

P521 γ -Spektroskopie mit Szintillations- und Halbleiterdetektoren

P521.1 Versuchsziel

Das Ziel dieses Versuchs ist es, die γ -Spektroskopie mit NaI-Szintillations- und HPGe-Halbleiterdetektoren kennenzulernen. Die charakteristischen Eigenschaften wie Energieauflösung und Effizienzen beider Detektortypen sind zu bestimmen und zu vergleichen. Als Anwendung des HPGe-Detektors ist eine beliebige Probe (z.B. Bodenprobe) auf Spuren von Radioaktivität zu untersuchen.

P521.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Radioaktiver Zerfall, Quellen radioaktiver Strahlung, natürliche Radioaktivität, Zerfallsreihen, γ -Strahlung.
- Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie: Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung, Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes dieser Effekte von E_γ sowie von der Ordnungszahl Z des Absorbermaterials.
- NaI-Szintillationsdetektor, HPGe-Halbleiterdetektor, Aufbau und Wirkungsweise eines Photomultipliers, Mechanismus der Ladungssammlung im Halbleiterkristall, PIN-Diode, Bändermodell.
- Impulshöhenspektrum, Funktionsweise eines Vielkanalanalysators, Totalenergiepeak (Photopeak), Comptonuntergrund, Comptonkante, Rückstreupeak, Escapepeaks, Peak-to-Total-Verhältnis.
- Ursachen der Breite einer Gammalinie im Spektrum eines Szintillations- bzw. Halbleiterdetektors, Energieauflösung, Unterschied zwischen beiden Detektortypen und daraus resultierende Konsequenzen für die Energieauflösungen.
- Detektoreffizienz als Funktion der Energie E_γ .
- Zerfallsschemata und γ -Energien der verwendeten Quellen (bei ^{152}Eu ohne Einzelheiten).

Bitte bringen Sie mit: Einen USB-Stick zum Abspeichern der Daten und eine Probe (ca. 800 g reichen) von Erde in einem dichten Plastikbeutel (oder eine andere Ihnen interessant erscheinende Probe) (Versuchsteil 2-7).

P521.3 Literatur

- SCHMIDT, HANS ULRICH
Messelektronik in der Kernphysik
LBS-Nr.: Phys Gc 32, Verlag : Teubner
Eine kleine Übersicht über die Messelektronik
- ALLKOFER, OTTO
Teilchendetektoren
LBS-Nr.: Phys Gc 18, Verlag: Thiemig
Kurze Übersichten über alle Themen
- RIEZLER, WOLFGANG U. KOPITZKI, KONRAD
Kernphysikalisches Praktikum
LBS-Nr.: Phys Gc 1, Teubner-Verlag
- LEO, WILLIAM
Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
LBS-Nr.: Phys Gc 24, Springer-Verlag
Online verfügbar
- KOLANOSKI, HERMANN U. WERMES, NORBERT
Teilchendetektoren
LBS-Nr.: Phys Gc 16, Verlag: Springer
Für den Halbleiter sind nur die S. 273–300 wichtig. Online verfügbar
- Lehrbücher der Kernphysik

P521.4 Aufgaben

0.1 Voraufgabe

Um den Arbeitsaufwand in der späteren Auswertung des Versuchs zu reduzieren, sollen Sie sich damit vertraut machen mit einem Programm Ihrer Wahl ein Skript zu schreiben, mit dessen Hilfe Sie die Linien eines Spektrums analysieren können. Bei der Anpassung der Linien ist darauf zu achten, dass der Untergrund jeweils mit berücksichtigt werden muss. Überlegen Sie sich welche Parameter (Fitbereiche, Startwerte, etc.) Sie dem Skript übergeben. Die Ergebnisse der Anpassung werden während der Abfrage kontrolliert und etwaige Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert. Das von Ihnen vorbereitete Skript, mit den diskutierten Verbesserungen, soll dann für die weitere Auswertung verwendet werden, um sowohl die Schwerpunkte als auch die Intensitäten der Linien der gemessenen Isotope zu bestimmen. Nehmen Sie die Voraufgabe mit in das Protokoll auf.

