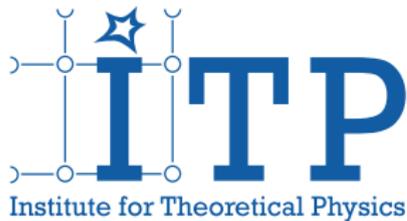


Raum – Zeit – Materie

Hendrik van Hees

Goethe University Frankfurt



- 1 Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen
- 2 Relativistische Quantenfeldtheorie und Standardmodell
- 3 Symmetrien und das Standardmodell
- 4 „The big Picture“: ART und Kosmologie
- 5 Kosmologie: Geschichte des Universums
- 6 Nachweis von Gravitationswellen

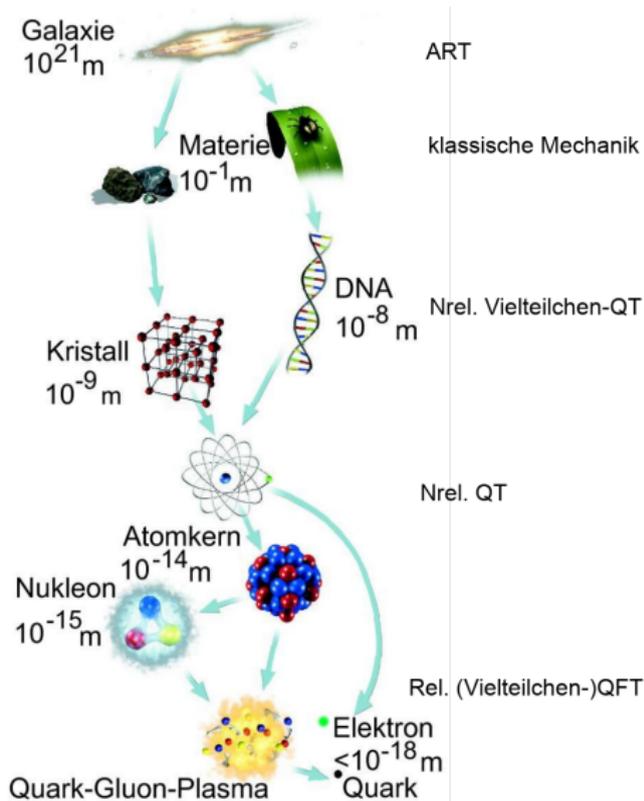
Aufbau der Materie

Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- verschiedene Skalen \Leftrightarrow **verschiedene theoretische Beschreibungsebenen**
- **makroskopische Beschreibung:** viele $\mathcal{O}(10^{24})$ Teilchen
 - **klassische nichtrelativistische Mechanik:** makroskopische Materie, gemittelte Beschreibung makroskopischer Freiheitsgrade, kleine Geschwindigkeiten/Kräfte
 - **klassische relativistische Mechanik:** Bewegungen makroskopischer Körper; hohe Geschwindigkeiten; alle Kräfte außer Gravitation: SRT; Gravitation ART
- **mikroskopische Beschreibung:** einzelne Teilchen, fundamentale WW
 - **nichtrelativistische QM:** einzelne/wenige Teilchen; kleine Energien (nicht zu schwere Atome, Moleküle, Kerne; Makrophysik: kondensierte Materie)
 - **Relativistische QFT einschließlich Quantisierung des em. Feldes:** derzeit fundamentalste Ebene; beschreibt alles außer Gravitation (Quantenoptik, Hochenergiepartikel- und Kernphysik, Astrophysik, Kosmologie)
 - **klassische Elektrodynamik:** Wechselwirkung zwischen em. Wellen und Materie (in klassischer und QT-Beschreibung)
 - **Allgemeine Relativitätstheorie:** klassische Beschreibung der Gravitationswechselwirkung (Astrophysik, Kosmologie);
 - bislang **QT-Beschreibung der Gravitation** noch nicht befriedigend verstanden!

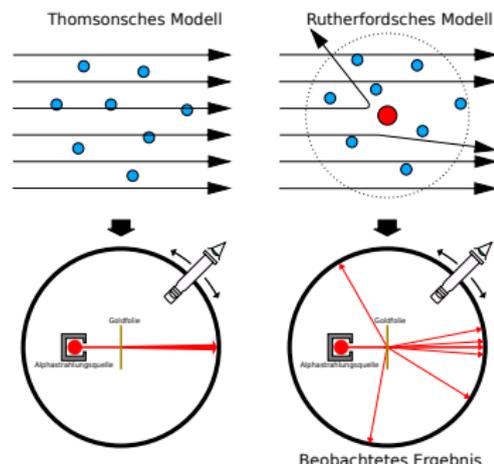
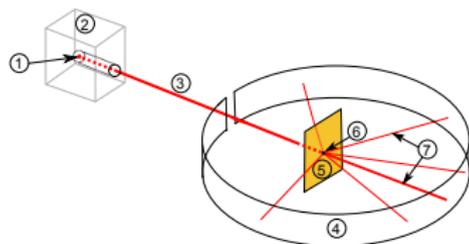
Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- fundamentale Physik:
relativistische QFT (umfassend außer Gravitation!)
- Demokrit (460-370 BC):
„Es gibt nur **Atome** und den **leeren Raum!**“
- **Atom=griechisch für „das Unteilbare“**
- Rutherford (1909-1911):
der größte Teil des Atoms ist „leerer Raum“
- Hauptanteil der Masse im **Atomkern**
- heute: **Standardmodell der Elementarteilchen**
- **Beschreibung bei größeren Skalen:**
Nrel. QT, Quanten-Statistik ⇒ **klassische Physik**



Streuexperimente

- Streuexperimente wichtigste Methode, um **Aufbau der Materie** zu untersuchen!
- Beispiel: **Rutherford-Goldfolienexperiment**



- **Theorie:** Streuung von α -Teilchen am **Coulombpotential des Kerns** (Schwerpunktsystem)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}$$

- **Quantentheorie** liefert gleiches Resultat wie klassische Mechanik!

Relativistische QFT

- Relativistische (hochenergetische) Stöße zwischen Teilchen:
Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse
- QM mit fester Teilchenzahl nicht mehr anwendbar!
- Ausweg: Quantenfeldtheorie mit Hilbertraum zur Beschreibung von Systemen nicht festgelegter Teilchenzahl
- Beobachtung: Gleichartige Teilchen ununterscheidbar
- zwei grundlegende Sorten: Bosonen und Fermionen
- Hilbertraum unbestimmter Teilchenzahl
- einzelnes Teilchen durch Impuls-Spin-Zustände $|\vec{p}, \sigma\rangle$ bestimmt

Relativistische Quantenfeldtheorie

- Definiere nun $|\Omega\rangle$ als „Vakuuzustand“ (kein Teilchen vorhanden)
- und **Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren** (cf. **harmonischer Oszillator!**)

$$|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle = \hat{a}^\dagger(\vec{p}_1, \sigma_1) \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2) \cdots \hat{a}^\dagger(\vec{p}_N, \sigma_N) |\Omega\rangle$$

- **Bosonen** \Leftrightarrow wie beim harmonischen Oszi **Kommutatoren**

$$[\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}(\vec{p}_2, \sigma_2)] = 0, \quad [\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2)] = \delta^{(3)}(\vec{p}_1 - \vec{p}_2) \delta_{\sigma_1 \sigma_2}$$

- $|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle$ **ändert sich nicht** durch Vertauschen zweier Einteilchenzustände im N -Teilchenzustand

- **Fermionen** \Leftrightarrow **Anti-Kommutatoren** ($\{\hat{A}, \hat{B}\} = \hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}$):

$$\{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = 0, \quad \{\hat{a}(\vec{p}_1, \sigma_1), \hat{a}^\dagger(\vec{p}_2, \sigma_2)\} = \delta^{(3)}(\vec{p}_1 - \vec{p}_2) \delta_{\sigma_1 \sigma_2}$$

- $|\vec{p}_1, \sigma_1; \vec{p}_2, \sigma_2; \dots; \vec{p}_N, \sigma_N\rangle$ **ändert Vorzeichen** durch Vertauschen zweier Einteilchenzustände im N -Teilchenzustand

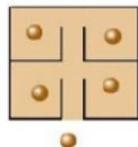
- nur ein Fermion kann daher jeden Einteilchenzustand besetzen

(**Paulisches Ausschließungsprinzip**)

- Pauliprinzip erklärt z.B. **Schalenaufbau der Atome** und das **Periodensystem der Elemente**

- Beliebige viele Bosonen können hingegen jeden Einteilchenzustand besetzen

Bosonen und Fermionen und rel. QFT



Fermionen		Bosonen	
Leptonen und Quarks	Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = 1^*	Kraft-Träger Teilchen
Baryonen (qqq)	Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Spin = 0, 1, 2...	Mesonen (q \bar{q})

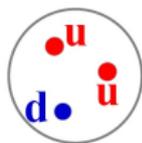
- notwendige Folge der relativistischen **Raum-Zeit-Symmetrie**
- für ununterscheidbare Teilchen: **Bosonen oder Fermionen**
- **Spin-Statistik**-Theorem:
 - **Fermionen**: nur ein Teilchen pro „Zimmer“
Teilchen mit halbzahligem Spin
 - **Bosonen**: bevorzugen Aufenthalt im gleichen „Zimmer“
Teilchen mit ganzzahligem Spin

- notwendige Folge der relativistischen **Raum-Zeit-Symmetrie**
- damit Energie für alle N -Teilchenzustände **positiv** ist
- Vakuum $|\Omega\rangle$ ist Energieeigenzustand zum Energieeigenwert $E = 0$ und Gesamtimpuls $\vec{P} = 0$
- Notwendigkeit der Antimaterie (Dirac 1928 für Spin-1/2-Teilchen)
- zu jedem Teilchen gibt es ein **Antiteilchen** mit exakt gleicher Masse aber entgegengesetzten Ladungen (z.B. Elektron mit Ladung $-e$ und Positron mit Ladung $+e$)
- gilt für alle Teilchensorten, auch Bosonen
- es gibt auch **strikt neutrale Teilchen** (Teilchen identisch mit Antiteilchen) z.B. neutrales Pion, Photon, vielleicht Neutrinos(?)

