

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Ivana Kolmašová  
Blýská se ...

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 60 (2015), No. 2, 123–132

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/144406>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2015

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

# Blýská se . . .

*Ivana Kolmašová, Praha*

Blesk: přírodní jev tak běžný a zároveň tak tajemný. Provází nás odedávna, fascinuje nás světelnými a zvukovými efekty, které ho provázejí, bojíme se jeho síly. Víme už více než čtvrt tisíciletí, že blesk je elektrický výboj. Víme již o blescích vše? Je to neuvěřitelné, ale stále ještě přesně nevíme, jak blesk v bouřkovém oblaku vzniká. Jeho ohromnou energii neumíme využít. Barevné nadoblačné blesky neboli elektrické výboje, které se občas objevují nad bouřkovými oblaky a které mohou sahat až k hranici ionosféry, jsme začali zkoumat až v devadesátých letech minulého století. Kam jsme se posunuli od dob Benjamina Franklina a Prokopa Diviše?

## 1. Z historie

Blesky existovaly na Zemi odedávna. V pískovcových skalách ve skotském Arranu byly nalezeny geologické kusové útvary 250 miliónů let staré, tzv. bleskovce (fulgurite), které vznikly roztavením křemičitých částic při úderu blesku a jejich opětovným ztuhnutím [8]. Podobné útvary jsou k nalezení i na jiných písčítých a skalnatých místech. Naši předkové, blesky a hromy vystrašení i ohromeni, přisoudili jejich původ různým božstvům. Starověcí Řekové měli svého hromovládného Dia, Římané Jupitera, Vikingové Thóra, Slované Peruna, keltský bůh hromu se jmenoval Taranis a staroindický Rudra.

To vše se změnilo za jedné letní bouřky roku 1752, kdy americký vydavatel, přírodovědec, spisovatel a státník Benjamin Franklin uskutečnil známý pokus s papírovým drakem opatřeným kovovým hrotem, konopným provázkem, klíčem a leidenskou lahví. Ukázal, že blesk je v podstatě elektrický výboj a že vzniká v bouřkovém oblaku. Připadl také na myšlenku možné ochrany před bleskem, a to pravděpodobně zcela nezávisle na českém katolickém knězi, teologovi, přírodovědci, léčiteli, hudebníkovi a vynálezci Prokopu Divišovi. Není totiž známo, že by byl Franklin v nějakém osobním či písemném styku s badateli ze střední a východní Evropy. Prokop Diviš postavil v roce 1754 na farské zahradě v Příměticích u Znojma první uzemněný bleskosvod na světě. Divišův bleskosvod tvořila soustava asi čtyř stovek kovových hrotů uložených do několika uzemněných kovových krabic plných železných pilin a umístěných na stožáru vysokém několik metrů. Úkolem soustavy bylo odsávat elektřinu z bouřkových oblaků a předcházet tím škodám způsobeným úderem blesků. Diviš uvažoval i o tom, že by mohl elektřinu z blesků uchovat a dále použít [9]. Divišův bleskosvod skončil poněkud neslavně, když mu ho rozlícení vesničané povalili v domnění, že způsobil velká sucha. Franklinův bleskosvod se nakonec ujal v nepříliš pozmeněné podobě poté, co vynálezce přesvědčil místní radní, že svedením blesků do země opravdu nevznikne zemětřesení.

---

Ing. IVANA KOLMAŠOVÁ, Ph.D., Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Boční II 1401, 141 31 Praha 4 – Spořilov, e-mail: [iko@ufa.cas.cz](mailto:iko@ufa.cas.cz)

Až do začátku minulého století nebyly jiné prostředky pro pozorování blesků než fotografické a jednoduché spektrografické metody. První záznamy elektromagnetických signálů vyzářenýchbleskovými výboji pocházejí ze třicátých a čtyřicátých let minulého století. Moderní éra měření optických, elektrických a magnetických signálů s mikrosekundovou a submikrosekundovou přesností začala až v sedmdesátých letech minulého století s vývojem dostatečně rychlých elektronických obvodů [13].

