

44 Die Struktur der Atomkerne

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand September 2012)

Atom und Atomkern

A1 In Abb. 1 siehst du die Auswertung der Streuversuche von α -Teilchen an einer Goldfolie (siehe auch A5 und Abb. 4). Wie groß ist statistisch gesehen das Verhältnis der Teilchen, die um 20° bzw. 120° abgelenkt werden? Erkläre mit Hilfe der Grafik, warum man sehr viele Teilchen durch die Folie schießen muss, um auch starke Ablenkungen zu erhalten.

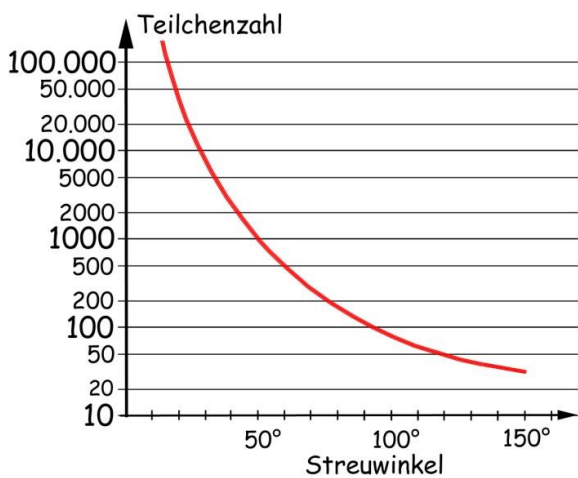


Abb.1: Auswertung der Streuversuche von α -Teilchen an einer Goldfolie (Grafik: Martin Apolin).

A2 a Berechne den Durchmesser eines Gold-Atomkerns mit Hilfe der Formel $r \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$ m, wobei A die Massenzahl (Atomgewicht) des Elements darstellt. Verwende dazu Abbildung 2.

	Gruppe							
	7	8	9	10	11	12		
Ordnungszahl	25	26	27	28	29	30		
Name	Mangan	Eisen	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink		
Atomgewicht	54,938	55,845	58,933	58,693	63,546	65,38		
Elektronenkonfiguration	2/8/13/2	2/8/14/2	2/8/15/2	2/8/16/2	2/8/18/1	2/8/18/2		
Symbol	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn		
	43	44	45	46	47	48		
Name	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium		
Atomgewicht	98,91	101,07	102,91	106,42	107,87	112,41		
Elektronenkonfiguration	2/8/18/13/2	2/8/18/15/1	2/8/18/16/1	2/8/18/18	2/8/18/18/1	2/8/18/18/2		
Symbol	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd		
	75	76	77	78	79	80		
Name	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksilber		
Atomgewicht	186,21	190,23	192,22	195,08	196,97	200,59		
Elektronenkonfiguration	2/8/18/32/13/2	2/8/18/32/14/2	2/8/18/32/15/2	2/8/18/32/17/1	2/8/18/32/18/1	2/8/18/32/18/2		
Symbol	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg		

Abb. 2: Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente (Quelle: Wikipedia).

A2 b Atome haben keine festen Grenzen. Man kann aber in Festkörpern den Atomdurchmesser abschätzen.

Nimm dazu exemplarisch Gold (Dichte $\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$) und gehe folgendermaßen vor:

- 1) Berechne zuerst die Masse von einem Mol Gold. Ein Mol hat $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Die Massenzahl A eines Stoffes gibt auch gleichzeitig die Molmasse in Gramm an.
- 2) Nimm an, dass jedes Atom einen würfelförmigen Raum beansprucht und berechne die Seitenlänge des „Atom-Würfels“. Setze diese Seitenlänge gleich dem Durchmesser des Goldatoms.

A2 c In welchem Verhältnis stehen die Größe des Atomkerns von Gold und die des gesamten Atoms? Wie groß wäre das Atom, wenn der Kern 1 cm groß wäre?

A3 Ordne die folgenden stichwortartigen Beschreibungen der Atommodelle richtig in der Tabelle ein:

- a) Um einen positiven Kern kreisen negative Elektronen
- b) Atome sind unteilbare Kugeln
- c) Elektronen haben keine Bahnen, sondern Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (Orbitale)
- d) wie Rutherford-Modell, aber Elektronen „dürfen“ nur auf bestimmten Bahnen kreisen
- e) Elektronen befinden sich wie Rosinen im positiven Atomkuchenteig

Atommodell	Jahr	stichwortartige Beschreibung
DEMOKRIT	-400	
THOMSON weist die Existenz von Elektronen nach		
THOMSON	1897	
RUTHERFORD weist den positiv geladenen Atomkern nach		
RUTHERFORD	1911	
Gase haben Linienspektren		
BOHR	1913	
Atome zerstrahlen nicht und kollabieren nicht		
HEISENBERG UND SCHRÖDINGER	um 1926	

Tab. 1: Entwicklung des Atommodells sowie (grau unterlegt) experimentelle Erkenntnisse und Tatsachen, die zu dieser Entwicklung geführt haben.

A4 a Was versteht man unter einem Elektronvolt?

b Welche Spannung herrscht zwischen dem Proton und dem Elektron in einem Wasserstoffatom? Hilf dir mit Abb. 3 (nächste Seite) und mit A4 a.



