

A2: Gamma-Spektrometrie

1. Übersicht zum Thema und Zusammenfassung der Ziele

γ -Spektrometer sind von grundlegender Bedeutung für die Kernphysik, da sie den energieaufgelösten Nachweis von γ -Strahlung und damit die Erfassung und Einordnung angeregter Kernzustände ermöglichen. Sie kommen zudem über verschiedene kern-physikalische Methoden in beinahe allen Gebieten der Physik zum Einsatz. In diesem Versuch werden mit verschiedenen Detektoren γ -Spektren radioaktiver Nuklide gemessen. Anhand der Spektren werden die Wechselwirkungsprozesse der γ -Strahlung mit Materie, die Schwächung in Absorbern und die Energieauflösung der Detektoren analysiert.

2. Was soll man wissen und lernen?

2.1 β -Zerfall

Beim **β -Zerfall** radioaktiver Nuklide entstehen angeregte Tochterkerne, die unter Aussendung von γ -Quanten (bzw. **Konversionselektronen**) in ihren Grundzustand übergehen. Die Energien und relativen Häufigkeiten der emittierten γ -Quanten sind in der *Table of Isotopes* [13.] bzw. im *Evaluated Nuclear Structure Data File* [14] aufgelistet. Die Zerfallsart eines Nuklids kann der **Nuklidkarte** entnommen werden. Machen Sie sich mit der Nuklidkarte und der Table of Isotopes vertraut.

2.2 Nachweis von γ -Strahlung

Der Nachweis von γ -Strahlung im Detektor erfolgt über Elektronen, die durch Wechselwirkung von γ -Strahlung mit dem Detektormaterial freigesetzt werden. Dabei erhalten die Elektronen einen Teil der Energie des γ -Quants als kinetische Energie. Diese wird im Detektor vollständig deponiert, indem durch Coulomb-Wechselwirkung mit den weiteren Elektronen des Detektormediums entweder Elektron-Loch-Paare erzeugt oder Atome in einen angeregten Zustand versetzt werden. Durch Ladungstrennung im elektrischen Feld (Halbleiterdetektor: "Absaugen" der Elektronen und Löcher, Umwandlung der gesammelten Ladung in einen Spannungsimpuls) oder durch das Aufsammeln von Lichtquanten, die durch Rekombination und Abregung entstehen (Szintillationsdetektor), kann man Signale erzeugen, deren Amplitude proportional zur kinetischen Energie der durch die Wechselwirkungsakte des einfallenden γ -Quants erzeugten Elektronen ist. Registriert wird also stets die kinetische Energie der sekundären Elektronen, nicht (direkt) die Energie des primären γ -Quants. Das hat zur Folge, dass auch bei Bestrahlung eines Detektors mit monoenergetischer γ -Strahlung ein Energiespektrum gemessen wird, das im allgemeinen aus mehreren Komponenten besteht: **Photopeak, Compton-Spektrum und Escape-Peaks**.

2.3 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

- Beim **Photoeffekt** überträgt ein γ -Quant seine gesamte Energie auf ein Elektron aus einer - meist inneren - Atomschale, so dass dieses Elektron das Atom mit der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = h\nu - E_B$ verlässt (ν ist die Frequenz der γ -Strahlung, E_B die Bindungsenergie des Elektrons). Der entstandene unbesetzte Elektronenzustand wird durch ein Elektron wiederbesetzt, wobei charakteristische Röntgenstrahlung bzw. Auger-Elektronen emittiert werden. Sowohl das zunächst erzeugte schnelle Elektron als auch die Auger-Elektronen werden in einem nicht zu kleinen Festkörper (Detektor) vollständig

abgebremst; ebenso wird die Röntgenstrahlung im allgemeinen absorbiert (Warum? Beachte die Energieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten), so dass im Ergebnis die gesamte Energie des ursprünglichen γ -Quants im Festkörper (Detektor) verbleibt.

