Záhadný urýchľovač

Experiment HIRes (High Resolution Fly's Eye)

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Dnes v oblasti fyziky vysokých energií nastala doba, keď kde-kto netrpezlivo očakáva spustenie LHC urýchľovača protibežných zväzkov protónov v CERN, Švajčiarsko, (viď Quark 98/4), s najväčšou pravdepodobnosťou posledného z radu "klasických" urýchľovačov elementárnych častíc. [1] Popri "honbe" za čo najvyššími energiami, ktoré chceme pomocou urýchľovačov udeliť elementárnym časticiam, [2] je dobré, že sa stále myslí aj na prirodzený zdroj vysokoenergetických častíc, ktorý predstavuje kozmické žiarenie. A nejedná sa o nejaký zanedbateľný "kozmický" urýchľovač, ako v ďalších riadkoch uvidíme!

Nedávno, v časopise fyziky vysokých energií, v CERN Courier, vol. 38, No. 8, November 1998, sa opäť rozvíjali úvahy nad podstatou hlavne vysokoenergetickej zložky kozmického žiarenia. Článok mal príznačný názov - "Cosmic mystery" (slovensky: "Kozmická záhada"). Skôr, ako sa pri ňom zastavíme, pripomeňme si niekoľko faktov o kozmickom žiarení.

Kozmické žiarenie

Pojem "kozmické žiarenie" sa viaže ku žiareniu pochádzajúceho z kozmu. Spočiatku, pri jeho prvej registrácii, nebolo jasné, či sa jedná o žiarenie, ktoré dopadá na Zem alebo ide o žiarenie, zdrojom ktorého je Zem. Pokusy jedného z prvých jeho objaviteľov, Vic Hessa, s použitím balóna s teplým vzduchom, v koši ktorého bol umiestnený elektroskop, ukázali, že sa jedná o žiarenie, ktoré k nám dopadá "zhora", a teda nie je produktom vnútra Zeme.

Podstatnú zložku kozmického žiarenia predstavujú protóny, ale v jeho spektre je možné nájsť nielen ľahké (He, Be), ale aj ťažké jadrá, napr. železo. Je tiež zaujímavé, že kozmické žiarenie dnes, tak ako ho poznáme, predstavuje široké spektrum energie v ňom obsiahnutých častíc, počnúc rádove energiami eV a končiac časticami so superenergiami, rádove 10^{20} eV. Určite asi najzaujímavejšia otázka spätá s kozmickým žiarením sa viaže k jeho zdroju. Vieme, že zdrojom kozmického žiarenia je naše Slnko, hviezdy, centrá galaxií, pulzary alebo kvazary. Nevieme si však ani len predstaviť zdroj vysokoenergetickej zložky kozmického žiarenia. Prečo? Nuž náš najväčší urýchľovač elementárnych častíc LHC urýchli protóny na energiu 7 TeV, čo je 7.10^{12} eV. Dnes najenergetickejšou časticou, ktorá sa pozorovala v spektre kozmického žiarenia, je častica o energii $3,2 \pm 0,9$ x 10^{20} eV (bola publikovaná pod menom "Oh My God"). Ide teda o objekt, ktorý je o 8 rádov energetickejší

[1] Domnievam sa, že v budúcnosti hlavným limitujúcim faktorom pri stavbe urýchľovačov elementárnych častíc alebo iónov jadier, bude ich cena, ktorá sa už dnes vyšplhala do závratných výšok. Som však optimista. V minulosti cena urýchľovača sa stávala neúmernou hlavne pre vysoké nároky kladené na urýchľovaciu trubicu a v nej požadované vákuum. Tento problém bol vyriešený zavedením tzv. silnej fokusácie (ide o typ fokusácie zväzku urýchľovaných častíc, kde sa využili rôzne fokusačné vlastnosti dipólových, kvadrupólových a sextupólových magnetov). Verím, že aj v budúcnosti sa nájde nejaké revolučné riešenie, ktoré cenu urýchľovača "stlačí" na únosnú mieru.

