

Feer og elver danser med Thor på nattehimmelen

Thomas Højgaard Allin, *Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, og Sol-Jord Fysik Sektionen, Danmarks Meteorologiske Institut.*

Den videnskabelige interesse for elektriske udladninger i atmosfæren har indtil for ca. 10 år siden været koncentreret om lyn og følgerne af disse. Det, vi ser som et lyn, er en kortvarig, men meget stærk elektrisk strøm (typisk 10–100 kA), som forbinder forskellige områder i tordenskyer eller tordenskyen med jorden. De elektrisk ladede områder af tordenskyen, hvorfra lynet udspringer, har deres oprindelse i ladningsadskillelende mekanismer i den del af skyen, hvor kraftige op- og nedadrettede luftstrømme hersker; skyens såkaldt konvektive kerne. Før, under og efter lynudladningen er en konsekvens heraf altså ændringen af det elektriske feltbillede i omegnen af tordenvejret. En betydelig del af forskningen omkring lyn har handlet om at begrænse skader på bygninger og elektriske installationer, som har vist sig særligt udsatte for lynnedslag, samt at mindske risikoen for tab af menneskeliv som følge af lynnedslag. I forsikringsøjemed er nøjagtig lokalisering af lynnedslag vigtig, hvorfor man i mange lande opererer netværk af elektriske feltmålere, som kan registrere tidspunktet for ankomsten af den elektromagnetiske puls fra lynudladninger.

Det måske vigtigste begreb for forståelsen af lyn er *streamere*, som menes at danne elektrisk ledende kanaler mellem områder med forskelligt potential umiddelbart før selve lynudladningen. Ved en streamer forstås udbredelsen af en ledende kanal af *plasma*, dvs. delvis ioniseret gas, som er karakteriseret ved at have meget større longitudinale end laterale dimensioner. På grund af deres ledningsevne forstyrres det elektriske felt af udbredelsen af streamere, og feltet er meget stærkt ved spidsen af streamerne, hvilket kan siges at være drivkraften til deres udbredelse. Fortolkningen af lyn som en konsekvens af lange streamere i områder mellem tordenskyer og jorden er i god overensstemmelse med eksperimenter, selvom der endnu hersker nogen tvivl om de mekanismer, der sætter de enkelte streamere i gang. Se [1] og [2] for en detaljeret diskussion af elektriske udladninger i gasser.

Lyn er måske ikke den eneste elektriske udladning over relativt store afstande i atmosfæren, hvis vi ved udladning forstår udligningen af potentialforskelle ved hjælp af en transient (varighed mindre end 1 ms) strøm, som giver anledning til elektromagnetiske bølger i et bredt frekvensområde. For relativt nylig er der udført eksperimenter omkring den elektromagnetiske signatur af lyn, som viser at der forekommer sådanne transiente strømme i den øvre atmosfære (i højder over 20 km) [3]. At der over tordenvejr er observeret kraftig ionisering (10^4 – 10^5 gange baggrunds niveauet) har fået nogle til at



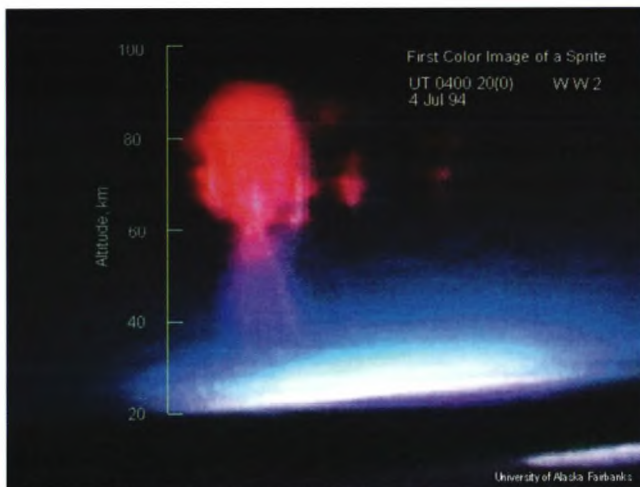
Figur 1. Lynudladning til træ. Læg mærke til den svagt lysende kanal der udgår fra masten nederst til venstre. Kilde: National Geographic.

foreslå, at udladninger også finder sted i disse højder.

