

De bliksem op het spoor

Bliksem en onweer zijn alledaagse verschijnselen, zeker in tropische gebieden. Toch zijn ze nog lang niet volledig te herleiden uit microscopische natuurkundige principes. Ook zijn er volstrekt nieuwe bliksemverschijnselen ontdekt: sinds 1989 verschillende types van tientallen kilometers grote ontladingen boven onweerswolken en in 1994 de aardse gammastralingsflitsen. Deze verschijnselen vormen een nieuwe toegang tot de natuurkunde van onweer, omdat deze ontladingen boven de wolken iets minder complex zijn dan de gewone bliksem. Ze zijn nu gedeeltelijk na te bootsen op computers en in het laboratorium. Ook aardse gammastralingsflitsen worden tegenwoordig niet alleen boven en onder onweerswolken gemeten, maar ook theoretisch en in het laboratorium onderzocht. Nederland speelt hierbij een belangrijke rol. Ute Ebert

300

Drie fases van de bliksem

Bliksem (zie kader *Bliksem in getallen* aan het eind van dit artikel) ontwikkelt zich ruwweg in drie fases. In de eerste fase bouwt de spanning zich op in een wolk. In de tweede fase groeit een geleidende, vaak sterk vertakte 'bliksemboom' door de lucht. In de derde fase treedt elektrische kortsluiting op: sterke stromen en een sterke Ohmse verhitting. Bliksemflitsen ontstaan dan door aangeslagen moleculen in het hete plasma en donder

ontstaat door thermische uitzetting van het kanaal. Deze derde fase is redelijk te begrijpen: sterke stromen vloeien door een bestaand kanaal van heet plasma, dat daardoor verder verhit wordt. Er is echter nog geen theorie die verklaart waarom de spanningen in een onweerswolk tot wel 100 MV kunnen oplopen in de eerste fase. Ook de tweede fase – de opbouw van ontladingskanalen en van de bliksemboom – levert nog veel raadsels op, maar hier is wel vooruitgang in het onderzoek. Dit artikel zal zich daarom verder op deze groeiende bliksembomen concentreren. Ze treden op in de gewone bliksem, maar ook in de reuzenbliksems boven wolken, en misschien produceren ze ook de aardse gammastralingsflitsen.

Schijnbare paradox

Een schijnbare paradox is het volgende. Lucht kan bij normale temperatuur en druk pas in een kettingreactie worden geïoniseerd bij elektrische velden sterker dan 30 kV/cm. Echter, een wolkenpotentiaal van 100 MV op 10 km hoogte levert een gemiddeld veld

van 100 V/cm tussen wolk en aarde en is voor de ionisatie van de lucht dus een factor 300 te klein. Toch gaat er een ontlading lopen en dit gebeurt door veldversterking aan de punt van het elektrisch geleidende en groeiende ontladingskanaal.

