

Radio voor de massa

Massacompositiebepaling van kosmische straling met behulp van radiometingen

Tijdens het lezen van dit artikel word je blootgesteld aan een stortvloed van microscopische deeltjes. Dit is een constante stroom van muonen, neutrino's, elektronen en vele andere soorten elementaire deeltjes, die de restanten vormen van botsingen tussen kosmische deeltjes en moleculen in de atmosfeer van de aarde. De kosmische deeltjes zelf zijn geladen atoomkernen, variërend van lichte waterstofkernen (protonen) tot zware ijzerkernen. Deze deeltjes zijn afkomstig van ver weg gelegen astronomische bronnen, en noemen we – om historische redenen – *kosmische stralen*. Stefan Jansen

68

De energie die de kosmische stralen hebben als ze de aardatmosfeer bereiken varieert enorm. Er zitten maar liefst elf ordes van grootte – dat is een factor van honderd miljard – tussen de hoogste en laagste energie van de kosmische stralen die we kunnen meten. Naarmate de energie van de deeltjes omhoog gaat, nemen we ze met steeds minder grote regelmaat op aarde waar. Elke vierkante centimeter op aarde wordt vaker dan eens per seconde geraakt door een kosmische straal met een lage energie, terwijl de kosmische stralen met de hoogst meetbare energie – ongeveer 10^{20} eV

– zó zeldzaam zijn dat je doorgaans meer dan een eeuw moet wachten om er één per vierkante kilometer te kunnen meten.

Het bestaan van deze zeldzame hoogenergetische deeltjes is omgeven door raadselen. We weten ten eerste niet precies hoe deze deeltjes versneld kunnen worden tot een dermate hoge energie. Daarnaast worden de geladen deeltjes afgebogen door magneetvelden met onbekende sterkte en oriëntatie gedurende hun reis tussen de bron en de aarde, waardoor het erg lastig is de herkomst van de deeltjes te achterhalen. Daardoor zijn de bronnen en versnellingsmechanismen van de kosmische stralen met de hoogste energie vooralsnog niet experimenteel vastgesteld. De sleutel om deze fundamentele vraagstukken op te lossen ligt in het meten van de massacompositie van de kosmische stralen.

De sleutel: massacompositie

Lichte kosmische deeltjes met weinig lading – zoals protonen – worden slechts in kleine mate afgebogen door magneetvelden tussen en binnen sterrenstelsels. Hoe zwaar-

der de atoomkern, hoe groter de lading, en des te groter is de invloed van de magneetvelden op deze deeltjes bij een gelijke energie. Door in zoektochten naar bronnen van kosmische straling alleen de aankomstrichting van zeer hoogenergetische lichte deeltjes mee te nemen is het waarschijnlijker dat de aankomstrichting overeenkomt met de ligging van de bron, zoals te zien is in figuur 2. Het meten van de zeldzame hoogenergetische kosmische straling en het bepalen van hun massacompositie is echter geen eenvoudige opgave.

Gelukkig helpt de natuur ons hier een handje. Wanneer de kosmische deeltjes botsen met moleculen in de atmosfeer produceren ze een cascade van secundaire deeltjes die we de deeltjeslawine noemen. In het geval van hoogenergetische kosmische straling kan deze lawine van reactieproducten op grondniveau een oppervlakte bestrijken van enkele tientallen vierkante kilometers. Hierdoor is het mogelijk om met relatief weinig deeltjesdetectoren een gigantisch detectoroppervlak gevoelig voor hoogenergetische kosmische straling te creëren. Van dit principe wordt gebruikgemaakt

Stefan Jansen (Ludvika, Zweden, 1985) voerde zijn promotie-onderzoek uit in samenwerking met de Auger-groep binnen het IMAPP op de Radboud Universiteit Nijmegen. Hij verdedigde zijn proefschrift *Radio for the Masses* in april 2016.



