

Physik mit höchstenergetischen Teilchenbeschleunigern (Tevatron und LHC)

Vorlesung TU München, WS 14/15

Prof. Dr. Siegfried Bethke

Dr. Frank Simon

MPI für Physik

Föhringer Ring 6

80805 München

bethke@mpp.mpg.de

fsimon@mpp.mpg.de

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

<https://indico.mpp.mpg.de/categoryModification.py?categId=93>

Organisatorisches; Einführung und Überblick

- Ziel der Vorlesung
- Organisation
- Literaturempfehlungen

- Teilchenphysik und Kosmologie
- Fundamentale Teilchen und Kräfte
- Beschleuniger und Detektoren
- derzeitiges Weltbild und offene Fragen

Ziel der Vorlesung:

aktueller Überblick über

- höchstenergetische Hadronenbeschleuniger
- Teilchendetektoren an Tevatron & LHC
- Experimentelle Analysemethoden
- Physik des Standardmodells bei hohen Energien
- Higgs Boson: Entdeckung und Eigenschaften
- Suche nach neuer Physik jenseits des SM
- Ausblick auf geplante Experimente

Organisation der Vorlesung:

- Zeit & Ort:
 - Montag 14:15-15:45 ,
Seminarraum PH 127
- Vorkenntnisse:
 - muss: Vorlesung Teilchen und Kerne
 - soll: Vorlesung Einführung in die Teilchenphysik
 - kann: Quantenfeldtheorie, theor. Teilchenphysik
- Übungen:
 - keine
- Schein:
 - bei Bedarf
- Skriptum:
 - <http://www.mpp.mpg.de> (-> Veranstaltungen -> Vorlesungen)
 - <https://indico.mpp.mpg.de/categoryModification.py?categId=93>
- Exkursion:
 - nach Vereinbarung: CERN
- Laborbesichtigung:
 - Tag der offenen Tür: MPI für Physik, 8.11.2014

Physik mit höchstenergetischen Beschleunigern

1.	Einführung	06.10.
2.	Teilchendetektoren I	13.10.
3.	Teilchendetektoren II	20.10.
4.	Hadronenbeschleuniger (Tevatron und LHC)	27.10.
5.	Monte Carlo Generatoren und Detektor Simulation	03.11.
6.	Trigger, Datennahme und Computing	10.11.
7.	QCD, Jets	17.11.
8.	Standard Modell Tests	24.11.
9.	Higgs Physik I	01.12.
10.	Higgs Physik II	08.12.
11.	Top Quark Physik	15.12.
12.	— fällt aus —	22.12.
	-----xmas -----	
13.	SUSY	12.01.
14.	Exotica (Black Holes, Extra Dimensions etc.)	19.01.
15.	Ausblick	26.01.

Literaturempfehlungen:

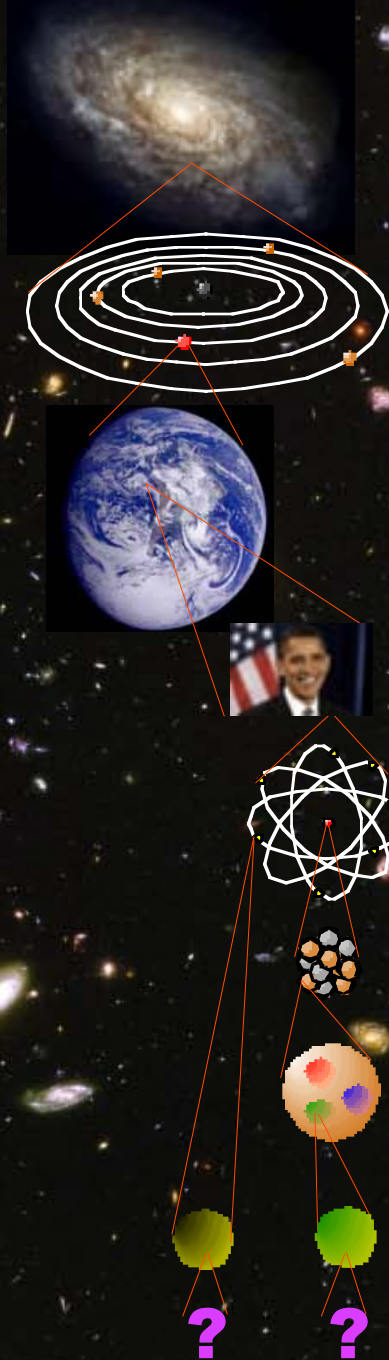
Grundlagen:

