

# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern

Vorlesung TU München, SS 12

**Prof. Dr. Siegfried Bethke**

**Dr. Frank Simon**

MPI für Physik

Föhringer Ring 6

80805 München

[bethke@mppmu.mpg.de](mailto:bethke@mppmu.mpg.de) (323 54 299)

[fsimon@mpp.mpg.de](mailto:fsimon@mpp.mpg.de) (323 54 535)

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

Max-Planck-Institut für Physik  
(Werner-Heisenberg-Institut)

# Organisatorisches; Einführung und Überblick

- Ziel der Vorlesung
- Organisation
- Literaturempfehlungen
  
- Teilchenphysik und Kosmologie
- Fundamentale Teilchen und Kräfte
- Beschleuniger und Detektoren
- derzeitiges Weltbild und offene Fragen
- Überblick über die Projekte

# Ziel der Vorlesung:

## Überblick über

Teilchenphysik und Kosmologie

Beschleunigungsmechanismen

Aktuelle und zukünftige Teilchenbeschleuniger

Teilchennachweis in Teilchen- und Astro-Teilchenphysik

Standard-Modell der Teilchenphysik

Physik (mit) der kosmischen Strahlung

# Organisation der Vorlesung:

- Zeit & Ort: - Montag 14:00-15:30 (s.t.)  
PH127 (TUM Physik Department)
- Vorkenntnisse: - muss: Vorlesung Teilchen und Kerne  
- soll: Vorlesung Einführung in die Teilchenphysik  
- kann: Quantenfeldtheorie, theor. Teilchenphysik
- Übungen: - keine
- Schein: - auf Anfrage
- Skriptum: - <http://www.mpp.mpg.de>  
(-> Veranstaltungen -> Vorlesungen)
- Laborbesichtigung: - nach Vereinbarung: MPI für Physik

# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern

1. Einführung: Teilchenphysik und Kosmologie 7.4.
2. Erdgebundene Beschleuniger 14.4.
3. Teilchendetektoren 28.4.
4. Kosmische Beschleuniger 5.5.
5. Standardmodell Präzisionsmessungen mit LEP/SLC/ILC 12.5.
6. QCD und Jet Physik an Lepton Beschleunigern 19.5.
7. Präzisionsexperimente ( $g-2$ ) 26.5.
8. Dunkle Materie und Dunkle Energie 2.6.
9. Kosmische Höhenstrahlung I 16.6.
10. Kosmische Höhenstrahlung II 23.6.
11. Atmosphärische- und Beschleunigerneutrinos 30.6.
12. Sonnen- und Reaktorneutrinos 7.7.

# Literaturempfehlungen:

## Grundlagen:

- D.H. Perkins, "Introduction to High Energy Physics", Cambridge University Press
- Ch. Berger, „Elementarteilchenphysik“, Springer
- Klapdor-Kleingrothaus, Zuber, "Teilchenastrophysik", Teubner
- Bogdan Povh, Klaus Rith, und Christoph Scholz; Springer, Berlin (September 2006)
- M.S. Longair: High Energy Astrophysics (Cambridge Press)

## begleitend und weiterführend:

- P. Schmüser, "Feynmangraphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker", Springer 1995
- Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung; Teubner 2005
- Helmut Wiedemann Particle Accelerator Physics, 2 Vols., Springer, Berlin (September 2003)
- Particle Data Group: [pdg.lbl.gov](http://pdg.lbl.gov) (-> "reviews, tables and plots", -> "exp. Methods" ...)
- SPIRES HEP library: [www-spires.slac.stanford.edu/find/hep](http://www-spires.slac.stanford.edu/find/hep)
- [www.cern.ch](http://www.cern.ch), [www.desy.de](http://www.desy.de), [www.fnal.gov](http://www.fnal.gov), [www.slac.stanford.edu](http://www.slac.stanford.edu), [www.kek.jp](http://www.kek.jp)

# 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

??

??

?????

???

# Die Theorie der Materie:

## Das "Standardmodell" der Teilchenphysik

### Elementare Teilchen:

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

(sowie jeweilige  
Anti-Teilchen)

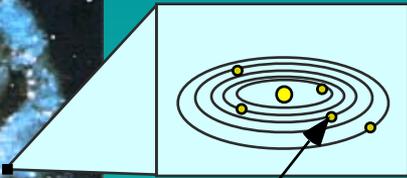
### Fundamentale Kräfte:

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

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

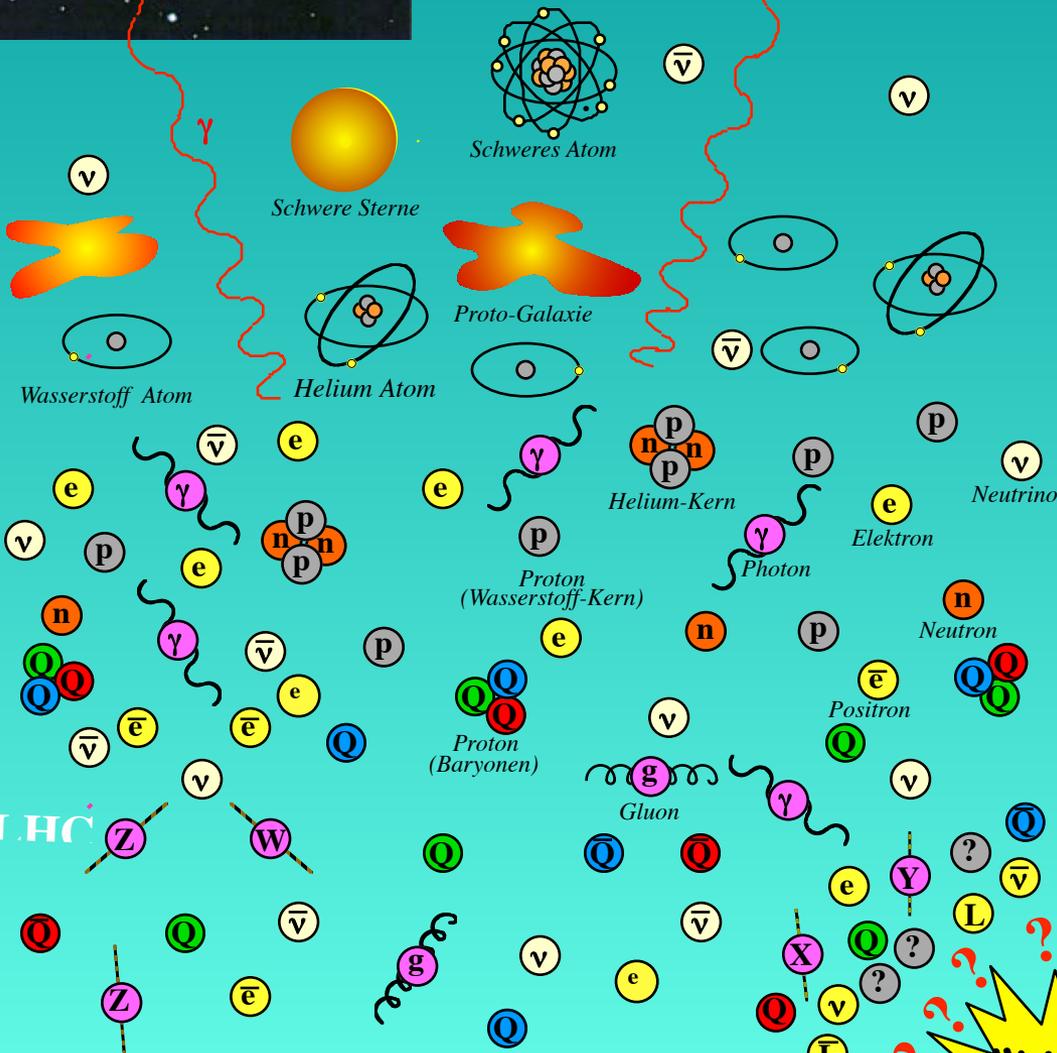
elektroschwache Symmetriebrechung und Erzeugung  
der Fermion- und Bosonmassen: Das Higgs-Boson

