

# Simulatie van fotondetectie in HiSPARC

T. Kooij

January 5, 2015

## Contents

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Monte carlo simulatie van fotonen door een scintillatorplaat</b>	<b>3</b>
4.1	Beschrijving van de montecarlo analyse . . . . .	3
4.2	Resultaten montecarlo simulatie . . . . .	3
4.3	Analyse van de detectorresponse van fotonen per mechanisme	4
4.3.1	Analyse van de bijdrage van het foto-elektrisch effect .	4
4.3.2	Analyse van de bijdrage van Compton verstrooiing . .	4
4.3.3	Analyse van de bijdrage van paarvorming . . . . .	5
4.4	Absorptie van electronen in detector . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Parametrisatie van Compton verstrooiing</b>	<b>6</b>
5.1	Detectiekans . . . . .	7
5.2	Afgegeven energie aan het electron . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Sapphire algorithmen</b>	<b>8</b>

## 1 Samenvatting

Ja, het kan!

## 2 Inleiding

Geladen leptonen (elektronen en muonen) worden in HiSPARC stations efficiënt gedetecteerd met vinyltolueen scintillatorplaten. De stoppping power is groot genoeg om de energieafgifte te benaderen door de *Continuous Slow-ing Down Approach (CSDA)*. Door het grote aantal interacties van geladen

leptonen met materie geven ze in kleine stapjes energie af aan de detector. De detectie kans is 1 en de energieafgifte per deeltje is reproduceerbaar.

Detectie van fotonen is moeizaam. De werkzame doorsnedes van de interacties zijn klein, zodat de kans op interactie slechts enkele procentpunt is [2]. De energieafgifte per interactie kan echter groot zijn. Daarom is de energieafgifte per foton variabel.

In een pulshoogtehistogram van een HiSPARC detector station zijn bijdragen van fotonen te identificeren [2]. In de simulatie van EAS op HiSPARC detectoren met behulp van CORSIKA en sapphire wordt geen rekening gehouden met de bijdragen van fotonen. Fotonen zijn wel aanwezig in de CORSIKA output, maar worden niet meegenomen in sapphire. Daarom is de interactie van fotonen met de HiSPARC detectoren onderzocht om de detectorreponse op fotonen in the bouwen in de sapphire simulaties.

### 3 Theorie

In de HiSPARC scintillator platen word fotonen (gamma's) gedetecteerd met een energie tussen 100 keV en 10 MeV [3]. Er zijn drie mechanismen waarmee dergelijke gamma's energieverliezen in een scintillatorplaat: Het foto-elektrisch effect, compton verstrooiing en paarvorming. Door deze interacties wordt energie van de invallende fotonen ovegedragen aan elektronen in de detector. Deze elektronen worden dan gedetecteerd zoals invallende elektronen uit airshowers.

De werkzame doorsnede voor het foto-elektrisch effect is alleen bij lage energie voldoende groot. Voor foton met energie rond 1 MeV is de werkzame doorsnede zo klein dat de interactie kans vrijwel nul is. Er zijn alleen foto-elektrische interacties die elektronen met lage energie vrijmaken. De pulshoogte in de PMT is kleiner dan het ruisniveau. [3]. Hypothese: Het foto-elektrisch effect kan buiten beschouwing gelaten worden.

Compton verstrooiing is de dominerende interactie. De elektronen die door deze interactie worden vrijgemaakt leveren pulshoogten tussen ruisniveau en 1 MIP. Compton verstrooiing moet worden gesimuleerd in de detector response voor fotonen.

Paar-vorming kan alleen optreden bij foton energie groter dan 1.022 MeV (de rustmassa van een elektron positron paar). De bijbehorende pulshoogtes zijn groot; In de orde van 1 MIP of meer. De werkzame doorsnede van paarvorming is klein, daarom is de interactiekans klein. De pulsen zijn in de detector ononderscheidbaar van pulsen die veroorzaakt worden door invallende geladen leptonen. Hierdoor is de invloed van paar-vorming op het uiteindelijke pulseintegral histogram minimaal. Hypothese: Paarvorming kan buiten beschouwng gelaten worden.

