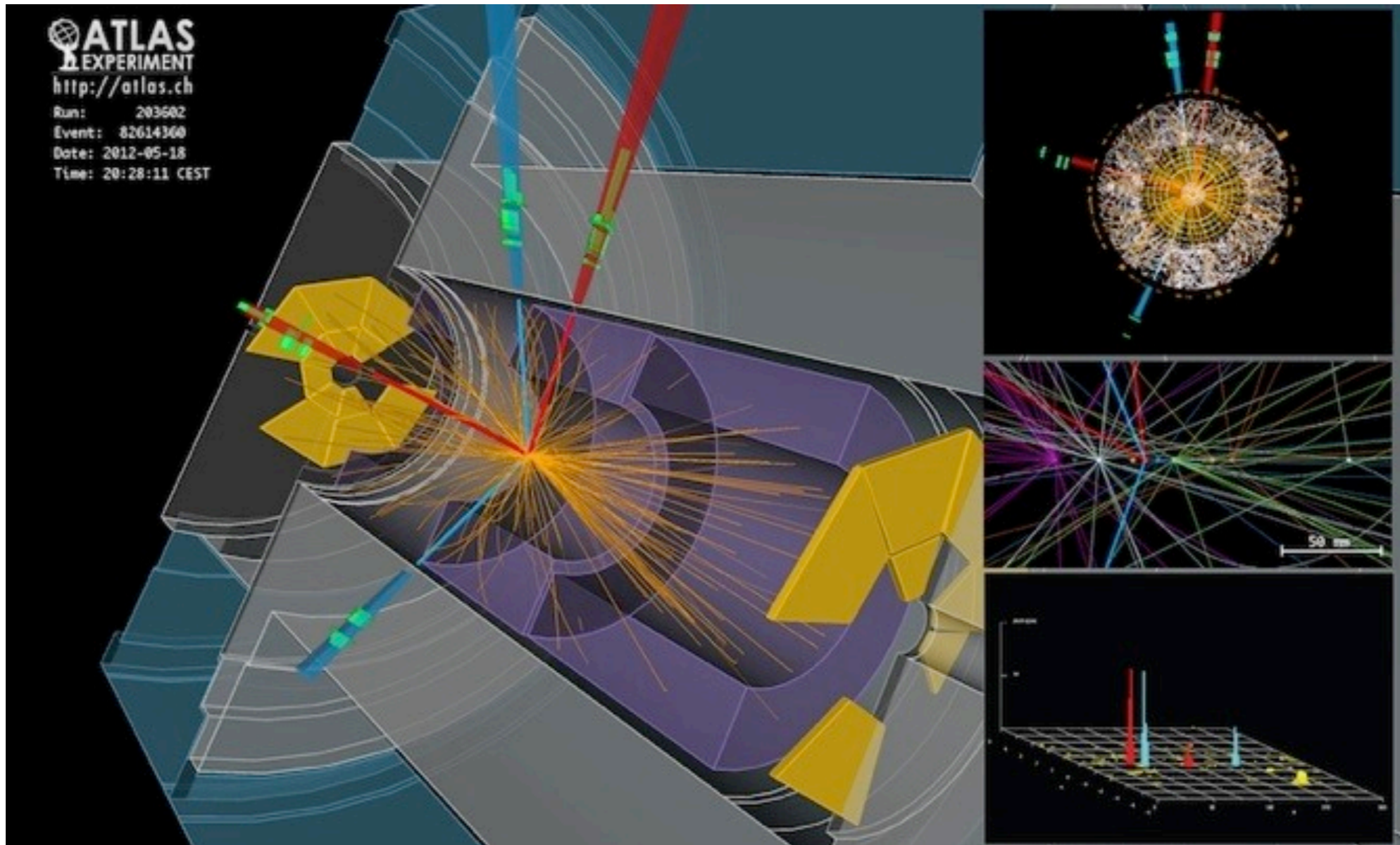


Teilchenphysik mit höchstenergetischen Beschleunigern (Higgs & Co)



1. Einführung

14.10.2013



Überblick

- Ziel der Vorlesung
- Organisation
- Literaturempfehlungen

- Teilchenphysik - Überblick und offene Fragen

- Experimente und Techniken der Teilchenphysik

Ziel der Vorlesung

- Überblick über
 - hochenergetische Hadronenbeschleuniger
 - Teilchendetektoren an Tevatron & LHC
 - Physik des Standardmodells bei hohen Energien
 - Signaturen neuer Physik jenseits des SM
 - Experimentelle Analysemethoden
 - Ausblick auf geplante Experimente
- Fortsetzung im Sommersemester:
 - Präzisionsmessungen an Lepton-Collidern
 - Astroteilchen-Physik
 - kosmische Strahlung
 - Dunkle Materie, Dunkle Energie
 - Neutrinos

Allgemein:
Schwerpunkt auf aktuelle
Ergebnisse, allgemeiner
Überblick über das Feld mit
vor allem experimenteller
Perspektive

Organisation

- Zeit und Ort:
 - Montags, 14:00 - 15:30
 - Physik II, Seminarraum PH 127
- Vorkenntnisse:
 - Einführungsvorlesung Kern-, Teilchen-, Astrophysik
- Übungen: keine
- Schein, Modulprüfung: Bei Bedarf
- Skript/Folien: Einige Tage nach der Vorlesung verfügbar unter www.mpp.mpg.de -> Veranstaltungen -> Vorlesungen
- Laborbesichtigungen am MPP: Jederzeit, auf Anfrage



Literatur

Ein neues, aktuelles Buch (incl. Higgs-Entdeckung): Grundlagen und begleitend zur Vorlesung:

Mark Thomson, *Modern Particle Physics*, Cambridge University Press 2013

- **Zusätzlich - Grundlagen:**

- D.H. Perkins, “Introduction to High Energy Physics”, Cambridge University Press 2000
- F.Halzen, D.Martin, “Quarks & Leptons”, Wiley&Sons
- Ch. Berger, “Teilchenphysik”, Springer
- R.K.Ellis, W.J.Stirling, B.R. Webber, “QCD and Collider Physics”, Cambridge Univ. Press

- **Zusätzlich - begleitend und weiterführend:**

- M.Peskin, “Beyond the Standard Model”, hep-ph/9705479
- J.Ellis, “Beyond the Standard Model for Hillwalkers”, hep-ph/9812235
- M.Herrero, “The Standard Model”, hep-ph/9812242
- Particle Data Group: pdg.lbl.gov (-> “reviews, tables and plots”, -> “exp. Methods”...)
- SPIRES HEP library: <http://slac.stanford.edu/spires/>
- www.cern.ch, www.desy.de, www.fnal.gov, www.slac.stanford.edu, www.kek.jp



Zeitplan

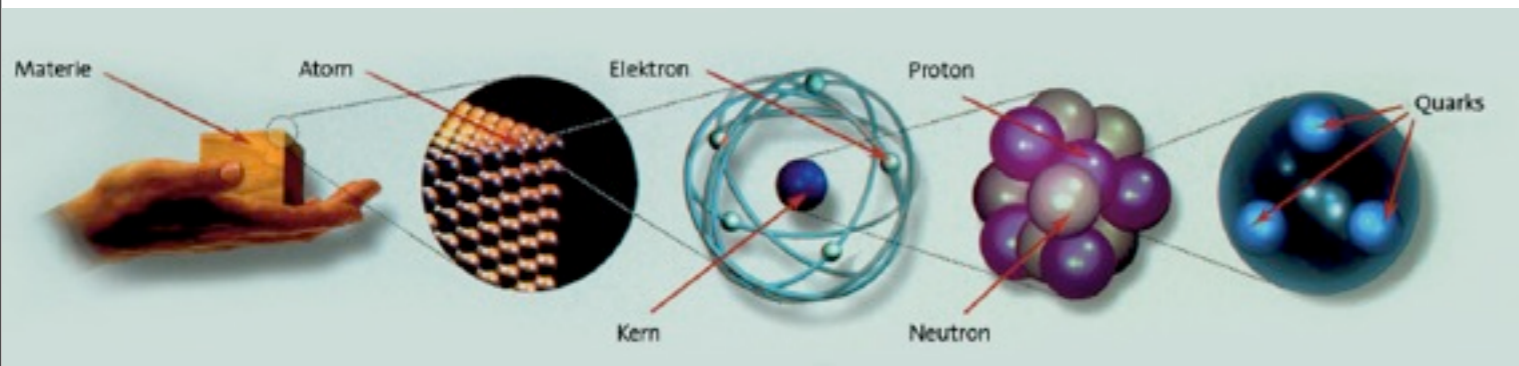
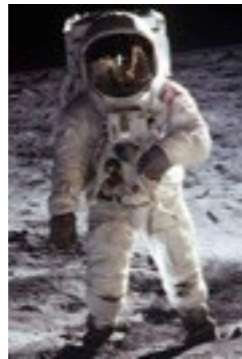
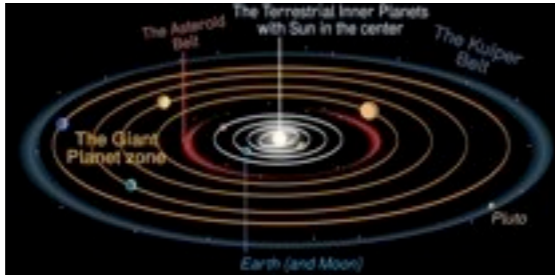
1.	Einführung; Stand der Teilchenphysik	14.10.
2.	Hadronenbeschleuniger: Tevatron und LHC	21.10.
3.	Standard-Modell Tests	28.10.
4.	Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (I)	04.11.
5.	Trigger, Datennahme und Computing	11.11.
6.	Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (II)	18.11.
7.	Monte Carlo Generatoren und Detektor Simulation	25.11.
8.	QCD, Jets, Strukturfunktionen	02.12.
9.	Top Quark	09.12.
10.	Higgs-Physik (I)	16.12.
	----- fällt vermutlich aus -----	23.12.
	-----Weihnachten -----	
11.	Higgs-Physik (II)	13.01.
	----- fällt vermutlich aus -----	20.01.
12.	SUSY, Physik jenseits des Standard-Modells	27.01.
13.	Andere Modelle jenseits des SM, Ausblick	03.02.



Teilchenphysik - Überblick, offene Fragen



Vom Größten zum Kleinsten

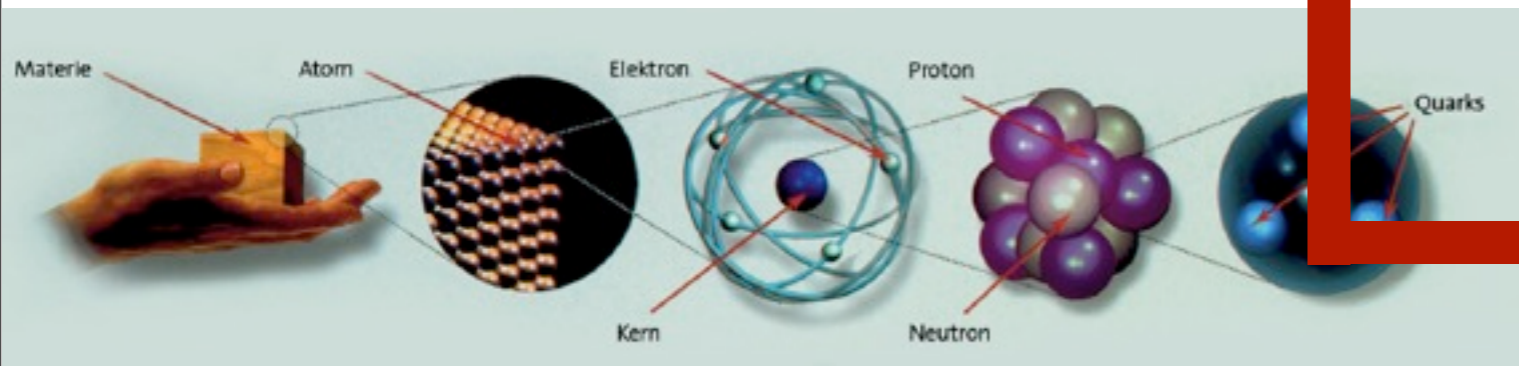
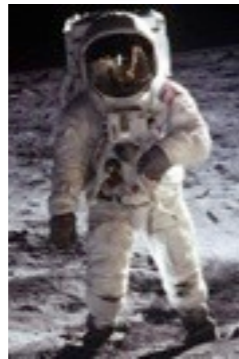
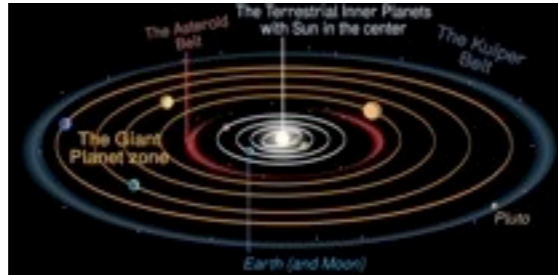


	Größe	Masse
Universum	10^{26} m	10^{52} kg
Galaxie	10^{21} m	10^{41} kg
Sonnensystem	10^{13} m	10^{30} kg
Erde	10^7 m	10^{24} kg
Mensch	10^0 m	10^2 kg
Atom	10^{-10} m	10^{-26} kg
Atomkern	10^{-14} m	10^{-26} kg
Nukleon	10^{-15} m	10^{-27} kg
Quarks, Lepton	$<10^{-18}$ m	10^{-30} kg

