

Mikrosvět (V)

Částice kosmického záření jsou důležitými posly blízkého i vzdáleného vesmíru. Jejich zprávy pro nás mohou být v mnohém nápovědou, potvrzením či varováním. Nejprve je však musíme umět zachytit a porozumět jim.

Úvod

V předchozích dílech seriálu jsme se zmiňovali prakticky jen o jediném typu nástroje pro výzkum mikrosvěta – urychlovači. Studium vysokoenergetických částic však není odkázáno jen na jeho pomoc a navíc probíhá i mimo pozemské laboratoře.

Ve vesmíru dochází k velkému množství procesů, které produkují částice nejrůznějších druhů a energií. Díky tomu na zemský povrch dopadá soustavný déšť částic a jejich produktů, vzniklých interakcí v atmosféře – tzv. **kosmické záření**. Toto záření přispívá podstatnou měrou k přirozenému radiačnímu pozadí¹ a jeho mimozemský původ byl znám již v pionýrských dobách jaderného výzkumu. Navíc, až do padesátých let minulého století představovalo ozařování emulzí vnesených v balónech do horních vrstev atmosféry základní metodu při objevování nových částic.

Balónové experimenty, nadále pokračující i v dnešní době díky nesrovnatelně nižším nákladům ve srovnání s družicemi, odhalily, že většina primárního kosmického záření (toho, které nevzniká v atmosféře) je tvořena protony a jádry lehkých prvků (např. He, tzv. α záření).

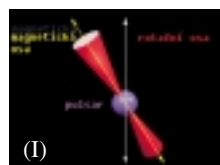
Kromě malé skupiny zabývající se nadále studiem interakcí těchto částic v atmosféře se však zájem fyziků, pracujících v tomto oboru (tj. na hranici astrofyziky a jaderné fyziky), obrátil k otázce samotného původu kosmického záření. Jelikož dráha nabitých částic je vlivem galaktických magnetických polí různě zakřivena a směr jejich příletu tak nevyovídá nic o místu jejich vzniku, je zapotřebí ke hledání zdrojů použít elektricky neutrálních stabilních částic – neutrin (jejichž detekce je ovšem značným experimentálním oříškem) nebo kvant γ . Na konci elektromagnetického spektra v oblasti velmi vysokých energií se tak zrodila nová disciplína, γ astronomie.

Zdroje záření

Vesmírné urychlovací procesy, dodávající energii i námi pozorovaným částicím, většinou souvisejí s uvolňováním extrémního

množství gravitační energie, ke kterému dochází buď v podobě katastrofických explozí, jako jsou výbuchy supernov, nebo v blízkosti velmi hmotných černých děr, jejichž existenci předpokládáme v centrech značného počtu galaxií. Při „běžných“, termodynamicky ustálených, procesech totiž částice s tak obrovskými energiemi nevznikají.

Vlastní proces urychlování souvisí, stejně jako v případě pozemských urychlovačů, s přítomností silných magnetických polí. V případě supernov vzniká takovéto pole v okolí neutronové hvězdy, zhroutěného jádra původního hvězdného obra, jehož rychlá rotace způsobuje také krátké rádiové záblesky. Právě díky těmto pulsům byly tyto objekty objeveny a pojmenovány jako pulsary:



K urychlování částic ale dochází i mimo malé okolí neutronové hvězdy: obálka, rozpínající se po výbuchu rychlostí blízkou rychlosti světla, vytváří při „vymetání“ okolní hmoty rázovou vlnu. Při interakci s ní mohou částice získat energii až stovek TeV, tedy o čtyři řády více nežli jsou limity urychlování v magnetosféře pulsarů samotných.

Při hledání prostředí umožňujících dosažení ještě vyšších energií (daleko nad hypotetickými možnostmi pozemských přístrojů) je zapotřebí se vydat do vzdálenějších oblastí (a tím i ranějších dob existence) vesmíru. Právě zde dochází k dramatickému formování nových galaxií a ke vzniku objektů známých jako aktivní galaktická jádra (mezi něž lze zařadit i známé kvasary). Obrovské množství záření uvolňované v těchto jádrech (přesahující výkon celého zbytku galaxie) je připisováno silnému ohřevu hmoty klesající v tzv. akrečním disku do centrální černé díry:



Podél osy symetrie tohoto disku pak z jádra uniká proud hmoty, označovaný jako jet neboli výtrysk, který mimo jiné obsahuje i částice urychlené na velmi vysoké energie. Při vhodné orientaci jádra pak tyto částice lze pozorovat i na Zemi.

