

KOSMICKÉ ROZHLEDY

NEPERIODICKÝ VĚSTNÍK ČESKOSLOVENSKÉ ASTRONOMICKÉ SPOLEČNOSTI PŘI ČSAV

3/1982

KOSMICKÉ ROZHLEDY, neperiodický věstník Československé astronomické společnosti při Československé akademii věd

ročník 1982

číslo 3

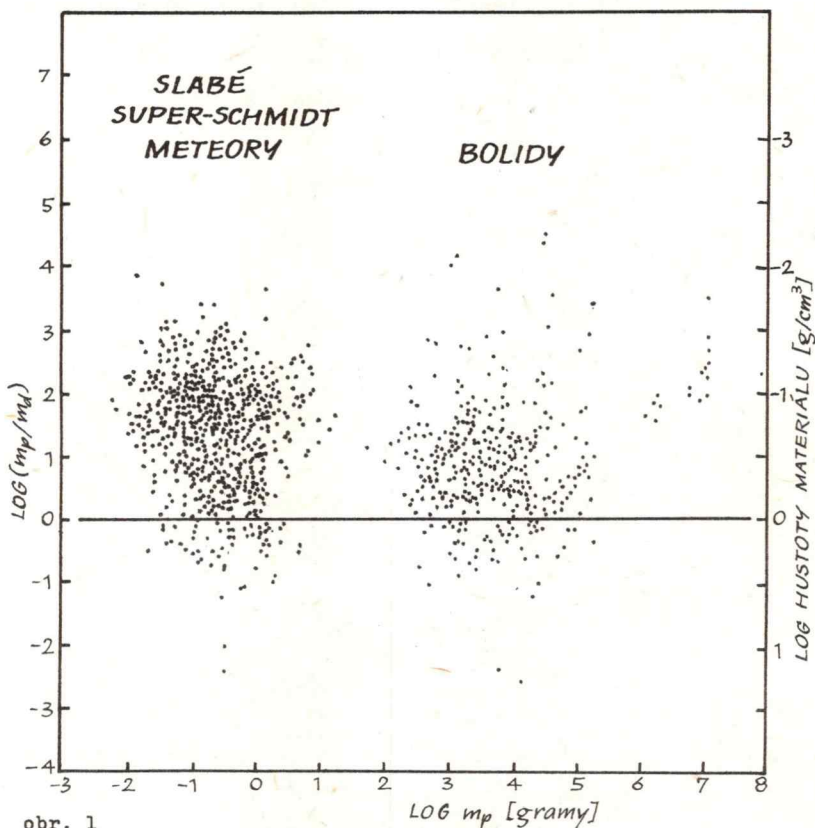
V. Padevět

Historie několika pokusů o teorii bolidů

1. "Paradox hmotností"

Jakmile začal být v šedesátých letech tohoto století k dispozici fotografický materiál o bolidech (tělesech o vstupních hmotnostech větších než řekněme 0,1 kg), hned se na ně začala aplikovat teorie tzv. jednoduchého tělesa formulovaná ve 30. letech. Pomocí teorie jsme chtěli získat o bolidech údaje, které nejsou dostupné pro přímá měření. Zajímala nás například hmotnost těchto těles a také struktura materiálu, který jev bolidu v atmosféře vyvolává. Chtěli jsme zkrátka vědět, z čeho ta tělesa jsou a jak jsou vlastně veliká. Ani jedno ani druhé se nám však nedařilo stanovit jednoznačně (až na pouhé tři případy, kdy se podařilo vyfotografovat pád meteoritů u Příbrami, Lost City a Innisfree). Jen v těchto třech případech jsme získali jasnou představu o struktuře materiálu, který tyto tři bolidy vyvolal. U všech ostatních bolidů dosud tápeme nejen v určení jejich materiálové struktury, ale i v určení jejich hmotnosti. Je tu totiž maličkost: teoretická Hoppeho hmotnost odvozená z dynamiky pohybu bolidu (neboli tzv. dynamická hmotnost m_d) nesouhlasí s teoretickou Őpikovou hmotností odvozenou ze svícení bolidů (neboli s tzv. fotometrickou hmotností m_p). U některých bolidů je to lepší, u jiných horší a zmíněný jev je variabilní i pro jeden a tentýž bolid v různých časových okamžicích. Kdyby obě hmotnosti byly pro týž bolid stejné (jak by tomu mělo být - vždyť jediné těleso nemůže mít současně dvě různé hmotnosti), pak by se všechny body na obr. 1 kupily kolem vodorovné přímky procházející nulou. Vidíme však, že ani u slabých meteorů (vlevo) ani u bolidů (vpravo) tomu tak není.

Střetly se tu zkrátka dvě autority (řekněme Hoppe s Őpikem) a nedokázaly se spolu dosud domluvit. Proto byla i "klasická" teorie meteorů slepencem dvou nezávislých částí: dynamických rovnic Hoppeho a fotometrické rovnice Őpikovy. A skutečně v této hybridní teorii byla ablovaná hmota (která těleso opustila) pro Hoppeho pouhým odpadem, už se o ni nezajímal a na pohyb tělesa tedy nijak nepůsobila. Naopak tatáž ablovaná hmota byla pro Őpika hlavním artiklem, jedině ona způsobovala svícení meteoru a toto svícení nezávi-



obr. 1

selo na dynamice pohybu meteoru, tedy na zrychlení.

Tak se Hoppe s Ůpikem dobře snesli vedle sebe v jedné teorii. Hoppe ablovanou hmotu vyhodil a Ůpik ji rozsvítil, nic dalšího od Hoppeho nežádal. Byla to značně jednostranná spolupráce. Každý si hrál na svém vlastním písečku, každý si vypočítal i svou vlastní hmotnost stejného tělesa a není divu, že po jejich konfrontaci obě hmotnosti negouhlasily. Zajímavé na celém případu bylo to, že většinou Ůpikova hmotnost byla větší než hmotnost Hoppeho, někdy i řádově (jak je vidět na obr. 1). Začalo se tomu říkat "paradox hmotností". Situace vypadala takto: buď se bolidy více brzdí než říká Hoppe, nebo bolidy více svítí než říká Ůpik.

2. Která hmotnost meteoroidu je blíže skutečnosti?

Tohle když zjistili Z. Ceplecha a R. McCrosky (z jejich práce obr. 1 pochází), v článku z r. 1970 se pokoušeli přiblížit obě hodnoty hmotnosti k sobě, ale všechny předpoklady, které vyzkoušeli, se ukázaly jako málo účinné. Klasické Whipplovo řešení "paradoxu hmotnosti" (užití pro slabé meteory), že meteoroidy jsou složeny z velmi řídkých kometárních materiálů, se pro bolidy dostalo přinejmenším do sporu s vyfotografovanými pády meteoritů, kdy žádný kometární materiál nespádl. Taková situace provokovala myšlení.

Já sám jsem v téže době věřil víc v Hoppeho dynamickou hmotnost. Avšak snížit Őpikovu hmotnost k hodnotě Hoppeho se mi také nedařilo žádným způsobem, ačkoliv jsem se např. snažil silněji rozsvítit bolid jeho drobením na fragmenty a udržováním svítících fragmentů ve "vakuové" pasti za tělesem.

Zkusil jsem to tedy jinak: za bližší skutečnosti jsem položil hmotnost Őpikovu (jako ostatně většina autorů v té době) a pokoušel jsem se zvýšit hmotnost Hoppeho, aby dosáhla Őpikovy hodnoty. Začal jsem si tedy myslet, že bolidy se asi více brzdí než říká Hoppe. V r. 1975 publikovali totiž Petrov a Stulov nový velmi účinný mechanismus (směšování meteorických par se vzduchem), který sami chybně aplikovali na bolidy, takže ještě více zvětšili už tak dost veliký "paradox hmotnosti". Moje aplikace téhož mechanismu na bolidy (z r. 1977) ukázala, že lze Hoppeho hmotnost zvětšit a odstranit tak "paradox hmotnosti".