“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen



Vom Größten zum Kleinsten



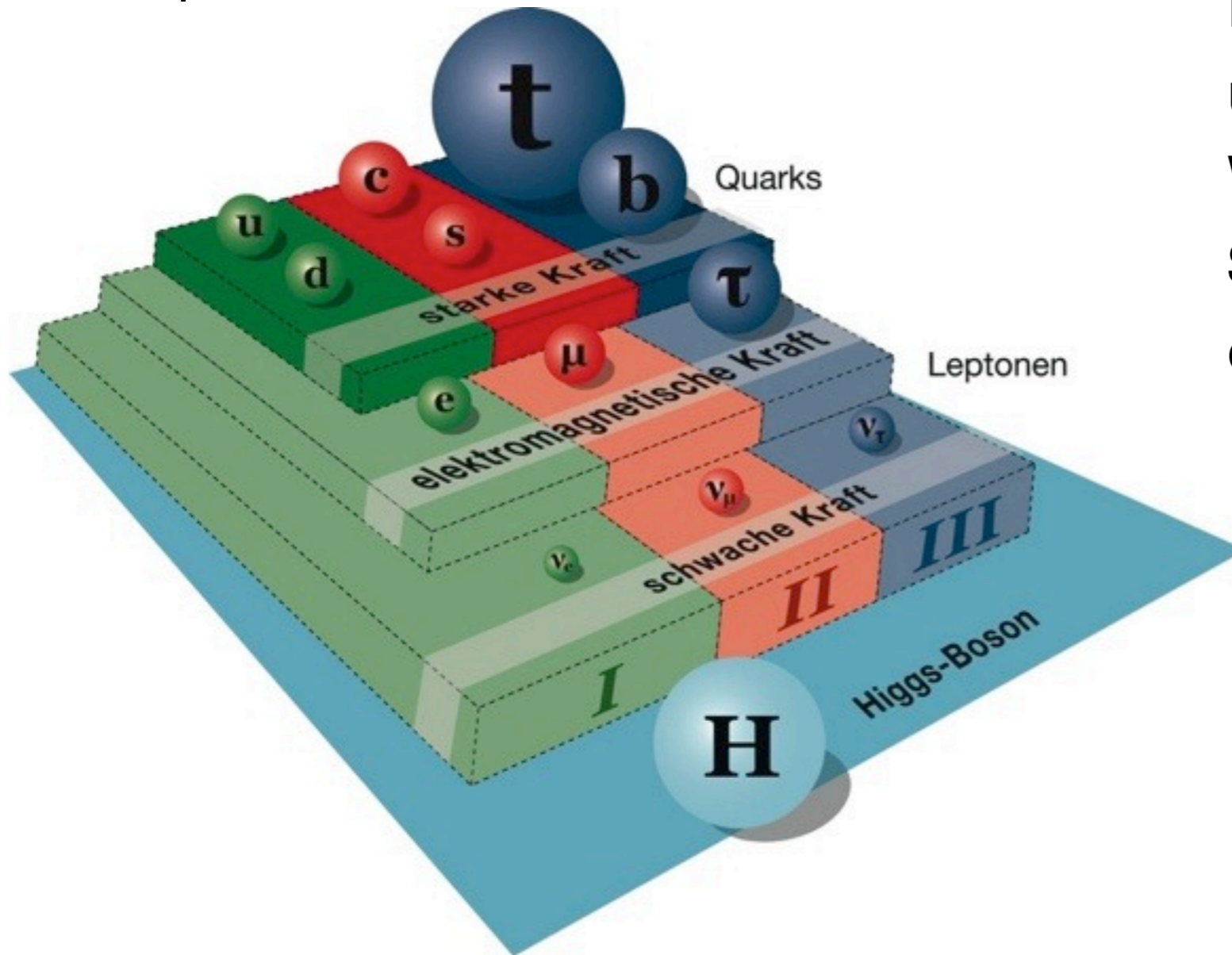
	Größe	Masse
Universum	10^{26} m	10^{52} kg
Galaxie	10^{21} m	10^{41} kg
Sonnensystem	10^{13} m	10^{30} kg
Erde	10^7 m	10^{24} kg
Mensch	10^0 m	10^2 kg
Atom	10^{-10} m	10^{-26} kg
Atomkern	10^{-14} m	10^{-26} kg
Nukleon	10^{-15} m	10^{-27} kg
Quarks, Lepton	$<10^{-18}$ m	10^{-30} kg

“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen



Teilchenphysik: Das Standardmodell

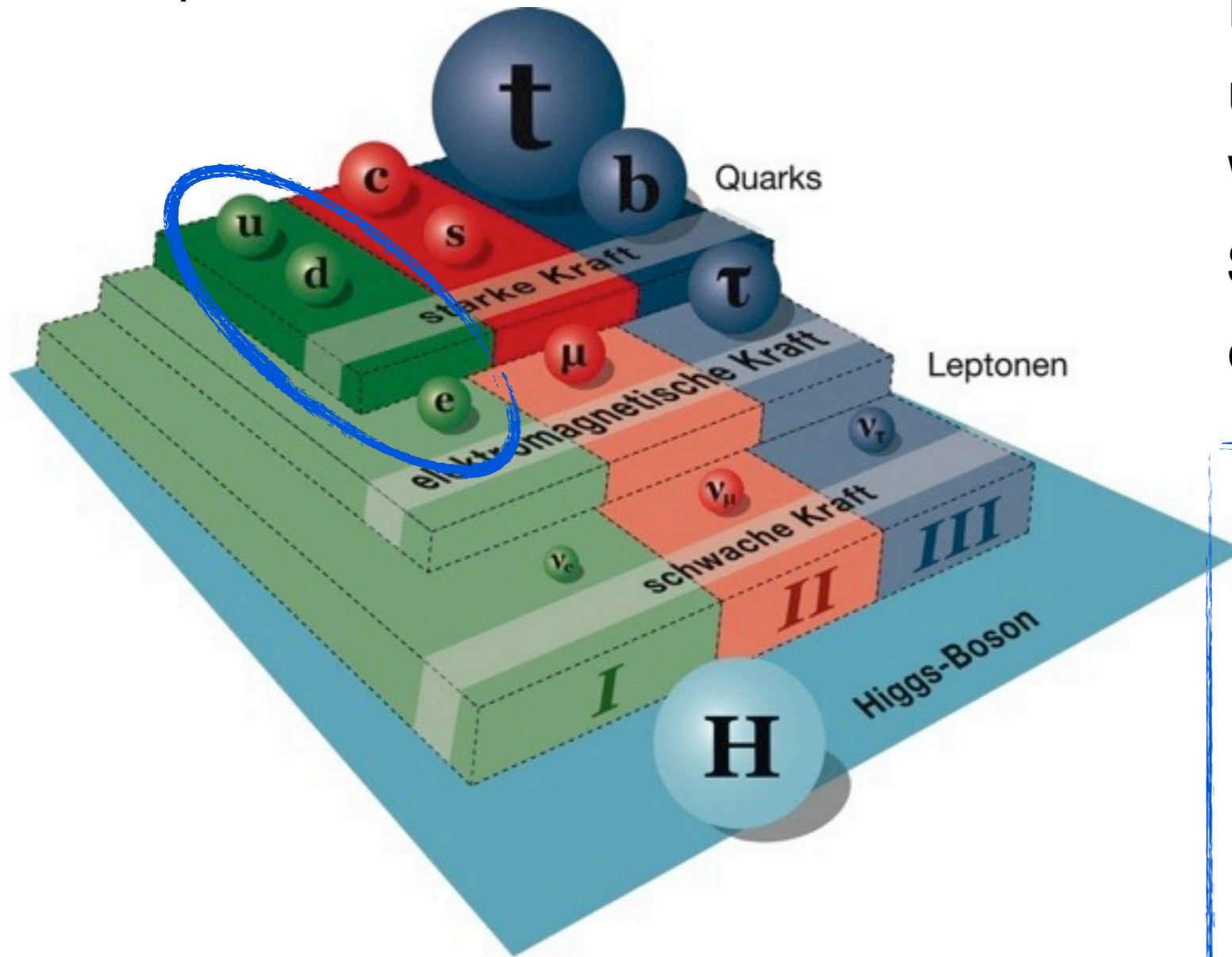
- detaillierte Erkenntnisse über den Aufbau der Materie durch Jahrzehnte von Experimenten und theoretischer Arbeit



Die fundamentalen Bausteine und die Beschreibung ihrer Wechselwirkung bilden das **Standardmodell** der Teilchenphysik

Teilchenphysik: Das Standardmodell

- detaillierte Erkenntnisse über den Aufbau der Materie durch Jahrzehnte von Experimenten und theoretischer Arbeit



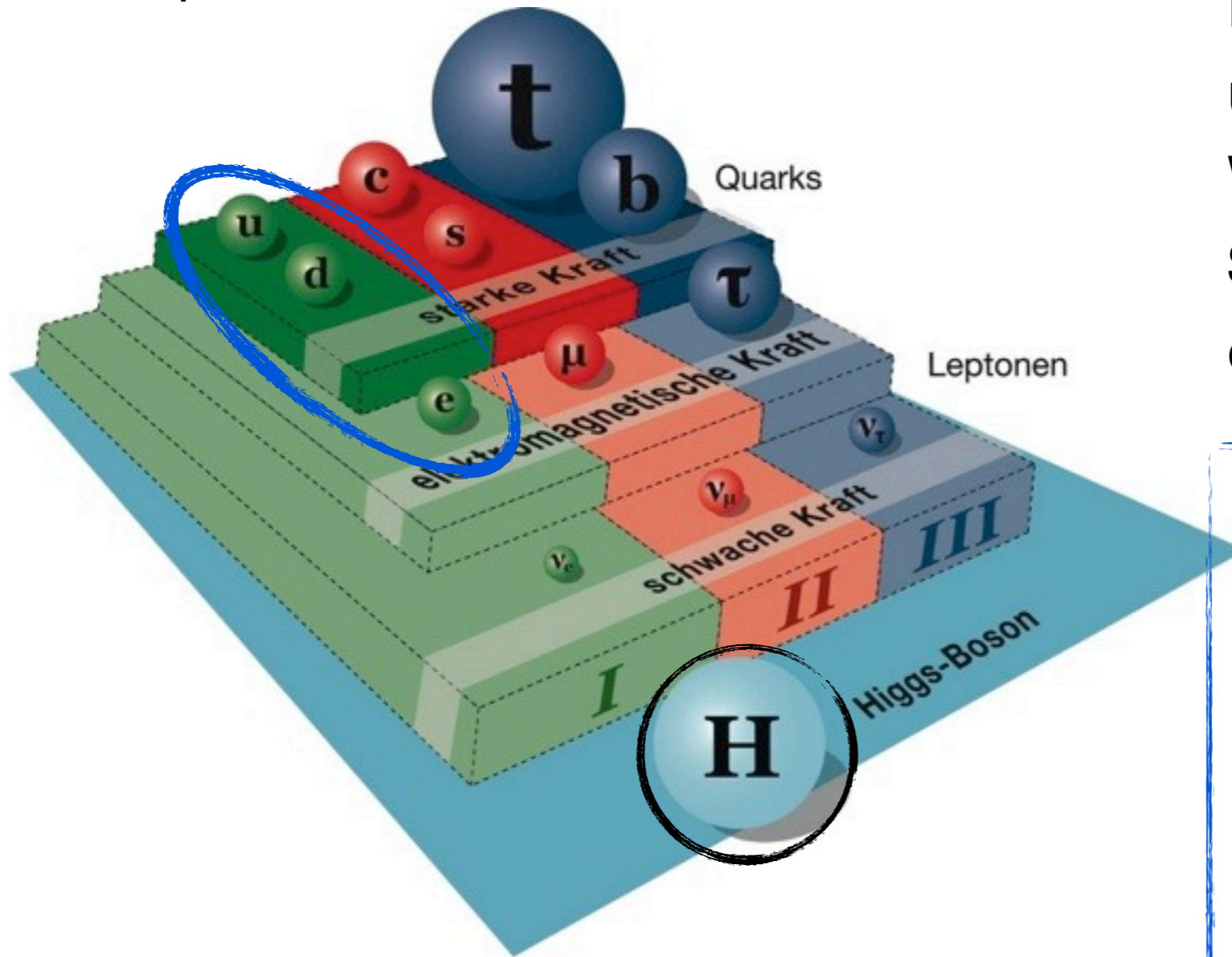
Die fundamentalen Bausteine und die Beschreibung ihrer Wechselwirkung bilden das **Standardmodell** der Teilchenphysik

Der Stoff, aus dem wir sind:

- Protonen und Neutronen bestehen (hauptsächlich) aus *u* und *d* Quarks
- Atome haben eine Hülle aus Elektronen

Teilchenphysik: Das Standardmodell

- detaillierte Erkenntnisse über den Aufbau der Materie durch Jahrzehnte von Experimenten und theoretischer Arbeit



Die fundamentalen Bausteine und die Beschreibung ihrer Wechselwirkung bilden das **Standardmodell** der Teilchenphysik

Der Stoff, aus dem wir sind:

- Protonen und Neutronen bestehen (hauptsächlich) aus u und d Quarks
- Atome haben eine Hülle aus Elektronen

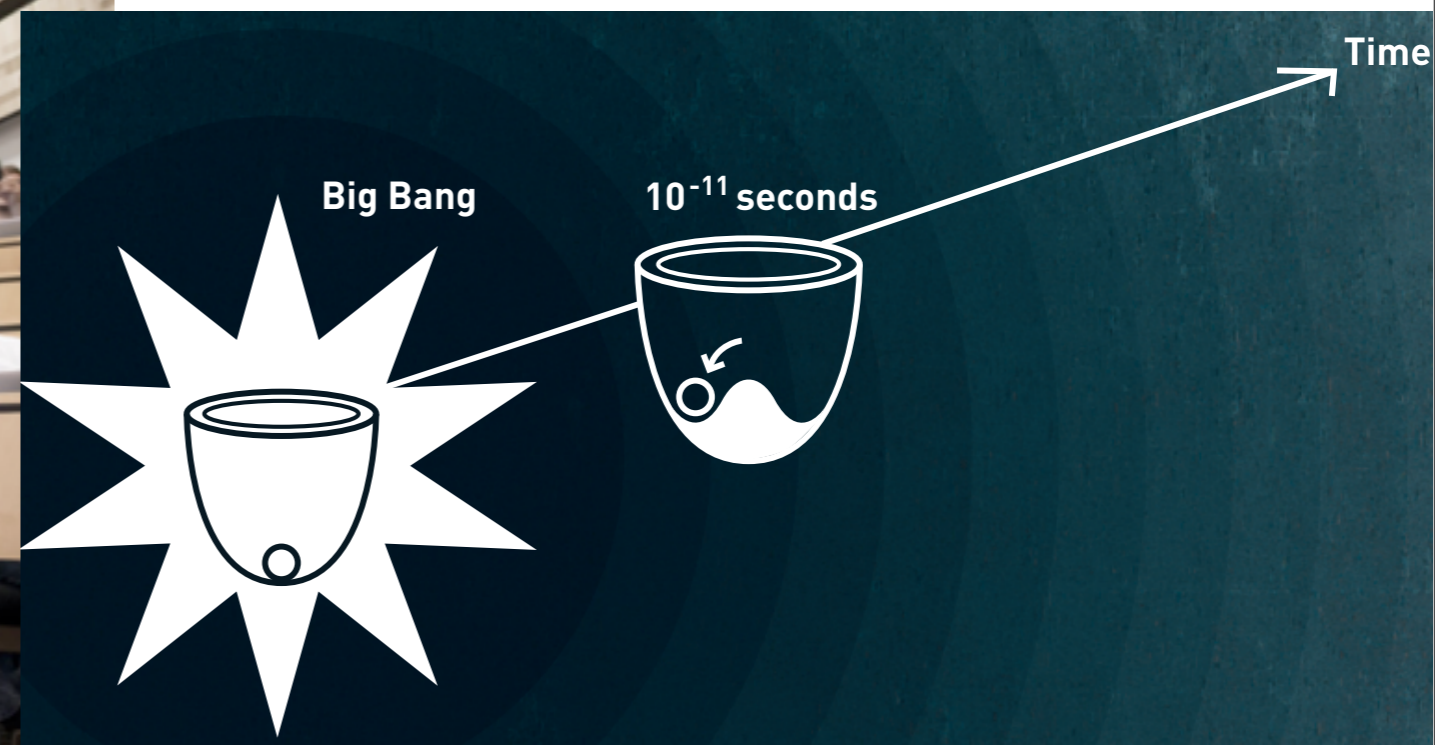
Letztes Jahr entdeckt: Die Erzeugung der Masse durch das Higgs - Feld

Erzeugung der Masse - Ausgezeichnet



The Nobel Prize in Physics 2013 - François Englert, Peter Higgs


"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"



CERN, July 4, 2012

Wechselwirkung der Teilchen

- Vier bekannte Kräfte
 - Gravitation bestimmt unsere Alltagserfahrung, Entwicklung des Universums
 - ▶ Spielt im Mikrokosmos der Teilchenphysik keine Rolle...