# Teilchenphysik und Kosmologie



Wir sind hier

Zeit



GEGENWART

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien



UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen. Entkopplung von Strahlung und Materie.



Nukleosynthese von Helium

Positronen verschwinden



Formation von Protonen und Neutronen

Antiquarks verschwinden



Asymmetrie Materie-Antimaterie

Inflation



GROSSE VEREINHEITLICHUNG

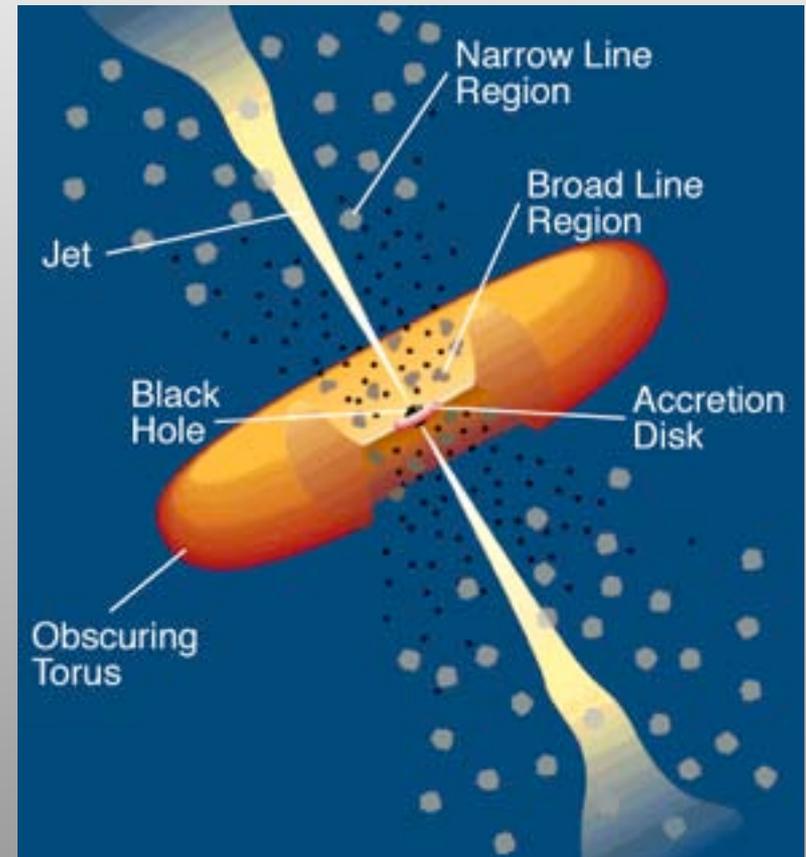
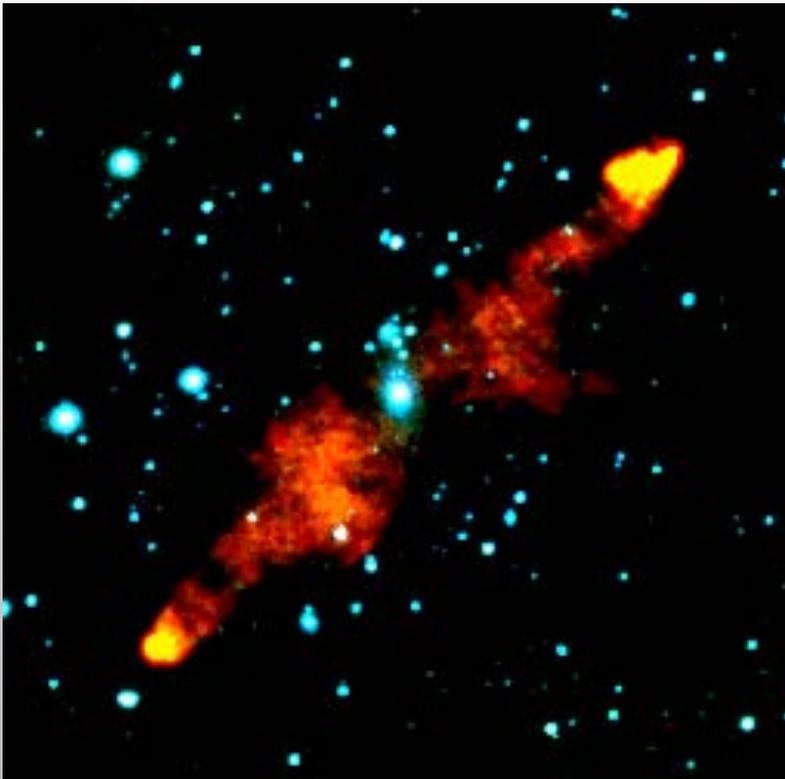
QUANTEN- GRAVITATION