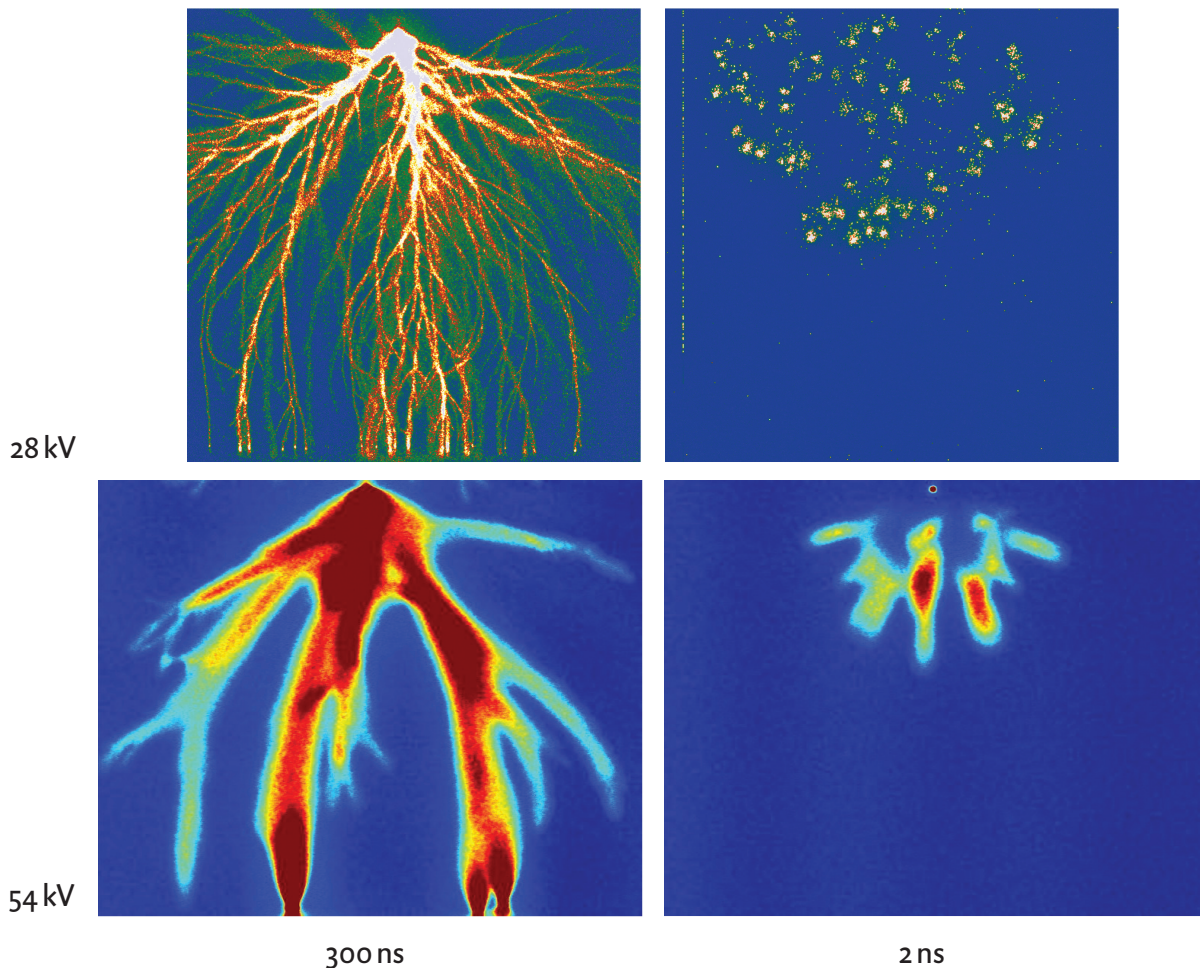
Streamer-leader-proces

Dit groeiende ontladingskanaal met zelfgemaakte veldversterking aan zijn uiteinde heet een streamer (zie [1]). Daarmee boort de bliksem bij wijze van spreken zijn pad door de lucht. De vertakte bomen van streamers zijn in Eindhoven met nanoseconden resolutie in beeld gebracht, zie figuur 1. Met oplopende spanning nemen ze snel toe in dikte en snelheid en dit begrijpen we ook theoretisch redelijk goed. De hoogste spanning, die op die manier onderzocht is, is 120 kV [2], terwijl de spanningen in echte onweerswolken wel kunnen oplopen tot 100 MV. Daarom is te verwachten dat de elektrische velden aan de uiteinden van bliksemstreamers veel hoger zijn, want ze worden bepaald door spanning en streamerdikte. De structuur in ruimte en tijd van een streamerboom bij spanningen boven

Ute Ebert is afgestuurd in de natuurkunde aan de Universiteit Heidelberg en gepromoveerd aan de Universiteit Essen. Na een postdoc-tijd aan het Instituut-Lorentz in Leiden ging zij in 1998 naar het Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) in Amsterdam. Sinds 2002 leidt ze daar de onderzoeksgroep 'Multiscale Modeling and Nonlinear Dynamics' en is ze tevens deeltijdhoogleraar in de natuurkunde aan de TU Eindhoven.



ebert@cwi.nl



Figuur 1 Streamerontladingen in lucht bij gewone druk en temperatuur over een afstand van 4 cm. De ontladingen starten van een puntelektrode boven en lopen naar een plaalectrode beneden. De belichtingstijd van de ICCD-camera is 300 ns links en 2 ns rechts. Boven is een spanningpuls van 28 kV aangelegd, en onderaan van 54 kV [2]. De plaatjes rechts met de korte belichtingstijd tonen aan, dat niet het hele ontladingskanaal gloeit, maar alleen de groeiende uiteinden. De plaatjes links moeten dus als het spoor geïnterpreteerd worden, dat het uiteinde van de ontlading gedurende de belichtingstijd afgelegd heeft. Een vergelijking van de bovenste en de onderste rij laat zien, dat de streamers zes keer dikker en vijftien keer sneller zijn, als de spanning met minder dan een factor twee opgevoerd wordt. De dunste streamers zijn 200 micrometer dik en hebben een snelheid van 10^5 m/s.

120 kV is echter tot op heden nog niet goed in kaart gebracht.

