

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miroslav Plavec

Výbuchy v kometách a vznik meteorických rojů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 2 (1957), No. 1, 91--104

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137162>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1957

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



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

vrstvy hustšího prostředí, které se rozpíná do řídkšího, odvodil tvary „chobotovitých“ mlhovin.

Dynamika mezihvězdné hmoty, která je nejmladším odvětvím výzkumu v astrofysice, bude mít v nejbližších letech velký význam při objasňování některých procesů, spojených se vznikem hvězd z mezihvězdné hmoty.

MIROSLAV PLAVEC
(Astronomický ústav ČSAV)

VÝBUCHY V KOMETÁCH A VZNIK METEORICKÝCH ROJŮ

Tento článek volně navazuje na článek Dr V. Vanýska „Fyzikální struktura komet“, uveřejněný v tomto časopise, roč. I (1956), č. 2, str. 156 a d. Prosim čtenáře, aby si podle možnosti dříve přečetl článek Vanýskův, z něhož, pokud jde o některé základní poznatky o kometách, vycházím.

M. P.

R. 1927 objevil Schwassmann-Wachmann kometu, která upoutala pozornost tím, že její dráha se podstatně liší od typické dráhy komety. Normální dráha komet je elipsa o velmi značné výstřednosti, mnohdy nerozeznatelná od paraboly. Nově objevená kometka však měla výstřednost jen 0,135, takže její dráha je poměrně blízká kružnici. Obíhá v periodě 16,4 let v oblasti mezi Jupiterem a Saturnem; v periheliu je vzdálena od Slunce 5,5 astronomických jednotek, v afelu 7,4.

Velmi záhy se však objevila jiná, ještě pozoruhodnější anomálie komety Schwassmann-Wachmannovy: kometa mění čas od času prudce svou jasnost. Je známo, že jasnost komet velmi výrazně závisí na vzdálenosti od Slunce; obvykle se dá intenzita jejich záření vyjádřit empiricky vzorcem $I = I_0 r^{-n} d^{-2}$, kde r je vzdálenost od Slunce a exponent n mívá hodnoty mezi 2 až 8, nejčastěji kolem 4, a d je vzdálenost od Země. Jestliže však tento vzorec aplikujeme na jasnost komety Schwassmann-Wachmannovy, ukáže se, že by její jasnost měla kolísat velmi povlovně v rozmezí asi 1,5 hvězdné velikosti. Ve skutečnosti se však pozorují prudké výkyvy až o 5 hvězdných velikostí, což odpovídá poměru intenzit 1 : 100. Tak na př. r. 1933 měla dne 5. ledna kometa jasnost 17^m, ale 20. ledna již 12,5^m, 24. ledna 12^m, načež se během února a března pozvolna vracela k původní jasnosti. Za 12 let bylo takových výbuchů pozorováno 11. Byla vyslovena domněnka, že prudký vzrůst jasnosti komety Schwassmann-Wachmannovy je způsoben účinkem aktivních center na Slunci. Nejspolehlivější analýsu provedl N. Richter ze Sonnebergu. Na osmi vzplanutích jasnosti komety z let 1939—1950 ukázal zřetelnou korelaci mezi výbuchy komety a pozemskými magnetickými bouřemi. Je známo, že magnetické bouře jsou způsobeny proudem elektricky nabitých korpuskulí, vyvržených z aktivních center na Slunci. Richter upozorňuje, že ve všech případech byla kometa blízko opozice, t. j. týž proud korpuskulí mohl zasáhnout Zemi i kometu. Richter z časového posunutí mezi magnetickou bouří a odpovídajícím výbuchem odvodil rychlost korpuskulí na 750—1000 km/s, což velmi dobře souhlasí s rychlostmi, které byly odvozeny z opožďování pozemských jevů oproti slunečním erupcím.

Všobecně se soudilo, že kometa Schwassmann-Wachmannova je svými výbuchy výjimkou mezi kometami. Ale v novější práci Richter [1] ukázal, že náhlá vzplanutí jasnosti u komet nejsou vzácností. Studoval 358 komet z let 1880—1947 a našel 12 za-

ručených případů, kdy došlo k výbuchu. Čtenáři se to jistě bude zdát nepatrné procento. Je však třeba uvážit, že celý výbuch proběhne většinou v několika málo dnech a vlastní prudké stoupnutí jasnosti se odehraje často během několika hodin. Uvážíme-li, že vzhledem k nepříznivé poloze, denní době, počasí atd. můžeme komety pozorovat poměrně velmi mezerovitě, pak musíme předpokládat, že výbuchy nemusí být příliš vzácné. Richter ovšem podotýká, že i tak zřejmě jen některé komety mají sklon k výbuchům, protože na př. Halleyova kometa byla r. 1910 středem stálé pozornosti a žádné náznaky prudkých změn jasnosti se neobjevily.

Pro rozpoznání fyzikální podstaty a příčin výbuchů je velmi důležité pozorování, které vykonali na kometě Ponsově-Brooksově Müller a Vogel v Postupimi. Kometa Ponsova-Brooksova je co do dráhy sesterskou kometou Halleyovy, liší se však od ní právě tím, že jeví nápadný sklon k prudkým změnám jasnosti. Dne 1. ledna 1884 v 5^h 47^m měřil Müller fotometrem jasnost komety. Kometa se jevila jako difusní obláček, uprostřed zhuštěný, ale bez zřetelného jádra; její jasnost byla asi 8,2^m. Ale když Müller v 7^h 20^m prováděl druhé pozorování, byl velmi překvapen změněným vzhledem komety. Místo neurčitěho středového zhuštění viděl zcela ostré, bodové jádro, takže se zprvu domníval, že kometa přechází před nějakou hvězdou. V průběhu hodiny jasnost jádra ještě zvolna stoupala a v 8^h 07^m byla o 1,3^m větší než před necelými třemi hodinami. Pak začal pozvolný pokles jasnosti, pomalejší než vzestup.

Ještě zajímavější je pozorování Vogelovo, který se zabýval spektroskopickým zkoumáním komety. V 6^h 15^m bylo spektrum komety celkem shodné s předcházejícími dny. Difusní hlava komety dávala charakteristické emisní pásové spektrum molekul plynu, centrální zhuštění jevila dosti jasné spojité spektrum. Upozorněn Müllerem, opakoval pozorování v 8^h 20^m. Při pohledu bez spektroskopu bylo jádro už zase změněno; namísto bodové hvězdy tu byl nyní jasný kotouček, asi tak jako se jeví v dalekohledu planeta Uran. Kotouček jevil velmi výrazné spojité spektrum. V 9^h 03^m, kdy už jasnost jádra klesala, bylo již opět větší, ale kotouček byl na okrajích méně ostrý. Rychlost rozpínání jádra byla v této poslední pozorované fázi podle mikrometrických měření asi 1 km/s.