- Mark Thomson, "Modern Particle Physics", Cambridge University Press 2013
- Matthew D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model, Cambridge U.P. 2014
- D.H. Perkins, "Introduction to High Energy Physics", Cambridge University Press 2000
- R.K.Ellis, W.J.Stirling, B.R. Webber, "QCD and Collider Physics", Cambridge Monographs 2010

begleitend und weiterführend:

- Particle Data Group: pdg.lbl.gov (-> "reviews, tables and plots", -> "exp. Methods" ...)
- Tilman Plehn, "Lectures on LHC Physics", Springer Lecture Notes, Volume 886 2015
- SPIRES HEP library: <http://inspirehep.net>
- www.cern.ch , www.desy.de , www.fnal.gov ,
www.slac.stanford.edu, www.kek.jp

Dimensions and Structure of Matter



Universe

10^{26} m

Galaxy

10^{21} m

Solar System

10^{13} m

Earth

10^7 m

Human

10^0 m

Atom

10^{-10} m

Atomic Nucleus

10^{-14} m

Nucleon

10^{-15} m

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

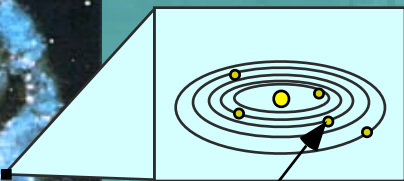
???

???

?????

???

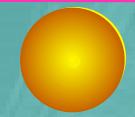
Teilchenphysik und Kosmologie



Wir sind hier



Schweres Atom



Schwere Sterne



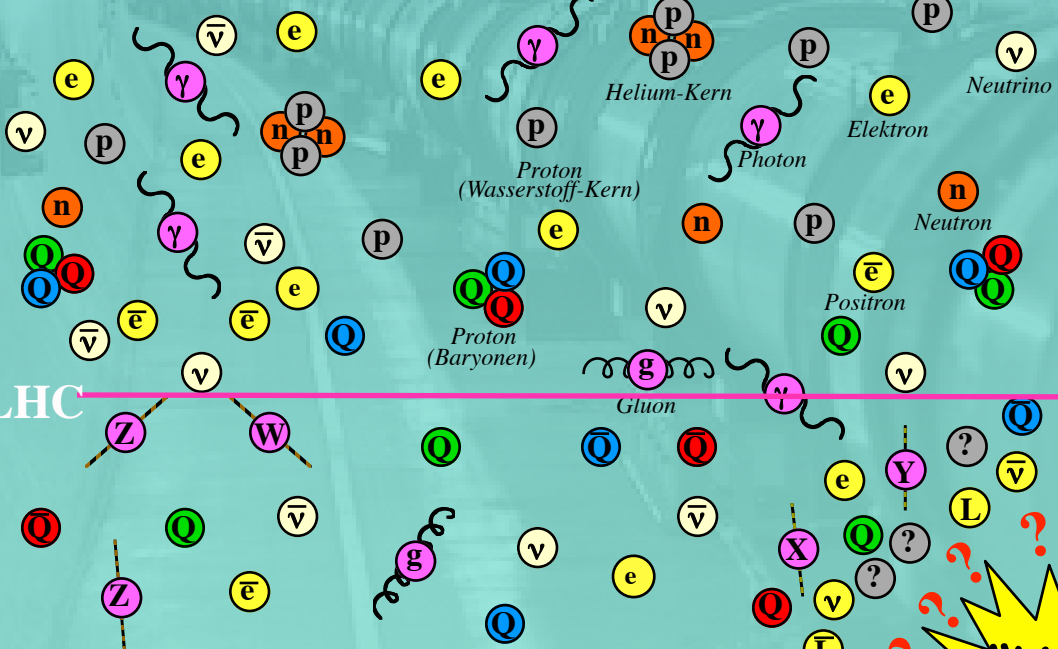
Proto-Galaxie



Wasserstoff Atom



Helium Atom

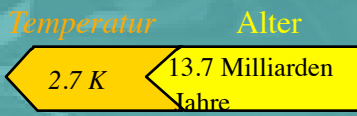


LHC

"Urknall"

Zeit

GEGENWART



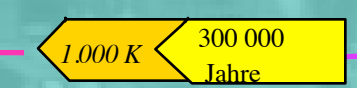
erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien



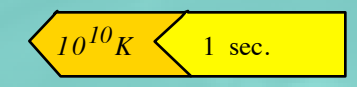
UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen. Entkopplung von Strahlung und Materie.



