

Compton-effect

Peter van Zwol Sietze van Buuren
Assistent: Heinrich Wörtche
16 oktober 2003

Samenvatting

Onder verschillende hoeken zijn energiespectra van fotonen, die door een vrij elektron zijn verstrooid, bepaald. Deze verstrooiing wordt het Compton-effect genoemd. De ftonspectra zijn met een singles-meting bepaald, terwijl dit bij de elektronspectra met een coïncidentie-meting gebeurde.

Voor ftonspectra bleek dit consistent te zijn met de theorie, maar de gemeten elektronenspectra bleken minder goed overeen te komen. Een vergelijking met de werkzame doorsnede leverde voor de ftonspectra een slechte overeenkomst, voor de elektronspectra klopte dit beter.

Inhoudsopgave

Titelpagina	1
Inhoudsopgave	2
Inleiding	3
Theorie	4
Experimentele Opzet	5
Resultaten en Discussie	7
Conclusie	10
Referenties	11
Appendices	12

Inleiding

Het Compton effect, scattering van elektromagnetische straling aan een elektron, was een van de verschijnselen die tot de kwantummechanica leidden. Het effect kon niet verklaard worden door de klassieke theorie die licht als elektromagnetische golven beschreef.

Het effect kon wel verklaard worden door een deeltjes karakter toe te kennen aan de elektromagnetische straling. De lichtdeeltjes - fotonen - hebben een bepaalde energie en impuls en kunnen dus botsen c.q. scatteren met massadeeltjes, zoals elektronen.

Bij botsing tussen het foton en elektron geldt dus behoud van energie en behoud van impuls. Zo kan verklaard worden waarom een gescattered foton een lagere frequentie kan hebben, de energie (een deel is overgedragen bij botsing) is namelijk lineair afhankelijk van de frequentie.

Theorie

Beschouw een foton botsend op een elektron, beide deeltjes bewegen zich voor en na botsing in hetzelfde vlak, tevens geldt er behoud van impuls en energie.

De Energie E' van het gescatterde foton voldoet hierom aan de volgende relatie¹

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma / mc^2)(1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

Waarin E_γ is de energie van het ingekomen foton en mc^2 de rustmassa van het elektron in elektronvolts. Hiermee wordt de energie van het elektron E_e

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma \quad (2)$$

Het elektron kan als vrij worden beschouwd, omdat de energie van het foton vele malen groter is dan de potentiële energie binnen een atoom. Voor zwaardere atomen, met een grotere kernlading kan het voor komen dat een elektron zo sterk gebonden is dat in plaats van de rustmassa van het elektron de rustmassa van het gehele atoom genomen moet worden. In relatie (1) resulteert dit in een niet detecteerbare verschuiving van E' omdat $mc^2 \gg E$.

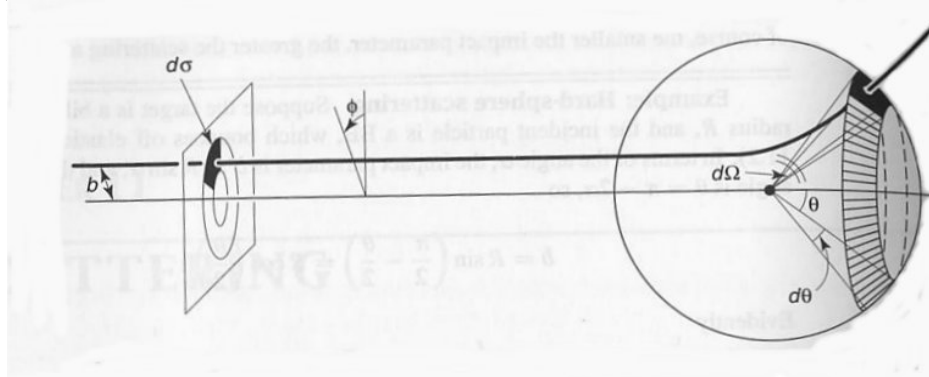
Natuurlijk is de kans op gescatterde fotonen groter in een stof met hogere elektrondichtheid c.q. hogere atoomdichtheid.

