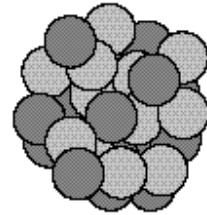




Praktikum für Fortgeschrittene
Institut für Kernphysik
Technische Universität Darmstadt



VERSUCH 2.2-B: Radioaktivität in der Umwelt

Bei diesem Versuch sollen Sie mit einem der modernsten derzeit erhältlichen Detektorsysteme für γ -Strahlung die Strahlung aus natürlichen und anthropogenen Quellen quantitativ analysieren. Durch die sehr gute Energieauflösung des Detektors wird es Ihnen möglich sein, die Ursache der ionisierenden Strahlung, d.h. die entsprechenden Isotope zu identifizieren. In einem weiteren Versuchsteil werden Sie mit dem Prinzip der zerstörungsfreien Untersuchung von Materialien durch die Methode der γ -induzierten Röntgenstrahlung vertraut gemacht.

STICHWORTE: natürliche Strahlenbelastung, Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie, -Spektroskopie, Prinzip von Halbleiter-Detektoren, Germanium-Einkristall, Vielkanal-Analysator, Effizienz-Eichung, charakteristische Röntgenstrahlung

ANWENDUNGEN: Analyse der Strahlung in der Umwelt (z.B. durch Landes- und Bundesbehörden), Überwachung von Kernkraftwerken, Nuklearmedizin, Materialanalyse mit Röntgenfluoreszenz, Grundlagenforschung

1 Einleitung

In der Nukleosynthese beim Urknall und in Sternen (vor allem in sog. Roten Riesen und bei Supernova-Explosionen) sind die heute bekannten Elemente erzeugt worden. Bei diesen Prozessen sind auch viele radioaktive Kerne entstanden, welche aber meist aufgrund ihrer Halbwertszeit inzwischen wieder zerfallen sind. Das Alter der Erde wird auf ca. 5 Mrd. Jahre geschätzt. Daraus ergibt sich, dass heute nur noch die radioaktiven Isotope auf der Erde vorhanden sein können, deren Halbwertszeit größer oder vergleichbar mit dem Erdalter ist. Zusätzlich findet man seit der Entdeckung der Kernspaltung im Jahre 1938 durch Hahn und Straßmann vom Menschen erzeugte Isotope in geringen Mengen in der Umwelt.

Der bei weitem größte Teil der natürlichen γ -Strahlung stammt aus den beiden Isotopen ^{40}K und ^{232}Th . Natürliches Kalium besteht zu 0.0117% aus ^{40}K mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 1.277 \cdot 10^9$ Jahren. Der uu -Kern ^{40}K (ungerade Protonen- und Neutronenzahl, $Z = 19$, $N = 21$) kann sowohl mit einem β -Zerfall zum Grundzustand von ^{40}Ca zerfallen (Verzweigungsverhältnis 89.3%) als auch per Elektroneneinfang zum ersten angeregten Zustand von ^{40}Ar (Verzweigungsverhältnis 10.7%). Elektroneneinfang zum Grundzustand von ^{40}Ar ist zwar energetisch möglich, aber sehr unwahrscheinlich. Der erste angeregte Zustand von ^{40}Ar zerfällt unter Emission eines γ -Quants mit der Energie $E = 1460.86$ keV zum Grundzustand von ^{40}Ar , d.h. in 10.7% aller Zerfälle von ^{40}K wird ein γ -Quant emittiert.

Der Kern ^{232}Th kommt in Spuren in der Natur vor. Es ist das einzige extrem langlebige Thorium-Isotop ($T_{1/2} = 1.405 \cdot 10^{10}$ Jahre). Es zerfällt mit einer Reihe von α - und β -Zerfällen zu ^{208}Pb . In knapp 35% der Zerfälle von ^{232}Th wird dabei ein γ -Quant mit der Energie von $E = 2614.5$ keV emittiert, das vom Übergang des ersten angeregten Zustands von ^{208}Pb in den Grundzustand stammt.

Weitere -Linien von schwächerer Intensität stammen von den Zerfallsketten der verschiedenen Uran-Isotope.

Die bereits diskutierte γ -Strahlung aus dem Zerfall von ^{40}K und aus den natürlichen Zerfallsreihen der Kerne ^{232}Th , ^{235}U und ^{238}U ist der Hauptbestandteil der natürlichen Strahlenbelastung. Zur natürlichen Strahlenbelastung trägt weiterhin die Höhenstrahlung bei. Beide Anteile hängen stark vom Aufenthaltsort ab. Zusätzlich ist der Mensch der weiteren Strahlungsquellen ausgesetzt (diagnostische und therapeutische Strahlenbelastung in der Medizin, zusätzliche Höhenstrahlung bei Langstreckenflügen, Überreste der Kernwaffenexplosionen in der Atmosphäre, Nachwirkungen des Reaktor-Unfalls von Tschernobyl, technisch angewandte radioaktive Substanzen, usw.). Die gesamte Stärke dieser Anteile liegt in der gleichen Größenordnung wie die natürliche Strahlenbelastung; allerdings können die einzelnen Beiträge stark schwanken.

An dieser Stelle muss auch noch darauf hingewiesen werden, dass das Inkorporieren von radioaktiven Substanzen zu besonders hohen Strahlenbelastungen führt. Hier geht die größte Gefahr nicht von γ -Strahlung, sondern von α - und β -Strahlern aus. Die γ -Strahlung kann Gewebe relativ gut durchdringen und deponiert deshalb nur relativ wenig Energie pro Gewebevolumen. Dagegen wird die Energie von α - und β -Strahlung von inkorporierten radioaktiven Substanzen praktisch vollständig in einem kleinen Gewebevolumen deponiert, was zu einer stärkeren Schädigung von Zellen führt. Aus diesem Grund ist das Essen, Trinken und Rauchen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen strikt untersagt. Das Messen von γ -Strahlung ist sehr hilfreich zur Bestimmung von radioaktiven Isotopen. Einerseits kann γ -Strahlung relativ einfach nachgewiesen werden, und andererseits wird bei den meisten radioaktiven Zerfällen γ -Strahlung emittiert. Wenn das Verzweigungsverhältnis für γ -Strahlung bekannt ist, kann daraus auf die vorhandene α - oder β -Aktivität zurückgeschlossen werden. Als Beispiel soll hier das radioaktive Jod-Isotop ^{131}I genannt werden, das die Ursache für den größten Teil der Strahlenbelastung in den ersten Tagen nach dem Tschernobyl-Unfall war. Der Kern ^{131}I zerfällt mit einer Halbwertszeit von 8.02 Tagen zu ^{131}Xe . Dabei wird in 81.7% der Zerfälle

ein γ -Quant der Energie $E_\gamma = 364.5 \text{ keV}$ emittiert, und mit einem Verzweigungsverhältnis von jeweils gut 5% wird γ -Strahlung mit $E_\gamma = 284.3 \text{ keV}$ und $E_\gamma = 637.0 \text{ keV}$ erzeugt. Die Messung eines γ -Energiespektrums mit den drei Linien bei $E_\gamma = 364.5 \text{ keV}$, 284.3 keV und 637.0 keV im bekannten Intensitätsverhältnis ist somit ein eindeutiger Nachweis für das Vorhandensein von ^{131}I .

