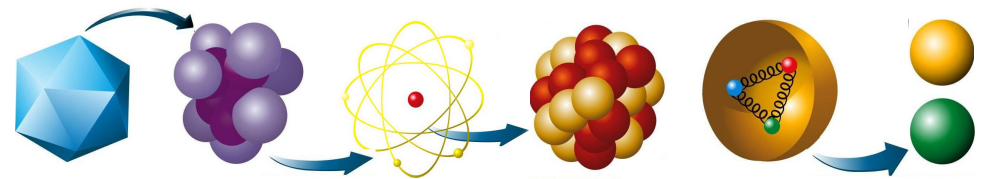
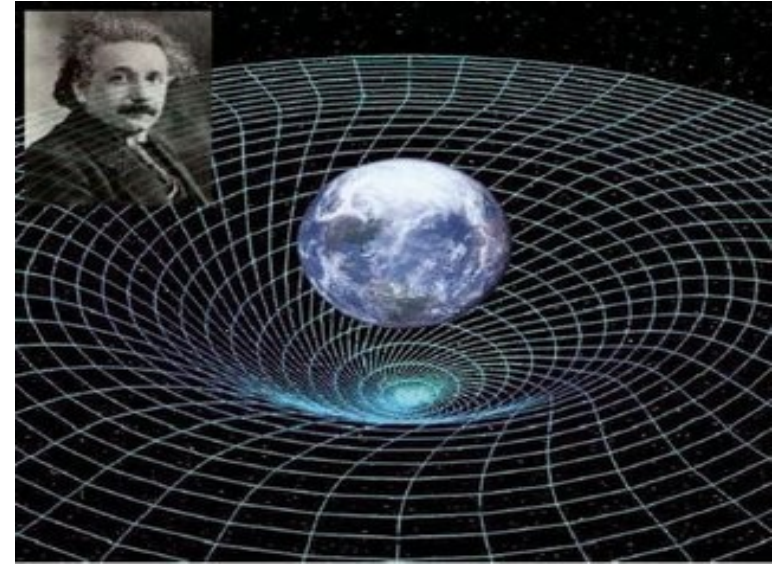
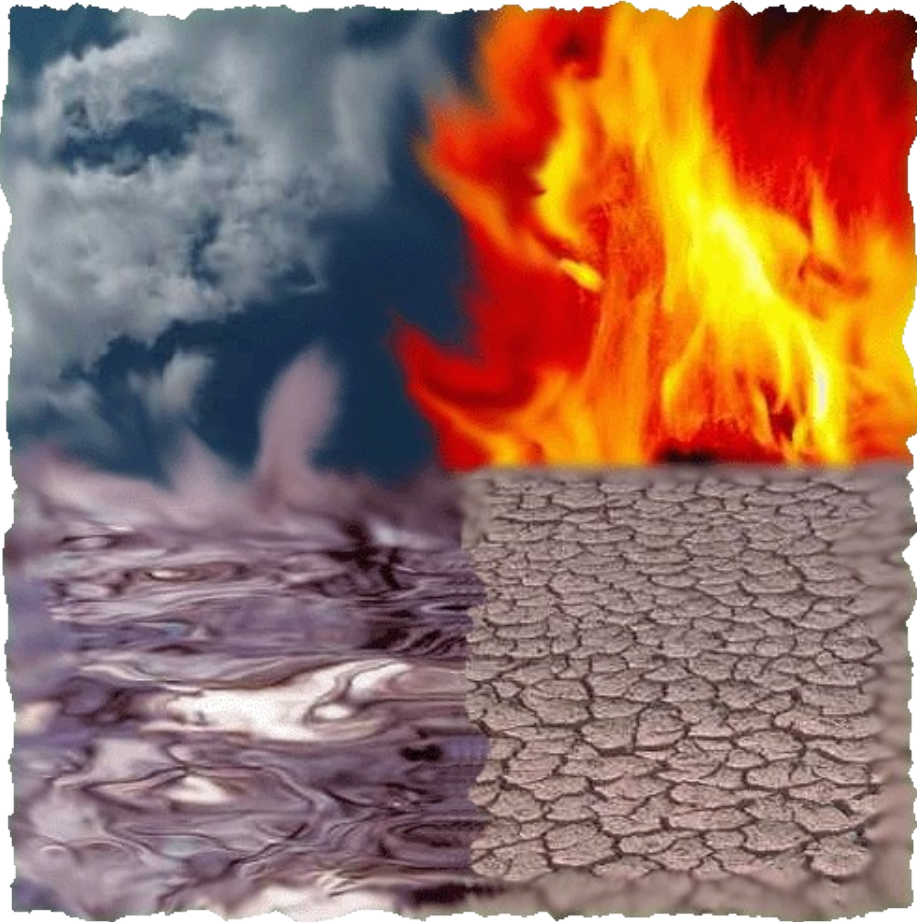


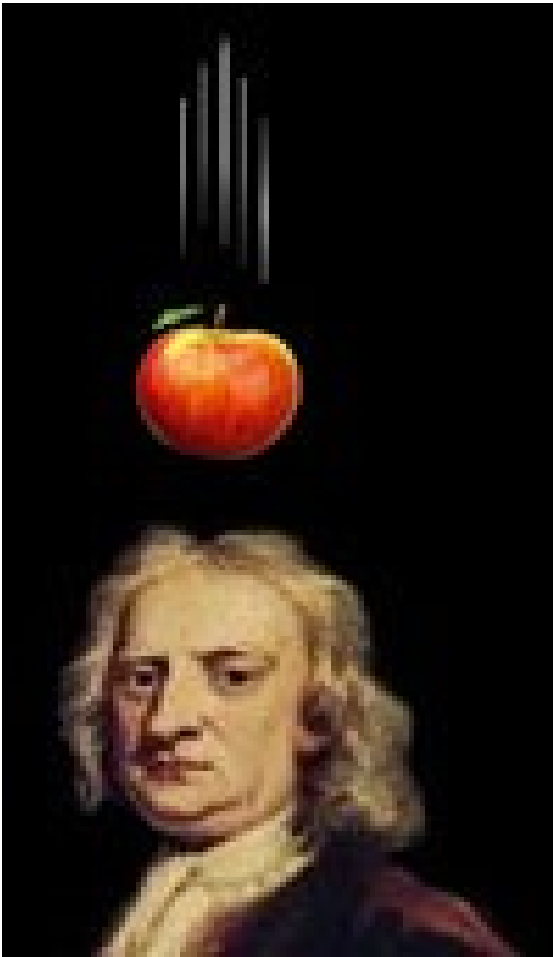
Fundamentale Physik



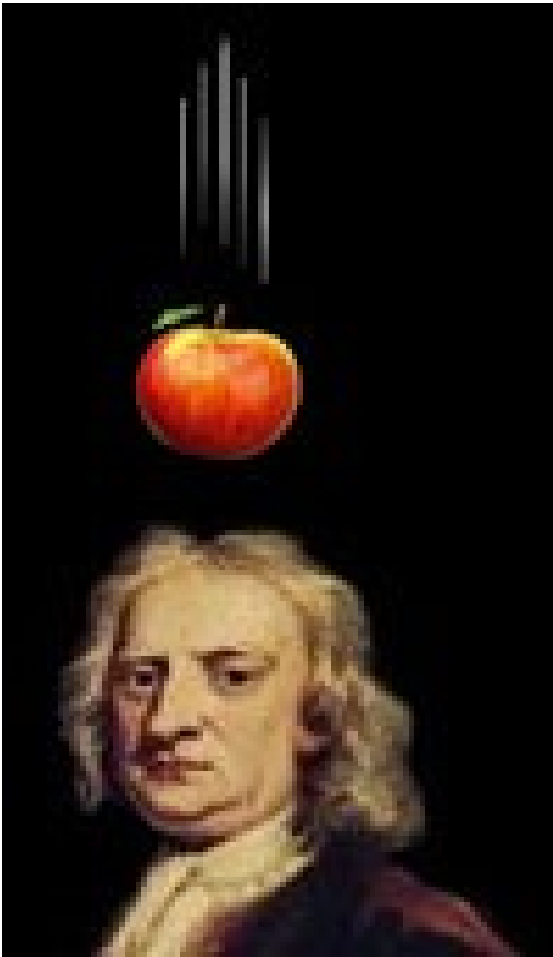
≈

- Grundfrage der Menschheit: woraus besteht, wie funktioniert alles?
- Teilchenphysik, Allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie

Phänomene

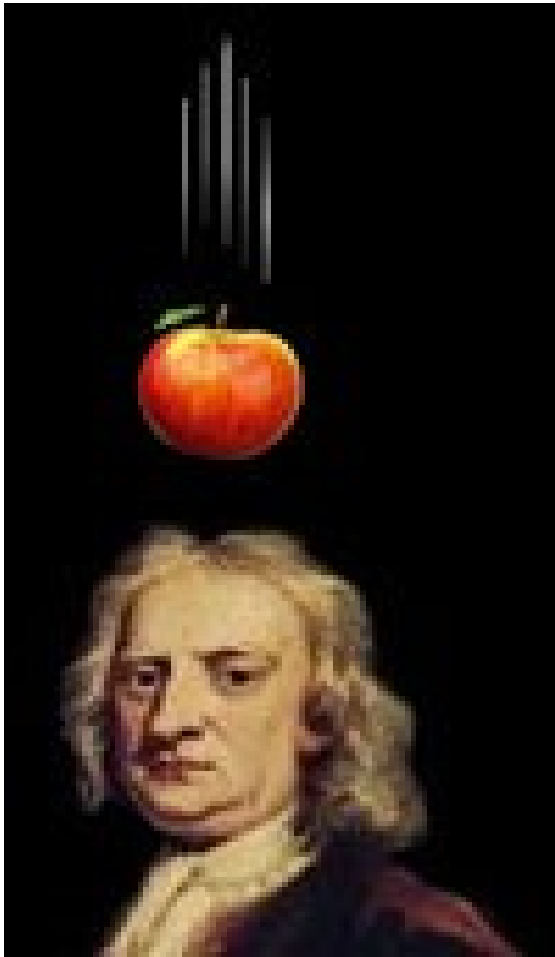


Phänomene



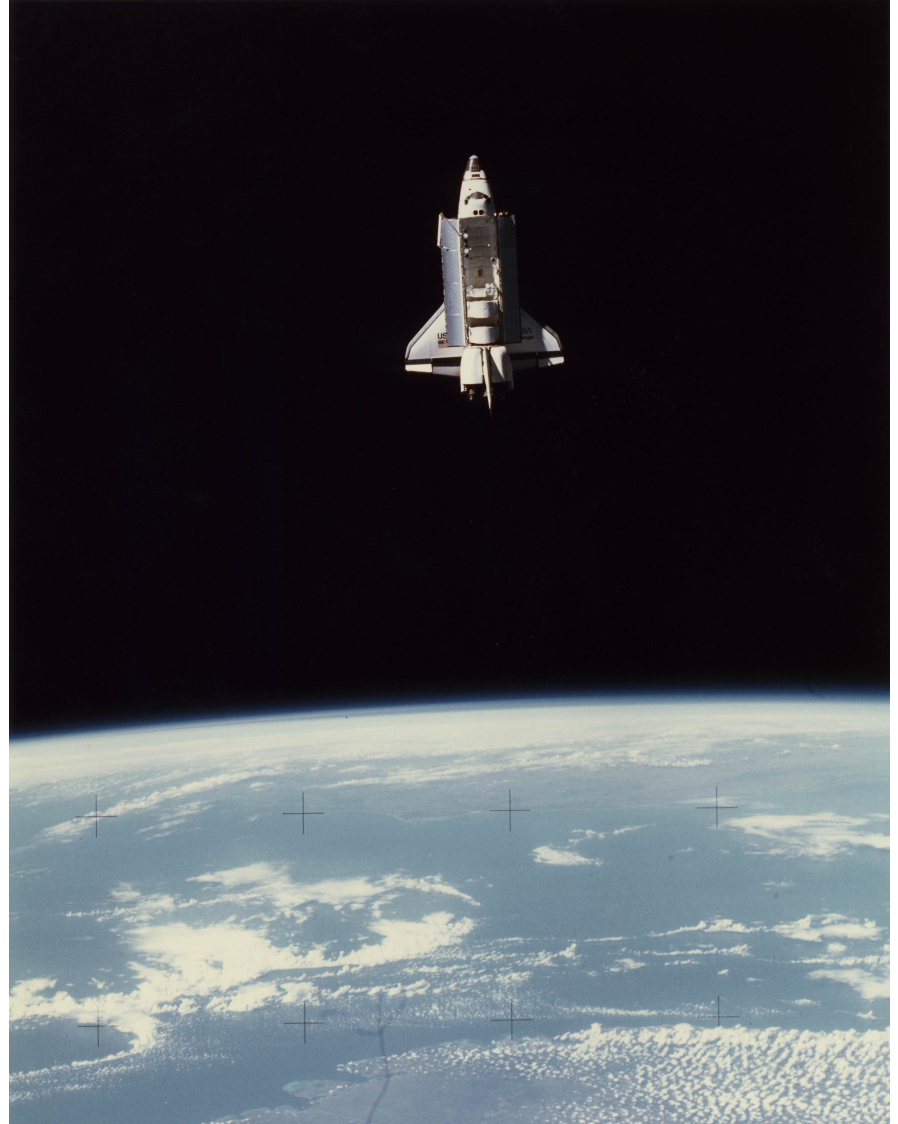
- Schwerkraft
- Radiowellen
- Licht

Phänomene

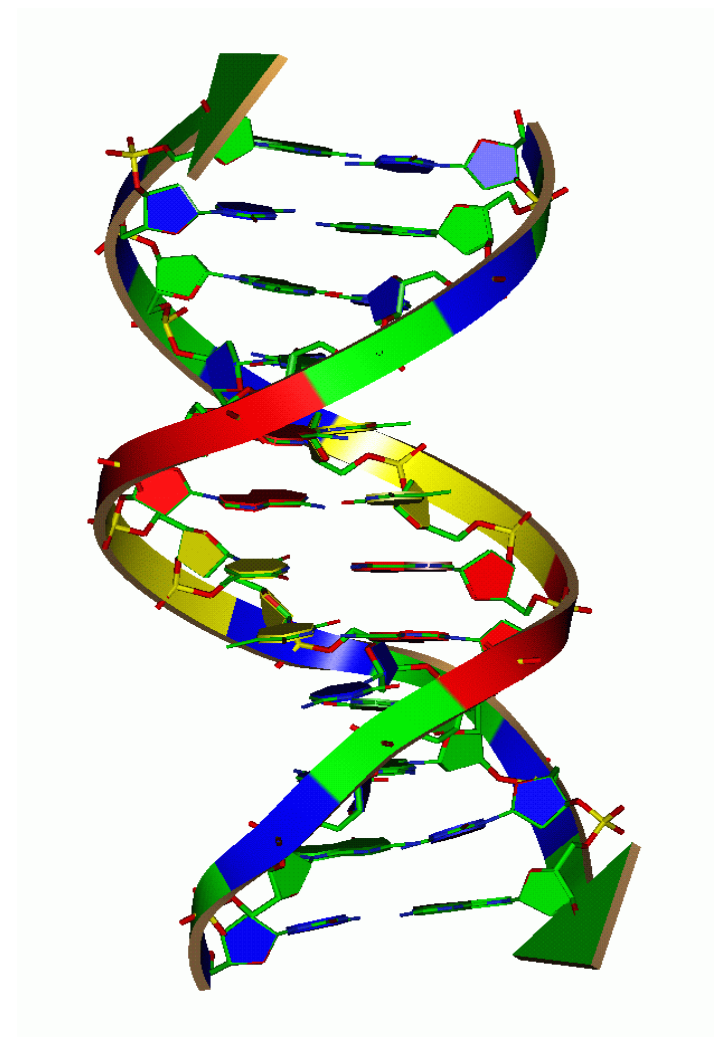


- Festkörper, Flüssigkeiten
- Chemische Verbindungen
- Metalle

Phänomene



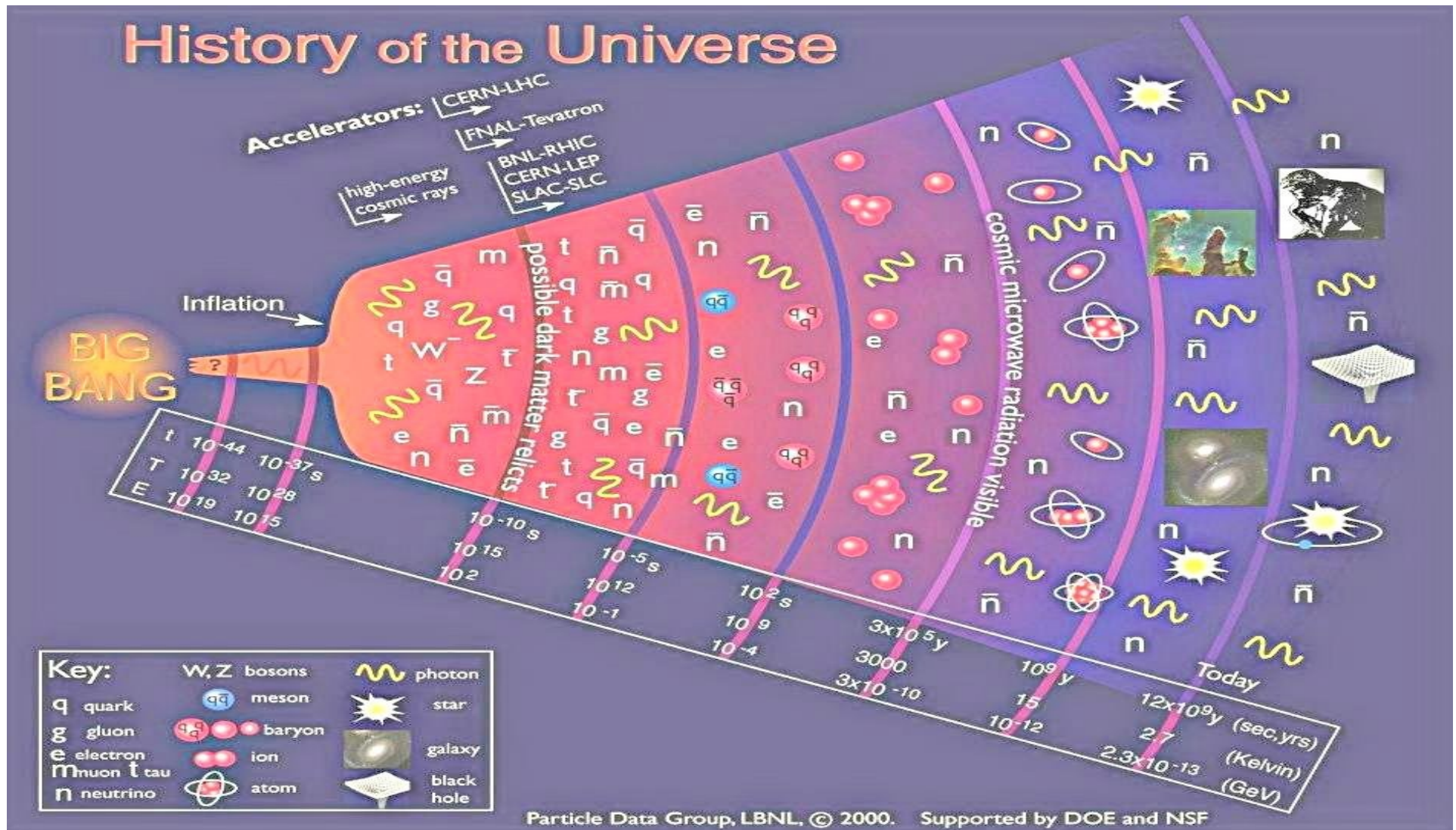
Phänomene



Vergangenheit



Vergangenheit



Fundamentale Physik

- Einzelphänomene => Grundgesetze

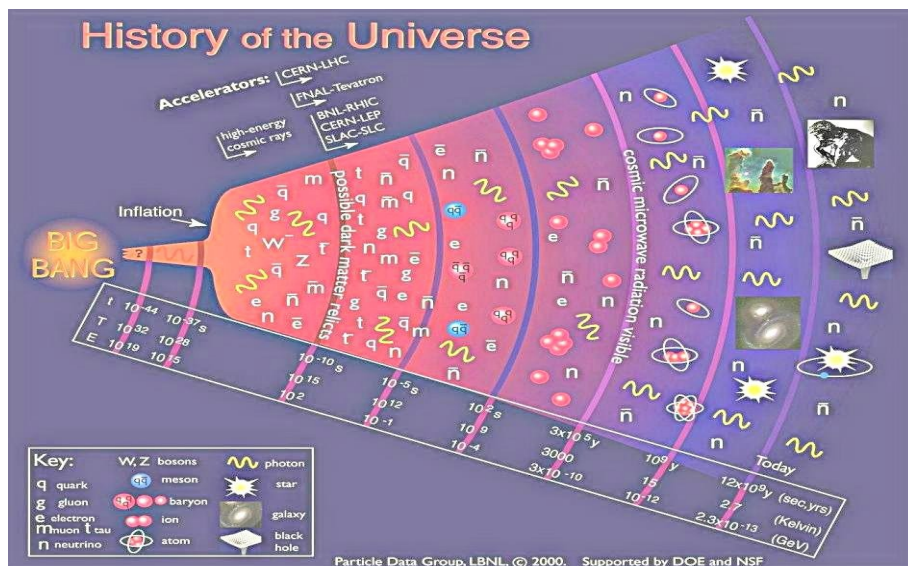
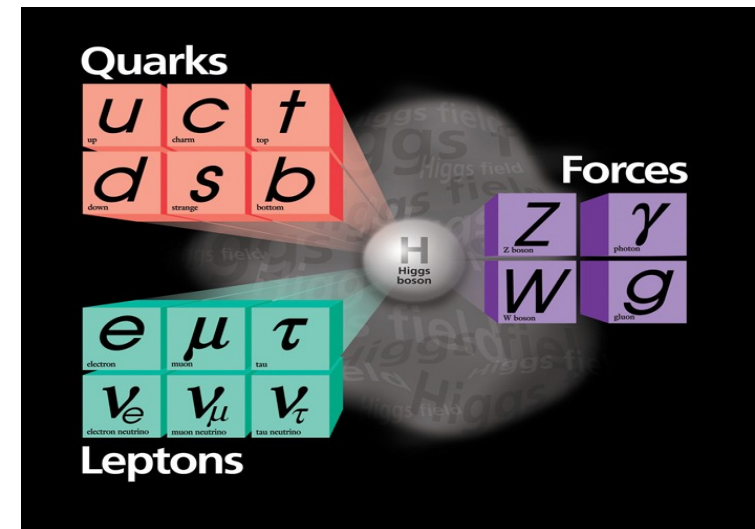
Teilchenphysik + Allgemeine Relativitätstheorie

- Entwicklung des gesamten Universums

Kosmologie

Inhalt

- Erkenntnis: Es gibt kleinste Bausteine
- Heutiger Stand der Elementarteilchenphysik



- Verbindung zur Kosmologie
- Offene Fragen

Diskret oder kontinuierlich?

- Materie körnig wie Sand?
- Oder kontinuierlich wie Wasser?



