



Atom- & Kernphysik

Vom Photon bis zum Atomkern: Grundlagen, Abschätzungen und Aufgaben

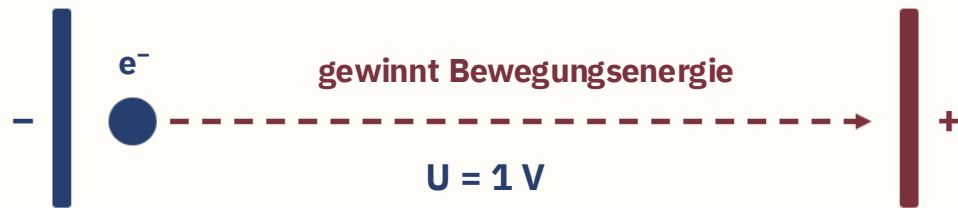
Jonas Wendlandt · Remote 12.10.2026 & 03.11.2026

ÜBERBLICK

Ablauf der 90 Minuten

Minute	Block	Inhalt
0–8	Werkzeugkasten	Elektronenvolt, Konstanten, Größenordnungen
8–40	Atomphysik	Photonen, Bohr-Modell, Spektren · Aufgaben 1 und 2
40–75	Kernphysik	Bindung, Fusion, Zerfälle · Aufgaben 3 und 4
75–80	Ausblick	Unschärfe: Warum sind Atome so groß?
80–90	Fragen	Alles, was offen geblieben ist

Rechnen in Elektronenvolt



NATURKONSTANTEN

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

DEFINITION

1 eV ist die Energie, die ein Teilchen mit der Elementarladung e gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 V durchläuft.

$$W = q \cdot U$$

$$1 \text{ eV} = e \cdot 1 \text{ V}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

WERKZEUGKASTEN

Ergebnis: hc in $\text{eV} \cdot \text{nm}$

$$\begin{aligned} hc &= 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= 1,240 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} \\ &= \mathbf{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} \end{aligned}$$

MERKFORMEL

$$E \text{ in eV} = \frac{1240}{\lambda \text{ in nm}}$$

BEISPIEL

$$\lambda = 620 \text{ nm} \rightarrow E = 2,0 \text{ eV}$$

RUHEENERGIEN

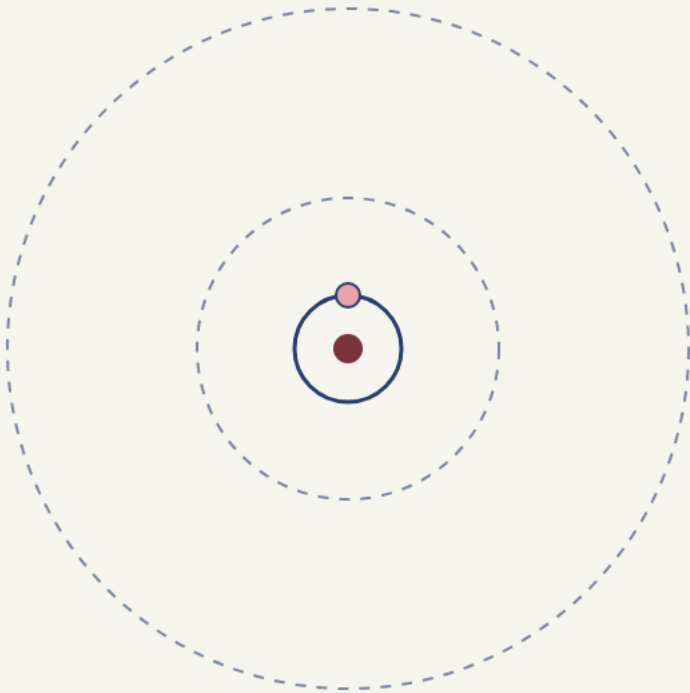
$$\text{Elektron: } m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

$$\text{Proton: } m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$$

$$\text{Neutron: } m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

Zwei Welten, zwei Größenordnungen



Bohrsches Modell des Wasserstoffatoms: Kern und Elektron, nicht maßstäblich

Atom

Größe: **10^{-10} m** (0,1 nm)