Abb. 3: a) Das Elektron des Wasserstoffs befindet sich als „Wolke“ um das Proton. b) Das Elektron wird vom Atomkern abgelöst. Dazu braucht man 13,6 eV (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 22.18, S. 77, BB6).

A5 a RUTHERFORD schoss bei seinem berühmten Experiment α -Teilchen auf eine Goldfolie (siehe Abb. 4). α -Teilchen haben Energie von 2 bis 5 MeV. Rechne die höchstmögliche Energie von α -Teilchen in Joule um.

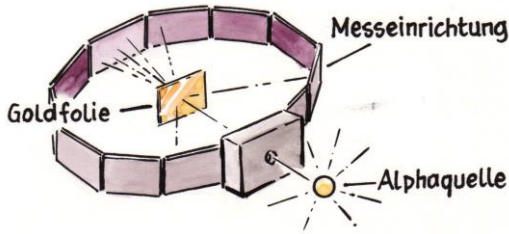


Abb. 4: Schematischer Aufbau des Rutherford-Experiments. Es war gewissermaßen das erste „Teilchenbeschleuniger-Experiment“ (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 44.3, S. 54).

A5 b Die Kraft, mit der eine Ladung eine andere anzieht, wird durch das Coulomb-Gesetz beschrieben: $F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$. Leite daraus durch Integration eine Formel für die Arbeit ab, die nötig ist, um eine negative Ladung im elektrischen Feld einer positiven Ladung vom Abstand r_0 ins Unendliche zu schieben. Diese Arbeit entspricht dann der potenziellen Energie der verschobenen Ladung im Unendlichen. Es gilt allgemein: Arbeit ist Kraft mal Weg.

A5 c Nimm an, ein α -Teilchen im Rutherford-Experiment hat 5 MeV. Berechne mit Hilfe der Ergebnisse von A5 a und b, wie nahe das Teilchen an einen Goldkern herankommen kann. Hilf dir mit Abb. 2! Nimm an, dass das α -Teilchen zentral auf den Kern trifft. Es läuft dann den Potenzialberg hinauf, bis es zum Stillstand kommt

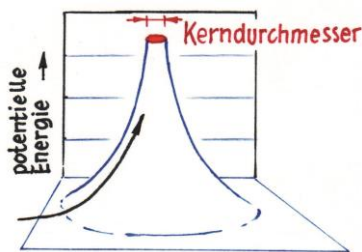


Abb. 5 (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin)

(Abb. 5). Die Einheitsladung beträgt $1,9 \cdot 10^{-19}$ C und ϵ_0 hat den Wert $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm.

A5 d Überlege mit Hilfe der Ergebnisse aus A2 a und A5 c, ob das α -Teilchen im Idealfall auf den Goldkern prallt oder nicht.

A6 a Schätze die Dichte eines Atomkerns ab. Nimm dazu exemplarisch ein Proton ($1,7 \cdot 10^{-27}$ kg), also einen Wasserstoffkern, und verwende die Gleichung für den Radius eines Atomkerns: $r \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$ m (siehe auch A2 a).

A6 b Welches Volumen hätte ein Mensch, wenn man den gesamten Raum zwischen den Atomen wegnehmen könnte und die Atomkerne dann dicht an dicht gepackt wären? Welche Seitenlänge hätte er auf Würfelform gebracht? Rechne in Größenordnungen und hilf dir mit Tabelle 2.

	ungefähre Dichte in kg/m ³
Helium	0,18
Luft, 20 °C, Normaldruck	1,20
Kohlenstoffdioxid	1,98
Olivenöl	910
Eis 0 °C	917
Mensch, eingeatmet	940– 990
Wasser, 4 °C	1000
Mensch, ausgeatmet	1010–1100
Meerwasser normal	1025
Totes Meer	1170
Quecksilber	13546

Tab. 2: einige Beispiele für Dichten (siehe auch Tab. 2.3, S. 17, BB5)

A6 c Neutronensterne haben Dichten, die um die Größenordnung 10^{17} kg/m³ liegen. Was kann man daraus schließen? Hilf dir mit der Antwort auf A6 a.

Neutronen, Protonen, Isotope

A7 Versuche möglichst einfach abzuschätzen, aus wie vielen Atomen ein Mensch besteht. Nimm dazu vereinfacht an, dass der Mensch zu 100 % aus Wasser besteht. Das ist gar nicht so falsch, denn in der Realität besteht der Mensch tatsächlich zu etwa 60 bis 80 % aus Wasser. Zur Berechnung brauchst du die Molmasse von Wasser. Die Molmasse ist die Summe der Massenzahlen des Stoffes in Gramm. Hilf dir da-

bei mit Abb. 6 auf der nächsten Seite. Ein Mol hat $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

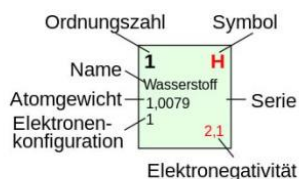


Abb. 6 zu A7 (Quelle: Wikipedia)

5 Bor 10,811 2/3	6 Kohlenstoff 12,011 2/4	7 Stickstoff 14,007 2/5	8 Sauerstoff 15,999 2/6	9 Fluor 18,988 2/7
13 Aluminium 26,982 2/8/3	14 Silicium 28,086 2/8/4	15 Phosphor 30,974 2/8/5	16 Schwefel 32,065 2/8/6	17 Chlor 35,453 2/8/7

A8 Das Isotop C-14 ist extrem selten. Schätze ab, wie viele C-14-Atome sich in einem Menschen befinden! Nimm für die Masse wieder 100 kg an (siehe A7). Verwende für deine Abschätzung Tab. 3 und 4.

