

HiSPARC als kosmische straling telescoop

N.G. Schultheiss

Samenvatting

Een kaart met bronnen voor kosmische straling is met een enkel meetstation met twee detectoren te maken. Een dergelijk station meet tussen de 1000 en 1500 events per uur. Een jaar duurt iets minder dan 10.000 uur. Een station meet per jaar dus ongeveer 10.000.000 events. Hier is statistiek mee te bedrijven. In een jaar draait de Aarde 365,25 keer rond ten opzichte van de Zon en 366,25 keer ten opzichte van de sterren. Een station met twee detectoren draait met de Aarde mee. Gedurende een dag worden alle richtingen gemeten. De nauwkeurigheid waarmee dit gebeurt, wordt uitgewerkt. Deze hangt af van de detector, het station en de locatie. Bij voldoende nauwkeurigheid is een kaart te maken. Tot op heden wordt aangenomen dat deze kaart, evenals de kaart voor de kosmische microgolf achtergrondstraling, een uniforme intensiteit laat zien.

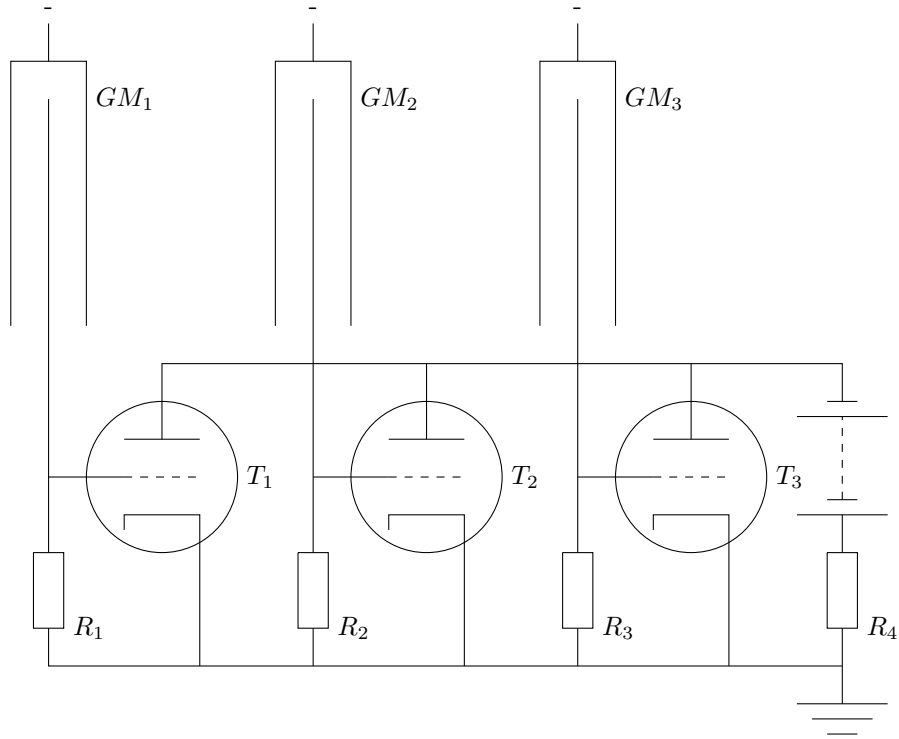
1 Inleiding

Dit artikel is gebaseerd op de handout van de voordracht 'HiSPARC als kosmische straling telescoop' die op 12 december 2014 op de NVON natuurkunde conferentie is gegeven.

2 Onderzoek aan kosmische straling

De ontdekking van radioactiviteit aan het eind van de 19^{de} en het begin van de 20^{ste} eeuw door Becquerel en Curie leidde tot nieuw natuurkundig onderzoek. De radioactiviteit kon worden gemeten doordat er fluorescentie in de buurt van radioactieve bronnen optrad. Daarnaast heeft de straling van deze bronnen een ioniserend effect.