Energien: **eV**

Beispiel: sichtbares Licht, ca. 2 eV

Kern

Größe: **10^{-15} m** (1 fm)

Energien: **MeV**

Beispiel: radioaktive Strahlung, einige MeV

TEIL 1 · ATOMPHYSIK

Licht kommt in Portionen

Photonen · Photoeffekt · Energieniveaus · Materiewellen

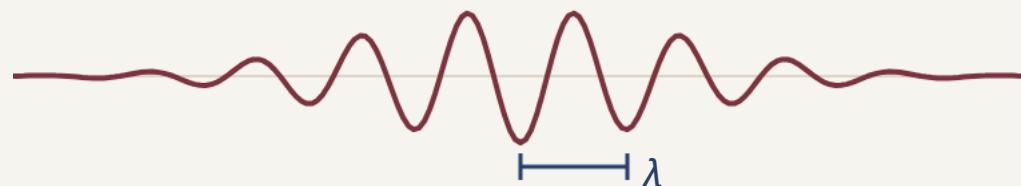
Das Photon

ENERGIE

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda}$$

IMPULS

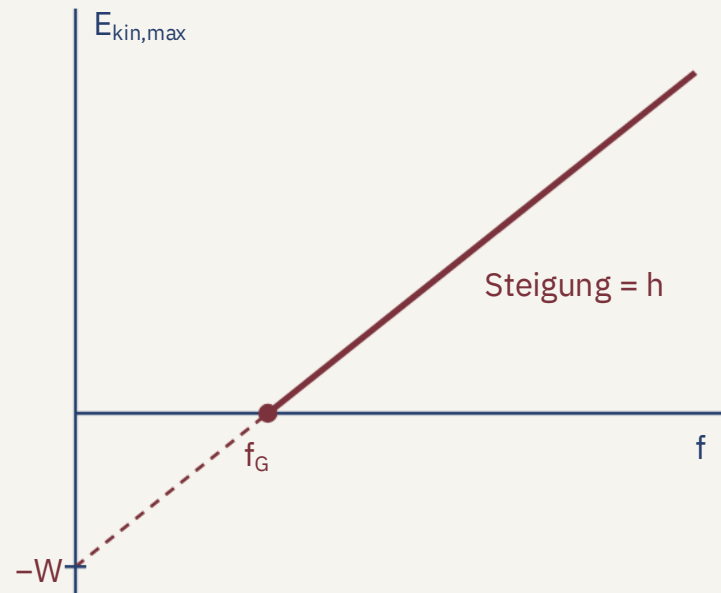
$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c}$$



Ein Photon als Wellenpaket mit der Wellenlänge λ

Strahlung	λ	E
Rotes Licht	700 nm	1,77 eV
Grünes Licht	500 nm	2,48 eV
UV	100 nm	12,4 eV
Röntgen	0,1 nm	12,4 keV

Der Photoeffekt



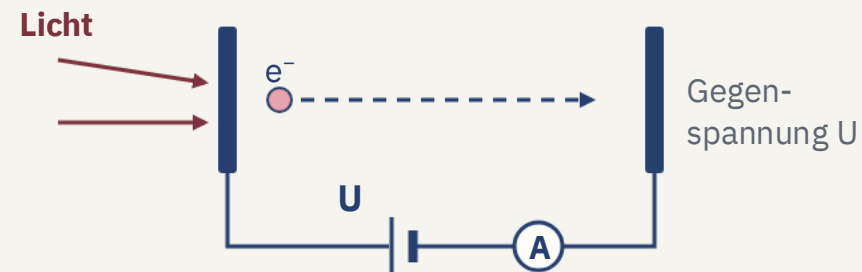
EINSTEIN 1905

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W$$

W = Austrittsarbeit des Metalls, einige eV

Unter der Grenzfrequenz $f_G = \frac{W}{h}$ kommt kein Elektron heraus – egal wie hell das Licht ist.