Pokud nám pozorování dovolují soudit, bývá průběh výbuchů komet patrně vždy přibližně týž. Schematicky jej ukazuje obr. 1, převzatý z Richtrovy práce. Uvnitř difusní komy se náhle vytvoří jasné bodové jádro, jež se rychle rozpíná, mění v difusní kotouček, který postupně přechází v difusní obláček, kterým byla hlava komety na počátku. Jádro má přitom vysloveně spojité spektrum. Prudké zvýšení jasnosti proběhne během několika hodin, v krajním případě v několika málo dnech, kdežto pokles jasnosti je pozvolnější. Přírůstek jasnosti činí obvykle 2^m—5^m, někdy až 8^m, což je ohromný poměr intenzit 1600 : 1.

Vzhledem k tomuto prudkému vzestupu jasnosti, rychlému průběhu dějů a k radikální změně vzhledu komety je nutno soudit, že v jádru komety dojde k nějakému výbuchu. Protože se pak vytvoří kotouček, jenž se rychle rozpíná, je zřejmě vyvržena určitá hmota do prostoru. Protože pak je spektrum vysloveně spojité, jsou zřejmě vyvrženy především drobné pevné částičky, nikoli plyn.

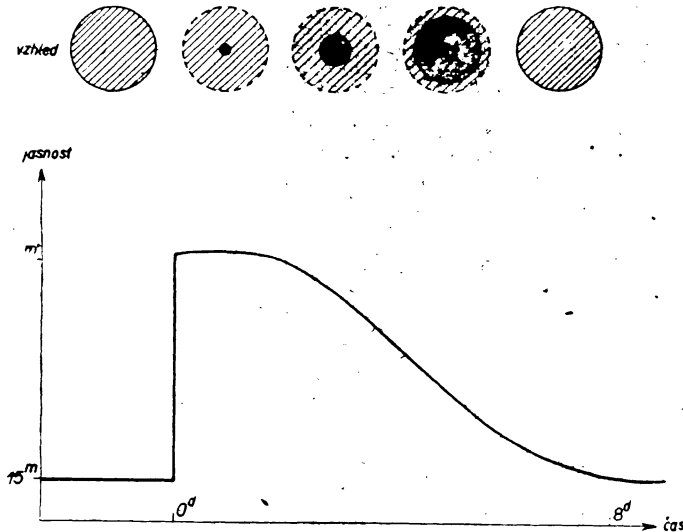
1. Jak vysvětlit výbuchy komet?

Je tedy třeba hledat vhodný fyzikální děj a jeho příčiny. Richter uvažuje několik možností. První z nich je srážka.

Srážka dvou větších meziplanetárních těles by určitě měla povahu katastrofy. Již při srážce dvou balvanů relativní rychlostí 4 km/s dojde k explozi tak mohutné, jako kdyby obě tělesa byla složena z nitroglycerinu. Ve skutečnosti by obecně relativní rychlost při srážce jádra komety na př. s velkým meteoritem byla značně větší, řádově několik

desítek km/s. Následky takové srážky vlastně ani nemůžeme dobře předvídat. Naproti tomu je však zřejmé, že při nepatrné hustotě větších těles v meziplanetárním prostoru je taková srážka krajně nepravděpodobná. Rozhodujícím argumentem — který Richter přehlédl — je však podle mého mínění ta okolnost, že jen určité komety (Schwassmann-Wachmann, Pons-Brooks, Holmes) jeví sklon k výbuchům. Není samozřejmě příčiny, proč jen jistá kategorie komet by se poměrně často měla srážet na různých místech dráhy s meteority. Je zřejmé, že příčinu výbuchů musíme hledat uvnitř komet, i když samozřejmě popud k nim může přijít zevně.

I tak je tu možné vysvětlení srážkou, totiž srážkou těles uvnitř komety samé. Mnozí badatelé soudí, že jádro komety je soustava většího počtu skalních bloků nebo aspoň balvanů. Takový útvar je pak podoben kulové hvězdokupě. Je celkem zřejmé, že každá složka tohoto složitého jádra musí vykonávat periodický pohyb kolem společného těžiště. Neběží tu ovšem o jednoduchý pohyb problému dvou těles. I za poměrně jednoduchých předpokladů o rozdělení hustoty v kulové hvězdokupě našli Strömgren a v poslední době Kurth, že dráhy jednotlivých těles jsou složité křivky, většinou elipsy s rychle proměnnou polohou hlavní osy. Předpokládáme-li, že jádro komet (nebo snad alespoň některé kategorie komet) má strukturu podobnou kulové hvězdokupě, můžeme očekávat, že čas od času dojde ke srážce dvou balvanů či skalních bloků. Lze předpokládat (ačkoli bezpečných důkazů pro to zatím nemáme), že při relativní rychlosti asi 200 m/sec vzniknou při srážce dvou skal o průměru 100 m úlomky nejruznější velikosti až po drobný prach; při vzrůstající relativní rychlosti bude poměrně relativní počet nejdrobnějších úlomků vzrůstat. Ukážeme dále, že prudký vzrůst jasnosti lze dobře vysvětlit, předpokládáme-li že jsou vyvrhovány hlavně drobné meteority a meteorický prach (pro lepší představu čtenáře řekneme částice milimetrových rozměrů a menší). Musíme tedy požadovat poměrně relativní rychlosti spíše vyšší než 200 m/sec.



Obr. 1. Schematický průběh výbuchu komety podle Richtera.

¹⁾ Rozuměj „hmotu“ v užším fyzikálním významu (hmota setrvačná, hmota tíhová), nikoli ve smyslu chemickém (látka, umělá hmota a p.) nebo obecně fyzikálním a filosofickým (mezihvězdná hmota, hmota jako objektivní realita a p.). Česká terminologie není v tomto směru dosud stabilisována. V jiných statích se používá termínu „massa“. Pozn. red.

