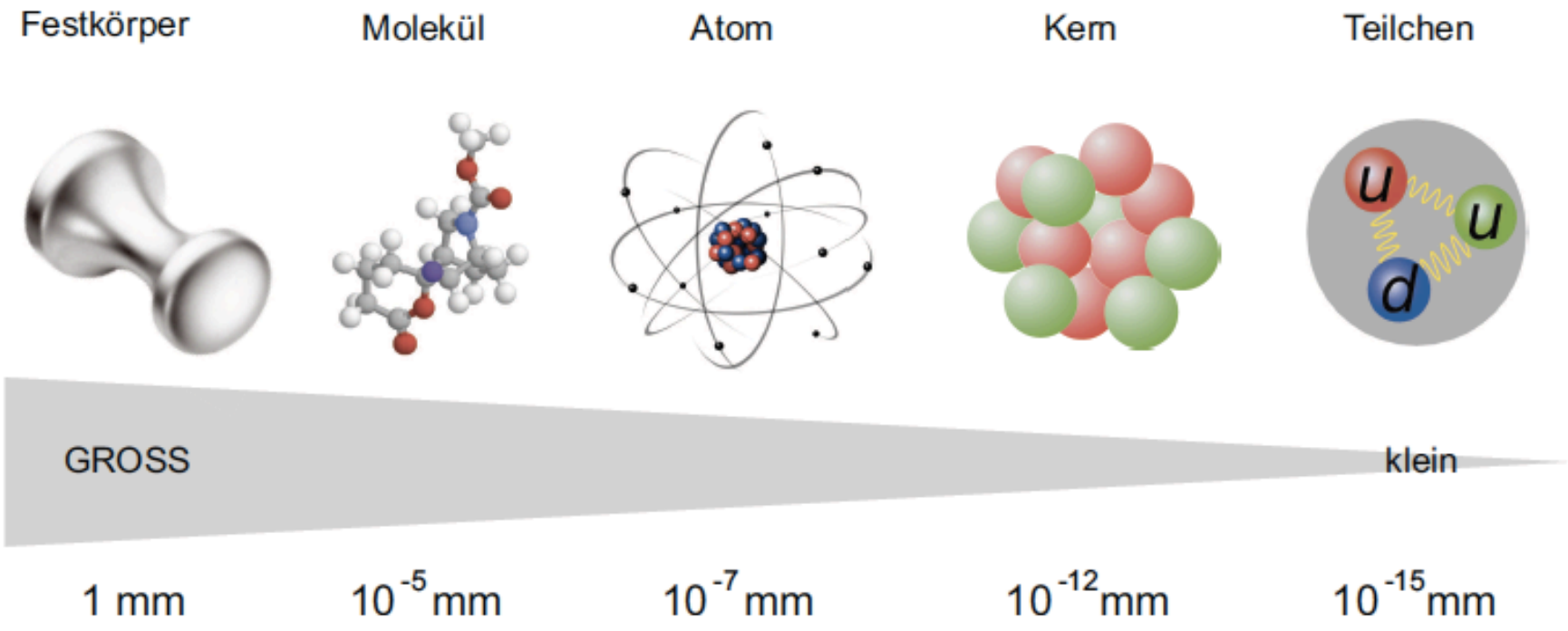
Struktur der Materie für Lehramt

Einführung:
Kern und Teilchenphysik

Michael Martins, Erika Garutti

Universität Hamburg
Sommer-Semester 2013

Struktur der Materie: Teil II



Einige aktuelle Fragen

Q1 Was ist Materie? ... Was ist Antimaterie?

Q2 Warum gibt es im Universum mehr Materie als Antimaterie?

Q3 Was ist die dunkle Materie?

Q4 Woher kommt die heutige dunkle Energie?

Q5 Was war die Ursache des Big Bang?

Q6 Ist Nuklear Energie gefährlich?

Q7 Wie funktioniert ein Nuklearreaktor?

Q8 Was ist Fusion?

Q9 Was ist Nuklear Medizin?

Q10 Was Ist besser, Proton oder Karbon Therapie?

Literature

- R. Eisberg, “QUANTUM PHYSICS of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles”
- T. Mayer-Kuckuk “Kernphysik”
- Berger “Elementarteilchenphysik”

Extras:

- U. Ellwanger, “Vom Universum zu dem Elementarteilchen”

Organization

- Vorlesung: Prof. Erika Garutti
  (eingeladene Vorlesung zur Thema: Reaktorphysik bei Dr. Marius Groll)

- Übungen: Milan Zvolsky

Teil II: Struktur

1 Einführung

2 Tools: Teilchenprozessen, Relativistische Kinematik, Quantenfeldtheorie, Wirkungsquerschnitt

3 Kernphysik

4 Detektoren und Beschleuniger

5 Teilchenphysik

1. Einführung

- Was ist Materie
- Elementar Teilchen
- Einheiten
- Fundamentale Wechselwirkungen

“ Whenever we probe nature—be it by studying the structure of nuclei, or by learning about macromolecules, or about elementary particles, or about the structure of solids we always get some essential part of this great universe."

(From **"Problems of Nuclear Structure,”** by Victor Weisskopf, **Physics Today** 14: 7, 1961.)

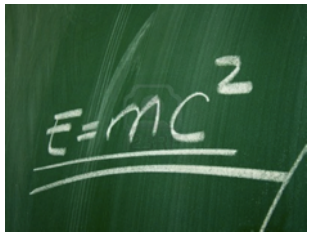
Was ist Materie?

Was ist Materie?

Physikalisch ist die Materie definiert als alles, was eine Masse hat.

Klassik Physik: Trennung zwischen Materie und Kräfte, Felder, Energie

Speziell Relativität: Einstein Masse-Energie-Äquivalenz



Die Masse ist nur eine von vielen Eigenschaften der Materie, mit denen sich die Physik beschäftigt.

verschiedene „Art“ von Materie?

Planetensysteme: Erde-Sonne ~1.5 10^{11} m

Sterne: Sonnenradius ~7 10^{8} m

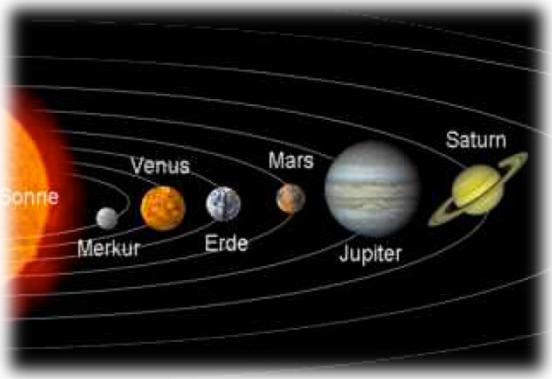
Planeten: Erde Radius ~ 6.4 10^{6} m

Sandkörner: ~ 10^{-3} m

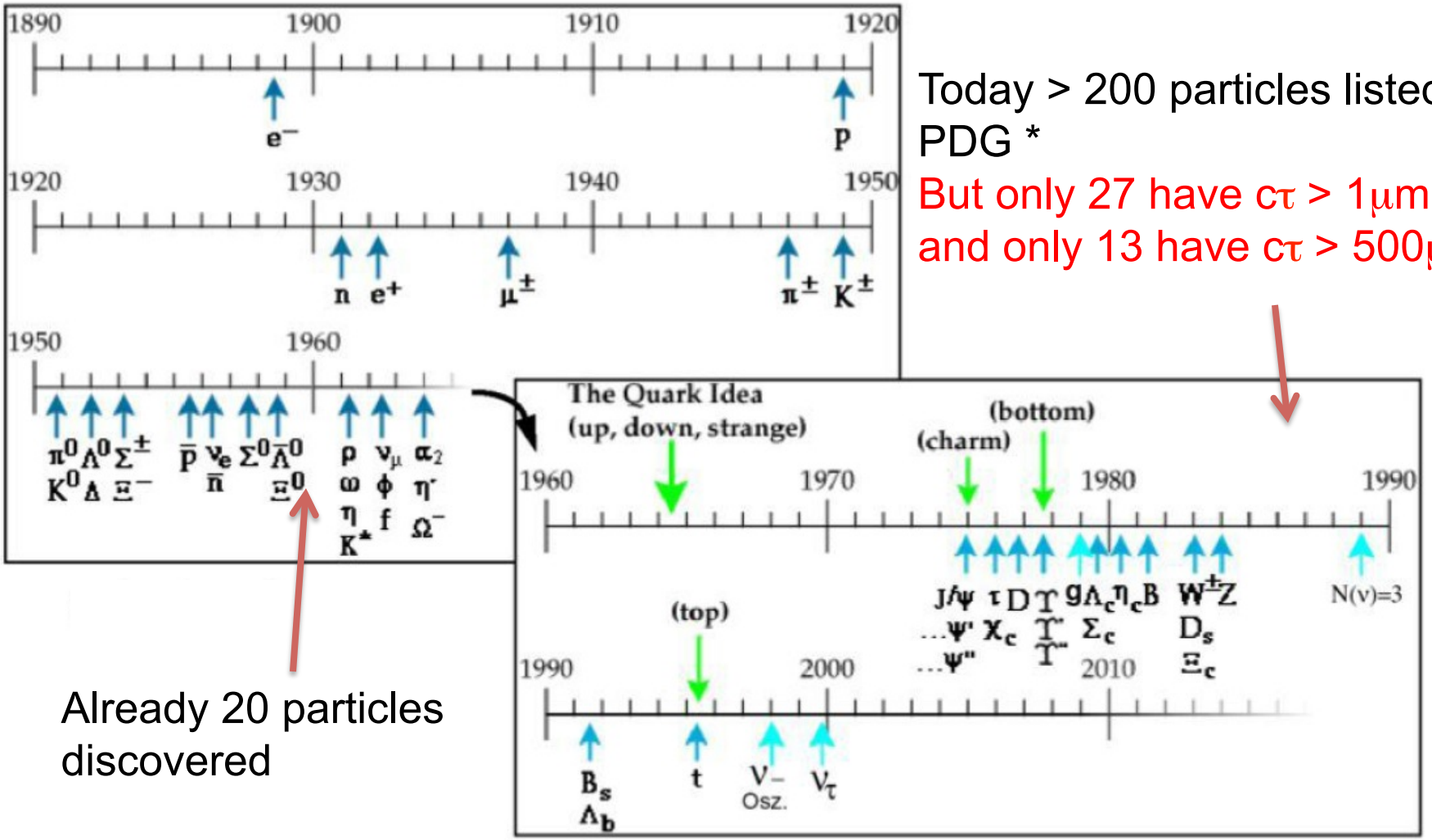
Vieren: ~ 10^{-7} m

Einfache Moleküle: ~ 10^{-9} m

Atome: ~ 10^{-10} m
Atomkern: ~ 10^{-14} m
Proton: ~ 10^{-15} m
Electron: < 10^{-18} m



A history of discoveries



Already 20 particles discovered

Today > 200 particles listed in PDG *

But only 27 have $c\tau > 1\mu m$ and only 13 have $c\tau > 500\mu m$

* PDG = Particle Data Group http://pdg.lbl.gov !!!

