3.2 Gammaspektroskopie

Vorausgesetzt werden Kenntnisse über

Entstehung von γ-Strahlung, Absorption von γ-Strahlung in Festkörpern (Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung), Erzeugung von Szintillationslichtquanten (Energiebandschema der Elektronen in einem NaI(Tl[Thallium]-Kristall), Arbeitsweise eines Sekundärelektronenvervielfachers (äußerer Photoeffekt, Sekundärelektronenemission, Störeffekte), Gestalt des Spektrums eines monochromatischen γ-Strahlers (Photolinie, Compton-Kante, Escape- und Doppelescapepeak, Rückstreumaximum, Compton-Kontinuum, charakteristische Röntgenstrahlung), Elektronik der Strahlungsmessung (Einkanaldiskriminator, Verstärker, Koinzidenzschaltungen, Ratemeter, Zähler), Winkelkorrelation und Quellstärkebestimmung.

Literatur

Riezler/Kopitzki: Kernphysikalisches Praktikum

Singru: Introduction to Experimental Nuclear Physics

Stoll: Experimentelle Methoden der Kernphysik

Diuvenstyn/Venverloo: Praktische Gammaspektroskopie

Neuert: Kernphysikalische Messverfahren

Abend/Vogelsang: Nukleare Elektronik

Siegbahn: Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy Vol.1 und 2

