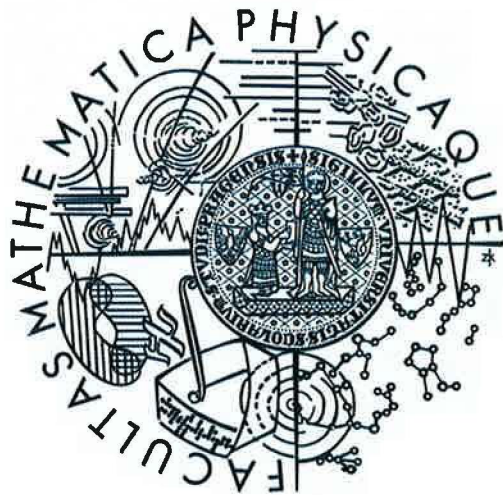


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Pavel Paloncý
Analýza světelných efektů v ionosféře

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: *Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.*

Studijní program: *Fyzika*

Studijní obor: *Obecná fyzika*

2007

Chtěl bych poděkovat prof. RNDr. Janě Šafránkové, DrSc. za její trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem svoji práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím s zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 29.května 2007

Pavel Páloncý

OBSAH

1. Proč zkoumat atmosféru?	5
2. Klasifikace světelných jevů v atmosféře.....	6
2.1. Rozdělení jevů v atmosféře	6
2.1.1. Stejnosměrné jevy (DC) – vznik bouřek a globální elektrický obvod.....	6
2.1.2. Střídavé jevy (AC) – blesky a příbuzné efekty.	7
2.1.3. Jevy způsobené nabitými částicemi	9
3. Výskyt TLE	10
3.1. Globální distribuce TLE.....	10
3.2. Denní distribuce TLE a TGF	12
4. Pozorování světelných jevů.....	14
4.1. První pozorování	14
4.2. Pozorování z raketoplánu	15
4.3. Plánovaná pozorování z ISS.....	15
4.4. Letecká pozorování při 1000 snímcích za sekundu	16
5. Současný stav problematiky.....	18
5.1. Úvod do představ o vzniku TLE	18
5.1.1. Mechanismus vzniku sprites	20
5.2. Laboratorní pokusy a jejich srovnání s pozorováním	22
6. Cíl práce	23
7. Projekt TARANIS	25
7.1. Cíle projektu	25
7.2. Doba trvání	25
7.3. Parametry oběžné dráhy	25
7.4. Měřicí přístroje	26
7.5. Synchronizace měření	27
7.6. Paměť	29
7.7. Koordinace družicových a pozemních pozorování.....	30
7.8. Pozemní pozorování.....	31
7.9. Vícebodová pozorování.....	31
8. Závěr.....	32
Literatura:	32

Název práce: Analýza světelných efektů v ionosféře
Autor: Pavel Paloncý
Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu
Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.
E-mail Vedoucího: jana.safrankova@mff.cuni.cz

Abstrakt: V předložené práci studujeme vlastnosti a výskyt krátkodobých světelných efektů v ionosféře. Výskyt těchto efektů je úzce spojen s bouřkovou činností a s přenosem náboje. Některé z těchto efektů se šíří vzestupně do vysokých výšek, tvoří vodivé spojení mezi atmosférou a ionosférou a přispívají tak ke globálnímu elektrickému obvodu. Diskutujeme procesy účastnící se na vzniku těchto efektů a srovnáváme současné teoretické modely s laboratorními experimenty provedenými při různých tlacích simulujících různé výšky nad zemským povrchem. Na základě analýzy dat z pozorování těchto efektů a jejich výskytu předkládáme v práci zhodnocení připravované družice TARANIS. Jejím cílem je pozorování těchto efektů v různých spektrech a objasnění jejich souvislostí se zachycenými gama záblesky. V práci diskutujeme dráhu jejího letu, přístrojové složení, datovou náročnost i očekávané výsledky.

Klíčová slova: Krátkodobé světelné efekty, sprite, TARANIS, globální elektrický obvod.

Title: Analysis of luminous effects in the ionosphere
Author: Pavel Paloncý
Department: Department of Surface and Plasma Science
Supervisor: Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.
Supervisor's e-mail address: jana.safrankova@mff.cuni.cz

Abstract: In the present work, we study the properties and occurrence of transient luminous effects in the ionosphere. The occurrence of these effects is closely connected with thunderstorms and transport of electric charge. Some of these effects propagate upward into high altitudes, creating a conductive coupling between the atmosphere and ionosphere and contribute to the global electric circuit. Processes participating in the creation of these effects are discussed and present theoretical models are compared with laboratory experiments conducted at different air pressures simulating different altitudes. Having analyzed its occurrence data, evaluation of the upcoming TARANIS satellite is presented. Objectives of the TARANIS satellite are observing these effects in different spectra and explaining the connection between them and observed gamma flashes. In the present work, its orbit, set of instruments, data payload, and expected results are discussed.

Keywords: Transient luminous effects, sprite, TARANIS, global electric circuit

1. Proč zkoumat atmosféru?

Atmosféra, ionosféra a magnetosféra tvoří úzce propojený systém, jenž je ovlivňován jak sluneční činností, tak i činností člověka. Využíváme stále větší část tohoto systému, a je proto nezbytné jej pochopit. Přestože v minulosti se lidé k obloze často obraceli, přisuzovali jí nejrůznější vlastnosti a pozorovali ji, některé jevy byly objeveny teprve nedávno. Mezi ně patří i takzvané TLE (Transient Luminous Effects), jakási obdoba blesků, které však nesměřují z mraků k zemi, ale naopak vzhůru do ionosféry. Pro jejich podobnost s blesky se jim někdy říká *blesky vysokých výšek*. Vysvětlení těchto jevů je důležitým krokem k pochopení procesů probíhajících v tomto systému.

Právě těmto světelným efektům je věnována tato práce, kde v první části je souhrn současných znalostí, ve druhé části pak jejich pozorování z družice TARANIS. Na tomto místě je třeba poznamenat, že pro označení světelných efektů se v anglické literatuře používají poetické názvy, které nemají v češtině jednoznačnou obdobu, a proto je v práci nepřekládáme, ale pouze přepisujeme v původním znění.

2. Klasifikace světelných jevů v atmosféře

Optické jevy v atmosféře a spodní vrstvě ionosféry je možné rozdělit na efekty způsobené střídavým proudem (AC), stejnosměrným proudem (DC) a efekty způsobené nabitými částicemi. Kritériem je relaxační doba, která je rovná poměru permitivity a lokální vodivosti. Hodnoty vodivosti mají velké rozpětí, při povrchu země jsou nízké, se vzrůstající výškou vodivost roste v důsledku pronikajícího slunečního záření, které způsobuje ionizaci prostředí. Vodivost se tak pohybuje v rozmezí $\sim 10^{-14}$ S/m při povrchu země až 10^{-9} S/m ve výšce ~ 75 km. Tomu odpovídají relaxační doby 10^3 až 10^{-2} s [1].

2.1. Rozdělení jevů v atmosféře

2.1.1. Stejnosměrné jevy (DC) – vznik bouřek a globální elektrický obvod

Uvnitř bouřek se objevují velké potenciálové rozdíly dosahující až ± 100 MeV, které urychlují nabitě částice. Jejich interakce s molekulami atmosféry může způsobovat vznik energetických fotonů, röntgenového a dokonce gamma záření. Tyto částice bývají absorbovány na krátkých vzdálenostech v nižší atmosféře, ale ve zřetelně větších vzdálenostech ve střední atmosféře.

Vznik potenciálových rozdílů je způsoben separací náboje na drobných kapkách deště, kroupách nebo sněhových vločkách. Tyto útvary mají různé elektrické povrchové vlastnosti, a proto se některé nabíjí kladně a jiné záporně. Menší a lehčí útvary se pohybují vlivem stoupavých proudů vzhůru, větší pak klesají vlivem gravitace. Výsledkem je elektrický proud. Pro jednotlivou bouřku jde asi o proud ~ 1 A, pro celou zeměkouli ~ 1000 A. Tyto proudy nabíjejí atmosféru, resp. dolní vrstvy ionosféry ve výšce ~ 80 km na potenciál kolem $+250$ kV. Představíme-li si soustavu země-ionosféra jako kondenzátor, bude celkový náboj na deskách tohoto kondenzátoru $\sim 2 \times 10^5$ C. Systém země-atmosféra je možné modelovat jako elektrický obvod, existuje však mnoho verzí tohoto obvodu. Podrobněji o tomto obvodu atmosféra-země pojednává [1], protože však s těmito procesy nesouvisí přímo žádné světelné jevy, nebudeme se jimi dále zabývat. Výjimku tvoří

koronový výboj, který může vzniknout na hrotech vlivem silného elektrického pole (tzv. Eliášovo světlo). Tento výboj je ale stacionární a jeho mechanismus je dobře prostudován.

2.1.2. Střídavé jevy (AC) – blesky a příbuzné efekty.

Naopak z našeho pohledu studia světelných efektů jsou střídavé jevy jejich významným zdrojem. Mezi nejběžnější patří **blesky**. Každý blesk produkuje puls tzv. atmosférických vln o frekvenci od několika Hz až do 10 MHz. Signály se šíří ionosférickými vlnovody na vzdálenosti tisíců km. Některé blesky trvají zlomek vteřiny, některé méně než μs . Většina blesků jdoucích z mraku do země přenáší záporný náboj (typicky $\sim 10\text{ C}$, avšak dosahují až 100 C).

Dalším světelným efektem jsou tzv. **sprites**, což jsou emise doprovázející skoro vždy pozitivní výboje z mraku do země. Zřídka doprovázejí negativní výboje z mraku do země nebo výboje mezi mraky. Tyto emise se objevují nad bouřkovými mraky ve výškách 50 až 90 km a šíří se shora dolů, přičemž dosahují velikostí až 50 km, avšak typicky je jejich velikost 5-10 km. Při zachycení kamerou se jeví na svém horním konci jako červené, s klesající výškou se postupně barva mění v modrou (Obrázek 1). Příčinou měnění se barvy sprites je různé složení okolní atmosféry, kde dochází k excitaci molekul do vyšších vibračních módů a ty pak produkují záření o různých vlnových délkách. Horní část má většinou povahu bezstrukturní záře, zatímco spodní část sprites má vzhled vláken větvičích se směrem dolů s velmi složitou jemnou (fraktální) strukturou [2, 3]. Sprites se vyskytují samostatně nebo ve skupinách po dvou i více, trvají několik milisekund a šíří se rychlostí až $50\,000\text{ km/s}$.