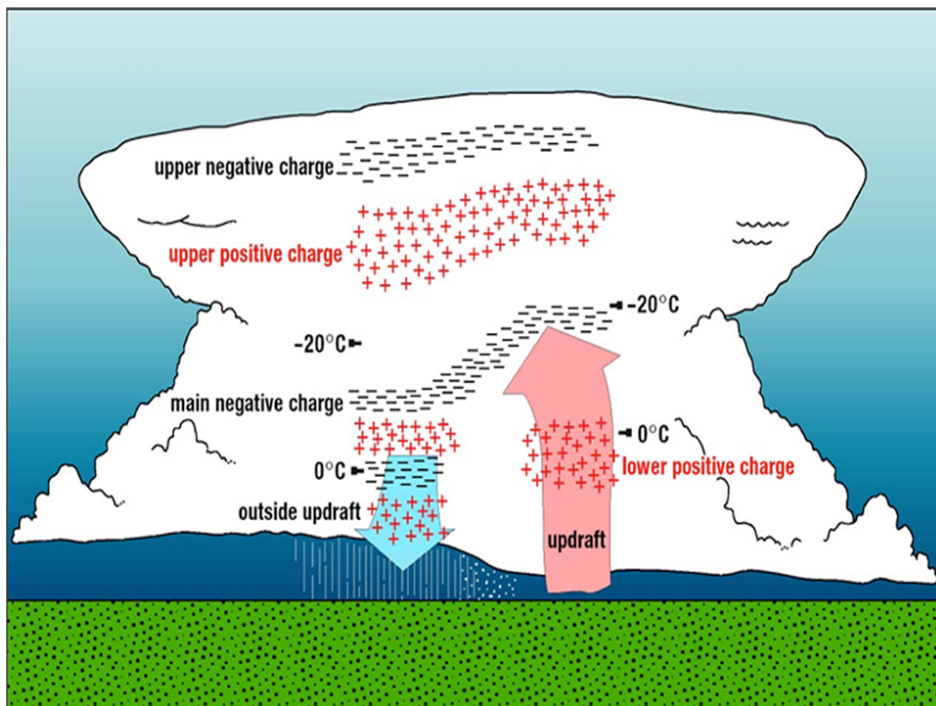
## 2. Terminologie

Vzhledem k tomu, že není mnoho českých publikací zabývajících se atmosférickou elektřinou, převzala jsem některé termíny z [2] a některé jsem si dovolila nově vytvořit. Anglické verze českých termínů jsou pro přehlednost vždy uvedeny v závorce za příslušným českým termínem.

Celý studovaný přírodní jev se nazývá blesk (*lightning flash*). Blesk se většinou skládá z řady bleskových výbojů (*lightning strokes*) následujících rychle za sebou s odstupy desítek až stovek milisekund. Fáze vzniku bleskového výboje v bouřkovém oblaku se nazývá iniciační fáze (*preliminary breakdown*). Další fází blesku je tzv. vůdčí výboj (*leader*), který postupně v krocích (*stepped leader*) vytváří kanál vysoce ionizovaného a zahřátého vzduchu. Fáze, ve které vytvořeným kanálem proteče značně velký proud o velikosti desítek až stovek kiloampérů, se nazývá zpětný výboj (*return stroke*). Občas zůstane bleskový kanál mezi jednotlivými bleskovými výboji ionizován a protéká jím tzv. udržovací proud (*continuing current*) o velikosti stovek ampérů až jednotek kiloampérů. Procesy odehrávající se v mraku mezi jednotlivými bleskovými výboji se nazývají K a M změny (*K-changes*, *M-components*).

## 3. Bouřkový oblak a jeho elektrifikace

Bouřkový oblak neboli *cumulonimbus* je místem, kde bleskový výboj vzniká. Bouřkový oblak má vertikální rozsah nejméně několik kilometrů a má tvar vysoké věže s horní partií protaženou ve směru výškového proudění větru, takže svým tvarem připomíná kovadlinu. Horní okraj bouřkového oblaku dosahuje až k tropopauze, někdy může dokonce prorůst i nad ní. Tropopauza je hranice mezi troposférou a stratosférou; je to místo, kde přestane teplota vzduchu s výškou klesat. Tropopauza je umístěna v našich zeměpisných šířkách ve výšce okolo 11 km, v rovníkových oblastech dosahuje až výšky 18 km nad hladinou moře. V bouřkovém oblaku se v různých výškách nacházejí oblačné částice různého druhu, jako jsou vodní kapky, přechlazená voda, sněhové vločky, sněhové krupky (2–5 mm), ledové krupky (2–5 mm) nebo kroupy (> 5 mm). Tyto oblačné částice se v bouřkovém oblaku pohybují směrem vzhůru působením stoupavých vzdušných proudů a padají dolů vlivem gravitace. Na oblačné částice se připojují nosiče elektrického náboje, přítomné v atmosféře díky ionizaci způsobené kosmickým zářením a radioaktivním zářením pocházejícím od radioaktivních prvků v zemi. Lehčí částice se nabíjejí převážně kladně, těžší se nabíjejí převážně záporně a při pohybu nahoru a dolů si neinduktivním způsobem (přímým dotykem) předávají elektrický náboj. Tím se v oblaku vytvoří vrstvy oblačných částic majících stejný náboj. Nejjednodušší model bouřkového oblaku má pak ve své horní části centrum kladného náboje a ve spodní části centrum záporného náboje. Nejpoužívanější je