Een logische gedachte die uit de ontdekking van radioactieve isotopen voortvloeide, was dat de Aarde als bron van straling kon worden opgevat. In dit geval moet het ioniserend effect van deze straling afnemen als de afstand tot de Aarde toeneemt. De onlaadtijd van geladen elektroscopen maakt een dergelijk onderzoek naar het ioniserend effect van deze straling mogelijk. Dit onderzoek is op de Eiffeltoren, in luchtballons en onder water door Wulff, Hess en Millikan uitgevoerd. Omdat de straling op de Eiffeltoren veel minder snel afnam als



Figuur 1: Telbuizen aangesloten op een 'en'-poort volgens Rossi. Iedere GM-buis (GM_1 , GM_2 of GM_3) is aangesloten op een eigen negatieve spanning. Als een deeltje door een buis gaat, neemt de negatieve spanning over de weerstanden R_1 , R_2 of R_3 toe. De bijbehorende triode (T_1 , T_2 of T_3) stopt met geleiden. Als geen enkele triode geleidt, zijn er deeltjes in alle telbuizen waargenomen. De spanning over R_4 is dan 0V.

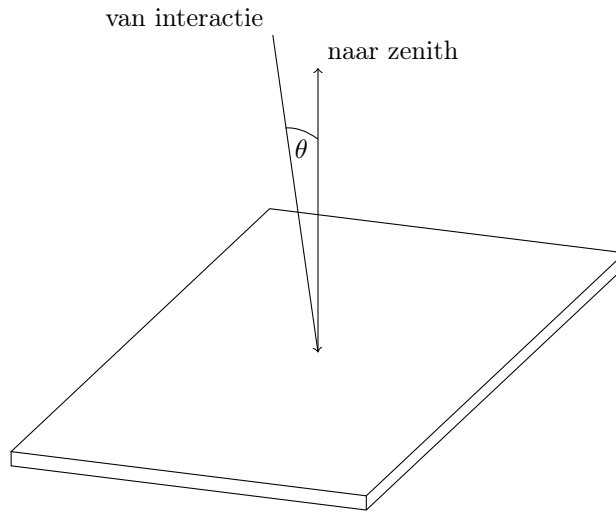
verondersteld en bij de grotere hoogten in luchtballons zelfs toenam, kwamen zij tot de conclusie dat deze straling ook uit de kosmos komt.

Bothe en Kohlhörster maten voor het eerst de gelijktijdigheid van deeltjes in kosmische straling. Tijdens zijn onderzoek bij Bothe ontwikkelde Rossi de eerste 'en'-poort door Geiger-Müller telbuizen aan te sluiten op vacuum-buizen (triodes). Met deze schakeling is het mogelijk om te onderzoeken of deeltjes nagenoeg gelijktijdig worden gedetecteerd. Op deze manier maten Rossi en Auger dat deze kosmische straling in de atmosfeer deeltjes-lawines veroorzaakt. De efficiëntie van de metingen neemt toe als er een plaat lood boven de GM-buis wordt geplaatst. De deeltjes hebben zoveel energie dat er in de plaat secundaire deeltjes (showering) ontstaan. De kans dat deze gemeten worden, wordt dan ook groter.

Het afgelopen decennium heeft het HiSPARC-project deeltjes uit deze lawines

gemeten met meetstations bestaande uit twee of vier detectoren. De verzamelde meetgegevens zijn openbaar. Met deze meetgegevens is het mogelijk om een hemelkaart met bronnen van kosmische straling te maken.

3 Detectoren



Figuur 2: De zenith hoek θ bij een scintillator

De HiSPARC-detectoren bestaan uit platen scintillator-materiaal van 1000mm*500mm * 20mm. Een deeltje uit de lawine dat door de plaat vliegt, brengt elektronen in anthraceen moleculen in een aangeslagen toestand [RouteNet]. De fotonen die vrijkomen als deze elektronen vervallen, worden door een PMT (foto multiplier buis) gemeten [dr. Th. W. Kool, N.G. Schultheiss, Fluorescentie / RouteNet en Detector / infopakket]. De efficiëntie van deze detectoren is door Rossi als functie van de zenith-hoek θ beschreven als:

$$n(\theta) = n(0) \cos^a(\theta) \quad (1)$$

Hoewel de efficiëntie voor $\theta = 0^\circ$ maximaal is, worden de meeste deeltjes gemeten bij een hoek van ongeveer 22° . Dit komt omdat het hemeloppervlak dat aan een zenith-hoek kan worden gekoppeld toeneemt als de zenith-hoek toeneemt. HiSPARC gebruikt een van formule die van formule 1 is afgeleid. Hierin wordt het gedetecteerde hemeloppervlak meegenomen:

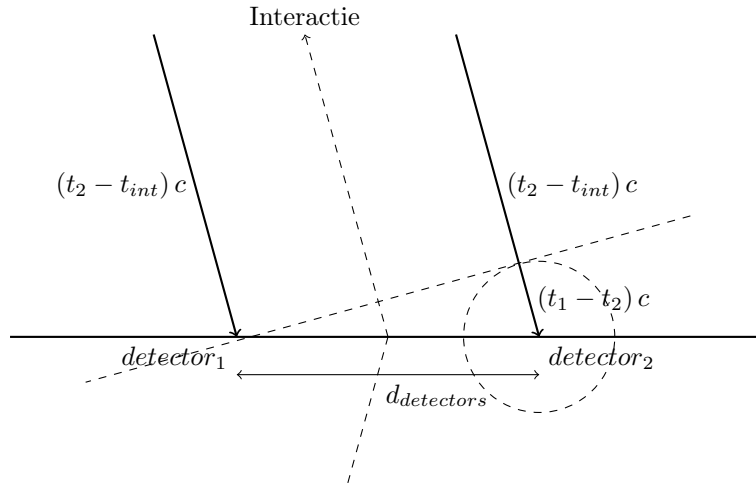
$$n(\theta) = k \sin(\theta) \cos^a(\theta) \quad (2)$$

Met deze formule is het mogelijk om de constante a te bepalen. In de praktijk ligt deze in de orde van $7 < a < 9$. Het onderzoek kan als een profielwerkstuk worden uitgevoerd.

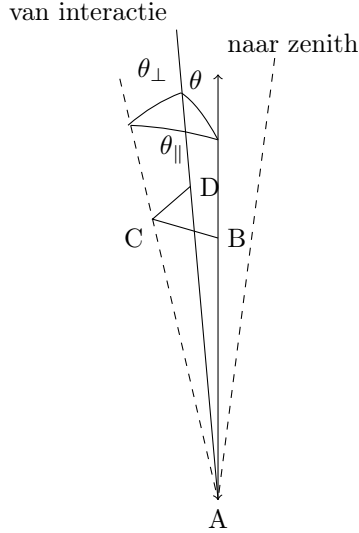
4 Stations

Voordat we een uitspraak kunnen doen over de efficiëntie van detectoren, moet de zenith-hoek van een deeltjes-lawine worden bepaald. Deze hoekafhankelijkheid kan ten dele met behulp van twee detectoren worden bepaald. Uitgaande van de hypothese dat de deeltjes de lichtsnelheid benaderen, is de afstand tussen een eerste interactie en de detectie in een station te berekenen met $s_{detectie,interactie} = (t_{detectie} - t_{interactie}) * c$. Hoewel het interactietijdstip onbekend is, is dit voor beide detectoren identiek. Met het tijdsverschil tussen beide detectoren en de afstand tussen detectoren is de hoek met de as door de detectoren te berekenen. Dit is in figuur 3 afgebeeld voor een plat vlak. Alle mogelijke oplossingen voor interacties zijn in dit geval wiskundig te vinden op de conflictkromme tussen de cirkel met straal $r = (t_1 - t_2)c$ rond detector 1 en het punt behorend bij detector 2 (een hyperbool). In de praktijk ligt de interactie ongeveer 25km boven het aardoppervlak in de aangegeven richting. In dit geval geldt:

$$\sin(\theta) = \frac{(t_1 - t_2)c}{d_{detectoren}} \quad (3)$$



Figuur 3: Reconstructie van de richting van de deeltjes in een lawine uit de aankomsttijden (t_1) en (t_2) . Het interactietijdstip is op (t_{int}) gesteld. De tijd tussen interactie en detectie is bij de rechterdetector in tweeën gedeeld.



Figuur 4: Als we uitgaan van een lengte voor het lijnstuk AD van 1 eenheid en een rechte hoek ACD wordt de lengte van lijnstuk AC: $\cos(\theta_{\perp})$. Op vergelijkbare wijze wordt de lengte van AB: $\cos(\theta)$ of $\cos(\theta_{\perp}) * \cos(\theta_{\parallel})$.