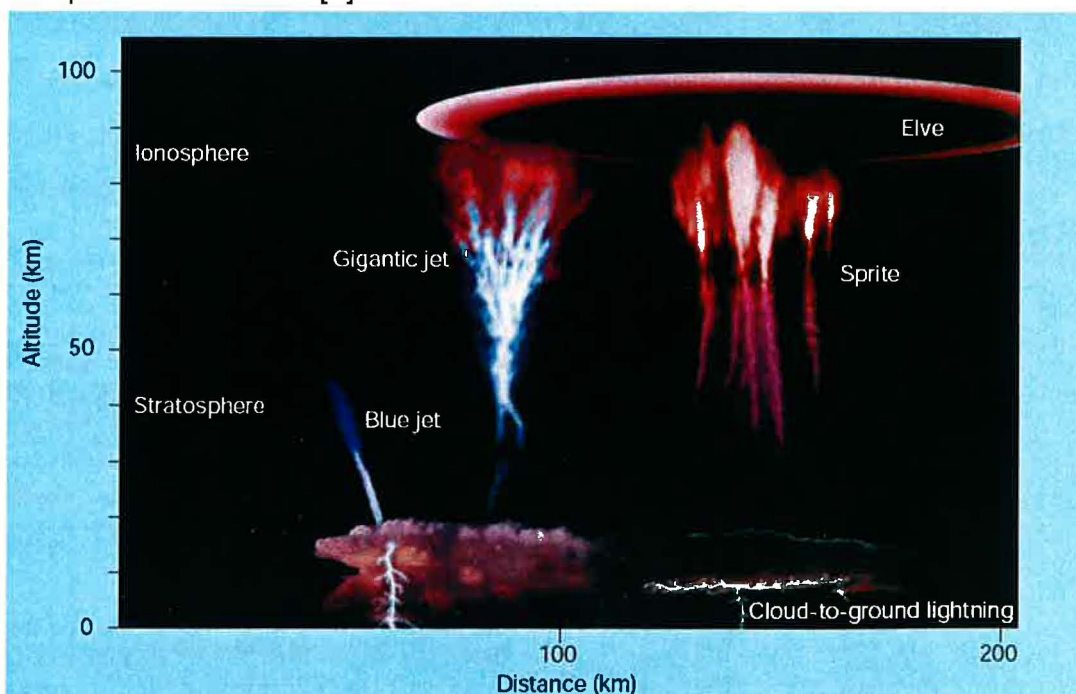
Další typ emisí - **halo** se vyskytují výhradně se sprites, ne každý sprite je však jimi doprovázen. Objevují se několik ms po výboji blesku a přibližně 1-2 ms před sprites nebo současně s ním. Vyskytují se nad sprites a mají charakter válcově symetrické záře ve tvaru disku bez výraznější struktury. Obvykle trvají několik ms.

Blue jets se někdy objevují na vrcholu bouřkových mraků a šíří se směrem vzhůru rychlostí kolem 100 km/s až do výšky okolo 40 km. Jsou to velmi úzké vzestupné svítící kužely, primárně modré barvy. Jets jsou částečně

ionizované a tvoří velmi dobré vodivé spojení mraku s ionosférou, proto se dají považovat za iniciátory sprites [4].

Gigantic Jets se objevují na vrcholu bouřkových mraků, šíří se až do výšky ~90 km a dosahují šířky až 40km. Při pozorování gigantic jets nebyly pozorovány žádné blesky, které by je způsobovaly. Tvoří velmi vodivé spojení s ionosférou a při jejich vzniku se přenesou desítky Coulombů záporného náboje do ionosféry [1, 5]. V porovnání s ostatními TLE jsou velmi vzácné [5].

Do skupiny světelných efektů patří také jevy zvané **elves**, které jsou úzce spojeny se sprites. Jde o světelné prstence ve výšce ~90 km rozpínající se rychlostí blízkou rychlosti světla. K jejich výskytu dochází nejčastěji okamžitě po začátku výboje sprite. Věří se, že vznikají díky velké amplitudě elektromagnetického pulsu z výboje blesku, který ohřívá a excituje molekuly ve spodní termosféře [1].



Obrázek 1. Světelné jevy v atmosféře: Blue jet a gigantic jet šířící se vzhůru do ionosféry, sprite šířící se směrem dolů bývá někdy doprovázen halo (není na obrázku). Nahoře vidíme elf, který se rozpíná rychlostí blízkou rychlosti světla.

Jak jsme již zmínili, všechny výše uvedené jevy se souhrnně označují jako TLE (Transient Lightning Effects). Odehrávají se ve viditelném spektru, avšak většinou probíhají příliš krátkou dobu, aby je bylo možné zachytit pouhým okem a emise záření je příliš nízká pro zachycení běžným fotoaparát, proto k jejich pozorování je třeba použít speciální techniky, např. rychlých

vysoce citlivých fotoaparátů umístěných buď na zemském povrchu (avšak ve výškách ~2000 m a výše) nebo na umělých objektech, které se pohybují v různých výškách nad povrchem.

2.1.3. Jevy způsobené nabitými částicemi

Pro úplnost uvádím i jevy způsobené nabitými částicemi, přestože v podstatě nejsou doprovázeny takovými světelnými efekty, jimž je věnována předložená práce.

Částicí s nejvyšší energií (~GeV) pozorované na zemi je **kosmické záření**. Další nejvíce energetické částice jsou **protony (> 100 MeV) a elektrony (~1 MeV)**. Pohybují se rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla, za dobu ~15 min dorazí ze Slunce do blízkosti Země, kde za některých předpokladů mohou iniciovat polární záři nebo mohou způsobit dodatečnou ionizaci prostředí nebo změnit složení mesosféry či stratosféry, např. produkcí NO₂ nebo O₃. Předmětem této bakalářské práce jsou především sprites, elves, jets a halo, proto jsou jejich vlastnosti, jako např. rozměry, svítivost a délka trvání, uvedeny v Tabulce 1.

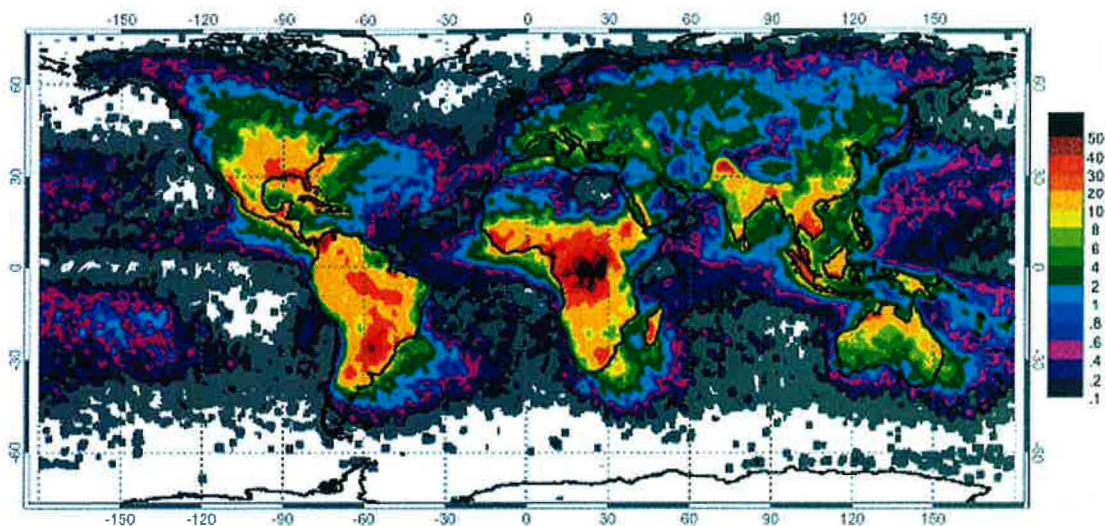
TLE	Horizontální rozměr	Vertikální rozměr	Svítivost	Trvání
Sprites Skupiny sprites	50 – 80 km	1 - 50 km	0.5 - 30 MR	1 – 10 ms až do 600 ms
Elves	100 - 300 km	Jednotky km	0.1 – 1 MR	0.1 – jednotky ms
Halo	~ 75 km	~ 20 km	0.1 – 1 MR	jednotky ms
Jets Giant Jets	Několik km 30 – 40 km	~18-45 km ~18-75 km	Jednotky MR	stovky ms
Blesky	10 - 100 km	~ 5 km	> 100 MR včetně pár MR (IC)	Výboj 500 μs ale ozáření mraku až do 100 ms (IC)

Tabulka 1. Hlavní charakteristika TLE (1 Rayleigh = 10⁶/4π fotonů/cm²/s/ster).

3. Výskyt TLE

3.1. Globální distribuce TLE

Podíváme-li se na globální rozložení blesků nad zemským povrchem (Obrázek 2) a víme-li, že elves, sprites i halo se vyskytují nad nimi, můžeme odhadnout i jejich výskyt.

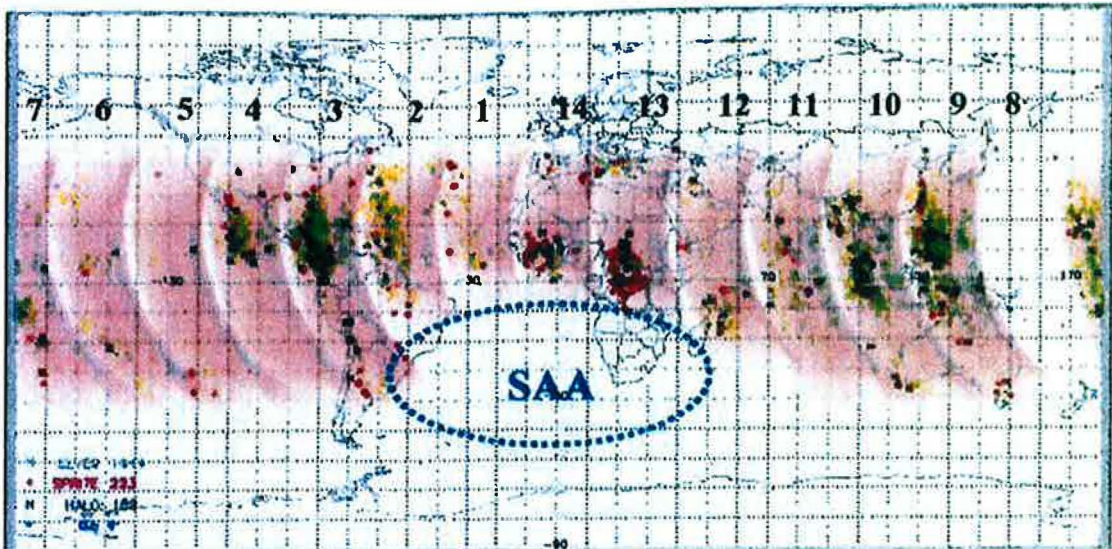


Obrázek 2. Globální distribuce blesků (Pozorováno z družice RHESSI).

