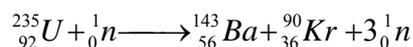


Abituraufgaben: Lösungen Aufgaben Kernchemie

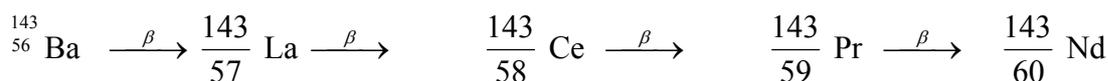
1980/I/

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Christian Kappl 2C1

2.1.1 :



2.1.2



Beim β – Zerfall wird ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt. Die Masse des Kerns bleibt erhalten; die Ordnungszahl erhöht sich um eine Einheit

Das Bariumisotop ist ein Betastrahler, da der Kern einen großen Neutronenüberschuss besitzt. Aus den Neutronen entstehen Protonen; dadurch entsteht ein günstigeres Verhältnis zwischen diesen beiden Kernbausteinen.

2.2.

2.2.1

Die Hauptaufgabe von Moderatoren ist das Abbremsen von Neutronen.

Je höher die Geschwindigkeit der Neutronen ist, umso niedriger ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese auf einen U – 235 Kern treffen und diesen spalten.

Das Abbremsen der Neutronen geschieht mittels elastischen Stoßes mit anderen leichten Atomkernen, die allerdings keine Neutronenabsorption aufweisen dürfen. Von den leichten Elementen sind dadurch Lithium und Bor ausgeschlossen. Theoretisch denkbar sind Wasserstoff, Deuterium, Helium, Beryllium und Kohlenstoff. Technisch genutzt werden Wasserstoff (Leichtwasserreaktor), Deuterium (Schwerwasserreaktor) und Kohlenstoff in Form von Graphit (Brutreaktor, Kugelhaufenreaktor).

Gleichzeitig findet jedoch auch eine Absorption (Verschlucken) von Neutronen in Materialien statt, die zur Kernspaltung nicht beitragen, etwa U-238 oder das Reaktorbaumaterial; diese Absorption findet vorzugsweise für mittelschnelle Neutronen statt. Insofern besteht das Aufrechterhalten der Kernreaktion darin, genügend Neutronen abzubremesen, die eine Kernspaltung bewirken.

2.2.2

Schnelle Neutronen werden durch Uran – 238 abgefangen überschüssige langsame Neutronen werden durch Kontrollstäbe (Steuerstäbe) abgefangen. Diese bestehen aus Bor oder Cadmium und können unterschiedlich tief zwischen die Brennstäbe geschoben werden. Wenn die Reaktion anwächst (Multiplikationsfaktor größer 1) werden die Regelstäbe tiefer eingeschoben, ist der Multiplikationsfaktor unter 1 werden sie herausgezogen.



Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Simon Baisl 2C1

1982 / I / 2.1

2.1

schnelle Neutronen:

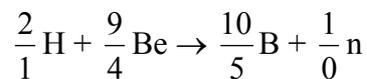
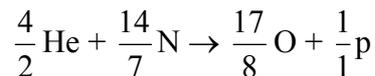
Durch einen Linearbeschleuniger oder Zyklotron; Produkt von Kernreaktionen z.B.

Kernspaltungen

langsame Neutronen:

Erhält man z.B. durch Deuterium (D_2O), Graphit oder Leichtwasser (H_2O), dabei werden die Neutronen durch elastische Zusammenstöße mit den Kernen abgebremst.

2.2



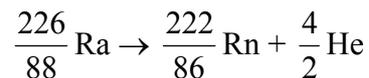
2.3

Die α -Teilchen und die Protonen besitzen positive Ladung die zu beschießenden Atomkerne ebenfalls.

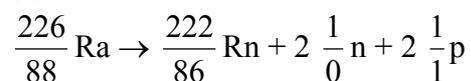
Mit der Ordnungszahl steigt auch die Anzahl der Protonen \Rightarrow gleichnamige Kräfte stoßen sich ab. Aus diesem Grund müssen α -Teilchen und Protonen stark beschleunigt werden, um einen Kern zu treffen.