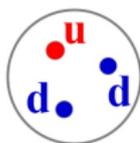
- neben Masse und Spin weitere intrinsische Eigenschaften/Quantenzahlen:
Ladungen
- beschreiben Kopplungsstärke an Felder, die Wechselwirkungen vermitteln
(**Lokalität wie in klassischer E-Dynamik!**)
- **Fundamentale Wechselwirkungen**
 - **elektromagnetische Wechselwirkung:** direkt aus „makroskopischer Anschauung“ bekannt;
elektrische und magnetische Kraftwirkung
Licht u.a. em. Wellen
 - **starke Wechselwirkung:** hält Atomkerne zusammen (kompliziertere Ladungsstruktur, s.u.)
 - **schwache Wechselwirkung:** β -Zerfall (kompliziertere Ladungsstruktur, s.u.)

Elementarteilchen

- **Elektronen sind elementar**
- Atomkern setzt sich zusammen aus **Nukleonen=Protonen und Neutronen**
- Nukleonen bestehen aus **up-** und **down-**Quarks

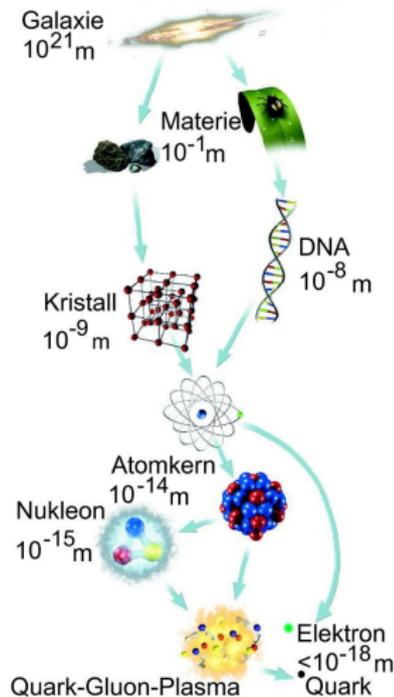


proton = (uud)



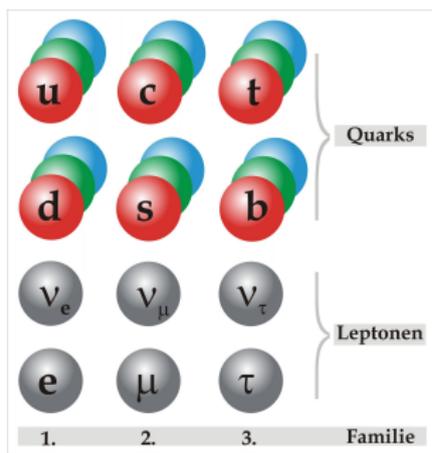
neutron = (udd)

- **up-**Quark: Ladung $+2/3$, Masse $m_u = 3 \text{ MeV}/c^2$
- **down-**Quark: Ladung $-1/3$, Masse $m_d = 6 \text{ MeV}/c^2$
- Elektron: Ladung -1 , Masse $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$



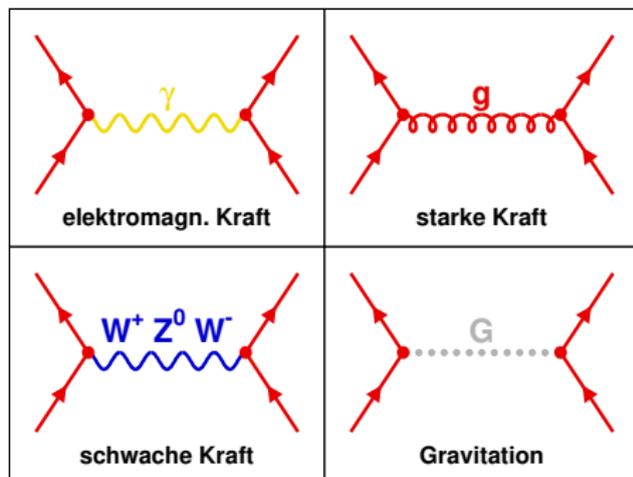
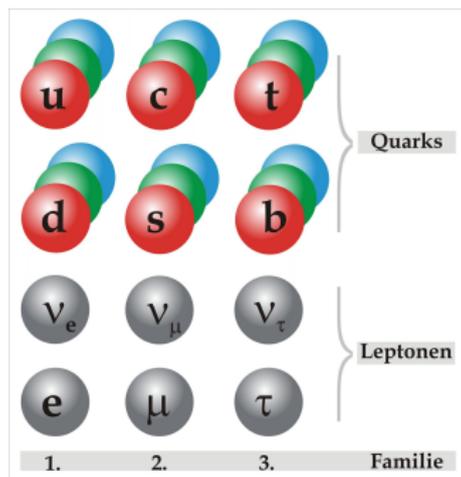
Die fundamentalen Kräfte

- Was hält die Teilchen zusammen (\Rightarrow **Materie**)?
- Fundamentale Kräfte oder Wechselwirkungen
- Gesetze werden von **Symmetrien** bestimmt
- e.g., **Erhaltung der elektrischen Ladung** \leftrightarrow „Kraftvermittlungsteilchen“ (Wellenfelder \leftrightarrow Teilchen) für elektromagnetische Wechselwirkung **Photon**



	Gravitation	Schwach (Elektroschwach)	Elektromagnetisch	Stark
Träger- teilchen	Graviton (nicht beobachtet)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
wirkt auf	Alle	Quarks und Leptonen	Quarks und geladene Leptonen und W^+ W^-	Quarks und Gluonen

„Materieteilchen“ und „Kraftteilchen“



- „Materieteilchen“ **Quarks** und **Leptonen** Spin $s = 1/2$
- „Kraftteilchen“ **Gluonen**, **Photonen** (γ), W^\pm , Z^0 Spin $s = 1$
- **Symmetrie der Wechselwirkungen:**
 - **Elementare Masse** durch **spontane Symmetriebrechung**
 - **Higgsboson** \Rightarrow Masse für **Quarks**, **Leptonen**, **W, Z-Bosonen**

Symmetrien und Standardmodell

Symmetrien als Grundprinzip der Theoretischen Physik

- **Emmy Noether 1918:** Raum-Zeit-Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungssätze
- **Newtonsche Mechanik:**
 - **Raum** euklidisch \Rightarrow symmetrisch unter Raumtranslationen, Drehungen um beliebigen Punkt
 - **Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit:** Zeittranslationsinvarianz; Spezielles Relativitätsprinzip \leftrightarrow Invarianz unter **Galilei**-Boosts
 - **Erhaltungsgrößen:** Zeittranslationsinvarianz \leftrightarrow **Energieerhaltung**; räumliche Translationsinvarianz \leftrightarrow **Impulserhaltung**; Drehinvarianz \leftrightarrow **Drehimpulserhaltung**; **Galilei**-Boost-Invarianz \leftrightarrow **Schwerpunktssatz** (**massen**-gewichtete Summe der Ortsvektoren der Konstituenten der Materie bewegt sich geradlinig gleichförmig)

Symmetrien als Grundprinzip der Theoretischen Physik

- **Emmy Noether 1918:** Raum-Zeit-Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungssätze
- **Newtonsche Mechanik:**
 - **Raum** euklidisch \Rightarrow symmetrisch unter Raumtranslationen, Drehungen um beliebigen Punkt
 - **Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit:** Zeittranslationsinvarianz; Spezielles Relativitätsprinzip \Leftrightarrow Invarianz unter **Galilei**-Boosts
 - **Erhaltungsgrößen:** Zeittranslationsinvarianz \leftrightarrow **Energieerhaltung**; räumliche Translationsinvarianz \leftrightarrow **Impulserhaltung**; Drehinvarianz \leftrightarrow **Drehimpulserhaltung**; **Galilei**-Boost-Invarianz \leftrightarrow **Schwerpunktssatz** (**massen**-gewichtete Summe der Ortsvektoren der Konstituenten der Materie bewegt sich geradlinig gleichförmig)
- **Spezielle Relativitätstheorie**
 - **Raum** euklidisch für inertielle Beobachter \Rightarrow symmetrisch unter Raumtranslationen, Drehungen um beliebigen Punkt
 - **Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit:** Zeittranslationsinvarianz; Spezielles Relativitätsprinzip \Leftrightarrow Invarianz unter **Lorentz**-Boosts
 - **Erhaltungsgrößen:** Zeittranslationsinvarianz \leftrightarrow **Energieerhaltung**; räumliche Translationsinvarianz \leftrightarrow **Impulserhaltung**; Drehinvarianz \leftrightarrow **Drehimpulserhaltung**; **Lorentz**-Boost-Invarianz \Leftrightarrow **Schwerpunktssatz** (**energie**-gewichtete Summe der Ortsvektoren der Konstituenten der Materie bewegt sich geradlinig gleichförmig)

Symmetrien von Teilchen

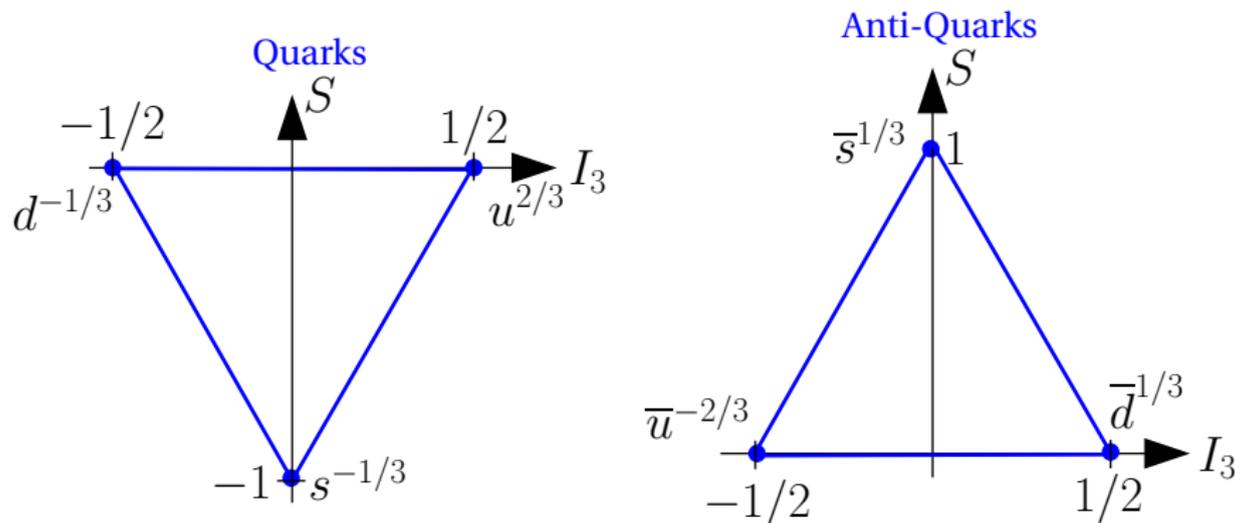
- Symmetrie als Ordnungsprinzip für Teilchenzoo
- einfachstes Beispiel: Isospin für Proton und Neutron (Heisenberg 1932)
- Proton und Neutron haben fast gleiche Masse $m_N c^2 \simeq 938 \text{ MeV}$
- Proton und Neutron als ein Teilchen (**Nukleon**) mit zusätzlicher **Quantenzahl** (Isospin)
- Isospin analog zu Spin, aber *nicht* als Drehimpuls bzw. Drehung im geometrischen Raum
- Drehungen in „Flavor-Raum“
- Isospin $T = 1/2$, $T_3 = \text{diag}(1/2, -1/2)$
- Wirken auf 2D komplexen Isospinraum der Quantenzustände: Gruppe $SU(2)$ ($2D \mathbb{C}^{2 \times 2}$ -Matrizen mit $\det U = 1$ und $UU^\dagger = 1$)
- Physik der **starken WW** (näherungsweise) invariant unter **Isospinrotationen**
- Proton und Neutron verhalten sich bzgl. starker WW (fast) gleich