Zur Vorbereitung zu bearbeiten:

- Skizzieren Sie das Zerfallsschema von ^{40}K .

- Finden Sie auf der Nuklidkarte [1] die α -Linien aus dem Zerfall von ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th und den nachfolgenden Zerfällen. Erstellen Sie eine Liste, in der Sie die entsprechenden Zerfallslinien den jeweiligen radioaktiven Kernen zuordnen.

- Berechnen Sie die Aktivität einer Flasche Mineralwasser mit Inhalt von 0.7 l (Saturn-Quelle: 18.7 mg/l Kalium-Konzentration nach Analyse Institut Fresenius, Taunusstein, vom 09.04.1996).

2 Versuchsziel

Das Ziel dieses Versuches ist es, γ -Strahlung mit einem hochauflösenden Reinstgermanium-Detektor (HPGe, High-Purity Germanium) zu analysieren. Die ausgezeichnete Energieauflösung eines solchen Detektorsystems erlaubt auch den Nachweis von geringen γ -Aktivitäten. Als Quelle der Strahlung dient in diesem Versuch unter anderem die natürliche Radioaktivität.

Die zur Messung und Interpretation von Spektren mit sehr guter Energieauflösung notwendigen Kenntnisse sollen in diesem Versuch vermittelt werden. Diese Kenntnisse umfassen einerseits die physikalischen Grundlagen der Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie und andererseits die Handhabung des HPGe-Detektors, der Messelektronik und der Analyse-Software.

Schließlich sollen die Kenntnisse in die Praxis umgesetzt werden. Dazu werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- 1) Der natürliche Untergrund im Praktikumsraum wird vermessen, und die gemessenen Linien werden den Zerfallsketten zugeordnet.
- 2) Ein Gegenstand des „täglichen Gebrauchs“ wird auf Strahlung untersucht und die Isotope bestimmt, die die Strahlung verursachen.
- 3) Ein unbekanntes Material wird mit unbekannter γ -Strahlung zerstörungsfrei analysiert.

3 Physikalische Grundlagen

3.1 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

Die Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie wird im Rahmen verschiedener Praktikumsversuche genauer diskutiert. Deshalb sollen hier nur kurz die wichtigsten Grundlagen wiederholt werden. Informieren Sie sich auch in der am Ende angegebenen weiterführenden Literatur.

γ -Strahlung der Primärenergie $E_{\gamma,0}$ wechselwirkt im wesentlichen über drei Effekte:

- **Photoeffekt:** Ein γ -Quant wird von einem Atom absorbiert. Dabei überträgt das γ -Quant seine gesamte Energie auf ein Elektron, das aus dem Atom herausgeschlagen wird. Die Energie des Elektrons kann nachgewiesen werden. Dieser Effekt dominiert bei kleinen Primärenergien E_γ unter 100 keV.
- **Compton-Effekt:** Ein γ -Quant wird an einem (quasi-) freien Elektron gestreut. Das γ -Quant fliegt mit geringerer Energie weiter. Der Rest der Energie wird auf das Elektron übertragen und kann nachgewiesen werden. Dieser Effekt dominiert bei mittleren Primärenergien E_γ im Bereich einiger MeV.
- **Paarbildung:** Ein γ -Quant bildet im elektromagnetischen Feld eines Atomkerns ein Elektron-Positron-Paar. Die kinetische Energie von Elektron und Positron kann nachgewiesen werden. Das Positron zerstrahlt mit einem Elektron in zwei γ -Quanten mit $E_\gamma = 511$ keV. Dieser Effekt dominiert bei hohen Primärenergien E_γ über 5 MeV; unter $E_\gamma = 2 \cdot 511$ keV = 1022 keV kann Paarbildung nicht stattfinden.

Die Energieabhängigkeit der einzelnen Effekte ist in Abb. 1 dargestellt.

