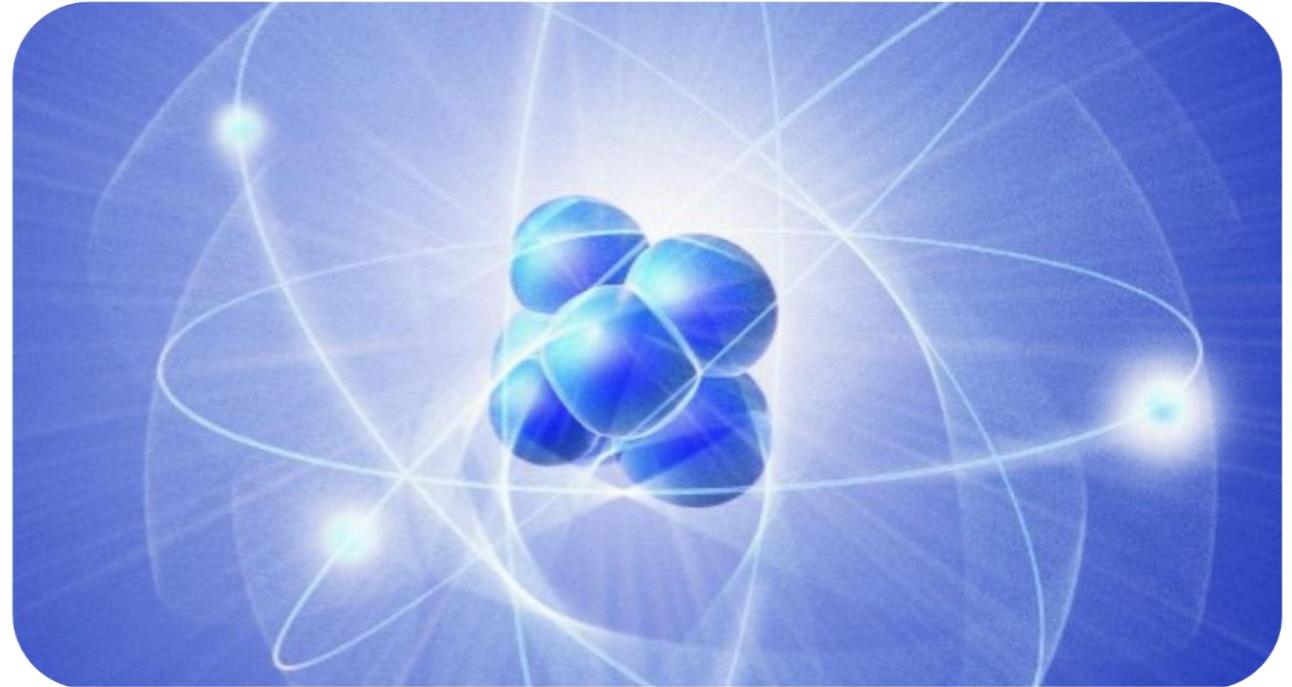


Atome & Kerne

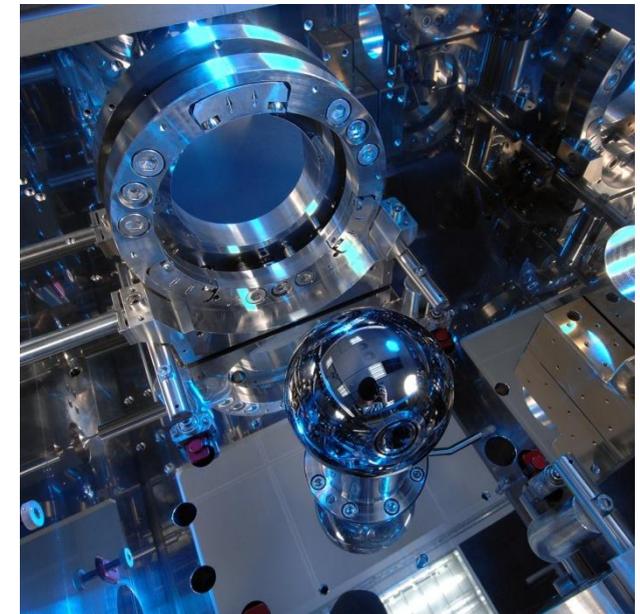
Sommersemester 2019
Vorlesung # 2, 25.04.19



Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

Experimentelle Grundlagen – Atome

- Avogadrozahl, Ladungsquantisierung
- Einheiten in der Atomphysik:
 - Planck (h) und Sommerfeld (α)-Konstante
 - Länge, Zeit, Masse
 - Drehimpuls
 - Energieskalen: $\mu\text{eV} \dots \text{MeV}$

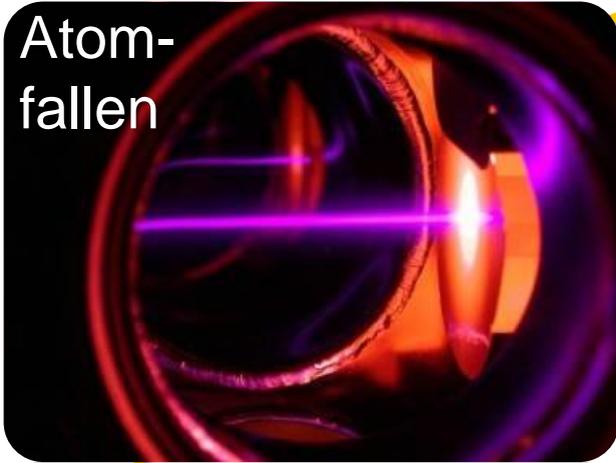


moderne Atomphysik – Übersicht

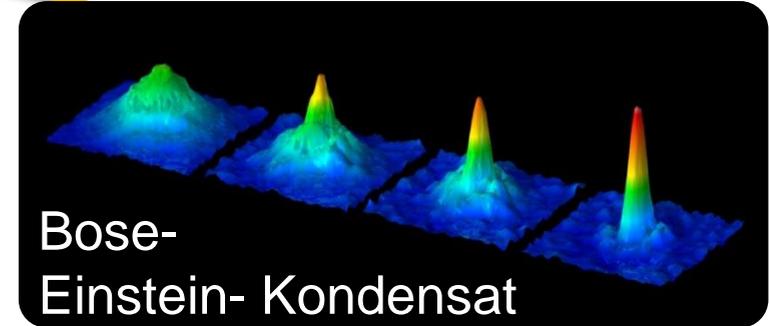


- Atome lassen sich gezielt manipulieren & hoch präzise ausmessen

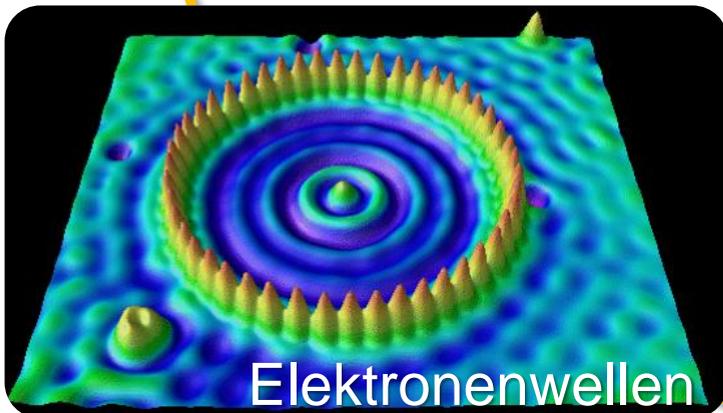
Atom-
fallen



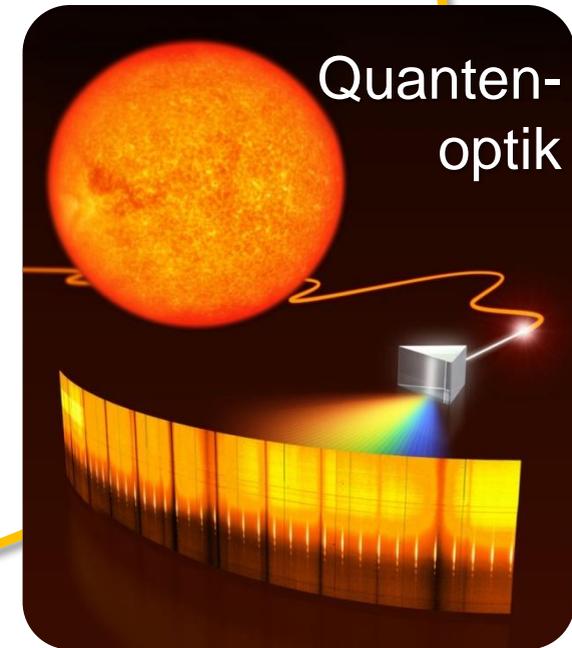
Bose-
Einstein-
Kondensat



Elektronenwellen



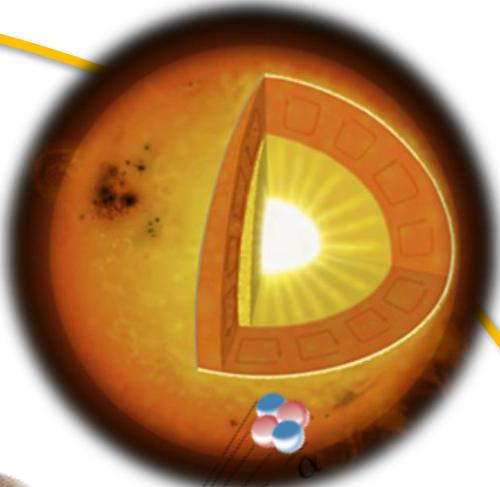
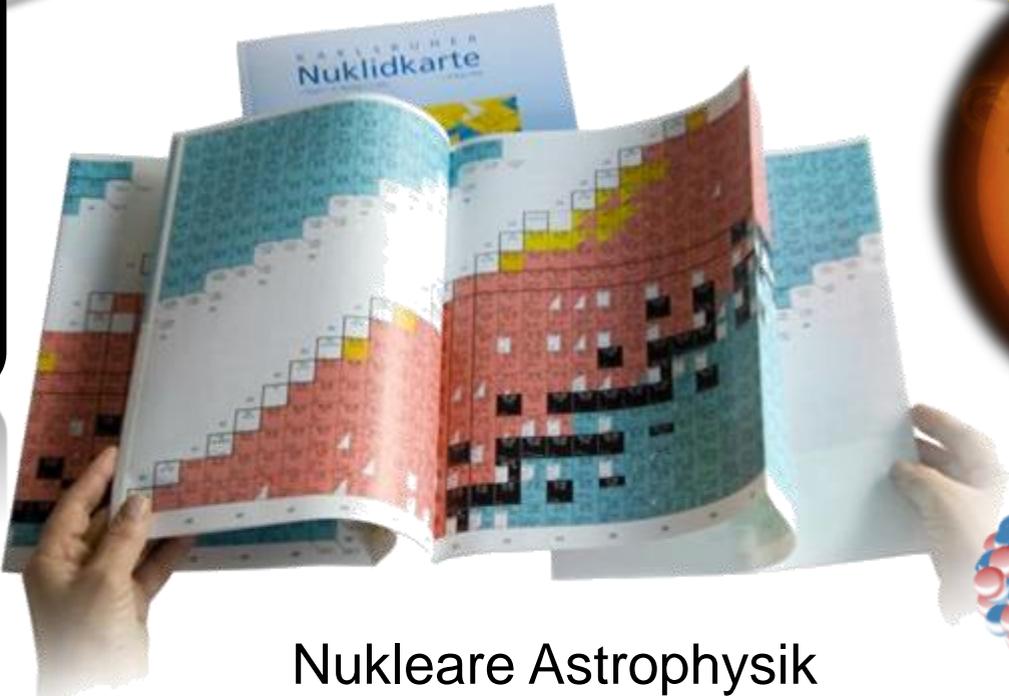
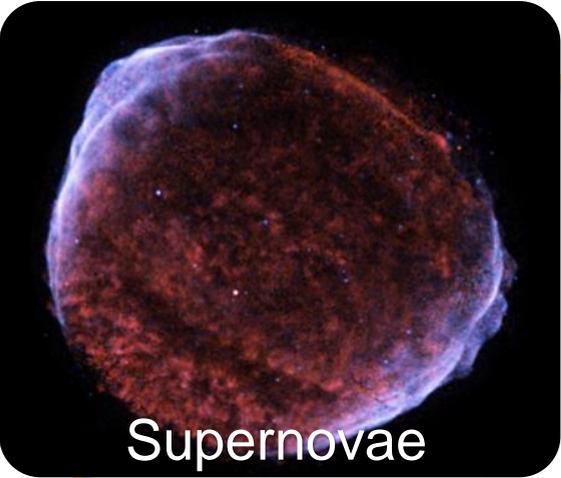
Quanten-
optik



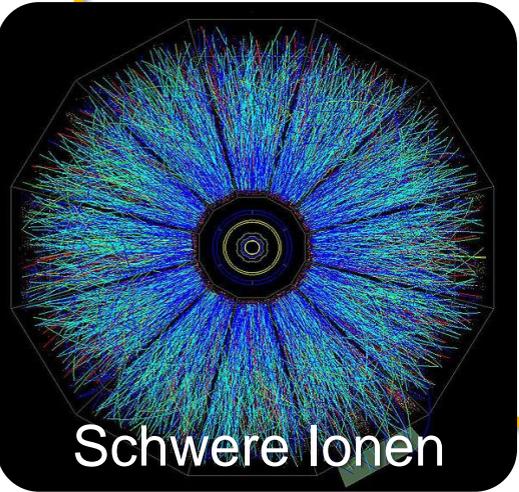
moderne Kernphysik – Übersicht



■ Kerne lassen sich heute unter extremen Bedingungen studieren

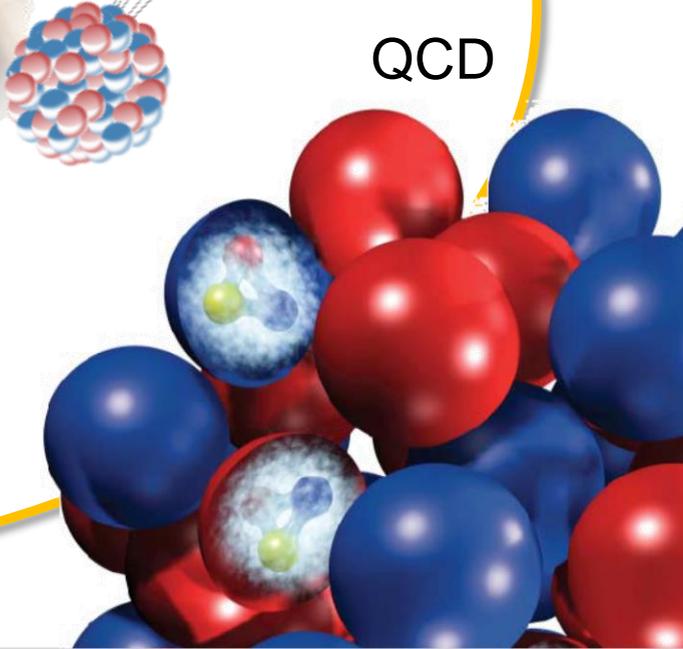
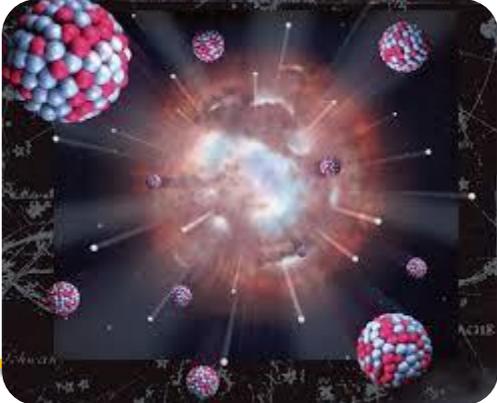


Sonnenmodell



Schwere Ionen

Nukleare Astrophysik

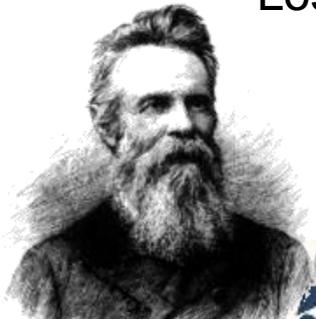


QCD

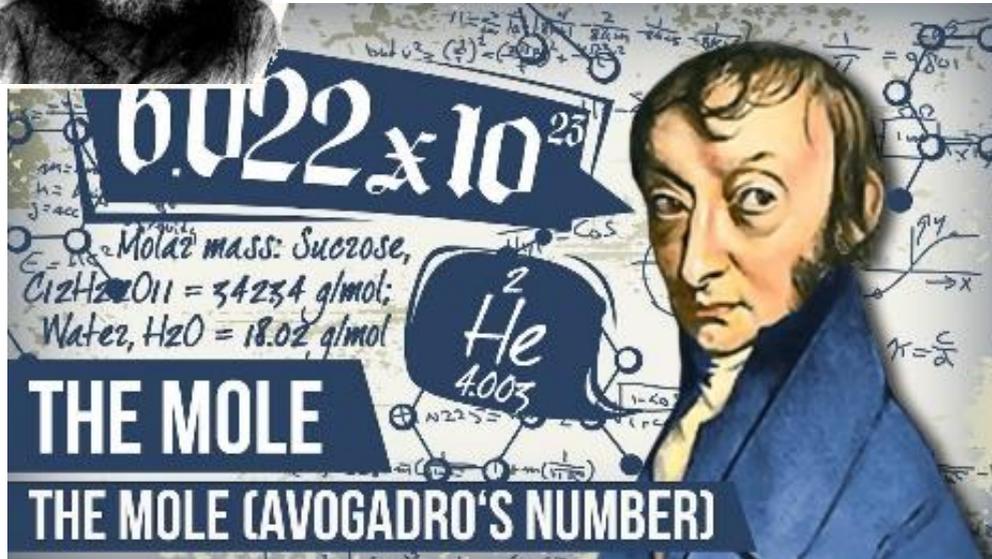
2. Experimentelle Grundlagen - Atome

- 2.1 Einheiten in der Atomphysik
- 2.2 Eigenschaften von Atomen
- 2.3 Massenspektrometrie
- 2.4 Atomstruktur & Streuexperimente