Neutronen sind elektrisch neutral, aus diesem Grund werden sie vom Kern nicht abgestoßen \Rightarrow sie müssen nicht so energiereich sein um mit einem Kern in Wechselwirkung zu treten

2.4



oder



$$m_{\alpha} = 4,0015064 \text{ u}$$

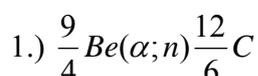
$$2 m_p + 2 m_n = 4,031884 \text{ u} \Rightarrow 4,0015064 \text{ u} - 4,031884 \text{ u} = 0,03037 \text{ u}$$

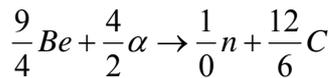
Die freiwerdende Bindungsenergie beträgt:

$$931,44 \text{ MeV} \cdot 0,03037 = 28,3 \text{ MeV}$$

1983/II/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiatin Anna Falk 2C1





Neutronen sind ungeladene Teilchen und somit hinterlassen sie im Nebelkammerbild keine Spur. Man kann ihre Existenz nur mithilfe des zweiten Reaktionsproduktes, Kohlenstoff, nachweisen. Hinzu kommt die relativ kurze HWZ von 11 Minuten

1.2.) Geg.: $m(\alpha) = 4,0015 \text{ u}$; $m(n) = 1,00866 \text{ u}$; $m(e^-) = 0,00055 \text{ u}$;
 $1g = 8,9876 \cdot 10^{13} \text{ J}$; $E(n) = 9,1487 \cdot 10^{-13} \text{ J}$; $M(C) = 12 \text{ g/mol}$

Ges.: $M(\text{Be})$

$$\Delta m = m_{\text{Be}} + m_{\text{He}} - m_{\text{C}} - m_n$$

$$m_{\text{Be}} = m_{\text{C}} + m_n - m_{\text{He}} + \Delta m$$

$$m_{\text{Be}} = 11,996708 \text{ u} + 1,00866 \text{ u} - 4,0015 \text{ u} + 0,006131053 \text{ u} = 9,009999 \text{ u}$$

$$8,9876 \cdot 10^{13} \text{ J} = 1g$$

$$9,1487 \cdot 10^{-13} \text{ J} = x \quad x = 1,017924696 \cdot 10^{-29}$$

$$1,660277 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1u$$

$$1,017924696 \cdot 10^{-29} = x \quad x = 0,006131053 \text{ u}$$

$$M_{\text{Be}} = 9,009999 \text{ u} + 4 \cdot 0,00055 \text{ u} = 9,0122 \text{ u}$$

2.) Geg.: $V = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ l}$; $N = 4,53 \cdot 10^{18} \text{ Teilchen}$; $V_m = 22,4 \text{ mol/l}$

Ges.: N_A

$$\frac{V}{V_m} = \frac{N}{N_A}$$

$$N_A = \frac{V_m \cdot N}{V}$$

$$N_A = 6,076 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}$$

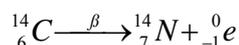
1984/I/2

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiatin Louisa Podlich 2C1

2.1.



In der Atmosphäre ist der Kohlenstoff im Wesentlichen im Kohlendioxid gebunden. Auf dem Weg über die Photosynthese gelangt mit C-14-haltige Kohlenstoffdioxidmolekülen das radioaktive Isotop in Pflanzen und über den Verzehr von Photosyntheseprodukten in Mensch und Tier. In lebenden Organismen ist das Verhältnis C-12 : C-14 konstant und entspricht dem in der Atmosphäre. Solange der Organismus lebt, wird ständig C-14 absorbiert. Mit dem Tod des Lebewesens, verschiebt sich jedoch das Verhältnis, da kein neuer C-14 aufgenommen wird. Der gebundene C-14 zerfällt aber als β -Strahler.



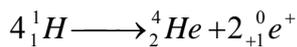
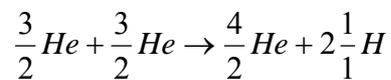
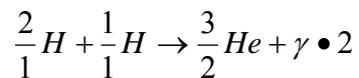
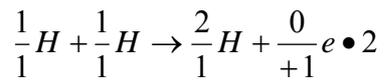
2.2.

Lebende Organismen absorbieren ständig das radioaktive C-14. Mit dem Absterben wird kein weiterer C-14 aufgenommen, der gebundene zerfällt jedoch als β -Strahler. Zur Altersbestimmung misst man daher die aktuelle C-14-Aktivität und kann dann mit der Hilfe der Halbwertszeit den Zeitpunkt berechnen, zu dem die Aktivität noch 16 Zerfälle pro g Kohlenstoff in der Minute betrug.

