SMART

Sammlung mathematischer Aufgaben als Hypertext mit TEX

Kernphysik (Physik)

herausgegeben vom

Zentrum zur Förderung des
mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts
der Universität Bayreuth*

1. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Aufbau der Kerne

1. $Q = \dfrac{1\,\mathrm{kg} \cdot e}{m_\mathrm{e}} = 1{,}759 \cdot 10^{11}\,\mathrm{C} = I\Delta t \quad \Longrightarrow \quad \Delta t = \dfrac{Q}{I} = 1{,}759 \cdot 10^{9}\,\mathrm{s} = 55{,}7\,\mathrm{a}$

2. Mittlere Masse eines Goldatoms: $M = 196{,}97\,\mathrm{u}$

   Masse des Goldes: $m = 19{,}3\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3} \cdot 1000\,\mathrm{cm}^3 = 19{,}3\,\mathrm{kg}$

   Zahl der Goldatome: $n = \frac{m}{M} = 5{,}90 \cdot 10^{25}$

3. (a) Kernladungszahl: $Z = 134 - 80 = 54 \quad \Longrightarrow \quad$ Xe (Xenon)
   (b) $A = 141 + 92 = 233$
   (c) $N = 241 - 94 = 147$

4.

E A / Z N		Be 6 / 4 2	Be 7 / 4 3	Be 8 / 4 4	Be 9 / 4 5	Be 10 / 4 6	Be 11 / 4 7	Be 12 / 4 8		Be 14 / 4 10
		Li 5 / 3 2	Li 6 / 3 3	Li 7 / 3 4	Li 8 / 3 5	Li 9 / 3 6	Li 10 / 3 7	Li 11 / 3 8		
	He 3 / 2 1	He 4 / 2 2	He 5 / 2 3	He 6 / 2 4	He 7 / 2 5	He 8 / 2 6	He 9 / 2 7			
H 1 / 1 0	H 2 / 1 1	H 3 / 1 2								
	n 1 / 0 1									

5. $N_1 \cdot A_{\mathrm{r}1} = N_2 \cdot A_{\mathrm{r}2} \quad \Longrightarrow \quad N_1 = \dfrac{N_2 \cdot A_{\mathrm{r}2}}{A_{\mathrm{r}1}} \approx \dfrac{238\,\mathrm{u}\,N_2}{235\,\mathrm{u}} = 1{,}0128 \quad \Longrightarrow \quad 12{,}8\,\%$

6. x ist der Bruchteil der ^{14}N-Atome:

$$x \cdot A_{14} + (1-x)A_{15} = \langle A \rangle \quad \Longrightarrow \quad x = \frac{A_{15} - \langle A \rangle}{A_{15} - A_{14}} = \frac{0{,}99341}{0{,}99704} = 0{,}99636$$

$$\Longrightarrow \quad 99{,}636\,\%\ {}^{14}\mathrm{N} \quad \text{und} \quad 0{,}364\,\%\ {}^{15}\mathrm{N}$$

7. Unter 10 000 Ne-Atomen sind 9051 ^{20}Ne-, 27 ^{21}Ne- und 922 ^{22}Ne-Atome:

$$\langle A \rangle = \frac{9051 \cdot 19{,}99244 + 27 \cdot 20{,}99385 + 922 \cdot 21{,}99138}{10\,000} = 20{,}179$$

8. $n \cdot m_\mathrm{n} = (n+1)m_\mathrm{p} \quad \Longrightarrow \quad n = \dfrac{m_\mathrm{p}}{m_\mathrm{n} - m_\mathrm{p}} = \dfrac{1{,}00727649}{0{,}0013884} = 725{,}48 \quad \Longrightarrow \quad \approx 725$

9.

$$\begin{aligned}
A' &= 11A & & \\
(A' - Z') &= 12(A - Z) & &\Longrightarrow \quad A = 12Z - Z' \\
Z' &= Z + 70 & &\Longrightarrow \quad A = 11Z - 70 \\
\frac{A - Z}{Z} &= \frac{5}{4} & &\Longrightarrow \quad A = \frac{9}{4}Z = 11Z - 70 \\
& & &\qquad\;\; \frac{35}{4}Z = 70
\end{aligned}$$

$$Z = 8, \quad Z' = 78, \quad A = 18, \quad A' = 198 \quad \Longrightarrow \quad {}^{18}_{8}\mathrm{O} \text{ und } {}^{198}_{78}\mathrm{Pt}$$

10. (a) Masse eines Aluminiumatoms:

$M = 0{,}991 \cdot 13(m_\mathrm{p} + m_\mathrm{e}) + 14m_\mathrm{n} = 0{,}991 \cdot 4{,}52 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg} = 4{,}48 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}$

$\varrho = \dfrac{M}{d^3} = \dfrac{4{,}48 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}}{1{,}66 \cdot 10^{-29}\,\mathrm{m}^3} = 2{,}70 \cdot 10^3\,\dfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 2{,}70\,\dfrac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$

(b) Zahl der Atome: $N = \dfrac{1\,\mathrm{kg}}{M} = 2{,}23 \cdot 10^{25}$

$A = \dfrac{N}{10} \cdot d^2 = 1{,}45 \cdot 10^5\,\mathrm{m}^2$

2 Strahlungsarten

1. (a) Von links nach rechts: α, γ, und β.

   (b) Die Bahn von α–Teilchen ist im Vergleich zu der von Elektronen kaum gekrümmt. Zwar ist der Betrag der Ladung von α–Teilchen doppelt so groß wie der Elektronen (was eine Vergrößerung des Krümmungsradius zur Folge hätte), aber ihre Masse ist etwa 3600–mal so groß wie die der Elektronen. Also ist der Krümmungsradius der α–Teilchen etwa 1800–mal so groß wie der der Elektronen. Daher braucht man um α–Teilchen abzulenken sehr starke Magnetfelder.

2. (a) Von Bedeutung sind giftig, Halbwertszeit, ausscheidbar, nachweisbar

   (b) geeignet: B und D
   nicht geeignet: A, weil Reichweite zu klein und C, weil Halbwertszeit zu lang

   (c) Vorteile, z. B. gute Abbildung innerer Organe möglich, Einsatz zur Krebsbekämpfung
   Gefahren, z. B. Schädigung von gesundem Gewebe durch Strahlenbelastung von Patienten und von medizischem Personal

3.

4.

3 Strahlungsintensität

4 Massendefekt und Bindungsenergie

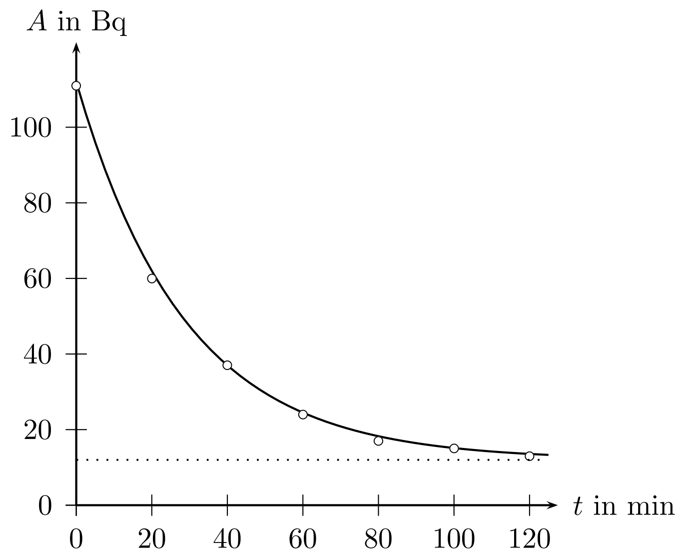
1. (a) ${}^{232}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\alpha} {}^{228}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\alpha} {}^{224}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{220}_{86}\mathrm{Rn} \xrightarrow{\alpha} {}^{216}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{212}_{82}\mathrm{Pb} \xrightarrow{\beta^-} {}^{212}_{83}\mathrm{Bi} \xrightarrow{\beta^-} {}^{212}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$

   (b) Alle Massenzahlen der Zerfallsreihe sind Vielfache von 4.

   (c) $(231{,}989\,682\,1 - 227{,}983\,777\,6 - 4{,}001\,506\,5)\ \mathrm{uc}^2 = 4{,}1\,\mathrm{MeV}$

   $\left(211{,}946\,667\,2 - 211{,}943\,700\,0 - 5{,}48580 \cdot 10^{-4}\right)\ \mathrm{uc}^2 = 2{,}2\,\mathrm{MeV}$

2. (a) t–A–Diagramm



   (b) Zunächst kann man dem Diagramm entnehmen, dass die Nullrate nicht größer als 13 Bq ist. Man kann vermuten, dass die Nullrate bei 12 Bq liegen dürfte.

   Die um die Nullrate korrigierten Messwerte lauten

t in min	0	20	40	60	80	100	120
$A(t)$ in Bq	99	48	25	12	5	3	1

   so, dass man auf eine Halbwertzeit von etwa 20 min kommt.