[2] Z pohľadu na jeden zo základných cieľov experimentu vo fyzike vysokých energií, a tým je bezosporu snaha získať informáciu o najmenších entitách matérie, nie je dôležitá ani tak čo najväčšia energia urýchlených častíc, ktoré do zrážky vstupujú, ale hodnota energie, ktorú si častice pri zrážke medzi sebou vymenia. Tá samozrejme je tým väčšia, čím je väčšia energia zrážky, ale bohužial, zďaleka nie všetká energia sa v danej zrážke realizuje. Je možné, že práve tu je cesta, akou sa bude stavba budúcich urýchľovačov uberať.

než my budeme vôbec môcť v dohľadnej dobe v laboratórnych podmienkach dosiahnúť!

"Oh My God" častica

Zastavme sa na chvíľu pri tejto častici. V ďalších riadkoch si dovolím sledovať výklad Johna Walkera z Cosmic Ray Research Lab. Utahskej univerzity, USA:
"Predpokladajme, že sa jedná o protón. Potom, keďže vieme jeho energiu a hmotnosť, vieme aj jeho rýchlosť. Tá je neuveriteľných $v_p = 0,9999999999999999999999951.c$ (v hodnote rýchlosti je skutočne 25 deviatok), kde c je rýchlosť svetla vo vákuu, teda $c = 2,99792458.10^8$ m.s^{-1}. Ak by sme v rovnakom čase a z rovnakého miesta vo vákuu vypustili protón s rýchlosťou v_p a fotón, tak za jeden svetelný rok by protón za fotónom "zaostával" len o 46 nanometrov!"

Objekt	Vzdialenosť vo svetelných rokoch	vlastný čas
Alpha Centauri	4,36	0,43 milisekundy
centrum Mliečnej dráhy	32 000	3,2 sekundy
galaxia Andromėda	2 180 000	3,5 minúty
klaster Virgo	42 000 000	1,15 hodiny
kvazar 3C273	2 500 000 000	3 dni
"hranice" Vesmíru	17 000 000 000	19 dní

V tabuľke 1 sú tri stĺpce. Pokiaľ prvé dva sú jasné, bližšie vysvetlenie vyžaduje stĺpec s názvom "vlastný čas". V súlade so špeciálnou teóriou relativity, čas nie je invariantnou veličinou, ale jeho hodnota závisí od vzťažnej sústavy, v ktorej sa daný pozorovateľ nachádza. Čas, ktorý plynie v sústave, v ktorej je pozorovateľ v kľude (alebo v rovnomernom priamočiarom pohybe), sa nazýva "vlastným časom". Jedným z pozoruhodných dôsledkov konečnosti šírenia sa materiálneho signálu (v skutočnosti len na základe tohto faktu a vlnového princípu Huygensa je možné vybudovať špeciálnu teóriu relativity) je fakt, že rýchlosť toku času v sústave, ktorá sa voči pozorovateľovi pohybuje s nejakou rýchlosťou v je tým pomalšia, čím je rýchlosť v bližšia k c (rýchlosť c je limitnou, žiaden materiálny objekt ju nemôže prekročiť).

Keď sme už pri relativite, pozrime sa ešte na vzdialeností, ktoré by videl pozorovateľ, keby sa pohyboval rýchlosťou v_p. Tie sú ukázané v tabuľke 2 : Ide teda o kontrakciu dĺžky v smere pohybu,

Objekt	Vzdialenosť v sústave, kde je pozorovateľ v kľude	Vzdialenosť v sústave, kde sa pozorovateľ pohybuje rýchlosťou v_p
priemer Zeme	12 756 km	0,0399 mm
Slnečná sústava	80 astronomických jednotiek	37 metrov
Alpha Centauri	4,36 svetelného roku	127 km
naša galaxia	30 kiloparsekov	2 895 000 km

výsledkom ktorej, ako vidíme z tabuľky 2, je skutočnosť, že pozorovateľ pohybujúci sa rýchlosťou v_p vidí vzdialeností, ktoré sú "skrátené" faktorom [3] 3.10^{11}.

