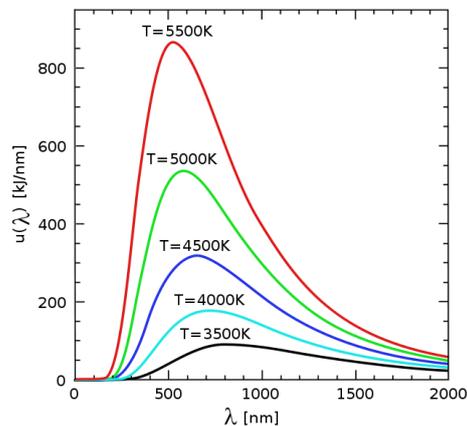
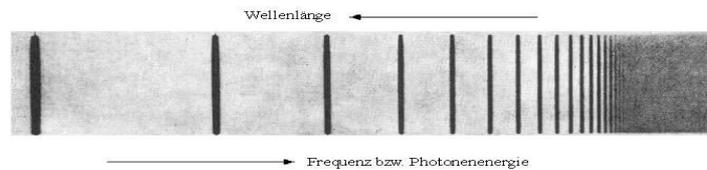


Name:.....Vorname:.....Mtrl. Nr:.....

1. Beschreiben Sie das Strahlungsspektrum „schwarzer Körper“? Skizzieren Sie die spektrale Intensität  $dI/d\lambda$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ .



2. Beschreiben Sie das Strahlungsspektrum von Gasentladungsröhren? Was sind die Besonderheiten des Lichtspektrums einer Wasserstofflampe?



3. Ordnen Sie die genannten elektromagnetischen Strahlungsarten nach aufsteigender Wellenlänge (es reicht, Kurzbezeichnungen zu verwenden).

Radarstrahlung (RA), Röntgenstrahlung (XR), IR-Strahlung (IR), UKW, Mikrowellen (MW), UV-Strahlung (UV), sichtbares Licht (SL),  $\gamma$ -Strahlung ( $\gamma$ )

$$\gamma < XR < UV < SL < IR < RA = MW < UKW$$

4. Wie ist die "relative Atommasse"  $A_{rel}$  definiert? Welche relative Atommasse hat das Element Kalium? Bestimmen Sie die Zahl der Kaliumatome in der Masse 1 kg.

$$A_{rel} = \frac{m_{Atom}}{u}$$

$$A_{rel}(\text{Kalium}) = 39,0983 \text{ g mol}^{-1}$$

$$1 \text{ kg enthält } n = \frac{1 \text{ kg}}{39,0983 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}} = 25,5766 \text{ mol}$$

$$N = N_A \cdot n = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 25,5766 \text{ mol} = 1,54 \cdot 10^{25}$$



5. Wie ist die Größe mass excess  $m_{exc}(Z,A) \cdot c^2$  definiert? In welcher Einheit wird die Größe üblicherweise in Tabellen angegeben?

$$m_{exc}(Z, A) \cdot c^2 = (m(Z, A) - A \cdot u) \cdot c^2$$

Einheit: 1 keV

6. Bestimmen Sie mit Hilfe der Tabelle im Anhang die mass excess - Werte von  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{K}$  und  $^{40}\text{Ca}$  und vergleichen Sie die Werte. Welche Radioaktivitätseigenschaften von  $^{40}\text{K}$  lassen sich ableiten?

$$^{40}\text{Ar}: m_{exc} \cdot c^2 = -35039,89602 \text{ keV}$$

$$^{40}\text{K}: m_{exc} \cdot c^2 = -33535,205 \text{ keV}$$

$$^{40}\text{Ca}: m_{exc} \cdot c^2 = -34846,275 \text{ keV}$$

Da die mass excess Werte für  $^{40}\text{Ar}$  und  $^{40}\text{Ca}$  kleiner sind als der Wert für  $^{40}\text{K}$ , kann  $^{40}\text{K}$  durch  $\text{EC} + \beta^+$  in  $^{40}\text{Ar}$  und durch  $\beta^-$  Zerfall in  $^{40}\text{Ca}$  zerfallen.

