

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Josip Kleczek

Korpuskulární záření v meziplanetárním prostoru

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 6 (1961), No. 3, 154--167

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139222>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1961

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>

KORPUSKULÁRNÍ ZÁŘENÍ V MEZIPLANETÁRNÍM PROSTORU

JOSIF KLECZEK, Ondřejov

Článek se zabývá korpuskulárním zářením uvnitř naší planetární soustavy. Ukazuje na metody, jimiž získáváme znalosti o jeho spektru. Pomocí korpuskulárního záření měřeného na Zemi lze odhadovat vlastnosti magnetického pole, které prostupuje prostor naší sluneční soustavy.

1. ÚVOD

Naše planetární soustava je v podstatě rozsáhlý rovinný útvar. Planety obíhají přibližně v jedné rovině, zvané ekliptika (to jest v rovině zemské dráhy). Meziplanetární prostor je především prostor mezi planetami, jehož hranici tvoří dráha Plutona, vzdáleného asi 6 miliard km od Slunce. Řidčeji počítáme k meziplanetárnímu prostoru také oblasti vzdálenější nad i pod ekliptikou, které však nepřesahují vzdálenost 6 miliard km od Slunce.

První astronautické lety byly sondážemi meziplanetárního prostoru v okolí Země. Přinesly nečekané objevy, zvláště objev pásů intenzivního korpuskulárního záření. Díky astronautice se stává meziplanetární prostor předmětem bezprostředního výzkumu a dostává se tak do oblasti zájmů nejen odborníků, ale i širší veřejnosti. Bude proto účelné povědět o některých důležitějších poznatecích, které astronomie o meziplanetárním prostoru získala.

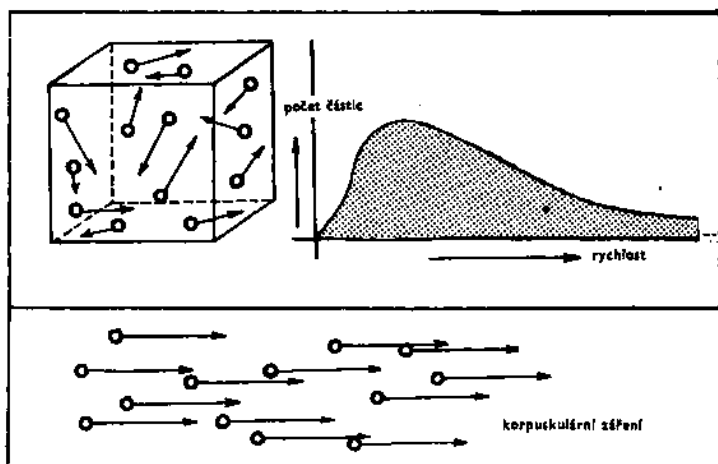
Rozsáhlý meziplanetární prostor zdaleka není prázdný. Nachází se v něm nejrozmanitější hmotné útvary — od komet s hmotou mnoha miliónů tun až po neutrina bez klidové hmoty. Prosbhají jím fotony od velmi intenzivního záření γ až po málo energetické fotony rádiové. Setkání částice s jinou částicí nebo s fotonem nezůstává bez následků. Výsledek interakce (vzájemného působení) je závislý na druhu částic, na blízkosti jejich přiblížení, na jejich energii a na tom, jakými silami na sebe působí: jadernými, elektromagnetickými nebo pouze gravitačními. Osudy částic meziplanetárního prostoru jsou kromě toho ještě určovány gravitačním a magnetickým působením Slunce a planet.

Ze složité spleti meziplanetárních částic, fotonů a jejich vzájemných vztahů se omezíme toliko na velmi rychlé částice — neutrina, elektrony, fotony, jádra těžších prvků i neutrální atomy — které se pohybují rychlostmi od tisíce km/s až po rychlost světla (300 tisíc km/s). Tyto velmi rychlé částice nazýváme *korpuskulárním zářením*. (Místo částice se používá termínu korpuskule.) Energie částic korpuskulárního záření je netepelného původu. V proudu korpuskulárního záření, jaký je např. vyvrhován ze Slunce při chromosférických erupcích, se částice pohybují celkem nezávisle, bez vzájemných srážek. Jejich rychlosti nejsou proto rozloženy podle Boltzmannova zákona (viz obr. 1). Rychlosti v takovém slunečním proudu jsou co do směru zhruba rovnoběžné. Co do velikosti přesahují rychlosti korpuskulárního záření průměrnou rychlost plyných částic v nejteplejším místě naší sluneční soustavy — v nitru Slunce. Jak známo je nitro Slunce obrovský termonukleární reaktor s teplotami přes 10 miliónů stupňů. Pro průměrnou kinetickou energii $\frac{1}{2}mv^2$ protonů (hmota jednoho protonu $\sim 10^{-24}$ g) najdeme podle vztahu

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

hodnotu $\sim 10^{-9}$ erg a průměrnou rychlost několika set kilometrů za vteřinu (k je Boltzmannova konstanta $\sim 10^{-16}$ erg/stupeň). Můžeme tedy říci, že částice korpuskulárního záření v meziplanetárním prostoru jsou rychlejší než protony zmítané vysokým žářem v hlubinách Slunce.

Kromě velmi rychlých částic korpuskulárního záření se setkáváme v meziplanetárním prostoru s částicemi pomalými, které poslušně zákonů gravitace obíhají kolem Slunce rychlostí několika desítek km/s. Jsou součástí meziplanetární hmoty.



Obr. 1. Plyn, v němž dochází k častým srážkám mezi částicemi, je znázorněn v horní části obrázku (Boltzmannovo rozdělení). Rychlosti jdou do všech směrů a jejich velikost je různá. Křivka vpravo nahoře ukazuje, kolik částic se pohybuje určitou rychlostí. Jako příklad takového (Boltzmannova) rozdělení můžeme uvést zemskou atmosféru, sluneční korunu, nitro Slunce. (V nitru některých hvězd — např. bílých trpaslíků — je zcela jiné rozdělení rychlostí částic.) V proudu korpuskulárního záření dochází jen zřídka k srážkám, rychlosti jsou téhož směru a mají stejnou velikost (viz spodní část obrázku).