Das Spektrum finden sie auf eCampus in dem Ordner **Material zur Vorbereitung**.

0.2 Vorbereitung mit dem Assistenten

0.2-1 Umgang mit dem Datenaufnahmeprogramm MC2Analyser.

0.2-2 Zeitplan für die Langzeitmessungen.

1. NaI-Szintillationsdetektor

1-1 Einstellen der Hochspannung.

1-2 Beobachtung des Detektorsignals direkt am Ausgang des Vorverstärkers des Photomultipliers mit dem Oszilloskop. Protokollierung der Signalform, Signaldauer und Amplitude. Wodurch wird die Signalform erzeugt und wie wird das Signal weiterverarbeitet?

1-3 Aufnahme der Gammaspektren der ^{60}Co -, ^{137}Cs - und ^{152}Eu -Quellen sowie eines Untergrundspektrums.

1-4 Energiekalibrierung mit diesen Spektren.

1-5 Bestimmung der Halbwertsbreite (FWHM) der Linien im ^{60}Co - und ^{137}Cs -Spektrum sowie der gut getrennten Linien im ^{152}Eu -Spektrum.

1-6 Bestimmung des Peak-to-Total-Verhältnisses für die Spektren der ^{137}Cs -Quelle und der ^{60}Co -Quelle.

1-7 Bestimmung der Effizienz des Detektors mit der ^{137}Cs -Quelle.

2. HPGe-Halbleiterdetektor

2-1 Beobachtung des Detektorsignals direkt am Ausgang des Vorverstärkers mit dem Oszilloskop. Protokollierung der Signalform, Signaldauer und Amplitude. Wodurch wird die Signalform erzeugt und wie wird das Signal weiterverarbeitet?

2-2 Aufnahme der Gammaspektren der ^{60}Co -, ^{137}Cs und ^{152}Eu -Quellen sowie eines Untergrundspektrums mit dem HPGe-Detektor.

2-3 Energiekalibrierung mit diesen Spektren.

2-4 Bestimmung der Halbwertsbreite (FWHM) der Linien im ^{60}Co - und ^{137}Cs -Spektrum sowie von mehreren starken Linien im ^{152}Eu -Spektrum.

2-5 Bestimmung des Peak-to-Total-Verhältnisses für die Spektren der ^{137}Cs -Quelle und der ^{60}Co -Quelle.

2-6 Bestimmung der Effizienz des Detektors in Abhängigkeit der Energie mit der ^{137}Cs - und ^{152}Eu -Quelle.

2-7 Anwendung des HPGe-Detektors zur Messung der Radioaktivität einer beliebigen Probe (z.B. Bodenprobe):

2-7-1 Langzeitmessung (Messzeit mindestens 12 Stunden) der Probe in der Bleiabschirmung.

2-7-2 Ebenso lange Untergrundmessung in der Bleiabschirmung ohne Probe.

2-7-3 Untergrundkorrektur des Spektrums und Identifizierung der γ -Linien.

2-7-4 Zuordnung der γ -Linien zu Isotopen und Zerfallsreihen.

Die Auswertung des Versuches ist relativ ausführlich, daher sollten alle Messungen der radioaktiven Proben am 1. Versuchstag durchgeführt werden. Die Auswertung erfolgt mit einem geeigneten Programm zuhause.

P521.5 Durchführung und Analyse

P521.5.1 Datenaufnahme

Zu Beginn des Versuchs ist die Hochspannung des Szintillationsdetektors gemäß der ausliegenden Anleitung einzustellen. Dokumentieren Sie die dabei ihr Vorgehen und die eingestellten Werte.

ACHTUNG: Die Datenaufnahme mit dem Szintillationsdetektor erst ca. 30 min nach dem Anlegen der Hochspannung starten!