Stabile Teilchen

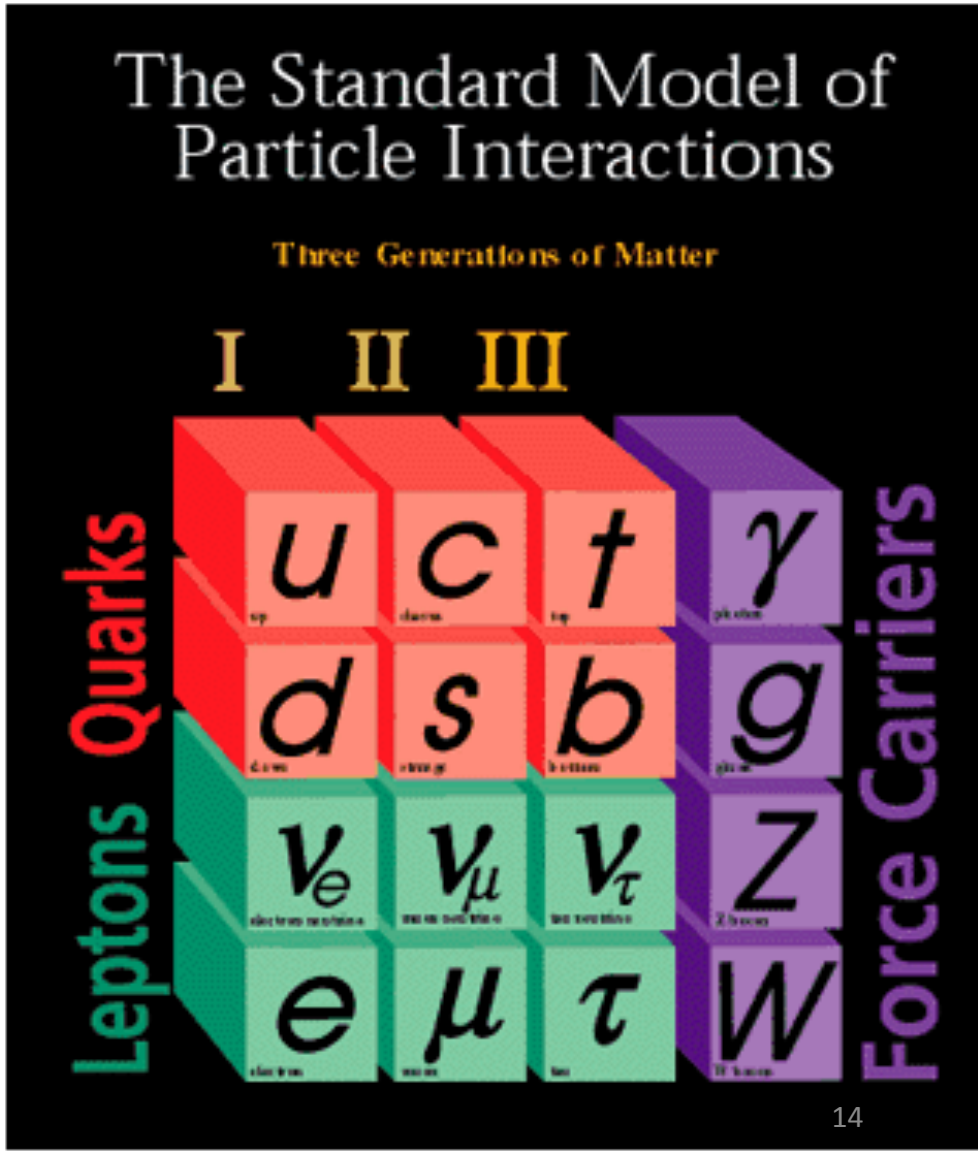
In die Natur nur 8 Teilchen sind „stabil“, i.e. Reichweite $c\tau > 500\mu m$

– $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$, $\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$, K^{0}, $p^{\pm}$, n, γ

- Alle andere Teilchen Zerfallen sofort nach die Produktion und müssen durch die Zerfallsprodukten rekonstruiert werden
- Letztendlich kann nur geladene Teilchen gemessen werden
- Neutrale Teilchen (Photons, Neutrons) müssen erstmals seine Energie zur geladene Teilchen übergeben.

Elementar Teilchen

-



3 Familien von je zwei Quarks (q)

+

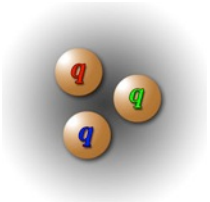
3 Familien von je zwei Leptonen (e^-,ν_e)

= Fermionen:

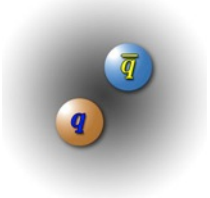
Spin (=Eigendrehimpuls) 1/2

Elementar Teilchen

- 3 Familien von je zwei Quarks (q)
- Kommen nur in gebundenen Zuständen vor!
  - $q\bar{q}$ (Mesonen) und qqq (Baryonen)



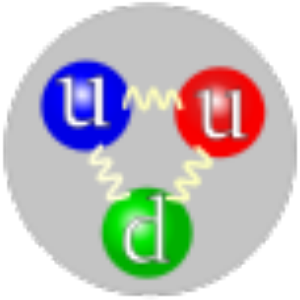
Baryonen



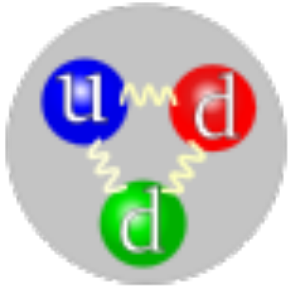
Mesonen

- 3 Familien von je zwei Leptonen (e^-,ν_e)
- Fermionen: Spin (=Eigendrehimpuls)1/2

Proton



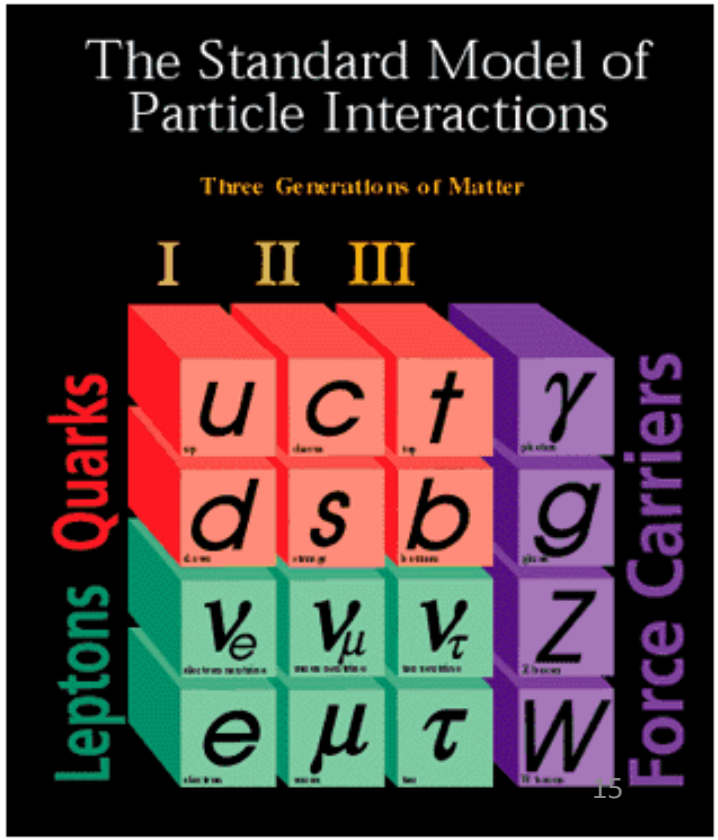
Neutron



$$Q(q_{u,c,t}) = \tfrac{2}{3}, \quad Q(q_{d,s,b}) = -\tfrac{1}{3}, \quad Q(\bar{q}) = -Q(q)$$