## 4 Monte carlo simulatie van fotonen door een scintillatorplaat

### 4.1 Beschrijving van de montecarlo analyse

Voor het analyseren van de response van HiSPARC detectoren op fotonen is een monte carlo simulatie programma geschreven door J. Steijger [3]. De analyse wordt door de auteur *Mini-Monte Carlo* genoemd. Hier wordt "de simulatie" gebruikt om te verwijzen naar de montecarlo simulatie.

De simulatie, geschreven in C, is gecompileerd met gcc-4.8.1 via cygwin64 op Windows 7. De uitvoer van de simulatie is of meerdere regels tekst per vrijgemaakt elektron. De opbouw van de tekstregels van de programma uitvoer is gedocumenteerd. De uitvoer wordt ingelezen een python-2.7 script waarmee de tabellen en figuren uit dit pamflet zijn gemaakt. De C en python broncode zijn beschikbaar via Github.

Aangenomen wordt dat de gammastraling loodrecht invalt op de detector en dat alle deeltje in dezelfde richting door de detector verplaatsen. De detector kan zo gemodelleerd worden als eendimensionaal met een lengte van 2,0 cm. De code simuleert een groot aantal fotonen waarvan de energie willekeurig getrokken wordt uit een  $1/E$  verdeling tussen 100keV en 10MeV. Per foton wordt de werkzame doorsnede van de drie interacties bepaald en daaruit de vrije weglengte van het foton. De kleinste vrije weglengte bepaalt het interactietype en een willekeurig getal bepaalt de interactieplaats. De aan de elektronen overgedragen energie wordt bepaald en daaruit wordt de aan de scintillatorplaat afgegeven energie berekend volgens de *continuous slowing down approach* met  $dE/dx = 1.75 \text{ g/cm}$ . Hierbij wordt zoals eerder genoemd aangenomen dat de elektronen ook loodrecht op scintillator plaat verder bewegen en dat alle energie in de detector wordt opgenomen, d.w.z. het elektron voldoende afstand kan afleggen voordat het de detector verlaat. Deze aanname is juist VERWIJZEN.

### 4.2 Resultaten montecarlo simulatie

De resultaten zijn uitgesplits per mechanisme, zie 1. In figuur 1 is een histogram weergegeven van de energieafgifte aan de detector per foton.

Table 1: Resultaten mini montecarlo

Omschrijving	aantal	percentage	
Aantal primaire fotonen	651075	100%	-
Fotonen met interactie	100000	15.4%	100%
waarvan foto-elektrisch effect	293		0.29%
waarvan Compton verstrooiing	90596		91%
waarvan Paarvorming	9111		9.1%

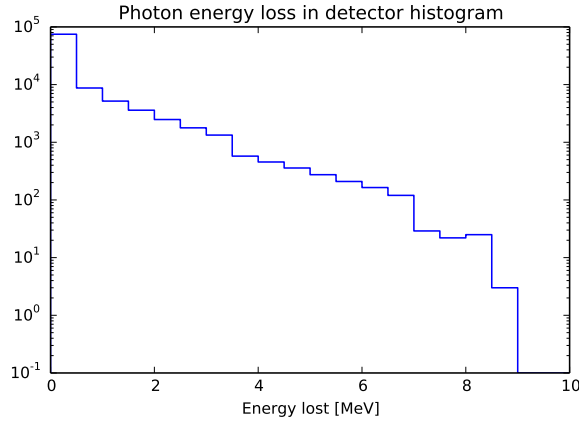


Figure 1: Energieafgifte aan detector per foton.

### 4.3 Analyse van de detectorresponse van fotonen per mechanisme

#### 4.3.1 Analyse van de bijdrage van het foto-elektrisch effect

In [3] is de ondergrens van de primaire fotonen in de minimontecarlo simulatie bepaald op 100 keV. Fotonen met minder energie worden niet waargenomen, omdat PMT pulsen binnen het ruisniveau vallen.