Sprites jsou jasně spojeny časově i prostorově se silnými bleskovými výboji v níže položených bouřkách, stejně tak s VLF (Very Low Frequency) událostmi. Sprites se vyskytují převážně nad kontinenty [6]. Jets nejsou nutně spojeny s výboji blesku a mohou se objevit jen v relativně vzácných případech velkých bouřkových nábojů (~300 – 400 C) ve vysokých výškách (~20 km) [7]. Jets se vyskytují ve fázi akumulace náboje při bouřkovém procesu, k jejich produkci není tedy nutné přesunout velké množství náboje [7]. Blue Jets se vyskytují převážně nad mořem.

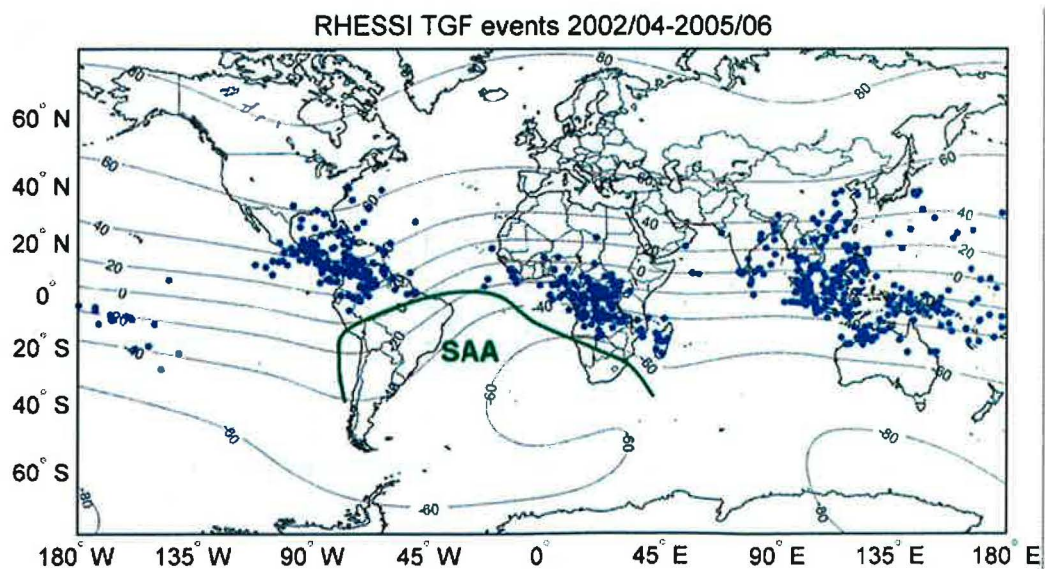
Elves často doprovází sprites, objevují se nad nimi. Jsou pozorovány hlavně nad pevninou a jejich výskyt je ~5 krát častější než výskyt sprites a halo.

Halo se vyskytuje převážně nad mořem a pobřežími a doprovází sprites. Vyskytuje se těsně nad sprites, takže sprite opticky přechází v halo, které vyhasíná pomaleji. Rozložení TLE pozorovaných družicí ISUAL je zobrazeno na Obrázku 3.



Obrázek 3. Distribuce TLE. Elves (zelená), sprites (červená) a halo (černá) pozorované družicí ISUAL [16]. Stínovaná oblast značí oblast pozorování, nad brazilskou anomálií (SAA) byla družice vypnutá.

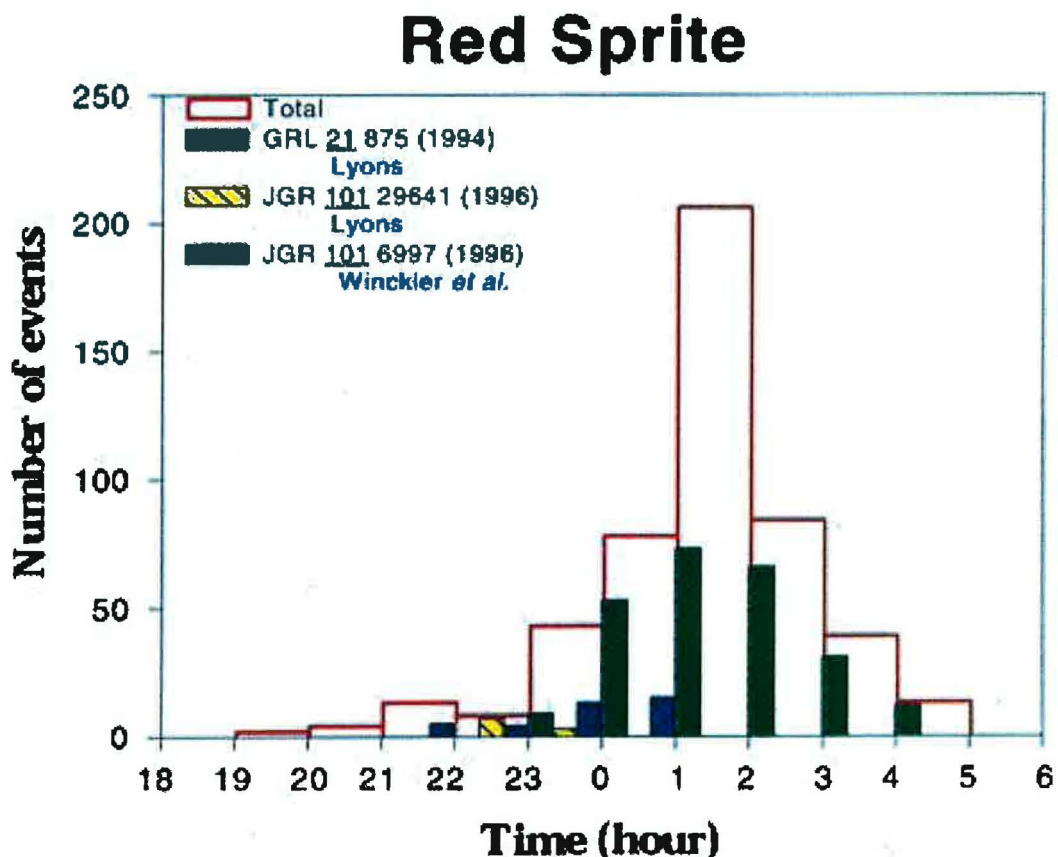
V souvislosti s TLE se také hodně hovoří o **gama záblescích**, tzv. TGF (Terrestrial gamma flashes), které se vyskytují také nad bouřkami, avšak existuje značný rozdíl v geografickém rozdělení mezi TLE a TGF. Jejich vzájemná souvislost není objasněná a je předmětem výzkumu připravované družice TARANIS. Také jejich rozložení je zobrazeno na Obrázku 4, opět na základě pozorování družice RHESSI [6].



Obraz 4. Globální distribuce TGF pozorovaných pomocí družice RHESSI [6].

3.2. Denní distribuce TLE a TGF

Díky tomu, že většina pozorování světelných efektů však doposud pochází z pozemních stanic, je o časovém rozložení TLE v průběhu dne známo velmi málo. Obrázek 5 ukazuje časové rozložení sprites nad USA, kde je možno pozorovat výrazné maximum mezi 1. a 2. hodinou. Dále je možno usoudit z Tabulky 2, že sprites se vyskytují převážně ve skupinách **do 500 ms od výskytu předchozího a další skupina se neobjeví dříve než za několik desítek sekund** [6] (pozorováno na Pic du Midi). Podobné studie zabývající se časovou distribucí ostatních efektů jsme v dostupné literatuře nenalezli.

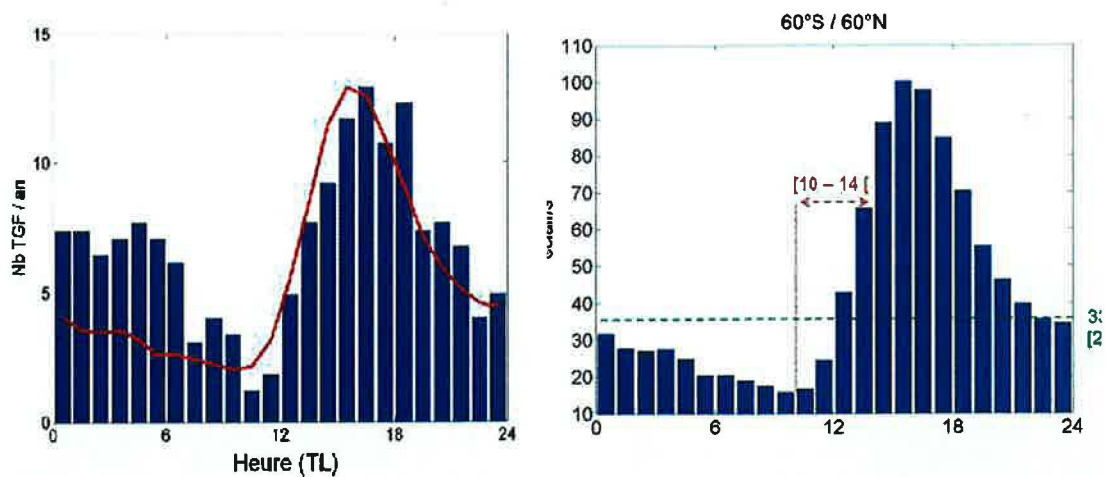


Obrázek 5. Výskyt a časová distribuce červených sprites nad USA (IZUAL).