Gravitation	elektromag. Kraft	schwache Kraft	starke Kraft
	1 Photon 	3 Bosonen 	8 Gluonen 

koppelt an Masse

koppelt an Ladung

koppelt an schwache
Ladung

koppelt an
Farbe

Relative Stärke bei niedrigen Energien

$\sim 10^{-40}$

1/137

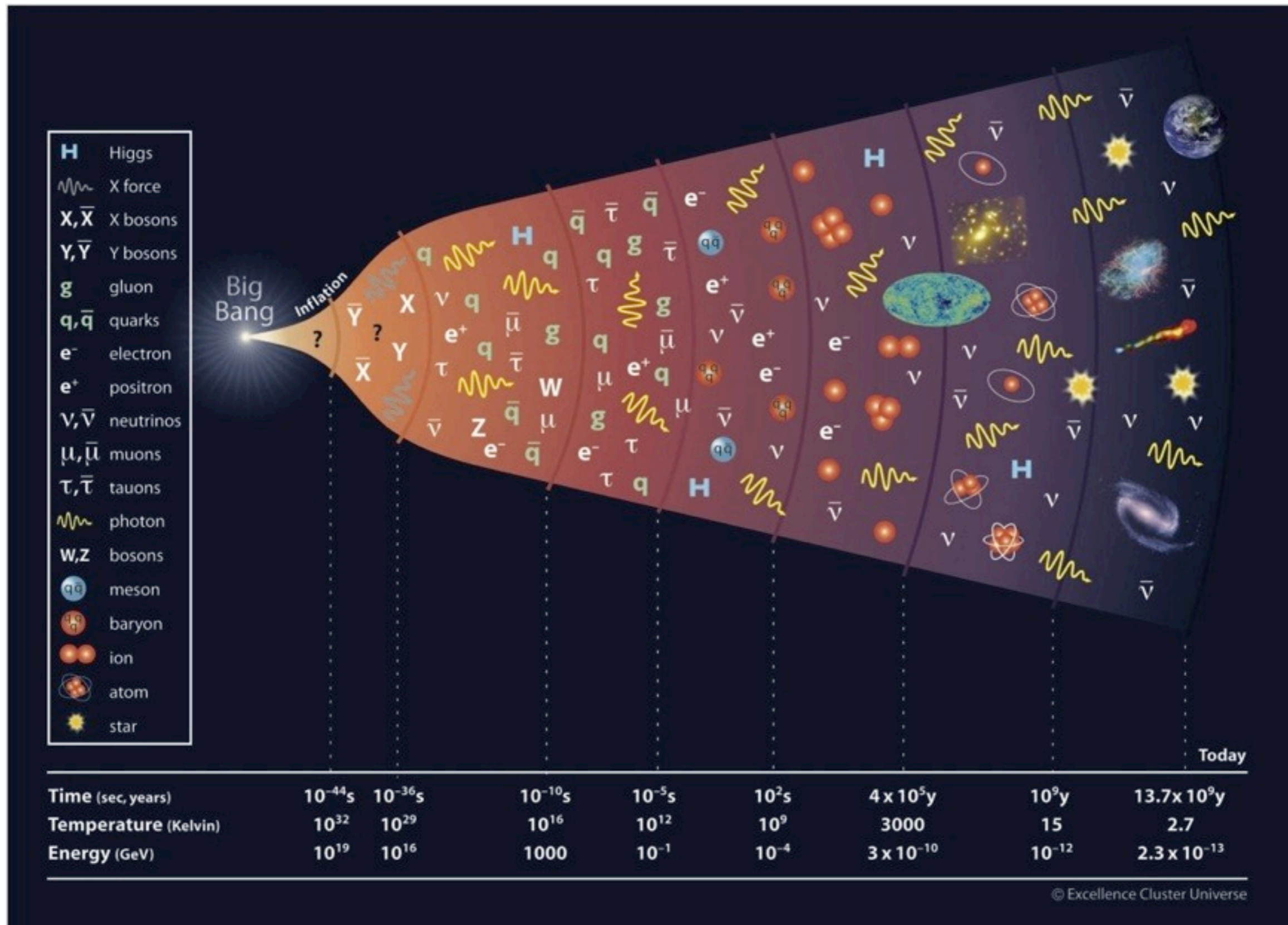
10^{-13}

~ 1

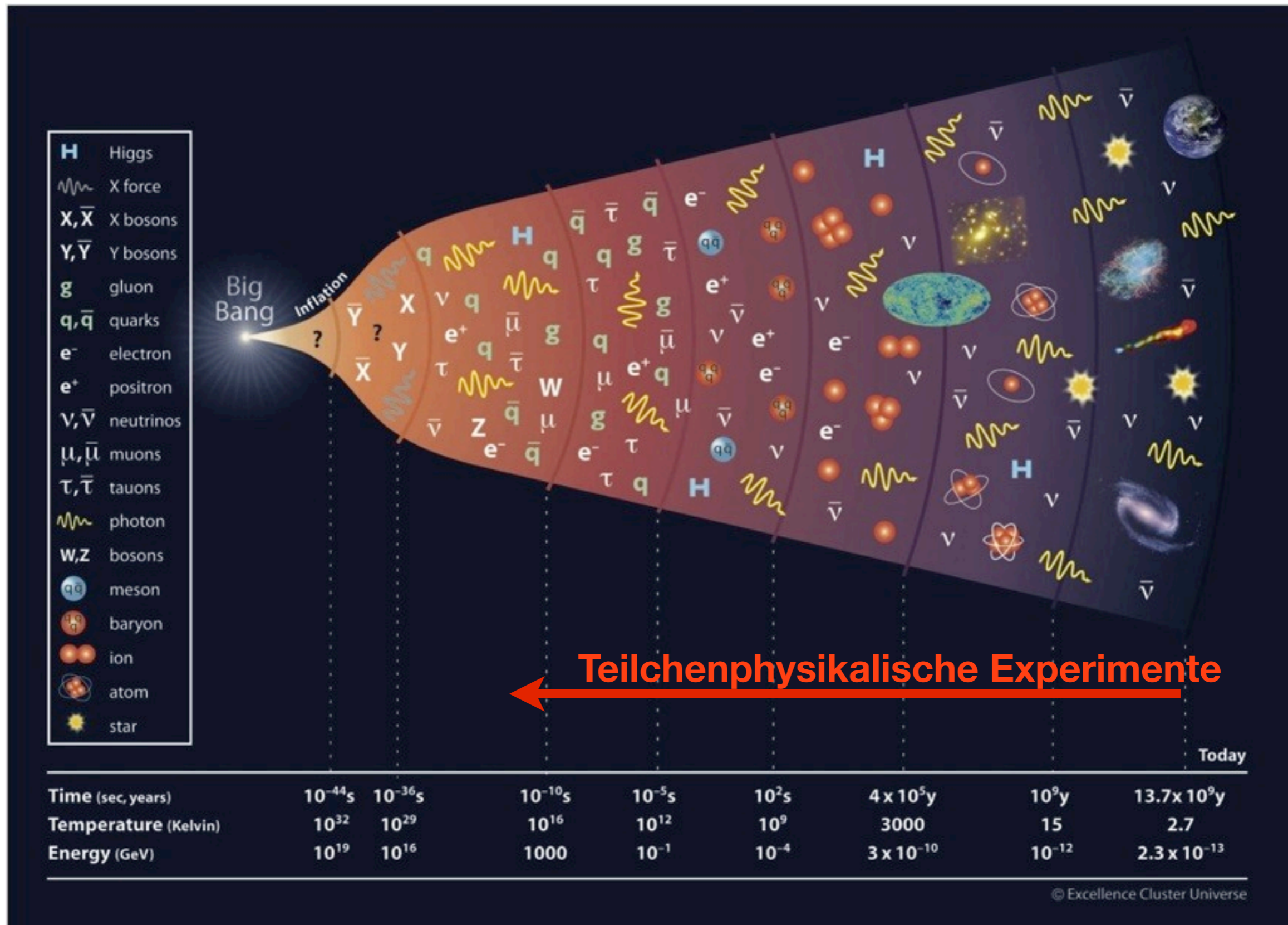
bedingt durch hohe Masse von W, Z:

W: ~ 80 GeV , Z: ~ 91 GeV

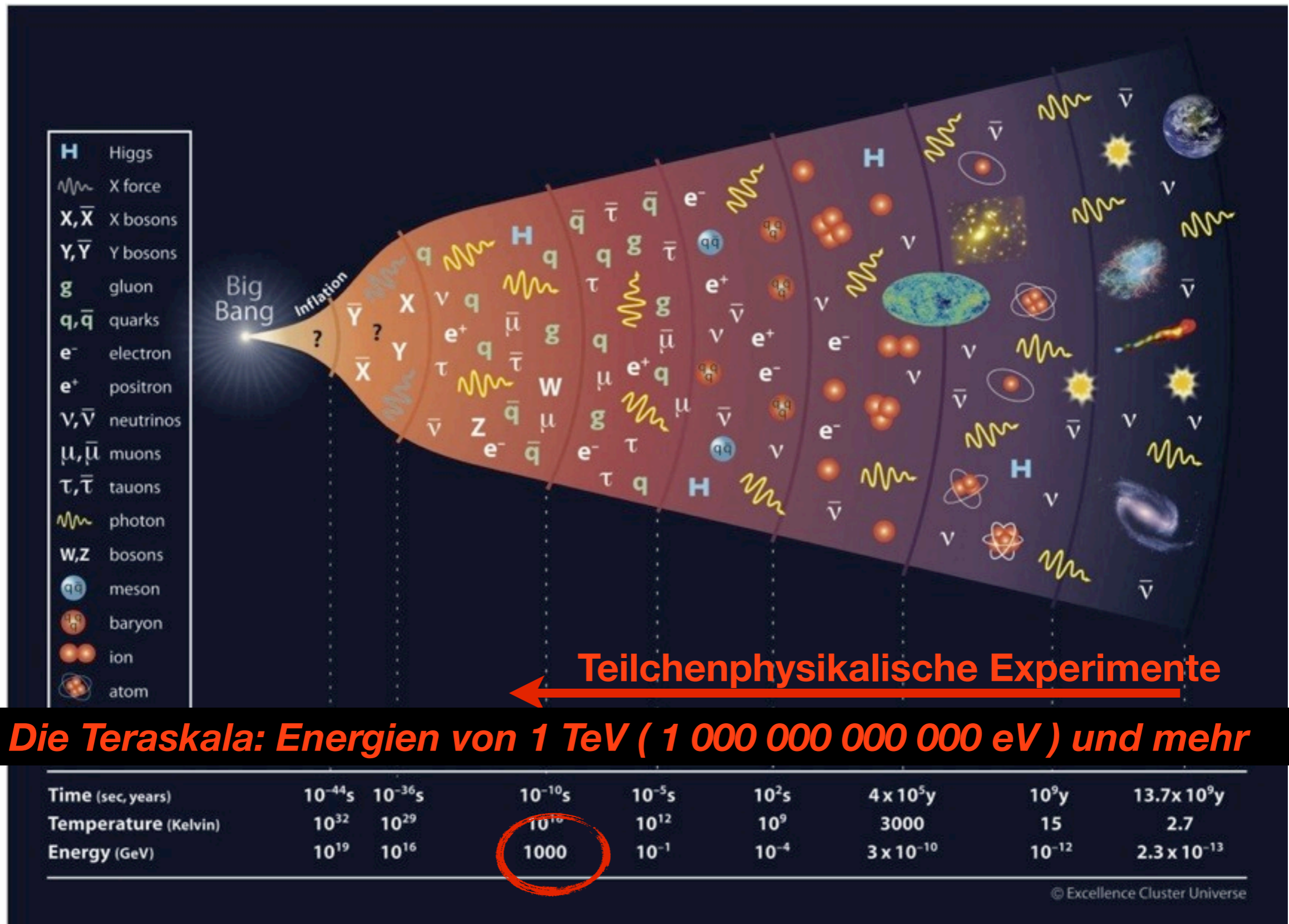
Das Universum verstehen...



Das Universum verstehen...