Lysfænomener i den øvre atmosfære

Bortset fra kuglelyn blev andre typer af atmosfæriske udladninger ikke tildelt megen opmærksomhed før sidst i det 20. århundrede. Selvom deres eksistens var forudsagt af den britiske fysiker C. T. R. Wilson i 1925, og givetvis observeret endnu tidligere, var det ikke før end 1989 at forekomsten af kortvarige, svage lysglimt – i dag kaldet *Red Sprites* (på dansk: Røde Feer; herefter blot *sprites*) – blev dokumenteret af Franz et al. [4]. Deres opdagelse satte gang i et væld af aktiviteter, da man ikke kunne finde nogen antropogenisk forklaring på deres observationer. I årene der fulgte, var sprites fokus for flere jord- og luftbårne kampagner, og sågar NASAs rumfærger blev taget i brug for at kortlægge forekomsten af sprites systematisk. Det blev dog kun til sporadiske observationer af sprites fra rummet, primært over de tropiske egne, hvor tordenaktiviteten er størst. I 1994 blev det første farvebillede af sprites taget (se

figur 2), og i de efterfølgende år skærpedes interessen om måling af energiforhold i de lysende områder ved hjælp af spektra opnået via fotometri.



Figur 2. Første farvebillede af sprites, taget fra et højtgående fly i 1994. Gengivet med tilladelse fra Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks.

Sprites er kun under favorable forhold synlige for det menneskelige øje, da hovedparten af emissionerne fra sprites ligger i det nær-infrarøde område (fra 650–800 nm), hvor øjets følsomhedskurve klinger af (se figur 3 for et af de første observerede spektra). De første deciderede kampagner fastslog, at sprites forekommer i nær tidslig sammenhæng med såkaldte positive sky-til-jord lyn (+CG), og altså ikke med lyn af den omvendte polaritet¹; en observation, som kun er blevet bekræftet sidenhen. I 1992 rapporteredes forekomsten af *Elves*, som er meget kortvarige og svage lysglimt i ca. 90 km's højde, og som af og til ses i nær sammenhæng med sprites. Også disse er tæt knyttet til lynaktiviteten i tordenskyer, men forekommer tilsyneladende med CG-udladninger af begge polariteter.

Under samme (luftbårne) kampagne som resulterede i farvebilledet herover, opdagedes yderligere de såkaldte *Blue jets*, som er blågrønne kegler af lys, der udgår fra toppen af tordenvejr og op til ca. 40 km's højde med en hastighed på ca. 100 km/s. Blue jets er vanskelige at observere fra jorden på grund af Rayleigh-spredning gennem den lange atmosfæriske vej til et kamera ved jorden, så videooptagelserne præsenteret i [5] udgør de hidtil eneste systematiske observationer af Blue Jets. Hvor man ikke i alle tilfælde observerer lys fra sprites helt ned til skyhøjde, er der for Blue Jets ingen tvivl om at de hidrører fra en elektrisk aktiv del af tordenvejret, nemlig oftest fra toppen af den konvektive kerne. Tabel 1 sammenfatter de fysiske karakteristika for sprites, blue jets og elves.

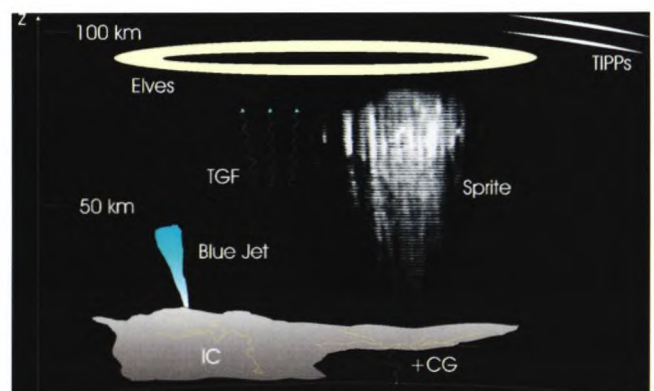
De ovennævnte udgør kun den mere eller mindre synlige del af den muligvis endnu ufuldstændige kendte

gruppe af tordenvejrrelaterede fænomener. Kun kort tid efter dokumentationen af sprites observeredes intense udbrud af røntgenstråling fra atmosfæren af instrumenter ombord på NASAs nyligt afbrændte Compton Gamma Ray Observatory, og disse blev hurtigt forbundet med områder med tordenaktivitet. Varigheden af røntgen-pulserne blev estimeret til nogle få ms, og spektret af disse *Terrestrial Gamma-Ray Flashes* (TGF'er) blev analyseret og fundet konsistent med bremsestråling fra 1 MeV-elektroner. For at nå op til satellithøjde måtte kilden ligge over 30 km, hvorfor man hurtigt forbandt TGF'er med sprites; der er dog endnu ikke lavet samtidige observationer med røntgen- og optiske kameraer til at bekræfte deres sammenhæng.

