

# Teilchenphysik komplett?

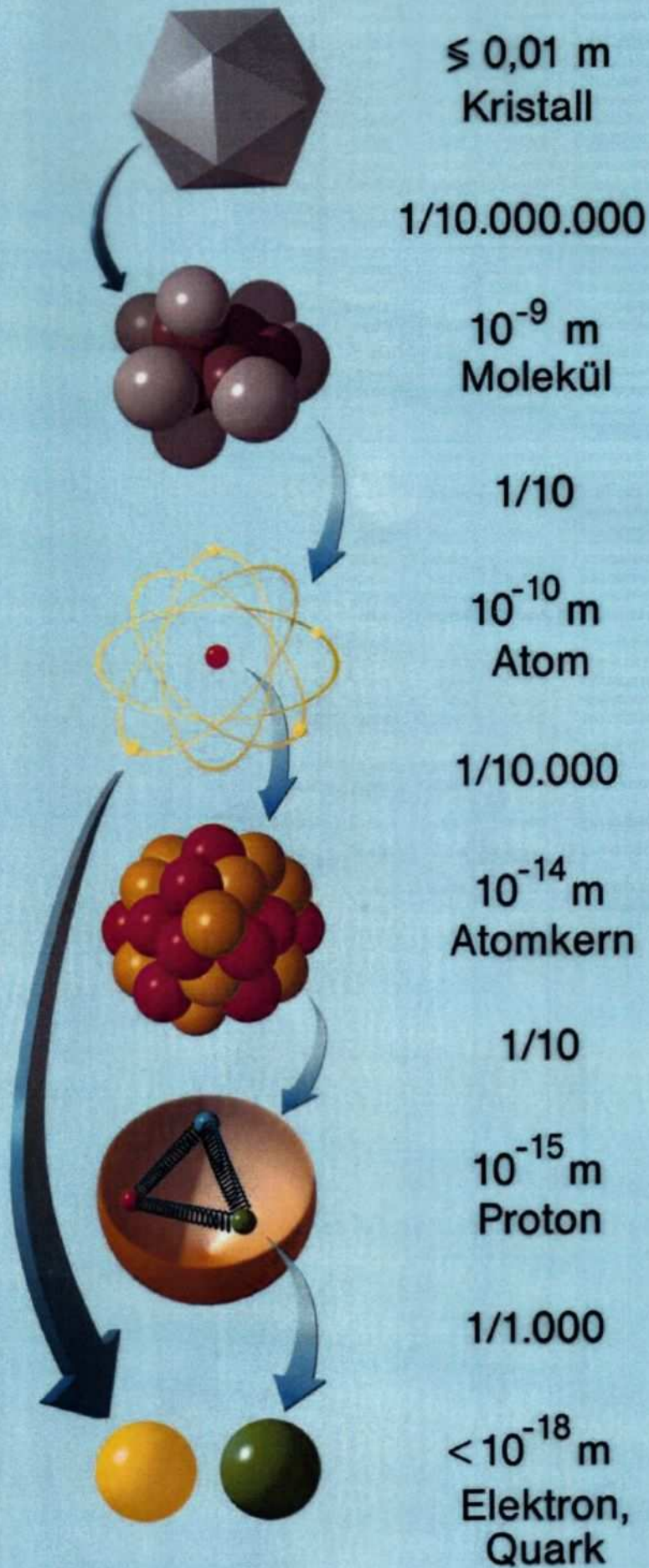
## Neues von den Beschleuniger-Experimenten

16.6.2003  
O. Biebel  
LMU München

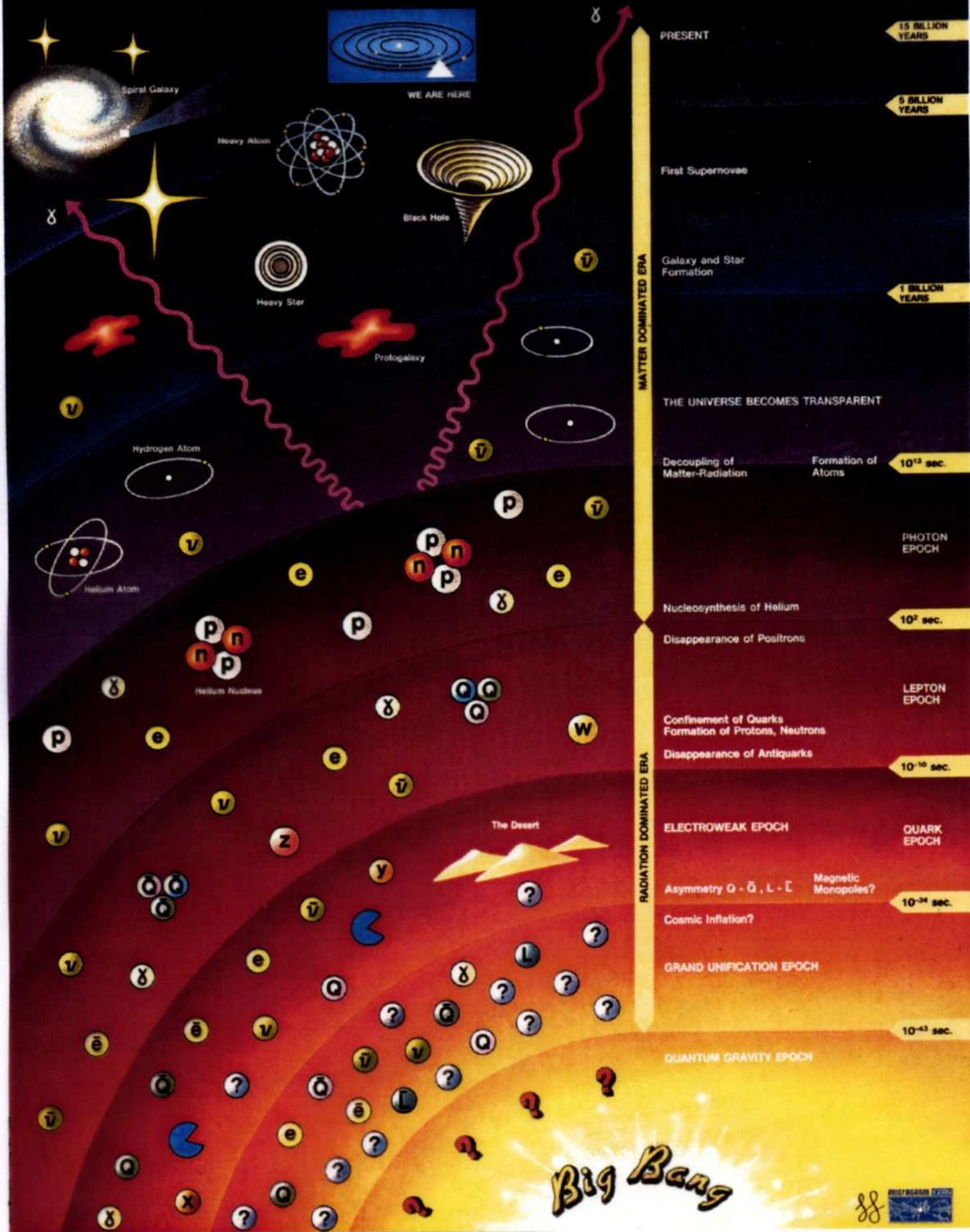
- Einleitung
- LEP-Experimente:
  - ▶ Elektroschwache Wechselwirkung
  - ▶ Higgs-Boson
- post-LEP-Ära = prä-LHC-Ära
- inter LEP&LHC : Tevatron
  - ▶ Status Beschleuniger & DØ-Experiment
  - ▶ Higgs-, SUSY-, Leptoquark-Suchen
- Teilchenphysik komplett?
- Zusammenfassung

# Einleitung

Unsere Kenntnis d. Struktur d. Materie:



# History of the Universe



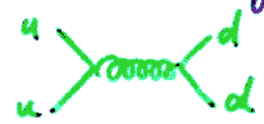
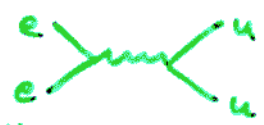
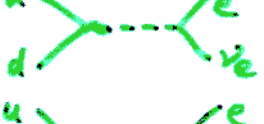
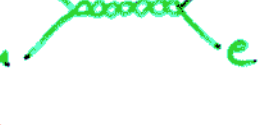
# Einleitung

## ● Bausteine der Materie: Fermionen

	<u>Familien</u>			<u>elekttr. Ladung</u>	<u>Kräfte</u> st., em., schw., grav.
<u>Leptonen</u> :	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	- x x x
	e	$\mu$	$\tau$	-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

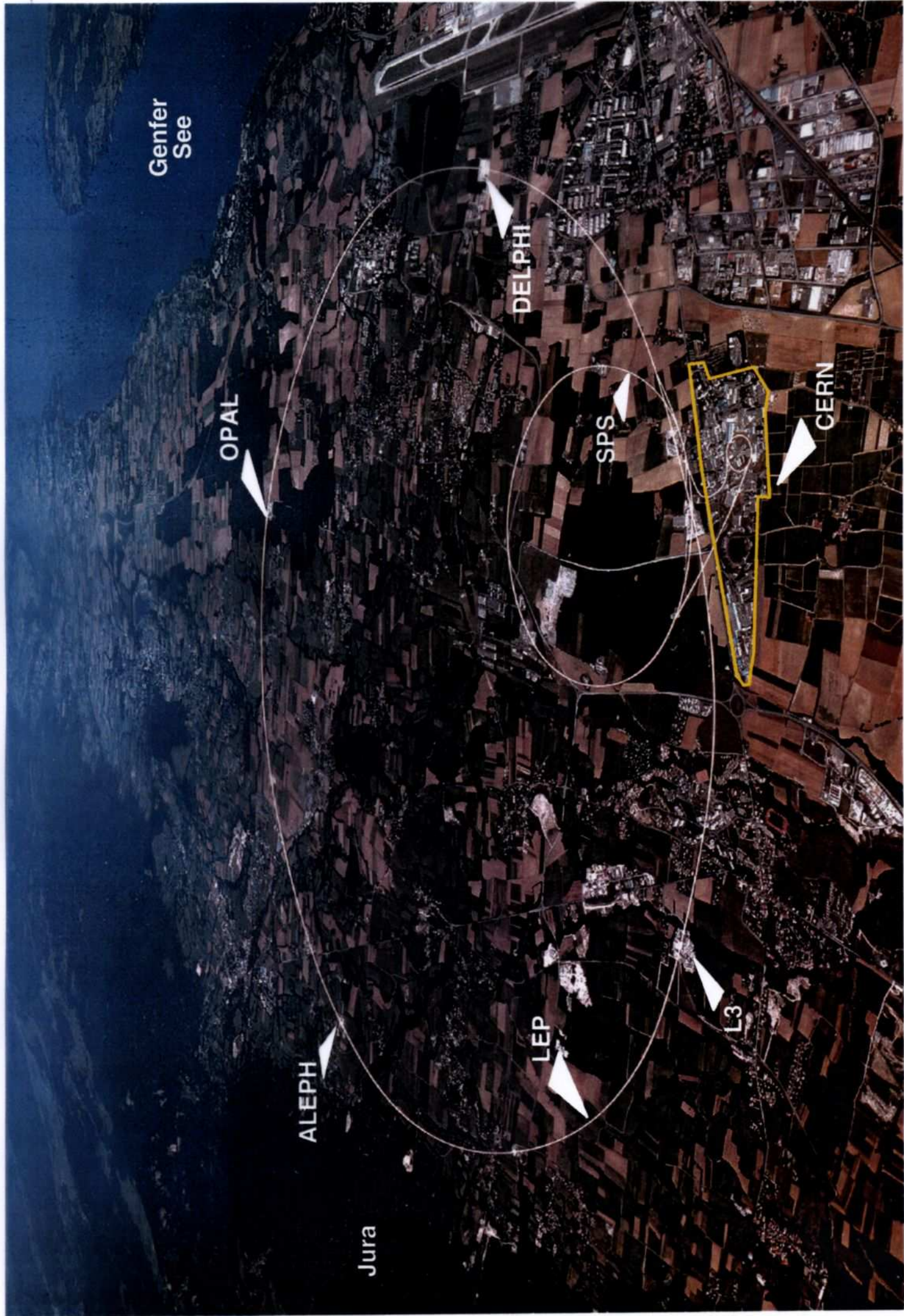
und ihre Anti-Teilchen

## ● Kräfte und Vermittler: Bosonen

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

## ● Erzeugung der Massen:

Higgs-Boson  $H$   
wird noch gesucht



# Elektroschwache Wechselwirkung

- 1967: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg:  
Einheitliche Beschreibung von elektromagnet.  
und schwacher Wechselwirkung

## Bosonen

$\gamma$

$W^\pm$

$Z$

$H$

## Kopplungen

$$\alpha_{em} = e^2/4\pi$$

$$g_W = e/\sin\theta_w$$

$$g_Z = e/\sin\theta_w \cdot \cos\theta_w$$

$$m_W = g_W/2\sqrt{2} \cdot G_F$$

$$m_Z = m_W/\cos\theta_w$$

$\Rightarrow$  3 Parameter  $\rightarrow$  Kopplungen, Boson-Massen

- 1983: C. Rubbia et al.:

Entdeckung der  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ -Bosonen

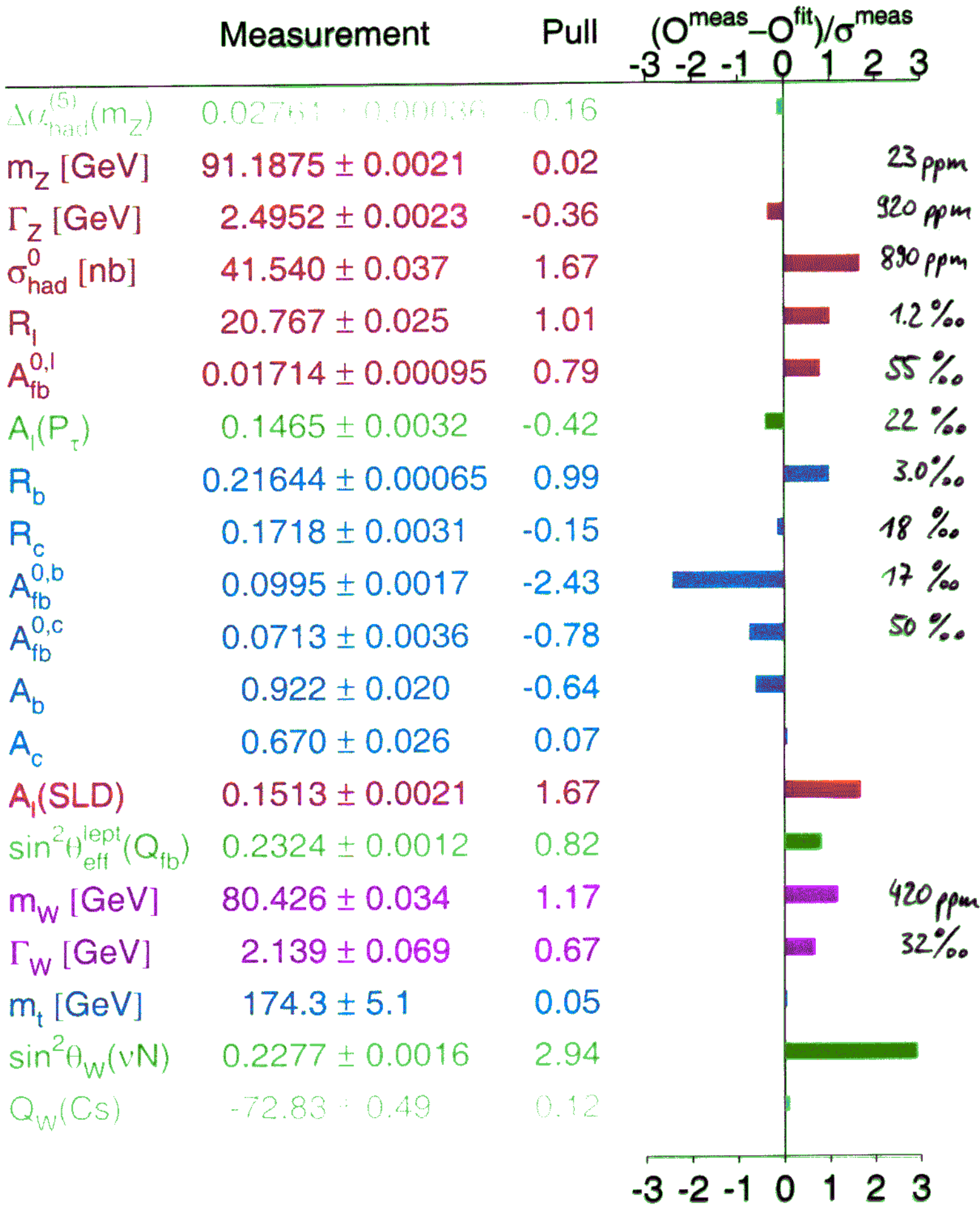
- 1989-2000: LEP-Beschleuniger: Test dieser Theorie

▶ Massen der  $W^\pm$ - und  $Z$ -Bosonen

▶ Existenz des Higgs-Bosons

⋮

▶ Präzisionstest des Standard-Modells



nahezu perfekte Übereinstimmung zw. Experiment und Standard-Modell auf ‰.

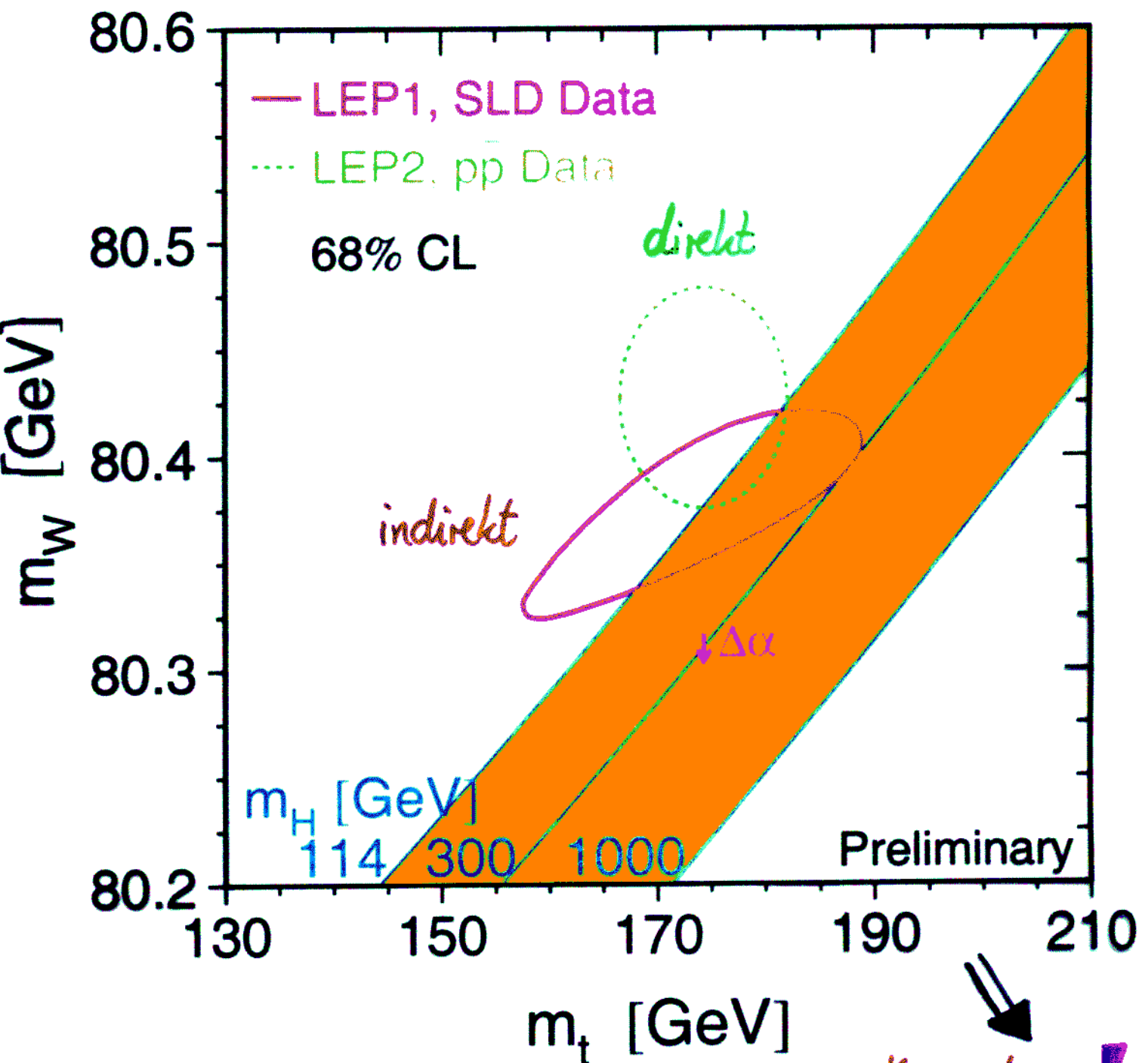
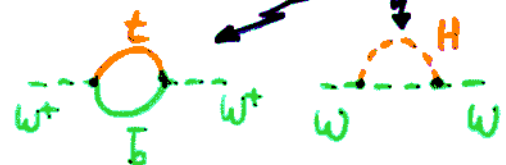
# Konsistenz des Standard-Modells

zur Erinnerung: 3 Parameter genügen:  $\alpha_{em}, G_F, m_Z$

► W-Boson-Masse damit berechenbar:

$$m_W^{indirekt} = f \left( \underbrace{\alpha_{em}, G_F, m_Z}_{\text{Feynrelation}}; \underbrace{m_{top}, m_H, \dots}_{\text{el.-schw. Korrekturen}} \right)$$

► direkte  $m_W^{direkt}$ -Messung



Konsistenz!



