Kosmisch onweer

De scheiding van elektrische ladingen in een onweerswolk en daarna de ontlading van de wolk door bliksem zijn bijzondere verschijnselen die iedereen kent, maar die wetenschappelijk nog veel vragen oproepen. In dit tweeluik gaan we twee ervan behandelen: hoe kan bliksem ontstaan als de gemeten elektrische velden in de wolk veel kleiner zijn dan het doorslagveld? En hoe kunnen we deze velden veel beter en zonder verstoring meten? Beide vragen hebben verband met energierijke kosmische deeltjes, afkomstig van explosies ver buiten ons zonnestelsel, die onze atmosfeer binnen schieten. Voor het ontstaan van bliksem zijn ook de ijsdeeltjes in de onweerswolk belangrijk. In dit eerste deel van het tweeluik vertellen we over de wisselwerking tussen elektrische velden in onweerswolken en elektronenlawines opgewekt door kosmische deeltjes.

Casper Rutjes, Anna Dubinova en Ute Ebert

Ergens hier ver vandaan

Een zware ster, in zijn laatste stuiptrekking, explodeert als supernova. Waterstofkernen worden met een enorme energie de ruimte in geslingerd. Een kern ligt precies op koers met de aarde en botst tegen een molecuul in onze atmosfeer, precies boven een onweerswolk. De waterstofkern creëert een uitgebreide deeltjeslawine die verder evolueert door de wolk en zijn pad kruist met precies de juiste hagelsteen om bliksem te veroorzaken, miljoenen jaren later.

Het probleem

Bliksem is een elektrische ontlading die zich in verschillende fasen voltrekt. De laatste fase, de zogenaamde *return stroke*, ziet men als flits en hoort men als donder. Dit artikel gaat over de eerste fase, het ontstaan van de ontlading in de eerste nanoseconden van de bliksem. Om een ontlading te starten zijn twee ingrediënten nodig: een voldoende groot elektrisch veld en daarin vrije elektronen. Beide zijn een noodzakelijke voorwaarde als het gaat om het ontstaan van bliksem.

Als er door ionisaties meer elektronen ontstaan dan er worden ingevangen, is het elektrische veld voldoende groot voor een ontlading. Onder normale omstandigheden is dit het geval bij een veldsterkte van 30 kV/cm (de doorslagspanning van lucht). Het meten van de grootte van elektrische velden in onweerswolken is overigens niet gemakkelijk. Ballonmetingen, waarbij meetapparatuur omhoog wordt gelaten, geven een beperkt beeld omdat ze niet overal komen. Recent hebben we een andere manier ontwikkeld om elektrische velden in wolken te meten. Dit gaat met behulp van kosmische deeltjes en vormt het onderwerp van deel twee van dit tweeluik. Alle metingen tot nu geven het beeld dat de elektrische velden te klein zijn om een ontlading te starten, in tegenstelling tot het empirische feit dat bliksem wel degelijk kan ontstaan. Vrije elektronen, de tweede voorwaarde voor een ontlading, zouden kunnen komen van ionisaties door de achtergrondstraling of van negatief geladen ionen die zich in onze atmosfeer bevin-

Casper Rutjes is promovendus bij het Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) in de groep van Ute Ebert. Casper heeft wis-, natuur- en sterrenkunde gestudeerd aan de Universiteit Utrecht. Na zijn studie heeft hij eerst de traineeship Eerst de Klas gedaan en daarin met veel plezier twee jaar les gegeven aan het Regius College in Schagen.

casper.rutjes@cwi.nl

Anna Dubinova studeerde natuurkunde aan Lobachevsky Universiteit van Nizjni Novgorod, Rusland. Sinds 2012 is ze werkzaam aan het CWI in de groep van Ute Ebert. Haar promotieonderzoek richt zich op het simuleren van elektrische ontladingen dicht bij diëlektrische materialen in het STW-project Creeping Sparks.

anna.dubinova@cwi.nl

Figuur 1 Deze samengestelde afbeelding toont een mogelijk begin van bliksem: een kosmisch deeltje produceert een deeltjeslawine die vrije elektronen genereert. Zodra deze elektronen beschikbaar zijn, begint een streamer (de eerste fase van bliksem) te groeien vanuit de punt van een grote hagelsteen of een samenklontering van graupel, waar het elektrische veld sterker is. Bronnen: U.S. National Weather Station (hagelsteen en onweerswolk) en DESY (deeltjeslawine).