Kowalski: Nuclear Electronics

Schatz/Weidinger: Nukleare Festkörperphysik

Lilley: Nuclear Physics

Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments

Versuchsaufbau

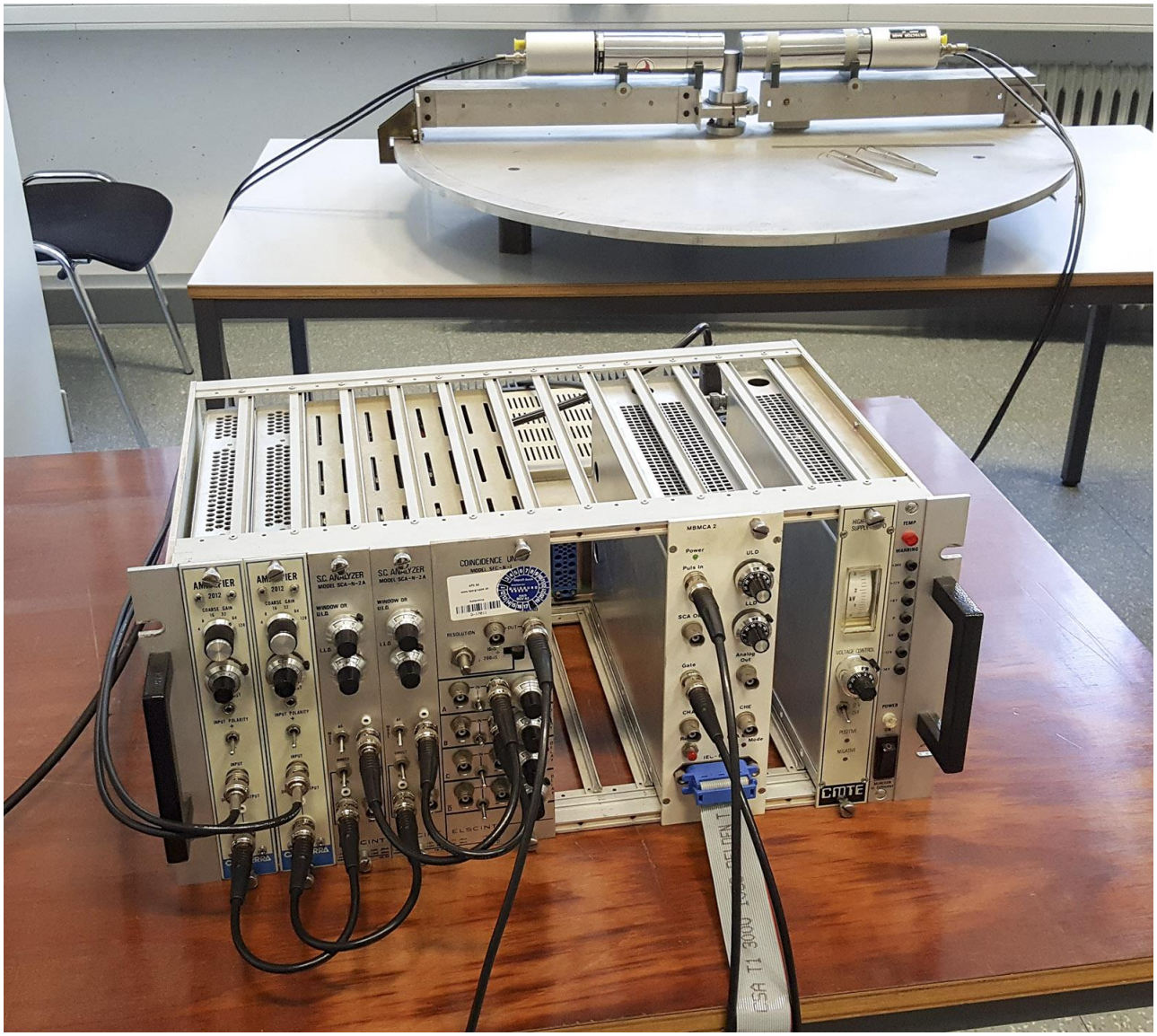


Abb.1: Foto des Versuchsaufbaus

Ein Foto des Aufbaus ist in Abb. 1 gezeigt. Hinten im Bild sind die beiden Detektoren erkennbar. In der Mitte zwischen den Detektoren befindet sich der Probenhalter. Der linke Detektor ist schwenkbar, wie in Abb. 2 abgebildet, sodass der Winkel zwischen den Detektoren verändert werden kann. Auch der Abstand zwischen den Detektoren und der Probe ist variierbar. Im Vordergrund sind, von links nach rechts, die zwei Verstärker und Diskriminatoren, sowie die Koinzidenzeinheit zu sehen. Dahinter folgt separat der Multichannel Analyzer, sowie ganz rechts die Hochspannungsquelle. Nicht im Bild ist der PC, zu dem die Messdaten geleitet werden. Mithilfe des PCs werden die aufgenommenen Spektren graphisch dargestellt und die Messdaten für die spätere Auswertung gespeichert. Ebenso können mit diesem Zählraten gemessen und ausgegeben werden.

