3 Woraus alles besteht

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand März 2011)

Atom und Atommodell

A1 a Wie lang wachsen Haare in einem Jahr in Zentimetern nach? Rechne diese Angabe in SI-Einheiten um (siehe Tab. 2.1, S. 11), und vergleiche dein Ergebnis mit dem Wert in Tab. 6.1 auf S. 56.

b Atome haben einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m. Wie viele „Lagen" Atome müssen an der Haarwurzel pro Sekunde eingebaut werden, damit sich die Haarspitze mit der oben berechneten Geschwindigkeit voranschieben kann? Schlage dazu den durchschnittlichen Atomdurchmesser nach (siehe S. 21, Kap. 3.2).

A2 Wie viele Schichten Atome verliert ein Autoreifen pro Umdrehung? Um das abzuschätzen, musst du dir vorher überlegen, wie viele Fahrtkilometer ein Reifen etwa aushält und wie viel Profil dabei abgefahren wird. Schlage den durchschnittlichen Atomdurchmesser nach (siehe S. 21, Kap. 3.2).

A3 Jede beschleunigte Ladung erzeugt eine elektromagnetische Welle (siehe Kap. 33.1, BB7). Begründe, dass „kreisende Elektronen", wie sie im Rutherford'schen und Bohr'schen Atommodell vorkommen, beschleunigt sind, und daher strahlen müssen.

A4 In Abb. 1 siehst du die Flagge der Internationalen Atom-Energie-Behörde (International Atomic Energy Agency, IAEA). Was ist dazu zu sagen?

Abb. 1: Die Flagge der Internationalen Atom-Energie-Behörde (International Atomic Energy Agency, IAEA).

A5 Was musst du in der Apotheke kaufen, wenn du Supernovareste möchtest? Lies zur Hilfe den Schluss von Kap. 3.4 durch und verwende das Periodensystem auf Seite 23.

A6 Du bittest einen physikalisch bewanderten Frisör, dir 100 Millionen Atomschichten an den Haaren wegzuschneiden. Wie viel ist das?

Mol und Masseneinheit

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 sooo falsch, denn in der Realität besteht der Mensch tatsächlich zu etwa 60 bis 80 % aus Wasser. Zur Berechnung brauchst du die Molmasse von Wasser (siehe Kap. 3.5, S. 28).

A8 Versuche möglichst einfach die Anzahl der Atome im Sonnensystem abzuschätzen. Die Masse der Sonne findest du in A9, die Masse des Jupiters beträgt rund $2 \cdot 10^{27}$ kg. Verwende für deine Überlegungen auch Tab. 12.1 (S. 12, BB6).

A9 Schätze die Masse des sichtbaren Universums ab. Nimm dazu folgendes an:
1) Die Sonne ist ein durchschnittlicher Stern und ihre Masse beträgt $2 \cdot 10^{30}$ kg.
2) Galaxien haben im Schnitt 10^{11} Sterne.
3) Man schätzt die Anzahl der Galaxien im sichtbaren Universum auf 10^{11}.
4) Der sichtbare Teil des Universums macht nur einen Bruchteil der Masse aus. Siehe dazu Abb. 2.

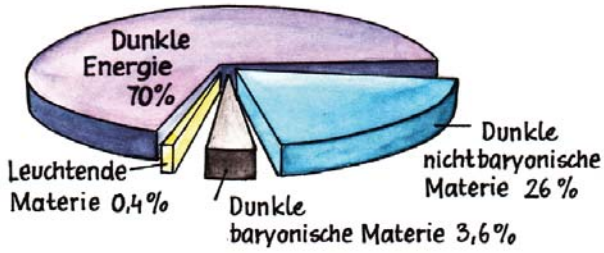


Abb. 2: Woraus aus heutiger Sicht das Universum besteht. Nur der mickrige Anteil von 0,4 % zeigt sich uns in Form von Sternen und Galaxien (Grafik: Janosch Slama; siehe Abb. 50.25, Kap. 50).

