

Wie schwer ist das Universum?

Oder wie viel wiegt ein Proton?

Urs Wenger

Albert Einstein Center für fundamentale Physik
Institut für theoretische Physik

Universität Bern



Universitäre Vorlesungen Winterthur – 16. Oktober 2019

Inhalt

- ▶ Wie schwer ist das Universum?
 - ▶ Wie gross ist das Universum und woraus besteht es?
 - ▶ Standardmodell der Kosmologie
- ▶ Wie schwer sind die Bestandteile der Materie?
 - ▶ Atome bestehen v.a. aus Nukleonen *Protonen, Neutronen*
- ▶ Woher hat das Proton/Neutron seine Masse?
 - ▶ Standardmodell der Elementarteilchen:
Quarks, Gluonen, Higgs,...
 - ▶ Das Ganze ist mehr als seine Teile...
- ▶ Wie messen wir Gewichte und andere Grössen?
 - ▶ Einheiten- und Referenzsysteme...

Wie messen wir Grössen?

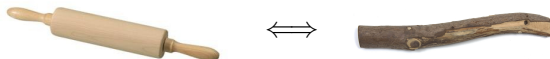
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

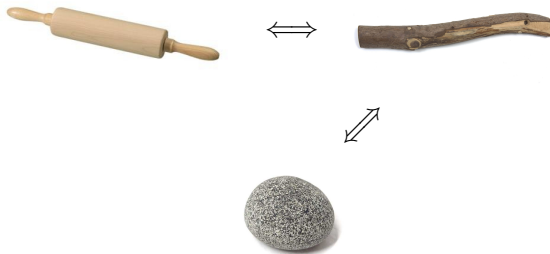
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

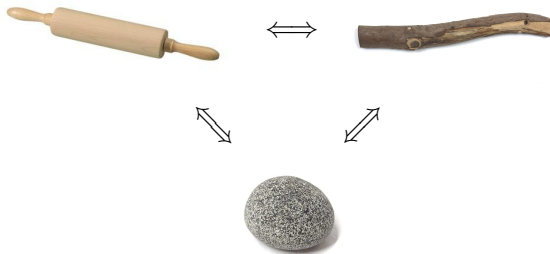
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

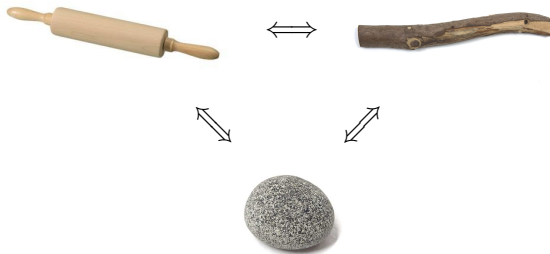
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse
- ▶ Idealerweise Vergleich mit Referenzsystem:
 - ⇒ universelles System von Einheiten
 - ▶ uniform, reproduzierbar

Wie messen wir Grössen?

- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Standardeinheiten

Wie messen wir Grössen?

- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Standardeinheiten
- ▶ SI Einheiten m, kg, s, A, K, cd, mol:
⇒ 'absoluter' Referenzrahmen

SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Jede Einheit ist durch *ein Referenzobjekt* definiert.

SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Jede Einheit ist durch *ein Referenzobjekt* definiert.



SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Jede Einheit ist durch *ein Referenzobjekt* definiert.



SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Jede Einheit ist durch *ein Referenzobjekt* definiert.



SI Einheiten

- ▶ Internationales System (SI) der Einheiten:

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Jede Einheit ist durch *ein Referenzobjekt* definiert.

- ▶ Andere Einheiten können abgeleitet werden:

| | | |
|-----------------|---|---------------------------|
| Volumen | → | m^3 |
| Geschwindigkeit | → | m/s |
| Kraft | → | $kg \cdot m/s^2 \equiv N$ |
| Energie | → | $N \cdot m \equiv J$ |
| ⋮ | | ⋮ |

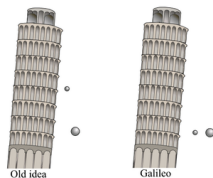
Physikalische Gesetze

- ▶ Einheitssystem vereinfacht **physikalische Gesetze**:
Galileos ursprüngliche Beobachtung fallender Körper

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{t_1}{t_2}$$

wird zu

$$v \propto t \quad \text{bzw.} \quad v = g \cdot t$$



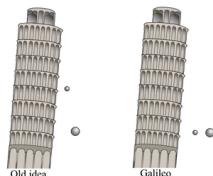
Physikalische Gesetze

- ▶ Einheitssystem vereinfacht **physikalische Gesetze**:
Galileos ursprüngliche Beobachtung fallender Körper

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{t_1}{t_2}$$

wird zu

$$v \propto t \quad \text{bzw.} \quad v = g \cdot t$$

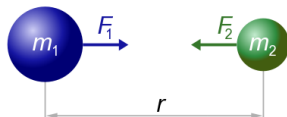


- ▶ Gesetze verbinden unterschiedliche Größen/Einheiten mithilfe von **Konstanten**:

$$\left. \begin{array}{l} [v] = \text{m/s} \\ [t] = \text{s} \end{array} \right\} \Rightarrow [g] = \text{m/s}^2$$

Physikalische Gesetze

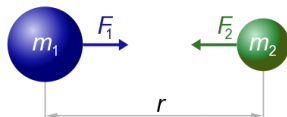
- ▶ Andere Konstanten sind weniger intuitiv, z.B. in Newtons Gravitationsgesetz:



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Physikalische Gesetze

- ▶ Andere Konstanten sind weniger intuitiv, z.B. in Newtons Gravitationsgesetz:



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

$$F = m \cdot a \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} [m] = \text{kg} \\ [a] = \text{m/s}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow [F] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \equiv \text{N}$$

Newtons Gravitationskonstante:

$$[G] = \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Einheiten legen Konstanten fest

- ▶ Durch Einführung des Einheitensystems werden (Natur-)Konstanten festgelegt.
- ▶ Physikalische Gesetze verknüpfen Einheiten.

Einheiten legen Konstanten fest

- ▶ Durch Einführung des Einheitensystems werden (Natur-)Konstanten festgelegt.
- ▶ Physikalische Gesetze verknüpfen Einheiten.
- ▶ Die sieben SI Einheiten sind nicht unabhängig:
⇒ wie viele Einheiten sind nötig?

Einheiten legen Konstanten fest

- ▶ Durch Einführung des Einheitensystems werden **(Natur-)Konstanten** festgelegt.
- ▶ Physikalische Gesetze verknüpfen Einheiten.
- ▶ Die sieben SI Einheiten sind nicht unabhängig:
⇒ wie viele Einheiten sind nötig?

| | Einheit | Abk. |
|-----------------------------|-----------|------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

Einheiten legen Konstanten fest



- ▶ Gesetze der Thermodynamik:
 - ▶ Temperatur \iff Mass für Energie der Freiheitsgrade

$$E \propto k_B \cdot T$$



Einheiten legen Konstanten fest



- ▶ Gesetze der Thermodynamik:

- ▶ Temperatur \iff Mass für Energie der Freiheitsgrade

$$E \propto k_B \cdot T$$

- ▶ setze $k_B = 1 \implies$ Temperatur in Einheiten der Energie

$$[T] = \text{N} \cdot \text{m} \equiv \text{J}$$

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Einheit Mol bezeichnet die Anzahl Moleküle:

$$1 \text{ mol} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle} \implies \text{Avogadrosche Zahl}$$

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Einheit Mol bezeichnet die Anzahl Moleküle:

$$1 \text{ mol} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle} \implies \text{Avogadrosche Zahl}$$

- ▶ Einheit Candela bezeichnet Lichtintensität:

als Energiefluss gemessen \implies mechanische Grösse

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Einheit Mol bezeichnet die Anzahl Moleküle:

$$1 \text{ mol} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle} \implies \text{Avogadrosche Zahl}$$

- ▶ Einheit Candela bezeichnet Lichtintensität:

als Energiefluss gemessen \implies mechanische Grösse

- ▶ Es bleiben noch m, kg, s, A, ...

SI Einheiten sind redundant...

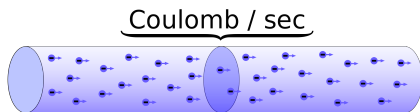
- ▶ Einheit Mol bezeichnet die Anzahl Moleküle:
1 mol = $6.02 \cdot 10^{23}$ Moleküle \implies Avogadrosche Zahl
- ▶ Einheit Candela bezeichnet Lichtintensität:
als Energiefluss gemessen \implies mechanische Grösse
- ▶ Es bleiben noch m, kg, s, A, ...

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

SI Einheiten sind redundant...