# Higgs-Boson-Masse

## Massengrenzen

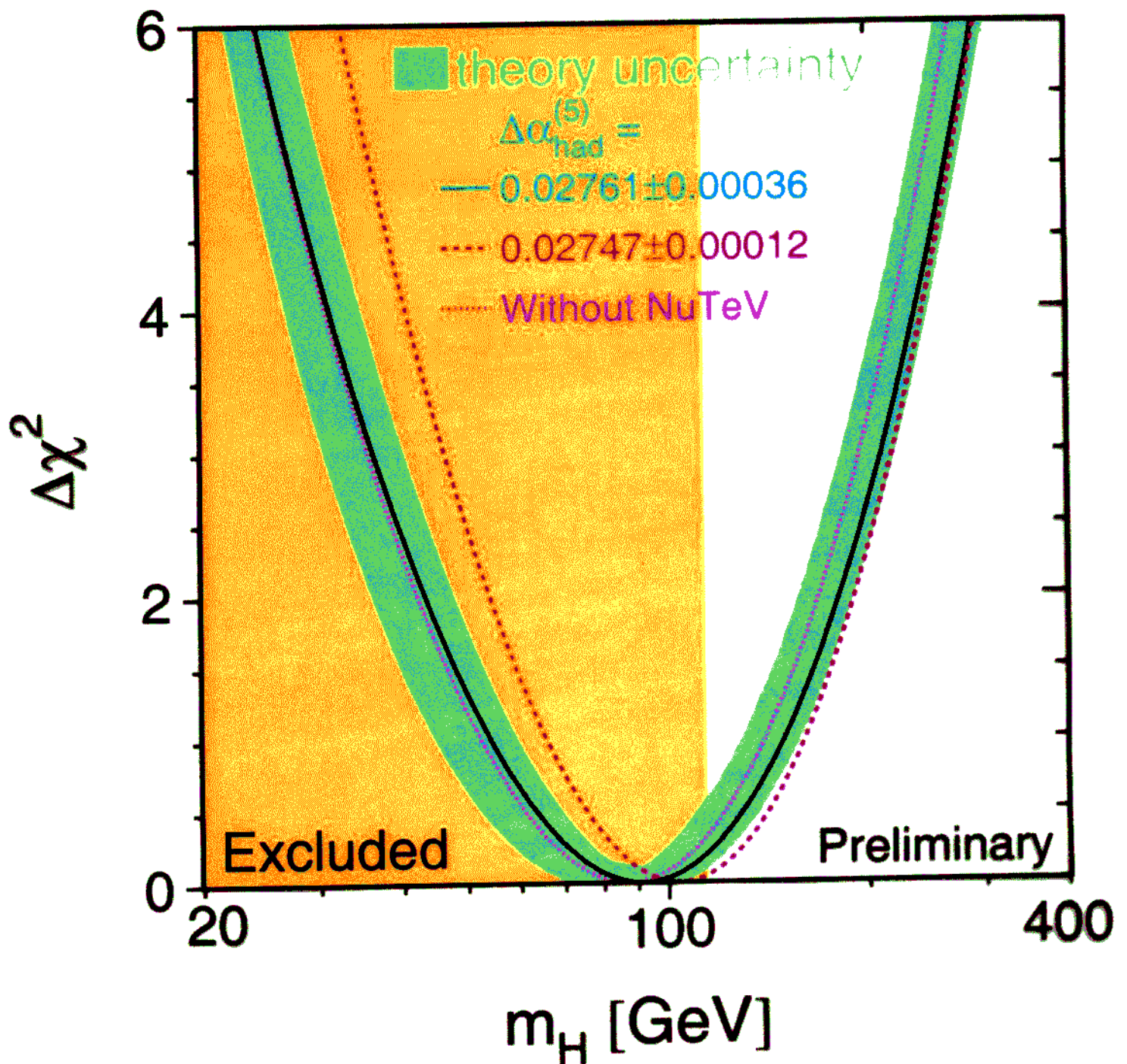
▶ Gültigkeit des Standard-Modells

$$m_H < 211 \text{ GeV}/c^2$$

▶ direkte Suche bei LEP

$$m_H > 114.4 \text{ GeV}/c^2$$

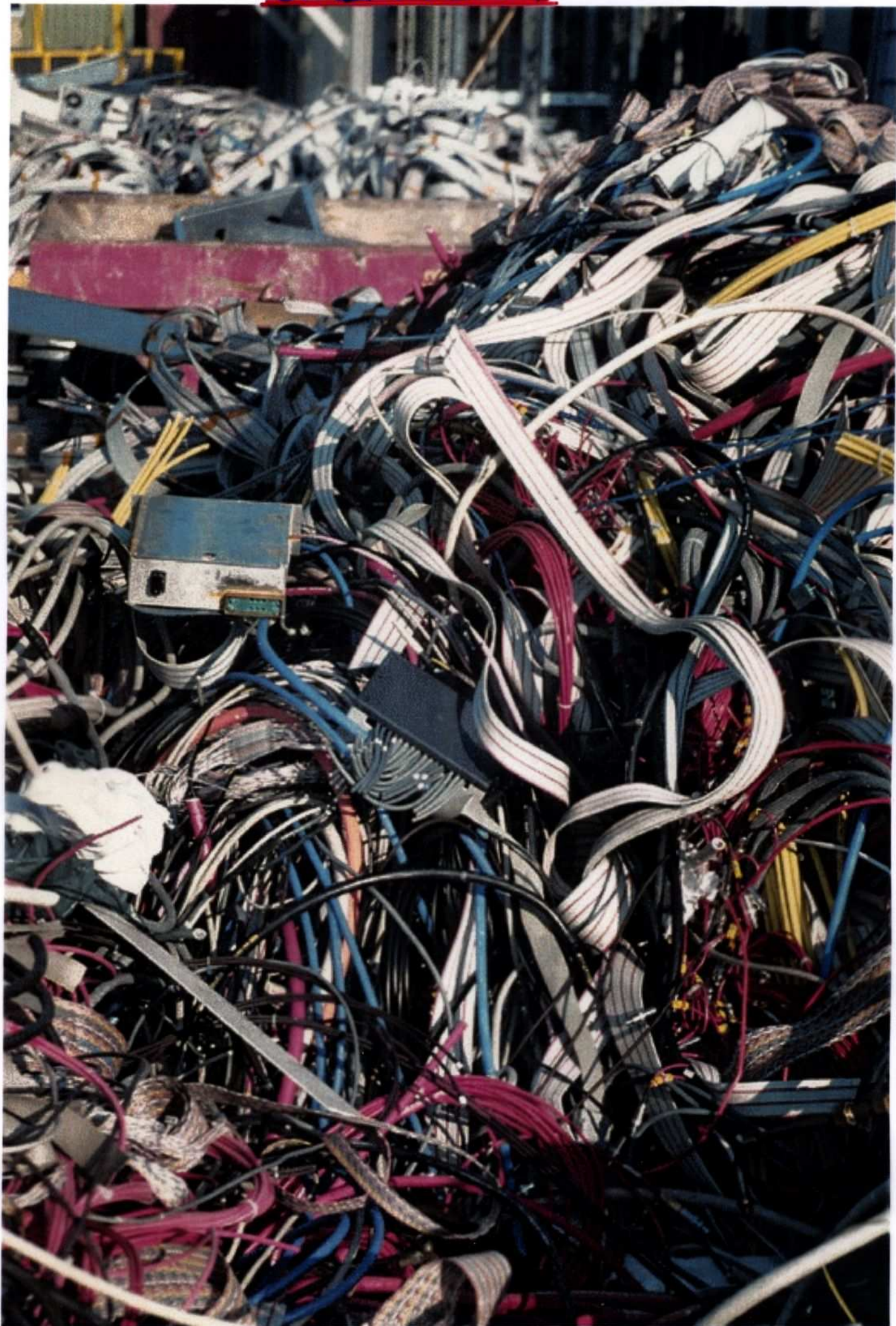
@ 95% CL



LEP in 2007



OPAL in 2001



Genfer See

Jura

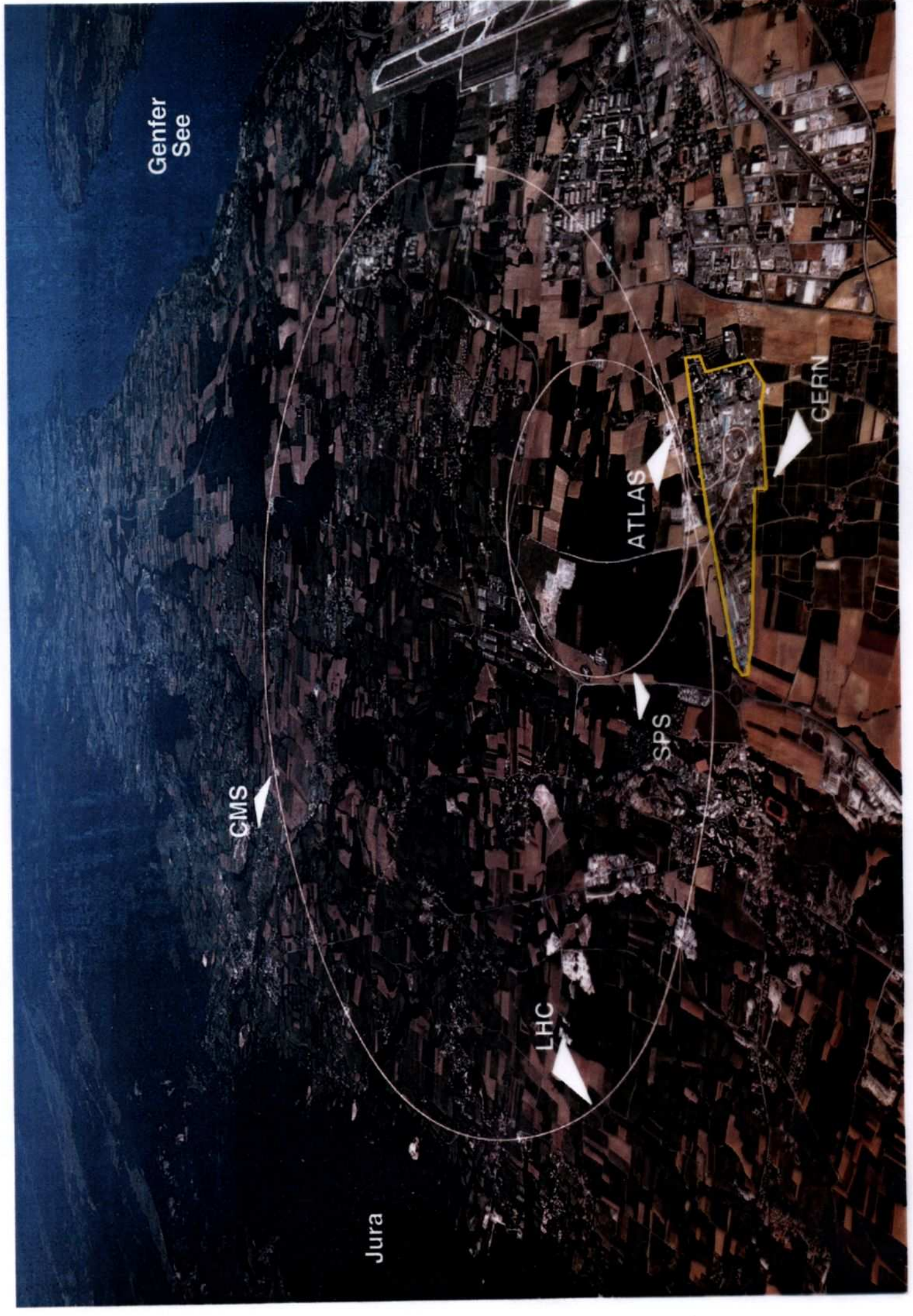
CMS

LHC

SPS

ATLAS

CERN



# LHC

seit 2001: im ehemaligen LEP-Tunnel  
27 km Ringumfang  
1232 supraleitende Dipolmagnete  
8.33 Tesla Dipolablenkfeld  
1.9 K Arbeitstemperatur der Dipole (suprafluides Helium)

ab 2007:

Proton → ← Proton

14 TeV Schwerpunktsenergie (7 GeV Strahlenergie)

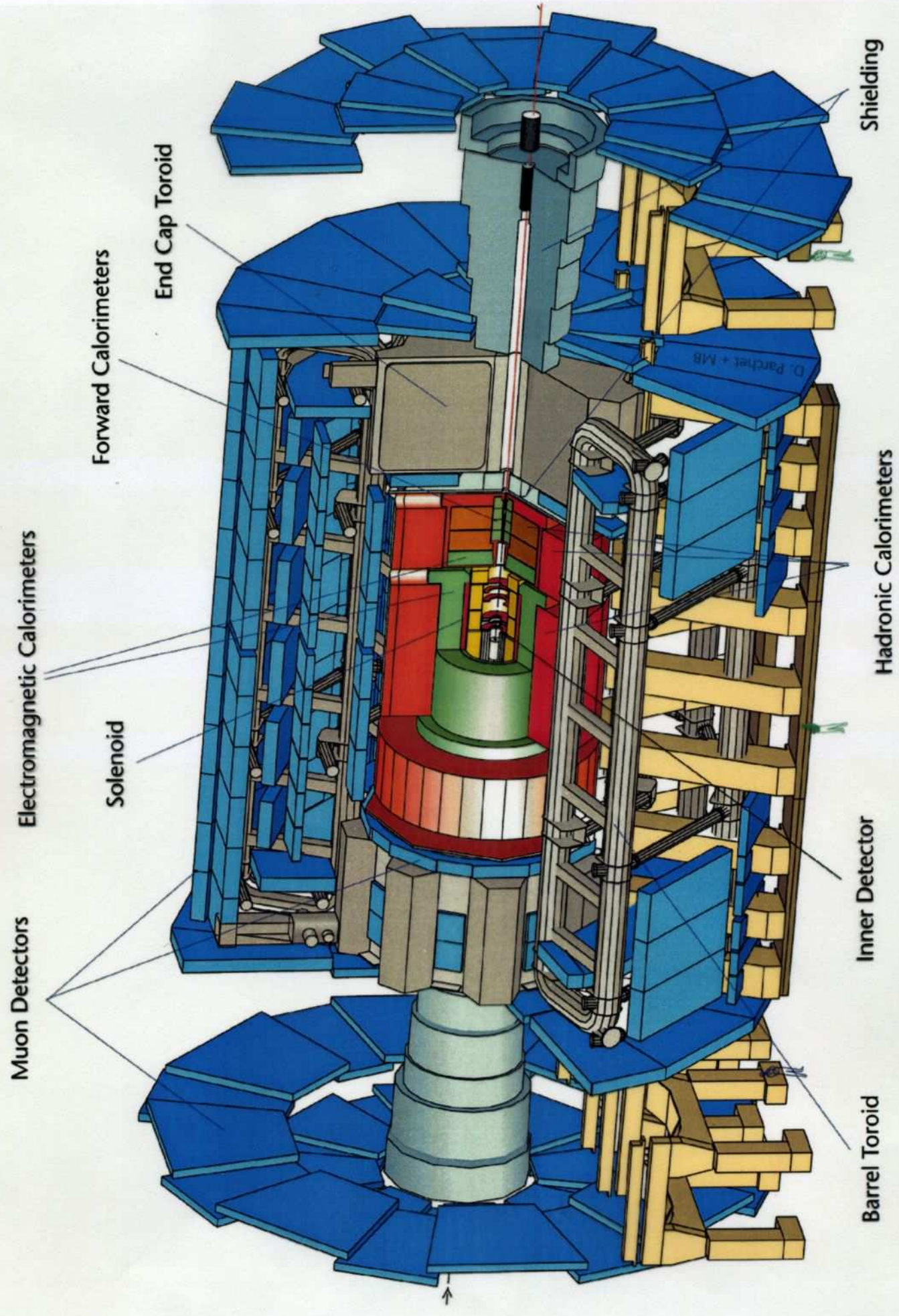
0.56 A Strahlstrom je Strahl

350 MJ gespeicherte Strahlenergie

2 Vielzweck-Detektoren: ATLAS, CMS

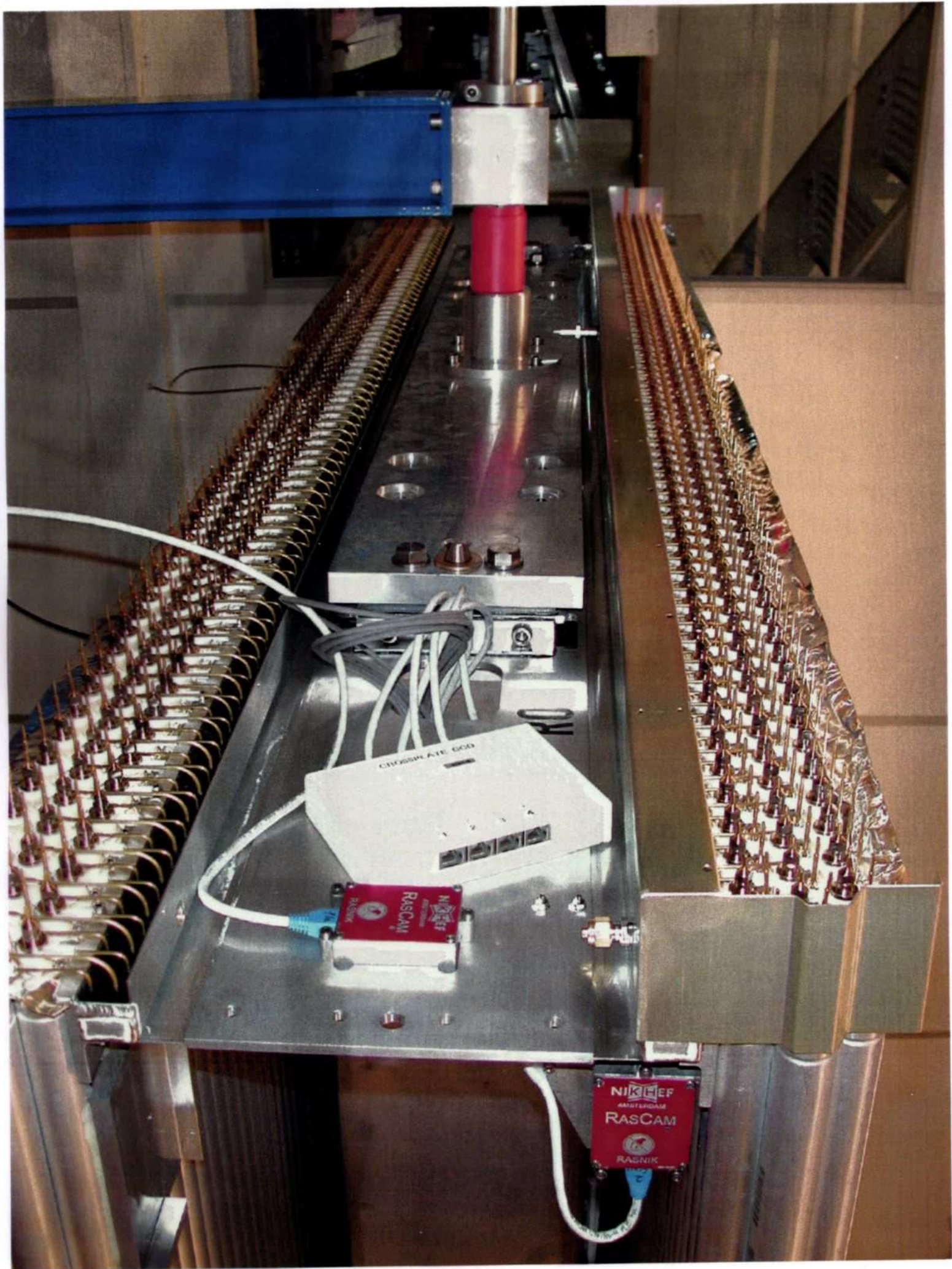
2007 geplanter Start d. Physik-Runs

# Der ATLAS-Detektor



# ATLAS MDT-Myonhammer





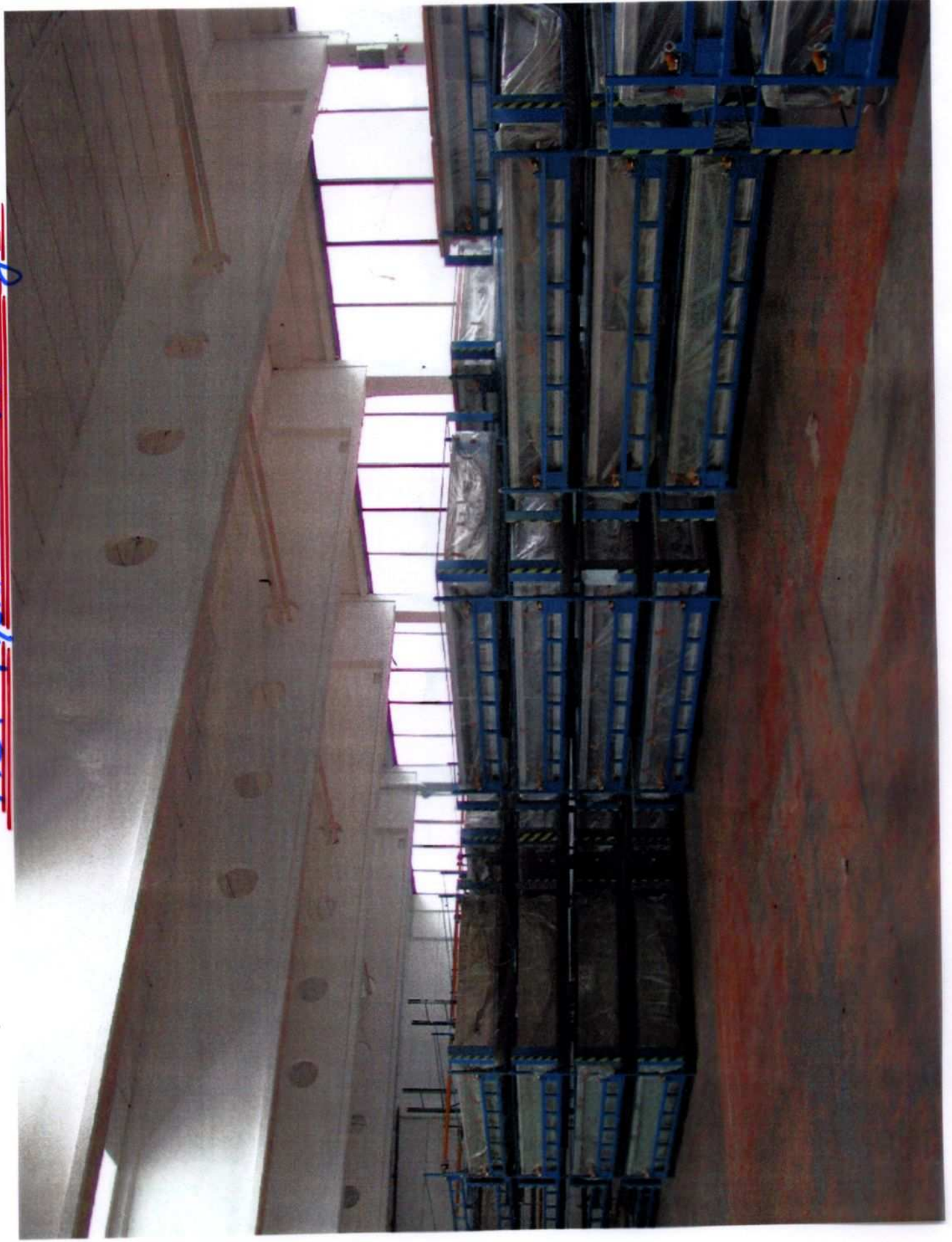
CROSSPLATE 600

RASCAM  
NIKHEF  
AMSTERDAM  
RASNIK

NIKHEF  
AMSTERDAM  
RASCAM  
RASNIK



MDT - Myonkammern in Eching



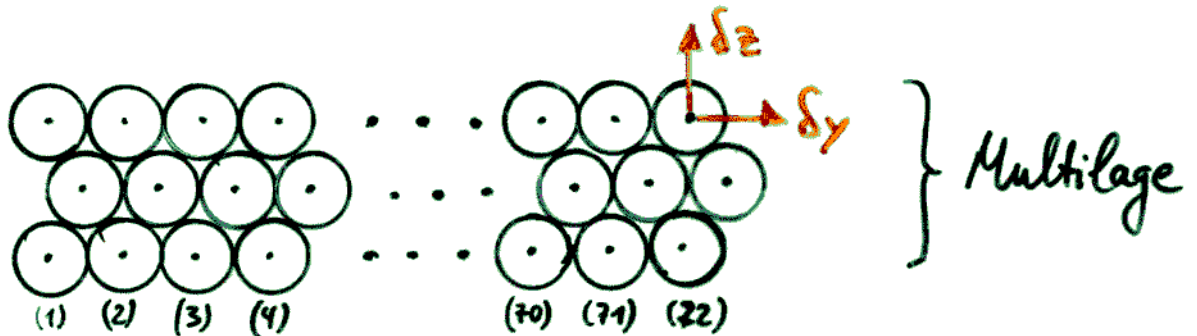


Höhenstrahlungs - Teststand für MDI-Kammern in Garding

# Höhenstrahlungs-Teststand in Garching

88 BOS Myonkammern zu vermessen:

- ▶ Drahtposition in Rohrlagen-Ebene  $\delta y$
- ▶ dito senkrecht dazu  $\delta z$



erreichte Genauigkeiten für einzelnen Draht

- ▶  $\delta y \approx 8 \mu\text{m}$
- ▶  $\delta z \approx 27 \mu\text{m}$

aus der Vermessung von  $\approx 1$  Mio kosmischer Myonspuren.

- bereit für Serientest aller 88 Kammeren bis  $\approx$  Mitte/Ende 2004
- **ATLAS** bereit für Datennahme in 2007

# Tevatron am Fermilab

seit 1983:

6.3 km

Ringumfang

≈ 1000

supraleitende Ablenk dipole (4.3 K)

seit 1987:

Proton → ← Anti-Proton

2

Vielzweck-Detektoren: CDF, DØ (ab 1992)

bis 2001:

Aufrüstung des Beschleunigers + Detektoren  
(Main Injector in eigenem Tunnel,  $\bar{p}$ -Recycler)

↳ seit 06/2001:

2 TeV

Schwerpunktsenergie

74 mA

Proton

Strahlstrom

8 mA

Anti-Proton

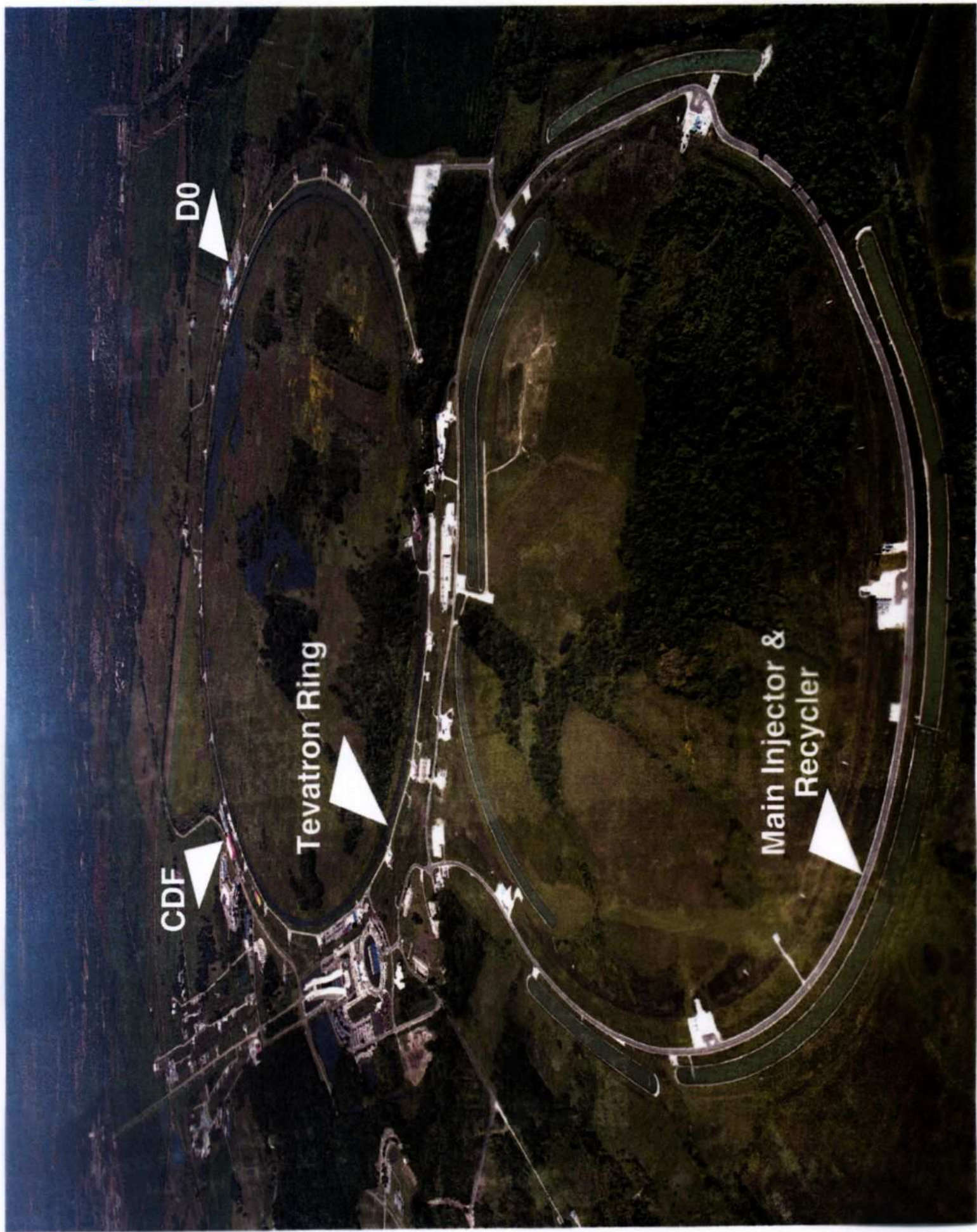
2.5 MHz

Strahlkreuzungsrate von p mit  $\bar{p}$

≈ 2.3

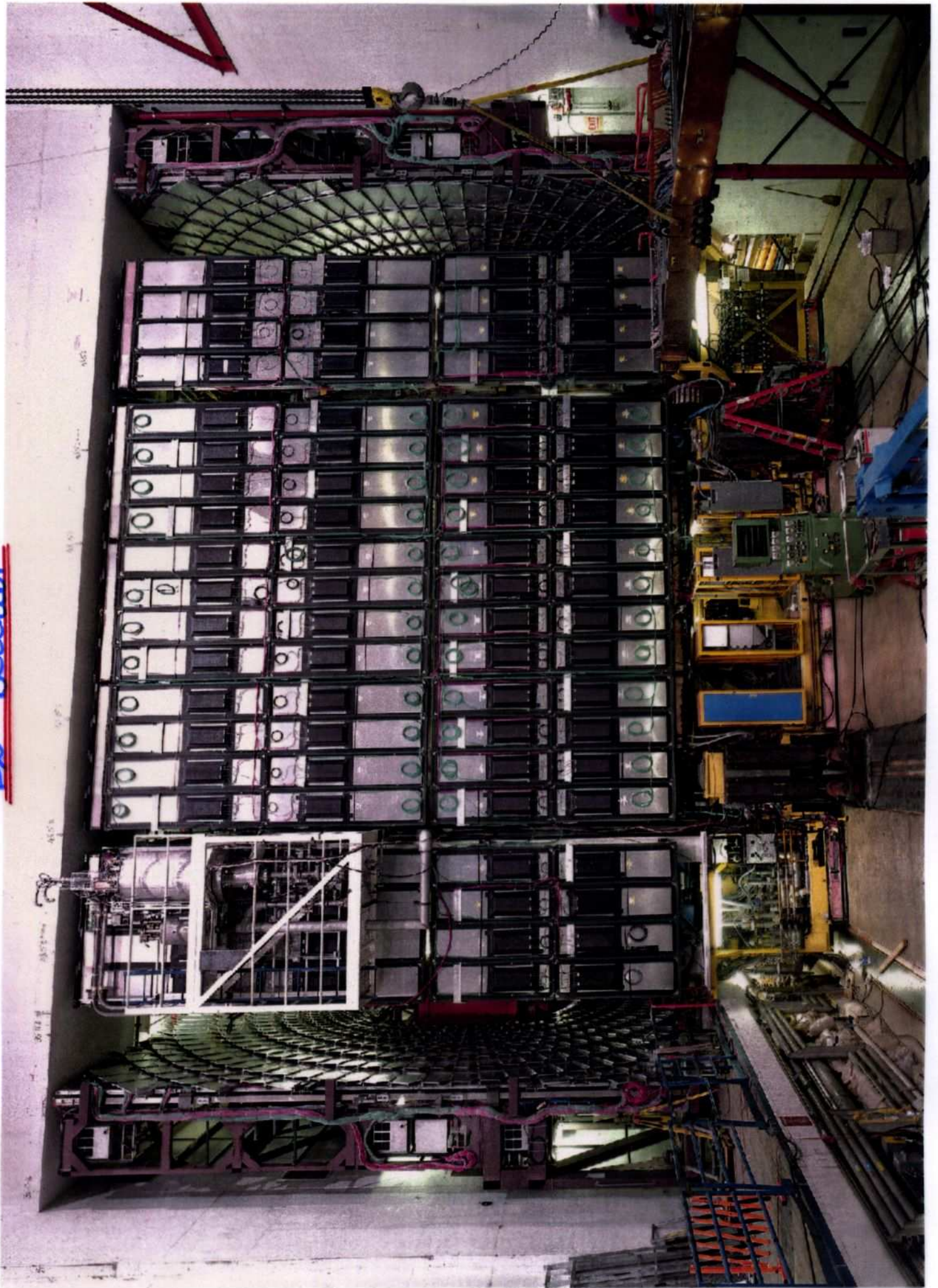
p- $\bar{p}$ -Wechselwirkungen / Strahlkreuzung

bei  
Chicago  
U.S.A.

