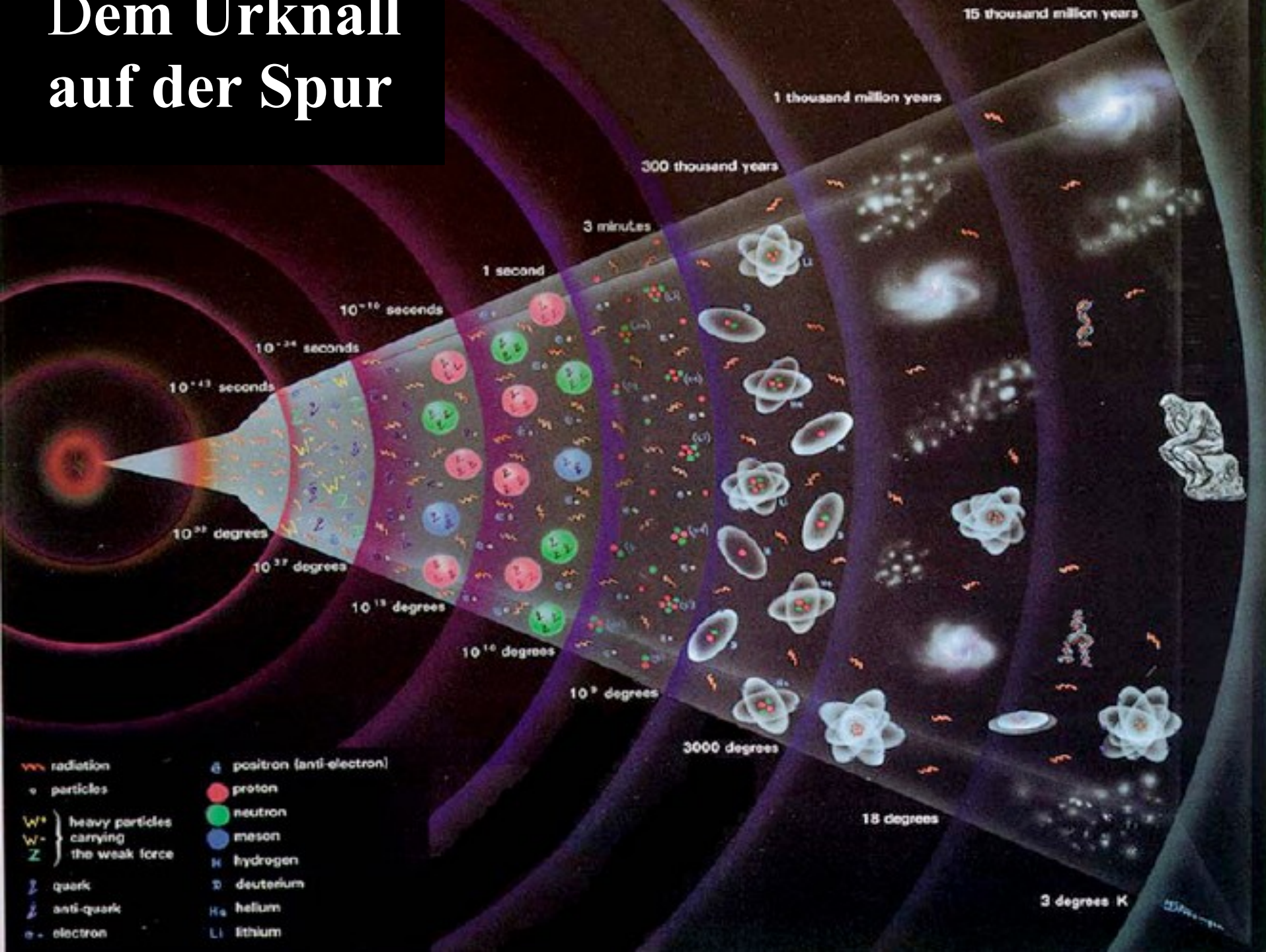


Die Jagd nach dem Higgs-Boson & der Large Hadron Collider am CERN

Physik am Samstag
Heidelberg, 8. Dez. 2012

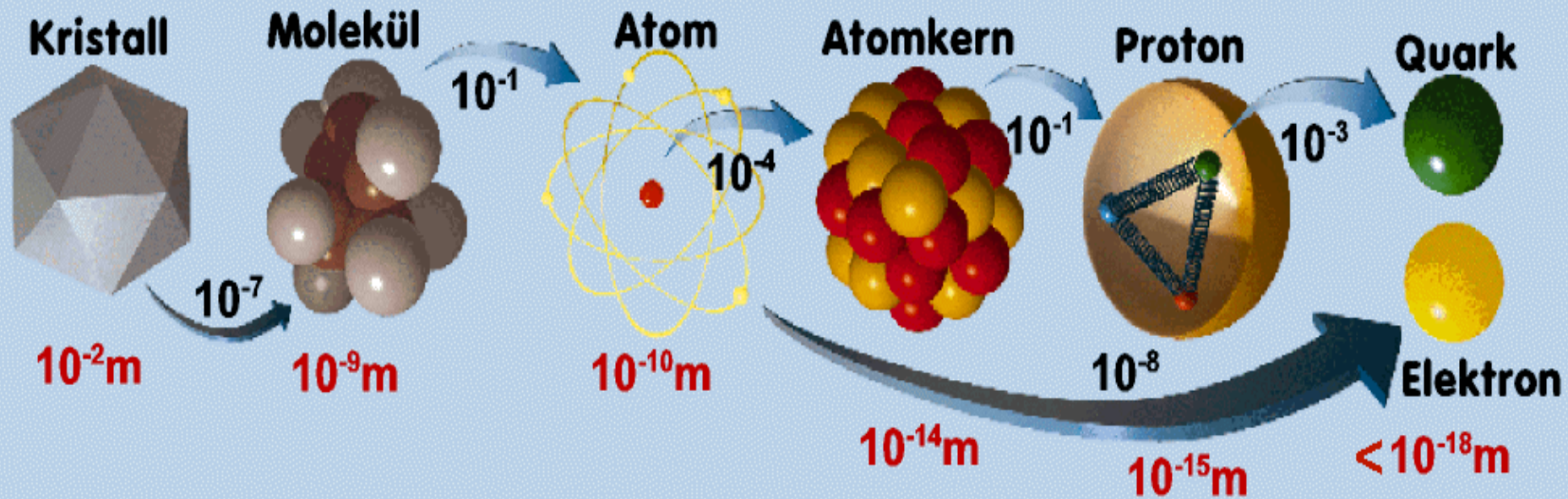
Dem Urknall auf der Spur



1. Teil

Was wir über den Aufbau der Materie wissen

Die Welt des ganz Kleinen



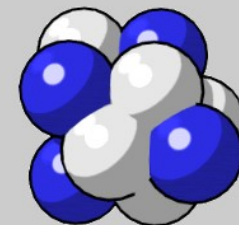
**Auge
Mikroskop**



Elektronenmikroskop



**Hochenergetische
Teilchenstrahlen**



Masse-Energie-Äquivalenz

Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie
von **Albert Einstein**, 1905

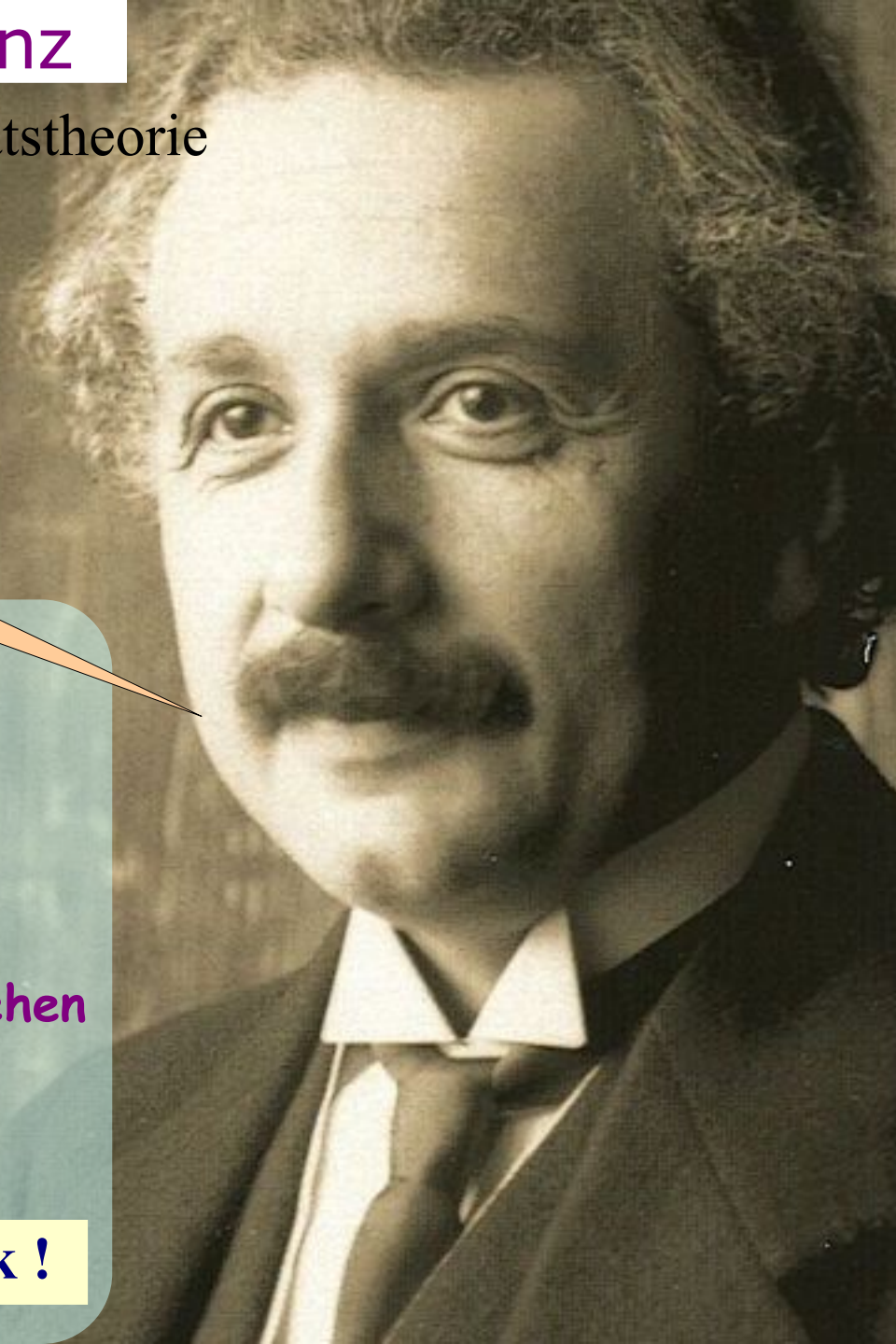
$$E = m \cdot c^2$$

Masse und Energie
sind ineinander wandelbar



aus Energie können Teilchen entstehen
und
Teilchen können zerstrahlen

Grundlage der Teilchenphysik !



Antimaterie: zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen

Vorhergesagt von P.A.M. Dirac (1928)

Konsequenz der
Relativistischen
Version der
Quantenmechanik

Eigenschaften der Anti-Teilchen:

- Entgegengesetzt geladen
- Ansonsten gleiche Eigenschaften
(Masse, Wechselwirkungen, ...)

Beispiel:

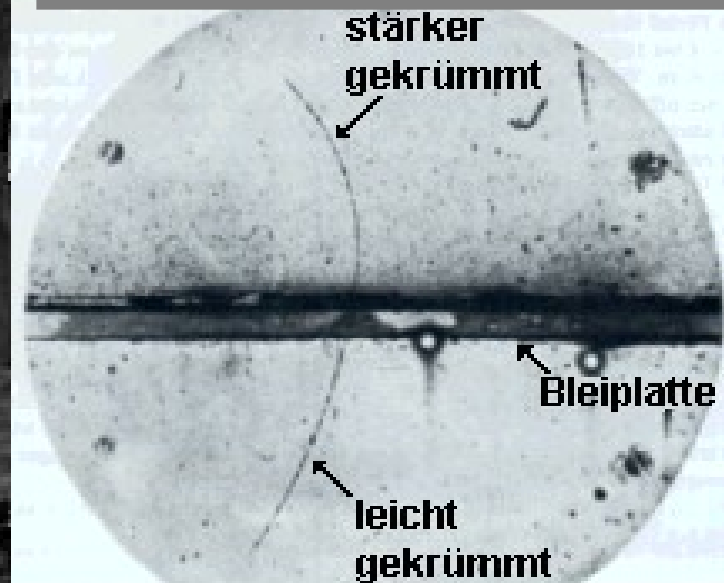
Elektron Ladung: $-1e$

Positron Ladung: $+1e$

Masse: $9,10938 \cdot 10^{-31} \text{kg} = 510998 \text{ eV}/c^2$

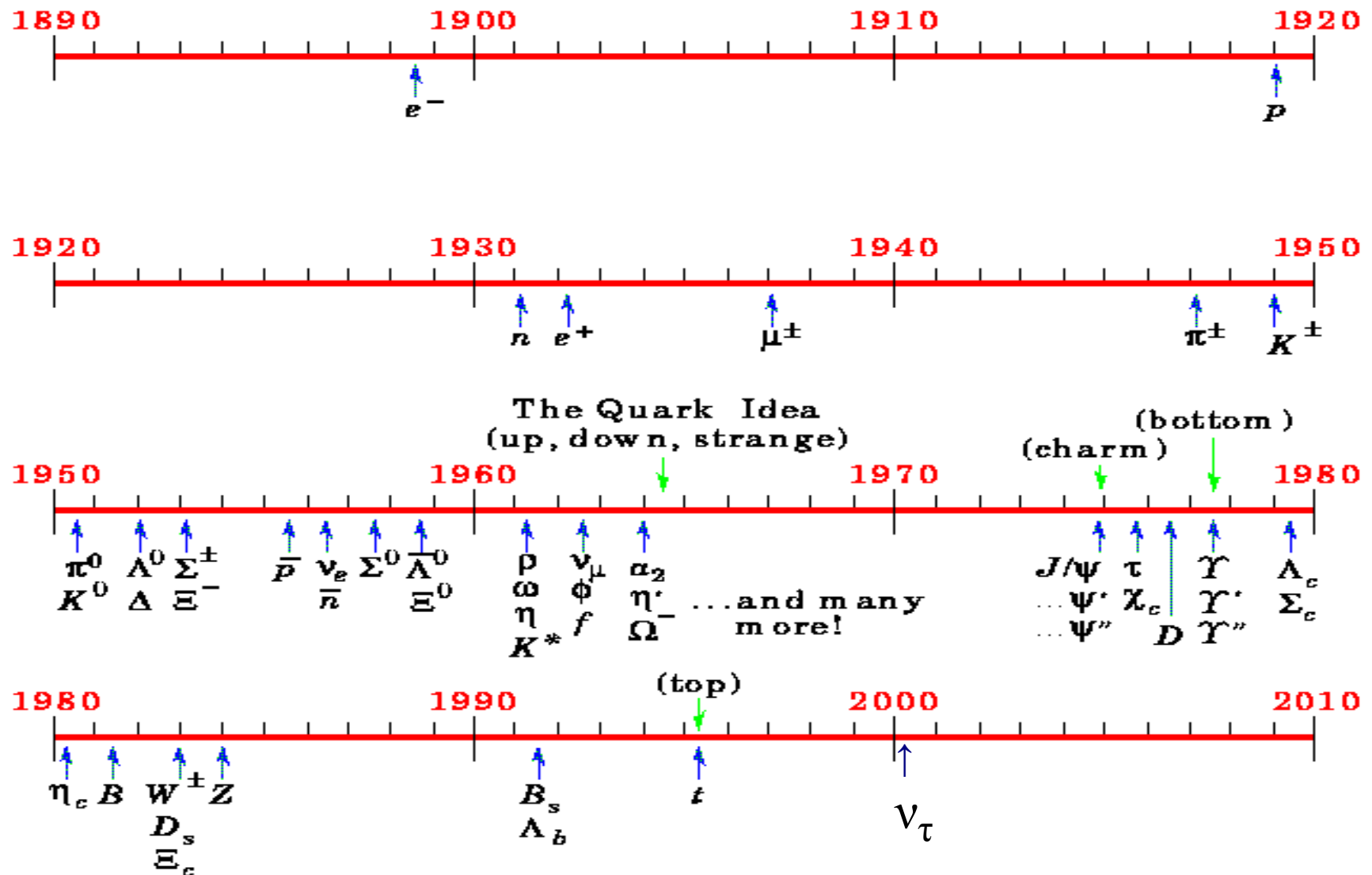
ebenso: Anti-Proton, Anti-Neutron,
Anti-Myon, ...

Entdeckung des Positrons



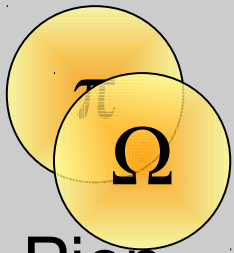
P. Anderson 1932

Viele Teilchen – ein Zoo ?

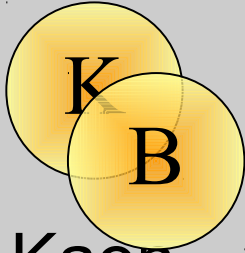


Da muss doch Ordnung her !?

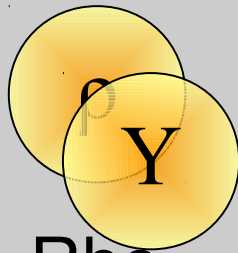
→ Das Standardmodell der Teilchenphysik



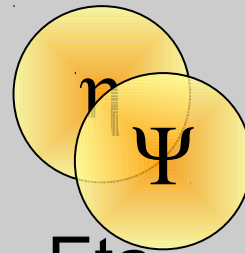
Pion
Omega



Kaon
B



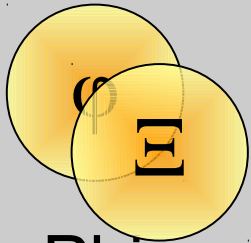
Rho
Ypsilon



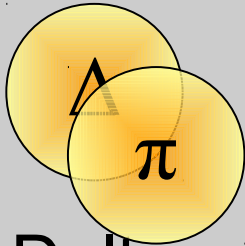
Eta
Psi



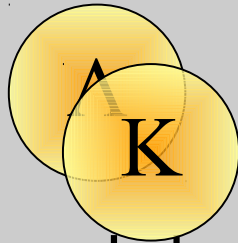
Elektron



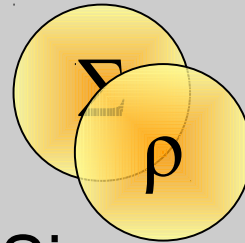
Phi
Sigma



Delta
Pion



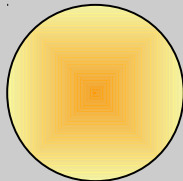
Lambda
Kaon



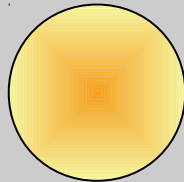
Sigma
Rho



Neutrino



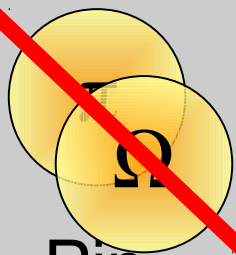
Neutron



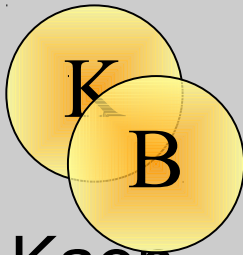
Proton



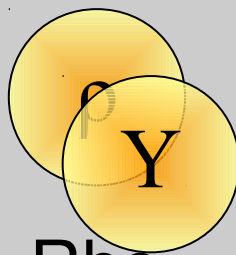
Myon



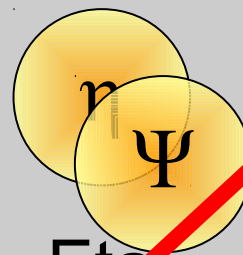
Pin
Omega



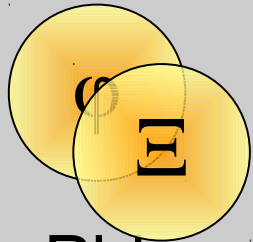
Kaon
B



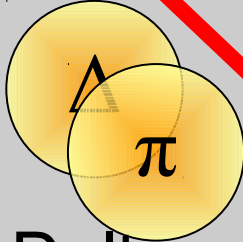
Rho
Ypsilon



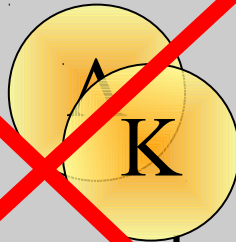
Eta
Psi



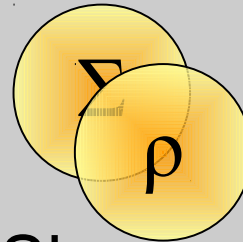
Phi
Sigma



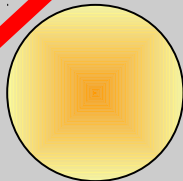
Delta
Pion



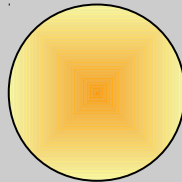
Lambda
Kaon



Sigma
Rho



Neutron



Proton



Elektron



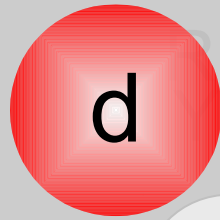
Neutrino



Myon



up-Quark



down-Quark



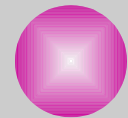
strange-Quark



Elektron



Neutrino



Myon

Einige Teilchen, die sog. Hadronen,
sind aus einfacheren („Quarks“)
zusammengesetzt !

Neutron

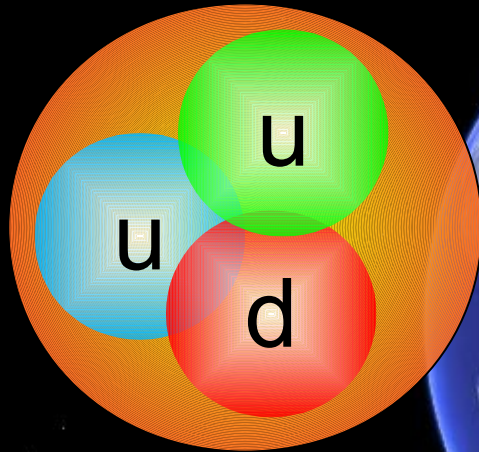
Proton

Woraus besteht die Welt ?

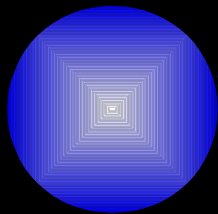
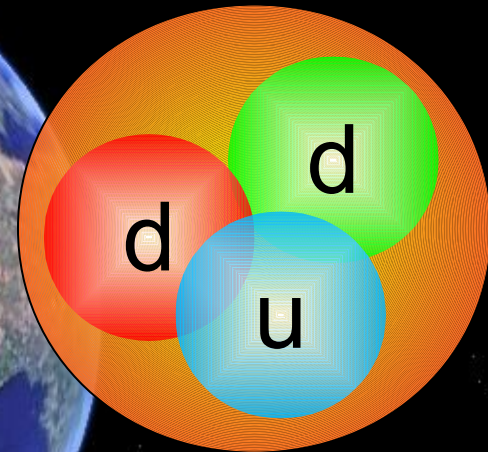


Woraus besteht die Welt ?

Proton



Neutron

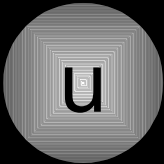


Elektron

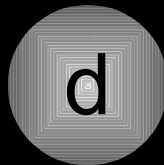
Woraus besteht die Welt ?



Elektron



up-Quark



down-Quark

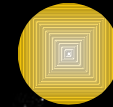
Woraus besteht die Welt ?



