

# A4 Gammaspektroskopie und Comptoneffekt

## PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Beim Zerfall radioaktiver Atome verbleiben die Folgekerne meist in metastabilen, energetisch angeregten Zuständen. Die Anregungsenergie kann in Form eines oder auch mehrerer Photonen, bei hohen Energien, auch als  $\gamma$ -Quanten bezeichnet, abgegeben oder durch innere Konversion auf ein Hüllenelektron des Folgekerns übertragen werden.

In der Abbildung (1) ist das Zerfallsschema des radioaktiven Isotops  $^{137}_{55}\text{Cs}$  dargestellt. Dieses Cäsiumisotop zerfällt mit

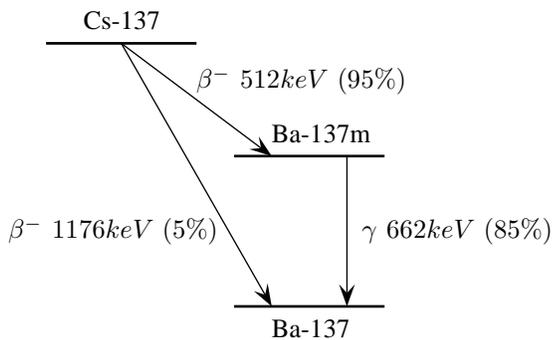


Abbildung 1. Zerfallsschema für das Isotop Cs-137

einer Halbwertszeit von 30,17 Jahren durch  $\beta$ -Zerfall zu  $^{137}_{56}\text{Ba}$ . 95% der Bariumkerne verbleiben als Isomer  $^{137m}_{56}\text{Ba}$  in einem energetisch angeregten Zustand. Mit einer Halbwertszeit von 2,6 Minuten geben 85% der Bariumisomere ihre Anregungsenergie in Höhe von 661,66 keV durch Aussendung eines einzelnen  $\gamma$ -Quants dieser Energie ab. Die verbleibenden Kerne übertragen ihre Energie durch innere Konversion direkt, ohne Beteiligung eines  $\gamma$ -Quants, auf ein Elektron der K-Schale, welches aus dem Atom gelöst wird. Beim Wiederauffüllen der entstandenen Fehlstelle entsteht charakteristische Röntgenstrahlung. Die stärksten Röntgenübergänge haben die Energien  $E(K_{\alpha_1}) = 32,19 \text{ keV}$ ,  $E(K_{\alpha_2}) = 31,82 \text{ keV}$  und  $E(K_{\beta_1}) = 36,38 \text{ keV}$ .

Treffen Photonen auf Materie können verschiedene Wechselwirkungen stattfinden.

Bei sehr geringen Energien  $E$  der Photonen werden die Elektronen in der Materie durch das elektrische Feld der einlaufenden Welle lediglich zu erzwungenen Schwingungen angeregt und senden ihrerseits elektromagnetische Wellen, bevorzugt senkrecht zur Schwingungsrichtung, aus. Es handelt sich um die Rayleigh- bzw. Thomsonstreuung. Die Streuung erfolgt praktisch rückstoßfrei und elastisch, d.h. die Frequenz der gestreuten Welle, d.h. die Energie der gestreuten Photonen ist unverändert.<sup>1</sup>

Bei höheren Energien kann der Rückstoß auf das Elektron

<sup>1</sup>Die Wellenlänge des Photons muss groß gegen die Abmessungen der Atome sein, damit eine kohärente Überlagerung der gestreuten Wellen erfolgt.

nicht vernachlässigt werden, die Streuung erfolgt inelastisch<sup>2</sup> durch den Comptoneffekt.

Unter dem Comptoneffekt wird der elastische<sup>3</sup> Stoß eines Photons mit einem Elektron<sup>4</sup> verstanden. Dabei bleiben so-