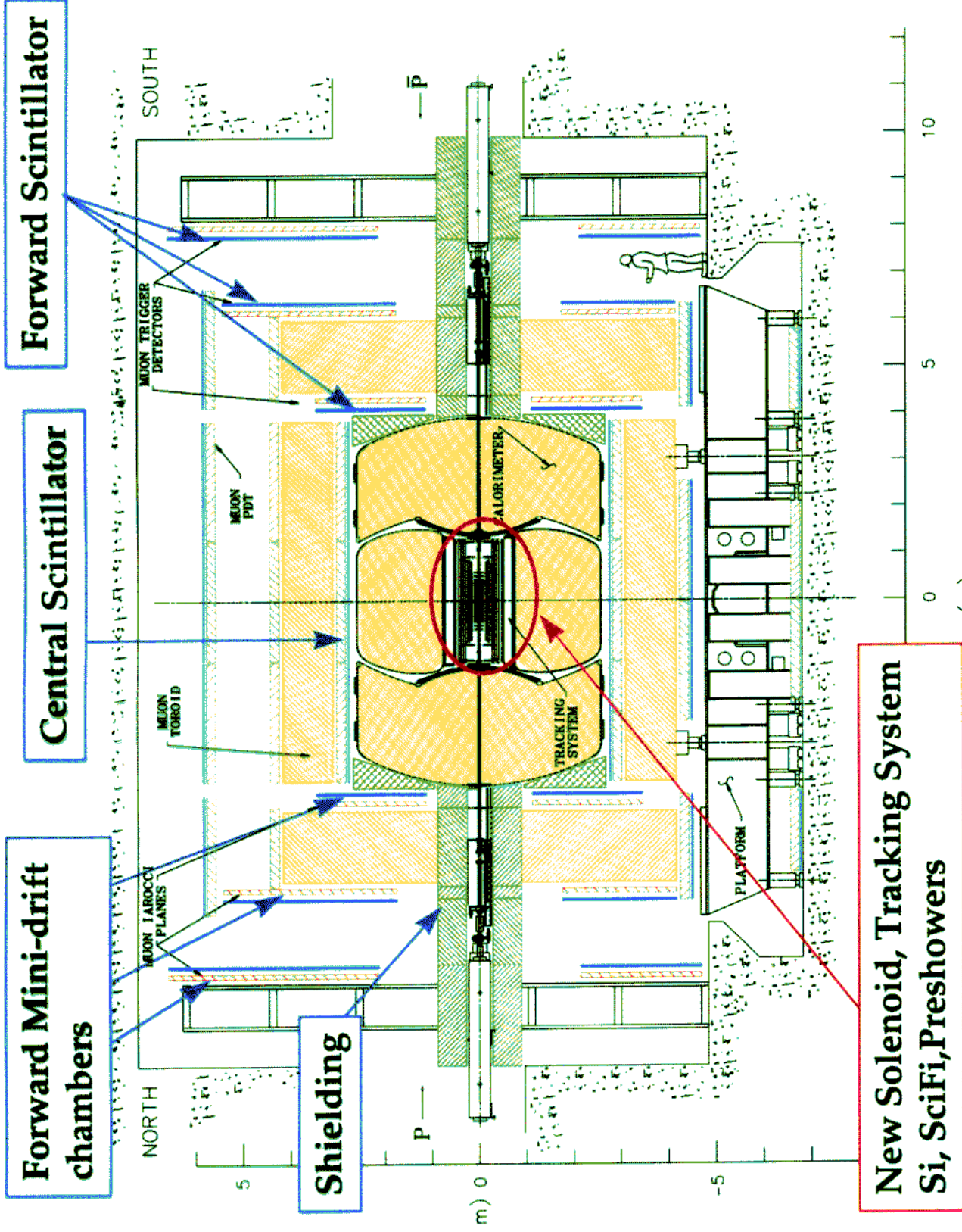




DO - Detektor



# D0 Upgrade



**New Solenoid, Tracking System  
Si, SciFi, Preshowers**

**+ New Electronics, Trig, DAQ**

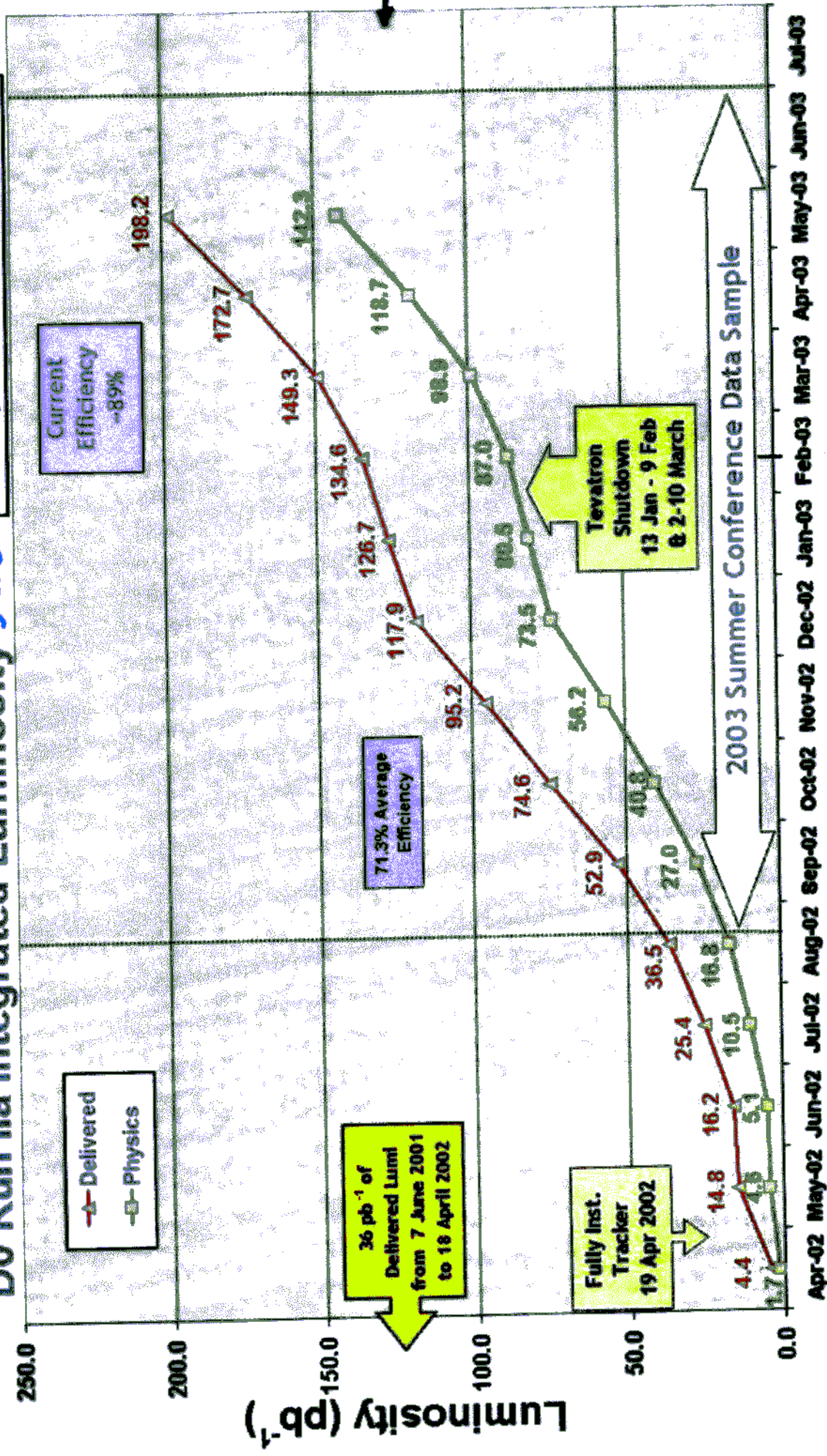


DO's never Supraconducter Solenoid



# D0 Run Ila Integrated Luminosity *Int dt*

19 April 2002 - 31 May 2003



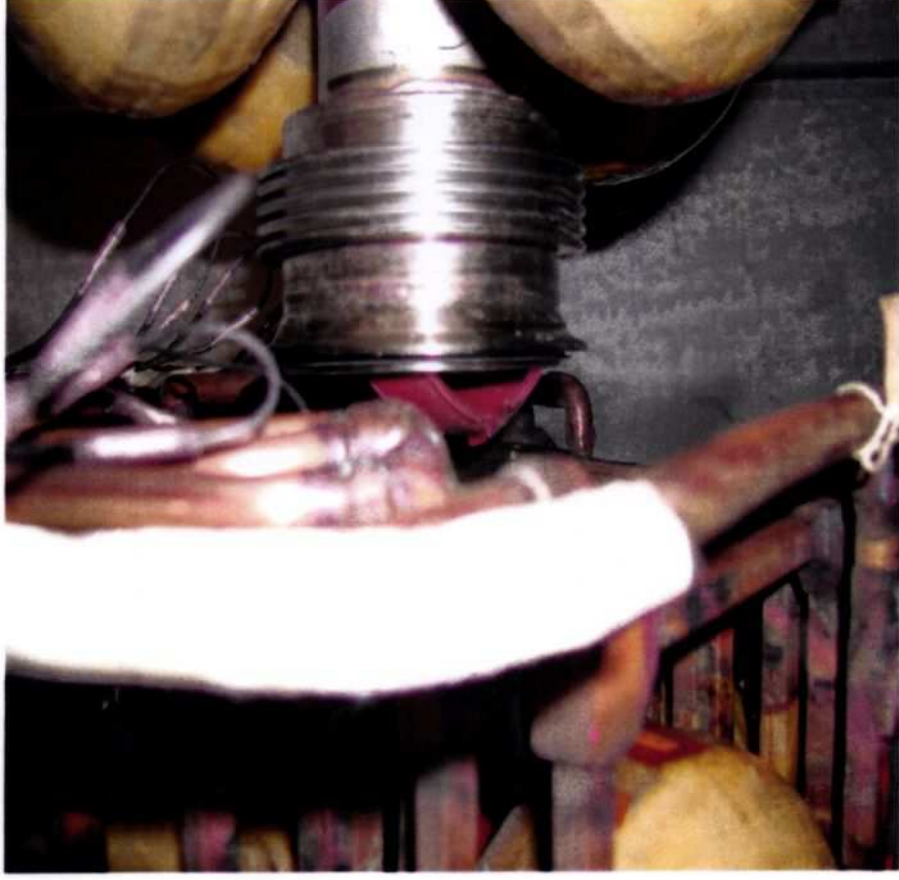
Run 1  
*Int dt*

*Tevatron steigert Luminositat zunehmend!*

Plastic beampipe cap  
removed on Jan 21



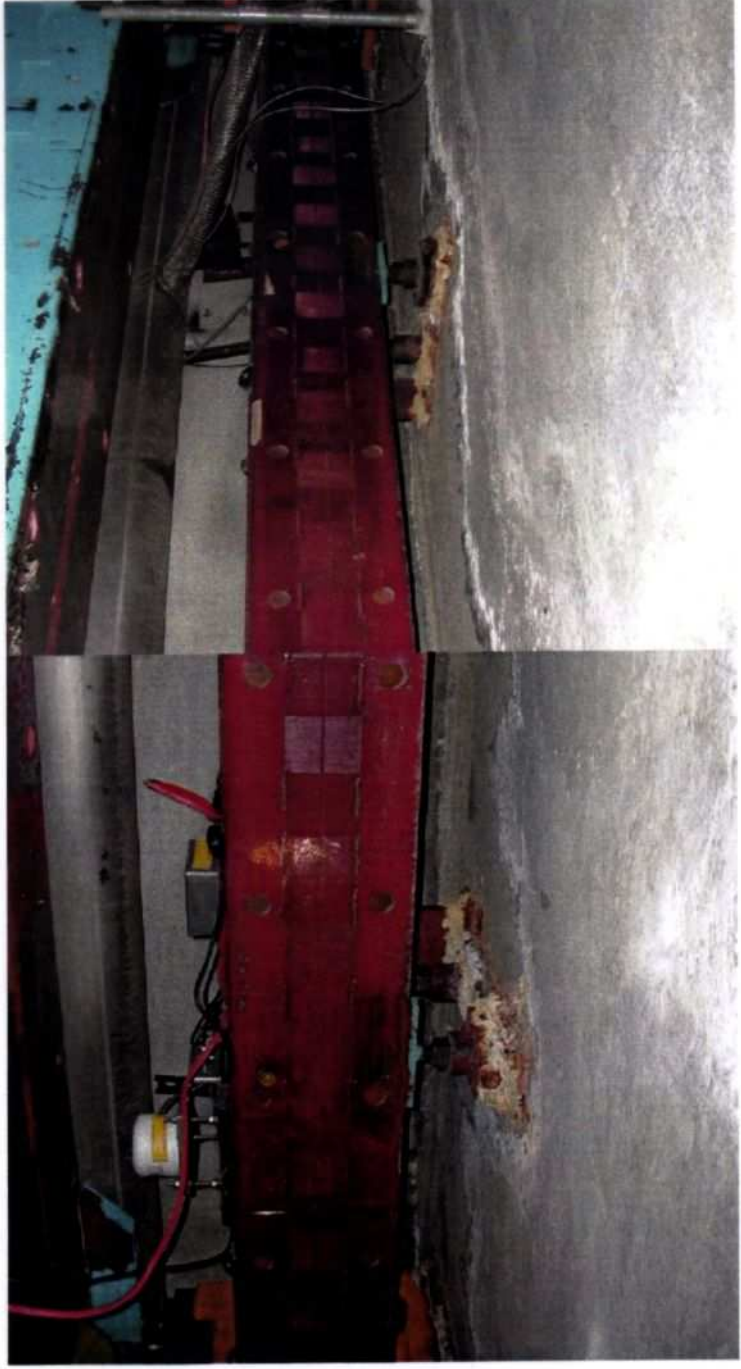
**Believed to have been  
there for many years...**



**Expect slightly reduced pbar emittance growth**

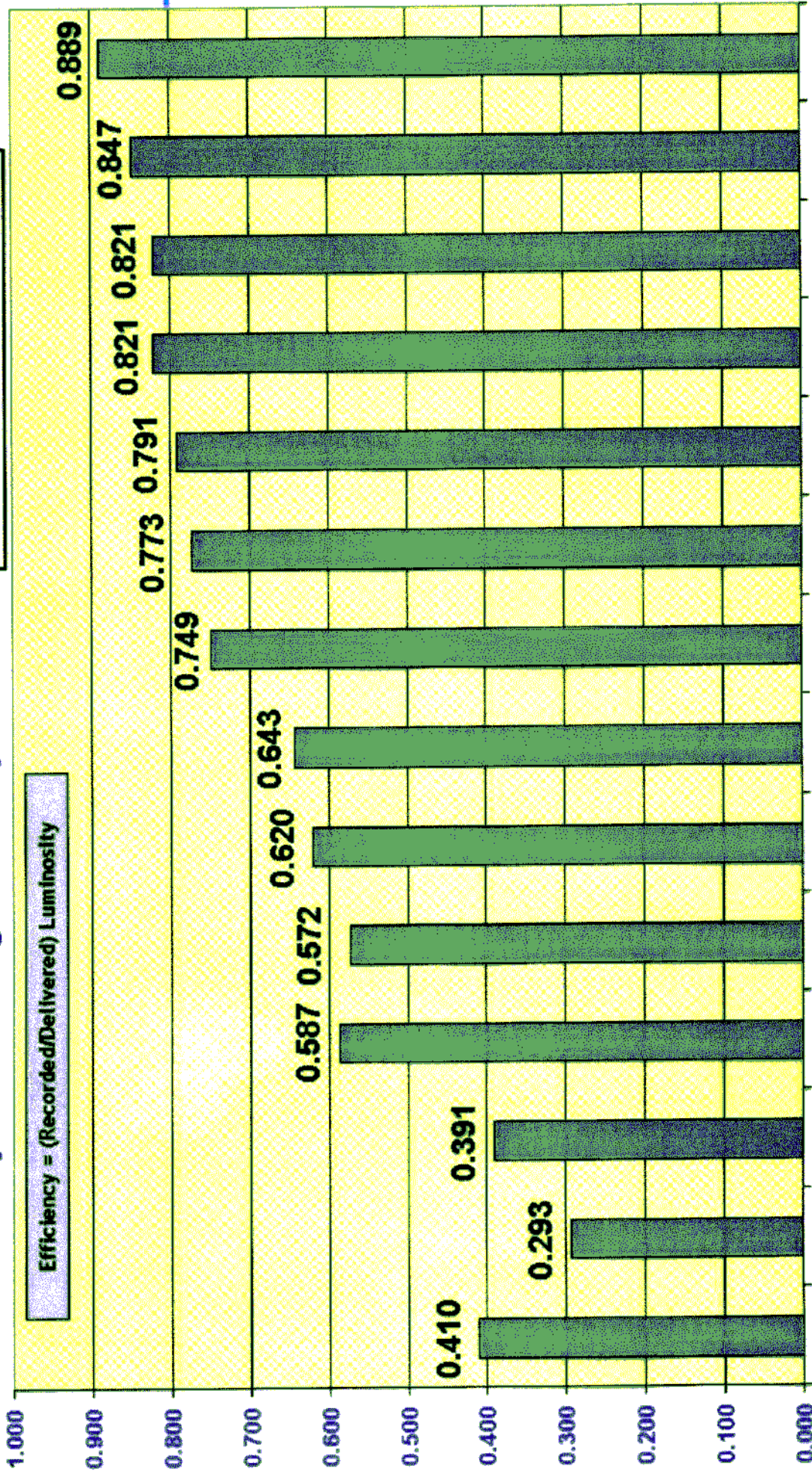
- Replaced four particularly deteriorated dipole stands in the Tevatron
- More to do in the future

## Tev A16-3 Dipole Photos



# D0 Monthly Data Taking Efficiency

19 April 2002 - 31 May 2003

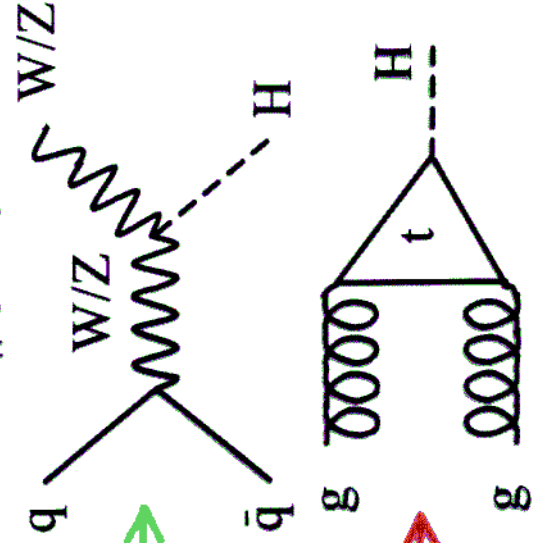
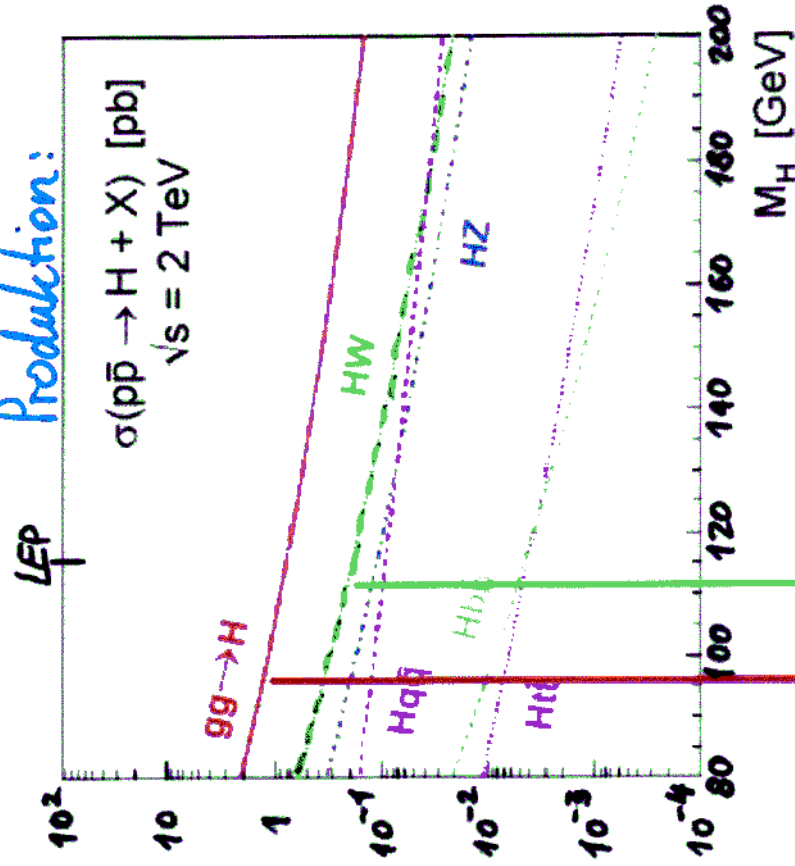