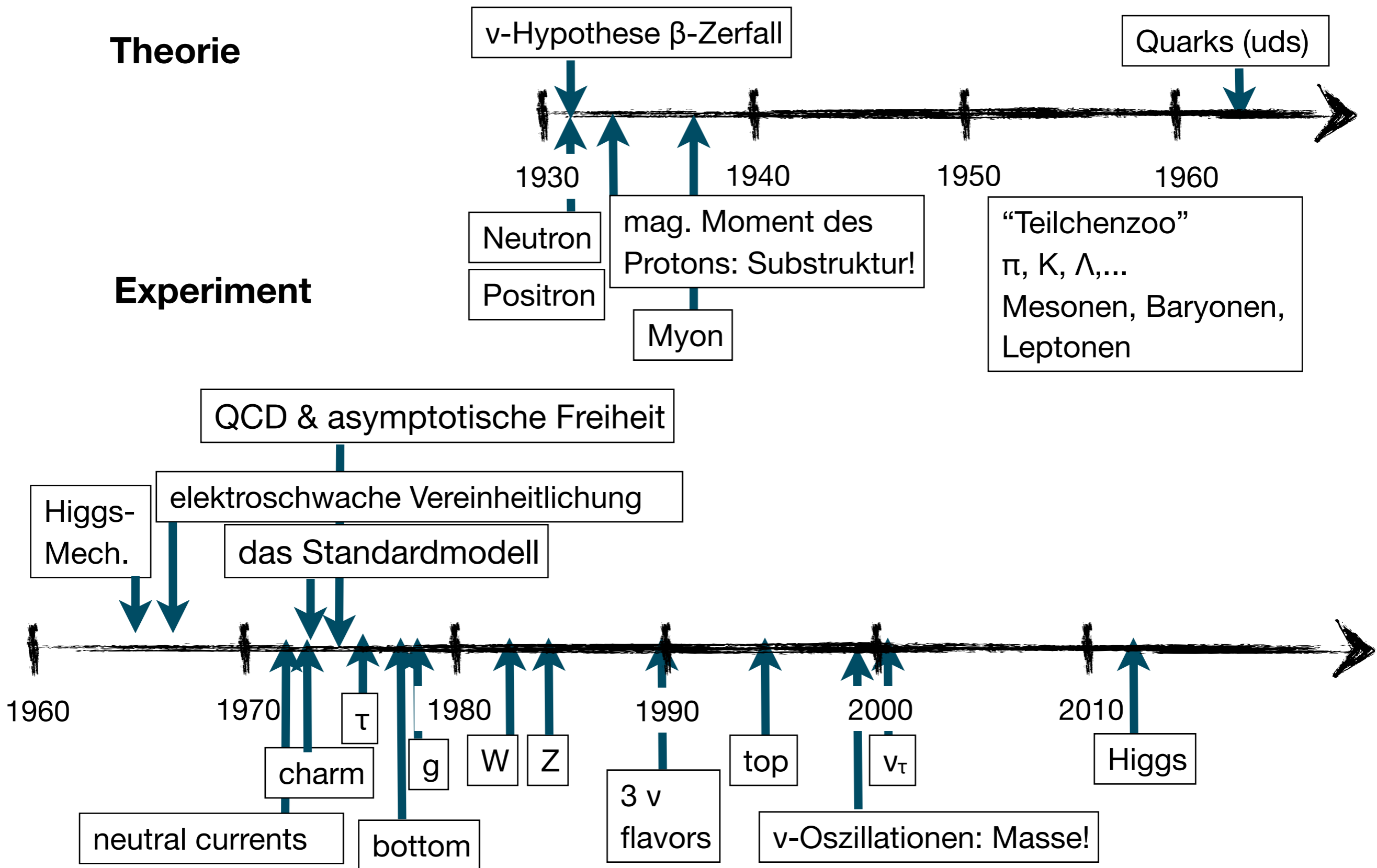


Das Universum verstehen...



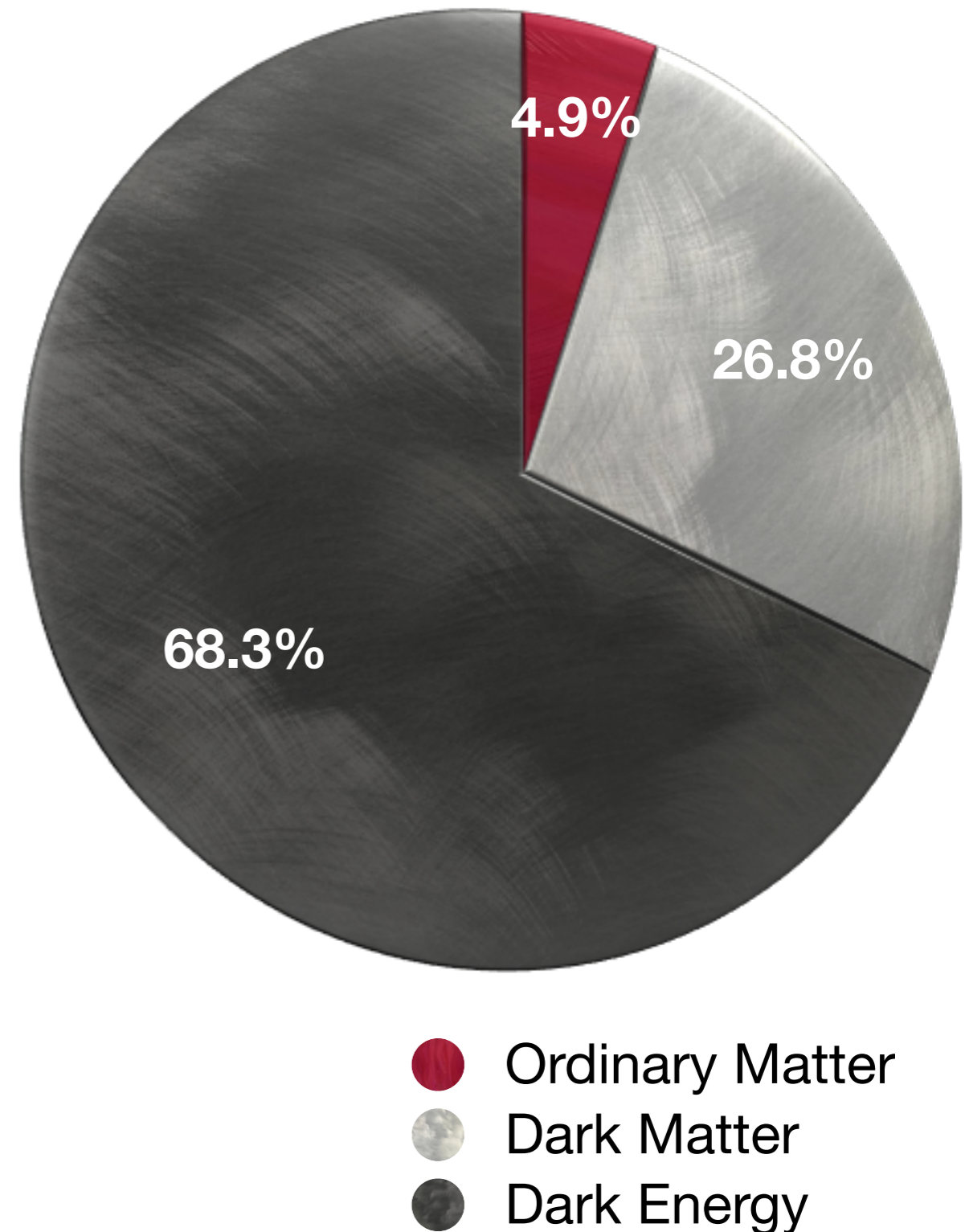
Die Teraskala: Energien von 1 TeV (1 000 000 000 000 eV) und mehr

Kurze Geschichte der Teilchenphysik



Offene Fragen: Die Energiebilanz des Universums

- Aus Rotationskurven schon lange bekannt: Galaxien enthalten viel mehr Masse als die sichtbaren Sterne
- In den letzten gut 10 Jahren hat sich das Verständnis grundlegend verbessert: Wir wissen, dass nur etwa 5% des Universums Teilchen des Standard-Modells sind
 - 1/4: Dunkle Materie - Ein neues Teilchen? Könnte am LHC erzeugt werden!
 - 3/4: Dunkle Energie - Noch ohne Erklärung!



Beschleunigte Ausdehnung des Universums - Dunkle Energie

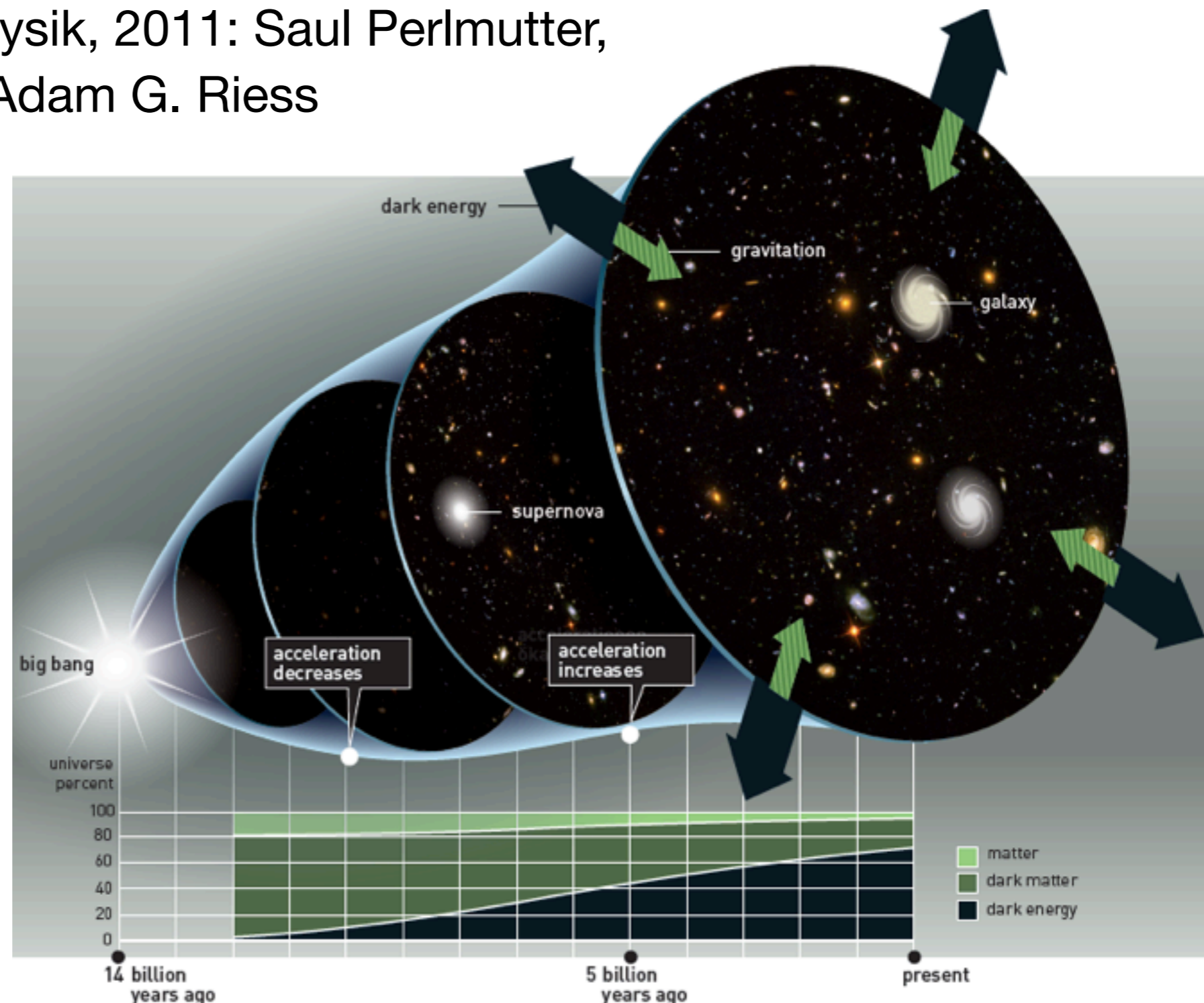


Nobel-Preis für Physik, 2011: Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

- Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung des Universums, Entdeckung der Dunklen Energie:

Beobachtung spezieller, weit entfernter Supernova-Explosionen

Mehr im Sommersemester und unter <http://www.nobelprize.org/>



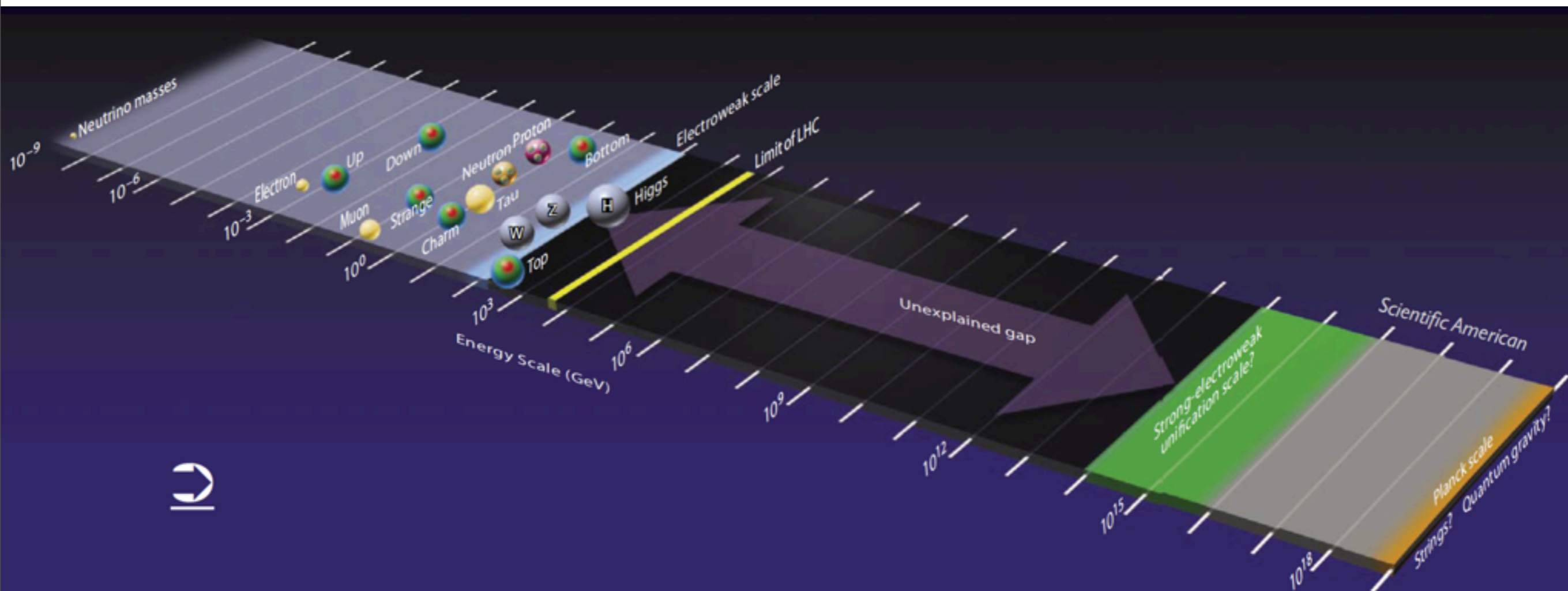
"The Nobel Prize in Physics 2011 - Popular Information". Nobelprize.org. 12 Oct 2011

Fundamental Questions: Particle Masses

- How are the particle masses generated?

