

Kosmisch onweer (II)

Elektrische velden in de atmosfeer

Bliksem is een zeer intrigerend natuurverschijnsel waarvan vele aspecten nog niet duidelijk zijn. In deel 1 van dit tweeluik [1] gingen we in op de mysteries rond het begin van het ontladingsproces. In dit artikel behandelen we hoe de elektrische velden binnen de onweerswolken gemeten kunnen worden met een nieuwe methode [2] waarbij het elektrische veld zelf niet beïnvloedt wordt. Hiervoor gebruiken we als sonde een hoogenergetisch kosmisch deeltje dat een deeltjescascade veroorzaakt in de atmosfeer en als uitleesinstrument de radiotelescoop LOFAR. Gia Trinh en Olaf Scholten

Structuur van elektrische velden in onweerswolken

Wolken worden gevormd door luchtconvectorie waarbij de warme vochtige opstijgende lucht afkoelt en er zich kleine waterdruppels vormen. Bij grote cumuluswolken stijgt de lucht tot enorme hoogtes. De voet van zo'n wolk ligt typisch op een hoogte van twee kilometer en de bovenkant vaak hoger dan twaalf kilometer. Bij het stijgen tot deze grote hoogtes koelt de vochtige lucht zo veel af dat er zich ijsdeeltjes gaan vormen. Bij onderlinge botsingen worden de grotere graupeldeeltjes (hagelclusters) meestal negatief geladen en de kleinere sneeuw-kristallen positief. Dit proces heeft

veel weg van het wrijven met een kattevel over een plastic staaf. Een eenvoudig model van dit proces verklaart dat de zwaardere graupeldeeltjes naar beneden zakken en er zich aan de onderkant van de wolk een overschot aan negatieve lading vormt. Terwijl de lichte sneeuw-kristallen naar boven gedragen worden en de wolk dus aan de bovenkant positief geladen wordt. De werkelijkheid is natuurlijk wat gecompliceerder doordat de eenvoudige lagenstructuur door turbulentie in wolken verstoord is.

Vanwege deze ladingen en de geïnduceerde positieve lading van de grond is er een sterk elektrisch veld dat van teken omklapt op die hoogtes waar de ladingen zitten. Deze elektrische velden kunnen zeer hoog zijn, tot dicht bij de waarden waar lucht spontaan ioniseert en leidt tot de ontladingen die we zien als bliksem. Welke fysische processen een essentiële rol spelen bij de ontwikkeling van deze ontlading staat beschreven in het eerste deel van dit tweeluik in het januarinumnummer [1].

Het meten van elektrische velden

Zoals beschreven eerder in het tweeluik zijn er voor het begin van het ontladingsproces vrije

elektronen nodig [3]. Deze elektronen worden versneld in een elektrisch veld dat lokaal versterkt wordt rond de hagelbrokken die in de onweerswolken aanwezig zijn. Ook voor de verdere ontwikkeling van de ontlading spelen de elektrische velden een cruciale rol. Het is echter heel moeilijk deze velden te meten. Een manier is met behulp van veldmeters die onder een ballon worden opgelaten in een onweerswolk. Deze techniek heeft als nadeel dat de ballon en de meetapparatuur sterk het aanwezige elektrische veld beïnvloeden. Onlangs hebben we een totaal andere manier gevonden om de elektrische velden te karakteriseren. Bij deze methode richten we ons

Gia Trinh heeft de lerarenopleiding natuurkunde gevolgd aan de Can Tho University, Vietnam. In 2011 kwam ze naar de Rijksuniversiteit Groningen om daar het natuurkundemasterprogramma te volgen. Nu werkt ze aan haar promotie in de astrodeeltjesfysicagroep van het KVI-CART Instituut van de RUG. Haar onderzoek concentreert zich op de invloed van atmosferische elektrische velden op de radio-emissie van *extensive air showers*.



t.n.g.trinh@rug.nl

Olaf Scholten (1953) studeerde natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen en promoveerde daar op een onderwerp in de theoretische kernfysica in 1980. Na een periode van vijf jaar aan Michigan State University keerde hij terug naar Groningen. Hij is nu als bijzonder hoogleraar verbonden aan het KVI-CART Instituut van de RUG waar hij werkt aan onderwerpen in de astrodeeltjesfysica.



