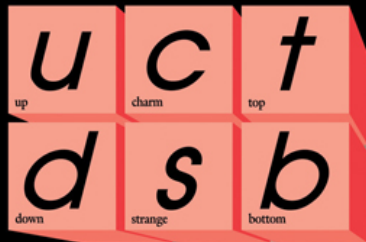


Neues aus der Teilchenphysik

Higgs, Myon, das Universum und der ganze Rest

Prof. Dr. Dominik Stöckinger
Institut f. Kern- und Teilchenphysik

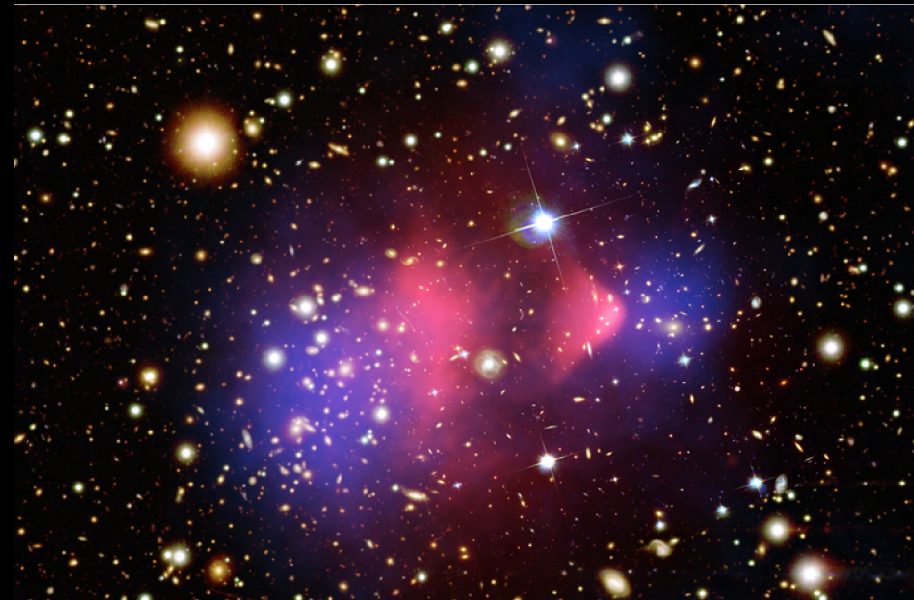
Quarks



Forces



Leptons



Fundamentale Gesetze...



Fundamentale Gesetze...

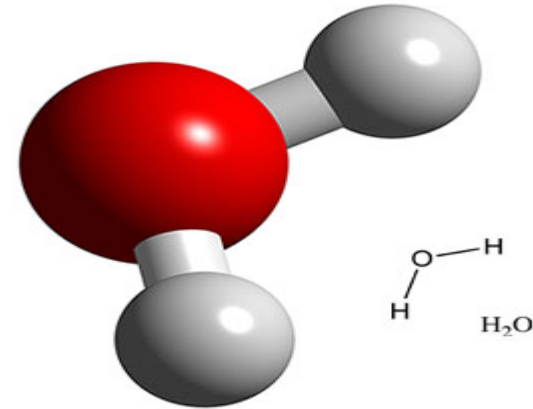


Kleine Bausteine

- Sandkorn



- Wassermolekül

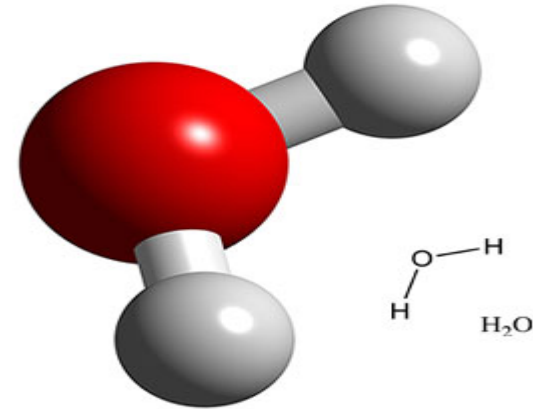


Kleine Bausteine

- Sandkorn



- Wassermolekül



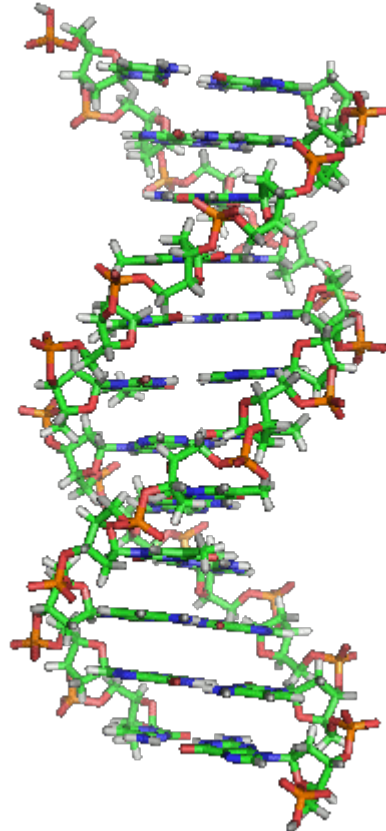
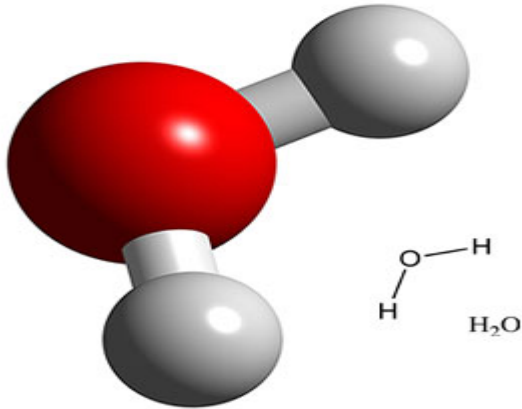
Welchen Gesetzen unterliegen die Bausteine?

Liefert ähnliche (einfache!) Gesetze

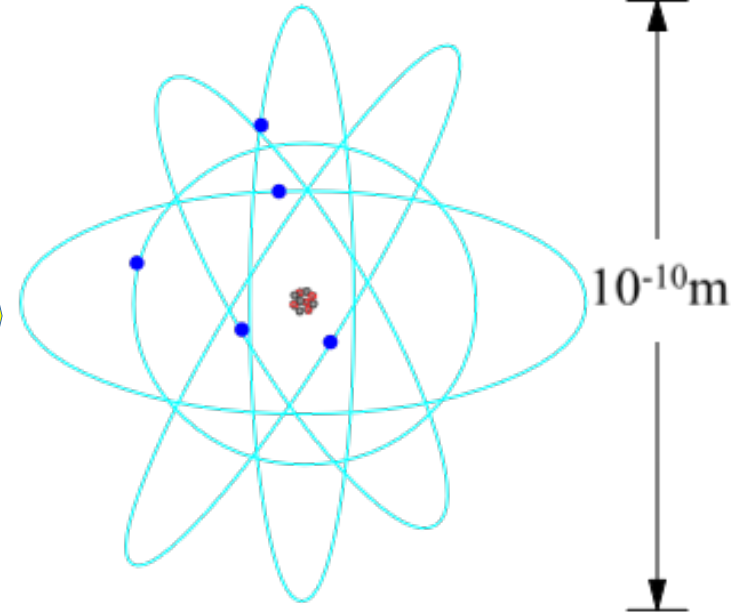
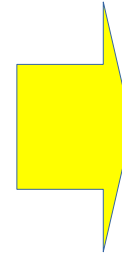
- Sanddünen
- Wasserwellen



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

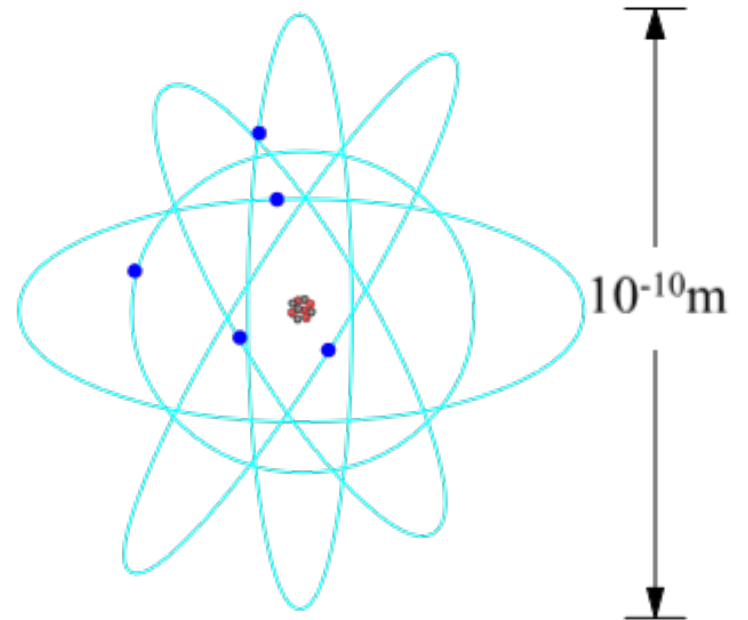


DNA-Molekül (Wikipedia)

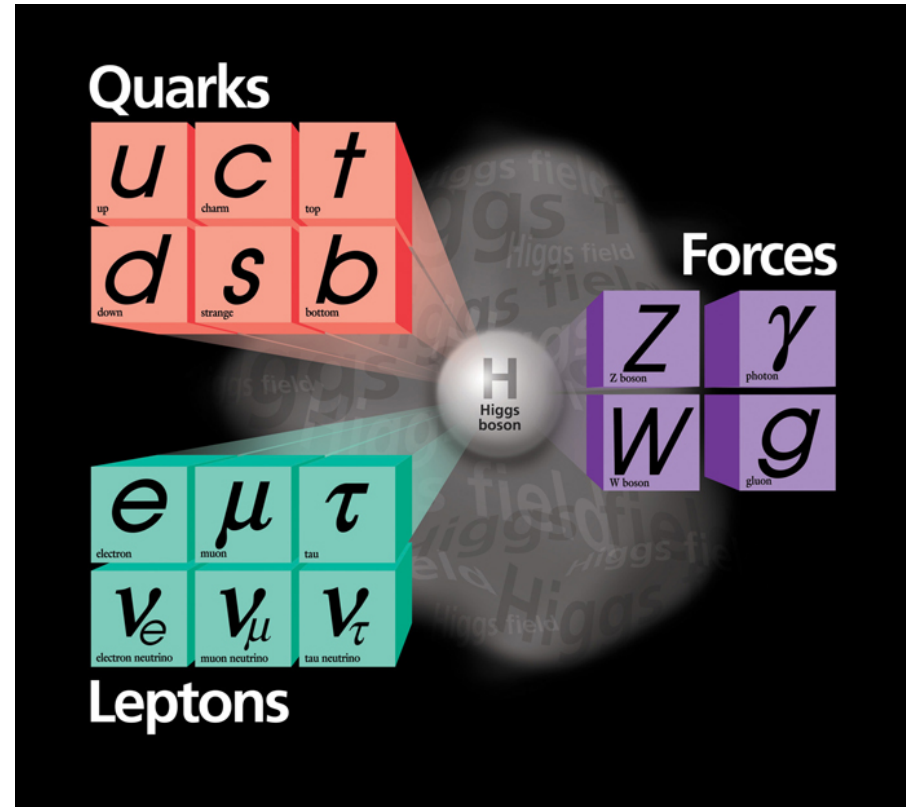


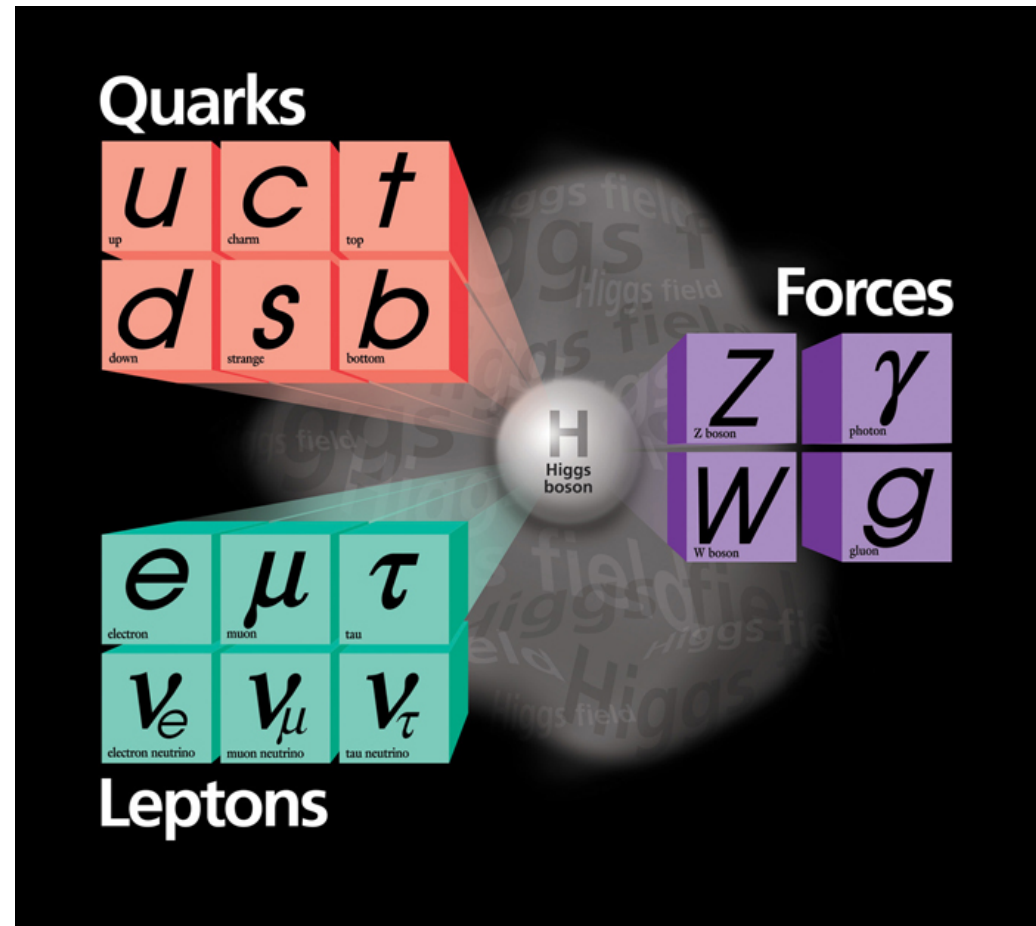
Bohrsches Atommodell (Leifi-Physik)