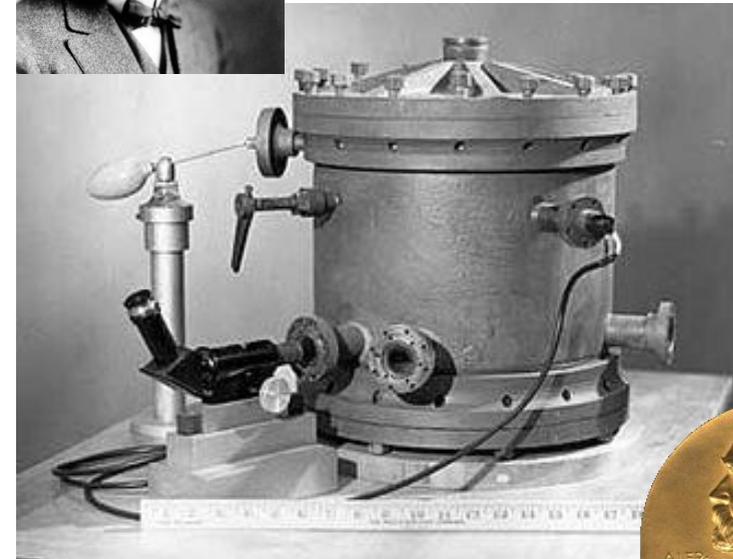
Loschmidt



Armedo C. Avogadro
(1776 - 1856)



Robert A. Millikan
(1868 - 1953)



Nobelpreis 1923

VORBEREITUNG: N_A , e

- **Avogadro Zahl** = Anzahl Teilchen in einer Stoffmenge von $n = 1$ Mol

$$N_A = 6,022\,140\,76(12) \cdot 10^{23} / \text{mol} \quad (\text{relative Unsicherheit } 2 \times 10^{-8})$$

- Experimentell bestimmbar über ~ 60 Methoden (zuerst von J. Loschmidt)

- **Faraday-Konstante F**: elektrische Ladung von 1 Mol Elektronen
(vgl. Exp. Physik-II) $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$

⇒ Faraday-Konstante **F** und Elementarladung **e**: $F = N_A \cdot e$

z.B. Auflösung von Silber von Anode einer Elektrolysezelle

- **N_A** : wichtig zur **Umrechnung** zwischen Größen

- Teilchenanzahl **N** und Stoffmenge **n** (Mole): $N = N_A \cdot n$

- Universelle Gaskonstante **R** und Boltzmann-Konstante **k_B** : $R = N_A \cdot k_B$

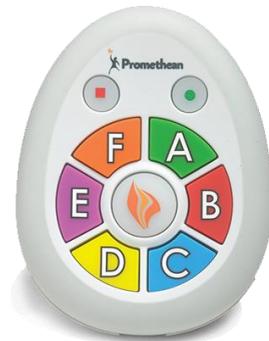
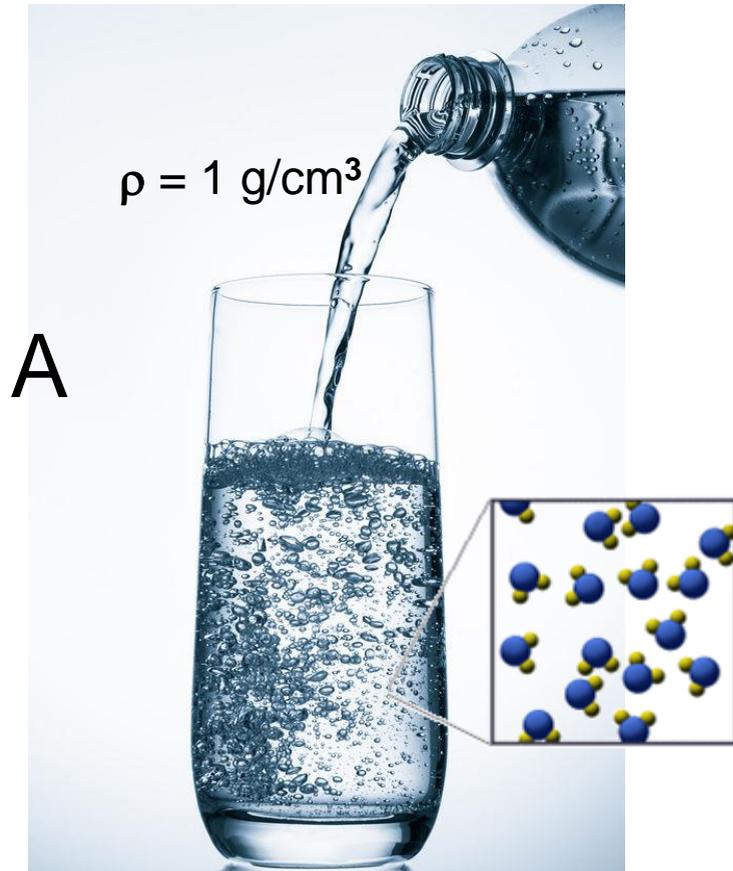
Fun with Facts: Avogadro-Zahl

■ Frage: wo gibt es mehr Moleküle?

A) H_2O in einer 1 l Flasche Sprudel

B) Luft (N_2 , O_2) in großem Vorlesungs-Hörsaal ($40 \times 25 \times 5 \text{ m}^3$)

SHELDON COOPER
presents
FUN WITH FACTS

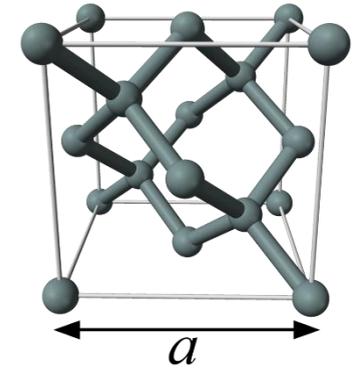


B

Avogadro – Projekt der PTB

- Ziel: Neuer Zugang zu Kilogramm m & Avogadrozahl N_A
 - polierte Kugel aus isotopenreinem ^{28}Si mit mol. Volumen V_m
 - Bestimmung des Gitterabstands a über Röntgenbeugung
daraus: atomares Volumen V_{atom}

→ $N_A = V_m / V_{\text{atom}}$



■ Experimentelle Details

- **Kristallperfektion:** Prüfung des Einflusses von Kristallbaufehlern
- **Gitterparameter a :** Bestimmung mit Röntgeninterferometer
- **Kugelvolumen V :** Bestimmung mit Interferometern
- **Zusammensetzung Oberflächenschicht (SiO_2):** Spektroskopie mit Elektronen, Synchrotronstrahlung, Röntgenstrahlung

Einkristall aus hochangereichertem ^{28}Si (99,99%)

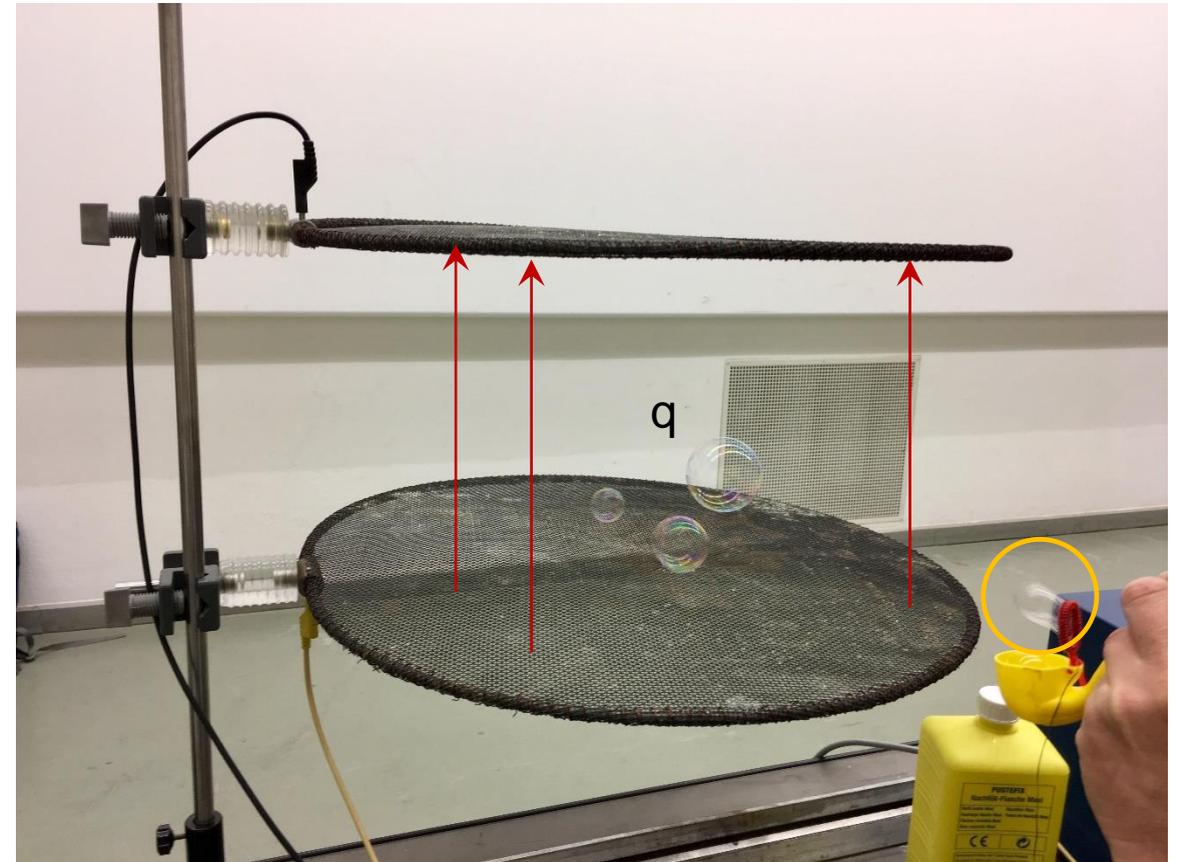
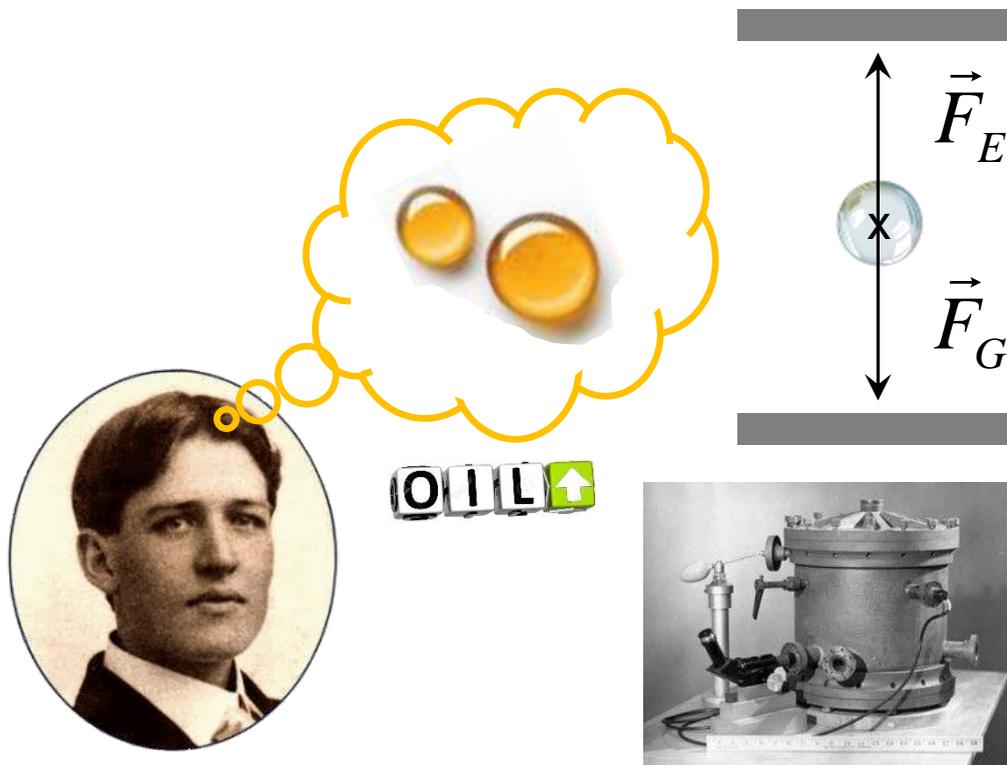


Q:PTB

Experiment: „Millikan – Versuch“

- Seifenblasen in einem homogenen elektrischen Feld (s. Ex-Phys 2)

- Kräftebetrachtung einer „schwebenden“ Seifenblase



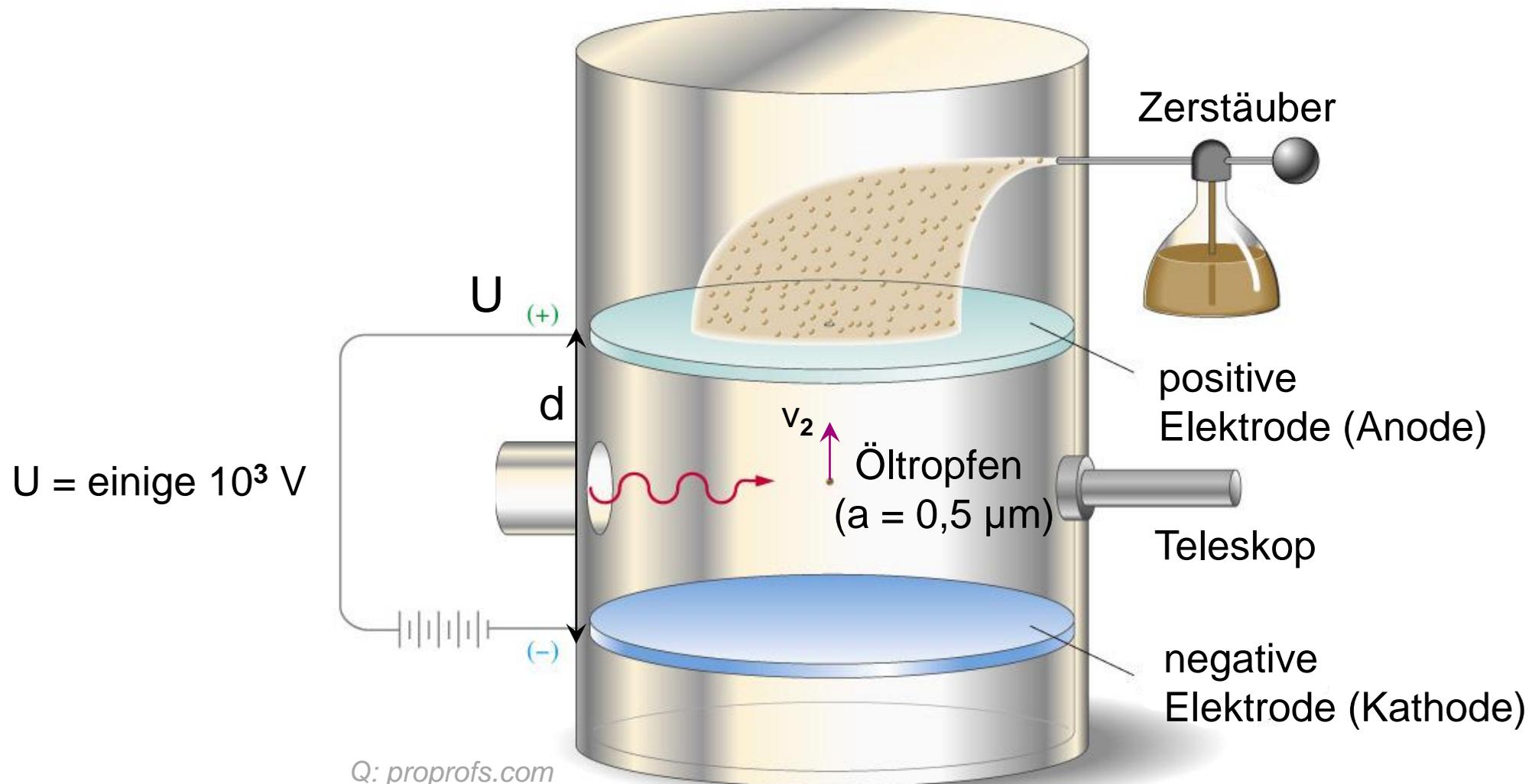
Doktorand Harvey Fletcher:
hatte die wichtige Idee, für das
Millikan-Experiment Öltropfen zu verwenden

Q:Wikipedia

Elementarladung: Millikan – Versuch

■ Experimenteller Beweis der Ladungsquantisierung

- 1909: Millikan & Flechter beobachten fallende Öltropfen zwischen horizontalen Metall-Elektroden (mit & ohne E-Feld)



Q: proprofs.com

■ Experimenteller Beweis der Ladungsquantisierung

- 1909: Millikan & Flechter beobachten fallende Öltröpfchen zwischen horizontalen Metall-Elektroden (mit & ohne E-Feld)

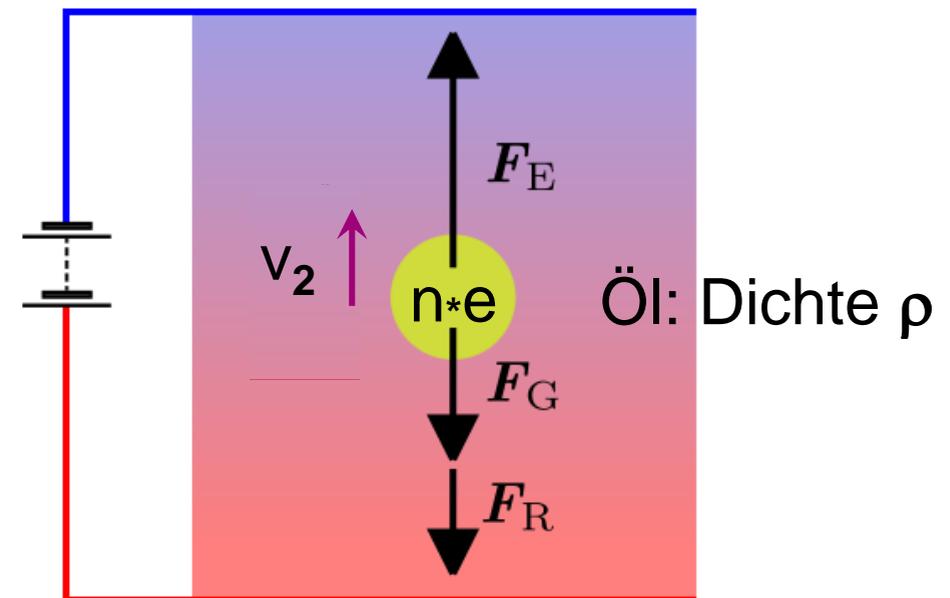
- Kräftebetrachtung eines „schwebenden“ **Öl-Tröpfchens mit Größe a**, dabei i.a. Umpolung des E-Feldes

