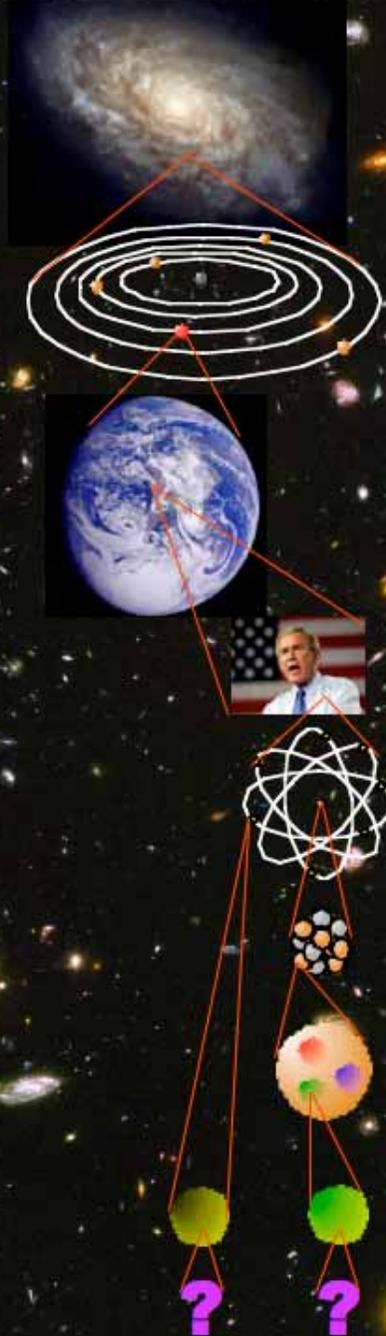


# Quarks, Quanten und Quasare- Bausteine des Universums

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

- Dimensionen und Struktur der Materie
- Materie und fundamentale Kräfte
- Teilchenphysik und Kosmologie
- Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen
- Beschleuniger, Experimente und Resultate
- 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

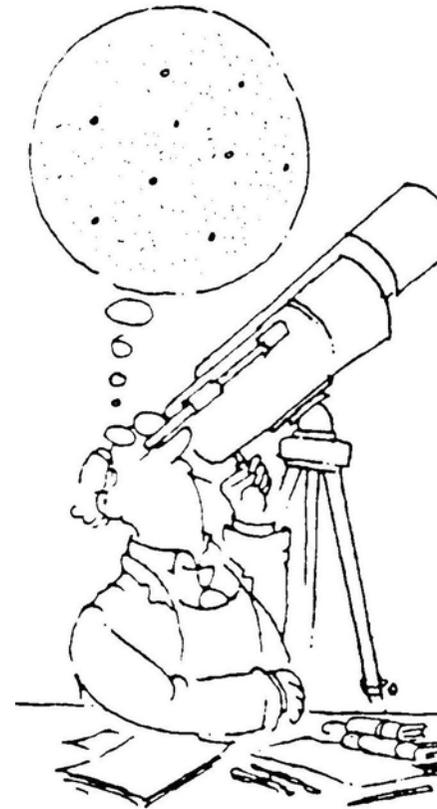
?????

???

# Physikalische Grundlagenforschung



Mikrokosmos



Makrokosmos

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

## Elementare Teilchen:

(sowie jeweilige Anti-Teilchen)

Sichtbare Welt besteht nur aus Teilchen der ersten Familie!

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

## Fundamentale Kräfte:

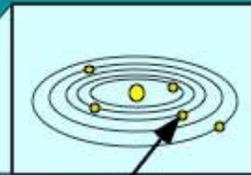
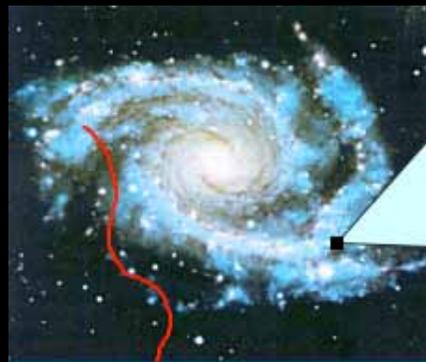
Elementare Kräfte (Wechselwirkungen) kommen durch **Austausch** von besonderen Teilchen (Austauschbosonen) zustande.

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

*Theoretische Vorhersage zur Erzeugung der Teilchenmassen:*

→ Higgs-Teilchen (H) ; bisher unentdeckt

# Die Geschichte des Universums



Wir sind hier

Zeit

Temperatur Alter  
 2.7 K 13.7 Milliarden Jahre

GEGENWART

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien 11 K 1 Milliarde Jahre

UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen. Entkopplung von Strahlung und Materie. 1.000 K 300 000 Jahre

Nukleosynthese von Helium Positronen verschwinden  $10^{10}$  K 1 sec.

Formation von Protonen und Neutronen Antiquarks verschwinden  $10^{15}$  K  $10^{-10}$  sec

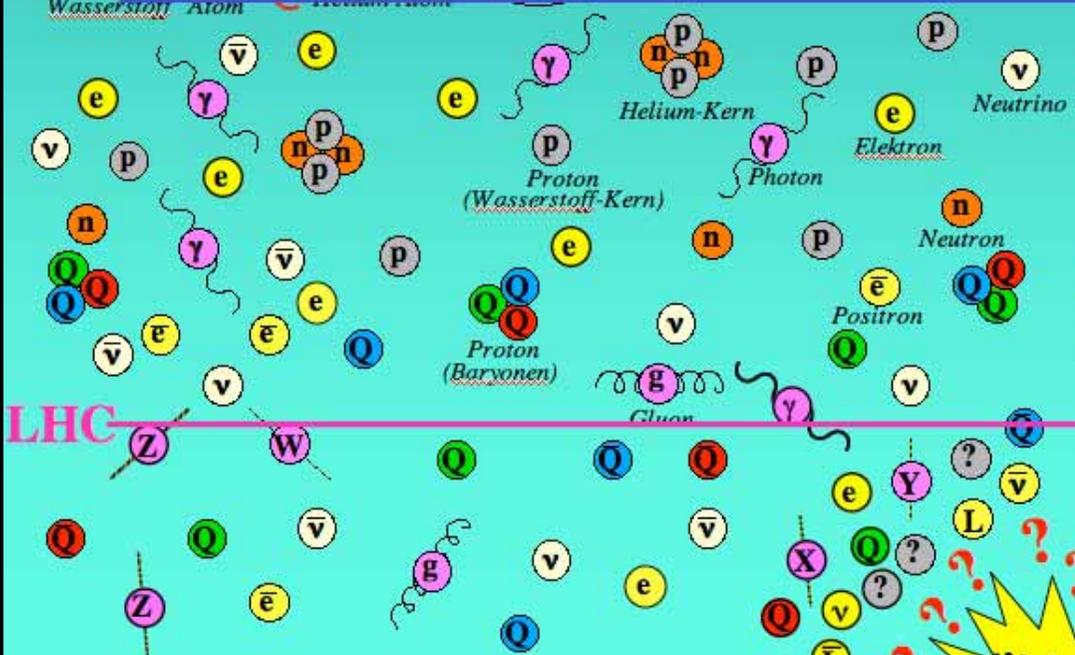
Asymmetry  $Q - \bar{Q}$   $L - \bar{L}$  Inflation  $10^{16}$  K  $10^{-15}$  sec  $10^{27}$  K  $10^{-34}$  sec

GROSSE VEREINHEITLICHUNG QUANTEN-GRAVITATION  $10^{31}$  K  $10^{-43}$  sec

Astronomie und Astrophysik

Teilchenbeschleuniger

strahlungsdominierte Ära materiedominierte Ära



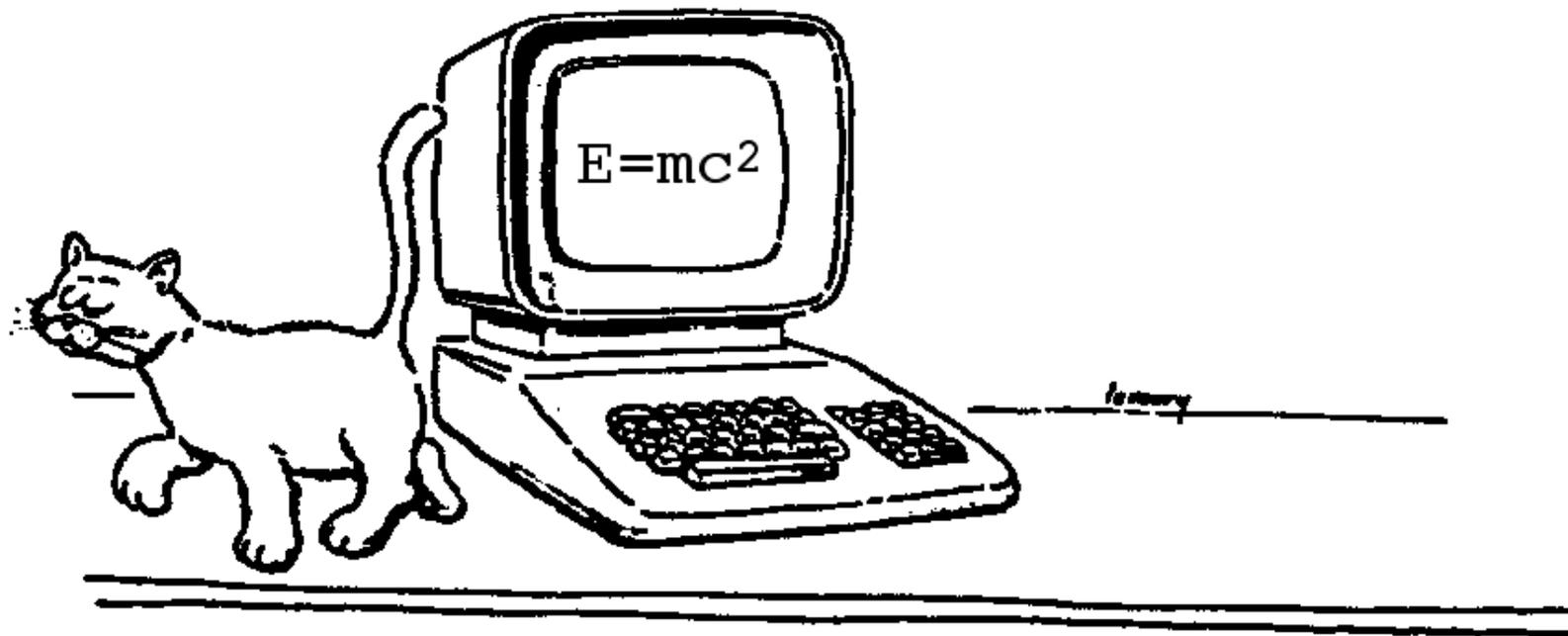
LHC

"Urknall"

Woher wissen wir dies alles?