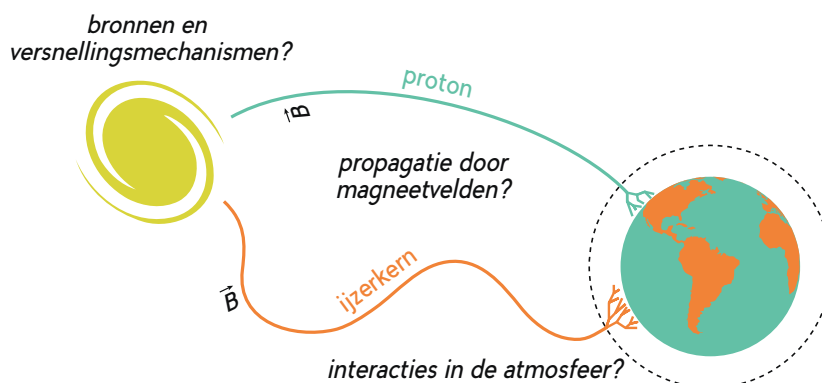
destefanjansen@gmail.com



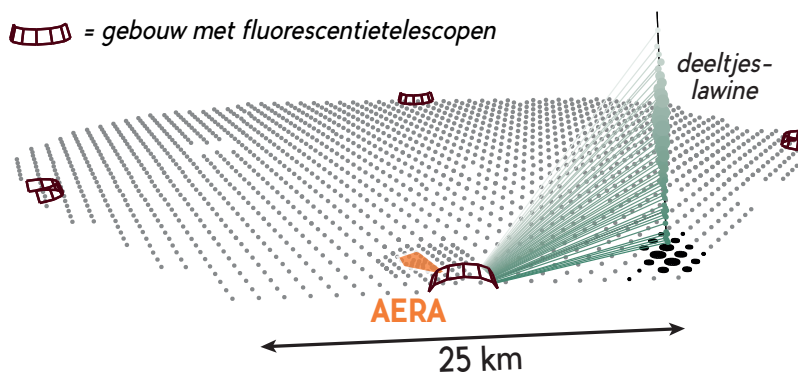
Figuur 1 Deeltjesdetector met op de achtergrond een gebouw met fluorescentietelescopen, onderdeel van het Pierre Auger Observatorium. Foto: Pierre Auger Observatorium.

bij het Pierre Auger Observatorium in Argentinië, waar meer dan 1600 deeltjesdetectoren zijn geplaatst in een gebied met een oppervlakte van ongeveer 3000 km² – ongeveer zo groot als de provincie Zuid-Holland. Een overzichtstekening van het observatorium is te zien in figuur 3. Met behulp van het gemeten aantal deeltjes en hun aankomsttijd in de deeltjesdetectoren is het mogelijk om de energie en aankomstrichting van de oorspronkelijke kosmische straal te berekenen.

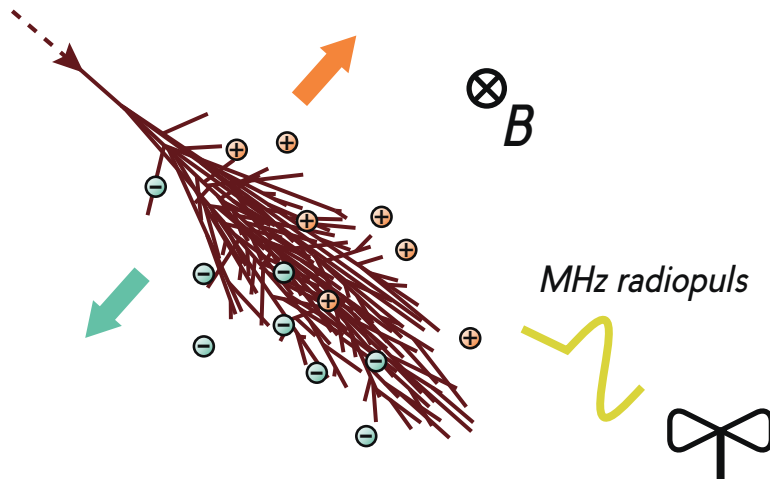
Om de massacompositie van de kosmische straal te kunnen bepalen staan er op vier locaties rondom het observatorium fluorescentietelescopen opgesteld die gericht zijn op de atmosfeer boven de deeltjesdetectoren. Deze kunnen op heldere donkere nachten het fluorescentielicht meten dat door atmosferisch stikstof wordt uitgezonden nadat het aangeslagen is door de geladen deeltjes in de lawine. Hierdoor kan de ontwikkeling van de deeltjeslawine als functie van atmosferische diepte bepaald worden. Deze ontwikkeling is gerelateerd aan de massacompositie van de kosmische straal: vanwege de grotere botsingsdoorsnede zal de deeltjeslawine



Figuur 2 De reis van kosmische stralen naar de aarde voert langs enkele onbeantwoorde fundamentele vraagstukken. Magneetvelden (B) hebben een grotere invloed op ijzerkernen dan op protonen.



