

# Quarks und Leptonen - Bausteine des Universums

*Siegfried Bethke  
Max-Planck-Institut für Physik  
(Werner Heisenberg Institut)  
München*

- vom Kosmos zu den Quarks -  
Dimensionen und Struktur der Materie
- Materie und fundamentale Kräfte
- Teilchenphysik und Kosmologie
- Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen
- LEP: Beschleuniger, Experimente und Resultate
- fundamentale offene Fragen
- die Zukunft: der Large Hadron Collider

# Dimensionen und Struktur der Materie



Universum  $10^{26}$  m

Galaxie  $10^{21}$  m

Sonnensystem  $10^{13}$  m

Erde  $10^7$  m

Mensch  $10^0$  m

Atom  $10^{-10}$  m

Atomkern  $10^{-14}$  m

Nukleon  $10^{-15}$  m

Quark; Lepton  $< 10^{-18}$  m

?????

???

# Aufbau der Materie und fundamentale Kräfte: Das „Standardmodell“ der Teilchenphysik

## Elementare Teilchen:

(sowie jeweilige Anti-Teilchen)

Sichtbare Welt besteht nur aus Teilchen der ersten Generation !

|          | Familien |           |            | elektr. Ladung | Kräfte |    |      |      |
|----------|----------|-----------|------------|----------------|--------|----|------|------|
|          |          |           |            |                | st     | em | schw | grav |
| Quarks   | u        | c         | t          | 2/3            | x      | x  | x    | x    |
|          | d        | s         | b          | -1/3           | x      | x  | x    | x    |
| Leptonen | $\nu_e$  | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ | 0              | -      | -  | x    | x    |
|          | e        | $\mu$     | $\tau$     | -1             | -      | x  | x    | x    |

## Fundamentale Kräfte:

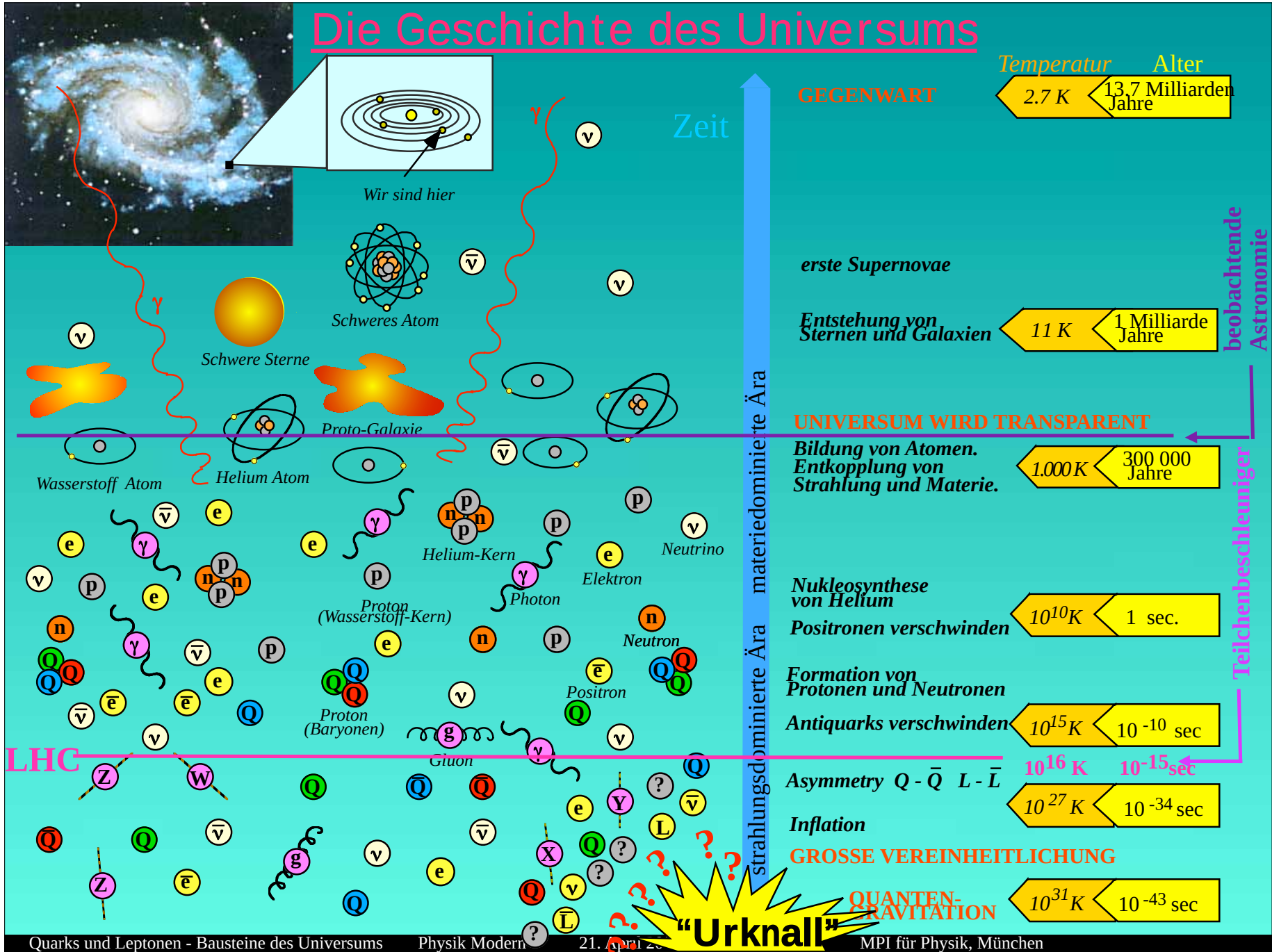
Elementare Kräfte (Wechselwirkungen) kommen durch **Austausch** von besonderen Teilchen (Austauschbosonen) zustande.

| Wechselwirkung | relative Reichweite | zugehörige Austauschteilchen | relative Stärke |
|----------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| Stark          | subatomar           | Gluon (g)                    | 1               |
| Electromagnet. | unendlich           | Photon ( $\gamma$ )          | $\frac{1}{137}$ |
| Schwach        | subatomar           | $W^+, W^-, Z^0$              | $10^{-14}$      |
| Gravitation    | unendlich           | Graviton (G)                 | $10^{-40}$      |

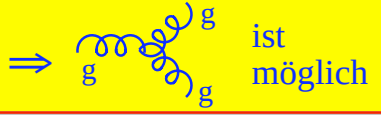
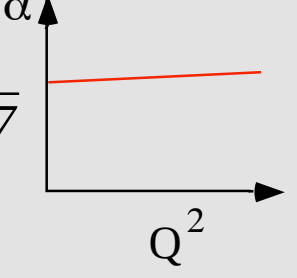
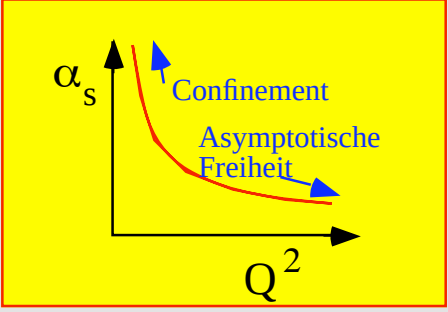
Theoretische Vorhersage zur Erzeugung der Teilchenmassen:

→ Higgs-Teilchen (H) ; bisher unentdeckt

# Die Geschichte des Universums



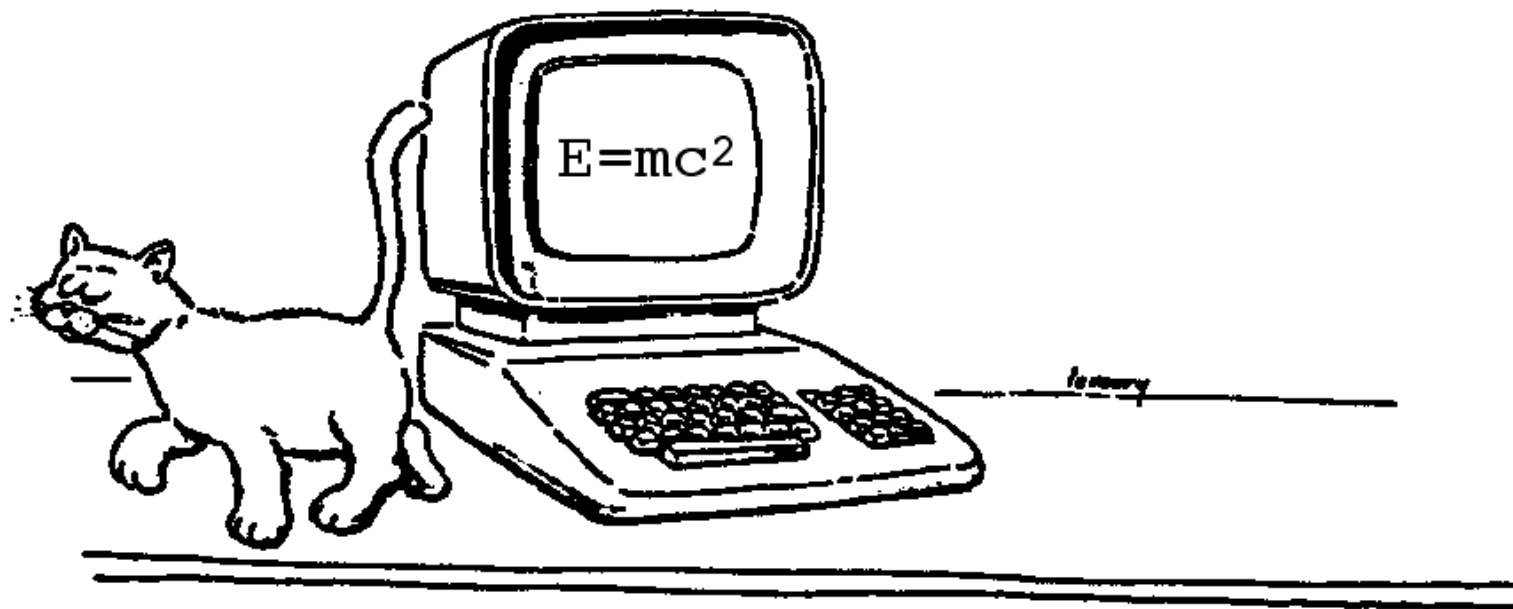
# Eigenschaften der Quarks und Leptonen

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

Woher wissen wir dies alles?

Wie kann man Quarks und Leptonen „sehen“?

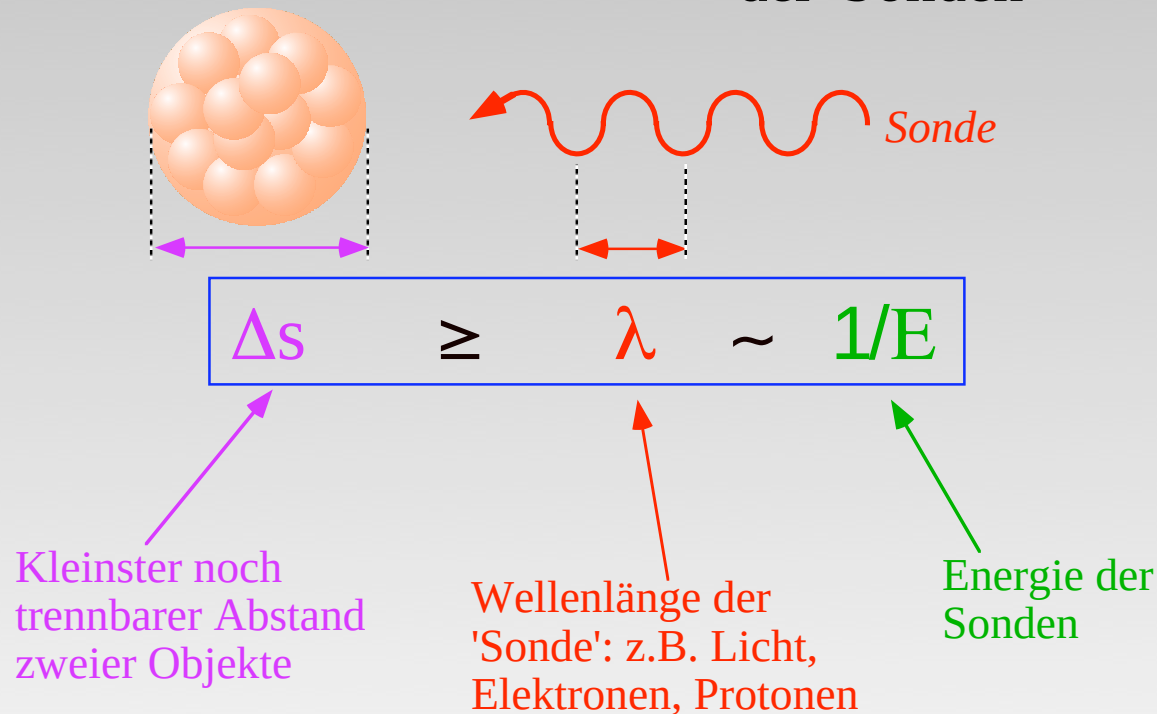
Wie kann man die zwischen ihnen wirkenden Kräfte erforschen und theoretisch beschreiben?



(eine mögliche, aber nicht sehr wissenschaftliche Methode ...)

# Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

Auflösung subnuklearer Strukturen } → Hohe Energien  
(Kleine Wellenlängen)  
der 'Sonden'



elektromagn. Welle:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

massives Teilchen:

$$E = m \cdot c^2 \equiv h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot c}$$



# Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

| Sonde, Instrument                                           | typ. Energie | Auflösung<br>bis ca. | auflösbare<br>Objekte     |
|-------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|---------------------------|
| sichtbares Licht                                            | 1 ... 3 eV   | $10^{-6}$ m          | Viren                     |
| Röntgenstrahlung;<br>Elektronenmikroskop                    | 10 keV       | $10^{-10}$ m         | Atome,<br>Kristallstrukt. |
| niederenergetische<br>Teilchenbeschleuniger                 | 100 MeV      | $10^{-14}$ m         | Atomkern                  |
| Moderne Teilchenbe-<br>schleuniger (LEP, HERA)              | 100 GeV      | $10^{-17}$ m         | Quarks & Co.              |
| Zukunft:<br>- Large Hadron Collider<br>(in Bau; Start 2007) | 14 TeV       | $10^{-19}$ m         | ????                      |



# Europäisches Zentrum für Teilchenphysik CERN / Genf



LEP:  $e^+e^-$  Kollisionen 1989 – 2000

LHC:  $p-p$  Kollisionen ab 2007



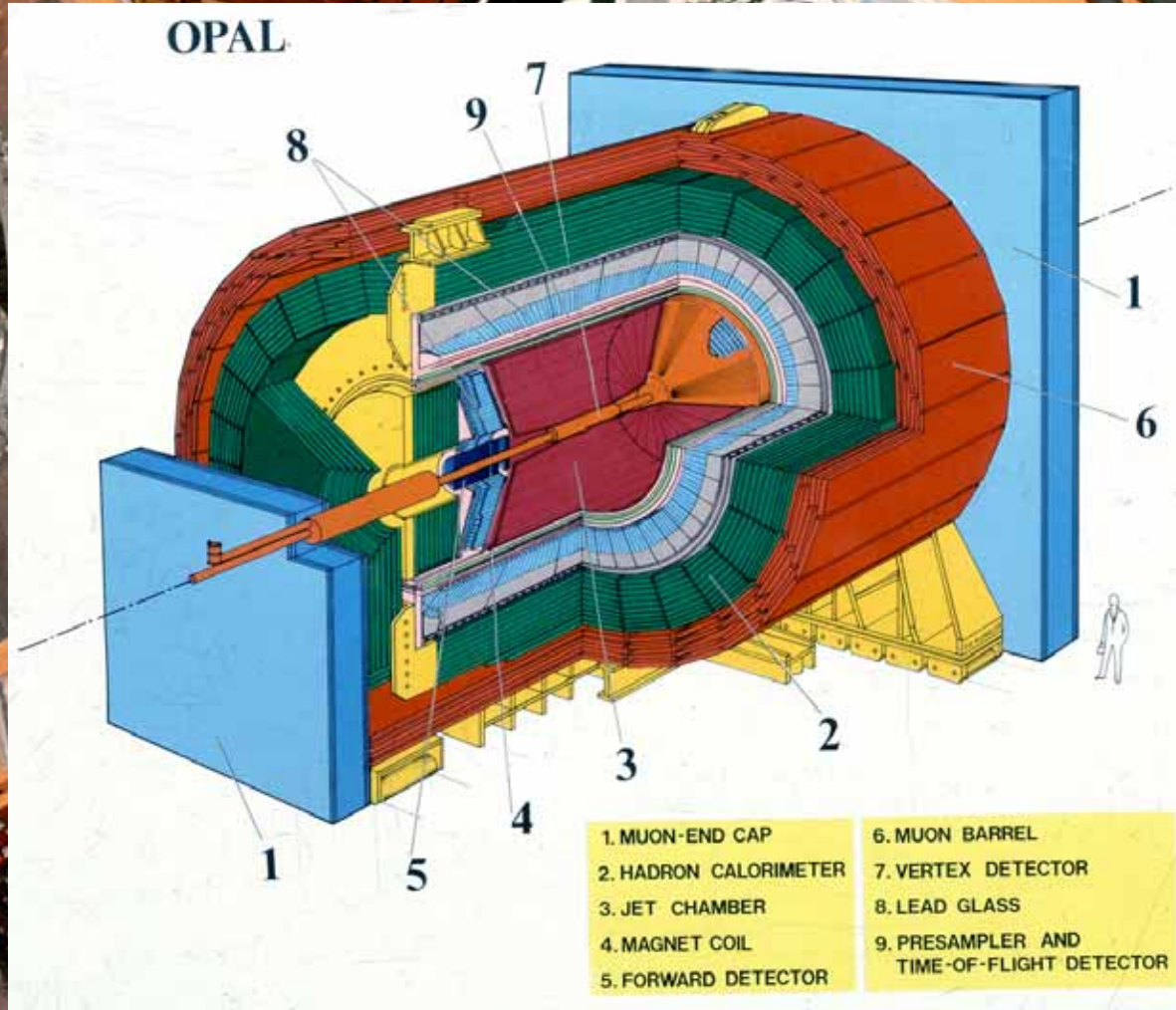
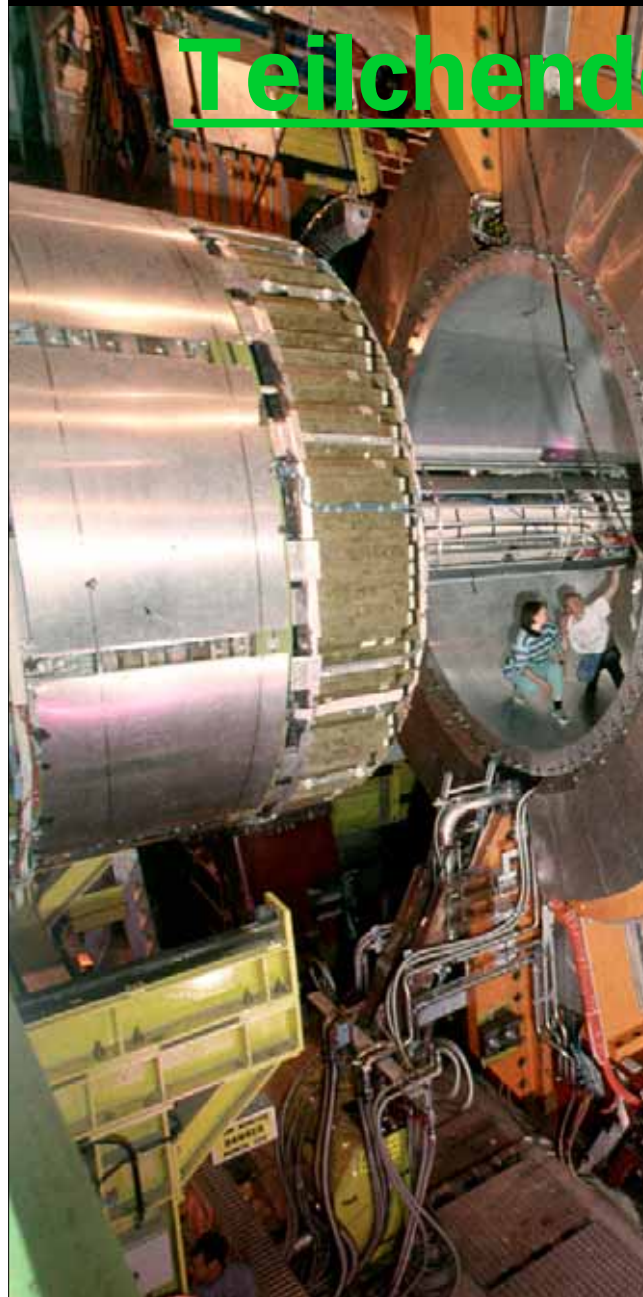
## LEP-Tunnel