$$Q(p) = Q(uud) = \tfrac{2}{3} + \tfrac{2}{3} - \tfrac{1}{3} = 1$$

$$Q(n) = Q(udd) = \tfrac{2}{3} - \tfrac{1}{3} - \tfrac{1}{3} = 0$$

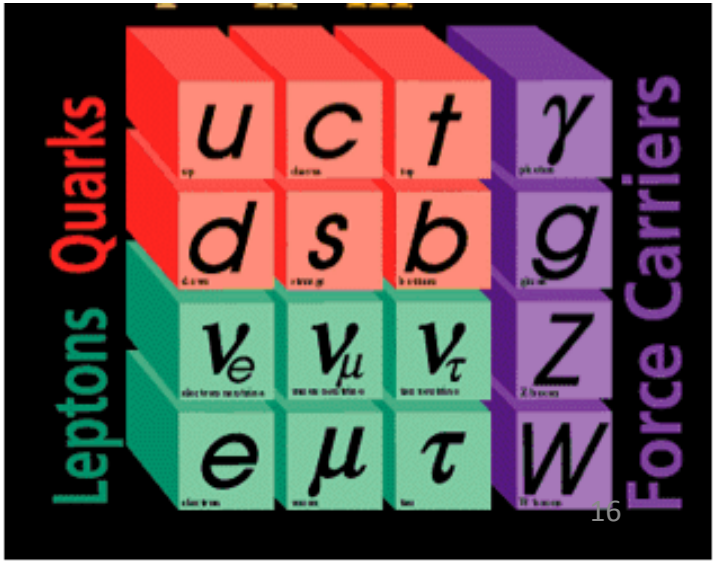


Hierarchy der Masse

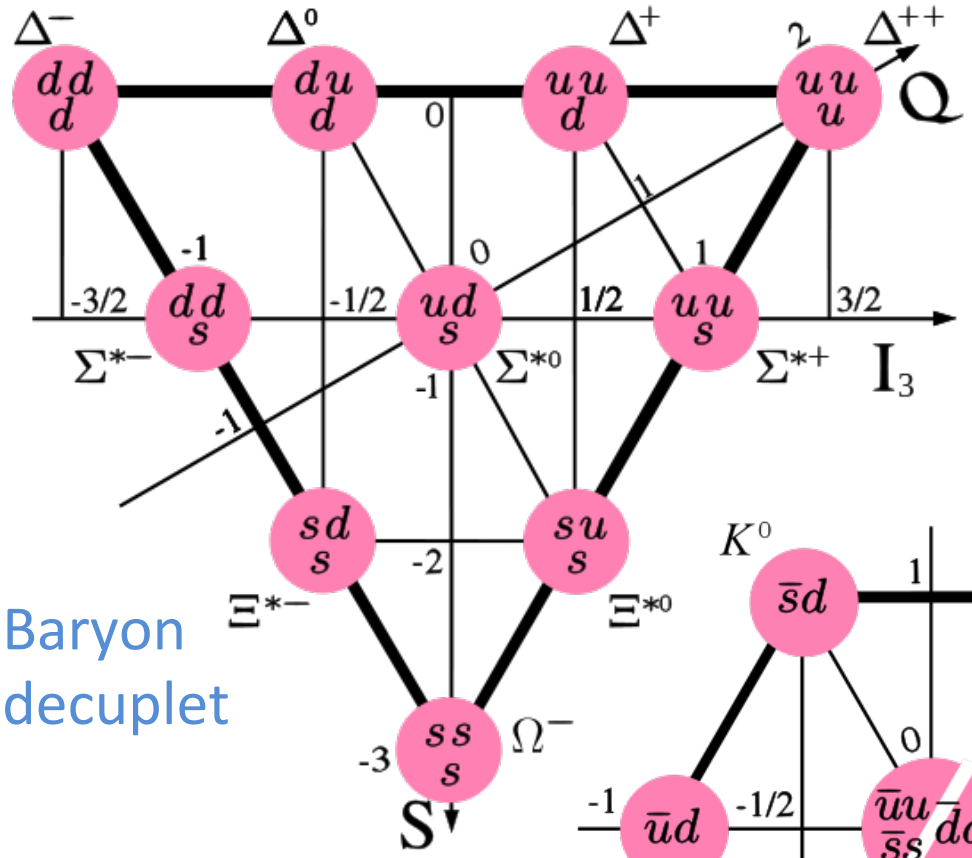
Massen der Teilchen sehr unterschiedlich (gänzlich unverstanden, freier Parameter des Modells aus Messungen)

- M_{up}~4 MeV/c^2, M_{charm}~1300 MeV/c^2, M_{top}~175000 MeV/c^2
- M_{down}~8 MeV/c^2, $M_{strange}$~150 MeV/c^2, M_{bottom}~4300 MeV/c^2
- $0<M_{\nu}<$eV/c^2, Hierarchie der Massen nicht bekannt
- M_e=0.511 MeV/c^2, M_{μ}=105.7 MeV/c^2, M_{τ}=1777 MeV/c^2

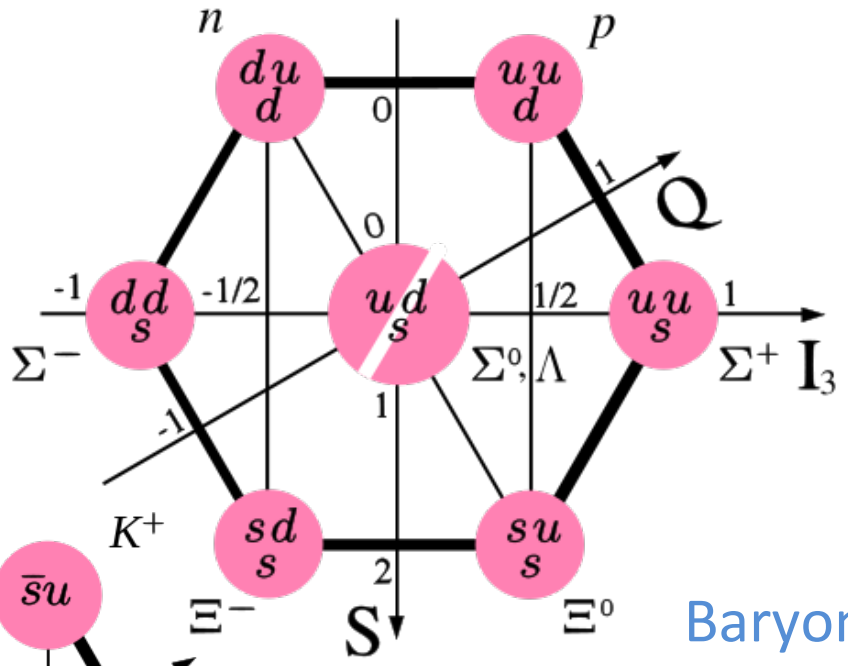
Warum gibt es so viele Teilchen,
die nicht in “Materie” verbaut sind?



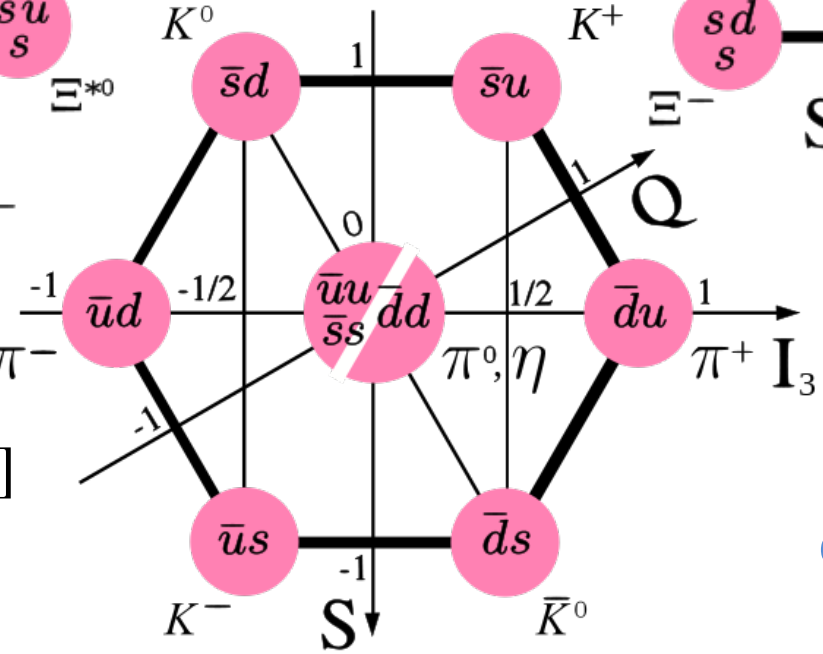
Baryonen & Mesonen



Baryon decuplet



Baryon octet



Meson octet

$$I_3 = \frac{1}{2}[(n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}})]$$

$$S = -(n_s - n_{\bar{s}})$$

Λ BARYONS
$(S = -1, I = 0)$

$\Lambda^0 = uds$

Λ

$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$

Mass $m = 1115.683 \pm 0.006$ MeV
$(m_\Lambda - m_{\overline{\Lambda}}) / m_\Lambda = (-0.1 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ (S = 1.6)
Mean life $\tau = (2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$ s (S = 1.6)
$(\tau_\Lambda - \tau_{\overline{\Lambda}}) / \tau_\Lambda = -0.001 \pm 0.009$
$c\tau = 7.89$ cm
Magnetic moment $\mu = -0.613 \pm 0.004\ \mu_N$
Electric dipole moment $d < 1.5 \times 10^{-16}\ e$cm, CL = 95%

Λ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	p (MeV/c)
$p\pi^-$	(63.9 ±0.5) %	101
$n\pi^0$	(35.8 ±0.5) %	104
$n\gamma$	(1.75±0.15) $\times 10^{-3}$	162
$p\pi^-\gamma$	[c] (8.4 ±1.4) $\times 10^{-4}$	101
$pe^-\overline{\nu}_e$	(8.32±0.14) $\times 10^{-4}$	163
$p\mu^-\overline{\nu}_\mu$	(1.57±0.35) $\times 10^{-4}$	131

* PDG = Particle Data Group http://pdg.lbl.gov !!!

Quantenzhalen

Teilchen Eigenschaften beschreibt man mit Quantenzhalen

$$I_3 = \frac{1}{2}[(n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}})]$$ Isospin

$$S = -(n_s - n_{\bar{s}})$$ Strangeness

$$B' = -(n_b - n_{\bar{b}})$$ Bottom-Zahl

$$C = +(n_c - n_{\bar{c}})$$ Charm-Zahl

$$T = +(n_t - n_{\bar{t}})$$ Top-Zahl

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B' + T)$$ Ladung (Gell-Mann–Nishijima)

Flavor quantum Zhalen

Baryonenzahl

Baryonenzahl

- Das Proton (leichtestes Baryon) ist stabil ($\tau > 10^{31}$ a)
- Beobachtet wird Neutron beta-Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

  Aber nicht: $\bar{n} \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Beobachtet wird: $pp \rightarrow p + p + \bar{p} + p$
- p,n wird Baryonenzahl B=+1 zugeordnet
- $\bar{p}\ \bar{n}$ wird Baryonenzahl B=-1 zugeordnet
- Baryonenzahl additiv, $B_{ein}=B_{aus}$
- beobachtet wird $pp \rightarrow \pi^0 pp$ oder $pp \rightarrow \gamma pp$

→Photon, Meson, (und auch W,Z,g) haben B=0

Auf Quark Niveau:

- Das ganze ist konsistent, wenn $B(q) = \frac{1}{3}$ $B(\bar{q}) = -\frac{1}{3}$

→Baryonen (qqq) →B=1 Mesonen ($q\bar{q}$)→B=0

Leptonenzahl

- Beoachtet wird: $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

  Aber nicht $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$

} Erlaubt durch Energie-, Impuls, Drehimpulserhaltung

→Einführung Leptonenzahl

$$(e^-, \nu_e): \quad L_e = 1, L_\mu = 0, L_\tau = 0$$

$$(\mu^-, \nu_\mu): \qquad 0 \qquad 1 \qquad 0$$

$$(\tau^-, \nu_\tau): \qquad 0 \qquad 0 \qquad 1$$

Für Antiteilchen: $(e^+, \bar{\nu}_e): \quad L_{e+} = -1, L_\mu = 0, L_\tau = 0$ etc.