Hellere Lampe heißt mehr Elektronen, aber nicht schnellere.



Teilchen sind auch Wellen

DE BROGLIE 1924

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Dieselbe Formel wie beim Photon – nur umgekehrt gelesen: Jedes Teilchen mit Impuls p hat eine Wellenlänge.

Elektron mit 100 eV

$$1. E = 100 \text{ eV} = 100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

$$2. p = \sqrt{2mE} = \sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}} \approx 5,4 \cdot 10^{-24} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$3. \lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{5,4 \cdot 10^{-24} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}} \approx \mathbf{0,12 \text{ nm}}$$

So groß wie Atomabstände im Kristall – Elektronen werden gebeugt.

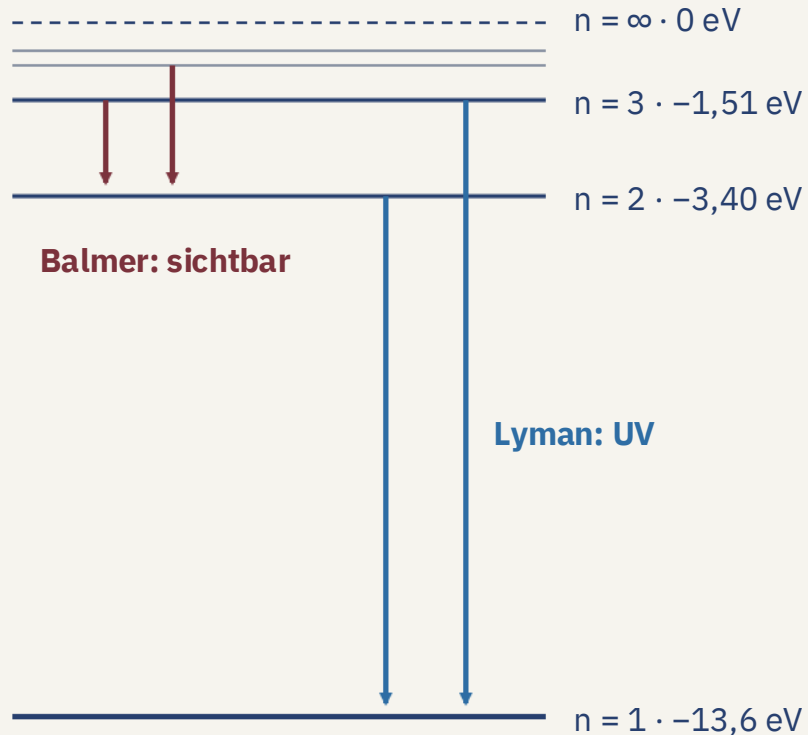
Tennisball, 60 g, 50 m/s

$$p = m \cdot v = 3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \mathbf{34 \cdot 10^{-34} \text{ m}}$$

Unmessbar klein – im Alltag sieht man keine Materiewellen.

Energieniveaus im Wasserstoffatom



$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Nur diese Energien sind erlaubt. Negativ heißt: gebunden.

Beim Sprung nach unten entsteht ein Photon mit

$$h \cdot f = E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}}$$

Ionisierung aus dem Grundzustand: **13,6 eV**.

Woher kommen die 13,6 eV?

1 · Kreisbahn

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{k e^2}{r^2}$$

Die Coulombkraft liefert die Zentripetalkraft.

2 · Welle

$$2\pi r = n \cdot \lambda = \frac{n h}{m_e v}$$

Die Elektronenwelle passt genau n-mal auf den Umfang.

3 · Radius

$$r_n = n^2 \cdot 0,053 \text{ nm}$$

4 · Energie

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{k e^2}{r} = -\frac{k e^2}{2 r_n} \quad E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Spektrallinien: der Fingerabdruck



Serie	endet auf	Bereich
Lyman	$n = 1$	UV, 91–122 nm
Balmer	$n = 2$	sichtbar
Paschen	$n = 3$	Infrarot, ab 820 nm

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ (Rydberg-Konstante)

AUFGABE 1 · EINZELARBEIT

Die rote Linie

Wasserstoff in einer Gasentladungsröhre leuchtet rötlich. Die Farbe stammt vom Übergang $n = 3 \rightarrow n = 2$.