Málem jsem si tenkrát začal myslet, že základ správné teorie bolidů je už na světě. Moje teorie, kterou jsem nazval "teorií komy", byla první teorií bolidů, ve které měl ablovaný materiál podstatnou úlohu při brzdění meteoru. Meteorické páry vytvořily kolem pevného tělesa jakýsi rozměrný padák, který těleso v atmosféře značně brzdil. Padák z ablovaných par působil tedy na pevné meteorické těleso značně velkou přídatnou silou, která z klasické teorie nebyla známa. Tato přídatná síla byla dokonce tak veliká, že by dokázala mechanicky rozdrtit pohybující se velké meteorické těleso ještě během jeho cesty atmosférou. Tímto novým předpokladem bylo možno vysvětlit hned několik pozorovaných faktů najednou. Především každé velké těleso nemusí skončit svou viditelnou trajektorii jenom tak, že se buď prakticky beze zbytku vypaří nebo se alespon zabrzdí do té míry, že už neablují a tedy nesvítili (jak se dřív předpokládalo), ale těleso se může ještě na konci své viditelné trajektorie (ještě při vysoké kosmické rychlosti) rozpadnout na drobné fragmenty, které se už nepozorovatelně snášejí pomalu na krajinu.

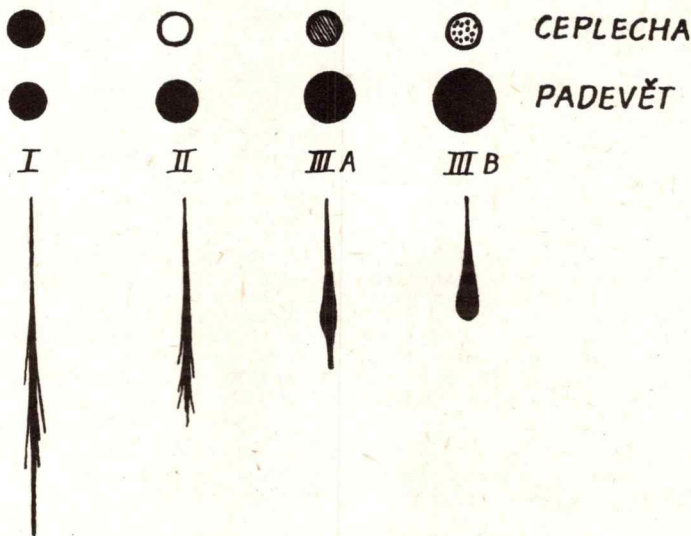
3. Jsou mezi bolidy kometární materiály?

Čtyři skupiny bolidů (I, II, IIIA, IIIB), které Ceplecha s McCroskym zrovna v té době empiricky objevili

(viz obr.2), se dají tedy vysvětlit dvěma alternativními způsoby. Autoři objevu čtyř skupin bolidů se v té době přikláněli k vládnoucí představě, že totiž bolidy skupiny III B končí v atmosféře proto nejvýše ze všech typů bolidů, že se prakticky beze zbytku vypaří, poněvadž zřejmý materiál, který je vyvolává, je nejkřehčí vůbec, velmi snadno ablující materiál, asi nějaký velmi "jemný kometární materiál typu Draconid" (vytečkovaný materiál na obr. 2). Bolidy skupiny III A končí o něco níže v atmosféře, poněvadž už jde o materiál o něco obtížněji ablující, ale přesto ještě materiál kometární, který sami autoři nazvali "obyčejným kometárním materiálem" (viz vyčárkovaný materiál na obr. 2). Bolidy skupiny II ablují ještě hůře a mohly by patřit podle tehdejších názorů Ceplechy a McCroskyně nejkřehčím známým meteoritům, tzv. uhlíkatým meteoritům typu Ivuna (viz materiál v prázdném kroužku na obr. 2).

Materiálové hustoty zmíněných tří skupin bolidů odhadli Ceplecha a McCroskyně speciálním semi-empirickým postupem, jak svůj postup sami autoři nazvali.

Nejhůře ablující bolidy skupiny I končí také ze všech bolidů nejnižše v atmosféře a jediné u nich jsme s jistotou věděli, jakému materiálu je máme přiřadit. Třikrát se totiž podařilo vyfotografovat pád meteoritů právě z této skupiny I bolidů, a pokaždé byly nalezeny obyčejné chondrity (u Příbrami, u Lost City i u Innisfree). Skupině I bolidů byly



obr. 2

povrch Země

tedy tenkrát přiřazeny obyčejné chondrity (viz plný kroužek na obr. 2).











Moje teorie kómy však dovozovala vysvětlit tentýž jev zcela jinak. Bolidy skupin III končí proto tak vysoko, že jsou již zde zcela rozdraceny na jemné fragmenty přídatnou brzdicí silou kómy meteorických par a to proto, že buď je zde meteorický materiál jen o něco křehčí než u skupiny I nebo II, anebo zde jde také o obyčejný chondritický materiál, ale přídatná síla je větší, poněvadž je i hmotnost těles ve skupinách III větší. Takové dvě možnosti teorie kómy dávala.

Velkou přídatnou silou lze vysvětlit nejen úplný rozpad na droboučké fragmenty u těles skupin III (u nichž na fotografických jednotlivé droboučké fragmenty nerozlišíme), ale i štěpení bolidů na velké fragmenty, které jsou na fotografických vidět u kompaktnějších materiálů skupin I a II (jak je schematicky znázorněno "kořatky" na obr. 2). Toto pozorované štěpení na fragmenty by se jinak těžko vysvětlovalo. Mysl by se zavést přinejmenším dosti libovolný předpoklad, že meteoroidy nejsou kompaktními horninami, ale jakýmisi slepenci tvrdších pecek u bolidů skupin I a II nebo dokonce koulemi prachu u bolidů skupin III. Takové představy o "dustballech" jsou skutečně rozvíjeny např. Jonesem či Wetherillem.

Moje teorie o přídatné síle jsou však takového druhu, že si dobře vystačím s kompaktními materiály u všech skupin bolidů. Na obrázku 2 je provokativně předložena právě ta možnost, že bolidy všech skupin byly vyvolány obyčejnými chondrity různé velikosti. To bylo nutno vyzkoušet. Šlo tedy o to vyzkoušet následující: jsou bolidy všech čtyř skupin vyvolány obyčejnými chondrity, nebo se přeci jen poněkud mezi sebou liší v materiálových vlastnostech? Takto jsem se zeptal v článku, který jsem publikoval v r. 1979. Teorii kómy bylo nutno aplikovat na skutečně vyfotografované bolidy, abychom dokázali na takovou otázku odpovědět.

Výsledek aplikace teorie na bolidy vyfotografované Frérijní sítí jsem publikoval v r. 1980. Obyčejné chondrity pro všechny čtyři skupiny bolidů nevyhovují, rozdíly v jejich hmotnostech by musely být příliš obrovské. Abych tedy vyzkoušel, jaké odlišnosti mohou být mezi jednotlivými skupinami bolidů (pokud jde o jejich materiálové složení), předpokládal jsem, že vstupní hmotnosti všech těles jsou rovny Āpikovým fotometrickým hmotnostem. Výsledek byl takový, jak jsem tušil. Pokud jde o mechanickou pevnost na tlak, meteorický materiál skupiny bolidů IIIB není podle mé teorie křehčí než je pevnost uhlikatých meteoritů typu Ivuna (viz obr. 3). Všechny ostatní materiály jsou ještě pevnější, zatím nevíme přesně jaké, budeme je muset hledat pravděpodobně mezi známými meteority. O tomto výsledku, že mezi dosud vyfotografovanými bolidy se pravděpodobně nevyskytuje žádný kometární materiál, ale jen materiály známé ze sbírek meteoritů, jsem poprvé referoval na posledním symposiu o výzkumu meteorů v Hluboké

I II IIIA IIIB

				CEPLECHA
	?	?		METEORITY
				PADEVĚT

obr. 3

nad Vltavou v roce 1980.

4. Bolidy více svítí nebo se více brzdí?

Popsal jsem historii jednoho svého pokusu o teorii bolidů až do bodu, než jsem se začal zabývat její kritikou, která se ozvala.

Řekl jsem, že jsem se snažil větším brzděním zvýšit Hoppeho dynamickou hmotnost až na úroveň fotometrické hmotnosti Őpikovy. Mezitím však v r. 1979 Američan Douglas O.ReVelle zasáhl do teorie bolidů obráceně. V podstatě uvěřil v Hoppeho dynamickou hmotnost a snažil se předpokladem většího svícení snížit Őpikovu fotometrickou hmotnost až na úroveň dynamické Hoppeho hmotnosti. ReVelle vlastně znovu oprávil do teorie let starý Fischerův předpoklad a učinil svícení bolidů znovu závislé na dynamice pohybu meteoru, tedy na jeho zrychlení. Pokus se mu podařil (tedy odstranil "paradox hmotnosti") u bolidů, které právě zkoumal, to jest u těch, které plodí meteority, nebo u jim podobných bolidů. Proto si ReVelle začal skoro myslet, že základ správné teorie bolidů už je na světě.

