

Versuch 2.2-A

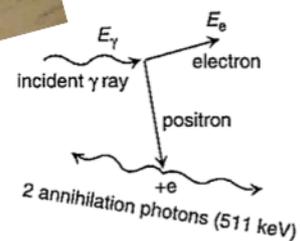
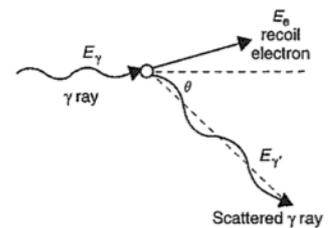
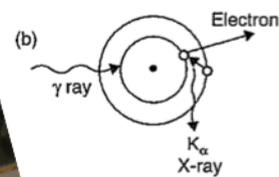
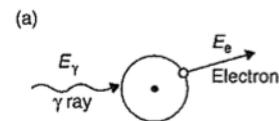
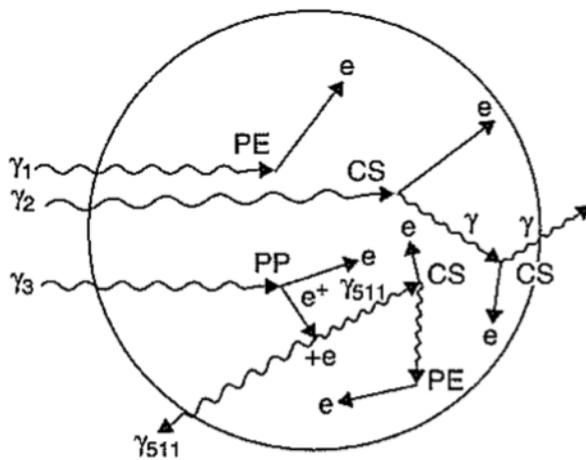
Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene (Abteilung C)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Physik
Institut für Kernphysik
Experimentelle Kernstrukturphysik
AG Pietralla, AG Kröll



Inhaltsverzeichnis

1. Ziel des Versuchs	2
2. Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie	3
3. Versuchsaufbau	6
4. Zum Versuch	7
4.1. Vorbereitung	7
4.2. Versuchsdurchführung	7
4.3. Auswertung	8
5. Zur Ausarbeitung	10
A. Zur Bestimmung der Quellenaktivität	11
B. Das Programm VKS	12
Literatur	13

1 Ziel des Versuchs

Bei diesem Versuch werden Sie die Wechselwirkung von Gammastrahlung verschiedener Energie mit Materie untersuchen. Das Verständnis der verschiedenen Wechselwirkungsmechanismen ist grundlegend für verschiedene Anwendungsgebiete, wie z.B. die Strahlenüberwachung, den Nachweis von Gammastrahlung in medizinischen Diagnoseverfahren oder bei der Materialanalyse. Darüber hinaus spielt die Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie eine essentielle Rolle in der Kernphysik. Bei der Gammaskopie geht es beispielsweise darum, von Atomkernen emittierte Gammastrahlen zu detektieren und bezüglich ihrer Energie zu analysieren, um Aussagen über die dem Kern zugrundeliegende Struktur zu treffen. Allerdings fällt in der Regel bereits die Antwort eines Detektors auf monoenergetische Gammastrahlen sehr komplex aus. Abbildung 1.1 veranschaulicht die Detektorantwort auf monoenergetische Gammastrahlen schematisch.

