

Strahlung rein, Spektrum raus

ORTEC Wissen: Detektor Response Funktion

Ich möchte auf den folgenden Seiten versuchen zu erklären was passiert, wenn Gamma-Strahlung auf einen HPGe-Detektor trifft. Wie sieht das resultierende Spektrum aus, als Funktion der einzelnen physikalischen Effekte. Dieser Beitrag der ORTEC News soll also ein wenig Hintergrundwissen vermitteln und richtet sich daher in erster Linie an den Nicht-Physiker, der Gammaskopie betreibt. Die Darstellungsweise soll daher bewußt einfach gehalten werden und nicht physikalisch, mathematisch abgehoben sein. Die daraus mangelnde Präzision wird hoffentlich durch eine allgemeine Verständlichkeit kompensiert.

Trifft ein Gammaquant auf Materie so lassen sich im Wesentlichen 3 physikalische Wechselwirkungen unterscheiden:

Photoelektrische Absorption

(dominant bis einige Hundert keV)

Compton Streuung

(großer Beitrag von einigen Hundert keV bis 5 MeV)

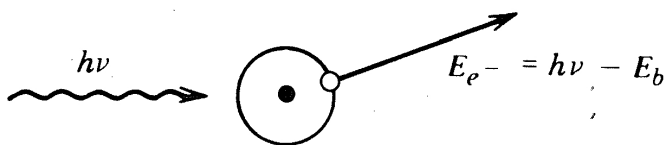
Paar Produktion

(dominant ab ca. 5 MeV)

Der Wechselwirkungsquerschnitt für die verschiedenen Effekte ist nicht nur energieabhängig sondern auch eine Funktion der Kernladungszahl Z . Je größer Z ist desto wahrscheinlicher wird sowohl der Photoeffekt als auch bei höheren Energien die Paarbildung. Im Gegensatz dazu steigt die Wahrscheinlichkeit für den Comptoneffekt mit kleiner werdendem Z . (Sehr schöne Graphiken dazu finden sich bei: Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons. Das ist das beste Buch zum Thema).

Photoeffekt:

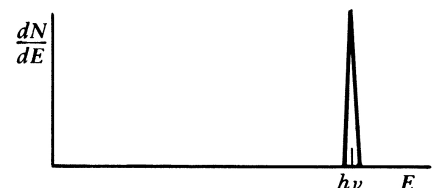
Der Photoeffekt beschreibt die vollständige Energieabgabe eines Gammaquants an ein stark gebundenes Elektron der Atomhülle. Das Quant mit der Energie $h\nu$ (h : Plancksches Wirkungsquantum, ν : Frequenz) trifft auf das Elektron und überträgt seine gesamte Energie und seinen Impuls. Das Hüllenelektron wird aus der Schale herausgeschlagen und besitzt danach die kinetische Energie $h\nu$ minus der Bindungsenergie E_b .



Aufgrund der notwendigen Energie- und Impulserhaltung bei diesem Prozeß ist es zwingend notwendig, daß das Elektron gebunden ist. Es ist nicht möglich, daß sowohl Energie als auch der Impuls erhalten bleiben bei einem ungebundenen Elektron. Durch die Bindung ist es möglich das Atom selbst als dritten Wechselwirkungspartner einzubeziehen um die notwendigen Erhaltungssätze zu erfüllen.

Der Wechselwirkungsquerschnitt geht dabei mit der fünften Potenz von Z , und damit ist sofort ersichtlich, daß Ge ($Z=32$) sich wesentlich besser als Detektormaterial für den Gammanachweis eignet als zum Beispiel Si ($Z=14$). Das aus der Hülle emittierte Elektron erzeugt beim Durchtritt durch den Festkörper nun Elektron-Loch-Paare, die durch Anlegen einer Hochspannung abgesaugt werden können, um somit ein Detektorsignal zu erzeugen (Das Prinzip „Halbleiter als Detektor“ kann nachgelesen werden unter der oben bereits zitierten Literaturstelle oder einfach auf einen der nächsten ORTEC Newsletter warten.)