Právě tento požadavek však činí vysvětlení výbuchu vnitřní srážkou nepravděpodobným. Komety jsou co do hmoty¹⁾ malá tělesa. Odhadneme-li, že průměrná kometa má



Obr. 2. Halleyova kometa v květnu 1910.

hmotu asi 10^{-10} hmoty Země, což je $6 \cdot 10^{17}$ g, budeme spíše ještě blíže horní hranici. Ale již i při této hmotě má pak kometa nepatrnou vlastní přitažlivost. Úniková rychlost²⁾ ve vzdálenosti 1 km od těžiště je pouze 9 m/s, ve vzdálenosti 10 km jen 3 m/s. Balvany, jež jsou částí jádra, obíhají tedy kolem těžiště rychlostí nižší než uvedená čísla; pak je ovšem relativní rychlost srážek menší než 10 % požadované nejnižší hodnoty. Je tedy správnější, hledat v kometě jiné síly než mechanické povahy, jež by mohly způsobit výbuch.

2. Elektrické odpudivé síly

Již Bessel a později Boss vyslovili domněnku, že v kometách mohou působit elektrické síly, jež sídlí v jádře a odpuzují drobné částice, čímž se může vytvářet koma kolem jádra a spoluvytvářet i ohon. Aby bylo možno tímto způsobem vysvětlit výbuchy komet, musíme předpokládat, že v kometě existují poměrně silná elektrostatičká nebo elektromagnetická pole a že tato pole se mohou náhle změnit. Popud k tomu by patrně musil přijít zvenčí a tu je nasnadě myslit na děje na Slunci. Dále však to znamená, že musíme předem v kometě očekávat existenci velkého množství drobných částic. Protože se před výbuchem spektroskopicky neprojeví, jsou zřejmě rozptýleny nebo snad lpějí na povrchu větších balvanů, jež dohromady zase zauímají patrně jen nepatrný prostor v hlavě komety. Samy v určitém malém prostoru bez přítomnosti větších těles soustředěny být nemohou, protože lze sotva najít sílu, která by je mohla udržet pohromadě. Kdyby

²⁾ Rychlost potřebná k tomu, aby se těleso vymanilo („uniklo“) z gravitačního pole mateřského objektu (planety, komety, hvězdy).

prachové částice byly rozptýleny v rozsáhlejších oblastech hlavy komety, musili bychom požadovat, aby elektrické pole v jádru komety částice nejdříve koncentrovalo a pak rozptýlilo. Tato domněnka naráží na problém, proč by se náhle měla změnit polarita pole. Navíc odporuje pozorování: chování komety před výbuchem nikdy neukazuje postupnou koncentraci do středu a zmenšování takto vytvořeného jádra; proces začíná tím, že se uvnitř difusní komy náhle utvoří jasné, bodové jádro, jež se rozpíná. Tak tedy pro vysvětlení elektrickými odpudivými silami musíme asi požadovat, aby prachové částice už v kometě byly a aby lpěly na povrchu velkých balvanů či podobně.

Dále ovšem musíme požadovat, aby prachové částice byly elektricky nabitý. Richter soudí, že fotoelektrický efekt krátkovlnného záření může způsobit nabití drobných pevných částic. Rozbor této otázky zatím nikdo neprovedl.

Je zřejmé, že tento pokus o výklad příčin výbuchů komet naráží na to, že celá řada problémů není vyřešena. Existuje v kometě elektrické nebo elektromagnetické pole a je dostatečně silné? Jsou tu drobné meteory elektricky nabitý? Jaký je vliv Slunce na toto pole? Všechny tyto okolnosti nás vedou k tomu, abychom hledali jiný výklad výbuchů^{*)}.

3. Whippleův model komety z prachu a ledu

R. 1955 se problémem výbuchů s jiného hlediska zabýval Ch. Whitney z Harvardovy observatoře v USA [2]. Jeho práce má oproti Richtegově objevitelské práci tu přednost, že se pokouší některé otázky řešit kvantitativně. Vychází opět z předpokladu, že materiál, který tvoří expandující jádro, jsou prachové částice, jež svítí odraženým světlem slunečním.

Whitney předpokládá, že všechny vyvržené částice mají též poloměr s . Z pozorovaného vzrůstu jasnosti je pak možno odvodit jejich celkový počet N_s . Protože při výbuchu vzroste jasnost komety v poměru 1 : 10 až 1 : 1000, lze původní záření komety (tedy hlavně záření plynů v kometě) zanedbat a předpokládat, že v maximu jasnosti všechno záření přichází od vyvržených prachových částic. Pak je počet těchto částic dán prostě poměrem celkové intenzity záření komety v maximu J_M k záření, které vysílá jediná částice J_s . Máme tedy

