

# 1. Blýskání



*Máš-li smůlu, pokouše tě i slimák.*

*Benjamin Franklin*

**N**ěkdy v době mých studií na gymnáziu jsme se vydali se spolužákem Vojtou ze základky na výlet na hrad Točnick. Jde o malebnou zříceninu mezi Berounem a Rokycany. Šli jsme ze Zdic do obce s prapodivným názvem Hředle a poté po žluté turistické hřebenovce směrem k Točnicku. Těsně před zříceninou nebe potemnělo a během několika sekund se rozpoutala bouřka nevídané intenzity. V nadmořské výšce přibližně 450 metrů nám příroda připravila mimořádný zážitek. Silný déšť nás téměř okamžitě promáčel skrz naskrz. Nebyl čas se někam schovat, bouřka vznikla velmi rychle. Déšť ale nepatřil k nejhorším prožitkům. Všude kolem nás dopadaly blesky s ohlušujícím rachotem a co chvíli osvítily ďábelsky se tyčící zříceninu hradu Točnick, která se tu a tam vynořovala z okolní tmy. Poprvé jsem měl z bouřky opravdový strach a uvědomoval si bezmocnost nás lidí před přírodními živly. Přibližně padesát blesků dopadlých v mé těsné blízkosti během několika minut se mně hluboce vrylo do paměti a zůstanou v ní do konce života. Tehdy jsem netušil, že nejde o mé poslední setkání s plazmatem a že se plazma stane dokonce každodenní součástí mého budoucího povolání. Lékaři mají pro náš zážitek dokonce pojmenování – *astrafobie* neboli chorobný strach z hromů a blesků. Prý se týká hlavně dětí. Nevěřím. Dodnes si myslím, že jediný člověk, který se opravdu nebál blesků, byla bláznivá Viktoria z naší tehdejší povinné školní četby.

## Plazma

Látka v kanálu blesku je typickým příkladem plazmatického skupenství. Než si vysvětlíme, co to plazma je, udělám jednu krátkou jazykovou odbočku. V česky psaných textech se pro plazma jakožto skupenství látky ujal střední rod (popisujeme to plazma, hovoříme o tom plazmatu, setkáváme se s tím plazmatem), zatímco pro

krvní plazmu se ujal rod ženský (v těle nám koluje ta plazma). Samotné slovo plazma je řeckého původu a znamená *formu* či *tvar*.

Pokud budete zahřívat kostku ledu, proběhne při určité teplotě fázový přechod ke kapalnému skupenství. Krystalická vazba se naruší (k tomu je třeba dodat energii v podobě tepla), molekuly vody se částečně osvobodí a jsou schopné samostatného pohybu. Vazby držící kapalinu pohromadě nejsou stálé, ale vznikají a zanikají podle toho, jak se sledovaná molekula v kapalině pohybuje. Kapalina má podobnou hustotu jako pevná látka, obě skupenství společně nazýváme *kondenzované stavy látky*. Při dalším zahřívání se naruší i mezimolekulární vazby v kapalině a látka se přemění v plyn. Hustota tohoto skupenství je podstatně nižší než u pevné látky nebo kapaliny. Plyn má spolu s kapalinou společnou volnost pohybu (tečení), proto oběma skupenstvím říkáme společně *tekutiny*. Na rozdíl od kapaliny mohou plyny vyplnit jakýkoli objem, ve kterém se ocitnou. Pevnou látku, kapalinu a plyn řadíme k tzv. klasickým skupenstvím.

Při dalším ohřevu látky dojde k *ionizaci* – uvolnění některých elektronů z atomárního obalu. K tomu je opět třeba dodat tepelnou energii a narušit určitý druh vazby – tentokrát vazby elektronu s atomovým jádrem. Vzniklé skupenství nazýváme *plazma*. Jeho vlastnosti se od ostatních skupenství velmi odlišují a změna chování při přechodu od plynu k plazmatu je největší ze všech popsaných fázových přechodů. V plazmatu se nacházejí volné nosiče nábojů (elektrony a ionty), a proto plazma jako jediné skupenství reaguje na elektrická a magnetická pole. Tato reakce je kolektivní: nabitě částice reagují společně, jako jeden jediný celek. Mohou se pod vlivem polí rozvltnit, vytvořit struktury složené ze stěn a vláken nebo mohou společně vytvořit makroskopická elektrická a magnetická pole. Hovoříme o tzv. kolektivním chování plazmatu. Všeobecně přijímaná definice plazmatu pochází od amerického fyzika a chemika Irwinga Langmuira (1881–1957), který již v roce 1928 použil slovo plazma pro ionizované prostředí, protože mu jeho vlastnosti připomínaly chování krevní plazmy. Langmuir sta-

novil tři základní podmínky, které musí plazmatické skupenství splňovat:

- 1. Plazma obsahuje volné nosiče nábojů. Zpravidla jde o elektrony a ionty různé násobnosti, které jsou schopné vést elektrický proud.*
- 2. Plazma vykazuje kolektivní chování – reaguje na elektrická a magnetická pole jako celek a je schopné obě pole samo vytvářet.*
- 3. Plazma je kvazineutrální, tj. obsahuje v každém makroskopickém objemu stejný počet kladných i záporných částic.*

Není bez zajímavosti, že tuto definici splňují i kovy, někdy proto hovoříme o kovech jako o chladném plazmatu. Některé typy plazmových vln byly poprvé objeveny právě v kovech, například ve vizmutu. Nás ale bude především zajímat plazma, které vzniklo ionizací plynů, ať již z důvodu vysoké teploty nebo vysokého tlaku.

Ve vesmíru je většina atomární látky v plazmatickém stavu. Z plazmatu je složeno nitro hvězd, za plazma lze považovat většinu mlhovin, mezihvězdné i mezigalaktické prostředí. Sluneční soustava je vyplněna plazmatem slunečního větru, plazma se nachází v magnetosférách planet. Jedinými neplazmatickými oázami jsou kamenné planety a měsíce. Naše Země je jedním z mála objektů ve vesmíru, na němž je plazma vzácností. Nalezneme ho ale v ionosféře, v kanálech blesků, v polárních zářích, v jiskrových výbojích statické elektřiny, v továrnách využívajících plazmové technologie a v tajuplných laboratořích plazmových fyziků.

