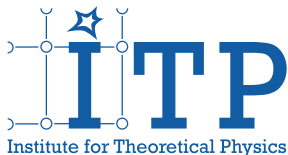


# Raum – Zeit – Materie

Hendrik van Hees

Goethe University Frankfurt

Wintersemester 2018/2019



- 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

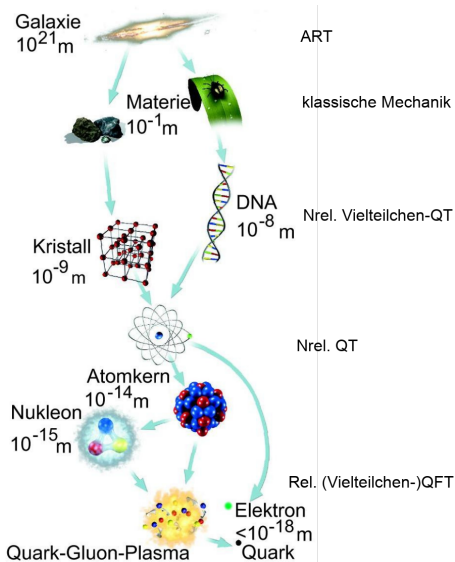
# Aufbau der Materie

# 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!

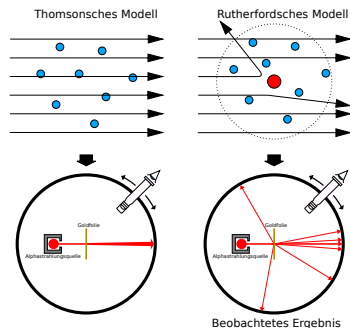
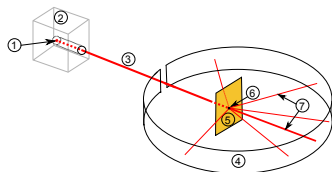
# Aufbau der Materie: Längen- und Energieskalen

- 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  $\alpha$ -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

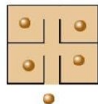
(**Paulisches Ausschließungsprinzip**)

- 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 $\bar{q}$ )

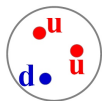
- notwendige Folge der relativistischen **Raum-Zeit-Symmetrie**
- für ununterscheidbare Teilchen: **Bosonen oder Fermionen**
- **Spin-Statistik**-Theorem:
  - **Fermionen**: nur ein Teilchen pro „Zimmer“  
Teilchen mit **halbzahligem Spin**
  - **Bosonen**: bevorzugen Aufenthalt im gleichen „Zimmer“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

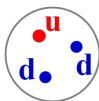
- neben Masse und Spin weitere intrinsische Eigenschaften/Quantenzahlen:  
**Ladungen**
- beschreiben Kopplungsstärke an Felder, die Wechselwirkungen vermitteln  
(**Lokalität wie in klassischer E-Dynamik!**)
- **Fundamentale Wechselwirkungen**
  - **elektromagnetische Wechselwirkung:** direkt aus „makroskopischer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

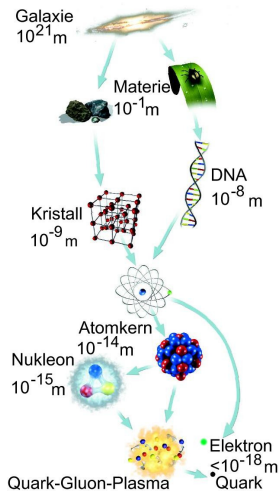


**proton** = (uud)



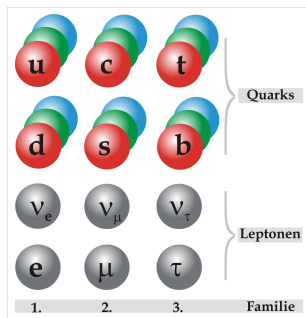
**neutron** = (udd)

- **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  $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$