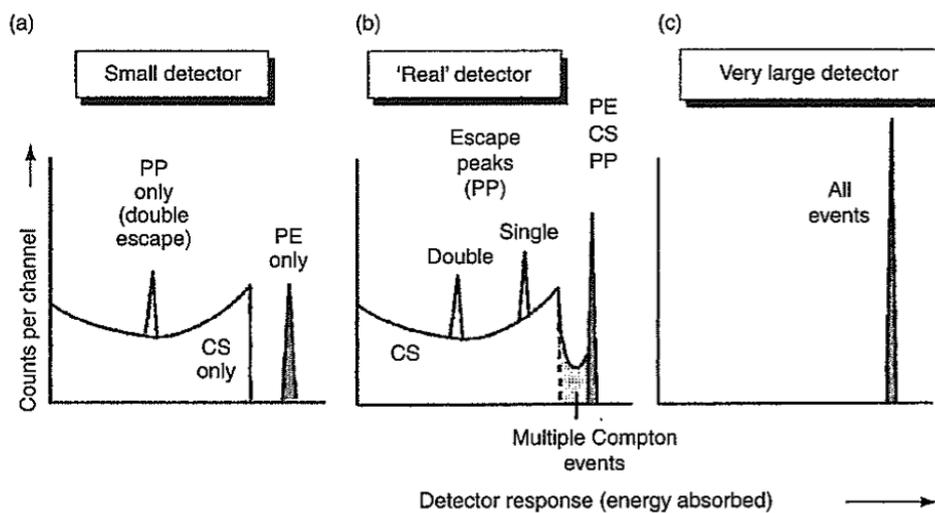


Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung der Detektorantwort eines „kleinen“ (a), eines „realen“ (b) und eines „sehr großen“ (c) Detektors auf den Einfall monoenergetischer Photonen [Gil08].

In diesem Versuch verwenden Sie einen NaI-Kristall zur Spektroskopie der Strahlung. In diesem Kristall löst die ionisierende Strahlung Photolumineszenz aus, die mit einem Photomultiplier verstärkt wird. Sie werden Messungen an zwei radioaktiven Quellen, ^{22}Na und ^{137}Cs , bei verschiedenen Randbedingungen durchführen und auswerten, um zum Einen die Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie im Allgemeinen und insbesondere Eigenschaften dieser beiden Isotope zu untersuchen.

Anhand der bekannten Linien in den Spektren sollen zunächst eine Energiekalibrierung der Apparatur vorgenommen und mit deren Hilfe weitere Linien identifiziert werden. Ziel der Analyse der aufgenommenen Spektren ist die Bestimmung sowohl des Konversionskoeffizienten α_K des M4-Übergangs in ^{137}Ba sowie des β^+ -Verzweigungsverhältnisses von ^{22}Na .

Darüber hinaus soll die Energieauflösung des Detektors untersucht werden. Den Einfluss sowohl der Messgeometrie als auch der Detektorabschirmung auf das Pulshöhenspektrum werden Messungen mit verschiedenen Rückstreuungskörpern und verschiedenen Abständen zwischen Quelle und Detektor zeigen.

2 Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie

Die Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie wird vor allem durch drei unterschiedliche Wechselwirkungsprozesse sowohl mit dem Atomkern als auch mit der Elektronenhülle des Atoms charakterisiert. Dies sind der Photoeffekt, bei dem das wechselwirkende Photon komplett absorbiert wird, der Comptoneffekt, bei dem das Photon an einem „quasifreien“ Elektron gestreut wird und dabei einen Teil seiner Energie abgibt, und der Paarbildungseffekt, bei dem das Photon in ein Elektron-Positron-Paar umgewandelt wird (vgl. Abb. 2.1).

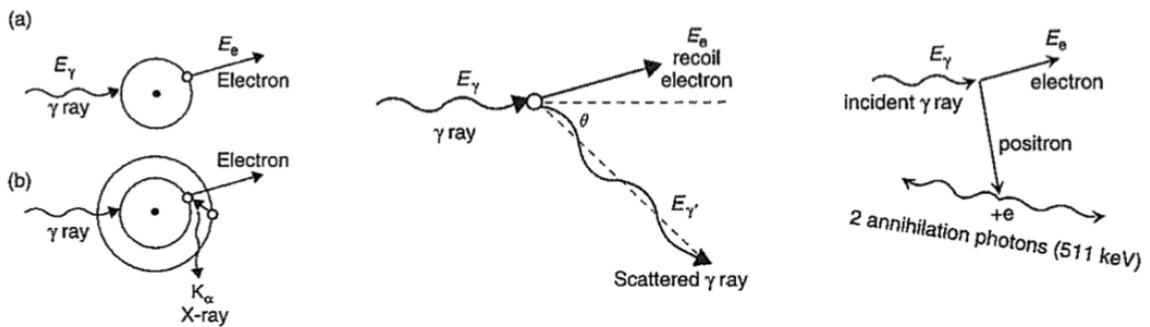


Abbildung 2.1.: Überblick über die drei häufigsten Wechselwirkungsmechanismen von Gammastrahlung mit Materie: Photoeffekt und anschließende Emission eines Röntgenquants (links), Comptoneffekt (Mitte) und Paarbildung (rechts) [Gil08].