Element	Massen-Prozent	absolute Masse bei einer Körpermasse von...	
		60 kg	80 kg
Sauerstoff	64 %	38,4 kg	51,2 kg
Kohlenstoff	20 %	12 kg	16 kg
Wasserstoff	10 %	6 kg	8 kg
Stickstoff	3 %	1,8 kg	2,4 kg
Calcium	1,5 %	0,9 kg	1,2 kg
Phosphor	1 %	0,6 kg	0,8 kg
Rest	0,5 %	0,3 kg	0,4 kg

Tab. 3: Die Massenanteile des Menschen nach Elementen sortiert. Zur besseren Anschaulichkeit sind in der letzten Spalte die absoluten Massenwerte für zwei konkrete Beispiele angegeben. Die Zahlen sind als Richtwerte zu sehen.

	Masse in u	Kernladungszahl Z	Neutronenzahl N	Nukleonenzahl A	relative Häufigkeit
e	0,00055	-	-	-	-
n	1,00728	0	1	1	-
p	1,00867	1	0	1	-
^1_1H	1,00783	1	0	1	0,99985
^2_1H	2,01410	1	1	2	0,00015
^3_1H	3,01603	1	2	3	radioaktiv
$^{12}_6\text{C}$	12,00000	6	6	12	0,9889
$^{13}_6\text{C}$	13,00335	6	7	13	0,0111
$^{14}_6\text{C}$	14,00324	6	8	14	$1,3 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 4: Einige Isotope und der Vergleich mit Elektron und Nukleonen. Die atomare Masseneinheit u wurde als 1/12 der Masse eines C-12-Atoms festgelegt und hat absolut $1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg (siehe auch Tab. 44.2, S. 56)

A9 Wie viele Deuterium-Atome befinden sich größenordnungsmäßig in dem Schnapsglas, wenn du es mit Wasser füllst? Verwende für deine Berechnung Tab. 4 und hilf dir mit A7.

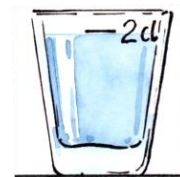
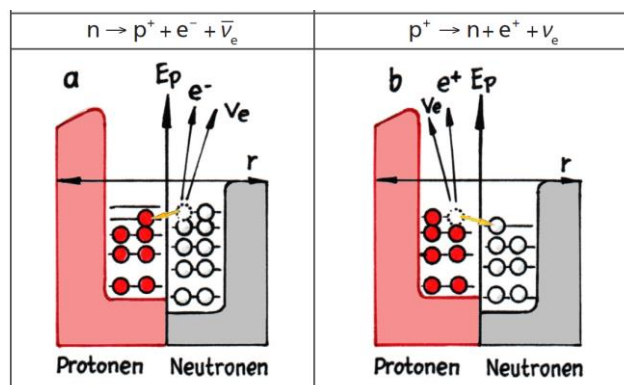


Abb. 7 (Grafik: Janosch Slama)

A10 Wenn im Kern zu viele Neutronen oder Protonen sind, kommt es zum β -Zerfall. Dabei kann man zwei Fälle unterscheiden: Ein Neutron kann in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 5a). Ein Proton kann in ein Neutron, ein Positron (Anti-Elektron) und ein Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 5b).

Ein einzelnes Neutron, also eines, das sich nicht in einem Kern befindet, kann ebenfalls so wie in Fall a zerfallen. Ein einzelnes Proton kann jedoch *nicht* so wie in Fall b zerfallen. Diesen Zerfall gibt es nur in Atomkernen. Warum? Hilf dir mit Tabelle 6. Die Neutrinomasse liegt im Bereich von 10^{-36} kg.



Tab. 5: Schematische Darstellung von β -Zerfall (a) und β^+ -Zerfall (b). Die Kernenergie sinkt, weil das zerfallende Nukleon auf ein niedrigeres Niveau springt (siehe auch Abb. 45.7, S. 61).

Teilchen	Masse in kg	Ladung	relative Masse
Neutron (n)	$1,675 \cdot 10^{-27}$	neutral	1838,7
Proton (p ⁺)	$1,673 \cdot 10^{-27}$	plus	1836,2
Elektron (e ⁻)	$9,109 \cdot 10^{-31}$	minus	1

Tab. 6

A11 Wenn Protonen ein bisschen schwerer wären als Neutronen (also genau umgekehrt, als es tatsächlich ist), dann könntest du diese Zeilen nicht lesen. Warum? Die Antwort ist etwas komplexer und hat mit dem gesamten Universum zu tun. Überlege mit Hilfe von A10.