Ceplecha však v r. 1980 ukázal, že ReVellova teorie dobře vyhovuje právě jen pro bolidy skupiny I, nejvýše pro některé bolidy skupiny II, které právě ReVelle zkoumal. Ceplecha na speciálním diagramu kinetické a vyzářené energie ukázal, že ReVellova teorie není dostatečně radikální, nelze jí použít u bolidů, které končí extrémně vysoko (tedy u skupin bolidů IIIA a IIIB). Pro ně by světelná účinnost byla větší než 100% jejich kinetické energie, což je fyzikální absurdita. Na stejném diagramu Ceplecha tenkrát ukazoval, že Padevětova teorie je použitelná pro všechny typy bolidů, se světelnými účinnostmi fyzikálně vyhovujícími a nezávislými na typu bolidu.

Ceplecha v r. 1980 ve svém přehledovém referátě pro symposium v Kanadě porovnával obě teoretické koncepce takto: "Srovnáme-li obě teoretické koncepce z hlediska jejich schopnosti vysvětlit pozorované údaje, vidíme, že teorie ReVellova je zřejmě lepší pro hluboko pronikající bolidy a Padevětova teorie zase lépe vysvětluje bolidy s velkou výškou pohasnutí. Chceme-li být zcela přísní,

potom vlastně máme jen jednu přijatelnou teorii a to teorii ReVellovu, kterou lze ale užít výhradně pro objekty se složením podobným obyčejným chondritům. Bolidy a extrémně vysokými výškami pohasnutí (typy IIIA a IIIB) jsou daleko od toho, aby byly plně vysvětleny kteroukoliv z existujících teorií, pokud ovšem nepřipustíme extrémně velký ablační koeficient a extrémně nízkou hustotu jejich meteoroidů."

Mám-li se k tomu vyjádřit lapidárně, měli bychom se pekovně vrátit k původní teoreticky dosti nepodložené hypotéze o přítomnosti kometárních materiálů mezi bolidy, když pekusy teoreticky vysvětlit všechny pozorované jevy u bolidů nebyly ještě do všech detailů úspěšné. Na takový ústup z vydobytých pozic však podle mého názoru situace sdaleka nevypadá, není to ten správný návod k jednání. Lepší je nevsadit to a teorii čili taktiku se snažit vylepšit rozvinout či změnit.

Hlavní předpovědi mé teorie komety byly dvě nové základní věci: 1. existuje přídatná síla, která je schopna velké meteoroidy nejen anomálně brzdit, ale dokonce je zároveň i mechanicky drtit na jejich cestě atmosférou; 2. důsledkem nové přídatné síly je i to, že mezi dosud vyfotografovanými bolidy pravděpodobně nejsou žádné kometární materiály. Takové kometární materiály by podle teorie musely končit (být rozdraceny) v atmosféře ještě ve větších výškách než u bolidů vůbec pozorujeme.

To jsou závažné předpovědi, které nutno důkladně ověřit, neboť si lze domyslet, že by měly značné důsledky i pro kosmogonii sluneční soustavy.

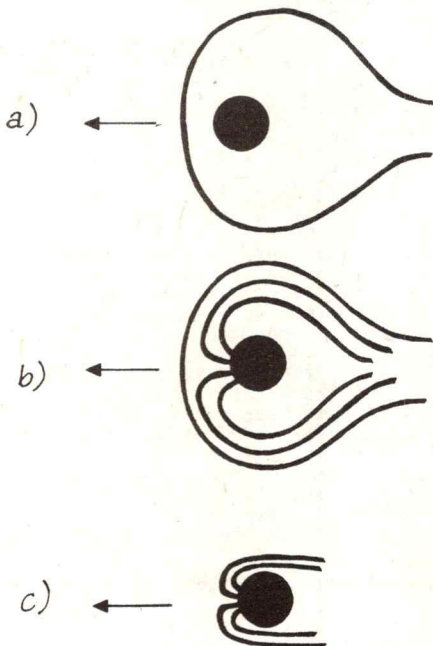
V této souvislosti mne napadá hříšná myšlenka: jestliže nějaké jemné a křehké kometární materiály mezi velkými tělesy vstupujícími do zemské atmosféry přeci jen jsou, nenajdeme je kupodivu mezi bolidy, ale ukryté rafinovaně mezi slabými meteory. Slabé meteory začínající i končící velmi vysoko (kolem výšky 100 km) by pak představovaly pestrý soubor těles, ve kterém by vedle skutečně malých tělísek z tvrdého kompaktního kamene parazitovala velká tělesa křehkého kometárního složení. Tato velká křehká tělesa by začala svítit mnohem výše v atmosféře než velká kamenná tělesa (bolidy), ale po svém rozsvícení by se účinkem tlaku začala hned progresivně rozpadat, takže by hluboko nepronikla, ale "rozmázla" by se úplně ještě ve velké výšce. Zeptejme se, zda něco takového mezi slabými meteory pozorujeme? Ano. Právě pro tyto meteory jsou typické jevy progresivní fragmentace empiricky popsané Jacobieou a jevící se na fotograficích pořízených Super-Schmidtovými komorami jako dlouhý svítící ohon (wake) za meteorem, takže někdy dochází dokonce k úplnému "smývání" úseků na fotografii, způsobených rotující závěrkou. Něco takového u bolidů neznáme, tam jsou úseky způsobené rotující závěrkou ostře definovány. Opustme však včas takový kuriozní nápad.

Kdybych měl sám hodnotit svůj teoretický přístup k bo

lidům a přístup ReVellův, řekl bych, že ReVelle je schopen pracovat s detaily uvnitř jedné skupiny bolidů, ale jeho přístup je dosud málo radikální, aby mohl překlenout větší rozdíly, které existují mezi jednotlivými skupinami bolidů. Můj přístup zase vystihuje bolidy zhruba jako celek, ale v detailech je ještě velmi nedotažený. Do budoucna bude třeba oba přístupy spojit s cítem pro vyváženost detailů a abstrakcí a pak byl to mohlo být ono. Není ze začátku možné udělat všechno z jedné vody na čisto, jak se říká. Přeci však srovnání mých a ReVellových výsledků dává dnes tušit, že v dynamice pohybu bolidů bude větší zakopaný pes než v jejich svícení. Toho se zatím držím a snažím se odstranit nejdříve hrubé nesrovnalosti a pak teprve nesrovnalosti jemnější.

5. Význam kritiky

To, co mi hlavně scházelo, byl nedostatek kritiky v podstatných záležitostech mého přístupu. Musím být tedy kritický sám k sobě, ale postupně se kritikové vynořují i zvnějšku. Nejdříve to byl sám ReVelle už v roce 1978. Napsal mi, že nerozumí, jak může objemná koma meteorických pár vyvinout tak obrovský tlak na meteoroid, když plynná koma a pevné těleso nejsou spojeny žádnou známou silou (viz obr. 4a). Jinými slovy řečeno, chybí-li mezi padákovým