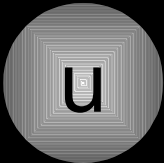
Elektron



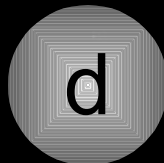
Myon



Tauon



up-Quark



down-Quark

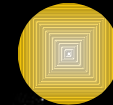
Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



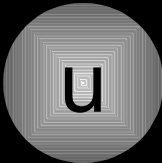
e-Neutrino



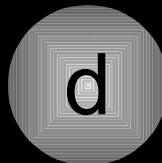
μ -Neutrino



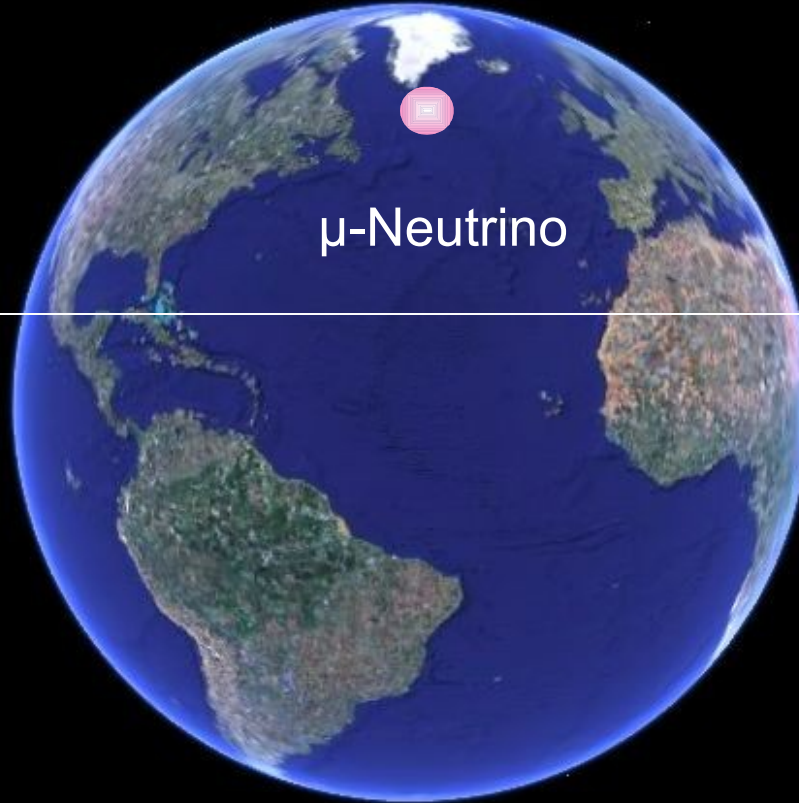
τ -Neutrino



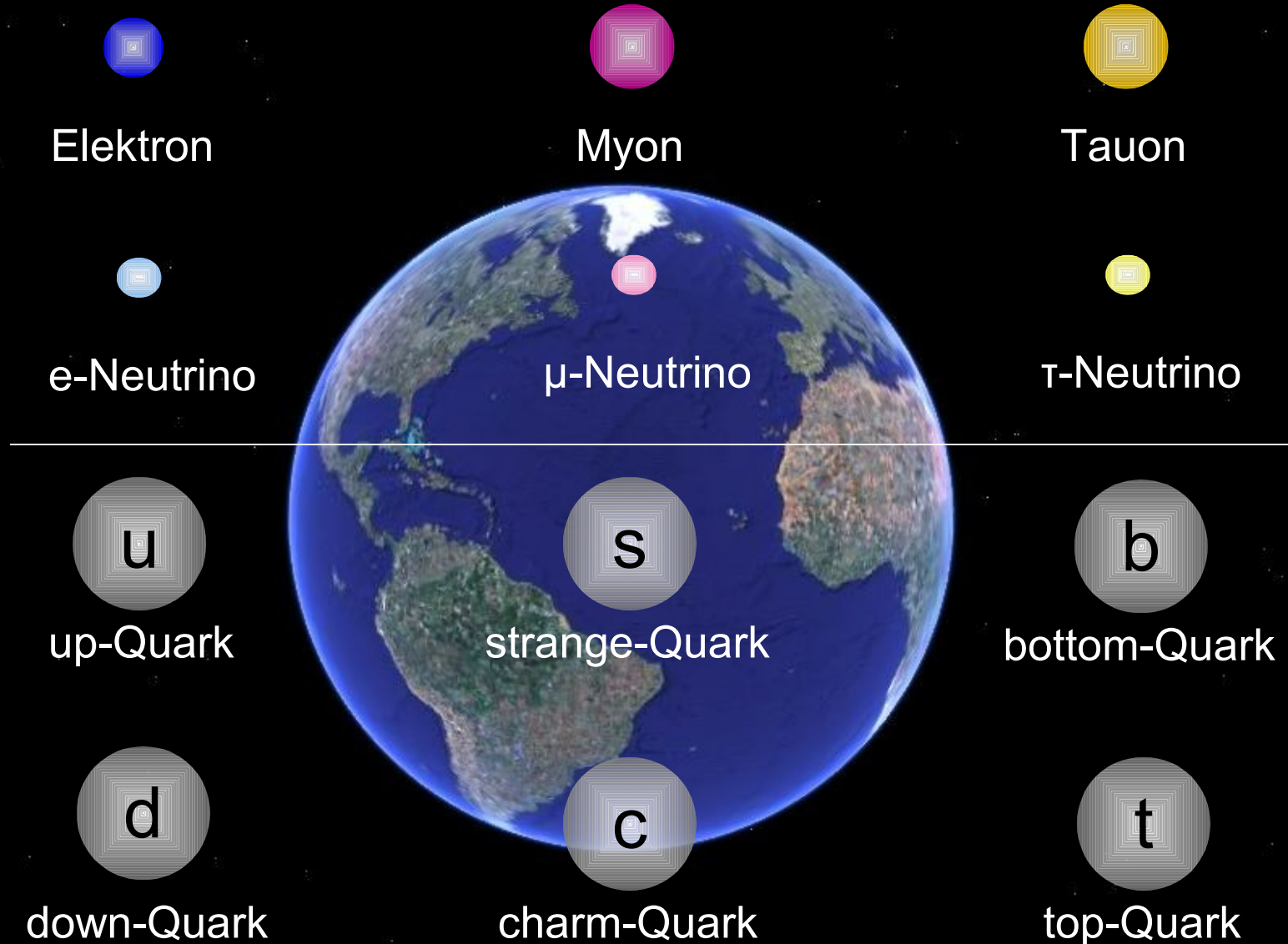
up-Quark



down-Quark



Woraus besteht die Welt ?



Zu jedem Teilchen existiert ein Anti-Teilchen

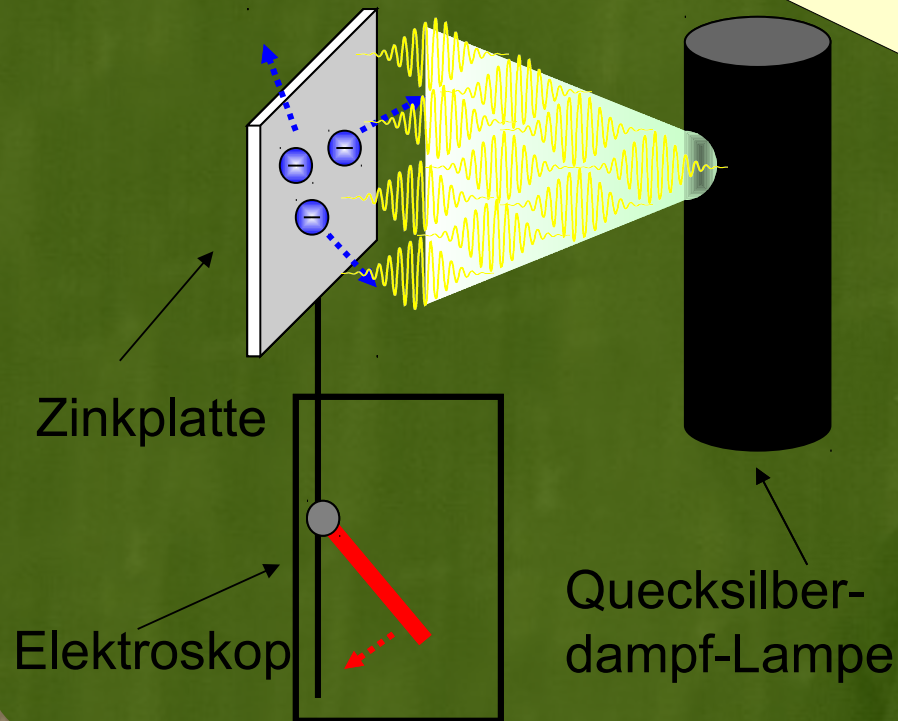
Quarks & Leptonen der 2. und 3. Familie sind nicht stabil !

Top entdeckt 1995
 τ -Neutrino 2000

Auch **Licht** besteht aus Teilchen,
den **Photonen** (Einstein, 1905)

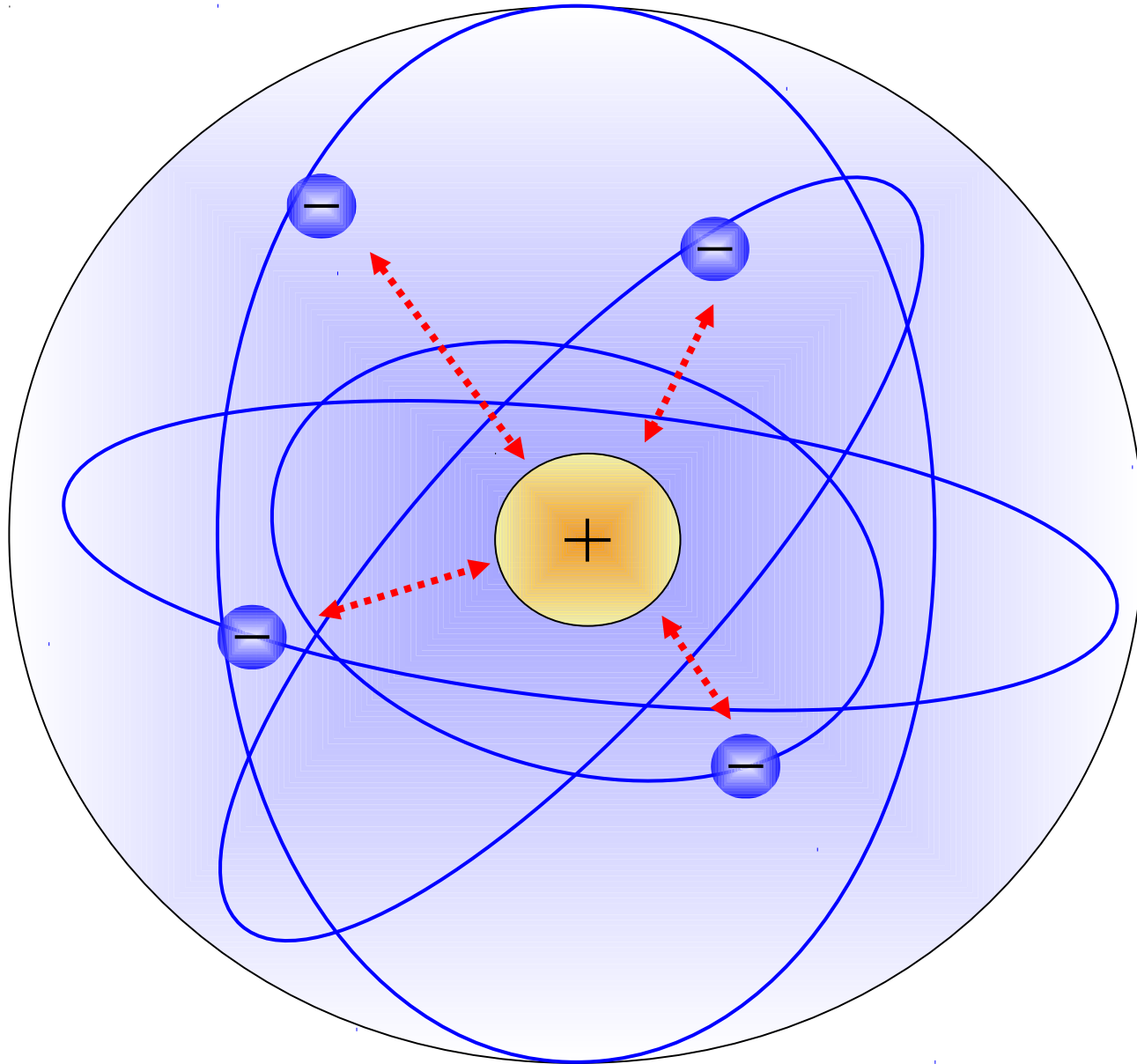
Licht hat Teilchen-
eigenschaften!