- Bei der **Compton-Streuung** wird das einfallende γ -Quant an einem fast freien Elektron gestreut ($E_\gamma \gg E_B$). Aus Energie- und Impulssatz lässt sich dann die Energie des gestreuten γ -Quants (bzw. Elektrons) in **Abhängigkeit von der Energie des einfallenden γ -Quants und dem Streuwinkel θ berechnen**. Der maximale Energieübertrag auf das Elektron, welcher der **Comptonkante** entspricht, wird bei Rückwärtsstreuung erreicht ($\theta = 180^\circ$). Ein Compton-gestreutes γ -Quant kann aus dem Festkörper (Detektor) entweichen, wobei in diesem Fall nicht die gesamte Energie des primären γ -Quants absorbiert wird. Es ist weiterhin möglich, dass ein γ -Quant erst nach Rückstreuung aus dem Abschirmmaterial in den Detektor gelangt und dort vollständig absorbiert wird; dies führt zur **"Backscatter"-Linie** im Spektrum.

- **Paarbildung** setzt bei einer Energie von $E_\gamma = 1.022 \text{ MeV}$ ein, da diese Energie der doppelten Ruhemasse eines Elektrons entspricht. Sowohl das Elektron als auch das Positron geben ihre kinetische Energie im Festkörper (Detektor) ab. Durch **Paarvernichtung** entstehen zwei γ -Quanten mit einer Energie von jeweils 511 keV. "Escape"-Linien im γ -Spektrum treten dadurch auf, dass eines der Vernichtungsquanten (oder beide) den Detektor ohne weitere Wechselwirkung verlassen. Wenn der beschriebene Prozess im Abschirmmaterial stattfindet, kann eines der Vernichtungsquanten in den Detektor gelangen, was zur sog. **Annihilationsline** führt.

Die **Wirkungsquerschnitte** aller drei Effekte zeigen eine starke Abhängigkeit von der Kernladungszahl Z des Absorbers und der γ -Energie. Zum **Massenschwächungskoeffizienten σ** tragen die drei Prozesse daher je nach Material und γ -Energie mit unterschiedlichen Gewichten bei. Das Auftreten von Absorptionskanten im Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt kann benutzt werden, um die Energie von Röntgen- oder γ -Linien über **kritische Absorption** [5] zu bestimmen.

2.4 Funktionsweise der benutzten Geräte

Im **NaJ(Tl)-Szintillationsdetektor** wird ein Teil der absorbierten γ -Energie zunächst in einen Lichtblitz umgewandelt (**wie?**), der mit Hilfe eines Photomultipliers in ein elektrisches Signal überführt wird. Die Beimischung von Thallium dient zur Erhöhung der Lichtausbeute. Beim **Ge-Detektor** [1] werden **Elektron-Loch-Paare** [9, 10] erzeugt und durch die angelegte Hochspannung getrennt (wozu dient die Kühlung mit flüssigem Stickstoff?). Die Signale beider Detektoren werden zunächst mit einem **ladungsempfindlichen Vorverstärker** integriert und in Impulse verwandelt, deren Höhen zur Ladung des Detektorpulses proportional sind. Die Impulse werden im Hauptverstärker gefiltert und geformt [11] und dann mit einem **Vielkanalanalysator (VKA)** nach Höhe sortiert und gezählt. Der VKA wird im Experiment durch eine Software emuliert [2]. Die Spektren zeigen die unterschiedliche **Energieauflösung** der beiden Detektortypen an, die auf Unterschiede in der **Zählstatistik** zurückzuführen ist.

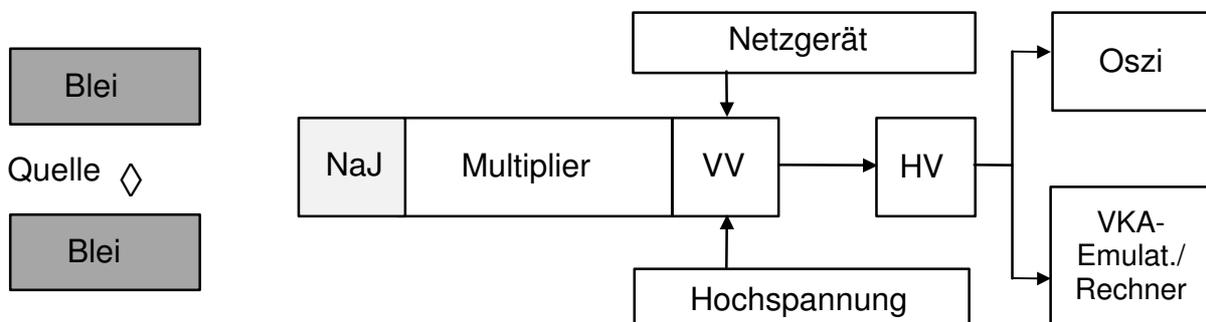
Die **fettgedruckten** Begriffe und Themenkreise müssen zu Versuchsbeginn beherrscht werden; die übrigen sollten beim Abschlussgespräch diskutiert werden können.

