

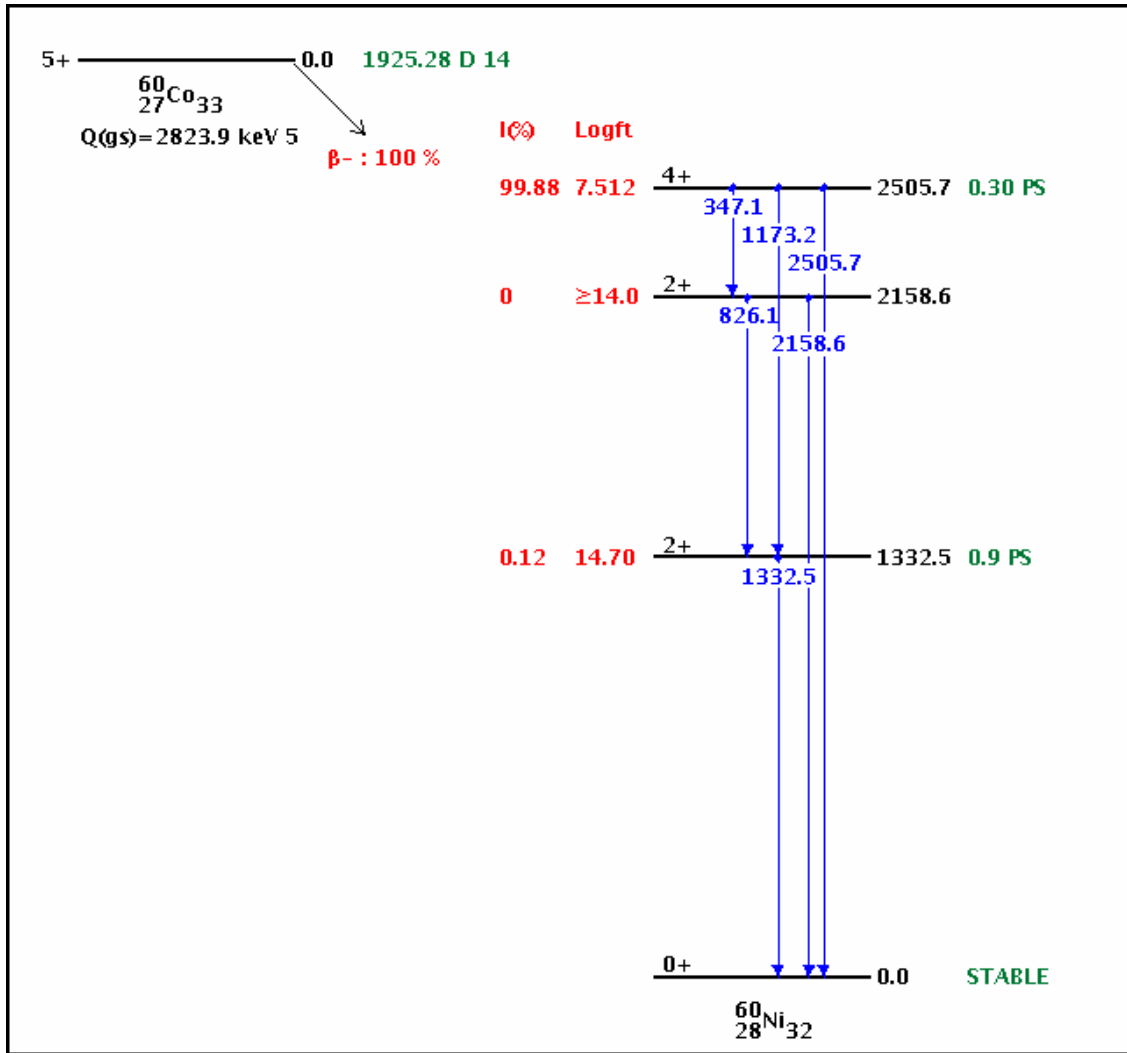
-
- 1a. Was sind Atome? Woraus bestehen sie? Wie groß sind sie? Wie groß sind Atomkerne? Wie ist die Masse im Atom verteilt?
- b. Beschreiben Sie das elektromagnetische Strahlungsspektren von „schwarzen Körpern“ und von Gasentladungsröhren? Nennen Sie Gemeinsamkeiten und die wesentlichen Unterschiede. Erklären Sie die Funktionsweise eines Pyrometers.
- c. Was versteht man unter dem "Photoeffekt", was bezeichnet "Photonenenergie"? Was nennt man "Comptoneffekt"?
- d. Charakterisieren Sie die elektromagnetische Strahlungsarten: Was sind die Unterschiede und Gemeinsamkeiten von ionisierender-, nicht-ionisierender-, Radio-, UKW-, Radar-, Mikrowellen- IR-, UV- Röntgen- und Gamma-Strahlung. Geben Sie relative und (ungefähre) absolute Angaben zu Frequenz, Wellenlänge oder Energie.
- e. Bestimmen Sie die Energie von rotem Licht ($\lambda = 700 \text{ nm}$) in der Einheit eV. Welche Wellenlänge hat Röntgenstrahlung mit einer Energie von 80 keV?
- 2a. Was sind Isotope, Isotone, Isobare? Nennen Sie Beispiele aus der Nuklidkarte.
- b. Welche exakte Masse hat ein neutrales ^{20}Ne Atom?
- c. Berechnen Sie die Bindungsenergie pro Nukleon für ^{12}C mit Hilfe der "Mass-Excess-Table".
- 3a. Was versteht man unter einer "Spontanspaltung", was unter einer "neutroneninduzierten Spaltung"? Erklären Sie den Begriff "Spaltbarriere".
- b. Wie lautet die Reaktionsgleichung für die neutroneninduzierte Spaltung von ^{239}Pu , wenn eins der Spaltprodukte ^{90}Kr ist und wenn bei dem Spaltungsvorgang zusätzlich zu den zwei Spaltprodukten noch drei Neutronen entstehen. Welches Halbwertszeit $T_{1/2}$ haben die Spaltprodukte? Was passiert anschließend nach der Spaltung mit den Spaltprodukten?
- c. Nennen Sie die wichtigsten der in der heutigen Kerntechnik verwendeten "Spaltstoffe"?
- d. Welche Funktion hat der Moderator in einem Kernreaktor? Welche Stoffe eignen sich als Moderator?
- e. Warum gibt es bei Kernspaltungsreaktoren ein Nachwärmeproblem?
