



## 1 Kosmische deeltjes

De aarde wordt continu ‘gebombardeerd’ door deeltjes vanuit de ruimte. Als zo’n deeltje de dampkring binnendringt zal het op een gegeven moment een botsing maken met een luchtmolecuul. Met ‘botsing’ bedoelen we niet een botsing zoals tussen biljartballen. Bij een botsing tussen biljartballen verandert wel de richting en snelheid van de biljartballen, maar er ontstaan geen nieuwe biljartballen. Het is beter te spreken van een *wisselwerking* tussen het kosmisch deeltje en een luchtmolecuul omdat tijdens de wisselwerking nieuwe deeltjes ontstaan. Deze deeltjes zullen op hun beurt ook weer wisselwerken met luchtmoleculen waardoor er nog meer nieuwe deeltjes ontstaan. Er ontstaat als het ware een ‘lawine’ van deeltjes, die in de wetenschappelijke literatuur wordt aangeduid als *cosmic air shower*. Bij elke wisselwerking wordt de energie verdeeld over de nieuwe deeltjes waardoor de energie per deeltje afneemt. Deeltjes waarvan de energie te klein is om bij een wisselwerking nieuwe deeltjes te maken dragen niet meer bij aan de ontwikkeling van de lawine; de lawine ‘sterft uit’. Hoe groter de energie van het deeltje dat uit de ruimte kwam, des te langer het duurt voor dat de lawine is uitgestorven. Als de energie groot genoeg is kan de lawine het aardoppervlak bereiken.

Van de deeltjes die in onze dampkring terechtkomen is een deel afkomstig van de zon. De energie van deeltjes van de zon is betrekkelijk laag; ze veroorzaken maar kleine lawines die al hoog in de atmosfeer zijn uitgestorven. Soms zijn er op de zon wel eens uitbarstingen van grote hoeveelheden geladen deeltjes. Deze kunnen in onze atmosfeer het *poollicht* of *noorderlicht* veroorzaken (Figuur 1.1). Dat we het poollicht kunnen waarnemen komt omdat er tijdens zo’n uitbarsting van de zon zeer veel deeltjes in onze atmosfeer terechtkomen.

Van verder weg uit de ruimte komen deeltjes met hogere energie. Van de lawines die daaruit in onze atmosfeer ontstaan kunnen deeltjes het aardoppervlak bereiken en een signaal afgeven in een HiSPARC detector. Op deze wijze kunnen we kosmische deeltjes indirect waarnemen. In deze lesbrief zal worden ingegaan op de ontwikkeling van de shower in de atmosfeer en de deeltjes die daarbij een belangrijke rol spelen. Eerst gaan we kijken naar de eenheden waarin we de energie van een deeltje kunnen uitdrukken.

## 2 De energie van een deeltje

Volgens het SI eenhedenstelsel is de joule (J) de eenheid van energie ( $1\text{J} = 1\text{kg}\text{m}^2/\text{s}^2$ ). In de deeltjesfysica is dat geen handige eenheid. Van zowel elementaire deeltjes als elektronen en muonen als samengestelde deeltjes als pionen (opgebouwd uit 2 quarks) en protonen (opgebouwd uit 3 quarks) wordt de energie vrijwel altijd uitgedrukt in elektronvolt (eV). Eén elektronvolt is de energieverandering van een elektron als het een potentiaalverschil van 1 V overbrugt. Een elektronvolt is een zeer kleine hoeveelheid energie:  $1\text{eV} = 1,60 \times 10^{-19}\text{J}$ . Om enig gevoel voor dergelijke kleine energieën te krijgen bekijken we eens de energie van een muon in rust. Deze is



**Figuur 1.1 – Poollicht boven Alaska [1].**

$E_0 = 105,6 \text{ MeV}$ . Voor een deeltje dat beweegt met snelheid  $v$  is de energie groter:

$$E(v) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Hierin is  $c$  de lichtsnelheid. Als een muon een snelheid heeft dat 99,9% is van de lichtsnelheid, dan is zijn energie

$$E(0,999c) = \frac{105,6}{\sqrt{1 - 0,999^2}} \text{ MeV} = 2,36 \text{ GeV}.$$

Uitgedrukt in joule zou deze energie een klein getal zijn. De waarde 2,36 GeV doet meer recht aan het feit dat de energie relatief hoog is voor een elementair deeltje als het muon.

