

Mit dem

Urknall im Teilchenphysiklabor

dem

Ursprung der Masse,

Materie - Kraft - Symmetrie

und

zusätzlichen Dimensionen

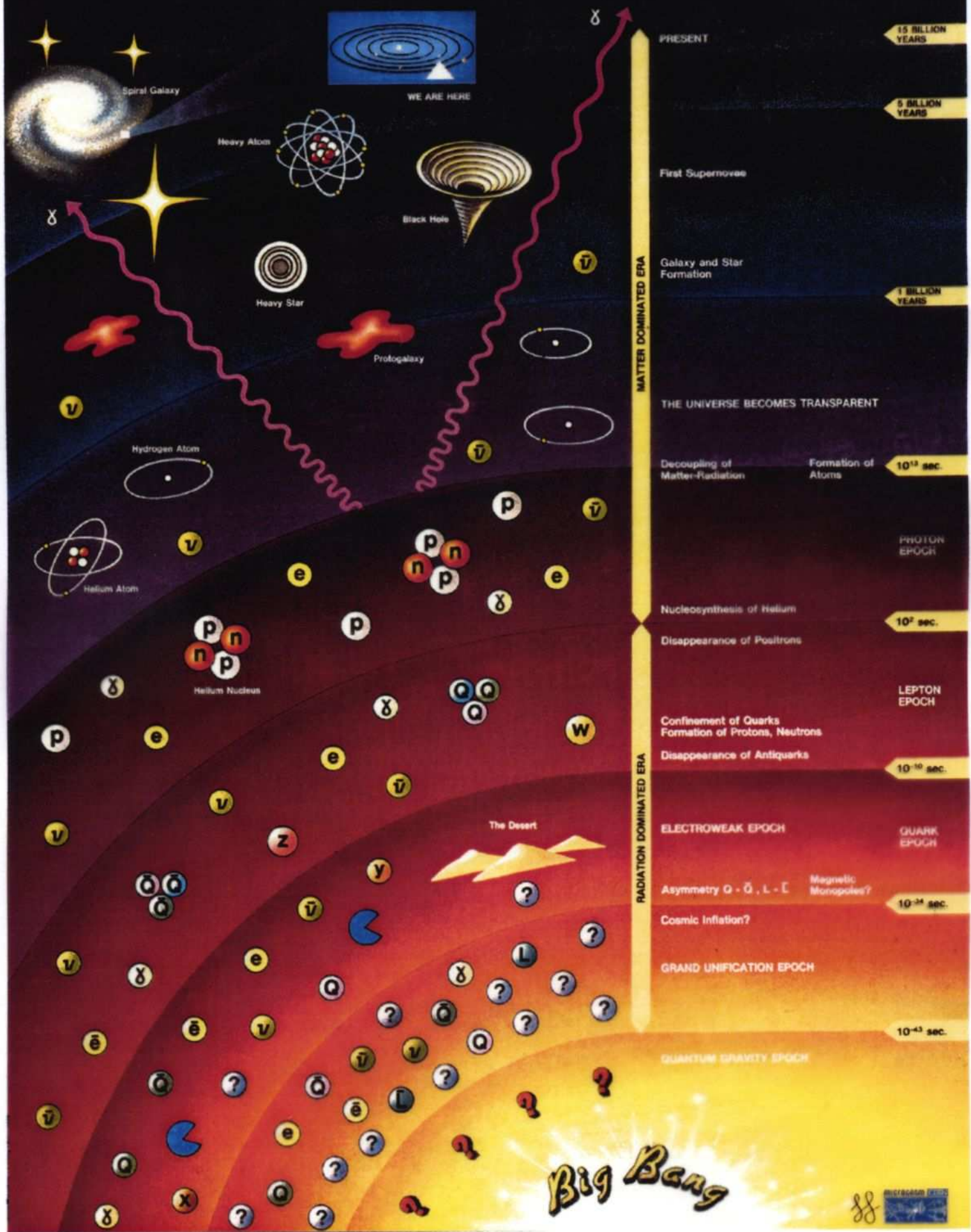
auf der Spur

8.7.2003

O. Biebel

LMU München

History of the Universe





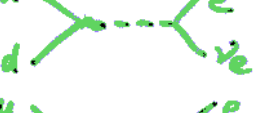

Einleitung

● 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	$+\frac{2}{3}$	x x x x
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$	x x x x

und ihre Anti-Teilchen

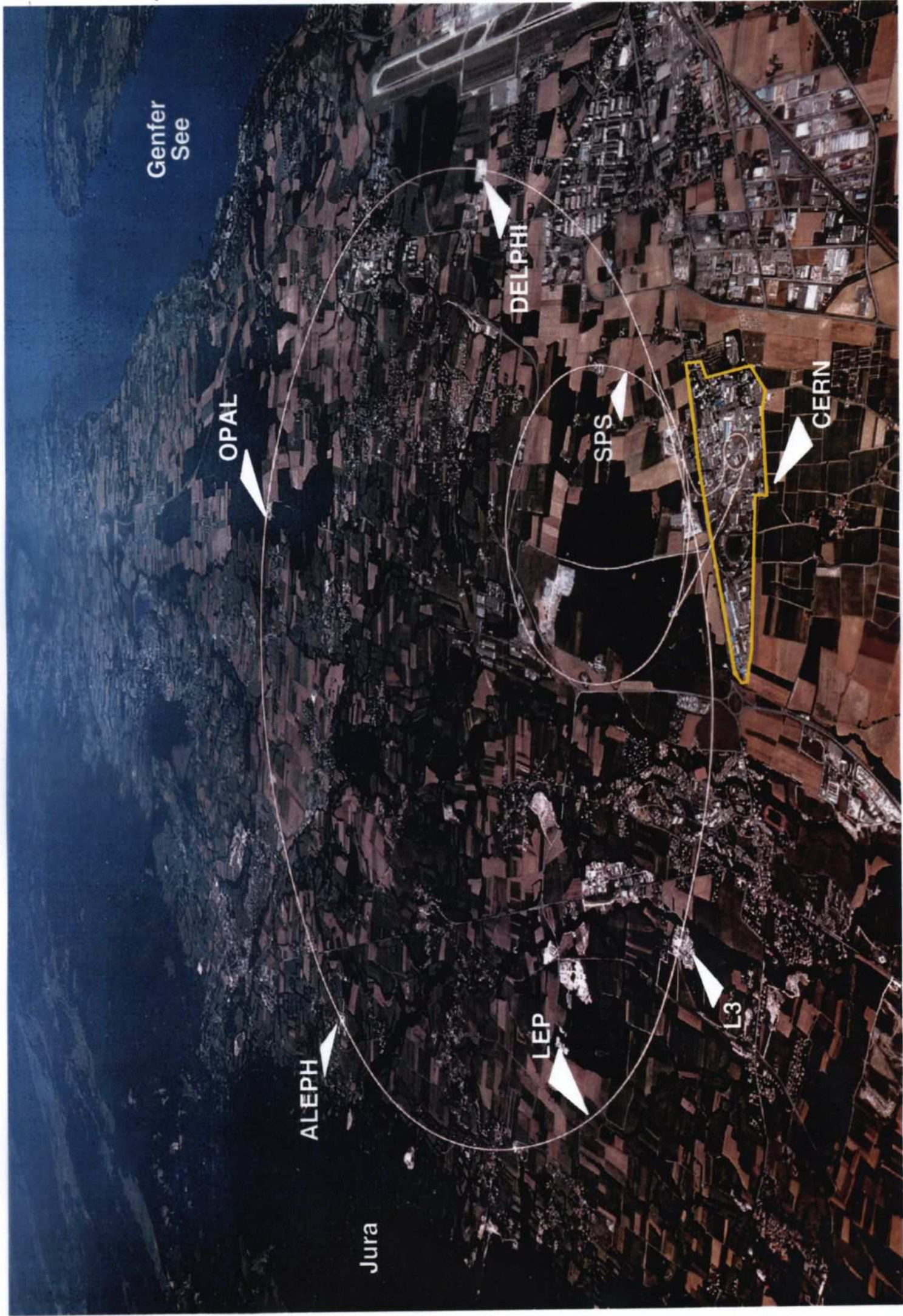
● Kräfte und Vermittler: Bosonen

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

● Erzeugung der Massen:

Higgs-Boson H

wird noch gesucht



Genfer See

OPAL

DELPHI

SPS

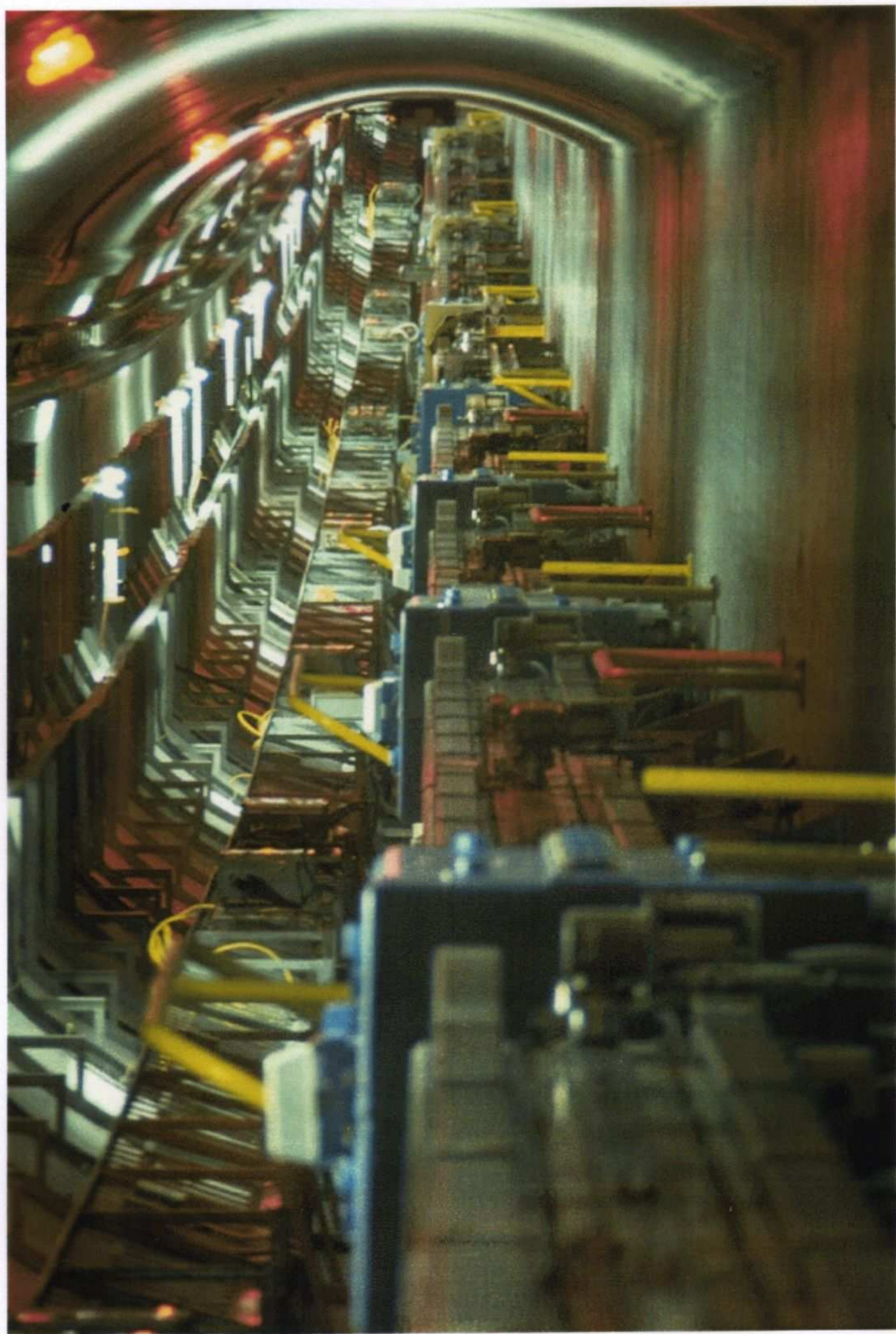
CERN

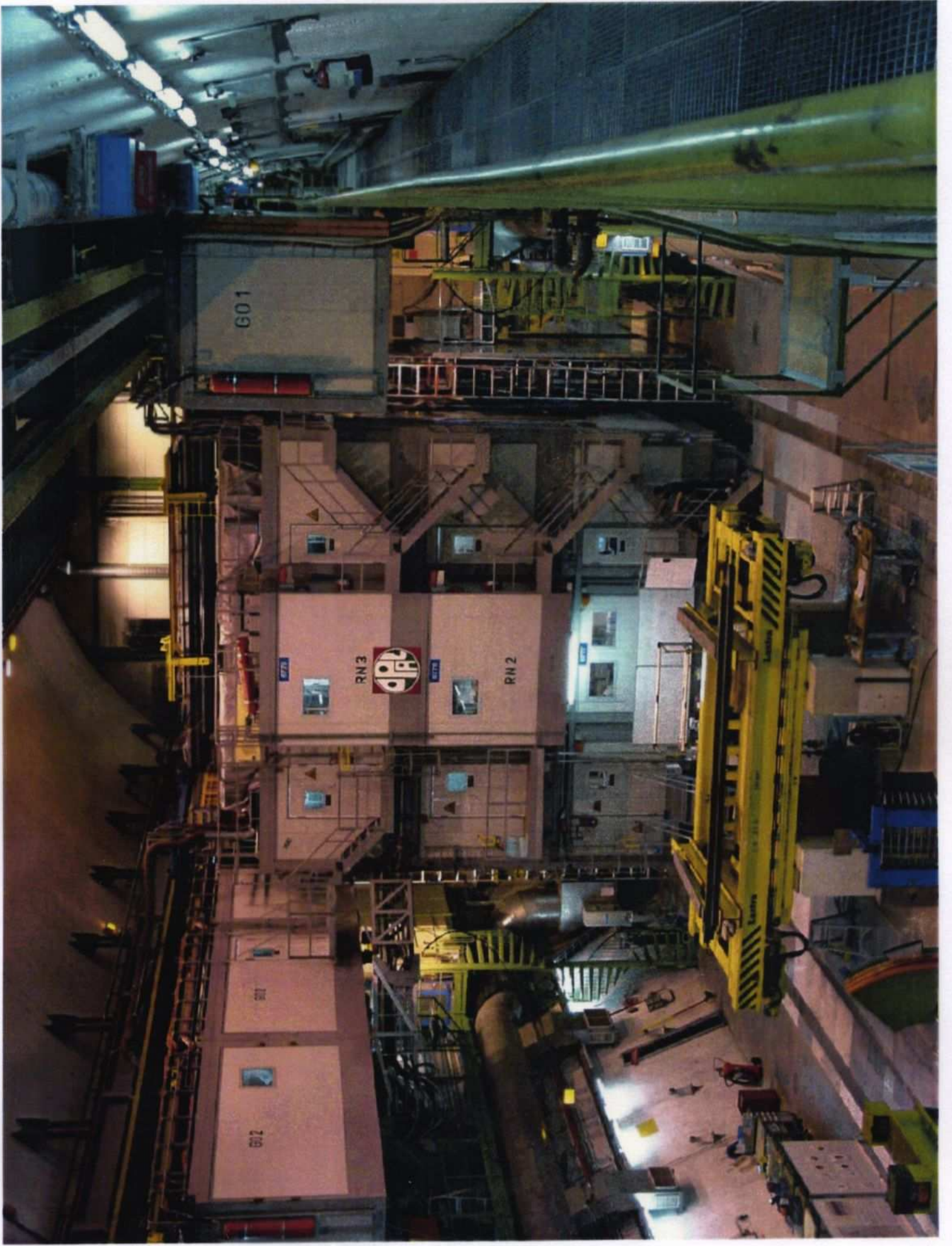
ALEPH

LEP

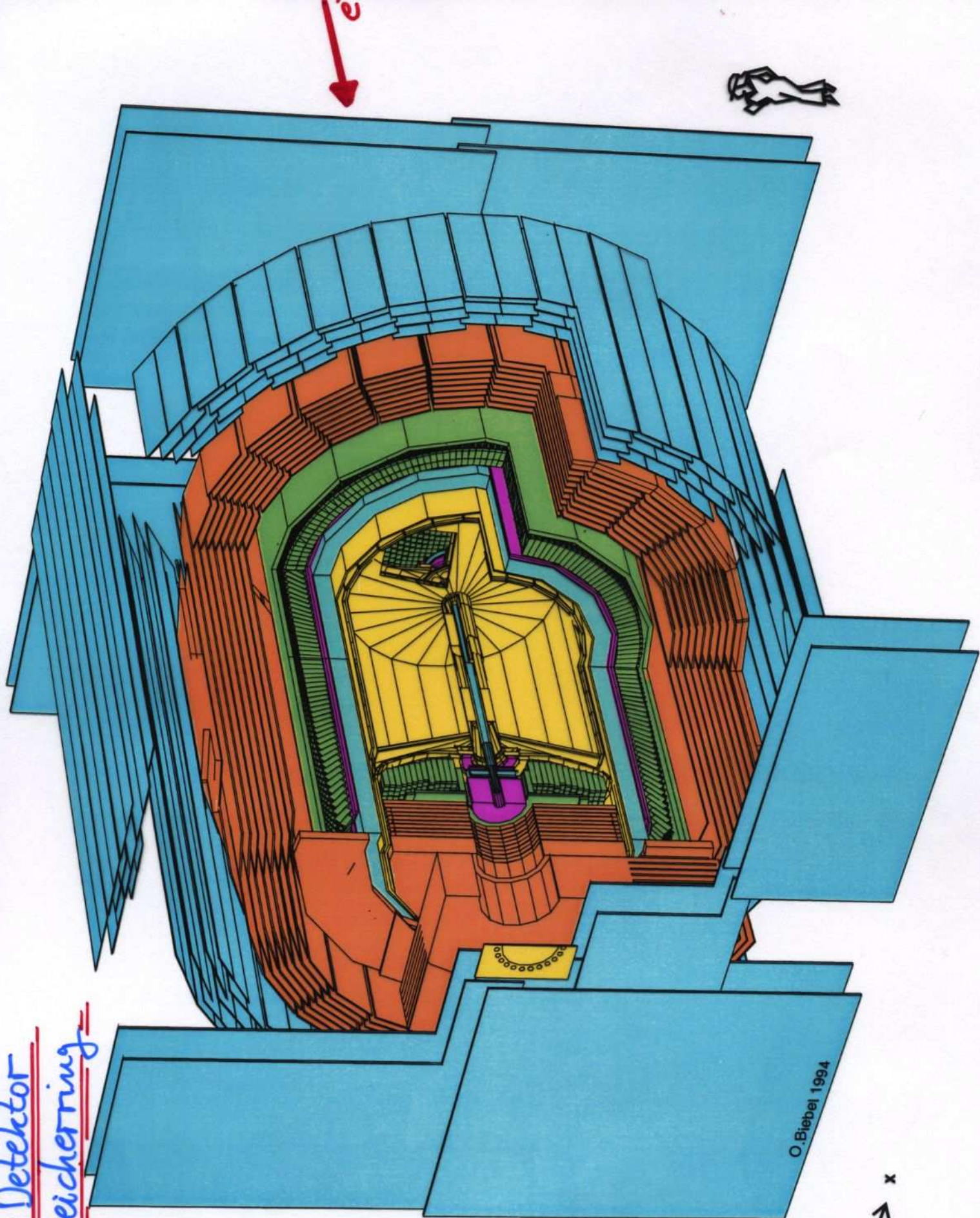
L3

Jura

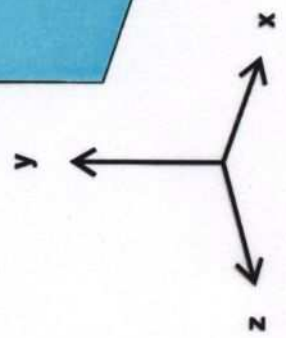




Der OPAL-Detektor
am LEP-Speicherring

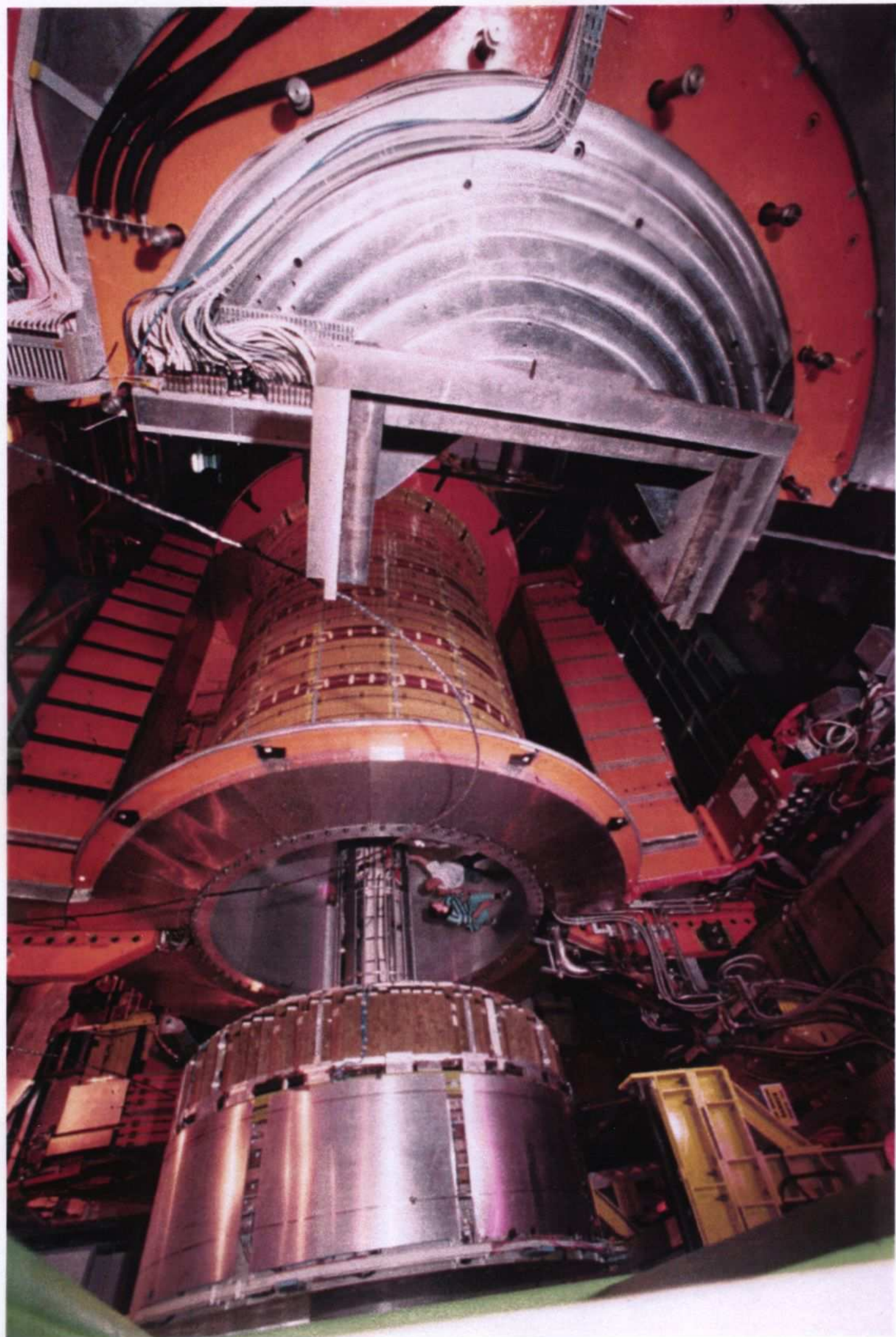


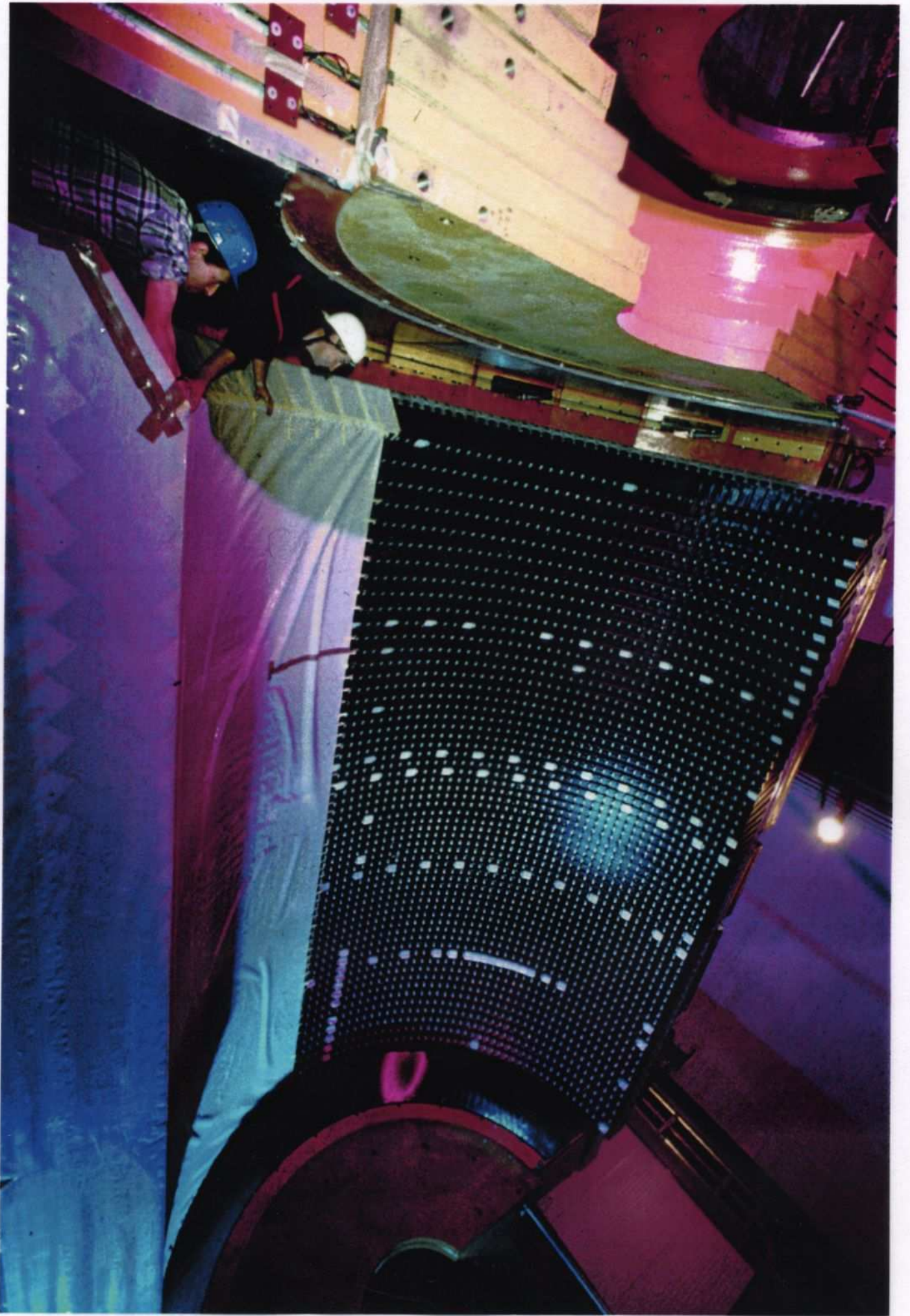
O. Biebel 1994

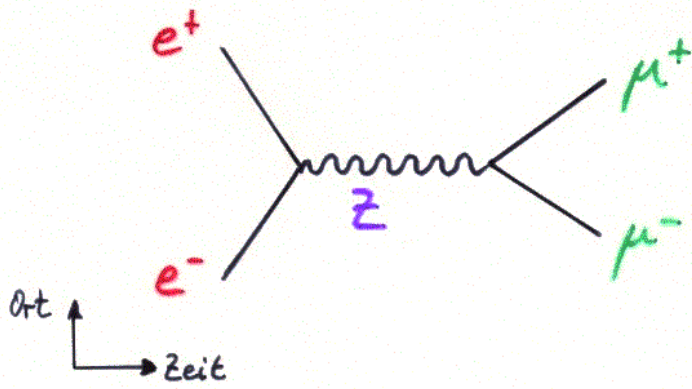


e^+

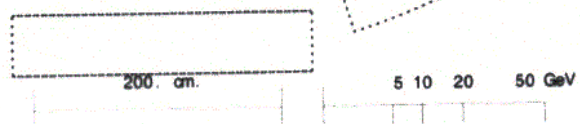
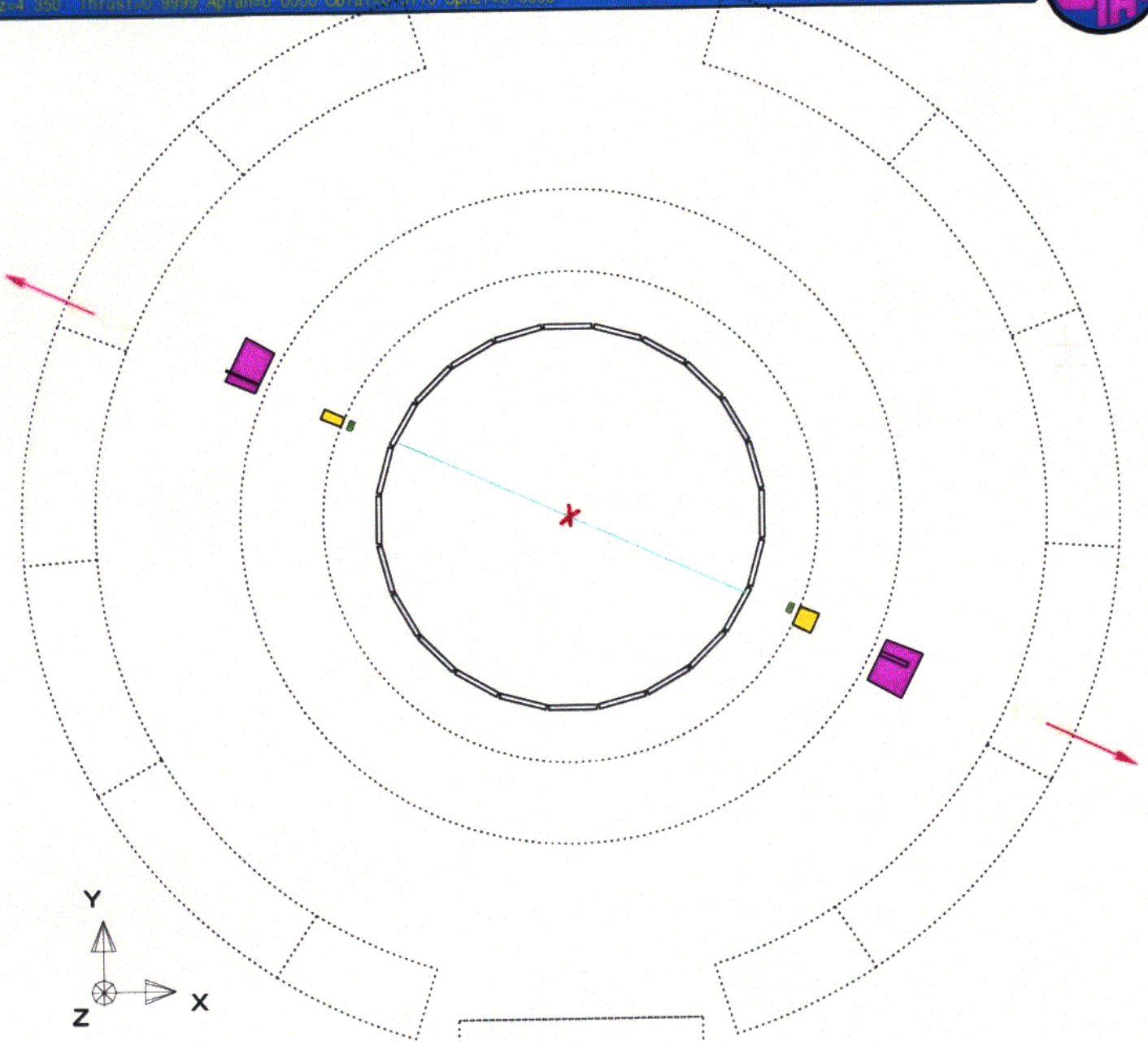
e^-



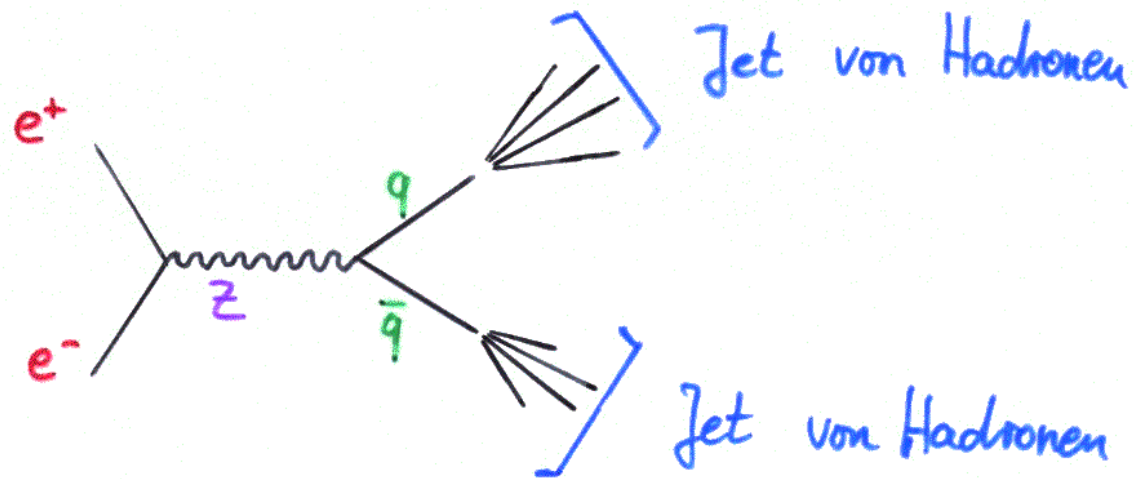




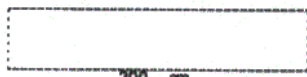
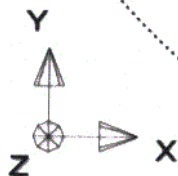
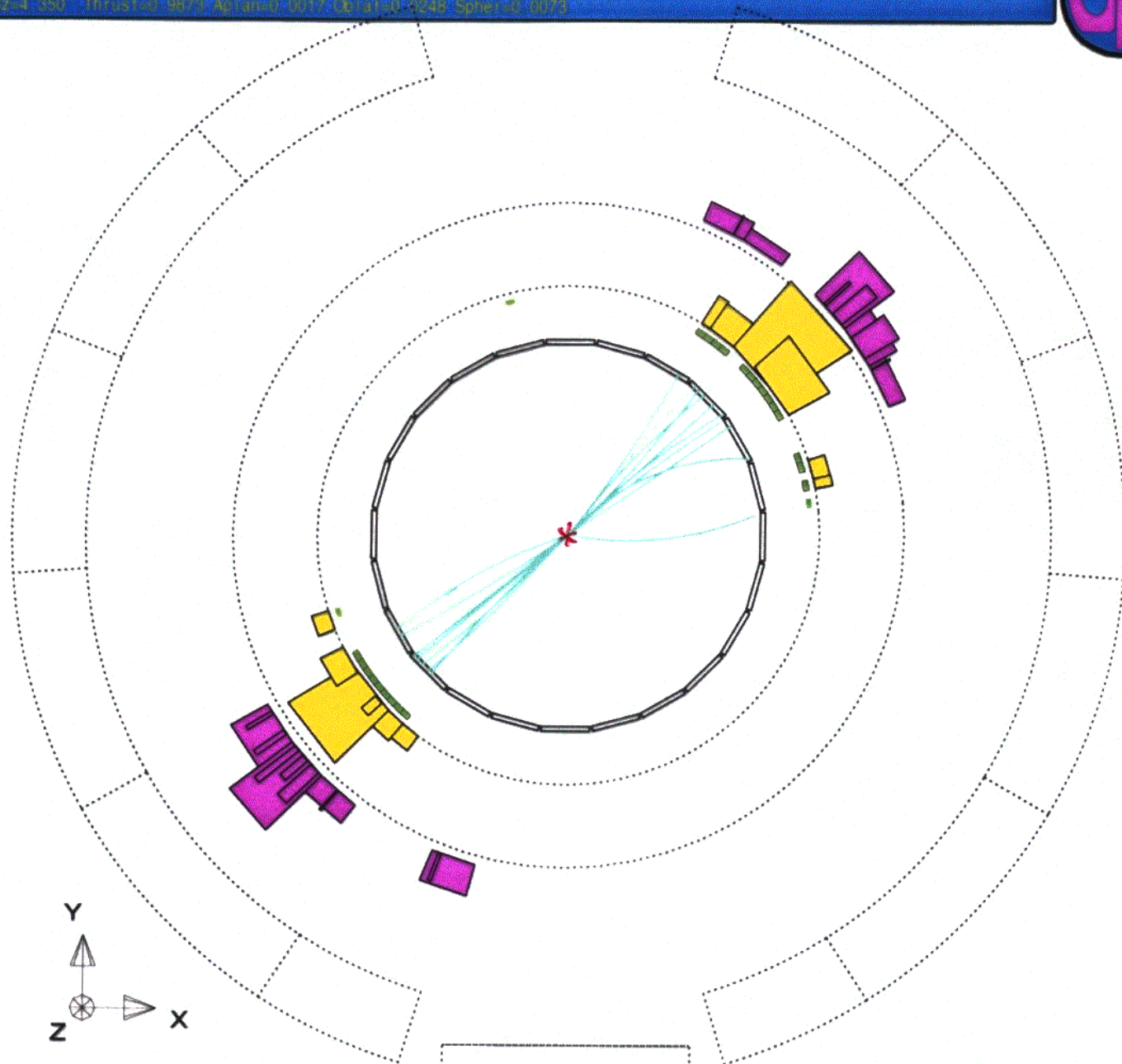
Run event 4093: 4556 Date: 930527 Time: 22439 C1rk(N= 2 Surp= 86.8) Ecal(N= 5 SurE= 1.6) Hcal(N= 4 SurE= 4.0)
 Ebeam 45.658 Evis 90.0 Emis 0.6 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SurE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9999 Apran=0.0000 Oblat=0.2110 Spher=0.0003



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



Run: event 4093 1000 Date 930527 Time 20716 Clr(N= 39 Sump= 73 3) Ecal(N= 25 SunE= 32 6) Hcal(N=22 SunE= 22 6)
 Ebeam 45 658 Evis 99 9 Emiss -0 6 Vtx (-0 07, 0 06, -0 80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 2) Foet(N= 0 SunE= 0 0)
 Bz=4 350 Thrust=0 9873 Aplan=0 0017 Oplat=0 3248 Spher=0 0073



5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

Elektroschwache Wechselwirkung

Einheitliche Beschreibung von elektromagnet. und schwacher Wechselwirkung

- 1961-67: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg; P. Higgs

Bosonen:

γ
 W^\pm
 Z

Kopplungsstärke:

$dem \hat{=} \text{elektr. Ladung}^2$
 g_w
 g_z

Problem: Massen von W^\pm und Z -Bosonen

Lösung: Spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus

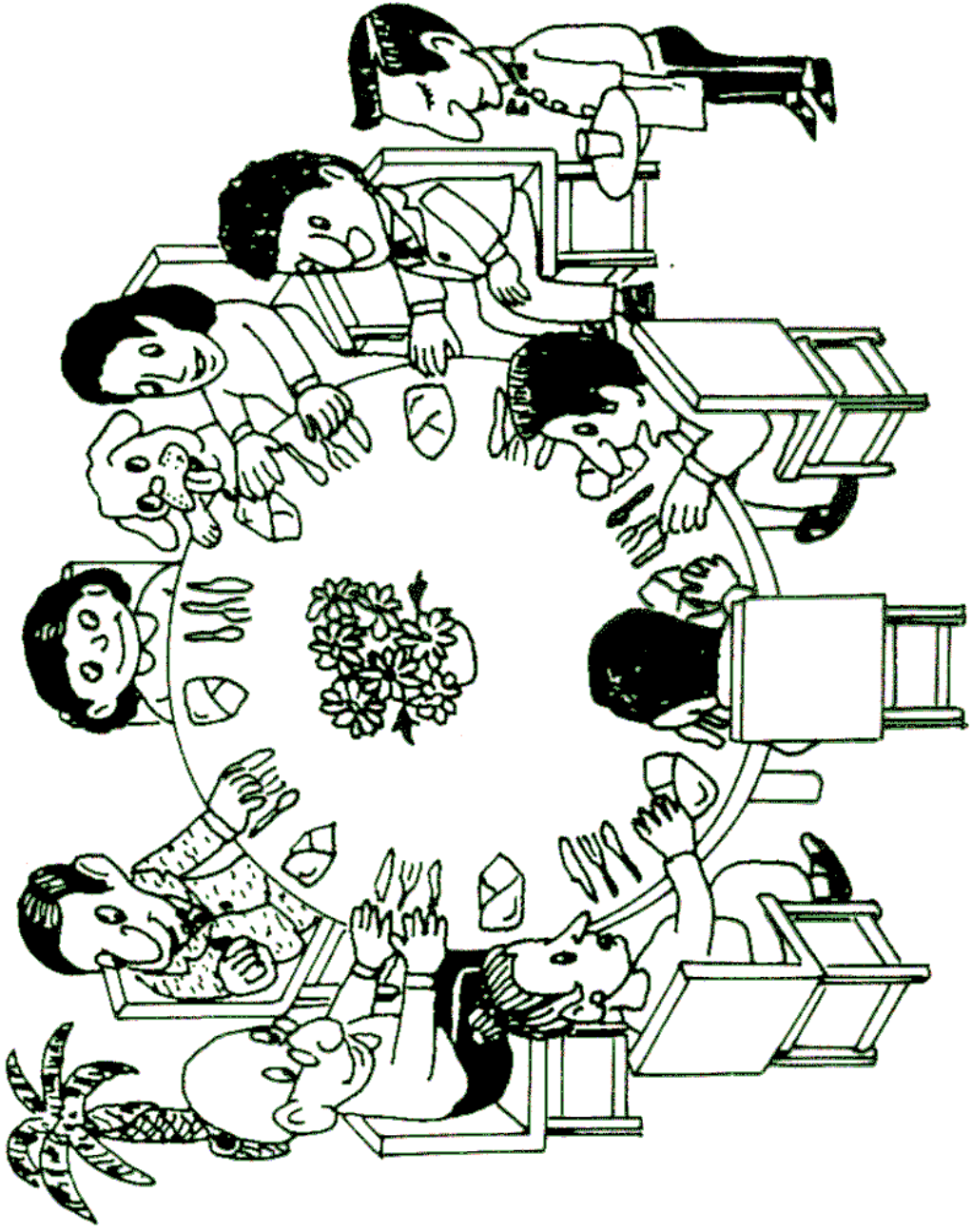
$$\text{H-Boson} \begin{cases} \rightarrow W^\pm\text{-Masse} = \frac{g_w}{2\sqrt{2} \cdot G_F} \\ \rightarrow Z\text{-Masse} \end{cases}$$

\Rightarrow 3 Parameter ($dem, G_F, Z\text{-Masse}$)