- 4a. Erklären Sie die Begriffe " α -, β^- , β^+ -Radioaktivität" und EC ("EC - electron capture"). Welche Reaktionsgleichungen gelten? Wann ist EC möglich, wann ist β^+ -Zerfall möglich?
5. Im Labor soll mit einer ^{60}Co Strahlenquelle experimentiert werden.
- a. Beschreiben Sie anhand des Zerfallsschemas die Zerfallseigenschaften des ^{60}Co . Welches sind die wichtigsten Strahlungen, die eine gekapselte ^{60}Co -Quelle aussendet? (siehe Anlage)
- b. Eine Quelle, die vom Hersteller mit 2,80 MBq zum Referenzzeitpunkt am 01.07.2003 um 00:00:00 h spezifiziert wurde, soll am 28.11.2008 um 10:00 h für Messungen verwendet werden. Welche Aktivität hat die Quelle zum Zeitpunkt der Messung?
- c. Wie groß war die Masse des ^{60}Co , die zum Referenzzeitpunkt die Aktivität 2,80 MBq erzeugte?
- d. Die ^{60}Co Strahlenquelle wird in einem festen Abstand vor einem Detektor positioniert. In einer Messzeit von 20 s werden 129762 Impulse der γ -Strahlung der Energie 1,173 MeV registriert. Bringt man einen Bleiquader von 5 cm Dicke zwischen Strahlenquelle und Detektor, so sinkt die Zahl der Impuls auf 3919 Ereignisse in 20 s. Zur Bestimmung der Untergrundzählrate wurde 200 s lang gemessen und die Anzahl der Impulse in diesem Zeitintervall zu 786 bestimmt. Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizient, den Massenschwächungskoeffizienten und den gesamten Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung mit Bleiatomen.
- e. Zur Abschirmung der Quelle sollen Bleiquader mit Dichte $\rho = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$ verwendet werden. Im Labor sind Quadersteine mit 10 cm verfügbar. Wie stark wird die γ -Strahlung des ^{60}Co mit höchster Energie (und nicht vernachlässigbarer Intensität) geschwächt?
- f. Wie groß ist die Halbwertsdicke des Pb für die ^{60}Co γ -Strahlung höchster Energie (und nicht vernachlässigbarer Intensität), wie groß ist der entsprechende Gesamtwirkungsquerschnitt?

