

Wie viel wiegt ein Proton?

Und wie schwer ist das Universum?

Urs Wenger

Albert Einstein Center für fundamentale Physik
Institut für theoretische Physik

Universität Bern

Physik am Freitag – 19. Januar 2018

Wie messen wir Grössen?

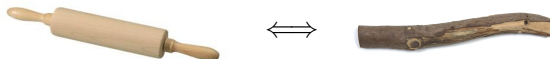
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

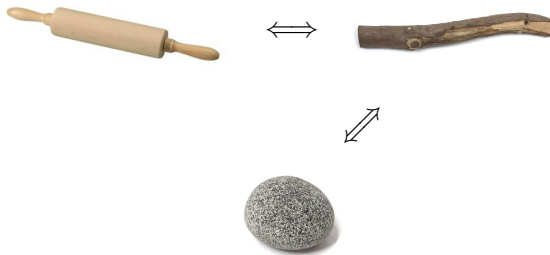
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

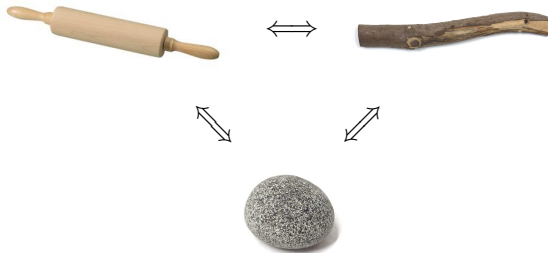
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ Angabe der Grösse in Einheiten einer Vergleichsgrösse

Wie messen wir Grössen?

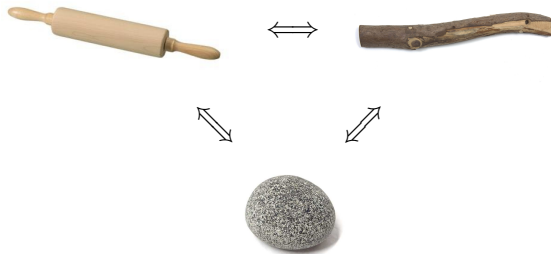
- ▶ Durch Vergleich von Objekten:



- ▶ 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	→	$N \cdot m \equiv J$
⋮		⋮

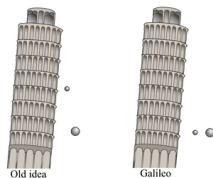
Physikalische Gesetze

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

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

wird zu

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



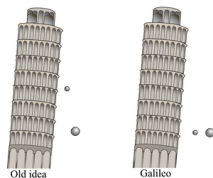
Physikalische Gesetze

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

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

wird zu

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

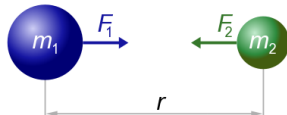


- ▶ Gesetze verbinden unterschiedliche Größen/Einheiten mithilfe von **Konstanten**:

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

Physikalische Gesetze

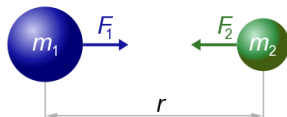
- ▶ Andere Konstanten sind weniger intuitiv, z.B. in Newtons Gravitationsgesetz:



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

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:

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

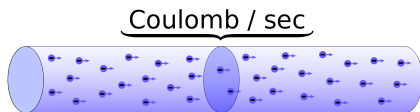
- ▶ Einheit Candela bezeichnet Lichtintensität:

als Energiefluss gemessen \implies **mechanische Grösse**

- ▶ Es bleiben noch **m, kg, s, A, ...**

- ▶ 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:

A diagram illustrating Coulomb's law. On the left is a blue circle labeled q_1 . 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**,

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

- ▶ 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

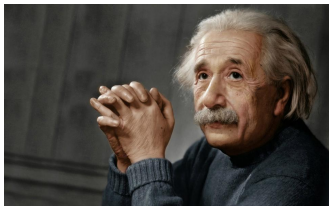


SI Einheiten sind redundant...

- ▶ 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,

$$L = c \cdot t$$

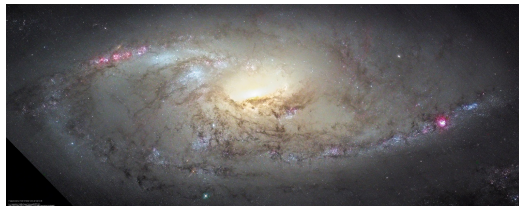
- ▶ setze $c = 1$ und miss Länge in Lichtsekunden

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 $G = 1$

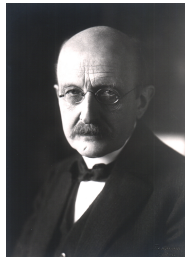
Planck-Einheiten

- ▶ Wahl der Naturkonstanten legt ein Einheitensystem fest.

Planck-Einheiten

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

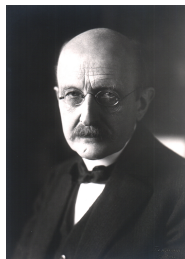
	Planck-Einheit	SI Einheiten
Masse	$M_{\text{Planck}} = \sqrt{hc/G}$	$5.45 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$
Länge	$L_{\text{Planck}} = \sqrt{hG/c^3}$	$4.04 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
Zeit	$T_{\text{Planck}} = L_{\text{Planck}}/c$	$1.35 \cdot 10^{-43} \text{ s}$



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



▶ Können wir seine Masse *messen*?



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

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ 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



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



- ▶ Woraus besteht ein Proton?



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

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



- ▶ 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



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



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

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

- ▶ Was ist überhaupt ein Proton?

- ▶ kleiner Bestandteil eines Atoms



- ▶ Können wir seine Masse *messen*?

- ▶ durch Vergleich mit einer Referenzmasse



- ▶ Woraus besteht ein Proton?

- ▶ aus Elementarteilchen (Quarks und Gluonen)



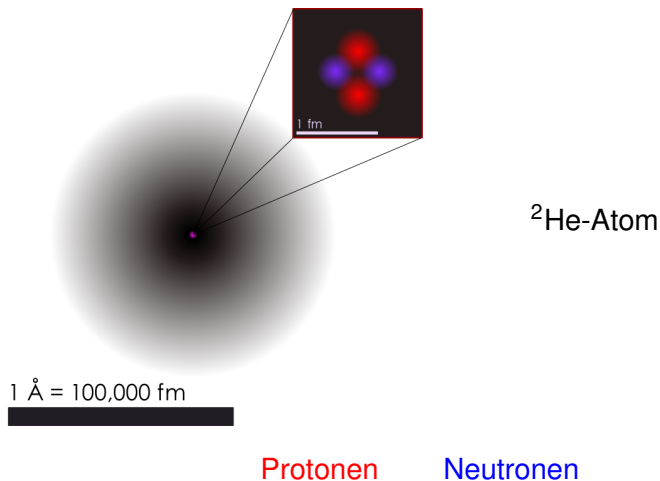
- ▶ Können wir seine Masse vielleicht sogar *berechnen*?