7. Beschreiben Sie die Zerfallseigenschaften des  $^{40}\text{K}$  anhand der Information in Anlage A1.

8. Bestimmen Sie die Bindungsenergie  $B(Z,A)$  und die Bindungsenergie pro Nukleon  $B(Z,A)/A$  für  $^{40}\text{K}$ .

Masse des  $^{40}\text{K}$ : 
$$m(Z, A) = A \cdot u + m_{exc}(Z, A) \quad (1)$$

Bindungsenergie: 
$$B(Z, A) = Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A) \quad (2)$$

Einsetzen von (1) in (2): 
$$B(Z, A) = Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - A \cdot m_u - m_{exc}(Z, A) \quad (3)$$

für  $m_H$  und  $m_n$  gilt: 
$$m_H = u + m_{exc,H} \quad \text{und} \quad m_n = u + m_{exc,n} \quad (4)$$

Setze (4) in (3): 
$$B(Z, A) = Z \cdot (u + m_{exc,H}) + (A - Z) \cdot (u + m_{exc,n}) - A \cdot u - m_{exc}(Z, A)$$

Es folgt: 
$$B(Z, A) = Z \cdot m_{exc,H} + N \cdot m_{exc,n} - m_{exc}(Z, A)$$

$$B(Z, A) = (19 \cdot 7,28897 + 21 \cdot 8,07132 - (-33535,205)) \text{ MeV}$$

$$B(Z, A) = 341,523 \text{ MeV}$$

Bindungsenergie pro Nukleon: 
$$\frac{B(Z, A)}{A} = \frac{341,523 \text{ MeV}}{40} = 8,538 \text{ MeV}$$

9. Welche (exakte) Masse hat ein neutrales  $^{40}\text{K}$  Atom? Geben Sie das Ergebnis als Energie  $mc^2$  in der Einheit  $eV$  oder Vielfache von  $eV$  an.

Masse des  $^{40}\text{K}$  
$$m(Z, A) = A \cdot u + m_{exc}(Z, A)$$



Exakt: 
$$(40 \cdot 931,494043 - (-33,535,205)) \frac{\text{MeV}}{c^2} = 37293,2969 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

- 10.** Im Gartenbau und in der Landwirtschaft werden Kalidüngersorten mit einem Gewichtsanteil von 60%  $\text{K}_2\text{O}$  verwendet. Welche Gesamtaktivität besitzt ein Gebinde, das 50 kg enthält?

Der 50 kg Sack Kalidünger soll zu 60% aus  $\text{K}_2\text{O}$  bestehen, also beträgt die Masse des  $\text{K}_2\text{O}$  insgesamt 30 kg. Der Massenanteil des Kaliums beträgt:

$$\frac{2 \cdot A_r(\text{K})}{2 \cdot A_r(\text{K}) + 1 \cdot A_r(\text{O})} = \frac{2 \cdot 39,0983}{2 \cdot 39,0983 + 1 \cdot 15,994} = 0,8303$$

Gesamtmasse Kalium:  $m(\text{K}) = 0,8303 \cdot 30 \text{ kg} = 24,91 \text{ kg}$

Gesamtmasse  $^{40}\text{K}$ :  $m(^{40}\text{K}) = 0,000117 \cdot 24,91 \text{ kg} = 2,914 \text{ g}$

Zahl der  $^{40}\text{K}$  Atome:  $N(^{40}\text{K}) = N_A \frac{2,914 \text{ g}}{40 \text{ g}} = 4,4 \cdot 10^{22}$

Aktivität: 
$$A = -\lambda \cdot N = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N$$

$$A = -\frac{\ln 2 \cdot 4,4 \cdot 10^{22}}{1,28 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}} = -7,55 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

$$A = 755 \text{ kBq}$$

- 11.** Wie groß ist der relative Anteil des Isotops  $^{40}\text{K}$  im natürlichen Isotopengemisch heute? Wie groß war der relative Anteil des Isotops  $^{40}\text{K}$  vor 4,5 Milliarden Jahren, zum Zeitpunkt, als die Erde entstand?