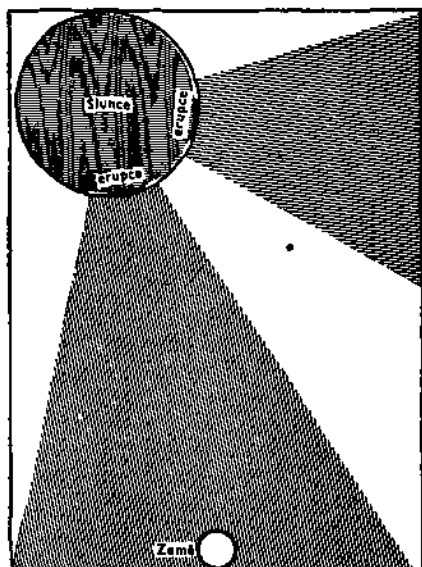
Základním zdrojem korpuskulárního záření v naší soustavě je Slunce. Spektrum slunečního korpuskulárního záření je předmětem příští kapitoly. Zvláště rychlé a energetické korpuskulární záření (s energií nad 10^9 eV*) nazýváme zářením *kosmickým*. Ve třetí kapitole se budeme podrobněji zabývat kosmickým zářením v meziplanetárním prostoru, tedy mimo zemskou atmosféru. Částice korpuskulárního záření jsou elektricky nabitě. Jejich pohyb je proto ovlivňován magnetickým polem. Ve čtvrté kapitole se budeme zabývat meziplanetárním magnetickým polem a jeho vlivem na korpuskulární záření.

2. KORPUSKULÁRNÍ ZÁŘENÍ SLUNCE

Před sto lety (1859) pozoroval CARBINGTON na Slunci mohutnou erupci, po níž za 17 hodin následovala magnetická bouře na Zemi. Od té doby bylo pozorováno mnoho erupcí, po nichž následovala *silná magnetická bouře*. Interval mezi erupcí a bouří je obvykle 22 až 34 hodin. Někdy, zvláště po velmi silných erupcích, nastane bouře za 17 hodin, ba i za kratší dobu. Naopak po

*) 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ erg

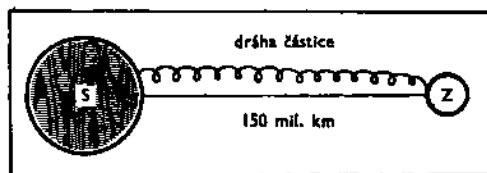
erupci nepřilíš silné dojde k magnetické bouři až za tři dny. Ne každá erupce na Slunci má za následek geomagnetickou bouři. Erupce při okraji slunečního kotouče obvykle nejsou doprovázeny magnetickou bouří. Sluneční korpuskule, které jsou při erupci vyvrhovány, způsobují po odpadu na Zemi změny v jejím magnetickém poli, tj. geomagnetickou bouři. Jestliže zkoumáme rozdělení geomagneticky účinných erupcí po slunečním kotouči, zjistíme, že korpuskule jsou zhruba vyvrhovány v kuželu s rozevřením asi 45 stupňů (viz obr. 2).



V době minima sluneční činnosti znamená magnetografy geofyziků také slabé geomagnetické bouře, kterým nepředchází žádná erupce na Slunci. Závislost slabých bouří na Slunci je však přesto očividná: slabé geomagnetické bouře projevují tendenci vracet se po 27 dnech. To je však doba, za kterou se jednou otočí Slunce vzhledem k Zemi (tzv. synodická otočka Slunce). Všechno nasvědčuje tomu, že z určitých oblastí slunečního povrchu jsou vyvrhovány

Obr. 2. Schematické znázornění korpukulárního záření vyvrhovaného chromosférickou erupcí. Je-li k nám erupce přivrácena, zasáhne proud korpukulí Zemi a způsobí magnetickou bouři, polární září i jiné efekty. Naopak proud z druhé erupce na našem obrázku nemůže Zemi zasáhnout. Může však způsobit zjasnění jiného tělesa, např. komety.

velkými rychlostmi korpuskule. Takové oblasti — zdroje korpukulárního záření — nazýváme oblasti *M*. Snaha ztotožnit oblasti *M* s nějakým slunečním jevem (skvrnami, flokulami, filamenti, koronálními kondensacemi apod.) nevedla k jednoznačnému výsledku, třebaže bylo vynaloženo mnoho úsilí. Je zjištěno, že oblasti *M* se vyskytují v královských páscech, tedy nepřilíš

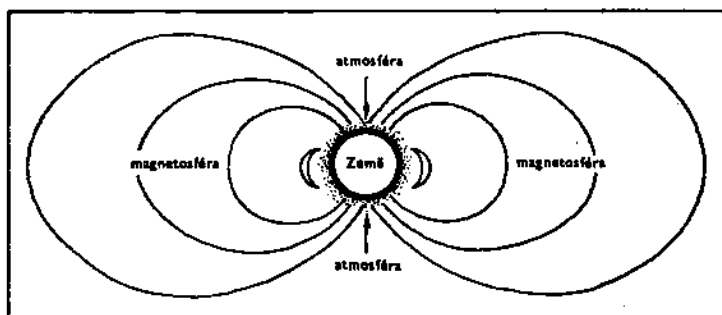


Obr. 3. Skutečná dráha částice je mnohem delší než vzdálenost mezi Sluncem a Zemí. Radiální magnetické pole způsobuje, že dráha korpukulí není přímočará, nýbrž spirální. Osou spirály je magnetická siločára.

daleko od rovníku. Co je však nejzajímavější, vyhýbají se skupinám slunečních skvrn. Zatímco erupce jsou krátkodobým zdrojem korpukulárního záření, vysílají oblasti *M* slabší proud po dobu několika měsíců.

Doba, která uplyne mezi erupcí a odpovídající magnetickou bouří (například 28 hodin, tj. 10^5 vteřin), nám dovolí vypočítat rychlost, jakou postupovalo korpukulární záření směrem k Zemi. Je to rychlost průměrná. Sluneční přitažlivost brzdí korpukulární záření, takže jeho rychlost v blízkosti Země

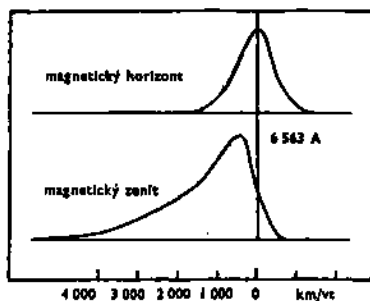
je menší než v blízkosti Slunce. Vzdálenost Slunce—Země je $1,5 \cdot 10^8$ km, takže průměrná rychlost korpuskulárního záření je $\frac{1,5 \cdot 10^8 \text{ km}}{10^5 \text{ sec}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ km/sec}$. To je rychlost zdánlivá, skutečná rychlost korpuskulárního záření je větší. Částice se totiž nepohybují přímočaře, nýbrž opisují šroubovitou křivku (spirálu) kolem magnetické siločáry. Skutečná dráha je tedy delší než vzdálenost Slunce—Země, stejně jako závit je delší než délka šroubu (viz obr. 3). Skutečná rychlost je tedy větší než zdánlivá 1500 km/sec.



