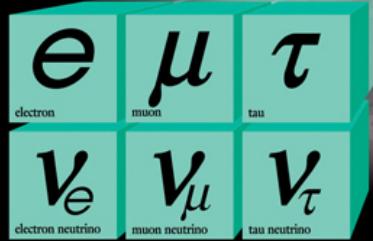


# **Neues aus der Teilchenphysik**

## **Higgs, Myon, das Universum und der ganze Rest**

# Quarks



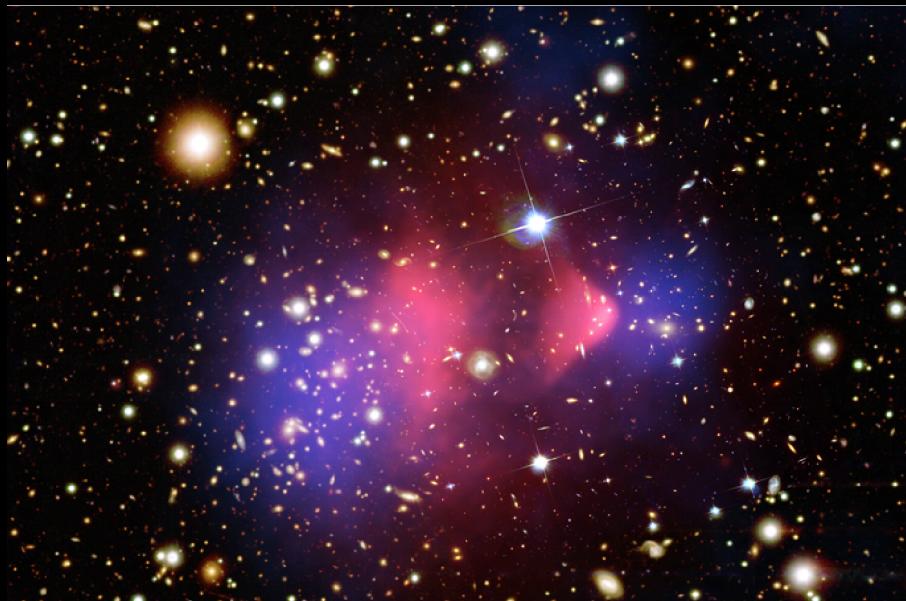
# Leptons

# Prof. Dr. Dominik Stöckinger

## Institut f. Kern- und Teilchenphysik

# Forces

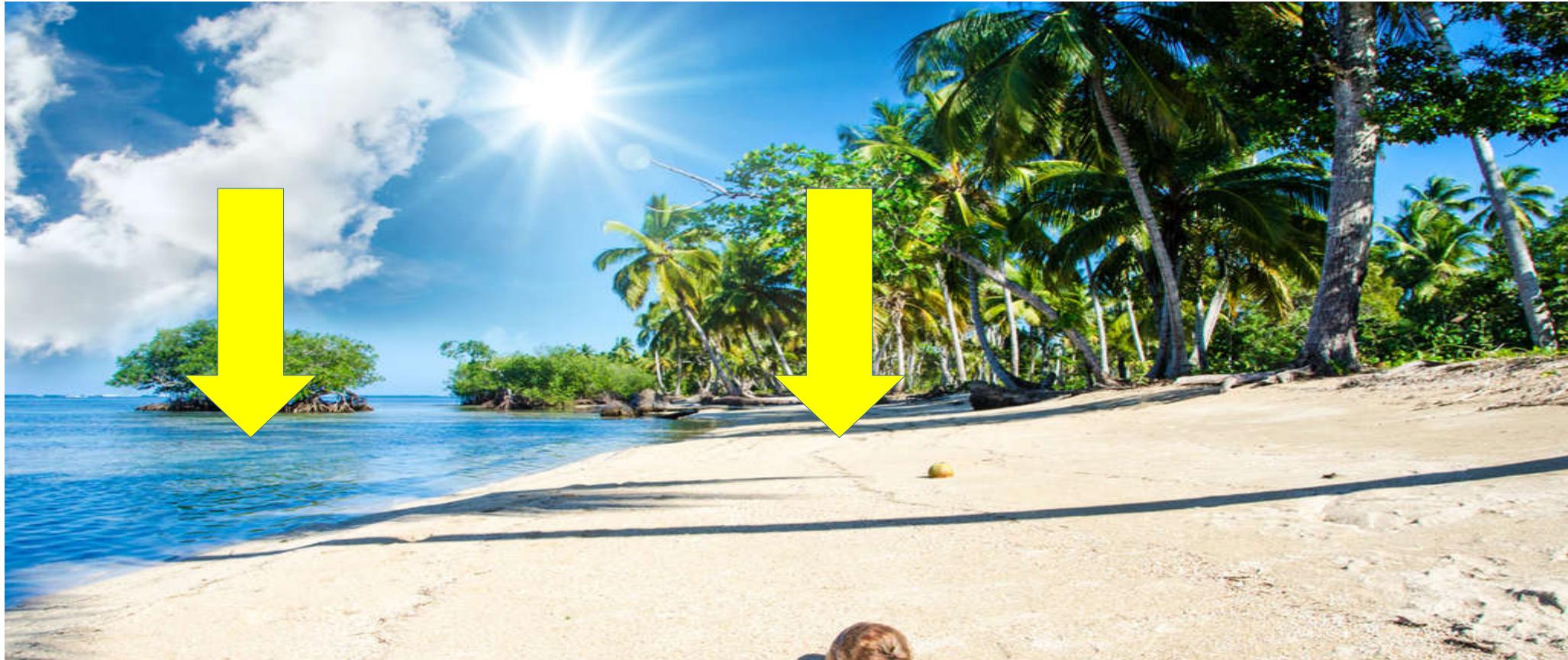
$Z$	$\gamma$
Z boson	photon
$W$	$g$
W boson	gluon



# Fundamentale Gesetze...

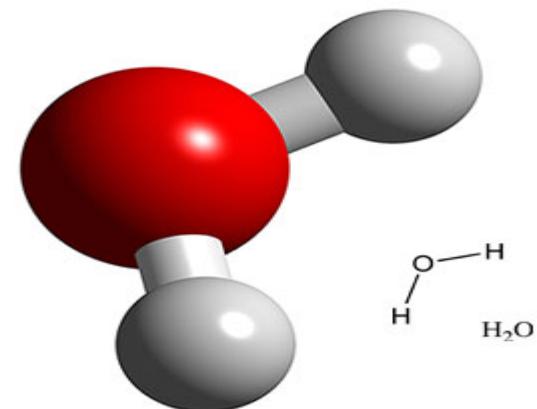


# Fundamentale Gesetze...



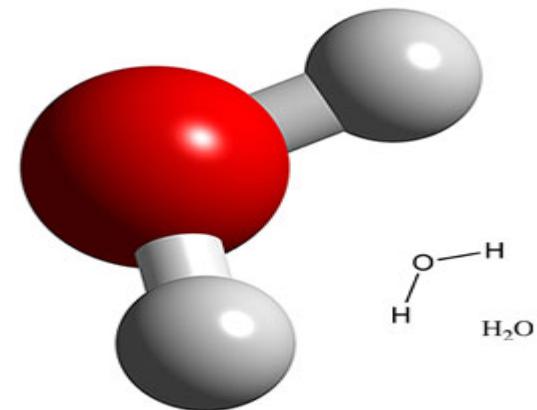
# Kleine Bausteine

- Sandkorn
- Wassermolekül



# Kleine Bausteine

- Sandkorn
- Wassermolekül



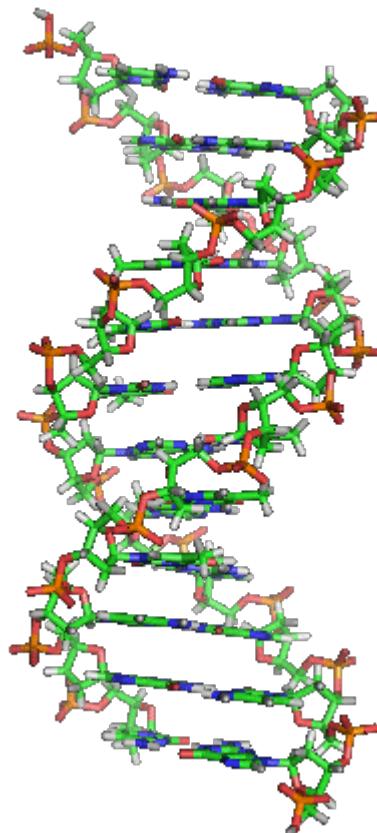
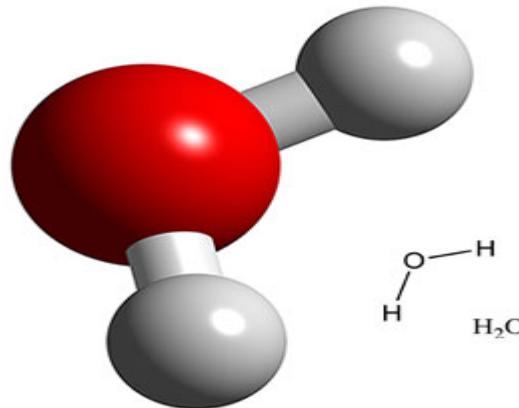
Welchen Gesetzen unterliegen die Bausteine?

# Liefert ähnliche (einfache!) Gesetze

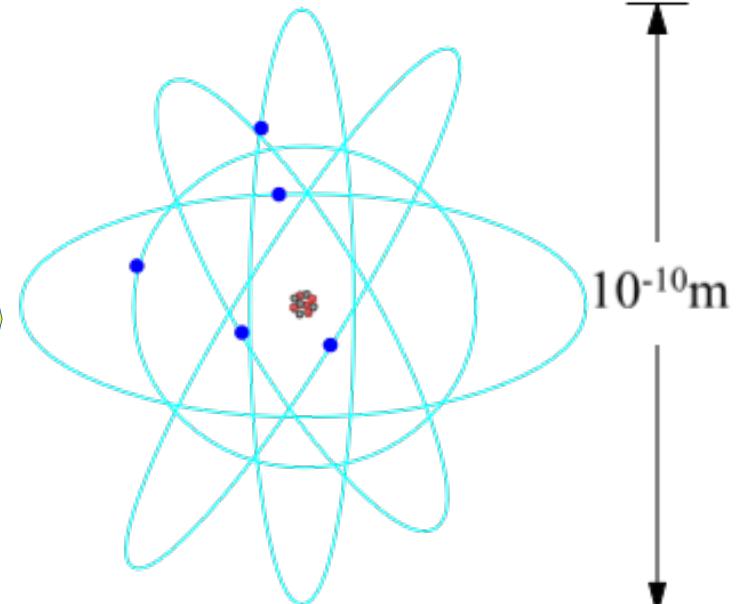
- Sanddünen
- Wasserwellen



Viele Molekülsorten → wenige Atomsorten  
noch fundamentalere Bausteine/noch einfachere Gesetze

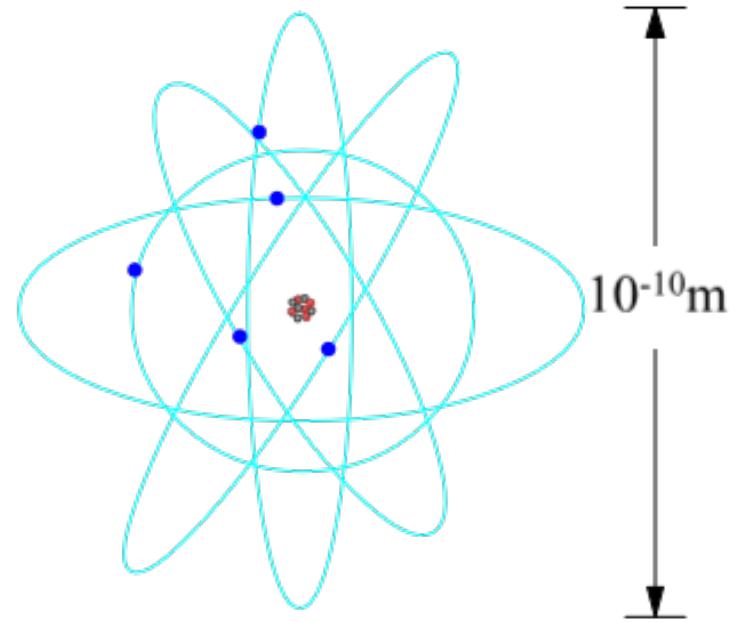


DNA-Molekül (Wikipedia)

