorzeichenbehafteten Zahlen bezeichnen Abweichungen vom Ergebnis der Standardanalyse. Die Fehlerrechnung ist im Text erklärt.

α_s aus re-analysierten
JADE-Daten (vorläufig)



$\alpha_s(14.0 \text{ GeV}) = 0.1704 \pm 0.0051^{+0.0206}_{-0.0171}$

$\alpha_s(22.0 \text{ GeV}) = 0.1513 \pm 0.0043^{+0.0144}_{-0.0121}$

$\alpha_s(34.6 \text{ GeV}) = 0.1409 \pm 0.0021^{+0.0114}_{-0.0093}$

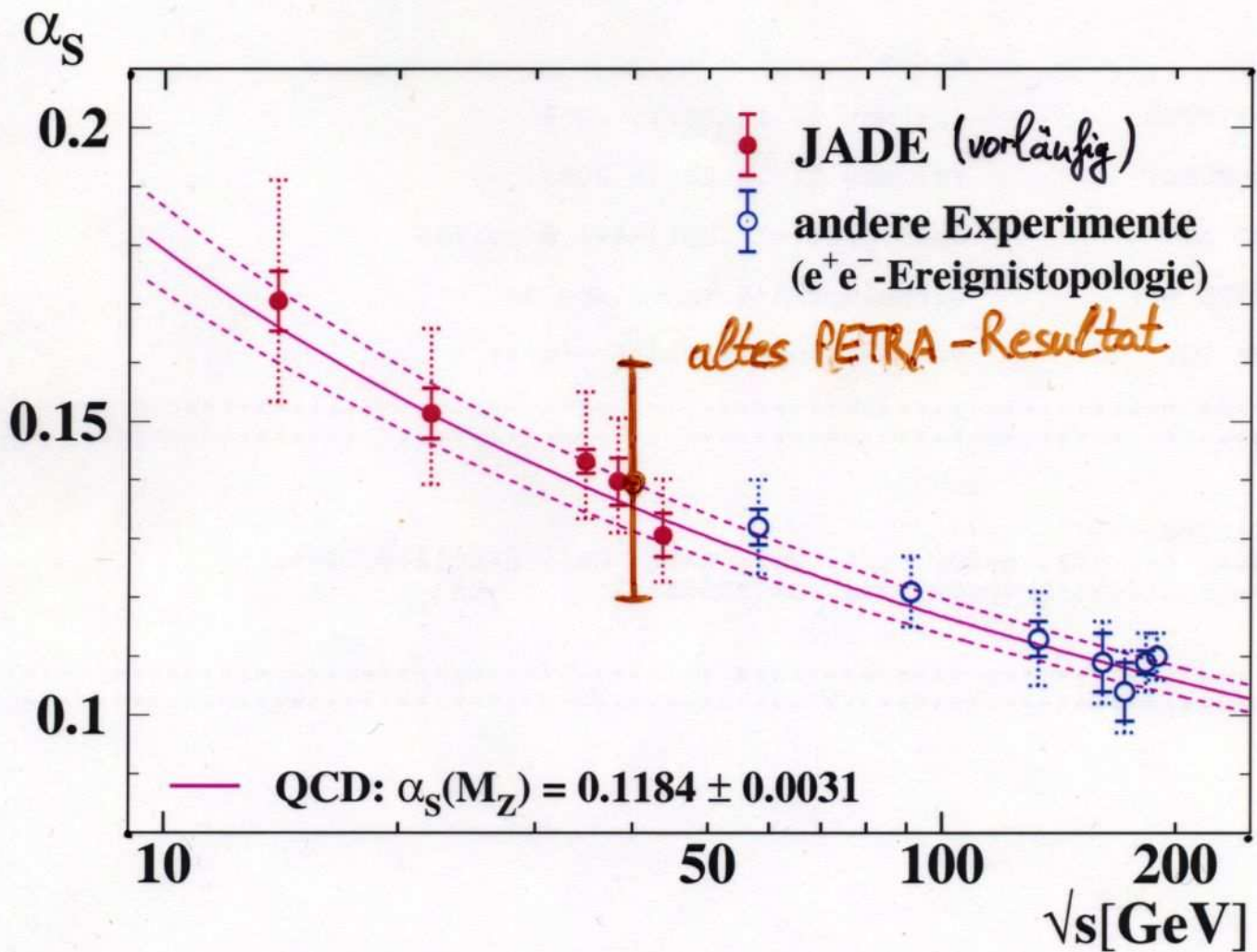
$\alpha_s(35.0 \text{ GeV}) = 0.1457 \pm 0.0023^{+0.0125}_{-0.0101}$