- ▶ ja, mit grossen Computern...



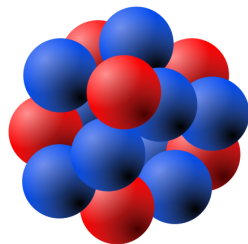
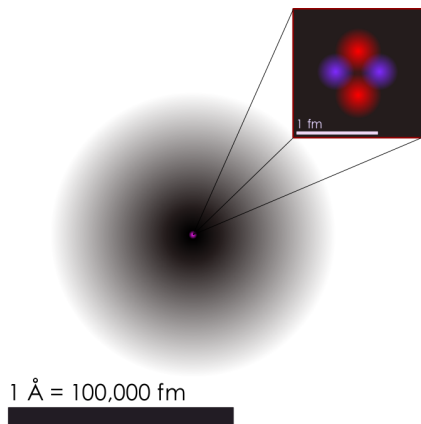
Was ist ein Proton?

Atomkerne bestehen aus **Nukleonen**:



Was ist ein Proton?

Atomkerne bestehen aus **Nukleonen**:



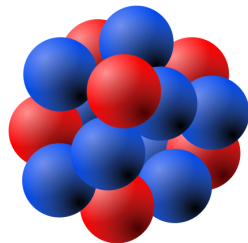
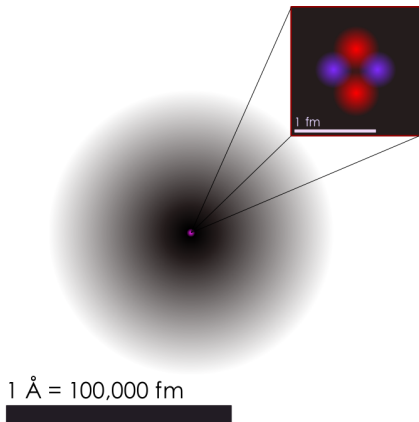
^{12}C -Atomkern

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

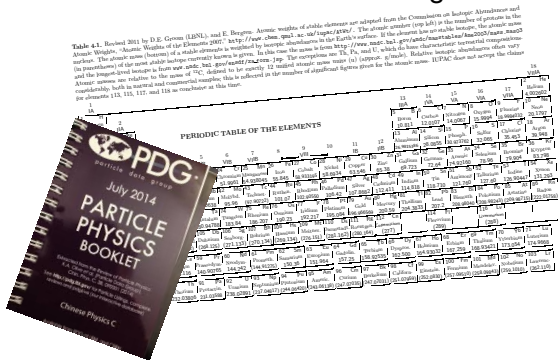
⇒ 250 g Silber (Element ^{47}Ag)

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?



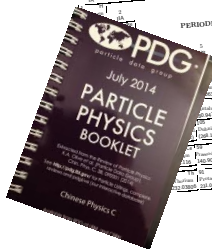
Wie viel wiegt ein Proton?

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	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	Lr		

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 $m_p = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

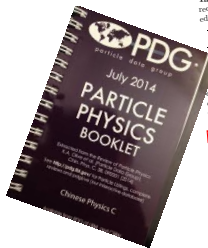


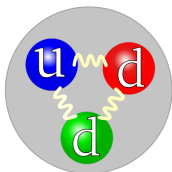
Table 1.1. Reviewed 2013 by P.J. Mohr (NIST). The set of constants excluding the last group (which come from the Particle Data Group) is recommended by CODATA for international use. The 1- σ uncertainties in the last digits are given in parentheses after the values. See the full edition of this Review 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	$1875.612\ 859(41) \text{ MeV}/c^2 = 1.672\ 621\ 777(74) \times 10^{-27} \text{ kg}$	22, 44
conversion constant	$\hbar c$	$938.272\ 046(21) \text{ MeV}/c^2 = 1.836\ 152\ 672\ 45(75) \text{ MeV}/c^2$	0.089, 0.41
conversion constant	$\hbar c$	$= 1.007\ 276\ 466\ 812(90) \text{ u} = 1.674\ 927\ 282(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$	22
electron mass	m_e	$1875.612\ 859(41) \text{ MeV}/c^2 = 1.674\ 927\ 282(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$	22, 44
proton mass	m_p	$931.494\ 061(21) \text{ MeV}/c^2 = 1.672\ 621\ 777(74) \times 10^{-27} \text{ kg}$	22, 44
deuteron mass	m_d	$1875.612\ 859(41) \text{ MeV}/c^2 = 1.674\ 927\ 282(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$	22, 44
unified atomic mass unit (u)	m_d	$(\text{mass } ^{12}\text{C atom})/12 = (1 \text{ g})/(N_A \text{ mol})$	exact
fine-structure constant	α	$8.854\ 187\ 817 \dots \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$	exact
permittivity of free space	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2} = 12.566\ 370\ 614 \dots \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$	0.32, 0.32
permeability of free space	μ_0	$7.297\ 352\ 5698(24) \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	0.97
fine-structure constant	$\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	$2.817\ 940\ 3267(27) \times 10^{-13} \text{ m}$	0.65
classical electron radius	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	$3.861\ 592\ 680(25) \times 10^{-13} \text{ m}$	0.32
Bohr radius ($m_{\text{reduced}} = \infty$)	$a_0 = \hbar/m_e c = r_e \alpha^{-1}$	$0.529\ 177\ 210\ 92(17) \times 10^{-10} \text{ m}$	22
Bohr radius ($m_{\text{reduced}} = \infty$)	$a_0 = \hbar/m_e c = r_e \alpha^{-1}$	$1.239\ 841\ 930(27) \times 10^{-6} \text{ m}$	22
wavelength of 1 eV/c particle	$\lambda = hc/E$	$1.239\ 841\ 930(27) \times 10^{-6} \text{ m}$	22
Rydberg energy	$hcR_\infty = m_e c^4/2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 = m_e c^2 \alpha^2/2$	$13.605\ 692\ 53(30) \text{ eV}$	22
Thomson cross section	$\sigma_T = 8\pi r_e^2/3$	$0.665\ 245\ 8734(13) \text{ barn}$	1.9

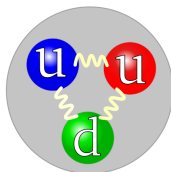
Woraus besteht ein Proton?