Verhältnis der Zahl der  $^{40}\text{K}$  Atome heute zur Zahl der  $^{40}\text{K}$  Atome vor 4,5  $10^9$  Jahren

$$\frac{N_{^{40}\text{K}}}{N_0} = e^{-\frac{\ln 2 \cdot 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}}{1,277 \cdot 10^9 \text{ a}}} = 0,086937 = \frac{1}{11,5025}$$

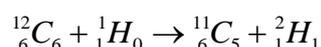
Es gilt heute:  $\frac{N_{^{40}\text{K}}}{N_R + N_{^{40}\text{K}}} = 0,000117$ . Daraus folgt:  $N_R = \frac{1 - 0,000117}{0,000117} \cdot N$

Vor 4,5 Milliarden Jahren galt:

$$x = \frac{N_{^{40}\text{K}} \cdot 11,5025}{N_R + N_{^{40}\text{K}} \cdot 11,5025} = \frac{11,5025}{\frac{1 - 0,000117}{0,000117} + 11,5025} = 0,001344$$

Relativer Anteil des  $^{40}\text{K}$  vor 4,5 Milliarden Jahren: 0,1344%

- 12.** Bei der medizinischen Positronenemissionstomographie (PET) verwendet man das radioaktive Isotop  $^{11}\text{C}$ , das durch Bestrahlung von  $^{12}\text{C}$  mit  $^1\text{H}^+$ -Ionen hergestellt wird. Wie lautet die Reaktionsgleichung? Berechnen Sie die Reaktionsenergie ( $Q$ -Wert).

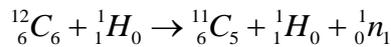


$$Q_1 = m_{exc, {}^{12}_6C} + m_{exc, {}^1_1H_0} - m_{exc, {}^{11}_6C} + m_{exc, {}^1_1H_1}$$

$$Q_1 = (0 + 7288,97 - 10650,34 - 13135,72) \text{ keV}$$

$$Q_1 = -16,50 \text{ MeV} \text{ Reaktion ist endotherm.}$$

Möglich ist auch:



$$Q_2 = m_{exc, {}^{12}_6C} + m_{exc, {}^1_1H_0} - m_{exc, {}^{11}_6C} + m_{exc, {}^1_1H_0} + m_{exc, {}^1_0n_1}$$

$$Q_2 = (0 + 7288,97 - 10650,34 - 7288,97 - 8071,31) \text{ keV}$$

$$Q_2 = -18,72 \text{ MeV} \text{ Reaktion ist endotherm.}$$

13. Nehmen Sie an, dass bei der Produktion des  ${}^{11}\text{C}$  in der MHH eine Aktivität von 1,2 GBq erzeugt wird. Die Verarbeitung zu einem medizinischen Diagnostikum dauert 35 Minuten. Welche Aktivität steht für die Diagnose beim Patienten zur Verfügung?

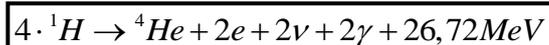
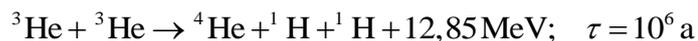
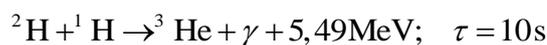
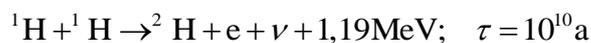
$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

$$A(t) = 1,2 \text{ GBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{20,38 \cdot 60 \text{ s}} \cdot 35 \cdot 60 \text{ s}} = 0,3649 \text{ GBq} = 365 \text{ MBq}$$

14. Welche Strahlung des  ${}^{11}\text{C}$  wird bei der PET-Methode verwendet? Welche Strahlungseigenschaften werden verwendet?

*Verwendet wird die  $\beta^+$ -Strahlung, bzw. die Vernichtungsstrahlung, die nach einer Reaktion von Positron und Elektron ausgesandt wird.*

15. Die Energie von Sternen stammt aus Kernfusionsreaktion. Welche Elementumwandlungen liefern den Hauptbeitrag der Energieproduktion in unserer Sonne? Beschreiben Sie den in der Sonne ablaufenden Kernreaktionszyklus. Warum kann man diesen Zyklus nicht auch auf der Erde zur Energieerzeugung verwenden.