Časový interval	% sprites
$\Delta t < 0.5$ s	22.52% (skupiny sprites)
$0.5 < \Delta t < 20$ s	0.90%
$20 < \Delta t < 200$ s	28.83%
$\Delta t > 200$ s	47.75%

Tabulka 2. Počet sprites jako funkce pozorovaného času (Δt označuje časovou prodlevu mezi výskytem jednotlivých sprites).

Pokud se týká výskytu TGF, výsledek pozorování je na Obrázku 6. Maximální výskyt byl, na rozdíl od TLE, pozorován mezi **14. a 22. hodinou místního času** s časovou odlehlostí mezi dvěma následujícími událostmi v průměru 1-2 dny.



Obraz 6a, b. Výskyt TGF jako funkce místního času. Červená čára na Obrázku 6a představuje časovou distribuci blesků.

4. Pozorování světelných jevů

4.1. První pozorování

Poprvé zmínil možnost světelných úkazů nad mraky v roce 1925 nositel Nobelovy ceny C.R.T. Wilson v [8]. Celé století se pak šířily pověsti o různých zářích na obloze, ale poprvé byl zachycen „neobvyklý optický úkaz zabírající velký objem v prostoru“ 5. července 1989 v průběhu testování nízkosvětelné kamery v O'Brienově observatoři na Universitě v Minnesotě poblíž Minneapolis. Toto pozorování je popsáno v [9].

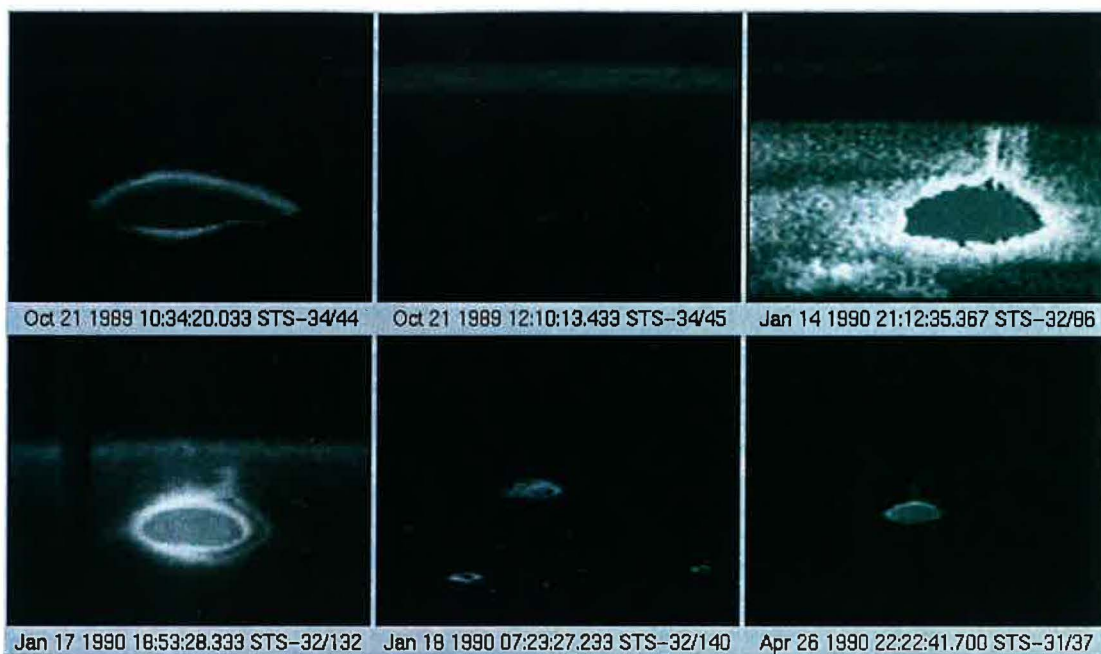


Obrázek 6: První zachycení optického záblesku nad bouřkovým mrakem TV kamerou. Zachyceno citlivou TV kamerou, obraz světelného elektrického výboje nad bouřkou ~250 km od místa pozorování. Obraz, který trval méně než jeden snímek (<30 ms), připomínal dva chocholovité výboje současně se šířící oblohou. [7,9].

V současné době se světelné jevy pozorují jak z raketoplánů, tak z umělých družic (RHESSI, ISUAL, DEMETER) či z pozemních observatoří (Pic du Midi). Pro nová pozorování se připravuje nová družice TARANIS a pozorovací modul ASIM, který bude umístěn na ISS. Oba objekty budou zaměřeny speciálně na pozorování TLE a umožní koordinované pozorování ze dvou míst.

4.2. Pozorování z raketoplánu

Po původních pozorováních popsanych v [9] publikovali Vaughan v [10] a Boeck v [11] pozorování desítek podobných ukazů z raketoplánu. Většina ukazů pozorovaných z kosmu vypadala jako svítící nitky zářícího plynu nad bouřkami dosahujícího do stratosféry [11]. Některé obrazy z pozorování z raketoplánu [10, 11] jsou zveřejněny v [7].



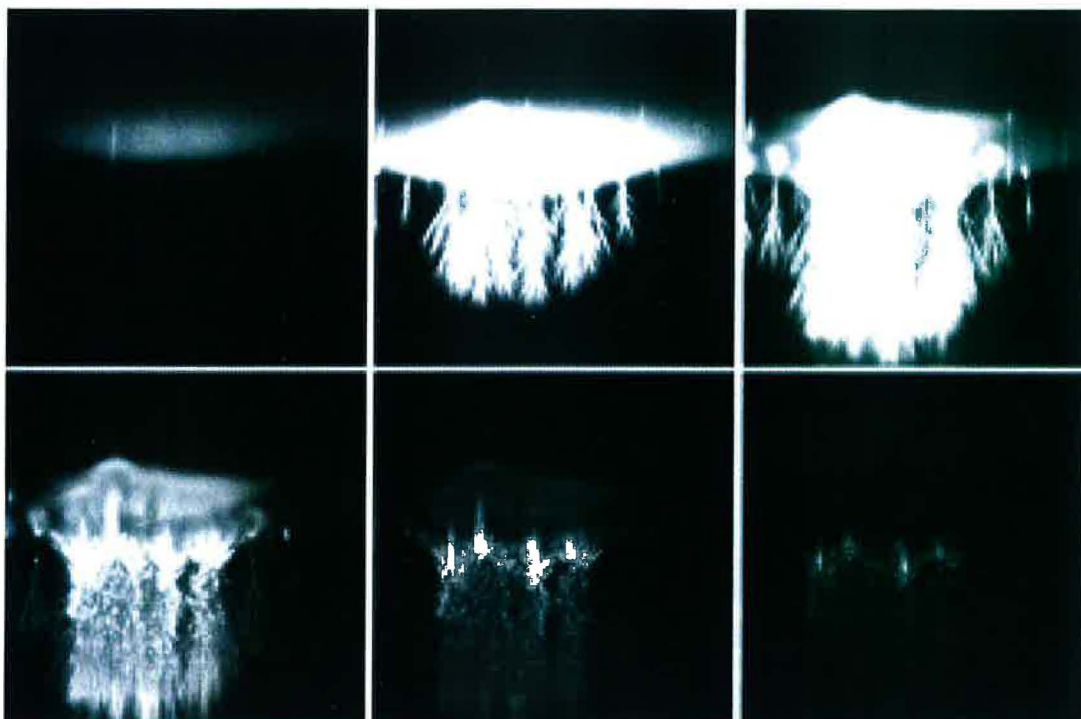
Obrázek 7. Pozorování z raketoplánu. <http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/skeets.html>

4.3. Plánovaná pozorování z ISS

Přístroj ASIM je navržen pro externí plošiny laboratorního modulu Columbus Evropské vesmírné agentury (ESA). Vyslání modulu je plánováno na rok 2007, vyslání přístroje ASIM na rok 2009. ASIM obsahuje 4 optické úzkopásmové TV kamery, 4 fotometry namířené k nebi (limb) a senzor röntgenového záření, 2 fotometry a 2 fotoaparáty namířené k povrchu země [12].

4.4. Letecká pozorování při 1000 snímcích za sekundu

Sprites byly zachyceny mnoha 30ti snímkovými kamerami, které stačí k jejich zachycení, avšak jsou příliš pomalé k objasnění procesu jejich vzniku. Letecká pozorování na Aljašce (Fairbanks) při 1000 snímcích za sekundu (fps) objevila mnoho nových detailů, avšak i pozorování s milisekundovým časovým rozlišením jsou příliš pomalá na to, aby zachytila počáteční fáze vzniku sprites.



Obrázek 8: Snímkování při 1000 fps. Snímky 1 ms po sobě [13].

Obrázek 8 zobrazuje velký sprite nad bouří v Nebrasce pozorovaný 18. srpna 1999 z Wyoming Infrared Observatory (WIRO). Spodní konec výhonků se nachází ve výšce 37 km a vrchol větví je ve výšce 94 km. Horizontální rozměr sprites je zhruba 80 km. Úkaz trval jen 6 ms, avšak typické trvání těchto úkazů se pohybuje v rozsahu 10-30 ms a někdy po hlavním sprite pokračuje méně výrazná aktivita po několik stovek ms. Obrázek ukazuje několik typických vlastností sprites: velká, relativně bezstrukturní záře vystupující v prvním obraze je halo ve výšce 70-80 km. Halo se objevuje několik ms po výboji blesku. Dříve než halo se může vyskytnout elve, (není viditelný na snímku), který trvá velmi krátce. Po halo následuje hlavní sprite

s výhonky mířícími směrem dolů a po cestě se větví. Rychlosti šíření výhonků jsou často velké, dosahují až ~50,000 km/s.

Další spektroskopická pozorování (s lepším časovým rozlišením než ms) mohou velmi přispět k objasnění vzniku sprites a v tomto směru již probíhá další úsilí [13].

5. Současný stav problematiky

Od prvního vyfografování sprites bylo pořízeno více než 10 000 snímků TLE (red sprites, blue jets, halo)...Modely založené na kvazistacionárních elektrických polích a elektromagnetických pulzech vysvětlují optické vlastnosti většiny TLE [18, 19, 20], ale nepředpovídají TGF.

Současné modely generace TGF počítají s produkcí proudů energetických elektronů a jejich urychlení elektrickým polem bouřkového mraku. Oba přístupy se spojují v posledních modelech, které předpovídají produkci relativistických elektronů ve vysokých výškách.