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

Neutron



Proton

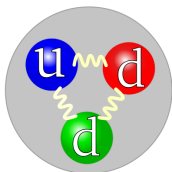


Das Ganze ist einfach die Summe der Bestandteile...

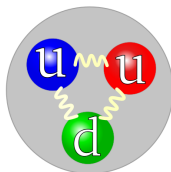
Woraus besteht ein Proton?

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

Neutron



Proton



Das Ganze ist einfach die Summe der Bestandteile...

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

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

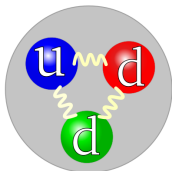
anstatt $m_p = 938 \text{ MeV} \dots!?$



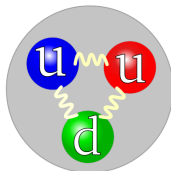
Woraus besteht ein Proton?

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

Neutron



Proton



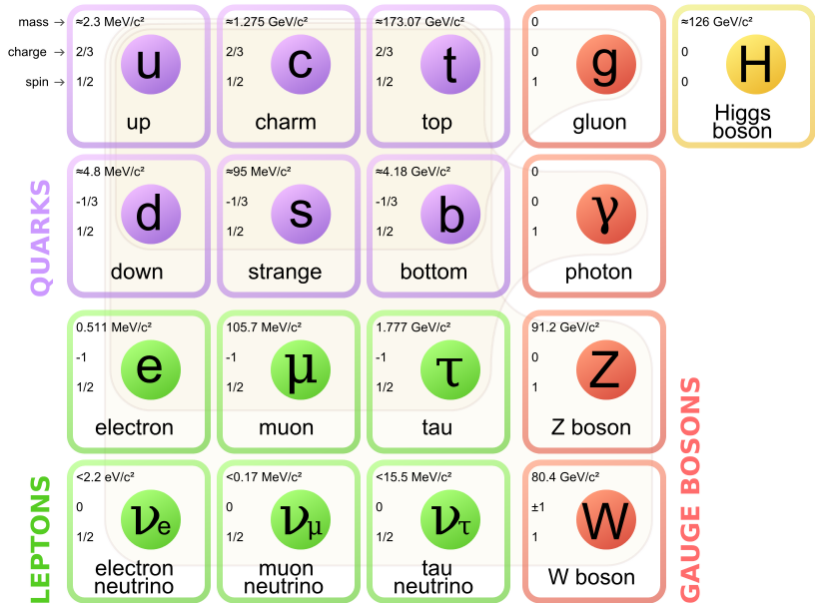
Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen!

- ▶ 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

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

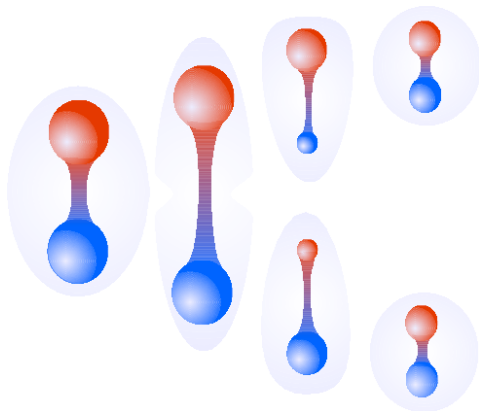
- ▶ beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen,
- ▶ Parameter sind die Quarkmassen m_q und die dimensionslose Eichkopplung,

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

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

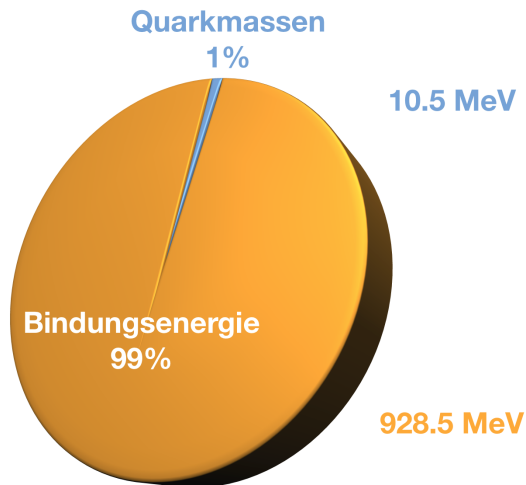
- ▶ Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen:



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

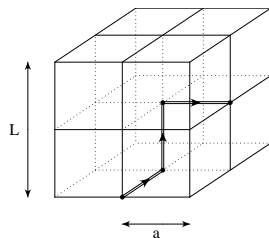


D. Politzer

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. . .



Benutze den Computer. . .

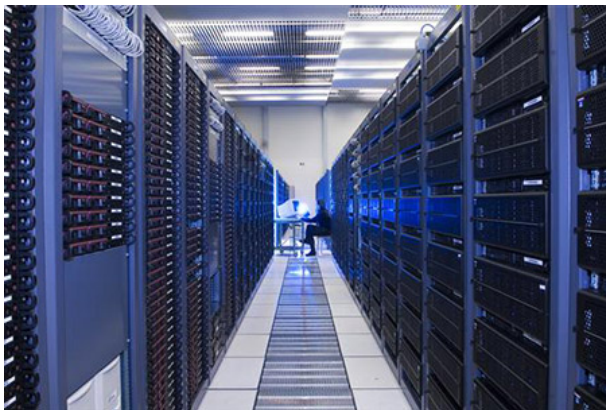


Benutze den Computer. . .



Benutze den Computer. . .

. . . grössere Computer . . .



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

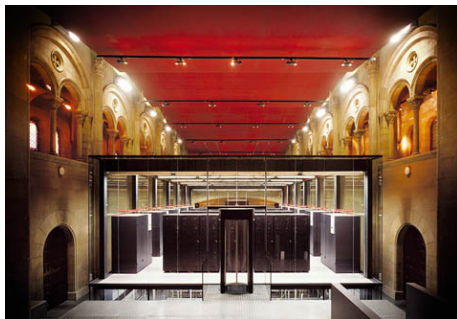
⇒ *Bessere Algorithmen* sind nötig.