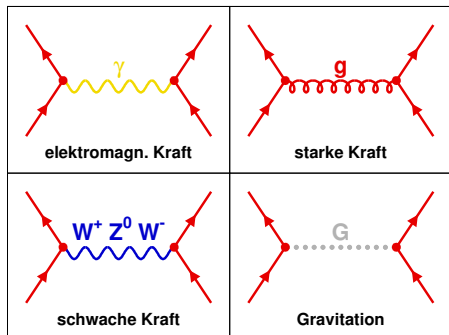
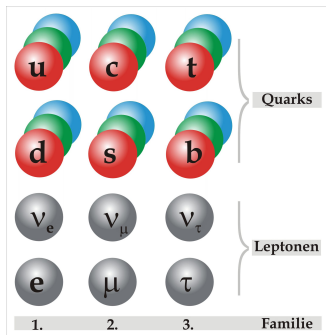
# Die fundamentalen Kräfte

- 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** ( $\gamma$ ),  $W^\pm, Z^0$  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

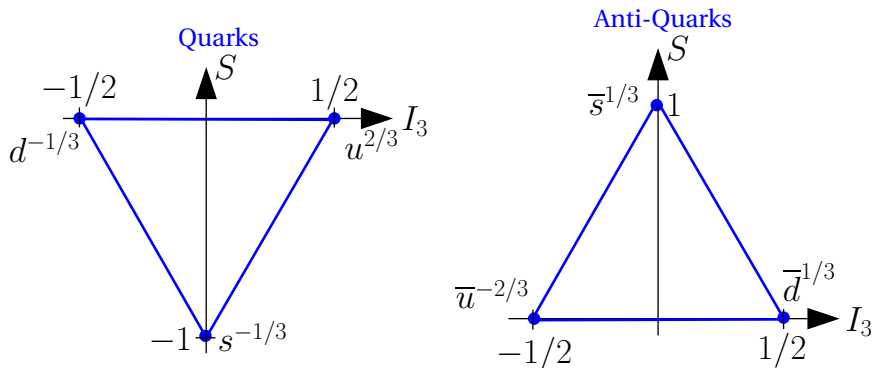
- Symmetrie als Ordnungsprinzip für Teilchenzoo
- einfachstes Beispiel: Isospin für Proton und Neutron (Heisenberg 1932)
- Proton und Neutron haben fast gleiche Masse  $m_N c^2 \simeq 938 \text{ MeV}$
- Proton und Neutron als ein Teilchen (**Nukleon**) mit zusätzlicher **Quantenzahl** (Isospin)
- Isospin 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)



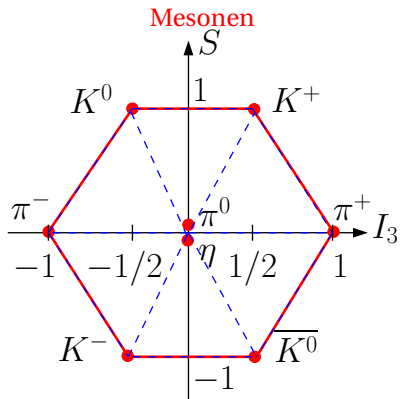
# Der achtfache Pfad

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



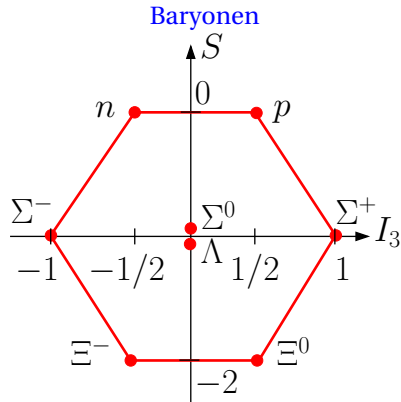
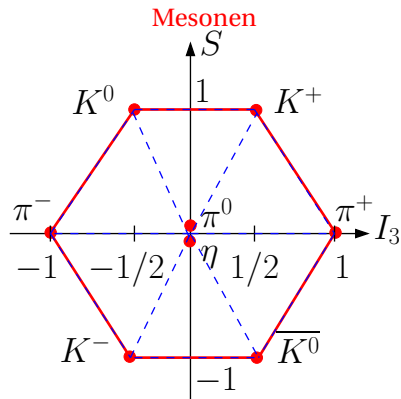
# Der achtfache Pfad

- **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!



