

Červené přízraky, elfové a pozemské gama záblesky

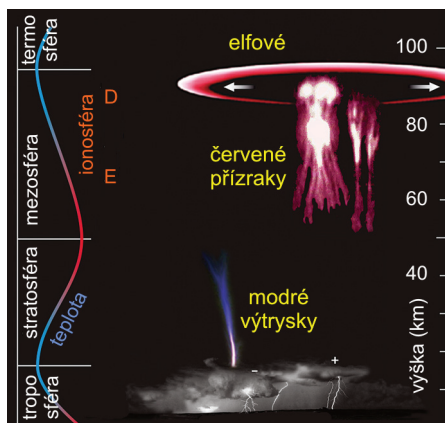
Troposféra – nejnižší vrstva atmosféry, ve které se tvoří počasí. Troposféra sahá od povrchu Země až do 7 km v polárních oblastech a 17 km okolo rovníku. Teplota troposféry klesá s nadmořskou výškou.

Stratosféra – vrstva atmosféry nad troposférou. Sahá přibližně do 50 km. Teplota s nadmořskou výškou roste.

Mezosféra – vrstva atmosféry nad stratosférou, přibližně do 80 až 85 km. Teplota s nadmořskou výškou klesá.

Termosféra – horní vrstva atmosféry, sahá od konce mezoféry přibližně do vzdálenosti 640 km od povrchu. Teplota s nadmořskou výškou stoupá.

Různé typy výbojů v horní atmosféře. Pravá stupnice znázorňuje výšku. Levá křivka odpovídá teplotě (nanášené na vodorovnou osu) v závislosti na výšce (na svislé ose). Dolní okraj vrstvy D v ionosféře je charakterizován prudkým nárůstem koncentrace elektronů. Právě v této oblasti se nacházejí hlavy červených přízraků a elfové. Evropská kosmická agentura.



Dnes víme, že bouře je mnohem komplikovanějším jevem, než jsme si dosud mysleli. Elektrické výboje mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí, které známe jako běžné blesky o energii 10^7 až 10^{10} J, jsou jen jedním průvodním jevem. Není to tak dávno, co se ukázalo, že některé typy výbojů mohou směřovat i vzhůru, z horních částí mraků směrem do ionosféry. Na přelomu tisíciletí byly také objeveny pozemské gama záblesky doprovázející rozsáhlejší bouřkovou aktivitu. Vědci tyto jevy ještě ne zcela pochopili a jsou proto předmětem rozsáhlého vědeckého výzkumu.

Červené přízraky, elfové a modré výtrysky

Záznamy o tom, že piloti letadel občas vidí výrazně barevné záblesky, (červené nebo modré), jsou velmi staré. Nikdo jim však nepřikládal většího významu. Teprve po nafilmování těchto atypických výbojů kamerami na raketoplánu se situace změnila a od roku 1990 započal jejich intenzivní vědecký výzkum. Za bouřek se z horních vrstev mraků ve výškách kolem 15 kilometrů občas vyvinou modré výtrysky (blue jets) mířící do horních částí stratosféry, do výšky 45 až 50 kilometrů. Dalším druhem výbojů jsou červené přízraky (red sprites) objevující se na dolním okraji ionosféry. Na fotografiích vypadají jako visící příšerky s hlavou zakotvenou v ionosféře. Kolem těchto výbojů se vytváří zářící kruhové oblasti, snad expandující prstence či disky, kterým se začalo říkat elfové (někdy také přízračná haló).

Pozemské gama záblesky

Gama záblesky pocházející ze Země byly objeveny v roce 1994 rentgenovou družicí COMPTON. Přístroj BATSE na této družici pozoroval přibližně 10 záblesků za rok až do zániku družice v roce 2000. Brzy se ukázalo, že v oblastech, ze kterých gama záblesky pocházejí, byla vždy intenzivní bouřková činnost. V angličtině se tyto záblesky označují TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashes). K jejich intenzivnímu výzkumu přispěla také družice RHESSI. Ukázalo se, že energie gama záblesků může být i přes 10 MeV, tedy jde o energetičtější fotony, než přicházejí ze záblesků slunečních. Záblesk trvá obvykle stovky mik-

rosekund až několik milisekund a míří od země směrem do vesmíru. Po gama záblesku následuje zpravidla běžný blesk směrem k zemi. Mechanismus tedy musí souviset se silným elektrickým polem, které je v mraku přítomno před vytvořením klasického blesku.