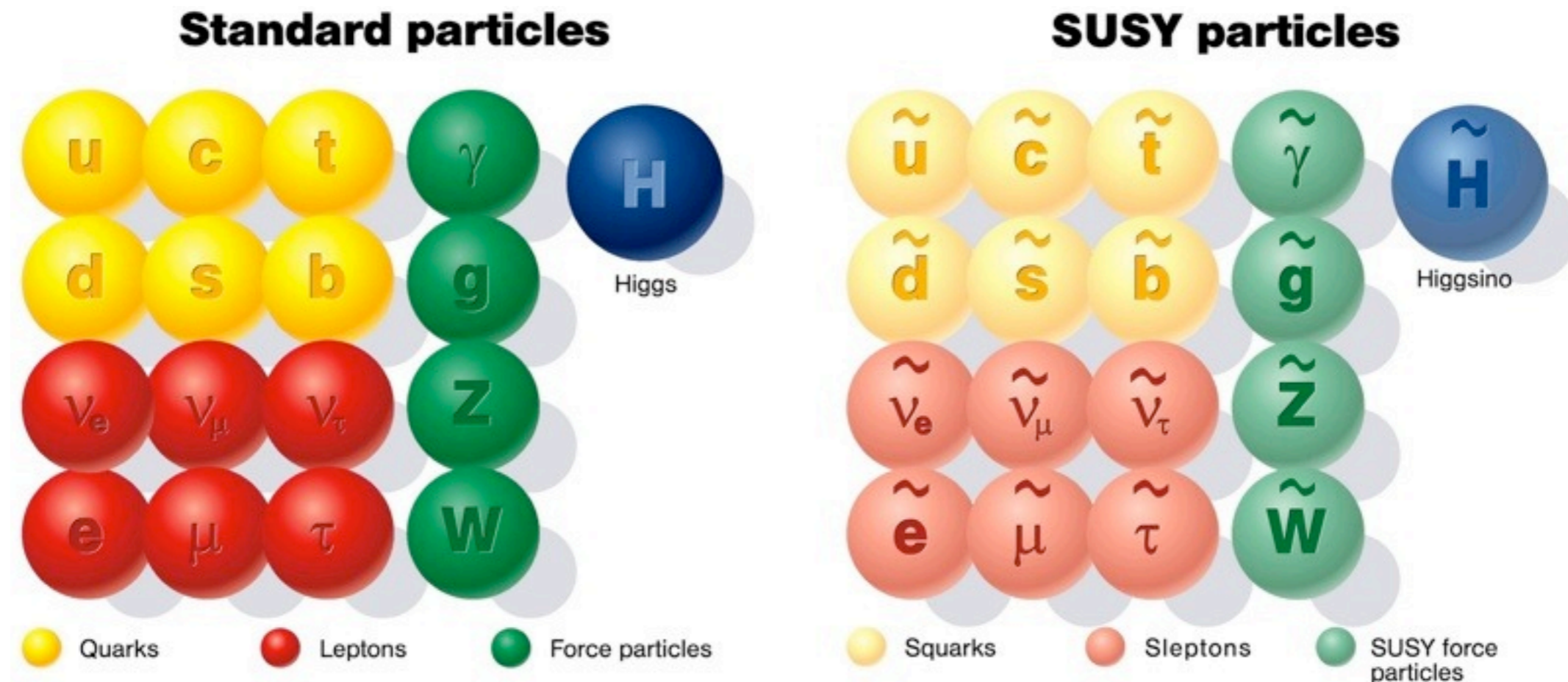
In the Standard Model: The Higgs mechanism

- But: Why are particle masses so different, and why are particles so light?
- Two very different energy scales: The electroweak scale, and the scale of gravity: “Hierarchy Problem”



Ideas for Solutions

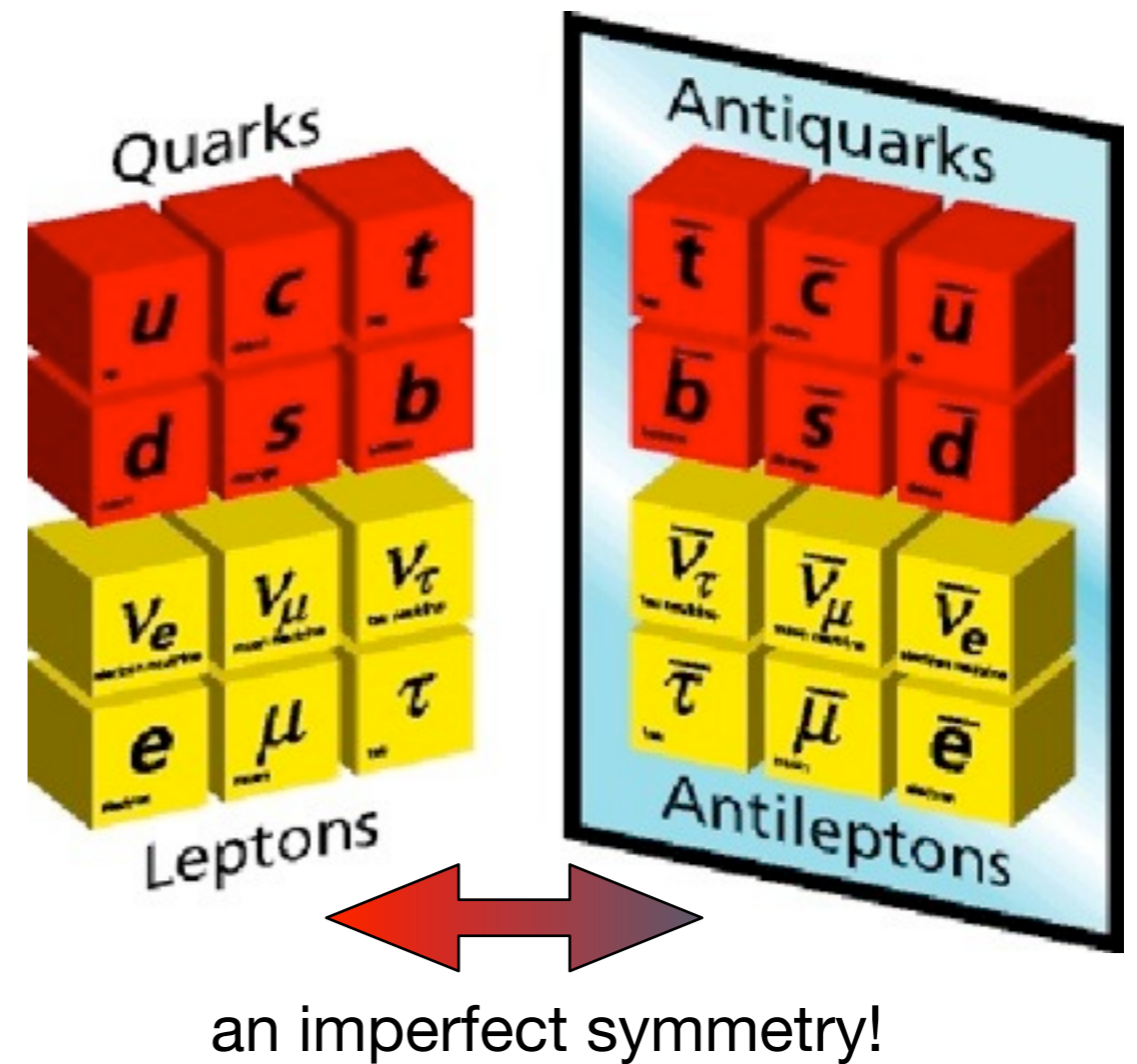
- New symmetries and new particles at higher energies:
Protection for the SM particles by cancelations in higher order loop contributions



- The most popular scenario: Supersymmetry - A rich phenomenology to discover - and provides dark matter candidate!
- Many other possibilities: Large extra dimensions particularly attractive

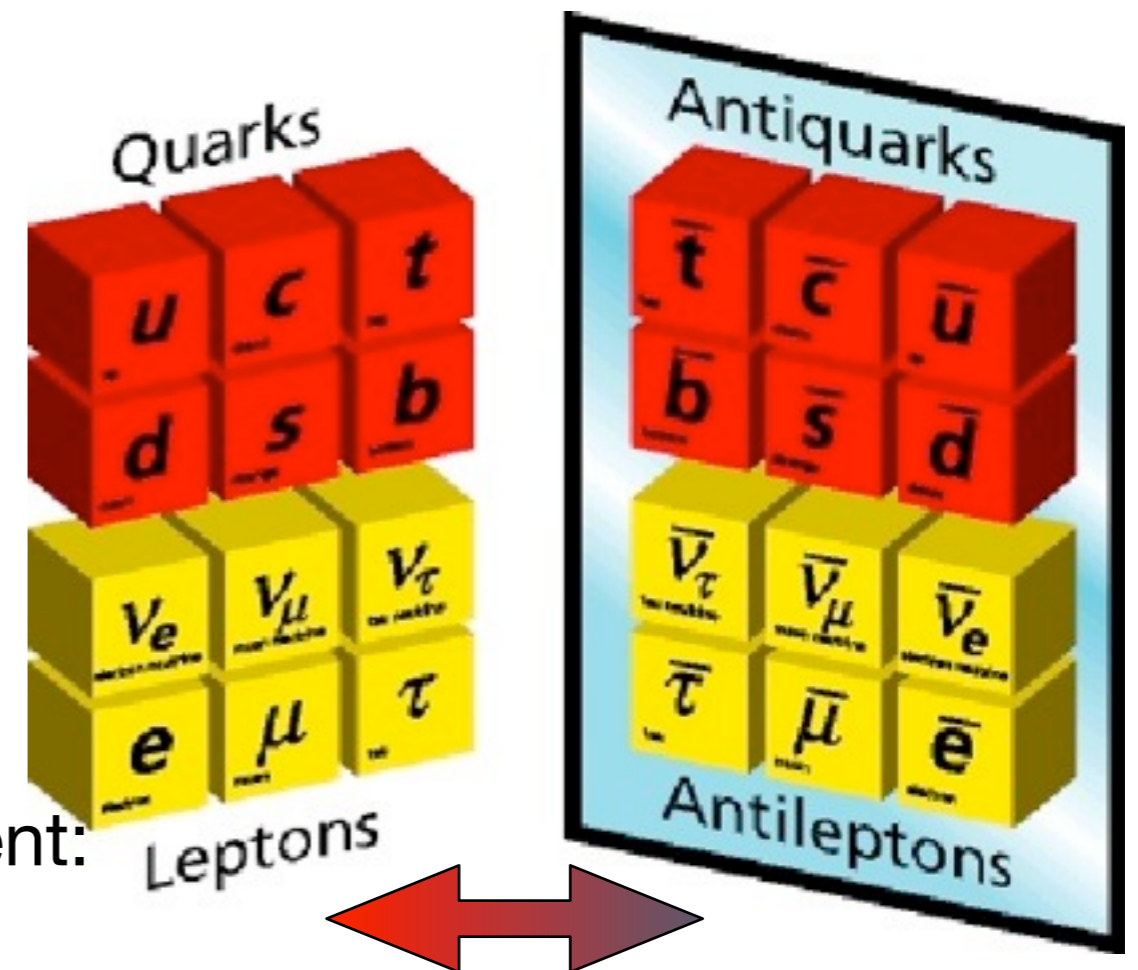
Fundamental Questions: Matter Dominance

- Today, the whole Universe consists of Matter:
What happened to the anti-matter that was created in the Big Bang?
- A slight preference (on the 10^{-9} level) for matter over anti-matter is needed to explain cosmological observations
 - CP violation can provide such an asymmetry...



Fundamental Questions: Matter Dominance

- Today, the whole Universe consists of Matter:
What happened to the anti-matter that was created in the Big Bang?
- A slight preference (on the 10^{-9} level) for matter over anti-matter is needed to explain cosmological observations
 - CP violation can provide such an asymmetry...
- ... but the SM effect is by far not sufficient:



New CP violating processes are required at higher energy scales!

Offene Fragen

- Kurze Zusammenfassung:

Wir erwarten Physik jenseits des Standard-Modells, um zumindest auf einige dieser Fragen eine Antwort zu geben.

An die Experimente am LHC haben wir hohe Erwartungen!

... und mit der Entdeckung letztes Jahr wurden wir nicht enttäuscht!

