

Radioaktivität

Einführung:

Mit Hilfe eines Szintillationsdetektors werden γ -Spektren von verschiedenen Proben gemessen, um daraus die enthaltenen Isotope zu bestimmen und die Strahlenbelastung für den Menschen abzuschätzen.

Messung 1/Aufgabe 1:

Aus den Spektren kann man mit Hilfe des Computerprogramms die Peaks der jeweiligen Isotope genau bestimmen:

	chn	E[keV]
Na-22	139	511
	328	1275
	458	1786
Co-60	304	1173
	343	1333
	632	2506
Cs-137	176	662

Wenn man für die einzelnen Werte die Energiebelegung pro Kanal ausrechnet, stellt man fest das mit steigendem Kanal auch die Energiebreite des Kanals zunimmt. Somit hat man für verschiedene Kanäle verschiedene Eichungen. Um Nuklide bestimmen zu können (Messung 4/5/6), nimmt man die Steigung m_i ($i=1..7$) des dazugehörigen Kanalbereiches her und berechnet so die Energie des unbekanntes Peaks (ggf. interpolieren):

$$E(\text{chn}) = m_i \cdot \text{chn} = \frac{E_i}{\text{chn}_i} \cdot \text{chn}$$

$$m_1 = 3,68 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_2 = 3,76 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_3 = 3,86 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_4 = 3,89 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_5 = 3,89 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_6 = 3,90 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

$$m_7 = 3,97 \frac{\text{keV}}{\text{chn}}$$

Messung 2:

a) Die Gesamtzählrate für den Untergrund ohne Bleiabschirmung beträgt:

$$n_\gamma = \frac{N_\gamma}{t} = 17,4 \cdot 10^9 \frac{1}{a} \pm 0,0302 \cdot 10^9 \frac{1}{a}$$

b) Für den Bereich des K-40-Peaks zählt man im Spektrum mit Bleiabschirmung:

$$N_{K-40; \text{Untergrund}} = 546 \pm 23$$

Aufgabe 2:

1.: Kristallmasse: $m = \rho \cdot V = 1,28575 \text{ kg}$

2.: massenspezifische Zählrate (Zählrate aus Messung 2a): $\frac{n_\gamma}{m} = 13,5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{kg} \cdot \text{a}} \pm 0,0235 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{kg} \cdot \text{a}}$

3.: Dosisleistung: $\frac{D}{t} = \bar{E}_\gamma \frac{n_\gamma}{m} = 0,216 \frac{\text{mSv}}{\text{a}} \pm 0,000376 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$

Messung 3:

Wir erwarten einen Peak für K-40 bei einer Energie von 1461keV. Die Anzahl der aus dem Zerfall von K-40 stammenden Quanten erhält man durch Subtraktion des Untergrundes vom gemessenen Spektrum (Messzeit: 600s):

$$N_{K-40} = N_{K-40; \text{gemessen}} - N_{K-40; \text{Untergrund}} = 2403 \pm 58,7$$

Aufgabe 3:

1.: Aktivität anno 2002:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\ln 2 \frac{t}{t_{1/2}}} = 333 \text{ kBq} \cdot e^{-\ln 2 \frac{12 \text{ a}}{30,17 \text{ a}}} = 253 \text{ kBq}$$

2.: Raumwinkel eines Menschen im Abstand 1m:

Wir gehen von einer geschätzten Fläche des Körpers von

$$A = 1,8 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = 0,54 \text{ m}^2 \text{ aus. Damit kommt man auf einen Anteil am gesamten Raumwinkel von}$$

$$\frac{A_{\text{Körper}}}{\Omega r^2} = 0,043.$$

3.: Energie in einem Jahr:

$$E_{\text{ges}} = E_\gamma \cdot N_\gamma = E_\gamma \cdot \int_0^{1 \text{ a}} A(t) dt = -A_0 \cdot \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \left[e^{-\ln 2 \frac{t}{t_{1/2}}} \right]_0^{1 \text{ a}} = 0,828 \text{ J}$$