- Umfang: 27 km
- Tiefe: ca. 100 m

Quadrupol-Magnete  
(Fokussierung)

Dipol-Magnete  
(Kreisbahn)

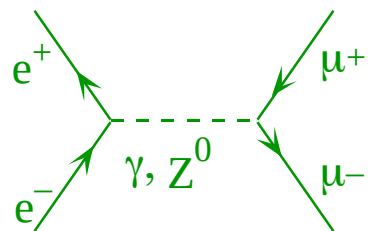
# Teilchendetektor am LEP: OPAL



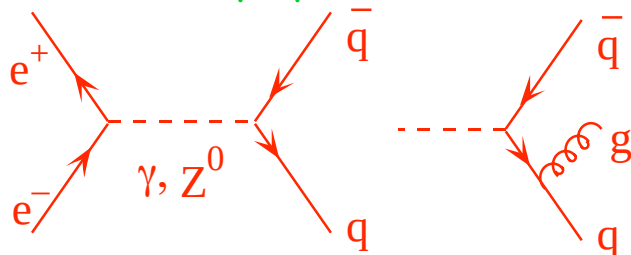
# $e^+e^-$ Vernichtungsreaktionen, gemessen mit OPAL bei LEP:

Quantenmechanik:  
Jedes Mal  
passiert etwas  
anderes!

zum Beispiel:



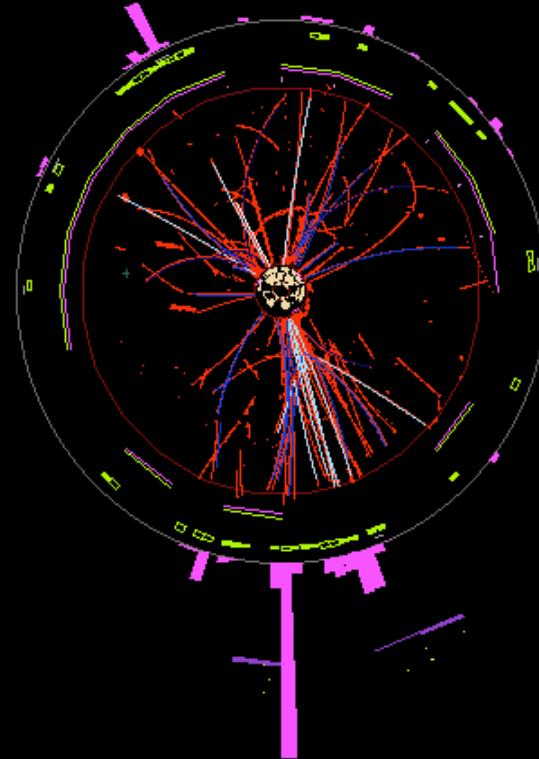
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \quad \text{oder} \quad q\bar{q}g$$

Run 13816 Event 9618

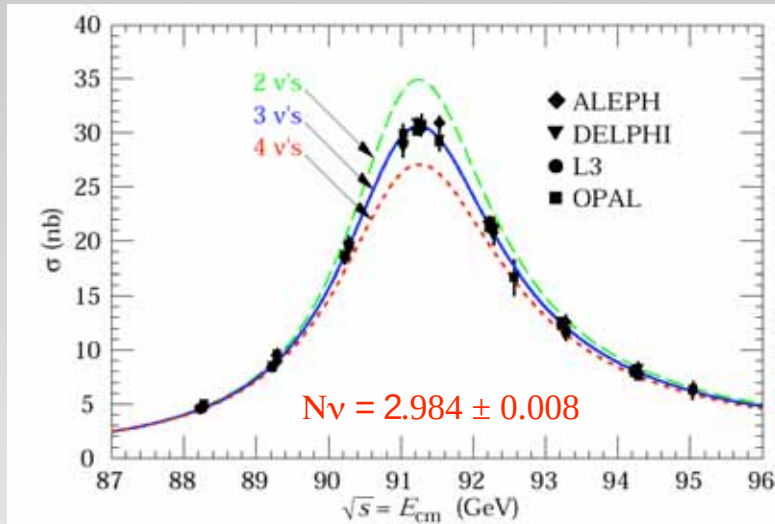
16 Jun 2000 05:34:19



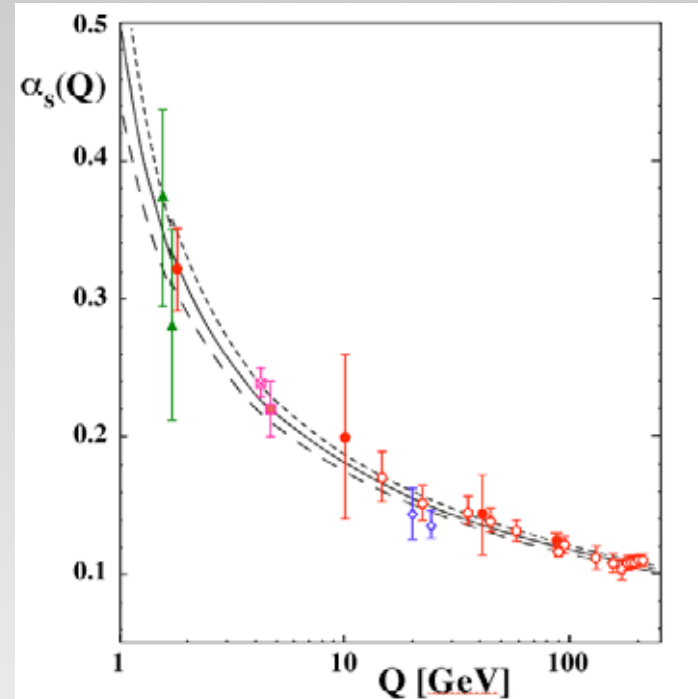
Centre-of-Mass Energy 205 GeV



# Einige Highlights von LEP & Co:



- Resonanzlinie des  $Z^0$  bei LEP: es gibt **genau** 3 Neutrino- (Teilchen-) Familien!
- $M_Z = (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV}$   
(...nach Korrektur auf Mondphasen und TGV-Fahrplan)
- exp. Tests des Standardmodells der Teilchenphysik im Promillebereich
- Grenzen für die Masse des Higgs-Boson bisher unentdeckt, aber von Theorie vorhergesagt:  $114.1 \text{ GeV} < M_H < 185 \text{ GeV}$



- Präzisionsmessungen der Stärke der Starken Kraft:  $\alpha_s$  „läuft“;  
**Beweis** der Asymptotischen Freiheit, des Confinement und damit der **QCD**!