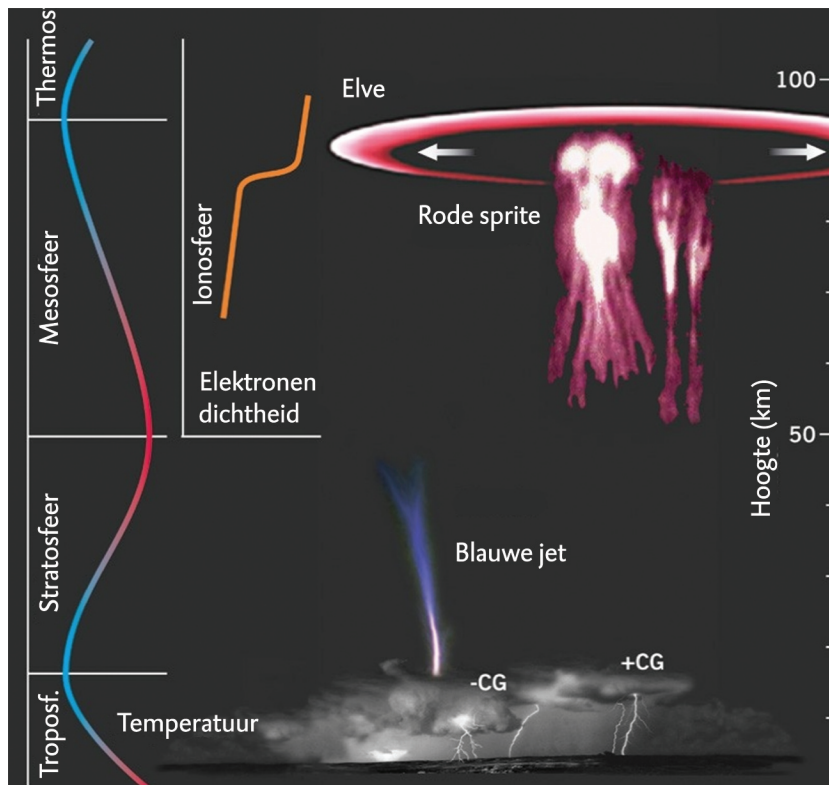
Het is wel zo dat de streamerboom of streamercorona alleen geen kortsluiting tussen wolk en aarde tot stand kan brengen. Tegenwoordig denken de meeste onderzoekers dat de stromen in streamers zo zwak zijn, dat ze 'koud' blijven en daarom na minder dan een microseconde terug keren in hun niet geleidende evenwichtstoestand. In bliksemstreamers hoeft dit niet zo te zijn. De hele streamerboom voedt wel het zogenaamde leaderkanaal, dat door zijn sterke gebundelde stromen Ohms verhit wordt, en door zijn elektrische geleidingsvermogen de elektrische potentiaal van de wolk naar de aarde kan transporteren. Voor de hele streamer-leader-boom bestaan fenomenologische modellen. Nieuwe *high speed*-films met 66.000 beelden per seconde (bijvoorbeeld door Geoff McHarg van de US Air

Force Academy) laten nu weer heel nieuwe processen zien die door de bestaande modellen niet beschreven worden. Hier is nog veel belangrijk werk te verrichten, want het streamer-leader-proces bepaalt uiteindelijk, waar een bliksemschicht de grond, een gebouw, windmolen of vliegtuig raakt en inslaat.

Sprite-ontladingen boven onweerswolken

Onze atmosfeer ligt in principe tussen twee 'plaalectrodes': onderaan de aarde, en bovenop de door zonnestraling sterk geïoniseerde ionosfeer, waarvan de onderkant zich op gemiddeld ongeveer 80-90 km hoogte bevindt. De luchtdichtheid neemt iedere 14 km hoogte met een factor tien af. Daarom groeit de vrije weglengte van vrije elektronen met de hoogte, en kunnen de elektronen bij een lager lokaal elektrisch veld moleculen

ioniseren (zie kader *Gelijksortigheid van streamer- en sprite-ontladingen*). De latere Nobelprijswinner C.T.R. Wilson stelde daarom al in 1925 voor, dat bliksemschichten ook boven de wolken konden ontstaan. Het duurde echter tot 1990, dat deze waarnemingen in de wetenschappelijke literatuur vermeld werden. In de loop van de jaren '90 werd een hele dierenrijk van spookachtige kortstondige lichtverschijnselen boven onweerswolken ontdekt (zoals geschetst in figuur 2), die met namen uit Shakespeare's *Midzomernachtdroom* aangeduid werden: *sprites* (reuzenbliksems, die uit de ionosfeer omlaag schieten), *elves* (uitdijende gloeiende ringen aan de onderkant van de ionosfeer), *jets* (bliksems, die uit de wolk omhoog schieten), later *gnomes* en *pixies* (kleinere ontladingen boven de wolk), en uiteindelijk *gigantic jets* (een jet, die overgaat in een sprite en de wolk met



Figuur 2 Een schets van de meest voorkomende kortstondige lichtverschijnselen boven onweerswolken: jets, sprites en elves. Aarde en ionosfeer kunnen als geleiders beschouwd worden. Onderaan de onweerswolk en gewone bliksemschichten (CG = cloud to ground = van wolk naar aarde), die positieve of negatieve lading van de wolk naar de aarde transporteren.