$$E_{\text{Photon}} = h \cdot f$$

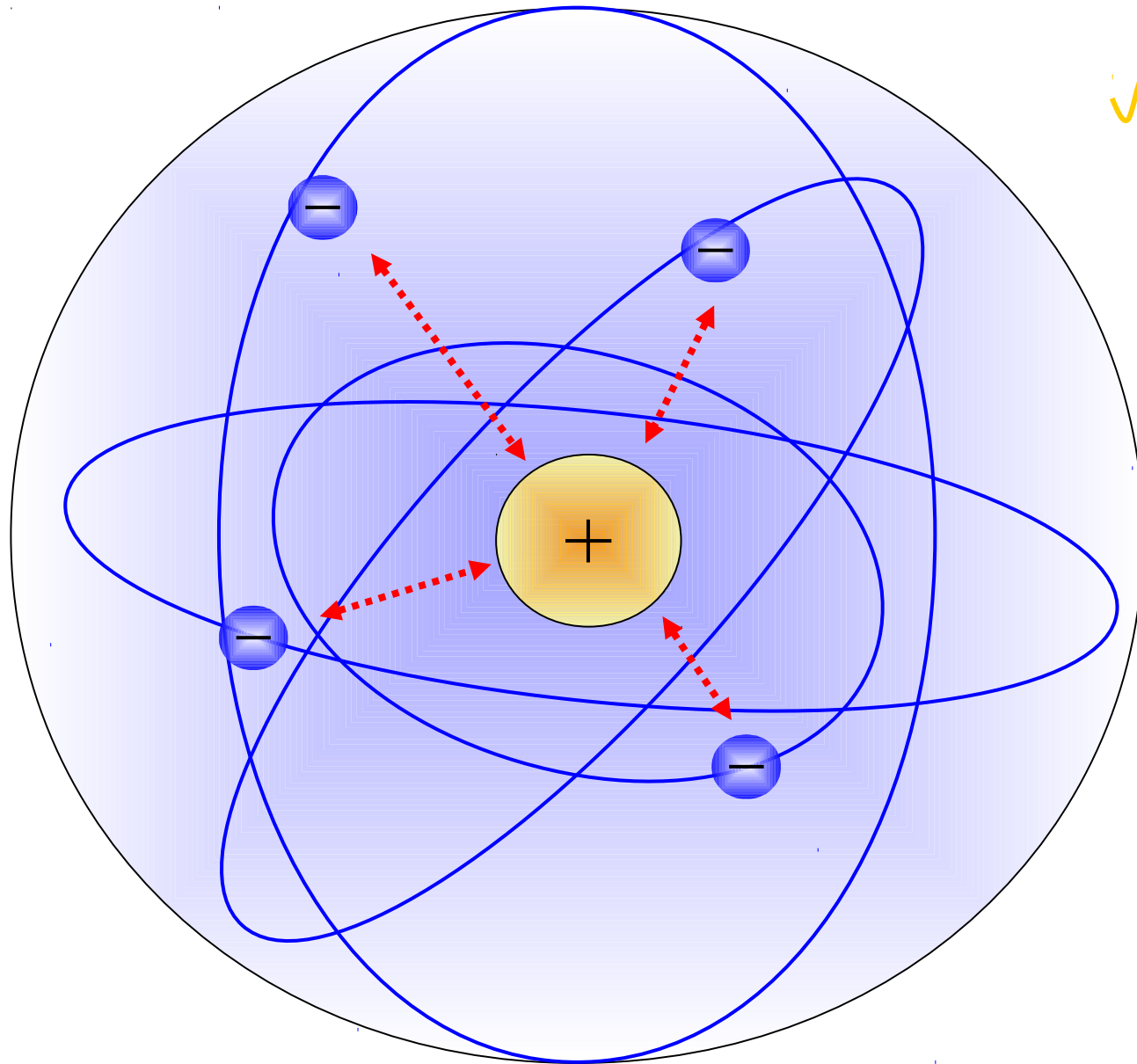


Photon
als Wellenpaket

Elektromagnetische Kraft

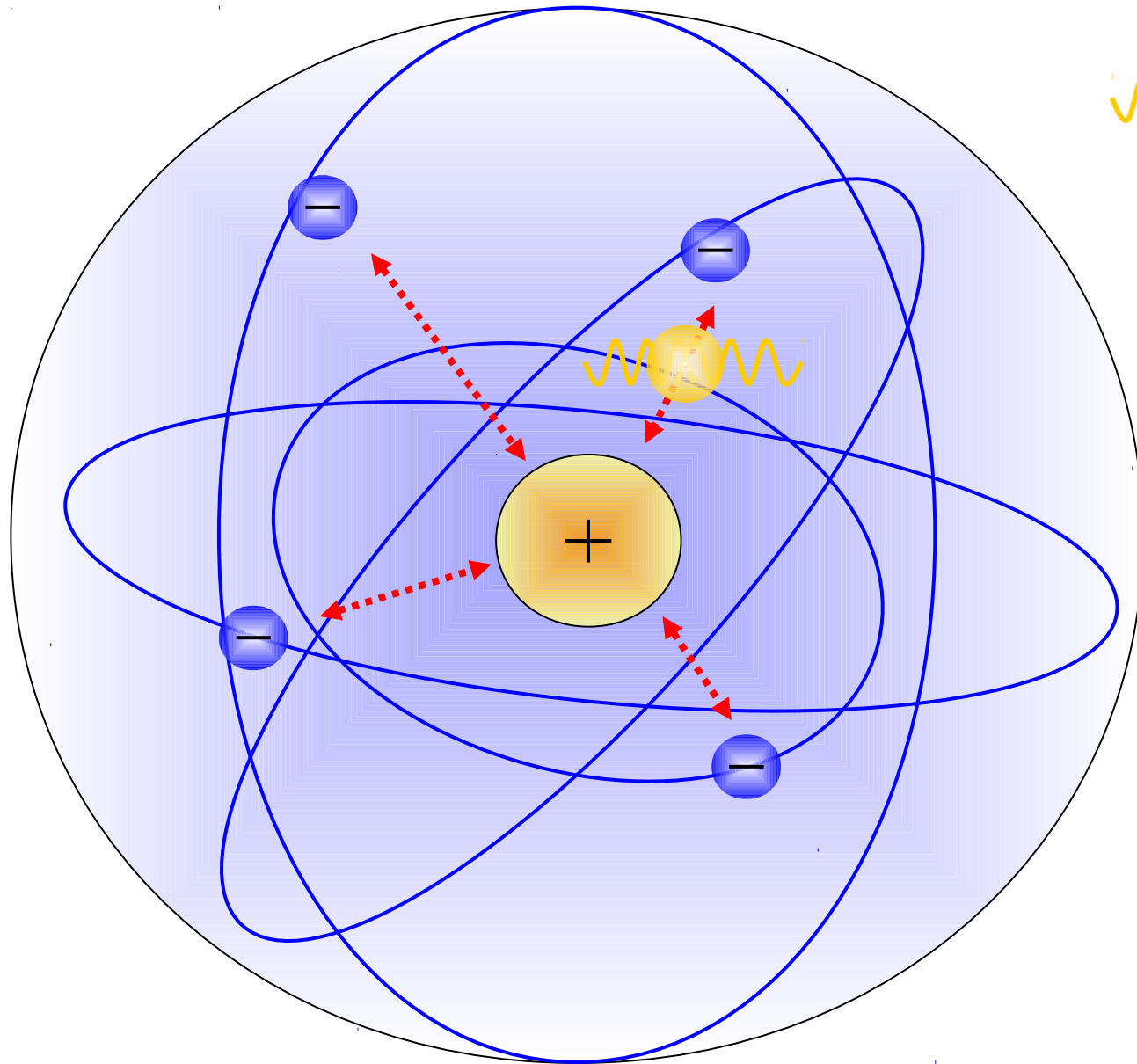


Elektromagnetische Kraft



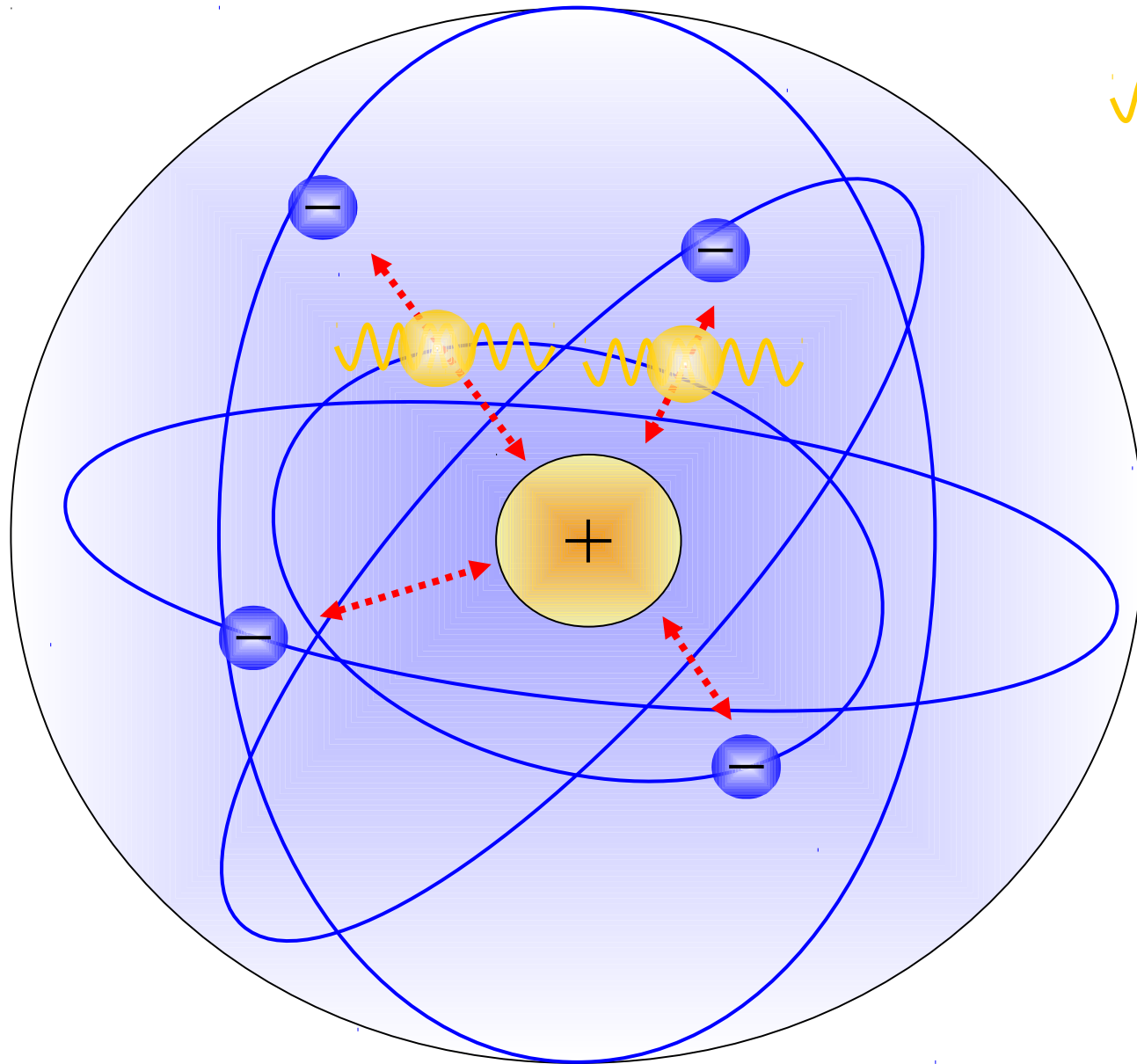
Photon

Elektromagnetische Kraft



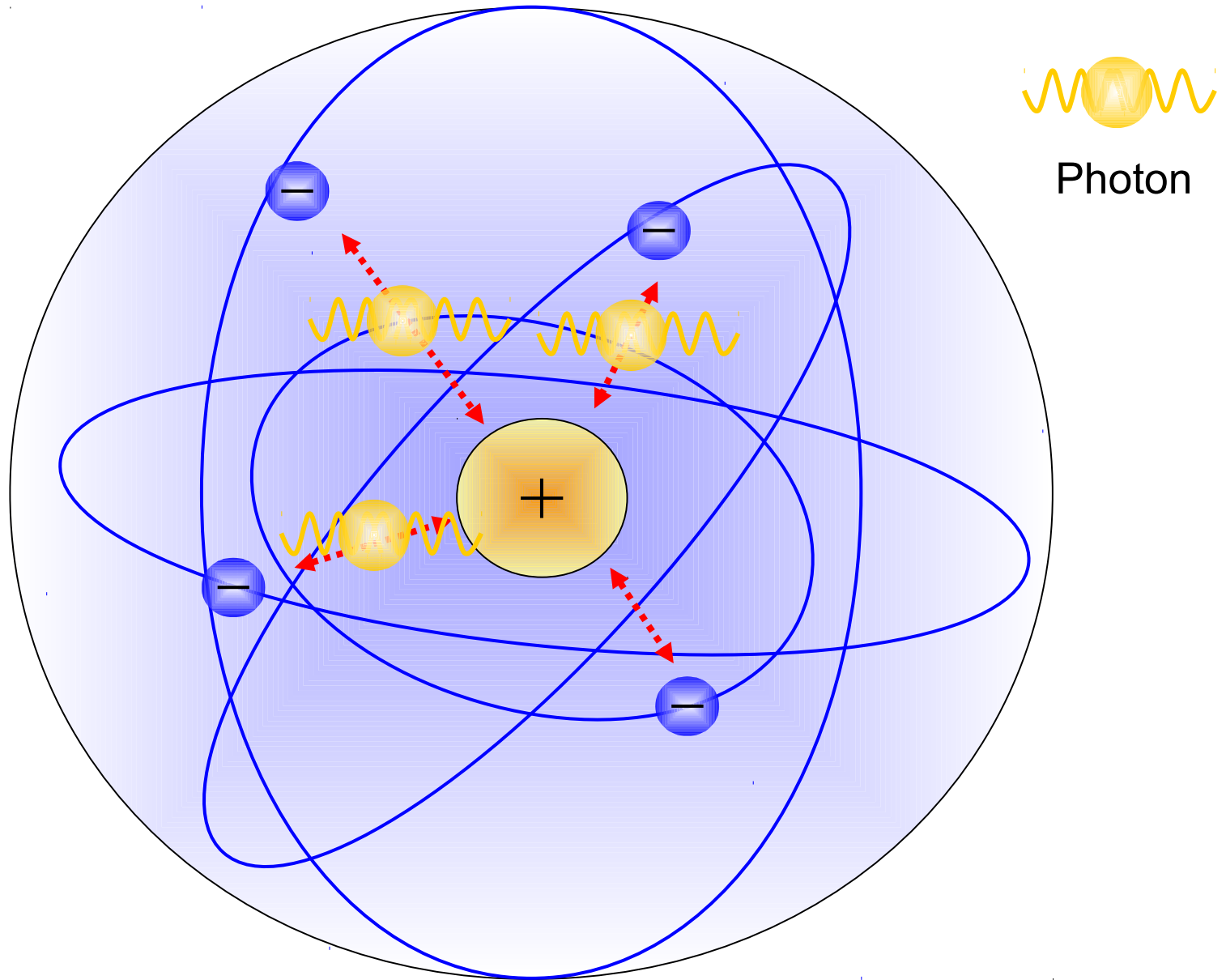
Photon

Elektromagnetische Kraft

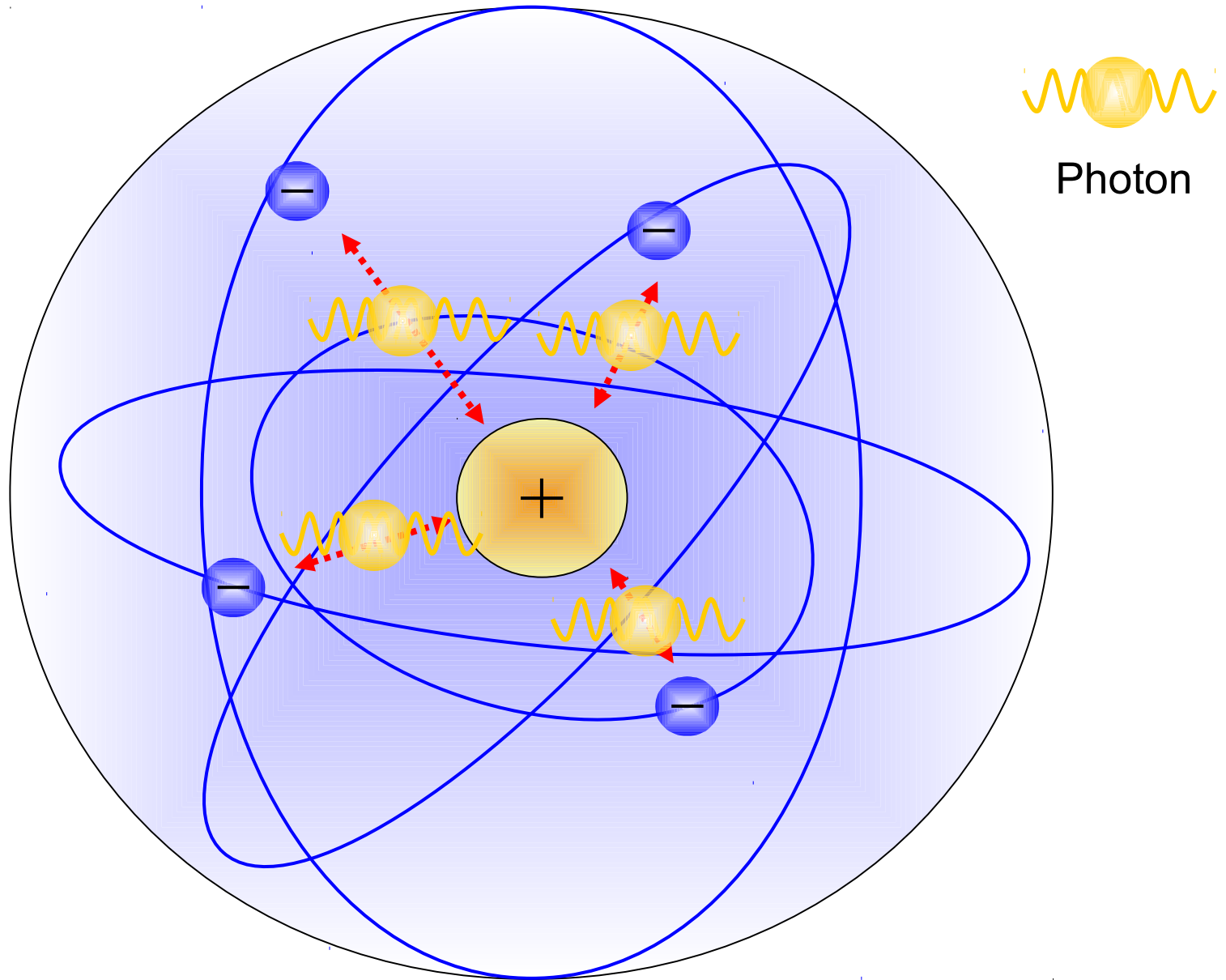


Photon

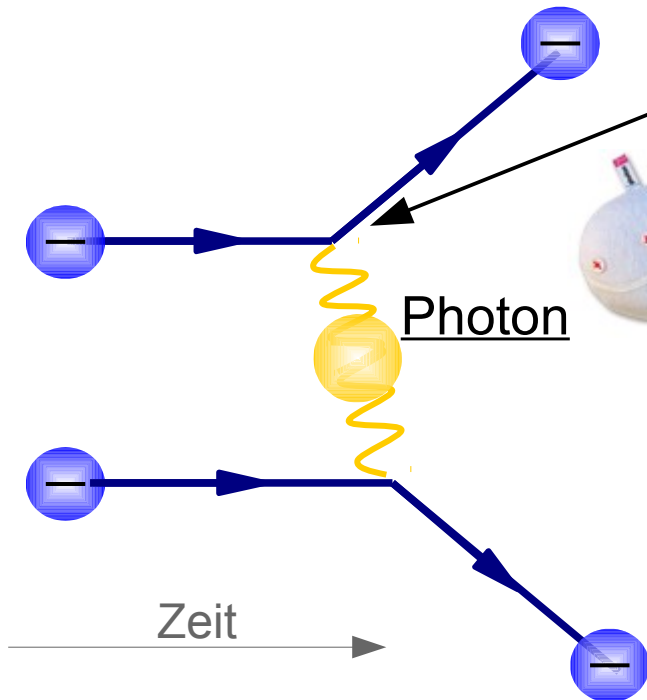
Elektromagnetische Kraft



Elektromagnetische Kraft



aus Sicht des Physikers: Elektromagnetische Kraft

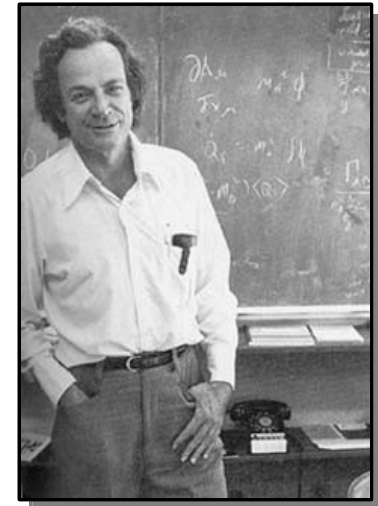


alle Erhaltungssätze gelten
(Impuls, Ladung etc.)



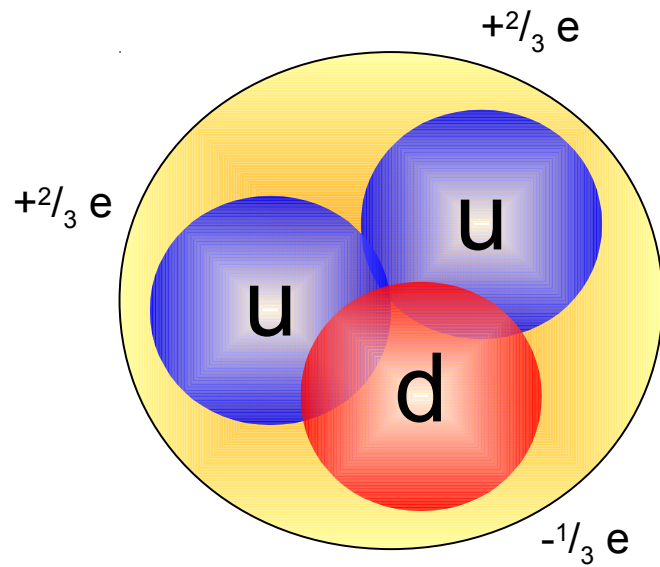
Photon

Feynman-Graph



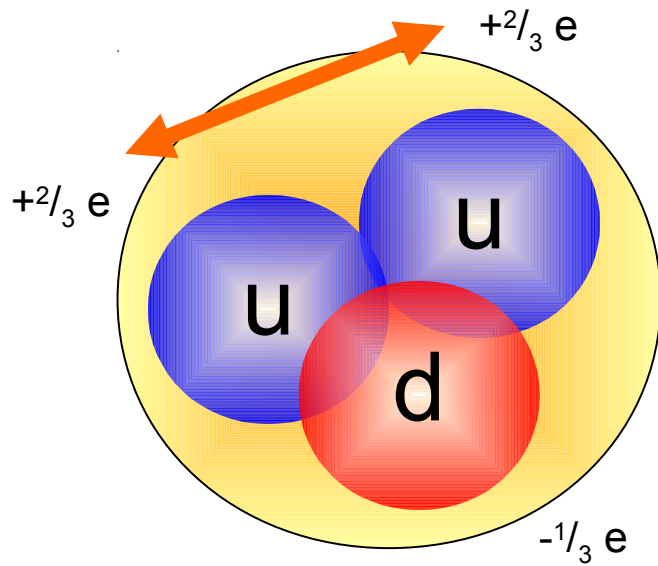
beinhaltet die komplette
Berechnungsvorschrift

Starke Kraft



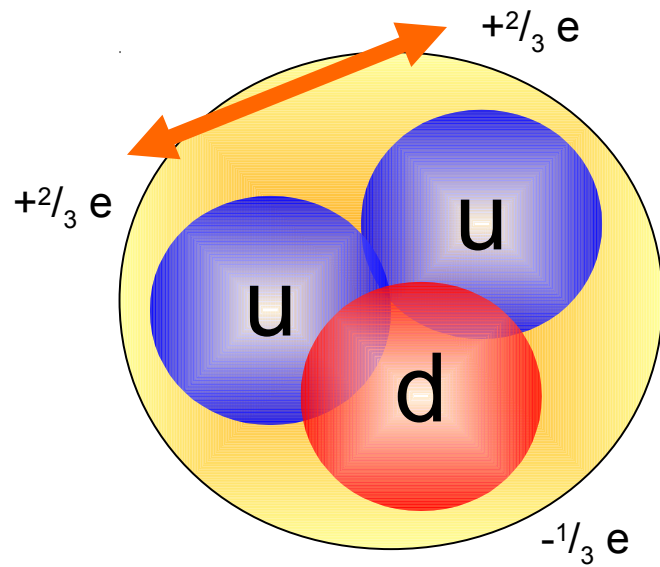
Proton

Starke Kraft

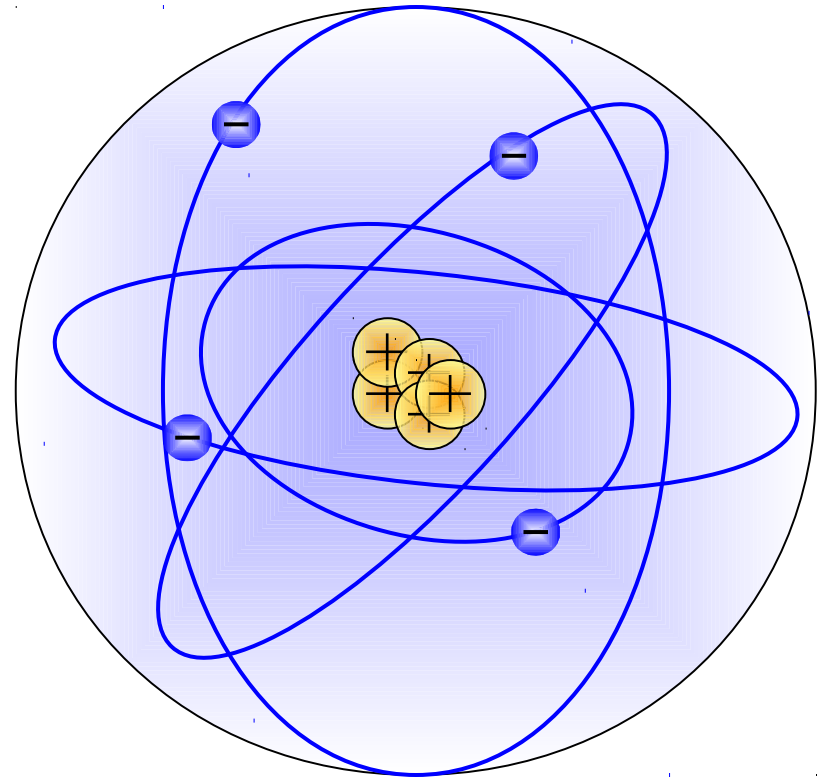


Proton

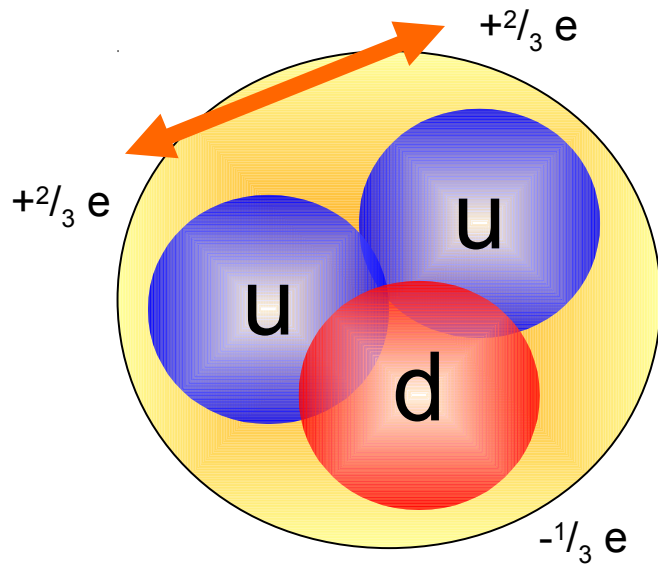
Starke Kraft



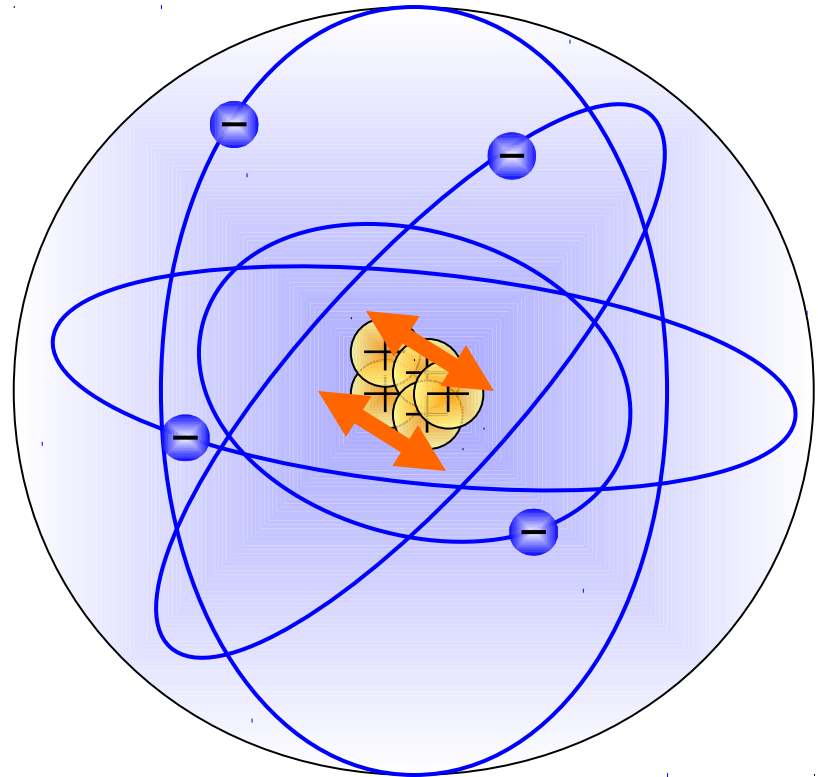
Proton



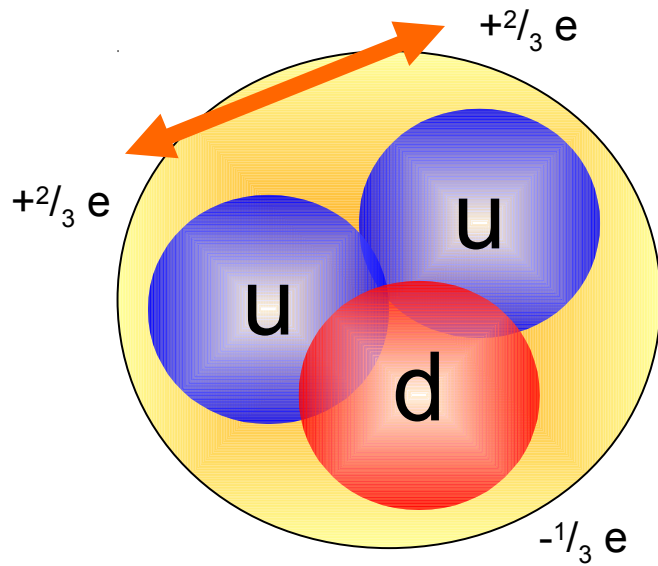
Starke Kraft



Proton



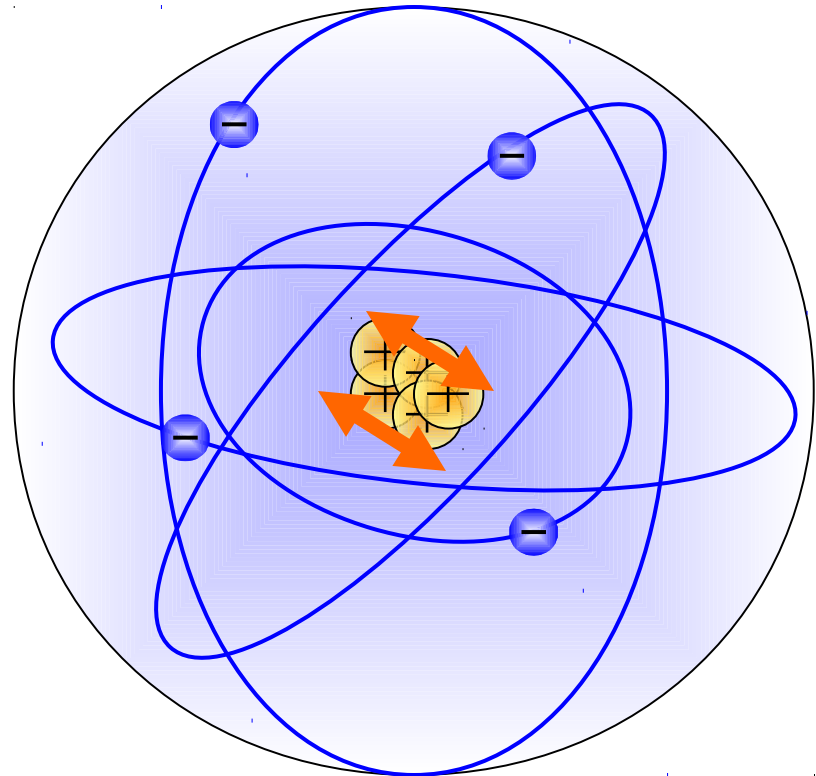
Starke Kraft



Proton



Gluon

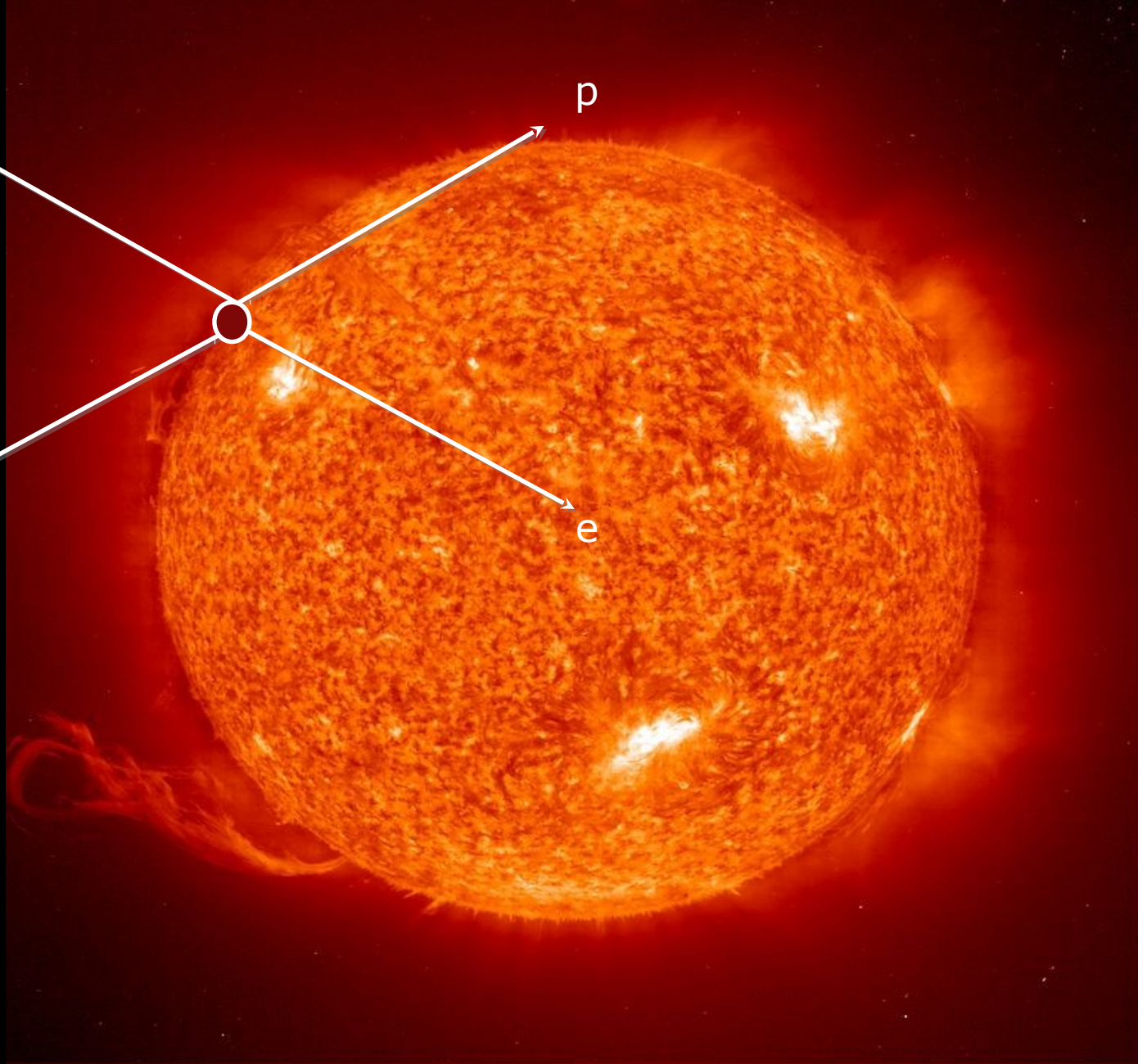


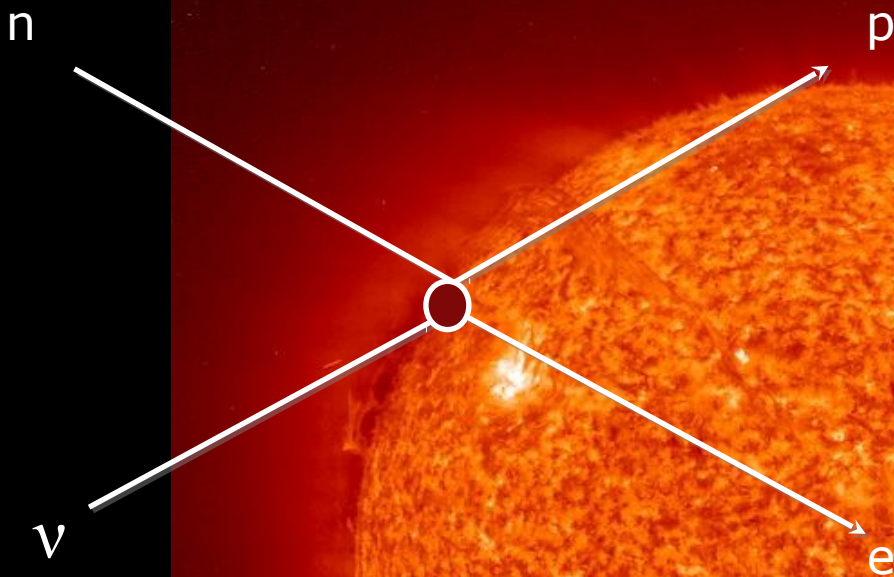
n

p

ν

e





„Schwache
Kraft“

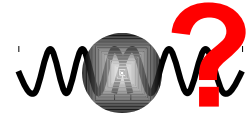
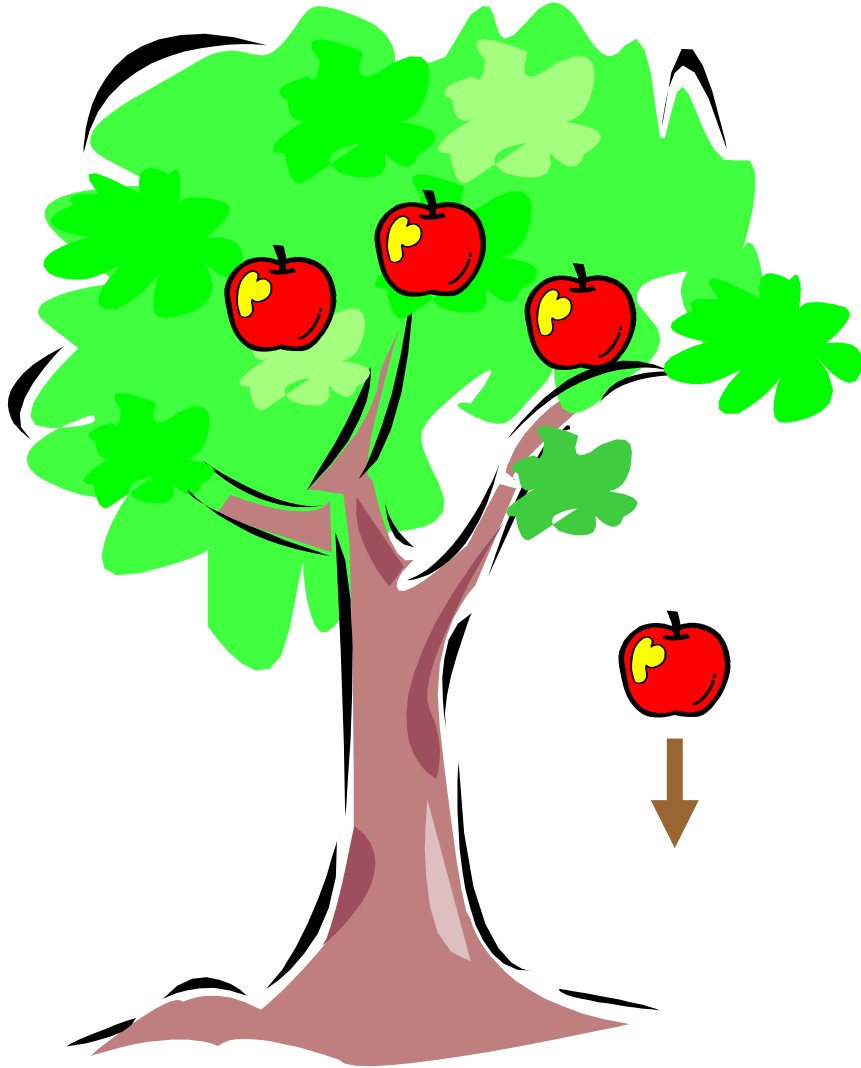