Sehr große Strukturen → auch einfache Gesetze

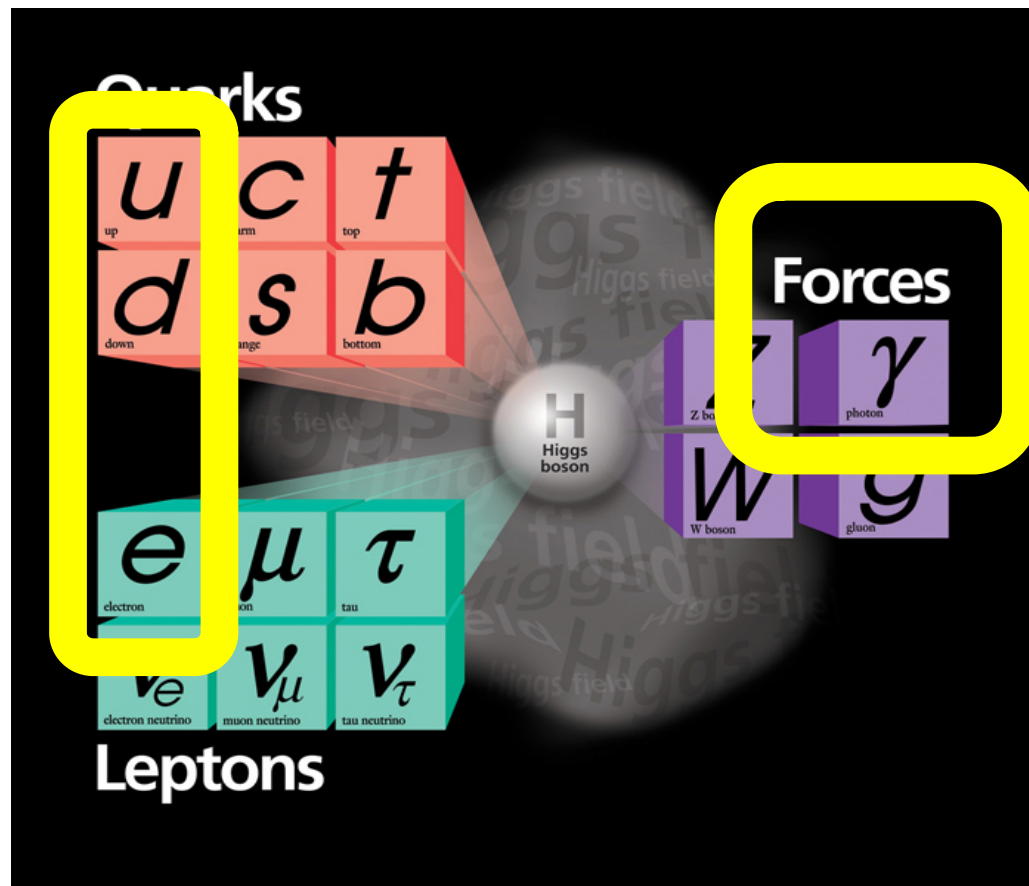


Elementarteilchen: kleinste Strukturen, fundamentalste Gesetze



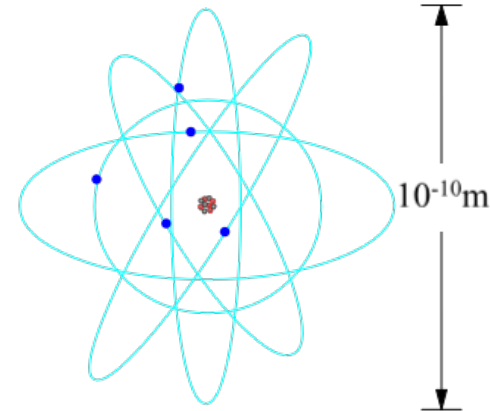
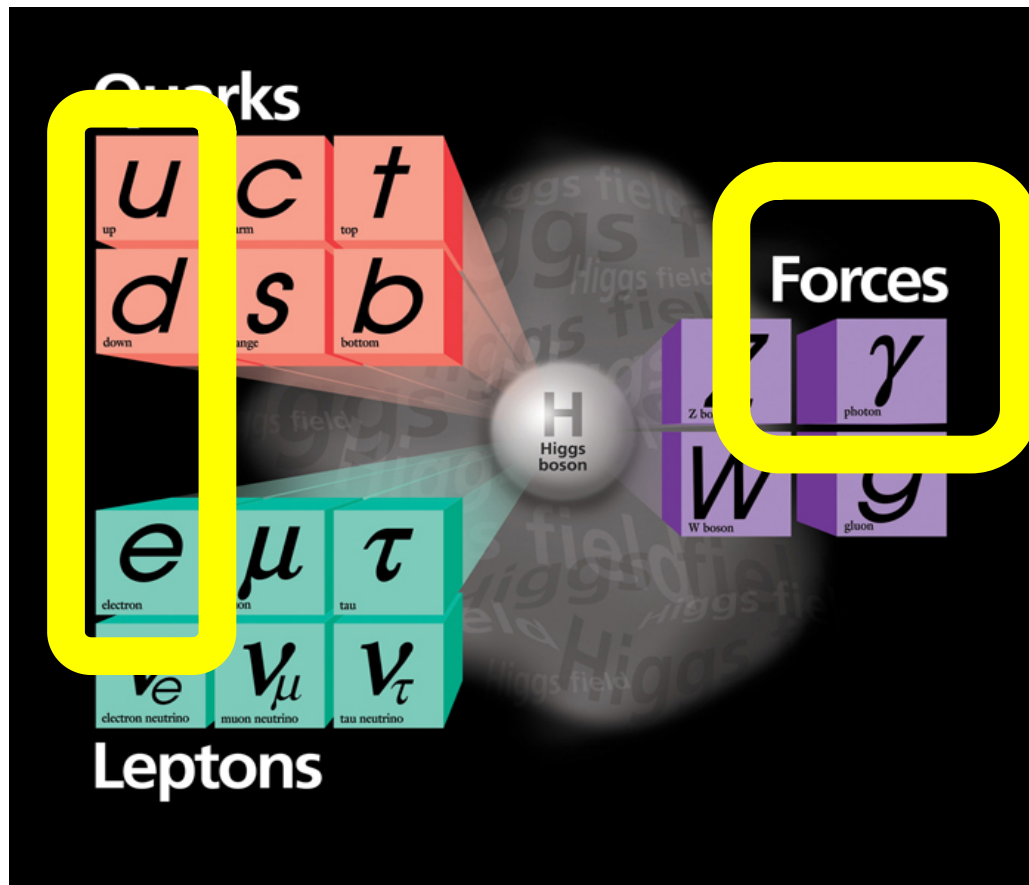


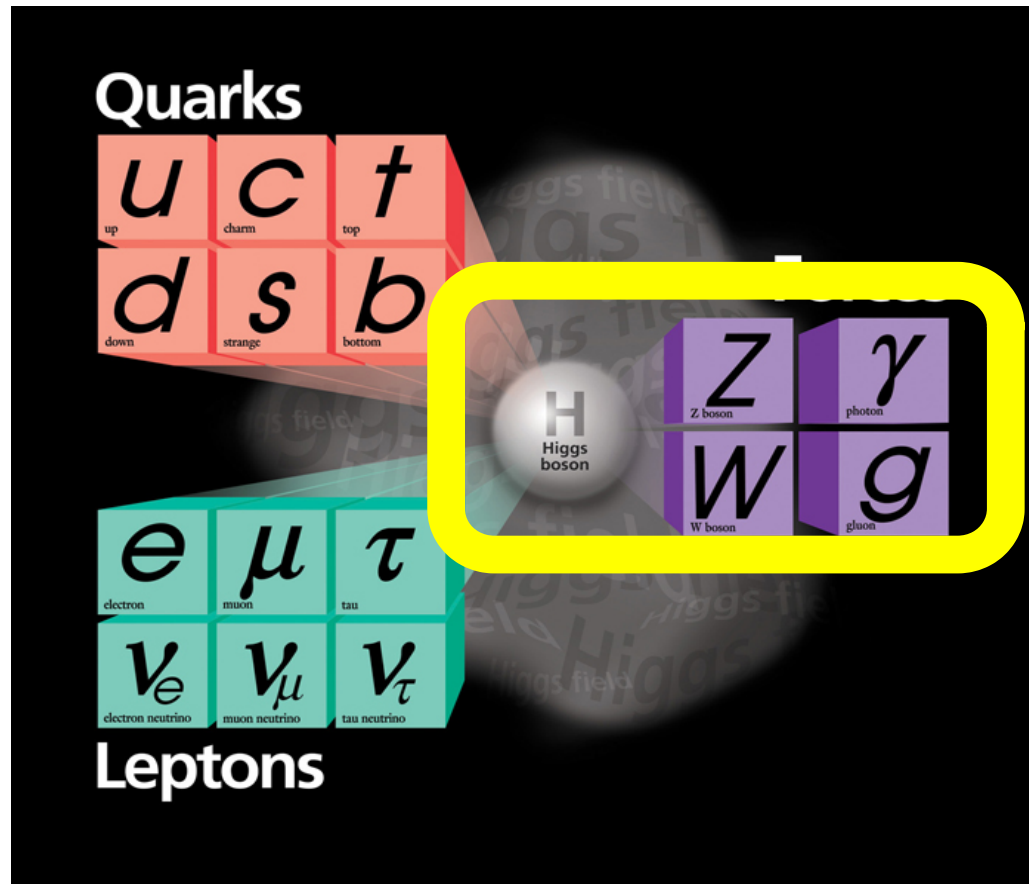
„Alle“ Naturphänomene lassen sich auf 4 Kräfte zurückführen:
Schwerkraft und 3 Kräfte zwischen den Elementarteilchen:
“**Standardmodell der Teilchenphysik**” (50 Jahre alt)



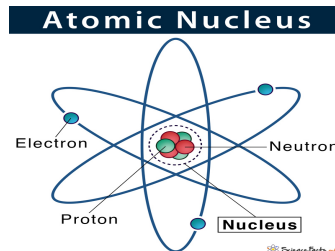
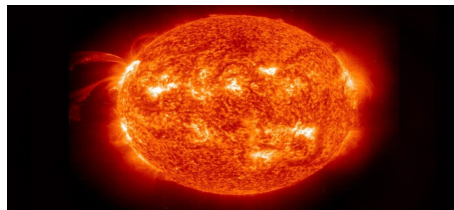
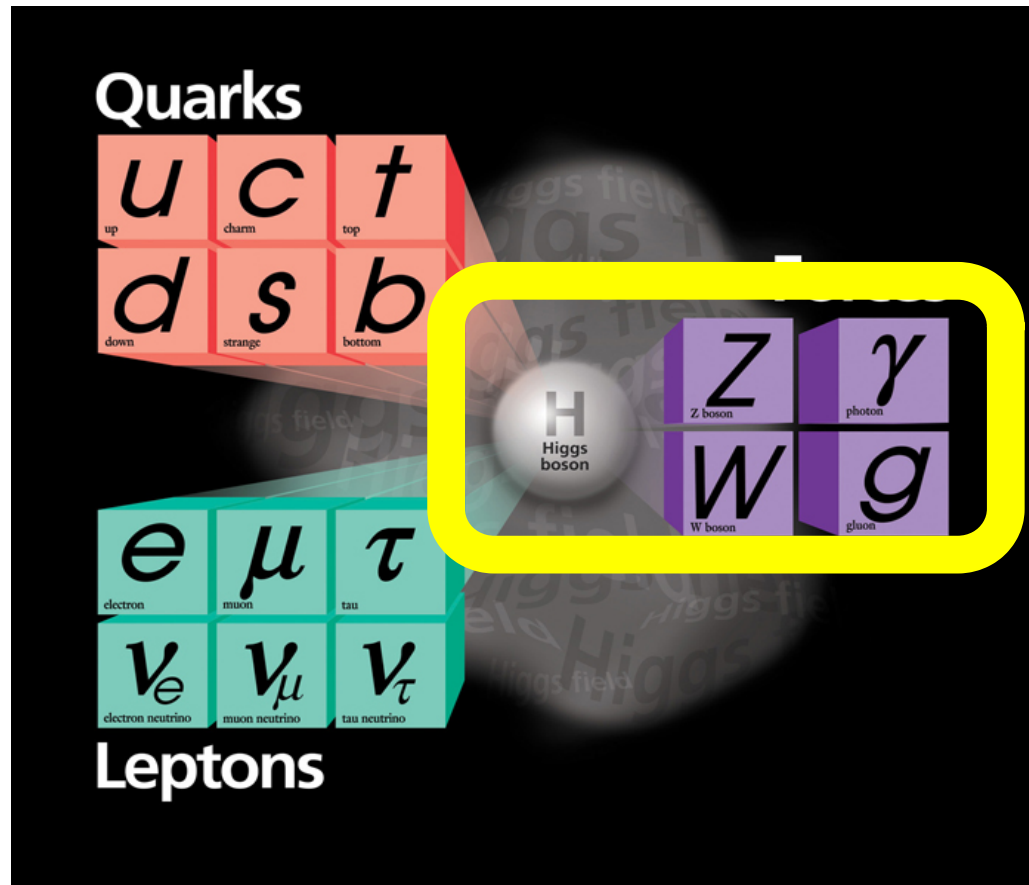
1. Elektromagnetismus

(Alltagsphysik!)