Obr. 4. Zemská magnetosféra sahá daleko za hranice atmosféry. Zachycuje korpuskulární záření. Zachycené částice vytvářejí v magnetosféře tzv. pásy pronikavého záření Země, objevené během Mezinárodního geofyzikálního roku.

Magnetické bouře jsou vyvolány proudem korpuskulárního záření, který po dlouhé pouti rozsáhlými prostorami mezi Sluncem a Zemí zasahuje zemskou magnetosféru. Zemské magnetické pole se prostírá na vzdálenost několika desítek tisíc kilometrů nad zemský povrch. Atmosféra obklopuje Zemi prakticky jen do výšky tisíc kilometrů. Magnetické siločáry Země se tedy prostírají daleko za hranici atmosféry (obr. 4). Nejdříve na ně dopadá proud korpuskulí ze Slunce. Nárazem elektrických korpuskulí se magnetické

Obr. 5. MEINLŮV spektroskopický důkaz vodíku v polárních zářích. Jakmile klesne rychlost protonů slunečního původu pod 4 tisíce km/sec, rekombinují se na neutrální vodíkové atomy a září. Přitom se pohybují dále v původním směru, tj. podél magnetických siločar. V jejich směru (v magnetickém zenitu) je tedy radiální rychlost největší a čáry Balmerovy série jsou silně posunuty ke kratším vlnovým délkám. Ve směru kolmém k magnetickým siločarám (magnetický horizont) se Dopplerův posuv neprojevuje.



siločáry deformují a v ionosféře se indukují proudy. Na zemském povrchu registrují magnetografy rychlá kolísání magnetické intensity — geomagnetickou bouří.

Některé částice korpuskulárního proudu pronikají magnetosférou až do atmosféry. Mají-li dostatečně velkou energii (10^6 — 10^8 eV), pronikají až do sta kilometrů nad povrch. Ve výškách 100 až 1000 km způsobují světélkování

kyslíku a dusku — polární záři. Srážkami s atomy a molekulami vzduchu však ztrácejí korpuskulární energii a z původních 10 tisíc km za vteřinu (což odpovídá energii 10^6 eV) klesne jejich rychlost na 4—3 tisíce km/sec. Při této rychlosti např. protony, které jsou nejhornější v proudu zastoupeny, zachycují elektrony — rekombinují. Stanou se tak z kladně nabitých protonů neutrálními vodíkovými atomy, které se pohybují rychlostí 3—4 tisíce km/sec. MEINLOVI se podařilo dokázat vodík slunečního původu v polárních zářích (obr. 5). Nesouhlas mezi rychlostí protonů vyvolávajících polární záře (10 tisíc km/sec) a zdánlivou rychlostí (v našem případě 1500 km/sec) vysvětlujeme spirálovou dráhou kolem magnetické siločáry.

Dosud jsme hovořili o korpuskulárním slunečním záření, pokud se projevuje v zemském magnetickém poli (geomagnetické bouře) a v zemské atmosféře (polární záře). Tím však zdaleka nejsou vyčerpány možnosti sledování korpuskulárních toků slunečního původu. Radioastronomie přímo měří rychlosti korpuskulárního záření ve sluneční koruně, tedy bezprostředně poté, co záření vzniklo. V meziplanetárním prostoru je indikátorem korpuskulárního záření kometa, která mu náhodou stojí v cestě. Mimoto byla učiněna řada pokusů, zachytit korpuskulární proud vyvržený erupcí spektroskopicky. Má se totiž za to, že atomy ionizovaného vápníku v korpuskulárním proudu by mohly vytvořit tmavou absorpční čáru ve spojitém slunečním spektru. Získané výsledky však nejsou příliš spolehlivé, neboť intenzita vápníkové absorpční čáry je na hranici pozorovacích možností. Mimoto je třeba pátrat ve spektru bezprostředně po začátku erupce, dokud je korpuskulární proud dostatečně hustý.

V ohonech komet dochází občas k urychlování zhustků. Je pravděpodobné, že toto urychlení je způsobeno proudem slunečního korpuskulárního záření. BIERMANOVI, který se podrobněji touto otázkou zabýval, vyšlo, že proud působící urychlení v ohonu komety je stejný jako proud vyvolávající geomagnetické bouře.

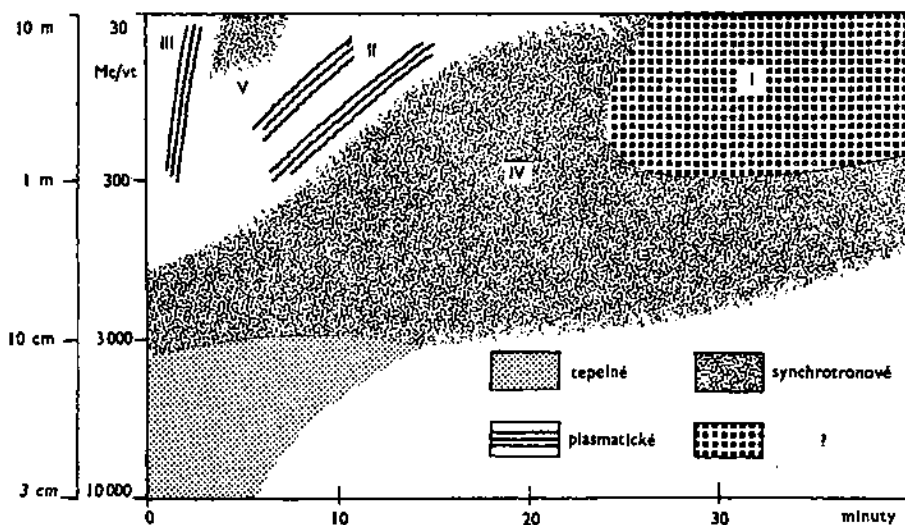
Radioastronomie skýtá možnost sledovat proud korpuskulárního záření ještě ve sluneční atmosféře. Obecně lze říci, že rádiové teleskopy nám ukazují



Obr. 6. Typický průběh slunečního rádiového vzplanutí (typ II). Vzplanutí nasadilo na krátkých vlnách (vysokých frekvencích — 120 Mc/s) a trvalo asi 15 minut. Vzplanutí je provázáno harmonickou složkou o dvakrát vyšší frekvenci. Takové záznamy jsou pořizovány rádiovými spektrografy a nazývají se rádiové spektrogramy.