4.: bei einem Körpergewicht von 75kg entspricht das einer Dosis von

$$D = \frac{E_\gamma \cdot N_\gamma}{m} = 11,0 \text{ mSv}.$$

Messung 4 und Messung 6:

Wir haben die Messungen von den verschiedenen Proben zusammengezogen. Wie in Messung/Aufgabe 1 erläutert, bestimmt man die Isotope:

Uraninit		
chn	E [keV]	Isotop
31,00	114	Th-234 ?
85,00	313	Pb-214 ?
99,43	366	Pb-214
167,40	623	Bi-214
298,50	1152	Bi-214
457,22	1783	Bi-214

Thorium		
chn	E [keV]	Isotop
28,51	105	?
67,57	249	Ra-224
94,00	346	Ac-228
157,20	583	Tl-208
191,36	721	Bi-212
239,68	913	Ac-228
252,00	965	Ac-228
408,26	1590	?
536,00	2106	?
647,26	2570	Tl-208

U₃O₈		
chn	E [keV]	Isotop
29,45	108	
54,00	199	Ra-226 ?
203,31	769	Pa-234
262,31	999	Pa-234
27,00	99	Th-234

Monazit		
chn	E [keV]	Isotop
29,00	107	?
68,94	254	Ra-224 ?
96,00	353	Ac-228 ?
160,61	597	Tl-208
201	760	Bi-212 ?
244,31	931	Ac-228
258,00	987	Ac-228
300	1158	?
415,37	1618	?
544,00	2141	?
659,44	2618	Tl-208
809,07	3212	?

Armbanduhr		
chn	E [keV]	Isotop
374,37	1456	K-40

Wecker		
chn	E [keV]	Isotop
68,86	253	?
83,38	307	Ra-224 ?
98,53	363	Ac-228 ?
165,29	615	Tl-208
207,43	785	Bi-212 ?
246,48	939	Ac-228
293,96	1132	Ac-228
323,05	1253	?
359,91	1400	?
448,74	1750	?
554,75	2183	Tl-208
611,16	2414	?

Aufgabe 4:

1.: Masse des Kaliums in 100g Probenmasse: $m_K = \frac{2M_K}{2M_K + M_C + 3M_O} \cdot 100g = 56,5g$

2.: Anzahl Kaliumatome in 100g Probenmasse: $N_K = \frac{m_K}{M_K} = 1,45mol = 8,73 \cdot 10^{23}$

3.: Anzahl K-40 darin: $N_{K-40} = 0,01\% \cdot N_K = 8,73 \cdot 10^{19}$

4.: Probenmasse: $m_{K_2CO_3} = 100,34g$

Mit Hilfe der differentiellen Schreibweise des Zerfallsgesetzes kann man die Aktivität ausrechnen:

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N_{K-40} = 9,0 \cdot 10^5 \frac{1}{s}$$

Es ergibt sich jedoch eine außerordentliche Diskrepanz zu den gemessenen Werten ($A(t)_{gem} = 2406 \frac{1}{s}$):

$$\frac{A(t)_{gem}}{A(t)} = 0,027$$

Erklärung: Die gesamte Aktivität der Probe kann gar nicht erfasst werden, da der Szintillationskristall nicht den gesamten Raumwinkel einnimmt. Selbst wenn man die Probe so nahe wie möglich an den Detektor heranschiebt, so wird maximal 50% der Strahlung registriert. Desweiteren werden zeitlich eng beieinanderliegende Ereignisse durch die Totzeit des Szintillators nicht einzeln aufgelöst. Es kommt also zu einer weiteren Reduzierung der tatsächlichen Zerfälle.

Messung 5:

Von dem Unfall 1986 in Tschernobyl ist heute hauptsächlich Cäsium-137 zu finden. Andere damals freigesetzte Isotope hatten sehr kurze Halbwertszeiten und waren einige Wochen nach dem Vorfall nicht mehr nachweisbar.