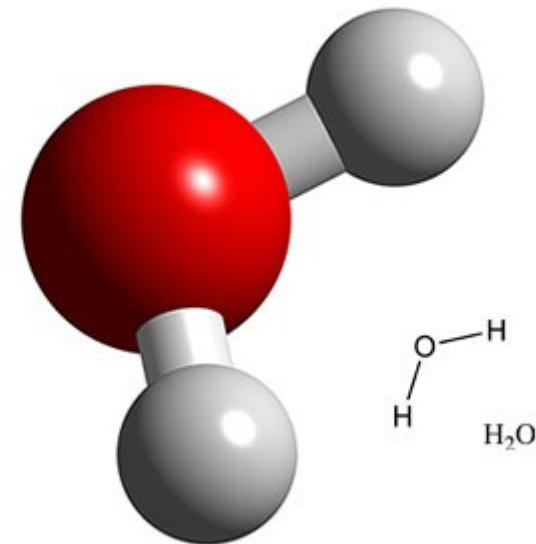
Diskret oder kontinuierlich?

- Materie körnig wie Sand?
- Oder kontinuierlich wie Wasser?



Diskret oder kontinuierlich?

- Materie körnig wie Sand?
- Erkenntnis: Wasser ist gar nicht kontinuierlich!

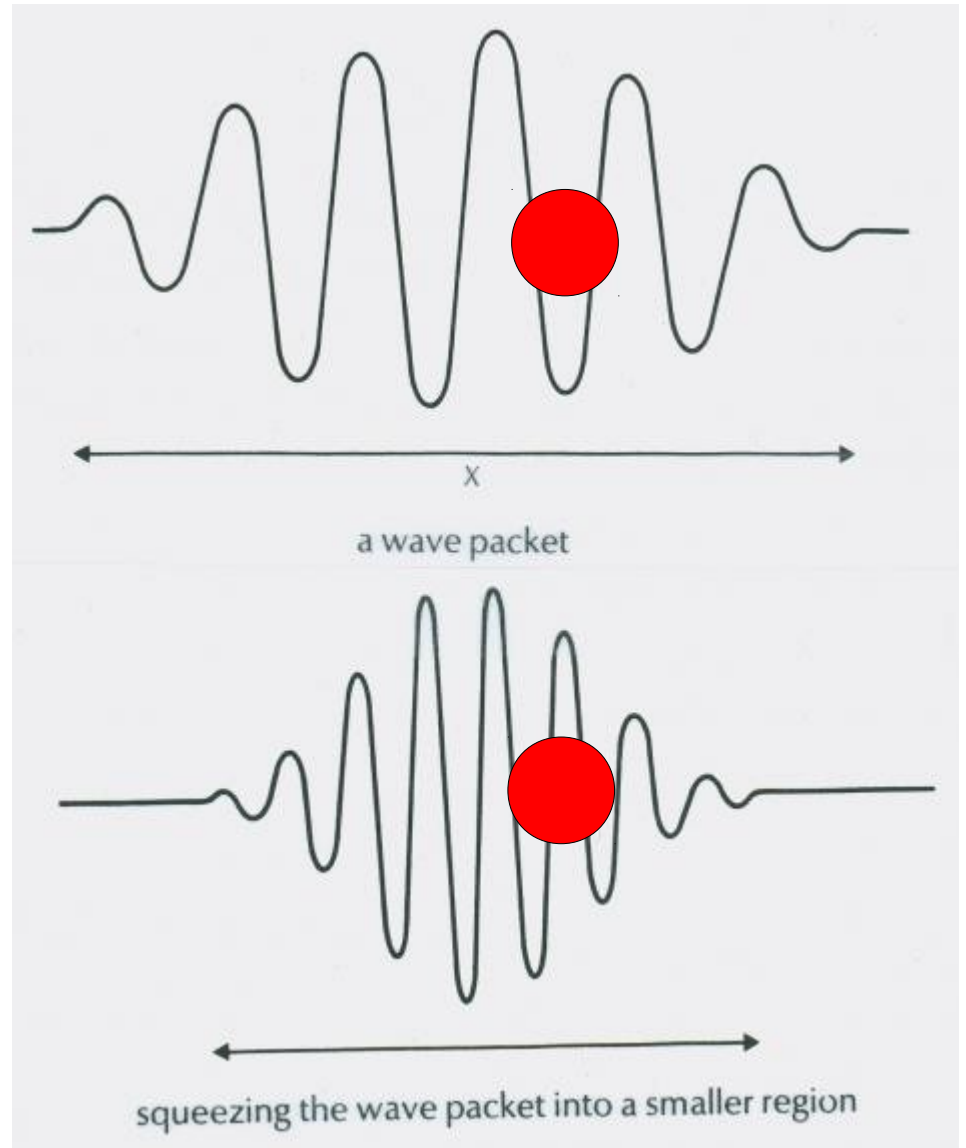


Diskret oder kontinuierlich?

Beobachtung z.B. aus Chemie:
alle Materie ist aus kleinsten Bausteinen
aufgebaut:
Atome und Moleküle!

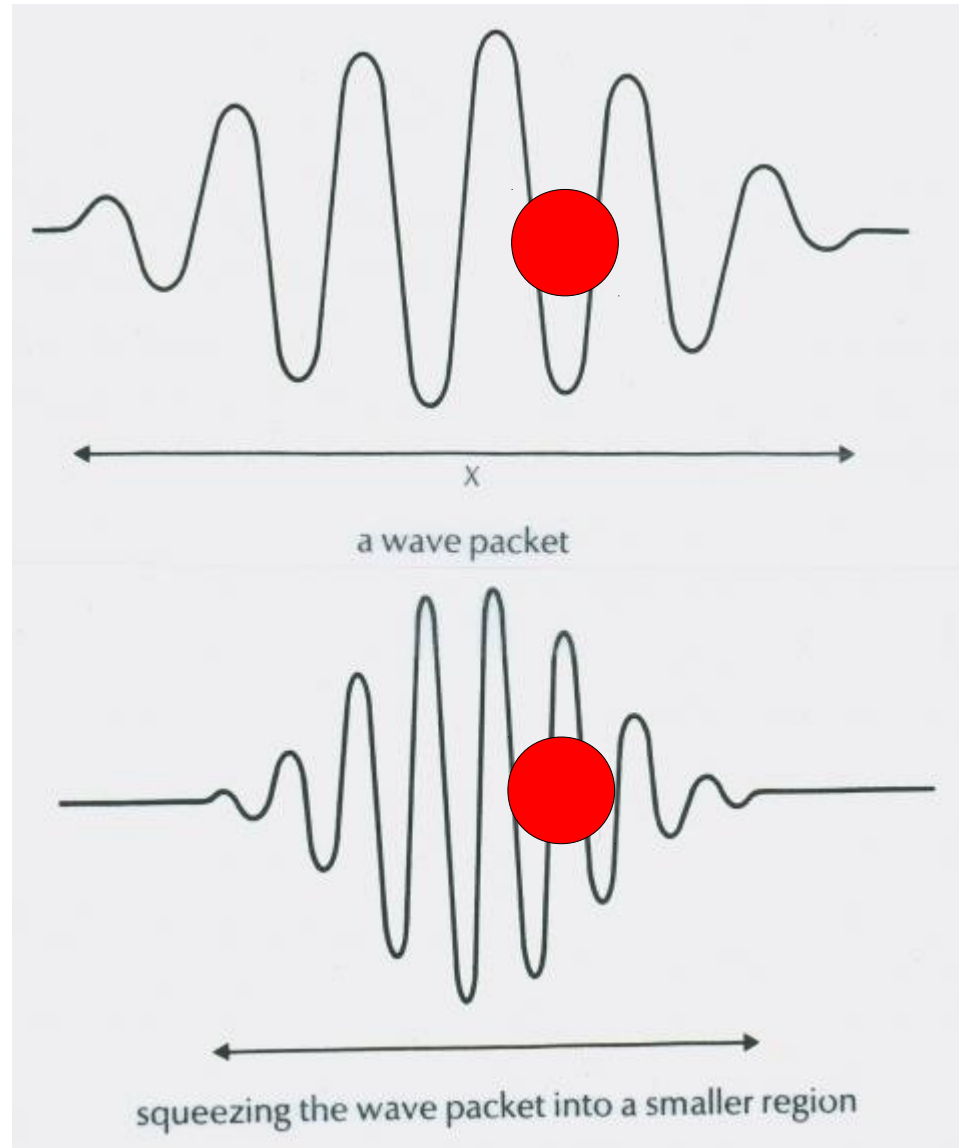
Kleinste Bausteine sichtbar machen

- Warum sehen wir Sandkörner aber keine Atome?



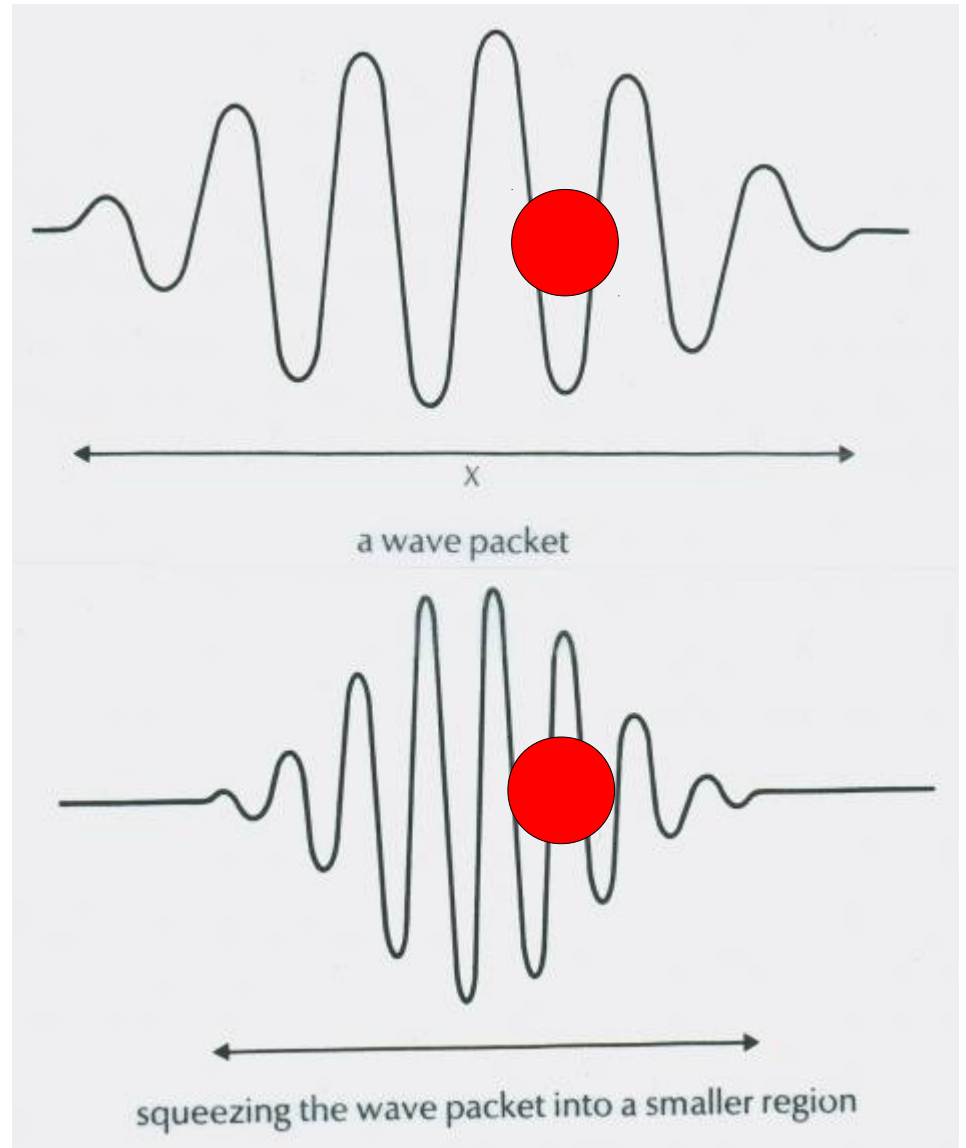
Kleinste Bausteine sichtbar machen

- Warum sehen wir Sandkörner aber keine Atome?
- Problem: das Licht!
Es hat zu große Wellenlänge!



Kleinste Bausteine sichtbar machen

- Warum sehen wir Sandkörner aber keine Atome?
- Problem: das Licht!
Es hat zu große Wellenlänge!
- Wir brauchen kleinere Wellenlängen!

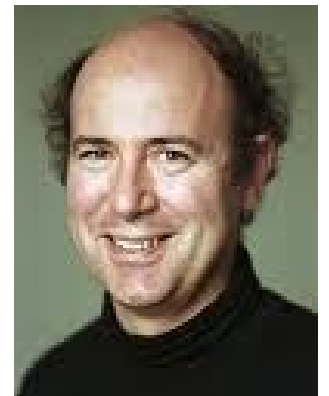


Lichtstrahlen bestehen aus Teilchen

$$E = h \cdot f$$

Lichtstrahlen bestehen aus Teilchen

$$E = h f$$



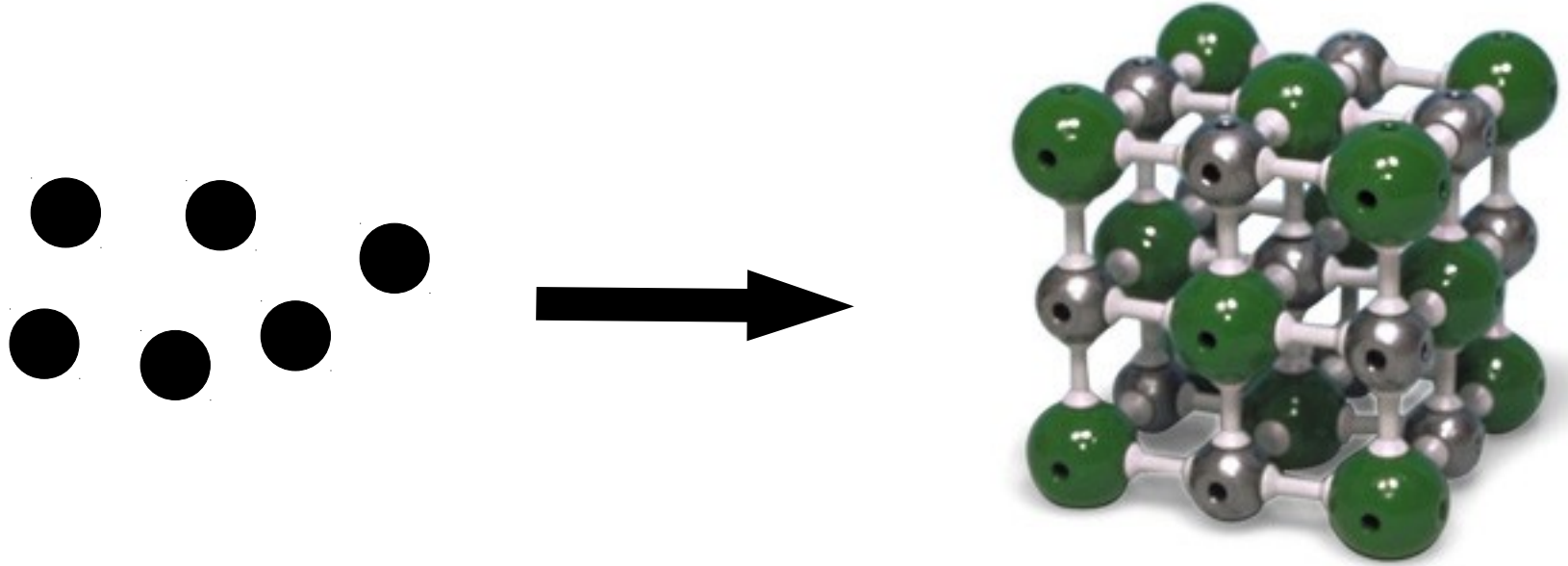
Lichtstrahlen bestehen aus Teilchen

$$E = h \cdot f$$

$$f = E/h$$

Teilchenstrahlen haben Welleneigenschaften

Kleinste Bausteine sichtbar machen



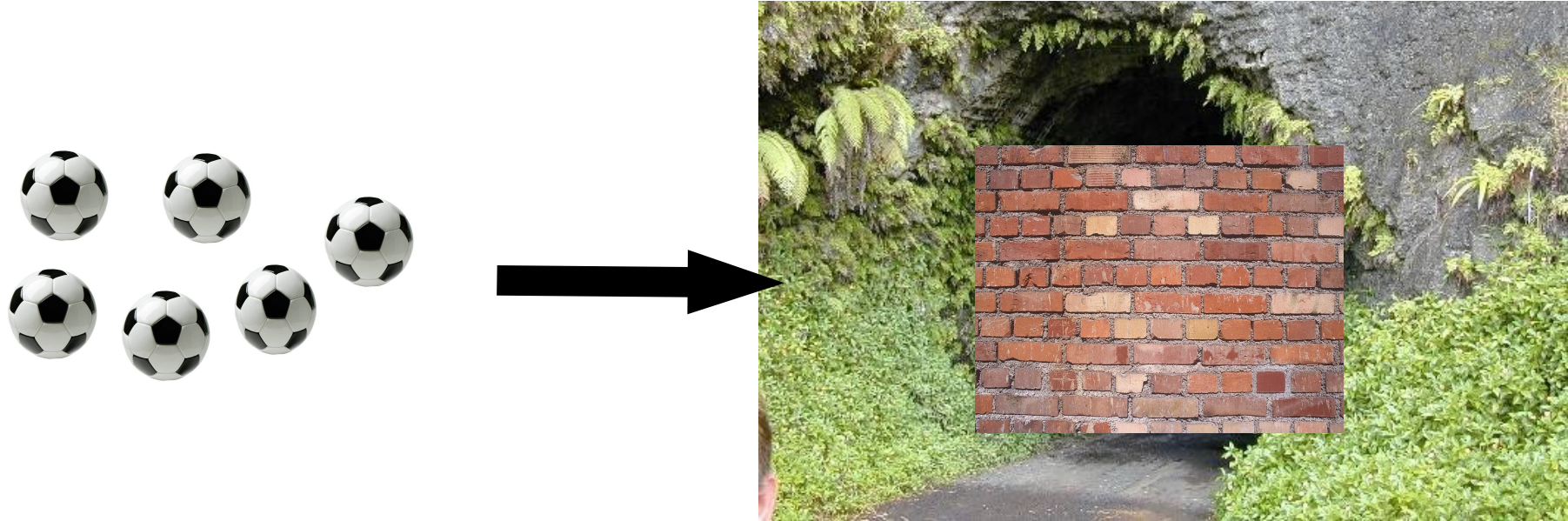
- Nehme Teilchen- statt Lichtstrahlen
- Lassen sich leichter beschleunigen
- Hohe Energie=kleine Wellenlänge=
hohe Auflösung

Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



- Beschieße Tunnel; finde heraus, was drin ist!

Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



- Beschieße Tunnel; finde heraus, was drin ist!
- Mauer – immer Rückprall

Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



- Beschieße Tunnel;
finde heraus, was drin ist!
- Sumpf – steckenbleiben
- Baum – selten Rückprall



Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



Was ist im Tunnel?

- Langsame Bälle kommen alle wieder zurück
- Schnelle Bälle gehen alle durch und sind danach genauso schnell wie vorher

A) Baum

B) Sumpf

C) Hügel

Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



Was ist im Tunnel?

- 50% aller Bälle kommen ungebremst zurück
- Die anderen 50% werden langsamer oder bleiben stecken
- Bälle ändern nie die Richtung

A) Viele Bäume

B) Mauer und Sumpf

C) Hügel

Übung: Lernen aus Teilchenstrahlen



Was ist im Tunnel?

- 99% gehen ungebremst durch
- 1% wird stark abgelenkt oder sogar zurückgeworfen (aber nie ungebremst)

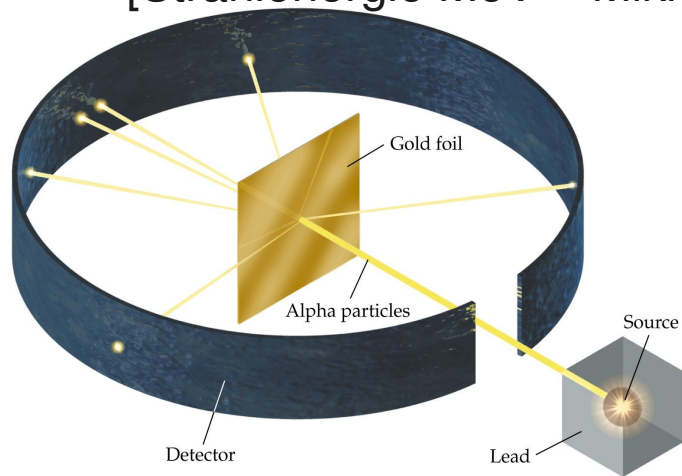
A) Betonboden,
Medizinball

B) Betonboden,
Torpfofen

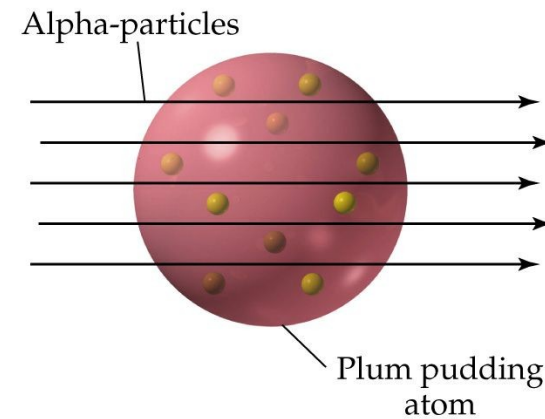
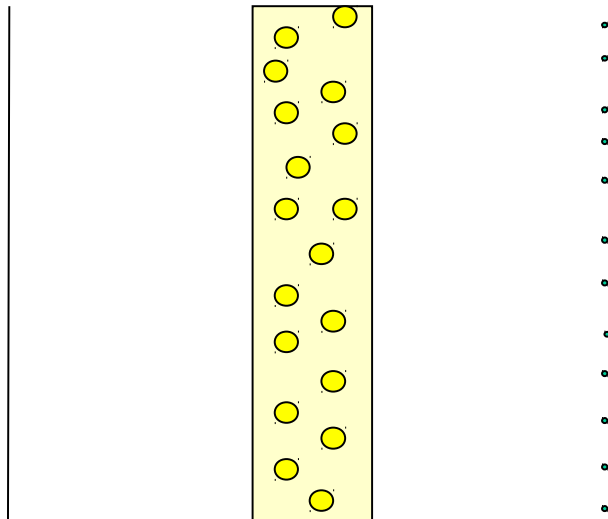
C) Sumpf, Baum

Rutherford – eines der wichtigsten Experimente

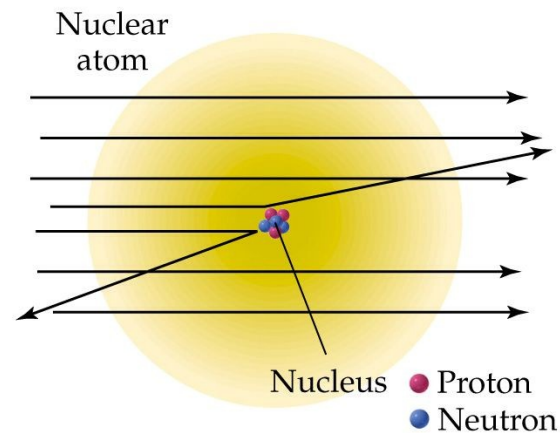
[Strahlenergie MeV = Mikroskop mit 10^{-12} m Auflösung]