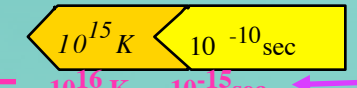
Nukleosynthese von Helium

Positronen verschwinden



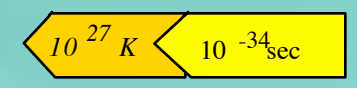
Formation von Protonen und Neutronen

Antiquarks verschwinden



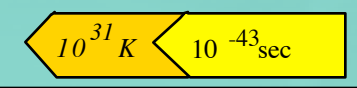
Asymmetry $\bar{Q} - Q$ $\bar{L} - L$

Inflation



GROSSE VEREINHEITLICHUNG

QUANTEN-GRAVITATION



hochobergetische kosmische Strahlung

Astronomie

Teilchenbeschleuniger

Kurze Geschichte der Teilchenphysik (1)

1932: Entdeckung des Neutrons

Entdeckung des Positrons

Neutrino-Hypothese des β -Zerfalls



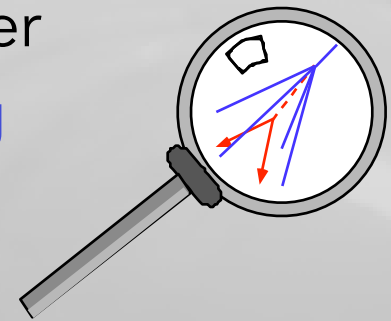
1933: $\vec{u} \cong 2.5 \frac{e}{2 m_p} \vec{\sigma} \Rightarrow$ Substruktur des Protons



1936: Entdeckung des μ (2. Lepton-Generation)



1947: Entdeckung der π -Mesonen und langlebiger V-Teilchen (K^0, Λ) in kosm. Höhenstrahlung

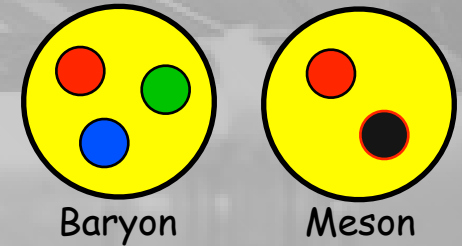


1953: V-Teilchen an Beschleunigern produziert; neue innere Quantenzahl ("strangeness").

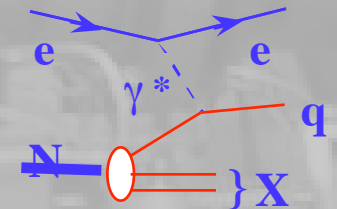
"Teilchenzoo": $\pi^+, \pi^-, \pi^0, K^0, K^\pm; \Lambda^0, p, n; e^\pm, \mu^\pm, \nu_e, \nu_\mu$
(Mesonen, Baryonen; Leptonen)

Kurze Geschichte der Teilchenphysik (2)

1964: Statisches **Quark-Modell** ;
neue innere Quantenzahl: **Farbe**.

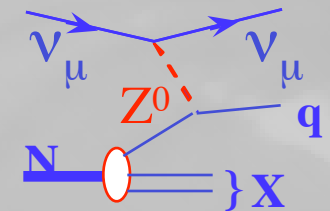


1969: Dynamisches **Partonenmodell**:



1973: **Standardmodell** der vereinigten
Elektroschwachen Wechselwirkung (eichinvariante
Quantenfeldtheorie)

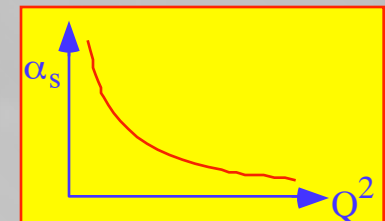
Entdeckung **Neutraler Ströme**



Theorie der Starken Wechselwirkung:

Quanten **C**hromo **D**ynamik;