## **Výzkum blesků**

Podstata blesku zajímala mnoho učenců, jedním z prvních byl řecký filosof Aristotelés ze Stageiry (384–322 př. n. l.). Aristotelés tehdy vyslovil domněnku, že blesk je světlo vznícených výparů, které stoupají ze země a srážejí se v mracích. Souvislost blesku s elektřinou prokázal experimentálně až o dvě tisíciletí později americký diplomat Benjamin Franklin (1706–1790).

Málokterý dnešní státník má zálibu v přírodních vědách. Spektrum zájmu současných politiků je poněkud odlišné a řekl bych že jednostranné. V dobách dávno minulých tomu tak ale nebyvalo. O americkém státníkovi a diplomatovi Benjaminu Franklinovi lze bez nadsázky také hovořit jako o významném přírodovědci a vynálezci. Mezi jeho záliby patřilo i pozorování bouřek a blesků. V polovině 18. století se rozhodl provádět aktivní experimenty v průběhu bouřek. V roce 1750 publikoval návrh, podle kterého by bylo možné prokázat souvislost bouřek s elektřinou. Za tím účelem nechal postavit ve Filadelfii výzkumnou věž; v průběhu její stavby ho ale napadlo, že by mohl bouřkové projevy zkoumat za pomoci letícího draku, kterého by vypustil směrem k bouřkovému mraku. Nápad to byl opravdu ďábelský a velmi riskantní.

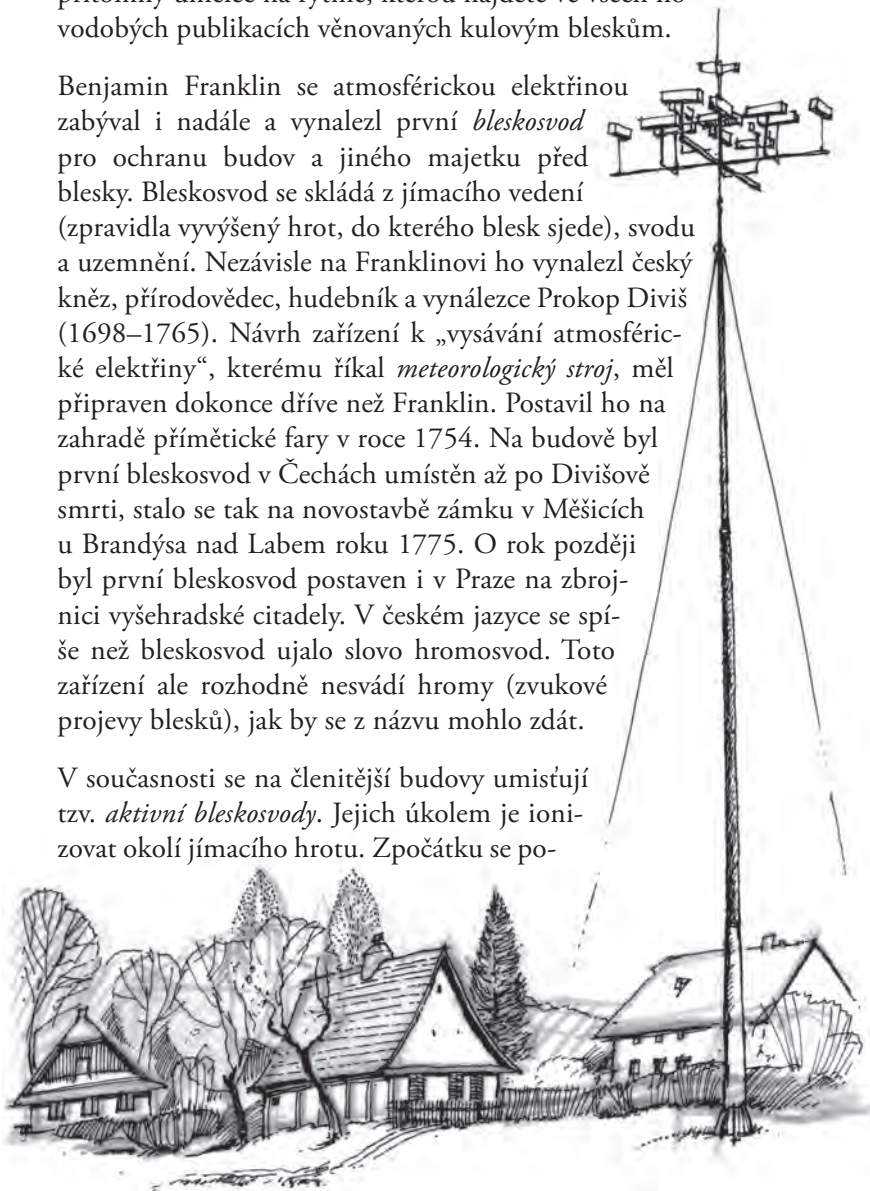
Spolu se synem v roce 1752 postavili draka a čekali na první bouřku. Jakmile se objevil bouřkový mrak, vypustili draka na šňůrce z hedvábí namotané na kovovém klíči. Déšť rychle šňůrku namočil, a tak se stala vodivou. Franklin nejprve pozoroval, že se uvolněná hedvábná vlákénka výrazně napnula. Poté mu z klíče na ruku přeskočila jiskra. Jako první tak dokázal, že bouřková činnost souvisí s elektřinou. Franklin tehdy netušil, že několik týdnů před ním provedl podobný experiment francouzský přírodovědec Thomas François Dalibard (1709–1799) ve vesničce Marly-la-Ville. Dalibard také v roce 1752 dokázal za pomoci 12 metrů vysoké tyče vytvářet při bouřce jiskry. K experimentům ho motivoval Franklinův článek z roku 1750. Franklin se s ním potkal až v roce 1767 při své návštěvě Francie.

Franklin měl při experimentech velké štěstí. Obdobné pokusy dělali i jiní vědci, kteří takové štěstí neměli. Německý profesor Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) nepochybně zaujal své současníky experimentem s elektroskopem umístěným na konci neuzemněné kovové tyče, který předváděl za bouřky několika účastníkům shromáždění Ruské akademie věd v Petěrburku. Dokonce se mu podařilo pravděpodobně vyvolat kulový blesk, který ho v zápětí zabil. Budiž mu útěchou, že jeho oběť na poli vědy zaznamenal

přítomný umělec na rytině, kterou najdete ve všech novodobých publikacích věnovaných kulovým bleskům.