Goldatome in einer Folie



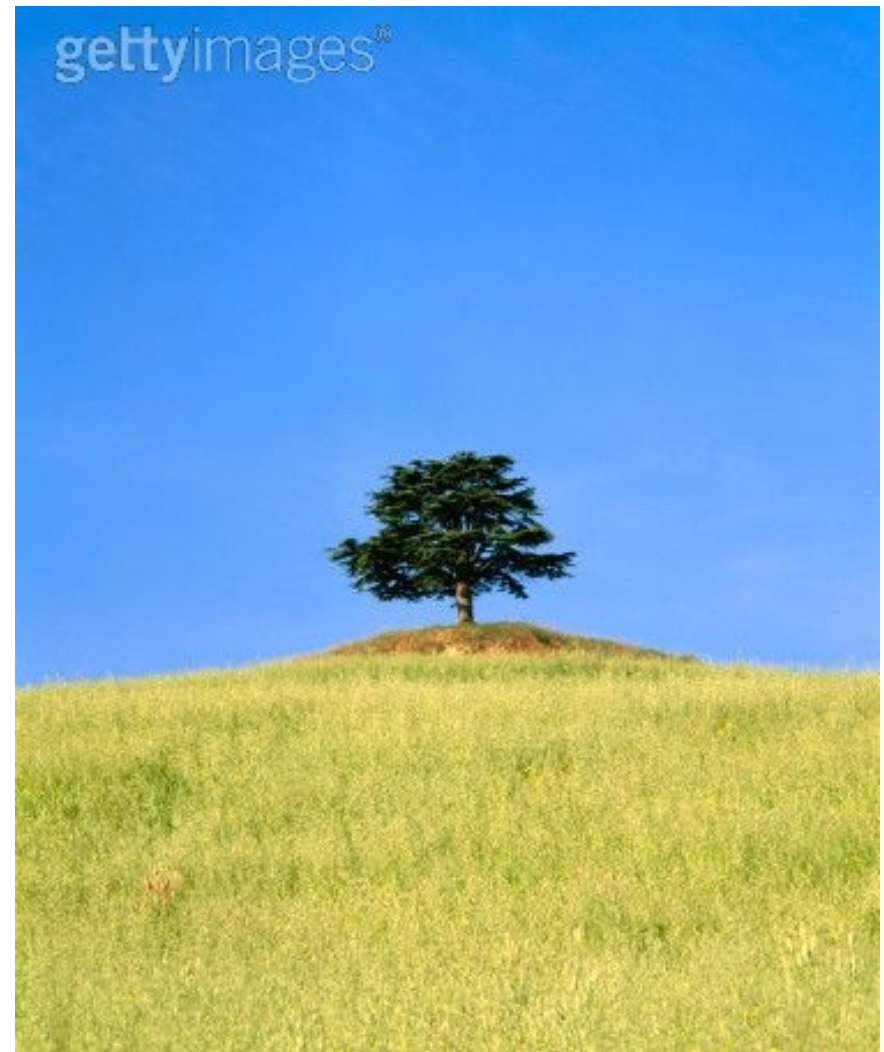
a) Rutherfords Erwartung



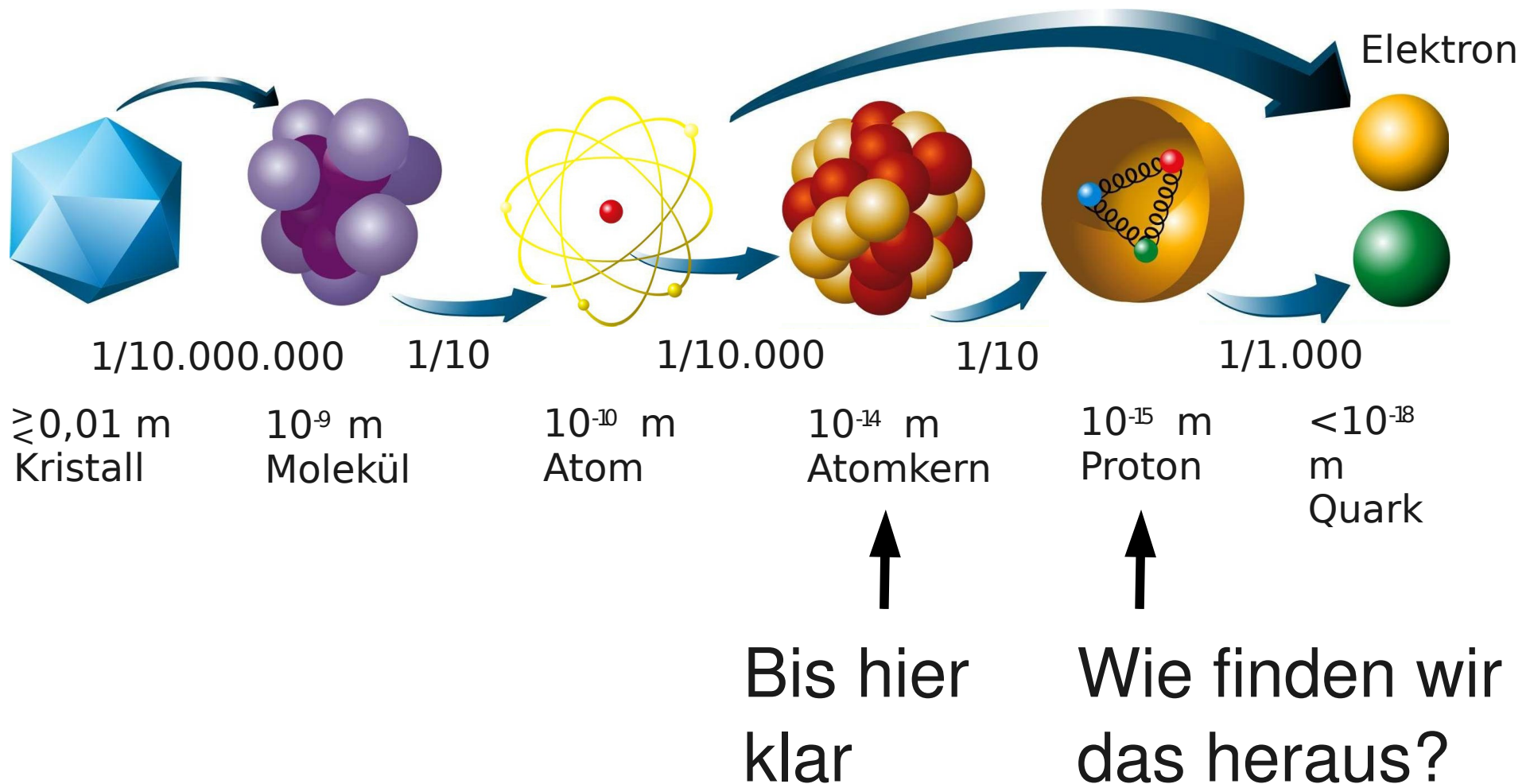
b) Rutherfords Ergebnis

Wie verhält sich also ein Atom?

- A) Hügel mit Baum
- B) Sumpf
- C) Hügel

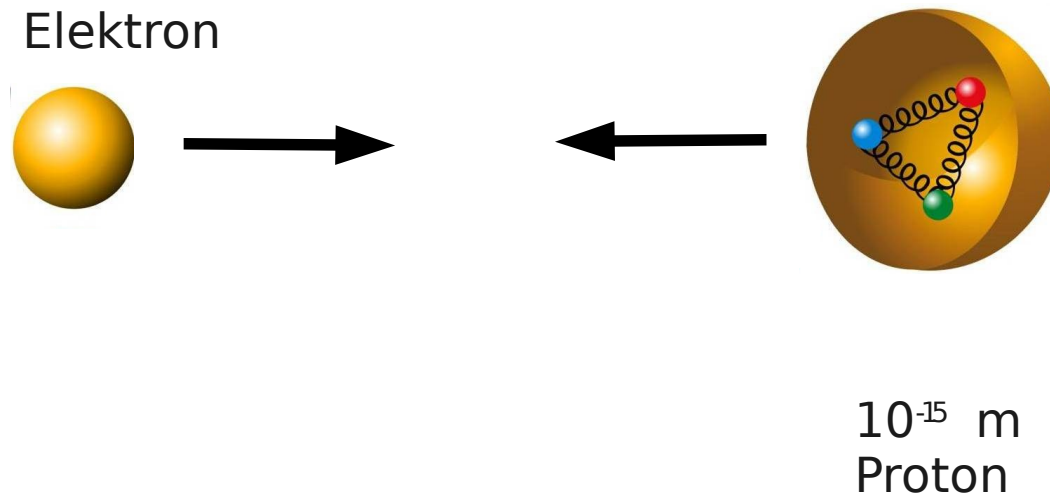


Struktur der Materie



Struktur des Protons

- Analoges Experiment am DESY/Hamburg



Kollision bei hoher Energie, entsprechende Wellenlänge $\ll 10^{-15}$ m

Struktur des Protons

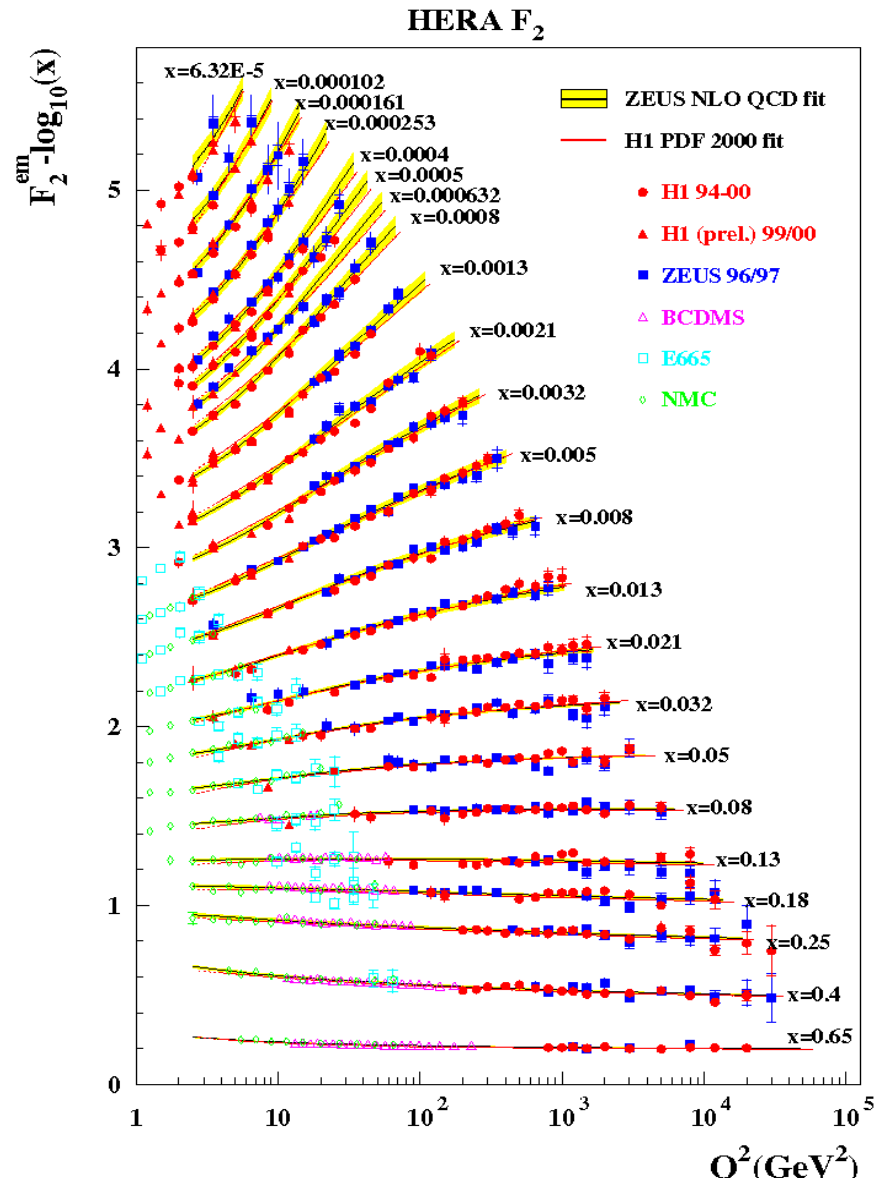
- Analoges Experiment am DESY/Hamburg
[Strahlenergie GeV = Mikroskop mit 10^{-15} m Auflösung]



Struktur des Protons

Ergebnis:

- Proton besteht aus kleineren Bestandteilen
- Je nach Energie ist es unterschiedlich wahrscheinlich, diese Bestandteile zu treffen



Weitere Hochenergieexperimente

[Strahlenergie 100-1000GeV = Mikroskop mit 10^{-18} m Auflösung]

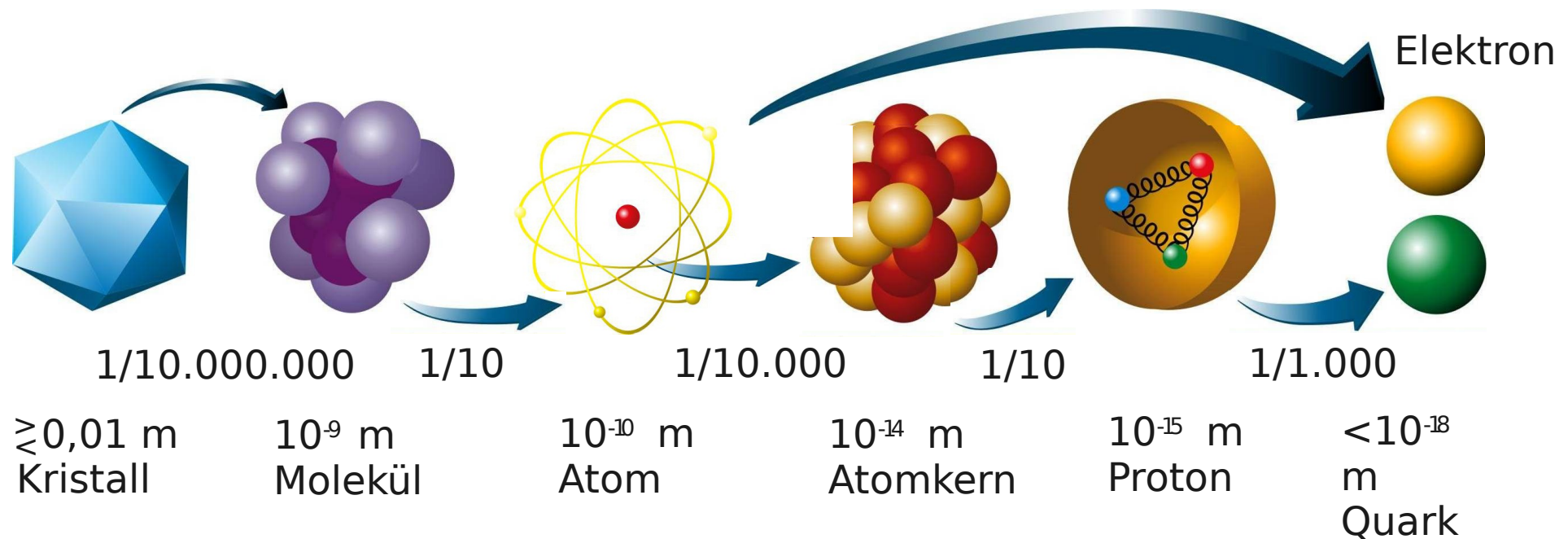


LEP (CERN)

Tevatron (Fermilab/USA)



Struktur der Materie



Daraus: Heutiges Wissen:

- Materie aus unteilbaren Elementarteilchen aufgebaut
- Quarks und Elektronen

Teilchenkollisionen: Zwei Aspekte

$$1) E = h f, \quad f = E/h$$

$$2) E = mc^2, \quad m = E/c^2$$

Teilchenkollisionen: Zwei Aspekte

$$1) E = h f, \quad f = E/h$$

Hohe Energie => Mikroskop mit hoher Auflösung

Wir kennen die fundamentalen Bausteine aller Materie

$$2) E = mc^2, \quad m = E/c^2$$

Teilchenkollisionen: Zwei Aspekte

$$1) E = h f, \quad f = E/h$$

Hohe Energie => Mikroskop mit hoher Auflösung

Wir kennen die fundamentalen Bausteine aller Materie

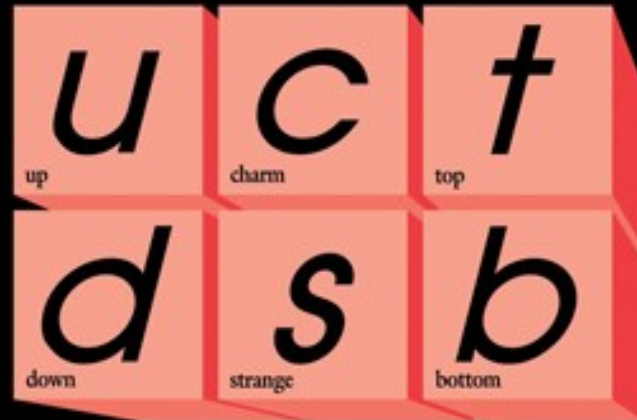
$$2) E = mc^2, \quad m = E/c^2$$

Hohe Energie => Erzeugung neuer Teilchen

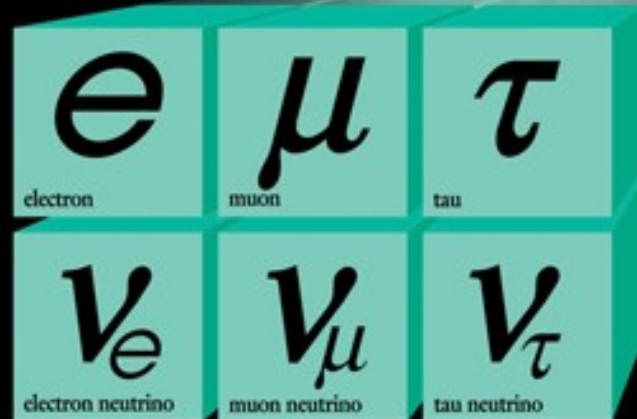
Wir kennen viele weitere Elementarteilchen; diese passen in ein sehr einfaches Schema

Heutiger Stand

Quarks



Forces

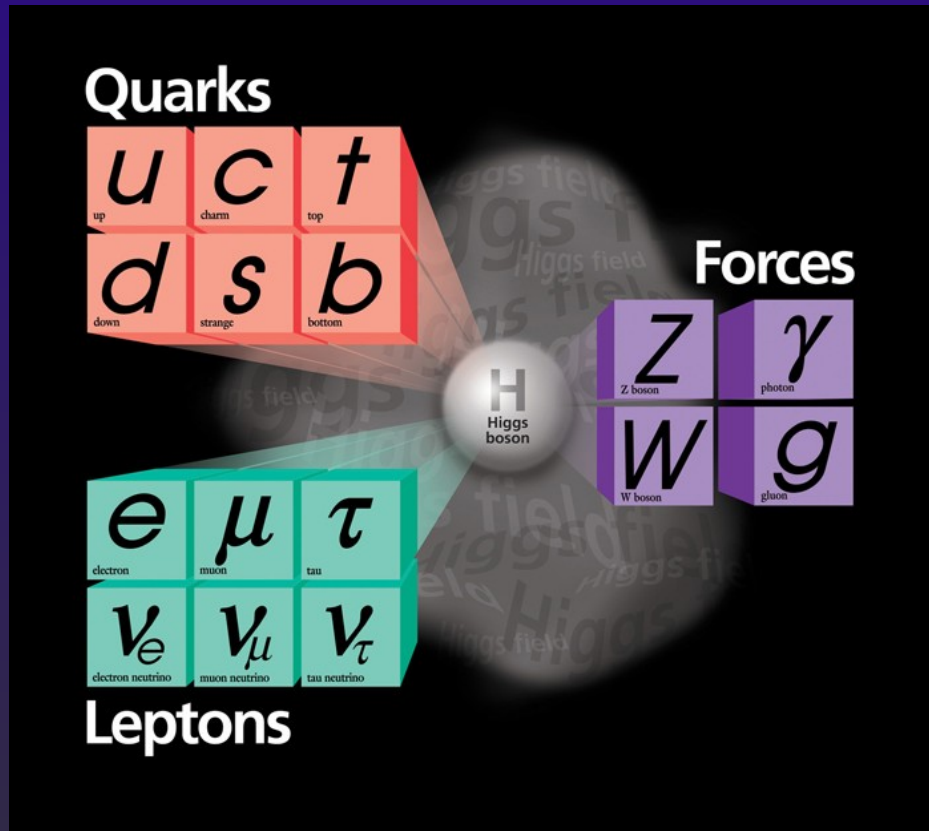


Leptons



Standardmodell

“Standardmodell”

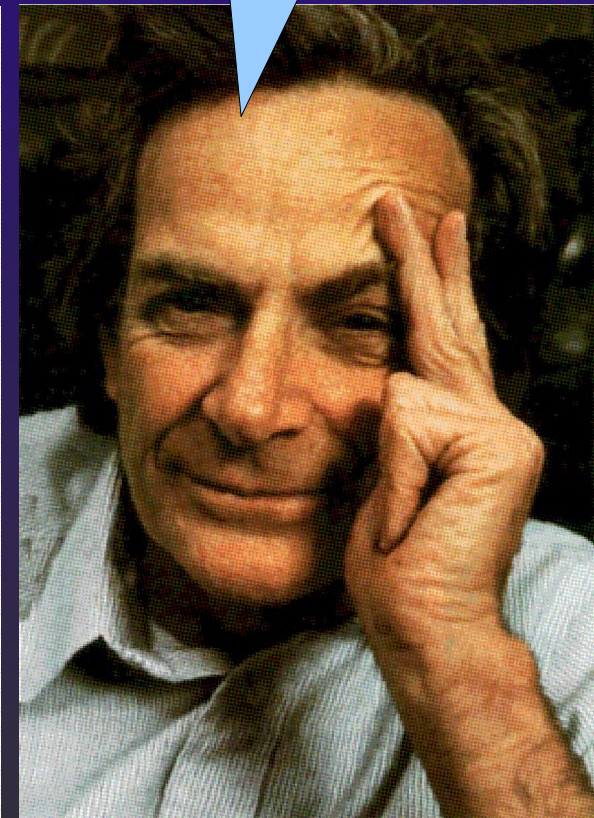
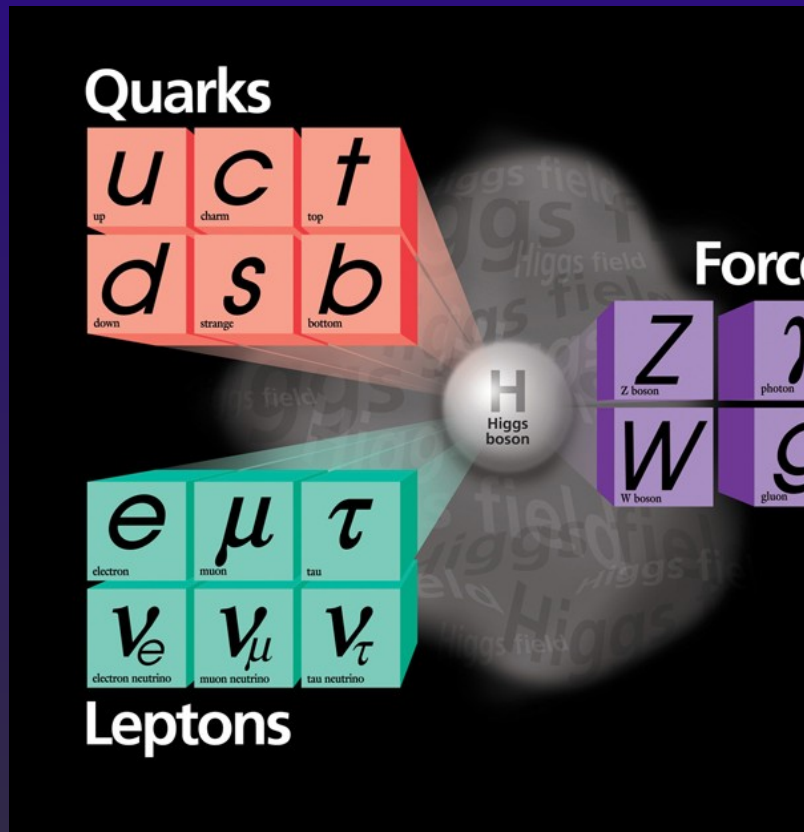
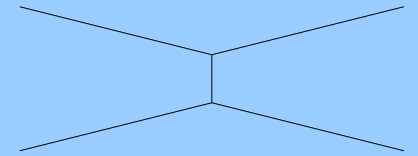