Konzept der **Asymptotischen Freiheit**



Kurze Geschichte der Teilchenphysik (3)

1974: Entdeckung des τ -Leptons (3. Lepton-Generation)
Entdeckung des c -Quarks (4. Quark)

1977: Entdeckung des b -Quarks (3. Quark-Generation)

1979: Entdeckung des Gluons

1983: Entdeckung der W - und Z -Bosonen

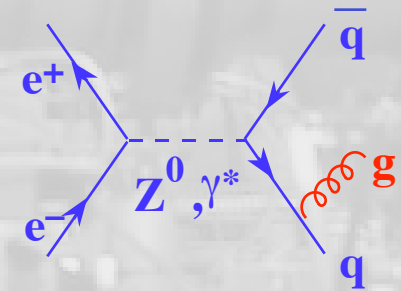
1990: Beschränkung auf 3 Neutrino-Generationen

1994: Entdeckung des t -Quarks (3. Quark-Generation)

2000: Explizite Bestätigung der Existenz des ν_τ

1998-2001: Neutrino-Oszillationen (Neutrinomasse)

2012: Entdeckung eines/des Higgs-Bosons



The „Standard Model“ of Particle Physics

... is rather simple (und „übersichtlich“):

Elementary Particles				Elementary Forces		relative strength
	Generation			exchange boson		
	1	2	3			
Quarks	u	c	t	Strong	g	1
	d	s	b	el.-magn.	γ	1/137
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Weak	W^\pm, Z^0	10^{-14}
	e	μ	τ	<i>Gravitation</i>	<i>G</i>	10^{-40}

... as well as anti-particles

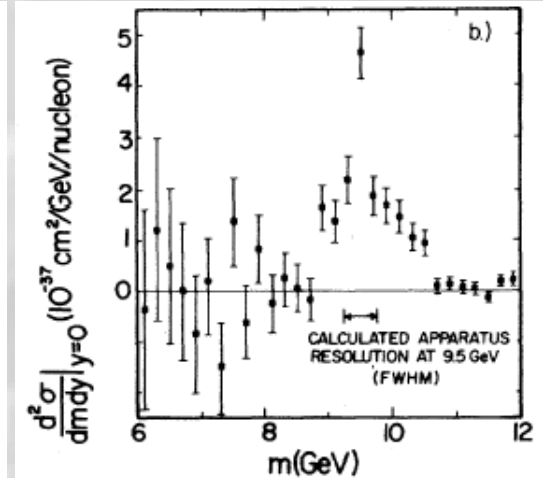
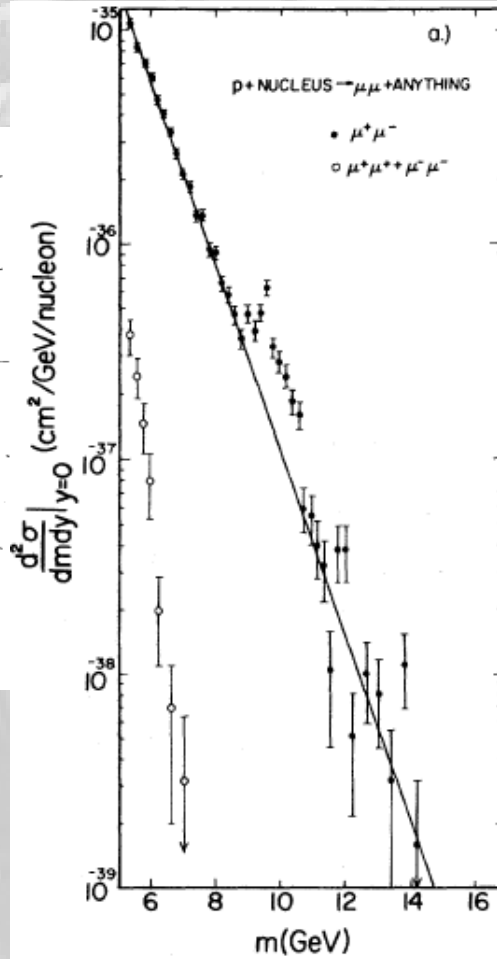
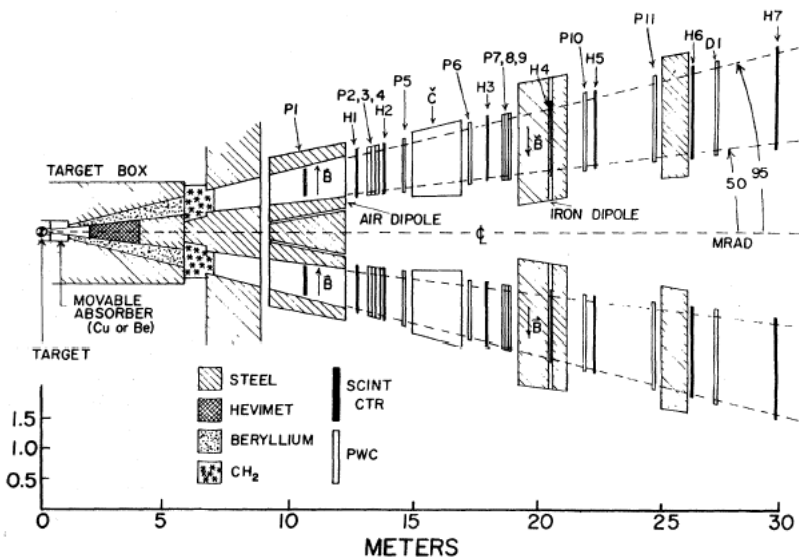
- ... describes the unified electro-weak interaction and the Strong force with gauge invariant quantum field theories;
- ... precisely describes all particle reactions observed to date
- ... provides a consistent (yet incomplete) picture of the evolution of the very early universe → **cosmology**
- ... theoretical explanation of particle masses: **the Higgs Boson**