Tabelle 2 Massenschwächungskoeffizient für Blei (Pb). Dichte: $\rho = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$ **Lead
Z = 82**

ASCII format

	Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
	1.00000E-02	1.306E+02	1.247E+02
	1.30352E-02	6.701E+01	6.270E+01
L3	1.30352E-02	1.621E+02	1.291E+02
	1.50000E-02	1.116E+02	9.100E+01
	1.52000E-02	1.078E+02	8.807E+01
L2	1.52000E-02	1.485E+02	1.131E+02
	1.55269E-02	1.416E+02	1.083E+02
	1.58608E-02	1.344E+02	1.032E+02
L1	1.58608E-02	1.548E+02	1.180E+02
	2.00000E-02	8.636E+01	6.899E+01
	3.00000E-02	3.032E+01	2.536E+01
	4.00000E-02	1.436E+01	1.211E+01
	5.00000E-02	8.041E+00	6.740E+00
	6.00000E-02	5.021E+00	4.149E+00
	8.00000E-02	2.419E+00	1.916E+00
	8.80045E-02	1.910E+00	1.482E+00
K	8.80045E-02	7.683E+00	2.160E+00
	1.00000E-01	5.549E+00	1.976E+00
	1.50000E-01	2.014E+00	1.056E+00
	2.00000E-01	9.985E-01	5.870E-01
	3.00000E-01	4.031E-01	2.455E-01
	4.00000E-01	2.323E-01	1.370E-01
	5.00000E-01	1.614E-01	9.128E-02
	6.00000E-01	1.248E-01	6.819E-02
	8.00000E-01	8.870E-02	4.644E-02
	1.00000E+00	7.102E-02	3.654E-02
	1.25000E+00	5.876E-02	2.988E-02
	1.50000E+00	5.222E-02	2.640E-02
	2.00000E+00	4.606E-02	2.360E-02
	3.00000E+00	4.234E-02	2.322E-02
	4.00000E+00	4.197E-02	2.449E-02
	5.00000E+00	4.272E-02	2.600E-02
	6.00000E+00	4.391E-02	2.744E-02
	8.00000E+00	4.675E-02	2.989E-02
	1.00000E+01	4.972E-02	3.181E-02
	1.50000E+01	5.658E-02	3.478E-02
	2.00000E+01	6.206E-02	3.595E-02

Abb. 5 Zerfallsschema des ^{60}Co



Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR l	0.85	3.10E-4 % 18	2.64E-9 15
XR k•2	7.461	0.00325 % 19	2.42E-7 14
XR k•1	7.478	0.0064 % 4	4.8E-7 3
XR k•3	8.265	3.94E-4 % 23	3.26E-8 19
XR k•1	8.265	7.7E-4 % 4	6.3E-8 4
	347.14 7	0.0075 % 4	2.60E-5 14
	826.10 3	0.0076 % 8	6.3E-5 7
	1173.228 3	99.85 % 3	1.1715 4
	1332.492 4	99.9826 % 6	1.332260 9
	2158.57 3	0.00120 % 20	2.6E-5 4
	2505.692 5	2.0E-6 % 4	5.0E-8 10

Quelle: http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_dec.jsp

Konstanten
Constants

Const:
Const:

Ref.: E. R. Cohen, B. N. Taylor, Journal of Physical and Chemical Reference Data 17, 1795 (1988)