Gelijksoortigheid van streamer- en sprite-ontladingen

De lopende uiteinden van streamer-ontladingen (zie figuur 1) vertonen gelijksoortig gedrag, als de gasdichtheid verandert. Het proces wordt namelijk bepaald door de botsing van een lage concentratie van (onderling niet wisselwerkende) elektronen met de talrijke neutrale moleculen in een gas. Als de elektronenenergie bij de botsing hoger is dan de ionisatie-energie van het molecuul, kan een nieuw elektron-ion-paar ontstaan. De waarschijnlijkheid hiervoor wordt bepaald door het product van vrije weglengte l en lokaal elektrisch veld E . Maar de vrije weglengte l is omgekeerd evenredig aan de gasdichtheid n . Dus hetzelfde E/n versnelt de elektronen tot dezelfde snelheid v en leidt tot dezelfde ionisatie-rates, ook al varieert de dichtheid n . Alle lengte- en tijdschalen schalen dus als $1/n$, de elektrische velden als n en elektrische spanningen veranderen niet met n .

Omdat de luchtdichtheid op 80 km hoogte 10^5 maal kleiner is dan op zeeniveau, zijn alle lengte- en tijdschalen 10^5 maal groter. Daarom komt 1 cm in een streamerontlading op zeeniveau (figuur 1) overeen met 1 km in een sprite-ontlading op 80 km hoogte (figuur 3), als ze door dezelfde elektrische spanning gedreven worden; dit is nu ook experimenteel zeer goed bevestigd [2].

Als de Maxwell-vergelijkingen meegenomen worden in de dimensieanalyse van streamers en sprites, volgt dat de mate van ionisatie evenredig is aan n , en dat de Ohmse verhitting per gasmolecuul in het streamerkanaal schaalbaar als n^2 ; streamers in dichtere media verhitten dus meer.

de ionosfeer verbindt). Sprites en elves komen het meest voor. De tijdsontwikkeling van een sprite over enkele tientallen kilometers hoogte [3] is te zien in figuur 3.

Na de ontdekking van sprites ontstonden er twee theorieën: ze waren of klassieke streamer-ontladingen zoals te zien in figuur 1, of lawines van hoogenergetische relativistische elektronen uit het heelal, die door de elektrische velden van het onweer versneld en vermenigvuldigd werden. Er zijn nu waarnemingen met een veel betere resolutie in ruimte en tijd gedaan en de theorie kan de gelijksoortigheid van sprites en streamers (zie kader Gelijksoortigheid van streamer- en sprite-ontladingen) kwantificeren. Figuur 1 laat zien, dat bij streamers met voldoende korte belichtingstijd alleen de groeiende uiteinden te zien zijn en niet de hele bliksemsboom. Inmiddels is dit verschijnsel ook bij sprite-ontladingen waargenomen [4].

In tegenstelling tot bliksemschichten van wolk naar aarde bestaat de tweede fase van een sprite-ontlading alleen uit streamers zonder leaderkanaal, en de derde fase van elektrische kortsluiting ontbreekt helemaal. Dit komt doordat volgens de gelijksoortigheidswetten de mate van ionisatie en daarom de Ohmse verhitting afneemt bij lagere luchtdichtheid.

Sprite-onderzoek in het laboratorium en met de computer

De gelijksoortigheid van streamers en sprites biedt grote mogelijkheden voor samenwerking tussen plasmafysica en geofysica. Figuur 3 vertoont meerdere spriteverschijnselen die ondertussen nagebootst zijn. Onze simulaties [5] met een realistisch hoogteprofiel voor lucht- en elektronendichtheid reproduceren het ontstaan van de spritehalo en van het eerste dikke spritekanaal, dat naar beneden schiet, zoals te zien tot en met het tijdstip 2,26 ms in figuur 3. Op tijdstippen 3,46 en 3,66 ms is te zien, dat ontladingskanalen uit de rechter boom bijna loodrecht op kanalen uit de middelste boom toe lopen en daar blijkbaar eindigen. Soortgelijk gedrag is nu in onze stereografische metingen van streamers gezien, en de 3D-reconstructie van Sander Nijdam bevestigt, dat het om echte aantrekkingsgang gaat en dat de kanalen niet achter elkaar langs lopen [6]. Op simulaties

van wisselwerkende kanalen [7,8] komen we hieronder terug. Gebaseerd op deze goede overeenstemming zijn we nu begonnen om vorm en spectroscopie van mogelijke sprite-ontladingen op bijvoorbeeld Jupiter en Venus in het laboratorium te onderzoeken.