Alle anderen Teilchen haben Leptonenzahl L=0.

Leptonenzahl additiv. Es gilt auch hier: $L_{ein}=L_{aus}$

Einheiten

Scheint trivial – ist aber komplex und aufschlussreich!

SI-Einheiten gesetzlich vorgeschrieben für die Lehre, aber nicht für wissenschaftliche Untersuchungen und Publikationen

- SI: Zeit..s, Laenge..m, Masse..kg, Strom...A

In Atomphysik:

- Typische Energien: $1\ eV = 1.602 \times 10^{-19}\ J$
- Typische Abstaende: $1\ Å = 0.1\ nm = 10^{-10}\ m$
- Typische Zeitskalen: $(\Delta E \Delta t \sim \hbar/2)\ 1fs = 10^{-15}\ s$

In Atomphysik: eV und Å gebräuchliche Einheiten

Einheiten

In Kern- und Teilchenphysik:

- Bindungsenergien im Kern ~ 10 MeV (10 x 10^6 eV)
- Bindungsenergien Quark im Proton ~ 0.3 GeV (0.3 x 10^9 eV)
- Anregungsenergien Hadronresonanzen ~ 0.3 GeV
- Größe von Kernen ~ 1 fm = 10^{-15} m (Fermi)

In Kern- und Teilchenphysik: MeV..GeV und fm gebraeuchlich

Relativitätstheorie: $E^2 = (pc)^2 + (Mc^2)^2$ → Impuls [MeV/c] und Massen [MeV/c^2]

- Impuls: 1 MeV/c = 5.344 x 10^{-22} kg m/s
- Masse: 1 MeV/c^2 = 1.783 x 10^{-30} kg

[Kernphysik: atomare Massenskala 1u = 1/12 ^{12}C-Atom,
1u = 931.5 MeV/c^2=1.661x10^{-27} kg]

Einheiten

Wichtige Konstanten:

Lichtgeschwindigkeit: $c=2.998 \times 10^{8}$ m/s [~30 cm/ns]

Geschwindigkeiten haeufig einheitenlos als $\beta=v/c$

Wirkungsquantum: $\hbar=h/2\pi=1.055 \times 10^{-34}$ Js= 6.582×10^{-22} MeVs

MERKEN: $\hbar c=197.3$ MeV fm

Einheiten

Anwendung : Heisenberg'sche Unschärferelation

$\Delta p \Delta x \approx \hbar / 2$

Ortsunsicherheit $\Delta x = 1\,fm \rightarrow \Delta p = \frac{1}{c}\frac{\hbar c}{2\Delta x} \approx 100 MeV / c$

$\Delta E \Delta \tau \approx \hbar / 2$

Lebensdauer $\tau = 10^{-24}\,s \rightarrow \Delta E \approx \Gamma = 300 MeV$

Anmerkung : In der Teilchenphysik ist es üblich $\hbar = c = 1$ zu setzen

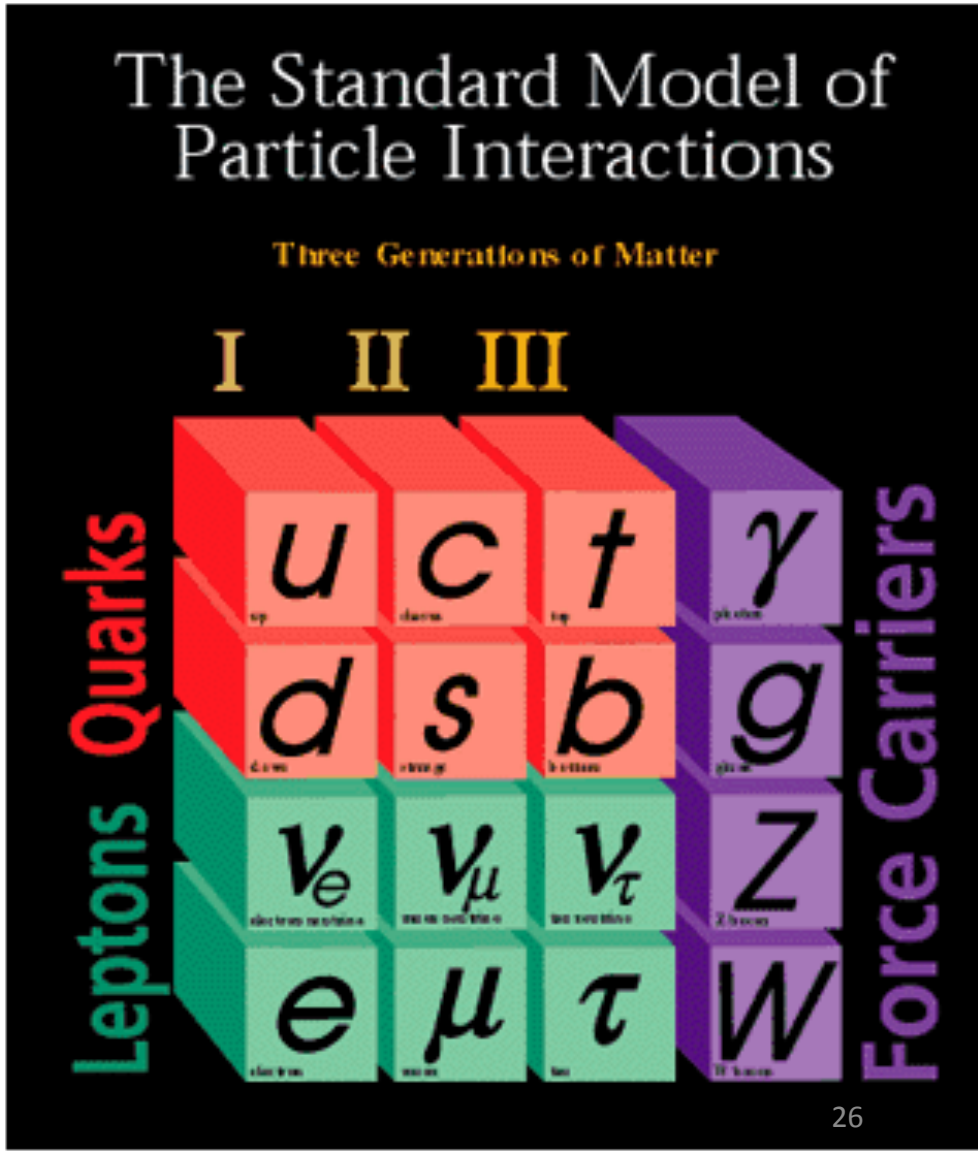
$\rightarrow \mathrm{L}: \left[\frac{\hbar c}{E}\right] = \left[GeV^{-1}\right]$ $\mathrm{T}: \left[\frac{\hbar}{E}\right] = \left[GeV^{-1}\right]$ $\mathrm{M}: \left[\frac{E}{c^2}\right] = \left[GeV\right]$ $\mathrm{p}: \left[\frac{E}{c}\right] = \left[GeV\right]$

$\Rightarrow$ übersichtlichere Formeln

Allerdings ist keine Dimensionsanalyse möglich.

Elementar Teilchen

Literature: Berger “Elementarteilchenphysik”



3 Familien von je zwei Quarks (q)

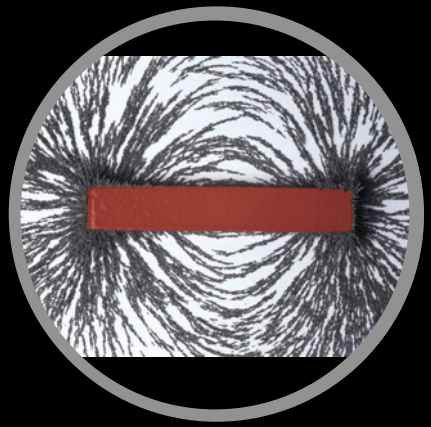
+

3 Familien von je zwei Leptonen (e^-,ν_e)

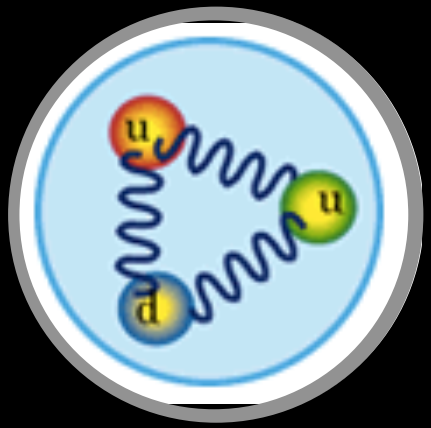
= Fermionen:

Spin (=Eigendrehimpuls) 1/2

Die Kräfte der Natur

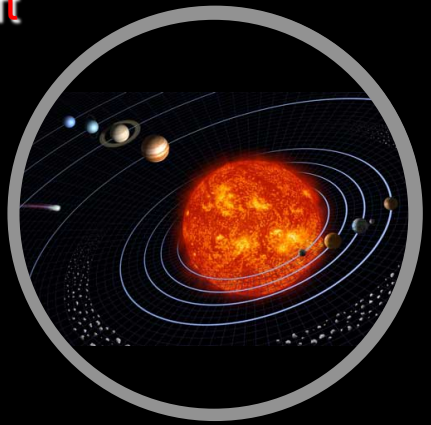


elektromagnetische Kraft



Starke Kraft

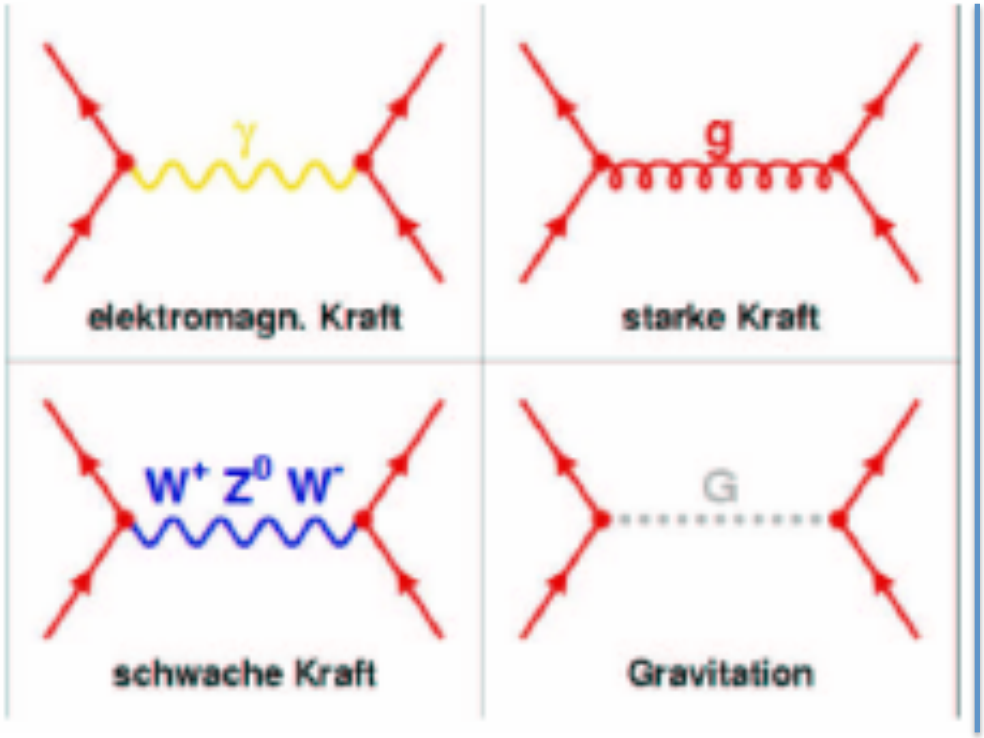
schwache Kraft



Gravitation

Fundamentale Wechselwirkungen

- Kräfte vermittelt durch Austauschteilchen (Feldquanten).
- Bosonen: Haben geradzahligen Spin (unterliegen der Bose-Einstein Statistik)
- Form der Kräfte folgt aus Symmetrieprinzip (Eichinvarianz)
- Ziel: Konsistente Theorie, die mit möglichst wenigen Parametern auskommt.



NB. Quantenfeldtheorie vs Klassisch

z.B. Coulomb

$\vec{F}_2 = g_2 \vec{E}$

$g_1 \quad g_2 \longrightarrow \vec{E}$

$\vec{E} = \frac{g_1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\hat{r}}{r^2}$

g_1 erzeugt Feld.

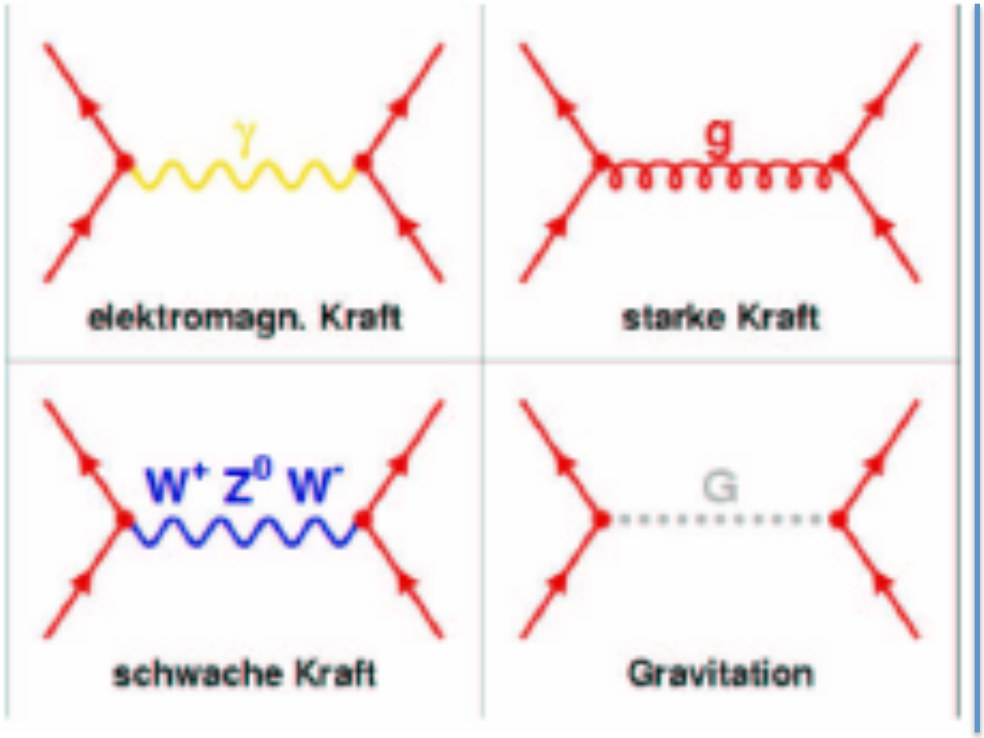
Feld vermittelt Wechselwirkung 1→2

Beschreibung durch Potential.

Zunächst mathematische Vereinfachung.

Fundamentale Wechselwirkungen

- Kräfte vermittelt durch Austauschteilchen (Feldquanten).
- Bosonen: Haben geradzahligen Spin (unterliegen der Bose-Einstein Statistik)
- Form der Kräfte folgt aus Symmetrieprinzip (Eichinvarianz)
- Ziel: Konsistente Theorie, die mit möglichst wenigen Parametern auskommt.



NB. Quantenfeldtheorie vs Klassisch

- Teilchen sendet Feldquanten (γ) aus
- Verletzung von Energie und Impulserhaltung (Unschärferelation) $\Delta E \Delta t \geq \hbar$
- Für Feldquant mit Masse m: $\Delta E = mc^2$

→Lebensdauer $\Delta t \approx \hbar / mc^2$

→Reichweite $r_0 \approx c\Delta t = \frac{\hbar c}{mc^2}$

Wechselwirkungen und Symmetrien

Wechselwirkungen unterscheiden sich durch ihre Reichweite, Stärke ...

- Reichweite: $r_0 \approx c\Delta t = \frac{\hbar c}{mc^2}$
- Stärke: Wahrscheinlichkeit, dass Feld ausgesandt wird.

(in QED: Proportional Ladung g_1

Kopplungskonstante $\sqrt{4\pi\alpha}$ mit $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} = 1/137$ Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante

- Feldquanten, die Kräfte vermitteln, werden virtuell genannt. $p_\gamma^2 = m_\gamma^2 c^4 < 0!$

... und Erhaltungsgrößen: (Noether-Theorem)

Verbindung von Symmetrie	←→ Erhaltungsgröße
Zeitverschiebung	←→ Energieerhaltung
Ortsverschiebung	←→ Impulserhaltung
Drehung	←→ Drehimpulserhaltung

Wechselwirkungen

$$\text{Reichweite}: \text{Coulomb} \rightarrow \text{Photon m} = 0 \rightarrow \mathrm{r}_0 = \frac{\hbar c}{m_0 c^2} \rightarrow \infty[\frac{1}{\mathrm{r}^2}]$$

$$\text{Kernkraft}: \pi\text{-Meson m}_\pi = 0.14 GeV/c^2 \rightarrow \mathrm{r}_0 = \frac{0.2 GeV fm}{0.14 GeV} = 1.4\, fm \quad \text{(Yukawa1935)}$$

$$\text{Schwache WW}: \text{W/Z Bosonen m} \sim 90\ \text{GeV/c}^2 \rightarrow r_0 = \frac{0.2}{90} fm = 2 \cdot 10^{-18}\,\text{m}$$

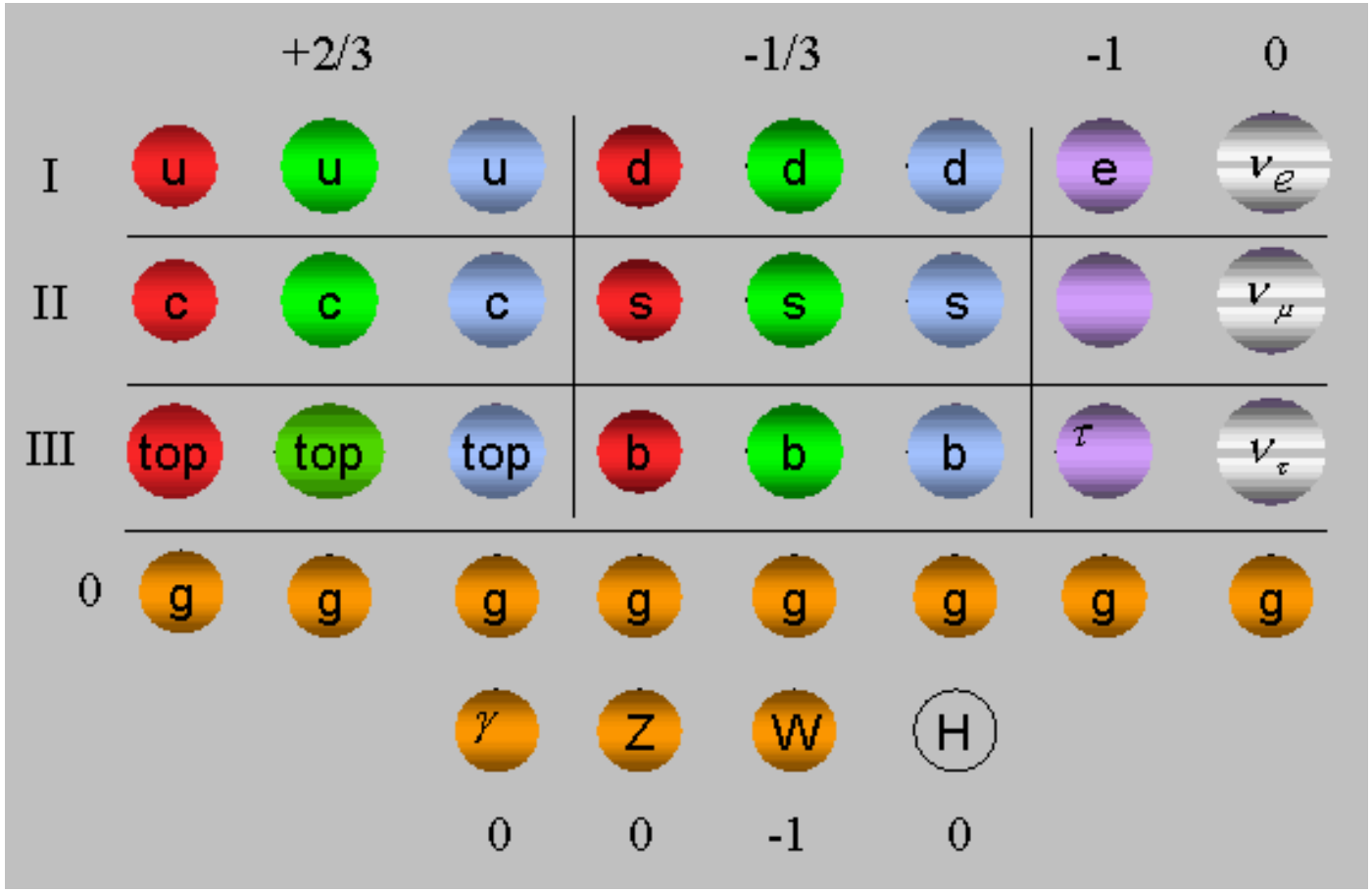
WW	Ladung	Stärke	Feldquant	Reichweite
Gravitation	Masse	10^{-28}	Graviton (m=0) ?	∞
Elektro-magn.	el. Ladung	1/137	Photon (m=0)	∞
Schwach	schw. Ladung	1/25	W/Z (m=80/90 GeV/c^2)	10^{-18} m
stark	Farbladung	1	Gluon (m=0)	10^{-15} m

Stärke ist Abstands/ Energie abhängig.