Benjamin Franklin se atmosférickou elektřinou zabýval i nadále a vynalezl první *bleskosvod* pro ochranu budov a jiného majetku před blesky. Bleskosvod se skládá z jímacího vedení (zpravidla vyvýšený hrot, do kterého blesk sjede), svodu a uzemnění. Nezávisle na Franklinovi ho vynalezl český kněz, přírodovědec, hudebník a vynálezce Prokop Diviš (1698–1765). Návrh zařízení k „vysávání atmosférické elektřiny“, kterému říkal *meteorologický stroj*, měl připraven dokonce dříve než Franklin. Postavil ho na zahradě přímětické fary v roce 1754. Na budově byl první bleskosvod v Čechách umístěn až po Divišově smrti, stalo se tak na novostavbě zámku v Měšicích u Brandýsa nad Labem roku 1775. O rok později byl první bleskosvod postaven i v Praze na zbrojnici vyšehradské citadely. V českém jazyce se spíše než bleskosvod ujalo slovo hromosvod. Toto zařízení ale rozhodně nesvádí hromy (zvukové projevy blesků), jak by se z názvu mohlo zdát.

V současnosti se na členitější budovy umísťují tzv. *aktivní bleskosvody*. Jejich úkolem je ionizovat okolí jímacího hrotu. Zpočátku se po-



Obr. 1. Rodný dům Prokopa Diviše a jeho meteorologický stroj.

užívaly jímací hroty z radioaktivního materiálu, nyní vyšle vrchní část bleskosvodu za bouřky sérii pulzů různých frekvencí, které ionizují okolí hrotu jímací tyče a s předstihem připraví vstřícný vodivý kanál. Aktivní bleskosvody většinou nepotřebují samostatný zdroj energie, obsahují kondenzátor, který se za bouřky automaticky nabije. Chrání objekt do podstatně větší vzdálenosti od jímací tyče než klasický Franklinův bleskosvod. V Praze chrání aktivní bleskosvody například katedrálu sv. Víta, Národní muzeum, Památník národního písemnictví, Pražský hrad a další památky.

Vraťme se ale opět do minulosti. S blesky také experimentoval slavný vynálezce srbského původu Nikola Tesla (1856–1943), který celý život zasvětil pokusům s elektřinou. Je autorem mnoha vynálezů, například střídavého motoru, Teslova transformátoru, vodní turbíny nebo první rentgenové lampy. Jeho posedlost střídavým proudem umožnila široké využití elektřiny v průmyslu i v domácnostech. Na přelomu 19. a 20. století uměle vytvářel blesky v laboratoři v Colorado Springs za pomoci vysokého napětí. Cílem těchto experimentů bylo porozumět chování blesků tak, aby bylo možné před nimi ochránit dálková vedení rozvodů elektřiny.

V roce 1905 udeřil v Austrálii v blízkosti Sydney blesk do dutého měděného hromosvodu. Měděná trubka byla po úderu silně zdeformovaná a stlačená směrem k ose. Jev vysvětlil irský profesor fyziky na Univerzitě v Sydney James Arthur Pollock (1865–1922) spolu s australským strojním inženýrem Samuelem Henrym Egertonem Barracloughem (1871–1958) z téže univerzity. Protékající proud vytvořil silné magnetické pole, které stlačilo měděnou trubku. V současnosti tomuto jevu říkáme pinč efekt (z anglického slova *pinch*, které znamená *stlačit*). Část zdeformovaného hromosvodu je dodnes uložena jako vzácná památka na Univerzitě v Sydney. V roce 2005, který byl vyhlášen Mezinárodním rokem fyziky, jsme tak kromě objevu speciální relativity, vysvětlení fotoelektrického jevu a Brownova pohybu (tyto tři fyzikální oblasti jsou spjaty se jménem Alberta Einsteina) mohli také slavit zrod fyziky plazmových vláken neboli pinčů. V pinčích je plazma stlačováno



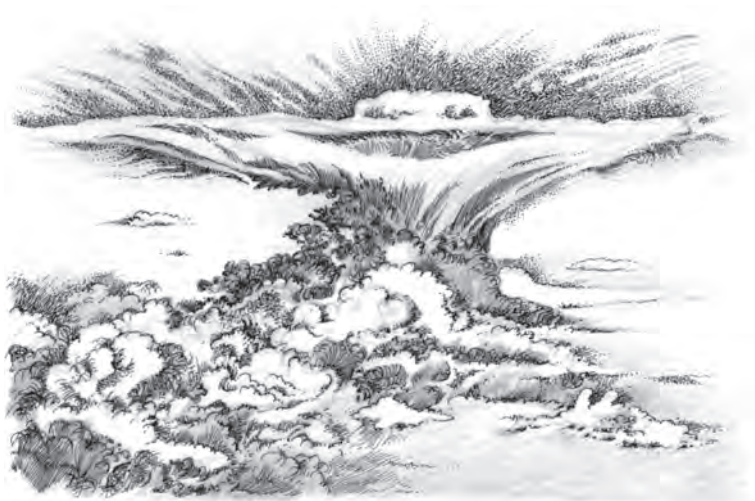
k ose stejným mechanismem, jakým byla stlačena měděná trubka australského hromosvodu v roce 1905. S pinči byly v 50. letech 20. století prováděny první experimenty s termojadernou fúzí, které po stočení plazmového vlákna do tvaru toroidu přerostly v dnešní fúzní experimenty na obřích tokamacích.

V současnosti se na mnoha místech provádí aktivní výzkum blesků. Stačí nastřelit do mraku meteorologickou raketu táhnoucí za sebou drátek a umělý blesk může být na světě. Metoda má mnoho výhod. Není třeba čekat na úder blesku. V blízkosti odpalovací rampy mohou být detektory částic, světelného, rentgenového i gama záření, čidla pro měření elektrického a magnetického pole, tekoucích proudů atd. Příkladem mohou být experimenty s meteorologickými raketami prováděné v Mezinárodním centru pro výzkum a testování blesků v Camp Blanding na Floridě, které je řízeno Floridskou univerzitou.