obr. 4

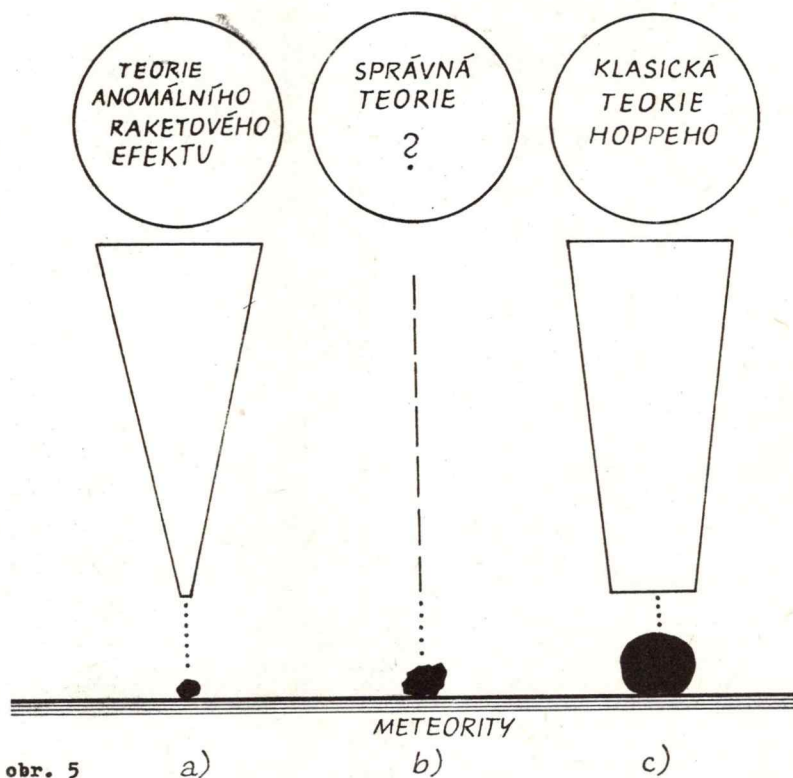
hedvábím kómy a parašutistou-meteoroidem spojovací provazy!? To byla příliš vážná námitka. Bránil jsem se tak, že na čele tělesa páry nejintenzivněji ablují, tryskají z čela pevného tělesa jako žhavé plyny z trysky rakety. Hledanou přídatnou silou by tedy mohl být reaktivní efekt těchto par (viz obr. 4b). Pak mi došlo, že je-li tomu tak, žádný objemný padák kómy par kolem tělesa nepotřebujeme, reaktivní síla par jeho brzdicí účinek nahradí. Šlo jen o to, zda je tento reaktivní efekt dostatečně mohutný, aby vysvětlil to, co u bolidů pozorujeme (viz obr. 4c).

To se odehrálo v roce 1979 a tiskem mi to vyšlo v r. 1980. V tomto momentě přišla další kritika od Stanjukoviče a Bronsteina, kteří teoreticky dokazovali, že rozměrná kóma par se nemůže kolem tělesa udržet, ale dostatečně rychle se vyprázdní do prostoru za těleso. Tato kritika přišla vlastně už s křížkem po funuse, já sám už jsem tak rozměrnou kómu par nepotřeboval, byla pro mne v té době již jen historickým hypotetickým útvarem.

6. Bolid jako raketa?

V další fázi výzkumu mi šlo tedy o to rozvinout teorii obráceného raketového efektu pro bolidy, který by byl dostatečně mohutný. Normální reaktivní efekt ablačních produktů je však pro bolidy příliš slabý, to dokázali Čeplecha s McCroskym už v roce 1970. V roce 1980 se mi však podařilo rozvinout teorii anomálního obráceného raketového efektu, který nastane, jestliže se meteorické těleso dostane do aerodynamického režimu tzv. silného vyfukování (s vrstvou par izolující meteoroid od přímého kontaktu se vzduchem). Režim silného vyfukování pochází od Katzena a Kaattakariho a byl základem teorie Petrova a Stulova i mé teorie kómy. V tomto režimu na meteoroid působí v atmosféře jen jediná síla a tou je právě reaktivní síla ablovaných meteorických par. Podle toho bychom si měli bolid představit jako pokus o měkké přistání tohoto objektu na povrch Země. Přistává tryskou napřed se zapnutými raketovými motory jako lunární modul na Měsíc. Měkčtým tělesům se měkké přistání podaří, těm pak říkáme meteority, jiná se tahem svých vlastních raketových motorů zhroutí a rozsejou již ve velké výšce v atmosféře.

O teorii anomálního raketového efektu jsem referoval na posledním symposiu o výzkumu meteorů v Hluboké nad Vltavou v r. 1980, a nápad se velmi líbil i ReVellovi, když byl v tomtéž roce poprvé na návštěvě v Ondřejově. Sám jsem však tuto teorii nepublikoval. Zjistil jsem totiž, že reaktivní síla je sice dostatečně veliká, ale hmotnosti meteoroidu za tohoto režimu ubývá příliš strmě, takže bychom například podle této teorie měli nacházet řádově menší meteority než skutečně nacházíme (viz obr. 5a). Naproti tomu klasická teorie Hoppeho předpovídá zase dopad o mnoho větších meteoritů než nacházíme. To jsem si ověřil na fotografovaných pádech meteoritů v Lost City i v Innisfree (viz obr. 5c).



obr. 5

Z uvedených důvodů je patrné, že klasická teorie Hoppeho i moje teorie anomálního raketového efektu z r. 1980 představují dva extrémní případy příliš radikálních redukcí nějakých obecnějších rovnic, které je nutno teprve nalézt (viz obr. 5b). V první polovině roku 1981 jsem se o to pokusil.

7. Poučení z neúspěchu

Řekl jsem si, že musím přijít na to, jaké je vlastně do detailu rozdělení energie a hybnosti mezi meteoroidem, jeho ablačními produkty a pružně či nepružně odraženými částicemi atmosféry. Začal jsem se zabývat výsledky srážek jednotlivých molekul. Rovnice, které jsem odvodil, byly

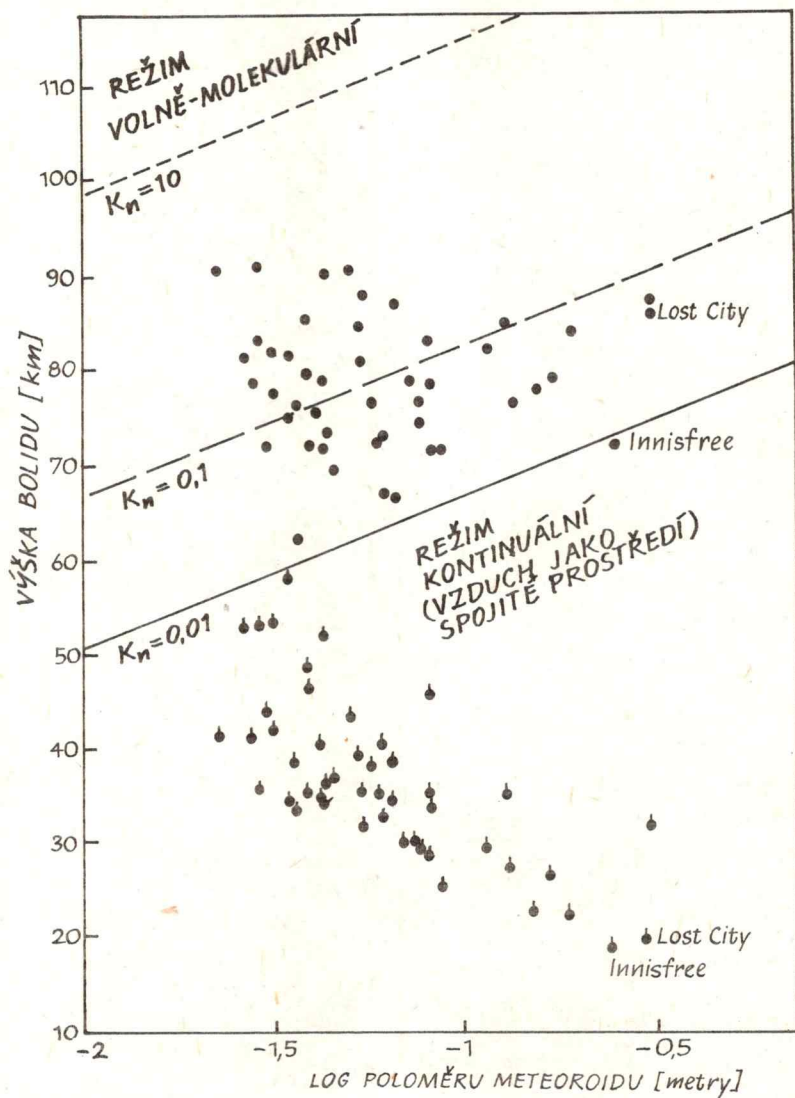
skvělé! Obsahovaly totiž singularitu, a ta byla právě tím, co jsme potřebovali. Když se některé parametry meteoru (např. jeho rychlost nebo materiálové složení) blížily singularitě, děly se divné věci, právě takové, jaké někdy u některých meteorů pozorujeme. Dále od singularity se meteorů chovaly krotce, jak to některé meteorů skutečně dělají.