- ★ Eine der erfolgreichsten physikalischen Theorien
- ★ Beschreibt alle Teilchen und Kräfte
- ★ Mit höchster Genauigkeit

Standardmodell

“Standardmodell”

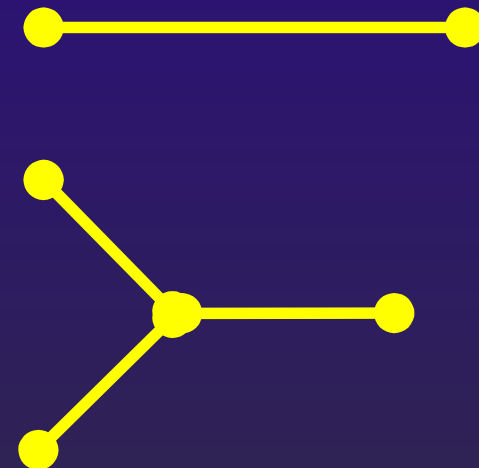
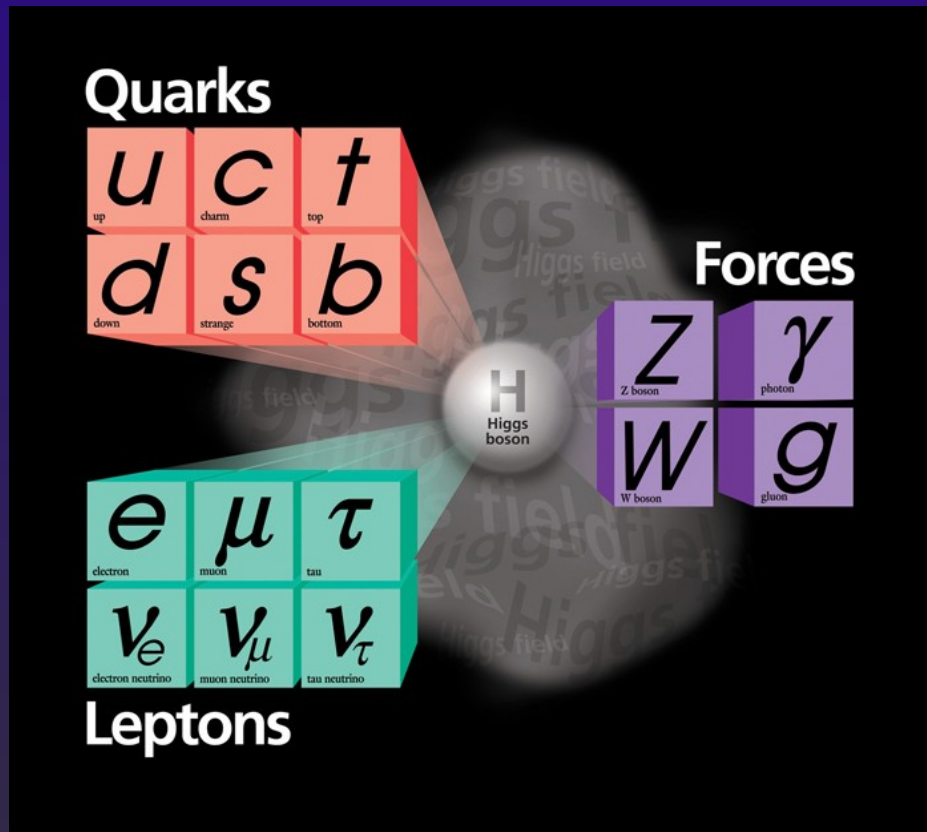
$$E = mc^2$$



Physikalische Aussagen

Elementare Teilchen

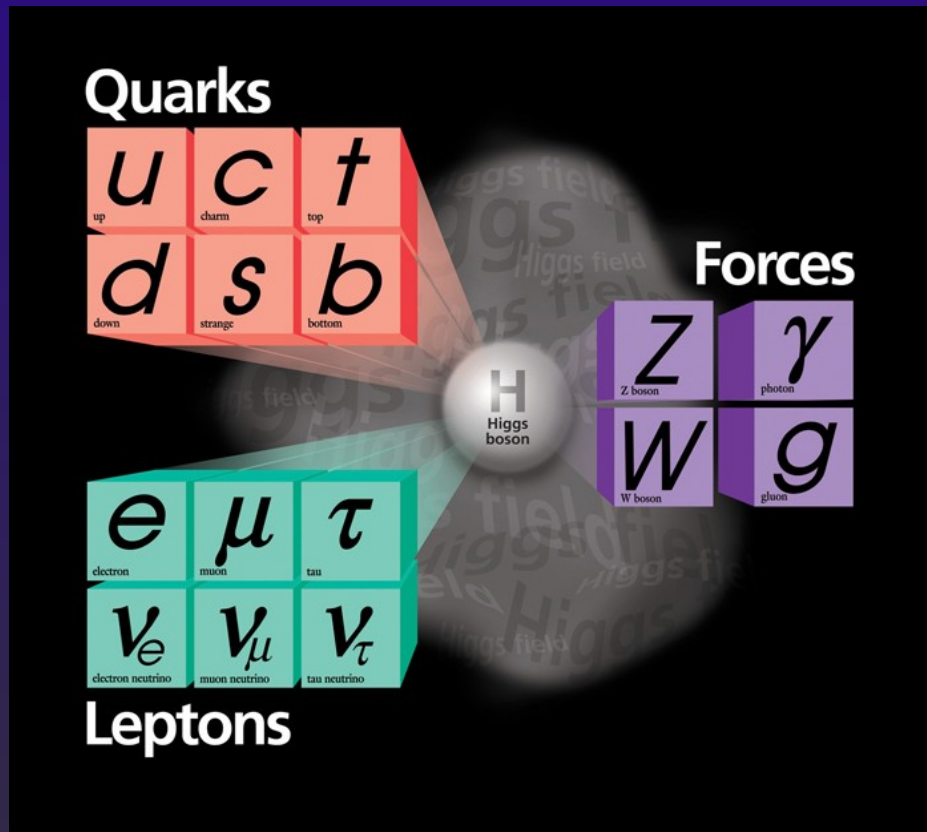
Prozesse



Physikalische Aussagen

Elementare Teilchen

Anschaulich



Kraftübermittlung durch Teilchenaustausch



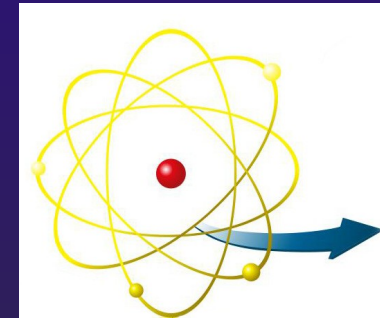
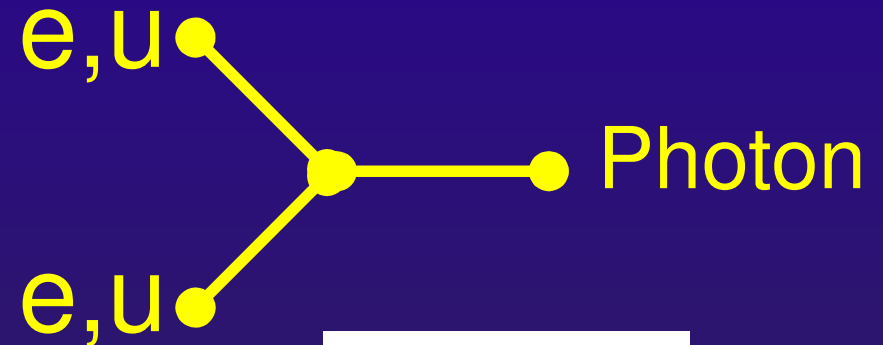
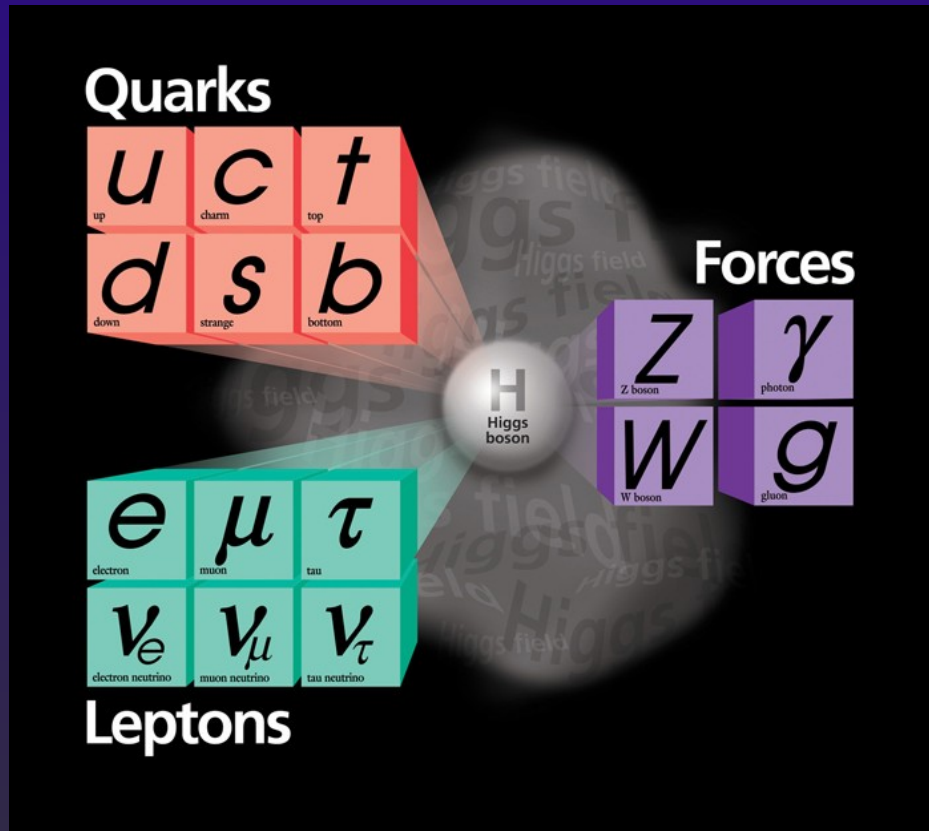
Mathematisch



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R M^{e*}\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R M^{\nu*}\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R M^{d*}\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R M^{u*}\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] \\
 & +\overline{(D_\mu\phi)}D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/v^2, \\
 & +(\text{Hermitian conjugate of some terms}).
 \end{aligned}$$

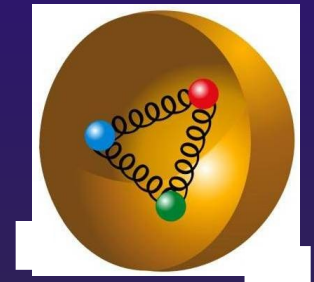
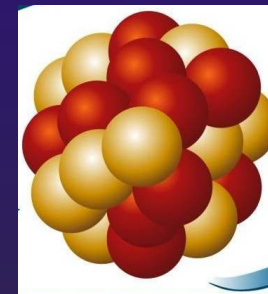
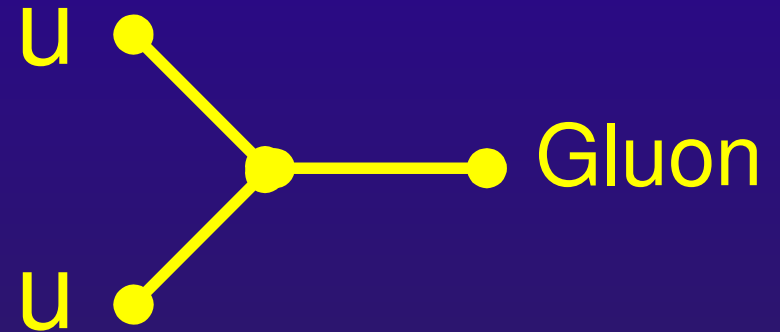
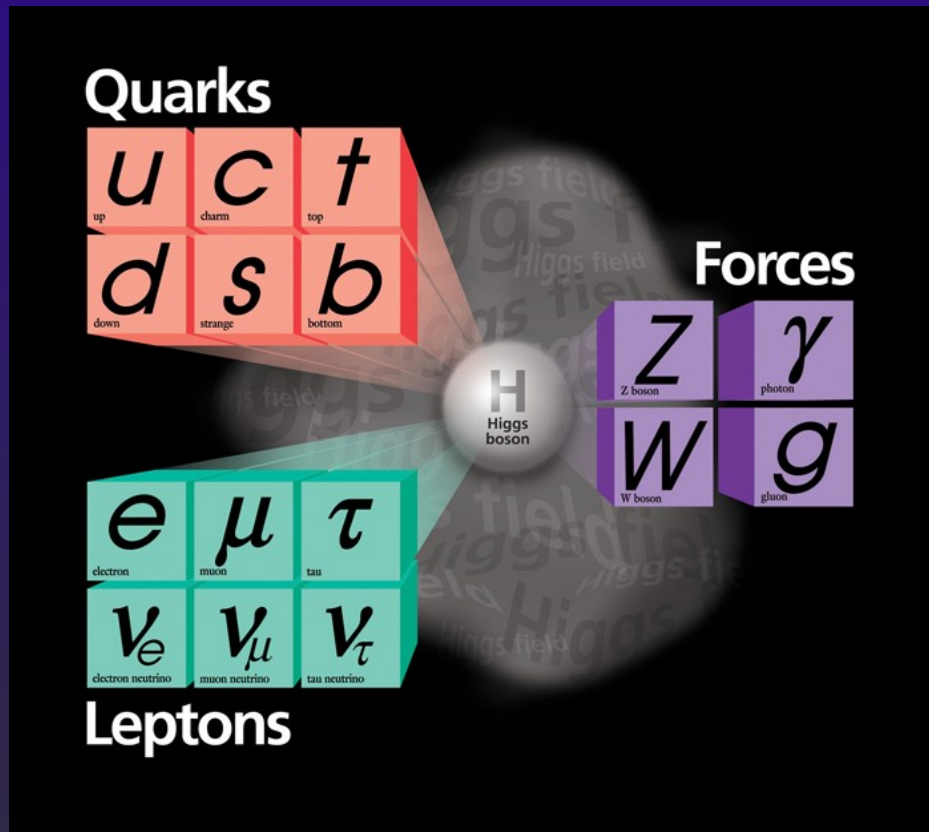


Physik I: Elektromagnetismus



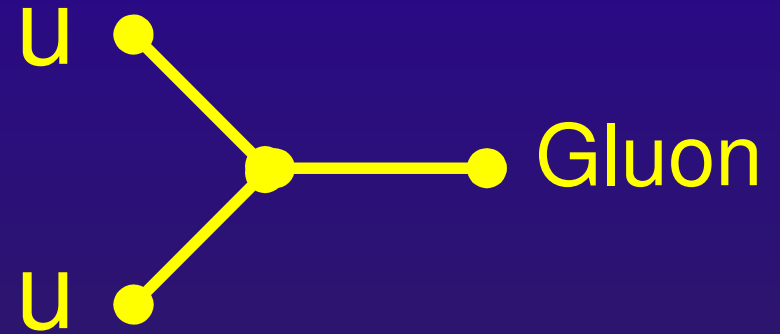
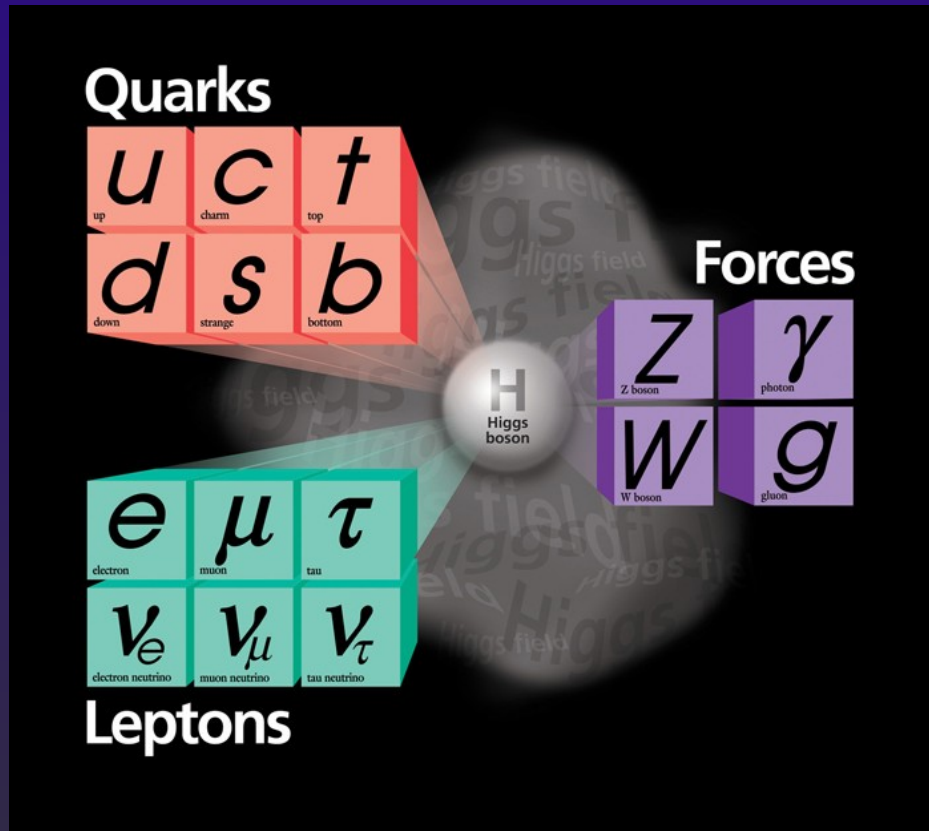
Moleküle, Chemie,
Licht
Alltagsphysik

Physik II: starke Kraft

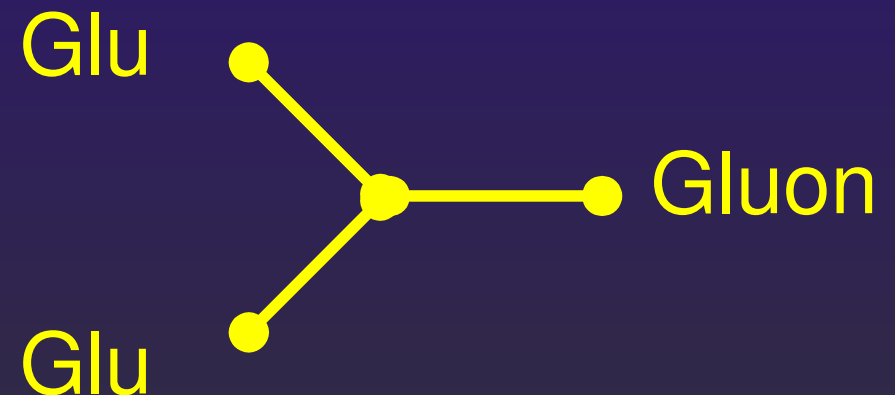


Atomkerne, Proton

Physik II: starke Kraft

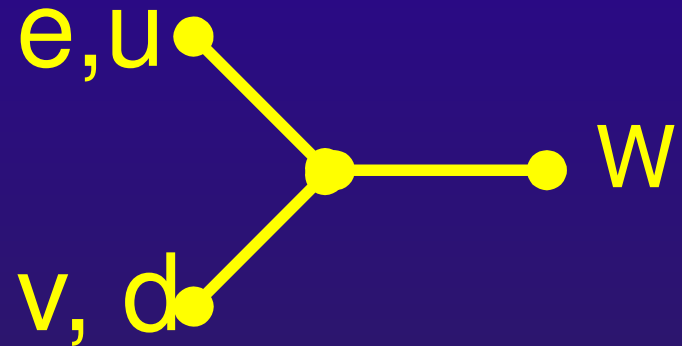
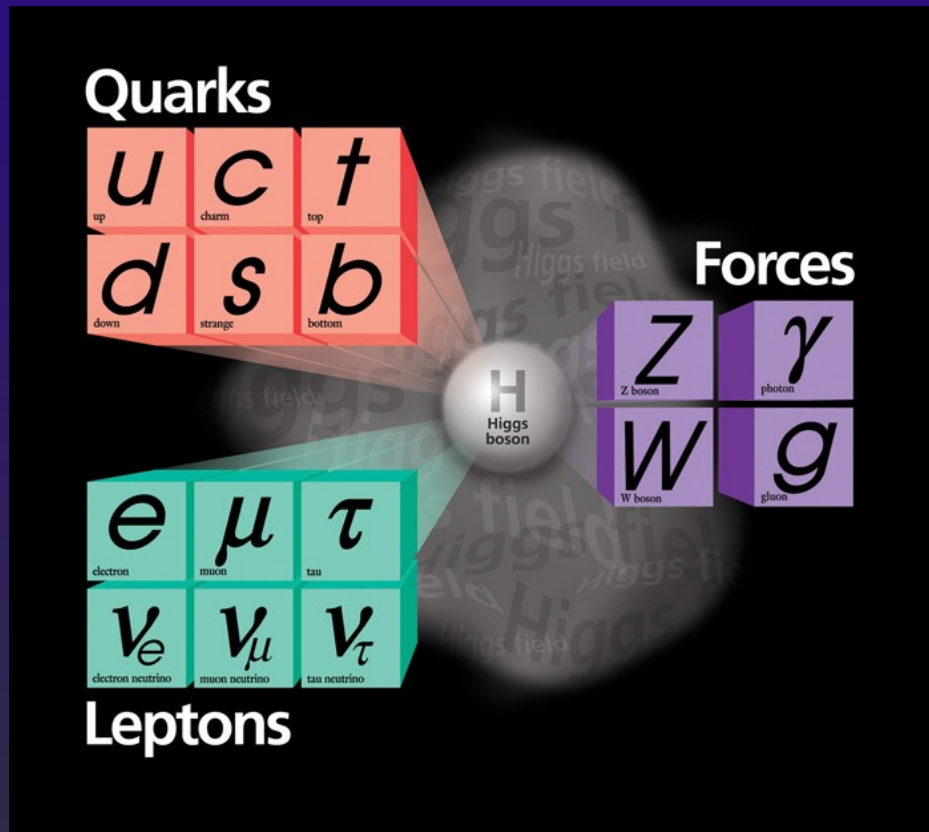


Aber auch:



Daher stärker, Quarks immer gebunden, nie einzeln

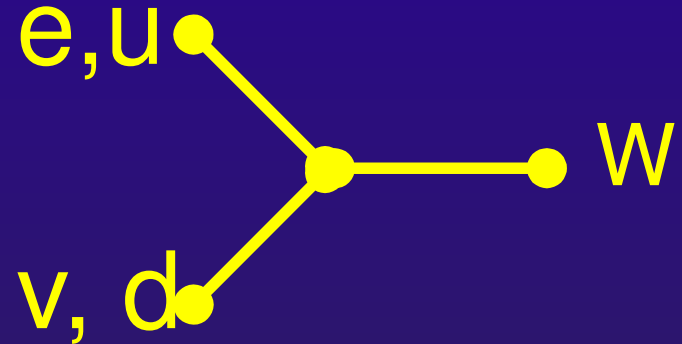
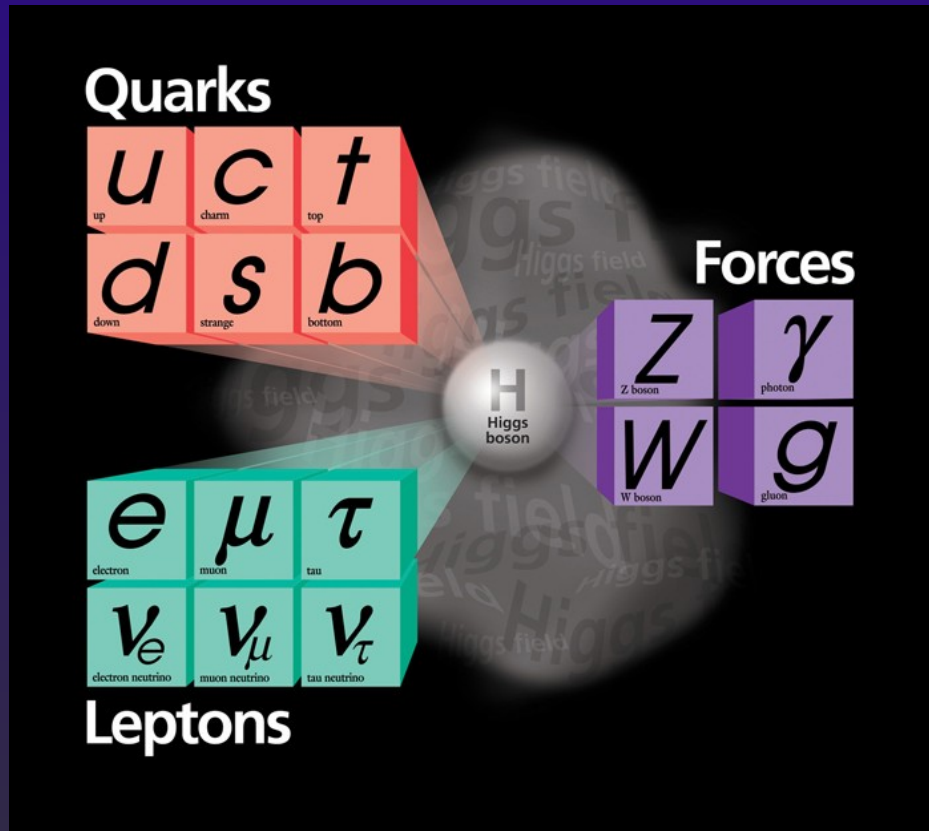
Physik III: schwache Kraft



Schwach wegen hoher
W-Masse

W W Ausbreitung
schwierig

Physik III: schwache Kraft

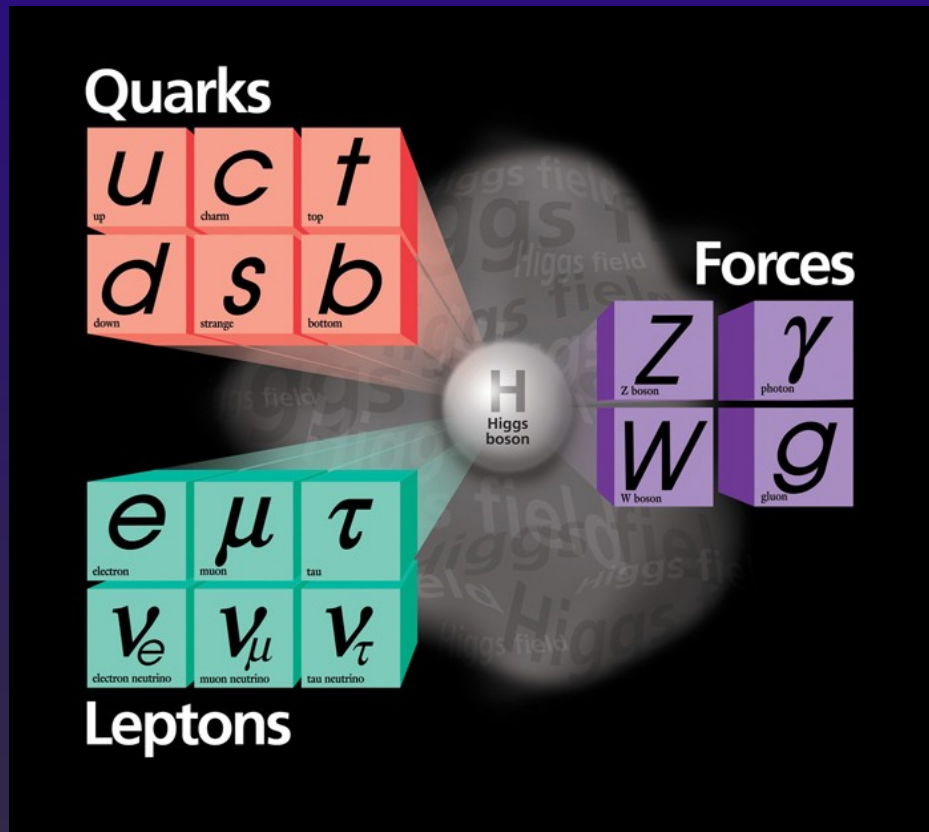


Schwach wegen hoher
W-Masse

W W Ausbreitung
schwierig

Heutiges Verständnis

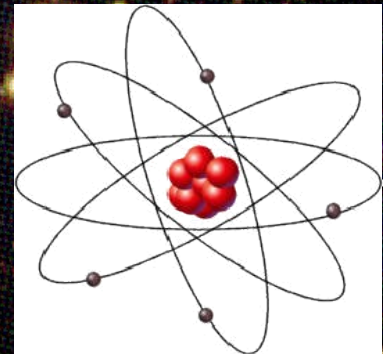
“Standardmodell”



- ★ Beschreibt alle fundamentalen Teilchen und Kräfte
- ★ Alltagsphysik ➔ High-Tech
- ★ Atome ➔ Sterne
- ★ Frühes Universum

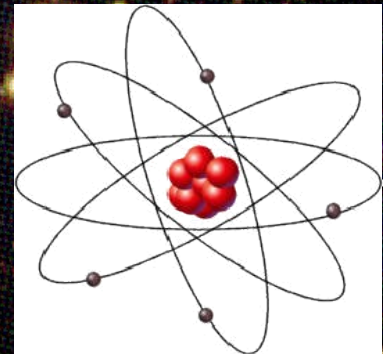
Wie ist das Universum
entstanden/aufgebaut?

Was sind die fundamentalen
Teilchen und Kräfte?

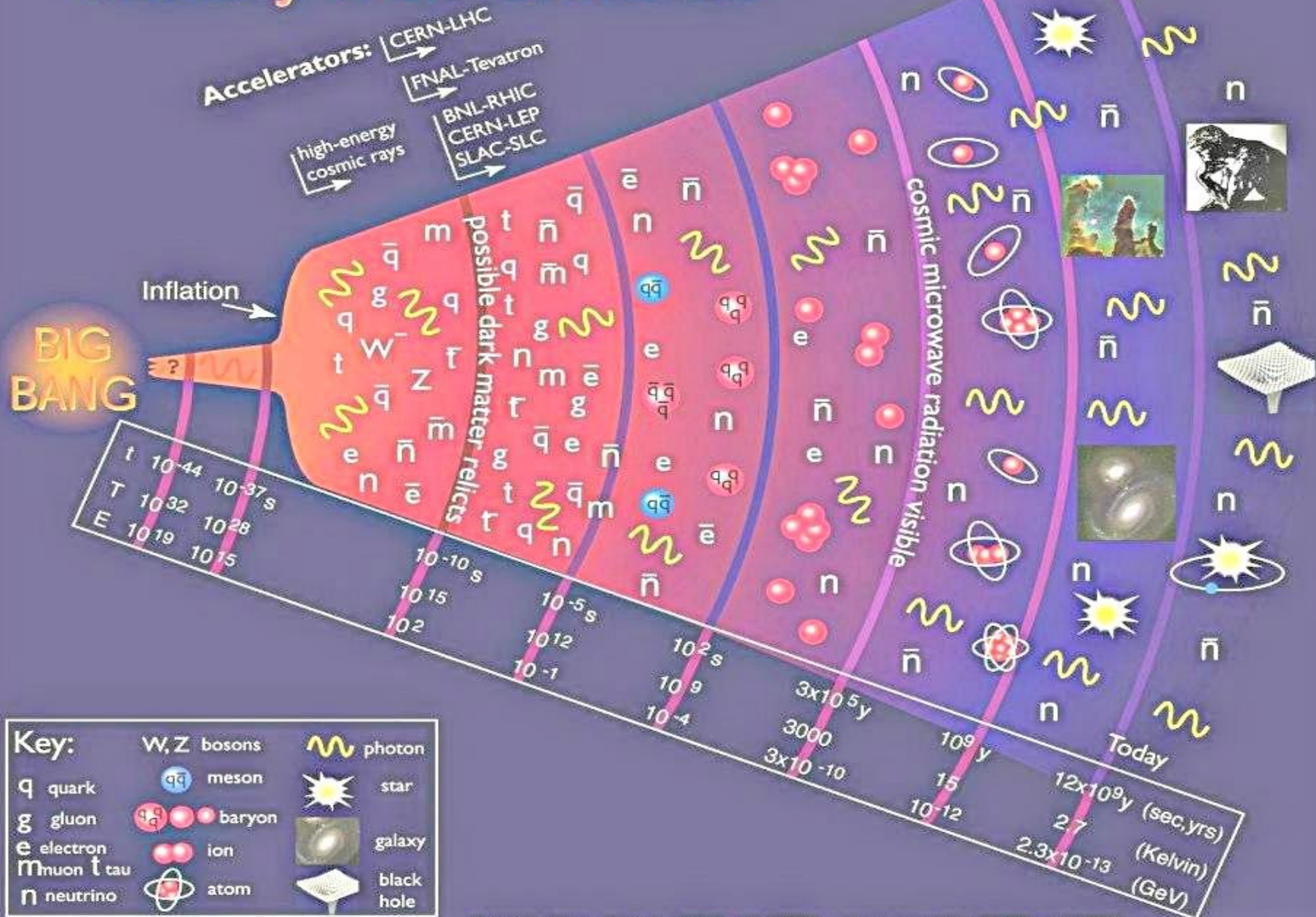


Kosmologie

Teilchenphysik

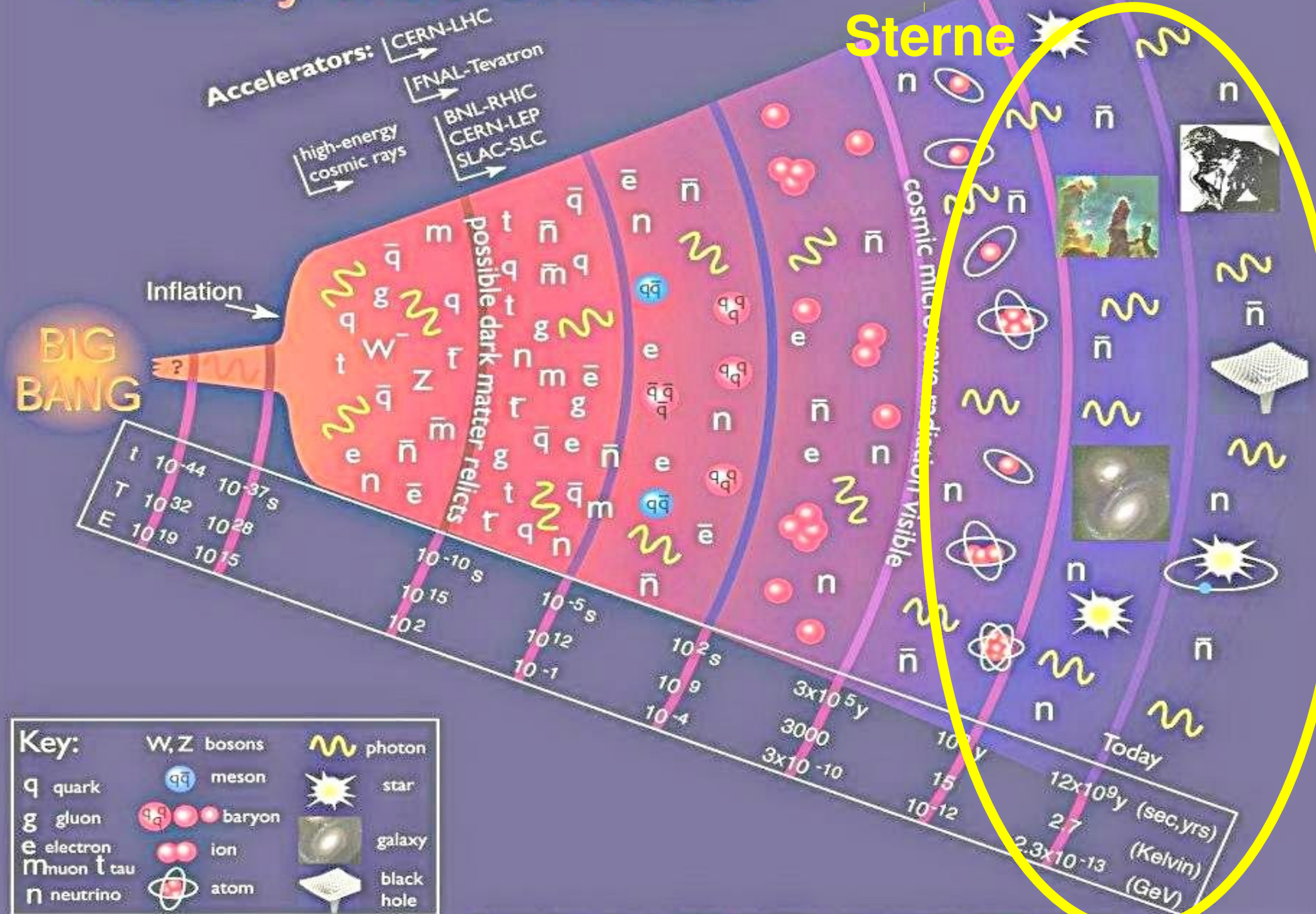


History of the Universe

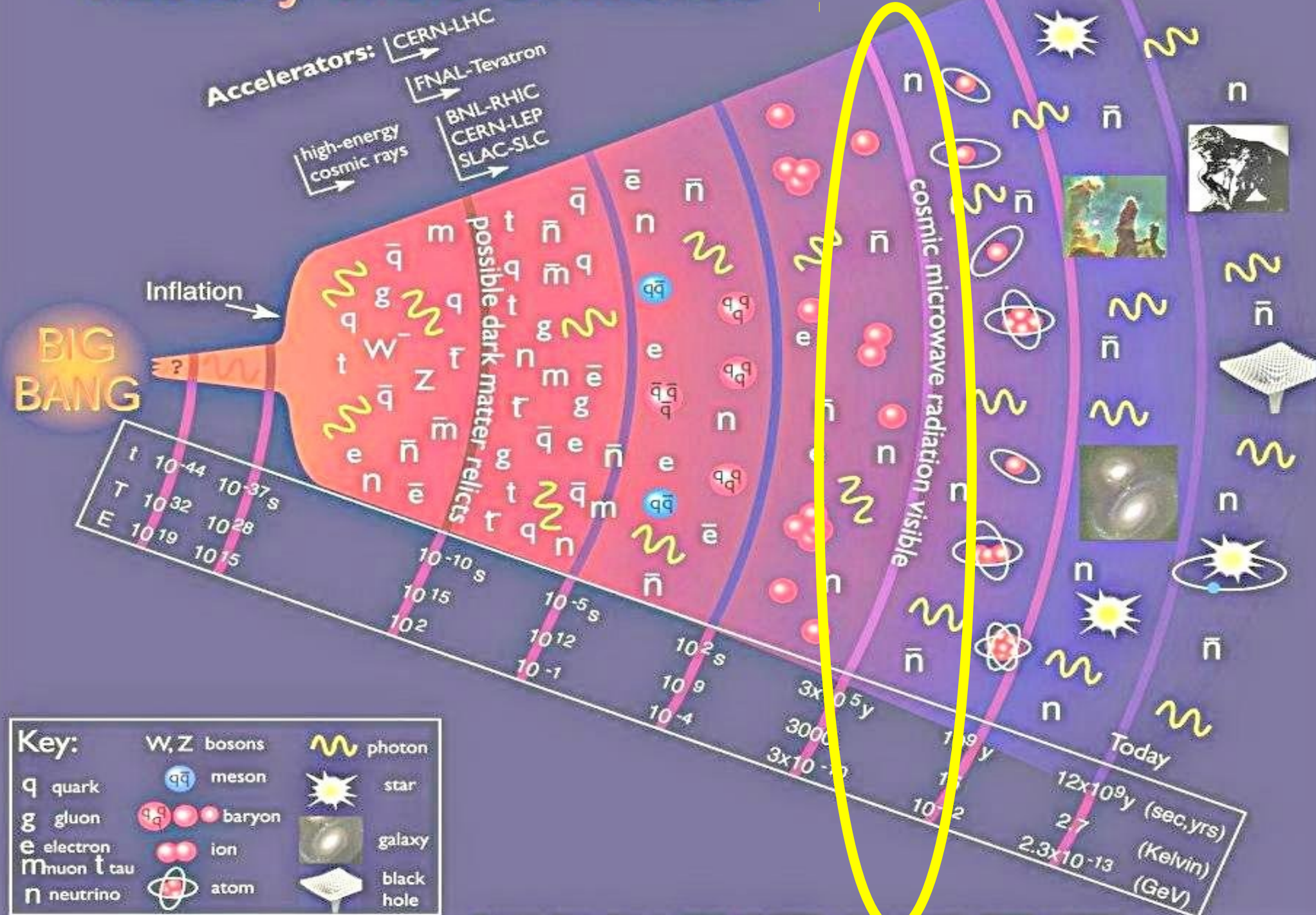


History of the Universe

Gewöhnliche Materie, Sterne



History of the Universe



History of the Universe

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

Inflation

BIG BANG

Undurchsichtig

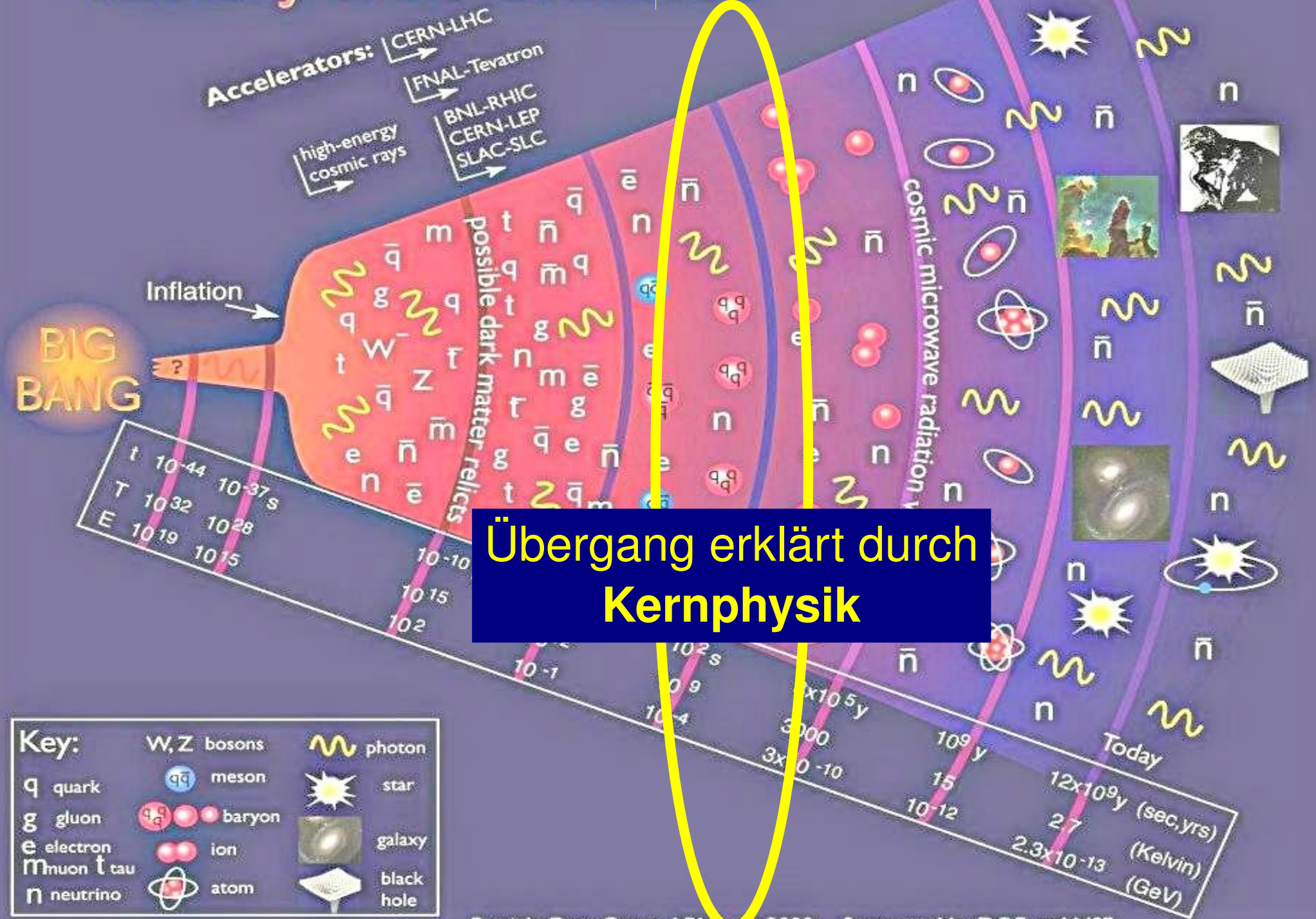
Durchsichtig

Übergang erklärt durch
Atomphysik

Key:

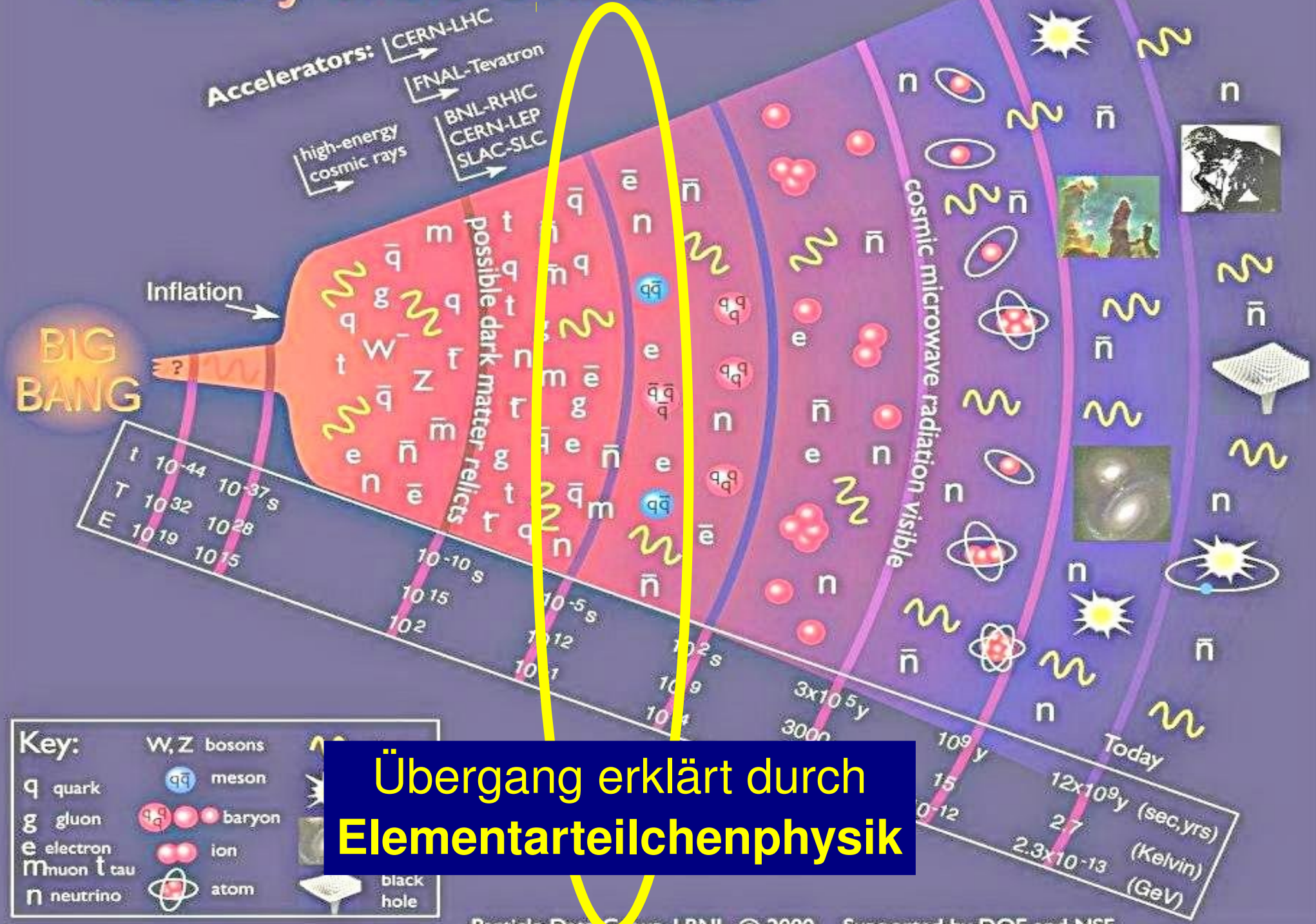
q quark	W, Z bosons	photon
g gluon	meson	star
e electron	baryon	galaxy
μ muon	ion	black hole
τ tau	atom	
ν neutrino		

History of the Universe



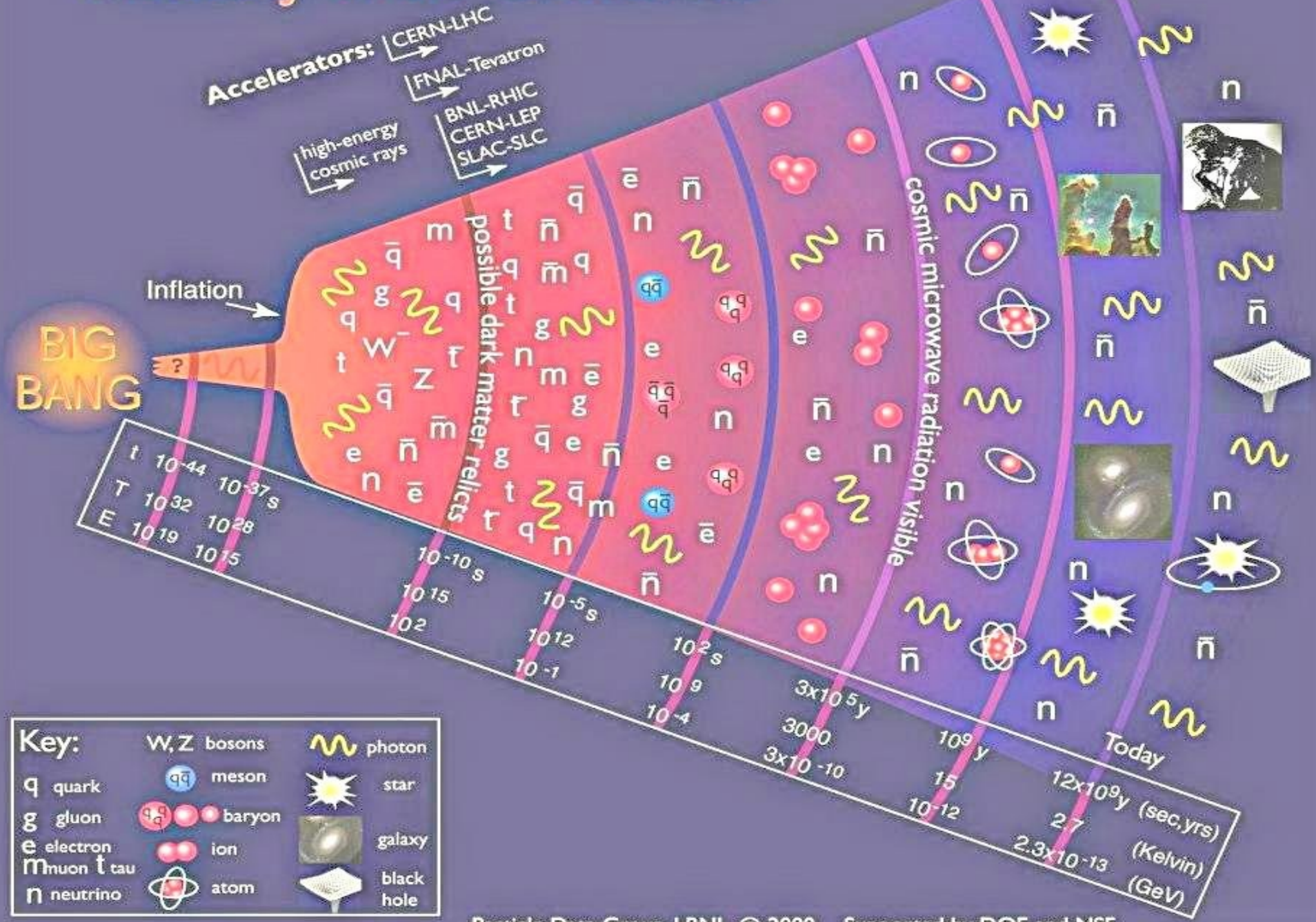
Übergang erklärt durch
Kernphysik

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

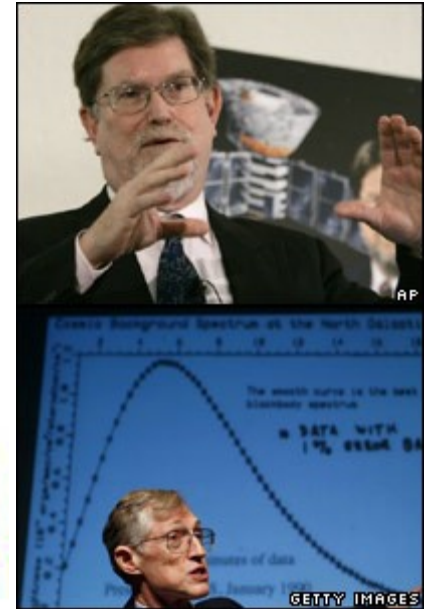
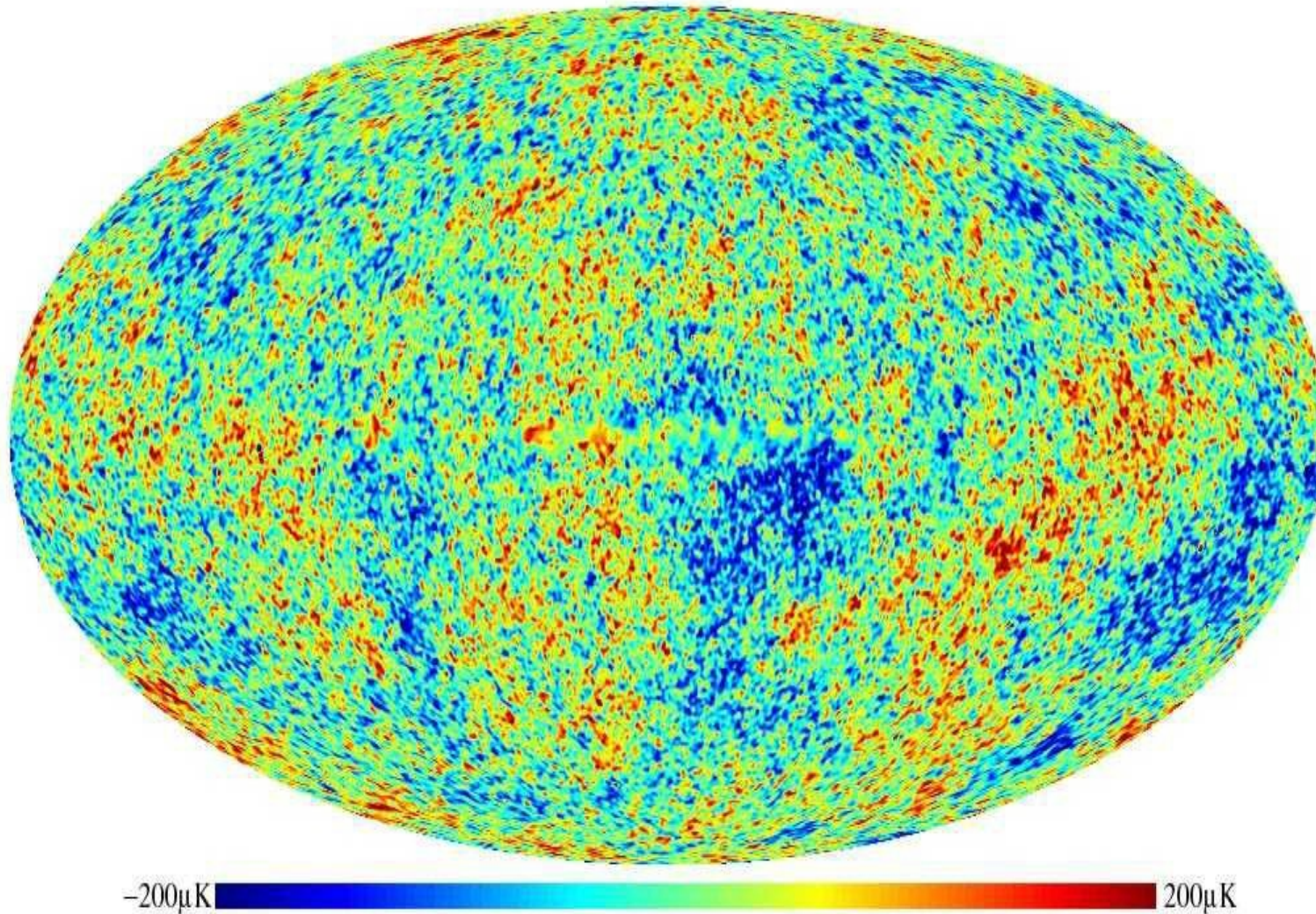
Diesen Übergang kann man heute noch sehen!

Übergang erklärt durch
Atomphysik



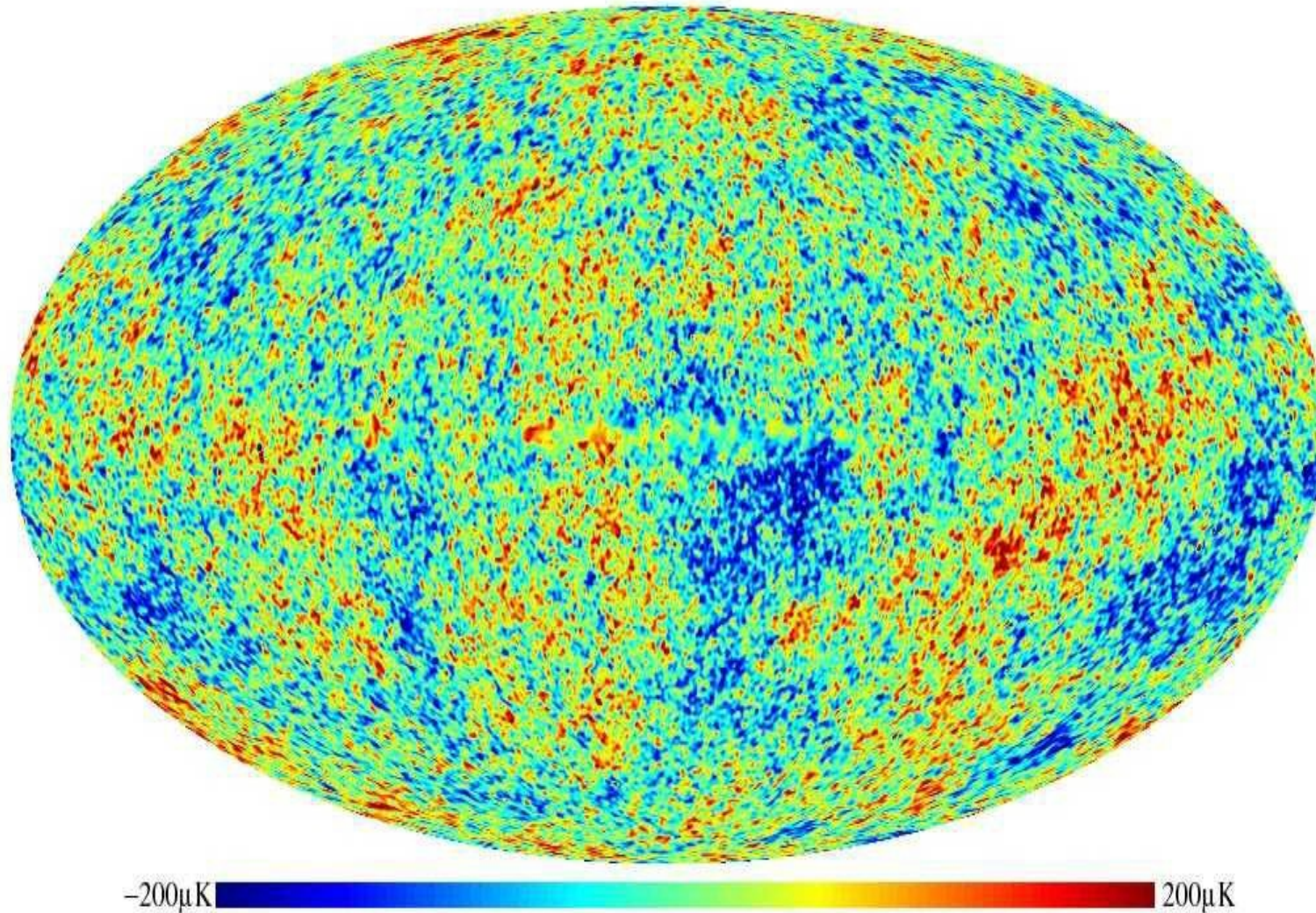
Blick in die Vergangenheit

Vgl. Nobelpreis
2006

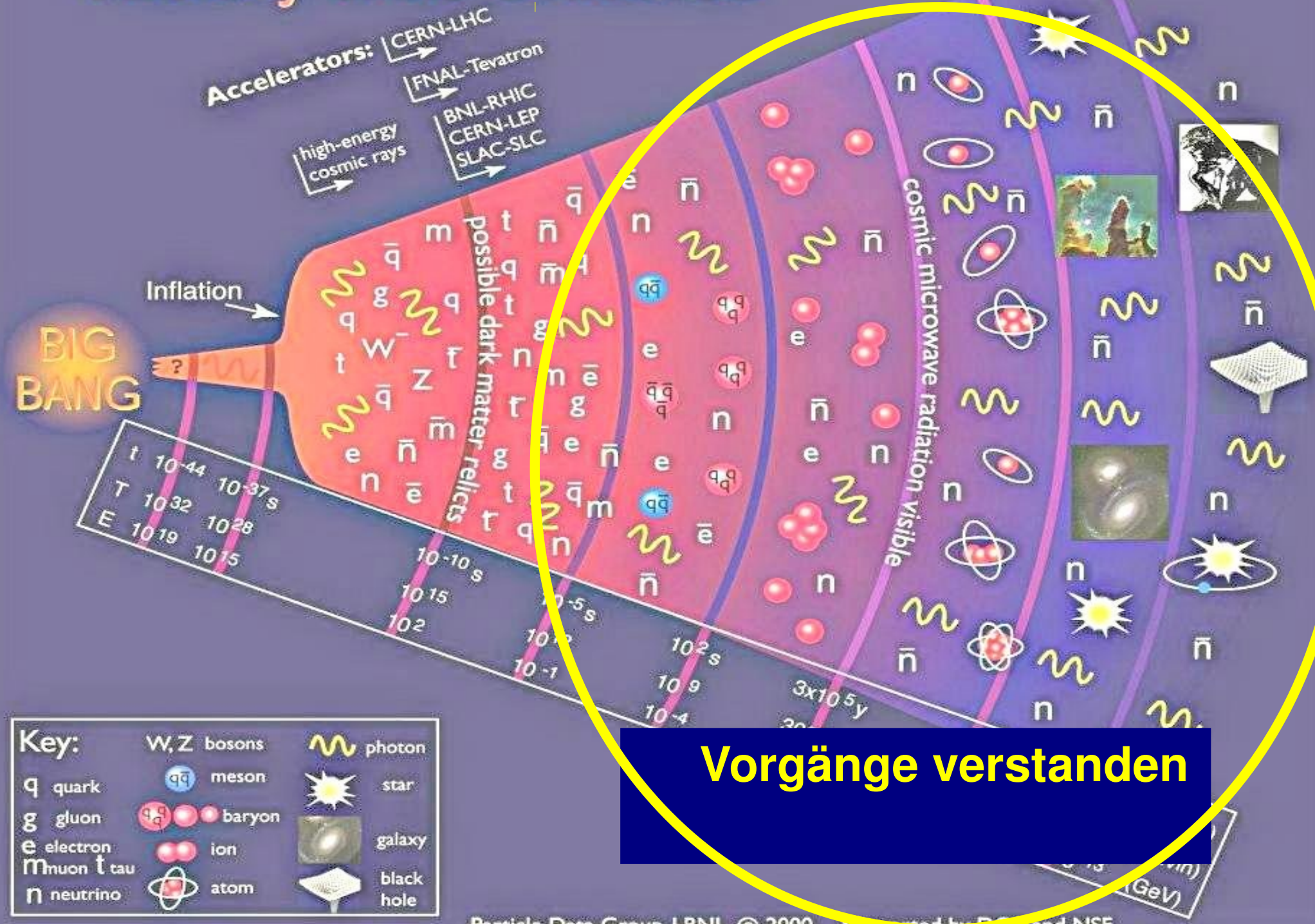


Blick in die Vergangenheit

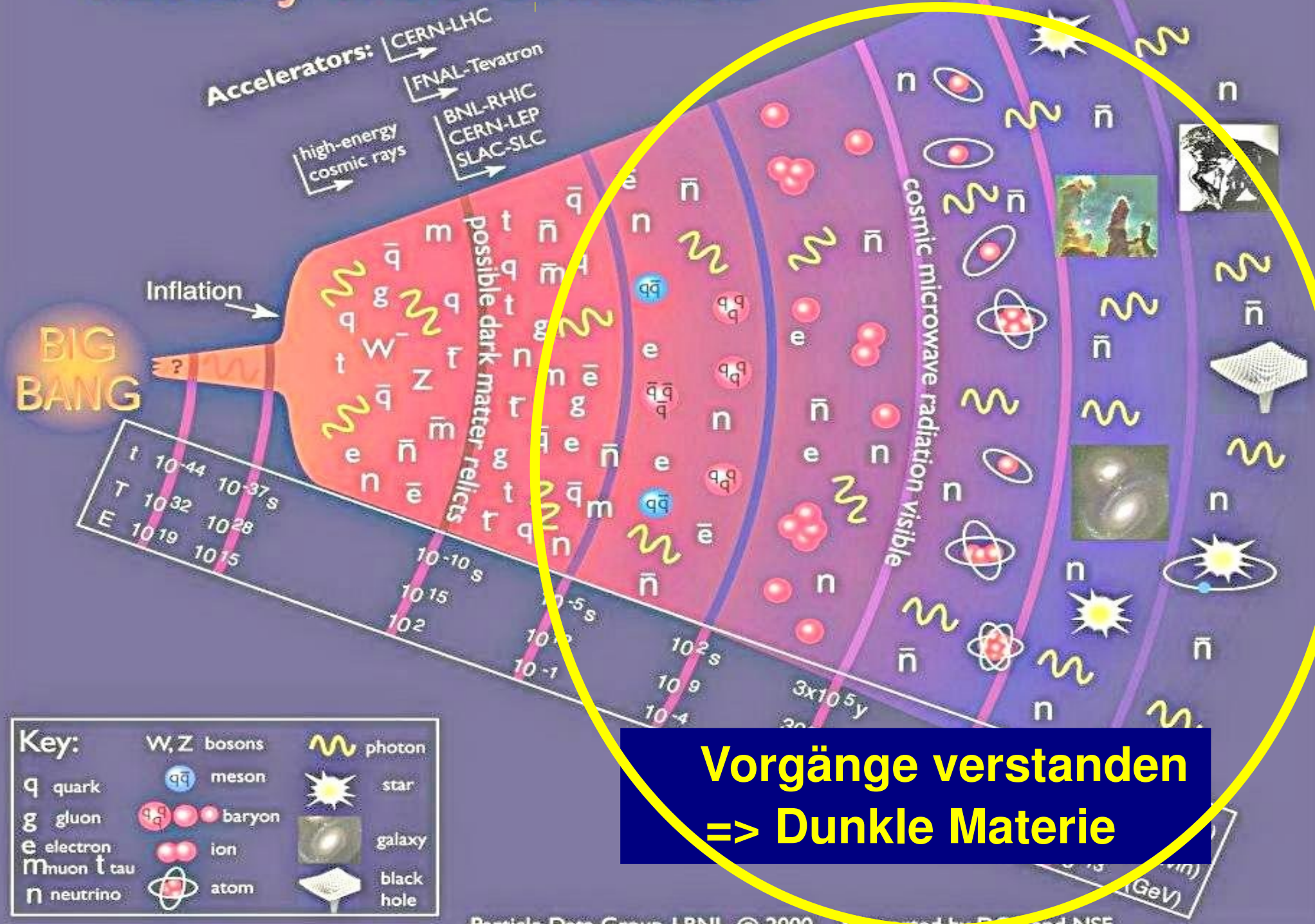
Universum früher: heiss, glühend, undurchsichtig



History of the Universe



History of the Universe



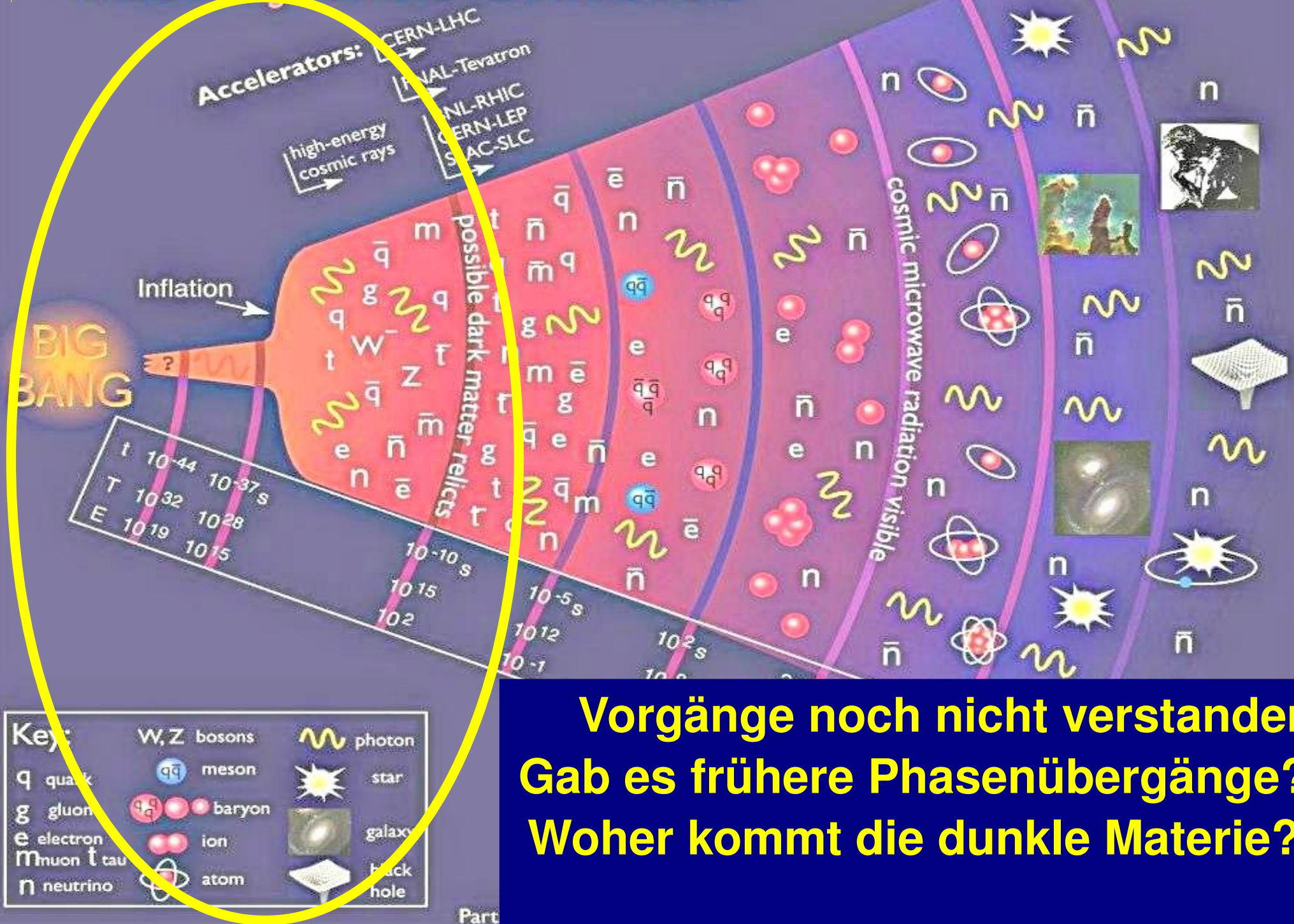
Dunkle Materie durch viele Beobachtungen erwiesen

Sichtbare
Materie

Dunkle
Materie



History of the Universe



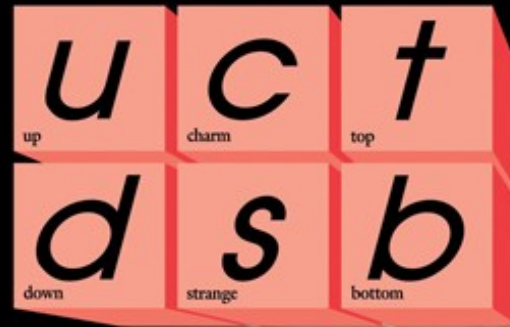
Vorgänge noch nicht verstanden
Gab es frühere Phasenübergänge?
Woher kommt die dunkle Materie?