Abhängig von der Energie der einfallenden Gammastrahlung überlagern sich diese Wechselwirkungsprozesse, wobei je nach Energiebereich jeweils einer der Prozesse dominiert (s. Abb. 2.2).

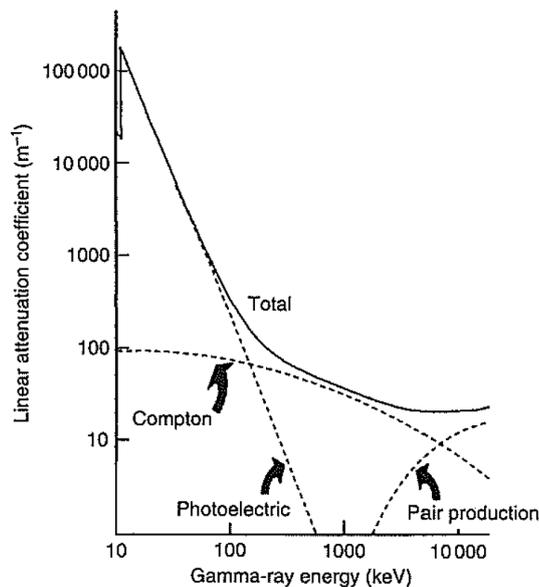


Abbildung 2.2.: Linearer Abschwächungskoeffizient und die Anteile des Photo- sowie Comptoneffekts und der Paarbildung für Germanium [Gil08].

In der Gammaskopie ist man an der vollen Energie der detektierten Gammaquanten interessiert. D.h. in einem idealen Detektor deponiert das Gammaquant seine komplette Energie im Kristall, wird dabei vollständig absorbiert und trägt im aufgenommenen Pulshöhenspektrum zum „Full Energy Peak“ bei. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das Photon über den Photoeffekt mit dem Kristall wechselwirkt. In einem realen Detektor wird ein einfallendes Photon aber in der Regel (abhängig von der Energie des Photons) nicht allein über den Photoeffekt mit dem Kristall in Wechselwirkung treten. Tatsächlich werden verschiedene Wechselwirkungen mit dem Kristall stattfinden, bevor das Photon seine komplette Energie an den Kristall abgegeben hat oder den Kristall wieder verlässt. Mögliche Wechselwirkungen von Photonen mit einem realen Detektor sind in Abbildung 2.3 skizziert.

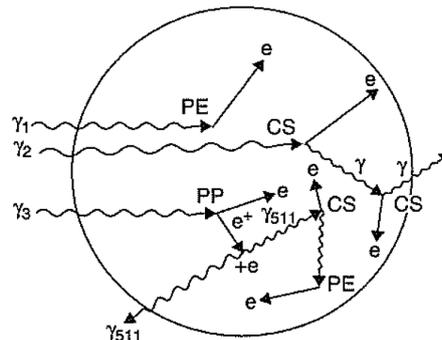


Abbildung 2.3.: Wechselwirkung von Gammaquanten mit einem realen Detektorkristall: Photoeffekt (PE), Compton-Streuung (CS) und Paarbildung (PP) [Gil08].

Jedesmal wenn ein Photon nicht seine gesamte Energie im Detektorkristall deponiert, wenn es den Kristall also vorher verlassen konnte, wird ein Ereignis mit geringerer als der vollen Photonenenergie im Pulshöhenspektrum eingetragen und man erhält bereits für monoenergetische Strahlung ein relativ komplexes Spektrum, welches sich neben dem „Full Energy Peak“ aus dem Comptonuntergrund und sogenannten Escapelinien zusammensetzt (vgl. Abb. 1.1).