Málem jsem si znovu začal myslet, že už jsem blízko řešení a sepsal jsem to horkou jehlou. Hřebínek mi však srazil P. Pecina, kterému se Cepelchovou zásluhou dostal můj elaborát do ruky. Pecina zjistil, že mám v nových rovnicích na jednom místě chybu ve znaménku. Ukázal, že když se chyba opraví, redukují se moje rovnice na rovnice klasické. Tím pádem mizí i ona singularita, která dávala takové naděje. Pecinovou zásluhou jsem se včas dostal ze slepé uličky. Z tohoto období jsem si poznamenal následující povzdech, na který jsem nemohl přestat myslet: "Kdyby se tak našla nějaká jiná singularita, ta by nám vytrhla trn z paty!"

Raději bych se ani o tomto svém nevydařeném extempore zde nezmiňoval, ale cesty Páně jsou nevyzpytatelné. Bylo zřejmé třeba, abych z neúspěchu vyvodil důkladné poučení. Především jsem si uvědomil, že jsem zákonitě musel dojít opět ke klasické teorii, jestliže jsem se začal zabývat jednotlivými srážkami molekul. To je totiž typický volně-molekulární přístup k problému a je adekvátní jen podmínkám, kdy střední volná dráha molekul atmosféry je větší než rozměr meteorického tělesa. Takový přístup je adekvátní malým meteorům, pro které je zmíněná podmínka splněna a které se tedy v takovém režimu ve velkých výškách v atmosféře objevují. A skutečně: klasická teorie Hoppeho byla odvozena v podmínkách volně-molekulárních a je tedy použitelná jen pro tuto oblast. Bolidy však žijí v režimech jiných, neboť pronikají hluboko do hustých vrstev atmosféry.

8. Bolid jako píst

Na obrázku 6 jsou zakresleny začátky a konce bolidů skupiny I (konce viditelných drah mají "ocásky"). Vidíme, že zapadají hluboko do režimu kontinuálního. Okolní atmosféra se vůči meteorickému tělesu chová jako spojité prostředí. Je třeba zvolit úplně jiný přístup k problému. Těmto podmínkám je adekvátní spíše hydrodynamika nebo ještě lépe aerodynamika vysokých nadzvukových rychlostí, poněvadž jde o spojité prostředí stlačitelné, o vzduch. Dnes existuje bohatá aerodynamická literatura supersonických i hypersonických rychlostí a mluví se v ní někdy i o velkých meteoroch. Konkrétní úlohy, které se nám vyskytují právě u bolidů, však takovým přístupem snad nikdo neřeší. Nenašel se nikdo, kdo by aerodynamické pojmy přeložil do řeči meteorářů, kdo by ukázal, jak se nové úvahy projeví ve veličinách, které u bolidů můžeme přímo měřit. Zajímalo mne, proč tomu tak je a jak by se to dalo vlastně napravit.



obr. 6

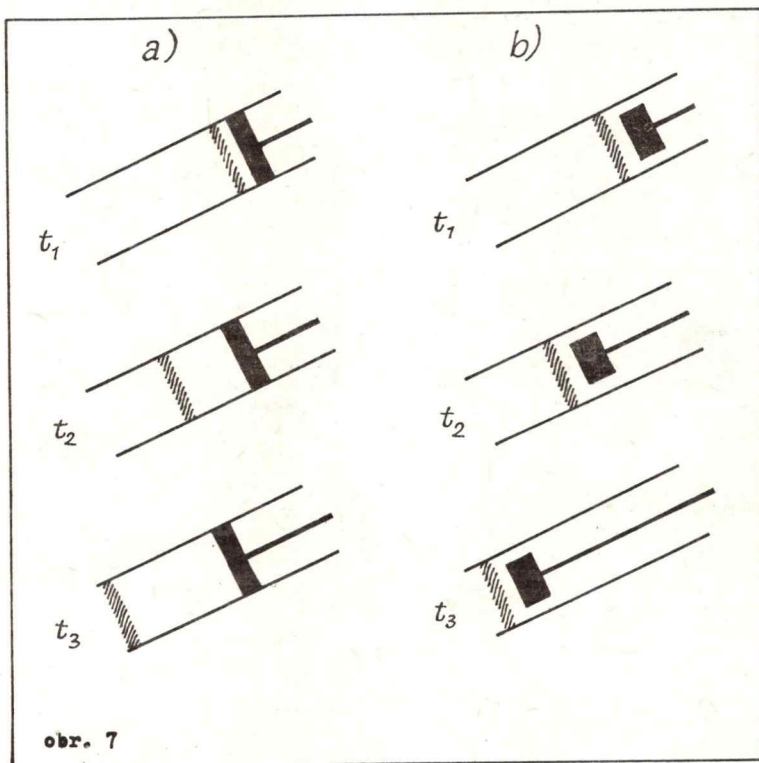
Šel jsem tedy do literatury dnes již historické a chtěl jsem vědět, kdo s aerodynamikou a termodynamikou u meteorů vlastně začal. Do dneška jsem se jmená nedověděl, ale dověděl jsem se tolik, že to byl původní (předklasický) přístup k meteorům, který byl zcela zapomenut a místo něj později ovládl pole přístup volně-molekulární. Tato historie měla svou logiku. V klasické knize "Astronomie" od Gutha, Linka, Mohra a Sternberka jsem si přečetl o meteorech tohle: "Dříve se vysvětlovalo záření meteorů jen přeměnou pohybové energie v energii tepelnou. Vnikne-li rychle letící meteor do zemského ovzduší, stlačuje prudce vzduch, který je mu v cestě, asi tak, jako píst výbušného motoru stlačí ve válci plyn nebo směs. Vzduch se tím prudce (adiabaticky) zahřeje a počne zářit. Rozžhaví se i meteor, který se nakonec vypaří. Novější teorie (Hoppe) však ukazují, že tento pochod se děje jen v nižších vrstvách vzduchu, čili že platí jen pro velké meteory. V obrovských výškách, kde záření meteorů začíná, je vzduch tak řídký, že tu dochází jen k ojedinělým pružným srážkám atomů vzduchu s atomy meteoru. Při tom jsou srážky tak prudké, že nastane ionizace atomů a vznikne krátkovlnné záření; tepelné záření možno při tom zanedbat. Tato teorie považuje tedy záření většiny meteorů (nebo alespon v počátečním stadiu) za "studené", za světélkování (luminiscenci)."

Tak to tedy bylo! Pozorovali jsme prakticky výhradně meteory menší ve větších výškách a proto jsme užívali celkem správně Hoppeho klasickou teorii. Nikdo netušil, že v šedesátých letech tohoto století budeme mít po pádu Příbrami k dispozici bohatý fotografický materiál ze speciálních sítí pro pozorování bolidů, tedy o velkých tělesech pronikajících hluboko do hustých vrstev atmosféry. Použili jsme na ně ze setrvačnosti Hoppeho teorii, která však není tomuto případu adekvátní. Starší představy o stlačování vzduchu meteoroidem jako pístem ve válci výbušného motoru byly úplně zapomenuty.

Právě tohle je však cesta, jak spojit bohatou vojenskou, kosmonautickou a jinou aerodynamickou literaturu s bolidy, jak najít společný jazyk mezi dvěma do té doby nezávisle se vyvíjejícími obory. Na tuto cestu mne tedy vlastně navedl dnes již mrtvý profesor Guth a je to cesta schůdná, jak jsem se přesvědčil v druhé polovině roku 1981.