*fast*  
*90%*  
*Effizienz*

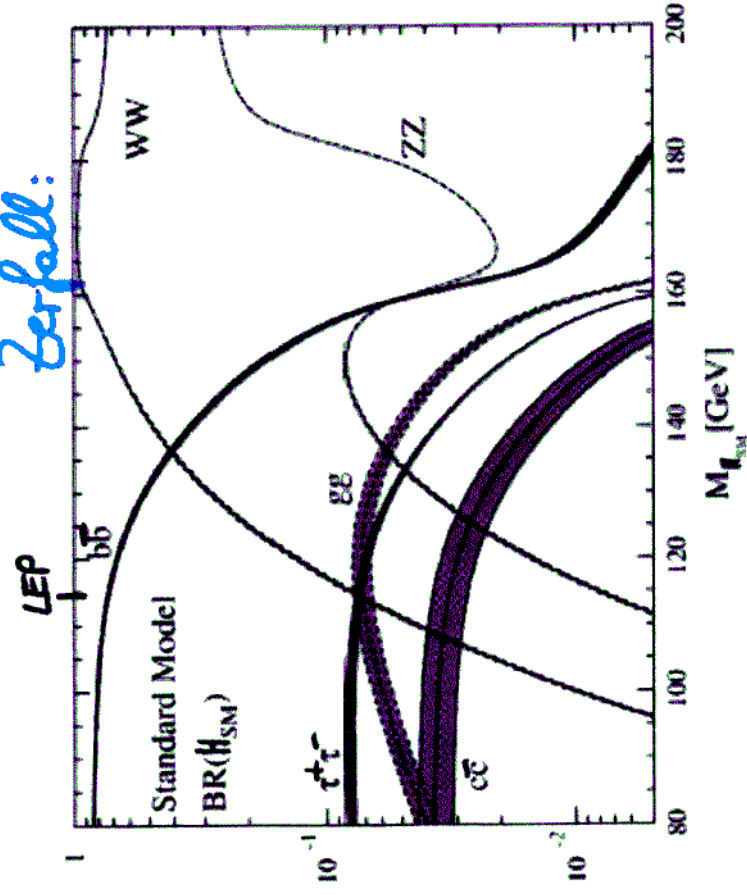
*wachsende Effizienz!*

# Higgs-Suche am Tevatron

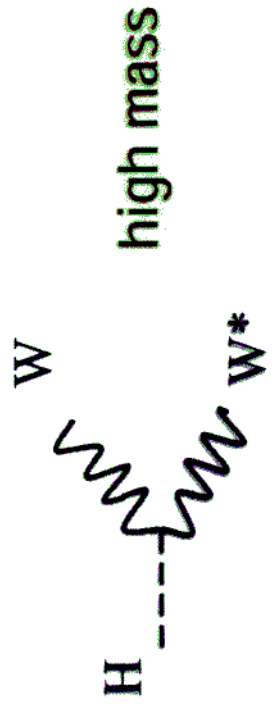
## Production:



## Zerfall:



low mass

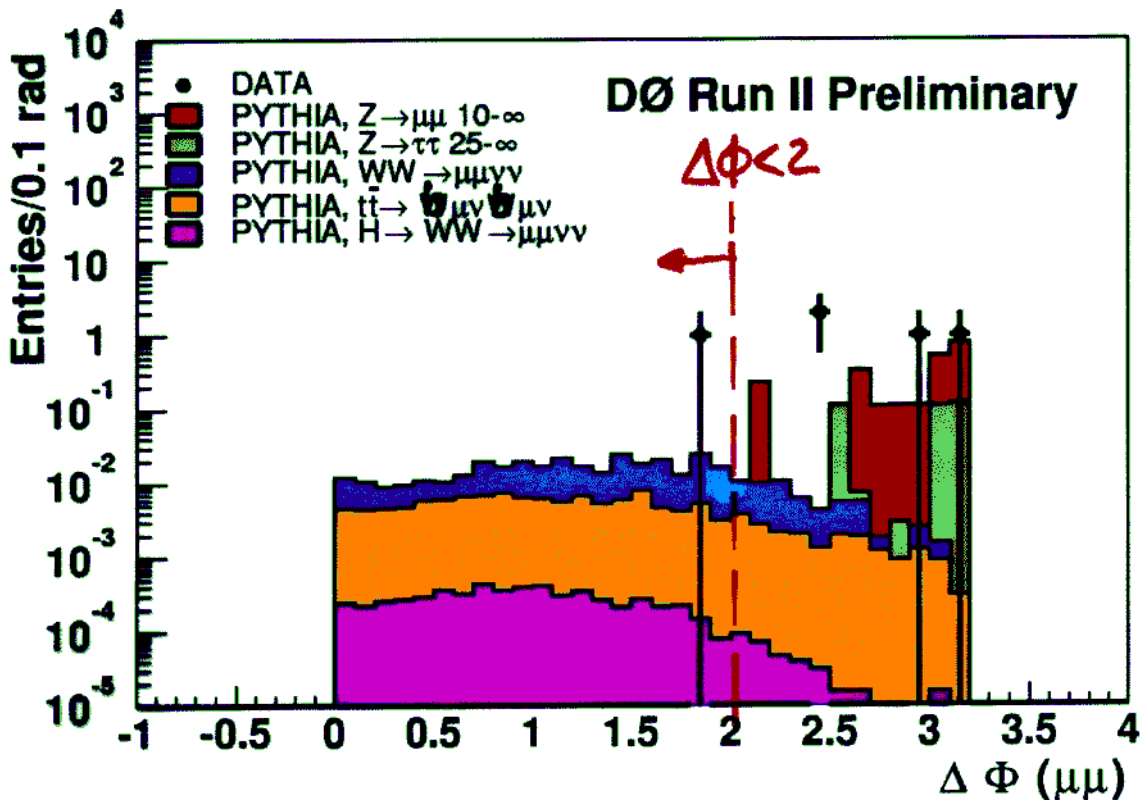


high mass



- Trigger: 2 Myonen
- Selektion:
  - fehlende Energie wg.  $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$
  - Vetos auf  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  &  $Z \rightarrow e^+ e^-$ , dito WW, tE
  - skalares Higgs:

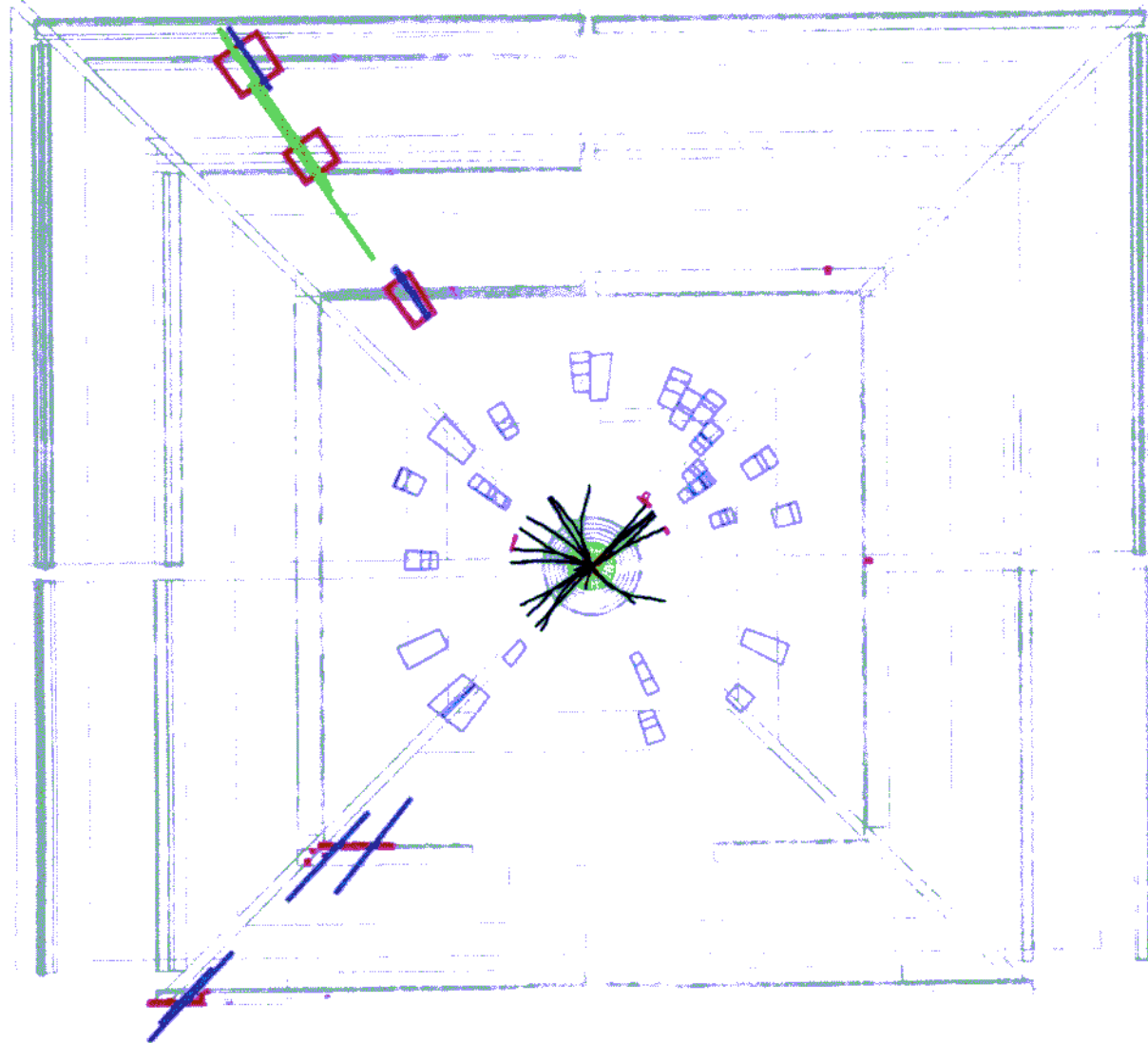
→ Winkelkorrelation zw.  $\mu^- \mu^+$ :  $\Delta\phi < 2$
- Simulation: opt. Signal÷Untergrund & Effizienz ( $\approx 15\%$ )
- Anwendung auf Messdaten ( $\int \mathcal{L} dt \approx 48 \text{ pb}^{-1}$ )



→ 1 Kandidat, erwarteter Untergrund  $\approx 0.32$

$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \mu^- \bar{\nu}_\mu$  Kandidat

Run 163305 Event 3024474 Feb 27, 2003



View 1, Front(X-Y)

vermutlich:  $W^+ W^- \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \mu^- \bar{\nu}_\mu$  oder  $t\bar{t} \rightarrow b\mu^+ \nu_\mu \bar{b}\mu^- \bar{\nu}_\mu$



# Teilchenphysik komplett...

... wenn Higgs-Boson gefunden?

## Motivation für Erweiterungen des Standard-Modells

- Anzahl der freien Parameter : 18 + 7 (Neutrino=sektor: m + Mischung)  
( $\alpha_{em}$ ,  $m_Z$ ,  $m_W$ ,  $m_H$ , 9 Quark- & Leptonmassen,  $\theta_s$ , CKM-Matrix)

- und offene Fragen:

- (1) Warum 6 Quarks und 6 Leptonen?
- (2) Was ist der Ursprung der Teilchenmassen? (Higgs?)
- (3) Woher kommt die Massenhierarchie? ( $\nu$  leicht, t schwer)
- (4) Was ist die Ursache der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Weltall?
- (5) Was ist die Natur der "Dunklen Materie" im Universum?
- (6) Gibt es eine weitere Vereinheitlichung der vier Kräfte?

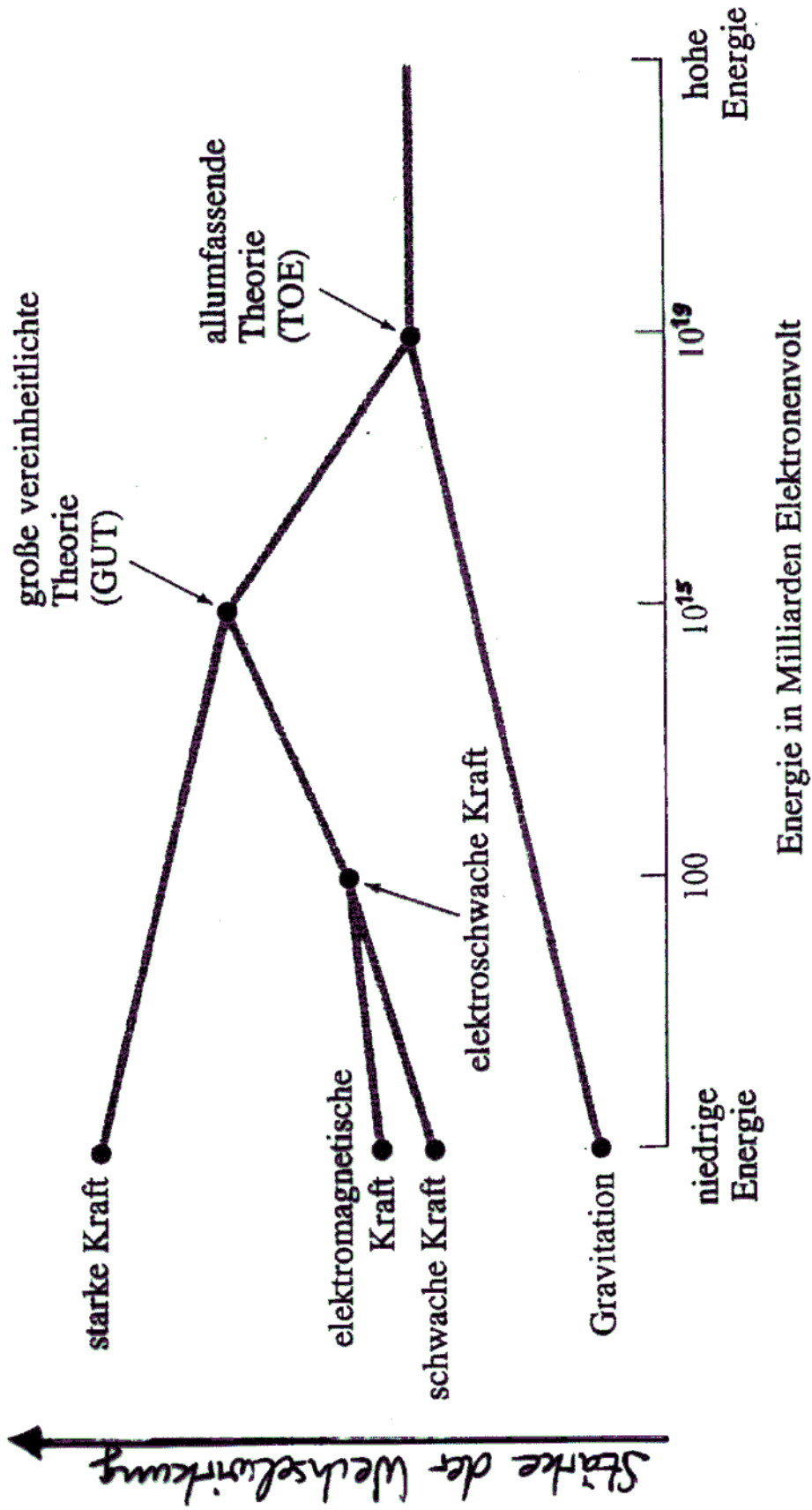
...

- und Probleme:

Theorie versagt bei extrem hohen Energien

→ Standard-Modell: Approximation einer fundamentaleren Theorie?!

# Der Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte?



# Vereinheitlichung der Kräfte?

- Die Kopplungsstärken sind energieabhängig  
(Vakuum polarisation  $\hat{Q}$  und deren Behandlung durch Renormierung)

⇒ Extrapolation der Kopplungsstärken  
zu extremen Energien (z.B. für  
eine GUT-Theorie):

$$\alpha_1 \equiv \frac{5}{3} \frac{\alpha_{em}}{\cos^2 \theta_w} ; \quad \alpha_2 \equiv \frac{\alpha_{em}}{\sin^2 \theta_w} ; \quad \alpha_3 \equiv \alpha_s$$

Startpunkt:  $Q = 100 \text{ GeV}$

$$\alpha_1 \approx 1/59.3 ; \quad \alpha_2 \approx 1/29.9 ; \quad \alpha_3 \approx 1/8.3$$

- Annäherung der Kopplungsstärken bei  $Q \approx 10^{14} \text{ GeV}$
- Vereinigung der Kopplungen durch geeignete zusätzl.

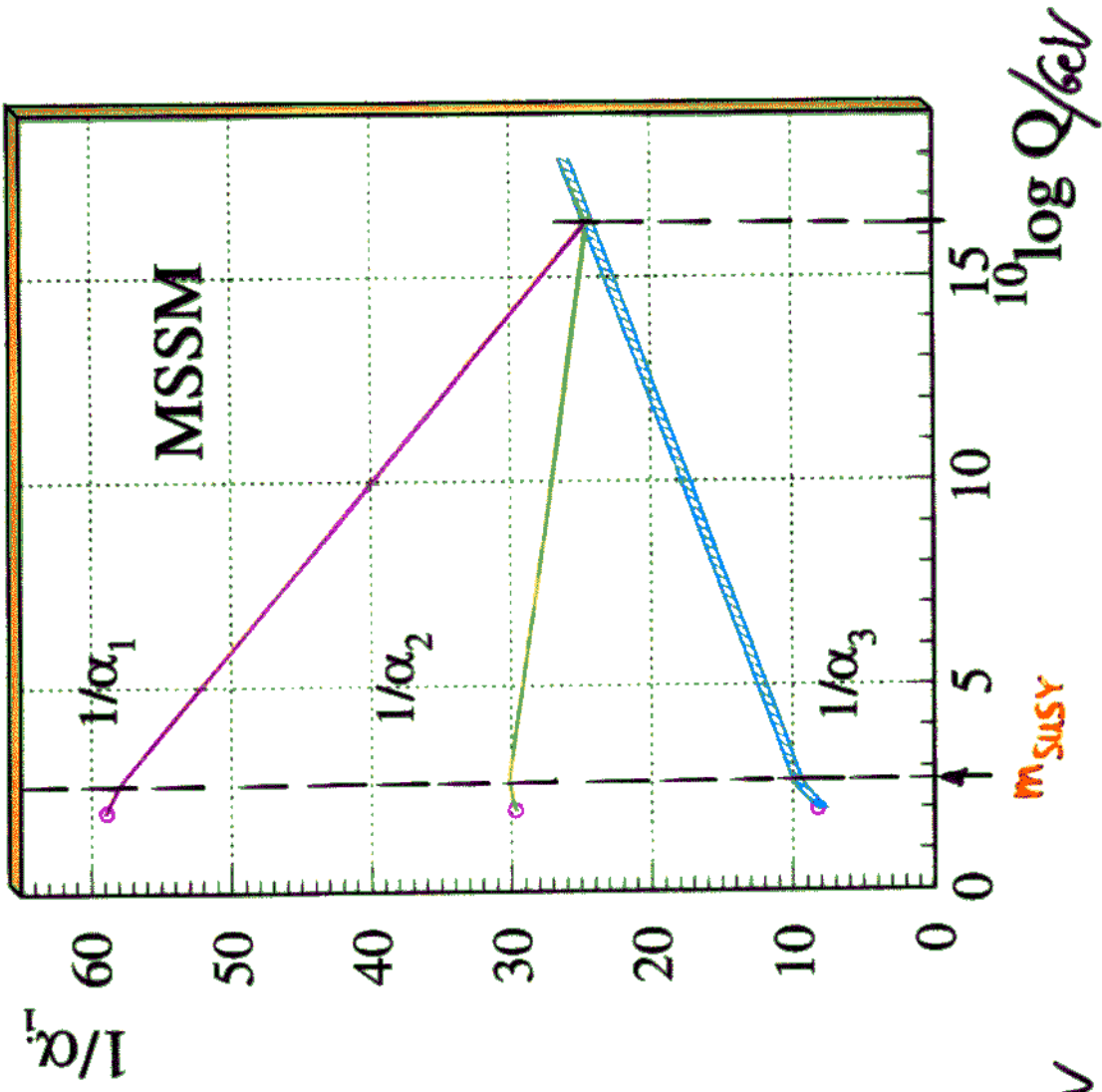
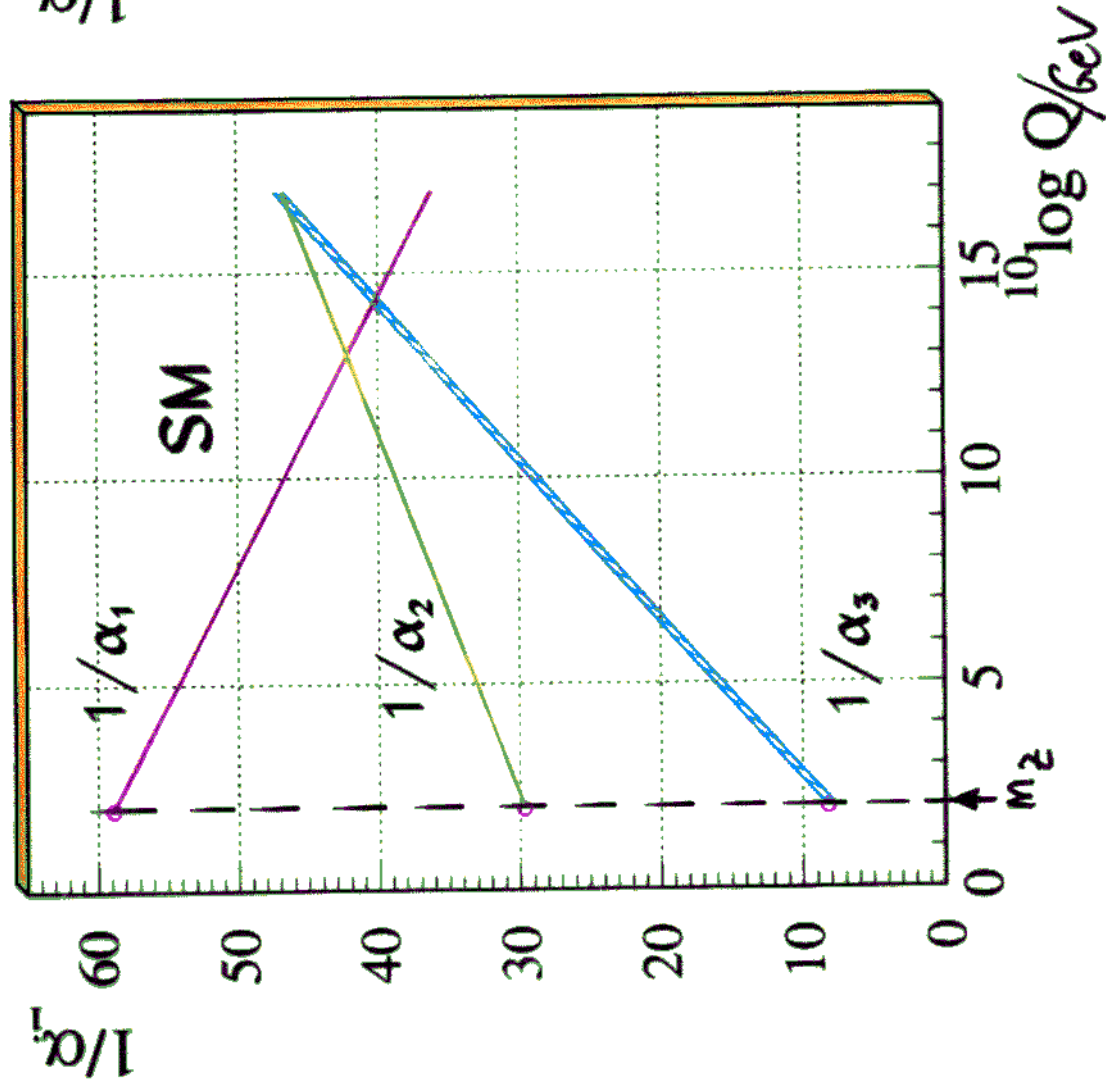
Schwelle bei  $\approx 10^3 \text{ GeV}$