Gravitation:
$$\vec{F}_G = mg = \frac{4}{3} \pi \cdot a^3 \cdot \rho \cdot g$$

Reibung:
$$\vec{F}_{R,Stokes} = 6\pi \cdot \eta \cdot a \cdot v_2$$

↑
Viskosität der Luft

elektrisches Feld:
$$\vec{F}_E = n \cdot e \cdot \vec{E}$$



Elementarladung: Millikan – Versuch

■ Experimenteller Beweis der Ladungsquantisierung

- Bestimmung der Tröpfchengröße a aus Fall-/Steig-Geschwindigkeiten

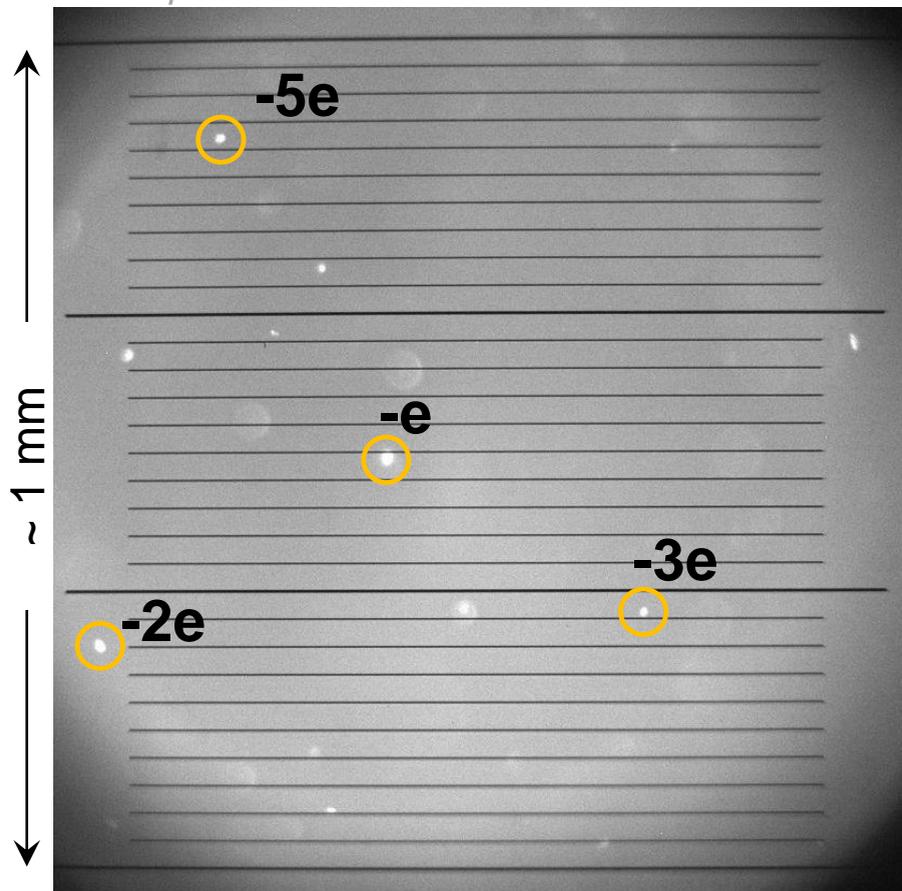
■ heutiger Wert für Elementarladung

$$e = 1,602\,176\,6208\,(98) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

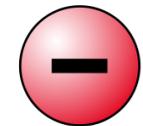
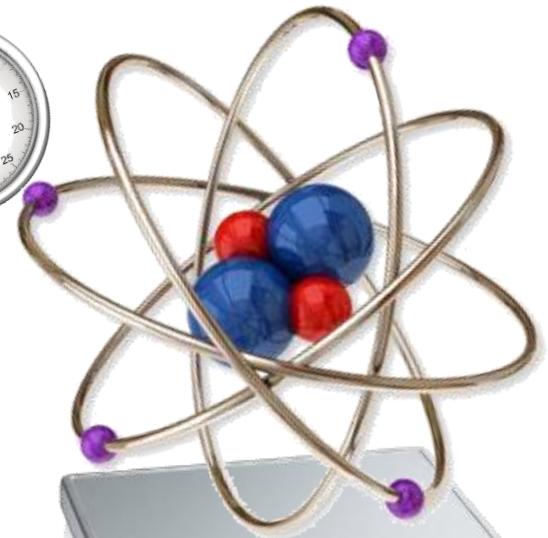
■ 1913: Millikan publiziert Resultate

- 6σ kleinerer Wert als heute
⇒ Systematik der Messungen?
- Auswahl der Tröpfchen für Analyse
⇒ Systematik des Beobachters?
- ohne Doktoranden Flechter
⇒ Systematik des Betreuenden?

Q:Wikipedia



Öltröpfchen in der Dunkelfeldmethode

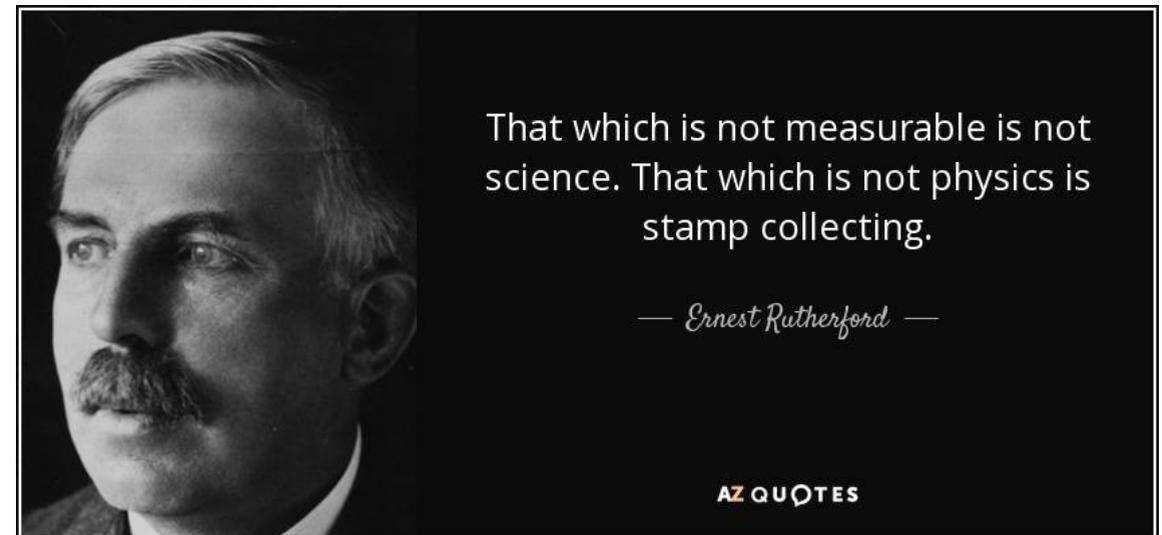
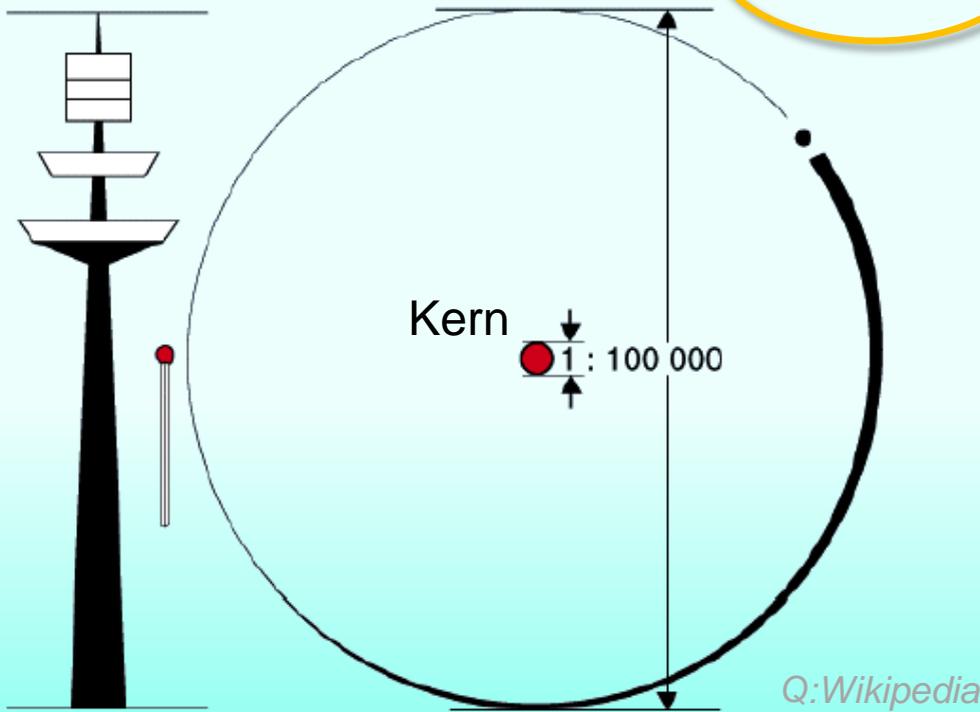


2.1 EINHEITEN IN DER ATOMPHYSIK

Größenskalen in der Atom-, Kern- & Teilchenphysik



„in Wirklichkeit gibt es nur
Atome im leeren Raum.“
„ok, in Wirklichkeit sind
Atome nur leerer Raum.“



Überblick über atomare Skalen

■ Atomphysik: typische/charakteristische Skala von

- ⇒ Länge r
- ⇒ Zeit t
- ⇒ Masse m
- ⇒ Energie E
- ⇒ Ladung Q

SI-Einheiten

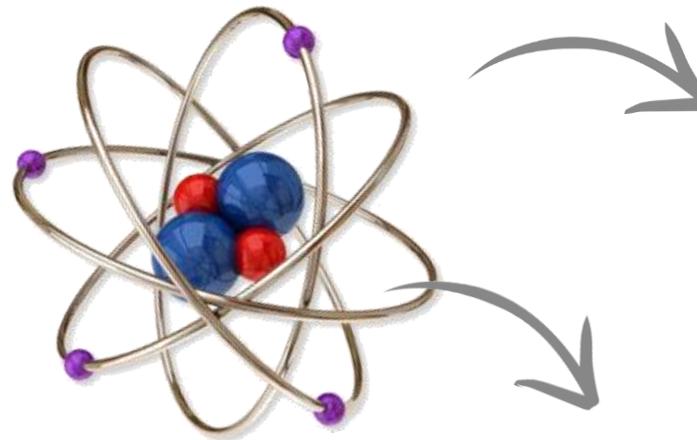
kg, m, s, J, ...

atomare Einheiten
(atomic units)

$u, a_0, \text{a.t.u.}, E_h \dots$

$t = 10^{-15} \text{ s}$
atomare
Zeiteinheit
a.t.u.

$E = 10^{-19} \text{ J}$
Hartree-Energie E_h



$Q = 10^{-19} \text{ C}$
Elementarladung e

$r = 10^{-10} \text{ m}$
Bohr-Radius a_0

$m = 10^{-27} \text{ kg}$
atomare Massen-
Einheit u (Dalton)

Einheiten: die Planck-Konstante h

- h ist von fundamentaler Bedeutung für alle Quantenprozesse (geht in QM-Formeln ein)
- h ist die Basis der Definition des Kilogramms (20.5.19)

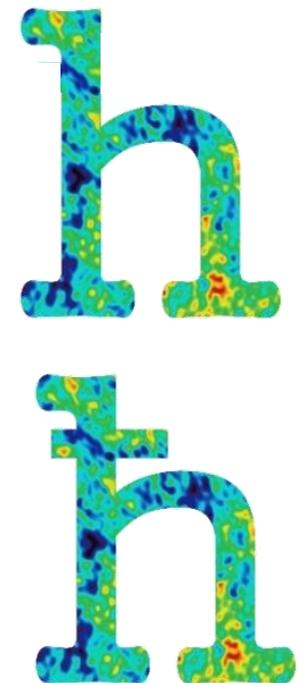
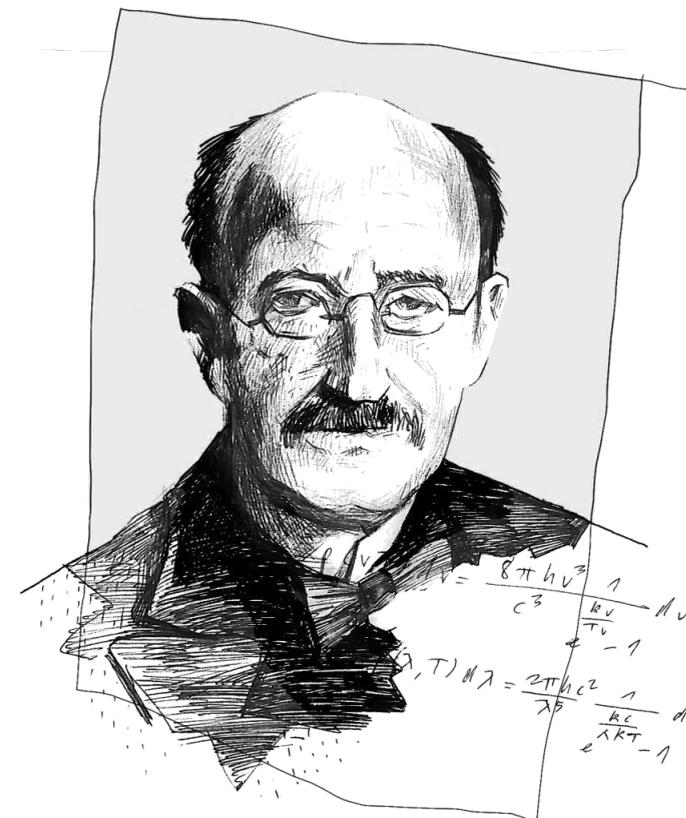
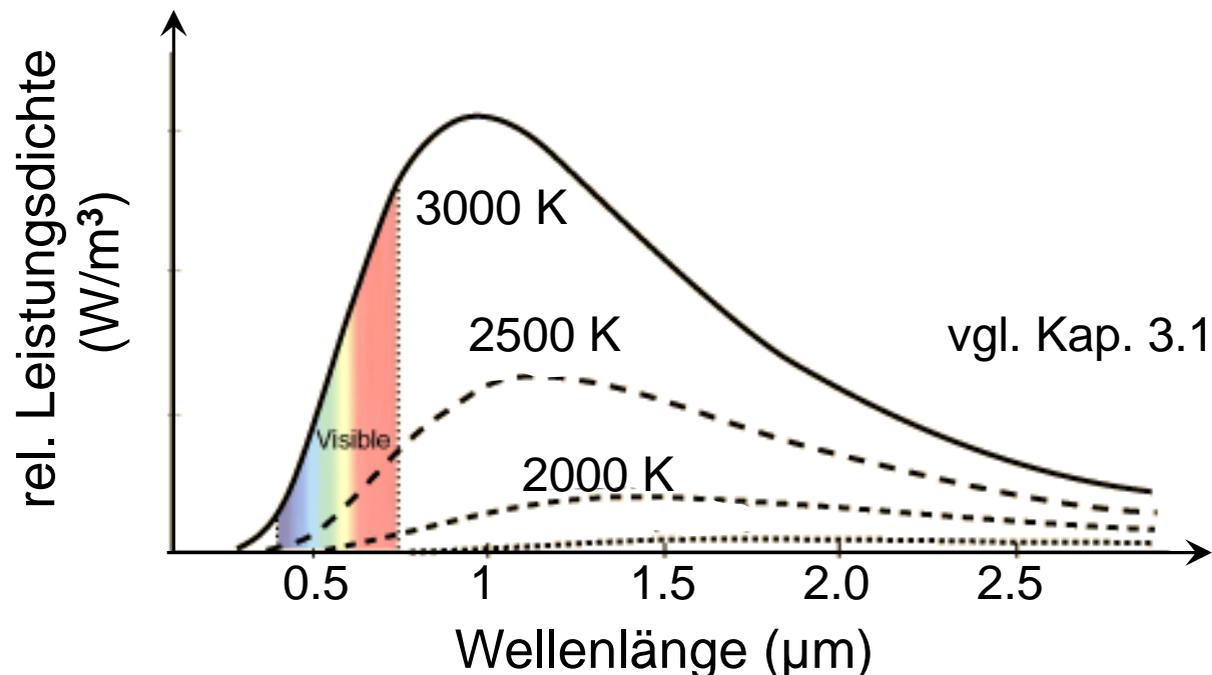


h = Planck'sches Wirkungsquantum

= $6,262 \times 10^{-34}$ J s (Energie E & Frequenz f eines Photons $E = h \times f$)

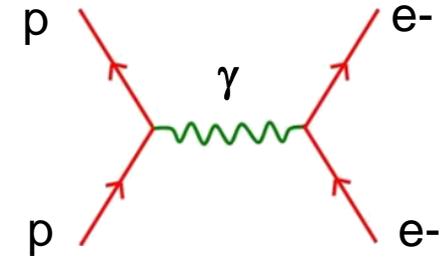
\hbar : = reduzierte Konstante mit $\hbar = h / 2 \pi$

= $1,055 \cdot 10^{-34}$ J s



Einheiten: die Sommerfeld-Konstante α

- α ist auch als **Feinstruktur-Konstante** bekannt
- = dimensionslose physikalische Konstante
- = **1/137**



α : charakterisiert die **Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung** zwischen zwei geladenen Teilchen

$$\alpha = \frac{1}{4\pi c \varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{\hbar}$$

elektr. Ladung ($e \cdot e$)

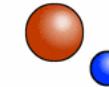
Quantenprozess

Permittivität des Vakuums
(„Durchlässigkeit“ für elektr. Feld)

