

γ -Spektren – Compton-Streuung

Ziele

In diesem Versuch werden Sie die Energiespektren von γ -Photonen unterschiedlicher radioaktiver Kerne untersuchen. Unter γ -Strahlung versteht man elektromagnetische Strahlung aus Kernübergängen. Sie trägt damit Informationen über den strahlenden Kern. Daher ist die γ -Spektroskopie ein wichtiges Verfahren zur Untersuchung der Struktur von Atomkernen.

1 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

Die Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie führt zu einer Abschwächung der Strahlung durch Intensitätsverlust (=Anzahl der Photonen), nicht aber durch Energieverlust. In dem Energiebereich bis 10 MeV spielen dabei Photoeffekt, Compton-Streuung und Paarbildung die wesentliche Rolle (Abb. 1).

Um die Energie der γ -Photonen zu bestimmen, verwenden Sie im Versuch energiesensitive Detektoren. Diese liefern Impulse, deren Höhe proportional zur Energie der γ -Photonen ist. Durch Messung der Impulshöhenverteilung können Sie das Energiespektrum von γ -Strahlung analysieren..

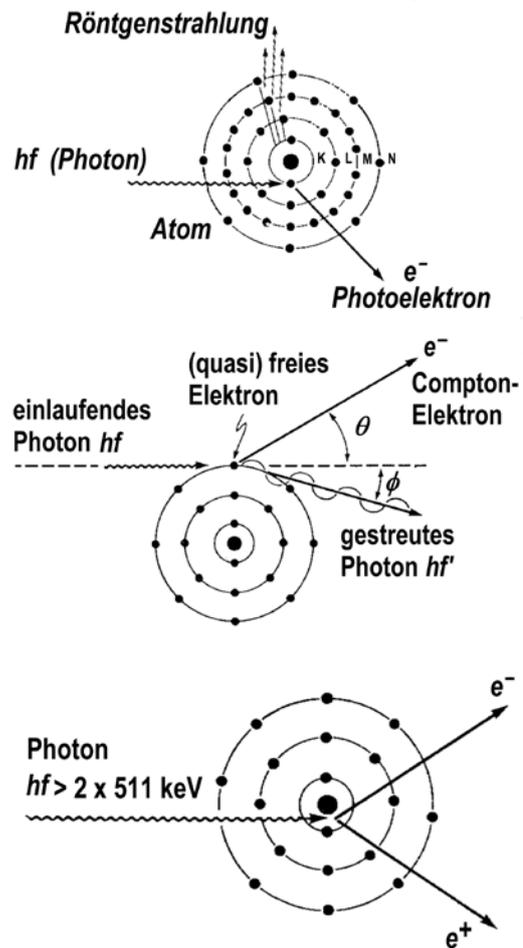
1.1 Zur Vorbereitung

1. Beim **Photoeffekt** (Abb. 1) gibt ein γ -Photon seine Energie $E = hf$ durch Stoß mit dem gebundenen Hüllenelektron eines Atoms komplett ab und verschwindet damit völlig aus der Strahlung. Die kinetische Energie des Photoelektrons nach dem Stoß ist also gleich $E_k = hf - E_B$ (Photonenenergie – Bindungsenergie des Elektrons). Warum findet der Photoeffekt nur an den inneren Hüllenelektronen statt?