Vereinigung bei  $\approx 10^{16} \text{ GeV}$

Schwelle  $\hat{=}$  Skala der neuen physikal. Prozesse

→ supersymmetrische Teilchen !

# Vereinigung der Kopplungskonstanten im Standardmodell und im minimalen MSSM

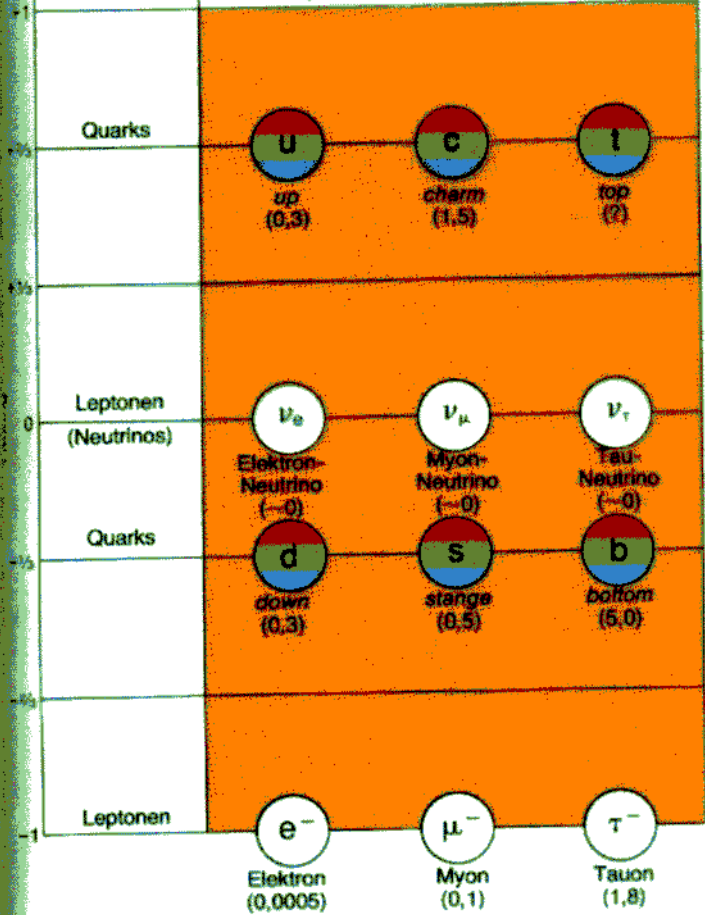




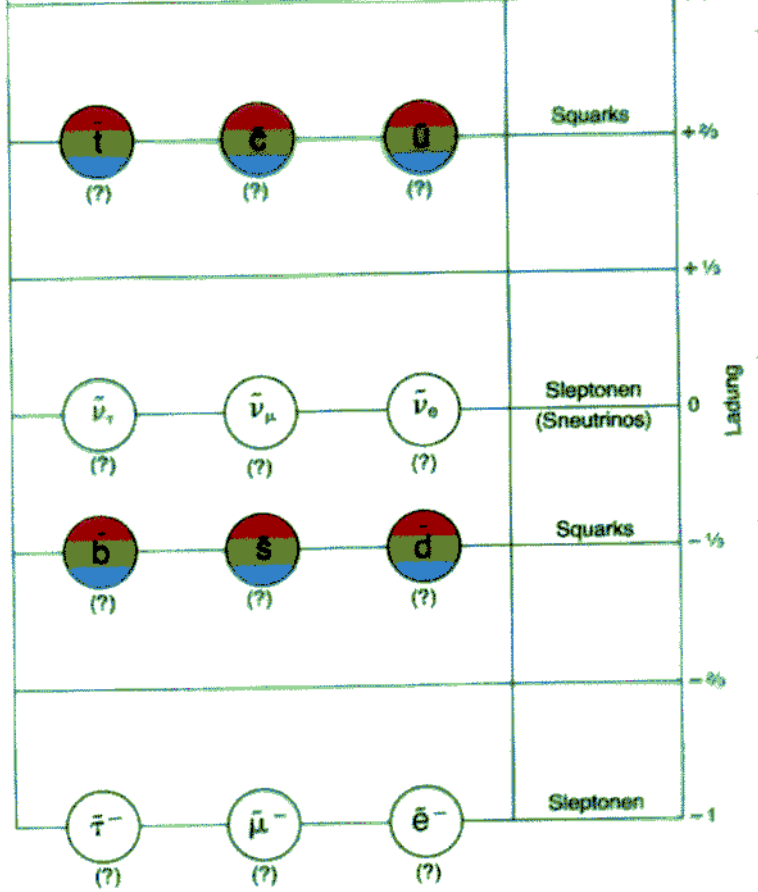
# Teilchen im minimal supersym. Standard-Modell (MSSM)

Spin 0	Spin 1/2	Spin 1	Spin 3/2
$\tilde{\chi}, \tilde{\nu}$	$\tilde{l}, \tilde{\nu}$		
$\tilde{q}$	$q$		
$h, H, A$	$\tilde{g}$ (Gluino)	$g$	
	$\tilde{\chi}, \tilde{Z}, \tilde{h}, \tilde{H}$	$\gamma, Z$	
	$\tilde{\chi}_{1-4}$ (Neutralino)		
$H^\pm$	$\tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm$	$W^\pm$	
	$\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$ (Chargino)		
			$\tilde{G}$ (Gravitino)

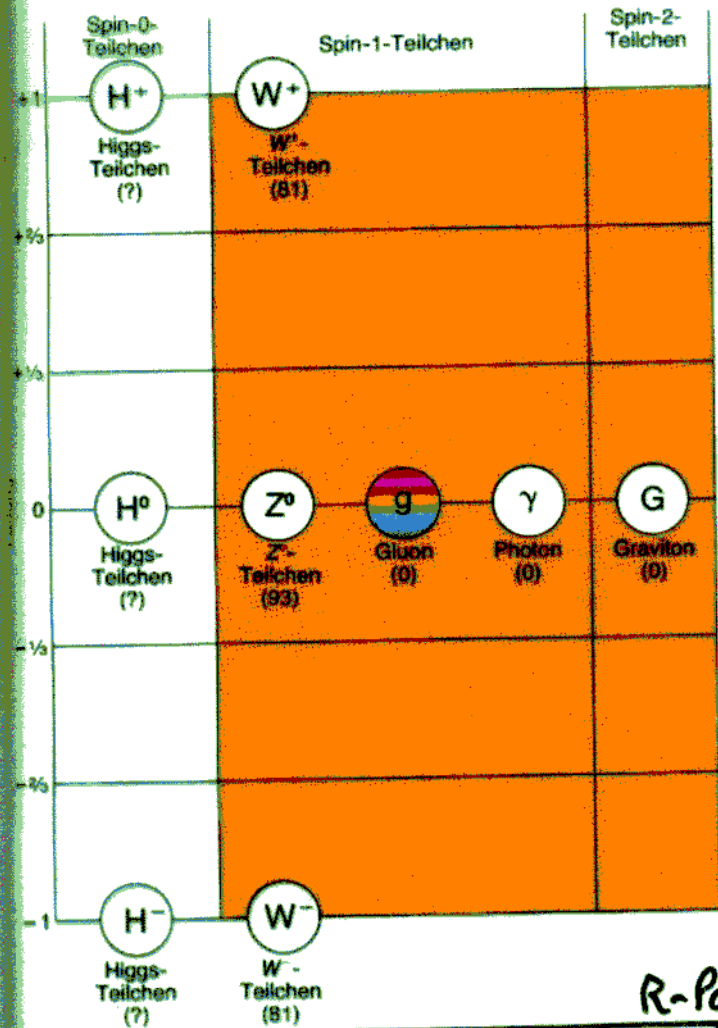
Elementarteilchen  
(Fermionen: Spin-1/2-Teilchen)



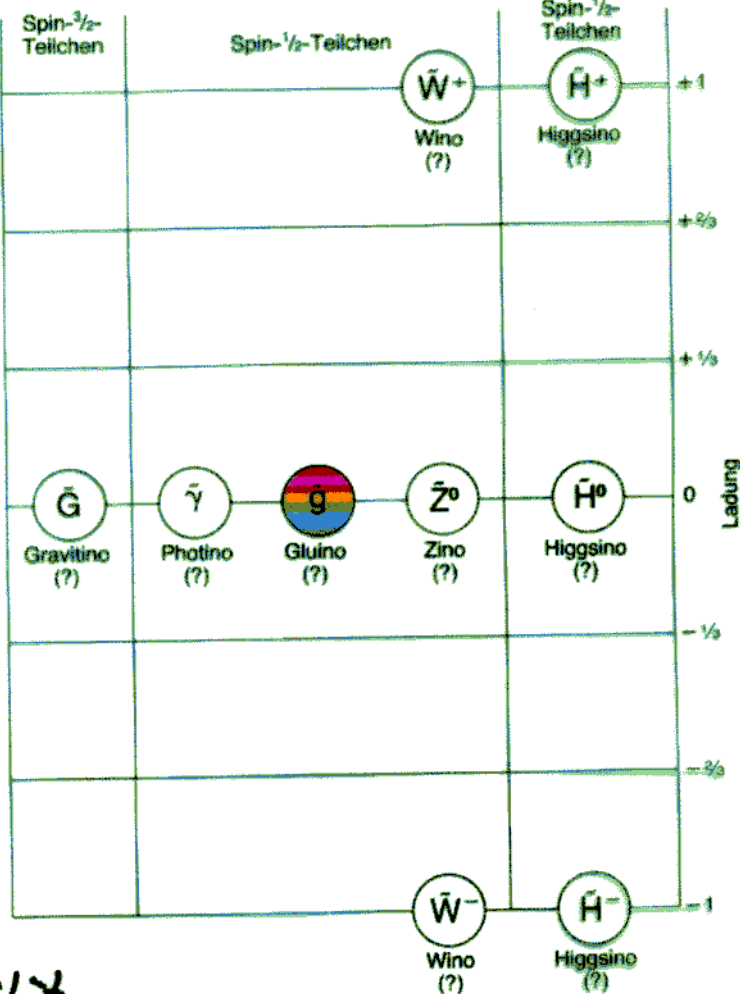
ihre Superpartner  
(Bosonen: Spin-0-Teilchen)



kraftvermittelnde Teilchen (Bosonen)



ihre Superpartner



R-Parität

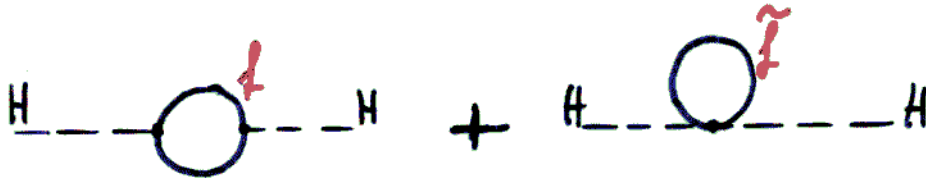
+1

-1

# Super-symmetrie

## Vorteile:

- Enthält präzise getestetes Standard-Modell
- kann berechnet werden
- bringt GUT-Vereinheitlichung
- löst Hierarchie-Problem, falls  $\Lambda_{\text{susy}} \approx 1\text{TeV}$



$$m_H^2(m_W) = m_H^2(\Lambda) + c g_W^2 \Lambda^2 + -c g_W^2 \Lambda^2$$

$\Lambda$ : Energieskala neuer physikal. Prozesse  
(z.B.  $\Lambda = m_{\text{Planck}} = 10^{19} \text{ GeV}$ )

- sagt viele neue Teilchen vorher
- Higgs-Boson leicht
- ...



# Supersymmetrie

## Nachteile:

- Symmetrie offensichtlich gebrochen (Mechanismus?)
- zusätzlich 106 Parameter (+18 aus SM)  
(Massen, Mischungswinkel, CP-Phasen, weitere VEV)
- phänomenologische Defizite
  - ▷ fehlende Unterdrückung von FCNC  
(Flavour-Änderung durch neutrale Eichbosonen, z.B.  $\sum \begin{pmatrix} u \\ \bar{c} \end{pmatrix}$ )
  - ▷ übermäßige CP-Verletzung

⇒ Nahezu gesamter 124 dim. Parameterraum  
des MSSM ausgeschlossen!

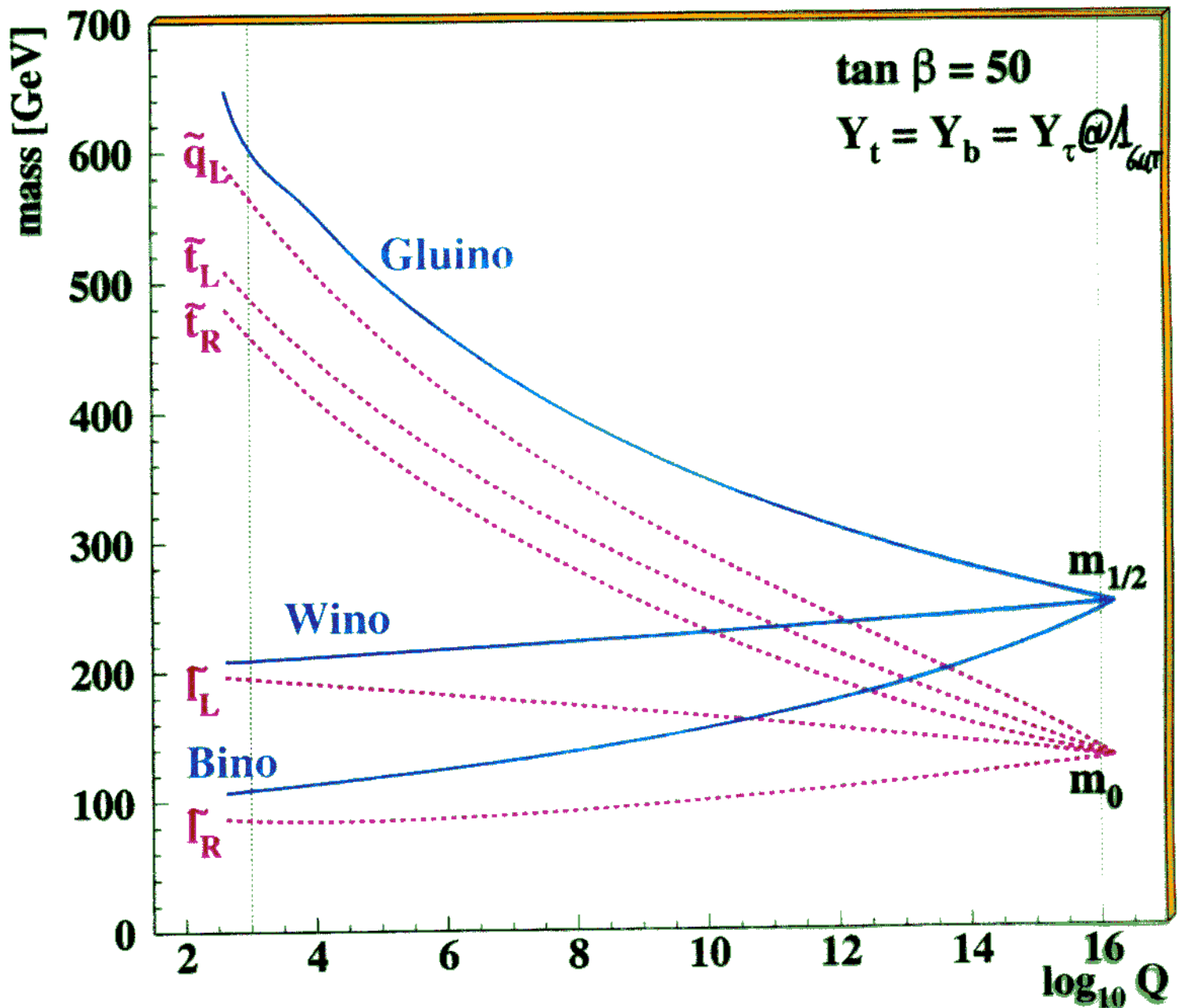
- Reduzierung der Parameter: Annahmen
  - ▷ Vereinigung der Eichbosino-Massen bei  $\Lambda_{\text{GUT}}$   
 $m_{\tilde{g}}(\Lambda_{\text{GUT}}) = m_{\tilde{w}}(\Lambda_{\text{GUT}}) = m_{\tilde{b}}(\Lambda_{\text{GUT}}) \equiv m_{1/2}$
  - ▷ Vereinigung der s-Fermionmassen bei  $\Lambda_{\text{GUT}}$   
 $m_{\tilde{t}}(\Lambda_{\text{GUT}}) \equiv m_0$

# Energie-Evolution der SUSY-Massen

... mittels Renormierungsgruppen-Gleichung.