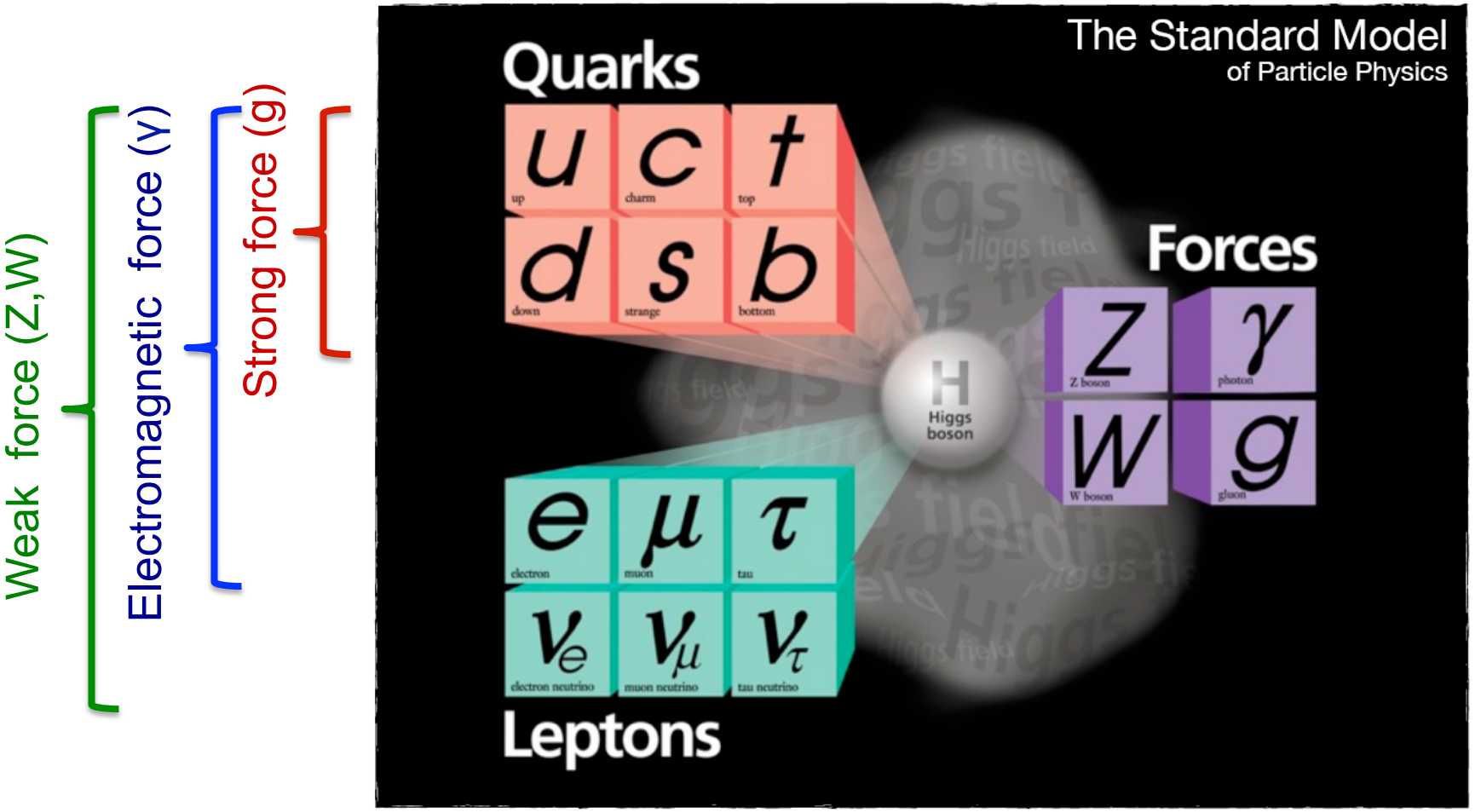
Werte angegeben für E=0.

Farbladung

Bezeichnung für jene physikalische Eigenschaft der Elementarteilchen Quarks und Gluonen



Gluonen tragen „farbe“ ➔ 8 verschiedene „Sorten“ von Gluonen



* Spin = ½ Spin = 0 Spin = 1

Gravitation ➔ Graviton (G), Spin = 2

* Spin ist der Eigendrehimpuls von Teilchen.

Was ist Materie?

Männer sind NICHT Schweine

Was ist Materie?

Das größtmögliche physikalische Objekt ist das Universum

- Eine Galaxie ~ 10^9 – 10^{12} Sterne
- Die Galaxien sind ~ gleichmäßig verteilt
- Die größte beobachtete Entfernung (einer Supernova) ~ 10^{10} Ly

  (1 Ly ~ 1 y x c = 3.1 10^7 s x 3 10^8 m/s = 0.9 10^{16} m ~ 10^{13} km

  1 Mpc = 3.262 x 10^6 Ly)

Annahme:

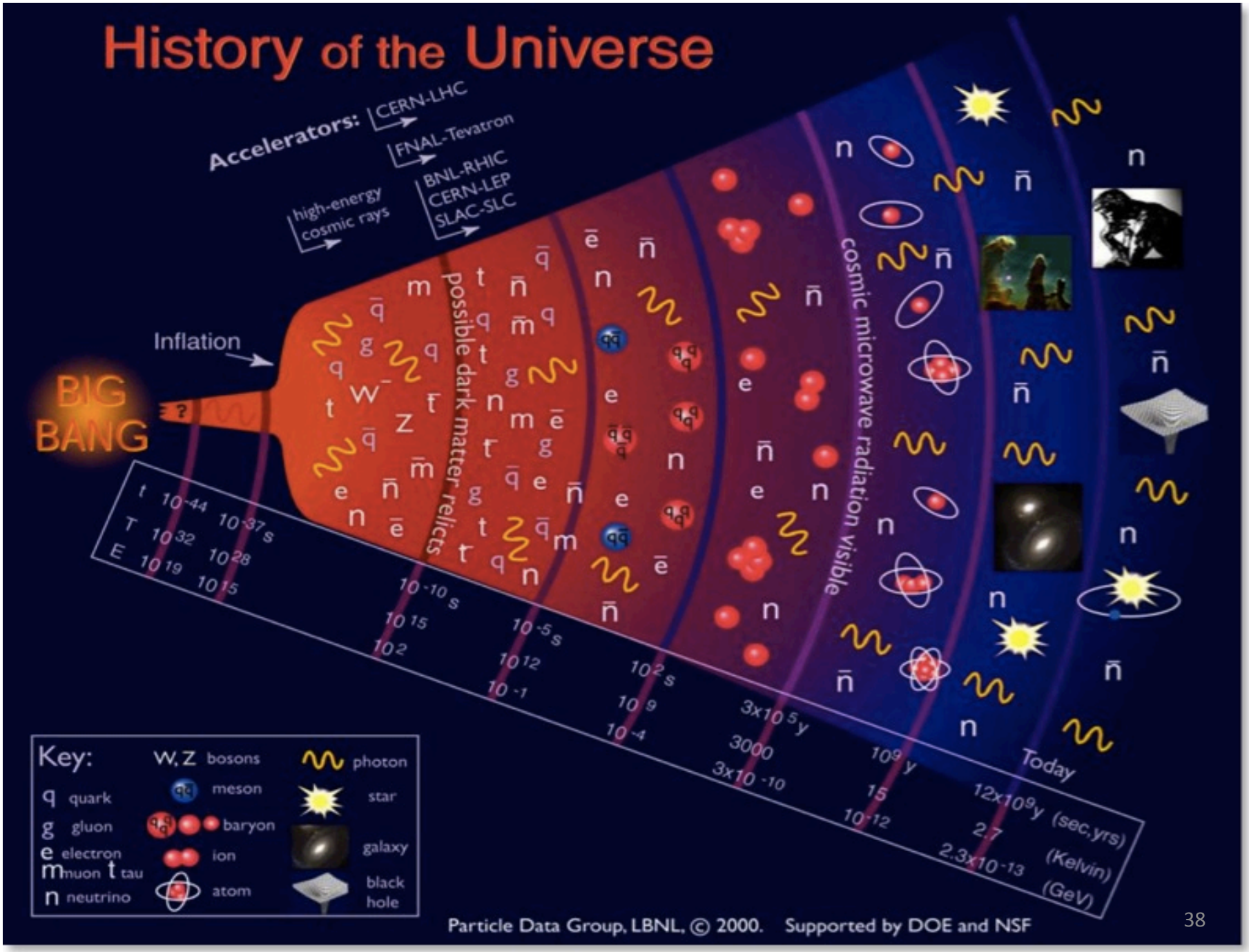
homogene Universum ➔ die gesamte Materie (Galaxien, Sterne, Staub, Atome, Elementarteilchen) betrachtet als ein homogenes Gas

Gas beschrieben durch Materiedichte ρ und Druck p

Materie im Universum

Man unterscheidet zwischen drei Formen von Materie und Energie:

a) non-relativistische Objekten (Galaxien, Sterne, Staub, Atome, Massive Elementarteilchen die sich mit v<<c bewegen). Beitrag ρ_{nr} zu den gesamte Gas Dichte. Den Beitrag zum „Druck des Universum“ ist vernachlässigbar.
b) Relativistische Objekte (Massenlose oder leichte energetische Teilchen die sich mit v~c bewegen). Beitrag ρ_r zu Gas Dichte. Beitrag $p \sim 1/3\ \rho_r c^2$ zum Druck.
c) Konstante Felder (erzeugen eine potentielle Energie(-dichte) bezeichnet als *dunkle Energie* oder *kosmologische Konstante* Λ).