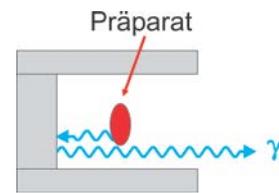
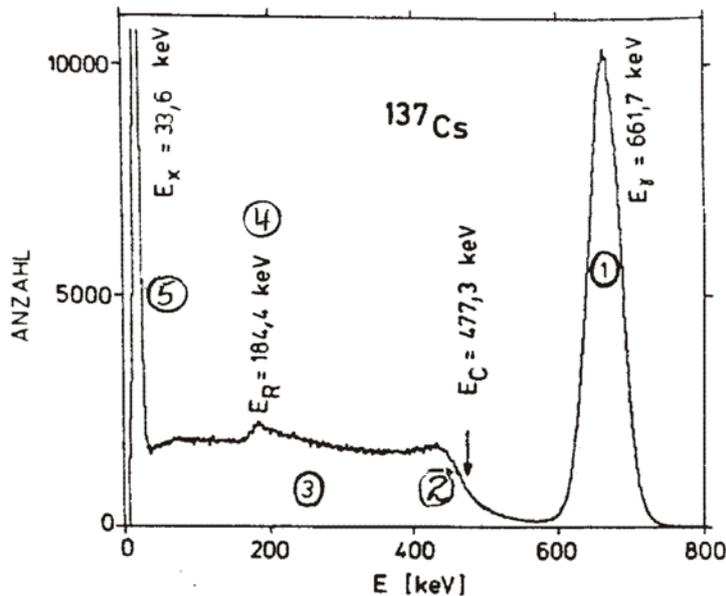
2. Die **Compton-Streuung** wird als elastischer Stoß zwischen γ -Photonen und freien Elektronen beschrieben. Unter dem Winkel ϕ gegen die Vorwärtsrichtung werden Photonen gestreut, deren Energie $E' = hf'$ sich von der Energie $E = hf$ der einfallenden γ -Photonen E unterscheidet (Abb. 1):

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{E_0} \cdot (1 - \cos \phi) \quad (1)$$

E = Energie vor dem Stoß, E' = Energie nach dem Stoß und $E_0 = m_e c^2$ die Ruheenergie des Elektrons. Skizzieren Sie E' als Funktion von ϕ für die 59,5 keV-Linie beim ^{241}Am .



1 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie:
 a) Photoeffekt; an Elektronen der inneren Schalen,
 b) Compton-Streuung an Elektronen der äußeren Schalen;
 c) Paarbildung



4 Rückstreupic E_R ; ein γ -Quant erfährt Compton-Streuung am Präparat und tritt mit $\phi = 180^\circ$ und mit der Energie $E_R = E_\gamma - \Delta E_{\max}$ nach vorn aus

2 Impulshöhenspektrum der γ -Strahlung von Cs-137

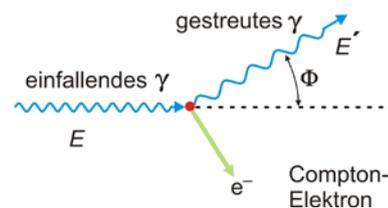
- 1 Photolinie E_γ ; 2 Comptonkante E_C ; 3 Comptonuntergrund
- 5 Röntgenlinie E_X ; ein γ -Quant löst Elektronen aus der K-Schale aus: $\Delta E_{K-L-Schale} = E_X$

3. **Paarbildung:** Übersteigt die γ -Energie die zweifache Ruhemasse von Elektronen (1,022 MeV), kann ein Elektron-Positron-Paar gebildet werden. Um die Impulserhaltung zu ermöglichen, muss der Prozess im Coulombfeld eines Atomkerns stattfinden. Mit zunehmender γ -Energie nimmt die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozess zu (Abb. 4). Der Prozess der Paarbildung ist umkehrbar. Das radioaktive Präparat ^{22}Na , mit dem Sie u. a. experimentieren werden, liefert Positronen. Was passiert, wenn diese Positronen in Materie abgebremst werden? Wie werden die Erhaltungssätze für Ladung, Energie, Impuls erfüllt? Wie groß sind Energie und Impuls der neuen Quanten?

4. Mit welchen Messgeräten lässt sich γ -Strahlung nachweisen? Welche physikalischen Prozesse werden ausgenutzt?

5. Compton hat 1927 den Nobelpreis für den nach ihm benannten Streueffekt erhalten. Er hat mit Röntgenstrahlen experimentiert, deren Wellenlänge $\lambda = h \cdot c / E_x$ gerade gleich der Comptonwellenlänge $\lambda_c = h / m_e \cdot c$ von Elektronen war. Warum? Kann man den gleichen Effekt auch bei sichtbarem Licht beobachten?