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Ralf Deutzmann 2C1

1985/I

1.1



1.2.1

Aufgrund des Massendefekts ist die Masse der Produkte geringer als die Masse der Edukte. Beim Massendefekt wird ein Teil der Masse der Edukte bei einer Kernreaktion in Energie umgewandelt.

1.2.2

Produkte:	4 Protonen : $6,69 \cdot 10^{-27}$ kg
Edukte:	Heliumnuklid: $6,644 \cdot 10^{-27}$ kg
	2 Positronen: $0,0018 \cdot 10^{-27}$ kg

Massendefekt: $0,0442 \cdot 10^{-27}$ kg

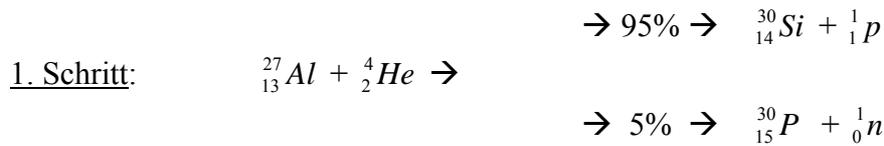
$$E = m \cdot c^2 = 0,0442 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,99793 \cdot 10^8)^2 = 0,3978 \cdot 10^{-11} \text{ Joule}$$

$6,69 \cdot 10^{-27}$ kg	\longrightarrow	$0,3978 \cdot 10^{-11}$ Joule
1kg	\longrightarrow	$6 \cdot 10^{14}$ Joule

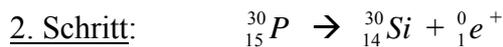
1986/I

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Martin Raithel 2C1

4.1) Erste künstlich induzierte Positronenstrahlung (Joliot/Curie 1934)

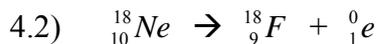
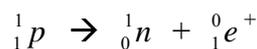


${}_{13}^{27}\text{Al}$ wird mit einem ${}_2^4\text{He}$ -Teilchen beschossen und zerfällt zu 95% in ${}_{14}^{30}\text{Si}$ und einem Proton und zu 5% in ${}_{15}^{30}\text{P}$ und einem Neutron.



Der entstandene ${}_{15}^{30}\text{P}$ ist ein künstliches Nuklid und zerfällt wiederum zu ${}_{14}^{30}\text{Si}$ und einem **Positron**

Positronenstrahlung: Hierbei zerfällt ein Proton in ein Neutron und ein **Positron**



$$\Delta m = m_{\text{Ne}} - m_{\text{F}} - m_{\text{e}^+} - m_{\text{e}^-}$$

$$\Delta m = 18,011196\text{u} - 18,005874\text{u} - 0,000549\text{u} - 0,000549\text{u} = 0,004224\text{u}$$

$$\text{Energie pro Mol: } E = m c^2$$

$$E = (\Delta m \cdot 1,660277 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot N_A) \cdot c^2 = 4,223 \cdot 10^6 \text{kg} \cdot (2,99793 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1})^2 = 3,7955 \cdot 10^{11} \text{J}$$

1986/III/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Winfried Weigl 2C1

1.

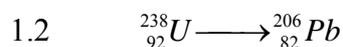
1.1 Um das Alter uranhaltiger Materialien zu bestimmen bestimmt man den genauen Gehalt von U-238 und Pb-206 in Gramm. Das Molverhältnis U-238 : Pb-206 erhält man, indem man die Massenwerte durch die Molmassen teilt.

Da jedes U-238 Isotop in ein Pb-206 Isotop übergeht, gilt:

$$n_t = n \text{ (U-238)}$$

$$n_0 = n \text{ (U-238)} + n \text{ (Pb-206)}$$

Wenn die Halbwertszeit von U-238 bekannt ist, muss man jetzt nur noch die Zerfallsgleichung $n_t = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ nach t auflösen, um das Alter zu bestimmen.



$$\text{Anzahl der } \alpha\text{-Zerfälle: } (238 - 206) : 4 = 8 \quad 8 \alpha\text{-Zerfälle}$$

$$\begin{aligned} \text{Anzahl der } \beta\text{-Zerfälle: } & 92 - 8 \cdot 2 = 76 \\ & 82 - 76 = 6 \end{aligned}$$

6 β -Zerfälle

Bei einem α -Zerfall verringert sich die Massenzahl um 4 Einheiten und die Kernladungszahl um 2 Einheiten

Bei einem β -Zerfall erhöht sich die Kernladungszahl um 1 Einheit. Begründung: Ein Neutron wird in ein Elektron und ein Proton umgewandelt.