Offene Fragen

Warum 3 Familien?

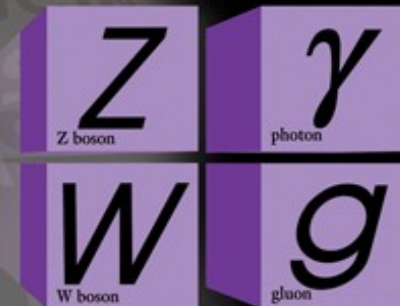
Warum Quarks und Leptonen?

Quarks



Leptons

Forces



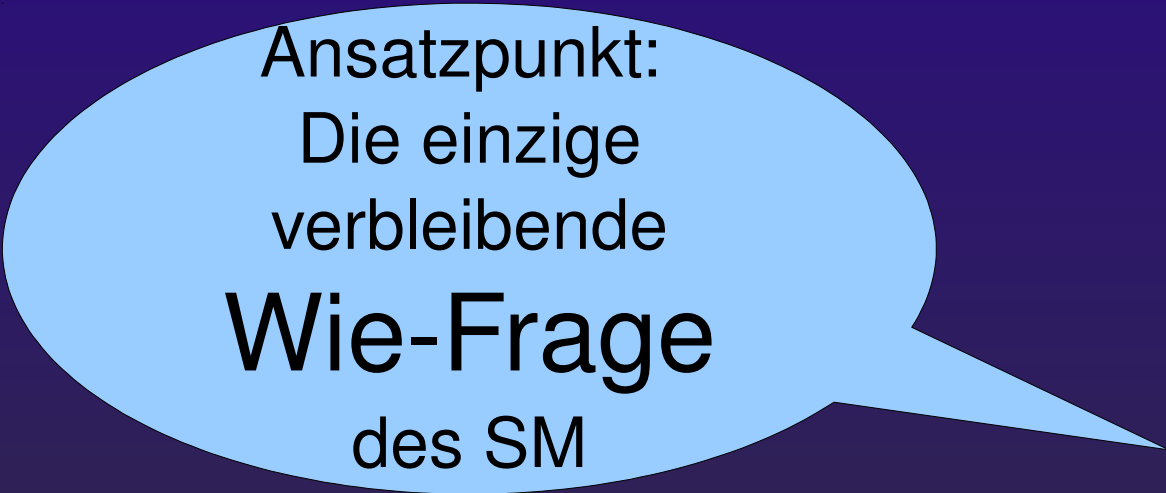
Warum 3 Kraefte?

Wie soll man Warum-Fragen beantworten?

Echter
Fortschritt:

Warum- → Wie-
Fragen

Wie soll man Warum-Fragen beantworten?

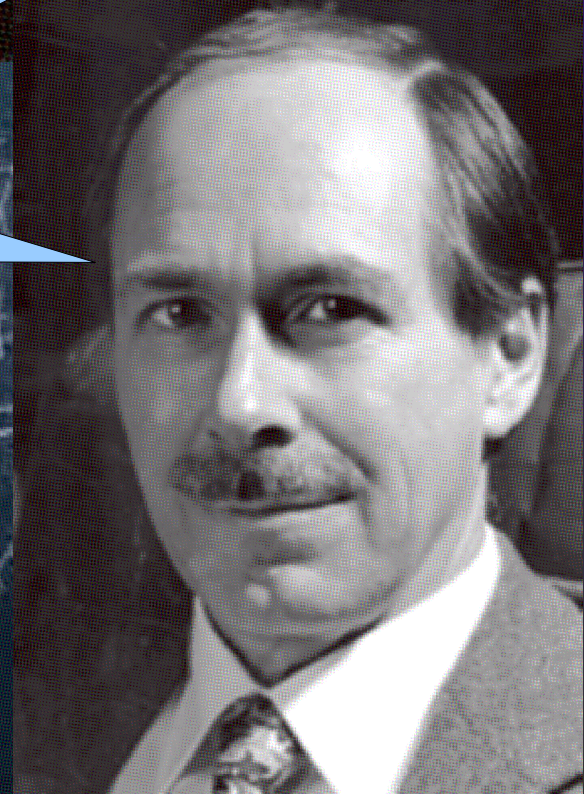
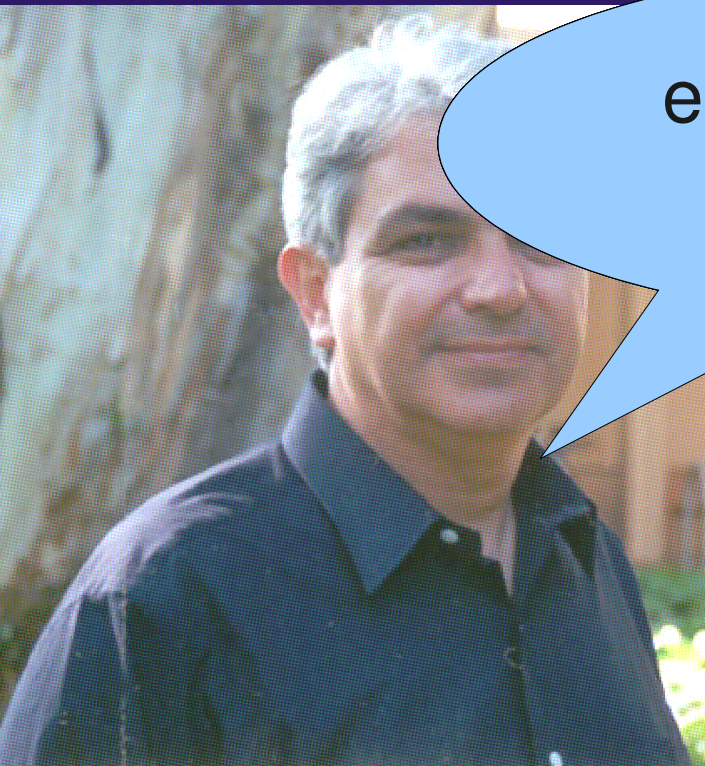


Ansatzpunkt:
Die einzige
verbleibende
Wie-Frage
des SM

Wie soll man Warum-Fragen beantworten?



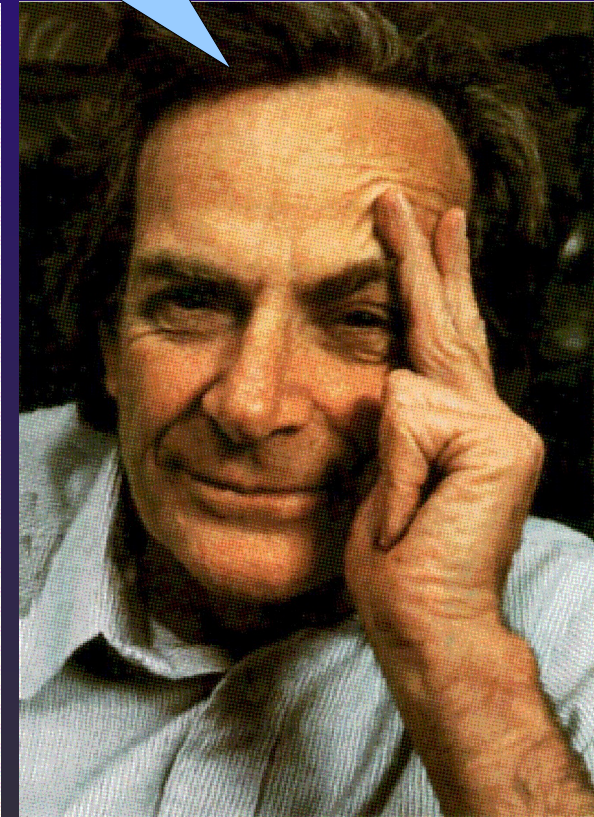
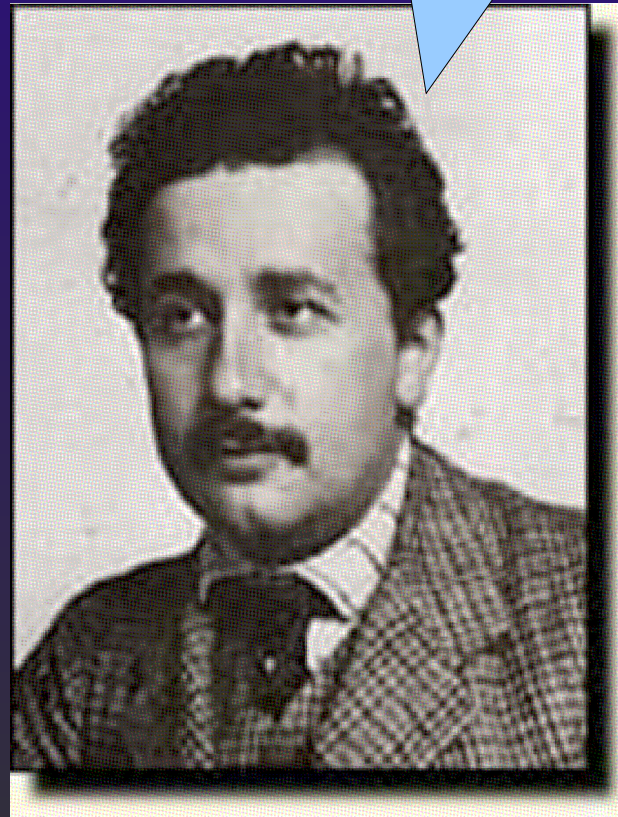
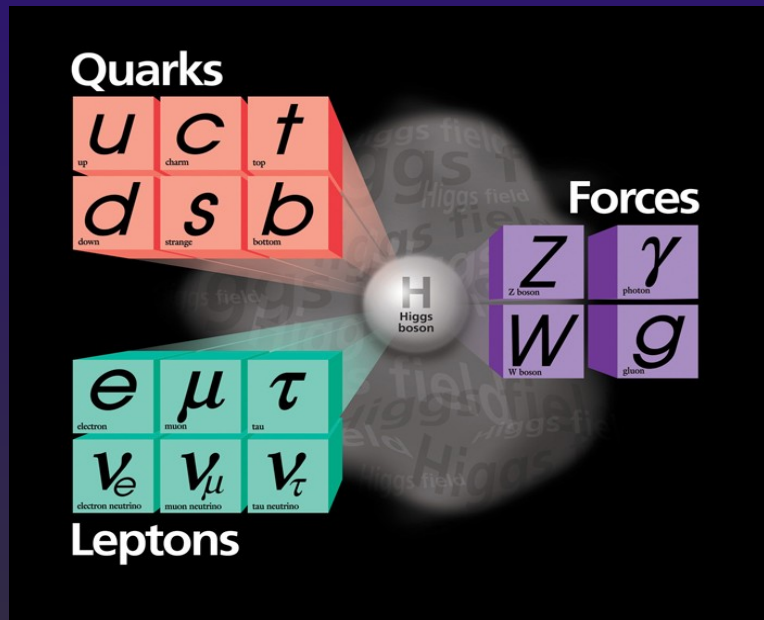
Wie ist die
elektroschwache
Symmetrie
gebrochen?



Heutiger Stand

Teilchen haben
unterschiedliche
Massen!
(schwache Kraft!)

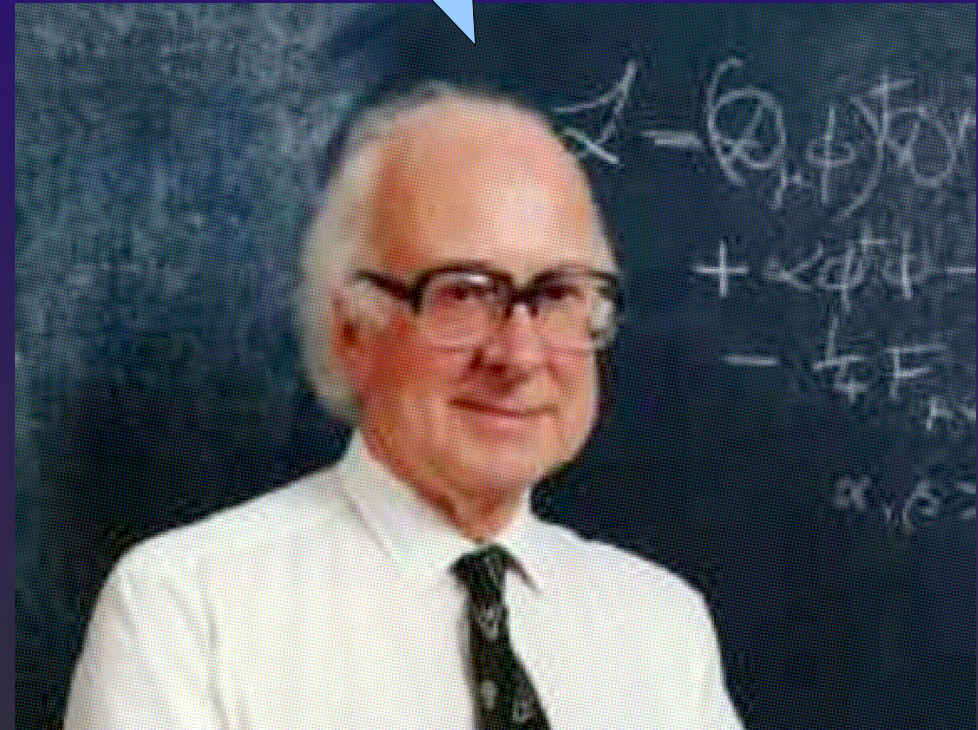
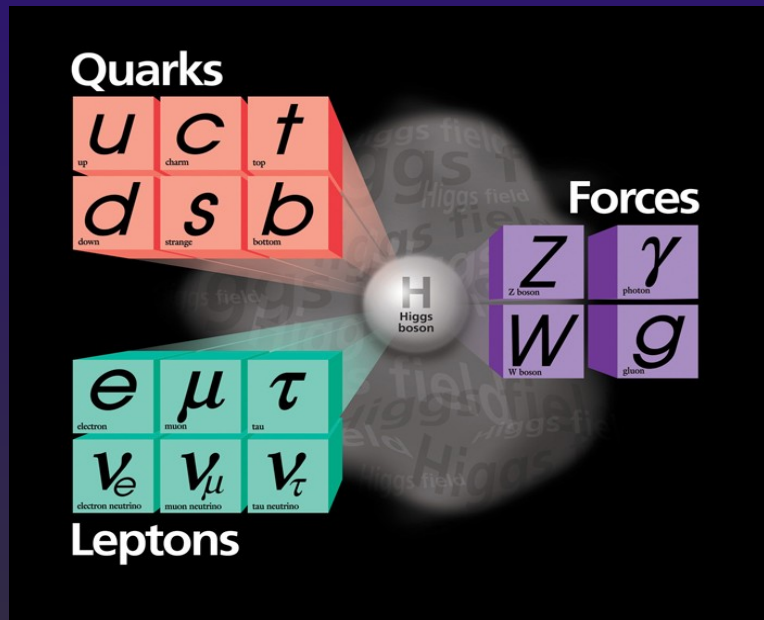
Ist das mit
Relativität und QM
vereinbar?



Heutiger Stand

Teilchen haben
unterschiedliche
Massen!

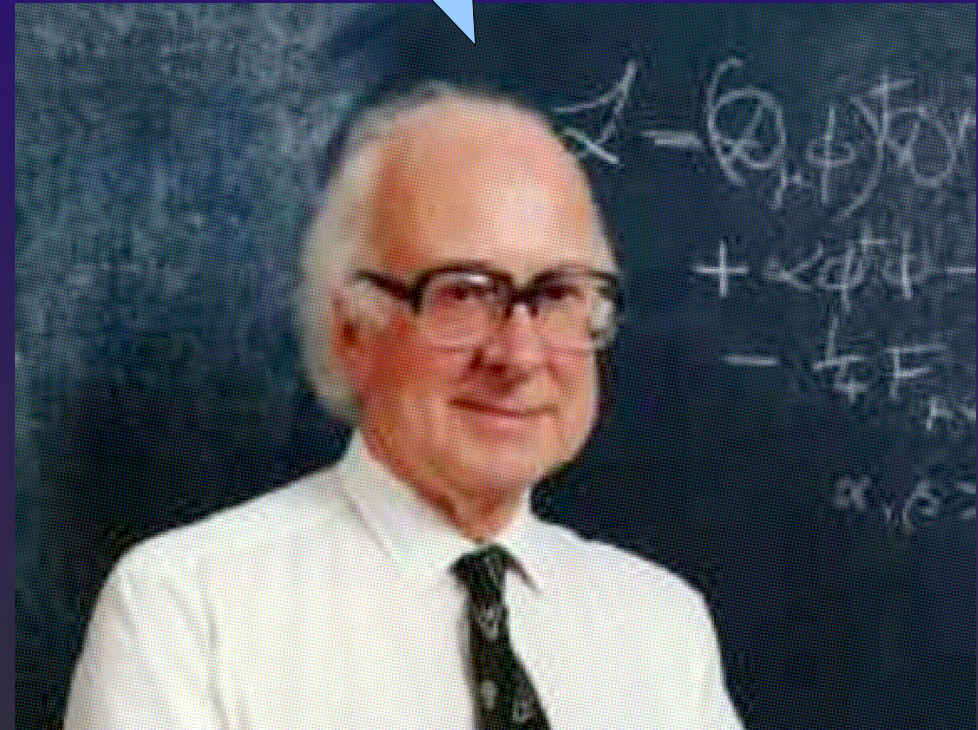
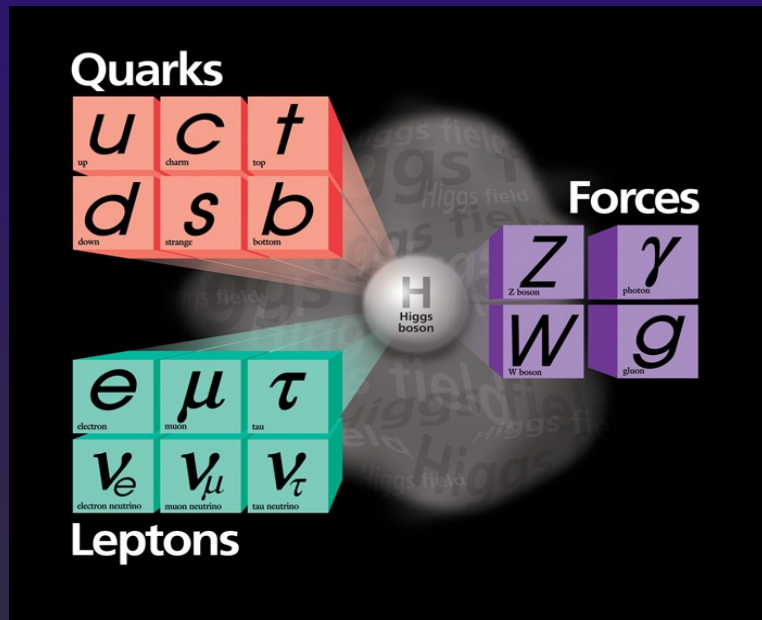
Ja, aber
Higgsmechanismus
nötig!



Heutiger Stand

Teilchen haben
unterschiedliche
Massen!