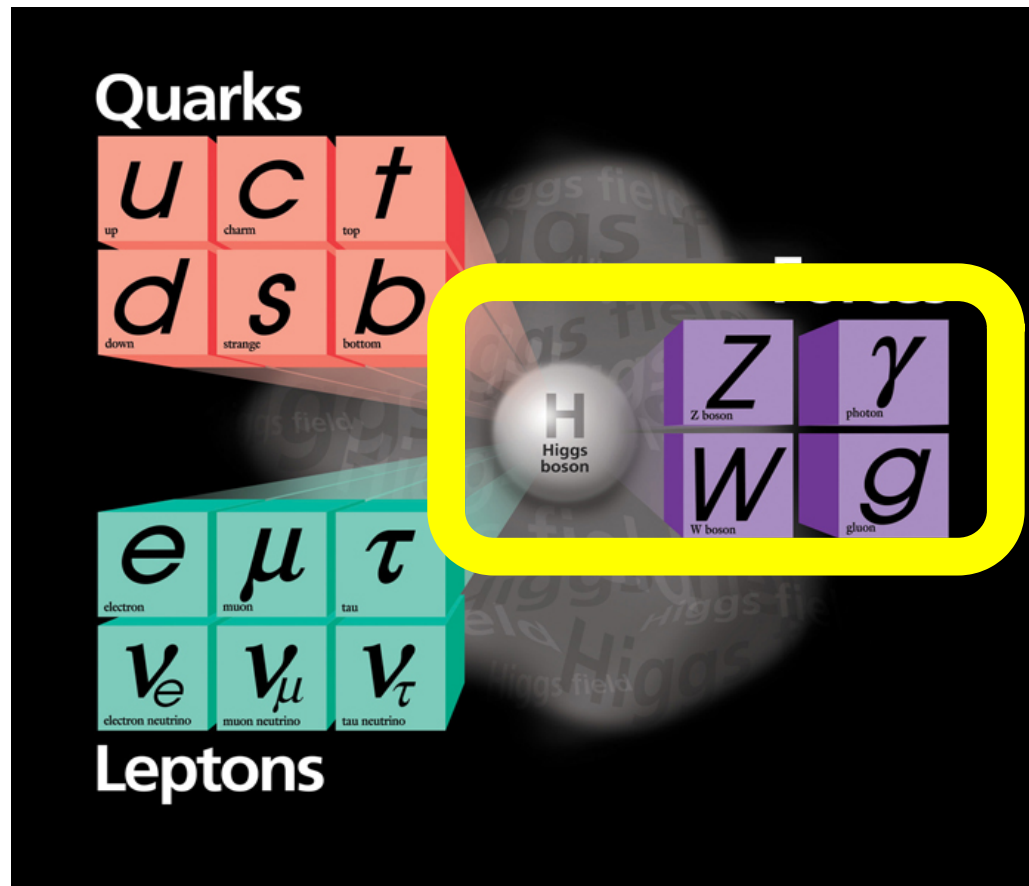




2. schwache Wechselwirkung
3. starke Wechselwirkung

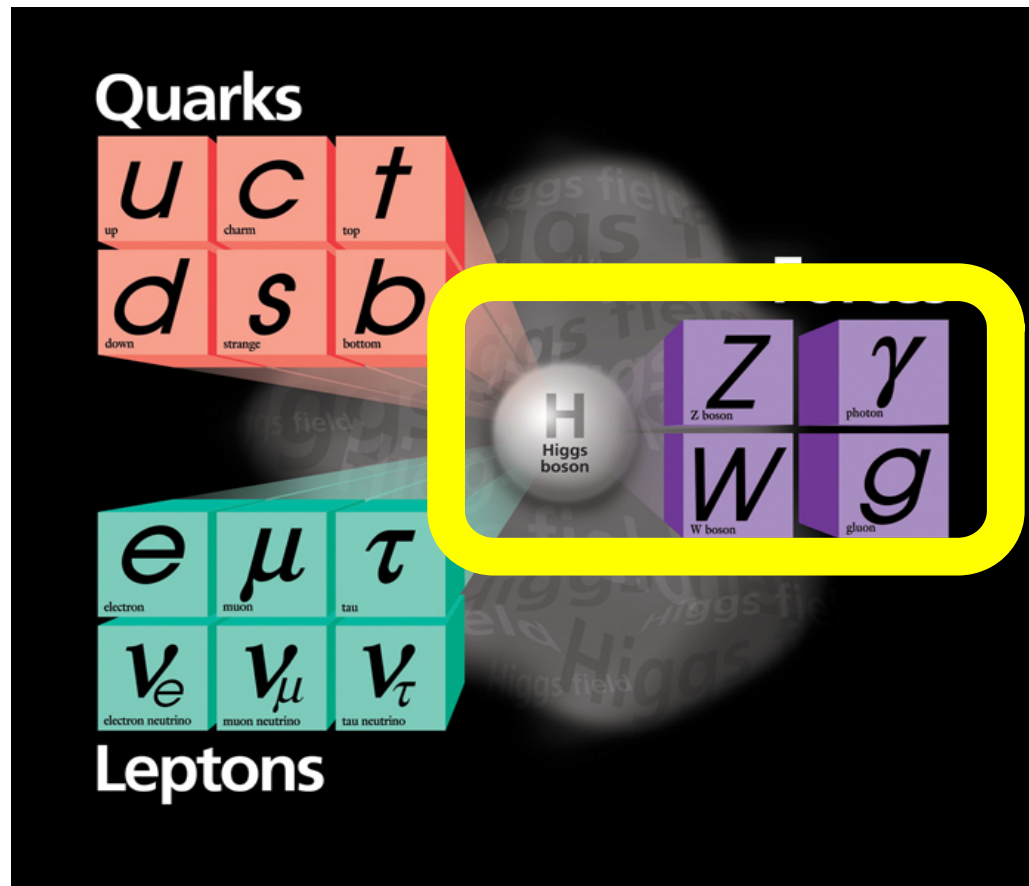


2. schwache Wechselwirkung
3. starke Wechselwirkung



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





Kleiner Exkurs:

40 Jahre nötig, um diese einfachen Gesetze zu verstehen:

Theorie:
alle WWen "gleich"
Beobachtung:
sehr verschieden?!?!

Lösung: Confinement
und Higgsmechanismus

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

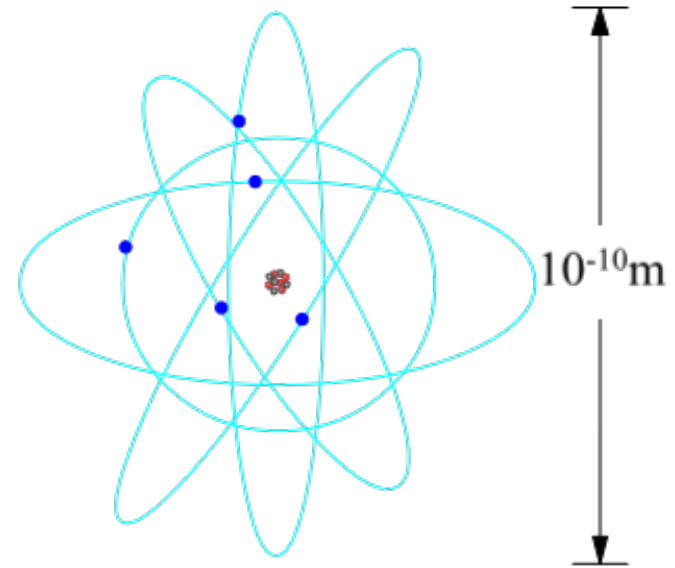


Frage: Noch kleinere Bausteine?

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

Konstituenten eingesperrt → Bewegungsenergie trägt zur Gesamtmasse bei: E_{const}

	Größe	Masse	E_{const}
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

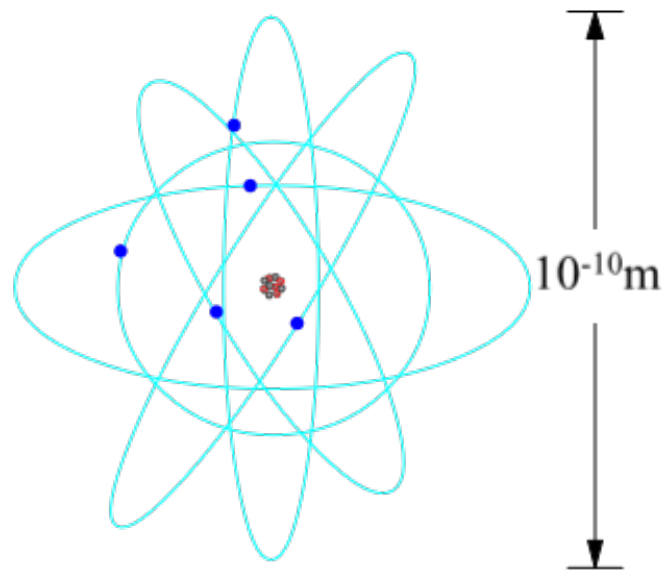


Frage: Noch kleinere Bausteine?

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

Konstituenten eingesperrt → Bewegungsenergie trägt zur Gesamtmasse bei: E_{const}

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



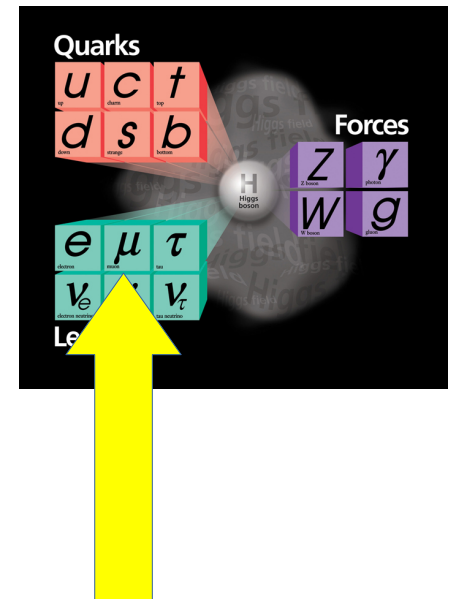
Antwort: Wahrscheinlich nicht! Elementarteilchen scheinen tatsächlich fundamental!

Noch wichtigere Frage: woher wissen wir das alles?

Antwort: Übereinstimmung Theorie – Experiment

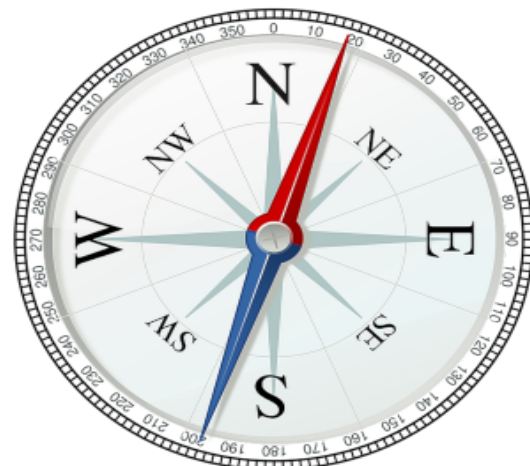
Beispiel (g-2) des Myons

2001 – 2013 – 2021 – 2025



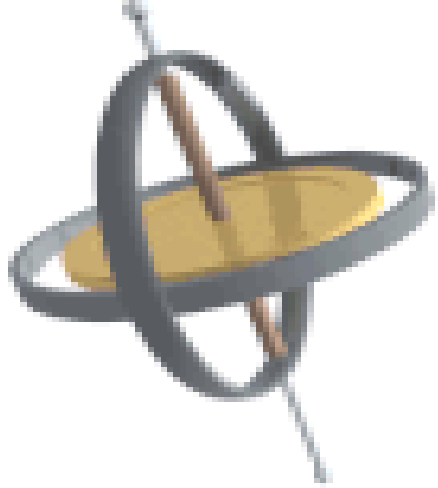
Was ist g?

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

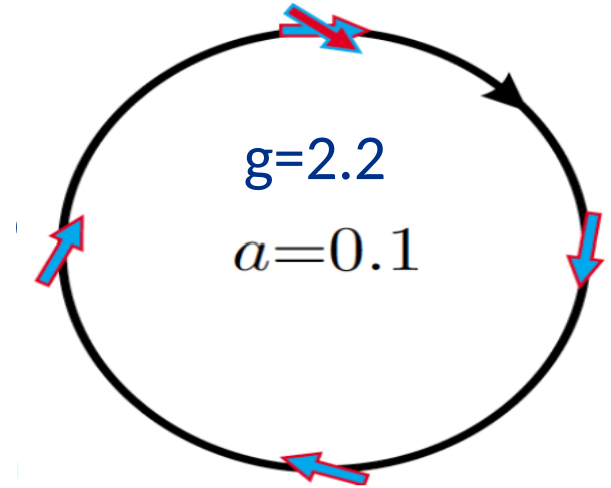
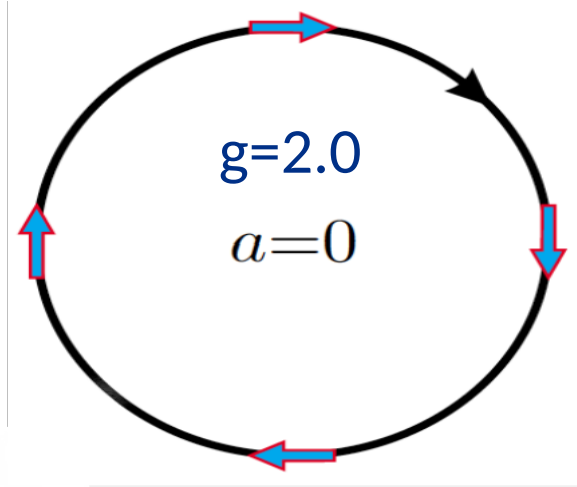


<https://www.schlauerlernen.de/magnetfeld/>

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

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

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](#)

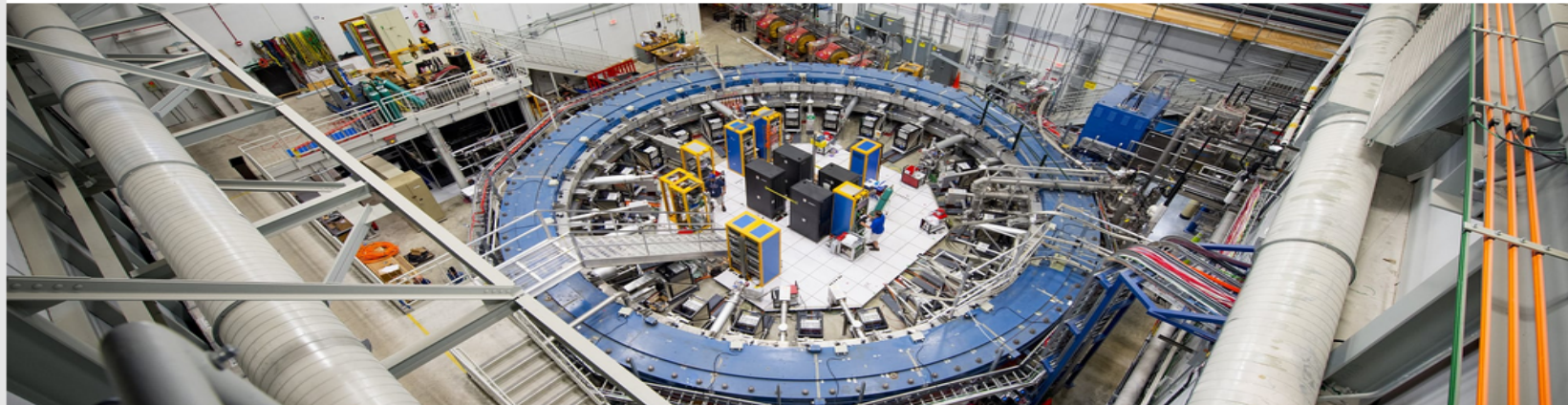
MAGNETSINN DER MYONEN

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!!