Temná hmota

Původ kvant gama může mít ještě jinou, pro částicové fyziky velmi zajímavou, souvislost s možnou a dosud neprokázanou existencí exotických částic. Ty nejsou obsaženy ve standardním modelu a byly předpovězeny tzv. **supersymetrickými teoriemi**. Tyto částice, označované jako WIMPs (weakly inter-

acting massive particles), by byly velmi vhodnými kandidáty na tzv. **temnou hmotu (dark matter)** ve vesmíru. Ta interaguje jen velmi slabě, a proto je pro nás téměř neviditelná. Ovšem na rozdíl od neutrin, jejichž interakce s hmotou je rovněž velmi slabá, jsou hmotnosti těchto částic značné.

Existence temné hmoty je nutná k vysvětlení rozdílu mezi množstvím „viditelného“ materiálu (hvězd, mlhovin) a pozorovaných gravitačních vlivů – např. velikostí **Hubbleovy konstanty**.

Jelikož gravitační působení je dominantním projevem temné hmoty, ta se bude (za předpokladu, že má zanedbatelnou kinetickou energii) soustřeďovat v místech jako jsou kulové hvězdokupy, centra galaxií nebo třeba i jádro našeho Slunce. Pomalým rozpadem či interakcí těchto částic by mělo vznikat γ záření, které by při dostatečné koncentraci WIMPs bylo pozorovatelné.

Záblesky γ

Zvláštní kapitolou astročásticové fyziky jsou γ záblesky, jev pozorovaný již dávno vojenskými družicemi, ale dosud bez prokazatelného vysvětlení. Nejedná se totiž o stálé zdroje, ale o nahodilé jevy, kdy z jistého směru příletí shluk γ -kvant. Současné satelity registrují asi jeden takový záblesk denně, ale malé úhlové rozlišení dlouho neumožňovalo identifikovat směr jejich příletu s nějakým známým objektem. Až nedávná měření družice **Beppo-SaX** ukázala doznívající záblesk i v rentgenovém oboru a optické teleskopy v inkriminované oblasti našly galaxii s vysokým rudým posuvem.

Velká vzdálenost, která odpovídá tomuto posuvu, znamená, že zdroj musí být nesmírně intenzivní: při vzniku takového γ záblesku přesahuje uvolněná energie o mnoho řádů energii exploze supernov(!).

Detektory na orbitě

Přes počáteční úspěchy v šedesátých letech všechny pokusy identifikovat zdroje kosmického záření pozemskými přístroji selhávaly. Ukázalo se, že není možno nalézt bodový zdroj kvant γ na pozadí způsobeném nabitými částicemi. Skutečný zdroj γ astronomie znamenalo až vypuštění speciálních družic, jejichž objevy korunovala mise Comptonovské observatoře (NASA) v devadesátých letech.

Teleskop **EGRET** na její palubě, zaměřený na nejtvrdší γ záření, byl vlastně obdobou detektorů užívaných u pozemských urychlovačů. Obsahoval **dráhový detektor** k určení směru příletu γ kvanta (poté, co se přeměnilo na pár elektron-pozitron), dále **kalorimetr** k měření energie a také **štit scintilační látky**, který umožňuje vyloučit události způsobené

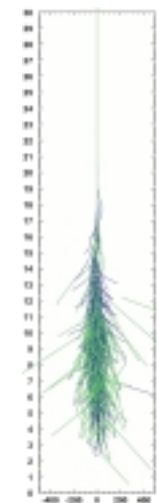


protony či jinými nabitými částicemi. Podobné zařízení, které na zemi běžně dosahuje hmotnosti

stovek tun, bylo třeba zmenšit natolik, aby se dalo dopravit na oběžnou dráhu. Výsledná detekční plocha pak nepřesahovala formát tohoto časopisu (pro γ paprsky narozdíl od jiných oblastí spektra neexistují žádná zrcadla ani čočky). Při této velikosti se horní hranice spektra detekovaných částic pohybuje okolo 10 GeV. Nad ní jsou toky záření i těch nejsilnějších zdrojů tak nízké, že sonda (díky své velikosti) registruje jen několik částic za rok. Za devět let existence tento velmi úspěšný experiment určil kolem 270 zdrojů; vinou nízkého úhlového rozlišení detektoru však pouze 70 bylo ztotožněno s objekty známými i v jiných oblastech spektra (většinu z nich tvoří aktivní galaktická jádra).