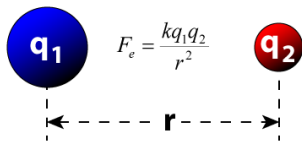
- ▶ Einheit Mol bezeichnet die Anzahl Moleküle:
1 mol = $6.02 \cdot 10^{23}$ Moleküle \implies **Avogadrosche Zahl**
- ▶ Einheit Candela bezeichnet Lichtintensität:
als Energiefluss gemessen \implies **mechanische Grösse**
- ▶ Es bleiben noch **m, kg, s, A, ...**
- ▶ Einheit Ampère misst Strom, also elektr. Ladung pro Zeit:

$$A = C/s$$



SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Coulombsches Gesetz:



The diagram illustrates Coulomb's Law. On the left is a blue circle labeled q_1 , and on the right is a red circle labeled q_2 . A dashed horizontal line with arrows at both ends connects the centers of the two circles, labeled with the vector \mathbf{r} . Above the circles, the equation $F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ is written.

- ⇒ neue Einheit **Coulomb** für elektr. Ladung,
- ⇒ neue **dielektrische Konstante**,

$$[k] = N \cdot m^2 / C^2$$

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Coulombsches Gesetz:

The diagram illustrates Coulomb's law between two point charges. On the left is a blue circle labeled q_1 , and on the right is a red circle labeled q_2 . A horizontal dashed line with arrows at both ends connects the centers of the two circles, labeled with the vector \mathbf{r} . Above the dashed line, the equation $F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ is written.

- ⇒ neue Einheit **Coulomb** für elektr. Ladung,
- ⇒ neue **dielektrische Konstante**,

$$[k] = N \cdot m^2 / C^2$$

- ▶ Alternativer Ansatz:
 - ▶ versteckte k in Definition der Ladung,

$$F_e = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

⇒ Einheitsladung durch mechanische Einheiten definiert!

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Sobald eine **Konstante** zwei Einheiten verknüpft:
⇒ Einheiten nicht unabhängig

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Sobald eine **Konstante** zwei Einheiten verknüpft:
⇒ Einheiten nicht unabhängig

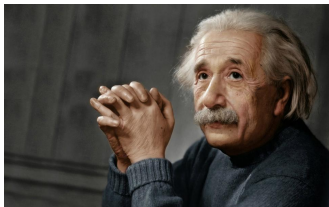


SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Sobald eine **Konstante** zwei Einheiten verknüpft:
⇒ Einheiten nicht unabhängig



SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Sobald eine **Konstante** zwei Einheiten verknüpft:
⇒ Einheiten nicht unabhängig
- ▶ Reduziere Länge auf Zeit:
 - ▶ **konstante Lichtgeschwindigkeit c** verknüpft Länge mit Zeit,

$$L = c \cdot t$$

- ▶ setze $c = 1$ und miss **Länge in Lichtsekunden**

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Es bleiben noch Einheiten für Länge, Masse und Zeit.

| | Einheit | Abk. |
|--|--------------------|----------------|
| Länge | Meter | m |
| Masse | Kilogramm | kg |
| Zeit | Sekunde | s |
| elektrischer Strom | Ampère | A |
| thermodynamische Temperatur | Kelvin | K |
| Lichtintensität | Candela | cd |
| Stoffmenge | Mol | mol |

- ▶ Sobald eine **Konstante** zwei Einheiten verknüpft:
⇒ Einheiten nicht unabhängig



SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Reduziere Zeit auf Energie:

- ▶ Plancksche Konstante h verknüpft Energie mit Zeit,

$$E = h \cdot \nu$$

- ▶ setze $h = 1$ und miss Zeit in inverser Energie.

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Reduziere Zeit auf Energie:

- ▶ Plancksche Konstante h verknüpft Energie mit Zeit,

$$E = h \cdot \nu$$

- ▶ setze $h = 1$ und miss Zeit in inverser Energie.

- ▶ Reduziere Energie auf Masse:

- ▶ Einsteins Gleichung verknüpft Energie mit Masse

$$E = m \cdot c^2$$

- ▶ setze $c = 1$ und miss Energie in kg, Zeit in 1/kg.

SI Einheiten sind redundant...

- ▶ Reduziere Zeit auf Energie:

- ▶ Plancksche Konstante h verknüpft Energie mit Zeit,

$$E = h \cdot \nu$$

- ▶ setze $h = 1$ und miss Zeit in inverser Energie.

- ▶ Reduziere Energie auf Masse:

- ▶ Einsteins Gleichung verknüpft Energie mit Masse

$$E = m \cdot c^2$$

- ▶ setze $c = 1$ und miss Energie in kg, Zeit in 1/kg.

- ▶ Definiere neue Einheit für Masse, so dass $G = 1$

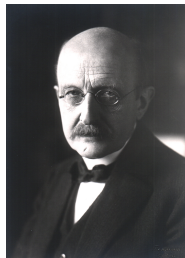
Planck-Einheiten

- ▶ Wahl der Naturkonstanten legt ein Einheitensystem fest.

Planck-Einheiten

- ▶ Wahl der Naturkonstanten legt ein Einheitensystem fest.
- ▶ Natürliches Einheitensystem mit $G = h = c = 1$:

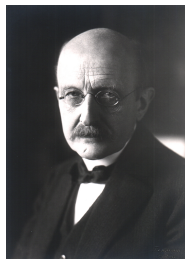
| | Planck-Einheit | SI Einheiten |
|-------|---|---------------------------------|
| Masse | $M_{\text{Planck}} = \sqrt{hc/G}$ | $5.45 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$ |
| Länge | $L_{\text{Planck}} = \sqrt{hG/c^3}$ | $4.04 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ |
| Zeit | $T_{\text{Planck}} = L_{\text{Planck}}/c$ | $1.35 \cdot 10^{-43} \text{ s}$ |



Planck-Einheiten

- ▶ Wahl der Naturkonstanten legt ein Einheitensystem fest.
- ▶ Natürliches Einheitensystem mit $G = h = c = 1$:

| | Planck-Einheit | SI Einheiten |
|-------|---|---------------------------------|
| Masse | $M_{\text{Planck}} = \sqrt{hc/G}$ | $5.45 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$ |
| Länge | $L_{\text{Planck}} = \sqrt{hG/c^3}$ | $4.04 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ |
| Zeit | $T_{\text{Planck}} = L_{\text{Planck}}/c$ | $1.35 \cdot 10^{-43} \text{ s}$ |



- ▶ Bedeutung der Planck-Länge und Planck-Zeit:

⇒ Grenzen unserer fundamentalen Theorien

Plancksches Einheitensystem

- ▶ Universelles System unabhängig von materieller Substanz.

Plancksches Einheitensystem

- ▶ Universelles System unabhängig von materieller Substanz.
- ▶ Theorien und physikalische Gesetze werden besonders einfach.

Plancksches Einheitensystem

- ▶ Universelles System unabhängig von materieller Substanz.
- ▶ Theorien und physikalische Gesetze werden besonders einfach.
- ▶ Standardgrößen im Labor schwierig zu realisieren ...
... aber notwendig um Theorie mit Natur zu verknüpfen.

Plancksches Einheitensystem

- ▶ Universelles System unabhängig von materieller Substanz.
- ▶ Theorien und physikalische Gesetze werden besonders einfach.
- ▶ Standardgrößen im Labor schwierig zu realisieren ...
... aber notwendig um Theorie mit Natur zu verknüpfen.
- ▶ Im folgenden benutzen wir häufig $h = c = 1$:

Masse in Einheiten der Energie, z.B. Elektronenvolt
 $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

[eV: Energiezunahme einer Elementarladung entlang $\Delta U = 1\text{V}$.]

... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?
 - ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?
 - ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms
- ▶ Woraus besteht ein Proton?



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



- ▶ Können wir seine Masse vielleicht sogar *berechnen*?

... aber wie viel wiegt denn jetzt ein Proton?

▶ Was ist überhaupt ein Proton?

▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



▶ Woraus besteht ein Proton?

▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



▶ Können wir seine Masse *messen*?

▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



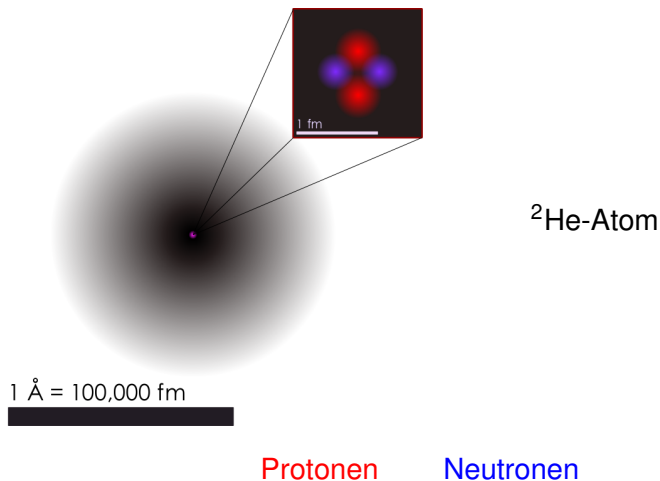
▶ Können wir seine Masse vielleicht sogar *berechnen*?

▶ ja, mit grossen Computern...