Avšak po deseti letech pozorování (i když převážně v samostatných experimentech zaměřených na jiné cíle) pouze v jednom případě byly v souvislosti s bleskem detekovány energetické elektrony putující vzhůru. Tento neúspěch je dále zvýrazněn daty z družice SAMPEX, který 10 let monitoroval radiační pásy a nepodal žádný důkaz o existenci proudů unikajících relativistických elektronů v souvislosti s bleskem.

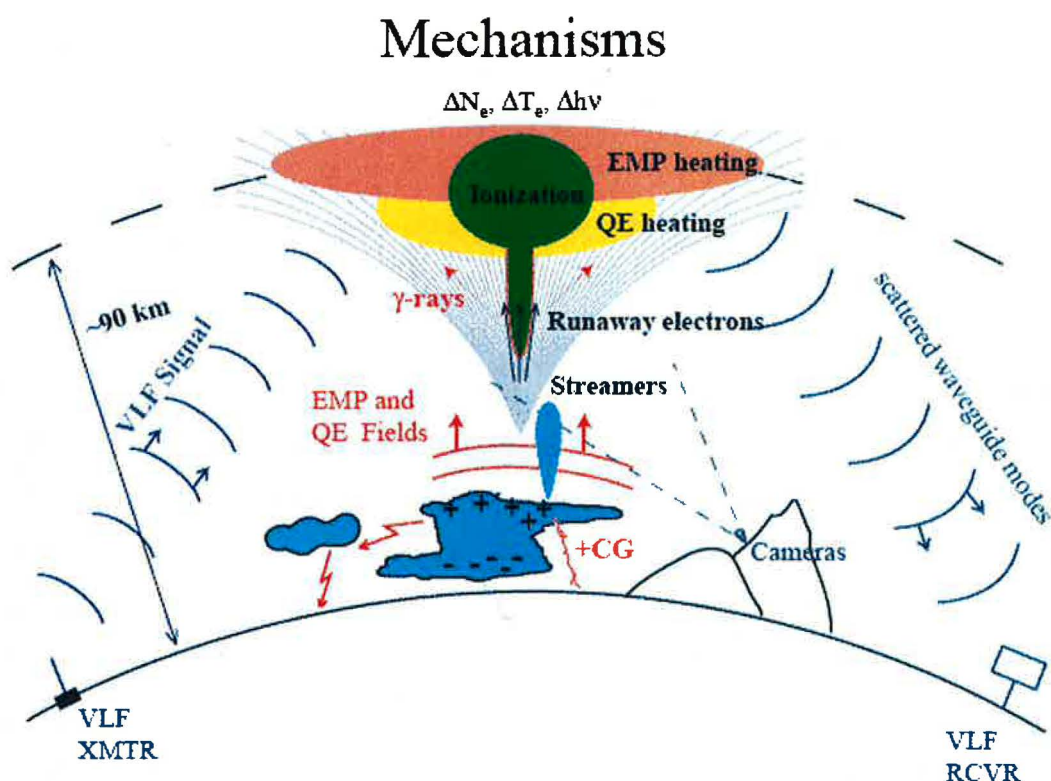
Celkově je naše současné porozumění TLE a TGF značně neúplné. Na jedné straně se má za to, že mnoho detailů týkajících se optických charakteristik sprites a elves je známých, fundamentální otázky týkající se souvislosti mezi TLE, blesky a TGF jsou stále neobjasněny. Tato záhada je dále prohlubována přibývajícím důkazy pro záření uvolňující se při všech formách blesků. Jaké je tedy spojitost mezi TLE a TGF a proč měření proudů relativistických elektronů byla prozatím bezvýsledná? Otázkou, jak zapadají TGF do celkového vědeckého obrazu výbojů se zabývá připravovaná družice TARANIS, jenž bude poskytovat komplexní měření záření, polí a částic, které mohou osvětlit detaily týkající se TLE [21].

5.1. Úvod do představ o vzniku TLE

Pokud se týká fyzikálního mechanismu vzniku TLE, byl průlomem rok 1996, kdy Victor Pasko publikoval svůj model [19], na jehož základě bylo od té doby provedeno mnoho počítačových modelů i laboratorních experimentů. Numerické modely založené na tomto teoretickém modelu se kvalitativně shodují s pozorovanými jevy, ale na časových škálách <1 ms nesouhlasí

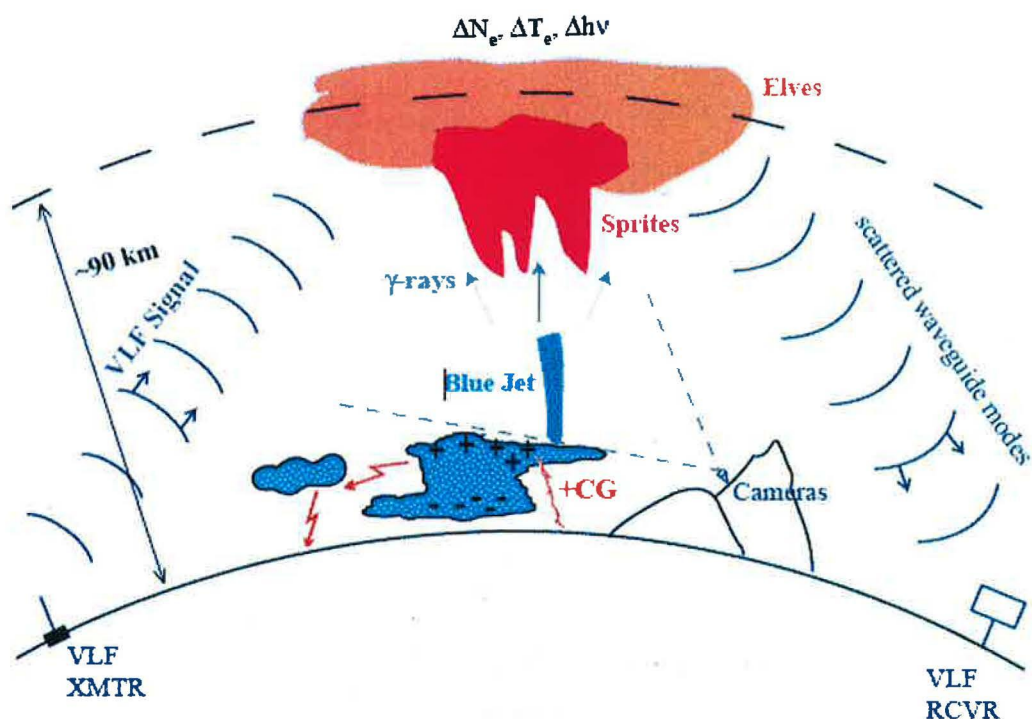
s měření [22] a některé naměřené hodnoty se značně liší od teorie a naznačují tak, že na vzniku sprites se podílí další nezahrnuté procesy. Model také nevysvětluje vznik TGF.

Z modelu [19] plyne, že rychlejší jevy (elves, halo, výhonky sprites), jsou řízeny elektromagnetickými a elektrostatickými silami, ale procesy způsobující pomalejší jevy (blue jets, gigantic jets) nejsou plně objasněny. Přesto se teoretický rámec představený v [19] zdá být slibným základem pro další studium, i když pravděpodobně nezahrnuje všechny procesy. Postupně je však model doplňován, proto v této práci vycházím z aktualizované verze rozšířené o další procesy podílející se na vzniku TLE, který publikoval opět V. Pasko [23].



Obrázek 9. Předpokládaný mechanismus vzniku dle [7, 19].

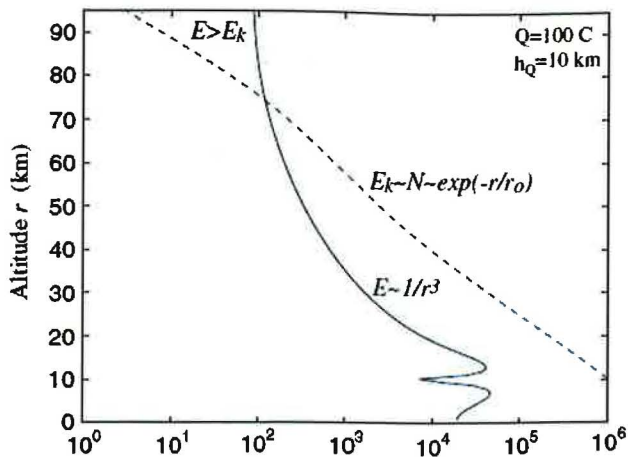
Phenomena



Obrázek 10. Schematické znázornění jevů v modelu [7, 19].

5.1.1. Mechanismus vzniku sprites

Poprvé zmínil možnost fotoemise nad mraky C.T.R. Wilson, který si uvědomil, že elektrické pole mraku klesá s nadmořskou výškou r jako $\sim r^{-3}$ (ve větších vzdálenostech je možno mrak považovat za dipól) a průrazná hodnota elektrického pole klesá rychleji (je úměrná exponenciálně klesající hustotě atmosféry), což vede k tomu, že „existuje výška, nad kterou intenzita el. pole mraku přesahuje průraznou hodnotu“ [8]. Tuto průraznou hodnotu budeme dále značit E_k . Během pomalého nabíjení mraku před výbojem blesku jsou vysoké výšky odstíněny nábojem opačné polarity, než je náboj mraku vytvářejícího kvazi-elektrostatické pole. Když dojde k blesku, výboje mrak-země (CG) přenesou do země během několika ms náboj až 300 C a náboj opačného znaménka zbývající v horní části mraku vytvoří silné kvazi-elektrostatické pole, které přežije přibližně po dobu odpovídající místní relaxační době ($\tau_0 = \epsilon_0 / \sigma$, kde σ je místní vodivost a ϵ_0 permitivita prostoru v příslušné nadmořské výšce). Toto dočasné pole vede k ohřevu okolních elektronů, ionizaci a k optickým emisím známým jako sprites.



Obrázek 11. Intenzita el. pole mraku E klesá strmě, intenzita potřebná k zapálení výboje E_k klesá ještě strměji.