6. Die Messungen mit dem Szintillationszähler ergeben neben der **Photolinie** 1 stets auch einen **Compton-Untergrund** 3 (Abb. 2). Wie kommt dieser Compton-Untergrund zustande?



3 Zum Comptoneffekt

$$\Delta E = E - E' = \frac{E^2(1 - \cos \phi)}{E_0 + E(1 - \cos \phi)} = \frac{2E^2}{E_0 + 2E};$$

$E = h \cdot f$ vor $E' = h \cdot f'$ nach dem Stoß; $E_0 = m_e \cdot c^2 = 511 \text{ keV} = \text{Ruheenergie des Elektrons}$.

Für den Streuwinkel $\phi = 180^\circ$ (s. Abb. 3) wird der Energieübertrag auf das Elektron maximal. Genau bei dieser Energie liegt die Comptonkante E_C (bitte nachrechnen!). Warum fällt dort der Compton-Untergrund ab?

1.2 Der Absorptionskoeffizient

(Nur A-Kurse)

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Wechselwirkung zwischen γ -Strahlung und Materie ist für jedes γ -Photon und für jede Stelle im Absorber gleich. Für den Intensitätsverlust der γ -Strahlung dI durch Absorption in einer Schicht der Dicke dx gilt demnach:

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dx.$$

μ ist der (materialabhängige) lineare Absorptionskoeffizient (Abb. 5). Die durch den Absorber gelangende Intensität I der γ -Strahlung nimmt also exponentiell mit der Absorberdicke d ab (vgl. Versuch D10)

$$I = I(0) \cdot \exp(-\mu \cdot d). \quad (2)$$

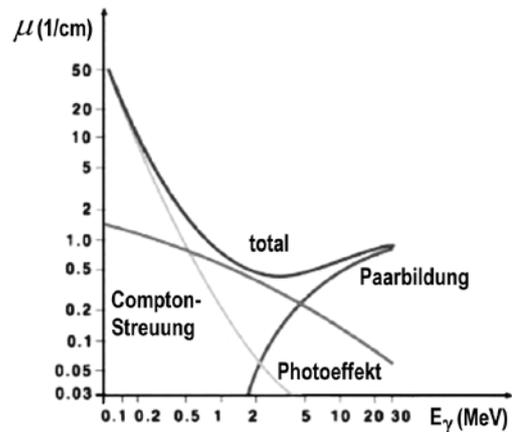
$I(0)$ = Intensität vor dem Absorber

Anstelle des Absorptionskoeffizienten wird auch die Schichtdicke $d_{1/2}$ angegeben (Tabelle 1), in der die Hälfte der Anfangsintensität absorbiert worden ist. Aus der Bedingung $I(d_{1/2}) = I(0)/2$ folgt mit Gl. (2)

$$d_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu}.$$

7. Leiten Sie Gl. (2) und Gl. (3) ab. Warum erwartet man, dass die γ -Intensität exponentiell mit der Dicke des Absorbers abnimmt? Überprüfen Sie die Genauigkeit von Abb. 4 mithilfe der Werte aus Tabelle 1.

8. Wie könnte man zeigen, dass die ungestreute γ -Strahlung, die einen Absorber verlässt, dieselbe Energie besitzt wie die auf den Absorber fallende Strahlung?