A12 In Streuexperimenten konnte man 1969 in Stanford die innere Struktur von Protonen belegen (siehe Abb. 8). Quarks verhalten sich wie punktförmige geladene Teilchen. Welche Energie ist notwendig, um Strukturen in der Größe eines Zehntel Protonendurchmessers zu untersuchen (10^{-16} m)? Verwende die Gleichungen $\lambda = h/p$ und $E = p \cdot c$. Die zweite Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen Energie und Impuls eines Teilchens angibt, folgt aus der Speziellen Relativitätstheorie. Gib das Ergebnis in Elektronvolt an ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Das Planck'sche Wirkungsquantum hat den Wert $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

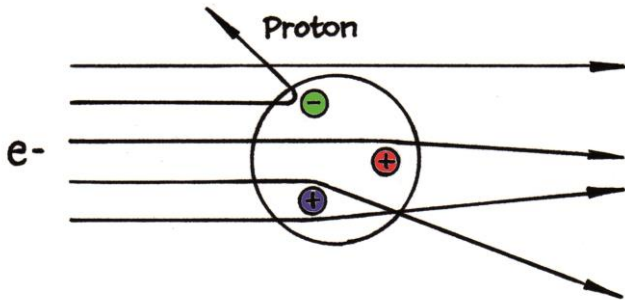


Abb. 8: In Streuexperimenten konnte man 1969 die innere Struktur von Protonen belegen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.13, S. 79).

A13 Es heißt, dass die kleinste in der Natur vorkommende Ladung die Elementarladung ist, die der Ladung der Elektronen und Protonen entspricht. Diese Entdeckung geht auf ROBERT MILLIKAN aus dem Jahr 1907 zurück (siehe Kap. 22.1.2, BB6). Nun bestehen aber Protonen und Neutronen noch einmal weiter aus Quarks (Abb. 9; siehe auch A12), die eine Ladung von $+2/3$ beziehungsweise $-1/3$ besitzen (Abb. 10). Es müsste doch heute möglich sein, dass man in großen Teilchenbeschleunigern wie dem LHC (Large Hadron Collider) am CERN Protonen und Neutronen quasi zerschießt und somit kleinere Ladungen als die Elementarladung freisetzt. Ist das möglich oder nicht? (siehe dazu auch Kap. 47.2.3, S. 80)

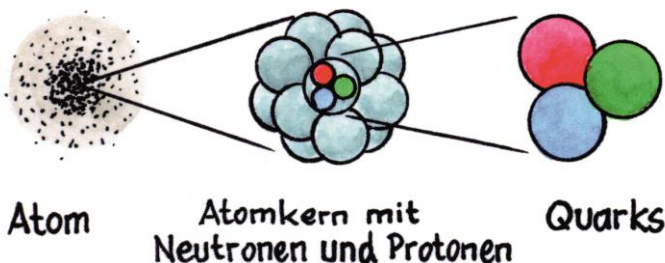


Abb. 9: Während die Elektronen nicht mehr teilbar sind, bestehen Neutronen und Protonen noch einmal aus je drei Quarks (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 22.7, S. 72, BB6).

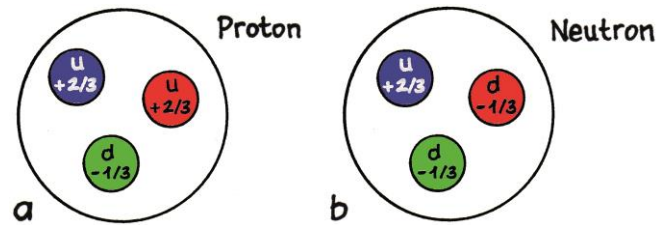


Abb. 10: Protonen und Neutronen sind keine Elementarteilchen, sondern setzen sich aus drei Quarks zusammen. Diese sind punktförmig, hier also übertrieben groß dargestellt. Quarks haben gedrittelte Ladungen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.12, S. 79).

A14 Welche der folgenden Teilchenumwandlungen (Tab. 7) sind erlaubt und welche nicht? Überlege dazu, welcher Erhaltungssatz für die Ladung gilt und was das für eine Teilchenumwandlung bedeutet.

a $p^- + p^+ \Rightarrow \pi^+ + \pi^0$	b $p^- + p^+ \Rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$
c $e^+ + e^- \Rightarrow p^+ + p^-$	d $e^+ + e^- \Rightarrow p^+ + n$
e $\gamma + p^+ \Rightarrow n + \pi^-$	f $\gamma + p^+ \Rightarrow n + \pi^+$

Tab. 7: Mögliche und unmögliche Teilchenumwandlungen. Finde heraus, welche undurchführbar sind. Erklärung: p^+ : Proton, p^- : Antiproton, π^+ , π^- , π^0 : Pi-Mesonen oder Pionen, e^- : Elektron, e^+ : Anti-Elektron oder Positron, n : Neutron, γ : Photon.

Kernkraft und Kernspin

A15 Mit welcher Kraft stoßen einander die zwei Protonen in einem Heliumkern ab ($Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)? Nimm den Abstand zwischen den Protonen mit $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ an. Könntest du mit Muskelkraft die Protonen zusammenhalten? Gib einen Tipp ab, bevor du rechnest!