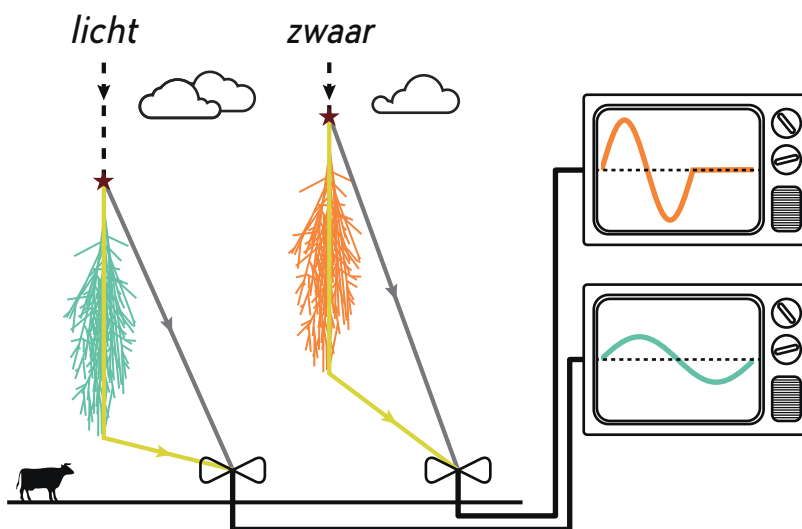
Figuur 3 Overzichtstekening van het Pierre Auger Observatorium, met de deeltjesdetectoren als grijze stippen. De deeltjeslawine wordt gezien door één van de vier fluorescentietelescopen en wordt gemeten door de zwarte deeltjesdetectoren. Het oranje gebied markeert AERA (gebaseerd op [1]).



Figuur 4 Onder invloed van het aardmagnetveld (B) bewegen de elektronen en positronen in tegengestelde richting in de deeltjeslawine, die langs de gestreepte pijl naar het aardoppervlak raast. Dit veroorzaakt emissie van radiostraling.



Figuur 5 Antennestation van het AERA-experiment.



Figuur 6 De lengte van de radiopuls op grondniveau als weglengteverschil: het verschil tussen de tijd die een radiosignaal reist van het begin van het emissiegebied naar de antenne (grijs), en de tijd die een radiosignaal nodig heeft om van het eind van het emissiegebied naar de antenne te reizen plus de totale tijd waarin de deeltjeslawine radiostraling uitzendt (geel). Het tijdsverschil voor een lichte kosmische straal is typisch groter dan voor een zware.

geproduceerd door bijvoorbeeld een ijzern kern gemiddeld hoger in de atmosfeer tot ontwikkeling komen dan die van een proton. Het nadeel van de fluorescentietechniek is dat er maar ongeveer 13% van de tijd geschikte meetomstandigheden zijn, waardoor slechts van een klein aantal van de toch al zeldzame hoogenergetische kosmische stralen de massacompositie bepaald kan worden.

Radiopulsen uit de deeltjeslawine

Behalve via de deeltjes in de lawine of het fluorescentielicht zijn kosmische stralen ook te detecteren met behulp van radiostraling. Deze straling wordt hoofdzakelijk veroorzaakt doordat de Lorentzkracht – die door het aardmagnetveld op de geladen deeltjes in de deeltjeslawine wordt uitgeoefend – de elektronen en positronen in een tegengestelde richting stuurt, zoals is afgebeeld in figuur 4. Net als bewegende elektronen in een draad veroorzaakt dit een stroom, die op zijn beurt weer resulteert in radiostraling. Deze straling laat zich met een simpele radioantenne meten als een puls in het megahertz domein – vergelijkbaar met FM-radio. Sinds 2013 vormen 95 relatief eenvoudige radioantennes de tweede fase van de Auger Engineering Radio Array (AERA), geplaatst op een klein oppervlak binnen het Pierre Auger Observatorium, zoals is aangegeven in figuur 3. Met deze opstelling is het mogelijk de radiopulsen uit de deeltjeslawine te meten in combinatie met waarnemingen van de deeltjesdetectoren en de fluorescentietelescoopen.