A10 Schätze die Atome im sichtbaren Universum ab. Dazu brauchst du das Ergebnis aus A9 und Abb. 2. Die Anzahl der Atome ergibt sich aus der leuchtenden und der dunklen baryonischen Materie. Zu den Baryonen gehören auch die Protonen und Neutronen, die die Atomkerne ausmachen.

E = *mc*² und Isotope

A11 Eine Näherungsformel für den Atomradius lautet $r = 1{,}2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{\mathrm{Massenzahl}}\ \mathrm{m}$. Berechne mit dieser Formel den Radius eines Protons.

A12 Das Isotop C-14 ist extrem selten. Auf 10^{12} Kohlenstoffatome kommt nur ein einziges C-14-Atom. Schätze ab, wie viele C-14-Atome sich in einem Menschen befinden!

A13 Nimm an, dass du einen Teekessel während des Erwärmens auf eine supergenaue Waage stellst. Wir nehmen an, dass kein Wasserdampf entweichen kann (so wie bei einem Druckkochtopf). Was könntest du beobachten? Und wie wäre das, wenn du eine volle und eine leere Batterie abwiegst?

A14 Wie sehr nimmt die Masse von 1 l Wasser zu, wenn du es von Zimmertemperatur (20 °C) zum Kochen bringst und dabei kein Dampf austritt? Die Spezifische Wärmekapazität beträgt rund 4200 kJ/(kg·K) (siehe Kap. 18.3, „Big Bang 6"). Wie viel Masse verliert eine Batterie beim Entleeren? Eine volle Standardbatterie (AA) hat rund 4000 Coulomb (siehe Kap. 23.1.3, BB6).

Abb. 3: Diese Standardbatterie Typ AA hat laut Hersteller einer Ladung von 4000 Coulomb.

A15 Nachdem man mit 5 kg Antimaterie so zirka den Jahresenergiebedarf von Österreich decken kann, stellt sich die Frage, warum man nicht tatsächlich Antimaterie herstellt. Wären dann die „Energieprobleme" nicht mit einem Schlag gelöst?

Radioaktivität

A16 Radioaktive Stoffe strahlen in irgendeiner Weise und geben dabei Energie ab. Nun kann aber Energie weder erzeugt noch vernichtet werden. Wie sind diese beiden Tatsachen unter einen Hut zu bringen?

A17 Mit der C-14-Methode kann man das Alter von Stoffen nur auf etwa 55.000 Jahre rückdatieren. Für ältere Proben eignet sich die Methode nicht. Warum?
A18 Es gibt den - natürlich bildlich - gemeinten Spruch: „Das Wissen in der Medizin hat eine Halbwertszeit von 6 Jahren." Was ist damit gemeint?

A19 In Tabelle 1 siehst du ein breites Spektrum von Stoffen und deren Halbwertszeit. Welche Aussage kannst du über die Stabilität der einzelnen Isotope treffen? Ist der körperliche Kontakt mit kurzlebigen oder langlebigen Isotopen schädlicher (Stichwort Nuklearmedizin)? Überlege dir weiters, wie Wasserstoff-7 aufgebaut sein muss.

Element	$T_{1/2}$	Ursprung bzw. Anwendung
Tellur-128; β^-	$7{,}7 \cdot 10^{24}$ a	natürliches Isotop mit unvorstellbarer Halbwertszeit; das Universum ist „nur" $1{,}4 \cdot 10^{10}$ Jahre alt
Uran-238; α	$4{,}5 \cdot 10^{9}$ a	natürlich vorkommendes, langlebiges Uran-Isotop
Uran-235; α	$7 \cdot 10^{8}$ a	wird in Brennstäben als spaltbares Element verwendet (Kap. 47.1)
Kohlenstoff-14; β	5736 a	Altersbestimmung
Cäsium-137; β^-	30,2 a	„Tschernobyl-Isotop"
Radon-222; α	3,82 d	macht den Großteil der natürlichen Strahlungsbelastung aus
Iod-131; β^-	8 d	„Tschernobyl-Isotop"
Iod-123; γ	13,2 h	Nuklearmedizin (Szintigraphie, Kap. 46.3)
Uran-228; α	9,1 m	kurzlebiges Uran-Isotop
Sauerstoff-15; β^-	2 m	Nuklearmedizin (PET-Scanner, Kap. 46.3)
Wasserstoff-7	$2 \cdot 10^{-23}$ s	Wasserstoffisotop mit extrem kurzer Halbwertszeit