den (voornamelijk O_2^-). Maar in wolken condenseert waterdamp gemakkelijk op deze geladen ionen waardoor zogenaamde waterclusters ontstaan die kunnen doorgroeien tot macroscopische druppels. Waterclusters geven in de aanwezigheid van een elektrisch veld niet snel genoeg elektronen af, zodat deze bron van vrije elektronen niet beschikbaar is bij het starten van een ontlading in een onweerswolk. Daarnaast produceert de gemiddelde achtergrondstraling, op wolkenhoogte voornamelijk afkomstig van de zon, onvoldoende [1] vrije elektronen om een ontlading te starten.

Kortom, het lijkt erop alsof voor het starten van een ontlading onweerswolken te kleine elektrische velden hebben en er te weinig vrije elektronen zijn om bliksem te laten ontstaan. In dit artikel vertellen we over ons onderzoek en hoe deze twee raadsels opgelost kunnen worden.

Figuur 2 Verband tussen de energie van de kosmische deeltjes en de (differentiële) frequentie waarmee zij worden waargenomen op aarde. Kosmische deeltjes tussen grofweg 10^{15} eV en $5 \cdot 10^{17}$ eV zijn belangrijk in de context van onweer. Onderliggende afbeelding uit [3] bestaat uit verschillende datasets. De *knee*, *second knee* en de *ankle* van het spectrum geven aan waar de helling verandert.

Uitzonderlijke kosmische deeltjes

De meeste kosmische deeltjes komen van de zon. Er bestaan echter ook kosmische deeltjes die buiten ons zonnestelsel gecreëerd zijn. Deze zijn ontstaan bij de meest extreme processen in ons heelal zoals supernovae.

Het verband tussen de energie van de kosmische deeltjes en de frequentie waarmee zij de aarde bereiken, wordt weergegeven in figuur 2. Kosmische deeltjes tussen grofweg 10^{15} eV en $5 \cdot 10^{17}$ eV zijn belangrijk in de context van onweer. Deze kosmische deeltjes zijn energierijk genoeg om een significante ionisatie te leveren en arriveren tegelijkertijd nog frequent genoeg om belangrijk te zijn.

Figuur 3 Mogelijke configuraties waarbij het Meekgetal (zie kader *Elektronenlawine en ontstaan streamer*) de waarde 10 bereikt. Op de horizontale as staat de elektrische veldsterkte. Op de verticale as staat de vorm van het ijsdeeltje. Voor vier lengtes (0,75, 1,5, 3 en 6 cm) is het verband van de mogelijke combinaties weergegeven, voor een hoogte van 5,5 km. Ter illustratie zijn op schaal voorbeeldvormen (de ellipsen) getekend; van links naar recht wordt de vorm kleiner en van boven naar beneden scherper. De stippellijn geeft de optimale scherpte aan, dat wil zeggen de vorm voor een gegeven grootte die 'werkt' voor een minimale veldsterkte. Het rode ruitje geeft de condities aan die we in detail hebben gesimuleerd, zie figuur 4.

Kosmische-deeltjeslawine

Als een kosmisch deeltje met een willekeurige inclinatie de atmosfeer binnendringt, dan botst het op een min of meer willekeurige hoogte tegen een eerste luchtmolecuul. Deze hoogte is bij de relevante energie van de deeltjes ongeveer 15 tot 25 km. Tijdens botsingen wordt energie omgezet in massa en ontstaan duizenden nieuwe elementaire deeltjes. Deze deeltjes ondergaan hetzelfde proces waardoor een lawine ontstaat die met bijna de lichtsnelheid naar beneden beweegt.

De kosmische-deeltjeslawine (*cosmic particle shower*) heeft de vorm van een pannenkoek loodrecht op de bewegingsrichting, waarbij de dichtheid in het centrum maximaal is. Deze pannenkoek wisselwerkt verder met de lucht en laat een spoor van ionisaties na. De vrije elektronen die hierbij ontstaan, zouden kunnen bijdragen aan een ontlading mits ze in een elektrisch veld terechtkomen dat groot genoeg is.

Groot verschil in energie

De kosmische-deeltjeslawine en de elektronen die door de ionisaties achterblijven, hebben een extreem groot energieverschil: 10^{-2} eV tot wel 10^{17} eV, dat zijn dus negentien orden van grootte.