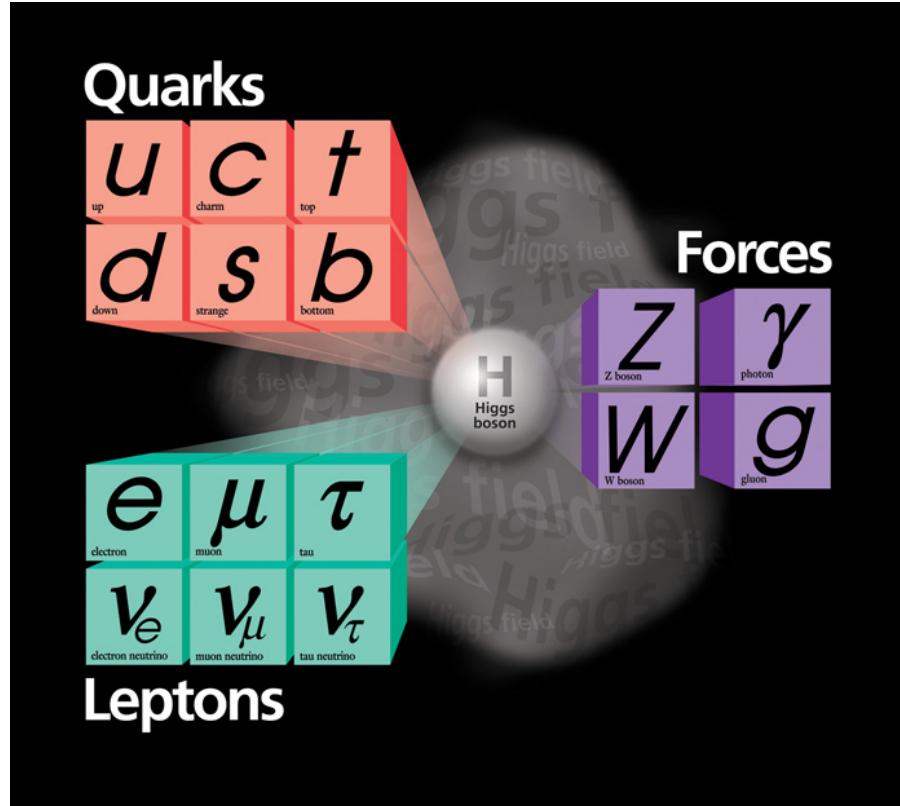


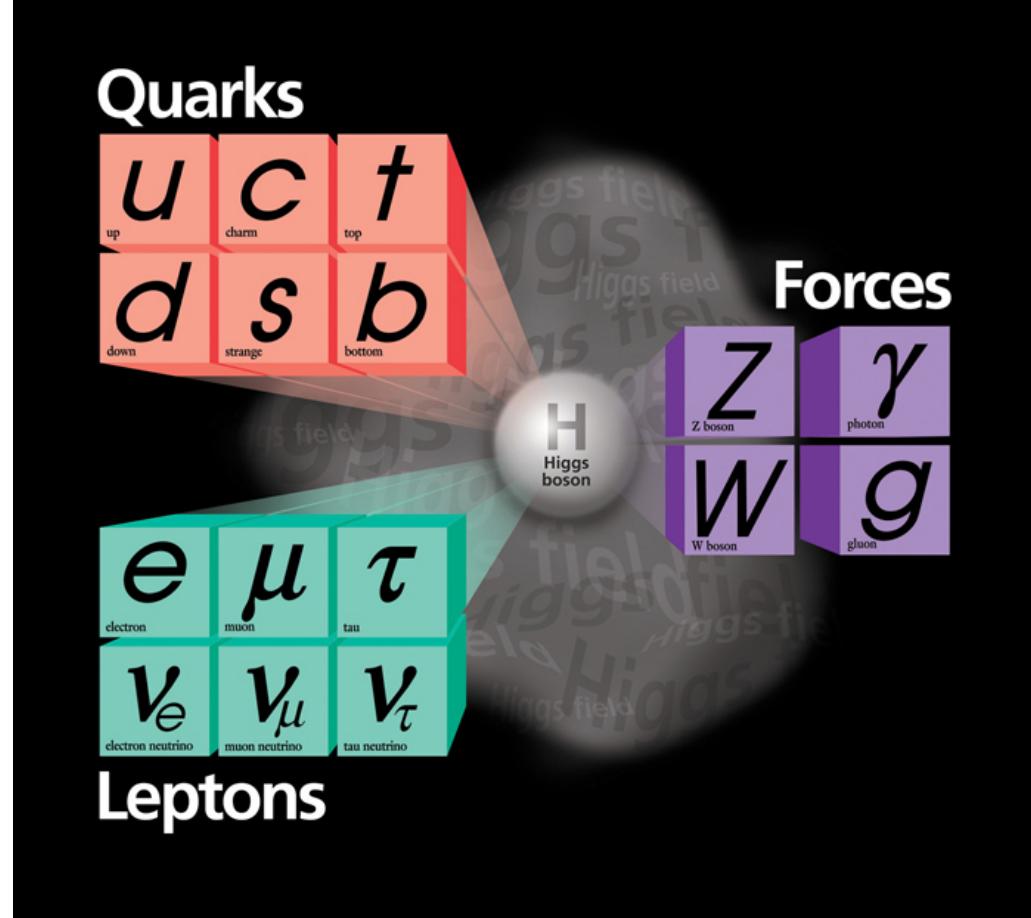
Bohrsches Atommodell (Leifi-Physik)

# Sehr große Strukturen → auch einfache Gesetze

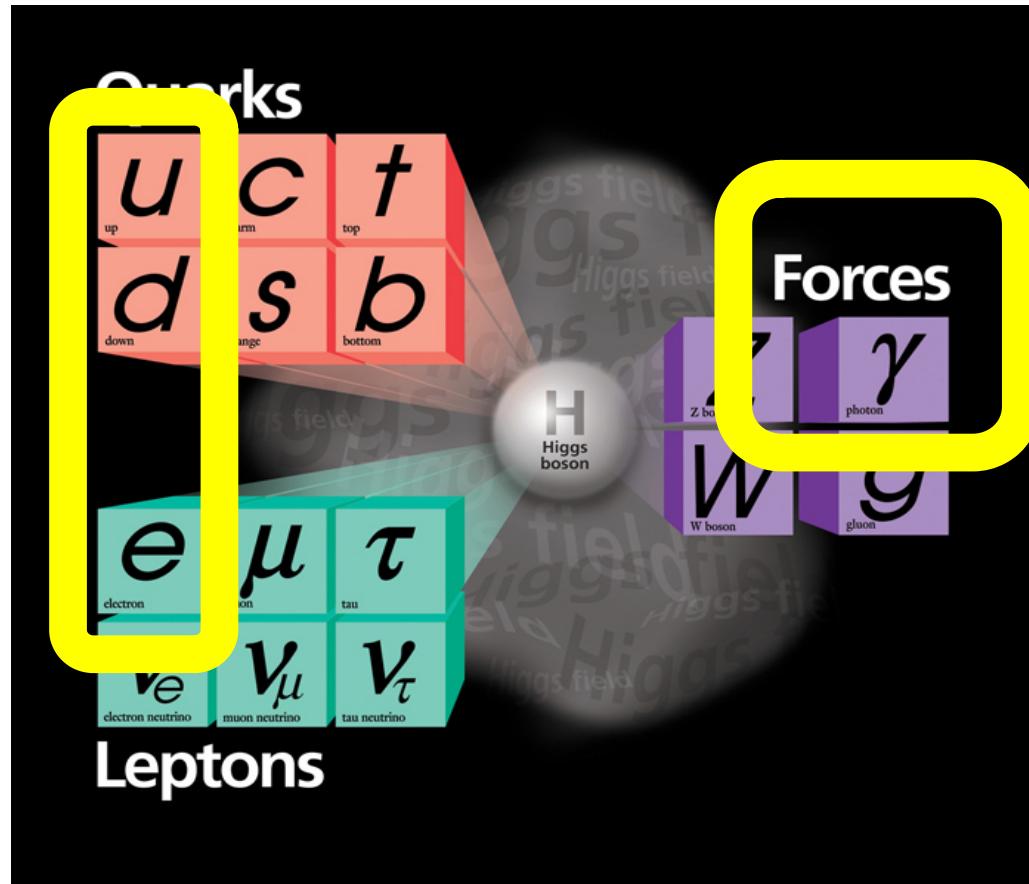


# Elementarteilchen: kleinste Strukturen, fundamentalste Gesetze



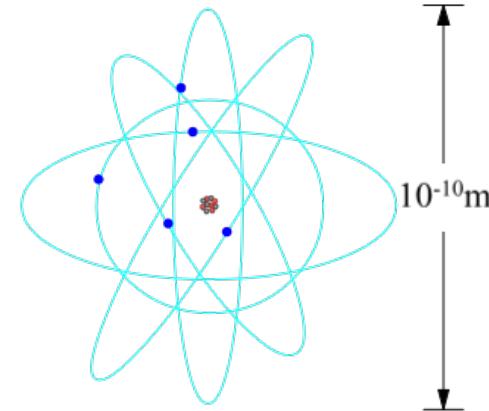
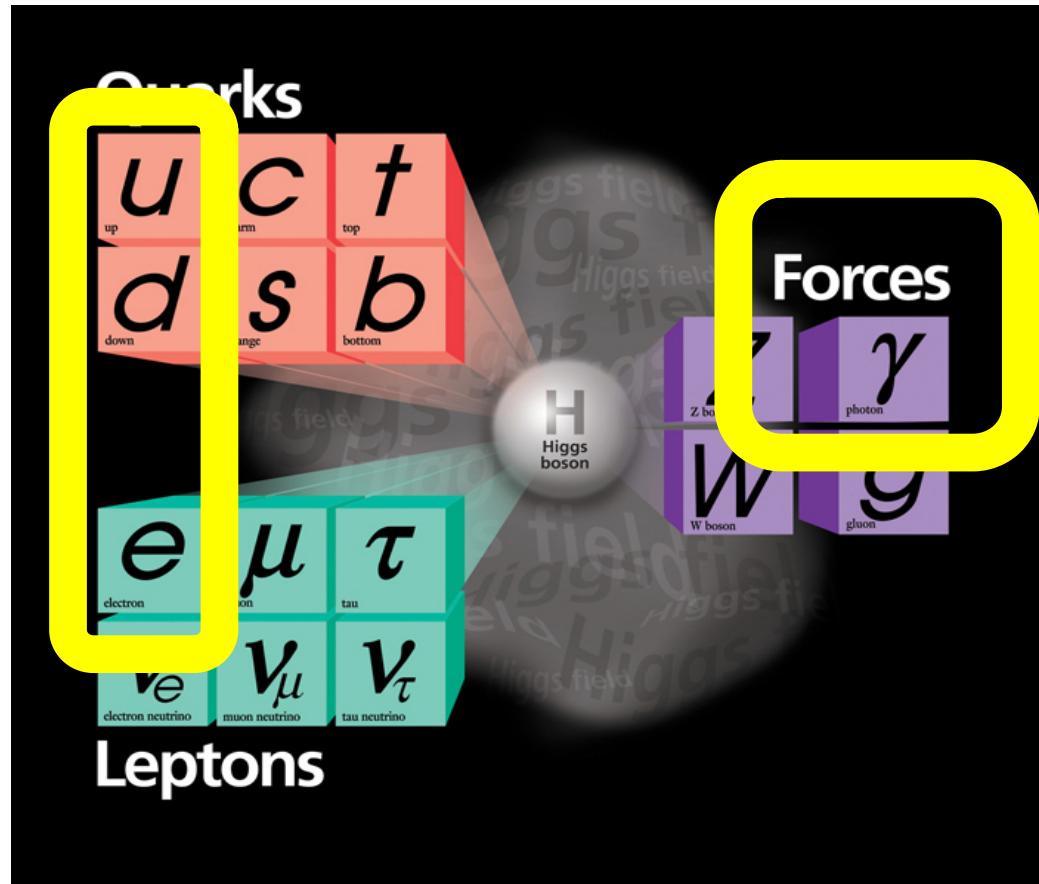


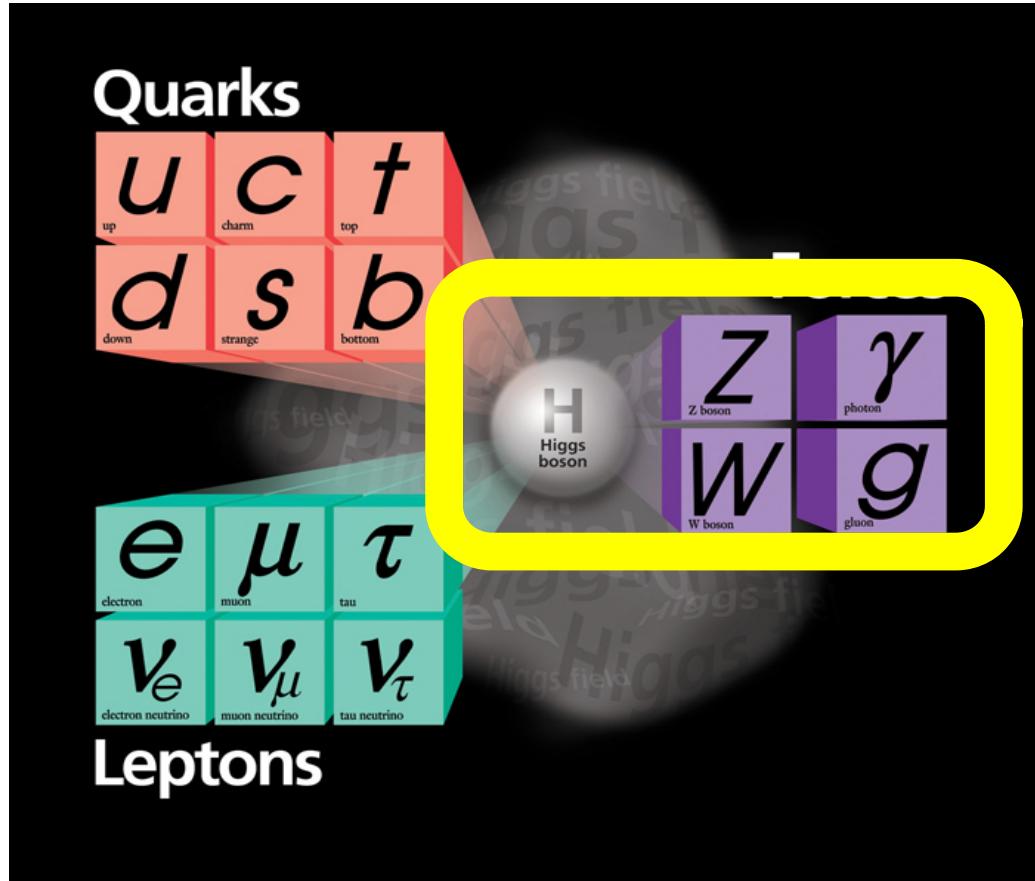
„Alle“ Naturphänomene lassen sich auf 4 Kräfte zurückführen:  
 Schwerkraft und 3 Kräfte zwischen den Elementarteilchen:  
**“Standardmodell der Teilchenphysik”** (50 Jahre alt)



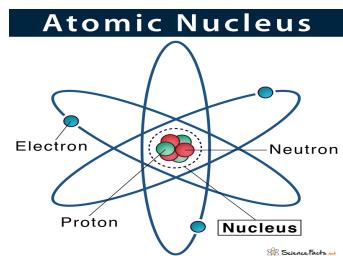
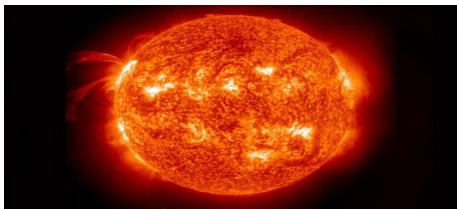
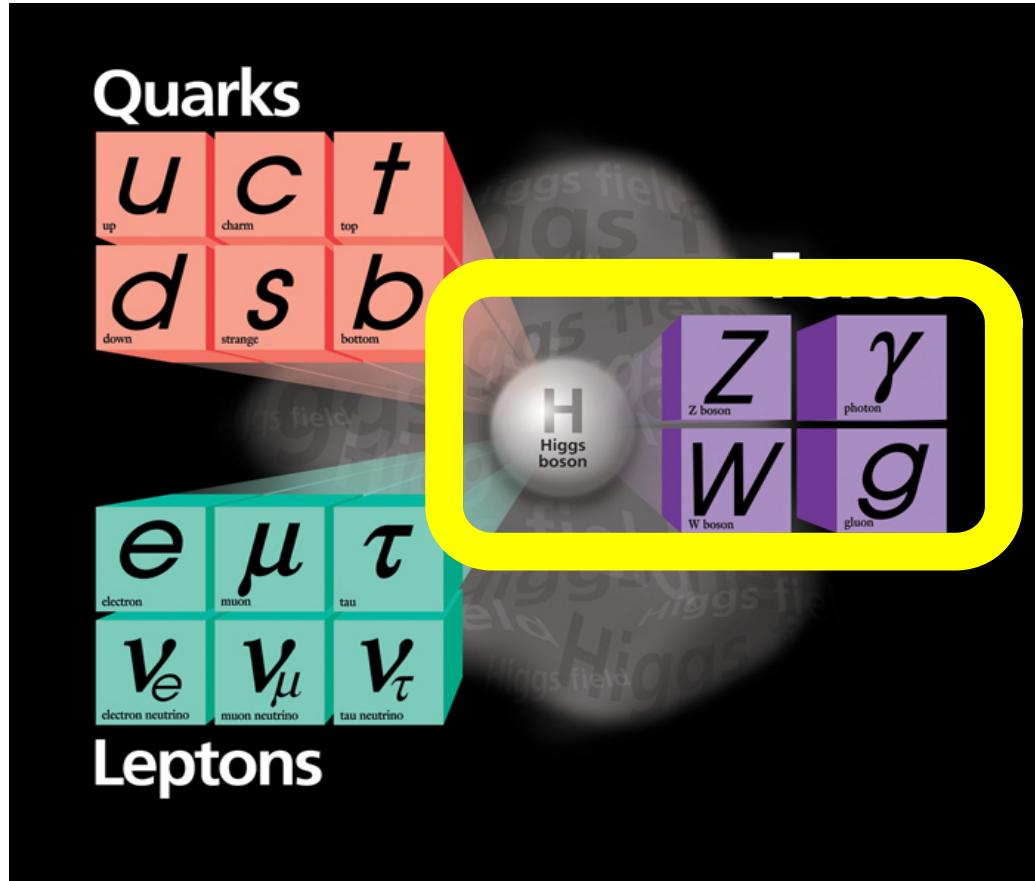
## 1. Elektromagnetismus

(Alltagsphysik!)