c	299792458 m s ⁻¹	Lichtgeschwindigkeit Speed of light	Vitesse de la lumière Velocidad de la luz
h $\hbar = h/2\pi$	6,6260755 (40) · 10 ⁻³⁴ J s 1,05457266 (63) · 10 ⁻³⁴ J s	Planck-Konstante Planck constant	Constante de Planck Constante de Planck
$u = 1/N_A$	1,6605402 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3149432 (28) · 10 ⁻² MeV	Atomare Masseneinheit Atomic mass unit	Unité de masse atomique Unidad de masa atómica
$M_n = N_A \cdot m_n$ m_n m_n	1,008664904 (14) u 1,6749286 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3956563 (28) · 10 ² MeV	Ruhemasse des Neutrons Neutron rest mass	Masse au repos du neutron Masa en reposo del neutrón
$M_p = N_A \cdot m_p$ m_p m_p	1,007276470 (12) u 1,6726231 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3827231 (28) · 10 ² MeV	Ruhemasse des Protons Proton rest mass	Masse au repos du proton Masa en reposo del protón
$M_e = N_A \cdot m_e$ m_e m_e	5,48579903 (13) · 10 ⁻⁴ u 9,1093897 (54) · 10 ⁻³¹ kg 0,51099906 (15) MeV	Ruhemasse des Elektrons Electron rest mass	Masse au repos de l'électron Masa en reposo del electrón
e	1,60217733 (49) · 10 ⁻¹⁹ C 4,8032068 (15) · 10 ⁻¹⁰ esu	Elementarladung Elementary charge	Charge élémentaire Carga elemental
e/m_e	1,75881962 (53) · 10 ¹¹ C kg ⁻¹ 5,2728086 (16) · 10 ¹⁷ esu g ⁻¹	Spezifische Elektronenladung Specific electron charge	Charge massique de l'électron Carga específica del electrón
$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$	2,81794092 (38) · 10 ⁻¹⁵ m	Elektronenradius Electron radius	Rayon de l'électron Radio del electrón
a_0	5,29177249 (24) · 10 ⁻¹¹ m	Bohr-Radius Bohr radius	Rayon de Bohr Radio de Bohr
α	7,29735308 (33) · 10 ⁻³	Feinstruktur-Konstante Fine structure constant	Constante de la structure fine Constante de estructura fina
R_∞	1,0973731534 (13) · 10 ⁷ m ⁻¹	Rydberg-Konstante Rydberg constant	Constante de Rydberg Constante de Rydberg
N_A	6,0221367 (36) · 10 ²³ mol ⁻¹	Avogadro-Konstante Avogadro constant	Constante d'Avogadro Constante de Avogadro
V_m	2,241410 (19) · 10 ⁻² m ³ mol ⁻¹	Molvolumen eines idealen Gases unter Normalbedingungen Molar volume of an ideal gas at s. t. p.	Volumen molaire d'un gaz parfait aux conditions normales Volumen molar de un gas ideal en condiciones normales
R	8,314510 (70) J mol ⁻¹ K ⁻¹ 8,314510 (70) · 10 ⁷ erg mol ⁻¹ K ⁻¹	Universelle Gaskonstante Molar gas constant	Constante molaire des gaz Constante universal de los gases
$k = R/N_A$	1,380658 (12) · 10 ⁻²³ J K ⁻¹ 8,617385 (73) · 10 ⁻⁵ eV K ⁻¹	Boltzmann-Konstante Boltzmann constant	Constante de Boltzmann Constante de Boltzmann
$F = N_A \cdot e$	9,6485309 (29) · 10 ⁴ C mol ⁻¹ 2,89255680 (87) · 10 ¹⁴ esu mol ⁻¹	Faraday-Konstante Faraday constant	Constante de Faraday Constante de Faraday
1 Ci = 3,7 · 10 ¹⁰ Bq	Zerfälle s ⁻¹ Disintegrations s ⁻¹ Désintégrations s ⁻¹ Desintegraciones s ⁻¹	(see also inside back cover)	1 μA = 6,2415064 · 10 ¹² e s ⁻¹ 1 eV/Atom ≅ 23 kcal mol ⁻¹ 1 MeV/Ci ≅ 5,93 · 10 ⁻³ W 1 W ≅ 169 MeV/Ci
1 W ≅ 3,1 · 10 ¹⁰	Spaltungen s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fisiones s ⁻¹		π = 3,141593 e = 2,718282 lg e = 0,434294 ln 10 = 2,302585 ln 2 = 0,693147
1 MWd ≅ 2,7 · 10 ²¹	Spaltungen Fissions ≅ 1 g Fissions Fisiones	spaltbares Material fissionable material smatière fissible material fisil	

Lösungen:

1a. Atome: Atome bestehen aus Kern und Hülle, **Atomgröße:** Nahezu unabhängig von der Ordnungszahl Z , Atomradius beträgt $\sim 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$, **Atomkerngröße:** $\sim 10^{-14} \text{ m}$, **Atommasse:** Ungefähr A mal atomare Masseneinheit ($A = Z + N$), **Atomare Masseneinheit:** $(1/12)$ der Masse des Isotops $^{12}\text{C} \sim$ Masse eines Wasserstoffatoms, Masse (H-Atom) $= (1 \text{ g mol}^{-1}) / N_A = (1 \text{ g mol}^{-1}) / (6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, Kern besteht aus Nukleonen = Protonen und Neutronen, Hülle wird durch Elektronen gebildet, **Masse des Kerns / Masse der Hülle** > 2000 , Hülle hat Schalenstruktur, d.h. die Elektronen bilden Gruppen mit etwa gleicher Bindungsenergie, Bezeichnungen: 1, 2, 3, ..., n oder K-, L-, M-, N-, ..., Schale, Besetzungszahlen: K-Schale maximal 2, L-Schale maximal 8, M-Schale maximal 18, ..., die n -te Schale kann maximal $2n^2$ -Elektronen aufnehmen.

