

[HiSPARC: Kosmische Straling]

Naam..... Kevin Choi

Klas..... vwo 6

Begeleider..... L. Verstrijden

Inleverdatum..... 17-3-2014

Afbeelding..... (Smithsonian Science)



SAMENVATTING

De ontdekking van kosmische straling was te danken aan het verschijnsel dat een elektroscop 'uit zichzelf' ontladde. Het feit dat straling uit de ruimte kan komen, werd door Victor Franz Hess bevestigd toen hij in 1911 en 1912 een ballonvaart maakte. Het resultaat was dat vanaf een bepaalde hoogte het aantal ionisaties toenam. Aanvankelijk vermoedde men dat de gedetecteerde straling uitsluitend gammastraling kon zijn, omdat andere deeltjes niet door de dampkring kunnen. Later bleek dat de kaarten anders lagen. Het ging om atoomkernen, vooral waterstofkernen, waaruit nieuwe deeltjes ontstaan als de atoomkernen botsen tegen de atmosfeer. Deze nieuwe deeltjes vormen een airshower en zijn ontstaan uit een primair deeltje.

Straling bestaat uit elementaire deeltjes die in het standaardmodel wordt beschreven. Deze kan men onderverdelen in fermionen, deeltjes met een halfvullige spin, en bosonen, deeltjes met een heeltvullige spin. Tot de fermionen behoren onder meer de leptonen en de quarks. Fotonen, gluonen, W- en Z-bosonen zijn elementaire deeltjes die een fundamentele kracht dragen. Deze krachten zijn respectievelijk de elektromagnetische kracht, de sterke kernkracht en de zwakke kernkracht.

Reacties tussen elementaire deeltjes moeten voldoen aan een aantal behoudswetten. Een deel daarvan komt overeen met de behoudswetten in de klassieke mechanica en de scheikunde, namelijk de wet behoud van energie, impuls en lading. Andere wetten zijn de wet behoud van quark- en leptongetal en, bij quarks, de wet behoud van kleurlading. Er is geen wet behoud van massa, omdat in de kwantummechanica sprake is van equivalentie van massa en energie. Dit wordt beschreven in de beroemde formule van Albert Einstein.

Indertijd werd onderzoek verricht naar elementaire deeltjes door middel van deeltjesversnellers. Sinds de ontwikkeling van het GPS en internet is het gemakkelijker geworden om onderzoek te doen naar kosmische straling. Het HiSPARC-project maakt ook gebruik van deze technieken.

Het HiSPARC-project maakt gebruik van scintillatoren om deeltjes te kunnen detecteren. Als er door twee detectoren gelijktijdig een deeltje wordt geregistreerd, dan spreekt men van event of coïncidentie. Men veronderstelt dat deze deeltjes van dezelfde airshower komen. Alle gegevens van de events, zoals de tijdstempel of het aantal MIP's, worden in een online database opgeslagen. Deze kan men onder meer ophalen door middel van een API of het downloadformulier.

De energie van een primair deeltje is van verschillende factoren afhankelijk. Vooral het aantal MIP's en de hoek die kosmische straling maakt als ze door de detector gaat hebben een grote invloed. Om deze hoek te berekenen, moet men de relatieve posities van de detectoren en de verschillen tussen de aankomsttijden bepalen.

VOORWOORD

Mijn definitieve onderwerp is kosmische straling. Ik ga hierbij meedoen aan een project op het Sint-Joriscollege genaamd HiSPARC (High-School Project on Astrophysics Research with Cosmics). Dit project is geïnitieerd door Nikhef (Nationaal instituut voor subatomaire fysica). In dit project ga ik onderzoek verrichten naar verschillende aspecten van kosmische straling, zoals de oorsprong en de invloed op Aarde.

Ik heb voor dit onderwerp gekozen om verschillende redenen. Ten eerste om een beetje ervaring op te doen met onderzoeken. Ik heb nog nooit een degelijk praktisch natuurkundig onderzoek gedaan en het lijkt mij leuk om eens iets te doen wat ik normaal niet zal doen. Ten tweede is het andere stof dan die ik op school krijg. Met dit project ga ik me bezighouden met kwantumfysica. Voor het eindexamen hoeft men slechts een aantal basisprincipes te kennen. Ik zou me graag meer in kwantumfysica verdiepen. Ten derde lijkt dit project mij veel uitdagender dan de stof die ik op school krijg. De natuurkundestof die ik krijg, is overwegend gemakkelijk voor mij. Kosmische straling is een relatief moeilijk onderwerp en ik denk dat zoiets beter bij mij past.

HOOFD- EN DEELVRAGEN

Hoofdvraag:

Welke invloed heeft kosmische straling op de verschijnselen op de Aarde?

Deelvragen:

- *Welke ontdekkingen zijn er gedaan omtrent kosmische straling?*
- *Welke (evenwichts)wetten zijn er voor kosmische deeltjes?*
- *Wat is het standaardmodel?*
- *Welke toepassingen omtrent kosmische straling zijn er?*
- *Hoe analyseert men kosmische straling?*
- *Hoe bepaalt men de primaire energie?*

Hypothesen:

De eerste vijf deelvragen worden beantwoord door middel van literair onderzoek. Hierbij is een hypothese niet nodig, omdat er geen experimenten worden verricht.

Bij de zesde deelvraag luidt de hypothese: "De energie van een airshower is vooral afhankelijk van de hoek van inval en de deeltjesdichtheid."

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting.....	2
Voorwoord	3
Hoofd- en deelvragen.....	4
Hoofdvraag:.....	4
Deelvragen:	4
Hypothesen:	4
Hoofdstuk 1.....	8
De elektronvolt en eV/c^2	8
Welke deeltjes zijn er?	9
Leptonen	9
Quarks	10
Krachtdeltjes (Bosonen)	10
De geschiedenis van kosmische straling.....	11
De ontdekking.....	11
Airshowers	12
Zonnewind.....	12
De flux van kosmische deeltjes.....	13
Energiespectrum	13
Het magnetisch veld in de Melkweg	14
De knie, de enkel en de cutoff.....	15
Samenstelling kosmische straling	16
Hoofdstuk 2.....	18
Behoudswetten in de klassieke mechanica en scheikunde	18
Energie en impuls.....	18
Massa en elektrische lading	19
Het verval van deeltjes	19
α -verval.....	20
β -verval.....	20
γ -verval.....	21
Creatie en annihilatie	21
Massa is energie en energie heeft massa.....	22

Behoudswetten van leptongetal en quarkgetal	24
De elektromagnetische kracht.....	24
Hadronen en gluonen.....	25
Behoud van kleurlading.....	26
De sterke kernkracht	27
Hoofdstuk 3.....	29
De krachtdeeltjes	29
Deeltjesprocessen.....	30
De elektromagnetische kracht	31
De sterke kernkracht	31
De zwakke kernkracht.....	32
Onbeantwoorde vragen over het standaardmodel	33
Hoofdstuk 4.....	35
Kernenergie	35
Kernsplijting.....	35
Kernfusie.....	36
Voordelen en nadelen.....	37
Deeltjesversnellers.....	37
Beeldbuis	38
LEP.....	39
Tevatron.....	39
LHC.....	39
Detectie.....	39
GM-teller	40
Nevelvat en bellenvat	40
Fluorescentie.....	41
Hoofdstuk 5.....	42
De detectoren	42
Elektronica	42
De fotoversterkerbuis.....	43
GPS.....	45
De software	46
Python	46
API.....	47

Downloadformulier	49
Hoofdstuk 6.....	53
Theorie.....	53
Coördinaten van detectoren	53
Hoeken van detectoren	62
Energiebepaling	67
Verwerking in Python	71
Het pythonbestand	71
De invoer	75
Verwerking.....	76
Uitvoer	77
Conclusies	79
Toevoegen aan eindschrift	80
SAPPHiRE.....	80
Het eindschrift.....	81
Histogrammen	90
Tekortkomingen	90
Conclusie	91
Conclusie: beantwoording van de hoofdvraag.....	92
Evaluatie	94
Bibliografie.....	95
Bijlage: Logboek.....	98

HOOFDSTUK 1

*Van oudsher onderzochten natuurkundigen de wisselwerking van de kleinste deeltjes die er bestaan. Met andere woorden, kwantumfysica. Prominente iconen uit de natuurkundewereld als Henri Becquerel, het echtpaar Pierre en Marie Curie en Ernst Rutherford deden in de 19e eeuw veel onderzoek naar het fenomeen radioactiviteit. In dit hoofdstuk wordt het antwoord gegeven op de vraag: **welke ontdekkingen zijn er gedaan omtrent kosmische straling?***

De elektronvolt en eV/c^2

Omdat men in de kwantumfysica rekent met nogal kleine massa's, is het niet erg handig om het uit te drukken in kilogram (kg). Dit geldt ook voor energie, die normaal uitgedrukt wordt in Joule (J). Voor deze twee grootheden hanteert men daarom andere eenheden dan kg en J: de elektronvolt (eV) bij energie en elektronvolt per lichtsnelheid kwadraat (eV/c^2) bij massa.

De eenheid eV kan men herleiden uit de formule¹:

$$E = qV$$

E is de energie in J, q is de lading in C (coulomb) en V is de spanning in V (volt). Als men het heeft over de lading van deeltjes, dan gaat het echter om een zeer klein getal: $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Dit getal is het elementaire ladingskwantum en daarmee wordt de lading van één elektron in coulomb bedoeld.

Een kleine waarde van q geeft een kleine waarde van E . Daarom wordt de energie van deeltjes uitgedrukt in elektronvolt. Oftewel, de hoeveelheid energie die wordt omgezet wanneer één elektron een potentiaalverschil van 1 volt doorloopt. 1 eV is dus:

$$E = qV = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

De massa in eV/c^2 kan men in kg herleiden door middel van Einsteins beroemde formule:

$$E = mc^2$$

E is de energie in J, m is de massa in kg en de c is de lichtsnelheid in m/s (meter per seconde). De lichtsnelheid in vacuüm wordt beschouwd als een natuurconstante en is per definitie exact 2,99792458. Deze waarde wordt vaak afgerond tot $3,0 \cdot 10^8$ m/s.

Door de energie van 1 eV uitgedrukt in J in te vullen in E , krijgt men:

¹ Deze formule wordt tevens gebruikt om te bepalen hoeveel energie wordt omgezet in een geladen deeltje dat door een elektrisch veld gaat. De E is in dat geval de W van arbeid.

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{(3,0 \cdot 10^8)^2} = 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Hoewel men in de kwantumfysica het over deeltjes met een kleine massa en lading heeft, gaat het bij kosmische straling om hoogenergetische deeltjes. Daarom worden energie en massa doorgaans uitgedrukt in respectievelijk MeV en MeV/c². In sommige gevallen wordt het voorvoegsel 'giga-' gebruikt, indien de energie of massa nog hoger is (Liempt, 2010).

Welke deeltjes zijn er?

Net als in de taxonomie kan men in de kwantumfysica alle mogelijke deeltjes ordenen. Alle deeltjes worden onderverdeeld in fermionen (materiedeeltjes) en bosonen (krachtedeeltjes). Fermionen kunnen weer onderverdeeld worden in leptonen en quarks. Fermionen moeten voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Pauli (ze voldoen immers aan de Fermi-Dirac statistieken). Dit betekent dat twee fermionen met dezelfde energie op dezelfde plek op hetzelfde moment zich niet in dezelfde kwantumtoestand kunnen bevinden. Minstens één kwantum eigenschap zoals de spin moet verschillen. Bosonen daarentegen hoeven daar niet aan te voldoen.

Een kenmerkend verschil tussen fermionen en bosonen is dat fermionen een halftallige spin (1/2, 3/2, 5/2, etc.) hebben, terwijl bosonen een heeltallige (1, 2, 3, etc.) spin hebben. Omdat fermionen moeten voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Pauli, zijn ze 'hard' en vormen ze materie, terwijl bosonen door elkaar heen kunnen kruisen en dus 'zacht' zijn. (Vissers, 2012)

Leptonen

Een atoom, zoals men in de scheikundeles leert, bestaat uit protonen, elektronen en neutronen. Dit zijn echter niet de enige deeltjes die in ons universum bestaan. Door de ontdekking van onder meer de positronen en muonen blijkt dat elektronen familie hebben. In **tabel 1** staat de familie van de leptonen.

lading	generatie I	generatie II	generatie III
-1 e	elektron e ⁻ 0,5	muon μ ⁻ 106	tauon τ ⁻ 1777
0 e	elektronneutrino ν _e ~0	muonneutrino ν _μ ~0	tauonneutrino ν _τ ~0
0 e	anti-elektronneutrino ν̄ _e ~0	anti-muonneutrino ν̄ _μ ~0	anti-taonneutrino ν̄ _τ ~0
+1 e	positron e ⁺ 0,5	anti-muon μ ⁺ 106	anti-tauon τ ⁺ 1777

tabel 1: leptonen

In de tabel staat onder de naam het symbool en daaronder de massa in MeV/c^2 . In deze tabel blijkt dat elektronen zwaardere varianten hebben: het muon en het tauon. Daarnaast heeft ieder deeltje een antideeltje. Antideeltjes hebben dezelfde massa als hun gewone deeltjes, maar de lading is tegengesteld. Ten slotte zijn er neutrino's die elk eveneens een antideeltje hebben. Neutrino's zijn ongeladen en hebben vrijwel geen massa. (Vissers, 2012; Liempt, 2010)

Quarks

In de kern van atomen zitten protonen en neutronen. Zij hebben een massa van respectievelijk $938 \text{ MeV}/c^2$ en $940 \text{ MeV}/c^2$ en zijn dus veel zwaarder dan elektronen. Het is gebleken dat protonen en neutronen niet uit leptonen bestaan, maar uit quarks. In **tabel 2** staan de quarks.

lading	generatie I	generatie II	generatie III
$+\frac{2}{3} e$	up u 3	charm c 1700	top t 173.000
$-\frac{1}{3} e$	down d 5	strange s 100	bottom b 4800
$+\frac{2}{3} e$	antidown $\bar{d}$ 5	antistrange $\bar{s}$ 100	antibottom $\bar{b}$ 4800
$-\frac{2}{3} e$	anti-up $\bar{u}$ 3	anticharm $\bar{c}$ 1700	antitop $\bar{t}$ 173.000

tabel 2: quarks

De indeling bij quarks komt ongeveer op hetzelfde neer als bij leptonen. In de tabel staan twee quarks centraal: de up-quark en de down-quark. Deze hebben beide twee zwaardere varianten. Deze zijn echter in het huidige heelal uitgestorven, maar ze kunnen tijdelijk ontstaan in airshowers en bij botsingen tussen hoogenergetische deeltjes. Deze 6 quarks samen worden ook wel smaken genoemd. Tot slot hebben quarks ieder een eigen antideeltje met dezelfde massa, maar tegengestelde lading net als bij leptonen.

Quarks komen alleen samengesteld voor. De lading in e moet opgeteld altijd gelijk zijn aan een geheel getal. Protonen bestaan bijvoorbeeld uit uud en neutronen bestaan uit udd . Hierdoor hebben protonen een lading van $+1 e$ en hebben neutronen geen lading. (Vissers, 2012; Liempt, 2010)

Krachtdeeltjes (Bosonen)

Naast leptonen en quarks bestaan er krachtdeeltjes zoals het foton (γ). Fotonen hebben geen massa en kunnen alleen met de lichtsnelheid bewegen. Daarnaast hebben ze een bijzondere rol bij interacties. Fotonen dragen immers een van de 4 fundamentele natuurkrachten: de elektromagnetische kracht. Krachtdeeltjes voldoen immers aan Bose-Einsteinstatistiek, waardoor ze bijzondere eigenschappen hebben. Meer over fotonen

wordt uitgelegd in hoofdstuk 2 en meer over krachtdeeltjes wordt in hoofdstuk 3 uitgelegd.

Bosonen kunnen ook samengesteld voorkomen. Technisch gezien vormt een even aantal fermionen een boson, omdat de halftallige spin van de fermionen opgeteld een heeltallige spin is. Mesonen zijn deeltjes die bestaan uit twee quarks en zijn dus een voorbeeld van een samengesteld boson. Ook atoomkernen met een even massagetal behoren daartoe, omdat zowel protonen als neutronen bestaan uit drie quarks (baryonen). In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op quarks. (Vissers, 2012; Liempt, 2010)

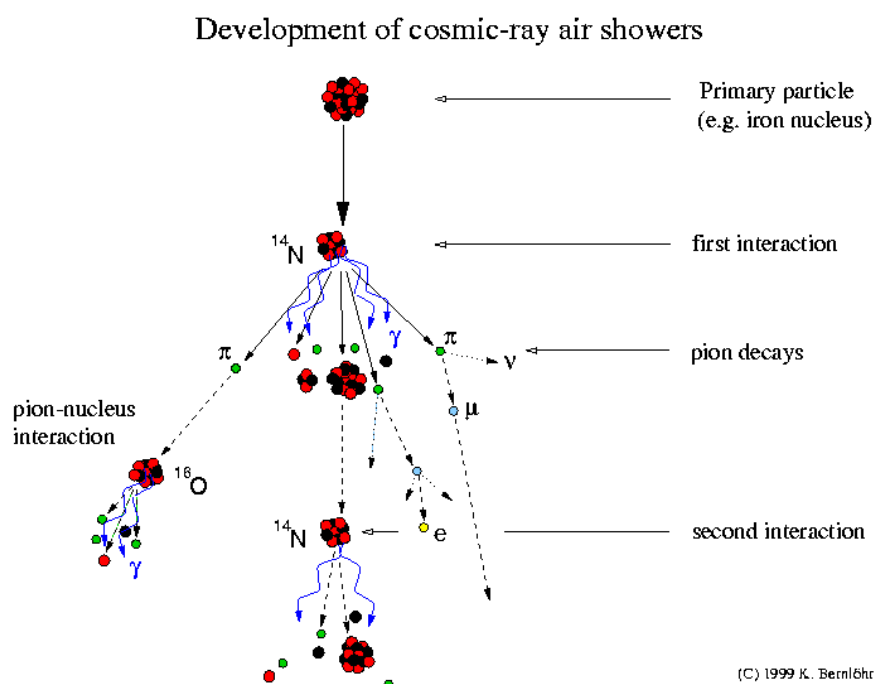
De geschiedenis van kosmische straling

De ontdekking van kosmische straling was net als bij vele ontdekkingen puur toeval. De ontdekking begon met elektroscopen (zie [afbeelding 2](#)) die niet helemaal functioneerden zoals men dacht. Tegenwoordig is men volop bezig met het verzinnen van toepassingen met betrekking tot straling. (Liempt, 2010; Streeter)



De ontdekking

Meer dan 100 jaar geleden gebruikte men elektroscopen om elektrische lading aan te tonen. Wanneer er een positief geladen voorwerp bij de bol van de elektroscop gehouden wordt, zullen de bladen uitslaan. Dit komt omdat de elektronen in de bladen naar de positieve staaf gaan. Hierdoor worden de bladen positief geladen en gaan ze door het feit dat gelijke ladingen elkaar afstoten uitslaan. **afbeelding 2: elektroscop**



afbeelding 1: ontwikkeling van een airshower

Wat men destijds echter niet begreep, was dat de bladen op een gegeven ogenblik hun lading verliezen. Dit verschijnsel werd verklaard, toen men begreep dat het kwam door ionen in de lucht. Men ging daardoor met verbeterde elektroscopen onderzoek verrichten naar ioniserende straling, straling die voldoende energetisch is om een elektron uit de buitenste schil van een atoom weg te slaan. In 1907 bouwde de Duitse natuurkundige Theodor Wulf² een zeer nauwkeurige elektroscop waarmee men kon aantonen dat de straling afnam als men verder van het aardoppervlak verwijderd was, zoals destijds werd verondersteld. In 1910 beklom Wulf met de elektroscop de Eiffeltoren om dat aan te tonen, maar de afname was veel minder dan men dacht. Om die reden maakte de Oostenrijkse Victor Franz Hess in 1911 en 1912 een ballonvlucht om de straling bij grotere hoogtes te meten. Hij kwam tot de ontdekking dat de intensiteit van ioniserende straling toenam vanaf een bepaalde hoogte, latere metingen bevestigden dit. Zo ontdekte men kosmische straling, straling die uit de ruimte komt. (Liempt, 2010; Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012),

Airshowers

Hess ontdekte dat de intensiteit van ioniserende straling toenam naarmate hij verder van het aardoppervlak opsteeg. Met dit verschijnsel veronderstelde hij dat er straling van buitenaf de Aarde bereikte. Men wist echter niet waaruit die straling bestond. Inder tijd wist men van het bestaan van alfa-, bèta- en gammastraling af. Men vermoedde dat de gemeten straling enkel gammastraling kon zijn, omdat alfa- en bètastraling onmogelijk door de dikke atmosfeer van de aarde zouden kunnen dringen. Dertig jaar later ontdekte de Franse natuurkundige Pierre Auger dat de kaarten anders lagen. De straling die de aardbodem bereikt, is helemaal niet de kosmische straling zelf. Het is een lawine van geladen deeltjes en fotonen die ontstaan doordat kosmische straling in de dampkring terechtkomt. Tegenwoordig wordt een dergelijke lawine een airshower genoemd.

Door veel onderzoek naar airshowers ontdekte de Amerikaanse astrofysicus Carl Anderson deeltjes die nooit eerder zijn waargenomen (zie **afbeelding 1**). In 1932 ontdekte hij het bestaan van positronen, het antideeltje van het elektron, en in 1936 ontdekte hij het bestaan van de muon, een zwaardere variant van het elektron. Rond die tijd vermoedde men ook dat er neutrino's zouden bestaan, hetgeen in 1956 indirect werd waargenomen. (Liempt, 2010; Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012)

Zonnewind

In 1927 maakte de Nederlandse natuurkundige Jacob Clay met zijn vrouw Tettje een bootreis naar Indonesië, wat toen tevens de enige manier was om daar te komen. Tijdens deze reis namen hij en zijn vrouw een goede elektroscop mee om op verschillende plaatsen de intensiteit van straling te meten. Zij ontdekten dat het aantal ionisaties minder werd, naargelang ze dich-



afbeelding 3: poollicht

² Theodor Wulf was tevens een jezuïetenprater. Hij was op het moment dat hij de elektroscop bouwde als leraar werkzaam in het Limburgse Valkenburg. (Wikipedia)

ter bij de evenaar kwamen. Dit gold zowel voor het Noordelijk als voor het Zuidelijk Halfrond. Het echtpaar concludeerde dat kosmische straling geladen moest zijn en afgebogen werd door het magnetische veld van de aarde. Nader onderzoek wees uit dat er een verband was tussen aantal ionisaties en de activiteit van de zon. Men begon ook te begrijpen dat Poollicht (zie [afbeelding 3](#)) vergelijkbaar was met licht dat ontstaat als er een bundel elektronen door een bepaald gas gaat.

Sinds het bestaan van de ruimtevaart kan men tevens in of buiten de dampkring metingen verrichten. In 1958 ontdekte men dat er zogenaamde 'schillen' van elektrisch geladen deeltjes bestaan, die tussen de magnetische polen van de aarde op en neer gaan.

Tegenwoordig zijn er veel satellieten, zoals SOHO (Solar & Heliospheric Observatory), die de zon permanent observeren. Op de zon worden soms hevige uitbarstingen waargenomen. Zulke uitbarstingen waarbij protonen en elektronen met snelheden tussen de $3 \cdot 10^5$ en $4 \cdot 10^5$ m/s worden uitgestoten, worden ook wel zonnewinden genoemd. Het merendeel van de kosmische straling dat de aarde bereikt, komt van de zon. De energie van deze straling is echter veel lager dan de straling die van verre supernova's komt. (Liempt, 2010; Broms, 2014)

De flux van kosmische deeltjes

Een maat voor de hoeveelheid straling in een bepaalde tijd is de flux. Het symbool van de flux is de hoofdletter Φ uit het Griekse alfabet. De formule voor de flux luidt:

$$\Phi = \frac{N}{\Delta t}$$

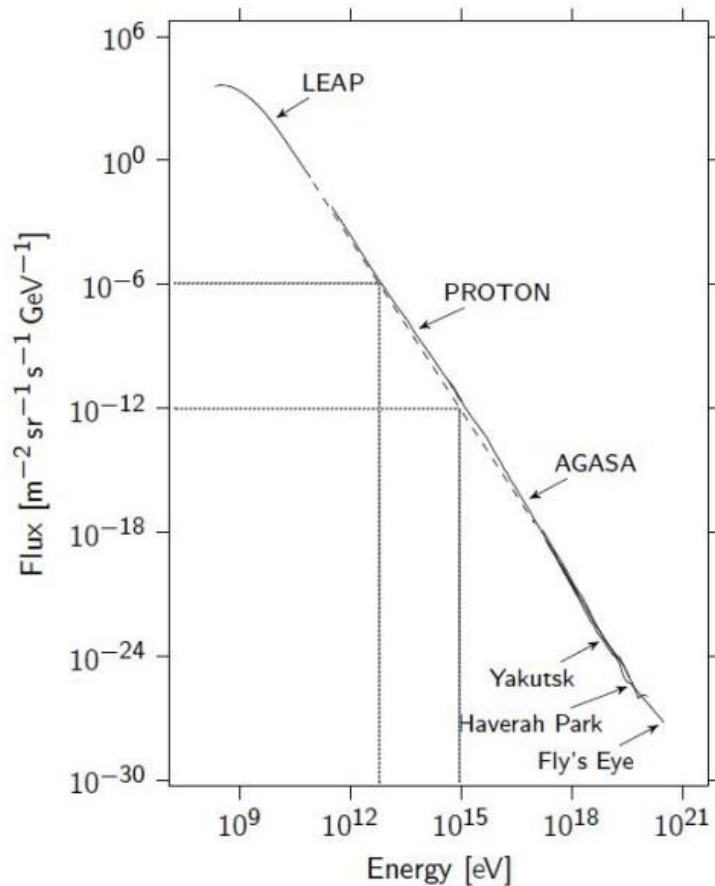
Meestal wordt er gerekend met de flux per vierkante meter. Dit noemt men de fluxdichtheid, die te berekenen is met de volgende formule:

$$\text{fluxdichtheid} = \frac{\Phi}{A}$$

(Liempt, 2010)

Energiespectrum

In [afbeelding 4](#) is het energiespectrum van kosmische straling op aarde te zien. Deeltjes van de zon vallen door hun lage energie dikwijls buiten dit spectrum.



afbeelding 4: het energiespectrum van kosmische straling

Het energiespectrum van kosmische straling geeft, behalve bij een energie onder de 10^{10} eV, de volgende machtswet:

$$F(E) \sim E^{-\gamma}$$

Waarbij γ de spectraalindex is.

In **afbeelding 4** is te zien dat bij een fluxafname van 10^6 , oftewel een toename van 10^{-6} , de energie met ongeveer 10^2 toeneemt. Met dit gegeven kan γ worden bepaald:

$$10^{-6} \sim (10^2)^{-\gamma}$$

$$-2\gamma \sim -6$$

$$\gamma \sim 3$$

Dit is echter een grove benadering van γ . Doorgaans bedraagt de spectraalindex ongeveer 2,7. (Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012; Eijk, 2012)

Het magneetveld in de Melkweg

Het magneetveld in de Melkweg speelt een belangrijke rol in het magnetische spectrum van kosmische straling. Hoe dat in elkaar zit, wordt later in het verslag duidelijk ge-

maakt. Geladen kosmische deeltjes worden door het magneetveld afgebogen, waarbij de volgende formule geldt:

$$R = \frac{E}{qBc}$$

Waarbij:

- R , de Larmorstraal. Geladen deeltjes leggen immers een cirkelvormig pad af;
- B , de magnetische inductie. In de Melkweg heerst een magnetische inductie van ongeveer $3 \times 10^{-10} \text{ T}^3$.

Deze formule kan men afleiden aan de hand van de formule van de lorentzkracht en van de middelpuntzoekende kracht. Deze zijn immers gelijk aan elkaar, aangezien de richting van de lorentzkracht loodrecht op de bewegingsrichting staat:

$$F_{mpz} = F_{lor}$$

$$\frac{mv^2}{R} = qBv$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Deze formule geldt echter alleen bij kleine snelheden. Kosmische deeltjes reizen met (vrijwel) de lichtsnelheid door het heelal. Men moet bij hoge snelheden rekening houden dat massa energie is, hetgeen in hoofdstuk 2 bij de paragraaf 'massa is energie en energie heeft massa' nader wordt uitgelegd. De massa moet door middel van de formule van Einstein gesubstitueerd worden:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

$$R = \frac{\frac{E}{c^2}c}{qB}$$

$$R = \frac{E}{qBc}$$

(Liempt, 2010)

De knie, de enkel en de cutoff

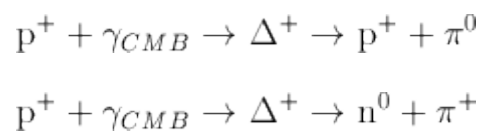
In feite is de spectraalindex niet constant. Vanaf een energie van ongeveer $4 \times 10^{15} \text{ eV}$ loopt de lijn steiler en gaat de spectraalindex van 2,7 naar 3,1. Deze knik in de lijn wordt ook wel de 'knie' genoemd. De knie komt tot stand door het magneetveld in de Melkweg. In de formule van de Larmorstraal is te zien dat kosmische deeltjes minder afbuigen als

³ Tesla

hun energie groter wordt. Bij de knie is de energie dusdanig groot dat protonen weglekken uit de Melkweg. Met andere woorden het magnetisch veld niet sterk genoeg is om de protonen in de Melkweg te houden. Zwaardere kerndeeltjes van bijvoorbeeld helium of ijzer lekken niet weg doordat hun lading q groter is, maar als de energie verder toeneemt, kunnen ook deze kosmische deeltjes uit het magnetisch veld ontkomen. Men kan dus concluderen dat vanaf de knie de samenstelling van de kosmische straling langzamerhand verschuift van overwegend protonen naar overwegend ijzerkernen.

Bij $E = 1 \times 10^{18}$ eV neemt de spectraalindex weer af naar 2,7. Vanaf dit punt is namelijk het aandeel van extragalactische straling, kosmische straling waarvan de bron buiten ons Melkwegstelsel ligt, dominant.

Wat wetenschappers vooral bewonderen, is het feit dat er deeltjes met extreem veel energie voorkomen. Dergelijke deeltjes worden aangeduid met de naam 'ultra high energy cosmic rays' (UHECR) en hebben een maximale energie van ongeveer 10^{20} eV. In [afbeelding 4](#) is te zien dat bij deze waarde de grafiek eindigt en om die reden wordt dit een cutoff genoemd. De maximale energie van kosmische straling wordt tevens de GZK-limiet⁴ genoemd. Deeltjes die een energie hebben boven deze limiet interacteren immers met de zogenaamde 'cosmic microwave background' (CMB):



Deze reacties blijven plaatsvinden totdat de energie van de deeltjes is afgenomen onder de limiet. Dit wordt ook wel het GZK-effect genoemd. Er kan echter niet geconcludeerd worden dat het per definitie onmogelijk is dat er deeltjes in het Universum bestaan die een energie boven de GZK-limiet hebben. De kans daarentegen, dat men een dergelijk deeltje aantreft, is verwaarloosbaar klein. Als de bron van de straling zich binnen een straal van 50 Mpc⁵ bevindt, dan is het theoretisch mogelijk dat de primaire energie hoger is dan de GZK-limiet. Om een voorstelling te krijgen hoe groot dit is: de diameter van de Melkweg is slechts 35 kpc en de grootste afstand binnen onze Lokale Supercluster bedraagt 30 Mpc. (Eijk, 2012; Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012)

Samenstelling kosmische straling

Geladen kosmische deeltjes bestaan voornamelijk uit protonen (waterstofkernen) en alfadeeltjes (heliumkernen), die een aandeel hebben van respectievelijk 84% en 12%. Het overige deel van de samenstelling bestaat vooral uit zwaardere atoomkernen. Elektronen vormen minder dan 1% van de kosmische straling.

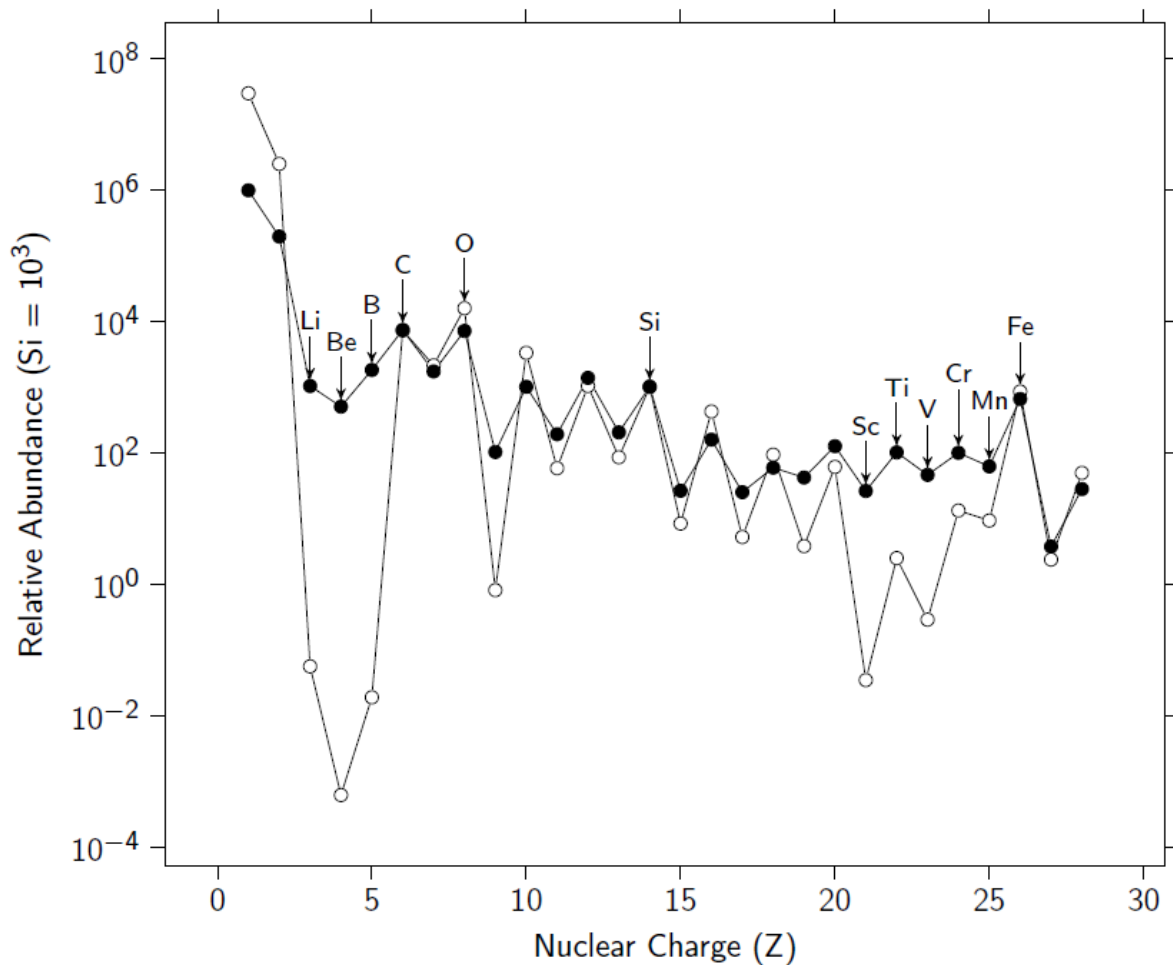
In [afbeelding 5](#) zijn de relatieve hoeveelheden van de elementen in het Zonnestelsel en in galactische kosmische straling weergegeven, waarbij die van silicium ingesteld is op 10^3 . Uit de afbeelding blijkt dat in de kosmische straling meer Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr en Mn voorkomt vergeleken met de elementen in het Zonnestelsel. Dit wordt veroorzaakt door

⁴ vernoemd naar Greisen, Zatsepin & Guzman

⁵ Eén parsec komt overeen met 3,261631 lichtjaar (Wikipedia).

spallatie, afsplintering van atoomkernen veroorzaakt door interacties met het interstellair medium (ISM). C en O splinteren af in Li, Be en B, en Fe in B, Sc, Ti, V, Cr en Mn.