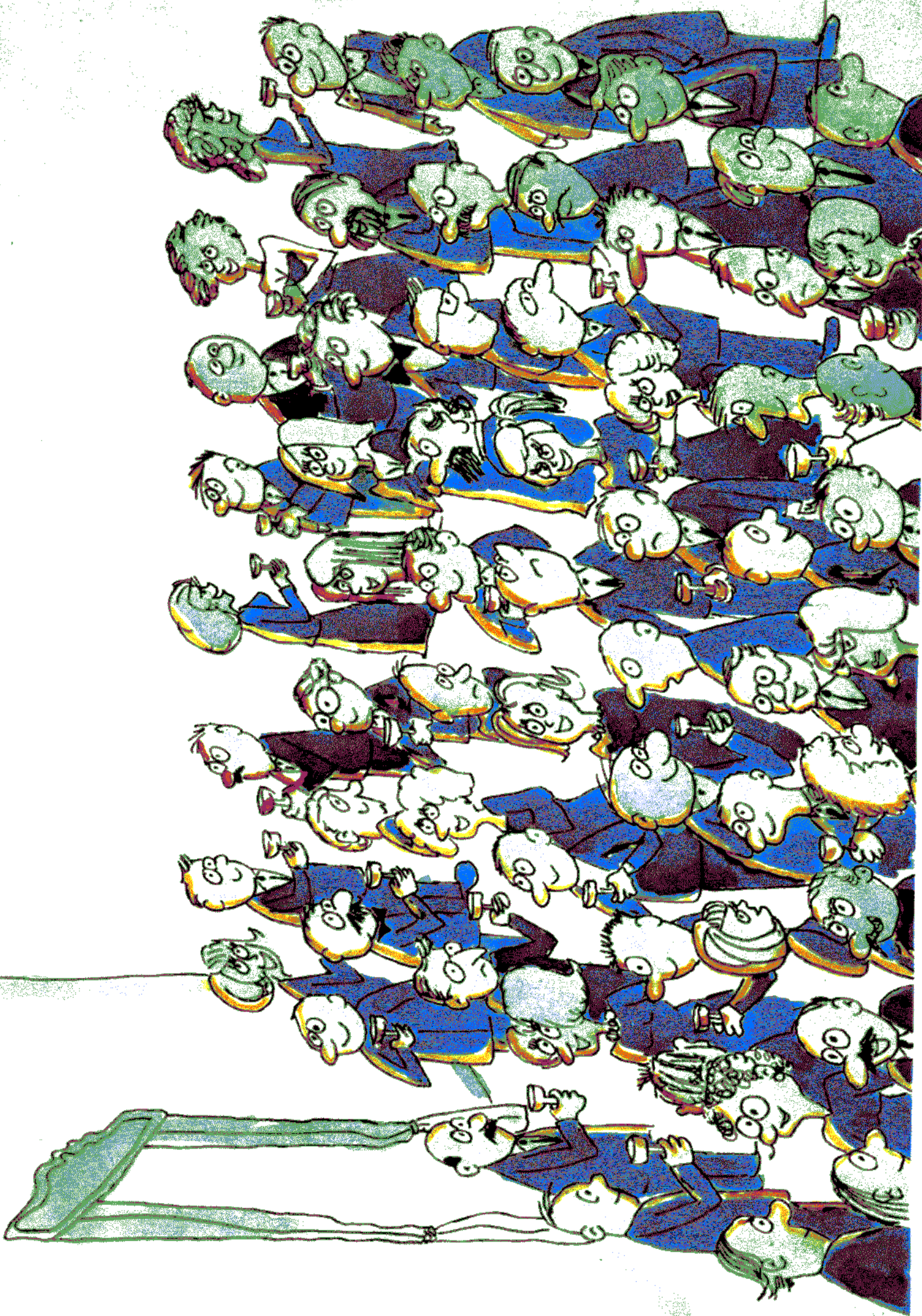


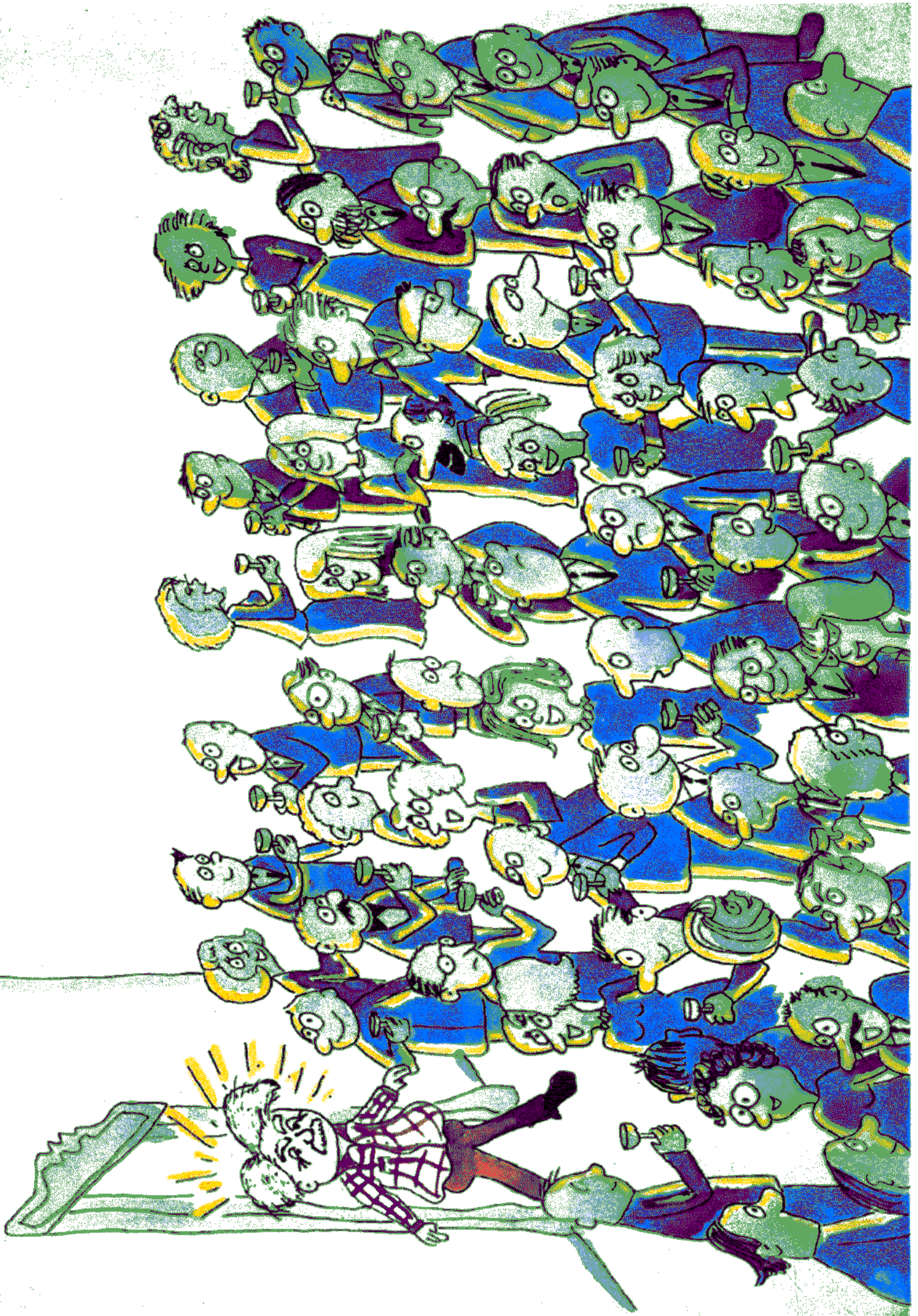
Kopplungsstärken, Boson-Massen

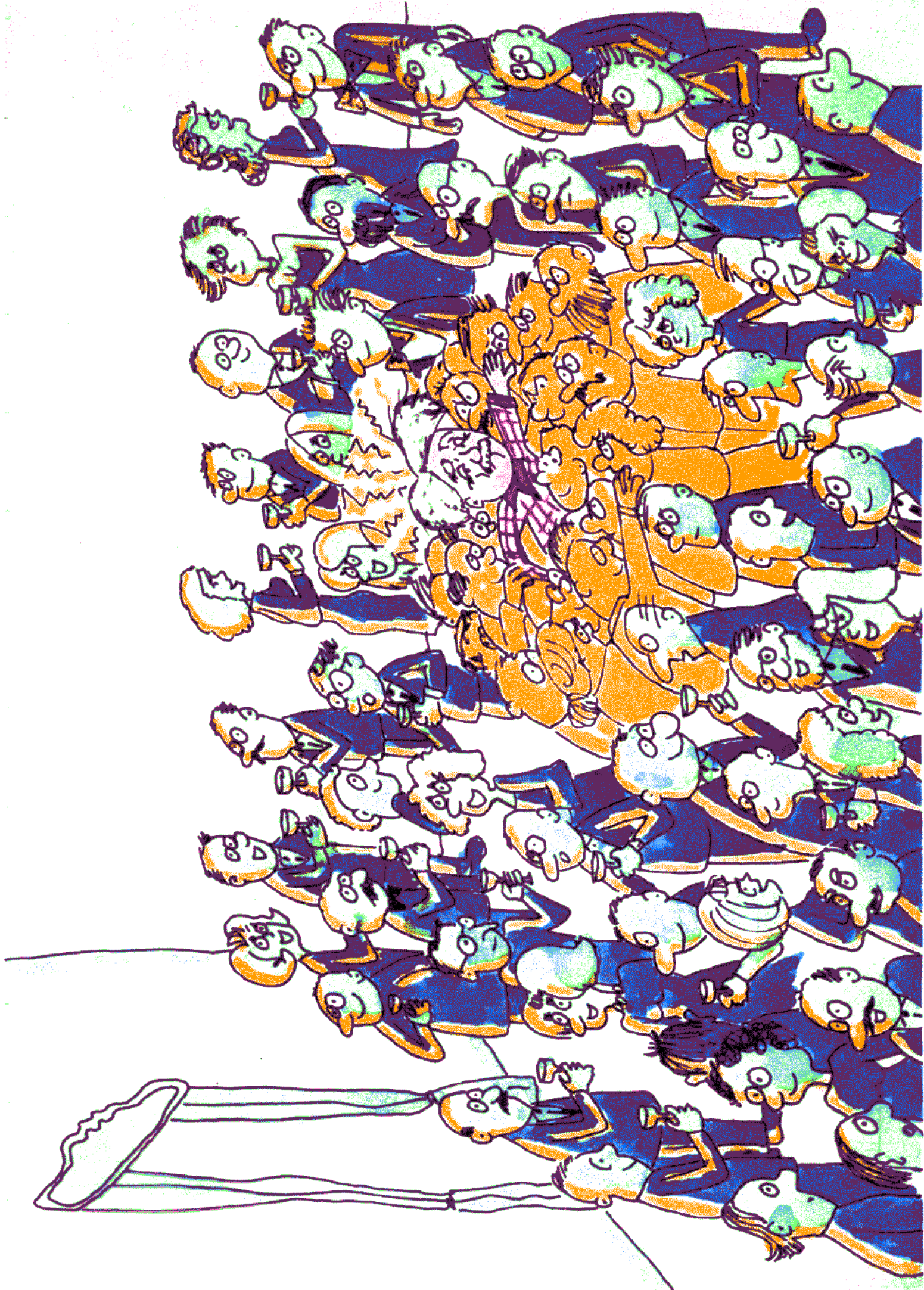
Spontane Symmetriebrechung

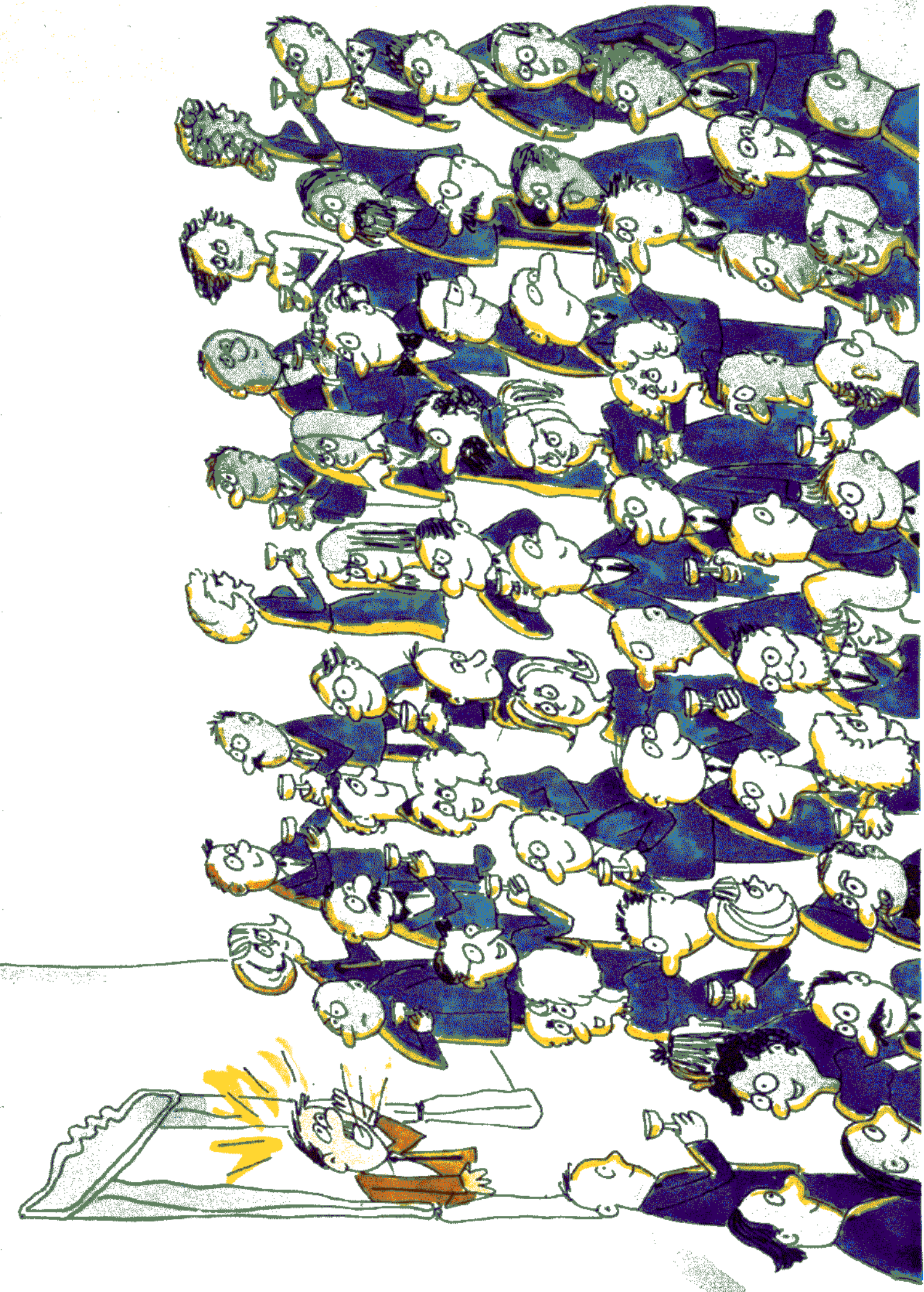


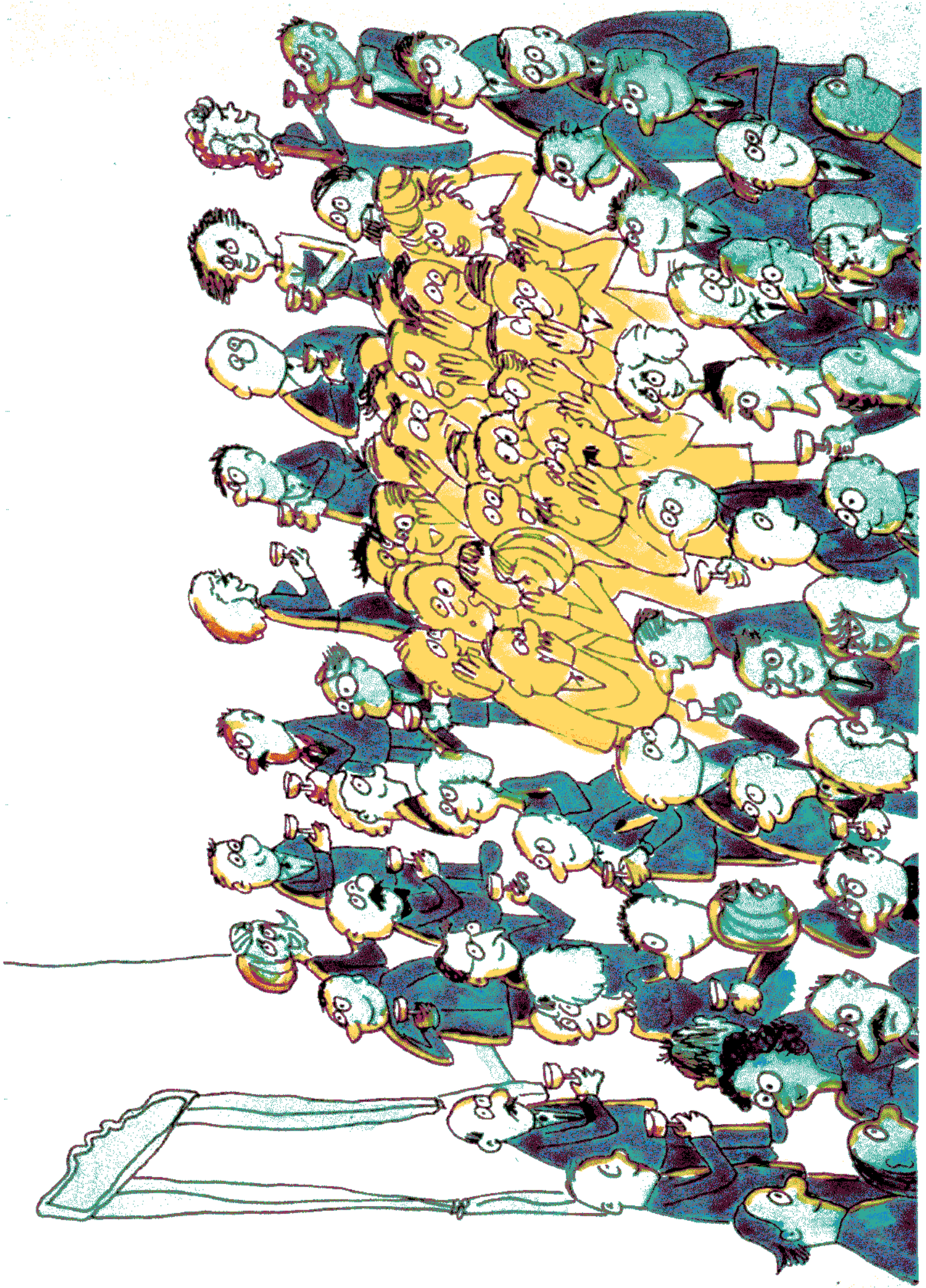
Spontaneous symmetry breaking — Salam's analogy.





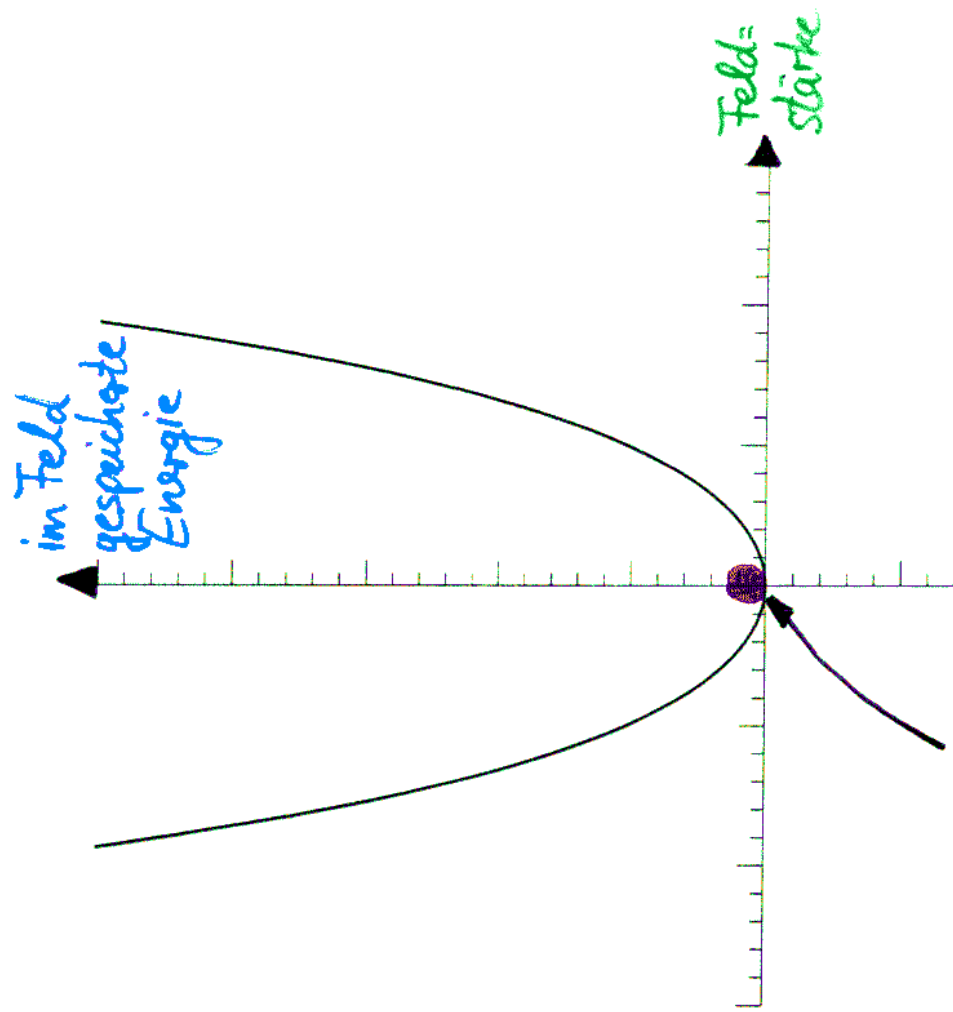






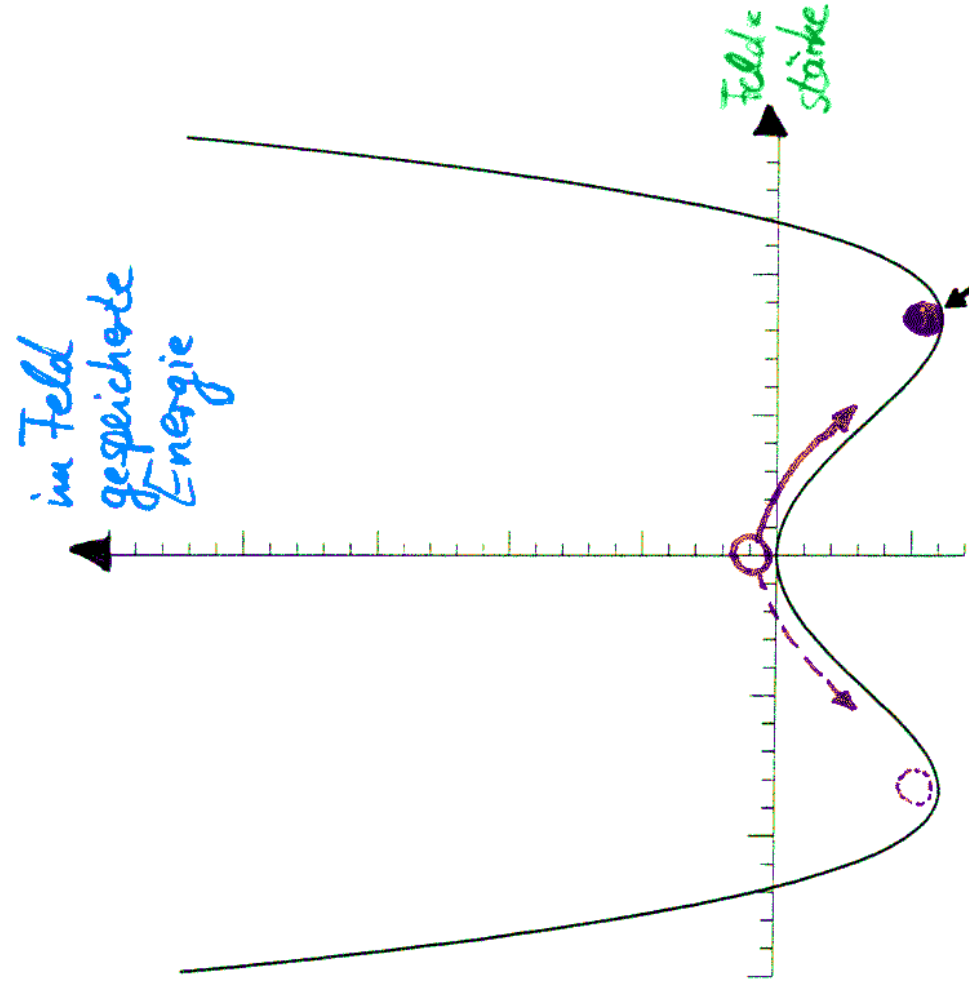
Spontane Symmetriebrechung

Temperatur hoch



im Minimum: Feld im Mittel = 0
Symmetrie um 0

Temperatur niedrig



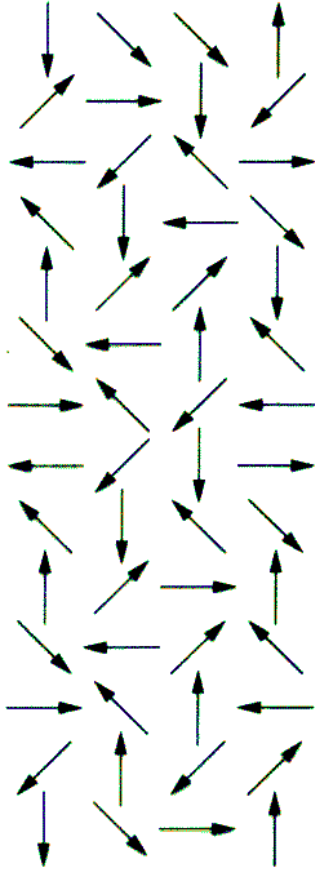
Feld im Mittel $\neq 0$, keine Symmetrie

Spontane Symmetriebrechung

- Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

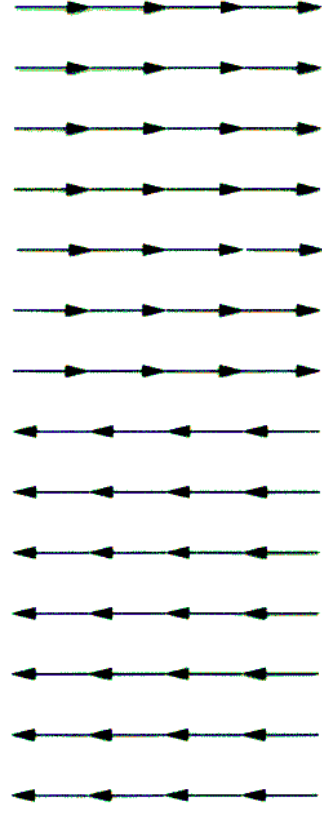
Temperatur hoch

Temperatur niedrig



Magnetfeld im Mittel = 0

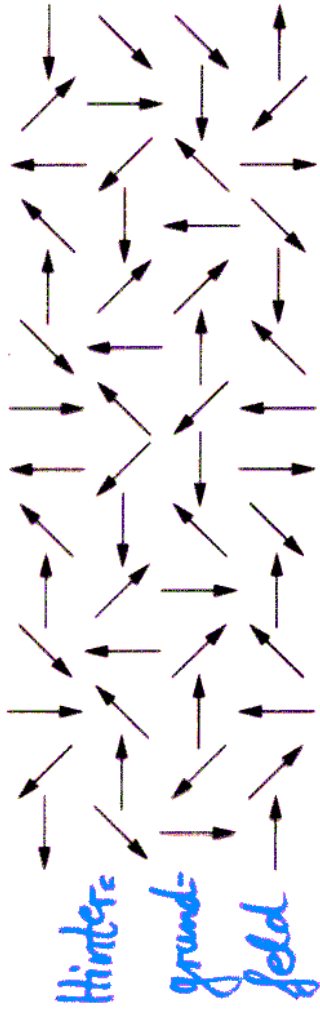
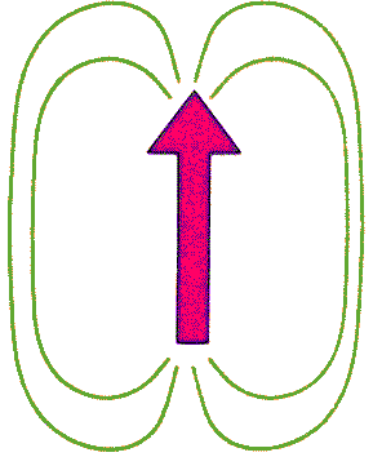
Rotationssymmetrie



Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

keine Rotationssymmetrie

Temperatur hoch

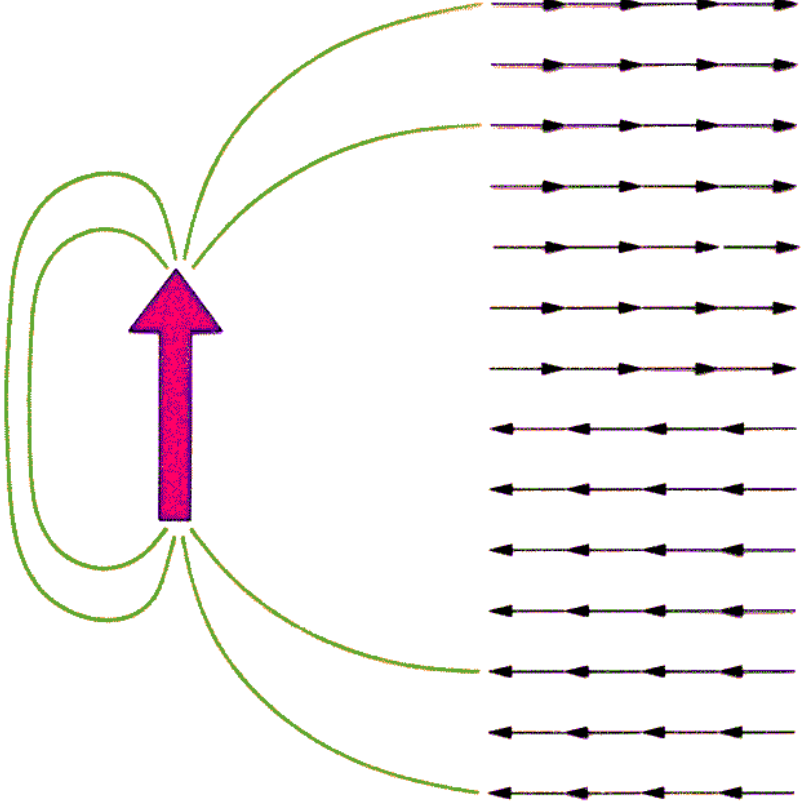


Magnetfeld im Mittel = 0

keine Wechselwirkung
mit Hintergrundfeld

→ gespeicherte Energie im Feld = 0

Temperatur niedrig

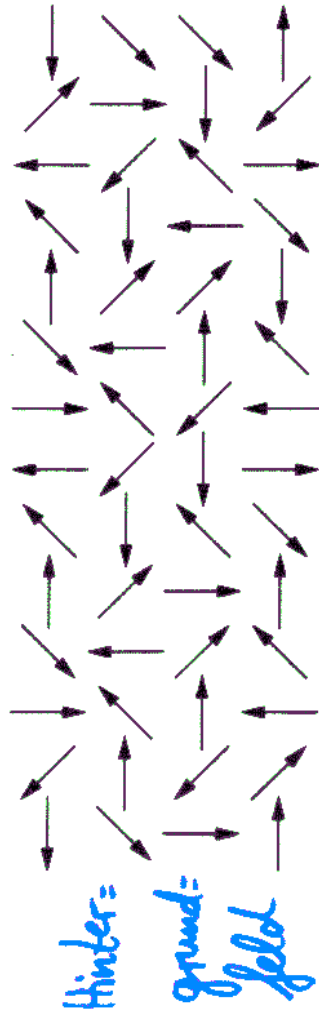


Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

Wechselwirkung
mit Hintergrundfeld

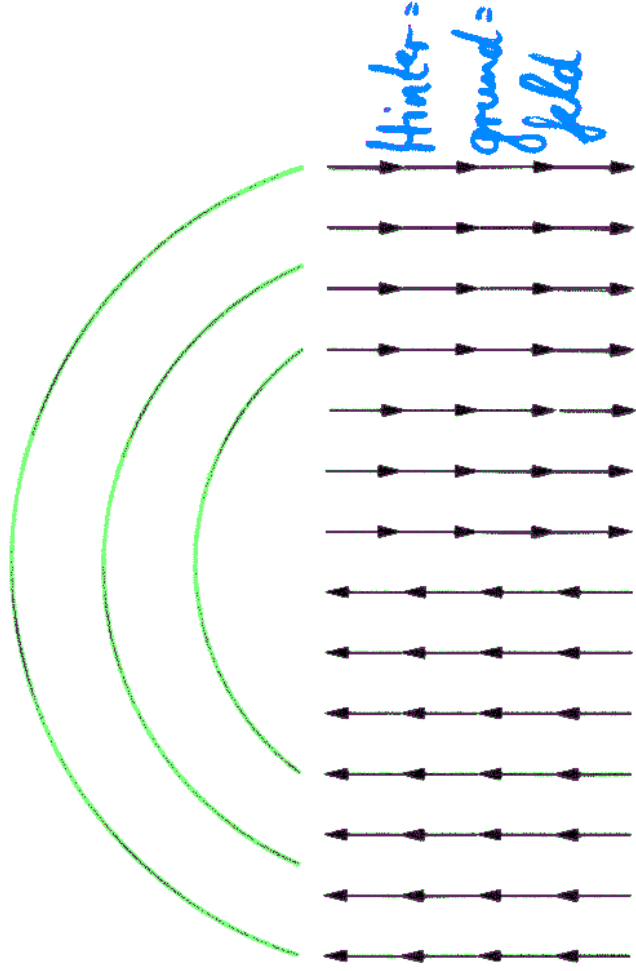
→ gespeicherte Energie im Feld $\neq 0$

Temperatur hoch



Magnetfeld im Mittel = 0

Temperatur niedrig



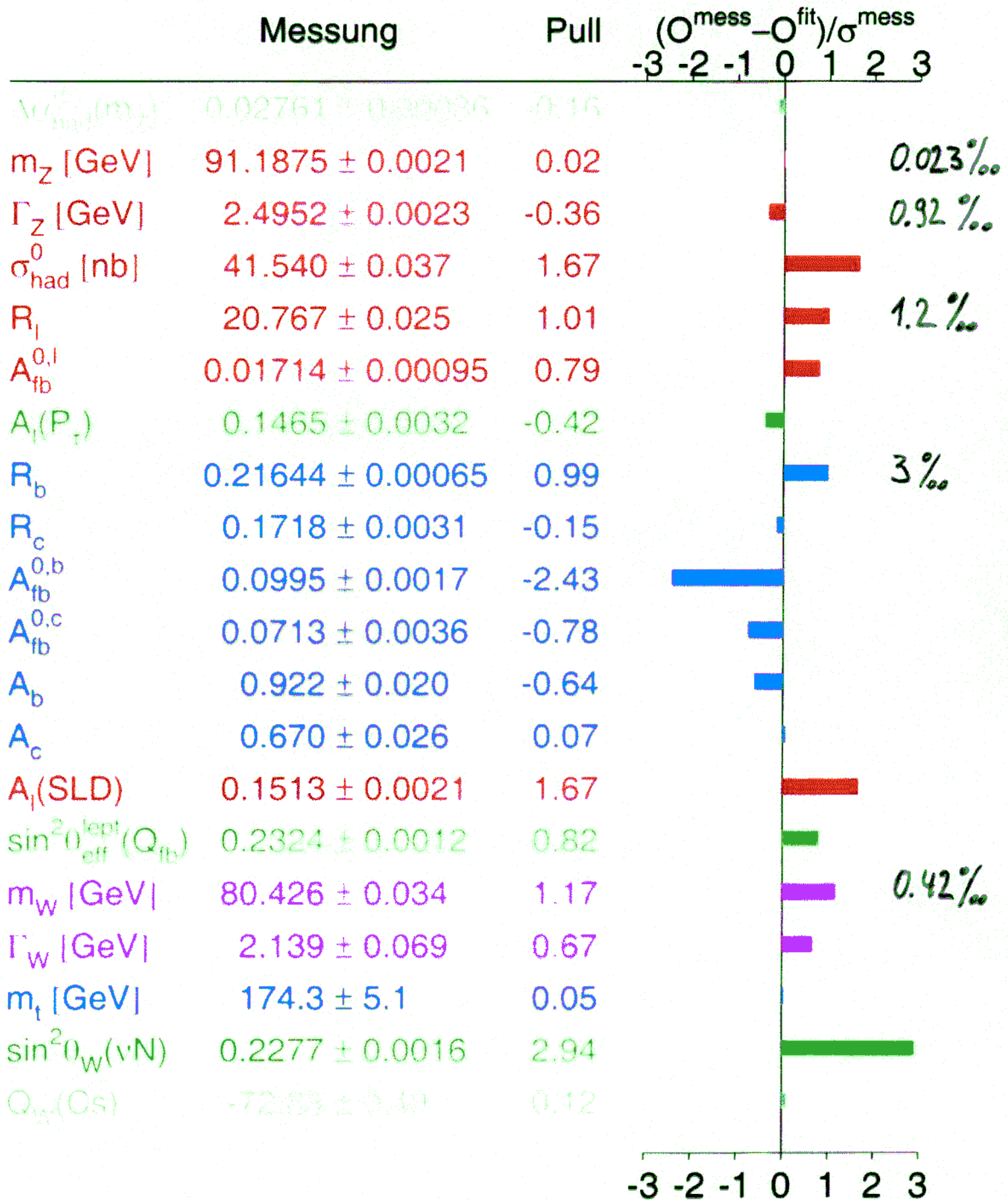
Magnetfeld im Mittel $\neq 0$

Selbstwechselwirkung-
im Hintergrundfeld
→ gespeicherte Energie im Feld $\neq 0$

Elektroschwache Wechselwirkung

- 1961-67: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg; P. Higgs:
 - ▶ "Es gibt W^+ , W^- , Z -Bosonen"
 - ▶ "Boson-Massen durch spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus"
 - ▶ "Es gibt ein Higgs-Boson"
 - 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
- NB: 3 Parameter \rightarrow W^\pm , Z -Bosonmassen und Kopplungsstärken

LEP: Präzisionstest der Theorie

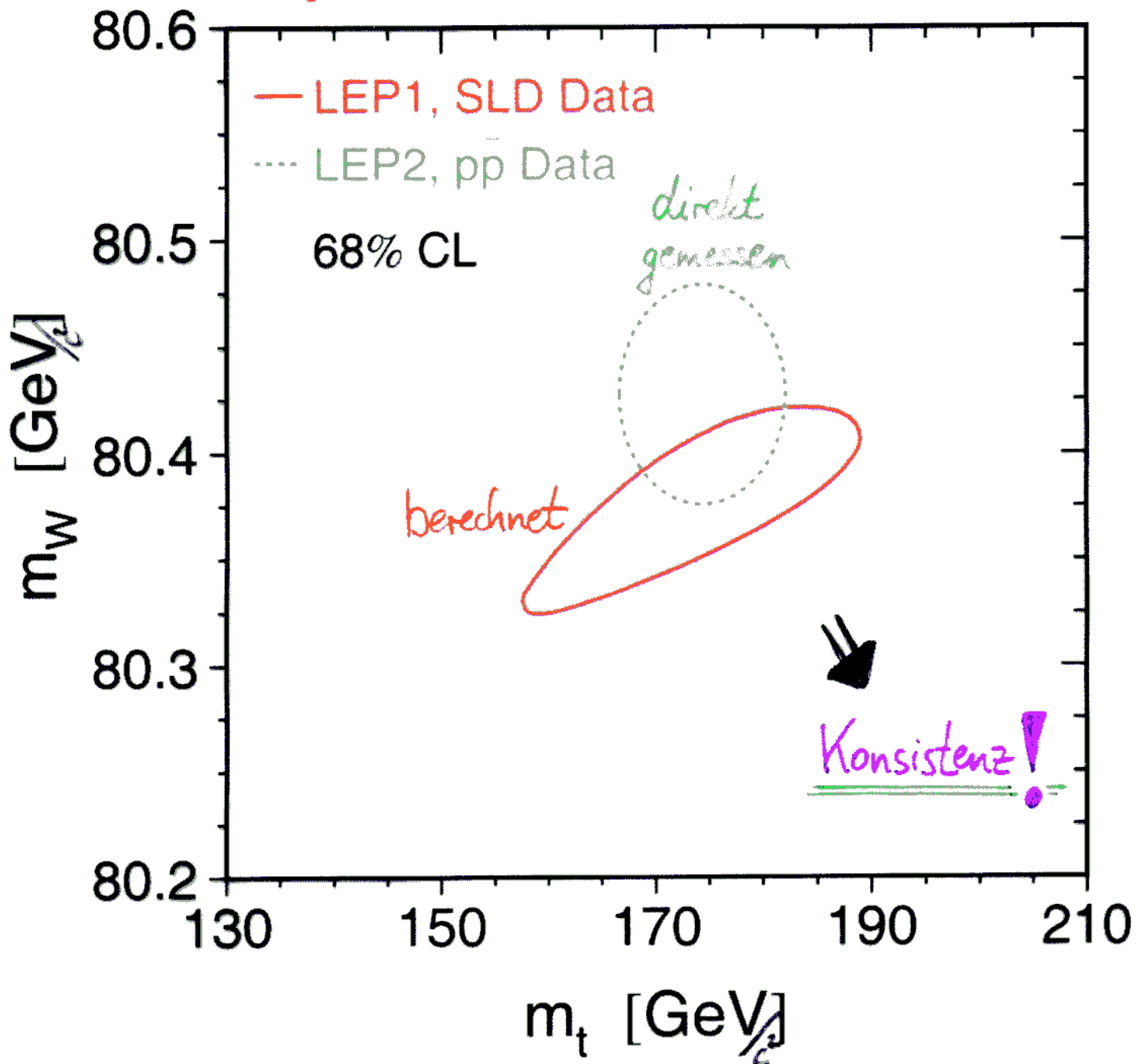
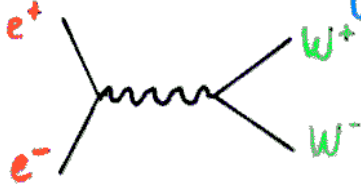


nahezu perfekte Übereinstimmung
 zw. Experiment und Theorie auf % genau

Konsistenz der Theorie

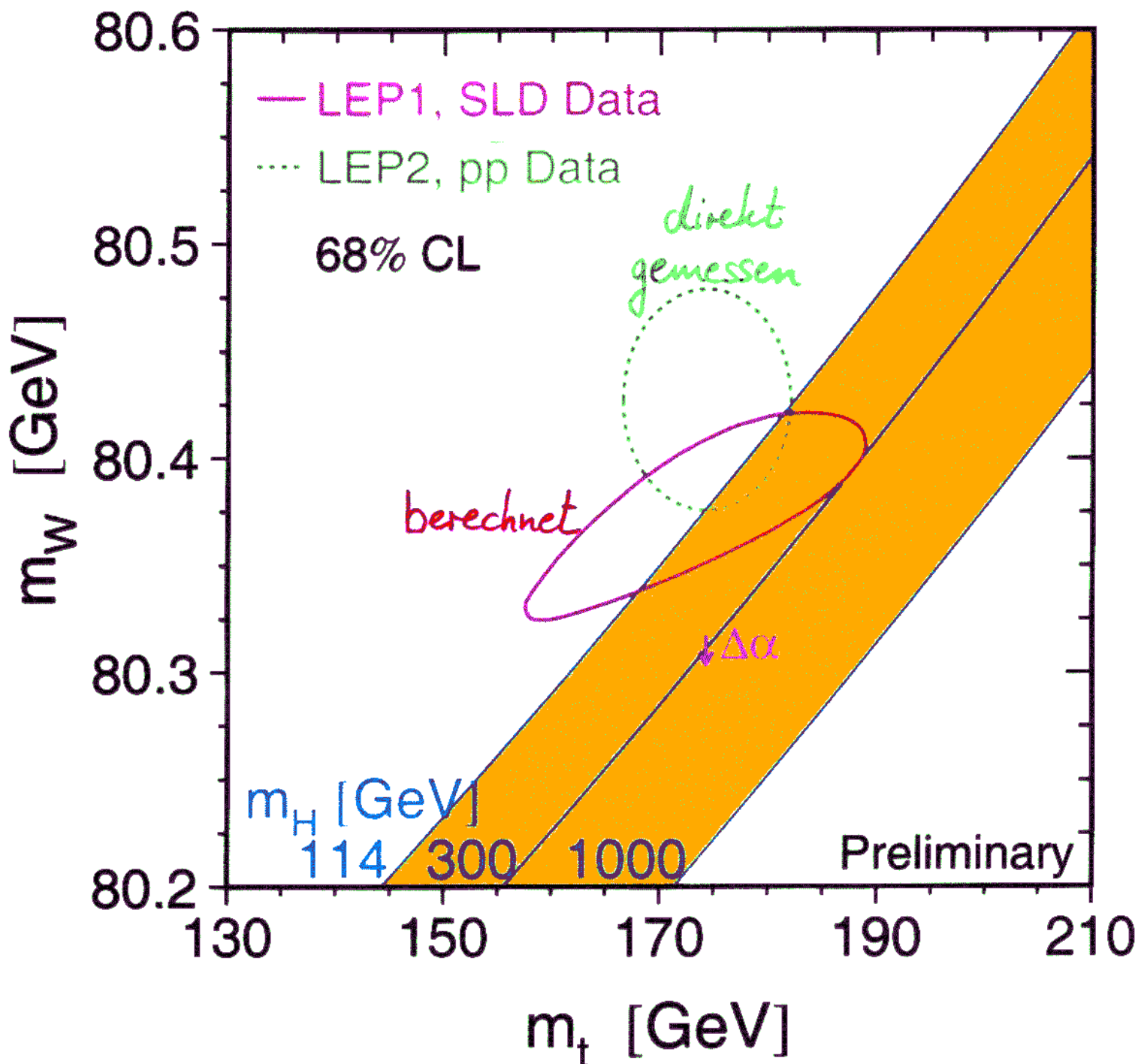
- ▶ LEP1: 3 Parameter \Rightarrow W-Bosonmasse berechenbar
(α_{em} , G_F , Z-Masse + t-Quarkmasse u. Higgsmasse)

- ▶ LEP2: bei höherer Energie \Rightarrow W-Masse direkt messbar

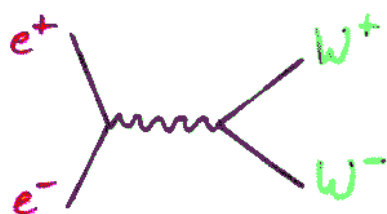


Konsistenz der Theorie!

- ▶ 3 Parameter (dem, G_F , Z-Masse) \Rightarrow W-Bosonmasse berechenbar
(genaue Berechnung braucht noch t-Quarkmasse u. Higgs-Masse)



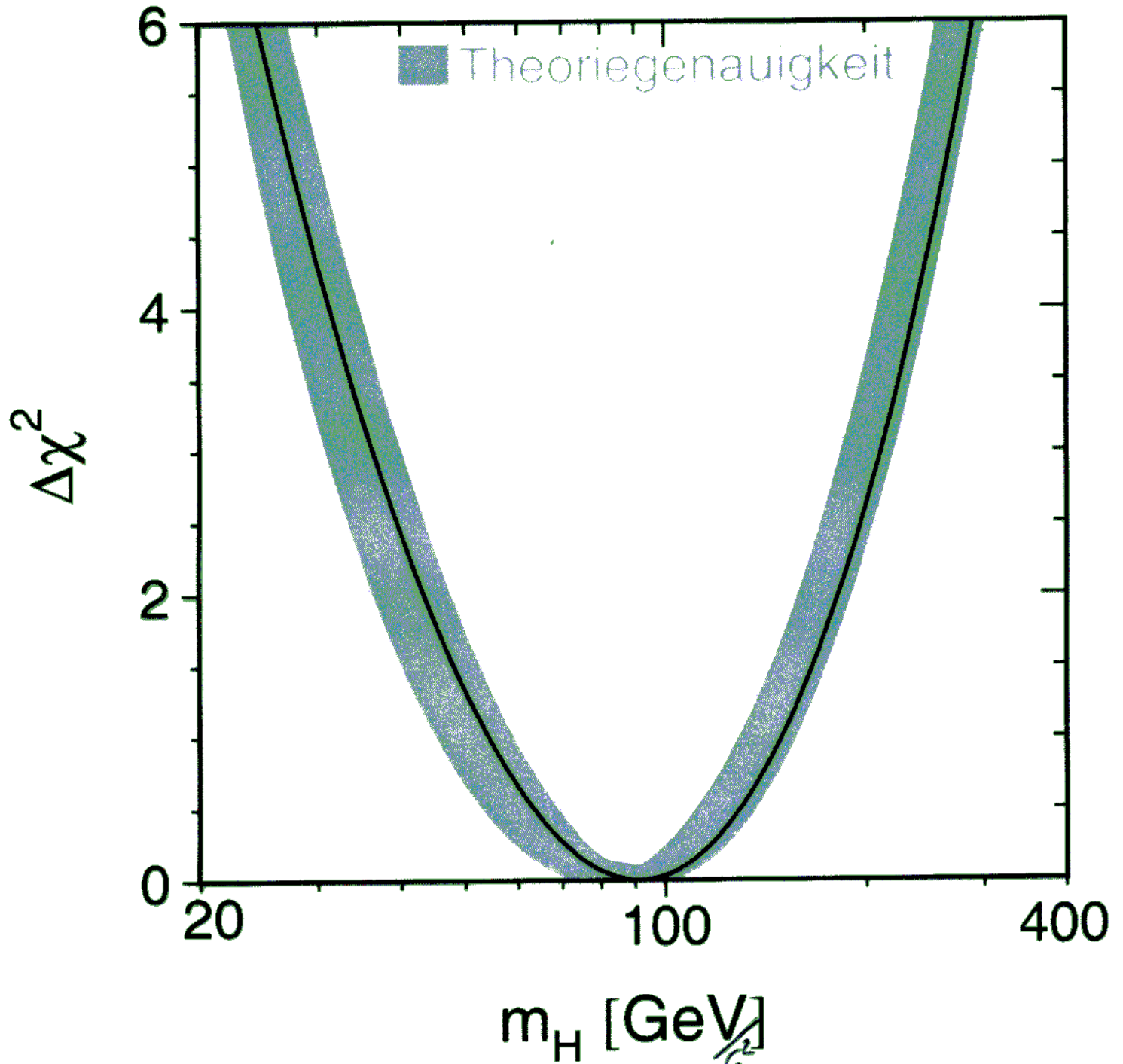
- ▶ bei höherer Energie (LEP2):



\Rightarrow W-Masse direkt messbar

Konsistenz der Theorie

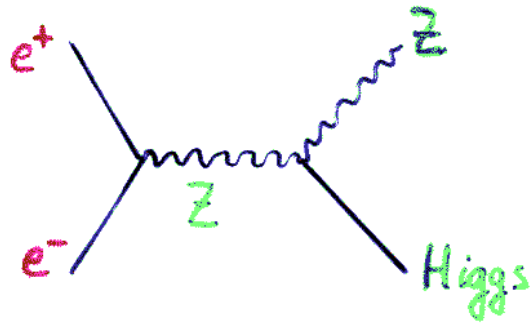
→ Welche Higgs-Bosonmasse passt am besten?



⇒ Wenn elektroschwache Theorie gilt,
dann muss Higgs-Boson leicht sein!
→ direkte Higgs-Bosonsuche bei LEP

Higgs-Boson-Eigenschaften

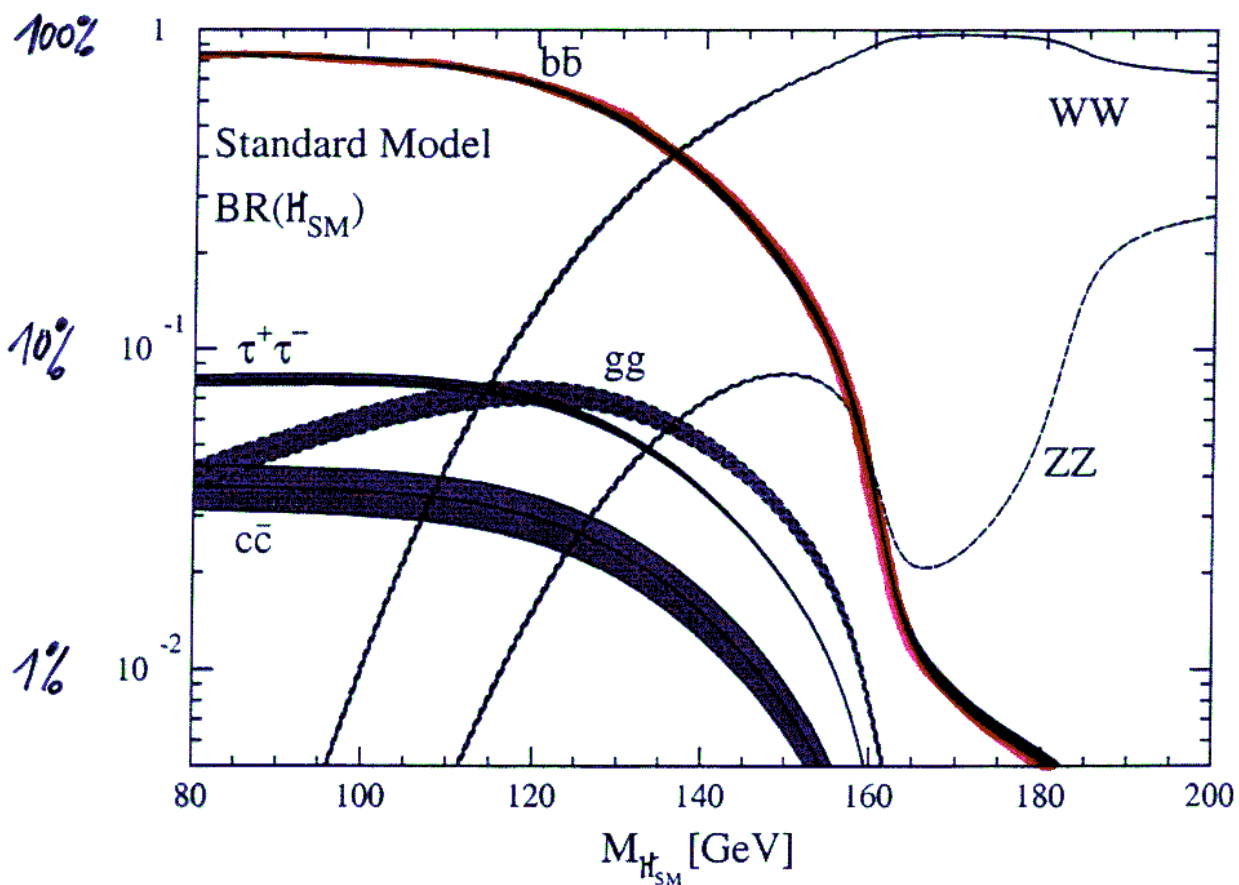
- Higgs-Produktion:



- Higgs-Zerfall:

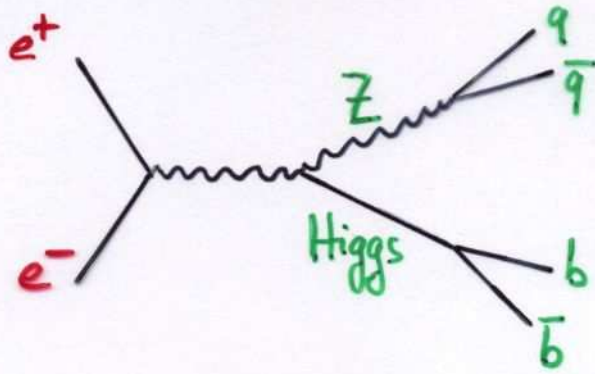
bevorzugt in schwere Teilchen

⇒ b-Quarks als Zerfallsprodukt

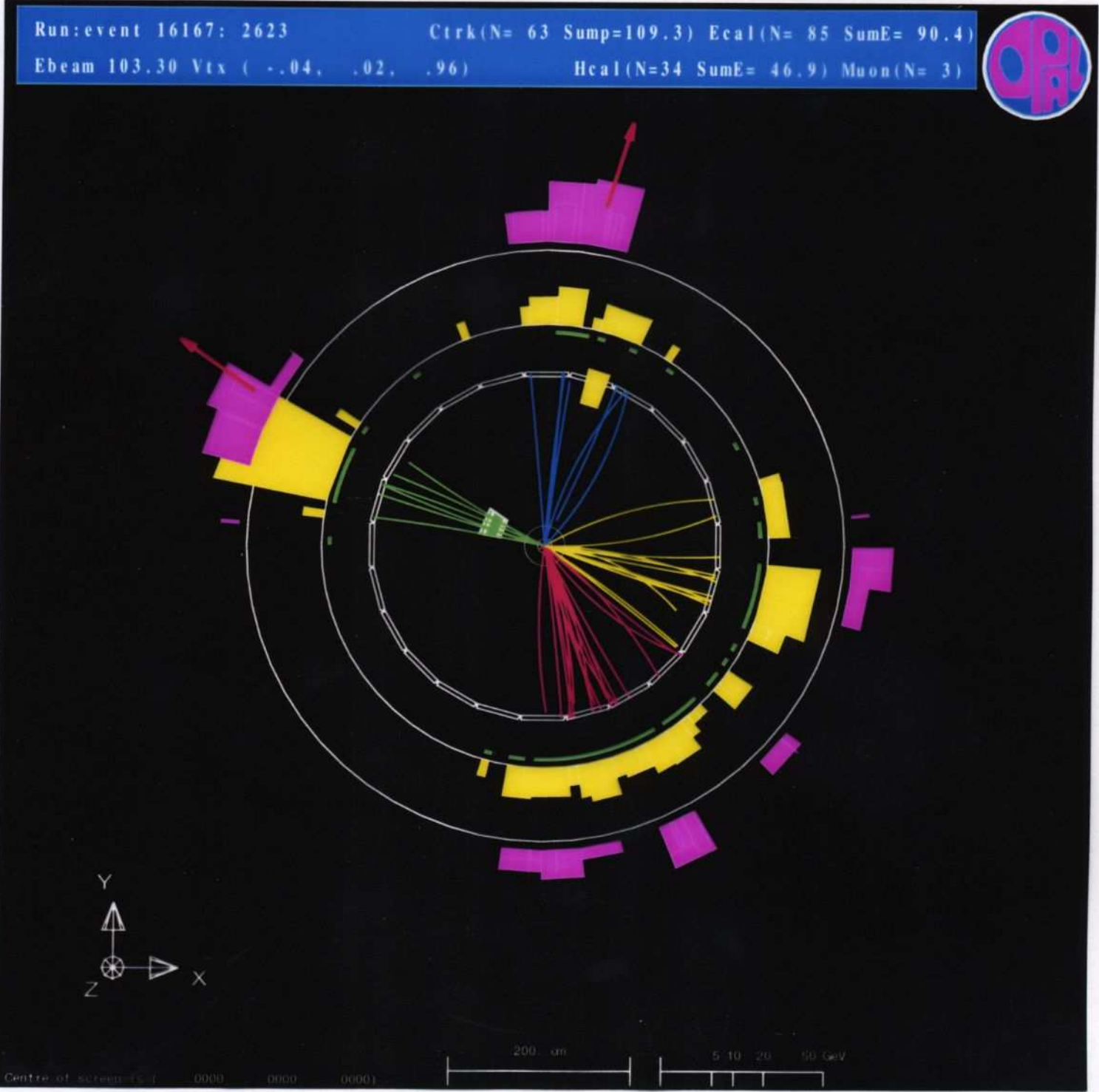


⇒ Suche Reaktion mit Zerfallsprodukte vom Z
und b-Quarks vom Higgs

$Z \rightarrow q\bar{q}$ + $H \rightarrow b\bar{b}$?



rekonstruierte Masse des Higgs-Kandidaten ca. $110 \text{ GeV}/c^2$

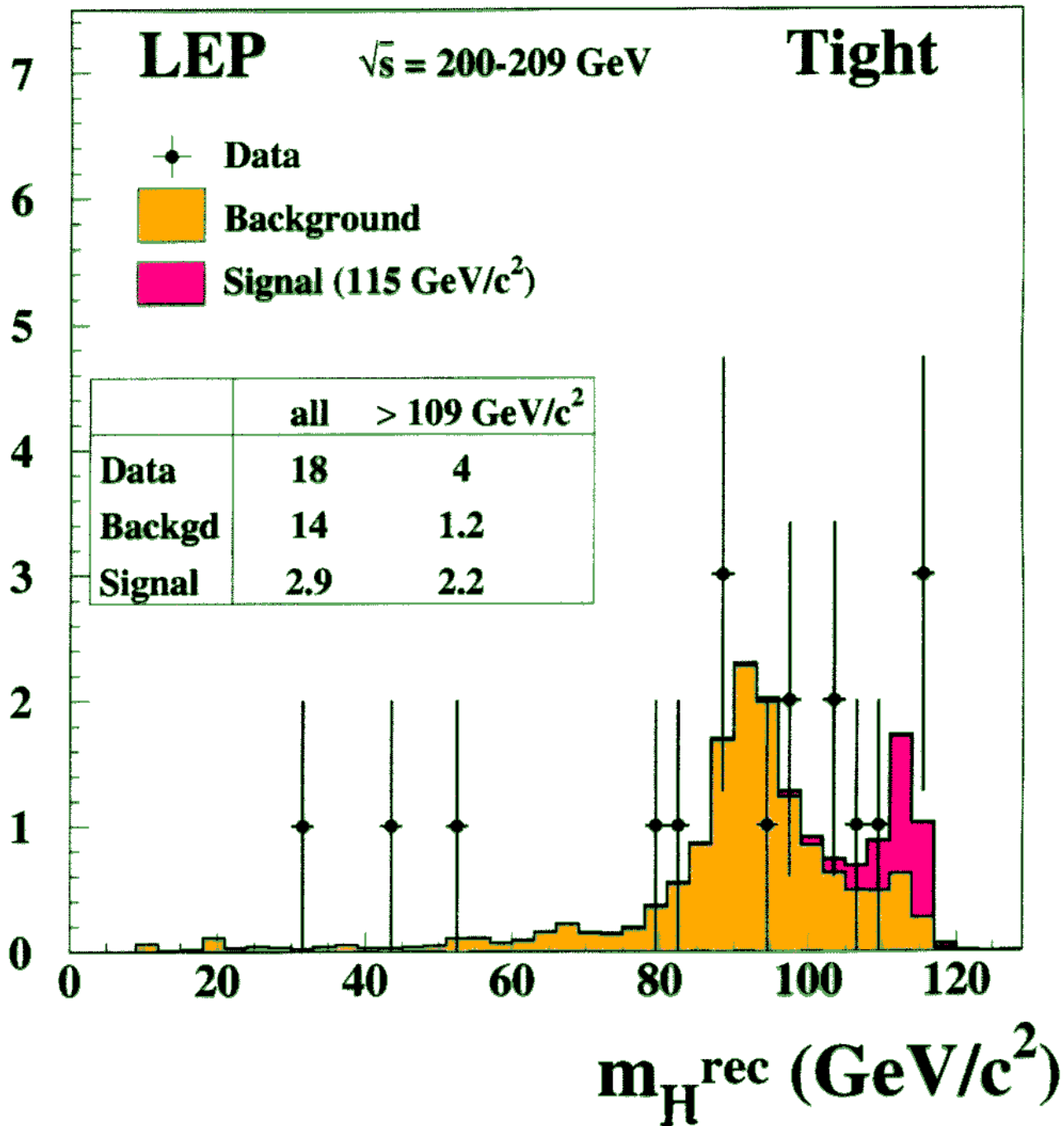


Anzeichen für Higgs-Produktion?

Häufigkeit der rekonstruierten Massen als Verteilung:

- ▶ ununterscheidbare Konkurrenzprozesse (→ Background)
 - ▶ Anzahl der beobachteten Reaktionen zu gering
- ⇒ keine überzeugende Anzeichen

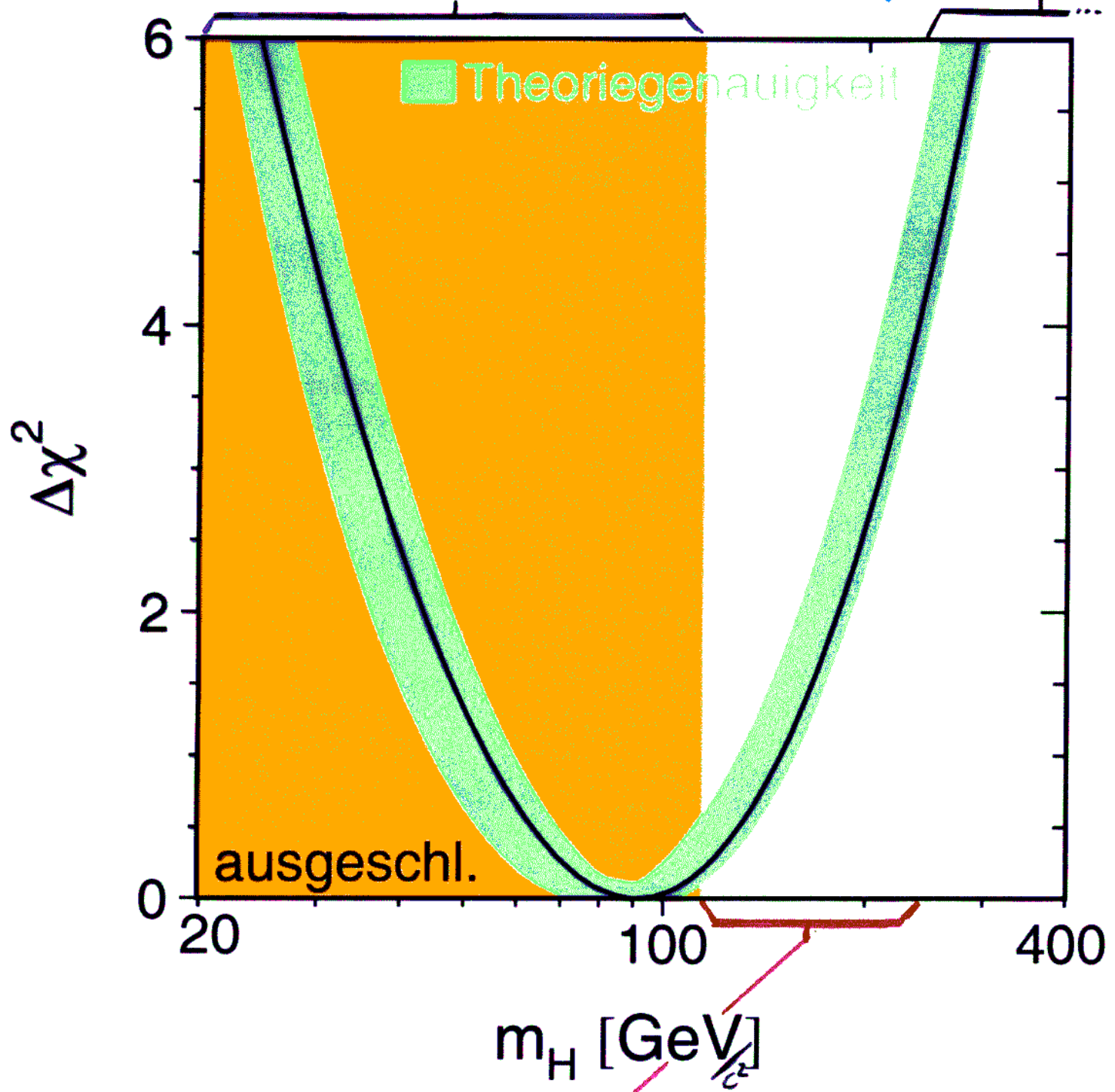
Events / $3 \text{ GeV}/c^2$



Massenbereich für Higgs-Boson

ausgeschlossen nach direkter Suche

ausgeschlossen wegen Theorie-Konsistenz



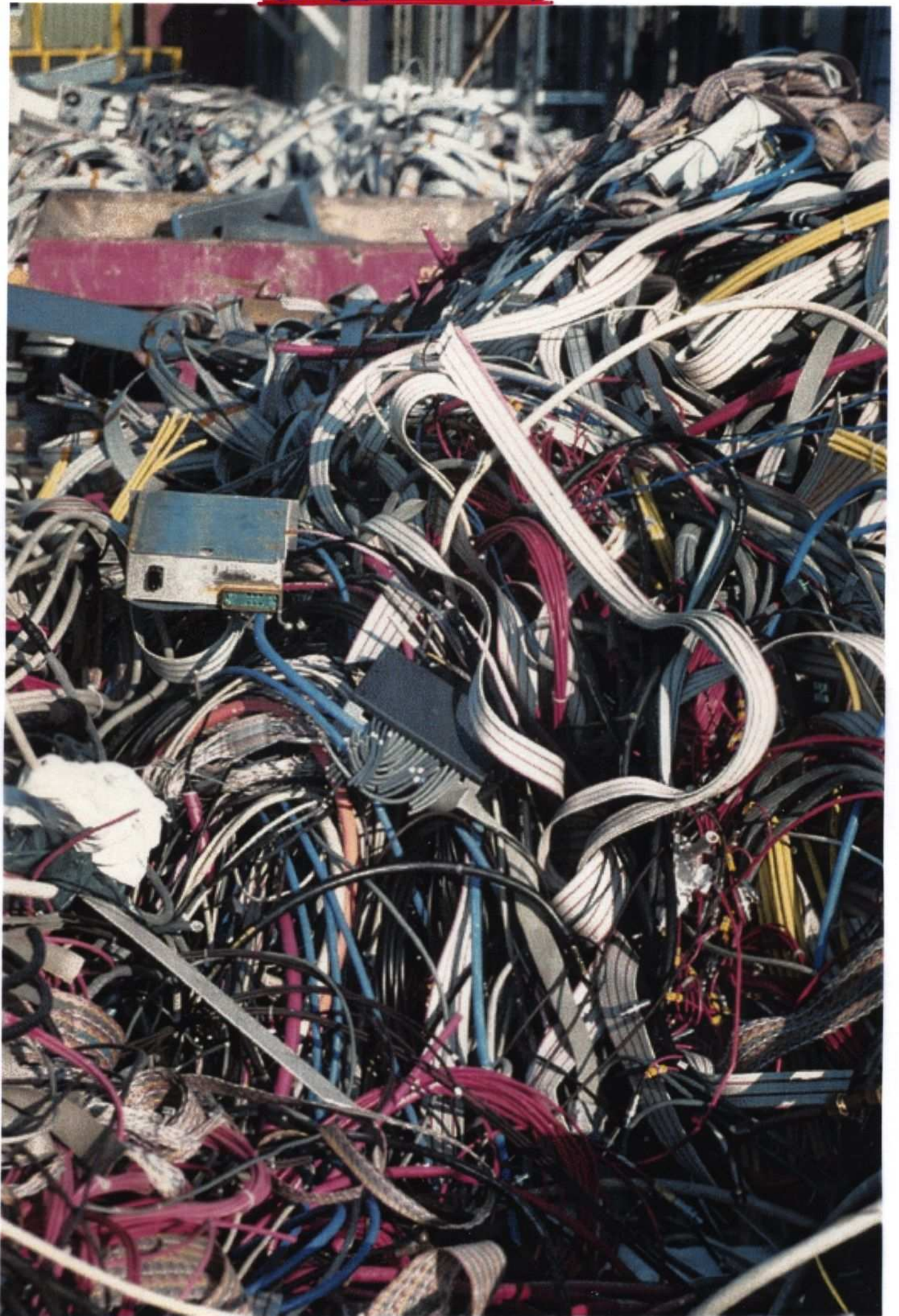
erlaubter Bereich:

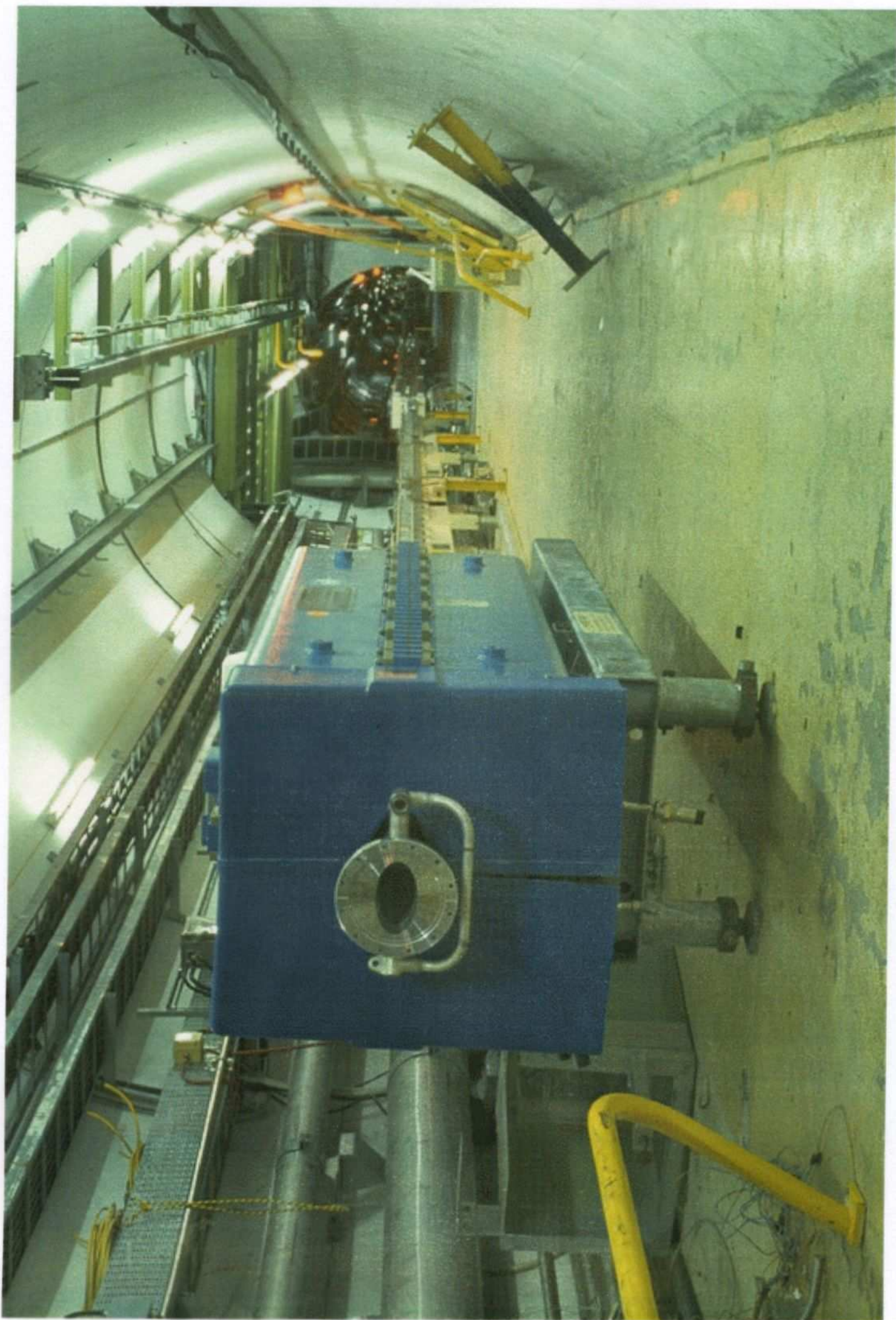
Higgs-Masse zwischen 114 $\frac{\text{GeV}}{c^2}$ und 211 $\frac{\text{GeV}}{c^2}$