Gravitationskraft	elektrische Kraft
$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

Tab. 8

A16 Berechne allgemein, um welchen Faktor die elektrische Kraft größer ist als die Gravitationskraft. Nimm dazu ein Proton (p^+) und ein Anti-Proton (p^-). Beide haben die Masse $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und die Ladung $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Sowohl die Gravitation als auch die elektrische Kraft führen zu einer Anziehung. In welchem Verhältnis stehen diese Kräfte? Hilf dir mit Tabelle 8.

A17 Versuche den Massendefekt mit möglichst einfachen Worten zu beschreiben und auch zu begründen. Hilfe dir mit Abb. 11.

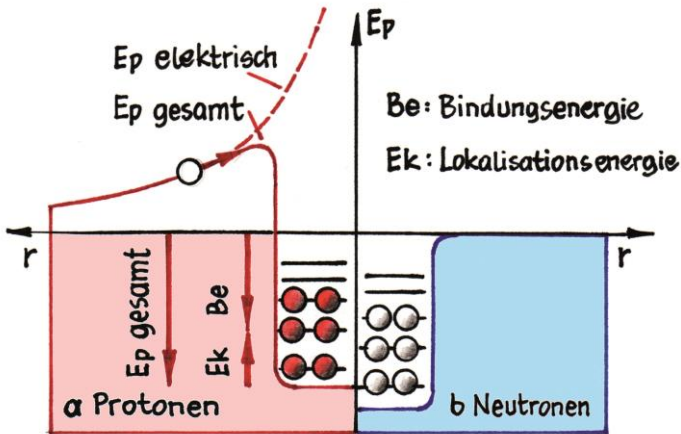


Abb. 11: Schematische Darstellung der Energien beim „Zusammenbauen“ von Atomkernen am Beispiel von C-12 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 44.11, S. 57).

A18 Berechne den Massendefekt eines C-12-Atoms in % mit Hilfe von Tab. 4 und überprüfe das Ergebnis mit Abb. 12.

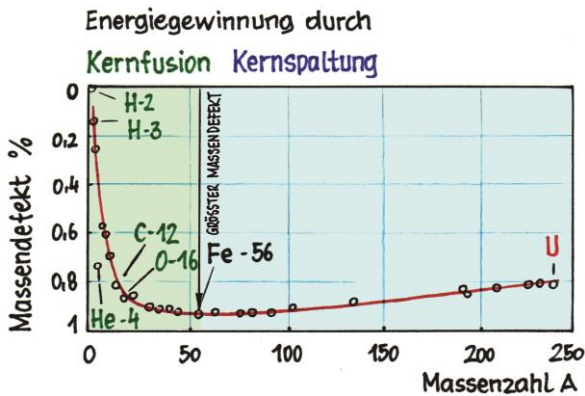


Abb. 12: Massendefekt in Prozent (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 44.13, S. 58).

A19 He-4 tanzt mit seinem extrem großen Massendefekt aus der Reihe (Abb. 12). Wie ist das zu erklären?

Hilfe zu A1: Wenn etwa 50.000 Teilchen um 20° abgelenkt werden, dann werden statistisch gesehen nur rund 50 Teilchen um 120° abgelenkt. Das Verhältnis beträgt also 1000:1. Daraus kann man schließen, dass sehr viele Teilchen durch die Goldfolie fliegen müssen, damit man auch sehr starke Ablenkungen messen kann.

Hilfe zu A2 a: Gold hat eine Massenzahl von etwa 197. Daher ergibt sich für den Durchmesser des Gold-Atomkerns $d = 2r \approx 2,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A} \text{ m} \approx 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ m}$.

Hilfe zu A2 b: Ein Mol Gold hat 197 g. Die Dichte ρ von Gold beträgt $19,3 \text{ g/cm}^3$ oder 19300 kg/m^3 . Aus $\rho = \frac{m}{V}$ folgt $V = \frac{m}{\rho}$. Das Volumen von 1 Mol Gold beträgt daher $0,197 \text{ kg}/(19300 \text{ kg/m}^3) \approx 10^{-5} \text{ m}^3$. Das Volumen eines einzelnen Goldatoms beträgt daher $10^{-5} \text{ m}^3/(6 \cdot 10^{23}) = 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$. Die Seitenlänge des „Gold-Würfels“ und somit auch sein Durchmesser beträgt $d = \sqrt[3]{1,7 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3} = 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Hilfe zu A2 c: Das Verhältnis Atom zu Atomkern beträgt bei Gold $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}/1,4 \cdot 10^{-14} \text{ m} \approx 18.600:1$. Wenn der Kern 1 cm groß wäre, dann wäre das gesamte Goldatom 18.600 cm oder 186 m groß.

