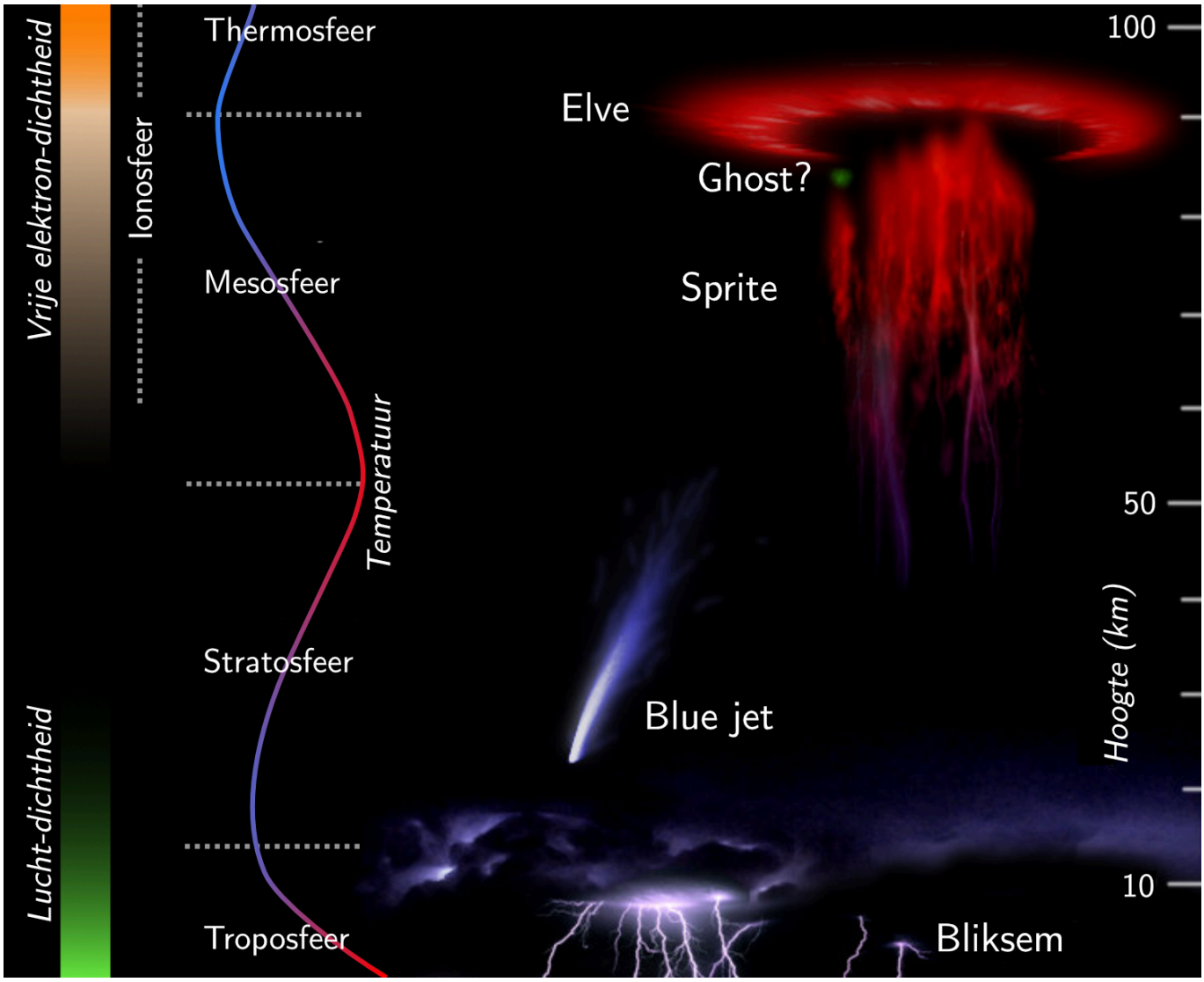
Bliksem boven de wolken?

Enkele weken geleden verdiepten we ons in het fenomeen bliksem. De pret houdt echter nog niet op bij ‘gewone’ bliksem, want bóven onweerswolken ontstaan ook lichtflitsen: rode vlammen, blauwe strepen of gigantische ringen. We hebben het hier over ‘Transient Luminous Events’.