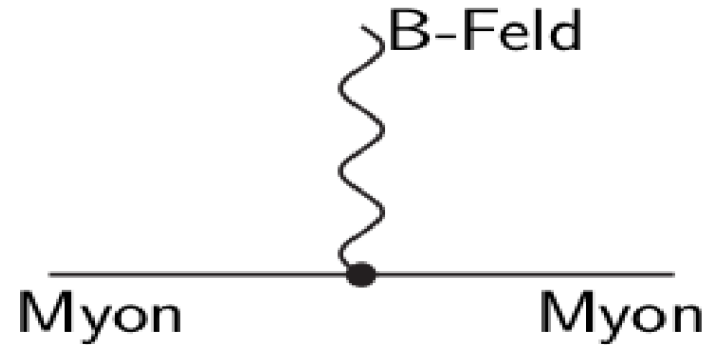
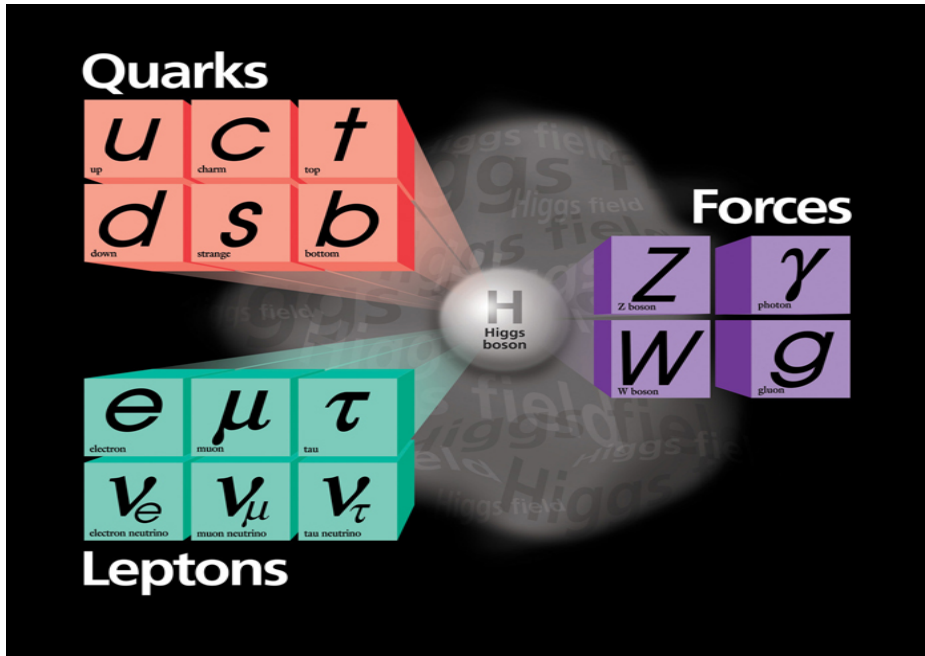


© REIDAR HAHN / FERMILAB / MUON G-2 EXPERIMENT (AUSSCHNITT)

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.

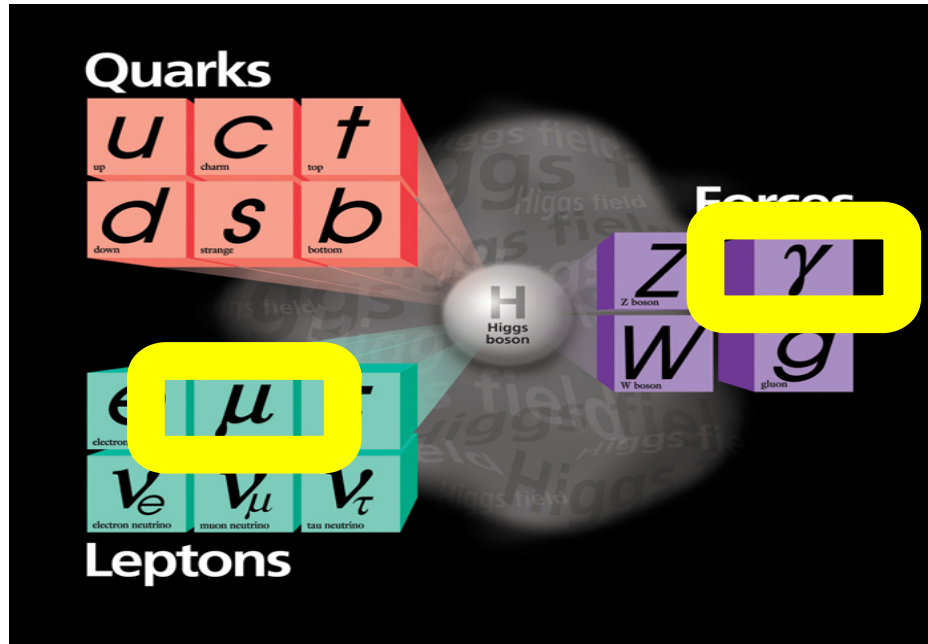
Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen

- $g=2$: Teilchen allein

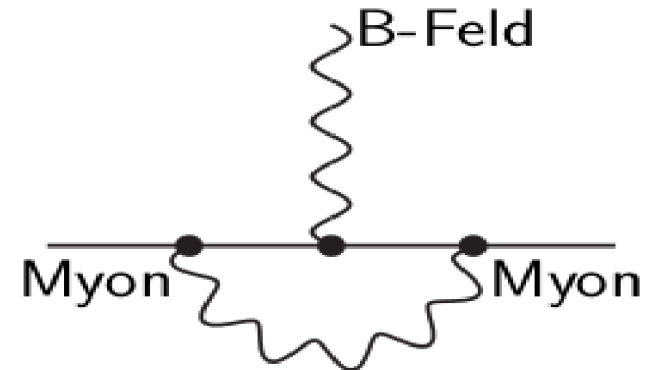


→ Nobelpreis für Dirac

Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



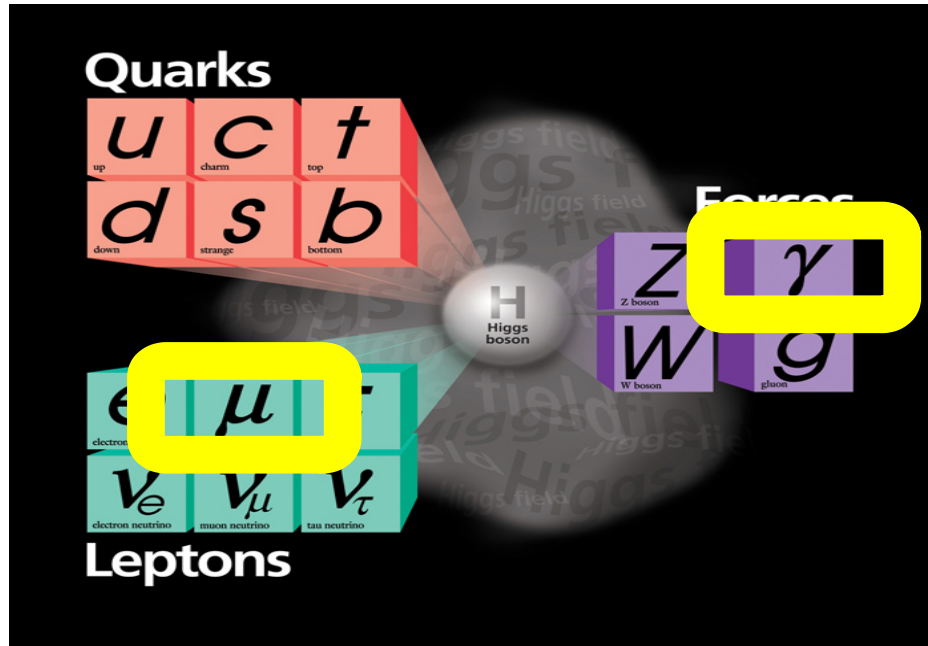
- $g=2$: Teilchen allein



→ Nobelpreis Schwinger

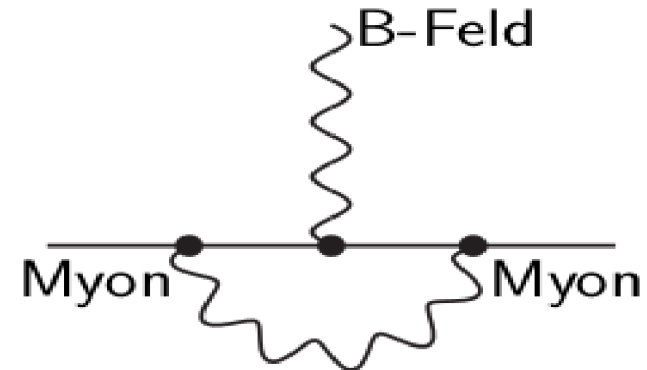
- $g>2$: weitere Teilchen durch Fluktuationen des Vakuums kurz erzeugt und zerfallen

Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



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

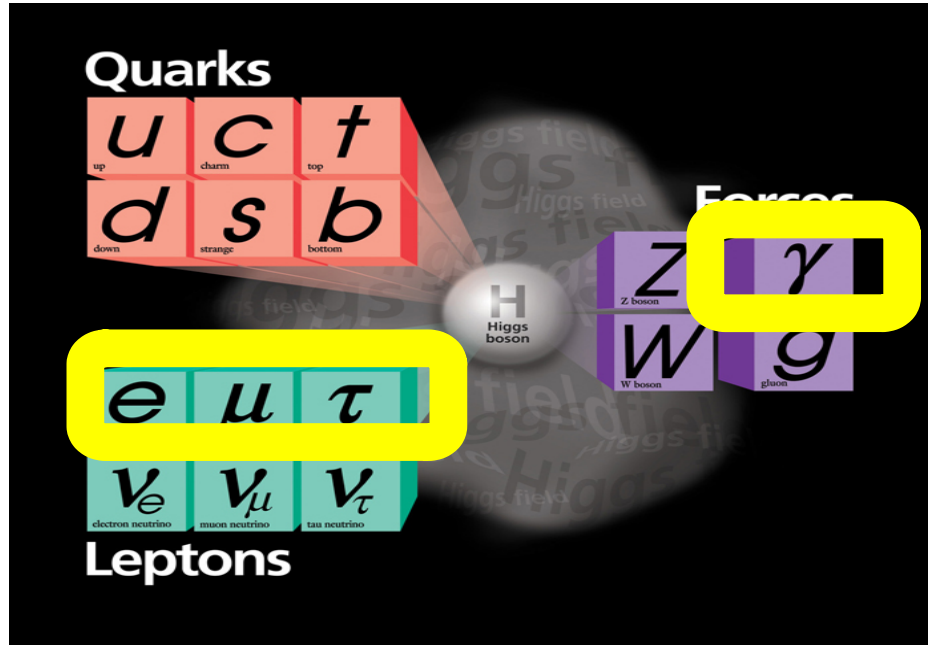
- $g=2$: Teilchen allein



→ Nobelpreis Schwinger

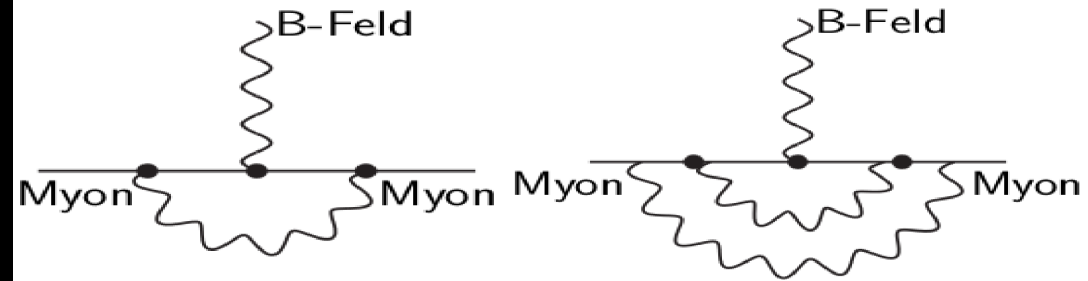
- $g>2$:
weitere Teilchen durch
Fluktuationen des
Vakuums kurz erzeugt
und zerfallen

Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



nur QED:
Experiment:

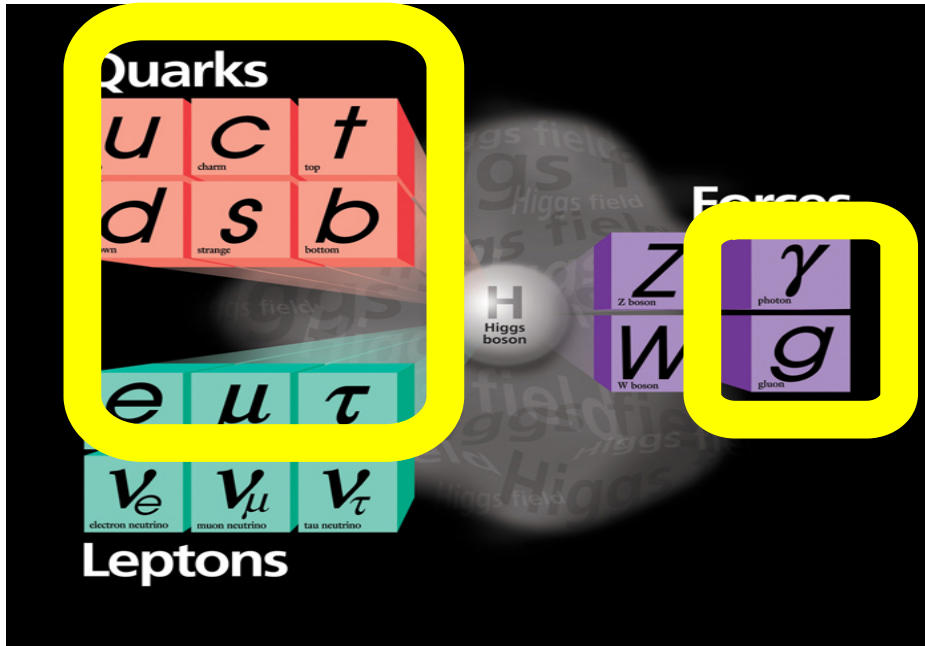
- $g > 2$:
Fluktuationen des Vakuums



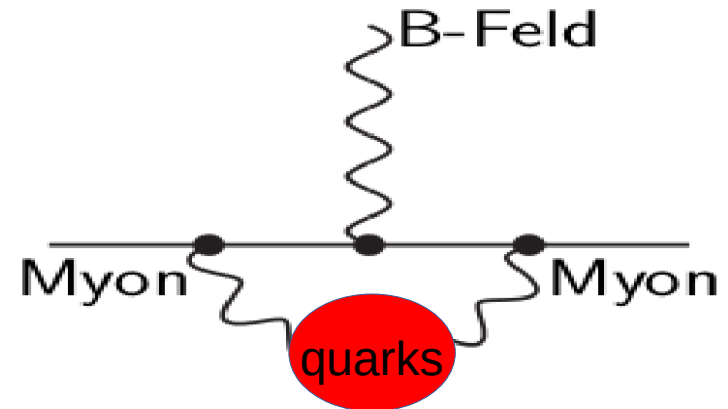
$$g = 2.002\,331\,694\,3786$$

$$g = 2.002\,331\,841\,43(29)$$

Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



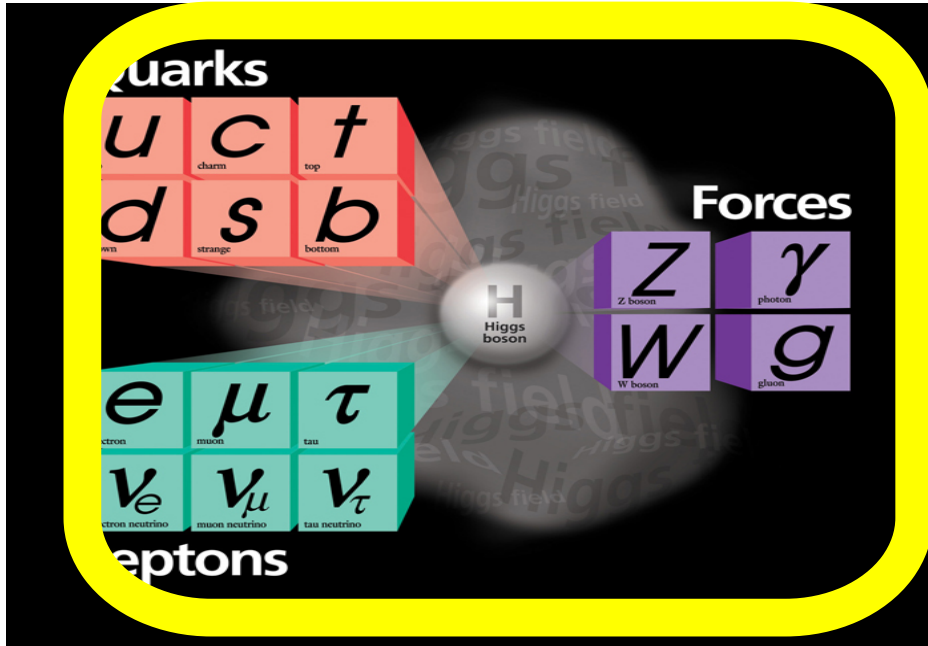
- $g > 2$:
Fluktuationen des Vakuums



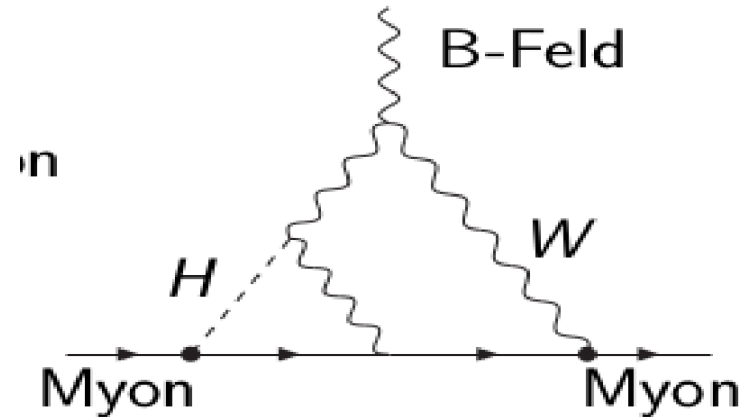
QED, Quarks, starke WW:
Experiment:

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

Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



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



QED, Quarks, starke WW:

Gesamter Rest (→ Dresden, 2013):

Experiment:

$g = 2.002\ 331\ 833\ 128$

$+3\ 072$

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

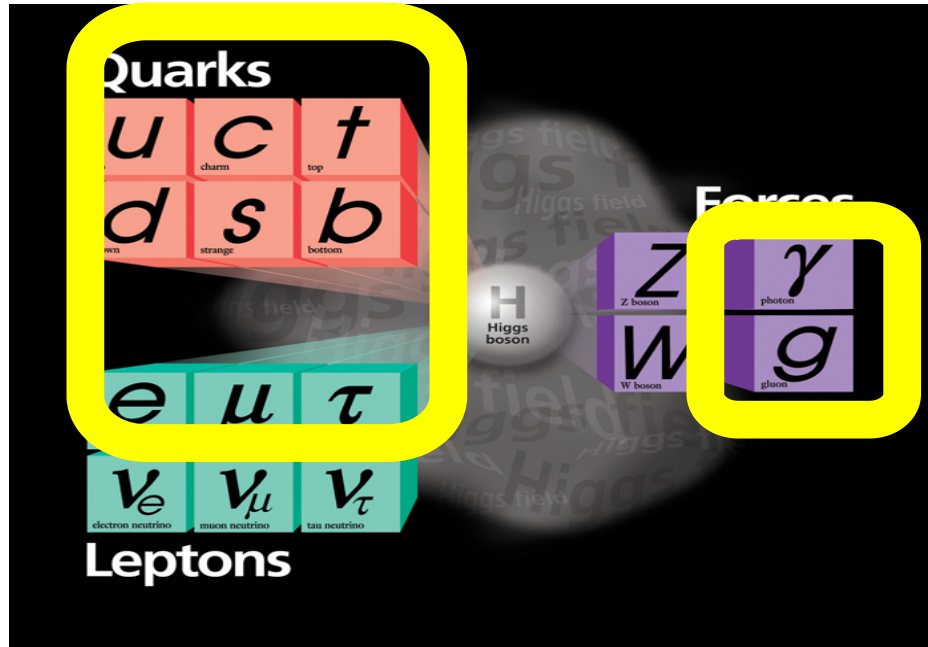
Ergebnisse

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

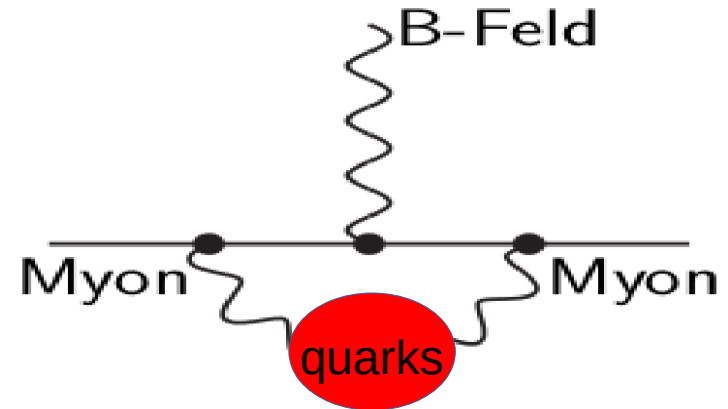
Standardmodell Rechnung: $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

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?

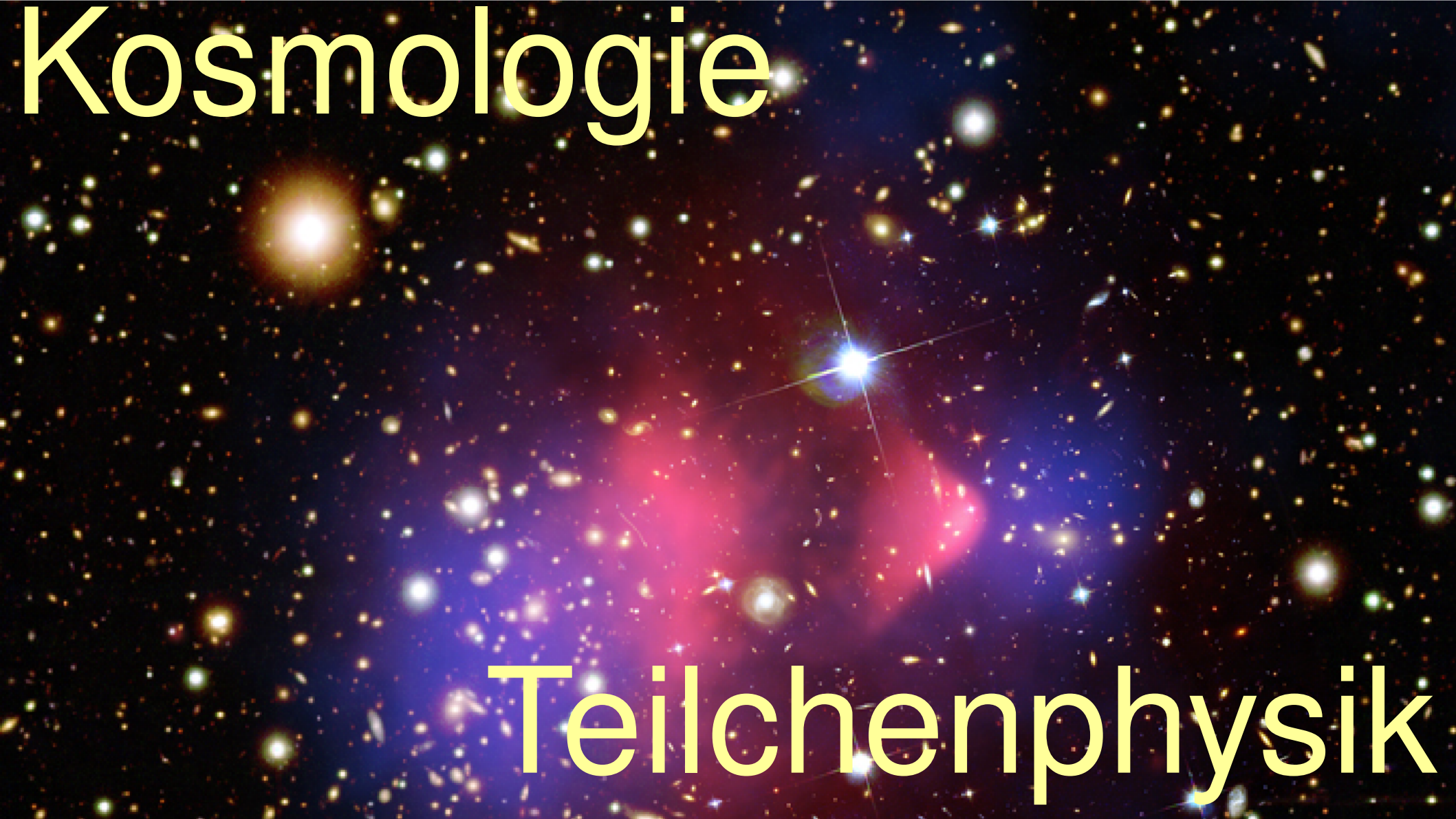
- Auch Higgs-Teilchen wurde genau vermessen
- Insbesondere Wechselwirkung mit Myon
- 10 verschiedene Hypothesen machen verschiedene Vorhersagen für Higgs/g-2

Hypothetische Alternativen zum “Standardmodell” eingeschränkt oder ausgeschlossen!

A deep space photograph showing a vast field of galaxies and stars against a dark cosmic background. The image is filled with numerous galaxies of various shapes and sizes, some appearing as bright, diffuse clouds and others as more compact, structured objects. The colors range from deep blues and purples to bright yellows and oranges, suggesting different temperatures and compositions. The overall effect is one of immense scale and complexity.

Wie ist das Universum
entstanden/aufgebaut?