Zusätzlich zu der charakteristischen Detektorantwort (sie hängt von der Detektorart und -geometrie ab) werden Ereignisse registriert, die auf Wechselwirkungen von Photonen mit der Umgebung des Detektors (z.B. seiner Abschirmung) zurück zu führen sind. Beispiele für solche Wechselwirkungen sind in Abbildung 2.4 schematisch zusammengefasst.

Zusammenfassend erhält man also bereits für monoenergetische Gammastrahlung ein relativ komplexes Spektrum. Führt man Spektroskopie an Atomkernen durch, so misst man in der Regel Photonen mit vielen verschiedenen Energien (korrespondierend zu den einzelnen Kernniveaus) und erhält in Summe ein Spektrum, in dem sich die verschiedenen „Full Energy Peaks“ mit dem Comptonuntergrund und den Escapelinien anderer Linien überlagern.

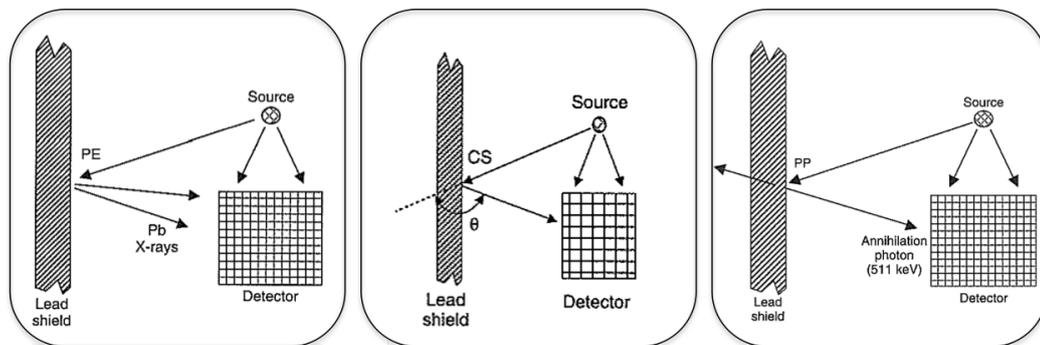


Abbildung 2.4.: Wechselwirkung von Gammaquanten mit der Detektorumgebung: Photoeffekt (PE, links), Comptoneffekt (CS, Mitte) und Paarbildung (PP, rechts) [Gil08].

3 Versuchsaufbau

Zur Spektroskopie der γ -Strahlung wird in diesem Versuch ein Szintillationszähler verwendet (vgl. Abb. 3.1). Der Szintillator als der wesentliche Bestandteil des Spektrometers ist ein mit Thallium dotierter zylinderförmiger NaI-Einkristall ($l = 3''$, $d = 3''$). Die dort ausgelöste Lumineszenz wird in der nachfolgenden optisch angekoppelten Einheit des Photomultipliers elektronisch registriert. Nach der Verstärkung der am Arbeitswiderstand auftretenden Spannungspulse erfolgt deren Analog-Digital-Wandlung und die Aufnahme in Pulshöhenspektren. Zur Datenaufnahme wird das Programm VKS verwendet.