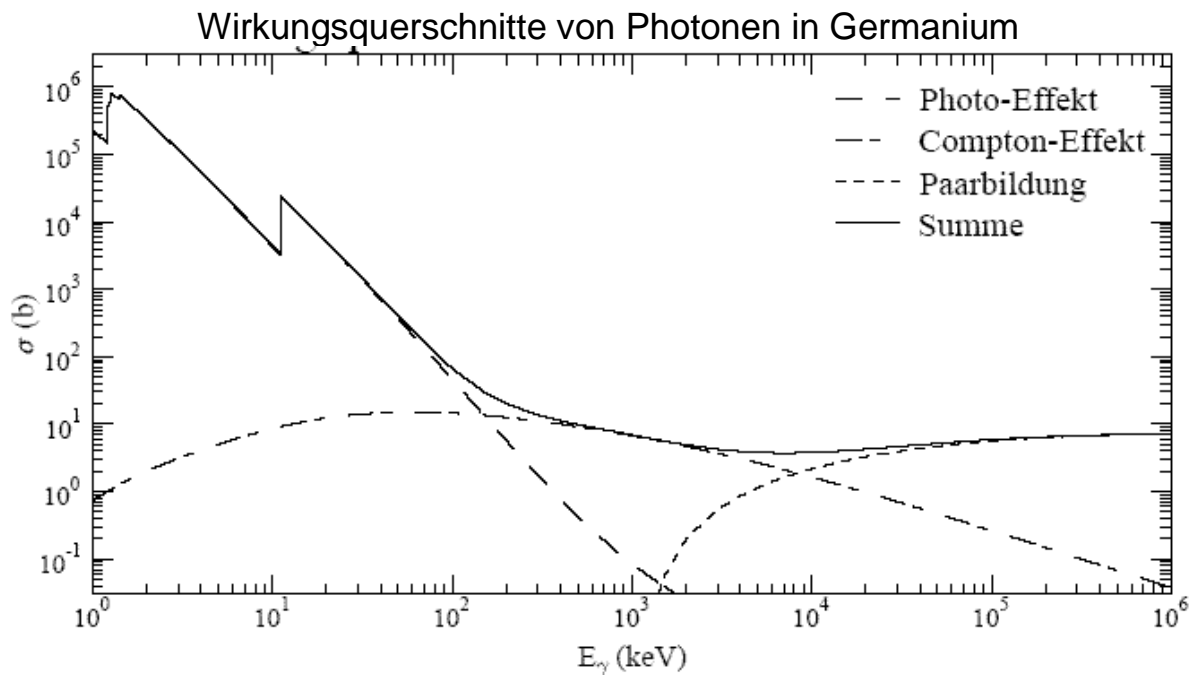


Abbildung 1: Energieabhängigkeit von Photo-Effekt, Compton-Effekt und Paarbildung in Germanium von 1 keV bis 1000 MeV. Beachten Sie den doppelt-logarithmischen Maßstab! Die Daten wurden aus dem WWW (<http://www.bnl.gov/world/>) [2] entnommen und basieren auf der Zusammenstellung von [6].

Der Photoeffekt führt zum sog. Photopeak im Spektrum, der bei der Energie $E_{\gamma,0}$ des primären γ -Quants liegt. Der Compton-Effekt führt zu einem kontinuierlichen Spektrum mit der charakteristischen Compton-Kante, zusätzlich tritt noch Paarbildung auf, deren Effekte im Folgenden noch beschrieben werden.

In einem großvolumigen Detektor ist es möglich, dass nicht nur eine, sondern mehrere Wechselwirkungen stattfinden, zum Beispiel

- können Compton-gestreuete Photonen ebenfalls nachgewiesen werden, was dann zu einem Signal bei der vollen Primärenergie $E_{\gamma,0}$ führt;

- kann eines der beiden 511-keV-Photonen nach der Paarbildung ebenfalls im Detektor nachgewiesen werden, was zu einer nachgewiesenen Energie von $E_{\gamma,0} - 511$ keV führt;
- können beide 511-keV-Photonen nach der Paarbildung Compton-gestreut werden und werden nicht detektiert, was zu einer nachgewiesenen Energie von $E_{\gamma,0} - 1022$ keV führt;
- usw.

Die nachgewiesene Energie ist also eine Summe über alle Wechselwirkungen im Detektor. Man findet i.Allg. in einem realen Spektrum drei Peaks, den Photopeak bei $E_{\gamma,0}$ (auch Full-Energy-Peak genannt), den sog. Single-Escape-Peak bei $E_{\gamma,0} - 511$ keV und den sog. Double-Escape-Peak bei $E_{\gamma,0} - 1022$ keV. Dazu findet man einen kontinuierlichen sog. Compton-Untergrund unterhalb der Compton-Kante.

Ein Signal mit der vollen Primärenergie $E_{\gamma,0}$ wird also immer dann im Detektor nachgewiesen, wenn die gesamte Energie des primären Photons im Detektor deponiert wird. Die Anzahl der Wechselwirkungen im Detektor spielt dabei keine Rolle, da diese Wechselwirkungen sehr schnell ablaufen. Es ist offensichtlich, dass ein größerer Detektor ein besseres Photopeak/Compton-Verhältnis hat als ein kleinerer Detektor, da in einem großen Detektor die Wahrscheinlichkeit steigt, auch sekundäre γ -Quanten nachzuweisen. Die Interpretation eines komplexen Spektrums wird selbstverständlich stark erleichtert, wenn möglichst häufig die gesamte Energie des primären γ -Quants nachgewiesen wird.

3.2 Halbleiterdetektoren

Hochenergetische Strahlung erzeugt in einem Halbleiter Elektron-Loch-Paare, deren Anzahl proportional zur deponierten Energie der Strahlung ist. In Germanium werden 2.95 eV benötigt, um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen; ein γ -Quant mit $E_{\gamma} = 3$ MeV erzeugt also ungefähr 10^6 Elektron-Loch-Paare.

Durch geeignete Wahl des Germaniums (n-Typ oder p-Typ) und geeignete Kontakte erzeugt man einen pn-Übergang (also eine Diode). Elektron-Loch-Paare in der Verarmungszone des pn-Übergangs werden durch das elektrische Feld des pn-Übergangs getrennt und können mit einem ladungsempfindlichen Vorverstärker nachgewiesen werden. Das zusätzliche Anlegen einer Hochspannung in Sperr-Richtung vergrößert die Verarmungszone; damit wird praktisch der gesamte Kristall empfindlich auf Strahlung. Außerdem werden die Sammeleigenschaften des Kristalls durch die Hochspannung verbessert, weil damit die Rekombination von Elektronen und Löchern reduziert wird. Außerdem muss ein HPGe-Detektor im Betrieb mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, um das thermische Rauschen des Detektors zu reduzieren.

3.3 Energieauflösung

Die Halbwertsbreite ΔE_{FWHM} bzw. die Energieauflösung $R = \Delta E_{FWHM}/E$ von Halbleiterdetektoren wird von zwei Faktoren begrenzt:

- Die Anzahl der Elektron-Loch-Paare ist statistischen Schwankungen unterworfen. Dies führt näherungsweise zu einer Halbwertsbreite $(\Delta E)_{stat}$ proportional zu \sqrt{E} .
- Das System Detektor-Vorverstärker rauscht. Dies führt zu einer Halbwertsbreite $(\Delta E)_{noise} \approx const.$

Die resultierende Auflösung setzt sich im wesentlichen aus diesen beiden Komponenten zusammen: $(\Delta E_{FWHM})^2 = (\Delta E_{stat})^2 + (\Delta E_{noise})^2 = c_1 * E + c_2$. Typische Werte für einen HPGe-Detektor sind $\Delta E_{noise} < 1$ keV und $\Delta E_{stat} \approx 1 - 2$ keV bei $E_{\gamma} = 1332.5$ keV (^{60}Co -Quelle). Die gesamte Halbwertsbreite für die $E_{\gamma} = 1332.5$ keV-Linie beträgt typischerweise ca. 2 keV.

Wie wichtig eine ausgezeichnete Energieauflösung insbesondere zur Analyse von schwachen Peaks ist, zeigt Abb. 2, bei der simulierte Spektren mit einer Auflösung von 50 keV (typisch für einen Szintillationsdetektor) und 3 keV (HPGe) verglichen werden.