	Sprites	Blue jets	Elves
Højde, km	40–90	20–40	80–100
Lateral udstrækning, km	25–50	3	100–300
Lysstyrke, kR	50–100	10–500	> 1000
Varighed, ms	5–500	250	< 1
Lyn	+CG	IC	±CG

Tabel 1. Resume af fysiske karakteristika af sprites, blue jets og elves. IC betegner sky-til-sky udladninger (intra-cloud). 1 kR er ækvivalent til en flux på 10^6 fotoner per sekund per m^2 overfladeareal. Sprites er i den henseende at sammenligne med middelstærkt nordlys.

I 1995 rapporteredes ydermere de såkaldte Trans-Ionospheric Pulse Pairs (TIPPs), som er to på hinanden følgende, næsten identiske radio-pulser, kun adskilt ca. 10–100 μs , og kraftige nok til at gennemtrænge den elektrisk ledende ionosfære. Ensartetheden af pulserne antyder, at den sidste er en refleksion af den første, som givetvis er opstået ved kraftige IC lynudladninger. Figur 3 sammenfatter de indtil nu kendte fænomener, der knytter sig tidsligt og rumligt til tordenvejr.



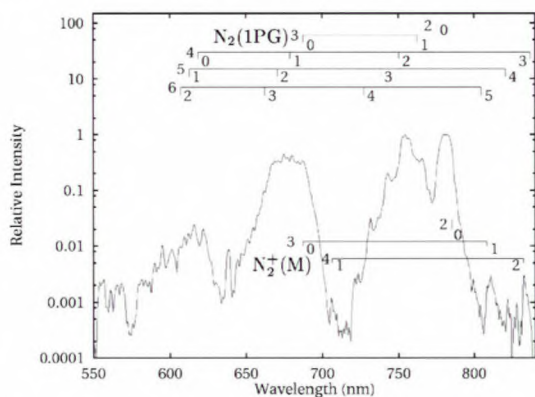
Figur 3. Sammenfatning af de nyligt opdagede fænomener knyttet til tordenvejr nævnt herover.

¹+CG betegner, at lynstrømmen overfører positiv ladning fra skyen til jorden (Cloud to Ground). Den modsatte variant betegnes -CG. Sædvanligvis udgør sky-til-jord udladninger ca. 25% af den samlede lynaktivitet, og heraf er kun ca. 10% af +CG varianten.

Mere om sprites

De første studier af sprites havde som formål at kortlægge deres hyppighed, størrelse, lysstyrke og spektra. Et af de første karaktertræk, man fandt, var at sprites i over 95% af tilfældene forekommer i tidlig sammenhæng med +CG lynudladninger, som gerne udviser såkaldte *ELF slow tails*. Disse "langsomme haler" på +CG'ens elektromagnetiske signatur er udtryk for relativt langvarige strømme (flere ms) i lynkanalen, og dette er igen udtryk for at ladningstransporten fra sky til jord er større end for normale lyn. Hvor et almindeligt -CG lyn overfører 10–20 C i løbet af højest 1 ms, er der observeret +CG-udladninger som har overført over 500 C i løbet af 2–3 ms. Dette peger på, at der skal meget kraftige lynudladninger til for at drive de processer, der frembringer de optiske emissioner, man ser som sprites [6]. +CG'er udspringer primært fra de meteorologisk set mindre aktive dele af tordenskyen, hvor de lodrette luftstrømme er ophørt, og nedbøren er relativt stille.

Langt den største del af observationer af sprites er gjort i USA, hvor tordenskyer let opnår vandrette dimensioner på flere hundrede km. Ofte ses sprites at vandre hen over horisonten, og aktiviteten kan flytte sig op mod 100 km på 1/100 s.



Figur 4. Et af de først opnåede sprite spektra. Indikeret er de tilstande, der ved henfald udsender lys ved en bestemt bølgelængde. $N_2^+(M)$ betegner Meinel-båndet; tallene angiver for hver tilstand de elektroniske og vibrationelle kvantetal for tilstandene.