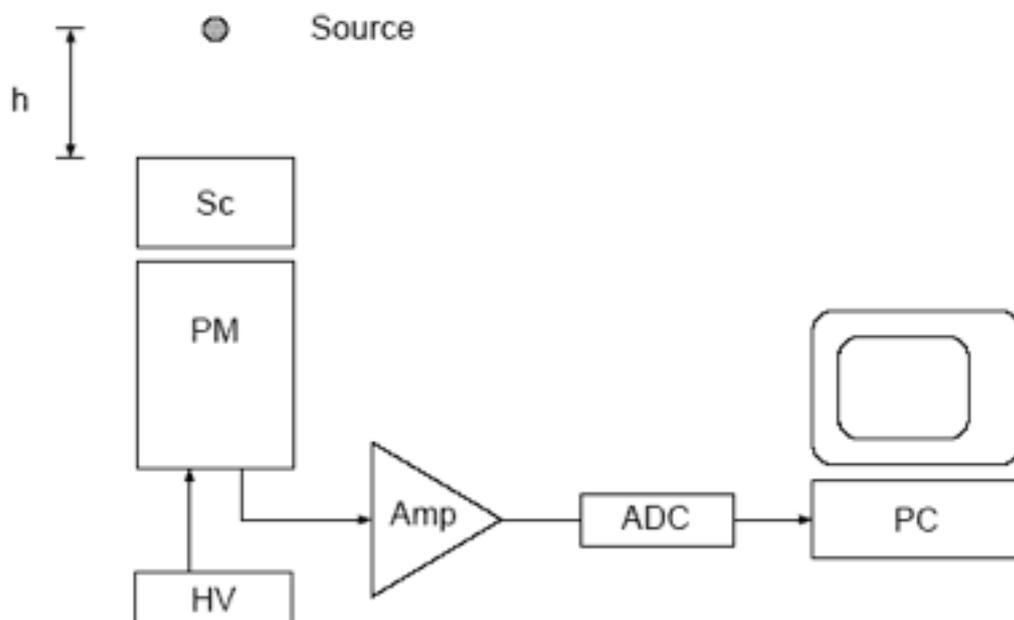


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung der Apparatur mit Quelle (Source), NaI-Szintillator (Sc), Photomultiplier (PM), Hochspannung (HV), Vor- und Hauptverstärker (Amp), Analog-Digital-Wandler (ADC) und Computer (PC).

4 Zum Versuch

4.1 Vorbereitung

Zur Vorbereitung auf den Versuch sollten Sie sich mit den folgenden Themen vertraut gemacht haben:

- Radioaktiver Zerfall - insbesondere Elektroneneinfang, innere Konversion und Zerfallsschemata der Isotope ^{22}Na und ^{137}Cs [Bet01, Mar69, May02].
- Wechselwirkungsmechanismen von Photonen (Röntgen- und γ -Strahlung) mit Materie, Absorptionsgesetz und Wirkungsquerschnitte für Photo- und Comptoneffekt sowie Paarbildungsprozess, insbesondere ihre Abhängigkeit von der Ladungszahl Z und der Energie E_γ [Gil08, Kno89, Leo94].
- Szintillationsspektrometrie (beschränken Sie sich hier auf wesentliche Eigenschaften von NaI-Kristall und Photomultiplier), Energieauflösung von Detektoren, Impulshöhenspektrum, Ansprechwahrscheinlichkeit von Detektoren [Gil08, Kno89].
- Experimenteller Aufbau: Spectroscopy Amplifier und Analog-to-Digital Converter (ADC) [Kno89, Leo94].

4.2 Versuchsdurchführung

Vorbereitung

Nehmen Sie den Versuchsaufbau in Betrieb. Der NaI-Szintillator wird bei einer Hochspannung von 1 kV betrieben. Stellen Sie den Abstand der Quelle zur Detektoroberfläche auf $h = 10$ cm ein. Dieser Abstand bleibt für den weiteren Verlauf des Versuchs - sofern nicht anders angegeben - konstant. Machen Sie sich mit dem Spectroscopy Amplifier und dem Datenaufnahmeprogramm VKS vertraut.

Messungen an ^{137}Cs

- Nehmen Sie ein Pulshöhenspektrum für ^{137}Cs auf, sodass die Flächen unter den einzelnen Linien möglichst genau bestimmt werden können (wie hängt die Peakfläche mit ihrer Unsicherheit zusammen?).
- Untersuchen Sie nun den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf das Pulshöhenspektrum, indem Sie in verschiedenen Messungen verschiedene Materialien (Al, Fe, Cd, Pb) „hinter“ die Quelle legen und dabei die Z -Abhängigkeit der Rückstreuulinie („backscatter peak“) bestimmen.
- Führen Sie weiterhin eine Messung durch, bei der zwischen Quelle und NaI-Detektor ein Bleiblech gelegt wird. Welche Effekte erwarten Sie in dieser Messung?

Messungen an ^{22}Na

- Nehmen Sie auch hier zunächst ein Pulshöhenspektrum für ^{22}Na unter optimalen Bedingungen auf (Was sind die optimalen Bedingungen? Welche Linien erwarten Sie im Spektrum?).