- ab den 1950-1960ern wurde in Beschleunigerexperimenten ein ganzer **Teilchenzoo** entdeckt
- die meisten sind **Hadronen: Teilchen, auf die starke Kraft wirkt**
- Gell-Mann, Zweig, Ne'eman (1961): alle Hadronen als gebundene Zustände von **Spin-1/2-Teilchen mit Ladungen $-1/3$ und $+2/3$**
- Gell-Mann: Wie sollen sie heißen? **Quarks!**
- **Symmetrieprinzipien** brachte Ordnung ins Chaos:
- drei Quarks (**up, down, strange**)
- drei Flavors: SU(3)-Symmetrie; (Zustände nur aus (up,down) Isospin SU(2)-Untergruppe)
- Murray Gell-Mann
Nobel Prize in Physics (1969)



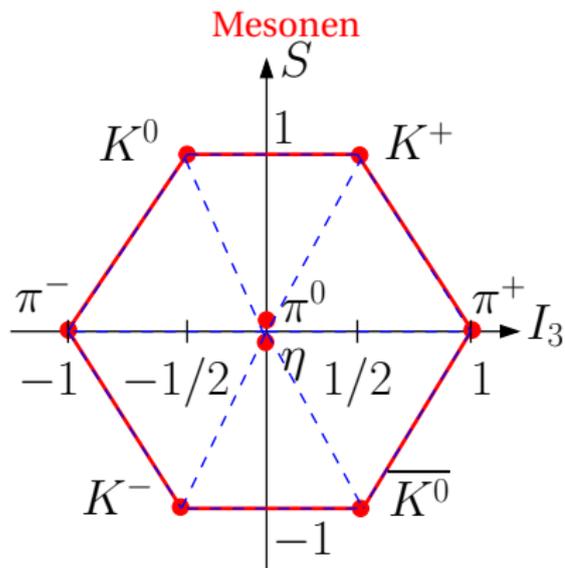
Der achtfache Pfad

- **Symmetrie** liefert zwei Quantenzahlen: **Isospin** und **Strangeness**
- **Isospin und Strangeness erhalten** bei starken Wechselwirkungen



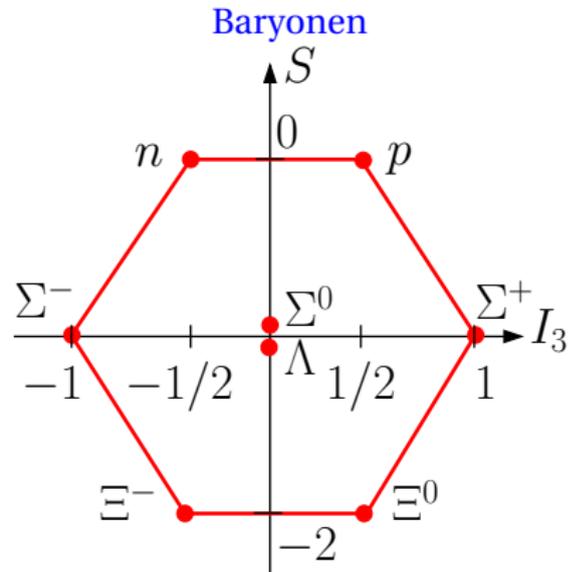
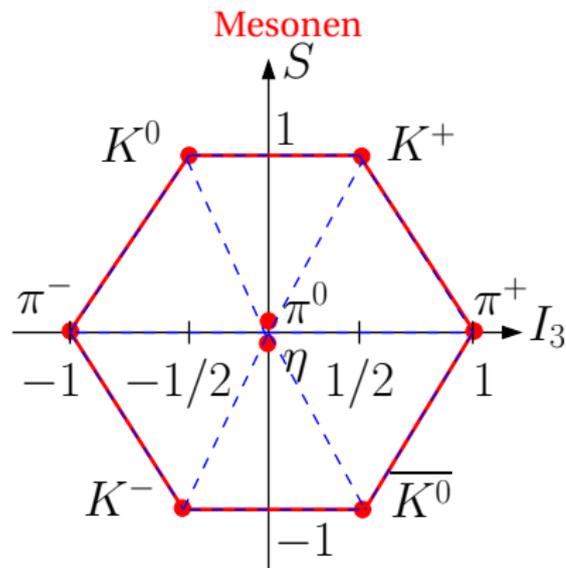
Der achtfache Pfad

- **Mesons:** “addiere” ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^- \rangle = |d \bar{u} \rangle$)



Der achtfache Pfad

- **Mesons:** “addiere” ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^- \rangle = |d\bar{u}\rangle$)
- **Baryonen:** “addiere” drei Quarks (Bsp: $|p \rangle = |uud\rangle$)



- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man **drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!**
- ABER: Quarks müssen **Spin 1/2** besitzen
- sie müssen daher **Fermionen** sein
(**die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein wollen!**)
- andererseits funktioniert das Modell:
vorhergesagtes Baryon $|\Omega^- \rangle = |s s s \rangle$ wurde gefunden!

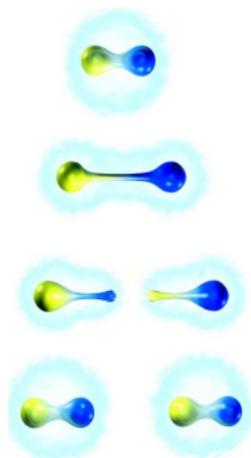
- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man **drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!**
- ABER: Quarks müssen **Spin 1/2** besitzen
- sie müssen daher **Fermionen** sein
(**die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein wollen!**)
- andererseits funktioniert das Modell:
vorhergesagtes Baryon $|\Omega^- \rangle = |s s s \rangle$ wurde gefunden!
- Lösung: Jede Quarksorte kommt in drei „**Farben**“ vor
- Alle Quarks von derselben Art sind gleich, können aber verschiedene Farbquantenzahlen besitzen \Rightarrow **Symmetrie!**

Quantenchromodynamik

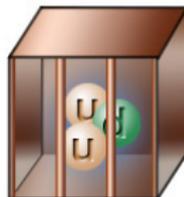
- Noch mehr Probleme: bislang hat noch niemand **freie Quarks** gefunden!

Befreiung der Quarks:

⇒ **versuche Meson auseinanderzubrechen**



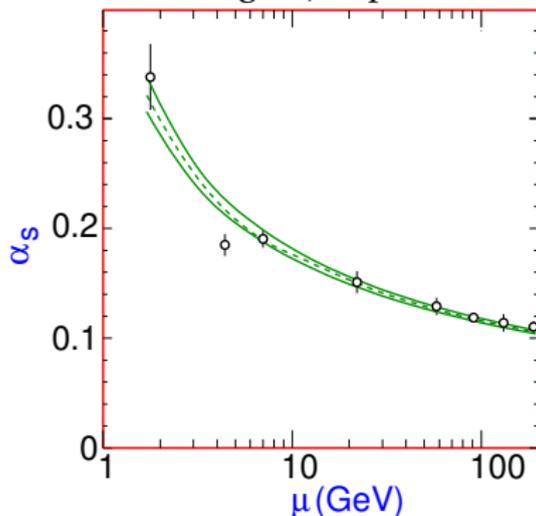
Man kann das Meson nicht auseinanderbrechen. Stattdessen **produziert man mehr Hadronen!**



- Quarks in Hadronen **gefangen**
- 1973: Gross und Wilczek, Politzer
- Theorie der starken WW basierend auf **Farb-Symmetry!**
- Kraft **wird stärker** für größere Abstände
- Grund: Kraftteilchen tragen selbst **Farbe**

Quantenchromodynamik

- **Lokale Farb-Eichsymmetrie** der Quarks (Farbladung **erhalten**)
- **Kraftteilchen** („Eichboson“): **Gluonen** (Spin 1)
- **Materieteilchen mit Farbladung**: **Quarks** (spin 1/2)
- Eich-Theorie: **Quantenchromodynamik (QCD)**
(griechisch: chromos=Farbe)
- Kraft wird schwächer bei kurzen Abständen
(hohen Energien/Impulsen)



Physik-Nobel-Preis 2004:



Gross, Wilczek, Politzer

- Glashow, Salam, Weinberg (Nobelpreis 1979)