Die Hochspannung des HPGe-Detektors liegt dauerhaft an, hier sind **keine** Einstellungen zu tätigen. Nach dem Anlegen der Hochspannung und dem Platzieren einer Quelle (Ist das notwendig oder kann man auch Signale ohne Quelle beobachten?) vor dem entsprechenden Detektor sind die Ausgangssignale direkt am Detektor mit dem Oszilloskop zu beobachten und die Signalform, Signaldauer und Amplitude zu protokollieren (siehe 1-2 und 2-1). Zusätzlich soll auch beschrieben werden wie das Signal zustanden kommt und wie es weiter verarbeitet wird (Wodurch kommt die asymmetrische Form zu Stande?).

Es empfiehlt sich, die Verstärkung des Vielkanalanalysators (MCA) so zu wählen, dass die ca. 16000 Kanäle einen Energiebereich von mindestens 1550 keV umfassen. Als Anhaltspunkt kann hierfür die höherenergetische Linie der ^{60}Co -Quelle (1332 keV) bzw. der ^{152}Eu -Quelle (1408 keV) dienen. Es bietet sich deshalb an, mit einer dieser Quellen die Datenaufnahme zu beginnen. Nachdem die Verstärkung festgelegt ist, sind die weiteren Spektren mit genau dieser Einstellung aufzunehmen. Sollten sie sich bei den Spektren nicht sicher sein, fragen sie bitte bei Ihrer Tutorin / Ihrem Tutor nach.

Die Messungen (siehe 1-3 und 2-2) sind ohne zusätzliche Bleiabschirmung durchzuführen, um die Spektren möglichst vom überflüssigen Untergrund der Rückstreustrahlung freizuhalten. Bei der Aufzeichnung der Spektren ist bei beiden Detektoren darauf zu achten, dass die Zählrate (kann im MC2Analyser-Programm kontrolliert werden) nicht größer als 2–2,5 kHz ist, da ansonsten die Energiekalibrierung ungenau wird.

Die Dauer der Messung (min. 300 s) kann im Datenaufnahmeprogramm MC2Analyser vorgegeben werden. Zu jedem Spektrum ist der Abstand Quelle-Detektor, die Messdauer und die Aktivität der Quelle zu protokollieren (vor allem für die Ermittlung der Effizienz beider Detektoren aus den Spektren sind diese Informationen notwendig).

Bei der Langzeitmessung der Bodenprobe (siehe 2-8) ist zur Reduktion des Untergrundes die Bleiabschirmung zu verwenden. Die Messdauer für die Probe sowie den Untergrund sollte nicht kürzer als je 12 Stunden sein.

P521.5.2 Auswertung der Spektren

Betrachten sie zunächst die gemessenen Rohspektren der Präparate sowie des Untergrundes. Ist ein Abzug der Untergrundspektren sinnvoll? Besprechen sie das Vorgehen mit Ihrer Tutorin / Ihrem Tutor. Achten Sie bei der Auswertung auf eine sinnvolle Berücksichtigung von Untergrundbeiträgen unter den jeweils untersuchten Signalen und auch auf eine sinnvolle Fehlerrechnung. Was sind dabei systematische und was statistische Unsicherheiten? Denken sie daran die Rohdaten als Spektren im Versuchsbericht zu dokumentieren.

Energiekalibrierung

Zur Energiekalibrierung reicht es für den NaI-Detektor aus, neben den Linien der ^{60}Co - und ^{137}Cs -Quellen nur die stärksten, gut getrennten Linien der ^{152}Eu -Quelle heranzuziehen. Achten Sie dabei auf die richtige Zuordnung der Linien dieses komplizierten Spektrums. Es können in den Spektren auch Linien sichtbar sein die nicht zu γ -Übergängen gehören (Wie könnten diese Linien entstehen?). Im Versuchsbericht ist der lineare Zusammenhang zwischen Energie und Kanalzahl zusammen mit den ermittelten Linienpositionen für beide Detektoren zu überprüfen und graphisch darzustellen.