Gras		
chn	E [keV]	Isotop
179,15	673	Cs-137

Aufgabe 5:

Als virtuell gegessene Probe nehmen wir reines Thorium. Die Aktivität kann bei einer Halbwertszeit von 14 Milliarden Jahren als konstant angenommen werden. Das heißt, dass innerhalb einer Woche

$N(7d) = A(t) \cdot 7d = 1,21 \cdot 10^{10}$ Atome zerfallen. Die höchste γ -Energie von Thorium beträgt 64keV. Also wird innerhalb einer Woche eine Energie von

$$E = N(7d) \cdot 64keV = 1,24 \cdot 10^{-4} J \text{ übertragen. Bei einem Körpergewicht von } 75kg \text{ sind das}$$
$$D = 1,65 \mu Sv$$

Aufgabe 6:

Wie im Protokollheft gerechnet, erfährt der Kristall eine Leistung von $P = 4,32 \cdot 10^{-9} W$. Das entspricht einer jährlichen Energie von $E = 0,137 J$. Auf die Körpermasse eines Menschen bezogen ergeben sich somit:

$$D = \frac{E}{m} = 1,82 mSv$$

Beantwortung der Fragen:

1. Wie ist die Einheit keV definiert? Drücken Sie die Energie des im Text erwähnten kosmischen Teilchens ($4 \cdot 10^{12} GeV$) in Joule aus. Vergleichen Sie diese Energie mit Energien um Sie herum.

Ein Elektron, das durch eine Spannung von 1keV beschleunigt wird, erhält dadurch die kinetische Energie von 1keV.

$$1ev = 1,6022 \cdot 10^{-19} J$$

$$1J = 6,241 \cdot 10^{18} eV$$

Eine Energie von $4 \cdot 10^{12} GeV$ entspricht somit 641J.

Mit 641J könnt man eine Last von 10kg 6,5m oder einen Menschen von 70kg 0,9m hochheben.

2. Wieso haben die im Versuch beobachteten Peaks eine Breite? Warum werden nicht alle γ -Quanten einer ganz bestimmten Energie in einem einzigen Kanal gezählt? Was versteht man unter dem Begriff Halbwertsbreite?

Die im Versuch beobachteten Peaks haben eine Breite, da die Energie der γ -Quanten nur indirekt gemessen werden. Somit werden eigentlich nur die durch die γ -Quanten ausgelösten Elektronen gemessen. Beim Photoeffekt verschwindet das γ -Quant vollständig; beim Compton-Effekt stößt das γ -Quant mit einem Atom zusammen, ionisiert es und fliegt mit niedrigerer Energie weiter. Man glaubt somit ein γ -Quant mit niedrigerer Energie zu registrieren. Auch erfolgen die Rekombinationen nicht alle simultan, sondern sie sind statistisch um einen Mittelwert verteilt.

Unter der Halbwertsbreite versteht man die Breite des Peaks bei halber Höhe des Maximalwertes.

3. Erklären Sie, aus welchen Peaks sich das ^{22}Na -Spektrum zusammensetzt und woher sie kommen (z.B. die 511 keV Linie).

Man erhält drei Peaks: bei 511 keV, 1276 keV und bei 1787 keV.

Die 1787 keV - Linie erhält man bei gleichzeitiger Registrierung der 511 keV- und der 1276 keV - Linien.

Beim radioaktiven Zerfall von ^{22}Na entsteht ein γ -Quant mit einer Energie von 1276 keV. Durch Paarbildung eines Positron- Elektronpaares entstehen zwei γ -Quanten, die in einem Winkel von 180° auseinanderfliegen. Jedes dieser γ -Quanten besitzt eine Energie von 511 keV. Da die beiden γ -Quanten in entgegengesetzte Richtungen fliegen, kann man nur eines registrieren.