Photo from the Nobel Foundation archive.
Sheldon Lee Glashow



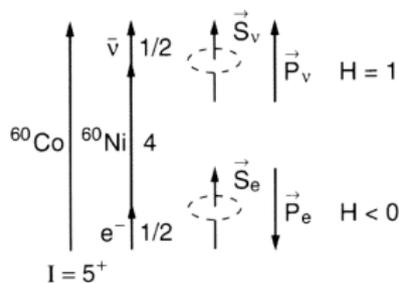
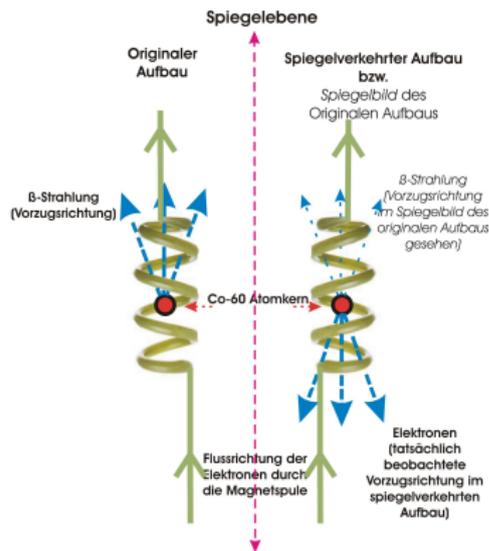
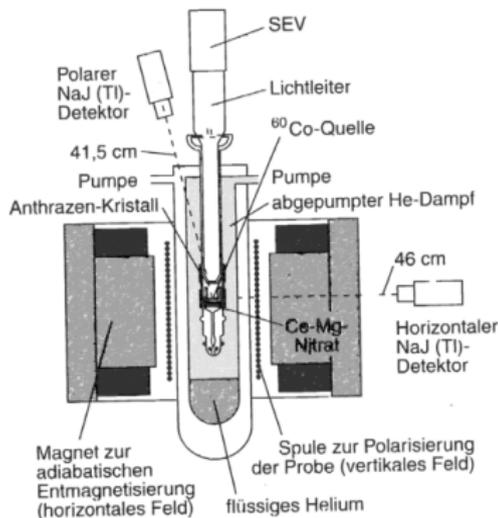
Photo from the Nobel Foundation archive.
Abdus Salam



Photo from the Nobel Foundation archive.
Steven Weinberg

- lokale Eichsymmetrie (Gruppe $SU(2)_{\text{wiso}} \times U(1)_{\text{wY}}$)
- Flavor-Symmetrie: schwacher Isospin und schwache Hyperladung
- Eichbosonen sollten Masse haben (schwache WW sehr kurzreichweitig)
- Dilemma: **Eichsymmetrie verbietet Masse für Eichbosonen!**
- schwache Wechselwirkung **verletzt Symmetrie unter Spiegelungen**

Wu-Experiment



- Anti-neutrino: **nur „rechthändig“**
- Helizität/Chiralität = $\vec{s} \cdot \vec{p} / (|\vec{s}||\vec{p}|) = 1$
- Drehimpulserhaltung: $s_z^{(e)} = s_z^{(\bar{\nu})}$
- Impulserhaltung: $\Rightarrow \vec{p}_e = -\vec{p}_{\bar{\nu}}$
- \Rightarrow Elektron linkshändig
- maximale Paritätsverletzung!

Higgs-Mechanismus

- schw. WW koppelt nur an linkshändige Teilchen/rechtshändige Antiteilchen
- Eichsymmetrie chiral \Rightarrow auch Quarks und Leptonen müßten masselos sein!
- Ausweg: **Higgs-Mechanismus**
- Führe **Higgs-Feld** ein (Bosonen mit Spin 0, WISO 1/2)
- WW mit Eichbosonen, Quarks und Leptonen erfüllt Eichsymmetrie
- $\langle \Omega | v | \Omega \rangle \neq 0 \Rightarrow$ **3 von 4 Eichbosonen, Quarks und Leptonen werden massiv**
- Eichsymmetrie immer noch erfüllt; ein **masseloses Eichboson** übrig: **Photon**
- Vorhersage: **es muß (mindestens) ein Higgs-Boson geben**
- wurde 2012 am LHC als letzter Bestandteil des Standardmodells gefunden (Nobelpreis an Englert und Higgs)

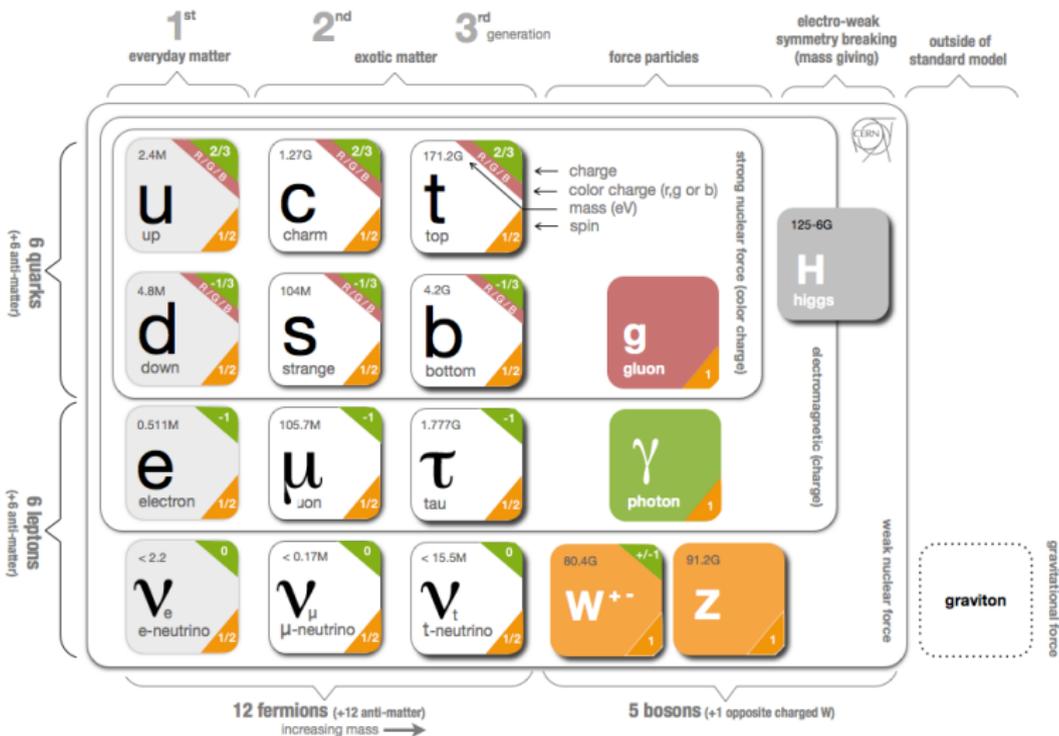


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
François Englert



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs

Das endgültige Standardmodell: Übersicht

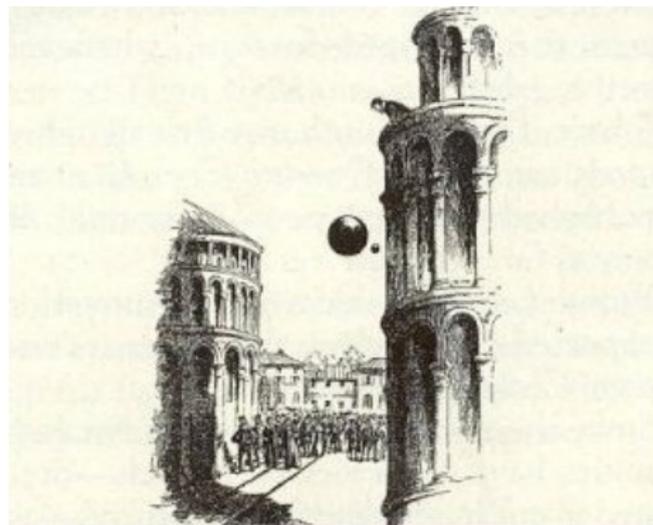


[graphics from <http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest>]

Literatur: [Net, PRS⁺ 14, KS95, Nac86, Phi18]

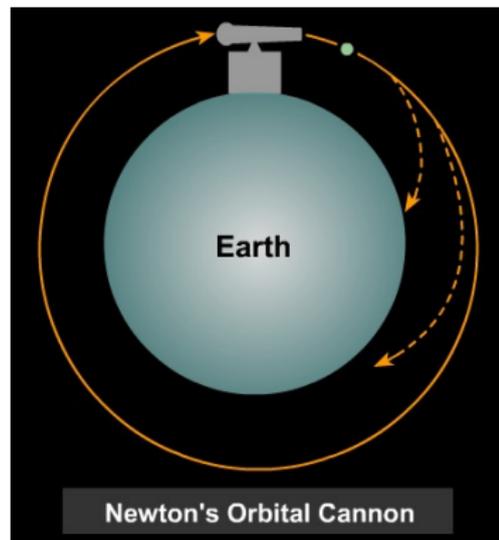
„The big Picture“ ART und Kosmologie

Galilei und der freie Fall



- Galileo Galilei: alle Körper fallen mit **gleicher Beschleunigung**
- **Kraft** zur Beschleunigung muss proportional zur **trägen Masse** sein: $F = ma$
- **Gravitationskraft** $F = mg$
- **Beschleunigung** unabhängig von der Masse $a = g$
- **träge Masse** = **schwere Masse**

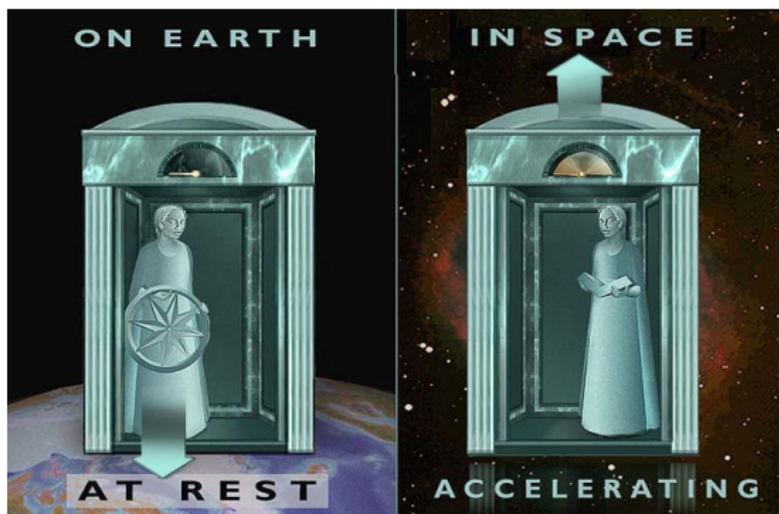
Newton und die Universalität der Gravitation



- Newton: Gravitationskraft auf Apfel von gleicher Art wie Kraft auf Mond im Orbit um Erde
- gleiche Naturgesetze für **Planeten** und **Sonne**
- Newton: alle Himmelsmechanik von einem **universellen Gravitationsgesetz**

