

SPEELT KOSMISCHE STRALING EEN ROL BIJ INITIATIE BLIKSEM?

In het gangbare fysische model voor het ontstaan van bliksem zijn zowel het aantal gemeten vrije ladingsdragers als de gemeten elektrische veldsterkte in de atmosfeer ontoereikend om een ontleding te kunnen starten. De door kosmische deeltjes geïnitieerde *extensive air showers* (EAS) zijn gepostuleerd als mechanisme om de doorslagspanning te verlagen en als mogelijke leverancier voor extra vrije ladingsdragers in de atmosfeer [1]. Met HiSPARC is experimenteel een aanwijzing gevonden dat EAS deze rol bij de opbouw van bliksem inderdaad kunnen spelen.

Bliksem ontwikkelt zich in fases. Eerst wordt elektrische lading opgebouwd in een wolk door wrijving tussen verschillende luchtmassa's. De onderzijde van een onweerswolk is meestal negatief geladen [2,3]. Wat hoger in de wolk is er positieve lading aanwezig. In het aardoppervlak ontstaat door inductie een positieve lading. Als er lokaal voldoende krachtige velden aanwezig zijn, kunnen er vervolgens geleidende gebiedjes in een bliksemboom (*streamers*) ontstaan. In aanwezigheid van voldoende vrije ladingsdragers vindt er langs deze zogenoemde *stepped leader* kortsluiting plaats. Als het geleidende kanaal gevormd is, vindt een elektrische ontlading plaats met sterke stromen en fel licht van het hete plasma als gevolg. Dit is de bliksem die wij zien [4,5]. Donder is het gevolg van variaties in druk door de thermische uitzetting van datzelfde kanaal. De ontladingsfase van de bliksem is echter nog niet goed begrepen.

De doorslagspanning van lucht is ongeveer 30 kV/cm op de hoogtes waarop bliksem ontstaat. Bij die spanning kunnen elektronen voldoende energie uit het elektrische veld oppikken zodat er bij ioniserende botsingen meer elektronen worden geproduceerd dan er worden ingevangen door luchtmoleculen. De met ballonnen gemeten wolkenpotentialen van 100 MV op 10 km geven een gemiddelde spanningsval van 100 V/cm en zijn dus onvoldoende om een doorslag te starten. Voor het verklaren van het ontstaan van bliksem wordt gedacht aan ijskristallen die afhankelijk van hun vorm veldversterking kunnen leveren [1].

Ook het aantal beschikbare vrije ladingsdragers is te klein om een ontlading te beginnen. Vrije negatieve ionen fungeren als condensatiekernen voor waterdamp en vormen waterclusters die niet gemakkelijk elektronen afgeven. De achtergrondstraling van de zon kan weliswaar vrije elektronen vrijmaken, maar genereert er onvoldoende. Kosmische straling met een hoge energie, 10^{14} tot 10^{16} eV, veroorzaakt bij interactie met de atmosfeer lawines van secundaire deeltjes met daarin veel elektronen. Deze deeltjes hebben

voldoende energie om niet te worden ingevangen in water. In een lawine kunnen meer dan 10^7 hoog energetische vrije ladingsdragers aanwezig zijn die elk ongeveer dertig laagenergetische elektronen per centimeter in hun spoor vrijmaken. De dichtheid van vrije elektronen kan zo oplopen tot honderd elektronen per cm^3 [1], genoeg om een bliksem teweeg te brengen.

Experiment

In dit onderzoek zijn gegevens over de bliksem nodig én gegevens over de kosmische straling in de directe omgeving van de bliksem. Het KNMI heeft een netwerk van zeven (radio)antennes, waarvan vier verspreid over Nederland en drie in België. Dit zogenoemde FLITS-systeem leverde van 2004 tot en met 2015 data van bliksems, die door het KNMI aan ons ter beschikking zijn gesteld. Daaruit selecteerden we de gegevens van grond-wolkbliksems. Voor het onderzoek zijn de tijd- en locatiegegevens van de bliksem en de maximumwaarde en stijg- en daaltijd van de stroom in de bliksem uit de FLITS-database gebruikt. De onnauwkeurigheid van de locatiegegevens is in de database gegeven, die van de tijd is niet expliciet bekend. Voor de laatste gebruiken we 100 μs , de waarde van het meest significante cijfer van de tijd in de database.