In **afbeelding 5** valt tevens op dat elementen met een even atoomnummer vaker voorkomen dan die met een oneven atoomnummer. Dit heeft te maken met het feit dat atoomkernen met een even aantal kerndeeltjes⁶, dus bosonen, stabiel zijn dan deze met een oneven aantal kerndeeltjes. Vooral als het aantal kerndeeltjes een magisch getal is, 2, 8, 20, 28, 50, 82 of 126, is de kern zeer stabiel. (Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012)



afbeelding 5: de relatieve hoeveelheden van atoomkernen in het Zonnestelsel (open bolletjes) en in kosmische straling (zwarte bolletjes)

⁶ het aantal neutronen in een kern is meestal even

HOOFDSTUK 2

*Robert Milikan was een Amerikaans fysicus die in 1923 de Nobelprijs won voor het determineren van de landing van het elektron. Hij was tevens een religieus individu en geloofde dat een Opperwezen buiten de atmosfeer nieuwe atomen creëerde waarbij fotonen als kosmische straling vrijkomen. Deze veronderstelling bleef in de wetenschappelijke wereld niet lang in stand, maar als schrale troost voor Millikan ontstaan er wel nieuwe deeltjes wanneer kosmische straling door de dampkring gaat. Weliswaar zijn het geen atomen, maar wel positronen, muonen, et cetera. Bij reacties met (elementaire) deeltjes zijn er wel restricties. In dit hoofdstuk wordt het antwoord gegeven op de vraag: **welke (evenwichts)wetten zijn er voor kosmische deeltjes?***

Behoudswetten in de klassieke mechanica en scheikunde

Het aantal manieren waarop deeltjes kunnen vervallen is niet grenzeloos. Net als bij de klassieke mechanica en bij scheikunde moet het aan een aantal wetten voldoen. Sommige wetten in deze twee gebieden gelden ook bij het verval van deeltjes.

Energie en impuls

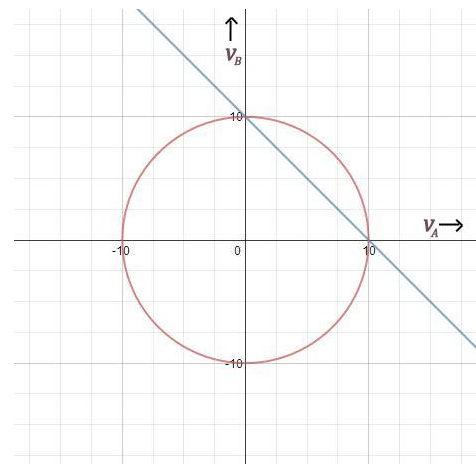
Een voorwerp kan niet ineens sneller gaan zonder dat er energie wordt toegevoegd. Net als bij het verval van kosmische straling geldt er de wet van behoud van energie. Bovendien blijft de impuls zowel bij de klassieke mechanica als bij het verval van deeltjes behouden.

Een voorbeeld: Op een pooltafel liggen twee biljartballen (A en B) met dezelfde massa. Bal A rolt met een snelheid van 10 m/s recht op bal 2 af die stil ligt. De wrijving die bij het rollen optreedt, mag verwaarloosd worden. De massa en de impuls blijven behouden dus:

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + \frac{1}{2}mv_B^2 = \text{constant} \wedge mv_A + mv_B = \text{constant}$$

De massa's kunnen worden weggestreepd en zodoende blijven de snelheden over. Wanneer men de huidige waarden van de snelheden invult, kunnen de constanten worden berekend:

$$v_A^2 + v_B^2 = 100 \wedge v_A + v_B = 10$$



afbeelding 6: v_a en v_b

In afbeelding 6 is grafisch weergegeven welke snelheden mogelijk zijn. De snijpunten van de 2 grafieken zijn de snelheden waaraan beide behoudswetten voldoen. Dit kan ook algebraïsch uitgerekend worden:

$$v_A^2 + v_B^2 = 100 \wedge v_A = 10 - v_B$$

$$(10 - v_B)^2 + v_B^2 = 100$$

$$100 - 2 \cdot 10 \cdot v_B + 2 \cdot v_B^2 = 100$$

$$2v_B(v_B - 10) = 0$$

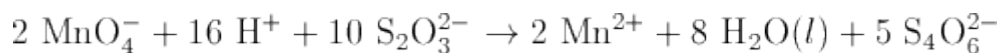
$$v_B = 0 \wedge v_A = 10 \vee v_B = 10 \wedge v_A = 0$$

Omdat biljartbal A niet door biljartbal B kan gaan, wat tevens de eerste wet van Newton impliceert, zal bal A na de botsing in rust zijn en zal bal B met 10 m/s in dezelfde richting als bal A voor de botsing verder rollen. (Liempt, 2010)

Massa en elektrische lading

Ook in de scheikunde is niet alles mogelijk. Men kan niet zomaar alles in goud veranderen, hetgeen de oude alchemisten trachtten te doen.

Een voorbeeld: wanneer men een thiosulfaat-oplossing titreert met een (aangezuurde) kaliumpermanganaat-oplossing, krijgt men de volgende reactie:



In deze reactie is de lading voor de reactie ($2 \cdot 1^- + 16 \cdot 1^+ + 10 \cdot 2^- = 6^-$) even groot als die na de reactie ($2 \cdot 2^+ + 5 \cdot 2^- = 6^-$). Bovendien is het aantal Mn'en (2), O's (38), H's (16) en S'en (20) voor de reactie even groot als het aantal na de reactie. Doordat ieder atoom een eigen massa heeft, blijft de massa bij deze reactie behouden. Net als bij de biljartballen blijft de energie behouden. Bij de bovenstaande redoxreactie zijn er 10 elektronen van de laagste standaardelektrodepotentiaal (+0,10 V) naar de hoogste standaardelektrodepotentiaal (+1,51 V) gegaan. De energie die vrijkomt bedraagt:

$$E = qV$$

$$E = 10 \cdot (1,51 - 0,10) = 14,1 \text{ eV} = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Deze energie komt in dit voorbeeld vrij als warmte en wordt daarom ook wel een exotherme reactie genoemd. Er zijn ook endotherme reacties, waarbij energie nodig is om deze plaats te laten vinden. (Liempt, 2010)

Het verval van deeltjes

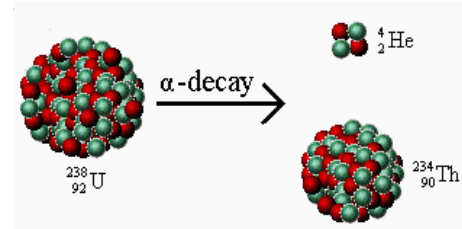
In de scheikunde blijven de atomen voor en na de reactie hetzelfde. Geldt dit ook in de natuurkunde wetten? Nee. Wat alchemisten lang geleden wilden proberen, is niet per

definitie onmogelijk, maar het kost veel moeite. Het is namelijk mogelijk om platina in goud te veranderen door een neutron om te zetten in een proton. Platina heeft immers een proton minder dan goud.

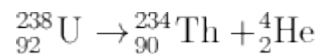
Bij het verval van atoomkernen bestaan er grofweg 3 verschillende vormen: alfa-, bèta- en gammaverval.

α-verval

Bij alfaverval zendt het te vervallen atoom een alfa-deeltje uit, dat niets anders is dan een heliumkern bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen. Als bijvoorbeeld een uraniumatoom, dat 92 protonen heeft, vervalt, ontstaat er een thoriumatoom, dat 90 protonen heeft. De reactievergelijking ziet er zo uit (zie ook afbeelding 7):



afbeelding 7: alfaverval



In deze reactie staat links bij ieder atoom 2 getallen. Het onderste getal is het atoomnummer (Z) dat gelijk is aan het aantal protonen in de kern. Het bovenste getal is het massagetal (A) dat gelijk is aan het aantal kerndeeltjes, dus het aantal protonen en neutronen. In de bovenstaande reactievergelijking is te zien dat het aantal protonen en neutronen – en dus ook het aantal kerndeeltjes – behouden is gebleven.

Merk op dat er bij een kernreactievergelijking de lading niet erbij staat. In feite ontstaat er Th^{2+} en He^{2+} , maar wanneer men enkel kijkt naar de samenstelling van de kern, zijn deze ladingen niet interessant. (Wikipedia; Liempt, 2010)

β-verval

Bij bètaverval zendt het te vervallen atoom een bètadeeltje uit, dat of een elektron of een positron kan zijn. Als bijvoorbeeld een cesiumatoom vervalt, krijgt men de volgende reactie:



Bij deze reactie is het aantal protonen met 1 toegenomen en het aantal neutronen met 1 afgenomen. Een wet van behoud van het aantal protonen en een wet van behoud van het aantal neutronen bestaat dus natuurkundig gezien niet. In deze reactie is het aantal kerndeeltjes behouden, maar ook dat hoeft niet constant te blijven. Waarom dat zo is, wordt uitgelegd in de paragraaf 'massa is energie en energie heeft massa'.

Wat minder duidelijk te zien is, maar wel klopt is dat de lading behouden blijft. Er is een proton meer, maar er is een elektron ontstaan die deze toename van lading opheft. Om dit gemakkelijker te zien, wordt een elektron in de reactievergelijking soms genoteerd als ${}_{-1}^0e$. Een elektron heeft immers geen kerndeeltjes en de lading van een elektron is $-1e$.

Naast een elektron ontstaat er ook een anti-elektronneutrino. Waarom deze eigenlijk ontstaat heeft te maken met een andere behoudswet, de wet van het behoud van het

leptongetal per generatie, die later in dit hoofdstuk wordt uitgelegd. (Wikipedia; Liempt, 2010)

y-verval

Bij gammaverval zendt het te vervallen deeltje een foton uit. De wet behoud van energie speelt hierbij een rol. Gammaverval vindt plaats wanneer een (zware) atoomkern radioactief vervalst. De atoomkernen die na het verval ontstaan, hebben een lagere bindingsenergie. Vanwege de wet behoud van energie komt er energie vrij in vorm van gammastraling.

Stel dat er door gammaverval één foton wordt uitgezonden. De energie van dat foton kan men berekenen met de formule:

$$E = hf$$

Hierbij is de E de energie, h de constante van Planck die gelijk is aan $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js en f de frequentie in Hz. Gammastraling valt onder de elektromagnetische straling. Er is sprake van een dualiteit van golven en deeltjes. De voortplantingssnelheid van fotonen is gelijk aan de lichtsnelheid, dus:

$$c = \lambda f$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \wedge E = hf$$

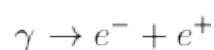
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

In het elektromagnetisch spectrum geldt vanaf $E \approx 0,2$ MeV dat er sprake is van gammastraling. Net onder deze energie ligt de categorie van Röntgenstraling. (Wikipedia; Liempt, 2010)

Creatie en annihilatie

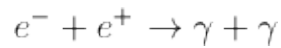
Hoe is het mogelijk dat een kosmisch deeltje door de atmosfeer kan gaan? In hoofdstuk 1 werd er al verteld over airshowers die ontstaan doordat hoogenergetische deeltjes tegen de dampkring botsen. Dit hoofdstuk en hoofdstuk 3 gaan nader in op de reacties in de airshower.

Stel dat er een foton met veel energie tegen de materie in de dampkring botst. In dat geval gebeurt er iets dat in de scheikunde uiterst wonderlijk is. Er ontstaan 2 elektrische deeltjes met massa, wat betekent dat het lijkt alsof er niet wordt voldaan aan de wet behoud van massa. Hoe dit precies zit, wordt uitgelegd onder het kopje 'massa is energie en energie heeft massa'. Dit proces wordt daarom creatie genoemd. De twee elektrische deeltjes kunnen een elektron en een positron zijn. De reactievergelijking is dus:



In deze reactie geldt de wet behoud van elektrische lading. Een foton heeft geen lading dus er kunnen daaruit geen 2 elektronen of 2 positronen ontstaan. Creatie wordt ook wel paarvorming genoemd. Dit heeft te maken met het feit dat een bepaald deeltje met zijn eigen antideeltje een paar wordt genoemd.

Deze reactie kan omgekeerd worden: 2 elektrische deeltjes met massa botsen en er ontstaan minstens 2 fotonen. Dit proces heet annihilatie en de bijbehorende reactievergelijking luidt:



De reden dat er nooit één foton ontstaat, is toe te schrijven aan de wet behoud van impuls. Als een elektron en een positron met dezelfde snelheid frontaal tegen elkaar aanbotsen, resulteert dat in een impuls van nul [kgm/s]. Wanneer er 1 foton zou ontstaan, is het niet mogelijk om een impuls van 0 [kgm/s] te realiseren, aangezien het foton altijd met de lichtsnelheid beweegt en dus impuls heeft. Er moeten dus minstens 2 fotonen ontstaan die de tegengestelde kant op bewegen. (Liempt, 2010)

Massa is energie en energie heeft massa

Bij creatie ontstaat er massa en bij annihilatie verdwijnt er massa. Hoe kan dat? Dit heeft te maken met de zeer bekende formule van Albert Einstein:

$$E = mc^2$$

Uit deze formule is af te leiden dat massa correspondeert met energie en Einstein was de eerste die dit beseftte. Zolang het deeltje in rust is, heeft het deeltje een energie die met deze formule berekend kan worden: de rustenergie.

In deze formule is de c de lichtsnelheid in m/s. Met deze formule kan men concluderen dat een beetje massa zeer veel energie bevat en dat voor het maken van een beetje massa zeer veel energie vereist is. Een foton moet dus veel energie hebben, indien er paarvorming plaatsvindt. Dit is tevens te berekenen. De rustmassa van een elektron en een positron zijn beide $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, dus:

$$E_{vereist} = 2mc^2$$

$$E_{vereist} = 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Men kan hiermee ook bepalen welke golflengte daarbij hoort:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-13}} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

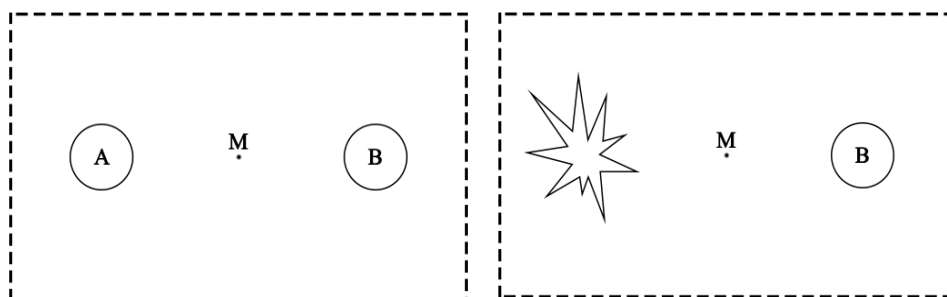
Deze golflengte valt onder de zachte gammastraling van het elektromagnetisch spectrum.

Zojuist is aangetoond dat massa energie is, maar deze stelling kan ook omgekeerd worden. Een vraag: de impuls van een voorwerp is het product van de massa en de snelheid. Heeft een foton eigenlijk geen impuls, aangezien het geen massa heeft? Nee, want een foton heeft wel energie en energie heeft massa! De impuls van een foton is dus:

$$E = mc^2 \wedge p = mc$$

$$m = \frac{E}{c^2} \wedge p = mc$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$



afbeelding 8: systeem met deeltjes A en B en zwaartepunt M

Tot het einde van de 19^e eeuw werden massa en energie als twee los van elkaar staande grootheden beschouwd. De formule van Einstein werd destijds zo uitgelegd alsof energie in massa kan worden omgezet en vice versa. Dit is niet juist, want in feite bestaan massa en energie tegelijkertijd.

Om dit beter uit te leggen, stelt men een systeem voor met 2 stilstaande deeltjes A en B met dezelfde massa (zie **afbeelding 8**). Het zwaartepunt M van deze 2 deeltjes ligt dus precies tussen A en B waarbij $AM = BM$. Het systeem is in rust. Met andere woorden, er worden geen krachten tussen het systeem en diens omgeving uitgeoefend, hetgeen betekent dat de impuls gelijk aan 0 is.

Stel dat deeltje A plotsklaps in energie wordt omgezet. Wat er overblijft, is deeltje B en zwaartepunt M. Men kan uit het ongerijmde bewijzen dat de energie correspondeert met de massa. Veronderstel dat energie geen massa is. Dat zou betekenen dat het zwaartepunt naar B verplaatst als deeltje A ineens energie wordt. Dit betekent echter dat het systeem door het verplaatsen van het zwaartepunt een impuls heeft ten opzichte van de omgeving. Dit vormt een tegenspraak met de wet behoud van impuls, omdat die niet gelijk aan nul blijft. De veronderstelling dat energie geen massa heeft is, klopt dus niet en dus moet het wel zijn dat energie een massa heeft. (Liempt, 2010)

Behoudswetten van leptongetal en quarkgetal

Als alleen de wetten van behoud van energie, impuls en elektrische lading zouden gelden is het mogelijk dat er uit een foton een proton en een elektron ontstaat. Dit komt echter in de praktijk niet voor. Er moeten dus meer behoudswetten bestaan naast die drie wetten.

Deeltjesprocessen moeten ook aan de volgende 2 eisen voldoen:

- De som van de leptongetallen per generatie moet voor de reactie even groot zijn als na de reactie. Als het aantal leptonen met 1 toeneemt, moet het aantal antileptonen ook met 1 toenemen. Daarnaast moeten dat lepton en dat antilepton tot dezelfde generatie behoren. Deze regel verklaart ook waarom bij bètaverval naast een elektron ook een antineutrino bestaat. Er is 1 lepton ontstaan en dus moet er ook een antilepton van dezelfde generatie ontstaan om aan deze wet te voldoen. Een positron kan niet, omdat anders de lading niet blijft behouden.
- De som van de quarkgetallen per generatie moet voor de reactie even groot zijn als na de reactie. Als er bijvoorbeeld uit een foton een down-quark ontstaat, moet er ook een anti-down-quark ontstaan om aan deze regel te voldoen en om de lading te behouden. Een antistrange-quark kan niet ontstaan, omdat deze van een andere generatie is.

Er geldt echter dat quarks nooit enkelvoudig voorkomen. Protonen bestaan uit twee up-quarks en één down-quark en neutronen bestaan uit twee down-quarks en één up-quark. In de paragraaf 'de kleurlading van quarks' wordt hier nader op ingegaan.

Bij bètaverval waarbij een elektron vrijkomt, verandert een proton in een neutron. Blijft de som van de quarkgetallen per generatie gelijk? Ja, want als men inzoomt op de drie quarks, ziet men in feite dat een down-quark een up-quark wordt. Deze behoren tot dezelfde generatie, dus het quarkgetal blijft onveranderd. Protonen en neutronen worden, omdat ze uit 3 quarks bestaan, ook wel baryonen genoemd. Doordat het quarkgetal behouden moet blijven, moet ook het baryongetal per generatie behouden blijven. Er bestaan immers antibaryonen, die uit drie antiquarks bestaan. (Liempt, 2010)

De elektromagnetische kracht

De wet behoud van impuls en de wet behoud van energie zijn universeel en gelden dus voor alle processen, maar in de kwantummechanica is energie niet precies vast te stellen. Dit verband wordt ook wel de onzekerheidsrelatie van Heisenberg genoemd. De betreffende formule luidt:

$$\Delta E \Delta t = \frac{h}{4\pi}$$

Hierin is ΔE de onzekerheid in energie, Δt de onzekerheid in tijd en h de constante van Planck. Als men ervan uitgaat dat de onzekerheid in tijd minimaal is, geldt dat de onzekerheid van de energie groter wordt.

Deze onzekerheidsrelatie betekent dat er energie kan zijn, maar dat er even later van deze energie niets te merken is. Bij een elektron komt de onzekerheidsrelatie tot uiting in een zogenaamde wolk van fotonen die het elektron omringt. Deze fotonen duiken ogenschijnlijk uit het niets op, maar verdwijnen later snel. Zij zijn tevens niet waar te nemen maar alleen de gevolgen van hun aanwezigheid zijn zichtbaar. Ze worden daarom virtuele fotonen genoemd.

Maar er is iets bijzonders aan de hand. Als een foton tijdens zijn virtuele leven in contact komt met bijvoorbeeld een ander elektron, dan geeft deze zijn energie af aan dat elektron. Hierdoor is er energie van het ene elektron naar het andere gegaan, hetgeen een kracht tussen de twee elektronen teweegbrengt. De virtuele fotonen zijn derhalve verantwoordelijk voor de elektromagnetische kracht, die ervoor zorgt dat ladingen met gelijke teken (– en – of + en +) elkaar afstoten en dat ladingen met tegengestelde teken (+ en –) elkaar aantrekken. De formule die daarbij hoort, luidt:

$$F_{el} = f \frac{qQ}{r^2}$$

Hierin is F_{el} de elektromagnetische kracht⁷ in N, f een constante die gelijk is aan $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$. q en Q de ladingen van de 2 voorwerpen of deeltjes in Coulomb en r de afstand tussen de twee deeltjes in meter. Deze formule wordt ook wel de wet van Coulomb genoemd.

In de formule is af te leiden dat de elektromagnetische kracht afneemt, naarmate de afstand tussen de twee deeltjes toeneemt. Is dit te rijmen met de onzekerheidsrelatie van Heisenberg? Ja, als de afstand tussen de twee deeltjes toeneemt, duurt het langer⁸ voordat het foton het andere deeltje bereikt. Een grotere onzekerheid in tijd betekent een kleinere onzekerheid in energie. Dientengevolge kunnen alleen fotonen met minder energie het andere deeltje bereiken, wat leidt tot een kleinere kracht tussen de twee deeltjes.

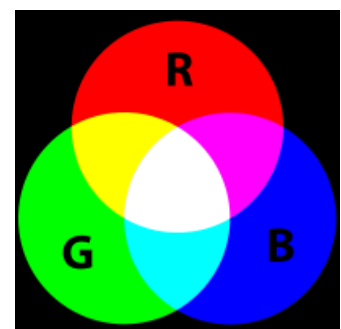
Een onzekerheid in energie, geeft ook een onzekerheid in impuls:

$$\Delta E \Delta t = \Delta F \Delta x \Delta t = \Delta m \Delta a \Delta t \Delta x = \Delta m \Delta v \Delta x = \Delta p \Delta x = \frac{h}{4\pi}$$

(Liempt, 2010)

Hadronen en gluonen

Zoals eerder vermeld kunnen quarks nooit enkelvoudig voorkomen. Daarnaast moet de som van de lading van alle quarks in een samenstelling gelijk zijn aan een geheel getal. Hoe wordt dit bewerkstelligd?



afbeelding 9: kleuren-driehoek

⁷ Als $F_{el} < 0$, dan zullen de 2 deeltjes elkaar aantrekken. Als $F_{el} > 0$, dan zullen de 2 deeltjes elkaar afstoten.

⁸ Volgens de waarnemer die niet beweegt. Volgens het foton zelf duurt het afleggen ten gevolge van de relativiteitstheorie 0 s.

Behoud van kleurlading

In analogie met de elektrische kracht en lading bij leptonen wordt bij quarks verondersteld dat ze een zogenaamde kleurlading hebben. Dit moet niet de suggestie wekken dat quarks daadwerkelijk een kleur kunnen hebben. Het is immers het absorptiespectra van stoffen die bepalen welke kleur ze hebben!

In **afbeelding 9** is de kleurendriehoek weergegeven met de 3 primaire kleuren van licht: rood, groen en blauw. Tevens zijn alle mogelijke mengkleuren in de driehoek terug te vinden. De quarks kunnen als lading de drie primaire kleuren rood (R), groen (G) of blauw (B) hebben. De antiquarks hebben de antikleuren die exact tegengesteld zijn aan de gewone kleuren: antirood ($\bar{R}$), antigroen ($\bar{G}$) en antiblauw ($\bar{B}$). Bij hadronen, een combinatie van gebonden quarks, is de totale kleurlading altijd gelijk aan 'wit'. Dit kan, zoals te zien is in de kleurendriehoek, als alle 3 de primaire kleuren één keer voorkomt. Omdat antikleuren exact tegengesteld zijn aan de gewone kleuren, betekent het dat bijvoorbeeld rood en antirood wit geeft. Daarnaast is de antikleur van een kleur hetzelfde als het mengsel van de 2 complementaire kleuren. Antirood is dus hetzelfde als groen plus blauw (cyaan), antigroen is hetzelfde als rood plus blauw (magenta) en antiblauw is hetzelfde als rood plus groen (geel). Tot slot zijn de 3 antikleuren bij elkaar opgeteld eveneens wit. Doordat de kleur in een hadron wit moet zijn, is het niet mogelijk om een lading te krijgen die opgeteld geen geheel getal is.

Hadronen kan men onderverdelen in mesonen en baryonen. Mesonen bestaan altijd uit een quark en een antiquark, omdat anders de kleurlading nooit wit kan worden. Een van de bekendste mesonen is het pion. Pionen bestaan uit een quark en een antiquark uit de eerste generatie en kennen een positieve (π^+), neutrale (π^0) en negatieve (π^-) variant. Mesonen bestaan ofwel uit drie quarks ofwel uit drie antiquarks. Protonen en neutronen en hun antibaryonen zijn voorbeelden daarvan. In **tabel 3** en **tabel 4** staan respectievelijk de belangrijkste baryonen en belangrijkste mesonen. In werkelijkheid bestaan er nog veel meer hadronen. (Liempt, 2010; Hol & Boer)

deeltje	symbool	quarks	rustmassa (MeV/c ²)	spin	B	S	levensduur (s)
Proton	p ⁺	uud	938,3	1/2	+1	0	Stabiel
Neutron	n	ddu	939,6	1/2	+1	0	920
Lambda	Λ^0	uds	1115,6	1/2	+1	-1	$2,6 \times 10^{-10}$
Lambda	Λ_c^+	udc	2281	1/2	+1	0	2×10^{-13}
Sigma	Σ^+	uus	1192,5	1/2	+1	-1	$0,8 \times 10^{-10}$
Sigma	Σ^0	uds	1197,3	1/2	+1	-1	6×10^{-20}
Sigma	Σ^-	dds	1232	1/2	+1	-1	$1,5 \times 10^{-10}$
Delta	Δ^{++}	uuu	1232	3/2	+1	0	$0,6 \times 10^{-23}$
Delta	Δ^+	uud	1232	3/2	+1	0	$0,6 \times 10^{-23}$
Delta	Δ^0	udd	1232	3/2	+1	0	$0,6 \times 10^{-23}$
Delta	Δ^-	ddd	1315	3/2	+1	0	$0,6 \times 10^{-23}$
Xi Cascade	Ξ^0	uss	1321	1/2	+1	-2	$2,9 \times 10^{-10}$
Xi Cascade	Ξ^-	dss	1672	1/2	+1	-2	$1,64 \times 10^{-10}$
Omega	Ω^-	sss	1115,6	3/2	+1	-3	$0,82 \times 10^{-13}$

tabel 3: de belangrijkste baryonen met B het baryongetal en S de vreemdheid (strangeness)

deeltje	symbool	quarks	Rustmassa (MeV/c ²)	spin	B	S	levensduur (s)
Pion	π^+	$u\bar{d}$	139,6	0	0	0	$2,60 \times 10^{-8}$
Pion	π^0	$\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135,0	0	0	0	$0,83 \times 10^{-16}$
Kaon	K^+	$u\bar{s}$	493,7	0	0	+1	$1,24 \times 10^{-8}$
Kaon	K^0_s	...	497,7	0	0	+1	$0,89 \times 10^{-10}$
Kaon	K^0_L	... ⁹	497,7	0	0	+1	$5,2 \times 10^{-8}$
Eta	η^0	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$	548,8	0	0	0	$< 10^{-18}$
Eta prime	$\eta^{0'}$	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$	958	0	0	0	...
Rho	ρ^+	$u\bar{d}$	770	0	0	0	$0,4 \times 10^{-23}$
Rho	ρ^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	770	0	0	0	$0,4 \times 10^{-23}$
Omega	ω^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	0	0	0	$0,8 \times 10^{-22}$
Phi	φ	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	20×10^{-23}
D	D^+	$c\bar{d}$	1869,4	+1	0	0	$10,6 \times 10^{-13}$
D	D^0	$c\bar{u}$	1864,6	+1	0	0	$4,2 \times 10^{-13}$
D	D^+_s	$c\bar{s}$	1969	+1	0	+1	$4,7 \times 10^{-13}$
J/Psi	J/ψ	$c\bar{c}$	3096,9	0	0	0	$0,8 \times 10^{-20}$
B	B^-	$b\bar{u}$	5279	0	-1	0	$1,5 \times 10^{-12}$
B	B^0	$d\bar{b}$	5279	0	-1	0	$1,5 \times 10^{-12}$
B _s	B_s^0	$s\bar{b}$	5370	0	-1	0	...
Upsilon	Υ	$b\bar{b}$	9460,4	0	0	0	$1,3 \times 10^{-20}$

tabel 4: de belangrijkste baryonen met B het bosongetal en S de vreemdheid (strangeness)

De sterke kernkracht

Als quarks dicht bij elkaar zijn, trekken ze elkaar aan. Dit wordt veroorzaakt door de sterke kernkracht. Dit is vergelijkbaar met de elektromagnetische krachten tussen geladen deeltjes, want de sterke kernkracht komt tot stand door het uitwisselen van kleurladingen.

In hoofdstuk 1 is verteld dat protonen en neutronen een massa hebben van respectievelijk $938 \text{ MeV}/c^2$ en $940 \text{ MeV}/c^2$. Maar volgens tabel 2 van hoofdstuk 1 zou een proton slechts $3 + 3 + 5 = 11 \text{ MeV}/c^2$ wegen en een neutron zou slechts $3 + 5 + 5 = 13 \text{ MeV}/c^2$ wegen. Hoe kunnen protonen en neutronen toch veel zwaarder zijn? Dit heeft te maken met het feit dat in hadronen meer dan alleen quarks of antiquarks te vinden zijn: gluonen. Gluonen zijn net als fotonen krachtdeeltjes, maar gluonen zorgen voor de sterke kernkracht.

Een gluon heeft in principe geen massa. Dit is niet helemaal waar, omdat gluonen wel energie hebben, wat juist wel een massa heeft. De energie kan men uitrekenen door de

⁹ Neutraal geladen Kaons stellen de symmetrische en antisymmetrische mengsels voor van de quarkcombinaties down-antistrange en antidown-strange.

werkelijke massa van een baryon af te laten trekken van de rustmassa. Bij protonen is de energie van gluonen $938 - 11 = 927$ MeV en bij neutronen is die ook $940 - 13 = 927$ MeV.

Meer over krachtdeeltjes en gluonen wordt uitgelegd in hoofdstuk 3.

HOOFDSTUK 3

*In de oudheid dacht men heel anders over krachten. Zo dacht de Griekse Aristoteles dat beweging altijd door een kracht werd aangedreven. Deze notie over kracht is anders dan de eerste wet van Newton die in de 17^e eeuw werd geformuleerd. Deze wet zegt dat er pas kracht optreedt als de snelheid van een voorwerp in grootte of richting verandert. Newton stelde tevens vast dat de totale 'hoeveelheid beweging' in het universum, de impuls, constant moet blijven. Aristoteles beweerde dat bij kracht altijd fysiek contact vereist is. Newton daarentegen sprak dit tegen. Toch heeft Aristoteles in dit opzicht gelijk. Maxwell en Einstein ontdekten dat kracht ontstaat door uitwisseling van krachtdeeltjes. Newton zou dit niet kunnen aantonen in zijn tijd. Door de ontdekking van krachtdeeltjes heeft kracht vorm gekregen in het standaardmodel. In dit hoofdstuk het antwoord op de vraag: **wat is het standaardmodel?***

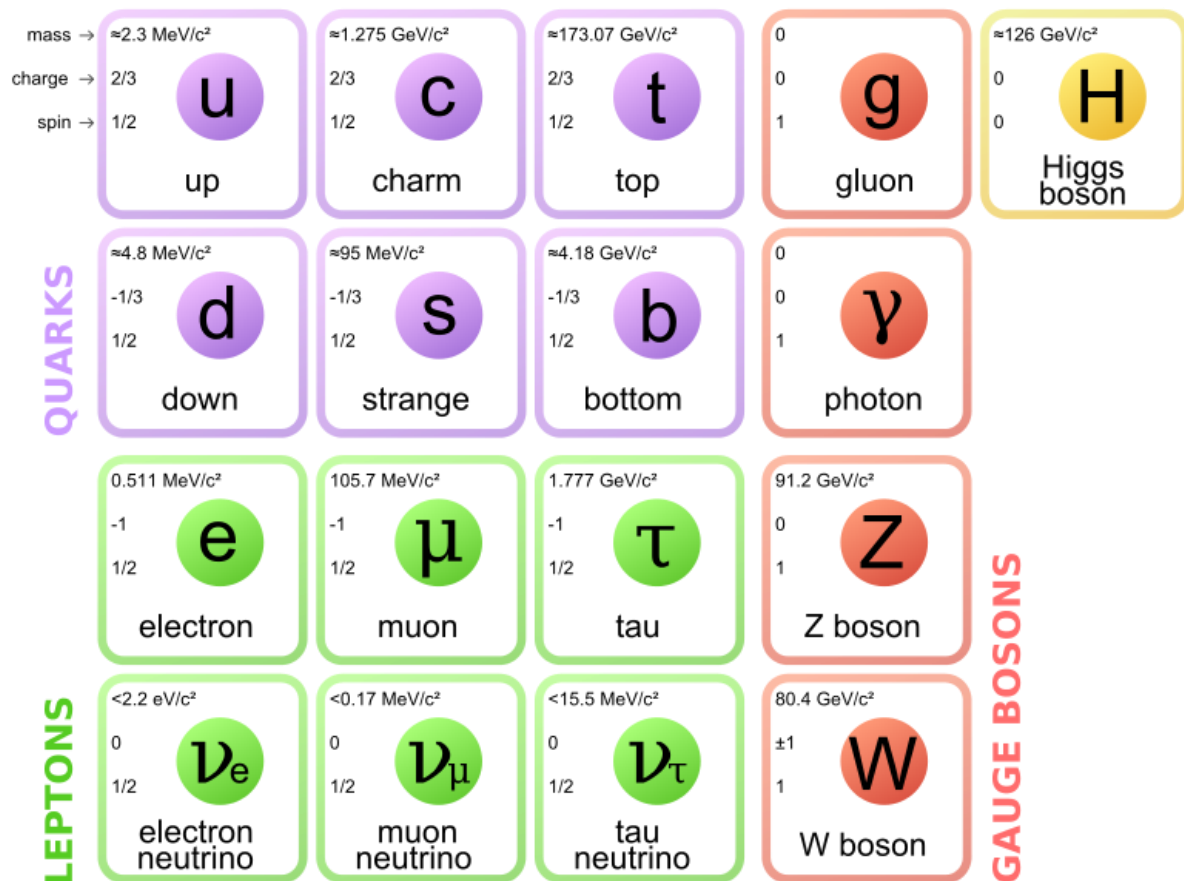
De krachtdeeltjes

In hoofdstuk 1 werd al uitgelegd wat voor deeltjes er zijn. In hoofdstuk 2 werd er nader op de leptonen en quarks ingegaan. Tevens werd er wat informatie gegeven over virtuele fotonen en gluonen.