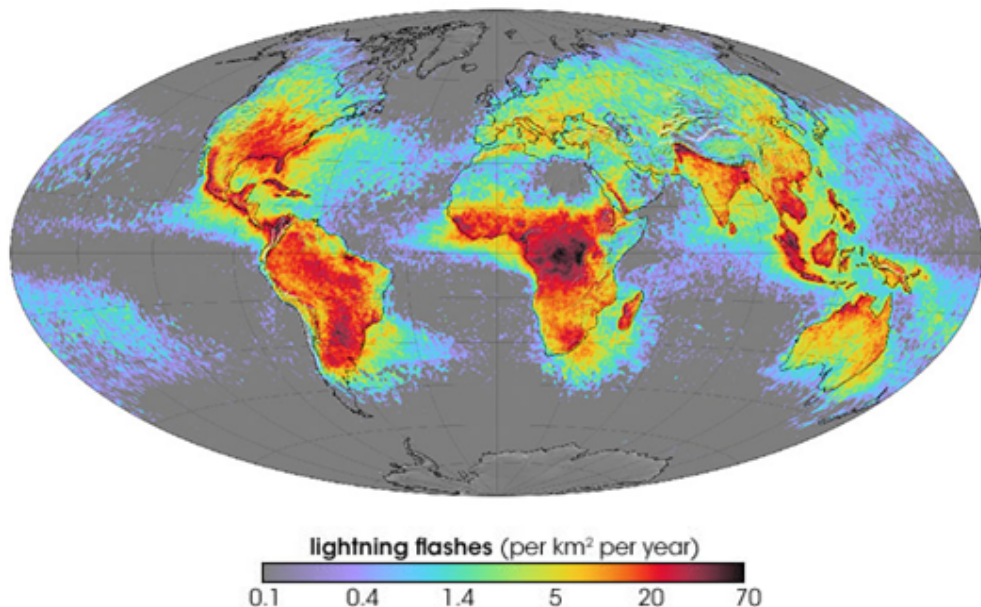


Obr. 1. Rozložení nábojových center v bouřkovém oblaku; kladný náboj je znázorněn křížky, záporný vodorovnými čárkami (převzato z <http://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/>).

tzv. třípólový model, který kromě hlavního centra záporného náboje a horního centra kladného náboje obsahuje ještě spodní centrum kladného náboje. Balónová měření [18] ukazují, že rozložení náboje v bouřkovém oblaku je mnohem složitější (obr. 1); ve stoupavém proudu vzduchu (*updraft*) zaznamenaly přístroje čtyři nábojová centra a mimo stoupavý proud vzduchu dokonce šest nábojových center.

Bouřkový oblak je součástí poměrně složitého systému atmosférických dějů probíhajících mezi zemským povrchem a ionosférou, což je vnější ionizovaná část atmosféry. Bouřkový oblak plní v tomto systému vlastně funkci obří baterie.

Elektrická pole naměřená uvnitř bouřkového oblaku dosahují maximálně hodnot  $1-2 \cdot 10^5$  V/m, což je hodnota desetkrát menší, než je očekávané průrazné napětí pro vznik výboje ve vzduchu [19]. Tento rozpor zůstává stále hádankou. Na vzniku bleskového výboje se může podílet vysokoenergetické kosmické záření, které se sráží s částicemi zemské atmosféry. Srážkami vznikají další a další částice a výsledkem je sprška tzv. sekundárního kosmického záření, která obsahuje také elektrony s energiemi vyššími než 100 keV. Takto rychlé elektrony se málo sráží s okolními částicemi a stávají se tzv. ubíhajícími (*runaway*) elektrony, neboť urychlující síla elektrického pole bouřkového oblaku převládne nad brzdou silou způsobenou srážkami. Ubíhající rychlé elektrony se tu a tam sráží s částicemi atmosféry a vyrobí další ubíhající elektrony. Lavina ubíhajících elektronů lokálně dostatečně zvyšuje ionizaci prostředí



Obr. 2. Mapa ukazující průměrný roční počet blesků na jeden čtvereční kilometr. Mapa byla vytvořena na základě dat naměřených družicemi NASA v letech 1995–2002 (převzato z <http://geology.com/articles/lightning-map.shtml>).

v bouřkovém oblaku a účinně snižuje (až desetkrát) potřebné průrazné napětí vzduchu [6]. Podle jiné teorie je bleskový výboj nastartován koronovým výbojem objevujícím se na hrotech tajících ledových oblačných částic, okolo kterých je lokálně zvýšené elektrické pole [17]. Podle [7] by mohly být za vznik blesku zodpovědné oba výše uvedené procesy. Kosmické záření spustí v oblaku lavinovitou ionizaci a uvolněné elektrony se pak podílí na vzniku koronových výbojů na hrotech ledových oblačných částic.