Fyzikální mechanismus vzniku gama záblesků není znám do detailů, ale většina odborníků se přiklání k názoru, že jde o průraz způsobený relativistickými elektrony. Pokud má elektron běžnou tepelnou energii, nemůže být v mraku urychlen na relativistické rychlosti potřebné ke vzniku gama záblesku. Jeho urychlení brání četné srážky s atmosférou. Stačí ale přítomnost jednoho jediného elektronu s velkou počáteční rychlostí. Takové elektrony vznikají jako sekundární částice při interakci kosmického záření s atmosférou. Je k tomu zapotřebí primární částice o energii $10^{18} \div 10^{19}$ eV. Rychlý elektron totiž s atmosférou interaguje výrazně méně, jeho střední volná dráha umožní další urychlení až na hodnotu $10 \div 20$ MeV.

Jak je to možné? Představte si pomalý elektron prolétávající kolem iontu v určité vzdálenosti. Jeho dráha bude elektrickou silou zakřivena. Pokud ve stejné vzdálenosti proletí rychlejší elektron, zakříví se jeho dráha méně. Tedy rychlejší elektrony s látkou reagují méně. Správně bychom měli říct, že účinný průřez interakce klesá a střední volná dráha roste. A právě takové rychlé (tzv. runaway, ubíhající) elektrony jsou výrazně urychlovány elektrickým polem v mraku, které má hodnotu $50 \div 400$ kV/m. Na své cestě takový energetický elektron vytváří další energetické elektrony schopné urychlení. Vytvoří se tak úzce směřovaný kužel s vrcholovým úhlem několika stupňů směrem vzhůru. Kužel je dlouhý cca 2,5 km. Nějakým mechanismem je svazek takto urychlených elektronů vymrštěn z horní hrany bouřkových mraků (cca 10 až 20 kilometrů) do výšky nad 30 kilometrů. Může jít o nějaký typ nestability, uvažuje se například o hvizdech nebo o nestabilitě vytvořené relativním driftem pomalých a rychlých elektronů. Ve výšce nad 30 kilometrů tyto elektrony svou energií vyzáří brzděním a vzniklý úzce směřovaný gama záblesk opustí Zemi. Do jaké míry souvisí tyto gama záblesky s vytvářením červených

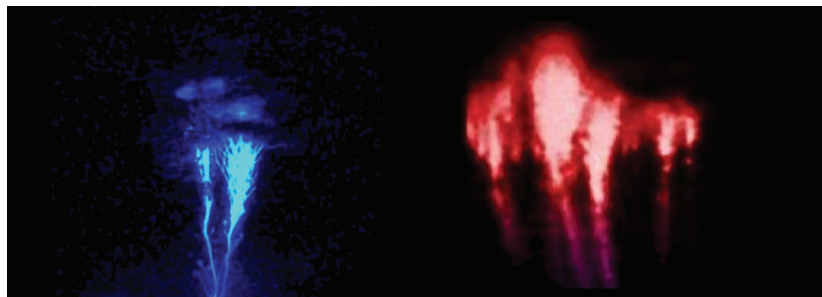
Ionosféra – slabě ionizovaná oblast atmosféry Země, dělí se na vrstvy E ($60 \div 90$ km), D ($90 \div 150$ km), F ($150 \div 800$ km). Přes den se vrstva F dělí na F1 a F2. Ve výšce 300 km je koncentrace 10^6 částic v jednom cm^3 .

Van Allenovy pásy – jde o nabitě částice (elektrony, protony a ionty O^+ , He^+) zachycené v okolí Země ve vzdálenosti 1,2 až $4 R_Z$ magnetickým polem Země. Tyto částice září. Jejich energie je od 1 keV do 100 MeV. Pásy objevil James van Allen z University of Iowa na základě měření družic Explorer 1 a 2.

Hvizdy – nízkofrekvenční elektromagnetické vlny (300 Hz až 30 kHz) šířící se podél magnetických silokřivek. Charakteristické je krátkodobé trvání s postupně klesající frekvencí vlny. Jde o modifikaci tzv. R vln. Poprvé byly pozorovány v kanálech blesků na Zemi Barkhausenem v roce 1919.

R vlna (pravotočivá vlna) – elektromagnetická vlna šířící se plazmatem podél magnetického pole. Elektrický vektor opisuje kružnici ve směru shodném s pohybem elektronů kolem silokřivek magnetického pole. Je-li frekvence oběhu elektronů shodná s frekvencí elektromagnetické vlny, dochází k tzv. cyklotronní rezonanci.

Červené přízraky se vyskytují ve větších výškách než modré výtrysky. Nalevo: modrý výtrysk. Napravo: Červené přízraky. V. Pasko, Penn State Electrical Engineering.