1.3 α - und β -Teilchen lassen sich in einer Nebelkammer sichtbar machen.

Beispiel Nebelkammer: In einer abgeschlossenen Kammer befindet sich Luft, die mit dem Dampf von Wasser oder Alkohol gesättigt ist. Vergrößert man das Kammervolumen schlagartig mit Hilfe eines Kolbens, erreicht man den Zustand der Übersättigung durch Abkühlung. Ionisierende Teilchen erzeugen auf ihrem Weg durch die Kammer Ionen, die als Kondensationskeime dienen. Die Bahn der Teilchen wird als Nebelspur sichtbar.

1987/1/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Clemens Krug 2C1

1.1

Gegeben: $N_0(\text{H-3}) / N_0(\text{H-1}) = 1 / 1,25 \cdot 10^{17}$; $t = 49,2 \text{ a}$; $T_{1/2} = 12,3 \text{ a}$

Gesucht: $N_t(\text{H-3}) / N_t(\text{H-1})$

$$N_t = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

$$N_t(\text{H-3}) = N_0(\text{H-3}) \cdot e^{-\ln 2 / T_{1/2} \cdot t} = 1 \cdot 0,0625$$

$$\text{Nach } 49,2 \text{ Jahren: } N_t(\text{H-1}) / N_0(\text{H-3}) = 1,25 \cdot 10^{17} / 0,0625 = 2 \cdot 10^{18} / 1$$

1.2.

Durch die relativ geringe Halbwertszeit von Tritium von nur 12,3 Jahren, ist es nicht mehr möglich das Verhältnis von H-3 / H-1 aus Wasserproben aus der Römerzeit, die etwa 2000 Jahre zurückliegt, mit modernen Methoden zu messen, da der Tritiumgehalt im Wasser bereits zu klein ist. Es ist bereits zu viel Tritium zerfallen ist.

1988/IV

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Thorben Kutz 2C1

3.1) Es gibt drei Arten der natürlichen Strahlung:

a) Alpha-Strahlung: zweifach positiv geladene Heliumkerne. Sie wirken stark ionisierend
Begründung: relativ große Masse und Ladung; relativ geringe Geschwindigkeit

- b) Beta-Strahlung: sind Elektronen mit hoher Geschwindigkeit.
Sie haben nur mittlere ionisierende Wirkung
Begründung: geringe Masse und hohe Geschwindigkeit
- c) Gamma-Strahlung: elektromagnetische Strahlung mit geringer ionisierender Wirkung
und hoher Durchdringungsfähigkeit

Möglichkeiten zur Unterscheidung

Aufspaltung im Magnetfeld; Geiger Müller-Zähler; Nebelkammer(α, β) Blaskammer(α, γ)



(223-207):4=4 \Rightarrow **4 α -Zerfälle** (Verringerung der MZ um 16)

4·2=8 \Rightarrow Verringerung der OZ um 8

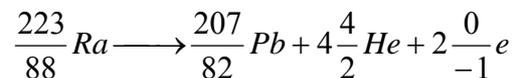
$$88-8=80$$

82-80=2 \Rightarrow **2 β -Zerfälle** (Erhöhung der OZ um 2)

Die MZ kann nur durch α - Zerfälle verändert werden; also berechnet man als erstes die Anzahl der α -Zerfälle. Ein α -Zerfall erniedrigt allerdings auch die OZ um 2 Einheiten und die Massenzahl um 4 Einheiten. Da der β -Zerfall die OZ um 1 Einheit erhöht, errechnet man die Anzahl der β -Zerfälle wie oben dargestellt.

3. Geg: $m(\text{Ra})=1\text{g}$

Ges: $V(\text{He})$



$$n(\text{Ra}) / n(\text{He}) = \frac{1}{4}$$

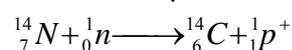
$$V(\text{He}) = 4 \frac{m(\text{Ra}) V_m}{M(\text{Ra})}$$

$$V(\text{He}) = 0,3946\text{l}$$

1989/II

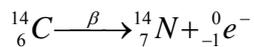
Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Bastian Pflüger 2C1

4.1. In der Atmosphäre treffen $^{14}_7\text{N}$ und ^1_0n aufeinander und es entsteht radioaktives $^{14}_6\text{C}$ und ^1_1p .