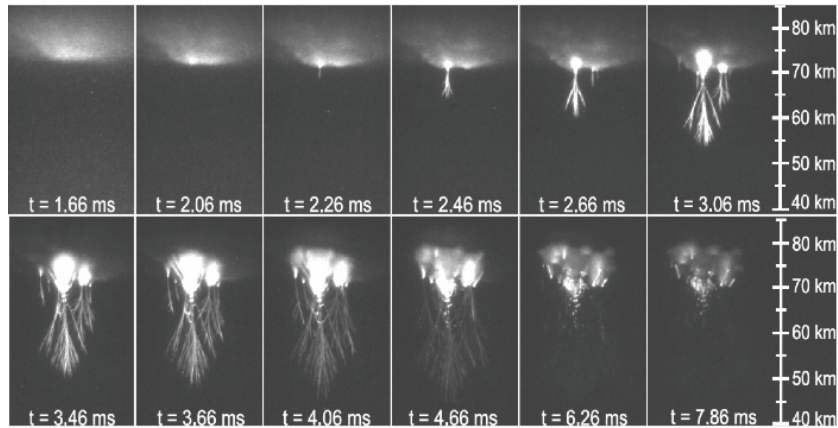
Aardse gammaflitsen

Gammaflitsen op aarde werden in 1994 bij toeval waargenomen door een slecht uitgelijnde satelliet, die naar kosmische gammaflitsen zocht. Het blijkt nu dat er meer dan 50 aardse gammaflitsen per dag plaatsvinden met energieën tot 35 MeV [9]. De satellietmetingen worden zo opgevat, dat 35 MeV een enkel quantum is. Figuur 4 laat zien hoe deze gammaflitsen over de aarde verdeeld zijn. Ondertussen weten we dat ze vaak enkele minuten voor bliksemschichten optreden [9]. Metingen worden verricht vanuit de grond, vliegtuigen, ballonnen en satellieten. De financiering voor het ASIM-meetplatform [10] om sprites en aardse gammaflitsen te onderzoeken op het International Space Station, is net rond. De lancering, die door ESA-ESTEC in Noordwijk gecoördineerd wordt, staat voor 2013 gepland.

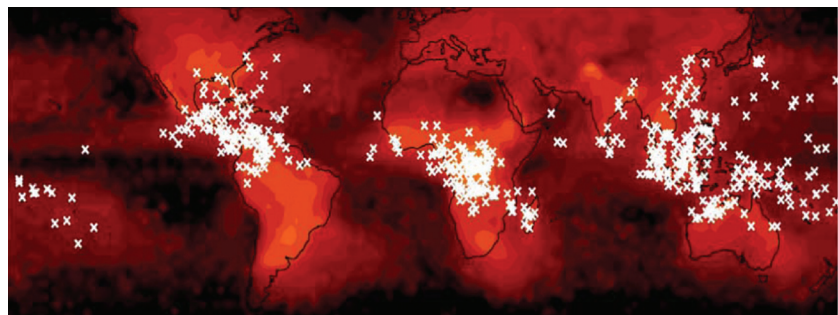
Bij de zoektocht naar een natuurkundige verklaring van de gammaflitsen komen weer soortgelijke argumenten naar boven als bij de bliksemparadox en bij de sprites. Hebben we te maken met klassieke gasontladingsfysica? Of moeten er energetische deeltjes uit het heelal aan te pas komen? Zijn de elektrische velden in de onweerswolk sterk genoeg voor een klassieke ontlasting? De hoogste velden in de wolk, die door ballonnen gemeten werden, zijn een factor tien te klein. Voor een verklaring hang ik wederom de niet-lineaire theorie van lokale veldversterking in de onweerswolk aan.