## **Jak vzniká blesk?**

Blesky vznikají v bouřkových mracích (v meteorologii se správně říká oblacích) neboli *Cumulonimbech*. Jejich latinský název znamená doslova dešťový sloupec. Mrak má zpravidla značné rozměry na výšku, horní část je rozšířená, takže se podobá kovadlině vyrůstající z květáku, prostřední část vytváří cosi jako stonek. Ve svislém směru probíhá intenzivní proudění vedoucí na značné turbulence. Proto se letadla těmto mrakům vyhýbají. V bouřkových mracích dochází k separaci náboje. Mechanismus není přesně znám. Jednou z možností jsou srážky drobných ledových krystalků s ledovými krupkami, při kterých přeskočí z krystalku na kroupu jeden nebo více elektronů. Lehké, kladně nabitě krystalky stoupají vzhůru, zatímco záporně nabitě kroupy a vodní kapky klesají směrem dolů. Výsledkem je polarizovaný mrak, jehož horní část (kovadlina) má kladný náboj a dolní část (květák) záporný náboj. Meteorologové navrhli i další mechanismy, které mohou vést ke stejné polarizaci bouřkového mraku.





Obr. 2. Bouřkový mrak – *Cumulonimbus capillatus incus*. Horní část obsahuje ledové krupky a její kovadlinový tvar vzniká zastavením vertikálního proudění o tropopauzu. Slovo *capillatus* znamená vlasatý a slovo *incus* kovadlina.

Spodní hrana bouřkového mraku může být od několika set metrů až do několika kilometrů. Horní část mraku dosahuje výšky až 17 kilometrů. Pokud se mrak pohybuje krajinou, jeho spodní (záporná část) odpuzuje v zemi elektrony a přitahuje kladné náboje. Výsledkem je, že pod mrakem má zemský povrch kladný náboj a tato kladně nabitá skvrna sleduje pohyb mraku. Ze spodní strany mraku se směrem k zemi *skokovitě* vytvářejí kanálky záporného náboje, jakási chapadla ne nepodobná chapadlům chobotnice (předvýboje). Vytvoření jednoho úseku trvá přibližně 50 mikrosekund a různými směry se může vytvořit i několik dalších úseků, a tím dochází k větvení blesku. Pokud je na zemi vyvýšená vodivá oblast (strom, komín nebo jen železná tyč), objeví se směrem vzhůru obdobné, ale kratší kanálky (předvýboje) s převládajícím kladným nábojem. Dojde-li k propojení, vytvoří se vodivý kanál *vedoucího výboje* a část záporného náboje ze spodní části mraku rychle protече směrem k zemi. Vzápětí se objeví *zpětný výboj* (trvá tisícinu sekundy), který přenesení kladný náboj ze země k mraku. Právě tento zpětný výboj ohřeje vodivý kanál na teplotu až 30 000 K,

což je pětkrát vyšší teplota než na povrchu Slunce, a my uvidíme zářící kanál blesku. Ohřáté plazma má až pětinasobně vyšší tlak než okolí a rychle expanduje. Vytvoří se nadzvuková rázová tlaková vlna, kterou slyšíme jako hrom. Základní mechanismus vzniku blesku objasnil jako první německo-americký fyzik Heinz Kasemir (1930–2007) v roce 1950.

Stejným kanálem může výboj proběhnout opakovaně (tam i zpět, tj. záporný výboj k zemi a poté kladný zpětný výboj k mraku). Zpravidla se tak děje dvakrát nebo třikrát, ale jsou i blesky, kdy počet opakovaných výbojů překročil dvě desítky. Jeden výboj trvá příliš krátce na to, aby lidské oko postřehlo jeho strukturu, typicky může jít o několik milisekund. Doba mezi opakovanými záblesky je 30 až 50 milisekund. Lidskému oku se proto zdá, že se bleskový kanál jakoby mihotá. Plazma se vytváří znovu a znovu a jeho vznik se střídá s temnými mezipauzami.

<b>Typické parametry blesku mezi mrakem a zemí</b>	
délka vodivého kanálu	kilometry
průměr kanálu	~ 5 cm
rychlost vytváření kanálu	~ 220 000 km/h
teplota	~ 30 000 K
elektrický proud	~ 30 000 A
potenciálový spád v kanálu	~ 100 V na metr délky kanálu
potenciálový rozdíl v mraku	až $100 \times 10^6$ V
přemístěný náboj	~ 10 C
uvolněná energie	~ 100 kWh (400 MJ)
nejvyšší okamžitý výkon	až 1 TW (nikoli po celou dobu)
tlak v kanálu blesku	~ 5 atm



Obr. 3. Země a ionosféra tvoří obří kulový kondenzátor. Náboj země je záporný a ionosféry kladný. V místě, kde se nachází bouřkový mrak, se indukuje obrácené elektrické pole.

# Bouřky

Bouřku zažil mnohokrát každý z nás. Bouřky jsou na Zemi velmi častým jevem. Na celém povrchu Země udeří v průměru padesát až sto blesků za sekundu a proběhne 200 000 bouřek denně. Nejčastější frekvence bouří byla naměřena na jedné náhorní planině v jihoamerickém Peru, v nadmořské výšce 2 500 metrů. Na jednu lokalitu se zde vyskytuje 50 až 120 bouřek za rok. Jejich průměrná délka je 45 minut a frekvence blesků 15 až 20 za minutu. Bouřky se objevují náhle, zejména odpoledne a večer. Planina je relativně hodně osídlená a domorodci popisují, že těsně před bouřkou slyší bzucení, vstávají jim vlasy a uši dobytka jiskří. V této oblasti je zasažení dobytka bleskem častým jevem, nezdídko je zasažen i člověk. Celosvětově je ale počet úmrtí člověka z důvodu zasažení bleskem velmi malý vzhledem k ostatním příčinám násilné smrti. Mnohem pravděpodobnější je, že vás srazí na přechodu pro chodce jedoucí automobil nebo vám ze střechy spadne na hlavu taška.