Voor de werkzame doorsnede σ , van inkomende fotonen, per eenheid ruimtehoek Ω van uitkomende fotonen in de richting θ geldt de Klein-Nishina formule.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{1}{2} r_0^2 \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left[\frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - \sin^2(\theta) \right] \quad (3)$$

Waarbij r_0 de klassieke elektronstraal is ($r_0 = 2.82 \text{ fm}$).

In figuur 1 is een visualisatie hiervan te zien.



Figuur 1. De werkzame doorsnede.

Relatie (3) geeft een soort ruimtelijke energie verdeling van fotonen. Het geeft de kans dat een op een elektron gescattered foton met energie E'_γ (en inkomend energie E_γ) zich in een bepaalde richting $\Omega(\theta)$ (Ruimtehoek, c.q. doorsnede) begeeft².

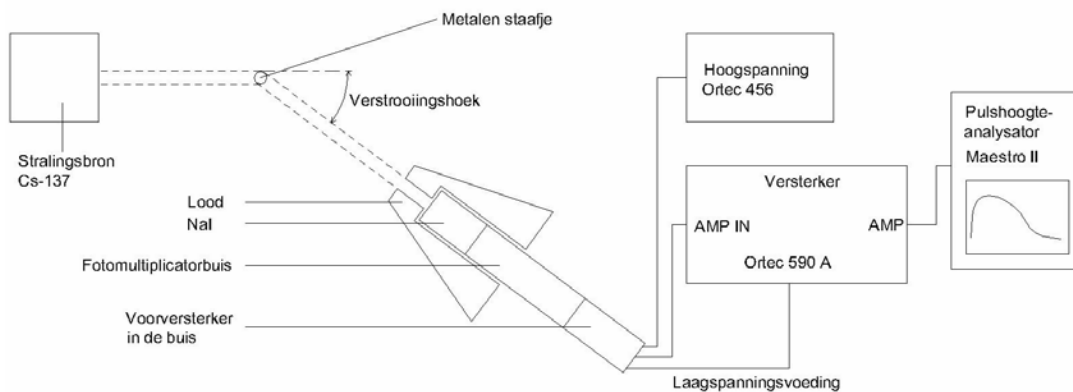
¹ Voor de complete afleiding zie referentie 1 Hoofdstuk 1.

² Zie voor meer uitleg referentie 2.

Experimentele opzet

Voor dit experiment zijn er aan twee opstellingen metingen verricht. Als eerste is er met één detector het foton spectrum onder verschillende hoeken bepaald. Deze meting wordt de singles meting genoemd, omdat er met een detector wordt gemeten. In de tweede opstelling worden er met twee detectoren d.m.v. coincidentie de spectra van het elektron onder verschillende hoeken bepaald. Dit is de coincidentie-meting. Bij beide opstellingen wordt er gemeten onder de hoeken 30, 40, 50, 70, 90, 110 en 130 graden.

Singles-meting

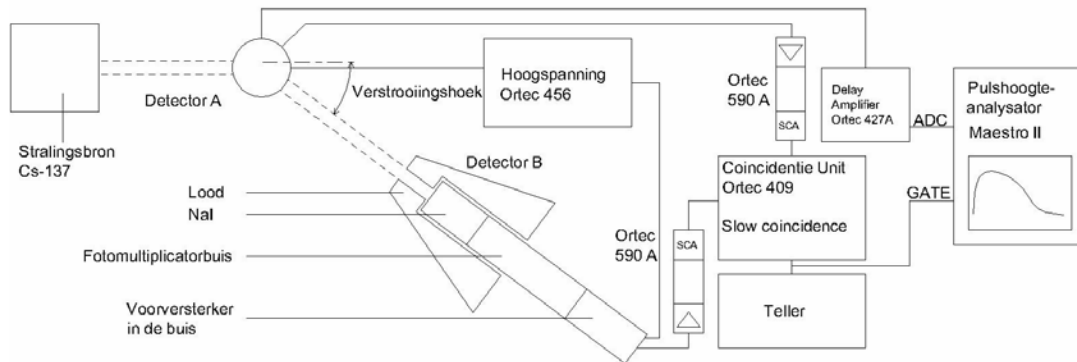


Figuur 2. Schema van de singles-meting.