1b. "Schwarzer Körper": Strahlungsspektrum ist kontinuierlich, Intensitätsverteilung (Spektrum) und Wert der Strahlungsfrequenz mit höchsten Intensität hängen nur von der Temperatur ab. Alle Strahlungsspektren von idealen "schwarzen Körpern" können durch eine Formel, die Plancksche Strahlungsformel, beschrieben werden; einziger Parameter in dieser Formel ist die Temperatur des "schwarzen Strahlers".

Gasentladungsröhren senden diskrete Linienspektren aus. Das Spektrum ist charakteristisch für die im Gas enthaltenen chemischen Elemente und Moleküle, nicht jedoch für die Temperatur des Gases.

Pyrometer nutzen die Temperaturabhängigkeit der Strahlung "schwarzer Körper" aus, um berührungslos die Temperatur sehr heißer Körper zu messen, z. B. Metallschmelzen oder glühende Objekte. Die Temperaturbestimmung basiert auf einem Farbvergleich = Frequenzvergleich des Strahlungsspektrums.

1c. Photoeffekt: Photon überträgt gesamte Energie auf ein Hüllenelektron, Energie des Elektrons ist gleich der Energie des Photon minus Bindungsenergie des Elektrons, $E_e = h \cdot \nu - B_e$, **Photonenenergie:** $E_e = h \cdot \nu - B_e$, **Comptoneffekt:** Streuung des Photons an (quasi-freien) Elektron, das Photon verliert Energie, hat also nach der Streuung eine größere Wellenlänge, das Elektron erhält einen Teil der Photonenenergie, der Energieübertrag ist am größten, wenn der Streuwinkel 180° beträgt.

1d. Der Energie- bzw. Frequenzbereich der elektromagnetischen Strahlung reicht langwelliger Radiostrahlung bis zur ultraharten γ -Strahlung. Sichtbares Licht liegt im Wellenlängenbereich von 400-700 nm, UV-, Röntgen- und γ -Strahlung ist kurzwelliger, IR-, Radar- Mikrowellen-, Radiostrahlung- (UKW - Langwelle) ist langwelliger. Der Bereich des sichtbaren Licht stellt in etwa die Grenze zwischen ionisierender (kurzwelliger) und nicht-ionisierender (langwelliger) Strahlung dar. Energien der ionisierenden Strahlung: γ -Strahlung: 10 keV - ∞ , Röntgen: 1 keV - 100 keV, UV:- \sim eV - 1 keV. Wellenlängen der nicht-ionisierenden Strahlungen: IR: 70 nm bis 1 mm, Mikrowelle 1 mm bis 1 m, UKW: 1 - 10 m, Kurz- Mittel- Langwelle: 10 m - 100 m, 100 m - 1000 m, 1 km bis 10 km, Längstwellen für U-Boot Kommunikation: 10 km - 100 km. Frequenz der IR: 400 THz bis \sim THz, Mikrowelle 300 MHz bis 300 GHz, UKW 30 MHz bis 300 MHz, Kurz- Mittel- Langwelle: 3 - 30 MHz, 0,3 - 3 MHz, 30 - 300 kHz,

1e. Berechnung der Energie von rotem Licht $\lambda = 700 \text{ nm}$:

Es gilt: $E = h\nu$

und: $c = \nu \lambda$

Es folgt:
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,99 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{700 \cdot 10^{-9} \text{ m}}$$

$$E = 2,8302 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = 2,830 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot \frac{eV}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 1,766 \text{ eV}$$

Berechnung der Wellenlänge von Röntgenstrahlung der Energie 80 keV:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,99 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{80 \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}$$

$$\lambda = 1,546 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,01546 \text{ nm} = 15,5 \text{ pm}$$

2a. Isobare:	Konstantes A	Isobarenreihe: ^{16}O , ^{16}N , ^{16}C
Isotope:	Konstantes Z	Isotopenreihe: ^{15}O , ^{16}O , ^{17}O
Isotone:	Konstantes N	Isotonenreihe: ^{17}F , ^{16}O , ^{15}N

2b. Berechnung der exakten Masse von ^{20}Ne :