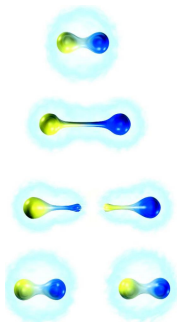
- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man **drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!**
- ABER: Quarks müssen **Spin 1/2** besitzen
- sie müssen daher **Fermionen** sein  
(**die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein wollen!**)
- andererseits funktioniert das Modell:  
vorhergesagtes Baryon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

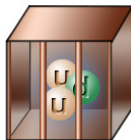
- Noch mehr Probleme: bislang hat noch niemand **freie Quarks** gefunden!

Befreiung der Quarks:

⇒ **versuche Meson auseinanderzubrechen**



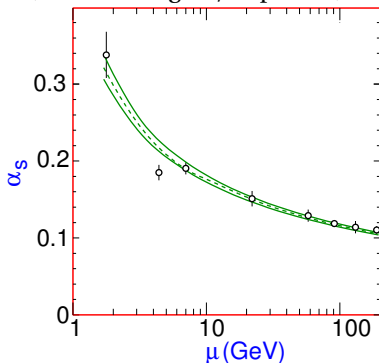
Man kann das Meson nicht auseinanderbrechen. Stattdessen **produziert man mehr Hadronen!**



- 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



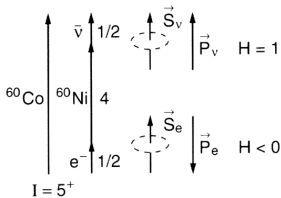
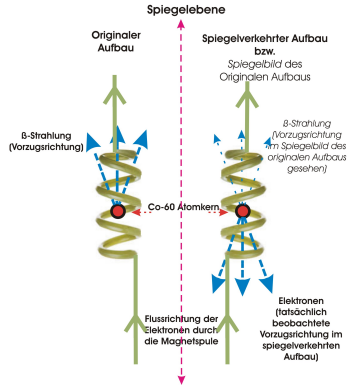
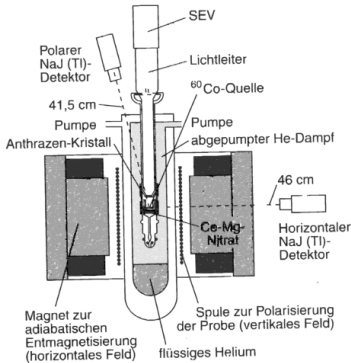
Photo from the Nobel Foundation archive.  
Abdus Salam



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)

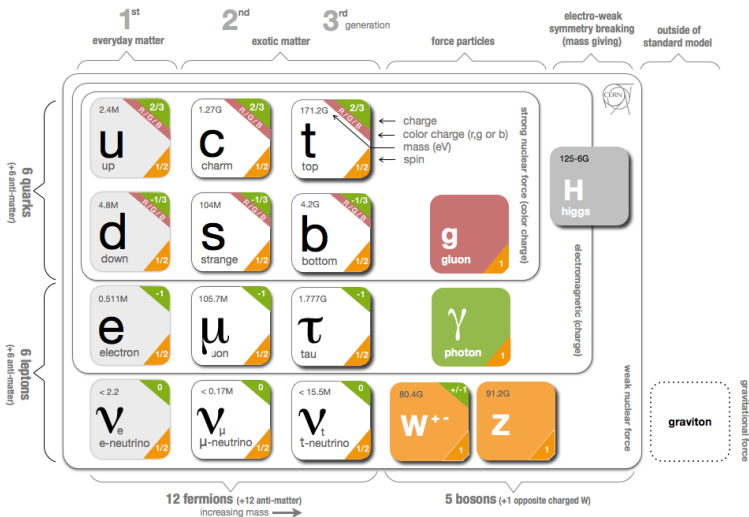


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud  
François Englert



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

# Das endgültige Standardmodell: Übersicht



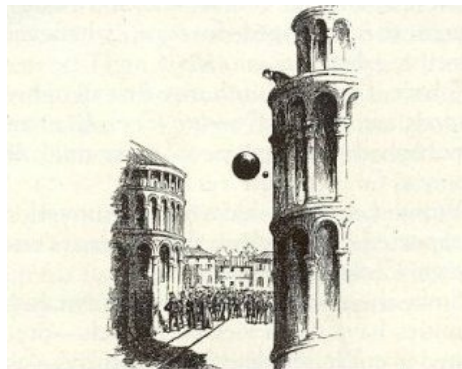
[graphics from <http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest>]

Literatur: [Net, PRS<sup>+</sup> 14, KS95, Nac86, Phi18]