LEP in 2001

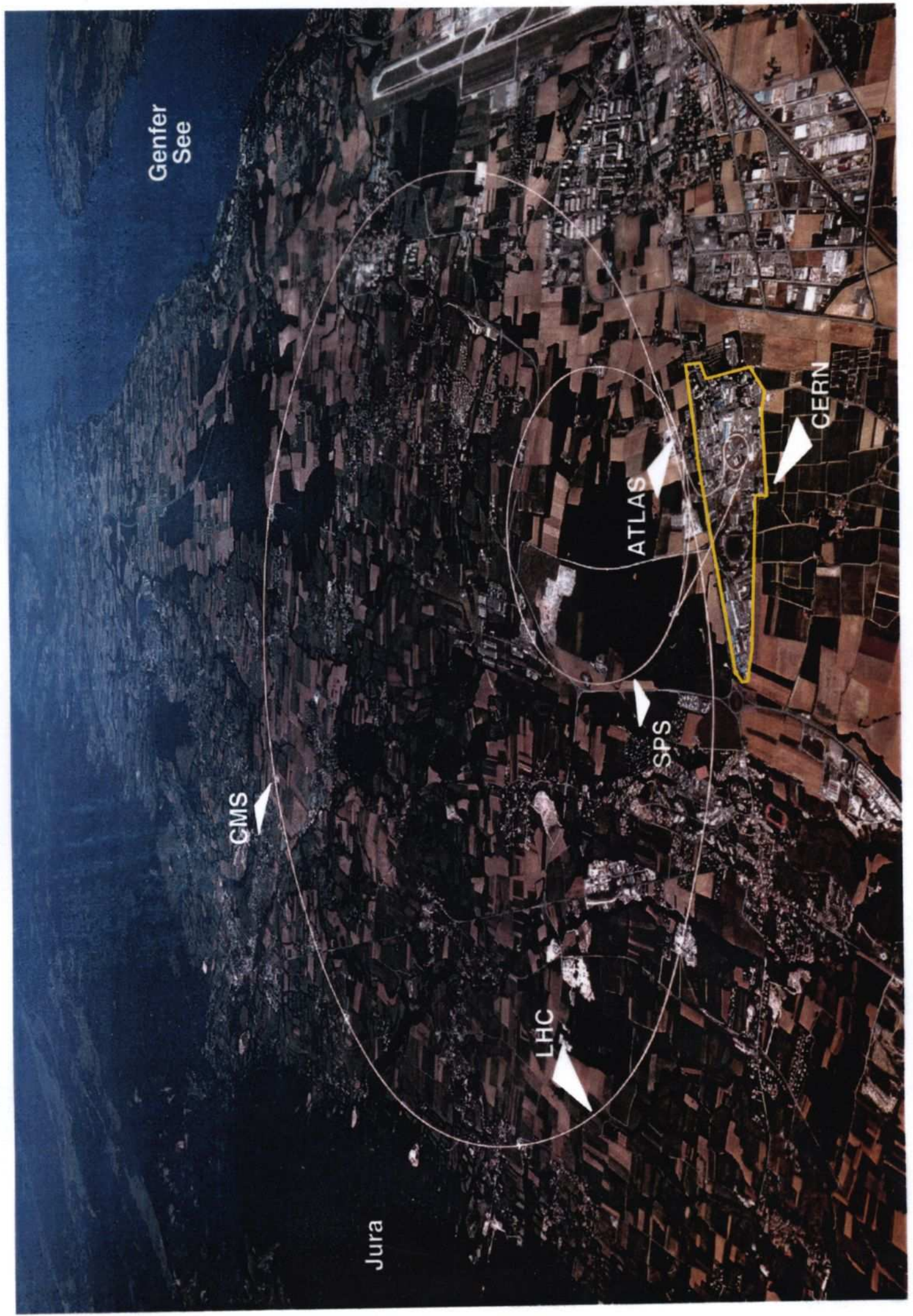


OPAL in 2001









Genfer See

GMS

LHC

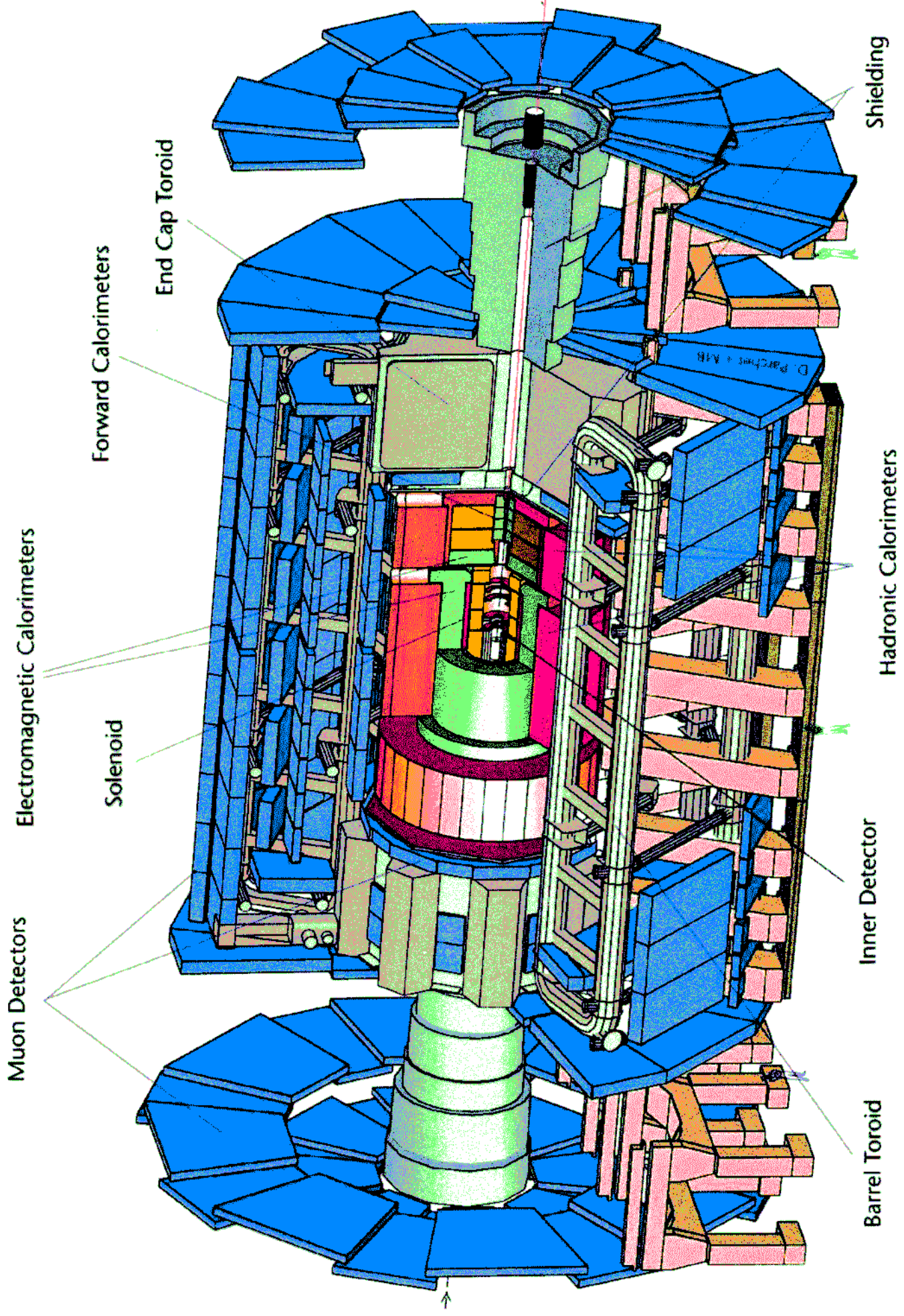
SPS

ATLAS

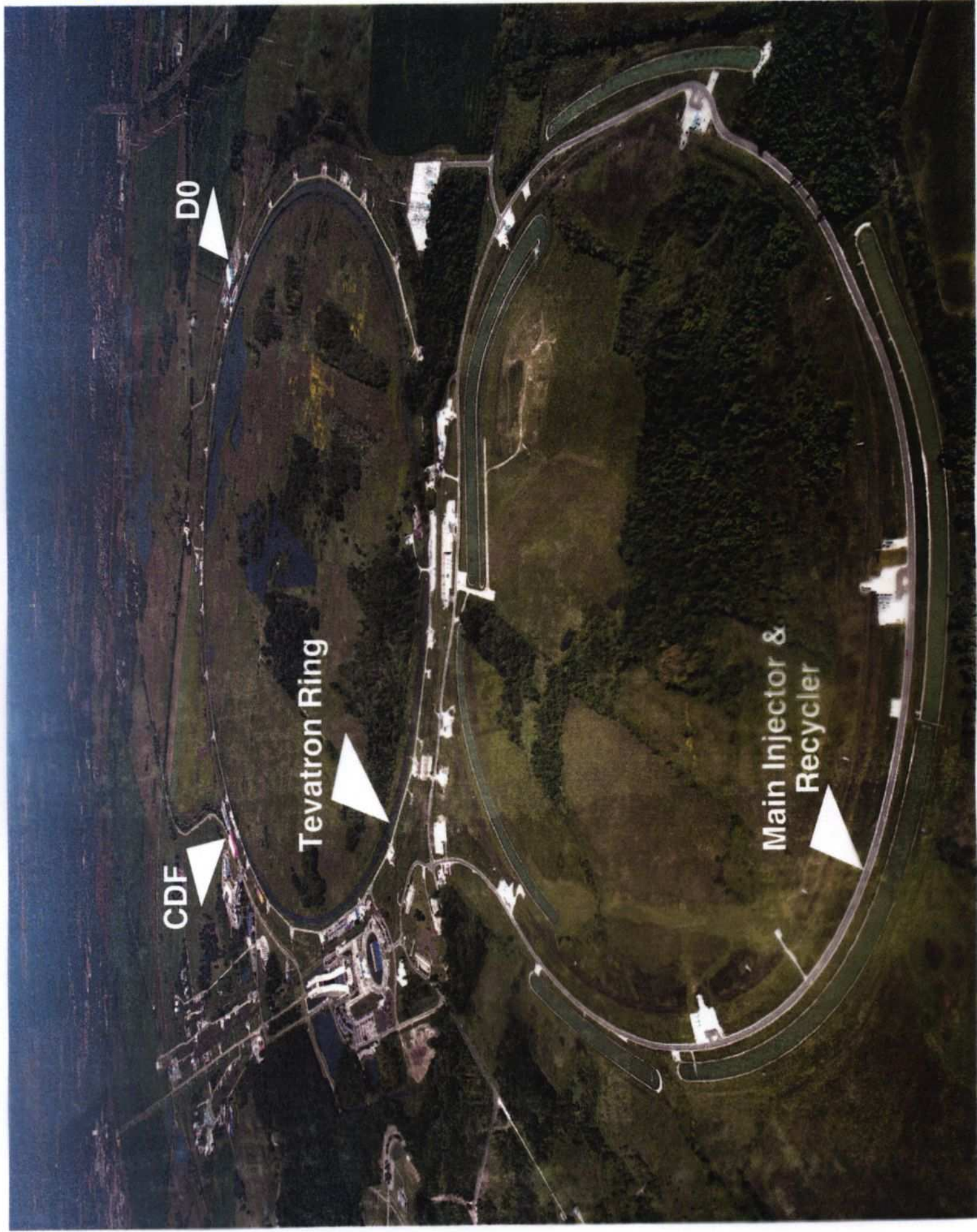
CERN

Jura

Der ATLAS-Detektor



bei
Chicago
U.S.A.



Tevatron-Beschleuniger

am Fermilab bei Chicago, U.S.A.

Proton \rightarrow \leftarrow Anti-Proton

seit 06/2001:

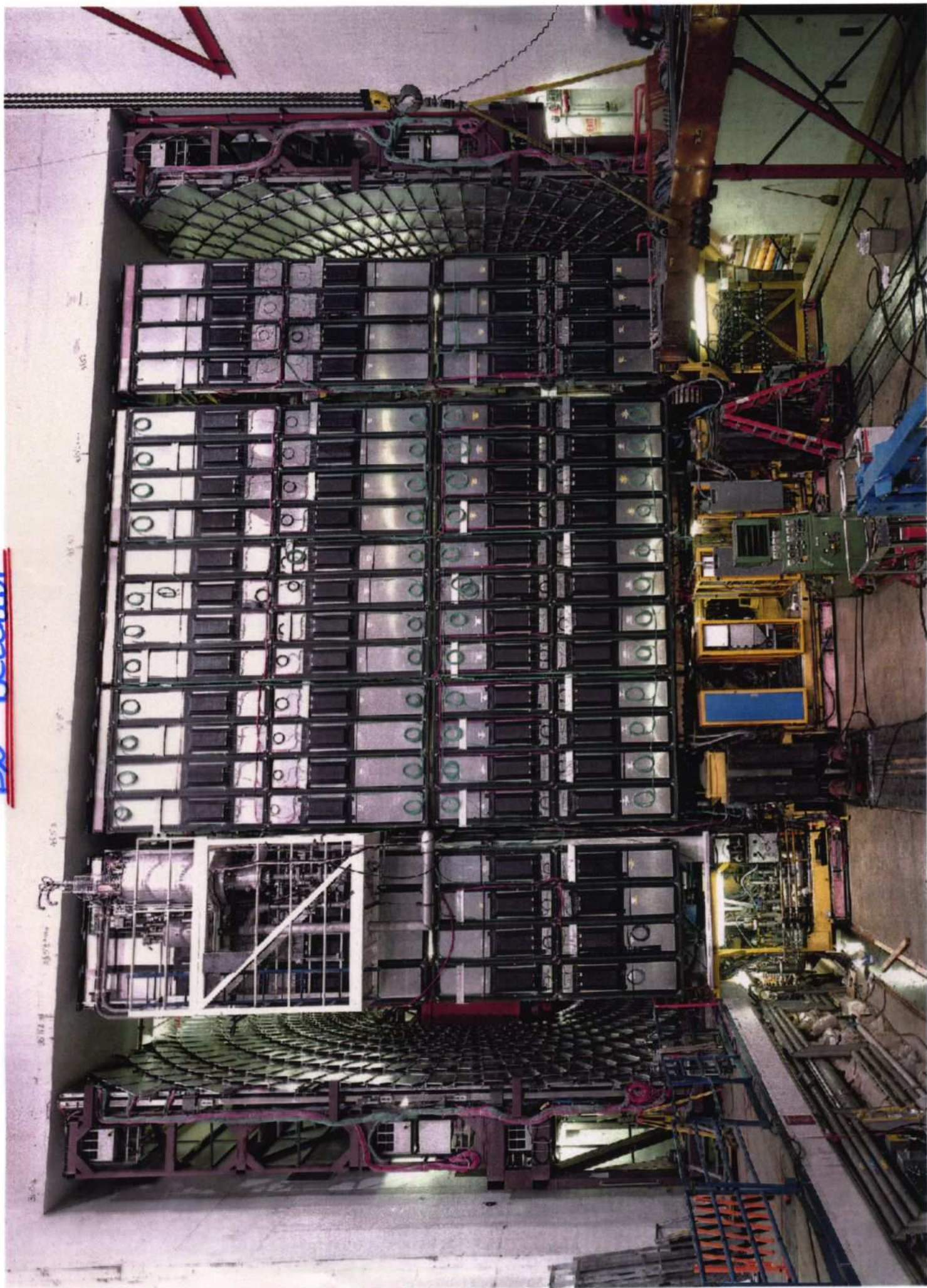
2 TeV Energie in Kollision verfügbar
(ca. $10 \times$ LEP2)

74 mA Proton \searrow Strahlstrom
8 mA Anti-Proton \swarrow

2 Vielzweck-Detektoren: CDF, DØ

\Rightarrow bereit, Suche nach Higgs-Boson fortzusetzen!
und nach weiteren neuen Phänomenen

DD - Detektor



Teilchenphysik komplett ...

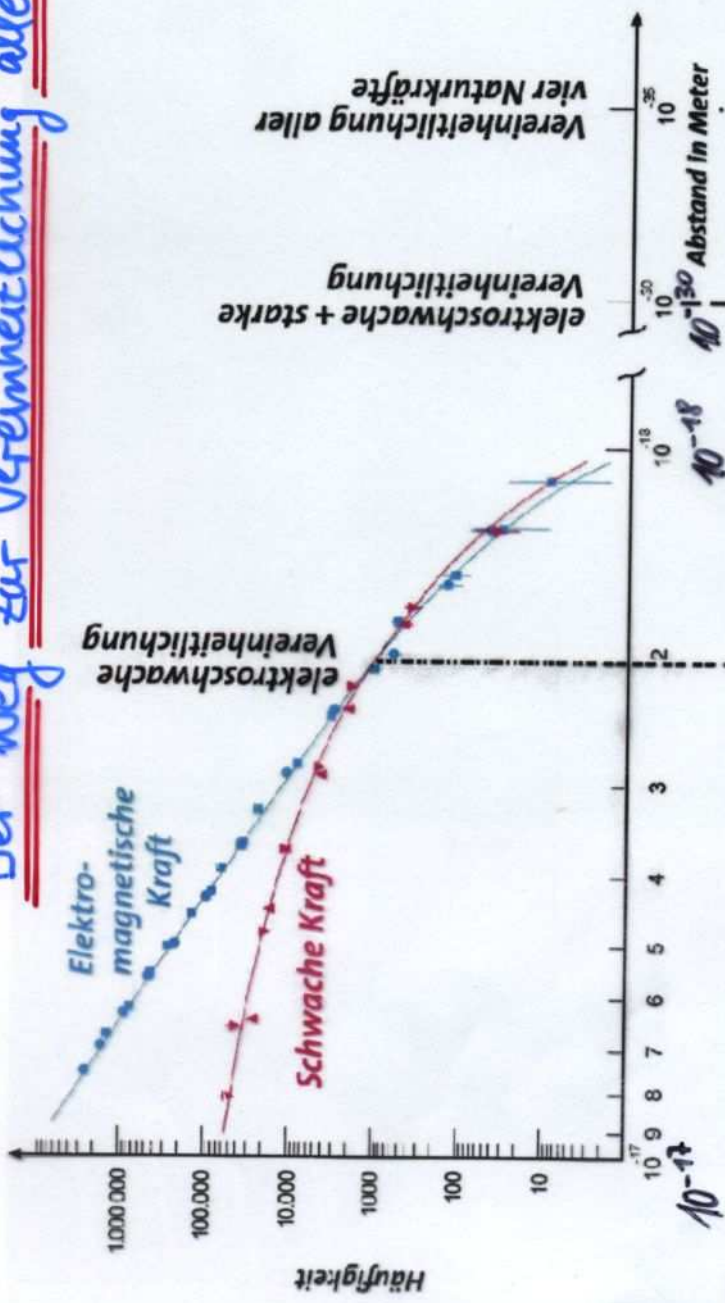
... wenn Higgs-Boson gefunden?

Motivation für Erweiterungen der Theorie

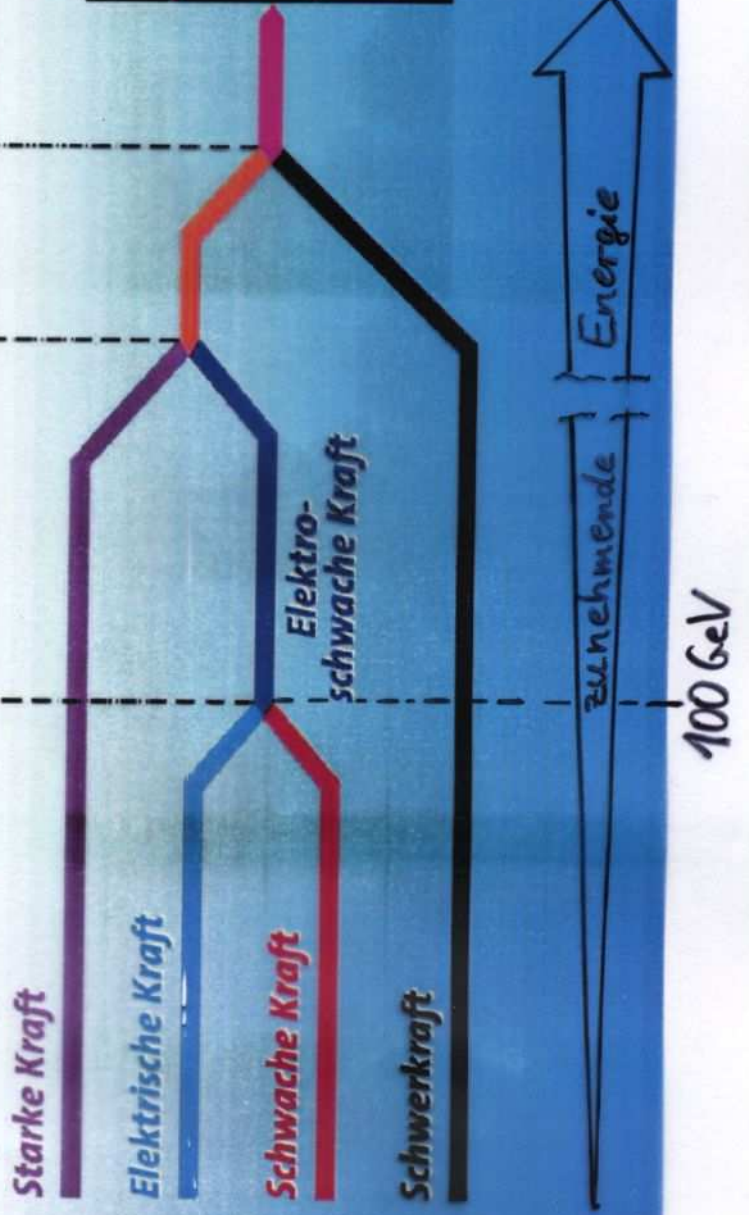
- Anzahl der freien Parameter: **18**
(wenn Neutrinos massiv, dann +7 weitere Parameter)
- und viele offene Fragen:
 - (1) Warum 6 Quarks und 6 Leptonen?
 - (2) Ist Higgs wirklich Ursprung der Teilchenmassen?
 - (3) Woher kommt die Massenhierarchie? (Neutrinos sehr leicht, t-Quark extrem schwer)
 - (4) 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?
 - (7) Gibt es zusätzliche Raumdimensionen?
- und Probleme:

Theorie versagt bei extrem hohen Energien

Der Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte?



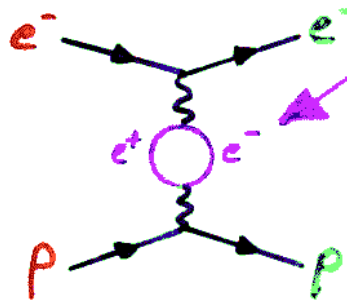
Urknall



Vereinheitlichung der Kräfte?

- Die Stärke der Kräfte (elektromagn., schwach, stark, Gravitation) ist energieabhängig.

Grund: ► Vakuumpolarisation



► Renormierung der Ladung

- Extrapolation der Kopplungsstärken α zu extremen Energien

- Startpunkt: $Q = 100 \text{ GeV}$ ($\hat{=}$ LEP-Energie)

- Annäherung der Kopplungsstärken bei $Q = 10^{14} \text{ GeV}$

- Vereinigung der Kopplungen durch geeignete Zusätze.

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

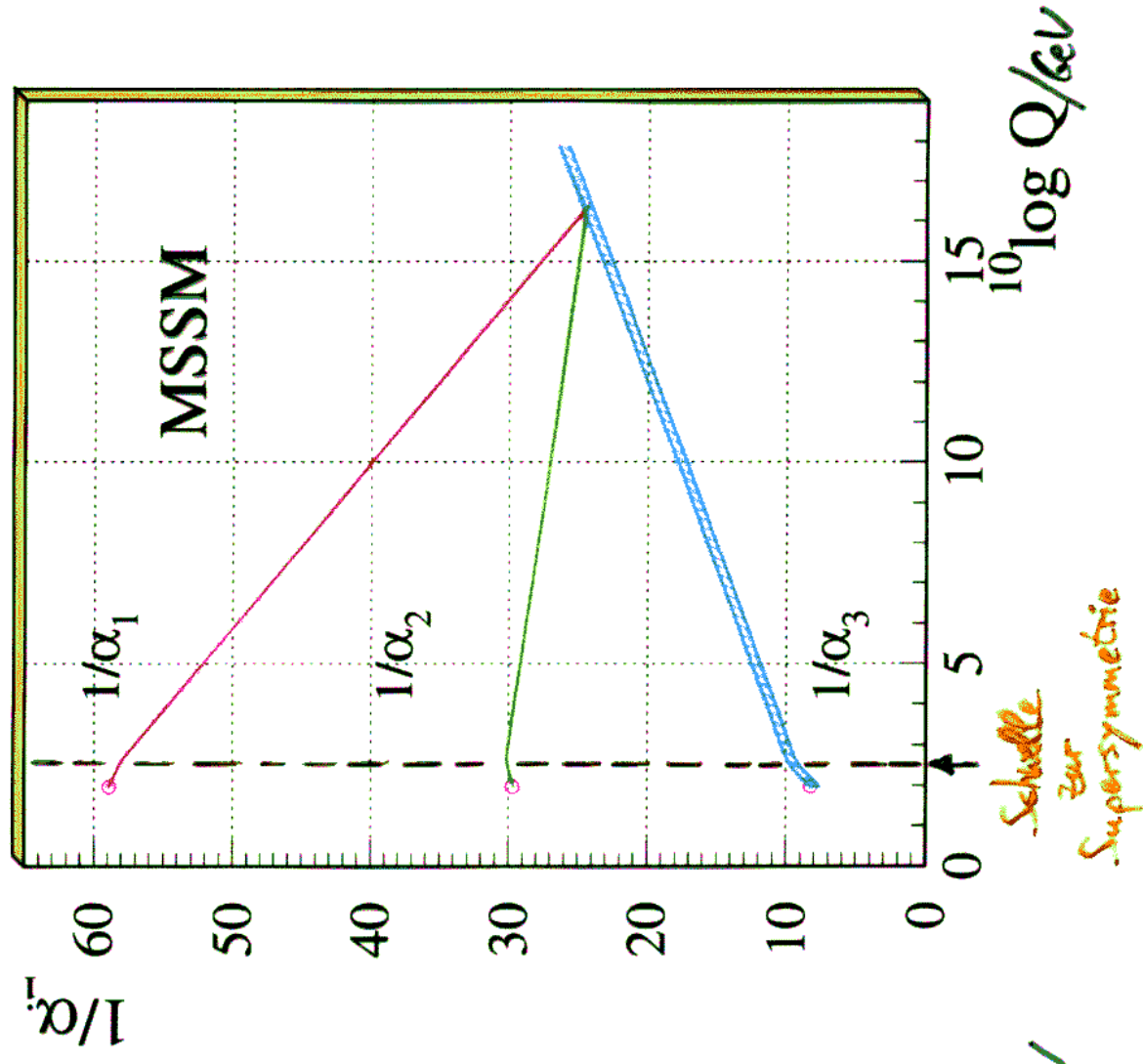
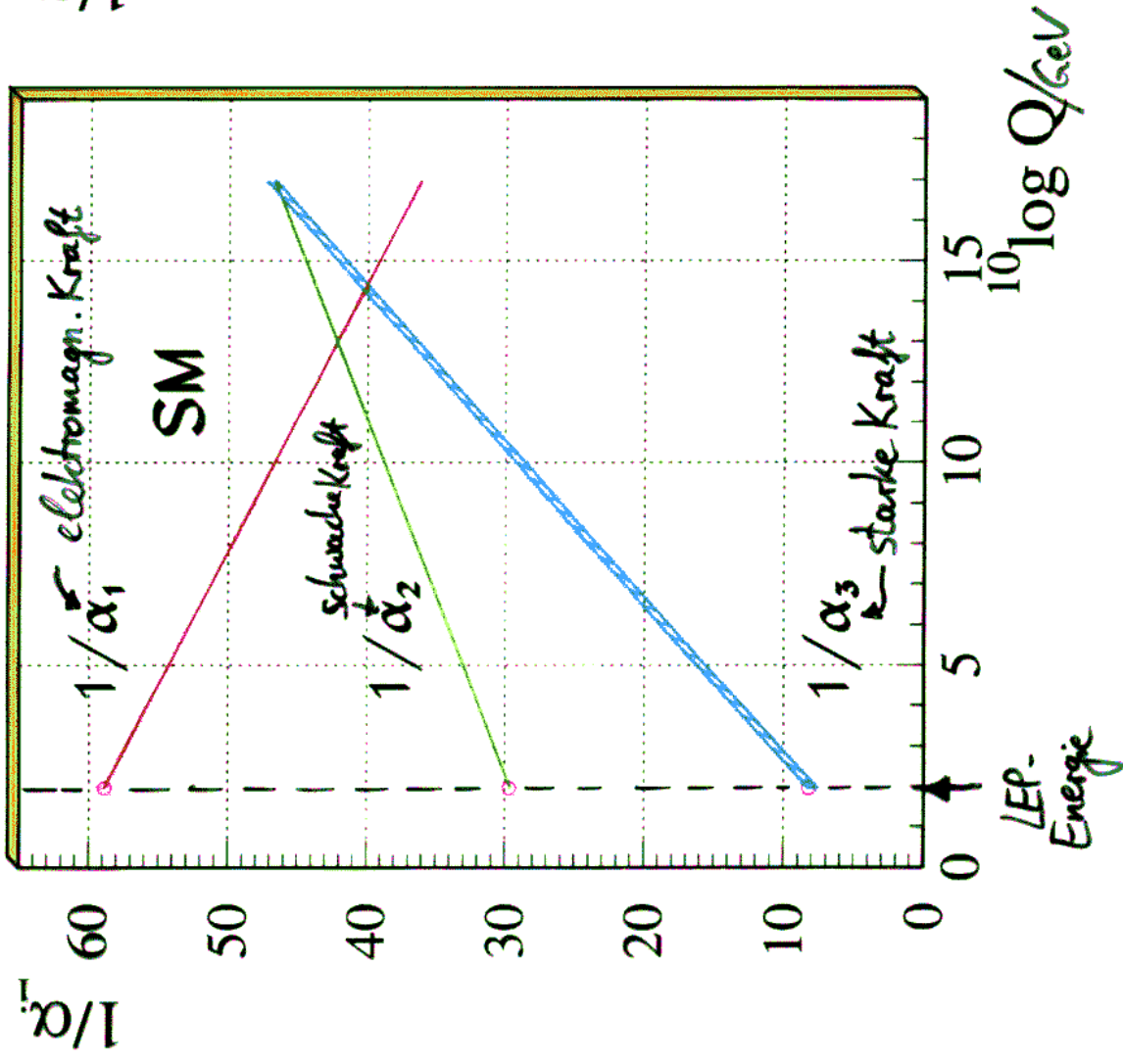
Vereinigung bei $= 10^{16} \text{ GeV}$

Schwelle $\hat{=}$ Energiebereich neuer physikal. Prozesse
→ Supersymmetrie!