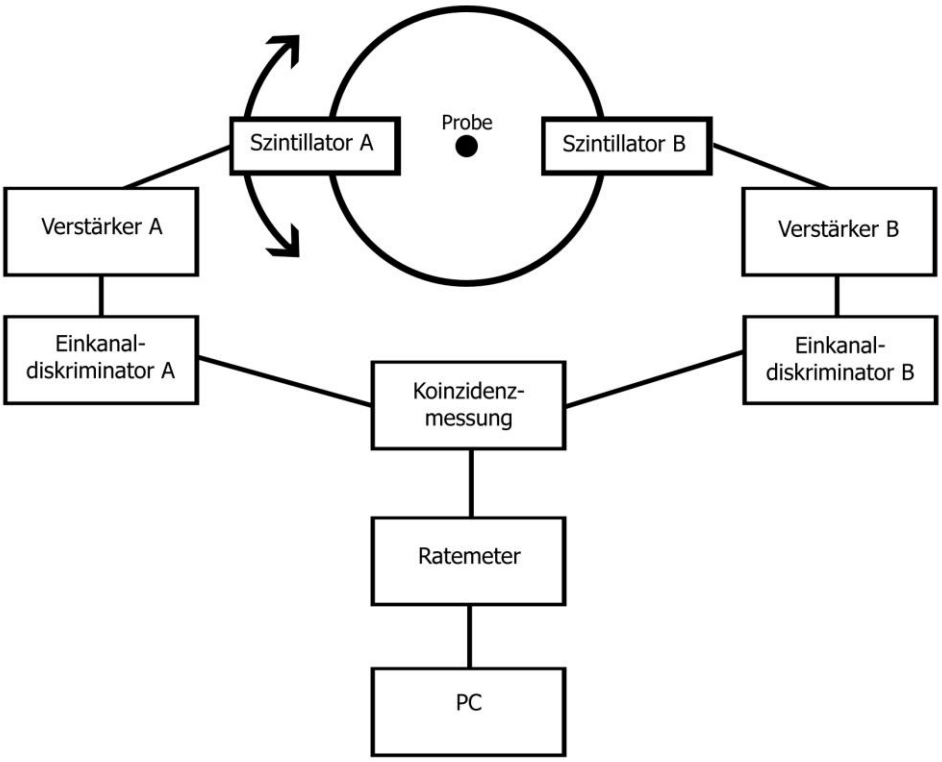


Abb.2: Schematische Skizze des Aufbaus

Physikalische Grundlagen

Entstehung von γ-Strahlung

Wenn angeregte Atomkerne sich in einem nicht-stabilen quantenmechanischen Zustand befinden, relaxieren sie in einen stabilen Zustand niedrigerer Energie. Die Energiedifferenz wird als Photon [γ-Quant] ausgesendet (Energie ab 200keV; zum Vergleich: Die Energie von sichtbarem Licht liegt bei etwa 2 bis 3eV). Angeregte Kerne liegen meist nach einem β-Zerfall vor, bei dem der Kern entweder ein Elektron (β^-) oder ein Positron (β^+) abstrahlt.

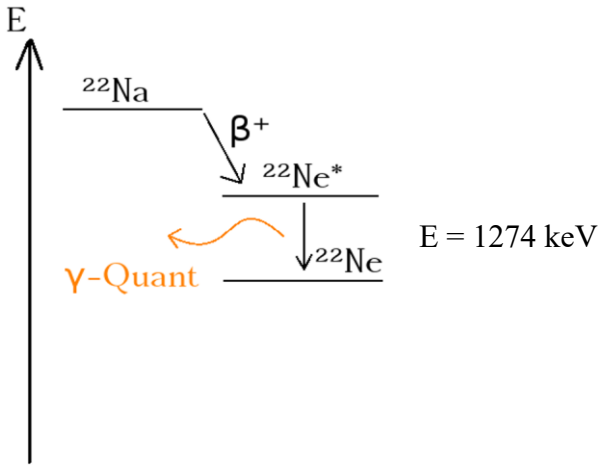


Abb.3: Zerfallsreihe von ^{22}Na zu ^{22}Ne

Absorption von γ-Strahlung in Festkörpern

Beim **Photoeffekt** trifft das γ-Quant auf die Atomhülle eines Atoms im Festkörper und gibt dabei seine gesamte Energie an ein Elektron ab, das daraufhin die Atomhülle verlässt. Für die kinetische Energie des Elektrons gilt:

$$E_{kin} = \hbar \cdot \omega - E_0$$

Wobei $\hbar \cdot \omega$ die Energie des γ-Quants und E_0 die Bindungsenergie des Elektrons ist.

Wenn die Bindungsenergie des Elektrons klein gegenüber der Energie des γ-Quants ist, kann es zu einem elastischen Stoß zwischen beiden Teilchen kommen. Es kommt zu einer Frequenz- und Energieänderung beim γ-Quant. Für die Energie $\hbar \cdot \omega_1$ des γ-Photons nach dem Stoß gilt entsprechend:

$$\hbar \cdot \omega_1 = \frac{m_e \cdot c^2}{1 - \cos(\alpha) + \frac{m_e \cdot c^2}{\hbar \cdot \omega_0}}$$

Dabei ist α der Stoßwinkel und ω_0 die Frequenz des γ-Quants vor dem Stoß. Dieser Effekt wird als **Compton-Effekt** bezeichnet. Der maximale Energieübertrag ist bei einem Streuwinkel von 180° vorhanden.

Als dritter Effekt tritt die sogenannte **Paarbildung** auf. Gelangt ein Photon in die Nähe eines Atomkerns oder eines Elektrons, so kann sich das Photon in ein Paar aus einem Elektron und einem Positron umwandeln. Dabei kann sich die Energie des Photons, abzüglich der Entstehungsenergie der beiden erzeugten Teilchen, frei auf das Elektron und Positron aufteilen.

Da die Entstehungsenergie von Positron und Elektron jeweils 0.51MeV beträgt, muss das Photon eine Mindestenergie von 1.02MeV besitzen, damit Paarbildung auftreten kann. Weiterhin spielt die Paarbildung nur bei schweren Materialien wie Blei eine Rolle, da der Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung Photon - Atomkern quadratisch mit der Ordnungszahl steigt.