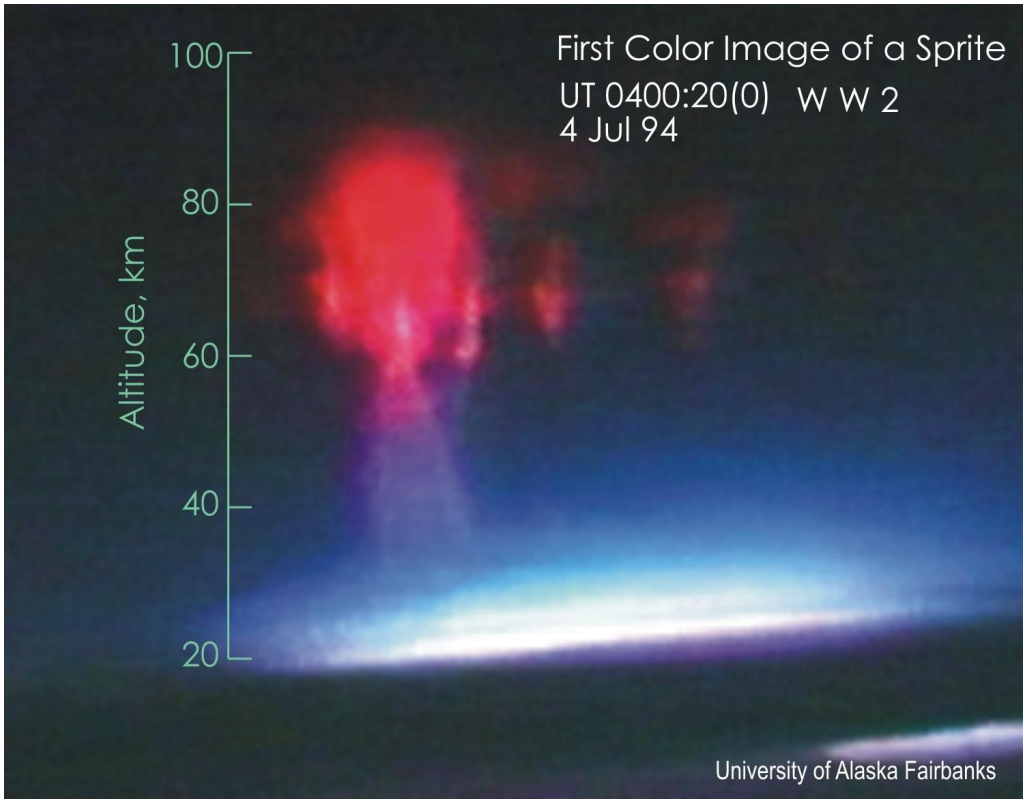


Afbeelding 1. Transient Luminous Events Links worden de verschillende lagen van de atmosfeer aangegeven, met (schematisch) hun temperatuur, luchtdichtheid en vrije-elektrondichtheid. Rechts wordt de hoogte boven het aardoppervlak aangegeven. Gebaseerd op een afbeelding van Abestrobi, aangepast door Jans Henke.

‘Transient Luminous Events’ (TLE’s) is Engels voor ‘voorbijgaande lichtgevende gebeurtenissen’. In het Nederlands worden zulke gebeurtenissen soms ‘stratosfeerontlading’ genoemd, hoewel ze ook boven de stratosfeer plaats kunnen vinden, en het technisch gezien niet allemaal ontladingen zijn. Bij gebrek aan een betere Nederlandse term voor deze fenomenen, evenals voor de namen van de verschillende soorten TLE’s die tot nu toe bekend zijn, zullen we in dit artikel de Engelse termen gebruiken. De onderzoekers die de namen voor TLE’s bedacht hebben, hebben er plezier mee gehad: naast *blue jets*, *sprites*, *elves* en *ghosts* bestaan er ook *trolls*, *halos*, *gnomes*, *pixies*... Wat deze termen precies betekenen zullen we gedurende dit artikel zien. Een versimpeld overzicht van verschillende soorten TLE’s is te zien in afbeelding 1. (Zie hier voor een uitgebreidere versie van dit plaatje.)