Wie kann man Quarks und Leptonen „sehen“?

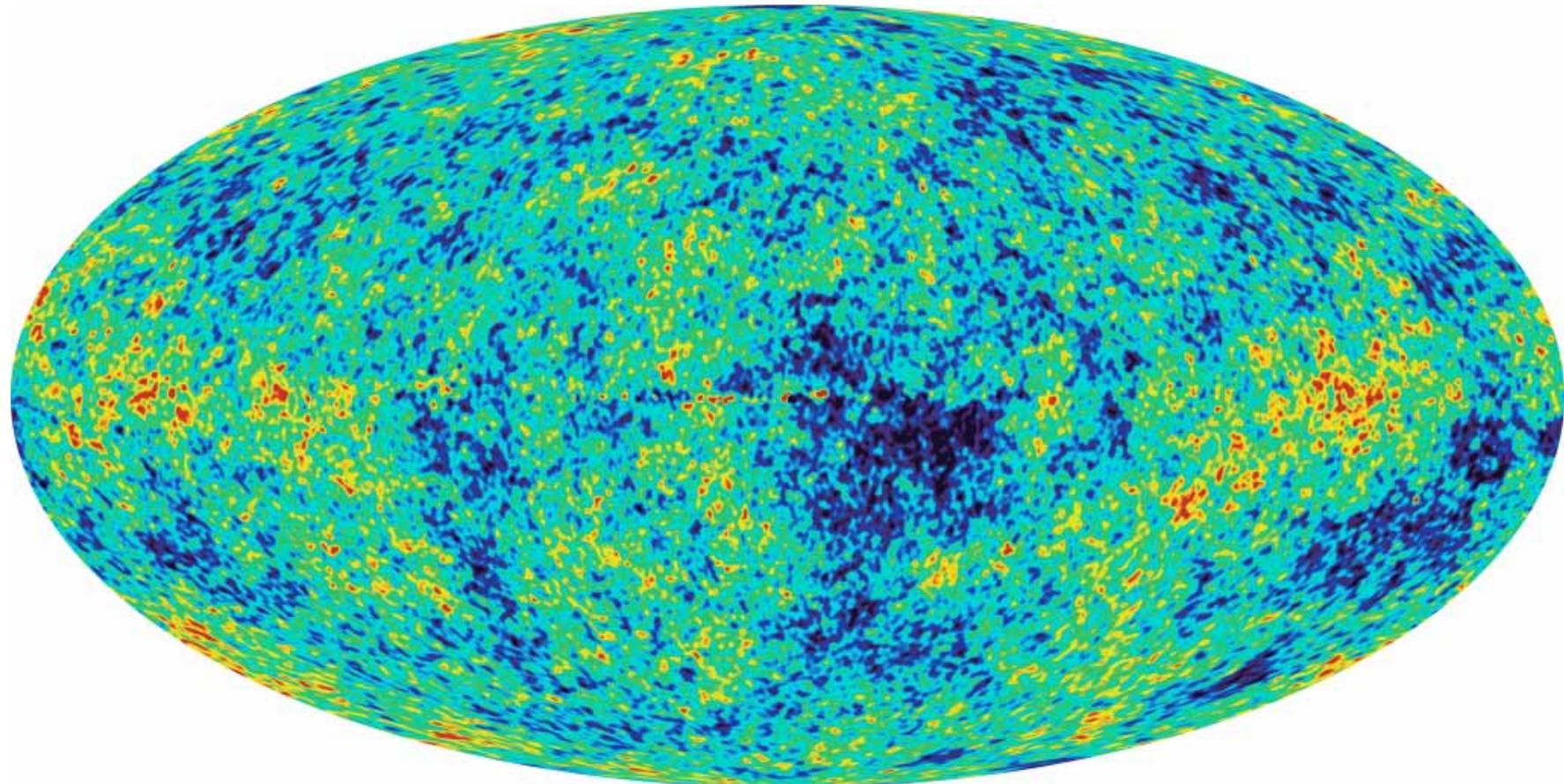
Wie kann man die zwischen ihnen wirkenden Kräfte erforschen und theoretisch beschreiben?



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

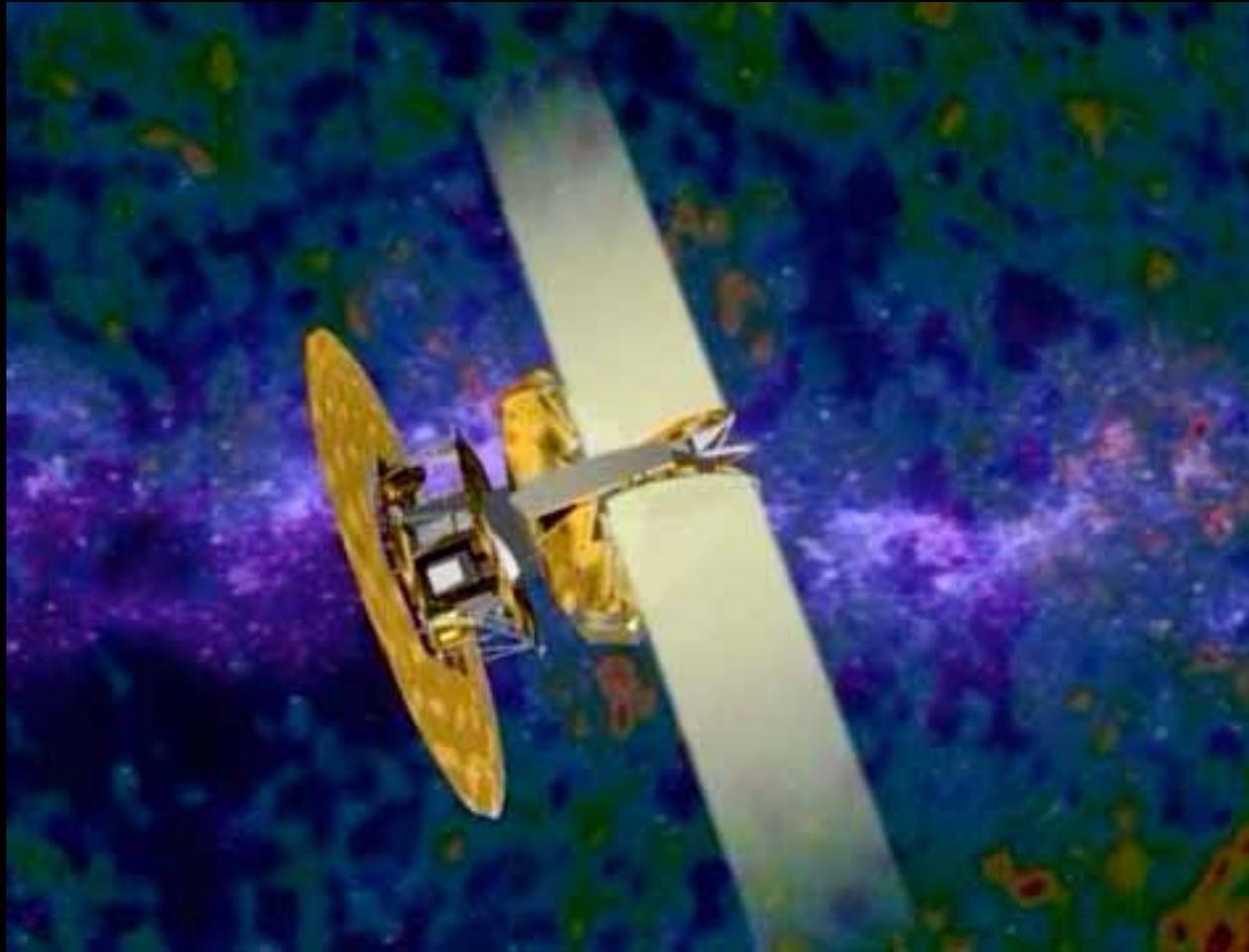
# Das Universum vor 13.4 Mrd. Jahren

Anisotropien in der Temperaturverteilung des Kosmos  
(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)



$\Delta T \approx 20 \mu\text{K}$  (Abweichung von 2.7 K Hintergrundstrahlung)