Astronomie

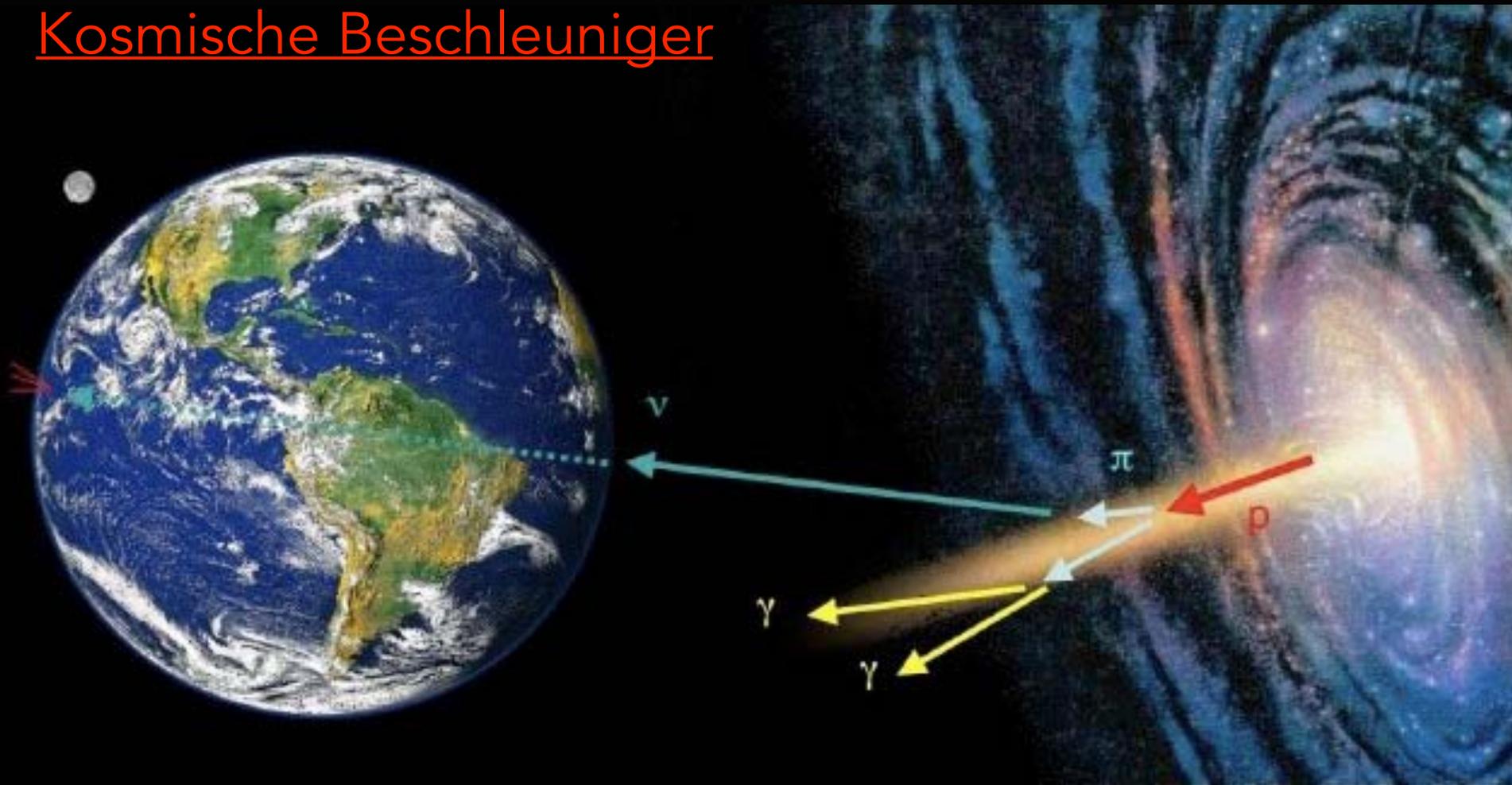
Teilchenbeschleuniger

# Kosmische Beschleuniger



AGN:  
aktive galaktische Kerne

# Kosmische Beschleuniger