Moeilijk te pakken

TLE’s werden al in 1924 voorspeld door C.T.R. Wilson [1], maar onderzoek ernaar is pas echt op stoom gekomen sinds 1989. In dat jaar namen wetenschappers van de Universiteit van Minnesota namelijk de eerste foto van een TLE (een sprite), iets wat decennia van beschreven observaties bevestigde. Deze eerste belangrijke documentatie werd gevolgd door een vliegtuig-campagne van NASA en de Universiteit van Alaska in 1994, waarin de eerste kleurenfoto van een sprite werd genomen. Inmiddels zijn er al tienduizenden opnames van TLE’s gemaakt. De conclusie van een drie jaar lange survey van de FORMOSAT-2 satelliet was dat er wereldwijd maar liefst 57.000 TLE’s per dag plaatsvinden!



Afbeelding 2. De eerste kleurenfoto van een sprite Afbeelding: University of Alaska Fairbanks/NASA.

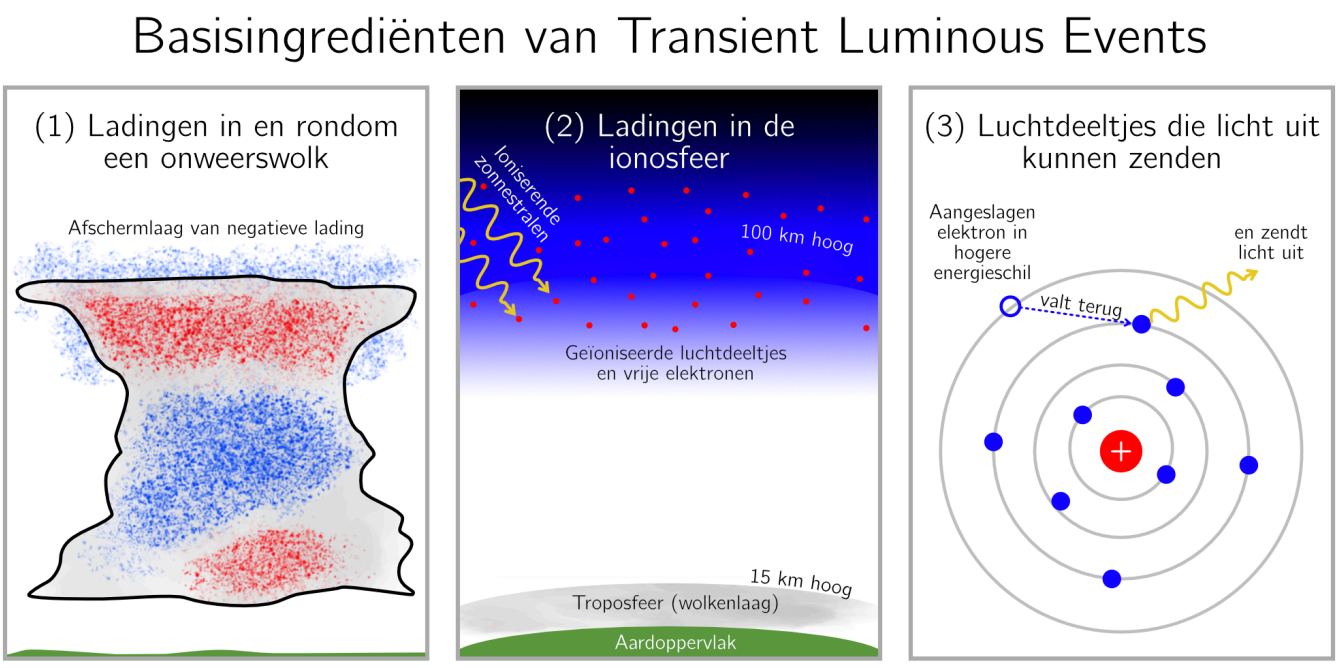
Omdat ze zo hoog in de atmosfeer plaatsvinden, bóven grote stormwolken die het zicht vanaf de grond eronder blokkeren, en omdat TLE's veel minder fel zijn dan bliksem en meestal maar milliseconden lang duren, zijn het niet de makkelijkste objecten om te bestuderen. De laatste veertig jaar van onderzoek naar TLE's heeft veel opgeleverd, en tot een bepaald punt begrijpen we ze al goed, maar er zijn veel open vragen. Wat weten we tot nu wel?