Es gilt: $m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2 = (m(Z, A) - A \cdot m_u) \cdot c^2$

nach Mass Excess Table gilt: $m_{\text{exc}}(10, 20) \cdot c^2 = -7041,93 \text{ keV}$

die Atomare Masseneinheit ist: $m_u = 1,6606502 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Lösung: $m(10, 20) = \frac{-7041,93 \text{ keV}}{c^2} + 20 \cdot 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$m(10, 20) = \frac{-7041,93 \text{ keV}}{c^2} + 33,210804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m(10, 20) = \frac{-7041,93 \cdot 10^3 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}}{2,99792458^2 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} + 33,210804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m(10, 20) = -1,2553407 \cdot 10^{-29} \text{ kg} + 33,210804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m(10, 20) = -0,012553407 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 33,210804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m(10, 20) = 33,19825059 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m(10, 20) = 3,319825059 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

2c. Bindungsenergie von ^{12}C :

Für den Mass Excess gilt: $m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2 = (m(Z, A) - A \cdot m_u) \cdot c^2$

Für die Masse gilt: $m(Z, A) = \frac{1}{c^2} (m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2 + A \cdot m_u \cdot c^2)$

$$m(6, 12) = \frac{1}{c^2} (0 \text{ keV} + 12 \cdot m_u \cdot c^2) = 12 m_u$$

$$m(1, 1) = \frac{1}{c^2} (7288,97 \text{ keV} + 1 \cdot m_u \cdot c^2) = 7288,97 \frac{\text{keV}}{c^2} + 1 \cdot m_u$$

$$m(0, 1) = \frac{1}{c^2} (8071,32 \text{ keV} + 1 \cdot m_u \cdot c^2) = 8071,32 \frac{\text{keV}}{c^2} + 1 \cdot m_u$$

Für die Bindungsenergie gilt: $B(Z, A) = (Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A)) \cdot c^2$

oder: $B(Z, A) = (Z \cdot m(1, 1) + (A - Z) \cdot m(0, 1) - m(Z, A)) \cdot c^2$

$$B(6, 12) = (6 \cdot m(1, 1) + 6 \cdot m(0, 1) - m(6, 12)) \cdot c^2$$

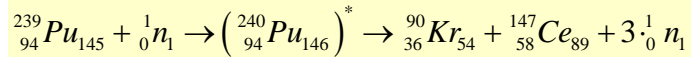
$$B(6, 12) = (6 \cdot 7288,97 + 6 \cdot 8071,32) \text{ keV} = 92161,74 \text{ keV}$$

Bindungsenergie pro Nukleon: $\frac{B(6, 12)}{12} = \frac{92161,74 \text{ keV}}{12} = 7680,145 \text{ keV} = 7,68 \text{ MeV}$

3a. Spontanspaltung bezeichnet (im Gegensatz zur induzierten Spaltung) eine spontane Zerlegung eines sehr schweren Atomkerns in leichtere Bruchstücke. Die Spontanspaltung tritt (ähnlich wie der α -Zerfall) ohne äußere Einwirkung auf und wird (ähnlich wie der α -Zerfall)

durch den Tunneleffekt erklärt. Im Fall der Spontanspaltung besteht der Tunneleffekt darin, dass sich ein näherungsweise sphärischer Ausgangskern spontan zunächst in eine elliptische, dann in eine hantelförmige Konfiguration umwandelt, obwohl für diesen Vorgang eigentlich erhebliche Energie zur Vergrößerung der Oberflächenenergie führt (**Spaltbarriere** = Spaltschwelle). Bei der **neutroneninduzierten Spaltung** dient der Einfang eines Neutrons zur Auslösung der Spaltung. Wird in einen schweren Kern mit gerader Ordnungszahl Z und ungerader Neutronenzahl N ein Neutron eingebaut, wird Bindungsenergie in beträchtlichem Umfang frei. Dadurch wird der Kern angeregt und kann die Spaltbarriere überwinden.

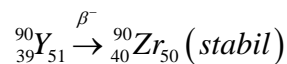
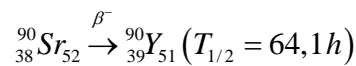
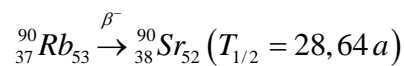
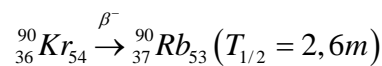
3b. Reaktionsgleichung



Halbwertszeiten:

$$T_{1/2}({}^{90}\text{Kr}) = 32,3\text{ s} \text{ und } T_{1/2}({}^{147}\text{Ce}) = 57,0\text{ s}$$

${}^{90}\text{Kr}$ zerfällt durch eine Reihe von β^- -Zerfällen zum ${}^{90}\text{Zr}$