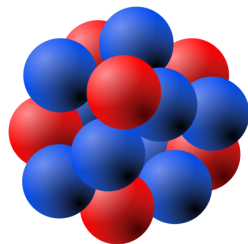
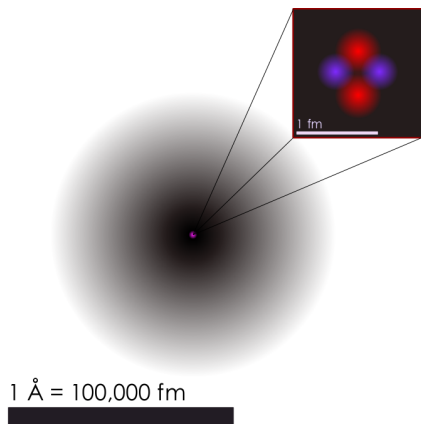
Was ist ein Proton?

Atomkerne bestehen aus **Nukleonen**:



Was ist ein Proton?

Atomkerne bestehen aus **Nukleonen**:



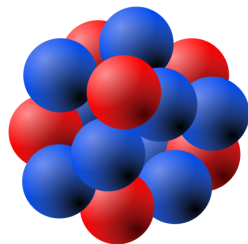
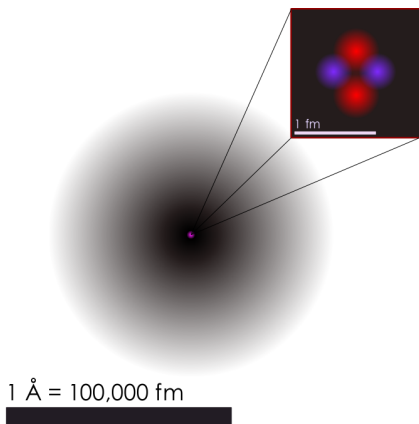
^{12}C -Atomkern

Protonen

Neutronen

Was ist ein Proton?

Atomkerne bestehen aus **Nukleonen**:



^{12}C -Atomkern

Protonen und **Neutronen**
sind keine Elementarteilchen.

Wie viel wiegt ein Proton?

Strategie 1: Vergleich mit Referenzmasse

⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

Wie viel wiegt ein Proton?

Strategie 1: Vergleich mit Referenzmasse

⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

- ▶ Wie viele Nukleonen sind in 250 g Silber enthalten?

Table 4.1. Revised 2011 by D.E. Gross (LBNL) and E. Berger. Atomic weights of stable elements are adopted from the Commission on Isotopic Abbreviations and Atomic Weights, "Atomic Weights of the Elements 2007." <http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/aww/>. The atomic number (top left) is the number of protons in the nucleus. The atomic mass (bottom) of a stable element is weighted by isotopic abundance in the Earth's surface. If the element has no stable isotopes, the atomic mass (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. In this case the mass is from <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/mass/mass.html> (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. The exceptions are Tl, Po, and U, which have characteristic terrestrial compositions. Atomic masses are relative to the mass of ^{12}C , defined to be exactly 12 unified atomic mass units (u) (approx. g/mole). Relative isotopic abundances differ vary considerably both in natural and commercial samples; this is reflected in the number of significant figures given for the atomic mass. IUPAC does not accept the change for elements 113, 115, 117, and 118 as conclusive at this time.

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

13 14 15 16 17 18
Al Si P S Cl Ar
13.003 14.013 15.003 15.999 17.003 18.998
Ga Ge As Se Br Kr
69.723 72.630 74.922 78.972 79.904 83.80
In Sn Sb Te I Xe
114.818 118.710 121.757 127.60 126.905 131.29
Tl Pb Bi Po At Rn
204.384 207.2 208.980 209 210 222

19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr
39.098 40.078 44.956 47.88 48.94 51.996 54.938 55.845 58.933 58.933 63.546 65.38 69.723 72.630 74.922 78.972 79.904 83.80
Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe
85.468 87.62 88.906 91.224 92.906 95.94 98.906 101.07 102.905 106.42 107.868 112.411 114.818 118.710 121.757 127.60 126.905 131.29
Cs Ba La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
132.905 137.327 138.905 140.12 140.908 144.24 147.07 150.919 151.964 157.25 158.925 162.50 164.930 167.259 171.934 174.967 176.485 178.49 180.948 183.848 186.207 188.906 191.224 192.225 195.084 196.967 198.906 200.970 201.07 208.980 209 210 222

37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000

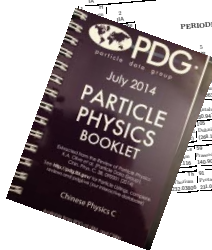
Wie viel wiegt ein Proton?

Strategie 1: Vergleich mit Referenzmasse

⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

- ▶ Wie viele Nukleonen sind in 250 g Silber enthalten?

Table 4.1. Revised 2011 by D.E. Gross (LBNL) and E. Berger. Atomic weights of stable elements are adopted from the Commission on Isotopic Abundance and Atomic Weights, "Atomic Weights of the Elements 2007." <http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/aww/>. The atomic number (top left) is the number of protons in the nucleus. The atomic mass (bottom) of a stable isotope is weighted by isotopic abundance in the Earth's surface. If the element has no stable isotopes, the atomic mass (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. In this case the mass is from <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/mass/mass.html> (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. The exceptions are Tl, Po, and U, which have characteristic terrestrial compositions and the longest-lived isotopes in the case of ^{208}Tl , defined to be exactly 12 unified atomic mass units (u) (approx. 4 nucleons). Relative isotopic abundances differ vary considerably both in natural and commercial samples; this is reflected in the number of significant figures given for the atomic mass. IUPAC does not accept the change for elements 113, 115, 117, and 118 as conclusive at this time.



PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|------------|---------------|---------|------------|---------|---------|------------|-----------|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| H | He | Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | American | Lawrencium | Rutherfordium | Dubnium | Seaborgium | Bohrium | Hassium | Tennessine | Oganesson | |

Atomgewicht eines ^{47}Ag -Atoms
relativ zu $1/12$ eines ^{12}C -Atoms:

Wie viel wiegt ein Proton?

Strategie 1: Vergleich mit Referenzmasse

⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

► Wie viele Nukleonen sind in 250 g Silber enthalten?

Table 4.1. Revised 2011 by D.E. Gross (LBNL) and E. Berger. Atomic weights of stable elements are adopted from the Commission on Isotopic Abundance and Atomic Weights, "Atomic Weights of Stable Elements" (<http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/awse/>). The atomic number (*top left*) is the number of protons in the nucleus. The atomic mass (bottom) of a stable element is weighted by isotopic abundances in the Earth's surface. If the element has no stable isotopes, the atomic mass (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. In this case the mass is from <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/mass/mass2003.html> (in parentheses) of the most stable isotope currently known is given. The exceptions are Tl, Po, and U, which have characteristic terrestrial compositions and the longest-lived isotopes in the case of ^{208}Tl , ^{209}Po , and ^{238}U . Relative isotopic abundances also vary considerably both in natural and commercial samples; this is reflected in the number of significant figures given for the atomic mass. IUPAC does not accept the claim for elements 113, 115, 117, and 118 as conclusive at this time.

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

PDG
particle data group
July 2014
PARTICLE
PHYSICS
BOOKLET
Chinese Physics C

Atomgewicht eines ^{47}Ag -Atoms
relativ zu $1/12$ eines ^{12}C -Atoms:

⇒ 107.87 g/mol

Wie viel wiegt ein Proton?

Strategie 1: Vergleich mit Referenzmasse

⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

- Mit 107 Nukleonen pro Kern erhalten wir $1.493 \cdot 10^{26}$ Nukleonen und damit $m_p = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

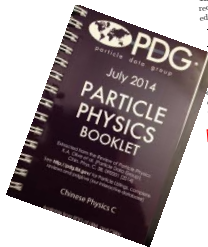


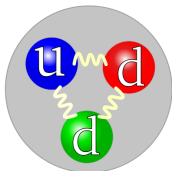
Table 1.1. Reviewed 2013 by P.J. Mohr (NIST). The set of constants excluding the last group (which come from the Particle Data Group) is recommended by CODATA for international use. The 1- σ uncertainties in the last digits are given in parentheses after the values. See the full edition of this Review for references and further explanation.