Het standaardmodel is niets anders dan de theorie over de elementaire deeltjes. Het beschrijft immers de interacties tussen deeltjes. Hierbij spelen krachtdeeltjes een belangrijke rol. Er bestaan vier fundamentele krachten die door middel van krachtdeeltjes uitgewisseld kunnen worden:

- Elektromagnetische kracht. Deze kracht houdt de elektronen bij de atomen en wordt overgebracht door fotonen. In hoofdstuk 2 is al informatie gegeven over virtuele fotonen, die energie en impuls kunnen uitwisselen tussen geladen deeltjes. Dit betekent dat fotonen niet kunnen koppelen aan neutrino's of aan elkaar.
- Sterke kernkracht. Deze kracht houdt de protonen en de neutronen in de kern bij elkaar en wordt overgebracht door gluonen. In hoofdstuk 2 is tevens informatie gegeven over gluonen, die kleur, energie en impuls kunnen uitwisselen tussen deeltjes met een kleurlading. Dit betekent dat gluonen aan elkaar kunnen koppelen, waardoor kleuren tussen gluonen uitgewisseld kunnen worden. Gluonen zorgen ook ervoor dat quarks en antiquarks in witte combinaties bij elkaar blijven.
- Zwakke kernkracht. Deze kracht speelt een rol bij de vervalprocessen. Deze kernkracht wordt overgebracht door W- en Z-bosonen. W-bosonen hebben een lading van $+1$ e of -1 e en een massa van $80.000 \text{ MeV}/c^2$. Z-bosonen hebben geen lading en een massa van $91.000 \text{ MeV}/c^2$. Deze krachtdeeltjes koppelen aan deeltjes een 'zwakke lading'. Dit zijn in feite alle elementaire deeltjes inclusief de W- en Z-bosonen zelf.

- Gravitatiekracht. Deze kracht houdt materie bij elkaar. Het betreffende krachtdeeltje, het graviton, is nog niet ontdekt. Dit deeltje heeft geen massa, aangezien de formule voor de gravitatiekracht vergelijkbaar is met die van de elektromagnetische kracht, die ook wel de wet van Coulomb wordt genoemd. Het graviton werkt tussen deeltjes met massa. Omdat dit deeltje nog niet aangetoond is, weet men niet precies hoe deze tot stand komt. Er wordt daarom niet nader op dit deeltje ingegaan.



afbeelding 10: Standaardmodel

In afbeelding 10 hierboven ziet men een overzicht van alle krachtdeeltjes. Inmiddels is ook het Higgsboson, een krachtdeeltje dat andere deeltjes massa geeft, aangetoond en hoort dat eigenlijk ook in het schema te staan. In hoofdstuk 4 wordt er ingegaan op de Large Hardon Collider in Genève. (Wikipedia; Liempt, 2010)

Deeltjesprocessen

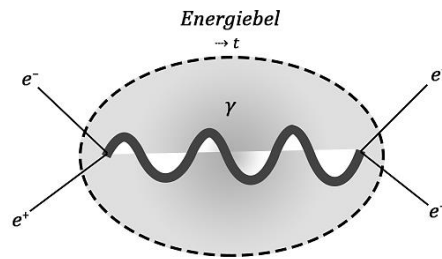
Bij deeltjesprocessen zijn altijd krachtdeeltjes betrokken en doorgaans vinden dit soort reacties in een energiebel plaats. Alle deeltjes, doorgaans krachtdeeltjes, die in een energiebel voorkomen, zijn virtueel en dus niet waarneembaar. Virtuele deeltjes kunnen echter niet lang bestaan en gaan dus snel over in reële deeltjes. Hierdoor moet een reël deeltjesproces altijd in twee stappen beschreven worden.

Daarnaast geldt bij deeltjesprocessen dat ze ook omgekeerd plaats kunnen vinden. Men zegt dat deeltjesprocessen tijdsymmetrie hebben. De reactiepijl die de tijd symboliseert, is bij een omgekeerd proces omgeklapt.

Naast tijdsymmetrie bestaat er ook ladingsymmetrie. Van ieder proces met quarks of leptonen bestaat een proces waarbij de deeltjes een tegengestelde lading of kleur hebben.

De elektromagnetische kracht

In **afbeelding 11** wordt een voorbeeld gegeven van een elektron en een positron die na het annihileren een nieuw elektron-positronpaar vormen. Het valt op dat er slechts één foton ontstaat. Is dat niet in tegenspraak met wat er in hoofdstuk 2 werd beweerd over annihilatie: er zijn minstens twee fotonen nodig om aan de wet van behoud van impuls te voldoen? Nee, deze reactie



afbeelding 11: Annihilatie en creatie elektron-positronpaar

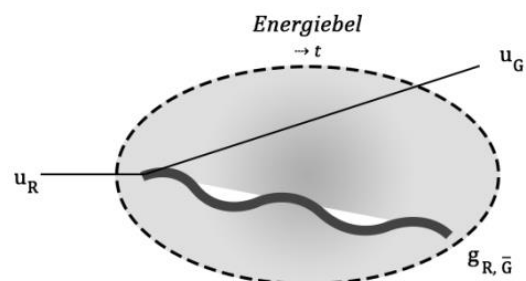
verschilt met die van hoofdstuk 2, waarbij minstens twee reële fotonen ontstaan¹⁰. In het voorbeeld in **afbeelding 11** is het enkele foton virtueel. Dit betekent dat de extra impuls van dit foton valt onder het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. In een energiebel hoeven de behoudswetten dus nog niet te gelden, maar wanneer virtuele deeltjes vervallen in reële deeltjes, moet er wel voldaan worden aan deze wetten. Daarom vervallen virtuele deeltjes snel, want hoe langer de tijd, des te kleiner de onzekerheid. Men moet er wel rekening mee houden dat aan de wet behoud van lading en kleur zowel reël als virtueel voldaan moet worden.

Het zou ook kunnen dat bij de annihilatie van een elektron-positronpaar een Z^0 -boson ontstaat. Deze kunnen immers aan elk deeltje koppelen en bovendien blijven daardoor de lading en de kleur behouden. Het is echter minder waarschijnlijk dat dit gebeurt, aangezien het Z^0 -boson een massa heeft, waardoor het creëren van een dergelijk deeltje energie vereist. (Liempt, 2010)

De sterke kernkracht

In **afbeelding 12** is te zien wat er gebeurt wanneer de kleurlading van een quark verandert. In het voorbeeld is te zien dat het gluon twee kleuren moet hebben om aan het behoud van kleur te voldoen.

Gluonen zijn virtuele deeltjes en manifesteren zich niet buiten atoomkernen. In tegenstelling tot fotonen kunnen gluonen aan elkaar koppe-



afbeelding 12: kleurverandering up-quark

¹⁰ Deze reële fotonen komen tot stand door een ander soort proces dat in het verslag niet wordt behandeld

len. Buiten de atoomkern bevinden zich geen quarks en gluonen en doordat de kleur van de hadronen netto wit moet blijven, zullen gluonen niet zomaar de atoomkern verlaten. Hoe wisselen gluonen kleuren uit? Stel dat de up-quark in afbeelding 12 deel uitmaakt van een positief geladen pion. Dit betekent dat er tegenover de rode up-quark een anti-rode antidown-quark zit. Als de rode up-quark plotseling groen wordt, zendt het een gluon uit naar de antidown-quark. Doordat het gluon rood, antigroen is en de antidown-quark antirood, wordt het antidown-quark antigroen als het gluon aan deze koppelt. De kleurlading in de pion blijft bijgevolg wit.

Bij baryonen liggen de kaarten anders. Stel dat er een proton is waarbij de twee up-quarks rood en groen zijn en de down-quark blauw is. Als een rode up-quark groen wordt en het uitgezonden gluon koppelt aan de andere up-quark, wordt deze andere up-quark rood. Dit klopt, maar als het gluon echter aan de blauwe down-quark koppelt, zou deze '2 antigroen' worden. Dit is zowel bij quarks als bij anti-quarks onmogelijk en dit gebeurt in de praktijk nooit.

Bij baryonen wordt vaak fout verondersteld dat gluonen tussen twee quarks kleur uitwisselen. Het is gebleken dat gluonen bij baryonen altijd bij elkaar komen om kleur uit te wisselen. (Liempt, 2010)

De zwakke kernkracht

In hoofdstuk 2 werd verteld dat bij bètaverval een elektron en een antineutrino ontstaan als een neutron in een proton verandert. Eigenlijk is het deeltjesproces bij bètaverval tweedelig, want er moet een krachtdeeltje tijdens het vervalproces betrokken zijn. Als een neutron in een proton verandert en dus een down-quark in een up-quark verandert, ontstaat er een W^- -boson. De reactievergelijking ziet er als volgt uit:

$$d \rightarrow u + W^-$$

Een down-quark heeft een lading van $-\frac{1}{3} e$ en een up-quark heeft een lading van $+\frac{2}{3} e$. Hierdoor blijft de lading door het W^- -boson behouden en zijn door deze wet alle andere krachtdeeltjes uitgesloten. Tevens blijven de kleur en het quarkgetal behouden. W^- -bosonen zijn virtueel en vervallen als volgt:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Ook hier zijn aan alle wetten voldaan. Netto krijgt men:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

Ook bij het verval van zwaardere leptonen spelen krachtdeeltjes die de zwakke kernkracht dragen een rol. Een voorbeeld daarvan is het muon. Wanneer deze vervalst, ontstaat er in ieder geval een muonneutrino, omdat op geen enkele andere manier het leptongetal behouden kan worden. De reactie luidt:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$$

Er ontstaat daarnaast een W^- -deeltje, waardoor de lading blijft behouden. Daarna vervalt dat deeltje, net als bij bètaverval, in een elektron en een anti-elektronneutrino. Dus:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Netto krijgt men dus:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

Dit is tevens de eindreactie in alle airshowers. (Liempt, 2010)

Onbeantwoorde vragen over het standaardmodel

Hoewel men veel lijkt te weten over de elementaire deeltjes zijn er nog steeds mysteries die nog niet opgelost zijn:

- Een van de mysteries was hoe sommige deeltjes een rustmassa kunnen krijgen. Nu weet men dat dit te danken is aan het Higgsboson.
- Het is echter een groot raadsel waarom er in het universum meer materie is dan antimaterie. De wet behoud van quarkgetal dat in hoofdstuk 2 behandeld is, impliceert dat er evenveel materie zou zijn als antimaterie. Dit lijkt niet te kloppen. Het blijkt mogelijk te zijn dat een charm-quark kan vervallen in een down-quark en een W^+ -deeltje. Bij dit verval is de generatie niet behouden gebleven. En mogelijk verschilt dit ook nog voor materie en antimaterie. Ook de ladingsymmetrie die in dit hoofdstuk besproken is, lijkt niet altijd te kloppen. In 2002 werd er met de SLAC-versneller (Stanford Linear Accelerator Center) experimenteel bevestigd dat bij vervalprocessen van B-mesonen, die bestaan uit een up- of down-quark en een antibottom-quark, niet altijd wordt voldaan aan de ladingsymmetrie.
- In hoofdstuk 1 werd ervan uitgegaan dat neutrino's geen massa hebben. In de jaren '90 werd ontdekt dat het niet zeker is dat de massa van neutrino's daadwerkelijk gelijk is aan nul. Er zijn erg veel neutrino's in het universum en als het blijkt dat neutrino's een rustmassa hebben, zou het grote consequenties hebben voor de massaberekening van het universum. Bovendien zou er in dit geval niet voldaan worden aan de wet van behoud van generaties bij leptonen en de wet van behoud van ladingsymmetrie bij neutrino's.
- Niet alleen de massa's van de elementaire deeltjes vormen een raadsel, ook van de massa van het universum is er geen helder beeld. Wetenschappers vermoeden dat men slechts 4% van alle materie in het universum kan zien. Onregelmatigheden in de beweging van Melkwegen wijzen namelijk uit dat er 'donkere materie' moet bestaan, materie die men niet kan zien, maar wel de zichtbare materie kan beïnvloeden. Men vermoedt op grond van in 2001 verrichte satellietmetingen dat 23% van de materie in het universum donkere materie is. Dit beantwoordt echter niet de vraag waaruit donkere materie bestaat. Een mogelijke hypothese verklaart dat er een nieuwe klasse elementaire deeltjes bestaat die ook wel WIMP deeltjes worden genoemd (Weakly Interacting Massive Particles). Zoals de naam

het al zegt, zouden deze deeltjes een nauwelijks waarneembare wisselwerking met de omgeving hebben. (Liempt, 2010)

HOOFDSTUK 4

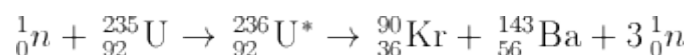
*Kosmische straling gebruiken voor nuttige toepassingen is lastig. Haar voorkomen is immers gebaseerd op toeval. Vroeger – en nu nog steeds – gebruikte men deeltjesversnellers om elementaire deeltjes te onderzoeken of aan te tonen. Het grote voordeel daarvan is dat men zelf interacties kan laten ontstaan. Het nadeel daarentegen is dat men deeltjes geen hoge energie kan geven, die vergelijkbaar is met die van kosmische deeltjes. Tegenwoordig kan men veel gemakkelijker kosmische straling onderzoeken. In dit hoofdstuk het antwoord op de vraag: **welke toepassingen omtrent (kosmische) straling zijn er?***

Kernenergie

Een van de bekendste toepassingen waarbij straling betrokken is bij kerncentrales. Thans wordt alleen kernsplijting gebruikt voor energieopwekking, maar er wordt volop onderzoek verricht naar kernfusie. Het voordeel van kernfusie is dat er vrijwel geen radioactief afval ontstaat. Het grote nadeel is echter de hoge temperatuur en druk die bij kernfusie ontstaat. Bovendien zijn de ontwikkelingskosten voor de bouw van een kernfusiereactor hoog. Men verwacht niet dat er voor 2050 een bruikbare kernfusiecentrale beschikbaar zal zijn. (Liempt, 2010)

Kernsplijting

Kerncentrales werken doorgaans op verrijkt uranium (U-235). Om deze te laten splijten, laat men een langzaam neutron tegen de zware uraniumkern botsen. Hierdoor ontstaat de volgende reactie:



Bij deze reactie ontstaan er 3 neutronen. Deze kunnen weer nieuwe splijtingsreacties teweegbrengen, waarbij er nog meer neutronen ontstaan. Men krijgt dus een kettingreactie.

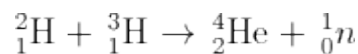
Een kettingreactie komt echter pas tot stand als er genoeg verrijkt uranium bij elkaar zit. In natuurkundige termen betekent dit dat de kritische massa bereikt moet zijn. Bovendien moeten de neutronen niet te snel bewegen, omdat ze anders teruggekaatst worden door de uraniumkernen.

Als uranium-236 vervalst in krypton-90 en barium-143, wordt er veel energie in warmte omgezet. Deze energie komt vrij doordat de rustmassa van de reactieproducten kleiner is dan die van het beginproduct. Dit verschil wordt het massadefect genoemd. Met de bekende formule van Einstein, $E = mc^2$, kan men berekenen hoeveel energie er vrijkomt. Er zijn ongeveer 440 werkende kerncentrales over de hele wereld, waaronder één in Nederland in het Zeeuwse Borssele gevestigd is. Alle centrales werken volgens hetzelfde principe. Bij kernsplijting komt er energie in de vorm van warmte vrij, waarmee water

in een stoomgenerator wordt gekookt. Met de stoom wordt een stoomturbine aangedreven, die vervolgens een dynamo aandrijft waardoor er elektriciteit wordt opgewekt. (Liempt, 2010)

Kernfusie

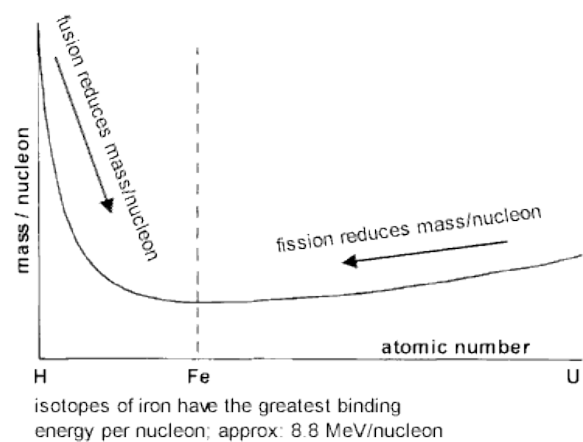
Bij kernfusie wordt het tegenovergestelde gedaan. Hierbij worden juist kernen samengesmolten. Kernfusie vindt onder meer plaats in sterren zoals de zon. Hierbij worden deuterium- en tritiumkernen, waterstofkernen met respectievelijk één en twee neutronen, samengesmolten, waardoor er een heliumkern en een los neutron ontstaan. De reactievergelijking ziet er als volgt uit:



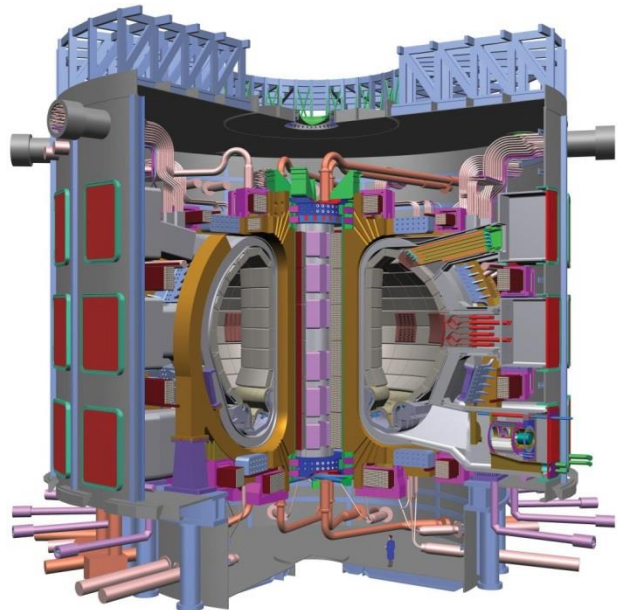
Wat opvalt, is dat ook bij deze reactie sprake is van een massadefect en dat er dus energie vrijkomt. Hoe kan dat? In **afbeelding 13** is te zien waarom dat zo is. Daaruit blijkt dat de bindingsenergie, die gelijk is aan de massa gedeeld door het aantal kerndeeltjes, bij ijzerkernen het kleinst is. Zowel bij het fuseren van twee waterstofkernen als bij het splijten van een uraniumkern ontstaan er dus kernen met een lagere bindingsenergie.

Doordat er bij kernfusie nauwelijks radioactief afval ontstaat, zijn wetenschappers bezig om door middel van kernfusie energie op te wekken. Dit is echter heel moeilijk, omdat kernfusie alleen plaatsvindt bij hoge temperaturen.

In het ITER-project (International Thermonuclear Experimental Reactor) werken landen over de hele wereld samen om een effectieve kernfusiereactor¹¹ te bouwen. Daartoe gebruikt men een tokamak (zie **afbeelding 14**), een torusvormig apparaat waarin door de hoge temperatuur en druk een plasma ontstaat. Men moet echter ervoor zorgen dat het plasma niet tegen de wanden komen, omdat deze anders smelten. Om dit voor elkaar te krijgen, kan men gebruikmaken van magneetvelden. Het pro-



afbeelding 13: de massa per kerndeeltje uitgezet tegen het aantal kerndeeltjes



afbeelding 14: de tokamak

¹¹ De ambitie van het ITER-project is om een reactor te bouwen waarbij er 10 keer meer energie vrijkomt dan er wordt verbruikt.

bleem is echter dat het zeer moeilijk is om met magneten het plasma op de juiste plek te houden. (Liempt, 2010; Westra, 2005)

Voordelen en nadelen

Het voordeel van kernenergie is dat er in vergelijking met andere brandstoffen zeer veel energie vrijkomt per massa-eenheid. Daarnaast ontstaat er geen CO₂ en draagt kernenergie niet bij aan het versterkte broeikaseffect.

Er zijn echter een aantal problemen met kernenergie. Ten eerste kan het voor verkeerde doeleinden worden gebruikt. Denk daarbij aan kernwapens. Ten tweede is de veiligheid van kernsplijting discutabel: hoewel er steeds meer maatregelen worden genomen om het risico te verminderen, kunnen de gevolgen niet te overzien zijn als er iets misgaat. Tot slot is het radioactief afval dat bij kernsplijting ontstaat een groot probleem. De halfwaardetijd van het afval is ongeveer 30 jaar en het vervalproces kan niet worden versneld. Er kan ook plutonium ontstaan, dat een halfwaardetijd heeft van 24.000 jaar. Op het moment wordt het radioactief afval heel lang veilig bewaard (voornamelijk diep onder de grond). In Nederland wordt radioactief afval dat is ontstaan in de kerncentrale van Borssele opgeslagen in loods en van COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval), een organisatie gevestigd in Nieuwdorp in de buurt van Vlissingen en Borssele. (Liempt, 2010)

Deeltjesversnellers

Sinds het bestaan van GPS-satellieten en het internet is het gemakkelijker geworden om onderzoek te verrichten naar airshowers, omdat een nauwkeurige plaats- en tijdsregistratie door een GPS noodzakelijk is en omdat communicatie tussen verschillende apparaten belangrijk is. Anders zou het moeilijk worden om de onderzoeksvraag in hoofdstuk 6 te beantwoorden.

Voor het begin van de 21^e eeuw was het onderzoeken van kosmische straling ook veel lastiger. Men kon immers niet voorspellen wanneer er een airshower zou ontstaan. Daarom werd er destijds onderzoek gedaan naar elementaire deeltjes door middel van deeltjesversnellers. Deze konden tevens worden gebruikt voor toepassingen, zoals de oude beeldbuis.

Een versneller bestaat uit een reeks kleine versnellers. Deeltjesversnellers kunnen worden onderverdeeld in lineaire versnellers en magnetische versnellers. Bij een lineaire versneller staan de kleine versnellers in een rechte lijn. Een voorbeeld van een lineaire versneller die nog in gebruik is, is SLAC van de universiteit van Stanford. Het nadeel van een dergelijke versneller is dat deze niet handig is om deeltjes veel snelheid te geven. Daarom worden bij grote experimenten magnetische versnellers gebruikt, die bestaan uit een ring van kleine versnellers. Magneten zorgen ervoor dat deeltjes zodanig afbuigen dat ze binnen de ringvormige tunnel blijven. Deeltjes kunnen hierdoor de kleine versnellers meerdere malen passeren waardoor men deeltjes gemakkelijker veel energie kan geven. (Liempt, 2010)

Beeldbuis

In een beeldbuis worden elektronen versneld door een elektrische spanning van 15 à 25 kV. Deze elektronen botsen tegen het fluorescentiescherm dat oplicht waardoor er een beeld ontstaat. Met behulp van magneten worden de elektronen afgebogen naar andere plekken op het beeldscherm.

In hoofdstuk 1 is reeds een formule behandeld waarmee men de kinetische energie van deeltjes kan berekenen: $\Delta E_{kin} = q \cdot \Delta V$. Stel dat men een elektron in rust laat versnellen in een beeldbuis waarin het potentiaalverschil 20 kV bedraagt. De snelheid zou op de volgende manier kunnen worden berekend:

$$E_{kin} = qV = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 20000 = 3.2 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot v^2 = 3.2 \cdot 10^{-15}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 3.2 \cdot 10^{-15}}{9.1 \cdot 10^{-31}}} = 8.4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Dit is een zeer hoge snelheid. In feite is dit niet het juiste antwoord. Bij grote snelheden moet er rekening gehouden worden met relativiteit. Men moet die uitrekenen door middel van de volgende 2 formules:

$$E_{tot} = mc^2 + E_{kin}$$

$$E_{tot} = mc^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mc^2$$

Invullen geeft:

$$E_{tot} = mc^2 + E_{kin} = 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (3.0 \cdot 10^8)^2 + 3.2 \cdot 10^{-15} = 8.51 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$E_{tot} = \gamma mc^2 = \gamma \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (3.0 \cdot 10^8)^2 = 8.51 \cdot 10^{-14}$$

$$\gamma = \frac{8.51 \cdot 10^{-14}}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (3.0 \cdot 10^8)^2} = 1.04$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{(3.0 \cdot 10^8)^2}}} = 1.04$$

$$v = \sqrt{\left(-\left(\frac{1}{1.04}\right)^2 - 1\right) (3.0 \cdot 10^8)^2} = 7.3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Dit antwoord heeft een waarde die 13% kleiner is dan die waarbij geen rekening is gehouden met relativiteit. (Liempt, 2010)

LEP

De LEP (Large Electron Positroncollider) was een groot Europees project van CERN waarin men, zoals de naam het al zegt, een bundel elektronen met een bundel positronen liet botsen. Het was een lange, cirkelvormige tunnel met een omtrek van 27 km en functioneerde van 1989 tot eind 2000.

In 1996 slaagde men erin een bundel elektronen en positronen met zoveel energie te laten botsen dat er paren W-bosonen ontstonden. De reactievergelijking luidt:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \rightarrow W^+ + W^-$$

De levensduur van W-bosonen is echter kort en ze vervallen weer in andere deeltjes. (Liempt, 2010)

Tevatron

De Tevatronversneller is een ringvormige tunnel met een diameter van 2 km. In 1995 werden hier top-quarks geproduceerd en waargenomen. De reactievergelijking luidt:

$$t + \bar{t} \rightarrow b + W^+ + \bar{b} + W^-$$

Deze zes deeltjes kon men niet direct waarnemen, maar door de deeltjes die wel waargenomen werden, kon men deze reactievergelijking construeren. Overigens zijn top-quarks en hun antideeltjes uiterst instabiel en vervallen ze vrijwel onmiddellijk. (Liempt, 2010)

LHC

Het LHC-experiment (Large Hardron Collider) is de opvolger van het LEP-experiment dat na enige opstartproblemen begon in 2010. In het experiment laat men een bundel protonen en een bundel antiprotonen tegen elkaar botsen. De energie van de deeltjes bedragen 14 TeV.

Men verwachtte dat er in de energiebel Higgs-deeltjes zouden ontstaan. Een van de potentiële reacties waarnaar men onderzoek verricht, is dat Higgs-deeltjes vervallen in twee Z-deeltjes. Deze vervallen vervolgens in muonen en antimuonen. De reactievergelijking ziet er dus als volgt uit:

$$H \rightarrow Z^0 + Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+ + \mu^- + \mu^+$$

(Liempt, 2010)

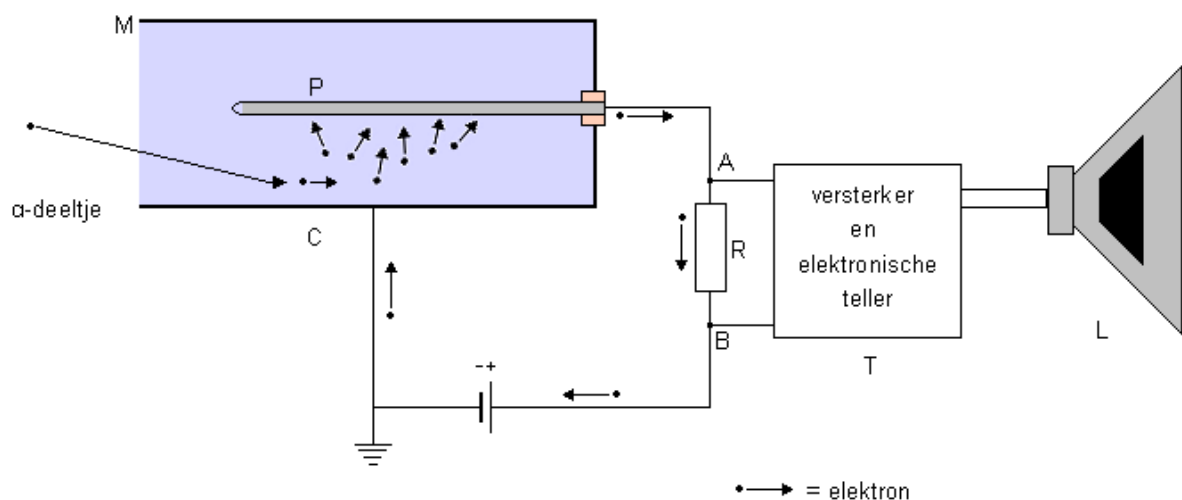
Detectie

Hoe worden elementaire deeltjes in de versnellers waargenomen? Er zijn verschillende manieren om deeltjes te detecteren. De elektroscop is in feite ook een soort detector.

Door ionisaties in de lucht gaan de bladen weer in een normale toestand staan. Het detecteren van ionisaties door elektronen en muonen wordt nu nog steeds gedaan. (Liempt, 2010)

GM-teller

De Geiger-Mueller-teller, kortweg GM-teller is een apparaat waarmee men de hoeveelheid straling kan meten. In **afbeelding 15** is te zien hoe het werkt. Op de draad staat een positieve spanning ten opzichte van de wanden. Als er in dit geval gammastraling binnen de kamer komt, zal dit de gasatomen ioniseren. De elektronen die vrijkomen, worden aangetrokken door de draad. Er loopt uiteindelijk een stroompje door de draad die door een teller wordt geregistreerd.



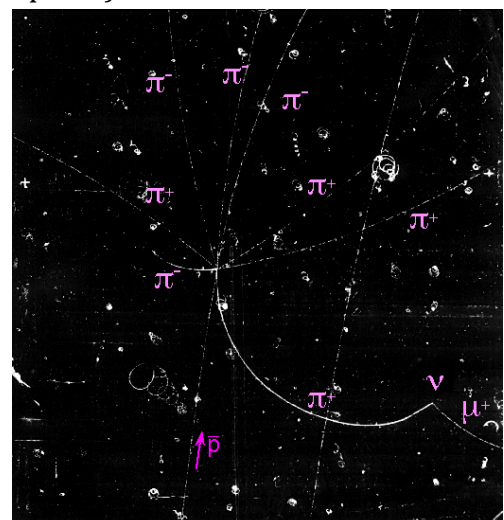
afbeelding 15: GM-teller

Het is belangrijk dat het spanningspotentiaal de juiste grootte heeft. Als deze te klein is, zal het ionisaties niet registreren, maar als deze te groot is, zal er spontaan een stroom lopen tussen de wand en de draad. (Liempt, 2010; Wikipedia)

Nevelvat en bellenvat

Rond ionen treden er in een vloeistof gemakkelijker verdamping en condensatie van een damp op. Ioniserende straling laat hierdoor een condensatiespoor achter in een vloeistof die bijna kookt. Met een nevelvat of bellenvat kan men sporen van ioniserende straling zichtbaar maken (zie **afbeelding 16**).

Een nevelvat is in zijn meest eenvoudige vorm een vat dat is gevuld met een oververzadigde en onderkoelde damp. Als er een ioniserend deeltje zoals een elektron of muon door een nevelvat gaat, ontstaat er een condensatiespoor. Als de atomen die in het pad van de deeltjes liggen ioniseren, dan trekken deze de omliggende dampmoleculen aan, waardoor de dampdichtheid lo-



afbeelding 16: nevelvat

kaal toeneemt en vervolgens meteen condenseert. De ontstane ionen fungeren als condensatiekernen (ook wel CN genoemd, van het Engelse Condensation Nucleus), hetgeen vergelijkbaar is met aerosolen die in de lucht wolken kunnen vormen.

In een bellenvat gebeurt het tegenovergestelde. In een bellenvat zit namelijk een doorzichtige vloeistof waarvan de temperatuur net onder het kookpunt ligt. Als er hoogenergetische deeltjes in contact komen met de vloeistof, zal deze bij drukverlaging spontaan gaan koken. Er ontstaat dan in het pad van de deeltjes een spoor van belletjes.

Het nadeel van nevel- en bellenvaten is dat de hersteltijd vrij groot is. Daardoor kan men pas na een lange tijd een nieuwe opname maken. (Liempt, 2010; Nevelvat; Bellenvat)

Fluorescentie

Als hoogenergetische fotonen botsen tegen atomen, raken die atomen in een hogere energietoestand (aangeslagen toestand). Wanneer elektronen vervolgens terugvallen in de normale toestand (grondtoestand), zenden ze fotonen uit met een lagere energie. Dit verschijnsel wordt fluorescentie genoemd. Het poollicht is een voorbeeld daarvan. Als ioniserende deeltjes van met name de zon door het aardmagneetveld worden afgebogen, treedt er bij de polen waar het magneetveld zwakker is fluorescentie op.

Fluorescentie kan men tevens gebruiken voor het maken van detectoren. Daartoe wordt er gebruik gemaakt van een scintillator, een kristal of een stuk plastic waarin fluorescentie plaatsvindt. Als er ioniserende straling door de scintillator gaat, ontstaan er ionisaties. De elektronen die vrijkomen, kunnen ook ionisaties veroorzaken, maar als een geïoniseerd atoom een elektron opneemt, treedt er fluorescentie op. Het licht dat hierdoor ontstaat, wordt omgezet in elektrische impulsen die geregistreerd kunnen worden.