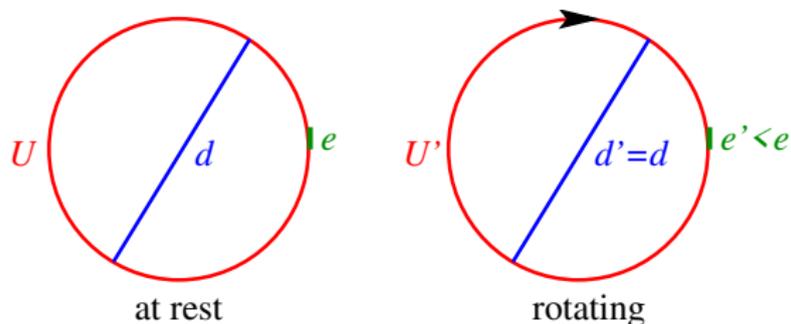
$$V = -\frac{G m_1 m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

Einstein und das Äquivalenzprinzip



- kein Experiment kann unterscheiden, ob es im Ruhesystem der Erde in deren Gravitationsfeld stattfindet oder in beschleunigtem Bezugssystem im leeren Raum stattfindet
- gilt nur für hinreichend homogene Gravitationsfelder
- \Leftrightarrow gültig für kleine Raum-Zeit-Bereiche
- Gravitation lokal äquivalent zu beschleunigtem Bezugssystem

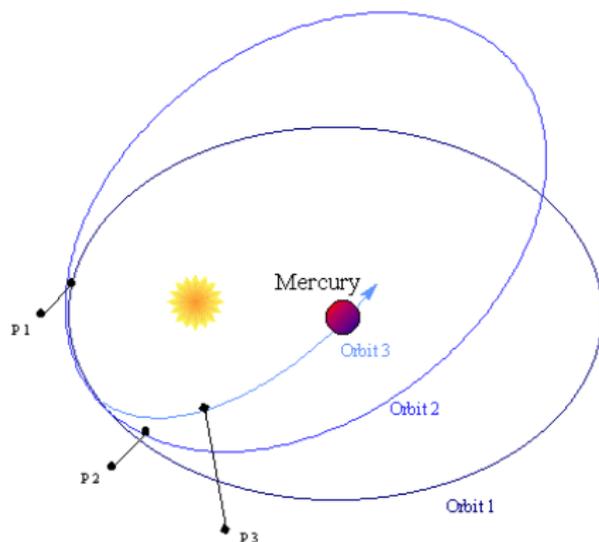
Gravitation = Gekrümmte Raumzeit



- messe **Umfang** und **Durchmesser** eines Kreises
 - Beobachter in Ruhe: $\frac{U}{d} = \pi = 3,1415\dots$
 - Beobachter in **rotierenden System**: Lorentz-Kontraktion des Einheitsmaßstabes $e' < e$
 $\Rightarrow U' > U$, aber $d' = d$
 $\Rightarrow \frac{U'}{d'} > \pi$
- Geometrie **nicht euklidisch** für **beschleunigten Beobachter**
- **Äquivalenzprinzip**: **Gravitation = gekrümmte Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit** (Allgemeine Relativitätstheorie, ART)

Experimentelle Bestätigung der ART

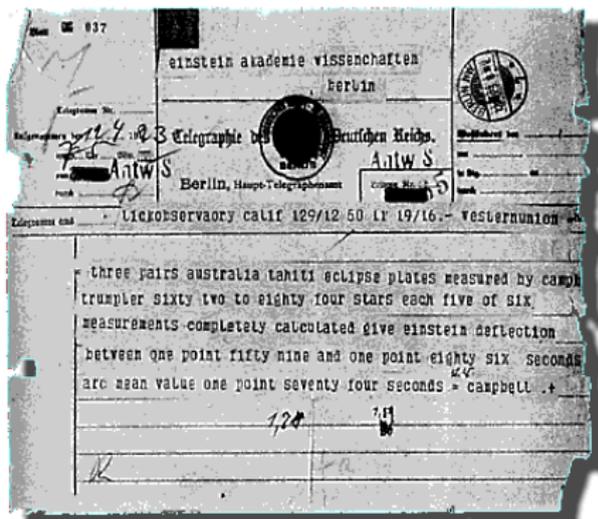
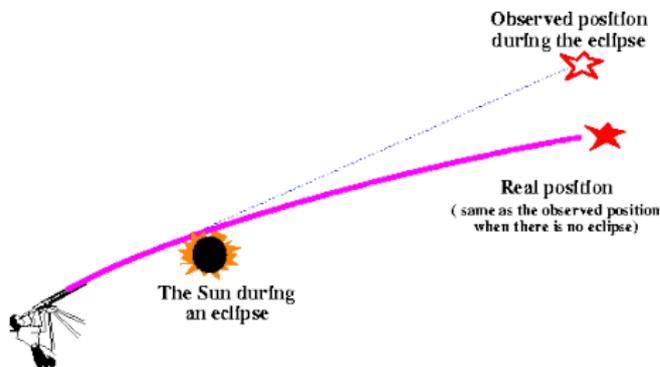
- Precession of **Perihel des Merkur**
(Perihel=sonnennächster Punkt der Merkurbahn um Sonne)



- Periheldrehung um $\approx 5600''$ pro Jahrhundert
- nach Korrektur von Störungen durch andere Planeten
43'' pro Jahrhundert nur durch Einsteins ART erklärbar!

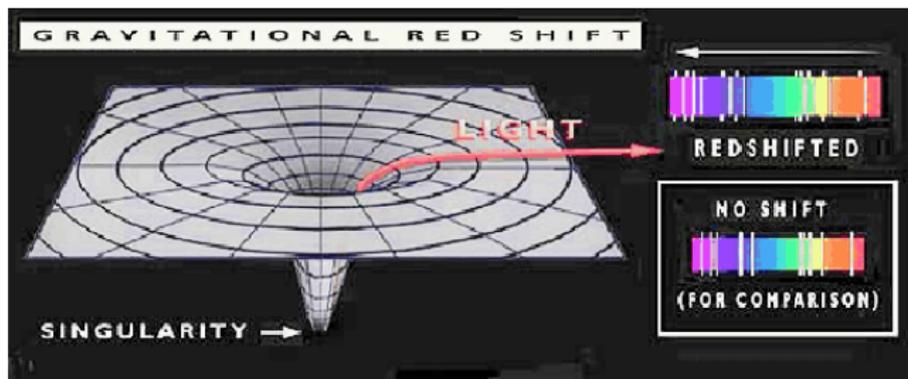
Experimentelle Bestätigung der ART

- **Lichtablenkung** durch Gravitation



- **Licht** (wie alle „Materie“) um $1,75''$ an Sonne abgelenkt
- zuerst von Eddington gemessen \Rightarrow **ART korrekt!**

- **Gravitationsrotverschiebung**



- Photon verliert Energie im Schwerefeld
Frequenz wird kleiner
- konnte auf der Erde durch **hochpräzise Spektroskopie** bestätigt werden

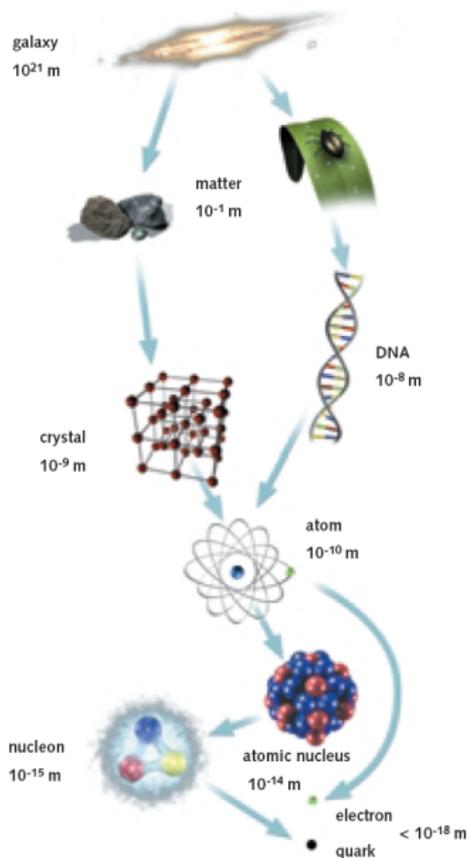
Anwendung im Alltag: GPS



- GPS funktioniert nur, wenn ART-Effekte berücksichtigt werden

Kosmologie

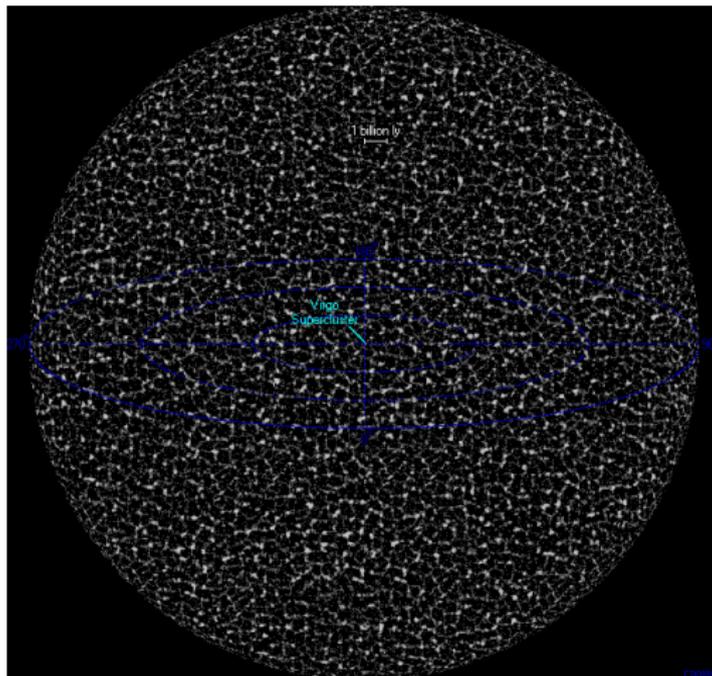
Das kosmologische Prinzip



- kein Ort und keine Richtung im Raum ausgezeichnet
- Raum homogen und isotrop
- Naturgesetze gelten überall und zu jeder Zeit

Das kosmologische Prinzip

- **Kosmologisches Prinzip:** Raum im großräumigen Mittel homogen und isotrop mit Materie + Strahlung gefüllt