[3] Aby nedošlo k nedorozumeniu: dilatácia času, resp. kontrakcia dĺžky v špeciálnej teórii relativity je priamym dôsledkom konečnosti šírenia sa materiálneho signálu a faktu, že ľubovoľný pozorovateľ daný objekt v princípe môže pozorovať len tak, že registruje zmeny materiálneho signálu, pred jeho "vyslaním" a po jeho "príjme" od daného

Z tabuľky 1 vyplýva, že pokiaľ by sme sa pohybovali rýchlosťou v_p, na to, aby sme dosiahli našu najbližšiu hviezdu Alpha Centauri, by sme potrebovali iba 0,43 milisekund a hranice nami pozorovaného Vesmíru by sme zvládli za 19 dní. Je to však len ilúzia, pretože aj keby sme vedeli protón urýchliť na rýchlosť v_p, ako spočítal Sokolsky (opäť z Utahskej univerzity), nedoletel by ďalej ako 10 megaparsekov (teda asi do vzdialenosti klastera Virgo) [4] , a to preto, lebo by cestou stratil energiu vďaka rozptylu na fotónoch pochádzajúcich zo všade prítomného mikrovlnového kozmického fónového žiarenia (objaveného v roku 1965 Penziasom a Wilsonom). Nuž, a tu sme pri záhade - ako vlastne "Oh My God" častica vznikla? A aby to bolo ešte záhadnejšie - na základe teoretických výpočtoch, nijaká častica v kozmickom žiarení nemôže mať energiu väčšiu ako 5.10^{19} eV, a to opäť vďaka rozptylu na už spomenutých fotónoch.

Fakt, že náš objekt má tak veľkú rýchlosť, má, z pohľadu na našu snahu zistiť odkiaľ pochádza, resp. aký mechanizmus ho urýchlil, jednu dobrú vlastnosť: očakávame, že je málo pravdepodobné, že by sa odchýlil v galaktických magnetických poliach, a preto by sme sledujúc jeho smer, mali vedieť vystopovať jeho zdroj. Nuž, a práve to je cieľom "mušieho oka", experimentu "HIgh Resolution Fly's Eye" (v skratke HIRes).