PET-scanners (Positron Emission Tomography) berusten op dit principe. Met een PET-scan kan men zien waar in een orgaan veel stofwisseling plaatsvindt. Daartoe krijgt een patiënt een radioactieve stof geïnjecteerd die in organen kan doordringen. Deze stof zendt bij verval positronen uit die door botsingen bijna stilstaan ten opzichte van hun omgeving. Als het positron in aanraking komt met elektronen die in het weefsel aanwezig zijn, treedt er annihilatie op. In hoofdstuk 2 is al verteld dat er twee fotonen ontstaan. Alleen metingen waarbij tegenover elkaar liggende detectoren gelijktijdig een foton registreren, tellen mee, opdat losse fotonen niet worden meegerekend. (Liempt, 2010; Wikipedia)

HOOFDSTUK 5

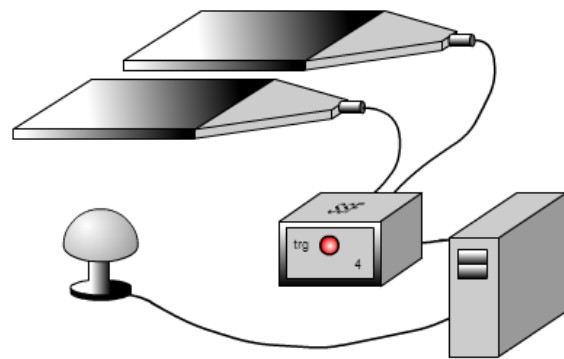
*In hoofdstuk 4 is uiteengezet dat men vroeger deeltjesversnellers gebruikte om meer te weten te komen over hoogenergetische deeltjes. Onderzoek doen naar airshowers was lastig, maar door satellieten en het internet is dit tegenwoordig veel eenvoudiger geworden. Een project dat zich bezighoudt met airshowers is HiSPARC. Aan dit project werken verschillende wetenschappelijke entiteiten en middelbare scholen om meer te weten te komen over kosmische deeltjes in airshowers. Daartoe wordt er gebruik gemaakt van detectoren. In dit hoofdstuk wordt het antwoord gegeven op de vraag: **hoe analyseert men kosmische straling?***

De detectoren

In het HiSPARC-project wordt er gebruik gemaakt van scintillatoren. In hoofdstuk 4 bij het onderdeel over fluorescentie is uitgelegd hoe deze werken.

Omdat men alleen geïnteresseerd is in de deeltjes die uit dezelfde airshower komen, en dus van hetzelfde kosmische deeltje komen, zijn er minimaal 2 detectoren nodig. Als deze detectoren gelijktijdig een deeltje registreren dan wordt deze meegeteld (zie [afbeelding 17](#)). Men spreekt dan over een coïncidentie of event. Het blijkt immers dat deeltjes uit dezelfde lawine bijna op het zelfde moment de aarde bereiken. De detectoren hebben ieder een oppervlakte van $0,5 \text{ m}^2$, bevinden zich doorgaans op dezelfde hoogte en zijn een paar meter van elkaar verwijderd.

Als men de gegevens van verschillende detectoren over Nederland vergelijkt, kan men airshowers onderzoeken die zich over een oppervlakte van honderden km^2 uitstrekken. (HiSPARC)



afbeelding 17: de detectoren van HiSPARC

Elektronica

Gekopieerd van de website van HiSPARC:

De HiSPARC II elektronica integreert snelle signaalverwerking, conversie van twee analoge signalen afkomstig van de fotoversterkerbuizen naar digitaal formaat, en een precisie GPS, in één behuizing. De elektronica verstuurt zijn data via een USB verbinding naar de pc. Een andere USB aansluiting is voor directe communicatie tussen de GPS en een GPS monitorprogramma op de pc. Hiermee kunnen de instellingen van de GPS geverifieerd en/of aangepast worden.

Op de pc draait een programma dat geschreven is in LabVIEW, hiermee kan de HiSPARC II elektronica volledig bestuurd worden. Het LabVIEW programma is tevens verantwoordelijk voor het verzamelen en tevens het doorsturen van de meetgegevens die uit de HiSPARC elektronica komen.

Er zijn twee versies van de HiSPARC II elektronica, een Master en een Slave versie. De verschillen zijn dat op de Slave geen GPS kan worden aangesloten en dat die niet direct, maar via een Master, met een pc verbonden wordt. (HiSPARC)



afbeelding 18: de HiSPARC II Master

In afbeelding 18 is de voorkant (links) en de achterkant (rechts) van de HiSPARC II Master te zien. Op de voorkant zijn, van links naar rechts, de volgende onderdelen te zien:

- een groene LED voor de voedingsspanning;
- een gele LED die brandt als er signaal binnenkomt, een signaal- en een voedings-aansluiting voor fotobuis-1;
- de inlaat voor de luchtkoeling;
- dezelfde onderdelen die bedoeld zijn voor fotobuis-1, maar dan in omgekeerde volgorde voor fotobuis-2.

Op de achterzijde zijn, van links naar rechts, de volgende onderdelen te zien:

- een USB-aansluiting voor het versturen van meetgegevens;
- een TTL-aansluiting voor een externe trigger, die enkel voor speciale doeleinden wordt gebruikt;
- twee UTP-verbindingen waarop men een HiSPARC II Slave kan aansluiten;
- de uitlaat voor de luchtkoeling;
- de aansluiting voor de voedingsadapter (12 Volt DC; 1,5 A);
- (rechtsboven) de aansluiting voor de GPS-antenne;
- een USB-aansluiting voor het aanpassen van de GPS-instellingen. (HiSPARC)

De fotoversterkerbuis

In een fotoversterkerbuis of fotobuis worden lichtflitsen die in de scintillatoren ontstaan, omgezet in elektrische pulsen. Daartoe wordt er gebruik gemaakt van het foto-elektrisch effect.

In 1887 slaagde Heinrich Hertz erin om met behulp van licht elektronen vrij te maken uit een metaaloppervlak. In die tijd was het voor natuurkundigen echter een groot raadsel waarom dit effect pas plaatsvond als de frequentie van het licht groot genoeg was, ongeacht de intensiteit van het licht.

In 1905 publiceerde Albert Einstein een artikel, getiteld *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (De productie en om-

zetting van licht vanuit heuristisch gezichtspunt). Daarin maakte hij bij het foto-elektrisch effect aan de hand van de theorie van Planck de volgende veronderstellingen:

- Licht bestaat niet uit golven, maar uit energiepakketjes (wat men nu fotonen noemt).
- Een elektron kan slechts de energie van één energiepakketje opnemen, ongeacht de intensiteit.
- Als de energie in het pakketje groter is dan de zogenaamde uittree-energie, dan komt er een elektron vrij. Deze uittree-energie wordt veroorzaakt door positief geladen metaalionen in het metaalrooster, dat de elektronen aantrekt. De energie die overblijft, wordt omgezet in kinetische energie. De betreffende formule luidt:

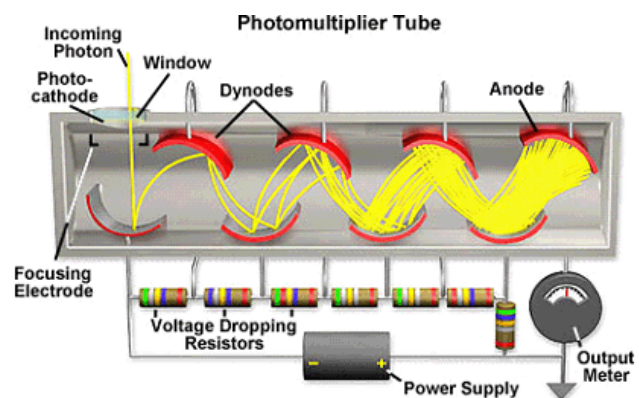
$$E_{kin} = E_{foton} - E_{uit}$$

- Als de energie van het energiepakketje gelijk is aan de uittree-energie, dan kan er nog net een elektron vrij worden gemaakt, maar de snelheid van die elektronen is nul. De bijbehorende frequentie wordt de grensfrequentie genoemd en verschilt per metaal. De betreffende formule luidt:

$$E_{uit} = hf_{grens}$$

Hoewel experimenten aantoonde dat deze veronderstellingen correct zijn, werd de theorie van Einstein aanvankelijk nog niet algemeen aanvaard. Pas in 1922 kreeg hij de Nobelprijs van het jaar 1921 voor zijn werk aan het foto-elektrisch effect.

Het foto-elektrisch effect kan men demonstreren met een fotocel, die bestaat uit een anode en een fotokathode. Een fotobuis is wat complexer opgebouwd. Deze heeft een fotokathode, een aantal dynodes en een anode (zie afbeelding 19). Bij een fotobuis gebruikt men een lichtgevoelig metaal dat een lage uittree-energie en hoge efficiëntie heeft. De alkali-metalen natrium en kalium voldoen aan deze twee voorwaarden.



afbeelding 19: fotoversterkerbuis

Als men het vrijgemaakte elektron meteen op de anode laat vallen, is men niet in staat om dit te detecteren. Er zijn meerdere elektronen vereist om het te kunnen waarnemen. Daarom wordt er gebruik gemaakt van dynodes. Deze zijn voorzien van een laagje materiaal dat minstens 2 elektronen uitzendt als er een elektron op valt. Stel dat er in een fotobuis 10 dynodes zitten. Het minimum aantal elektronen dat op de anode valt is dus $2^{10} = 1024$. Door het gebruik van de weerstanden wordt de spanningspotentiala telkens groter als men dichterbij de anode komt. Men kan kiezen voor ofwel een positieve spanning op de anode en de kathode geaard ofwel een negatieve spanning op de kathode en de anode geaard. De tweede optie is te zien in afbeelding 19.

Bij een fotoversterkerbuis moet men tevens rekening houden met diens ‘tijdsoplossend-vermogen’. Dat is het tijdsverschil tussen het moment waarop een foton de fotokathode raakt en het moment waarop de elektronen de anode raken. Deze tijd is immers niet gelijk aan nul en is afhankelijk van de afgelegde weg van de elektronen. Het is belangrijk dat dit tijdsverschil bij alle HiSPARC-detectoren zo min mogelijk verschilt. Daartoe moet men de fotobuizen geometrisch zorgvuldig bouwen. Bovendien moeten de fotobuizen afgeschermd worden tegen de invloed van het aardmagnetveld, omdat op andere plaatsen de magnetveldsterke en -richting kan verschillen. Voor de afscherming maakt men gebruik van mu-metaal.

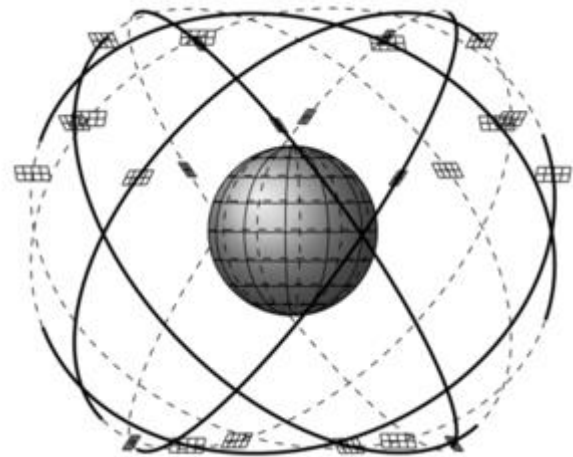
Zelfs als een fotobuis in een ruimte is afgesloten waar zich geen straling bevindt, zal deze nog steeds elektronpulsen meten. Deze pulsen zijn de donkerstroom van een fotobuis, die wordt veroorzaakt door vrijgekomen elektronen door thermische emissie en door ruis in de uitleeselektronica. (HiSPARC)

GPS

Met het Global Positioning System (GPS) kan men nauwkeurig de positie op aarde determineren. Het systeem werd in de jaren '80 ontwikkeld door en voor het Amerikaanse leger, maar al gauw werd het beschikbaar gesteld voor andere vreedzame doeleinden als de luchtvaart en de scheepvaart.

Voor het analyseren van airshower is dit systeem essentieel, omdat hiermee de ligging van de detectoren nauwkeurig kan worden bepaald. Tevens kan men door middel van GPS de metingen van een exact tijdstempel met een nauwkeurigheid van 100 nanoseconde voorzien. Dankzij GPS heeft men een goed beeld van de omvang van een airshower en de richting van het kosmische deeltje. Vooralsnog blijft het onbekend hoe en waar kosmische deeltjes hun oorsprong vinden.

Het GPS-systeem bestaat uit 24 satellieten plus 3 noodsatellieten indien er 1 uitvalt (zie [afbeelding 20: het GPS-systeem](#)). De satellieten draaien op ongeveer 20.200 km hoogte rond de aarde. Om de juiste plaats en tijd te achterhalen zijn minimaal 4 satellieten nodig die ‘zichtbaar’ zijn vanuit de aarde.



afbeelding 20: het GPS-systeem

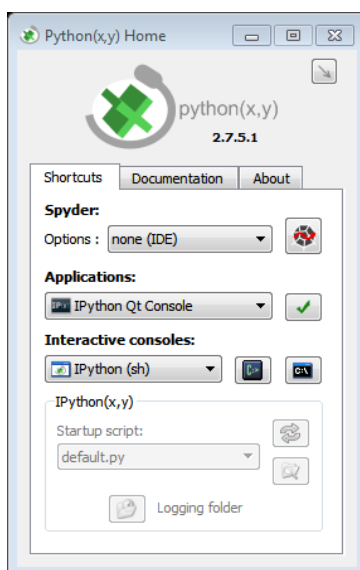
De werking van GPS berust op triliteratie. Door middel van radiogolven kunnen satellieten de afstand tussen zichzelf en de GPS-ontvanger bepalen. Door samen te werken met meetstations op de grond weten satellieten waar ze zich bevinden. Hierdoor kan uitgerekend worden waar de GPS-ontvanger zich bevindt. Tevens is er in iedere GPS-satelliet een atoomklok met een precisie van 100 nanoseconden. Voor de nauwkeurigheid is het belangrijk dat er rekening wordt gehouden met relativiteit. De tijd in satellieten loopt sneller dan op aarde, aangezien de invloed van de algemene relativiteit groter is dan de

speciale relativiteit. De atoomklok in de satellieten moet dus telkens gecorrigeerd worden. (HiSPARC)

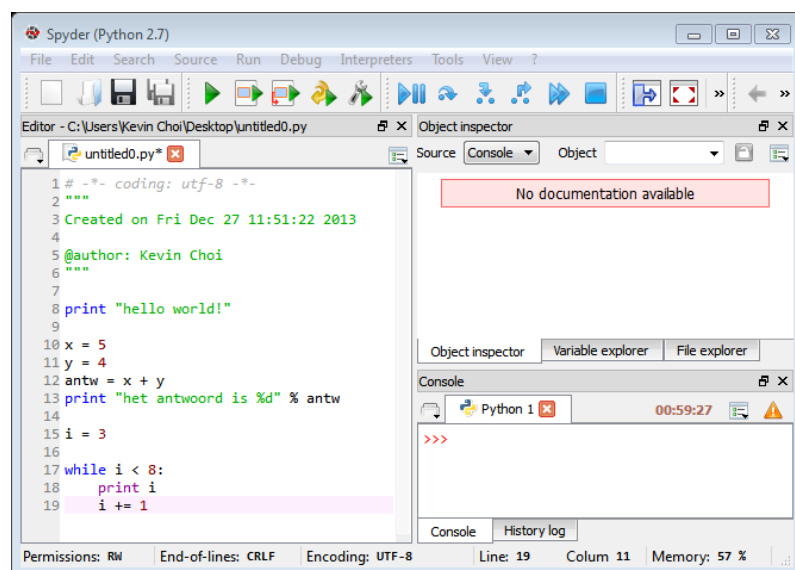
De software

Met behulp van computerprogramma's en het internet kan men eenvoudig gegevens verzamelen en verwerken. In het HiSPARC-project maakt men gebruik van programmeertalen als Python of Javascript om bijvoorbeeld de energie van het kosmische deeltje uit te rekenen. Met een API (Application Programming Interface) van HiSPARC is het mogelijk om gegevens via het internet op te vragen. In dit verslag wordt nader ingegaan op Python en hoe men het moet gebruiken om gegevens op te halen met de API.

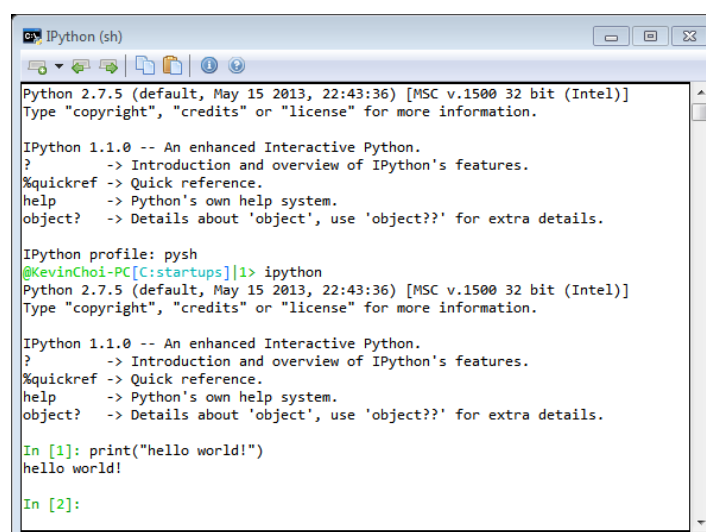
Python



afbeelding 22: homevenster



afbeelding 23: Spyder



afbeelding 21: IPython (sh)

Python is een programmeertaal die ontworpen is in 1991 door de Nederlandse informaticus Guido van Rossem. Het unieke van deze taal is dat het gebruik maakt van indenta-

tie als indicatie van de gelaagdheid van de verschillende onderdelen. Bovendien implementeert Python het zogenaamde duck-typing. Dit wil zeggen dat het niet noodzakelijk is om het type van een variabele aan te geven zoals de integer (doorgaans afgekort als int) en de float. (Wikipedia)

Om van het programma gebruik te maken, moet men de programmeeromgeving 'Python(x,y)' (zie [afbeelding 22](#)) installeren. Deze programmeeromgeving bevat een functie waarmee men pythonbestanden (bestandsextensie = .py) kan uitvoeren door het bestand te openen, een programma genaamd 'Spyder' (zie [afbeelding 23](#)), waarmee men Pythonbestanden kan schrijven, debuggen en testen en een shell waarin men Python-commando's kan uitvoeren (zie [afbeelding 21](#)).

API

Op de HiSPARC-site kan men een API benaderen om metadata op te vragen van de detectoren zoals de locatie en het aantal coïncidenties in een bepaald tijdsbestek. De API kan men bezoeken met de link: <http://data.hisparc.nl/api/>. Als men deze site bezoekt ziet men een dictionary:

```
{ "base_url": "http://data.hisparc.nl/api/", "clusters": "clusters/",
  "clusters_in_country": "countries/{country_number}/", "configuration":
  "station/{station_number}/config/{year}/{month}/{day}/", "countries":
  "countries/", "event_trace": "sta-
  tion/{station_number}/trace/{ext_timestamp}/", "has_data": "sta-
  tion/{station_number}/data/{year}/{month}/{day}/", "has_weather": "sta-
  tion/{station_number}/weather/{year}/{month}/{day}/", "number_of_events":
  "station/{station_number}/num_events/{year}/{month}/{day}/{hour}/",
  "pulseheight_drift": "sta-
  tion/{station_number}/plate/{plate_number}/pulseheight/drift/{year}/{mont
  h}/{day}/{number_of_days}/", "pulseheight_fit": "sta-
  tion/{station_number}/plate/{plate_number}/pulseheight/fit/{year}/{month}
  /{day}/", "station_info": "sta-
  tion/{station_number}/{year}/{month}/{day}/", "stations": "stations/",
  "stations_in_subcluster": "subclusters/{subcluster_number}/", "sta-
  tions_with_data": "stations/data/{year}/{month}/{day}/", "sta-
  tions_with_weather": "stations/weather/{year}/{month}/{day}/", "subclus-
  ters": "subclusters/", "subclusters_in_cluster": "clus-
  ters/{cluster_number}/" }
```

Op deze pagina ziet men echter alleen waar bepaalde gegevens staan. Stel dat men wil weten hoeveel coïncidenties er waren bij de detectoren van Pleincollege Sint-Joris op 1 december 2013. In de bovenstaande dictionary staat: "number_of_events": "station/{station_number}/num_events/{year}/{month}/{day}/{hour}/". Hieruit kan men de juiste URL afleiden. De juiste link is:

http://data.hisparc.nl/api/station/8003/num_events/2013/12/1/

Men ziet dan dat het aantal events toen gelijk was aan 39527.

De vraag is echter vanwaar 8003 als id c.q. stationnummer? Als men de link <http://data.hisparc.nl/api/subclusters/> volgt, is er een overzicht te zien van plaatsen die gekoppeld zijn aan nummers. Er staat ook dat Eindhoven nummer 8000 heeft, hetgeen in de buurt komt van 8003. Bezoekt men <http://data.hisparc.nl/api/subclusters/8000/>, dan ziet men een overzicht van alle instanties in Eindhoven die deelnemen aan het HiS-

PARC-project zoals de Technische Universiteit. Er is ook te zien dat het Sint-Joris College nummer 8003 toegewezen krijgt.

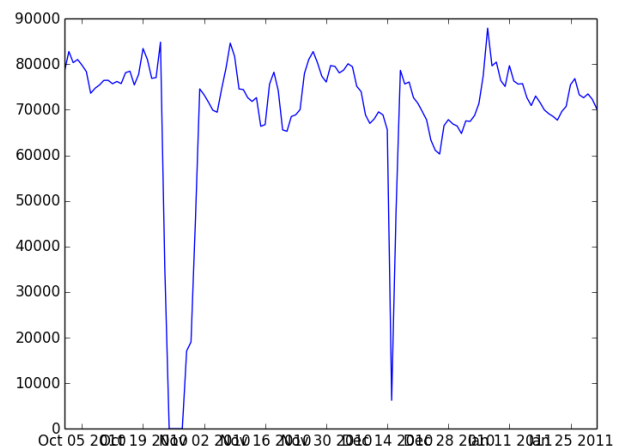
Om te laten zien wat men met behulp van de API kan doen, geeft men een voorbeeld. Stel dat men een diagram wil maken van het aantal events tussen 1 oktober 2010 en 1 februari 2011 bij de detectoren van Nikhef op Science Park (id = 501). Hieronder staat de bijbehorende broncode (HiSPARC, 2013):

```
1. from urllib2 import urlopen
2. from datetime import date, timedelta
3. from pylab import plot, show
4. id = 501
5. datum = date(2010, 10, 1)
6. end_datum = date(2011, 2, 1)
7. base = 'http://data.hisparc.nl/api/station/%d/num_events/%d/%d/%d'
8. events = []
9. dates = []
10. while datum < end_datum:
11.     url = urlopen(base % (id, datum.year, datum.month, datum.day))
12.     events.append(url.read())
13.     dates.append(datum)
14.     datum += timedelta(days=1)
15.
16. plot(dates, events)
17. show()
```

code 1

In **afbeelding 24** ziet men het geplote diagram dat in beeld verschijnt als deze code wordt uitgevoerd. Er bevinden zich soms diepe dalen in de grafiek. Dit komt doordat de detector op dat moment buiten werking was.

In de eerste drie regels worden een aantal functies van verscheidende modules in het pythonbestand geïmporteerd. Met `urlopen()` kan men webpagina's openen die men met de functie `read()` kan uitlezen. `Date()` en `timedelta()` zijn nodig



afbeelding 24: diagram bij code 1

om respectievelijk data en tijdsverschillen als variabele in te voeren. Met `plot()` kan men twee arrays tegen elkaar uitzetten om een diagram te maken en met `show()` kan men het diagram tonen.

In de regels 4 t/m 7 staan alvorens een aantal gegevens: het id van de detectoren van Nikhef, de begindatum, de einddatum en de basis van de betreffende link. De meerdere `%d`'s worden later in het programma vervangen met de juiste id en datums.

In de regels 8 en 9 worden alvorens twee lege arrays, `dates` en `events`, gemaakt die in het programma tegen elkaar worden uitgezet nadat de juiste gegevens in deze variabelen zijn opgeslagen.

In regel 10 begint de `while`-loop. Dit betekent dat de ingesprongen regels 11 t/m 14 continue worden uitgevoerd totdat de voorwaarde (`datum < end_datum`) niet meer klopt. In

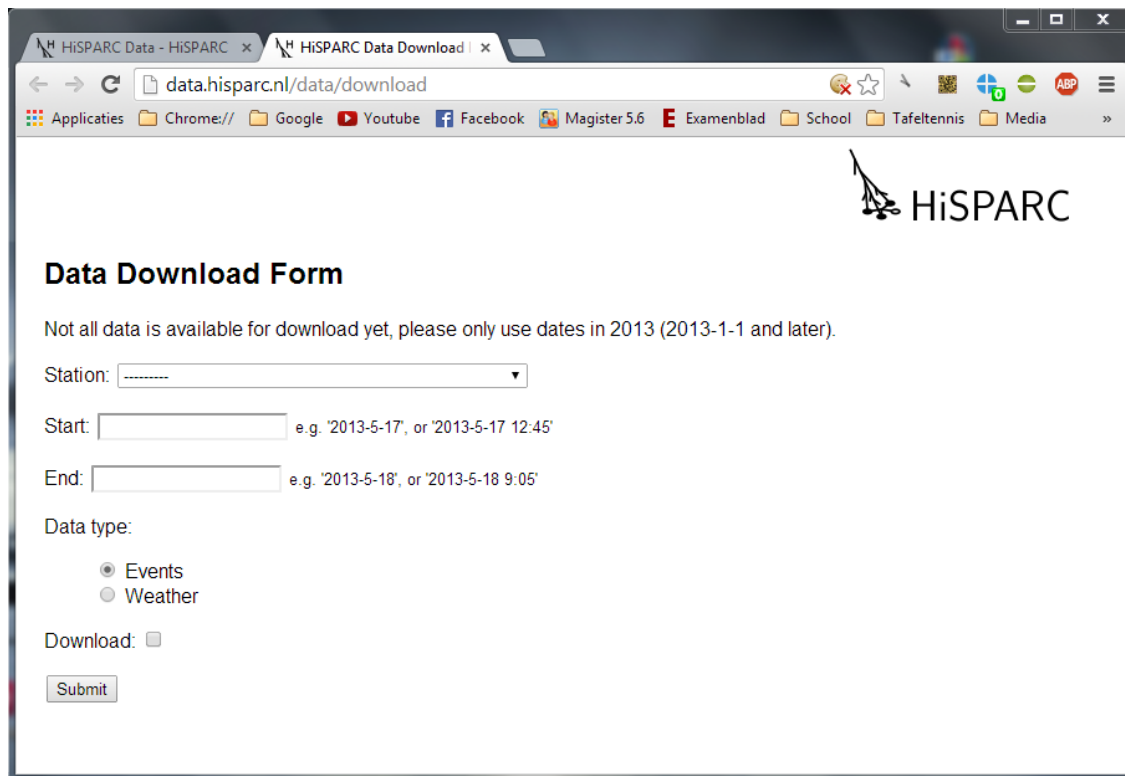
regel 11 word de URL geopend. Bij de eerste iteratie zal de begindatum worden ingevoerd. In regel 12 wordt het aantal events op de datum die in de URL is ingevoerd uitgelezen en vervolgens toegevoegd aan de events-array. In regel 13 wordt de bijbehorende datum toegevoegd aan de dates-array. Doordat het aantal events en de betreffende datum zich bevinden in dezelfde dimensie van hun array, zijn deze aan elkaar gekoppeld als de gegevens worden geplot. In regel 14 wordt er één dag opgeteld bij de datum die zojuist is gebruikt om de betreffende gegevens op te halen. Als de datum nog eerder is dan de einddatum, dan worden de regels 11 t/m 14 opnieuw uitgevoerd.

In regel 16 worden de dates-array en de events-array tegen elkaar uitgezet in een diagram. Bij de plotfunctie is het eerste argument de gegevens die op de x-as moeten worden uitgezet en het tweede argument de gegevens die op de y-as moeten worden uitgezet. In regel 17 is de showfunctie nodig om het diagram in beeld te brengen.

Hoewel alles in slechts 17 regels staat, kan het best lang duren voordat het diagram in beeld komt. Ten eerste doordat de while-loop op alle dagen in oktober, november, december en januari het aantal events moet ophalen, hetgeen neerkomt op 123 dagen. De voornaamste oorzaak is echter dat het plotten van de gegevens lang kan duren.

Downloadformulier

De gegevens die men met behulp van de API kan ophalen zijn echter beperkt. In hoofdstuk 6 is het aantal MIP's (Minimun Ionizing Particle) door een detector en de tijdsverschillen tussen de registraties vereist om de primaire energie te bepalen. Om gegevens van een aantal specifieke events over een bepaalde periode te verkrijgen, moet men niet de API raadplegen, maar een zogenaamd downloadformulier (zie **afbeelding 25**). Dit formulier is te benaderen door de volgende link te volgen: <http://data.hisparc.nl/data/download>.

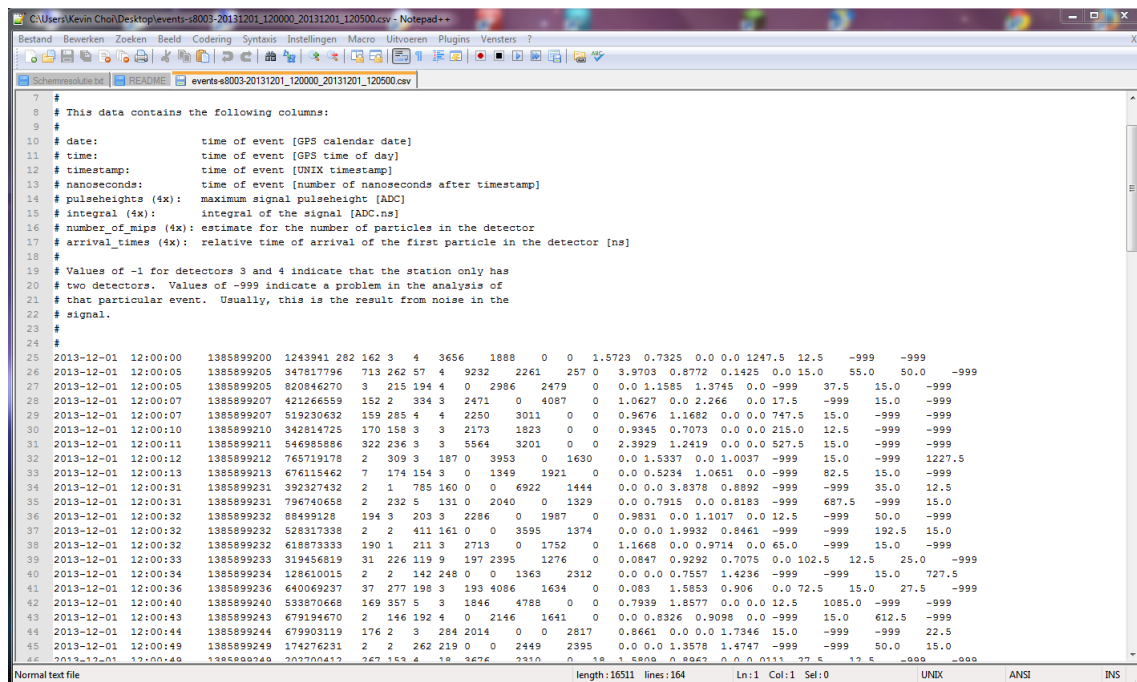


The screenshot shows a web browser window with two tabs: 'HiSPARC Data - HiSPARC' and 'HiSPARC Data Download'. The address bar shows the URL 'data.hisparc.nl/data/download'. The browser's toolbar includes various icons and a search bar. The main content area displays the 'HiSPARC' logo and the title 'Data Download Form'. Below the title, a message states: 'Not all data is available for download yet, please only use dates in 2013 (2013-1-1 and later)'. The form includes a 'Station:' dropdown menu, 'Start:' and 'End:' text input fields with example dates, a 'Data type:' section with radio buttons for 'Events' and 'Weather', a 'Download:' checkbox, and a 'Submit' button.

afbeelding 25: Het downloadformulier

Stel dat men gegevens wil hebben van alle events bij Pleincollege Sint-Joris op 1 december 2013 tussen 12:00 en 12:05. Men voert deze gegevens in in het formulier, controleert of onder het datatype 'Events' is gekozen en drukt vervolgens op de 'Submit'-knop. Er wordt een CSV-bestand¹² gedownload. In **afbeelding 26** is te zien hoe het bestand er uitziet als het met Notepad++, een uitgebreidere versie van het kladblokprogramma van Windows zelf, wordt geopend.

¹² Comma-separated values. Soms wordt het ook character-separated values genoemd, omdat voor de scheidingstekens in dergelijke bestanden niet per se komma's hoeven te worden gebruikt. (Wikipedia)

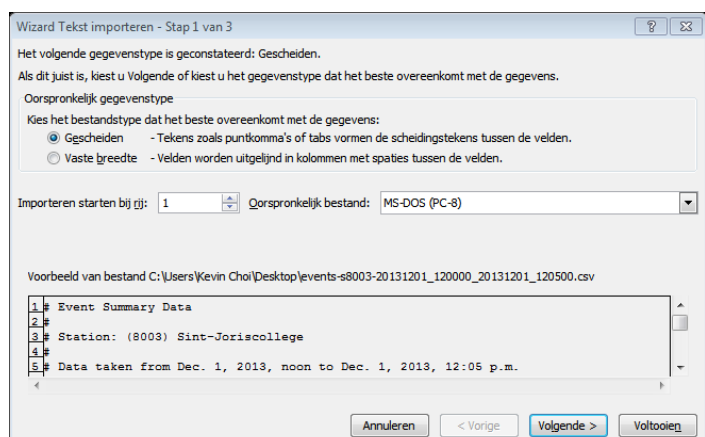


afbeelding 26: Een CSV-bestand geopend in Notepad++

In de eerste 24 regels worden de kolommen in het CSV-bestand toegelicht. In de kolommen staan van links naar rechts de volgende gegevens:

- de datum;
- het tijdstip, uitgedrukt in hh:mm:ss;
- de bijbehorende UNIX tijdstempel van de event. De UNIX tijdstempel duidt een moment aan uitgedrukt in seconden na 1 januari 1970, de Unix Epoch;
- het aantal nanoseconden na de tijdstempel. De GPS kan immers tijden registreren met een precisie van 100 nanoseconde;
- de gemeten pulshoogte van de doorgaans 4 detectoren in het meetstation. deze is met behulp van een ADC¹³ omzet in een binair;
- de integraal van het pulssignaal van de 4 detectoren, oftewel de oppervlakte onder de puls;
- het aantal MIP's van de 4 detectoren;
- de relatieve tijden van detectie van de 4 detectoren in nanoseconde.