De gegevens over de kosmische straling worden geleverd door het HiSPARC-experiment. Dit experiment heeft ruim 120 detectiestations in Nederland, waarvan de meeste op daken van middelbare scholen staan. Elk station bestaat uit twee of vier scintillatiedetectoren (platen) in een weerbestendige behuizing op het dak en is via twee lange (30 m) kabels verbonden met een uitleessysteem dat in het gebouw is geplaatst. De eerste kabel voorziet de fotomultiplicatorbuizen van energie en bepaalt de hoogspanning die voor de werking ervan noodzakelijk is. De tweede transporteert het signaal naar de uitleeselektronica. Een gps-ontvanger levert een tijdsignaal met een nauwkeurigheid van beter dan 10 ns. Vanwege de vereiste uniformiteit in de registratie van de tijd in de HiSPARC-metingen hebben we ons

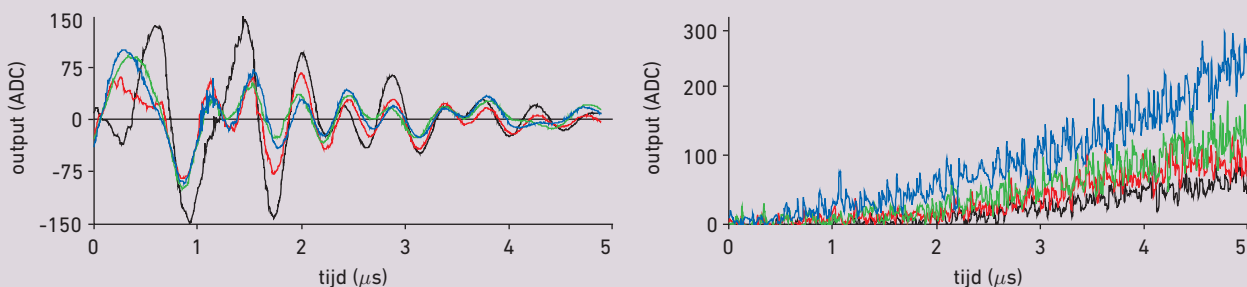
beperkt tot de periode juli 2010 tot eind 2015.

De passage van een geladen deeltje door de scintillator resulteert in een stroompuls op de anode van de fotomultiplicatorbuis (PMT) met typisch een stijgtijd van 9 ns. De stijgtijd wordt vooral bepaald door de vervaltijd van de fosfor en de looptijd in de scintillator. De daaltijd is ongeveer 44 ns en wordt vooral beïnvloed door de uitleeselektronica. De vorm van de puls kan verder nog worden gecompliceerd omdat meerdere geladen deeltjes met kleine tijdsverschillen door de scintillator kunnen vliegen.

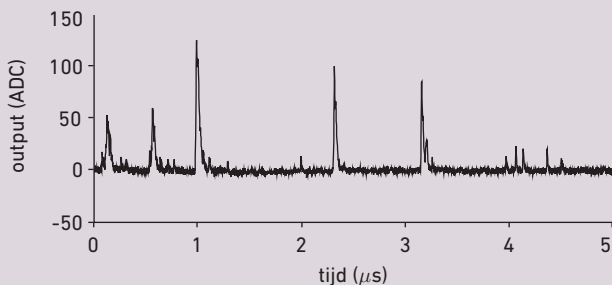
Het blijkt dat de elektronica, waarschijnlijk door de lange kabels tussen PMT en uitlezing, ook gevoelig is voor bliksem in de buurt. Zowel tijdens de opbouw van de bliksem als tijdens het herstel van de elektronica na de bliksem, kunnen deze signalen voorkomen. Deze zijn gemakkelijk te onderscheiden van de signalen van kosmische straling. Er zijn drie verschillende types storing ten gevolge van een bliksem waargenomen: een oscillatie (vaak gedempt), een gelijkspanningscomponent op de uitgang en een periode met zeer veel pulsen lijkend op die van deeltjes. De eerste twee zijn eenvoudig te onderscheiden van de pulsen die veroorzaakt zijn door kosmische straling (zie figuur 1). De derde mogelijkheid onderscheidt zich van deze laatste door de telsnelheid. Kosmische straling geeft pulsen met een frequentie van ongeveer 100 - 200 Hz, in het onweer loopt dit op tot 1-10 MHz voor een zeer korte periode. Zie hiervoor ook [6] en figuur 2.