3.4 Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit („Efficiency“) eines HPGe-Detektors hängt von der Energie der primären γ -Strahlung und der Geometrie des Aufbaus (Abstand Quelle-Detektor, Raumwinkel, Volumen des Detektors) ab. Die Kenntnis der Nachweiswahrscheinlichkeit ist die Grundlage zur quantitativen Analyse von γ -Spektren. Die Nachweiswahrscheinlichkeit wird in der Regel über Eichquellen bei diskreten γ -Energien experimentell vermessen. Der Zwischenbereich kann mit relativ geringen Unsicherheiten interpoliert werden, da die Energieabhängigkeit der Wechselwirkungsprozesse bekannt ist. Alternativ wird in den letzten Jahren versucht, über Simulationsrechnungen der o.g. Prozesse unter Verwendung der bekannten Wechselwirkungsquerschnitte die Nachweiswahrscheinlichkeit von Detektoren zu berechnen. In Abb. 2 werden Beispiele für simulierte Spektren gezeigt.

Meist wird mit dem Begriff „Nachweiswahrscheinlichkeit“ die Wahrscheinlichkeit gemeint, mit der die volle Energie des γ -Quants nachgewiesen wird, also ein Ereignis im Photopeak detektiert wird. Es ist aber auch möglich, Nachweiswahrscheinlichkeiten für Single-Escape- und Double-Escape-Peaks anzugeben.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit von HPGe-Detektoren wird in der Regel als *relative Nachweiswahrscheinlichkeit* in Prozent angegeben. Der im Praktikum verwendete Detektor hat eine relative Nachweiswahrscheinlichkeit von 30%. Dies bedeutet **nicht**, dass 30% aller primären γ -Quanten nachgewiesen werden! Die Angabe von 30% bedeutet, dass die Photopeak-Nachweiswahrscheinlichkeit dieses HPGe-Detektors für eine bestimmte γ -Energie und für eine bestimmte Geometrie 30% im Vergleich zu einem Standard-Detektor beträgt. Der Referenzdetektor ist ein zylindrischer Szintillationsdetektor aus NaI(Tl) mit einem Durchmesser und einer Länge von je 3 Inch, und die ^{60}Co -Quelle mit einer Energie von $E_\gamma = 1332,5$ keV befindet sich im Abstand von 25 cm vor dem jeweiligen Detektor. (Man beachte die kuriose Mischung von Zentimeter und Inch in dieser Definition!)

Die Nachweiswahrscheinlichkeit steigt natürlich mit dem Volumen des Germanium-Kristalls im HPGe-Detektor an. Mit dem Volumen des Kristalls steigt aber auch dessen Preis: in guter Näherung kostet jedes Prozent relative Nachweiswahrscheinlichkeit ca. Euro 800 €. Der im Praktikum verwendete HPGe-Detektor mit 30% relativer Nachweiswahrscheinlichkeit hat also einen Neupreis, der ungefähr einem neuen VW Golf oder Opel Astra entspricht.