Aktueller CODATA Wert:

$$\alpha^{-1} = 137,035\,999\,139$$

aus: magnet. Moment des Elektrons



α

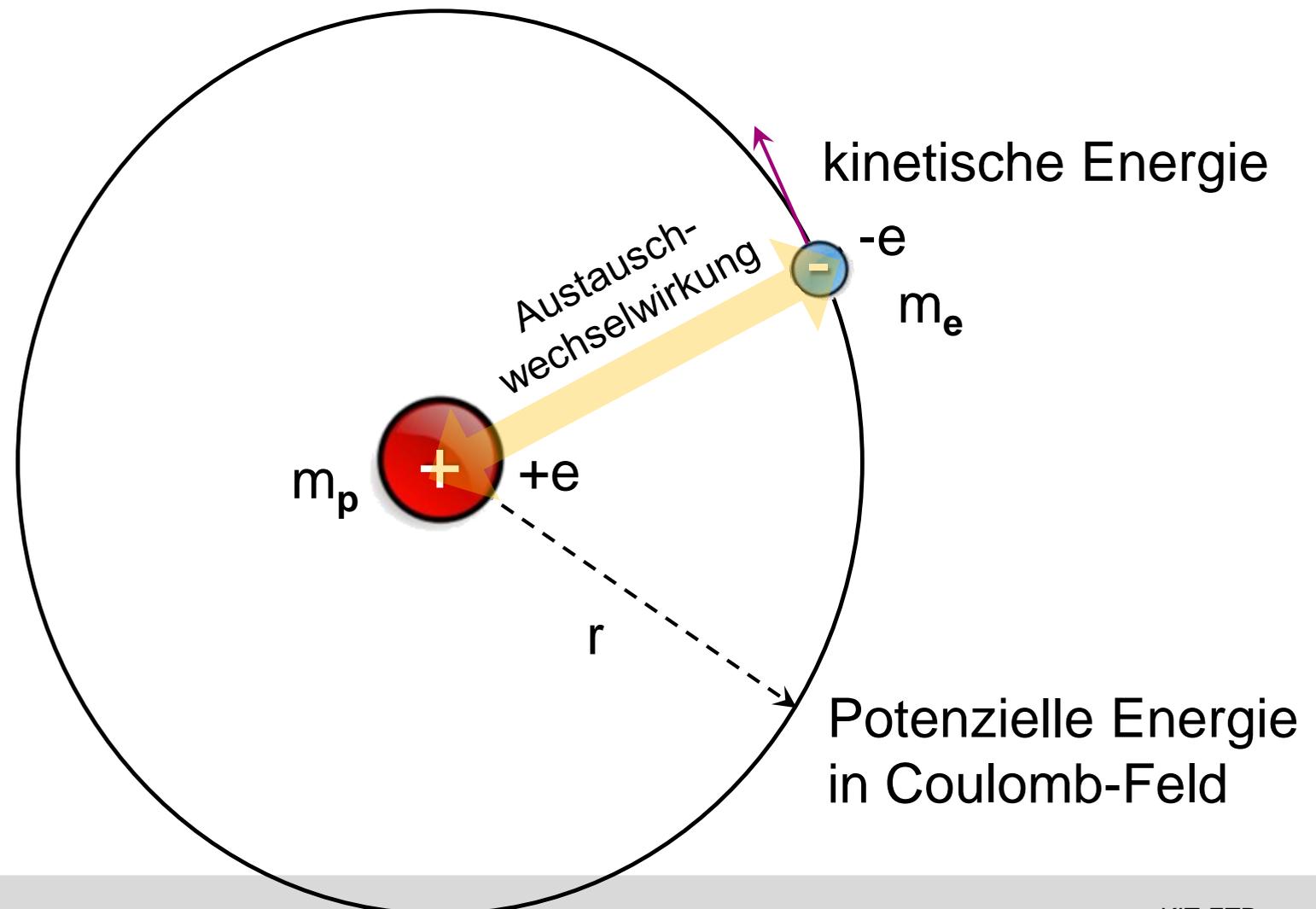
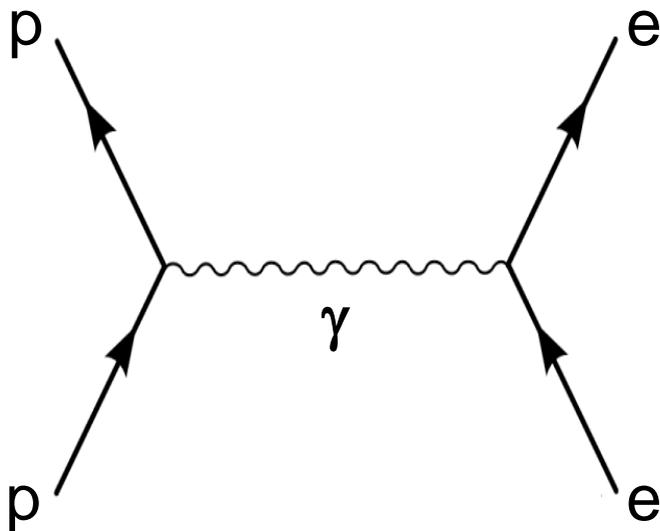
A. Sommerfeld 1916

Einheiten: das H-Atom

- Eigenschaften des Grundzustands eines H-Atoms durch Naturkonstanten:
 - Elementarladung e , Massen m_p & m_e , Lichtgeschwindigkeit c ,
 - neu: Quantennatur der Prozesse h (Planck-Konstante)**

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Elektromagnetische
Wechselwirkung
Proton-Elektron



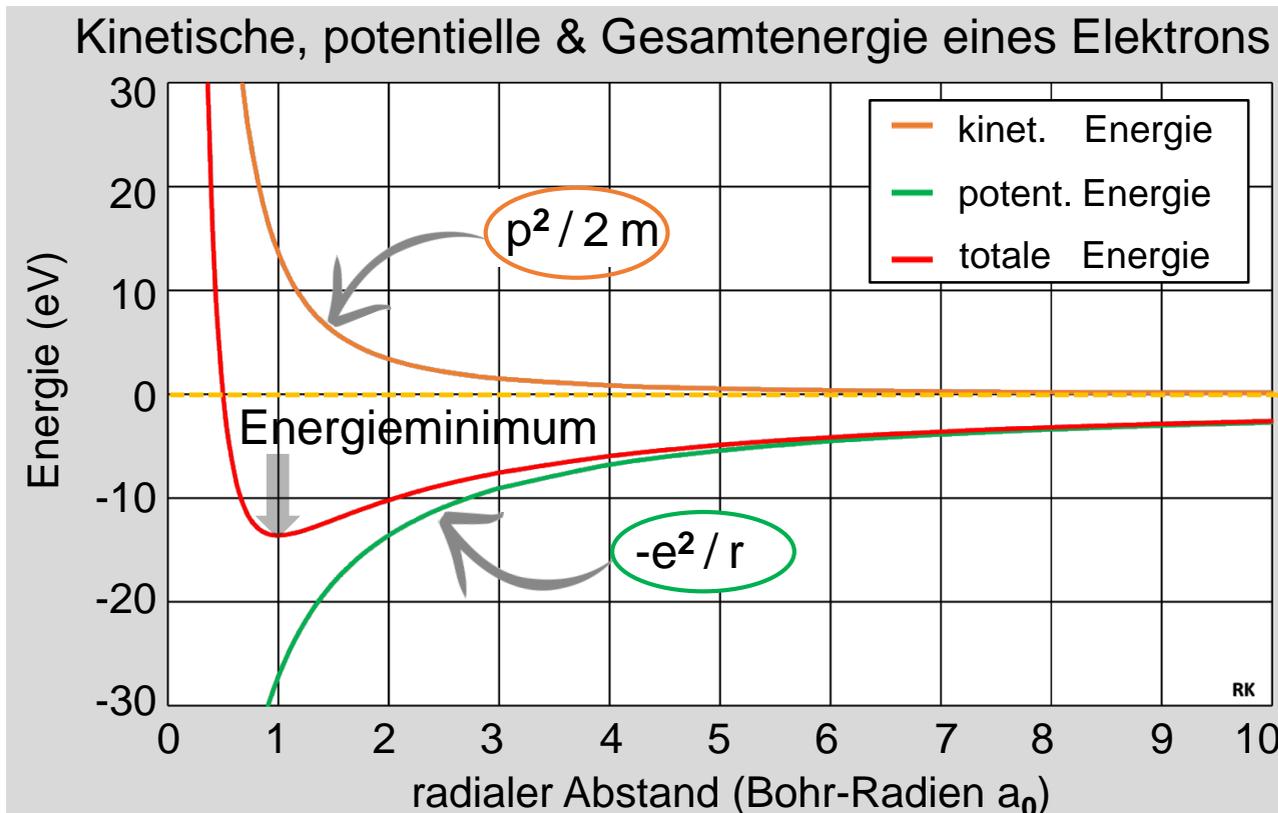
atomare Längenskala a_0

- charakteristische Längenskala a_0 von atomaren Prozessen:

a_0 : **Bohrscher Radius** = 52,92 pm = 0,5292 Å [1 Å = 10^{-10} m]

Längenskala a_0 ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**

Q: Wikipedia



- detaillierte Betrachtung zum **Bohrschen Radius a_0** in Kap. 4

Bohrsches Atommodell



atomare Längenskala a_0

- charakteristische Längenskala a_0 von atomaren Prozessen:

a_0 : **Bohrscher Radius** = 52,92 pm = 0,5292 Å [1 Å = 10^{-10} m]

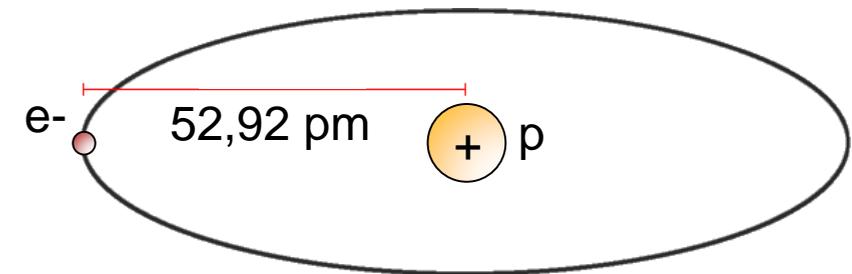
Längenskala a_0 ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**

$$a_0 = \frac{4\pi \varepsilon_0 \cdot \hbar^2}{m_e e^2} = 5,292 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

m_e : Elektronmasse = $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg
= 510998,928 eV

\hbar : Wirkungsquantum = $1,055 \cdot 10^{-34}$ J s
= $6,582 \cdot 10^{-16}$ eV s

e : Elementarladung = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C



H-Atom im Grundzustand
(Proton zunächst unendlich schwer)

atomare Längenskala a_0

- charakteristische Längenskala a_0 von atomaren Prozessen:

a_0 : **Bohrscher Radius** = 52,92 pm = 0,5292 Å [1 Å = 10^{-10} m]

Längenskala a_0 ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**

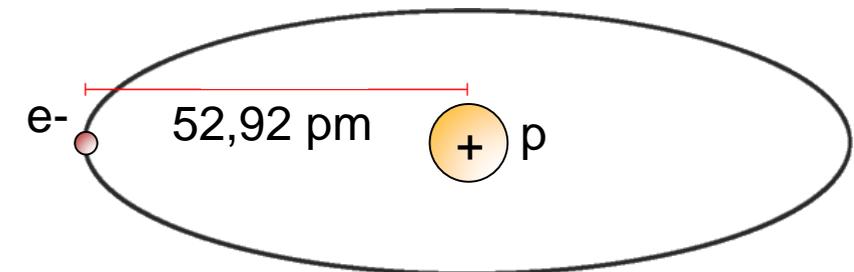
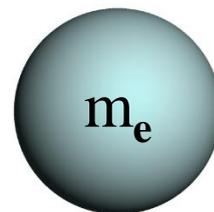
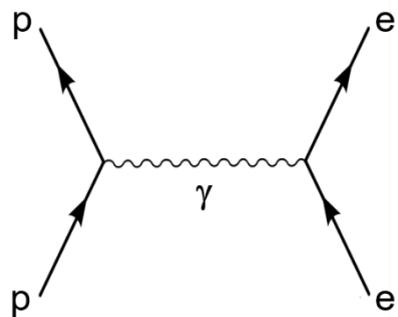
$$a_0 = \frac{\hbar}{\alpha \cdot m_e c}$$

Quantenprozess



elektromagnet.
Wechselwirkung

Elektronmasse



**H-Atom im
Grundzustand**
(Proton zunächst
unendlich schwer)

Einheiten: Energie E

Energie E

■ Einheit: **Elektronvolt (eV)** $E = |q \cdot \Delta U|$

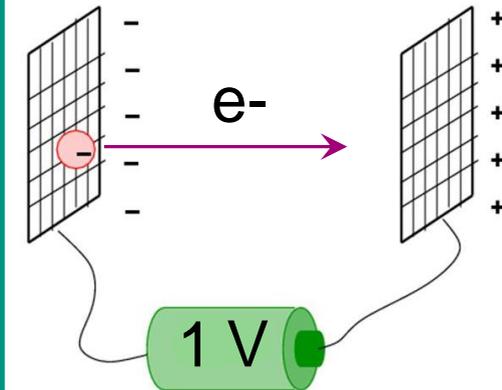
$E = 1 \text{ eV}$ entspricht der Energie eines Elektrons ($|q| = e$)
nach dem Durchlaufen von $\Delta U = 1 \text{ V}$

$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (\Rightarrow J ist makroskopische Größe)

$\approx 8066 \text{ cm}^{-1} \cdot hc$ [Wellenzahl $\tilde{\nu}$ in Kayser]

$\approx 2,41 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \cdot h$ [Frequenz f]

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$



Atomphysik Kernphysik (Astro-)Teilchenphysik

neV μeV meV eV keV MeV GeV TeV PeV

Energieskala

Einheiten: Energie E

- Energieumwandlung online: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/energy.html>

The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty

Information at the foundation of modern science and technology from the [Physical Measurement Laboratory](#) of NIST

CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants

Conversion factors for energy equivalents

For your convenience, you may convert energies online below.
Or display factors as:
[alphabetical list](#), [table \(gif\)](#)

Convert: x 10

e.g. 12.345 or 12.345(67)
(Number is unnecessary if you only want the factor)

To:

or

See also

- [Values of the constants](#)
- [Searchable bibliography on the constants](#)
- [Background information related to the constants](#)

Constants Topics:
[Values](#)
[Energy Equivalents](#)
[Searchable Bibliography](#)
[Background](#)
[Constants Bibliography](#)
[Constants, Units & Uncertainty home page](#)

- International Council for Science
CODATA = Committee on Data for Science and Technology



The purpose of the CODATA Task Group on Fundamental Physical Constants is to periodically provide the scientific and technological communities with a self-consistent set of internationally recommended values of the basic constants and conversion factors of physics and chemistry based on all of the relevant data available at a given point in time.



Einheiten: Energie E

■ Energieumwandlung online: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/energy.html>

**The NIST Reference on
Constants, Units, and Uncertainty**

Information at the foundation
of modern science and
technology from the [Physical
Measurement Laboratory of
NIST](#)

**CODATA Internationally recommended values of the
Fundamental Physical Constants**

Conversion factors for energy equivalents

For your convenience, you may convert energies online below.
Or display factors as:
[alphabetical list](#), [table \(gif\)](#)

Convert: x 10

e.g. **12.345** or **12.345(67)**
(Number is unnecessary if you only want the factor)

To:

or

See also
[Values of the constants](#)
[Searchable bibliography on the constants](#)
[Background information related to the constants](#)

[Constants Topics:](#)
[Values](#)
[Energy Equivalents](#)
[Searchable Bibliography](#)
[Background](#)

[Constants Bibliography](#)

[Constants, Units & Uncertainty home page](#)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 88, JULY-SEPTEMBER 2016

CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014*

Peter J. Mohr,[†] David B. Newell,[‡] and Barry N. Taylor[§]
National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA
 (published 26 September 2016)

This paper gives the 2014 self-consistent set of values of the constants and conversion factors of physics and chemistry recommended by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA). These values are based on a least-squares adjustment that takes into account all data available up to 31 December 2014. Details of the data selection and methodology of the adjustment are described. The recommended values may also be found at physics.nist.gov/constants.

DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035009

CONTENTS	Page
I. Introduction	2
A. Background	2
B. Highlights of the CODATA 2014 adjustment	3
1. Planck constant h , elementary charge e , Boltzmann constant k , Avogadro constant N_A , and the redefinition of the SI	3
2. Relative atomic mass of the electron $A_r(e)$	4
3. Proton magnetic moment in units of the nuclear magneton μ_N/μ_N	4
4. Fine-structure constant α	4
5. Relative atomic masses	4
6. Newtonian constant of gravitation G	4
7. Proton radius r_p and theory of the muon magnetic-moment anomaly a_μ	4
C. Outline of the paper	5
II. Special Quantities and Units	5
III. Relative Atomic Masses	5
A. Relative atomic masses of atoms	5
B. Relative atomic masses of ions and nuclei	6
C. Relative atomic mass of the deuteron, triton, and helium	7
IV. Atomic Transition Frequencies	8
A. Hydrogen and deuterium transition frequencies, the Rydberg constant R_∞ , and the proton and deuteron charge radii r_p, r_d	8
1. Theory of hydrogen and deuterium energy levels	9
a. Dirac eigenvalue	9
b. Relativistic recoil	9
c. Nuclear polarizability	10
d. Self energy	10
e. Vacuum polarization	10
f. Two-photon corrections	11
g. Three-photon corrections	12
h. Finite nuclear size	12
i. Nuclear-size correction to self energy and vacuum polarization	13
j. Radiative-recoil corrections	13
k. Nucleus self energy	13
l. Total energy and uncertainty	13
m. Transition frequencies between levels with $n = 2$ and the fine-structure constant α	13
2. Experiments on hydrogen and deuterium	14
3. Nuclear radii	14
a. Electron scattering	15
b. Isotope shift and the deuteron-proton radius difference	15
c. Muonic hydrogen	15
B. Hyperfine structure and fine structure	16
V. Magnetic Moments and g -factors	16
A. Electron magnetic-moment anomaly a_e and the fine-structure constant α	17
1. Theory of a_e	17
2. Measurements of a_e	18
B. Muon magnetic-moment anomaly a_μ	18
1. Theory of a_μ	18
2. Measurement of a_μ ; Brookhaven	19
3. Comparison of theory and experiment for a_μ	20
C. Proton magnetic moment in nuclear magnetons μ_p/μ_N	20

*This review is being published simultaneously by the Journal of Physical and Chemical Reference Data.