Gammaflitsen in laboratorium en computer

Het hoge elektrische veld voor het streameruiteinde is een mogelijke bron van gammaflitsen op aarde. Daarvoor spreekt dat harde röntgenstraling (meer dan 200 keV per quantum) ook kan worden opgewekt door meterslange vonken, gedreven door een spanning van 1 MV, en het is mogelijk dat het hier om hetzelfde fysische mechanisme gaat. Nguyen en Van Deursen in Eindhoven toonden



Figuur 3 De tijdsontwikkeling van een diffuse voorontlading (de zogenaamde spritehalo) tot tijd $t = 2.06$ ms en de daarop volgende sprite-ontlading boven een onweerswolk is hier gefilmd met 5000 beelden per seconde [3]. De hoogte in de atmosfeer is rechts aangegeven. De bovenkant van een onweerswolk bereikt 10 of hooguit 16 km. De onderkant van de sterk geleidende ionosfeer ligt gemiddeld op 80 - 90 km. Op tijdstip $t = 0$ begint een bliksemschicht lading van de wolk naar de aarde te transporteren, waardoor er een elektrisch veld ontstaat tussen wolk en ionosfeer, die eerst een spritehalo aan de onderkant van de ionosfeer en dan een sprite voortbrengt.



Figuur 4 Waarneming van aardse gammaflitsen met de RHESSI-satelliet in 2006 [9]. De verdeling komt ongeveer overeen met de bliksemdistributie (in kader *Bliksem in getallen*).

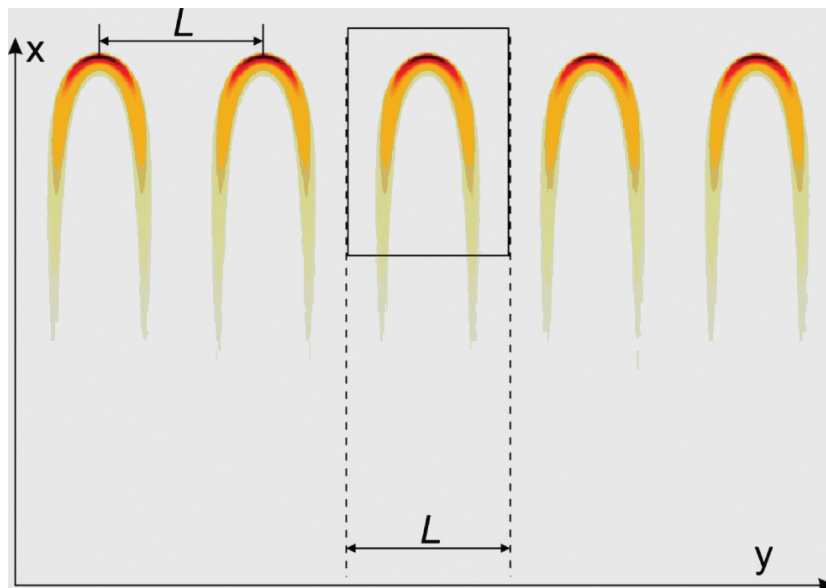
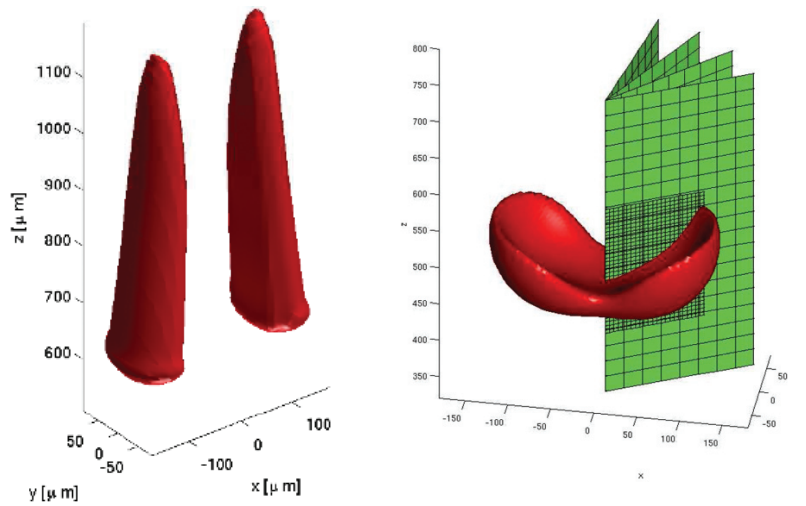
met hun onderzoek van harde röntgenstraling uit lange vonken als eerste aan dat deze straling gedurende de streamer-leader-fase vrijkomt [11]. Onderdelen van de gammadetector, die voor de ASIM-ruimtemissie ontwikkeld wordt, zullen de komende maanden in hun laboratorium ingezet worden.