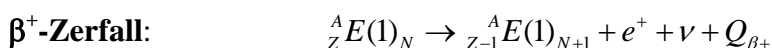
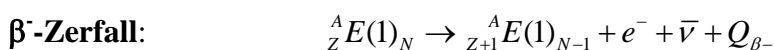
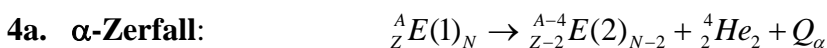
${}^{147}\text{Ce}$ zerfällt durch eine Reihe von β^- -Zerfällen zum ${}^{147}\text{Sm}$

3c. **Spaltstoffe** müssen ug-Kerne (g-gerade Protonenzahl, u-ungerade Neutronenzahl) besitzen, um beim Einfang eines Neutrons einen gg-Kern als Zwischenkern bilden zu können. Dadurch wird Energie frei, die zur Überwindung der Spaltschwelle benötigt wird.

Beispiele: ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{233}\text{U}$

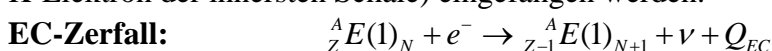
3d. Eine Moderators substanz bremst möglichst effektiv schnelle Neutronen auf thermische Energien ab. Die Moderationswirkung beruht auf elastischen Stößen der Neutronen mit leichten Atomkernen. Geeignete Moderatoren sind ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ in atomarer oder molekularer Form.

3e. Das Nachwärmeproblem des Kernreaktors beruht auf den bei der Spaltung erzeugten radioaktiven Spaltprodukten. Während die Kernspaltung selbst in einer kritischen Situation durch Schnellabschaltung oder bei einem Unfall durch Kühlmittelverlust gestoppt wird, stellt die Radioaktivität der Spaltprodukte eine nicht beeinflussbare Wärmequelle dar. Sie liegt bei einem typischen Druckwasserreaktor mit thermischer Leistung von ca. 4000 MW bei etwa 60 MW.



EC-Elektroneneinfang: EC ist die Alternative zum β^+ -Zerfall. Da für die Bildung eines Positrons (Antimaterie) eine Energie vom zweifachen der Elektronenruhemasse

$2 \cdot m_e = 2 \cdot 511\text{ keV} = 1022\text{ keV}$ erforderlich ist, ist ein β^+ -Zerfall nur dann möglich, wenn die Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand größer als 1022 keV ist. Alternativ kann (ohne Schwellenenergie von 1022 keV) eines der Hüllenelektronen (am häufigsten das K-Elektron der innersten Schale) eingefangen werden.



5a. Zerfalleigenschaften des ^{60}Co :

^{60}Co zerfällt durch β^- -Zerfall zu 99,88% in den 3ten Anregungszustand des ^{60}Ni mit der Energie 2,5057 MeV. Die Zerfallszweige in den ersten und den zweiten Anregungszustand besitzen nur geringe Zerfallswahrscheinlichkeiten: $\sim 0,12\%$. Die Energie des 3ten Anregungszustand mit 2,5057 MeV wird hauptsächlich durch eine Kaskade von γ -Quanten mit den Energien $E_{\gamma_1} = 1,1732 \text{ MeV}$ und $E_{\gamma_2} = 1,3325 \text{ MeV}$ zum Grundzustand des ^{60}Ni abgebaut. Die beiden γ -Quanten haben die relative Intensitäten $I_{\gamma_1} = 99,85 \%$ und $I_{\gamma_2} = 99,9826 \%$.

Außerhalb einer gekapselten Quelle des ^{60}Co findet man als intensivste γ -Strahlung eine Energie von 1,3325 MeV mit 99,9826% und als zweitstärkste Strahlung eine Energie von 1,1732 MeV mit 99,85% aus. Die anderen γ -Strahlungen können im Allgemeinen vernachlässigt werden, da deren Intensität $< 0,01\%$ ist.

5b. Referenzintensität der Quelle: 2,80 MBq

Referenzdatum: 01.07.2003 um 00:00:00

Halbwertszeit: $T_{1/2} = 5,2714 \text{ a} = 1925,3 \text{ d} = 1,664 \cdot 10^8 \text{ s}$

Verwendungsdatum: 28.11.2008 um 10:00:00

Zeitdifferenz: $\Delta t = 1975,42 \text{ d} = 1,707 \cdot 10^8 \text{ s}$

Aktivität zum Verwendungszeitpunkt:

$$A(\Delta t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \Delta t} = 2,80 \text{ MBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 1,707 \cdot 10^8 \text{ s}}{1,664 \cdot 10^8 \text{ s}}}$$

$$A(\Delta t) = 2,80 \text{ MBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 1,707}{1,664}} = 2,80 \text{ GBq} \cdot e^{-0,71116}$$

$$A(\Delta t) = 2,80 \cdot 0,49107 \text{ MBq} = 1,37501 \text{ MBq} \approx 1,38 \text{ MBq}$$