Gegevens analyseren vanuit Notepad++ is echter niet handig. Men moet het bestand openen met behulp van Excel. Daartoe moet men niet vanuit Windows Verkenner het bestand openen met Excel, omdat men



afbeelding 27: de wizard bij het importeren van tekst

¹³ Analog-to-digital converter

anders alle gegevens in één kolom krijgt.

De juiste manier om gemakkelijk de gegevens in verschillende kolommen te plaatsen is via de functie 'Externe gegevens ophalen van tekst' onder het tabblad 'Gegevens'. Nadat men het betreffende CSV-bestand heeft geselecteerd verschijnt er een wizard in het beeldscherm (zie afbeelding 27). Vervolgens controleert men bij stap 1 of 'Gescheiden' is geselecteerd voor het oorspronkelijke gegevenstype en wijzigt men de rij waarbij het importeren begint in '25'. Bij stap 2 moet voor scheidingstekens alleen het hokje 'Tab' aangevinkt zijn. Bij het gegevenstype per kolom in de derde stap hoeft men niets aan te passen, omdat Excel automatisch kan herkennen tot welke gegevenstype de ingevoerde waarden behoren. Tot slot klikt men op 'Voltooien' en worden, nadat men heeft aangegeven waar de gegevens geplaatst moeten worden, alle gegevens naar behoren geïmporteerd (zie afbeelding 28).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	1-12-2013	12:00:00	1385899200	1243941	282	162	3	4	3656	1888	0	0	15.723	0.7325	0	0	1247.5	12.5	-999	-999
2	1-12-2013	12:00:05	1385899205	347817796	713	262	57	4	9232	2261	257	0	39.703	0.8772	0.1425	0	15	55	50	-999
3	1-12-2013	12:00:05	1385899205	820846270	3	215	194	4	0	2986	2479	0	0	11.585	13.745	0	-999	37.5	15	-999
4	1-12-2013	12:00:07	1385899207	421266559	152	2	334	3	2471	0	4087	0	10.627	0	2.266	0	17.5	-999	15	-999
5	1-12-2013	12:00:07	1385899207	519230632	159	285	4	4	2250	3011	0	0	0.9676	11.682	0	0	747.5	15	-999	-999
6	1-12-2013	12:00:10	1385899210	342814725	170	158	3	3	2173	1823	0	0	0.9345	0.7073	0	0	215	12.5	-999	-999
7	1-12-2013	12:00:11	1385899211	546985886	322	236	3	3	5564	3201	0	0	23.929	12.419	0	0	527.5	15	-999	-999
8	1-12-2013	12:00:12	1385899212	765719178	2	309	3	187	0	3953	0	1630	0	15.337	0	10.037	-999	15	-999	1227.5
9	1-12-2013	12:00:13	1385899213	676115462	7	174	154	3	0	1349	1921	0	0	0.5234	10.651	0	-999	82.5	15	-999
10	1-12-2013	12:00:31	1385899231	392327432	2	1	785	160	0	0	6922	1444	0	0	38.378	0.8892	-999	-999	35	12.5
11	1-12-2013	12:00:31	1385899231	796740658	2	232	5	131	0	2040	0	1329	0	0.7915	0	0.8183	-999	687.5	-999	15
12	1-12-2013	12:00:32	1385899232	88499128	194	3	203	3	2286	0	1987	0	0.9831	0	11.017	0	12.5	-999	50	-999
13	1-12-2013	12:00:32	1385899232	528317338	2	2	411	161	0	0	3595	1374	0	0	19.932	0.8461	-999	-999	192.5	15
14	1-12-2013	12:00:32	1385899232	618873333	190	1	211	3	2713	0	1752	0	11.668	0	0.9714	0	65	-999	15	-999
15	1-12-2013	12:00:33	1385899233	319456819	31	226	119	9	197	2395	1276	0	0.0847	0.9292	0.7075	0	102.5	12.5	25	-999
16	1-12-2013	12:00:34	1385899234	128610015	2	2	142	248	0	0	1363	2312	0	0	0.7557	14.236	-999	-999	15	727.5
17	1-12-2013	12:00:36	1385899236	640069237	37	277	198	3	193	4086	1634	0	0.083	15.853	0.906	0	72.5	15	27.5	-999
18	1-12-2013	12:00:40	1385899240	533870668	169	357	5	3	1846	4788	0	0	0.7939	18.577	0	0	12.5	1085	-999	-999

afbeelding 28: de resulterende tabel

De laatste vier kolommen Q, R, S en T, waarin de relatieve detectietijden van de vier¹⁴ detectoren staan, hebben regelmatig de waarde -999. Dit betekent dat de detector het tijdsverschil niet kan meten, wat gebruikelijk komt door een ruis in de uitleeselektronica. Tevens is het mogelijk dat een airshower net buiten het bereik van deze detectoren valt. In hoofdstuk 6 heeft men minstens drie detectoren nodig om de primaire energie uit te rekenen. Omdat bij veel events slechts twee tijden, bekend zijn, zijn deze niet bruikbaar. Tevens moeten bij de metingen dezelfde drie detectoren gebruikt worden.

¹⁴ Als voor de eigenschappen van detector 3 en/of 4 telkens de waarde -1 gegeven is, dan betekent dat het meetstation geen derde en/of vierde detector heeft.

HOOFDSTUK 6

*Dankzij het HiSPARC-project kan men kosmische straling door middel van onderzoek beter begrijpen. Het project is veelzijdig, omdat men allerlei aspecten van kosmische straling kan onderzoeken zoals de relatie tussen energie van kosmische deeltjes en het weer, de ontwikkeling van een airshower, de oorsprong van een primair deeltje, etc. In dit verslag wordt nader ingegaan op de relatie tussen het oppervlaktebereik van een airshower en de energie van het betreffende primaire deeltje. In dit hoofdstuk wordt het antwoord gegeven op de vraag: **hoe bepaalt men de primaire energie?***

Theorie

Het is mogelijk om bij één event de energie van het primaire deeltje, het kosmische deeltje voordat deze in de dampkring in andere elementaire deeltjes splijt, te kunnen achterhalen. De basis van de formule luidt (vergelijking 25 van stageverslag Manon Kok):

$$E = 4.0 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{N_i} \sum_i \frac{n_i}{\hat{S}(r_i)} \hat{S}(600)$$

De variabelen worden nog nader in dit verslag uitgelegd en uitgewerkt.

Om de energie van het primaire deeltje te kunnen achterhalen heeft men minstens drie detectoren nodig. Later in het verslag wordt uitgelegd waarom. Het is ook mogelijk om de energie te bepalen aan de hand van vier of meer detectoren. In het verslag wordt uitgelegd hoe men dat kan doen, maar bij het uitrekenen in Python wordt er gebruik gemaakt van slechts drie detectoren, omdat coïncidenties met vier detectoren minder voorkomen. (Kok, 2008)

Coördinaten van detectoren

Er zijn meerdere manieren om de locatie van de detectoren te bepalen. In dit verslag worden twee methodes beschreven. De eerste methode staat beschreven in het stageverslag van Manon Kok. De tweede methode, het omrekenen van geografische coördinaten naar RD-coördinaten, wordt in de energieberekening gehanteerd.

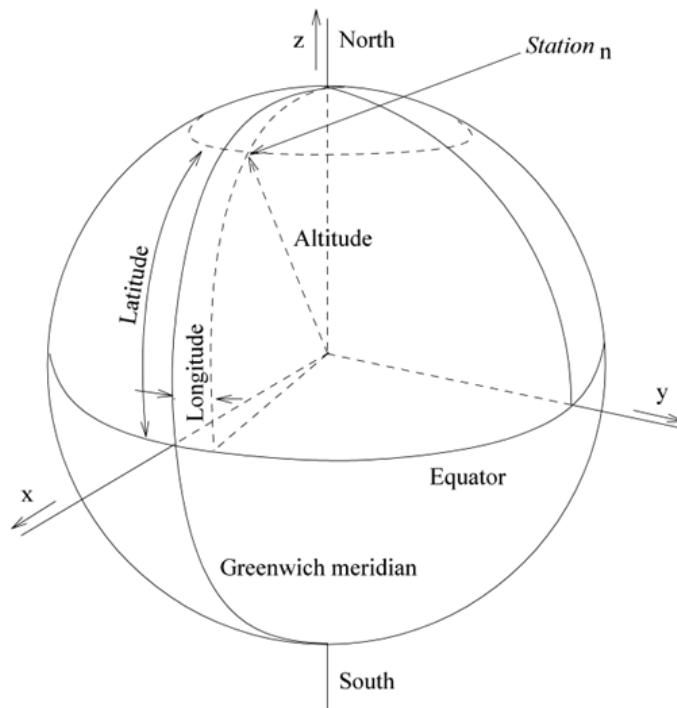
Methode van Manon Kok:

De energie van het primaire deeltje is onder meer afhankelijk van de hoek van inval van ioniserende deeltjes. Om deze te berekenen moet men eerst de coördinaten van de detectoren weten. Ieder station heeft een GPS die nauwkeurig de laterale en longitudinale positie kan bepalen. Het is echter de bedoeling dat er een tweedimensionaal coördinatensysteem (x', y') op het vlak van de drie detectoren wordt gedefinieerd. Daartoe moet men de ligging van de detectoren uitdrukken in coördinaten van het ECEF¹⁵-

¹⁵ Earth-Centered, Earth-Fixed

assenstelsel. In dit rechtshandige assenstelsel is de kern van de aarde de oorsprong. De x-as gaat door het snijpunt van de evenaar en de Greenwich-mediaan, de y-as gaat door het snijpunt van de evenaar en 90° Oosterlengte en de z-as gaat door de Noordpool. In **afbeelding 29** zijn zowel de geografische coördinaten als het EDEF-assenstelsel gevisualiseerd.

De coördinaten van de verschillende detectoren worden opgeslagen in de arrays $x[i]$, $y[i]$ en $z[i]$. De variabele i kan de waarde 0, 1, 2 hebben die ieder voor een andere detector staan. Vervolgens worden de relatieve posities $dx[i]$, $dy[i]$ en $dz[i]$ ten opzichte van “detector 0” bepaald. Dit betekent tevens dat $dx[0]$, $dy[0]$ en $dz[0] = 0$. Het maakt voor de berekening niet uit welke detector het referentiepunt is.



afbeelding 29: de geografische coördinaten en het EDEF-assenstelsel

Om het coördinatenstelsel van het vlak van de drie detectoren te definiëren, moet men de normaalvector van het vlak berekenen. Deze vector wijst van de aarde af. Teneinde deze normaalvector te berekenen, moet eerst het kruisproduct worden genomen van de vector van detector 0 naar detector 1 en de vector van detector 0 naar detector 2. Vervolgens moet de vector genormaliseerd worden. Dit wil zeggen dat de vector verkort of verlengd wordt, opdat deze een lengte van 1 heeft. De kentallen worden daardoor met dezelfde normalisatiefactor vermenigvuldigd.

Bij drie detectoren zijn er dus twee vectoren die luiden:

$$v_{01} = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx[1] \\ dy[1] \\ dz[1] \end{pmatrix}$$

$$v_{02} = \begin{pmatrix} x_2 - x_0 \\ y_2 - y_0 \\ z_2 - z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx[2] \\ dy[2] \\ dz[2] \end{pmatrix}$$

Het kruisproduct van de twee vectoren geeft:

$$w = v_{01} \times v_{02} = \begin{pmatrix} dy[1]dz[2] - dz[1]dy[2] \\ dz[1]dx[2] - dx[1]dz[2] \\ dx[1]dy[2] - dy[1]dx[2] \end{pmatrix}$$

De normaalvector is dus:

$$n = \frac{w}{|w|} = \frac{w}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}$$

Met behulp van deze normaalvector kan men de positie van de drie detectoren uitdrukken in x' en y' , de coördinaten in het vlak van de drie detectoren. De x' -as gaat naar het oosten en loopt parallel met de evenaar. De y' -as gaat naar het noorden en loopt parallel met de mediaan die door de oorsprong gaat van het coördinatensysteem. Er is tevens een z' -as die vanuit het midden van de Aarde komt, maar deze is voor de berekening van de hoek niet nodig. De y' -coördinaten worden gegeven door (formule 2 Manon Kok):

$$y'[i] = \frac{dz[i]}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}$$

De formule voor de x -coördinaten is afhankelijk van de x -component van de normaalvector. Indien de waarde daarvan niet gelijk is aan nul, wordt x' gegeven door (vergelijking 3 Manon Kok):

$$x'[i] = \frac{dy[i]\sqrt{w_x^2 + w_y^2} + y'[i]w_zw_y}{w_x}$$

Indien de waarde van w_x wel gelijk is aan nul, wordt x' gegeven door (vergelijking 4 Manon Kok):

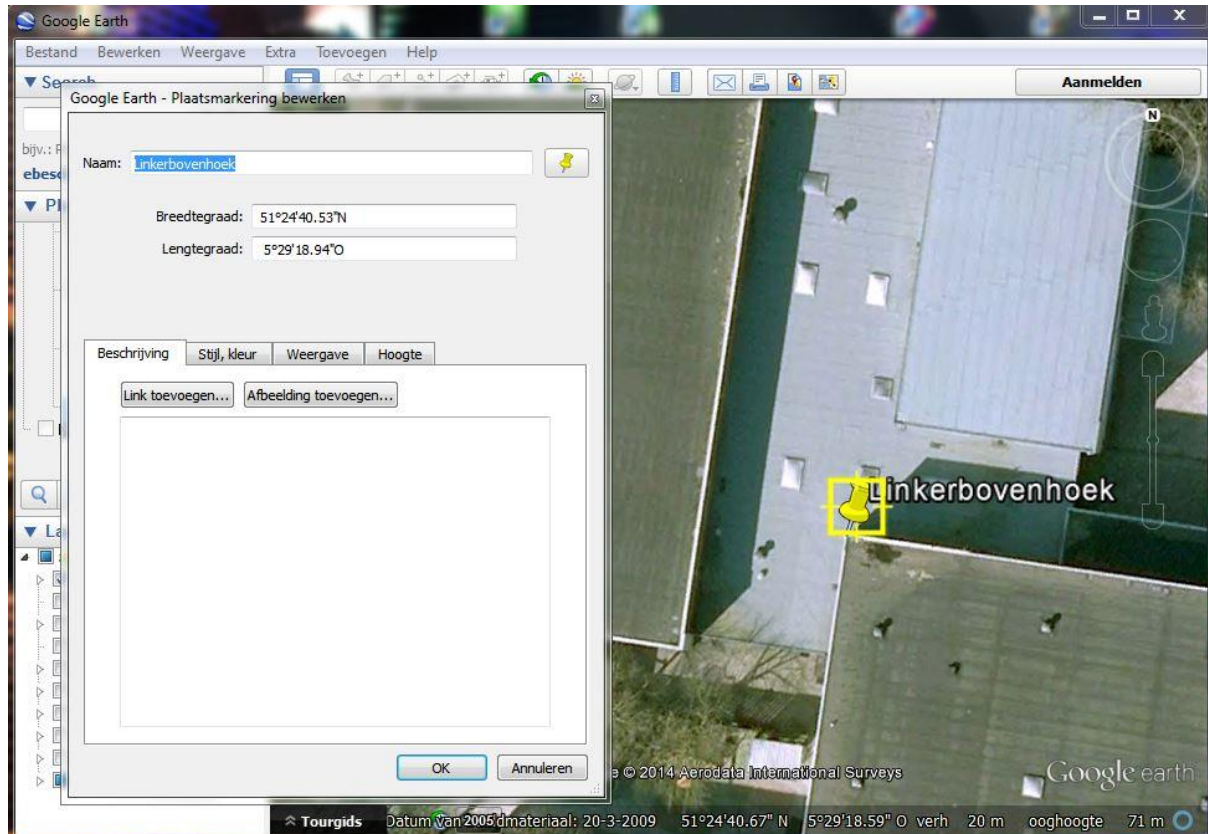
$$x'[i] = \frac{-(dx[i]\sqrt{w_x^2 + w_y^2} + y'[i]w_zw_x)}{w_y}$$

Omdat $dx[0]$, $dy[0]$ en $dz[0] = 0$ zal $x'[0]$ en $y'[0] = 0$. (Kok, 2008)

Methode van Govert Strang van Hees:

Opmerking: deze methode is gebaseerd op een profielwerkstuk van Sander Bloemen. Later is gebleken dat zijn metingen onjuist waren. De koers in het dak is gecorrigeerd, maar andere gegevens zijn niet verbeterd. De methode zelf klopt, hoewel er wel enige kanttekeningen zijn. Later in het verslag zijn de tekortkomingen nader toegelicht.

Bij de methode van Manon Kok is echter een probleem: deze methode kan alleen worden toegepast als iedere detector een GPS heeft, hetgeen bij die van het Sint-Joriscollege niet het geval is. Dit kan men oplossen door een andere methode te gebruiken. Daartoe bepaalt men door middel van Google Earth de positie van een referentiepunt. Dit punt moet men met de muis nauwkeurig kunnen aanwijzen zoals de linkerbovenhoek van het dak waarop de detectoren staan.



afbeelding 30: de positie bepalen met Google Earth

Op **afbeelding 30** is te zien dat de breedtegraad uitgedrukt in graden, minuten en seconden gelijk is aan $51^{\circ}24'40.53''\text{N}$. De lengtegraad is gelijk aan $5^{\circ}29'18.94''\text{O}$. Omgerekend in graden is dat equivalent aan $51,41125833^{\circ}\text{N}$ en $5,488594444^{\circ}\text{O}$. Deze coördinaten kunnen worden omgezet in RD-coördinaten¹⁶. Dit is vergelijkbaar met de x' - en y' -coördinaten van de methode die in het stageverslag van Manon Kok beschreven is. In een online benaderbaar boek van Govert Strang van Hees wordt uitgelegd hoe men geografische coördinaten kan omrekenen in RD-coördinaten:

*De stereografische projectie in Nederland is een zogenaamde dubbelprojectie. Dit wil zeggen, dat de punten op de ellipsoïde van Bessel eerst worden geprojecteerd op de bol volgens de conforme projectie van Gauss. Vervolgens worden de punten op de bol geprojecteerd in het platte vlak volgens de stereografische projectie. De formules zijn beschreven in het boek *Radio Positioning at Sea* door G. Bakker, J.C. de Munck en G.L. Strang van Hees (Delft, 1989).*

¹⁶ Rijksdriehoekskoördinaten: de coördinaten die voor Europees Nederland op nationaal niveau worden gebruikt als grondslag voor geografische aanduidingen en bestanden (Wikipedia).

Hieronder volgen de constanten en de formules voor de praktische berekening:

Constanten	
Ellipsoïde van Bessel (1841):	$a = 6\,377\,397,155\text{ m}$
excentriciteit	$e = 0,081\,696\,8312\,22$
Basispunt Amersfoort:	
breedte op ellipsoïde	$\varphi_0 = 52^\circ,156\,160\,556$
lengte op ellipsoïde	$\lambda_0 = 5^\circ,387\,638\,889$
breedte op bol	$B_0 = 52^\circ,121\,097\,249$
lengte op bol	$L_0 = 5^\circ,387\,638\,889$
Constanten Gauss-projectie:	$n = 1,000\,475\,856\,68$
	$m = 0,003\,773\,953\,832$
straal bol	$R = 6382\,644,571\text{ m}$
Constanten RD-systeem:	$k = 0,999\,9079$
	$x_0 = 155\,000\text{ m}$
	$y_0 = 463\,000\text{ m}$

afbeelding 31: constanten

In het boek staan voor het omrekenen van geografische naar RD-coördinaten de volgende formules (Hees, 2006):

$$q' = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)$$

$$\Delta q = \frac{1}{2} e \ln \left(\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right)$$

$$q = q' - \Delta q$$

$$w = nq + m$$

$$B = 2 \arctan(\exp[w]) - 90^\circ$$

$$\Delta L = n(\lambda - \lambda_0)$$

$$\sin^2 \frac{1}{2} \psi = \sin^2 \frac{1}{2} (B - B_0) + \sin^2 \frac{1}{2} \Delta L \cos B \cos B_0$$

$$\cos \frac{1}{2}\psi = \left(1 - \sin^2 \frac{1}{2}\psi\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tan \frac{1}{2}\psi = \frac{\sin \frac{1}{2}\psi}{\cos \frac{1}{2}\psi}$$

$$\sin \psi = 2 \sin \frac{1}{2}\psi \cos \frac{1}{2}\psi$$

$$\cos \psi = 1 - 2 \sin^2 \frac{1}{2}\psi$$

$$\sin \alpha = \sin \Delta L \frac{\cos B}{\sin \psi}$$

$$\cos \alpha = \frac{\sin B - \sin B_0 \cos \psi}{\cos B_0 \sin \psi}$$

$$r = 2kR \tan \frac{1}{2}\psi$$

$$x = r \sin \alpha + x_0$$

$$y = r \sin \alpha + y_0$$

Hierbij is φ de breedtegraad en λ de lengtegraad. Met behulp van Python kan men eenvoudig een script schrijven die dit allemaal berekent (zie [code 2](#)). Uit deze code blijkt dat bij de hoeken $\varphi = 51,41125833^\circ$ en $\lambda = 5,488594444^\circ$ de RD-coördinaten $x = 162022,801923$ [m] en $y = 380140,583199$ [m] zijn.

```

1.  # -*- coding: utf-8 -*-
2.
3.  from math import atan, cos, exp, log, pi, sin, sqrt
4.
5.  class Coördinaten:
6.      def __init__(self):
7.          #constanten ellipsoïde
8.          self.a = 6377397.155
9.          self.e = 0.081696831222
10.
11.         #basispunt Amersfoort
12.         self.phi_0 = 52.156160556 * pi / 180.0
13.         self.labda_0 = 5.387638889 * pi / 180.0
14.         self.B_0 = 52.121097249 * pi / 180.0
15.         self.L_0 = self.labda_0
16.
17.         #Gauss-projectie
18.         self.n = 1.00047585668
19.         self.m = 0.003773953832
20.
21.         #straal bol
22.         self.R = 6382644.571
23.
24.         #constanten RD-systeem
25.         self.k = 0.9999079
26.         self.x_0 = 155000.0

```

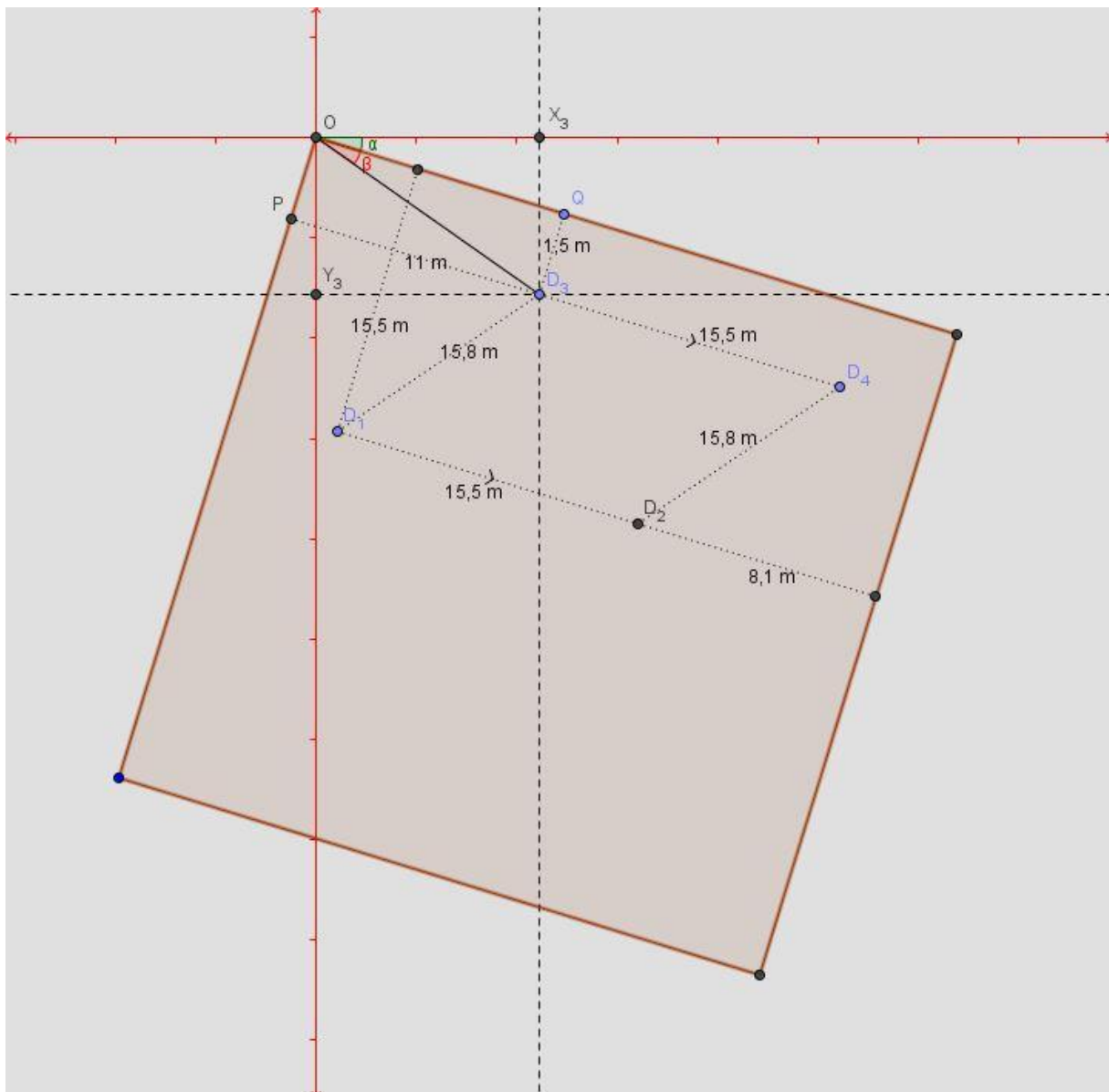
```

27.         self.y_0 = 463000.0
28.
29.     print "\nInvoer (in graden):"
30.     while True:
31.         try:
32.             self.phi = float(raw_input("Breedtegraad (phi) = "))
33.             self.phi *= pi / 180.0
34.             break
35.         except ValueError:
36.             print "Ongeldige waarde. Probeer nogmaals."
37.
38.     while True:
39.         try:
40.             self.labda = float(raw_input("Lengtegraad (labda) = "))
41.             self.labda *= pi / 180.0
42.             break
43.         except ValueError:
44.             print "Ongeldige waarde. Probeer nogmaals."
45.
46.     def BerekenGeoNaarRD(self):
47.         tlr = 1 + sin(self.phi)
48.         nmr = 1 - sin(self.phi)
49.         q_accnt = 0.5 * log(tlr / nmr)
50.         tlr = 1 + self.e * sin(self.phi)
51.         nmr = 1 - self.e * sin(self.phi)
52.         Delta_q = 0.5 * self.e * log(tlr / nmr)
53.         q = q_accnt - Delta_q
54.         w = self.n * q + self.m
55.         B = 2 * atan(exp(w)) - 0.5 * pi
56.         Delta_L = self.n * (self.labda - self.labda_0)
57.         sin2halfpsi = sin(0.5 * (B - self.B_0)) ** 2
58.         sin2halfpsi += sin(0.5 * Delta_L) ** 2 * cos(B) * cos(self.B_0)
59.         sinhalfpsi = sqrt(sin2halfpsi)
60.         coshalfpsi = (1 - sin2halfpsi) ** 0.5
61.         tanhalfpsi = sinhalfpsi / coshalfpsi
62.         sinpsi = 2 * sinhalfpsi * coshalfpsi
63.         cospsi = 1 - 2 * sin2halfpsi
64.         sinalfa = sin(Delta_L) * (cos(B)/sinpsi)
65.         cosalfa = sin(B) - sin(self.B_0) * cospsi
66.         cosalfa /= cos(self.B_0) * sinpsi
67.         r = 2 * self.k * self.R * tanhalfpsi
68.         x = r * sinalfa + self.x_0
69.         y = r * cosalfa + self.y_0
70.
71.         return x, y
72.
73.     Hoekpunt = Coördinaten()
74.     ans = Hoekpunt.BerekenGeoNaarRD()
75.     print "\nDe RD-coördinaten:"
76.     print "X = %f" % ans[0]
77.     print "Y = %f" % ans[1]

```

code 2

Op de satellietbeelden van Google Earth zijn de detectoren niet te zien. Wel is er een oud profielwerkstuk van Sander Bloemen die de ligging van de detectoren op het dak in een schets heeft uiteengezet. In [afbeelding 32](#) is met behulp van GeoGebra een schets gemaakt van de situatie.



afbeelding 32: het dak en de posities van de detectoren (niet op schaal)

Hoek α is de hoek tussen de bovenste zijde van het dak en de OW-as. Deze hoek is even groot als de koers, de hoek tussen de linkerzijde van het dak en de NZ-as. Met behulp van Google Earth kan deze hoek gemeten worden (zie **afbeelding 33**). Uit de meting blijkt die koers $\alpha = 8,45^\circ$ te zijn.

Met behulp van **afbeelding 32** en de gegeven RD-coördinaten van de linkerbovenhoek van het dak, kan men de RD-coördinaten van de vier detectoren bepalen. In de afbeelding zijn twee streeplijnen bijgetekend die beide door



afbeelding 33: koers bepalen

detector 3 gaan. De ene streeplijn loopt parallel met de NZ-as en gaat door het punt X_3 op de OW-as en de andere loopt parallel met de OW-as en gaat door het punt Y_3 op de NZ-as.

OX_3 en OY_3 worden dus op de volgende manier berekend:

$$OD_3 = \sqrt{PD_3^2 + QD_3^2}$$

$$\beta = \arctan \frac{QD_3}{PD_3}$$

$$OX_3 = OD_3 \cos(\alpha + \beta)$$

$$OY_3 = OD_3 \sin(\alpha + \beta)$$

Invullen geeft dat $OX_3 = 10,66$ [m] en $OY_3 = 3,10$ [m]. Omdat van punt 0 de RD-coördinaten bekend zijn kan men bepalen wat de RD-coördinaten van detector 3 zijn. In **tabel 5** staan die van alle vier de detectoren.

	x [m]	y [m]
Detector 1	161791.371643749	379352.467074509
Detector 2	161805.908643749	379357.049074509
Detector 3	161805.3616	379342.6171
Detector 4	161809.9556	379343.1851

tabel 5: RD-coördinaten van de detectoren

Waarom hanteert men RD-coördinaten als alleen de relatieve posities van de detectoren van belang zijn voor de berekening van de energie? Dit wordt gedaan met het oog op de toekomstige leerlingen die gaan meewerken aan het HiSPARC-project. Als men de gegevens van meerdere stations wil gebruiken, dan is het gebruik van RD-coördinaten handig om de relatieve posities te bepalen.

Tekortkomingen

Vlak voor de inleverdatum blijkt dat de kaart van Sander Bloemen onjuist is. In **tabel 6** staan de juiste coördinaten. Het is echter onduidelijk waar de oorsprong van het assenstelsel zich bevindt en hoe de metingen zijn verricht. Hierdoor is het op het moment niet mogelijk om de juiste RD-coördinaten van de detectoren te bepalen. Het is aangeraden dat toekomstige leerlingen die deelnemen aan het HiSPARC-project de bijbehorende RD-coördinaten gaan bepalen.

	x [m]	y [m]
Detector 1	36.4	14.8
Detector 2	38.9	30.1
Detector 3	24.2	24.8
Detector 4	26.6	40.1

tabel 6: de juiste plaatcoördinaten

De meetmethode is betrouwbaar, maar er is een andere en ook logischere manier om de RD-coördinaten van de detectoren te bepalen. Zo is er geen gebruik gemaakt van de GPS van het meetstation. Het is handiger als men de GPS als referentiepunt neemt, omdat men zijn exacte locatie kan ophalen. Dit is gemakkelijker dan met Google Earth de geografische coördinaten van een referentiepunt bepalen. De geografische coördinaten van de GPS kan men met behulp van de methode van Govert Strang van Hees omrekenen in RD-coördinaten. Als men de relatieve posities van de detectoren ten opzichte van de GPS bepaalt, kan men de RD-coördinaten van de detectoren bepalen.

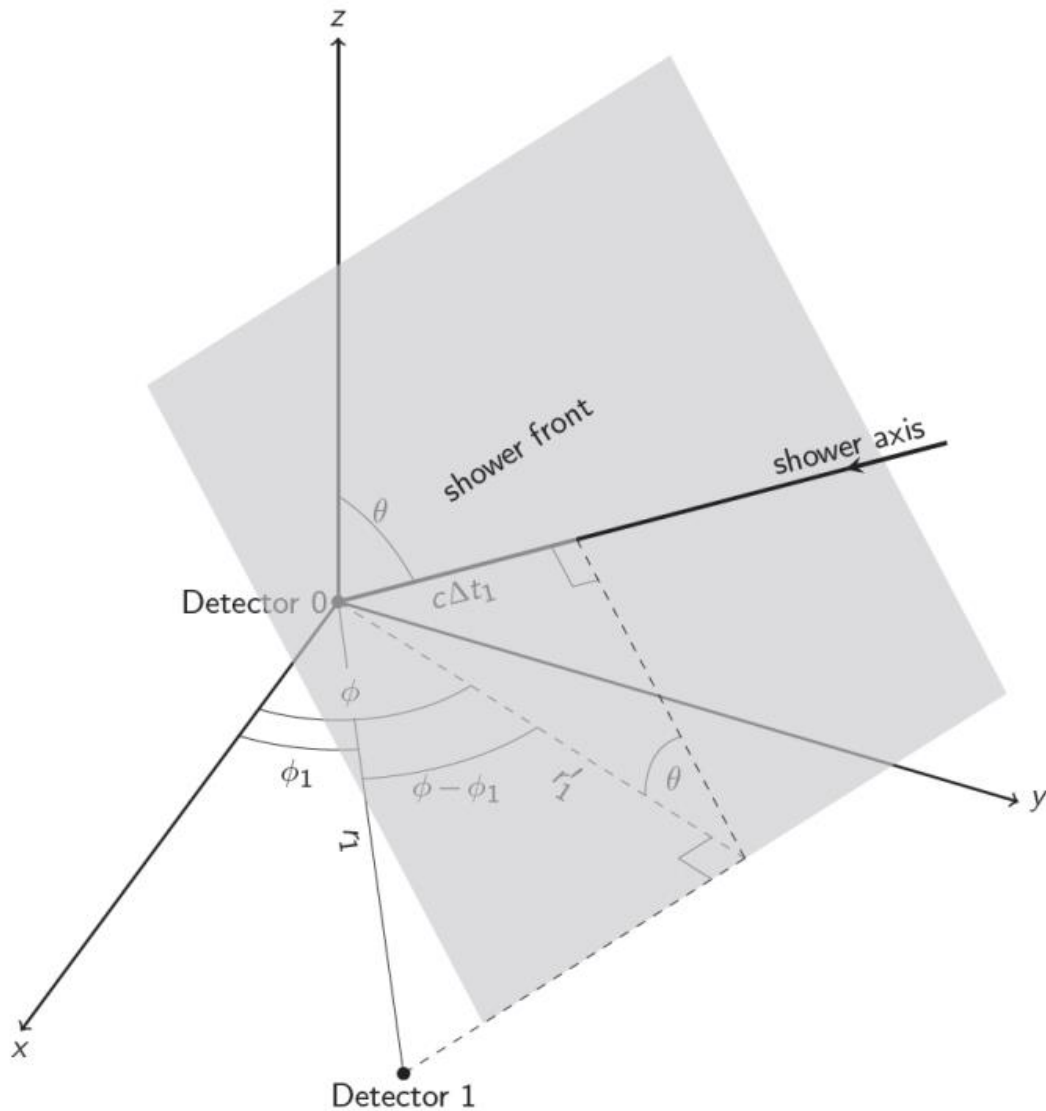
Hoeken van detectoren

Bij de richtingsbepaling van een invallend deeltje zijn twee hoeken belangrijk:

- De zenithhoek, de hoek tussen de shower-as, de as die parallel loopt met de invallende straling en het zenit. Met het zenit wordt hier een lijn bedoeld die vanuit detector 0 recht naar boven gaat. De zenithhoek wordt aangeduid met de Griekse letter θ (theta).
- De azimuthhoek, de hoek tussen de x-as (x' en y' worden nu x en y genoemd) en een denkbeeldige lijn die onder de shower-as over het vlak loopt. Eigenlijk is het geen azimuthhoek omdat de x-as niet naar het noorden wijst, maar naar het oosten. De hoek wordt aangeduid met de Griekse letter ϕ (phi).