Entdeckungen: b-Quark (1977)

“Observation of a di-muon resonance at 9.5 GeV/c² in 400 GeV proton-nucleus collisions”

S.W. Herb et al., Phys.Rev.Lett. 39 (1977) 252

$p (400 \text{ GeV}) + \text{Cu/Pt} \rightarrow \mu^+ \mu^- X$

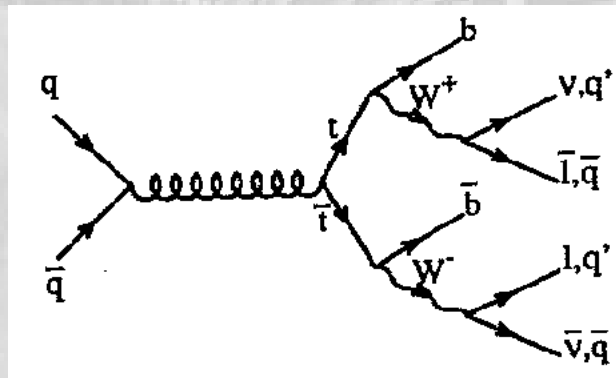


Entdeckungen: t-Quark (1994)

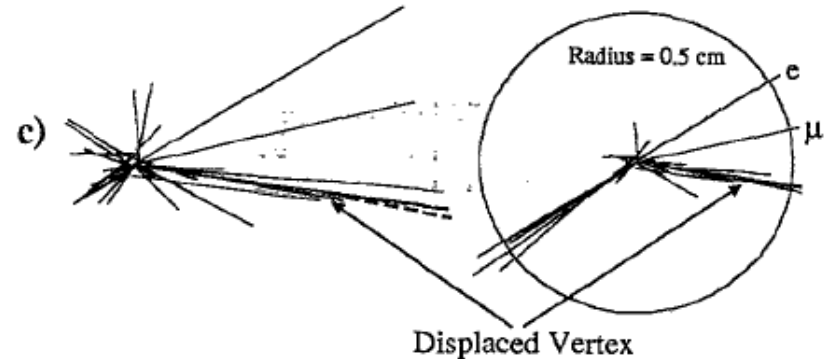
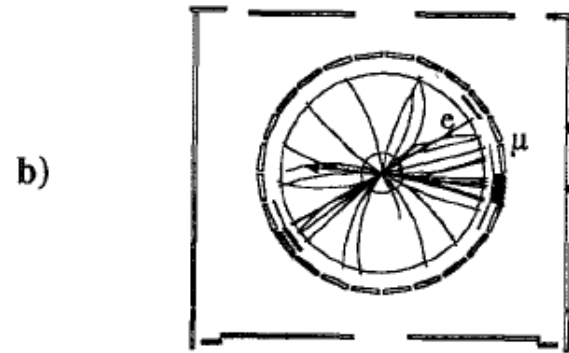
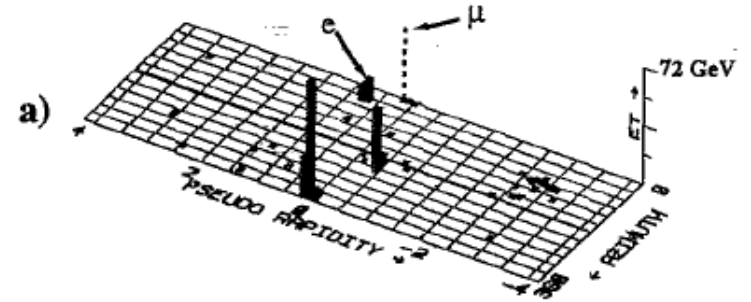
“Evidence for top Quark production in p - anti-p collisions at 1.8 TeV”