European Twisted Mass Collaboration (ETMC)

Kombination von theoretischem Fachwissen und Rechenkraft:

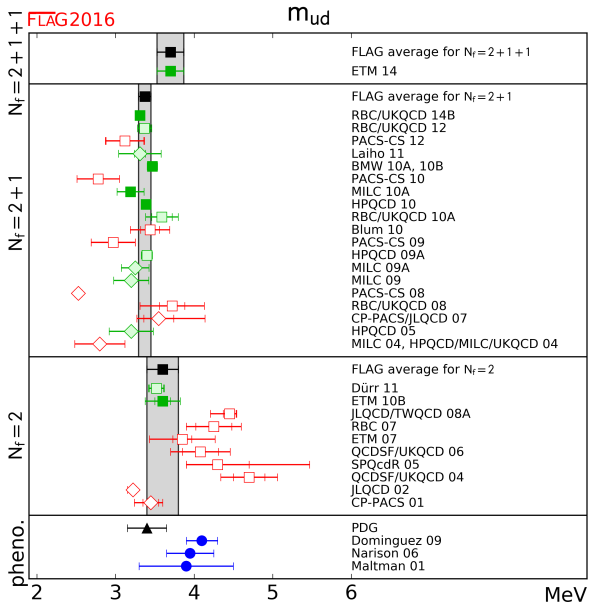


Institutionen in Deutschland, Italien,
Dänemark, Frankreich, Spanien,
England, Zypern, Holland, Schweiz.



Simulation der Energiedichte in der QCD:

Was ist der momentan beste Wert für m_{ud} ?



Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:

Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

S. Aoki¹, Y. Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, G. Colangelo⁶, M. Della Morte⁷, S. Dürr⁸,
A. X. El-Khadra⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J. Laiho^{*14},
L. Lellouch^{15,16}, H. Leutwyler⁶, V. Lubicz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi¹⁰, C. Pena²⁰,
C. T. Sachrajda¹², S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³, A. Vladikas²⁴,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:



Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, **G. Colangelo**⁶, M. Della Morte⁷, S. Dürr⁸,
F. Gladyshev⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J. Laiho^{*14},
H. Leutwyler⁶, V. Lubitz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi¹⁰, C. Pena²⁰,
S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³, **A. Vladikas**²⁴,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:

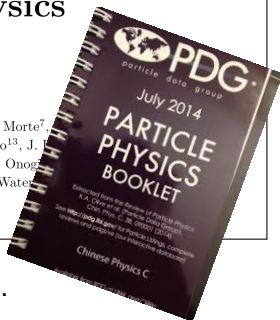
Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, G. Colangelo⁶, M. Della Morte⁷,
Dhadra⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J.
H. Leutwyler⁶, V. Lubitz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi²⁰,
S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Ähnlich den Bemühungen des PDG...



Wie viel wiegt ein Proton?

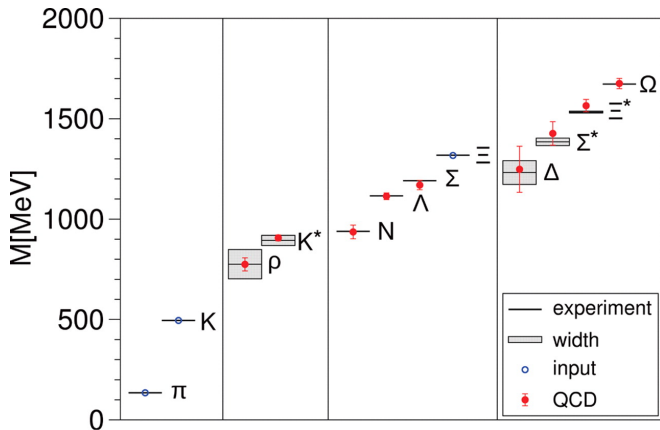
Ach ja, das **Proton**...

... 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

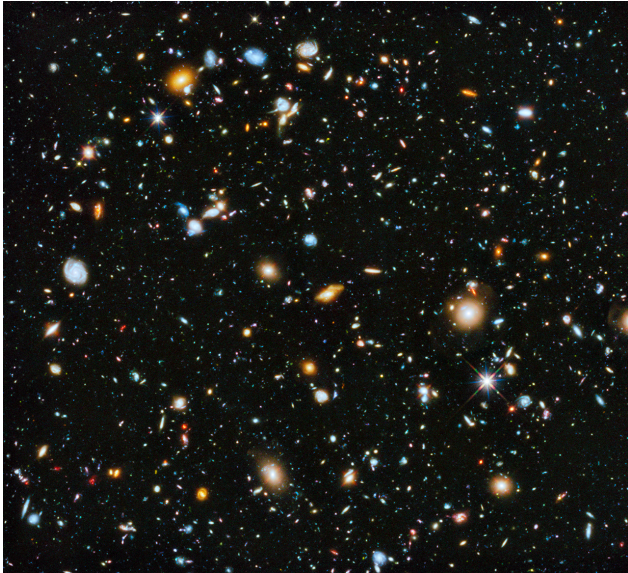
Quarks und Gluonen

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:



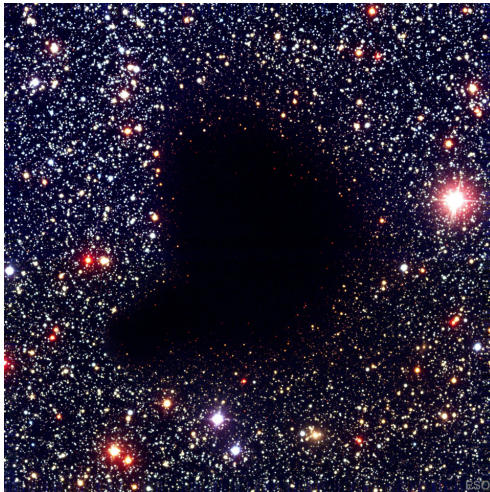
Und wie schwer ist das Universum?