- Reduzieren Sie jetzt die Verstärkung so weit, dass Impulshöhen bis etwa 2 MeV registriert werden können. Um den Einfluss hoher Zählraten und ungünstiger Geometrie zu untersuchen, nehmen Sie je ein Pulshöhenspektrum für den Detektorabstand $h = 10$ cm und $h = 0$ cm (Präparat direkt auf den Detektor legen) auf.

Messung des Untergrunds

Nehmen Sie zuletzt ein Pulshöhenspektrum der Untergrundstrahlung (was ist die Quelle der Untergrundstrahlung?) bis $E_\gamma \approx 3$ MeV auf. Eine Energiekalibrierung kann mit Hilfe des ^{22}Na Präparates vorgenommen werden.

4.3 Auswertung

A) Analyse der Spektren

Führen Sie eine Energiekalibrierung der aufgenommenen Spektren durch und erklären Sie alle wichtigen Strukturen. Bearbeiten Sie darüber hinaus insbesondere die folgenden Punkte:

1. Bestimmen Sie die Energien aller beobachteten Linien und der Comptonkanten (wie gehen Sie dazu vor?) und vergleichen Sie letztere mit theoretisch bestimmten Werten.
2. Diskutieren Sie die Z-Abhängigkeit der Rückstreulinie. Beachten Sie dabei die Massenbelegung der aufgelegten Streukörper.
3. Welche Effekte auf das aufgenommene Spektrum hat die Bleiplatte, die zwischen Detektor und Quelle platziert wurde?
4. Untersuchen Sie den Einfluss des Abstandes der Quelle vom Detektor auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Summenlinie.
5. Diskutieren Sie die Abhängigkeit der Energieauflösung von der Energie der γ -Quanten. Tragen Sie dazu die Halbwertsbreite aller beobachteten Totalabsorptionslinien über der Wurzel $\sqrt{E_\gamma}$ der Gammaenergie auf. Daraus lässt sich die effektive Energie E_{eff} herleiten, die notwendig ist, um ein Photoelektron aus der Photokathode herauszuschlagen. Berechnen Sie diese Energie.
6. Identifizieren Sie anhand des Pulshöhenspektrums des Raumuntergrundes möglichst viele Quellen der γ -Untergrundstrahlung.

B) Konversionskoeffizient α_K

Der Konversionskoeffizient α_K ist definiert als das Verhältnis der Anzahl n_K der K-Konversionselektronen und der Anzahl n_γ der emittierten Gammaquanten:

$$\alpha_K = \frac{n_K}{n_\gamma}. \quad (4.1)$$

Die Anzahl n_K der K-Konversionselektronen erhält man dabei aus der Zahl n_R der emittierten Röntgen-Quanten. Mit der Fluoreszenzausbeute $\omega_K = 0.901$ für Barium gilt:

$$n_R = \omega_K \cdot n_K. \quad (4.2)$$

Bestimmen Sie daraus unter Beachtung der im Anhang erläuterten Korrekturen den Konversionskoeffizienten α_K .

C) β^+ -Verzweigungsverhältnis

Bestimmen Sie nun analog zum Konversionskoeffizienten das β^+ -Verzweigungsverhältnis

$$\eta = \frac{n_{\beta^+}}{n_{\text{tot}}} \quad (4.3)$$

aus dem ^{22}Na -Spektrum. Hier bezeichnet n_{β^+} die Anzahl der β^+ -Zerfälle und n_{tot} die Gesamtzahl der Zerfälle.

D) Mehrfachprozesse

Vergleichen Sie zuletzt den Flächenanteil der Totalabsorptionskennlinie am Spektrum, das sogenannte „Peak-to-Total“-Verhältnis, beispielsweise bei der 1,28 MeV Linie von ^{22}Na mit dem Verhältnis der Ansprechwahrscheinlichkeiten, die man für den Photo- bzw. den Comptoneffekt unter der Annahme kollimiert in der Achse des Kristalls einfallender γ -Strahlung berechnet. Wie groß ist demnach der Beitrag von Mehrfachprozessen zur Totalabsorptionslinie?