Für die Energiekalibrierung im Falle des HPGe-Detektors können mehr Linien des ^{152}Eu -Spektrums verwendet werden. Zur Energiekalibrierung sind mindestens 7 Linien des ^{152}Eu -Spektrums heranzuziehen.

Bestimmung der Halbwertsbreite

Die Halbwertsbreiten (FWHM) der Linien im ^{60}Co - und ^{137}Cs -Spektrum sowie von mehreren starken, gut getrennten Linien im ^{152}Eu -Spektrum sollen bestimmt und ihre Energie- und Detektorabhängigkeit kommentiert werden.

Intrinsische Halbwertsbreite des HPGe-Halbleiterdetektors

Die Halbwertsbreite ΔE (und damit die Energieauflösung) eines HPGe-Detektors setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

$$\Delta E(E_\gamma) = \sqrt{(\Delta E_d(E_\gamma))^2 + (\Delta E_e)^2}$$

Der intrinsische Anteil der Halbwertsbreite (ΔE_d) rührt vom statistischen Prozess der Ladungssammlung im HPGe-Kristall her. Deshalb besteht bei diesem Anteil eine Abhängigkeit von der

registrierten Photonenergie E_γ . Eine theoretische Analyse ergibt den folgenden Zusammenhang:

$$\Delta E_d(E_\gamma) = \text{Const.} \cdot \sqrt{E_\gamma}$$

Durch die Messung der Halbwertsbreiten mehrerer Eu-Linien (mindestens 7) ist der Zusammenhang zwischen ΔE_d und E_γ durch eine geeignete Anpassung zu überprüfen. Der elektronische Anteil ΔE_e ist dabei ebenfalls zu bestimmen. Kommentieren Sie Ihre Ergebnisse.

Peak-to-Total-Verhältnis

Das Verhältnis der im Photopeak registrierten Gammaquanten eines Übergangs zur Gesamtzahl aller im Detektor registrierten Gammaquanten dieses Übergangs ist ein Maß für die Nachweisgüte (Ansprechfunktion) des Detektors. Dieses sog. Peak-to-Total-Verhältnis ist eine Funktion der Photonenergie und soll in 1-6 und 2-6 für die beiden Detektoren bestimmt werden. Im Fall der ^{137}Cs -Quelle wird dieses Verhältnis bei der Energie 662 keV ermittelt. Beim ^{60}Co kann das Verhältnis nicht für beide Übergänge einzeln bestimmt werden. Nehmen Sie daher die mittlere Energie der beiden Linien von 1250 keV an. Warum und wie muss hier das Untergrundspektrum berücksichtigt werden? Bei der Bestimmung der Gesamtzahl der Einträge im Spektrum sind der Rückstreuanteil und eventuell sichtbare Röntgenpeaks im Niederenergiebereich miteinzubeziehen. Kommentieren Sie Ihre Ergebnisse.

Bestimmung der Detektoreffizienz

Die absolute Detektoreffizienz ϵ gibt an, welcher Anteil der Photonen einer Energie E_γ im Photopeak nachgewiesen wird:

$$\epsilon(E_\gamma) = \frac{N_{E_\gamma, \text{Photopeak}}}{N_{E_\gamma, \text{Detektor}}}$$

Dabei ist $N_{E_\gamma, \text{Detektor}}$ die Anzahl der Photonen eines Übergangs die den Detektor erreichen und $N_{E_\gamma, \text{Photopeak}}$ die Anzahl der im Photopeak registrierten Photonen. Um die Effizienz zu bestimmen, muss zunächst berechnet werden, wie viele Photonen den Detektor tatsächlich treffen. Benutzen Sie dazu die Aktivität der Quelle (zu entnehmen vom jeweiligen Quellenbehälter), den Durchmesser des HPGe-Kristalls von 55,7 mm bzw. des NaI-Kristalls von 50,8 mm, sowie den von Ihnen bestimmten Abstand der Quelle zum Detektor.