In figuur 2 is de opstelling voor de singles meting te zien. De detector kan onder verschillende hoeken voor de radioactieve bron Cs-137 worden geplaatst, met als draaipunt het metalen staafje van in dit geval koper. De Cs-137 bron is afgeschermd door lood, zodat alleen door een kleine opening straling van 661.7keV kan ontsnappen. Cs-137 straalt namelijk ook nog sinificante hoeveelheden 32keV straling. De verstrooide fotonen worden in een NaI-scintillatiedetector gedetecteerd. Deze detector meet op 512 verschillende kanalen een bepaalde intensiteit. Met behulp van een computer die op de detector is aangesloten kunnen deze gegevens worden gevisualiseerd. Door voor de meting een ijkmeting te doen met een losse bron van Cs-137 en Am-142 kan bij elk kanaal de corresponderende energie worden uitgerekend. De gegevens die met de computer zijn verkregen kunnen na conversie van het programma Specon³ met een spreadsheet verder worden bewerkt, zodat daarna de positie van de fotopiek, zijn fout en de inhoud van het spectrum kunnen worden bepaald.

³ Zie voor meer informatie referentie 3

Coïncidentie-meting

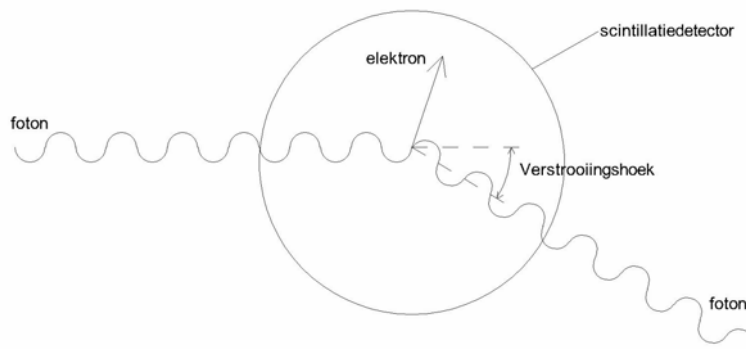


Figuur 3. Schema van de coïncidentie-meting.

In deze meting dient niet een metalen staafje, maar een tweede scintillatiedetector als verstrooier, zoals te zien is op figuur 3. Het elektron wat bij de Comptonverstrooiing ontstaat, zal de detector niet verlaten, maar het foton zal dit wel kunnen doen (zie ook het figuur hieronder). Voor het detecteren van deze fotonen zal de tweede detector worden gebruikt. Door de signalen van beide detectoren naar de Ortec coïncidentie-unit te leiden, wordt er alleen een puls afgegeven als nagenoeg tegelijkertijd in beide detectoren een puls wordt gedetecteerd. Dit zijn dus de pulsen van de Comptonverstrooiing in detector A en het foton wat hierdoor ontstaat in detector B. Hierbij moet men rekening houden met het feit dat de detectoren een eindige telnslheid hebben en de pulsen een bepaalde lengte hebben, zodat er toevallige coïncidenties plaats konden vinden. Dit moet gecorrigeerd worden op de resultaten. Het aantal toevallige coïncidenties N wordt gegeven door:

$$N = 2\tau N_1 N_2 \quad (4)$$

Waarbij τ de lengte van de puls en N_1 en N_2 de telnslheden van de beide detectoren zijn.