Omdat de werkzame doorsnede voor het foto-elektrisch effect bij 100keV klein is, zijn er slechts weinig (minder dan 1%) fotoelektrische interacties (tabel 1) in de simulatie. Deze interacties leveren electronen in de scintillator plaat met lage energie (figuur 2). De bijbehorende pulshoogte is onder het ruisniveau.

Conclusie: Het foto-elektrisch effect kan verwaarloosd worden.

#### 4.3.2 Analyse van de bijdrage van Compton verstrooiing

Compton verstrooiing is het mechanisme dat voor 90% van alle interacties zorgt. In figuur 3a ?? en is de energie afgifte aan de detector weergegeven. Het overgrote deel van de energie overdracht aan de detector is tussen de 0.1 en 2 MeV. Bijbehorende pulshoogte is tussen ruis en 60mV (120 ADC counts) <sup>1</sup>.

Conclusie: Compton verstrooiing zorgt voor detector response in het voor deze analyse interessante gebied.

<sup>1</sup>3.38 MeV = 200mV = 350 ADC counts; De hoogte van de *MIP piek* is 3.38 MeV, dit komt overeen met 200mV (beide volgens [2] blz 24). 1mV komt overeen met 1.75 ADC stap (volgens [2] blz 32).

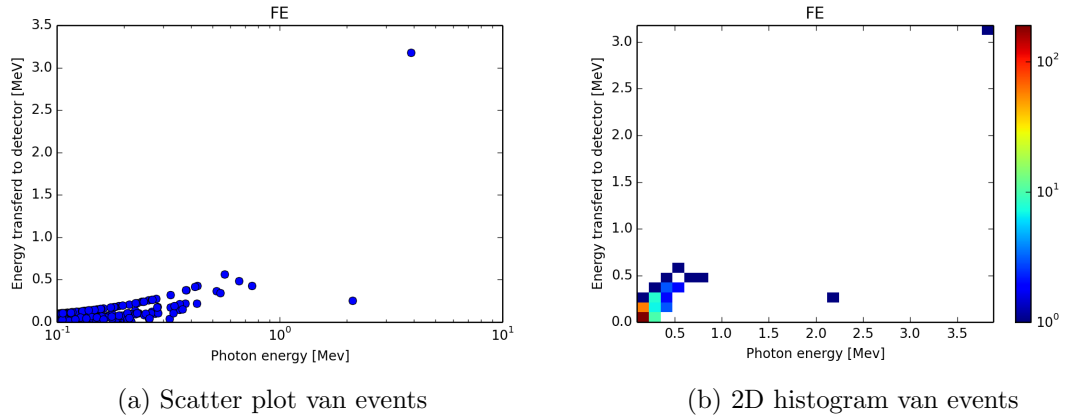


Figure 2: Foto-elektrisch effect: Energieoverdracht aan detector vs Gamma energie

#### 4.3.3 Analyse van de bijdrage van paarvorming

Bij ongeveer 10% van de interacties van fotonen in de detector treedt paarvorming op. De overgedragen energie is hierbij hoog. In figuren 4 is af te lezen dat de energieoverdracht meestal groter is dan 2 MeV. De bijbehorende pulshoogte is ongeveer 120mV (200 ADC counts)<sup>2</sup> en groter.

Daarmee zijn de pulsen ononderscheidbaar van geladen leptonen.

Conclusie: Compton verstrooiing levert grote detectorrespons die onderscheidbaar is van de response door geladen leptonen. De interactiekans is echter zo klein, dat deze bijdrage t.o.v. de bijdrage van geladen leptonen verwaarloosd kan worden.