F. Abe et al., CDF collab., Phys.Rev. D50 (1994) 2966
 S. Abachi et al., D0-collab., Phys.Rev.Lett. 74 (1995) 2632

$$p \bar{p} \rightarrow t \bar{t} X \quad (\sqrt{s} = 1800 \text{ GeV})$$



Run 41540, Event 127085



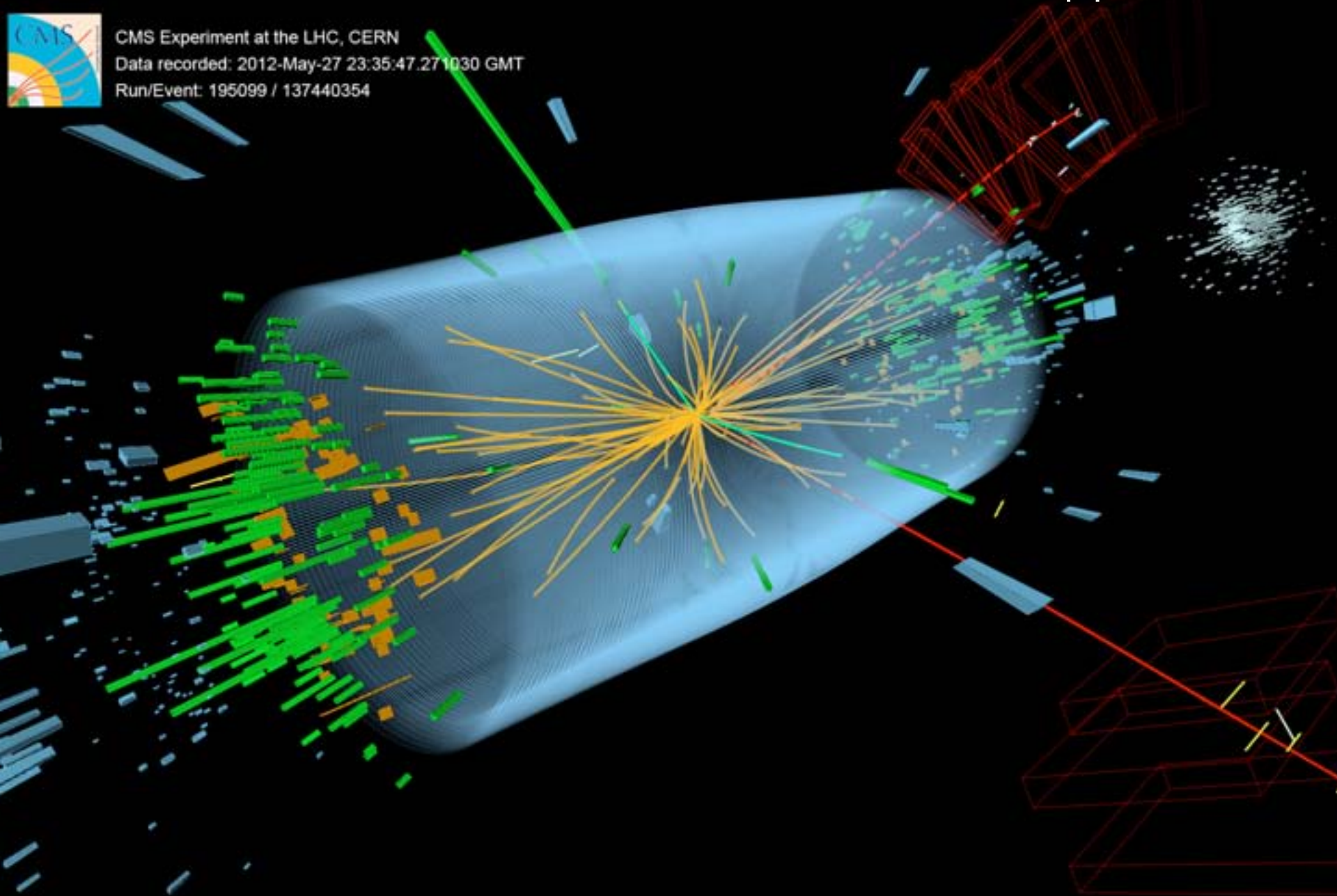
July 4, 2012: „observation of a new boson“