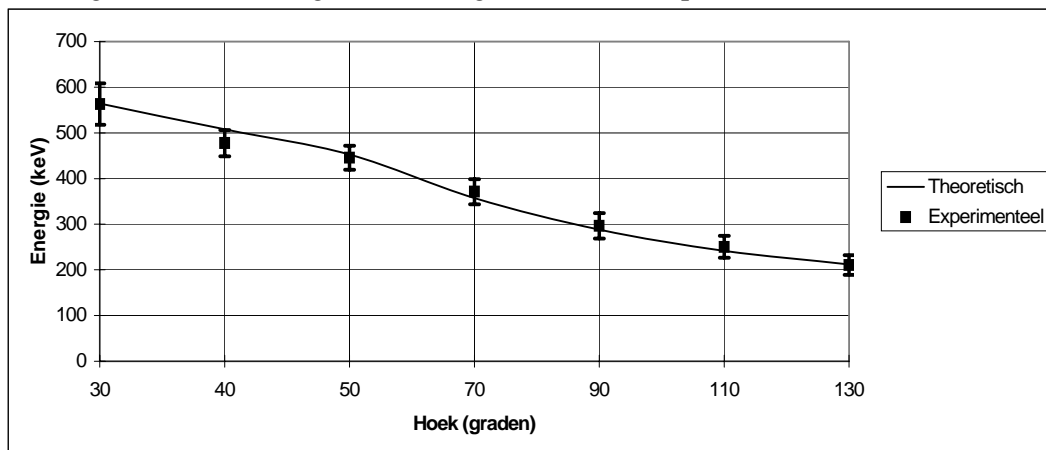
Figuur 4. Compton-effect in NaI-detector.

Resultaten en Discussie

Voor meerdere hoeken is bij de singles- en coincidentie-meting het spectra bepaald. De energieën van de fotopieken in deze spectra zijn geplot tegen de verstrooiingshoek en tevens het quotiënt van de intensiteit en de werkzame doorsnede per ruimtehoek. De grafieken waarin de energieën zijn geplot tegen de hoek zijn alleen gecorrigeerd op de achtergrond straling (Voor de coincidentie opstelling was dit niet nodig omdat de ruis automatisch wel gefilterd wordt. Dit is duidelijk te zien in de appendix), in de overige grafieken is ook rekening gehouden met de relatieve gevoeligheid van detector B. De grafieken waarin het quotiënt is uitgezet tegen de hoek zijn genormeerd op 40 graden.

Singles-meting

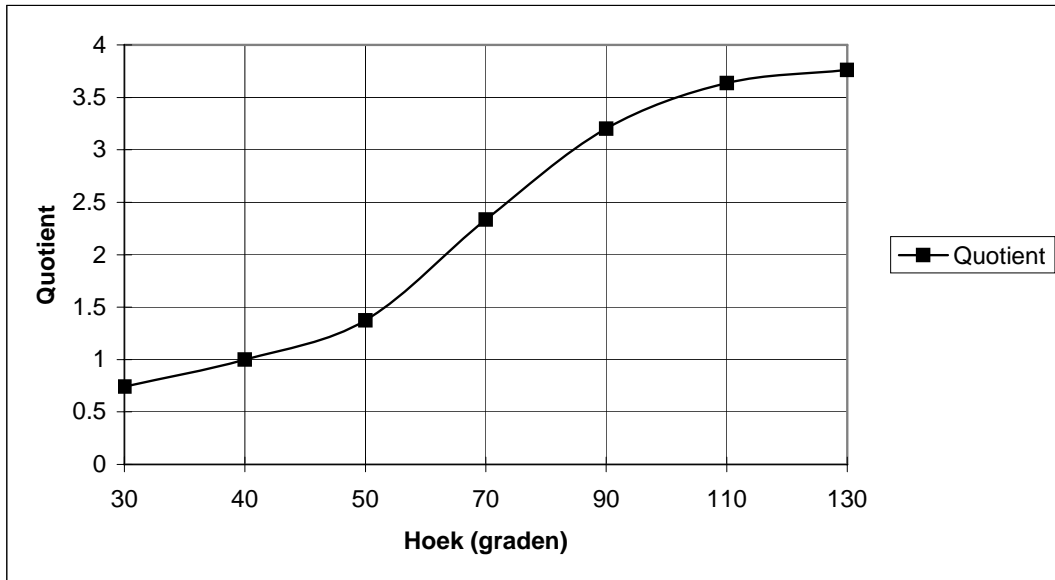
In figuur 5 zijn de energieën van fotopieken en hun fout geplot tegen de hoek, tevens is er een theoretische kromme toegevoegd ter vergelijking. De theoretische waarden komen goed overeen met gemeten energieën van de fotopieken.