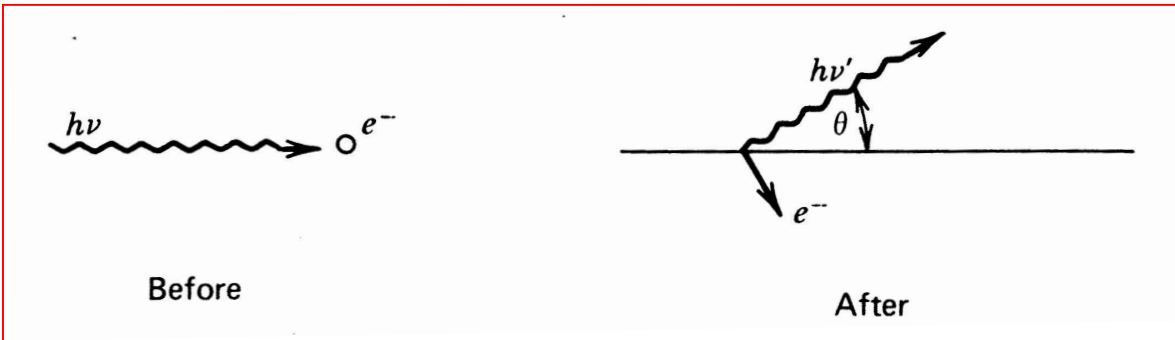
Lassen wir uns auf folgendes Gedankenexperiment ein: Es gibt nur den Photoeffekt als einzigen Wechselwirkungsmechanismus. Wie würde das resultierende Spektrum aussehen, wenn wir monoenergetische Gammastrahlung auf unseren Detektor treffen lassen. Wir würden in einem Spektrum nur an der Stelle $h\nu$ einen gaußförmigen Peak sehen (Verbreiterung und Formveränderung durch Rauschen und unvollständige Ladungssammlung sei hier nicht berücksichtigt). Dies wäre das optimale Spektrum für die Analyse, da es keine weiteren Peaks gibt und keinen Untergrund. Die Energie im Spektrum kann sofort dem einfallenden Gammaquant zugewiesen werden.



Fortsetzung: Detektor Response Funktion

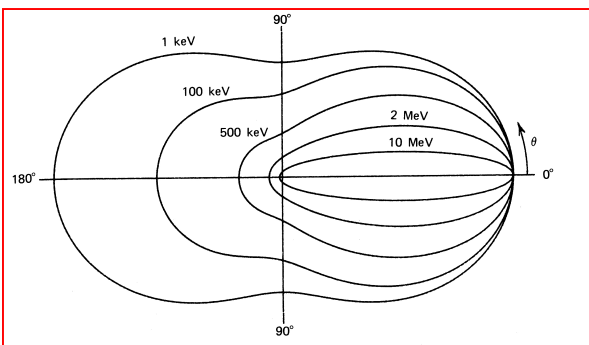
Comptone Effekt:

Der Comptoneffekt beschreibt die Streuung eines Gammaquants an einem Elektron. Dieser Streuprozess kann sowohl an einem gebundenen, als auch an einem ungebundenen Elektron stattfinden. Das gestreute Quant gibt also nur einen Teil seiner Energie an seinen Streupartner ab. Das gestreute Quant hat nach der Wechselwirkung die Energie $h\nu'$.



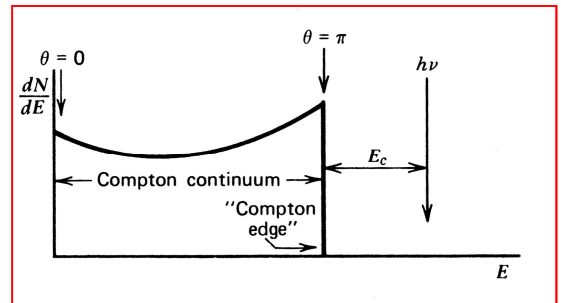
$$h\nu' = h\nu / (1 + h\nu / m_0c^2 * (1 - \cos \theta)) \text{ mit } m_0c^2 = 511 \text{ keV}$$

Daraus folgt, daß bei $\theta = 0$ Grad keine Energie übertragen wird. Dieser Grenzfall beschreibt also die Situation, bei dem das Quant das Elektron gerade nicht trifft. Der andere Grenzfall tritt bei $\theta = 180$ Grad ein. In diesem Fall wird die maximale Energie übertragen. Der Energieübertrag ist somit eine Funktion des Streuwinkels und variiert zwischen 0 und E_{\max} . Der Wirkungsquerschnitt an sich wird beschrieben durch die Klein-Nishina Formel, deren Resultat in nachstehender Abbildung graphisch dargestellt ist.