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



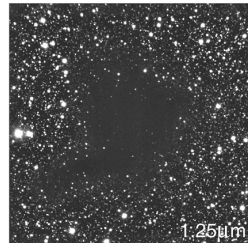
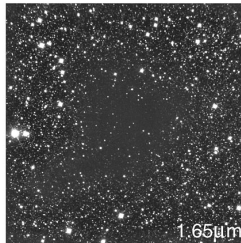
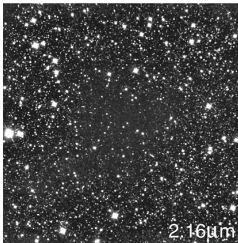
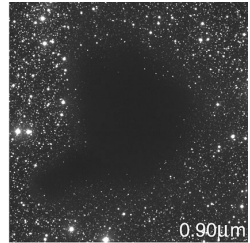
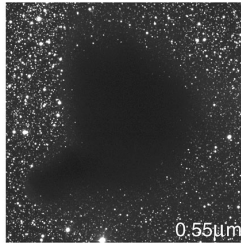
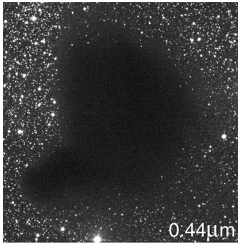
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Intergalaktische Materie:



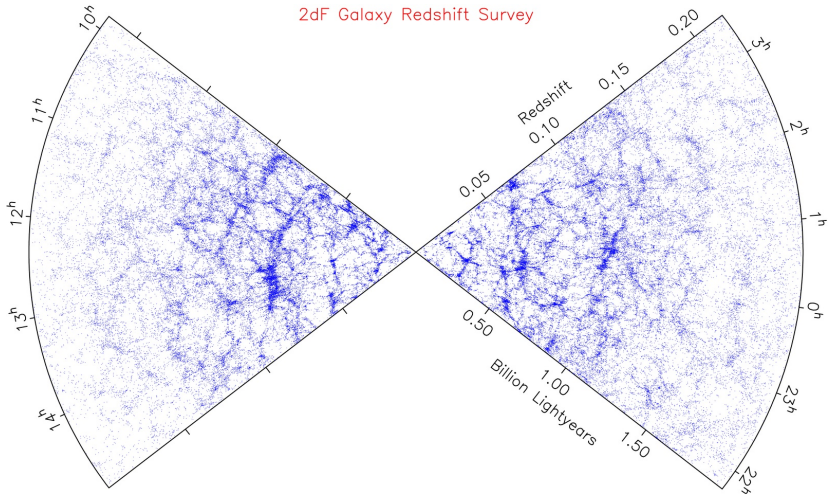
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Intergalaktische Materie:



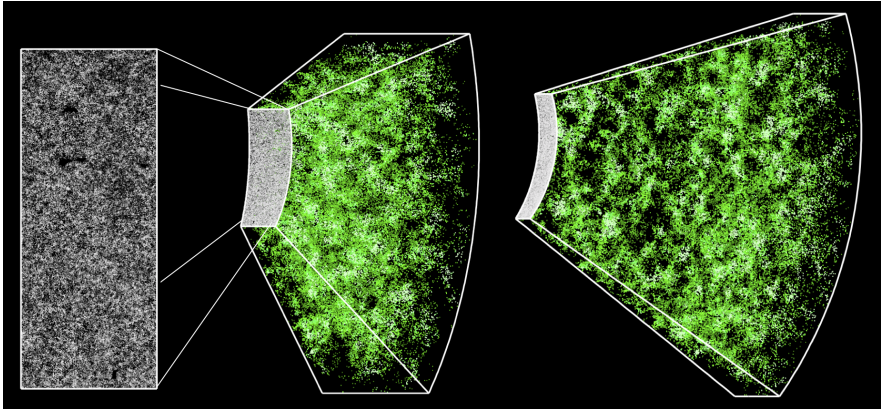
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Galaxien bilden grosse Strukturen:



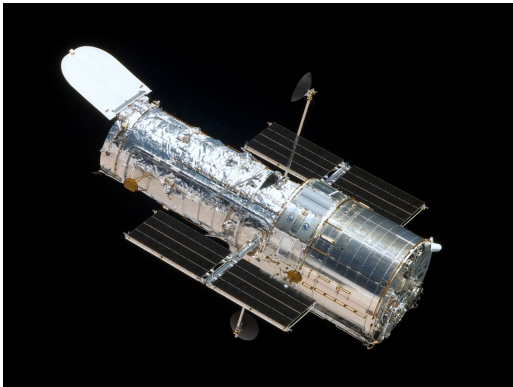
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Galaxien bilden grosse Strukturen:



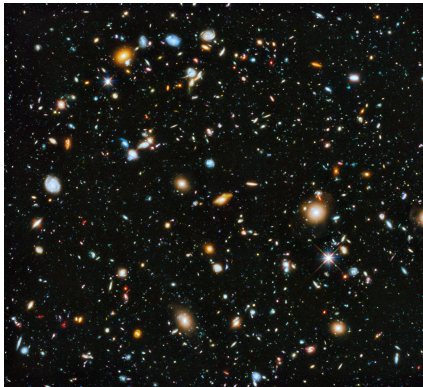
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Hubble Deep Field Telescope:



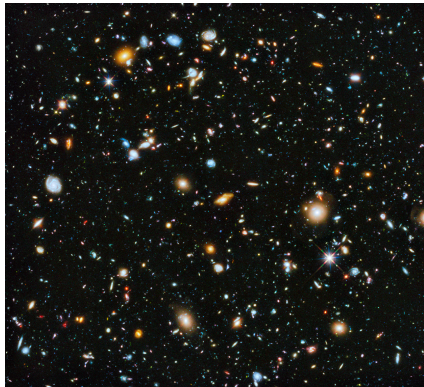
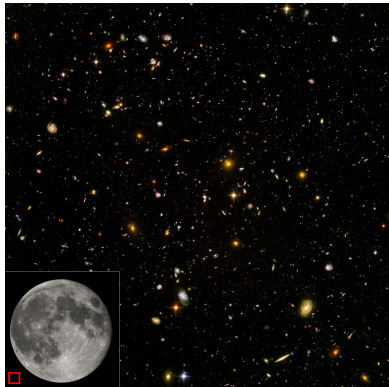
Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ 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:

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

Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Abschätzung der Massendichte des Universums:

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

- ▶ Abschätzung der Grösse des Universums:

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

Und wie schwer ist das Universum?

- ▶ Abschätzung der Massendichte des Universums:

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

- ▶ Abschätzung der Grösse des Universums:

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

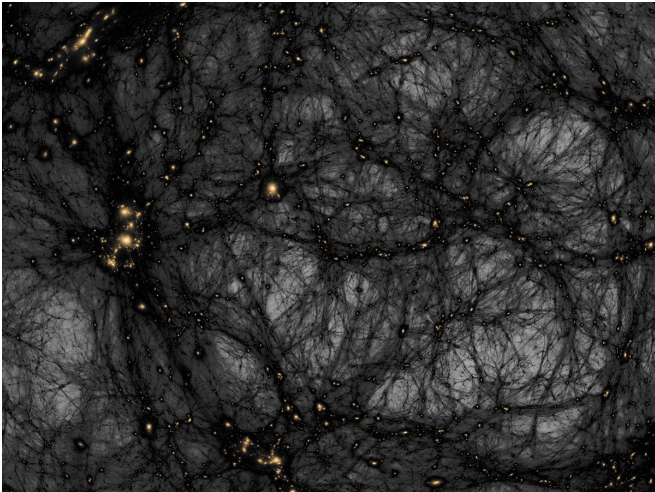
- ▶ Abschätzung der Masse des Universums:

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

Sind wir nun am Ende? ... nein!

