

Mapa směrů, z nichž přiletělo 69 nejenergetičtějších částic pozorovaných Observatoří Pierra Augera (černé tečky), doplněná o kruhy o průměru 3° okolo AGN z katalogu VCV (Véron-Cetty a Véron). Mapa je provedena v galaktických souřadnicích a je vyznačena také část oblohy, kterou Auger pozoruje. Povšimněte si výrazného shluku teček přibližně uprostřed: 12 ze 69 částic přiletělo z kruhu o průměru 12°, jehož střed je těsně vedle jedné z nejbližších aktivních galaxií známé jako Centaurus A.

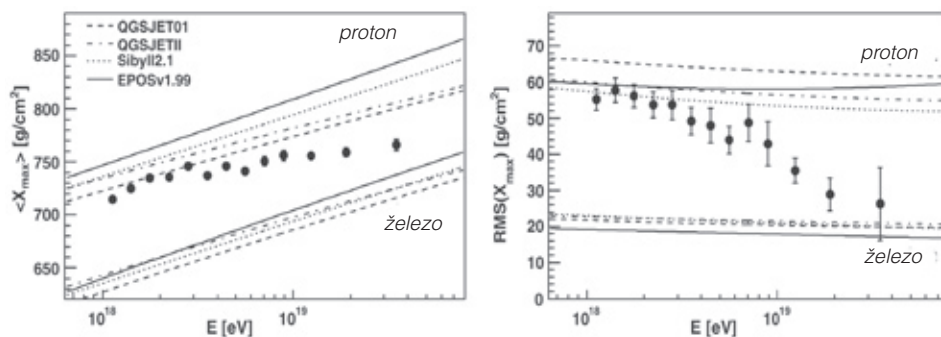
k detekci částic o různých energiích bude potřeba radikálně odlišných metod. Přímá detekce částic pomocí družic a stratosferických balónů je možná jen do energií okolo 10^{15} eV. Pro nízké toky částic vyšších energií je již plocha detektorů, které lze vynést do dostatečné výšky, aby zachytily částice před jejich interakcí v atmosféře, příliš malá. Jedinou možností jsou proto nepřímá pozorování, kdy místo primárních kosmických částic pozorujeme produkty jejich interakcí se vzduchem v podobě rozsáhlých atmosferických spršek, a to buď pomocí částicových detektorů rozmístěných na povrchu Země, nebo dalekohledy zaznamenávajícími fluorescenční záření vybuzevané sprškou při jejím průletu atmosférou.

Nespornou výhodou nepřímé detekce je obrovský objem detektoru, který nám připravila příroda sama v podobě několika desítek kilometrů tlusté atmosféry, nevýhodou ovšem nepřímá pozorování, která nám neumožňují snadno identifikovat druh primární částice. Obvyklá sprška se skládá z miliard částic, které se rodí v mnoha generacích při srážkách s molekulami vzduchu. Velkou část jejich interakcí umíme poměrně spolehlivě simulovat na počítači, ale s rostoucí energií primární částice se u několika prvních interakcí ve

spršce dostáváme do energetických oblastí, které nejsou prozkoumány pomocí urychlovačů (srážka dvou protiběžných protonů o energii 1 TeV dosahované na Tevatronu odpovídá díky relativistické transformaci energií srážce stojícího jádra dusíku nebo kyslíku s kosmickým protonem o energii lehce nad 10^{15} eV).

Všechny modely, které se takovou spršku snaží popsat, pak musí přijmout nějaké předpoklady o tom, jak k vyšším energiím extrapolovat současná data z urychlovačů. Kvantová – a tedy pravděpodobnostní – povaha interakcí částic nám prakticky znemožňuje říci, zda konkrétní částice