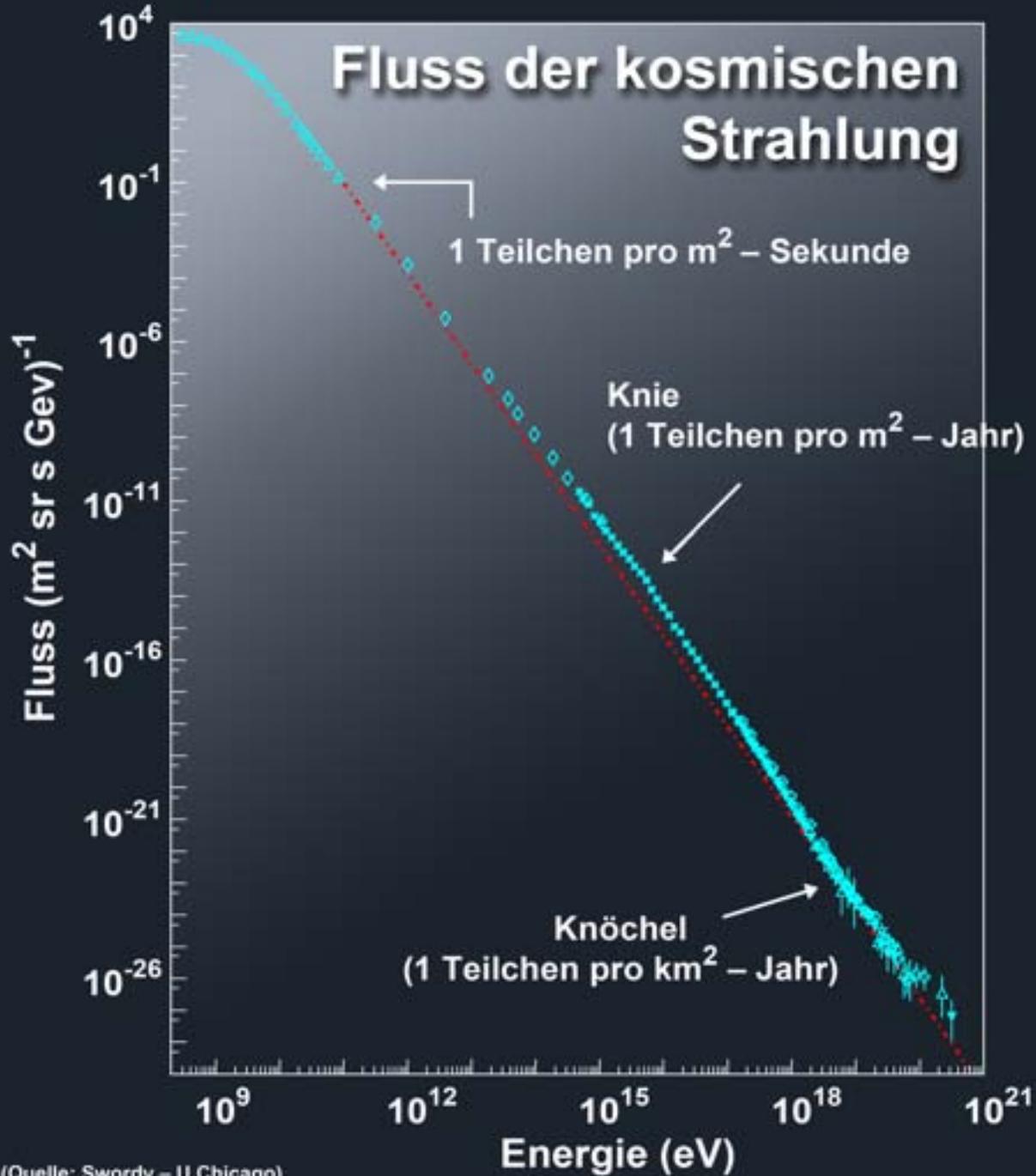
# Teilchenbeschleunigung in Supernovae



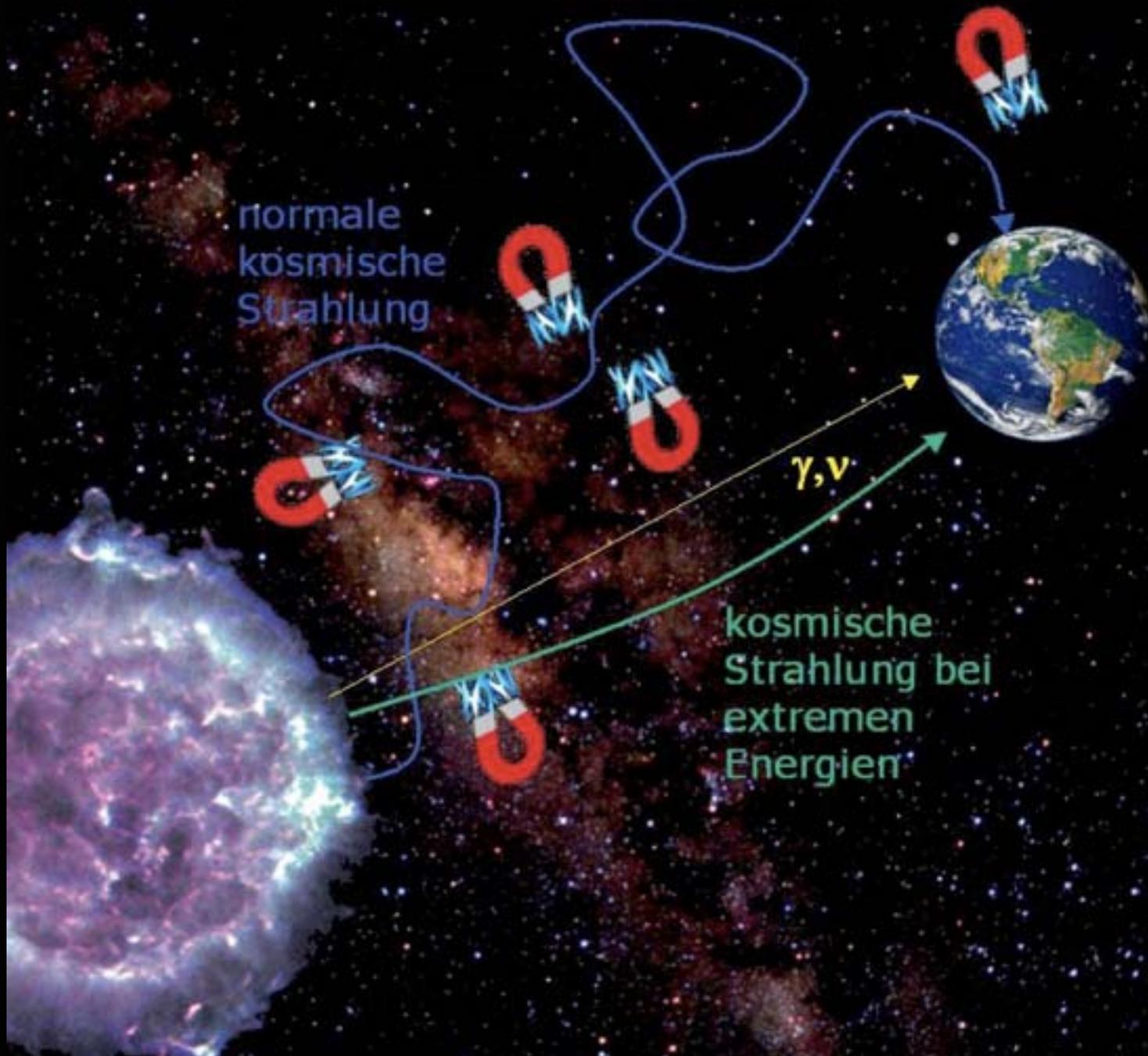
Kassiopeia A



SN2011fe



(Quelle: Swordy – U.Chicago)