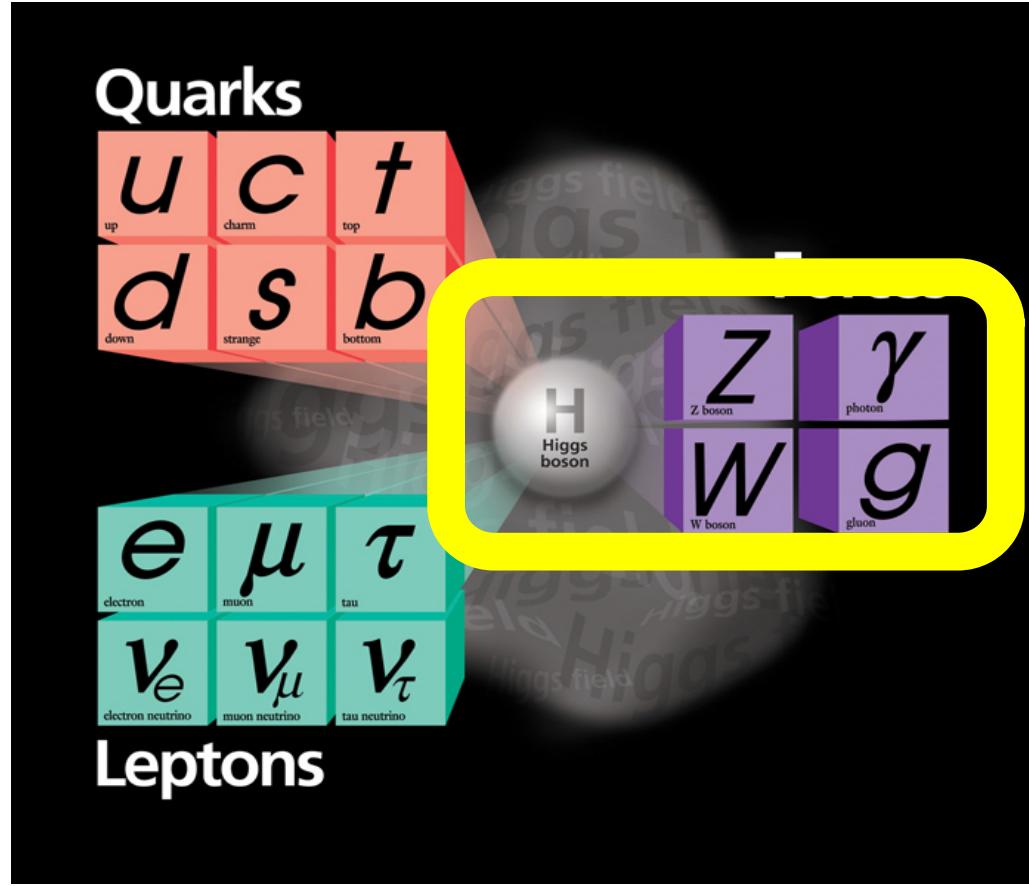




2. schwache Wechselwirkung
3. starke Wechselwirkung

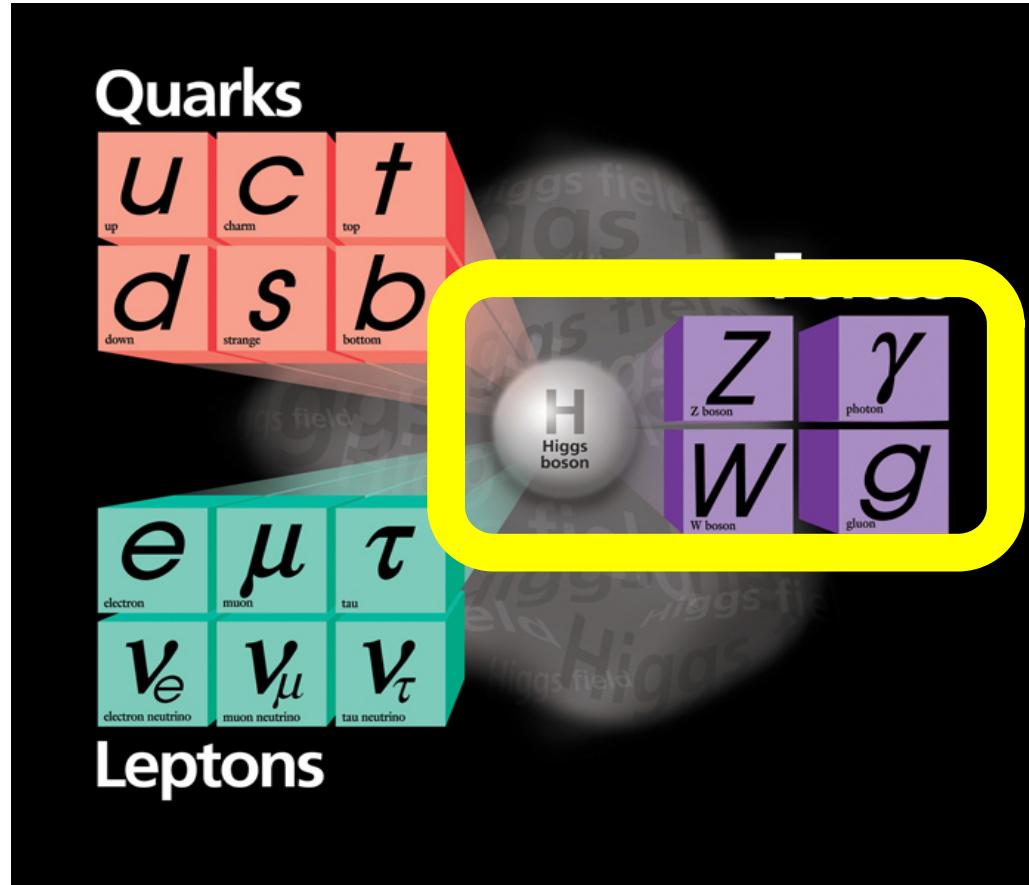


2. schwache Wechselwirkung
3. starke Wechselwirkung



Sehr einfache Gesetze:  
 Teilchen=Wechselwirkungen!  
 Nur zwei „Elementarprozesse“:  
 beschreiben „alle“ Phänomene!





Sehr einfache Gesetze:  
 Teilchen=Wechselwirkungen!  
 Nur zwei „Elementarprozesse“:  
 beschreiben „alle“ Phänomene!

Kleiner Exkurs:

40 Jahre nötig, um  
 diese einfachen Gesetze  
 zu verstehen:

Theorie:  
 alle WWen “gleich”  
 Beobachtung:  
 sehr verschieden?!?!

Lösung: Confinement  
 und Higgsmechanismus

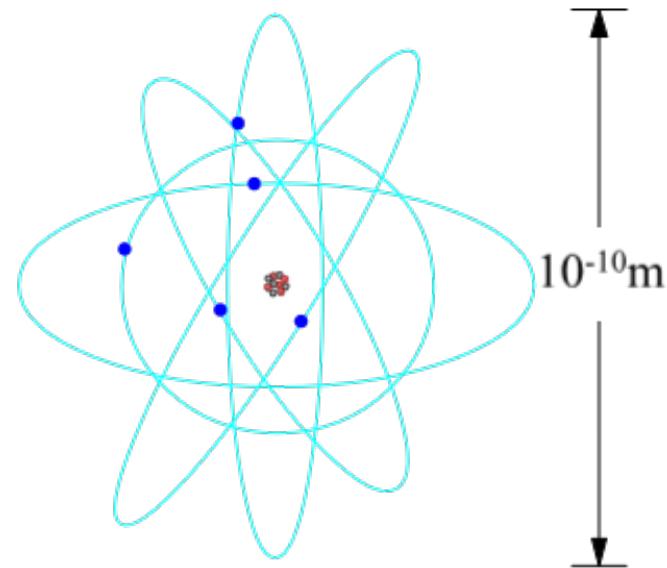


# Frage: Noch kleinere Bausteine?

Quantenmechanik/Unschärferelation +  $E=mc^2$ :

Konstituenten eingesperrt → Bewegungsenergie  
trägt zur Gesamtmasse bei: Econst

	Größe	Masse	Econst
Sandkorn	1 mm	0.003 g	$10^{-37}$ g
Atom	$10^{-10}$ m	1,000,000 eV	0.04 eV
Atomkern	$10^{-15}$ m	1 GeV	0.2 GeV
Elektron?	< $10^{-18}$ m	0.0005 GeV	>1000 GeV

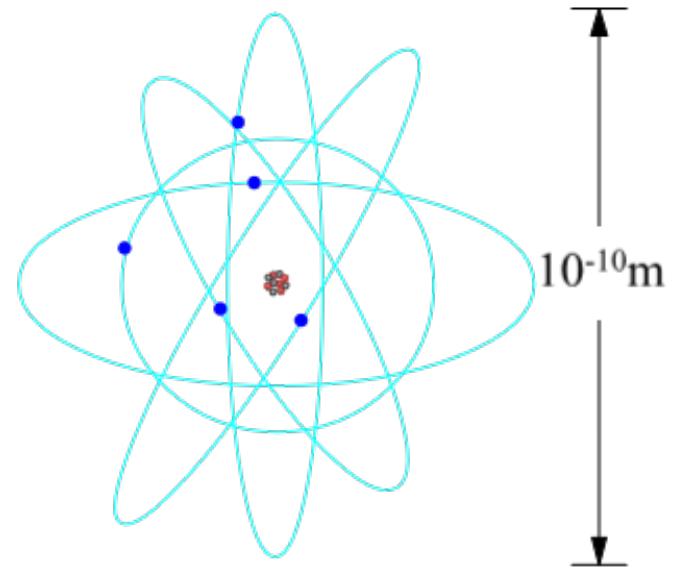


# Frage: Noch kleinere Bausteine?

Quantenmechanik/Unschärferelation +  $E=mc^2$ :

Konstituenten eingesperrt → Bewegungsenergie  
trägt zur Gesamtmasse bei: Econst

Sandkorn	$10^{-3}$ m	0.003 g	$10^{-37}$ g
Atom	$10^{-10}$ m	1,000,000 eV	0.04 eV
Atomkern	$10^{-15}$ m	1 GeV	0.2 GeV
Elektron?	< $10^{-18}$ m	0.0005 GeV	>1000 GeV



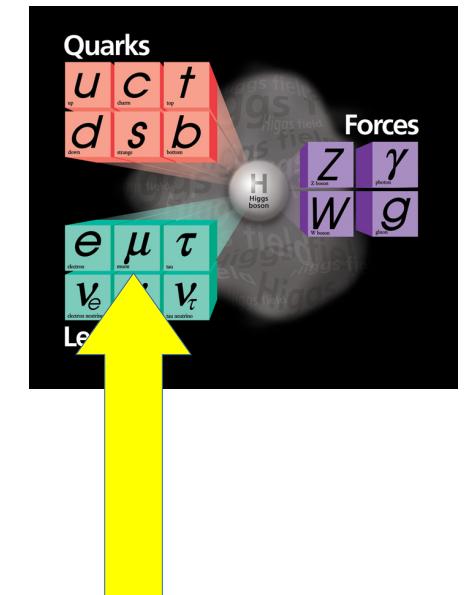
Antwort: Wahrscheinlich nicht! Elementarteilchen scheinen tatsächlich fundamental!

# Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Antwort: Übereinstimmung Theorie – Experiment

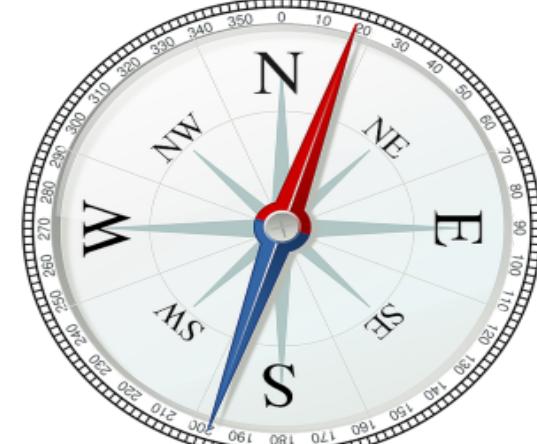
Beispiel (g-2) des Myons

2001 – 2013 – 2021 – 2025



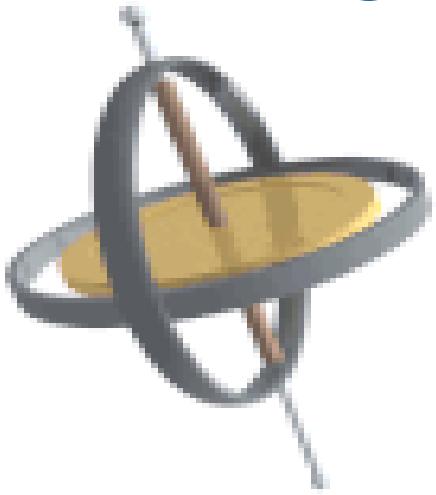
# Was ist g?

- Teilchen besitzen:
- Masse
- Elektrische Ladung
- Magnetisches Moment, g
- Beim Myon kann g gemessen und berechnet werden-sensitiv auf Quantenfluktuationen aller Teilchen!