In afbeelding 34 zijn deze hoeken gevisualiseerd, waarbij:

- ϕ_i , de hoek tussen de x-as en de lijn tussen detector 0 en detector i .
- r_i , de afstand tussen detector 0 en detector i .
- r'_i , de afstand tussen detector 0 en het punt waarop de denkbeeldige lijn onder de shower-as loodrecht snijdt met de denkbeeldige lijn tussen detector i en dat punt.
- $\phi - \phi_i$, de hoek tussen r_i en r'_i .
- Δt_i , het tijdsverschil tussen het moment dat detector 0 een deeltje registreert en dat van detector i .
- $c\Delta t_i$, het verschil tussen de afgelegde weg van de straling naar detector 0 en die naar detector i , dat gelijk is aan het product van het tijdsverschil en de lichtsnelheid.



afbeelding 34: assenstelsel met inkomende shower

In de afbeelding is ook te zien dat men veronderstelt dat alle deeltjes van de airshower uit dezelfde richting komen. Deze veronderstelling is gebaseerd op het feit dat de afstand tussen de detectoren en het midden van een airshower (de showercore) veel groter is dan de doorsnee van de airshower.

In **afbeelding 34** zijn tevens de volgende vier vergelijkingen af te leiden (vergelijking 5 Manon Kok):

$$\tan \phi_i = \frac{y_i}{x_i}$$

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$r'_i = r_i \cos(\phi - \phi_i)$$

$$c\Delta t_i = r'_i \sin \theta$$

Uit de laatste twee formules en uit het feit dat er drie detectoren bij de coïncidentie betrokken zijn kan men de volgende twee vergelijkingen opstellen (vergelijking 6 en 7 Manon Kok):

$$c\Delta t_1 = r_1 \cos(\phi - \phi_1) \sin \theta$$

$$c\Delta t_2 = r_2 \cos(\phi - \phi_2) \sin \theta$$

Uit deze formules kan men ook concluderen dat er minimaal drie detectoren nodig zijn om de twee hoeken en dus de primaire energie te bepalen. Twee onbekende waarden, in dit geval ϕ en θ , kunnen alleen worden berekend in een stelsel van minstens twee vergelijkingen.

Om ϕ en θ te berekenen moet men dus het volgende stelsel oplossen:

$$\begin{cases} c\Delta t_1 = r_1 \cos(\phi - \phi_1) \sin \theta \\ c\Delta t_2 = r_2 \cos(\phi - \phi_2) \sin \theta \end{cases}$$

De ϕ :

Allereerst wordt ϕ bepaald door de onderste vergelijking te delen door de bovenste vergelijking, opdat $\sin \theta$ (en ook c) weggestreept kan worden. Deze kan weer afgeleid worden tot een andere vorm (vergelijking 8 Manon Kok):

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{r_2 \cos(\phi - \phi_2)}{r_1 \cos(\phi - \phi_1)}$$

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{r_2 \cos \phi \cos \phi_2 + \sin \phi \sin \phi_2}{r_1 \cos \phi \cos \phi_1 + \sin \phi \sin \phi_1}$$

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{r_2 \cos \phi_2 + \tan \phi \sin \phi_2}{r_1 \cos \phi_1 + \tan \phi \sin \phi_1}$$

$$(\cos \phi_1 + \tan \phi \sin \phi_1) \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{r_2}{r_1} (\cos \phi_2 + \tan \phi \sin \phi_2)$$

$$\cos \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} - \frac{r_2}{r_1} \cos \phi_2 = \tan \phi \sin \phi_2 \frac{r_2}{r_1} - \tan \phi \sin \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$$

$$\tan \phi = \frac{\cos \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} - \frac{r_2}{r_1} \cos \phi_2}{\sin \phi_2 \frac{r_2}{r_1} - \sin \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

$$\tan \phi = \frac{\cos \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \frac{r_1}{r_2} - \cos \phi_2}{\sin \phi_2 - \sin \phi_1 \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \frac{r_1}{r_2}}$$

Allereerst wordt de verschilformule van de cosinus toegepast. Vervolgens worden de teller en de noemer van de meest rechtse breuk vermenigvuldigd met $1/\cos \phi$. Daarna wordt $\cos \phi_1 + \tan \phi \sin \phi_1$ aan de andere kant gezet. De elementen met $\tan \phi$ worden dan aan een kant gezet, wat in dit geval het rechterlid is. Uiteindelijk wordt $\tan \phi$ vrijgemaakt en worden de teller en de noemer van de breuk vermenigvuldigd met r_1/r_2 .

In afbeelding 34 kan men de volgende vergelijkingen afleiden (vergelijking 9 Manon Kok):

$$\sin \phi_1 = \frac{y_1}{r_1}$$

$$\sin \phi_2 = \frac{y_2}{r_2}$$

$$\cos \phi_1 = \frac{x_1}{r_1}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{x_2}{r_2}$$

Substitutie geeft dan (vergelijking 10 Manon kok):

$$\tan \phi = \frac{\frac{x_1}{r_1} \frac{t_2}{t_1} \frac{r_1}{r_2} - \frac{x_2}{r_2}}{\frac{y_2}{r_2} - \frac{r_1}{r_2} \frac{t_2}{t_1} \frac{y_1}{r_1}}$$

$$\tan \phi = \frac{x_1 \frac{t_2}{t_1} \frac{1}{r_2} - \frac{x_2}{r_2}}{\frac{y_2}{r_2} - \frac{1}{r_2} \frac{t_2}{t_1} y_1}$$

$$\tan \phi = \frac{x_1 t_2 - x_2 t_1}{y_2 t_1 - t_2 y_1}$$

Na het substitueren kunnen alle r_1 's in de formule weggestreept worden. Vervolgens kunnen de teller en de noemer vermenigvuldigd worden met $r_2 t_1$.

De formule voor ϕ luidt dus (vergelijking 11 van Manon Kok):

$$\phi = \arctan \left(\frac{x_1 \Delta t_2 - x_2 \Delta t_1}{y_2 \Delta t_1 - \Delta t_2 y_1} \right)$$

De θ :

Vervolgens kan θ bepaald worden aan de hand van vergelijking 6 uit het stageverslag van Manon Kok (vergelijking 12 Manon Kok):

$$c \Delta t_1 = r_1 \cos(\phi - \phi_1) \sin \theta$$

$$\sin \theta = \frac{c\Delta t_1}{r_1 \cos(\phi - \phi_1)}$$

$$\sin \theta = \frac{c\Delta t}{r_1 \cos \phi \cos \phi_1 + r_1 \sin \phi \sin \phi_1}$$

$$\sin \theta = \frac{c\Delta t_1}{x_1 \cos \phi + y_1 \sin \phi}$$

Bij de berekening wordt allereerst $\sin \theta$ vrijgemaakt. Vervolgens wordt de verschilformule van de cosinus gehanteerd en worden per slot van rekening $\cos \phi_1$ en $\cos \phi_2$ gesubstitueerd door respectievelijk x_1/r_1 en x_2/r_2 .

Als Δt_1 ongelijk is aan nul, dan wordt θ gegeven door (vergelijking 13 Manon Kok):

$$\theta = \left| \arcsin \left(\frac{c\Delta t_1}{x_1 \cos \phi + y_1 \sin \phi} \right) \right|$$

Als Δt_1 wel gelijk is aan nul en Δt_2 niet, dan moet in plaats van vergelijking 6 vergelijking 7 worden gebruikt om θ te bepalen (vergelijking 14 Manon Kok):

$$\theta = \left| \arcsin \left(\frac{c\Delta t_2}{x_2 \cos \phi + y_2 \sin \phi} \right) \right|$$

Als zowel Δt_1 als Δt_2 gelijk zijn aan nul, dan betekent dat θ en ϕ eveneens gelijk zijn aan nul. De airshower komt dan recht van boven, vanuit het zenit.

Het is tevens mogelijk om deze berekeningen uit te voeren met meer dan drie detectoren. Als men eerst voor alle betrokken detectoren de posities bepaald kan men $N - 1$ formules opstellen die gelijkenis hebben met de vergelijkingen 6 en 7 van Manon Kok, waarbij N het aantal detectoren is.

Om ϕ te bepalen, heeft men twee vergelijkingen nodig die met elkaar gedeeld moeten worden. Indien er meer dan drie detectoren gebruikt zijn, heeft men keuze uit meerdere combinaties van twee vergelijkingen: $C = \binom{N}{2}$. In feite zouden alle combinaties (vrijwel) dezelfde waarde van ϕ moeten opleveren, maar voor de nauwkeurigheid kan men het beste alle mogelijke combinaties uitrekenen en vervolgens het gemiddelde daarvan te nemen, aangezien het geen extra rekenkracht vereist.

Om vervolgens θ te bepalen, is slechts één vergelijking nodig. Eerder in het verslag is uitgelegd dat men de eerste vergelijking neemt om θ te berekenen en, indien Δt_1 nul is, de tweede vergelijking wordt gebruikt in plaats van de eerste. Pas als alle tijdsverschillen gelijk zijn aan nul, mag worden geconcludeerd dat de airshower recht van boven komt. Een andere methode om θ te berekenen is dat men, net als bij ϕ , alle vergelijkingen gebruikt om θ uit te rekenen en vervolgens het gemiddelde neemt. Ook hier geldt dat de extra berekeningen geen rekenkracht kosten.

Energiebepaling

De energie van het primaire deeltje kan ofwel experimenteel ofwel theoretisch bepaald worden. Het is in het HiSPARC-project niet mogelijk om de primaire energie experimenteel te bepalen. De theoretische methode is echter minder nauwkeurig, maar is nu de enige optie.

Er zijn verscheidende eigenschappen van de shower afhankelijk van de primaire energie van een kosmisch deeltje. Belangrijke eigenschappen zijn onder meer de afstand tussen detector en showercore, de muondichtheid van de airshower en, wat zojuist is uitgerekend, de zenithhoek van de shower-as. Omdat er veel meer factoren afhankelijk zijn van de primaire energie, zullen in dit verslag niet alle factoren nader worden besproken.

Bij AGASA:

Het verband tussen alle factoren kan alleen empirisch worden bepaald. Het HiSPARC-project kan worden vergeleken met het AGASA¹⁷-experiment in Japan. Daar wordt evenals bij HiSPARC gewerkt met scintillatoren. Wel moet men er rekening mee houden dat de ligging van deze detectoren hoger is, hetgeen invloed heeft op de energie van het primaire deeltje. Het AGASA-experiment wordt immers uitgevoerd in Akeno dat 200 meter boven zeeniveau ligt.

In het AGASA-experiment is het volgende verband gevonden (vergelijking 15 Manon Kok):

$$S(r) = N_e C_e R^{-\alpha} (1 + R)^{-(\eta - \alpha)} \left[1.0 + \left(\frac{r}{2000} \right)^2 \right]^{-0.6} \quad \text{met } R = \frac{r}{r_{mol}}$$

Waarbij:

- $S(r)$, 'het gemiddelde energieverlies van elektronen, fotonen en muonen in de scintillator, uitgedrukt in eenheden van het energieverlies van verticaal binnengedrongen muonen';
- N_e , het aantal geladen deeltjes (met name elektronen);
- $R = \frac{r}{r_{mol}}$
 - r_{mol} , de Molière unit, gelijk aan 91.60;
 - r , de afstand tussen de detector en de showercore;
- $\alpha = 1.2$;
- $\eta = 3.97 - 1.79(\sec \theta - 1)$;
- C_e , een normalisatieconstante.

Deze formule geldt echter alleen als de shower recht van boven komt, hetgeen zelden het geval is. De formule moet worden gecorrigeerd voor de hoek θ waaronder de shower inkomt. In het AGASA-experiment luidt de formule (vergelijking 16 Manon Kok):

$$S_\theta(r) = S_0(r) \cdot \exp \left[-\frac{x_{obs}}{\lambda} (\sec \theta - 1) - \frac{x_{obs}}{\lambda_2} (\sec \theta - 1)^2 \right]$$

¹⁷ Akeno Giant Air Shower Array

Waarbij:

- $S_\theta(r)$, het gemiddelde energieverlies bij een invalshoek van θ ;
- $S_0(r)$, het gemiddelde energieverlies bij een invalshoek van 0° ;
- λ , de absorptielengte van de shower. De waarde is tevens afhankelijk van het type detector, aangezien scintillators gevoelig zijn voor elektronen en fotonen met weinig energie. Bij AGASA is de waarde gelijk aan $500 \pm 50 \text{ g cm}^{-2}$;
- $\lambda_2 = 594 \text{ g cm}^{-2}$;
- x_{obs} , de atmosferische diepte bij de waarnemingsplaats. Deze heeft bij AGASA een waarde van 920 g cm^{-2} .

De correctieformule kan men gebruiken voor hoeken tot $\theta = 45^\circ$. Als men wil corrigeren voor hoeken die groter zijn, moet de correctieformule uitgebreid worden. Voor hoeken tot $\theta = 60^\circ$ moet de volgende correctiefactor worden gebruikt (vergelijking 19 Manon Kok):

$$\exp \left[-\frac{x_{obs}}{\lambda}(\sec \theta - 1) - \frac{x_{obs}}{\lambda_2}(\sec \theta - 1)^2 - \frac{x_{obs}}{\lambda_3}(\sec \theta - 1)^3 \right]$$

Uit ervaring is gebleken dat het gebruik van de correctieformule leidt tot resultaten die meer overeenkomen met de experimentele resultaten. De energie van het primaire deeltje wordt bij AGASA met de volgende vergelijking berekend (formule 17 Manon Kok):

$$E_0[\text{eV}] = 2.0 \cdot 10^{17} \cdot S(600)_{AG}^{1.0}$$

Bij de bepaling van de energie wordt er expliciet gekozen voor een afstand tussen de detector en de showercore van 600. Er blijkt hiervoor een algemene consensus te zijn gesloten.

Bij HiSPARC:

Voor de energiebepaling van HiSPARC wordt er gebruik gemaakt van de formules die vergelijkbaar zijn met die van AGASA. In andere onderzoeken naar airshowers zijn andere formules gevonden, maar omdat het AGASA-project de meeste gelijkenissen heeft met HiSPARC, wordt er gekozen voor de hierboven beschreven vergelijkingen.

Uit simulaties is gebleken dat het aantal deeltjes op zeeniveau grofweg gehalveerd is ten opzichte van het aantal deeltjes op 200 meter hoogte bij Akeno in Japan. Het energieverlies is eveneens gehalveerd en om die reden wordt bij HiSPARC de berekening aangepast tot (vergelijking 20 Manon Kok):

$$E_0[\text{eV}] = 4.0 \cdot 10^{17} \cdot S(600)$$

Bij HiSPARC wordt $S(r)$ in een andere vorm geschreven (vergelijking 21 Manon Kok):

$$S(r) = kR^{-\alpha}(1 + R)^{-(\eta-\alpha)} \left[1.0 + \left(\frac{r}{1000} \right)^2 \right]^{-0.6}$$

$$S(r) = k\hat{S}(r)$$

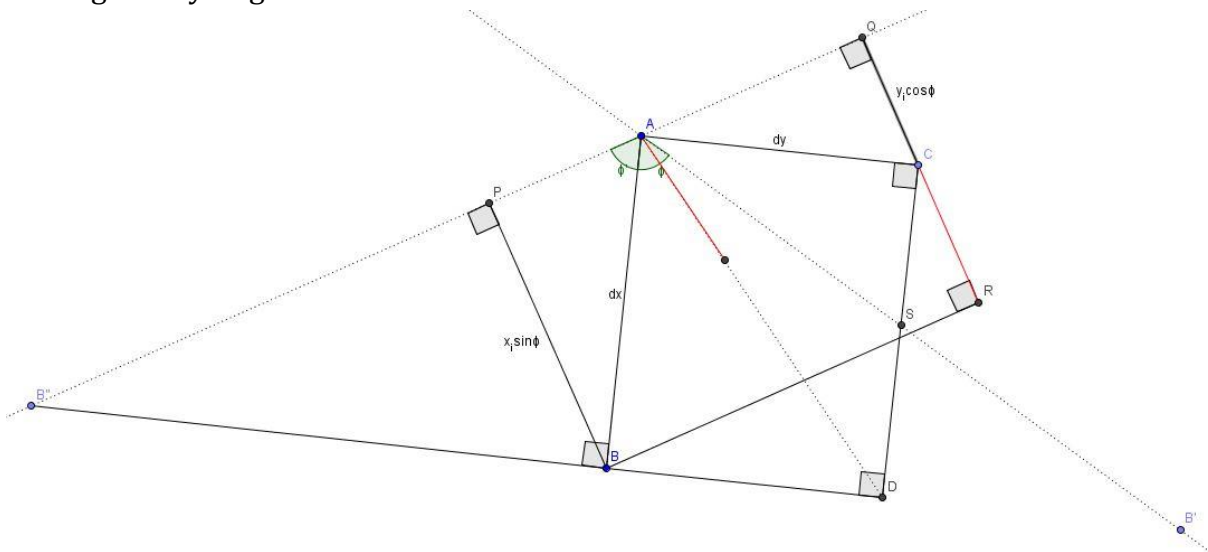
Het enige verschil met de vergelijking van AGASA is dat er in de formule gedeeld wordt door 1000 in plaats van 2000. Het is echter niet helemaal zeker of er gekozen moet worden voor 1000 of 2000, maar het heeft slechts een kleine invloed op $S(r)$. In de formule geldt tevens dat $k = N_e C_e$. Het aantal geladen deeltjes en de normalisatieconstante kan in het HiSPARC-project niet worden bepaald. Wel kan k aan de hand van een andere vergelijking worden berekend (vergelijking 22 Manon Kok):

$$n_i = k\hat{S}(r_i)$$

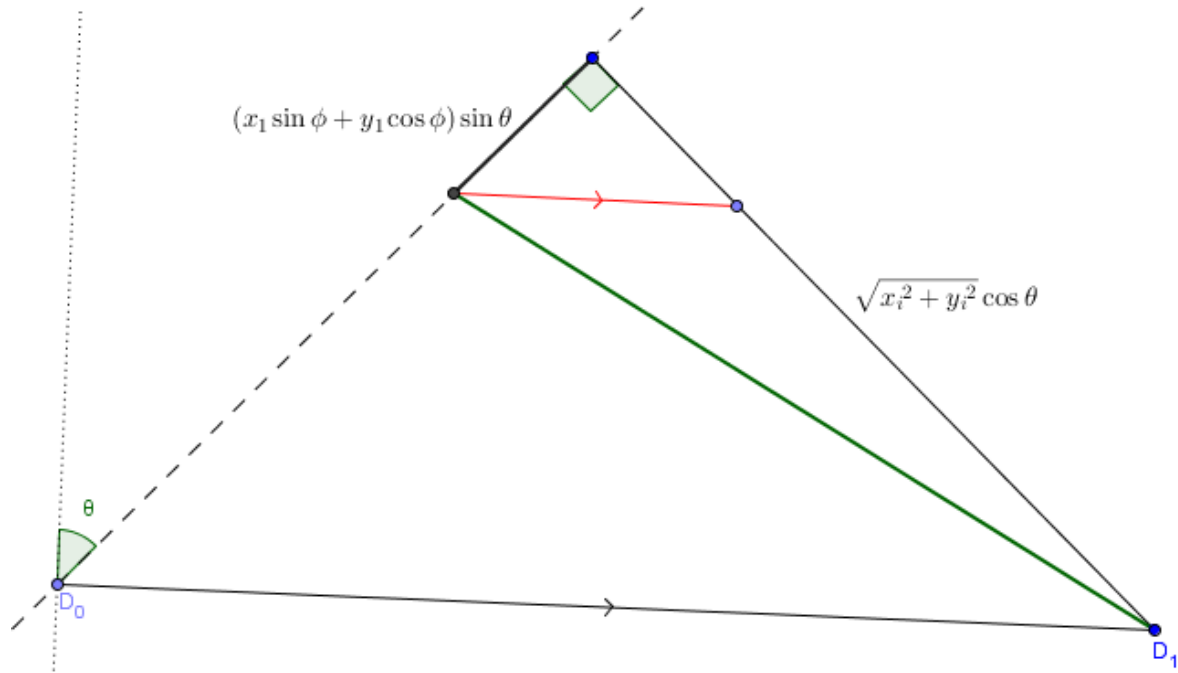
n_i , het aantal MIP's (minimum ionizing particles) per vierkante meter; r_i wordt gegeven door (vergelijking 23 Manon Kok):

$$r_i = \sqrt{(x_i^2 + y_i^2) \cos^2 \theta + (x_i \sin \phi - y_i \cos \phi)^2 \sin^2 \theta}$$

Deze r_i geeft niet de afstand tussen detector 0 en i weer, gekeken naar de formule. Wat stelt r_i wel voor? Stel dat de shower-as in [afbeelding 34](#) vanaf boven over de lijn tussen detector 0 en detector i loopt. Dan zou $(x_i^2 + y_i^2) \cos^2 \theta$ gelijk zijn aan het kwadraat van de kortste afstand tussen detector i en de shower as. $(x_i^2 + y_i^2)$ is immers het kwadraat van de afstand tussen de detectoren 0 en i . Een vermenigvuldiging met $\cos^2 \theta$ geeft de aanliggende zijde. $x_i \sin \phi - y_i \cos \phi$ kan men met behulp van GeoGebra visualiseren. In [afbeelding 35](#) is te zien dat de rode lijn het verschil is tussen $x_i \sin \phi - y_i \cos \phi$. In [afbeelding 36](#) wordt de r_i met een groene lijn weergegeven. De rode lijn in deze afbeelding is even lang als die in [afbeelding 35](#). Merk op dat uit de formule van de r_i de stelling van Pythagoras af te leiden is.



afbeelding 35: visualisatie van $x_i \sin \phi - y_i \cos \phi$

afbeelding 36: visualisatie van r_i

Het volgende kan hierdoor geconcludeerd worden (vergelijking 24 Manon Kok):

$$E_0[\text{eV}] = 4.0 \cdot 10^{17} \cdot \frac{n_i}{\hat{S}(r_i)} \hat{S}(600)$$

Normaaliter geeft $\frac{n_i}{\hat{S}(r_i)}$ voor iedere detector hetzelfde uitkomst, maar het is waarschijnlijk dat er kleine verschillen zijn. Om deze verschillen op te vangen, kan men het beste de gemiddelde waarde daarvoor nemen. Men krijgt nu de formule die al eerder in het verslag is getoond (vergelijking 25 Manon Kok):

$$E = 4.0 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{N_i} \sum_i \frac{n_i}{\hat{S}(r_i)} \hat{S}(600)$$

De N_i staat in dit geval voor het aantal detectoren.

Bij de berekening van de primaire energie worden de volgende waarden gebruikt:

- Voor de Molière unit wordt 79 meter genomen. Deze is afhankelijk van de luchtdichtheid die verandert als functie van temperatuur en druk;
- Voor η wordt 3.84 genomen. Deze waarde is eigenlijk afhankelijk van de hoek θ , maar in hoeverre deze invloed heeft, is niet bekend;
- Voor α wordt, net als bij AGASA, 1.2 genomen;
- Voor λ wordt, net als bij AGASA, 500 g cm⁻² genomen;
- Voor λ_2 wordt, net als bij AGASA, 594 g cm⁻² genomen;
- Voor x_{obs} wordt 1800 g cm⁻² genomen. De waarde is, net als bij η , eigenlijk afhankelijk van de hoek θ . De waarde x_{obs} is gevonden bij hoeken van $\theta = 55^\circ$ en het is niet bekend in hoeverre deze waarde door θ wordt beïnvloed. (Kok, 2008)

Verwerking in Python

Het schrijven van het pythonbestand gaat in de volgende stappen:

- bepaal met behulp van Google Earth en andere bronnen de locatie van de air-showers. Sla deze gegevens op in de arrays: $x[]$ en $y[]$ en bereken hiermee de relatieve posities $dx[]$ en $dy[]$ van de drie detectoren. In dit geval laat men detector 4 buiten beschouwing;
- haal met behulp van het downloadformulier de tijdsverschillen van detectie op en sla deze op in de array $dt[][]$. Omdat er meerdere events zijn met tijdsverschillen, moet $dt[][]$ tweedimensionaal zijn. Hoe men dit precies doet, wordt later uitgelegd;
- haal het aantal MIP's van de drie detectoren op en sla deze op in $n[][]$. Ook deze array is tweedimensionaal;
- met behulp van de posities van de detectoren en tijdsverschillen, kan men de hoeken ϕ en θ berekenen;
- met behulp van de twee hoeken, het aantal MIP's en de posities van de detectoren kan men de energie bepalen

Het pythonbestand

```

1.  # -*- coding: utf-8 -*-
2.
3.  from math import asin, atan, cos, exp, pi, sin, sqrt
4.
5.  def sec(a):
6.      return 1 / cos(a)
7.
8.  C = 3e08
9.
10. class Coördinaten:
11.     def __init__(self):
12.         #oorsprong van het assenstelsel is nog niet berekend
13.         self.x = [36.4, 38.9, 24.2]
14.         self.y = [14.8, 30.1, 24.8]
15.         self.dx = []
16.         self.dy = []
17.         self.n_d = len(self.x) #alleen geschikt voor 3 detectoren
18.
19.     def BerekenRelatievePosities(self):
20.         for i in xrange(self.n_d):
21.             self.dx.append(self.x[i] - self.x[0])
22.             self.dy.append(self.y[i] - self.y[0])
23.
24.         return self.dx, self.dy
25.
26. class Tijden:
27.     def __init__(self, n_d, e):
28.         self.dt = []
29.
30.         self.t = []
31.
32.         print "\nEvent %d:\n" % e
33.         print "t ="
34.         for i in xrange(n_d):
35.             while True:

```

```

36.         try:
37.             m = raw_input("Geef t (in ns) van detector %d: " % i)
38.             f = float(m)
39.             self.t.append(f)
40.             break
41.         except ValueError:
42.             print "Ongeldige invoer. Voer opnieuw in a.u.b."
43.
44.     def BerekenRelatieveTijdenPerEvent(self, n_d):
45.         for i in xrange(n_d):
46.             a = (self.t[i] - self.t[0]) / 1000000000.0 #van ns naar s
47.             self.dt.append(a)
48.
49.         return self.dt
50.
51. class MIPS:
52.     def __init__(self, n_d, e):
53.         self.mips = []
54.
55.         print "\nMIPs ="
56.         for i in xrange(n_d):
57.             while True:
58.                 try:
59.                     m = raw_input("Geef aantal MIPs van detector %d: " % i)
60.                     f = float(m)
61.                     self.mips.append(f)
62.                     break
63.                 except:
64.                     print "Ongeldige invoer. Voer opnieuw in a.u.b."
65.
66.     def BepaalMIPsPerEvent(self, n_d):
67.         return self.mips
68.
69. class Downloadform:
70.     def __init__(self, n_d):
71.         self.n_d = n_d
72.
73.         self.dt = []
74.         self.mips = []
75.
76.         while True:
77.             try:
78.                 self.n_e = int(raw_input("\nVoer aantal events in: "))
79.                 break
80.             except:
81.                 print "Ongeldige invoer. Voer opnieuw in a.u.b."
82.
83.         self.t_data = []
84.         self.mips_data = []
85.         for i in xrange(self.n_e):
86.             self.t_data.append( Tijden(n_d, i) )
87.             self.mips_data.append( MIPs(n_d, i) )
88.
89.     def BerekenRelatieveTijden(self):
90.         for i in xrange(self.n_e):
91.             a = self.t_data[i].BerekenRelatieveTijdenPerEvent(self.n_d)
92.             self.dt.append(a)
93.
94.         return self.dt
95.
96.     def BepaalMIPs(self):

```

```

97.         for i in xrange(self.n_e):
98.             a = self.mips_data[i].BepaalMIPsPerEvent(self.n_d)
99.             self.mips.append(a)
100.
101.         return self.mips
102.
103. class Hoeken:
104.     def __init__(self, pos, dt, n_e, n_d):
105.
106.         self.phi = []
107.         self.theta = []
108.
109.         self.dx = pos[0]
110.         self.dy = pos[1]
111.         self.dt = dt
112.         self.n_e = n_e
113.         self.n_d = n_d
114.
115.     def BerekenHoeken(self):
116.         for i in xrange(self.n_e):
117.             tlr = self.dx[1] * self.dt[i][2] - self.dx[2] * self.dt[i][1]
118.             nmr = self.dy[2] * self.dt[i][1] - self.dy[1] * self.dt[i][2]
119.             try:
120.                 self.phi.append(atan(tlr/nmr))
121.             except ZeroDivisionError:
122.                 self.phi.append(0.0)
123.
124.             try:
125.                 if self.dt[i][1] != 0:
126.                     tlr = C * self.dt[i][1]
127.                     nmr = self.dx[1] * cos(self.phi[i])
128.                     nmr += self.dy[1] * cos(self.phi[i])
129.                     self.theta.append(abs(asin(tlr/nmr)))
130.                 elif self.dt[i][2] != 0:
131.                     tlr = C * self.dt[i][2]
132.                     nmr = self.dx[2] * cos(self.phi[i])
133.                     nmr += self.dy[2] * cos(self.phi[i])
134.                     self.theta.append(abs(asin(tlr/nmr)))
135.                 else:
136.                     self.theta.append(0.0)
137.             except ValueError:
138.                 self.theta.append(0.0)
139.                 print "Opmerking:"
140.                 print "event %d geeft een onmogelijke situatie!" %i
141.                 print "Hoek theta is daarom ingesteld op 0 graden."
142.                 print "Dit betekent dat de berekening eigenlijk niet klopt."
143.
144.         return self.phi, self.theta
145.
146.     def Weergeven(self):
147.         print "\nGrootte hoeken (in graden):"
148.         for i in xrange(self.n_e):
149.             print "\nEvent %d:" % i
150.             grad = self.phi[i] / pi * 180.0
151.             print "Phi    = %f" % grad
152.             grad = self.theta[i] / pi * 180.0
153.             print "Theta = %f" % grad
154.             #omrekenen van radialen in graden
155.
156. class Energiebepaling:
157.     def __init__(self, pos, n_e, n_d, mips, hoeken):

```

```

158.     self.dx = pos[0]
159.     self.dy = pos[1]
160.     self.n_e = n_e
161.     self.n_d = n_d
162.     self.mips = mips
163.     self.phi = hoeken[0]
164.     self.theta = hoeken[1]
165.
166.     self.r_mol = 79.0
167.     self.eta = 3.84
168.     self.alfa = 1.2
169.     self.L = 500.0
170.     self.L_2 = 594.0
171.     self.X = 1800.0
172.
173.     self.E = []
174.
175. def S(self, r): #eigenlijk S hoed
176.     R = r / self.r_mol
177.     S_0 = R ** (-1 * self.alfa)
178.     S_0 *= (1.0 + R) ** (-1 * (self.eta - self.alfa))
179.     S_0 *= (1.0 + (r / 1000.0) ** 2) ** (-0.6)
180.
181.     return S_0
182.
183. def Correctie(self, E_id):
184.     corr = -1 * self.X * (sec(self.theta[E_id]) - 1.0) / self.L
185.     corr -= self.X * (sec(self.theta[E_id]) - 1.0) ** 2 / self.L_2
186.
187.     return exp(corr)
188.
189. def BerekenR_i(self, e, d):
190.     a = (self.dx[d] ** 2 + self.dy[d] ** 2) * cos(self.theta[e]) ** 2
191.     b = self.dx[d] * sin(self.phi[e]) - self.dy[d] * cos(self.phi[e])
192.     b = b ** 2 * sin(self.theta[e]) ** 2
193.
194.     return sqrt(a + b)
195.
196. def BerekenPrimaireEnergie(self):
197.     print "\nDe Shoed / n_i verhoudingen:"
198.     print "\n-----"
199.     for i in xrange(self.n_e):
200.         t = 0
201.         m = 0
202.         for j in xrange(self.n_d):
203.             r_i = self.BerekenR_i(i, j)
204.             n_i = self.mips[i][j]
205.             try:
206.                 Shoed = self.S(r_i)
207.                 print Shoed / n_i
208.                 t += Shoed / n_i
209.             except ZeroDivisionError:
210.                 print "ZeroDivisionError"
211.                 m += 1
212.         print "-----"
213.         gem = t / (self.n_d - m)
214.         corr = self.Correctie(i)
215.         self.E.append(4.0e17 * gem * self.S(600.0) * corr)
216.
217.     return self.E
218.