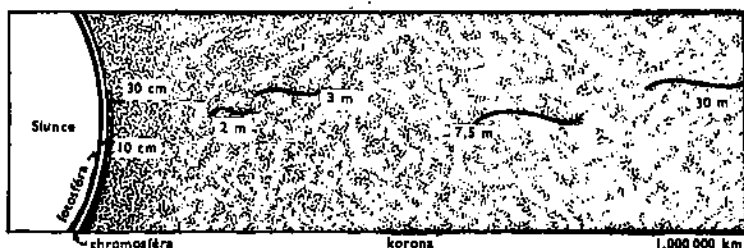
vesmír značně odlišný od vesmíru optického. Na rádiových vlnách probíhají bouřlivé procesy tam, kde optický astronom nic netuší. To platí obecně o vesmíru a speciálně o našem Slunci. Změny ve sluneční atmosféře, pozorované na rádiových vlnách, jsou mnohem bouřlivější než ve světle. Poměrně často dochází na Slunci k velmi intenzivnímu *rádiovému zjasnění* („vzplanutí“). Na různých vlnových délkách (pro astronomii připadají v úvahu vlnové délky 8 mm až 17 m) nastupuje zjasnění v různou dobu: nejdříve na krátkých vlnových délkách, a čím je vlna delší (frekvence nižší) — (obr. 6), tím později

na ní dochází k zjasnění. Radioastronomové užívají ke studiu zjasnění rádiových spektrografů. Rozlišují celkem pět druhů zjasnění. Analýza jednotlivých druhů by nás příliš odváděla od našeho tématu a proto se omezíme na schematické znázornění rádiového spektrogramu na obr. 7, v němž jsou zaneseny všechny známé typy.



Obr. 7. Schematické znázornění jednotlivých typů rádiového záření. Na ose úseček je čas, na ose pořadnic je vlnová délka, příp. kmitočet. Různým šrafováním je vyznačen i původ jednotlivých rádiových typů.

Každé frekvenci lze přiřadit určitou výšku nad slunečním povrchem: čím je frekvence nižší (tj. vlnová délka větší), tím z vyšších vrstev sluneční atmosféry přichází (obr. 8). Můžeme tedy ve spektrogramu místo frekvencí (vlnových délek) nanést výšky nad povrchem Slunce v kilometrech. Změna výšky s časem

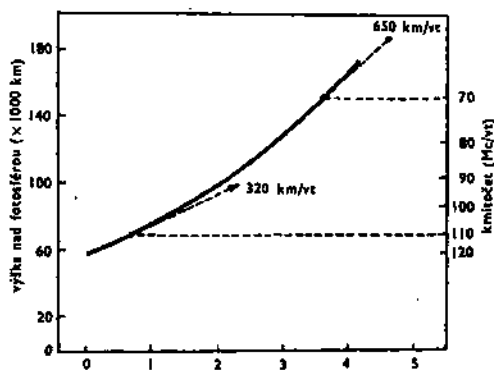


Obr. 8. Rádiové vlny přicházejí z různých vrstev sluneční atmosféry. Velmi krátké vlny přicházejí ze sluneční chromosféry, delší vlny z korony. Čím má rádiové záření delší vlnovou délku, tím z větší výšky přichází.

nám pak udává rychlost, kterou se pohybuje zdroj rádiového záření — proud korpuskulí (obr. 9). V poslední době užívají australští radioastronomové la-ditelného interferometru, kterým sledují pohyb proudu korpuskulí přímo. Obě metody, jak spektrální, tak i interferometrická vedou k shodným výsledkům.

Z hlediska korpuskulárního záření unikajícího do meziplanetárního prostoru jsou významné typy II, III, IV a V. Typ I je patrně buzen korpuskulami uvězněnými v magnetickém poli velkých skupin skvrn.

Rychlost korpuskulí, které budí typ II, je 500 až 3 tisíce km/sec. U typu III je pohyb budících korpuskulí podstatně rychlejší. Hodnoty určené pomocí



Obr. 9. Odvození rychlosti rádiového zdroje ze spektrogramu. Na ose úseček je čas v minutách, na ose pořadnic je (vpravo) kmitočet odečtený pro jednotlivé doby ze spektrogramu. Na levé straně je na ose pořadnic vynesena odpovídající výška nad fotosférou. Změna výšky s časem (směrnice ke křivce) je rychlost, kterou zdroj rádiového záření vystupuje v koroně. Z obrázku vidíme, že na studovaném úseku dráhy vzrostla rychlost ze 320 km/sec na 650 km/sec za dobu tří minut.

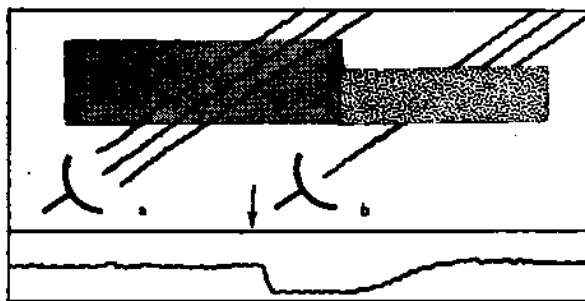
rádiového spektrogramu jsou mezi 50 a 280 tisíce km/sec. Typy IV a V jsou záření synchrotronové (magnetické brzděné záření). Přichází z velkých výšek. Je vyzařováno relativistickými elektrony, tj. elektrony, jejichž rychlost se blíží rychlosti světla. Magnetické pole vysoko v koroně zakřivuje dráhy relativistických elektronů a nutí je obíhat po kruhové dráze. Elektrony ztrácejí svoji kinetickou energii ve formě záření, kterému říkáme synchrotronové. Synchrotronové záření protonů a těžších iontů také existuje, je však o několik řádů slabší než synchrotronové záření elektronů.