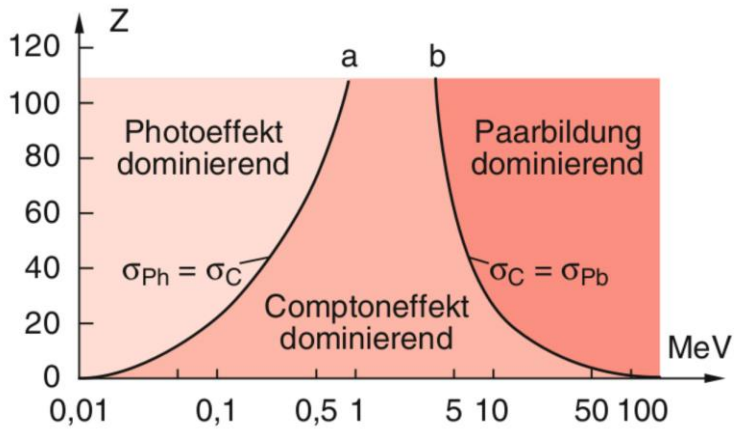


Abb.4: Dominante Bereiche der Absorptionseffekte als Funktion der Ordnungszahl des Absorbers und der Energie des γ-Quants (Aus: Demtröder; Kern-, Teilchen und Astrophysik; 2. Auflage Springer Verlag; S.88 Abb.4.45)

Insgesamt drücken sich diese Effekte in einer Änderung der Intensität der γ-Strahlung nach Durchlaufen eines Festkörpers aus:

$$I = I_0 \mathrm{e}^{-\mu x}$$

I_0 ist die Intensität der Strahlung vor der Durchquerung des Mediums und μ der Absorptionskoeffizient des Mediums.

Spektrum

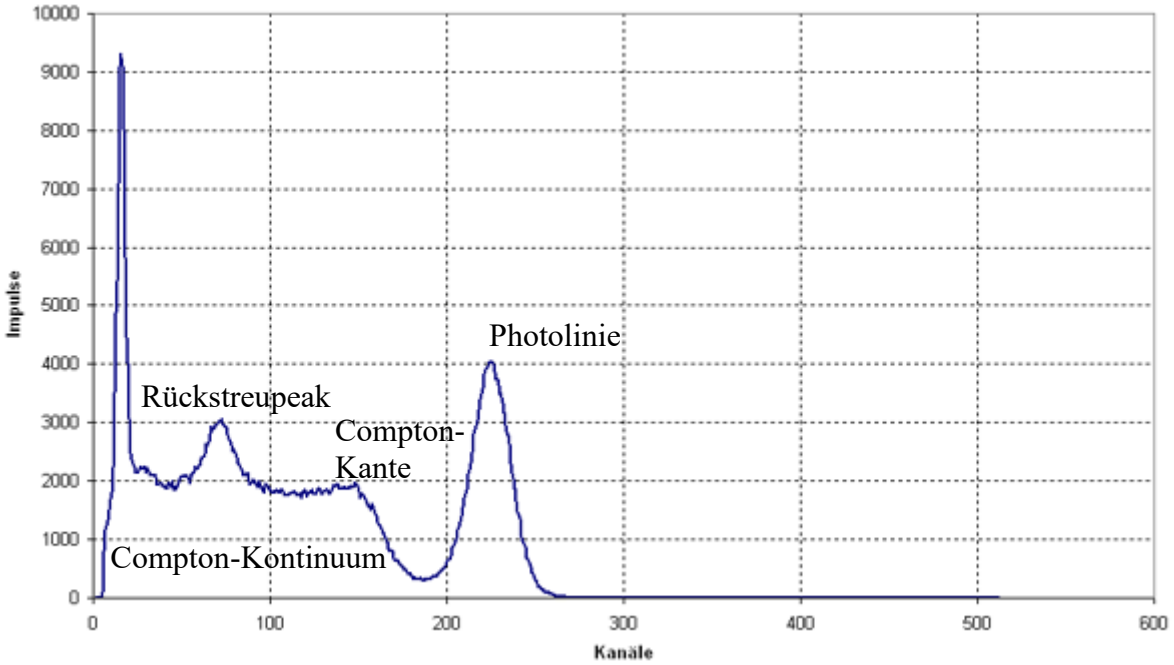


Abb.5: Spektrum (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Gammaspektroskopie)

Die Energie des **Photopeaks** entspricht der Gesamtenergie des γ-Quants. Im Szintillator (s.u.) verliert das Photon nicht immer seine gesamte Energie durch den Photoeffekt, es kann auch Compton-Streuung mit Elektronen erfahren, wodurch das **Compton-Kontinuum** im Spektrum entsteht, das bei einer gewissen Maximalenergie durch die **Compton-Kante** begrenzt wird. Der **Rückstreupeak** entsteht, wenn ein Photon nach einem Zusammenstoß mit einem Elektron unter einem Stoßwinkel von 180° detektiert wird.