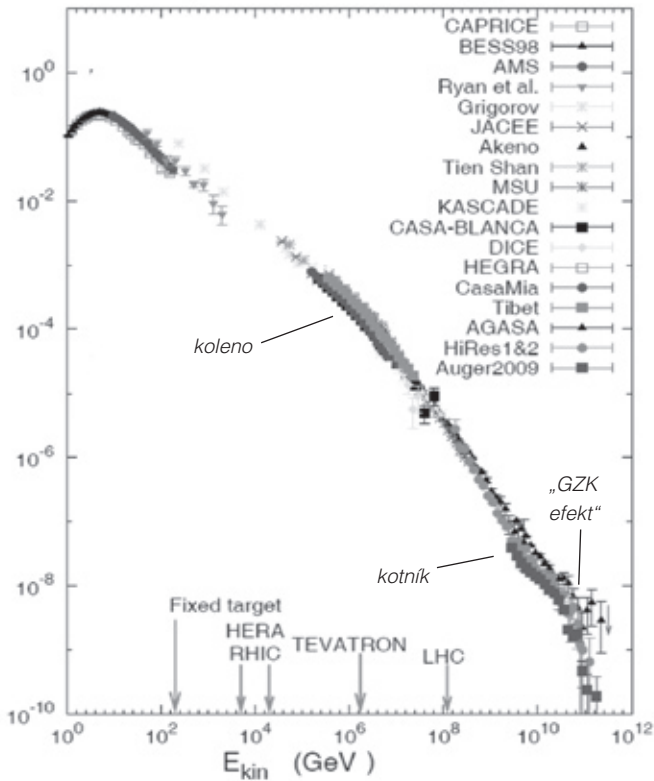
byla proton nebo jádro nějakého těžšího prvku (množství elektronů je při vysokých energiích zanedbatelné vzhledem k velkým energetickým ztrátám, které zažívají při průchodu galaktickým magnetickým polem). V současné době však není ani zřejmé, jaké je celkové poměrné zastoupení protonů a různých těžších jader (v žargonu označované jako „chemické složení“) v celém souboru pozorovaných spršek. S trochou nadsázky se dá říct, že lze najít model, který by vše označil za protony, i takový, který ukazuje na převahu jader železa (jakožto nejtěžšího hojně zastoupeného prvku ve vesmíru).



Pomocí fluorescenčních detektorů Observatoře Pierra Augera můžeme přímo vidět vývoj spršky v atmosféře. Ta nejprve narůstá, jak se opakovanými interakcemi rodí další a další částice, ale v určité chvíli dosáhne maxima, protože se vyčerpá dostupná energie a částice ve spršce začnou ubývat. Hloubka v atmosféře (udaná v jednotkách plošné hustoty proletěného vzdušného sloupce) tohoto maxima se označuje X_{max} a měla by představovat indikátor chemického složení, tedy druhu primární částice. V grafech jsou vyneseny střední hodnoty veličiny X_{max} (vlevo) a jejich střední rozptyl (vpravo) pro řadu energií a předpovědi různých počítačových modelů, vždy pro případ, že jsou všechny částice protony (horní čáry) respektive jádra železa (spodní čáry). Ačkoliv je potěšující, že body leží mezi dvěma extrémními možnostmi, rozptyl různých předpovědí je značný, a i chyba měření rozptylu, daná velmi malým počtem pozorovaných částic, je významná. Podle obou grafů se zdá, že částice nejvyšších energií jsou spíše těžší jádra – v takovém případě by ale bylo těžké vysvětlit pozorovanou anizotropii vzhledem k jejich většímu vychýlení magnetickými poli ve vesmíru.

Mgr. Jan Ebr (*1982)

vystudoval MFF UK v Praze, obor teoretická fyzika. Nyní pracuje na doktorské práci věnující se interakci částic v atmosféře na Fyzikálním ústavu AV ČR, v.v.i. Je členem sdružení Observatoře Pierra Augera.
E-mail: ebr@astropis.cz



Vlevo: kombinované spektrum kosmického záření z balónových, vesmírných i pozemních detektorů s vyznačením tří hlavních jevů: kolene, kotníku a poklesu na konci, obvykle připisovaného GZK efektu. O existenci posledně jmenovaného panovaly dlouhou dobu pochyby, protože zatímco data z fluorescenčního detektoru HiRES jeho existenci podporovala, podle systému pozemních detektorů AGASA to vypadalo, že spektrum pokračuje nerušeně dál. Teprve data z Augeru díky lepší statistice rozhodla, že pravda je na straně HiRESu. Na vodorovné ose jsou vyznačeny energie, které odpovídají pozemním urychlovačovým experimentům. Značka „fixed target“ ukazuje nejvyšší energii dosaženou v urychlovačích s nehybným terčem, ostatní uvedené experimenty používají systém dvou vstříčných svazků. Energie vyznačená LHC odpovídá původní návrhové hranici 14 TeV, které zatím nebylo a v nejbližší době ani nebude dosaženo. Veškerá data napravo od LHC (zatím tedy spíše Tevatronu, protože LHC je teprve na začátku svého fungování) byla tedy analyzována na základě teoretických extrapolací interakčních modelů.