Alright Ruth, I about got this one renormalized — See Chapter 15

Vereinigung der Kopplungskonstanten im Standardmodell und im minimalen MSSM



Supersymmetrie

... zwischen Bosonen und Fermionen

- bisheriges Modell supersymmetr. Modell
Fermion f \longleftrightarrow skalares Fermion \tilde{f}
Boson b \longleftrightarrow fermionisches Boson \tilde{b}

- Eigenschaften der SUSY-Partnerteilchen

- ▶ identische Eigenschaften wie Standard-Teilchen bis auf Spin

- ▶ Unterschied im Spin: $\frac{1}{2}$

z.B.: Elektronenspin = $\frac{1}{2}$ \longleftrightarrow skalares Elektron Spin = 0

- ▶ leichtestes der SUSY-Partnerteilchen (LSP)

ist stabil! (\leadsto Kandidat für "Dunkle Materie"?)

Aber: Supersymmetrie ist gebrochen,

da kein skalares Elektron mit Masse des Standard-Elektrons beobachtet wurde

\Rightarrow SUSY-Partnerteilchen viel schwerer als

Standard-Teilchen

Supersymmetrie

Standard-Teilchen

SUSY-Partnerteilchen

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

Quarks			
Leptonen (Neutrinos)			
Quarks			
Leptonen			

ihre Superpartner (Bosonen: Spin-0-Teilchen)

				Squarks	+1
					+2/3
				Squarks	+1/3
				Squarks	0
				Squarks	-1/3
				Squarks	-2/3
				Squarks	-1

kraftvermittelnde Teilchen (Bosonen)

Spin-0-Teilchen	Spin-1-Teilchen		Spin-2-Teilchen

ihre Superpartner

Spin-1/2-Teilchen	Spin-1/2-Teilchen		Spin-1/2-Teilchen

Supersymmetrie

Vorteile:

- Enthält präzise getestete Standard-Theorie
- kann berechnet werden
- bringt Vereinigung der elektromagn., schwachen und starken Kräfte
- hilft, theoretische Probleme der Standard-Theorie zu lösen
- bietet Teilchen zur Erklärung der "Dunklen Materie"
- sagt viele neue Teilchen vorher

...

Supersymmetrie

Nachteile:

- Symmetrie offensichtlich gebrochen (Mechanismus?)
- zusätzlich 106 Parameter
(Massen der SUSY-Partnerteilchen, ...)
- sagt Reaktionen vorher, die nicht beobachtet werden oder viel schwächer sind

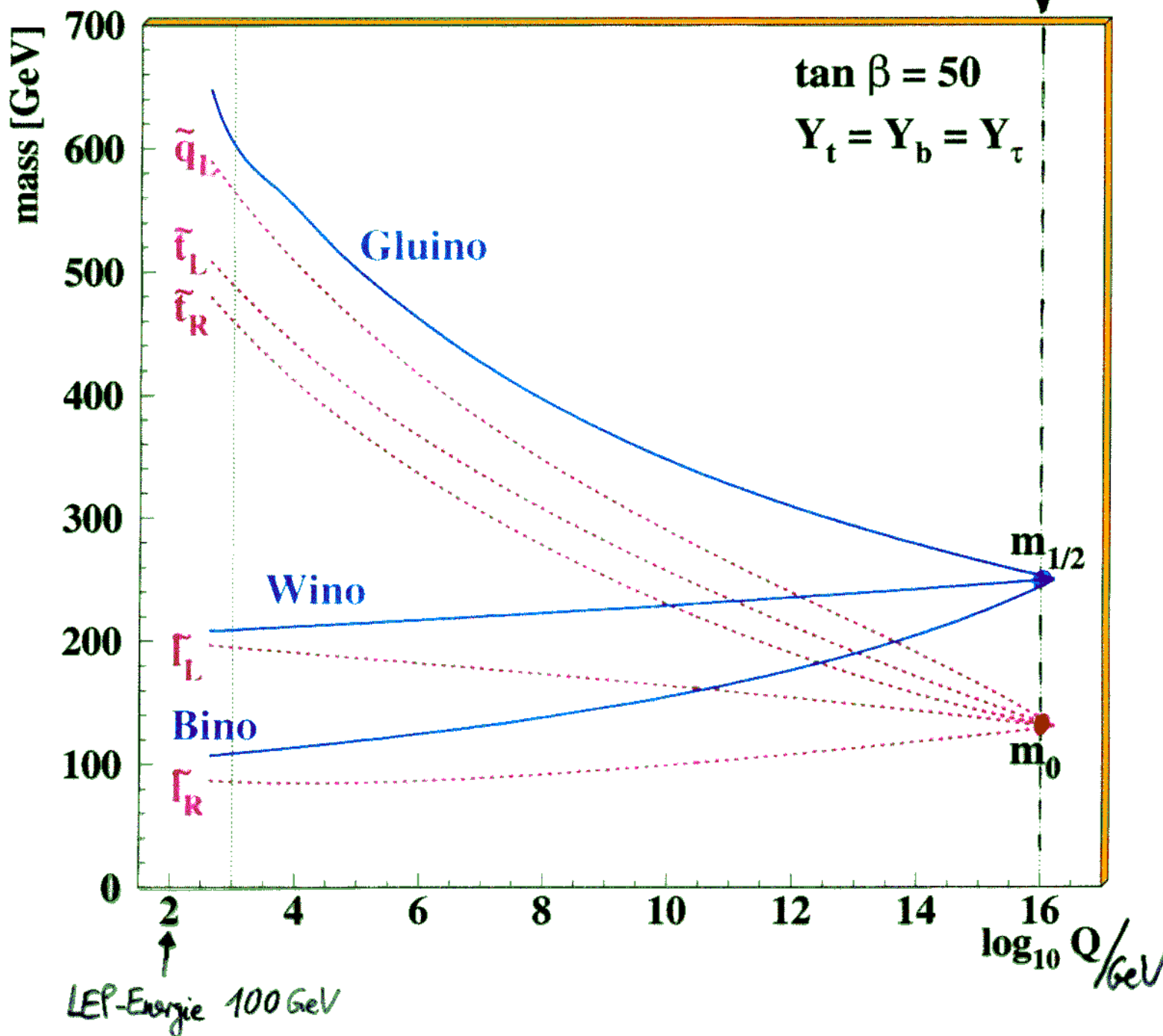
⇒ Nahezu gesamter $106 + 18$ dimensionaler Parameterraum der SUSY-Theorie ausgeschlossen!

- weitere Reduzierung der Parameter: Annahmen
 - ▶ gemeinsamer Massenwert aller SUSY-Partner von W^\pm, Z, γ, g bei Vereinigungsenergie \rightarrow $m_{1/2}$
 - ▶ Vereinigung der Massen aller skalaren Fermionen bei Vereinigungsenergie \rightarrow m_0

Massen der SUSY-Partnerteilchen

... können durch vereinfachende Annahmen für die Werte gewisser Parameter berechnet werden, z.B.

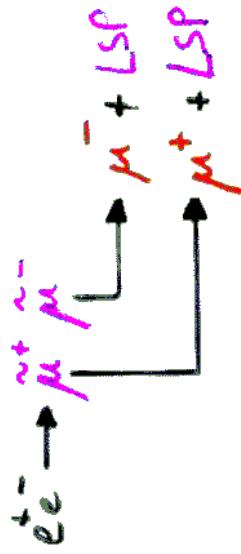
Startpunkt $m_{1/2}$ und m_0 bei 10^{16} GeV



Supersymmetrie?

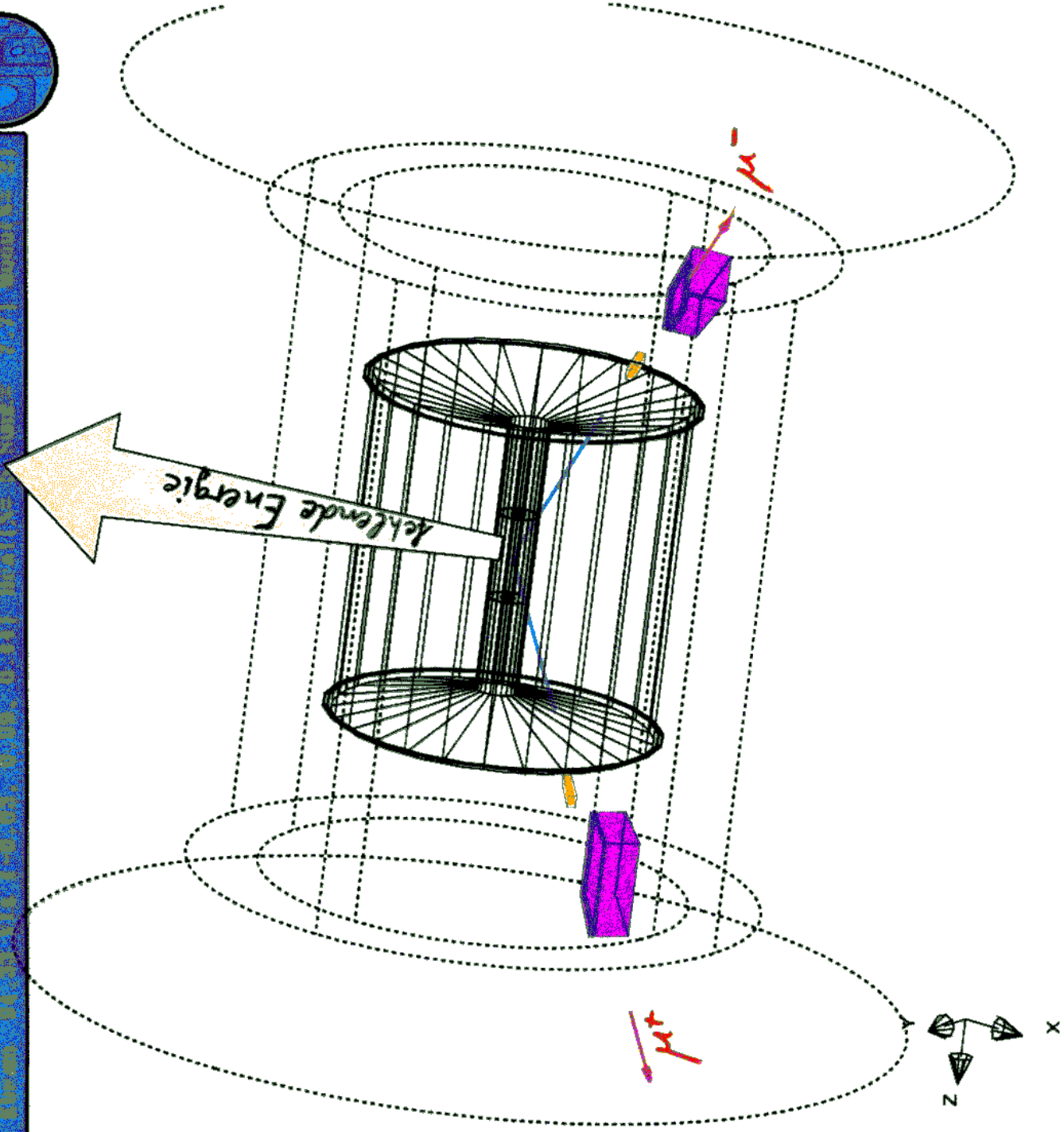
Massewert: 105.66 MeV
 Ladung: -1
 Spin: 1/2
 Leptonenzahl: 1
 Baryonzahl: 0
 Charm: 0
 Strange: 0
 Bottom: 0
 Top: 0
 Farbe: 0

• Reaktion:



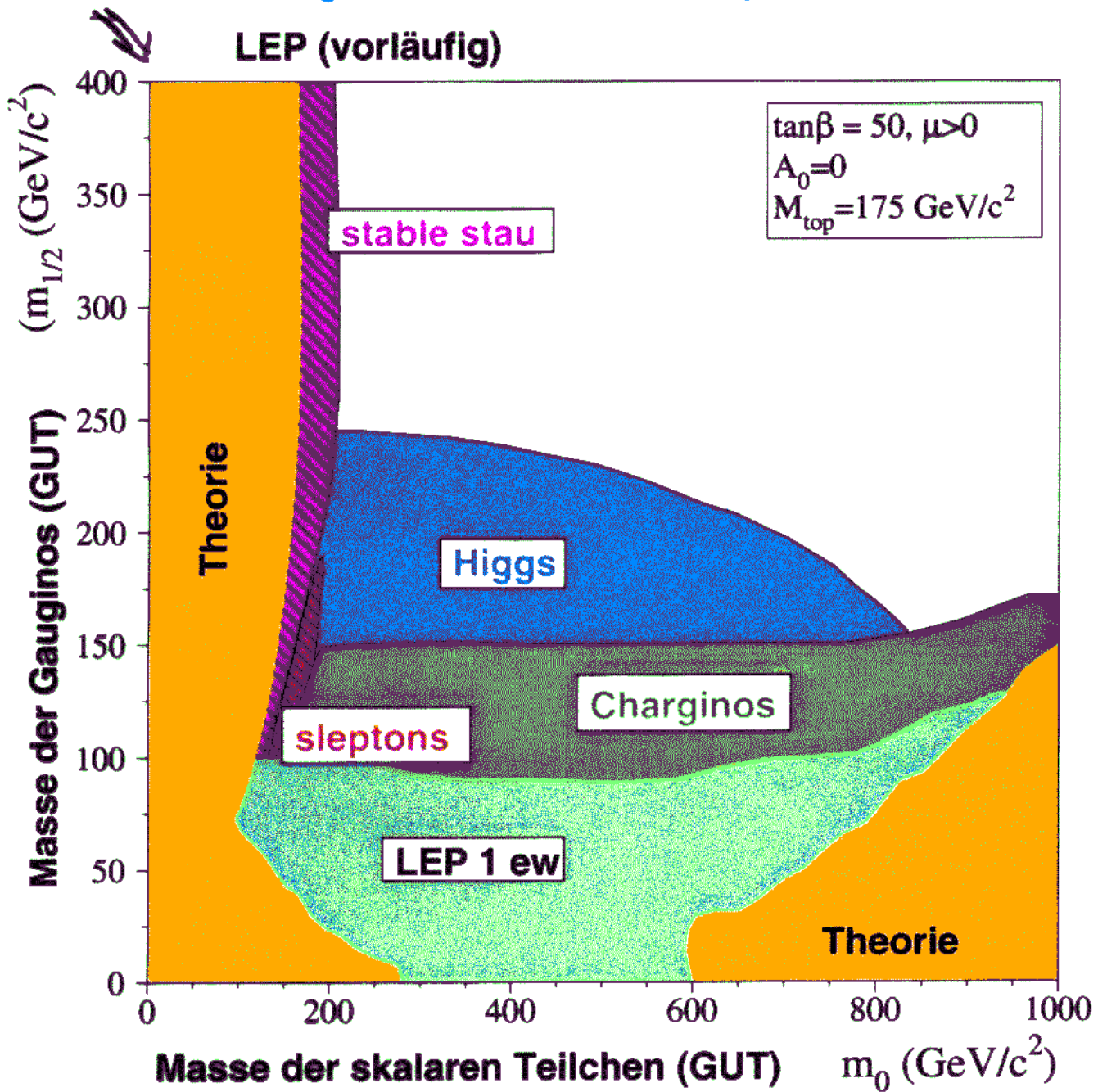
• Beobachtung:

- ▶ LSP unbeobachtet,
- ▶ LSP-Energie fehlt in Energiebilanz
- ▶ $\mu^+ \mu^-$ - Teilchenpaar



Suche nach Supersymmetrie

... bislang ohne Anzeichen für SUSY-Teilchen



- viele verschiedene Einzelanalysen der Messdaten tragen zum Ausschluss der Massenbereiche in $m_0, m_{1/2}$ bei.
- alle zusammengefasst: LSP-Teilchen schwerer als $50 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

Vereinheitlichung aller Kräfte

- bisherige Betrachtung elektromagn., schwache, starke Kräfte vereinheitlicht
- und Gravitation?

Viele offene Fragen zur Gravitation, z.B.:

▶ Quantentheorie der Gravitation?

▶ Warum so viel schwächer?

schwache Kraft: relative Stärke 10^{-5}
Gravitation: ————— " ————— 10^{-40}



Mögliche Erklärung (motiviert durch String-Theorie):

- **Gravitation** breitet sich in mehr als den 3 Raumdimensionen aus

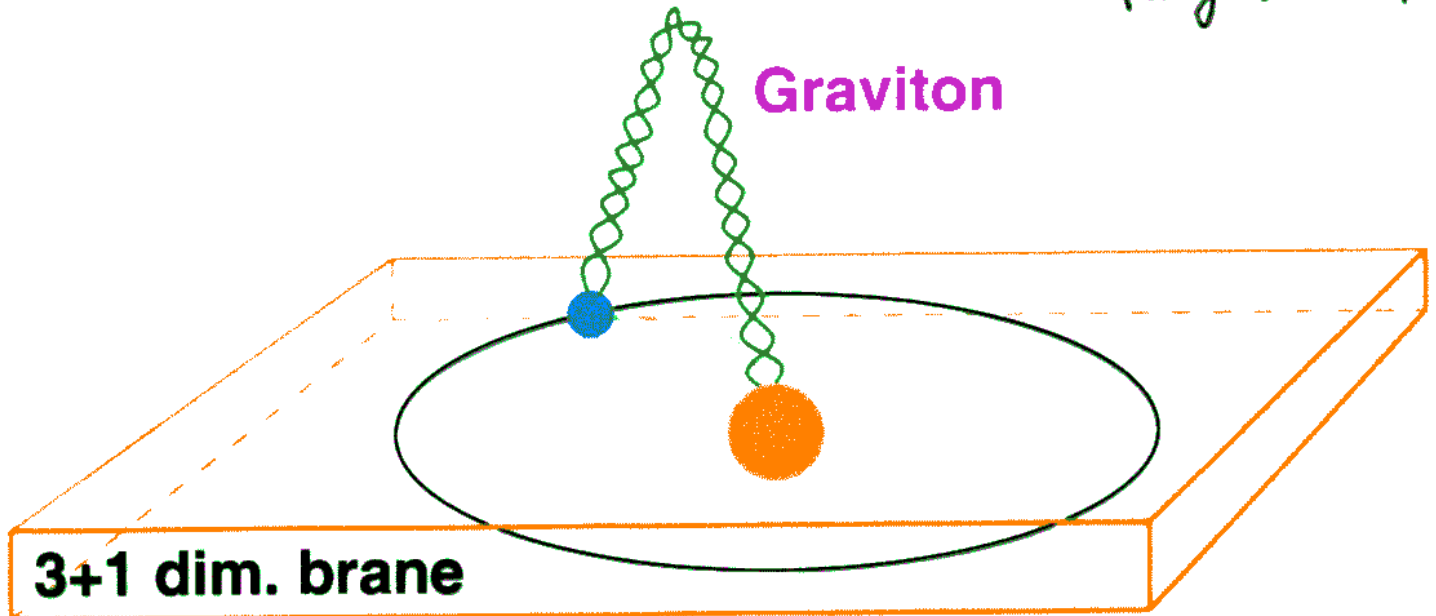


Große Extra-Dimensionen

Extra - Dimensionen

● Struktur

Graviton breitet sich auch in Extra-Dimensionen aus
(so gen.: bulk)



Materie und übrige Wechselwirkungen sind in 3 Raum- + 1 Zeit-Dimension gefangen (so gen.: brane)

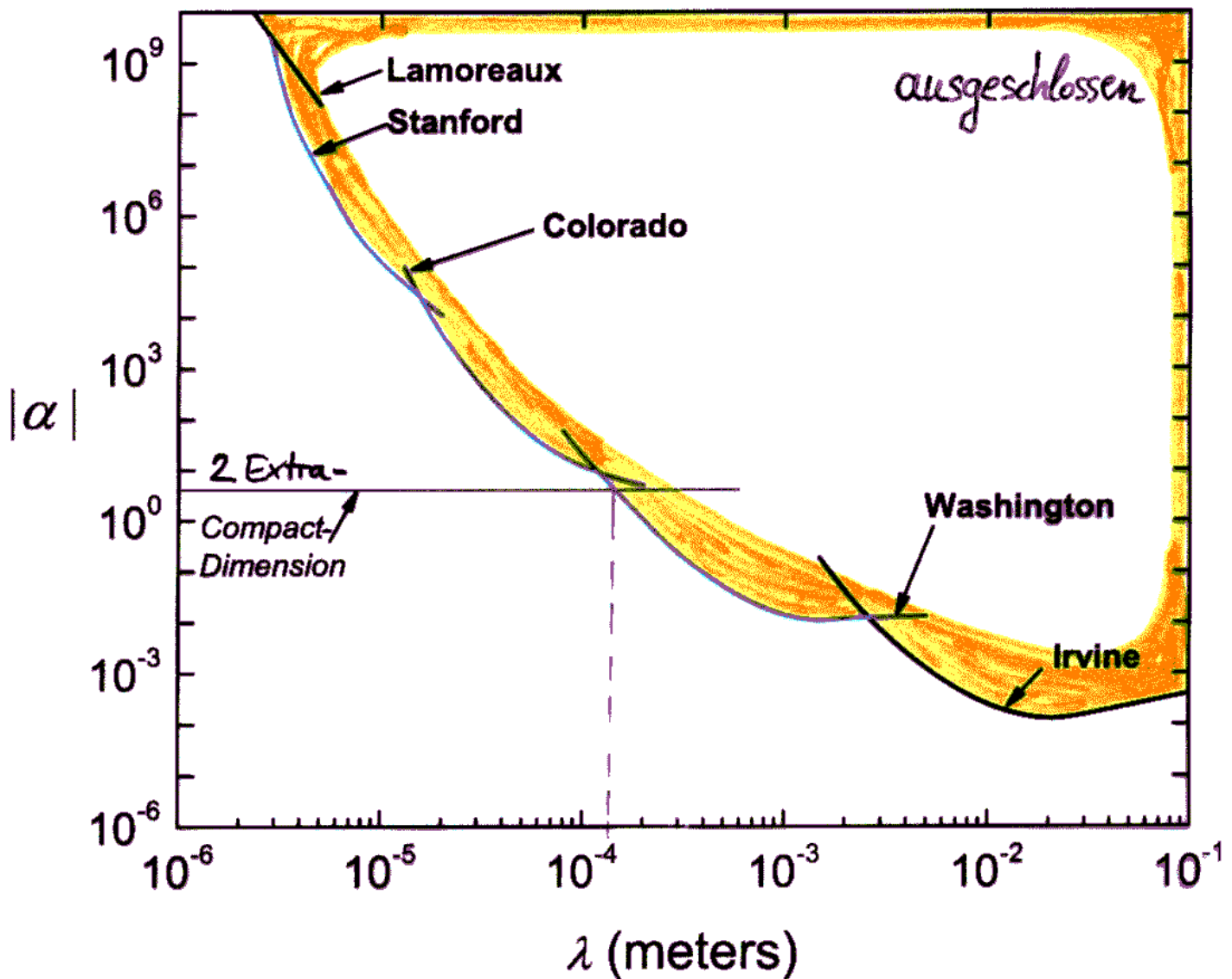
● Konsequenzen

- ▶ Extra-Dimensionen müssen kompakt sein, sonst Abweichungen von Newtons Gravitationsgesetz
- ▶ Extra-Dimensionen erst bei sehr kleinen Abständen oder bei hohen Energien beobachtbar