Szintillator

Bei einem Szintillator handelt es sich um einen Kristall, in welchem die eintreffenden γ-Quanten absorbiert und Lichtblitze emittiert werden, deren Intensitäten proportional zur Energie der γ-Quanten sind. Dabei müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Es muss sich um einen Einkristall handeln, damit die Photonen ungehindert den Festkörper passieren können, und er muss mit Aktivatorzentren dotiert sein. Wäre dies nicht der Fall, so würden die von den Atomen im Kristallgitter emittierten Photonen wieder die Atome im Kristall anregen, sodass kaum etwas vom Licht aus dem Kristall entweichen kann. Die Atome der Dotierung,

also die Aktivatoren, haben eine andere Emissionscharakteristik. Das von ihnen emittierte Licht regt die Atome des Kristalls nicht mehr an und kann nach Austritt aus diesem gemessen werden.

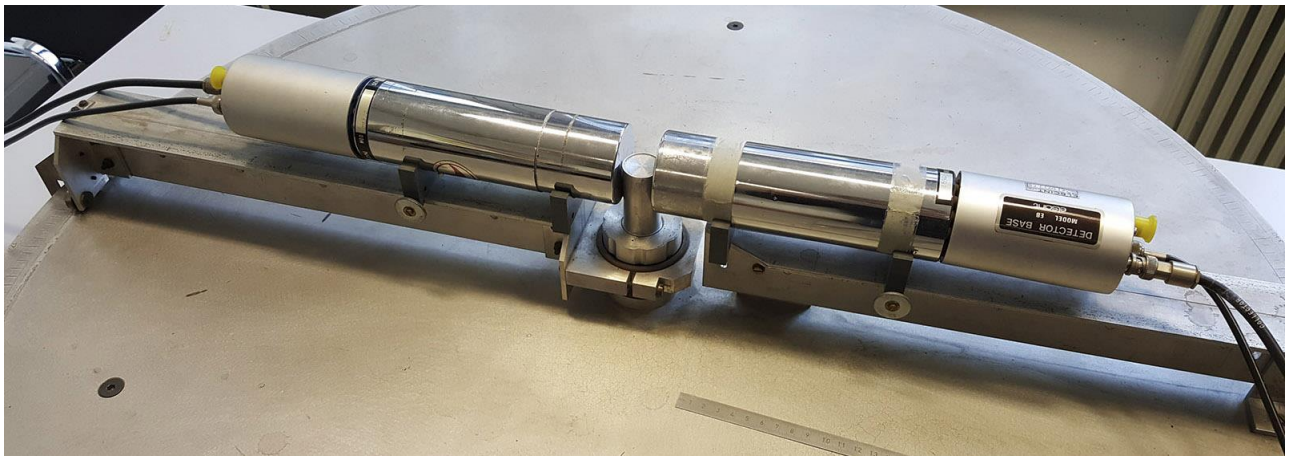


Abb.6 Detektor, bestehend aus Szintillator und Photomultiplier

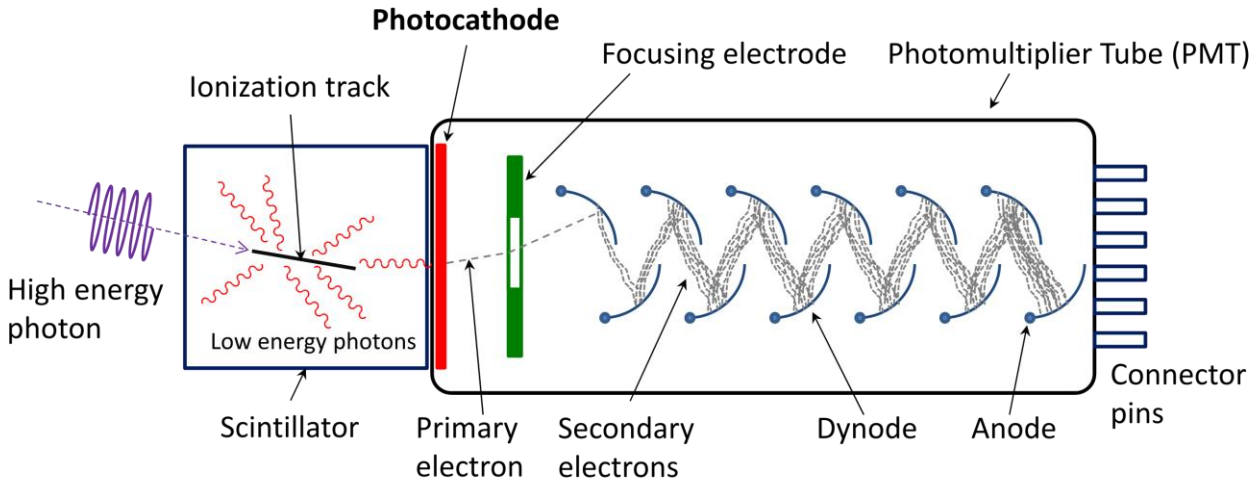


Abb.7 Schematische Darstellung (https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier_tube)

Photomultiplier

Beim Photomultiplier handelt es sich im Grunde um eine Photoplatte mit anschließenden Elektroden von zunehmendem Potential, sog. Dynoden. Entweicht aus dem Szintillator nun ein Photon, trifft dieses auf die Photoplatte und schlägt ein Elektron heraus (Photoeffekt). Dieser Effekt kommt nur zustande, wenn die Energie des Photons die materialspezifische Austrittsarbeit der Platte übersteigt. Das freigewordene Elektron wird dann durch das anliegende elektrische Feld zur ersten Dynode hin beschleunigt und trifft mit einer solch hohen Energie auf, dass gleich