Om deze grote verschillen bij berekeningen te kunnen hanteren, moeten verschillende oplossingsmethoden of simulatiemodellen gekoppeld worden. Tot op heden bestaat er geen programma dat het gehele energiegebied in een keer kan doorrekenen.

Veldversterking

Zoals gezegd is het tweede probleem het vinden van elektrische velden boven de doorslagspanning. De gemeten velden in onweerswolken blijken een factor vijf tot tien te klein te zijn.

Water is diëlektrisch

Diëlektrische materialen polariseren in de aanwezigheid van een elektrisch veld. Hierdoor kan aan de randen een versterking optreden waardoor veldsterkten ontstaan die groter zijn dan de doorslagspanning.

Op de hoogte waarop bliksem ontstaat, typisch zo'n 5,5 km, is water meestal bevroren. De ijsdeeltjes kunnen allerlei vormen aannemen die, als ze gaan vallen, als sneeuw of hagel op de grond terechtkomen.

De veldversterking door de ijsdeeltjes is afhankelijk van de diëlektrische constante (materiaaleigenschap) en van de fysieke vorm van het ijsdeeltje.

Benodigde vormen van ijsdeeltjes

Om het effect van de vorm van een ijsdeeltje op het ontstaan van een ontlading te onderzoeken, maakten we een benadering met behulp van het Meekgetal (zie kader *Elektronenlawine en ontstaan streamer*). Deze resultaten zijn weergegeven in figuur 3.

Wat ons opviel in deze studie was dat een scherpere vorm niet altijd gunstiger was voor de doorslagspanning. Hoe scherper het ijsdeeltje hoe sterker de lokale versterking van het veld, maar ook hoe geconcentreerder het veld (dus in een kleiner gebied). Aangezien elektronen energie verkrijgen door zich in een elektrisch veld te *verplaatsen*, is een uitgestrekt gebied ook erg belangrijk.

We kunnen dus concluderen dat er een optimale scherpte bestaat bij elke lengte (deze is aangegeven met de stippellijn in figuur 3), optimaal in de zin dat deze vorm resulteert in een elektrische doorslag bij de laagste veldsterkte van de onweerswolk.

Simuleren van de streamer

Met de benadering van mogelijke beginvoorwaarden in de hand, moet de proef op de som worden genomen. In een STW-project onderzoekt Anna Dubinova hoe ontladingen zich gedragen in de buurt van diëlektrische materialen. Dit is in het bijzonder van belang voor de hoogspanningstechnologie. Haar ontwikkelde software is in staat het ontstaan van de streamer te simuleren. Een interessant detail is dat we de frequentieafhankelijkheid van de diëlektrische constante hebben toegevoegd. Dit is nodig omdat op de tijdschaal van de streamer (nanoseconden) het ijs zich anders gedraagt dan op de tijdschaal van het achtergrondveld van de onweerswolk (seconden).

In figuur 4 is de evolutie van de streamer te zien. Opmerkelijk is dat het

Ute Ebert studeerde natuurkunde aan de Universiteit Heidelberg, promoveerde aan de Universiteit Essen, was postdoc aan de Universiteit Leiden en werd daarna staflid aan het Centrum Wiskunde & Informatica in Amsterdam. Sinds 2002 leidt ze de onderzoeksgroep Multiscale Dynamics aan het CWI en is ze tevens hoogleraar natuurkunde aan de TU Eindhoven.

Ute.ebert@cwi.nl, www.cwi.nl/~ebert

veld (zie rechter plaatje) het ijsdeeltje binnendringt omdat het ijsdeeltje op een tijdschaal van nanoseconden het veld veel minder kan afschermen.
Dergelijke streamersimulaties zijn erg rekenintensief, waarbij de tijdsintensieve stap wordt gevormd door het oplossen van de Poissonvergelijking. Eenvoudig geformuleerd: omdat elke elektrisch lading elke andere lading beïnvloedt, is elk gebied in het rekendomein met ieder ander verbonden. Hierdoor moeten slimme keuzes worden gemaakt zoals adaptieve roosterverfijning. In onze groep ontwikkelen wij methodes om volledig driedimensionaal dergelijke simulaties uit te voeren.