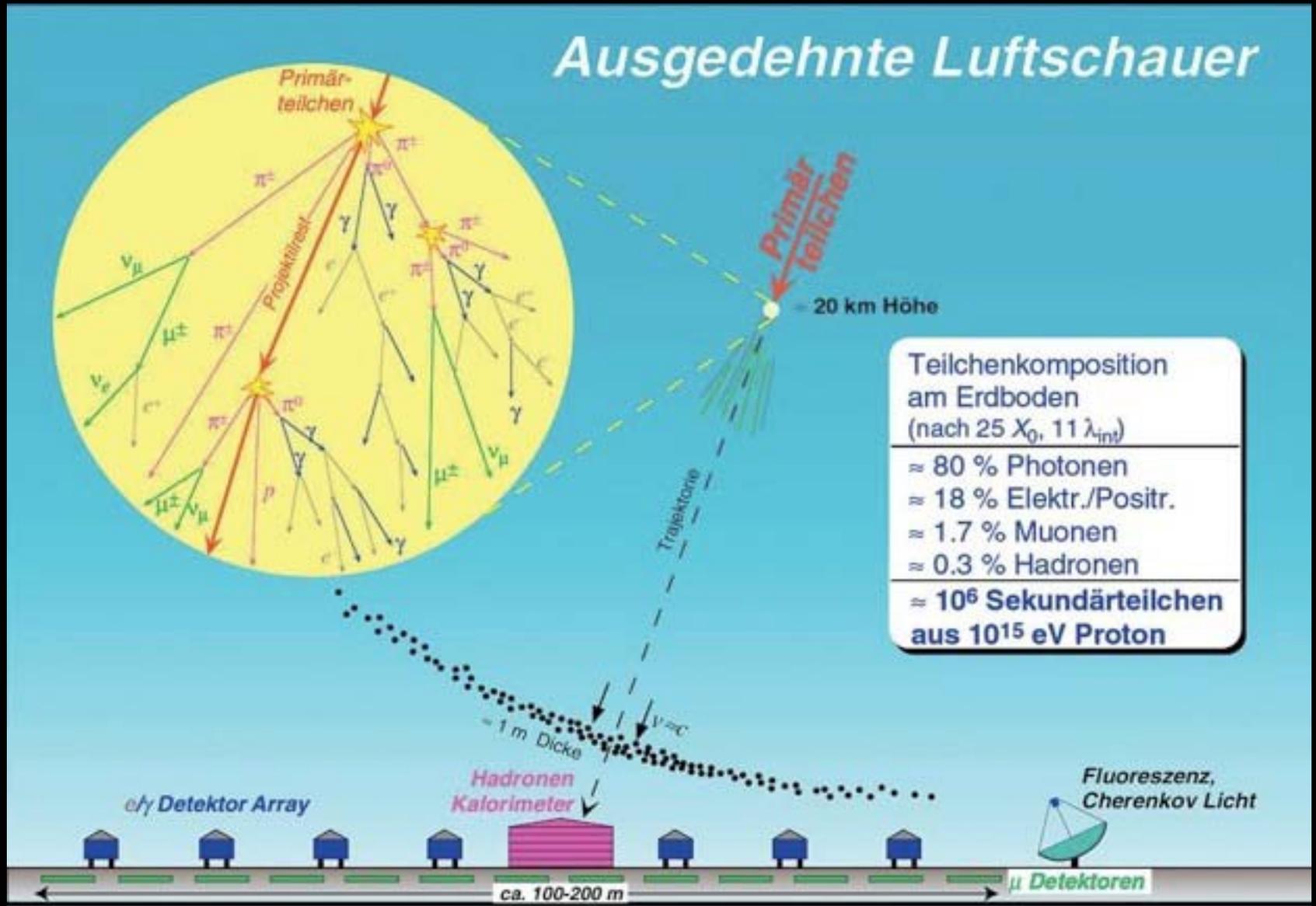


normale  
kosmische  
Strahlung

kosmische  
Strahlung bei  
extremen  
Energien

$\gamma, \nu$

# Ausgedehnte Luftschauer

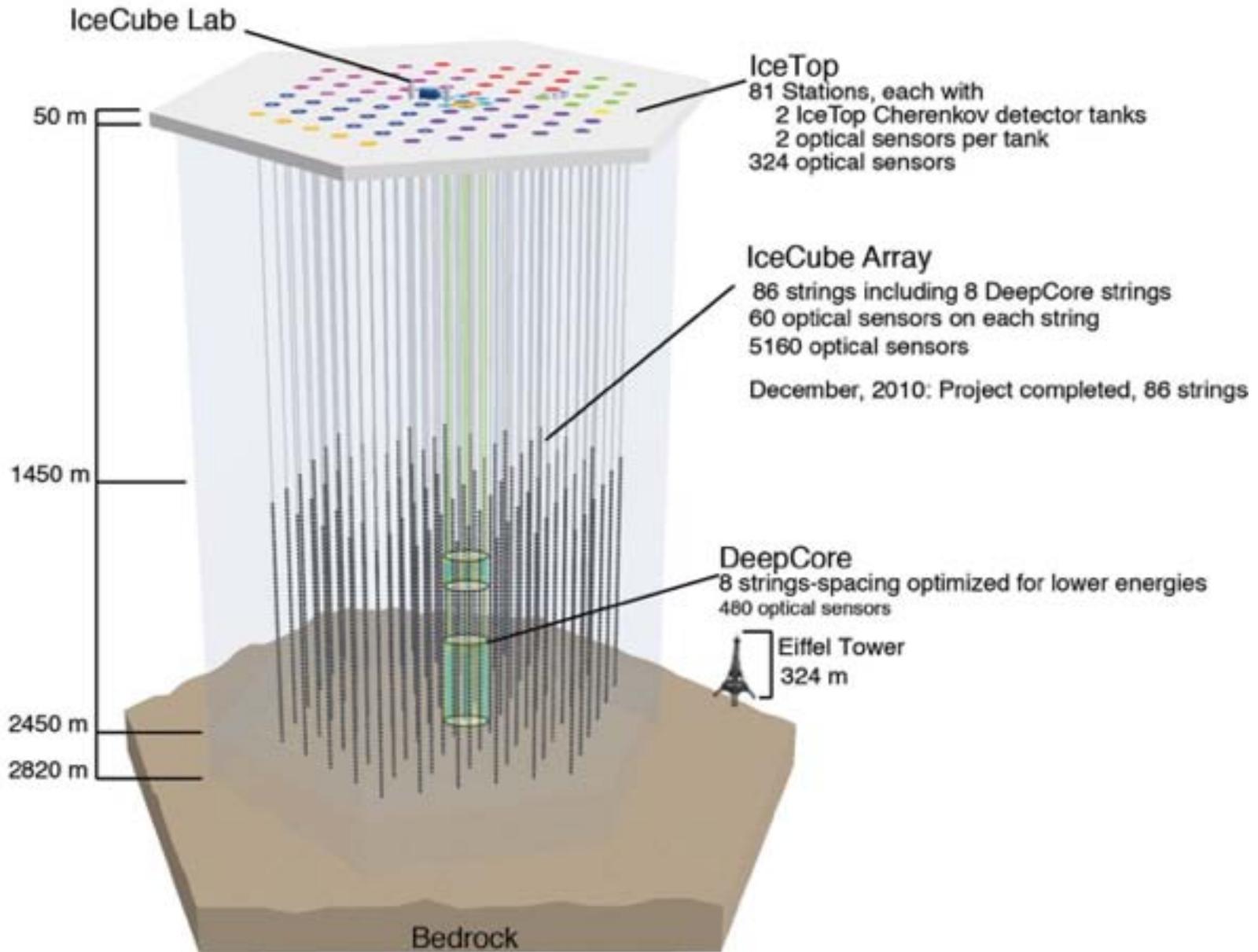


# MAGIC

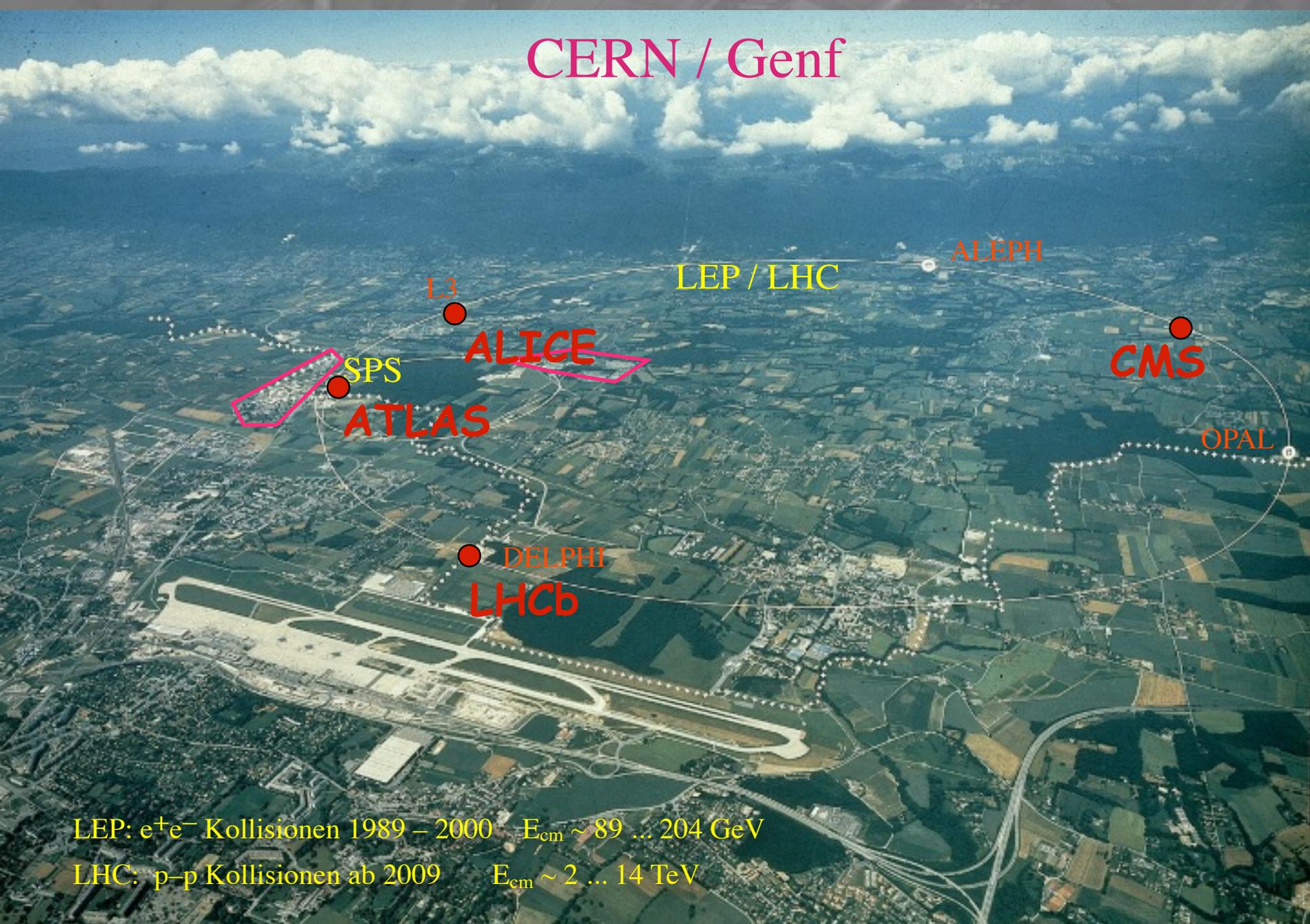
## Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Teleskop