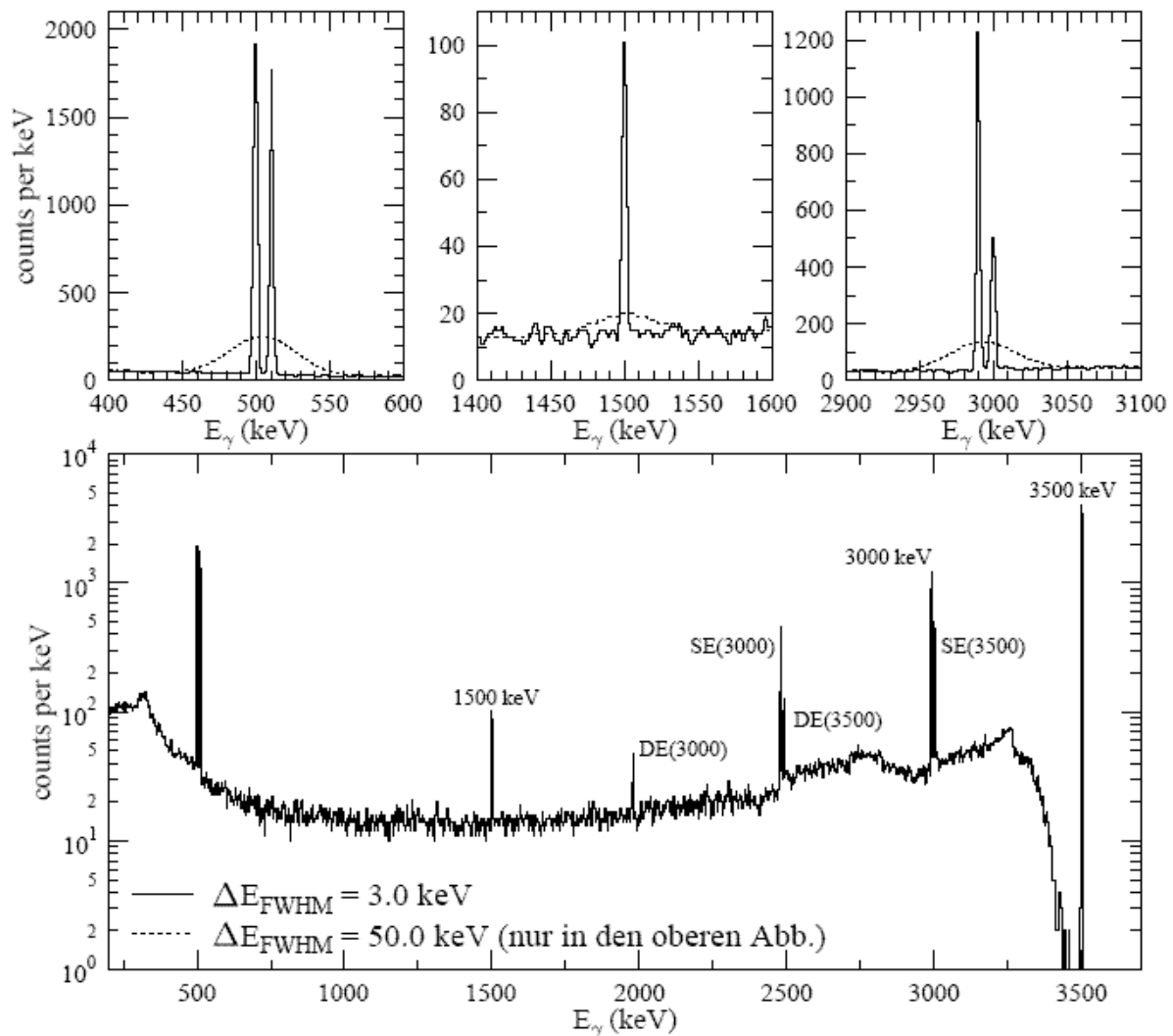


Abbildung 2: Simulierte Spektren mit einer Auflösung von 3 keV (HPGe) bzw. 50 keV (Szintillationszähler). Berechnet wurden γ -Spektren mit Quellen der folgenden Energien und Intensitäten: $E_\gamma = 3500$ keV (10^6 Ereignisse), $E_\gamma = 3000$ keV (10^5 Ereignisse), $E_\gamma = 1500$ keV (10^4 Ereignisse) und $E_\gamma = 500$ keV (10^5 Ereignisse). Im hochaufgelösten Spektrum sind die Escape-Linien der 3500-keV-Quelle (2989 keV, 2478 keV) gut getrennt von den Linien der 3000-keV-Quelle zu sehen, und auch die schwache Linie bei 1500 keV ist klar zu erkennen. Die Quelle mit $E_\gamma = 500$ keV ist ebenfalls gut getrennt von der 511-keV-Linie, die dann detektiert wird, wenn ein γ -Quant außerhalb des Detektors durch Paarbildung wechselwirkt und anschließend eines der beiden 511-keV-Quanten im Detektor registriert wird. Beachten Sie, dass die Peakflächen in beiden Spektren identisch sind!

Anregungen und Fragen

- Bei welcher Energie E_γ ist die Wahrscheinlichkeit am größten, dass γ -Strahlung den Detektor ohne Wechselwirkung durchdringt?
- Wie wird ein HPGe-Detektor hergestellt?
- Wie rein ist das Reinstgermanium eines HPGe-Detektors, und warum muss eine möglichst hohe Reinheit erreicht werden?

- Kann es Detektoren mit mehr als 100% relativer Nachweiswahrscheinlichkeit geben?

- Warum ist die Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares in Germanium größer als die Bandlücke?

4 Anwendungen von HPGe-Detektoren

4.1 Grundlagenforschung

Viele Erkenntnisse in der modernen Kernphysik der letzten Jahre wären ohne den Einsatz hochauflösender HPGe-Detektoren nicht möglich gewesen. So existieren z.B. sowohl in Europa als auch in den USA Detektoranordnungen („Arrays“), wo viele (z.T. bis über 100) HPGe-Detektoren auf einer Kugelschale montiert sind, um die γ -Strahlung aus Kernreaktionen im vollen Raumwinkel von 4π zu beobachten.

Im Institut für Kernphysik der TU Darmstadt werden HPGe-Detektoren zur Untersuchung von (γ, γ') -Kernreaktionen am S-DALINAC verwendet, und auch an der GSI werden HPGe-Detektoren zum Nachweis von γ -Strahlung eingesetzt.

4.2 Strahlenschutz

Wie bereits in der Einleitung kurz erwähnt, erleichtert die ausgezeichnete Energieauflösung den eindeutigen Nachweis von schwachen γ -Linien. Damit sind HPGe-Detektoren besonders geeignet, die radioaktiven Isotope von unbekanntem Strahlungsquellen herauszufinden.

In diesem Versuch werden verschiedene handelsübliche Gegenstände auf die von ihnen ausgehende γ -Strahlung untersucht; die radioaktiven Isotope können eindeutig zugeordnet werden.

4.3 Materialanalyse

Die von einem Material ausgehende charakteristische Röntgenstrahlung erlaubt eine direkte Zuordnung zur Kernladungszahl Z des Materials (eine Abschätzung der Protonenzahl ist mit Hilfe des Moseleyschen Gesetzes möglich). Man kann eine Probe zur Emission von Röntgenstrahlen auf verschiedene Weise anregen.

In diesem Versuch wird eine zerstörungsfreie Variante angewandt. Eine Probe aus einem unbekanntem Material wird mit einer Quelle mit relativ niedriger γ -Energie bestrahlt. Diese γ -Strahlung kann aus den Atomen des unbekanntem Materials Elektronen herausschlagen. Die nachfolgenden charakteristischen Röntgenlinien werden mit einem HPGe-Detektor nachgewiesen. Aus der Energie der K_{α} - und K_{β} -Linien wird dann direkt die Kernladungszahl Z des unbekanntem Materials bestimmt. Dieses Verfahren ist in der Literatur unter dem Namen Röntgenfluoreszenzanalyse bekannt.

Ein weiteres, häufig angewandtes Verfahren zur Materialanalyse verwendet zur Anregung des zu analysierenden Materials Ionenstrahlen, vor allem Protonen (PIXE, Particle-Induced X-ray Emission oder Proton-Induced X-ray Emission). Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Ausbeute an Röntgenstrahlung wesentlich größer ist als bei dem in diesem Versuch angewandten Verfahren. Allerdings ist dafür der Aufwand wesentlich höher, und meist kann dieses Verfahren nicht zerstörungsfrei angewandt werden, da die zu untersuchenden Materialien für die Analyse präpariert werden müssen.

5 Versuchsdurchführung

Zur Vorbereitung zu bearbeiten

Überprüfen Sie sofort die Polarität der Hochspannung (LED an der Hochspannungsversorgung). Dieser HPGe-Detektor benötigt eine positive Hochspannung. Schalten Sie das NIM-Crate wieder aus und lassen Sie die Einstellung vom Betreuer berichtigen, wenn die Hochspannung negativ sein sollte.

Detektor-Rauschen, Anlegen der Hochspannung

Betrachten Sie das Rauschen des Detektors. Verbinden Sie dazu das Oszilloskop mit dem Eingang des Verstärkers (Vorderseite). Das Signal von der Rückseite wird im Verstärker nach vorne durchgeschleift. Schalten Sie den Trigger auf automatisch und wählen Sie eine *Zeitablenkung von ca. 0.5 ms/div und eine Verstärkung von 10 mV/div*. Achten Sie darauf, dass die Kopplung des Oszilloskops auf „DC“ gestellt ist. Sie sollten ein Detektorrauschen mit einer Breite von ca. 5-20 mV sehen, je nachdem, ob die Hochspannung anliegt oder nicht.

Wenn die Hochspannung bereits eingeschaltet war, reduzieren Sie die Amplitude so langsam auf 0, dass Sie immer das Detektorrauschen auf dem Oszilloskop sehen. Das Abschalten der Hochspannung dauert mehrere Minuten.