$$N_s = \frac{J_M}{J_s}$$

a přejdeme-li od poměru intenzit k rozdílu hvězdných tříd podle známého vztahu

$$m_s - m_M = 2,5 \log \frac{J_M}{J_s},$$

dostaneme konečně

$$N_s = 10^{0,4(m_s - m_M)}.$$

Odtud pak plyne celková hmota vyvržených částic

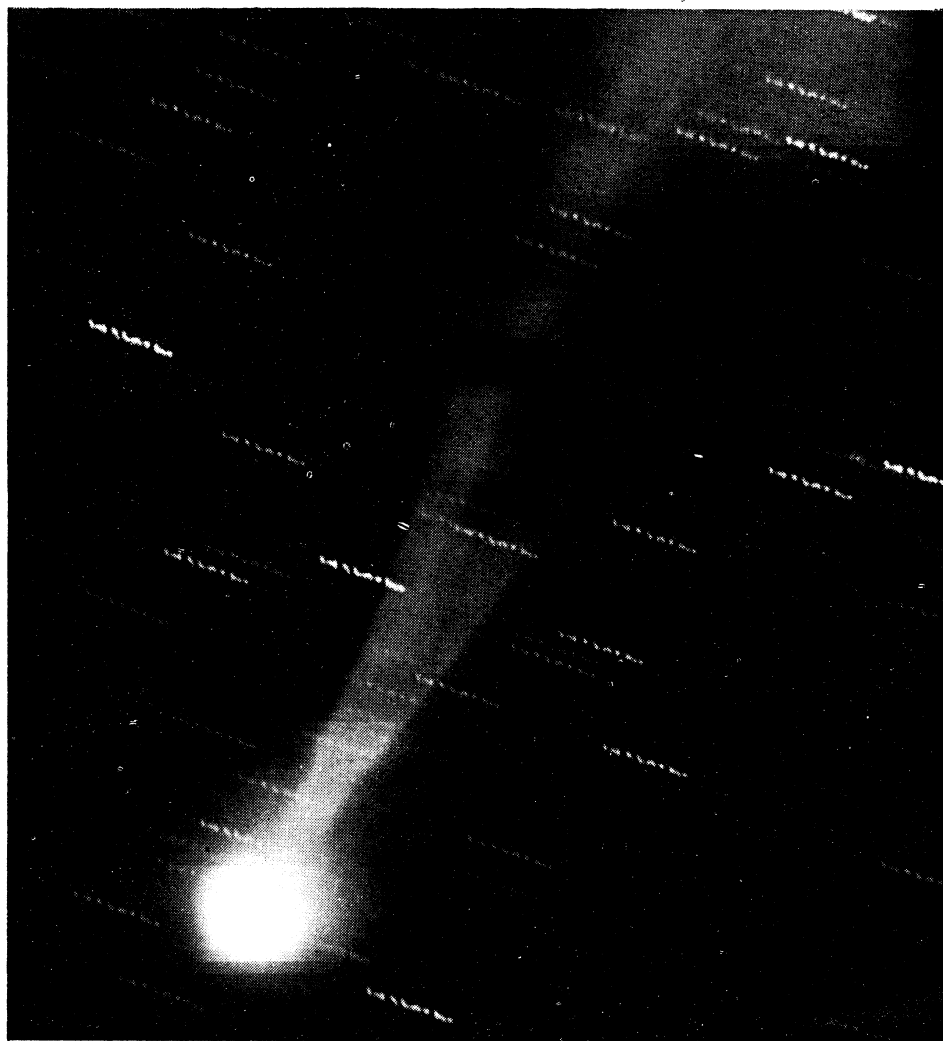
$$M_s = \frac{4}{3} \pi N_s \rho s^3,$$

kde ρ je průměrná hustota částice. Hodnotu m_s určuje Whitney z geometrických poměrů pro každý výbuch tak, že podle vzdálenosti komety od Slunce a Země vypočte, jakou jasnost by v onom místě měla planetka Ceres, o jejímž povrchu se celkem dobře můžeme

^{*)} Práce Poloskova, Dobrovolského a Biermanna, ač neřeší problém úplně, vedou k závěrům, že elektrické pole v kometách nemůže pronikavě působit na meteory či na povrchové částice.

domnívat, že má stejné odrazecí schopnosti (albedo) jako meteory. Protože z pozorování plyne, že ve vzdálenosti 1 od Slunce i od Země by měla Ceres hvězdnou velikost $3,7^m$ a že její poloměr je 385 km, lze snadno vypočítat hvězdnou velikost částice o poloměru s .

Za předpokladu, že všechny vyvržené částice mají poloměr $s = 10^{-3}$ cm, odvodil Whitney pro průměrný výbuch, že celková vyvržená hmota je asi $5 \cdot 10^{12}$ g; při $s = 10^{-4}$ cm vyjde $M_s = 5 \cdot 10^{11}$ g. Odtud je možno také odvodit celkovou kinetickou energii vyvržených částic. Pozorované rychlosti rozpínání jádra byly povětšinou řádově 10^2 m/s, jen ojedinele překročily 1 km/s; hodnota 7 km/s, odvozená pro jednu fázi výbuchu Holmesovy komety r. 1893, je dosti pochybná. Předpokládáme-li tedy průměrnou rychlost 0,8 km/s, vyjde celková kinetická energie v prvním případě $3 \cdot 10^{22}$ erg, ve druhém $3 \cdot 10^{21}$ erg.



Obr. 3. Finslerova kometa z r. 1937.

Jak získá kometa tuto energii?

Jak již bylo řečeno, ukázal Richter pro kometu Schwassmann-Wachmannovu, že její vzplanutí jsou v úzké korelaci s ději na Slunci a dokazuje, že k výbuchu dochází tehdy, když ke kometě dospějí nabitě korpuskule, vyvržené ze Slunce. Whitney však poukazuje na to, že hustota takového proudu korpuskul je asi 10^2 – 10^3 částic na cm^2 v místě Země; jsou-li to protony, vede toto číslo k toku energie jen nejvýše 500 erg/ cm^2s . Ale sluneční elektromagnetické záření dává tok na Zemi přes 10^6 erg na cm^2s . Ve vzdálenosti komety Schwassmann-Wachmannovy jsou obě hodnoty příslušně redukovány podle zákona o čtverci vzdálenosti, ale jejich poměr zůstává týž. Je tedy zřejmé, že relativně nevelké kolísání toku slunečního záření by mohlo mít větší vliv než korpuskulární částice; je spíše možné, že sluneční erupce a vyvrhování korpuskul může jaksi uvést do chodu proces, který vede k výbuchu, ale vlastní síla musí být jiná. Ve vzdálenosti šesti astronomických jednotek od Slunce dostává kometa Schwassmann-Wachmannova za vteřinu celkem $6 \cdot 10^{18}$ erg elektromagnetického záření, předpokládáme-li, že má monolitní jádro o poloměru asi 70 km, jak vyplývá z některých úvah. Dále je možno usuzovat, že asi 90 % tohoto záření absorbuje. Pak tedy řádově během několika málo hodin absorbuje právě tolik energie, kolik je jí potřeba pro vyvržení částic při výbuchu. Tuto energii ovšem dostává stále a není trvale ve stadiu výbuchů, čili za normálních okolností právě tato energie je zapotřebí k určité rovnováze a stabilitě. Jestliže by se příliv slunečního záření zvýšil, mohlo by dojít k výbuchu. Zvýšení může být skutečné nebo pravděpodobnější může být způsobeno vzrůstem absorpčních schopností (poklesem albeda) komety.

Whitney se odvolává na známý Whippleův model jádra komety. Whipple ve svých pracích r. 1951 vyslovil domněnku, že jádro komety je konglomerát meteorických částic a ledových krystalů vody, kyslíčnku uhličitého, čpavku a případně i dalších látek. Whitney soudí, že kometa Schwassmann-Wachmannova a patrně i ostatní komety, jež mají sklon k výbuchům, patří mezi mladé komety, jež podle Oorta obsahují mnoho ledu, a to i na povrchu jádra. Protože ve vzdálenosti 6 a. j. od Slunce je povrchová teplota komety asi 130°K , neodpařuje se žádná ze zmrzlých látek znatelně, až na metan. Můžeme si představit, že na některých místech se metan odpaří a zůstává pod ním dosti tenká vrstva směsi meteorických částic a ledu neaktivních látek. Jestliže se však tato vrstva z nějakého důvodu zhroutí nebo je místním prudším odpařováním metanu rozrušena, pronikne sluneční záření dovnitř jádra a může způsobit prudké odpařování těkavějších plynů. Plyny, unikající termickými rychlostmi, strhnou s sebou meteorický materiál a dojde k pozorovanému výbuchu.