O.Scholten@rug.nl

op het meten van de radiostraling die wordt uitgezonden door de deeltjes-cascade veroorzaakt door een hoog-energetisch kosmisch deeltje. Ten gevolge van de elektrische velden die aanwezig zijn in de luchtlagen waar deze cascade zich doorheen beweegt, verandert het emissiepatroon van de radiostraling. De mate van verandering is karakteristiek voor de aanwezige elektrische velden.

Anders dan bij ballonmetingen, waar de sonde het te meten veld beïnvloedt, is dit niet het geval bij de hier besproken methode. De deeltjescascade ontwikkelt zich met de lichtsnelheid en het veld kan zich pas aanpassen nadat de radiostraling is uitgezonden. Als gevolg van de deeltjescascade kan zich, bijvoorbeeld, een bliksemontlading ontwikkelen zoals besproken in het eerste deel van dit tweeluik.

Deeltjescascade

Een hoogenergetisch kosmisch deeltje (een proton, een ijzerkern, dan wel iets daar tussenin) dat de atmosfeer binnendringt, zal reeds op een hoogte van twintig of dertig kilometer botsen met een zuurstof- of stikstofkern waarbij er een groot aantal secundaire deeltjes geproduceerd worden. Een dergelijke deeltjescascade kan ontstaan omdat de bewegingsenergie van één zo'n kosmisch deeltje vele miljarden malen groter is dan de energie die nodig is om een elektron-positronpaar te creëren. Ieder van de gevormde deeltjes heeft dusdanig veel bewegingsenergie dat bij een volgende botsing weer een groot aantal nieuwe deeltjes zal worden geproduceerd. Dit proces herhaalt zich totdat de energie per deeltje onder een bepaalde grenswaarde komt waar de productie van nieuwe deeltjes niet meer opweegt tegen het verlies van deeltjes door absorptie in de atmosfeer. In dit proces wordt de bewegingsenergie van het oorspronkelijke kosmische deeltje omgezet in massa en bewegingsenergie van de deeltjes in de cascade. Het merendeel zijn fotonen, elektronen en positronen omdat dit de lichtste deeltjes zijn die met de sterke dan wel de elektromagnetische interactie geproduceerd kunnen worden en stabiel zijn dan wel een lange (op de tijdsschaal van de cascade) levensduur hebben. Door paarcreatie en bremsstrahlungsreacties vindt een



Figuur 1 Een schematische weergave van een deeltjescascade die veroorzaakt wordt door een kosmische straal boven LOFAR. Binnen onweerswolken zijn de aanwezige elektrische velden dermate sterk dat de uitgezonden radiostraling duidelijk meetbaar verandert.

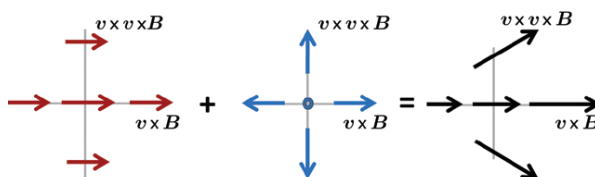
voortdurende conversie plaats tussen deze deeltjes.

Aangezien het merendeel van de deeltjes in de cascade ultrarelativistisch is, bewegen ze allemaal met vrijwel de lichtsnelheid. Om die reden bevinden ze zich in een grote dunne schijf die met de lichtsnelheid naar het aardoppervlak schiet. In deze cascadeschijf zitten overwegend hoogenergetische fotonen en vrije elektronen en positronen die een schijfvormig plasma vormen.