In werkelijkheid bewegen de deeltjes-lawines niet in een twee dimensionaal vlak, maar in de drie dimensionale ruimte van figuur 5. De hoek in ieder vlak door beide detectoren is op de hierboven beschreven methode te bepalen. Een uitspraak over de hoeken in de ruimte lijkt in eerste instantie niet mogelijk. De zenith hoek θ is op te splitsen in een hoek θ_{\parallel} in de richting van de as door de detectoren en θ_{\perp} loodrecht op de as door de detectoren. Wiskundig is af te leiden dat:

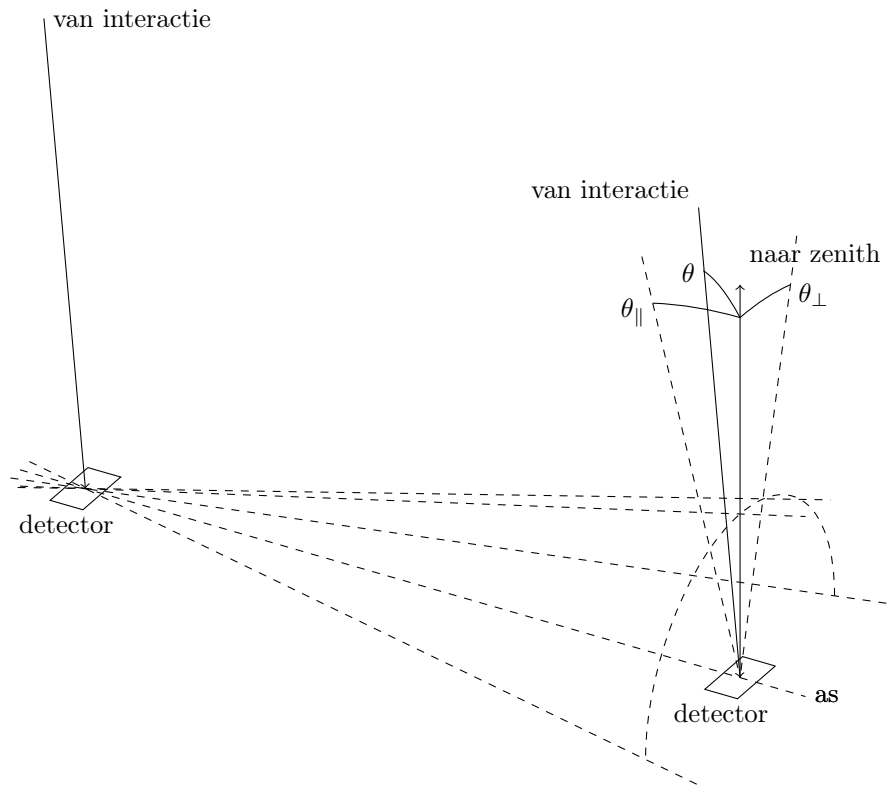
$$\cos(\theta) = \cos(\theta_{\parallel}) \cos(\theta_{\perp}) \quad (4)$$

Als we uitgaan van de hypothese dat er geen voorkeursrichting voor de deeltjes is, dan is de verdeling van deeltjes als functie van de zenith hoek niet afhankelijk van het azimut. De verdeling in de richting van de as door de detectoren is dan gelijk aan de verdeling loodrecht op de as door de detectoren. Formule 1 is nu te schrijven als:

$$n(\theta) = n(0) \cos^a(\theta_{\parallel}) \cos^a(\theta_{\perp}) \quad (5)$$

Het totale aantal deeltjes dat wordt gemeten met een bepaald gedetecteerd tijdsverschil is te berekenen door te integreren over $\cos(\theta_{\perp})$. In formule 5 is te zien dat deze integraal niet van $\cos(\theta_{\parallel})$ afhangt, de integraal is dus constant.

$$n(\theta) = \text{constante} \cos^a(\theta_{\parallel}) \quad (6)$$



Figuur 5: Twee deeltjes met een zenith hoek θ raken twee scintillatoren van een meetstation.

Met de verdeling van de gemeten tijdsverschillen kunnen we de constante a bepalen. De kans dat deeltjes worden gedetecteerd is daarmee als functie van θ uit te rekenen. De 'scherpte' van de telescoop loodrecht op de as door de detectoren is daarmee bekend.

De scherpte van de telescoop langs de as door de detectoren wordt bepaald door het gedetecteerde tijdsverschil in beide detectoren. Het signaal wordt gesampled met een frequentie van 400MHz. Tijdsverschillen worden dus gemeten in stapjes van 2,5ns. De straal in figuur 3 neemt ook in stappen toe. We kunnen nu bepalen uit welke, vrij brede, band aan de hemel de straling afkomstig is.