Whippleův „ledový model“ komety, ač velmi odvážný, vysvětluje mnohá pozorování a je třeba mu věnovat pozornost. Přijmeme-li jej, pak dosti logicky můžeme předpokládat nejružnější porušení rovnováhy v kometách a různé úkazy, z nichž jedním mohou být popsane výbuchy. Je ovšem třeba říci, že Whippleova domněnka není prokázána a v její aplikaci na výbuchy komet je tolik hrubě nahozených úvah a představ, že se současným stavem nemůžeme být spokojeni.

4. Domněnka o chemických reakcích

Whitneyova práce přivedla dva další badatele na myšlenku, zda by snad nebylo možno některé děje v kometách vysvětlit chemickými reakcemi, jež by mohly za určitých okolností probíhat velmi prudce.

V práci, publikované r. 1956, Donn a Urey [3] poukazují na jednu potíž Whitneyova výkladu kometárních výbuchů. Whitney, jak jsem řekl výše, předpokládá, že v určité izolované části jádra komety dojde k prudkému zahřátí a odpařování plynů, vzniklých



Obr. 4. Kometa Whipple—Fedtke—Tevezadze z r. 1943. Fotografoval Dr Bečvář na Štrbském Plese.

ze zmrzlých látek jako je metan. Donn a Urey ovšem poukazují na to, že prudké odpařování samo nevede ještě k výbuchu; musí tu být jakýsi „kotel“, ve kterém jsou plyny uzavřeny a jehož stěny mohou po určitou dobu snášet stoupající tlak. Whippleův model jádra, složeného z beztvaré směsi ledů a meteorů, sotva dává možnost předpokládat nějaký prostor s pevnějšími stěnami.

Proto Donn a Urey soudí, že by výbuch bylo možno vysvětlit snad chemickými reakcemi. Soudí, že by stačilo předpokládat, že ve směsi, jež tvoří kometaryní jádro, jsou také přítomny volné radikály jako CH, OH, NH a podobně. Laboratorní pokusy, prováděné zejména v poslední době, vedou k závěru, že takové radikály i za nízkých teplot mohou způsobit bouřlivé chemické reakce. Je na př. známo, že hydroxyl již při teplotě 77° K přechází v peroxid vodíku H₂O₂, který je velmi nestálý a jehož směsi se sloučeninami uhlíku jsou za vhodných podmínek vysoce explosivní. Donn a Urey soudí, že za vhodného složení jádra komety by mohlo dojít i k určité řetězové chemické reakci, která by mohla zachvátit podle okolností větší či menší část jádra.

Jak již bylo řečeno výše, našel Richter úzký vztah mezi výbuchy komety Schwassmann-Wachmannovy a pozemskými magnetickými bouřemi a vysvětluje jej tak, že obojí je způsobeno proudy korpuskulárních částic ze Slunce. Whitney namítá, že energie těchto korpuskul je nedostatečná. Donn a Urey jsou toho názoru, že energie korpuskul stačí k tomu, aby „zapálily“ místní chemickou reakci, jež pak může přejít v mohutnější řetězovou reakci. Při výbuchu by podle nich měl být pozorován silný světelný záblesk, trvající ovšem jen řádově vteřiny.

5. Souvisí výbuchy komet se vznikem meteorických rojů?

Zabýval jsem se nedávno výbuchy v kometách s nového hlediska: jaké poznatky může výzkum výbuchů komet přinést pro meteorickou astronomii? [4]

Z předchozích úvah vysvítá, že příčiny výbuchů v kometách nejsou ještě zcela jasné, že však lze dobře předpokládat, že prudký vzestup jasnosti komety způsobují mraky drobných částic, jež, vyvrženy z jádra, odrážejí sluneční záření. Na druhé straně je známo, že meteorické roje souvisí s kometami. Meteorické roje jsou soubory drobných pevných částic, jež obíhají kolem Slunce ve drahách přibližně shodných; tvoří tedy jakési difusní eliptické prstény. Dokáži v příštím článku, že neexistuje síla, jež by částice meteorického roje držela pohromadě. Meteorický roj tvoří uspořádaný systém částic prostě proto, že vnější síly neměly ještě dostatek času, aby je rozptýlily. Z tohoto poznatku vyplývají dva důležité závěry: předně meteorické roje musí být útvary astronomicky mladé, za druhé musí mít společný vznik. Pozorování ukazují, že mnohé meteorické roje se pohybují ve drahách komet. Ukáží ve zvláštním článku, že přes některé odchylné názory lze mít za to, že meteorické roje se tvoří rozpadem kometaryních jader.

Jeden z procesů rozpadu kometaryních jader — výbuchy — byl předmětem našeho zkoumání. Můžeme si tedy ihned položit otázku, zda výbuchy v kometách nějak souvisí s tvořením meteorických rojů. Budeme si tedy nyní všimnout ne síly, jež částice z komety vyvrhne, nýbrž částic samých.

V odst. 4 bylo uvedeno, že Whitney předpokládá, že všechny vyvržené částice mají stejný rozměr a uvažuje prachová zrnka o poloměru 10⁻⁵ cm, resp. 10⁻⁴ cm. To jsou částice vesměs podstatně menší než ty, jež se mohou projevit v naší atmosféře jako meteor. Pro představu můžeme uvést, že podle Watsona je vztah mezi hvězdnou velikostí meteoru m a jeho poloměrem s