Rozložení bouřek na zemi není rovnoměrné. Nejvíce bouřek se vyskytuje v nižších zeměpisných šířkách nad pevninami, kde je dostatečně dobře splněna základní podmínka vzniku bouřkového oblaku, totiž velké rozdíly mezi teplotami mas vzduchu v různých výškách, které vedou k výskytu vzestupných proudů teplého a vlhkého vzduchu a sestupných proudů studeného vzduchu. V centrální a západní Africe, v rovníkové oblasti Jižní Ameriky, ve Střední Americe a v jihovýchodní Asii bychom našli místa, kde intenzita bouřek dosahuje hodnoty až desítek blesků na  $1 \text{ km}^2$  ročně (obr. 2).

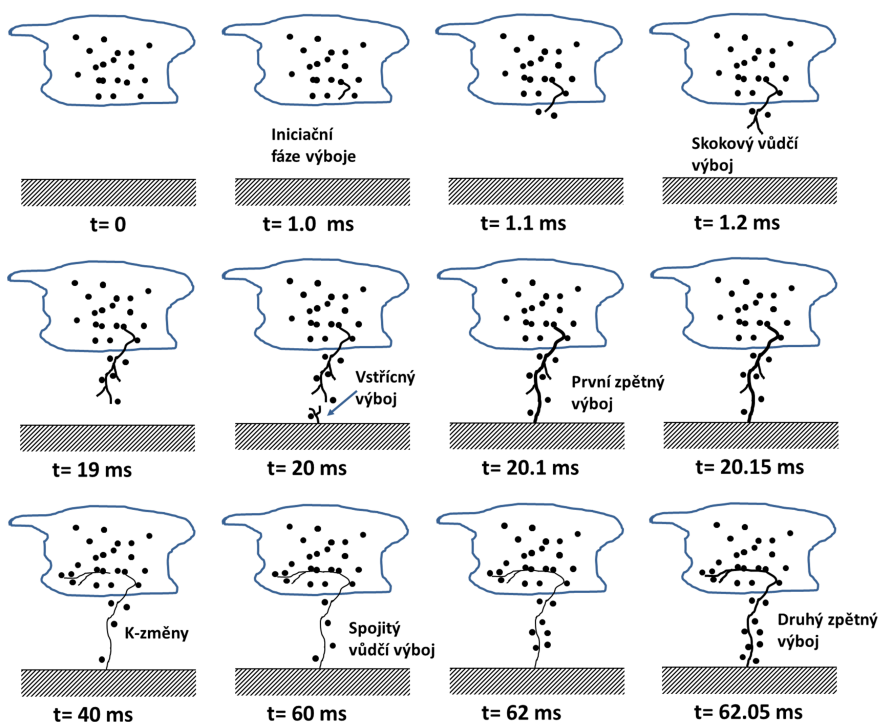
#### 4. Typy bleskových výbojů

Každou sekundu se na Zemi zablýskne v průměru padesátkrát až stokrát a bouřky v každém okamžiku pokrývají asi 1 % zemského povrchu [13]. Prostým pohledem na oblohu za bouřky zjistíme, že blesky mají nejrůznější tvary. Někdy jsou bohatě rozvětvené, jindy jen vidlicovité, svislé či vodorovné, méně často jsou hladké, existují i blesky připomínající svým tvarem stužku, pavučinu nebo korálky na šňůrce.

Rozlišujeme tzv. blesky oblak-oblak, tj. výboje mezi kladnými a zápornými nábojovými centry téhož bouřkového oblaku nebo různých oblaků a tzv. blesky oblak-země. Nejčastější blesky oblak-země jsou výboje mezi centrem záporného náboje a zemí (90–95 %). Méně často se vyskytují výboje mezi centrem kladného náboje a zemí. Výboje mezi centrem záporného náboje a zemí nazýváme blesky se zápornou polaritou neboli záporné blesky; výboje mezi centrem kladného náboje a zemí považujeme za blesky s kladnou polaritou neboli kladné blesky. Kladné blesky jsou nejen méně obvyklé, ale jsou s nimi spojeny i další zajímavé jevy. Občas se kladný blesk šíří oblakem i několik kilometrů vodorovně a opustí oblak v jeho horní, větrem protažené části, která přesahuje základnu neboli dno oblaku. Pozorovateli se pak může zdát, že blesk uderil „z čistého nebe“. Kladné blesky bývají také častěji následovány tzv. nadoblačnými blesky, kterým věnujeme samostatnou kapitolu. Tajemný kulový blesk si také zaslouží vlastní kapitolu.