# „The big Picture“ ART und Kosmologie

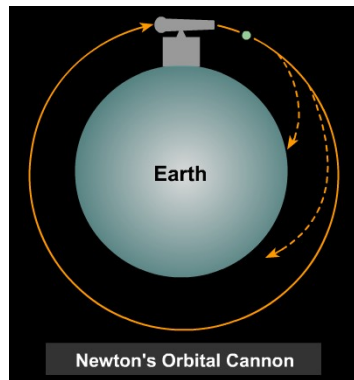


# Galilei und der freie Fall



- 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**

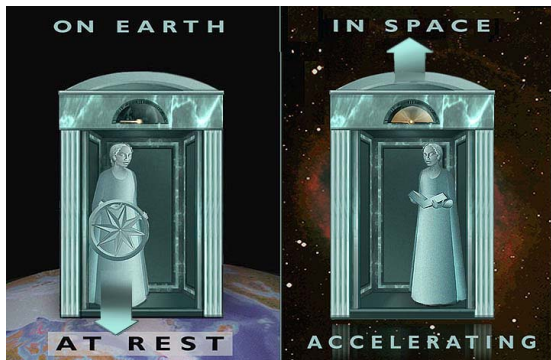
# Newton und die Universalität der Gravitation



- 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**

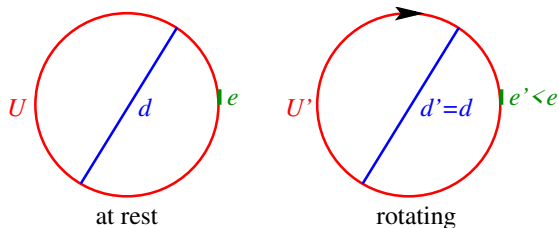
$$V = -\frac{G m_1 m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

# 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

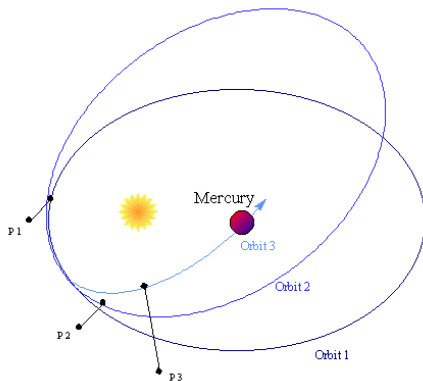
# Gravitation = Gekrümmte Raumzeit



- 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

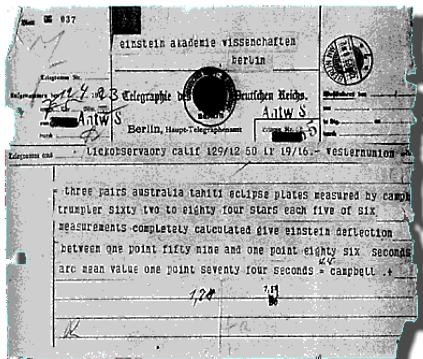
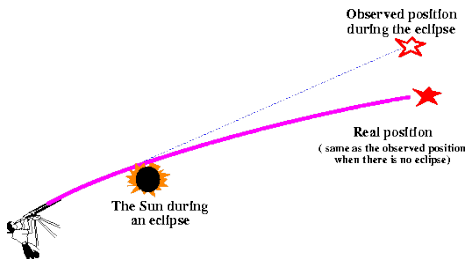
- Precession of **Perihel des Merkur**  
(Perihel=sonnennächster Punkt der Merkurbahn um Sonne)