1. Berechne die Energie des ausgesandten Photons in eV.
2. Welche Wellenlänge hat es? Passt die Farbe?
3. Zusatz: Welche Wellenlänge hat derselbe Übergang bei He^+ ($Z = 2$)? Kann man ihn sehen?

HILFSMITTEL

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{E}$$

Sichtbar: etwa 380–750 nm

AUFGABE 2 · EINZELARBEIT

Photoeffekt an Cäsium

Violettes Licht mit $\lambda = 400 \text{ nm}$ fällt auf eine Cäsiumplatte. Die Austrittsarbeit von Cäsium beträgt $W = 2,1 \text{ eV}$.

1. Welche Energie hat ein Photon?
2. Mit welcher kinetischen Energie verlassen die schnellsten Elektronen die Platte?
3. Bis zu welcher Wellenlänge funktioniert der Effekt noch?
4. Zusatz: Welche Gegenspannung stoppt alle Elektronen?

HILFSMITTEL

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W$$

$$E = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

Aufgaben 1 und 2

Aufgabe 1 · Die rote Linie

a Energieniveaus: $E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$

$$E_3 = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{9} = -1,51 \text{ eV}$$

$$E_2 = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{4} = -3,40 \text{ eV}$$

$$\Delta E = E_3 - E_2 = 1,89 \text{ eV}$$

b Photon: $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$

$$\lambda = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{1,89 \text{ eV}}$$

$$\lambda \approx 656 \text{ nm} \rightarrow \text{rot}$$

c He^+ hat $Z = 2$: Energien mal $Z^2 = 4$

$$\Delta E = 4 \cdot 1,89 \text{ eV} = 7,56 \text{ eV}$$

$$\lambda = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{7,56 \text{ eV}} \approx 164 \text{ nm} \rightarrow \text{UV}$$

Aufgabe 2 · Photoeffekt an Cäsium

a Photonenenergie: $E = \frac{hc}{\lambda}$

$$E = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{400 \text{ nm}} = 3,10 \text{ eV}$$

b Einstein: $E_{\text{kin}} = E - W$

$$E_{\text{kin}} = 3,10 \text{ eV} - 2,1 \text{ eV} = 1,0 \text{ eV}$$

c Grenzfall: $E_{\text{kin}} = 0$, also $\frac{hc}{\lambda_G} = W$

$$\lambda_G = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{2,1 \text{ eV}} \approx 590 \text{ nm}$$

d Gegenspannung bremst: $e \cdot U = E_{\text{kin}}$

$$U = \frac{1,0 \text{ eV}}{e} = 1 \text{ V}$$

TEIL 2 · KERNPHYSIK

Wo die Megaelektronvolt stecken

Aufbau · Bindungsenergie · Zerfälle

Der Atomkern

Schreibweise



Oben A = Nukleonen,
unten Z = Protonen.
Neutronen: $N = A - Z$

Isotope



Gleiches Z, also gleiche Chemie –
aber andere Neutronenzahl.

Größe

$$R \approx 1,2 \text{ fm} \cdot A^{\frac{1}{3}}$$

Volumen wächst mit A: Alle Kerne
haben dieselbe Dichte,
 $\approx 2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$.

Ein Teelöffel Kernmaterie wöge rund **eine Milliarde Tonnen**.

Massendefekt und Bindungsenergie

1 • Beobachtung

$$m_{\text{Kern}} < Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Ein Kern ist leichter als seine einzelnen Protonen und Neutronen zusammen.

2 • Erklärung

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

Beim Bilden des Kerns wird Energie frei. Sie fehlt dem Kern als Masse.

3 • Bindungsenergie

$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

So viel Energie braucht man, um den Kern wieder zu zerlegen.