## 5. Bleskový výboj a jeho části

Nejběžnější bleskový výboj je záporný výboj typu oblak-země. Vývoj takového výboje je znázorněn na obrázku 3. V čase  $t = 0$  jsou v bouřkovém oblaku vytvořena příslušná nábojová centra a začíná iniciační fáze, během které se uvnitř oblaku začne (z dosud

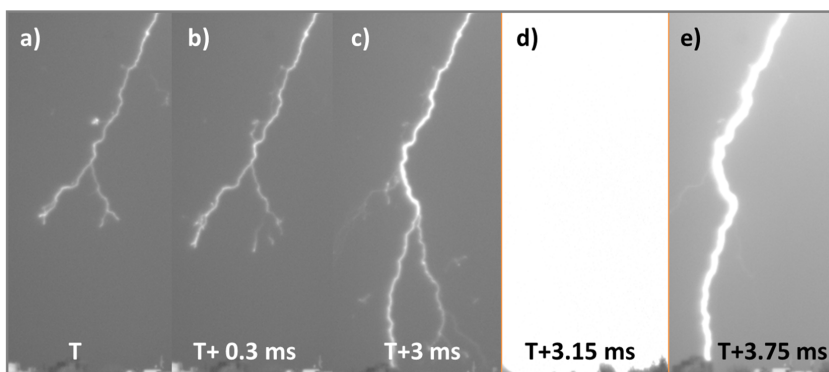


Obr. 3. Typický časový vývoj bleskového výboje typu oblak-země (autorka, adaptováno podle [13])

ne zcela jasných příčin, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole) rodit bleskový výboj a postupuje v krocích převážně směrem dolů. Méně často se může šířit i horizontálně. Tato část bleskového výboje je zatím poměrně málo prozkoumaná.

V čase  $t = 1.1$  ms výboj opustí bouřkový oblak, stává se z něj tzv. vůdčí výboj, který skokově ionizuje vzduch a vytváří vodivou cestu. Průměrná rychlost vůdčího výboje je  $\sim 10^5$ – $10^6$  m/s [14], protéká jím elektrický proud o velikosti několika desítek ampérů a jednotlivé skoky jsou většinou desítky metrů dlouhé. Jakmile se vůdčí výboj přiblíží zemi, začne se velmi často od nějakého vyvýšeného předmětu, nacházejícího se na zemi, šířit směrem vzhůru tzv. vstříčný výboj. Spojí-li se jejich ionizované cesty (na obrázku 3 v čase  $t = 20$  ms), vznikne vodivý kanál mezi zemí a oblakem, kterým se vzápětí ( $t = 20.1$  ms) šíří mohutný zpětný výboj směrem vzhůru rychlostí až třetiny velikosti rychlosti světla. Vůdčí výboj tedy vytváří vodivé spojení mezi oblakem a zemí, přičemž zanechává ve vodivém kanále záporný náboj z bouřkového oblaku. Zpětný výboj poté na své cestě vzhůru náboj neutralizuje. Takovým způsobem vlastně vůdčí a zpětný výboj společnými silami přenesou záporný náboj z oblaku na zem. Vodivý kanál je široký až deset centimetrů, teplota v něm dosahuje až  $30\,000$  °C, a protéká jím elektrický proud o velikosti desítek až stovek kiloampérů. Poté zůstává často kanál i nadále mírně vodivý a protéká jím udržovací proud. Pokud je v bouřkovém oblaku ještě dost nashromážděného náboje, tak následuje další vůdčí výboj šířící se dolů obvykle spojitě bez skoků (na obrázku 3 v čase  $t = 60$  ms) a další tzv. následný zpětný výboj (v čase  $t = 62.5$  ms). Obvyklý počet zpětných výbojů v jednom blesku je 3–5, byly pozorovány i blesky obsahující až 26 zpětných výbojů [13].

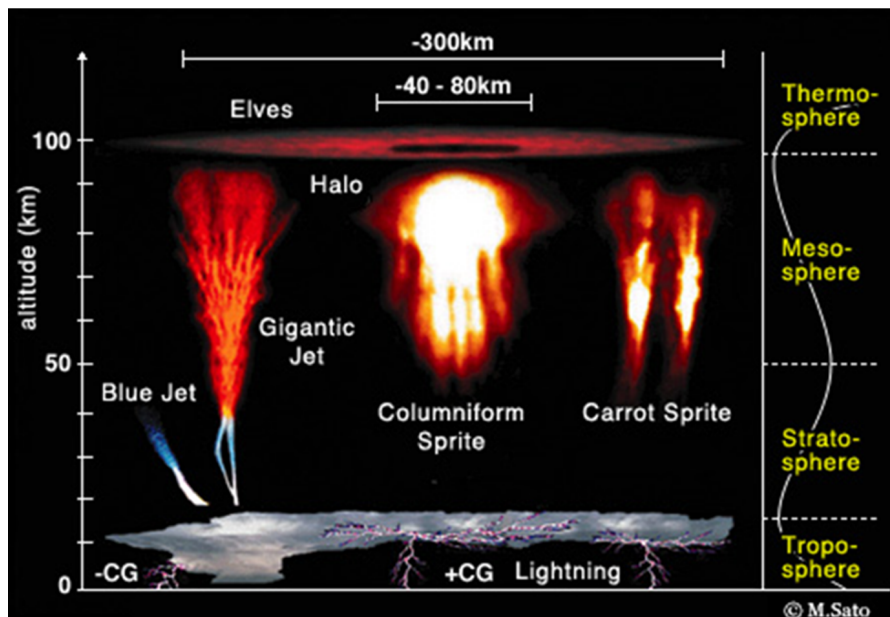
Bleskový výboj je vděčným objektem fotografií a kameramanů. Část bleskového výboje zahrnujícího vůdčí výboj, zpětný výboj a fázi udržovacího proudu zaznamenaná vysokorychlostní kamerou v Praze je vidět na obrázku 4.