Figuur 5. Fotopiekenergie uitgezet tegen de verstrooiingshoek.

Het quotiënt van de intensiteit en de werkzame doorsnede per ruimtehoek ($d\sigma/d\Omega$) uitgezet tegen de hoek zou constant moeten zijn. Dit is echter niet het geval, zoals te zien is in figuur 6.

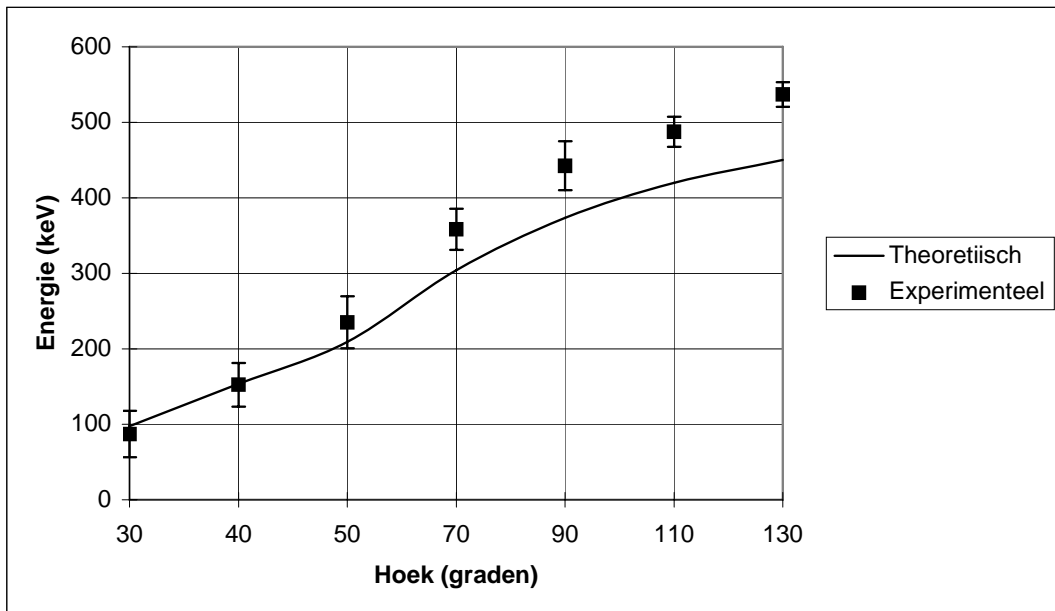
Er is ook een singles-meting verricht met in plaats van koperen een aluminium staafje. De uitkomsten van deze metingen kwamen sterk overeen met die van de van het koperen staafje, alleen waren de fotopieken veel minder duidelijk zichtbaar. Dit komt omdat de atoomnummer en de dichtheid kleiner van aluminium kleiner zijn dan die van koper.



Figuur 6. Quotiënt van intensiteit en theoretische werkzame doorsnede per ruimtehoek.

