

Na hranici Země a vesmíru: Co mají společného tunguzská katastrofa, bombardování Měsíce nebo vznik života?

M. Ferus, L. Lenža, A. Knížek, P. Kubelík, V. Laitl

Hvězdárna a radioklub lázeňského města Karlovy Vary hostily začátkem října konferenci zaměřenou na pozorování a studium dějů v ionosféře. Tato svrchní vrstva pozemské atmosféry je velmi dobře pozorovatelná pomocí monitorů SID (z anglického *Sudden Ionospheric Disturbances*, náhlé ionosférické poruchy). Přestože se jedná o instrumentálně nenáročnou metodu, přináší informace o celé řadě jevů, jejichž podstata je sice zcela odlišná, ale jejich společným jmenovatelem je právě výrazný vliv na ionosféru. Patří sem například střídání dne a noci, které způsobuje změnu ve stupni ionizace a rozvrstvení ionosféry, impakt tělesa meziplanetární hmoty, sluneční erupce, gama záblesk z vesmíru či pozemské zemětřesení.

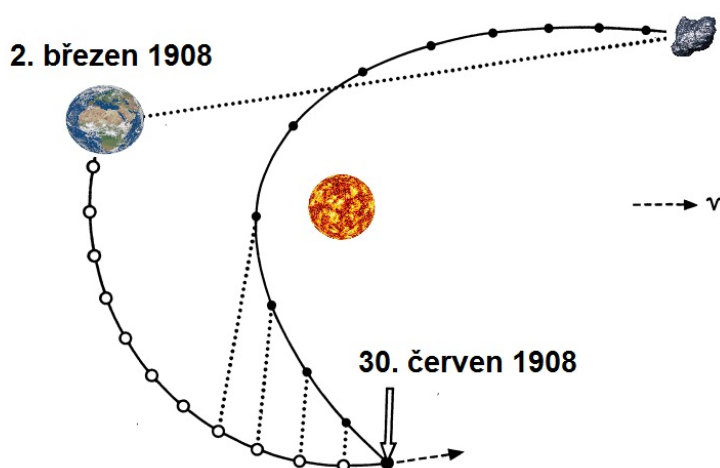
Psal se 30. červen 1908. Nad neobydlenou oblastí tajgy došlo ke kataklyzmatické explozi. Dodnes není jasné, co tuto událost způsobilo. Jaroslav Maxa z karlovarské hvězdárny ve své přednášce glosuje, že kdyby tehdy bylo možno sledovat poruchy ionosféry, tunguzská záhada by záhadnou nebyla. Zní to jako science fiction? Kdyby si tunguzská událost „počkala“ jen dvě desetiletí, byla by bezpochyby zaznamenána. S rozvojem rozhlasového a následně také televizního vysílání v meziválečném období již byly ionosférické poruchy sledovány a jejich souvislost například se sluneční aktivitou byla potvrzena inženýrem

Ionosféra je rozsáhlá oblast svrchní atmosféry lokalizovaná ve výškách od 60 do přibližně 1000 kilometrů, kde přechází do takzvané plazmasféry. Její charakteristickou a pro fyzikální chemii velmi zajímavou vlastností je přítomnost níže ionizovaného plazmatu, které se nachází v ionosférických vrstvách D, E, F₁ a F₂, případně i ve sporadické vrstvě E_s. Tyto vrstvy se od sebe liší výškou a stupněm ionizace zmíněného plazmatu a jsou odděleny lokálními minimy, takzvanými *valleys*, kde k ionizaci nedochází.

Johnem Howardem Dellingerem (1886-1962) a následně také vysvětlena fyzikem Hansem Mögelem (1900-1944) během 30. let [1]. „Signály z ionosféry by bezpochyby odhalily řadu detailů o fyzice této události a hlavně by bylo možné zjistit, jestli jí skutečně nepředcházely jevy, které jsou občas zmiňovány (např. údajné světélkování atmosféry měsíce před událostí) a které by poukazovaly spíše na pozemský původ katastrofy – uvolnění plynu podél geofyzikální poruchy, tvorba plazmoidů pohybujících se podél tektonických zlomů, apod.“ poznamenal Maxa.