Experimente und Techniken der Teilchenphysik



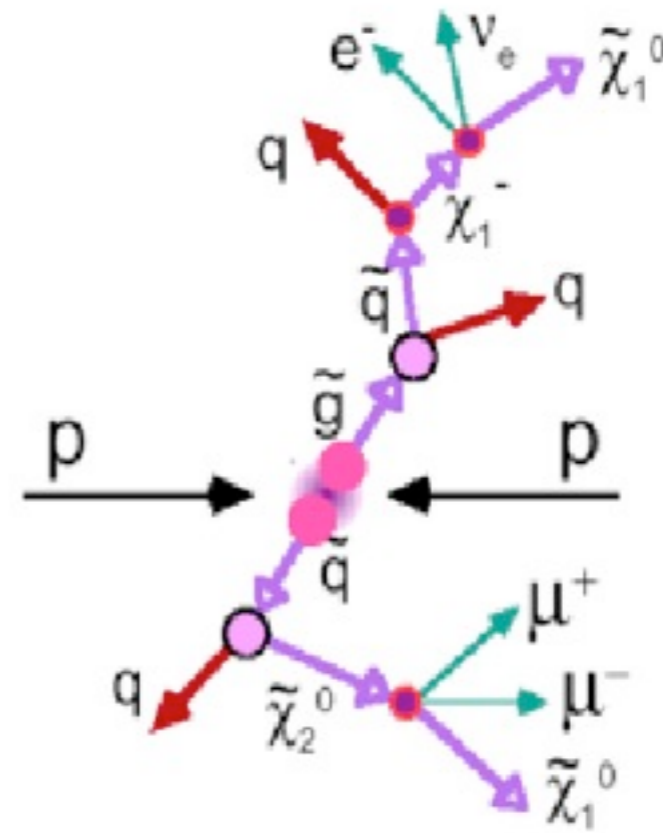
Entdeckungsstrategien in der Teilchenphysik

- Zwei komplementäre Ansätze:

Die direkte Suche bei höchsten Energien:

Erzeugung und Nachweis neuer Teilchen

Schwerpunkt dieser Vorlesungsreihe



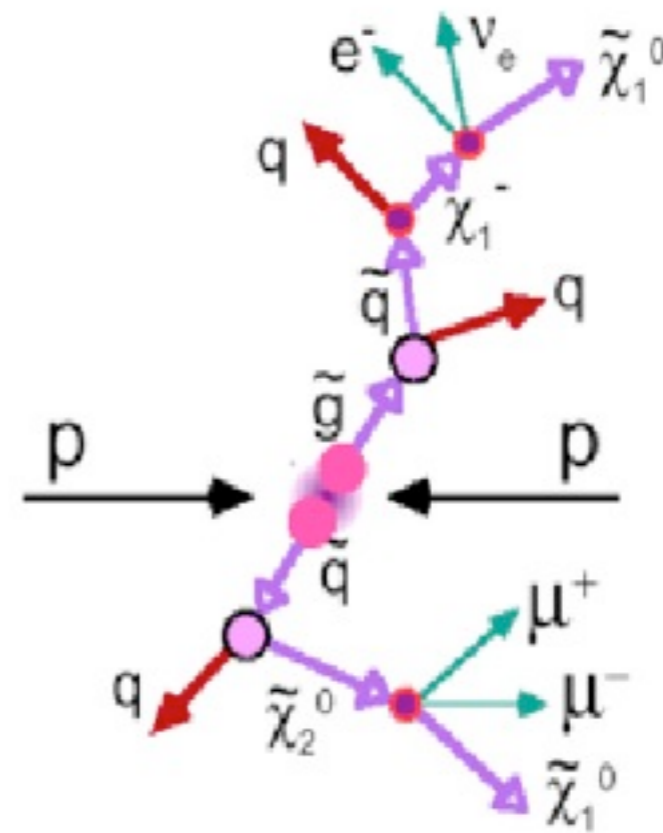
Entdeckungsstrategien in der Teilchenphysik

- Zwei komplementäre Ansätze:

Die direkte Suche bei höchsten Energien:

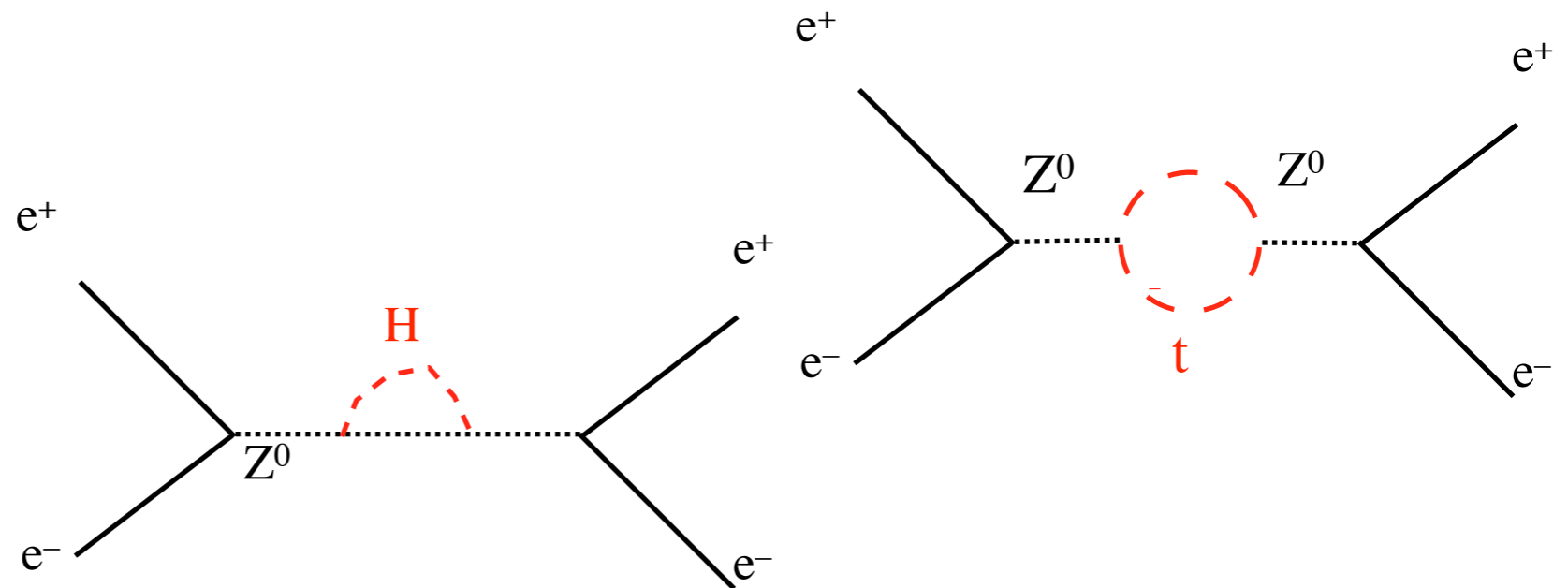
Erzeugung und Nachweis neuer Teilchen

Schwerpunkt dieser Vorlesungsreihe



Präzisionsmessungen:

Indirekte Evidenz für neuer Teilchen in virtuellen Schleifen



Die Werkzeuge: Beschleuniger & Detektoren

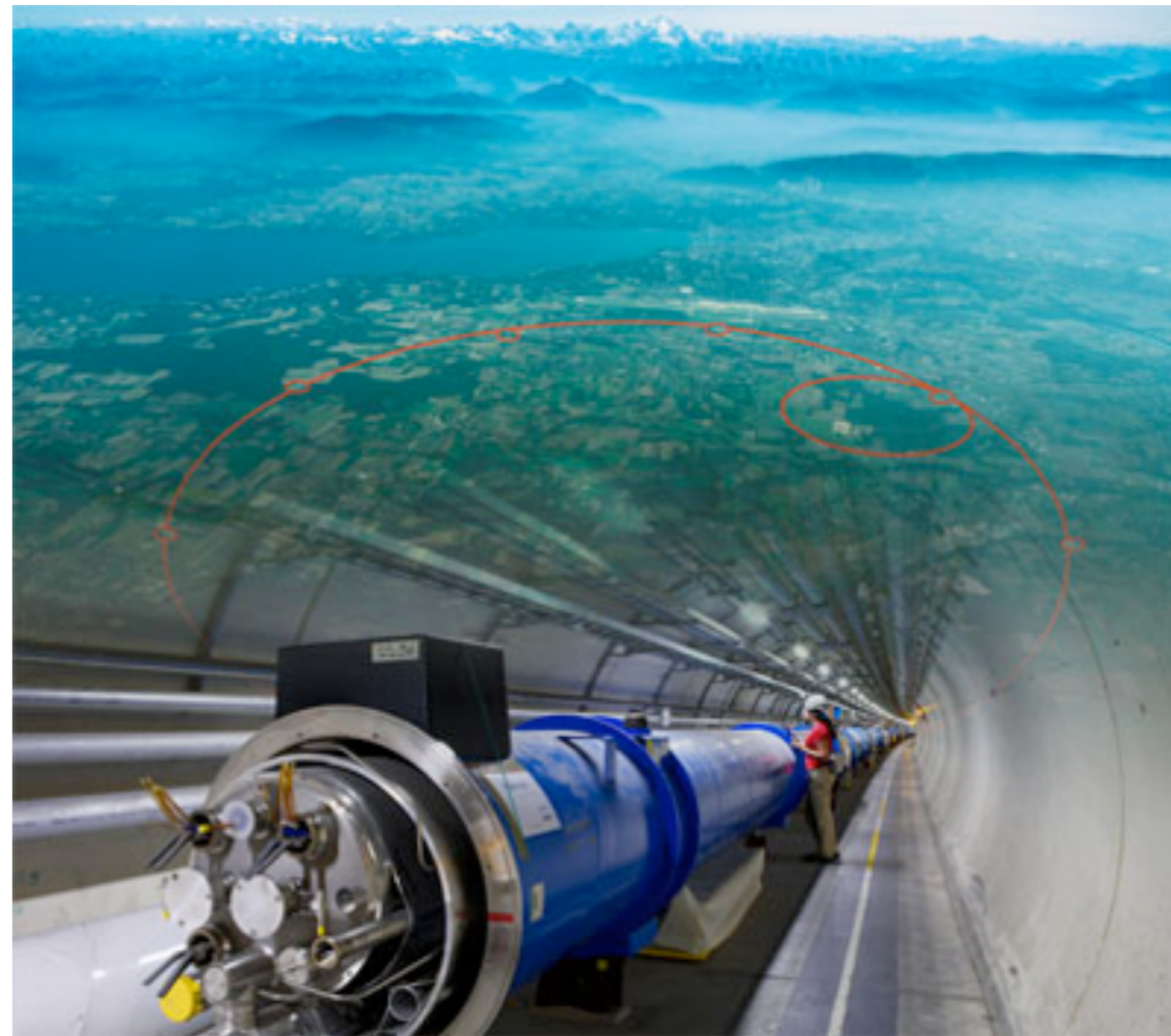
- Um kleinste Teilchen zu untersuchen sind höchste Energien erforderlich:
Energie \Leftrightarrow Abstand (de Broglie - Wellenlänge)
 - Auflösung $d[\text{fm}] \sim 0.197/E [\text{GeV}]$

Beschleuniger für höchste Energien,
Kollisionen im Laborsystem: Collider!

Der größte Beschleuniger:
Large Hadron Collider (LHC),

die “Weltmaschine”:
10 000 beteiligte Wissenschaftler und
Ingenieure aus über 100 Ländern

Aktuell: Shutdown zur Wartung
Ab 2014 (fast) volle Energie:
bis zu 7 TeV auf 7 TeV