Historicky první komplexní nahrávka bouřkového gama záblesku doplněná nahrávkou optického senzoru a senzoru elektrického pole. Horní dvě nahrávky jsou ze scintilačních detektorů (energie gama fotonů > 3 MeV). Nahrávka (c) je z optického senzoru a je na ní patrný záznam pěti blesků. Nahrávka (d) je ze senzoru elektrického pole, patrný je pokles pole souvisící s blesky. Poslední nahrávka je z plastového scintilátoru a zaznamenávala fotony s energií nad 1 MeV. H. Tsuchiya a kol., arXiv:0708.2947v1, 2007.

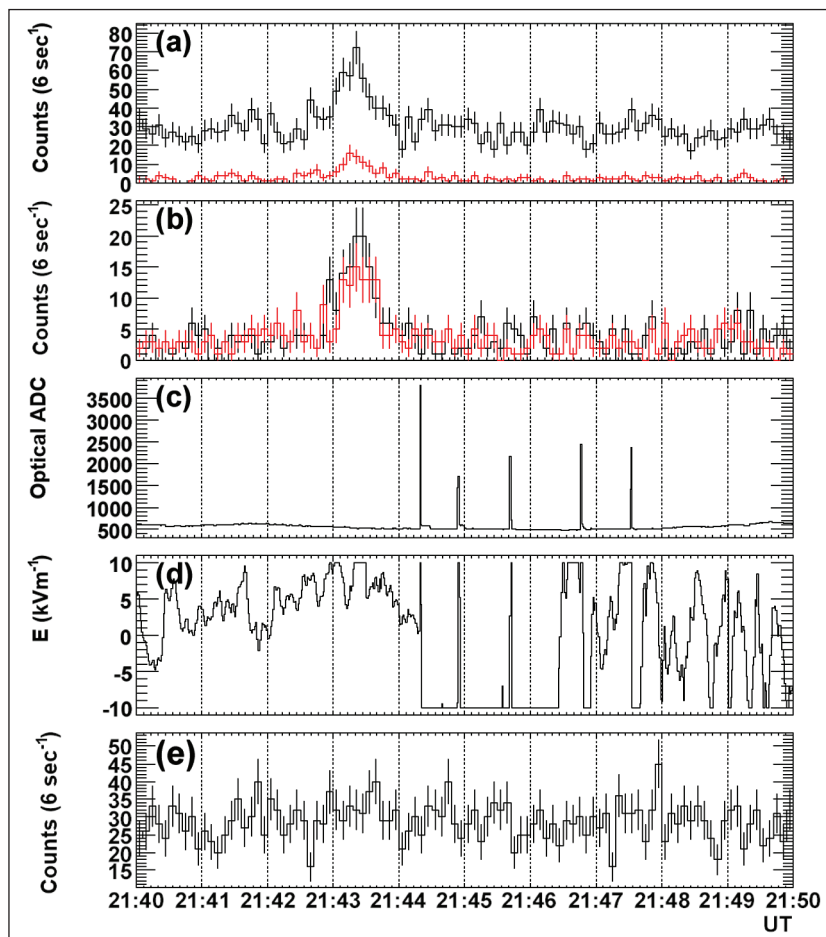
příznaků, elfů a modrých výtrysků není dosud známo. Také není jasné, zda mohou elektrony urychlené výše popsaným mechanismem plnit vnitřní van Allenův radiační pás, ve kterém byly elektrony o energiích 10 až 20 MeV detekovány.

Japonské pozorování gama záblesku ze Země

Dne 6. ledna 2007 byl v Japonsku při silné bouři pozorován zcela výjimečný gama záblesk přímo ze země. Výjimečný byl z několika

hledisek. Poprvé byl pozorován mimořádně přesnými přístroji se směrovou citlivostí a současně byla pořízena nahrávka v optickém oboru. Záblesk zcela zjevně mířil k zemi, na rozdíl od záblesků pozorovaných na oběžné dráze. Největší záhadou je ovšem délka trvání záblesku přes 40 sekund! Všechny záblesky pozorované z vesmíru mají maximální délku několik milisekund.