Om theoretisch grip te krijgen op harde straling uit streamers en leaders, moeten de elektronen en hun energieverdeling in het streameruiteinde onderzocht worden. Het is namelijk bekend dat deze verdeling extreem ver uit evenwicht is met een lange start bij hoge energieën. Elektronen met zeer hoge energie kunnen door moleculen afgeremd worden en daarbij röntgen- of gammastraling emitteren. De theoretische basis voor dit onderzoek is gelegd door Chao Li [12] in Amsterdam. Hij is erin geslaagd om de statistische Monte Carlo-beschrijving van de elektronen aan het streameruiteinde numeriek te koppelen aan een

dichtheidsbenadering voor de talrijke langzame elektronen in de streamer. De eerste resultaten laten zien, dat bij een spanning van 12 kV de elektronen aan het streameruiteinde versneld kunnen worden tot 2,5 keV.

De theorie van streamerontladingen, een veelschalig probleem

In de streamertheorie is nog veel werk te verrichten. De inwendige structuur van een enkele streamerontlading is door Carolynne Montijn in het NTvN beschreven [1]. Ze laat hier zien dat het geleidend kanaal omgeven is door een dunne ruimteladingslaag (zie figuur 5 rechts en onderaan). Deze laag schermt het inwendige van het geïoniseerde kanaal elektrisch af en versterkt het elektrische veld voor het groeiende uiteinde. Deze lokale veldversterking brengt het veld boven de genoemde 30 kV/cm en leidt tot een lokale ionisatiereactie van de lucht en ook tot een verdere groei van



Figuur 5 Simulatie van wisselwerkende streamers. Boven: afstoting of aantrekking van twee streamers. Links het niveau van gelijke elektronendichtheid van twee naar beneden lopende streamers, die elkaar elektrisch afstoten, en rechts het niveau van gelijke ruimteladingsdichtheid (rood) van twee streameruiteinden, die door niet-lokale fotoïonisatie samensmelten. Het numerieke rekenrooster met lokale roosterverfijning is groen aangegeven [7]. Onder: de ruimteladingsdichtheid van een groep van gelijke, met elkaar wisselwerkende streamers met een onderlinge afstand L . Deze oplossing werpt ook interessante nieuwe wiskundige vragen op, zie [8].

het kanaal. Dit dunne, verschuivende ruimteladingsgebied is alleen goed te beschrijven door lokale verfijning van het numerieke rekenrooster in de simulatie. Dit deden we in 2006 voor cilindersymmetrische streamers. Echter door de wisselwerking, zijn tien streamers niet gelijk aan tien maal een enkele streamer. Wisselwerkende streamers vragen om volledig driedimensionale roosterverfijning. De aanpak, die Alejandro Luque hiervoor ontwikkeld heeft, is geschetst in figuur 5 boven en in detail beschreven in [7]. Daarmee kunnen we nu voor het eerst de wisselwerking van twee streamers met elkaar numeriek be-

studeren. Conceptuele vooruitgang wordt ook geboekt door het bestuderen van groepen van gelijke streamers [8], zoals te zien is in figuur 5 onderaan.

In de samenwerking tussen theorie en experiment werken we aan het begrip van streamers: hun dikte en snelheid, vertakkingen en uitdoven, onderlinge wisselwerkingen, afhankelijkheid van gastype en -dichtheid, wisselwerking met de stroom- en spanningsbron, emissie van energetische straling, scheikundige omzettingen, verhitting en overgang naar de leader fase. Naast talrijke technische toepassingen geeft het onderzoek aan sprite-ontladin-

gen, aan aardse gammaflitsen en aan bliksem en bliksemaanhechting aan structuren volop aanleiding om dit onderzoekspad verder te volgen.