$$m = -4,7 - 7,7 \log s. \quad (1)$$

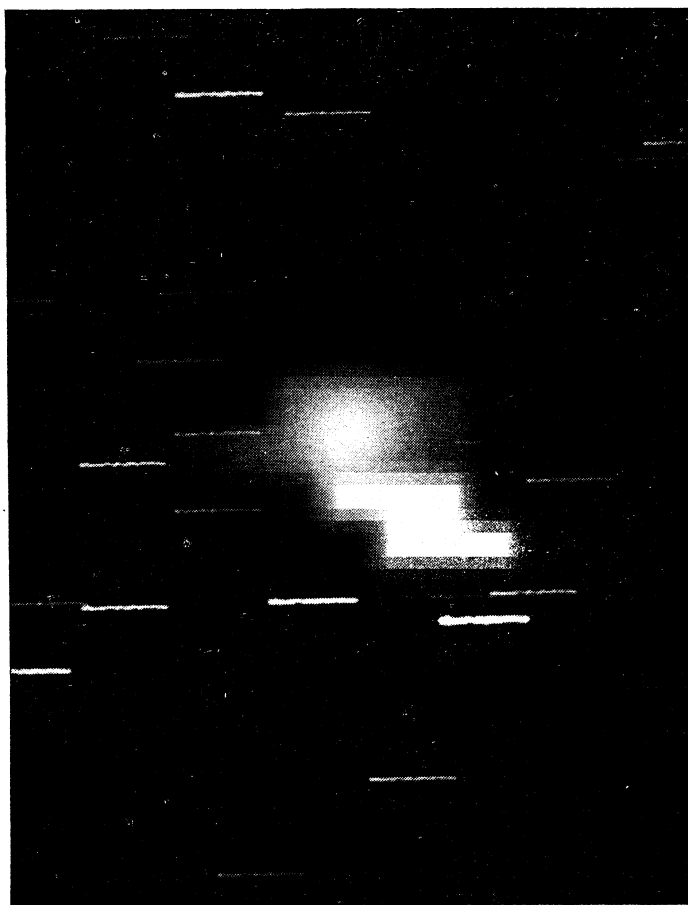
Meteory jasnější než 5^m můžeme pozorovat visuálně a až asi k meteorům 10^m sahají

spolehlivá pozorování teleskopická a radioelektrická. Ale jasnosti 10^m odpovídá asi $s = 10^{-2}$ cm.

Kdyby tedy Whitneyovy předpoklady byly splněny, vyvrhovala by kometa při výbuchu pouze t. zv. meteorický prach. Je ovšem zřejmé, že Whitneyův předpoklad o tom, že všechny částice mají stejné rozměry, není udržitelný. Považuji za správnější předpokládat, že ve vyvrženém oblaku jsou zastoupeny částice všech rozměrů mezi 10^{-5} cm a 1 cm. Pro dolní mez mluví ta okolnost, že částice ještě menší jsou odpuzovány tlakem záření ze sluneční soustavy; meteory větší než 1 cm jsou pozorovány vzácně a nepochybně mohou být přítomny jen v nepatrném množství. Jaké však je rozdělení částic podle rozměrů? Můžeme usuzovat z pozorování meteorických rojů. Rozborem pozorování meteorického roje Drakonid jsem odvodil, že počet částic o poloměru mezi s a $s + ds$ je dán vztahem

$$N(s) ds = N(1) s^{-4} ds, \quad (2)$$

kde $N(1)$ odpovídá poloměru 1 cm.



Obr. 5. Typická malá kometa: Periodická kometa Schaumasse, fotografovaná Dr Kresákem v lednu 1952. Kometa má jen komu, uprostřed zhuštěnou.

Tento rozdělovací zákon platí u Drakonid v oboru mezi 10^{-2} cm do 1 cm. O meteoroch menších než 10^{-2} cm nevíme nic. U ostatních meteorických rojů jsou spíše náznaky toho, že již pod 10^{-1} cm roste počet drobných meteorů s klesajícím poloměrem mnohem pomaleji, než jak vyžaduje napsaný zákon. Domníváme se, že je to znakem vyššího stáří. Známe totiž síly (na př. t. zv. Poynting-Robertsonův efekt), které se snaží oddělit drobné částice od větších [5]. Působením Poynting-Robertsonova efektu klesá spojitě s časem velká poloosa a výstřednost dráhy meteoru; rychlost poklesu je nepřímo úměrná poloměru meteoru. Následkem toho postupně vymizí z roje drobnější částice.

U meteorického roje Drakonid máme několik důvodů domnívat se, že vznikl nedávno. Proto soudím, že rozdělení meteorů v něm může nejspíše být obrazem rozdělení meteorů v oblaku, vyvrženém při výbuchu komety. Protože o rozdělení pro meteory slabší než 10^{-2} cm nevíme nic, propočítal jsem dva předpoklady:

1. V celém intervalu mezi 10^{-5} cm až 1 cm je rozdělení dáno zákonem

$$N(s) ds = N(1) s^{-4} ds, \quad (2)$$

2. Tento zákon platí pouze v intervalu $1 > s > 10^{-2}$ cm, kdežto ve zbývajícím intervalu je $N(s) = \text{konst.} = N(10^{-2})$. (3)

Označí-li $M(1)$ hmotu⁴⁾ meteoru o $s = 1$ cm, bude celková hmota částic, vyvržených při výbuchu z komety, v případě 1.:

$$M = \int_{10^{-5}}^1 M(1) s^3 N(1) s^{-4} ds = M(1) N(1) \ln 10^5 = 48,4 N(1), \quad (4)$$

kam jsme dosadili $M(1) = 4,19$ g, což odpovídá hustotě meteoru rovné 1. Hodnota $N(1)$ vyplývá z pozorované maximální jasnosti komety při výbuchu \mathcal{J}_M (vyjádřeného ve hvězdných velikostech m_M). Označíme-li analogicky \mathcal{J}_1 a m_1 jasnost a hvězdnou velikost jednoho meteoru o $s = 1$ cm, platí zřejmě

$$\mathcal{J}_M = \int_{10^{-5}}^1 \mathcal{J}(1) s^2 N(1) s^{-4} ds, \quad (5)$$

protože jasnost částice je úměrná odrazejícímu povrchu, t. j. roste se čtvercem poloměru. Přejdem k hvězdným velikostem máme

$$m_M = m_1 - 2,5 \log \int_{10^{-5}}^1 N(1) s^{-2} ds. \quad (6)$$

Odtud dostáváme

$$\log N(1) = 0,4 [m_1 - m_M] - 5.$$

Rozborem pěti nejlépe pozorovaných výbuchů se ukázalo, že hodnota $m_1 - m_M$ je u všech celkem shodná, rovná v průměru 38. Je pak

$$N(1) = 1,5 \cdot 10^{10}$$

a podle (4)

$$M = 7 \cdot 10^{11} \text{ g.}$$

Přijmeme-li však druhý předpoklad o rozdělení částic, máme

⁴⁾ Viz pozn. 3).