Experiment HIRes

Ako sme už povedali, cieľom experimentu HIRes je pokúsiť sa vniesť viac svetla do nami už spomenutej záhady existencie superenergetických kozmických častíc. HIRes detektor sa buduje asi hodinu cesty autom smerom do púšte pri meste Five Mile Hill v americkom štáte Utah, viď obr. 1. Detektor je spločným dielom vedcov z Univerzity Utah, Columbia, Illinois, Michigan, Chicago z USA a Adelaide z Austrálie. Jeho názov súvisí s jeho vlatnosťami - je schopný regi- strovať signál (svetlo) v danom čase v niekoľkých smeroch naraz, podobne ako oko muchy.
Pri dopade častíc z kozmického žiarenia do atmosféry Zeme, následkom ich zrážok s molekulami vznikajú spŕšky častíc, ktoré opäť kaskádovite vyvolávajú ďalšie spŕšky, z ktorých mnohé častice, resp. spŕšky samotné dopadnú až na povrch Zeme. Počiatočná energia do atmosféry vstupujúcich častíc sa distrubuuje pomocou následných spŕšok, pričom jednou z vlastností týchto spŕšok je, že dusík nachádzajúci sa v atmosfére začne floreskovať. Tvorba fluorescenčného svetla prebieha v oblasti medzi 300 až 400 nanometrami. Práve toto svetlo je "vstupom" pre HIRes detektor, viď obr. 2, ktorý jeho registráciou bude schopný nielen určiť energiu častíc, ktoré spŕšky vyvolali, ale aj ich smer z ktorého do zemskej atmosféry dopadli. Nezanedbateľnou informáciou bude aj frekvencia, s ktorou sa vysokoenergetické častice budú pozorovať. Fluorescenčné svetlo sa bude zberať pomocou pevne umiestnených sférických zrkadiel, viď obr. 3, ktoré svetlo fokusujú do klastra pozostávajúceho z 256 fotonásobičových trubíc, viď obr. 4, kde klaster je vo vnútri jedného z detektorov.
Detektor je umiestnený ďaleko od mesta preto, aby na výsledky merania nemalo vplyv mestské svetlo, z rovnakého dôvodu sa registrácia uskutočňuje len počas nocí, keď je tmavá obloha bez Mesiaca. Akčný rádius detektora je 20 km, čo zodpovedá priestoru cca 6 000 km^2.steradián. Aj keď na rekonštrukciu smeru spŕšok v princípe postačuje informácia len z jedného smeru, oveľa presnejší výsledok sa dosiahne s použitím dvoch alebo viacerých "stereo očí". Z tohto dôvodu sa asi 13 km juhozápadne od Five Mile Hill stavia druhý detektor, ktorý bude mať navyše voči súčasnému detektoru 43 zrkadiel a fotonásobičových trubicových detektorov. Mal by byť ukončený tento rok. Vo vzdialenej budúcnosti sa plánuje postaviť celkove ešte desať podobných detektorov, ktoré by mali byť umiestnené na západe štátu Utah.
Ako pracuje HIRes? Svetlo fokusované zrkadlami do fotonásobičových trubíc uvoľňuje isté množstvo

objektu. Teda ide o *efekt merania*, ktorý *reálne* nezmení charakteristiky daného objektu (kvantovo-mechanické efekty zanedbávame), t.j. samotný objekt nie je si "vedomý", že by sa napr. jeho dľžka menila - preto napr. efekt dvojčiat v tejto teórii existovať nemôže, ten je dôsledkom až všeobecnej teórie relativity, kde skutočne dochádza k interakcii medzi časovo-priestorovou metrikou a dynamickými silami, reprezentovanými napr. tenzorom energie-hybnosti.

[4] 1 megaparsek je cca 3 262 000 svetelných rokov

Obr. 1: HIRes *detektor vo Five Mile Hill.*

elektrónov z materiálu na prednej strane povrchu trubice. Tieto elektróny sú zachytené niektorou z radu dynód, ktoré ich ďalej urýchľujú. Pri každom dopade elektrónu do dynódy sa uvoľňujú ďalšie elektróny. Ich počet, ktorý nakoniec dopadne do katódy, ktorá je na konci trubice, resp. elektrický pulz, ktorý tomuto počtu elektrónov zodpovedá, je úmerný počiatočnej energii fotónov, ktoré tento lavínovitý proces uvoľňovania sa elektrónov vo fototrubici spôsobili. Poznamenajme, že ide o veľmi citlivé fotonásobiče, napr. ostré svetlo odrazené z Mesiace nielenže by skreslilo meranie, ale by tieto zariadenia aj poškodilo. Na obr. 5 je znázornený počítačom vytvorený obraz typického prípadu, ktorý HIRes pozoruje.