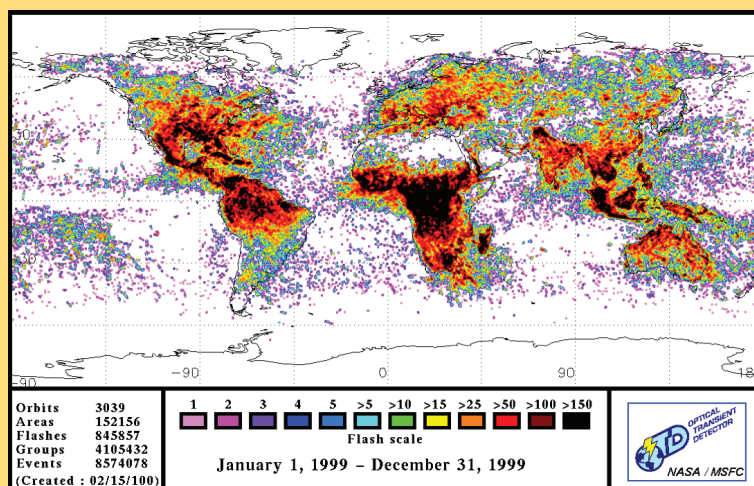
Dank

Aan dit onderzoek hebben meer mensen bijgedragen dan ik tot co-auteurs van dit artikel kan benoemen. Mijn dank voor gedreven en succesvol onderzoek in Nederland gaat naar Fabian Brau, Tanja Briels, Wouter Brok, Willem Hundsdorfer, Gerrit Kroesen, Chao Li, Alejandro Luque, Bernard Meulenbroek, Carolynne Montijn, Vuong Nguyen, Sander Nijdam, Guus Pemen, Valeria Ratushna, Lothar Schäfer, Joost van der Mullen, Lex van Deursen, Bert van Heesch, Eddie van Veldhuizen, Hans Winands en Gideon Wormeester.

Referenties

- 1 C. Montijn, *NTvN* **72-4**, 114-118 (2006).
- 2 T. Briels, J. Kos, G.J.J. Winands, E.M. van Veldhuizen en U. Ebert, *J. Phys.* **D 41**, 234004 en 234008 (2008).
- 3 S.A. Cummer, N. Jaugey, J. Li, W.A. Lyons, T.E. Nelson en E.A. Gerken, *Geophys. Res. Lett.* **33**, L04104 (2006).
- 4 H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, T. Kanmae en D.D. Sentman, *Geophys. Res. Lett.* **34**, L11105 (2007).
- 5 A. Luque en U. Ebert, under review.
- 6 S. Nijdam, C.G.C. Geurts, E.M. van Veldhuizen en U. Ebert, *J. Phys.* **D 42**, 045201 (2009).
- 7 A. Luque, U. Ebert en W. Hundsdorfer, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 075005 (2008).
- 8 A. Luque, F. Brau en U. Ebert, *Phys. Rev. E* **78**, 016206 (2008).
- 9 D.M. Smith, *Science* **307**, 1085 (2005), meerdere *Geophys. Res. Lett.* en voordracht bij www.agu.org/meetings/chapman/2009/bcall/, mei 2009.
- 10 www.space.dtu.dk/English/Research/Earth/Projects/ASIM.aspx
- 11 C.V. Nguyen, A.P.J. van Deursen en U. Ebert, *J. Phys.* **D 41**, 234012 (2008).
- 12 C. Li, U. Ebert, W.J.M. Brok en W. Hundsdorfer, *J. Phys.* **D 41**, 032005 (2008) en <http://arxiv.org/abs/0907.0555>.
- 13 <http://wwlln.net/>

Bliksem in getallen



Onze aarde wordt gebombardeerd door ongeveer 45 bliksemschichten per seconde. De figuur laat hun verdeling op onze aardbol zien volgens metingen door een satelliet in een lage baan. Waarnemingen van alle voldoende sterke bliksemschichten op aarde worden nu gedaan door het *world wide lightning location network* [13] dat tegenwoordig bestaat uit 40 sensoren. Dit netwerk maakt gebruik van het feit, dat bliksemstromen elektromagnetische golven uitzenden. In frequenties van 8 Hz, 14 Hz, et cetera (de zogenaamde Schumann-resonanties) kunnen deze golven in de trilhulpe van de atmosfeer (tussen aarde en ionosfeer) om de hele aardbol heen lopen. Daarom kan met minimaal drie sensoren de positie van iedere bliksemschicht op aarde worden bepaald. Natuurlijk worden bliksemschichten in industrielanden ook nauwkeurig gemeten door nationale meteorologische instituten, maar niet boven de oceanen of bijvoorbeeld

in Congo, het land met de hoogste bliksemactiviteit op aarde.

De spanningen in een onweerswolk kunnen tot 100 MV oplopen, en de stromen in een bliksemkanaal tot 200 A. Dit komt overeen met een elektrisch vermogen van 20 GW voor een enkele bliksemschicht, gelijk aan het vermogen van alle Nederlandse energiecentrales bij elkaar. Bij een stroomduur van 0,1 seconde levert deze bliksemschicht een energie van 500 kWh. Deze energie kan natuurlijk niet aan het bliksemvoetpunt afgetapt worden. Ze wordt in de atmosfeer gebracht en gaat op aan bliksem en donder (licht, verhitting, akoestische schokgolf) over de hele hoogte van de bliksemkolom, aan elektromagnetische golven en aan scheikundige omzettingen in de lucht. Stikstofoxiden en ozon, die in bliksemschichten geproduceerd worden, zijn een belangrijke bijdrage aan het broeikaseffect in de tropen.