Hilfe zu A3:

Atommodell	Jahr	stichwortartige Beschreibung
DEMOKRIT	-400	Atome sind unteilbare Kugeln
THOMSON weist die Existenz von Elektronen nach		
THOMSON	1897	Elektronen befinden sich wie Rosinen im positiven Atomkuchenteig
RUTHERFORD weist den positiv geladenen Atomkern nach		
RUTHERFORD	1911	um einen positiven Kern kreisen negative Elektronen auf beliebigen Bahnen
Gase haben Linienspektren		
BOHR	1913	wie Rutherford-Modell, aber Elektronen „dürfen“ nur auf bestimmten Bahnen kreisen
Atome zerstrahlen nicht und kollabieren nicht		
HEISENBERG UND SCHRÖDINGER	um 1926	Elektronen haben keine Bahnen, sondern Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (Orbitale)

Tab. 9: Entwicklung des Atommodells sowie (grau unterlegt) experimentelle Erkenntnisse und Tatsachen, die zu dieser Entwicklung geführt haben.

Hilfe zu A4 a: Darunter versteht man die potenzielle Energie eines einzigen Elektrons, wenn dieses im Spannungsfeld von 1 V verschoben wird. Seine Energie beträgt dann $E_p =$

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}.$$

Hilfe zu A4 b: Man kann ohne Rechnung überlegen. 1 eV ist die Energie, die nötig ist, um 1 Elektron im Spannungsfeld von 1 V zu verschieben. Wenn für die Ablösung des Elektrons 13,6 eV notwendig sind, muss das Spannungsfeld auch 13,6 V betragen.

Oder rechnerisch: Zum Ablösen des Elektrons ist eine Energie von 13,6 eV notwendig. Aus $E_p = Q \cdot U$ folgt daher $U = E_p/Q = 13,6 \text{ eV}/1 \text{ e} = 13,6 \text{ V}$.

Hilfe zu A5 a: 1 eV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (siehe A4 a). Daher gilt $5 \text{ MeV} = 5 \cdot 10^6 \text{ eV} = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

Hilfe zu A5 b: Es gilt Arbeit ist Kraft mal Weg, also $W = F \cdot s$. Weil in diesem Fall der Weg s dem Radius entspricht, schreiben wir statt dessen r . Die aufgewendete Arbeit entspricht gleichzeitig der potenziellen elektrischen Energie der Ladung. Daher kann man schreiben:

$$\begin{aligned} W = E_p = F \cdot r &= \int_{r_0}^{\infty} F \cdot dr = \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot dr = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{r^2} \cdot dr \\ &= \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_0}^{\infty} r^{-2} \cdot dr = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} [-1 \cdot r^{-1}]_{r_0}^{\infty} \\ &= \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_0}^{\infty} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(0 - \left(-\frac{1}{r_0} \right) \right) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_0} = E_p \end{aligned}$$

Hilfe zu A5 c: Eine kinetische Energie von 5 MeV sind umgerechnet $8 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ (siehe A5 a). Nehmen wir an, dass das Teilchen zentral auf den Kern trifft. Es läuft dann quasi den Potenzialberg hinauf, bis es zum Stillstand kommt. Nach dem Energiesatz wird dabei die kinetische Energie in potenzielle umgewandelt und man kann sie gleichsetzen. Die potenzielle elektrische Energie ist $E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_0}$ (siehe A5 b). Dabei ist r_0 der Abstand der beiden Ladungen. Wenn man umformt, erhält man $r_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{E_p}$. Das α -Teilchen hat die Ladungszahl 2, der Goldkern 79 (siehe Abb. 2). Wenn man nun wegen der Energieerhaltung E_p durch E_k ersetzt und die bekannten Werte einsetzt, erhält man $r_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{8 \cdot 10^{-13}} \approx 4,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}$.

Hilfe zu A5 d: Ein Goldkern hat einen Radius von $1,3 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ bzw. einen Durchmesser von $2,6 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ (siehe A2 b). Selbst die schnellsten α -Teilchen kommen bei einem zentralen Stoß, der extrem unwahrscheinlich ist, nur auf $4,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ heran. Sie sind also trotz idealster Bedingungen

noch mehr als einen Goldkern-Durchmesser vom Kern entfernt.

Hilfe zu A6 a: Wasserstoff hat das Atomgewicht 1 und daher gilt $r \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{1} \text{ m} = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. Das Proton hat ein Volumen von $V = \frac{4r^3\pi}{3}$. Wenn du den Radius des Protons einsetzt, erhältst du für das Volumen $7,2 \cdot 10^{-45} \text{ m}^3$. Dichte ist Masse pro Volumen und daher $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} / (7,2 \cdot 10^{-45} \text{ m}^3) = 2,4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$.

Hilfe zu A6 b: Die Dichte des Menschen liegt zwischen 940 und 1100 kg/m^3 . Das ist kein Wunder, weil wir zu etwa 60 bis 80 % aus Wasser bestehen (siehe auch A7). Weil wir in Größenordnungen rechnen, nehmen wir daher eine Dichte von 10^3 kg/m^3 an. Wenn wir annehmen, unser Modellmensch hat 100 kg, dann hat er somit ein Volumen von $0,1 \text{ m}^3$ (weil $\rho = m/V$ und daher $V = m/\rho$). Die Dichte von Atomkernen liegt bei 10^{17} kg/m^3 , ist also um den Faktor 10^{14} größer. Es gilt $V \sim 1/\rho$. Ein Mensch, dem man also quasi den Zwischenraum herausnimmt, hätte somit statt eines Volumens von 10^{-1} m^3 nur mehr ein Volumen von 10^{-15} m^3 . Für den Würfel gilt $V = a^3$ und somit $a = \sqrt[3]{V}$. Auf Würfelform gebracht hätte ein Mensch daher eine Seitenlänge von 10^{-5} m oder 10^{-2} mm , also $1/100 \text{ mm}$. Mit freiem Auge wären wir also dann nicht mehr sichtbar!