Obr. 4. Blesk zaznamenaný vysokorychlostní kamerou: a), b), c) postupující vůdčí výboj; d) zpětný výboj vedoucí k saturaci čidla kamery; e) v bleskovém kanále teče udržovací proud (natočil R. Lán, Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR)

## 6. Přechodné světelné úkazy

Přechodné světelné úkazy (*Transient Luminous Events, TLEs*) neboli nadoblačné blesky jsou optické jevy pozorované nad oblastmi se silnou bouřkovou aktivitou v širo-



Obr. 5. Přechodné světelné úkazy zakreslené ve výškách, kde se obvykle vyskytují; v pravé části obrázku je znázorněna výšková závislost teploty v atmosféře (převzato z <http://www.isas.jaxa.jp/>).

kém rozmezí výšek mezi vršky bouřkových oblaků a spodní hranicí ionosféry (60–90 km podle denní či noční doby). Unikaly poměrně dlouho naší pozornosti, přestože jsou některé z nich pozorovatelné prostým okem. Vědci se jimi začali intenzivně zabývat až po roce 1990. Existuje šest základních druhů přechodných světelných úkazů; jejich názvy nám mohou znít až pohádkově. Nad rozsáhlými bouřkami se tak může objevit třeba červený skřítek (*red sprite*), halo, modrý spouštěč (*blue starter*), modrý výtrysk (*blue jet*), obří výtrysk (*gigantic jet*) anebo elf [11]. Rodina nadoblačných blesků včetně výšky jejich obvyklého výskytu je na obrázku 5. Nejběžnějším typem nadoblačného blesku je červený skřítek. Je opravdu zbarven červeně a má obvykle podobu sloupce, mrkve nebo vypadá jako medúza. Poprvé a vlastně náhodou skřítky natočil mladý vědec R. Franz v Minnesotské prérii před necelými 30 lety [4], když chtěl původně testovat kameru určenou na pozorování polárních září a namířil ji nad rozsáhlý systém bouřkových buněk (*Mesoscale Convective System, MCS*).

Skřítkci se vyskytují nejčastěji ve výšce 60–90 km nad povrchem země, velcí skřítkci mohou být i více než 40 km širocí. Předchází je obvykle silný kladný blesk typu oblak-země. Ve srovnání s plně ionizovaným kanálem „obyčejného“ blesku jsou „vlásky“ či „kořínky“ skřítků jen slabě ionizovány. Halo je světelný úkaz tvaru disku, který bývá často následován skřítkem a vypadá, jako by z něj skřítek vylézal. Méně obvyklý modrý výtrysk je kužel modrého světla šířící se vzhůru z vršku oblaku do výšky asi 40 km rychlostí 100 km/s [11]. Obří výtrysky jsou většinou dvojbarevné, ve spodní části modré a v horní červené. Barva je dána typem molekul nebo atomů, které jsou výbojem vybudeny a vyzáří pak světlo příslušné vlnové délky. Obří výtrysky se objevují nad



vrškem oblaku a mohou dosahovat až do výšek 90 km. Velmi často jsou doprovázeny značnou svítivostí bouřkového oblaku, ze kterého vycházejí. Elfové (*Emissions of Light and Very low frequency perturbations from Electromagnetically pulsed Sources*) jsou pokládány za nejrychlejší a největší přechodné světelné úkazy. Objevují se ve výškách kolem 100 km a rychle se šíří jako zvětšující se kruh do vzdálenosti stovek kilometrů. Jejich zdrojem jsou elektromagnetické impulsy generované silnými bleskovými výboji. Elektronů ve spodní části ionosféry, ohřáté těmito impulsy, se sráží s molekulami dusíku, které jsou tak vybuzeny a vyzáří expandující světelný kruh [5], [1].