5 Zur Ausarbeitung

Für die Ausarbeitungen gelten die im „Anleitungsblatt“ zum Fortgeschrittenenpraktikum angegebenen Grundsätze:

- Stellen Sie die allgemeinen Grundlagen des Versuchs knapp aber treffend dar (hier z.B.: Wechselwirkungsmechanismen von Gammastrahlen mit Materie, Funktionsweise eines Szintillationsdetektors, ...).
- Stellen Sie die für Auswertung und Verständnis nötigen Grundlagen und Formeln so knapp wie möglich und so ausführlich wie nötig dar. Versuchen Sie hierbei, eine grobe Übersicht über die Grundlagen zu geben, die auch ohne Verwendung von Sekundärliteratur (Anleitungsblatt, weitere Quellen, ...) verständlich ist. Auf dezidierte Herleitungen kann hierbei verzichtet werden (zitieren Sie verwendete Quellen!).
- Schildern Sie das Messprinzip / die Messidee.
- Diskutieren Sie eingehende Fehlerquellen für Messwerte und Abschätzungen ausführlich und führen Sie eine sorgfältige Abschätzung der Unsicherheiten durch. Wichtig ist hierbei, dass Sie von Fehlerquellen einen Eindruck erhalten und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis abschätzen lernen.
- Das Versuchsprotokoll ist wesentlicher Bestandteil Ihrer Auswertung. Ohne Versuchsprotokoll kein Testat! Ein Mitglied der Praktikantengruppe legt das Protokoll im Original bei, andere Mitglieder kopieren das Protokoll und fügen es ebenfalls bei.
- Abgabetermin: Nach dem Versuch haben Sie **drei Wochen Zeit** eine Versuchsausarbeitung anzufertigen und abzugeben.

A Zur Bestimmung der Quellenaktivität

Die Fläche F unter einer Totalabsorptionslinie ergibt sich im Allgemeinen zu

$$F = \varepsilon \cdot R^{\text{PT}} \cdot N \cdot K \quad (\text{A.1})$$

wobei N die Zahl der innerhalb der Messzeit von der Quelle emittierten Photonen ist. Die totale Ansprechwahrscheinlichkeit ε beinhaltet sowohl die Absorptionswahrscheinlichkeit im Kristall als auch die Raumwinkelakzeptanz. Das „Peak-to-Total“-Verhältnis R^{PT} gibt den relativen Anteil der Ereignisse an, die unter der Totalabsorptionslinie registriert werden. Beide Faktoren hängen folglich von der Geometrie (Kristallgröße und Abstand zur Quelle) sowie der Photonenenergie ab. In dem Korrekturfaktor K wird der Einfluss weiterer Effekte zusammengefasst, die bei der Bestimmung von α_K eine Rolle spielen.

Für Energien $E_\gamma \leq 100$ keV muss die Absorption der Photonen im Eintrittsfenster des Kristalls berücksichtigt werden. Für die im Versuch benutzten Detektoren und die mittlere Röntgenenergie von Barium $E_K(\text{Ba}) = 32,9$ keV gilt $K = 0,85$.

Da die Bindungsenergie der K-Schale im Jod $BE_K(\text{I}) = 33,2$ keV beträgt, ist der Absorptionskoeffizient für die Ba- K_α -Strahlung ($E_{K_\alpha} = 32,1$ keV) sehr viel größer als für die Ba- K_β -Strahlung ($E_{K_\beta} = 36,6$ keV). Die nach der Absorption eines Ba- K_β -Quants durch Photoeffekt in der K-Schale des Jod folgende Röntgenstrahlung hat eine Energie von $E_{K_\alpha} = 28,5$ keV und kann daher mit einer Wahrscheinlichkeit $p_{\text{esc}} = 0,21$ aus dem Kristall entkommen [Del69]. Die kinetische Energie des Photoelektrons und die damit an den Kristall übertragbare Energie beträgt nun

$$T_e = E_{K_\alpha}(\text{Ba}) - BE_K(\text{I}) = (36,6 - 33,2) \text{ keV} = 3,4 \text{ keV}, \quad (\text{A.2})$$

sodass diese Energie unter der Empfindlichkeitsschwelle der Messanordnung liegt und ein Teil der K_β -Quanten nicht registriert wird. Für die K_α -Quanten ist der Verlust vernachlässigbar. Aus der relativen Intensität

$$\frac{n_{K_\beta}}{n_{K_\beta} + n_{K_\alpha}} = 0,192 \quad (\text{A.3})$$

der Ba- K_β -Quanten [Dat85] und der Escapewahrscheinlichkeit p_{esc} kann der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Escapeeffekts bestimmt werden.