Spršky v atmosféře

Pozemská atmosféra představuje pro vysokoenergetické částice bariéru. Jak γ -kvanta, tak nabitě protony interagují vysoko nad zemí a vytvářejí postupně se rozvíjející spršku sekundárních částic (atmosféra tím vlastně plní roli velkého kalorimetru). V případě kvant γ se jedná zejména o elektromagnetickou kaskádu: vzniká elektron-pozitronový pár, který brzdícím zářením emituje další kvantum γ a následně se proces opakuje (obr. IV). Vlivem dalších interakcí však sprška postupně slabne a jen u extrémních energií (nad 10^{15} eV) dosáhne zemského povrchu. Pole částicových detektorů, užívané k detekci atmosférických spršek, jsou proto umístěny ve vysoko položených místech, kde je již možné zachytit spršky o energiích několika TeV, přičemž plochy zasažené sprškou jsou řádově 10^4 m². Vysoký energetický práh (znamenající zároveň velmi nízký tok primárních částic) je vyvážen velkou detekční plochou – detektory pro extrémní energie musí být rozmístěny na plochách mnoha tisíc čtverečních kilometrů. Přesto však počet detekovaných částic – zvláště v blízkosti prahu – není velký a tím je omezena schopnost rekonstruovat směr příletu spršky a především schopnost rozlišit mezi elektromagnetickou a hadronovou kaskádou, iniciovanou protonem či nabitým jádrem. Některé nové experimenty (např. MILAGRO využívající velké vodní nádrže jako detektoru) by však mohly v brzké době tento nedostatek překonat.



(IV)

schopnost rekonstruovat směr příletu spršky a především schopnost rozlišit mezi elektromagnetickou a hadronovou kaskádou, iniciovanou protonem či nabitým jádrem. Některé nové experimenty (např. MILAGRO využívající velké vodní nádrže jako detektoru) by však mohly v brzké době tento nedostatek překonat.

Záblesk na obloze

Existuje ještě jedna, zatím neúspěšnější cesta, jak detekovat atmosférické spršky: využít světla, které emitují ve vzduchu nabitě částice pohybující se v tomto prostředí rychleji než světlo.

Toto tzv. Čerenkovovo záření, které spadá převážně do modré oblasti viditelného spektra (i blízkého ultrafialového záření), je pouze málo absorbováno v atmosféře. Hustota Čerenkovových fotonů je úměrná energii primární částice – kaskáda iniciovaná kvantem γ o energii 50 GeV produkuje cca 1 foton/m² v oblasti o poloměru 130 m (obr. V).

Ovšem celkový počet fotonů z okolní oblohy, které každou sekundu dopadnou na tutéž plochu, je i za bezměsíčné noci o mnoho řádů vyšší. Proto je zapotřebí používat velmi rychlou elektroniku a kvalitní optiku, tak aby se signál spolu s pozadím integroval pouze po dobu trvání záblesku (řádově nanosekundy) z oblasti oblohy pokryté sprškou (do několika stupňů). V současnosti byly prověřeny dva alternativní přístupy k měření Čerenkovových záblesků.

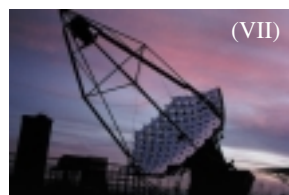
První, tzv. **zobrazovací**, pozoruje oblast, odkud vycházejí γ spršky, kamerou sestavenou z fotonásobičů s malým průměrem: signál se zaregistruje v okamžiku, kdy počet fotonů zachycených v několika sousedních fotonásobičích (obr. VI) přesáhne jistou mez.