Basisingrediënten

Alle soorten TLE's zijn, direct of indirect, het resultaat van bliksem. Breed gezegd hebben TLE's drie basisingrediënten nodig. Laten we beginnen met (1) ladingen in en rondom een onweerswolk, iets wat we in het vorige artikel al besproken hebben. Grote wolken zitten vol met geladen deeltjes, als resultaat van botsingen tussen zware korrelhagel en kleine ijskristalletjes die meegesleurd worden door sterke luchtstromen. Zo laadt een grote onweerswolk op als een grote condensator, met sterke elektrische velden tot gevolg. Bliksem is in feite een kortsluiting van zo'n veld.

Belangrijk om hierbij te vermelden is dat de ladingen in de wolk ook ladingen uit de omgeving aantrekken. Hierdoor krijgt de (meestal) positief geladen bovenkant van een wolk vanzelf een dekentje van negatieve ladingen. Deze negatieve laag schermt de positieve ladingen bovenin de wolk af, net zoals elektronen in een atoom de positieve lading van de kern afschermen.

Basisingrediënt (2) zijn ladingen ver bóven de wolken, in de zogeheten *ionosfeer*. Dit deel van de atmosfeer wordt door uv- en röntgenstraling, afkomstig van de zon (en kosmische straling), geïoniseerd, en bestaat daardoor deels uit geïoniseerde luchtmoleculen en vrije elektronen. Door deze geladen deeltjes is dit deel van de atmosfeer goed in het geleiden van elektriciteit, net als de aarde zelf, maar in tegenstelling tot de lucht tussen de twee in. Overdag begint de ionosfeer rond 50 km hoog, 's nachts rond 90 km. Die variatie heeft natuurlijk alles te maken met de aanwezige hoeveelheid straling van de zon die de deeltjes ioniseert.



Afbeelding 3. De basisingrediënten voor een TLE.TLE's ontstaan nadat bliksem razendsnel een deel van een onweerswolk ontlaadt. Afbeelding: Jans Henke.

Als laatste moeten we (3) de lucht tussen de wolken en ionosfeer in niet vergeten. Hoewel de luchtdruk snel afneemt met de hoogte, is deze zone zeker niet leeg. Tot en met de ionosfeer bestaat de lucht voornamelijk uit stikstofmoleculen (N_2) en zuurstofmoleculen (O_2). Met de hoogte groeit de hoeveelheid ioniserende straling, waardoor er rond 100 km hoogte meer

geïoniseerde luchtmoleculen en zelfs losse zuurstofatomen (die eigenlijk het liefst een zuurstofmolecuul zouden willen vormen) voorkomen.

Deze luchtdeeltjes zijn belangrijk, want zij produceren het licht dat we herkennen als een TLE. Dat doen ze nadat ze in een aangeslagen toestand raken, waarbij een elektron in een hogere energieschil terecht komt. Bij het terugvallen van het elektron naar een lagere energieschil wordt de overbodige energie omgezet in licht – zie afbeelding 3 hierboven. (De weergave van het atoom in die afbeelding – het Bohrmodel – is natuurlijk maar schetsmatig; zie dit recente artikel over hou je een atoom éigenlijk zou moeten tekenen.) De golflengte van het uitgezonden licht – en dus de kleur van het licht – hangt af van het energieverschil tussen de twee energieschillen waar het aangeslagen elektron tussen springt, iets wat verschilt per soort molecuul, atoom of ion.

Het meeste licht van TLE's is afkomstig van (deels geïoniseerde) stikstofmoleculen, die rode en blauwe emissielijnen hebben. Bij hogere luchtdruk worden sommige emissies, zoals het rode licht van N_2(1P), onderdrukt door moleculaire botsingen, dus houdt je vooral blauw licht over. Bij waarneming op grotere afstand dan 50 km wordt het juist lastiger om blauw licht te kunnen detecteren, want dat verstrooit veel sneller dan rood licht. Dit is de reden dat de kleur van TLE's in het algemeen met de hoogte van blauw naar rood verandert.



Afbeelding 4. Een gigantic jet. Foto genomen van 4.200 meter hoog op Mauna Kea, Hawaii. Deze gigantic jet veranderd met de hoogte van kleur. Afbeelding: International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA/A. Smith.