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

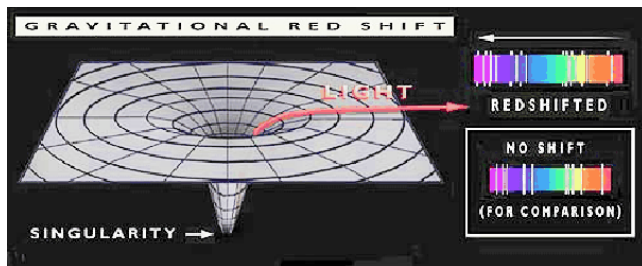
# Experimentelle Bestätigung der ART

- **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

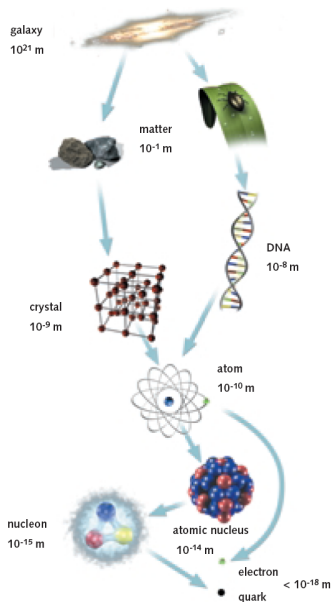


- GPS funktioniert nur, wenn ART-Effekte berücksichtigt werden



# Kosmologie

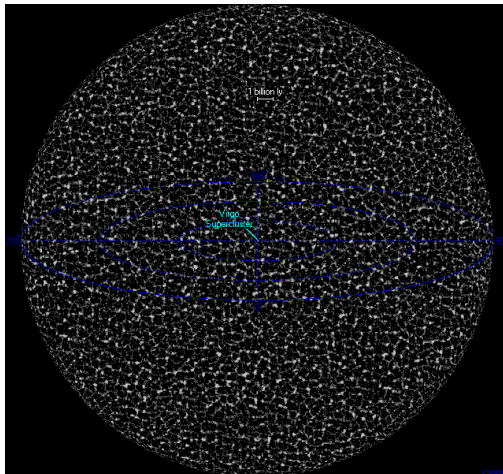
# Das kosmologische Prinzip



- 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



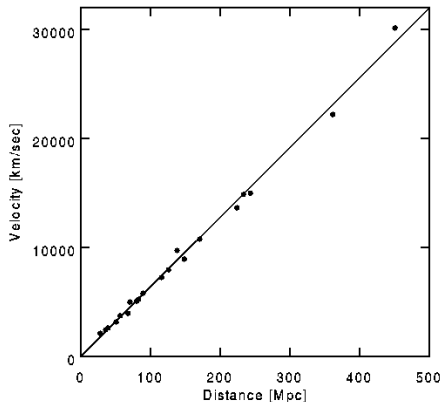
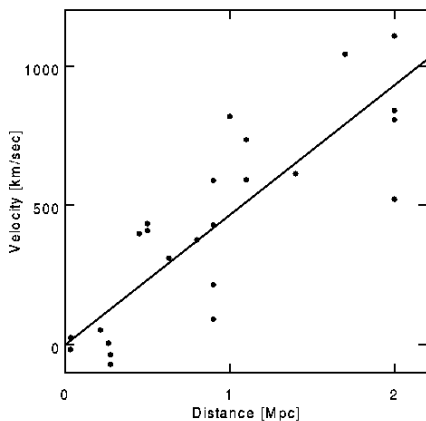
- Lösung der **Einsteingleichung der Gravitation**

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

- **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:  $v = Hd$



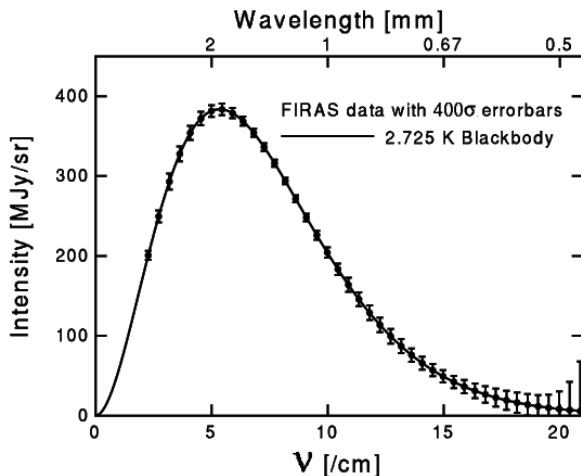
$$1 \text{ Mpc} = 3,1 \cdot 10^{22} \text{ m} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ ly}$$