9. Rázová vlna

Dokázal jsem, že letící velké meteorické těleso lze skutečně v prvním přiblížení aproximovat netěsným pístem, který se pohybuje atmosférou v prakticky válcové trubici zvukových rozruchů, kolem níž je neporušená atmosféra (viz obr. 7b). Píst meteoroidu skutečně před sebou silně stlačuje vzduch. Poněvadž se však meteoroid pohybuje vysokou nadzvukovou rychlostí (desítek až stovek Machů), stlačení a zahřátí vzduchu před pístem meteoroidu existuje jen v určité tenké tzv. rázové vrstvě na čele s mohutnou rázovou vlnou (v obr. 7 čárkovaná), která představuje náhlý skok všech



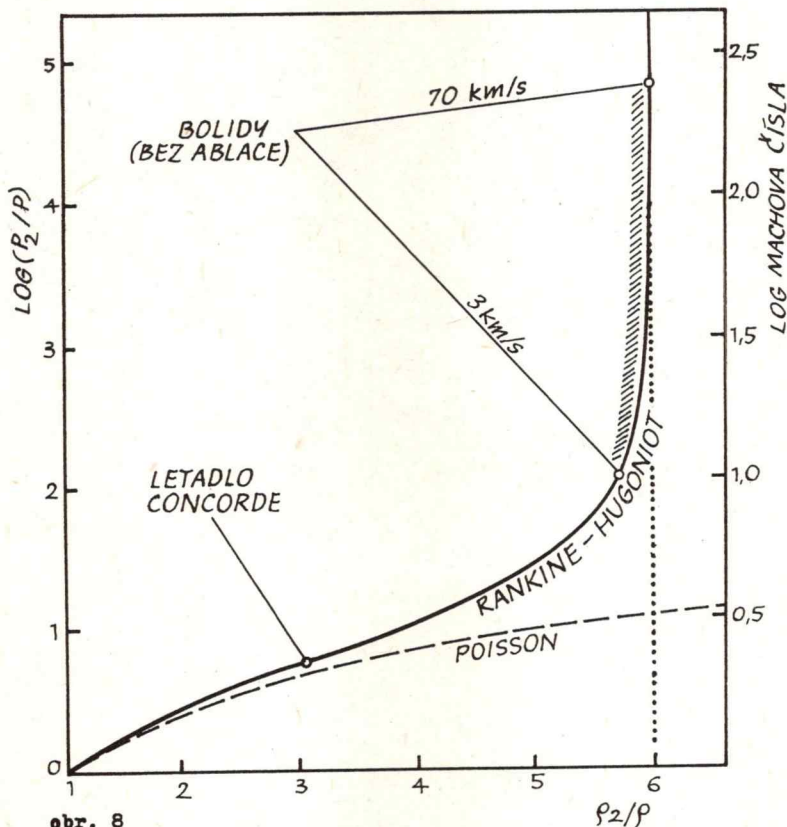
obr. 7

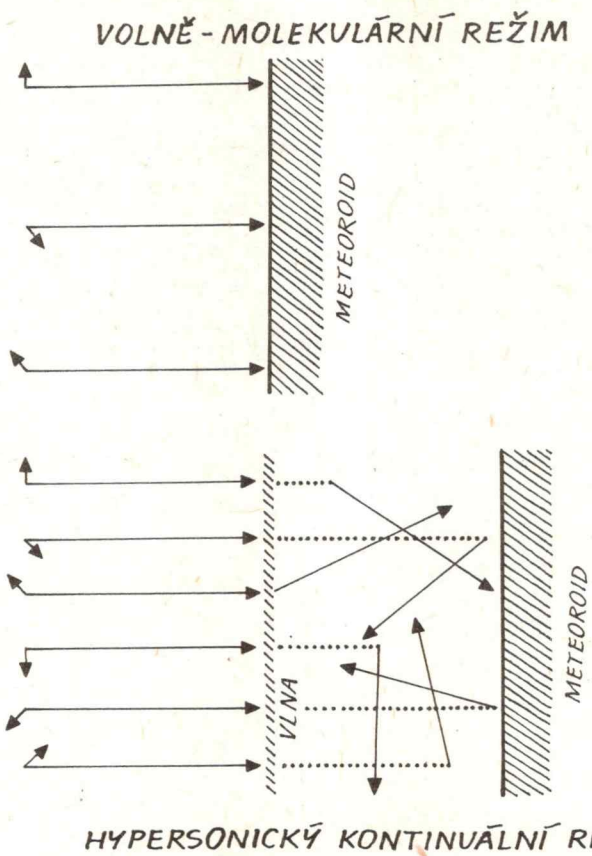
parametrů vzduchu z neporušeného prostředí před vlnou na vzeduch se silně změněnými parametry za vlnou v rázové vrstvě.

Stlačení vzduchu za rázovou vlnou neprobíhá podle klasické isentropní adiabaty Poissonovy, kterou jsme se učili v základech termodynamiky a ze které plyne, že čím víc adiabaticky stlačujeme plyn v nějaké nádobě, tím má také větší hustotu a to bez omezení. Za rázovou vlnou probíhá stlačování plynu jinak, podle tzv. néisentropní adiabaty Rankine-Hugoniotovy (viz obr. 8). Zhuštění plynu po průchodu rázové vlny nemůže překročit určitou mez (u ideálního vzduchu může být zhuštění za vlnou nejvíce šestinásobné). Na obrázku 8 vidíme, že jestliže se poměr

hustoty vzduchu ρ_2 za vlnou ku hustotě před vlnou ρ blíží hodnotě 6, roste tlak vzduchu p_2 za vlnou nade všechny meze.

Rázová adiabata má tedy singularitu podobnou oné singularitě, o které jsem loni snil, že by nás mohla vyvést z problémů! Již u letadel s vysokými nadzvukovými rychlostmi činí neúměrný růst tlaku za rázovou vlnou potíže. Jde o to, aby velikost tlaku za rázovou vlnou nepřesáhla mechanickou odolnost konstrukce letadla. Musí se proto létat ve velkých výškách a ještě snižovat tlakový účinek čelní rázové vlny vystřikováním ostrých jehlic před trup letadla a před motory, aby se zhoubný tlakový účinek přímého skoku zhuštění nahradil soustavou šikmých skoků, které nepůsobí takovým tlakem. Bolidy taková opatření nečiní, bez rozmyslu proniknou klidně dost hluboko do atmosféry s ještě daleko vyššími rychlostmi a s čelní rázovou vlnou blízkou přímému skoku zhuštění, tedy s maximálními tlakovými účinky, které mohou překonat mechanickou odolnost materiálu, ze kterého jsou skonstruovány.





obr. 9

Na obrázku 8 vidíme, že tlak p_2 na těleso meteoru může být (podle rychlosti meteoru) o 2 až 5 řádů vyšší než je atmosférický tlak v dané výšce v neporušené atmosféře. To už jsou tlaky, které se zcela vyrovnají klasickým Hoppeho tlakům, které by na meteoroid působily, kdyby před tělesem nebyla tlačena rázová vlna. Podobné je to i s přenosem energie k tělesu a tedy i s ablací. Tohle ovšem vypadá, jako by se nic nového nestalo, když numericky je nový tlak za vlnou i přenos energie prakticky stejný jako v klasické teorii Hoppeho, když se jen vymění kvalita mechanismů, které tlak nyní způsobují. Řekneme si, že nás výměna kvality mechanismů nemusí zajímat, hlavně když celkový výsledek bude prakticky stejný. Není to ale tak! Takto mluví lidé, kteří se ještě nedostali s partnery do kritických situací. Někteří lidé také vypadají za určitých všedních okolností stejně nebo podobně a teprve v zátěžových a kritických situacích se jejich chování rozrůžňuje podle jejich kvality.

Moje nová teorie dává také prakticky stejné výsledky jako teorie Hoppeho, pokud by meteoroid neabloval (neztrácel hmotu např. vypařováním). Jakmile však meteoroid abluje (a to je všude na jeho viditelné trajektorii, poněvadž jinak by ani nesvítíl), pak se najednou znovu objevuje nová dostatečně velká přídatná síla s vlastnostmi, jejichž kvalita odpovídá pozorováním.

Ukažme si v principu, jak tato nová přídatná síla vzniká. V Hoppeho teorii, která je adekvátní volně-molekulárnímu režimu, vzniká tlak na meteoroid přímým dopadem částic vzduchu až na pevný povrch meteoroidu rychlostí rovnou prakticky rychlosti meteoru (viz obr. 9 nahoře). Chaotické tepelné pohyby částic vzduchu v dané výšce je možno zanedbat, poněvadž jejich střední rychlosti jsou řádově nižší než jsou meteorické rychlosti (jak je na obr. 9 nahoře znázorněno délkou velkých a malých šipek, vektorů rychlostí). V hypersonickém kontinuálním režimu (na obr. 9 dole) je tomu jinak. Chaotické tepelné pohyby částic neporušeného vzduchu před průchodem rázové vlny lze opět zanedbat, ale už to neplatí pro tepelné pohyby částic vzduchu po průchodu rázové vlny, tedy těsně před meteoroidem. Je známo, že po průchodu rázové vlny vzroste skokem entropie nabíhajícího plynu a tedy i uspořádané pohyby částic plynu se zčásti změni na neuspořádané (tepelné) pohyby těchto částic za vlnou. Část mechanické energie plynu se tedy změni na energii tepelnou po průchodu vlnou. Dá se ukázat, že pro meteorické rychlosti jsou střední hodnoty rychlostí chaotických tepelných pohybů částic vzduchu za vlnou srovnatelné s meteorickými rychlostmi (viz obr. 9 dole).