Tab. 1: Beispiele für den extremen Unterschied in den Halbwertszeiten (siehe Tab. 46.2, S. 62, BB8).

A20 Zeichne die Zerfallskurve zweier hypothetischer Stoffe mit einer Halbwertszeit von 1 bzw. 2 Sekunden in ein Diagramm für die ersten 10 Sekunden ein.

A21 Du willst eine Sonde, die du ins All schießt, mit einer radioaktiven Energieversorgung ausrüsten. Du hast die Wahl zwischen zwei Varianten mit gleicher Masse. **Variante a** verwendet ein Isotop mit einer Halbwertszeit von 1/2 Jahr. **Variante b** ist zu Beginn nur halb so radioaktiv (gibt also nur die halbe Leistung ab), hat dafür aber eine Halbwertszeit von 1 Jahr. Welche Variante wirst du sinnvoller Weise wählen?

Hilfe zu A1 a: Wenn man annimmt, dass Haare in einem Jahr 12 cm wachsen, dann ergibt das eine Wachstumsgeschwindigkeit von $3{,}8 \cdot 10^{-9}$ m/s (10 cm pro Jahr entsprechen $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ m/s).

Hilfe zu A1 b: Atome haben einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m. Daher müssen also an den Haarwurzeln etwa 30 bis 40 „Atomschichten" pro Sekunde eingelagert werden.

Hilfe zu A2 a: Wir nehmen für unsere Schätzung an, dass ein neuer Satz Reifen (abhängig von der Härte) in der Regel etwa 30.000 km hält, und dass dabei etwa 1 cm (0,01 m) Profiltiefe abgefahren wird. Ein Autoreifen hat einen Durchmesser von etwa 65 cm (26 Zoll). Der Umfang des Reifens beträgt daher etwa 2 m. Bei einer Strecke von 30.000 km sind daher knapp 15 Millionen Umdrehungen nötig. Pro Umdrehung geht daher eine Gummischichte von 0,01 m/ $(1{,}5 \cdot 10^{7})$ $\approx 7 \cdot 10^{-10}$ m verloren, also eine knapper Nanometer. Atome haben Durchmesser in der Größenordnung von 10^{-10} m. Daher werden pro Umdrehung etwa 7 Atomschichten abgefahren.

Hilfe zu A3: Jede Änderung der Geschwindigkeit nennt man in der Physik eine Beschleunigung (siehe Kap. 4.1, S. 35). Daher sind kreisende Elektronen beschleunigt – und müssten daher strahlen!

Hilfe zu A4: Das quantenmechanische Atommodell wirft ein Problem auf: Es ist sehr unanschaulich. Auf die Frage, wie man sich ein Atom vorstellen soll, hat Werner Heisenberg angeblich einmal geantwortet: „Versuchen Sie es erst gar nicht!". Aus diesem Grund findet man heute noch in sehr vielen Büchern das veraltete Atommodell. Es ist aber das letzte anschauliche Atommodell und hat wohl aus diesem Grund die letzten 80 Jahre überlebt.

Hilfe zu A5: Elemente über Eisen werden praktisch nur bei Supernovaexplosionen gebildet. Du musst daher schwerere Elemente als Eisen kaufen. Wenn du etwa Iodtabletten kaufst, kaufst du garantiert Reste vieler vieler Supernovae.