Waarnemingen

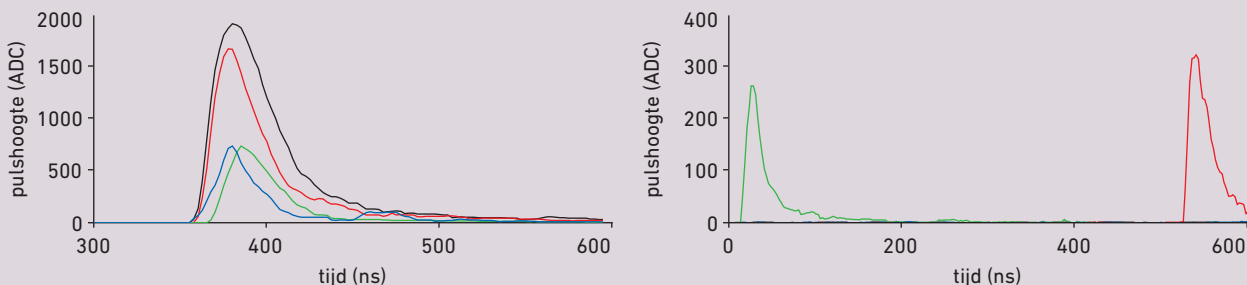
Uitsluitend showes die zijn gemeten door stations die op maximaal 10 km afstand liggen van de positie van de bliksem uit de KNMI-database, zijn gebruikt voor het onderzoek. Daarbij is ook nagegaan dat de HiSPARC-stations op dat moment ook operationeel waren. Deze afstand is gekozen omdat de voetafdruk van een shower beperkt is tot ongeveer 1 km, en de onzekerheid van de plaatsbepaling van het KNMI tot 5 km kan zijn. 10 km is daarom een veilige ondergrens. Het aantal grond-



Figuur 1. Twee voorbeelden van een storing in het interval 25 ms voor tot 25 ms na de bliksem. Links: een gedempte oscillatie, rechts: een stijgende gelijkspanning op de uitgang. De data van de vier platen in dit station corresponderen met de verschillende kleuren.



Figuur 2. Tijdens de bliksem worden pulsen gemeten met hoge frequentie, hier groter dan 1 MHz. Dit figuur toont slechts de meting in één plaat. De signalen van de andere platen verschillen in aantal en tijd van de pulsen, maar lijken overigens sterk op dit spoor. Deze zijn niet in de plot opgenomen om deze leesbaar te houden.



Figuur 3. Links: een voorbeeld van een coïncidentie. De vier platen geven elk een puls in hetzelfde, korte tijdsbestek. Rechts: bij een toevallige coïncidentie is de afstand tussen de pulsen (veel) groter. Bovendien geven slechts twee platen een puls. De triggervoorwaarde in een station met vier platen is dat er minstens twee platen een signaal met een pulshoogte van minstens 140 ADC binnen een tijd van 1,5 μ s hebben.