CMS: candidate event $H \rightarrow ZZ \rightarrow ee\mu\mu$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



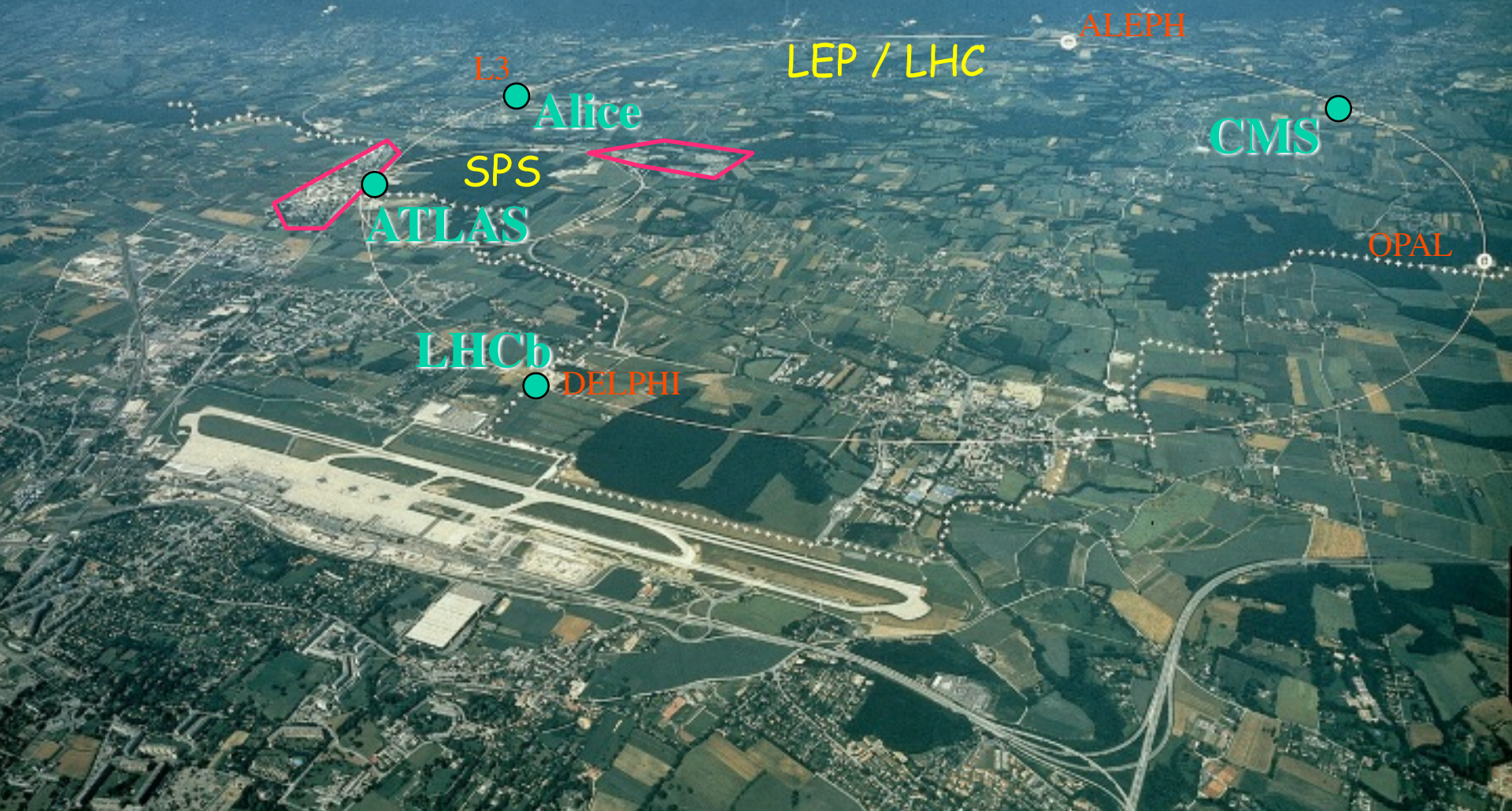
Die wichtigsten Hochenergie-Teilchenbeschleuniger:

Collider	start – end date	beam type	max. beam energy (GeV)	circumference or length (km)
PETRA (DESY)	1978 - 1986	$e^+ e^-$	23.4	2.304
SLC (SLAC)	1989 – 1999	$e^+ e^-$	50	<i>1.45 + 1.47</i>
LEP (CERN)	1989 – 2000	$e^+ e^-$	104	26.7
ILC (Japan)	2025 -	$e^+ e^-$	400 (?)	<i>15 + 15</i>
KEKB (KEK)	1999 - 2010	$e^+ e^-$	8 x 3.5	3.0
PEP-II (SLAC)	1999 - 2007	$e^+ e^-$	9 x 3.1	2.2
HERA (DESY)	1991 - 2007	$e p$	30 x 920	6.3
Spp̄S (CERN)	1981 – 1990	$p\bar{p}$	315	6.9
TEVATRON (Fermilab)	1987 – 2009(?)	$p\bar{p}$	1000	6.28
LHC (CERN)	2009 - ...	pp	7000	26.7

DESY / Hamburg



CERN / Geneva (Switzerland)



Das Standardmodell der Teilchenphysik...

- ... beschreibt erfolgreich und präzise alle bekannten Teilchen und Kräfte (LEP, HERA, Tevatron)

Elementare Teilchen				Elementare Kräfte		relative Stärke
	Generation			Austauschboson		
	1	2	3			
Quarks	u	c	t	Stark	g	1
	d	s	b		El.-magn.	
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	Schwach	W^\pm, Z^0	10^{-14}
	e	μ	τ		Gravitation	

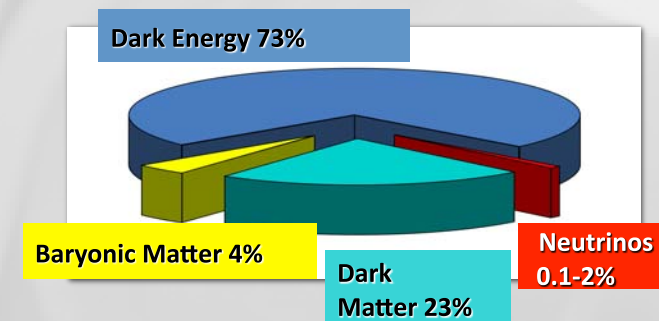
... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein!

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?

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%)



es gibt 2 prinzipielle Möglichkeiten, um nach Physik jenseit des Standardmodells zu suchen:

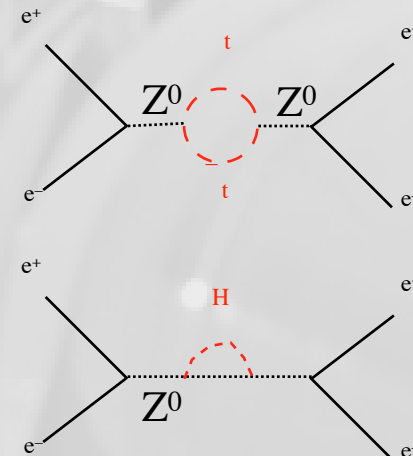
- direkte Produktion neuer Teilchen in **höchstenergetischen** Kollisionen

(diese Vorlesungsreihe)



- indirekte Evidenz für neue Phänomene in **Hochpräzisions**-Experimenten

(durch virtuelle „Schleifen“)



12



nächste Vorlesung: 13.10. Teilchendetektoren an Tevatron und LHC