| Quantity | Symbol, equation | Value | Uncertainty (ppb) |
|---|--|---|-------------------|
| | | | exact* |
| | | 299 792 458 m s ⁻¹ | 44 |
| speed of light in vacuum | c | $6.626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34} \text{ J s}$ | 44 |
| Planck constant | h | $1.054\ 571\ 726(47) \times 10^{-34} \text{ J s}$ | 22 |
| Planck constant, reduced | $\hbar = h/2\pi$ | $= 6.582\ 119\ 28(15) \times 10^{-22} \text{ MeV s}$ | 22, 22 |
| | | $1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19} \text{ C}$ | 22 |
| elementary charge | e | $197.326\ 9718(44) \text{ MeV fm}$ | 44 |
| fine-structure constant | α | $0.389\ 370\ 338(17) \text{ GeV}^2 \text{ mbarn}$ | 44 |
| electron charge magnitude | e | $0.510\ 998\ 948(11) \text{ MeV}/c^2 = 9.109\ 382\ 91(40) \times 10^{-31} \text{ kg}$ | 22, 44 |
| electron mass | m_e | $1.875\ 612\ 859(41) \text{ MeV}/c^2 = 1.672\ 621\ 777(74) \times 10^{-27} \text{ kg}$ | 22, 44 |
| conversion constant | $(\hbar c)^2$ | $938.272\ 046(21) \text{ MeV}/c^2 = 1.609\ 538\ 921(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$ | 0.089, 0.41 |
| conversion constant | m_p | $= 1.007\ 276\ 466\ 812(90) \text{ u} = 1.836\ 152\ 672\ 45(75) \text{ m}_e$ | 22 |
| electron mass | m_e | $1875.612\ 859(41) \text{ MeV}/c^2$ | 22, 44 |
| proton mass | m_p | $931.494\ 061(21) \text{ MeV}/c^2 = 1.660\ 538\ 921(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$ | 22, 44 |
| deuteron mass | m_d | exact | exact |
| unified atomic mass unit (u) | $(m_{12}\text{C atom})/12 = (1 \text{ g})/(N_A \text{ mol})$ | $8.854\ 187\ 817 \dots \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ | exact |
| vacuum permittivity | $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ | $4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2} = 12.566\ 370\ 614 \dots \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ | 0.32, 0.32 |
| permittivity of free space | μ_0 | $7.297\ 352\ 5698(24) \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ | 0.97 |
| permeability of free space | $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ | $2.817\ 940\ 3267(27) \times 10^{-13} \text{ m}$ | 0.65 |
| fine-structure constant | $r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$ | $3.861\ 592\ 680(25) \times 10^{-13} \text{ m}$ | 0.32 |
| classical electron radius | $\lambda_c = h/m_e c = r_e \alpha^{-1}$ | $0.529\ 177\ 210\ 92(17) \times 10^{-10} \text{ m}$ | 22 |
| Compton wavelength of electron | $\lambda_{c0} = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e c^2 = r_e \alpha^{-2}$ | $1.239\ 841\ 930(27) \times 10^{-6} \text{ m}$ | 22 |
| Bohr radius ($m_{\text{reduced}} = \infty$) | $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e c^2 = r_e \alpha^{-2}$ | $1.395\ 916\ 312(30) \text{ eV}$ | 22 |
| wavelength of 1 eV/c particle | $hcR_\infty = m_e c^2/2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2 = m_e c^2 \alpha^2/2$ | $0.366\ 255\ 8734(13) \text{ barn}$ | 1.9 |
| Rydberg energy | $hcR_\infty = m_e c^2/2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2 = m_e c^2 \alpha^2/2$ | | |
| Thomson cross section | $\sigma_T = 8\pi r_e^2/3$ | | |

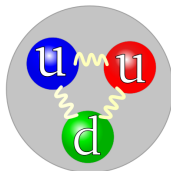
Woraus besteht ein Proton?

- ▶ Nukleonen bestehen aus Quarks, durch Gluonen 'verklebt':

Neutron



Proton

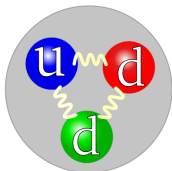


Das Ganze ist einfach die Summe der Bestandteile...

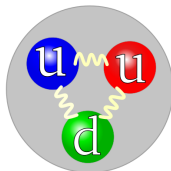
Woraus besteht ein Proton?

- ▶ Nukleonen bestehen aus Quarks, durch Gluonen 'verklebt':

Neutron



Proton



Das Ganze ist einfach die Summe der Bestandteile...

- ▶ **Strategie 2:** aus Summe der Quarkmassen

$$m_{ud} = 3.5 \text{ MeV} \implies m_p = 10.5 \text{ MeV}$$

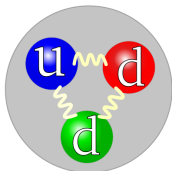
anstatt $m_p = 938 \text{ MeV} \dots!?$



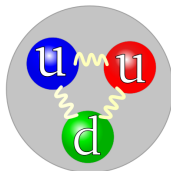
Woraus besteht ein Proton?

- ▶ Nukleonen bestehen aus Quarks, durch Gluonen 'verklebt':

Neutron



Proton



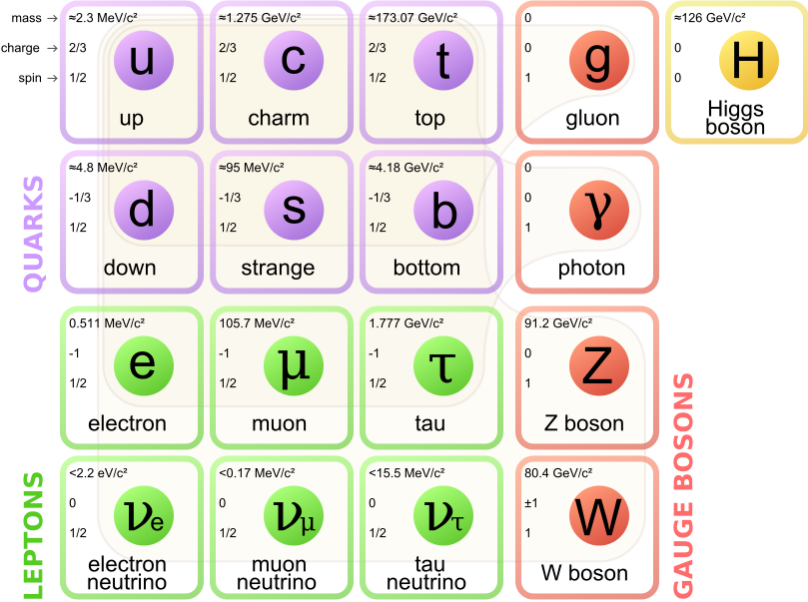
Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen!

- ▶ Dafür verantwortlich ist die **starke Wechselwirkung** im SM:

Standardmodell (SM) der Elementarteilchen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G_{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \bar{\psi}_iy_{ij}\psi_j\phi + h.c. + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

Das Standardmodell der Elementarteilchen



Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

- ▶ beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen,

Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

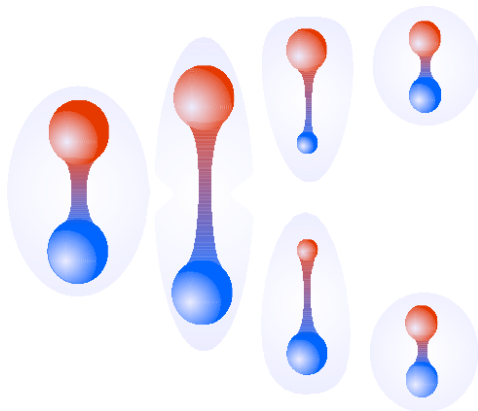
- ▶ beschreibt die Wechselwirkungen zwischen **Quarks** und **Gluonen**,
- ▶ Parameter sind die **Quarkmassen** m_q und die **dimensionslose Eichkopplung**,

Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

- ▶ Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen:



Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

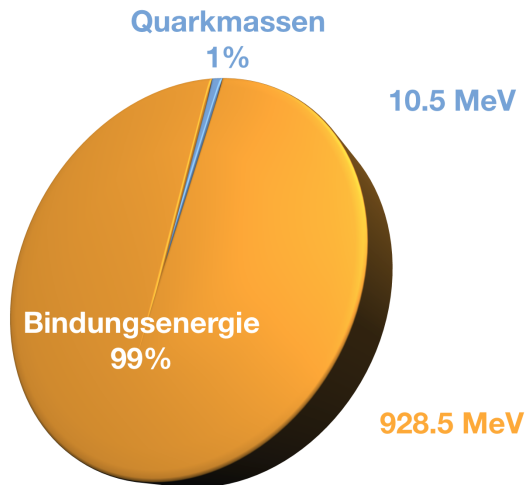
- ▶ Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen:



Anziehungskraft ist **enorm stark!**

Quark confinement

- ▶ Die **Bindungsenergie** zwischen den Quarks im Proton ist **enorm gross**:



Quantenchromodynamik (QCD)

- ▶ Eigenschaften der QCD:
 - ▶ Farbbindung (colour confinement)
 - ▶ asymptotische Freiheit

Quantenchromodynamik (QCD)

- ▶ Eigenschaften der QCD:
 - ▶ Farbbindung (colour confinement)
 - ▶ asymptotische Freiheit
- ▶ Nobelpreis der Physik in 2004:



D. Gross



F. Wilczek

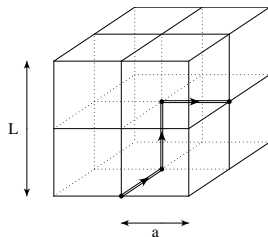


D. Politzer

QCD auf dem Gitter

Gitter-Regularisierung: diskretisiere die Euklidische Raum-Zeit!