De verschillen in de aankomsttijd van het radiosignaal bij de individuele antennes maken het mogelijk om de aankomstrichting van de kosmische stralen te bepalen. Daarnaast weten we sinds kort dat we met behulp van de signaalsterkte van de puls ook de energie van de kosmische straal kunnen uitrekenen [2]. Het laatste puzzelstukje is het meten van de massacompositie met radiostraling en dit vormde het onderwerp van mijn promotieonderzoek. Het grote voordeel van compositiebepaling met radiostraling is dat deze niet afhankelijk is van de duisternis – in tegenstelling tot de fluorescentietechniek. We kunnen zo in principe een methode ontwikkelen die bijna 100% van de tijd werkt.

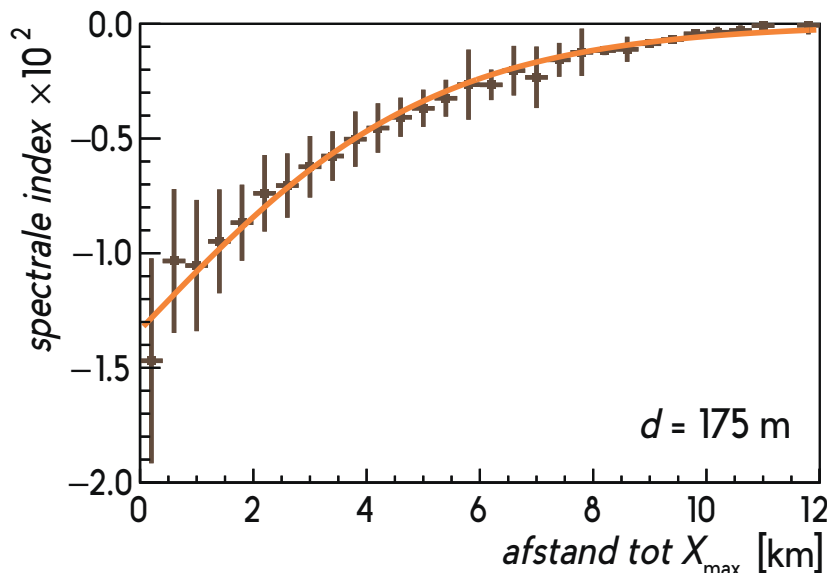
Ik heb onderzocht of de pulslengte van het radiosignaal bruikbaar is als maat voor de ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine in de atmosfeer – en dus om de massacompositie van de kosmische straal te bepalen.

Massacompositiebepaling met de pulslengte

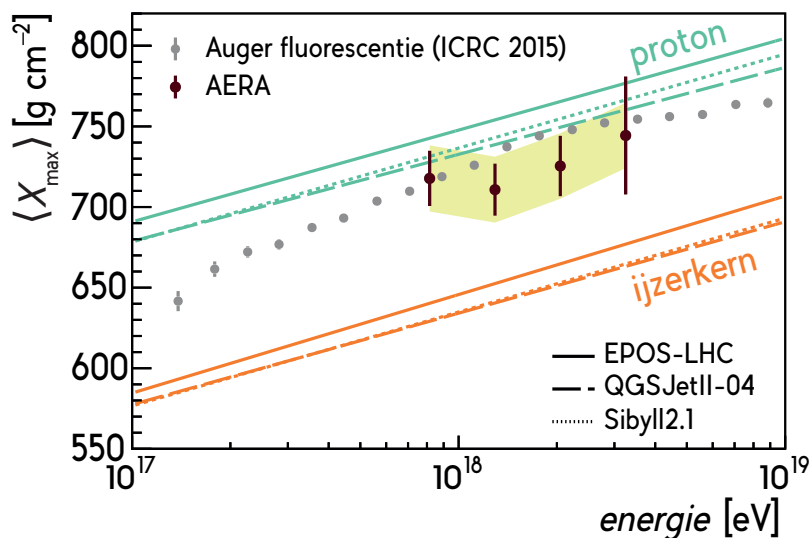
De lengte en vorm van de radiopuls zoals we deze op de grond meten hangt af van de locatie van het radio-emissiegebied in de deeltjeslawine ten opzichte van de antennepositie [3]. Dit kunnen we illustreren met het weglengteverschil, zoals is weergegeven in figuur 6. Het weglengteverschil bij een deeltjeslawine die dicht bij het aardoppervlak radiostraling uitzendt, is groter dan het weglengteverschil bij een deeltjeslawine die hoog in de atmosfeer radiostraling uitzendt. Omdat de hoogte van het emissiegebied gerelateerd is aan de ontwikkelingsdiepte van de lawine, en dus aan de botsingsdoorsnede van de kosmische straal, is de lengte van de radiopuls een massacompositiegevoelige parameter. Kort samengevat zal een kosmische straal met een lichte massacompositie – zoals een proton – laag in de atmosfeer een deeltjeslawine genereren en dus een lange radiopuls opleveren. Een zwaardere kosmische straal – zoals een ijzerkern – zal daarentegen eerder in de atmosfeer een lawine ontwikkelen waardoor een korte radiopuls gemeten zal worden.

