

# I: Teilchen & Kräfte

**Dr. Frank Simon**

**Max-Planck-Institut für Physik  
Excellence Cluster Universe**

**Lehrerfortbildung “Aspekte der modernen Kosmologie”  
Deutsches Museum München, 30 Juli 2009**

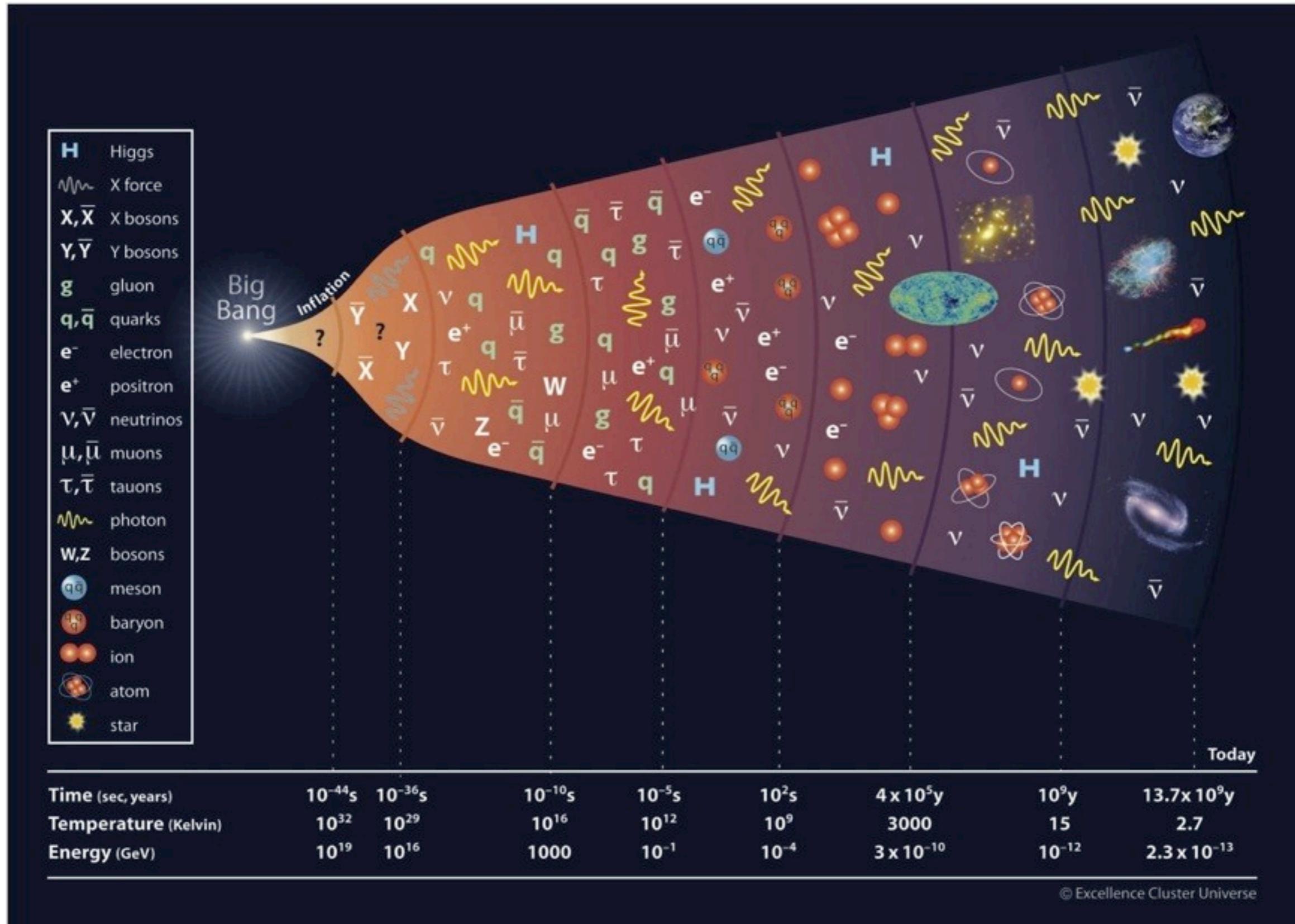


Max-Planck-Institut für Physik  
(Werner-Heisenberg-Institut)

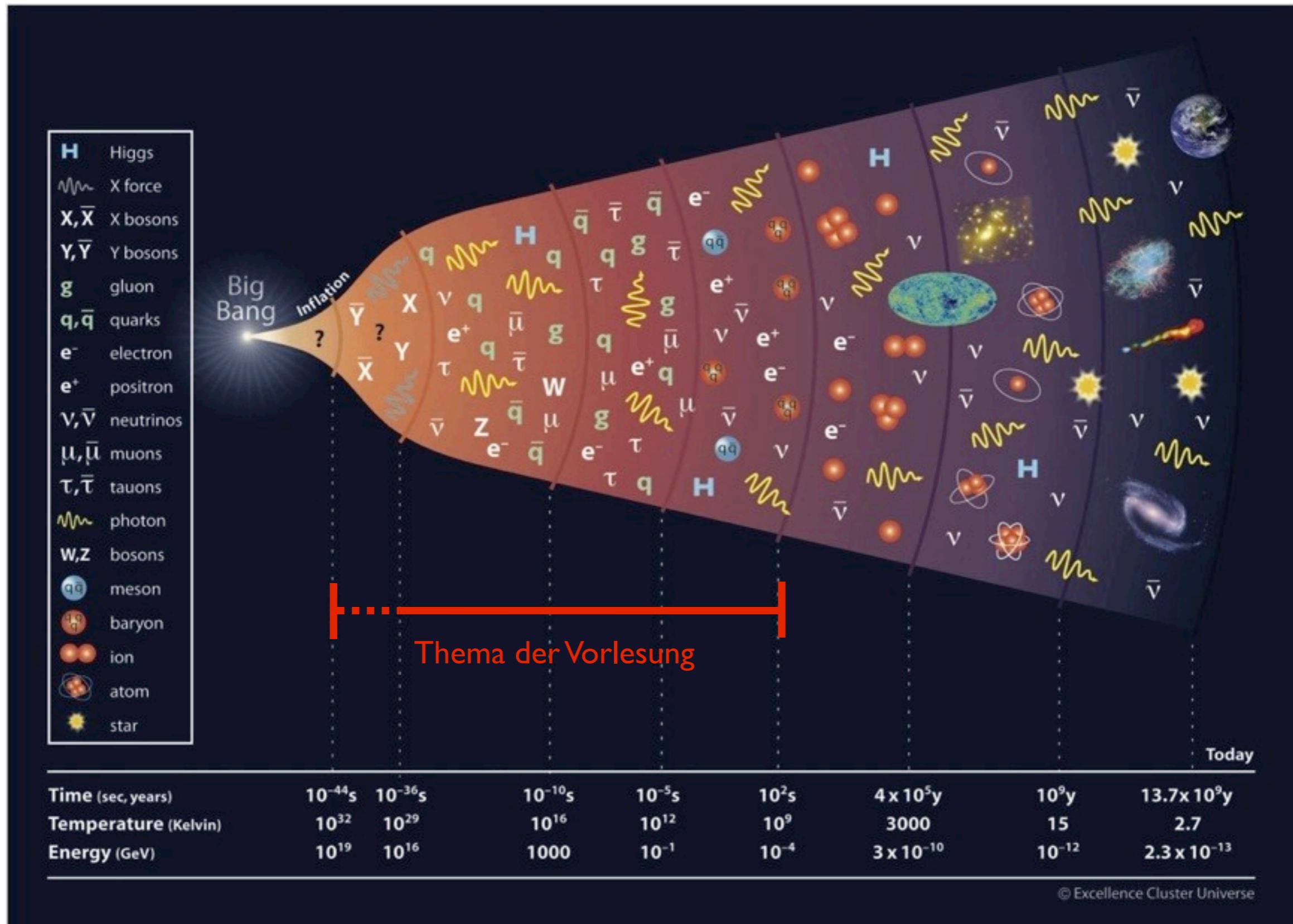
Deutsches Museum



# Die Entwicklung unseres Universums



# Die Entwicklung unseres Universums



- **Der Stand der Dinge: Das Standardmodell der Teilchenphysik**
  - Teilchen & Kräfte
- **Spezielle Themen aus der Entwicklung des Universums**
  - Materie-Antimaterie Asymmetrie
  - Quark-Gluon-Plasma
  - Entstehung der Atomkerne
- **Physik jenseits des Standard-Modells**
- **Experimente der Teilchenphysik**
  - Beschleuniger
  - Detektoren
- **Ist Teilchenphysik gefährlich?**
  - Antimaterie?
  - Schwarze Löcher?

# I.

## **Der Stand der Dinge: Das Standardmodell der Teilchenphysik**

# Die Sprache der Teilchenphysik

- Alles wird als Energie ausgedrückt:
  - Lichtgeschwindigkeit,  $\hbar = 1$
  - Energieeinheit: Elektronenvolt eV, die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es eine Potentialdifferenz von 1 V durchläuft
- ▶ Massen:  $E = mc^2$ , zum Beispiel Proton  $m = 938 \text{ MeV}$
- ▶ Längenskala: 1 fm (“Fermi”),  $10^{-15} \text{ m}$ 
  - ▶ als Energie:  $197.3 \text{ MeV} = 1 \text{ fm}^{-1}$

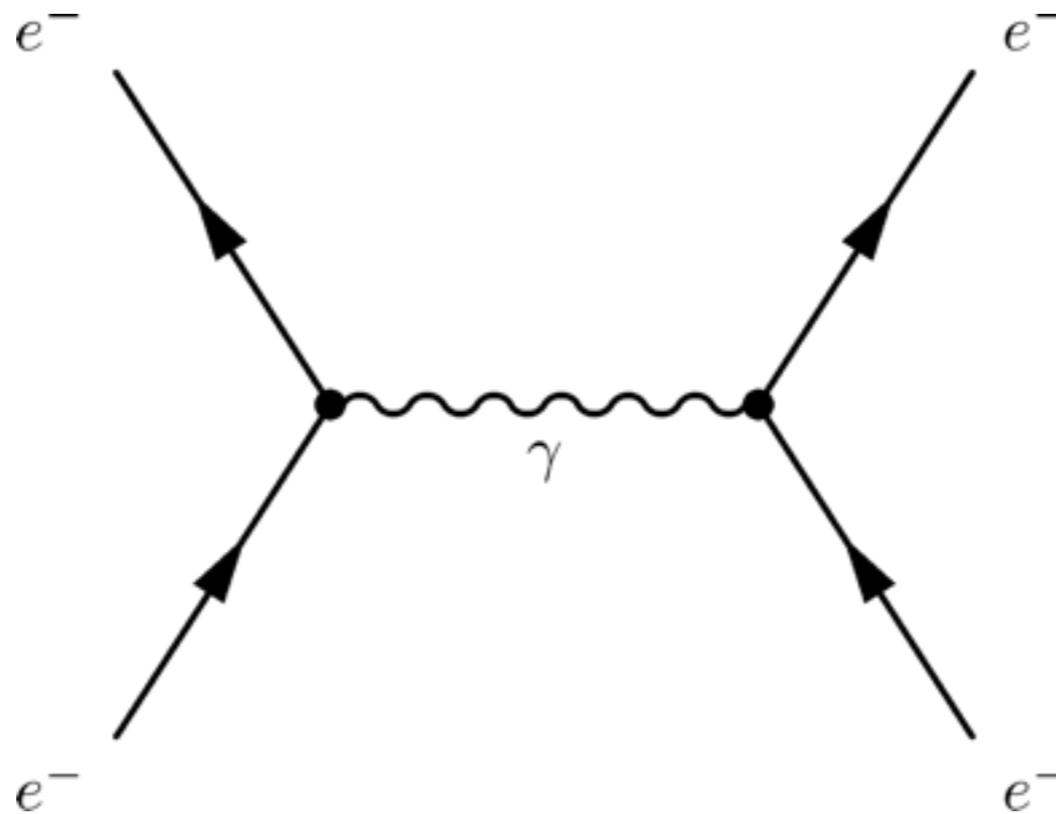
# Die Sprache der Teilchenphysik

- Alles wird als Energie ausgedrückt:
  - Lichtgeschwindigkeit,  $\hbar = 1$
  - Energieeinheit: Elektronenvolt eV, die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es eine Potentialdifferenz von 1 V durchläuft
- ▶ Massen:  $E = mc^2$ , zum Beispiel Proton  $m = 938 \text{ MeV}$
- ▶ Längenskala: 1 fm (“Fermi”),  $10^{-15} \text{ m}$ 
  - ▶ als Energie:  $197.3 \text{ MeV} = 1 \text{ fm}^{-1}$

Rechenpaket

# Kräfte: Einführung

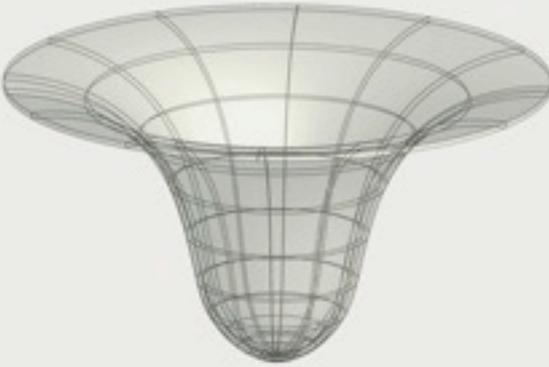
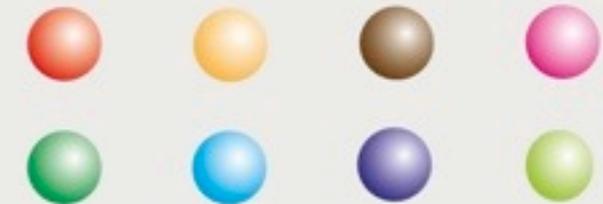
- Elementare Spin 1 Bosonen vermitteln die Wechselwirkungen zwischen elementaren Spin 1/2 Fermionen



- Jede Kraft wird durch den Austausch von sog. "Eichbosonen" beschrieben

# Die Vier Kräfte

- 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<br> | 3 Bosonen<br> | 8 Gluonen<br> |

koppelt an Masse

koppelt an Ladung

koppelt an schwache Ladung

koppelt an Farbe

*Relative Stärke bei niedrigen Energien*

$\sim 10^{-40}$

1/137

$10^{-13}$

$\sim 1$

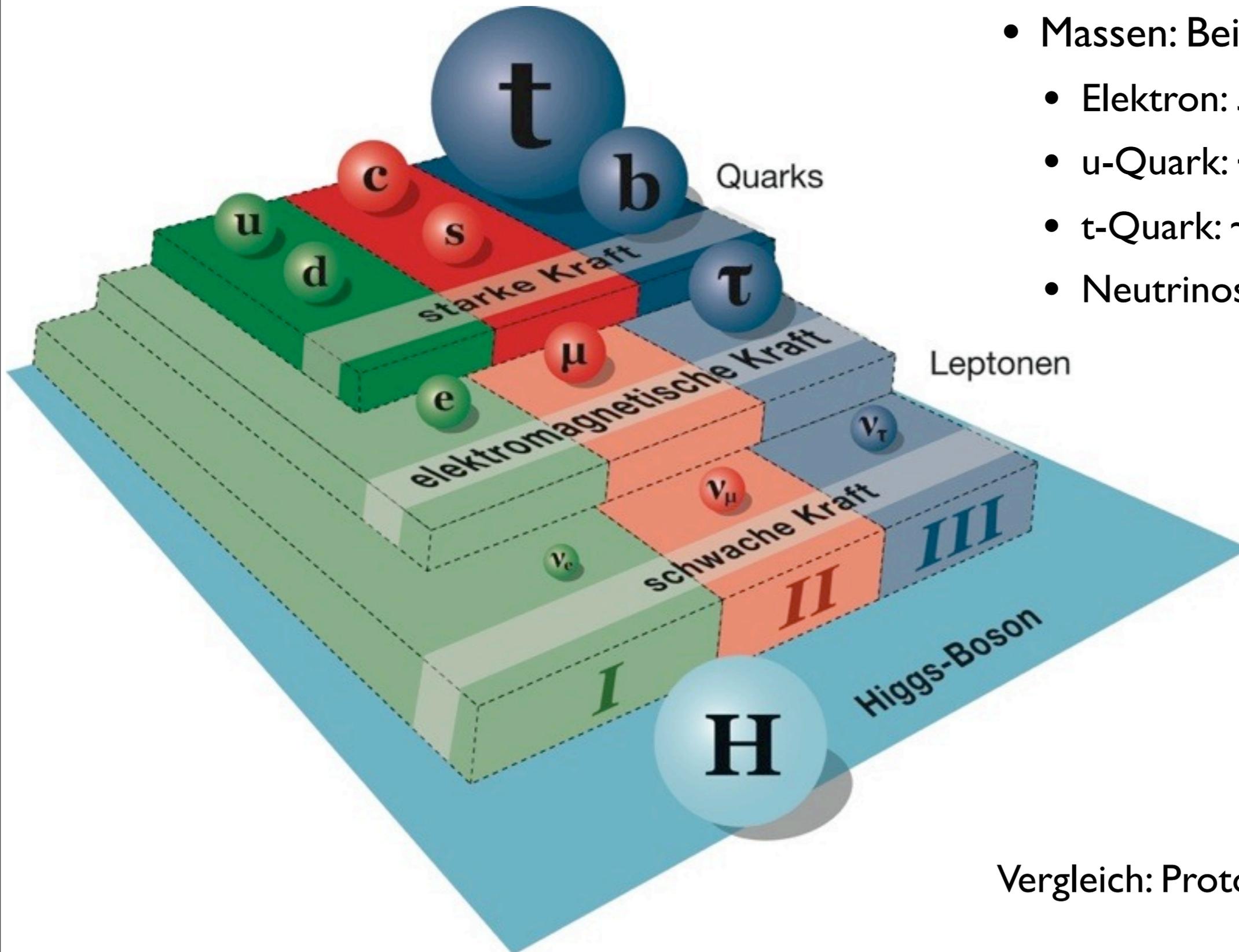
bedingt durch hohe Masse von W, Z:  
W:  $\sim 80$  GeV, Z:  $\sim 91$  GeV

# Die Elementaren Kräfte:Theorien

- Jede der drei Wechselwirkungen wird durch eine sog. Eichtheorie beschrieben
  - Quantenelektrodynamik QED: Elektromagnetische Wechselwirkung
    - ▶ Die mit Abstand am besten getestete Theorie der Menschheit (sehr viel besser als zB die Gravitation)
  - Quantenchromodynamik QCD: Starke Wechselwirkung
    - Es gibt 3 verschiedene Sorten der starken Ladung, deswegen “Farbe”
    - “Confinement”: Freie Farbladungen kommen in der Natur nicht vor, alle Objekte sind “weiss”
- Elektroschwache Theorie (GSW-Modell): Die Elektromagnetische Kraft und die Schwache Kraft sind beides Ausdruck des selben Mechanismus und werden bei hohen Energien vereinheitlicht



# Elementarteilchen: Quarks und Leptonen



- Massen: Beispiele
  - Elektron: 511 keV
  - u-Quark:  $\sim 5$  MeV
  - t-Quark:  $\sim 170$  GeV
  - Neutrinos:  $< 2$  eV

Vergleich: Proton: 938 MeV

# Zusammengesetzte Teilchen: Hadronen

- Bindungszustände der starken Wechselwirkung: Immer farbneutral!
  - Quark + Anti-Quark: Mesonen
    - Pion: u-Quark, Anti-d Quark:  $\pi^+$
    - Kaon: u-Quark, Anti-s Quark:  $K^+$
  - Drei Quarks: Baryonen
    - Proton: 2 u-Quarks, 1 d-Quark
    - Neutron: 2 d-Quarks, 1 u-Quark

# Das fehlende Puzzle-Stück

- Woher bekommen die Elementarteilchen ihre Masse?
  - In den Quantenfeldtheorien des Standardmodells sind alle Teilchen a priori masselos
    - ▶ Sie bekommen durch die Wechselwirkung mit einem zusätzlichem Feld Masse: Dem Higgs-Feld
    - ▶ Durch den Higgsmechanismus müsste auch ein massives Boson erzeugt werden, das Higgs-Boson
      - ▶ Bis jetzt noch unentdeckt, das fehlende Puzzle-Stück des SM

# Warum haben Teilchen Masse? Das fehlende Puzzlestück...

- Im Standard-Modell erhalten alle Teilchen durch die Wechselwirkung mit einem neuen Feld, dem Higgs-Feld, ihre Masse:
  - je stärker die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, um so größer die Masse



credit:Weltmaschine.de

# Was nun?

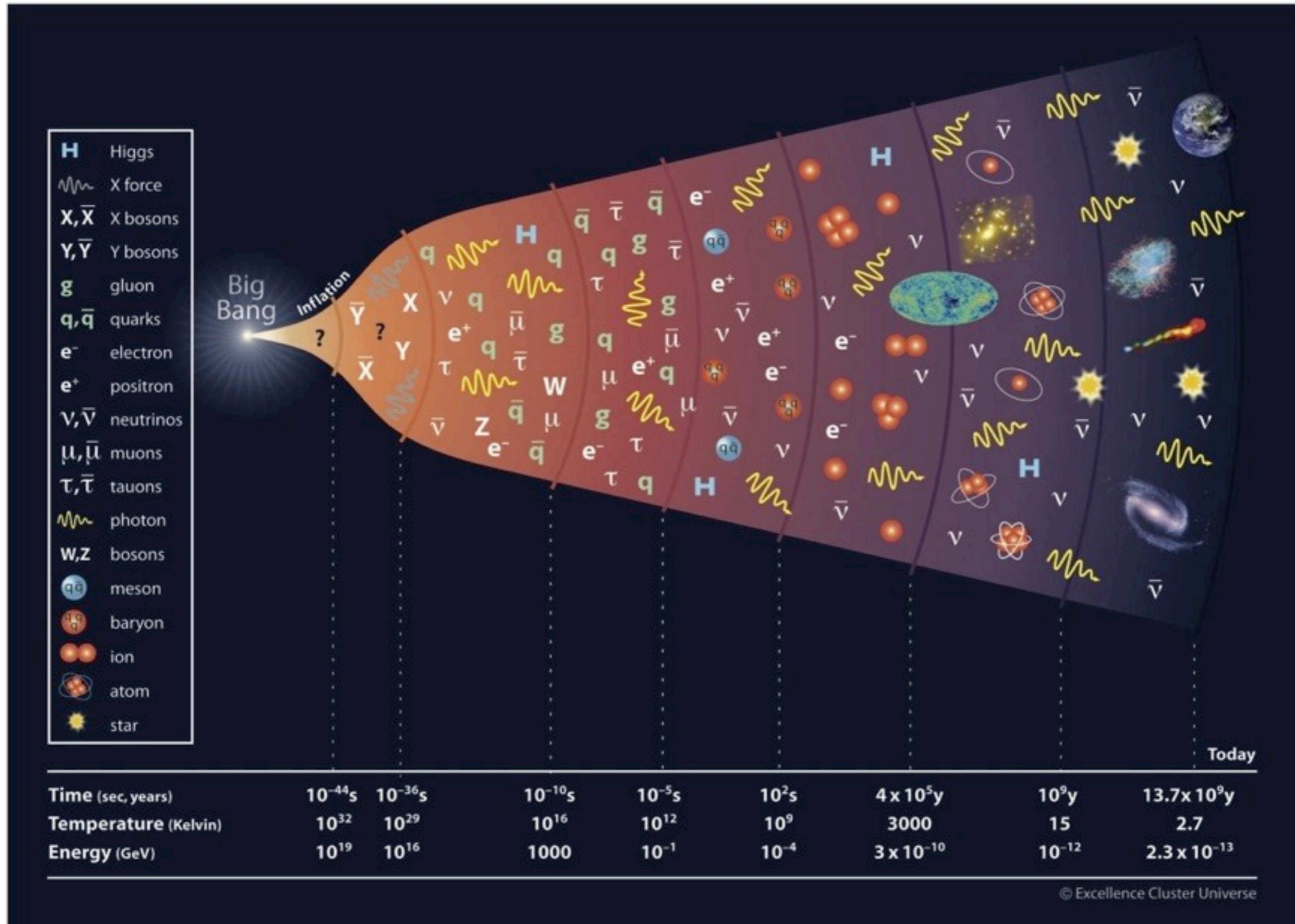
- **Der Stand der Dinge: Das Standardmodell der Teilchenphysik**
  - Teilchen & Kräfte
- **Spezielle Themen aus der Entwicklung des Universums**
  - Materie-Antimaterie Asymmetrie
  - Quark-Gluon-Plasma
  - Entstehung der Atomkerne
- **Physik jenseits des Standard-Modells**
- **Experimente der Teilchenphysik**
  - Beschleuniger
  - Detektoren
- **Ist Teilchenphysik gefährlich?**
  - Antimaterie?
  - Schwarze Löcher?