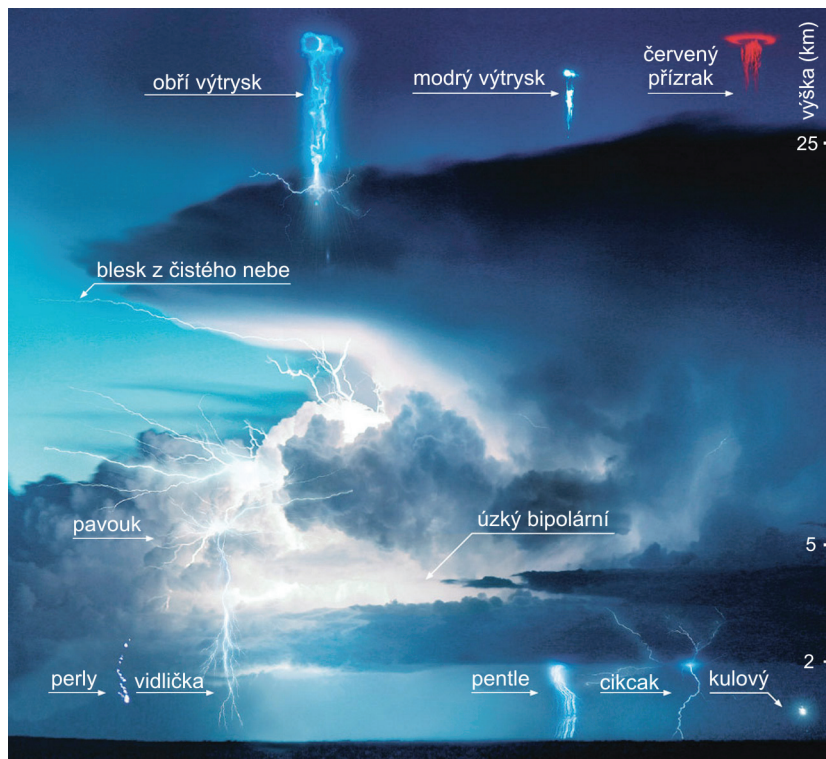
Gama záblesk pozorovala skupina vedená Harafumi Tsuchiyou z Laboratoře kosmického záření, která patří japonskému vědecko-výzkumnému centru RIKEN, dne 6. ledna v 21:43 světového času. Soustava několika scintilačních a optických detektorů byla umístěna na střeše jaderné elektrárny Kashiwazaki-Karima. Jeden typ detektorů byl schopen měřit v rozmezí energií $0,04\div 10$ MeV a druhý $0,6\div 80$ MeV. Na střeše byl také umístěn senzor elektrického pole a optický senzor. Všechny gama detektory zaznamenaly 40 sekund trvající záblesk s energetickým spektrem fotonů až do 16 MeV.



Energetické spektrum bylo mocninné, tj. počet gama fotonů byl úměrný E^β s koeficientem $\beta \approx -1,6$. Optický senzor následně zaznamenal 5 píků, které vědci interpretovali jako blesky, z nichž první následoval necelou minutu po gama záblesku. Vybití mraku bleskem způsobilo otočení polarizace elektrického pole na měřicím senzoru. Jde o první a zatím jediné takto komplexní proměření gama záblesku vzniklého při bouři. Doufejme, že obdobná měření budou následovat a přispějí k pochopení mechanismů odehrávajících se vysoko nad našimi hlavami. Snad k tomu přispěje i Evropskou kosmickou agenturou plánovaný výzkum výbojů v horní atmosféře na Mezinárodní kosmické stanici.

Na závěr připomeňme, že gama záblesky pozorované při bouřkové činnosti nijak nesouvisí s gama záblesky pozorovanými od 60. let 20. století z vesmíru. Poprvé byly sledovány síti špionážních družic VELA a pozorování byla odtajněna v roce 1973. Tyto záblesky mohou vznikat při zhroucení velmi hmotných hvězd na černé díry nebo při splynutí dvou neutronových hvězd či černých děr a označujeme je GRB (Gamma Ray Burst). Další druh gama záblesků vzniká při rekonekci magnetických siločar magnetarů a má označení SGR (Soft Gamma Repeater). Nepochybně existují i další, dosud nepoznané mechanismy vzniku gama záblesků z propastných hlubin vesmíru.

■ Petr Kulháněk, 5. 10. 2007, AB 39/2007



Při pozorování bouřkové činnosti ze země vidíme jen malou část bouřkových projevů, přibližně do výšky dvou kilometrů. K nejvyšším projevům patří červené přízraky, které jsou pozorovány i ve výškách kolem 80 kilometrů. Časopis Wired.

Elektronvolt (eV) – jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením v potenciálovém rozdílu jeden volt, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. V jaderné fyzice se používají spíše násobky této jednotky, kiloelektronvolt (keV, 10^3 eV), megaelektronvolt (MeV, 10^6 eV), gigaelektronvolt (GeV, 10^9 eV) nebo teraelektronvolt (TeV, 10^{12} eV). V těchto jednotkách se také vyjadřuje hmotnost ($E = mc^2$) a teplota ($E = kT$). Teplota 1 eV odpovídá teplotě přibližně 11 600 K.