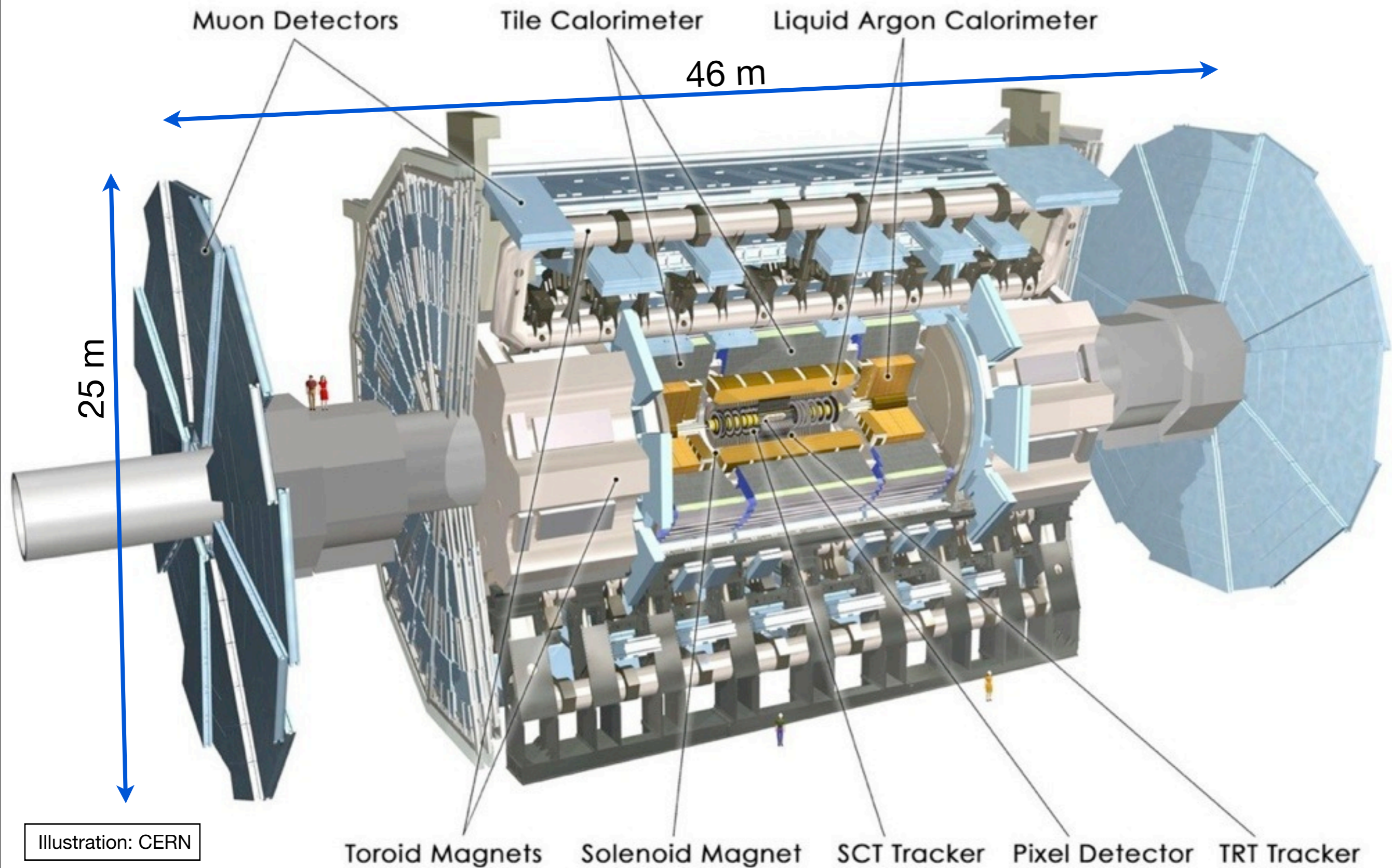


Die wichtigsten Teilchenbeschleuniger

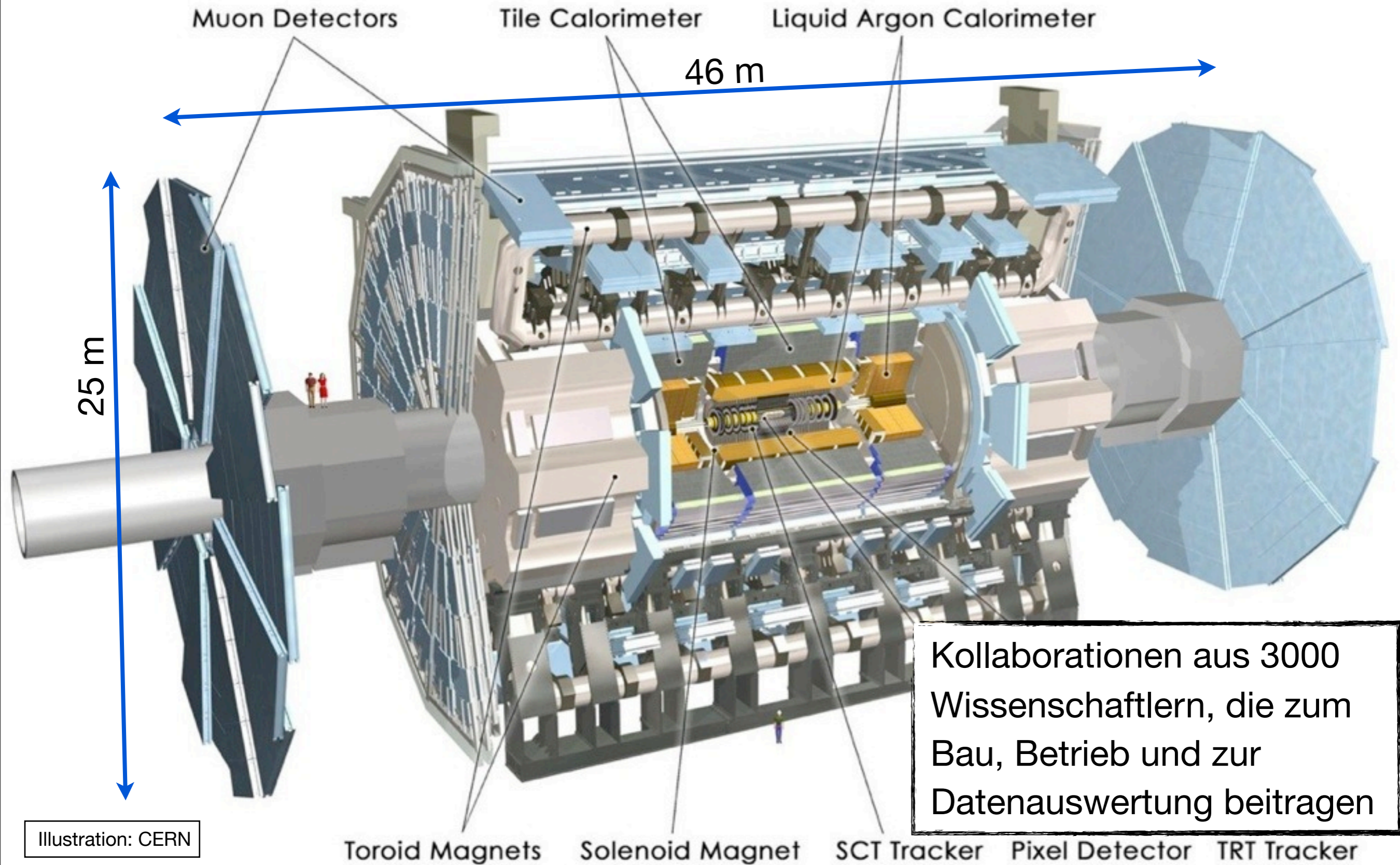
Collider	start – end date	beam type	max. beam energy (GeV)	circumference or length (km)
PETRA (DESY)	1978 - 1986	$e^+ e^-$	23.4	2.304
SLC (SLAC)	1989 – 1999	$e^+ e^-$	50	<i>1.45 + 1.47</i>
LEP (CERN)	1989 – 2000	$e^+ e^-$	104	26.7
ILC / CLIC (?)	?? (> 2025)	$e^+ e^-$	250 / 1500	15+15 / 25+25
KEKB (KEK)	1999 - 2010	$e^+ e^-$	8 x 3.5	3.0
PEP-II (SLAC)	1999 - 2008	$e^+ e^-$	9 x 3.1	2.2
HERA (DESY)	1991 - 2007	$e p$	30 x 920	6.3
Sp \bar{p} S (CERN)	1981 – 1990	$p\bar{p}$	315	6.9
TEVATRON (Fermilab)	1 1987 - 2011	$p\bar{p}$	1000	6.28
LHC (CERN)	2009 -	pp	7000	26.7



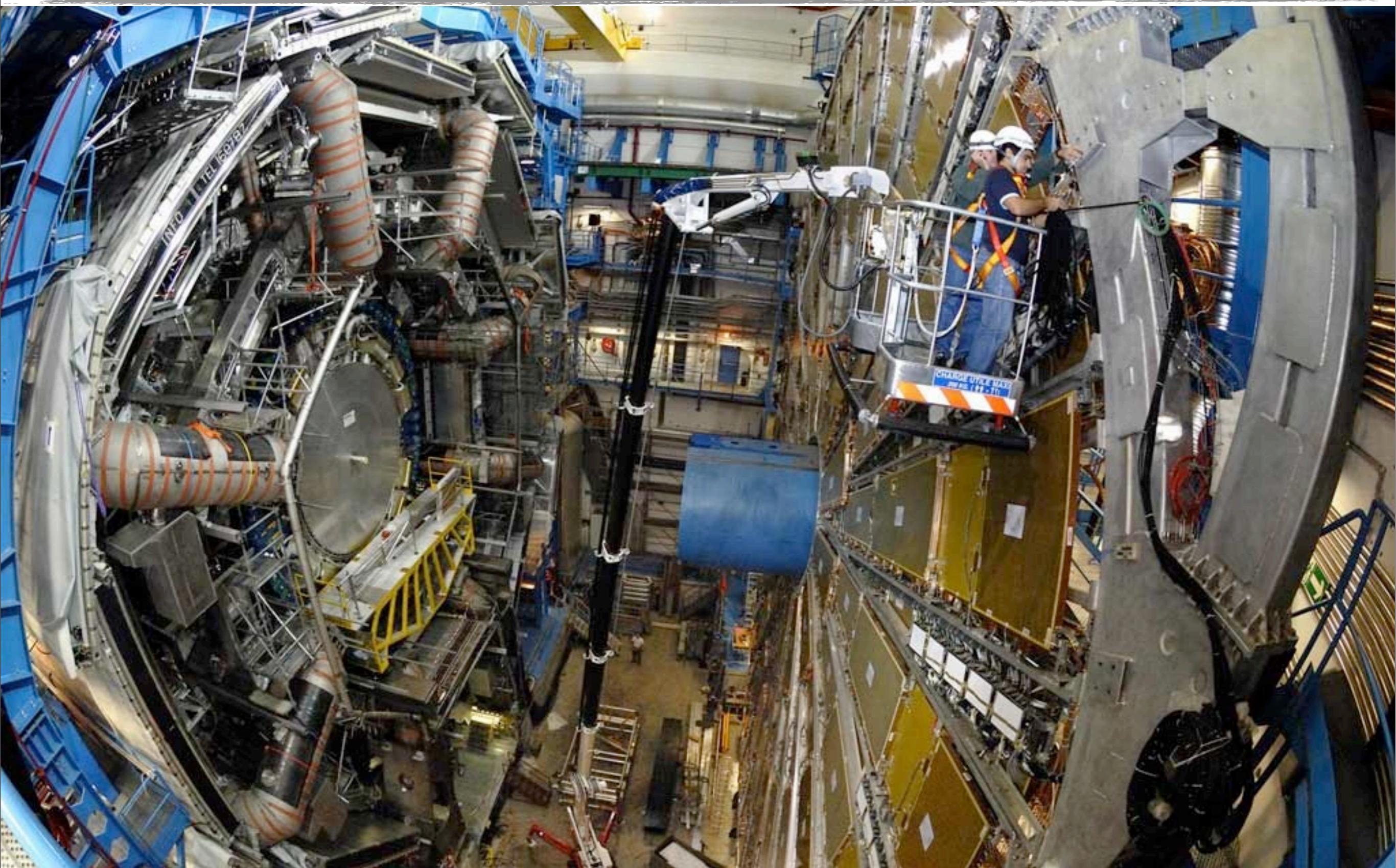
Detektoren / Experimente in der Teilchenphysik



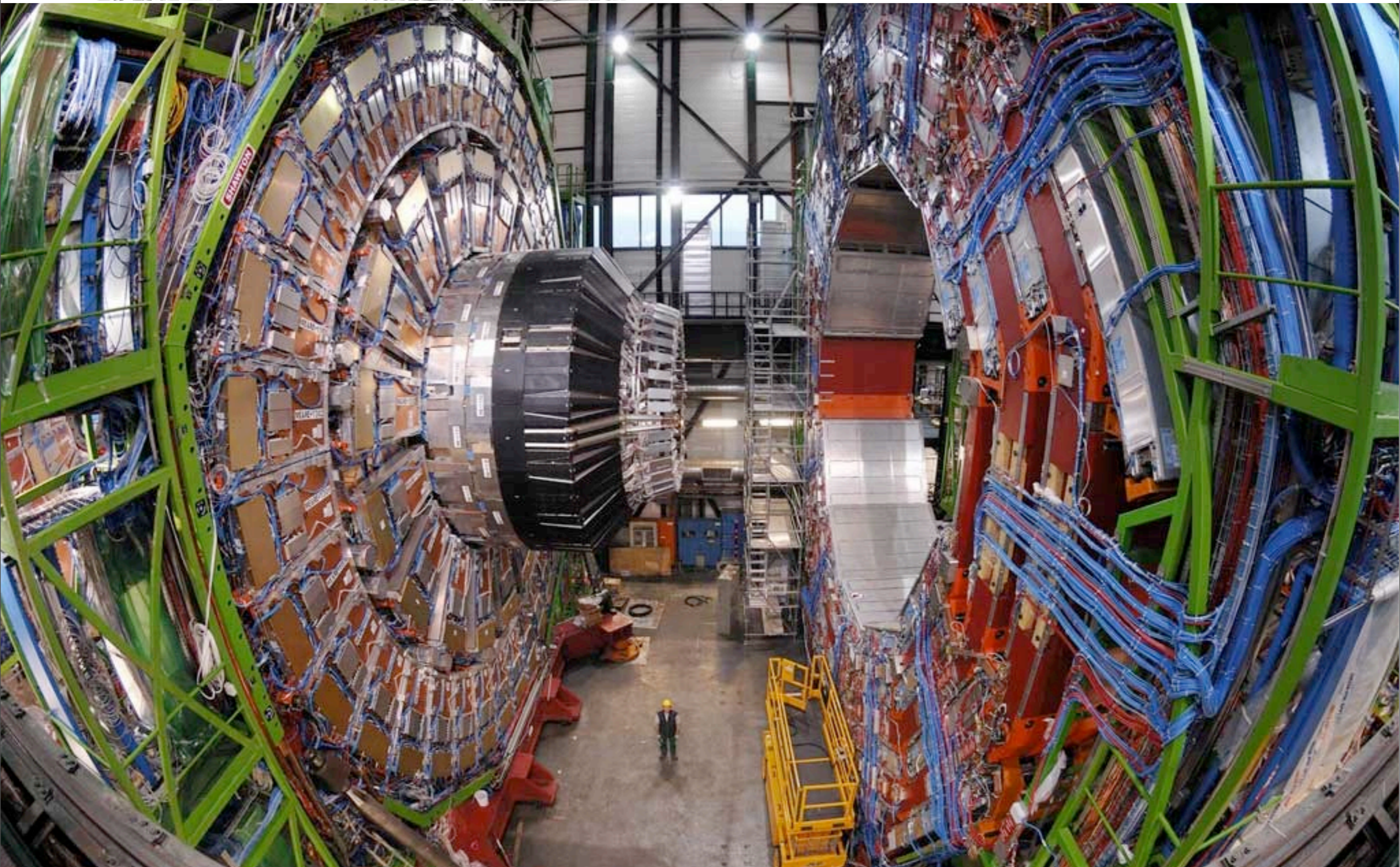
Detektoren / Experimente in der Teilchenphysik