W-
Boson



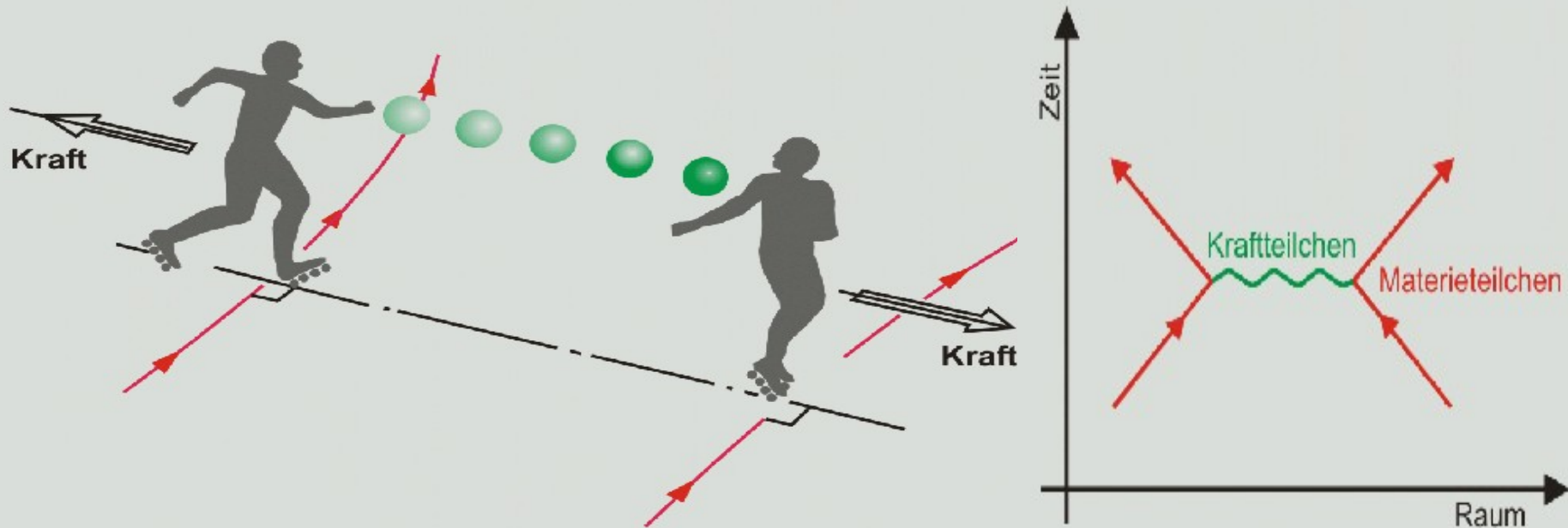
Z-
Boson

Gravitation



Graviton

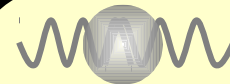
„Kraftteilchen“ sind zuständig für Wechselwirkungen



Photon

elektromagnetisch

Atom, Molekül, Festkörper,
alle „mechanischen“ Kräfte



8 Gluonen

Starke Kernkraft

hält Kerne und
Quarks zusammen



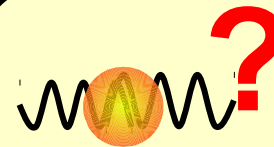
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



Graviton
hypothetisch

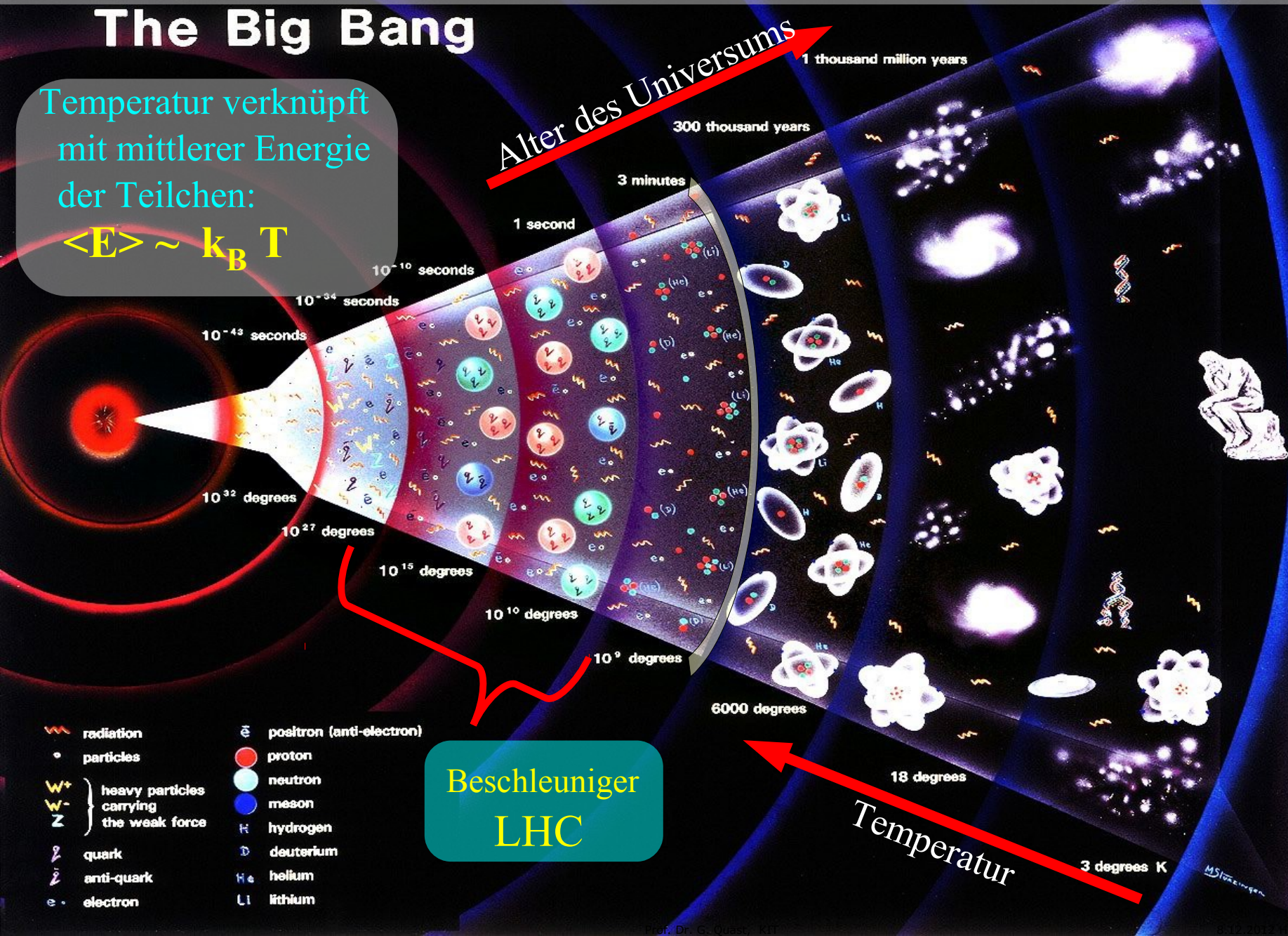
Gravitation

keine Quantentheorie
der Schwerkraft

The Big Bang

Temperatur verknüpft
mit mittlerer Energie
der Teilchen:

$$\langle E \rangle \sim k_B T$$



Das Standard-Modell der Teilchenphysik

- konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen **AUSNAHME: Gravitation !**
- beruht auf grundlegenden Symmetrien – **elegant und schön !**
- Grundlagen in den frühen 70er Jahren – und bis heute alle Präzisionstests bestanden !
- Teilchenmassen durch **„Higgs-Mechanismus“**
wir sind dem **„Higgs-Teilchen“** auf der Spur !

- viele weitere **offene Fragen** (Gravitation, dunkle Materie & Energie, ...) erfordern allerdings auch

„neue Physik“ jenseits des Standardmodells
(nicht Thema dieses Vortrags ...)

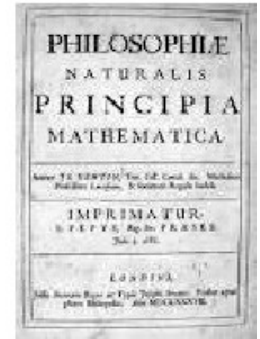
2. Teil

Das Problem mit der Masse

Was ist Masse ?

$$F = m \cdot a$$

Newtons „träge Masse“
(2. Newton'sches Axiom)



$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Newtons
„schwere Masse“



$$E = m \cdot c^2$$

Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz

$$= m_0 \cdot \gamma \cdot c^2$$

m_0 : „Ruhemasse“

$m_0 c^2$: „Ruheenergie“

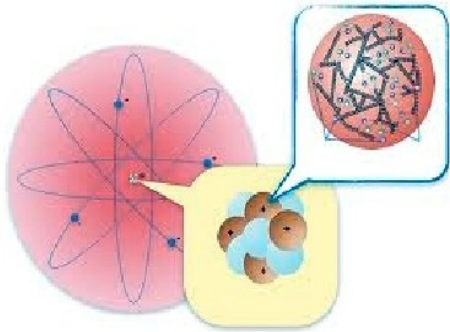
E : Ruheenergie + kinetische Energie

Anmerkung: Teilchen durch Ruhemasse charakterisiert;
Teilchenphysiker meinen mit „Masse“ immer die Ruhemasse

Ursprung der Masse



Masse im Alltag bestimmt durch
Gesamtmasse der Atome



Atome sind zusammengesetzt
→ Quantenbewegung der Bausteine

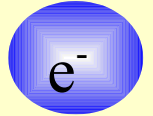
Masse von Atomen stammt nur zu $\sim 1\%$ aus Ruhemasse der
Elementarteilchen (Elektronen und Quarks)

Rest kommt aus der Quantenbewegung der in
Protonen und Neutronen gebundenen Quarks, also dem
Massenäquivalent von Bindungs- und Bewegungsenergie

Trotzdem ist **Ruhemasse der Elementarteilchen** extrem wichtig:

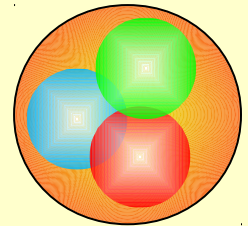
Warum ist die Ruhemasse so wichtig ?

Elektron ($m_e=511 \text{ KeV}/c^2$)



- $m_e = 0$ → **keine Atome**
- $m_e = 20 \text{ keV}/c^2$ → Atome viel größer, Menschen ~45 m groß
- $m_e = 1500 \text{ keV}/c^2$ → Prozess $p+e^- \rightarrow n+\nu$ möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

Quarks



- $m_q = 0$ → Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**
- oder d leichter als u ganz anderes Universum !



W-Boson ($m_W=80,4 \text{ GeV}/c^2$)



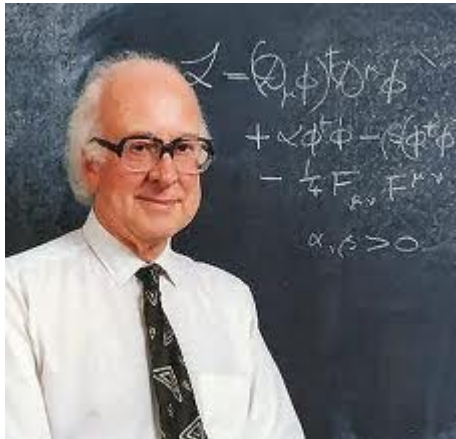
- $m_W = 0$ → Atome haben schwache Ladung & stoßen sich ab,
d.h. keine kondensierte Materie
- M_W klein → Fusionsrate in Sternen viel schneller, unsere Sonne
wäre kälter und längst erloschen
kein höheres Leben auf der Erde



Ursprung der Masse

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird die Masse über den
„Brout-Englert-Higgs-Kibble-Hagen-Guralnik-Mechanismus“
eingeführt.

Teilchen erhalten Masse
durch Wechselwirkung
mit neuem Feld
„Higgs-Feld“

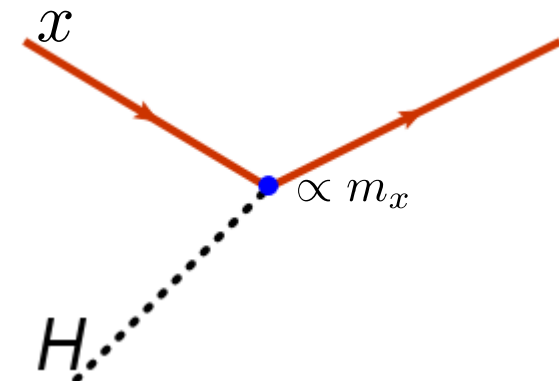


Symmetrien des Standardmodells werden erhalten

Wichtigster Beitrag von Peter Higgs:

Vorhersage des Higgs-Teilchens

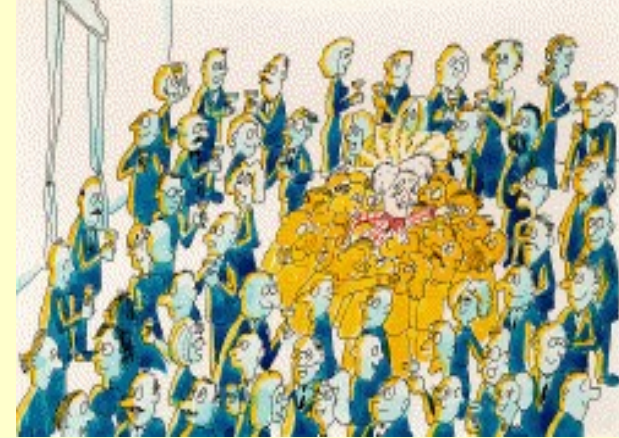
**Stärke der Wechselwirkung mit dem
Higgs-Teilchen hängt von Teilchenmasse ab.**



Ursprung der Masse ?

Veranschaulichung des Higgs-Mechanismus

Teilchenmasse als Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld



Selbstwechselwirkung des Higgs-Feldes führt zu Masse des Higgs-Teilchens



Gibt es den Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen ?

Veranschaulichung des Higgs-Mechanismus



3. Teil

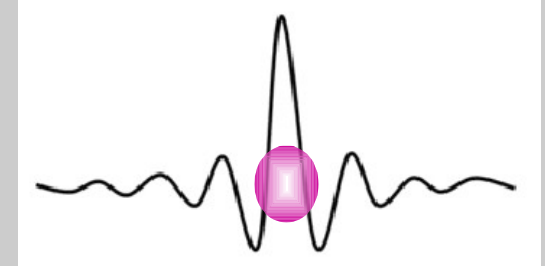
Jagd-Vorbereitung

Vorbereitung: noch etwas Quantenphysik



Quantenteilchen haben
Welleneigenschaften:

$$\lambda = h/p$$



Je höher der Impuls, desto kleiner die Wellenlänge

Um kleine Objekte zu sehen, braucht man
kleine Wellenlänge → großen Impuls → **viel Energie**

Vorbereitung: etwas Relativitätstheorie

Manche Teilchen sind sehr schwer:

Proton: $\sim 1'000'000 \text{ eV}/c^2 = 1 \text{ GeV}/c^2$

Z-Boson: $91.2 \text{ GeV}/c^2$

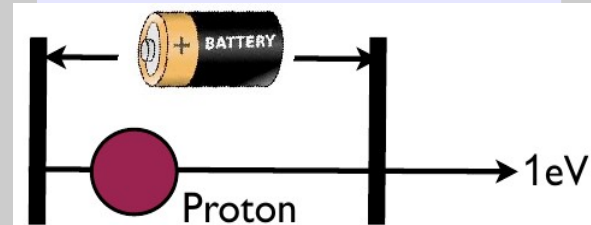
top-Quark: $172 \text{ GeV}/c^2$

Higgs-Boson: ???

→ **Brauchen viel Energie**, um schwere Teilchen zu erzeugen

Einheit eV:

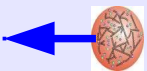
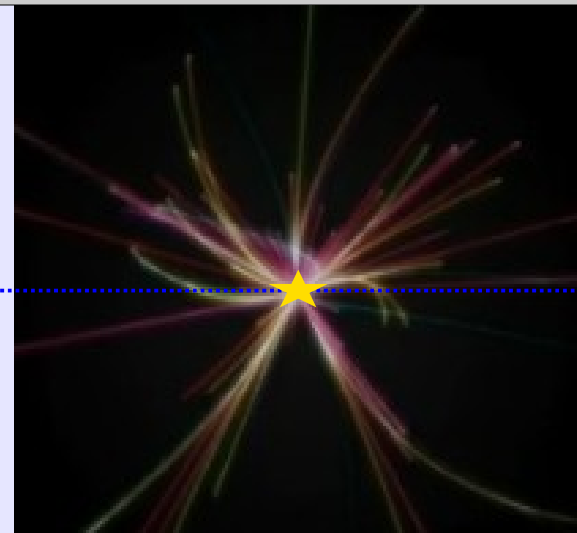
die Energie, die ein Elektron oder Proton gewinnt, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 V durchläuft



Methode:

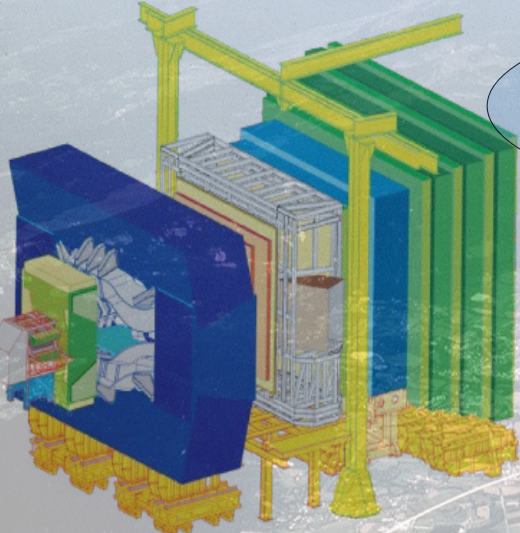
Erzeugung neuer Teilchen
in Teilchenkollisionen

Umwandlung von Energie
in Materie

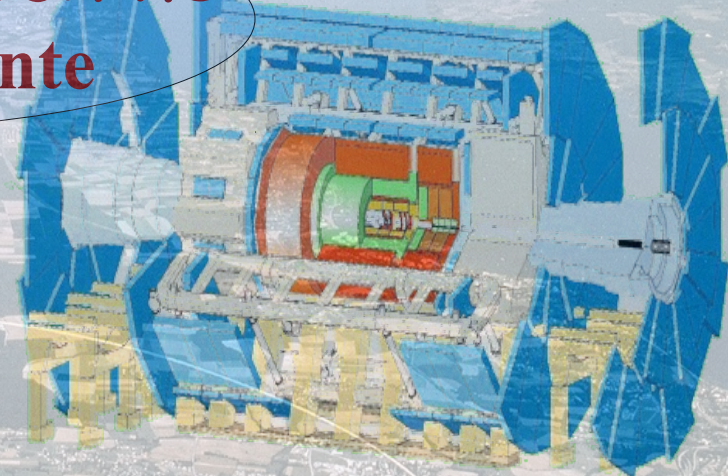


Higgs-Jagd erfordert große Anlagen und viele Jäger !

Entdeckungsmaschine LHC & Experimente



LHCb



ATLAS

CERN



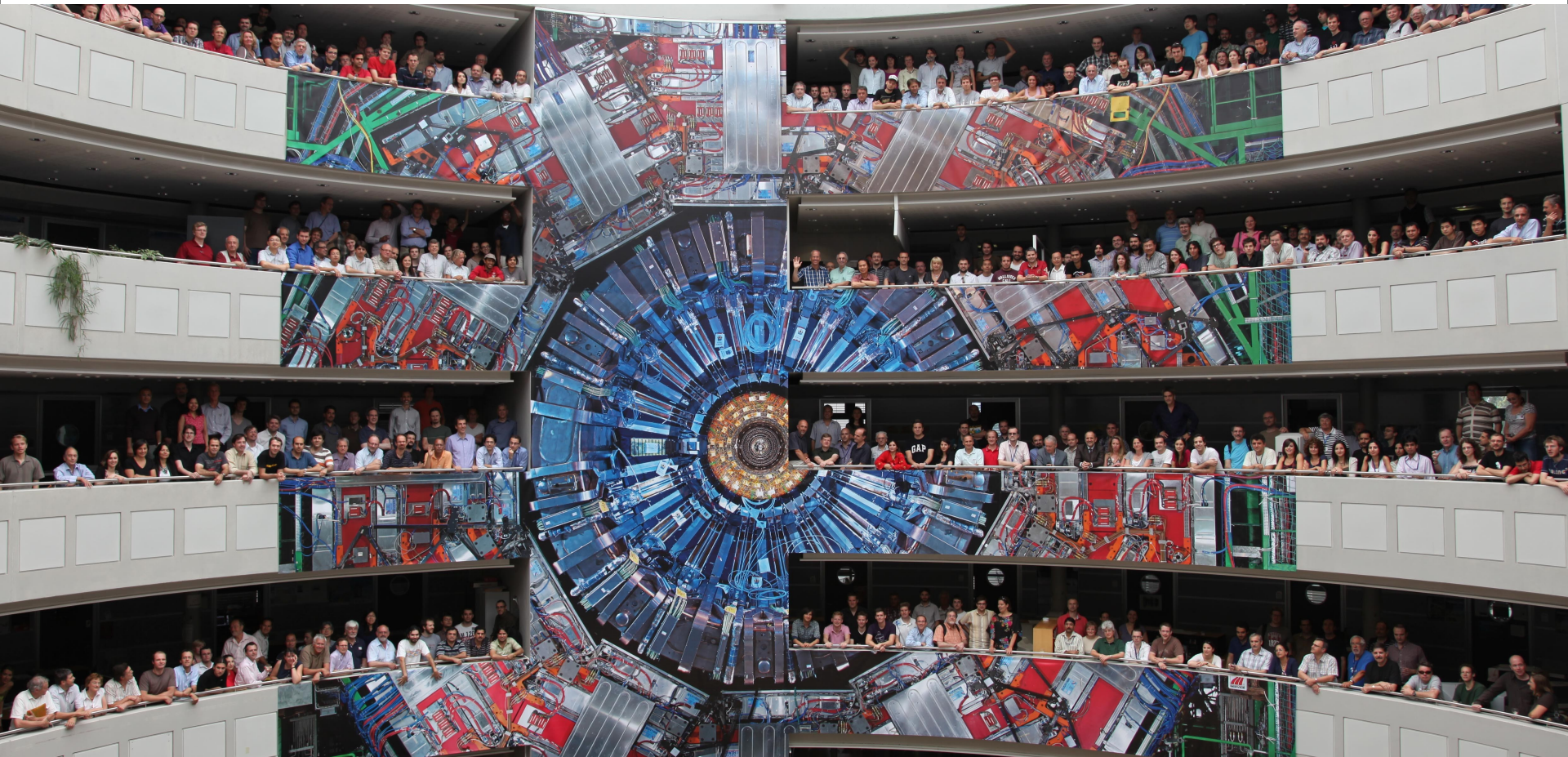
CMS



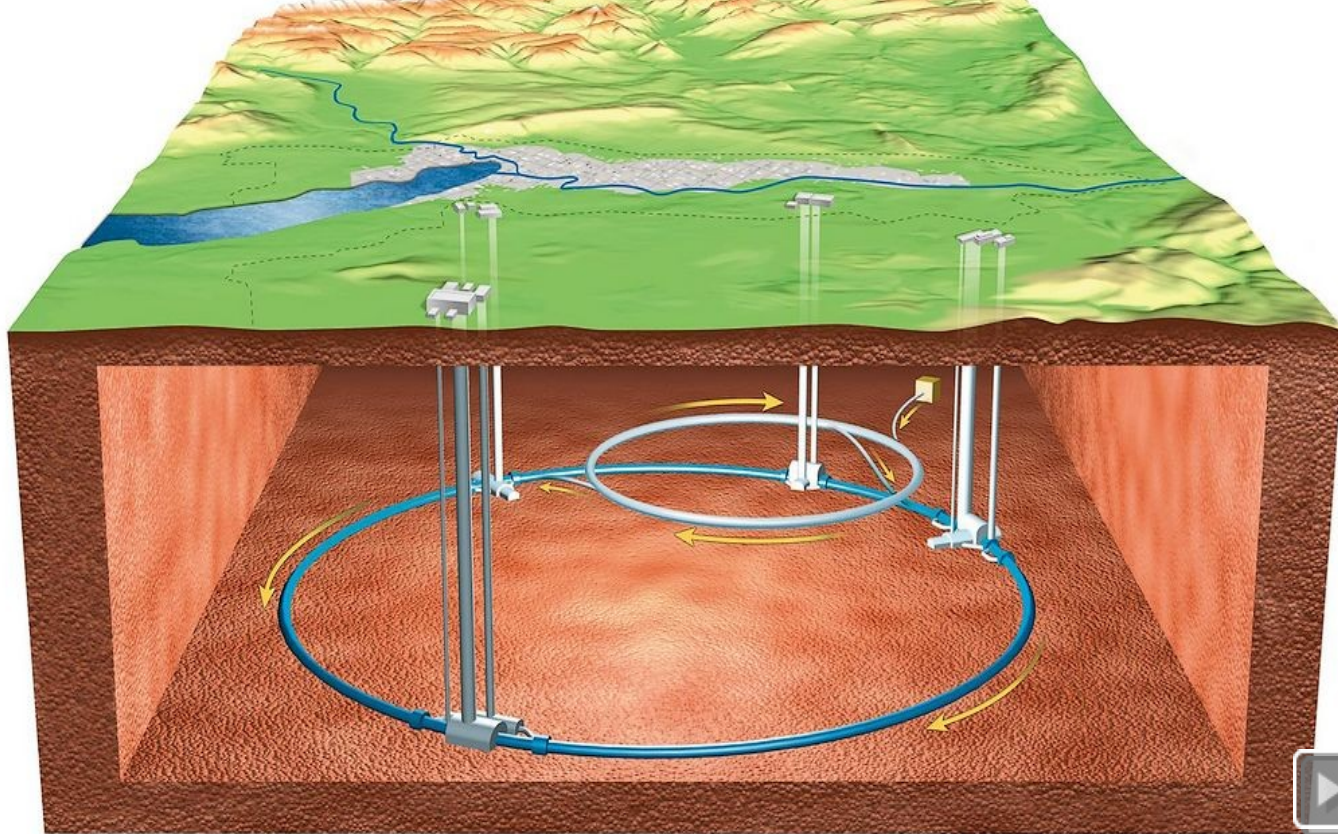
Alice

Teilchenphysik ist internationale Teamwork !

