

Kosmické záření

Pavel Kendziorski

- 1) Co je kosmické záření
- 2) Jaké má energie.
- 3) Odkud přichází
- 4) Jaké jsou zdroje
- 5) Detekce částic kosmického záření
- 6) Jak se šíří

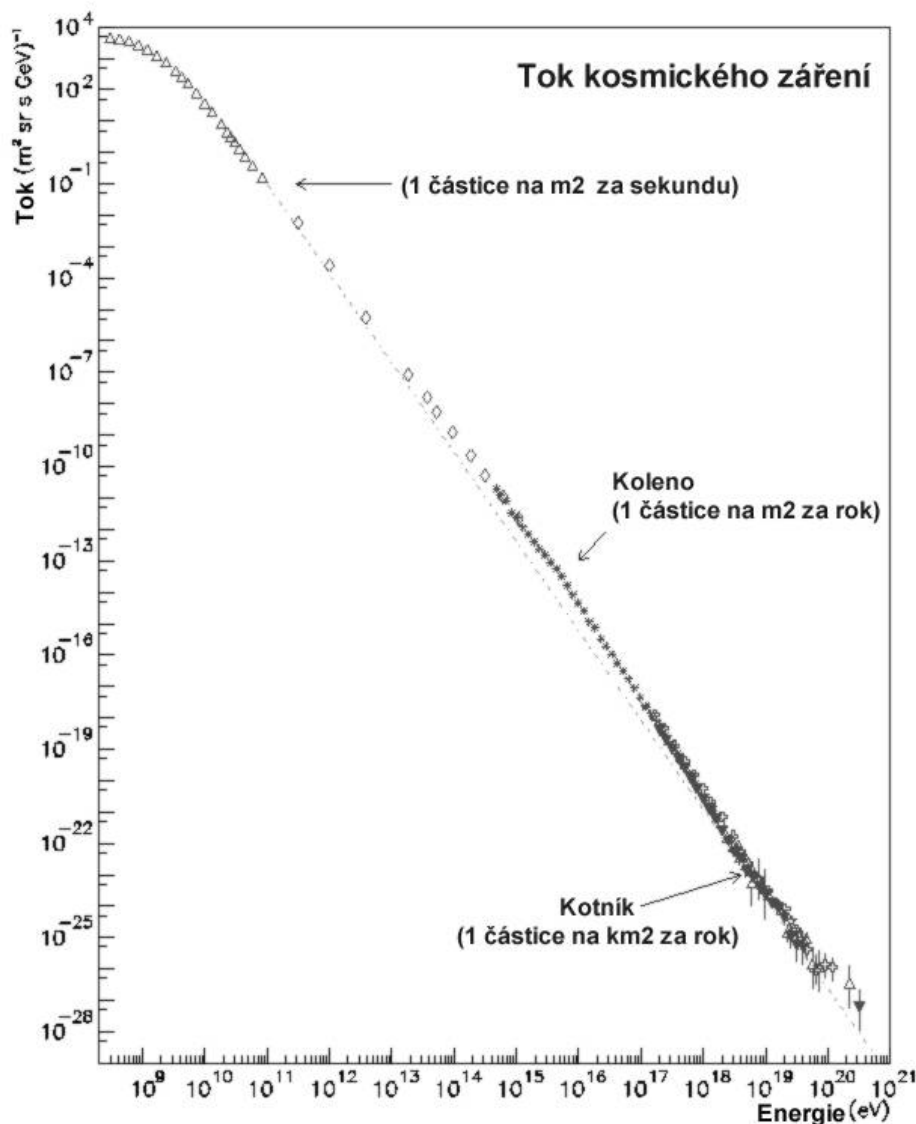
1 Co je kosmické záření

Za kosmické záření je obvykle považován vysokoenergetický proud částic, který do zemské atmosféry proniká z kosmického prostoru. Přesněji řečeno, jedná se o primární kosmické záření, které interaguje (tedy sráží se) s částicemi zemské atmosféry. Při průchodu primárního záření atmosférou vzniká další záření, sekundární, jehož složení je velmi rozmanité. V sekundárním záření se rozeznává složka tvrdá - složená z částic o větší energii a tedy pronikavější a složka měkká o menší energii a tedy méně pronikavá, která se značněji absorbuje. Srážkami vznikají další a další částice, reakce se rozvětňuje a výsledkem je sprška. Sprška vzniká poté, co se částice s velmi vysokou energií srazí s molekulou atmosféry. Úlomky této primární srážky se mohou znovu srazit s dalšími molekulami atmosféry, čímž dochází k vzniku dalších a dalších částic - k jakési řetězové reakci. Toto drobení pokračuje, dokud není energie primární částice rozdělena mezi miliardy částic dopadajících na zemský povrch. Studium těchto atmosférických spršek lze určit parametry původní primární částice (konkrétně její energii, směr dopadu na atmosféru a typ částice). Kosmické záření je z největší části tvořeno protony (kolem 90%), zbytek tvoří jádra hélia a těžších prvků, jistě malé zastoupení mají i elektrony. Součástí kosmického záření jsou i další stabilní částice - neutrino, které se však mohou srazit s částicí v atmosféře jen nesmírně vzácně a mechanismy jejich urychlování nejsou zatím zcela jasné. Někdy bývají za složku kosmického záření považovány i velmi energetické gama fotony, které se rovněž mohou srazit s nějakým atomem či molekulou v atmosféře a následně vytvořit spršku sekundárního záření.

2 Jaké má energie