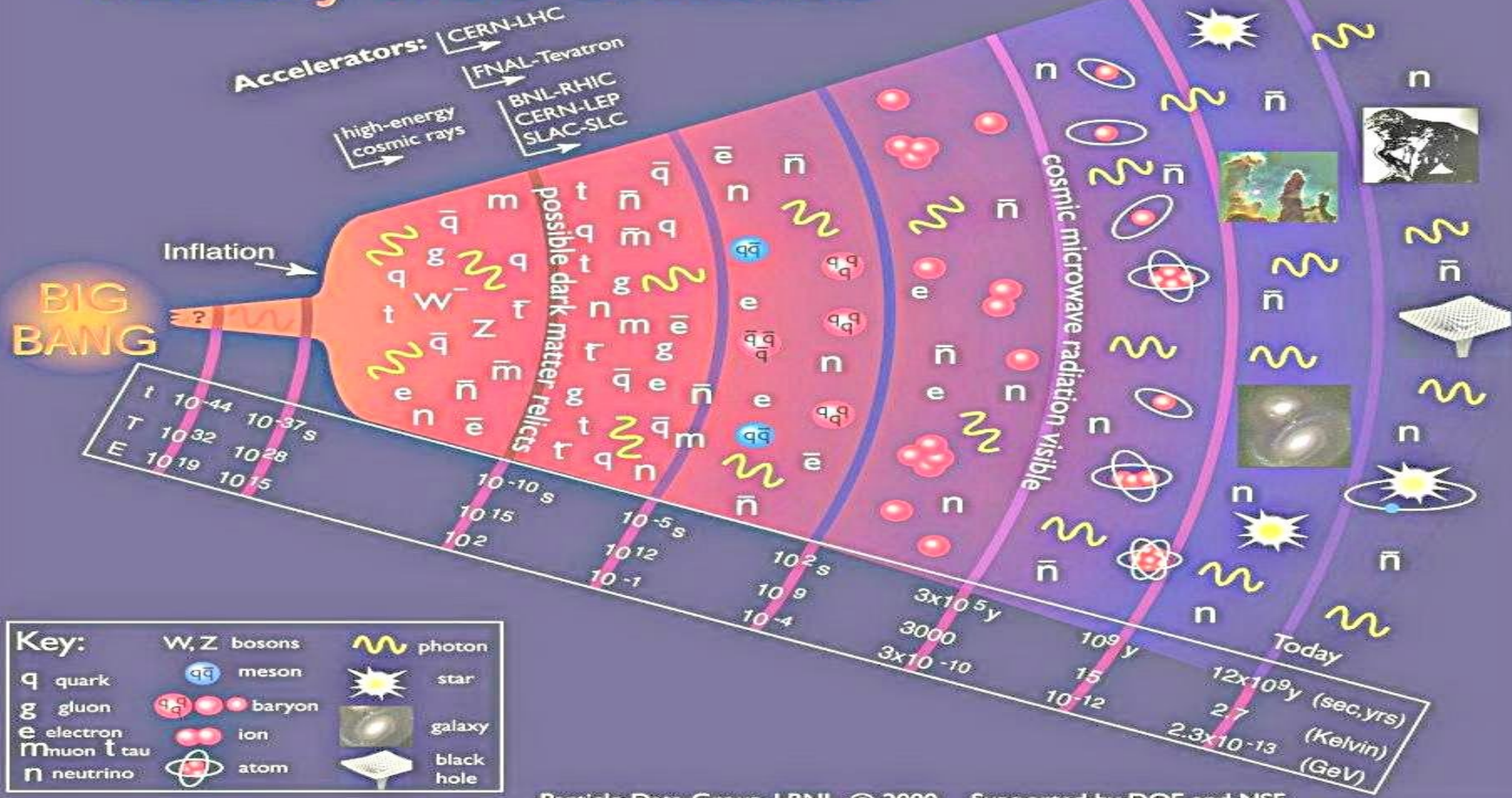
Was sind die fundamentalen
Teilchen und Kräfte?

A deep space photograph showing a vast field of galaxies and stars against a dark cosmic background. The galaxies are mostly yellow and orange, with some blue and red highlights. A prominent bright blue star with a cross-shaped diffraction pattern is visible in the center-right. The overall scene is a rich tapestry of celestial objects.