$$M = \int_{10^{-5}}^{10^{-2}} N(10^{-2})^s M(1) s^3 ds + \int_{10^{-2}}^1 N(1) M(1) s^{-1} ds = 21 N(1),$$

kde nyní $N(1)$ je definováno vztahem

$$\log \left[\int_{10^{-2}}^1 N(1) s^{-2} ds + \int_{10^{-5}}^{10^{-2}} N(10^{-2}) s^2 ds \right] = 0,4 [m_1 - m_M]$$

čili

$$\log 132 N(1) = 0,4 [m_1 - m_M] - 2,12.$$

Odtud vyplývá

$$N(1) = 10^{13},$$

$$M = 2 \cdot 10^{14} \text{ g}.$$

Odhaduje se, že malá kometa má celkovou hmotu řádově 10^{15} až 10^{16} g. Kdybychom přijali druhý předpoklad o rozdělení vyvržených částic podle poloměru, musili bychom tedy požadovat, aby jediným výbuchem ztratila kometa řádově 10 % celkové hmoty. To však odporuje pozorování, protože takový výbuch by se projevil změnou dráhy komety, což nebylo pozorováno; dále pak na př. kometa Schwassmann-Wachmannova prodělala již přes 10 pozorovaných výbuchů, aniž to nějak pronikavě rozrušilo celou její stavbu.

Je tedy zřejmě správnější předpoklad, že v celém intervalu $1 > s > 10^{-5}$ cm platí zákon $N(s) ds = N(1) s^{-4} ds$. Pak lze výbuch komety vysvětlit předpokladem, že je vyvrženo asi $7 \cdot 10^{11}$ g drobných pevných částic. Převážnou část vyvrženého materiálu při tom tvoří meteorický prach. Protože řada pozorování vizuálních i radioelektrických naznačuje, že v meteorických rojích je naopak drobných částic nedostatek, musíme předpokládat, že nějaká síla je z roje odstraní velmi brzo po vytvoření roje. Poynting-Robertsonův efekt vyžaduje příliš dlouhé časové intervaly a zřejmě pro vysvětlení tohoto zjevu nestačí.

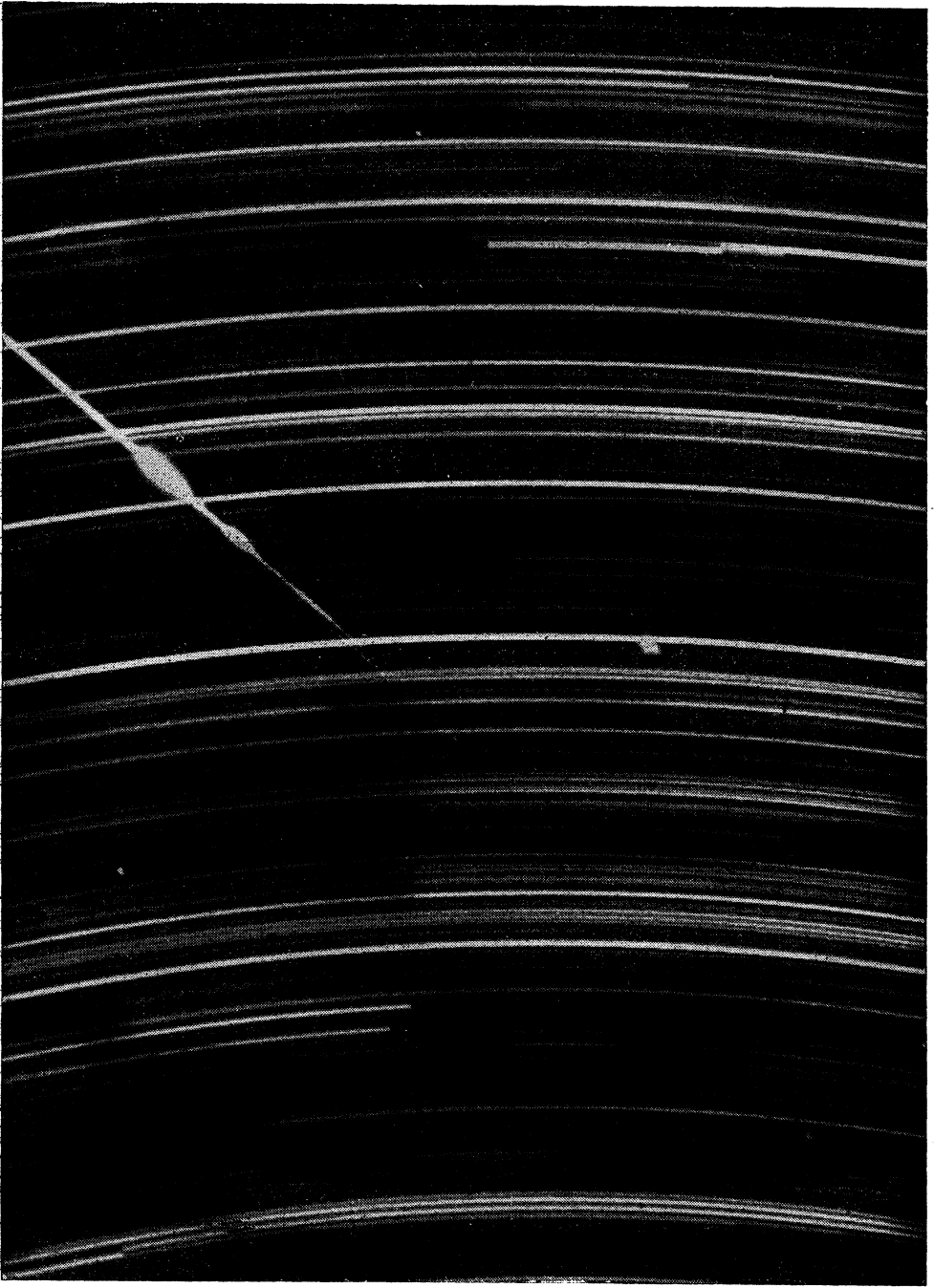
Předpokládáme-li nyní, že všechny částice jsou z komety vyvrženy stejnou rychlostí a přijmeme-li pro tuto rychlost hodnotu 0,3 km/s, vyjde pro celkovou kinetickou energii hodnota řádu 10^{20} erg.