Bennie and the Blue Jets

Genoeg over de basisingrediënten; welke soorten TLE's kennen we eigenlijk? Laten we beginnen met de TLE's die het meest op bliksem lijken: *blue jets*. Deze blauwe fontein-achtige ontladingen schieten omhoog uit de top van onweerswolken. De kleinste versie hiervan, *blue starters* geheten, komen maar enkele kilometers boven de wolk. Dit zijn eigenlijk 'mislukte' jets, omdat ze niet genoeg energie dragen om echt ver te komen. Een normale blue jet komt veel verder, tot zo'n 40 km hoog. Ze brengen positieve lading naar de stratosfeer en ontstaan in de wolktentop. *Gigantic jets* zijn de nog grotere broer van deze twee – die kunnen tot 80 km hoog komen (zie afbeelding 4). Hiermee maken ze een directe verbinding met de ionosfeer! Deze ontstaan echter middenin de wolk net als gewone bliksem, maar bouwen veel energie op en ontsnappen dan via de wolkentop. Doorgaans brengt een gigantic jet juist negatieve lading met zich mee.

Net als Elton John's 'sci-fi rock goddess' Bennie, kun je zeggen dat deze blue jets 'electric boots' hebben. Jets beginnen namelijk als een opwaartse bliksemschicht van de positieve lading bovenin de wolk in de richting van de negatieve lading die zich daaromheen heeft verzameld. Boven de wolk verandert de voorontlading van een smal plasmakanaal in een kegel van koud plasma (een 'streamer'). Voor de duidelijkheid: *plasma* is simpelweg een term voor een gas dat bestaat uit geladen deeltjes, dus ionen en elektronen. In een bliksemschicht is de plasmastroom heet, geconcentreerd en volledig geïoniseerd, maar in de ijlere stratosfeer en mesosfeer spreidt deze zich dus uit.

Video 1. Een blue jet, gefilmd vanuit de International Space Station.De Deense astronaut Andreas Mogensen filmde deze storm boven India in september 2015. Video: ESA.

Eigenlijk zijn deze streamers een soort grotere versie van Sint-Elmsvuur: het sterke elektrische veld afkomstig van de leader zendt een spray van elektronen uit, ook wel bekend als een corona of puntontlading. Deze elektronen geven stikstofmoleculen in de lucht een energieboost, die de moleculen weer kwijtraken door blauw licht (en uv-straling) uit te

zenden.

Sprites, halos, trolls en ghosts

Verder naar andere soorten TLE's. Wat C.T.R. Wilson in 1924 voorspelde was dat een grote ontlading van een wolk naar de grond (een blikseminslag) ook een secundaire ontlading hoog in de atmosfeer zou veroorzaken, tussen de wolk en de onderste laag van de ionosfeer. Nadat dit fenomeen op film werd vastgelegd kreeg het ook een naam: *sprite*. De man die deze term bedacht, Davis D. Sentman, vond de naam een goede reflectie van de 'sprookjesachtige eigenschappen' van deze lichtflitsen. De foto hieronder maakt wel duidelijk wat hij daarmee bedoelde. Er is geen eenduidige Nederlandse vertaling voor de term; 'sprite' kan verwijzen naar een elf, fee of luchtgeest – het personage van Ariel in Shakespeares romantische komedie *The Tempest* is er een voorbeeld van.



Afbeelding 5. Dansende sprites. Deze prachtige foto is genomen door 'Sprite Chaser' Paul M. Smith; © gebruikt met toestemming. Sprites vastleggen is een kunst, zoals duidelijk uit bijvoorbeeld deze video, of deze.

In tegenstelling tot blue jets, die beginnen als een voorontlading in een wolk, zweven sprites tientallen kilometers boven de wolk, vanaf ongeveer 40 km hoog. Ze ontstaan nadat een grote (positieve) blikseminslag razendsnel een groot deel van de lading in de wolk ontlaadt,