*Nobelpreis 2004 in Physik an  
Gross, Wilczek und Politzer*

# Das Standardmodell der Teilchenphysik...

- beschreibt die vereinheitlichte Elektroschwache Wechselwirkung und die Starke Wechselwirkung mit eichinvarianten Quantenfeldtheorien
- ist extrem erfolgreich in konsistenter und präziser Beschreibung der bis heute beobachteten Teilchenreaktionen

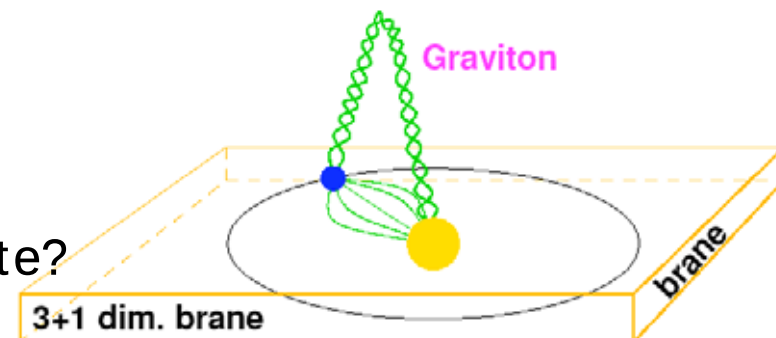
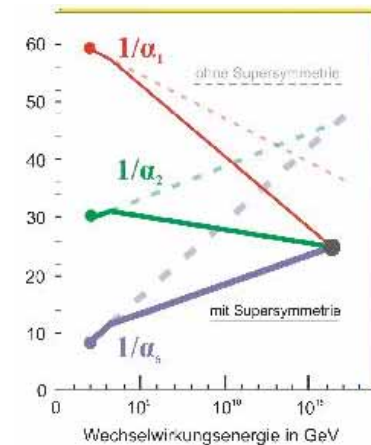
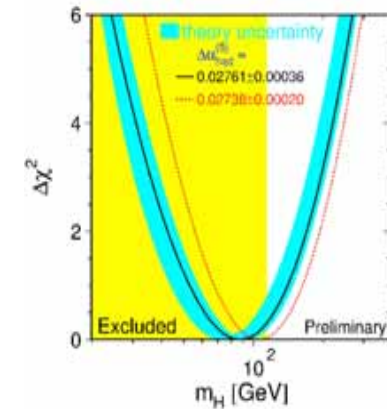
... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein:

- es versagt bei sehr hohen Energien (Unitaritätsverletzung)  
→ es muss etwas passieren im Bereich  $E \sim 100 \text{ GeV} \dots 1 \text{ TeV}$
- es hat zu viele freie Parameter (Kopplungsstärken, Massen, ...)
- es lässt viele fundamentalen Fragen offen:

# fundamentale offene Fragen:

1. Was ist der Ursprung der Masse ?
  - Existiert das **Higgs Teilchen** ?
  - Falls nein, wie sonst erhalten die Teilchen Masse ?
2. Warum gibt es 3 Quark-/Leptonfamilien ?  
 Warum ist (Ladung des  $e^-$ ) = -(Ladung des p) ?
3. Wo ist die Antimaterie im Universum?
4. Gibt es eine Universalkraft als gemeinsame Urkraft ?  
 -> GUT
5. Gibt es bisher unbekannte Formen von Materie ?
  - Ist unsere Welt **supersymmetrisch** ?
  - Besteht die **dunkle Materie** aus dem leichtesten supersymmetrischen Teilchen ?
6. Gibt es verborgene Raumdimensionen ?
  - warum ist Gravitation so viel schwächer als die anderen Kräfte?

...





# Astrophysik und Kosmologie (2004):

- $t_0 = 13.7 \pm 0.3 \text{ Gyr}$  (Alter des Universums)
- $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.2$  (rel. Dichte,  $\Omega_0 = \rho / \rho_{\text{kritisch}}$ )
  - $\Omega_M = 0.33 \pm 0.035$  (Materiedichte)
  - $\Omega_B = 0.04 \pm 0.008$  (baryonische Materie)
  - $\Omega_S = 0.005$  (Sterne; leuchtende Materie)

→  $-\Omega_{DM} = 0.29 \pm 0.04$  (Dunkle Materie,  $\Omega_{DM} = \Omega_M - \Omega_B$ )

$-\Omega_X = 0.67 \pm 0.06$  (Dunkle Energie,  $\Omega_X = \Omega_0 - \Omega_M$ )

DM Hauptkandidaten:

- HDM: massive Neutrinos
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs

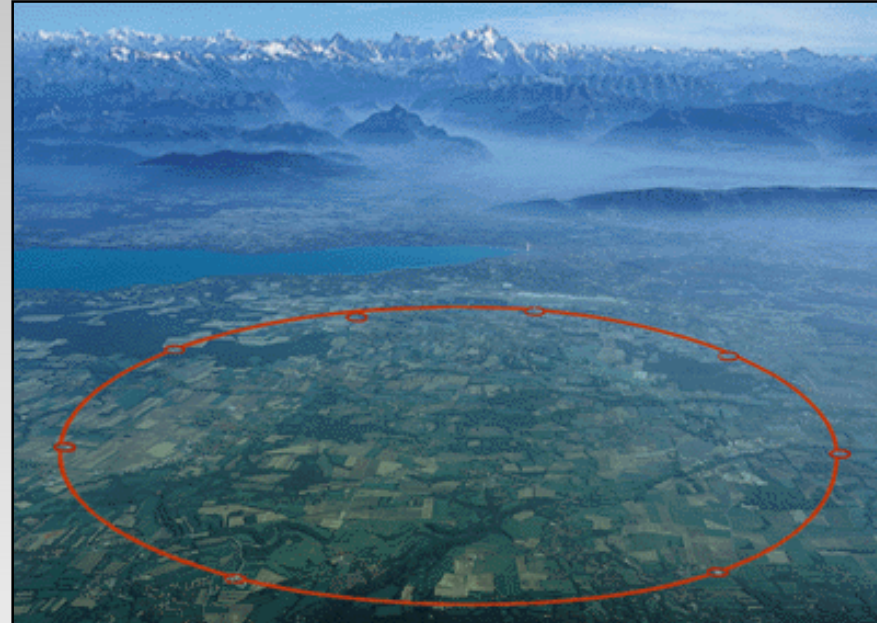


if it's not  
dark  
it doesn't  
matter

# Beantwortung der (meisten) offenen, fundamentalen Fragen:

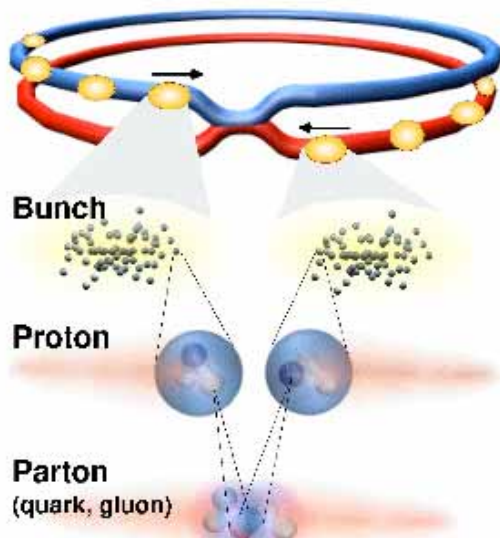
## Der Large Hadron Collider (LHC)

- Proton-Proton Beschleuniger im LEP-Tunnel am CERN



- Höchste Energien pro Kollision
- Höchste Luminositäten
- Vier geplante Experimente: ATLAS, CMS (pp-Physik)  
LHC-B (Physik der b-Quarks)  
ALICE (Pb-Pb Kollisionen)
- Gebaut in einer internationalen Kollaboration aus 34 Ländern
- Geplante Inbetriebnahme: 2007

# Der Large Hadron Collider (LHC)



Proton – Proton Kollisionen:

2835 x 2835 Pakete (bunches)

Abstand: 7.5 m (25 ns)

$10^{11}$  Protonen / bunch

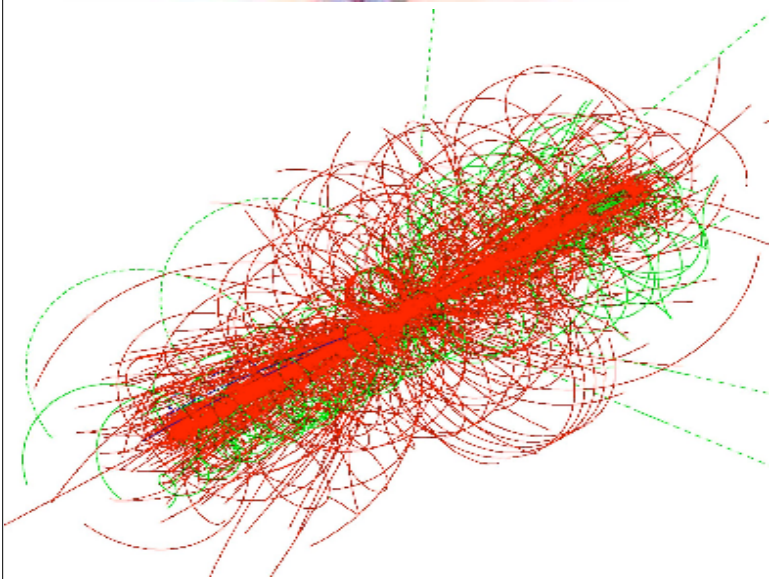
Kreuzungsrate der p-Pakete: 40 Mio. mal / sec.

Luminosität:  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

Proton-Proton Kollisionen:  $\sim 10^9$  / sec  
(Überlagerung von 23 pp-Wechselwirkungen  
während einer Strahlkreuzung)

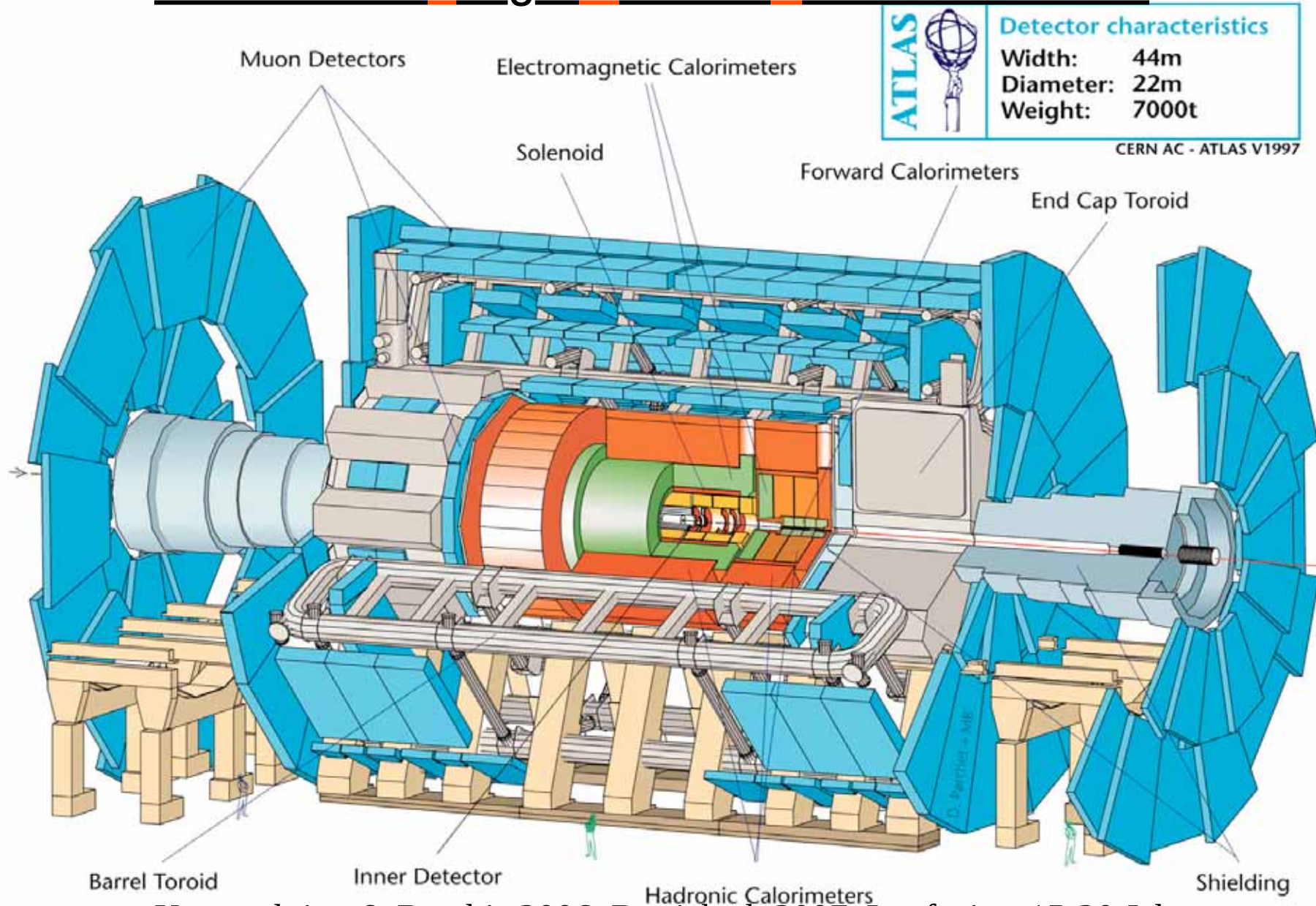
$\sim 1600$  geladene Teilchen im Detektor