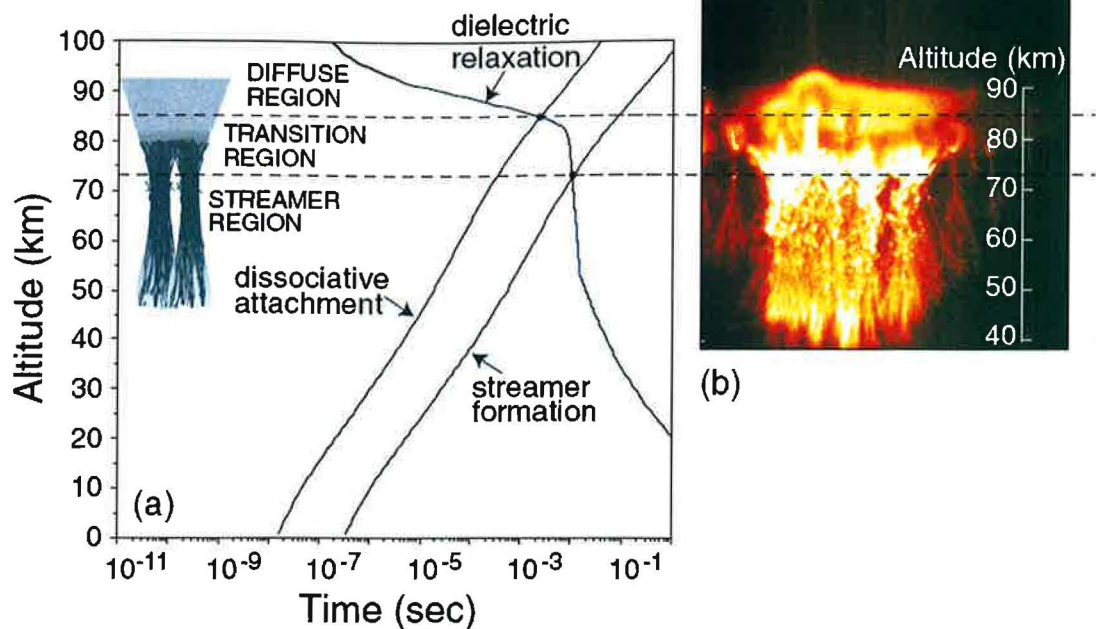
Ve smyslu obecné teorie výbojů v plynech odpovídá situace se sprites velkým hodnotám pd (kde p je tlak a d je účinná délka výboje), které stačí pro vytvoření kanálů. Proto očekáváme růst sprites ve formě kanálů. Při podrobnějším rozboru by ovšem bylo třeba uvážit další korekce pro relativně husté

plazma v nižších vrstvách ionosféry ve výškách 80-90 km [23]. Klíčovým parametrem určujícím schopnost blesku budit sprites je změna momentu náboje Qh_Q (tedy náboj Q přenesený bleskem z výšky h_Q). Jedním ze současných hlavních nevyřešených problémů, jsou sprites pozorované ve výškách 70-80 km buzené velmi slabými bleskovými výboji se změnou momentu náboje jen 100 C·km.

Z teorie publikované v [24] plyne, že charakter sprites se mění z difúzní záře bez výrazné struktury ve výškách >85 km na jemně strukturovanou oblast kanálů ve výškách <75 km. Plyne to ze souhry tří časových měřítek:

(1) časová konstanta disociativního záchyty τ_a (která je určena jako maximální četnost zachycení $1/(v_a - v_i)$, kde v_a resp. v_i jsou četnost zachycení resp. ionizace), (2) relaxační doba okolního dielektrika τ_σ , (3) doba potřebná k vytvoření kanálu z jednotlivého lavinového výboje t_s (jde o efektivní čas, během kterého lavinový výboj vytvoří pole srovnatelné s intenzitou okolního pole). Souhra mezi těmito třemi parametry vytváří tři odlišné oblasti výšek zobrazené na Obrázku 12.

- (1) oblast difúze ($\tau_\sigma < \tau_a$, $\tau_\sigma < t_s$) charakterizovaná produkcí elektronů,
- (2) přechodná oblast ($\tau_\sigma > \tau_a$, $\tau_\sigma \sim t_s$) typická záchytem elektronů před započítáním průrazu,
- (3) oblast kanálů ($\tau_\sigma > \tau_a$, $\tau_\sigma > t_s$) charakterizovaná záchytem elektronů a vytvořením kanálů z jednotlivých lavinových výbojů [23].



Obrázek 12. Vertikální struktura optických emisí ve sprites. (a) Výškové rozmístění různých časových měřítek charakterizujících vertikální strukturu optických emisí ve sprites [24]. (b) Výsledky pozorování.

Horní hranice přechodné oblasti se může posunout vzhůru v případě velmi silného výboje blesku, který způsobí zvýšenou hustotu elektronů, jenž mohou způsobit vznik halo v prvotní fázi tvorby sprites. Spodní hranice se může zvýšit díky kanálům začínajícím v nižších výškách, avšak směřujícím vzhůru do spodní ionosféry [23].

Analýza provedená v [25] ukázala velmi dobrou shodu mezi modelem optických emisí a vysokorychlostním pozorováním a poprvé identifikovala halo jako produkt pouze kvazi-elektrostatického pole bouřkového mraku.

5.2. Laboratorní pokusy a jejich srovnání s pozorováním

Předchozí teorie poukazuje na silnou závislost vlastností sprites na okolním tlaku. Nejsme schopni v laboratoři vytvořit stejný tlakový gradient, který se nalézá v atmosféře, avšak při modelování kanálů, jejichž velikost je ve srovnání se sprites malá, můžeme tlak považovat za konstantní.

Čas, po který kanál existuje, se mění s hustotou vzduchu jako $\sim 1/N$, velikost kanálu se mění s hustotou vzduchu jako $\sim 1/N$, hustota elektronů se mění s hustotou vzduchu jako N^2 . To umožňuje provádět laboratorní experimenty

při různých tlacích (tj. simulovat různou výšku) a vzájemně je srovnávat. Hodnoty velikosti kanálu, čas jeho existence a hustota elektronů jsou tak přepočítány vzhledem k hodnotě na povrchu Země pomocí výše uvedených závislostí.

Experimenty provedené za tlaku odpovídajícím výškám 0 km, 30 km a 70 km ukázaly, že rychlá expanze a akcelerace jsou jednou z charakteristik šíření kanálů [23]. Např. kladný kanál iniciovaný ve výšce 70 km při $E = 1,1 E_k$ dosáhne efektivního poloměru 110 m a rychlosti zhruba 1/10 rychlosti světla při uražení vzdálenosti pouhého kilometru. Takové rychlosti skutečně byly pozorovány vysokorychlostní kamerou [26]. Je zřejmé, že při pozorování struktury sprites (kanálů) v různých výškách závisí vlastnosti kanálů na geometrii mezoférických elektrických polí a historii tvorby sprites (výška počátečního bodu/bodů). Ve výšce 60 km jsou změřené velikosti kanálů o více než řád větší než velikosti získané experimentem a přepočtem. Vezmeme-li v úvahu možné velikosti momentu náboje pro iniciaci sprites, je možné, že sprites pozorované v těchto nízkých výškách vznikly v daleko vyšších oblastech a urazily již značnou vzdálenost během svého šíření [23]. Všechny velikosti kanálů pozorované v [3, 27] tak mohou být považovány za odpovídající modelu z [28].

Yi a Williams studovali v [29] negativní a pozitivní kanály v N_2 a ve směsi N_2/O_2 při tlaku blízkém atmosférickému. Také prováděli některé experimenty při nízkém tlaku tak, že efektivní intenzita byla větší než $1,6 \cdot E_k$. V tomto případě rychlost šíření kanálu přesáhla 10^7 m/s, což je v souladu s pozorovanými sprites [26] a s výsledky urychlování kanálů uvedenými v [28]. Ve směsi N_2 (90%) a O_2 (10%) byly naměřeny poloměry 6 a 8 mm, což dobře odpovídá pozorovaným sprites [3] (6 a 8 mm odpovídají ve výšce 70 km velikostem ~90 m a 120 m).

6. Cíl práce

Z předchozího přehledu vyplývá, že k bližšímu objasnění vzniku sprites a dalších TLE a jejich souvislosti s TGF schází ještě mnoho detailů, proto se připravuje vypuštění specializované družice TARANIS. Cílem práce je na základě současných znalostí kriticky zhodnotit koncepci dalšího výzkumu světelných jevů družicí TARANIS (délku její mise, oběžnou dráhu či použité

přístroje a algoritmy, atd.) tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků a družice přispěla podstatně k objasnění dosud nezodpovězených otázek týkajících se souvislosti TLE a TGF.

7. Projekt TARANIS

7.1. Cíle projektu

Pod názvem TARANIS se skrývá zkratka anglického sousloví Tool for the Analysis of RAdiations from lightNings and Sprites neboli „nástroj k analýze záření z blesků a sprites“. Jak již název napovídá, cílem družice TARANIS je získávat data o záření pocházející z blesků a sprites. Jde především o pochopení souvislosti mezi nimi a objasnění mechanismu vzniku tohoto vlnění a jejich vzájemných souvislostech. Podrobné cíle projektu TARANIS jsou uvedeny v [6], předpokládaný mechanismus je podrobně teoreticky rozebrán v [7, 19, 23].

7.2. Doba trvání

Požadovaná doba trvání mise TARANIS jsou **dva roky**. Taková doba je nutná pro změření dostatečného počtu všech druhů světelných efektů, aby bylo možné zaručit pro všechny jejich druhy, že píky výskytu nejsou měřeny při stejném místním čase (LT) a/nebo ve stejné geografické oblasti [6].

7.3. Parametry oběžné dráhy

TLE jsou produkovány převážně ve výškách 10 až 100 km, přirozeným požadavkem pro připravovaný projekt je tedy nízká kruhová dráha. Při vyšší dráze se sice zvětšuje oblast pokrytí, ale snižuje se rozlišovací schopnost měření. Výška **650 km** navrhovaná v projektové dokumentaci družice TARANIS [6] je tak vhodným kompromisem mezi těmito dvěma veličinami.

Maximum výskytu TLE pozorovaných z kosmu i ze země se nachází mezi 23 h LT a 04 h LT (Obrázek 5), zatímco maximum TGF je mezi 15 h LT a 19 h LT (Obrázek 6) a minimum blízké k 10 h LT. Mezi 21 h LT a 3h LT je četnost TGF vyšší než polovina své maximální hodnoty.