3. (a) $\approx 235 \cdot (8{,}3\,\mathrm{MeV} - 7{,}6\,\mathrm{MeV}) = 0{,}16\,\mathrm{GeV}$

   (b) $1{,}6 \cdot 10^{16}; 0{,}0062\,\mathrm{mg}$

(c) 1,6 t

(d) In natürlich vorkommendem Uran sind nur 0,718% Uran-235.

(e) 1,2 Mio. t

4. (a) Freiwerdende Energie pro Fusionsreaktion:

$$\Delta W = (4 \cdot M_{\mathrm{H1}} - M_{\mathrm{He4}})c^2 = (1{,}007825032 - 4{,}002603254)uc^2 =$$
$$= 0{,}028696874\,uc^2 = 4{,}28 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{J} = 26{,}7\,\mathrm{MeV}$$

(b) Abgestrahlte Energie pro Sekunde: $W = P \cdot 1\,\mathrm{s} = 3{,}84 \cdot 10^{26}\,\mathrm{J}$

Zahl der Fusionsreaktionen und somit der entstehenden He-Atome pro Sekunde:

$N = \dfrac{W}{\Delta W} = 8{,}97 \cdot 10^{37}$

$\Delta M = N \cdot \Delta m \cdot 24 \cdot 3600 = 3{,}69 \cdot 10^{14}\,\mathrm{kg}$

5 Radioaktiver Zerfall

1. β^--Zerfall: $\quad {}^{198}_{77}\mathrm{Ir} \longrightarrow {}^{198}_{78}\mathrm{Pt} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_\mathrm{e}$
2. β^+-Zerfall: $\quad {}^{200}_{81}\mathrm{Tl} \longrightarrow {}^{200}_{80}\mathrm{Hg} + \mathrm{e}^+ + \nu_\mathrm{e}$
3.
4. (a) ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$
   (b) ${}^{170}_{77}\mathrm{Ir}$
   (c) ${}^{192}_{84}\mathrm{Po}$
   (d) ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$
   (e) ${}^{214}_{86}\mathrm{Rn}$
   (f) ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$
   (g) ${}^{180}_{80}\mathrm{Hg}$
5. (a) ${}^{2}\mathrm{H} + {}^{3}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{1}\mathrm{n} + 17{,}589\,49\,\mathrm{MeV}$
   (b) ${}^{2}\mathrm{H} + {}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + {}^{1}\mathrm{n} + 3{,}268\,939\,\mathrm{MeV}$
   (c) ${}^{2}\mathrm{H} + {}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{p} + 4{,}032\,940\,\mathrm{MeV}$
   (d) ${}^{2}\mathrm{H} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{1}\mathrm{p} + 18{,}353\,25\,\mathrm{MeV}$

6 Zerfallsreihen

1. Massenzahl: $238 - 8 \cdot 4 = 206$. Kernladungszahl: $92 - 8 \cdot 2 + 6 = 82$, also ${}^{206}_{82}\mathrm{Pb}$.

2. α: $(241 - 209) : 4 = 8$; β^-: $94 - 8 \cdot 2 + n = 83 \quad \Rightarrow \quad n = 83 + 16 - 94 = 5$.

3. (a) ${}^{232}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\alpha} {}^{228}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\alpha} {}^{224}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{220}_{86}\mathrm{Rn} \xrightarrow{\alpha} {}^{216}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{212}_{82}\mathrm{Pb} \xrightarrow{\beta^-} {}^{212}_{83}\mathrm{Bi} \xrightarrow{\beta^-} {}^{212}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$

   (b) Alle Massenzahlen der Zerfallsreihe sind Vielfache von 4.

   (c) $(231{,}989\,682\,1 - 227{,}983\,777\,6 - 4{,}001\,506\,5)\ \mathrm{uc}^2 = 4{,}1\,\mathrm{MeV}$

   $\left(211{,}946\,667\,2 - 211{,}943\,700\,0 - 5{,}48580 \cdot 10^{-4}\right)\ \mathrm{uc}^2 = 2{,}2\,\mathrm{MeV}$

4.

5.