Kosmische deeltjes kunnen een relatief hoge energie hebben, tot wel meer dan  $10^{20}$  eV. De energie van energetische deeltjes wordt vaak uitgedrukt in TeV, PeV, etc. De betekenis daarvan staat in Tabel 1.

factor	eenheid	symbool
$10^0$	elektronvolt	eV
$10^3$	kiloelektronvolt	keV
$10^6$	megaelektronvolt	MeV
$10^9$	gigaelektronvolt	GeV
$10^{12}$	teraelektronvolt	TeV
$10^{15}$	petaelektronvolt	PeV
$10^{18}$	exaelektronvolt	EeV
$10^{21}$	zettaelektronvolt	ZeV

**Tabel 1 – Energie eenheden van deeltjes.**

### 3 Showers

Ruwweg kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten showers: elektromagnetische showers en hadronische showers. Omdat de elektromagnetische shower het eenvoudigst kan worden beschreven, zullen we die het eerst behandelen.

#### 3.1 Elektromagnetische showers

Wanneer een kosmisch gamma-deeltje  $\gamma$  (een hoogenergetisch foton) de dampkring binnenkomt, kan het door elektromagnetische wisselwerking met de kern van een luchtatoom opsplitsen in een elektron  $e^-$  en een positron  $e^+$ . Dit proces heet paar-creatie. Wat verderop in de dampkring kan het elektron vervolgens door elektromagnetische wisselwerking met de kern van een luchtatoom een gamma-deeltje afstaan. Hetzelfde geldt voor het positron. Dit proces heet remstraling. Weer wat verderop in de dampkring zal er weer paar-creatie optreden bij de gamma-deeltjes en remstraling bij de elektronen en positronen. Er komen dus steeds meer deeltjes, maar die hebben elk wel een steeds kleinere energie. Na een aantal splitsingen is de energie van een deeltje zo klein dat het gemakkelijk zijn energie kwijtraakt aan het ioniseren van een luchtatoom. Dat gebeurt als de energie van een deeltje nog maar zo'n 84 MeV is. Voordat het zover is kunnen er uit één kosmisch deeltje een lawine van vele miljoenen deeltjes in de dampkring ontstaan: de *cosmic air shower* of kortweg *shower*. Omdat zowel paar-creatie als remstraling elektromagnetische processen zijn spreekt men van een elektromagnetische shower.

Samenvattend wordt de elektromagnetische shower gedomineerd door paar-creatie

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

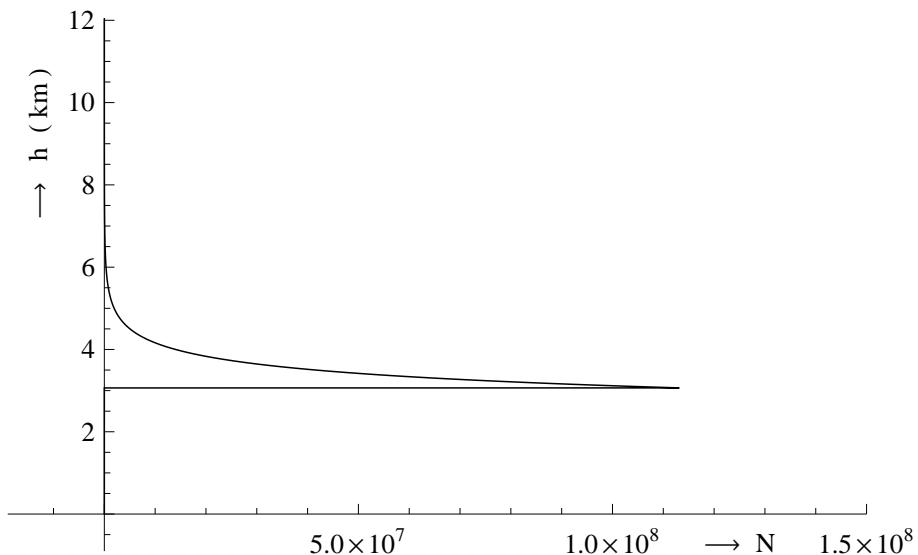
en remstraling

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma .$$

In beide gevallen is er een ‘splitsing’ van één deeltje in twee deeltjes.