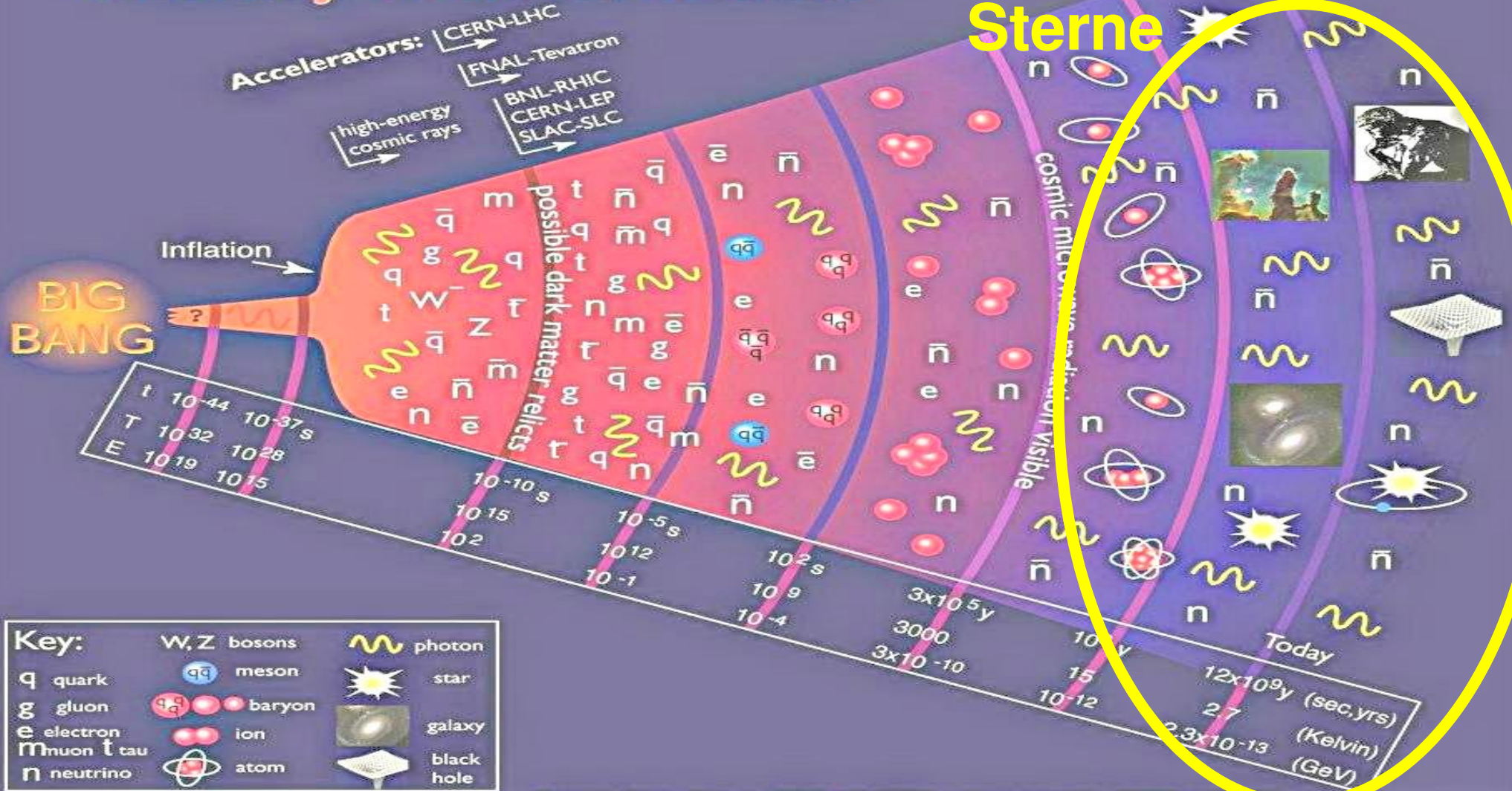
Kosmologie

Teilchenphysik

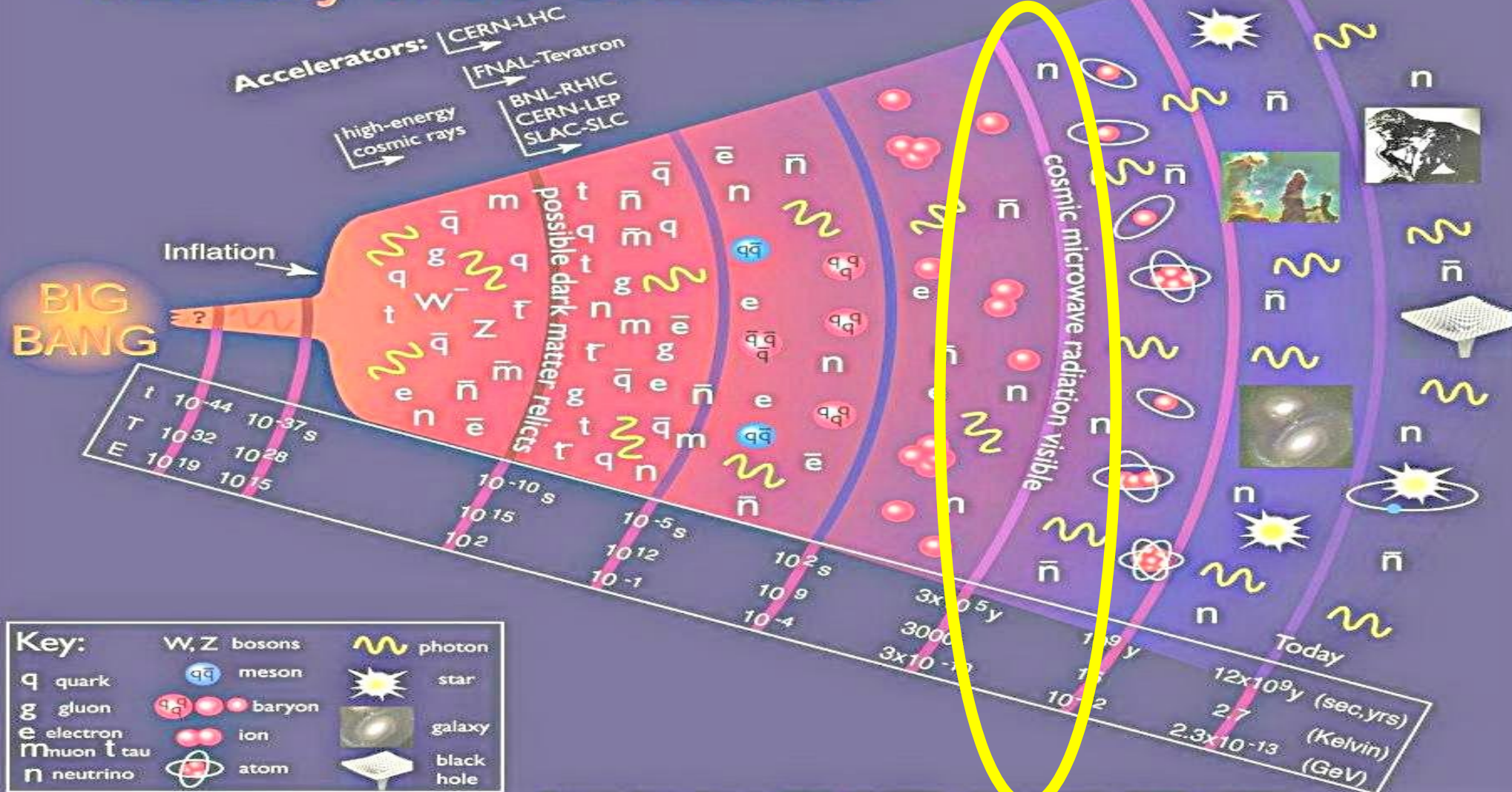
History of the Universe



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

BIG BANG

Inflation

Undurchsichtig

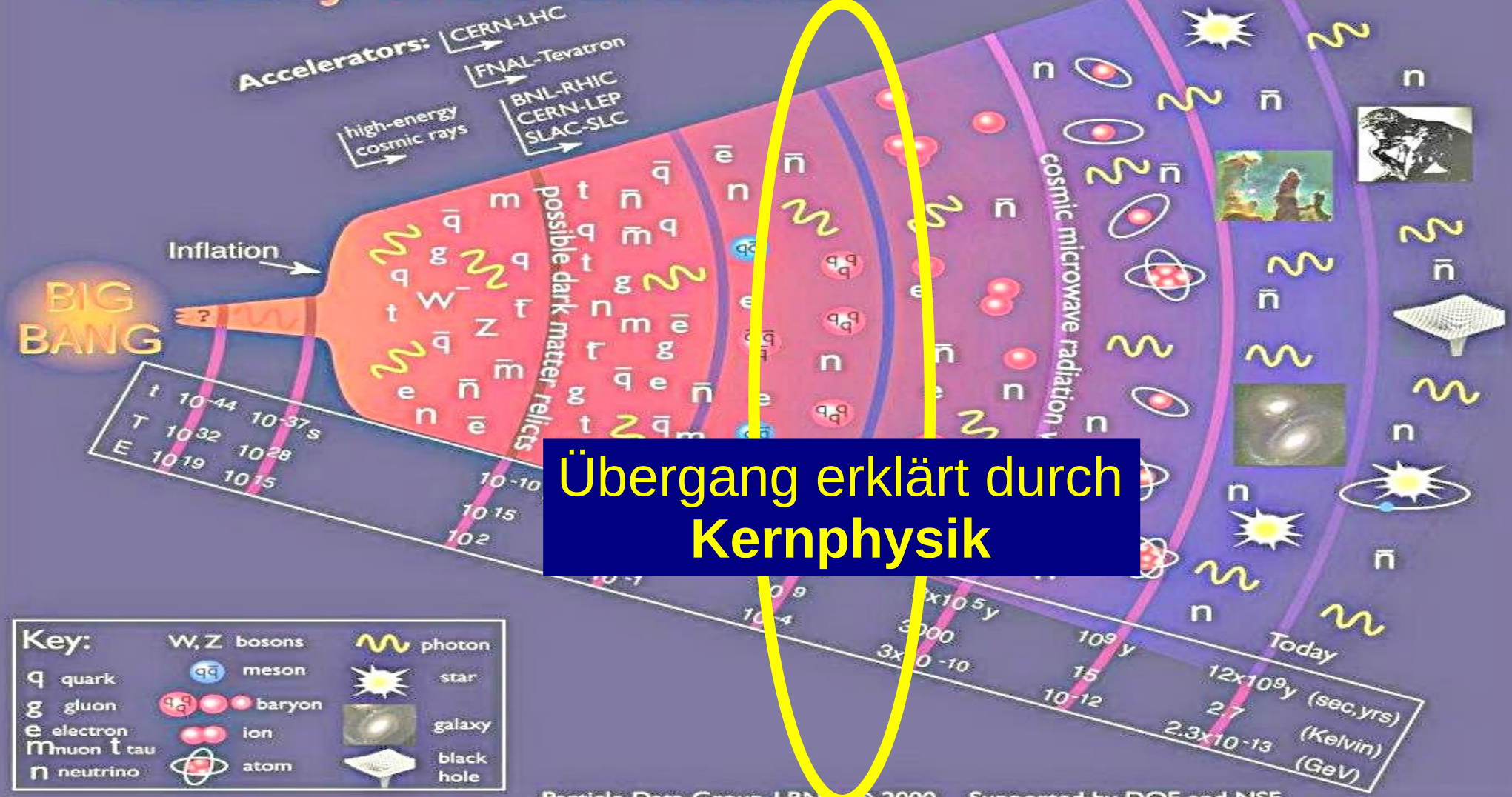
Durchsichtig

Übergang erklärt durch
Atomphysik

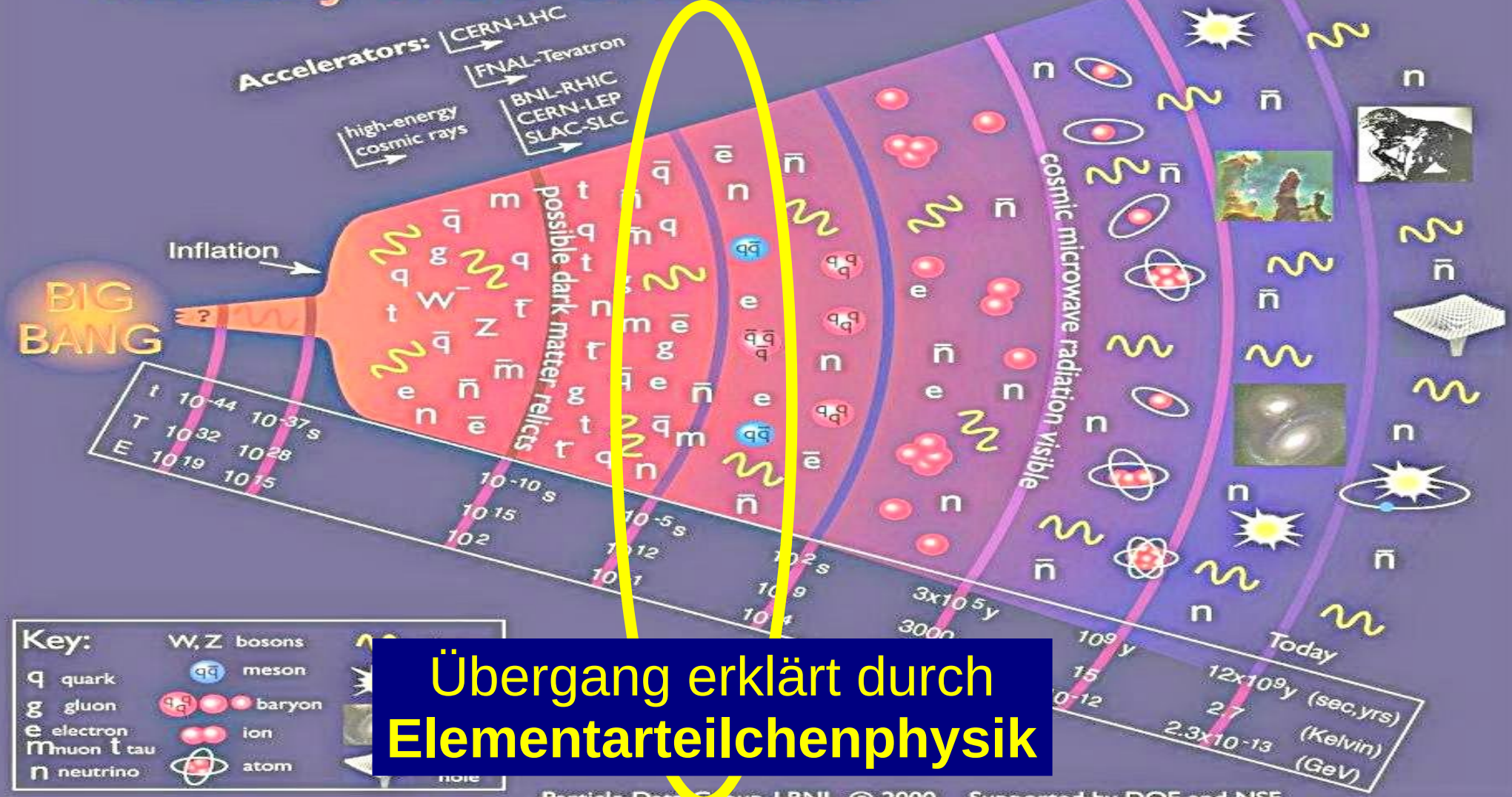
Key:

q quark	W, Z bosons	photon
g gluon	meson	star
e electron	baryon	galaxy
m muon	ion	black hole
t tau	atom	
n neutrino		

History of the Universe

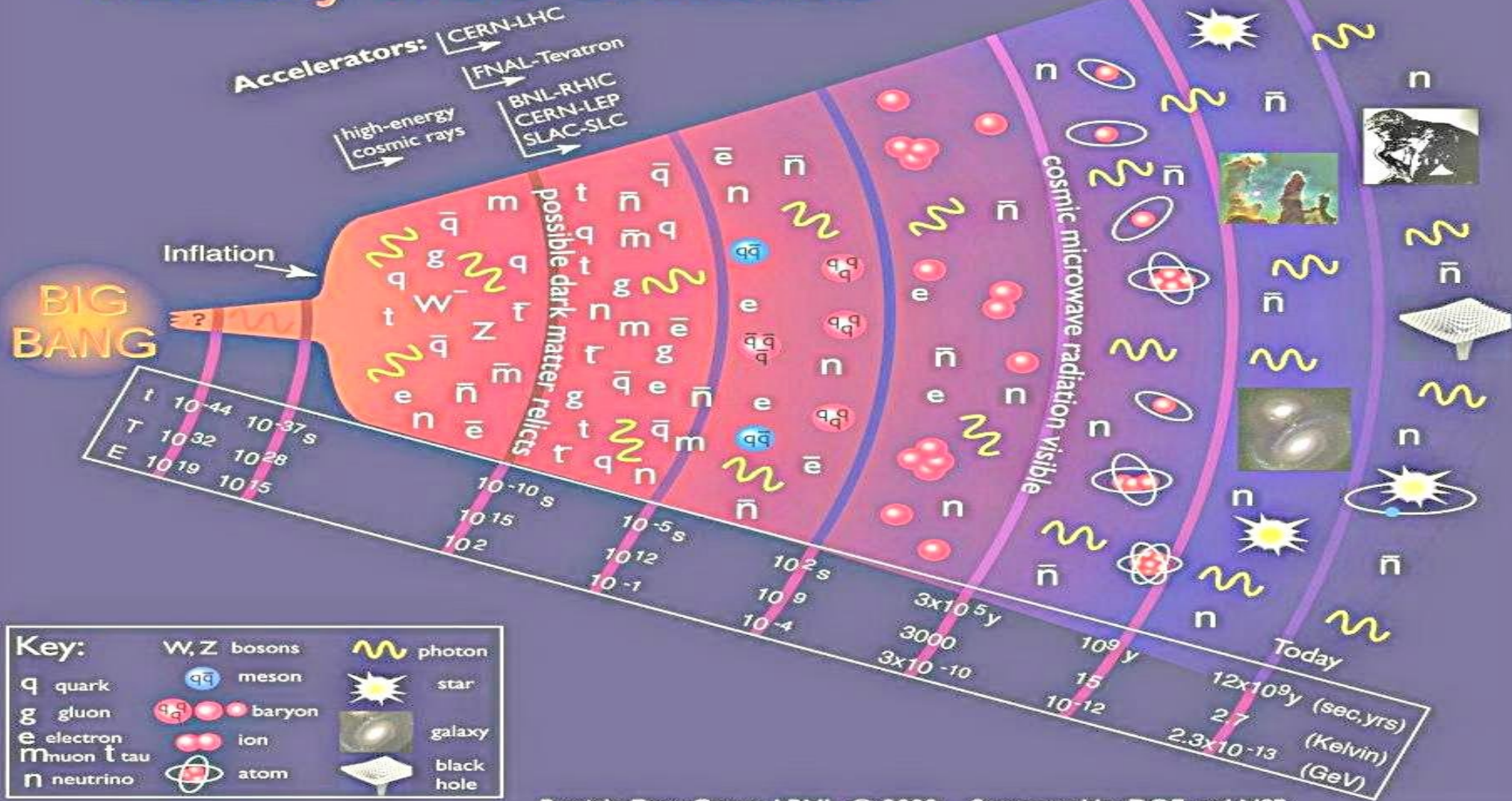


History of the Universe



Übergang erklärt durch
Elementarteilchenphysik

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

Durchsichtig

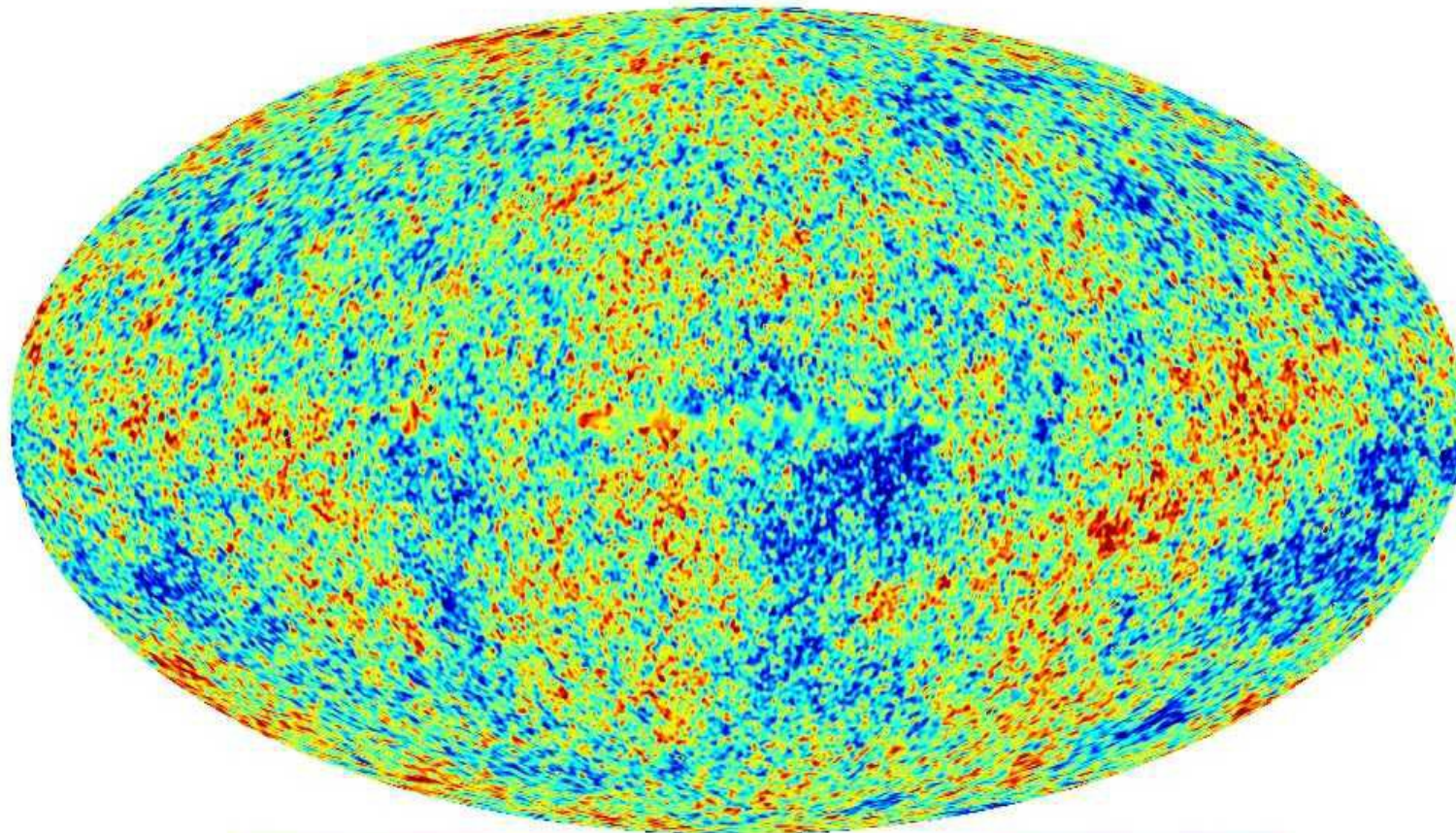
Diesen Übergang
kann man heute
noch sehen!