Et typisk sprite spektrum er gengivet i figur 4. Hovedparten af emissionerne udgøres af overgange i N_2 i det nær-infrarøde område, som kan induceres af elektroner med energi på kun 8.3 eV, mens intensiteten af overgange i N_2^+ er omtrent en størrelsesorden lavere. Troværdige spektra af sprites er svært opnåelige, specielt for kortere bølgelængder, hvor Rayleigh-spredning på grund af observationsgeometrien gør sig kraftigt gældende. Derfor har der været nogen diskussion om hvorvidt den tilsyneladende mangel på observationer af N_2^+ -overgange kan tages som tegn på, at sprites er et relativt lavenergetisk fænomen. Levetiden af den første exciterede N_2^+ tilstand, som ville forventes at give sig til kende i sprites, er ca. 14 μ s, hvilket gør at den undertrykkes kollisionelt i højder på mindre end

ca. 90 km. Den korrekte fortolkning af de målte spektra er naturligvis vigtig i forbindelse med tilpasning af teoretiske modeller for sprites. Nyere eksperimenter har yderligere påvist spektrale forskelle mellem sprites med forskelligt udseende, hvilket tyder på at processerne, der forårsager emissionerne, ikke nødvendigvis er ens fra gang til gang.

En sammenligning af sprites med andre udladninger kom for alvor på tale, da man foretog de første samtidige målinger af lavfrekvent (VLF) elektromagnetisk (EM) stråling med bredbånds-modtagere og lysstyrken af sprites med fotometre. Det viste sig, at den primære puls i de elektriske og magnetiske felter på grund af lynudladninger følges op af en yderligere puls, når lynet akkompagneres af en sprite. Dette signal falder tidsligt nøjagtigt sammen med lysstyrken i den observerede sprite, hvorfra man har konkluderet, at en strøm på 1–5 kA løber i de lysende dele af visse sprites [7].

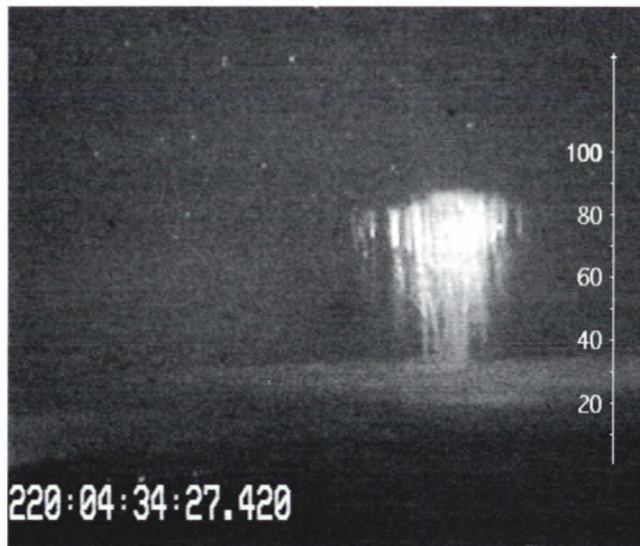
Kampagnen "Sprite 99"

I juli og august sidste år deltog jeg på vegne af DMI i kampagnen Sprite 99, som havde til formål at lave stereoskopiske observationer af sprites i høj opløsning. Gennem den 1 måned lange periode optoges sprites fra Kitt Peak i det sydlige Arizona og Langmuir-laboratoriet i New Mexico, med specielt forstærkede CCD kameraer med både brede (ca. 20×15 grader) og smalle synsfelter (4×3 grader). Speciel var aftenen efter d. 7 august 1999, hvor der i tidsrummet mellem kl. 3 og kl. 5 UTC (20–22 lokal tid) blev observeret 36 sprites over et stort tordenvejrskompleks over det nordlige Mexico. Heraf blev flere opfanget i de kameraer, der var udstyret med telelinse (300 mm focal længde), og rumlige strukturer ned til 80 m i udstrækning kunne opløses og senere positioneres via triangulation (se figur 5). Yderligere optoges kontinuerligt ELF perturbationer på audio-kanalen af de videobånd, som optoges ved Langmuir-laboratoriet.