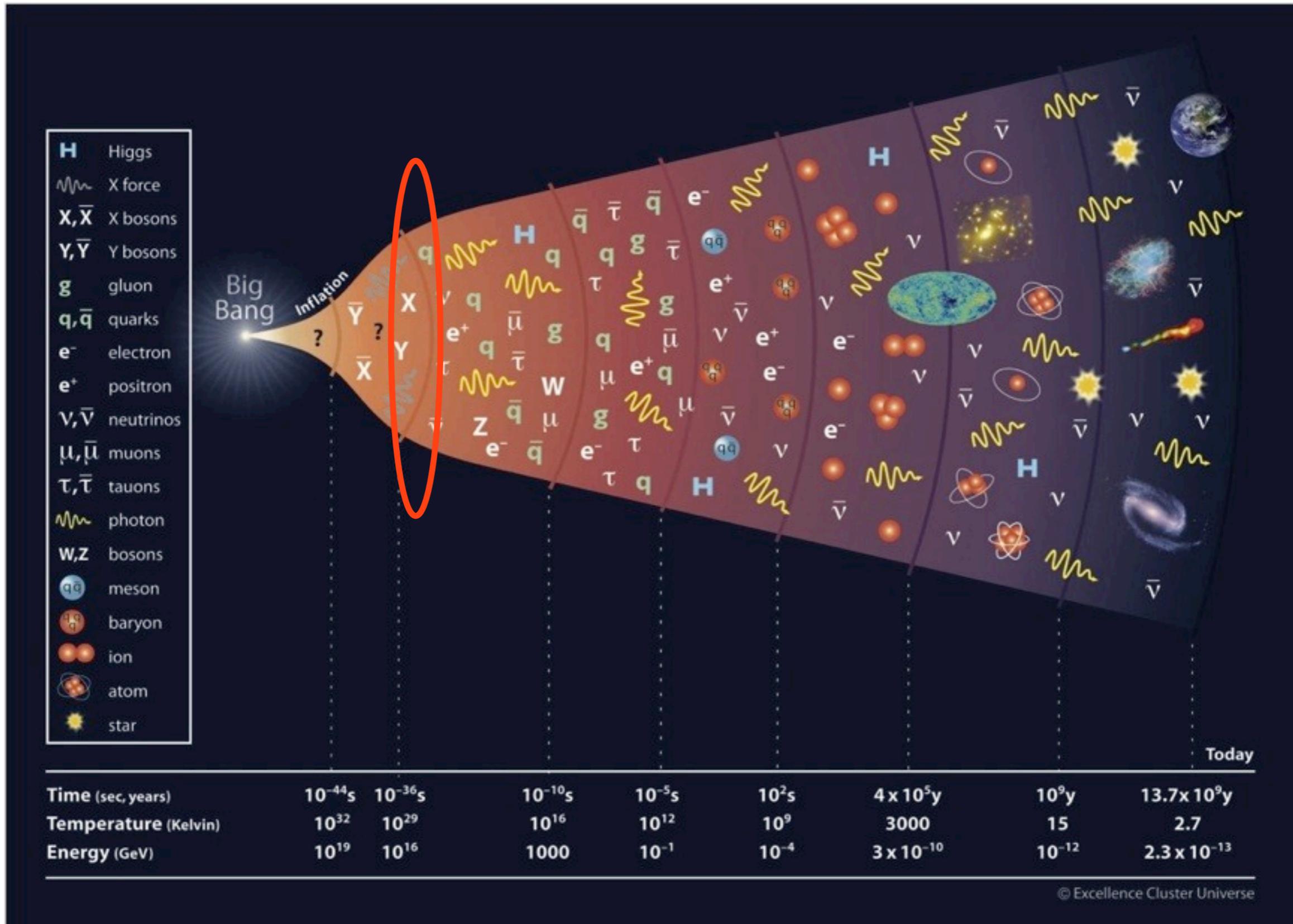
# III.

## Spezielle Themen: Antimaterie, Quark-Gluon-Plasma, Erste Atomkerne

# Materie-Antimaterie Asymmetrie

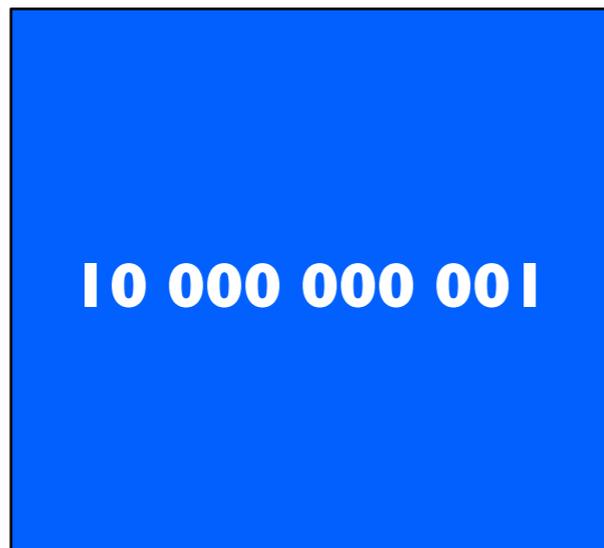


# Materie-Antimaterie Asymmetrie

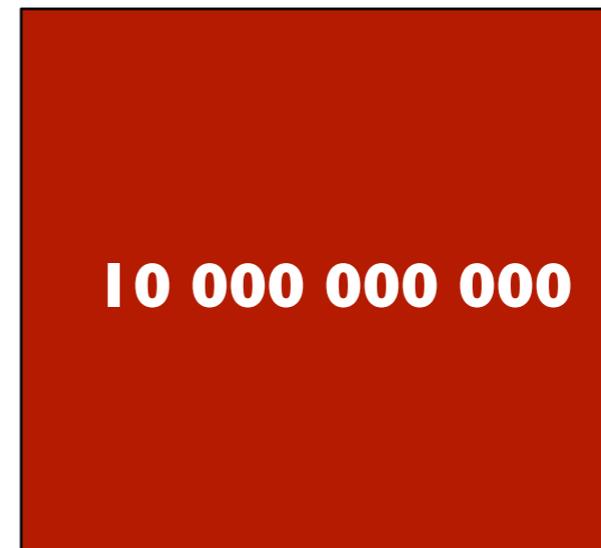


# Was ist mit der Antimaterie passiert?

- Beim Urknall sollte gleich viel Materie und Anti-Materie entstanden sein
  - Es muss einen Mechanismus geben, der zwischen Materie und Anti-Materie unterscheidet, so dass etwas mehr Materie gebildet wurde!



**Materie**



**Anti-Materie**

# Was ist mit der Antimaterie passiert?

- Beim Urknall sollte gleich viel Materie und Anti-Materie entstanden sein
  - Es muss einen Mechanismus geben, der zwischen Materie und Anti-Materie unterscheidet, so dass etwas mehr Materie gebildet wurde!

●  
I:Wir!

**Materie**

**Anti-Materie**

# Was ist mit der Antimaterie passiert?

- Beim Urknall sollte gleich viel Materie und Anti-Materie entstanden sein
  - Es muss einen Mechanismus geben, der zwischen Materie und Anti-Materie unterscheidet, so dass etwas mehr Materie gebildet wurde!

●  
I:Wir!  
**Materie**



... und das gesamte sichtbare Universum!

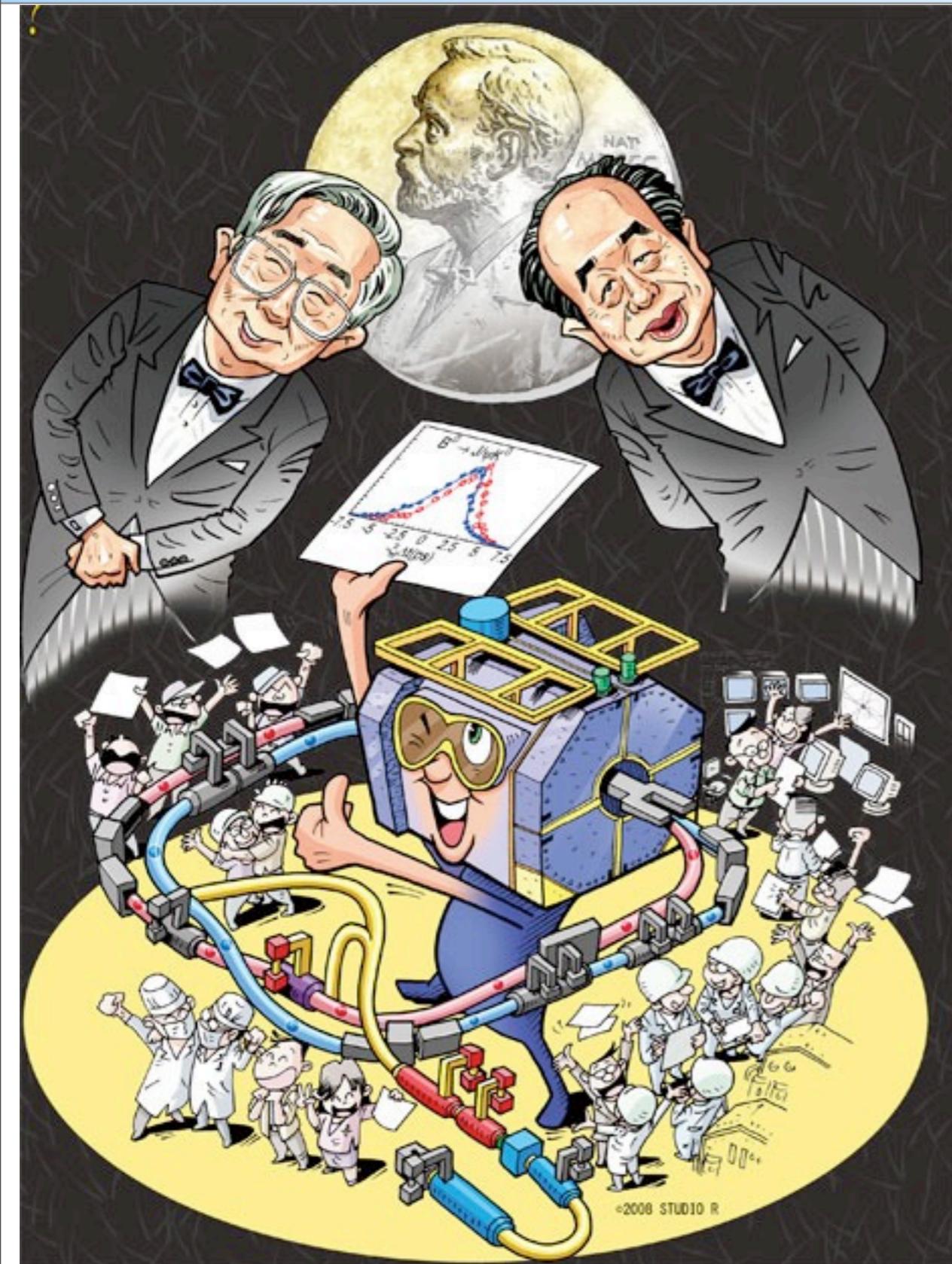
credit: NASA, ESA/JPL-Caltech/B. Mobasher (STScI/ESA)

# Ein Mechanismus im Standard-Modell: CP-Verletzung

Nobel-Preis 2008 an Makoto Kobayashi  
und Toshihide Maskawa:  
Vorhersage von 3 Quark-Familien 1972

Ermöglicht Prozesse, die zwischen  
Materie und Antimaterie unterscheiden:  
**CP-Verletzung**

Nachweis unter anderem in  
**B-Mesonen**  
bei Belle und BaBar



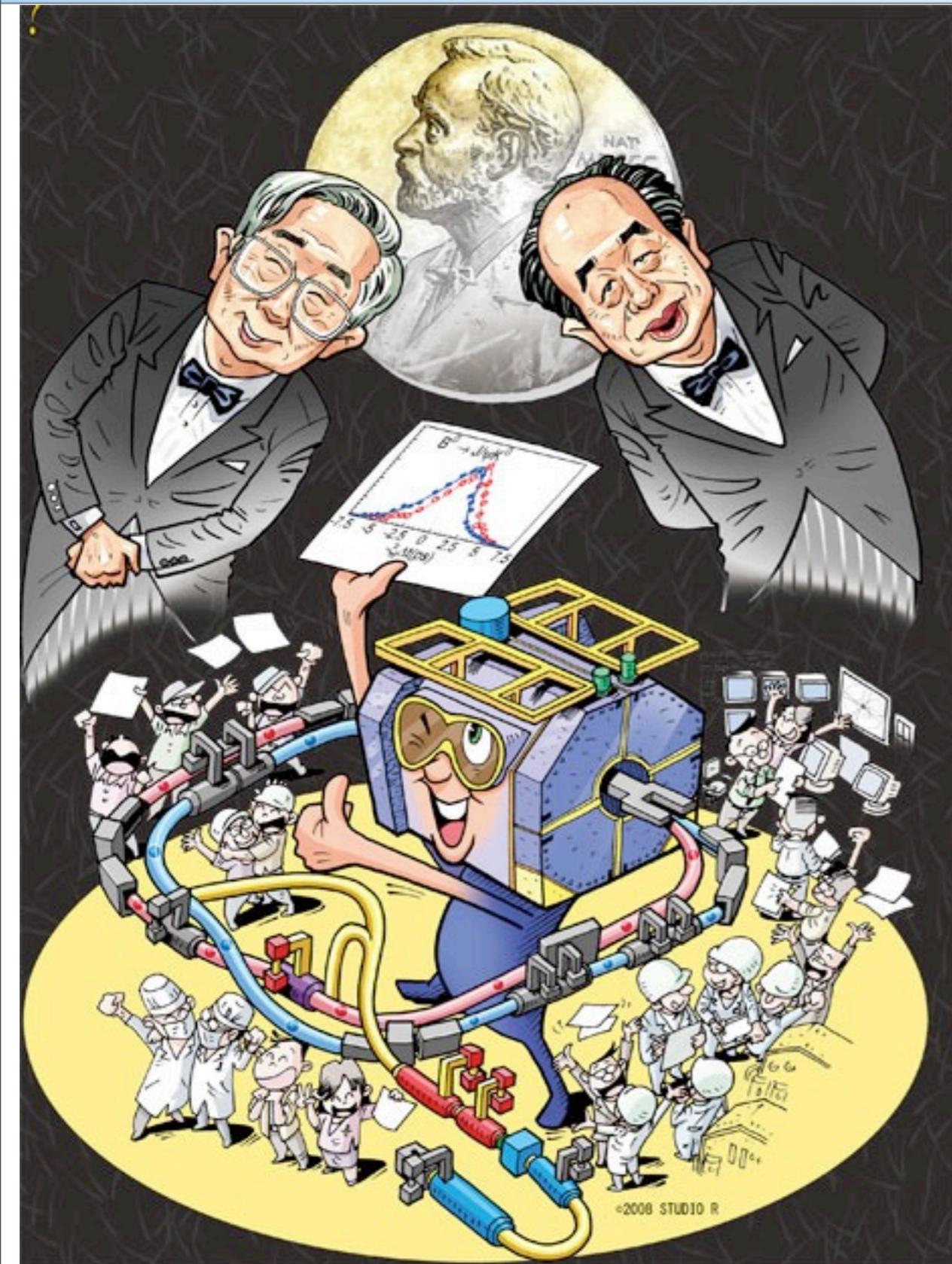
# Ein Mechanismus im Standard-Modell: CP-Verletzung

Nobel-Preis 2008 an Makoto Kobayashi  
und Toshihide Maskawa:  
Vorhersage von 3 Quark-Familien 1972

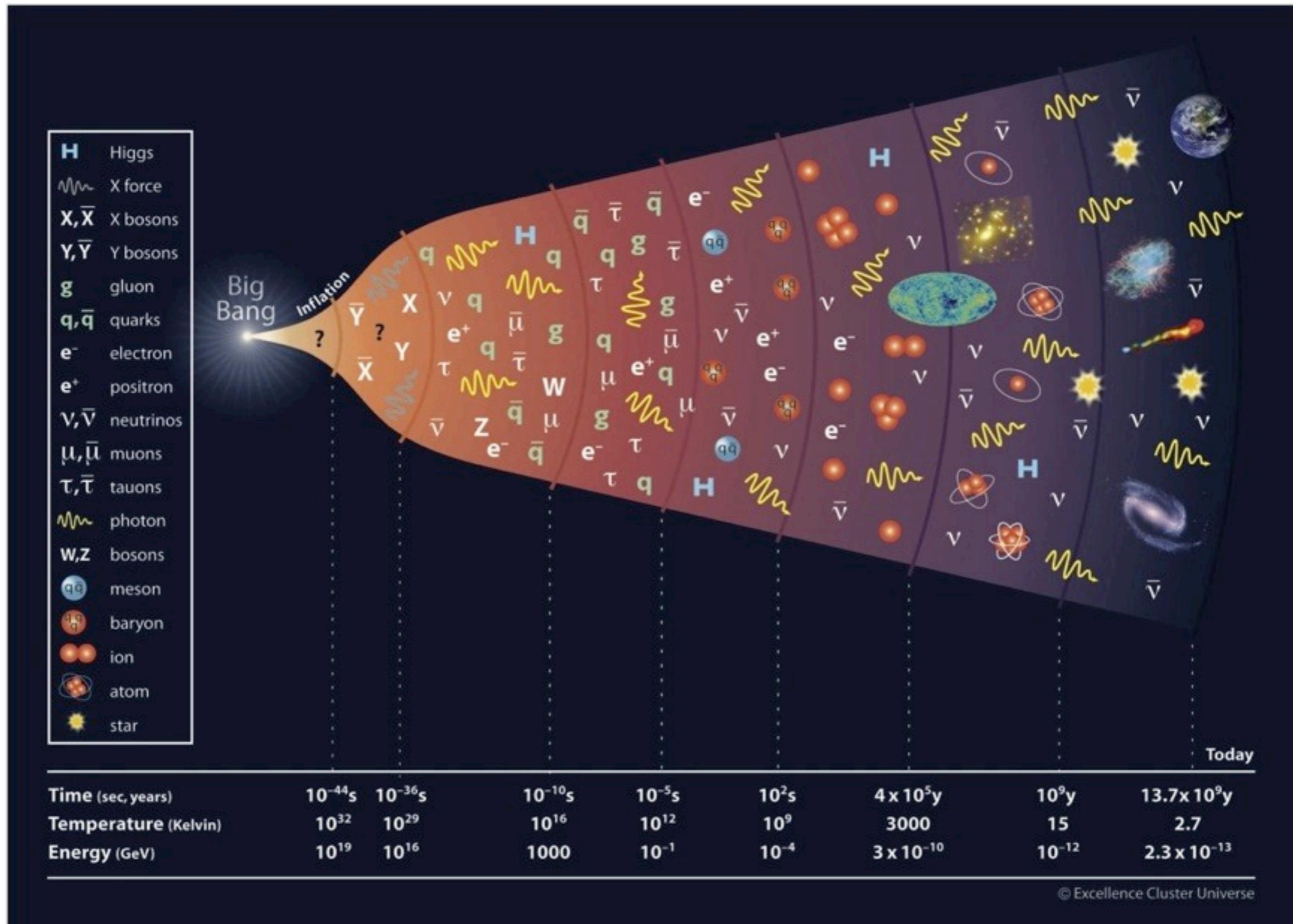
Ermöglicht Prozesse, die zwischen  
Materie und Antimaterie unterscheiden:  
**CP-Verletzung**