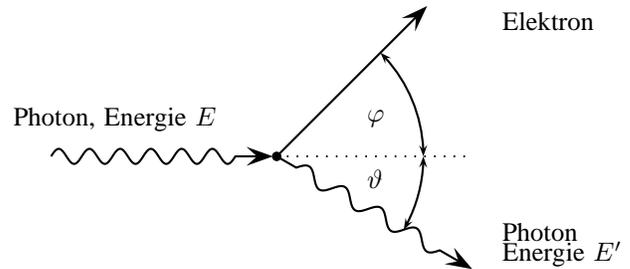


Abbildung 2. Stoß eines Photons mit einem ruhenden Elektron

wohl die Energie als auch der Gesamtimpuls der Stoßpartner erhalten. Der Winkel der gestreuten Photonen kann im Bereich von  $0^\circ \leq \vartheta \leq 180^\circ$  liegen. Für eine Rückstreuung ( $\vartheta = 180^\circ$ ) gilt

$$E = E' + \frac{m_e}{2}v^2, \quad (1)$$

$$\frac{E}{c} = -\frac{E'}{c} + m_e v. \quad (2)$$

Unter der Annahme einer nur geringen Energieabgabe, d.h.  $E/E' \approx E'/E \approx 1$ , folgt<sup>5</sup>

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{2}{E_0}. \quad (3)$$

Mit  $E_0 = m_e c^2 = 511,00 \text{ keV}$  ist die Ruheenergie des Elektrons bezeichnet. Für beliebige Winkel erhält man

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{(1 - \cos \vartheta)}{E_0}. \quad (4)$$

Bei nicht zu großen Energien<sup>6</sup> der Photonen erfolgt die Wechselwirkung hauptsächlich durch den Photoeffekt. Dabei wird die gesamte Energie des Photons, abzüglich der Bindungsenergie, auf das ausgelöste Photoelektron übertragen. Da der Atomkern einen Teil des Impulses aufnehmen muss, werden hauptsächlich stark gebundene Elektronen aus der kernnächsten Bahn, also K-Elektronen, freigesetzt.

<sup>2</sup>die Photonen geben Energie ab

<sup>3</sup>in Hinblick auf den klassischen Stoß, bei dem die Gesamtenergie erhalten bleibt

<sup>4</sup>Dieses wird als schwach gebunden angenommen, da sonst die Wechselwirkung mit dem sehr viel schwereren Gesamtsystem erfolgen würde.

<sup>5</sup>Eine exakte Rechnung muss die relativistische Massenzunahme des Elektrons berücksichtigen und liefert für beliebig große Energieabgabe das gleiche Ergebnis.

<sup>6</sup>jedoch größer als die Bindungsenergie der Elektronen

Bei Energien  $E \geq 2E_0$  setzt der Effekt der Paarbildung ein, welcher bei großen Energien zum dominierenden Effekt wird.

Der Nachweis der  $\gamma$ -Quanten erfolgt mittels eines Szintillationszählers. Das Szintillatormaterial reagiert auf sich durch das Material bewegende Elektronen, welche durch Ionisation durch Photo- oder Comptoneffekt oder durch Paarbildung erzeugt wurden. Entlang ihrer Bahn werden Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband angeregt. Bei der Abregung entstehen Lichtblitze, die auf eine Photokathode gelangen und Photoelektronen freisetzen.

Mit einem Sekundärelektronenvervielfacher verstärkt, wird ein Spannungspuls generiert, dessen Höhe proportional zur Energie aller bei der Wechselwirkung des  $\gamma$ -Quants gebildeten Elektronen<sup>7</sup> ist. Die Auftragung der Anzahl der in einem bestimmten Spannungsbereich<sup>8</sup> registrierten Impulse liefert ein energiedispersives Gammaskpektrum.

Die durch Photoeffekt freigesetzten Elektronen, haben die Energie des  $\gamma$ -Quants abzüglich der Bindungsenergie der Elektronen. Die beim Wiederauffüllen der entstanden Fehlstellen entstehenden Photonen werden im Regelfall nahezu zeitgleich ebenfalls registriert, so dass im Spektrum ein Peak bei der vollen  $\gamma$ -Energie, der Vollenergiepeak, entsteht.

Durch Wechselwirkung infolge Comptoneffekt erhalten die Elektronen winkelabhängig einen Teil der Photonenenergie  $E_e(\vartheta) = E - E'(\vartheta)$ . Die größtmögliche Energie wird bei Rückstreuung ( $\vartheta = 180^\circ$ ) an das Elektron übertragen. Diese Energie  $E_C$  heißt Energie der Comptonkante und bildet den Abschluss des bis dahin reichenden Comptonplateaus, welches bei verschwindenden Energien beginnt.