This report was prepared by the authors under the auspices of the CODATA Task Group on Fundamental Constants. The members of the task group are F. Cabiati, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Italy; J. Fischer, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany; J. Flowers (deceased), National Physical Laboratory, United Kingdom; K. Fujii, National Metrology Institute of Japan, Japan; S. G. Karshenboim, Pulkovo Observatory, Russian Federation and Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Germany; E. de Mirandés, Bureau international des poids et mesures; P. J. Mohr, National Institute of Standards and Technology, United States of America; D. B. Newell, National Institute of Standards and Technology, United States of America; F. Nez, Laboratoire Kastler-Brossel, France; K. Pachucki, University of Warsaw, Poland; T. J. Quinn, Bureau international des poids et mesures; C. Thomas, Bureau international des poids et mesures; B. N. Taylor, National Institute of Standards and Technology, United States of America; B. M. Wood, National Research Council, Canada; and Z. Zhang, National Institute of Metrology, People's Republic of China.

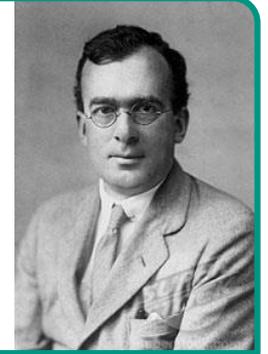
[†]mohr@nist.gov
[‡]dnewell@nist.gov
[§]barry.taylor@nist.gov

0034-6861/2016/88(3)/035009(73) 035009-1 Published by the American Physical Society

■ Typische Energie in der Atomphysik: Hartree

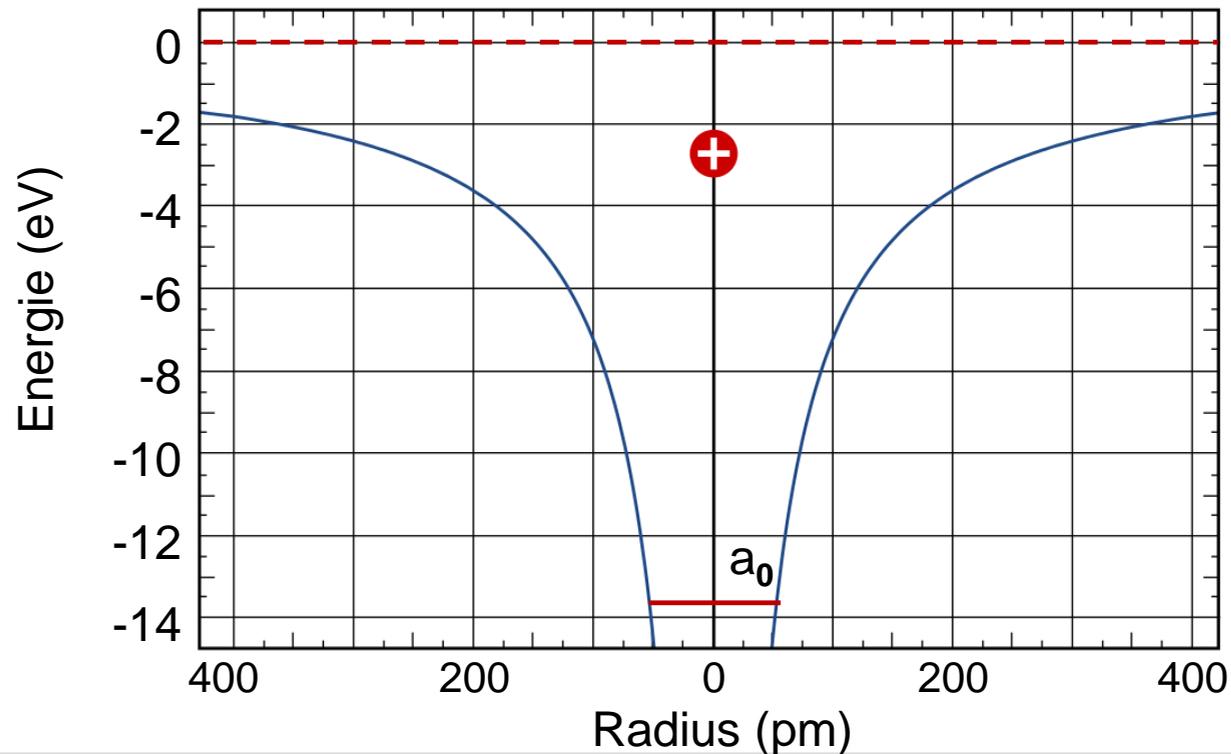
1 Hartree = doppeltes Ionisationspotenzial des Wasserstoff-Atoms = 27,21 eV

ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**



D.C. Hartree

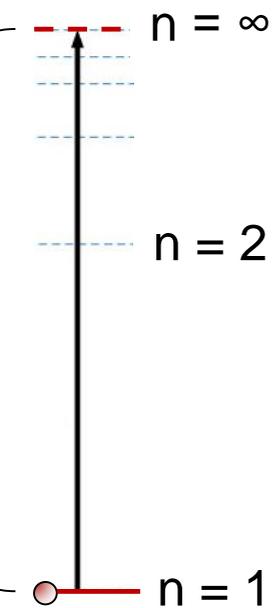
$$E_H = \alpha^2 \cdot m_e c^2 = \hbar c \cdot \frac{\alpha}{a_0}$$



freies e-

Ionisation
H-Atom =
E = 13,6 eV

Kontinuum



Grundzustand

■ Typische Energie in der Atomphysik: Hartree

1 Hartree = doppeltes Ionisationspotenzial des Wasserstoff-Atoms = 27,21 eV

ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**



D.C. Hartree

$$E_H = \alpha^2 \cdot m_e c^2 = \hbar c \cdot \frac{\alpha}{a_0} = 27,21 \text{ eV}$$

■ E_H aus „Dimensionsanalyse“ über Masse des Elektrons

$$E_H \sim 5 \cdot 10^{-5} \times 5 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

■ E_H entspricht der potenziellen elektrostatischen Energie des H-Atoms im Grundzustand

- Einfluss der endlichen Protonmasse führt zu einer Änderung von 0,05%

■ Typische Energie in der Atomphysik: Rydberg

1 Rydberg = Ionisationspotenzial von Wasserstoff
 - wichtig für Diskussion des H-Spektrums

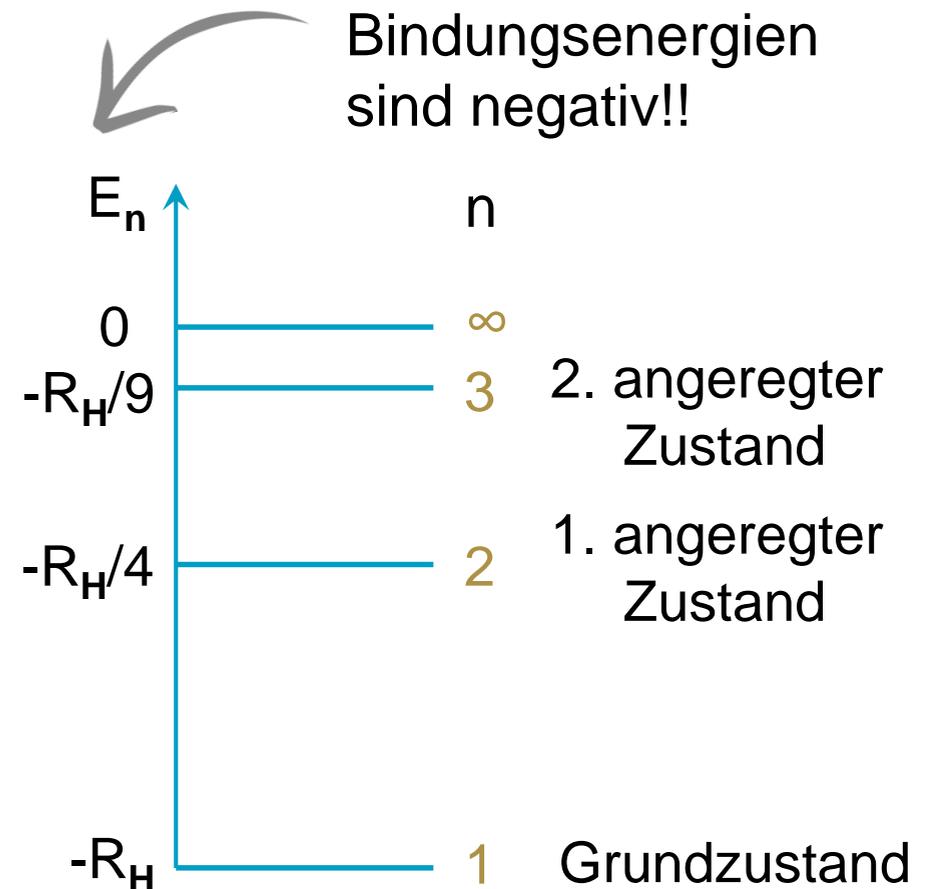
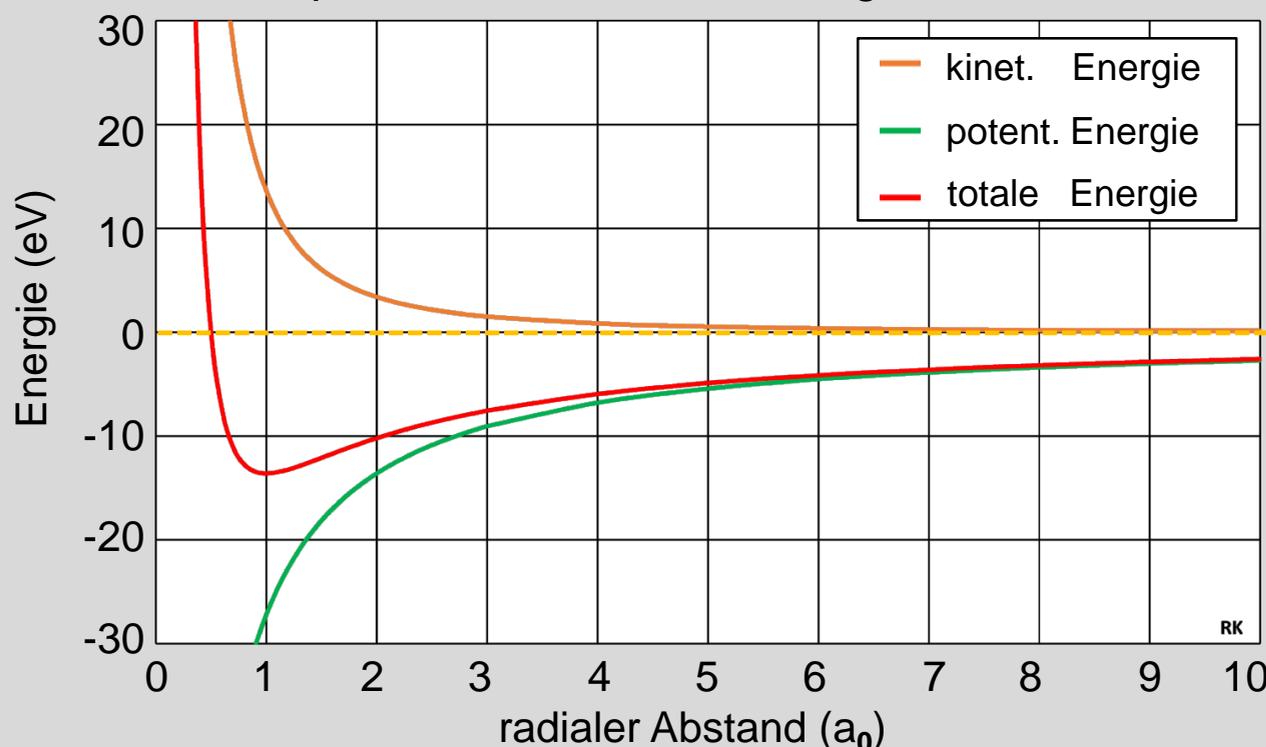


Johannes Rydberg

$$R_H = \frac{\alpha^2 \cdot mc^2}{2} = 13,605 \text{ eV}$$

Q:Wikipedia

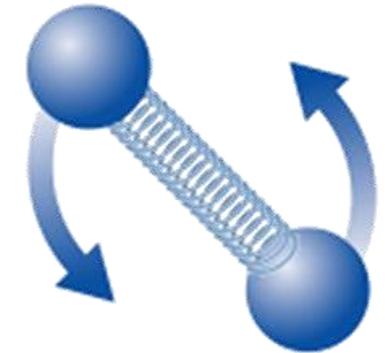
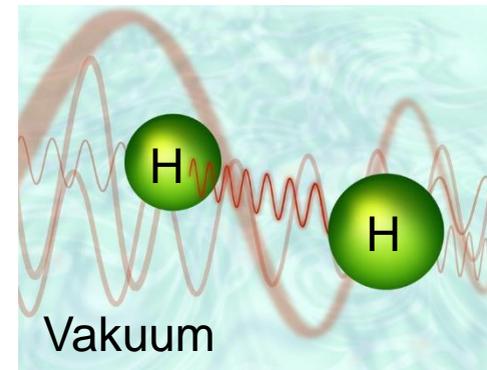
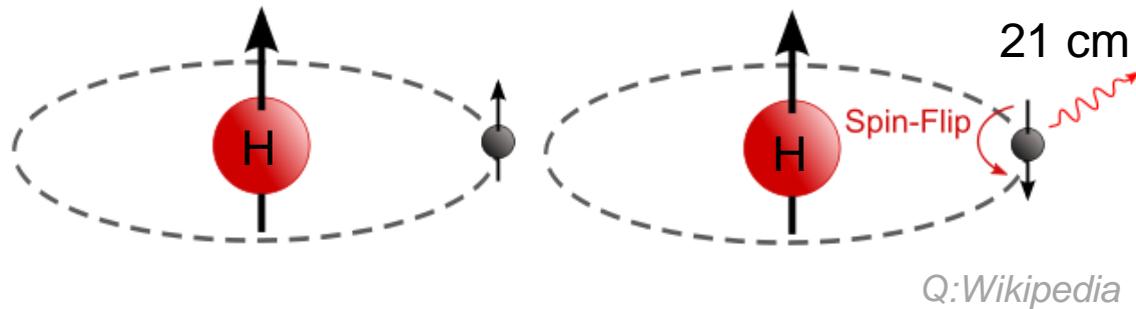
Kinetische, potentielle & Gesamtenergie eines Elektrons



Einheiten: Energie (sub-eV Skala)

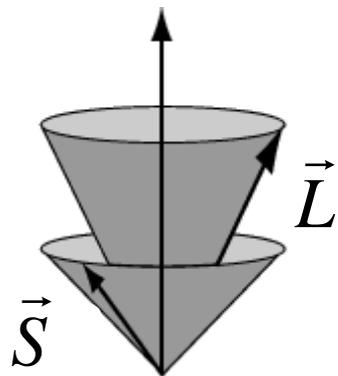
Energieskalen in Atom-, Molekül- und Kern-Physik und Beispiele

1 μeV | 10^{-6} eV | **H-Atom:** Hyperfeinstruktur, Lambshift, **Molekül:** Rotationsspektren

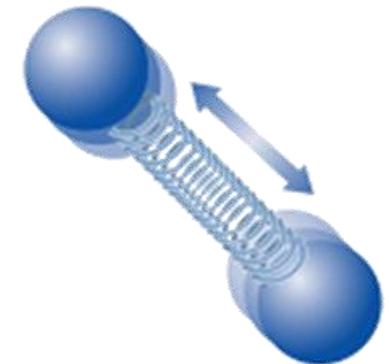
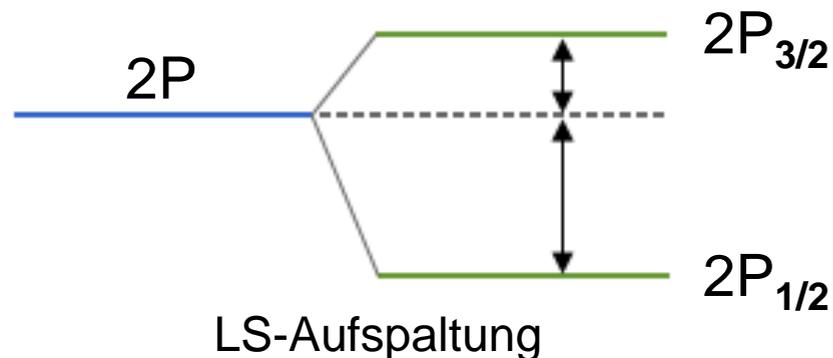


Energieskalen in Atom-, Molekül- und Kern-Physik und Beispiele

1 meV | 10^{-3} eV | **mittelschwere Atome:** Feinstruktur, **Molekül:** Vibrationsspektren



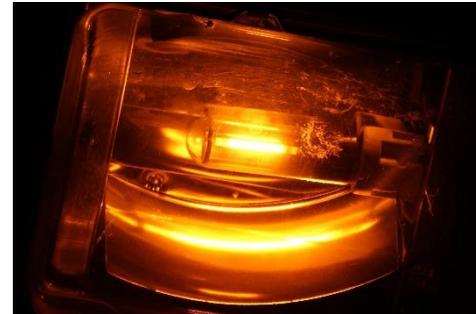
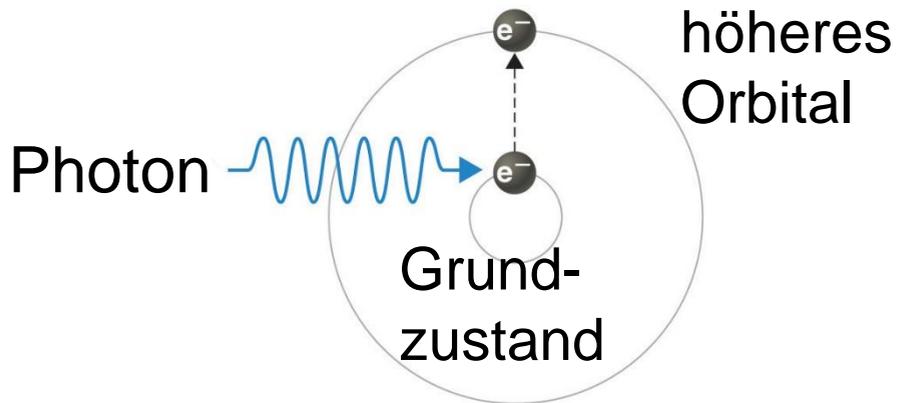
Q:Hyperphysics



Einheiten: Energie (eV-Skala)