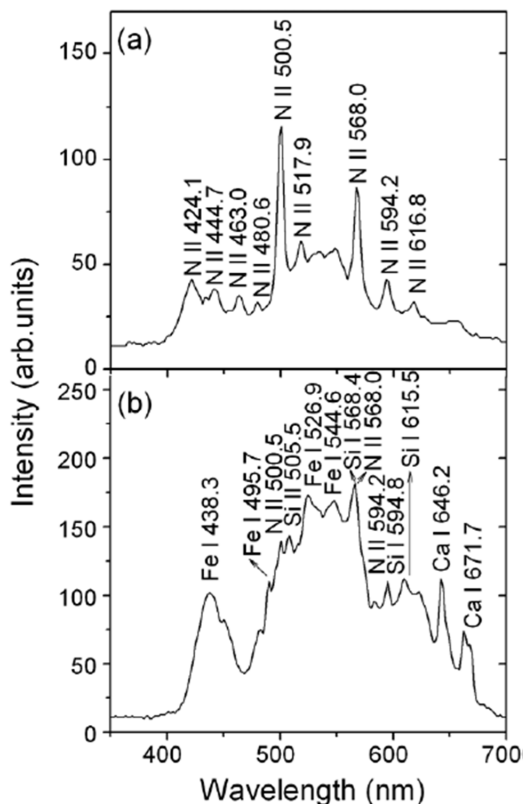
Přechodné světelné úkazy bude z výšky 700 km pozorovat družice TARANIS (*Tool for the Analysis of RAdiations from lightNING and Sprites*) pojmenovaná podle keltského boha hromu. Její start je naplánován na konec roku 2017 (bližší informace jsou k nalezení na <http://smc.cnes.fr/TARANIS/>). Na své palubě ponese unikátní sadu přístrojů včetně českého širokospektrálního analyzátoru radiových vln a elektro-nového detektoru.

## 7. Pozemské gama záblesky

Pozemské gama záblesky (*Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGFs*) byly objeveny neočekávaně v roce 1994 rentgenovým detektorem umístěným na družici COMPTON. Všechny pozorované záblesky vycházely ze zemské atmosféry, mířily do vesmíru a trvaly stovky mikrosekund až několik milisekund. Ukázalo se, že tyto pozemské záblesky jsou mnohem kratší než jiné jevy provázené gama záření a přicházející z kosmu [16]. Na výzkumu záblesků se také výrazně podílela družice RHESSI, původně určená k pozorování rentgenového a gama záření pocházejícího ze slunečních erupcí. Detektor na družici RHESSI zaznamenal fotony s energií přes 10 MeV, tedy energetičtější fotony, než přicházejí ze slunečních záblesků. Ukázalo se dále, že pozemské gama záblesky byly pozorovány výhradně nad oblastmi s intenzivní bouřkovou aktivitou. Mechanismus vzniku gama záblesků zjevně souvisí se silným elektrickým polem, přítomným v bouřkovém oblaku před úderem blesku. Podle nedávných pozorování [15] doprovázejí pozemské gama záblesky pravděpodobně skoky vůdčího výboje běžného blesku typu oblak-oblak v počátečních fázích jeho pohybu směrem vzhůru od centra záporného náboje k centru kladného náboje.

## 8. Kulový blesk

Kulový blesk je tajemný přírodní úkaz, který se zatím nepodařilo uspokojivě vysvětlit. Z výpovědí očitých svědků, pravděpodobně ovlivněných výjimečností situace, nelze vyvodit, jak kulový blesk vzniká a jaké má vlastnosti. Podle doložených svědectví mají pozorované objekty tvar bílé, žluté, oranžové či namodralé koule o průměru několika jednotek až desítek centimetrů. Většinou plují vzduchem rychlostí 0.1–10 m/s a často se pohybují podél vodivých předmětů. Celý úkaz trvá 10–20 sekund, pak se potichu či hlučně rozpadají. 50 % kulových blesků se rozpadá výbuchem, 40 % pomalu se syčením, 10 % se rozpadá na menší části [13]. Záhadou je, kde bere kulový blesk svou energii, když je schopen propálit díru v okenní tabuli, prorazit stěnu nebo rozbořit komín či dokonce dům. Zdroj energie by mohl být elektromagnetický, elektrostatický, chemický nebo jaderný. Vědci se snaží úkaz podobný kulovému blesku vytvořit v laboratoři ve



Obr. 6. (a) Optické spektrum bleskového kanálu běžného bleskového výboje typu oblak-země; (b) spektrum kulového blesku v okamžiku jeho vzniku (převzato z [3])

snaze pochopit jeho původ. Zatím nejúspěšnější byli brazilští vědci [12], kteří vytvořili v obloukovém křemíkovém výboji namodralé kulovité struktury o velikosti 1–4 cm, které se jim po dobu 2–5 sekund kutálely po laboratoři.