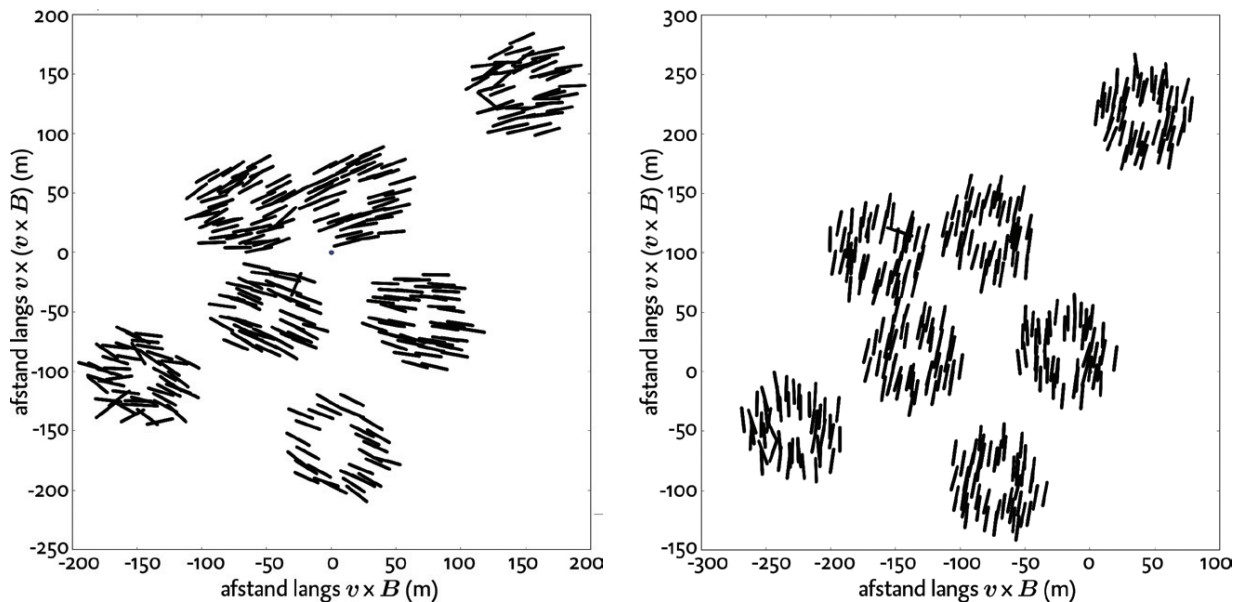
Het mechanisme van radio-emissie

De vrije elektronen en positronen in de cascadeschijf (= plasmaschijf) bewegen met de lichtsnelheid naar de aarde (vector v). Tegelijkertijd ondervinden zij de lorentzkracht uitgeoefend door het aardmagnetisch veld (vector B), waardoor de elektronen en positronen in tegengestelde richtingen zullen gaan bewegen. Dit geeft een netto elektrische stroom in de richting $v \times B$. Deze stroom zal radiostraling uitzenden, net als een va-

riërende stroom in een antennedraad. Belangrijk voor latere beschouwingen is te weten dat uitgezonden straling altijd evenwijdig is gepolariseerd aan de richting van de stroom, zie linker paneel (rood) in figuur 2. Tevens is er een kleinere, tweede-orde bijdrage aan de radio-emissie ten gevolge van het nettoladingsoverschot in de cascadeschijf. Dit wordt veroorzaakt door de elektronen die door hoogenergetische uitstootreacties vrijgemaakt zijn uit lucht moleculen. De positief geladen lucht moleculen zijn veel zwaarder en blijven niet-relativistisch achter. De nettolading in de deeltjescascade zendt ook straling uit, maar deze is radiaal gepolariseerd, zie middelste paneel (blauw) in figuur 2. Het verschil in de polarisatierichting van de straling van de twee processen komt vanwege het feit dat een stroom een magnetisch veld emiteert en een lading een elektrisch veld. Vanwege interferentie van de twee processen is de straling sterker aan één kant van de cascade dan aan de andere (zie figuur 2).



Figuur 2 Het radiosignaal is opgebouwd uit twee componenten die ieder hun eigen polarisatieprofiel hebben (zie tekst). Het gemeten signaal is de vectorsom van beide. De richting van de pijlen geeft de polarisatierichting van het veld, de lengte geeft schematisch de sterkte weer.



Figuur 3 De polarisatieprofielen voor een meting tijdens normale weersomstandigheden (links) en een tijdens een onweersactiviteit. Ieder pijltje geeft de polarisatierichting aan van de desbetreffende antenne.