Nachweis unter anderem in  
**B-Mesonen**  
bei Belle und BaBar

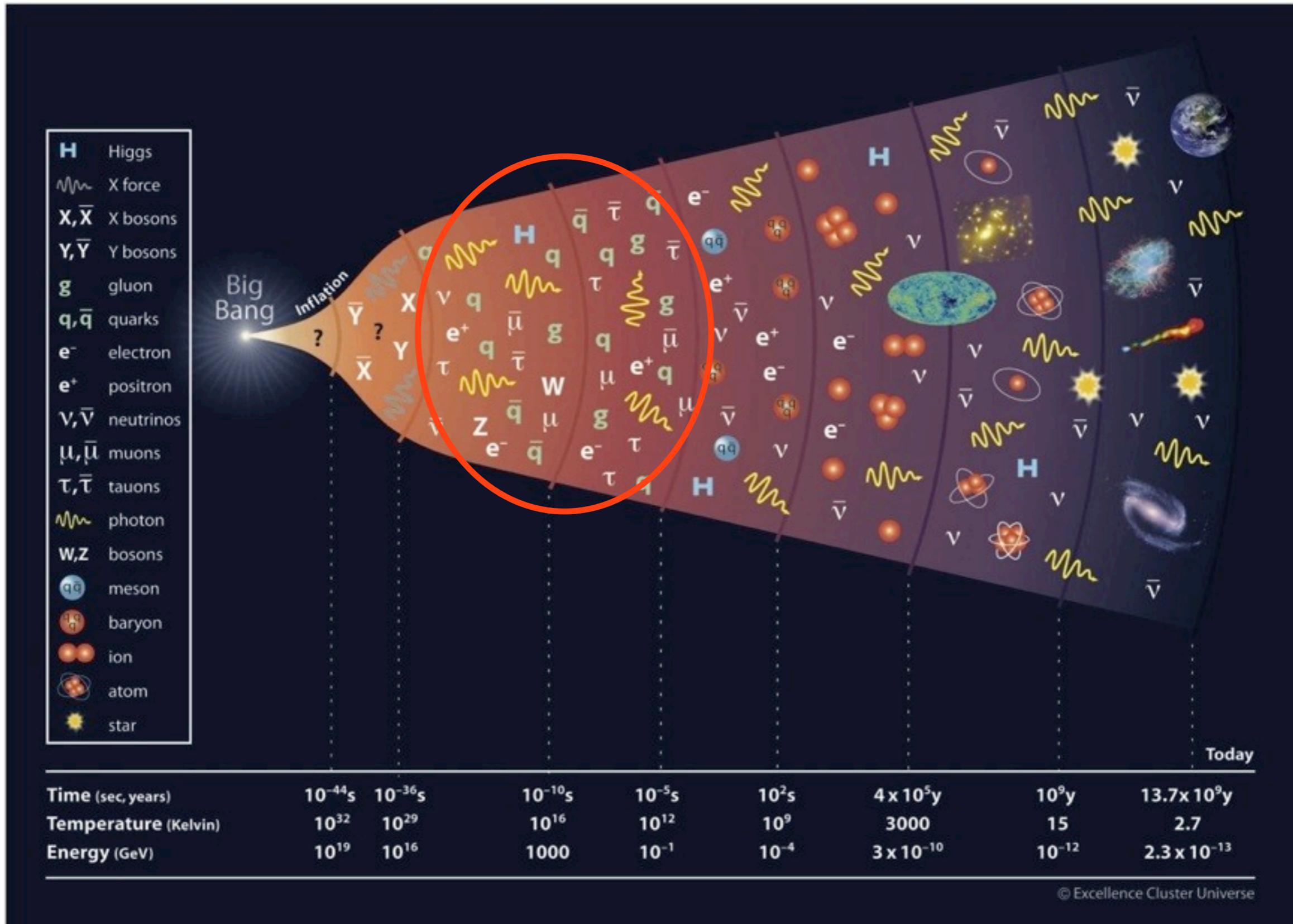
Aber: Der CP-Verletzung im  
Standard-Modell reicht bei weitem  
nicht aus!



# Das Quark-Gluon-Plasma: Die "Ur-Suppe"



# Das Quark-Gluon-Plasma: Die "Ur-Suppe"



© Excellence Cluster Universe



# Das Quark-Gluon-Plasma

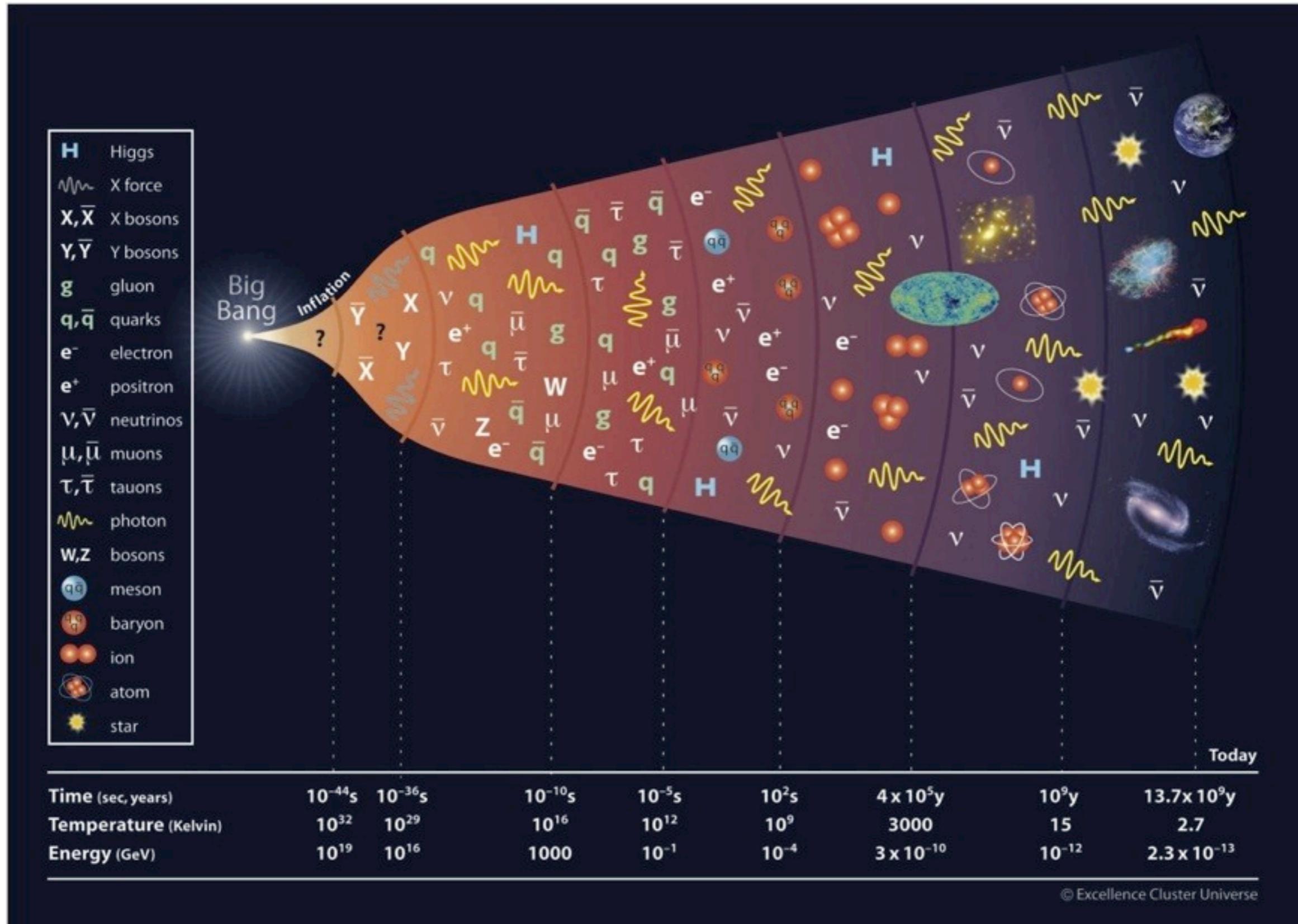
- Heisser, dichter Zustand von freien Quarks und Gluonen:
  - Teilchen mit Farbladung können sich frei durch das Medium bewegen und sind nicht confined, im Medium gibt es eine Abschirmung freier Farbladung durch andere Farbladungen, analog zum klassischen Plasma für elektrische Ladung
- Im Moment Gegenstand intensiver Forschung am Relativistic Heavy Ion Collider in Brookhaven, entdeckt 2005
  - Ein QGP wird durch die Kollision hochenergetischer Gold-Kerne erzeugt
- Einige  $\mu\text{s}$  nach dem Urknall hat sich das Universum so weit abgekühlt ( $T < \sim 175 \text{ MeV}$ ), dass ein Phasenübergang zu einem Hadronengas stattfindet:
  - Freie Farbladungen verschwinden, Confinement ist hergestellt

# Das Quark-Gluon-Plasma

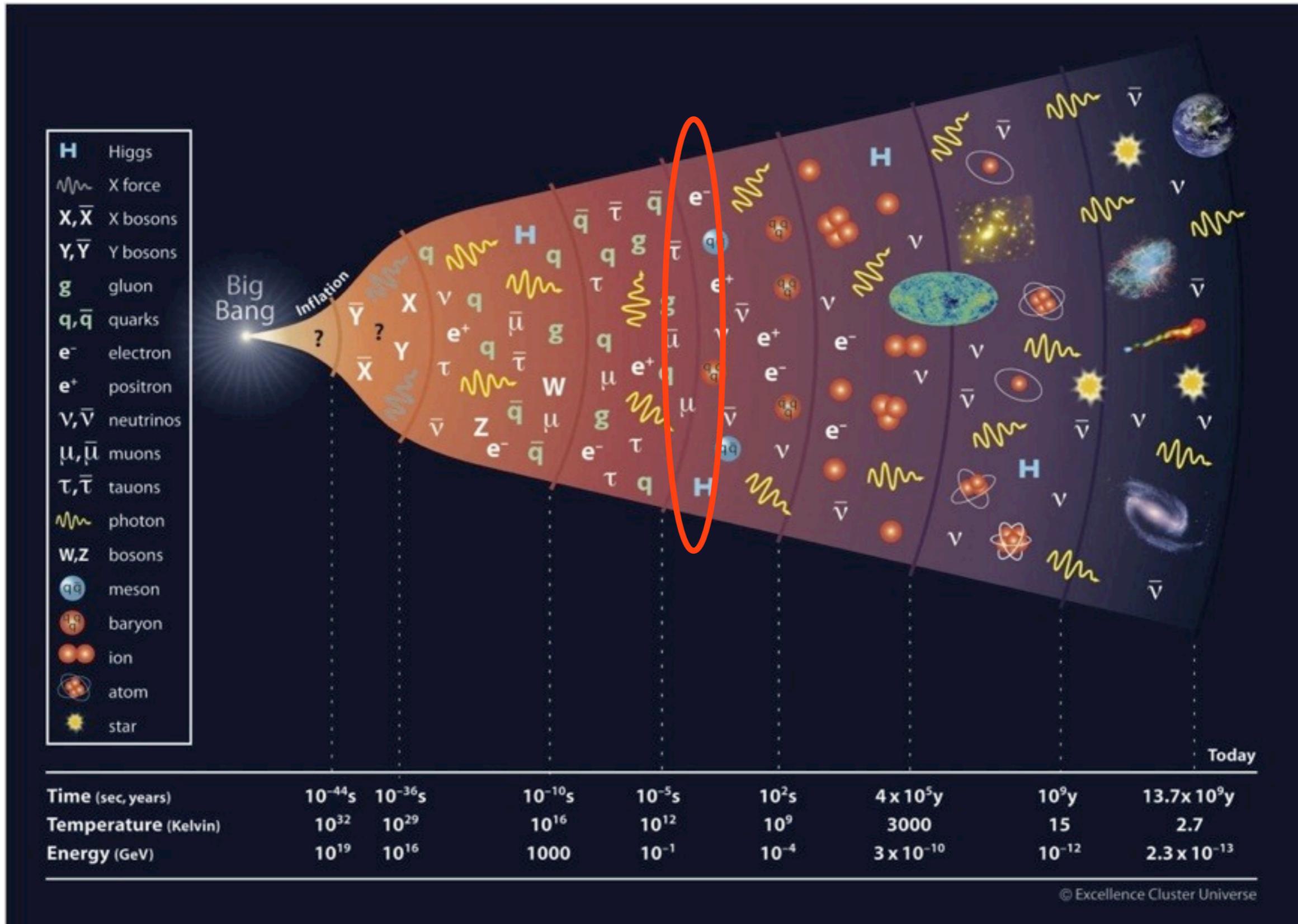
- Heisser, dichter Zustand von freien Quarks und Gluonen:
  - Teilchen mit Farbladung können sich frei durch das Medium bewegen und sind nicht confined, im Medium gibt es eine Abschirmung freier Farbladung durch andere Farbladungen, analog zum klassischen Plasma für elektrische Ladung
- Im Moment Gegenstand intensiver Forschung am Relativistic Heavy Ion Collider in Brookhaven, entdeckt 2005
  - Ein QGP wird durch die Kollision hochenergetischer Gold-Kerne erzeugt
- Einige  $\mu\text{s}$  nach dem Urknall hat sich das Universum so weit abgekühlt ( $T < \sim 175 \text{ MeV}$ ), dass ein Phasenübergang zu einem Hadronengas stattfindet:
  - Freie Farbladungen verschwinden, Confinement ist hergestellt

Rechenpaket

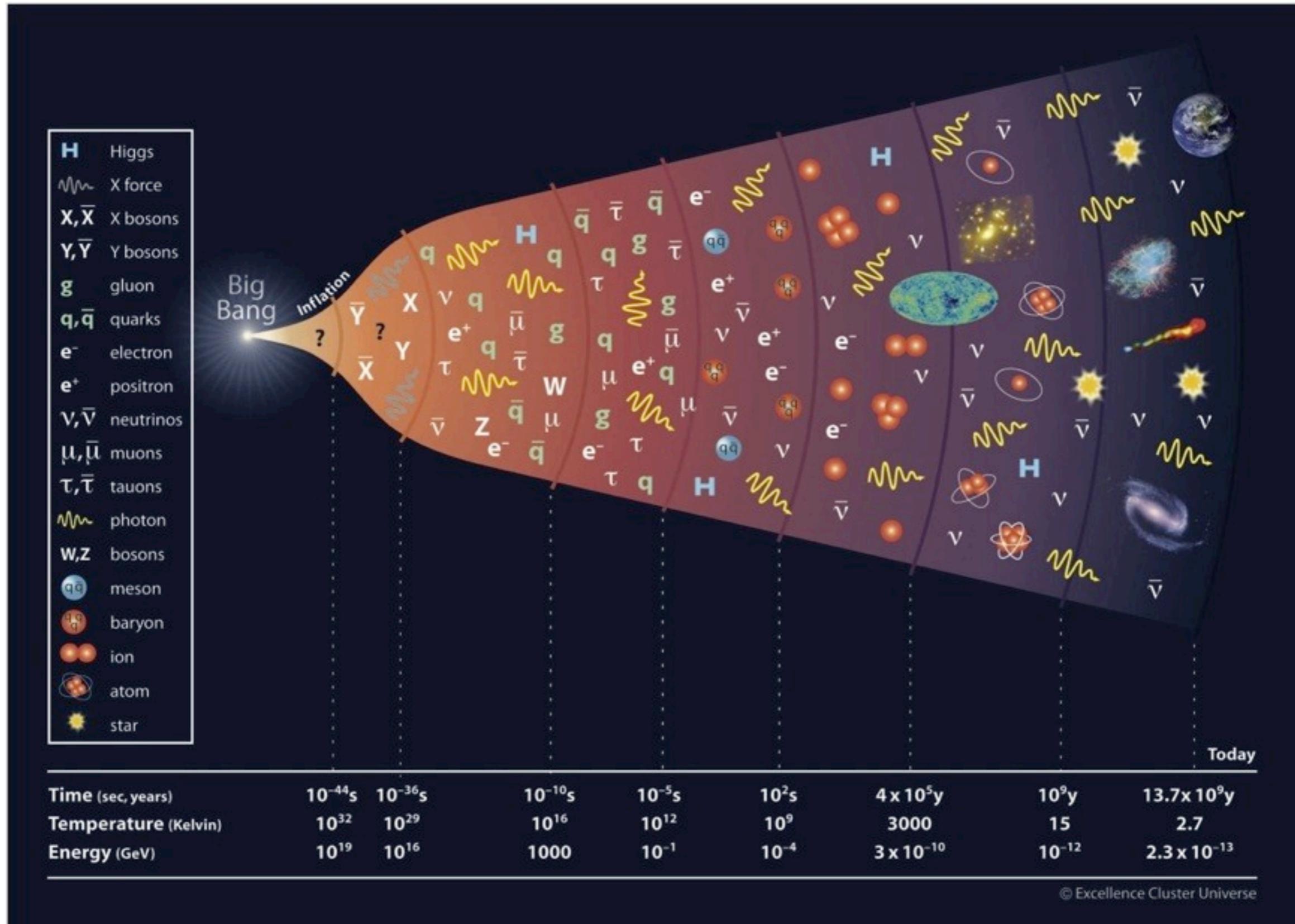
# Hadronisierung: Freie Quarks und Gluonen verschwinden



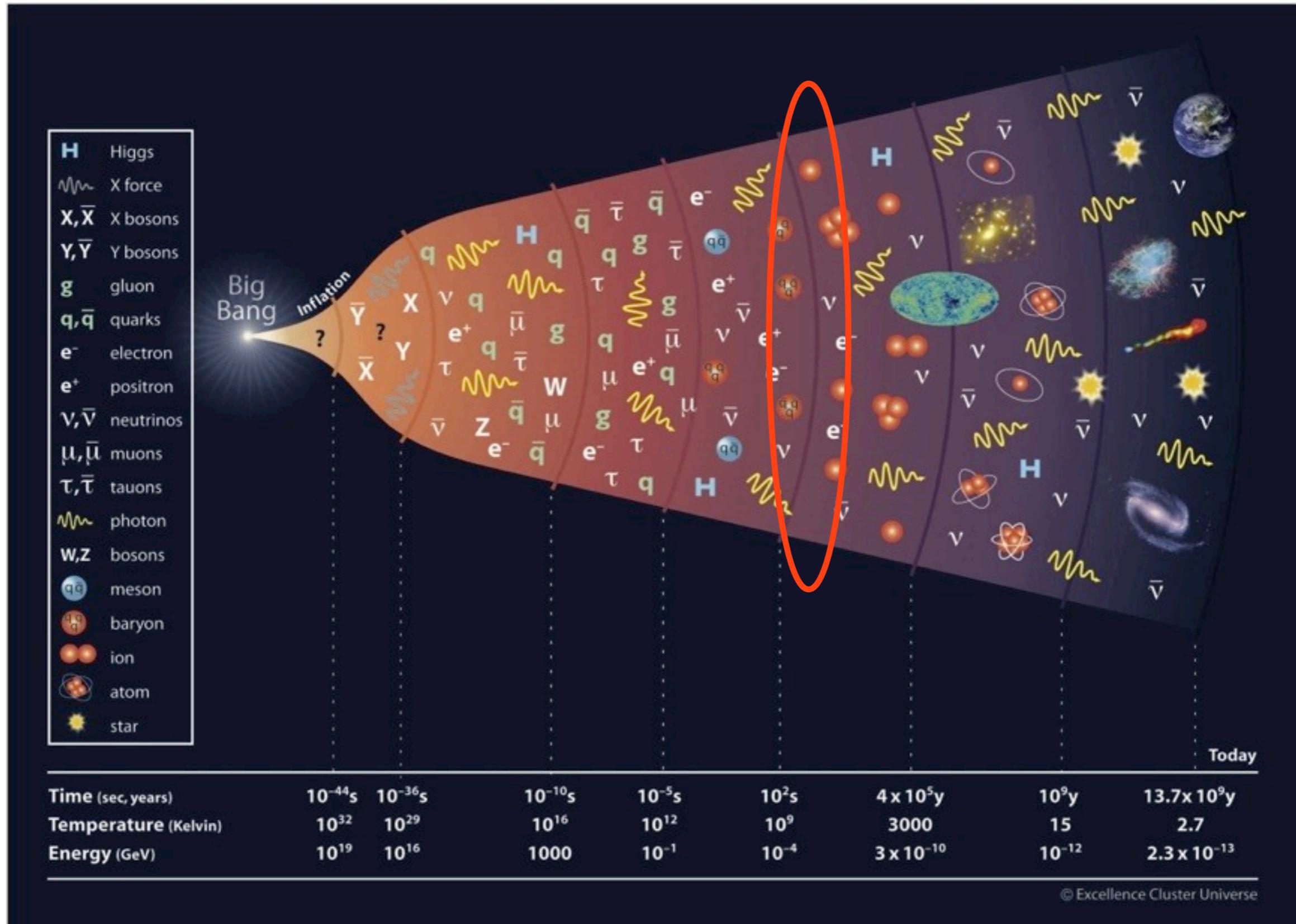
# Hadronisierung: Freie Quarks und Gluonen verschwinden