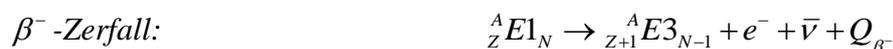
*Vier Wasserstoffatome werden in ein  ${}^4\text{He}$  Atom verwandelt, wobei zusätzlich 2 Elektronen, 2 Neutrinos und zwei Gamma-Quanten entstehen. Die gesamte frei werdende Energie ist 26,72 MeV pro Reaktionszyklus. Allerdings bleibt nur ein kleinerer Betrag von 26,21 MeV in der Sonne, der Rest verlässt als kinetische Energie der Neutrinos die Sonne.*



Der Zyklus kann nicht auf der Erde zur Energieerzeugung eingesetzt werden, weil die Zeitkonstanten viel zu lang sind, um tatsächlich einen Reaktionszyklus ausbilden zu können.

16. Warum gibt es in den meisten der heutigen Kernspaltungsreaktoren ein Nachwärmeproblem? Wodurch entsteht die Nachwärme? Worin besteht das Problem? Welche technischen Gegenmaßnahmen gibt es? Welche quantitativen Aussagen können Sie zum Nachwärmeproblem bei einem Leistungsreaktor mit  $P_{el} = 1200 \text{ MW}$  machen? *Nachwärme entsteht unvermeidbar durch die radioaktiven Spaltprodukte. Die Halbwertszeiten der Spaltprodukte bestimmen die Abklingkurve der Wärmeproduktion und sind durch physikalische-technische Maßnahmen nicht beeinflussbar. Die Nachwärme muss bei einem Leichtwasserreaktor aktiv aus dem Reaktorgefäß entfernt werden (aktive Kühlungseinrichtungen) Bei einem  $1200 \text{ MW}_{el}$  Reaktor, der etwa  $4000 \text{ MW}$  thermische Leistung hat, beträgt die Nachwärmeproduktion einige Minuten nach dem Ausschalten knapp  $100 \text{ MW}$ , nach 100 Tagen ist sie auf  $2\text{-}3 \text{ MW}$  abgeklungen. Nach dieser Zeit reicht normalerweise auch eine passive Kühlung.*

17. Mit welchen Reaktionsgleichungen können Sie die  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ - und EC-Radioaktivität beschreiben? Unter welchen Bedingungen tritt eine EC-Umwandlung, unter welchen Bedingungen ein  $\beta^+$ -Zerfall auf?



$$\text{Es muss gelten: } Q_{EC} = Q_{\beta^+} + 1022 \text{ keV}$$

18. Beschreiben Sie, was mit den Reaktionsprodukten der  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ - und EC-Radioaktivität nach deren Abbremsung in Materie passiert. Welche Konsequenzen ergeben sich für den praktischen Strahlenschutz?

*$\alpha$ -Teilchen werden zu neutralen He-Atomen. In gekapselten Quellen baut sich ein Gasdruck auf, der die Quellen beschädigen kann.  $\beta^-$ -Strahlung wird zu normalen Elektronen in der Materie,  $\beta^+$ -Strahlung zerstrahlt nach der Abbremsung mit Elektronen der Materie zu zwei Vernichtungsquanten mit der Energie  $511 \text{ keV}$ .*



19. Beschreiben Sie die spektralen Energieverteilungen (Spektren) der  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ - und EC-Radioaktivität.

$\alpha$ -Zerfall:	Diskrete Spektren
$\beta^-$ -Zerfall:	Kontinuierliche Spektren
$\beta^+$ -Zerfall:	Kontinuierliche Spektren
EC -Zerfall:	Neutrino hat diskretes Spektrum

20. Auf welche Weise kann man experimentell die Ladungsart (positiv, negativ und neutral) von Elementarteilchen bestimmen?