Die Hochspannung muss langsam angelegt und abgeschaltet werden, damit α -berschl α ge im Kristall vermieden werden, durch die der Kristall gesch α digt

Erhöhen Sie dann langsam die Hochspannung und beobachten Sie dabei das Detektorrauschen auf dem Oszilloskop. Notieren Sie sich in geeigneten Schritten die Breite des Rauschens und tragen diese in ein geeignetes Diagramm ein. Legen Sie die Hochspannung von +1200 V (am Potentiometer der Hochspannungsversorgung, kontrollieren Sie aber auch die Anzeige des Geräts!) so langsam an, dass Sie immer das Detektorrauschen auf dem Oszilloskop sehen. Das Anlegen der Hochspannung dauert mehrere Minuten. Damit ist der Detektor betriebsbereit. Legen Sie nun eine schwache radioaktive Quelle (^{60}Co) in die passende Halterung vor den Detektor. Sie sehen auf dem Oszilloskop die Vorverstärkersignale des Detektors. Als nächstes betrachten Sie auf dem zweiten Kanal des Oszilloskops die Ausgangssignale des Verstärkers (bipolar und unipolar). Der Verstärker filtert das Vorverstärkersignal durch mehrere Differentiations- und Integrationsstufen. Das unipolare Ausgangssignal ist näherungsweise gaussförmig und sollte eine Breite von ca. 10 μs haben.

Die Handhabung der radioaktiven Quellen erfolgt nur durch den Betreuer oder auf Anweisung des Betreuers! Die Quellen dürfen nur mit einer

Verändern Sie nun die möglichen Einstellungen des Verstärkers und betrachten Sie dabei das unipolare Signal des Verstärkers auf dem Oszilloskop. Stellen Sie die Amplitude des Verstärkersignals auf ca. 3 V ein.

Das Potentiometer mit der Aufschrift „PZ ADJ“ dient zum Einstellen des „Pole Zero“. Die PZ-Einstellung kompensiert die relativ langsam abfallende hintere Flanke des Vorverstärkersignals. Die PZ-Einstellung muss so gewählt werden, dass das unipolare Signal exakt zur Null zurückkehrt. Bei

schlechter PZ-Einstellung werden nachfolgende Signale nicht richtig gemessen. Die PZ-Einstellung muss für jeden Detektor und für jede Einstellung der Pulsformung im Verstärker individuell angepasst werden.

5.2 Start der Messung und Eichung des Spektrums

Verbinden Sie nun den unipolaren Ausgang des Verstärkers mit dem Eingang des ADC und schalten Sie den PC ein, der die Daten des ADC auf dem Bildschirm darstellt und abspeichern kann. Starten Sie das Programm „WinTMCA“, ein kommerziell erhältliches Software-Paket zur Aufnahme, Darstellung und Analyse von γ -Spektren. Die Bedienung des Programms ist Windows-konform; für weitere Fragen liegt ein Manual bereit.

Legen Sie ein Unterverzeichnis an, in dem Sie Ihre gemessenen Spektren abspeichern. Definieren Sie dieses Verzeichnis als Arbeitsverzeichnis des WinTMCA-Programms (Spektrum \rightarrow Definitionen).

Starten Sie jetzt die Messung; Sie sollten ein Spektrum mit zwei γ -Linien der schwachen ^{60}Co -Quelle sehen. Die beiden Linien haben die Energien von $E_\gamma = 1332.5 \text{ keV}$ und $E_\gamma = 1173.2 \text{ keV}$. Nach wenigen Minuten Messzeit haben Sie genug Ereignisse für die Eichung des Spektrums. Speichern Sie die Messung ab, und räumen Sie die ^{60}Co -Quelle zurück in den Tresor. Setzen Sie „Regions of Interest (ROI)“ auf die beiden Linien. Bestimmen Sie dann die Lage und Stärke der beiden Peaks durch Integration der Peakfläche.

Zur Energie-Eichung des Spektrums verwenden Sie die Kanalzahlen und die Energien der Eichlinien. Überprüfen Sie Ihre Eichung anhand der Untergrundlinien bei $E_\gamma = 1460.8 \text{ keV}$ und $E_\gamma = 2614.5 \text{ keV}$. Bestimmen Sie außerdem den Offset des Spektrums.

Anregungen und Fragen

- Die beiden γ -Quanten von ^{60}Co mit $E_\gamma = 1332.5 \text{ keV}$ und $E_\gamma = 1173.2 \text{ keV}$ werden nahezu gleichzeitig (koinzident) emittiert. Was passiert, wenn beide γ -Quanten gleichzeitig im Detektor nachgewiesen werden? Analysieren Sie das gemessene Spektrum entsprechend. Wie könnte man diesen Effekt reduzieren?

5.3 Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit des HPGe-Detektors

Die Nachweiswahrscheinlichkeit des HPGe-Detektors wird in diesem Versuch mit verschiedenen Eichquellen bestimmt. Legen Sie dazu die schwachen Quellen ^{210}Pb ($E_\gamma = 46.5 \text{ keV}$), ^{137}Cs ($E_\gamma = 661.7 \text{ keV}$), ^{60}Co ($E_\gamma = 1332.5 \text{ keV}$ und 1173.2 keV), ^{133}Ba ($E_\gamma = 81.0 \text{ keV}$, 276.4 keV , 302.9 keV , 356.0 keV und 383.8 keV) und ^{57}Co ($E_\gamma = 122.1 \text{ keV}$ und $E_\gamma = 136.5 \text{ keV}$) in die jeweiligen Halterungen vor den Detektor. Messen Sie jede Quelle ca. 5 Minuten, um ausreichend Statistik zu sammeln. Sie sollten ca. 10000 Ereignisse in den jeweiligen Peaks haben.

Für die Berechnung des mit dem Detektor abgedeckten Raumwinkels können der Abb. 4 die Abmessungen des Detektors entnommen werden. Vergessen Sie nicht, den Abstand zwischen Detektor und der einzelnen Quellen zu messen!

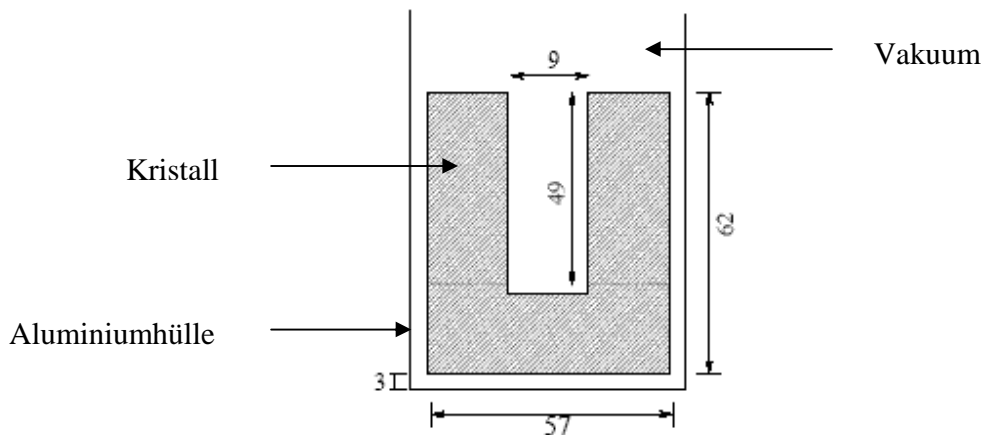


Abbildung 4: Abmessungen des HPGe-Detektors in mm.