ART: Großräumige Struktur der Raumzeit

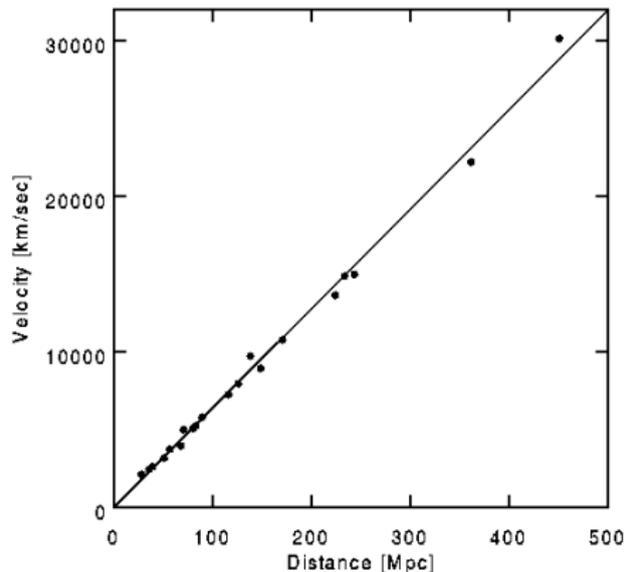
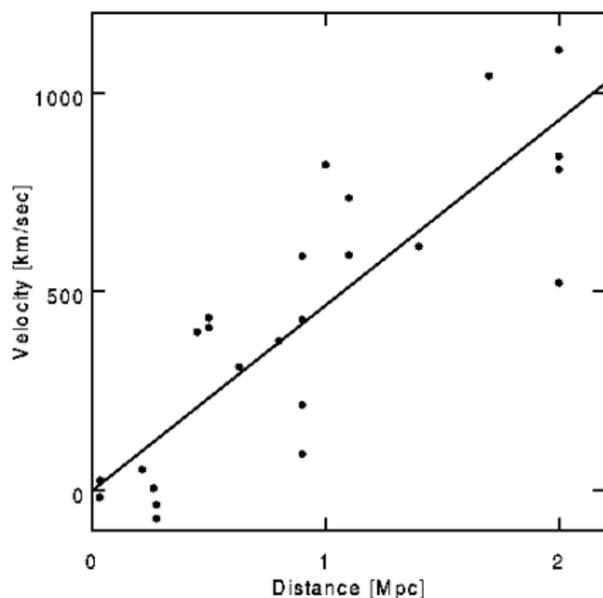
- Lösung der **Einsteingleichung der Gravitation**

$$G_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}$$

- **Raumzeitkrümmung/Gravitation** hängt von
- **Energie-Impulsdichte und Spannungstensor der Materie** ab
- Quelle der **Gravitation**:
Energie-Impulsverteilung und Spannung/Druck der Materie!
- Raum **hyperbolisch, flach, sphärisch** (konstante Krümmung)
- **räumliche Abstände** von „ruhenden“ Objekten können **zeitabhängig** sein!
- observation (**Hubble 1929**): **Expandierendes Universum**
 - Licht von Sternen/Galaxien **bekanntes Spektrum der Elemente**
 - Lichtausbreitung im expandierenden Universum
Wellenlängen werden größer
 - wie **Doppler-Effekt** für Licht
 - scheinbare Geschwindigkeit **proportional zu Abstand** (“Hubble-Gesetz”)
- frühes Universum: **heiß und dicht**
- **Urknall!**

Hubble-Lemaitre-Expansion

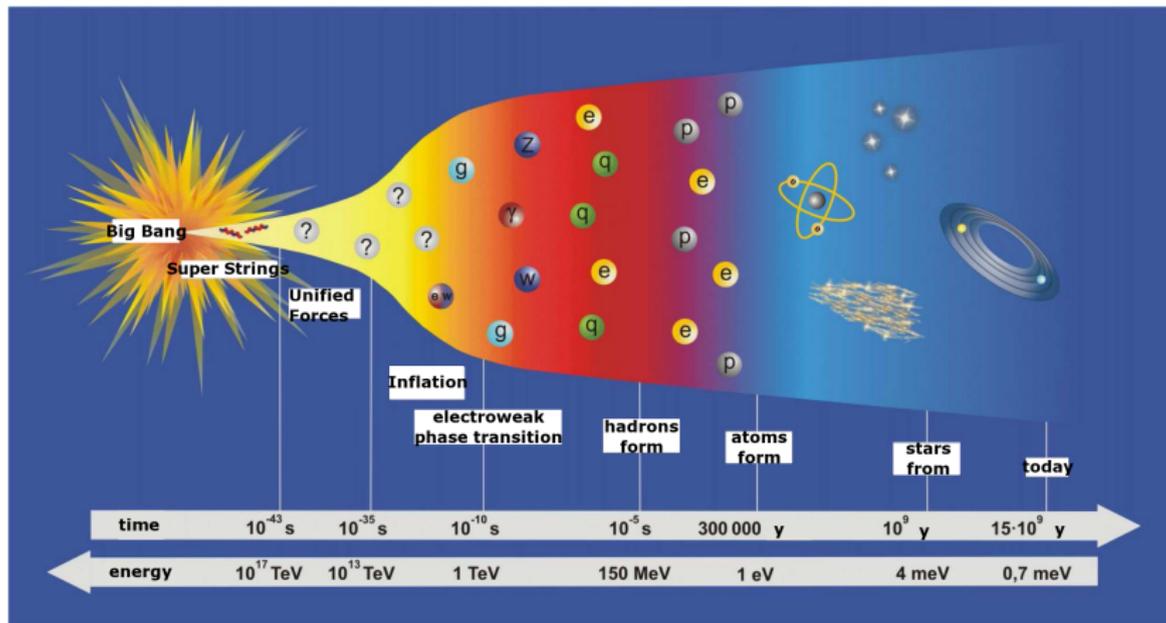
Hubble-Geschwindigkeit: $v = Hd$



$$1 \text{ Mpc} = 3,1 \cdot 10^{22} \text{ m} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ ly}$$

Entwicklung des Universums

- basiert auf bekannter Physik: **Standardmodell der Teilchenphysik...**
- ... und hypothetische “neue Physik”:
Inflation, Stringtheorie, Loop Quantum Gravity

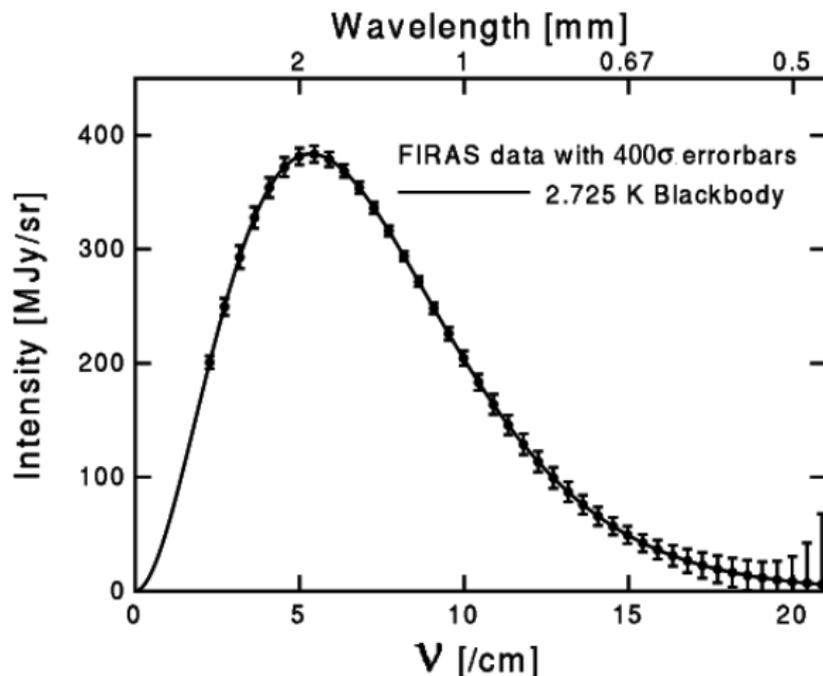


- **Woraus besteht das Universum? Materieinhalt?**

Kosmischer Mikrowellenhintergrund

- heißes dichtes Gas aus **geladenen Teilchen** \Rightarrow **viele Photonen!**
 - **Photonen** in thermischem Gleichgewicht mit Materie
- rund 400 000 Jahre nach Urknall
 - Universum auf $T \approx 3000 \text{ K}$ abgekühlt
 - Bildung **elektrisch neutraler Atome**
 - **Photonen** entkoppeln
 - Hubble-Expansion \Rightarrow **Rotverschiebung**
 - **Alpher, Bethe, Gamow (1949)**: es sollte thermische kosmische Mikrowellenstrahlung geben!
 - **kosmischer Mikrowellenhintergrund** entdeckt durch Penzias und Wilson (1965)

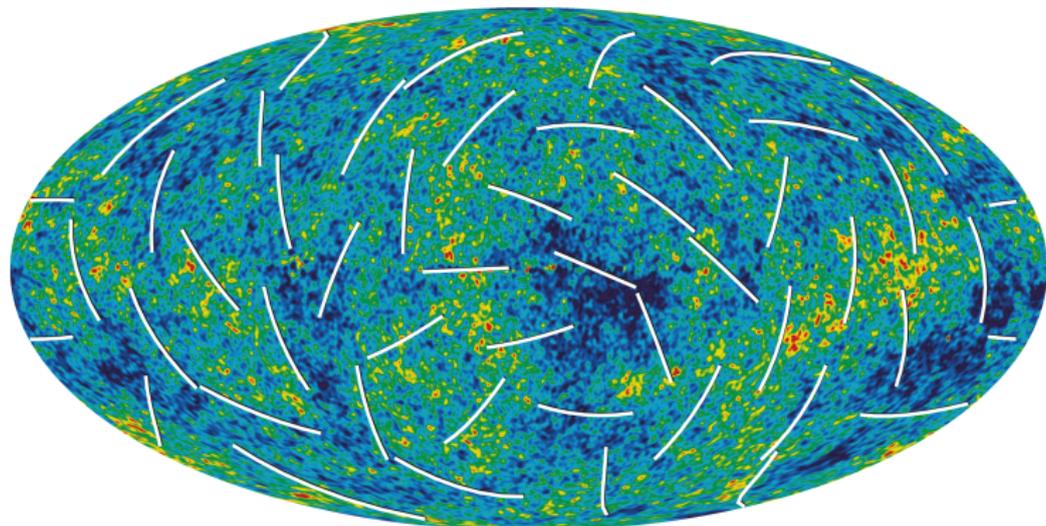
Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)



- nahezu exaktes **Hohlraumstrahlungsspektrum** (Planck 1900)
- **CMB-Photonen** im Gleichgewicht bei $T = (2,7255 \pm 0.0006)$ K