Ať je to jakkoliv, Martin Ferus ve svém příspěvku naopak zmiňuje jinou teorii, a sice impakt fragmentu asociovaného s kometou *2P/Encke* z denního meteorického roje Beta Taurid [2]. Zde bychom měli zmínit, že toto zjištění publikoval ve svém článku v roce 1978 astronom Ľubor Kresák (1927 – 1994) z Astronomického ústavu Slovenské akademie věd [3].

Poslední čtyři miliardy let je na naší planetě nicméně celkem bezpečno, a to i přesto, že kromě tunguzské události lze hovořit o celé řadě kataklyzmatických impaktů. Nám jsou bezpochyby časově i místně nejbližší



Obr. 1. Dráha tunguzského objektu asociovaného s kometou *2P/Encke* podle Kresáka (přepřacováno podle [3]). Ilustrace rovněž ukazuje, že objekt letěl „od Slunce“ a nebyl tak pravděpodobně pozorovatelný tehdejší technikou.

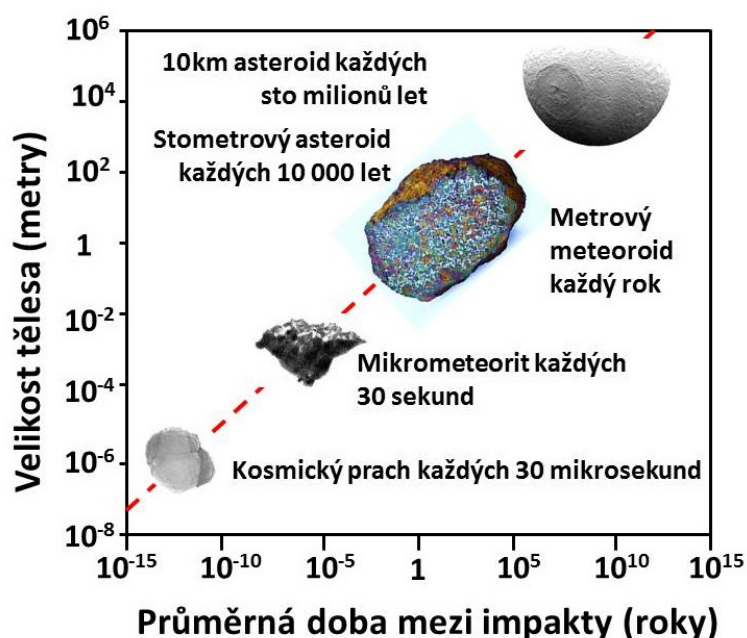
impaktní struktury u bavorských městeček Steinheim a Nördlingen ztotožňované s dopadem dvou těles před 14,6 miliony lety. Strašlivá událost nám zanechala překrásnou památku: „drahokamy“ vltavíny. Tektit vltavín (též moldavit) patrně vznikl vymrštěním hornin přetavených čelní vlnou těsně před dopadem asteroidů. Na základě analýz bublinek vzduchu zataveného uvnitř vltavínů bylo zjištěno, že tyto vzácné a nádherné kameny utuhly během své pouti ve velmi vysokých vrstvách atmosféry a následně dopadly do oblasti kolem Českých Budějovic, Brna, Lipska a rakouského Waldviertelu, poznamenali Libor Lenža a Jiří Srba

Tektitem obecně rozumíme horninu vzniklou během impaktu mimozemského tělesa, meteoroidu nebo komety. Během sestupu atmosférou, a především samotného dopadu, se uvolňuje velké množství energie, která se mění především na teplo iniciující procesy metamorfózy. Ty přeměňují původní horninu na převážně skloamorfní horninný materiál, tektit. Vzhledem i strukturou lze tektity přirovnat například k pozemskému sopečnému sklu, obsidiánu. Tektity se označují podle místa naleziště a jejich konkrétní chemické složení závisí především na mateřském tělese. Obecný chemický vzorec zmíněných vltavínů je $n \text{SiO}_2 \cdot n \text{Al}_2\text{O}_3$.

v následné diskuzi.

Beze všech pochyb je však nejznámější událostí tohoto druhu dopad asteroidu, který ukončil éru obřích plazů a znamenal nástup nové geologické epochy Země - třetihor. Na základě analýz sedimentů s vysokým obsahem iridia, které se v zemské kůře téměř nevyskytuje, Luis W. Alvarez z University of California tento scénář navrhl a datoval do doby 65 mil. let před současností [4]. V roce 1991 Alan R. Hildebrand následně tuto událost ztotožnil s kráterem Chicxulub v oblasti Mexického zálivu [5]. Znamenalo to epochální objev. Podrobnější popis události si můžete přečíst zde: https://technet.idnes.cz/dinosauri-vyhubeni-dopad-planetky-asteroid-chicxulub-druho-hory-ph1-/veda.aspx?c=A170407_140401_veda_mla.