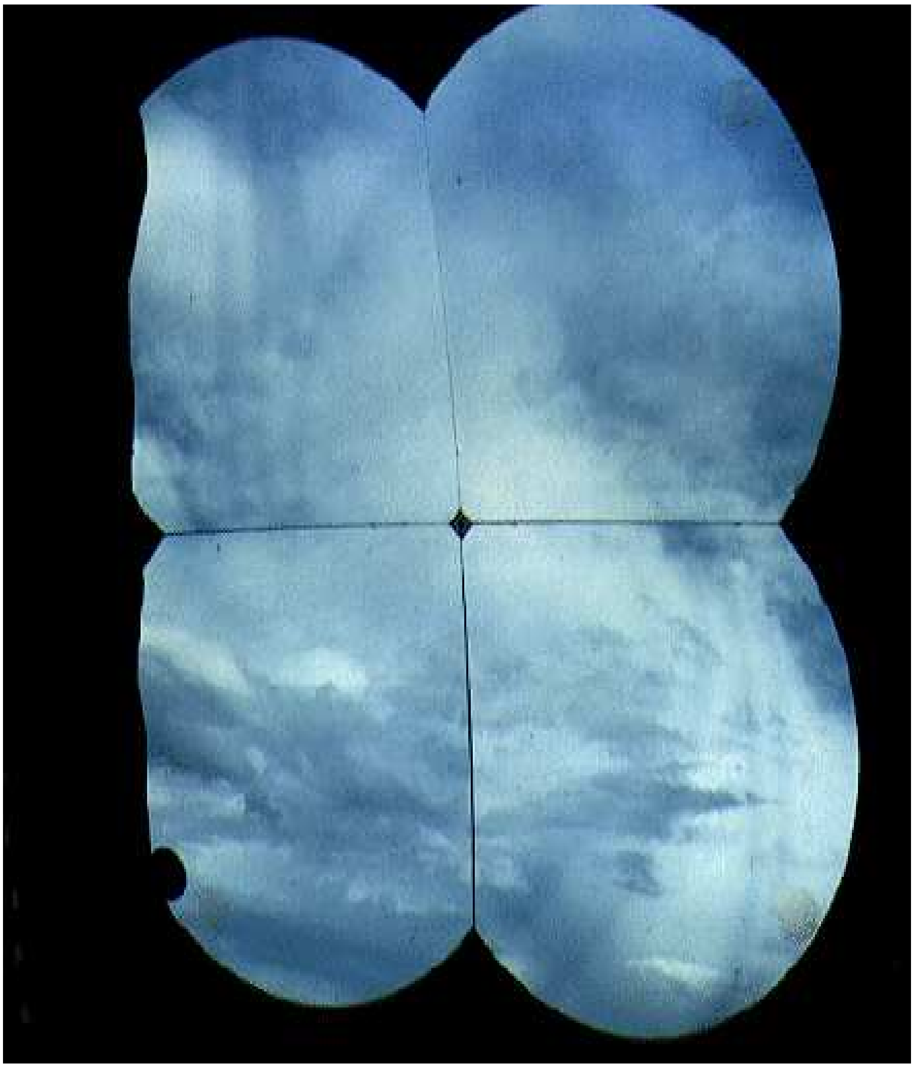
Teoretické špekulácie

Vysvetliť existenciu superenergetických častíc v kozmickom žiarení môžeme napr. tak, že budeme predpokladať existenciu nateraz neznámych superenergetických častíc (dostali názov "uhecrony"), ktorým strata energie vďaka rozptylu na fotónoch z kozmického fónového žiarenia nehrozí preto, lebo účinný prierez (alebo ak chcete, pravdepodobnosť zrážky) tohto procesu je zanedbateľný.

Ďalším možným vysvetlením existencie superenergetických častíc môže byť existencia nám nateraz neznámeho relativistického efektu, ktorý by sa mohol prejavovať práve pri extrémnych energiách.