Energie částic primárního kosmického záření se pohybuje od 10^9 eV do cca 10^{20} eV (1 eV odpovídá $1,602 \cdot 10^{-19}$ J; Pro porovnání je možná vhodné poznamenat, že nejenergetičtější částice připravené člověkem v urychlovačích dosahují energií nejvýše v řádu 10^{12} eV.). Dolní mez je dána existencí slunečního větru, který je tvořen pohybujícími se nabitými částicemi vytvářejícími magnetické pole. Toto pole zabraňuje naprostě většině kosmického záření - nabitým částicím, aby vůbec pronikly do sluneční soustavy.

Částic s energiemi kolem 10^9 eV dopadá na Zemi poměrně hodně, zhruba 10 tisíc na čtvereční metr za sekundu. S rostoucí energií jejich počet rychle klesá (energetický tok primárního kosmického záření je zhruba úměrný E^{-3} , kde E je energie), pro energie 10^{12} eV je to zhruba jedna částice za sekundu na metr čtvereční. Pokles počtu částic začíná být ještě o něco rychlejší pro energie cca 10^{16} eV, kdy pozorujeme již jen několik částic dopadajících na čtvereční metr zas jeden rok. Této části spektra kosmického záření se říká též "koleno" - zajímavé je to, že existence takového "kolena" je pro astronomy dosud víceméně záhadou. Na mnohem větší a možná i zajímavější problémy narážíme však v oblasti částic s energiemi vyššími než 10^9 eV. Částice s takovou energií dopadne zhruba jedna za rok na kilometr čtvereční. Z toho vyplývá, že statistika v této oblasti je zatím jen velmi omezená, nicméně je patrné, že energetické spektrum má v této oblasti jakýsi "kotník" - úbytek částic začíná být opět pomalejší, křivka spektra je o něco plošší. Existence "kotníku" je opět nevysvětlena, závažnější však je, že kosmické záření s takovými energiemi by se dle stávajících teorií nemělo vyskytovat vůbec. Doposud nejenergetičtější částice zachycená na Zemi měla energii $3,2 \cdot 10^{20}$ eV, tedy 51 Joulů, čili zhruba tolik jako pětikilogramová cihla padající z jednoho metru. Zachycena byla fluorescenčním detektorem "Fly's Eye" (Muší oko) v Utahu v USA v 15. října roku 1991.