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

1. (a) $t = 16,7min$

   (b) $^{18}F \rightarrow ^{18}O + e^{+} + \nu$

   $p^{+} \rightarrow n + e^{+} + \nu$

   maximale kinetische Energie $E = [m_A(^{18}F) - m_A(^{18}O) - 2m(e)] \cdot c^2$

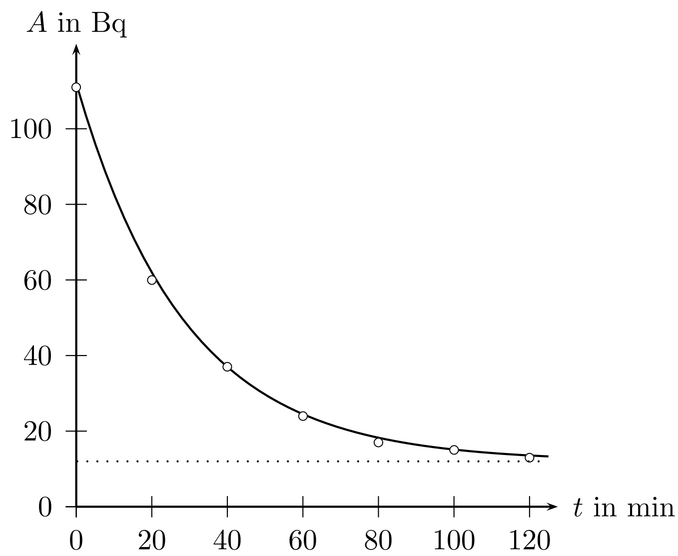
   Die meisten Positronen haben eine geringere Energie, da das Neutrino einen Teil der beim Prozess frei werdenden Energie erhält.

   (c) Die beiden Gammaquanten müssen sich aufgrund des Impulserhaltungssatzes (Anfangsimpuls von Elektronen und Positron ist nahezu Null) in entgegengesetzte Richtungen und mit gleicher Energie ausbreiten.

   Berechnung der Energie: Jedem Gammaquant steht die Ruheenergie $E = Mc^2$ des zerstrahlten Elektrons bzw. Positrons zur Verfügung. Daraus folgt $E = 511keV$.

2.

3. (a) t–A–Diagramm



   (b) Zunächst kann man dem Diagramm entnehmen, dass die Nullrate nicht größer als 13 Bq ist. Man kann vermuten, dass die Nullrate bei 12 Bq liegen dürfte.

   Die um die Nullrate korrigierten Messwerte lauten

t in min	0	20	40	60	80	100	120
$A(t)$ in Bq	99	48	25	12	5	3	1

so, dass man auf eine Halbwertzeit von etwa 20 min kommt.

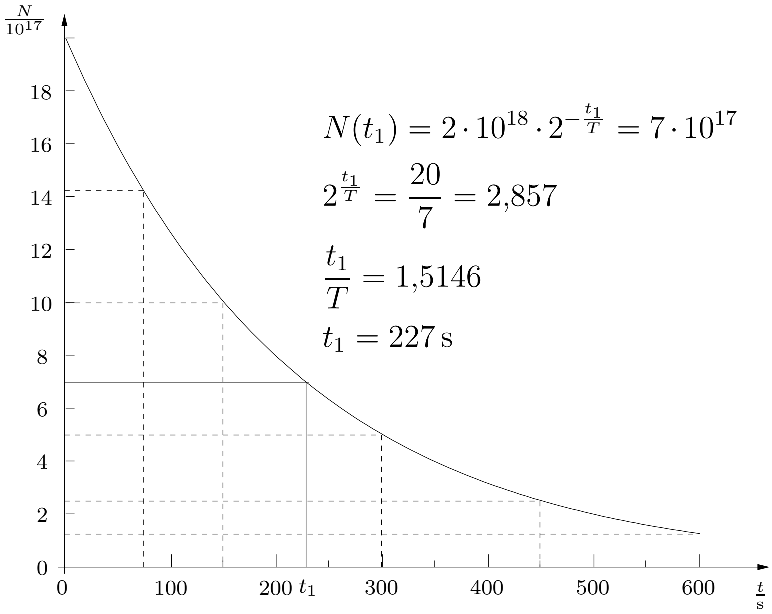
4. Ermittle die Nullrate und die Halbwertzeit von Pb–209. 18 Bq; 3,3 h

5. (a) ${}^{30}_{15}\mathrm{P} \longrightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + \mathrm{e}^+ + \nu_\mathrm{e}$

(b) $m = N_0 M \approx N_0 \cdot 30u = 9{,}96 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{kg} \approx 0{,}10\,\mathrm{mg}$