History of the Universe
Accelerators:
CERN-LHC
FNAL-Tevatron
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC-SLC
high-energy cosmic rays
Inflation
BIG BANG
possible dark matter relicts
cosmic microwave radiation visible
Today
t 10-44 10-37 s
T 1032 1028
E 1019 1015
10-10 s
1015
102
10-5 s
1012
10-1
102 s
109
10-4
3x105 y
3000
3x10-10
109 y
15
10-12
12x109 y (sec,yrs)
2.7 (Kelvin)
2.3x10-13 (GeV)
Key:
q quark
g gluon
e electron
m muon t tau
n neutrino
W, Z bosons
meson
baryon
ion
atom
photon
star
galaxy
black hole
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Materie im Universum

Wir wissen heute dass:

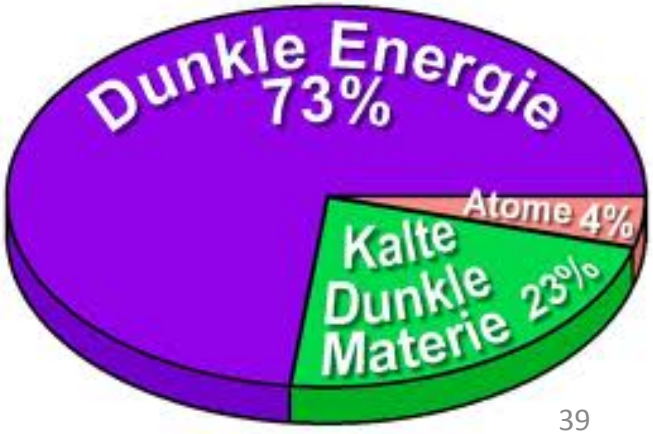
- Galaxien mit eine Geschwindigkeit $v \sim H_0 d$ von uns entfernen
  (d = Galaxie Entfernung zu uns, H_0 = Hubblekonstante 70 km / s Mpc)

- $t_{Heute} = t_0 \sim 1.4 \times 10^{10}$ Jahre

- Aus Einstein-Gleichungen berechnete Materiedichte
  $\rho(t_0) = \rho_{nr} + \rho_r \sim 2 \times 10^{-27}$ kg m^{-3}

- Dichte der bekannter Materie (Galaxien+Sterne+Staub) $\rho_{bek} \sim \rho(t_0) / 6$!!!
  ➔ 5 x mehr Dunkle Materie als Materie
  („Dunkle“ = kein Licht abstrahlt)

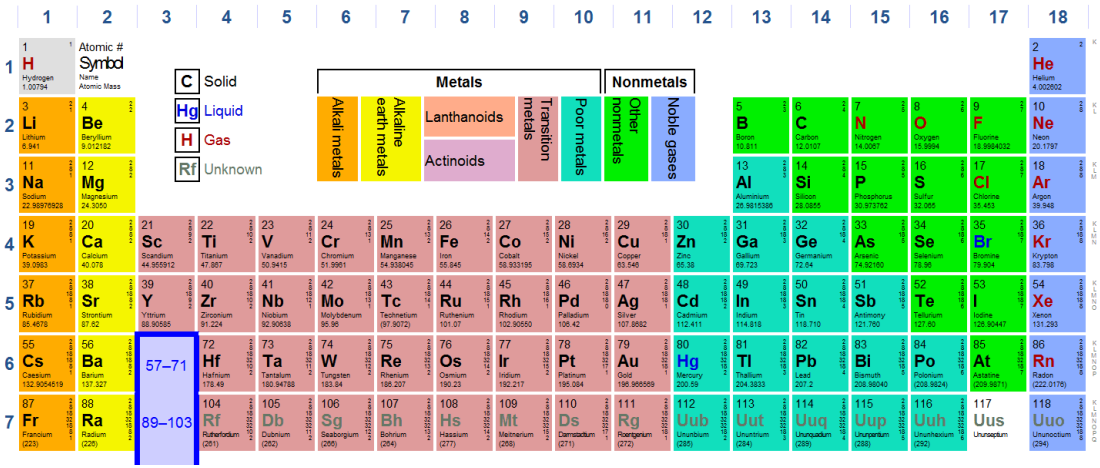
- Die größte teil des Universum bestehet auf ein konstante Feld (Dunkle Energie)
  ~3-fach grösser als $\rho(t_0)$
  („Dunkel“ = unklar, unerklärt)



Kernphysik:

Systematik der Atomkerne und deren Zerfälle

Komplexe Systeme, oft keine analytischen Berechnungen möglich



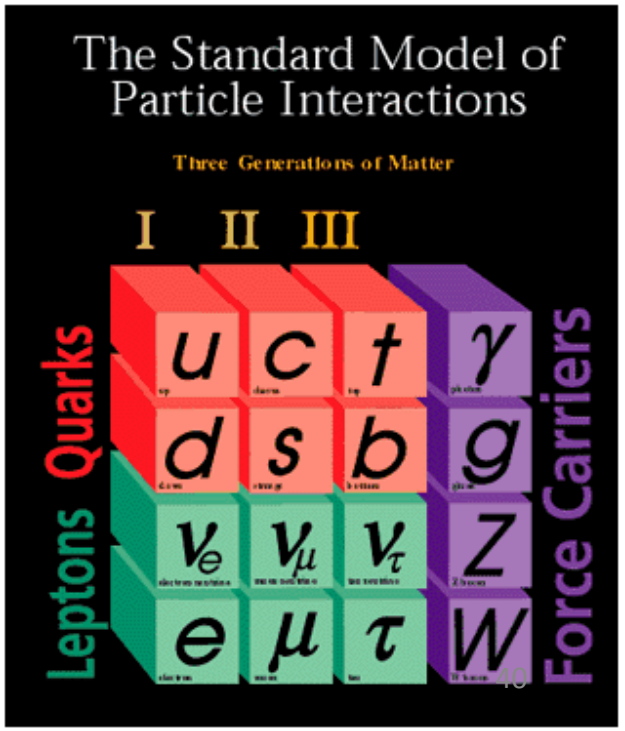
Elementarteilchenphysik:

Auffinden der elementaren (=strukturlosen) Bausteine

Untersuchung ihrer Eigenschaften

Untersuchung der Kräfte, die zwischen den Teilchen wirken

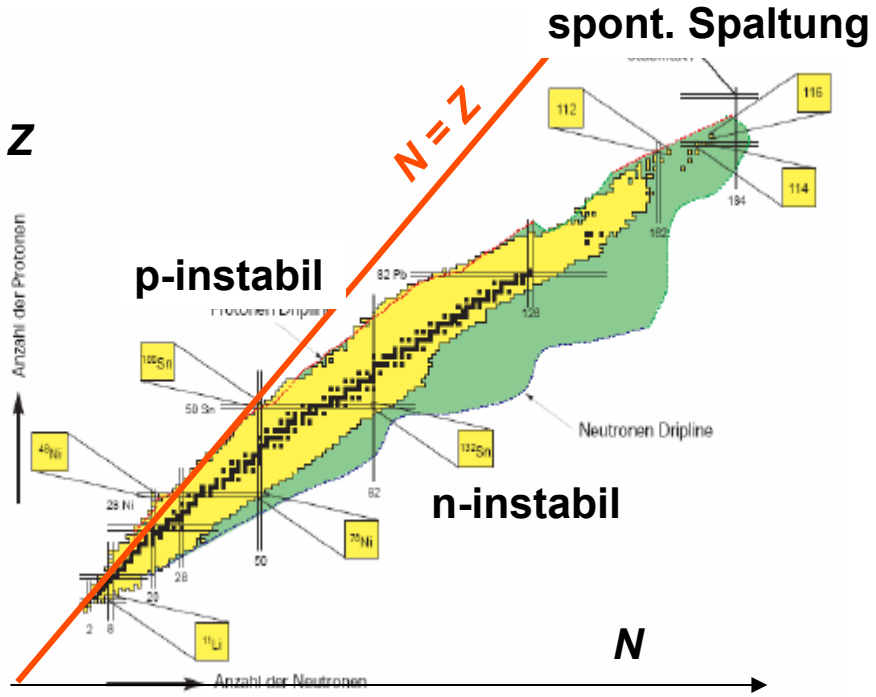
➔ allgemeine Theorie (?)



Kernphysik:

Systematik der Atomkerne und deren Zerfälle

Komplexe Systeme, oft keine analytischen Berechnungen möglich



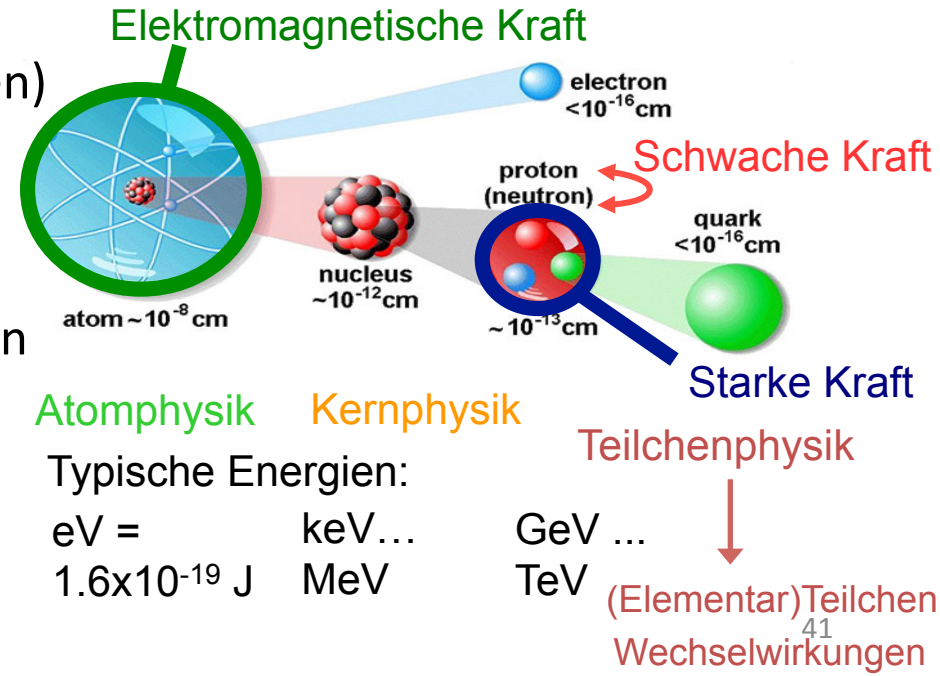
Elementarteilchenphysik:

Auffinden der elementaren (=strukturlosen) Bausteine

Untersuchung ihrer Eigenschaften

Untersuchung der Kräfte, die zwischen den Teilchen wirken

➔ allgemeine Theorie (?)