Energieskalen in Atom-, Molekül- und Kern-Physik und Beispiele

1 eV 1 eV **H-Atom:** Spektrallinien, **Molekül:** elektronische Zustände



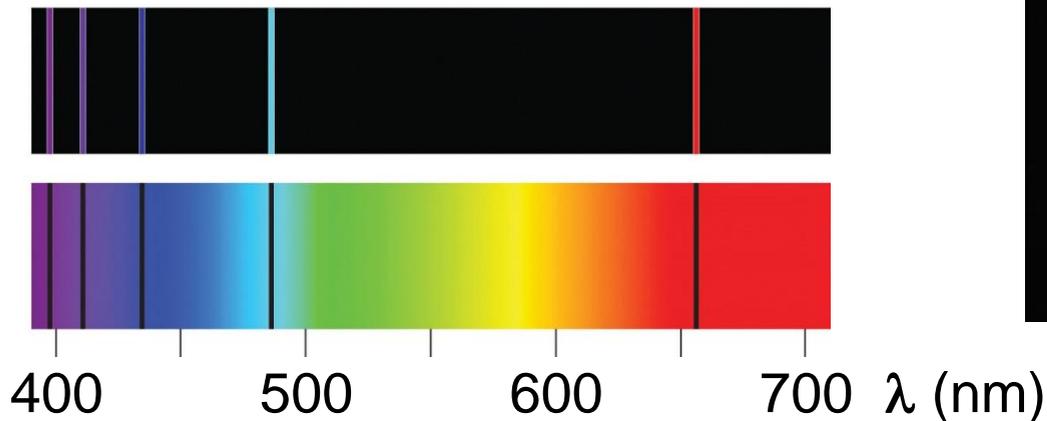
Na-Dampflampe



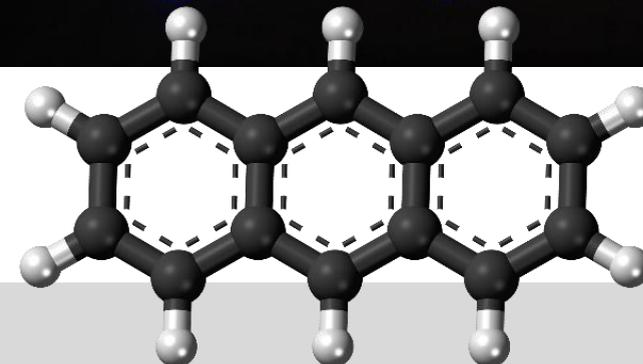
Szintillatoren

Photon-Absorption

Q: Wikipedia

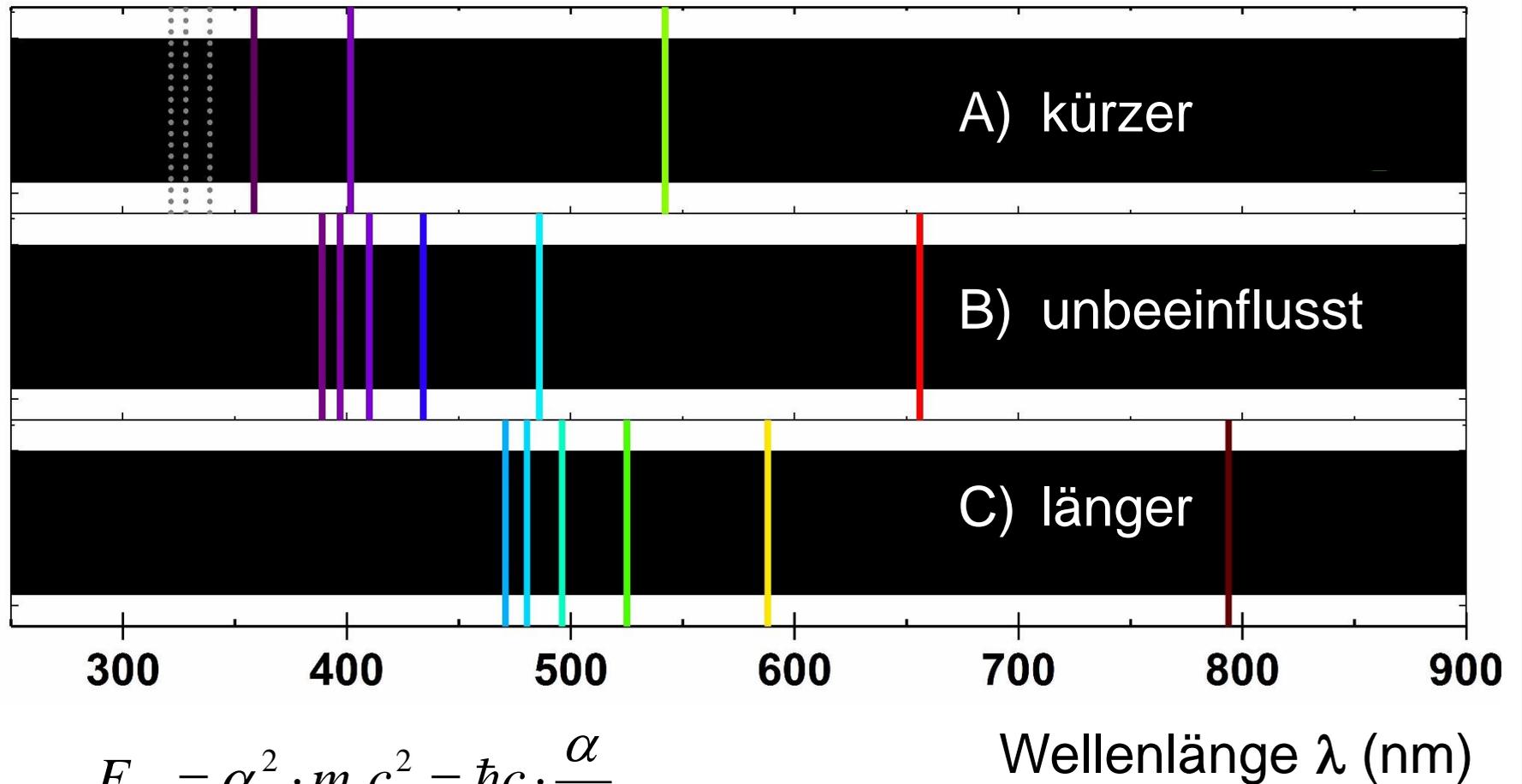
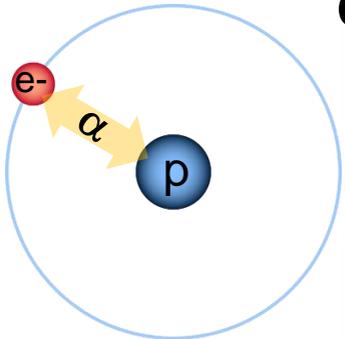


Emissions-/Absorptions- Spektrum H-Atom



Anthrazen

- Frage: Wäre die Feinstrukturkonstante α 10% größer, dann wären die Wellenlängen von Spektrallinien (hier H-Atom)...



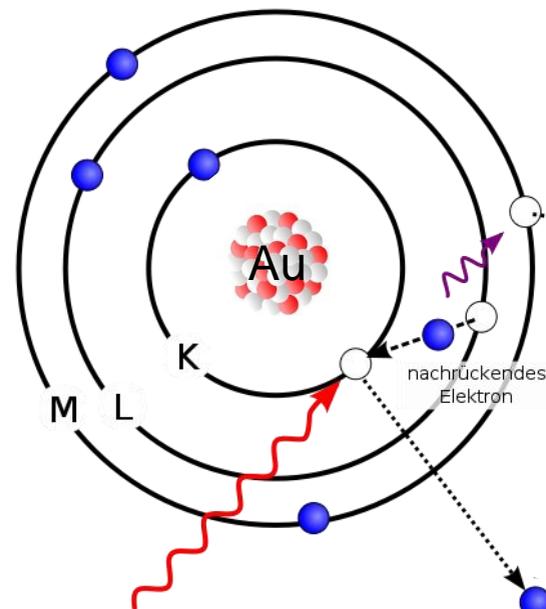
$$E_H = \alpha^2 \cdot m_e c^2 = \hbar c \cdot \frac{\alpha}{a_0}$$



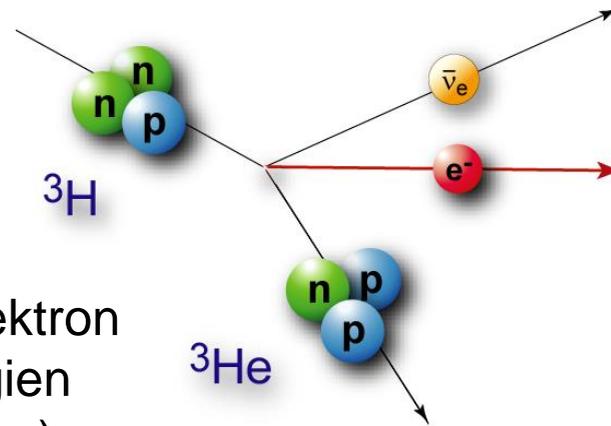
Einheiten: Energie (keV-Skala)

Energieskalen in Atom-, Molekül- und Kern-Physik und Beispiele

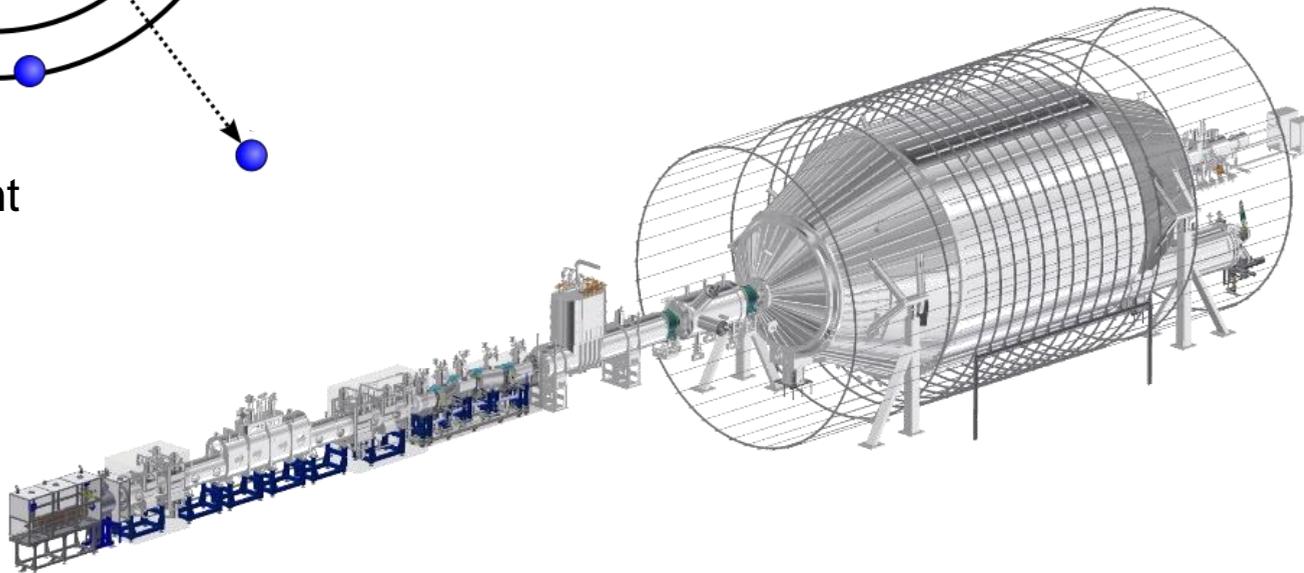
1 keV 10^3 eV schweres Atom: Bindungsenergie, β -Zerfall ${}^3\text{H}$, Röntgenstrahlen



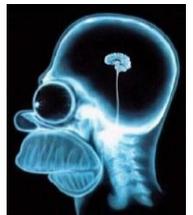
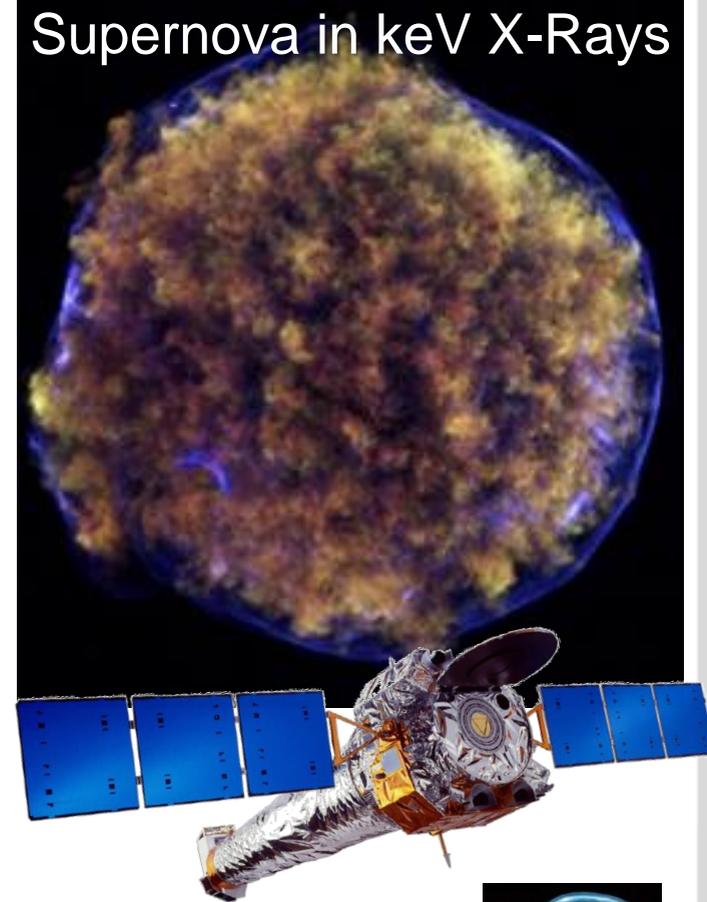
● Elektron
○ Loch
emittiertes Elektron mit keV-Energien (Auger-Prozess)



Röntgenquant



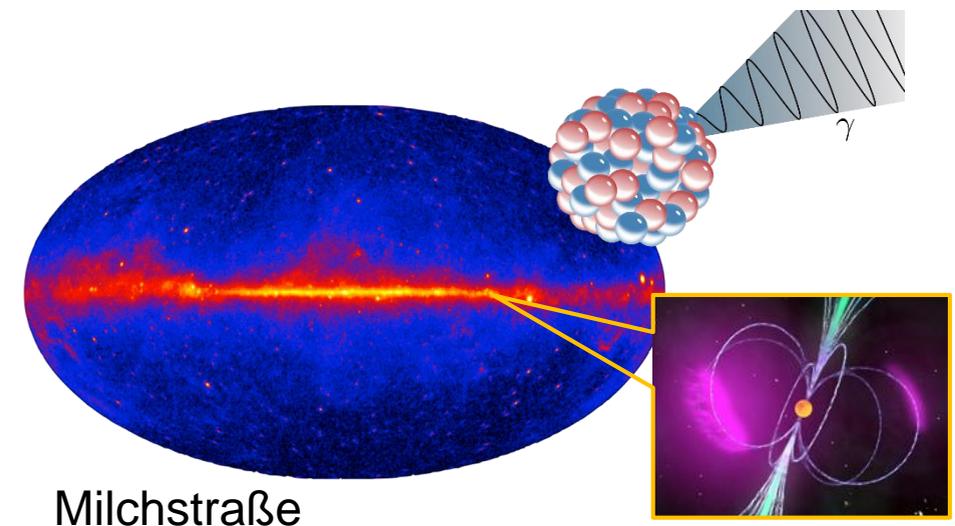
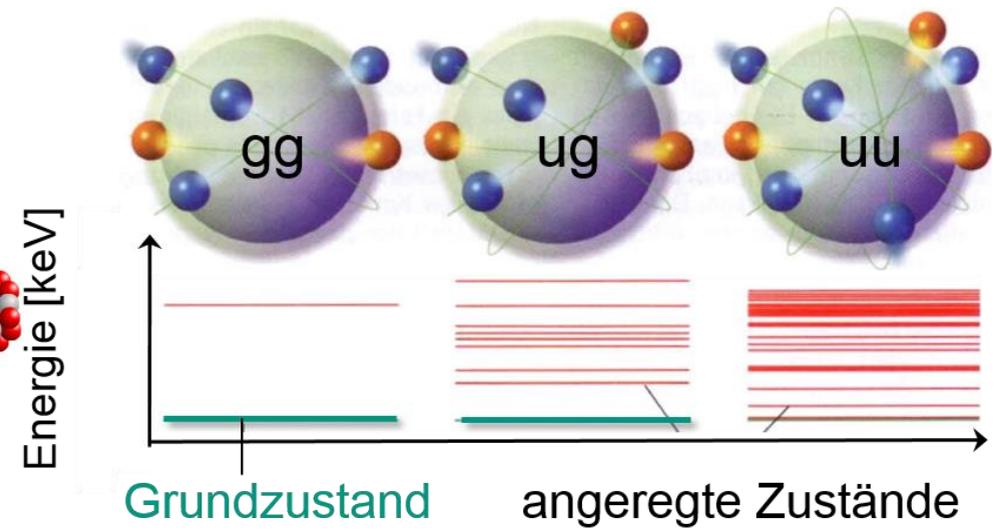
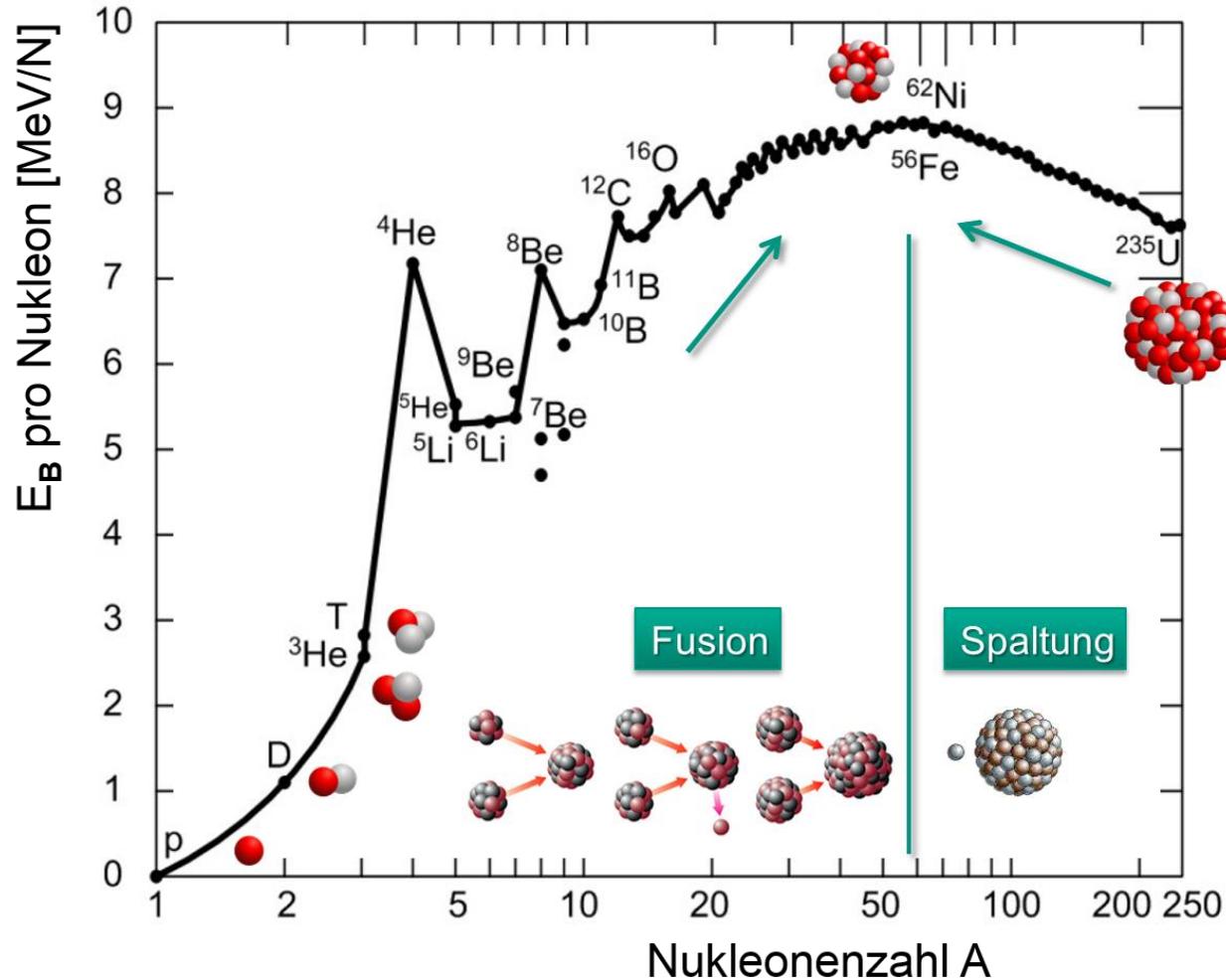
Supernova in keV X-Rays