# ICE CUBE Neutrino Telescope



# CERN / Genf



LEP:  $e^+e^-$  Kollisionen 1989 – 2000  $E_{cm} \sim 89 \dots 204$  GeV

LHC:  $p-p$  Kollisionen ab 2009  $E_{cm} \sim 2 \dots 14$  TeV

# LEP-Tunnel



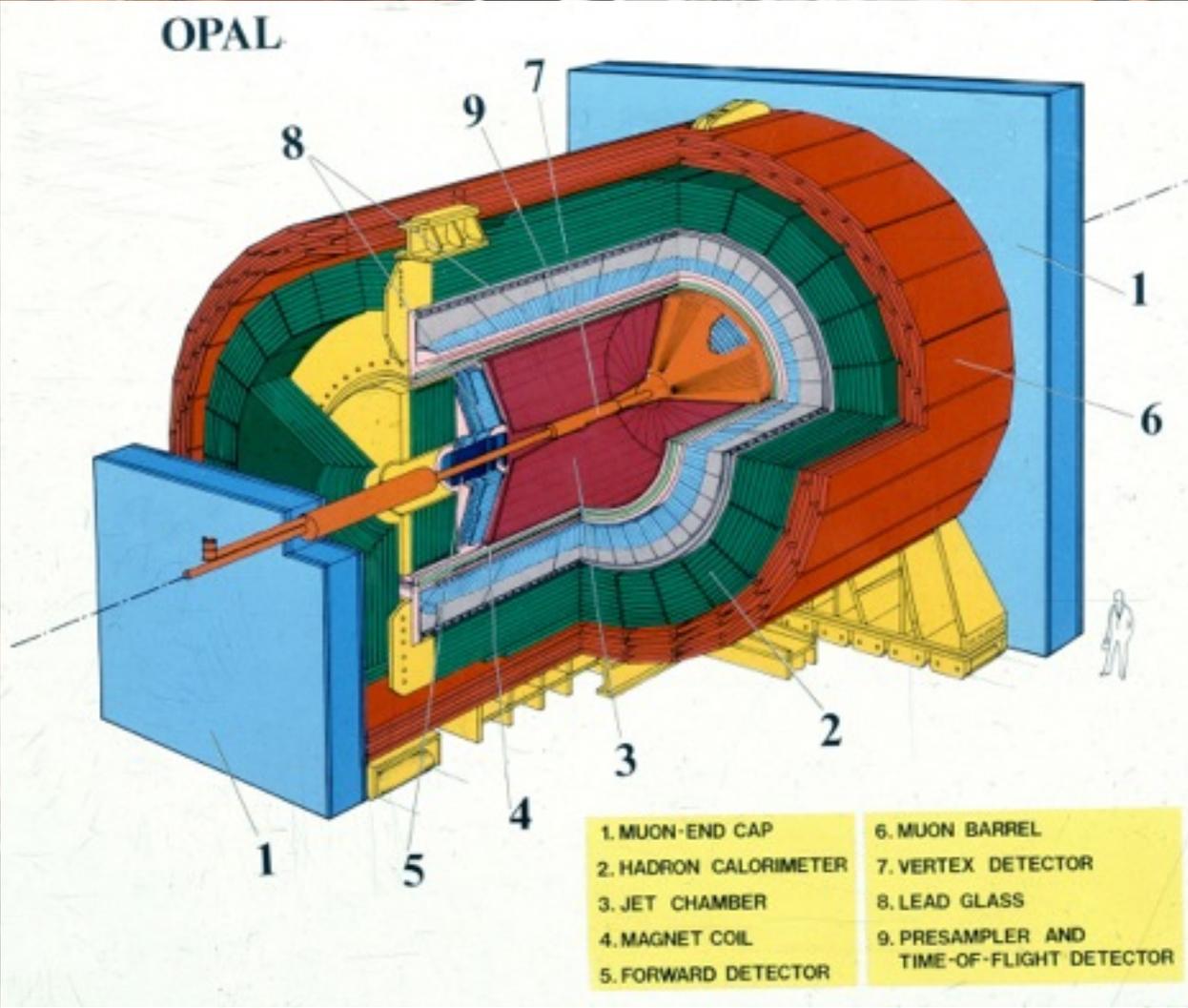
Quadrupol-Magnete  
(Fokussierung)