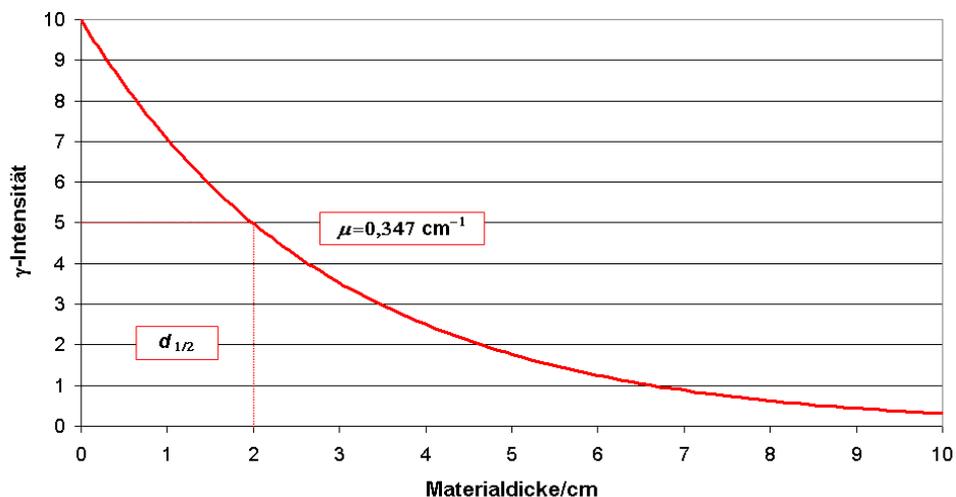


4 Absorptionskoeffizient μ (in cm^{-1}) für die Absorption von γ -Strahlung in Blei. Die Beiträge der drei diskutierten Elementarprozesse sind gesondert angegeben.

γ -Energie	$d_{1/2}$ /Blei	$d_{1/2}$ /Alu
0,1 MeV	0,014 cm	1,7 cm
0,5 MeV	0,41 cm	3 cm
1 MeV	0,88 cm	4,3 cm
2 MeV	1,36 cm	5,7 cm
5 MeV	1,46 cm	9,5 cm

Tabelle 1 Halbwertsdicken für Blei
(Quelle: nach Vogt/Schultz, *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*, 2007)

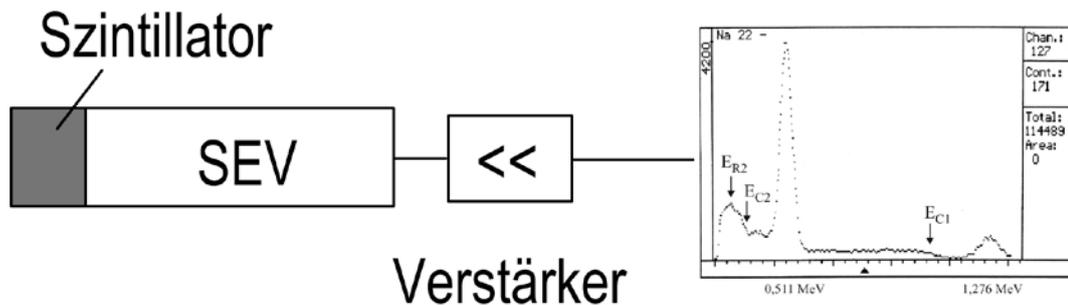
Absorption von γ -Strahlung



5 Absorptionskoeffizient μ und Halbwertsdicke $d_{1/2}$

3 Versuchsaufbau

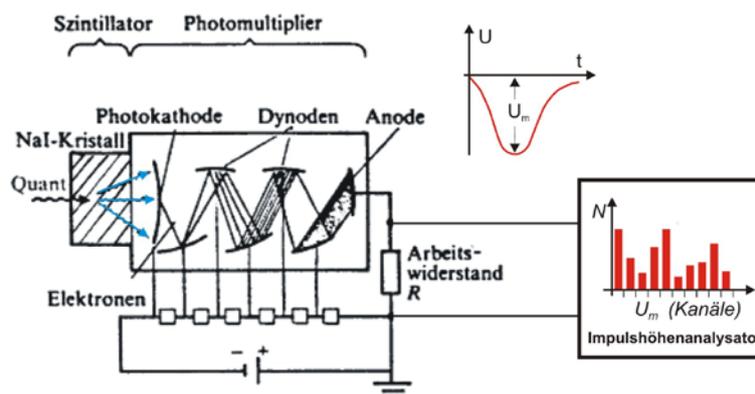
Abb. 6 zeigt das Prinzip eines Aufbaus für die Aufnahme des Energiespektrums: Ein γ -Quant dringt in das Szintillatormaterial ein und gibt es dort seine Energie ab. Im Szintillator entstehen dabei Lichtblitze, die aus der Photokathode Elektronen befreien. Diese Elektronen werden schließlich im SEV vervielfacht und erzeugen am Ausgang Spannungsimpulse. Diese Impulse werden verstärkt und dem VKA (Vielkanalanalysator) zugeführt. Diese Elektronik sortiert die Impulse nach ihrer Höhe und zählt sie. Im Computer wird aus diesen Anzahlen eine Häufigkeitsverteilung (Impulshöhenspektrum) berechnet.