Einheiten: Energie (MeV-Skala)

Energieskalen in Atom-, Molekül- und Kern-Physik und Beispiele

1 MeV | 10^6 eV | Bindungsenergie Kerne, Kernanregungen, Gammastrahlen



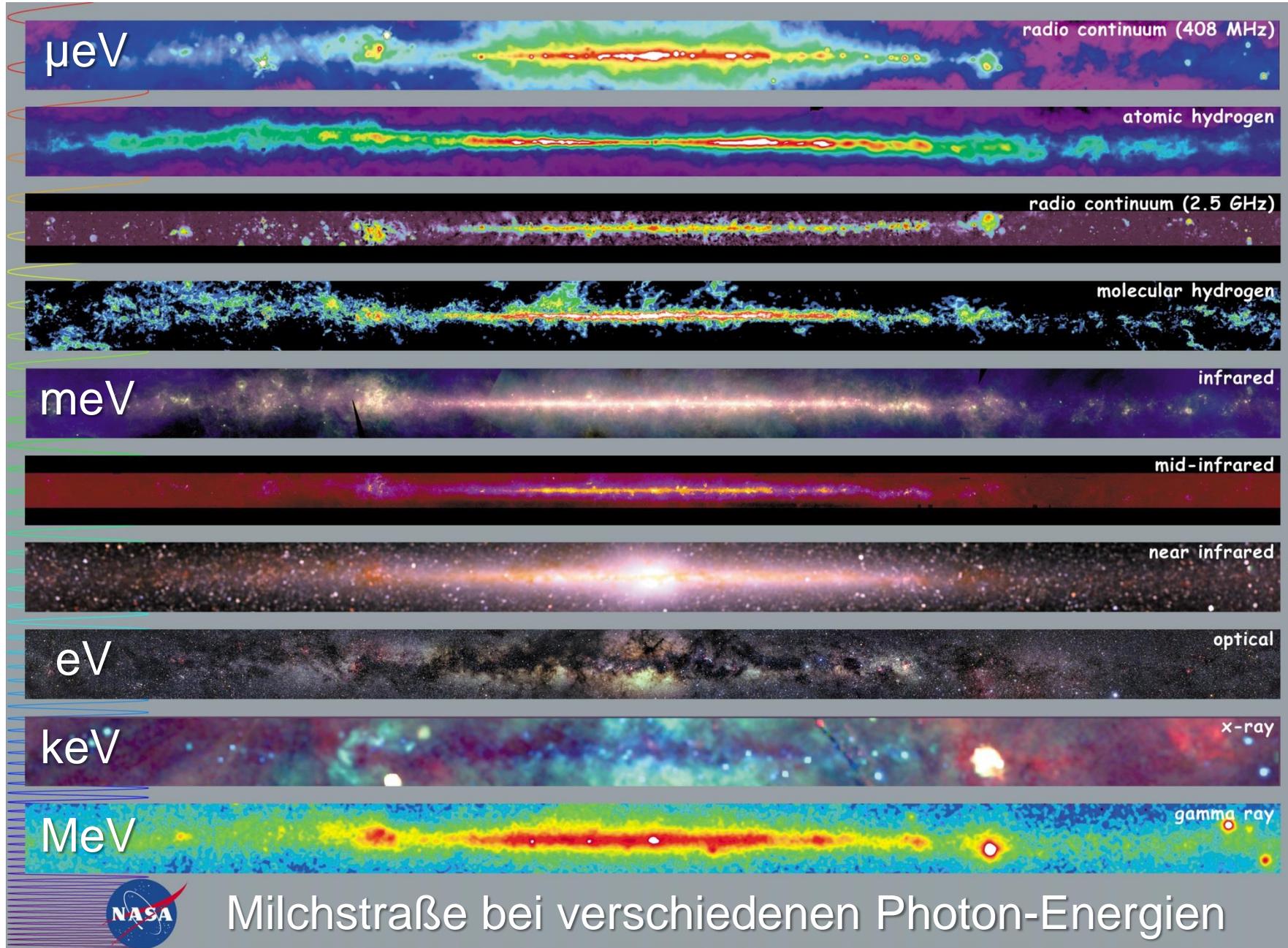
$E = hf$: Energie & Frequenz von Photonen



Energie E, Frequenz f

$E = 1,24 \text{ eV} / \lambda (\mu\text{m})$

$E = 4,14 \mu\text{eV} * f (\text{GHz})$



Milchstraße bei verschiedenen Photon-Energien

Q:NASA

<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>

Einheiten: Impuls p , Drehimpulse L

Impuls p Beispiel: Teilchenkollision (Beschleuniger)

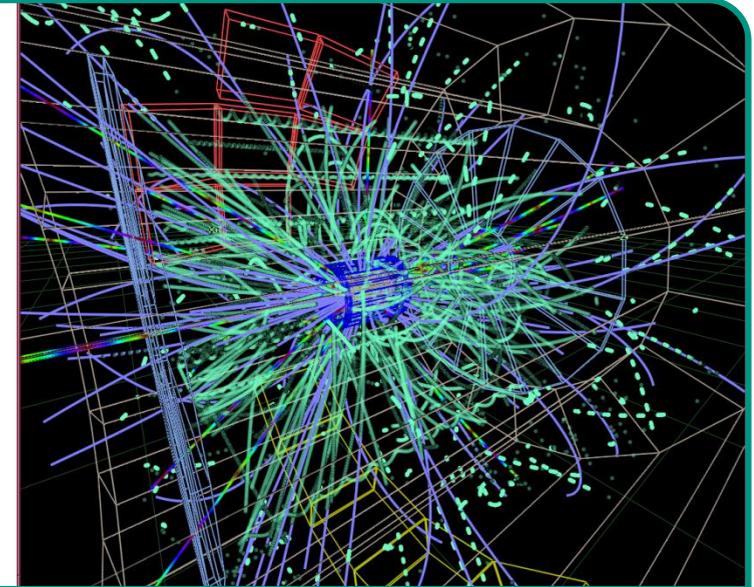
■ Einheit: **Elektronvolt/c (eV/c)**

$$1 \text{ eV/c} = 0,535 \cdot 10^{-27} \text{ kg m/s}$$

- vektorielle Größe $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z) = (p_r, p_\theta, p_\phi)$

- relativistische Energie-Impuls Beziehung:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

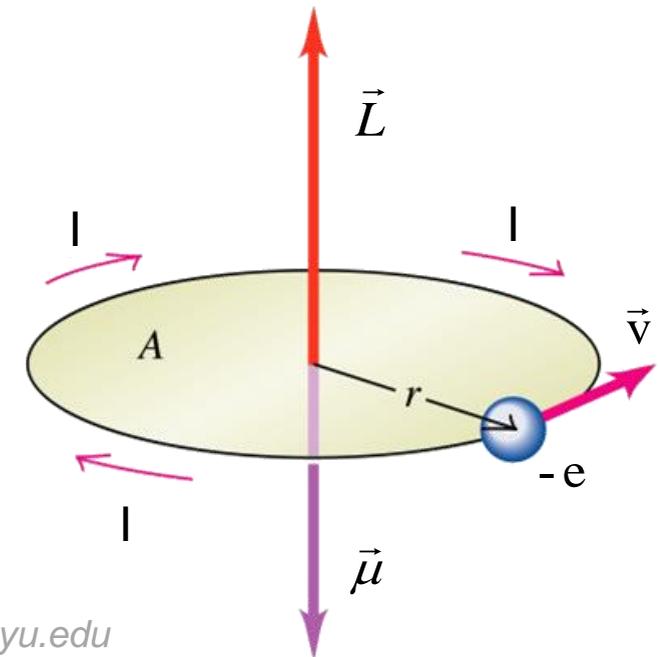


Drehimpuls L

■ **Drehimpulse** in der Atom- und Kernphysik sind **gequantelt!**

- axialvektorielle Größe $\vec{L} = (L_x, L_y, L_z)$

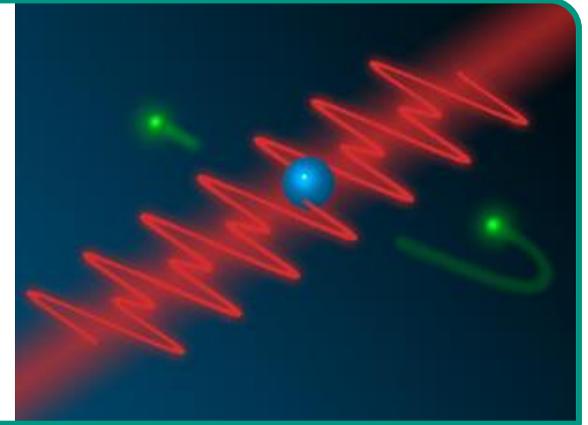
- magnetisches Moment $\vec{\mu}$



Q:ctaps.yu.edu

atomare Zeitskala L

- charakteristische Zeitskala τ_0 von atomaren Prozessen:
1 atto-s = 1 as = 10^{-18} s
~ Orbitalperiode von inneren Elektronen um den Kern



- Zeitskala τ_0 ergibt sich aus der **Kombination von Naturkonstanten**

Dimensionsanalyse

$$\tau_0 = \frac{\hbar}{\alpha^2 \cdot m_e c^2} = 24,18 \text{ atto-s}$$

Planck Konstante = $6,582 \cdot 10^{-16}$ eV·s

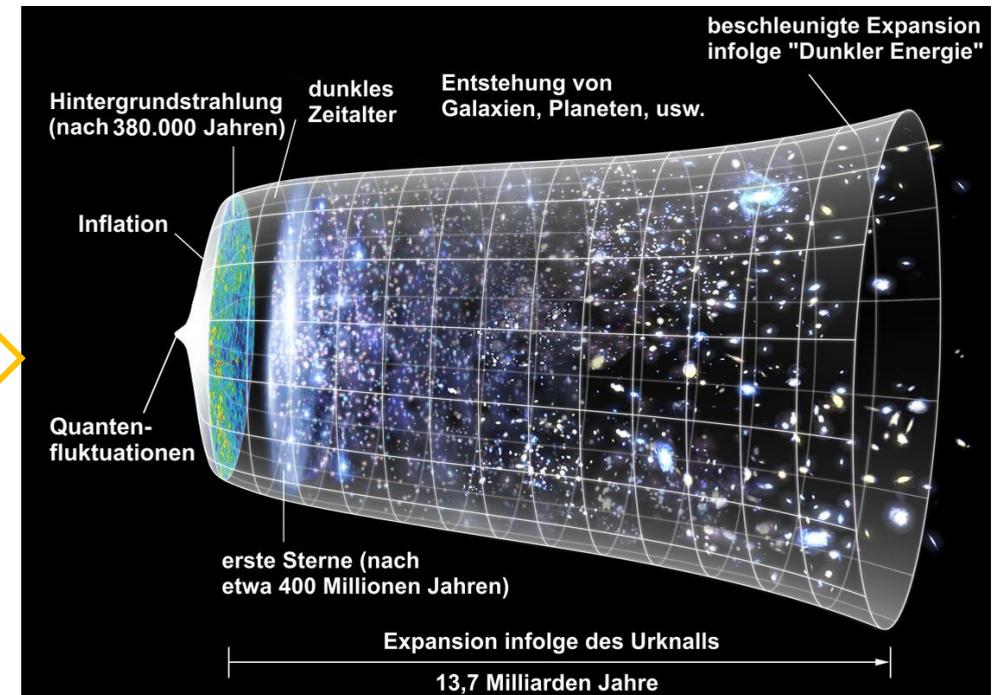
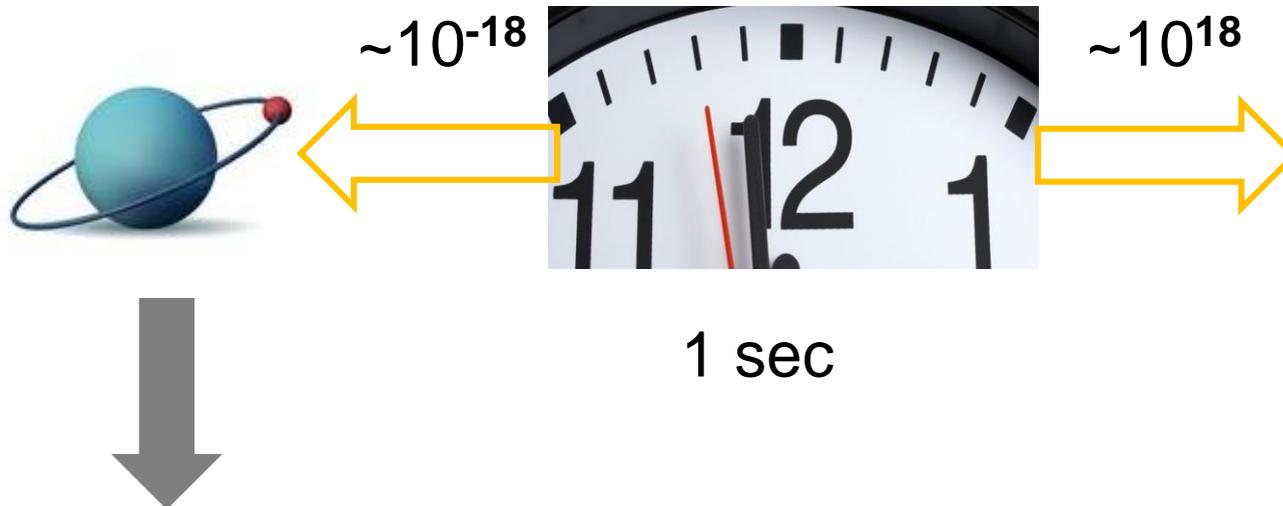
Hartree-Energie E = 27,21 eV

- atomare Zeitskala τ_0 ist extrem kurz, da
 - kleiner Bohrscher Abstand $a_0 \sim 10^{-10}$ m
 - hohe Orbitalgeschwindigkeit $v_B \sim 0.01$ c

Einheiten: atomare Zeitskalen & Universum

- Verhältnis der atomaren Zeitskala τ_0 relativ zu 1 s ist extrem klein, vergleichbar mit Verhältnis 1 s relativ zum Alter des Universum

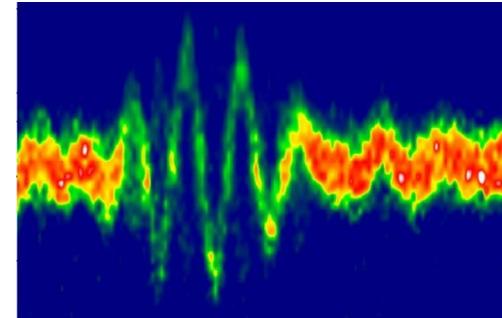
$$t_0 = 0,436 \cdot 10^{18} \text{ s}$$



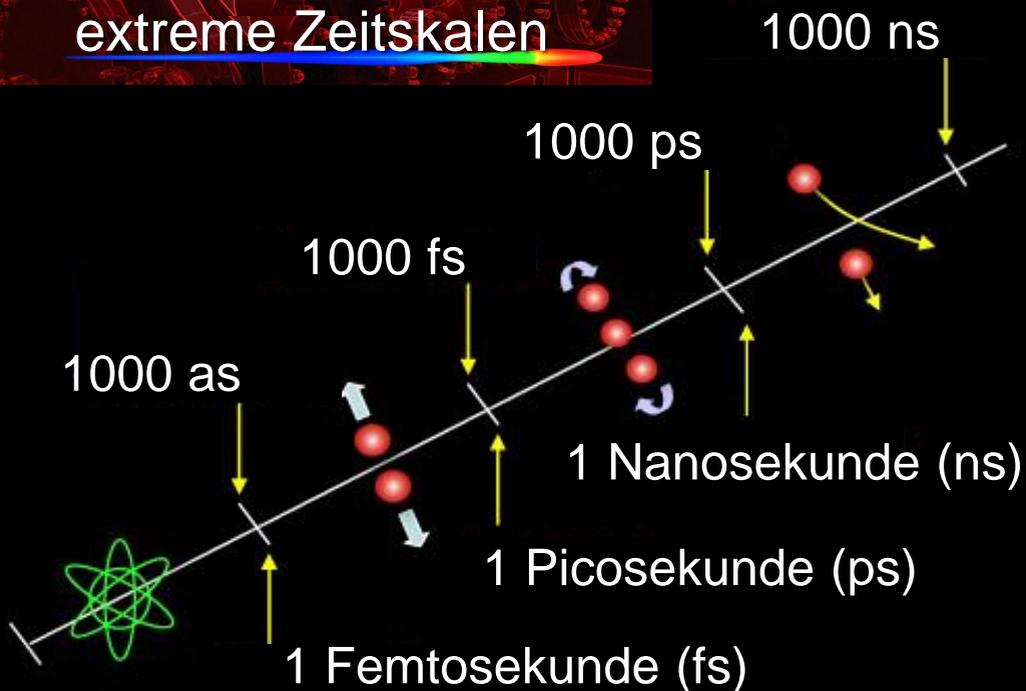
$$\tau_0 = \frac{16\pi^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \hbar^3}{m_e \cdot e^4} = 2,418 \cdot 10^{-17} \text{ s} = 24,18 \text{ atto-s}$$