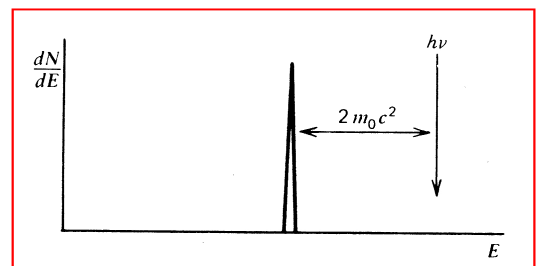
Die Linien zeigen gleiche Wechselwirkungsquerschnitte als Funktion der Energie und des Streuwinkels. Es zeigt sich, daß bei hohen Energien kleine Streuwinkel bevorzugt werden. Dies hat unmittelbare folgen für die Detektorauswahl für die Hochenergiespektroskopie. HPGe Detektoren mit langen Kristallen (kleiner Durchmesser, große Länge) eignen sich hier in besonderer Weise.

Kehren wir zurück zu unserem Gedankenexperiment. Nehmen wir an, daß der Comptoneffekt die einzige Wechselwirkung ist, so sehen wir im Spektrum an der Stelle $h\nu$ keinen Peak, sondern es zeigt sich eine plateauartige Responsefunktion von 0 keV (-> Streuwinkel 0 Grad) bis zu der sogenannten Comptonkante bei E_{\max} (-> Streuwinkel 180 Grad). Zwischen E_{\max} und $h\nu$ sehen wir keine Beiträge zum Spektrum.



Paarbildung:

Paarbildung beschreibt die Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares bei gleichzeitiger Vernichtung des Gammaquants. Dieser Prozess ist aufgrund der Energie-Masse-Relation möglich und wird mit der berühmten Formel $E = m_0c^2$ beschrieben (m_0 : Ruhemasse des Elektrons, c : Lichtgeschwindigkeit). Wenn die Energie des Quants $h\nu$ größer oder gleich der zweifachen Ruheenergie des Elektrons ist, dann kann dieser Prozess stattfinden. Dominant wird er allerdings erst bei Energien von einigen MeV. Aufgrund von Energie- und Impulserhaltung kann die Paarbildung nur im Feld des Atoms stattfinden.



$$E_e^- + E_e^+ = h\nu - 2 m_0 c^2$$

Das erzeugte Elektron wird sich durch den Festkörper bewegen und Elektron-Loch-Paare erzeugen. Das Positron als Antiteilchen zum Elektron wird beim Auftreffen auf ein Elektron durch Aussendung zweier 511keV Quanten vernichtet werden. Dieser Prozess ist analog zur Paarbildung. Die zwei 511 keV Quanten können nun entweder durch weitere Wechselwirkungen im Festkörper verbleiben oder den Kristall verlassen.