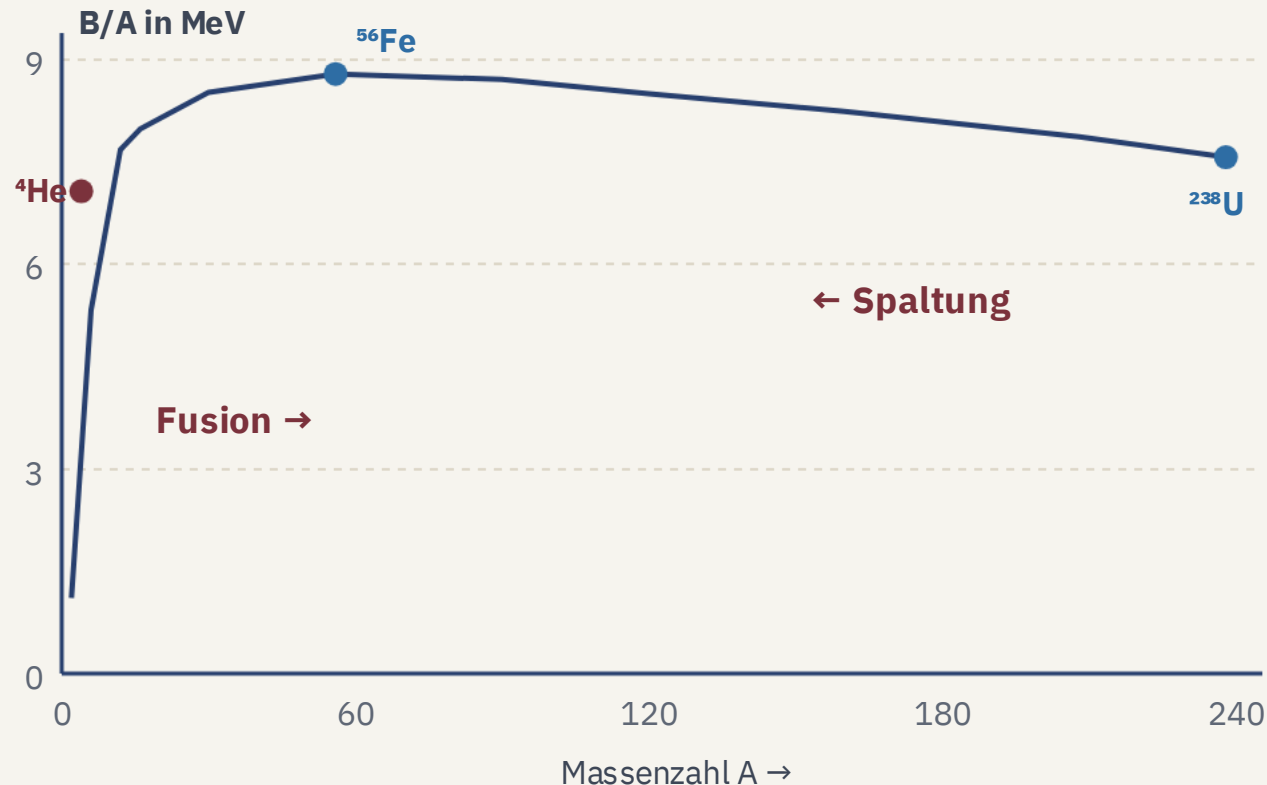
RECHENWEG

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{Kern}}$$

$$EB = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$1 u = \frac{1}{12}$ der Masse von C-12 = $1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg. Mit $E = mc^2$ entspricht das 931,5 MeV.

Bindungsenergie pro Nukleon



Maximum bei Eisen mit $\approx 8,8$ MeV: die stabilsten Kerne.

Wer sich auf der Kurve **nach oben** bewegt, setzt Energie frei – von links durch Fusion, von rechts durch Spaltung.

Spaltung U-235: ≈ 200 MeV

Fusion D + T: 17,6 MeV

Fusion: Leichte Kerne verschmelzen



vorher	nachher
${}^2\text{H}$: 2,014102 u	${}^4\text{He}$: 4,002603 u
${}^3\text{H}$: 3,016049 u	n: 1,008665 u
5,030151 u	5,011268 u

$\Delta m = 0,0189 \text{ u} \rightarrow Q \approx \mathbf{17,6 \text{ MeV}}$ pro Reaktion

DIE HÜRDE

Beide Kerne sind positiv geladen und stoßen sich ab.