Einheiten: atomare Zeitskalen

- Lichtlaufzeit durch ein H-Atom: 0.3 atto-s $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$
- kürzeste je gemessene Zeit [2010]: 12 atto-s
- kürzester Laserpuls [2012]: 67 atto-s

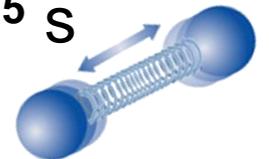


extreme Zeitskalen



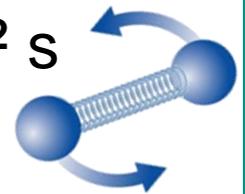
Femtosekunden: $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$

Vibration von Molekülen



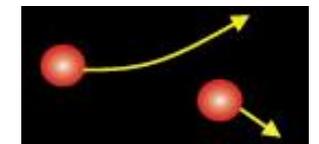
Picosekunden: $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$

Rotation von Molekülen



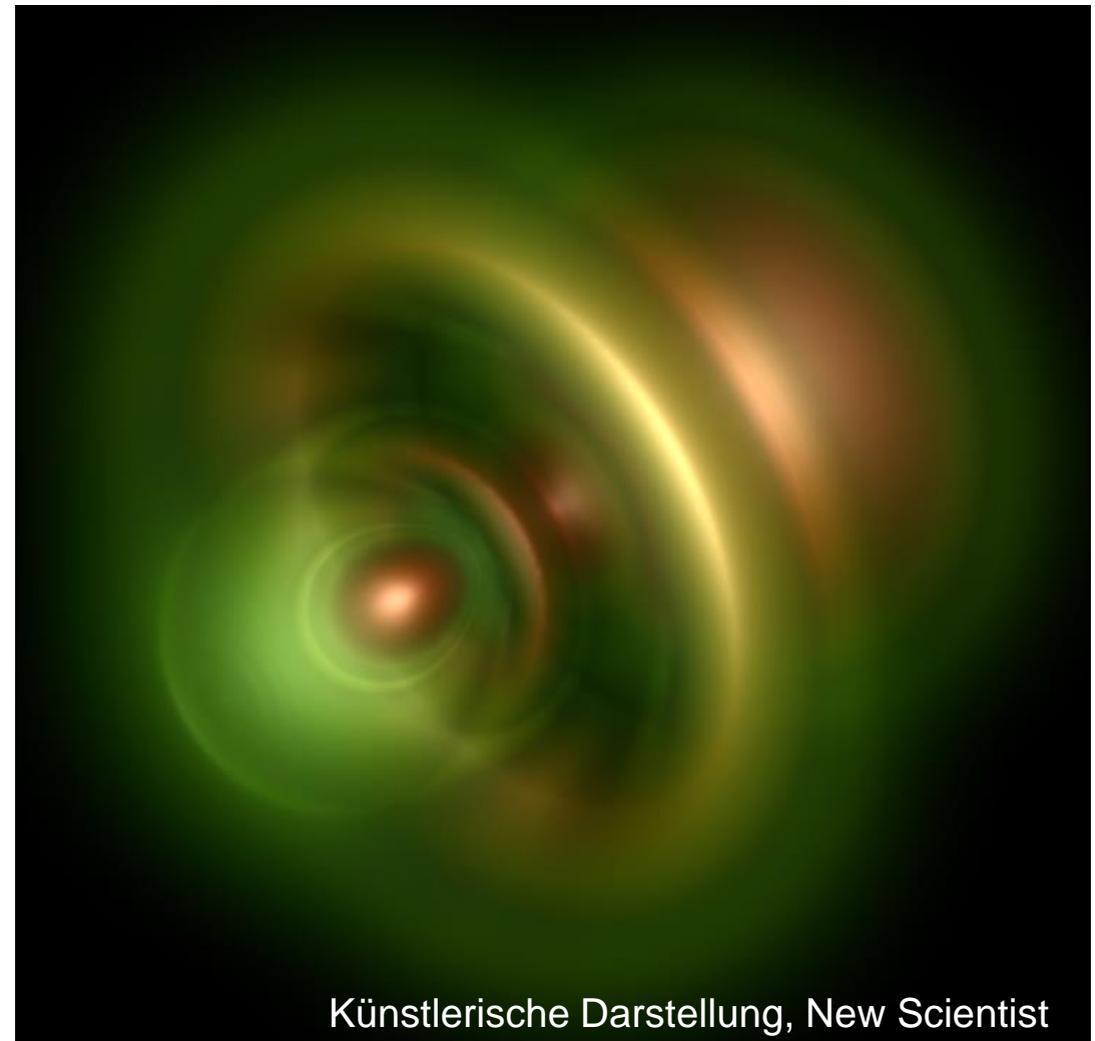
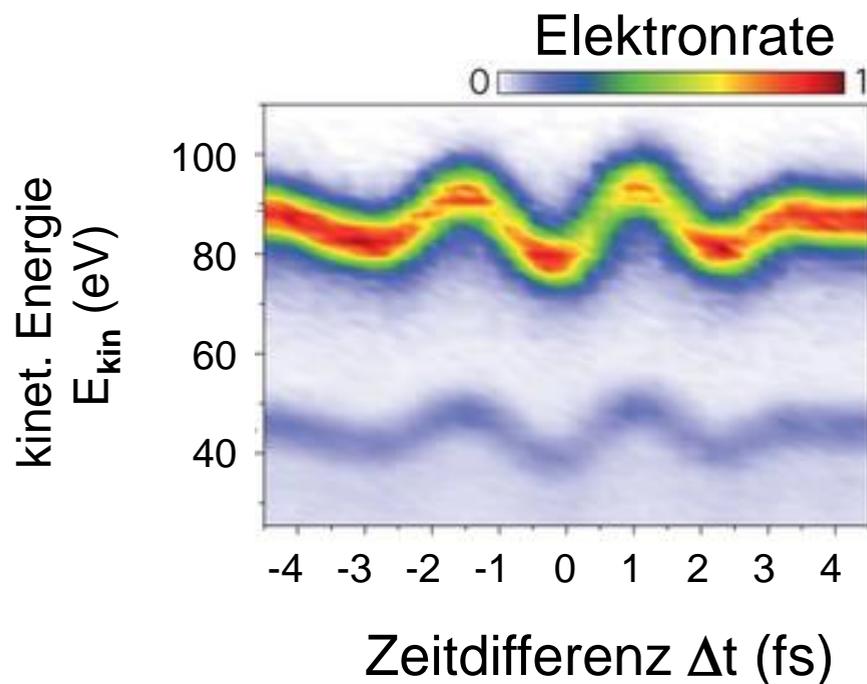
Nanosekunden: $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$

chemische Reaktionen



Einheiten: atomare Zeitskalen

- November 2016: Nachweis eines Elektrons, welches nach einer Anregung (photoelektrischer Effekt) ein He-Atom verlässt
 - **Gesamtdauer des atomaren Prozesses: 7-20 as**
 - weitere Elektronen können das Atom verlassen (Energie der Elektronen ist korreliert, s.u.)



Nature Physics 13 (2017) 280-285

Einheiten: atomare Masseneinheiten

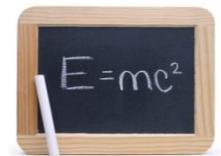
- **Atomare Masseneinheit, 1 u** = Masseneinheit für Atome (Isotope)
= **1/12 Masse des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C**

1 u = 1/12 der Masse eines einzelnen, neutralen ^{12}C -Atoms im Grundzustand

[auch 1 Dalton, (1 Da)]

$$= 931,494\,061(21) \text{ MeV}/c^2$$

$$= 1,660\,538\,921(73) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



^{12}C -Kern: Nukleonenzahl = 12 (6 Protonen & 6 Neutronen)

^{12}C -Atom: Masse = 12,00000 u



■ Massen der Nukleonen und Elektronen

Proton $m(p) = 938,272 \text{ MeV}/c^2$

Neutron $m(n) = 939,565 \text{ MeV}/c^2$

Elektron $m(e) = 0,511 \text{ MeV}/c^2$

- Berücksichtigung der neg. Bindungsenergie (E_B)

Nukleonen im Kern: $\langle E_B \rangle \sim 7 \text{ MeV}/c^2$

Elektronen im Atom: $E_B \sim 10^{-5} - 10^{-2} \text{ MeV}/c^2$

1 atomare
Masseneinheit



C-12

Einheiten: CODATA Äquivalente

■ Umrechnungsfaktoren: E [Joule], m [kg], Wellenzahl [m^{-1}], Frequenz [Hz]

	J	kg	m^{-1}	Hz
1 J	$(1 \text{ J}) =$ 1 J	$(1 \text{ J})/c^2 =$ $1.112\,650\,056 \dots \times 10^{-17} \text{ kg}$	$(1 \text{ J})/hc =$ $5.034\,117\,01(22) \times 10^{24} \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ J})/h =$ $1.509\,190\,311(67) \times 10^{33} \text{ Hz}$
1 kg	$(1 \text{ kg})c^2 =$ $8.987\,551\,787 \dots \times 10^{16} \text{ J}$	$(1 \text{ kg}) =$ 1 kg	$(1 \text{ kg})c/h =$ $4.524\,438\,73(20) \times 10^{41} \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ kg})c^2/h =$ $1.356\,392\,608(60) \times 10^{50} \text{ Hz}$
1 m^{-1}	$(1 \text{ m}^{-1})hc =$ $1.986\,445\,684(88) \times 10^{-25} \text{ J}$	$(1 \text{ m}^{-1})h/c =$ $2.210\,218\,902(98) \times 10^{-42} \text{ kg}$	$(1 \text{ m}^{-1}) =$ 1 m^{-1}	$(1 \text{ m}^{-1})c =$ 299 792 458 Hz
1 Hz	$(1 \text{ Hz})h =$ $6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34} \text{ J}$	$(1 \text{ Hz})h/c^2 =$ $7.372\,496\,68(33) \times 10^{-51} \text{ kg}$	$(1 \text{ Hz})/c =$ $3.335\,640\,951 \dots \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ Hz}) =$ 1 Hz
1 K	$(1 \text{ K})k =$ $1.380\,6488(13) \times 10^{-23} \text{ J}$	$(1 \text{ K})k/c^2 =$ $1.536\,1790(14) \times 10^{-40} \text{ kg}$	$(1 \text{ K})k/hc =$ $69.503\,476(63) \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ K})k/h =$ $2.083\,6618(19) \times 10^{10} \text{ Hz}$
1 eV	$(1 \text{ eV}) =$ $1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19} \text{ J}$	$(1 \text{ eV})/c^2 =$ $1.782\,661\,845(39) \times 10^{-36} \text{ kg}$	$(1 \text{ eV})/hc =$ $8.065\,544\,29(18) \times 10^5 \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ eV})/h =$ $2.417\,989\,348(53) \times 10^{14} \text{ Hz}$
1 u	$(1 \text{ u})c^2 =$ $1.492\,417\,954(66) \times 10^{-10} \text{ J}$	$(1 \text{ u}) =$ $1.660\,538\,921(73) \times 10^{-27} \text{ kg}$	$(1 \text{ u})c/h =$ $7.513\,006\,6042(53) \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$	$(1 \text{ u})c^2/h =$ $2.252\,342\,7168(16) \times 10^{23} \text{ Hz}$
1 E_h	$(1 E_h) =$ $4.359\,744\,34(19) \times 10^{-18} \text{ J}$	$(1 E_h)/c^2 =$ $4.850\,869\,79(21) \times 10^{-35} \text{ kg}$	$(1 E_h)/hc =$ $2.194\,746\,313\,708(11) \times 10^7 \text{ m}^{-1}$	$(1 E_h)/h =$ $6.579\,683\,920\,729(33) \times 10^{15} \text{ Hz}$

The values of some energy equivalents derived from the relations $E = mc^2 = hc/\lambda = h\nu = kT$, and based on the 2010 CODATA adjustment of the values of the constants; 1 eV = (e/C) J, 1 u = $m_u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) = 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}/N_A$, and $E_h = 2R_\infty hc = \alpha^2 m_e c^2$ is the Hartree energy (hartree).

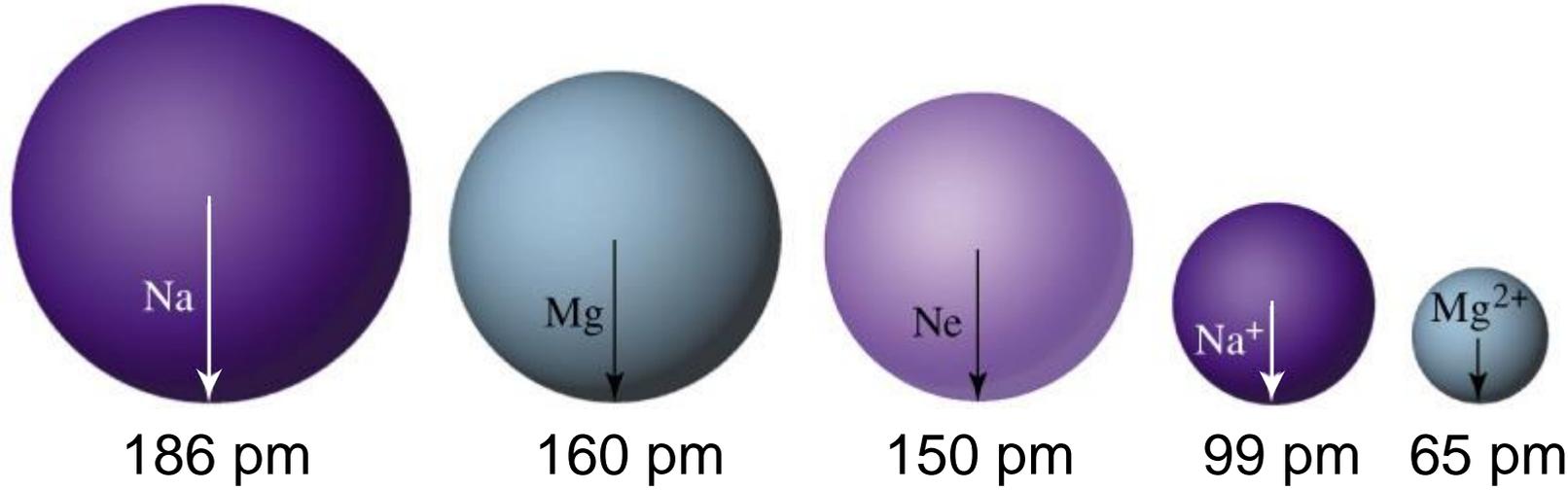




"ACTUALLY I STARTED OUT IN QUANTUM MECHANICS, BUT SOMEWHERE ALONG THE WAY I TOOK A WRONG TURN."

Atomphysik – Größenskalen

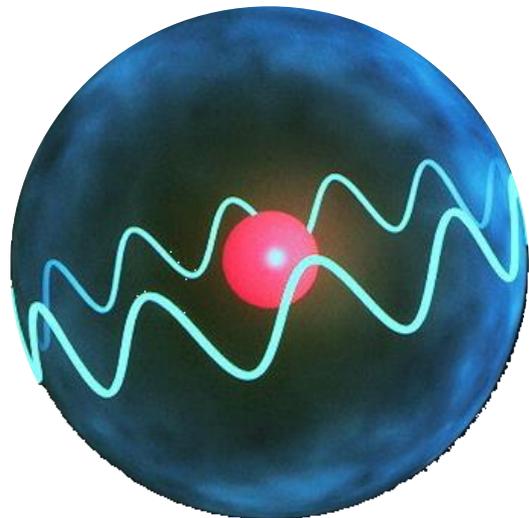
■ Atome: typische Größe $r \sim 100 \text{ pm} = 1 \text{ \AA}$ [$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$]



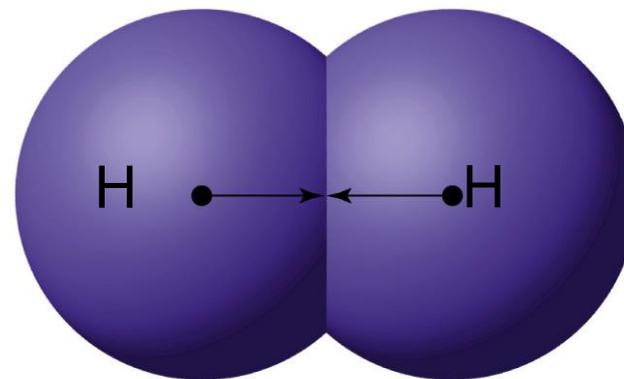
Q: Wikipedia

[$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$]

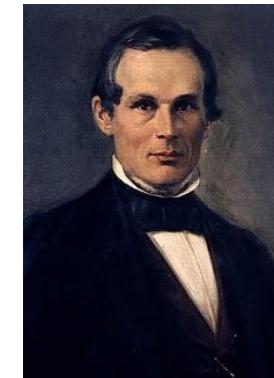
„Rand“ eines H-Atoms?



Ausdehnung von Molekülen (H₂)



Intra-nuklearer Abstand: 266 pm



Anders
Jonas
Ångström

■ Ionisierungsenergien von freien Atomen

- wichtig für Auslegung von Teilchendetektoren (Gase, Flüssigkeiten)
- Vieldrahtkammern oder Driftdetektoren:

Betrieb mit Argon: $\Delta E_{\min} = 15,76 \text{ eV}$ pro Elektron/Ion-Paar