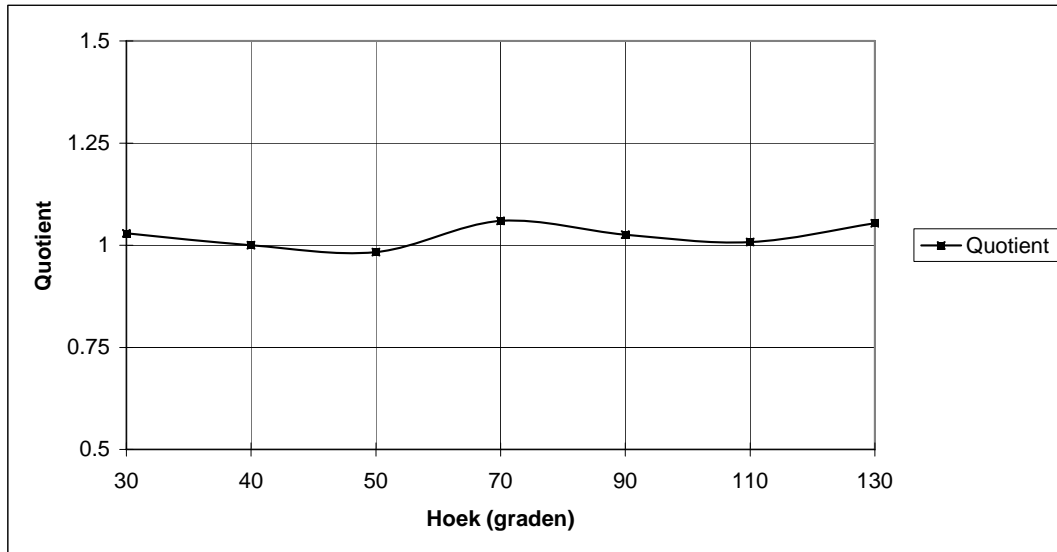
Coïncidentie-meting

Met twee detectoren werden de energieën voor de fotopieken van het elektronenspectrum onder verschillende verstrooiingshoeken (zie figuur 7) bepaald. Duidelijk is te zien dat naarmate de hoek groter wordt de energie steeds verder van de theoretische waarde gaat afwijken, terwijl de fout juist steeds kleiner wordt. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de ijkmeting niet juist is geweest.



Figuur 7. Fotopiekenergie van het elektronenspectra onder verschillende hoeken.

Het eerder in singles-meting bepaalde quotiënt, is nu veel constanter, zoals te zien valt in figuur 8. Een coïncidentie-meting lijkt een stuk nauwkeuriger op dit gebied vergeleken met de singles-meting.



Figuur 8. Quotiënt bij een coïncidentiemeting, genormeerd op 40 graden.

Conclusie

Bij de singles-meting is gebleken dat relatie (1) goed klopt met de experimentele waarden, voor het quotiënt was dit echter niet het geval. De mindere nauwkeurigheid van detector B zou hierbij een rol kunnen hebben gespeeld.

De energieën van de coïncidentie-meting uitgezet tegen de hoek kwamen, naarmate de hoek toenam, steeds verder van de theoretische waarde af te liggen. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de ijkmeting onjuist is geweest. Het quotiënt van de coïncidentie-meting is wel redelijk constant in tegenstelling tot die van de singles-meting. Dit komt waarschijnlijk doordat detector A een betere nauwkeurigheid heeft dan detector B en dat de coïncidentieopstelling minder ruisgevoelig was. Dit is ook te zien aan de ijkmetingen in de appendices.

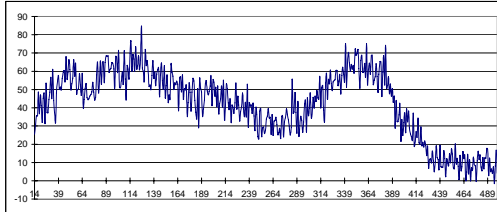
Referenties

1. S. Gasiorowics, *Quantum Physics 2nd edition* (John Wiley & Sons, Inc, 1987)
2. R.D. Evans, *The Atomic Nucleus* (Kreiger, 1982)
3. W. Hong, *Specon*,
<http://ccp14.semo.edu/ccp/web-mirrors/wan-hong/specon/Specon.html>
4. RUG, *Practicumhandleiding Compton-effect* (RUG, 1998)