In de praktijk is het weglengteverschil niet alleen afhankelijk van de ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine, maar hangt het ook af van de aankomstrichting van de kosmische straal en de afstand van de antenne tot de deeltjeslawine. Daar komt nog bij dat de reistijd van het radiosignaal afhankelijk is van de lokale lichtsnelheid in de atmosfeer, die niet constant is maar afneemt wanneer men zich dichterbij de grond bevindt. Alles bij elkaar vormt dit een complex samenspel van verschillende afhankelijkheden die het ingewikkeld maakt de pulslengte direct te relateren aan de ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine.

Om deze relaties te onderzoeken hebben we een studie uitgevoerd op computersimulaties van deeltjeslawines en hun radiostraling. Hierbij hebben we veel verschillende aankomstrichtingen, antenneposities en ontwik-



Figuur 7 Parametrisering van de *spectrale index* – een maat voor de pulslengte – als functie van ontwikkelingsdiepte, uit de simulatiestudie voor het geval de antenne 175 m van de deeltjeslawine af staat.



Figuur 8 De gemiddelde ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine – uitgedrukt in X_{max} – als functie van de energie van de kosmische straal. De resultaten gebaseerd op de analyse met radiodata van AERA zijn in overeenstemming met de fluorescentiemetingen. De diagonale lijnen zijn de verwachte gemiddelde ontwikkelingsdieptes gebaseerd op enkele modellen met verschillende massacomposities.

kelingsdieptes van de deeltjeslawine bekeken. Deze hebben we vervolgens vergeleken met de pulslengte van het radiosignaal. Met deze simulatiestudie hebben we een parametrisering ontwikkeld die de pulslengte beschrijft als functie van de ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine, mits de rest van de geometrie van de deeltjeslawine van de kosmische straal volledig bekend is.

In figuur 7 is de parametrisering van de pulslengte weergegeven voor één bepaalde antennepositie. De ontwikkelingsdiepte drukken we uit in X_{max} : de atmosferische diepte waar het maximale aantal deeltjes in de deelt-

jeslawine wordt bereikt voordat hij uitsterft, gemeten vanaf de bovenkant van de atmosfeer (zie ook figuur 6). Omdat de kans op een botsing met een atmosferisch deeltje afhangt van de hoeveelheid massa waar de kosmische straal doorheen reist, drukken we deze diepte uit in de massa van deze luchtkolom, in dit geval in gram per vierkante centimeter. Als maat voor de lengte van de radiopuls gebruiken we de *spectrale index*: deze beschrijft het verval van het spectrum van de puls als functie van de frequentie. Het spectrum van een lange puls heeft relatief meer vermogen bij lage frequenties dan een korte puls. Hier-

door loopt het spectrum van een lange puls steiler af dan dat van een korte puls en heeft het een spectrale index die sterker negatief is.

Massacompositie zoals gemeten met AERA

De parametrisering van de pulslengte is vervolgens toegepast op radiopulsen gemeten met de AERA-antennestations. Uit een directe vergelijking met metingen van de Auger-fluorescentietelescopen blijkt dat de metingen met de radiomethode van de ontwikkelingsdiepte per deeltjeslawine in redelijke mate overeenkomen, zeker wanneer een gecombineerde analyse wordt uitgevoerd op meerdere radiopulsen afkomstig van dezelfde deeltjeslawine.