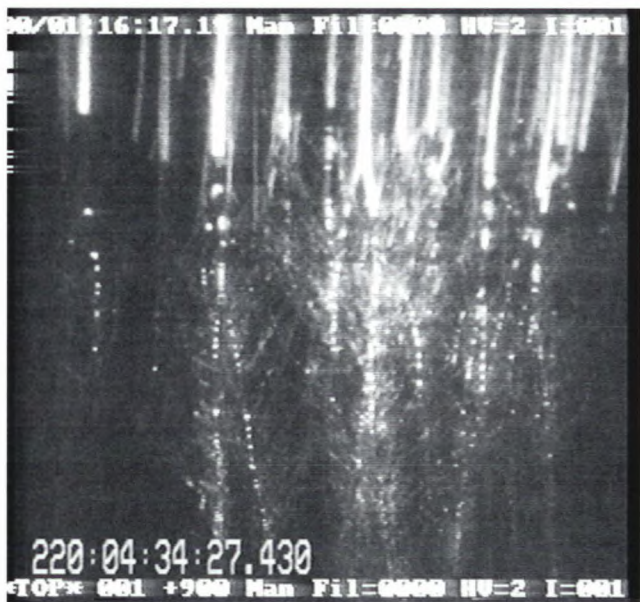
Med almindelig triangulation kan positionen og størrelsen af forskellige strukturer genkendt i både billeder fra Kitt Peak og Langmuir Laboratoriet bestemmes. Interessant i sammenhæng med udladninger er imidlertid også den indbyrdes geometriske orientering af forskellige strukturer. Den (Γ -formede nedadrettede struktur til venstre i figur 5b ser ud til at danne basis for udspringet af andre og tyndere filament. Hvis disse er forgreninger af en elektrisk ledende kanal, vil deres orientering muligvis kunne give indblik i geometrien af det lokale elektriske felt. Et delvist indblik heri haves måske allerede, idet man med kendskabet til amplituden af den sprite-associerede ELF puls har et kvalificeret bud på den totale strøm i den observerede sprite. Hvis det også antages, at kun de lysende dele af en sprite bærer strømmen, kan man ved at bestemme det volumen, som lyser op, give et bud på strømtætheden i de lysende områder.

Man skal imidlertid huske på, at integrationstiden

af et videobillede som i figur 5 er ca. 33 ms, hvilket ikke tillader god tidslig opløsning af udviklingen af de enkelte delstrukturer i sprites. Til det formål er det nødvendigt med kameraer, der er i stand til at tage flere end 1000 billeder per sekund.



Figur 5a. Sprite set fra Kitt Peak, aften efter d. 7/8 1999. Højdeskalaen (i km) til højre er konstrueret ved hjælp af positionen af det næsten samtidige +CG lyn, registreret af NLDN. Tidstemplet nederst er UT, afledt fra et video-processeret GPS signal.



Figur 5b. Samme sprite som i (a), set med telelinse med synsfelt på ca. 4×3 grader. Læg især mærke til den diskrete struktur af emissionerne, som ikke er specielt tydelig i (a), og især de perleagtige emissioner i de nedre dele.

Modeller for frembringelse af sprites

Den nære forbindelse til +CG udladninger giver det første fingerpeg om, at processerne, der frembringer

²Kvasi-elektrostatisk vil sige, at retardationen af felterne ignoreres (uendelig lyshastighed). For afstande op til 100 km og på tidsskalaer over 1 ms er dette en rimelig god approksimation.

emissionerne i sprites er drevet af elektromagnetiske felter fra tordenskyen. I et typisk tordenvejr forekommer lyn med en rate på 1–10 udladninger per minut, hvorfor vi nødvendigvis har en tidsskala for opladning af tordenvejret på $\tau_s \approx 10$ s. Ledningsevnen af atmosfærisk luft er i en simpel model eksponentielt voksende med højden, altså

$$\sigma(z) = \sigma_0 \exp(z/H) \quad (1)$$

med $H=7$ km. Dermed bliver den tid, hvorpå Ohm'ske strømme i atmosfæren kan eliminere elektriske felter (relaxationstiden), givet ved

$$\tau_r(z) = \tau_{r0} \exp(-z/H) \quad (2)$$

hvor $\tau_r(z=0) = \epsilon_0/\sigma_0 \approx 900$ s. I ca. 30 km's højde er relaxationstiden aftaget til 10 s, og i højder herover kan polarisationsstrømme på tidsskalaen for opladning af tordenvejret skabe en afskærmende polarisationsladning af den primært dipol-agtige ladningsfordeling i tordenskyen.

Afladningen af tordenskyen sker imidlertid på en helt anderledes, kort tidsskala. For +CG-tilfældet sker afladningen gennem lynkanalen på højst 1–5 ms, hvorved ladningsmængder på op til 2–300 C elimineres. Antages ledningsevnen at være upåvirket af polarisationsladningen, er det først i højder omkring 90 km at de transiente felter på grund af lynudladningen forsvinder på samme tidsskala som lynstrømmen. Der er altså fra skyhøjde og op til bunden af ionosfæren mulighed for at opretholde elektrostatiske felter på tidsskalaer sammenlignelige med varigheden af de optiske emissioner i sprites.