Tak za vlnou v rázové vrstvě vzduchu vzniká prostředí s teplotami jdoucími do "hvězdných" teplot desetitisíců a statisíců stupňů (podle rychlosti meteoru). Jestliže se do tohoto rozžhaveného prostředí dostanou ablované páry meteorického materiálu, které jsou proti tomu chladné (s teplotami jen kolem 3000 K), ohřejí se a prudce expandují. Jejich tlak se tím velmi zvýší a tento tlak ohřátých

meteorických par je onou přídatnou silou, která způsobuje zvýšené brzdění bolidů, jejich fragmentaci, úplný rozpad atd. a jejíž původ jsem neustále hledal.

10. Tepelné záření vlny

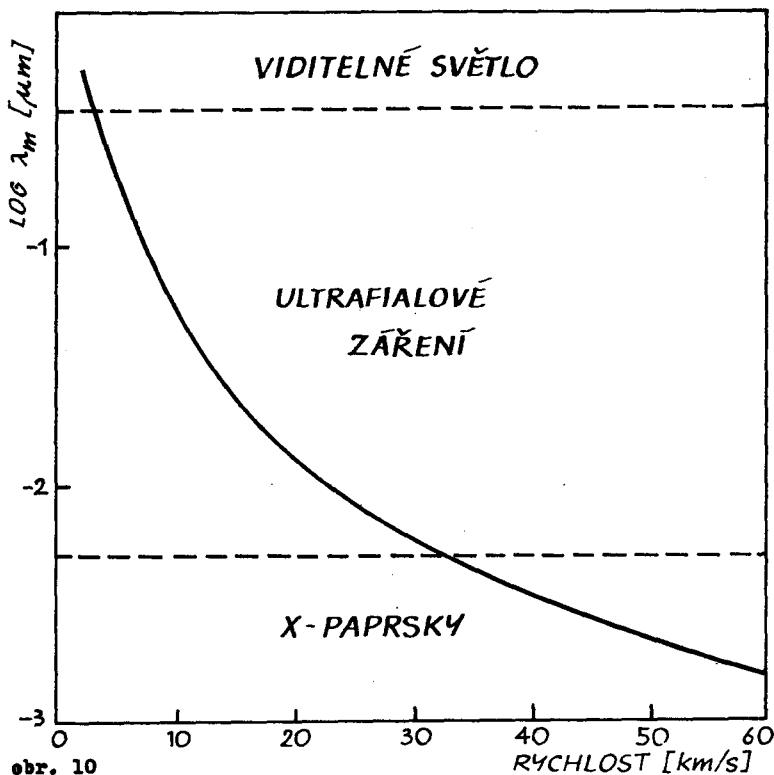
Z. Ceplechu v diskusi nadými novými výsledky zaráželo nejvíce to, že přídatná síla je příliš velká a že např. tak veliké brzdění, jaké umožňuje nová teorie, zdaleka u bolidů nepozorujeme. Upozornil mne, že by snad bylovšechno v pořádku, kdyby koeficient přenosu energie σ byl enormně nízký, kolem $10^{-3} \text{ s}^2 \text{ km}^{-2}$ (zatímco u bolidů měříme tutéž veličinu a je řádově vyšší).

(Aby Ceplechově poznámce bylo dobře rozumět: zde je situace naprosto opačná než káysi. Dříve jsme nemohli najít mechanismus, který by byl pro bolidy dostatečně účinný, aby vysvětlil pozorované efekty. Nyní jsem naopak našel mechanismus účinný až hanba, ale všeho moc zase škodí, jak se říká.)

Tokoto nedostatku jsem si byl plně vědom a proto jsem měl v diskusi k poslední své práci připravenu řadu efektů, které teplotu rázové vrstvy vzduchu reálně a značně snižují, takže nedosahuje tak vysokých teplot jako v případě adiabatického zahřátí vzduchu jako ideálního plynu. Přídatná síla expandujících meteorických par tedy nebude tak velká a brzdění bolidů bude nakonec vyhovovat pozorováním, jen co teorii ještě rozvinu a vylepším.

Největším únosem energie z horké rázové vrstvy je její tepelné záření, které se nedá ničím zdržet. Ideální adiabaticky stlačená rázová vrstva vzduchu před tělesem září ve viditelném oboru pouze pro nejnižší meteorické rychlosti na konci dráhy nejhluběji pronikajících bolidů. Pro vyšší rychlosti by mělo být její záření již v oboru neviditelného ultrafialového světla a dokonce snad někdy až rentgenovské (viz obr. 10). Záření bolidu by tedy mělo mít charakter podobný třeba slunečnímu spektru: přes spojitě mohutné pozadí záření stlačeného vzduchu se překládá nerovnovážné diskrétní čárové spektrum příměsí meteorických par unikajících z povrchu meteoroidu. Podstatný rozdíl je jen v tom, že mohutné spojitě pozadí spektra je v neviditelném oboru vlnových délek, čárové spektrum par však také ve viditelném oboru. Avšak ani fotografické desky citlivé na ultrafialové záření by spojitě pozadí spektra bolidů nezaznamenaly, poněvadž dobůh takového záření v atmosféře je jen několik desítek metrů a tak blízko se žádný bolid ke kameře nedostane. Výsledkem fotografického záznamu spektra bolidu je proto čárové spektrum převážně meteorických par, i když je v něm podstatně méně energie než ve spojitěm pozadí. Takže starí měli v podstatě pravdu, když uvažovali o tepelném záření stlačeného vzduchu před meteoroidem jako o hlavním fenoménu. Vyhlíželo to značně paradoxně, když fotografický záznam spekter bolidů ukazuje prakticky jen diskrétní spektrum s význačnými a charakteristickými čarami např. železa a jiných těžších prvků charakteristických pro laboratorní spektrum meteoritů.

Co je ale nejdůležitější: dá se vypočítat, že tepelným zářením se odnáší prakticky všechna energie, kterou má meteorický systém k dispozici. Část této zářivé energie zasáhne šelvný povrch meteoroidu a způsobí ablaci, větší díl se však vyzáří mimo těleso dopředu a do všech stran ze systému ven. Stlačení plynu v rázové vrstvě tedy vůbec nebude adiabatické, jak jsme předpokládali (t.j. takové, že by nenastávala žádná výměna energie s okolím), naopak ven uniká zářením většina energie a rázová vrstva se tím ochladí. Tak se zmenší i přídatná síla (tlak) expandujících meteorických par a budeme ji mít v oblasti, kde ji potřebujeme mít. Samotné meteorické páry ejetované do rázové vrstvy ji též ochladí a jsou tu ještě další efekty jako ionizace atd., o kterých se zde raději ani nebudu mluvit. Zjistit přesné poměry je úkolem dalšího rozvíjení teorie, která dnes ještě není v takovém stavu, aby se dala hned aplikovat

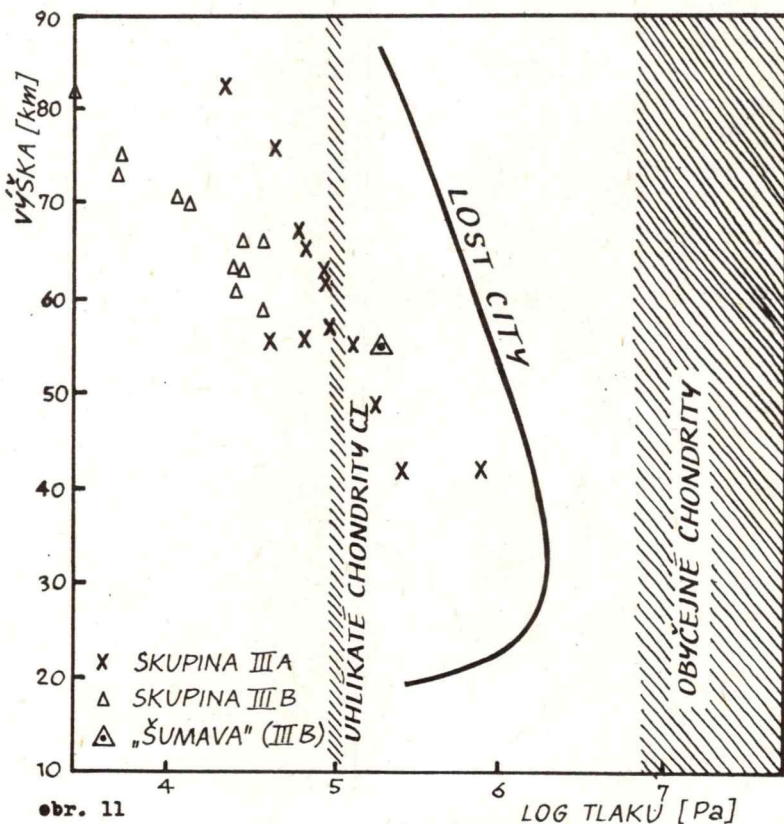


obr. 10

s perfektním úspěchem na bolidy, které máme již vyfotografovány. Ve stavu, v jakém dnes moje teorie právě je (bez úprav, které plánuji), by její aplikace na bolidy pravděpodobně ještě ukázala, že horniny, které vyvolávají všechny čtyři skupiny bolidů, se od sebe prakticky neliší, že všechno je kompaktní tvrdé obyčejné chondritické kamení.