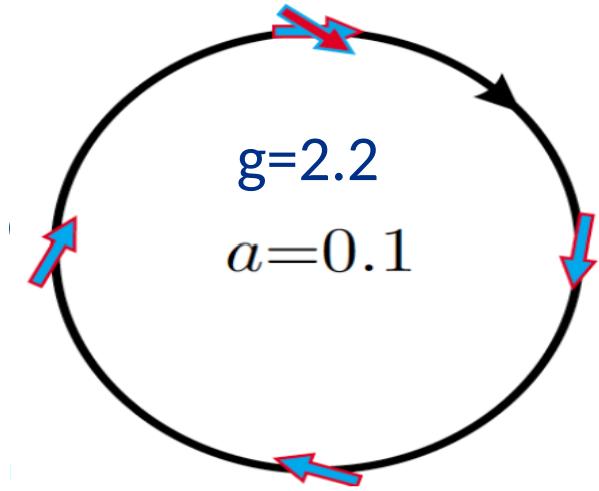
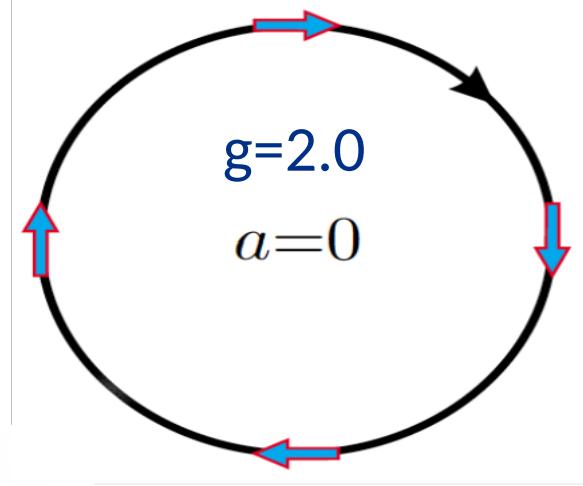


<https://www.schlauerlernen.de/magnetfeld/>

# Erklärung von g: Kreisel und Myon



Kreisel-  
geschwindigkeit  
intrinsisch  
beschrieben  
durch eine Zahl: g



Fermilab

# Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Elektron:  $g = 2.002\ 319\ 304\ 361\ 46(56)$

Myon:

Proton:  $g = 5.585\ 694\ 713(46)$

# Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Elektron:  $g = 2.002\ 319\ 304\ 361\ 46(56)$

Myon:  $g = 2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

Proton:  $g = 5.585\ 694\ 713(46)$

# Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Elektron:  $g = 2.002\ 319\ 304\ 361\ 46(56)$

Myon:  $g = 2.002\ 3\textcolor{green}{31}\ \textcolor{red}{841}\ \textcolor{blue}{43}(29)$

Proton:  $g = 5.585\ 694\ 713(46)$

# Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Elektron:  $g = 2.002\ 319\ 304\ 361\ 46(56)$

Myon:  $g = 2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

Proton:  $g = 5.585\ 694\ 713(46)$

Fragen:

Warum  $g = 2$  fast erfüllt, aber nicht genau?

Warum so ähnlich?

Warum aber doch verschieden?

[Startseite](#) » [Physik](#) » Magnetsinn der Myonen: Der Riss im Weltmodell

Hintergrund  
07.04.2021  
Lesedauer ca. 7  
Minuten  
[Drucken](#)  
[Teilen](#)

MAGNETSINN DER MYONEN

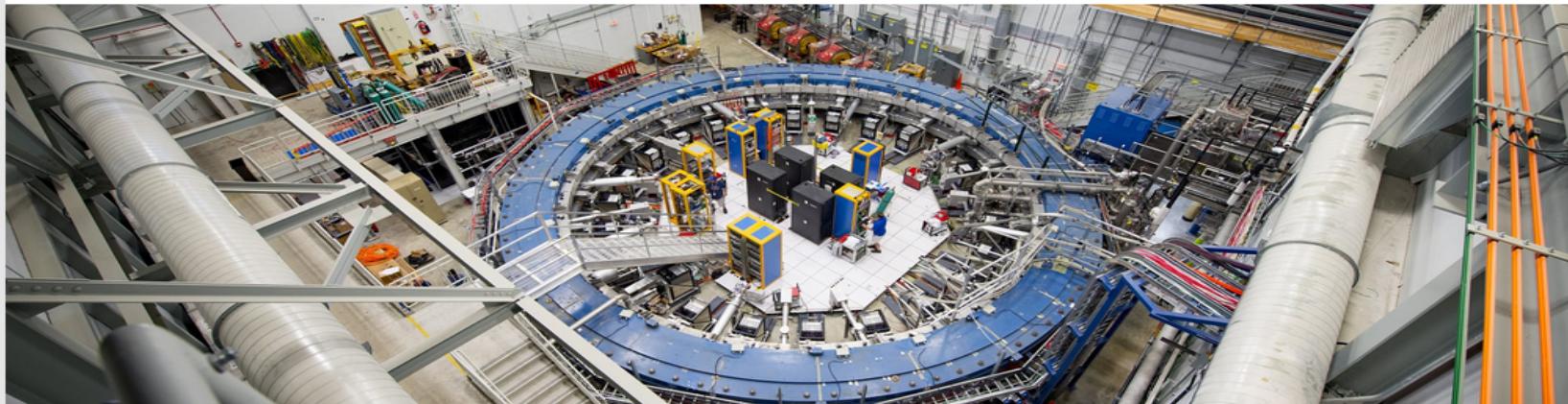
# Der Riss im Weltmodell

Eine mit Spannung erwartete Messung widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik. Eine Spur zu neuen Naturgesetzen? Forscher sind begeistert, mahnen aber noch zur Vorsicht.

von [Robert Gast](#)



2021!!

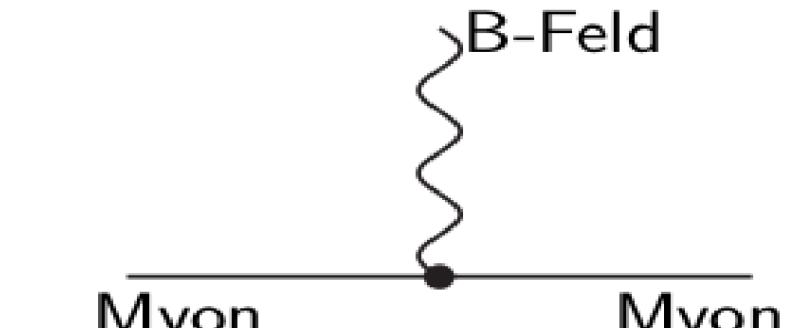
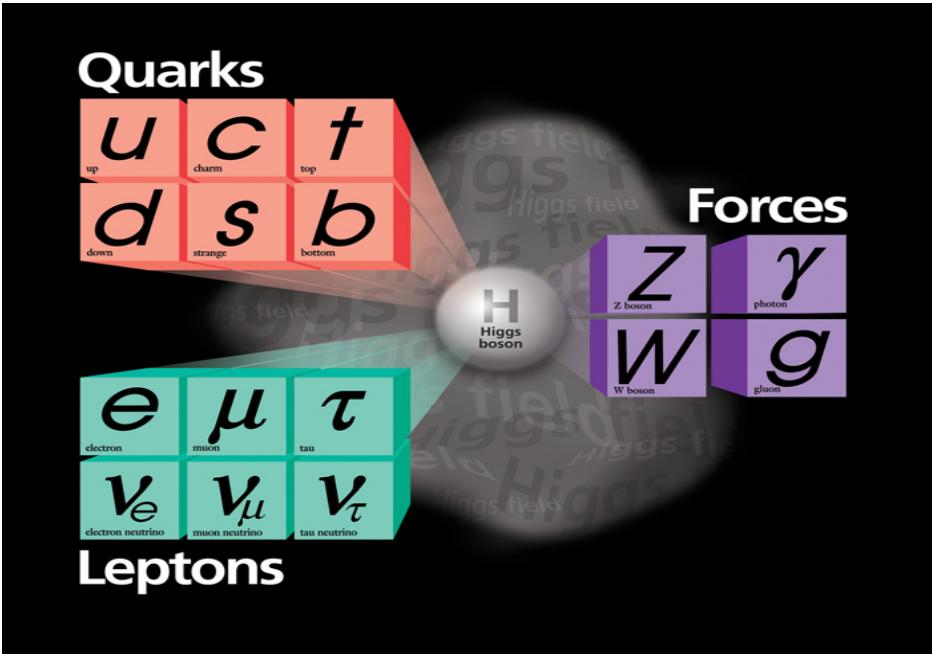


© REIDAR HAHN / FERMILAB / MUON G-2 EXPERIMENT (AUSSCHNITT)

Drei Jahre lang hielten die beiden Männer den Zahlencode unter Verschluss. Der eine Zettel mit der Chiffre lag in einem Tresor in Seattle, der andere dort, wo die Messungen stattfanden, am Forschungszentrum Fermilab bei Chicago. Acht Ziffern in einem versiegelten Umschlag, der Schlüssel zum meistersehnten Teilchenphysik-Ergebnis seit Jahren.

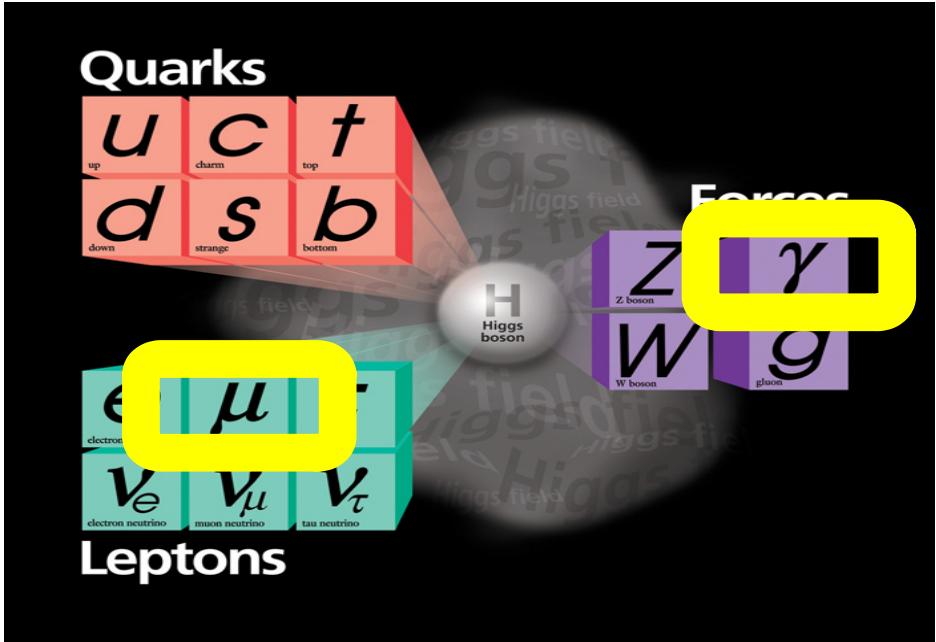
# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen

- $g=2$ : Teilchen allein

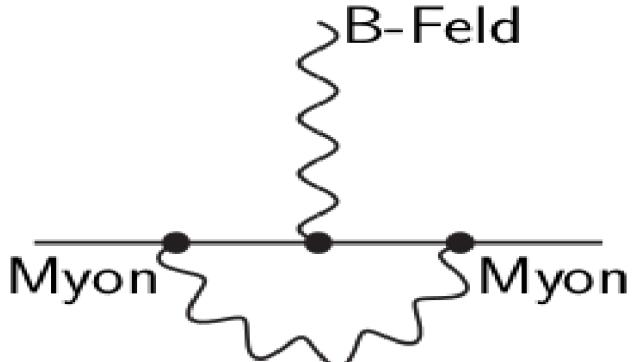


→ Nobelpreis für Dirac

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



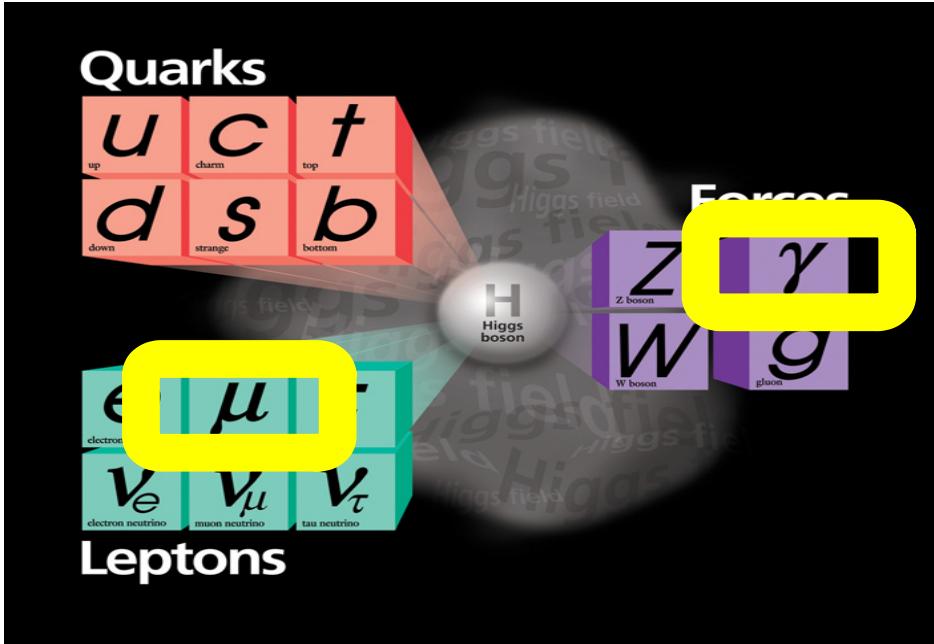
- $g=2$ : Teilchen allein



→ Nobelpreis Schwinger

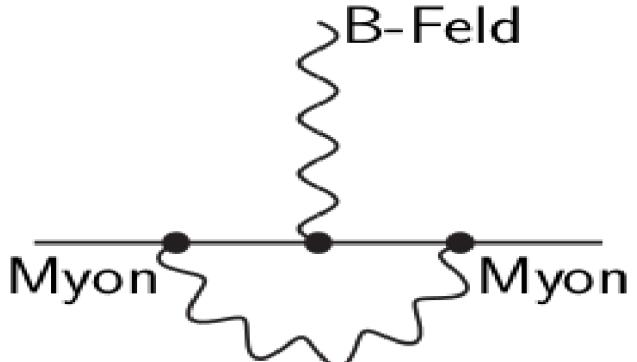
- $g>2$ : weitere Teilchen durch Fluktuationen des Vakuums kurz erzeugt und zerfallen

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



Gibt es noch weitere Quantenfluktuationen?  
Ja, alle Teilchen können beitragen!!