$\alpha_s(38.3 \text{ GeV}) = 0.1397 \pm 0.0041^{+0.0108}_{-0.0087}$

$\alpha_s(43.8 \text{ GeV}) = 0.1306 \pm 0.0037^{+0.0096}_{-0.0080}$

JADE & LEP zu α_s

- gleiche Event shape-Observable ($T, \beta_w, B_T, M_H, \gamma_{23}$)
- gleiche Theorievorhersagen ($\ln R$ -matched)
- vergleichbares Studium syst. Unsicherheiten

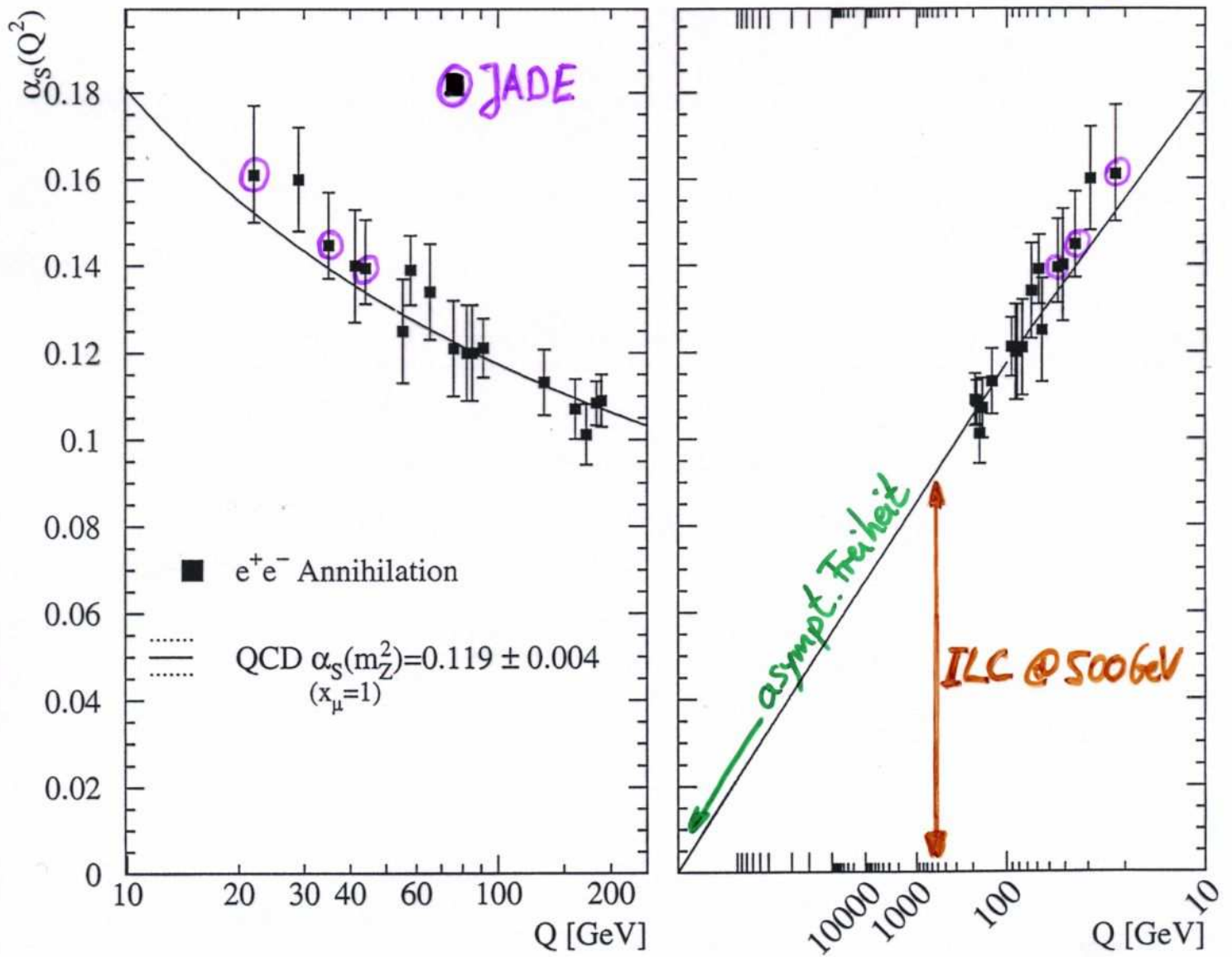


$\Rightarrow \alpha_s$ läuft!

NB: Gesamtfehler durch Renormierungsskala dominiert

Zusammenfassung

- Reanalyse der JADE - Daten
wertvolle Beiträge zu QCD-Tests!
- und Potential noch nicht völlig ausgeschöpft!
- weitere QCD-Studien bei geringen Schwerpunktsenergien



- wichtige Erfahrungen für Archivierung unwiederbringlicher Messdaten!

Zusammenfassung

- Erkenntnisse von Gross, Politzer, Wilczek grundlegend:

Vereinigte Theorien sind asympt. freie Theorien!