6 Aufbau für die Aufnahme eines Impulshöhendiagramms

3.1 Der Szintillator

Der Szintillationskristall besteht aus einem Natrium-Jodid-Kristall, der mit Thallium dotiert ist. Auf ihrem Weg durch den Kristall erzeugt die γ -Strahlung mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Photoelektron. Dieses Elektron wird seinerseits Ionisationen im Kristall hervorrufen. Die so erzeugten Sekundärelektronen rekombinieren und produzieren Übergänge im Ultravioletten. Der größte Teil dieser UV-Strahlung wird im Kristall absorbiert; ein Teil jedoch erreicht die Thallium-Zentren und erzeugt dort angeregte Zustände der Thallium-Atome. Die Thallium-Atome senden beim Übergang in den Grundzustand blaues Licht aus. Da der NaI-Kristall für den sichtbaren Spektralbereich durchlässig ist, kann diese Strahlung aus dem Kristall entweichen und von dem Photodetektor (Photomultiplier) registriert werden.



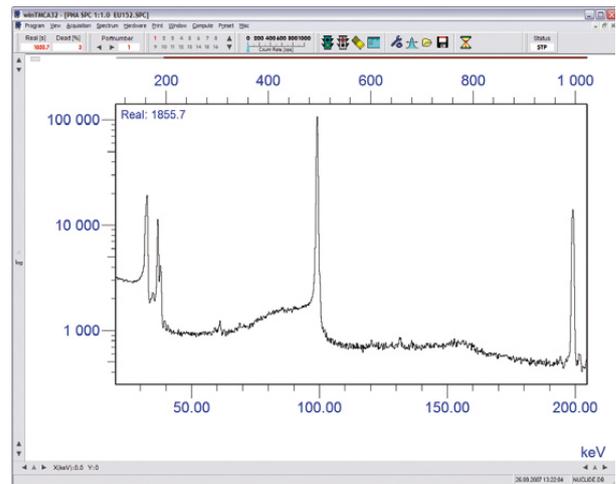
7 Photomultiplier (Quelle: Dorn/Bader, Physik Oberstufe)

3.2 Der Photomultiplier

Der Photomultiplier benutzt den äußeren lichtelektrischen Effekt wie die Photozelle (s. Versuch D 07), nur ist seine Empfindlichkeit gegenüber einfallenden Photonen sehr viel größer. Nachdem Photoelektronen aus der Kathode ausgetreten sind, werden sie gegen eine Zwischenelektrode (1. Dynode) beschleunigt. Ist die Spannung zwischen Kathode und 1. Dynode hinreichend groß, so werden aus der 1. Dynode weitere Sekundärelektronen herausgeschlagen. Die Vervielfachungsfaktoren δ liegen in der Größenordnung $\delta \approx 5$, so dass bei $n = 6$ Dynoden die gesamte Stromvervielfachung $\delta^n = 5^6$ beträgt.