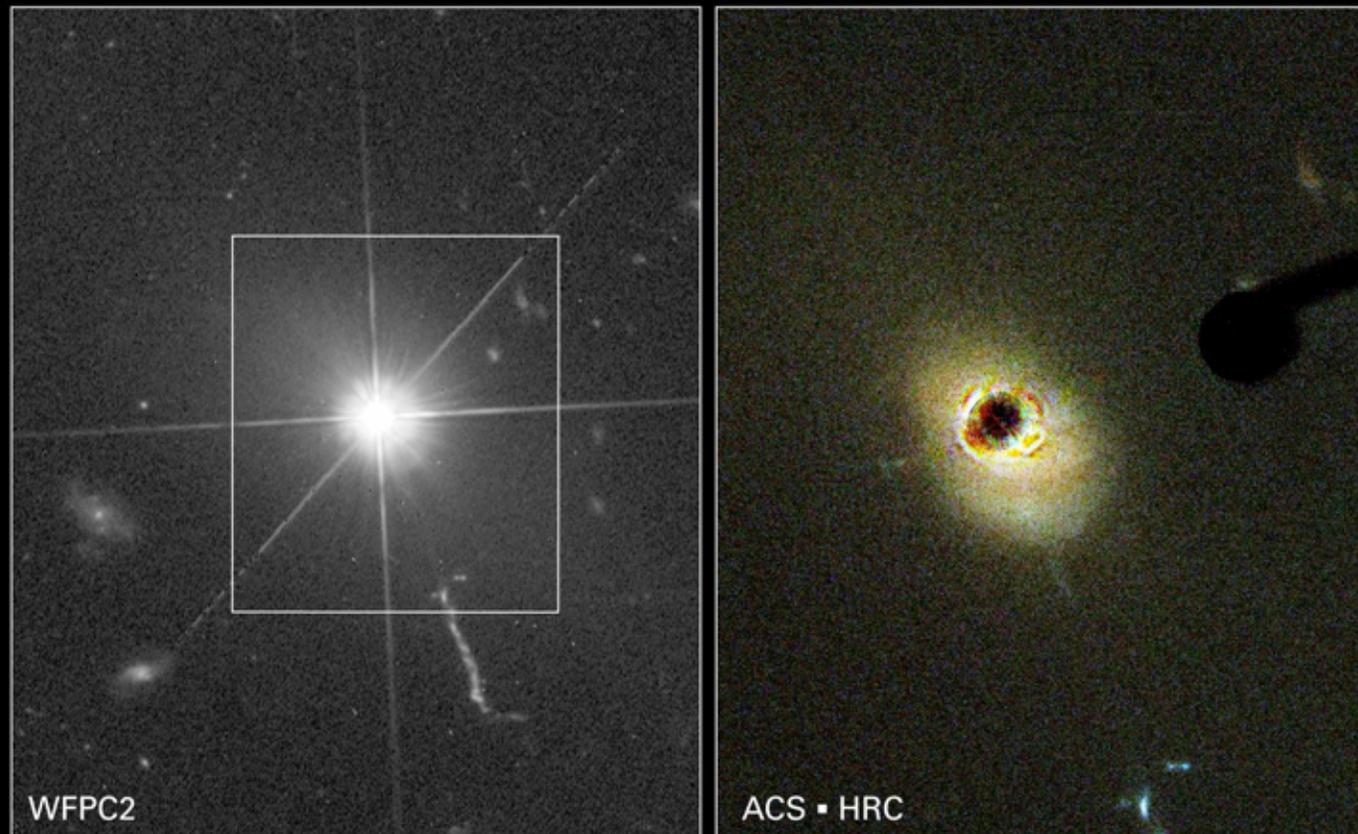
(Film: WMAP & Entwicklung des Universums)



die leuchtkräftigsten, am weitesten entfernte  
Objekte im Universum:

## Quasare

(quasi stellar radio sources)



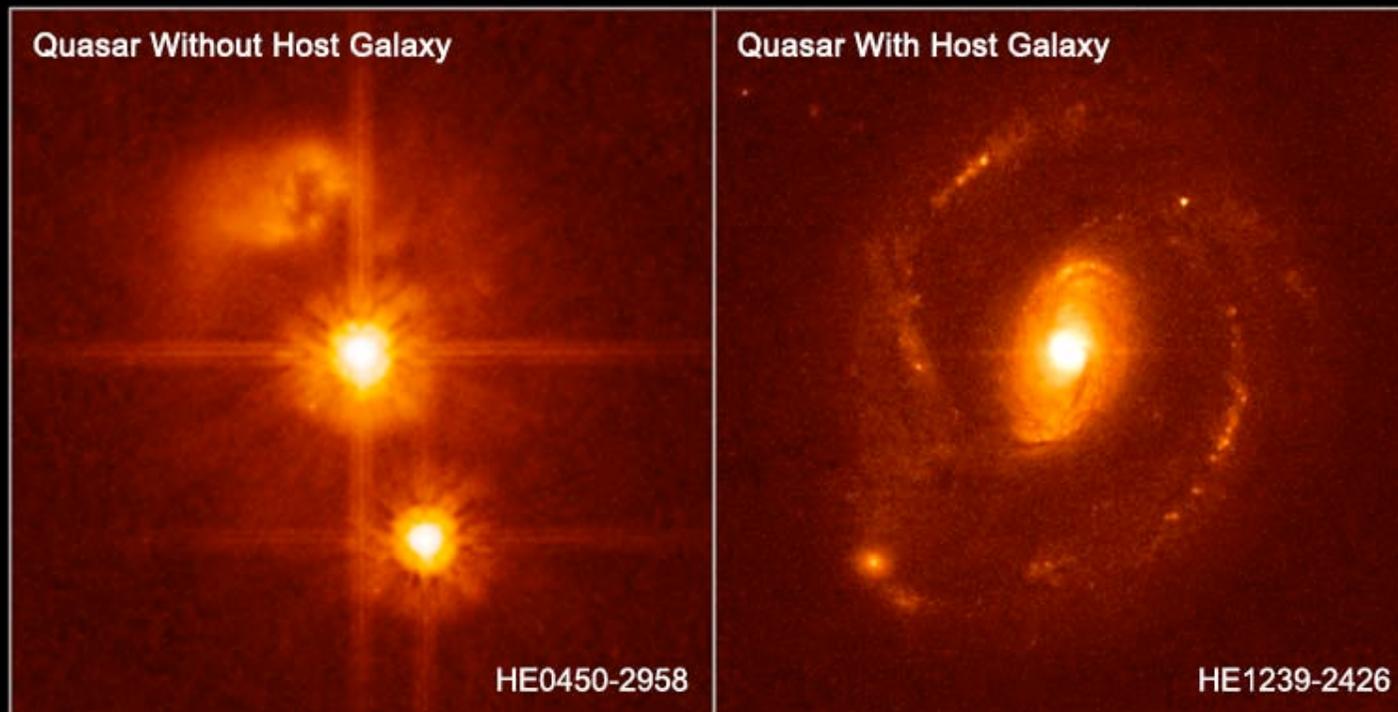
**Quasar 3C 273**  
**Hubble Space Telescope • ACS HRC Coronagraph**

NASA, A. Martel (JHU), the ACS Science Team, J. Bahcall (IAS) and ESA • STScI-PRC03-03

# Quasare

- extrem leuchtstarke "Punktquellen"
- meist eingebettet im Zentrum einer Galaxie
- vermutlich gespeist durch extrem massereiches schwarzes Loch (Milliarden von Sonnenmassen) und darin einfallende Materie
- Entfernungen: ~ 1 ... 13 Mrd. Lichtjahre → Blick auf "junge" Galaxien

HST ACS/HRC

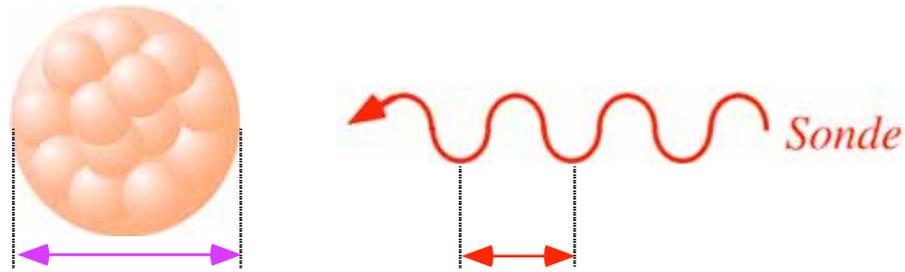




## Mikrokosmos

# Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

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



$$\Delta s \geq \lambda \sim 1/E$$

Kleinster noch trennbarer Abstand zweier Objekte

Wellenlänge der 'Sonde': z.B. Licht, Elektronen, Protonen

Energie der Sonden

elektromagn. Welle:

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

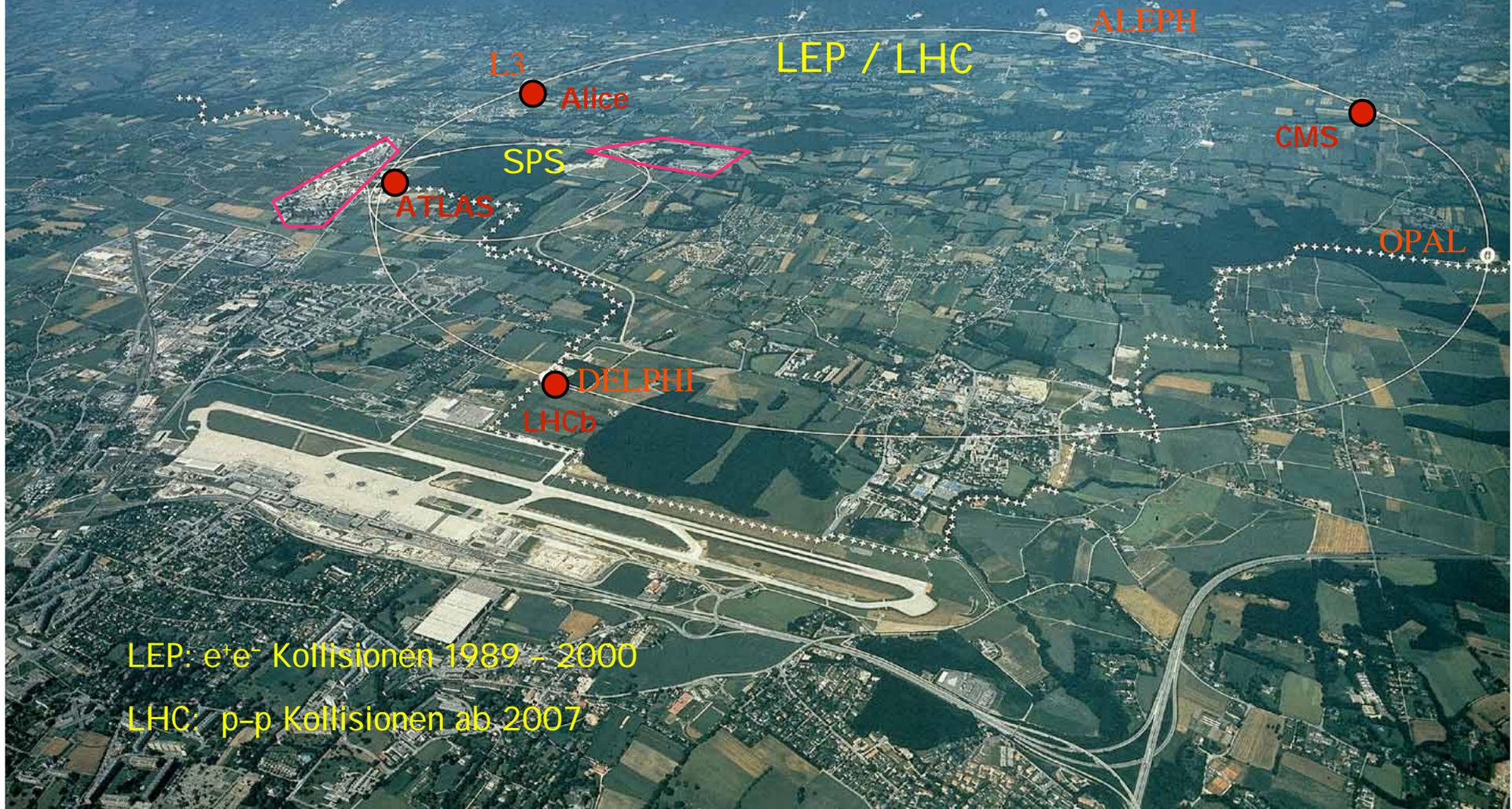
massives Teilchen:

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

# Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

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

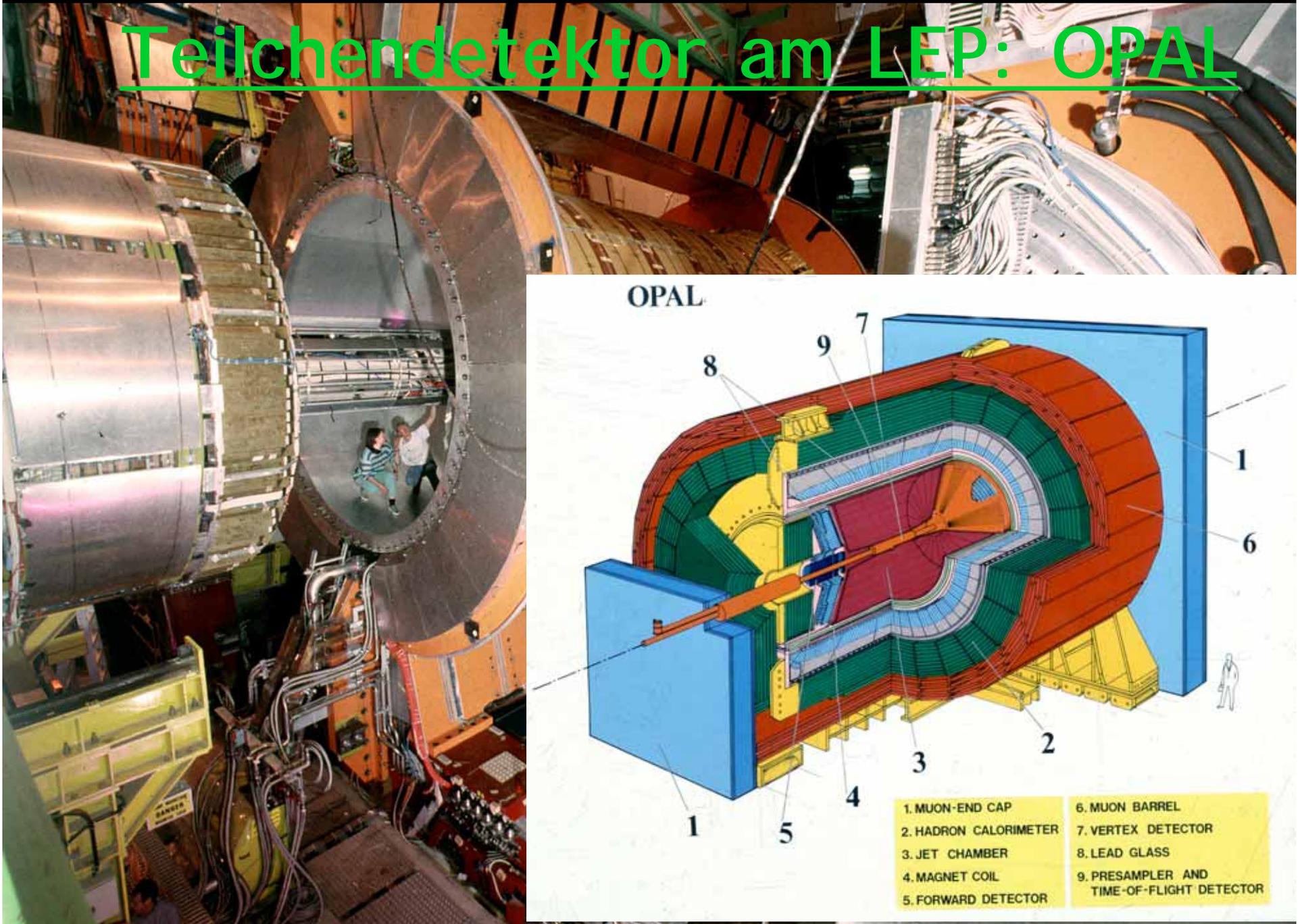
## LEP-Tunnel

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

Quadrupol-Magnete  
(Fokussierung)

Dipol-Magnete  
(Kreisbahn)

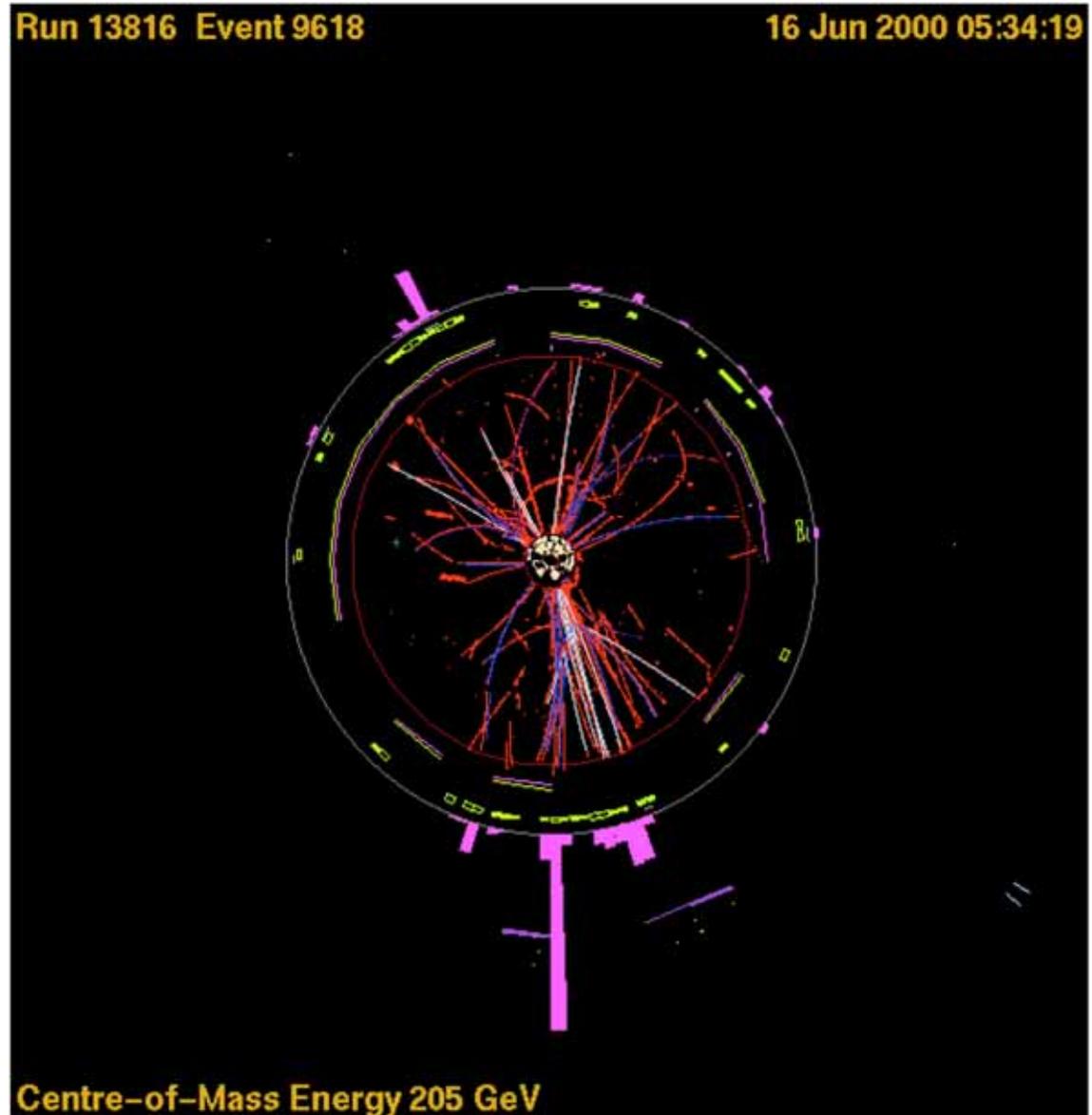
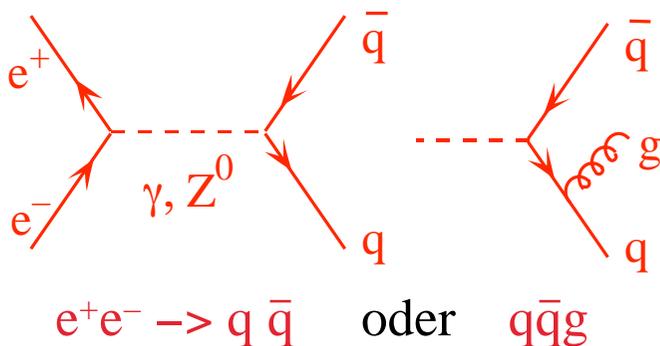
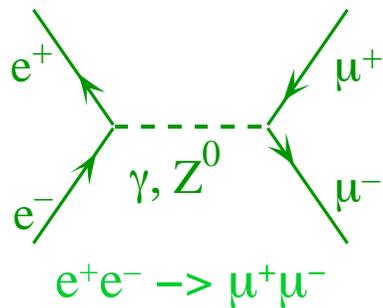
# Teilchendetektor am LEP: OPAL