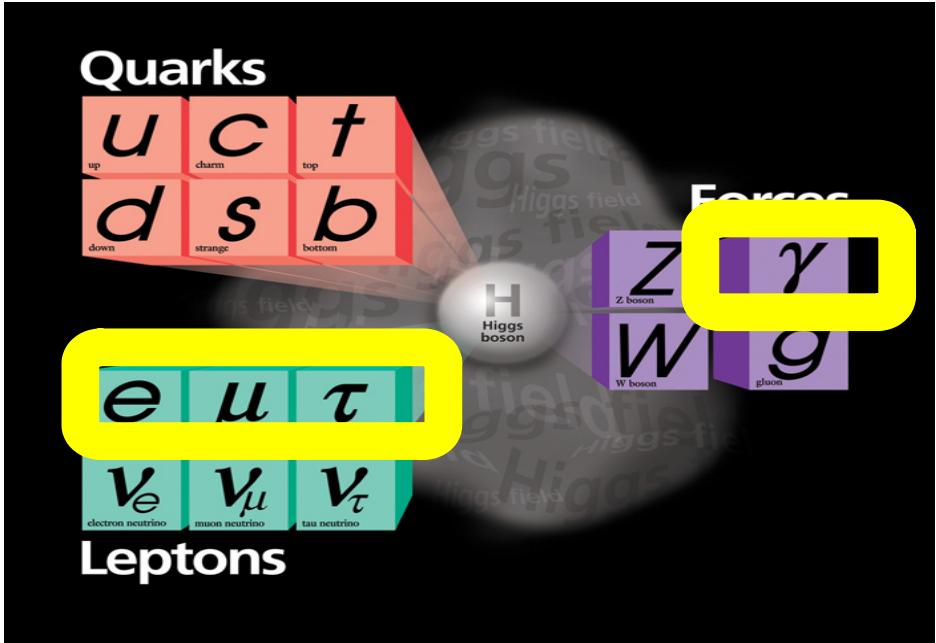
- $g=2$ : Teilchen allein



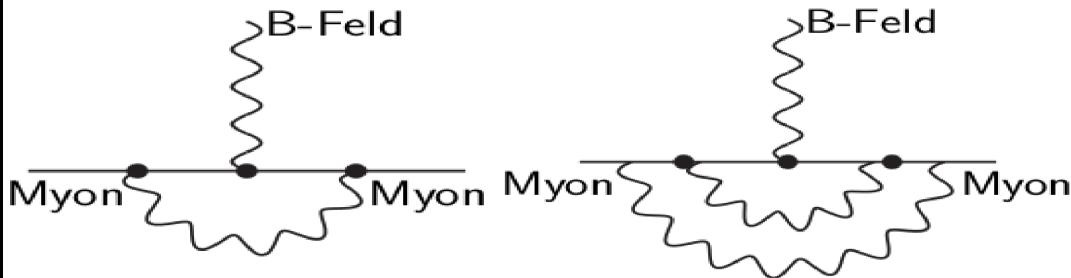
→ Nobelpreis Schwinger

- $g>2$ : weitere Teilchen durch Fluktuationen des Vakuums kurz erzeugt und zerfallen

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



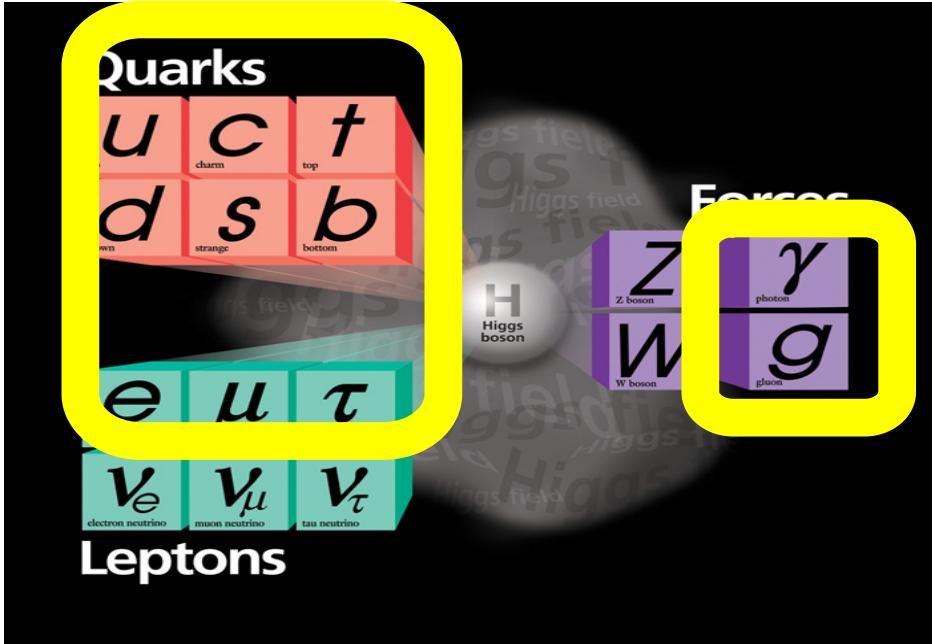
- $g > 2$ :  
Fluktuationen des Vakuums



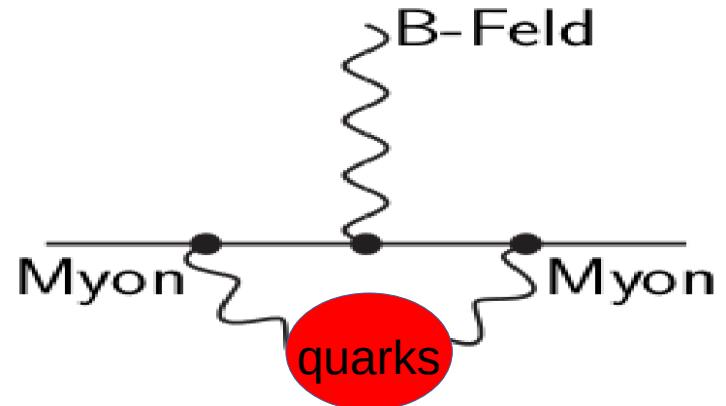
nur QED:  
Experiment:

$g = 2.002\ 331\ 694\ 3786$   
 $g = 2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



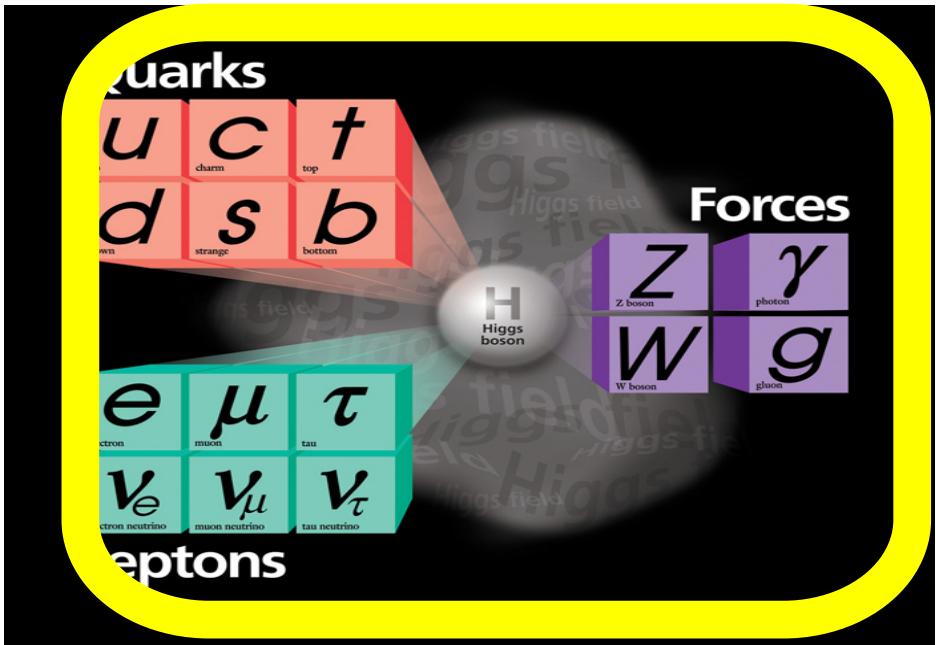
- $g > 2$ : Fluktuationen des Vakuums



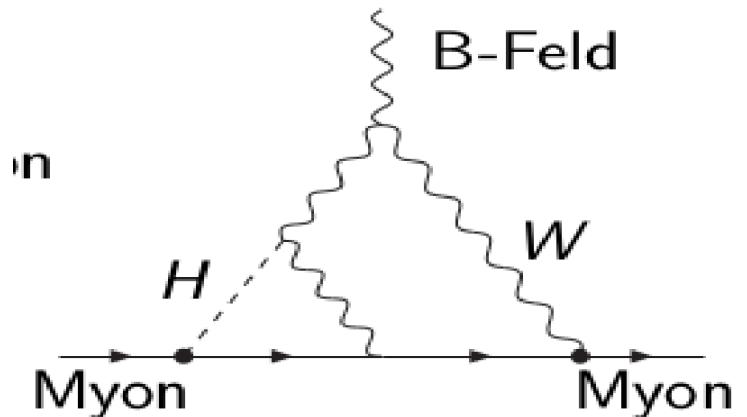
QED, Quarks, starke WW:  
Experiment:

$g = 2.002\ 331\ 833\ 128$  (2021!!)  
 $g = 2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



- $g > 2$ : Alle Teilchen treten auf!!



QED, Quarks, starke WW:  $g=2.002\ 331\ 833\ 128$   
Gesamter Rest ( $\rightarrow$  Dresden, 2013):  $+3\ 072$   
Experiment:  $g=2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

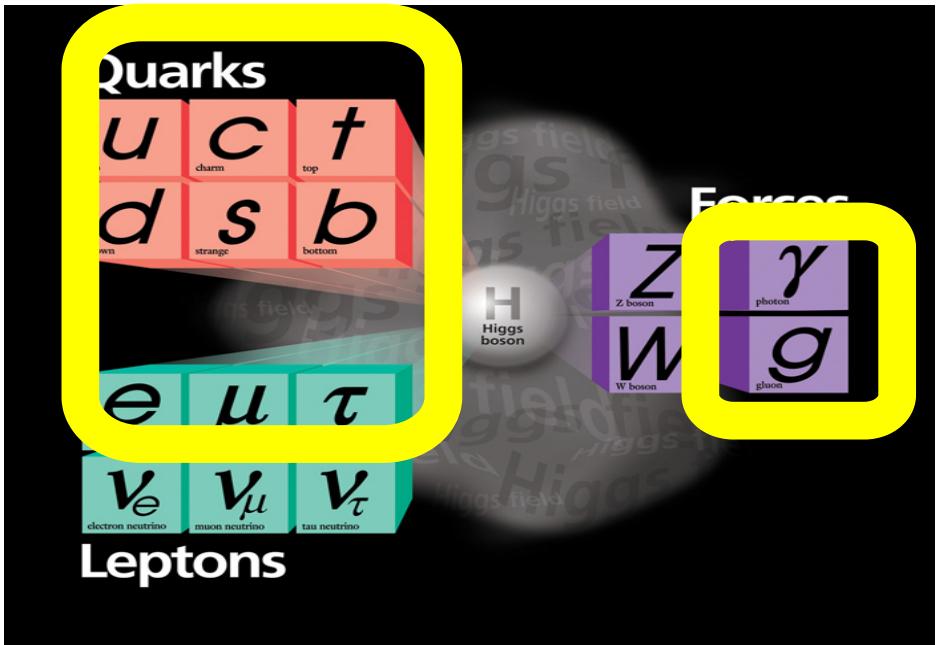
# Ergebnisse

Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

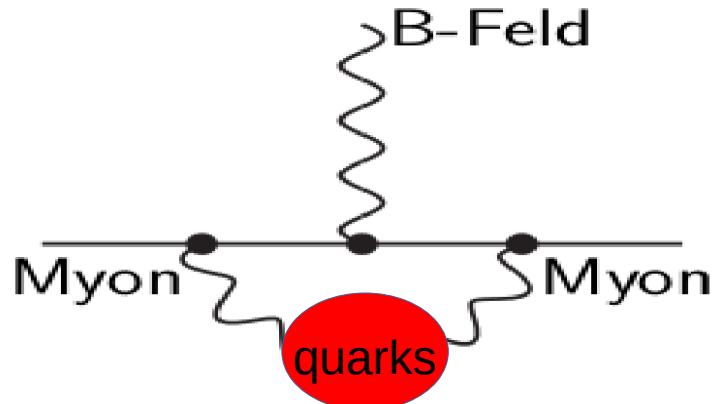
Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

Das geht nicht ganz auf?!?!? Haben wir eventuell ein paar Quantenfluktuationen in der Rechnung vergessen? (2021!!!)

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



- $g > 2$ : Fluktuationen des Vakuums



QED, Quarks, starke WW: Änderung

+04 02 (Neu!!)

Standardmodell Rechnung:  $g = 2.002\ 331\ 840\ 66(1\ 24)$

# Ergebnisse

Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 43(29)$

Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 840\ 66(1\ 24)$

Jetzt: Es könnte nicht besser sein!!!

Dies zeigt: wir haben alle Details sehr gut verstanden!

Insgesamt: praktisch überall Übereinstimmung!!

# Was lernen wir daraus?

- Auch Higgs-Teilchen wurde genau vermessen
- Insbesondere Wechselwirkung mit Myon
- 10 verschiedene Hypothesen machen verschiedene Vorhersagen für Higgs/g-2

# Was lernen wir daraus?

- Auch Higgs-Teilchen wurde genau vermessen
- Insbesondere Wechselwirkung mit Myon
- 10 verschiedene Hypothesen machen verschiedene Vorhersagen für Higgs/g-2

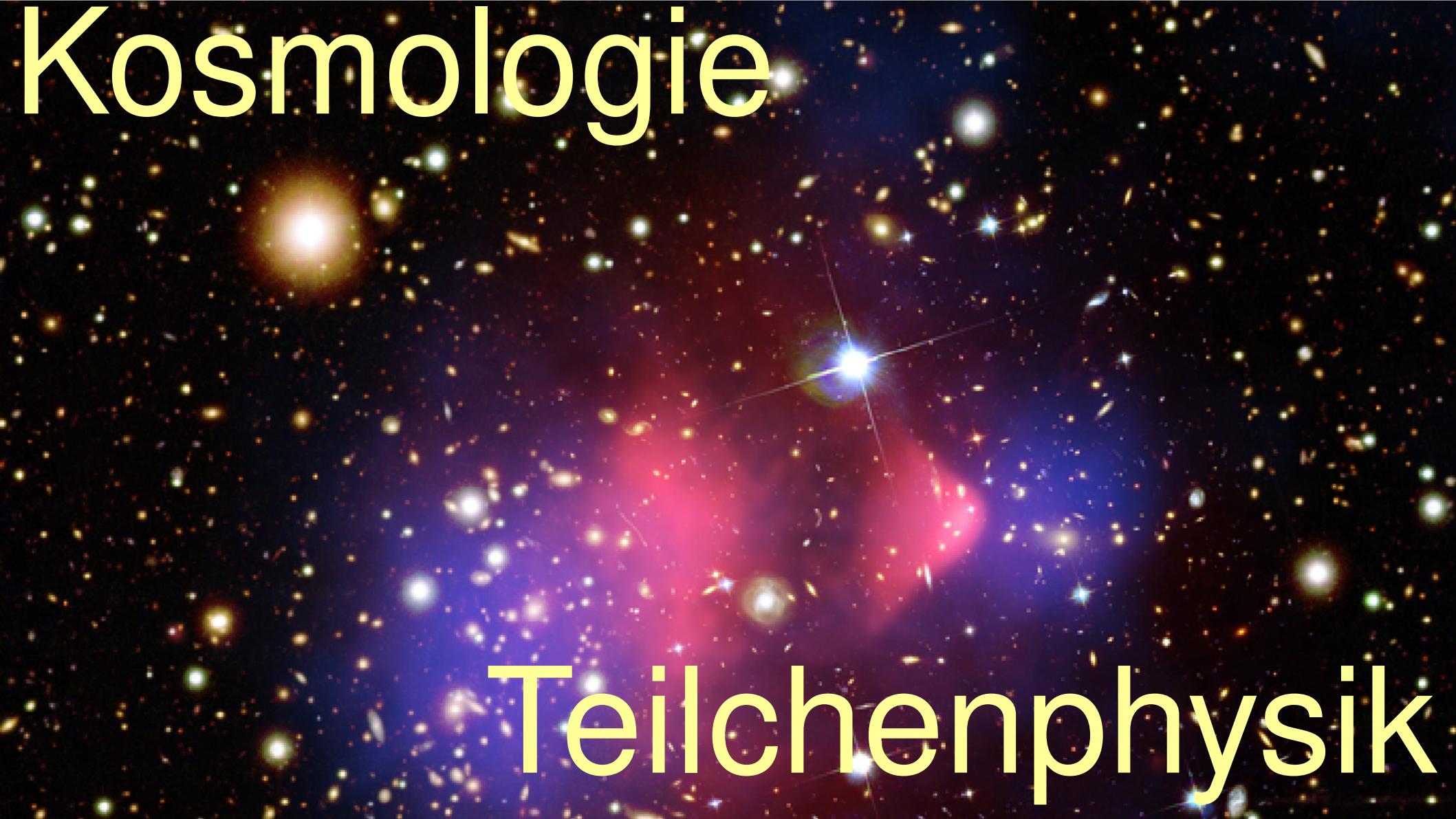
Hypothetische Alternativen zum “Standardmodell” eingeschränkt oder ausgeschlossen!