Zmíněná, jakkoliv strašlivá kataklyzmata dělí desítky milionů let, během kterých panoval na naší planetě relativní klid. V současné době se Země statisticky setká s tělesem o velikosti 1 m jednou za rok. Setkání s většími tělesy mohou dělit desetitisíce i miliony roků. Projevy střetů s kosmickým smetím menších rozměrů pozorujeme častokrát během roku jako občasně meteory (sporadické meteory či tzv. bolidy s jasností větší než Venuše) či romantické roje „padajících hvězd“. Statistické rozdělení četnosti ukazuje ilustrace na obrázku 2. Dovedli bychom si představit, že by celou noc pršely tisíce meteorů za hodinu a velký asteroid by dopadl třeba i několikrát za století (a to je z geologického hlediska hodně často)? V minulosti Země i ostatních planet to tak skutečně bylo. Za touto podívanou bychom se však museli vypravit více než čtyři miliardy let do minulosti, do éry hadaika (4,6 – 3,8 mld. let). V době vzniku života



Obr. 2. Statistická pravděpodobnost střetu s meziplanetární hmotou různých velikostí.

„Peklo rané Země“ Dnešní podoba Země coby modré planety je výsledkem bezmála 4,6 miliardy let trvajících geologických, chemických i biologických procesů, během nichž byla zformována hydrosféra, atmosféra a lithosféra. Současné období geologického klidu však Zemi zdaleka neprovází po celou dobu její existence, ale počíná se až mesozoikem, druhohorami. V dlouhých geologických obdobích, která mesozoiku předcházela, prvohorách, starohorách a prahorách (paleozoiku, proterozoiku a archeozoiku) panovaly na Zemi podmínky, za nichž bychom ji dnes nepoznali. Vzpomínané hadaikum, nejmladší období prahor, získalo svůj název od antického boha podsvětí Háda. Jednalo se tedy doslova o peklo rané Země, kdy byla naše rodná planeta bombardována extraterestrickými tělesy a kdy byly praoceány a praozduší vyplněny jedovatými kapalinami a plyny. Přesto právě v tomto z dnešního pohledu zcela nehostinném prostředí byly položeny základy pro chemickou evoluci života, jaký dnes známe.

byl střet Země s meziplanetární hmotou 10 000x pravděpodobnější než dnes.

V přednáškách Martina Feruse a Svatopluka Civiše byla diskutována teorie, podle které dopad asteroidu mohl být jedním z energetických impulsů ke vzniku základních stavebních kamenů života – biomolekul, jako jsou nukleové báze, cukry, organicky vázaný fosfát – esenciálních bloků pro výstavbu biochemie první živé struktury patrně založené na ribonukleové kyselině (RNA) [6], [7], [8]. O vzniku života se toho v současné době příliš neví, vědecké poznání základních chemických principů formování biomolekul a jejich polymerů v podmínkách rané Země je velmi složité, a i přes to, že se mu věnují špičkové týmy po celém světě (např. skupiny Dr. Sutherlanda, prof. Saladina a Di Maura, Dr. Szostaka, Dr. Bennera) včetně tuzemských laboratoří, např. Oddělení spektroskopie Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR (skupina prof. Civiše a dr. Feruse), Biofyzikální ústav AV ČR (skupina manželů Šponerových), není v současné době možné prohlásit, že mechanismus vzniku života byl zcela jasně vysvětlen bez jakýchkoliv „ale“. Na svého Einsteina si tento obor patrně bude muset počkat.

O bombardování Země asteroidy v době, kdy se na ní formoval život, se ale ví s jistotou, která je vzhledem k tomu, že od něj uběhly 4 miliardy let, téměř ohromující. Libor Lenža ve své přednášce představil základní charakteristiky impaktních kráterů a struktur z hlediska morfologie a celé řady dalších parametrů. Dále se věnoval principům určování stáří kráterů na Měsíci a jiných kosmických tělesech. Právě datace impaktních kráterů, jizev na tváři našeho souputníka, odhalila, že většina impaktů se stala ve zmíněné době.