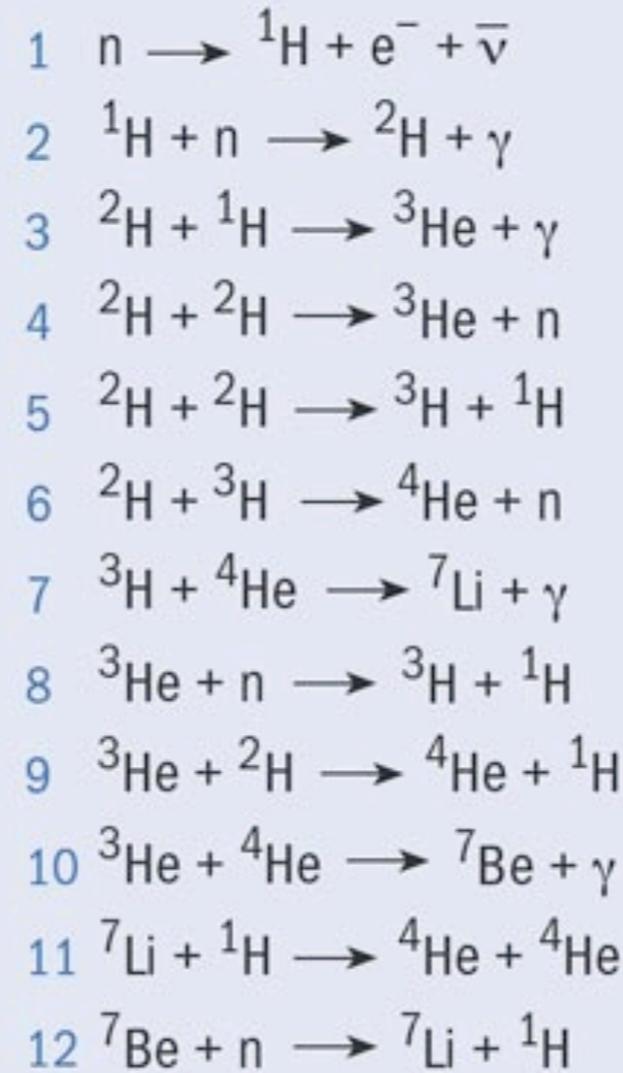
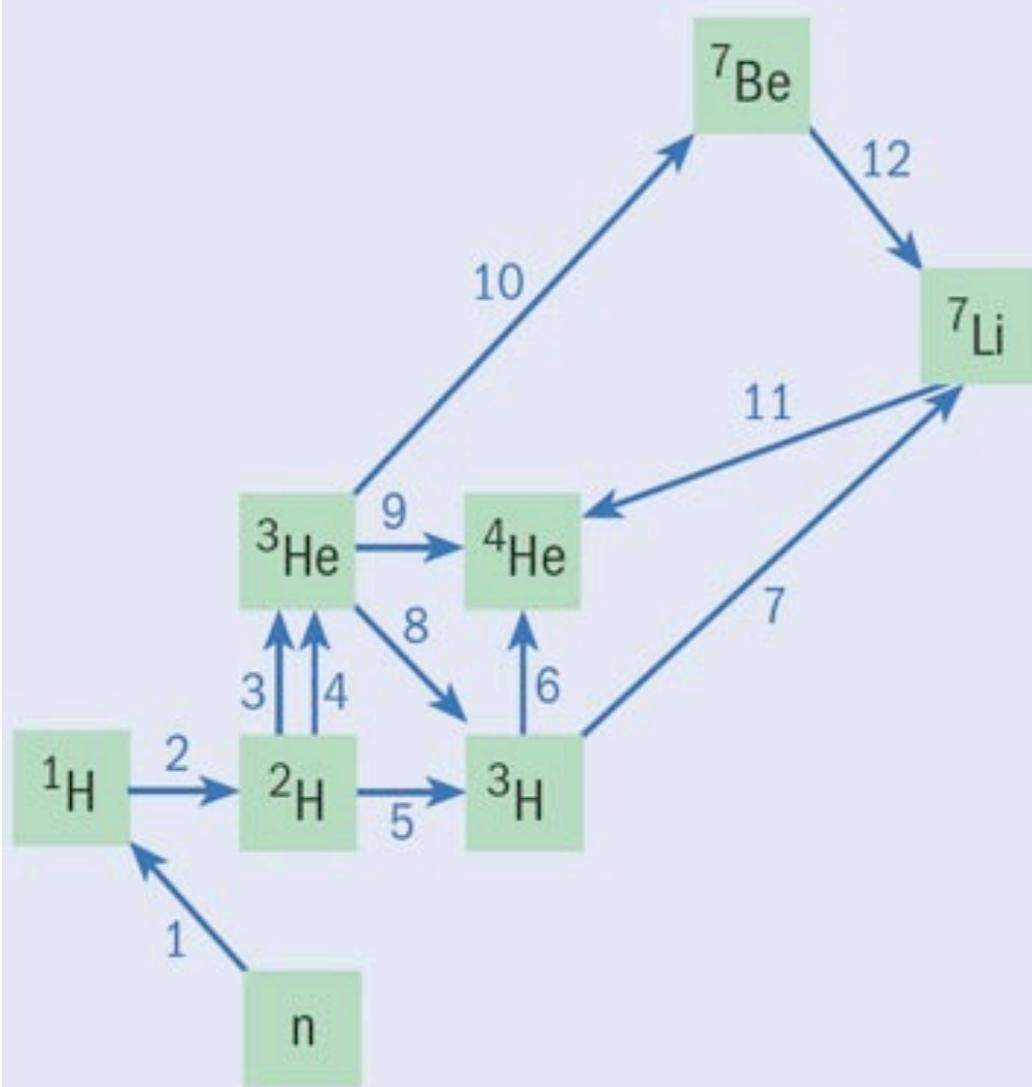
# Erste Atomkerne



# Erste Atomkerne



# Big-Bang Nukleosynthese



credit: PhysicsWorld

- ~ 3 Minuten nach dem Urknall  
 $T \ll$  Deuteriums-Bindungsenergie (2.2 MeV), Bildung aus  $p + n$
- Bildung schwererer Elemente durch Bindung von zusätzlichen Protonen oder Neutronen

- Ende ~ 20 Minuten nach dem Urknall, Temperatur unter der für Fusion nötigen Temperatur
- Keine Elemente mit mehr als 7 Nukleonen: Kein Stabiles Element mit 8 Nukleonen, Abbruch der Kette

# IV.

## Physik jenseits des Standardmodells

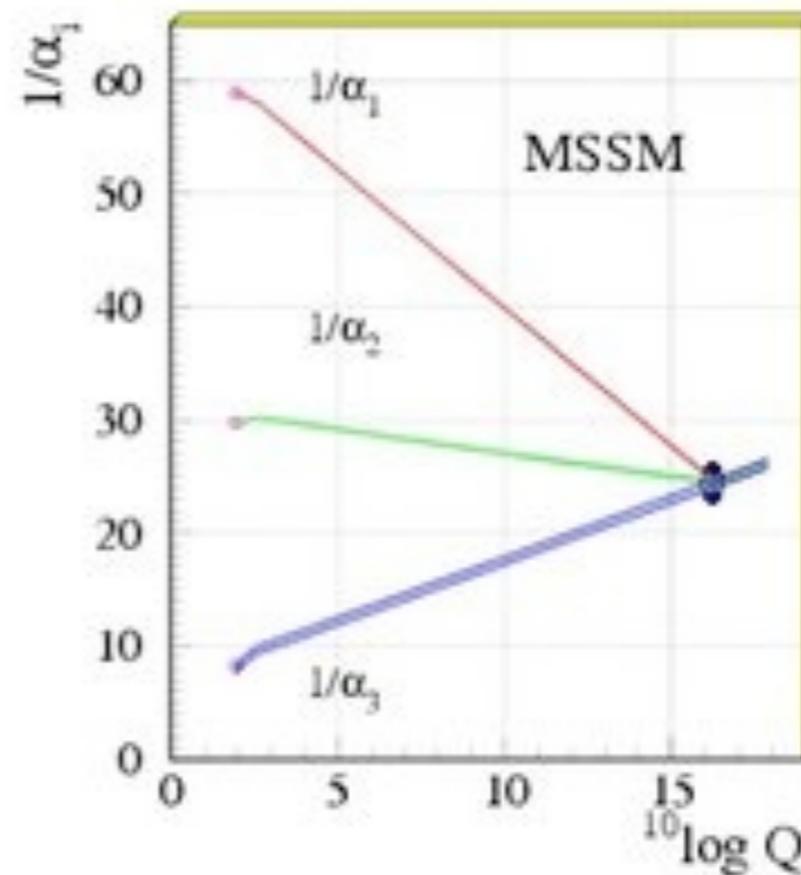
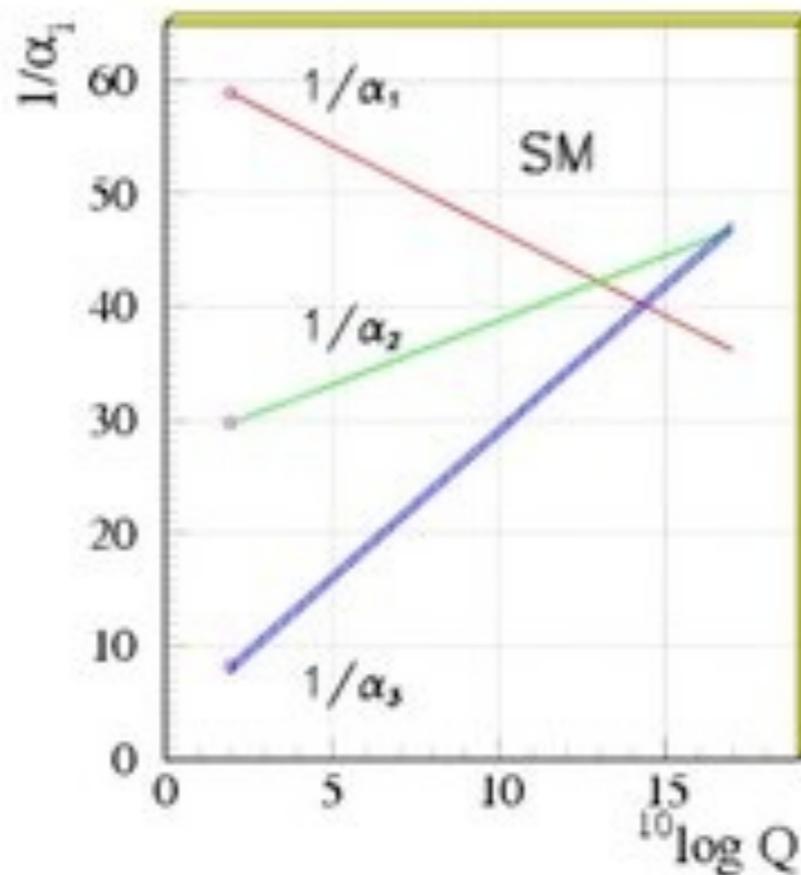
# Ist das alles?

- Gibt es Teilchenphysik jenseits des Standardmodells?
  - Vereinheitlichung aller Kräfte?



# Vereinheitlichung der Kräfte?

- Die laufenden Kopplungskonstanten der drei Wechselwirkungen treffen sich nicht in einem Punkt bei der Extrapolation zu hohen Energien
- Die Einführung zusätzlicher, schwerer Teilchen (Supersymmetrie) ermöglicht eine Vereinheitlichung etwas unter der Skala der Gravitation



$\alpha_1$ : EM-Kopplung  
 $\alpha_2$ : Schwache Kopplung  
 $\alpha_3$ : Starke Kopplung

Q: Wechselwirkungsenergie in GeV

# Hierarchie-Problem, Skala der Gravitation

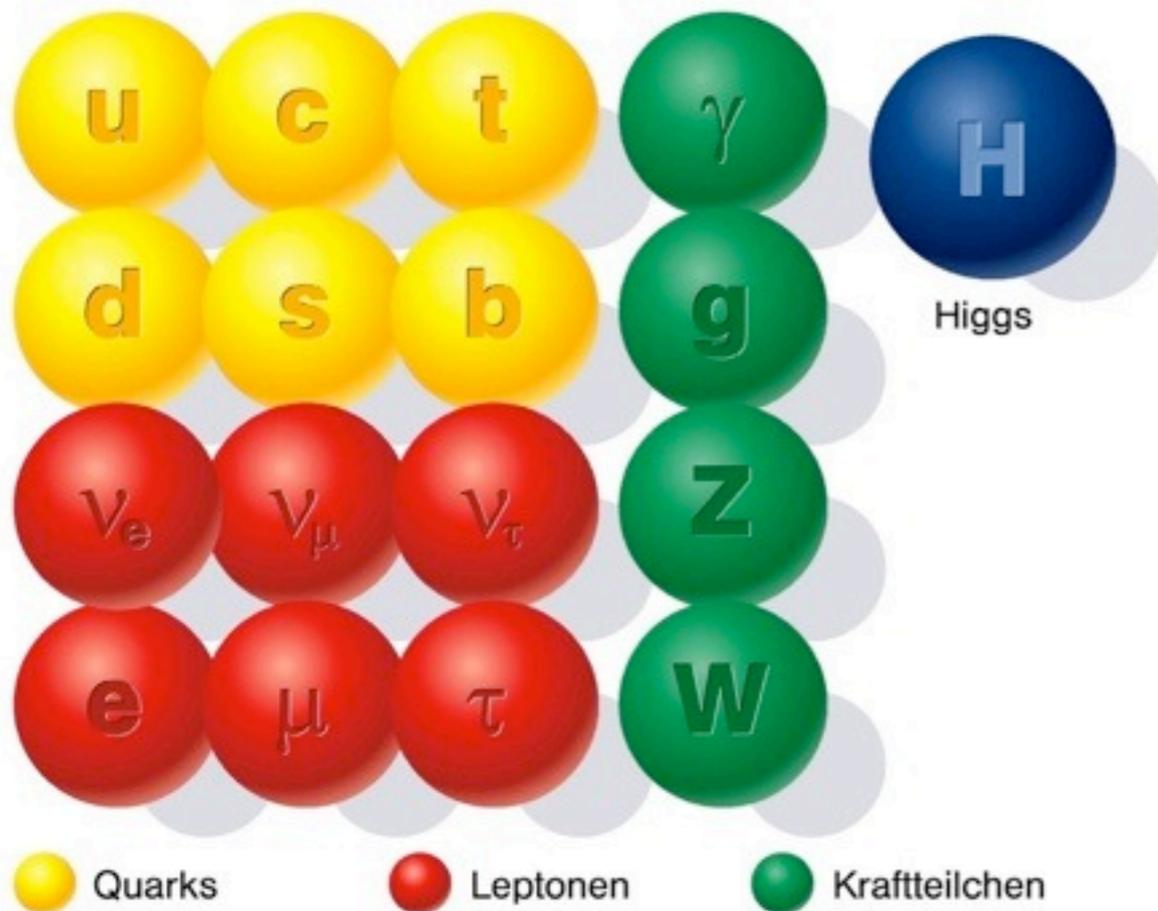
- Warum ist die Gravitation so schwach?
  - Die natürliche Skala der Gravitation: Die Planck-Masse
    - Zusammenbruch der klassischen Beschreibung, Quantengravitation notwendig

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1.2 \times 10^{19} GeV = 2 \times 10^{-8} kg$$

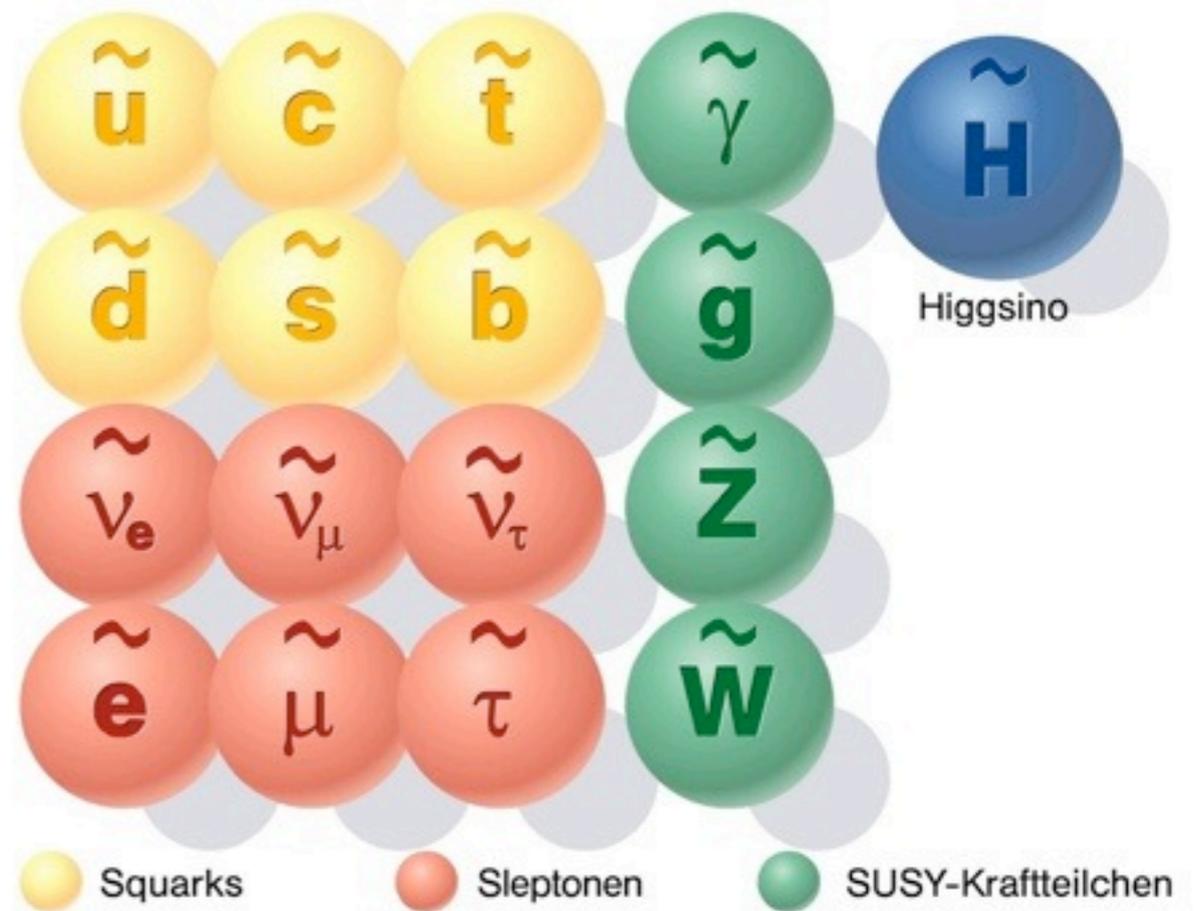
- Alternative Frage: Warum sind die uns bekannten Elementarteilchen so leicht?
  - Quantenkorrekturen könnten zu viel höheren Massen führen
- Mögliche Lösung: Zusätzliche, noch unbekannte Teilchen bei etwas höheren Energien

# Supersymmetrie

## Standard-Teilchen



## SUSY-Teilchen



- Symmetrie zwischen Kräften und Materie: Für jedes Fermion gibt es einen bosonischen Superpartner und umgekehrt
- Supersymmetrie ist in der Natur gebrochen: SUSY-Teilchen sind schwerer als normale Teilchen
- ▶ Leichtestes SUSY-Teilchen könnte stabil sein: Guter Kandidat für Dunkle Materie

# Gravitation: Neue Überraschungen?

- Wir wissen erstaunlich wenig über Gravitation bei kleinen Abständen:  
Bis vor wenigen Jahren war Gravitation bei Abständen kleiner als **1 mm** nicht nachgewiesen!
- ▶ Heute: Newtonsches Gravitationsgesetz gilt auf jeden Fall ab **50  $\mu\text{m}$**

⇒ String-Theorie, eine Möglichkeit, Gravitation und Teilchenphysik zu vereinen, fordert zusätzliche Raumdimensionen

# Gravitation: Neue Überraschungen?

- Wir wissen erstaunlich wenig über Gravitation bei kleinen Abständen:  
Bis vor wenigen Jahren war Gravitation bei Abständen kleiner als **1 mm** nicht nachgewiesen!
- ▶ Heute: Newtonsches Gravitationsgesetz gilt auf jeden Fall ab **50  $\mu\text{m}$**

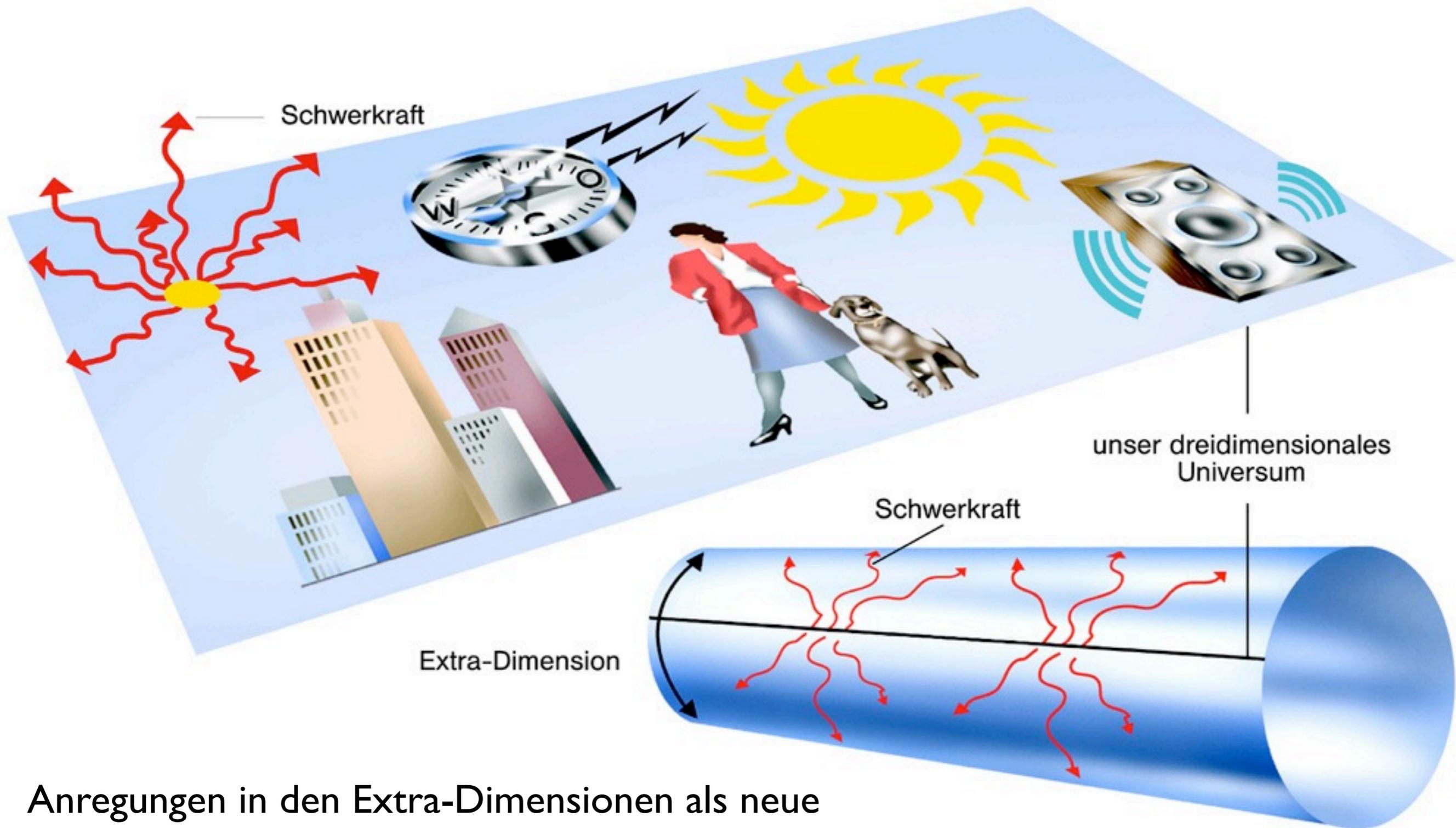
Sollte der Raum um uns herum mehr als 3 Dimensionen haben, würde Gravitation bei kleinen Abständen deutlich stärker werden!