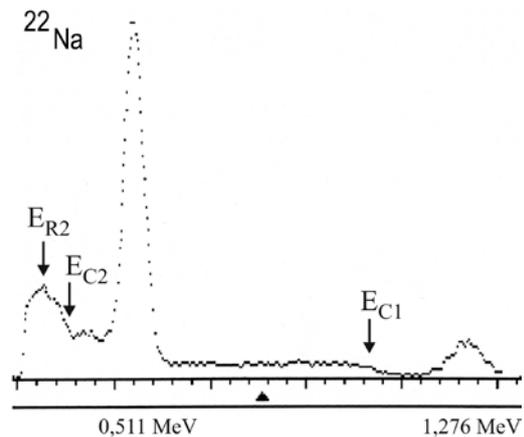
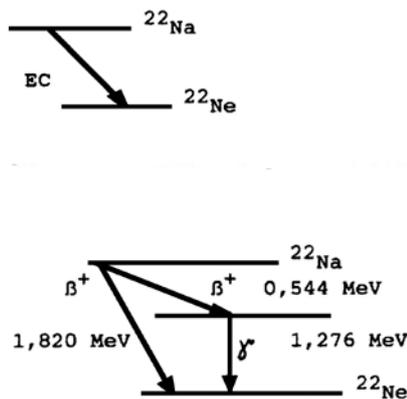
3.3 Der Impulshöhenanalysator

Je größer die Energie E_γ eines γ -Quants ist, desto mehr Licht erzeugt es im NaI-Kristall und umso größer ist die Amplitude des Spannungsimpulses U_m am Ausgang des Photomultipliers. Der Zusammenhang ist über weite Bereiche linear: $U_m \sim E_\gamma$. Der Impulshöhenanalysator misst die Höhe der Spannungspulse und zählt die Anzahl N der Impulse, die in einem kleinen Intervall ΔU um U_m liegen. Mit einer Messsoftware erhält man dann Ausdrücke wie in Abb. 8, in denen die Anzahl N der Impulse über deren Energie aufgetragen ist. Den Impulshöhen wurde für Abb. 8 jeweils eine Energie der γ -Quanten zugeordnet.



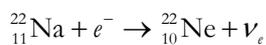
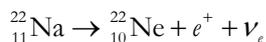
8 Gammaskpektrum

4 Kernphysikalische Messungen



9 Zerfallschema und Impulshöhenspektrum ^{22}Na

^{22}Na zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 2,6088$ Jahren durch β^+ -Zerfall zu nahezu 100 % in den angeregten Kernzustand von ^{22}Ne . Dabei tritt β^+ -Zerfall mit einer Wahrscheinlichkeit von 89,9 % und Elektroneinfang zu 10,1 % auf.

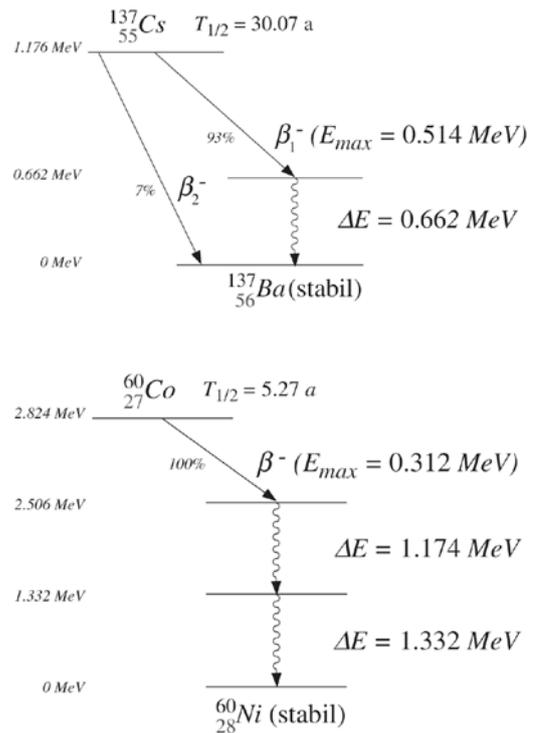


Entwickeln Sie aus dem obigen Termschema eine Interpretation des zugehörigen Spektrums. Geben Sie auch eine Erklärung für die 511 keV-Linie.