Přesto je dobré za bouřky neriskovat a dodržovat alespoň elementární bezpečnostní pravidla. Pokud nejste zrovna uprostřed zuřící bouřky, je dobré odhadnout její vzdálenost. Světlo blesku se šíří rychlostí 300 000 km/s, zvuk hromu rychlostí 340 m/s. Zatímco světelný záblesk vidíte téměř okamžitě, zvukový doprovod může dorazit až za několik sekund. Je-li bouře vzdálená 1 kilometr, uslyšíte hrom přibližně za tři sekundy. Pokud tedy vydělíte počet sekund, jež uplynuly mezi bleskem a hromem třemi, získáte přibližně vzdálenost bouřky v kilometrech. Zcela v bezpečí jste, pokud je bouře vzdálená přes deset kilometrů, tj. od blesku k zahřmění uplyne přes půl minuty. Uvedme několik jednoduchých zásad chování za bouřky:

- 1. Pokud jste doma, počkejte, až bouře přejde. Pokud jste v kovovém objektu, zůstaňte v něm (například v autě, autobuse, ve vlaku). Kovové objekty tvoří tzv. Faradayovu klec a případný blesk bude sveden po kovové schránce do země. Ani z letadla se nedoporučuje za letu vystupovat, zde to platí nejenom za bouřky.*

2. *Pokud se nacházíte v otevřeném terénu, sedněte si na bobek s nohama u sebe a nehýbejte se. Tím minimalizujete pravděpodobnost zásahu bleskem i úraz krokovým napětím od blesku, který udeřil ve vaší blízkosti.*
3. *Za bouře nepobíhejte v otevřeném terénu, nechodte po hřebenech a vrcholcích hor, neplavte v rybnících a řekách, nestůjte blízko vysokých předmětů. Je-li v blízkosti prohlubeň, přesuňte se do ní.*
4. *Neschovávejte se v jeskyních, často je zde zvýšená radioaktivita (a tím ionizace vzduchu a vodivost), vlhká a vodivá půda, zábradlí a lana, která snadno vedou proud. Jeskyně jsou nejčastějším místem hromadných úrazů při bouře.*

Chcete-li se pokochat bouřkovou aktivitou v České republice, podívejte se na webovou stránku [3]. Je zde mapa míst, do kterých za posledních deset minut udeřil blesk. Můžete si vyhledat i starší mapy a sledovat vývoj bouřkové činnosti za určité období. Na mapách jsou zakresleny jak normální blesky (se zápornou polaritou), tak blesky s kladnou polaritou, o kterých si teprve povíme.

V historii Země mohly bouřky sehrát značnou roli. V prostředí, které ionizovaly blesky, vznikají různé organické molekuly, a tak mohly časté bouřky na úsvitu dějin Země ovlivnit vznik života. V dobách pozdějších se bouřky staly zdrojem rozsáhlých lesních požárů, jež jsou přirozenou součástí životního cyklu lesa a tím i vývoje naší planety.

## **Další druhy blesků**

K nejčastějším bleskům patří výboje uvnitř mraku nebo mezi různými mraky. Na jeden blesk mezi mrakem a zemí připadnou tři až čtyři blesky uvnitř mraků nebo mezi mraky. Pokud se mrak rychle pohybuje, jednotlivé výboje probíhající v jednom kanálu oko nerozliší a nám se zdá, že vidíme *plošný blesk*.

Z blesků mezi mrakem a zemí tvoří 90 až 95 procent blesky, které jsme popsali. Vycházejí z dolní (záporné) hrany mraku a míří

směrem k zemi. Někdy je nazýváme *blesky se zápornou polaritou*. V pěti až deseti procentech vznikne *blesk s kladnou polaritou*. Záporný (elektronový) předvýboj vychází ze Země a kladný předvýboj z horní vrstvy mraku, většinou míří ve vodorovném směru i několik kilometrů a teprve poté se skloní k zemi. V místě, kde se oba předvýboje spojí a udeří blesk vůbec nemusí být bouřka. Někdy hovoříme o *blesku z čistého nebe*. Základní výboj (elektrony ze země) míří od země k mraku, teprve zpětný výboj, který zahřeje hlavní kanál, míří z mraku na zem. Blesky s kladnou polaritou jsou, co se proudu týče, o řád silnější než blesky se zápornou polaritou a trvají přibližně desetkrát déle. Jsou nejčastější příčinou lesních požárů. Často se vedou diskuse, zda jsou dnešní letadla vůči bleskům s kladnou polaritou dostatečně chráněna. Blesky s kladnou polaritou jsou doprovázeny velkým množstvím nízkofrekvenčních elektromagnetických vln v rádiovém oboru. Směr blesku a tím jeho polaritu snadno určíme z jeho větvení.

Podle tvaru můžeme blesky mezi mrakem a zemí a blesky v mračích dělit na plošné, rozvětvené, vidlicovité, perlové, pavučinové a jiné. Existují ale i výboje vedoucí z horní vrstvy bouřkových mraků směrem vzhůru k ionosféře. K nejnámějším patří tzv. *modré výtrysky*, které míří z výšky přibližně 15 km do výšky 45 až 50 km. Mají charakteristické modré zabarvení, nejužší část je na horní vrstvě mraků a blesk se postupně rozšiřuje směrem do stratosféry. Na existenci různých barevných blesků ve vysokých výškách upozorňovali piloti letadel již velmi dávno. Nikdo jim však nepřikládal většího významu. Seriozní výzkum započal až v 90. letech 20. století, kdy byly tyto blesky nafilmovány z raketoplánu. Nyní se zkoumají i z Mezinárodní vesmírné stanice. Na dolním okraji ionosféry (ve výšce 80 až 90 kilometrů) se objevují různé načervenalé výboje, některé vypadají jako příšerky visící za hlavu z ionosféry dolů, těm se začalo říkat *červené přízraky*. Kolem nich se vytvářejí zářící kruhové oblasti, tzv. elfové (z anglického *elves*, což je zkratka pro *Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources*) nebo přízračná halo. Mechanismus vzniku těchto atypických blesků je zatím nejasný.

Zcela jiný druh blesků vzniká v prašném prostředí, kde se může snadno vytvářet statický náboj. Jde například o prachová oblaka nad sopkami (viz obrázky 2 a 3 v barevné příloze), prachové bouře v pouštích nebo dým nad lesními požáry. I zde je vhodné prostředí pro vznik výboje podobného blesku, jehož vodivý kanál má délku ve stovkách metrů. U lesních požárů jde svým způsobem o kladnou zpětnou vazbu. Lesní požár vytvoří prach a dým nad hořícím porostem a v něm iniciované blesky pomáhají udržovat požár.