5.4 Messung der Untergrundstrahlung

Die Mittagspause soll dazu genutzt werden, die Radioaktivität im Praktikumsraum zu messen. Starten Sie dazu die Messung und lassen Sie die Messung mindestens eine Stunde lang laufen. Bestimmen Sie die Energien der verschiedenen γ -Linien und ordnen Sie die γ -Linien den jeweiligen Isotopen zu.

5.5 Messung der Radioaktivität von Gegenständen des täglichen Lebens

Nun können verschiedene Gegenstände des täglichen Lebens auf ihre Radioaktivität untersucht werden. Messen Sie ein Spektrum von einem der folgenden Gegenstände, den Sie im Abstand von ca. 5 cm vor dem Detektor positionieren:

- 1) Aschenbecher (Rauchen ist ungesund!)
- 2) Badezimmer-Kachel
- 3) Sand von den Stränden Brasiliens (Monazit-Sand, CePO_3)¹
- 4) Stein aus dem Odenwald
- 5) Türkischen Tee aus dem Jahre 1986

Einen dieser Gegenstände erhalten Sie vom Betreuer des Versuchs. Bringen Sie keine eigenen Gegenstände mit!

Vergessen Sie nicht, den Abstand zwischen Detektor und Quelle zu messen.

Sollten Sie auf den ersten Blick keine eindeutig von dem Gegenstand stammende Linie identifizieren können, müssen Sie das gemessene Untergrundspektrum nach geeigneter Normierung vom Spektrum des Gegenstands abziehen. Dann sehen Sie die Linien, die vom Gegenstand stammen, viel deutlicher. Diese Normierung und Subtraktion ist direkt im WinTMCA-Programm möglich.

¹ Abschnitt „Natürliche Radioaktivität in Guarapari“ in <http://www.ecolo.org/efn-news/EFN9.de.html>

5.6 Materialanalyse

Zur Materialanalyse messen Sie die Röntgenstrahlung, die von einer Probe unter Bestrahlung einer γ -Quelle emittiert wird. Da die primäre γ -Strahlung viel stärker ist als die sekundäre Röntgenstrahlung, muss die γ -Quelle gut abgeschirmt werden. Bauen Sie unter Anleitung Ihres Betreuers eine Abschirmung aus den Bleiziegeln. Beachten Sie, dass der Bleiziegel mit der Aussparung für die γ -Quelle so platziert wird, dass die Aussparung knapp unterhalb des HPGe-Detektors liegt.

Messen Sie zuerst ein Spektrum ohne Probe, damit Sie die Röntgenlinien aus dem Blei identifizieren können. Beachten Sie dabei das Ratemeter des TMCA-Programms. Die Zählrate im HPGe-Detektor sollte nicht über 2000/s liegen. Korrigieren Sie gegebenenfalls die Abschirmung der γ -Quelle. Achten Sie darauf, dass die untere Schwelle des ADC so tief ist, dass die Röntgenlinien im Spektrum zu sehen sind ($E_\gamma \approx 50$ keV). Legen Sie dann die zu untersuchende Probe, ein kleines Metallscheibchen, in die Plexiglshalterung und stellen Sie die Plexiglshalterung in die Bleiburg unmittelbar vor den Detektor. Messen Sie ca. 30 Minuten, bis Sie die Röntgenlinien aus der Probe klar sehen können, und speichern Sie das Spektrum ab. Notieren Sie die eingravierte Nummer des Metallscheibchens.

5.7 Ende der Messung

Schalten Sie die Hochspannungsversorgung und das NIM-Crate NICHT aus!

Fragen Sie den Betreuer, ob die Messapparatur weiterlaufen oder ausgeschaltet werden soll. Verbinden Sie gegebenenfalls wieder das Oszilloskop mit dem Vorverstärker-Ausgang (siehe auch Abschnitt 5.1), und betrachten Sie das Rauschen des Detektors. Drehen Sie dann die Hochspannung so langsam auf 0, dass Sie immer das Detektorrauschen auf dem Oszilloskop sehen. Wie das Anlegen der Hochspannung dauert auch das Ausschalten einige Minuten. Sobald die Hochspannung auf 0 steht und sich das Detektorrauschen auf dem Oszilloskop nicht mehr verändert, können Sie das NIM-Crate abschalten.

Kopieren Sie abschließend Ihre gemessenen Spektren zur Datensicherung auf eine Diskette (bitte von zu Hause mitbringen).

6 Auswertung des Versuchs

Das WinTMCA-Programm ist auch auf den Rechnern in der Bibliothek des Instituts für Kernphysik installiert. Der PC in der Bibliothek (linfp1) hat Lesezugriff auf die Festplatte des Messrechners im Praktikum (linfp2). Die Festplatte des Praktikumsrechners kann auf dem Bibliotheks-PC als Netzlaufwerk unter F: eingebunden werden.

Die Spektren können also nach der Versuchsdurchführung nochmals genau analysiert werden. Falls Sie Ihre Daten zu Hause mit anderen Programmen analysieren möchten, fragen Sie Ihren Betreuer nach der Umwandlung der Binär-Dateien in ASCII-Dateien.

6.1 Auswertung der Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit

Bestimmen Sie die Photopeak-Nachweiswahrscheinlichkeit des HPGe-Detektors aus den gemessenen Spektren für die bei der Messung verwendete Geometrie. Berücksichtigen Sie dabei die Totzeit, die vom TMCA-Programm automatisch ermittelt wird, sowie den Untergrund und die Verzweungsverhältnisse für die entsprechenden γ -Übergänge. Tragen Sie dann Ihre Ergebnisse in ein doppelt-logarithmisches Diagramm ein. Es sollte sich näherungsweise eine Gerade ergeben. Welche Gründe könnte es für eventuelle „Ausreißer“ geben?