TLE jsou úkazy s nízkou světelností, tudíž je možné pozorovat je jen při velkém kontrastu, proto jejich pozorování ve viditelných spektrech není přes den díky malému kontrastu možné. Vezmeme-li v úvahu všechna časová omezení, pak TARANIS se soustředí na pozorování v době mezi **22 h a 2 h**

v průběhu dvouleté mise. Důvod upřednostnění doby pozorování v době maxima TLE před TGF je patrný z grafů výskytu (Obrázek 5 a 6). TLE má ostré maximum a mimo dobu mezi 23h LT a 04h LT je jejich výskyt téměř nulový na rozdíl od TGF, kde maximum je neostré a i mimo dobu maxima se jich vyskytuje mnoho (asi polovina maxima).

Elves, halo i sprites se vyskytují hlavně v ekvatoriálních oblastech, proto by se družice měla soustředit hlavně na tyto oblasti. Specifikace mise provádět **měření mezi zeměpisnými šířkami -60° and +60°** je v dobrém souladu s požadavky.

7.4. Měřicí přístroje

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem projektu TARANIS je přinášet komplexní pozorování, je třeba na palubu družice umístit celou řadu vědeckých přístrojů, detektorů a měřících zařízení. Protože sprites i elves jsou efekty s nízkou světelností, je nutné je měřit pouze v noci citlivými kamerami. Kvazistacionární model počítá s produkcí energetických elektronů, röntgenových vln a gama záření.

Družice ponese na palubě následující přístroje:

Citlivé CCD kamery a fotometry. CCD kamery na palubě TARANIS dosahují při zvolené výšce 1 km/pixel. Při expoziční době 100 ms a rychlosti 7km/s (kruhová rychlost ve výšce 650 km nad povrchem země) dochází k posunu o 70 % pixelu tj. 700 m (= 7 km/s x 0.1 s). Avšak sprites trvají od 1 do 10 ms a budou tak dobře rozlišitelné. (Čím kratší je daný úkaz a tedy celková světelnost nižší, tím je třeba použít citlivější nástroje, ale tím je také menší zkreslení způsobené pohybem družice). Pomocí družice TARANIS je tak možné zachytit sprites, nebude však možné dobře zachytit ranná stadia jejich vzniku. Sprites dosahují vertikální velikosti až 50 km a mění svou barvu od červené po modrou v důsledku různého složení okolní atmosféry, proto by bylo vhodné použít fotometry s maximální citlivostí v modré a červené oblasti viditelného spektra.

Detektor röntgenového a gama záření. Cílem projektu TARANIS je zachytit záření z blesků a sprites, proto jsou tyto detektory nezbytné. Na rozdíl od fotometrů a CCD kamer, mohou zaznamenávat údaje i ve dne a není třeba je

vypínat. Očekáváme však nízkou intenzitu zachycených událostí v polárních oblastech, jak je zřejmé z Obrázku 4.

Detektor relativistických elektronů. Model počítá s produkcí energetických elektronů a jejich urychlením, avšak doposud byly relativistické elektrony zachyceny pouze v jednom případě, i přes desetiletou misi družice SAMPEX. Do družice TARANIS se vkládají velké naděje, že buď se podaří zachytit relativistické elektrony a nebo vysvětlí příčiny tohoto neúspěchu.

Přístroje na měření elektrického pole. V ideálním případě sada dvou měřících přístrojů – antény na měření vysoko a nízkofrekvenčního pole.

Přístroje na měření magnetického pole. Model počítá s elektromagnetickým pulzem, družici je třeba vybavit třemi magnetometry na měření třech složek magnetického pole.

Tato sada přístrojů je nezbytná pro měření současně TLE a TGF a ke zkoumání jejich souvislosti. Dalším směrem, kterým se ubírá současný výzkum, je měření sprites v jeho ranných fázích. K tomu se používají kamery s vysokou frekvencí snímání (1000 – 10000 snímků/s). To umožňuje přesněji zachytit prvotní fáze vzniku sprites a v kombinaci se zachyceným spektrem fotoemise nám poskytuje cenné informace o povaze vzniku sprites. Z tohoto důvodu by bylo vhodné umístit na palubu kameru s velmi rychlým snímáním (>1000 snímků za sekundu). Lepší časové rozlišení nám poskytne tolik potřebné informace o vzniku sprites a jejich souvislosti se vznikem TGF. Celou tuto aparaturu je třeba opatřit řídicí jednotkou, jejíž hlavním úkolem je časová synchronizace.

7.5. Synchronizace měření

Protože TLE i TGF neprobíhají trvale, ale mají charakter samostatných jednorázových událostí, je výhodnější zavést dva módy pozorování pro družici. Jeden čekací, kdy je družice „v klidu“ a kdy jsou v provozu jen ty přístroje, které mohou předpovědět vznik TLE či TGF. Data z nich jsou neustále zaznamenávána do jejich vnitřní paměti. Ostatní přístroje jsou v klidovém režimu a čekají na pokyn k měření samotného TLE či TGF. Při pokynu k měření se zapnou všechny detektory a družice se přepne do módu pozorování. TLE i TGF následují po výboji blesku, proto hlavním úkolem je detekovat blesk a dát pokyn přístrojům k měření.

Metoda detekce blesků na zemi se uskutečňuje pomocí VLF antén a je založená na analýze spektra elektromagnetického záření, kdy maximum se pohybuje kolem 10 kHz. Ve vesmíru se uskutečňuje ve VHF oblasti spektra, kde vlny prochází ionosférou prakticky beze změny. Avšak hustota energie v těchto spektrech je příliš nízká a nepochybná identifikace je tedy obtížná. Podobná omezení (ne tak silná) jsou platná pro oblast vysoké frekvence (HF), ve které bude měřit TARANIS.

Časová prodleva mezi bleskem a TLE je typicky několik ms, v některých případech se však objevují skupiny sprites a prodleva roste až na několik set ms. U TGF je situace složitější. Měření družice RHESSI ukazují, že prodleva mezi bleskem a TGF se pohybuje mezi -3 a 1 ms (distribuce má maximum 0,7 ms, minimum -3,0 ms, střední hodnota -1,24 ms, standardní odchylka 0,97 ms). V současné době neexistuje způsob, kterým by bylo možné rozhodnout, zda předstih 1,24 ms TGF před bleskem je způsoben časovým posunem mezi družicí RHESSI a pozemním měřením nebo souvisí se vznikem TGF v rané fázi blesku. K určení časové prodlevy mezi bleskem a TGF je třeba přesnost časové synchronizace s pozemním měřením podstatně lepší než 1 ms. Algoritmus pro vyhodnocení detekce blesku musí být dostatečně rychlý, aby bylo možné aktivovat přístroje před započítáním TLE.

Z uvedeného je zřejmé, že pro měření TLE je nutné dát povel k měření během zlomku ms, pro měření TGF zatím není jasné, zda blesku předchází či nikoli, což představuje vážný problém pro jejich měření. Proto jsou přístroje vybaveny dvěma paměťmi, do nichž se budou neustále zaznamenávat dva druhy dat – data s vysokým a nízkým rozlišením. Paměť pro data s vysokým rozlišením je výhodné realizovat jako kruhový registr (ring buffer), kdy nejstarší data se postupně přepisují nejnovějšími. V případě, že algoritmus detekuje blesk, paměť s daty s vysokým rozlišením se analyzuje a v případě, že jsou v ní uložena data obsahující záznam TLE či TGF, odešle se obsah paměti do pozemního centra. Pořadí analýzy a odeslání dat je zaměnitelné. Závisí na tom, který proces je kritický, tedy zda jsme limitováni přenosovou kapacitou na zem, či velikostí kruhového registru. Tímto postupem jsme schopni zaznamenávat data o TGF a vyhnuli jsme se požadavku na detekci blesku během milisekundy. Rychlost algoritmu je určena velikostí kruhového registru. Algoritmus musí vyhodnotit blesk (a dát pokyn ke kopírování) dříve,

než se data přepíší. Rychlost přenosu do hlavní paměti musí být vyšší než rychlost zápisu do kruhového registru. Tento postup je výhodnější, protože nedochází ke ztrátě dat. Jeho nevýhodou je vyšší spotřeba energie, neboť přístroje jsou neustále v provozu. Tímto postupem však není možné zapojit vysokorychlostní kameru, neboť její energetické nároky jsou příliš vysoké a kruhový registr by musel mít obrovskou kapacitu.

~ 7.6. Paměť

Každý přístroj má dva druhy paměti – na data s malým rozlišením (nazvěme ji Paměť pozorování) a na data s vysokým rozlišením (Paměť efektu).

Celá družice je vybavena hlavní pamětí, do které se průběžně kopíruje Paměť pozorování a která se v určitých časových intervalech přenáší do pozemního centra. Paměť efektu se kopíruje jednorázově. Datově nejnáročnější je záznam obrazu. Pokud družici vybavíme CCD kamerami s rozlišením 512x512 pixelů s 8mi bitovou barevnou hloubkou (256 barev), pak datový tok při 10 snímcích za sekundu je 2,5MB/s pro jednu kameru (512x512x10 bytů). S použitím bezztrátových algoritmů pro kompresi obrazu lze dosáhnout komprese až 1:2,7 – 1:3, čímž lze snížit paměťové nároky, naopak se zvýší nároky na čas zpracování o čas komprimace. Uvážíme-li počet dalších přístrojů a jejich další možné datové toky, pak se pohybujeme max. v desítkách MB/s. Takovýchto přenosových rychlostí se běžně dosahuje i mezi pevnými disky ve stolních počítačích při kontinuálním kopírování (tzv. burst reading/writing). Každý detektor má však vlastní kruhový registr, a tedy i vlastní sběrnici. Pevný disk s hlavní pamětí by tak pravděpodobně nestíhal data z mnoha sběrnic zaznamenávat. Je proto výhodnější zvětšit paměť kruhového registru (kapacity potřebné pro záznam několika efektů jsou minimální ve srovnání s běžně dostupnými kapacitami záznamu) a data odesílat přímo do pozemního řídicího centra. Datový tok generovaný přístroji do paměti pozorování je v řádu desítek kb/s [6]. Při použití telemetrie s přenosovou rychlostí 2,1 MB/s je hlavní paměť 2GB uváděná v dokumentaci plně dostačující.