wolkbliksems dat op minder dan 10 km afstand van een werkend HiSPARC-station insloeg was 10.354. Vervolgens is een bestand van showers gemaakt met een ruime tijdsrelatie, van 60 s vóór tot 60 s na de bliksem. Uit deze bestanden zijn de bliksems en HiSPARC-signalen gekozen waarvan de tijden minder dan 100 μ s verschillen: de coïncidenties. Van 10 juli 2010 tot en met 31 december 2015 werden 234 coïncidenties tussen bliksems en HiSPARC-signalen gevonden. Ten slotte zijn de signalen die binnen 1 s voor of na de coïnciden-

ties plaatsvonden, toegevoegd aan de selectie. Nadere beschouwing van deze 234 signalen, die binnen 100 μ s voorafgaand of na een door het KNMI registrerende grond-wolkbliksem plaatsvonden, leverde op dat de HiSPARC-stations tijdens een bliksem een signaal geven dat niet lijkt op dat van een deeltje, maar een storing zoals beschreven in de sectie *Experiment*. Deze afwijkende signalen komen voor vanaf 7 ms vóór de bliksem tot 3 ms erna. Voor alle coïncidenties komen deze afwijkende

signalen voor op het tijdstip van de KNMI-detectie binnen de nauwkeurigheid van de klok, dat wil zeggen met een afwijking van minder dan 100 μ s. Dat is binnen de nauwkeurigheid van de KNMI-klok. Naast de onmiddellijk door de bliksem veroorzaakte storingen komen dergelijke signalen ook op andere tijden voor en met een waarschijnlijkheid die uniform verdeeld is in de periode van 0,8 s vóór tot 0,8 s na de bliksem. De oorzaak van deze storingen is niet geïdentificeerd. De signalen in een HiSPARC-station

worden pas opgeslagen nadat ze een trigger hebben gepasseerd. De trigger is een voorwaarde in de elektronica waarin geëist wordt dat in een periode van 1,5 μ s minstens twee detectoren van een station een pulshoogte geven die groter is dan 70 mV (of in een station met vier scintillatoren: ten minste drie signalen groter dan 30 mV). De signalen eerder dan 2,5 ms vóór of meer dan 2,5 ms na de bliksem zijn te verdelen in signalen ten gevolge van showers of van twee ongecorreleerde deeltjes of het zijn stoorsignalen. Bij een shower is het maximum tijdverschil tussen de platen 100 ns. Als het tijdverschil groter is dan dit noemen wij het signaal afkomstig van singles of toevallige coïncidenties, zie figuur 3. In de seconde vóór de bliksem werden respectievelijk 72 showers en 42 singles waargenomen. In de seconde erna waren dat respectievelijk 25 showers en 48 singles. Deze gebeurtenissen werden geteld in 234 periodes waarin een bliksem zowel door het KNMI als door een HiSPARC-station werd gedetecteerd.

Statistische analyse

De rol die kosmische straling bij het ontsteken van een bliksem zou kunnen spelen, is als volgt: het kosmische deeltje dat de aardatmosfeer binnendringt kan, mits het voldoende energie heeft, een lawine van secundaire deeltjes veroorzaken. De daarin voorkomende deeltjes maken voldoende vrije elektronen vrij om de doorslagspanning lokaal te verlagen. Deze lokale voorontladingen rijgen zich aaneen in een proces dat de *stepped leader* heet. Uiteindelijk ontstaat een geleidend kanaal waardoor de ontlading plaats kan vinden. Een probleem nu is dat de tijdsrelatie tussen de shower en het optreden van de bliksem niet goed bekend is. Enige tienden van een seconde kunnen verstrijken voordat de shower wordt gevolgd door de bliksem. Een tweede probleem is dat de duur van die periode nogal uiteen kan lopen door variaties in de plaatselijke atmosferische toestand en de grootte van de shower. Kosmische straling komt voor in een breed energiespectrum. Als de energie van het inkomende deeltje te laag is, dooft de shower al op grote hoogte uit.