*Ablenkung in magnetischen Feldern: Aus der Ablenkungsrichtung kann auf das Ladungsvorzeichen geschlossen werden.*

21. Beschreiben Sie die Eigenschaften eines Geiger-Müller-Zählrohrs, insbesondere die Unterschiede zum Proportionalzählrohr und zur Ionisationskammer.  
*Bei einer Gasentladungsröhre entsteht bei sehr hohen Gasverstärkungen ein Plateau., h.h. die Gasverstärkung ist als Funktion der Speisespannung in einem gewissen Bereich näherungsweise konstant. Dieser Bereich wird Geiger-Müller-Bereich genannt. Ursache ist, dass die Ladungslawine keine Ladungsvermehrung mehr erzeugen kann, weil keine Atome mehr verfügbar sind.*

22. In den drei natürlichen Zerfallsreihen von  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$  entstehen radioaktive Isotope des Elementes Radon. Welches Radonisotop aus diesen Zerfallsreihen hat die längste Halbwertszeit? Welche radioökologische Bedeutung haben die Radon-Isotope und deren Folgeprodukte?

Zerfallsreihe des $^{238}\text{U}$ :	$^{222}\text{Rn}$ mit $T_{1/2} = 3,825\text{ s}$
Zerfallsreihe des $^{235}\text{U}$ :	$^{219}\text{Rn}$ mit $T_{1/2} = 3,96\text{ s}$
Zerfallsreihe des $^{232}\text{Th}$ :	$^{220}\text{Rn}$ mit $T_{1/2} = 55,6\text{ s}$

*Die Radonisotope und ihre Folgeprodukte erzeugen die Radioaktivität in der Atmosphäre.*

23. In einem Vorlesungsversuch wurde die Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $E_\gamma = 662\text{ keV}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) in Aluminium untersucht.

Absorberdicke	$E_\gamma = 661,6\text{ keV}$
$x / \text{cm}$	$N / 10\text{ s}$
0,8	8167
8,0	2023

Die Untergrundzählrate betrug 25 Ereignisse in einer Messzeit von 10 s. Ohne Absorber wurden drei Messungen durchgeführt, die 9415, 9517 und 9602 Ereignisse in 10 s lieferten.

Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , den Massenschwächungskoeffizienten



$\frac{\mu}{\rho}$  und den Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ .

(Dichte Blei  $\rho_{Al} = 2,699 \text{ g cm}^{-3}$ , rel. Atommasse:  $A_{rel,Al} = 26,98 \text{ g mol}^{-1}$ , Avogadro Zahl:  $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ g mol}^{-1}$ )

Bestimmung von  $\mu$ : 
$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N(z_2) - N_u}{N_0 - N_u}\right) - \ln\left(\frac{N(z_1) - N_u}{N_0 - N_u}\right)}{z_2 - z_1} = -0,1938 \text{ cm}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient: 
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1,270 \text{ cm}^{-1}}{11,3 \text{ g cm}^{-3}} = 0,07181 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Wirkungsquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{26,98 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,07181 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = 3,21 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

24. Schätzen Sie anhand der Information der Anlagen A1 und A2 die Schichtdicke  $z$  aus Aluminium, die mindestens erforderlich ist, um die  $\beta^-/\beta^+$ -Strahlung des  $^{40}\text{K}$  vollständig abzuschirmen.

Die maximale Energie der  $\beta^-$ -Strahlung ist ca. 1311 keV und damit erheblich höher als die Maximalenergie der  $\beta^+$ -Strahlung

( $Q_{EC} = 1504 \text{ keV}$ ,  $E_{\beta^+, \max} = (1504 - 1022) \text{ keV} = 482 \text{ keV}$ ).

Eine  $\beta^-$ -Strahlung in Aluminium hat eine Reichweite von circa  $3 \cdot 10^{-1} \text{ cm} = 3 \text{ mm}$ .

25. Wie groß ist die Halbwertsdicke von Aluminium für die  $\gamma$ -Strahlung des  $^{40}\text{K}$  mit höchster Energie? Wie dick müsste eine Abschirmung aus Aluminium sein, um die Strahlungsintensität auf 1/10 zu reduzieren?

Beim  $^{40}\text{K}$  Zerfall wird  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $E_\gamma = 1461 \text{ keV}$  ausgesandt.