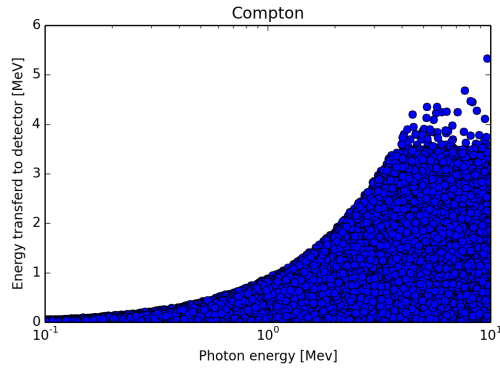
#### 4.4 Absorptie van electronen in detector

In de montecarlo simulatie worden elektronen gegeneerd. Vervolgens wordt aangenomen dat alle energie van de elektronen opgenomen wordt in de detector. Deze aanname is alleen geldig als er het elektron nog voldoende afstand kan afleggen in de detector. Als het elektron meer energie krijgt dan *stopping power \* dikte* dan verlaat het elektron de detector met energie.

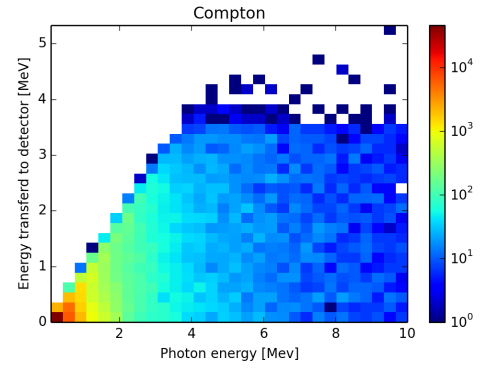
In de simulatie van 10.000 events waarbij een electron wordt vrijgemaakt zijn 12034 elektronen vrijgemaakt. (Paarvorming levert 2 of 3 electronen op). Hiervan zijn 9989 totaal geabsorbeerd in de detector, dat is 83%. Slechts 17% van de electronen verlaat de detector met energie. Dit zijn voornamelijk elektronen met grote energie die vrijgemaakt zijn door paarvorming.

In 5 is een histogram weergegeven van de energie van gesimuleerde elektronen als ze de detector verlaten. De helft (8% van het totaal) heeft een

<sup>2</sup>3.38 MeV = 200mV = 350 ADC counts

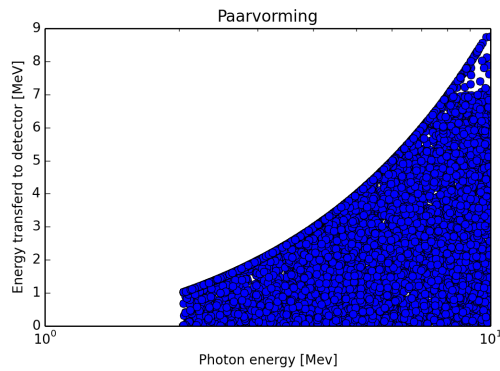


(a) Scatter plot van events

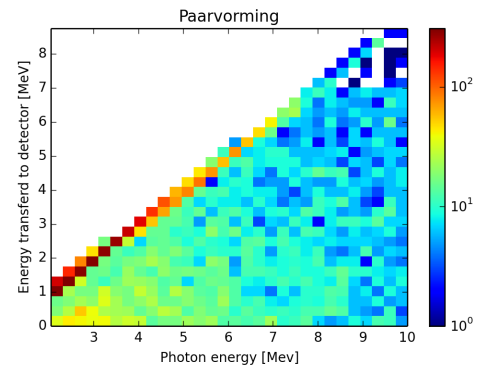


(b) 2D histogram van events

Figure 3: Compton verstrooiing: Energieoverdracht aan detector vs Gamma energie



(a) Scatter plot van events



(b) 2D histogram van events

Figure 4: Paarvorming: Energieoverdracht aan detector vs Gamma energie

energie in het gebied dat interessant is (0 - 2 MeV).

De aanname dat alle energie van een door compton verstrooiing vrijgemaakt elektron wordt opgenomen door de detector is juist.