#### 3.2 Eenvoudig model voor de elektromagnetische shower

Een eenvoudig model voor de ontwikkeling van het aantal deeltjes in een elektromagnetische shower is het Heitler model. Volgens dit model ondergaan de deeltjes die op een bepaald moment in de shower zitten gelijktijdig een opsplitsing waarbij de energie van een deeltje gelijk verdeeld wordt over de twee ontstane deeltjes. We noemen die gemeenschappelijke opsplitsing een ‘stap’. Dus als we beginnen met een deeltje met een energie van bijvoorbeeld 8 PeV, dan hebben we na de eerste stap 2 deeltjes van elk 4 PeV, na twee stappen 4 deeltjes van 2 PeV, na 3 stappen 8 deeltjes van 1 PeV, enzovoort. Na 27 stappen is de energie minder dan 84 MeV zodat de shower, volgens dit model, stopt. Zolang de energie boven de stopenergie van 84 MeV zit groeit het aantal deeltjes vol-



**Figuur 3.1** – Het aantal elektronen en positronen in een shower volgens het Heitler model (horizontaal) als functie van de hoogte (verticaal).

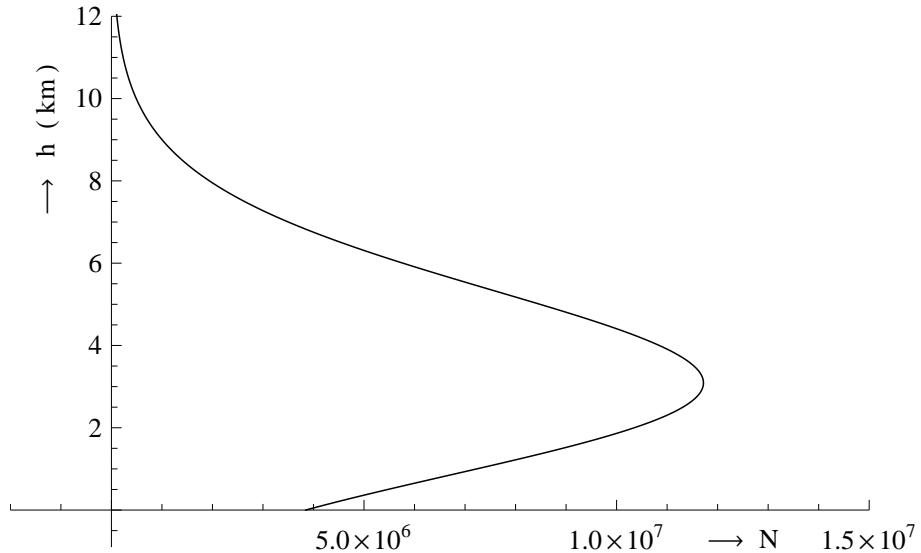
gens het Heitler model exponentieel als functie van het aantal stappen om vervolgens plotseling op te houden. Als de begin energie 8 PeV is, gebeurt dat op circa 3 km hoogte (Figuur 3.1).

In werkelijkheid wordt bij een splitsing de energie niet gelijk verdeeld. Ook duurt het bij het ene deeltje langer voor het splitst dan bij het andere deeltje; dat hangt van het toeval af. Het belangrijkste gevolg is dat de shower niet plotseling stopt, maar geleidelijk afneemt (Figuur 3.2).

We zien duidelijk dat de ontwikkeling van de shower volgens het Heitler model veel verschilt van de werkelijkheid. Het maximum aantal deeltjes is volgens het Heitler model bijna 10 keer te groot. Dat er toch waarde wordt gehecht aan het Heitler model komt omdat het de hoogte waarop het maximum aantal deeltjes wordt bereikt wél goed voorspelt. Voor de voorbeeld shower van 8 PeV is die hoogte ongeveer 3 km. Verder zien we dat volgens het Heitler model de shower op 3 km hoogte ophoudt, terwijl in werkelijkheid voor de voorbeeld shower van 8 PeV er ongeveer 4 miljoen elektronen en positronen het aardoppervlak bereiken. Als die een signaal afgeven in een HiSPARC detector wordt de shower geregistreerd.