mehrere Elektronen, die Sekundärelektronen, ausgeschlagen werden. Diese schlagen nun ihrerseits Elektronen aus der zweiten Dynode aus, bis an der finalen Anode eine regelrechte Elektronenlawine ankommt. Über einen Kondensator und einen Widerstand kann so ein Spannungsabfall gemessen werden, wobei man theoretisch in der Lage ist, sogar einzelne Photonen auf diese Weise zu zählen. Die Menge der am Ende ankommenden Elektronen ist proportional zur Energie des γ-Quants.

Gang des Versuchs

1. γ-spektroskopische Messungen

1.1 Kalibrierung des Spektrometers mit der Quelle ^{60}Co bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren. Man trage in einem Diagramm den Abstand der Photolinien vom Ursprung des Spektrums gegen ihre Energie auf und zeichne eine ausgleichende Gerade. Für die γ-Energien des ^{60}Co können 1173 und 1333 keV verwendet werden.

1.2 Man nehme die Spektren von ^{137}Cs, ^{22}Na und ^{60}Co auf. Aus den erhaltenen Spektren sollen bestimmt werden: Die Energien der γ-Strahler aus den Photolinien, die relativen Halbwertsbreiten der Photolinien, die Compton-Kanten und die Rückstreumaxima, sowie evtl. weiterer beobachteter charakteristischer Positionen. Die Lage obiger Punkte soll mit theoretisch berechneten Werten verglichen werden (z.B. 180° Compton-Streuung). Die Lage der Rückstreumaxima soll mit berechneten Werten verglichen werden (180° Compton-Streuung).

2. Quellstärkenbestimmung

2.1 Man messe die Quellstärke einer ^{60}Co-Quelle über ihren γ-γ-Kaskadenzerfall. Der ^{60}Co-Kern geht durch β^--Zerfall in einen angeregten Zustand des ^{60}Ni-Kerns über. Dieser gibt seine Anregungsenergie durch zwei aufeinander folgende γ-Übergänge ab.