(c) $N(75\,\mathrm{s}) = N_0 \cdot 2^{-\frac{1}{2}} = \dfrac{N_0}{\sqrt{2}}$

$\frac{t}{\mathrm{s}}$	75	150	300	450	600
$\frac{N(t)}{10^{17}}$	14,1	10,0	5,00	2,50	1,25



$$N(t_1) = 2 \cdot 10^{18} \cdot 2^{-\frac{t_1}{T}} = 7 \cdot 10^{17}$$

$$2^{\frac{t_1}{T}} = \frac{20}{7} = 2{,}857$$

$$\frac{t_1}{T} = 1{,}5146$$

$$t_1 = 227\,\mathrm{s}$$

(d) $N(t_2) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t_2}{T}} = 2 \cdot 10^{18} \cdot 2^{-\frac{298}{150}} = 5{,}046 \cdot 10^{17}$

$N(t_3) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t_3}{T}} = 2 \cdot 10^{18} \cdot 2^{-\frac{302}{150}} = 4{,}954 \cdot 10^{17}$

$\Delta N = N(t_2) - N(t_3) = 9{,}2 \cdot 10^{15} \quad \Longrightarrow \quad A(300\,\mathrm{s}) = \frac{\Delta N}{4\,\mathrm{s}} = 2{,}3 \cdot 10^{15}\,\frac{1}{\mathrm{s}}$

6. (a) $N_0 = \dfrac{m}{M_{\mathrm{Sm146}}} = \dfrac{0{,}1\,\mathrm{kg}}{146\,u} = 4{,}125 \cdot 10^{23}, \quad N_1 = \dfrac{m_1}{M_{\mathrm{Sm146}}} = \dfrac{0{,}0925\,\mathrm{kg}}{146\,u} = 3{,}815 \cdot 10^{23}$

(b) $N_1 = N_0 \cdot 2^{-\frac{t_1}{T}} \quad \Longrightarrow \quad 2^{-\frac{t_1}{T}} = \dfrac{N_1}{N_0} = \dfrac{m_1}{m_0} = 0{,}925 \quad \Longrightarrow \quad \dfrac{t_1}{T} = 0{,}1125$

$t_1 = 0{,}1125 \cdot T = 1{,}16 \cdot 10^7\,\mathrm{a}$

$x = t_1 \cdot v = 1{,}16 \cdot 10^7 \cdot 365{,}25 \cdot 24 \cdot 3600\,\mathrm{s} \cdot 10000\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 3{,}66 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m}$

$$1\,\mathrm{LJ} = 3\cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\cdot 365{,}25\cdot 24\cdot 3600\,\mathrm{s} = 9{,}47\cdot 10^{15}\,\mathrm{m} \quad\Longrightarrow\quad x = 386\,\mathrm{LJ}$$

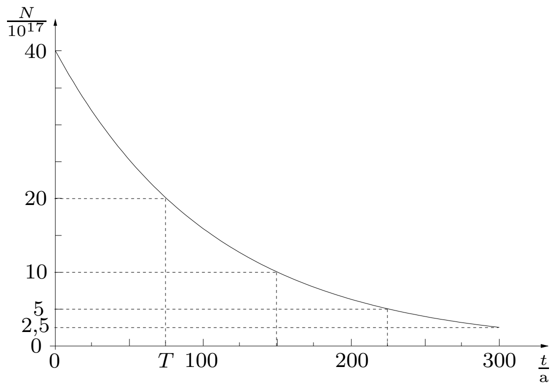
oder eleganter: $x = vt_1 = \frac{v}{c}\cdot ct_1 = 3{,}336\cdot 10^{-5}\cdot 1{,}16\cdot 10^7\,\mathrm{LJ} = 386\,\mathrm{LJ}$

7. (a) ${}^{148}_{64}\mathrm{Gd} \to {}^{144}_{62}\mathrm{Sm} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

$$\begin{aligned}\Delta W &= (M_{\mathrm{Gd148}} - M_{\mathrm{Sm144}} - M_{\mathrm{He4}})c^2 = \\ &= (147{,}9181146 - 143{,}9119994 - 4,002603254)uc^2 = \\ &= 0{,}003511868\,uc^2 = 5{,}24\cdot 10^{-13}\,\mathrm{J} = 3{,}27\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

(b) $N_0 = \frac{m}{M_{\mathrm{Gd148}}} = 4{,}00\cdot 10^{18}$

In der Zeichnung: $T \mathrel{\widehat{=}} 3{,}0\,\mathrm{cm}$



(c) $N(t_1) = N_0\cdot 2^{-\frac{t_1}{T}} = 3{,}15\cdot 10^{-3}\,N_0 \quad\Longrightarrow\quad 2^{-\frac{t_1}{T}} = 3{,}15\cdot 10^{-3} \quad\Longrightarrow\quad 2^{\frac{t_1}{T}} = 317{,}46$