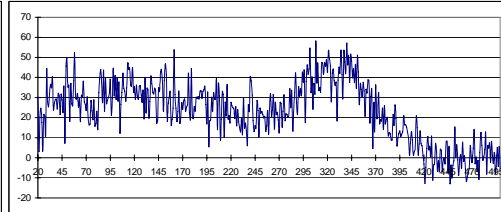
Appendices

A – Singles-metingen

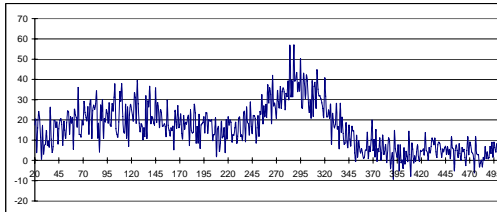
De fotspectra bij alle verstrooiingshoeken, met als verstrooier het koperen staafje.



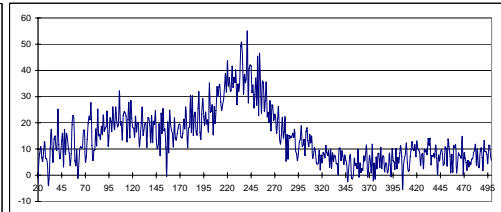
30 graden



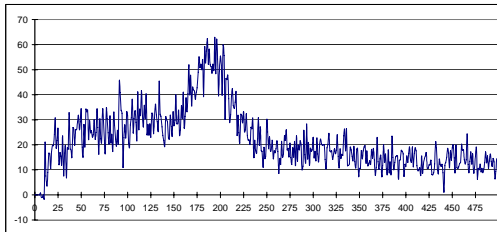
40 graden



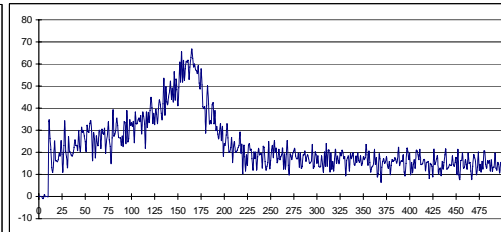
50 graden



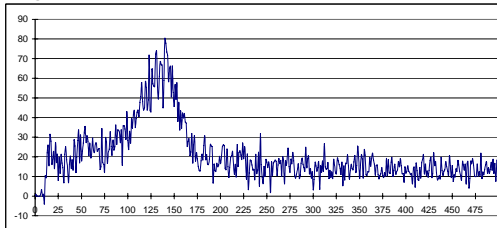
70 graden



90 graden

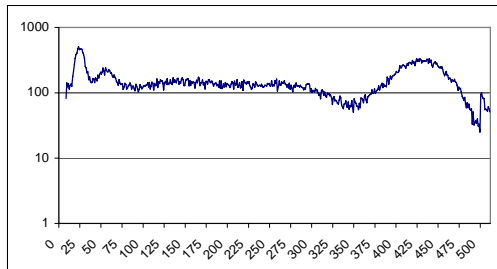


110 graden

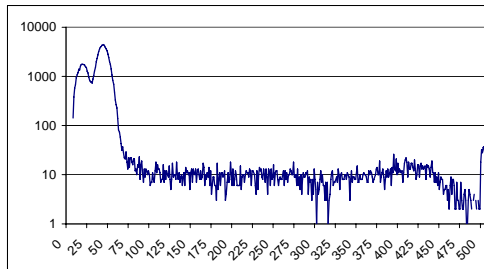


130 graden

Ijkmetingen(met detector B):