4.1 Nehmen Sie nun die Anlage in Betrieb

- Bitte gehen Sie mit den Messköpfen sehr vorsichtig um, die Geräte kosten sehr viel Geld und sind sehr empfindlich.
- Lassen Sie sich die Funktionsweise der Software von Ihrem Tutor/Ihrer Tutorin gut erklären.

Als Test-Präparat verwenden Sie ^{22}Na . Abstand zum Szintillator ca. 10 cm. Achtung: Strahlrichtung nur auf den Szintillator. Wählen Sie die Hochspannung (Menüpunkt **Hardware**) so, dass Sie die beiden Linien bei 0,511 MeV und 1,276 MeV und die Comptonkante gut erkennen können. Erst wenn Sie ein Spektrum wie in Abb. 9 erhalten haben, bei dem auch die 1,276 MeV-Linie in der Darstellung deutlich sichtbar wird, machen Sie den Ausdruck über den Netzdrucker. Notieren Sie auf dem Ausdruck Ihre Gruppennummer und das Präparat. Notieren Sie bitte für diese Darstellung den Verstärkungsfaktor und die den Peaks zugehörigen Kanalnummern. Dazu sollten Sie die „ROIs“ (region of interest) entsprechend definiert haben. Verändern Sie den Abstand Präparat–Szintillator bei ansonsten gleichen Einstellungen. Was ändert sich und warum? Hier bitte kein Ausdruck – nur Beobachtung und entsprechende Notiz im Messprotokollheft.



10 Gammaspektrum von ^{137}Cs und ^{60}Co
(Quelle: Physikpraktikum, Universität Zürich)

4.2 Kalibrierung der Energieskala

Für einen festen Wert der Hochspannung sollen die Spektren der folgenden Präparate aufgenommen werden:

Präparat	Energie in MeV		Ausdruck für jedes Präparat 1x mit Angabe Ihrer Gruppennummer und des Präparates
^{137}Cs	0,662		
^{22}Na	0,511	1,276	
^{60}Co	1,173	1,333	

Notieren Sie für alle fünf Peaks die zugehörigen Kanäle (denken Sie an die Definition der ROIs).

Auswertung

1. Tragen Sie bitte auf Millimeterpapier die Energien der Peaks gegen die Kanäle auf und bestimmen Sie Steigung der Ausgleichsgeraden. Überprüfen Sie so die Energiekalibrierung der Software.
2. Erklären Sie das ^{22}Na -Spektrum anhand des Zerfallschemas eingehender:
 - Wie entsteht der γ -Peak bei 0,511 MeV?
 - Wo liegen die beiden Comptonkanten theoretisch, s. 1.2 (5)?
 - Vergleichen Sie Ihre gemessenen Comptonkanten mit den hier berechneten.

4.3 Genauere Untersuchung des ^{241}Am Spektrums; Compton-Streuung

Präparat: ^{241}Am : Bei den Messungen müssen Sie darauf achten, dass die Röntgenlinie über die LLD-Funktion ausgeblendet wird. Lassen Sie sich ggf. von Ihrem Tutor zeigen, wie das geht.

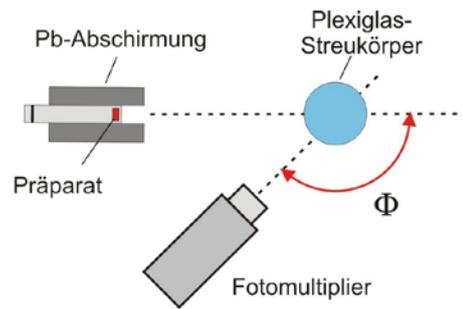
Am-241		
Energie in MeV	0,059	0,03
Wahrscheinlichkeit in %	35,5	2,6

Überprüfen Sie die Hochspannung, um eine bessere Energieauflösung zu erreichen. Wählen Sie die Hochspannung so, dass die Photolinie möglichst weit rechts im Spektrum liegt. Bitte noch keine Ausdrücke. Bestimmen Sie aber die Kanalnummer der Linienmitte (dazu eine ROI festlegen!).