$\frac{t_1}{T} = 8{,}31 \quad\Longrightarrow\quad t_1 = 620\,\mathrm{a}$

8. (a) ${}^{238}_{94}\mathrm{Pu} \to {}^{234}_{92}\mathrm{U} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

$$\begin{aligned}\Delta W &= (M_{\mathrm{Pu238}} - M_{\mathrm{U234}} - M_{\mathrm{He4}})c^2 = \\ &= (238,0495598 - 234,0409521 - 4,002603254)uc^2 = \\ &= 0.00600453\,uc^2 = 8{,}961\cdot 10^{-13}\,\mathrm{J} = 5{,}593\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

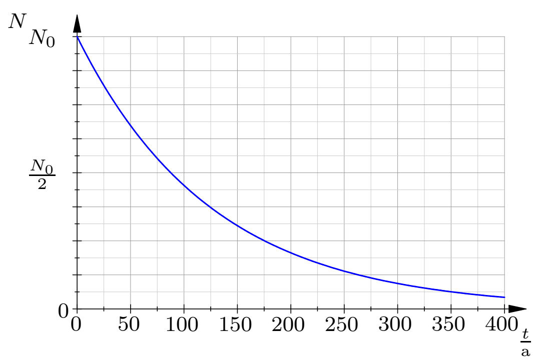
(b) $N_0 = \frac{m}{M_{\mathrm{Pu238}}} = 8{,}00\cdot 10^{23}$

$N(t_1) = N_0\cdot 2^{-\frac{t_1}{T}} = 0{,}1\,N_0$

$2^{-\frac{t_1}{T}} = 0{,}1 \quad\Longrightarrow\quad 2^{\frac{t_1}{T}} = 10$

$\frac{t_1}{T} = 3{,}322 \quad\Longrightarrow\quad t_1 = 291\,\mathrm{a}$

In der Zeichnung: $T \mathrel{\widehat{=}} 2{,}2\,\mathrm{cm}$



(c) $\Delta N = N_0 - N_0 \cdot 2^{-\frac{1\,\mathrm{h}}{T}} = N_0(1 - 2^{-\frac{1}{768778}}) = N_0 \cdot 9{,}016 \cdot 10^{-7} = 7{,}21 \cdot 10^{17}$

$A(0) = A_0 = \dfrac{\Delta N}{3600\,\mathrm{s}} = 2{,}00 \cdot 10^{14}\,\dfrac{1}{\mathrm{s}}, \quad A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$

$P_0 = P(0) = \dfrac{\Delta N \cdot \Delta W}{\Delta t} \cdot 80\% = A_0 \cdot \Delta W \cdot 0{,}08 = 180\,\mathrm{W} \cdot 0{,}08 = 14{,}4\,\mathrm{W}$

$P(t) = P_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$

9. (a) ${}^{209}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{210}_{83}\mathrm{Bi} \longrightarrow {}^{210}_{84}\mathrm{Po} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

(b) ${}^{210}_{84}\mathrm{Po} \longrightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

(c) Am 23.11.2006: N_1: Zahl der Po 210-Kerne, N_2: Zahl der Pb 206-Kerne

$\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} = 5{,}797 \cdot 10^{-8}\,\dfrac{1}{\mathrm{s}} = 5{,}009 \cdot 10^{-3}\,\dfrac{1}{\mathrm{d}}$

$N_1 = \dfrac{A}{\lambda} = 2{,}69 \cdot 10^{15}, \qquad N_2 = \dfrac{m}{206\,u} = 5{,}74 \cdot 10^{16}$

Die Zahl der Po 210-Kerne zum Zeitpunkt der Herstellung ist

$$N_0 = N_1 + N_2 = 6{,}00 \cdot 10^{16}$$

$$N_1 = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \Longrightarrow \quad t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{N_1}{N_0}\right) = 5{,}38 \cdot 10^{8}\,\mathrm{s} = 620\,\mathrm{d}$$

$620 = 365 + 255 = 365 + 23 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31 + 30 + 18 \quad \Longrightarrow$

Datum der Herstellung: 13.03.2005

8 Dosimetrie

1. (a) Bei einer Äquivalentdosis von 41 Sv hätte man eine Wahrscheinlichkeit größer als 1 an Krebs zu erkranken.

   (b) $\frac{5\%}{1\,\mathrm{Sv}} \cdot 30\,\mathrm{mSv} = 0{,}15\%$

   Die Äquivalentdosis einer CT-Aufnahme des Bauchraums ist 15–mal so groß wie die gesamte Äquivalentdosis, die in einem Jahr durch medizinische Diagnostik verursacht wird!!!