E / MeV	mü/rho	ln E	ln(mü/rho)
1,250E+00	5,500E-02	0,2231	-2,9004
1,500E+00	5,010E-02	0,4055	-2,9937
1,461E+00	5,078E-02	0,3791	2,98025142

Massenschwächungskoeffizient: 
$$\frac{\mu}{\rho} = 5,078 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

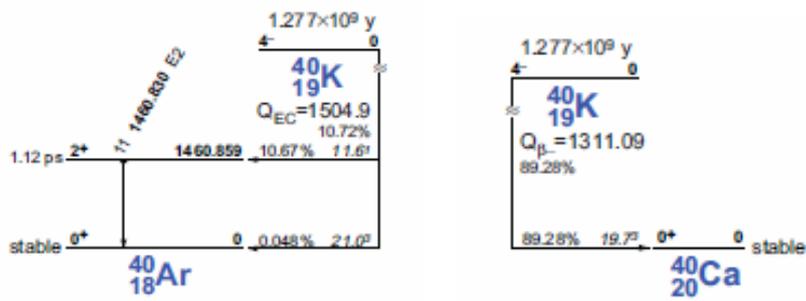
Schwächungskoeffizient: 
$$\mu = 1,371 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

Halbwertsdicke: 
$$d_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu} = 5,057 \text{ cm}$$

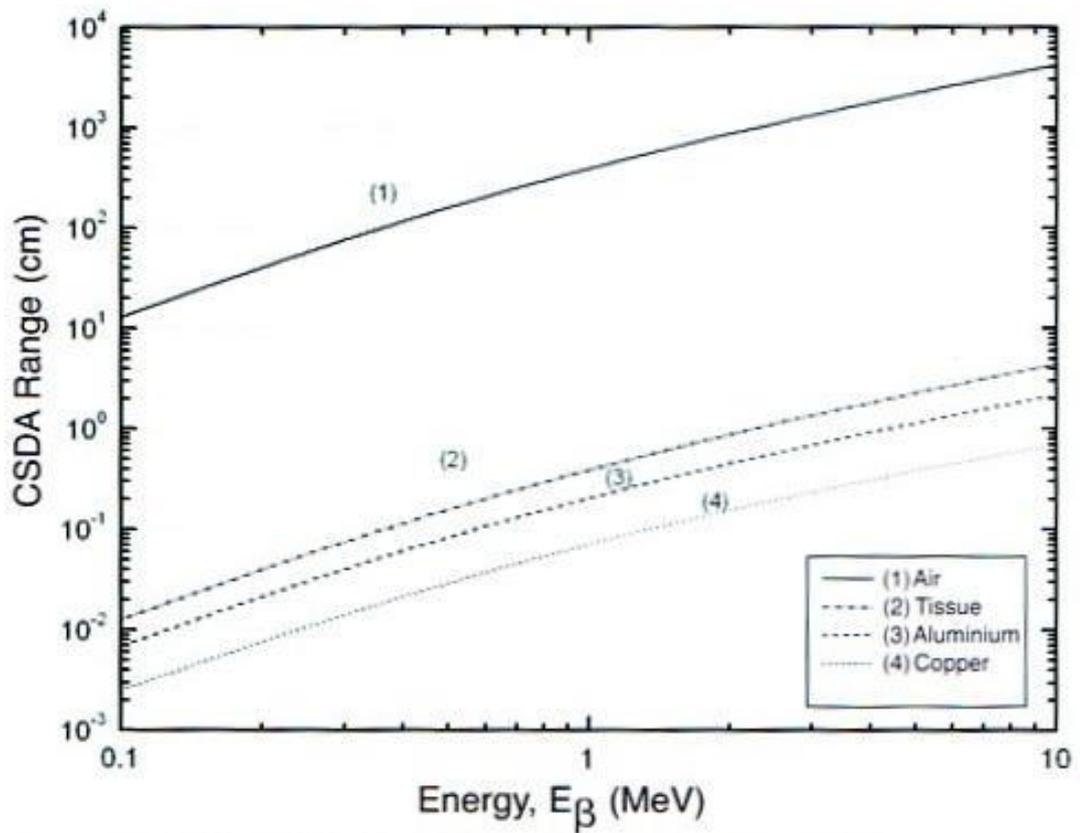
Zehntelwertsdicke: 
$$d_{1/10} = \frac{\ln(10)}{\mu} = 16,8 \text{ cm}$$