Hilfe zu A6 c: Durch den unglaublichen Gravitationsdruck kollabieren die Atome und die Elektronen werden salopp gesagt in die Protonen gedrückt. Man spricht vom inversen β -Zerfall: $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$ (siehe Kap. 47.3, S. 84). Die Atome werden durch die Schwerkraft quasi zu einem Neutronenbrei zermatscht, und die Neutronen liegen dann ohne Zwischenraum dicht aneinander. Daher liegt die Dichte eines Neutronensterns in der Größenordnung der Dichte von Atomkernen.

Hilfe zu A7: Nehmen wir vereinfacht an, dass ein Mensch 100 kg hat und zu 100 % aus Wasser besteht. Wir suchen daher die Atome in 100 kg Wasser. Sauerstoff hat die Massenzahl 16. Die Molmasse von Wasser (H_2O) ist daher $2 \cdot 1 \text{ g} + 16 \text{ g} = 18 \text{ g}$. 100 kg (10^5 g) Wasser entsprechen daher $10^5 \text{ g} / (18 \text{ g/Mol}) = 5556 \text{ Mol}$ oder rund $6 \cdot 10^{23} \cdot 5556 = 3,3 \cdot 10^{27}$ Molekülen. Weil ein Molekül Wasser aus drei Atomen besteht, hat unser Mensch daher rund 10^{28} Atome.

Hilfe zu A8: Ein Mensch besteht zu rund 20 % aus Kohlenstoff (Tab. 3). Bei einer Person mit 100 kg sind das 20 kg. Kohlenstoff hat die Massenzahl 12, und daher hat 1 Mol

Kohlenstoff 12 g. Der Mensch besteht daher aus etwa $2 \cdot 10^4 \text{ g} / (12 \text{ g/Mol}) = 1667 \text{ Mol}$ Kohlenstoff, das sind $6 \cdot 10^{23} \cdot 1667 \approx 10^{27}$ Atome. Rund jedes 10^{12} te dieser C-Atome ist ein C-14-Atom (Tab.4). Obwohl C-14 extrem selten ist, besitzt ein Mensch trotzdem rund 10^{15} Atome davon!

Hilfe zu A9: Wasser hat eine Molmasse von 18 g (siehe A7). Im Schnapsglas sind 2 cl = 0,02 l, und das sind in etwa 0,02 kg oder 20 g Wasser. Das entspricht also ziemlich genau einem Mol Wasser oder $6 \cdot 10^{23}$ Wassermolekülen und somit $1,2 \cdot 10^{24}$ H-Atomen. Die relative Häufigkeit von Deuterium ist 0,00015 (= $1,5 \cdot 10^{-4}$; Tab. 4). Daher befinden sich im Schnapsglas etwa $1,2 \cdot 10^{24} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \approx 2 \cdot 10^{20}$ Deuterium-Atome.

Hilfe zu A10: Bei Reaktion a sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe kleiner als die des Neutrons. Ein Neutron hat $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Zerfallsprodukte haben $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} + 10^{-33} \text{ kg} \approx 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die restlichen $0,001 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ werden über $E = mc^2$ als Energie frei. Bei Reaktion b sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe jedoch größer als die des Protons. Ein Proton hat $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Zerfallsprodukte haben $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} + 10^{-33} \text{ kg} \approx 1,676 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Es fehlt also eine Masse von etwa $0,003 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Wenn sich das Proton im Atomkern befindet, kann es die fehlende Masse über $E = mc^2$ aus der überschüssigen Energie des Kerns bekommen.

Hilfe zu A11: Wenn die Masse der Protonen größer wäre als die der Neutronen, dann könnten freie Protonen spontan wie in Tab. 5 b zu Neutronen zerfallen. Protonen sind aber nichts anders als Wasserstoffkerne. Wenn alle Protonen zu Neutronen zerfallen, dann könnte auch kein Wasserstoff existieren, und die Sterne hätten keinen Brennstoff. Die Sterne würden nicht leuchten, und es könnten auch keine höheren Elemente entstehen. Schlechte Aussichten für Leben im Universum!

Hilfe zu A12: Damit man eine Struktur in der Größe von 10^{-16} m untersuchen kann, muss die Wellenlänge zumindest in derselben Größenordnung oder darunter liegen. Wenn man die erste Gleichung nach p umformt ($p = h/\lambda$) und in die zweite einsetzt, erhält man $E = hc/\lambda$. Wenn man die bekannten Werte einsetzt, erhält man für $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 10^{-16} \text{ J} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 13 \cdot 10^9 \text{ eV} = 13 \text{ GeV}$. Als man die Quarkstruktur der Protonen belegte, verwendete man Elektronen mit einer Energie von 20 GeV - man ging also auf Nummer sicher!