Radio-emissie bij onweersomstandigheden

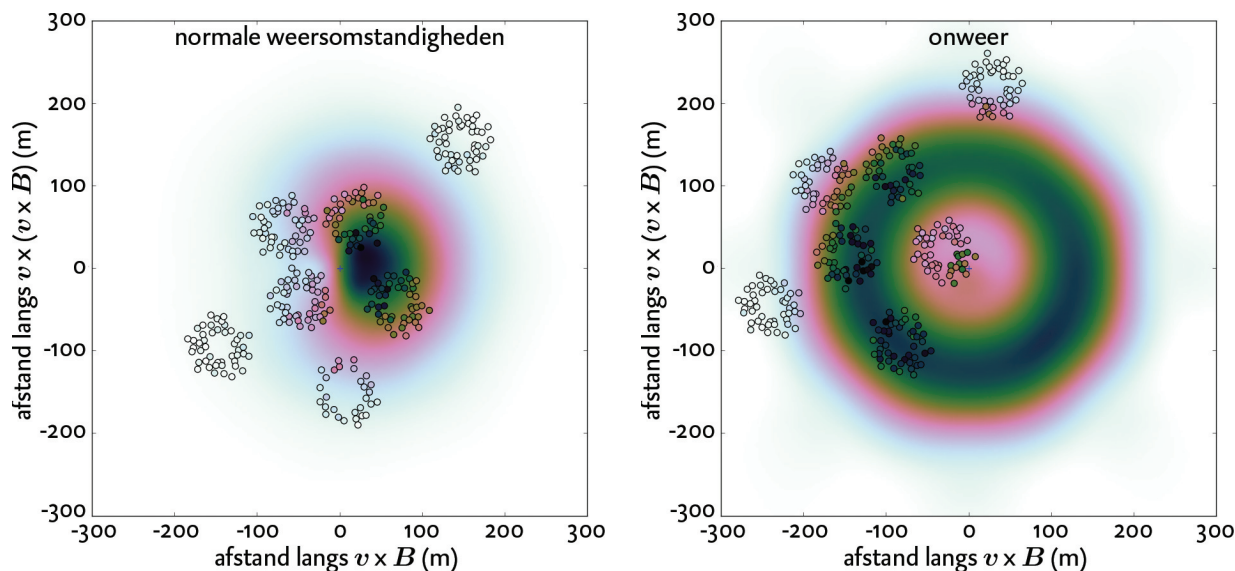
De sterke elektrische velden die bij onweersomstandigheden aanwezig zijn, veroorzaken een aanzienlijke verandering van het radio-emissiepatroon van kosmische stralen. Naast de lorentzkracht oefent nu ook het elektrische veld een kracht uit op de geladen deeltjes. Hierbij moeten we onderscheid maken tussen de component van het veld parallel aan de bewegingsrichting van het initiële kosmische deeltje, $E_{\parallel}$, en de component daar loodrecht op, $E_{\perp}$. De evenwijdige component resulteert vooral in een relatief geringe toe- of afname van de energie van respectievelijk de elektronen en positronen. Door de loodrechte component, $E_{\perp}$, wordt de richting van de geïnduceerde stroom verdraaid in de richting van de resulterende kracht, $F = q(v \times B + E_{\perp})$. Aangezien de kracht door het elektrisch veld in onweersomstandigheden (typisch van ordegrrootte 100 kV/m) vele malen groter is dan de magnetische lorentzkracht, resulteert dit naast een richtingsverandering, ook in een veel grotere geïnduceerde elektrische stroom. Het totale effect van elektrische velden bij onweersomstandigheden is dus een verandering van de polarisatierichting van de uitgezonden radiostraling met daarnaast ook nog een toename van de intensiteit (= grootte). Hier komen we later op terug.