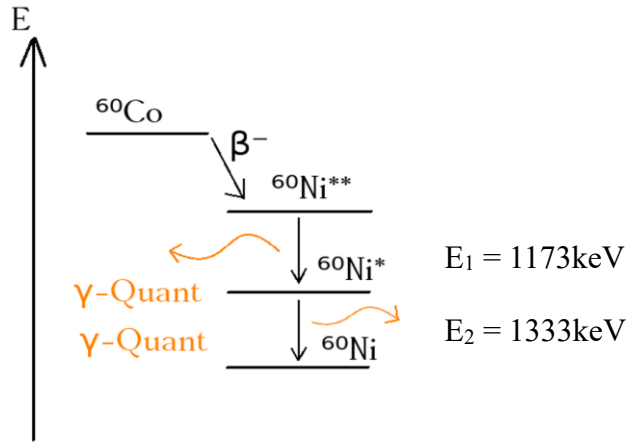


Abb.7: Kaskadenzerfall von ^{60}Co zu ^{60}Ni

Die Lebensdauer des ^{60}Ni*-Kerns beträgt etwa 1ps. Da die Auslösungszeit T des hier benutzten Koinzidenz-Geräts sehr viel größer als 1ps ist, werden die beiden von *einem* ^{60}Ni-Kern emittierten γ-Quanten als gleichzeitig registriert. Außerdem sind die beiden γ-Energien fast gleich. In einem solchen Fall ist eine einfache Messung der Quellstärke des Präparats (d.h. der Gesamtzahl der pro s emittierten Teilchen) mit dem Versuchsaufbau möglich.

Die Ansprechwahrscheinlichkeit des Szintillators A für die γ-Quanten sei W_A, die des Szintillators B W_B. Dann registriert Szintillator A

$$N_A = 2 \cdot W_A \cdot N \qquad \textbf{(1)}$$

γ-Quanten der Energien E_1 und E_2 pro s. Entsprechend B:

$$N_B = 2 \cdot W_B \cdot N \qquad \textbf{(2)}$$

Quanten pro s. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen jeweils im Zähler A und B registriert werden, ist $2 \cdot W_A \cdot W_B$, dementsprechend gilt für die Koinzidenzrate:

$$K = 2 \cdot N \cdot W_A \cdot W_B \qquad \textbf{(3)}$$

Aus (1), (2) und (3) folgt dann

$$N = \frac{N_A \cdot N_B}{2 \cdot K} \qquad \textbf{(4)}$$

Die Größe K in (4) bedeutet die echte Koinzidenzrate. Diese lässt sich aus der gemessenen Gesamtkoinzidenz berechnen:

$$K_{Zufällig} = 2 \cdot T \cdot N_A \cdot N_B \qquad \textbf{(5)}$$

Die zufällige Koinzidenzrate erhält man aus

$$K = K_{Gesamt} - K_{Zufällig} - K_{Null} \qquad \textbf{(6)}$$

Hierzu müssen die Einzelzählraten der beiden Detektoren N_A und N_B, sowie die Auslösungszeit T der Koinzidenzapparatur bekannt sein.

T erhält man aus einer zusätzlichen Messreihe mit einem monochromatischen Strahler (z.B. ^{137}Cs), der nur zufällige Koinzidenzen liefern kann. Man trägt in einem Diagramm das Produkt $N_A \cdot N_B$ verschiedener Einzelzählraten gegen die Koinzidenzrate $K_{Zufällig}$ auf. Der Anstieg der ausgleichenden Gerade ist dann gemäß (6) gleich $2T$.

Messtechnische Hinweise:
Die echte Koinzidenzrate K beim ^{60}Co ist relativ gering. Für brauchbare Ergebnisse sollte man die Messung mehrere Minuten laufen lassen (statistischer Fehler). Außerdem sollten sich die beiden Szintillatoren relativ nah am Präparat befinden. Die Zählkanäle der beiden Einkanaldiskriminatoren werden so eingestellt, dass nur die beiden ^{60}Co-Linien durchgelassen werden. Durch diese Maßnahme kann man die zufällige Koinzidenzrate herabsetzen.

3. Untersuchung der Winkelkorrelation von Zerstrahlungsquanten

Man messe die Koinzidenzrate, d.h. die Zahl der pro Zeiteinheit in den Strahlungsdetektoren A und B gleichzeitig nachgewiesenen Teilchen von ^{22}Na in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den beiden Szintillatoren. Man bestimme die echte und zufällige Koinzidenzrate, sowie die Nulleffekte. Man stelle die Versuchsergebnisse graphisch dar und erkläre diese!

Fragen und Aufgaben zur Selbstkontrolle

1. Man berechne die Energien eines 2MeV γ-Strahlers, die mit einem NaI(Tl)-Szintillationszähler registriert werden, und skizziere das Spektrum.
2. Wie entsteht die Intensitätsstarke γ-Linie des ^{22}Na?
3. Wieso muss bei einer Positronenemission mindestens ein Energieüberschuss von 1.02MeV gegenüber dem Endkern vorhanden sein?
4. Wodurch ist das energetische Auflösungsvermögen des Spektrometers begrenzt?
5. Was ist der Zusammenhang zwischen dem Rückstreupeak und der Compton Kante?