Tabulka 1

Země: pásy pronikavého záření	Energie částic (log eV)	Slunce: korpuskulární záření a průvodní jevy
Protony ve vnitřním pásu	9	P kosmické záření, chromosférické erupce, smyčkové protuberance, rádiová emise IV. typu
	8	P rádiová emise III. typu, protony nad Minnesotou
Elektrony ve vnějším pásu	7	P protony zaznamenané pomocí riometrů
	6	E rádiová emise IV. a V. typu
	5	E rádiová emise typu III
	4	P magnetické bouře, polární záře, rádiová emise II. typu
	3	P eruptivní protuberance
	2	P úniková energie protonů P tepelná energie protonů a E elektronů v koroně
	1	
	0	

V tabulce je znázorněno energetické spektrum korpuskulárního záření Slunce. V levé části tabulky jsou zaznamenány energie částic v pásích pronikavého záření. Energie částic je vyjádřena v elektronvoltech; je udán její logaritmus. Písmeno P značí protony, E označují elektrony.

Dosud jsme hovořili o metodách měření rychlosti korpuskulárního záření Slunce. Seřadíme je a některé doplníme v tabulce 1, která podává energetický přehled pozorovaného korpuskulárního záření. Pro srovnání je v tabulce uvedena tepelná energie protonů a elektronů ve sluneční koruně. Teplotě 10^6 °K odpovídá energie $kT \sim 10^{-16} \cdot 10^9 \text{ erg} = 10^{-10} \text{ erg} = 10^2 \text{ eV}$. To je průměrná energie a v důsledku Boltzmannova rozdělení rychlostí (obr. 1) mají některé protony v koruně tak vysokou kinetickou energii, že unikají ze Slunce. Množ-



Obr. 10. Funkce riometru. Riometr je v podstatě rádiový dalekohled, který zaznamenává rádiový šum ze vzdálených částí vesmíru. Tok rádiového záření z vesmíru je konstantní, mění se však průzračnost zemské atmosféry. V případě a) je ionizace slabá a rádiové záření prochází prakticky nezeslabeno do riometru. Naopak vpád korpuskulárního záření do atmosféry způsobí vysokou ionizaci a silné zeslabení intenzity kosmického rádiového záření (b). Ve spodní části obrázku je záznam intenzity kosmického rádiového záření. Je v něm dobře patrný pokles.

ství takových částic je však pranepatrné. Eruptivní protuberance jsou obrovské mraky slunečních plynů (až milióny tun), které jsou vrhány ze Slunce rychlostí přesahující někdy tisíc kilometrů za vteřinu. Unikají sluneční přitažlivosti, a zasáhnou-li ve svém letu Zemi, způsobí magnetické bouře a polární záře.

V tabulce 1 je zmínka o riometru. Je to vlastně rádiový teleskop, který míří do oblasti pólu a registruje rádiové záření přicházející z vesmíru, tj. z mlhovin, ze spirálních ramen, z galaktického hala a ze vzdálených galaxií, které jsou v zorném úhlu radioteleskopu. Měřený rádiový tok přicházející z polární oblasti je velmi konstantní — lépe řečeno, byl by velmi konstantní, kdyby nebylo zemské atmosféry. Někdy v noci dopadne (především v oblastech nepřilíh vzdálených od magnetických pólů) do atmosféry záplava vysoce energetických částic slunečního korpuskulárního záření a způsobí vysokou ionizaci. Kolem sta kilometrů vytvoří korpuskulární vrstvu *E* a ve výškách nad 60 km zesiluje ionizaci vrstvy *D*. Způsobuje tak vymizení příjmu na krátkých vlnách v polárních oblastech a v nočních hodinách. Obdobný DELLINGERŮV efekt v našich zeměpisných šířkách je působen jen ve dne, a to krátkovlnným elektromagnetickým zářením Slunce (záření X a UV záření). Kosmické rádiové záření registrované riometrem musí tedy projít nejdříve vrstvou elektronů. Elektrony však odebírají energii rádiovým vlnám a předávají ji srážkami jiným částicím. Můžeme říci, že elektronová vrstva silně snižuje průzračnost atmosféry pro delší rádiové vlny. Riometr měří tuto průzračnost a tím i nepřímo korpuskulární záření, které ji snižuje (obr. 10). Částice tohoto korpuskulárního záření, pronikajícího až pod 60 km, mají energie řádově 10^7 eV.

Překvapivý výsledek přinesly balonové výstupy nad Minnesotou: protony s energiemi 10^6 eV pronikají až pod 40 km. Tento výsledek je velmi důležitý pro výklad vnitřního pásu pronikavého korpuskulárního záření. Ukazuje totiž, že energetické korpuskule ve vnitřním pásu mohou být slunečního původu. Korpuskulární záření o energii částic 10^8 eV bývá někdy označováno jako subkosmické záření.

3. KOSMICKÉ ZÁŘENÍ V MEZIPLANETÁRNÍM PROSTORU

Pod pojmem kosmické záření se rozumí obvykle korpuskulární záření, jehož částice mají energii větší než 10^9 eV. Kosmické záření v meziplanetárním prostoru nazýváme *primárním* kosmickým zářením. Na jeho vlastnosti usuzovali fyzikové ze *sekundárního* kosmického záření, měřeného pod atmosférou na povrchu Země. Průchodem atmosférou se vlastnosti původního — primárního — kosmického záření silně mění. Umělé měsíce Země a meziplanetární stanice však dovolují měřit nezměněné primární záření.

Na celý povrch zemské atmosféry dopadá za vteřinu 10^{12} částic primárního kosmického záření. Převážná část primárních částic má energii vyjádřenou v miliardách elektronvoltů. Takové energie dosahují částice v neuvěřitelných pozemských urychlovačích. Se vzrůstající energií primárních částic klesá jejich počet a jen nepatrný zlomek má energie 10^{18} — 10^{19} eV. Tyto velmi energetické částice nestačí udržet ani magnetické pole celé naší Galaxie. Má se za to, že jsou to návštěvníci z velmi vzdálených galaxií. Po milióny let dlouhé pouti mezigalaktickým prostorem vnikají do naší Galaxie, proběhnou jí za několik tisíc roků, odcházejí se poněkud od původního směru a přicházejí opět do mezigalaktického prostoru, pokud ovšem nenarazí na nějakou hvězdu, planetu či jiné těleso.