Radiostraling meten met LOFAR

Op 12 juni 2010 is LOFAR officieel in werking gesteld door koningin Beatrix. LOFAR staat voor Low Frequency Array en is in feite een grote detector voor radioastronomie, vele malen gevoeliger dan de bekende schotelantennes in Westerbork. De kern met de hoogste concentratie van antennes ligt bij Exloo, dat net als Westerbork ook in de provincie Drenthe ligt. Voor radioastronomie is het belangrijk om, naast een groot antenneoppervlak, ook lange afstanden te hebben tussen antennes om een scherper beeld te kunnen vormen van het heelal. Om deze reden zijn er ook antennestations in Zweden, Duitsland, Frankrijk en Engeland op afstanden van de orde van duizend kilometer. LOFAR moet daarnaast gezien worden als een uniek ICT-project waarbij vele duizenden radioantennes softwarematig met elkaar verbonden zijn in een snel glasvezelnet. Het Donald Smits Centre for Information Technology van de Rijksuniversiteit Groningen is het centrale knooppunt waar de data verwerkt worden. Er worden twee soorten antennes gebruikt bij LOFAR. De Low Band Antennas (LBA's) zijn, afhankelijk van de instelling, gevoelig in het frequentiebereik van 10 - 90 MHz. De High Band Antennas (HBA's) werken in het bereik van 100 - 240 MHz. De antennes zijn gegroepeerd in stations, dat zijn clusters van een honderdtal LBA- en

HBA-antennes. De 'superterp' bij Exloo vormt de kern van LOFAR die te zien is in figuur 1 als een grote cirkelvormige structuur in het landschap met een diameter van 320 meter. Hier zijn ook een aantal LOFAR Radboud Air shower array-detectors (LORA-detectors) geïnstalleerd die energetische deeltjes kunnen meten uit een deeltjescascade.

De kracht van LOFAR is dat de afzonderlijke dipoolantennes gevoelig zijn voor signalen van vrijwel de gehele hemel, terwijl conventionele schotelantennes alleen gevoelig zijn voor de signalen van de bronnen waar ze op gericht staan. Met software kan er bij de verwerking van de data een of meerdere richtingen worden geselecteerd. Deze richtingsselectie kan overigens ook achteraf gebeuren, nadat de data verzameld zijn. Hiertoe is het instrument uitgerust met ringbuffergeheugens die de signalen van alle antennes gedurende de afgelopen vijf seconden bevatten. De radioantennes van LOFAR zijn hierdoor bij uitstek geschikt voor het meten van de door kosmische cascades uitgezonden radiostralen. Deeltjes in de cascade produceren een signaal in de LORA-detectors dat gebruikt wordt om het interessante deel van de ringbuffergeheugens uit te lezen. We maken hiervoor vooral gebruik van de LBA-antennes op en rond de superterp van LOFAR die afgestemd zijn op het frequentiebereik van 30 - 80 MHz. Deze LBA-antennes zijn gevoelig voor stra-



Figuur 4 Intensiteitsprofielen van twee kosmische stralen. De kleur van de achtergrond geeft het resultaat van een berekening, die van de kleine cirkels de gemeten waarden. Donkere kleuren corresponderen met een hoge intensiteit. Daar waar de kleur van de cirkels overeenkomt met de achtergrond is er een goede overeenstemming.

ling uit alle richtingen terwijl de HBA-antennes onderling zo gekoppeld zijn dat ze een verhoogde gevoeligheid hebben voor signalen uit een bepaalde richting (deze werken meer als een schotelantenne). Dit laatste maakt ze minder geschikt voor de hier besproken metingen omdat de kosmische stralen vanuit alle mogelijke richtingen op aarde aankomen.

Meetresultaten

Gedurende de periode van juni 2011 tot september 2014 heeft LOFAR de signalen van ongeveer achthonderd kosmische deeltjes geregistreerd waarbij aan de eis voldaan is dat het radiosignaal gezien wordt in minstens vier antennestations. Hiervan zijn er 31 gemeten terwijl er in de buurt onweersactiviteit aanwezig was volgens waarnemingen van het KNMI. Bij deze metingen worden sterke afwijkingen waargenomen in zowel het intensiteitsprofiel als in de overheersende polarisatierichting van de radiostraling.