Fortsetzung: Detektor Response Funktion

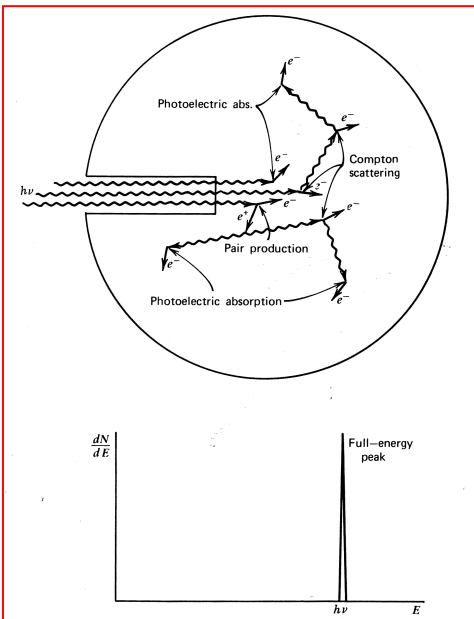
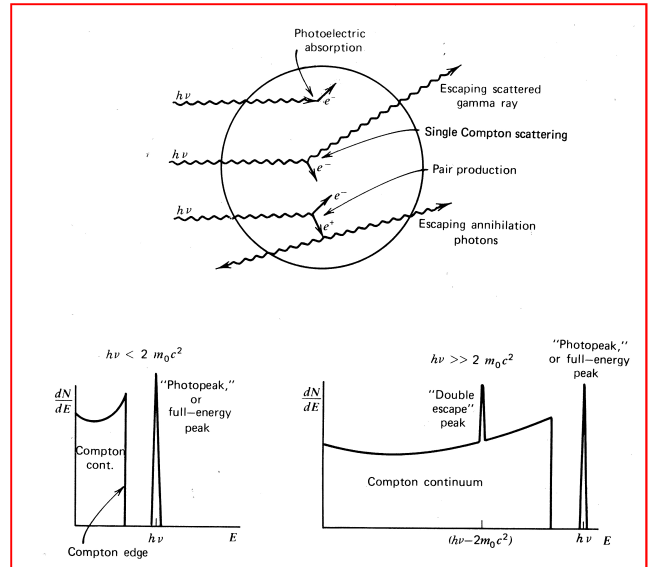
Wir nehmen erneut an, daß es nur eine Wechselwirkung von Gammaquanten mit Materie gibt. Für den Fall der Paarproduktion sehen wir einen Peak bei der Energie $E = h\nu - 2 m_0 c^2$. Dieses Spektrum ergibt sich unter der Annahme, daß beide erzeugten 511 keV Quanten aus der Positron Vernichtung den Detektor verlassen haben.

Spektrum eines kleinen Detektors:

Ein kleiner Detektor wird definiert unter der Annahme, daß die Kristalldimensionen kleiner sind als die mittlere freie Weglänge der Sekundärgammaquanten. Damit verlassen sowohl die gestreuten Quanten als auch die 511 keV Quanten den Kristall ohne weitere Wechselwirkung. Das resultierende Spektrum zeigt einen Photopeak, einen Comptonuntergrund mit klar definierter Comptonkante. Desweiteren sehen wir den Double-Escape Peak der Paarbildung, wenn die Gammaenergie groß genug war.

Spektrum eines großen Detektors:

Ein großer Detektor wird definiert unter der Annahme, daß die Kristalldimensionen groß sind gegenüber der mittleren freien Weglänge der Sekundärgammaquanten. Alle sekundären Gammaquanten, die nach Comptonstreuung oder nach Paarbildung entstehen werden durch nachfolgenden Photoeffekt im Kristall nachgewiesen. Das Spektrum zeigt trotz aller drei Wechselwirkungen nur den Photopeak bei der Energie $h\nu$.

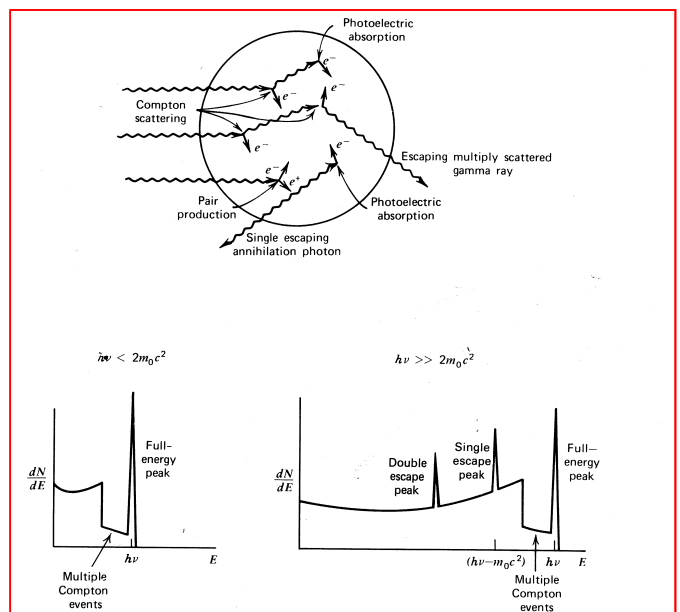


Spektrum eines realen Detektors:

Es gibt in der realen Welt natürlich keinen kleinen oder großen Detektor sondern nur mittelgroße Detektoren. Alle beschriebenen Effekte treten auf und Sekundärgammaquanten verlassen zum Teil den Kristall oder werden mittels Photoeffekt final nachgewiesen. Das resultierende Spektrum zeigt daher einen Comptonuntergrund mit Comptonkante sowie einen Comptonuntergrund jenseits der Comptonkante, der auf mehrfachen Comptoneffekt zurückzuführen ist. Dabei wird das gestreute Quant erneut gestreut und verläßt danach erst den Kristall. Durch mehrfache Comptonstreuung zeigt sich ein Untergrund von 0 keV bis $h\nu$. Ist die Gammaenergie groß genug für die Paarbildung so ist neben dem Double-Escape Peak auch der Single-Escape Peak zu sehen. Hierbei wird ein 511 keV Quant nachgewiesen, das zweite 511 keV Quant verläßt jedoch den Kristall.

Leider sieht ein reales Spektrum aber noch weitaus komplizierter aus und es müssen weitere Effekte berücksichtigt werden, die hier jedoch nur kurz erwähnt werden sollen:

- Das Sekundärelektron kann den Detektor verlassen, wenn der Kristall sehr klein oder die Gammaenergie sehr groß ist. Als Resultat erhalten wir einen Comptonuntergrund der kleinen Energien favorisiert.
- Das Sekundärelektron kann Energie durch Bremsstrahlung verlieren, die den Detektor verlassen kann. Dieser Effekt tritt im Hochenergiebereich von einigen MeV auf. Das Resultat ist vergleichbar mit dem vorherigen Punkt.



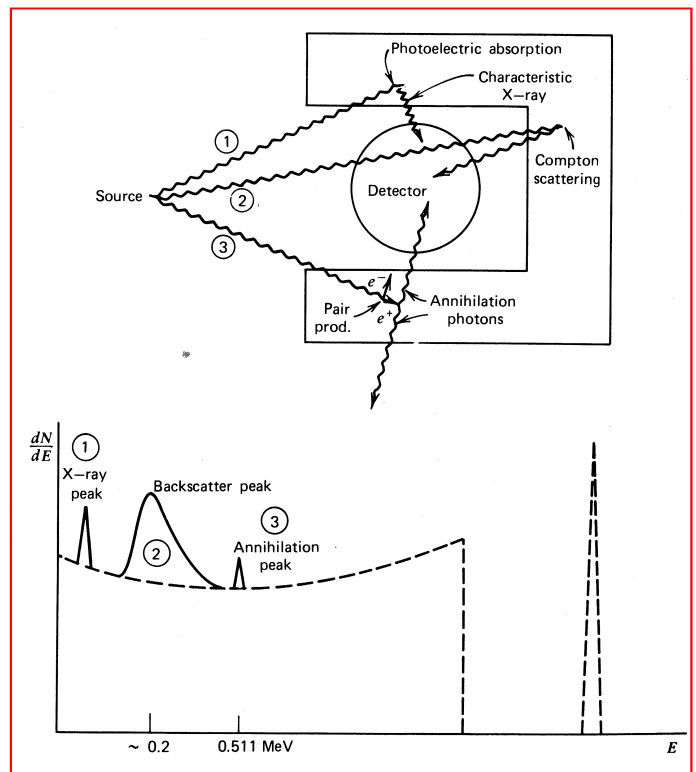
Fortsetzung: Detektor Response Funktion

- Die charakteristische Röntgenstrahlung wird erzeugt durch die Abregung der Atomhülle nach einem Photoeffekt. Wie bereits erwähnt muß das Elektron für den Photoeffekt gebunden sein und somit ist eine Energieübertragung auf ein Elektron der K-Schale am wahrscheinlichsten. Der leere Hüllenplatz wird durch ein Elektron der äußeren Schalen unter Emission eines charakteristischen Röntgenquants ersetzt. Dieses Röntgenquant kann den Kristall ohne weitere Wechselwirkung verlassen. In diesem Fall sehen wir einen Peak bei $E = h\nu - E_{\text{Röntgen}}$.