# 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)

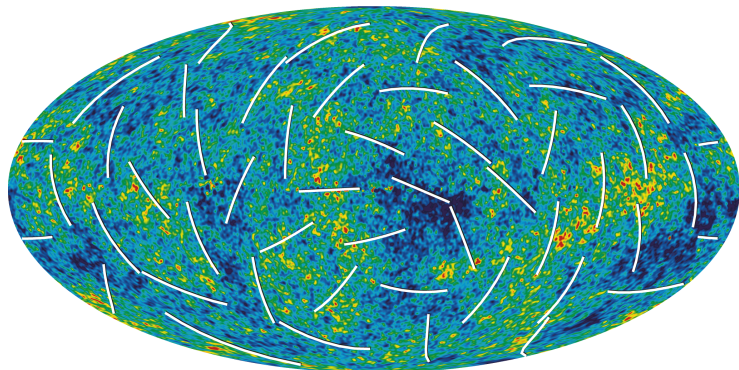


- nahezu exaktes **Hohlraumstrahlungsspektrum** (Planck 1900)
- **CMB-Photonen** im Gleichgewicht bei  $T = (2,7255 \pm 0.0006)$  K



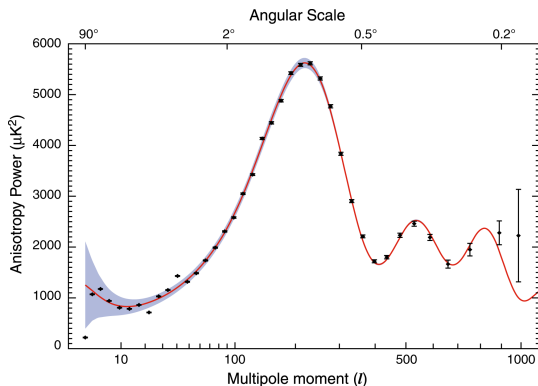
# Fluktuationen im CMB

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

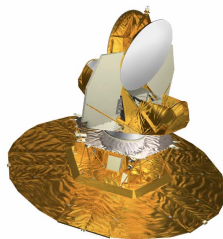


# Energie im Universum

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

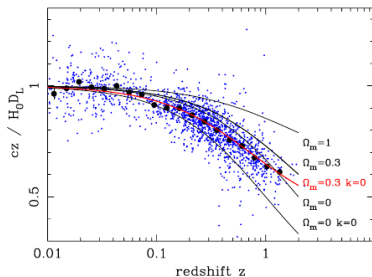
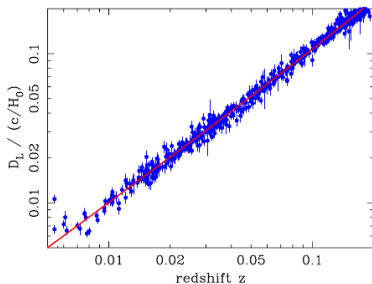


WMAP-Satellit (NASA)  
Planck-Satellit (ESA)



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

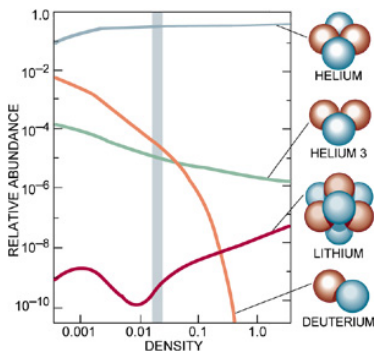
# Wieviel Materie im Universum?



- $D_L$ : 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?**

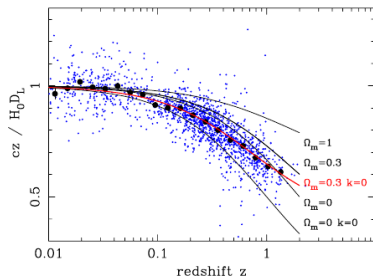
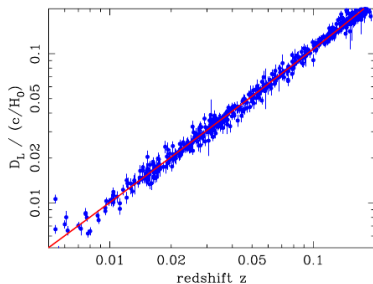
# Woraus besteht die Materie im Universum