Polarisatieprofiel

In figuur 3 worden de polarisatieprofielen vergeleken voor een normale meting [4] met een meting waarbij er onweersactiviteit in de buurt was. De pijltjes in de figuur geven de polarisatierichting weer van de ontvangen straling. Voor iedere antenne een pijltje. Duidelijk is te zien dat de antennes in cirkelvormige stations zijn gegroepeerd en dat voor deze metingen

de gegevens van zeven stations zijn gebruikt. Bij de meting gedaan onder normale weersomstandigheden staan, zoals verwacht, de polarisatievectoren allemaal vrijwel evenwijdig aan de magnetische lorentzkracht, dat wil zeggen evenwijdig aan $v \times B$ (de abscis in de figuur). De richting van de polarisatievectoren is totaal anders bij de meting tijdens onweersomstandigheden. Aangezien deze richting de oriëntatie van de kracht geeft die op de elektronen en positronen werkt, kunnen we hieruit dus de richting van de transversale component van het elektrisch veld, $E_{\perp}$, bepalen.

Intensiteitsprofiel

Onder normale weersomstandigheden is het intensiteitspatroon [5] niervormig (figuur 4, links) vanwege de interferentie van de bijdragen veroorzaakt door de elektrische stroom en het ladingsoverschot, zoals eerder benoemd in figuur 2. Bij onweersomstandigheden is de stroombijdrage veel sterker wat resulteert in een veel meer cirkelvormig patroon (figuur 4, rechts). Dit patroon geeft inzicht in de hoogte-afhankelijkheid van het atmosferische elektrische veld. De cirkel komt namelijk tot stand door de interferentie van twee bijdragen. Eén bijdrage afkomstig van het hoger gelegen deel van de cascade dat binnen de wolk valt en één bijdrage afkomstig van het lager gelegen deel onder de ladingslaag in de onderkant van de wolk. In de cumuluswolk ligt

deze onderste ladingslaag op ongeveer drie kilometer hoogte. Aangezien de richtingen van het elektrisch veld tegengesteld zijn boven en onder de ladingslaag, heeft de geïnduceerde stroom een tegengestelde richting. Dit resulteert in een destructieve interferentie van de twee bijdragen in het centrum. Meer naar buiten is de interferentie minder destructief, waardoor het typische cirkelpatroon gegeneerd wordt.

Bepaling van het atmosferische elektrische veld

Op basis van de structuur van de elektrische ladingen in een wolk verwachten we in het eenvoudigste geval dat in de wolk een sterk elektrisch veld aanwezig is, terwijl het veld aan de onderkant minder sterk en tegenovergesteld is. Numerieke simulatieberekeningen laten zien dat met deze configuratie goed het waargenomen patroon van figuur 4 kan worden verklaard. Uit metingen kan de hoogte worden bepaald waar de richting van het veld omslaat in de onderste lagen van de wolken. De gevonden waarde van $2,9 \pm 0,1$ km voor de weergegeven meting komt goed overeen met de verwachte waarde op basis van metingen met weerballonnen. De grootte van het elektrisch veld loodrecht op de kosmische straal is bepaald op 50 kV/m. Bij deze eerste toepassing van de nieuwe methode is het nog niet mogelijk om een goede afschatting te maken van de meetfout.

Samenvatting en nawoord

We hebben in dit werk laten zien dat het meten van radio-emissie van hoogenergetische kosmische deeltjes een manier is om elektrische velden te kunnen bepalen bij onweersomstandigheden. Ten opzichte van de gebruikelijke methode waarbij ballonnen met veldmeters worden opgelaten in een onweerswolk is het grote voordeel van deze methode dat deze onafhankelijk is van sterke winden en dat bovendien de meting zelf geen verstoringe invloed heeft op het te meten veld ten tijde van de meting (maar later wel). Zoals besproken in het eerste deel van dit tweeluik kunnen de deeltjes cascades wel een bliksemontlading

initieëren.

Het is interessant om te realiseren dat deze meetmethode puur bij toeval is ontdekt. We waren nieuwsgierig om de afwijkende vorm van een aantal meetresultaten beter te begrijpen in ons onderzoek naar eigenschappen van kosmische deeltjes. Uit de schijnbaar nutteloze resultaten van deze metingen tijdens onweersomstandigheden kunnen we nu informatie over het aanwezige elektrische veld in onweerswolken halen.

Referenties:

- 1) Casper Rutjes, Anna Dubinova en Ute Ebert, *Kosmisch onweer*, NTvN **82-1** (2016) 22-26.