B Das Programm VKS

Das Programm VKS wird über das Kommando VKS gestartet. Spektren können in einem Speicherbereich, dem sogenannte „Analyzer“, aufgenommen werden. Dieser Speicherbereich heißt „ADC“ und kann über seinen Namen angesprochen werden. Die folgende Übersicht gibt eine Liste der am häufigsten verwendeten Befehle:

1. Messung

START *Name*: Startet eine Messung. Daten werden im Analysator *Name* aquiriert.

STOP *Name*: Stoppt die Messung und Datenaquisition im Analysator *Name*.

CLEAR *Name*: Löscht den Inhalt des Analysators *Name*.

2. Anzeige der Spektren

DISPLAY *Name*: Stellt den Inhalt des Analysators *Name* auf dem Bildschirm dar.

LIN: Stellt die Ordinate linear dar.

LOG: Stellt die Ordinate logarithmisch dar.

POINT: Stellt den Kanalinhalt als Punkte dar.

HIST: Stellt den Kanalinhalt als Histogramm dar.

EXP [*xmin*, *xmax*]: Vergrößert den Ausschnitt der Abzisse im Intervall [*xmin*, *xmax*].

EYP [*ymin*, *ymax*]: Vergrößert den Ausschnitt der Ordinate im Intervall [*ymin*, *ymax*].

3. Sichern und Laden

CDUMP *Name*: Speichert ein Spektrum auf der Festplatte.

CFETCH *Name*: Lädt ein Spektrum von der Festplatte.

4. Verschiedenes

HCOPY: Druckt ein Spektrum auf dem Drucker.

CURSOR: Aktiviert graphischen Cursor im Spektumbild und ermöglicht das Abfahren einzelner Kanäle.

EICH: Eichung des Spektrums durch Zuordnung von Energien zu Kanälen.

INT [*ymin*, *ymax*]: Integrieren (nach Grenzwahl durch den Cursor) der Kanalhalte (SUM). Die Fläche unter der Geraden zwischen den Spektrumspunkten an den Integrationsgrenzen wird subtrahiert (PEAK).

ADD: Addiert zwei Spektren gemäß $A = \alpha A + \beta B + m$ bei Vorgabe der Spektrumsnamen A, B sowie der Wichtungen α , β und m .

OVERLAY: Stellt zwei Spektren übereinander dar.

Literatur

- [Bet01] K. Bethge, G. Walter, B. Weidemann, *Kernphysik - Eine Einführung* (3. Auflage) Springer, Berlin, Heidelberg (2001)
(siehe auch Literaturmappe zum Versuch)
- [Dat85] Datenblätter zum F-Praktikum (1985) und dort zitierte Referenzen
- [Del69] J.R. Dell and P.J. Ebert, *Nucl. Instr. Meth.* **68** (1969) 335
- [Gil08] G. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectroscopy* (2. Auflage), John Wiley and Sons, New York (2008)
(siehe auch Literaturmappe zum Versuch)
- [Kno89] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (2. Auflage), John Wiley and Sons, New York (1989)
(siehe auch Literaturmappe zum Versuch)
- [Leo94] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (2. Auflage), Springer, Berlin, Heidelberg (1994)
- [Mar69] P. Marmier and E. Sheldon, *Physics of Nuclei and Particles I*, John Wiley and Sons, New York (1969)
- [May02] T. Mayer-Kuckuk, *Kernphysik - Eine Einführung* (7. Auflage), Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden (2002)

Beachten Sie auch die Hinweise zum Versuch im Internet:

www.ikp.tu-darmstadt.de > Lehre > F-Praktikum > Versuch 2.2 A