```

```

219.     def Weergeven(self):
220.         print "\nEnergie primair deeltje (in eV):"
221.         for i in xrange(self.n_e):
222.             print "\nEvent %d:" % i
223.             print "E = %e" % self.E[i]
224.
225.     HetJoris = Coördinaten()
226.     Posities = HetJoris.BerekenRelatievePosities()
227.     N_detectors = HetJoris.n_d
228.
229.     Eventdata = Downloadform(HetJoris.n_d)
230.     Delta_t = Eventdata.BerekenRelatieveTijden()
231.     MinIonPar = Eventdata.BepaalMIPs()
232.     N_events = Eventdata.n_e
233.
234.     HoekenBijEvents = Hoeken(Posities, Delta_t, N_events, N_detectors)
235.     PhiTheta = HoekenBijEvents.BerekenHoeken()
236.     HoekenBijEvents.Weergeven()
237.
238.     ShowerE = Energiebepaling(Posities, N_events, N_detectors, MinIonPar,
239.                               PhiTheta)
240.     PrimaireEnergie = ShowerE.BerekenPrimaireEnergie()
241.     ShowerE.Weergeven()

```

code 3**Opmerkingen:**

- Een class kan de functie `__init__()` bevatten. Dit wordt ook wel de constructor genoemd (Wikipedia). Als een object wordt aangemaakt, zoals in regel 224, dan wordt de constructorfunctie uitgevoerd.
- Een functie in een class kan argumenten hebben. Dat zijn de variabelen die tussen haakjes achter de functienaam staan. Het eerste argument `self` betreft alle functies, variabelen, en dergelijke die in de class zelf zitten. Voor de specifieke variabele moet men bijvoorbeeld `self.variabele` invoeren.
- Om een functie met argumenten uit te voeren moet men de functie intypen met parameters. De parameters zijn de variabelen die tussen haakjes achter de te uitvoeren functie staan. Merk op dat men geen parameter hoeft te gebruiken voor het argument `self`.

De invoer

In de regels 12 en 13 worden de RD-coördinaten van detector 1, 2 en 3 (detector 4 wordt buiten beschouwing gelaten) reeds in de arrays `x[]` en `y[]` opgeslagen. Hierbij wordt aangenomen dat detector 1 correspondeert met detector 0, detector 2 correspondeert met detector 1 en detector 3 correspondeert met detector 2. In de functie `BerekenRelatievePosities(self)` worden de relatieve posities berekend. Bij detector 0 geldt $dx = 0$ en $dy = 0$.

In regel 36 wordt gevraagd om de tijdstippen in nanoseconde en in regel 58 wordt gevraagd om het aantal MIP's in te voeren. In regel 77 wordt gevraagd van hoeveel events men gegevens wil invoeren. Men kan door middel van de primaire energie meerdere events berekenen.

Merk op dat er bij iedere invoermogelijkheid in het programma wordt gecontroleerd of deze bruikbaar is. Als dit niet het geval is, dan wordt er gewaarschuwd dat de invoer ongeldig is en wordt er opnieuw om input gevraagd.

Voor de invoer maakt men gebruik van het CSV-bestand dat is beschreven in hoofdstuk 5 over het downloadformulier. Niet alle gegevens op 1 december 2013 tussen 12:00 en 12:05 zijn bruikbaar. Het is belangrijk dat de detectoren 1, 2 en 3 ieder een bruikbaar tijdstip moeten hebben voor de berekening. Een voorwaarde is dat er geen sprake moet zijn van een 'ruis'. In dat geval wordt dit aangegeven met de waarde -999. Een andere voorwaarde is dat de relatieve tijdsverschillen niet te groot mogen zijn. De afstand tussen bijvoorbeeld detector 1 en 2 is slechts 15,5 [m]. Dit wil zeggen, het tijdsverschil kan, verondersteld dat airshowers met de lichtsnelheid voortbewegen, hooguit 51,6 nanoseconde zijn als $\theta = 90^\circ$. Een groter tijdsverschil is onmogelijk en derhalve zijn deze gegevens onbruikbaar.

Verwerking

Dankzij het gebruik van classes is de verwerking onderverdeeld in verschillende stappen. In de regels 224 t/m 240 is globaal weergegeven hoe de primaire energie wordt berekend. De berekeningen zelf staan in de functies van de classes.

Allereerst worden de relatieve posities van de detectoren bepaald aan de hand van de RD-coördinaten. Vervolgens wordt er met behulp van de class `Downloadform` de aankomsttijden en het aantal MIP's verkregen door middel van invoer. Van tevoren wordt gevraagd hoeveel events men wil invoeren. Tevens worden de verschillen tussen de aankomsttijden berekend.

Na de invoer wordt de class `Hoeken` gebruikt om ϕ en θ te bepalen. Merk op dat bij de berekening van de θ try-except-blokken worden gebruikt. Zoals eerder is vermeld, kan het tijdsverschil niet te groot zijn. Mocht er toch een onmogelijk event worden ingevoerd dan wordt θ ingesteld op $0,0^\circ$. Dit betekent niet dat men van een onmogelijke event de primaire energie kan berekenen, maar deze instelling voorkomt dat het programma later in de problemen komt. Er wordt tevens geattendeerd indien het berekenen van θ niet mogelijk is. Er is ook een functie die de berekende hoeken toont.

Tot slot worden alle berekende gegevens (de tijdsverschillen zijn niet nodig) gebruikt om de primaire energie te bepalen. In de constructor¹⁸ worden tevens nieuwe constante variabelen gedefinieerd. Deze worden gebruikt voor de $S(r)$ en de correctiefactor. In de functie `BerekenPrimaireEnergie(self)` wordt naast het berekenen van de primaire energie ook de $\frac{n_i}{\bar{S}(r_i)}$ van iedere detector per event weergegeven. Dit wordt gedaan, om-

dat men betwist of er daadwerkelijk ieder event dezelfde waarde van $\frac{n_i}{\bar{S}(r_i)}$ oplevert. Voor detector 0 is r_i altijd gelijk aan nul, omdat de relatieve posities dx en dy gelijk zijn aan 0. $S(0)$ geeft een error omdat er door nul gedeeld wordt. Of de andere twee detectoren een identieke uitkomst opleveren is daarom discutabel. Het gemiddelde zal in de

¹⁸ De `__init__` in een class. Zie de opmerkingen onder `code 3` voor uitleg

berekening wel toegepast worden, maar detector 0 wordt dan buiten beschouwing gelaten.

Uitvoer

```
Voer aantal events in: 5

Event 0:

t =
Geef t (in ns) van detector 0: 17.5
Geef t (in ns) van detector 1: 25
Geef t (in ns) van detector 2: 15

MIPs =
Geef aantal MIPs van detector 0: 108.492
Geef aantal MIPs van detector 1: .9013
Geef aantal MIPs van detector 2: 14.765

Event 1:

t =
Geef t (in ns) van detector 0: 25
Geef t (in ns) van detector 1: 15
Geef t (in ns) van detector 2: 25

MIPs =
Geef aantal MIPs van detector 0: .1165
Geef aantal MIPs van detector 1: .8687
Geef aantal MIPs van detector 2: .4735

Event 2:

t =
Geef t (in ns) van detector 0: 20
Geef t (in ns) van detector 1: 22.5
Geef t (in ns) van detector 2: 12.5

MIPs =
Geef aantal MIPs van detector 0: 49.505
Geef aantal MIPs van detector 1: 23.248
Geef aantal MIPs van detector 2: 19.145

Event 3:

t =
Geef t (in ns) van detector 0: 17.5
Geef t (in ns) van detector 1: 25
Geef t (in ns) van detector 2: 12.5

MIPs =
Geef aantal MIPs van detector 0: .0099
Geef aantal MIPs van detector 1: 13.599
Geef aantal MIPs van detector 2: .8572
```

Event 4:

t =

Geef t (in ns) van detector 0: 27.5

Geef t (in ns) van detector 1: 25

Geef t (in ns) van detector 2: 30

MIPs =

Geef aantal MIPs van detector 0: 21.039

Geef aantal MIPs van detector 1: 20.067

Geef aantal MIPs van detector 2: 10.651

Grootte hoeken (in graden):

Event 0:

Phi = 36.970948

Theta = 9.103312

Event 1:

Phi = 50.659482

Theta = 15.418364

Event 2:

Phi = 4.806052

Theta = 2.423389

Event 3:

Phi = 27.539885

Theta = 8.195885

Event 4:

Phi = 20.976784

Theta = 2.586379

De Shoed / n_i verhoudingen:

ZeroDivisionError

4.93111732891

0.289780744571

ZeroDivisionError

5.29081074642

9.0257553628

ZeroDivisionError

0.189150088741

0.223396355204

ZeroDivisionError

0.325270693442

4.99848692496

```

-----
ZeroDivisionError
0.219207568954
0.401412591673
-----

```

Energie primair deeltje (in eV):

```

Event 0:
E = 2.485791e+14

```

```

Event 1:
E = 6.216019e+14

```

```

Event 2:
E = 2.050922e+13

```

```

Event 3:
E = 2.557537e+14

```

```

Event 4:
E = 3.083949e+13

```

Conclusies

De berekende energieën hebben doorgaans een exponent die tussen de 13 en de 14 ligt. Hieruit blijkt dat de primaire energie van een airshower vaak tussen de 10^{13} en 10^{15} [eV] ligt. Indien secundaire deeltjes het aardoppervlak moeten bereiken, moet de primaire energie minimaal 5 GeV bedragen (Universiteit Utrecht). De berekende energieën liggen weliswaar ruim boven de grens, maar ruim onder de GZK-limiet.

Eerder is gesteld dat $\frac{n_i}{\bar{S}(r_i)}$ mogelijk niet voor iedere detector hetzelfde is bij een bepaalde event. De uitput bevestigt dat detector 0 altijd een error geeft. Hoewel $\frac{n_i}{\bar{S}(r_i)}$ bij enkele events het redelijk overeenkomt, zijn toch events waarbij het verschil groot is. Een mogelijke verklaring is de nauwkeurigheid van de gemeten aankomsttijden en het gemeten aantal MIP's. Niet alle geregistreerde 'events' komen van dezelfde shower, wat tevens een verklaring kan zijn van het significante aantal events met te grote verschillen tussen de aankomsttijden.

Ten slotte zijn er te veel tekortkomingen in de berekening. Daar zijn verschillende redeneren voor. De eerder vermelde onnauwkeurigheden bij het meten behoren daartoe. Een andere voorname reden is dat de berekening simplistisch is. De primaire energie hangt immers van veel factoren af. Zoals in de hypothese gesteld, is de energie vooral afhankelijk van de hoek van inval en het aantal MIP's. Er zijn echter nog meer factoren waarmee men rekening moet houden, zoals de atmosferische diepte. De berekening is gebaseerd op veel aannames. In de berekening zijn veel variabelen als constanten beschouwd, terwijl deze soms afhankelijk zijn van de hoek θ . Ook de anatomie met het AGASA-experiment zorgt voor onnauwkeurigheden, ook al is er rekening gehouden met een aantal verschillen. Bovendien is de energie alleen theoretisch benaderd. In feite

moet men ook de positie van de showercore bepalen om de primaire energie nauwkeuriger te bepalen.

Toevoegen aan eindschrift

Op het Sint-Joris college bewaart men een pythonscript waaraan alle leerlingen die deelnemen aan het HiSPARC-project hun eigen code kunnen toevoegen. In de voorgaande jaren zijn andere leerlingen reeds begonnen met het schrijven van het eindschrift. Ieder jaar wordt het script uitgebreid waardoor het steeds meer functionaliteiten krijgt. Met het script kan men al de zenit- en de azimuthhoek berekenen. Dit schooljaar¹⁹ wordt de energiebepaling die in dit hoofdstuk uitvoerig beschreven werd, toegevoegd. Tevens moet het script een histogram van de hoeken en de energie genereren. Zo kan men in een oogopslag zien welke hoeken en energieën het vaakst voorkomen bij een aantal events over een bepaalde periode.

SAPPHiRE

```

Opdrachtprompt
Microsoft Windows [versie 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Alle rechten voorbehouden.

C:\Users\Kevin Choi>cd C:\

C:\>easy_install pip
Searching for pip
Best match: pip 1.4.1
Adding pip 1.4.1 to easy-install.pth file
Installing pip-script.py script to C:\Python27\Scripts
Installing pip.exe script to C:\Python27\Scripts
Installing pip.exe manifest script to C:\Python27\Scripts
Installing pip-2.7-script.py script to C:\Python27\Scripts
Installing pip-2.7.exe script to C:\Python27\Scripts
Installing pip-2.7.exe manifest script to C:\Python27\Scripts

Using c:\python27\lib\site-packages
Processing dependencies for pip
Finished processing dependencies for pip

C:\>
  
```

afbeelding 37: installeren Pip

In het eindschrift is gebruik gemaakt van SAPPHiRE, een python-package waarmee men HiSPARC-data kan simuleren en analyseren. Het voordeel van SAPPHiRE is dat alle onderzoekers die betrokken zijn bij het project gebruik kunnen maken van dezelfde code. De onderzoekers kunnen, indien het voor anderen nuttig kan zijn, tevens hun eigen code toevoegen aan SAPPHiRE. (Fokkema, The HiSPARC Experiment, 2012, p. 71)

Deze python-package moet men downloaden door middel van Pip, een Python package manager. Deze kan al samen met 'Python(x,y)' geïnstalleerd zijn. Indien Pip niet geïnstalleerd is, kan men het met opdrachtprompt downloaden (zie afbeelding 37). Vervolgens moet men 'pip install hisparc-sapphire' invoeren om SAPPHiRE te downloaden en te installeren (zie afbeelding 38). Tot slot kan men controleren of de installatie goed is verlopen. Start daartoe 'ipython' op in opdrachtprompt en probeer vervolgens SAPPHiRE te importeren. Als men geen error krijgt, dan is het zeker dat SAPPHiRE correct is geïnstalleerd. (Fokkema, Installation SAPPHiRE, 2012)

```

Opdrachtprompt
C:\>pip install hisparc-sapphire
Downloading/unpacking hisparc-sapphire
  Downloading hisparc-sapphire-0.9.5.tar.gz (6.0MB): 6.0MB downloaded
  Running setup.py egg_info for package hisparc-sapphire
    C:\Python27\lib\distutils\dist.py:267: UserWarning: Unknown distribution option: 'bugtrack_url'
      warnings.warn(msg)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): numpy in c:\python27\lib\site-packages (from hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): scipy in c:\python27\lib\site-packages (from hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): tables in c:\python27\lib\site-packages (from hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): matplotlib in c:\python27\lib\site-packages (from hisparc-sapphire)
Downloading/unpacking progressbar (from hisparc-sapphire)
  You are installing a potentially insecure and unverifiable file. Future versions of pip will default to disallowing insecure files.
  Downloading progressbar-2.2.tar.gz
  Running setup.py egg_info for package progressbar
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): mock in c:\python27\lib\site-packages (from hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): numexpr>2.0.0 in c:\python27\lib\site-packages (from tables->hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): python-dateutil in c:\python27\lib\site-packages (from matplotlib->hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): tornado in c:\python27\lib\site-packages (from matplotlib->hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): pypparsing>1.5.6,!=2.0.0 in c:\python27\lib\site-packages (from matplotlib->hisparc-sapphire)
Requirement already satisfied (use --upgrade to upgrade): nose in c:\python27\lib\site-packages (from python-dateutil->matplotlib->hisparc-sapphire)
Installing collected packages: hisparc-sapphire, progressbar
  Running setup.py install for hisparc-sapphire
    C:\Python27\lib\distutils\dist.py:267: UserWarning: Unknown distribution option: 'bugtrack_url'
      warnings.warn(msg)
  Running setup.py install for progressbar
Successfully installed hisparc-sapphire progressbar
Cleaning up...

C:\>
  
```

afbeelding 38: installeren SAPPHiRE

¹⁹ 2013/2014

Het eindscript

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import math
import cmath
from tables import *
import datetime
import sapphire.esd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
#from matplotlib import cm
#from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
#from matplotlib.ticker import LinearLocator, FormatStrFormatter

#mijn code: de energiebepaling en dergelijke
class Energiebepaling:
    def __init__(self, dx, dy, mips, phi, theta):
        self.dx = dx
        self.dy = dy
        self.mips = mips
        self.phi = phi
        self.theta = theta

        self.r_mol = 79.0
        self.eta = 3.84
        self.alfa = 1.2
        self.L = 500.0
        self.L_2 = 594.0
        self.X = 1800.0

        self.n_d = len(self.dx)

    def sec(self, x):
        return 1 / math.cos(x)

    def S(self, r):
        R = r / self.r_mol
        S_0 = R ** (-1.0 * self.alfa)
        S_0 *= (1.0 + R) ** (-1.0 * (self.eta - self.alfa))
        S_0 *= (1.0 + (r / 1000.0) ** 2) ** (-0.6)

        return S_0

    def BerekenR_i(self, d):
        a = (self.dx[d] ** 2 + self.dy[d] ** 2) * math.cos(self.theta) ** 2
        b = self.dx[d] * math.sin(self.phi) - self.dy[d] *
math.cos(self.phi)
        b = b ** 2 * math.sin(self.theta) ** 2

        return math.sqrt(a + b)

    def Correctie(self):
        corr = -1 * self.X * (self.sec(self.theta) - 1.0) / self.L
        corr -= self.X * (self.sec(self.theta) - 1.0) ** 2 / self.L_2

        return math.exp(corr)

    def BerekenPrimaireEnergie(self):
        t = 0
```

```

m = 0
for i in xrange(self.n_d):
    r_i = self.BerekenR_i(i)
    n_i = self.mips[i]
    try:
        Shoed = self.S(r_i)
        t += Shoed / n_i
    except ZeroDivisionError:
        m += 1
gem = t / (self.n_d - m)
corr = self.Correctie()
E = 4.0e17 * gem * self.S(600.0) * corr
return E

# Deze waarden bevatten de X en de Y coördinaten van de platen.
# xplt0 = x coördinaat van plaat 0 yplt2 = Y coördinaat van plaat 2.
# De echte coördinaten liggen 1 lager. Dit hebben we gedaan omdat je dan
# rekenfouten veroorzaakt door de nul voorkomt.
print "Programma voor hoekreconstructie"
print "8003. Sint-Joriscollege -- Eindhoven"

#coördinaten Sint-Joriscollege -- Eindhoven.
xplt0 = 36.4
yplt0 = 14.8
xplt1 = 38.9
yplt1 = 30.1
xplt2 = 24.2
yplt2 = 24.8
xplt3 = 26.6
yplt3 = 40.1

#download data + loop
file = "esddata.h5" #data wordt automa-
#tisch hier in gedownload

data = openFile(file, "w") #File waar data in
#wordt gedownload

sty = int(raw_input("Start jaar: "))
#startwaardes
stm = int(raw_input("Start maand: "))
std = int(raw_input("Start dag: "))
stu = int(raw_input("Start uur: "))

eny = int(raw_input("Eind jaar: "))
#eindwaardes
enm = int(raw_input("Eind maand: "))
end = int(raw_input("Eind dag: "))

enu = int(raw_input("Eind uur: "))

start = datetime.datetime(sty, stm, std, stu)

end = datetime.datetime(eny, enm, end, enu)

sapphire.esd.download_data(data, '/s8003', 8003, start, end)
#Download data

events = data.root.s8003.events

```

```
filtered_events = [e for e in events [:] if not -999 in [e['t1'] and
['t2'], e['t1'] and e['t3'], e['t1'] and ['t4'], e['t2'] and e['t3'],
e['t2'] and e['t4'], e['t3'] and e['t4']]]
```

```
#opbouw output tabel
```

```
class HiSparc(IsDescription):
    idnumber = Int64Col(pos=0)
    hoek_y = Float32Col(pos=1)
    hoek_k = Float32Col(pos=2)
    hoek_l = Float32Col(pos=3)
    mips1 = Float32Col(pos=4)
    mips2 = Float32Col(pos=5)
    mips3 = Float32Col(pos=6)
    mips4 = Float32Col(pos=7)
    af_hoek_y = Int32Col(pos=8)
    af_hoek_k = Int32Col(pos=9)
    af_hoek_l = Int32Col(pos=10)
    p_energie = Float64Col(pos=11)
```

```
output_data = raw_input('file waarin data op wordt geslagen: ') #File waar
outputdata in wordt opgeslagen
output_file = openFile(output_data, mode = 'w', title = "Sint-Joris HiS-
parc")
group = output_file.createGroup("/", 'event', 'event information')
table = output_file.createTable(group, 'readout', HiSparc)

x = table.row
```

```
event_num = 0
hoeke_y = 0
hoeke_k = 0
hoeke_l = 0
amips1 = 0
amips2 = 0
amips3 = 0
amips4 = 0
hoekaf_y = 0
hoekaf_k = 0
hoekaf_l = 0
```

```
for event in filtered_events:
```

```
    t0 = event['t1']
    t1 = event['t2']
    t2 = event['t3']
    t3 = event['t4']
```

```
    if t0 == -999:
        b = t3-t1 #Var. dt2
        a = xplt2-xplt1 #dx1
        c = xplt3-xplt1 #dx2
        d = t2-t1 #Var. dt1
        e = yplt3-yplt1 #dy2
        f = yplt2-yplt1 #dy1
        g = math.atan((a*b-c*d)/(e*d-f*b)) #Hier moet de constante nog
```

```
aan worden toegevoegd.
```

```
    y = math.degrees(g)
```

```
    #Formule 13
```

```

        i = 0.299792458                                #lichtsnelheid
in m/ns
    h = abs(cmath.asin((i*d)/(cmath.cos(g)*a+cmath.sin(g)*f)))

    #Formule 14
    j = abs(cmath.asin((i*b)/(cmath.cos(g)*c+cmath.sin(g)*e)))

    #Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
    k = math.degrees(h)
    l = math.degrees(j)

    hoeke_y = y
    hoeke_k = k
    hoeke_l = l

elif t1 == -999:
    b = t3-t0                                            #Var. dt2
    a = xplt2-xplt0                                     #dx1
    c = xplt3-xplt0                                     #dx2
    d = t2-t0                                            #Var. dt1
    e = yplt3-yplt0                                     #dy2
    f = yplt2-yplt0                                     #dy1
    g = math.atan((a*b-c*d)/(e*d-f*b))                 #Hier moet de constante nog
aan worden toegevoegd.
    y = math.degrees(g)

    #Formule 13
    i = 0.299792458                                #lichtsnelheid
in m/ns
    h = abs(cmath.asin((i*d)/(cmath.cos(g)*a+cmath.sin(g)*f)))

    #Formule 14
    j = abs(cmath.asin((i*b)/(cmath.cos(g)*c+cmath.sin(g)*e)))

    #Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
    k = math.degrees(h)
    l = math.degrees(j)

    hoeke_y = y
    hoeke_k = k
    hoeke_l = l

elif t2 == -999:
    b = t3-t0                                            #Var. dt2
    a = xplt1-xplt0                                     #dx1
    c = xplt3-xplt0                                     #dx2
    d = t1-t0                                            #Var. dt1
    e = yplt3-yplt0                                     #dy2
    f = yplt1-yplt0                                     #dy1
    g = math.atan((a*b-c*d)/(e*d-f*b))                 #Hier moet de constante nog
aan worden toegevoegd.
    y = math.degrees(g)

    #Formule 13
    i = 0.299792458                                #lichtsnelheid
in m/ns
    h = abs(cmath.asin((i*d)/(cmath.cos(g)*a+cmath.sin(g)*f)))

    #Formule 14
    j = abs(cmath.asin((i*b)/(cmath.cos(g)*c+cmath.sin(g)*e)))

```

```

#Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
k = math.degrees(h)
l = math.degrees(j)

hoeke_y = y
hoeke_k = k
hoeke_l = l

elif t3 == -999:
    b = t2-t0                                #Var. dt2
    a = xplt1-xplt0                          #dx1
    c = xplt2-xplt0                          #dx2
    d = t1-t0                                #Var. dt1
    e = yplt2-yplt0                          #dy2
    f = yplt1-yplt0                          #dy1
    g = math.atan((a*b-c*d)/(e*d-f*b))      #Hier moet de constante nog
aan worden toegevoegd.
    y = math.degrees(g)

    #Formule 13
    i = 0.299792458                          #lichtsnelheid
in m/ns
    h = abs(cmath.asin((i*d)/(cmath.cos(g)*a+cmath.sin(g)*f)))

    #Formule 14
    j = abs(cmath.asin((i*b)/(cmath.cos(g)*c+cmath.sin(g)*e)))

    #Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
    k = math.degrees(h)
    l = math.degrees(j)

    hoeke_y = y
    hoeke_k = k
    hoeke_l = l

else:
    #Eerste berekening
    b1 = t3-t1                                #Var. dt2
    a1 = xplt2-xplt1                          #dx1
    c1 = xplt3-xplt1                          #dx2
    d1 = t2-t1                                #Var. dt1
    e1 = yplt3-yplt1                          #dy2
    f1 = yplt2-yplt1                          #dy1
    g1 = math.atan((a1*b1-c1*d1)/(e1*d1-f1*b1)) #Hier moet de con-
stante nog aan worden toegevoegd.
    y1 = math.degrees(g1)

    #Formule 13
    i1 = 0.299792458                          #lichtsnelheid
in m/ns
    h1 = abs(cmath.asin((i1*d1)/(cmath.cos(g1)*a1+cmath.sin(g1)*f1)))

    #Formule 14
    j1 = abs(cmath.asin((i1*b1)/(cmath.cos(g1)*c1+cmath.sin(g1)*e1)))

    #Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
    k1 = math.degrees(h1)
    l1 = math.degrees(j1)

    #Tweede berekening

```

```

b2 = t3-t0                                #Var. dt2
a2 = xplt2-xplt0                          #dx1
c2 = xplt3-xplt0                          #dx2
d2 = t2-t0                                #Var. dt1
e2 = yplt3-yplt0                          #dy2
f2 = yplt2-yplt0                          #dy1
g2 = math.atan((a2*b2-c2*d2)/(e2*d2-f2*b2))
y2 = math.degrees(g2)

#Formule 13
i2 = 0.299792458                          #lichtsnelheid
in m/ns
h2 = abs(cmath.asin((i2*d2)/(cmath.cos(g2)*a2+cmath.sin(g2)*f2)))

#Formule 14
j2 = abs(cmath.asin((i2*b2)/(cmath.cos(g2)*c2+cmath.sin(g2)*e2)))

#Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
k2 = math.degrees(h2)
l2 = math.degrees(j2)

#Derde berekening
b3 = t3-t2                                #Var. dt2
a3 = xplt1-xplt0                          #dx1
c3 = xplt3-xplt0                          #dx2
d3 = t1-t2                                #Var. dt1
e3 = yplt3-yplt0                          #dy2
f3 = yplt1-yplt0                          #dy1
g3 = math.atan((a3*b3-c3*d3)/(e3*d3-f3*b3))
y3 = math.degrees(g3)

#Formule 13
i3 = 0.299792458                          #lichtsnelheid
in m/ns
h3 = abs(cmath.asin((i3*d3)/(cmath.cos(g3)*a3+cmath.sin(g3)*f3)))

#Formule 14
j3 = abs(cmath.asin((i3*b3)/(cmath.cos(g3)*c3+cmath.sin(g3)*e3)))

#Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
k3 = math.degrees(h3)
l3 = math.degrees(j3)

#Vierde berekening
b4 = t2-t0                                #Var. dt2
a4 = xplt1-xplt0                          #dx1
c4 = xplt2-xplt0                          #dx2
d4 = t1-t0                                #Var. dt1
e4 = yplt2-yplt0                          #dy2
f4 = yplt1-yplt0                          #dy1
g4 = math.atan((a4*b4-c4*d4)/(e4*d4-f4*b4))
y4 = math.degrees(g4)

#Formule 13
i4 = 0.299792458                          #lichtsnelheid
in m/ns
h4 = abs(cmath.asin((i4*d4)/(cmath.cos(g4)*a4+cmath.sin(g4)*f4)))

#Formule 14

```

```

j4 = abs(cmath.asin((i4*b4)/(cmath.cos(g4)*c4+cmath.sin(g4)*e4)))

#Antwoord van Formule 13&14 omzetten van radialen naar graden.
k4 = math.degrees(h4)
l4 = math.degrees(j4)

hoeke_y = ((y1 + y2 + y3 + y4)/4)
hoeke_k = ((k1 + k2 + k3 + k4)/4)
hoeke_l = ((l1 + l2 + l3 + l4)/4)

hoekaf_y = abs(math.floor(hoeke_y))
hoekaf_k = math.floor(hoeke_k)
hoekaf_l = math.floor(hoeke_l)

'''
1. Waarom is er geen universele variabele voor de lichtsnelheid ge-
bruikt?
Deze is toch altijd hetzelfde?
2. Het gebruik van a, b, c, etc. is verwarrend. Sla de gefilterde
events op
in lijsten, nl. dx[], dy[] en dt[]
'''

if math.isnan(hoeke_y) == False and math.isnan(hoeke_k) == False:
    #aantal mips en aantal events
    amips1 = event['n1']
    amips2 = event['n2']
    amips3 = event['n3']
    amips4 = event['n4']
    event_num += 1

    #mijn code: de klassen van de energie
    if not(-999 in [t0, t1, t2, t3]):
        dx = [0.0, xplt1 - xplt0, xplt2 - xplt0, xplt3 - xplt0]
        dy = [0.0, yplt1 - yplt0, yplt2 - yplt0, yplt3 - yplt0]
        mips = [amips1, amips2, amips3, amips4]
        phi = math.radians(hoeke_y)
        theta = math.radians(hoeke_k)

    else:
        dx = [0.0, a, c]
        dy = [0.0, f, e]
        phi = g
        theta = h
        if t0 == -999:
            mips = [amips2, amips3, amips4]
        elif t1 == -999:
            mips = [amips1, amips3, amips4]
        elif t2 == -999:
            mips = [amips1, amips2, amips4]
        else: # t3 == -999
            mips = [amips1, amips2, amips3]

E = Energiebepaling(dx, dy, mips, phi, theta)
p_energie = E.BerekenPrimaireEnergie()

#data schrijven in tabel
x['idnumber'] = event_num
x['hoek_y'] = hoeke_y
x['hoek_k'] = hoeke_k
x['hoek_l'] = hoeke_l

```

```

x['af_hoek_y'] = hoekaf_y
x['af_hoek_k'] = hoekaf_k
x['af_hoek_l'] = hoekaf_l
x['mips1'] = amips1
x['mips2'] = amips2
x['mips3'] = amips3
x['mips4'] = amips4
x['p_energie'] = p_energie
#insert
x.append()
table.flush()

#Histogram
his = output_file.root.event.readout
ev_y = [ x['af_hoek_y'] for x in his.iterrows()]
ev_k = [ x['af_hoek_k'] for x in his.iterrows()]
energie = [ x['p_energie'] for x in his.iterrows()]

#Grafiek met y
plt.hist(ev_y, 180, normed=False, facecolor='r')
plt.xlabel('Hoek in graden')
plt.ylabel('Count')
plt.title('azimuthhoek')
plt.grid(True)
plt.show()

#Grafiek met x
plt.hist(ev_k, 360, normed=False, facecolor='g')
plt.xlabel('Hoek in graden')
plt.ylabel('Count')
plt.title('zenithhoek')
plt.grid(True)
plt.show()

#energie

def convert(lijst):
    resultaten = []
    for x in lijst:
        try:
            m = math.frexp(x)[0]
            e = math.frexp(x)[1]
            n = 5.0 ** (-1.0 * e)
            g = m * n

            while True:
                if g == 0.0:
                    e = 0
                    break
                elif g > 10.0:
                    g /= 10.0
                    e += 1
                    continue
                elif g < 1.0:
                    g *= 10.0
                    e -= 1
                    continue
                else:
                    break

            g = int(math.floor(g))

```

```

        if e >= 0:
            resultaten.append(10 * e + g)
        else:
            resultaten.append(-1)
    except:
        resultaten.append(-1)
    return resultaten

plt.hist(convert(energie), 200, normed=False, facecolor='b')
plt.xlabel('Energie in eV')
plt.ylabel('Count')
plt.title('Primaire energie')
plt.axis([0, 200, 0, len(energie)])
plt.grid(True)
plt.show()

#Grafiek 3D met y en x
'''
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')

X = ev_k
Y = ev_y
Z = [X, Y]

surf = ax.plot_surface(X, Y, Z, rstride=1, cstride=1,
                        cmap=cm.RdBu, linewidth=0, antialiased=True)

ax.zaxis.set_major_locator(LinearLocator(10))
ax.zaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%.02f'))

fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect=5)
ax.set_xlabel('Hoek met x')
ax.set_ylabel('Hoek met y')
ax.set_zlabel('Count')
plt.show()

Werkt niet!
'''