⇒ Lösung des Hierarchie-Problems!

⇒ Planck-Skala könnte deutlich kleiner sein,  
Gravitation würde auch in der Teilchenphysik eine Rolle spielen

⇒ String-Theorie, eine Möglichkeit, Gravitation und Teilchenphysik zu vereinen, fordert zusätzliche Raumdimensionen

# Extra-Dimensionen: Aufgerollt!



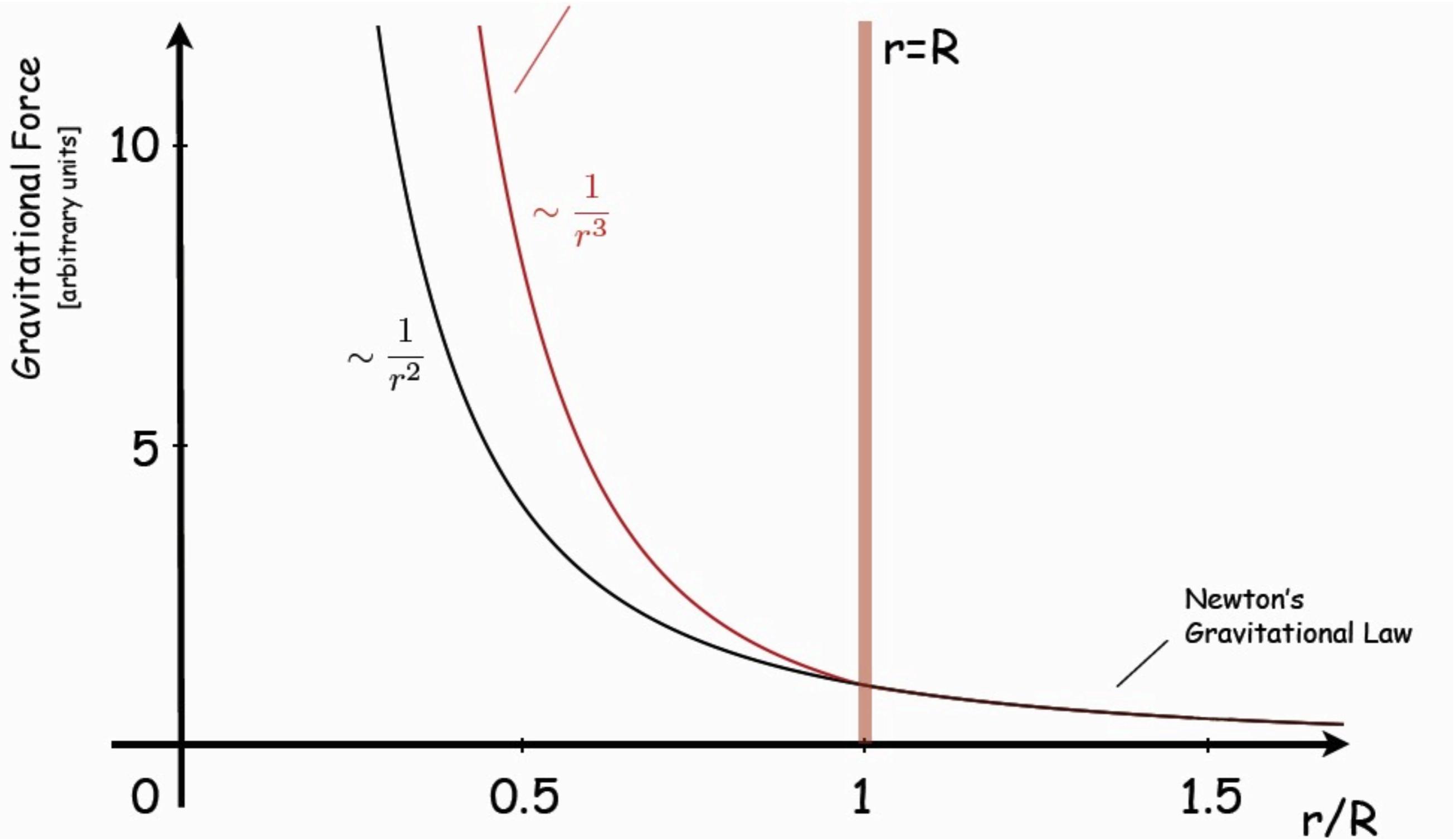
Anregungen in den Extra-Dimensionen als neue Teilchen könnten die Dunkle Materie erklären!

# Extra Dimensionen: Kompaktifizierung

- Die Extra-Dimensionen unterscheiden sich von den uns bekannten 3:
  - ▶ Die Extra-Dimensionen können nur bei sehr kleinen Abständen relevant werden
  - ▶ Möglich zum Beispiel durch Kompaktifizierung (“Aufrollen”):

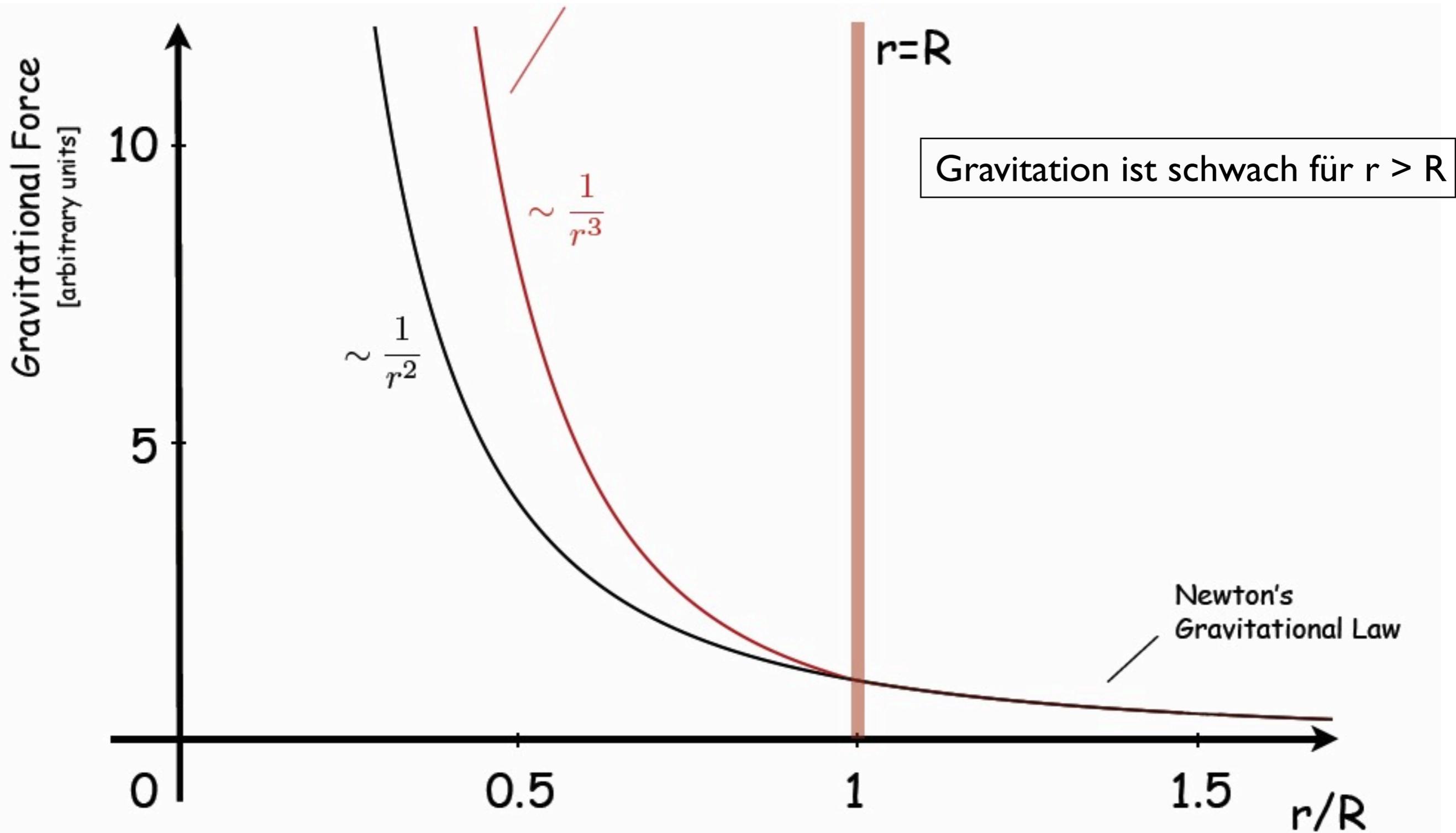
# Gravitation in 4D

## Gravitation in 4 Raumdimensionen



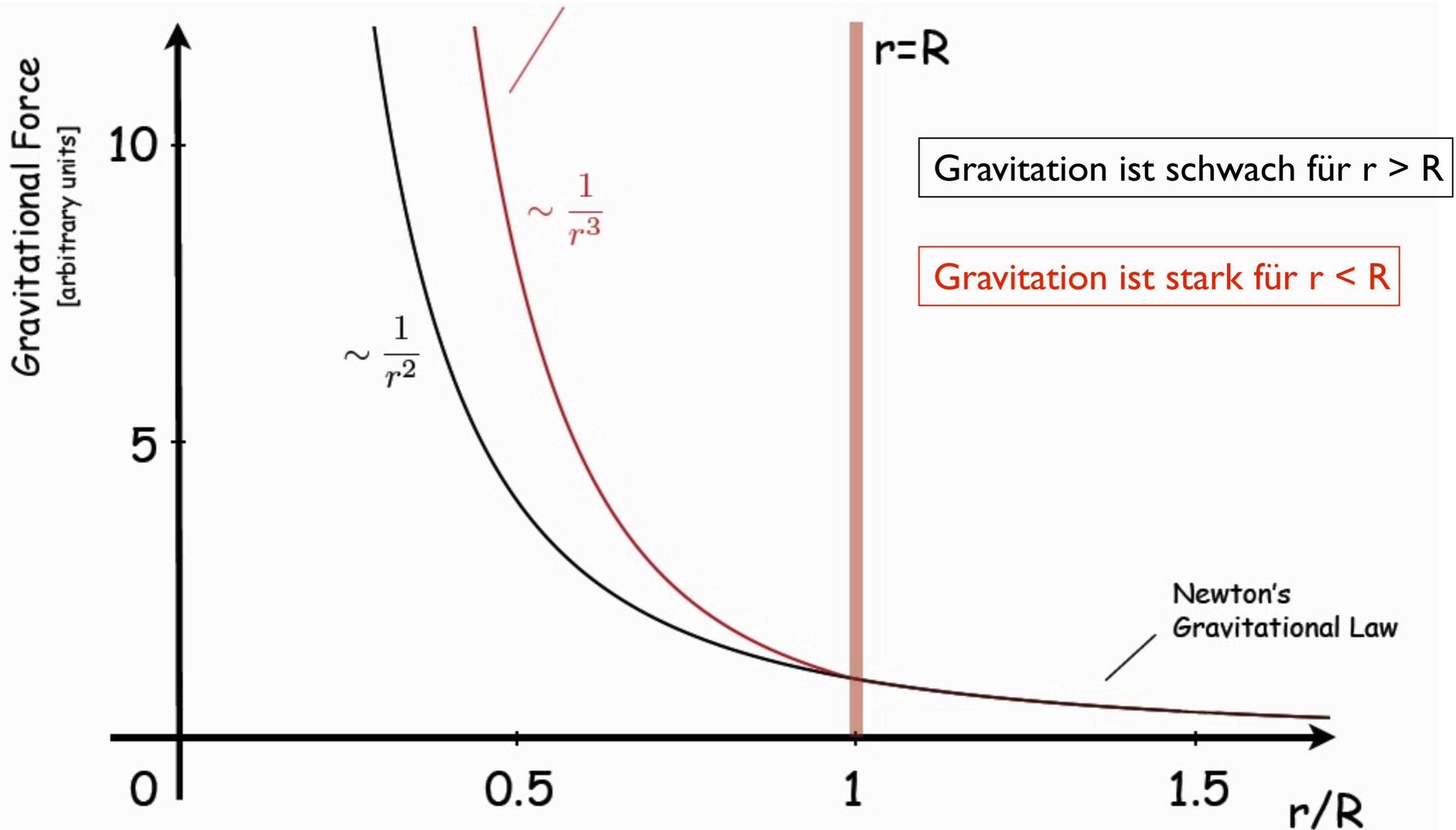
# Gravitation in 4D

## Gravitation in 4 Raumdimensionen



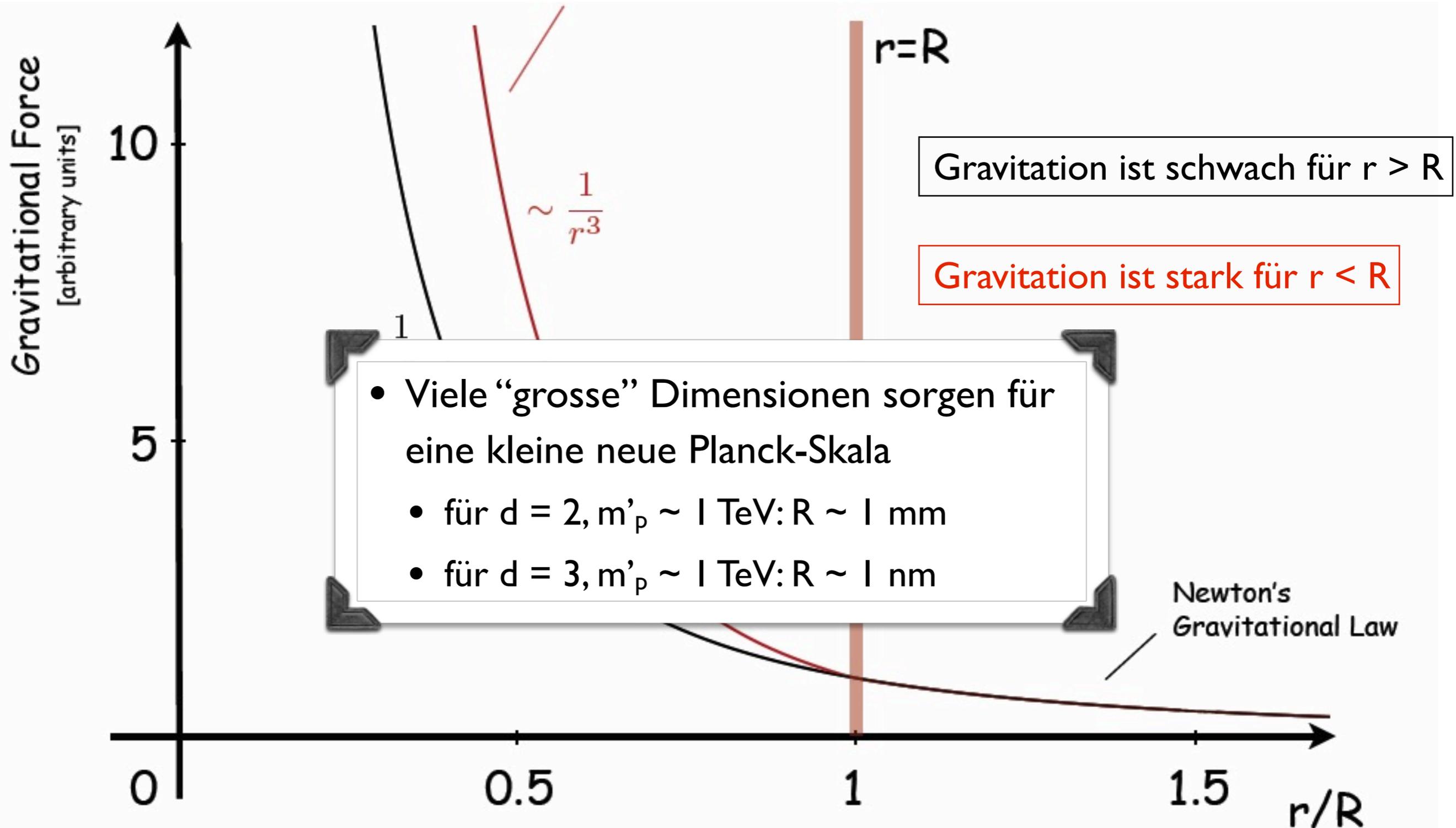
# Gravitation in 4D

## Gravitation in 4 Raumdimensionen



# Gravitation in 4D

## Gravitation in 4 Raumdimensionen



# II.

## Experimente der Teilchenphysik

# Teilchenphysikalische Experimente: Grundprinzip

- Um die fundamentalen Teilchen und ihre Wechselwirkungen zu verstehen muss man sie im Labor untersuchen

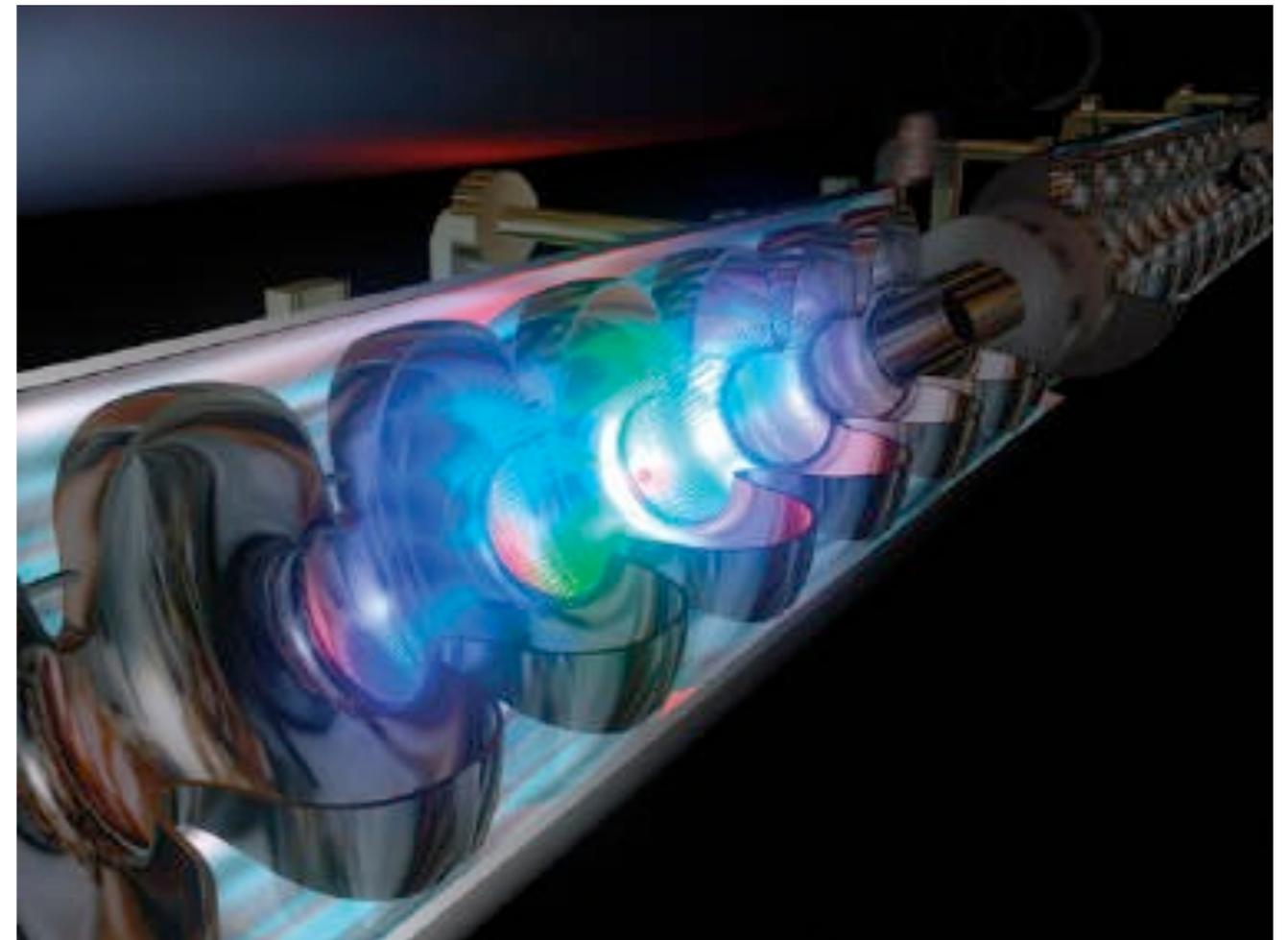
- Zugriff auf die kleinsten Bausteine der Materie nur durch hohe Energie möglich:

Energie  $\Leftrightarrow$  Abstand (de Broglie - Wellenlänge)

- Auflösung  $d[\text{fm}] \sim 0.197/E [\text{GeV}]$ 
  - ▶ Um an die Bausteine des Protons heranzukommen brauche ich Energien  $> \sim 1 \text{ GeV}$
  - ▶ Nicht so leicht zu bekommen: Radioaktive Quellen  $\sim 1 \text{ MeV}$

# Werkzeuge: Beschleuniger

- Hochenergetische Teilchen (Elektronen, Protonen, Ionen...) werden mit Beschleunigern erzeugt:
  - Geladene Teilchen gewinnen beim Durchlaufen von elektrischen Potentialdifferenzen Energie
- Hohe Energien “mit Tricks”: Viele GV Spannungsdifferenz nicht zu erzeugen!
  - Zyklotron: Die selbe Potentialdifferenz wird immer wieder auf einer Spirale durchlaufen, geschicktes Umpolen notwendig
  - Moderne Kavitäten: Teilchen “surfen” auf elektromagnetischen Wellen



# Moderne Beschleuniger

- Zwei Typen, je nach Teilchensorte
  - Linear-Beschleuniger
    - Bestehen praktisch nur aus hintereinandergeschalteten Beschleunigungs-Kavitäten
    - Die gesamte Energie der Teilchen muss in einem Schuss erreicht werden
    - Hauptsächlich für Elektronen
  - Kreis-Beschleuniger (“Synchrotron”)
    - Bestehen hauptsächlich aus Magneten, die die Teilchenstrahlen auf der Kreisbahn halten und fokussieren
    - Energie wird in vielen Umläufen aufgebaut, wenige Beschleunigungsstrecken werden sehr oft durchlaufen
    - Für alle Teilchensorten, höchste Energien nur mit Proton oder schwereren Kernen