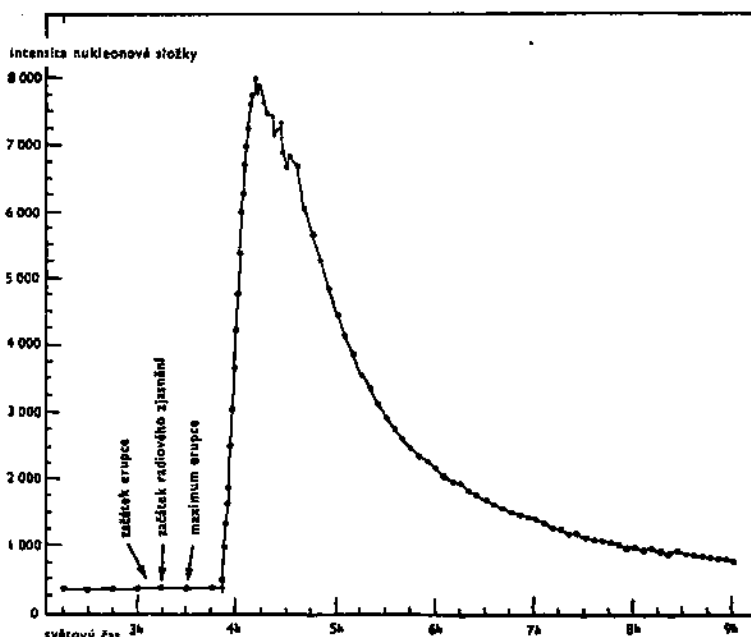
Význačnou vlastností kosmického záření je jeho stálost. Archeologické kosmické záření, o němž byly získány informace průzkumem materiálu ze dna moří, bylo totéž před miliónem roků jako je dnes.

Jinou charakteristickou vlastností kosmického záření je jeho izotropnost. Žádný směr v něm není preferován. Přichází do naší sluneční soustavy ze vzdálených prostor Galaxie až na nepatrný zlomek vněgalaktických částic s energiemi 10^{18} — 10^{19} eV. Zatímco dráha světelného paprsku v mezihvězdném prostoru je přímočará (pokud neprochází příliš blízko kolem masivní hvězdy), je dráha primární částice zakřivována stále. Působí na ni nejen celkové magnetické pole Galaxie, nýbrž i silná lokální pole ionizovaných mraků mezihvězdné hmoty. To je příčina izotropnosti a neštěstí pro astrofyziky, kteří hledají zdroje kosmického záření.

To, co jsme dosud říkali o stálosti a izotropnosti kosmického záření, má výjimky: v oblasti nízkých energií (10^9 — 10^{10} eV) zasahuje do kosmického záření Slunce. Přesněji řečeno sluneční činnost. Sluneční činnost ovlivňuje nízkoenergetickou složku kosmického záření dvojnásobným způsobem: krátkodobé zesílení nebo zeslabení na dobu několika hodin a dlouhodobé kolísání během slunečního cyklu (za jedenáct let).

Celkem ve vzácných případech dochází k vydatné emisi kosmického záření ze Slunce, takže intenzita kosmického záření vzroste na dobu několika hodin. Třebaže je toto přídavné korpuskulární záření poměrně slabé (10^9 — 10^{10} eV), převyšuje miliónkrát energii tepelných částic ve sluneční koruně a v nitru Slunce. Jaký mechanismus soustřeďuje do jednotlivých částic tolik energie?

V deseti pozorovaných případech došlo ke zvýšení kosmického záření po neobyčejně jasných chromosférických erupcích na Slunci a v jednom případě předcházela vzrůstu kosmického záření na Zemi rychlá kondenzace smyčkové protuberance na okraji slunečního disku. Ve všech případech měly částice kosmického záření energie řádově 10^9 eV, vzácně 10^{10} eV ale vždy menší než $5 \cdot 10^{10}$ eV. Krátkodobé zvýšení intenzity kosmického záření je vyvoláno



Obr. 11. Zvýšení kosmického záření po chromosférické erupci dne 23. února 1956.

mohutnými erupcemi nebo smyčkovými protuberancemi a ovlivňuje toliko nízkoenergetickou část kosmického záření, zatímco intenzita energií $5 \cdot 10^9 - 10^{10}$ eV zůstává neproměnná.

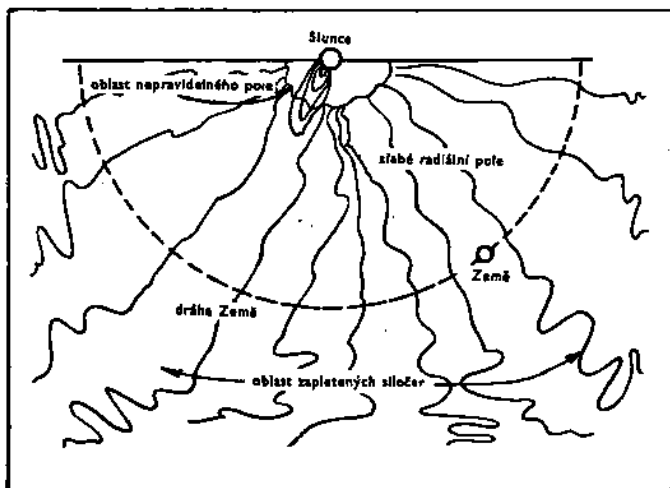
Pro názor popíšeme zvýšení kosmického záření dne 23. února 1956 (obr. 11). Na obrázku je vyznačen začátek erupce, začátek rádiového zjasnění a maximální jas erupce. První částice, které dorazily na Zemi, byly směřované: přicházely z té části oblohy, kde bylo Slunce. (To je výjimka z izotropnosti kosmického záření a nepopiratelný důkaz, že zdrojem částic bylo Slunce.) První zaregistrované částice měly také nejvyšší energie z celého spektra kosmického záření vyslaného při erupci. Později se plocha, z níž přicházelo záření, rozprostřela na celou oblohu, takže asi po 10 minutách od začátku zvýšení se kosmické záření z erupce stalo izotropním, tj. dopadalo ze všech směrů ve stejné intenzitě. Po dosažení izotropie začala intenzita pozvolna klesat. Do původního stavu se celková intenzita kosmického záření vrátila asi po dvaceti hodinách. To neznamená, že by chromosférická erupce po celou dobu 20 hodin vysílala energetické částice kosmického záření. Vždyť erupce mají trvání několika desítek minut, hodinové jsou vzácné. Všechny částice kosmického záření byly vyslány při erupci a „skladovány“ po dobu 20 hodin v mezipla-

netárním prostoru. Mezi dráhou Země a dráhou Jupitera se prostírá rozsáhlé magnetické pole s propletenými siločárami. Toto magnetické pole působí jako stěna, která kosmickým částicím nedovolí uniknout. Zapletené magnetické pole mezi dráhou Země a Jupitera je také příčinou dlouhodobého kolísání intenzity kosmického záření.

4. MEZIPLANETÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE

Naší planetární soustavou probíhá stále velké množství částic nejrůznějších energií, zvláště částic kosmického záření. Řekli jsme, že na Zemi (poloměr $6 \cdot 10^3$ km) jich dopadne za vteřinu 10^{12} . Do prostoru planetární soustavy (poloměr $6 \cdot 10^9$ km) dopadne každou vteřinu 10^{12} krát více částic kosmického záření než na naší Zemi. Tedy za vteřinu vbíhá 10^{24} částic do planetární soustavy. Protože jde převážně o protony (hmota 10^{-24} g) je celková hmota vbíhajících částic jeden gram. V tomto gramu látky je však soustředěna fantastická energie. Většina těchto částic prochází naší planetární soustavou, aniž byly zachyceny některým tělesem. Zdaleka největším terčem pro ně je Slunce s efektivním průřezem 10^{13} km². Protože průřez soustavy je 10^{18} km², vidíme, že každá desetimilióntá částice je zachycena.

Bez následků však neprojde žádná částice, neboť: a) po mnoho hodin prochází gravitačním polem Slunce, případně i planet, a její dráha je zakřivená; částice se pohybují po hyperbolách, v jejichž jednom ohnisku je Slunce; b) meziplanetární prostor je prostoupen magnetickými siločárami, které silně



Obr. 12. Meziplanetární magnetické pole. Kolem Slunce je oblast nepravidelného pole. Dále, až za dráhu Země, se prostírá slabé radiální magnetické pole o intenzitě 10^{-8} gauss. Potom, až ke dráze Jupitera, je rozsáhlá oblast zapletených siločer (10^{-5} gauss), která moduluje kosmické záření během slunečního cyklu.

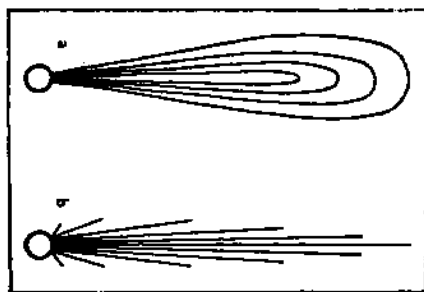
působí na kladná jádra, protony i záporné elektrony. Tak např. rozsáhlé zapletené magnetické pole v prostorách mezi Zemí a Jupiterem zadržuje částice s menšími energiemi a nepouští je do vnitřní planetární soustavy.

Nabitá částice se pohybuje volně jen ve směru siločer. Při pohybu kolmém k siločáram na ni působí síla, která ji zakřivuje, takže částice krouží kolem

určité siločáry. Obecně se částice pohybuje po spirále, jejíž osou je magnetická siločára. (Blíže viz úvodní článek o hydromagnetice, Pokroky MFA 5 (1960), 293.)

Dnešní představy o magnetickém poli v meziplanetárním prostoru možno znázorniti obrázkem 12. Jeho vnitřní část — uvnitř zemské dráhy — je radiální, to znamená, že magnetické siločáry směřují ze Slunce ven přibližně v radiálním směru. Intenzita radiálního magnetického pole je 10^{-5} gauss.

Obr. 13. Proud slunečních korpusek za sebou vleče magnetické siločáry. Na našem obrázku je znázorněno rozložení natahovaných magnetických siločar: a) v průmětu na ekliptiku, b) v průmětu do roviny kolmé k ekliptice. Takto vytahované magnetické siločáry vytvářejí magnetické meziplanetární pole, znázorněné na obr. 12. Je zajímavé, že tyto magnetické siločáry nejsou pouhým matematickým pojmem, ale mají reálný fyzikální smysl, neboť představují osy spirál, po nichž se pohybují nabitě korpusekule.



Stejnou intenzitu má také mezihvězdné magnetické pole.

Vnější magnetické pole, tj. pole mezi Zemí a Jupiterem, je velmi nepravidelné, siločáry jsou silně zamotané, a v důsledku toho počet siločar procházejících jedním cm^2 je větší než v poli radiálním. Jinak řečeno, intenzita je větší a dosahuje 10^{-5} gauss, což je jednotka gama, které užívají pozemští geomagnetikové při měření změn zemského magnetického pole.

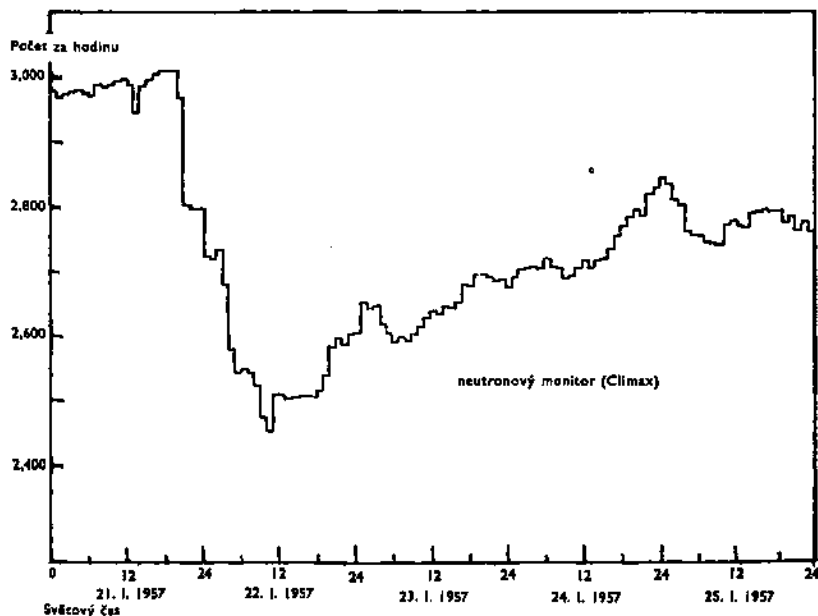
Dříve než se vrátíme k otázce vlivu meziplanetárního magnetického pole na korpusekulární záření, zmíníme se krátce o jeho vzniku. Z toho, co jsme řekli na začátku, vyplývá, že Slunce je zdrojem korpusekulárního záření o nejrozmanitějších energiích. Avšak korpusekulární záření sestává z ionizovaných částic a strhává s sebou magnetická pole ze Slunce. Proud korpusekulí vyvržených erupcí s sebou unáší magnetické pole. Siločáry magnetického pole však zůstávají zakotveny ve sluneční fotosféře (obr. 13). Korpusekulární proudy tedy natahují siločáry až někde za zemskou dráhu. Siločáry se snaží natahování zabránit, a tak je proud částic brzděn. Záleží na energii korpusekulárního záření, zda skončí nedaleko Země, nebo zda letící částice natáhnou siločáry až daleko za dráhu Martovu, někde k Jupiteru. Turbulentní nepravidelné pohyby v této vnější oblasti meziplanetárního pole silně zamotají magnetické siločáry a zesílí jeho intenzitu.