Bestimmen Sie die Effizienz mit der ^{137}Cs -Quelle für den Halbleiter- und Szintillationsdetektor und vergleichen Sie das Resultat mit ihren Erwartungen.

Im Spektrum des Halbleiterdetektors sind die meisten Linien der ^{152}Eu -Quelle gut trennbar und können genutzt werden, um die Energieabhängigkeit der Effizienz zu bestimmen. Benutzen Sie die am Ende der Anleitung angegebenen Intensitäten, um die Effizienz für die von Ihnen ausgewerteten ^{152}Eu -Linien zu bestimmen. Beachten Sie dabei, dass auch im Halbleiterspektrum nicht alle Linien getrennt werden können. Im Fall von zwei sich überlagernden Linien sollte die Summe der Intensitäten und der Mittelwert der Energien verwendet werden. Passen Sie eine geeignete Funktion für die energieabhängige Effizienz an die ermittelten Werte an. Begründen Sie die Wahl

der Regressionsfunktion und erklären Sie das Verhalten der Effizienzkurve sowohl für kleine als auch für große Energien. Zeichnen Sie in den Graphen zusätzlich den Datenpunkt der Effizienz für ^{137}Cs ein und bewerten Sie das Ergebnis.

Mit der Effizienzkurve können Sie die Anzahl der in den Photopeaks der ^{60}Co -Linien registrierten Einträge gewichten und die Aktivität der Quelle bestimmen. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der angegebenen Aktivität der ^{60}Co -Quelle und ordnen Sie das Ergebnis ein.

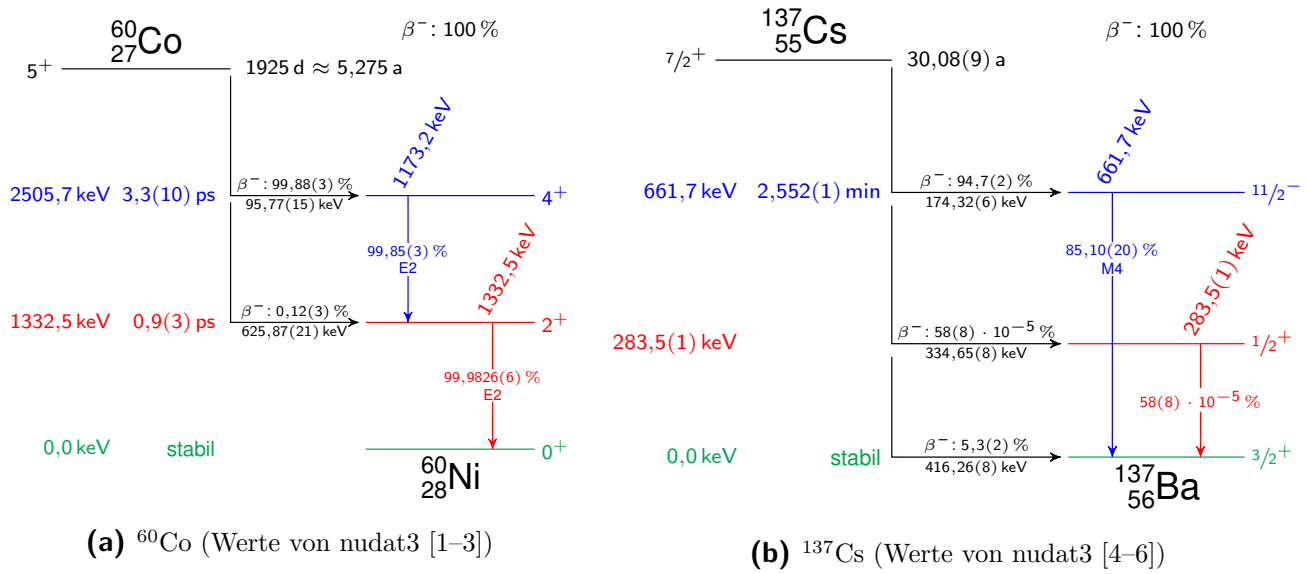
Nachweis der Radioaktivität in einer Probe