# Der Large Hadron Collider



CERN (Genf)



- Beschleuniger-Tunnel unter der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich
  - Zwischen 50 m und 175 m tief unter der Erde
  - 26,659 km Umfang

Foto: CERN

# Das größte Experiment der Menschheit

- 10 000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 100 Ländern

# Das größte Experiment der Menschheit

- 10 000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 100 Ländern
- 8 Jahre Bauzeit, jahrzehntelange Vorbereitungen (Genehmigung 1994)

# Das größte Experiment der Menschheit

- 10 000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 100 Ländern
- 8 Jahre Bauzeit, jahrzehntelange Vorbereitungen (Genehmigung 1994)
- Baukosten des Beschleunigers: 4.6 Milliarden CHF (ca. 3 Milliarden Euro)

# Das größte Experiment der Menschheit

- 10 000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 100 Ländern
- 8 Jahre Bauzeit, jahrzehntelange Vorbereitungen (Genehmigung 1994)
- Baukosten des Beschleunigers: 4.6 Milliarden CHF (ca. 3 Milliarden Euro)
- Elektrische Leistung: 120 MW, Jahresverbrauch 800 GWh (ca. 250 000 Haushalte)

# Das größte Experiment der Menschheit

- 10 000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 100 Ländern
- 8 Jahre Bauzeit, jahrzehntelange Vorbereitungen (Genehmigung 1994)
- Baukosten des Beschleunigers: 4.6 Milliarden CHF (ca. 3 Milliarden Euro)
- Elektrische Leistung: 120 MW, Jahresverbrauch 800 GWh (ca. 250 000 Haushalte)
- 4 Experimente, Datenrate  $\sim 700$  MB/s, fast 1% der gesamten Informationsproduktion der Menschheit

# Der LHC



Foto: CERN



# Der LHC

- Insgesamt 9593 Magnete, davon 1232 Main Dipoles
- Supraleitende Magnettechnologie: Magnete in superfluidem He bei 1,9 K
- Dipol-Magnetfeld: 8,33 T
- Energie der Teilchen: bis 7 TeV (ca. 7 000 x Ruhemasse des Protons, etwa die kinetische Energie einer Mücke)
- Geschwindigkeit: 99,9999991% c, 299 792 455,3 m/s
- ~ 3 m/s langsamer als Licht



Foto: CERN

# Der LHC

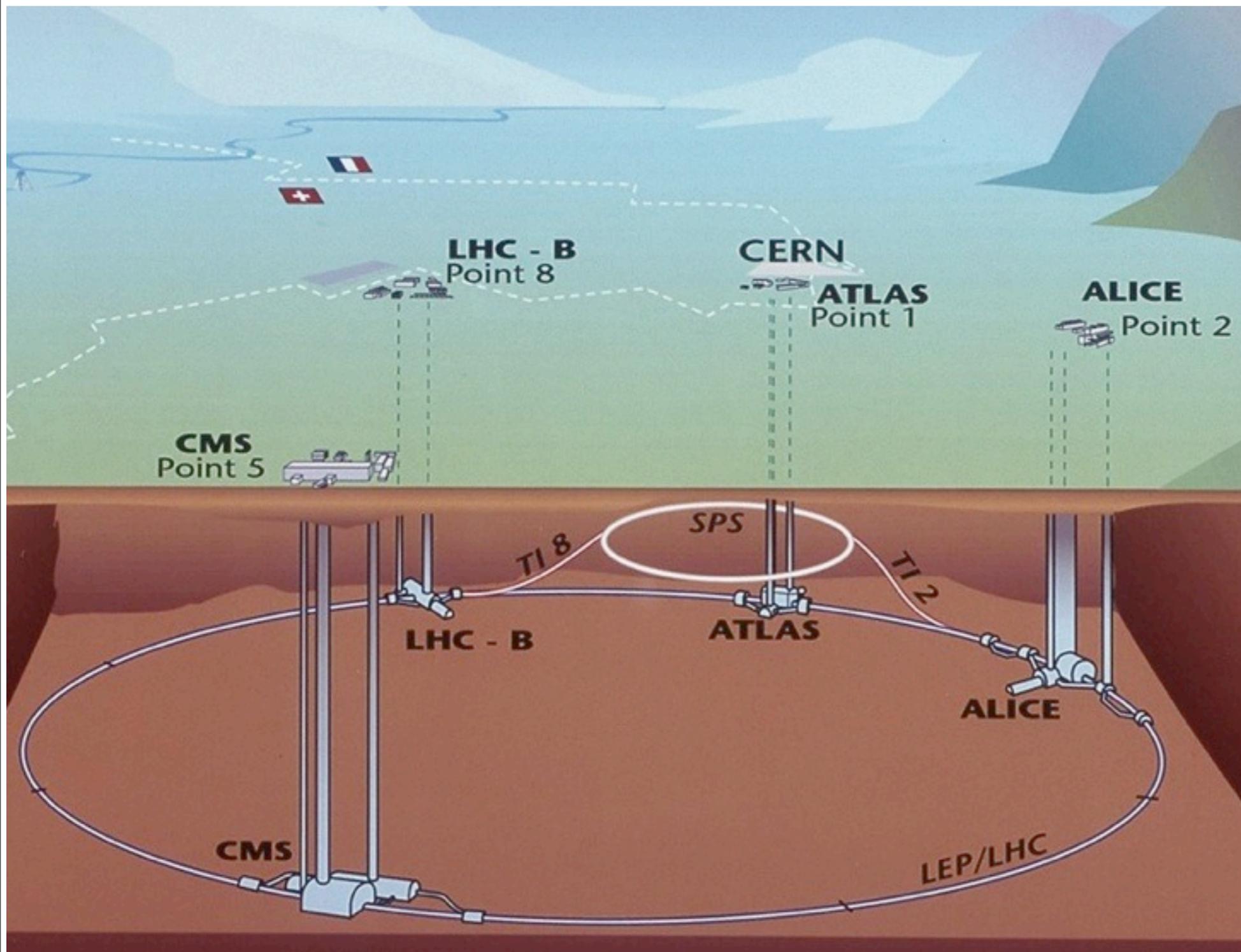
- Insgesamt 9593 Magnete, davon 1232 Main Dipoles
- Supraleitende Magnettechnologie: Magnete in superfluidem He bei 1,9 K
- Dipol-Magnetfeld: 8,33 T
- Energie der Teilchen: bis 7 TeV (ca. 7 000 x Ruhemasse des Protons, etwa die kinetische Energie einer Mücke)
- Geschwindigkeit: 99,9999991% c, 299 792 455,3 m/s
- ~ 3 m/s langsamer als Licht



Rechenpaket

Foto: CERN

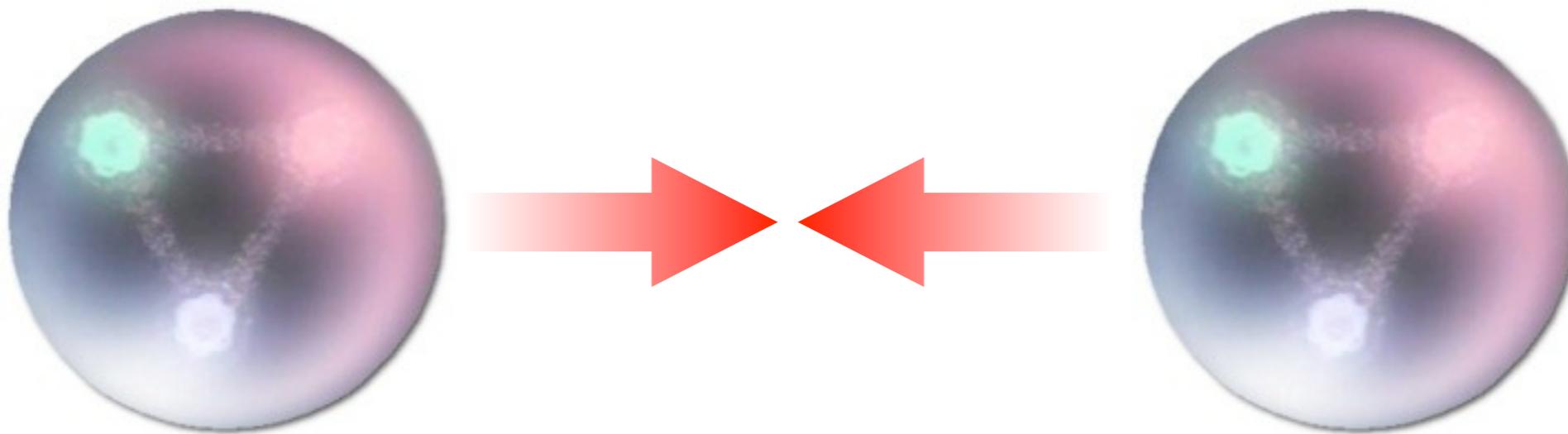
# Der LHC



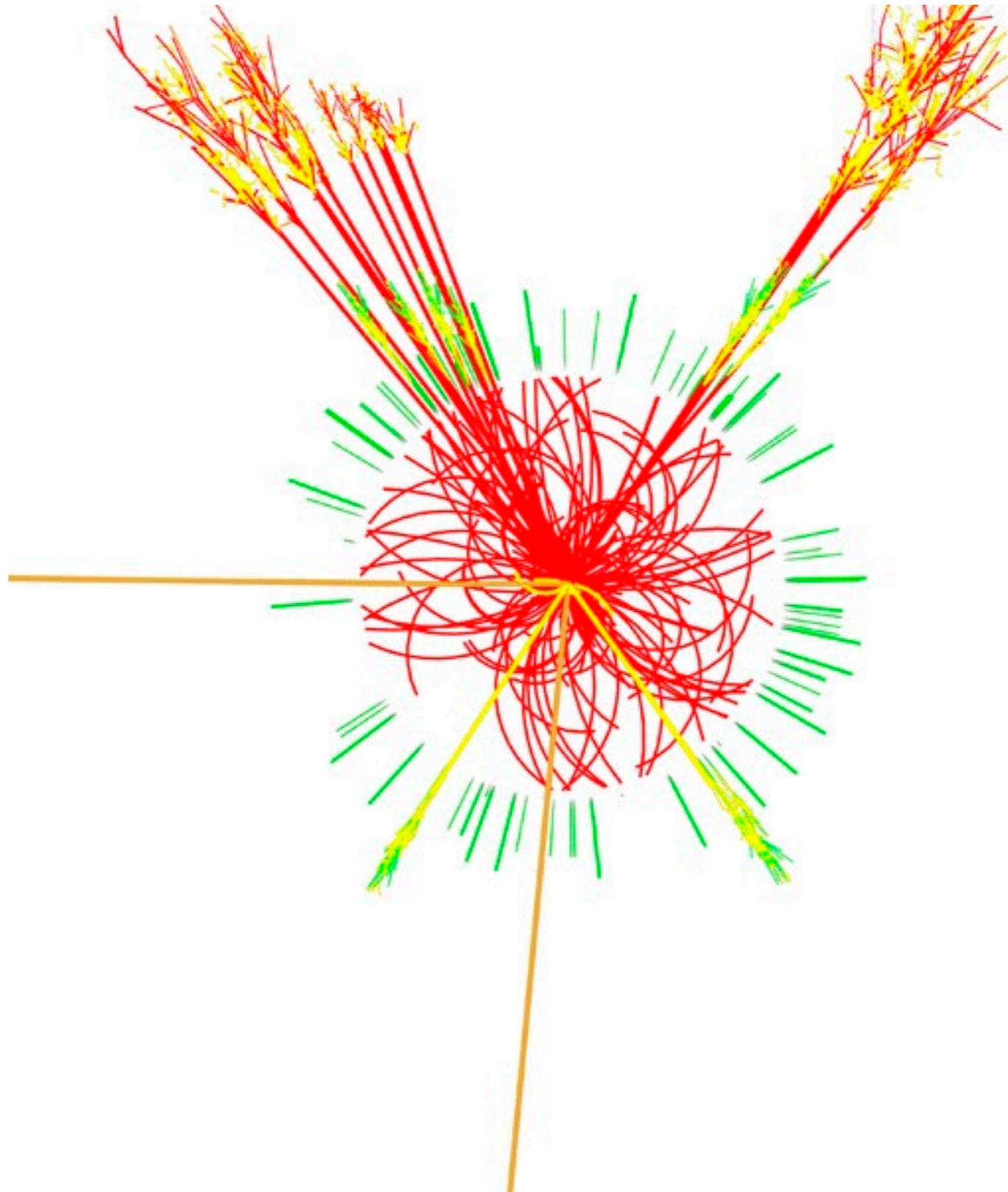
- Zahl der Protonen im LHC:  
 $2 \times 2808 \times 1.1 \times 10^{11}$
- 11 245 Umläufe pro Sekunde
- Teilchenkollisionen in den Experimenten alle 25 ns
- Energie im Strahl: Ein ICE mit 150 km/h, reicht um 500 kg Kupfer zu schmelzen

credit: CERN

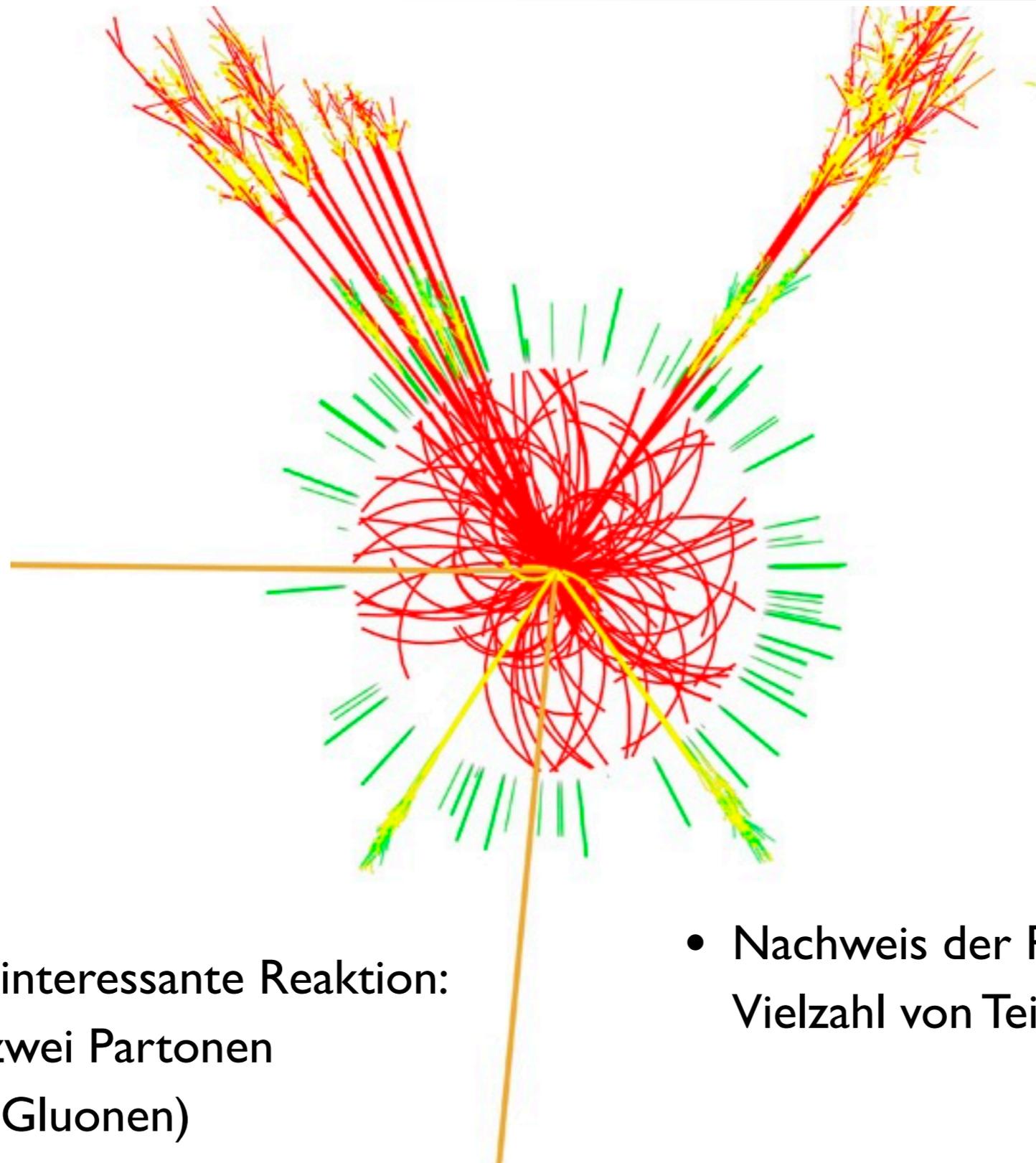
# Teilchenkollisionen am LHC



# Teilchenkollisionen am LHC

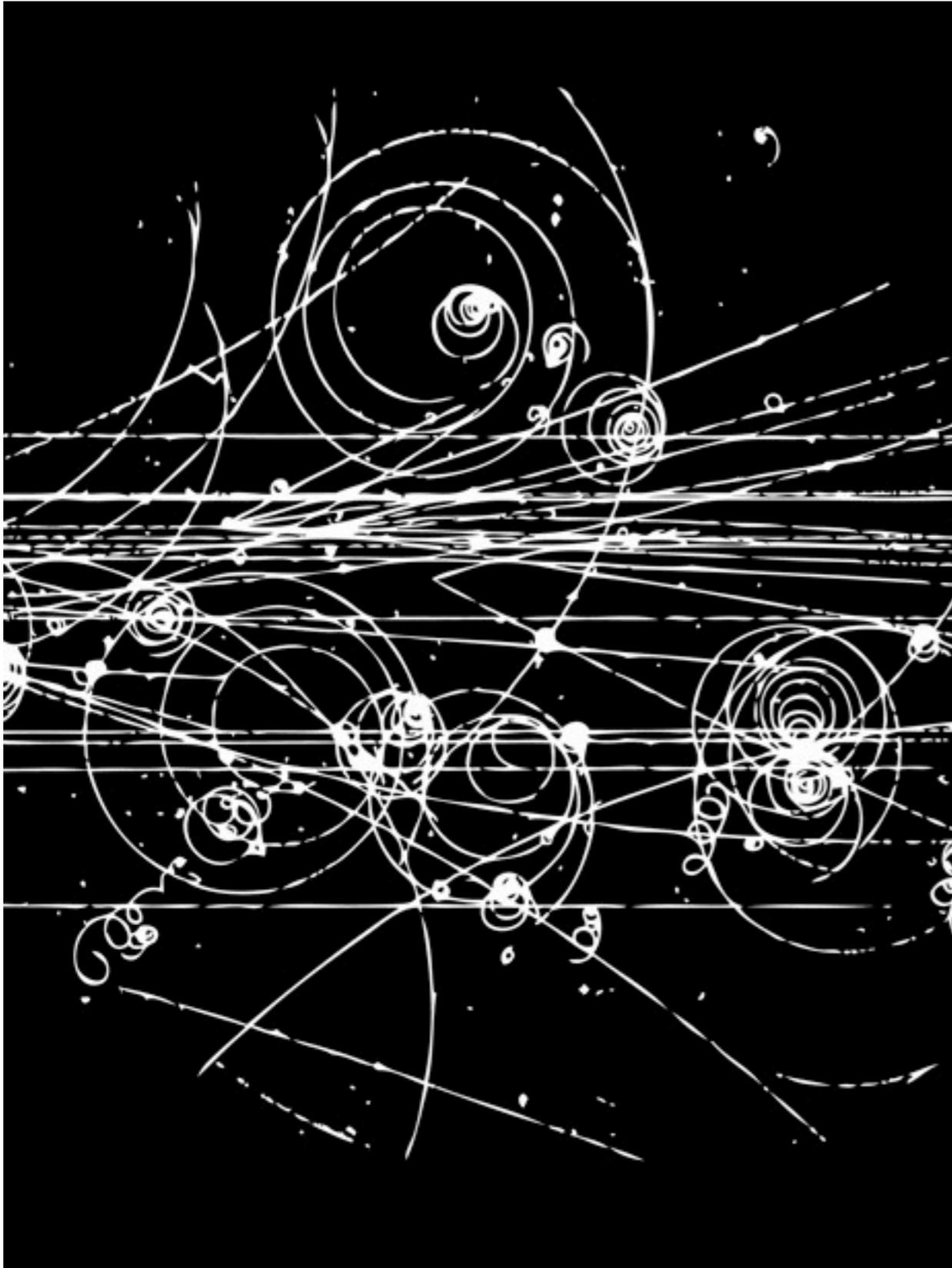


# Teilchenkollisionen am LHC



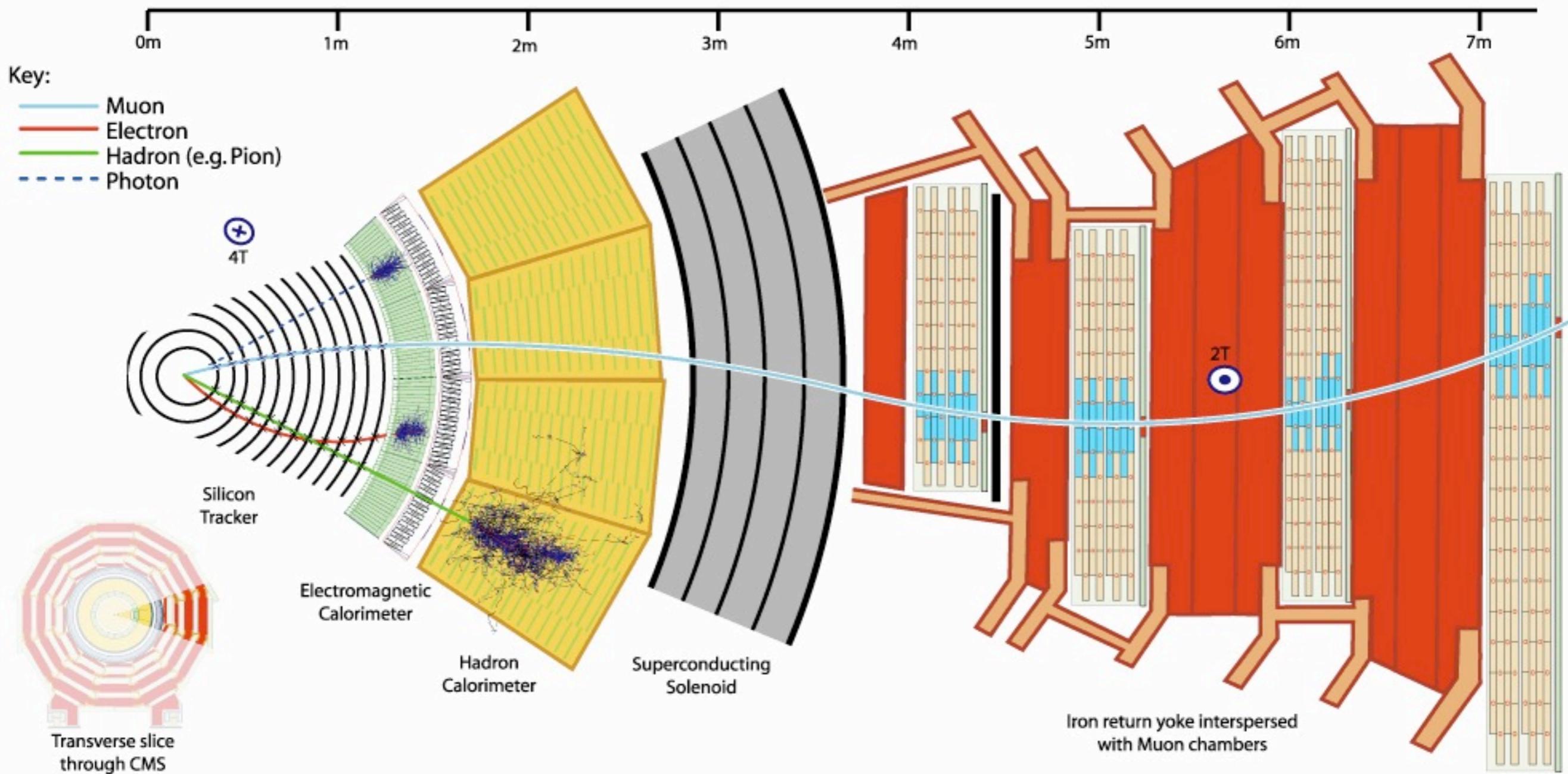
- Die eigentlich interessante Reaktion: Kollision von zwei Partonen (Quarks oder Gluonen)

- Nachweis der Reaktionsprodukte, eine Vielzahl von Teilchen, in den Detektoren



- Nachweis der Reaktionsprodukte von Teilchenkollisionen
- Ziel: Genaue Rekonstruktion der Prozesse aus den beobachteten Teilchen
- Moderne Detektorsysteme bestehen aus vielen verschiedenen einzelnen Detektoren, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen und zwiebelschalenförmig angeordnet sind

# Collider-Detektoren: Querschnitt [CMS]



- Die hohen Energien erfordern große Magnetfelder und große Detektoren
- Beispiel hier: CMS, C steht für Compact!