#Afsluiten
output_file.close()
data.close()
raw_input("Druk enter om programma te sluiten: ")

```

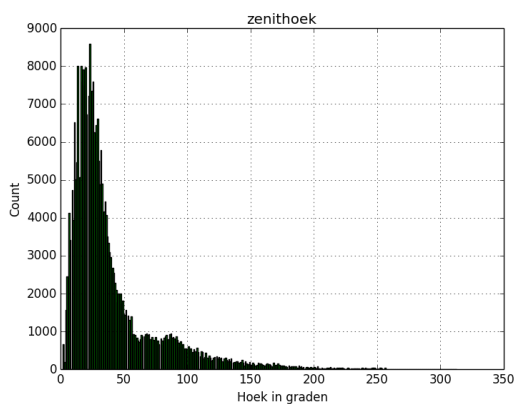
code 4

De code is als volgt opgebouwd:

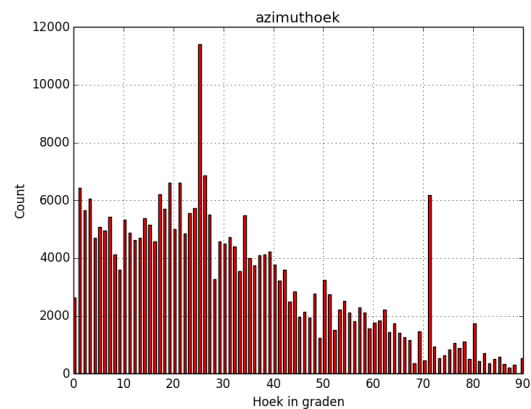
- Het importeren van de benodigde modules;
- Een class om de energie te berekenen. Deze code is extra ingevoerd;
- Het definiëren van de detectorcoördinaten van het Sint-Joriscollege;
- Het downloaden van de online data. Er wordt vooraf gevraagd om een begin- en einddatum in te voeren. Ook het betreffende uur kan worden ingevoerd;
- Het filteren van de onbruikbare events;
- De opbouw van de tabel waarin de (berekende) gegevens wordt opgeslagen. Tevens wordt gevraagd om het bestand waarin de gegevens worden opgeslagen een naam te geven;

- De for-loop waarin voor iedere event de hoeken en de energie wordt berekend en vervolgens in de tabel wordt opgeslagen;
- Het genereren van de histogrammen van de zenit- en azimuthhoek en de primaire energie. In het histogram van de energie wordt de waarde van de primaire energie in eV omgezet in een geheel getal, waarbij het laatste cijfer de mantisse²⁰ voorstelt en de cijfers daarvoor het exponent voorstellen. 153 betekent dus 3×10^{15} . Dit wordt gedaan omdat de waarde van de energie zo hoog is dat men geen fatsoenlijke histogram krijgt als de mantisse niet op een geheel getal naar beneden wordt afgerond;
- Het sluiten van de h5-bestanden.

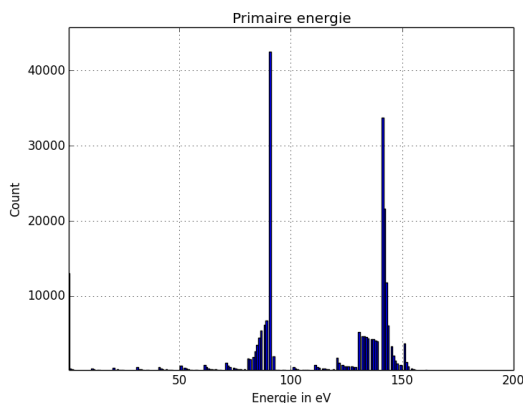
Histogrammen



afbeelding 40: histogram zenithhoek



afbeelding 39: histogram azimuthhoek



afbeelding 41: histogram primaire energie

Tekortkomingen

Het eindscript bevat echter een aantal tekortkomingen:

- De wijze waarop de code geschreven is, is een probleem. De code is immers niet geordend in subroutines, wat het lezen van de code lastiger maakt. Bovendien was het hierdoor moeilijker om de code van de energiebepaling toe te voegen aan

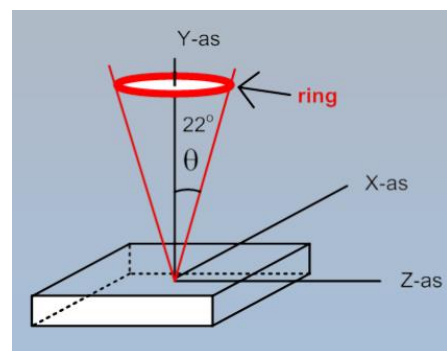
²⁰ Naar beneden afgerond op een geheel getal tussen de 1 en 9.

het eindscript. Aangeraden wordt om de code te herschrijven. In het eindscript staat ook commentaar waar de code ontspoot;

- Wat nogal onbegrijpelijk is, is waarom er gebruik gemaakt moet worden van de `cmath`-module. De code van de hoekbepaling is overigens geschreven door een andere leerling. Het is uiterst onwaarschijnlijk dat de hoeken een complex getal zijn en de absolute waarde van een complex getal is geen benadering van het antwoord. Indien de waarde van de hoek toch een complex getal zal worden, dan kan de betreffende event beter worden eruit gehaald. De event is immers onmogelijk als de deeltjes in de airshower nagenoeg evenwijdig lopen;
- De histogrammen van de zenit- en azimuthhoek hebben hierdoor een vreemd interval. De zenithoek kan alleen tussen de 0° en 90° liggen, terwijl het interval in het histogram tot de 350° gaat. De azimuthhoek ligt normaal ofwel tussen de 0° en de 360° ofwel tussen de -180° en de 180° , afhankelijk welk interval de voorkeur heeft. $\text{atan } \phi$ heeft echter een bereik van $\langle -90^\circ, 90^\circ \rangle$. In feite worden alle oplossingen gegeven door $\text{atan } \phi + k \times 180^\circ$. Als men de oplossingen beperkt tot het interval van de azimuthhoek, dan zijn er altijd twee oplossingen. Door te kijken of de detectoren eerder of later een deeltje registreren dan detector 0, kan men nagaan welke van de twee oplossingen juist is;
- Net als bij het andere pythonbestand is er sprake van een (te) lage energie. In het histogram is tevens te zien dat er energieën zijn die onder de minimale grens van 5 GeV liggen.

Conclusie

Door de vele tekortkomingen geven de histogrammen niet een erg betrouwbare indruk. Er zitten eigenlijk nog teveel fouten in het script om een goed oordeel te kunnen vellen. Uit **afbeelding 40** blijkt het toch juist te zijn dat een zenithoek het vaakst rond de 22° ligt. Dit heeft te maken met het feit dat deeltjes onder een grotere hoek op meer manieren op de detector kunnen vallen, wat gegeven wordt met de ring in **afbeelding 42**. Echter, als de hoek groter wordt, dan moeten de deeltjes door meer atmosfeer en zal het aantal events afnemen. (Bloemen)



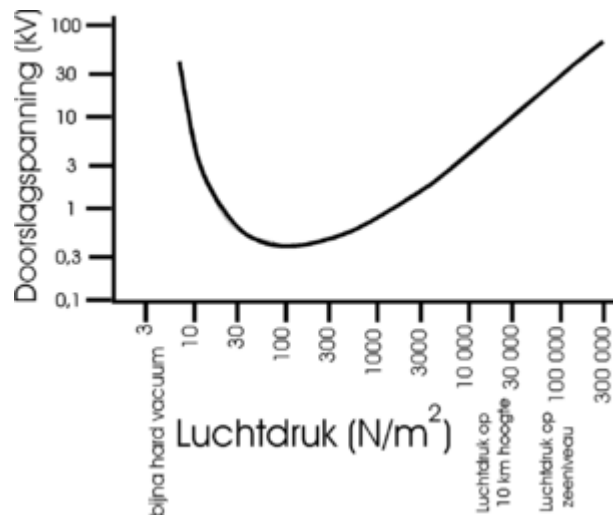
afbeelding 42: optimale zenithoek

CONCLUSIE: BEANTWOORDING VAN DE HOOFDVRAAG

In dit hoofdstuk het antwoord op de hoofdvraag: Welke invloed heeft kosmische straling op de verschijnselen op de Aarde?

Hoewel kosmische straling weinig invloed lijkt te hebben op het alledaags leven, zijn er verschijnselen die enkel te verklaren zijn door kosmische straling. Het Noorderlicht is een voorbeeld daarvan, maar het lijkt tot nu toe het enige concrete voorbeeld te zijn.

Er bestaan echter vermoedens dat bliksem kan ontstaan door airshowers. Lucht is in principe een goede isolator, maar als het elektrisch veld groot genoeg is, vindt er doorslag plaats. De benodigde veldsterkte in volt per meter is afhankelijk van de



afbeelding 43: Paschen-kurve

luchtdruk. In afbeelding 43 is de druk tegen de doorslagspanning uitgezet. Deze grafiek wordt ook wel de Paschen-kurve²¹ genoemd (Wikipedia). Bij een druk van 1 bar is de doorslagspanning 30 kV/cm. De laagste attitude van cumulonimbuswolken is circa 600 meter (Georgia Institute of Technology). Als op 600 meter hoogte de druk eveneens 1 bar bedraagt, dan moet de spanningspotentiaal tussen de wolk en de grond minimaal 1,8 GV zijn. In de praktijk komt deze grote spanningspotentiaal niet voor als men nagaat dat de ionosfeer op ongeveer 50 km hoogte een spanning heeft van slechts 300 kV ten opzichte van de aarde (KNMI, 2005).

Kosmische straling kan lucht echter ioniseren, waardoor de doorslagspanning kleiner wordt. Het is daarom aannemelijk dat kosmische straling bliksem kan teweegbrengen. In feite wordt het ontstaan van bliksem niet op die manier verklaard.

In cumulonimbuswolken is een onregelmatige verdeling van ladingen, waardoor vonken ontstaan. Doordat ook ionisaties ontstaan, zal de geleiding van lucht toenemen. Hierdoor ontstaan vonken op andere plekken, in dit geval beneden de wolk. Er is sprake van een kettingreactie waarbij een geleidend kanaal tussen de wolk en de grond ontstaat. Dit wordt ook wel de voorontlading genoemd. Als een geleidend kanaal de grond nadert, dan zal de veldsterkte bij de grond stijgen. Uiteindelijk vindt er kortsluiting plaats tussen de wolk en de Aarde. De geleiding is dusdanig groot dat elektronen zich met een immense snelheid van de wolk naar de aarde²² verplaatsen. Dit wordt de hoofdontlading genoemd, hetgeen men als bliksem waarneemt. (KNMI, 2005)

²¹ Vernoemd naar de Duitse natuurkundige Friedrich Paschen

²² Er is sprake van een negatief neerwaartse blikseminslag

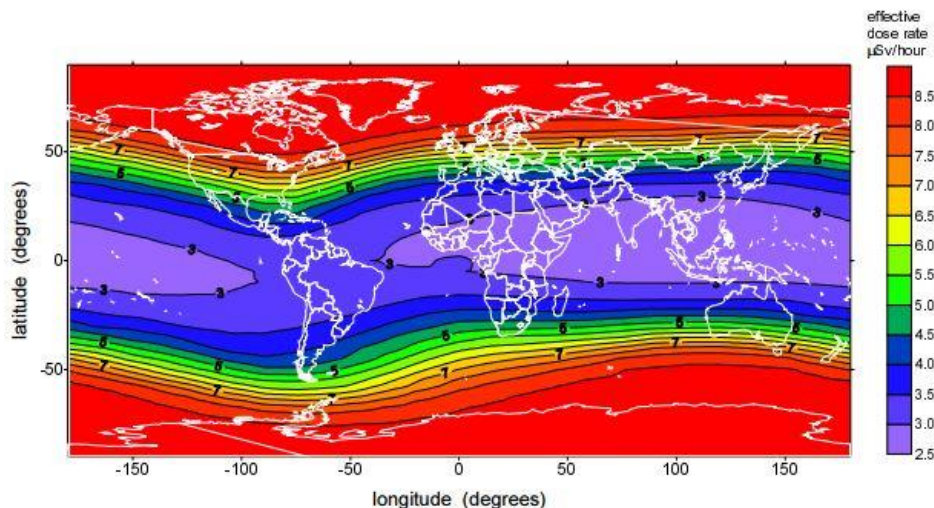
Een ander feit van kosmische straling is dat het bijdraagt aan de totale stralingsdosis. De dosis is gelijk aan de hoeveelheid stralingsenergie die een massa van één kg absorbeert, aangeduid met de eenheid gray (Gy). Omdat men er ook rekening mee moet houden dat niet alle soorten straling hetzelfde schadelijke effect hebben, moet men voor iedere soort straling een weegfactor geven (zie [tabel 7](#)). Dit wordt het dosisequivalent genoemd, dat wordt gegeven met de volgende formule:

$$H = QD = Q \frac{E_{abs}}{m}$$

Hierin is E_{abs} de geabsorbeerde energie in J, m de massa in kg en Q de weegfactor. Hoewel de weegfactor een eenheid heeft, en dus de dosis en de equivalente uit dezelfde SI-eenheden bestaan, heeft de equivalente dosis H een andere eenheid: sievert (Sv). In [afbeelding 44](#) is zien dat het dosistempo, de dosis per tijdseenheid, bij 10 km hoogte bij de polen groter is dan bij de evenaar. Dit bevestigt de bevinding van Jacob Clay, besproken in hoofdstuk 1 over de zonnewind.

stralingstype	weegfactor
alfastraling	20
bètastraling	1
gammastraling	1
röntgenstraling	1
Protonen	5
thermische neutronen	3 - 5
snelle neutronen	10 - 20

tabel 7: weegfactoren (TU/e)



afbeelding 44: dosistempo in μSv/uur op 10 km hoogte (Blaauboer, 2003, p. 19)

Hoewel thans lijkt dat kosmische straling weinig invloed heeft op natuurverschijnselen op Aarde, laten de bovenstaande voorbeelden zien dat onderzoek daarnaar de moeite waard is. Mogelijk bestaan er nog meer verschijnselen die worden bewerkstelligd door kosmische straling.

EVALUATIE

Zelf ben ik tevreden over mijn profielwerkstuk, ook al is niet alles vlekkeloos verlopen. Een van de problemen was mijn plan van aanpak. Het begon goed, maar vanaf hoofdstuk 5 kwam ik in de moeilijkheden, omdat ik niet wist wat ik moest doen. Bovendien week ik te vaak van mijn planning. Dit was te wijten aan het feit dat opdrachten langer duurden dan ik dacht. Wel was ik zo verstandig geweest om mijn planning te voorzien van buffers. Dit wil zeggen, ik plande het zodanig dat ik nog ruim genoeg tijd had, voordat ik mijn profielwerkstuk moest inleveren. Hierdoor had ik genoeg tijd om eventuele tegenvallers op te vangen.

Een ander verbeterpunt was het verzamelen van informatie. Anders dan bij andere verslagen moest ik gebruik maken van universitaire verslagen, proefschriften, et cetera. Ik moest erg wennen aan het gebruik van bronnen waarvan ik niet alles snel kon begrijpen, maar ik leerde hierdoor wel hoe ik informatie moest analyseren en verwerken. Ik moest ook accepteren dat ik niet alles kon uitleggen.

Ik heb zelf erg veel geleerd door het maken van het profielwerkstuk. Toen dhr. Neuraij aan het begin van het schooljaar aan mij uitlegde wat het project inhield, wist ik vrijwel niets over kosmische straling. Nu beschik ik over veel kennis over dit onderwerp. Tevens heb ik door het profielwerkstuk nuttige details en begrippen geleerd, zoals normaliseren (van vectoren), torus, annihilatie, enzovoort. Wat ik allemaal heb geleerd, komt goed van pas als ik ga studeren op de TU/e. Ik heb vernomen dat men op de universiteit opdrachten kan verwachten waarbij men iets zelf moet uitzoeken. Bij het maken van het profielwerkstuk moest ik ook veel zaken zelf uitzoeken. Het enige verschil was dat ik enkele bronnen al kreeg en dat ik zelf de onderzoeksvraag mocht verzinnen.

Kortom, ik heb veel voor elkaar gekregen, maar ik blijf kritisch over de manier hoe ik te werk ben gegaan.

BIBLIOGRAFIE

- Blaauboer, R. O. (2003). *Cosmic radiation during air travel: trends in exposure of aircrews and airline passengers*. Opgehaald van Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu:
http://www.rivm.nl/Onderwerpen/S/Stralingsbelasting_in_Nederland/Natuurlijke_bronnen/Kosmische_straling
- Bloemen, S. (sd). *Berekening van de hoeken waaronder het deeltje*. Opgehaald van HiSPARC:
http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/presentaties/leerlingsymposium/presentatie_SanderBloemen_2013.pdf
- Broms, F. (2014). *Noorderlicht*. Opgehaald van SmugMug, Inc:
http://www.northernlightsphotography.no/Other/Northern-Lights/20310316_xNnpnR#!i=2419447985&k=cqsW8HZ
- Eijk, B. v. (2012, Oktober 10). *Leraar in Onderzoek*. Opgehaald van HiSPARC:
http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/documenten/Leraar_in_Onderzoek/HiSPARC_LiO_Rapport_101012.pdf
- Fokkema, D. (2012). *Installation SAPPHiRE*. Opgehaald van HiSPARC documentation:
<http://docs.hisparc.nl/sapphire/installation.html>
- Fokkema, D. (2012, Oktober 17). *The HiSPARC Experiment*. Opgehaald van Nikhef:
http://www.nikhef.nl/pub/services/biblio/theses_pdf/thesis_D_Fokkema.pdf
- Georgia Institute of Technology. (sd). *Common Cloud Names, Shapes, and Altitudes*. Opgehaald van Website van Georgia Institute of Technology:
<http://nenes.eas.gatech.edu/Cloud/Clouds.pdf>
- Hees, G. S. (2006). *Globale en lokale geodetische systemen*. Delft: Nederlandse Commissie voor Geodesie.
- HiSPARC. (2013). *API Tutorial*. Opgehaald van HiSPARC documentation:
http://docs.hisparc.nl/publicdb/api_tutorial.html
- HiSPARC. (sd). *De fotoversterkerbuis*. Opgehaald van HiSPARC:
<http://www.hisparc.nl/over-hisparc/hisparc-detector/fotoversterkerbuis/>
- HiSPARC. (sd). *De HiSPARC elektronica*. Opgehaald van HiSPARC:
<http://www.hisparc.nl/over-hisparc/hisparc-detector/elektronica/>
- HiSPARC. (sd). *Global Positioning System (GPS)*. Opgehaald van HiSPARC:
<http://www.hisparc.nl/over-hisparc/hisparc-detector/gps/>
- HiSPARC. (sd). *HiSPARC detector*. Opgehaald van HiSPARC: <http://www.hisparc.nl/over-hisparc/hisparc-detector/>
- Hol, V., & Boer, M. d. (sd). *Muonen en HiSPARC*. Opgehaald van HiSPARC:
http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/werk_van_students/PWS_Muon_en_HiSPARC_2013_Vincent_Hol_Mathijs_de_Boer.pdf

- KNMI. (2005, april). *Hoofdstuk 20, Bliksem*. Opgehaald van Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut:
http://www.knmi.nl/samenw/hawa/pdf/Handboek_H20.pdf
- Kok, M. (2008, september 26). *Bepaling van de energie en richting van het primaire deeltje op de HiSPARC-website*. Opgehaald van Universiteit Twente:
http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/werk_van_students/stageverslag_Manon_Kok.pdf
- Liempt, F. v. (2010, mei). *Deeltjes en hun interacties*. Opgehaald van NiNa:
http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/NiNa_Deeltjes/Deeltjes_Interacties_2010_SZ.pdf
- Smithsonian Science. (sd). *Cosmic Rays*. Opgehaald van website van smithsonianscience.org: <http://smithsonianscience.org/wordpress/wp-content/uploads/2009/11/sideways1.jpg>
- Streeter, C. (sd). *Elekroscoop*. Opgehaald van DK images:
<http://dkimages.wg.picturemaxx.com/webgate/preview.php?UURL=1208a88ebc95df25620a3cd1b4b509a9&IMGID=00618251>
- TU/e. (sd). *Dosisbegrippen stralingsbescherming*. Opgehaald van Technische Universiteit Eindhoven: http://w3.tue.nl/fileadmin/sbd/Documenten/Basiscursus/DOS/04-1180_Dosisbegrippen_stralingsbescherming.pdf
- Universiteit Utrecht. (sd). *Interactie van kosmische straling en aardatmosfeer*. Opgehaald van Website universiteit Utrecht:
http://www.fisme.science.uu.nl/hisparc/downloads/hisparc_2-3.pdf
- Vissers, S. (2012). *Het Standaardmodel*. Opgehaald van Deeltjesfysica:
<http://deeltjesfysica.doorgronden.nl/het-standaardmodel-2.html>
- Westra, d. M.-T. (2005, Juni 28). *Kernfusie-experiment ITER naar Frankrijk*. Opgehaald van Kennislink: <http://www.kennislink.nl/publicaties/kernfusie-experiment-iter-naar-frankrijk>
- Wikipedia. (sd). *Alfastraling*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Alfastraling>
- Wikipedia. (sd). *Bellenvat*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Bellenvat>
- Wikipedia. (sd). *Bètaverval*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/B%C3%A8taverval>
- Wikipedia. (sd). *Comma-separated values*. Opgehaald van Wikipedia EN:
http://en.wikipedia.org/wiki/Comma-separated_values
- Wikipedia. (sd). *Constructor (object-oriented programming): Python*. Opgehaald van Wikipedia EN: [http://en.wikipedia.org/wiki/Constructor_\(object-oriented_programming\)#Python](http://en.wikipedia.org/wiki/Constructor_(object-oriented_programming)#Python)
- Wikipedia. (sd). *Fluorescentie*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Fluorescentie>
- Wikipedia. (sd). *Gammastraling*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Gammastraling>

- Wikipedia. (sd). *Gasontlading*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Gasontlading>
- Wikipedia. (sd). *Geigerteller*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Geigerteller>
- Wikipedia. (sd). *Nevelvat*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Nevelvat>
- Wikipedia. (sd). *Parsec*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Parsec>
- Wikipedia. (sd). *Python_(programmeertaal)*. Opgehaald van Wikipedia NL:
[http://nl.wikipedia.org/wiki/Python_\(programmeertaal\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Python_(programmeertaal))
- Wikipedia. (sd). *Rijksdriehoekscoördinaten*. Opgehaald van Wikipedia NL:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Rijksdriehoeksco%C3%B6rdinaten>
- Wikipedia. (sd). *Standaardmodel van de deeltjesfysica*. Opgehaald van Wikipedia NL:
http://nl.wikipedia.org/wiki/Standaardmodel_van_de_deeltjesfysica
- Wikipedia. (sd). *Theodor Wulf*. Opgehaald van Wikipedia NL:
http://nl.wikipedia.org/wiki/Theodor_Wulf

BIJLAGE: PLAN VAN AANPAK

Week 42

Ma – beantwoorden vraag: welke ontdekkingen zijn er gedaan omtrent kosmische straling?

Di – m. § 2.2

Wo – m. § 2.3 t/m 21

Do – m. § 2.3 t/m 23

Vr – m. § 2.4

Zo – python leren

Week 43

Ma – m. § 2.5

Di – m. § 2.6 t/m 32

Wo – m. § 2.6 t/m 34

Do – beantwoorden vraag: Welke (evenwichts)wetten kent men van kosmische deeltjes?

Zo – python leren

Week 44

Ma – samenvatten § 3.1

Di – samenvatten § 3.2

Wo – samenvatten § 3.3

Do – beantwoorden vraag: Wat is het standaardmodel?

Zo – python leren

Week 45

Ma – m. § 4.1 module

Di – m. § 4.2 module t/m 43

Wo – m. opdr. 44 + § 4.3 module

Do – beantwoorden vraag: Welke toepassingen omtrent (kosmische) straling zijn er?

Zo – python leren

Week 46

Ma – m. DT blz. 80

Di – m. DT blz. 81

Wo – m. DT blz. 82

Zo – python leren

Week 47

Ma – m. voorblad en samenvoegen werk in één document.

Di – m. voorblad en samenvoegen werk in één document.

Wo – m. voorblad en samenvoegen werk in één document.

Do – Eerste Beoordelingsmoment

Vr – installeren python + testen!

Zo – informatie verzamelen

Week 48

Hele week – informatie verzamelen

Week 49

Hele week – informatie verzamelen

Week 50

Hele week – informatie verzamelen

Week 51

Hele week – informatie verzamelen

Week 52

Hele week – werken aan verslag en python experimenteren

Week 1

Hele week – werken aan hoofdstuk 7

Ma – lezen jaarverslag t/m 18

Di – lezen jaarverslag t/m 34

Wo – Werken aan H6

Do – Werken aan H6, coördinaten van de detectoren af

Vr – Werken aan H6, hoeken af

Za – Werken aan H6, energie af

Week 2

Wo – Tweede beoordelingsmoment

Do – evaluatie schrijven

Vr – verbeteren H3 en H4

Za – verbeteren H3 en H4

Zo – Neuraij informeren m.b.t. oppervlaktebereik

Week 3

Ma – doornemen informatie

Di – doornemen informatie

Wo – werken H6 verslag oppervlakte

Do – werken H6 verslag oppervlakte

Vr – werken H6 verslag oppervlakte

Za – werken H6 verslag oppervlakte

Zo – werken H6 verslag oppervlakte

Week 4

Ma – Neuraij informeren m.b.t. gegevens HiSPARC

Di – schrijven pythonprogramma

Wo – schrijven pythonprogramma

Do – schrijven pythonprogramma

Vr – werken H6 verslag verwerking python

Za – werken H6 verslag verwerking python

Zo – werken H6 verslag verwerking python

Week 5

Ma – werken aan H7 conclusie en evaluatie

Di – werken aan H7 conclusie en evaluatie

Wo – schrijven samenvatting

Do – schrijven samenvatting

Vr – bronvermeldingen

Za – bronvermeldingen

Week 6

Ma – verbeteren verslag

Di – verbeteren verslag

Wo – derde beoordelingsmoment

Do – uitgesteld werk afmaken

Vr – uitgesteld werk afmaken

Week 7

Hele week – eventueel uitgesteld werk afmaken

Week 8

Hele week – completeren verslag (alles in juiste volgorde, eisen nakijken)

Week 9

Wo – inleveren PWS (uitgesteld wanneer Joris uitloopt)

BIJLAGE: LOGBOEK

datum	Tijd (min)	Plaats	activiteit	Opmerkingen	Afspraken
28-feb-13	240	Helder	Info zoeken; nadenken over onderwerp;	kreeg te horen over hisparc, wilde eerst over aardmagneetveld	n.v.t.
3-sep-13	60	Joris	info hisparc van Neurij	was ingewikkeld, maar lijkt interessant en passend voor mij	Lve zal begeleiden. Indien nodig Neurij
4-sep-13	50	Helder	lezen § 1.1 module	n.v.t	n.v.t.
5-sep-13	50	Helder	maken § 1.1 module	schoot niet erg op	n.v.t.
8-sep-13	60	Thuis	maken § 1.1 module	bij opdr.7 extra opgaven overgeslagen	n.v.t.
9-sep-13	50	Helder	maken § 1.2 module	nog lange weg te gaan	n.v.t.
12-sep-13	50	Helder	maken § 1.2 module	n.v.t	n.v.t.
17-sep-13	60	Thuis	leren Python	http://www.learnpython.org/	n.v.t.
29-sep-13	120	Thuis	Hoofd- deelvragen; module H2	vragen	n.v.t.
13-okt-13	300	Thuis	Maken planning; afm H1 module; werken verslag vraag welke ontdekkingen	n.v.t	n.v.t.
14-okt-13	240	Thuis	werken verslag; m § 2.1	n.v.t	n.v.t.
15-okt-13	240	Thuis	H1 verslag af; m § 2.2	n.v.t	n.v.t.
17-okt-13	60	Thuis	m § 2.3 t/m § 2.6	voortuitgewerkt t.o.v. de planning	n.v.t.
21-okt-13	50	Helder	m § 2.7	n.v.t	n.v.t.
21-okt-13	60	Thuis	correcties H1 verslag; python leren	http://www.learnpython.org/	n.v.t.
22-okt-13	50	Helder	begin H2 verslag	n.v.t	n.v.t.
22-okt-13	60	Joris	uitleg over HiSPARC	Was duidelijk, wel denk ik dat het vinden van info niet zonder problemen zal gaan	taak: de energie van kosmische deeltjes onderzoeken aan de hand van bereik van de deeltjes
23-okt-13	50	Helder	H2 verslag	n.v.t	n.v.t.
24-okt-13	50	Helder	H2 verslag	n.v.t	n.v.t.
25-okt-13	80	Helder	H2 verslag	n.v.t	n.v.t.
27-okt-13	540	Thuis	H2 verslag	bijna af, loop wat achter door dat het veel is. Ik denk dat het beter is als ik DT niet ga maken en in die week verder ga met python leren	n.v.t.
28-okt-13	180	Thuis	H2 verslag af	n.v.t	n.v.t.
29-okt-13	45	Thuis	Lezen heel H3	ga verslag H3 maken in weekend	n.v.t.

31-okt-13	45	Thuis	Begin H3 verslag	in weekend afmaken	n.v.t.
2-nov-13	80	Thuis	H3 verslag	n.v.t	n.v.t.
3-nov-13	180	Thuis	H3 verslag	niet af kunnen krijgen, doordat ik voor Engels boek moest lezen. Volgende week H3 en H4 af.	n.v.t.
4-nov-13	90	Thuis	H3 verslag af	maak alles netjes (met afbeelding) aan het eind	n.v.t.
5-nov-13	50	Helder	H4 § 1	n.v.t	n.v.t.
5-nov-13	60	Thuis	H4 § 2	n.v.t	n.v.t.
6-nov-13	50	Helder	H4 opdrachten af	n.v.t	n.v.t.
9-nov-13	120	Thuis	H4 verslag begin	n.v.t	n.v.t.
10-nov-13	240	Thuis	H4 verslag af	n.v.t	n.v.t.
12-nov-13	30	Thuis	Python leren	http://www.learnpython.org/	n.v.t.
13-nov-13	40	Helder	Titelpagina bedenken	n.v.t	n.v.t.
18-nov-13	120	Thuis	Voorpagina + samenvoegen gemaakt werk	n.v.t	n.v.t.
19-nov-13	100	Helder	samenvoegen gemaakt werk	n.v.t	n.v.t.
20-nov-13	45	Thuis	verslag voorzien afbeeldingen	n.v.t	n.v.t.
21-nov-13	30	Helder	verslag voorzien afbeeldingen	eerste 20 min les gevolgd	n.v.t.
22-nov-13	60	Thuis	verslag voorzien afbeeldingen + installeren	installatie verliep moeizaam. HiSPARC files	n.v.t.
27-nov-13	50	Helder	Opzoeken informatie + start H5	n.v.t	n.v.t.
30-nov-13	180	Thuis	werken aan H5	n.v.t	n.v.t.
1-dec-13	180	Thuis	werken aan H5 + python	er vond onverwacht een error plaats, moet vragen hoe dat komt	n.v.t.
17-dec-13	50	Helder	werken verslag H5	Weinig tijd gehad door PO ijsbaan	n.v.t.
18-dec-13	50	Helder	werken verslag H5	n.v.t	n.v.t.
24-dec-13	150	Thuis	verbeteren verslag	n.v.t	n.v.t.
25-dec-13	120	Thuis	verbeteren verslag + doornemen Manon Kok verslag	n.v.t	n.v.t.
26-dec-13	90	Thuis	werken Python-file	loop vast bij vector - morgen werken aan verslag	n.v.t.
27-dec-13	240	Thuis	werken verslag en python	heb gemerkt dat installatie onvolledig was, maar dat is nu opgelost	n.v.t.
28-dec-13	240	Thuis	planning, verslag, python, verslagen doorlezen	n.v.t	n.v.t.
30-dec-13	120	Thuis	Lezen Leraarverslag	n.v.t	n.v.t.

1-jan-14	300	Thuis	Werken aan H6	ga planning volledig omgooien. Ik moet alleen relevante info hebben en dat hoofdstuk over bliksem vervalt. Alle aandacht op mijn onderzoeksvraag. Al dat lezen veroorzaakt alleen maar stress.	n.v.t.
2-jan-14	540	Thuis	Werken aan H6 hoeken	n.v.t	n.v.t.
3-jan-14	420	Thuis	Werken aan H6 hoeken en energiebepaling	n.v.t	n.v.t
4-jan-14	360	Thuis	Energiebepaling af	n.v.t	n.v.t.
8-jan-14	50	Helder	Maken planning tot inleverdatum	n.v.t	Vertelt wat ik ging doen
9-jan-14	100	Helder	Evatuatie en bronvermelding; verbeteren	n.v.t	n.v.t.
14-jan-14	150	Helder	Doorlezen Thesis D. Fokkema	n.v.t	n.v.t.
15-jan-14	50	Helder	Doorlezen Thesis D. Fokkema	Neuraj heeft nog steeds niet beantwoord	n.v.t.
16-jan-14	240	Thuis	Uitbreiden verslag: tabel hadronen en spectrum	n.v.t	n.v.t.
17-jan-14	300	Thuis	Uitbreiden H1, omdat ik nog steeds geen antwoord heb gekregen	n.v.t	n.v.t.
18-jan-14	180	Thuis	Uitbreiden verslag + bronvermelding	n.v.t	n.v.t.
20-jan-14	180	Thuis	Uitbreiden verslag mbt download-formulier	heb antwoord gekregen	n.v.t.
21-jan-14	120	Thuis	Uitbreiden verslag mbt download-formulier	n.v.t	n.v.t.
22-jan-14	50	Helder	Uitbreiden verslag	n.v.t	Verstrijden de toevoegingen besproken
22-jan-14	150	Thuis	python schrijven	Vraag: hoe kan ik het beste de coördinaten van detectoren verkrijgen?	n.v.t.
23-jan-14	120	Thuis	python schrijven	n.v.t	n.v.t.
24-jan-14	50	Helder	python schrijven	n.v.t	n.v.t.
24-jan-14	240	Thuis	python schrijven	n.v.t	n.v.t.
25-jan-14	120	Thuis	python schrijven	n.v.t	n.v.t.
26-jan-14	240	Thuis	python schrijven + verslag	Wil het anders doen: bepaling ligging detectoren adhv een Delft en wil afzien van oppervlaktebepaling	n.v.t.
27-jan-14	40	Helder	Overleggen en vragen stellen	n.v.t	n.v.t.
27-jan-14	180	Thuis	Verslag uitbreiden	n.v.t	n.v.t.
28-jan-14	300	Thuis	Verslag uitbreiden	n.v.t	n.v.t.
29-jan-14	40	Helder	Verslag uitbreiden	n.v.t	n.v.t.
30-jan-14	90	Thuis	Ri verklaren en python	n.v.t	n.v.t.

31-jan-14	180	Thuis	Toelichting python	n.v.t	n.v.t.
1-feb-14	180	Thuis	Conclusies python	n.v.t	n.v.t.
2-feb-14	150	Thuis	Conclusie en evaluatie	n.v.t	n.v.t.
4-feb-14	100	Helder	Conclusie	n.v.t	n.v.t.
4-feb-14	100	Joris	Overleggen en vragen stellen	n.v.t	1. coördinaten detectoren kloppen, zoals ik verwacht, niet. 2. voeg het script toe aan het eindschrift
4-feb-14	210	Thuis	Conclusie, inhoudsopgave, bibliografie	n.v.t	n.v.t.
8-feb-14	60	Thuis	Coördinaten detectoren	Djaïr antwoordt niet	n.v.t.
11-feb-14	15	Helder	Samenvatting	n.v.t	n.v.t.
16-feb-14	120	Thuis	Samenvatting + perfectionaliseren	n.v.t	n.v.t.
18-feb-14	60	Joris	Djaïr overlegd	n.v.t	ik heb hem gewezen op de onjuiste coördinaten.
18-feb-14	60	Helder	Onjuistheden in verslag vermelden	n.v.t	n.v.t.
18-feb-14	60	Thuis	Doornemen code + verbeteringen verslag	n.v.t	n.v.t.
19-feb-14	180	Thuis	Doorspitten Eindschrift en schrijven	zeer rommelig script. Het toevoegen van mijn deel zal wel lukken, maar dat gaat even duren	n.v.t
23-2-2014	240	Thuis	Eindschrift	bijna af	n.v.t.
24-2-2014	60	Thuis	Eindschrift	zowat af. Bespreken wat beter kan.	n.v.t.
25-feb-14	50	Joris	Eindschrift met Djaïr bespreken	Python op laptop weigert dienst	Djaïr gaat thuis ernaar kijken
27-feb-14	350	Helder	Presentatie	n.v.t	n.v.t.
1-mrt-14	120	Helder	Presentatie verkorten + verb verslag	n.v.t	n.v.t.
5-mrt-14	90	Thuis	afm. Verslag	n.v.t	n.v.t.
6-mrt-14	180	Thuis	afm. Verslag	n.v.t	n.v.t.
7-mrt-14	50	Joris	Overleggen tekortkomingen	n.v.t.	n.v.t.
Totaal	12780				

opmerking:

PWS minimaal 80 uur.

Dat is $80 \times 60 = 4800$ minuten