## 5 Parametrisatie van Compton verstrooiing

Uitleg compton verstrooiing

Deze paragraaf vullen naar behoefte vanuit tekst hieronder

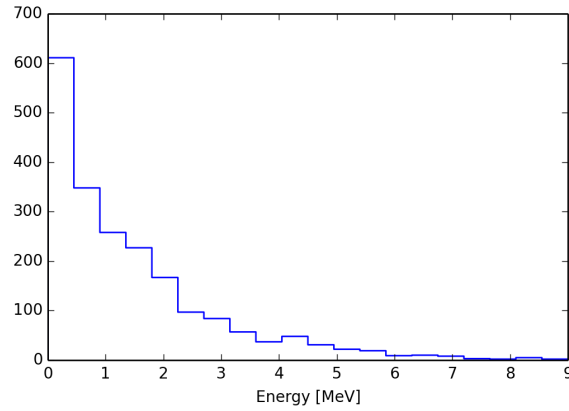


Figure 5: Histogram van energie van elektronen bij het verlaten van de detector.

## 5.1 Detectiekans

De kans op compton verstrooiing van een electron in de scintillator door een invallend foton is kan berekend worden door:

$$P(d) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{l \cdot d}\right) \quad (1)$$

waarin:

$l$  = vrije weglengte voor compton verstrooiing voor een foton met gegeven energie

$d$  = dikte scintillator

De vrije weglengte wordt bepaald door:

$$l = \frac{1}{n \cdot Z \cdot \sigma} \quad (2)$$

waarin:

$\sigma$  = totale werkzame doorsnede voor compton scattering (Klein-Nisihina) [1]

$Z$  = atoommassa (64. voor vinyltoluene)

$n$  = aantal atomen per m<sup>3</sup>

Figuur 6 laat de detectiekans zien voor het spectrum 100keV-10MeV. Deze kans kan geparametriseerd worden door (gestippelde lijn):

$$P(E) = 0.134198 \exp(-0.392389 \cdot E) + 0.034156 \quad (3)$$

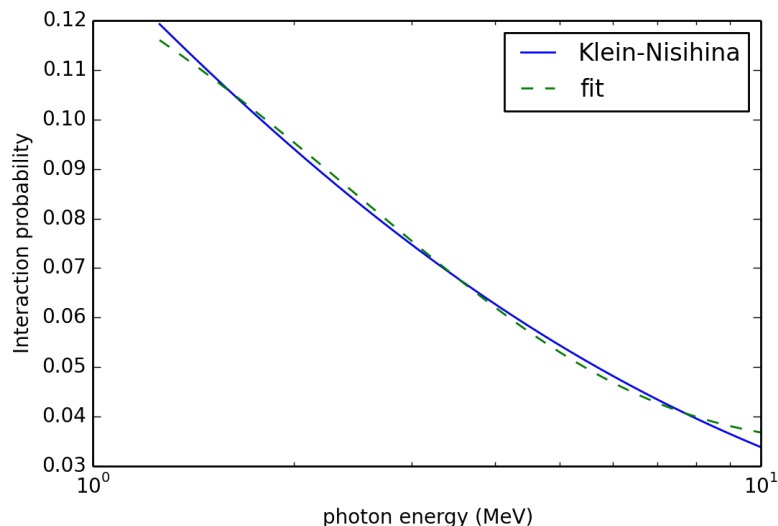


Figure 6: Detectiekans van fotonen door compton scattering. Gestippelde lijn is een parametrisatie d.m.v. een e-macht. Zie tekst.

## 5.2 Afgegeven energie aan het electron

Als er een interactie plaatsvindt dan wordt de energie van het electron ( $T$ ) bepaald door de impuls van het foton en de (onbekende) verstrooiingshoeken  $\theta$  en  $\phi$ . De energieverdeling van de electronen wordt bepaald door de  $\frac{d\sigma}{dT}$ . [1] en Evans1955. De energieverdeling is weergegeven in figuur 7 voor verschillende energieën.

De overgedragen energie  $T$  heeft een kinematisch maximum, de zogenaamde *compton edge*. Dit is het geval waarin het foton 180 graden wordt terugverstrooid. Dit maximum is goed zichtbaar in de energieverdeling.