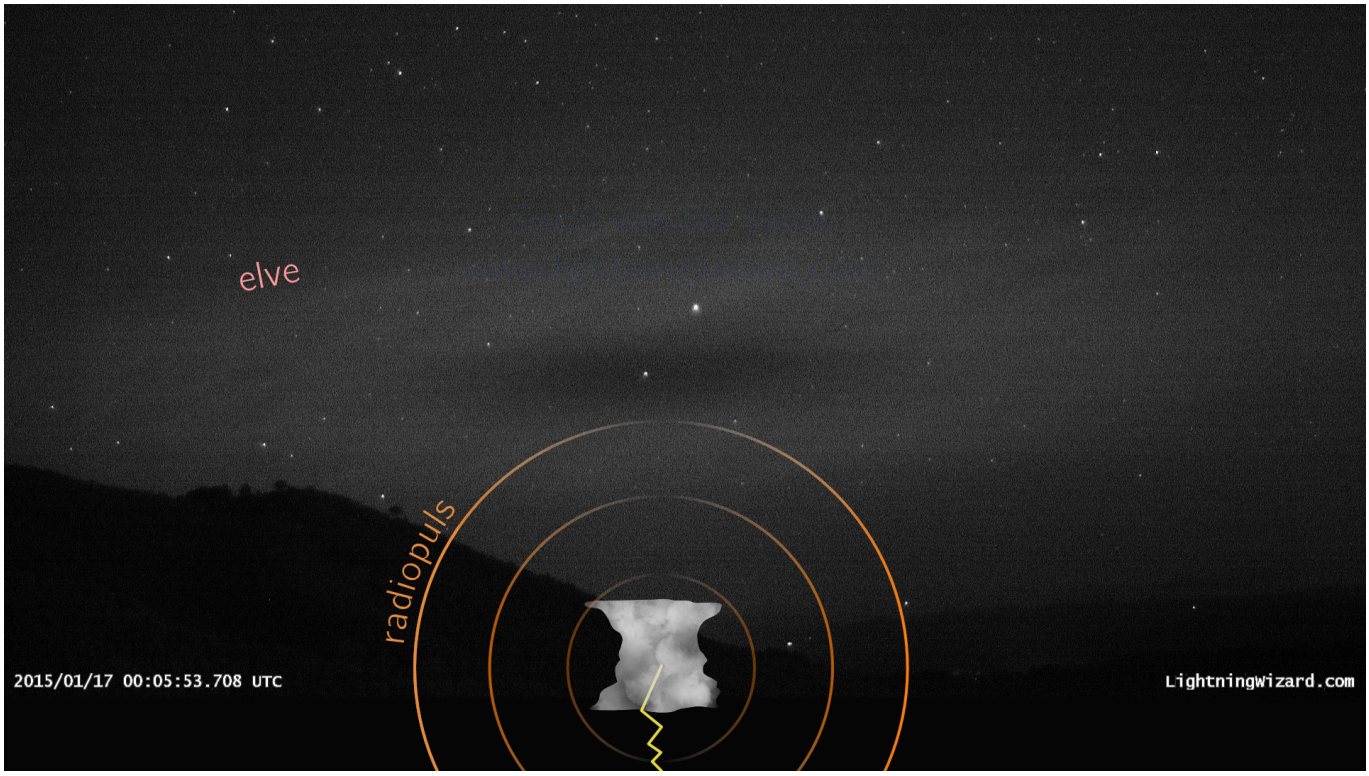
een proces waarbij de negatieve afschermlaag bovenin de wolk achterblijft. Door dit onbalans ontstaat er plotseling een elektrisch veld tussen de wolk en de ionosfeer, wat ontladingen op gang kan brengen. De sprite begint ergens tussen de top van de wolk en de ionosfeer in, en groeit vanuit daar omhoog en omlaag.

De vorm van sprites kan variëren, met benamingen als ‘jellyfish’ (kwal), ‘column’ (colonne) of ‘carrot’ (wortel). Meestal komen ze in groepen voor, waarbij een enkele sprite tientallen kilometers lang en breed kan zijn. Het bovenste gedeelte is vaak omringd door een uitgesmeerde rode gloed – een *halo* – hoewel losstaande halos én sprites zonder halo ook voorkomen. In de gebieden onderaan grote sprites (30-50 km hoog) vormen ook wel eens rood-gloeiende bollen, die daarna deels richting de wolkentop leeg lijken te lopen, terwijl een ander deel omhoog kruipt . Dit fenomeen heeft de speelse naam *troll* gekregen, een afkorting voor ‘Transient Red Optical Luminous Lineament’. Zo’n troll is waarschijnlijk een derde ontlading, dus ná de blikseminslag en ná de sprite, voortkomend uit het elektrische veld tussen een sprite en een wolk in.

In 2019 filmden de professionele stormjagers Hank Schyma, Paul M. Smith en Scott Curren per ongeluk een nieuwe soort TLE. In hun beelden lijkt het erop dat er aan het boveneinde van sprites een groene gloed ontstaat, die na enkele milliseconden weer verdwijnt. Hierover is nog weinig bekend, maar er wordt gedacht dat het licht afkomstig is van aangeslagen zuurstofatomen, die groen licht kunnen produceren. (Noorderlicht is om dezelfde reden vaak groen.) Niet afwachtend op sluitend bewijs hiervoor is die herkomst al meegenomen in hun naam: *ghosts*, een wat vrije afkorting voor ‘Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops’.