Spektrum kosmického záření - symboly přísluší měřeným hodnotám toků kosmického záření, tečkovaná čára odpovídá závislosti celkového toku energie F na energii E dopadajících částic: $F \sim E^{-3}$.

3 Odkud přichází

Kosmické záření, které se vyskytuje v kosmickém prostoru a je zachyceno na Zemi, je přesně izotropní, tedy ze všech směrů ho přichází stejně. Drobné odchylky od této izotropie jsou způsobeny v nízkoenergetické oblasti (do 10^{11} eV) zářením přicházejícím od Slunce, přičemž tato složka jeví zřetelné 11-leté variace shodné se slunečním cyklem. Pro vyšší energie je odchylka od izotropie menší než 1%.

V kosmickém záření výrazně převažují nabitě částice, jejichž dráhy jsou zakřiveny zejména v magnetických polích. Částice tak opisují na svojí cestě k Zemi velmi složité dráhy, čímž se ztrácí informace o zdroji, v němž byly vyprodukovány. Zakřivení dráhy (které se charakterizuje tzv. Larmorovým poloměrem) je přímo úměrné energii částice a nepřímo úměrné jejímu náboji a intenzitě magnetického pole, kterým se pohybuje.

Například v magnetickém poli naší Galaxie ($2-3 \cdot 10^{10}$ T) je Larmorův poloměr pro proton s energií 10^{15} eV pouhých 0,5 pc. Pouze nejenergetičtějšími částicemi s energiemi kolem 10^{19} eV je Galaxie poněkud "malá", jejich Larmorovy poloměry jsou v řádu kiloparseků, a kdyby tedy zdroj těchto částic měl být v naší Galaxii, museli bychom jistě pozorovat větší počet takových částic přicházejících z okolí roviny Galaxie, což se však neděje. Nejenergetičtější částice mají tedy poměrně jistě extragalaktický původ.

4 Jaké jsou jeho zdroje

Možné zdroje: Slunce, hvězdy, centra galaxií, supernovy, pulzary, srážky galaxií, rázové vlny při akreci nebo kvazary.

Možné zdroje záření lze rozdělit do tří kategorií.

Do první kategorie patří velké rozlehlé objekty, například celé galaxie či velká oblaka mezigalaktického plynu, v nichž dochází k postupnému urychlování částic. Základní mechanismus tohoto urychlování navrhl již v roce 1949 Enrico Fermi. Podstatou procesu, který bývá též nazýván stochastické či difúzní urychlování, jsou opakované interakce částice s pohybujícími se oblaky kosmické plazmy, tedy v zásadě s libovolným nabitým mezihvězdným či mezigalaktickým materiálem. Podstatné je, jak vypočítal právě Fermi, že průměrná změna energie částice je při těchto urychlujících "setkáních" kladná a že při vhodných parametrech oblaku plazmatu (např. v rádiových galaxiích) může částice dosáhnout energie až 10^{20} eV předtím, než oblast, ve které je urychlována, definitivně opustí a vydá se třeba směrem k Zemi.

Do druhé kategorie lze zařadit zdroje, v nichž probíhají více či méně katastrofické procesy. Jedná se většinou o poměrně kompaktní objekty a částice jsou v nich urychlovány jen v jediném kroku. Lze sem zařadit supernovy, aktivní galaktická jádra, akreční disky u neutronových hvězd a v neposlední řadě i procesy probíhající v souvislosti se záblesky záření gama, kde (ať již je fyzikální podstata zdrojů záblesků jakákoli) dochází k produkci gama fotonů právě interakcí ultrarelativisticky urychlených částic s okolním prostředím (a částice kosmického záření nejsou nic jiného než ultrarelativisticky urychlené částice). Dle stávajících teorií může i ve všech těchto zdrojích při ideálním nastavení parametrů docházet k urychlení částic na energie nad 10^{20} eV.