Große Extradimensionen

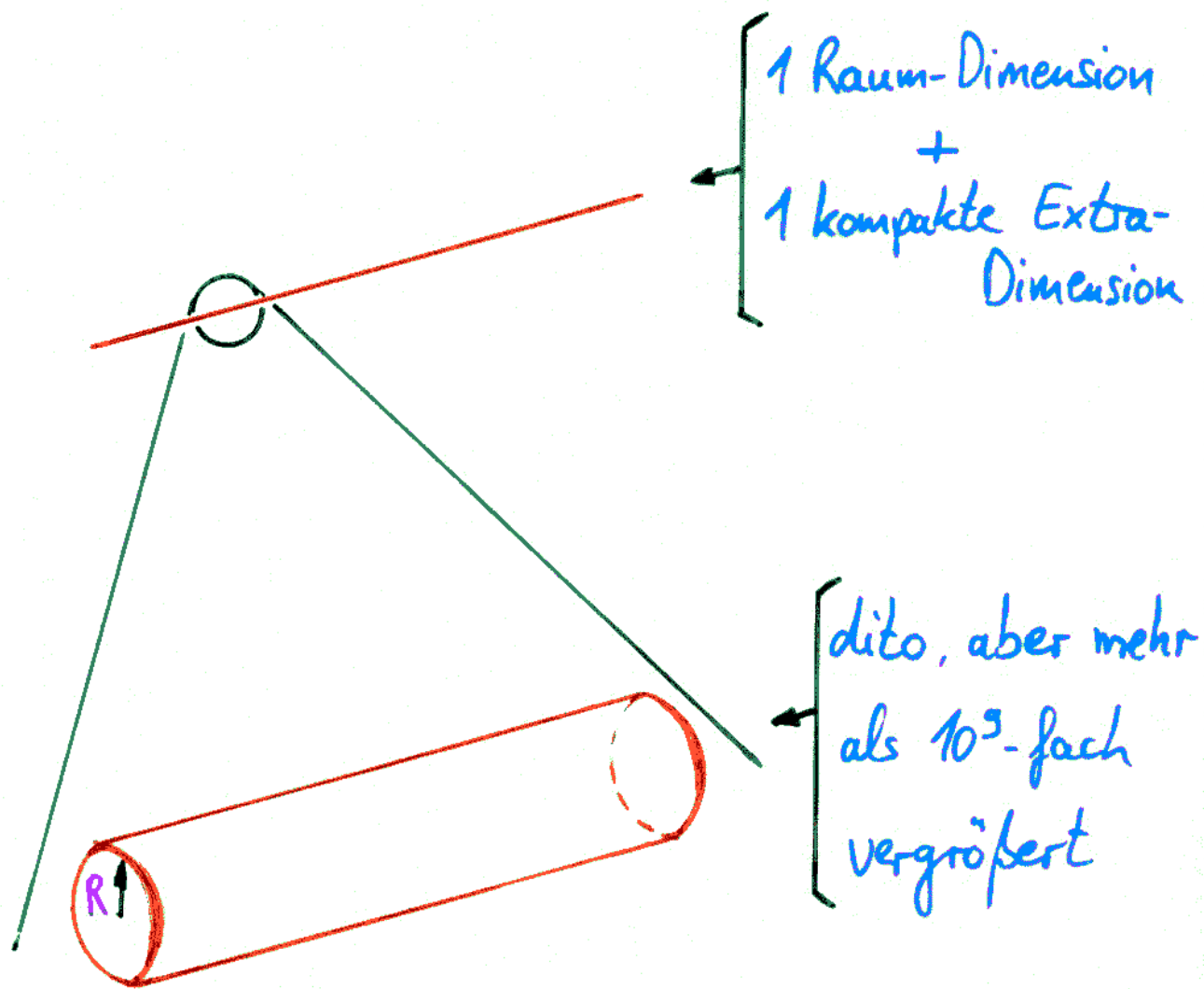
Abweichungen von Newtons Gravitationsgesetz wurden experimentell untersucht auf Längenskalen bis unter $10\ \mu\text{m}$

→ keine Anzeichen für Extra-Dimensionen gefunden



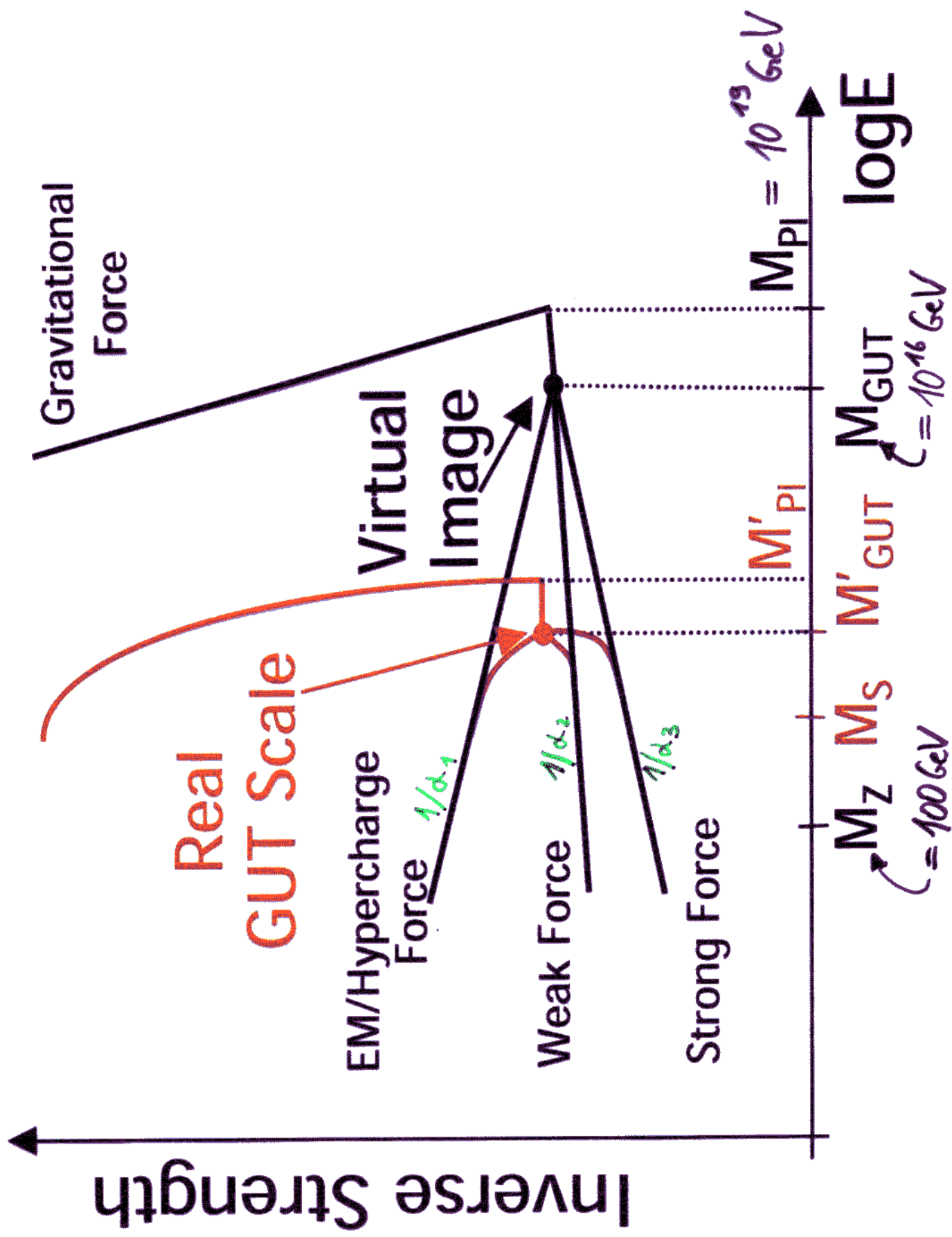
⇒ Extra-Dimensionen kompakter als $0.14\ \text{mm}$

Kompaktifizierte Extra-Dimensionen



⇒ Wirkungen der Extra-Dimensionen
werden nur bei kleinsten Abständen
bzw. bei höchsten Energien beobachtbar

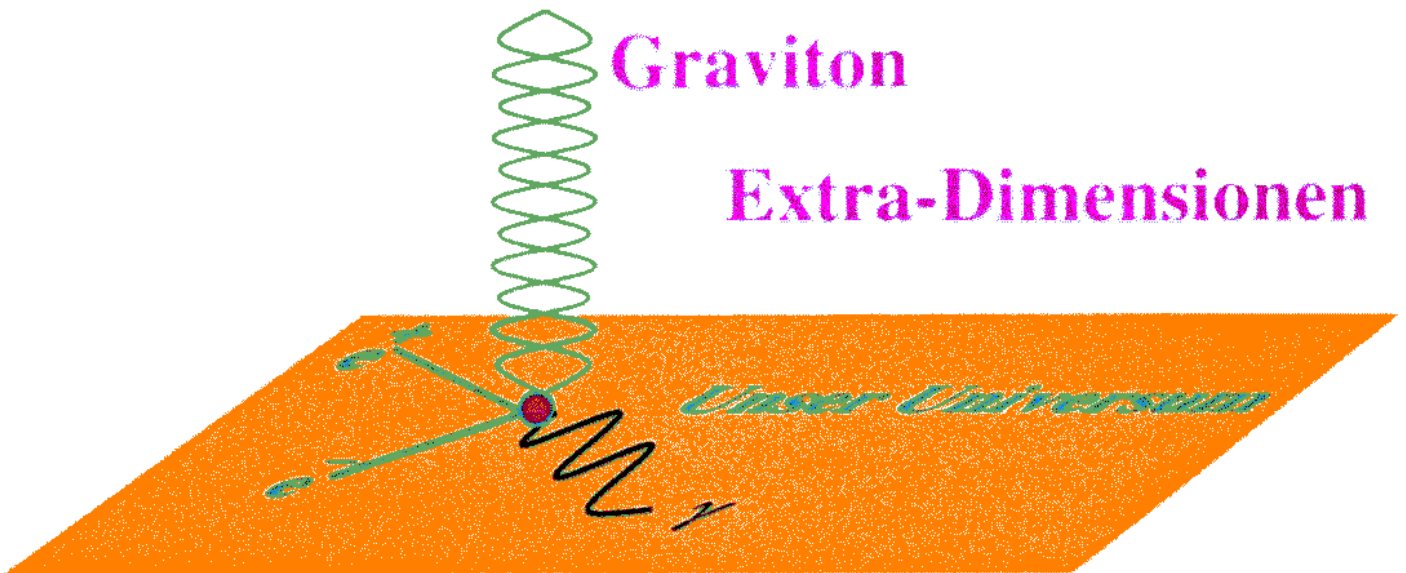
Extra-Dimensionen



Suche nach Extra-Dimensionen

... in Beschleuniger-Experimenten:

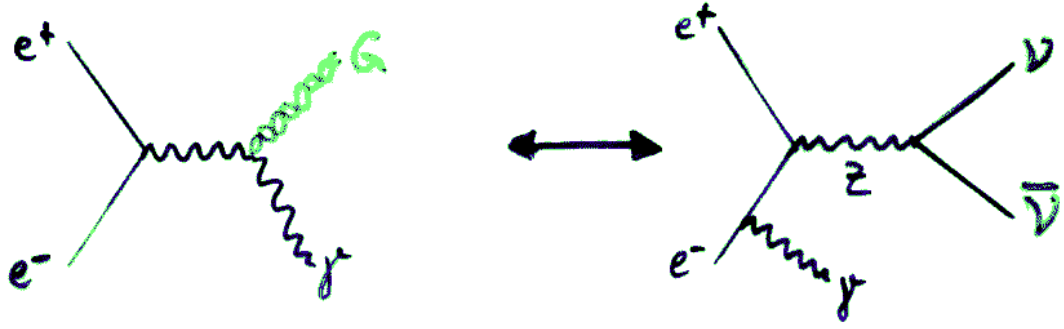
- Reaktion:



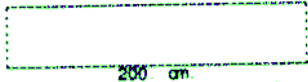
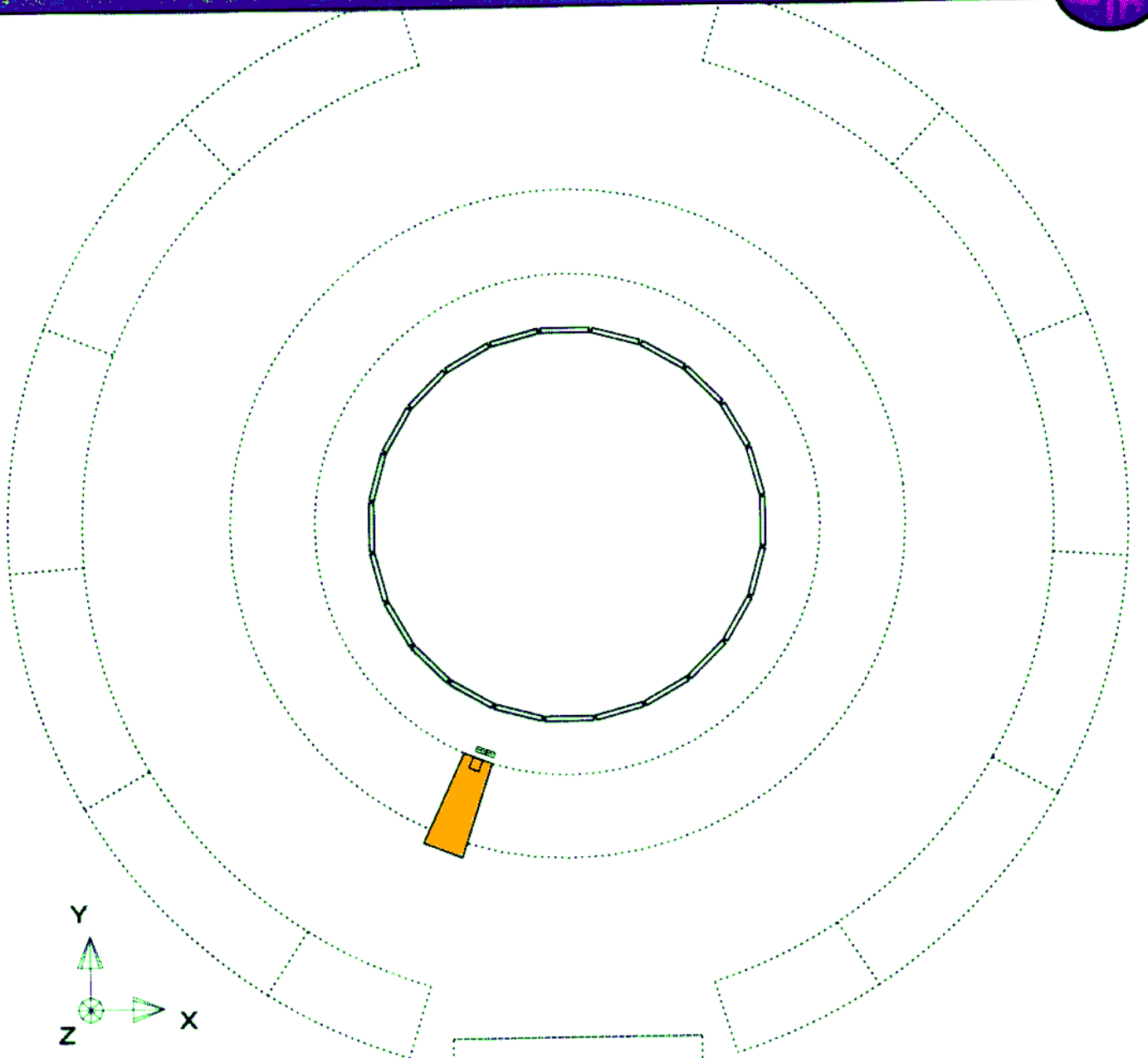
- Beobachtung:

- ▶ Graviton entführt Energie in Extra-Dimensionen
- ▶ einzelnes Photon im Detektor beobachtbar

Anzeichen für Extra-Dimensionen?



Run event 2466 0645 Date 910819 Time 910370 Trk(N= 0) Snp(N= 0 0) Ecal(N= 4) SumE= 15.3 Hcal(N= 0) SumE= 0.0
 Ebeam 45.61 Eycs 15.0 Emiss 75.9 Vtx (0.12, 0.12, 0.19) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fcal(N= 0) SumE= 0.0
 Bz 4.350 TrkAlgo ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO ALGO



5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

Suche nach Extra-Dimensionen

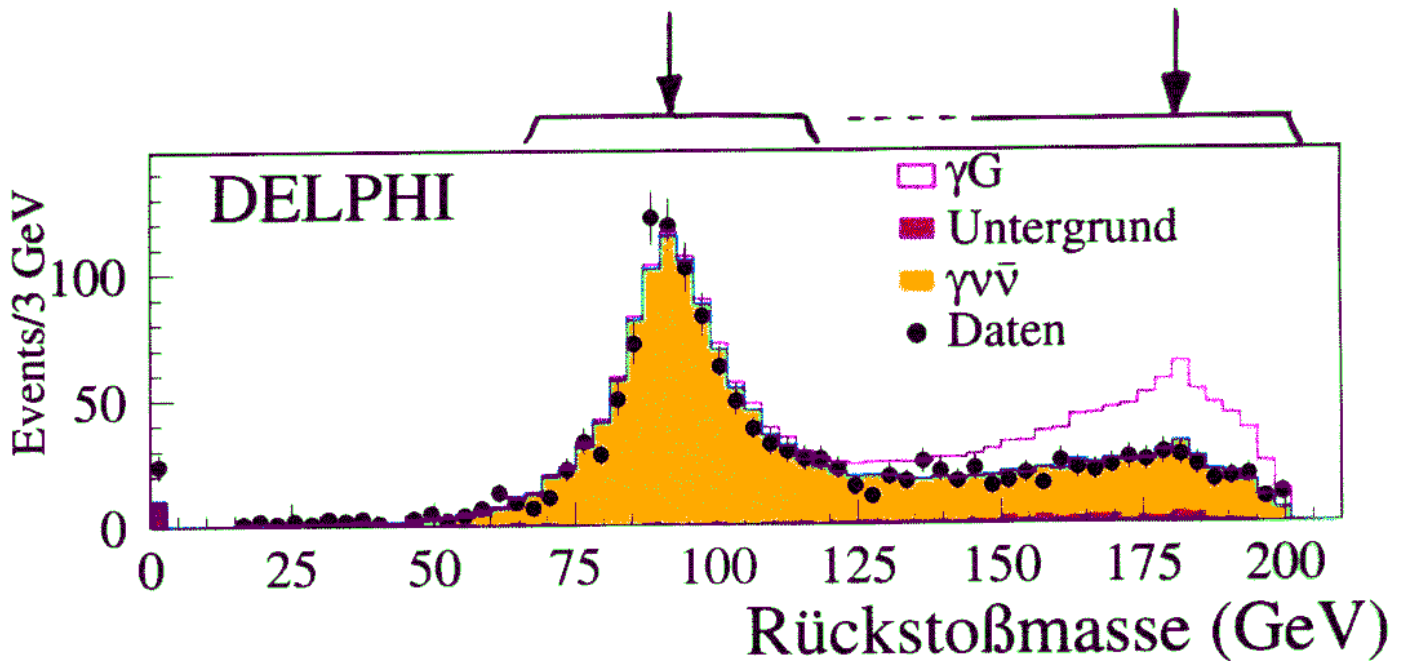
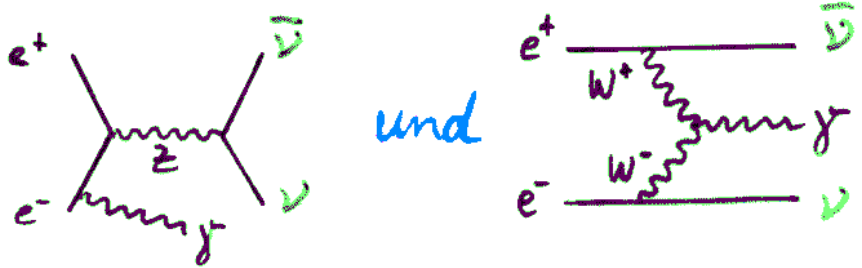
- Reaktion:



- Beobachtung:

- ▶ einzelnes Photon
- ▶ fehlende Energie in Bilanz durch Graviton

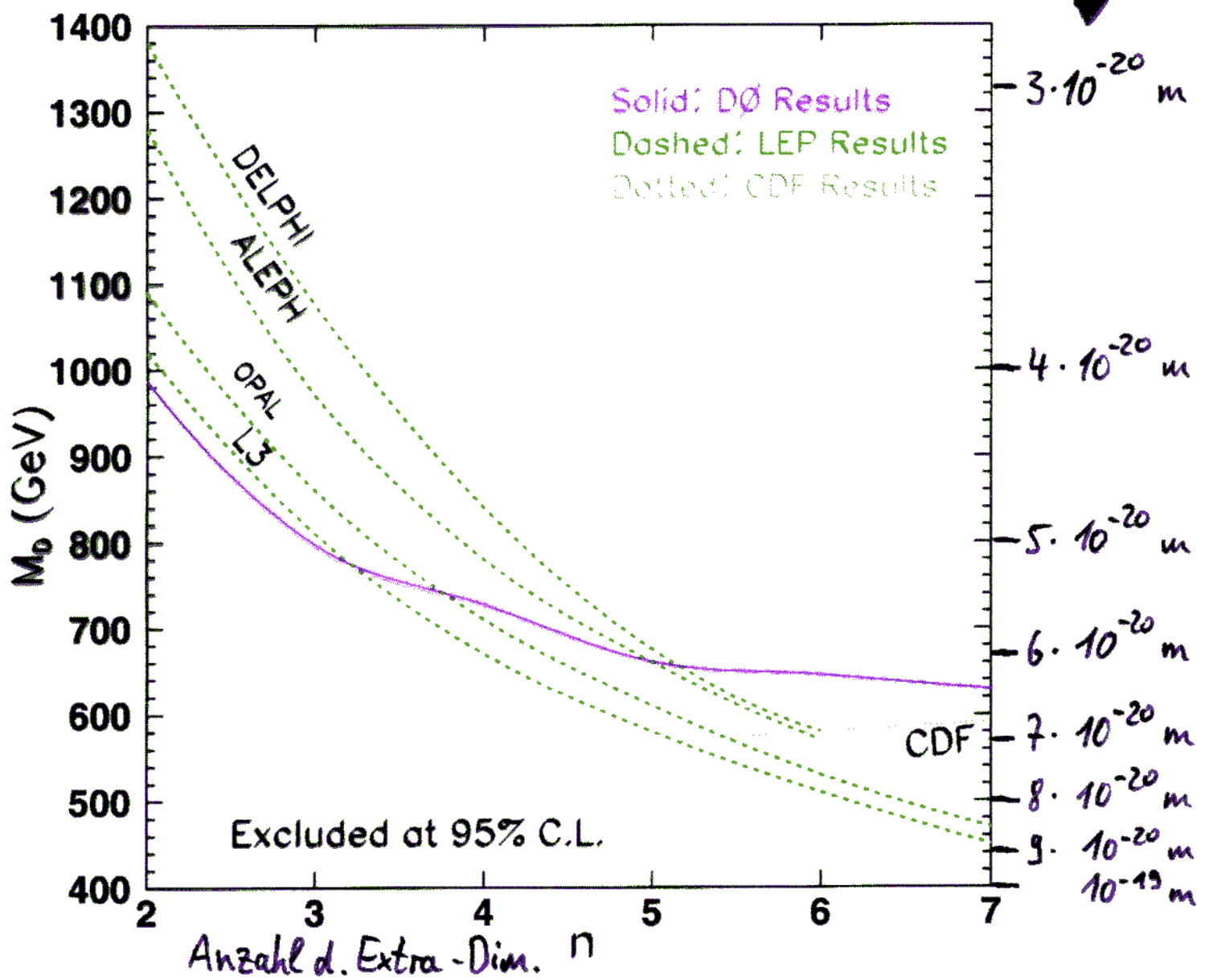
- Konkurrenzprozesse:



⇒ keine Anzeichen für Extra-Dimensionen

Grenzen auf Extra-Dimensionen

- keine Anzeichen für Extra-Dimensionen
- Wirkungen von Extra-Dimensionen erst unterhalb eines Abstands von:



⇒ je nach Anzahl der Extra-Dimensionen
Auswirkungen erst unterhalb von einigen 10⁻²⁰ m

Zusammenfassung & Ausblick

- **Urknall im Teilchenphysiklabor**
 - ▷ Hochenergie-Teilchenbeschleuniger:
Untersuchung der Physik 10^{-12} s nach Urknall
 - ▷ Standard-Theorie der Teilchenphysik:
exzellente Übereinstimmung mit experimentellen
Resultaten
- **Ursprung der Masse**
 - ▷ Higgs-Mechanismus und spontane Symmetrie-
brechung
 - ▷ Higgs-Teilchen noch nicht entdeckt
 - ▷ Masse des Higgs-Teilchen aber bereits stark
eingegrenzt
- **Materie-Kraft-Symmetrie (Supersymmetrie)**
 - ▷ Supersymmetrie erlaubt Vereinheitlichung dreier
Kräfte
 - ▷ jedes Standard-Teilchen erhält SUSY-Partner
 - ▷ SUSY-Teilchen noch nicht entdeckt

Zusammenfassung & Ausblicke

• Extra-Dimensionen

- ▷ erlauben Vereinheitlichung aller Kräfte
- ▷ Gravitation breitet sich als einzige Kraft auch in Extra-Dimensionen aus
- ▷ Extra-Dimensionen auf kleine Radien kompaktifiziert
- ▷ erst auf kleinen Abständen / höchsten Energien _{beobachtbar}
- ▷ Extra-Dimensionen noch nicht beobachtet

• Zukunft der Teilchenbeschleuniger

- ▷ LEP-Experimente abgeschlossen
- ▷ Tevatron-Beschleuniger setzt Suchen bei höheren Energien / kleineren Abständen fort
- ▷ LHC-Beschleuniger im LEP-Tunnel ab 2007 bei 7-fach höherer Energie / 7-fach geringeren Abständen als Tevatron-Beschleuniger
- ▷ TESLA-Beschleuniger zum genauen Studium des Higgs-Teilchens und SUSY-Teilchen in Planung