⇒ hohe Anforderungen an die Detektoren





# ATLAS am Large Hadron Collider / CERN



Konstruktion & Bau bis 2006, Betrieb ab 2007, Laufzeit ~ 15-20 Jahre



## ATLAS Halle (04/2004)





February 2005





- ~ 1800 Physiker und Ingenieure
- 151 Institute
- 35 Nationen



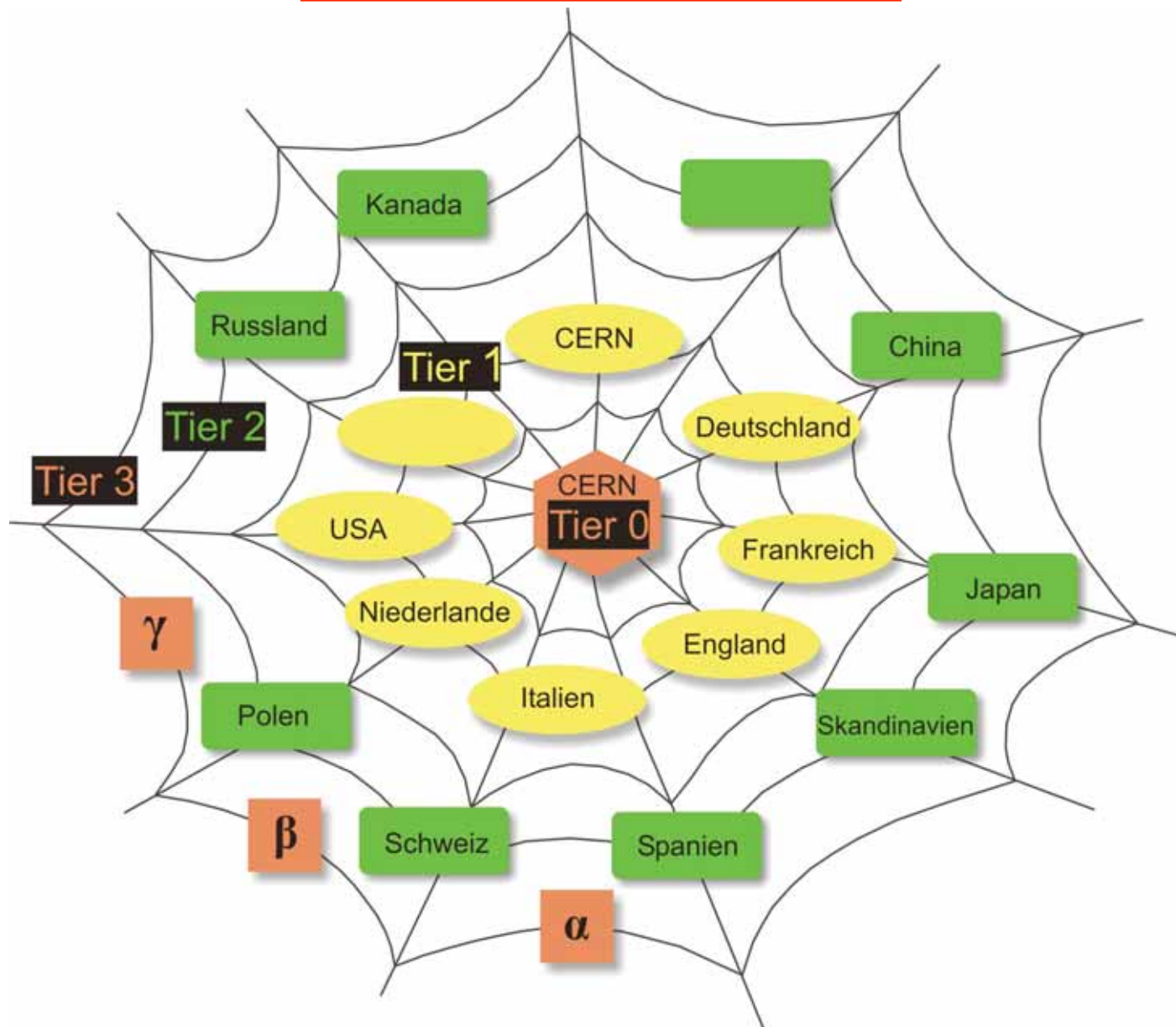
# LHC Data and Computing

## the challenge:

- 40 MHz collision rate → unfiltered data flow  $\sim 10^{14}$  B/s  
(~10 Billion phone calls)
- 4 experiments; 50-200 Hz data taking rate
- raw event size: 0.12 / 1 / 1-25 MB (LHCb / ATLAS-CMS / ALICE)
- total raw data storage: 7 PB/a  
( $7 \cdot 10^{15}$  Bytes/year;  
100 000 km thick  
pile of A4-paper)
- total simulated Data storage: 3.2 PB/a
- world-wide\* tape storage: 28.5 PB/a (40 million CD-Rom's)
- world-wide\* disk storage: 10.4 PB/a (140k disks à 75 GB)
- world-wide\* CPU capacity: 7350 k SI-95 (360k today's PCs)
- WAN bandwidth (Tier-0/-1): 1500 Mbps (1 experiment)  
(5000 Mbps when serving all 4 exp.'s)