# Wie ist das Universum entstanden/aufgebaut?

A dense cluster of galaxies in space, with a central bright star and lens flare.

Was sind die fundamentalen  
Teilchen und Kräfte?

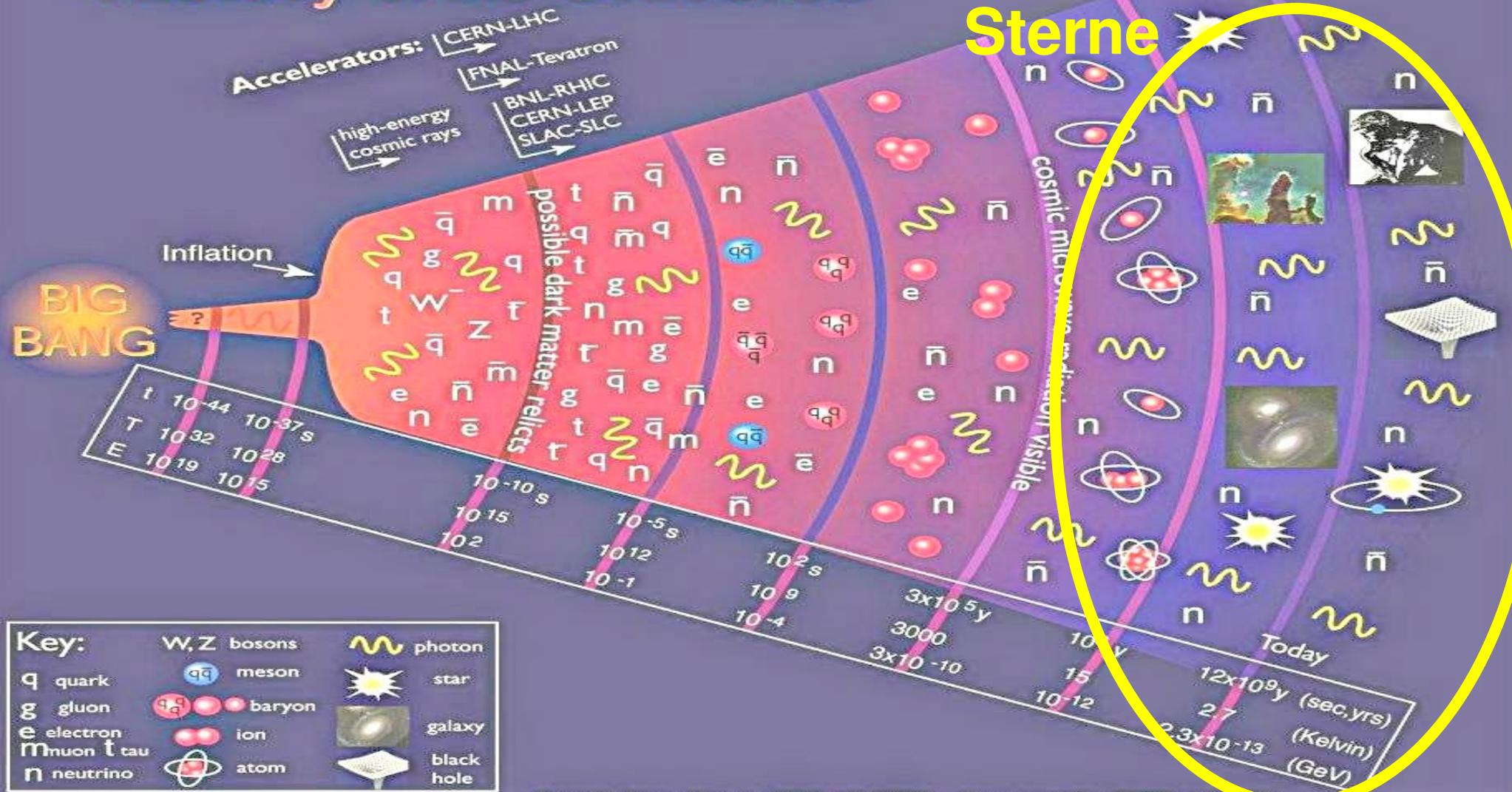
# Kosmologie

A dense field of galaxies in space, with a bright central star and lens flare.

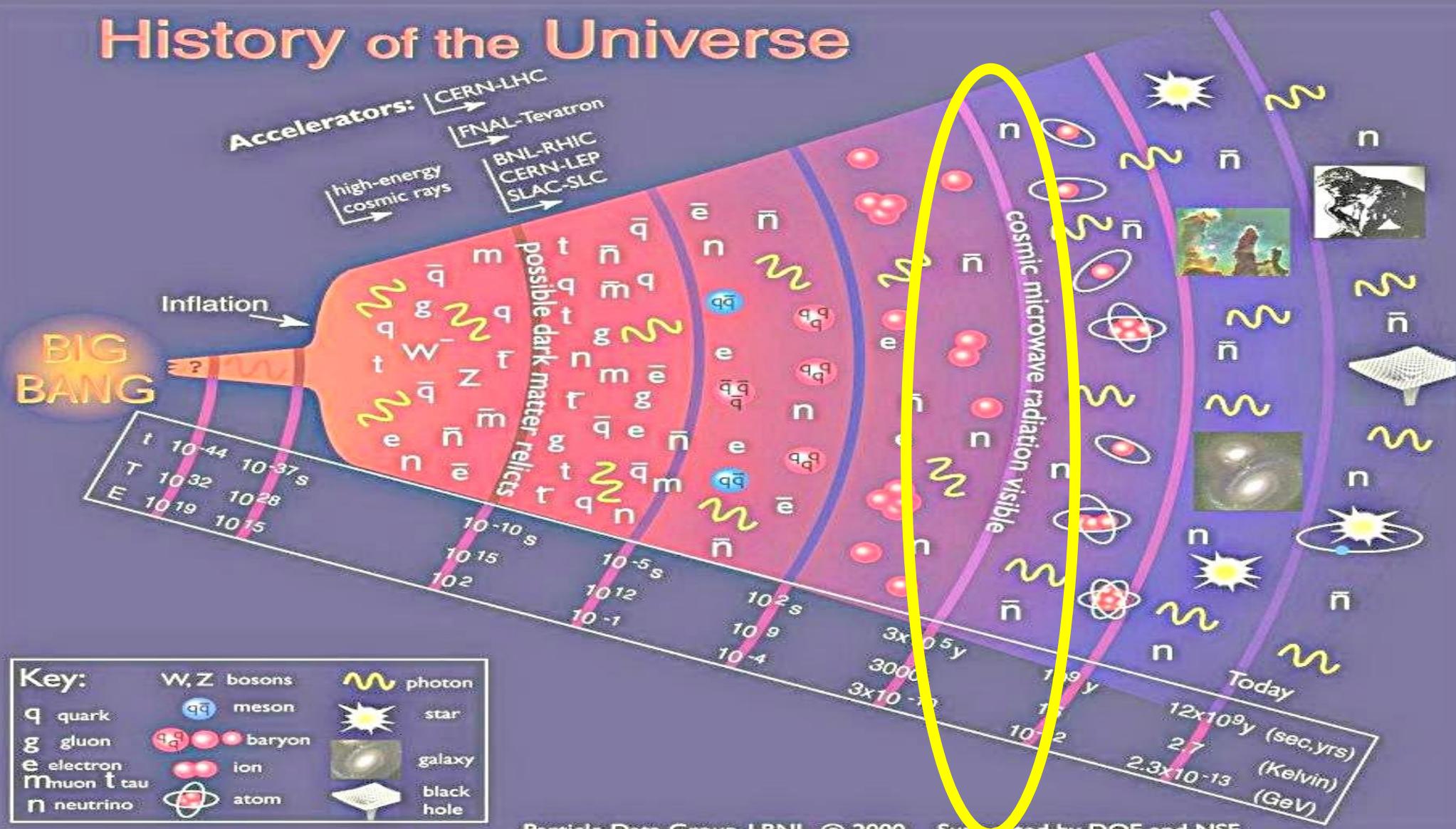
# Teilchenphysik



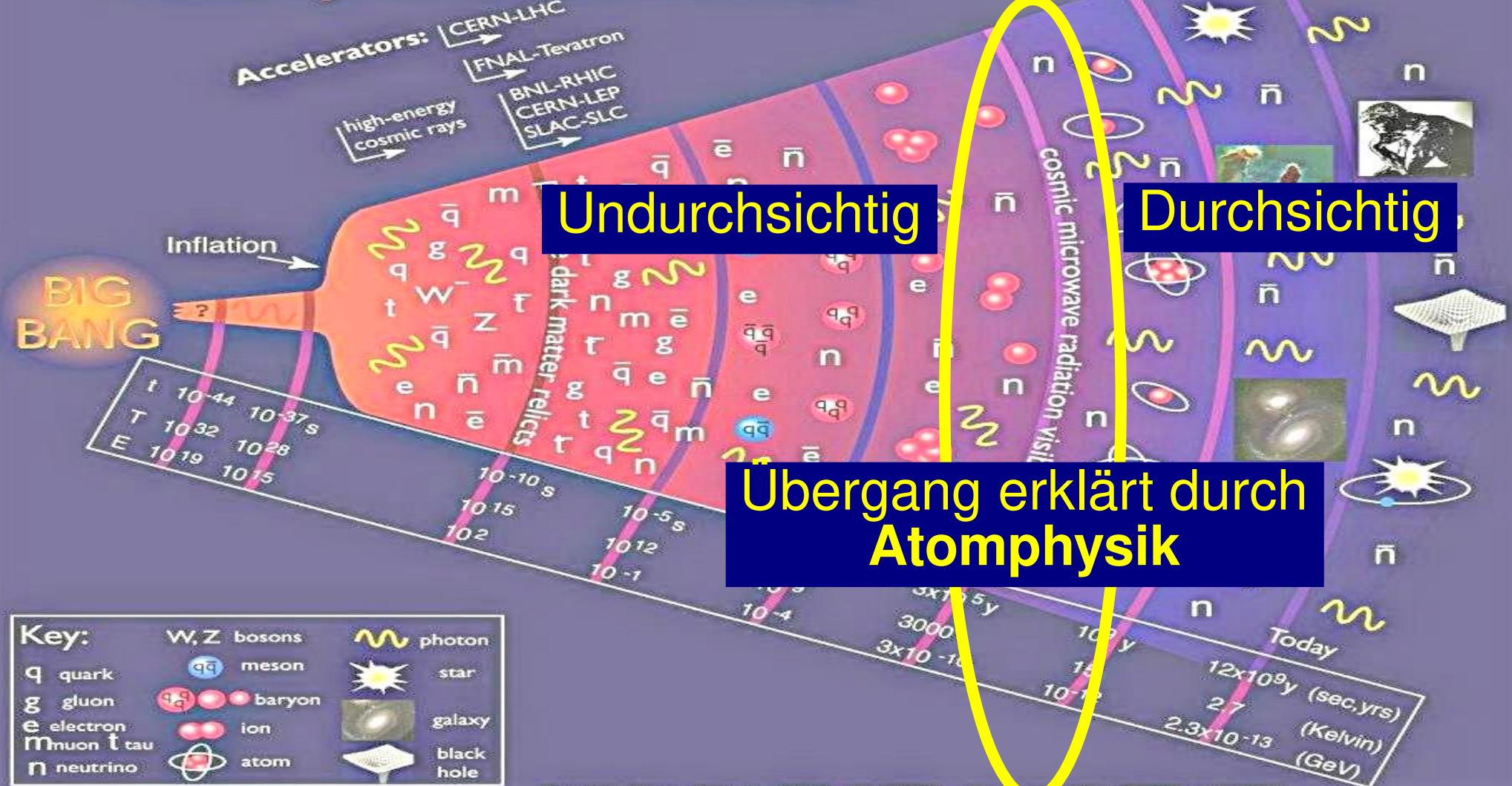
History of the Universe Gewöhnliche Materie, Sterne