Übergang erklärt durch
Atomphysik

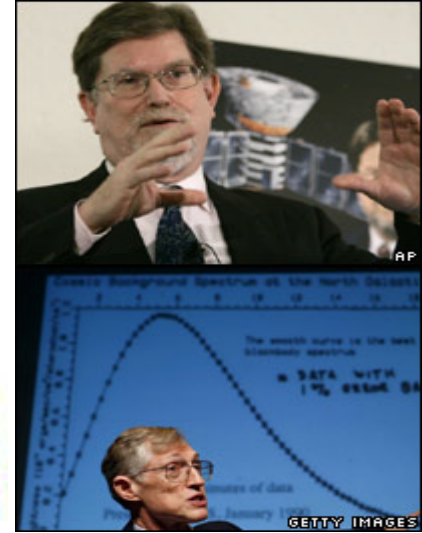


Blick in die Vergangenheit

Vgl. Nobelpreis 2006

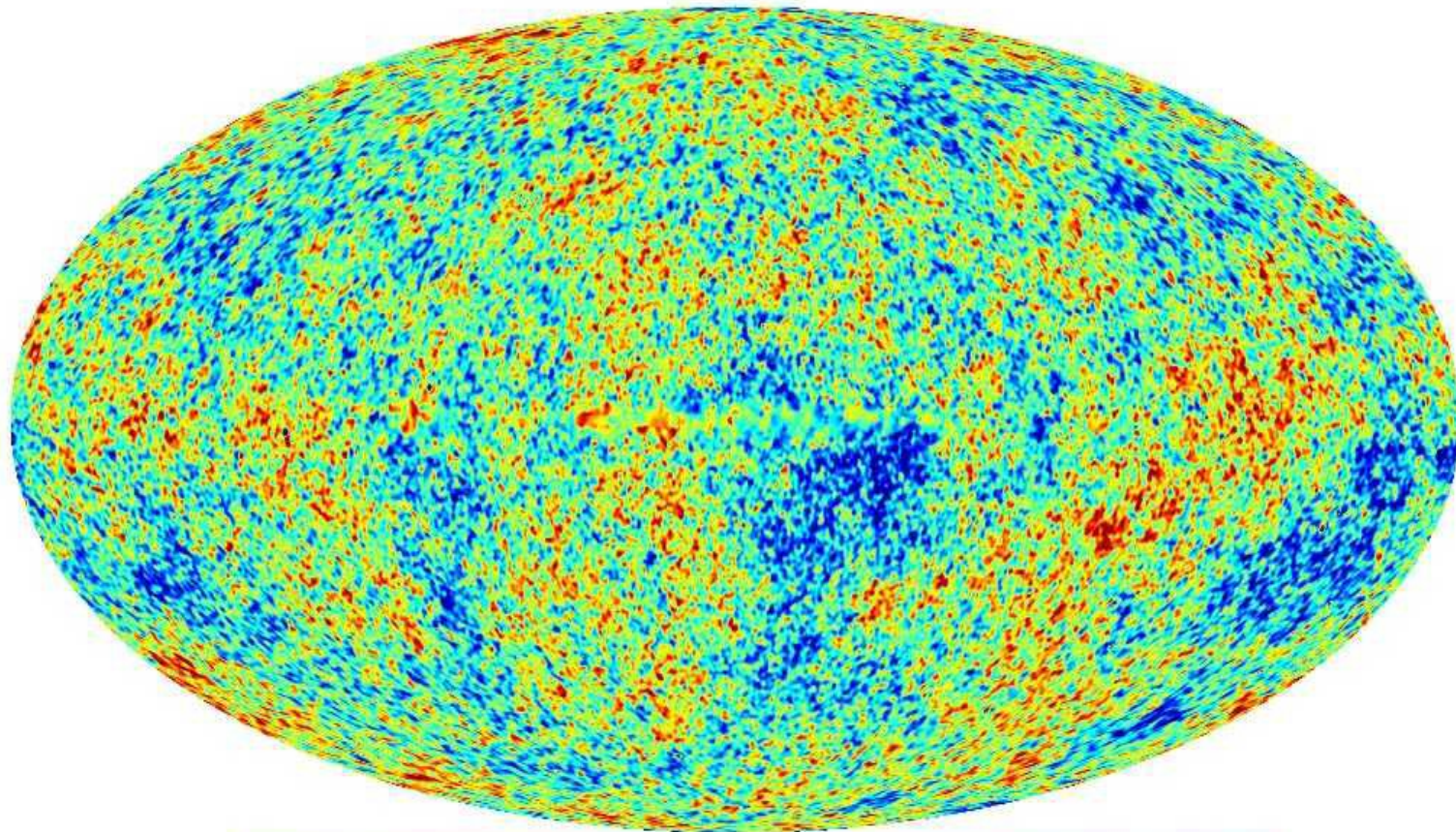


-200μK 200μK



Blick in die
Vergangenheit

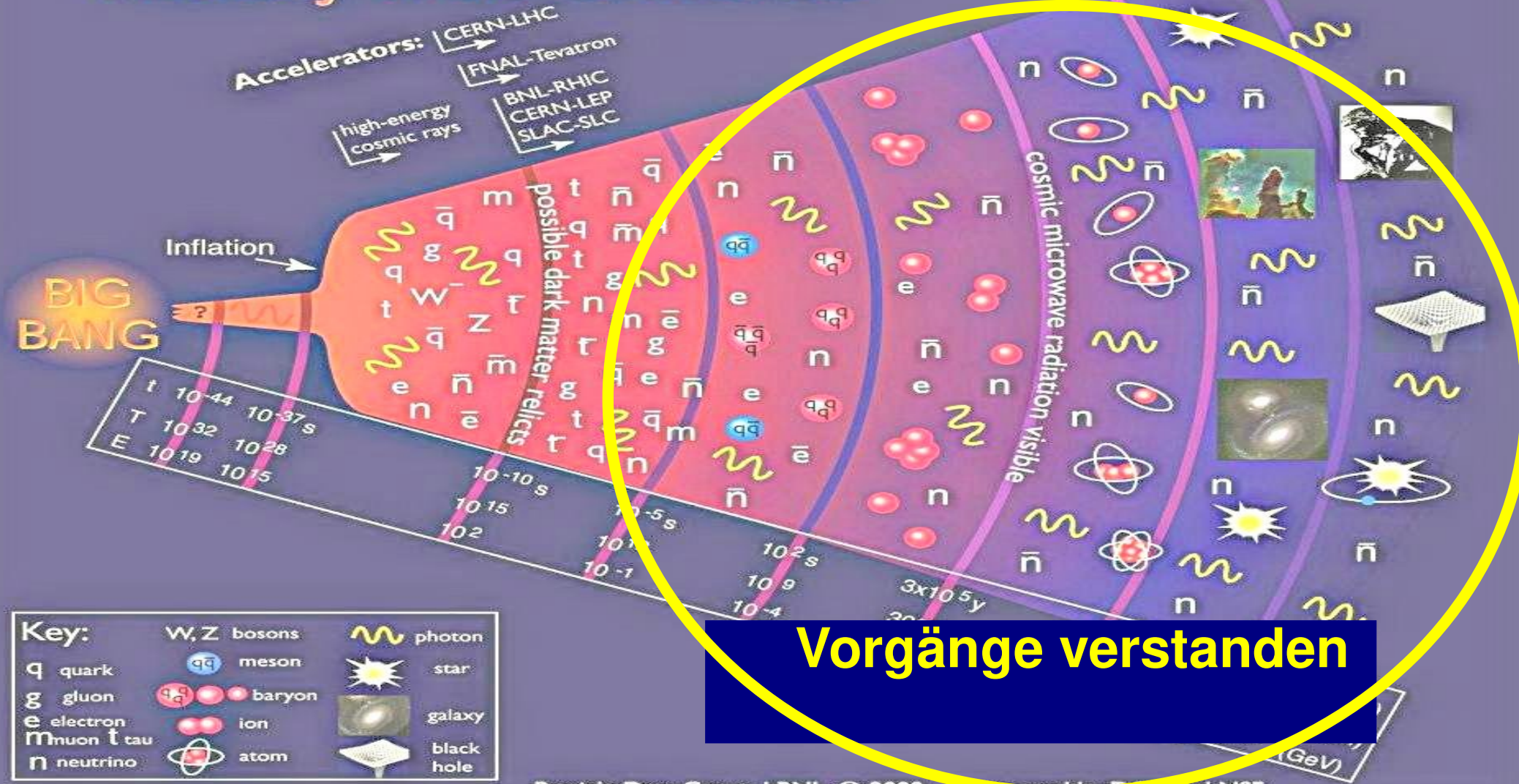
Universum früher: heiss,
glühend, undurchsichtig



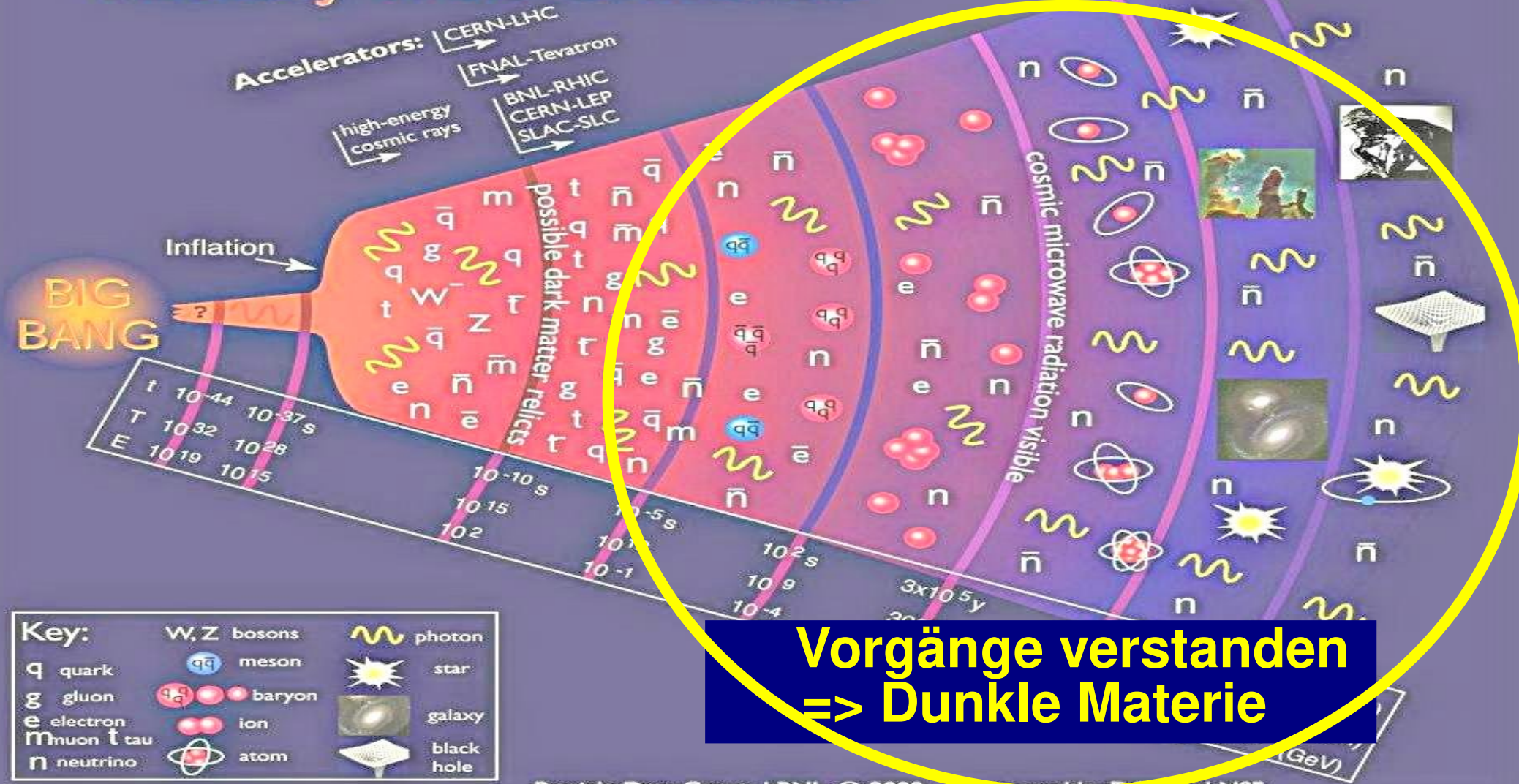
-200 μ K  200 μ K



History of the Universe



History of the Universe



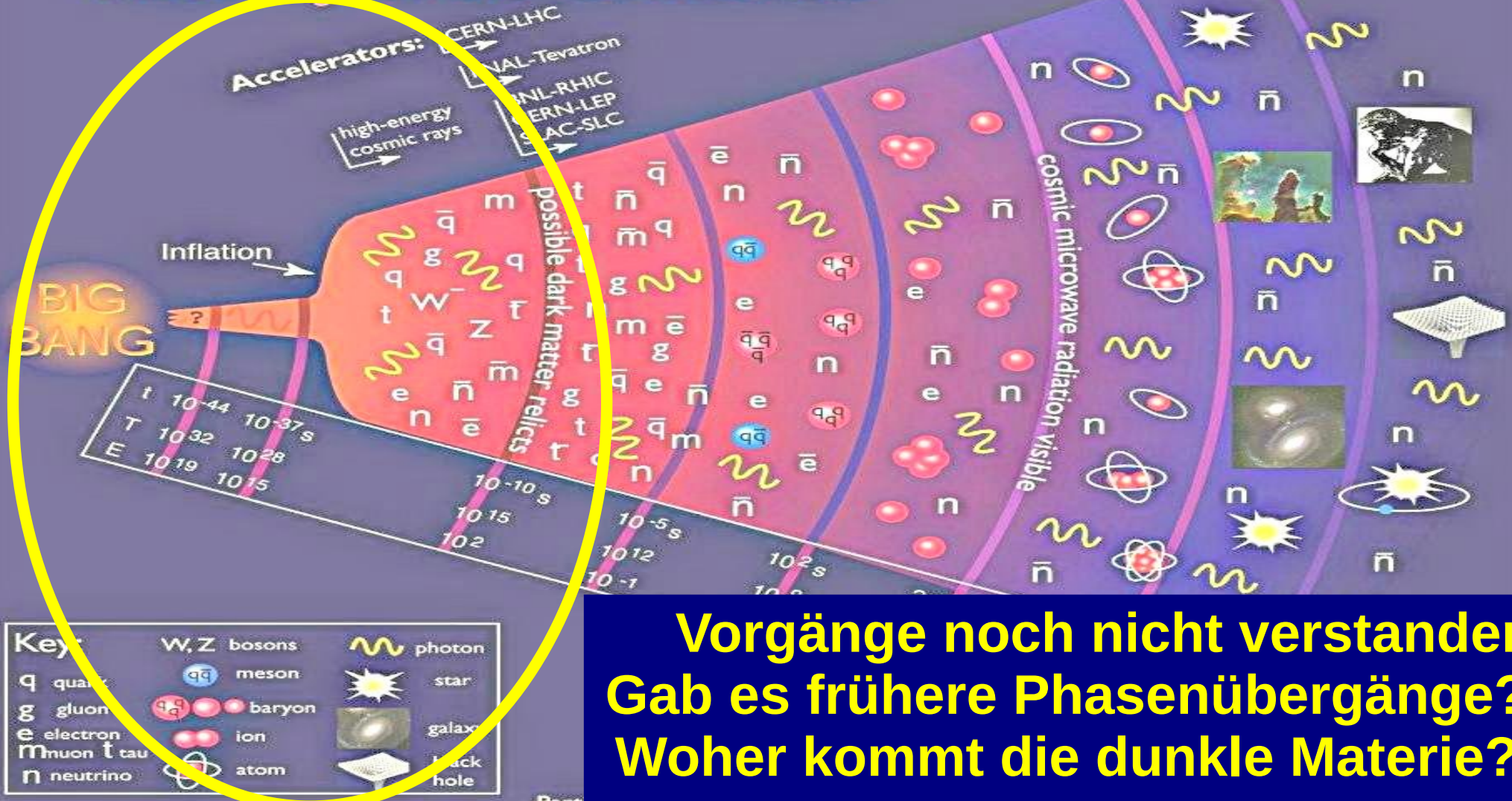
Dunkle Materie durch viele Beobachtungen erwiesen



Sichtbare
Materie

Dunkle
Materie

History of the Universe



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