Zatím máme jen velmi málo vědeckých pozorování přírodního kulového blesku. Existuje jediný, a to náhodný záznam časového vývoje optického spektra kulového blesku, který se podařilo získat čínským vědcům [3]. Monitorovali dlouhodobě bouřkovou aktivitu ve snaze získat optické spektrum obyčejného bleskového výboje. V místě úderu jednoho takového běžného blesku se objevila svítící koule a videokamera zaznamenala spektrum obou blesků, běžného i kulového (obr. 6). Z obrázku je vidět, že se obě spektra výrazně liší. Ve spektru obyčejného blesku jsou přítomny převážně spektrální čáry jedenkrát ionizovaného dusíku, což není příliš překvapivé. Ve spektru kulového blesku jsou vidět výrazné spektrální čáry křemíku, vápníku a železa, což jsou prvky obsažené v půdě, do které běžný blesk udeřil. Takové spektrum podporuje hypotézu tzv. křemíkového kulového blesku, kdy se při úderu běžného blesku do půdy prudce zahřeje místo úderu a vznikne jakýsi vatovitý útvar složený z pomalu oxidujících nanovláken křemíkových sloučenin [10]. Tato hypotéza je velmi pravděpodobná v případě čínského pozorování, nevysvětluje ovšem všechna pozorování kulového blesku. Na úplné vysvětlení si budeme muset ještě počkat.

## L i t e r a t u r a

- [1] BARRINGTON-LEIGH, C. P., INAN, U. S.: *Elves triggered by positive and negative lightning discharges*. Geophys. Res. Lett. 26 (1999), 683–686.
- [2] BEDNÁŘ, J.: *Pozoruhodné jevy v atmosféře: Atmosférická optika, akustika a elektrina*. Academia, Praha, 1989.
- [3] CEN, J., YUAN, P., XUE, S.: *Observation of the optical and spectral characteristics of ball lightning*. Phys. Rev. Lett. 112 (2014), 035001.
- [4] FRANZ, R. C., NEMZEK, R. J., WINCKLER, J. R.: *Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system*. Science 249 (1990), 48–51.
- [5] FUKUNISHI, H., TAKAHASHI, Y., KUBOTA, M., SAKANOI, K., INAN, U. S., LYONS, W. A.: *Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere*. Geophys. Res. Lett. 23 (1996), 2157–2160.
- [6] GUREVICH A. V., ZYBIN, K. P.: *Runaway breakdown and the mystery of lightning*. Phys. Today 37–43 (2005).
- [7] GUREVICH, A. V., KARASHTIN, A. N.: *Runaway breakdown and hydrometeors in lightning initiation*. Phys. Rev. Lett. 110 (2013), 185005.
- [8] HARLAND, W. B., HACKER, J. L. F.: *“Fossil” lightning strikes 250 million years ago*. Advancement Sci. 22 (1966), 663–671.
- [9] KOLOMÝ, R.: *Benjamin Franklin (1706–1790) a jeho přínos k nauce o elektřině*. PMFA 48 (2003), 129–142.
- [10] KULHÁNEK, P.: *Na stopě kulovému blesku*. ALDEBARAN BULLETIN [online], 12 (4) (2014).
- [11] NEUBERT, T.: *On sprites and their exotic kin*. Science 300 (2003), 747–749.
- [12] PAIVA, G. S., PAVÃO, A. C., DE VASCONCELOS, E. A., MENDES, O., JR., DA SILVA, E. F., JR.: *Production of ball-lightning-like luminous balls by electrical discharges in silicon*. Phys. Rev. Lett. 98 (2007), 048501.
- [13] RAKOV, V. A., UMAN, M. A.: *Lightning – physics and effects*. Cambridge University Press, 2003.
- [14] SHAO, X. M., KREHBIEL, P. R., THOMAS, R. J., RISON, W.: *Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida*. J. Geophys. Res. 100 (1995), D2, 2749–2783.
- [15] SHAO, X. -M., HAMLIN, T., SMITH, D. M.: *A closer examination of terrestrial gamma-ray flash-related lightning processes*. J. Geophys. Res. 115 (2010), A00E30.
- [16] SMITH, D. M., LOPEZ, L. I., LIN, R. P., BARRINGTON-LEIGH, C. P.: *Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV*. Science 307 (2005), 1085.
- [17] SOLOMON, R., SCHROEDER, V., BAKER, M. B.: *Lightning initiation – conventional and runaway-breakdown hypotheses*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 127 (2001), 2683–2704.
- [18] STOLZENBURG, M., RUST, V. D., MARSHALL, T. C.: *Electrical structure in thunderstorm convective regions 3*. Synthesis. J. Geophys. Res. 103 (1998), 14097–14108.
- [19] VOLLAND, H.: *Handbook of atmospheric electrodynamics, volume 1*. Atmospheric electricity. CRC Press, 1995.