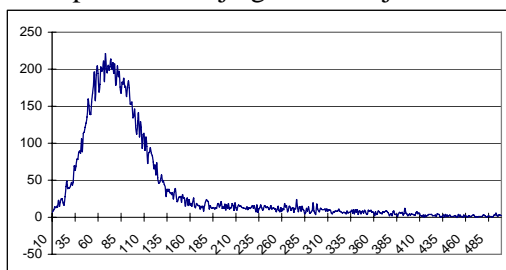
Cs-137



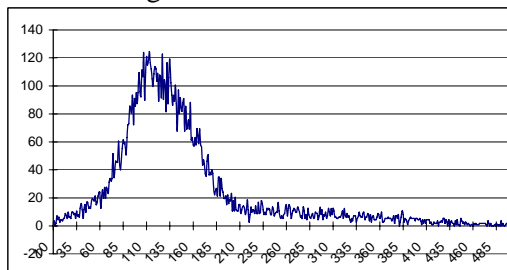
Am-142

B - Coincidentie-metingen

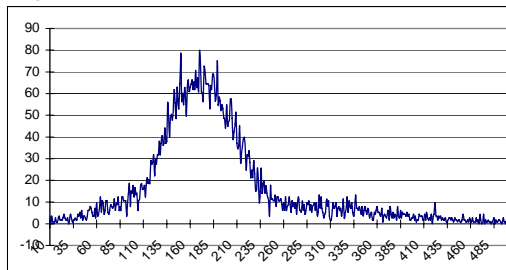
Alle spectra die zijn gemaakt bij de coincidentie-meting.



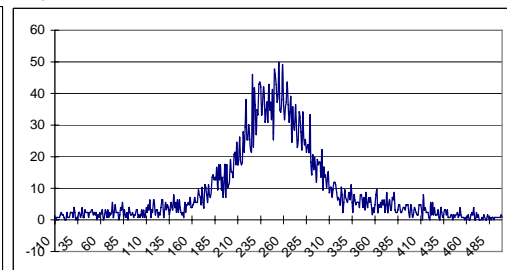
30 graden



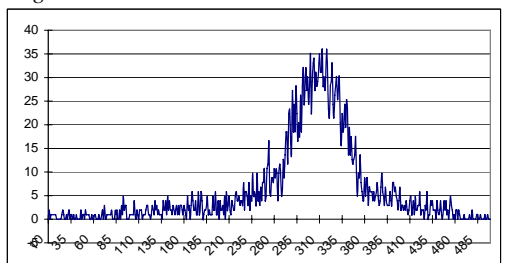
40 graden



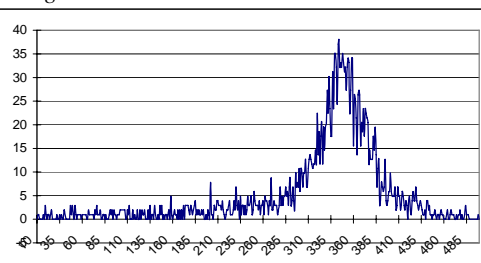
50 graden



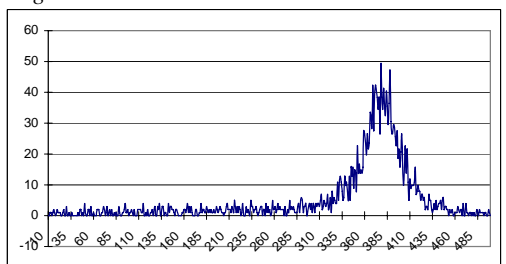
70 graden



90 graden

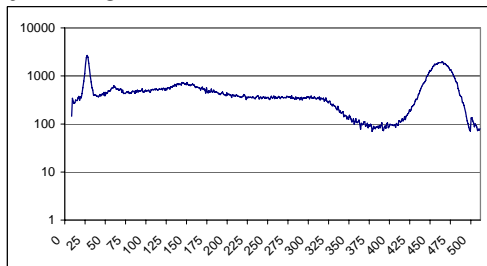


110 graden

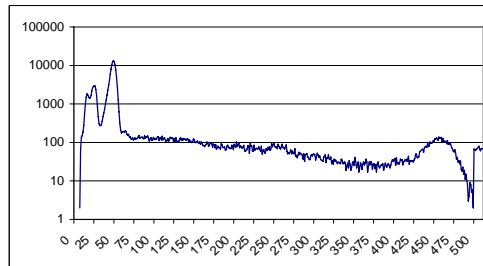


130 graden

Ijkmetingen (met detectorA):



Cs-137



Am-142