Hilfe zu A13: Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft sinkt die starke Kraft nicht ab, wenn man den Abstand der Teilchen erhöht (Abb. 13). Je weiter man zwei Quarks „auseinander zieht“, desto größer ist die Energiemenge, die man in das System stecken muss. Bei einem Abstand von 10^{-15} m ist die investierte Energie so hoch, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht (Abb. 14 b/c). Übrig bleiben das ursprüngliche Proton und ein neu erzeugtes Meson, etwa ein π -Teilchen. Genau das passiert in Teilchenbeschleunigern. Natürlich werden dort Protonen nicht auseinander gezogen, sondern mit hoher Geschwindigkeit beschossen. Aber das Ergebnis ist dasselbe. Das bedeutet, dass es zwar kleinere Ladungen als die Elementarladung gibt, man diese aber niemals frei beobachten kann.

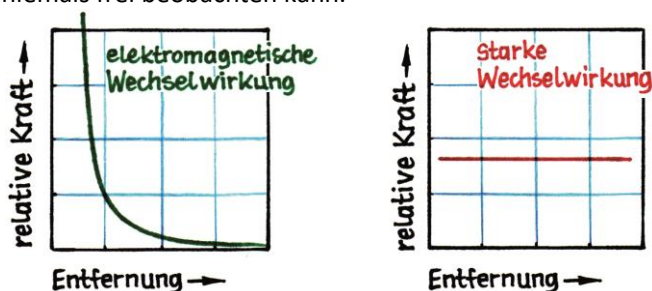


Abb. 13 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.20, S. 82).

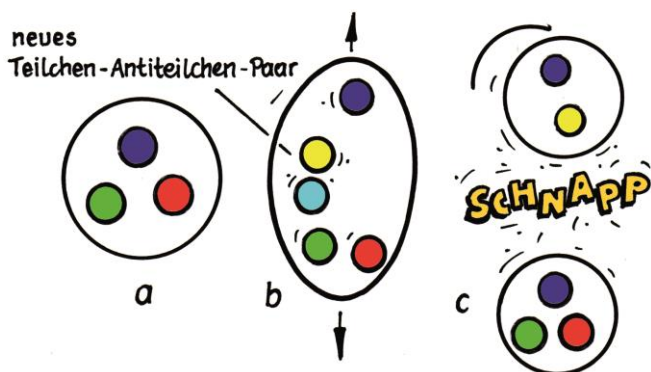


Abb. 14 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.21, S. 82).

Hilfe zu A14: In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtladung immer gleich groß. Es können aber gleich viele positive und negative Ladungen entstehen oder vernichtet werden. Daher können die Reaktionen a, d (jeweils vorher elektrisch neutral und nachher positiver Ladungsüberschuss) und e (vorher positiver Ladungsüberschuss, nachher negativer) nicht vorkommen.

Hilfe zu A15: Wenn du die bekannten Werte einsetzt, erhältst du $F_E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(1,5 \cdot 10^{-15})^2} \text{ N} = 102 \text{ N}$. Das entspricht etwa der Kraft, mit der 10 kg von der Erde angezogen werden. Es wäre möglich, aber sehr anstrengend, auch

nur 2 Protonen mit Daumen und Zeigefinger zusammenzuhalten. Bei Elementen mit mehr Protonen wäre es schlichtweg unmöglich.

Hilfe zu A16: $\frac{F_E}{F_G} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}}{G \frac{m_1 m_2}{r^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{G m_1 m_2}$. Wenn du nun die bekannten Werte einsetzt, erhältst du $\frac{F_E}{F_G} = \frac{8,99 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (1,673 \cdot 10^{-27})^2} = 1,23 \cdot 10^{36}$. Die elektrische Kraft zwischen Proton und Antiproton ist also rund um den Faktor 10^{36} größer als die Gravitationskraft.

Hilfe zu A17: Als Massendefekt bezeichnet man den Unterschied zwischen der Summe der Einzelmassen aller Nukleonen und der tatsächlich gemessenen Gesamtmasse des Atomkerns. Warum ist aber die Masse geringer? Weil das Nukleon nach dem "Einbau" eine geringere potenzielle Energie hat. Nach $\Delta m = \Delta E/c^2$ hat diese Energie aber eine Masse, und daher verliert das Nukleon gleichzeitig mit der Energie etwas Masse. Wie geht die Energie verloren? Sie wird in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt.

Hilfe zu A18: Die Massen der Einzelteile eines C-12-Atoms haben $6 \cdot 0,00055 \text{ u} + 6 \cdot 1,00728 \text{ u} + 6 \cdot 1,00867 \text{ u} = 12,099 \text{ u}$. Ein C-12-Atom hat exakt 12 u . Der Massendefekt beträgt daher $12,099/12 = 1,00825$, das entspricht also $0,83 \%$ und das deckt sich mit der Angabe in Abb. 11.

Hilfe zu A19: Ähnlich wie bei den Elektronen können sich auch bei den Nukleonen nur jeweils 2 in einem Orbital aufhalten. Bei He-4 befinden sich jeweils zwei Protonen und Neutronen im niedrigsten Energiezustand. Das macht den Kern so stabil.