(Ein Teil der) CMS-Kollaboration: 3400 Wissenschaftler (davon 840 Doktoranden)
aus 173 Institutionen in 40 Ländern



Der Large Hadron Collider („LHC“)



- Beschleunigt Protonen (=Wasserstoffkerne) auf bisher unerreichte Energie und bring sie in zwei gegenläufigen Ringen zur Kollision
- Protonpakete kollidieren 40 Millionen Mal in der Sekunde
- Proton-Energie entspricht der typischen Teilchenenergie eine 100-Milliardstel-Sekunde nach dem Urknall

LHC-Magnete sind kalt: -271°C

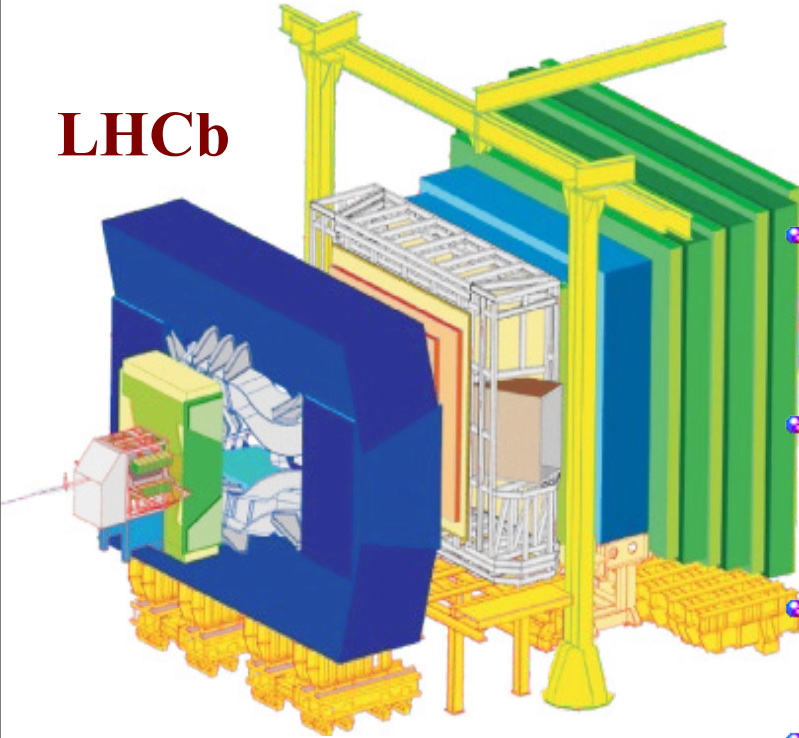


- Magnetfeld von 8,3 Tesla
- insgesamt 1232 Stück, 15 m lang
- 270'000 km Kabelstränge mit 6400 $7\mu\text{m}$ dicken supraleitenden Filamenten
- Strom von 11'700 A
- Betriebstemperatur von 1.9 K

Der coolste Ring im Weltall !

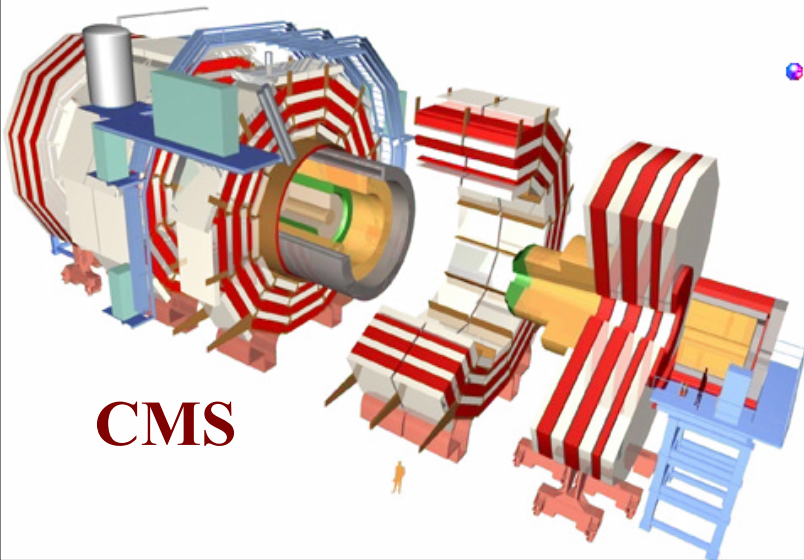
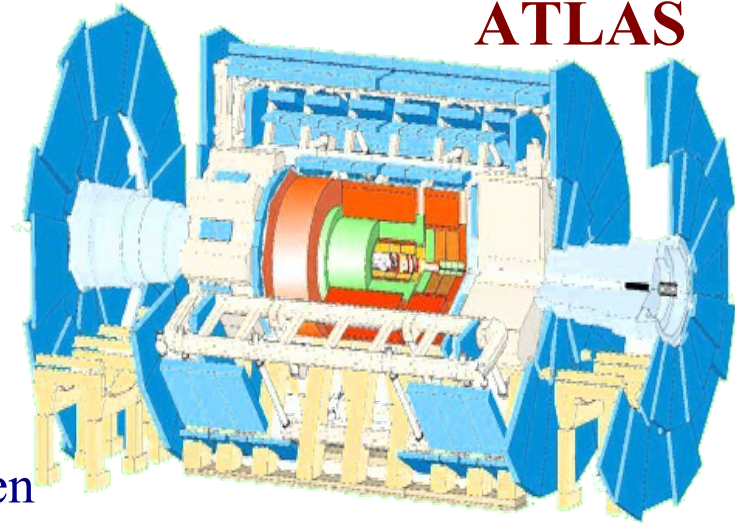
Die vier großen Detektoren

LHCb



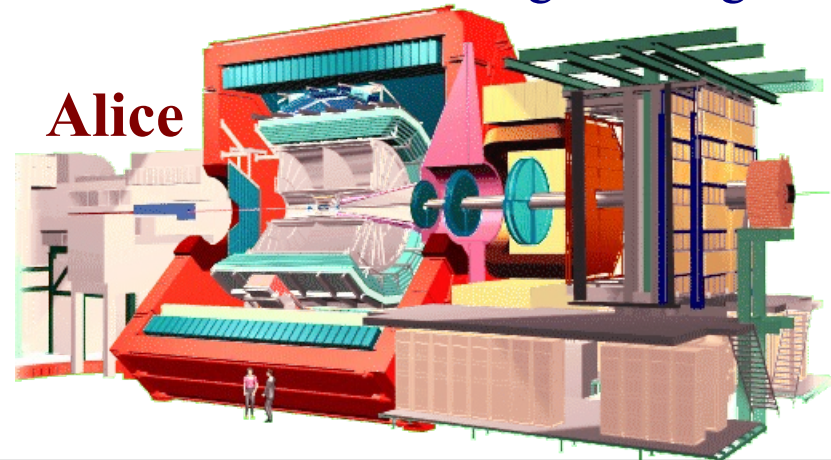
- Gebaut von Instituten in der ganzen Welt
- Jeder hat mehr als 100 Millionen Sensoren
- 40 Millionen Aufnahmen von Kollisionen pro Sekunde
- Insgesamt etwa 10'000 Physiker aus ~70 Ländern
- Spezialisiert auf unterschiedliche Fragestellungen

ATLAS



CMS

Alice



- 25 m hoch, 46 m lang
- 7.000 t schwer
- ca. 2.200 Wissenschaftler von 170 Instituten aus 37 Ländern
- große Toroid-Magnete außen

ATLAS & CMS

- die Universalisten

- 15 m hoch, 21 m lang
- 12.500 t schwer
- > 2.000 Wissenschaftler von 155 Instituten aus 37 Ländern
- 4 T Magnetfeld

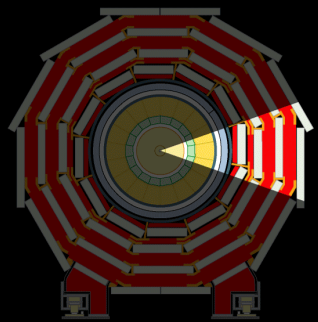


Funktionsprinzip eines Detektors: Ausschnitt aus CMS



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- Photon



Transverse slice through CMS

4T

Silicon Tracker

Electromagnetic Calorimeter

Hadron Calorimeter

Superconducting Solenoid

2T

Iron return yoke interspersed with Muon chambers

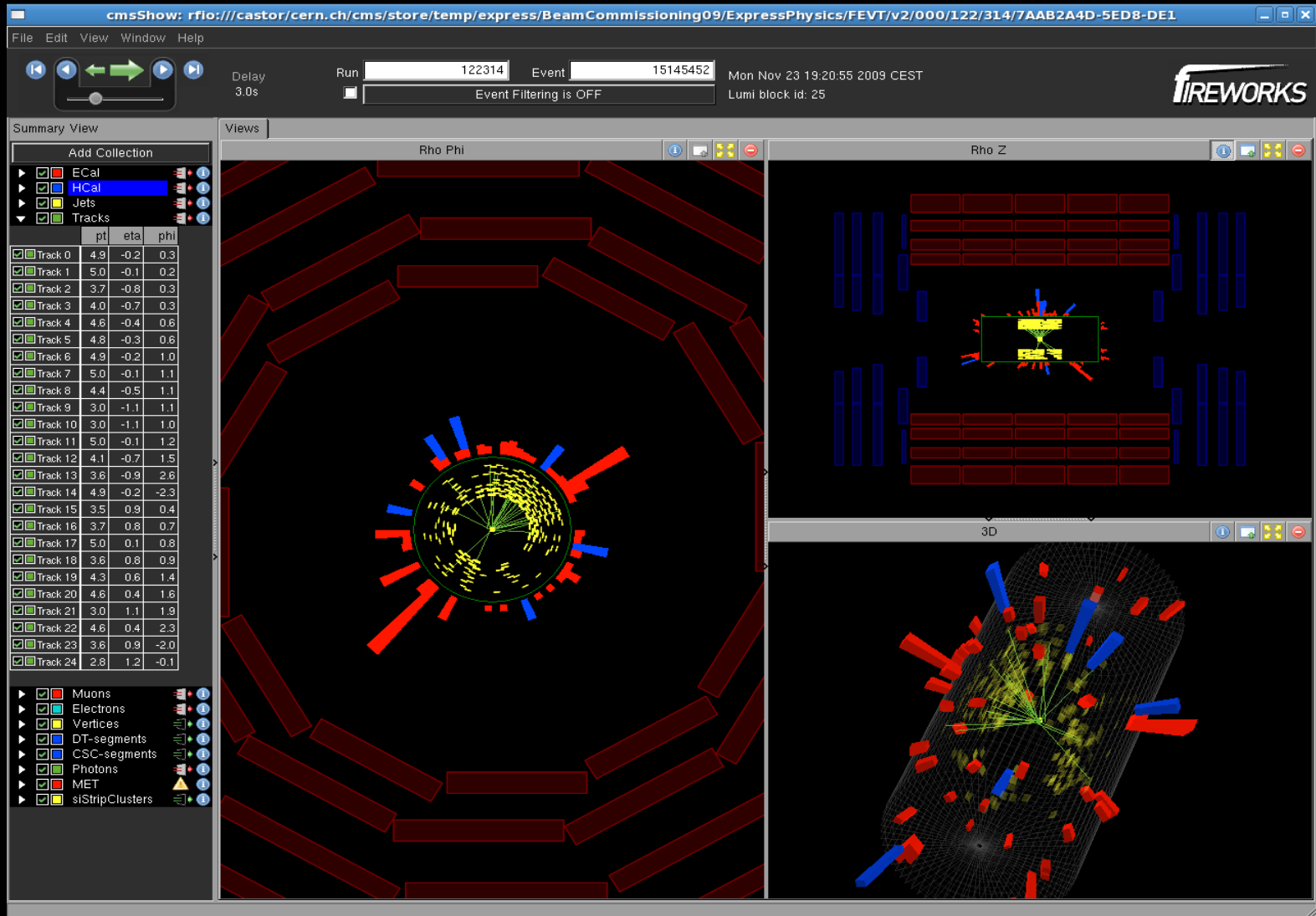
0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m

4. Teil

Die Higgs-Jagd beginnt

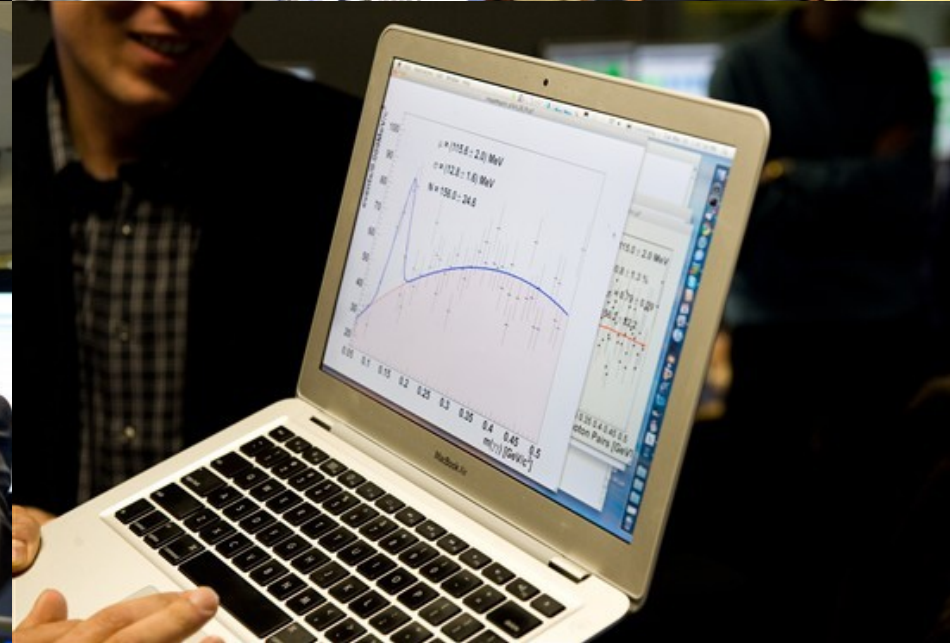
LHC (Re-) Start im November 2009

Erstes Kollisionseignis in CMS



30. März 2010, 12:58:48 Uhr

Erste Kollision bei 7 TeV Schwerpunktsenergie



Alle freuen sich, der Anfang einer langen Datennahmeperiode ...

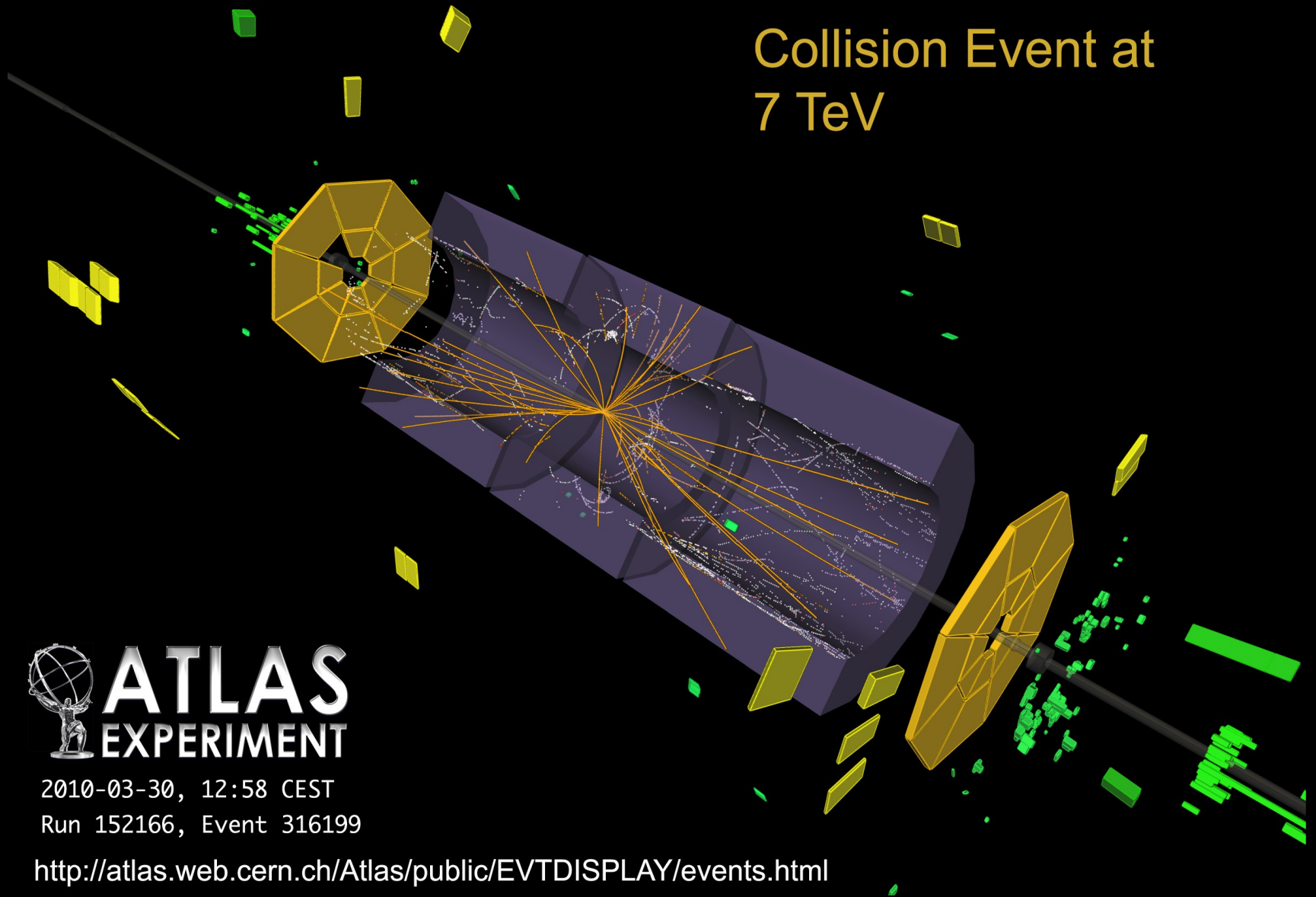
ATLAS war ebenfalls fertig ...

Collision Event at 7 TeV



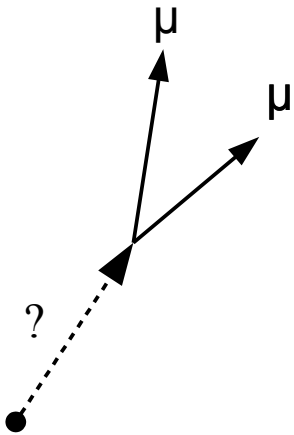
2010-03-30, 12:58 CEST
Run 152166, Event 316199

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

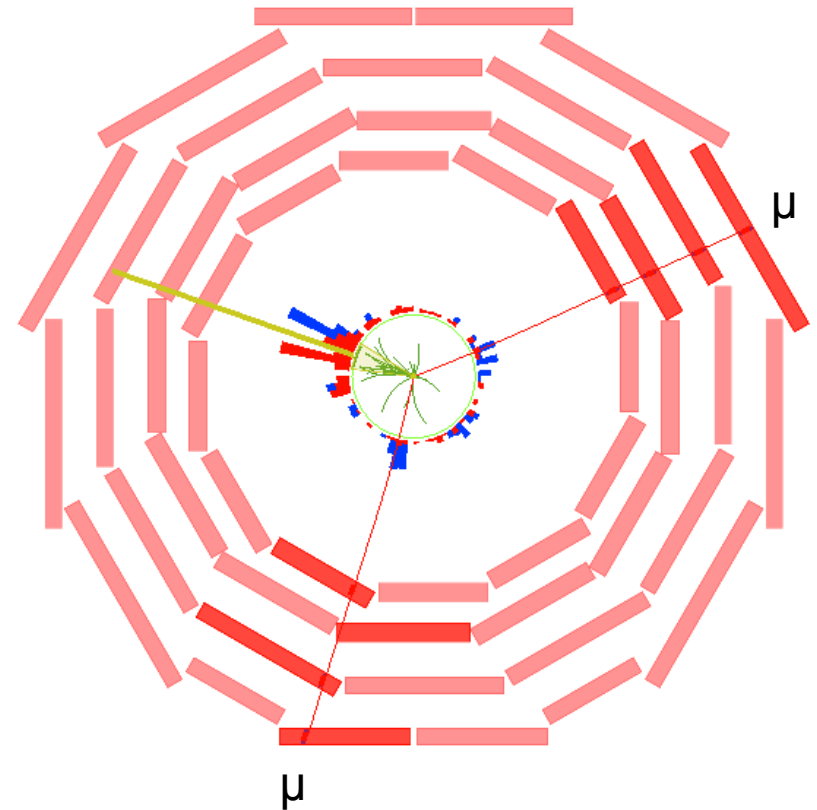
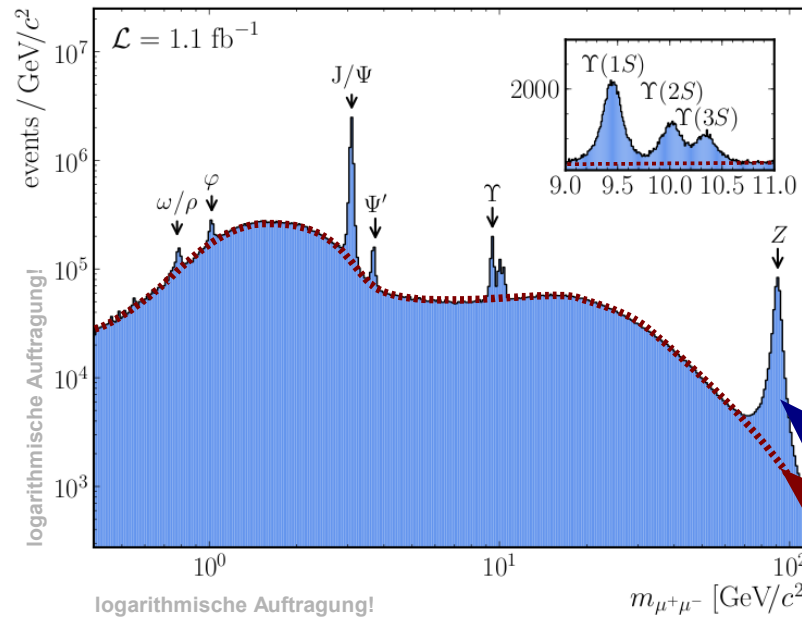


... wie auch alle anderen Experimente

Die Analyse-Arbeit beginnt



- selektiere Ereignisse mit zwei Myonen
- rekonstruiere Masse des Mutterteilchens
- zähle die Ereignisse mit einer gewissen Masse



Teilchen, die in 2 Myonen zerfallen
kombinatorischer Untergrund
(zufällig zwei Myonen)

50 Jahre Teilchenphysik im Zeitraffer

Wie sähe ein Higgs-Ereignis aus ?