5c. Differentielles Zerfallsgesetz:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N(^{60}\text{Co})$$

Es folgt:

$$N(^{60}\text{Co}) = \frac{A}{-\lambda} = \frac{T_{1/2} \cdot A}{\ln 2}$$

$$N(^{60}\text{Co}) = \frac{1,664 \cdot 10^8 \cdot (-2,8 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1})}{-\ln 2} = 6,722 \cdot 10^{14}$$

Es gilt:

$$\frac{m(^{60}\text{Co})}{A_r(^{60}\text{Co})} = \frac{N(^{60}\text{Co})}{N_A}$$

$$m(^{60}\text{Co}) = A_r(^{60}\text{Co}) \cdot \frac{N(^{60}\text{Co})}{N_A}$$

$$m(^{60}\text{Co}) = 60 \text{ g mol}^{-1} \cdot \frac{6,722 \cdot 10^{14}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}$$

$$m(^{60}\text{Co}) = 6,697 \cdot 10^{-8} \text{ g} = 67 \text{ ng}$$

5d. Bestimmung des Schwächungskoeffizienten für γ -Strahlung der Energie 1,1732 MeV in Blei:

Zahl der Untergrundereignisse in 200s: $N_u(200\text{s}) = 786$

Zahl der Untergrundereignisse in 20s: $N_u(20\text{s}) = 78,6$

Schwächungskoeffizient:
$$\mu = \frac{\ln(N_1 - N_u) - \ln(N_2 - N_u)}{5 \text{ cm}}$$

$$\mu = \frac{\ln(129683) - \ln(3840)}{5 \text{ cm}} = 0,7039 \text{ cm}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient: $\frac{\mu}{\rho} = \frac{0,7039 \text{ cm}^{-1}}{11,35 \text{ g cm}^{-3}} = 0,0620 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Gesamtwirkungsquerschnitt: $\sigma_{ges} = \frac{A_r}{N_A} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,02210^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,0620 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$
 $\sigma_{ges} = 2,133 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 21,33 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 21,3 \text{ barn}$

- 5e. Abschirmung mit Bleiquadern der Dicke von 10 cm für Strahlung mit der höchsten Energie. Da laut Tabelle die Strahlungen mit den Energien 2,158 MeV und 2,505 MeV eine sehr geringe, vernachlässigbare Intensität besitzen, ist die Strahlung höchster Energie mit nicht-vernachlässigbarer Intensität die 1,332 MeV Strahlung.

Die Tabelle mit den Massenschwächungskoeffizienten für Pb liefert:

E	mü/rho
MeV	cm2/g
1,000	7,102E-02
1,250	5,876E-02
1,500	5,222E-02

Bildet man den ln für alle Elemente der Tabelle, so folgt:

ln(E)	ln(mü/rho)
0,000000	-2,644794
0,223144	-2,834294
0,405465	-2,952290

Man interpoliert zum Wert ln(E) den entsprechenden Wert von ln((mü/rho)) und wendet die exp-Funktion an:

E	ln(E)	ln(mü/rho)	mü/rho
MeV			cm2/g
1,173	0,159565	-2,780301	6,202E-02
1,332	0,286682	-2,875415	5,639E-02

Die Schwächung der Intensität einer γ -Strahlung der Energie 1,332 MeV in einer 10 cm dicken Bleischicht:

$$\frac{I(x=10 \text{ cm})}{I_0} = \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x\right)$$

$$\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x = 5,639 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \cdot 11,35 \text{ g cm}^{-3} \cdot 10 \text{ cm} = 6,400265$$

$$\frac{I(x=10 \text{ cm})}{I_0} = \exp(-6,400265) = 0,001661$$

Die Strahlungsintensität wird auf 0,166 % reduziert.

- 5f. Halbwertsdicke von Blei für Strahlung der Energie 1,332 MeV.

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho}$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{5,639 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \cdot 11,35 \text{ g cm}^{-3}}$$

$$d_{1/2} = 1,083 \text{ cm} = 10,83 \text{ mm}$$

Gesamtwirkungsquerschnitt:

$$\sigma_{ges} = \frac{A_r}{N_A} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,02210^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,05639 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma_{ges} = 1,940 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 19,4 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 19,4 \text{ barn}$$