## Může za vznik blesku kosmické záření?

Vznik blesku není dodnes zcela pochopenou záležitostí. Typické pole v mraku nemá hodnotu průrazného napětí. Mezi horní a dolní vrstvou mraku může být napětí ve stovkách milionů voltů. Průrazné napětí v mraku se odhaduje na dva miliony voltů na metr, této hodnoty ale elektrické pole v rozlehlém bouřkovém mraku nedosahuje. Při vzniku blesku se proto uplatňují i další faktory, za nejvýznamnější je považováno kosmické záření<sup>1</sup>, které atakuje atmosféru a při těchto srážkách vzniká sprška sekundárních částic s vysoce energetickými elektrony (s průměrnou energií 20 megaelektronvoltů<sup>2</sup>), které přibližně sledují směr dráhy primární částice kosmického záření. Vytvoří jakýsi pomalu se rozšiřující „lívavec“ rychlých elektronů, které se řítí směrem k zemi. Pokud se na své

---

1 **Kosmické záření** – proud urychlených částic neznámého původu. Při interakci s atmosférou vzniká sprška milionů i miliard částic. Nejenenergetičtější částice kosmického záření, které se dosud podařilo detekovat, mají energie až  $10^{20}$  eV. Sprška z takové částice zasáhne na zemském povrchu mnoho desítek  $\text{km}^2$ . Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za sto let. Kosmické záření může vznikat v supernovách, pulzarech, aktivních galaktických jádrech atd. Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra hélia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku.

2 **Elektronvolt** – jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením za pomoci napětí (v potenciálovém rozdílu) jeden volt,  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Ve fyzice elementárních částic se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt (keV,  $10^3 \text{ eV}$ ), megaelektronvolt (MeV,  $10^6 \text{ eV}$ ), gigaelektronvolt (GeV,  $10^9 \text{ eV}$ ) nebo teraelektronvolt (TeV,  $10^{12} \text{ eV}$ ).



cestě potkají s bouřkovým mrakem, pravděpodobně sehrají při vzniku blesků rozhodující roli.

Běžný elektron je elektrickým polem mraku urychlován, ale srážky s ostatními nabitými částicemi v atmosféře (tzv. coulombické srážky neboli tření) ho zase brzdí. Při určité rychlosti se ustaví rovnováha mezi urychlováním elektronu a jeho brzděním a elektron již vyšší rychlost nezíská. Pokud má ale elektron hned na počátku vysokou rychlost (takový elektron může vzniknout jen při srážce kosmického záření s atmosférou), stává se pro něho atmosféra téměř průhlednou a účinný průřez coulombických srážek s atmosférou je minimální. Takový elektron je neustále urychlován elektrickým polem, protože jeho srážky s okolím jsou téměř zanedbatelné. Hovoříme o tzv. *ubíhajících elektronech* (v anglické literatuře *runaway electrons*), které mohou získat relativistickou rychlost a značnou energii. Jejich existenci předpověděl skotský fyzik a objevitel mlžné komory Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959) v roce 1924. Právě tyto elektrony mohou ionizovat atmosféru, vytvářet velké množství tepelných (málo energetických) elektronů a menší množství elektronů s vysokou energií, které se také stanou ubíhajícími elektrony. Tím dojde k lavinovitému procesu, průrazu a zformování blesku, jak navrhnul ruský fyzik Alexandr Gurevič (1930) v roce 1992. Ubíhající elektrony sníží průrazné napětí ze dvou milionů voltů na metr na pouhých 200 tisíc voltů na metr. Při průrazu ubíhajícími elektrony by měl vzniknout charakteristický rádiový pulz v megahertzové oblasti. Pulzy odpovídajícího průběhu byly Gurevičem a dalšími detekovány v roce 2003.

## Gama záblesky a rentgenové záření

Od 90. let 20. století jsou v bouřkově aktivních oblastech pozorovány krátké gama záblesky, a to jak z oběžné dráhy, tak z pozemských měřících stanic. Záblesky mívá většinou z bouřkových oblastí (z výšky 15 až 21 km) směrem vzhůru. Jako první je detekovala ve výšce 500 až 600 km v roce 1994 americká rentgenová družice

CGRO<sup>3</sup>, která jich za deset let své existence zachytila 77. Družicová observatoř RHESSI<sup>4</sup> je úspěšnější, z jejích pozorování se zdá, že jich je generováno na celé Zemi přibližně 50 denně. Oproti gama zábleskům přicházejících z vesmíru jsou atmosférické gama záblesky velmi krátké, většinou trvají kolem jedné milisekundy. Označujeme je zkratkou TGF (*Terrestrial Gamma-ray Flashes*). Jejich existence byla pro fyziky velkým překvapením. Energie těchto gama fotonů<sup>5</sup> občas překročí i hodnotu 20 MeV. V roce 2003 se Josephu Dwyerovi z Chicagské univerzity podařilo tyto gama záblesky vytvořit i uměle v blescích iniciovaných meteorologickou raketou nastřelenou do mraku.

Jak mohou fotony s vysokou energií při bouřce vznikat? Pravděpodobně je produkují ubíhající elektrony urychlené na relativistické rychlosti. Rychlé elektrony vzniklé interakcí kosmického záření s atmosférou interagují i s polem atypických blesků, například modrých výtrysků, a vytvořit lavinu *relativistických ubíhajících elektronů* mířících směrem vzhůru, která poté vyše gama záblesk.

Na dalším urychlování ubíhajících elektronů se mohou podílet i hvizdy, nízkofrekvenční elektromagnetické vlny vznikající jako doprovodné projevy blesků. Hvizdy se pohybují podél magnetických indukčních čar Země, rovina jejich elektrického pole se otá-

- 
- 3 **COMPTON** – Compton Gamma Ray Observatory, první obří družice NASA určená pro výzkum gama záření, hmotnost měla 17 tun a na oběžnou dráhu ji vynesl raketoplán Atlantis 5. 4. 1991. Mise byla ukončena 4. 6. 2000 navedením družice do zemské atmosféry, kde shořela. Přesnost určení polohy zdroje gama záření činila několik stupňů. Družice byla pojmenována po americkém fyzikovi Arthuru Comptonovi, nositeli Nobelovy ceny za fyziku, a to za výzkum rozptylu vysoce energetických fotonů na elektronech. Právě tento mechanismus sloužil k detekci gama záření na všech čtyřech přístrojích družice.
  - 4 **RHESSI** – Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, malá družice NASA vypuštěná 5. 2. 1992. Jejím hlavním cílem je výzkum uvolňování energetických částic při náhlých slunečních vzplanutích. Pohybuje se na kruhové dráze kolem Země ve výšce 600 km. Pojmenována je podle Reuvena Ramatyho (1937–2001), který je průkopníkem sluneční fyziky, gama astronomie a výzkumu kosmického záření. Ramaty se narodil v Rumunsku, většinu života ale pracoval v USA v NASA.
  - 5 **Gama obor** – elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami kratšími než setina nanometru, tj.  $10^{-11}$  m. Frekvence tohoto záření je vyšší než  $3 \times 10^{19}$  Hz. Nejčastěji se záření charakterizuje energií fotonů, která je pro gama záření vyšší než 0,1 MeV.