3. Aufgaben

1. Inbetriebnahme des NaJ-Detektors (Hochspannung wird vom Assistenten eingestellt). Betrachten der Impulsformen (^{137}Cs -Quelle) vor und hinter dem Hauptverstärker [11]; Skizze der Impulsformen ins Protokoll (Achsenbeschriftung !); Bestimmung der Anstiegs- und Abfallzeiten der Impulse; Diskussion.
2. Energieeichung des NaJ-Detektors mit ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs und Bestimmung der Energieauflösung für alle Photopeaks. Dabei ist die Verstärkung am Hauptverstärker so einzustellen, dass der Photopeak der 1.33 MeV ^{60}Co -Linie im Konversionsbereich des VKA liegt. Bestimmung der Peaklagen und Halbwertsbreiten direkt am Rechner (Cursor, Fehler abschätzen !). Messpunkte und Eichgerade auf Millimeterpapier darstellen.
3. Bestimmung des Massenschwächungskoeffizienten von Pb, Cu und Al für die 1.33 MeV ^{60}Co -Linie. Hierzu die starke ^{60}Co -Quelle (wird vom Assistenten eingesetzt), Kollimator und NaJ-Detektor verwenden. Die Zählrate wird durch Integration über den Photopeak direkt am Rechner bestimmt (Festlegen einer *Region of Interest* (ROI), Zeitvorwahl, Totzeit beachten!). Graphische Darstellung der Zählrate über der Absorberdicke parallel zur Messung.
4. Inbetriebnahme des Ge-Detektors (Hochspannung wird vom Assistenten eingestellt). Protokollieren der Impulsformen vor und nach dem Hauptverstärker, Bestimmung der Anstiegs- und Abfallzeiten der Impulse.
5. Energieeichung des Ge-Detektors mit ^{60}Co (Verstärkung wie in 2. abgleichen), ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{241}Am , und Bestimmung der Energieauflösung für alle Photopeaks. Aufnahme eines ^{60}Co -Spektrums mit guter Statistik, grafische Ausgabe und quantitative Diskussion (Bestimmung von Compton-Kanten, "Back-scatter"-Linien, "Escape"-Linien; Vergleich mit berechneten Werten).
6. Bestimmung der Röntgenkonversionslinie von ^{133}Ba ($E \sim 30 \text{ keV}$) über die kritische Absorption (Ge-Detektor). Als Absorber sind Sn, Sb, Te und J verfügbar. Um Einflüsse der Geometrie und der Absorberdicke auf die absolute Zählrate zu kontrollieren und zu eliminieren, sollte die 81-keV-Linie als Referenz genutzt werden. Die Messgrößen (Zählrate im interessierenden Peak bzw. Verhältnis dieser Zählrate zur Referenzzählrate) sind grafisch über der Lage der Absorptionskante für den entsprechenden Absorber darzustellen.

4. Versuchsaufbau, experimentelle Hinweise

4.1 Skizze des Versuchsaufbaus



4.2 Geräteliste

NaJ-Detektor, Ge-Detektor, jeweils mit integriertem Vorverstärker
Netzgerät, Hochspannungsversorgung
Hauptverstärker

Oszillograph

Computer mit Analog/Digital-Wandler und Software zur Emulation eines Vielkanalanalysators.

4.3 Hinweise auf bestimmte Verfahren

Das Programm lässt die Markierung von *Regions of Interest* (ROI) zu. Informationen über Peaklage, Halbwertsbreite (FWHM) und Anzahl der Zählereignisse werden unter *Peak Info* angezeigt und können als *ROI-Report* ausgedruckt werden.

5. Hinweise zur Auswertung und Diskussion

5.1 Auswertverfahren

Um die Ereigniszahl einer γ -Linie zu bestimmen, muss über den Bereich des zu untersuchenden Peaks integriert werden. Dazu wird zunächst der nicht vom Peak herrührende Untergrund abgezogen und dann werden die Ereignisse in den Kanälen gezählt, die dem Peak mit der ROI zugeordnet wurden. In der Software zur VKA-Emulation wird die unter Verwendung eines lineares Modells für den Untergrund berechnete Ereigniszahl in der ROI als *net area* bezeichnet.