# CMS: Der “Kompakte”

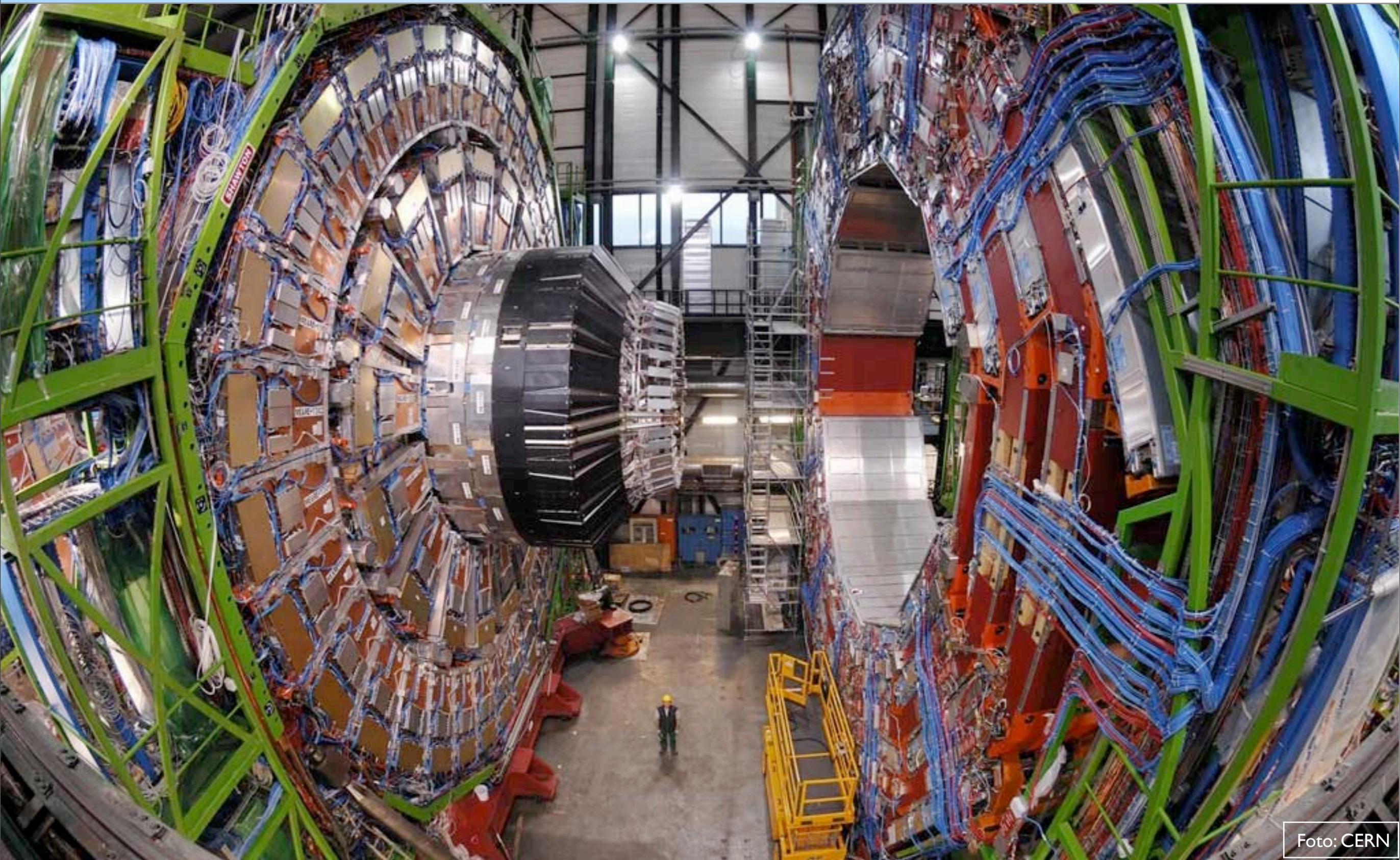
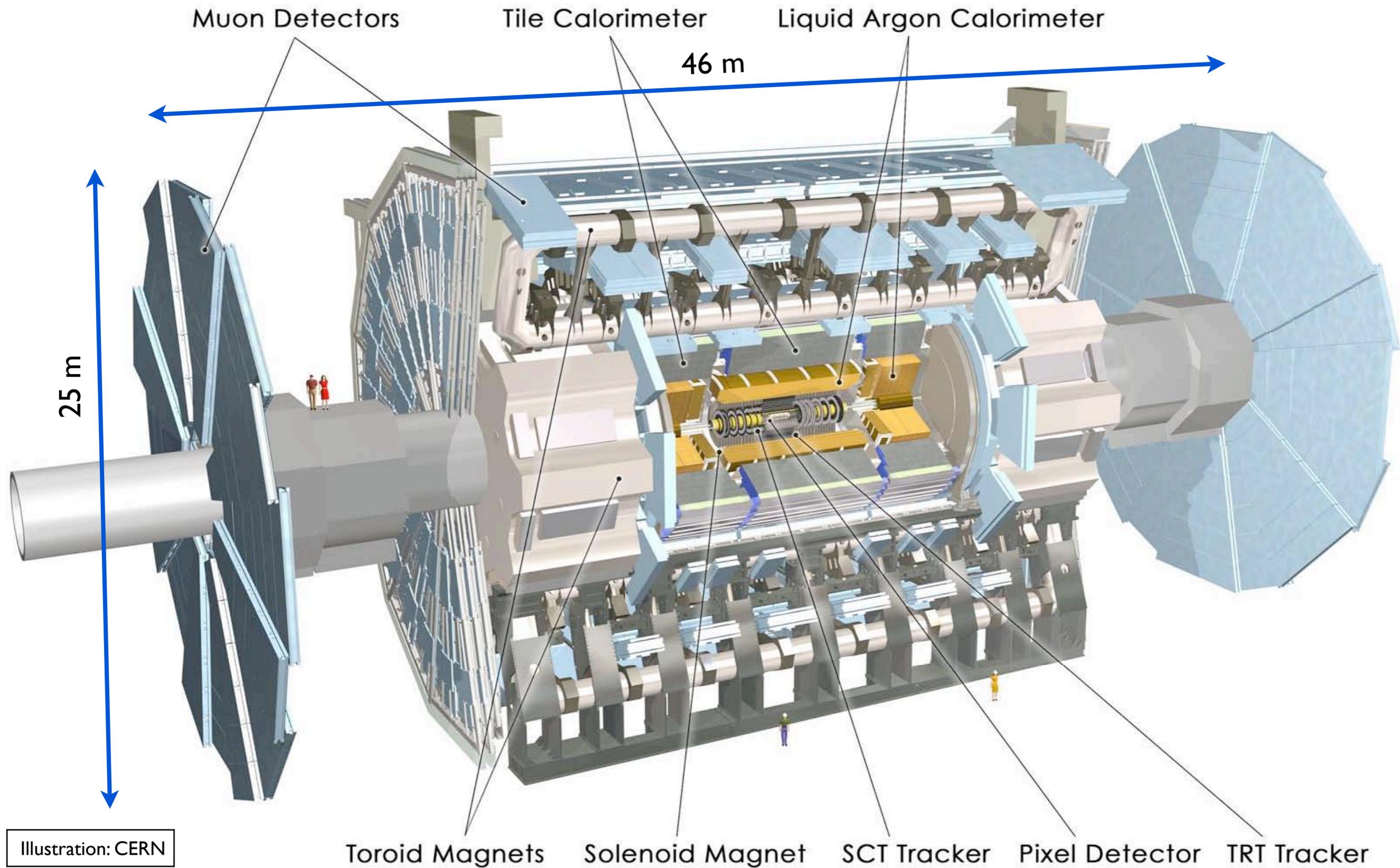


Foto: CERN



# ATLAS: Der größte Detektor der Teilchenphysik



# ATLAS

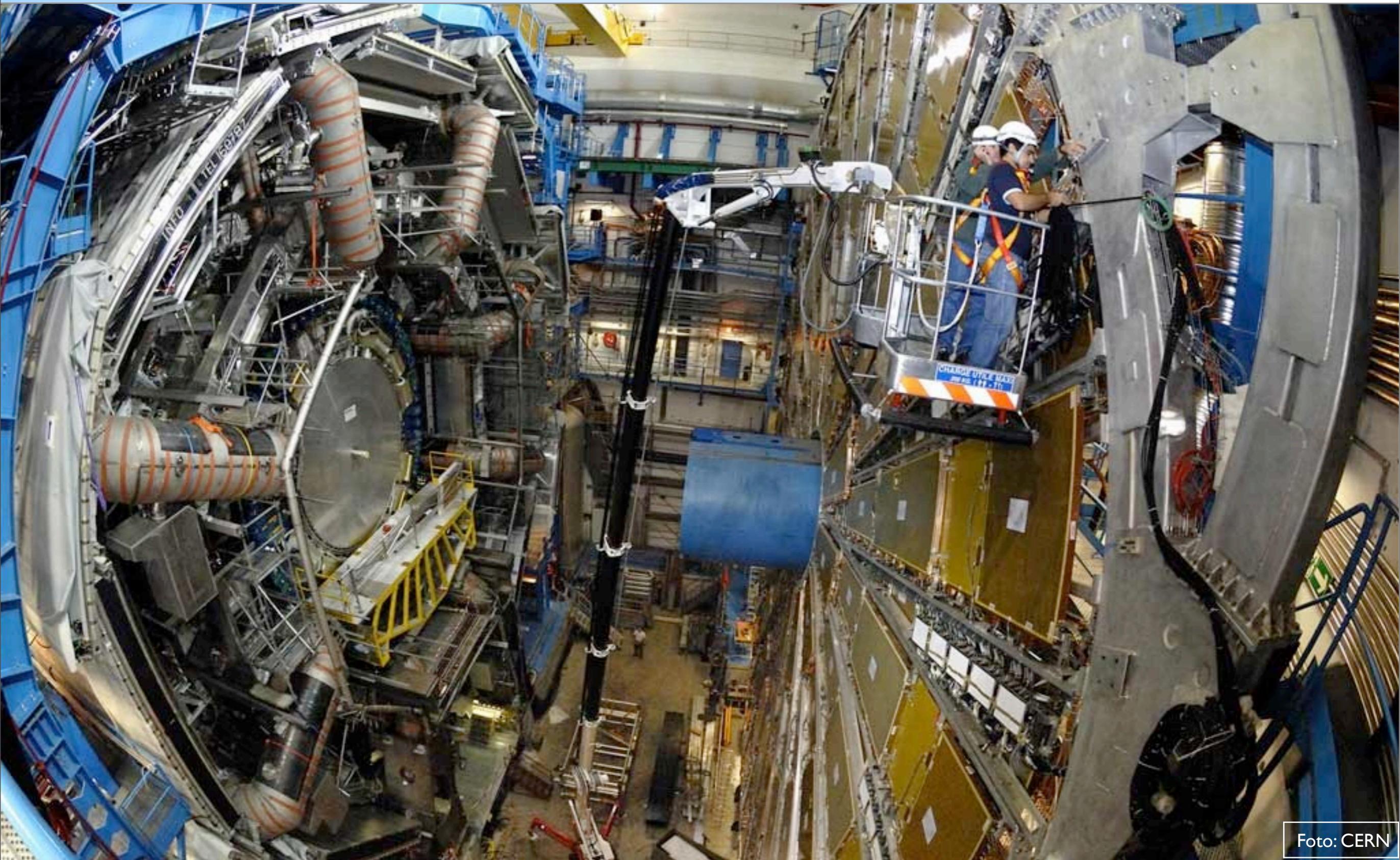
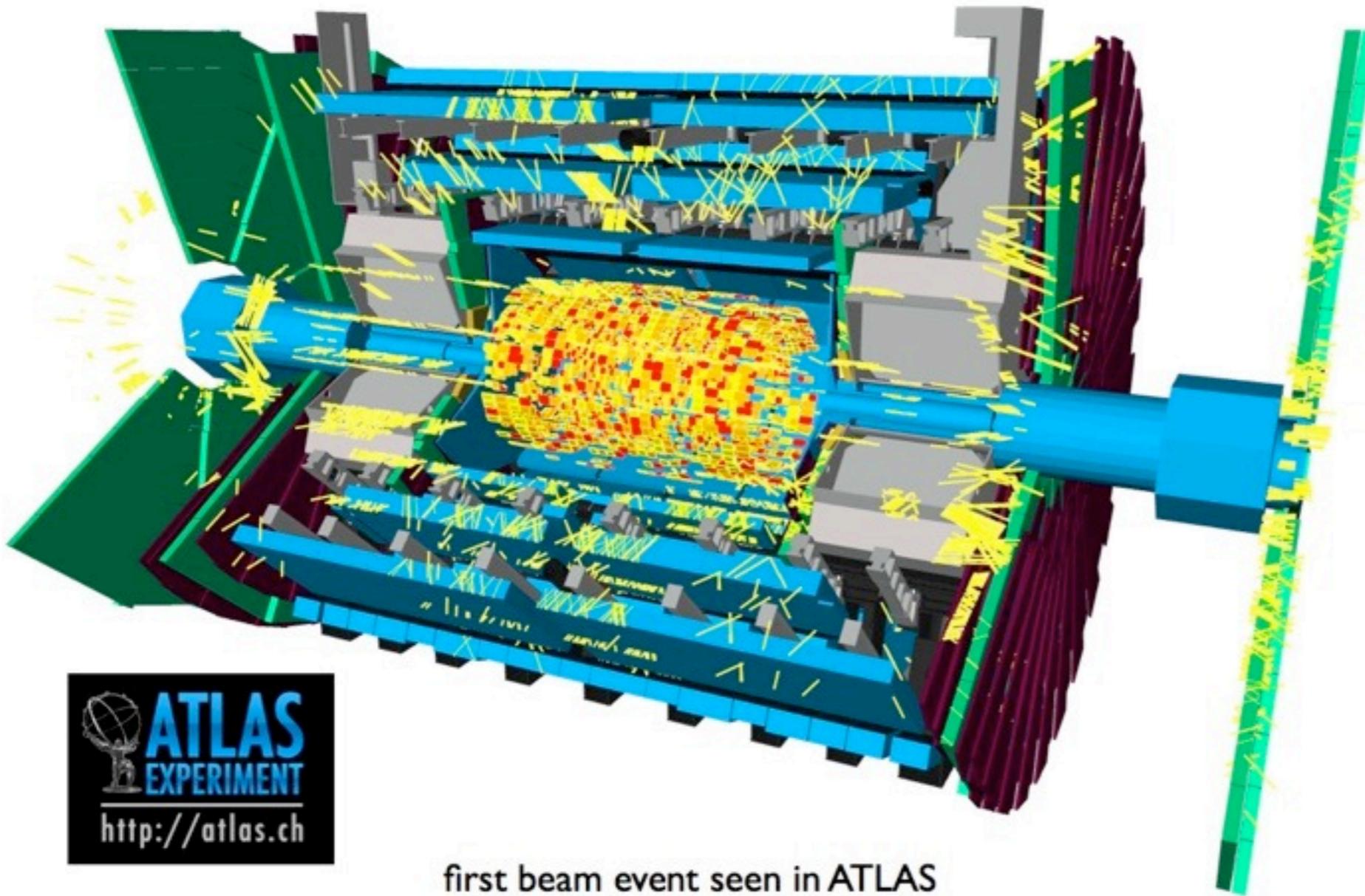
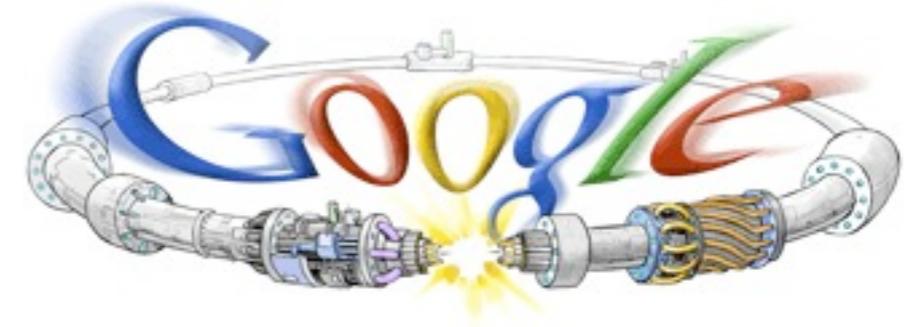


Foto: CERN



# LHC: Erfolgreicher Start am 10. September 2008

- Erster Strahl im LHC-Ring bei 450 GeV

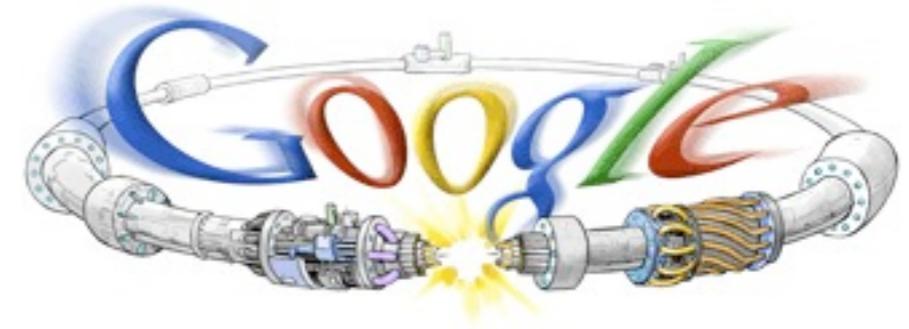


first beam event seen in ATLAS

Wechselwirkung des Proton-Strahls mit Gasatomen in der Strahlröhre des LHC und mit Elementen der Strahloptik

# LHC: Erfolgreicher Start am 10. September 2008

- Erster Strahl im LHC-Ring bei 450 GeV



Nach dem Unfall am 19.09.2008:  
der letzte fehlende Magnet wieder im Tunnel seit 30. April

## LHC-Neustart September 2009

Protonen in der Strahlröhre des LHC und mit Elementen der Strahloptik



first beam event seen in ATLAS

**V.**

# **Ist Teilchenphysik gefährlich?**

# Schwarze Löcher?

## **Schwarze Löcher: Ein Phänomen der Gravitation!**

⇒ Könnten in Teilchenreaktionen entstehen, wenn die Gravitation bei kleinen Abständen sehr viel stärker ist als wir heute annehmen

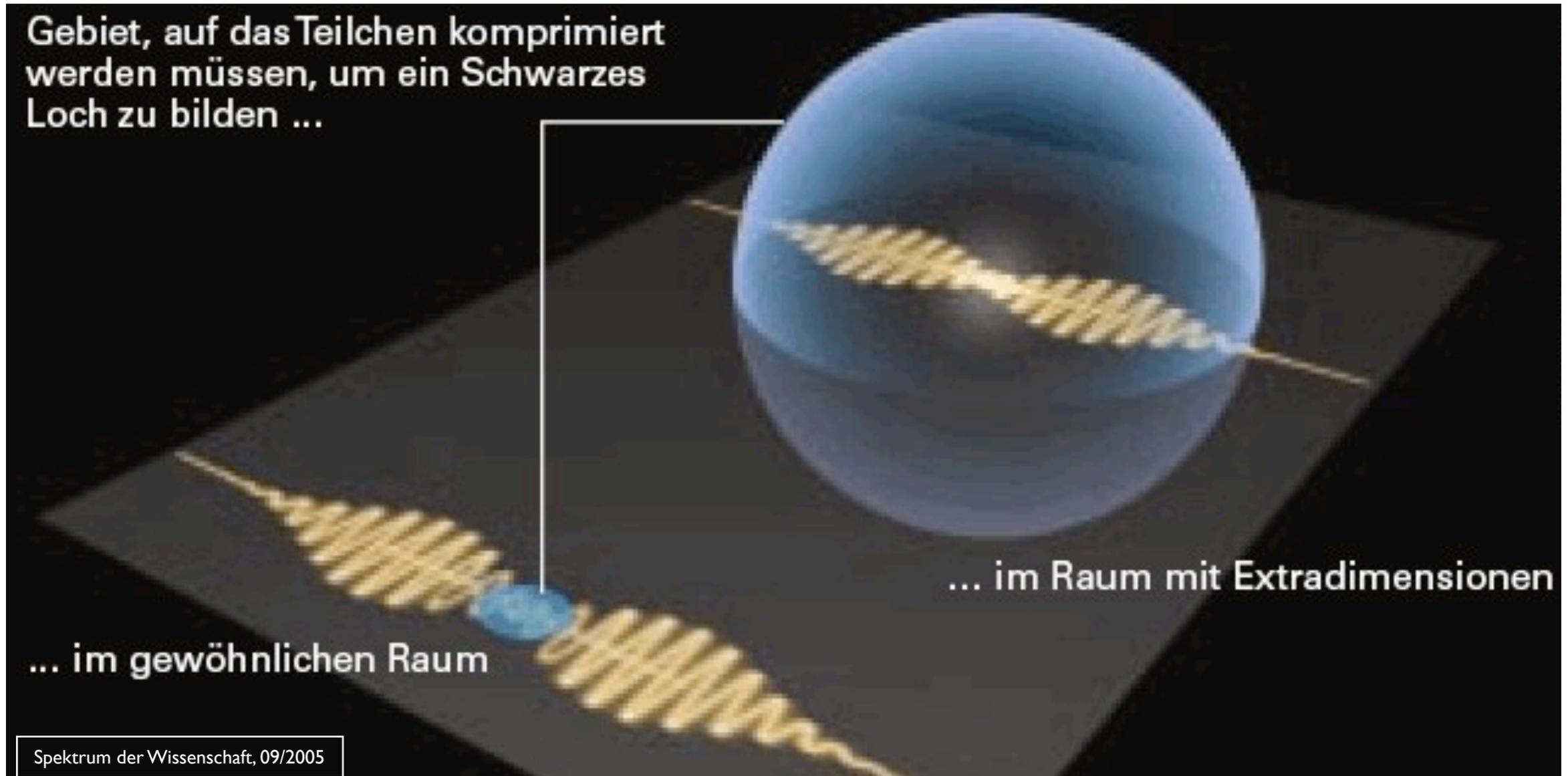
Möglich in einer Welt mit “großen” Extra-Dimensionen: Mehr als die drei Raumdimensionen, die wir kennen!