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



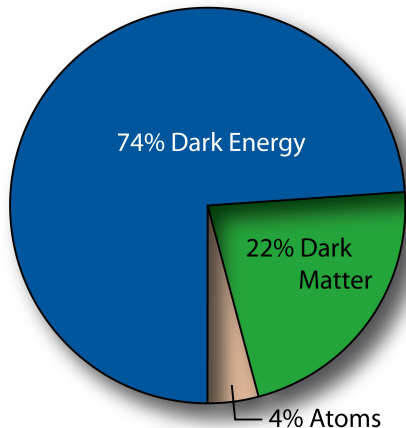
- Messe die Anzahl der leichten Elemente im Universum **Nebel**
- $\Omega_{\text{baryons}} = 0.04 \pm 0.02$
- Natur von  $\sim 25\%$  unbekannt  $\Rightarrow$  „**dunkle Materie**“
- „**dunkle Materie**“ auch notwendig für Erklärung der Bewegung von Sternen in unserer Milchstraße!
- Alternative Erklärung: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

# Woraus besteht der Rest?



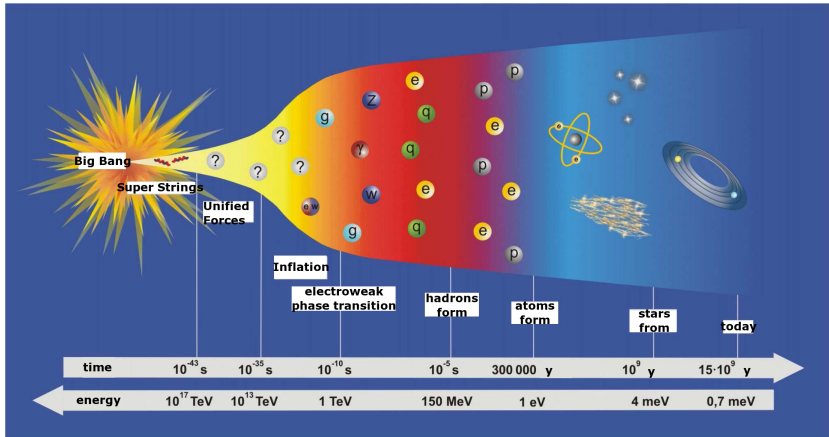
- $\Omega_{\text{tot}} \simeq 1, \Omega_{\text{matter}} \simeq 0.3$   
⇒ 70% noch nicht erklärt!
- genauere Messung der Hubble-Expansion
- ⇒ Universe must expand heute beschleunigt!
- einzige Art Energie, für die Gravitation abstoßend wird: Einsteins kosmologische Konstante
- eingeführt in 1918, um statisches 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

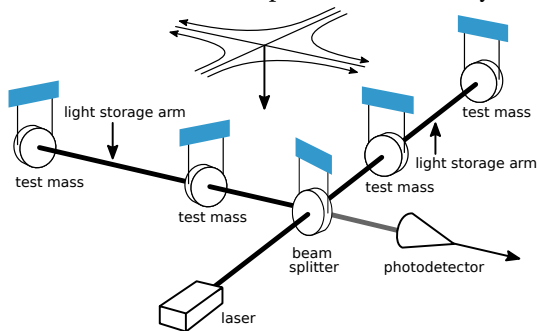


# Nachweis von Gravitationswellen



# Neuester Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

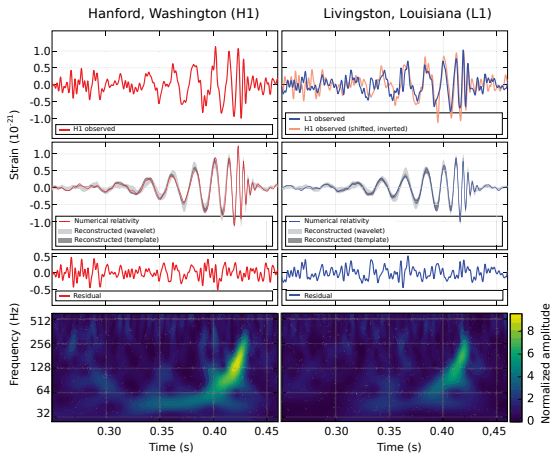
- 14. September 2015:  
erster direkter **Nachweis eines Gravitationswellensignals!**
- zwei Detektoren der LIGO-Kollaboration
- Gravitationswelle bringt Probemassen zum Schwingen
- Nachweis durch Lichtschwankungen im Photodetektor
- Nobelpreis 2017 an Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish



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

# Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

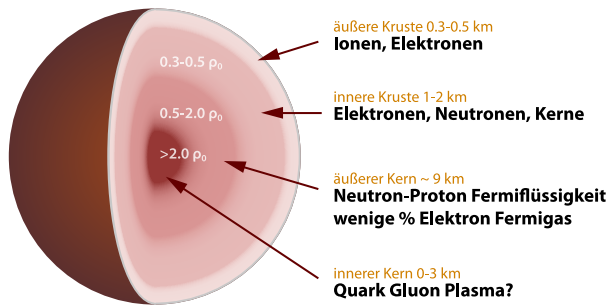
- Quelle: zwei umkreisende schwarze Löcher
- strahlen Gravitationswellen ab
- am Ende **Zusammenprall und Vereinigung**
- Rest: **neues schwarzes Loch**



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

# Neutronensterne

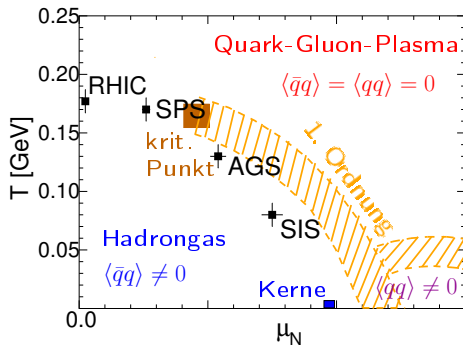
- Sterne (z.B. Sonne):  
stabil durch Balance zwischen **Gravitation und Gasdruck**
- Energieproduktion durch **Kernfusion**
- produziert schwere Atomkerne bis zum Eisen
- wenn „Brennstoff“ verbraucht: Kollaps
- in bestimmtem Massenbereich: **Neutronenstern** (Dichte  $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{kg/m}^3$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



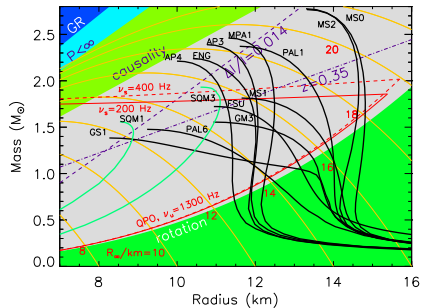
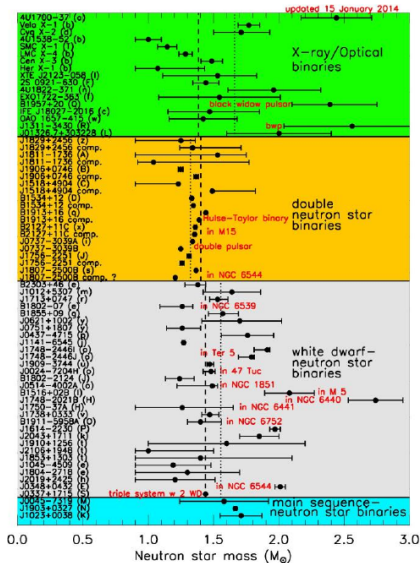
[Wikipedia: Von Robert Schulze - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11364464>]

# 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



# Neutronensterne



- mögliche Neutronsterne  $\leftrightarrow$  Zustandsgl. Kernmaterie
- Berechnungen: ART + Zustandsgleichung!

# Neutronensternkollisionen

- 17.08.2017: Gravitationswellen von **Neutronensternkollision** („Kilonova“)
- Quelle konnte lokalisiert werden
- auch **elektromagnetische Wellen** (Licht, Röntgen-,  $\gamma$ -Strahlen)
- „Multimessenger Astronomy“
  - neuer Blick ins Universum
  - Gravitationswellensignal  $\leftrightarrow$  **sensitiv aus Zustandsgleichung der Kernmaterie**
  - Kilonovae  $\Rightarrow$  Quellen von hochenergetischen „Röntgenblitzen ( $\gamma$  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>]

- [KS95] W. Kuhn, J. Strnad, Quantenfeldtheorie - Photonen und ihre Deutung, Teubner&Vieweg, Wiesbaden (1995).  
<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.  
<https://www.teilchenwelt.de/>
- [Phi18] O. Philipsen, Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik, Springer Spektrum, Berlin (2018).  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57820-9>
- [PRS<sup>+</sup>14] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, W. Rodejohann, Teilchen und Kerne, Springer, 9 ed. (2014).  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-37822-5>