Als we deze verdeling integreren over  $T$  dan krijgen we een cumulatieve energieverdeling. In figuur 8 is deze verdeling weergegeven. Op de horizontale as staat de Energie van 0.1 MeV tot de *compton edge* onderverdeeld in 1000 bins. De verticale as is genormaliseerd. Als we een willekeurig getal trekken en tussen 0 en 1 en het daarbij horende *bin* opzoeken in figuur 8 dan kan daaruit de energie die is overgedragen aan het elektron  $T$  bepaald worden.

## 6 Sapphire algorithm

Flowchart?



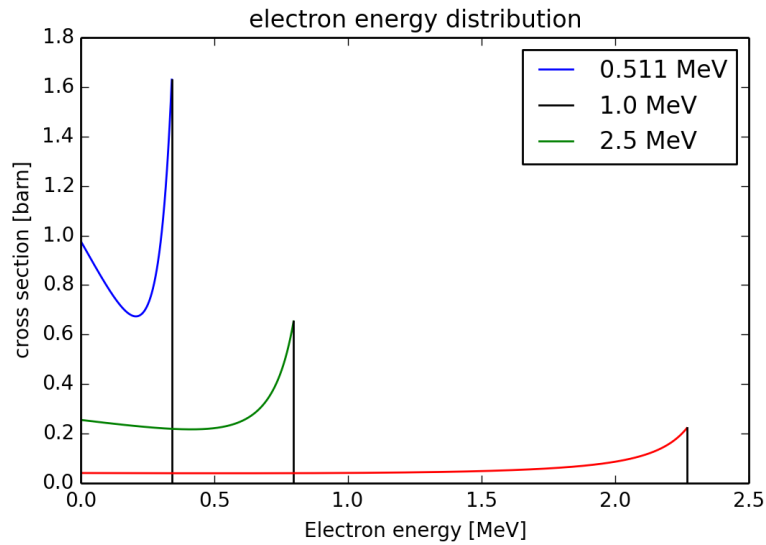


Figure 7: Energieverdeling van vrijgemaakte elektronen door Compton verstrooiing voor verschillende foton energie. De zwarte lijn is de *compton edge*

## References

- [1] W.R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*. Springer-Verlag, 1987.
- [2] Dorrieth Pennink. Analyse van het pulshoogte histogram. In *FOM verslag LIO's 2009 – 2010*. FOM, 2010.
- [3] J. J. M. Steijger. Nikhef internal note 16 juni. 2010.

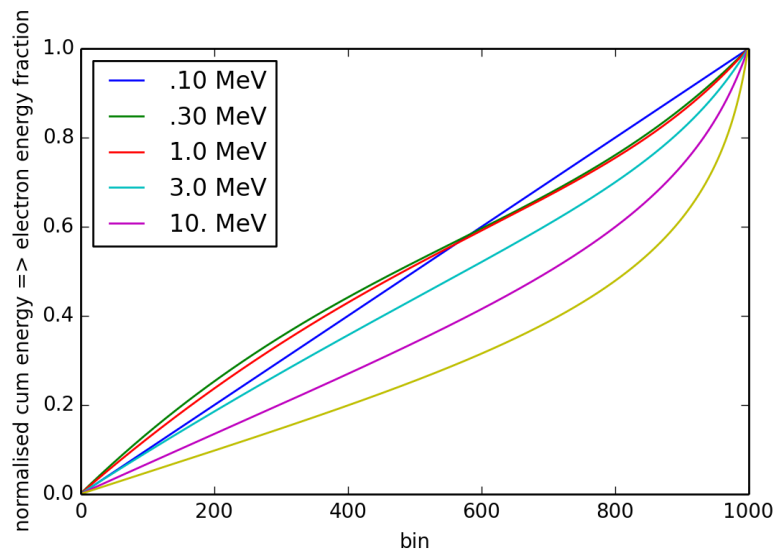


Figure 8: Cumulatieve energie verdeling voor Compton Scattering. Op de horizontale as staat de energie van 0.1 MeV tot de *compton edge* in 1000 bins. De verticale as is genormaliseerd.