- Parameter:
- $m_{1/2}$  Masse der Gauginos @  $\Lambda_{GUT}$
  - $m_0$  Masse der s-Fermionen @  $\Lambda_{GUT}$
  - $\tan\beta = VEV_2/VEV_1$  d. beiden Higgs-Dubletts
  - $\mu$  Higgs-Mischung
  - $A$  trilineare Kopplung ( $H\tilde{q}\tilde{q}, H\tilde{l}\tilde{l}$ )

z.B.



# SUSY-Phänomenologie

SUSY-Brechung  
(GMSB, SUGRA, ...)

+

SUSY-Parameter  
( $m_0, m_{1/2}, \tan\beta, \mu, A, \dots$ )

viele konkrete Modelle

z.B.:

• GMSB: LSP = Gravitino  $\tilde{G}$  ( $\approx$  masselos)

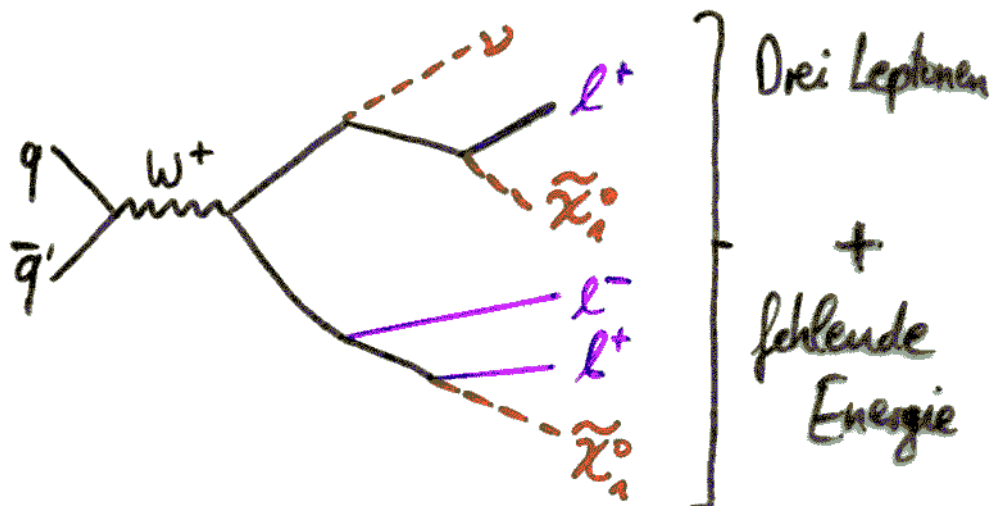
+  
 $\Delta$  NLSP = Neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$  (NLSP = nächst-leichtestes SUSY-Teilchen)  
 $\rightarrow \gamma \tilde{G}$  oder  $Z \tilde{G}$  oder  $h \tilde{G}$   
 ↑  
 unbeobachtet  
 $\rightarrow$  fehlende Energie

$\Delta$  NLSP = slepton  $\tilde{l}^\pm$   
 $\rightarrow l^\pm \tilde{G}$

...

• SUGRA: LSP = Neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$

$\Delta$  z.B.:

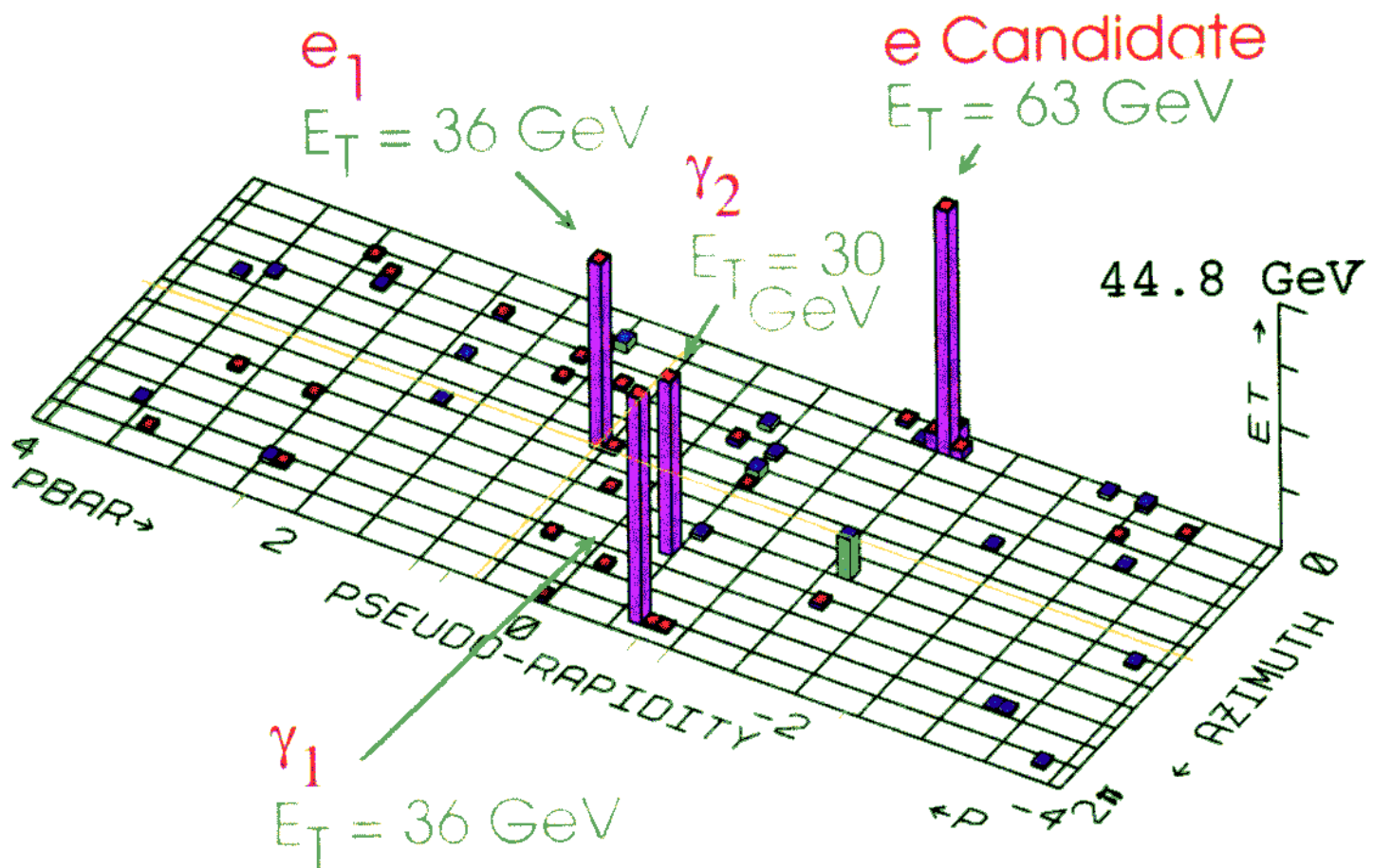


...

# SUSY-Kandidat ?

CDF (1996):

## $e\gamma\cancel{E}_T$ Candidate Event



$E_T = 55$  GeV

z.B.:  $q\bar{q} \rightarrow \tilde{e}^+\tilde{e}^-$

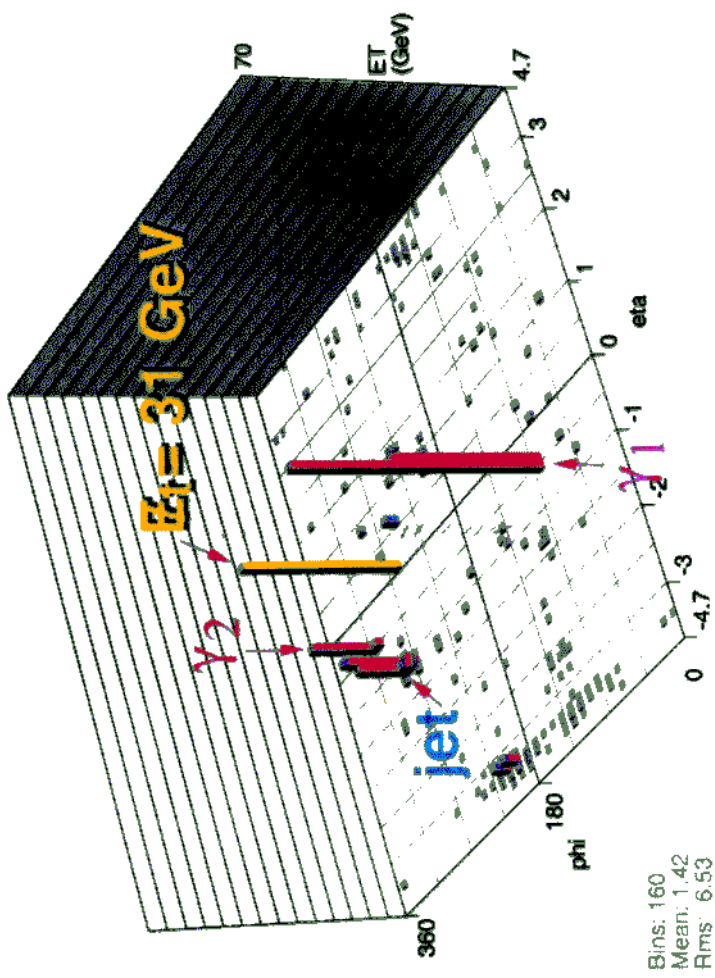
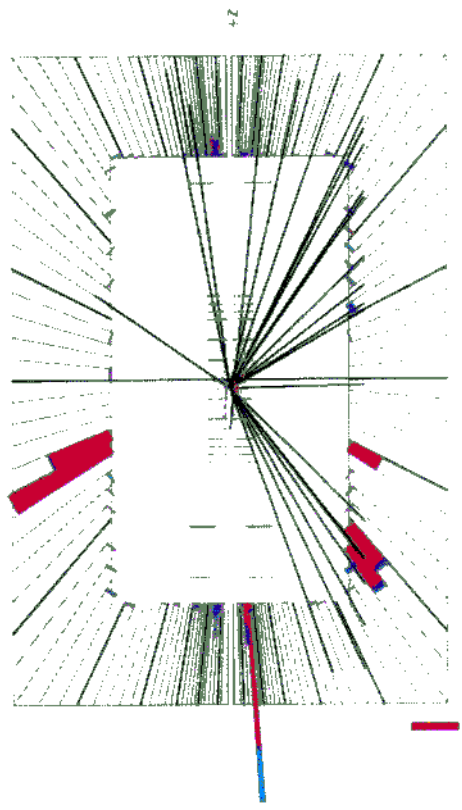
$\tilde{e}^\pm \rightarrow e^\pm \tilde{\chi}_1^0$

$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G}$   
 $\tilde{G} \rightarrow \cancel{E}_T$

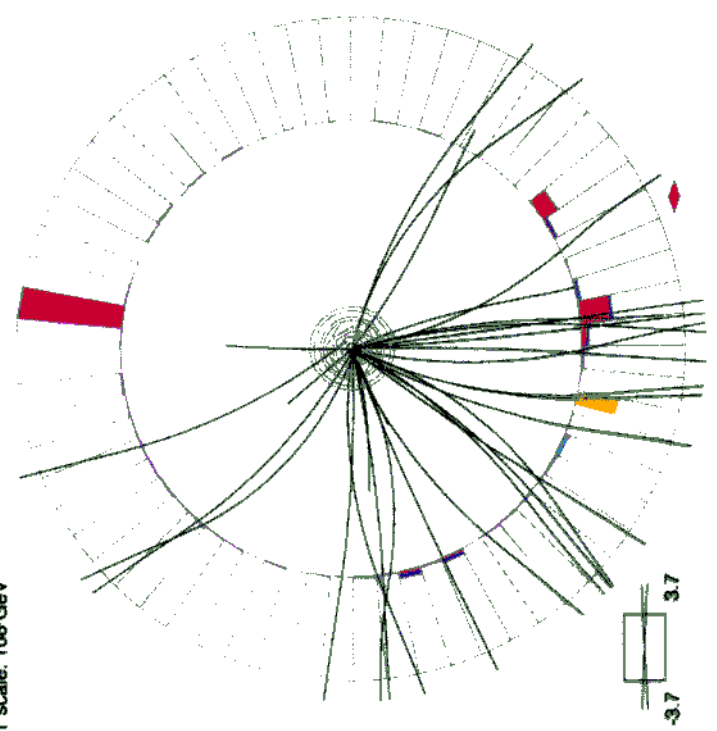
DD: Kandidat mit größtem  $E_t$

Run 165653 Event 12351398 Thu Mar 6 15:27:39 2003

E scale: 67 GeV



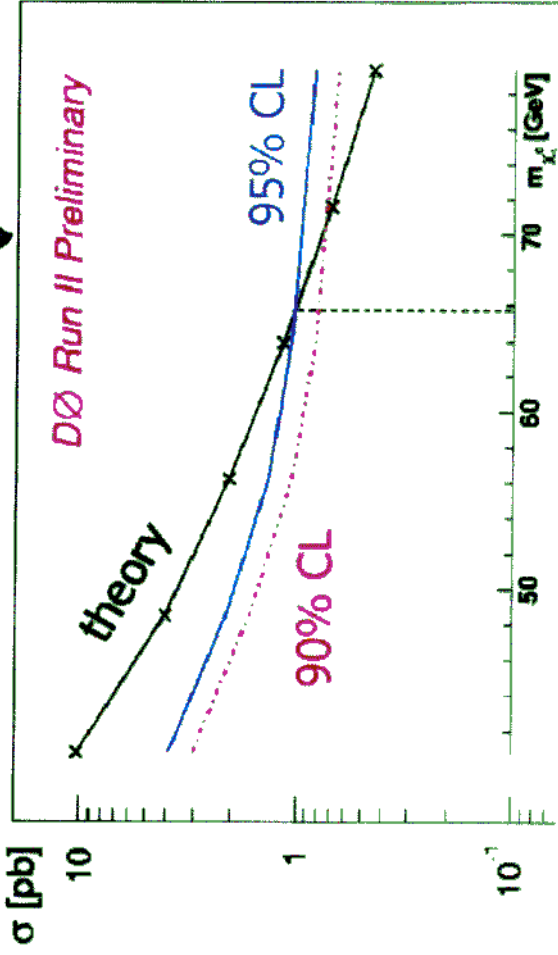
ET scale: 108 GeV



z.B.:  $q\bar{q} \rightarrow \text{Gauginos} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_n^+ + \dots$   
 $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G} \rightarrow E_t$

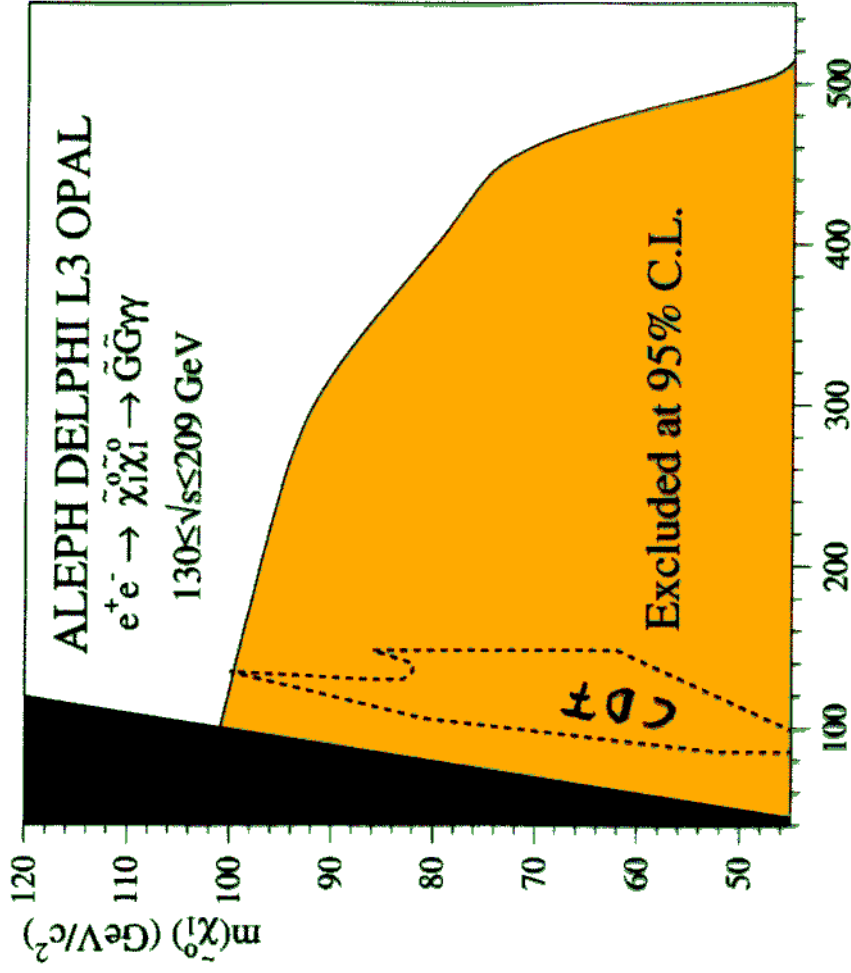
# Grenzen auf $\tilde{\chi}_1^0$ -Masse im GMSB

Zählrate von  $\gamma\gamma + \cancel{e}e \rightarrow$



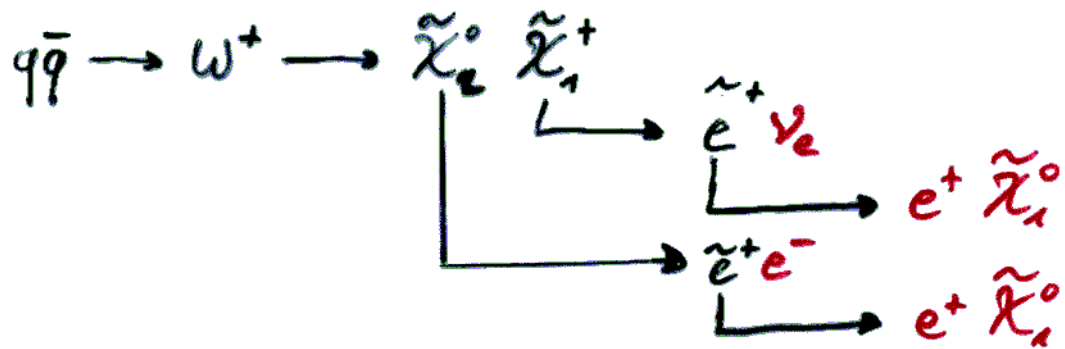
DØ (vorl.):  $m_{\tilde{\chi}_1^0} > 66 \text{ GeV/c}^2$   
 @ 95% CL

... und CDF-Kandidat?