Magnetické nepříjemnosti

Na rozdíl od fotonů a neutrin jsou nabitě částice ovlivňovány magnetickými poli v mezihvězdném prostoru, a proto necestují po přímých čarách, ale jejich trajektorie jsou zakřivené. Bohužel pro nás, magnetické pole v naší galaxii je dostatečně silné na to, aby v něm většina částic vykonala řadu klíčků, než doletí k Zemi, a proto se informace o jejich původním směru letu zcela ztrácí. Po odstranění vlivů slunečního větru a pohybu Země je tak obloha viděná očima částicových detektorů téměř dokonale izotropní. Výjimkou jsou částice o těch největších energiích, přibližně nad 5×10^{19} eV, kde se podle dat z observatoře Pierra Augera zdá, že jsou určité směry preferovány. Že je anizotropie pozorována u nejvyšších energií je logické, protože energetičtější částice dokáží magnetickými poli proletět po přímějších liniích, a tak si zachovat směr alespoň trochu blízký směru k jejich zdroji.

Hledání opravdových zdrojů částic však není jednoduché, protože je zatížené řadou neznámých. Zatímco naše znalosti magnetického pole naší Galaxie jsou řeckně omezené, tak co se pole mezigalaktického týče, jde víceméně o tápání – a že jsou nejenergetičtější částice mimogalaktické, je téměř jisté: nepozorujeme jejich kon-

centraci ke galaktické rovině a především neznáme v naší galaxii žádné objekty, které by byly produkce tak extrémních částic schopné. I kdybychom ale znali magnetická pole lépe, stojíme stále před problémem chemického složení: jádro železa je díky svému náboji v mag-

netickém poli vychýleno 26x více, než samotný proton, a tak bude danému směru přiletu částice k Zemi odpovídat zcela jiný směr ke zdroji.

Nedostatek důkazů

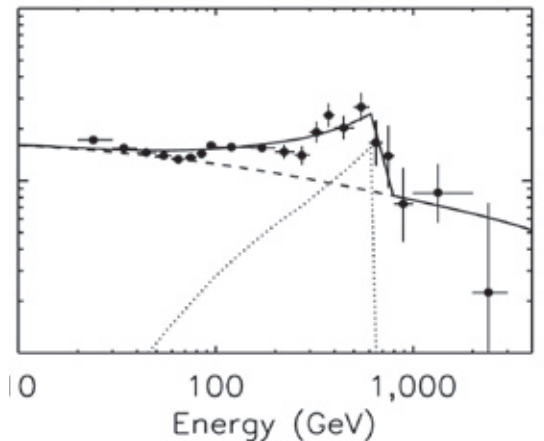
Aby toho nebylo málo, je třeba také zmínit, že i observatoř Pierra Augera, jejíž sběrná plocha převyšuje plochu všech předchozích experimentů dohromady, napozorovala ke konci roku 2009 teprve 69 jednotlivých případů částic s energií nad $5,5 \times 10^{19}$ eV. Z nich přiletělo ze směru vzdáleného méně než 3° od některého z vybraných blízkých aktivních galaktických jader (AGN) celých 29. To je téměř polovina, což může vypa-