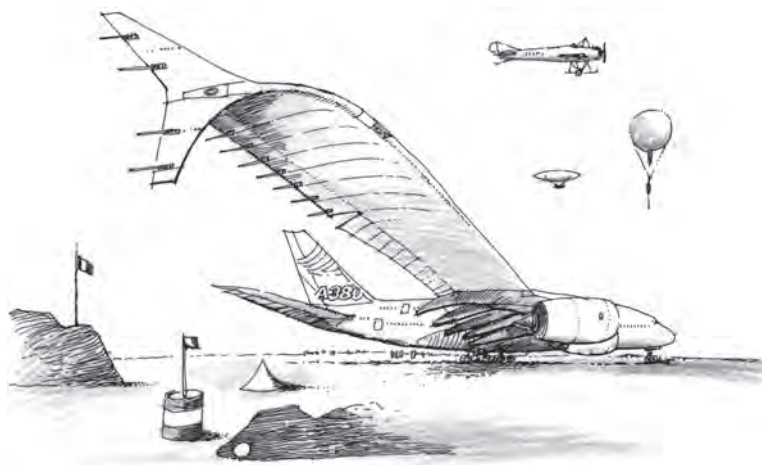
čí ve stejném směru, v jakém se pohybují elektrony po šroubovících v magnetickém poli. Elektrické pole vlny proto může přispět k dalšímu urychlení elektronů až na jejich relativistickou rychlost. Takové elektrony potom také vyzáří gama záblesk. Navrhovaných mechanismů je celá řada a pochopení vzniku gama záblesků při bouřkové činnosti se teprve začíná rýsovat v hrubých obrysech.

Jednu milisekundu před prvním zpětným úderem blesku vzniká z neznámých příčin intenzivní rentgenový záblesk. Poprvé ho pozorovali Michael McCarthy a George Parks z Washingtonské univerzity v roce 1984. Pravděpodobně nějak souvisí se skoky při vytváření vedoucího kanálu. Záblesk trvá až minutu a má energii kolem 50 keV. Při bouřkách vzniká i slabý rentgenový šum. V tomto případě nejde o záblesky, ale o signál trvající několik desítek minut. Objeven byl při brazilském experimentu GGR (*Ground Gamma Radiation*) v roce 2005. GGR je scintilační detektor, který zaznamenává fotony v rozsahu energií 60 keV až 2,12 MeV, tedy jak rentgenové tak měkké gama záření. Detektor je umístěn v oblasti Cachoeira Paulista, 3 metry nad zemí, na okraji deštného pralesa. V blízkosti jsou i dvě odpalovací rampy, ze kterých lze uměle za pomoci meteorologických raket vyvolat blesky. Rentgenové záření se ale pravidelně objevuje i za běžné bouřky. Při vzniku ubíhající elektronů směrem vzhůru by také měly vzniknout urychlené protony mířící směrem k zemi. Při srážkách těchto protonů s uhlíkem, dusíkem, kyslíkem a argonem vznikají v atmosféře v malém množství radioaktivní nuklidy  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{16}\text{F}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  a  $^{38}\text{Cl}$  s poločasem rozpadu mezi 10 až 100 minutami, což dobře koresponduje s dobou, po kterou je měřeno rentgenové záření. Při experimentech byla detekována spektrální čára odpovídající energii 1,24 MeV. Ta přísluší rozpadu radioaktivního chlóru  $^{39}\text{Cl}$ , který vzniká při srážce protonu s argonem. Zdá se tedy vysoce pravděpodobné, že zdrojem rentgenového signálu při bouřce jsou radioaktivní nuklidy vznikající při srážkách urychlených protonů s běžnými atomy atmosféry. Podle některých simulací by mohl být za část rentgenového signálu zodpovědný i rozpad atmosférického radonu v silném elektrickém poli bouřky.

## Jsou letadla za bouřky bezpečná?

Letecký provoz je řízen tak, aby letadla, pokud je to možné, nevlétávala do bouřkových oblastí. I přesto je každé komerční letadlo v průměru jednou za rok zasaženo bleskem. V některých případech letadlo prolétávající bouřkovou oblastí blesk přímo iniciuje. Letadla jsou ale vůči tomuto jevu dnes již velmi dobře chráněna. Letadlo se stává součástí elektrického obvodu mezi náboji opačného znaménka. Proud teče vodivými částmi po povrchu letadla, který je navržen tak, aby byl blesk odveden okolo letadla až do speciálních míst (například na zadní hraně křídla), kde jsou umístěny difuzéry podobné malým anténkám, které rozptýlí blesk zpět do atmosféry. Cestující se tak případného blesku nemusejí bát. Nejdůležitější je, aby blesk nepoškodil elektroniku letadla a palivové nádrže. To jsou dvě nejkritičtější místa, která se snaží konstruktéři dnešních letadel chránit na prvním místě.

Poslední velká letecká neštěstí způsobená bleskem se odehrála před více než 20 lety. Pojdme se ale vrátit poněkud zpět. V roce 1963 bylo bleskem (pravděpodobně kladné polarity) zasaženo letadlo



Obr. 4. Difuzéry na zadní hraně křídla Airbusu A380-800 rozptylují atmosférickou elektřinu zpět do mraku.

Boeing 707 společnosti Pan Am při letu z Baltimoru do Filadelfie. V důsledku úderu blesku se vznítilo palivo v první rezervní nádrži. Následovala exploze na levém křídle, po které ztratil personál nad letadlem kontrolu. Všech 81 lidí na palubě zemřelo.