Detektoren: ATLAS



Detektoren: CMS



4. Juli 2012: Fieberhaft erwartet...

July 3rd, 18:00h



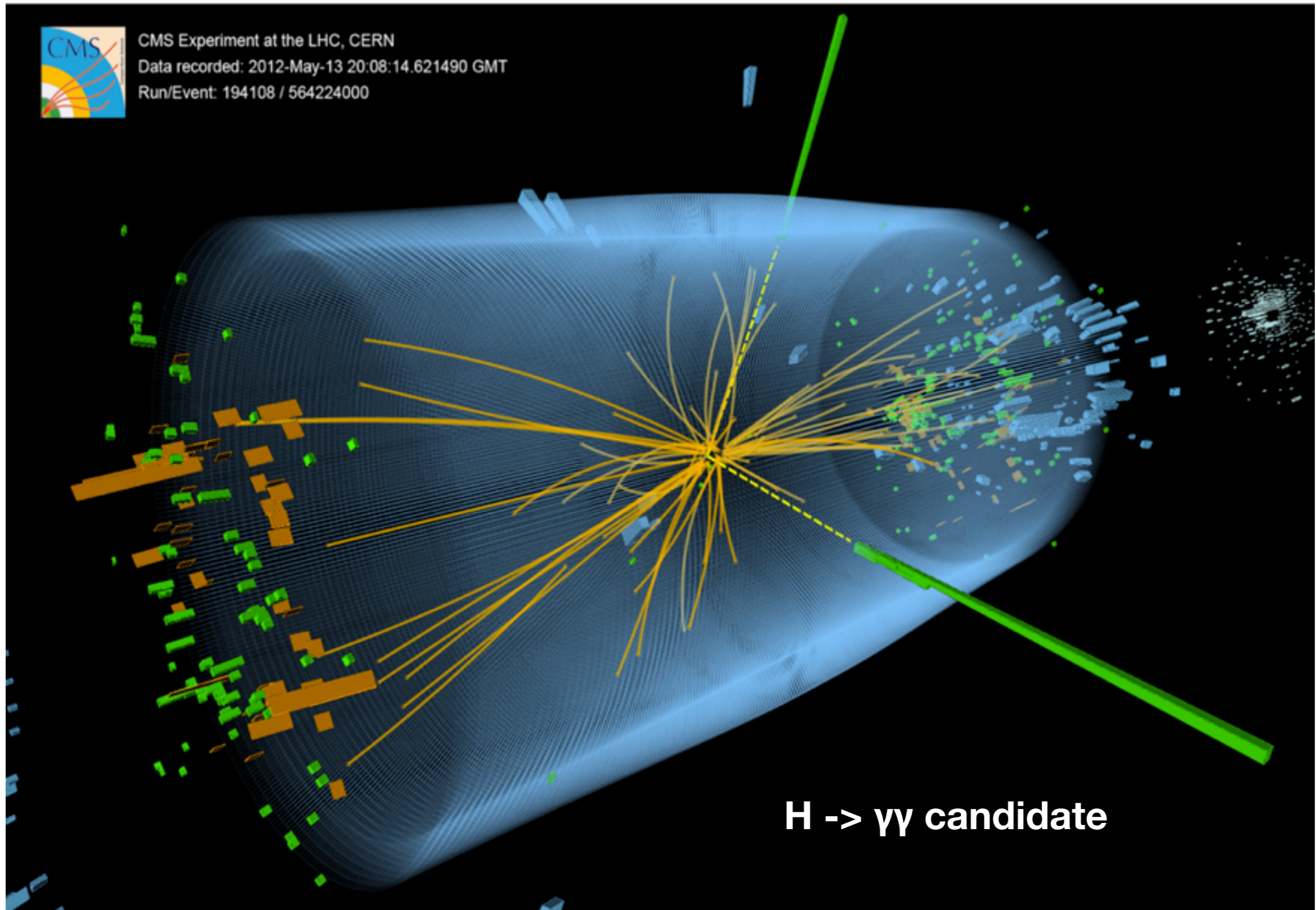
July 3rd, 22:00h



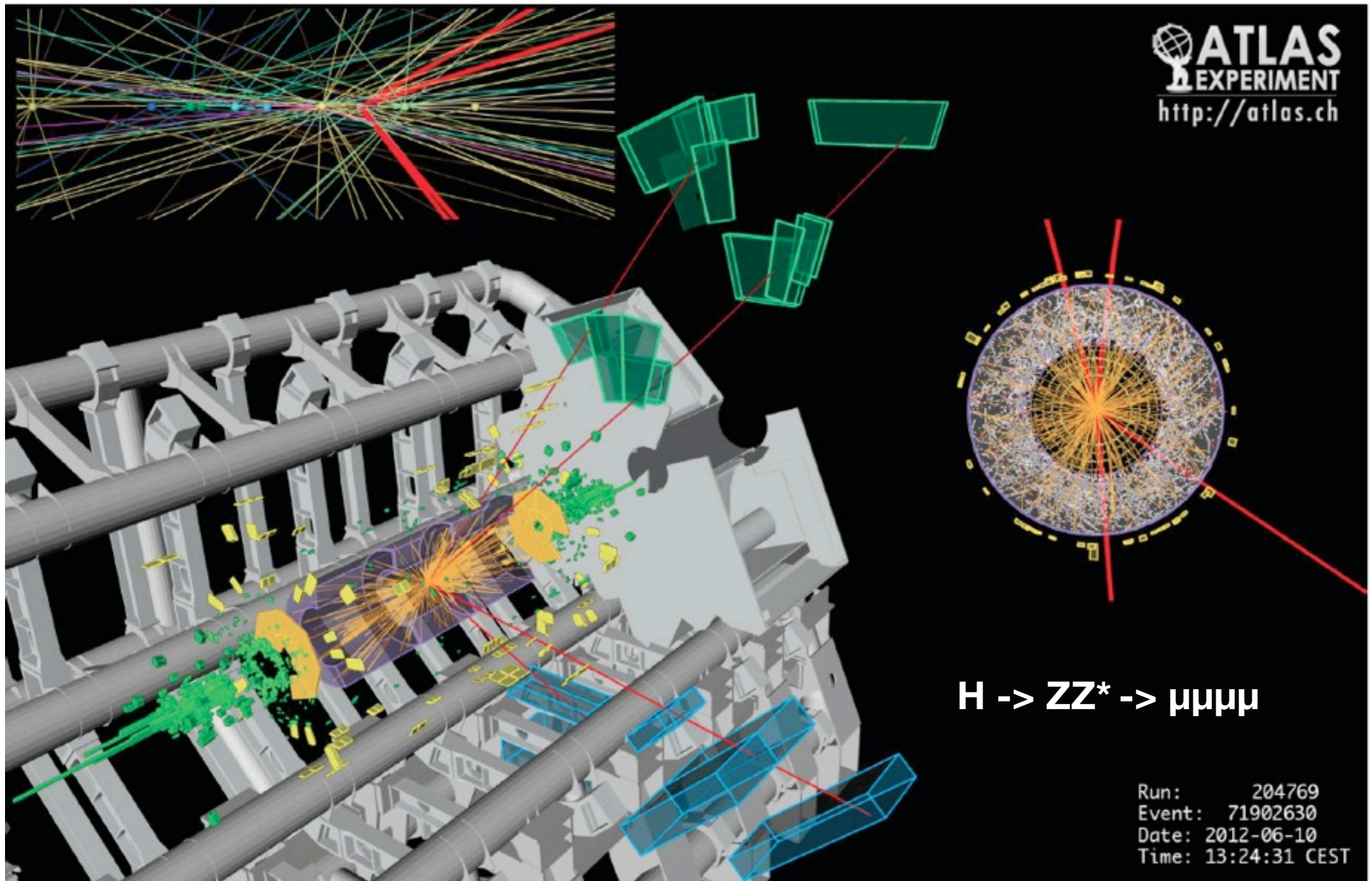
July 4th, 07:00h



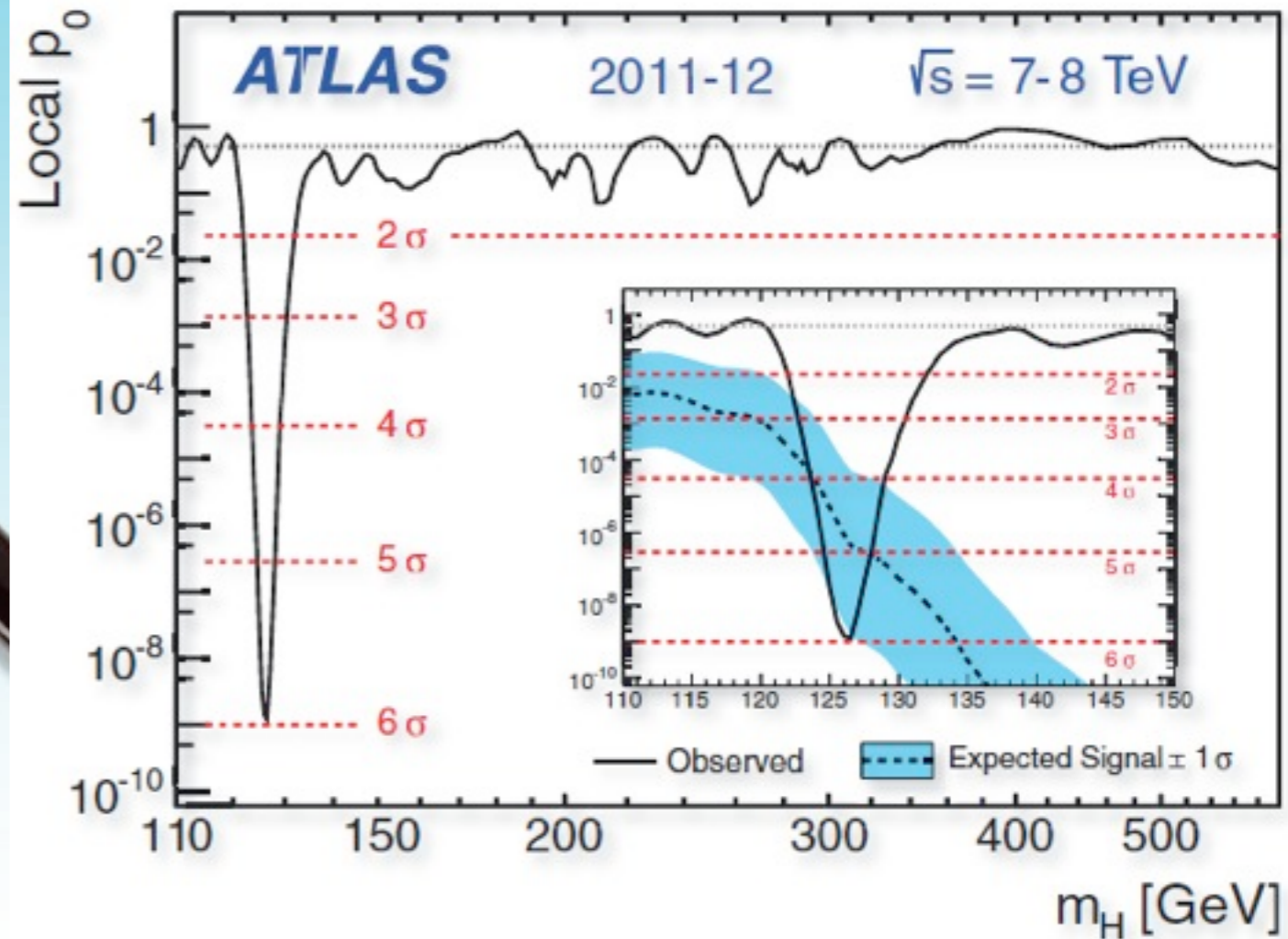
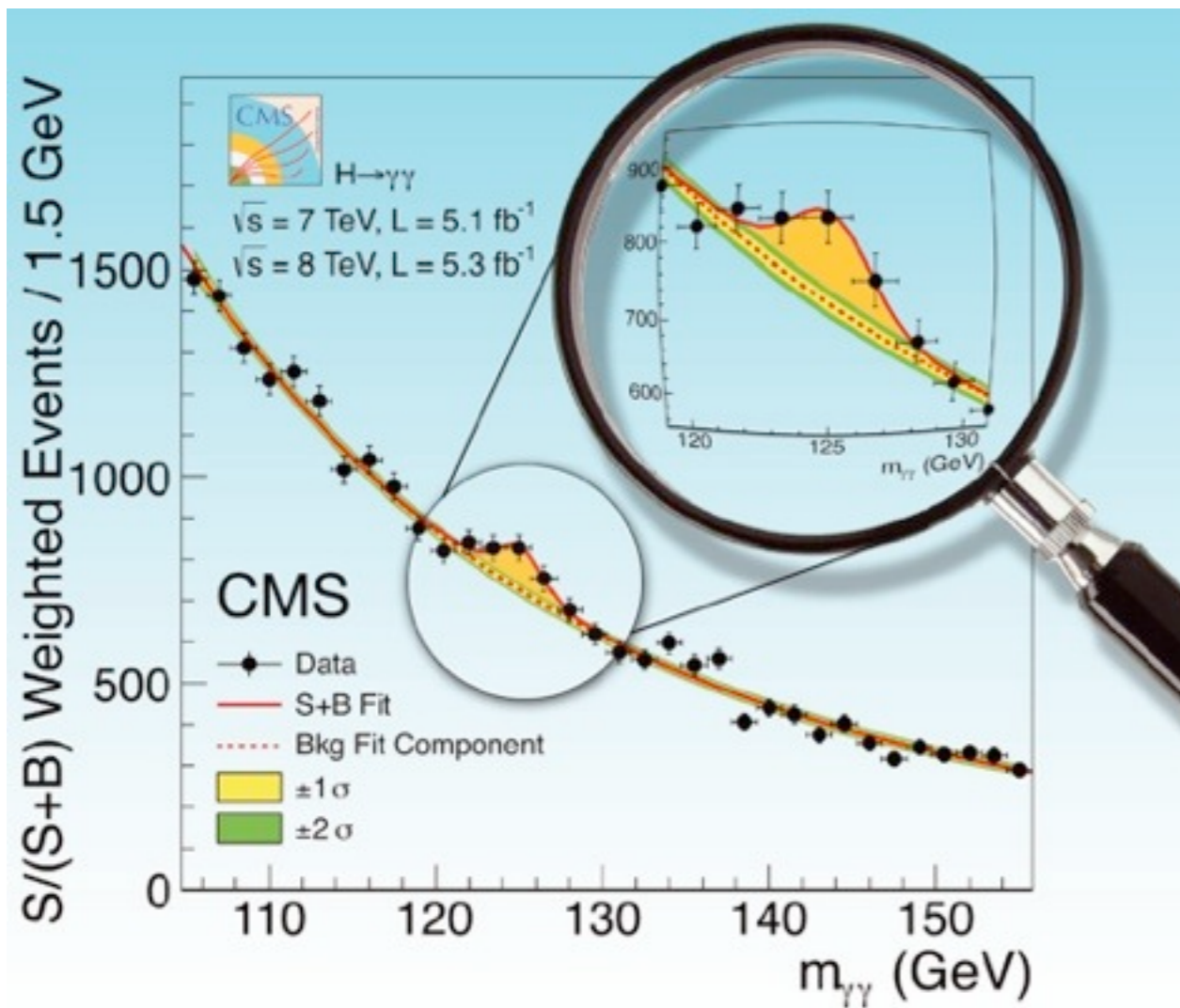
Ereignisse: Möglicherweise ein Higgs-Boson



Ereignisse: Möglicherweise ein Higgs-Boson



Erfolgreiche Higgs-Suche



- Sehr deutliches Signal in verschiedenen Kanälen bei einer Masse von 125 GeV - 126 GeV: Entdeckung eines Higgs - Bosons, das bis jetzt gut mit dem SM-Higgs verträglich ist

Nächste Vorlesung: 21.10.

Hadronenbeschleuniger: Tevatron und LHC, S. Bethke