Elves

Als laatste heb je *elves*, een ‘afkorting’ voor ‘Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources’. Zoals die naam beschrijft, zijn elves het resultaat van de sterke radiopuls geproduceerd door een grote bliksemontlading, van de wolk naar de grond of binnen de wolk. Groot betekent hier dat de ontlading meer dan 100 kiloampère draagt, tien keer meer dan een ‘normale’ inslag. Toch komen elves vaak voor: wereldwijd worden er naar schatting tenminste 3 per minuut geproduceerd.



Afbeelding 6. Elves worden veroorzaakt door een sterke radiopuls afkomstig van een blikseminslag.Foto: Oscar van der Velde © (gebruikt met toestemming), toevoegingen van Jans Henke.

De radiopuls versnelt vrije elektronen in de ionosfeer, die tegen luchtmoleculen botsen. Het rode en uv-licht dat hierop volgt is voornamelijk afkomstig van aangeslagen stikstofmoleculen. Elves zien eruit as een razendsnel expanderende gloeiende ring in de onderste laag van de ionosfeer. Ze kunnen breedtes van 400 km bereiken, maar verschijnen en verdwijnen zó snel, binnen 1 ms, dat ze niet met het blote oog gezien kunnen worden. Met snelle camera's worden ze wel eens vastgelegd, en zien ze er uit als een uitgesmeerde rode donut. De uv-straling die de elves uitzenden kunnen we ook meten, met bijvoorbeeld satellieten.

Nog lang niet klaar

Wat ik hierboven heb beschreven, is bijna alles wat we tot nu toe weten en begrijpen van TLE's. Er zijn nog enkele soorten die nog niet genoemd zijn. *Gnomes* (kabouters) en *pixies* (elfjes) zijn korte lichtflitsen rond de doorschietende top van een onweerswolk, waarin sterke opwaartse luchtstromen vochtige lucht boven het aambeeld van de wolk duwen. Naast al deze sprookjesachtige wezens bestaan er mogelijk ook 'tijgers' in de lucht: een campagne van de noodlottige Columbia space shuttle mat in 2003 een 'Transient Ionospheric Glow

Emission in Red', oftewel *tiger*. Deze rode lichtflits ontstond pas 0,23 seconden na, en meer dan 1000 km verwijderd van de dichtstbijzijnde bliksemflits. De oorsprong hiervan is nog steeds onduidelijk.

Al met al kunnen we zeggen dat we, van alle TLE's, sprites en elves het beste begrijpen. Hun vorming kunnen we overigens ook al redelijk goed nabootsen met computermodellen. Huidig onderzoek richt zich op vragen als: Wat gebeurt er precies nadat een TLE eenmaal is ontstaan? Welke eigenschappen van verschillende soorten bliksem bepalen de eigenschappen van de resulterende sprites of jets? Welke omstandigheden zijn er nodig voor gigantic jets en trolls? Wat is de invloed van de 'achtergrond', zoals variaties in de chemische samenstelling van de atmosfeer, of zelfs zwaartekrachtsgolven?

Wetenschappers en stormjagers zijn hard aan het werk om de hiaten in onze kennis van TLE's op te vullen. Wie weet wat er nog meer schuil gaat hoog boven de wolken! Terwijl we wachten op zulke nieuwe resultaten, volgt er in deze serie nog één artikel, waarin we ons verdiepen in de werking van het grootste elektrische circuit op aarde.

---

[1] Een leuk weetje: Wilson werd in 1927 beloond met de Nobelprijs voor de natuurkunde voor het ontwerpen van de eerste wolkenkamer (ook wel bekend als nevelvat), meetapparatuur waar we het in het vorige artikel over hebben gehad, en die ook tot vele belangrijke ontdekkingen in de deeltjesfysica heeft geleid .

Dank aan 'Lightning Wizard' Oscar van der Velde (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona) voor zijn duidelijke uitleg en hulp bij het schrijven van dit artikel. Ook dank aan 'Sprite Chaser' Paul M. Smith voor het gebruik van zijn foto.