Som udførligt beskrevet i [1] er +CG-udladningen imidlertid en todelt proces. Når den ledende kanal har forbundet det store reservoir af positiv ladning i skyen med jorden, opstår først en meget kortvarig (< 0.1 ms) retur-strøm i kanalen, som detekteres af lynpejlings-systemer. Derefter kan der fortsat løbe strømme i kanalen, så et område af skyen aflades på typisk 1–5 ms, og en kvasi-elektrostatisk² model er efter returstrømmen rimelig nøjagtig i beskrivelsen af de elektriske felter over tordenskyen. Det kvasi-elektrostatiske felt over tordenskyen kan relativt let modelleres, hvis man antager en simpel model af ladningsfordelingen i tordenskyen. Til sammenligning er det imidlertid nyttigt at betragte en af de processer, som er foreslået for frembringelsen af optiske emissioner i sprites.

Runaway air breakdown (RB) [8] er den engelske betegnelse for en kaskadeprocess, hvorved relativt få højenergetiske elektroner i tilstedeværelsen af et passende elektrisk felt kan igangsætte en type elektrisk nedbrud af en gas. Princippet for RB er det samme som for ordinært elektrisk gennemslag – mellem kollisioner øges elektronernes kinetiske energi mere, end de taber ved disse, ligesom andre elektroner frigøres og accelereres i det elektriske felt. Forskellen til RB er dog, at

de første elektroner i RB-kaskaden allerede har energier på flere MeV – eksempelvis som resultatet af den kosmiske strålings vekselvirkning med atmosfæren. For at RB kan forekomme, må det elektriske felt være i stand til at opretholde og multiplicere antallet af MeV-elektroner, hvilket kan siges at definere en kritisk elektrisk feltstørrelse for RB. Midlet over mange kollisioner oplever en MeV-elektron en dynamisk friktion (energitab per længde), som kan skrives analytisk som

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{mv^2} N Z_2 f(\gamma) \quad (3)$$

med

$$f(\gamma) = \ln \frac{E}{I} \sqrt{\frac{\gamma+1}{2}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\gamma^2} - \frac{2\gamma-1}{\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{8} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

Heri repræsenterer γ Lorentz-faktoren, I det typiske ioniseringspotential for atmosfæren, N den atmosfæriske tæthed, Z middelladningstallet (~ 14.5), m elektronens hvilemasse og $E = \gamma mc^2$ dens energi. Den dynamiske friktion udviser et markant minimum ved elektronenergier på ca. 1 MeV ($\gamma = \gamma_{min} = 3.8$), og en tilsvarende kritiske elektrisk feltstørrelse E_c for RB-kaskaden findes af

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} = -eE_c - \left(v \frac{dE}{dx} \right) \Big|_{\gamma=\gamma_{min}} &= 0 \\ \Rightarrow E_c \approx 281 \frac{kV}{m} \frac{P(z)}{P_0} \end{aligned} \quad (5)$$

hvor P_0 er trykket ved jordoverfladen. Til sammenligning sker ordinært atmosfærisk nedbrud først ved $E_0 = 3200$ kV/m.

RB kræver lange skalalængder sammenlignet med ordinært atmosfærisk nedbrud, idet kollisioner som resulterer i relativt store energitab for en MeV-elektron er meget sjældnere end dem, som resulterer i små energitab (få keV). Sidstnævnte er dog vigtige for frembringelsen af optiske emissioner, idet frembringelsen af eksempelvis N_2 's laveste exiterede tilstand kun kræver elektroner med kinetisk energi på ca. 8 eV. Den relativt fåtallige (men dog eksponentielt voksende) skare af MeV-elektroner vil således trække et synligt spor i atmosfæren, ligesom man fra oven vil kunne se et glimt af hård røntgenstråling (bremsestråling) fra denne. At elektriske felter fra en +CG udladning i en tordensky kan trigge RB-nedbrud er vist i figur 6.