5 Meetfouten

Binnen een meetstation worden er diverse meetfouten gemaakt. De inslag van een kosmisch deeltje op de scintillator plaat is niet bekend. De afstand van de inslag tot de PMT is dus ook niet bekend. Bij voldoende detecties zal deze

fout echter uitgemiddeld worden. Er is dus sprake van een stochastische fout. De nauwkeurigheid van de metingen neemt iets af, de waarde blijft gelijk. Een tweede fout die gemaakt wordt zit in de looptijd van de elektronen door de PMT's. Deze looptijd hangt af van de spanning over de PMT's en is constant. Voor deze systematische fout is te corrigeren als we uitgaan van een isotrope verdeling van de kosmische straling. Gemiddeld komt alle straling van boven. Tijdsverschillen tussen de detectoren zijn op deze wijze te corrigeren. De tijden worden door middel van GPS-klokken binnen het gehele netwerk gemeten. Deze tijden hangen af van het aantal zichtbare satellieten aan de hemel. De locatie van de GPS-antenne is evenals de locatie van de detectoren van belang. Een kaart van het station is dus van belang.

6 De Aarde en de hemel

Als de Aarde stilstond ten opzicht van de hemel, hield het verhaal hier op. Gelukkig draait de Aarde iedere dag ten opzicht van de zon een rondje rond haar as. Onze detectoren doen dat dus ook. Omdat de afstand tot de Noordpool voor onze detectoren veel kleiner is dan de afstand tot de evenaar, kijkt HiSPARC redelijk goed in de richting van de Poolster. Iedere 6 uur draaien de detectoren 90° ten opzicht van de Zon.

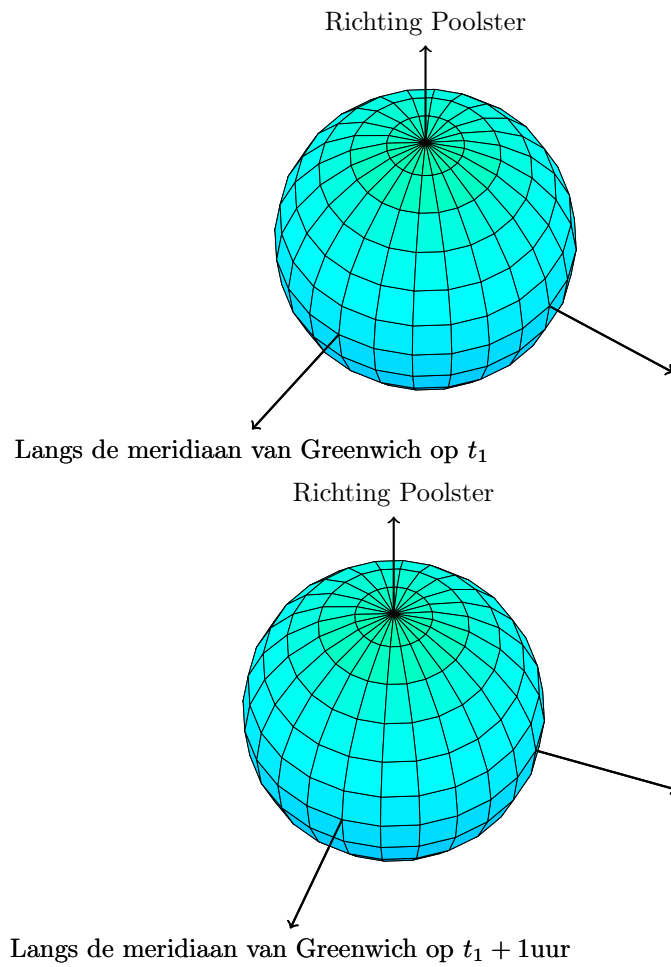
Om een hemelkaart te maken, hebben we echter niet de draaiing ten opzichte van de zon nodig, maar de draaiing ten opzichte van de sterren. Naast de zonnetijd, zoals wij die kennen, bestaat er ook een sterren- of siderale tijd. De omzetting van zonnetijd naar sterrentijd is te bepalen als we weten dat de omlooptijd van de Aarde ongeveer 365,25 zonnedagen is. In deze tijd draait de Aarde ook een extra rondje rond de Zon (ten opzichte van de sterren): 365,25 zonnedagen \approx 366,25 sterrendagen.