Porovnání s meteorickým rojem Drakonid

Abychom mohli posoudit, zda se oblak částic, vyvržených při výbuchu z komety, může chovat jako meteorický roj, kříží-li náhodou dráhu Země, vypočteme celkovou hmotu pozorovatelných meteorů (t. j. částic s $s > 10^{-2}$ cm) v tomto oblaku:

$$\begin{aligned} M_{\text{vis}} &= \int_{10^{-2}}^1 M(1) N(1) s^{-1} ds \\ &= 2,9 \cdot 10^{11} \text{ g}. \end{aligned}$$

Kdyby tento oblak zaujímal týž prostor jako roj Drakonid, t. j. $6,6 \cdot 10^{23}$ cm³, byla by prostorová hustota $4,4 \cdot 10^{-23}$ g · cm⁻³. To je přibližně asi 10 % prostorové hustoty Drakonid. Drakonidy způsobily r. 1933 a 1946 neobyčejně intenzivní meteorické deště, kdy hodinová frekvence meteorů pro jednoho pozorovatele dosáhla řádově až 10⁴ met/hod. Je tedy zřejmé, že i při 10 % této hustoty by došlo k velmi význačné frekvenci meteorů.



Obr. 6. Unikátní snímek meteoru, který se po výbuchu na konci dráhy rozpadl na dva kusy (dráha drobného odštěpku odbočuje pod stopu hlavní části). Fotografoval Z. Ceplecha.

Kdyby tedy oblak, vyvržený z komety při výbuchu, byl soustředěn do řádově téhož prostoru jako Drakonidy, tvořil by význačný meteorický roj.

Lze však předpokládat, že meteorické částice se poměrně brzy (řádově za 10^2 — 10^3 let) rozptýlí do prostoru podstatně většího. Kdyby byly rozptýleny rovnoměrně do prostoru, který zaujímají Perseidy ($2,4 \cdot 10^{38}$ cm³), klesla by hustota na 10^{-27} g · cm⁻³, byla by tedy rovna jen asi tisícině hustoty Perseid. Tak řídký roj už by nebyl pozorovatelný. Obecně by tedy jeden výbuch komety nemohl stačit k vytvoření velkého meteorického roje.

Uvažujme nyní skutečný roj, na př. Drakonidy. Podle mých výpočtů [4] je celková hmota meteorů do 10^{-2} cm řádově 10^{12} g. Z několika důvodů soudíme, že Drakonidy jsou velmi mladý roj, který se patrně v současné době stále ještě tvoří. R. 1898 se totiž mateřská kometa roje, kometa Giacobiniova-Zinnerova, přiblížila těsně k Jupiteru, a to na pouhých 30 mil. km. Při takovémto přiblížení se značně změní dráha komety, jak bylo skutečně výpočtem prokázáno [4,7]. Pro nás je však podstatné, že oblaky meteorů, pohybující se v blízkosti komety, by musily být rozptýleny, nebo aspoň uvrženy do drah odchýlených od dráhy komety. Protože však pozorujeme nyní oblaky meteorů nedaleko od komety, jež mají dráhu téměř shodnou s ní, je zřejmé, že nemohly vzniknout před r. 1898. Jsou tedy dvě možnosti: buď vznikly při setkání s Jupiterem nebo po něm. V tomto článku se budeme zabývat druhou možností.

Podle jedné z vážných domněnek o vzniku meteorických rojů se meteory oddělují od komet *ejekcemi*, t. j. vyvrhováním vlivem vnitřních sil. Skutečnost, že takové mohutné ejekce — výbuchy — skutečně pozorujeme, podporuje samozřejmě tuto domněnku. U mateřské komety Drakonid nebyly výbuchy pozorovány, ukáží však, že vůbec není potřeba požadovat tak mohutné síly, jaké působí při velkých výbuších. Od r. 1900 vykonala kometa Giacobiniova-Zinnerova 8 oběhů. Předpokládáme, že vyvrhovala meteory stejnoměrně při každém oběhu; pak na jeden oběh připadá řádově 10^{11} g meteorů. Rozborem pozorování Drakonid jsem dospěl k závěru, že rychlost částic vyvrhovaných z komety nebyla vyšší než 30 m/s [6]; z jiných úvah dospěl Jevdovkimov [7] k hodnotě 20 m/s, tedy shodné. Tedy celková kinetická energie meteorů, vyvržených za jeden oběh, by byla $5 \cdot 10^{17}$ erg. Uvažme však dále, že všechna energie potřebná k výbuchu komety se spotřebuje řádově během jednoho dne. Přijmeme-li však Whippleovu představu o složení jader komet, můžeme očekávat, že kometa je aktivní a vyvrhuje částice pokud je Slunci blíže než řekneme dvě astronomické jednotky. Pak totiž dochází k poměrně značnému zahřívání a může nastat silné odpařování ledů, při čemž unikající plyn strhuje s sebou meteory. Kometa Giacobiniova-Zinnerova je při každém oběhu po dobu 200 dní blíže Slunci než 2 a. j. Stačila by tedy spotřeba energie asi $2 \cdot 10^{18}$ erg na den. To je řádově pouze 10^{-5} energie, potřebné k výbuchu.

Můžeme tedy uzavřít: Tvoření meteorických rojů vyžaduje síly mnohokrát slabší než ty, jež se uplatňují při výbuchu komet. Protože výbuchy nejsou zcela vzácné úkazy, je zřejmé, že mnohem méně mohutné ejekce, jež vedou k postupnému tvoření meteorických rojů, mohou být daleko častějším zjevem. Podle mého mínění je tento poznatek značnou podporou domněnky, že meteorické roje se tvoří vyvrhováním meteorů z komet vnitřními silami.

Literatura

- [1] N. Richter, *Astronomische Nachrichten*, 277 (1949), 12.
- [2] Ch. Whitney, *Astrophysical Journal*, 122 (1955), 190.
- [3] B. Donn a H. C. Urey, *Astrophysical Journal*, 123 (1956), 339.
- [4] M. Plavec, *Vznik a raná vývojová stadia meteorických rojů*, ČSAV, Praha, 1957.
- [5] M. Plavec, *Comptes Rendus*, 231 (1950), 234.
- [6] M. Plavec, *Meteors*, Suppl. 2 to *J. Atmosph. Terr. Phys.* (1955), 168.
- [7] J. V. Jevdovkimov, *Astronomičeskij cirkuljar SSSR*, 159 (1955).