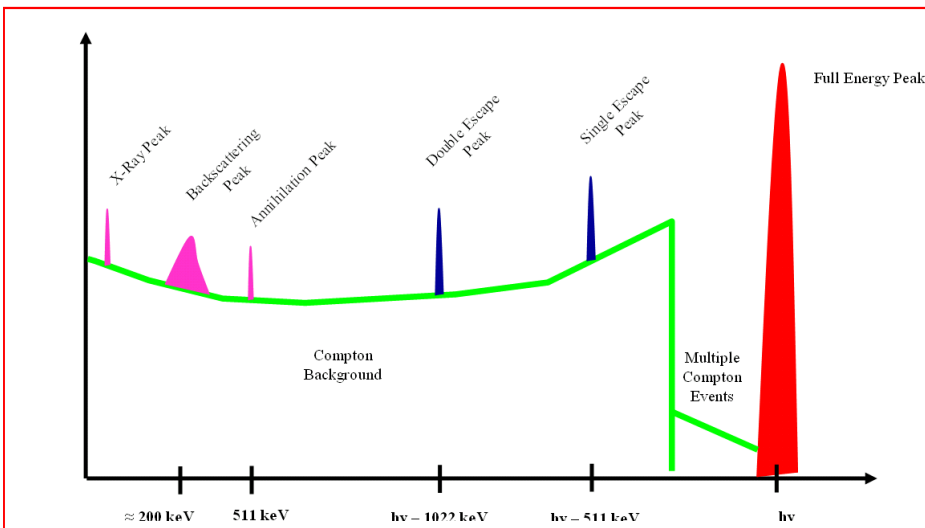
Spektrum eines realen Detektors in einer realen Welt:

Bislang wurde stillschweigend die Annahme gemacht, daß der Detektor in einem unendlich großen Raum ohne weiteres Strukturmaterial steht. Das reale Leben ist natürlich komplizierter und unendlich große Labore sind doch eher die Seltenheit. Strukturmaterial kann dabei eine Bleiabschirmung sein oder die Wände des Labors.

- Trifft die Strahlung nicht direkt auf den Detektor sondern auf Strukturmaterial, so kann es zu einem Photoeffekt im Strukturmaterial kommen mit Emission eines charakteristischen Röntgenquants, welches vom Detektor nachgewiesen wird. Im Spektrum ist ein Röntgenpeak (1) zu sehen. Daraus wird auch sofort ersichtlich, daß ein sogenanntes Graded-Z-Shielding (Cu Liner plus Plexiglas) bei Bleiabschirmungen sehr sinnvoll ist, um den Röntgenpeak zu sehr kleinen Energien zu verschieben.
- Wenn anstatt einem Photoeffekt eine Paarbildung im Strukturmaterial erfolgt, so kann eventuell ein 511 keV Vernichtungsquant (3) im Detektor nachgewiesen werden. Da beide 511 keV Quanten mit einem Winkel von 180 Grad emittiert werden ist immer nur ein Quant nachweisbar. Im Spektrum ist bei 511 keV ein Peak sichtbar. Diese Strahlung ist nicht zu verwechseln mit 511 keV Quanten, die direkt von der Quelle kommen.
- Es ist natürlich ebenfalls möglich, daß eine Comptonstreuung im Strukturmaterial stattfindet mit anschließendem Nachweis im Detektor. In diesem Fall sehen wir den Rückstreupeak (2) im Spektrum bei etwa 250 keV. Der Peak ist sehr breit und eine Herleitung seiner Form würde den Rahmen dieser Übersicht bei weitem sprengen.



Zusammenfassend seien alle angesprochenen Effekte nochmals schematisch in einer Graphik zusammengestellt:



Neben dem gewünschten Photopeak bei der Gammaenergie $h\nu$ zeigen sich vielfältige Effekte, die allesamt zum unerwünschten Untergrund beitragen. Man kann durch Verringerung des Strukturmaterials oder durch ein Graded-Z-Shielding den Untergrund minimieren. Ein großer Detektor wird immer ein saubereres Spektrum zeigen als ein kleiner. Hochenergiespektren sollten mit langen Kristallen aufgenommen werden.

(Einige Graphiken sind entnommen worden aus dem hervorragenden Buch von **Glenn F. Knoll**, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons. Dieses Buch ist jedem Interessierten sehr zu empfehlen und stellt eine absolute Kaufempfehlung dar.)