- **Higgs-Bosonen sind extrem selten**

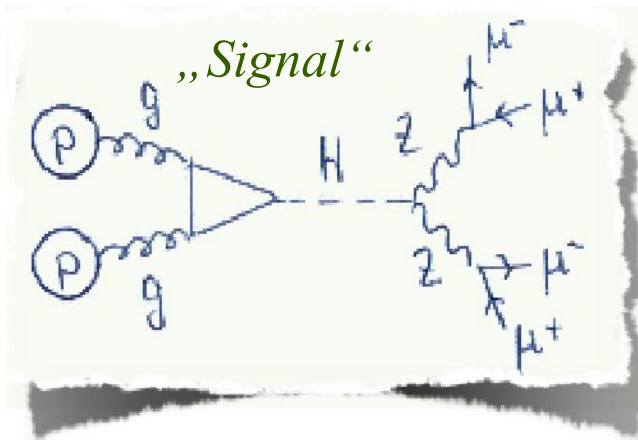
entstehen nur in ~ 1 von 10'000'000'000 pp-Kollisionen

- **Man muss sie erst finden,**

denn es gibt Untergrund !

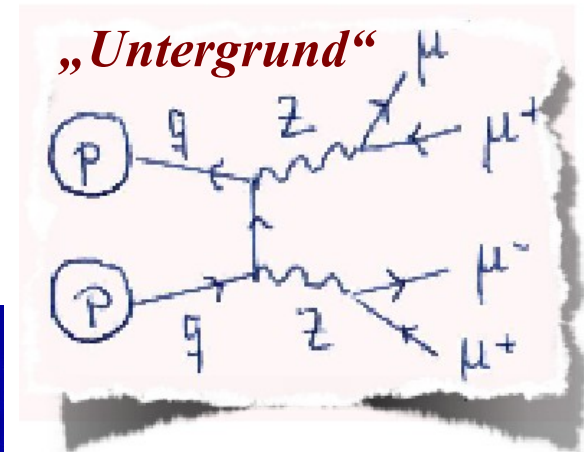
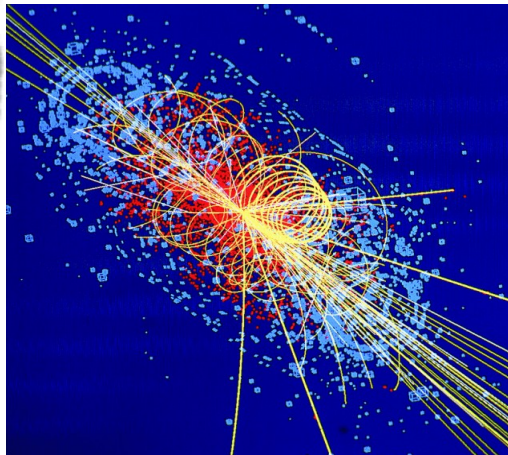
- **Theorie**

sagt uns, womit wir rechnen müssen:



$pp \rightarrow H \rightarrow 4 \text{ Myonen}$
oder nur
 $pp \rightarrow 4 \text{ Myonen}$

Im Detektor sehen wir 4 Myonen:

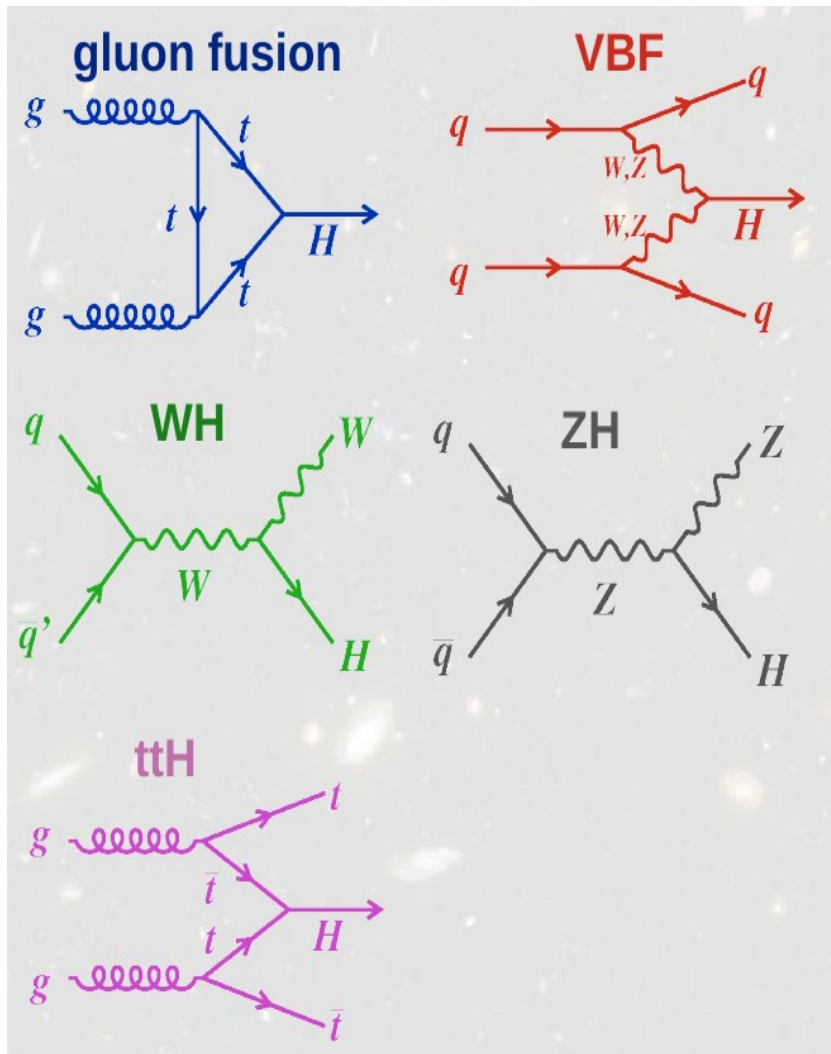


Simulation eines Higgs-Ereignisses im CMS-Detektor

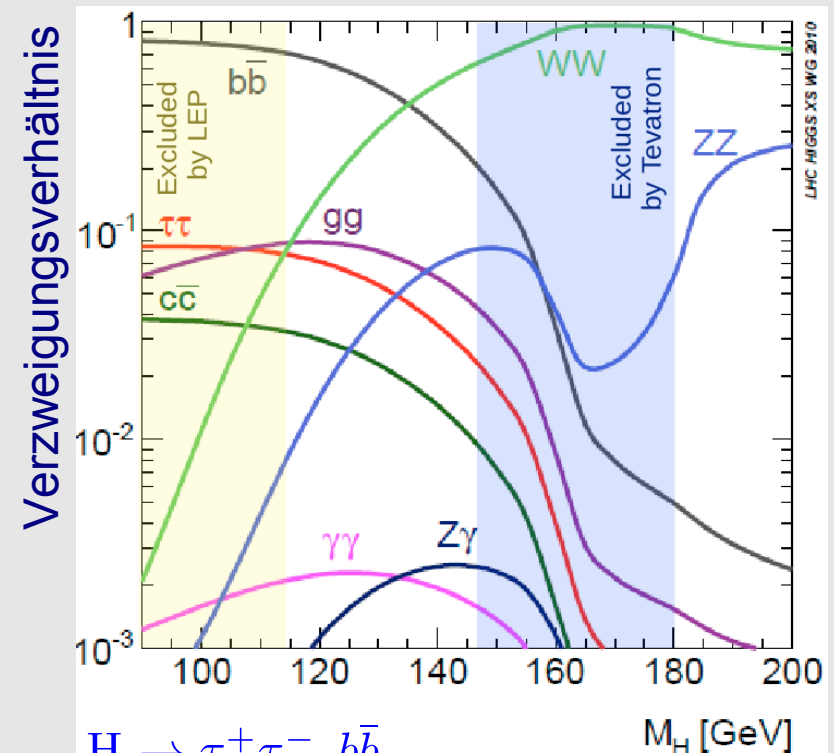
Higgs-Produktion und Zerfall

Verschiedene Produktions-

und Zerfallskanäle



Higgs-Teilchen zerfällt bevorzugt in die schwerstmöglichen Teilchen, die leichter sind als es selbst:



$H \rightarrow \tau^+\tau^-, b\bar{b}$

$H \rightarrow W^+W^-, ZZ$

$H \rightarrow t\bar{t}, \gamma\gamma$

Higgs-Suche und Würfeln

Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

Frage: sind Würfel gezinkt?

Experiment:

100 mal würfeln

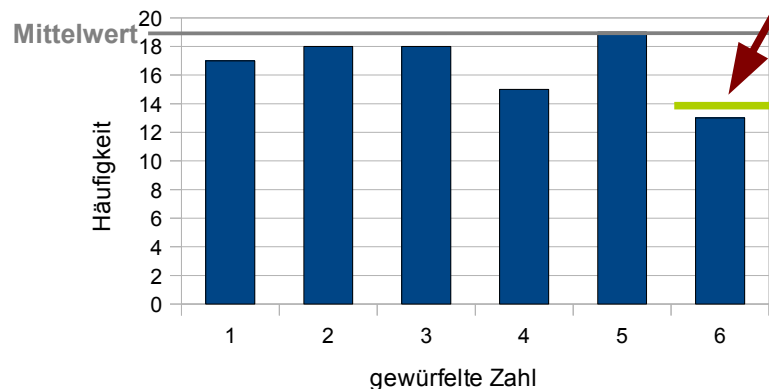
Simulation:

viele Würfelspiele mit
perfekten Würfeln

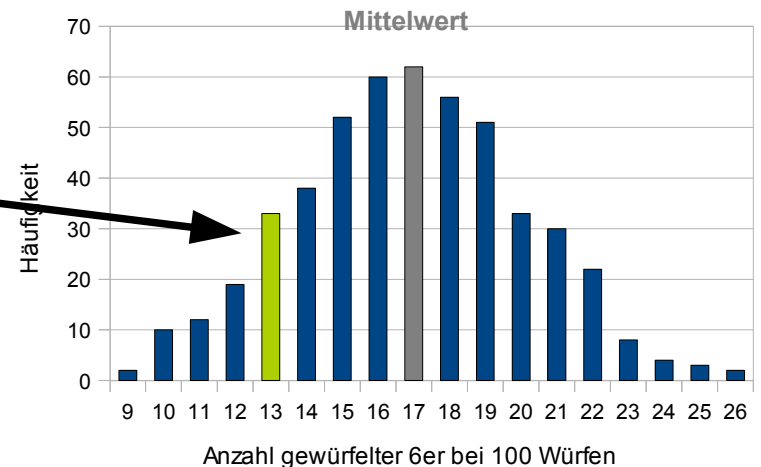


100 Würfe

?? gezinkt ??



500 simulierte Würfelspiele

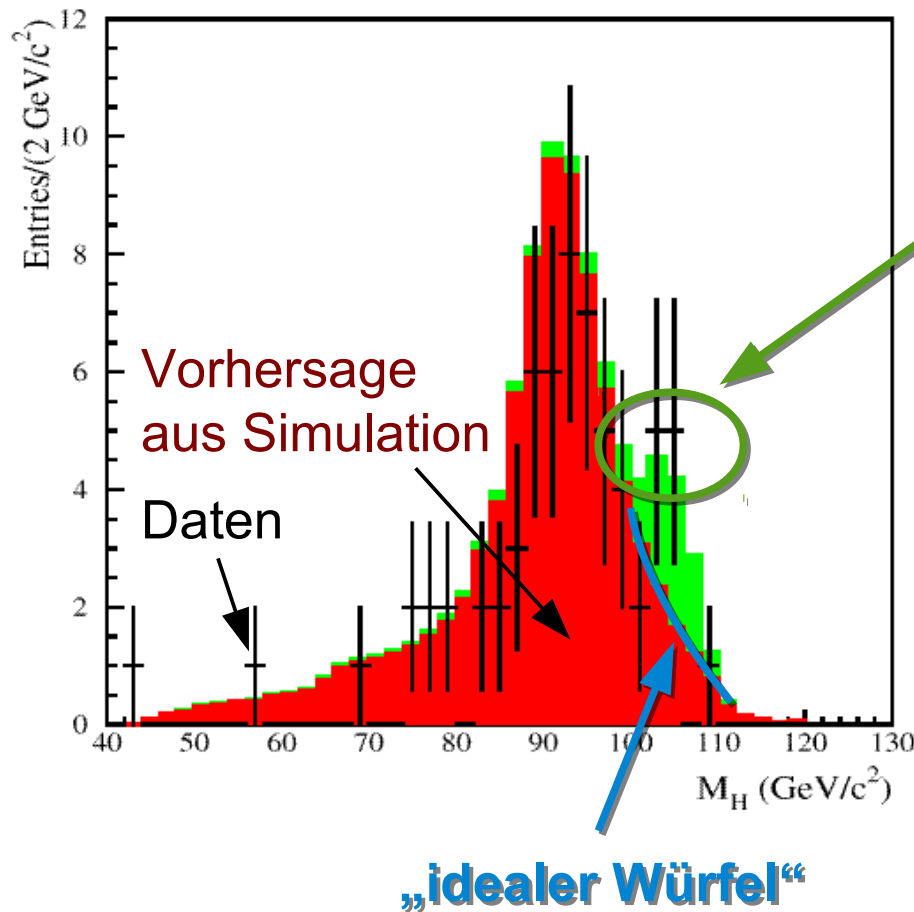


wohl nicht
gezinkt !

Übertragen auf das Higgs-Suche:

statistisch signifikanter Überschuss an 6ern
entspricht Entdeckung eines neuen Teilchens

Signal oder „statistische Fluktuation“



„gezinkter Würfel“?

Was sehen wir?

- Modell **mit** neuem Teilchen
- Modell **ohne** neues Teilchen

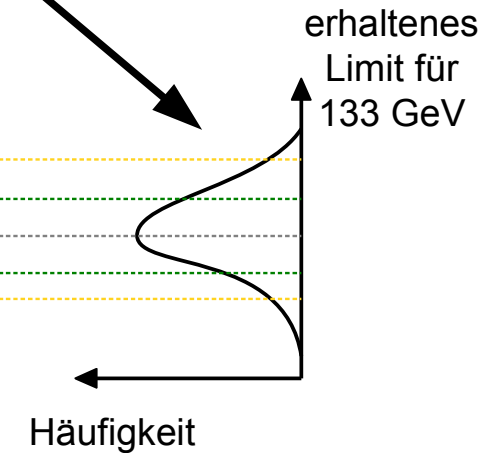
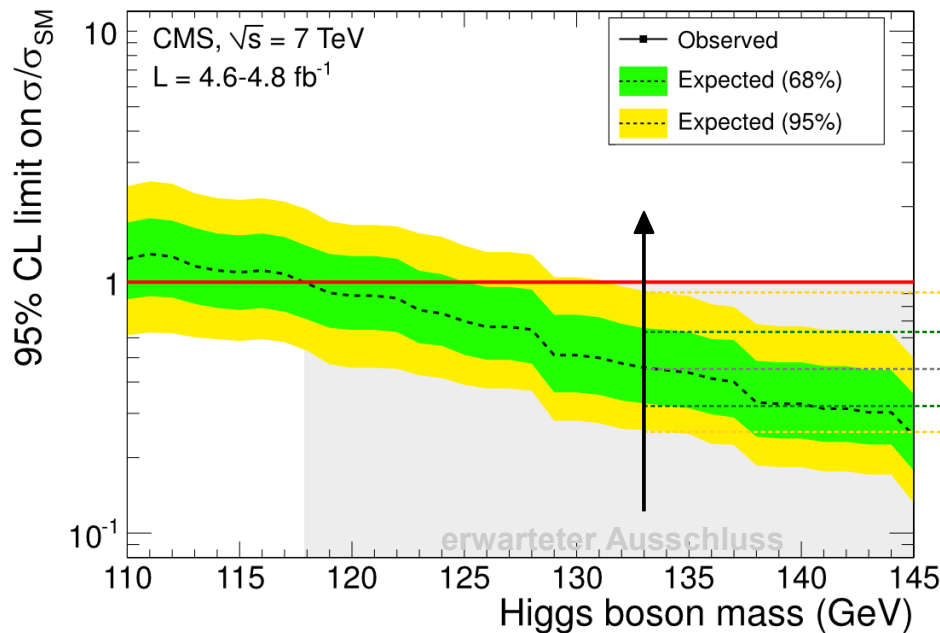
Womit sind die Daten verträglich?

- Modell **mit** Higgs-Boson
- Modell **ohne** Higgs-Boson

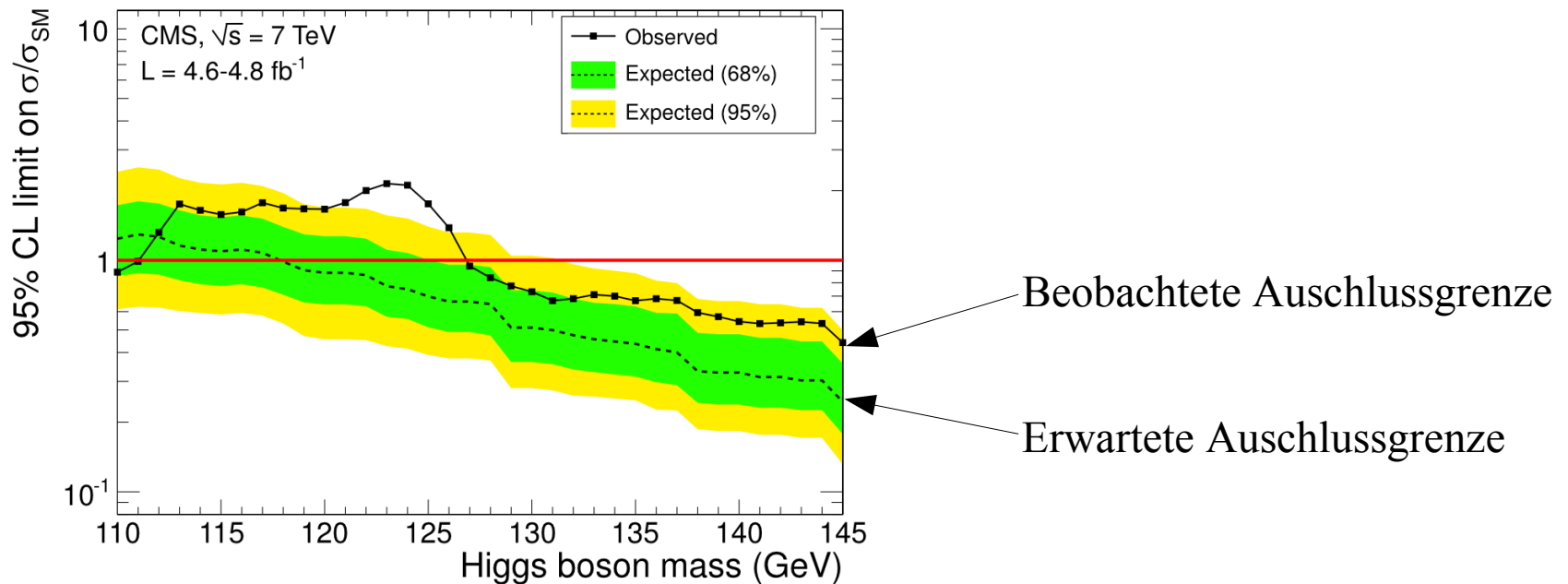
→ **Wahrscheinlichkeitsaussagen mit Hilfe statistischer Methoden**

Statistische Analyse zur Higgs-Suche

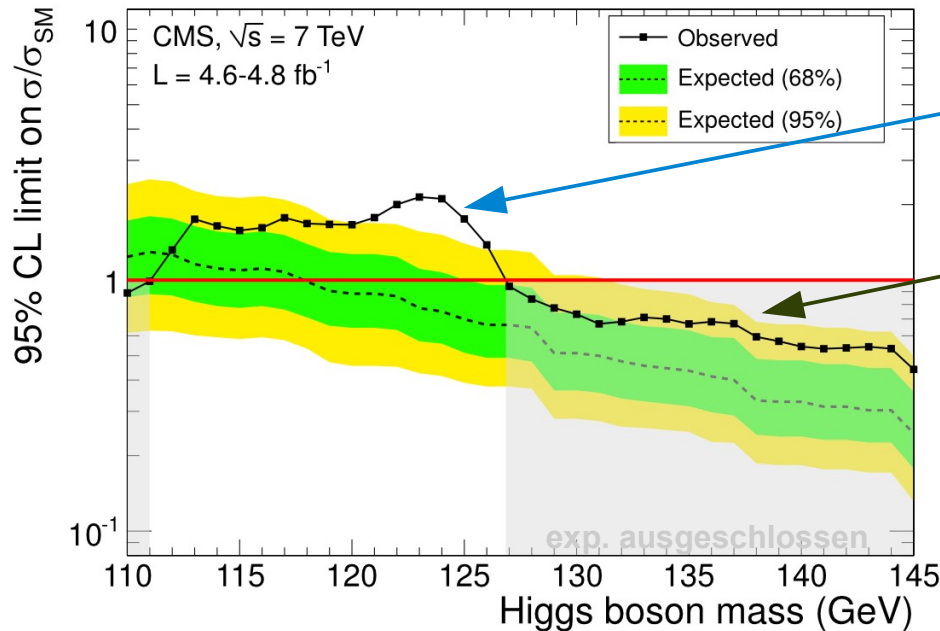
Simuliere die Messung für jede mögliche Higgs-Masse sehr häufig und trage die Häufigkeit der erhaltenen Grenzen auf



Berechne das Limit für die Beobachtung in Daten:



Schlussfolgerungen



Ergebnis der Higgs-Suche von CMS, Dez. 2011

Ereignisse mit Higgs-Kandidaten

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

ATLAS
EXPERIMENT

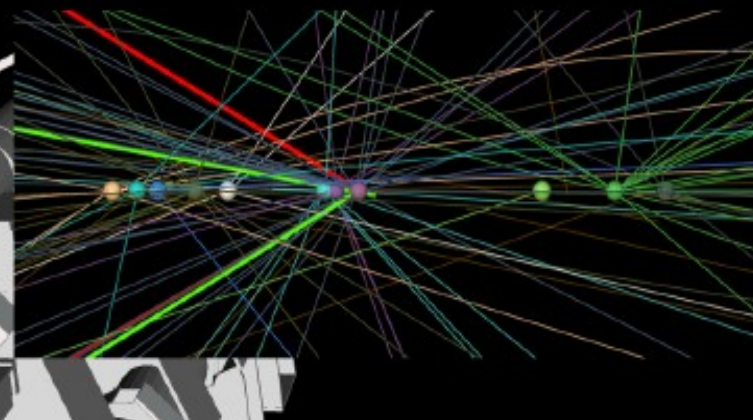
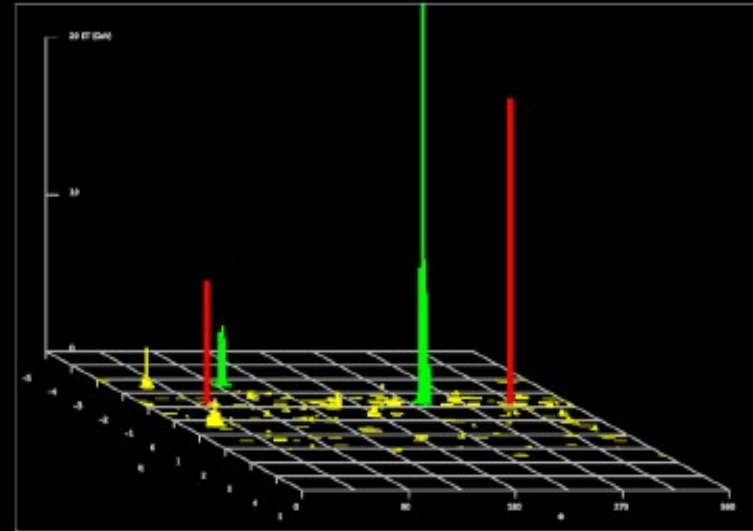
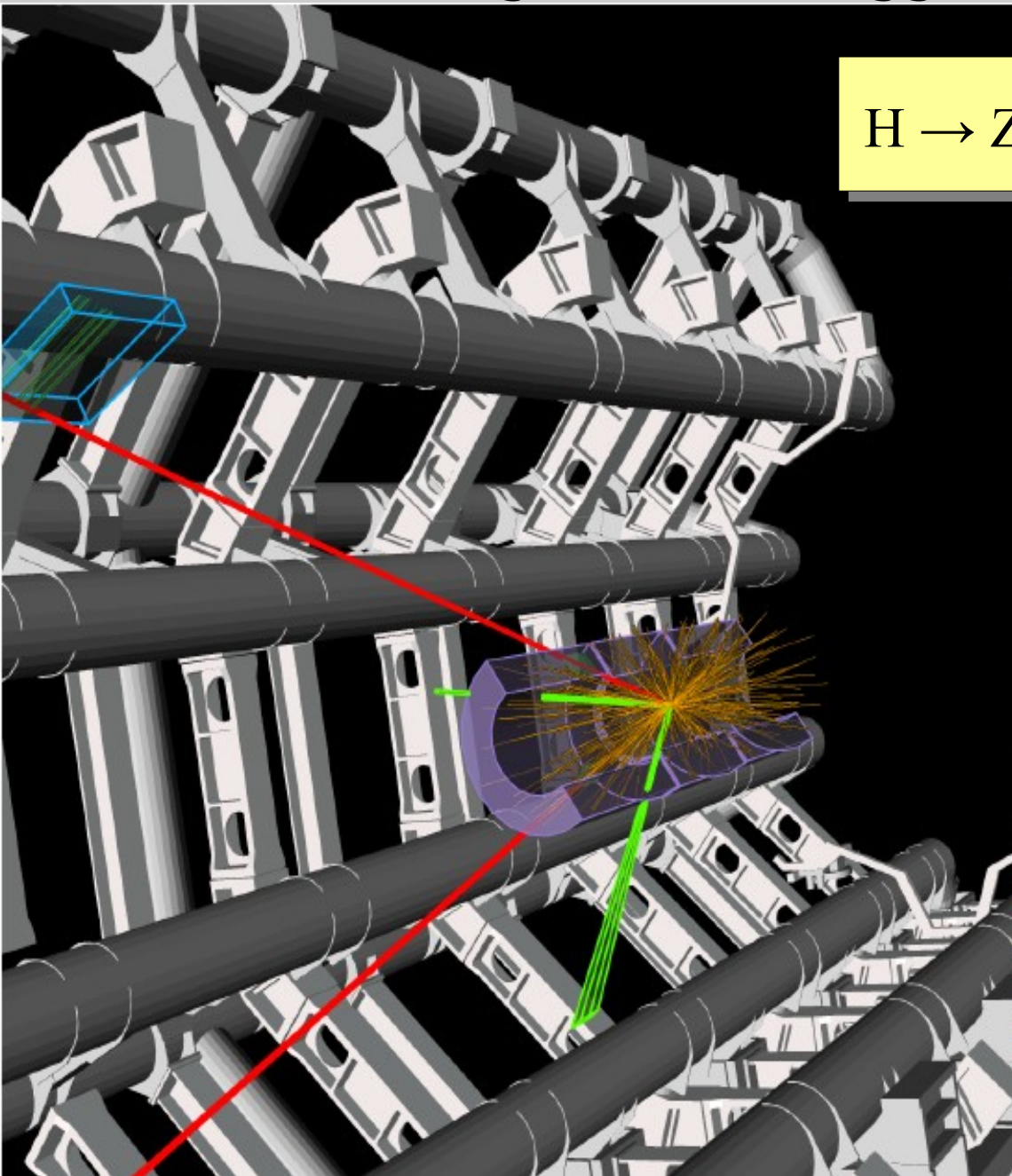
<http://atlas.ch>