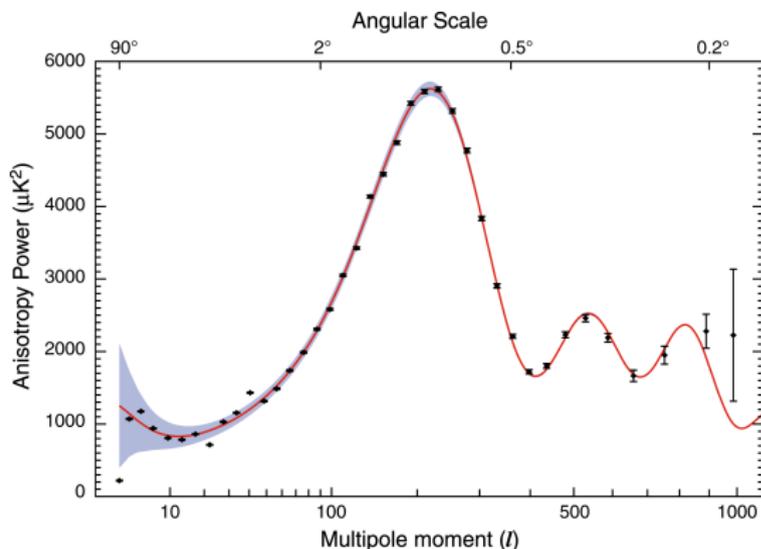
Fluktuationen im CMB

- kleine Dichtefluktuationen der Materie vor der Entkopplung
- **Photonen** müssen durch Regionen **unterschiedlicher Gravitation** propagieren
- entspricht unterschiedlichen Temperaturen; richtungsabhängige Fluktuationen von $\delta T/T \simeq 10^{-5}$

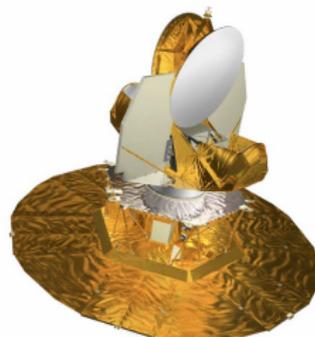


Energie im Universum

- Region hoher Dichte **kontrahiert unter Gravitation** (Rate R)
- zugleich **Hubble-Expansion** (Rate H_{CMB})
- maximale Fluktuationen für $R \simeq H_{\text{CMB}}$
- berechne H_{CMB} unter Annahme **des Energiegehalts** des Universums
- Raum **flach** bei **kritischer Dichte** $\Rightarrow \Omega = \rho / \rho_{\text{krit}}$

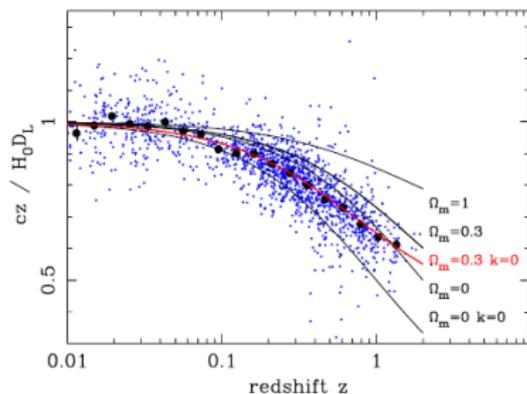
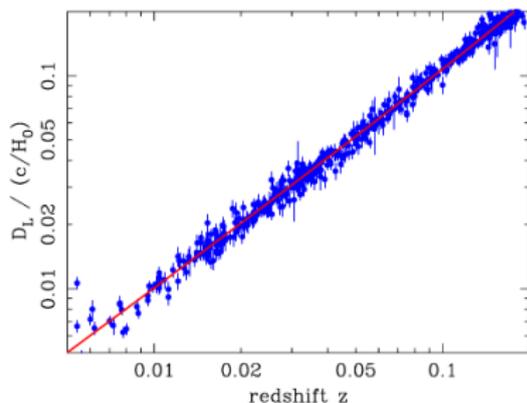


WMAP-Satellit (NASA)
Planck-Satellit (ESA)



$\Rightarrow 0.98 < \Omega_{\text{total}} < 1$
unser Universum ist flach!

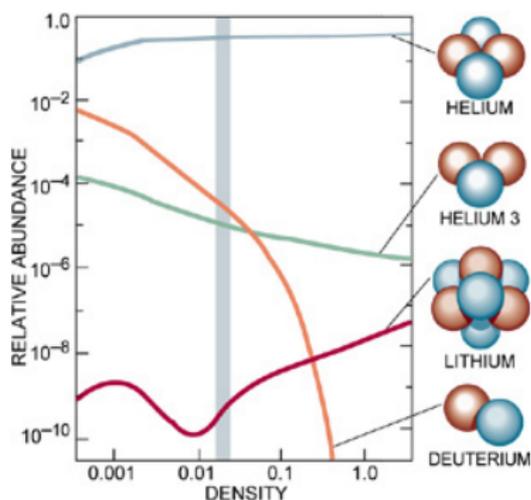
Wieviel Materie im Universum?



- D_L : Leuchtabstand von Galaxie
- z : Rotverschiebung $\lambda_{\text{here}} = (1+z)\lambda_{\text{star}}$
- wenn $H = \text{const} = H_0 \Leftrightarrow$
Gerade im unteren Plot
- Krümmung dieser Kurve
wie ändert sich H mit t
 \Rightarrow **Materieinhalt des Universums**
- bester Fit
(unter Annahme $\Omega_{\text{total}} = 1 \Leftrightarrow k = 0$)
 $\Omega_{\text{matter}} = 0.3$
- **Was ist der Rest von 0.7?**
- **Welche Art Teilchen?**

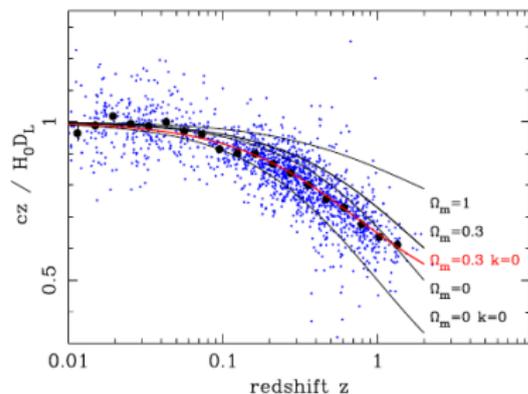
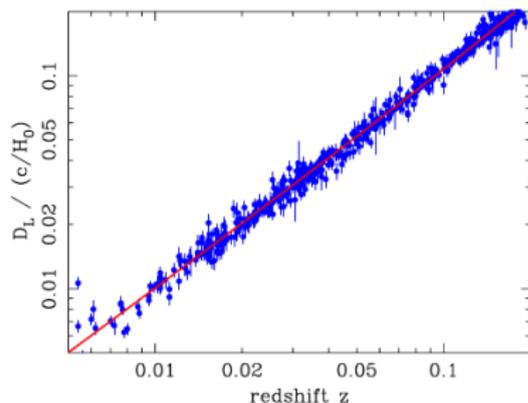
Woraus besteht die Materie im Universum

- **Kernphysik** \Rightarrow **Reaktionsraten Γ** für **Erzeugung und Vernichtung** der leichten Elemente d, ^3He , ^4He , ^7Li
- Nukleosynthese endet, wenn $\Gamma < H$ (~ 1 sec after big bang)



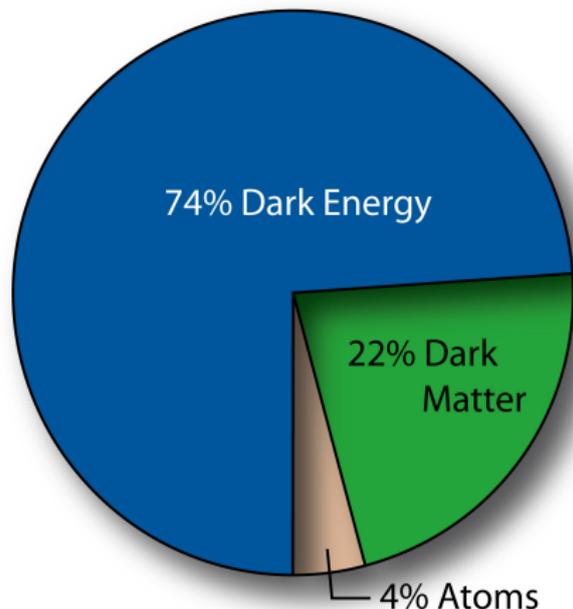
- Messe die Anzahl der leichten Elemente im Universum **Nebel**
- $\Omega_{\text{baryons}} = 0.04 \pm 0.02$
- Natur von $\sim 25\%$ unbekannt \Rightarrow „**dunkle Materie**“
- „**dunkle Materie**“ auch notwendig für Erklärung der Bewegung von Sternen in unserer Milchstraße!
- Alternative Erklärung: **modifizierte Gravitationstheorie?!?**

Woraus besteht der Rest?