4. Wieso ist in den Spektren eine Linie bei 77 keV zu sehen? (Hinweis: Bleiabschirmung).

Die Strahlung entzieht auch den Blei-Atomen in der Abschirmung Elektronen. Somit erhält man das charakteristische Röntgenspektrum von Blei (hier: K-Linie von 77 keV).

5. In der Einführung wurde darauf hingewiesen, dass die einzige Aussage, die man über den Zerfall von Atomkernen machen kann, statistischer Natur ist. Der statistische Fehler, den Sie durch Zählen der Zerfälle machen, ist $\Delta n = \sqrt{n}$. Was bedeutet dies für hohe Zählraten?

Aufgrund der Beziehung $\Delta n = \sqrt{n}$ folgt für hohe Zählraten, dass der relative Fehler $\frac{\Delta n}{n} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}$

geringer ist als bei niedrigen und für sehr hohe gegen Null geht.

6. In einem frisch gereinigten langlebigen radioaktiven Präparat wie z.B. Ra steigt die Aktivität zunächst an. Bevor sich die Abnahme durch das Zerfallsgesetz bemerkbar macht, bleibt diese Aktivität jedoch lange Zeit nahezu konstant. Können Sie sich dieses Verhalten erklären? Denken Sie an die Erzeugung von Tochterkernen und an deren Zerfall.

Bei den Zerfällen entstehen teilweise Tochterkerne mit sehr kurzen Halbwertszeiten. Deren Aktivität addiert sich zur Aktivität der verbleibenden Ausgangskerne. Dadurch steigt die Aktivität zunächst an. Erst nach einer kurzen Zeit macht sich die Verringerung der Zahl der ursprünglichen Kerne bemerkbar. Während dieser Phase ist die Aktivität nahezu konstant. Sobald fast nur noch Tochterkerne vorliegen macht sich das Zerfallsgesetz bemerkbar.

7. Wie kann α -, β -, γ -Strahlung abgeschirmt werden? Wie kosmische Strahlung?

α -Teilchen können aufgrund ihres hohen Ionisationsvermögens bereits durch ein Blatt Papier abgeschirmt werden.

Bei β -Strahlung benötigt man aufgrund des geringeren Ionisationsvermögens Bleiplatten von bis zu einigen Zentimetern Dicke (Blei ist aufgrund der hohen Dichte besonders gut als Absorber geeignet).

γ -Strahlung kann durch sehr dicke Bleiplatten abgeschwächt werden. Wegen des für elektromagnetische Wellen geltenden Abstandsquadrat-Gesetzes ist der bestmögliche Schutz vor γ -Strahlung eine große Distanz zum Strahler.

Kosmische Strahlung ist sehr stark durchdringend (sehr hohe Teilchenenergien; siehe Frage 1) und kann nur in sehr großen Tiefen in der Erde abgeschirmt werden.

8. Warum sieht man bei Th Linien bei 2615 keV, 2104 keV und 1593 keV?

Die 2615keV Linie kommt durch den Zerfall von ^{208}Tl , einem Tochterkern von ^{232}Th , zustande. Die niedrigeren Energien entstehen bei einer Elektron-Positron-Paarbildung von γ -Quanten mit der Energie von 2615keV. Die Ruheenergie des Elektrons bzw. Positrons beträgt 511 keV. Verläßt ein Zerstrahlquant den Kristall, so erhält man $2615 \text{ keV} - 511 \text{ keV} = 2104 \text{ keV}$. Wenn beide Zerstrahlquanten den Kristall verlassen, so wird nur die verbleibende Energie, die in Form eines Rückstoßes (+Ionisation) an den NaI-Kristall übergeben wird, registriert: $2615\text{keV} - 2 \cdot 511\text{keV} = 1593\text{keV}$.

10. Ist Ihnen jetzt die Radioaktivität klarer geworden? Haben Sie Verbesserungsvorschläge zum Versuch?

Ja. Nein.