Historische Entwicklung (willkürliche Auswahl)

Experiment	Theorie
1895 Röntgen Röntgenstrahlen	
1896 Becquerel Radioaktivität	
1897 Thomson Elektron (e/m)	
1911 Rutherford Atomkern	
1922 Compton Compton Effekt	
1932 Chadwick Neutron	
1932 Anderson Anti-Elektron	
1937 Anderson, Neddermayer Myon	
1939 Hahn, Straßmann Kernspaltung	
1952 Fermi, Anderson Nukleonresonanzen	
1955 Chamberlain, Segre Antiproton	
1956 Reines,Cowan Neutrino	
1964 Cronin, Fitch CP-Verletzung	
1968 SLAC Quarks in ep-WW	
1974 Richter,Ting J/ψ-Teilchen	
1974 Ledermann Υ-Teilchen	
1979 DESY Gluon	
1983 CERN W-Z-Teilchen	
1989 CERN Anzahl Neutrinos = 3	
1994 FNAL Top-Quark	
1996 GSI Kern mit Z=112	
1998 Japan Neutrinooszillation	
2000 FNAL τ-Neutrino	
	1900 Planck Wirkungsquantum
	1905 Einstein Photon, $E=mc^2$
	1927 Dirac Antimaterie
	1932 Heisenberg Isospin
	1933 Pauli Neutrino
	1934 Fermi Theorie β-Zerfall
	1935 Yukawa Mesonen-Hypothese der Kernkraft
	1935 Weizsäcker Kern-Massenformel
	1949 Tomonaga, Feynman, Schwinger QED
	1949 Göppert-Mayer, Jensen Schalenmodell Kern
	1956 Lee, Yang Paritätsverletz.
	1964 Gell-Mann, Zweig Quark-hypothese
	1964 Glashow,Weinberg,Salam Elektro-schwache Verein.
	1973 Fritzsch, Gell-Mann QCD
	1973 Green, Politzer, Wilczek Asymptotische Freiheit

2012 CERN (LHC) Higgs-Teilchen

Viele dieser Schlüsselentdeckungen werden Thema in dieser Vorlesung sein.

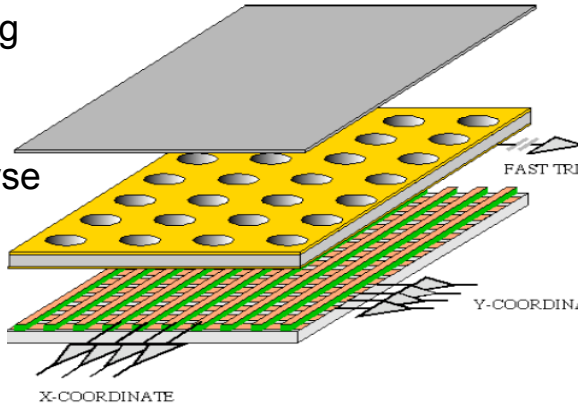
Anwendungen

Ionenstrahltherapie zur Behandlung von inoperablen Tumoren im Kopf- und Halsbereich.

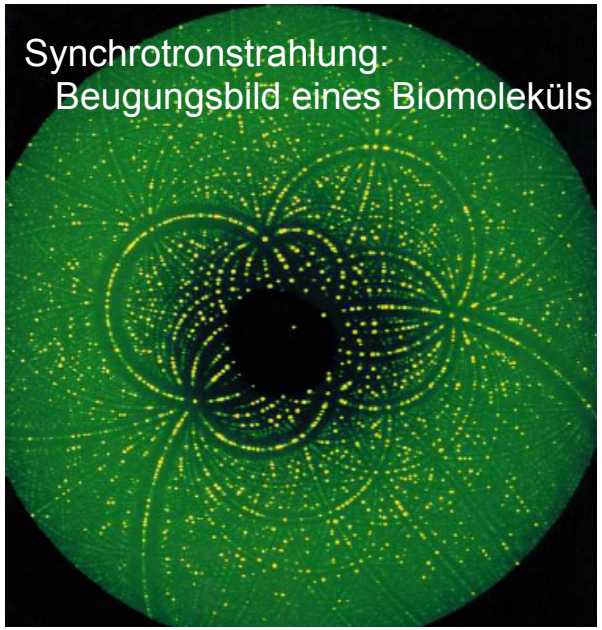
Spinoff-Produkte der Kern- und Teilchenphysik:

- Kultur
- Beschleuniger und Nachweismethoden in
  - Festkörperphysik, Materialwissenschaften
  - Chemie, Biowissenschaften
  - Medizin (Therapie und Diagnose)
- Energie
- WWW + Grid-Computing

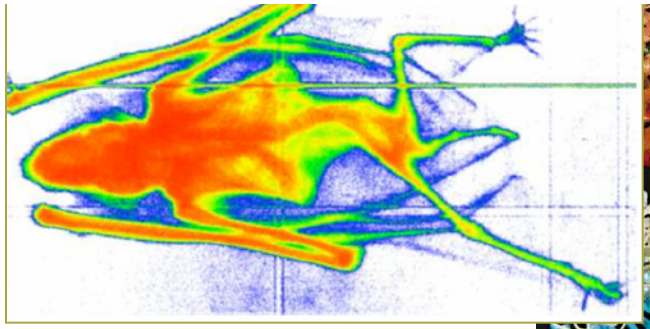
Gasdetektor für Röntgenanalyse



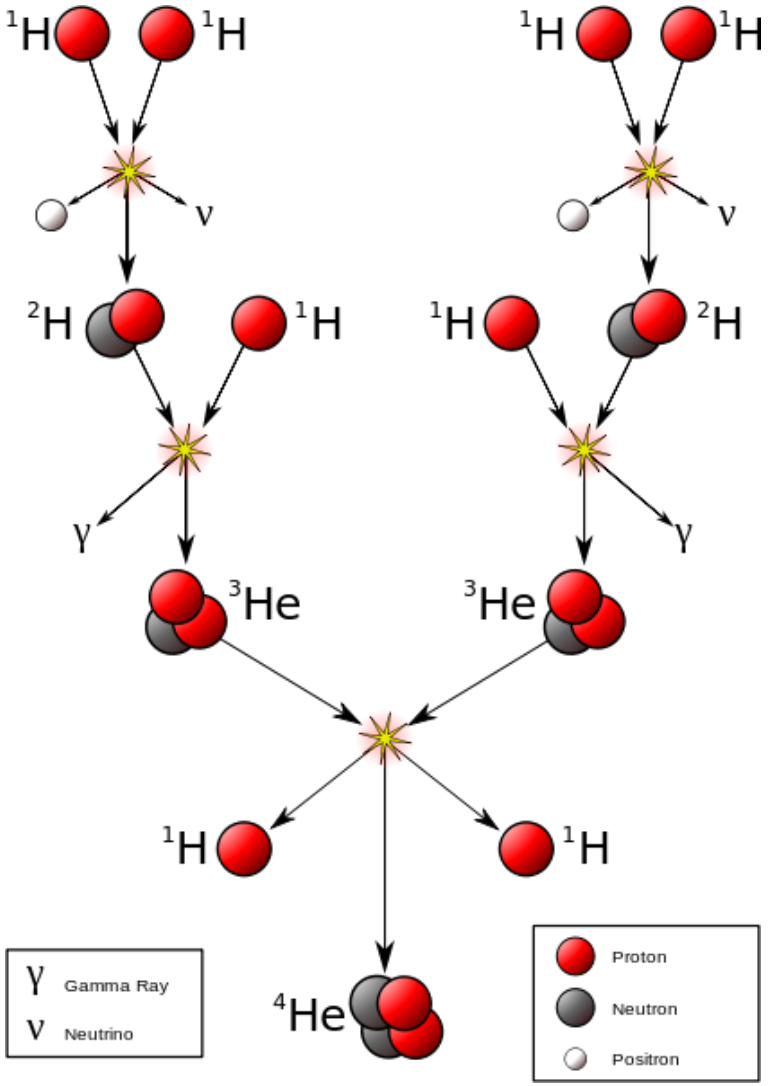
Strukturbestimmung Biomolekül



Fledermaus: Radiographie 9 keV Photonen



Warum scheint die Sonne?



$$ {}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^2_1\mathrm{D} + e^+ + \nu_e + 0.42\ \mathrm{MeV} $$

$$ e^- + e^+ \rightarrow 2\,\gamma + 1.02\ \mathrm{MeV} $$

$$ {}^2_1\mathrm{D} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma + 5.49\ \mathrm{MeV} $$

Zusammenfassung: Kapitel 1

- Kern-und Teilchenphysik = Physik der subatomaren Systeme: Ortsskala< 10^{-15} m (fm) und Energieskala > MeV (10^6 eV)
- Materie zusammengesetzt aus fundamentalen (punktförmigen) Spin-1/2-Teilchen (Fermionen): Quarks und Leptonen
- Quarks und Leptonen kommen in 6 „flavours“ (3 Familien)
- Vier fundamentale Wechselwirkungen: elektro-magnetisch, schwach, stark und Gravitation
- Wechselwirkungen werden durch den Austausch von Eichbosonen (Photonen; W,Z; 8 Gluonen; Graviton) beschrieben, die an Ladungen (elektrische Ladung, schwache Ladung, Farbe und Masse) koppeln
- Reichweiten der Wechselwirkungen hängen von den Massen der Eichbosonen ab

- Symmetrien und Quantenzahlen beschreiben, welche Teilchenreaktionen auftreten (Energieerhaltung, Ladungserhaltung, Leptonzahlen, Baryonzahlen,..)
- Quarks und Gluonen treten nicht als freie Teilchen auf, sondern in farbneutralen Hadronen (Mesonen, Baryonen)
- Mesonen sind Quark+Antiquark-Systeme, Baryonen sind qqq-Systeme
- Kerne setzen sich aus Protonen und Neutronen zusammen
- Ziel der Kern-und Teilchenphysik ist es, die subatomare Welt mit einer konsistenten Theorie (Modell) zu beschreiben
- Kern-und Teilchenphysik haben eine enge Verbindung zur Kosmologie und Astrophysik (Astroteilchenphysik)
- Methoden der Kern- und Teilchenphysik finden zahlreiche Anwendungen in Wissenschaft, Technik und täglichem Leben