Door de volledige AERA-dataset te analyseren, hebben we de gemiddelde ontwikkelingsdiepte van de deeltjeslawine kunnen bepalen als functie van de energie van de kosmische straal. De resultaten van deze meting zijn weergegeven in figuur 8 en blijken goed overeen te komen met de gemiddelde ontwikkelingsdiepte zoals

gemeten door de Auger fluorescentietelescopen. Om deze gemeten resultaten te interpreteren, zijn tevens de gemiddelde ontwikkelingsdieptes die verschillende modellen voorspellen aangegeven met lijnen, kleur gecodeerd voor twee verschillende massacomposities van de kosmische straal. Aan de hand hiervan is te zien dat we voornamelijk kosmische stralen met een lichte massacompositie meten in het energiegebied waarin AERA gevoelig is.

Hoe nu verder?

Uit mijn promotieonderzoek blijkt dat de spectrale index van de radiopuls bruikbaar is voor massacompositiemetingen van kosmische stralen. Dit betekent dat we behalve de signaaltijd en -sterkte ook het frequentiespectrum van de radiopuls kunnen aanwenden om de eigenschappen van kosmische straling te bepalen. Een gecombineerde analyse van al deze informatie zorgt voor een grotere bruikbaarheid van de radiodetectietechniek, wat interessant is met het oog op toekomstige toepassingen op

grotere schaal. Samen met de ontwikkeling van methodes om ook met de deeltjesdetectoren van het Pierre Auger Observatorium massacompositiemetingen te verrichten, biedt dit de mogelijkheid om in de toekomst veel beter onderscheid te maken tussen lichte en zware kosmische stralen. Hierdoor komt het beantwoorden van de fundamentele vraagstukken omtrent de oorsprong van hoogenergetische kosmische straling weer een stukje dichterbij.

Referenties

- 1 A. Aab et al., *Phys. Rev. D* **90-12** (2014) 122005.
- 2 A. Nelles et al., *Astropart. Phys.* **60** (2015) 13-24.
- 3 S. Grebe, *Finger on the pulse of cosmic rays*, proefschrift (2013).

23^e NTvN-Prijsvraag – Uitslag

De NTvN-prijsvraag heeft dit jaar negen inzendingen opgeleverd. De inzendingen waren alle van hoge kwaliteit, met als gevolg dat de jury in eerste instantie erg verdeeld was over de klassering. De verhalen over de verschillende promotieonderzoeken waren helder geschreven. Wel viel als algemene trend te bespeuren dat de popularisering van het onderzoeksonderwerp vaak ten koste ging van het uitleggen van de details. De jury betreunde het dat soms interessante informatie en uitleg verloren waren gegaan in een poging het toch vooral niet te moeilijk te maken. Van de lezers van het NTvN mag toch verwacht worden dat ze elementaire natuurkundige begrippen kennen en uitleg willen over de specifieke vaktermen, en zo niet, dat zij zelf de afweging maken een complexe passage als gegeven te accepteren.

In dit opzicht viel het met de derde prijs bekroonde artikel van Roel Andringa, getiteld *De centrale rol van de Newton-potentiaal* positief uit de toon. Andringa beschrijft in heldere termen een ingewikkeld onderwerp, zonder daarbij de details uit de weg te gaan. De jury miste wel een schets waarbij duidelijk wordt of de resultaten van dit onderzoek – een nieuwe afleiding van een bestaande theorie – ook tot nieuwe fysische inzichten leiden.

De tweede prijs gaat naar Jolijn Onvlee, voor haar artikel *Molecuulbotsingen ontrafeld*. Hoewel in dit artikel de details soms best wat verder uitgewerkt mogen worden, weet de auteur duidelijk te maken wat het belang van het door haar gedane onderzoek is. De jury had het liefst nog een wat scherper geformuleerde implicatie van het experimentele werk voor de molecuulfysica gezien.

De winnaar schreef een artikel met een echte kop en staart. Stefan Jansen weet de lezer in zijn artikel *Radio voor de massa* vanaf de eerste zin mee te slepen in zijn onderzoek. Hoewel het artikel – net als de meeste andere – wat aan diepgang zou kunnen winnen, weet Jansen de lezer tot aan het eind geïnteresseerd te houden met een verhandeling over hoe de aard en herkomst van kosmische deeltjes aan een atmosferische radiogolfsignatuur te herleiden zijn. Zo brengt hij niet alleen *Radio voor de massa*, maar breekt hij ook het onderzoeksveld van kosmische straling open voor de lezers.

Joost Bakker, Claud Biemans, Eduard Driessen, Richard Engeln en Henk Vrielinck
Jury van de NTvN-Prijsvraag