Als Anwendung des HPGe-Detektors ist die Radioaktivität einer mitgebrachten Probe zu messen. Die Spektren (Proben- und Untergrundspektrum) sind sinnvoll zu normieren und anschließend ist das Differenzspektrum zu erzeugen. Die Energien der im Differenzspektrum vorliegenden Gammalinien sind zu bestimmen. Anhand dieser Energien ist dann eine Identifikation der radioaktiven Isotope bzw. Zerfallsreihen vorzunehmen. Insbesondere ist die Belastung der Probe mit dem ausschließlich zivilisatorisch (wieso?) bedingten Isotop ^{137}Cs qualitativ zu ermitteln. Beschreiben Sie auch ob die gefundenen Isotope Ihren Erwartungen entsprechen. Sie können ihre Zuordnungen überprüfen, indem Sie sich anschauen ob die Isotope weitere Übergänge haben, die Sie auch beobachten müssten. Für den Fall, dass im Differenzspektrum keine bzw. nur wenige Gammalinien auftreten, ist zusätzlich das Untergrundspektrum auf die Isotope der natürlichen Zerfallsreihen zu untersuchen. Kommentieren Sie auch hier Ihre Ergebnisse.

P521.6 Anhang

P521.6.1 Zerfallsschemata der verwendeten radioaktiven Quellen

Literaturwerte Die zur Energiekalibration und Identifikation von Isotopen benötigten Informationen zu Zerfällen verschiedener Isotope sind beispielsweise unter www.nndc.bnl.gov/nudat3/ öffentlich erhältlich. Dort können Sie unter „Decay Radiation“ die Übergänge einzelner Isotope nachschlagen oder unter „Decay Radiation Search“ nach Isotopen suchen, die zu beobachteten Übergängen passen. Achten sie bei der Recherche darauf, dass es verschiedene nicht natürlich vorkommende Isotope mit teilweise kurzen Halbwertszeiten gibt, die hier keine Rolle spielen. Außerdem werden in der Literatur auch Zerfälle von angeregten Kernzuständen der Mutterkerne aufgelistet. Bei Unklarheiten schauen Sie sich die zusätzlichen Informationen auf eCampus an oder fragen Sie bei Ihrer Tutorin / Ihrem Tutor nach.