De juiste plaats en tijd

Nu bekend is welke combinaties van ijsdeeltjes, elektronendichtheden en elektrische velden kunnen leiden tot ontladingen is de vraag hoe vaak het nu voorkomt dat op gegeven plaats en tijd precies aan die voorwaarden voldaan wordt.
Zoals gezegd komen energierijke kosmische deeltjes slechts sporadisch voor. Verder evolueren ze op een willekeurige manier en moeten ze ook nog eens de juiste vorm ijsdeeltje en velden tegenkomen.
Uit simulaties bleek dat er ten minste honderd vrije elektronen per kubieke centimeter aanwezig moeten zijn voor het starten van de ontlading. Met een Monte Carlostudie van honderden simulaties van kosmische-deeltjeslawines (gebruikmakend van de data in figuur 2) hebben we een kansverdeling opgesteld voor de frequentie die nodig is voor deze elektronendichtheid. Het resultaat is dat ten minste vijf keer per vierkante kilometer per minuut een juiste kosmische-deeltjeslawine aanwezig is om de benodigde dichtheid te creëren.
Een tweede voorwaarde is dat een ijsdeeltje van de juiste vorm aanwezig is in het centrum van de kosmische-deeltjeslawine waar de elektronendichtheid de vereiste waarde heeft. Helaas is het (nog) erg moeilijk om specifieke vormen van ijsdeeltjes in onweerswolken te meten. Op basis van de beschikbare literatuur hebben we een simpele afschatting gemaakt van de dichtheid van ijsdeeltjes, namelijk 10^{-7} cm^{-3}.
De twee verdelingen samen geven een indicatie van de duur en de grootte van het benodigde elektrische veld in de ruimte. Dit is geïllustreerd in figuur 5. Het bleek dat de hoogte waarbinnen het elektrische veld aanwezig moet zijn ten minste drie meter is.

Figuur 4 Streamergroei getoond door elektronendichtheid (links) en elektrische veldsterkte (rechts) vanaf een ijsdeeltje met een lengte van 6 cm en een krommingsstraal van 0,4 mm aan de onderkant (donkerblauwe vorm aan de bovenkant van de figuur). Te zien is de vergroting aan de onderkant van een ijsdeeltje. Achtergrondveld is 15% van het doorslagveld. We zien hier de toestand na 46 nanoseconden.

Elektronenlawine en ontstaan streamer

Als het elektrische veld groter is dan het doorslagveld dan groeit ieder elektron uit tot een ionisatielawine. Een lawine groeit met een factor e^M waarbij M het Meekgetal is. Het wordt berekend door de inverse ionisatielengte $\alpha(E(x))$ (die van het elektrische veld $E(x)$ afhangt) te integreren over het pad met positieve α,

$$M = \int \alpha(E(x))\mathrm{d}x.$$

In de lawine treedt steeds meer ladingsscheiding op. Door deze ladingsscheiding wordt het elektrische veld in de lawine steeds meer afgeschermd en stopt de elektronenlawine uiteindelijk met exponentieel groeien, het systeem wordt dan zelfregulerend en een streamer is geboren. Deze overgang kan benaderd worden door te kijken bij welk Meekgetal M dat gebeurt. In onze studie (typische dichtheid, elektrische veld en diëlektricum) was dat het geval bij $M = 10$. In figuur 3 staan verschillende vormen die voldoen aan deze vuistregel. Dit bood de mogelijkheid om de mogelijke begincondities af te schatten voor het ontstaan van een streamer.

Samenvatting

De vraag hoe bliksem ontstaat was nog allesbehalve volledig beantwoord. De belangrijkste uitdagingen waren: er zijn geen of nauwelijks vrije elektronen om te versnellen en voldoende hoge elektrische velden worden niet waargenomen. We hebben bestudeerd hoe elektrische velden worden versterkt door de speciale eigenschappen van

Figuur 5 De figuur illustreert hoe de verschillende voorwaarden voor ontstaan van elektrische bliksemontlading elkaar kruisen. In het midden is het centrum van de kosmische-deeltjeslawine (*shower core*). Hierin vereisten we een minimale elektronendichtheid van 100 cm^{-3} binnen een straal van 100 cm. In deze cilinder moet een ijsdeeltje aanwezig zijn. De schatting voor de dichtheid van de aanwezige ijsdeeltjes met de juiste vorm is $n_{HM} > 10^{-7}$ cm^{-3}, wat resulteert in een minimale hoogte van $h = 3$ m. Verder geeft de Monte Carlostudie van de kosmische-deeltjeslawines de relatie oppervlakte A keer tijd: vijf keer per vierkante kilometer per minuut.