Run: 205113

Event: 12611816

Date: 2012-06-18

Time: 11:07:47 CEST

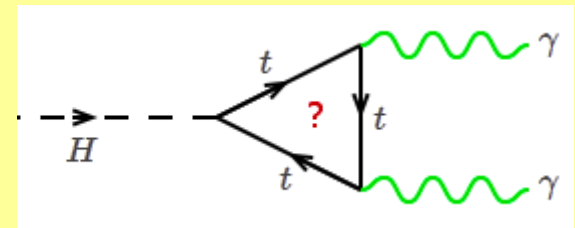


Ereignisse mit Higgs-Kandidaten



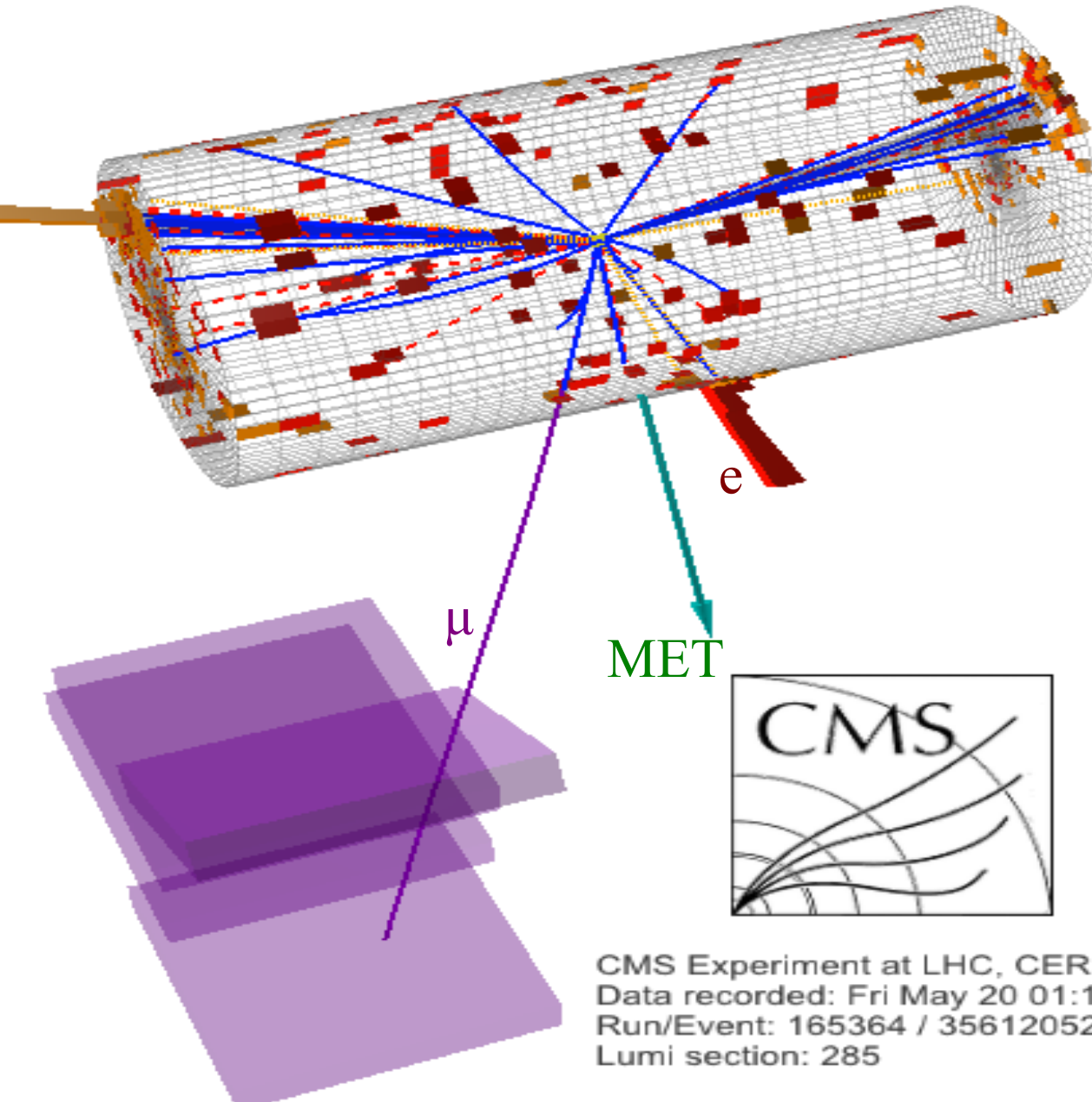
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:09:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

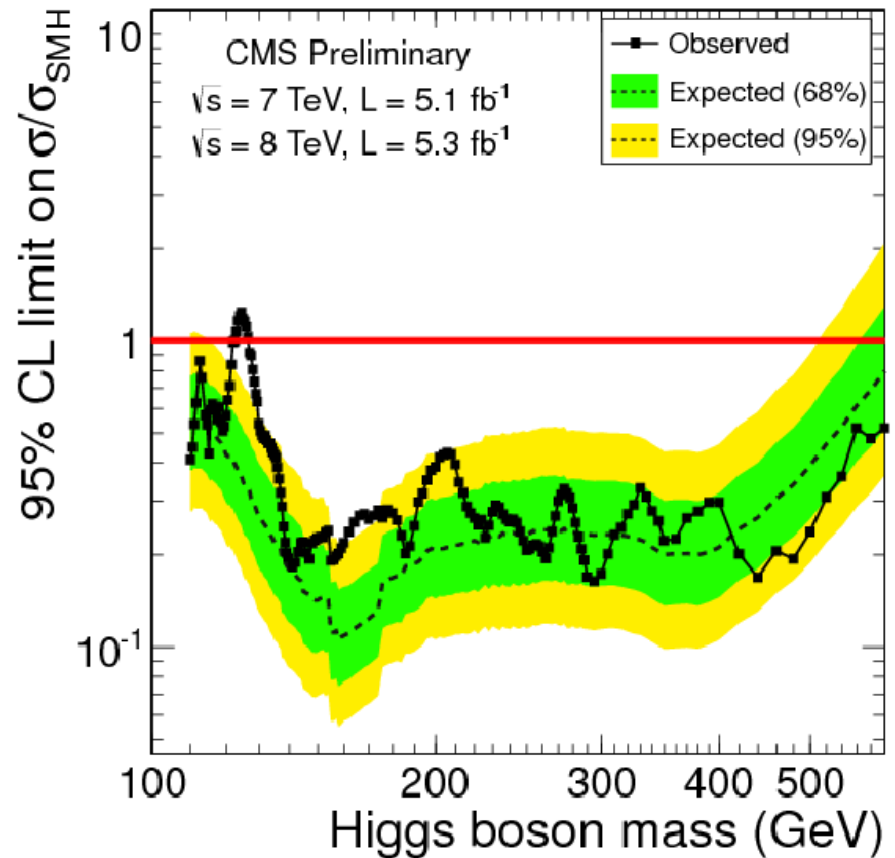
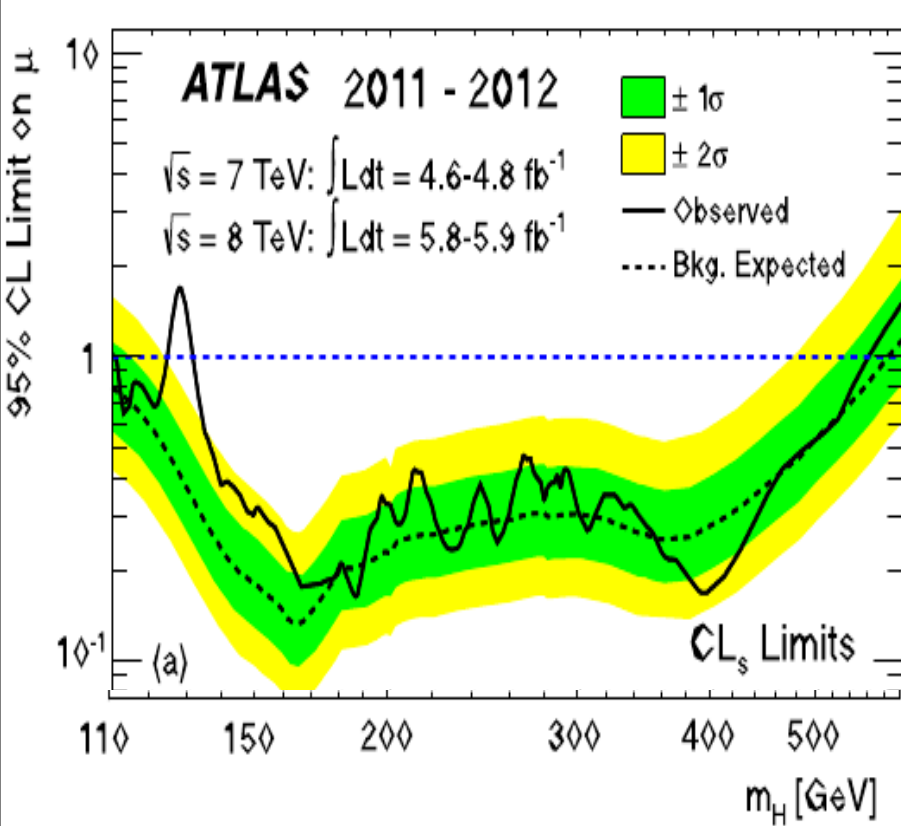


Ereignisse mit Higgs-Kandidaten

$$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$$



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri May 20 01:10:36 2011 CEST
Run/Event: 165364 / 356120525
Lumi section: 285



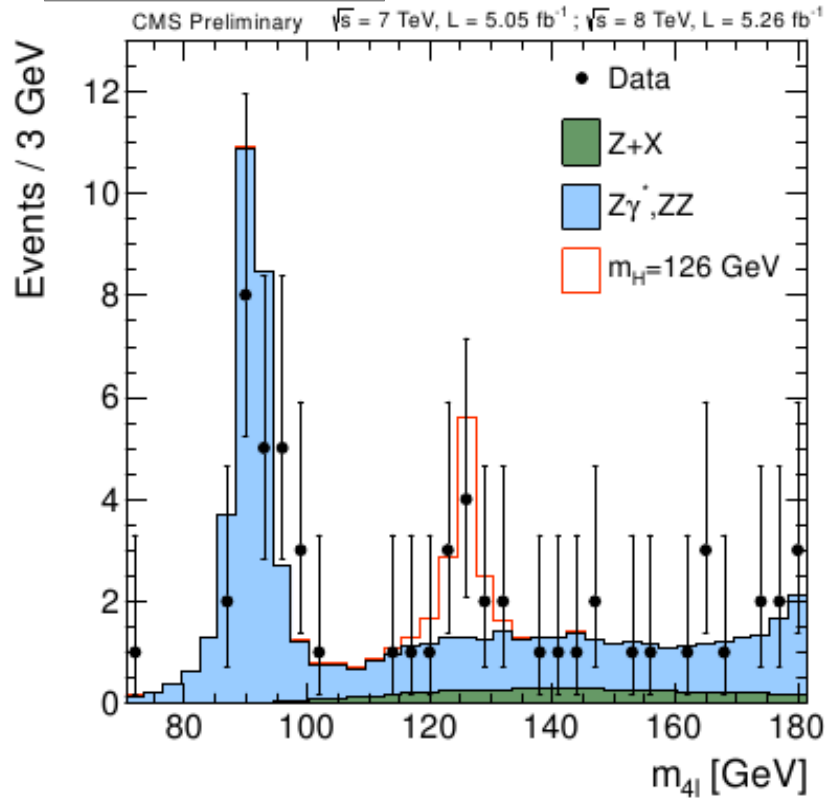
Ausschlussgrenzen (95% CL)

131–523 GeV/c²

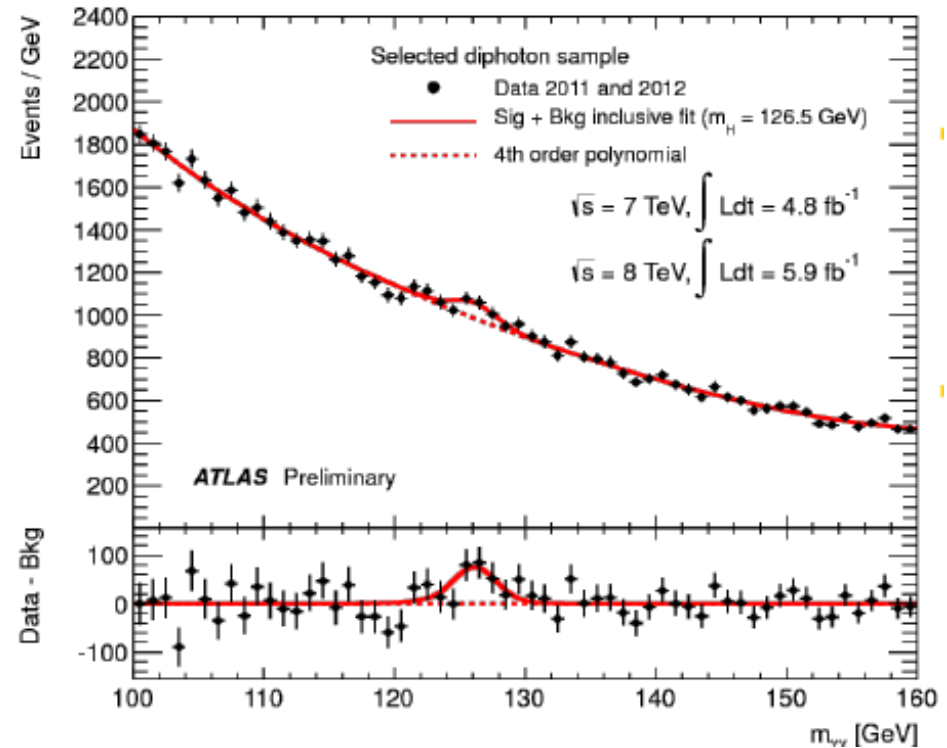
128–600 GeV/c²

!!! Kein Ausschluss bei $m_H \sim 125 \text{ GeV/c}^2$!!!

$$H \rightarrow ZZ$$



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



Ereignisüberschuss in ZZ und $\gamma\gamma$ bei ATLAS und CMS

Sonderseminar am CERN, 4. Juli 2012

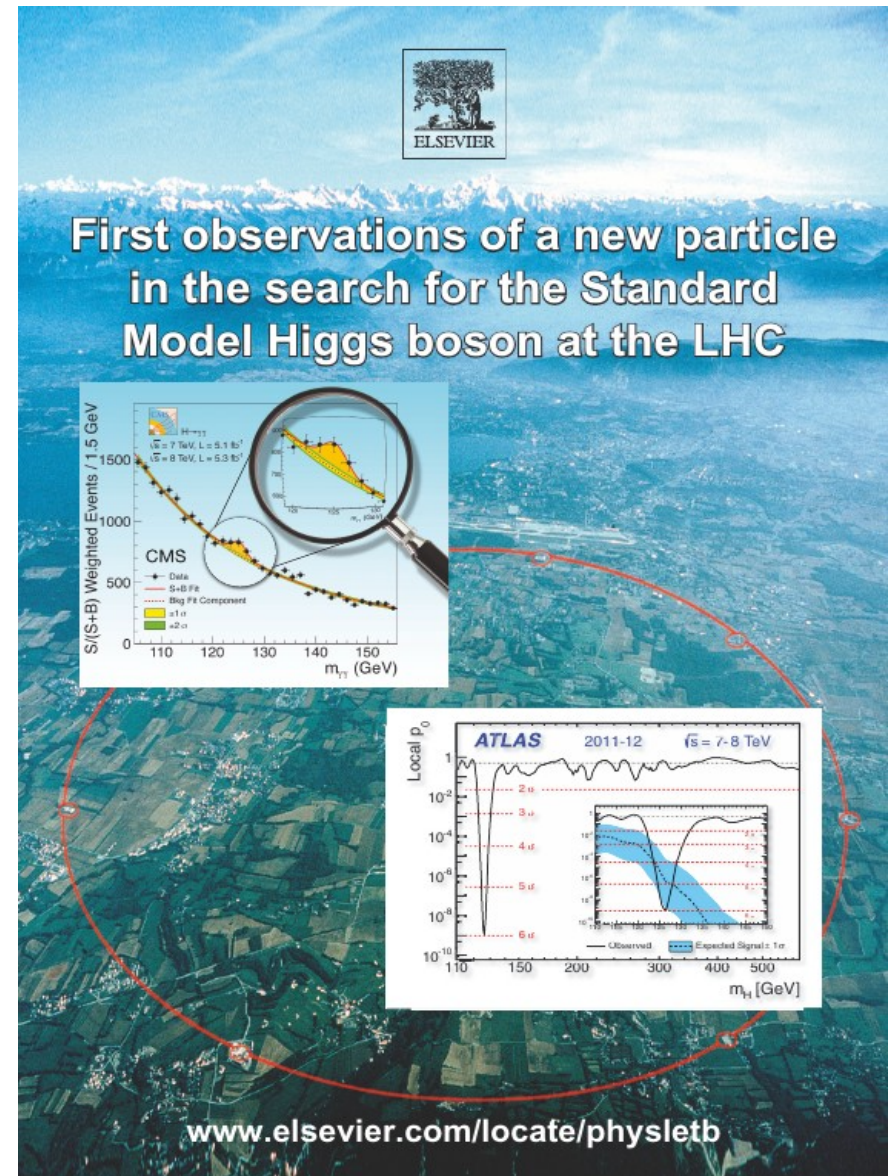


Veröffentlichung der Entdeckung
eines Higgs-artigen Teilchens im
Sommer 2012, ATLAS & CMS

Signifikanter Überschuss in
ATLAS und CMS in

$H \rightarrow ZZ$ und $H \rightarrow \gamma\gamma$
(die sensitivsten Kanäle)

Noch keine signifikante
Beobachtung in anderen
Zerfallskanälen möglich



Brief von Peter Higgs



SCHOOL of PHYSICS and ASTRONOMY

The University of Edinburgh
James Clerk Maxwell Building
The King's Buildings
Mayfield Road
Edinburgh EH9 3JZ

Telephone +44 (0)131 650 1000

or direct dial +44 (0)131 650 5249

Fax +44 (0)131 650 5902

Email info@ph.ed.ac.uk

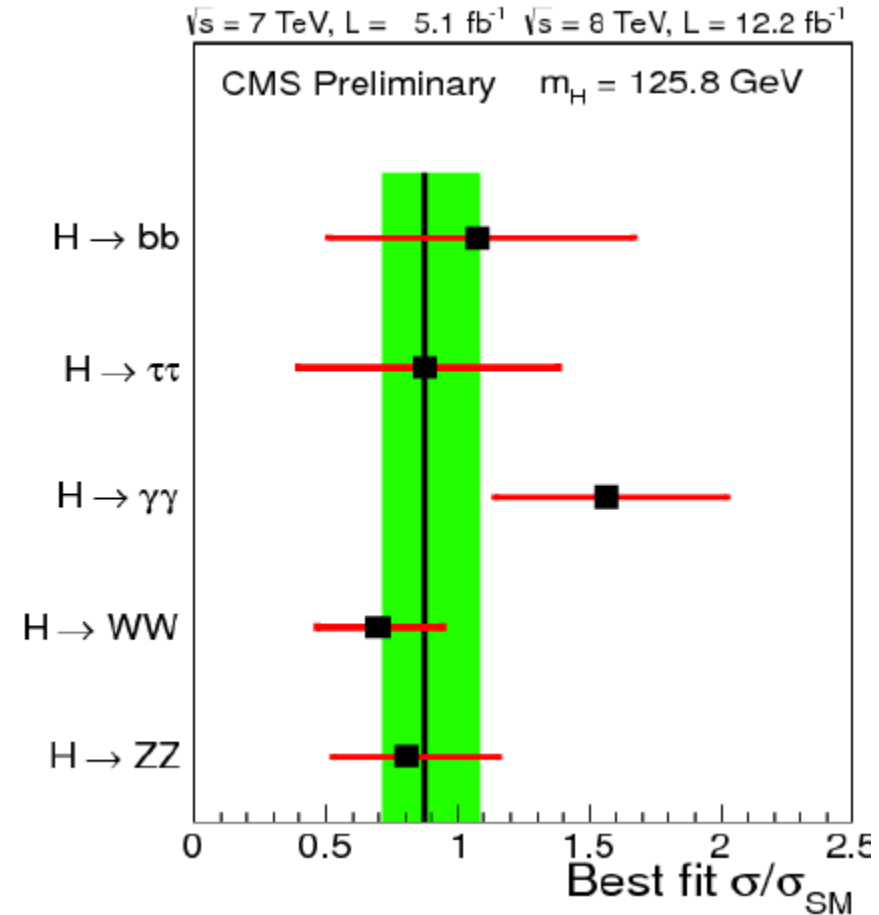
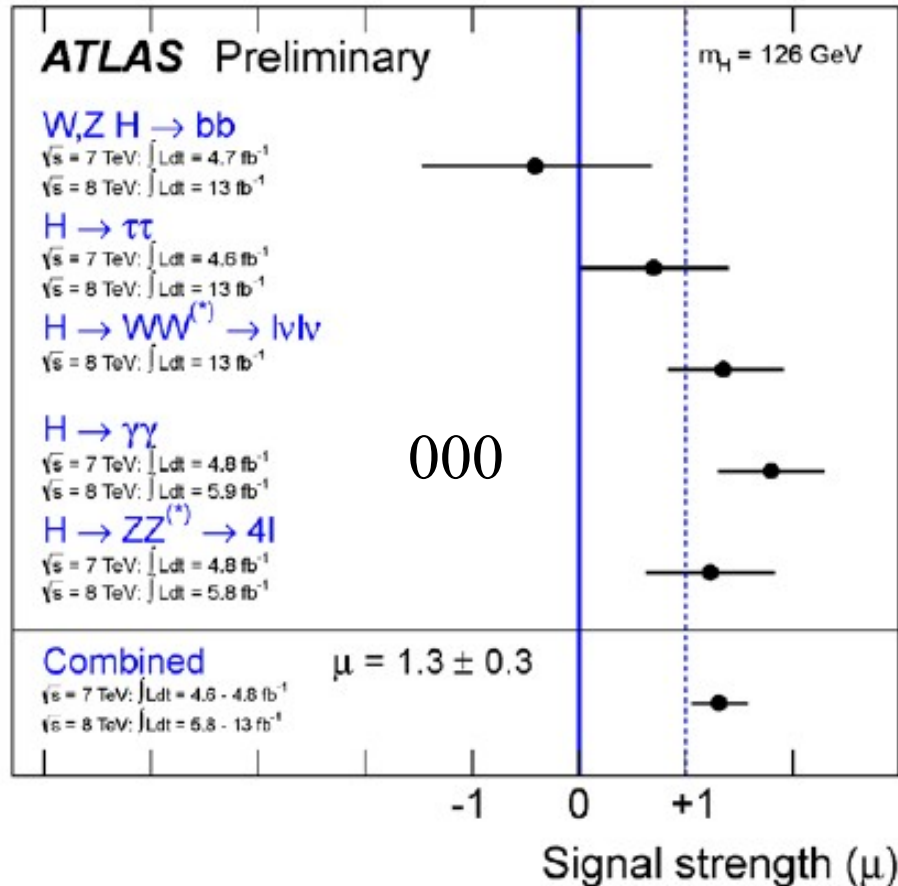
www.ph.ed.ac.uk

Congratulations to both
Atlas and CMS Collaborations
and to the builders of the LHC
on a magnificent achievement!