**Abbildung P521.1:** Zerfallsschemata der Isotope ^{60}Co und ^{137}Cs

Energie / keV	Rel. Int. / %	Energie / keV	Rel. Int. / %
$121,7817 \pm 0,0003$	$28,53 \pm 0,16$	$764,88 \pm 0,04$	$0,189 \pm 0,004$
$244,6974 \pm 0,0008$	$7,55 \pm 0,04$	$778,9045 \pm 0,0024$	$12,93 \pm 0,08$
$295,9387 \pm 0,0017$	$0,440 \pm 0,004$	$810,451 \pm 0,005$	$0,317 \pm 0,003$
$329,41 \pm 0,05$	$0,1213 \pm 0,0024$	$841,574 \pm 0,005$	$0,168 \pm 0,003$
$344,2785 \pm 0,0012$	$26,59 \pm 0,20$	$867,380 \pm 0,003$	$4,23 \pm 0,03$
$367,7891 \pm 0,0020$	$0,859 \pm 0,006$	$919,337 \pm 0,004$	$0,419 \pm 0,005$
$411,1165 \pm 0,0012$	$2,237 \pm 0,013$	$926,31 \pm 0,05$	$0,272 \pm 0,003$
$416,02 \pm 0,03$	$0,1088 \pm 0,0019$	$963,367 \pm 0,007$	$0,140 \pm 0,006$
$443,9606 \pm 0,0016$	$2,827 \pm 0,014$	$964,057 \pm 0,005$	$14,51 \pm 0,07$
$444,01 \pm 0,17$	$0,298 \pm 0,011$	$1005,27 \pm 0,05$	$0,659 \pm 0,011$
$488,6792 \pm 0,0020$	$0,414 \pm 0,003$	$1085,837 \pm 0,010$	$10,11 \pm 0,05$
$503,467 \pm 0,009$	$0,1524 \pm 0,0020$	$1089,737 \pm 0,005$	$1,734 \pm 0,011$
$563,986 \pm 0,005$	$0,494 \pm 0,005$	$1109,18 \pm 0,05$	$0,189 \pm 0,006$
$566,438 \pm 0,006$	$0,131 \pm 0,003$	$1112,076 \pm 0,003$	$13,67 \pm 0,08$
$586,2648 \pm 0,0026$	$0,455 \pm 0,004$	$1212,948 \pm 0,011$	$1,415 \pm 0,008$
$656,489 \pm 0,005$	$0,1441 \pm 0,0022$	$1249,94 \pm 0,05$	$0,187 \pm 0,003$
$674,64 \pm 0,14$	$0,169 \pm 0,003$	$1299,142 \pm 0,008$	$1,633 \pm 0,011$
$678,623 \pm 0,005$	$0,473 \pm 0,004$	$1408,013 \pm 0,003$	$20,87 \pm 0,09$
$688,670 \pm 0,005$	$0,856 \pm 0,006$	$1457,643 \pm 0,011$	$0,497 \pm 0,004$
$719,346 \pm 0,007$	$0,250 \pm 0,008$	$1528,10 \pm 0,04$	$0,279 \pm 0,003$

Tabelle P521.1: Energien und Intensitäten der 40 häufigsten Gamma-Linien von ^{152}Eu . Die Intensitäten sind relativ zur Anzahl der ^{152}Eu Zerfälle angegeben.[7]