Diskutujme ještě možnost umístění vysokorychlostní kamery (1000 snímků/s) na palubu TARANIS. Při rozlišení 256x256 pixelů, 1000 snímcích/s a 8bitové barevné hloubce generuje datový tok 62,5 MB/s. S tímto si je možné poradit,

avšak aby snímkování s takovou frekvencí mělo smysl, je třeba s podobnou frekvencí snímat i ostatní veličiny a datový tok generovaný dalšími senzory by také výrazně vzrostl. Celkový datový tok by se tak blížil 1 GB/s, což není nemožné zvládnout, ale překračuje hranice malé družice. Mohu tak jen doufat, že někdy se podobné vysokorychlostní kamery dočkáme na ISS, či podobné stanici.

Datový tok je možné snížit tím, že budeme měřit jen prvních 20 ms po detekci blesku, kdy je pravděpodobnost vzniku TLE i TGF největší, avšak tím bychom se opět potýkali s problémem rychlého vyhodnocení blesku a včasného spuštění.

7.7. Koordinace družicových a pozemních pozorování

Je třeba dosáhnout velmi přesné časové synchronizace mezi družicí a Zemí, avšak přístroje na palubě musí být synchronizovány mezi sebou ještě přesněji. Absolutní určení času je třeba znát s rozlišením v řádu zlomků ms. Taková přesnost je potřebná [6] pro:

- k určení, zda k produkci blesku dochází před či po TGF (pozorování provedená z družice RHESSI ukazují, že časový interval mezi pozorováním TGF a spuštěním blesku je asi 1ms)
- k určení typu blesku (kladný nebo záporný elektrický výboj mezi mraky a zemí)
- aby bylo možné korelovat družicová měření s pozemními měřeními.
- srovnání s doprovodným měřením prováděným na zemi a/nebo balónovým měřením.
- srovnání s pozemní LDN (Lightning Detector Network) umožňuje určit typ výboje a kalibrovat měření HF rádiových emisí [6].

Při použití vysokorychlostní kamery by přesnost synchronizace přístrojů musela být minimálně o řád lepší než je rychlost snímkování vysokorychlostního fotoaparátu, aby bylo možné přiřadit zachycená spektra a naměřené hodnoty pole k jednotlivým snímkům.

7.8. Pozemní pozorování

V dnešní době je možné pozorovat TLE z pozemních stanic, z balónů, letadel i družic. Neefektivnější je pozorování oblastí nad bouřkovými mraky v malých zeměpisných šířkách, ideálně v ekvatoriálním pásmu. Pro minimalizaci času, kdy je pozorování nemožné kvůli oblačnosti, je vhodné pozorovat TLE z vysokých výšek. Sprites se vyskytují nad pevninou, halo u pobřeží a elves nad mořem. Pokud budeme chtít pozorovat všechny tyto TLE, je vhodné je pozorovat z místa, kde máme „na dohled“ moře. Z tohoto pohledu jsou vhodné observatoře umístěné sice na pevnině, ale ve vyšší nadmořské výšce. V našich podmínkách jsou takovými místy observatoř na Lomnickém



Štítě (2500 m.n.m) nebo observatoř Aiguille du Midi (3800 m.n.m). Na jižní polokouli má slibé předpoklady observatoř Gemini South v Chile.

Obrázek 13: Observatoř Aiguille du Midi

7.9. Vícebodová pozorování

Do družice TARANIS je vkládáno mnoho nadějí a vědecká veřejnost očekává, že pomůže vyřešit mnoho otázek spojených s výskytem TLE a TGF. Domnívám se, že dalšího pokroku by bylo možno dosáhnout použitím modulu ASIM, který v roce 2009 má být vynesena na ISS. Současné vícebodové měření specializované družice, modulu na mezinárodní stanici a pozemní, případně letecká pozorování, doplněná o vysokorychlostní kamery by byla ideální řešení úkolu. Největší přínos z pozemních či leteckých pozorování přináší právě vysokorychlostní kamery. V této oblasti lze očekávat také nejrychlejší rozvoj, neboť již bylo provedeno pozorování při 10 000 snímcích za sekundu [22] a na rychlejších kamerách se usilovně pracuje.

8. Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit navržené složení přístrojů na palubě družice TARANIS, její oběžnou dráhu a další parametry družice připravované pro studium diskutovaných světelných jevů. Myslím, že zařazení navrhovaných přístrojů zaručí skutečně současné a komplexní pozorování jak TLE, tak i TGF a pomohou tak objasnit jejich vzájemnou souvislost a přispějí k objasnění všech zdrojů záření. V průběhu dvou let od vypuštění družice je možné očekávat velké množství dat (předpoklad je sledování průměrně 110 efektů denně) s vysokým časovým rozlišením. V celém projektu je třeba dořešit vzájemnou časovou synchronizací jednotlivých přístrojů, návaznost na pozemní pozorování a připravit (a ověřit) algoritmy pro jejich řízení.

Umístění vysokorychlostní kamery by značně zvětšilo možnosti pozorování, avšak při návrhu této varianty jsem narážel na obtíže a její umístění na palubu zatím překračuje možnosti družice TARANIS a nemohu ho proto doporučit. Avšak snímání pomocí této kamery se jeví jako velmi slibný směr pozorování a nezbyvá než věřit, že se jednou dočkáme takové kamery na palubě ISS či jiného vesmírného objektu.

Literatura:

- [1] M.J. Rycroft: Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An Overview, J.A.S.T.P.,68, 445, 2006
- [2] V. P. Pasko, U. S. Inan and T. F. Bell: Fractal structure of sprites, Geophys. Res. Lett. 27, 497, 2000
- [3] E.A. Gerken, U.S. Inan, C.P. Barrington-Leigh: Telescopic imaging of sprites, Geophys. Res. Lett. 27, 2637, 2000
- [4] C. P. Barrington-Leigh, U.S. Inan: Sprites triggered by negative lightning discharges, Geophys. Res. Lett. 26, 3605, 1999
- [5] V.P.Pasko: Electric Jets, Nature 423, 2003, 927-929
- [6] D. Lagoutte, F. Lefeuvre: TARANIS microsatellite – Scientific payload, LPCE, 2006
- [7] V.P. Pasko: disertacka

- [8] C.T.R. Wilson: The electric field of a thundercloud and some of its effects, Proc. Phys. Soc. London 37 32D, 1925
- [9] R.C. Franz, R.J. Remzek, J.R. Winckler: Television image of a large upward electric discharge above a thunderstorm system, Science 249, 48, 1990
- [10] O. H. Vaughan Jr., R. J. Blakeslee, W. L. Boeck, B. Vonnegut, M. Brook, J. McKune Jr.: A cloud-to-space lightning as recorded by the space shuttle payload-bay TV cameras, Mon. Weather Rev. 120, 1459, 1992
- [11] W. L. Boeck, O. H. Vaughan, R. J. Blakeslee, B. Vonnegut, M. Brook, J. McKune: Observations of lightning in the stratosphere, J. Geophys. Res. 100, 1465, 1995
- [12] T. Neubert, I. Kuvvetli, C. Budtz-Jørgensen, N. Østgaard, V. Reglero, N. Arnold: The Atmosphere-Space Interactions Monitor (ASIM) for the International Space Station
- [13] H.C. Stenbaek-Nielsen: Research with airborne observation at 1000 frames/s, Proceedings SOFIA Upper Deck Science Opportunities Workshop, 2004
- [14] W.A. Lyons, T.E. Nelson, R.A. Armstrong, V.P. Pasko, M.A. Stanley: Upward electrical discharges from thunderstorm tops, Am. Meteor. Soc 445-453, 2003.
- [15] W.A. Lyons: The meteorology of transient luminous events, an introduction and an overview, NATO Advanced Study Institute on "Sprites, elves, and intense lightning discharges", book, Corte 2004.
- [16] B. Chen, Y. Lee, R. Hsu, P. Chiang, C. Kuo, S. Wang, M. Chang, S. Mende, H. Frey, H. Fukunishi, Y. Takahashi, T. Adachi, L. Lee: Global distribution and seasonal distribution variation of Transient Luminous Events, AGU Fall meeting, San Francisco, 2005.
- [17] D.M. Smith, L.I. Lopez, R.P. Lin, C. Barrington-Leigh: Terrestrial gamma ray-flashes observed up to 20 MeV, Science 307, 1085-1088, 2005.
- [18] U. S. Inan, S.C. Reising, G.J. Fishman, J.M. Horack: On the association of terrestrial gamma-ray bursts with lightning and implications for sprites, Geophys. Res. Lett. 23, 1017-1020, 1996.
- [19] V.P. Pasko, U.S. Inan and T.F. Bell: Sprites produced by quasi-electric heating and ionization in the lower ionosphere, J.G.R., 102, 4529, 1997

- [20] M. Cho, M.J. Rycroft: Non-uniform ionisation of the upper atmosphere due to the electromagnetic pulse from a horizontal lightning discharge, *J.A.S.T.P.* 63, 559–580, 2001.
- [21] F. Lefeuvre, E. Blanc, R. Roussel-Dupré, J.A. Sauvaud: The TARANIS project: Scientific objectives and instrumentation, MC 3009, AGU, dec 2005.
- [22] S.A. Cummer, M. Stanley: Submillisecond resolution lightning currents and sprite development: Observations and implications, *Geophys. Res. Lett.* 26, 3205, 1999
- [23] V.P. Pasko: Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges, *Plasma Sources Sci. Technol.*, S13–S29, 2007
- [24] V.P. Pasko, U.S. Inan, T.F. Bell: Spatial structure of sprites, *Geophys. Res. Lett.* 25, 2123–6, 1998
- [25] C. P. Barrington-Leigh, U. S. Inan, M. Stanley: Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry, *J. Geophys. Res.* 106, 1741-50, 2001
- [26] M. Stanley, P. Krehbiel, M. Brook, C. Moore, W. Rison, Abraham B: High speed video of initial sprite development, *Geophys. Res. Lett.* 26, 3201-4, 1999
- [27] E.A. Gerken, U.S. Inan: A survey of streamer and diffuse glow dynamics observed in sprites using telescopic imagery, *J. Geophys. Res.* 107, 1344, 2002
- [28] N. Liu, V. P. Pasko: Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites, *J. Geophys Res.* 109, A04301, 2004
- [29] W.J. Yi, P.F. Williams: Experimental study of streamer in pure N₂ and N₂/O₂ mixtures and a 13 cm gap, *J. Phys: Appl. Phys.* 35, 205-18, 200