\* all Tier-0, Tier-1 and Tier-2 computing centres, excl. Tier-3 and -4

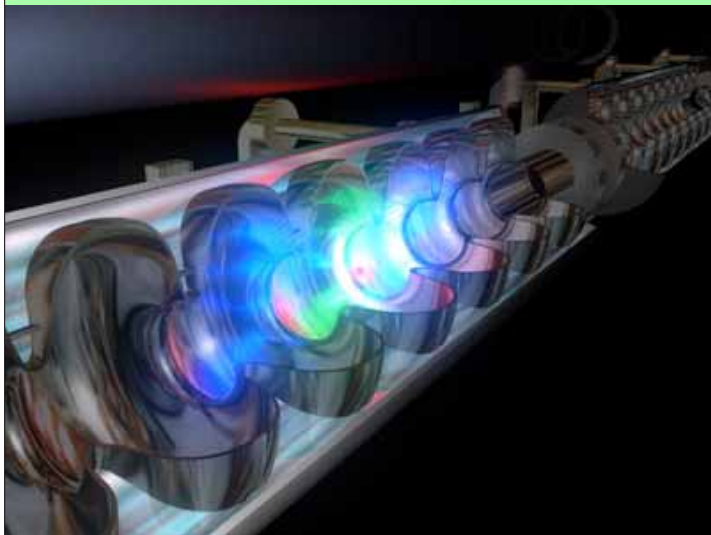
# The LHC Data Grid



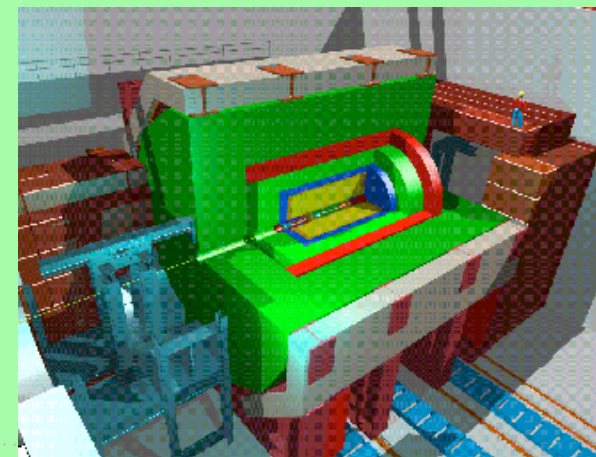
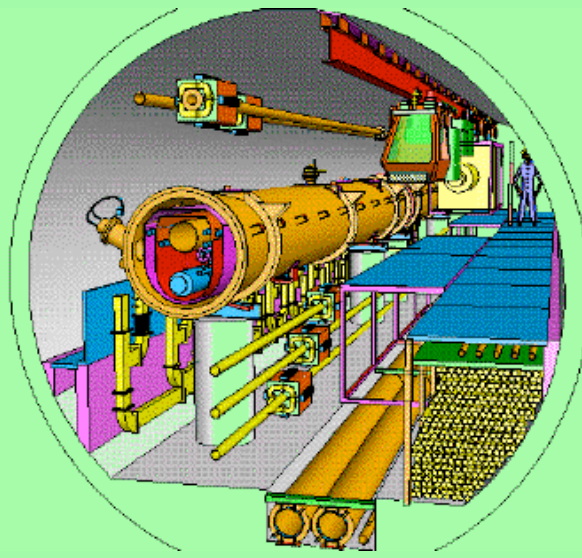


# Weitere Zukunft: ILC (International Linear e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Collider)

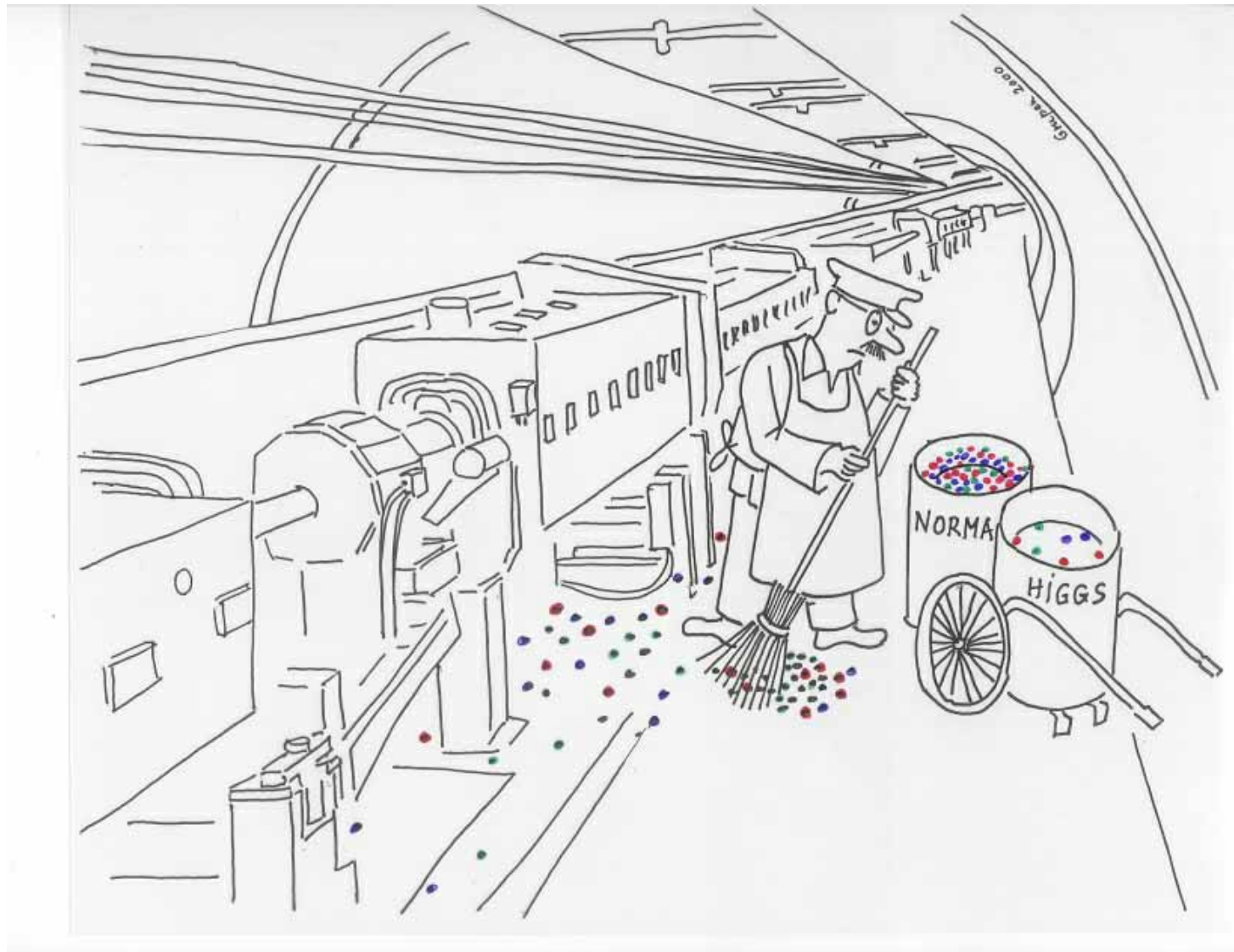
mit integriertem Röntgenlaser (free electron laser)



- 2 Linearbeschleuniger mit je 15 km Länge
- Kollisionsenergie von 500 GeV bis ca. 800 GeV
- 1 - 2 Großdetektor(en) zur Teilchenphysik
- Röntgenlaser Wellenlänge von 5 bis 0.05 Nanometer
- Experimentierkomplex für Materialforschung, Biologie, Medizin
- Beschleunigertunnel mit 5 m Durchmesser
- 20.000 supraleitende Beschleunigerstrukturen
- Betriebstemperatur 2 K







# The End

[www.mppmu.mpg.de](http://www.mppmu.mpg.de)