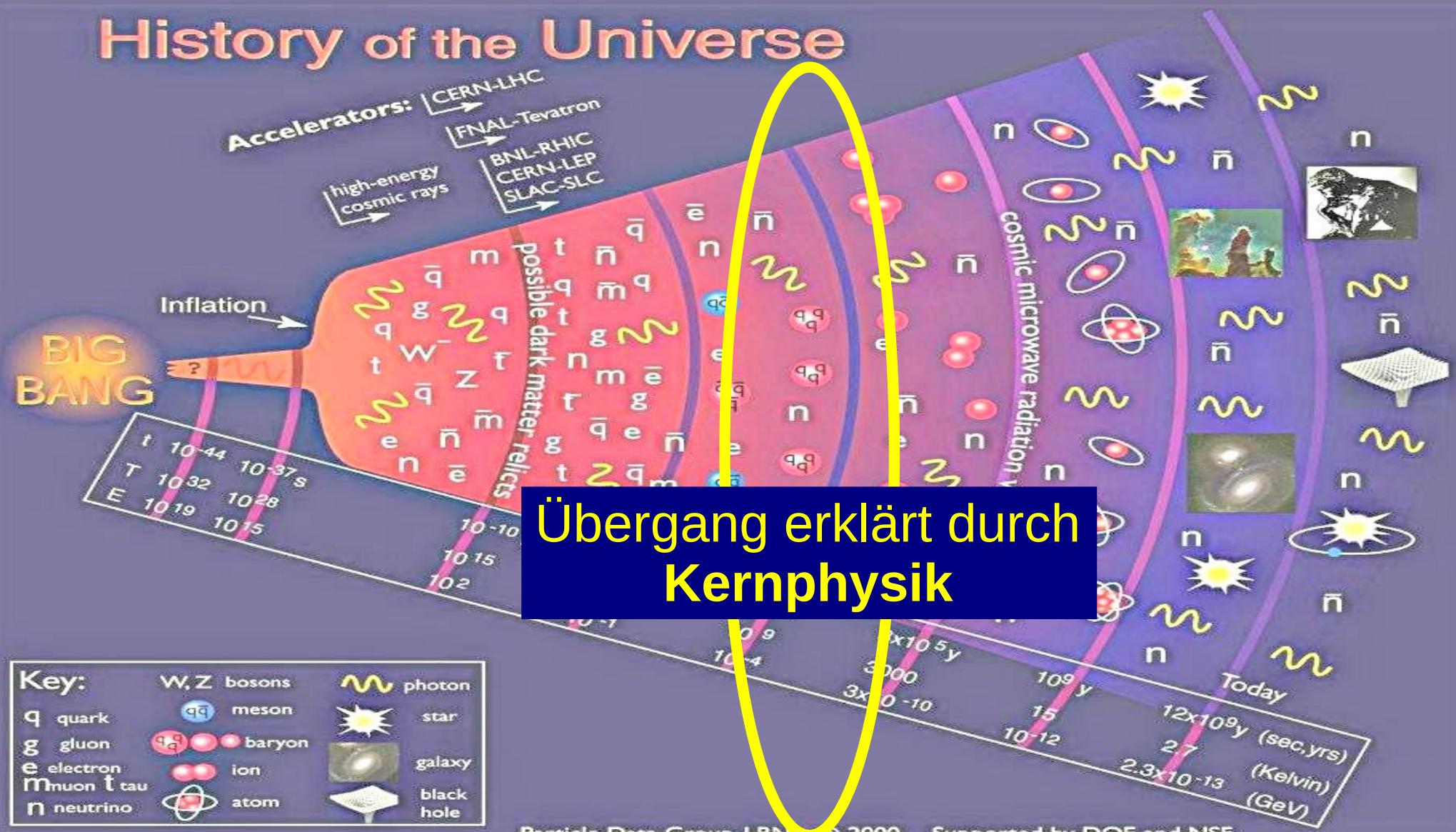
# History of the Universe



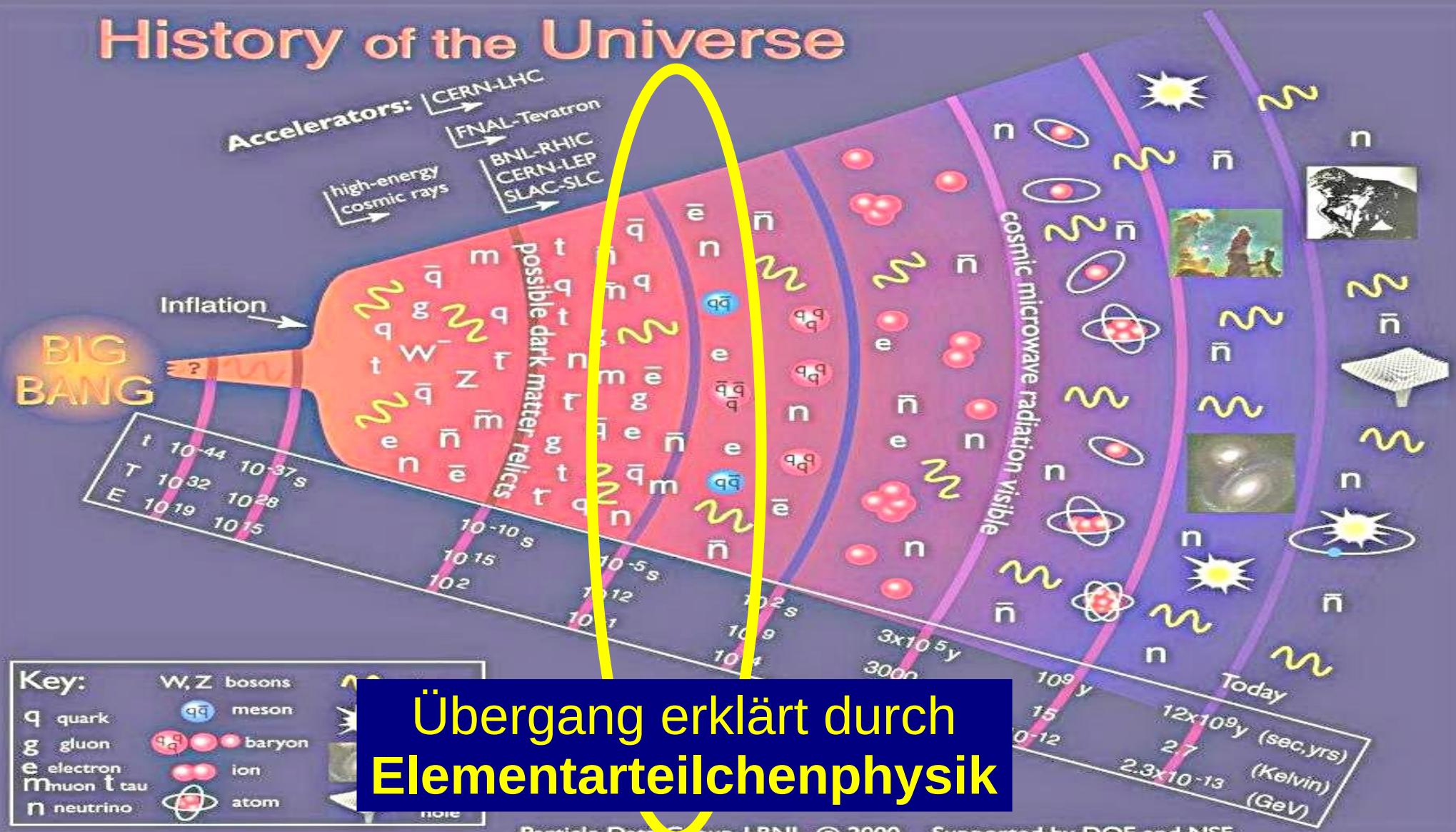
# History of the Universe



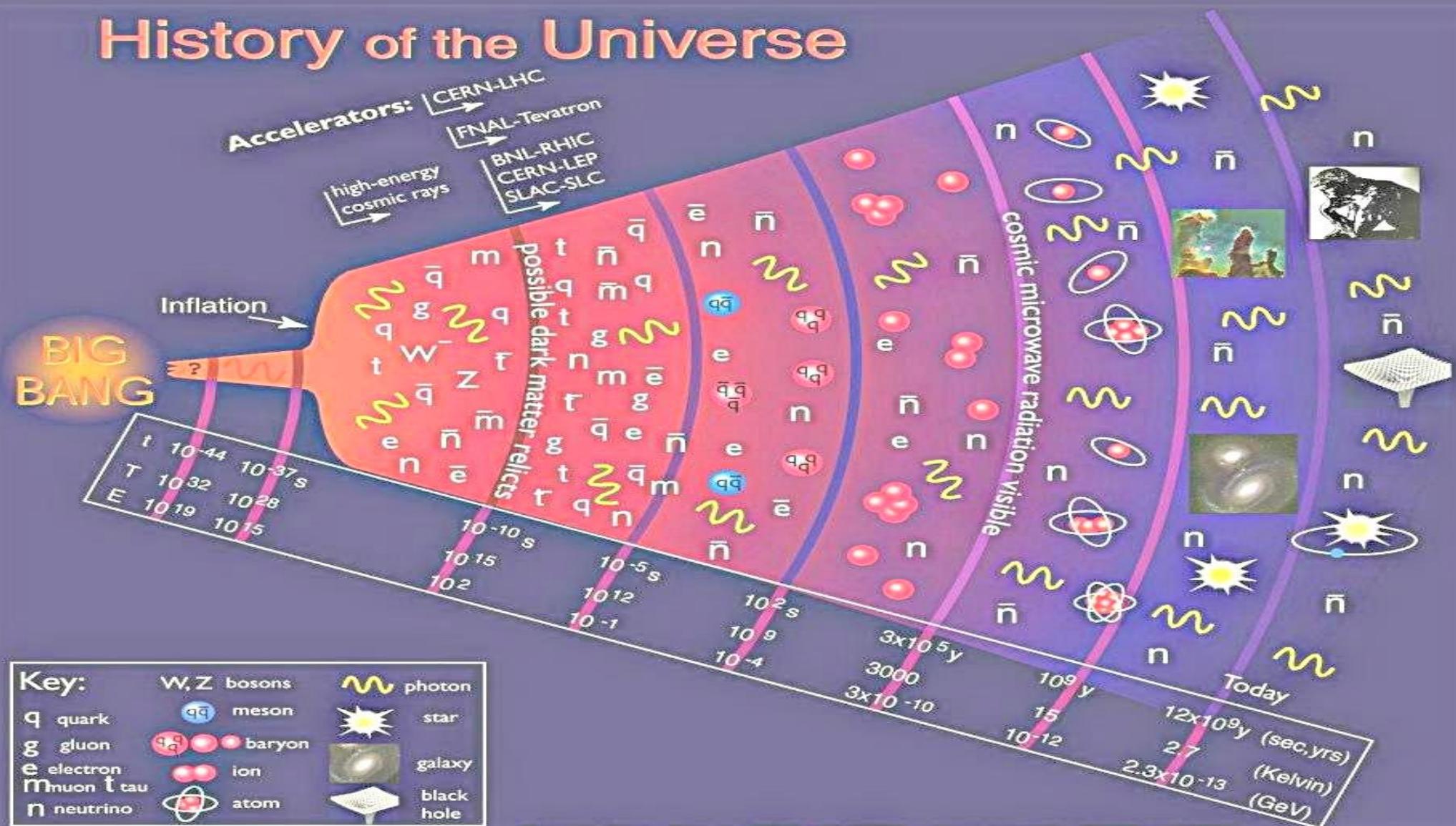
# History of the Universe



# History of the Universe



# History of the Universe



# History of the Universe

Accelerators:  
CERN-LHC  
FNAL-Tevatron  
BNL-RHIC  
CERN-LEP  
SLAC-SLC  
high-energy cosmic rays

Inflation

Undurchsichtig

Diesen Übergang kann man heute noch sehen!

Durchsichtig

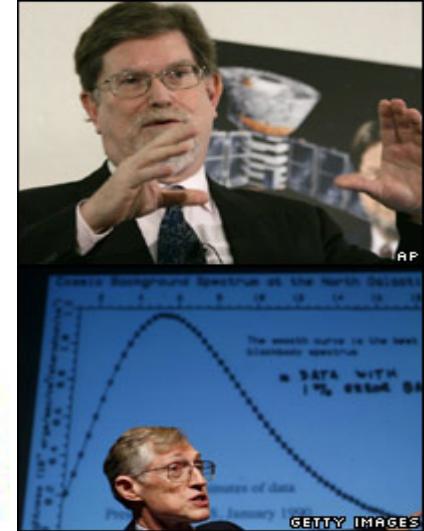
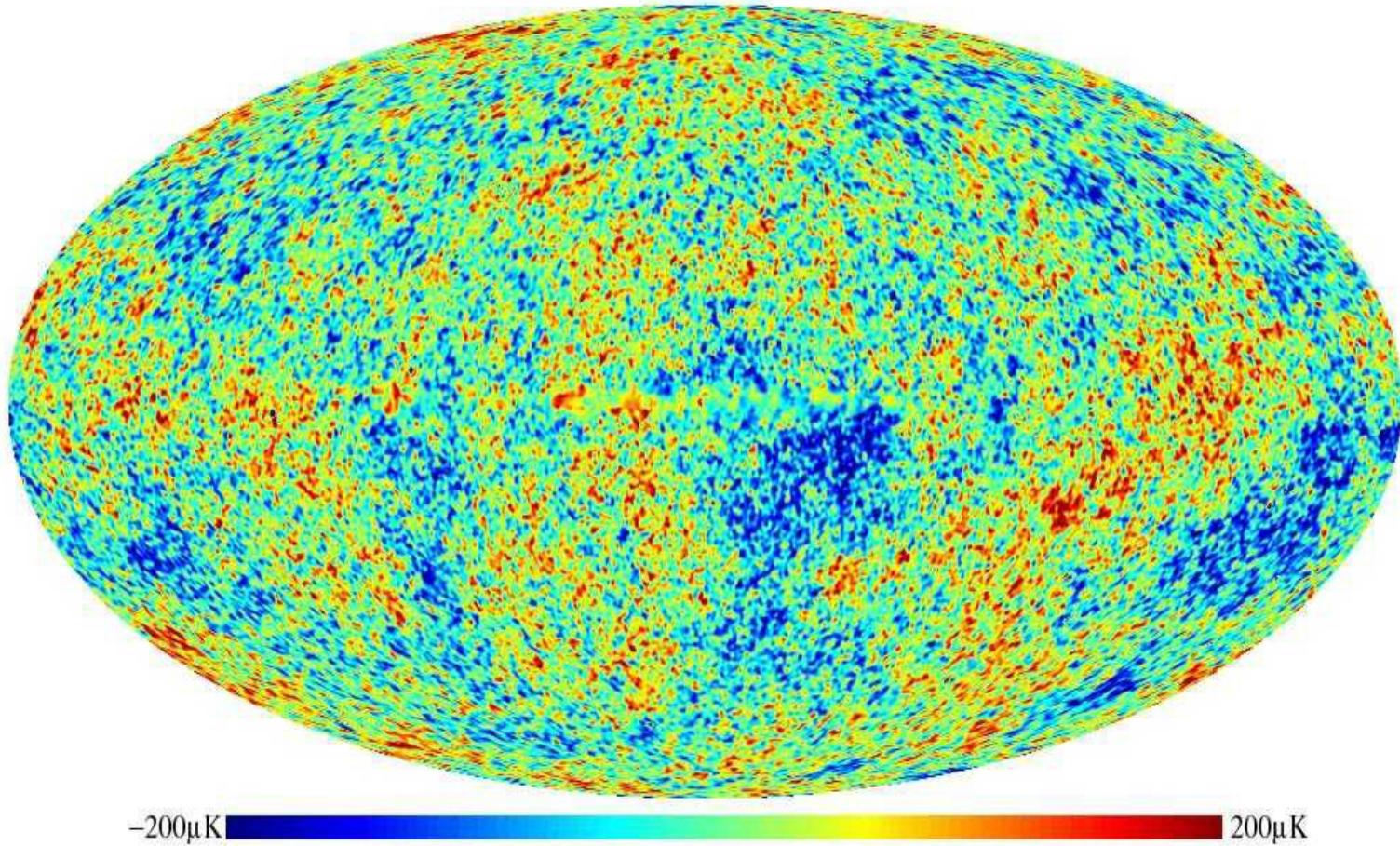
Übergang erklärt durch  
**Atomphysik**

Key:  
q quark  
g gluon  
e electron  
M muon  
n neutron

bosons: photon  
meson: star  
baryon: galaxy  
ion: black hole  
atom:

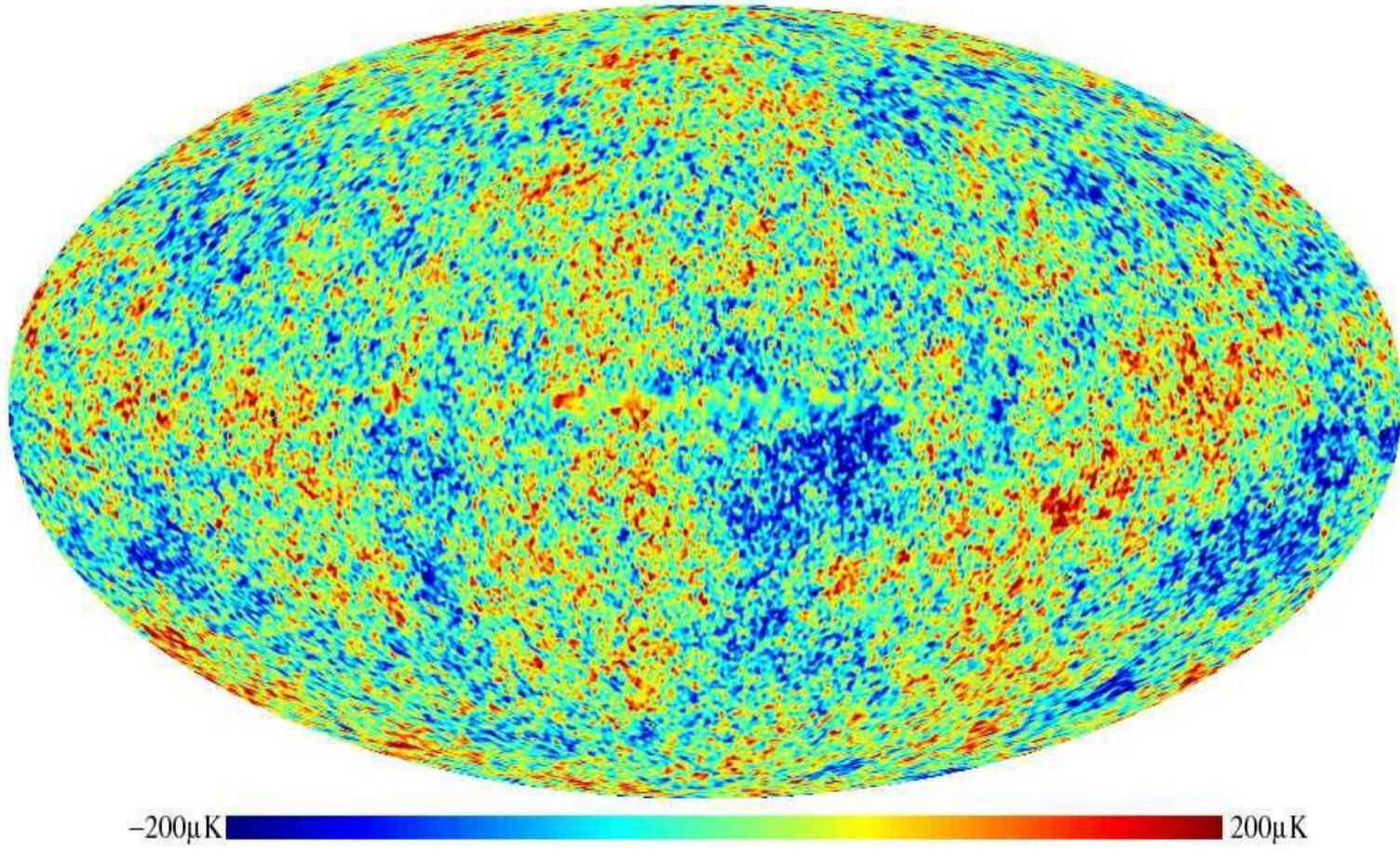
# Blick in die Vergangenheit

Vgl. Nobelpreis  
2006

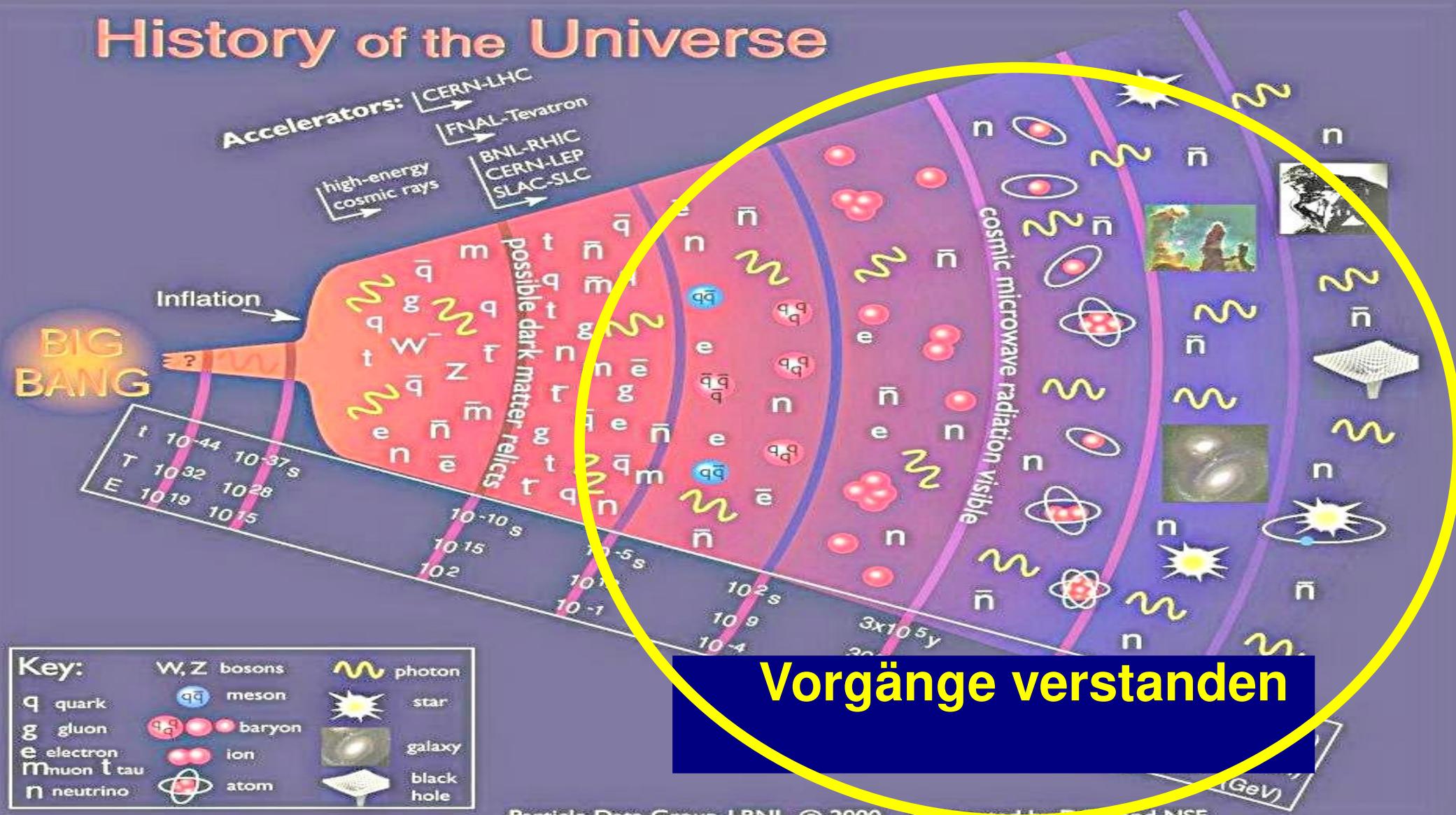


Blick in die  
Vergangenheit

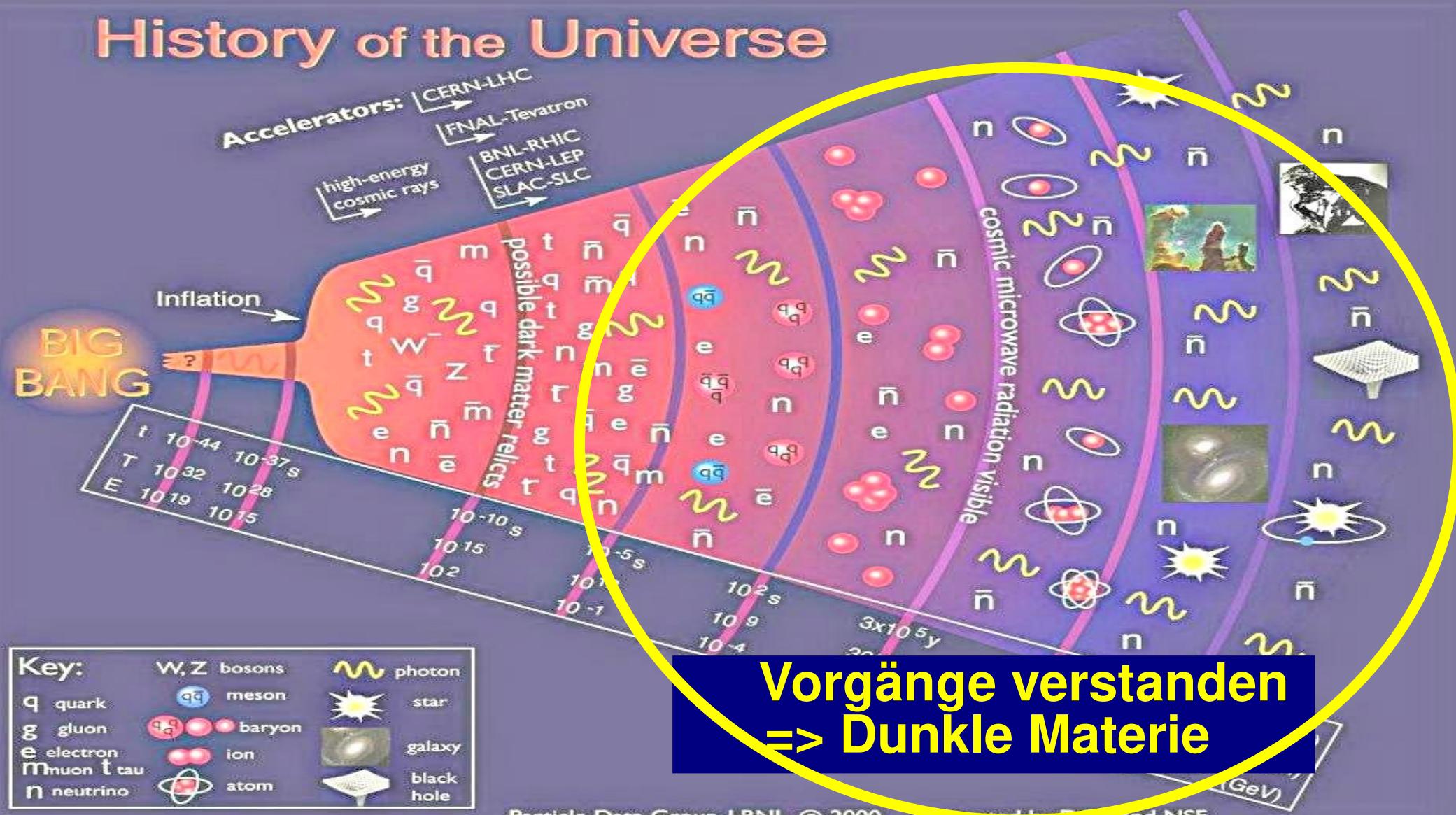
Universum früher: heiss,  
glühend, undurchsichtig



# History of the Universe



# History of the Universe



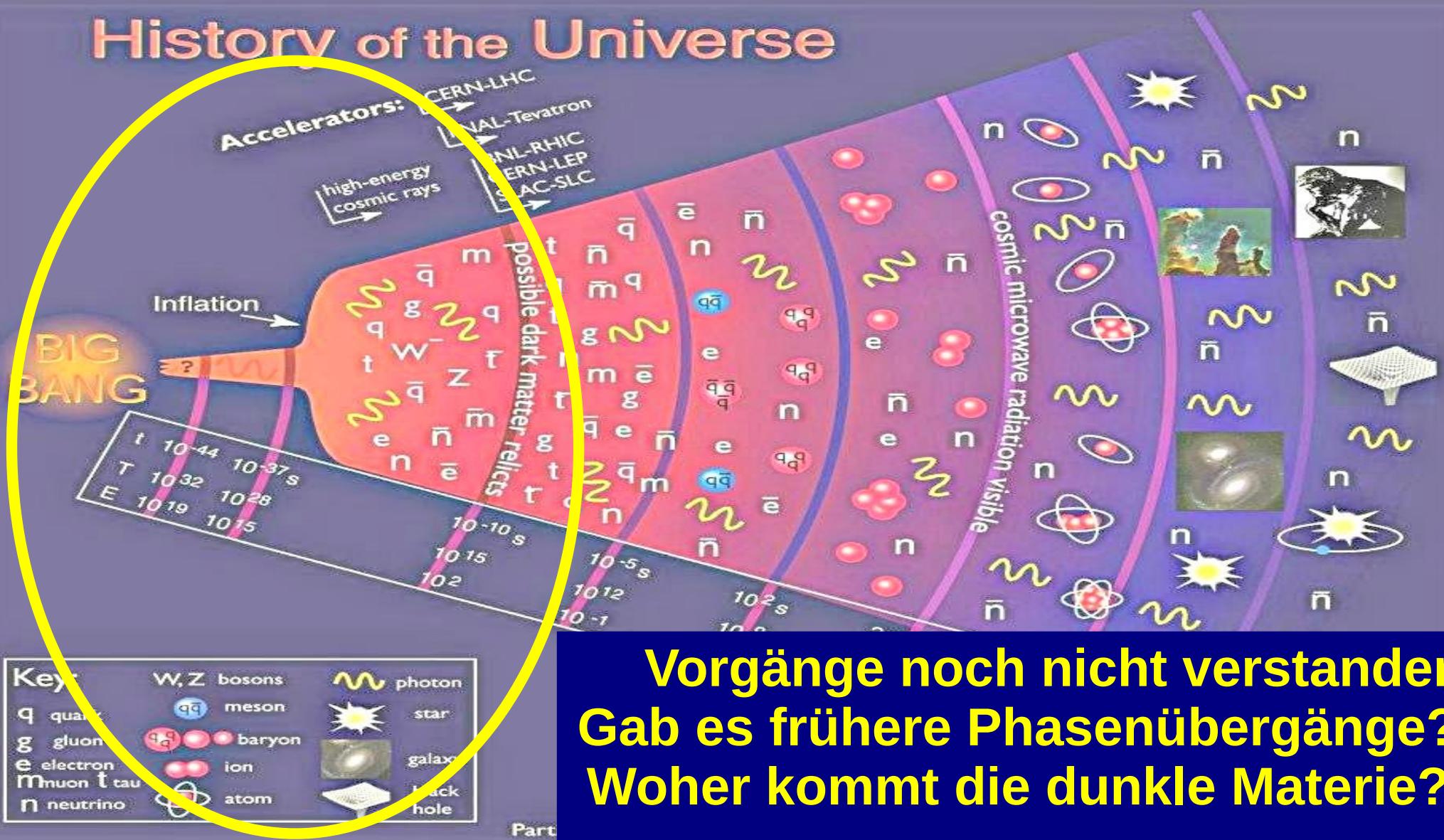
# Dunkle Materie durch viele Beobachtungen erwiesen



Sichtbare  
Materie

Dunkle  
Materie

# History of the Universe



Vorgänge noch nicht verstanden  
Gab es frühere Phasenübergänge?  
Woher kommt die dunkle Materie?

# Was lernen wir daraus?

- Teilchenphysik zwar sehr gut verstanden, keine Abweichung zu Teilchen-Experimenten
- Aber großes Problem:
- Dunkle Materie nicht beschrieben?!?!
- Es muss zusätzliche Teilchensorte geben?!?!

# Was lernen wir daraus?

- Kandidaten für dunkle Materie tragen zu g-2 bei!
- Einschränkungen an Erklärungen für dunkle Materie

# Zusammenfassung

- Bekannte Teilchen und Kräfte verstanden, fantastische Übereinstimmung Theorie – Experiment
- Noch nie so gut wie heute!
- Offen: dunkle Materie? Neutrinos? Higgs/Masse?
- Verbindungen zur Kosmologie/Astrophysik