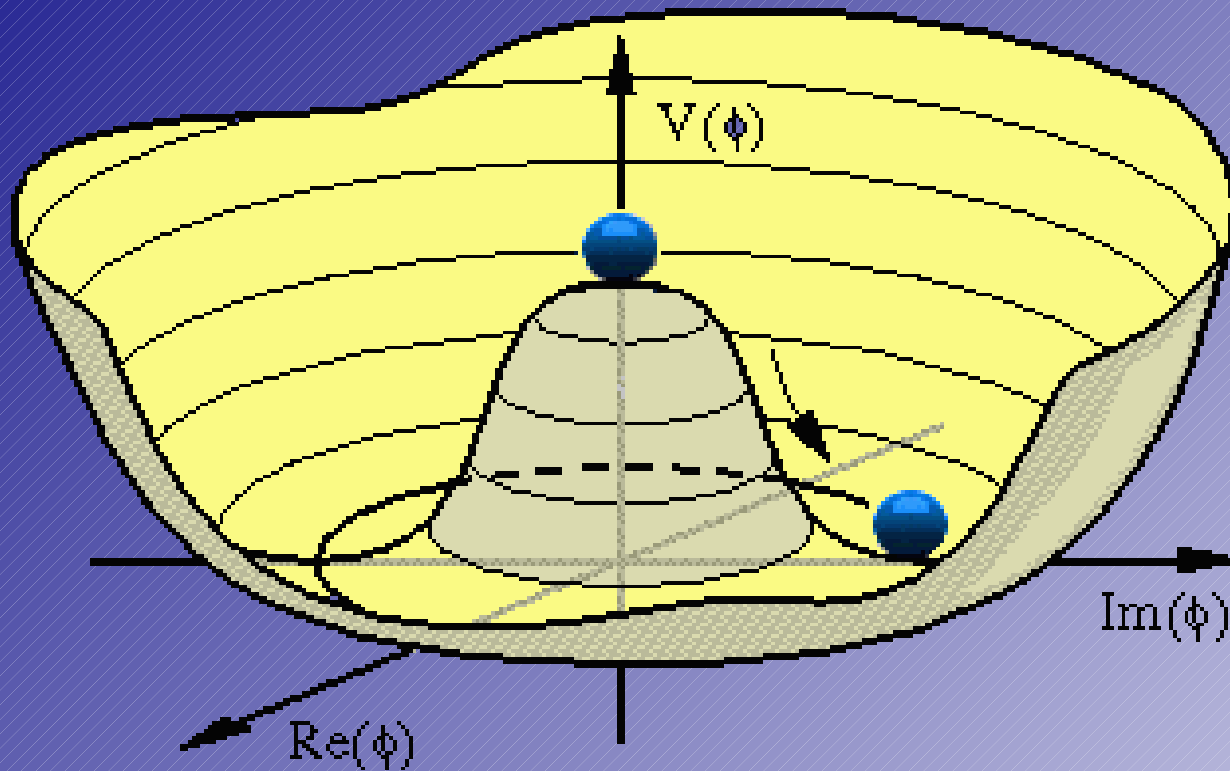
Elektroschwache
Symmetriebrechung



Elektroschwache Symmetriebrechung

Letztes Rätsel des SM:
Massen

Elektroschwache Symmetriebrechung



Sombbrero
symmetrisch

Stabiler Zustand
unsymmetrisch

=>

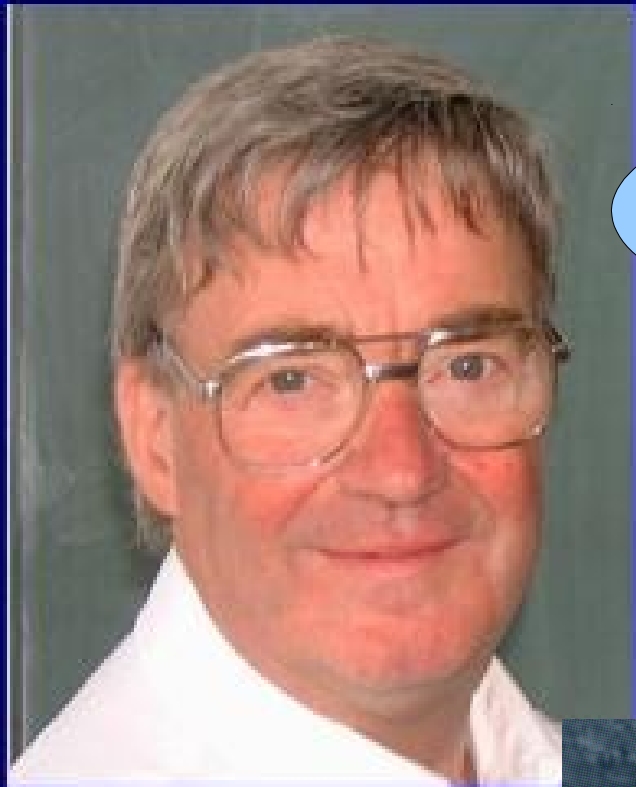
Unterschiedliche
Teilchenmassen

Elektroschwache Symmetriebrechung

- ★ Wie sieht das Sombbrero
(Higgs-)Potential genau aus?
- ★ Wie kann man es nachweisen?
- ★ Wodurch wird es erzeugt? (40

Jahre Zeit f. Spekulation!!)

Es gibt viele Möglichkeiten

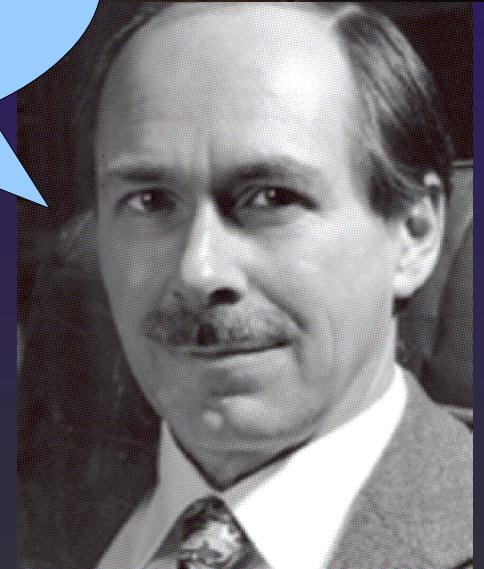
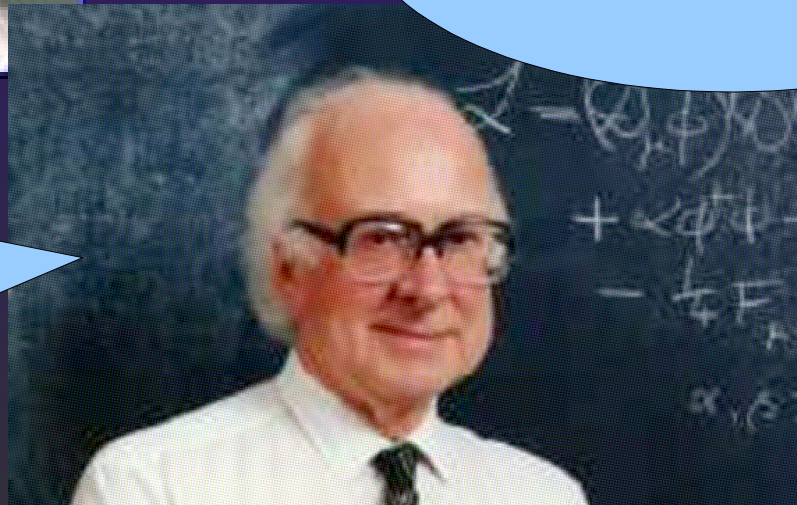


Super-
symmetrie

5te
Dimen-
sion

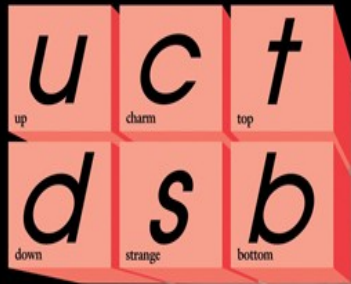
Neuartige
Wechselwirkung

Ein
Higgs-
boson



Pforte zur Erkenntnis

Quarks



Forces



Leptons

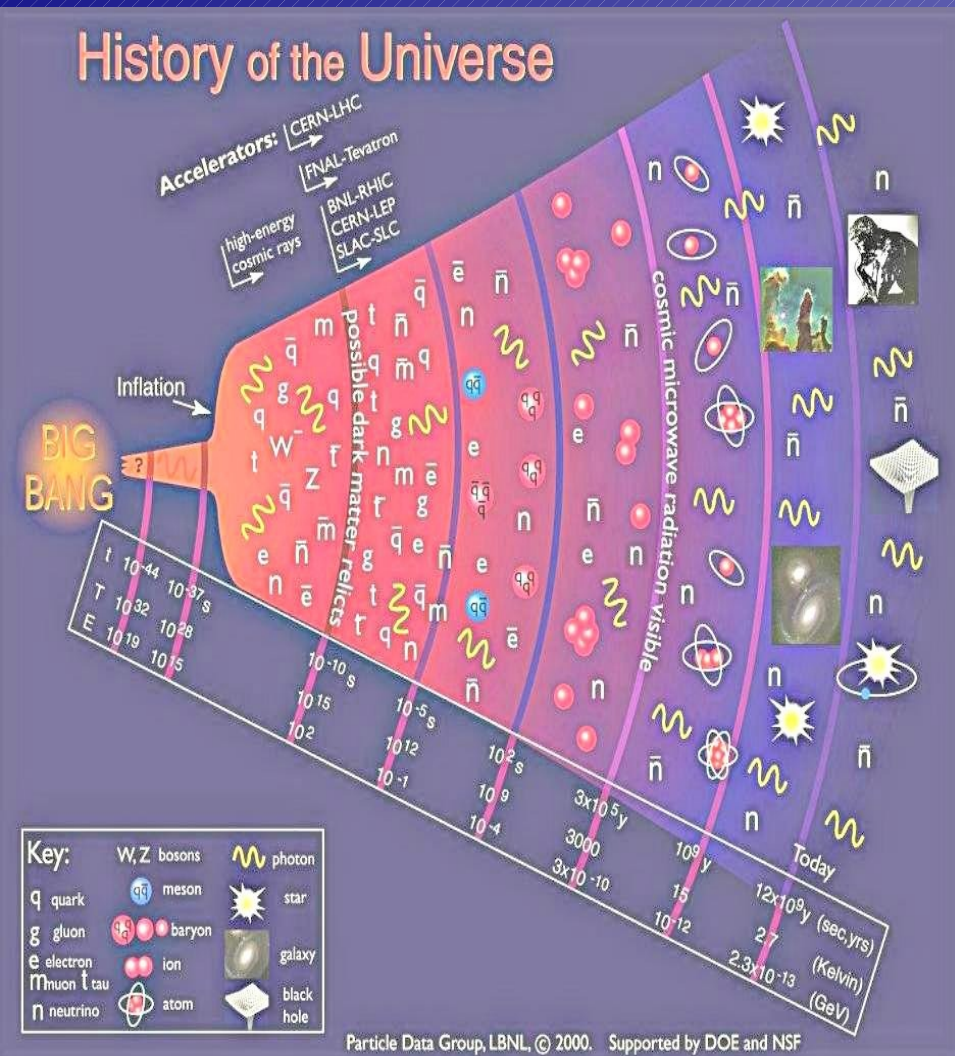


Elektroschwache
Symmetrie-
brechung

- Neue Physik
- Fundamental neu
- Erklärt Higgs
- Warum-Fragen

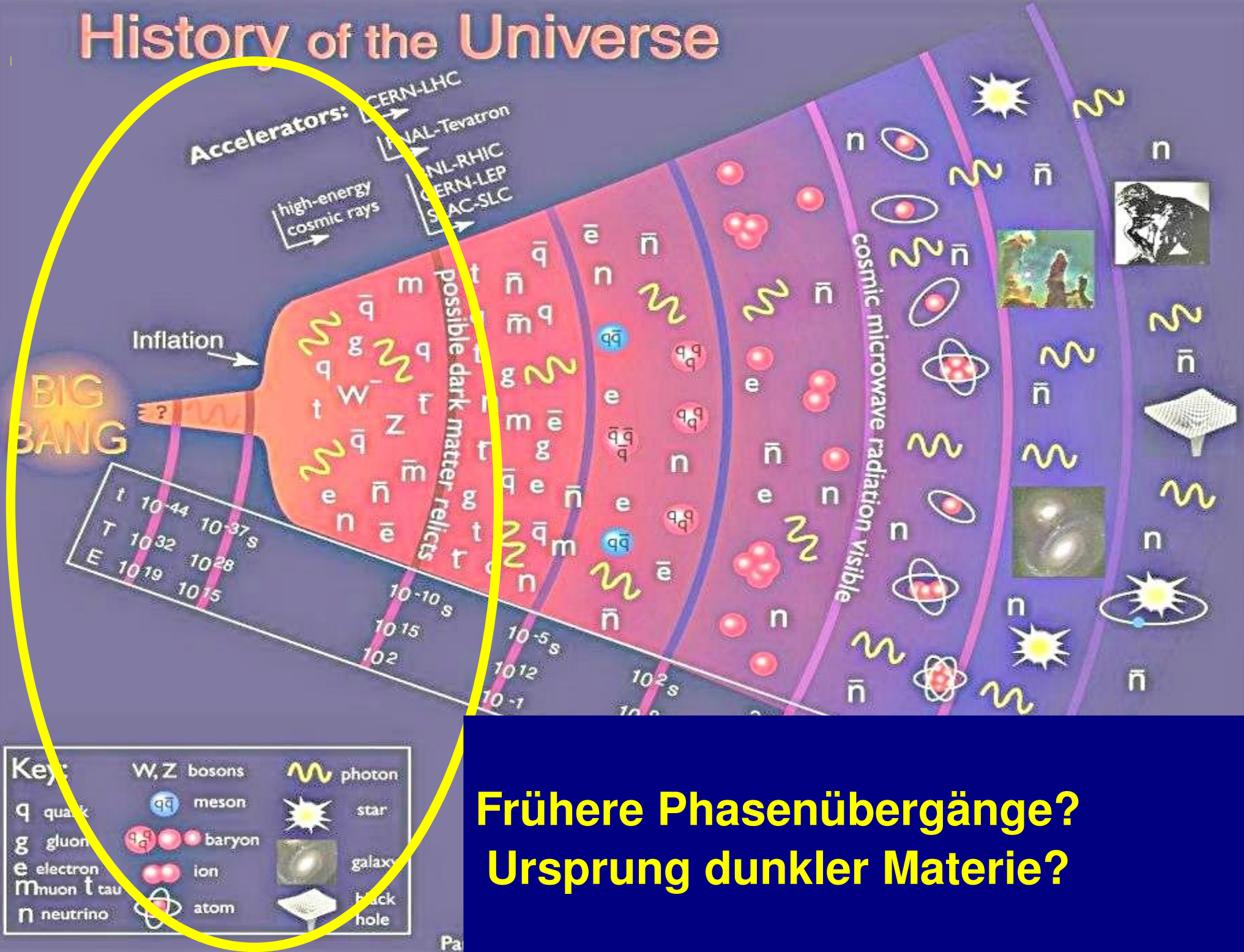
Pforte zur Erkenntnis

Elektroschwache
Symmetrie-
brechung



Verständnis des
Universums
näher am
Urknall

History of the Universe

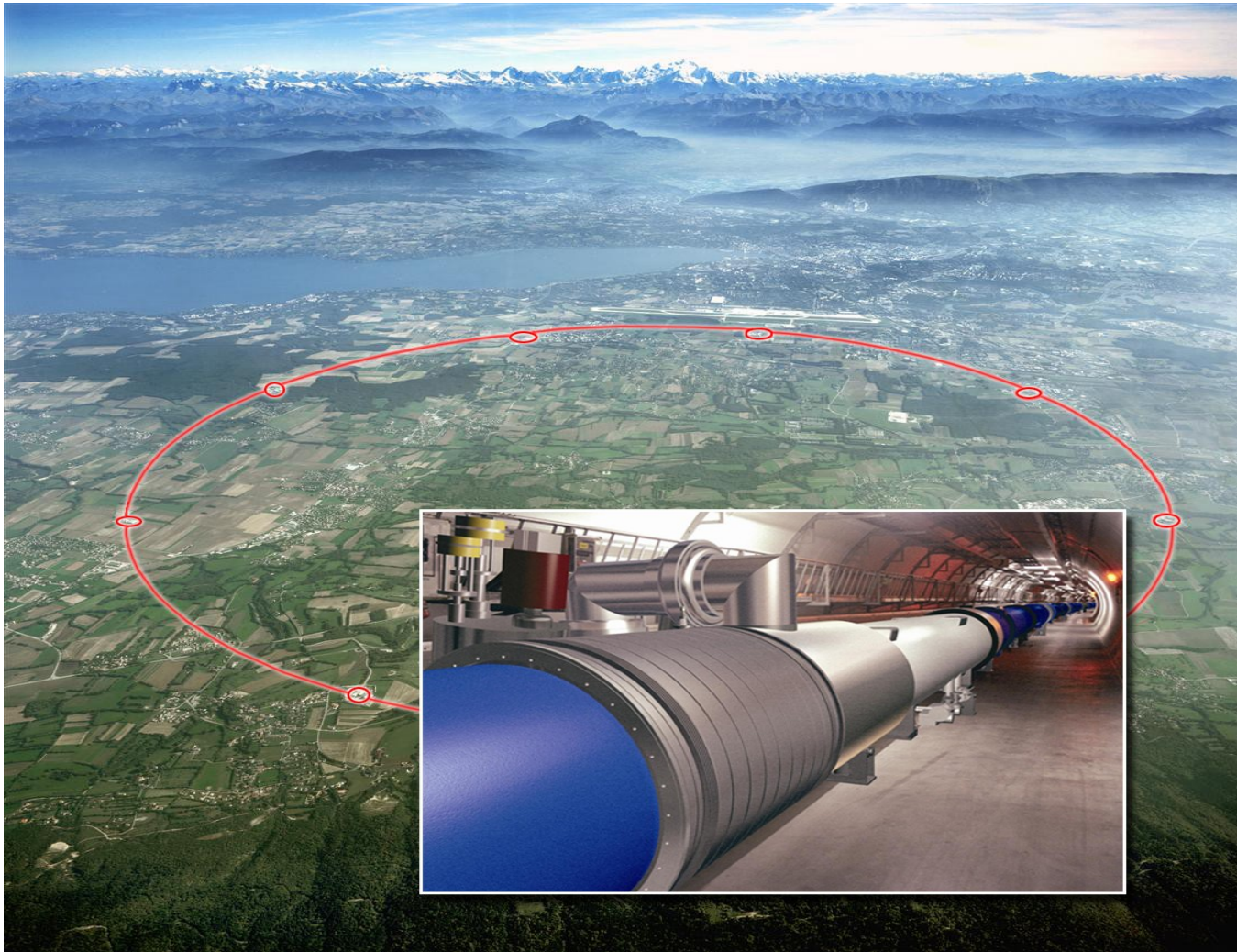


**Frühere Phasenübergänge?
Ursprung dunkler Materie?**

Hochenergieexperimente am LHC

[Strahlenergie bis 14000 GeV = Mikroskop mit 10^{-19} m Auflösung]

LHC (CERN)



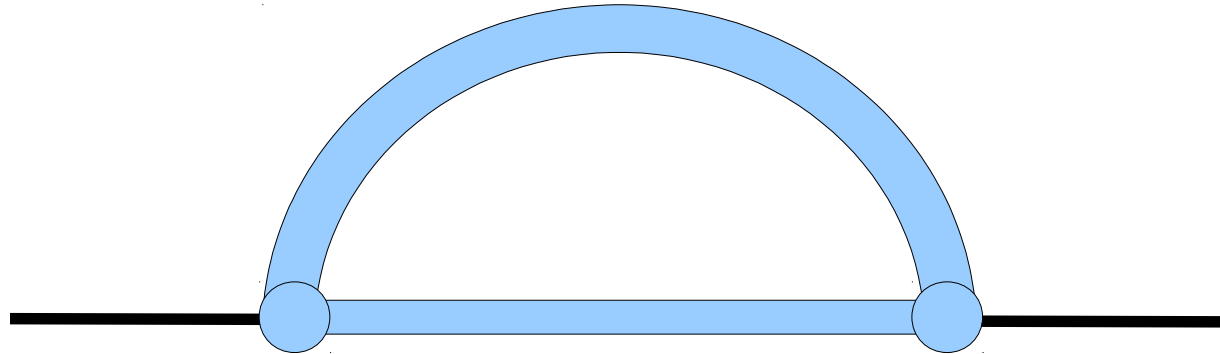
Hochenergieexperimente am LHC

[Strahlenergie bis 14000GeV = Mikroskop mit 10^{-19} m Auflösung]

Ziele:

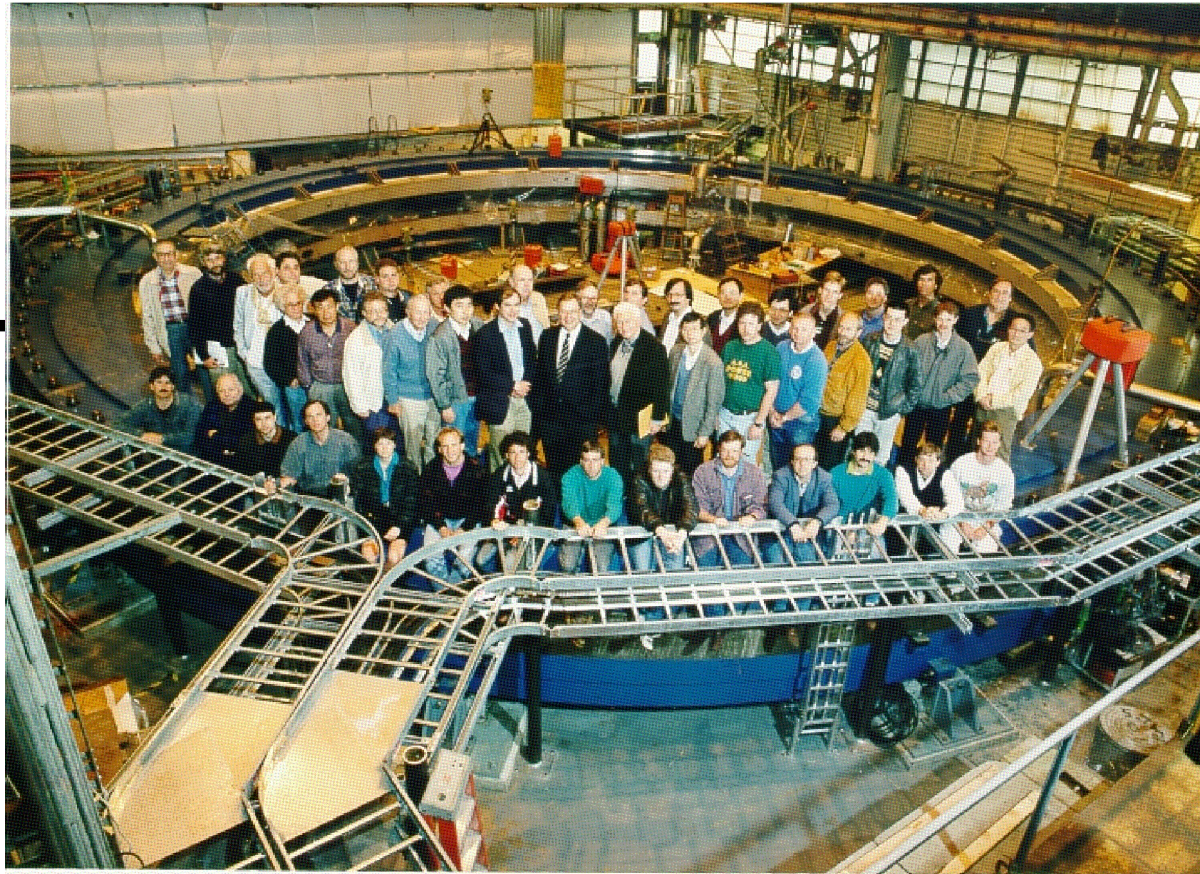
- Higgsmechanismus verstehen:
- Ein Higgsboson, viele, Supersymmetrie, 5te Dimension, etc???
- Ausserdem: dunkle Materie verstehen,
insgesamt: Beschaffenheit des Universums

Zusätzliche Möglichkeit



- Ausbreitung bekannter Teilchen beeinflusst von **neuen Teilchen!**

Zusätzliche Möglichkeit



- Messung von magnetischen Eigenschaften bekannter Teilchen

Zusammenfassung fundamentale Physik

- Bekannte Teilchen und Kräfte verstanden, fantastische Theorie
- Offen: Warum...? dunkle Materie? Higgs/Masse?
- Wir stehen an der Schwelle zu neuen Erkenntnissen