### 3.3 Hadronische showers

Wanneer een kosmisch proton  $p$  de dampkring binnenkomt, kan het een sterke (hadronische) wisselwerking aangaan met de kern van een luchtatoom. Het gevolg is dat er een groot aantal pionen ontstaat. Daarvan is ongeveer een derde deel positief geladen ( $\pi^+$ ), een derde deel negatief geladen ( $\pi^-$ ) en een derde deel ongeladen (neutraal) ( $\pi^0$ ). De neutrale pionen hebben een extreem korte levensduur; ongeveer  $8,4 \times 10^{-17}$  s in rust. Ze vervallen daardoor direct in twee gamma-deeltjes die elk een elektromagnetische shower teweegbrengen zoals hiervoor beschreven. De geladen pionen hebben een langere levensduur; ongeveer  $2,6 \times 10^{-8}$  s in rust. De hoge snelheid van de geladen pionen veroorzaakt tijddilatatie (een gevolg van de relativiteitstheorie) waardoor de levensduur veel groter is. Het gevolg is dat de geladen pionen een sterke wisselwerking aan-



**Figuur 3.2** – Het aantal elektronen en positronen in een shower volgens een realistisch model (horizontaal) als functie van de hoogte (verticaal).

gaan met de kern van een luchtatoom voor dat hun levensduur voorbij is. Daarbij ontstaan weer nieuwe pionen, waarvan weer een derde deel  $\pi^+$ , een derde deel  $\pi^-$  en een derde  $\pi^0$ . De neutrale pionen daarvan vervallen weer direct tot twee gamma deeltjes, terwijl de geladen pionen weer een sterke wisselwerking aan kunnen gaan, enzovoort. Na een aantal sterke wisselwerkingen is de energie van per pion, en daarmee ook zijn levensduur, zodanig afgenomen dat het pion vervalt voordat het een sterke wisselwerking aangaat. Het geladen pion vervalt dan in een muon  $\mu$  (met dezelfde lading als het pion) en een muonneutrino  $\nu_\mu$  (ongeladen). In een schema:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu ,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu ,$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma .$$

Net als de pionen hebben de muonen ook een eindige levensduur; ongeveer  $2,2 \cdot 10^{-6}$  s in rust. De muonen die in de hadronische shower ontstaan hebben een dusdanige hoge energie (en daarmee een dusdanige levensduur) dat ze veelal het aardoppervlak bereiken. Omdat ze geladen zijn kunnen ze net als de elektronen een signaal afgeven in de HiSPARC detector. De muonen die niet het aardoppervlak bereiken zijn ergens in de lucht vervallen in een elektron en twee verschillende neutrino's:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu ,$$

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

Sommige elektronen (positronen) die ontstaan zijn uit het verval van muonen kunnen alsnog het aardoppervlak bereiken en een signaal afgeven in een HiSPARC detector.

De hadronische shower is belangrijk omdat bijna 90% van de kosmische deeltjes protonen zijn.

## 4 Levensduur en relativiteit

Eerder kwam al de verlenging van de levensduur van een energetisch deeltje ter sprake. Volgens de relativiteitstheorie geldt voor de levensduur van een bewegend deeltje:

$$\tau(v) = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} .$$

Hierin is  $v$  de snelheid van het deeltje en  $c$  de lichtsnelheid. Verder is  $\tau_0$  de levensduur van een deeltje in rust. Als een muon een snelheid heeft dat 99,9% is van de lichtsnelheid, dan is zijn levensduur

$$\tau(0,999c) = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - 0,999^2}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - 0,999^2}} = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Voor de afstand  $x$  die dit muon aflegt voor het vervalt vinden we dan

$$x = v \cdot \tau(v) = 0,999c \cdot \tau(0,999c) = 0,999 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5} = 1,47 \cdot 10^4 \text{ m.}$$

Dat is bijna 15 km.

Tot slot moet worden benadrukt dat de levensduur eigenlijk een **gemiddelde** levensduur betreft. Als er wordt gezegd dat de levensduur van bijvoorbeeld een geladen pion in rust  $2,6 \times 10^{-8}$  s is, dan is die waarde een verwachtingswaarde. Een individueel pion kan best korter of langer leven, maar gemiddeld over een groot aantal pionen klopt het. Dit geldt voor alle deeltjes met eindige levensduur.

## Referenties

- [1] Foto door U.S. Air Force Senior Airman J. Strang.