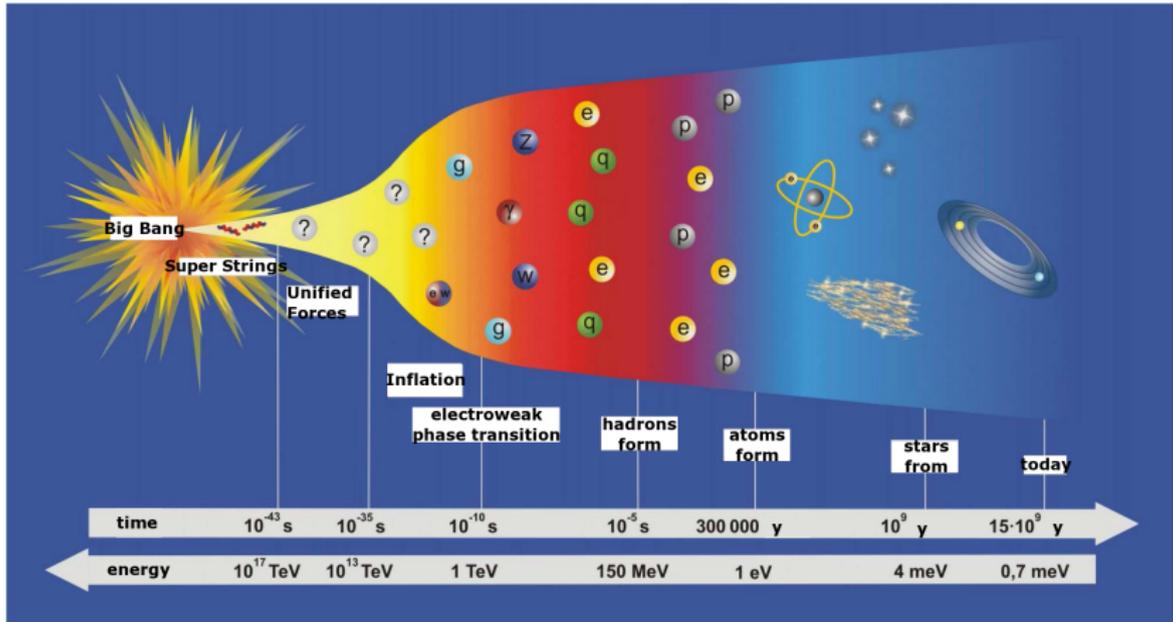
- $\Omega_{\text{tot}} \simeq 1, \Omega_{\text{matter}} \simeq 0.3$
⇒ 70% noch nicht erklärt!
- genauere Messung der Hubble-Expansion
- ⇒ Universe must expand heute beschleunigt!
- einzige Art Energie, für die Gravitation abstoßend wird: Einsteins kosmologische Konstante
- eingeführt in 1918, um statisches Universum als Lösung der Einstein-Gleichungen zu erhalten
- „Das war meine größte Eselei!“
- trotzdem heutiges Modell: $\Omega_\Lambda \simeq 0.7!$

Wir kennen nur 4% des Materiegehalts im Universum!



- Bester Fit an Daten von **WMAP 2006**
- 4% **baryonische Materie** (bekannt)
- 22% **dunkle Materie**, nur Spekulationen darüber, was das sein könnte (Supersymmetry?)
- 74% **dunkle Energie**: DAS Rätsel der modernen Physik!

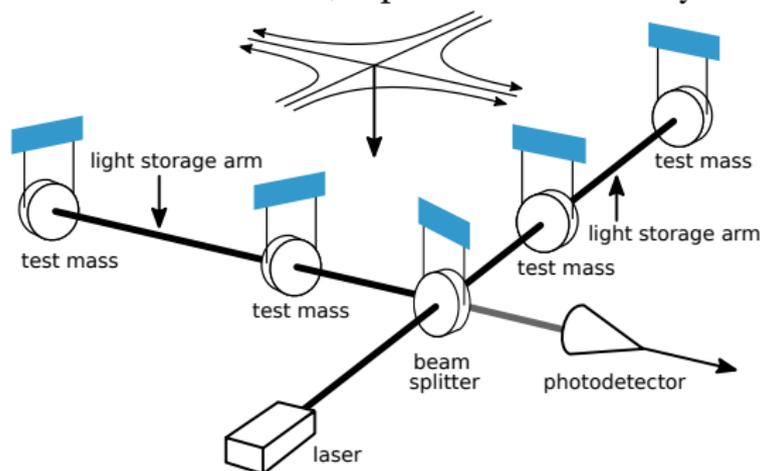
Zusammenfassung



Nachweis von Gravitationswellen

Neuester Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

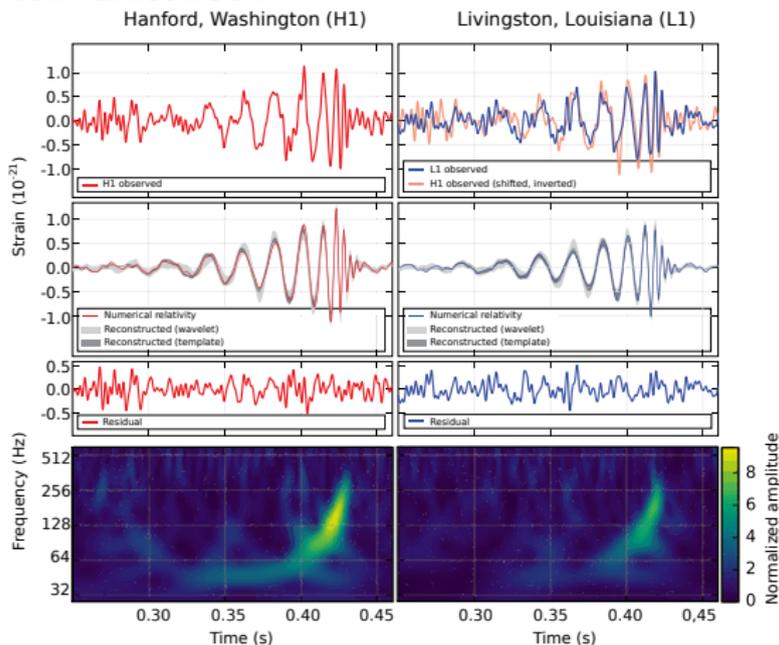
- 14. September 2015:
erster direkter **Nachweis eines Gravitationswellensignals!**
- zwei Detektoren der LIGO-Kollaboration
- Gravitationswelle bringt Probemassen zum Schwingen
- Nachweis durch Lichtschwankungen im Photodetektor
- Nobelpreis 2017 an Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish



[Wikipedia: Von Ligo.gif: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18325956>]

Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

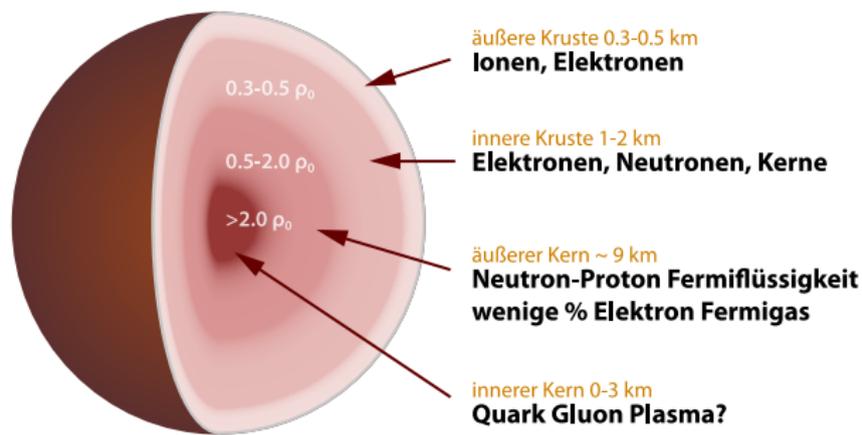
- Quelle: zwei umkreisende schwarze Löcher
- strahlen Gravitationswellen ab
- am Ende **Zusammenprall und Vereinigung**
- Rest: **neues schwarzes Loch**



[Wikipedia: Von B. P. Abbott et al. (LIGO and Virgo Coll.) <http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>]

Neutronensterne

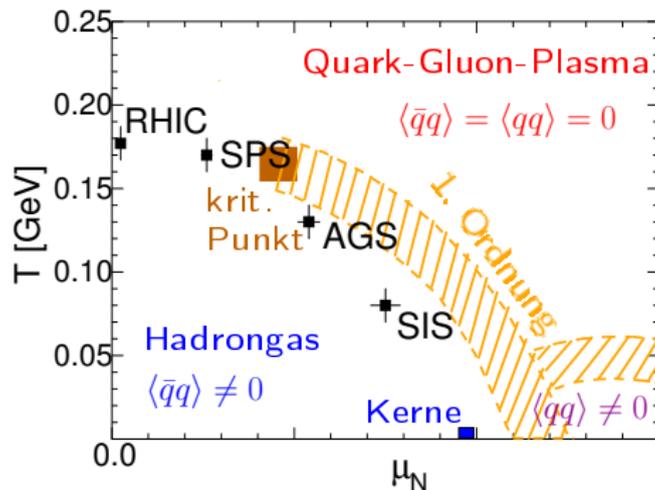
- Sterne (z.B. Sonne):
stabil durch Balance zwischen **Gravitation und Gasdruck**
- Energieproduktion durch **Kernfusion**
- produziert schwere Atomkerne bis zum Eisen
- wenn „Brennstoff“ verbraucht: Kollaps
- in bestimmtem Massenbereich: **Neutronenstern** (Dichte $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{kg/m}^3$!)



[Wikipedia: Von Robert Schulze - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11364464>]

Neutronensterne

- **Masse-Radius-Beziehung** \Leftrightarrow **Zustandsgleichung der Kernmaterie**
- im Labor: relativistische Kollisionen von **Atomkernen** bei LHC am CERN, RHIC auf Long Island, GSI/FAIR in Darmstadt
- **Quarks und Gluonen**: elementare Bestandteile von Proton und Neutron



Neutronensternkollisionen

- 17.08.2017: Gravitationswellen von **Neutronensternkollision** („Kilonova“)
- Quelle konnte lokalisiert werden
- auch **elektromagnetische Wellen** (Licht, Röntgen-, γ -Strahlen)
- „Multimessenger Astronomy“
 - neuer Blick ins Universum
 - Gravitationswellensignal \Leftrightarrow **sensitiv aus Zustandsgleichung der Kernmaterie**
 - Kilonovae \Rightarrow Quellen von hochenergetischen „Röntgenblitzen (γ Ray Bursts)“
 - Produktion der **schweren Elemente > Eisen**, z.B. Gold
 - wird an der Goethe-Uni **interdisziplinär erforscht!**
 - Buch-Tip: Luciano Rezzolla, Die unwiderstehliche Anziehung der Schwerkraft: Eine Entdeckungsreise zu den schwarzen Löchern, C. H. Beck (2021)



[Wikipedia: Von University of Warwick/Mark Garlick, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63436916>]

Bibliography I

- [KS95] W. Kuhn, J. Strnad, Quantenfeldtheorie - Photonen und ihre Deutung, Teubner&Vieweg, Wiesbaden (1995).
URL <https://doi.org/10.1007/978-3-322-90949-7>
- [Nac86] O. Nachtmann, Phänomene und Konzepte der Elementarteilchenphysik, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden (1986).
- [Net] Netzwerk Teilchenwelt.
URL <https://www.teilchenwelt.de/>
- [Phi18] O. Philipsen, Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik, Springer Spektrum, Berlin (2018).
URL <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57820-9>
- [PRS⁺14] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, W. Rodejohann, Particles and Nuclei, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 7 ed. (2014).
URL <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46321-5>