Die Energieverschiebung $\Delta E = E - E'$ des gestreuten γ -Quants lässt sich umso genauer bestimmen, je weiter rechts die Linie liegt. Wie kommt's?

Die Messzeit für alle folgenden Versuche liegt nicht unter 10 min. Sie erhalten sonst keine auswertbaren Spektren.

- Messung der Nullrate: Achten Sie darauf, dass keine Präparate in der Nähe sind.
- Messung des Referenzspektrums $\phi = 0^\circ$ (ohne Streukörper); Abstand $d \approx 10$ cm
- Messung des Spektrums $\phi = 0^\circ$ (mit Streukörper); Abstand $d \approx 5$ cm
- Streumessungen für $\phi = 90^\circ$ und 110° am Arbeitsplatz. Abstand $d \approx 5$ cm



11 Versuchsanordnung zum Comptoneffekt

Die gemessene Nullrate lässt sich von den danach aufgenommenen Spektren mithilfe der Messsoftware subtrahieren.

Auswertung

- Kalibrieren Sie die Energieskala für die aufgenommenen Spektren.
- Bestimmen Sie die Energieverschiebungen ΔE und vergleichen Sie diese mit der Rechnung (s. 1.1(6)). Berechnen Sie die Messgenauigkeit.

4.5 Massenabsorptionskoeffizient

(Nur Hauptfach)

Im letzten Versuchsteil werden der Massenabsorptionskoeffizient und die Halbwertsdicke von Blei für 662 keV- γ -Quanten (Cs-137) gemessen. Dazu bestimmen Sie die cps (Impulse pro Sekunde) aus der Fläche der Spektrallinie. Keine Angst, die Rechenarbeit nimmt Ihnen die Software ab. Legen Sie wieder eine ROI fest und bestimmen Sie den jeweiligen cps-Wert aus der Zahl der Impulse und der Messzeit.

- **Ablesbarkeit:** Vergrößern Sie die Photolinie mit Hilfe der Leertastenfunktion des Programms.
- **Statistik und Genauigkeit:** Legen Sie die Messzeiten so fest, dass für die Linie ein Verhältnis Peakhöhe/Untergrund größer als etwa 10 ist. Notieren Sie bei allen Messungen die Messzeiten inkl. Totzeit. Um eine genügende statistische Genauigkeit zu erhalten, sollte die gemessene Peakhöhen nicht unter 1.000 liegen. Berechnen Sie die Totzeitkorrektur (n wahre Impulsrate, n' die gemessene Impulsrate). Wie groß sind die Abweichungen?

$$n = n' \cdot \frac{1}{1 - n' \cdot \tau}$$

Führen Sie für nun mindestens 10 Messungen mit unterschiedlichen Absorberdicken sowie je eine Kontrollmessung ohne Absorber durch. Diese Kontrollmessungen sind durch die extreme Abhängigkeit der Zählraten von der relativen Position Quelle/Szintillator notwendig. Wählen Sie die größte Absorberdicke so, dass die Zählrate (Peakfläche) annähernd auf 1/10 (oder weniger) abnimmt.

Fragen zur Auswertung:

- Warum betrachtet man statt des linearen Absorptionskoeffizienten μ zweckmäßigerweise den Massenabsorptionskoeffizienten μ/ρ (ρ = spez. Dichte)?
- Welche Konsequenzen für den Massenabsorptionskoeffizienten hat die Tatsache, dass die Abnahme der γ -Intensität (annähernd) proportional zur Absorberdicke ρ ist.
- Bestimmen Sie mithilfe linearer Regression μ und μ/ρ ($\rho = 2,71$ g/cm³).