   (c) $\frac{5\%}{1\,\mathrm{Sv}} \cdot 80 \cdot 4{,}1\mathrm{mSv} = 1{,}6\%$

   Man muss davon ausgehen, dass man die gesamte Äquivalentdosis am Anfang des Lebens bekommt, was natürlich nicht richtig ist. So ist es für einen 80–jährigen relativ egal, ob er im 81.ten Lebensjahr 4 mSv oder 5 mSv Äquivalentdosis abbekommt. Der daraus resultierende Krebs tritt wohl eh erst zehn Jahre später ein.

   (d) Radioaktiver Fallout, radioaktive Belastung im näheren Umkreis von Atomkraftwerken, beruflich bedingte Exponiertheit etwa vom Personal in Kernkraftwerken (kann statistisch eingerechnet werden).

   (e) Die Wahrscheinlichkeit in *einem* Jahr bei einem Autounfall zu sterben ist statistisch gesehen genau so groß wie aufgrund der Äquivalentdosis von 1 Sv an Krebs zu erkranken. Dennoch sollte man die Belastung durch die Radioaktivität nicht unterschätzen und ernst nehmen. Einige Leute sind der Ansicht, dass die Selbstheilungskräfte des Immunsystems, das heißt hier die Fähigkeit Strahlenschäden zu reparieren, durch geringe Dosen gestärkt wird (Training des Immunsystems). Dies bezeichnet man als Strahlenhormesis.

2. (a) $\frac{(365-240:3)}{365} \cdot 0{,}4\,\mathrm{mSv} + \frac{(240:3)}{365} \cdot 1{,}1\,\mathrm{mSv} = 0{,}6\,\mathrm{mSv}$

   (b) 38%

3. (a) $\frac{0{,}002\,\mathrm{kg}\cdot 0{,}000117}{39\cdot 1{,}66\cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}} = 3{,}6 \cdot 10^{18}$

   (b) Pro Kilogramm: $A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2\cdot N}{T_\mathrm{H}} = 62\,\mathrm{Bq}$

   Standardmensch: $70 \cdot A = 4{,}3\,\mathrm{kBq}$

   (c) $H = q\,D = q\,\frac{E}{m} = q\,\frac{A\cdot 1\,\mathrm{a}\cdot 1{,}3\,\mathrm{MeV}}{m} = 0{,}41\,\mathrm{mSv}$

4. (a) $N(t) = N(0) \cdot \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{T_{\text{physikalisch}}}\right) \cdot \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{T_{\text{biologisch}}}\right) =$

   $N(0) \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot t \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{physikalisch}}} + \frac{1}{T_{\text{biologisch}}}\right)\right) = N(0) \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_{\text{eff}}}\right)$

   Frau: 65 d; Mann: $1{,}1 \cdot 10^2$ d

   (b) $A(0) = 5{,}0 \cdot 10^3\,\text{Bq}$; $A(t) = A(0) \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_{\text{eff}}}\right)$

   Frau: $4{,}0 \cdot 10^{10}$; Mann: $6{,}8 \cdot 10^{10}$

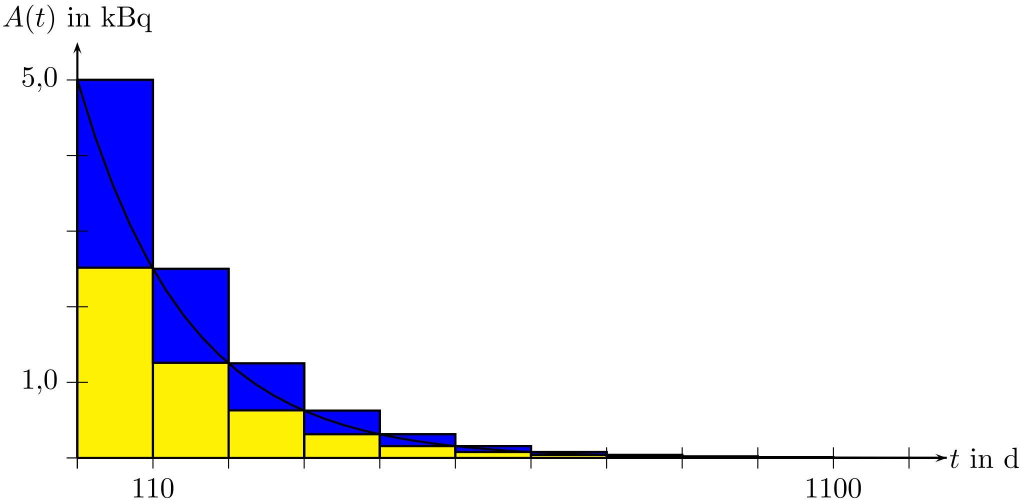
   (c) Frau: 0,054 mSv; Mann: 0,074 mSv

5. (a) Physikalisch: 93%; Biologisch: 0,10%.