Hilfe zu A6: $100 \cdot 10^{6} \cdot 10^{-10}$ m = $10^{8} \cdot 10^{-10}$ m = 10^{-2} m = 1 cm.

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. Die Molmasse von Wasser ist 18 g. 100 kg Wasser entsprechen daher 5556 Mol oder rund $3{,}3 \cdot 10^{27}$ Molekülen. Weil ein Molekül Wasser aus drei Atomen besteht, hat unser Mensch daher 10^{28} Atome. Eine exakte Rechnung liefert übrigens praktisch dasselbe Ergebnis.

Hilfe zu A8: Der Jupiter hat etwa 71 % der Planetenmasse, aber trotzdem nur rund $2 \cdot 10^{27}$ kg. Die Masse der Sonne ist also um den Faktor 10^{3} größer. Die Sonne vereint daher praktisch die gesamte Masse des Sonnensystems. Wie nehmen an, dass sie zu 100 % aus Wasserstoff besteht. 1 Mol Wasserstoff hat die Masse von 1 g oder 10^{-3} kg. Die Sonne besteht daher aus $2 \cdot 10^{33}$ Mol oder $1{,}2 \cdot 10^{57}$ Atomen.

Hilfe zu A9: Aus den Punkten 1) bis 3) kannst du die Masse des sichtbaren Universums errechnen: $2 \cdot 10^{30} \cdot 10^{11} \cdot 10^{11}$ kg = $2 \cdot 10^{52}$ kg. Der sichtbare Teil macht aber nur etwa 0,4 % aus. Der tatsächliche Wert ist also 250-mal größer, nämlich $5 \cdot 10^{54}$.

Hilfe zu A10: Der sichtbare Teil des Universums macht 2.10^{52} kg aus (siehe A9) und beträgt 0,4 %. Die Summe aus leuchtender und dunkler baryonischer Materie macht 4 % aus (2.10^{53} kg). Wir nehmen wieder vereinfacht an, dass es sich dabei zu 100 % um Wasserstoff handelt (Molmasse 1). Daher gibt es im Universum etwa 2.10^{56} Mol Wasserstoff und somit 10^{80} Atome.

Hilfe zu A11: Das Proton ist der Kern eines Wasserstoffatoms. Dieses hat die Massenzahl 1. Daher ist der Radius eines Protons größenordnungsmäßig 10^{-15} m.

Hilfe zu A12: Ein Mensch besteht zu rund 20 % aus Kohlenstoff. 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 1667 Mol Kohlenstoff, das sind 10^{27} Moleküle. Rund jedes zehnte Atom in unserem Körper ist also ein C-Atom. Jedes 10^{12}te dieser C-Atome ist ein C-14-Atom. Obwohl C-14 also so selten ist, besitzt ein Mensch trotzdem rund 10^{15} davon!

Hilfe zu A13: Wenn du einen Wasserkessel erwärmst, dann führst du ihm Energie zu ($\Delta E > 0$). Daher muss auch $\Delta m > 0$ sein. Verblüffend, aber die Gleichung sagt voraus, dass die Masse von Wasser und Kessel beim Erwärmen steigen muss! Wie alle relativistischen Effekte ist allerdings auch dieser im Alltag so winzig, dass er nicht zu bemerken ist (siehe A14).

Hilfe zu A14: Die Spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt rund 4200 kJ/(kg·K). Um einen Liter Wasser (1 kg) um 80 °C zu erwärmen, sind daher $3{,}4 \cdot 10^5$ J nötig. Die Masse nimmt also nur um $3{,}7 \cdot 10^{-14}$ kg zu. Wie viel Masse verliert eine Batterie beim Entleeren? Unsere volle Standardbatterie hat 4000 Coulomb. Bei 1,5 V entspricht das $E = Q \cdot U = 6 \cdot 10^3$ J. Beim Entladen nimmt daher die Masse um lächerliche $7 \cdot 10^{-16}$ kg ab. Im Alltag sind Massenänderungen also wirklich nicht zu merken.