## Anlage A1: Zerfallsschemata des $^{40}\text{K}$



## Anlage A2. Reichweite von $\beta$ -Strahlung in Materie



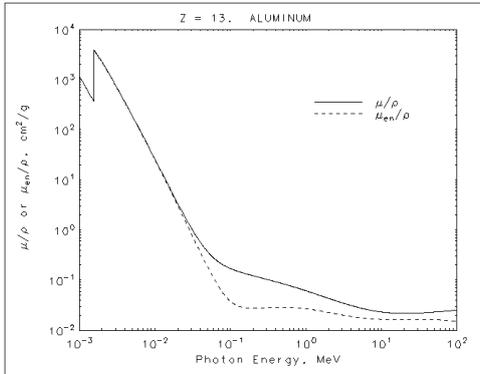
**Abb.1** Reichweite (CSDA Range) von  $\beta$ -Strahlung in Materie.

Dichte:  $\rho_{Air} = 1.293 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\rho_{Tissue} = 1,060 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\rho_{Al} = 2,699 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\rho_{Cu} = 8,960 \text{ g cm}^{-3}$ .



# Anlage A3 Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

Dichte des Aluminium:  $2,699 \text{ g cm}^{-3}$



Mass Attenuation Coefficient for Aluminium					
Energy	$\mu/\rho$	Energy	$\mu/\rho$	Energy	$\mu/\rho$
(MeV)	( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	(MeV)	( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	(MeV)	( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
1,00E-03	1,19E+03	3,00E-02	1,13E+00	1,00E+00	6,15E-02
1,50E-03	4,02E+02	4,00E-02	5,69E-01	1,25E+00	5,50E-02
1,56E-03	3,62E+02	5,00E-02	3,68E-01	1,50E+00	5,01E-02
K 1,56E-03	3,96E+03	6,00E-02	2,78E-01	2,00E+00	4,32E-02
2,00E-03	2,26E+03	8,00E-02	2,02E-01	3,00E+00	3,54E-02
3,00E-03	7,88E+02	1,00E-01	1,70E-01	4,00E+00	3,11E-02
4,00E-03	3,61E+02	1,50E-01	1,38E-01	5,00E+00	2,84E-02
5,00E-03	1,93E+02	2,00E-01	1,22E-01	6,00E+00	2,66E-02
6,00E-03	1,15E+02	3,00E-01	1,04E-01	8,00E+00	2,44E-02
8,00E-03	5,03E+01	4,00E-01	9,28E-02	1,00E+01	2,32E-02
1,00E-02	2,62E+01	5,00E-01	8,45E-02	1,50E+01	2,20E-02
1,50E-02	7,96E+00	6,00E-01	7,80E-02	2,00E+01	2,17E-02
2,00E-02	3,44E+00	8,00E-01	6,84E-02		