Libor Lenža se také zmínil o dvou základních principech datování stáří impaktních struktur. V případě, že můžeme odebrat vzorky hornin, lze stanovit izotopové složení a pro některé izotopy je možné použít metodiku radioaktivního datování. Využíváme znalostí o rychlosti (tzv. poločasu) spontánního rozpadu jednoho radioaktivního prvku na prvek jiný. Jednou z často používaných rozpadových řad je $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ s poločasem 1,4 miliardy roků. Přímo lokalizované vzorky máme pouze z naší planety, a naštěstí také z Měsíce (projekt Luna a Apollo).

Jenže počet vzorků z Měsíce je omezen, a tak si musíme pomoci jinou metodou. Ta vychází z jednoho ze základních principů geologické stratigrafie, tzv. principu superpozice. V případě impaktních kráterů na povrchu těles s pevným povrchem můžeme s dostatečnou jistotou předpokládat, že starší impaktní krátery jsou překryty těmi mladšími, novějšími. Na některých površích můžeme k relativnímu datování využít také vliv kosmického „zvětrávání“ – materiál na povrchu díky energetickému kosmickému záření tmavne apod. Světlejší barvy dna kráterů a impaktních výhozů mohou svědčit o relativním mládí těchto

Radioaktivní datování

Při využití této metody je nezbytné znát výchozí podmínky, kdy se poměr izotopů nastaví na „základní hodnoty“. V případě rozpadové řady $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ předpokládáme, že například při vulkanické činnosti či impaktu dojde k přetavení původní horniny až do podoby sklovité taveniny, ze které plynný argon zachycený v krystalových mřížkách minerálů vyprchá. Tím se nastaví tyto „hodiny“ na čas nula a dále měří čas postupnou přeměnou ^{40}K na ^{40}Ar .

struktur oproti těm tmavším ve stejných podmínkách. Dále můžeme využít relativního datování pomocí rozsahu sesuvů valů, tektonických zlomů a celé řady dalších geomorfologických jevů. Provedeme-li pečlivou statistickou analýzu impaktních kráterů a zakotvíme alespoň některá místa (odkud máme vzorky pro radioaktivní datování) v časové ose a pomůžeme si dalšími informacemi (například počtem impaktních kráterů na mladém povrchu vůči povrchu starému; na Měsíci typicky počet kráterů mezi měsíčními „moři“ a vysočinami), získáme mnohem lepší představu o časovém vývoji měsíčního povrchu a počtu impaktů v čase, včetně intenzity bombardování daného tělesa. Informace a časovou představu získanou díky měsíčnímu povrchu pak můžeme s určitými omezeními aplikovat i na jiná tělesa sluneční soustavy, odkud zatím vzorky hornin nemáme. Právě tyto složité analýzy nám dovolují poodhalit roušku děsivé smršti asteroidů a meteoroidů, které byla naše planeta vystavena v hadaiku.

Impakty asteroidů musely chemismus naší planety velmi ovlivnit. Dokonce lze hovořit o impakty řízené chemii raných planet, zmiňuje Martin Fergus. Bylo by nesmírně zajímavé předpovědět, jaké prostředí na těchto planetách lze očekávat, protože to může odpovědět na otázku, jak vypadala chemie rané Země v době vzniku života. Simulace impaktů asteroidů v laboratoři lze docílit například použitím vysoce výkonných laserů. Podmínky panující v plazmatu okolo meteoroidu padajícího atmosférou Země lze určit na základě přímého měření jeho fyzikálních parametrů. Těmi jsou například teplota, hustota a stupeň ionizace plazmatu a také výchozí složení objektu. Na základě těchto informací lze sestavit chemický model a vytvořit si tak představu o tom, jakým způsobem impakty asteroidů přispěly k chemickému složení rané Země a jeho změnám. Pro nastavení parametrů laboratorních pokusů však potřebujeme terénní data. Ta lze získat především spektroskopickým studiem meteorů.

Interpretaci spekter meteorů se věnovala přednáška Petra Kubelíka, který nastínil základní principy interpretace spektrálních dat. Postup založený na numerické simulaci emisních spekter meteorů, který zde byl prezentován, lze zjednodušeně popsat jako skládání emisních spekter prvků a sloučenin tak, aby se výsledné spektrum za daných podmínek (teplot, hustoty plazmatu a chemického složení) shodovalo jednak se spektry získanými v laboratoři a jednak se spektry reálných meteorů. Na toto téma je již recenzován odborný článek a na astro.cz se mu budeme velmi podrobně věnovat.