Das C-14 gelangt durch die Photosynthese der Pflanzen in die Nahrungskette \Rightarrow in jedem Organismus ist derselbe C-14-Anteil wie in der Luft vorhanden. Es besteht ein konstantes Verhältnis zwischen C-12 und C-14 (seit mindestens 100000 Jahren).

Nach dem Tod eines Organismus kommt kein neues C-14 in den Körper, das bestehende zerfällt aber (β -Zerfall).



Durch Messung des noch vorhandenen C-14-Anteils kann der Zeitpunkt des Todes festgestellt werden.

$$4.2. \quad N_0 = 100(\%) \quad N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N_t = 81,7(\%) \quad N_t = N_0 \cdot e^{-t \cdot \frac{\ln 2}{T}}$$

$$T = 5736a$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -t \cdot \frac{\ln 2}{T}$$

$$t = -T \cdot \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{\ln 2} = -5736a \cdot \frac{\ln \frac{100}{81,7}}{\ln 2} = \underline{\underline{1673a}}$$

$$4.3. \quad m_E = 100g$$

$$M_E = 234 \frac{g}{mol}$$

$$V_{He} = 66,94l$$

$$\frac{n_E}{n_e} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{m_E}{M_E} = \frac{N_E}{N_A}; \Rightarrow N_E = \frac{m_E \cdot N_A}{M_E} = \frac{100g \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{234 \frac{g}{mol}} = 2,5735 \cdot 10^{23}$$

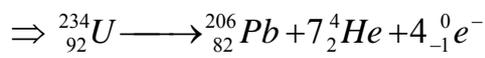
$$\frac{N_{He}}{N_A} = \frac{V_{He}}{V_m}; \Rightarrow N_{He} = \frac{V_{He} \cdot N_A}{V_m} = \frac{66,94l \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{22,4 \frac{L}{mol}} = 1,7996 \cdot 10^{24}$$

$$\frac{N_{He}}{N_E} \approx 7; \Rightarrow 7 \times \alpha - \text{Zerfall}$$

$$\frac{n_E}{n_{He}} = \frac{1}{4}; \Rightarrow 4 \times \beta - \text{Zerfall}$$

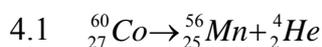
$$234 - 28 = 206; \Rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb}$$

$$82 - 4 + 14 = 92; \Rightarrow {}^{234}_{92}\text{U}$$



1991/I

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Martin Raithel



4.2 a) geg: $T_{1/2} = 5,27a$, $t = 10a$, $m_0 = 1,5 \cdot 10^{-3} g$

ges: m_t

$$m_t (Co - 60) = m_0 (Co - 60) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t}$$

$$m_{10a} (Co - 60) = 1,5 \cdot 10^{-3} g \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 10a}{5,27a}}$$

$$m_{10a} (Co - 60) = 4,026 \cdot 10^{-4} g$$

b) geg: $m_0 = 100\%$ $m_t = 0,1\%$

ges: t

$$t = -\ln \frac{m_0}{m_t} \cdot \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$

$$t = -\ln \frac{100}{0,1} \cdot \frac{5,27a}{\ln 2} = 52,5a$$

1993/I/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiatin Anna Falk 2C1

1.1.

Geg.: $m_0 = m_0$; $m_t = 0,02 \cdot m_0$; $T_{1/2} = 138,38d$

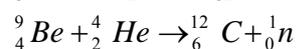
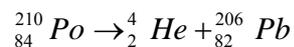
Ges.: t

$$m_t = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$-\lambda \cdot t = \ln m_t/m_0 \quad \lambda = \ln 2/T_{1/2}$$

$$t = \ln 0,02/(-\ln 2/138,38d) = 780,997d = 2,14a$$

1.2.

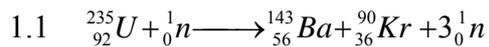


1.3.

Man kann die Strahlung mit einer Nebelkammer sichtbar machen. In einer abgeschlossenen Kammer befindet sich mit dem Dampf einer Flüssigkeit gesättigte Luft. Man erreicht einen Zustand der Übersättigung durch Abkühlung, indem man mittels eines Kolbens das Kammervolumen schlagartig vergrößert. Ionen (in diesem Fall α - Teilchen) erzeugen auf dem Weg durch die Kammer Nebelspuren (in diesem Fall kurze, dicke Spuren).