Nur sehr schnelle, also sehr heiße Kerne kommen sich nah genug.

Sonne: $\approx 15 \text{ Mio. K}$

Die Sonne: ein Fusionsreaktor

PP-KETTE, BILANZ



$$3,8 \cdot 10^{26} \, \text{W}$$

Leistung der Sonne

$$4 \cdot 10^9 \, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Massenverlust $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{L}{c^2}$

$$6 \cdot 10^{14}$$

Neutrinos pro m^2 und Sekunde auf der Erde

Trotzdem verliert die Sonne in 10 Milliarden Jahren nur etwa 0,07 % ihrer Masse.

Drei Arten zu zerfallen

Art	Was passiert	Änderung	Abschirmung
α	Kern sendet ${}^4\text{He}$ -Kern aus	$A - 4, Z - 2$	Blatt Papier
β^-	$n \rightarrow p + e^- + \text{Antineutrino}$	$Z + 1$	einige mm Aluminium
β^+	$p \rightarrow n + e^+ + \text{Neutrino}$	$Z - 1$	einige mm Aluminium
γ	angeregter Kern sendet Photon aus	keine	dickes Blei

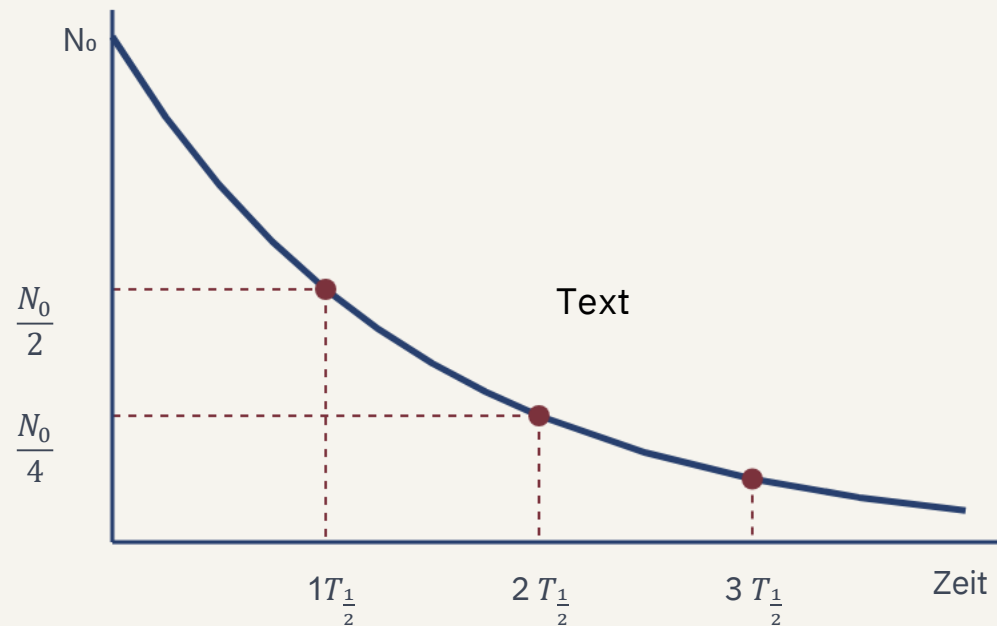
Bilanz prüfen



Warum das Neutrino?

β -Elektronen haben verschiedene Energien – ein drittes Teilchen nimmt den Rest mit.

Das Zerfallsgesetz



$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Aktivität $A = \lambda \cdot N$: Zerfälle pro Sekunde, Einheit Becquerel.

Ein einzelner Kern hat kein Alter: Die Wahrscheinlichkeit, dass er zerfällt, bleibt immer gleich.