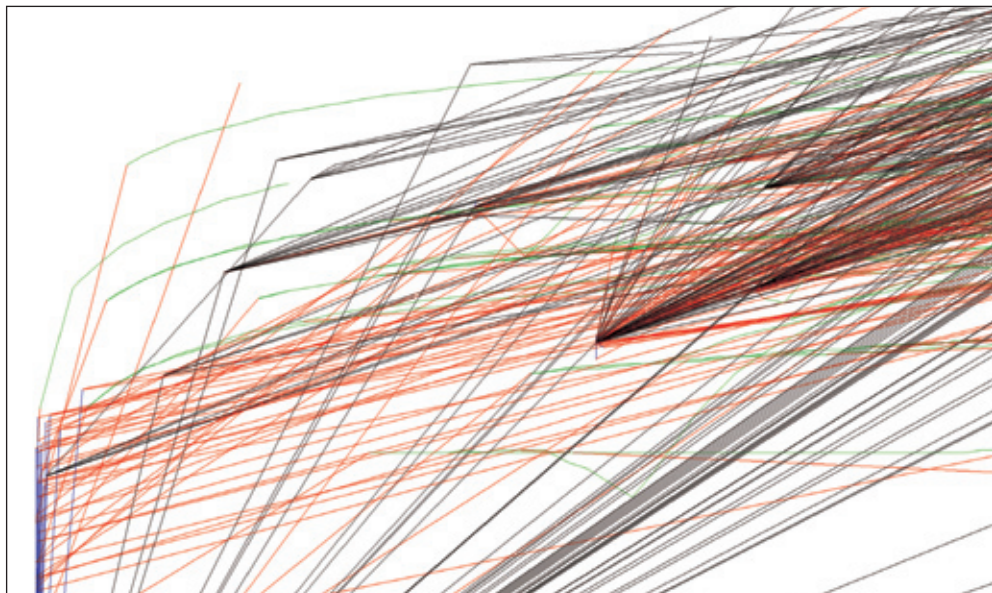
dat jako úctyhodná korelace, ale vzhledem k počtu pozorovaných částic stále nelze zdaleka vyloučit, že jde o náhodu – vždyť také oblasti vzdálené do 3° od vybraných AGN zabírají asi pětinu oblohy pozorovatelné Augerem. Ve skutečnosti je velmi těžké „od oka“ odhadnout, do jaké míry jde o reálný jev, a místo toho je potřeba použít sofistikované statistické postupy. I poté však v interpretaci tohoto pozorování panuje mnoho nejistoty. Především nevíme, zda jsou ona AGN skutečnými zdroji vysokoenergetických částic, nebo pouze jakýmsi ukazateli oblastí se zvýšenou hustotou hmoty, kde mohou probíhat zcela jiné procesy vedoucí k urychlení částic. Již v minulosti se také stalo, že byl na základě statisticky omezeného pozorování vyhlášen „objev“ anizotropie či přímo zdrojů kosmického záření, avšak většina těchto tvrzení se ukázala jako neopodstatněná.

Spektrální noha

Asi nejsolidnějším pozorováním částicové astrofyziky tak kromě přímo měřeného zastoupení jednotlivých částic při nižších

Zdánlivě jednoduchý graf vyvolal v roce 2008 velkou odezvu v astrofyzikální komunitě, která trvá dodnes. Balónový experiment ATIC, který jako řada dalších využíval příznivé větry okolo jižního pólu pro dlouhodobá pozorování ve výškách, pozoroval přebytek elektronů (nebo pozitronů, nemůžeme je rozlišit) v oblasti 300–800 GeV. Tím potvrdil dřívější pozorování experimentu Pamela, ale později se dostal do částečného rozporu s měřením sondy Fermi. I přes nejasnosti, které kolem interpretace dat panují, přitahuje toto pozorování zástupy teoretiků, snažících se najít vysvětlení nejen v konvenčních astrofyzikálních modelech, ale často také v rozpadu vhodně zvolených částic temné hmoty. Jednomu takovému modelu odpovídá i křivka, kterou jsou body proloženy v tomto obrázku.





Vizualizace počítačové simulace začátku atmosférické spršky (v radiálně logaritmickém zobrazení). K první interakci částice v atmosféře došlo vlevo dole, její produkty dále interagují a po každé další srážce vzniká nový svazek rozblhajících se částic. Zatímco v první části spršky vznikají při silných interakcích mezi primární částicí a jádry atomů vzduchu hadrony (černě kromě neutrálních pionů), záhy začnou většinu spršky tvořit fotony (červeně) z rozpadů neutrálních pionů (modře) a elektrony a pozitrony (zeleně) produkované těmito fotony v elektrických polích okolních atomů. Tato tzv. elektromagnetická komponenta se časem tlumí a povrchu Země dosahuje až od určité energie primární částice (závislé na nadmořské výšce). Naopak miony (nevykresleny), které vznikají rozpadem nabitých pionů, letí k zemi téměř nerušeně, pokud se nestihnou rozpadnout.