Konečně do třetí kategorie patří tzv. exotické urychlovače. Sem patří například dosud neznámé supertěžké částice, jejichž existenci předpovídá supersymetrická teorie (SUSY) a které by mohly vznikat při srážkách či anihilaci (rovněž doposud nenalezených) topologických defektů z raných fází vesmíru, jako jsou kosmické struny, doménové stěny, magnetické monopóly a podobně. Tyto částice by měly mít energie kolem 10^{24} eV a jejich rozpadem by měly vznikat typicky desetitisíce baryonů a mezonů s potřebnými energiemi (tedy nad 10^{20} eV), které mohou dopadnout až na Zemi. Při těchto procesech mohou vznikat i fotony a neutrina s podobně velkými energiemi. Extrémně energetická neutrina, která mohou být i reliktní - tedy jako pozůstatky po bouřlivých procesech po velkém třesku, jsou vůbec zajímavá. Mohou se totiž srážet s jinými, pomalými neutriny a vytvářet částice Z (intermediální bosony slabé interakce), jejichž rozpadem pak vzniká několik desítek částic včetně protonů a elektronů s energiemi až do 10^{21} eV. Tato reakce je perspektivní zejména kvůli tomu, že pomalých neutrin je všude dostatek, a tak může docházet k rozpadu Z částic a

následnému vzniku spršek i v poměrně "kosmologicky malých" vzdálenostech (řádově Mpc) od Země.

5 Detekce částic kosmického záření:

1. Balóny a kosmické sondy – do energie $\sim 10^3$ GeV (limitováno hustotou částic a plochou detektorů).
2. Pozemní velkoplošné detektory:
 1. detekce nabitých částic
 2. detekce fluorescenčního světla z excitovaných molekul dusíku, např. detektorový systém HIRES – soustavy zrcadel soustřeďují fluorescenční světlo do fotonásobičů:
3. Detekce Čerenkova záření- využívají se také zrcadla.
Pro detekci vysokoenergetických neutrin reakce s produkcí nabitého leptonu \rightarrow detekce Čerenkovova záření \rightarrow prostředí pro odstínění mionů z kosmického záření, interakci neutrina a vznik Čerenkovova záření - moře, jezera, ledovec.
4. K měření intenzity záření se používá elektroskop.

6 Jak se šíří

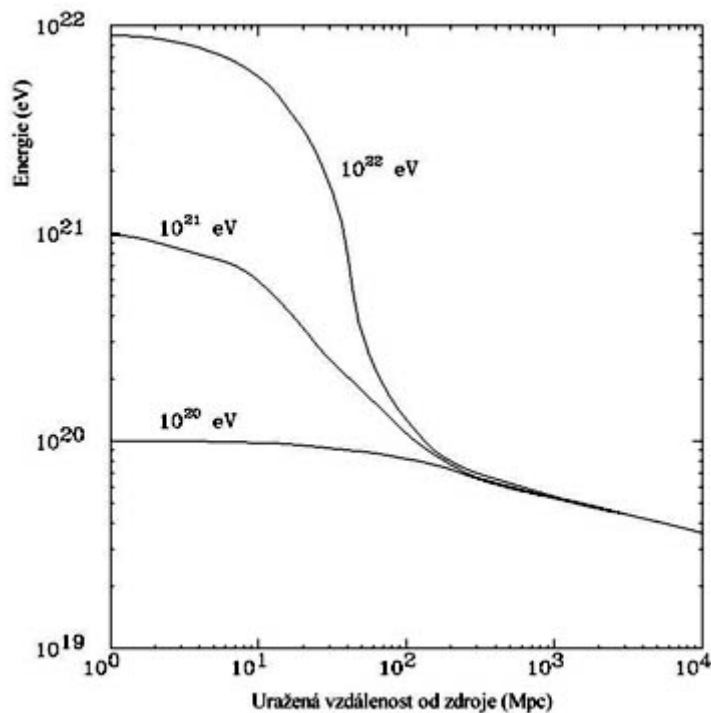
Kosmické záření se v kosmickém prostoru nepohybuje ve vesmíru volně, ale je do značné míry ovlivňováno i okolním prostředím. O jeho zakřivených drahách jsme se již zmiňovali, avšak zvláště částice zatím nejzáhadnější, tedy ty nejenergetičtější, se účastní i řady dalších interakcí, které vedou ke snižování jejich energie.