Quelle: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>



N =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	N =		
n	0	8071,3171												n	0	
H	1	7288,9705	13135,72158	14949,806	25901,518	32892,44	41863,757	49135#	<b>Mass excess = <math>m_{exc}c^2 = (m(Z,A) - A * u) * c^2</math> in keV</b>						H	1
He	2		14931,21475	2424,91565	11386,233	17595,106	26101,038	31598,044	40939,429	48809,203				He	2	
Li	3	28667#	25323,185	11678,886	14086,793	14908,141	20946,844	24954,264	33050,581	40797,31	50096#			Li	3	
Be	4		37996#	18374,947	15770,034	4941,672	11347,648	12606,67	20174,064	25076,506	33247,823	39954,498	49798#	57678#	Be	4
B	5		43603#	27868,346	22921,49	12415,681	12050,731	8667,931	13368,899	16562,166	23663,683	28972,278	37081,686	43770,816	B	5
C	6			35094,06	28910,491	15698,682	10650,342	0	3125,01129	3019,89305	9873,144	13694,129	21038,832	24926,178	C	6
N	7				38800,148	24303,569	17338,082	5345,481	2863,41704	101,43805	5683,658	7871,368	13114,466	15862,129	N	7
O	8					32047,954	23112,428	8007,356	2855,605	-4737,00141	-808,813	-781,522	3334,87	3797,462	O	8
F	9		<b>Mass excess values in keV</b>				32658#	16775,372	10680,254	1951,701	873,701	-1487,386	-17,404	-47,551	F	9
Ne	10							23996,462	16460,901	5317,166	1751,44	-7041,93131	-5731,776	-8024,715	Ne	10
N =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Na	11	
								24189,968	12926,808	6847,719	-2184,161	-5182,436	-9529,85358	Mg	12	
								33040,092	17570,348	10910,506	-396,963	-5473,766	-13933,567	Al	13	
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		
			<b><math>u = 1,660\ 538\ 86\ 10^{-27}</math> kg</b> <b><math>uc^2 = 931,494\ 043</math> MeV</b>													
B	5	52322#	59364#							26119#	18183#	6769,57	-56,946	-8916,172	Al	13
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#					32164#	23772#	10754,673	3824,318	-7144,632	Si	14
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#								P	15
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#						S	16
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#				Cl	17
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#	25	Ar	18
Na	11	-8418,114	-9357,818	-6862,316	-5517,436	-989,247	2665,004	8361,09	12654,768	19064,478	24889,293	32761#	39582#	47953#	Na	11
Mg	12	-13192,826	-16214,582	-14586,651	-15018,641	-10619,032	-8910,672	-3217,38	-954,781	4894,07	8808,603	16152#	21424#	29249#	Mg	12
Al	13	-12210,309	-17196,658	-16850,441	-18215,322	-15872,419	-14953,628	-11061,966	-8529,377	-2932,495	-130,19	5781,974	9946,326	16050,594	Al	13
Si	14	-12384,301	-21492,79678	-21895,046	-24432,928	-22949,006	-24080,907	-20492,662	-19956,77	-14360,307	-12482,507	-6579,998	-4067,274	1928,205	Si	14
P	15	-7158,753	-16952,626	-20200,575	-24440,885	-24305,218	-26337,486	-24557,669	-24857,74	-20250,977	-18994,145	-14757,82	-12873,735	-8106,838	P	15
S	16	-3159,582	-14062,532	-19044,648	-26015,697	-26585,994	-29931,788	-28846,356	-30664,075	-26896,36	-26861,197	-23162,245	-22866,568	-19019,105	S	16
Cl	17	4443#	-7067,165	-13329,771	-21003,432	-24439,776	-29013,54	-29521,857	-31761,532	-29798,097	-29800,203	-27557,81	-27307,189	-24912,99	Cl	17
Ar	18	11293#	-2200,204	-9384,141	-18377,217	-23047,411	-30231,54	-30947,659	-34714,551	-33242,011	-35039,89602	-33067,467	-34422,675	-32009,808	Ar	18
K	19	20418#	6763#	-1481#	-11168,9	-17426,171	-24800,199	-28800,691	-33807,011	-33535,205	-35559,074	-35021,556	-36593,239	-35809,606	K	19
Ca	20		13153#	4602#	-6439,359	-13161,76	-22059,22	-27274,4	-34846,275	-35137,759	-38547,072	-38408,639	-41468,479	-40811,95	Ca	20
Sc	21			13898#	2841#	-4937#	-14168,021	-20523,228	-28642,392	-32121,239	-36187,929	-37816,093	-41067,792	-41757,115	Sc	21
Ti	22				9101#	1500#	-8850,275	-15700#	-25121,552	-29321,103	-37548,459	-39005,737	-44123,422	-44932,394	Ti	22
V	23					10330#	-205#	-8169#	-18024#	-24116,38	-31879,629	-37073,013	-42002,051	-44475,385	V	23
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		

Anlage 4: Mass Excess Table: G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, [http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass\\_3.pdf](http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass_3.pdf)