Hilfe zu A15: Man kann zwar Antimaterie erzeugen, aber nur winzige Mengen und unter sehr hohem Energieaufwand. Aber selbst wenn es einmal möglich wäre, riesige Mengen ökonomisch zu erzeugen: Man kann aus der Antimaterie niemals mehr Energie gewinnen, als man vorher investiert hat. Energie kann niemals erzeugt oder vernichtet, sondern immer nur umgewandelt werden (siehe Energiesatz Kap. 9).

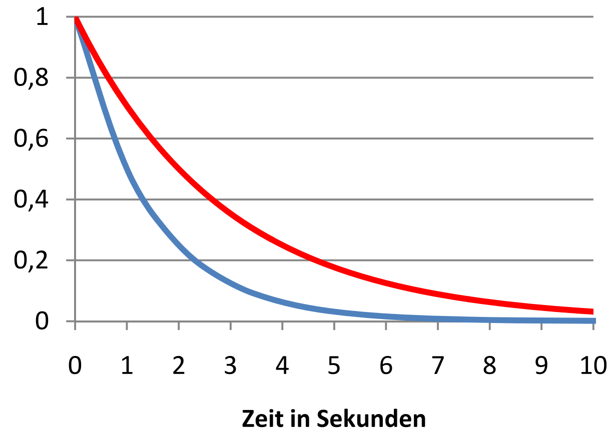
Hilfe zu A16: Nach $E = mc^2$ hat Energie eine Masse. Strahlt der Kern radioaktiv, verliert er zusätzlich zur Masse des abgestrahlten Teilchens auch an Energie und somit an Masse.

Hilfe zu A17: Nach einer Halbwertszeit ist die Hälfte über (1/2), nach zwei Halbwertszeiten ein Viertel (also die Hälfte der Hälfte; $1/2^2 = 1/4$), nach drei Halbwertszeiten ein Achtel ($1/2^3 = 1/8$) und so weiter. Nach 10 Halbwertszeiten ist weniger als 1 ‰ übrig ($1/2^{10} = 1/1024$). Nachdem C-14-Atome bereits in lebenden Organismen sehr selten sind (A12), ist hier die technische Nachweisgrenze erreicht.

Hilfe zu A18: Damit ist gemeint, dass nach 6 Jahren nur mehr die Hälfte des medizinischen Wissens gültig ist. Das ist wahrscheinlich übertrieben, hat aber einen wahren Kern: neue Techniken führen relativ rasch zu neuen Erkenntnissen. Würdest du gerne zu einem Arzt gehen, der vor 30 Jahren das Studium beendet und sich seitdem nicht mehr fortgebildet hat? Sicher nicht!

Hilfe zu A19: Je instabiler ein Stoff, desto schneller zerfällt er. Die Halbwertszeiten reichen von unvorstellbar kurz bis unvorstellbar lang. Bei körperlichem Kontakt sind lange Halbwertszeiten ungünstig, weil dadurch der Organismus stärker belastet wird. In der Nuklearmedizin verwendet man daher möglichst schnell zerfallende Isotope. Wasserstoff-7 besteht aus 1 Proton und 6 Neutronen. Durch dieses „Übergewicht" an Neutronen ist er extrem kurzlebig.

Hilfe zu A20:



Hilfe zu A21: Tabelle 2 zeigt die Leistungsabgabe beider Varianten. Variante b startet zwar mit halber Leistung, diese sinkt aber langsamer ab. Bereits nach zwei Jahren sind die Leistungen gleich, nach 16 Jahren ist sie bereits 16-mal so groß. Deshalb sollte man Variante b wählen.

Jahr	1	2	3	4	5	6
rel. Leistung Variante a	1	1/4	1/16	1/64	1/256	1/1024
rel. Leistung Variante b	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64

Tab. 2: Relative Leistungen bei den Varianten a und b.