Diskutieren Sie die Unsicherheiten Ihrer Messung und tragen Sie entsprechende Fehlerbalken in Ihr Diagramm ein. Berechnen Sie eine Ausgleichsgerade durch Ihre Messpunkte im doppelt-logarithmischen Diagramm unter Berücksichtigung der Fehler. Ist es sinnvoll, alle Messpunkte für die Berechnung der Ausgleichsgeraden zu verwenden? Wie groß ist die Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors bei einer Energie von $E_\gamma = 850 \text{ keV}$?

Bestimmen Sie nun auch die relative Nachweiswahrscheinlichkeit des verwendeten Detektors.

6.2 Auswertung der Energieauflösung

Bestimmen Sie aus den Spektren der verschiedenen Eichquellen die Halbwertsbreiten der jeweiligen Zerfallslinien und tragen Sie die Halbwertsbreiten in Abhängigkeit von den Zerfallsenergien graphisch auf. Welcher Verlauf ist zu erwarten? Fitten Sie anschließend eine entsprechende Kurve an Ihre Messpunkte.

6.2 Auswertung der Untergrundmessung

Bestimmen Sie die Energien der γ -Linien im gemessenen Untergrundspektrum und ordnen Sie die Linien mit Hilfe der von Ihnen schon ausgewerteten Zerfallsketten den jeweiligen Isotopen zu.

Erstellen Sie eine Tabelle mit den identifizierten Linien. Weitere Informationsquelle befinden sich unter Ref. [3] und [4].

6.3 Auswertung der Messung der Gegenstände des täglichen Lebens

Bestimmen Sie die Energien der γ -Linien des gemessenen Spektrums und ordnen Sie die Linien den jeweiligen Isotopen und Zerfallsketten zu. Verwenden Sie dazu eine Nuklidkarte [1] und die Ergebnisse der Auswertung der Untergrundmessung.

Tipp: Suchen Sie zunächst nur nach Elementen, die Sie während des Versuch bereits kennen gelernt haben.

Schätzen Sie mit Hilfe der in 6.1 bestimmten Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors die Aktivität des Gegenstandes ab.

Vergleichen Sie die Stärken der Linien mit den Eichquellen aus Abschnitt 6.1. In grober Näherung ist die Ortsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit einfach durch den Raumwinkel des HPGe-Detektors definiert: $\varepsilon \sim 1 / r^2$.

6.4 Auswertung der Messung der Materialanalyse

Stellen Sie zuerst fest, was für eine radioaktive Quelle für die primäre γ -Strahlung verwendet wurde. Die Linie ist eindeutig im Spektrum zu sehen.

Suchen Sie dann nach den Röntgenlinien, die im Energiebereich um 50 keV liegen, und ordnen Sie die Röntgenenergie(n) dem unbekanntem Material mit Hilfe des Datenblatts von [7] oder [8] zu. So können Sie zerstörungsfrei ermitteln, aus welchem Material das Metallscheibchen besteht.

Literatur

- [1] G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius, H. Seelmann-Eggebert, Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage, Forschungszentrum Karlsruhe, 1995 (hängt in jedem Praktikumsraum)
- [2] Data base Photo-Atomic Cross Sections, Brookhaven National Laboratorium, WWW-Adresse: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
- [3] Decay data search, WWW-Adresse: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/database/nudat>
- [4] Table of Nuclides, WWW-Adresse: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
- [5] Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) und das Quick Retrieval from ENSDF, WWW-Adresse: <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- [6] D. E. Cullen, M. H. Chen, J. H. Hubbell, S. T. Perkins, E. F. Plechaty, J. A. Rathkopf, and J. F. Scofield, Tables and Graphs of Photon {Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL), UCRL-50400, Vol. 6, Parts A+B (1989)
- [7] Periodic Table, WWW-Adresse: <http://www.csrii.iit.edu/periodic-table.html>
- [8] J. A. Bearden, X-Ray Wavelengths, Rev. Mod. Phys. 39 (1967), 78; WWW-Adresse: http://cornell.mirror.aps.org/abstract/RMP/v39/i1/p78_1

Grundlegende Literatur

In den nachfolgend angegebenen Literaturstellen finden Sie die Antworten zu den Fragen und Anregungen in den Abschnitten 1, 3 und 5 und viele weitere Informationen über γ -Spektroskopie.

Besonders wichtige Teile der genannten Quellen liegen zudem in den Praktikumsmappen in der Bibliothek des IKP aus.

- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag, 1987.
- Firma EG & G Ortec, The Whys and Wherefores of Gamma- and X-Ray Detectors, Oak Ridge, 1997.
- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 2000.
- Firma Lambda Research, <http://www.lambda-research.com/>
- Firma Amptek Inc., XRF-System für die "Handtasche", <http://www.amptek.com/fp.html>

A Anhang

Tabelle 1: Aktivitäten der im Praktikum verwendeten Quellen A₀ an einem Referenzdatum und die jeweiligen Energien E_γ.

Quelle	Isotop	Aktivität A ₀ (kBq)	Referenzdatum	E _γ (keV)
GW 380	¹³⁷ Cs	45.7 ± 3.0 %	01.12.1999	661.7
GW 382	⁶⁰ Co	46.1 ± 3.0 %	01.12.1999	1332.5, 1173.2
GW 379	¹³³ Ba	44.9 ± 3.0 %	01.12.1999	383.3, 356.0, 302.9, 276.4, 81.0
NX 434	²¹⁰ Pb	40.7 ± 4.0 %	01.03.2006	46.5
NA 568	⁵⁷ Co	392.0 ± 3.0 %	01.02.2005	122.1, 136,5

Tabelle 2: Aktivitäten der im Praktikum verwendeten Quellen am Praktikumstag A(t) bei einer Energie E_γ unter Berücksichtigung des Verzweigungsverhältnisses (br). Füllen Sie die nachfolgende Tabelle unter Verwendung von [3], [4], [5] oder den Nuclear Data Sheets aus!

Quelle	Isotop	Aktivität A ₀ (kBq)	Referenzdatum	E _γ (keV)	br (%)	A(t) x br (kBq)
GW 380	¹³⁷ Cs			661.7		
GW 382	⁶⁰ Co			1173.2		
GW 382	⁶⁰ Co			1332.5		
GW 379	¹³³ Ba			81.0		
GW 379	¹³³ Ba			276.4		
GW 379	¹³³ Ba			302.9		
GW 379	¹³³ Ba			356.0		
GW379	¹³³ Ba			383.8		
NX 434	²¹⁰ Pb			46.5		
NA 568	⁵⁷ Co			122.1		
				136.5		