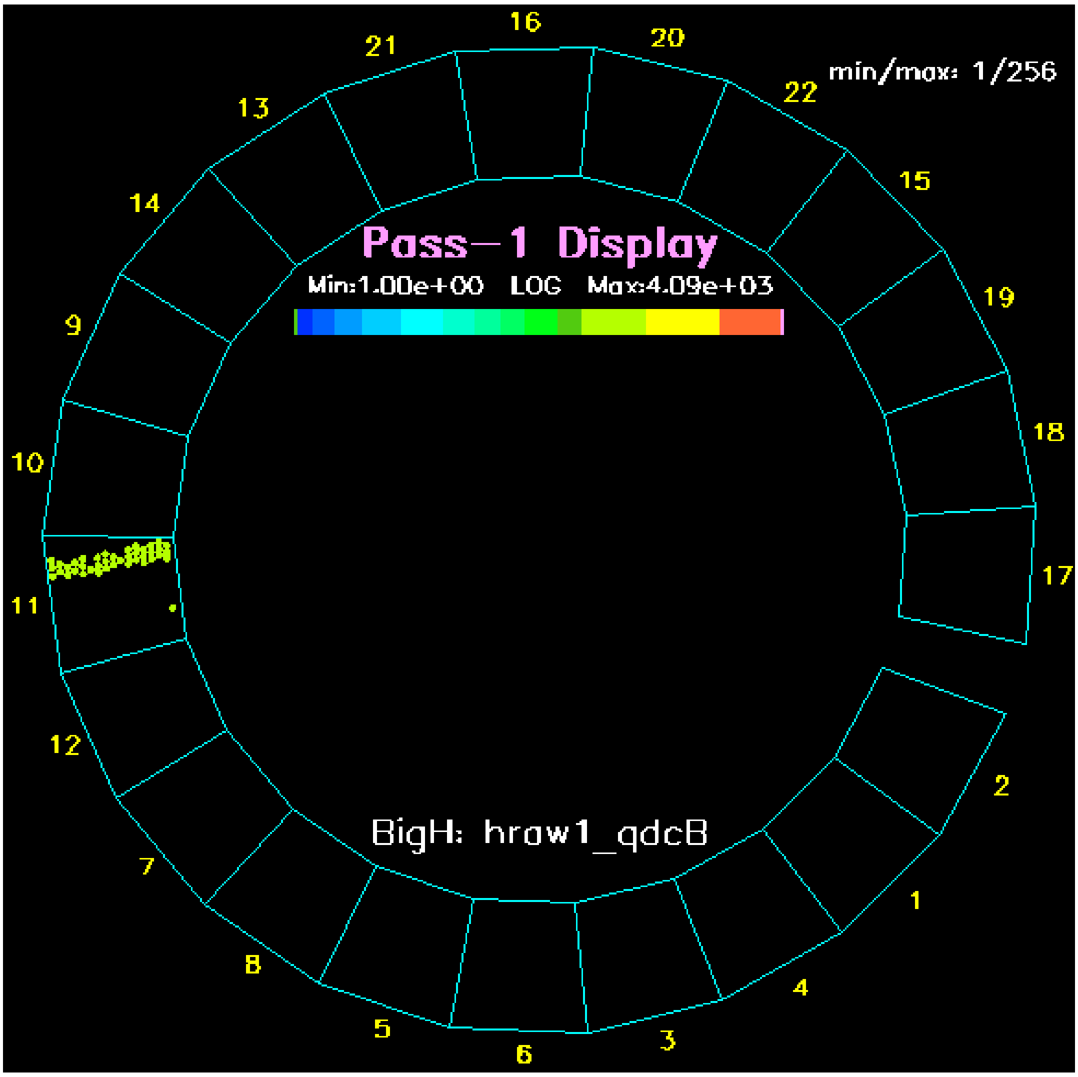
Obr. 2: *Jeden z detektorov* HIRes *komplexu.*

Existuje rad ďalších hypotéz, napr. Farrar a Biermann sa domnievajú, že častice s energiou nad 10^{20} eV sú produktom vzájomnej kombinácie vplyvu galaktických a medzigalaktických magnetických polí s vysoenergetickými časticami pochádzajúcimi z kvazarov.
Kde ale je pravda, dnes nevieme. Cieľ, dozvedieť sa ju, je tiež jednou z hlavných úloh, ktoré stoja nielen pred astrofyzikou, ale aj fyzikou elementárnych častíc.



Obr. 3: *Jedno zo zrkadiel, ktoré odráža svetlo do klastera.*

Obr. 4: *Klaster vo vnútri jedného z detektorov* HIRes *komplexu.*



Obr. 5: *Grafické znázornenie registrovaného prípadu z* HIRes *komplexu.*