- ▶ hyperkubisches L^4 -Gitter mit Gitterabstand a
- ▶ Gluonen leben auf den Verbindungen \longleftrightarrow
- ▶ Quarks auf den Gitterpunkten \bullet



⇒ erfordert die Berechnung einer $100M \times 100M$ Matrix!

Benutze den Computer. . .

or: 'Shut up and calculate!'



Benutze den Computer. . .

or: 'Shut up and calculate!'



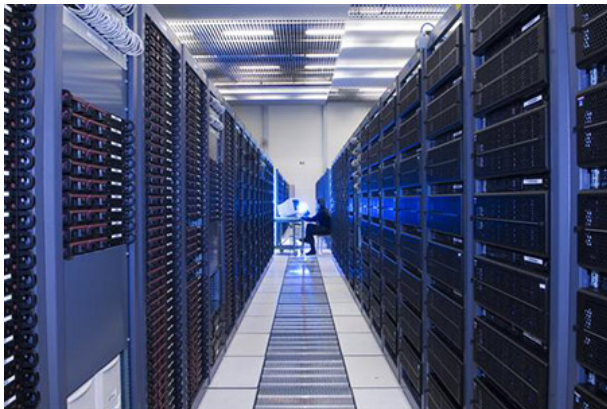
Benutze den Computer. . .

or: 'Shut up and calculate!'



Benutze den Computer. . .

. . . grössere Computer . . .



. . . allerdings dauern die Rechnungen immer noch mehrere Monate und Jahre.

⇒ *Bessere Algorithmen* sind nötig.

European Twisted Mass Collaboration (ETMC)

Kombination von theoretischem Fachwissen und Rechenkraft:



Institutionen in Deutschland, Italien,
Dänemark, Frankreich, Spanien,
England, Zypern, Holland, Schweiz.



Simulation der Energiedichte in der QCD:

Wie viel wiegt ein Proton?

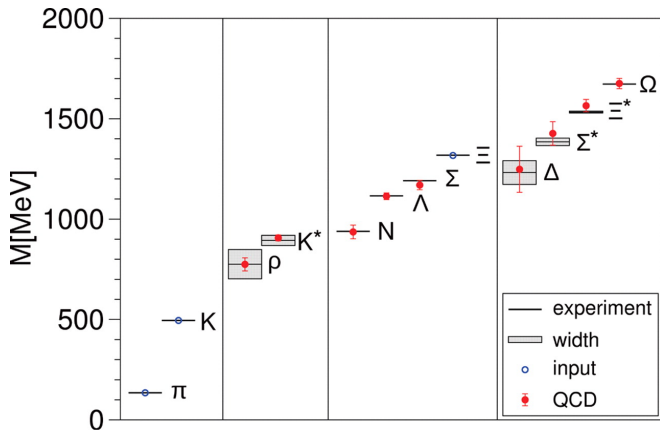
Ach ja, das **Proton**...

... wie viel wiegt das denn jetzt?

Wie viel wiegt ein Proton?

Ach ja, das **Proton**...

... wie viel wiegt das denn jetzt? $\Rightarrow m_p = 933(18) \text{ MeV}$



Zusammenfassung

- ▶ Bedeutung einer **Messung**.
- ▶ Rolle der **Konstanten** bei Wahl der Einheiten.
- ▶ Masse des Protons durch das Standardmodell bestimmt:
 - ▶ nur 1% durch das Higgs-Teilchen erzeugt,
 - ▶ restliche 99% als Bindungsenergie zwischen

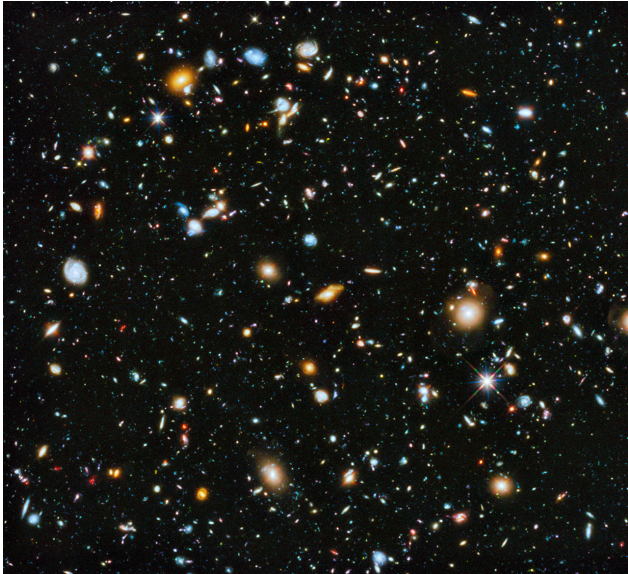
Quarks und Gluonen

durch starke Wechselwirkung der QCD beschrieben.

- ▶ Computersimulationen auf dem Raum-Zeit-Gitter:

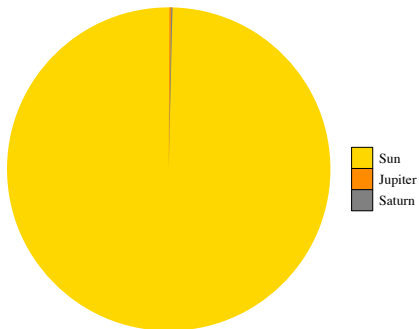
⇒ präzise *ab-initio* Berechnungen der QCD

Und wie schwer ist das Universum?



Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Masse des Sonnensystems dominiert durch die Sonne



Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Masse des Sonnensystems dominiert durch die Sonne
- ▶ Unsere Milchstrasse enthält Milliarden von Sternen:



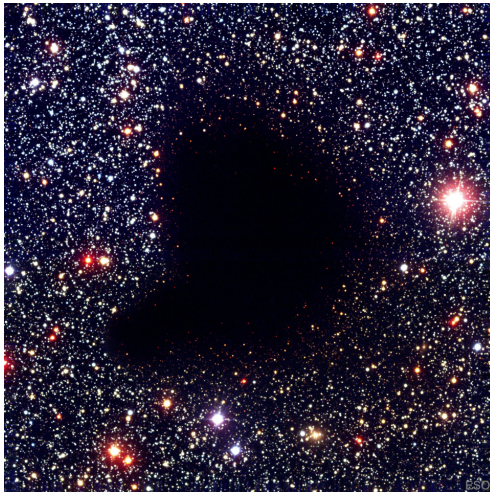
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Masse des Sonnensystems dominiert durch die Sonne
- ▶ Unsere Milchstrasse enthält Milliarden von Sternen:



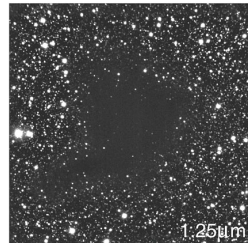
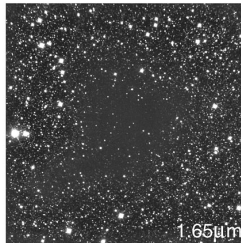
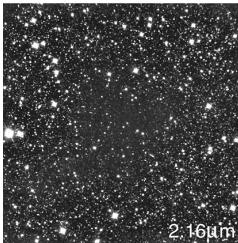
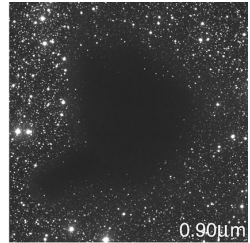
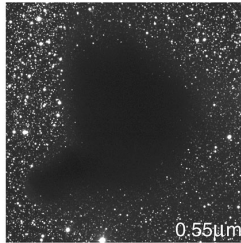
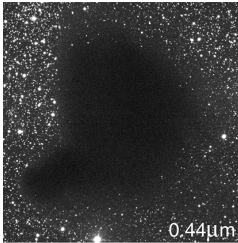
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Intergalaktische Materie:



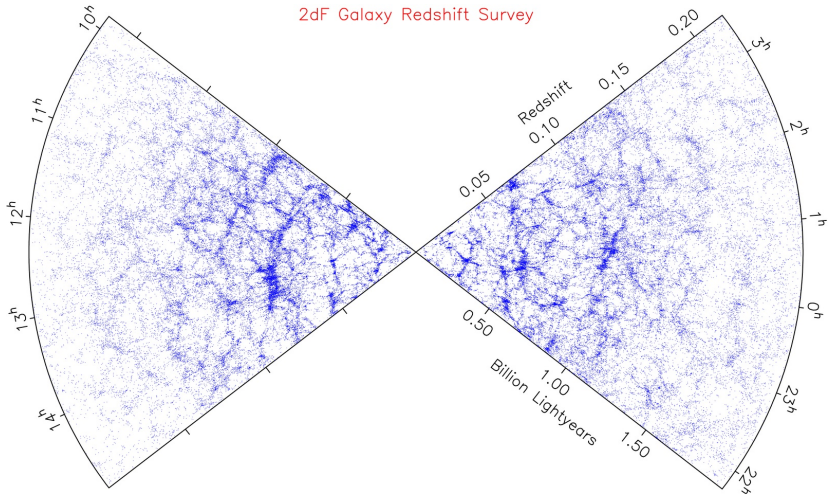
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Intergalaktische Materie:



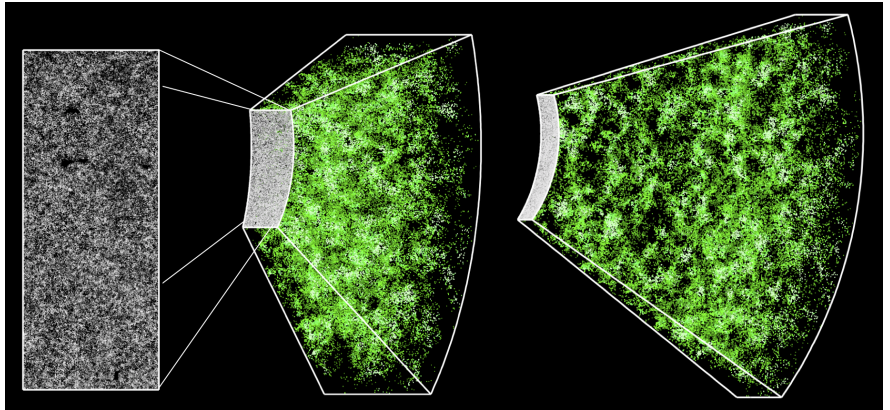
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Galaxien bilden grosse Strukturen:



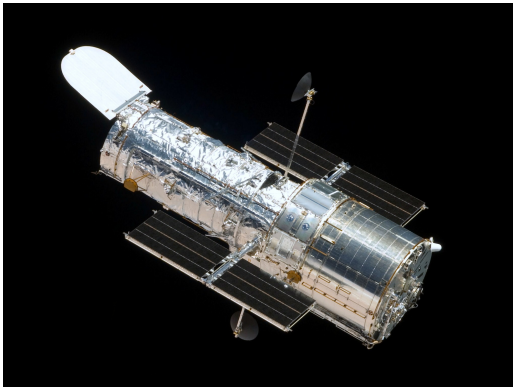
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Galaxien bilden grosse Strukturen:



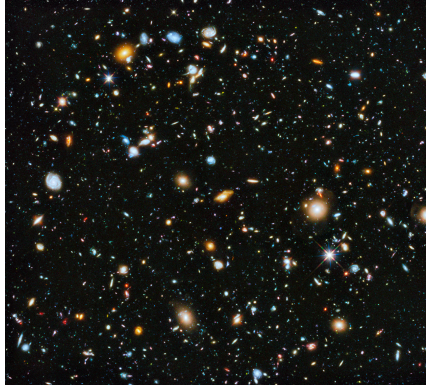
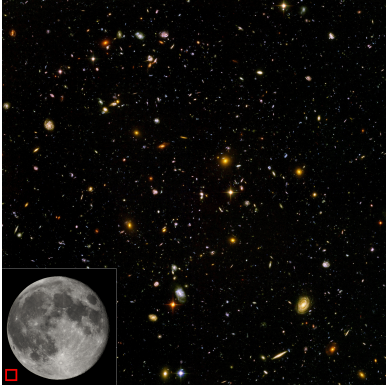
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Hubble Deep Field Telescope:



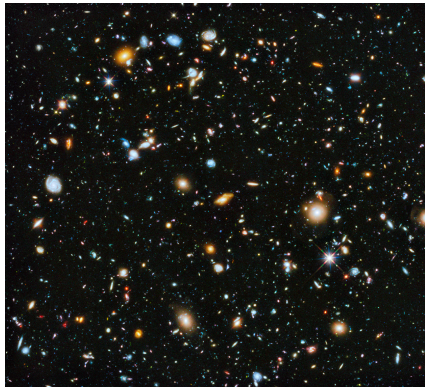
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Hubble Deep Field Telescope:



Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Hubble Deep Field Telescope:



- ▶ Grösse des beobachtbaren Universums

~14 Milliarden Lichtjahre

Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Abschätzung der Massendichte des Universums:

$$\rho_{\text{Universum}} = 4.1 \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$$

1 Proton pro 4 m^3

Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Abschätzung der Massendichte des Universums:

$$\rho_{\text{Universum}} = 4.1 \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$$

1 Proton pro 4 m^3

- ▶ Abschätzung der Grösse des Universums:

$$V_{\text{Universum}} = 3.6 \cdot 10^{80} \text{ m}^3$$

Durchmesser: 93 GLy

Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Abschätzung der Massendichte des Universums:

$$\rho_{\text{Universum}} = 4.1 \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$$

1 Proton pro 4 m^3

- ▶ Abschätzung der Grösse des Universums:

$$V_{\text{Universum}} = 3.6 \cdot 10^{80} \text{ m}^3$$

Durchmesser: 93 GLy

- ▶ Abschätzung der Masse des Universums:

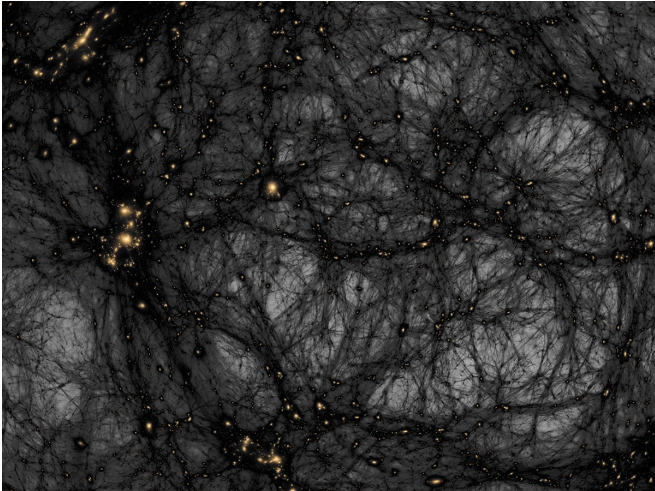
$$M_{\text{Universum}} = \rho \cdot V = 1.5 \cdot 10^{53} \text{ kg}$$

10^{80} Protonen

Sind wir nun am Ende? ... nein!

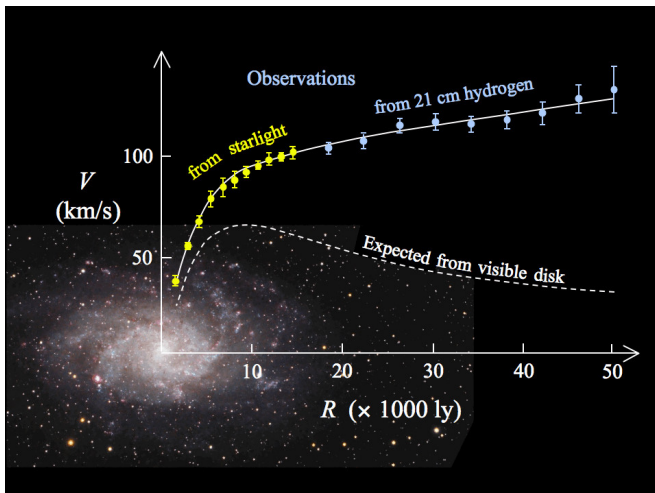
Sind wir nun am Ende? ... nein!

- ▶ Es gibt viele Indizien für **dunkle Materie**...



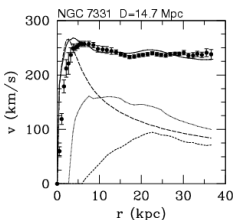
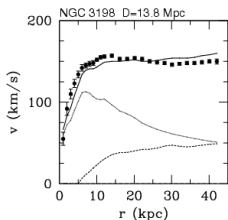
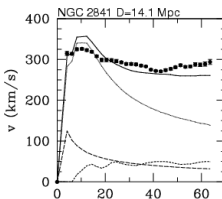
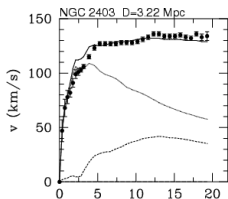
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 1 – Rotationskurven von Galaxien:



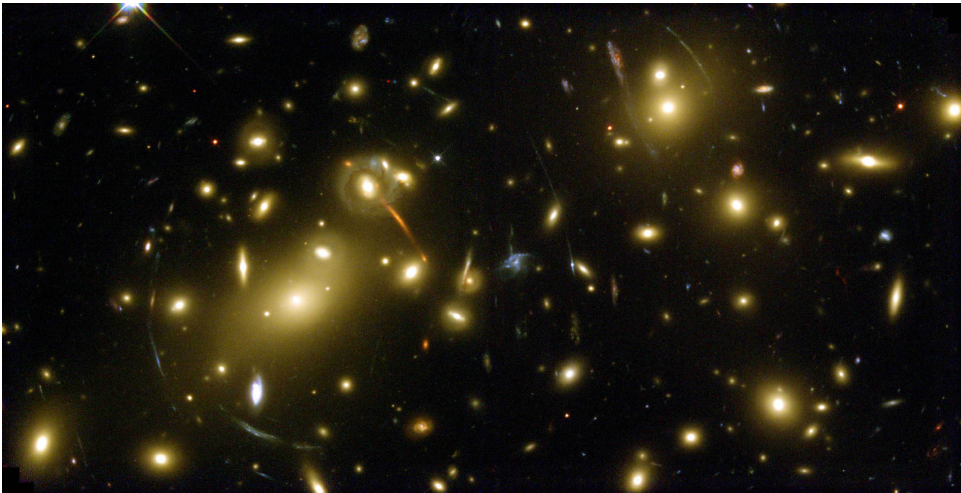
Dunkle Materie

► Indiz 1 – Rotationskurven von Galaxien:



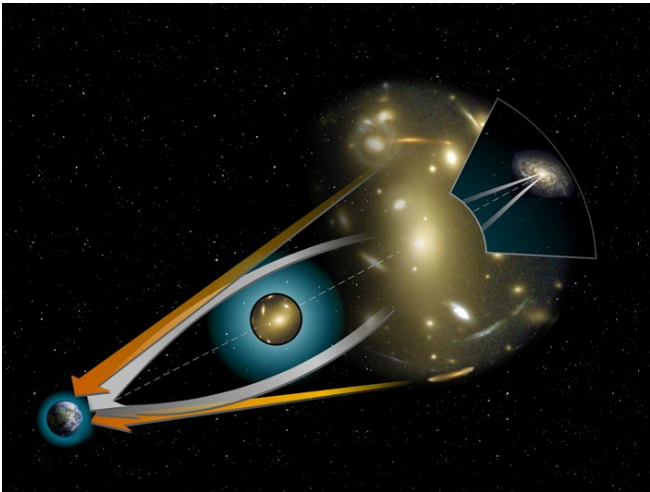
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



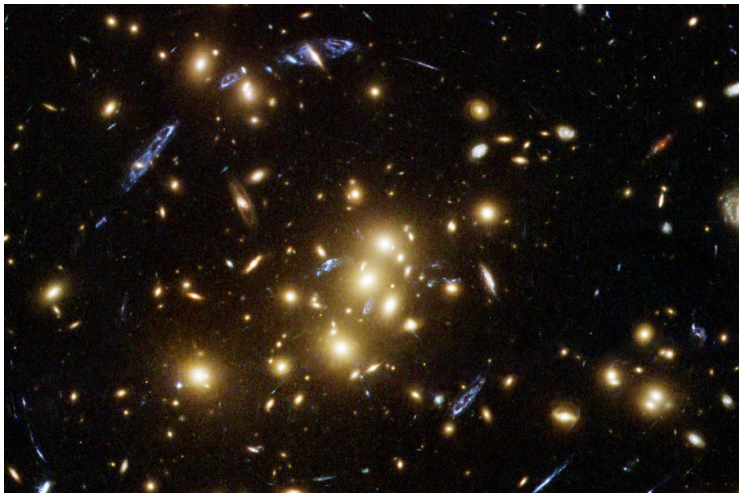
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



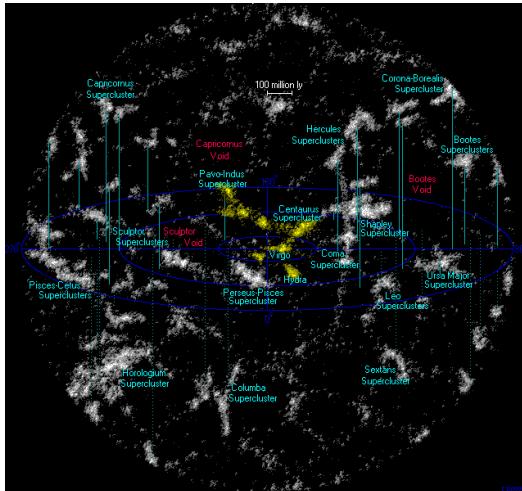
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



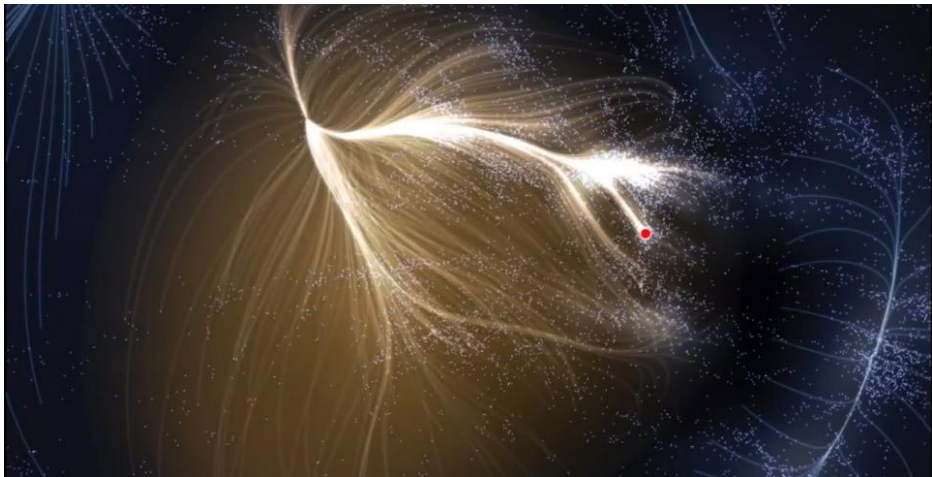
Dunkle Materie

► Indiz 3 – Strukturbildung im Universum:



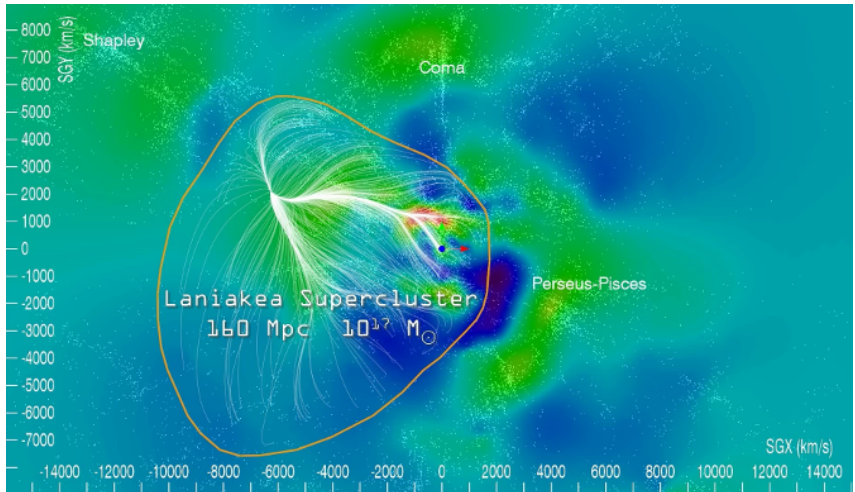
Dunkle Materie

- ▶ **Indiz 3** – Strukturbildung im Universum:



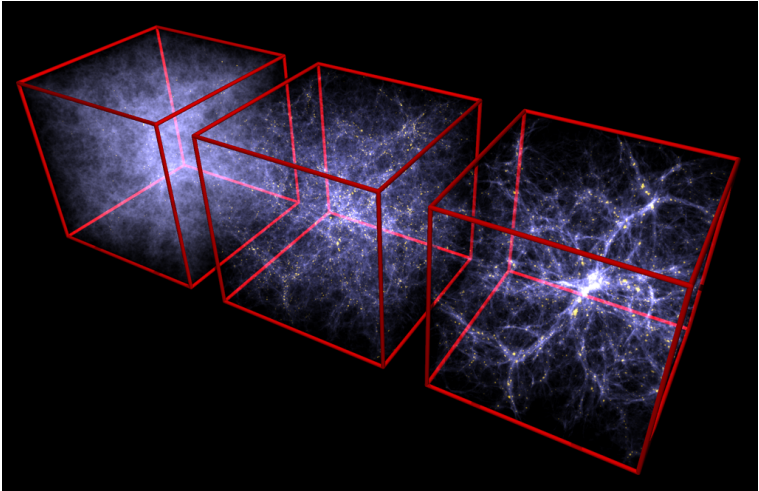
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 3 – Strukturbildung im Universum:



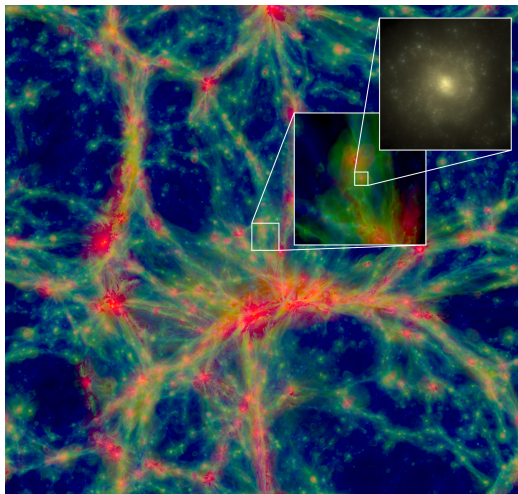
Dunkle Materie

- ▶ **Indiz 3** – Strukturbildung im Universum:



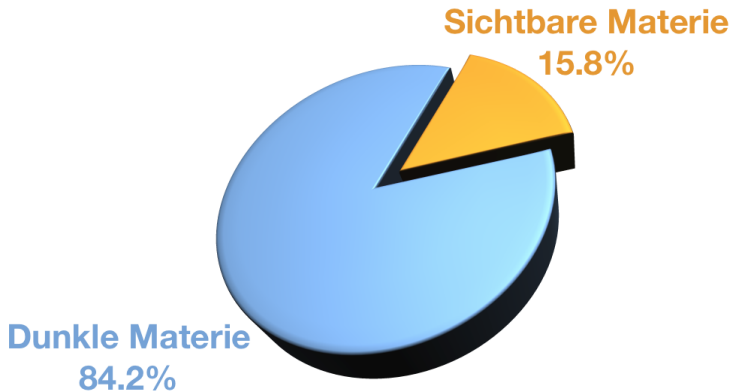
Dunkle Materie

- ▶ **Indiz 3** – Strukturbildung im Universum:



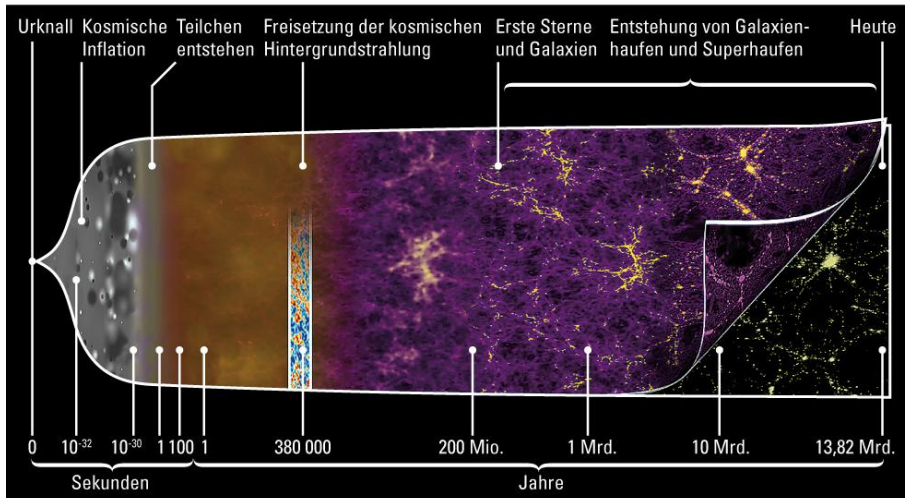
Dunkle Materie

- ▶ Anteil der dunklen Materie an der Gesamtmasse des Universums:



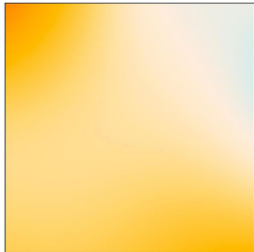
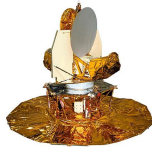
Kosmische Hintergrundstrahlung

- ▶ Blick ins Universum ist ein Blick zurück in der Zeit:

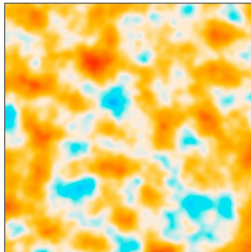


Kosmische Hintergrundstrahlung

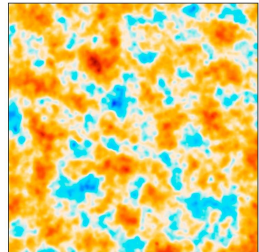
- ▶ Temperatur der Strahlung im Mikrowellenbereich:



COBE



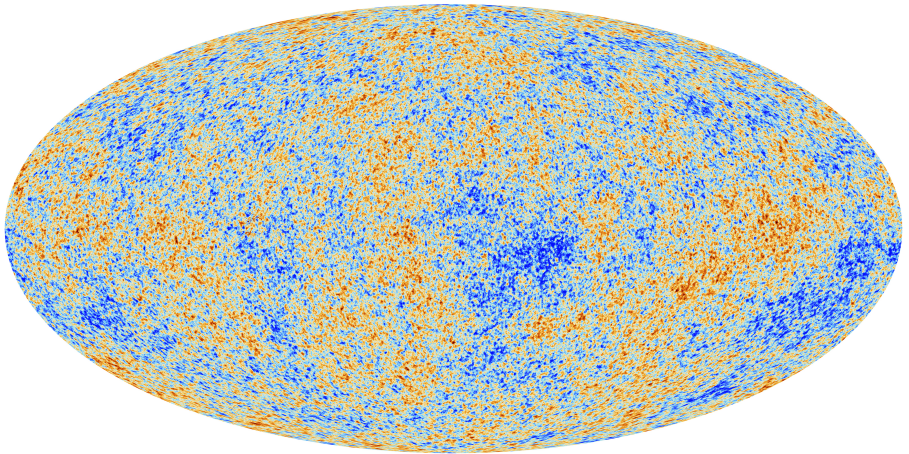
WMAP



Planck

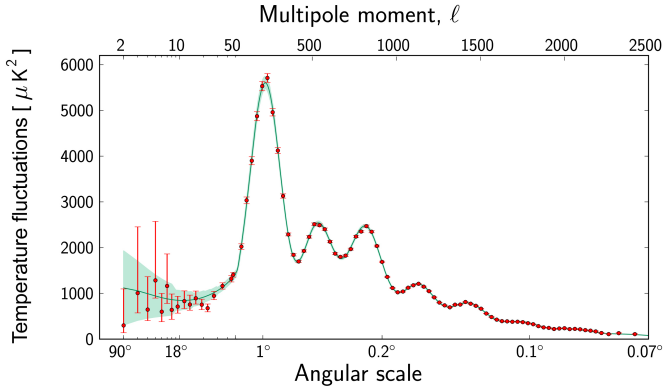
Kosmische Hintergrundstrahlung

- ▶ Temperatur der Strahlung im Mikrowellenbereich:



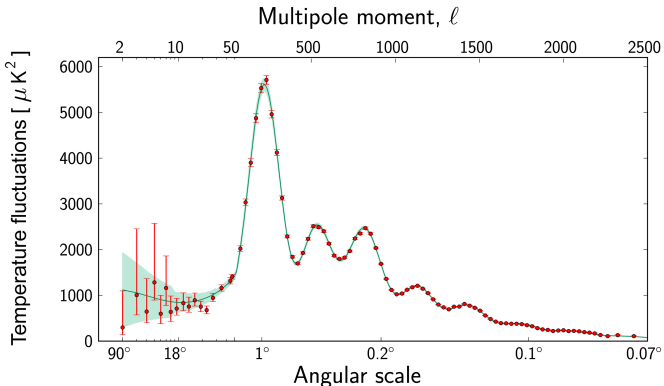
Kosmische Hintergrundstrahlung

- Korrelationen der Temperaturfluktuationen:



Kosmische Hintergrundstrahlung

- ▶ Korrelationen der Temperaturfluktuationen:



- ▶ Äusserst genau durch das **kosmologische Standardmodell** beschrieben!

Das kosmologische Standardmodell

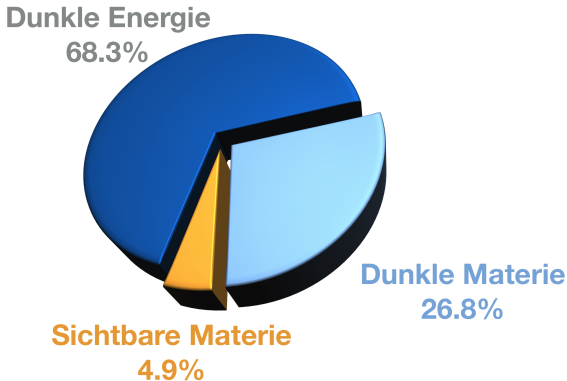
- ▶ Beschreibt die Entwicklung des Universums nach dem Big Bang bis heute (mit nur 6 Parametern):
 - ▶ Anteile der sichtbaren und dunklen Materie

Das kosmologische Standardmodell

- ▶ Beschreibt die Entwicklung des Universums nach dem Big Bang bis heute (mit nur 6 Parametern):
 - ▶ Anteile der sichtbaren und dunklen Materie
 - ▶ Anteil an **dunkler Energie**

Das kosmologische Standardmodell

- ▶ Beschreibt die Entwicklung des Universums nach dem Big Bang bis heute (mit nur 6 Parametern):
 - ▶ Anteile der **sichtbaren** und **dunklen** Materie
 - ▶ Anteil an **dunkler Energie**



Wir wissen viel, und trotzdem nichts, . . .



. . . und wir hören nicht auf zu fragen!