Kubelíkův student Vojtěch Laitl následně ve své přednášce popsal počítačové simulace související s interpretací monitoringu ionosférických poruch, jejichž studium je dlouhodobou tradicí právě karlovarské hvězdárny. Pomocí odrazu velmi dlouhých rádiových vln od nejnižší

vrstvy ionosféry (D) lze detekovat např. její poruchy způsobené slunečními erupcemi nebo lokální změny hustoty ionosférického plazmatu vyvolané průletem meteoru. Jako zdrojů tohoto dlouhodobého elektromagnetického záření se využívá vysílačů určených pro navigaci a komunikaci s ponorkami (v ČR lze zachytit signál např. z vysílačů DHO38 (Německo), HWU (Francie) nebo GBZ (Velká Británie)). Výpočty vedoucí k interpretaci těchto měření jsou však poměrně složité a párování dat se spektroskopickým a videopozorováním meteorů je v současné době v plenkách. V České republice se nicméně rýsuje vznik světově unikátní systematicky propojené sítě stanic, které budou sdružovat spolupracující baterie spektrografů, kamer, monitorů ionosféry, krátkodosahových a dalekodosahových radarů pro simultánní sledování meteorů. A to je úžasná věc s dalekosáhlým přesahem.

Dopady mimozemských těles do atmosfér planet ve všech stádiích jejich života mají velký vliv na jejich složení. Takovými transformacemi se zabývá Antonín Knížek. Ve své přednášce, která karlovarské setkání zakončovala, představil, jakým způsobem je možné v laboratoři přeměnit nereaktivní a stabilní atmosféru z oxidu uhličitého na reaktivní směs oxidu uhelnatého a metanu, to vše za použití slunečního světla. Oxid uhličitý je přeměněn na metan na povrchu kyselých minerálů. Z hlediska planetární chemie tyto pochody mohou vysvětlit fotochemickou transformaci atmosféry složené převážně z oxidu uhličitého na reaktivní směs plynů, ze kterých vycházel slavný Millerův experiment nebo také přítomnost metanu na Marsu. Metan ale může například představovat také palivo pro uzavřený uhlíkový energetický cyklus vycházející z oxidu uhličitého, významného polutantu a původce zhoršujícího se skleníkového efektu. Výzkum tedy souvisí nejen se vznikem života, ale také s hrozícím globálním oteplováním.

Všechny tyto aktivity podpořila v rámci projektu podpory regionální spolupráce Akademie věd ČR. Věříme, že tato instituce zaštiťující značnou část základního výzkumu v České republice zachová těmto aktivitám přízeň i nadále.

Poděkování: Konference byla podpořena projektem reg. č. R200401721 Regionální spolupráce krajů a ústavů AV ČR. Za dar pro účastníky konference děkujeme společností Jan Becher – Karlovarská Becherovka, a. s., a pivovaru Permon - Sokolovské pivo. Hvězdárna a radioklub lázeňského města Karlovy Vary, o. p. s., dále děkuje za podporu městu Karlovy Vary. Související výzkumné aktivity popsané v tomto článku byly a jsou podporovány interním grantem Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i., Grantovou agenturou ČR v rámci grantu 17-05076S a realizovány ve spolupráci s Hvězdárnou Valašské Meziříčí, příspěvkovou organizací Zlínského kraje. Děkujeme také Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., za zajištění experimentů simulujících chemické účinky impaktu asteroidů pomocí výkonného laseru Prague Asterix Laser System (PALS), společného pracoviště Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i.

Reference

- [1] J.H. Dellinger, J. Geophys. Res. 42 (1937) 49.
- [2] B. Napier, D. Asher, Astron. Geophys. 50 (2009) 18–26.
- [3] L. Kresák, Bull. Astron. Inst. Czechosl. 29 (1978) 129–134.
- [4] L.W. Alvarez a kol., Science (80-). 208 (1980) 1095–1108.
- [5] A.R. Hildebrand a kol., Geology 19 (1991) 867–871.
- [6] M. Ferus a kol., Proc. Natl. Acad. Sci. 112 (2015) 657–662.
- [7] M. Ferus a kol., Proc. Natl. Acad. Sci. 114 (2017) 4306–4311.
- [8] S. Civiš a kol., Nat. Astron. 1 (2017) 721–726.