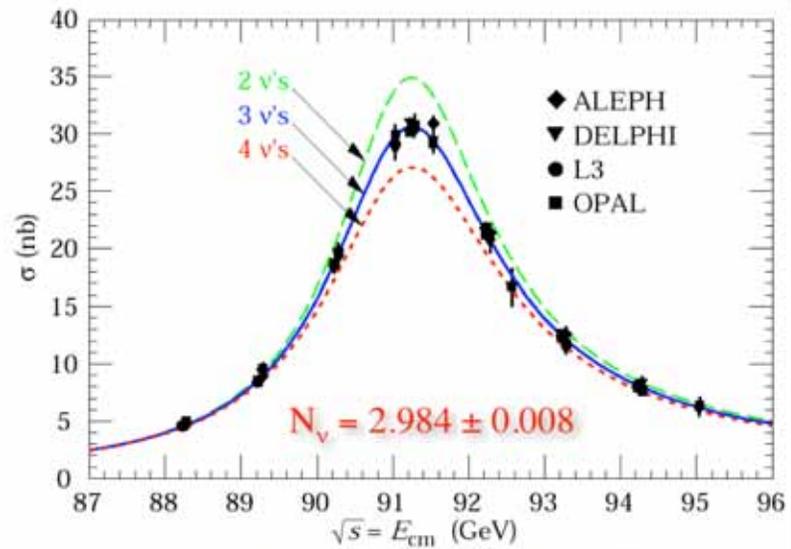
# $e^+e^-$ Vernichtungsreaktionen, gemessen mit OPAL bei LEP:

Quantenmechanik:  
Jedes Mal  
passiert etwas  
anderes!

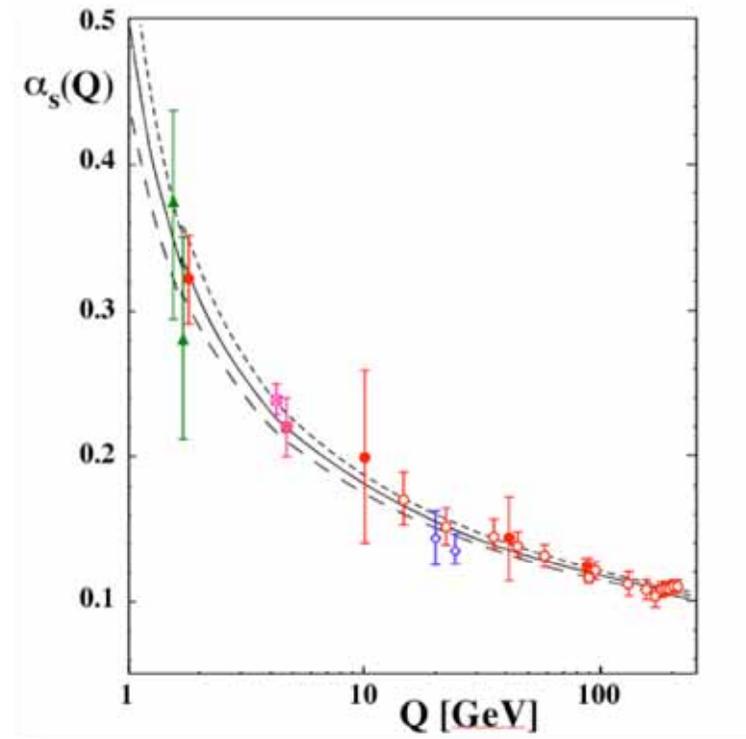
zum Beispiel:



# Einige Highlights von LEP & Co:



- Resonanzlinie des  $Z^0$  bei LEP: es gibt **genau** 3 Neutrino- (Teilchen-) Familien!
- $M_Z = (91.1875 \pm 0.0021)$  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 der QCD!

**Nobelpreis 2004**

# Das Standardmodell der Teilchenphysik...

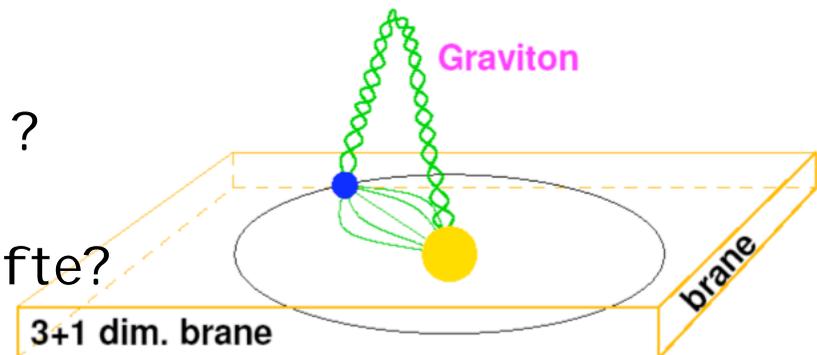
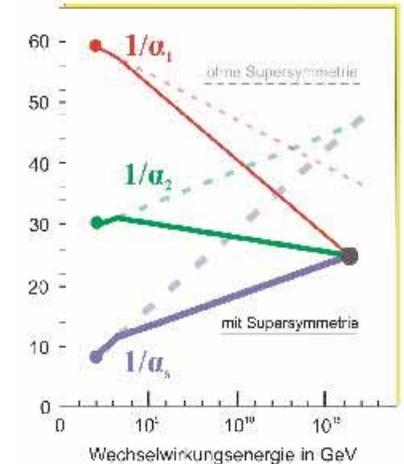
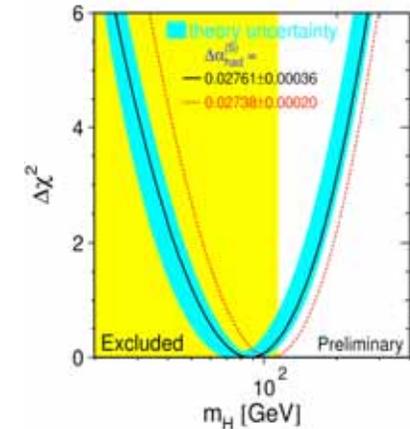
- beschreibt die vereinheitlichte Elektroschwache Wechselwirkung und die Starke Wechselwirkung mit eichinvarianten Quantenfeldtheorien
- ist extrem erfolgreich in konsistenter und präziser Beschreibung der bis heute beobachteten Teilchenreaktionen

... 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 :

- $t_0 = 13.7 \pm 0.3$  Gyr (Alter des Universums)
- $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$  ( $\Omega_0 = \rho / \rho_{\text{kritisch}}$  ;  $\rho$  : Dichte)
- $\Omega_M = 0.27 \pm 0.04$  (Materiedichte)
  - $\Omega_B = 0.044 \pm 0.004$  (baryonische Materie)
  - $\Omega_S = 0.005$  (Sterne; leuchtende Materie)
- - $\Omega_{DM} = 0.22 \pm 0.04$  (Dunkle Materie,  $\Omega_{DM} = \Omega_M - \Omega_B$ )
  - $\Omega_X = 0.73 \pm 0.04$  (Dunkle Energie,  $\Omega_X = \Omega_0 - \Omega_M$ )

Kandidaten für Dunkle Materie: - HDM: massive Neutrinos  
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs

A dark field of galaxies, showing numerous bright yellow and white points of light, some with faint blue halos, scattered across a black background. The text is overlaid in the center.

if it's not  
dark  
it doesn't  
matter

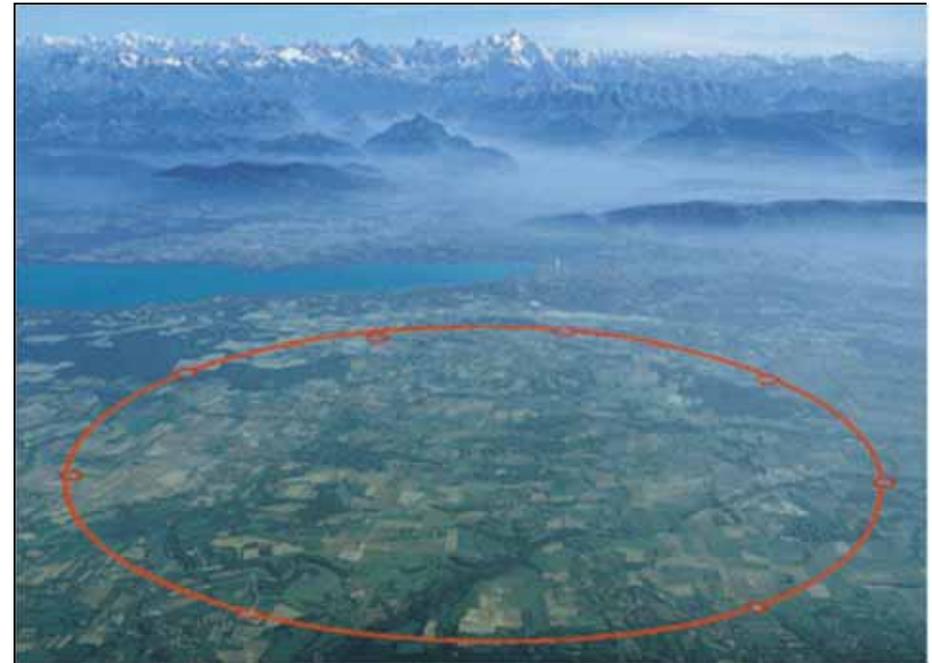
Beantwortung der (meisten) offenen, fundamentalen Fragen:

## Der Large Hadron Collider (LHC)

- Proton-Proton Beschleuniger im LEP-Tunnel am CERN

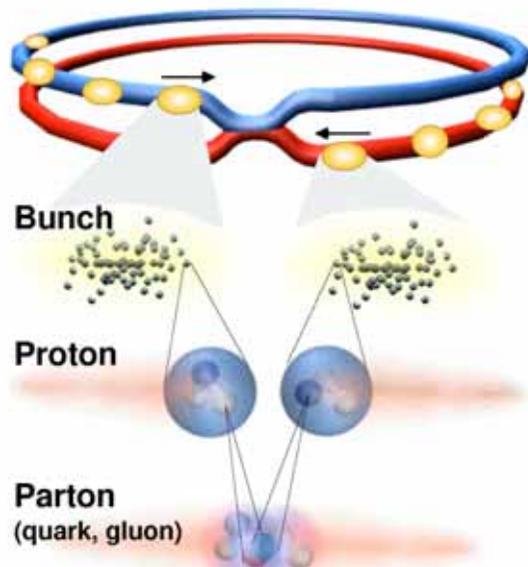


- Höchste Energien pro Kollision
- Höchste Luminositäten



- 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

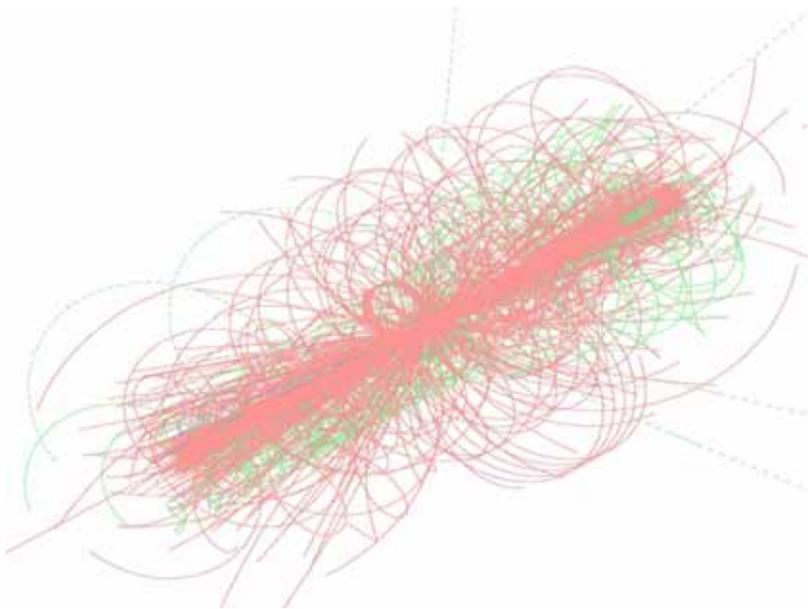
Kreuzungsrate der p-Pakete: 40 Mio. mal / sec.

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

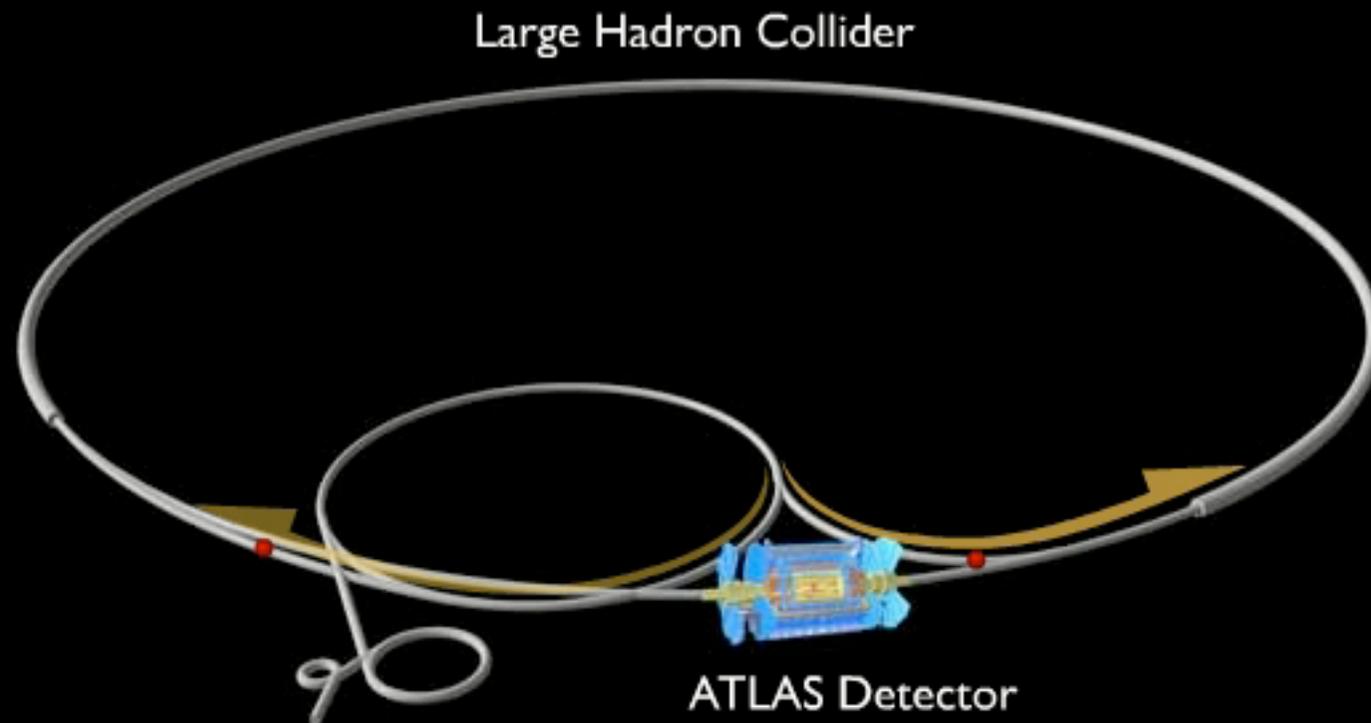
Proton-Proton Kollisionen:  $\sim 10^9$  / sec  
(Überlagerung von 23 pp-Wechselwirkungen  
während einer Strahlkreuzung)

$\sim 1600$  geladene Teilchen im Detektor

⇒ hohe Anforderungen an die Detektoren



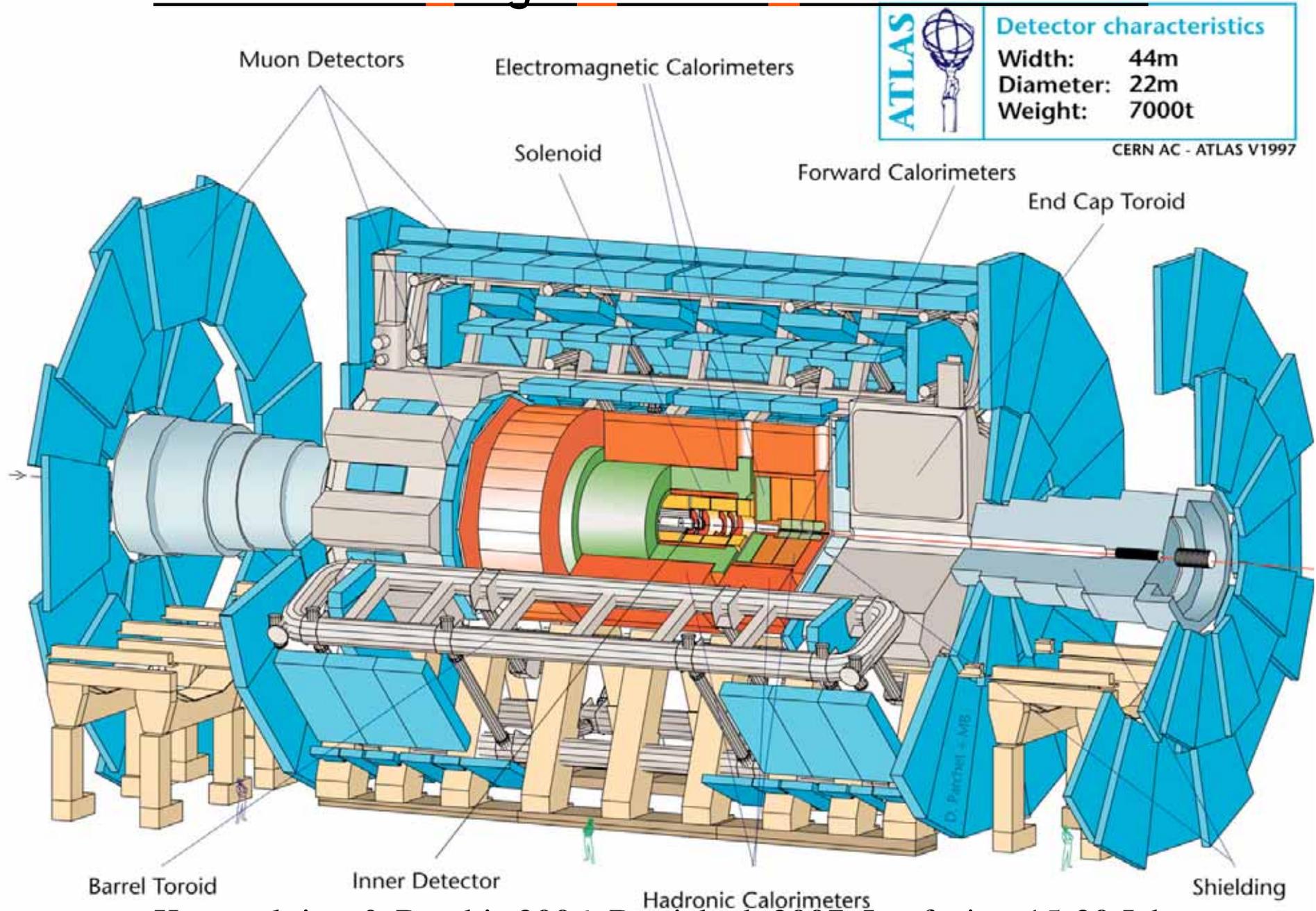
# Film: LHC & ATLAS - Beschleuniger und Detektor