Z tvaru výsledného obrazu lze rekonstruovat parametry spršky a především velmi dobře odlišit elektromagnetické kaskády od hadronových.

Druhá, tzv. **vzorkovací metoda**, sleduje celou spršku z více míst najednou. Přílet spršky je zaregistrován jako koincidence signálu v několika sousedních detektorech. Původní sprška je pak rekonstruována na základě intenzity signálu a času příletu v jednotlivých bodech detekčního pole.

A co my?

Čeští fyzikové, zejména z Centra částicové fyziky v Praze (FZÚ AV ČR + MFF UK), ale i z Optických laboratoří v Olomouci, mají podíl na obou druhých experimentů, a to díky spolupráci vzniklé na základě dodávek zrcadel pro observatoř **Themis** ve francouzských Pyrenejích. V prvním případě se jednalo o primární sběrnou plochu asi 17 m² (sestavenu z 50cm kruhových zrcadel) pro zobrazovací teleskop **CAT** (obr. VII), schopný detekovat spršky od 200 GeV (jeho parametry jej v současné době řadí k nejlepším na světě).



(VII)

V druhém případě šlo o revoluční princip využití sběrné plochy zrcadel na observatoři, která původně sloužila jako sluneční elektrárna, pro sestavení obřího vzorkovacího teleskopu. Tato plocha (řádově tisíce m²) a promyšlený elektronický systém umožňuje registrovat spršky již od energie 30 GeV. Tím se tento experiment nazvaný **CELESTE** velmi přiblížil horní hranici energií dostupné pomocí satelitů a otevřel tak nové, dosud neprozkoumané okno v elektromagnetickém spektru.

Šance pro zítřek

Hledání zdrojů kosmického záření zatím přineslo více otázek nežli odpovědí, neboť teoretikové (jako ostatně v poslední době vždy) mají před experimentátory značný náskok a množství navržených modelů přesahuje současnou rozlišovací schopnost měření. V brzké době by se však měly objevit nové experimenty, založené především na kombinaci a vylepšení současných metod. Na jižní polokouli v Namibii se buduje observatoř **HESS**, která využije čtyř (plánovaných až 16) teleskopů podobných CAT ke stereoskopickému pozorování spršek – výhodou je mnohem lepší rekonstrukce parametrů primární částice a tedy i citlivost zařízení. Optika, stejně jako v případě CAT, pochází z českých dílen. Dále na západ, na argentinských pláních, se připravuje mnohem větší projekt nazvaný **AUGER**. Pole detektorů rozmístěných na ploše 3000 km² by mělo být schopno zachytit spršky o obrovských energiích přes 10^{20} eV (několik joulů v jediné částici!) v množství dostatečném k poodhalení roušky jejich původu. Systém by měl být vybaven i několika detektory tzv. **Fly's Eyes** („muší oka“) sledujících ve všech směrech fluorescenční záblesky vyvolané těmito extrémními sprškami. A optika těchto detektorů je opět z českých dílen.

Záslouhou astrofyziků z Ondřejova bude mít Česká republika podíl i na tak prestižní záležitosti, jakou je start nové evropské kosmické observatoře **INTEGRAL**, pracující v široké oblasti spektra mezi 15 keV a 10 MeV. Zároveň je tím zaručen i přímý přístup k fyzikálně velmi bohatým datům. Záleží proto jen na vás, zda se včas připojíte k rostoucí rodině astročásticových fyziků se zájvou budoucností.

Nashledanou někdy příště v našem nádherném a společném světě.

Zdroje

- <http://science.nasa.gov/newhome/help/tutorials/pulsar.htm>,
- <http://pnp90.in2p3.fr/~cat/Images/>
- http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_astro/agn/agn_rixos.html
- <http://lheawww.gsfc.nasa.gov/docs/gamcosray/EGRET/egret.html>

FILIP MÜNZ A TOMÁŠ SÝKORA, ÚČJF MFF UK ■
www-ucjf.troja.mff.cuni.cz

¹ Kosmické záření je mj. zodpovědné za přítomnost radioaktivního uhlíku ¹⁴C v atmosféře, který se využívá ve známé datační metodě.