Bestimmung des Massenschwächungskoeffizienten σ durch logarithmische Auftragung der Zählrate über der Absorberdicke. Welche Schlüsse kann man aus den gemessenen σ -Werten für die Abschirmung von γ -Strahlung ziehen? Welcher Effekt dominiert im vorliegenden Fall ?

5.2 Hinweise zur kritischen Fehlerdiskussion

Der statistische Fehler bei N gezählten Ereignissen ist $\pm\sqrt{N}$.

6. Fragen zum Verständnis des Versuches

- Warum ist bei den beiden Detektoren das Signal proportional zur Energie des durch die Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie erzeugten Elektrons ?
- Warum misst man beim Photopeak die volle γ -Energie, obwohl die herausgeschlagenen Elektronen nur die Energie $E_{\text{kin}} = E_{\gamma} - E_{\text{Bindung}}$ haben ?
- Welche Energie erwartet man für die "Backscatter"-Linie ?
- Warum ist das Intensitätsverhältnis zwischen 511 keV Annihilationslinie und 1.27 MeV-Linie der ^{22}Na -Quelle im gemessenen Spektrum weit größer als 2:1, obwohl über 90% der β^+ -Zerfälle von ^{22}Na von der Emission eines 1.27 MeV γ -Quants aus dem angeregten Tochterkern ^{22}Ne begleitet wird ?
- Welche Energie ist im Mittel erforderlich, um
 - ein Elektron-Loch-Paar im Halbleiter zu erzeugen;
 - ein Photoelektron aus der Photokathode eines Sekundärelektronenvervielfachers (Photomultiplier) auszulösen, der an einen NaJ-Kristall angekoppelt ist ?
- Was beschreibt der Fano-Faktor und welche Wert hat er bei den verwendeten Detektoren ?
- Welche Schlussfolgerungen ergeben sich für die theoretisch mögliche Energieauflösung?
- Warum ist der Massenschwächungskoeffizient im Energiebereich von $E_{\gamma} \cong 1$ MeV nahezu unabhängig vom Absorbermaterial ?

7. Literatur

Soweit nicht anders angegeben, ist die Literatur in der Literatursammlung zum Fortgeschrittenenpraktikum bzw. in dem zum Versuch gehörenden Ordner in der Fachbereichsbibliothek zu finden.

7.1 Gebrauchsanleitungen

- [1] Handbuch der Halbleiter für Nuklearstrahlung (Auszug), Detektor Systems GmbH
- [2] Manual zur Software, die den Vielkanalanalysator emuliert (MAESTRO-32)

7.2 Monographien und Lehrbücher

- [3] P. Marmier: "Kernphysik I", insbesondere Kapitel 3 und 8.2
- [4] T. Mayer-Kuckuk: "Kernphysik", Teubner, insbesondere Kapitel 3
- [5] C. Kittel: "Einführung in die Festkörperphysik", Kapitel 11
- [6] P. Huber: "Einführung in die Physik", Band III/2, Kernphysik Kapitel 5, insbesondere 5.3.1, 5.3.2.6 und 5.6
- [7] B.G. Harvey: "Kernphysik und Kernchemie", S. 203
- [8] F. Adams und R. Dams: "Applied Gamma-Ray Spectrometry", Appendix I
- [9] W.R. Leo: "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer
- [10] K. Kleinknecht: "Detektoren für Teilchenstrahlung", Teubner
- [11] Th. Friese: Skripte zur Vorlesung "Nukleare Elektronik"
- [12] G. Schatz und A. Weidinger: "Nukleare Festkörperphysik", Teubner

7.3 Datensammlungen

- [13] C.M Lederer u.a: „Table of Isotopes“ (liegt am Versuchsplatz aus)
- [14] „Evaluated Nuclear Structure Data File“ (ENSDF)
des Brookhaven National Laboratory:
Im ENSDF werden Daten zur Kernstruktur und zu radioaktiven Zerfällen bereitgestellt. Diese können mit folgendem Link über das Internet abgerufen werden: <http://ie.lbl.gov/ensdf>