De muonen die in dit geval ontstaan, bereiken door hun geringe interactie met de atmosfeer toch het aardoppervlak. Door de grote afstand die zij daarheen afleggen raken zij verspreid. De HiSPARC-detectoren worden dan niet getriggerd tenzij ze als toevallige coïncidentie wel gemeten kunnen worden. Deze gebeurtenissen maken te weinig vrije ladingsdragers om de bliksem te veroorzaken. Als de energie van het kosmische deeltje groot genoeg is komen veel deeltjes tegelijk op de aarde terecht. De dichtheid varieert van een tot vele tientallen deeltjes per vierkante meter. Op de grond worden dan verschillende scintillatorplaten geraakt in een nauw tijdsinterval. Dit is voldoende om de detector te triggeren. In deze situatie meten we in de seconde voor een bliksem meer showers dan erna: in de seconde voor de bliksem zit minstens één shower, de seconde erna kunnen dat er nul zijn. Als de shower geen relatie met de bliksem heeft worden in beide secondes evenveel gebeurtenissen geteld. Bij singles is dit verband er niet omdat singles geen bliksem kunnen veroorzaken.

In de selectie van de stations blijkt dat 42 toevallige coïncidenties geteld worden voor de bliksem en 48 erna. Het verschil is niet significant (0,6 maal de statistische onzekerheid). Zoals verwacht is er in dit geval geen verschil tussen de seconde voor en de seconde na de bliksem. Het aantal showers in de seconde voor de bliksem is 72 en in dezelfde periode erna 25. In de 234 geselecteerde gebeurtenissen is het verschil zeer significant (4,8 maal de onzekerheid).

Ter controle analyseerden wij een dataset met een vergelijkbaar aantal periodes van één seconde. Deze periodes werden gekozen in een tijdsinterval waarin geen enkele bliksem werd waargenomen, noch in een HiSPARC-station noch bij het KNMI. Het verschil in zowel het aantal toevallige coïncidenties als het aantal showers voor en na een willekeurig tijdstip bleek kleiner dan 1 onzekerheidsinterval.

Conclusie

De metingen steunen de hypothese dat showers een rol spelen bij de initiatie

van een bliksem. Dit concluderen wij uit het verschil van het aantal showers vóór en na de bliksem. Dit verschil is afwezig bij toevallige coïncidenties die door laagenergetische kosmische stralen worden veroorzaakt. Als een willekeurig tijdstip wordt gekozen in periodes waarin geen bliksems werden waargenomen door het KNMI is het verschil in beide gevallen afwezig. Het verschil is dus gecorreleerd met de aanwezigheid van een bliksem. Het blijkt dat de waargenomen verschillen nog niet kwantitatief verklaard kunnen worden. De belangrijkste oorzaak daarvan is dat er relatief weinig HiSPARC-detectoren zijn. De detectoren die er zijn, zijn willekeurig over het land verdeeld waardoor het mogelijk is dat showers die een bliksem veroorzaken gemist worden door HiSPARC. De kans dat dit het geval is, is moeilijk te kwantificeren. Bovendien kunnen we helaas niet aanwijzen welke shower de bliksem heeft veroorzaakt. Maar we menen wel aangetoond te hebben dat extended showers bijdragen aan de vorming van bliksem.

Reno Beekman was docent aan het Gemeentelijk Gymnasium Hilversum, universitair docent medische informatiekunde aan de UvA en klinisch fysicus bij het Arnhemse Radiotherapeutisch Instituut.

Thijs Aldus is docent aan het Sint Vituscollege in Bussum. Daarnaast volgt hij aan de HU de master docent natuurkunde en doet hij onderzoek in het project Leraar in Onderzoek.

Jos Steijger is senior onderzoeker bij het Nikhef. Hij is betrokken bij de begeleiding van vwo-docenten in het Leraren in Onderzoek-programma van NWO. josst@nikhef.nl

REFERENTIES

- 1 A. Dubinova et al., Prediction of lightning inception by large ice particles and extensive air showers. *Phys.Rev.Lett.* **115** (2015).
- 2 Gia Trinh en Olaf Scholten, *NTvN* **82**, 38-42 (2016).
- 3 Casper Rutjes, Anna Dubinova en Ute Ebert, *NTvN* **82**, 22-26 (2016).
- 4 D.R. Poelman, On the science of lightning: An overview Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, report No 56 (2010).
- 5 www.weather.gov/safety/lightning-science-return-stroke.
- 6 Ute Ebert en Casper Rutjes, *NTvN* **84**, 68-69 (2018).