Dipol-Magnete  
(Kreisbahn)

# LHC Tunnel (12/2005)



# Teilchendetektoren: OPAL



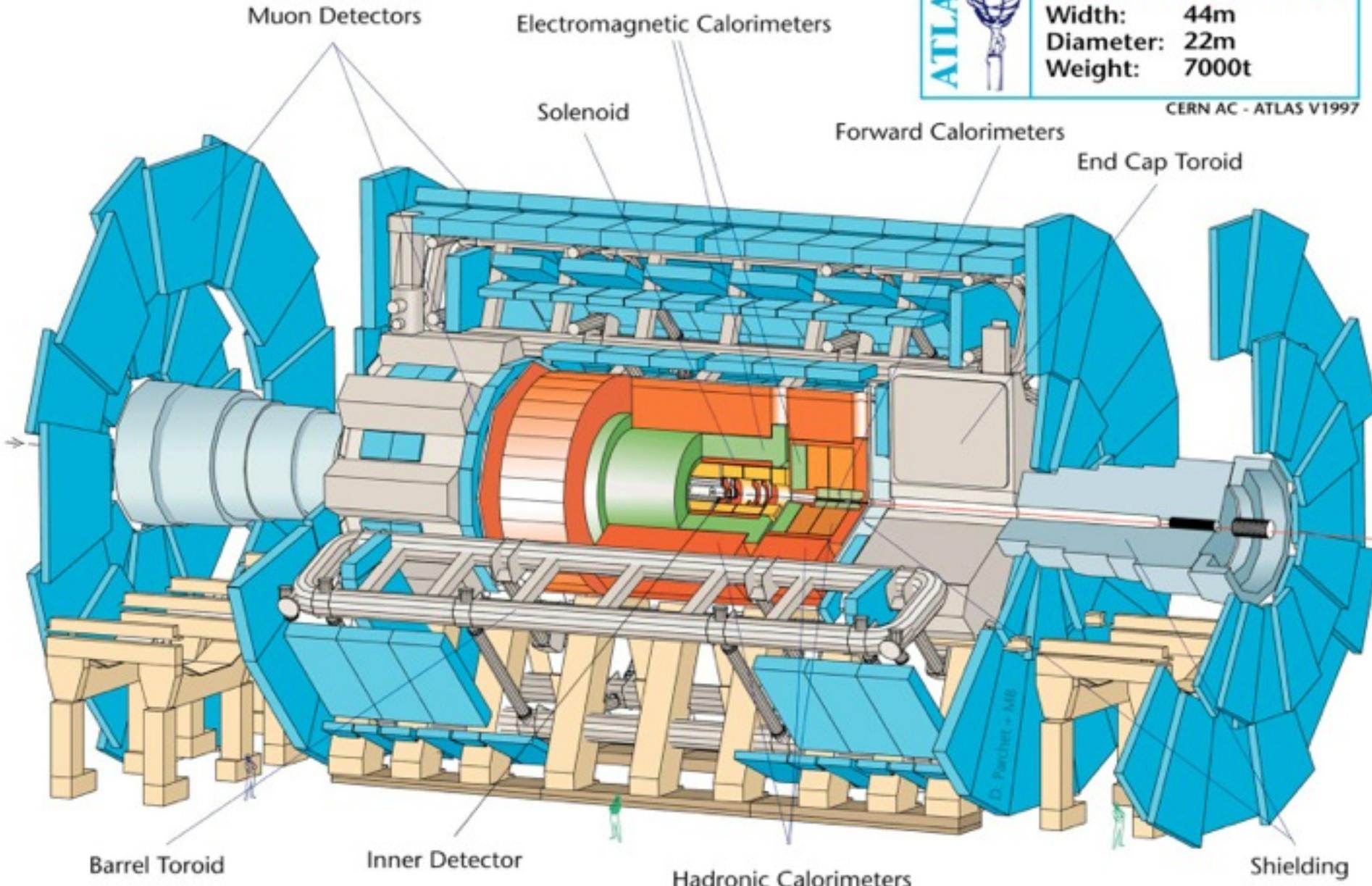
# ATLAS am Large Hadron Collider / CERN



## Detector characteristics

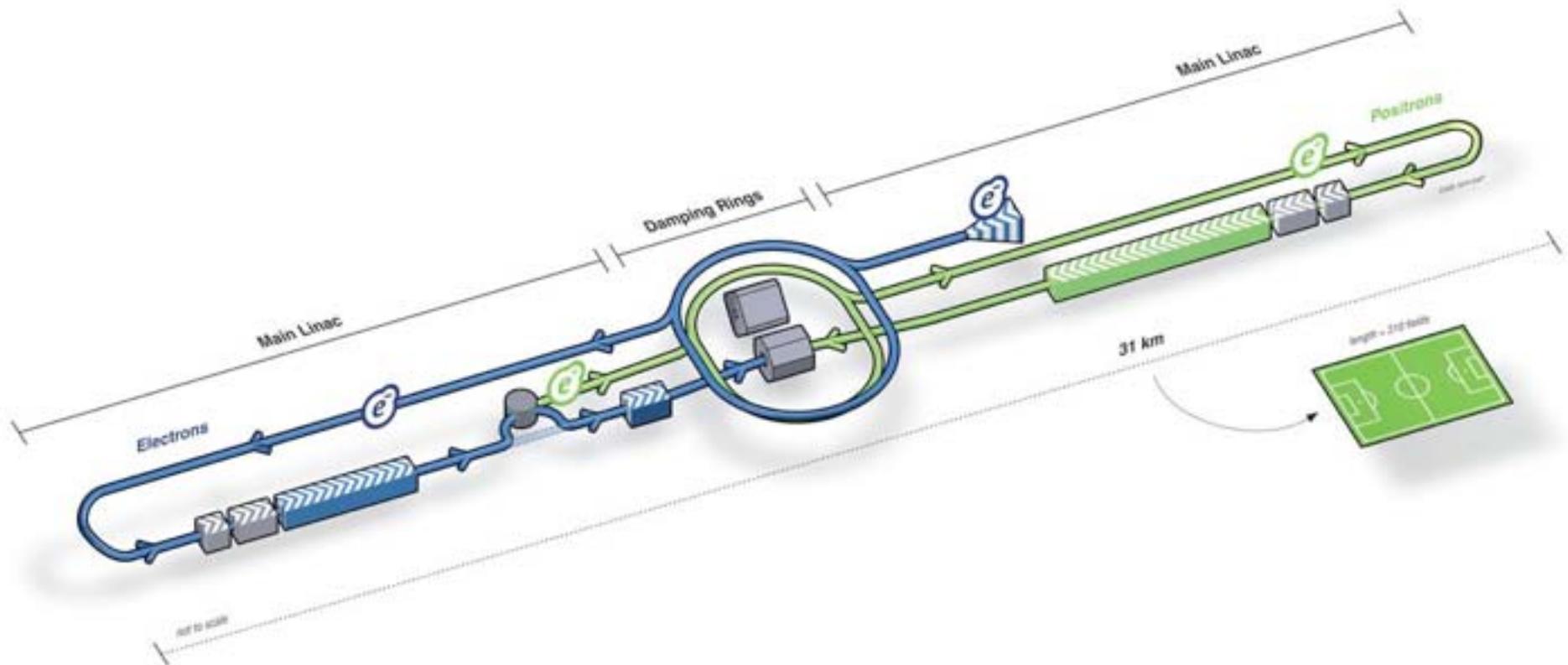
Width: 44m  
Diameter: 22m  
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997