   (b) $T_{\text{physikalisch}} \ll T_{\text{biologisch}} \quad \Rightarrow \quad T_{\text{physikalisch}} + T_{\text{biologisch}} \approx T_{\text{physikalisch}} \quad \Rightarrow$

   $T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{biologisch}} \cdot T_{\text{physikalisch}}}{T_{\text{biologisch}} + T_{\text{physikalisch}}} \approx \frac{T_{\text{biologisch}} \cdot T_{\text{physikalisch}}}{T_{\text{physikalisch}}} = T_{\text{biologisch}}$

   (c) Durch Summieren der Rechtecksflächinhalte aus



   kommt man auf 110 d: $3{,}6 \cdot 10^{10}$; 1100 d: $7{,}1 \cdot 10^{10}$

   (d) $H = q\,\frac{E}{m} = 1 \cdot \frac{7{,}1 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}511\,\text{MeV}}{75\,\text{kg}} = 0{,}078\,\text{mSv}$

9 Kernreaktionen

1. (a) Mit $\gamma_{\mathrm{D}} = 199$ und $\gamma_{\mathrm{n}} = 396{,}01675$ gilt:

$$W_{\mathrm{T}} = (\gamma_{\mathrm{D}} + 1)m_{\mathrm{D}}c^2 - \gamma_{\mathrm{n}}m_{\mathrm{n}}c^2 = 4{,}8689 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{J} = 3038{,}94\,\mathrm{MeV} = \underbrace{1{,}08189}_{\gamma_{\mathrm{T}}}\, m_{\mathrm{T}}c^2$$

$$W^2 = W_0^2 + p^2c^2 \quad \Longrightarrow \quad p = \frac{1}{c}\sqrt{W^2 - W_0^2} = \frac{W_0}{c}\sqrt{\gamma^2 - 1} = mc\sqrt{\gamma^2 - 1}$$

$$p_{\mathrm{D}} = m_{\mathrm{D}}c\sqrt{\gamma_{\mathrm{D}}^2 - 1} = 1{,}9947 \cdot 10^{-16}\,\frac{\mathrm{kg \cdot m}}{\mathrm{s}} = 400{,}692uc$$

$$p_{\mathrm{T}} = m_{\mathrm{T}}c\sqrt{\gamma_{\mathrm{T}}^2 - 1} = 6{,}1983 \cdot 10^{-19}\,\frac{\mathrm{kg \cdot m}}{\mathrm{s}} = 1{,}245uc$$

$$p_{\mathrm{n}} = m_{\mathrm{n}}c\sqrt{\gamma_{\mathrm{n}}^2 - 1} = 1{,}9885 \cdot 10^{-16}\,\frac{\mathrm{kg \cdot m}}{\mathrm{s}} = 399{,}447uc$$

$$\Longrightarrow \qquad p_{\mathrm{D}} = p_{\mathrm{T}} + p_{\mathrm{n}}$$

   (b) $\mathrm{n} \to \mathrm{p}^+ + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_{\mathrm{e}}$

   Freie Neutronen existieren viel zu kurz „in Freiheit“, da sie beim Auftreffen auf Materie sofort von anderen Kernen eingefangen werden.

   (c) Mit $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}$ gilt $e^{-\lambda t'} = \frac{1}{10} \quad \Longrightarrow \quad t' = \frac{\ln 10}{\lambda} = \frac{\ln 10 \cdot t_{\frac{1}{2}}}{\ln 2} = 3{,}32 \cdot t_{\frac{1}{2}} = 2043\,\mathrm{s}$

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \beta_{\mathrm{n}}^2}} = \gamma_{\mathrm{n}}t' = 8{,}09 \cdot 10^5\,\mathrm{s}, \qquad \beta_{\mathrm{n}} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_{\mathrm{n}}^2}} = 0{,}9999968 \approx 1$$

$$x = \beta_{\mathrm{n}}ct \approx ct = 8{,}09 \cdot 10^5\,\mathrm{Ls} = 225\,\mathrm{Lh} = 9{,}36\,\mathrm{Ld} = 2{,}43 \cdot 10^{14}\,\mathrm{m}$$