# LHC Tunnel (12/2005)



# ATLAS am Large Hadron Collider / CERN

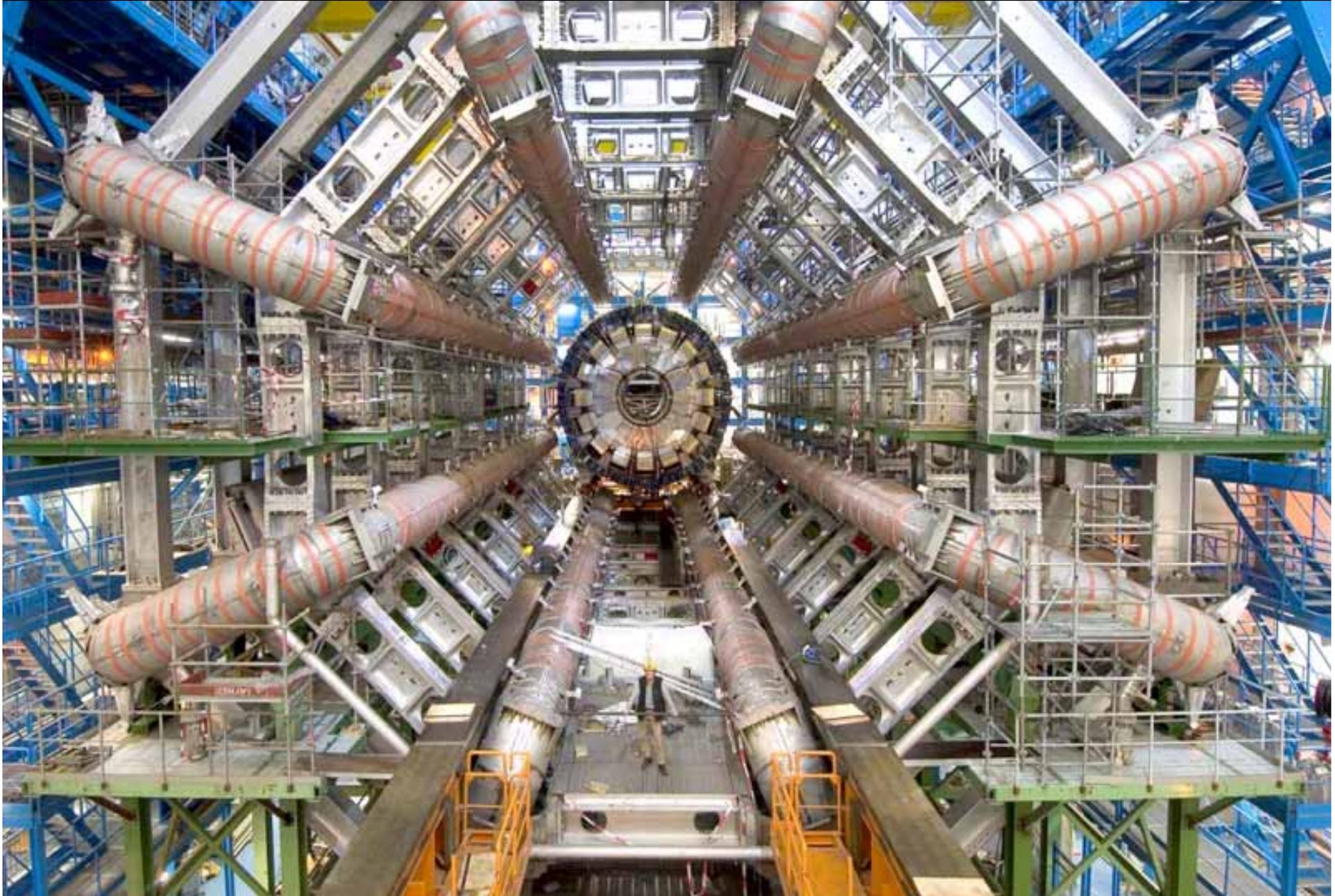


Konstruktion & Bau bis 2006, Betrieb ab 2007, Laufzeit ~ 15-20 Jahre

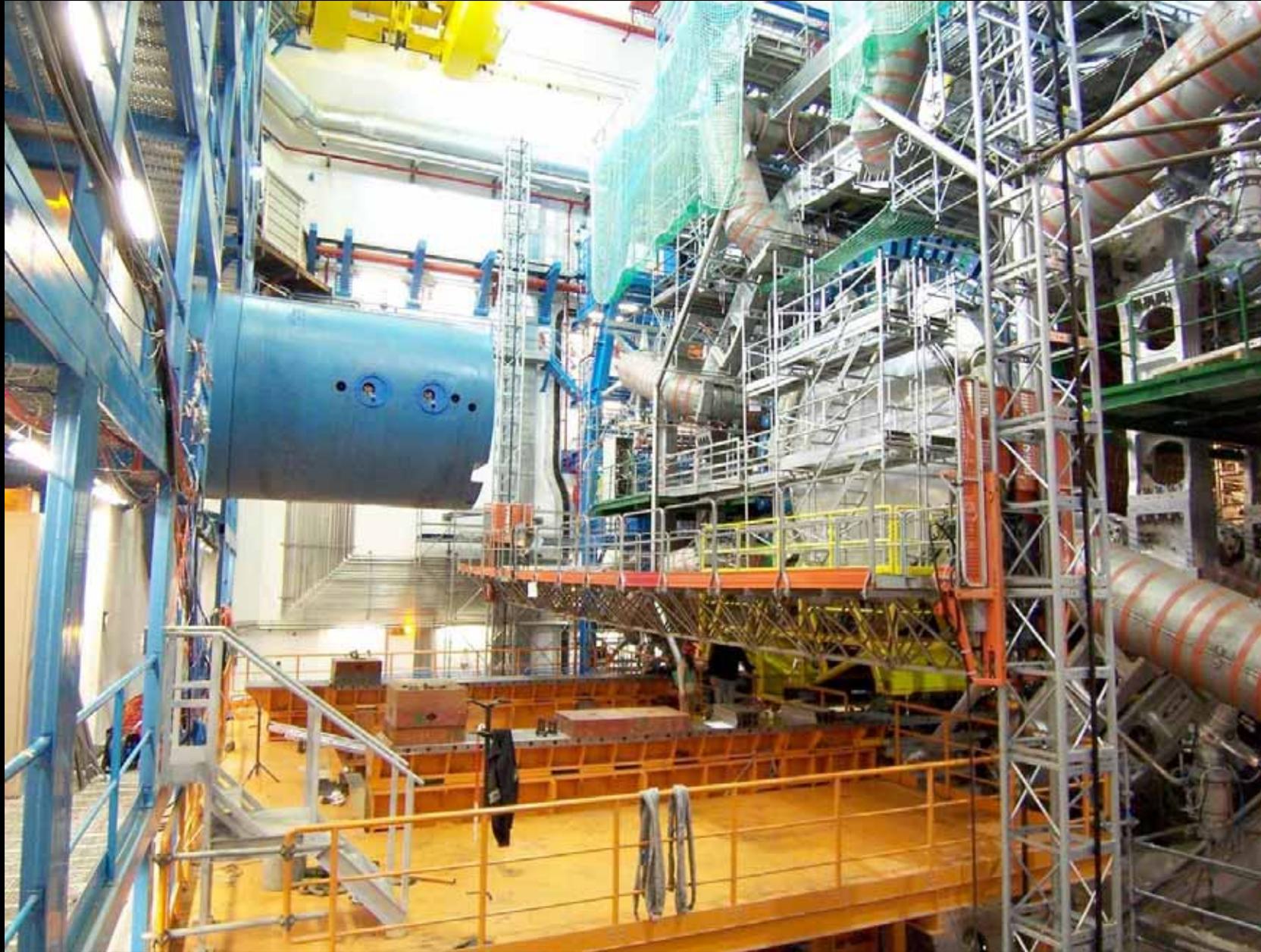
# ATLAS Cavern (02/2004)



# ATLAS Cavern (08/2005)



# ATLAS Cavern (05/2006)



# ATLAS Collaboration

(As of March 2006)