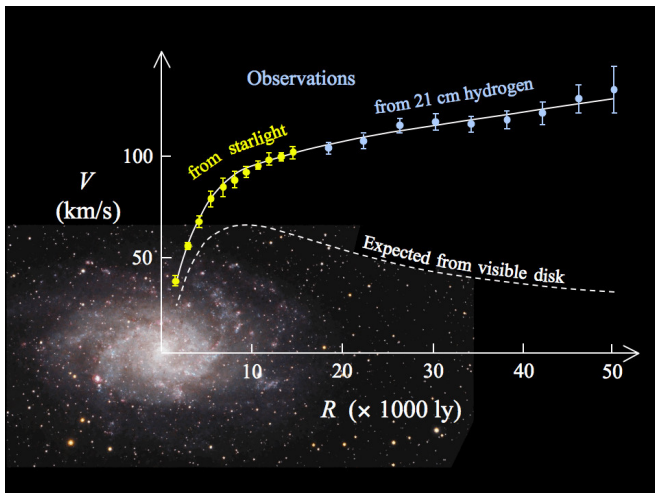
Sind wir nun am Ende? ... nein!

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



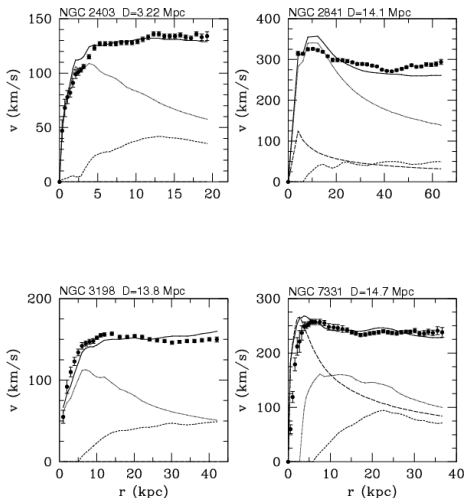
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 1 – Rotationskurven von Galaxien:



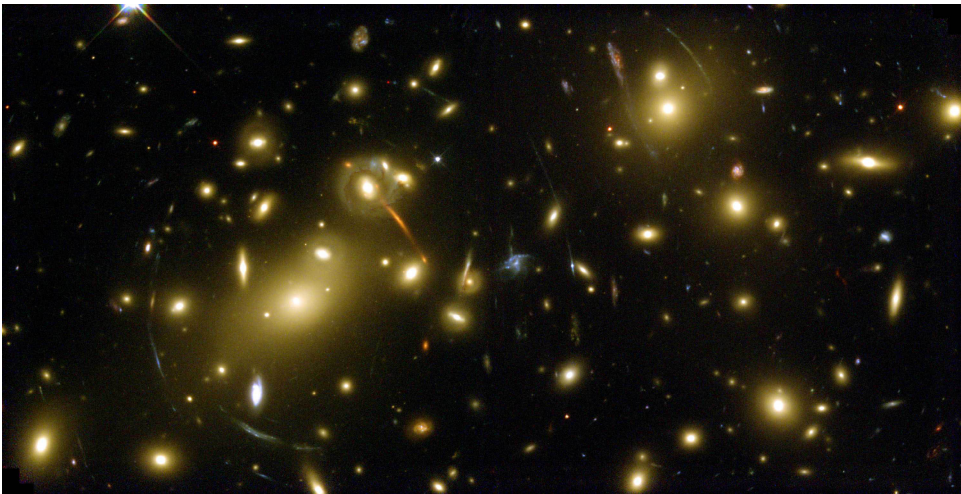
Dunkle Materie

► Indiz 1 – Rotationskurven von Galaxien:



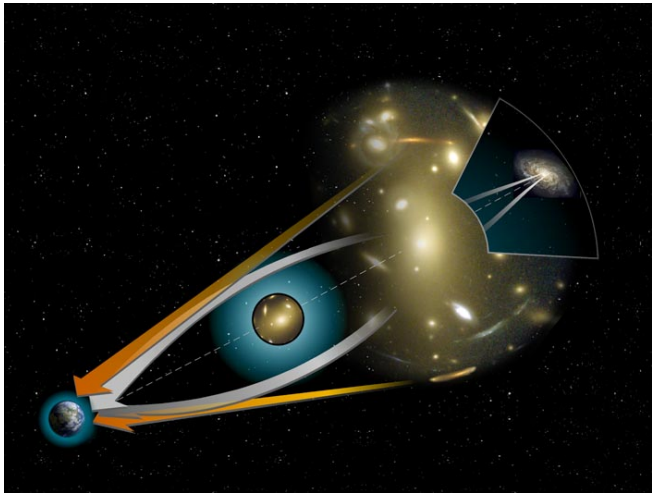
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



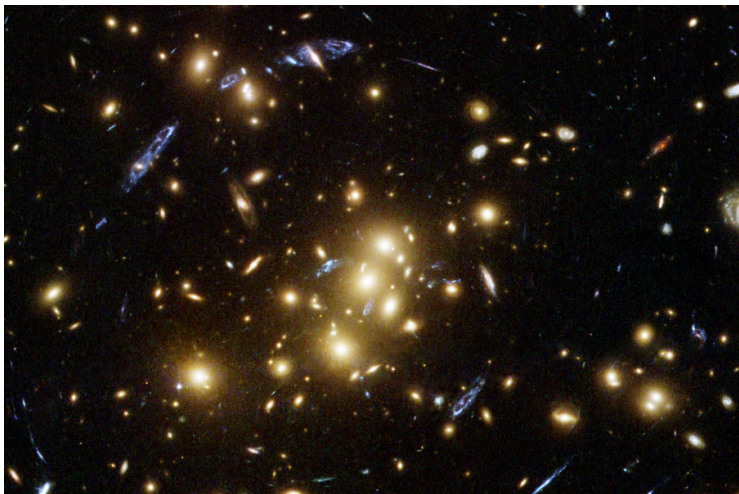
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