Som en yderligere fjer i hatten til RB-teorier for sprites tæller, at de favoriserer +CG-udladninger, der producerer nedadrettede elektriske felter over tordenskyer – altså felter rettet langs gradienten af den atmosfæriske tæthed. Til gengæld synes finstrukturen i sprites ikke umiddelbart at være inkluderet i RB-teorier,

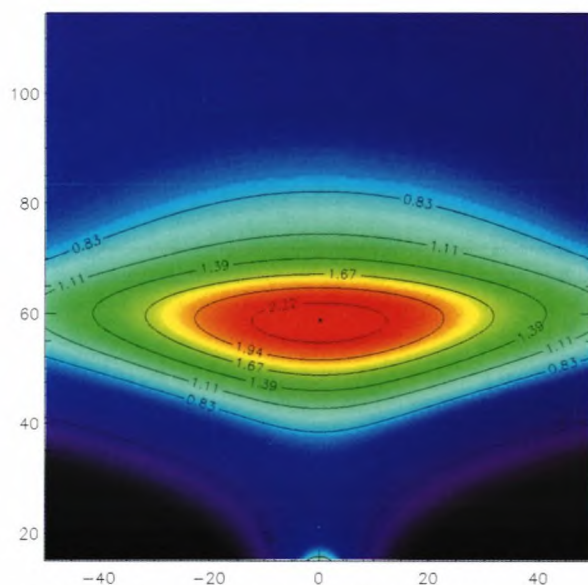
ligesom den tilsyneladende mangel på linjer fra N_2^+ i sprite-spektra skal forklares.

Kvasi-elektrostatisk opvarmning og ionisering [9] betegner en anden tænkt proces for sprites, hvori frie elektroner med lav energi (nogle få eV) accelereres i det elektriske felt fra +CG-udladningen og producerer optiske emissioner ved kollisioner med N_2 , samt en lav grad af ionisering. Igen er her tale om en proces der ikke umiddelbart indeholder den faktiske form af emissionerne i sprites, men som gengiver visse andre aspekter som f.eks. muligheden for at der kan løbe strømme i sprites og den primært røde farve af disse.

Finstruktur af sprites – overdimensionerede lyn?

Forekomsten af velafgrænsede og relativt smalle strukturer i sprites som set på figur 5b, set i sammenhæng med de strømme, man har bevis for løber i sprites er måske et synligt tegn på paralleller mellem lyn og sprites. Af og til forekommer sprites og elves (se ovenfor) i nær sammenhæng, hvilket tyder på at den første elektromagnetiske puls fra returstrømme i lyn også kan have betydning for udviklingen af sprites. Den elektromagnetiske puls, der dannes af lyn, er sammensat af bidrag fra de enkelte dele af lynkanalen, udsendt til forskellige tidspunkter under returstrømmen. Mens lynet i figur 1 ikke er specielt kringlet, menes de lyn, som igangsætter sprites at være af en anderledes, kompliceret struktur med mange vandrette forgreninger i skyen. Strålingsfeltet der udbreder sig fra sådanne lyn kan have noder og anti-noder over skyen; altså punkter hvor delbidragene interfererer konstruktivt eller destruktivt. Afstanden over skyen gør det imidlertid tvivlsomt om årsagen til finstrukturen findes her – der burde i så fald også være observeret finstruktur i Elves, hvilket ikke er tilfældet.

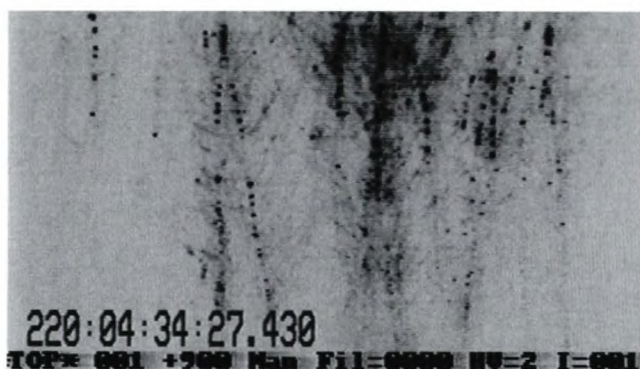
Måske findes forklaringen i en nyere teori for sprites, som knytter emissionerne til lange streamere – eksempelvis de øvre dele af figur 5b. Streamere i atmosfæren kan starte, hvor der findes små inhomogeniteter i elektrontætheden. For at igangsætte en streamer må det elektriske felt overstige det ordinære kritiske felt for gennembrud, hvilket for højder på ca. 80 km kan opnås af EMP'en fra +CG udladningen. Herefter kan streamerne udbrede sig nedefter, i retningen af det kvasistatiske elektriske felt. Overgangen til den endnu mere diskrete struktur nederst i figur 5b kan skyldes flere ting, men forgreningerne og forekomsten af de lysende perler på linje taler for en underliggende, ledende struktur. I figur 7 er det inverterede videobillede af den samme sprite vist. Man fornemmer herved bedre, at der udgår tynde filamenter fra den Λ -formede struktur, hvilket dog først kan bekræftes ved triangulation. Forekomsten af perle-linjerne direkte under de tykke kolonner taler også i sig selv for en elektrisk sammenhæng mellem disse.