Erfolgt die Streuung der Photonen im Strahler oder im ihn umgebenden Material, so gelangen geometrisch bedingt bevorzugt um  $180^\circ$  rückgestreute Photonen in den Detektor und bilden den sogenannten Rückstreupeak.

Überdies werden, hauptsächlich durch Photoeffekt, im umgebenden Material Elektronen der inneren Schalen herausgelöst, so dass die entsprechende charakteristische Röntgenstrahlung im Spektrum registriert wird.

#### VERSUCHSVORBEREITUNG

- Entstehung und Eigenschaften von  $\alpha$ -,  $\beta$ -, und  $\gamma$ -Strahlung
- radioaktives Zerfallsgesetz
- Berechnen Sie die Aktivität eines radioaktiven Eichpräparates  $^{137}\text{Cs}$ , das am 21.11.1991 eine Aktivität von 37 kBq hatte.
- Photonenenergie und -impuls, DeBroglie-Beziehung
- charakteristische Röntgenstrahlung
- Leiten Sie (3) her.
- Warum ist der Himmel blau?

<sup>7</sup>Die beschriebenen Vorgänge verlaufen so schnell, dass praktisch immer nur ein einzelnes  $\gamma$ -Quant der Auslöser ist. Fallen zwei  $\gamma$ -Quanten nahezu gleichzeitig in den Szintillator ein, können sie nicht unterschieden werden. Es entsteht ein Spannungssignal, welches der Summe der Energien der  $\gamma$ -Quanten (bzw. der Energien der angeregten Elektronen) entspricht.

<sup>8</sup>Üblicherweise benutzt man keine Spannungswerte, sondern teilt den gesamten möglichen Spannungsbereich in Kanäle auf. Durch Zusammenfassen von mehreren Kanälen kann die Anzahl der registrierten Impulse gesteigert, die statistischen Schwankungen damit verringert werden.

- Geben Sie die Zerfallsgleichungen und die Zerfallsschemata der Strahler  $^{137}\text{Cs}$ , und  $^{60}\text{Co}$  an. Geben Sie jeweils die Energien von Comptonkante und Rückstreupeak an.
- natürliche radioaktive Zerfallsreihen  
Zu welcher Zerfallsreihe gehört das Isotop  $^{232}\text{Th}$ ?  
Geben Sie alle Zerfälle in dieser Reihe an.

#### AUFGABEN

- Messen Sie das Spektrum eines Strahlers  $^{137}\text{Cs}$ .  
Untersuchen Sie den Einfluss von Verstärkung, Kanalbreite und der Betriebsspannung des Sekundärelektronenvervielfachers.
- Kalibrieren Sie die Energieachse an Hand der bekannten Linien im Spektrum. Wählen Sie die Parameter so, dass Spektren bis 1500 keV gemessen werden können.
- Zeichnen Sie in das Spektrum die errechneten Positionen für die Comptonkante und den Rückstreupeak.
- Schätzen Sie die Nachweisempfindlichkeit des Detektors an Hand des Verhältnisses der Aktivität des Strahlers und der Zählrate des Detektors ab.
- Bestimmen Sie die relative Energieauflösung des Detektors, d.h. das Verhältnis der Verbreiterung von  $\gamma$ -Linien in Bezug auf deren Energie.
- Bestimmen Sie das Verhältnis der registrierten Ereignisse, d.h. der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens, des Photo- und Comptoneffektes.
- Bestimmen Sie den Anteil der inneren Konversion am Übergang  $^{137\text{m}}\text{Ba} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ .
- Bringen Sie verschiedene Streukörper hinter dem Strahler an. Bestimmen Sie die Energie der rückgestreuten Photonen. Bestimmen Sie durch Auswertung der Röntgenfluoreszenz die verwendeten Rückstreumaterialien.
- Nehmen Sie das Spektrum von  $^{60}\text{Co}$  auf.  
Zeichnen Sie die berechneten Energien von Comptonkante und Rückstreupeak ein.
- Messen Sie das Spektrum von Thorium ( $^{232}\text{Th}$  und Tochternuklide).  
Vergleichen Sie mit dem Spektrum der natürlichen Umgebungsstrahlung.
- Versuchen sie charakteristische Linien den entsprechenden Isotopen zuzuordnen.