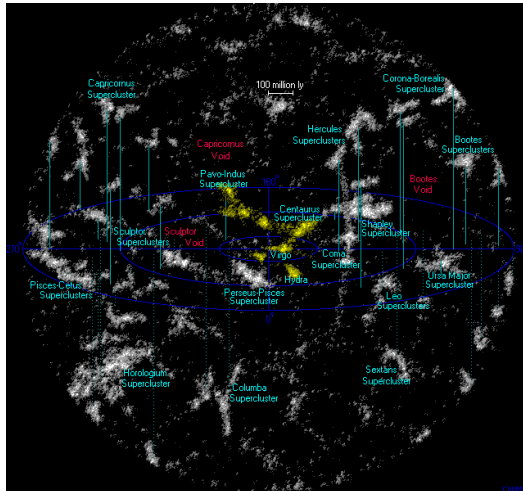
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 2 – Graviationslinseneffekt:



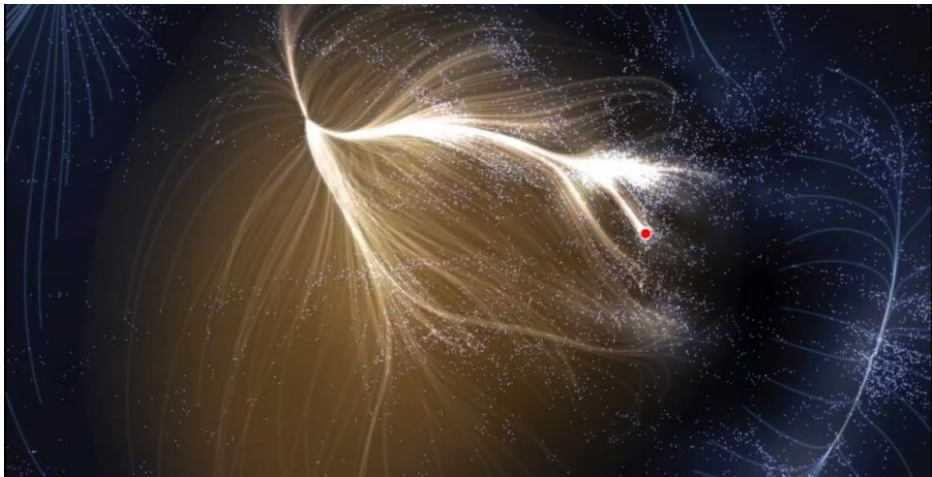
Dunkle Materie

► Indiz 3 – Strukturbildung im Universum:



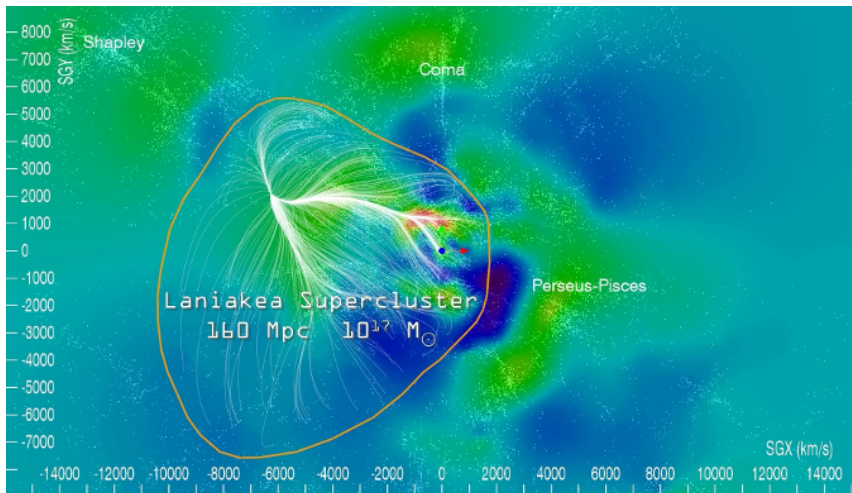
Dunkle Materie

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



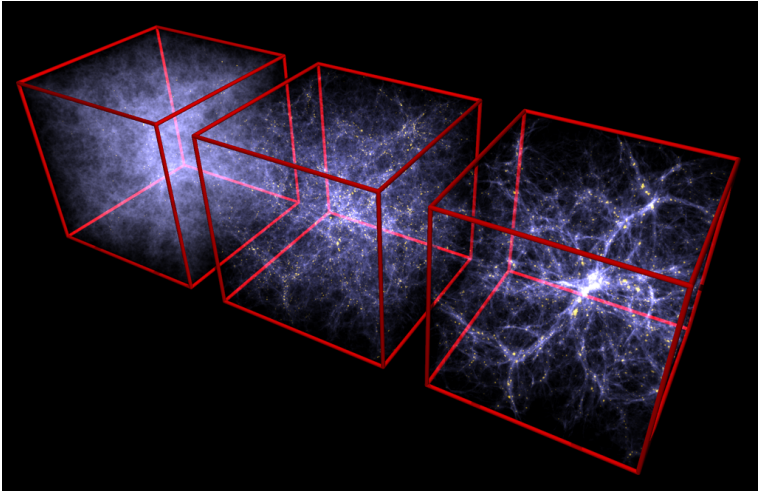
Dunkle Materie

- ▶ Indiz 3 – Strukturbildung im Universum:



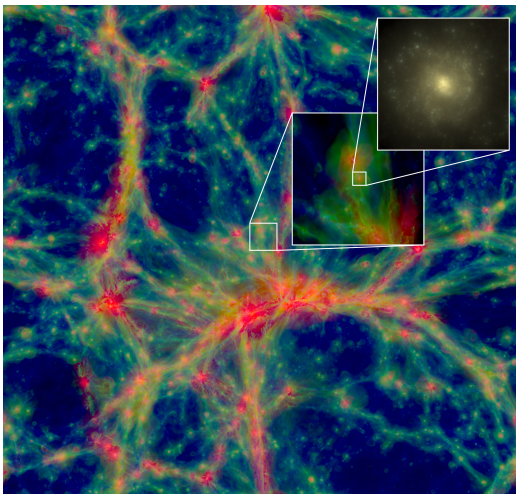
Dunkle Materie

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



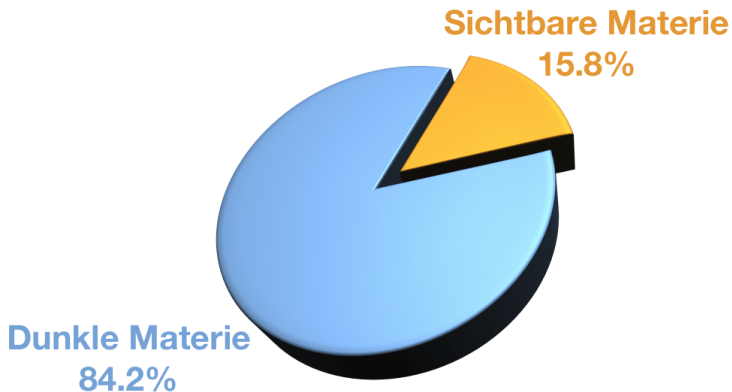
Dunkle Materie

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



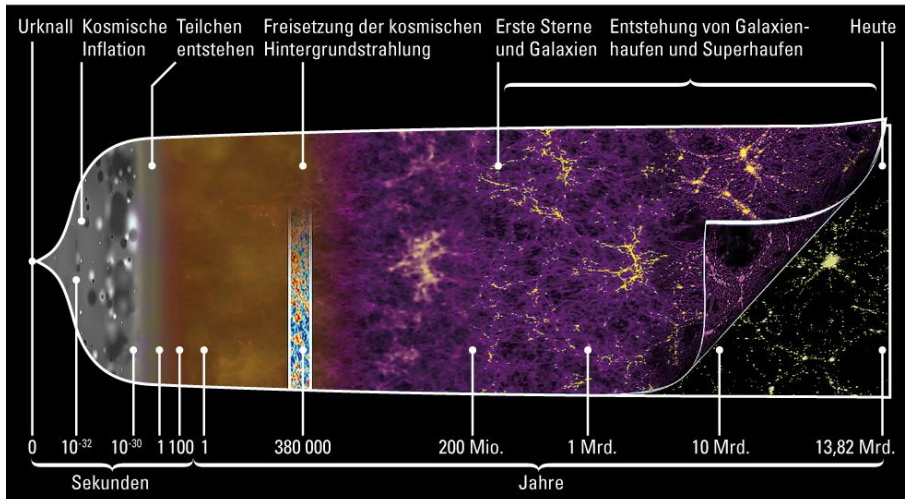
Dunkle Materie

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



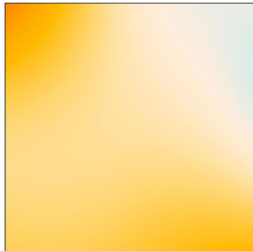
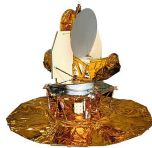
Kosmische Hintergrundstrahlung

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

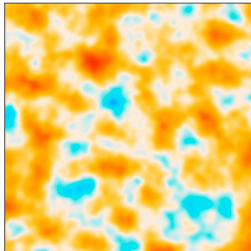


Kosmische Hintergrundstrahlung

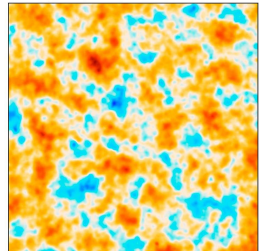
- ▶ Temperatur der Strahlung im Mikrowellenbereich:



COBE



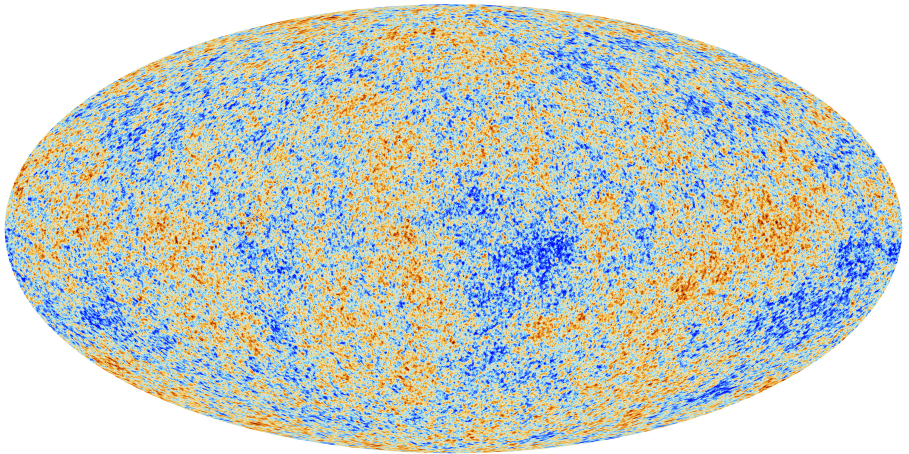
WMAP



Planck

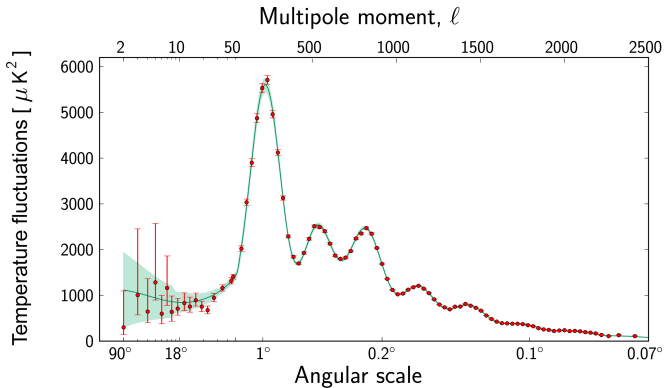
Kosmische Hintergrundstrahlung

- ▶ Temperatur der Strahlung im Mikrowellenbereich:



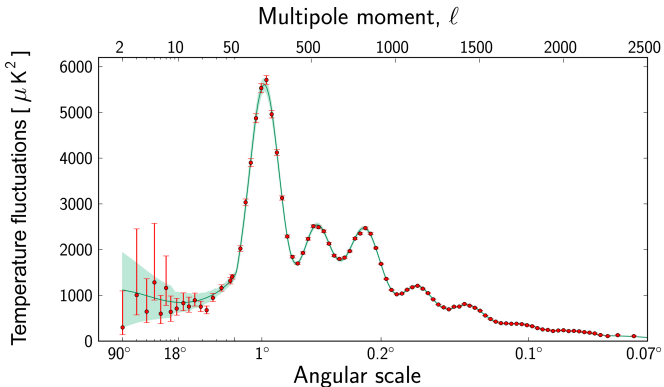
Kosmische Hintergrundstrahlung

- 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**