Figur 6. Forholdet mellem det elektriske felt og det kritiske felt E_c for RB-nedbrud, under en modelleret +CG-udladning, hvor 100 C elimineres på 3 ms fra 8 km's højde.

Konklusion

Skønt først dokumenteret for ca. 11 år siden, er omfanget af litteratur om sprites, elves og blue jets allerede meget stort, ligesom kvaliteten af observationerne bliver fortsat bedre. Hvis sprites virkelig er udtryk for en udladningsproces i stil med lyn, har man med deres opdagelse fået nye muligheder for at studere sådanne processer over helt andre skalaer og tætheder, end tilfældet har været det hidtil. Skønt sprites rent faktisk kan ses med det blotte øje, og i få tilfælde er observeret med almindelige videokameraer, er vigtige fysiske parametre (såsom deres sande spektrum) fortsat dårligt kendte. Der er imidlertid nye tiltag på vej for at råde bod på dette, såsom den taiwanesiske satellit Rocsat-2, ligesom der årligt afholdes jordbaserede observationskampagner i USA.



Figur 7. Nederste portion af figur 5b, inverteret for at fremhæve de svagt lysende filamenter og forgreninger.

Sprites er nu observeret over USA, Japan, Aus-

tralien, Sydamerika og for ganske nylig over det sydlige Europa. Der er altså tale om et globalt forekommende fænomen, over tordenvejr som er i stand til at produce store +CG-udladninger. Endnu er effekterne af sprites i de lag, hvori de forekommer, ikke kendte, men påvirkning af atmosfærens kemi er en mulighed - og voluminet af sprites taget i betragtning, måske slet ikke uvæsentlig. Andre perspektiver er forekomsten af elektriske udladninger på andre planeter, der afhængig af planetatmosfærens tykkelse og sammensætning kan tænkes at antage andre former, end vi kender dem fra jorden.

Referencer:

- [1] Martin A. Uman (1984) "Lightning", Dover.
- [2] Yuri P. Raizer (1997) "Gas discharge physics", Springer.
- [3] R. A. Roussel-Dupré og E. Blanc (1997) "HF echoes from ionization potentially produced by high-altitude discharges", *Journal of Geophysical Research*, bind **102** A3, side 4613.
- [4] R. D. Franz, R. J. Nemzek og J. R. Winckler (1990) "Television images of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system", *Science*, bind **249**.
- [5] E. M. Wescott, D. D. Sentman, D. L. Osborne, D. L. Hampton og M. J. Heavner (1995) "Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue Jets", *Geophysical Research Letters*, bind **22**, side 1209.
- [6] E. Huang m.fl. (1999) "Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations", *Journal of Geophysical Research*, bind **104** D14, side 16943.
- [7] S. A. Cummer, U. S. Inan, T. F. Bell og C. P. Barrington-Leigh (1998) "ELF radiation Produced by Electrical Currents in Sprites", *Geophysical Research Letters*, bind **25**, side 1281.
- [8] R. A. Roussel-Dupré, A. V. Gurevich, T. Tunnell og G. M. Milikh (1994) "Kinetic theory of runaway air breakdown", *Physical Revue E*, bind **49**, side 2257.
- [9] V. P. Pasko, U. S. Inan, Y. N. Taranenko og T. F. Bell (1997) "Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere", *Journal of Geophysical Research*, bind **102**, side 4529.

Yderligere eksempler på billeder fra Sprite 99 kampagnen findes på www.gfy.ku.dk/~tha/sprite99.html.

Eksempler på sprites over Europæiske tordenvejr, set under DMI-kampagnen EuroSprite 2000, findes på www.gfy.ku.dk/~tha/eurosprite2000/listofsprites.html

Information om Rocsat-II findes på www.nspo.gov.tw/e30/origin.html



Thomas Højgaard Allin er specialestuderende ved Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, samt Danmarks Meteorologiske Institut.