Konstruktion & Bau bis 2006, Betrieb ab 2008, Laufzeit ~ 25-30 Jahre

# International Linear Collider (ILC)



ILC:  $e^+e^-$  Kollisionen; in Planung  $E_{\text{cm}} \sim 250 - 800 \text{ GeV}$

# Das Standardmodell der Teilchenphysik...

- ... beschreibt erfolgreich und präzise alle bekannten Teilchen und Kräfte

Elementare Teilchen				Elementare Kräfte		relative Stärke
	Generation			Austauschboson		
	1	2	3			
Quarks	u	c	t	Stark	g	1
	d	s	b		El.-magn.	
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Schwach	$W^\pm, Z^0$	$10^{-16}$
	e	$\mu$	$\tau$		Gravitation	G

... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein!

es lässt viele fundamentale Fragen offen:

- Erzeugung der Teilchenmassen (Higgs-Boson?)
- bisher noch keine Quantenfeldtheorie der Gravitation
- Vereinheitlichung aller Kräfte (GUT; TOE) ?
- wo ist die Antimaterie geblieben ? („warum gibt es uns?“)
- was sind die „Dunkle“ Materie und Energie, die 95% unseres Universums ausmachen?

# Astrophysik und Kosmologie (2004):

(Planck + WMAP + BAO + ...)

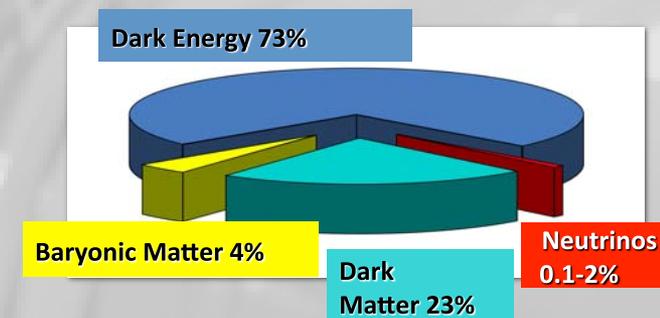
- $t_0 = 13.789 \pm 0.037$  Gyr (Alter des Universums)
- $H_0 = 67.3 \pm 1.2$  km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup> (Hubble Konstante)
- $\Omega_0 = 1.01 \pm 0.02$  ( $\Omega_0 = \rho_{\text{average}} / \rho_{\text{critical}}$ )
  - $\Omega_M = 0.315 \pm 0.017$  (Materiedichte)
  - $\Omega_\Lambda = 0.692 \pm 0.010$  (Dark Energy)
  - $\Omega_B = 0.0482 \pm 0.0005$  (baryonische Materie)
  - $\Omega_S = 0.005$  (Stars; Luminous Matter)
  - $\Omega_{\text{cDM}} = 0.258 \pm 0.004$  (cold Dark Matter)



if it's not  
dark  
it doesn't  
matter

today, there are few but significant signals for BSM physics:

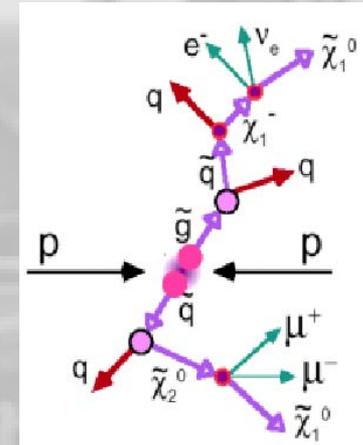
- neutrinos are not massless
- 95% of the mass/energy budget of the universe cannot be explained by SM particles and forces:
  - Dark Matter (23%)
  - Dark Energy (73%)



# the most *en vogue* candidates to solve (some of) these problems:

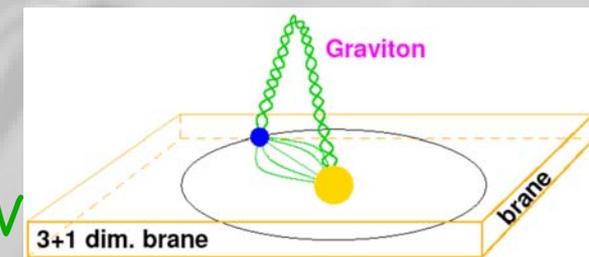
## • Supersymmetry (SUSY)

- + fully compatible with and supported by GUT's
- + offers excellent Dark Matter candidates
- + theory finite and computable up to Planck Mass
- + essential for realisation of string theory (including quantum gravity)
- no SUSY signals seen yet (LEP, Tevatron)
- (too) many free parameters, large parameter space



## • Extra Space Dimensions

- + would solve hierarchy problem ( $M_{\text{Planck}} \rightarrow O(1 \text{ TeV})$ )
- + inspired by string theory: compactified extra dimensions
- + exciting scenarios, but cannot solve many of above problems?
- large model dependences



# Zusammenfassung / Motivation für diese Vorlesung:

- Teilchenphysik und Kosmologie / Astrophysik sind in ihren Grundlagen und der Phänomenologie eng verzahnt
- die derzeit offenen, fundamentalen Fragen der Physik sind gleichsam für diese Gebiete relevant
- diese Fragen können (und müssen) in den Gebieten der Teilchen-, Astroteilchen- und Astrophysik gemeinsam und komplementär untersucht werden

# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern

<del>1.</del>	<del>Einführung: Teilchenphysik und Kosmologie</del>	<del>7.4.</del>
2.	Erdgebundene Beschleuniger	14.4.
3.	Teilchendetektoren	28.4.
4.	Kosmische Beschleuniger	5.5.
5.	Standardmodell Präzisionsmessungen mit LEP/SLC/ILC	12.5.
6.	QCD und Jet Physik an Lepton Beschleunigern	19.5.
7.	Präzisionsexperimente (g-2)	26.5.
8.	Dunkle Materie und Dunkle Energie	2.6.
9.	Kosmische Höhenstrahlung I	16.6.
10.	Kosmische Höhenstrahlung II	23.6.
11.	Atmosphärische- und Beschleunigerneutrinos	30.6.
12.	Sonnen- und Reaktorneutrinos	7.7.