De plaats van een hemellichaam is aan te duiden met de Rechte Klimming en de Declinatie. De Rechte Klimming is uit te drukken in een uurhoek, de (lokale) sterrentijd waarbij een hemellichaam in transitie is. Het hemellichaam gaat dan van de oostelijke hemel naar de westelijke hemel. Per definitie is het siderale tijdstip waarop de zon door het equatoriaal vlak (van de zuidelijke naar de noordelijke sterrenhemel) gaat 0 uur. De Declinatie is de hoek tussen het equatoriaal vlak en het hemellichaam.

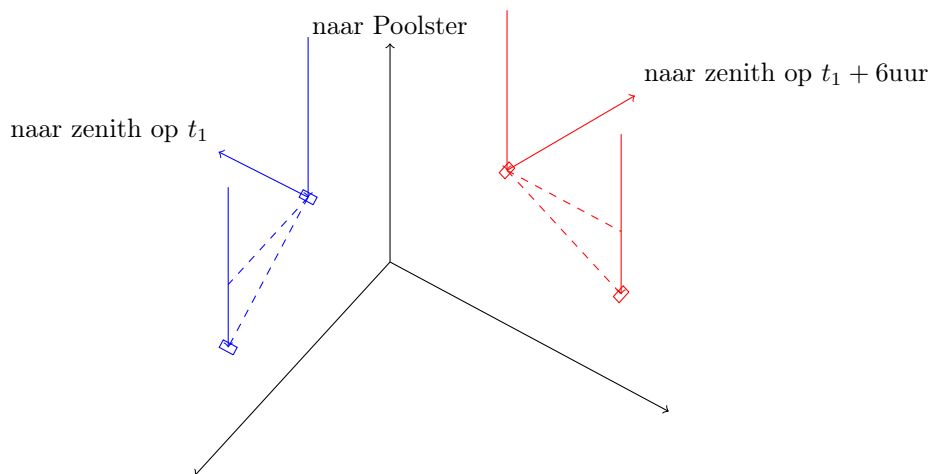
Omdat de Aarde in 26000 jaar een rondje draait, verandert de positie van punten aan de hemel uitgedrukt in Rechte Klimming en Declinatie langzaam. Dit is veel langer dan de periode waarin HiSPARC metingen doet.

7 De meetmethode voor de sterrenkaart

Laten we aannemen dat er een bron voor kosmische straling aan de hemel staat. Bij een station met twee detectoren is de bron te herkennen aan extra straling bij een zeker tijdsverschil. Zoals is besproken is dit tijdsverschil een maat voor



Figuur 6: De Aarde op twee verschillende tijdstippen. (De Aarde draait 15° per uur.)



Figuur 7: Deeltjes afkomstig van een bron (hier de Poolster) aan de hemel raken een meetstation op de tijdstippen t_1 (blauw) en $t_1 + 6$ uur (rood)

de hoek tussen de as door de detectoren en de richting van de gedetecteerde deeltjes. Omdat de detectoren op Aarde staan draait de as van de detectoren met de Aarde mee.

In figuur 7 is een station op twee tijdstippen afgebeeld. In dit geval zijn de detectoren langs een meridiaan opgesteld. Het zenith van het station draait ook met de Aarde mee. Zoals in de figuren 3 en 5 te zien is, kunnen de zenith hoeken nu langs twee snijdende vlakken worden bepaald. De plaats van de bron aan de hemel is hiermee te reconstrueren, deze ligt op de snijlijn van de twee vlakken.

8 De verwerking van meetgegevens

Op <http://www.hisparc.nl/hisparc-data/> is te vinden hoe data met de HiSPARC-API op te halen is. Hier is ook een link naar de documentatie (Engels) te vinden. Met deze informatie is deze data in javascript te verwerken.