Peter Higgs

30 August 2012

Doppelt so viele pp-Kollisionen wie im Sommer,
aber Daten noch nicht vollständig analysiert



Signalstärke in $ZZ, \gamma\gamma$ entspricht Higgsteilchen des Standardmodells

Zerfall in b -Quarks und τ -Leptonen noch nicht signifikant gesehen

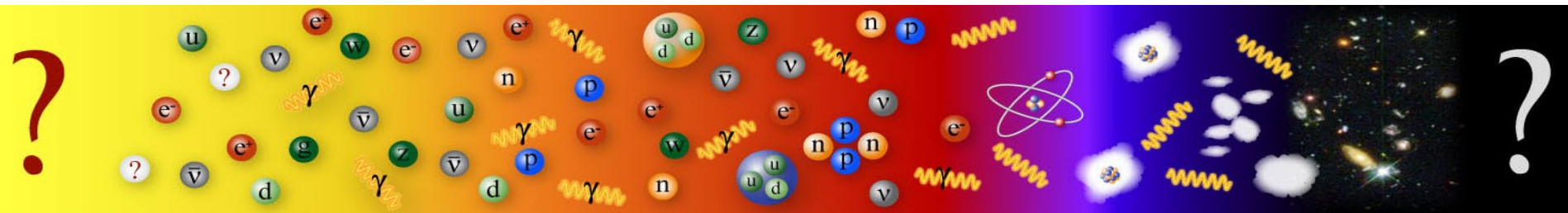
Higgs-artiges Teilchen von ATLAS und CMS am LHC entdeckt !

* 1'513'728'000 sec =
48 Jahre nach seiner
theoretischen Vorhersage
durch
Higgs
Kibble
Brout
Englert
Hagen
Guralnik



Der LHC läuft noch –
Ergebnisse im März 2013 erwartet
Es bleibt noch spannend !

Weitere Informationsquellen:



- www.teilchenwelt.de Netzwerk Teilchenwelt – Organisation von „Masterclasses“ und Schüler – Workshops
- www.teilchenphysik.de Sammlung von Links zur Teilchenphysik
- www.weltmaschine.de deutsche Seiten zum LHC
- www.weltderphysik.de Physik allgemein (BMBF und DPG)
- <http://cern.ch/PhysicsTeaching> Lehrerfortbildung des CERN
- www.cern.ch (englisch)
- „Physik am Samstag“ an verschiedenen Universitäten

The END

Bonusmaterial

Offene Fragen für den LHC

Woraus besteht das Universum ?

QCD

Was geschah beim Urknall ?

W' ?

Woraus besteht die „Dunkle Materie“?

Z' ?

Gibt es Super-Symmetrie ?

Woher kommt die Masse ?

Top

Glueballs?

Z

Warum gibt es überhaupt (noch) Materie ?

W

t' ?

Woraus haben sich Protonen gebildet ?

B_s

Was ist „Dunkle Energie“?

?

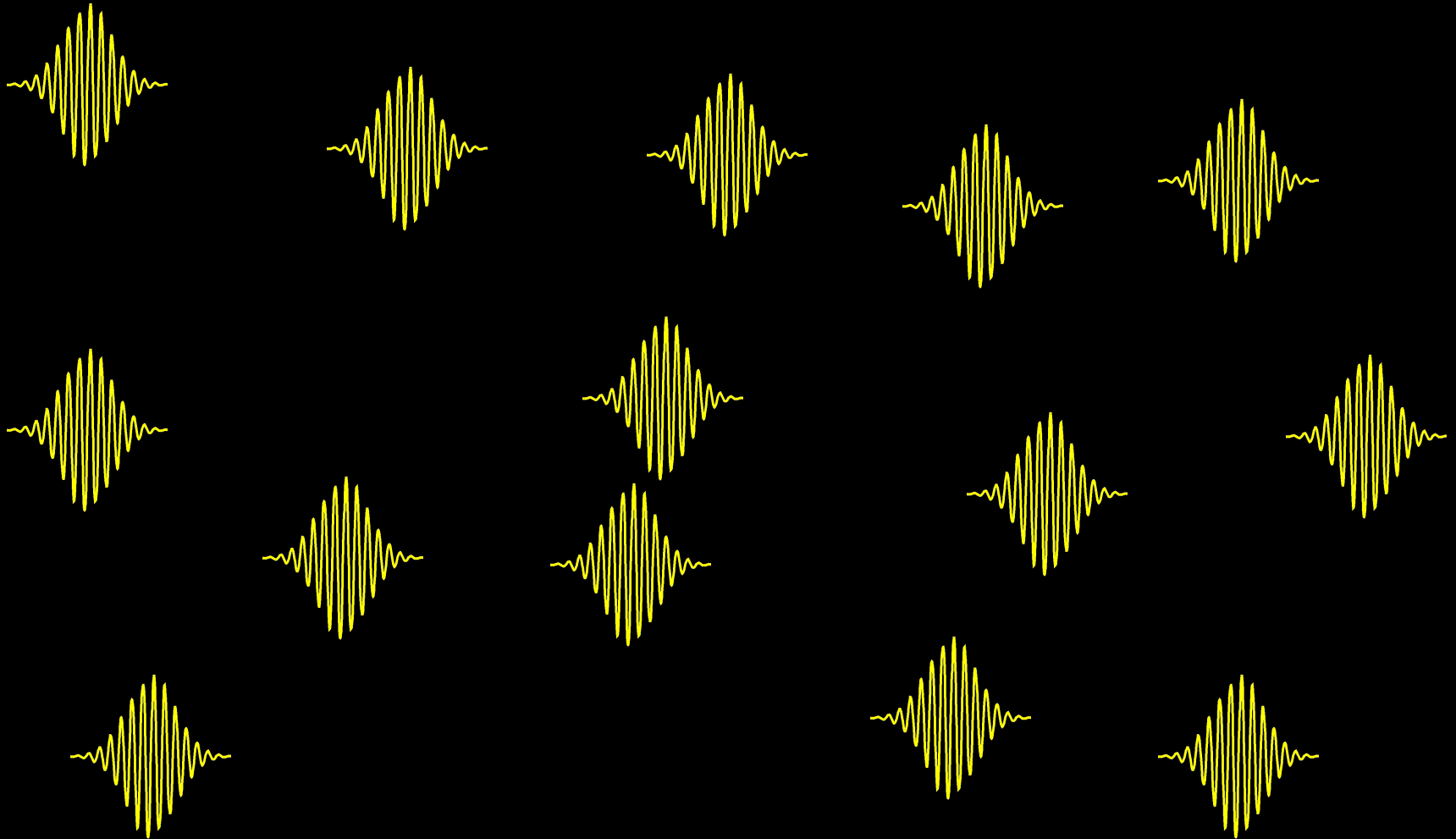
Materie und Anti-Materie

Was passiert,
wenn Materie



auf
Anti-Materie trifft ?

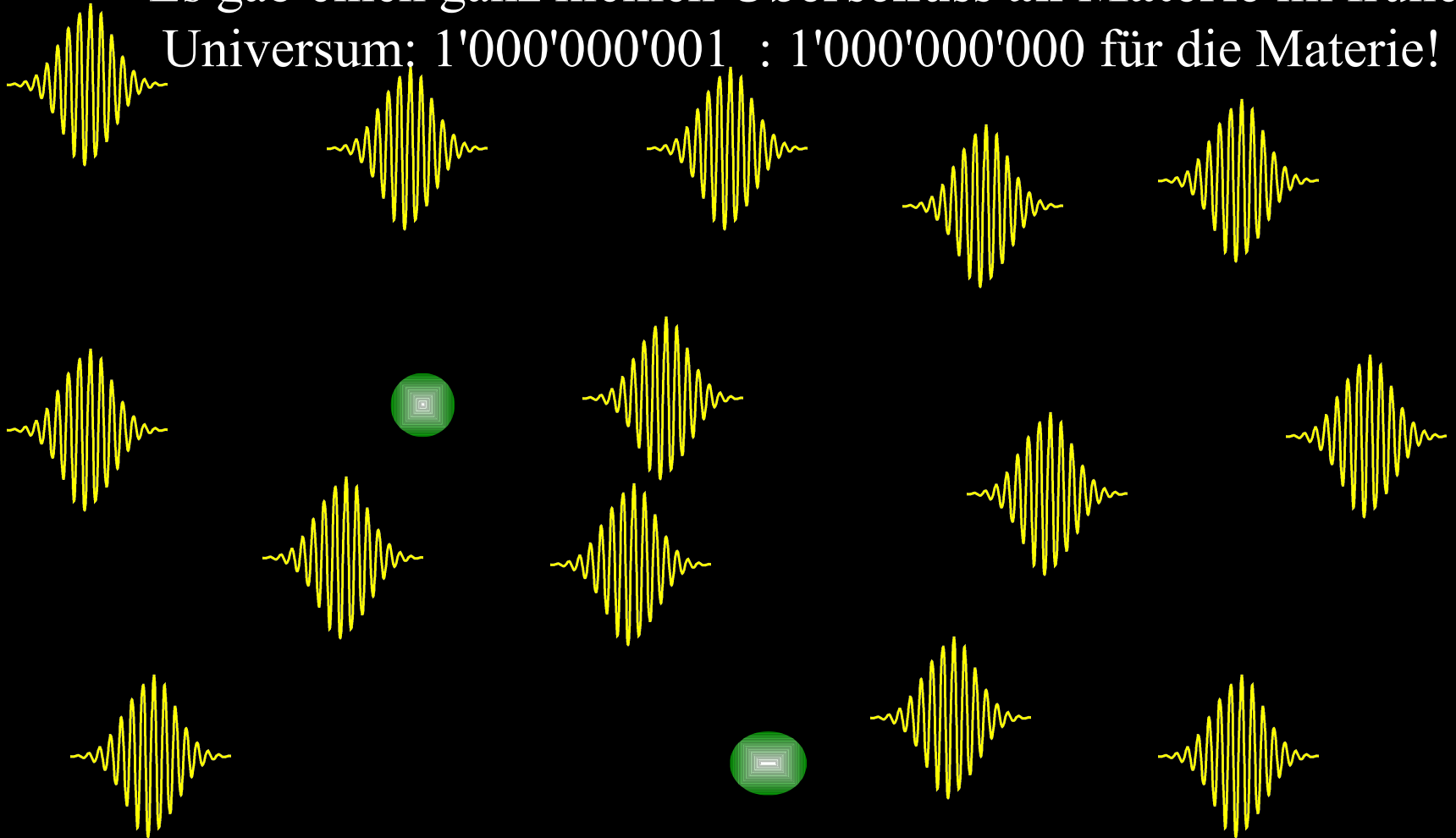
Warum gibt es überhaupt noch Materie ?



Wenn Materie und Anti-Materie genau gleich wären,
gäbe es im Universum nur noch Licht (=Photonen) !

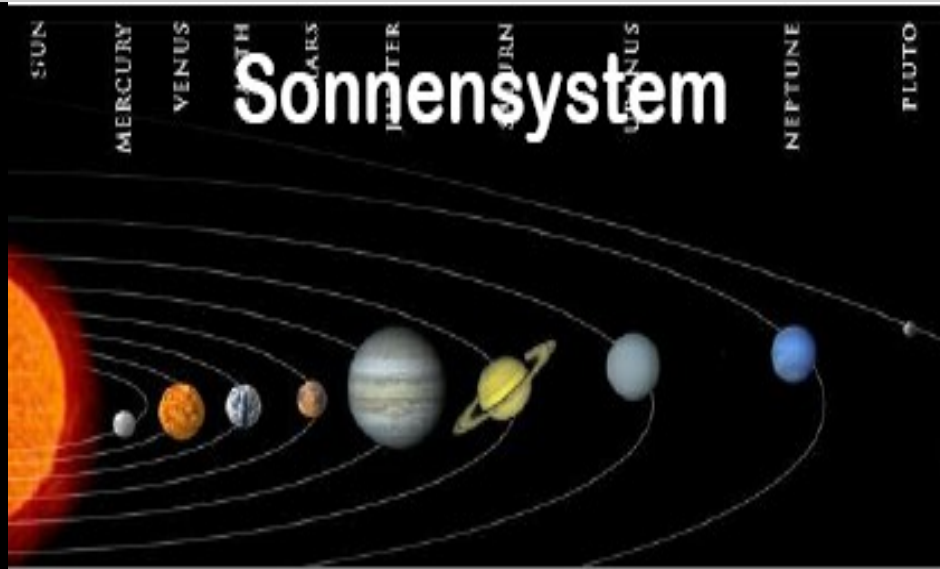
Warum gibt es überhaupt noch Materie ?

Es gab einen ganz kleinen **Überschuss an Materie** im frühen
Universum: 1'000'000'001 : 1'000'000'000 für die Materie!

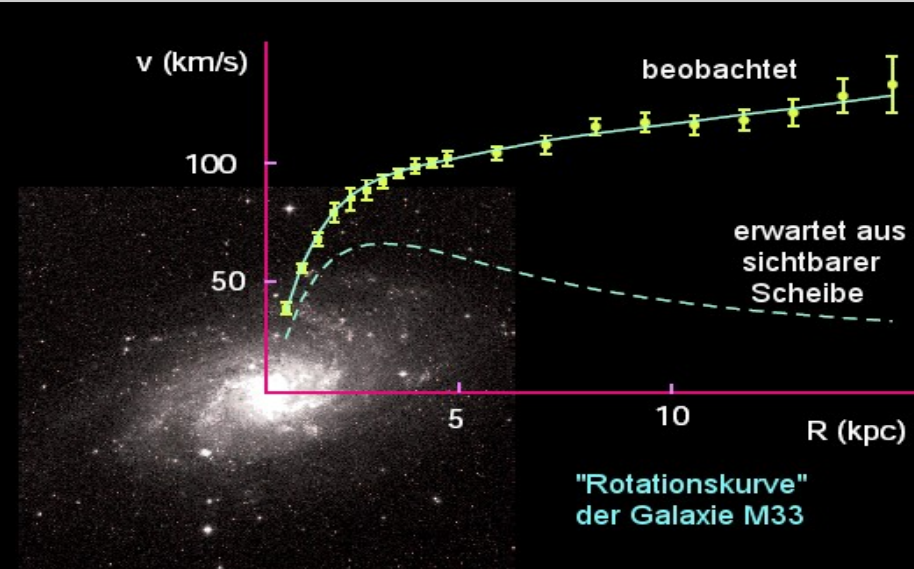


Etwas Materie hat überlebt, aus diesem Rest bestehen wir !!
Materie-Antimaterie-Asymmetrie ist Spezialität von LHCb

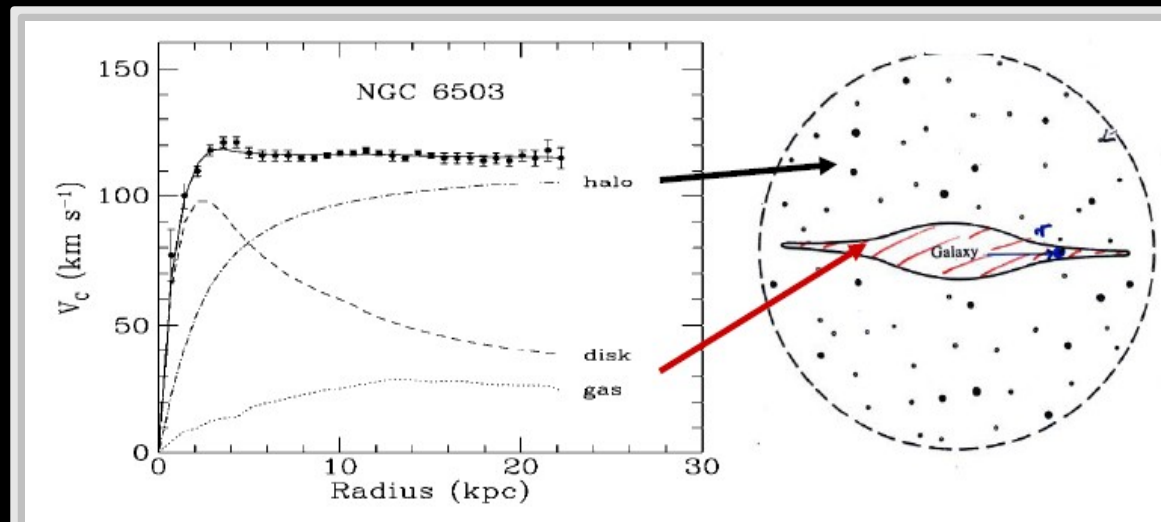
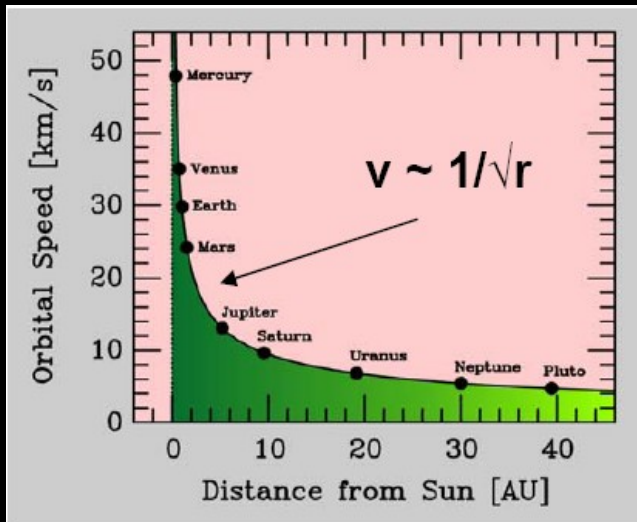
Unbekannte Form(en) von Materie !?



Im Sonnensystem gilt
Keplers Gesetz



Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in
Galaxien **nicht** durch „sichtbare“ Materie
erklärbar \Rightarrow **dunkle Materie !**



dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

Was ist „Dunkle Energie“

Unser Universum dehnt sich aus –
und zwar mit **zunehmendem Alter immer schneller !**

Hubble Ultra Deep Field Details

HST • ACS



Dunkle
Materie



NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and The HUDF Team

STScI-PRC04-07c



Dunkle
Energie

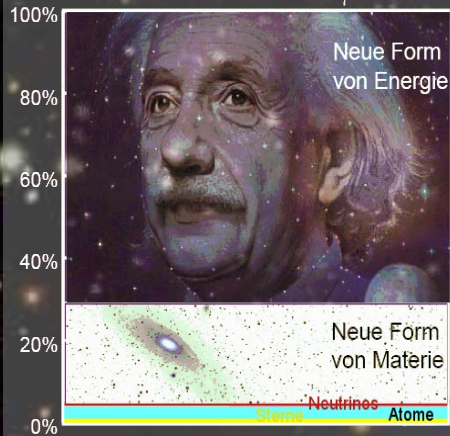


“Dunkle Energie(*)” treibt es auseinander !

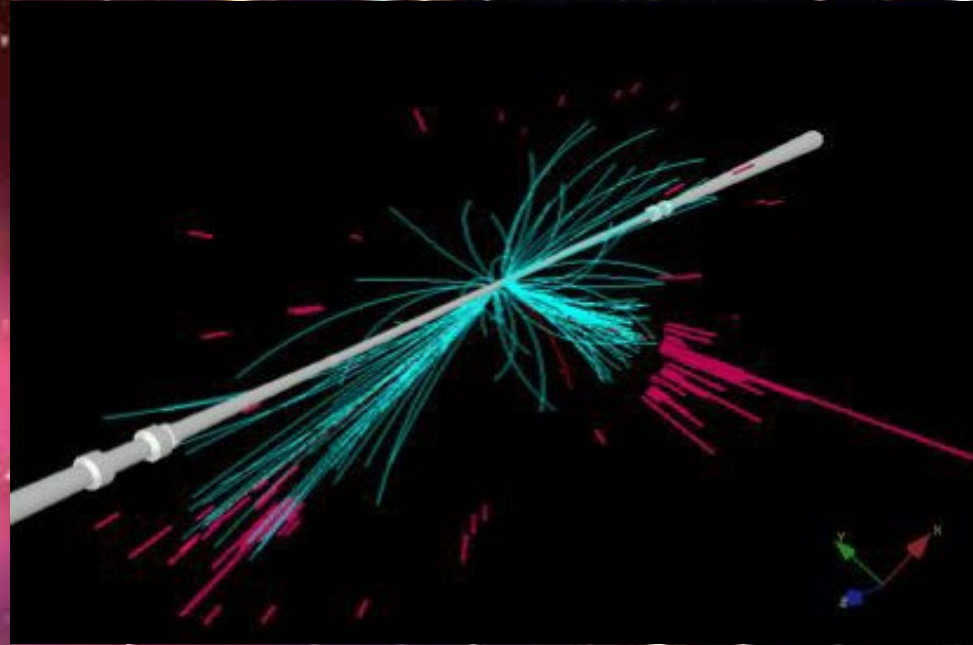
(*) dunkle Energie = die Konstante λ in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie

Was steckt teilchenphysikalisch dahinter ?

Woraus besteht das Universum?



Astronomen und Astrophysiker werden die Verteilung der dunklen Materie aufklären



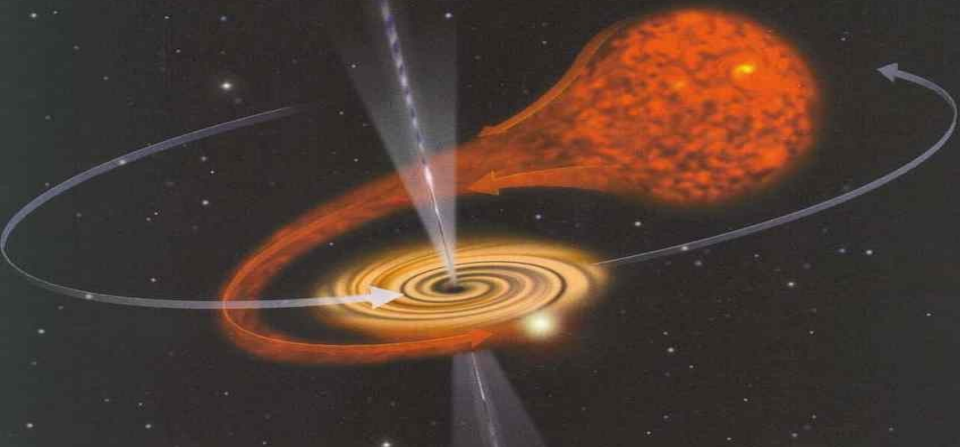
Der LHC wird dunkle Materie vielleicht erzeugen und ihre Natur aufklären.

Steckt auch hinter der „dunklen Energie“ ein Elementarteilchen ?



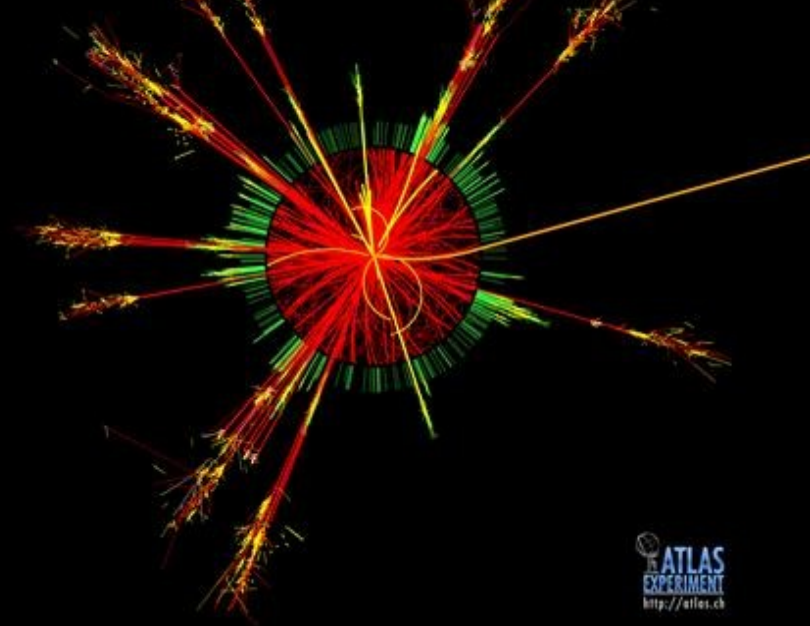
Schwarze Löcher am LHC ?

... oder noch Spektakulärereres ?



Schematische Darstellung
eines schwarzen Lochs mit
Milliarden Sonnenmassen,
das einen Stern verschluckt.

Simulierter Zerfall eines schwarzen
Lochs im ATLAS-Detektor



Am LHC höchstens

„mikroskopische“ Schwarze Löcher“

Erzeugung nur mittels „neuer Physik“, z.B.
bei Existenz zusätzlicher Raumdimensionen

- sie sind instabil („Hawking-Strahlung“)
- Prozesse wie am LHC auf Grund der kosmischen Strahlung seit Milliarden Jahren, ohne Gefahr für die Erde
- Gefahr durch stabile, mikroskopische schwarze Löcher durch kosmische Beobachtungen ausgeschlossen:
würden z.B. in Sternen gestoppt !

**Keine Materie-fressenden
Monster am LHC möglich!**