11. Tříštění meteoritů

Přeci však lze něco již dnes ze zvědavosti udělat. Tradovalo se, že klasický Hoppeho tlak na meteoroid je i pro bolidy příliš malý, než aby mohl překonat mechanickou pevnost jejich materiálů. Patrně to nikdo přes hlavu autorit ani nezkusil. Jestliže ale přijmeme za svou moji hypotézu, že přeci jen alespoň bolidy skupin IIIA a IIIB končí svou viditelnou pout atmosférou většinou úplným rozpadem (kolapsem

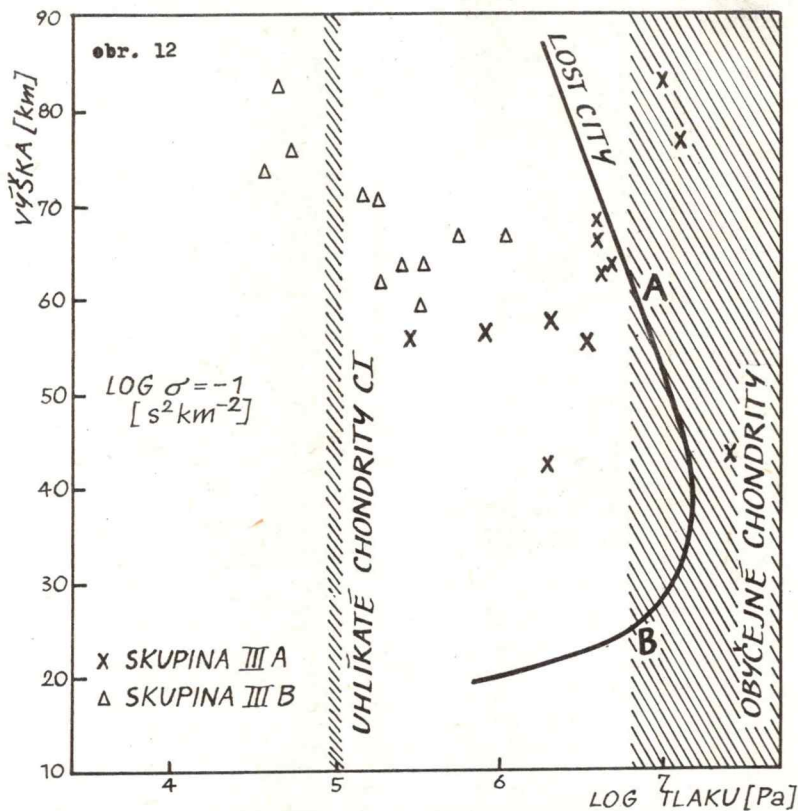


obr. 11

struktury), měl by tlak na konci viditelné trajektorie dosahovat mechanické pevnosti těchto materiálů. Když tyto klasické tlaky v koncových bodech bolidů a pevnosti meteorických materiálů srovnáme v jediném grafu (viz obr. 11), jsme mile překvapeni. Zjišťujeme, že tlaky (při různých empirických postupech bez teorie) prostě a jednoduše nebyly v popředí zájmu a unikly proto pozornosti. Z obr. 11 je vidět, že klasické tlaky na bolidy skupiny III jsou kupodivu srovnatelné s pevností uhlikatých meteoritů typu Ivuna (CI). Když jsem tohle zjistil, nedalo mi to a zakreslil jsem do grafu na obr. 11 ještě náš bolid Šumava patřící do skupiny IIIB, o kterém se soudilo podle jeho zvlášť extrémní hodnoty Cepolechova kritéria PE = -7,15, že je to typický představitel zvlášť jemnoučkého kometárního materiálu typu Draconid. A ejhle, tento bolid se rozpadl až ve výšce, kdy i klasický tlak na jeho čelo přesáhl pevnost uhlikatých meteoritů typu Ivuna. Kritérium PE nám tedy nemusí vždy vystihovat pouze strukturu materiálu, ale infiltrují do něho asi značně i jiné vlivy, dokonce i ty, o kterých jsme si mysleli, že už jsou odfiltrovány.

Stačí tedy jen malá přídatná síla a všechny bolidy se dostanou svými mechanickými pevnostmi do pásma mezi pevností uhlikatých meteoritů typu Ivuna (CI) a pevností obyčejných chondritů. Přesun bolidů do zmíněného pásma je vidět na obrázku 12, když jsme připustili ablaci řídící se mou novou teorií. Tlak na meteorit Lost City (viz obr. 12) kolem výšky 30 - 50 km překonal dokonce krátce i pevnost obyčejných chondritů, která je nepřesně známa z literatury (Wasson se zmiňuje o měřeních Buddhua z r. 1942). A skutečně: McCrosky píše, že na fotografiích bolidu Lost City došlo k oddělení dvou malých fragmentů právě mezi výškami 30 - 40 km. Hlavní příčina štěpení velkých těles by tedy mohla být skutečně v síle, která mechanicky drtí kompaktní kámen. K překonání mechanické pevnosti těles (u bolidů typu I) dochází (jak je vidět z obr. 12) jen v určitém výškovém pásmu (mezi body A a B), do kterého těleso vstoupí a zase z něj poněkud níže vystoupí, drtivá síla povolí. To by mohlo souhlasit s pojmem "pásmo tříštění", o kterém mluví např. K. Tuček ve své knize o meteoritech v Československu. Meteority skutečně většinou dopadají na zem už roztržitény ve správkách a i na fotografických bolidů dráhy jednotlivých úlomků často rozeznáme.

V kontrastu s mými názory o malých rozdílech v materiálovém složení těles vyvolávajících čtyři skupiny bolidů a tedy nepřítomnost jemných "kometárních" materiálů mezi bolidy hájil Z. Ceplecha přítomnost těchto kometárních materiálů ještě na meteorickém semináři 1980 v Brně takto: "Rozdíly v hladinách maximální koncentrace bodů pohasnutí bolidů jsou: 8 km mezi nejnižší hladinou I a hladinou II, 18 km od hladiny I ke hladině IIIA, 29 km od hladiny I k hladině IIIB. Tyto rozdíly jsou přímo patrné ve výškách pohasnutí bolidů s přibližně stejnou vstupní rychlostí, stejnou maximální jasností, stejnou celkovou vyzářenou energií a stejným úhlem vstupu do ovzduší. Vysvětlení těchto



přímě pozorovaných rozdílů ve výškách pohasnutí pomocí různého složení a struktury meteoroidů se zdá zcela přirozené. V každém případě, i kdyby se jednou toto vysvětlení ukázalo nesprávným, bylo by třeba hledat příčinu toho, proč bolidy s téměř identickými vstupními parametry končí ve výškách lišících se v hustotě vzduchu až 1000 krát."

Podle mého názoru lze rozpor poslední věty jednoduše vysvětlit již dnes: Všechny známé kamenné meteority stejné hmotnosti jsou téměř identické, neboť se jen málo liší v materiálové hustotě (maximálně 1,7 krát) a pravděpodobně i ve schopnosti ablace. Proto se v atmosféře i podobně projevují (např. i svítí) až na výšku svého pohasnutí, určenou dle mé hypotézy především mechanickou