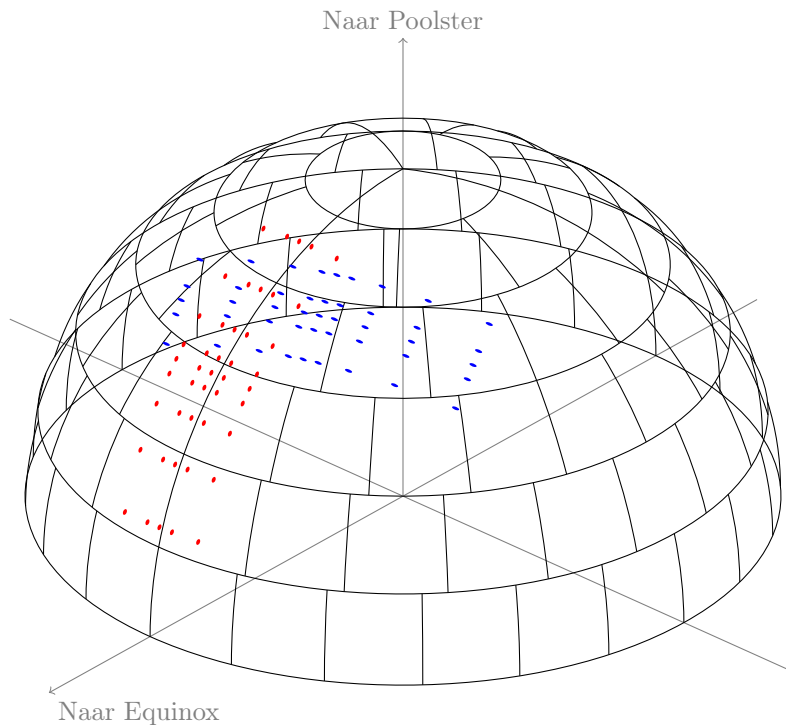
Een veel gebruikte methode voor het verwerken van grote hoeveelheden data is het "binnen". Deze methode is te beschouwen als een verzameling virtuele vuilnisbakken (vandaar de naam "bin"). We vullen de noordelijke hemel met bins. In figuur 8 hebben alle bins een even groot oppervlak. Dit vereenvoudigt de interpretatie¹.

$$\Omega = 2\pi (1 - \sin(\delta)) \quad (7)$$

¹De nauwkeurigheid van een HiSPARC station is overigens zo hoog dat de breedte en hoogte van de bins ongeveer drie maal zo klein genomen kunnen worden.

De bin-grootte kan worden berekend door de ruimtehoek Ω voor ringen met bins te bepalen. De ringen zijn begrenst door de declinatie δ . Iedere bin in een ring krijgt dezelfde ruimtehoek Ω_{bin} . In dit geval zijn er ringen met 3, 9, 15, 20, 22 en 24 bins. De noordelijke hemel is verdeeld in 93 bins, dit geeft $2\pi = 93\Omega_{bin}$. De bijbehorende hoeken δ zijn nu te berekenen omdat de declinatie ook als functie van de ruimtehoek is te schrijven:

$$\delta = \arcsin\left(1 - \frac{\Omega}{2\pi}\right) \quad (8)$$



Figuur 8: Het binnen van de noordelijke hemel. Op de hemel zijn de mogelijke bronnen voor een detectie zoals in figuur 7 afgebeeld. In de praktijk meet het station gedurende de hele dag en zullen er veel meer events in de bins worden geladen.

Naast de HiSPARC-API is de HiSPARC module Sapphire te gebruiken. Deze documentatie is te vinden op <http://docs.hisparc.nl/sapphire/>. Naast javascript gebruikt HiSPARC Python. De installatie van Python is ook in deze documentatie beschreven. Python beschikt over een veelheid aan modules, zoals matplotlib voor grafieken, numpy voor wiskundige bewerkingen, scipy voor wetenschappelijke bewerkingen etc. Het is aan te bevelen om in ieder geval even naar Python te kijken.

In figuur 7 is te zien hoe de straling van een bron op verschillende tijdstippen wordt waargenomen. De "scherpte" van de kosmische straling telescoop draait met de Aarde mee. We verdelen de kans op een detectie over het geheel gebied wat wordt waargenomen. In dit geval wordt de meting verdeeld in 45 mogelijke bronnen. Als de kans kleiner wordt, neemt het aantal mogelijke bronnen per bin af. Er ontstaat bij de randen van de bins wat sample ruis. Deze kan worden onderdrukt door een random waarde aan de plaats van de bin toe te voegen of door twee aparte definities voor de binning te gebruiken. Beide binnings moeten dan geen overlap in de bin-grenzen hebben.

9 Conclusie

Met een enkel station met twee detectoren is het mogelijk om een kaart van de sterrenhemel te maken als:

- De plaats van de detectoren bekend is.
- Bekend is welk deel van de hemel door een detector gemeten wordt.
- Wat de "scherpte" van de detector in de richting van de as door de detectoren is.
- Met de "scherpte" langs de as van de detectoren, is de scherpte loodrecht op deze as te bepalen.
- De metingen kunnen opgevraagd worden (zie het recept van David Fokkema).
- Tot slot moet een programma voor het binnen van de meetresultaten worden geschreven.

Bij elkaar is dit een project voor meerdere jaren.