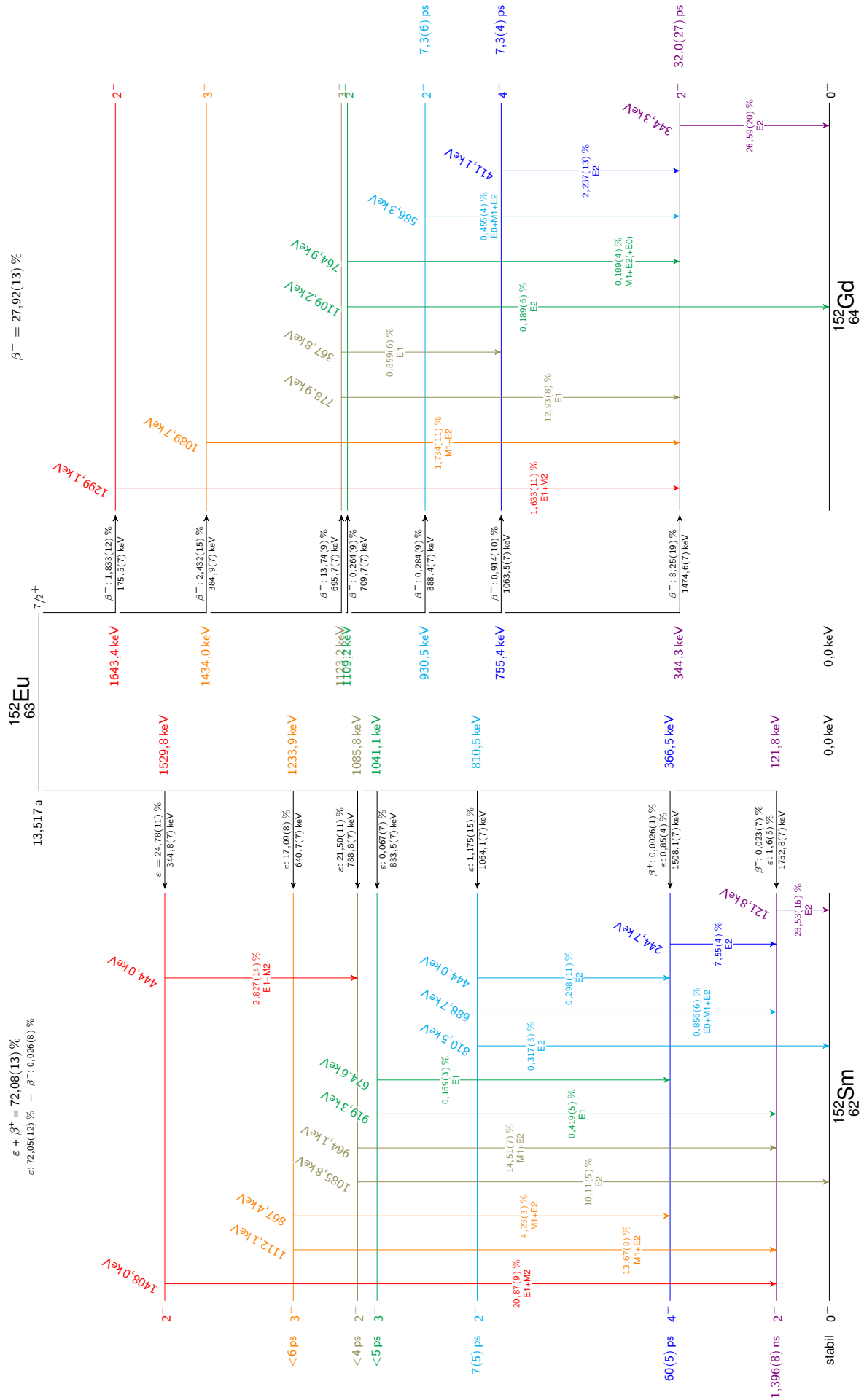


Abbildung P521.2: Zerfallsschema des ^{152}Eu (Werte von nudat3 [8–13])

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: September 2024

Literatur

- [1] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{60}Co (Nuclear Data Sheets 114, 1849)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=60Co> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [2] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{60}Ni (Nuclear Data Sheets 114, 1849)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=60Ni&unc=NDS> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [3] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – ^{60}Ni levels, β^- - and γ -radiations of ^{60}Co β^- decay (Nuclear Data Sheets 114, 1849)*. 2013. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/60/Ni/beta_decay_1925.28_d.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [4] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{137}Cs (Nuclear Data Sheets 108, 2173)*. 2007. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=137Cs> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [5] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{137}Ba (Nuclear Data Sheets 108, 2173)*. 2007. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=137Ba&unc=NDS> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [6] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – ^{137}Ba levels, β^- - and γ -radiations of ^{137}Cs β^- decay (Nuclear Data Sheets 108, 2173)*. 2007. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/137/Ba/beta_decay.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 8).
- [7] M. J. Martin. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{152}Eu (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=152Eu> (besucht am 12.09.2024) (siehe S. 8).
- [8] M. J. Martin. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{152}Eu (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=152Eu> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [9] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{152}Gd (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=152Gd&unc=NDS> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [10] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – ^{152}Gd levels, β^- - and γ -radiations of ^{152}Eu β^- decay (13,517y) (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/152/Gd/beta_decay_13.517_y.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [11] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{152}Sm (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=152Sm&unc=NDS> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).

-
- [12] E. Browne und J. K. Tuli. *NuDat 3.0 – ^{152}Sm levels, β^- - and γ -radiations of ^{152}Eu ε decay (13,517 y) (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. 2013. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/152/Sm/ec_decay_13.517_y.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [13] M. J. Martin. *NuDat 3.0 – ^{152}Eu Decay radiation information (Nuclear Data Sheets 114, 1497)*. Use of γ -Lines from ε decay with $T_{1/2} = 13.517(14)$ y. 2013. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=152Eu&unc=NDS> (besucht am 06.09.2022) (siehe S. 9).