AUFGABE 3 · EINZELARBEIT

Wie fest hält der Heliumkern?

Ein ${}^4\text{He}$ -Kern besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen.

1. Berechne den Massendefekt in u.
2. Wie groß ist die Bindungsenergie insgesamt und pro Nukleon in MeV?
3. Zusatz: Wie viel mal größer ist sie als die Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms (13,6 eV)?

GEGEBEN

$$m_p = 1,007276 \text{ u}$$

$$m_n = 1,008665 \text{ u}$$

$$m({}^4\text{He-Kern}) = 4,001506 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

AUFGABE 4 · EINZELARBEIT

Wie alt ist das Holz?

Lebende Bäume nehmen ständig C-14 auf. Nach dem Tod zerfällt es nur noch.

1. Ein Holzstück zeigt noch 25 % der C-14-Aktivität von frischem Holz. Wie alt ist es?
2. Ein anderes zeigt nur noch 10 %. Wie alt ist es?
3. Zusatz: Warum taugt die Methode nicht für Fossilien, die 1 Million Jahre alt sind?

HILFSMITTEL

$T_{\frac{1}{2}}$ C-14) = 5730 Jahre

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}}$$

Tipp zu b: $(\frac{1}{2})^n = 0,1$ heißt $n = \log_2 10 \approx 3,32$

LÖSUNGEN

Aufgaben 3 und 4

Aufgabe 3 · Wie fest hält der Heliumkern?

- a** Massendefekt: Einzelteile minus Kern
 $2 m_p + 2 m_n = 2,014552 \text{ u} + 2,017330 \text{ u}$
 $= 4,031882 \text{ u}$
 $\Delta m = 4,031882 \text{ u} - 4,001506 \text{ u} = 0,030376 \text{ u}$
- b** Bindungsenergie: $E_B = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$
 $E_B = 0,030376 \cdot 931,5 \text{ MeV}$
 $E_B \approx 28,3 \text{ MeV}$
pro Nukleon: $28,3 \text{ MeV} \cdot \frac{1}{4} \approx 7,1 \text{ MeV}$
- c** Zusatz: Vergleich mit 13,6 eV
 $\frac{28,3 \cdot 10^6 \text{ eV}}{13,6 \text{ eV}} 10^6 \cdot 2 \approx$

Aufgabe 4 · Wie alt ist das Holz?

- a** Zerfallsgesetz: $\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2}^n$ mit $n = \frac{t}{T_{1/2}}$
 $0,25 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \rightarrow n = 2$
t = 2 · 5730 Jahre ≈ 11 500 Jahre
- b** $= 0,10 \frac{1}{2}^n \rightarrow n = \log_2 10$
 $n \approx 3,32$
t = 3,32 · 5730 Jahre ≈ 19 000 Jahre
- c** Zusatz: Wie viele Halbwertszeiten?
 $n = \frac{10^6 \text{ Jahre}}{5730 \text{ Jahre}} \approx 175$
 $\left(\frac{1}{2}\right)^{175} \approx 10^{-53} \rightarrow \text{nichts mehr messbar}$

Warum ist ein Atom so groß, wie es ist?

$$\Delta x \cdot \Delta p \gtrsim \hbar$$

Wer ein Teilchen einsperrt, zwingt es zu Bewegung. Je enger der Käfig, desto größer der Impuls.

1 · Einsperren

Elektron im Atom: $\Delta x \approx 0,1 \text{ nm}$

$$p \cdot c \approx \frac{\hbar c}{\Delta x} 2000 \approx \text{eV}$$

2 · Energie

Mindestens diese Bewegungsenergie

$$E \approx \frac{(pc)^2}{2m_e c^2} \approx 4 \text{ eV}$$

3 · Vergleich

Passt zu den 13,6 eV vom Anfang. Ein kleineres Atom bräuchte mehr Energie – darum kollabiert es nicht.

Im Kern ist Δx etwa 100 000-mal kleiner – so landet man bei Energien im MeV-Bereich.

FRAGERUNDE

Fragen?

Viel Erfolg in der 2. Runde!