- 2) P. Schellart, Gia Thi Ngoc Trinh et al., *Probing Atmospheric Electric Fields in Thunderstorms through Radio Emission from Cosmic-Ray-Induced Air Showers*, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 165001; arXiv:1504.05742.
- 3) Anna Dubinova, Casper Rutjes, Ute Ebert, Stijn Buitink, Olaf Scholten en Gia Thi Ngoc Trinh, *Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers*, *Phys. Rev. Lett.* **115** (2015) 015002.
- 4) P. Schellart et al., *Polarized radio emission from extensive air showers measured with LOFAR*, *J. Cosm. and Astrop. Phys.* **1410**, (2014) 014; arXiv:1406.1355.
- 5) S. Buitink et al., *Method for high precision reconstruction of air shower Xmax using two-dimensional radio intensity profiles*, *Phys. Rev. D* **90** (2014) 082003; arXiv:1408.7001.

Reactie

Denk aler gij doende zijt...

In zijn column in het januarinummer verwondert het Frans Kingma dat op het adagium van Kamerlingh Onnes 'Door meten tot weten' zo weinig kritiek is geleverd. Dat is iets wat mij weer verwondert.

In zijn autobiografie *Het toeval van de werkelijkheid* (1983) schreef H.B.G. Casimir reeds: "Deze spreuk [Door meten tot weten] heeft veel kwaad gedaan. Want al is het ontegenzeggelijk waar dat kwantitatieve metingen erg

belangrijk zijn, het is een ernstige fout te menen dat de hele experimentele natuurkunde daaruit bestaat. We kunnen alleen beginnen te meten wanneer we weten wat we willen meten. Kwalitatieve waarneming moet vooraf gaan aan kwantitatieve meting, en door te vroeg opstellingen te maken voor metingen kunnen we zelfs de mogelijkheid om nieuwe verschijnselen te vinden tenietdoen. Ook is het de taak van de experimentele natuurkun-

de nieuwe omstandigheden te scheppen waaronder nieuwe verschijnselen mogelijk worden: lage temperaturen, hoge druk, sterke magneetvelden." Deze opvatting was dus al dertig jaar geleden gemeengoed. Mijn promotor had dan ook voor ons, experimentele promovendi, een genuanceerder adagium als leidraad: "Better think than measure, better measure than speculate".

Herman de Lang

De retorica van een experiment

De vaardigheid om je te laten verwonderen is een goede eigenschap van een fysicus. In het uitgebreide citaat van Casimir komt die strekking naar voren. Het uitvoeren van experimenten is niet louter zoeken naar feiten. Er zijn geen kale feiten die wachten op ontdekking, er is geen zoeklicht dat je aanzet om in de verduisterde realiteit te zoeken en evenmin is er een *rock bottom of knowledge*.

Wat doet een experiment? Welke betekenis heeft een experiment? Op dergelijke vragen luidt het antwoord: met een experiment ben je in staat anderen te overtuigen. Galilei deed geen

proeven om zijn wetmatigheden op te stellen. Welnee, hij was al overtuigd van zijn gelijk, hij gebruikte de experimenten om zijn opvattingen aannemelijk te maken. Het experiment diende als illustratie en maakte deel uit van een retorisch repertoire.

Retorica in de natuurkunde? Zeker, en niet alleen vroeger, ook heden ten dage is deze nog aanwezig, vooral als de budgetten beperkt zijn. Hoogleraren in de fysica moeten met woorden hun onderzoek bepleiten, met slogans en adagia. Zo ook de promotor van Herman de Lang: Beter nadenken dan meten, beter meten dan speculeren.

Wat is hierin het verschil tussen nadenken en speculeren? Voor mij als fysicus is er geen onderscheid, het betreft een vorm van creatief piekeren om een probleem helder te krijgen. Daarbij is creativiteit vooral out-of-the-box-denken, hoe raarder, hoe beter. Was het niet Pauli die mopperde dat het nooit gek genoeg kon zijn in de natuurkunde? In alle redelijkheid valt het gememoreerde adagium te herformuleren tot: N is beter dan M en M is beter dan N . Is het dan onjuist om te constateren: $N = M$?

Frans Kingma