35 Countries

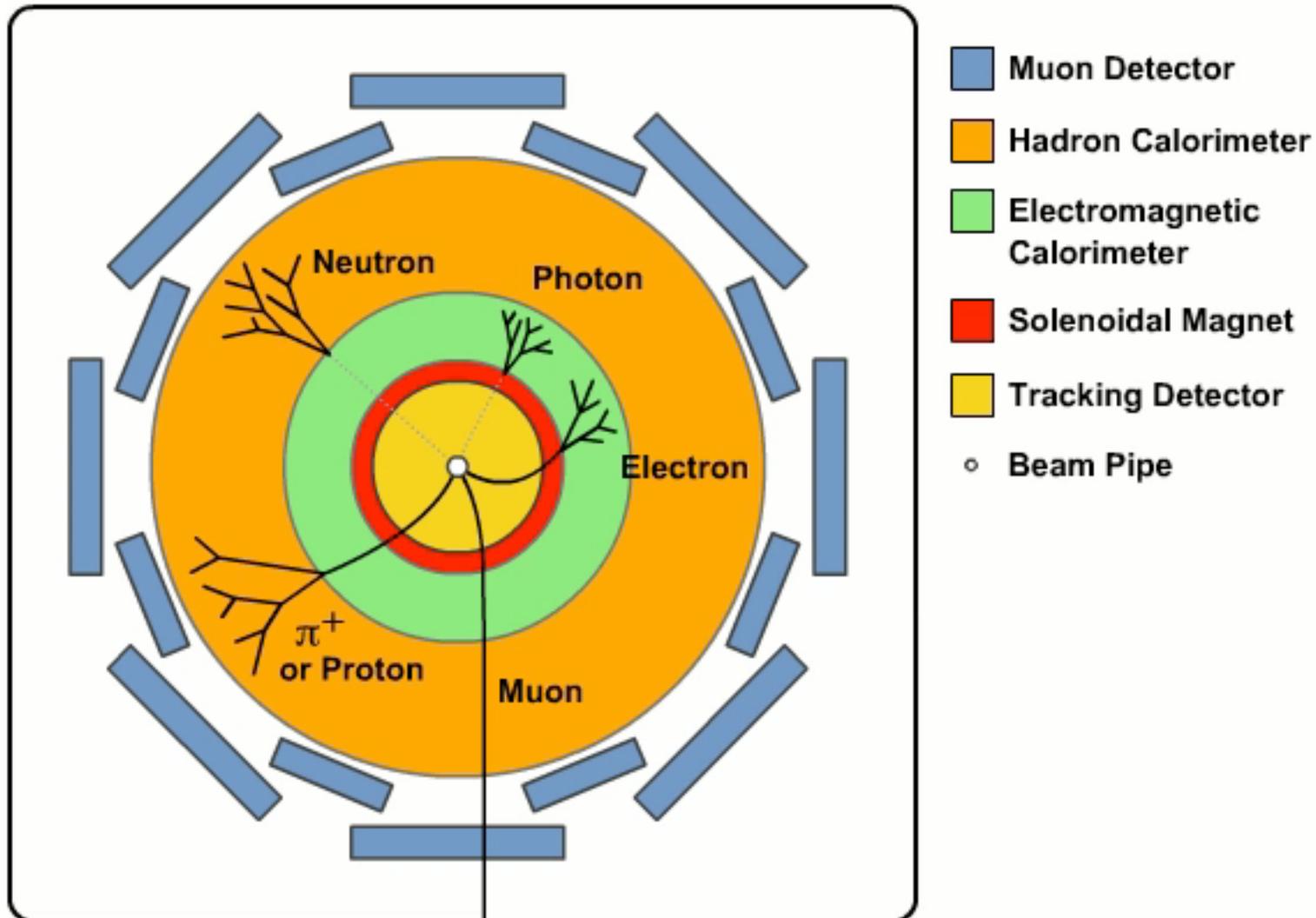
158 Institutions

1650 Scientific Authors total



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, INP Cracow, FPNT Cracow, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Naples, Naruto UE, New Mexico, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

# Aufbau und Funktionsweise des ATLAS Detektors



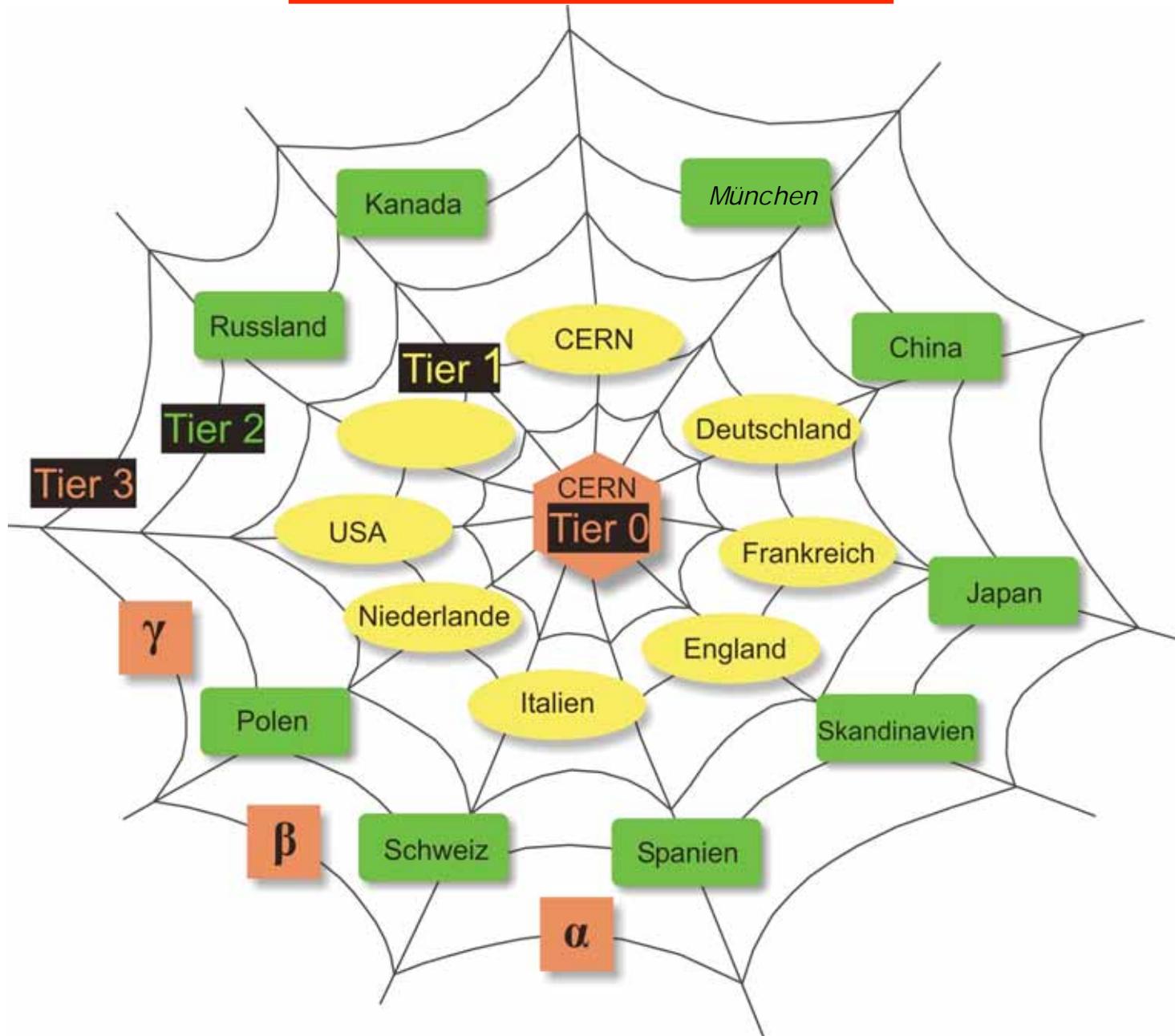
# LHC Data and Computing

## the challenge:

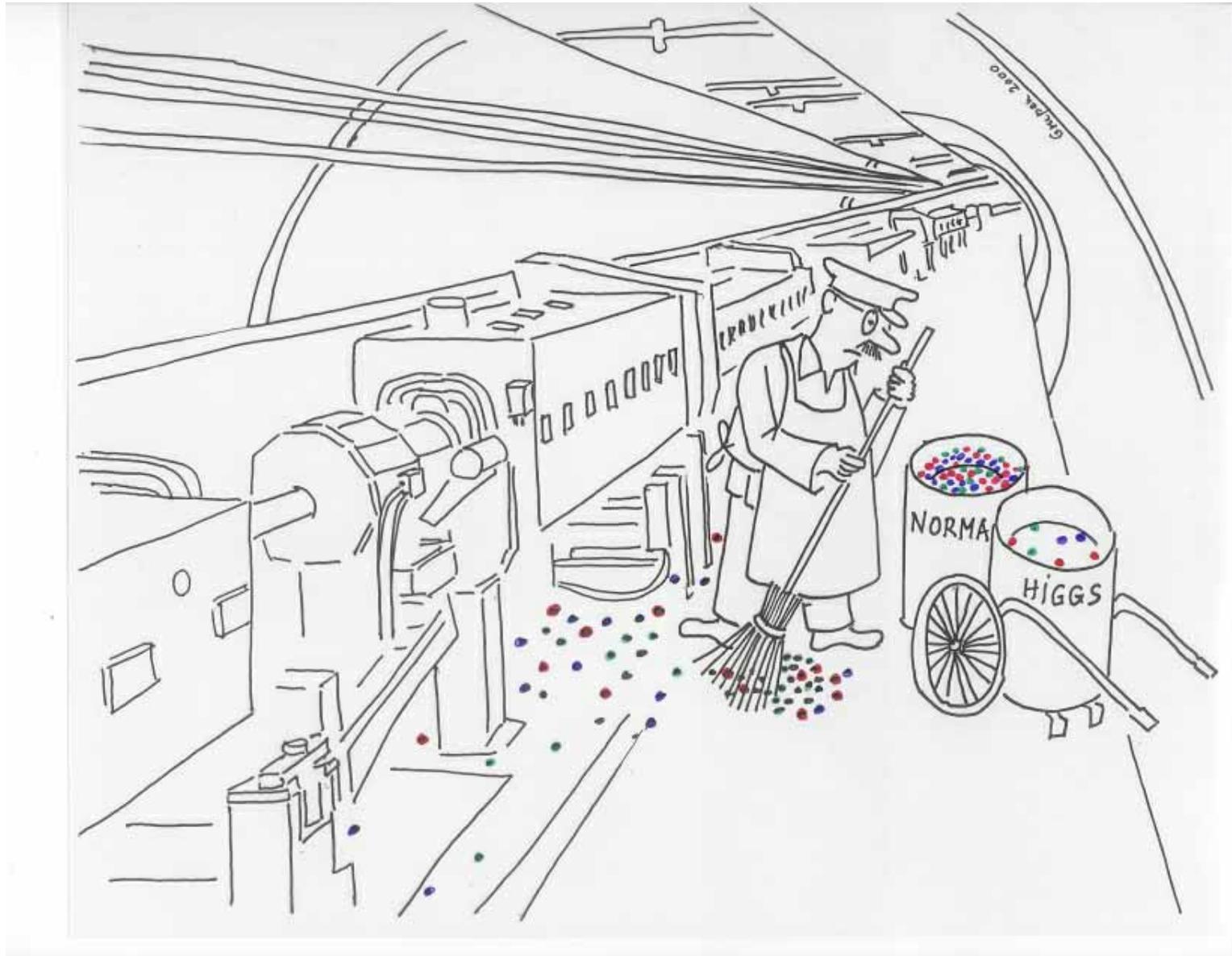
- 40 MHz collision rate → unfiltered data flow  $\sim 10^{14}$  B/s  
(~10 Billion phone calls)
- 4 experiments; 50-200 Hz data taking rate
- raw event size: 0.12 / 1 / 1-25 MB (LHCb / ATLAS-CMS / ALICE)
- total raw data storage: 7 PB/a  
( $7 \cdot 10^{15}$  Bytes/year;  
100 000 km thick  
pile of 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



LHC Run Start: 08/09 2007



... wir hoffen auf viele Entdeckungen !

# The End

<http://www.mppmu.mpg.de>

# Film: Status von LHC & ATLAS