Příčinou těchto postupných energetických ztrát jsou interakce s reliktním mikrovlnným zářením, které doplňují i srážky se zářením rádiovým a infračerveným. Částice kosmického záření (nejčastěji proton) se totiž pohybují relativistickými rychlostmi a zákonitě se na nich projevují efekty speciální teorie relativity. Ve svém klidovém systému totiž částice "vidí", že foton reliktního záření má velký modrý dopplerovský posuv a stává se tak pro ní gama fotonem, na kterém se potom částice účinně rozptyluje a ztrácí energii - obvykle vyprodukováním pionu. Obdobně strádají i těžší jádra, které se na fotonech nejprve roztříští, ale třeba i gama fotony, které mohou srážkami například produkovat elektron -pozitronové páry.

Srážky s fotony jsou tím efektivnější, čím má částice vyšší energii. Jak ukázali nezávisle na sobě v roce 1966 K. Greisen a G.T. Zacepin spolu s V.A. Kuzminem, lze dokonce stanovit energetickou mez, která se na jejich počest nazývá mezí GZK a která pro protony činí zhruba $5 \cdot 10^{19}$ eV. Podle jejich výpočtů nemohou přilétat protony s energií vyšší než $5 \cdot 10^{19}$ eV ze vzdáleností větších než cca 50 - 100 Mpc, neboť ať byla jejich energie zpočátku jakákoli, postupnými srážkami s reliktními fotony se sníží až na mez GZK, pod kterou již nejsou srážky spojené s tvorbou pionů dostatečně efektivní, aby tak vedly k dalšímu snižování energie.

Detekujeme-li tedy kosmické záření s energiemi většími než je mez GZK (což skutečně, byť zřídka, detekujeme), jsou možné jen dva typy řešení. Za prvé - zdroje extrémně energetického záření jsou "blízko" Země (tedy do 50 - 100 Mpc), v takovém

případě však zatím nevíme, o jaké zdroje se jedná. Výše diskutované zdroje totiž buď nejsou dost blízko (rádiové galaxie) anebo jejich parametry nejsou ideální (neutronové hvězdy). V blízkosti kompaktních objektů navíc dochází k degradaci energie částic vysíláním synchrotronového záření. Ve hře tedy zatím zůstávají jen exotické zdroje záření, jako již zmiňované topologické defekty či zatím neznámé typy částic. Za druhé - zdroje jsou v kosmologických vzdálenostech a GZK limit je vypočten špatně. To může mít však jen velmi fundamentální příčiny - spekulativní teorie, které byly zatím předloženy, se pokoušejí mez GZK zvýšit kvantově-gravitačními korekcemi vycházejícími ze superstrunové teorie, anebo tvrzením, že lorentzovská transformace není "zcela přesně invariantní", čehož důsledkem je, že speciální teorie relativity je "trochu" špatně.



Energie protonu v závislosti na uražené vzdálenosti od zdroje. Velmi jasně se projevuje vliv meze GZK - bez ohledu na počáteční energii protonu je ve vzdálenosti nad 100 Mpc jeho energie vždy pod 10^{20} eV.

Použitá literatura:

- Horák.Z,Krupka.F,Šidelář.V.: Technická fyzika SNTL-Praha, 1960
- Fojtek.A,Foukal.J.: Fyzika pro posluchače VŠB TU Ostrava, skripta, 2000
- Československy časopis pro fyziky, 49 (1999)
- Kopečný,J.,Pistora.V.: Fyzikální Měření VŠB TU Ostrava , 1997
- Část z přednášek Ing. M. Švadlenkové, CSc.