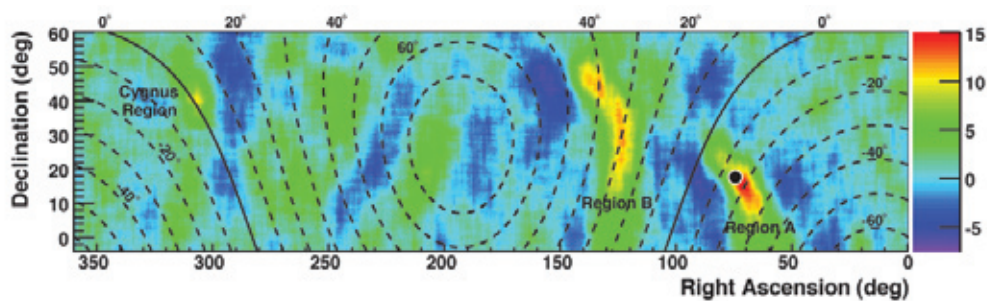
energiích zůstává energetické spektrum, tedy měření celkového toku částic v závislosti na energii. To zasahuje přes úctyhodných 10 řádů od desítek GeV, kde končí vliv Slunce, až po nejenergetičtější zachycené částice okolo 10^{20} eV. Pozoruhodné je, že v celém tomto rozsahu jde o velmi nezáživnou křivku, na níž si lze všimnout jen tří zřejmých jevů: kolene, kotníku a poklesu na konci, označovaného také (poněkud odvážně) jako GZK efekt. Názvy prvních dvou jevů názorně popisují tvar spektra, pokud si ho představíme jako mírně pokrčenou nohu: v oblasti kolene (10^{16} eV) se spektrum stává strmějším, aby se v kotníku (4×10^{18} eV) zas trochu narovnal – ovšem další pokles u 3×10^{19} eV tuto analogii trochu kazí.

Přestože jde o poměrně jednoduchý tvar, nedává toto spektrum dlouhodobě spát především astrofyzikům, hledajícím modely pro zdroje kosmického záření, neboť jeho reprodukce vyžaduje poměrně složité modely. Zdánlivě nejjednodušší k vysvětlení je finální pokles spektra, které odpovídá teoreticky předpovězenému GZK (Greisen-Zacepin-Kuzmin) efektu. Ten předpovídá, že právě při energiích nad 10^{19} eV se začínají významně projevovat interakce kosmického záření (hlavně protonů) s reliktním mikrovlnným zářením, při nichž částice ztrácejí energii – proton o energii 10^{20} eV tak může bez výrazného zpomalení proniknout maximálně desítky milionů světelných let, což je, z hlediska vzdáleností mezi objekty dostatečně extrémními na produkci takových částic, nedaleko.

Zatímco částice nižších energií k nám tedy mohou přiletět téměř z libovolné části vesmíru, ty nejenergetičtější pozorujeme jen z relativně omezeného vesmírného okolí, a tak je jejich tok nižší. Povšimněte si, že částice postižené GZK limitem jsou právě ty, u nichž pozorujeme anizotropii: GZK limit je tak častým vodítkem pro volbu vzdálenosti, do níž hledáme zdroj pro přiřazení k pozorovaným částicím.

Jak je ale v astročásticové fyzice zvykem, i nad touto interpretací visí otazníky. Především je tu stále se opakující téma chemického složení, protože GZK limit omezuje nejvíce protony a nejtěžší jádra.

Ve skutečnosti ale i v případě, že by šlo o těžší prvky, tak nás ve spektru podobná struktura nepřekvapí, neboť těžká jádra pro změnu při srážkách s fotony ve vesmíru prodělávají rozpady na několik dceřiných jader, a to na podobných rozměrových škálách. Otázkou však zůstává, jestli pozorovaný útlum není ve skutečnosti daný nedostatkem objektů, schopných tak extrémního urychlení jednotlivých částic, tedy zda to, že pozorujeme jen malé množství částic s velmi vysokými energiemi, není dáno tím, že se jich více zkrátka neprodukuje. ■



Prvotním cílem experimentu Milagro bylo pozorování atmosférických spršek pocházejících od gama záření o energiích v řádu TeV, ale samozřejmě se nevyhnul ani detekci „obyčejného“ kosmického záření – ve skutečnosti většina dat, která získal, pochází od nabitých částic a fotony bylo třeba pečlivě hledat. I toto „pozadí“ nakonec přineslo své ovoce, protože po bedlivém prozkoumání jeho titěrných změn v řádu promile byla kromě velkoškálové dipólové variace nalezena i mnohem jemnější struktura, kterou později potvrdily i další experimenty. Zajímavé je, že dvě oblasti s přebytkem signálu se nacházejí symetricky okolo nejbližšího pulsaru Geminga. Lze dokonce vymyslet takovou konfiguraci magnetického pole mezi námi a Gemingou, že zakřivení částic v něm nezpůsobí jejich rozmazání do všech směrů, jak by se dalo čekat, ale obrazec podobný tomu pozorovanému. Ještě zajímavější je, že vhodným modelováním toku částic od Gemingy je možné vysvětlit i data z Pamely a ATICu (viz obrázek na protější straně). Zdá se, že ani svému poměrně blízkému vesmírnému okolí ještě dobře nerozumíme, a že na vysvětlení neobvyklých pozorování není potřeba hned postulovat existenci exotických částic temné hmoty.