Jestliže se Země náhodou dostane do proudu korpusekulárního záření, pozorujeme magnetickou bouři, případně ve vyšších šířkách polární záři. Mnoho korpusekulí z proudu však pokračuje dále ve svém letu a vleče za sebou magnetické siločáry. Jsou-li dostatečně husté, mohou zastínit Zemi od dopadajícího kosmického záření. A tak se občas v době magnetických bouří pozoruje pokles intenzity kosmického záření o nižších energiích (obr. 14). Tomuto zjevu se říká FORBUSHŮV efekt.

Můžeme nyní lépe porozumět zdánlivé nesrovnalosti týkající se rychlosti částic, způsobujících polární záře a poruchy v ionosféře ve vyšších šířkách. Teoretické rychlosti těchto částic, především protonů, by měly být kolem 10^4 km/sec. Avšak rychlosti vypočtené z doby letu (tj. od erupce do polární

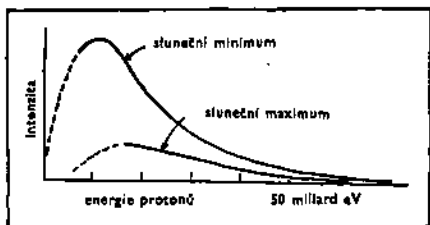
záře) jsou 500—3000 km/sec. Dráha částic je spirála, tedy mnohem delší než vzdálenost Země—Slunce (viz obr. 3).

Magnetické pole v meziplanetárním prostoru se však rozpadá. V době maxima sluneční činnosti je ze Slunce vyvrhováno mnoho proudů korpuskulárního záření a magnetické pole je neustále obnovováno. Avšak v době minima slu-



Obr. 14. Nizkoenergetická složka kosmického záření je občas zastíněna magnetickým polem unášeným ze Slunce. Toto zastínění se na Zemi projeví poklesem intenzity kosmického záření — FORBUSHOVÝM efektem. Jako příklad uvádíme Forbushův pokles z ledna 1957.

neční činnosti, kdy se korpuskulární záření stává vzácností, magnetické pole mizí. Tím ovšem mizí i stínící vrstva zamotaného magnetického pole mezi Zemí a Jupiterem. Všechny částice kosmického záření (včetně málo energie-



Obr. 15. Změny kosmického záření během slunečního cyklu. Na ose úseček je vynesena energie protonů od 0 do 50 miliard eV. Změny tohoto druhu jsou působeny sluneční modulací kosmického záření. Pojem sluneční činnosti se tedy neomezuje pouze na Slunce samotné, ale zahrnuje i změny magnetického pole ve vzdálených oblastech planetární soustavy až po dráhu Jupitera.

tických) pronikají do vnitřních oblastí planetární soustavy. Naopak v době maxima sluneční činnosti, kdy je stínící zamotané magnetické pole plně vyvinuto, jsou mnohé částice zadrženy ve vnějším magnetickém poli a nepronikají k Zemi. Tím vysvětlujeme kolísání intenzity kosmického záření během cyklu sluneční činnosti: pokles v době maxima a vzrůst v době minima. Slunce se

nám v tomto směru jeví jako obrovský modulátor nízkoenergetické složky záření.

5. NEUTRINOVÉ ZÁŘENÍ

Korpuskulární záření, o němž jsme dosud hovořili, včetně kosmického záření sestávalo z kladně nebo záporně nabitých částic: jader atomů a elektronů. Neutrální atomy nemohou být urychlovány na tak vysoké energie nikde ve vesmíru. Přesto se setkáváme v meziplanetárním prostoru s vydatným proudem neutrálních částic — neutrin. Ty nevznikají elektromagnetickým urychlováním, nýbrž jsou produktem jaderných reakcí v nitru hvězd. Při vytvoření jednoho heliového jádra ze čtyř protonů vzniknou dvě neutrina s průměrnou energií $2,6 \cdot 10^6$ eV. Jestliže však teplota v nitru hvězdy dosahuje 15 až 20 milionů stupňů, potom přeměna vodíku v helium probíhá za spolupůsobení uhlíku jako katalysátoru a energie uvolňovaných neutrin je vyšší: $7,2 \cdot 10^6$ eV a $9,8 \cdot 10^6$ eV. Bylo by tedy možné v principu určovat typ jaderných reakcí probíhajících v nitru hvězd. Neutrina mají téměř zanedbatelný efektivní průřez srážky: procházejí Sluncem i Zemí, aniž byla zachycena. Bylo by proto docela možné pozorovat nitro Slunce v noci přes Zemi, která působí na všechna ostatní záření jako filtr. Měřitelný proud neutrin je 10^{12} za vteřinu na 1 cm^2 . Ze Slunce k nám však přichází mnohem slabší neutrinový proud, tisíckrát menší než umožňuje měřit dnešní technika. Z ostatních hvězd vesmíru k nám přichází tok neutrin ještě mnohem slabší (asi tisíckrát slabší než ze Slunce). Zatím tedy není technika dosti pokročilá pro vznik neutrinové astronomie.

Citlivost měřicích metod je stejná pro neutrina i antineutrina. Často se v poslední době vyskytla otázka: Existují ve vesmíru antičástice, antihmota, antihvězdy či antigalaxie? Některé velmi intenzivní rádiové zdroje (např. Labuť A) byly vysvětlovány jako setkání galaxie s antigalaxií. Při takovém setkání by se uvolňovala fantastická množství energie, byt by rádiovým zdrojem byly srážky mezihvězdné hmoty jedné galaxie s mezihvězdnou antihmotou druhé antigalaxie. Tak by bylo možno vysvětlit, že radioteleskopy zaznamenají šum z objektů vzdálených několik miliard světelných roků.

Proti takové teorii není námitek. Přímým důkazem antihmoty v našem vesmíru bude změření toku neutrin a antineutrin, kterýžto poměr nám zároveň dovolí odhad celkového množství antihmoty ve vesmíru.

6. ZÁVĚR

Na korpuskulárním záření v meziplanetárním prostoru vidíme, že prostor mezi planetami je dějištěm mnoha zajímavých událostí. Lety meziplanetárních stanic nám v nedaleké budoucnosti ukáží, kde byly naše názory správné a kde je musíme poopravit.