V roce 1967 zasáhl nad Iránem blesk vojenské letadlo Lockheed C-130B patřící Iránským vzdušným silám. Po explozi palivové nádrže zemřelo všech 23 lidí na palubě. V roce 1971 zasáhl blesk v Peru letadlo Lockheed L-188A společnosti Lansa. Vypukl požár a následně odpadlo pravé křídlo. Z 92 lidí na palubě přežila jako jediná sedmnáctiletá německá studentka Juliane Köpcke. Padala z roztržitého letadla s celou řadou sedaček, které se dostaly do výrazné rotace. Poté ztratila vědomí a probudila se v džungli s relativně lehkými zraněními (zlomená klíční kost, oteklé oči). V roce 1988 zasáhl blesk nad Německem dopravní letoun Swearingen Metroline. Letadlo ztratilo po úderu bleskem křídlo a všech 21 lidí na palubě zemřelo. Databázi leteckých neštěstí s podrobnějšími údaji naleznete na webové stránce [11].

Letecké společnosti přistoupily v 70. a 80. letech k razantním opatřením a v současnosti mohou létat jen letadla splňující speciální certifikáty odolnosti vůči bleskům a obdobné katastrofy by se již neměly u komerčních letů opakovat. Například palivové nádrže jsou zesíleny a palivový systém je konstruován tak, aby v žádné jeho části při zasažení bleskem nemohla přeskočit jediná jiskra. Problémem ale nadále zůstávají malá necertifikovaná letadla. Ta by za bouřky neměla vůbec létat.

## **Blesky na ostatních planetách**

Blesky jsou velmi rozšířeným jevem u všech planet ve sluneční soustavě, které mají atmosféry. V průběhu posledních desetiletí byly detekovány jak na terestrických planetách (Venuši), tak i na obřích planetách (Jupiteru, Saturnu, Uranu i Neptunu). Nejprozkoumanější jsou na Venuši, která má výjimečně hustou atmosféru a na Jupiteru, jenž je největší planetou sluneční soustavy.

Světelné a elektromagnetické záblesky na Venuši byly detekovány již při letech sondy Veněra 11 v roce 1978, která měla jak orbitální, tak přistávací část. Blesky na Venuši pozorovaly i další sondy, například Pioneer Venus (1978–1992), Galileo (sonda prolétla kolem Venuše v roce 1990) a Venus Express (startovala v roce 2005, u Venuše je od roku 2006). Atmosféra Venuše je zcela odlišná od zemské atmosféry, obsahuje 96 % oxidu uhličitého, silný skleníkový efekt ohřívá povrch planety až na 480 °C a povrchový tlak je 90 atmosfér, tedy devadesátkrát vyšší než na Zemi. I přes zcela odlišné podmínky je intenzita blesků a jejich prostorové rozložení obdobné situaci na naší Zemi. Zdá se, že obdobný je i mechanismus vzniku blesků. Při srážkách přechází elektrony z těžších částic na lehčí. V gravitaci následně těžší částice klesají a lehčí stoupají, čímž dojde k separaci náboje v mracích a ke vzniku elektrického pole. Zatím nejcitlivější přístroje pro sledování atmosférických jevů jsou umístěny na evropské sondě Venus Express, která byla na protáhlé oběžné dráze (250 až 66 000 km) kolem Venuše od roku 2006 do roku 2008. V roce 2008 byla oběžná dráha snížena tak, aby bylo možné pozorovat brzdění sondy o atmosféru. Mise je zatím prodloužena do 31. prosince 2012.

Jupiter je oproti Zemi a Venuši zcela jiným světem. Jde o obří plynokapalnou planetu složenou převážně z vodíku a hélia, jejíž hustota je pouhých 1,4 g/cm<sup>3</sup>, tedy srovnatelná s hustotou vody (1 g/cm<sup>3</sup>). Hmotnost planety Jupiter je 318krát větší než hmotnost Země, objem 1 400krát větší. Jupiter má oproti Zemi extrémně silné magnetické pole, jeho dipólový moment je 20 000krát vyšší než pozemský. Magnetosféra Jupiteru je největší ze všech planet sluneční soustavy. Na Jupiteru byly detekovány blesky (viz obrázek 4 v barevné příloze) podobné atypickým bleskům z horních vrstev zemské atmosféry (modré výtrysky, červené přízraky). Proudů v blescích jsou na Jupiteru desetkrát až stokrát vyšší než na Zemi. K výzkumu blesků na Jupiteru nejvíce přispěla sonda Galileo (u Jupiteru pracovala od roku 1995 do roku 2003, kdy byla navedena do atmosféry planety a shořela), zajímavé snímky pořídila i sonda New Horizons, která kolem Jupiteru prolétla v roce 2007.

## Víte, že

■ Víte, že kolem kanálu blesku vzniká velmi intenzivní magnetické pole, které v místě dopadu dokáže trvale zmagnetovat horniny? Jev se označuje zkratkou LIRM (*Lightning-Induced Remanent Magnetism*, bleskem vytvořený zbytkový magnetizmus).

■ Víte, že blesky, které udeřily do výškových budov (Eiffelova věž, Empire State Building) se větvi v nadpoloviční většině případů směrem vzhůru? Míří tedy opačným směrem než běžné blesky v rovinaté krajině a předvýboj obyčejného blesku záporné polarity vychází z budovy, ne z mraku. Prohlédněte si blesky zachycené nad Eiffelovou věží na obrázku 1 v barevné příloze.

■ Víte, že energeticky je jeden bleskový výboj ekvivalentní řádově 100 kilowatthodinám? Stowattová žárovka by mohla svítit přibližně měsíc. Proto není získávání energie z mraků příliš ekonomicky zajímavé. Navíc do místa úderu přichází jen desetina až setina původní energie. Zbytek je rozptýlen v podobě tepla, světla a rádiových vln.

■ Víte, že je v dolní části mraku malá oblast kladného náboje, která se nazývá kladné jádérko? Mechanismus vzniku této oblasti není dostatečně prozkoumán.

Každý příběh by měl mít na závěr nějaké poučení. A naše vyprávění o blescích? Tak třeba: *Za bouřky buďte opatrní a vše pečlivě sledujte. Vaše setkání s bleskem může být tím posledním.*