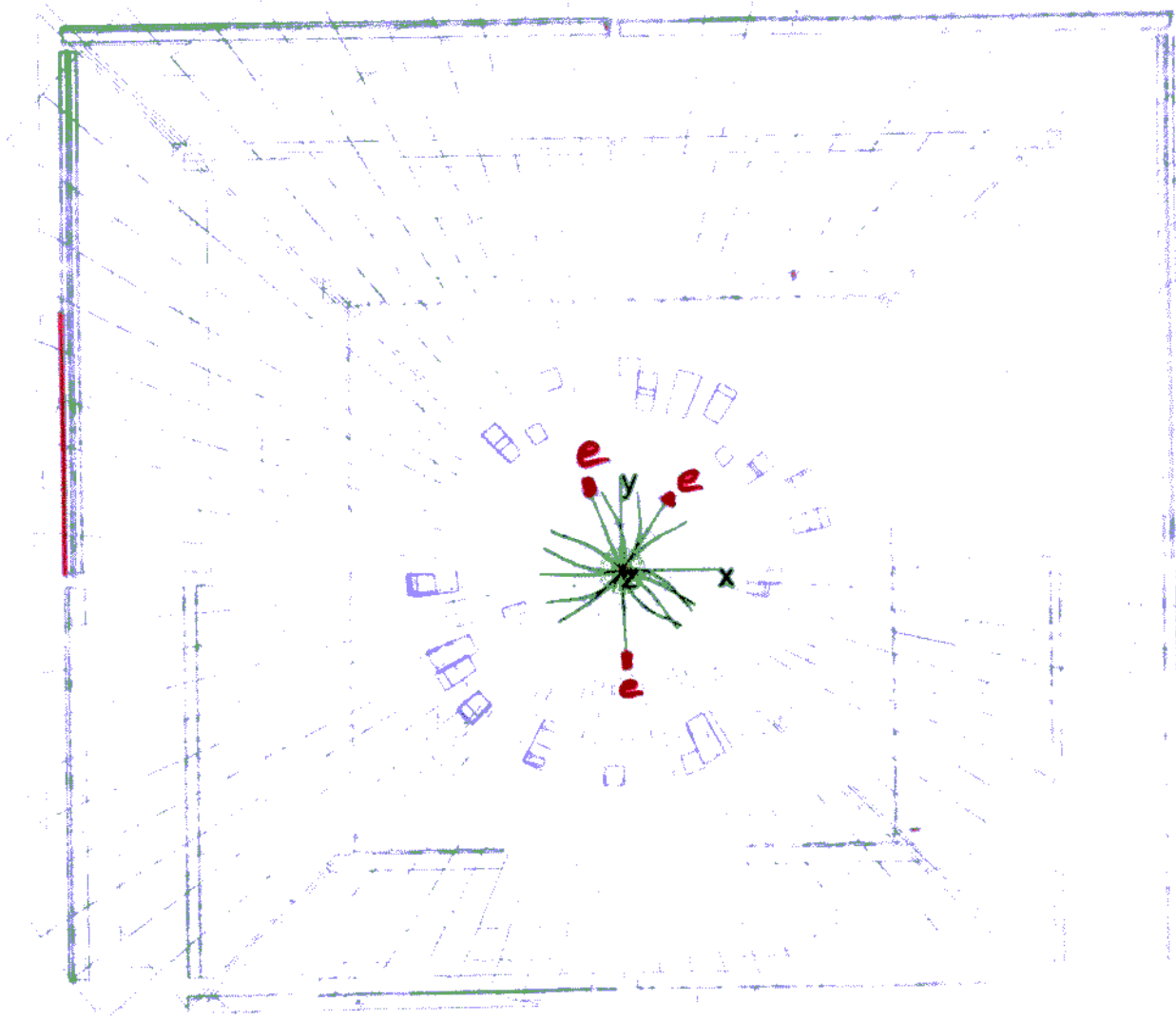
SUSY-Interpretation (GMSB)  
 ausgeschlossen

# 3-Elektron-Kandidat



Run 167885 Event 21398063 Fri Mar 7 13:08:31 2003

150



View 1, Front(X-Y)





# R-Paritätsverletzung und Leptoquarks

- Falls  $\mathcal{R}$   $\rightarrow$  LSP zerfällt

allgemeiner: SUSY-Teilchen  $\rightarrow$  SM-Teilchen

z.B.:  $\blacktriangleright \tilde{d} \rightarrow e^- u$

$\blacktriangleright \tilde{u} \rightarrow e^+ d$

$\blacktriangleright \tilde{s} \rightarrow \mu^- c$

$\blacktriangleright \tilde{c} \rightarrow \mu^+ s$

...

$\hookrightarrow$  analog zu Leptoquarks

## • Leptoquarks

- $\blacktriangleright$  allgemein in GUT erwartet
- $\blacktriangleright$  ggf. Baryon-, Leptonzahl verletzend ( $\leadsto$  Protonzerfall)
- $\blacktriangleright$  9 skalare, 9 Vektor-Leptoquarks  $LQ$
- $\blacktriangleright$  Produktion, z.B. in Paaren:  
 $q\bar{q} \rightarrow LQ + \bar{L}\bar{Q}$ ;  $qg \rightarrow LQ + \bar{L}\bar{Q}$ ;  $gg \rightarrow LQ + \bar{L}\bar{Q}$
- $\blacktriangleright$  Zerfall  
 $\beta := BR(LQ \rightarrow lq)$ ,  $1 - \beta = BR(LQ \rightarrow \nu q')$

# Phänomenologie der Leptoquarks

## • Produktion

$$\triangleright q\bar{q} \rightarrow LQ + L\bar{Q}$$

$$\triangleright gq \rightarrow LQ + L\bar{Q}$$

$$\triangleright g\bar{q} \rightarrow LQ + L\bar{Q}$$

## • Zerfall

$$\beta := BR(LQ \rightarrow lq), 1 - \beta = BR(LQ \rightarrow \nu q')$$

## • Signaturen

$$\triangleright p\bar{p} \rightarrow LQ L\bar{Q} \rightarrow \bar{l}q l^+\bar{q} \quad (2 \text{ Leptonen} + 2 \text{ Jets})$$

$$\triangleright \quad \quad \quad \rightarrow \nu q' \bar{\nu} \bar{q}' \quad (2 \text{ Jets} + \text{fehlende Energie})$$

$$\triangleright \quad \quad \quad \rightarrow \bar{l}q \bar{\nu} \bar{q}' \quad (1 \text{ Lepton} + 2 \text{ Jets} + \cancel{E})$$

## • Selektion für $LQ_2 L\bar{Q}_2 \rightarrow \mu^- q \mu^+ \bar{q}$

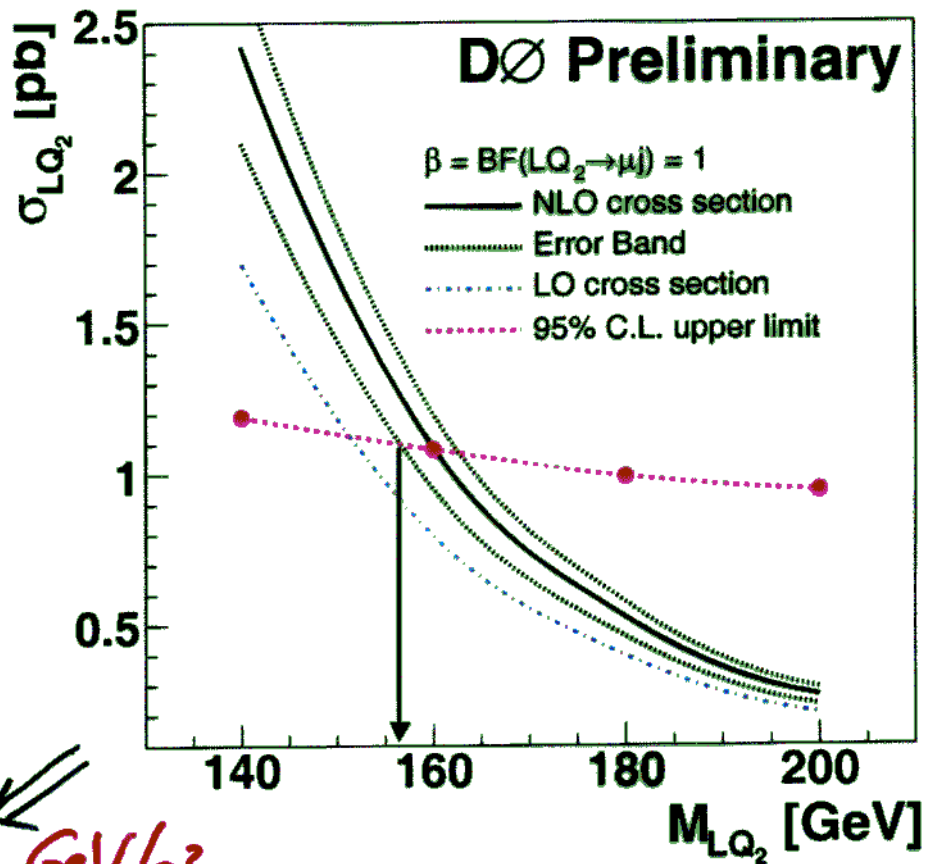
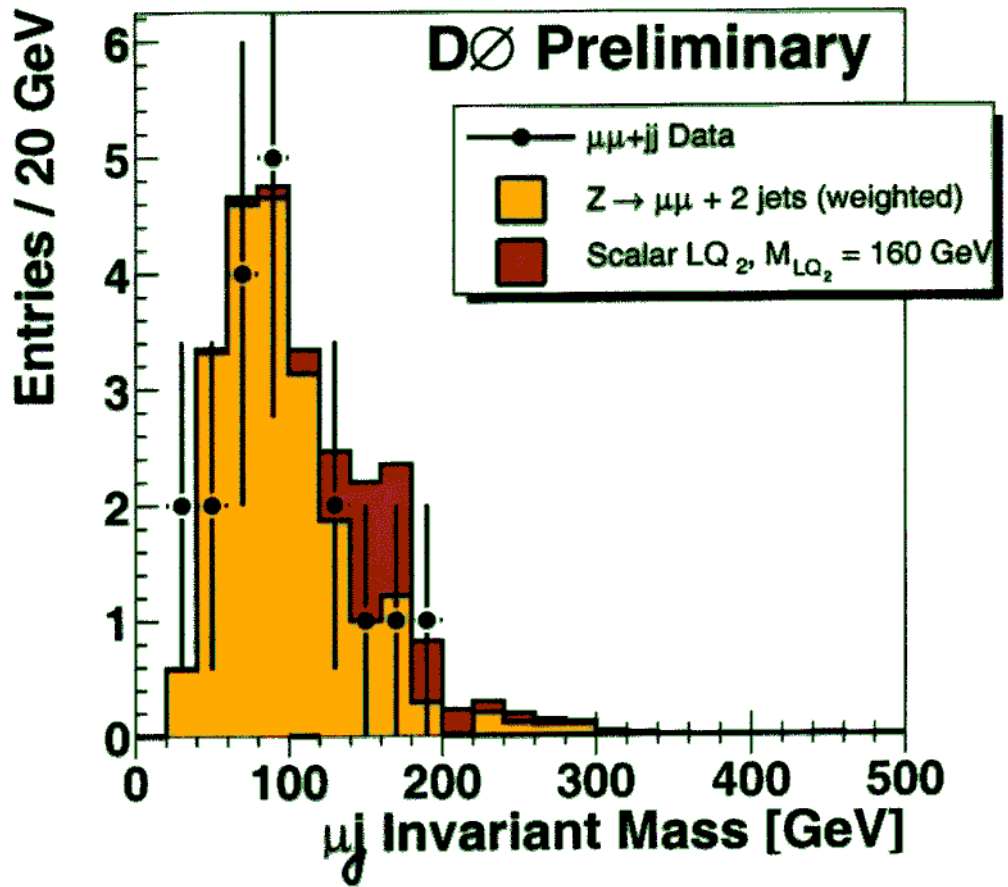
$$\triangleright \text{Trigger: } 2 \text{ Myonen}$$

$$\triangleright \text{Vetos: } Z \rightarrow \mu^+ \mu^-, W^+ W^- \rightarrow \mu^+ \nu \mu^- \bar{\nu}, t\bar{t}$$

## • Simulation: opt. Signal $\div$ Untergrund & Effizienz ( $\approx 15\%$ )

$\rightarrow$  0 Kandidaten, erwarteter Untergrund  $\approx 4.1$   
mit  $M(\mu^+\mu^-) > 110 \text{ GeV}/c^2$

# Leptoquarks

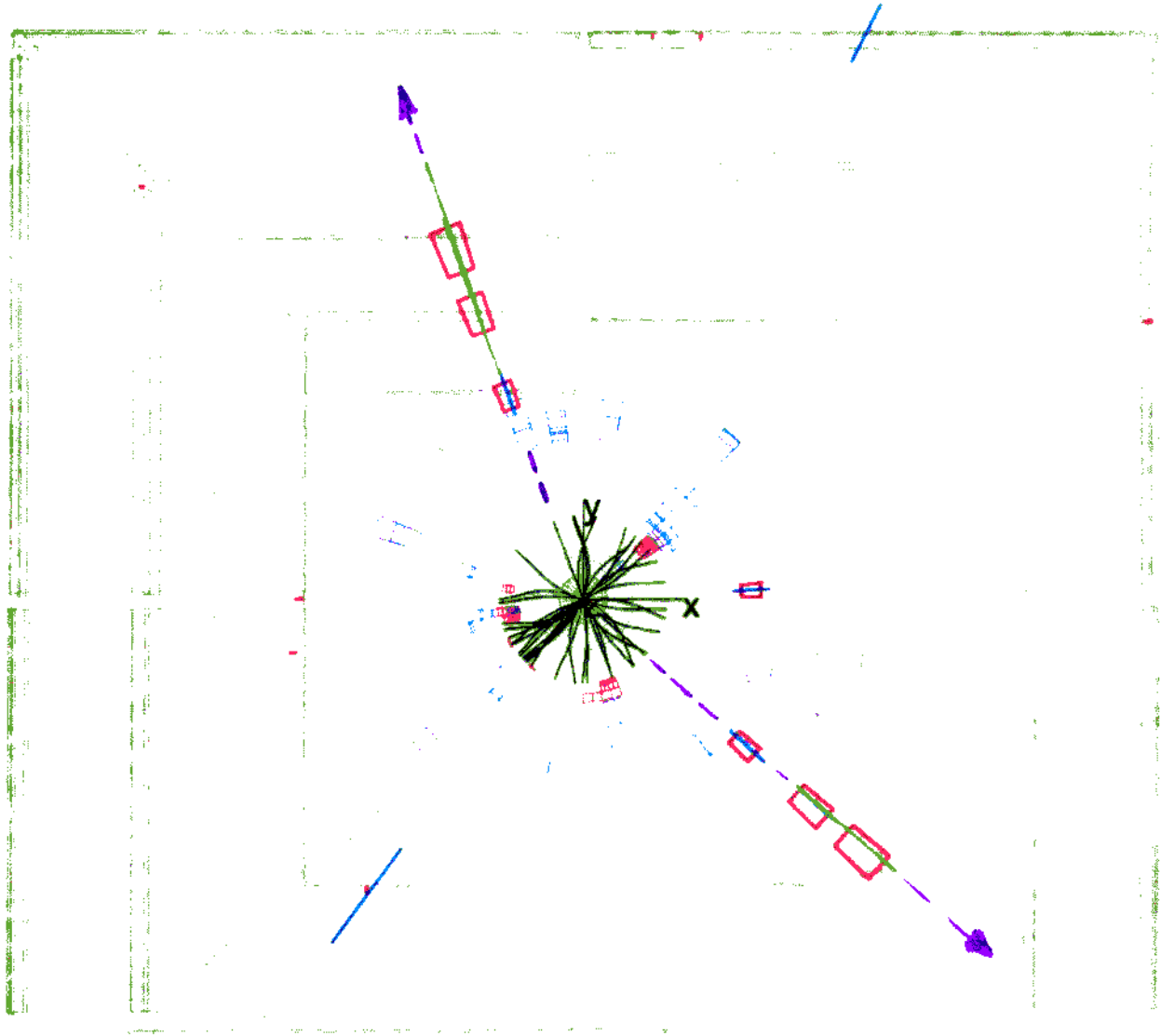


$m(LQ_2) > 157 \text{ GeV}/c^2$   
( $\beta=1$ ) @ 95% CL

# Leptoquark-Kandidat

2 Myonen + 3 Jets

Run 162351 Event 6997479 Wed Mar 5 17:22:35 2003



View 1, Front(X-Y)

# Zusammenfassung & Ausblicke

## • LEP - Experimente

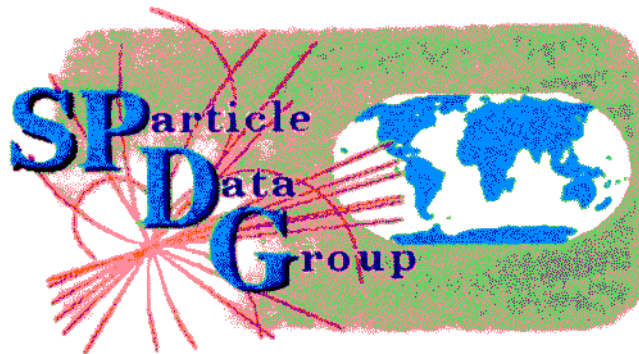
- ▷ innere Konsistenz der elektroschwachen Theorie
- ▷ strenge Grenzen für Masse des Higgs-Bosons
$$114.4 \text{ GeV}/c^2 < m_H < 211 \text{ GeV}/c^2$$
- ▷ ...

## • Tevatron und DØ - Experiment

- ▷ erheblich umgebaut & aufgerüstet
- ▷ zunehmende Leistungssteigerung
- ▷ erste vorläufige Resultate (Higgs, SUSY, Leptoquarks u.a.!) 
$$(Higgs, SUSY, Leptoquarks)$$
- ▷ Ausschlussgrenzen aus Run1 und von LEP: hoch (einige werden bald mit Run2 erreicht & verbessert)

## • Teilchenphysik komplett? Nein!

- ▷ Noch viele ungeklärte Fragen
- ▷ Experimente wie ATLAS @ LHC werden Antworten suchen, Vorbereitungen rasant  
→ bereit für Messungen in 2007!



The [SPDG](#) is an international collaboration that reviews Sparticle Physics and related areas of Astrophysics, and compiles/analyzes data on particle properties. SPDG products are distributed to 130,000 physicists, teachers, and other interested people. The *Review of Sparticle Physics* is the most cited publication in particle physics during the last twenty years. Plots of [SPDG statistics](#) are available.

Mirror sites: [USA \(LBNL\)](#) [Brazil](#) [CERN](#) [Italy \(Genova\)](#) [Japan \(KEK\)](#) [Russia \(Novosibirsk\)](#) [Russia \(Protvino\)](#) [UK \(Durham\)](#)

[Review of Sparticle Physics](#) [Charts, Educational materials, Sparticle Adventure](#) [Information and Databases](#)  
[US-HERFOLK](#) [Sparticle Physics: Twenty Years of Discoveries](#) [Home Pages of major HEP labs](#)

# The Review of Sparticle Physics

[C. Caso et al.](#) *The European Physical Journal C*103 (2018) 1 ([2018 Authors](#))

- **2019** [2019 Web update of Reviews, Tables, Plots](#) New November 2, 2019
- **2019** [2019 Web update of Sparticle Listings](#) New July 6, 2019
- **2018** [2018 Summary Tables and Conservation Laws](#)
- [2018 Reviews, Tables, Plots \(incl. Intro, Text\)](#) Superseded by [2019 Web Version](#)
- [2018 Sparticle Listings \(published version\)](#) Superseded by [2019 Web Version](#)
- [Errata](#) (last changed January 18, 2020)
- [Archived WWW editions:](#) [2017](#) [2016](#) [2015](#)
- [Descriptions](#) of the Summary Tables, Reviews, Listings, etc.
- [Ordering information](#) and list of products
- [2018 Authors and Directory of Sparticle Data Group Authors, Associates, and Advisors](#)
- [Computer-readable files](#) – masses, widths, cross-sections, etc., including [Palm Pilot XXII](#) files.
- [Encoder tools](#) (for SPDG collaborators)