ijs. Door middel van een benadering op basis van het Meekgetal kan worden onderzocht welke vormen wel of niet geschikt zijn als functie van de veldsterkte. We kunnen nu concluderen dat er een optimale scherpte bestaat voor iedere lengte. Ook hebben we onderzocht hoe energierijke kosmische deeltjes bliksem kunnen opstarten door het creëren van hoge dichtheden van vrije elektronen rond de ijsdeeltjes. Alle ingrediënten tezamen vormen een interessante mix, waarbij verschillende combinaties mogelijk zijn. We hebben in detail bekeken hoe een streamer ontstaat bij een specifieke combinatie. Ook hebben we de frequentie berekend waarop een dergelijke mix van ingrediënten tegelijkertijd op dezelfde plaats kan voorkomen. Deze frequentie blijkt hoog genoeg te zijn om het starten van een ontlading in een onweerswolk te verklaren.

Volgende keer

We gaan het in deel twee van dit tweeluik hebben over de vraag hoe onweerswolken de evolutie van kosmische-deeltjeslawines beïnvloeden. Dit omgekeerde effect werd in eerste instantie als een storend verschijnsel beschouwd. Nu blijkt dat het een unieke en veelbelovende manier is om de elektrische eigenschappen van onweerswolken te diagnosticeren.

Wordt vervolgd.

Dankwoord

Met dank aan Stijn Buitink (VUB), Olaf Scholten (KVI) en Gia Trinh (KVI) voor hulp met dit artikel en samenwerking bij de publicatie in PRL.

Referenties

1 Anna Dubinova, Casper Rutjes, Ute Ebert, Stijn Buitink, Olaf Scholten en Gia Trinh, *Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers*, *Physical Review Letters* **115** (2015): 015002.

2 www.cwimd.nl (website van de onderzoeksgroep op het CWI).

3 K. Olive *et al.*, *Review of Particle Physics*, *Chin. Phys. C* **38**, 090001 (2014).

Agenda

t/m 3 januari 2016

Einstein & Friends, in Museum Boerhaave. Met de tentoonstelling *Einstein & Friends* viert Museum Boerhaave de honderdste verjaardag van de algemene relativiteitstheorie, Einsteins revolutionaire kijk op ruimte, tijd en zwaartekracht. Centraal in de tentoonstelling staat Einsteins liefde voor Nederland, Leiden in het bijzonder.
www.museumboerhaave.nl.

22 - 26 februari 2016

Frontiers of Physics, een grote natuurkundeweek met Gerard 't Hooft, Vincent Icke, Carlo Beenakker, Dennis Dieks, Frank Linde, Marcel Vonk, Simon Portegies Zwart, Jo Hermans en Charlotte Icke-Lemmens. Topwetenschappers praten u een week lang bij over de nieuwste ontwikkelingen in de natuurkunde.
In de ochtenden verzorgt Vincent Icke colleges over nieuwe theorieën, onder meer over zwaartekracht, quanta, symmetrie, het ontstaan van het zonnestelsel, de relativiteitstheorie en de zoektocht naar buitenaards leven. In de middagen zijn er lezingen van andere topfysici. Ook dit jaar is Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft te gast. Hij zal zijn standaardmodel in de deeltjesfysica toelichten. Dennis Dieks spreekt over een theorie van alles en Marcel Vonk verzorgt een lezing over de snaartheorie en de mathematische fysica. Spinozalaureaat Carlo Beenakker spreekt over quantumfysica, de zin en onzin van de quantumcomputer en teleportatie. Tot slot spreekt Frank Linde, onderzoeker astrodeeltjesfysica, over massamysteries in de elementaire deeltjesfysica.
In de avond vertonen we relevante films en documentaires, geeft Marcel Vonk een college over waarom wiskundigen betere pokerspelers zijn dan psychologen, met aansluitende pokerclinics waaraan u kunt deelnemen, zoals ook aan een simulatiespel, een gestructureerd filosofisch gesprek onder leiding van filosoof Ed Weijers en u kunt met Jo Hermans experimenten uitvoeren die natuurkunde zichtbaar maken.
Alle informatie: www.isvw.nl.

Volg het *NTvN* ook op Twitter via NTvN_tweets! Met nieuws over het *NTvN*, de NNV en natuurkunde in Nederland.
twitter

8 april 2016

FYSICA 2016, in Nijmegen.
www.fysica.nl.