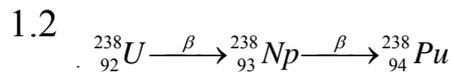
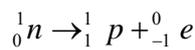
1994/II/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Winfried Weigl 2C1



Anzahl der β -Zerfälle: $60 - 56 = 4$ 4 β -Zerfälle

Wegen des hohen Neutronenüberschusses wird Ba-143 durch 4 beta-Zerfälle zu Nd-143 abgebaut



Das instabile Isotop U-238 zerfällt als β -Strahler bis zum stabilen Nuklid ${}_{94}^{238}\text{Pu}$

1.3. Geg: $N = 4.53 \cdot 10^{18}$ Teilchen : $V(\text{He} - 4) = 0,000167 \text{ l}$

Ges: $V_m(\text{He} - 4)$

$$n = n$$

$$\frac{N}{N_A} (\text{Ra-226}) = \frac{V}{V_m} (\text{He} - 4)$$

$$V_m = \frac{V \cdot N_A}{N} = \frac{0,000167 \text{ l} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{4.53} \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{\text{mol}} = 22,2 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

1996/I/1

Kursleiter Klaus Bentz/ Kollegiat Maximilian Beer

1.1 Berechnung von A

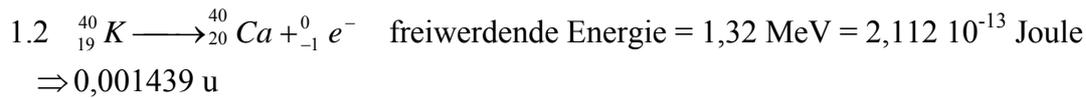
$$A = k \cdot N$$

$$T = 1,28 \cdot 10^9 \text{ a} = 4,0366 \cdot 10^{16} \text{ s}$$

Berechnung von N:

$$\frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \quad \Rightarrow \quad N = 2,11 \cdot 10^{20} \text{ Atome}$$

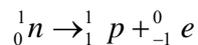
$$A = \frac{\ln 2}{4,0366 \cdot 10^{16} \text{ s}} \cdot 2,11 \cdot 10^{20} = 3620 \text{ Bq}$$



$$m_{\text{Calcium Kern}} = m_K - \Delta m - m_e = 39,953585 - 0,000548 - 0,001439 = 39,9516 \text{ u}$$

$$m_{\text{Ca}} = 39,95161884 \text{ u}$$

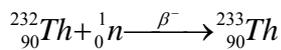
1.3 K-40 besitzt einen Neutronenüberschuss. Der Überschuss wird abgebaut durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron



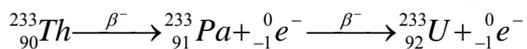
1999/III

Kursleiter: Klaus Bentz; Kollegiat: Bastian Pflüger 2C1

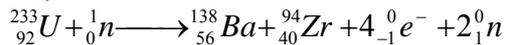
1.1)



Neutronenüberschuss: Umwandlung in ${}_1^1\text{p}$ und ${}_{-1}^0\text{e}^-$ (β^- -Zerfall)



1.2)



$$1,9720405 \cdot 10^{10} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \Rightarrow \Delta E = 3,274726835 \cdot 10^{-14} \frac{\text{kJ}}{\text{u}} \Rightarrow 204,6704272 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$\Rightarrow \underline{\Delta m = 0,219735493 \text{ u}}$$

$$m(\text{U} - 233) = m(\text{Ba}) + m(\text{Zr}) + \Delta m + m + 4e^- = \underline{\underline{233,2618871 \text{ u}}}$$

1.3)

$$\frac{232 - 208}{4} = 6 \times \alpha - \text{Zerfall}$$

$$n'(He) = \frac{n(He)}{6} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

$$n_0(Th - 232) = n_t(Th - 232) + n'(He) = 5 \cdot 10^{-5} \text{ mol} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ mol} = \underline{5,1 \cdot 10^{-5} \text{ mol}}$$

$$n_t = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$n_t = n_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}} \quad | : n_0 \quad | \ln$$

$$\ln \frac{n_t}{n_0} = -\frac{\ln 2 \cdot t}{T}$$

$$t = -T \cdot \frac{\ln \frac{n_t}{n_0}}{\ln 2} = -1,4 \cdot 10^{10} \text{ a} \cdot \frac{\ln \frac{5 \cdot 10^{-5} \text{ mol}}{5,1 \cdot 10^{-5} \text{ mol}}}{\ln 2} = \underline{\underline{4,0 \cdot 10^8 \text{ a}}}$$