# Schwarze Löcher?

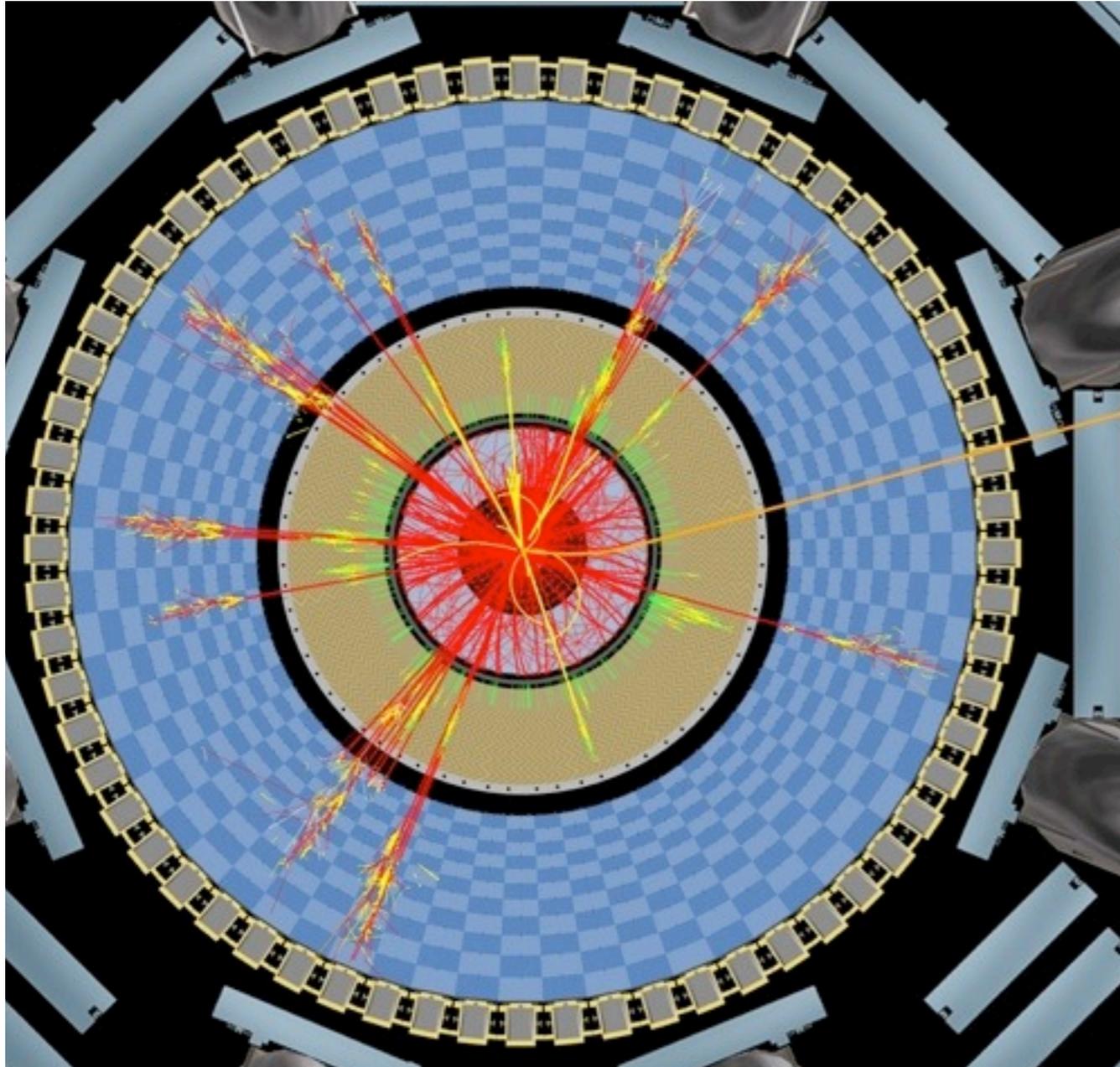
## Schwarze Löcher: Ein Phänomen der Gravitation!

⇒ Könnten in Teilchenreaktionen entstehen, wenn die Gravitation bei kleinen Abständen sehr viel stärker ist als wir heute annehmen

Möglich in einer Welt mit “großen” Extra-Dimensionen: Mehr als die drei Raumdimensionen, die wir kennen!



# Schwarze Löcher: Sofortiger Zerfall

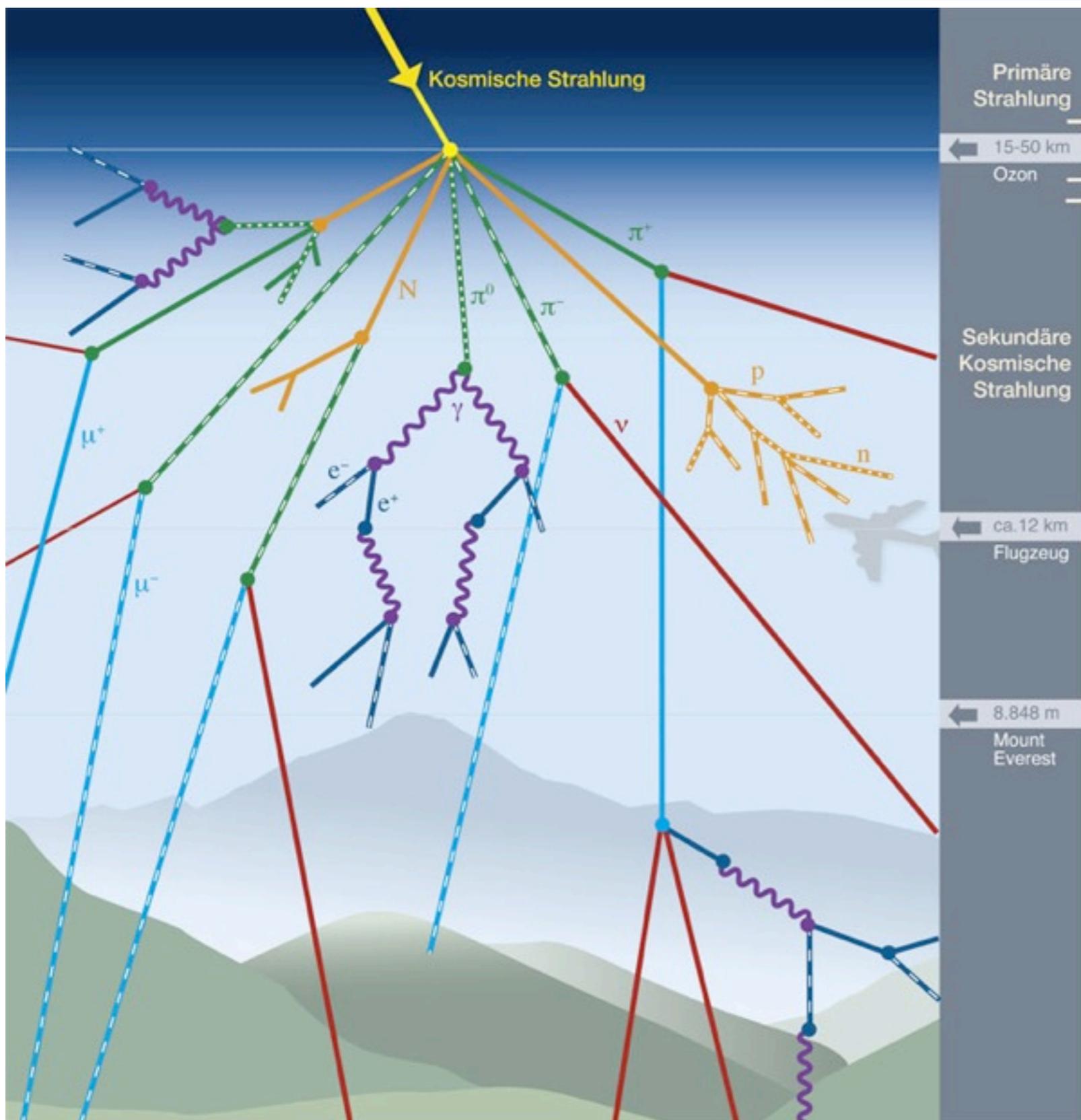


Schwarze Löcher an Beschleunigern hätten ein extrem kurzes Leben:

Spektakulärer Zerfall in eine Vielzahl von Teilchen nach nur  $10^{-26}$  Sekunden

⇒ Keine Zeit, sich voll zu fressen

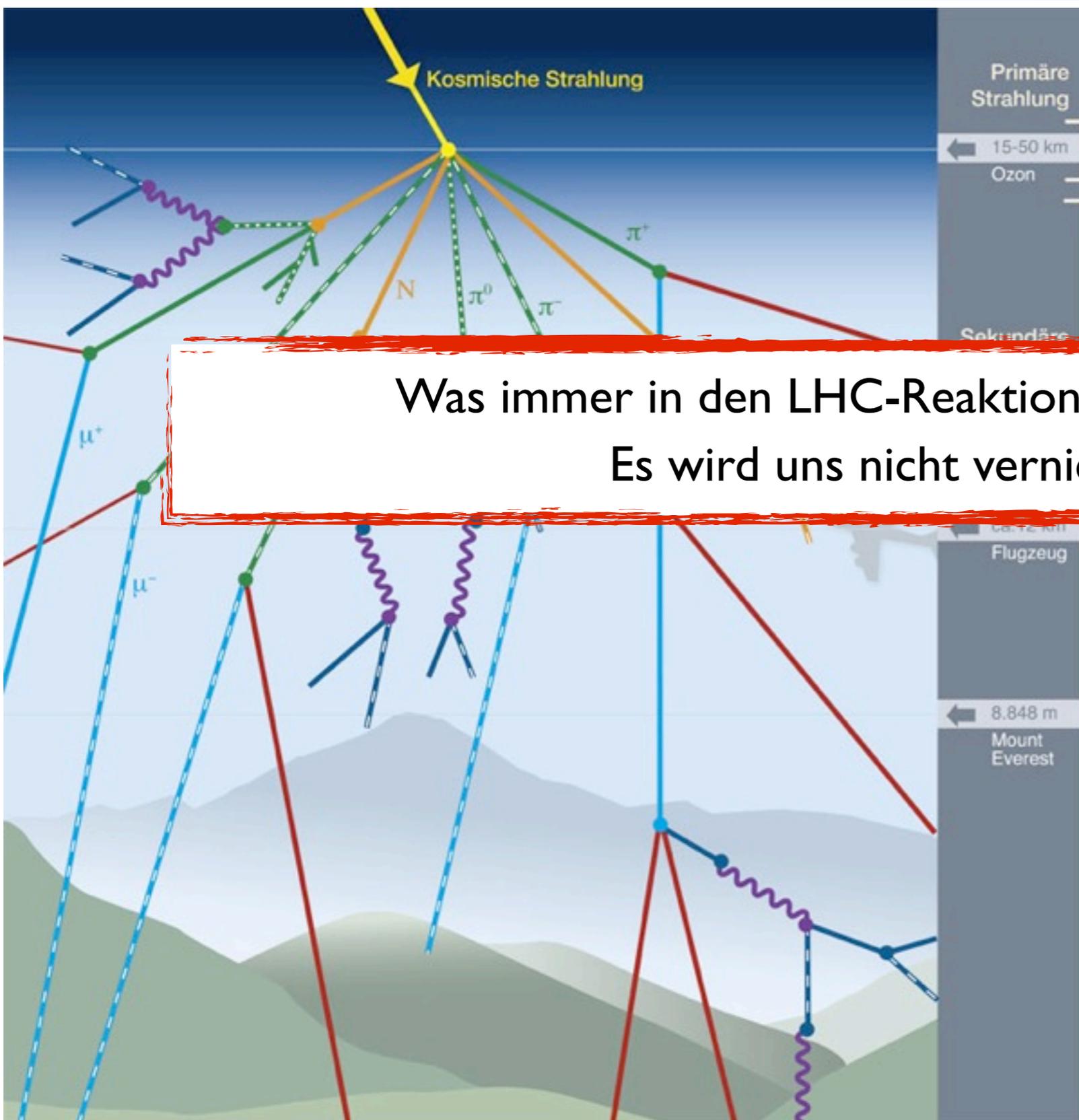
# Keine Gefahr!



Die Erde (und jeder andere Himmelskörper) sind seit Milliarden von Jahren einem ständigen Beschuss hochenergetischer Teilchen ausgesetzt

Allein in der Erdatmosphäre finden jede Sekunde 500 000 Ereignisse mit einer Schwerpunktsenergie oberhalb der LHC-Energie statt!

# Keine Gefahr!



Die Erde (und jeder andere Himmelskörper) sind seit Milliarden von Jahren einem ständigen Beschuss hochenergetischer Teilchen

Was immer in den LHC-Reaktionen erzeugt wird:  
Es wird uns nicht vernichten!

Allein in der Erdatmosphäre finden jede Sekunde 500 000 Ereignisse mit einer Schwerpunktsenergie oberhalb der LHC-Energie statt!

- **Das Standard-Modell der Teilchenphysik**
  - Beschreibt die elementaren Fermionen und ihre Wechselwirkung über Austauschbosonen
    - Gravitation ist nicht enthalten!
  - Die Masse der Teilchen wird über den Higgs-Mechanismus erzeugt
    - Das letzte unentdeckte Puzzle-Stück
- Offene Fragen - Probleme:
  - Gibt es eine Vereinheitlichung aller drei Wechselwirkungen?
  - Warum ist die Gravitation so viel schwächer als die anderen?  
-> Hierarchie-Problem
  - ▶ Mögliche (teilweise) Lösung: Supersymmetrie

- **Experimente der Teilchenphysik**

- Die Instrumente:

- Beschleuniger zur Erzeugung und zur Kollision hochenergetischer Teilchen
- Detektoren zum Nachweis der Reaktionsprodukte der Teilchenreaktionen

- Beschleuniger

- Maximale Energien mit Kollidern: 2 Teilchenstrahlen werden aufeinandergeschossen
- Ringbeschleuniger oder Linearbeschleuniger, je nach Energie und Teilchensorte

- Detektoren

- Der Nachweis kleinster Teilchen erfordert riesige Systeme
- Verschiedene Sub-Komponenten zum Nachweis verschiedener Teilchen und zur Messung verschiedener Eigenschaften

- **Antimaterie, Quark-Gluon-Plasma & Erste Atomkerne**
  - CP Verletzung sorgte für einen Materieüberschuss im frühen Universum, die Größe dieses Effektes ist bis jetzt nicht vollständig verstanden
  - Kurz nach dem Urknall bestand das Universum aus einem Plasma freier Quarks und Gluonen (neben anderen Teilchen)
  - bei einer Temperatur unterhalb von  $\sim 175$  MeV fand ein Phasenübergang zu einem Hadronengas statt: Nukleonen bilden sich
    - $\sim$  einige  $\mu$ s nach dem Urknall
  - Nach  $\sim 3$  Minuten ist die Abkühlung soweit fortgeschritten dass sich Atomkerne bilden können
    - von Deuterium bis  ${}^7\text{Li}$  und  ${}^7\text{Be}$ , schwerere Kerne werden erst viel später in Sternen gebildet

# Rechenpaket Teilchenphysik



## Aufgabe 2a)

*Berechne die Masse des Protons in Einheiten von  $eV/c^2$ . Verwende dazu den Zahlenwert der Protonenmasse in Höhe von  $1,67 \times 10^{-27}$  kg.*

## Aufgabe 2a)

*Berechne die Masse des Protons in Einheiten von  $eV/c^2$ . Verwende dazu den Zahlenwert der Protonenmasse in Höhe von  $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .*

$$\begin{aligned} m_P c^2 [eV] &= m_P c^2 / 1 eV \\ &= 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 / 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 9.38 \times 10^8 \end{aligned}$$

Die Protonenmasse beträgt  $938 \text{ MeV}/c^2$ , also knapp  $1 \text{ GeV}/c^2$

Weitere Beispiele:

Energie von Radiowellen: etwa  $1 \text{ meV}$

Röntgenphoton: um  $1 \text{ keV}$

Elektronenmasse:  $511 \text{ keV}/c^2$

## Aufgabe 2b)

*Beim Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf werden Protonen auf eine Energie von 7 TeV beschleunigt. Wie viel langsamer als das Licht sind diese Protonen? Verwende die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c = 300.000 \text{ km/s}$ .*

## Aufgabe 2b)

Beim Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf werden Protonen auf eine Energie von 7 TeV beschleunigt. Wie viel langsamer als das Licht sind diese Protonen? Verwende die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c = 300.000 \text{ km/s}$ .

Bei solchen Energien wird das Verhalten durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben:

$$E = \gamma m_P c^2 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} m_P c^2 \quad \Leftrightarrow \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{m^2 c^4}{E^2}}$$

$$\beta = 0.9999999991 = 1 - 9 \times 10^{-9}$$

Die Protonen sind also 3 m/s langsamer als das Licht

## Aufgabe 2c)

*In Dan Browns Roman „Illuminati“ (engl. Titel „Angels & Demons“) und dem gleichnamigen Kinofilm wird der Vatikan durch eine „Antimaterie-Bombe“ bedroht, die aus  $\frac{1}{4}$  g Antimaterie besteht. Reicht diese Menge Antimaterie tatsächlich für eine verheerende Explosion? Hinweis: Die Maßeinheit für Sprengkraft, 1 kT (1 Kilo-Tonne TNT, 1000 t TNT) ist definiert als  $10^{12}$  cal, was  $4,184 \times 10^{12}$  J entspricht.*

Die Freisetzung der Energie erfolgt durch Materie-Antimaterie-Vernichtung. Zur Vernichtung von  $\frac{1}{4}$  g Antimaterie wird auch  $\frac{1}{4}$  g Materie benötigt, die aber natürlich überall vorhanden ist. Insgesamt wird also  $\frac{1}{2}$  g Materie in Energie umgewandelt.

$$E = mc^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 4.5 \times 10^{13} \text{ J} = 10.8 \text{ kT}$$

## Aufgabe 2c) Teil 2

*Wie lange würde es dauern, so viel Antimaterie herzustellen (Speicherprobleme usw. werden hierbei völlig ignoriert)? Benutze dazu, dass das US-amerikanische Beschleunigerlabor Fermilab, die größte „Antimaterie-Fabrik“ der Welt,  $1,4 \times 10^{15}$  Antiprotonen im Jahr 2008 produzierte.*

## Aufgabe 2c) Teil 2

*Wie lange würde es dauern, so viel Antimaterie herzustellen (Speicherprobleme usw. werden hierbei völlig ignoriert!)? Benutze dazu, dass das US-amerikanische Beschleunigerlabor Fermilab, die größte „Antimaterie-Fabrik“ der Welt,  $1,4 \times 10^{15}$  Antiprotonen im Jahr 2008 produzierte.*

$1,4 \times 10^{15}$  Antiprotonen entsprechen bei einer Protonenmasse von  $1,67 \times 10^{-27}$  kg einer Masse von  $2,34 \times 10^{-9}$  g = 2,34 ng. Das ist die jährliche Produktionsmenge an Antiprotonen am Fermilab. Damit ergibt sich die Zeit, um ein Viertel Gramm zu produzieren zu:

$$0,25 \text{ g} / (2,34 \times 10^{-9} \text{ g} / \text{Jahr}) = 107 \text{ Mio. Jahre}$$

Die jährlichen Betriebskosten einer solchen Anlage liegen im Bereich von 10 Millionen US Dollar, so dass sich ein Gesamtpreis von  $10^{15}$  US Dollar (einer Billion) oder 700 Billionen Euro ergibt.

Wir schließen: Antimaterie-Bomben sind also reine Phantasie.