RADOMÍR ŠMÍDA

Nadbytek elektronů a pozitronů v kosmickém záření

Mnohem víc, než se očekávalo

Zdá se, že převratné objevy týkající se kosmického záření poslední dobou přicházejí během předvánočního období. V roce 2007 bylo publikováno první pozorování anizotropie směru příletů extrémně energetického kosmického záření, jež vzniká mimo naši Galaxii. O rok později se téměř zároveň objevily dvě zprávy o výsledcích studia kosmického záření, které vzniká v blízkém okolí sluneční soustavy: jedna o přebytku elektronů, druhá o přebytku pozitronů (antičástic elektronů) v kosmickém záření (viz rámeček Elektrony a pozitrony). Oba výsledky mohou vést k změně našeho pohledu na vesmír. Může se ukázat, že jsme poprvé nepřímo pozorovali signál přicházející z částic temné látky. Přestože temná látka tvoří více než 80 procent celkové látky ve vesmíru, nebyla dosud dokázána. Proto každý nepřímý důkaz existence temné látky bude znamenat zásadní objev pro fyziku elementárních částic, astronomii a kosmologii, ale může zanechat stopu i v nepřírodovědných oborech, jako je například filozofie.

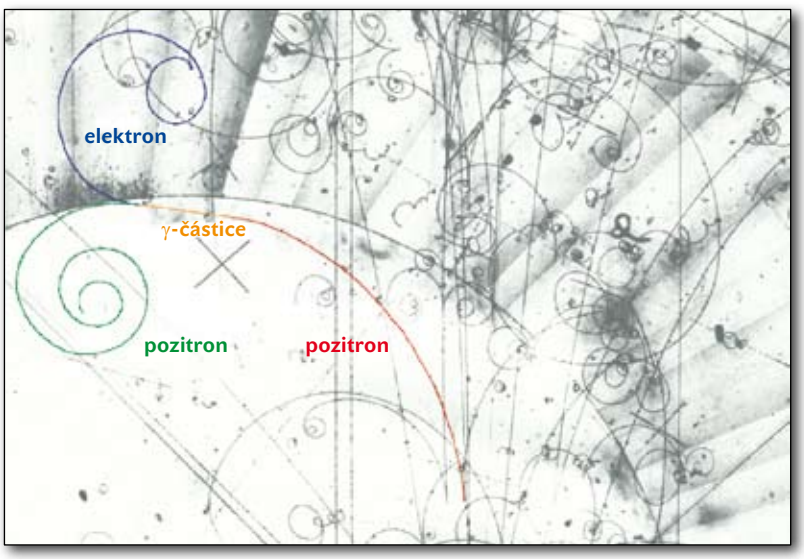
Přestože je pozitron stejně jako elektron stabilní částicí, na Zemi krátce po svém vzniku zaniká anihilací. Anihilace je proces, kdy se antičástice a její částicový protějšek setkají a při tomto setkání zaniknou, nejčastěji za vzniku dvojice gama částic. Protože se v důsledku procesů odehraných během prvních zlomků sekundy po vzniku vesmíru narušila původní rovnováha mezi počtem částic a antičástic mírně ve prospěch částic (baryogeneze), vyskytují se v soudobém vesmíru pouze objekty z částic. Také Země, sluneční soustava i Mléčná dráha jsou poskládány z částic. Antičástice v současném vesmíru vznikají jen při energetických procesech, jež se odehrávají buď v atomových jádrech, nebo při interakcích kosmického záření.

Anihilace může probíhat i opačně, kdy se gama částice (nesoucí energii vyšší než dvojnásobek klidové energie elektronu) přemění na pár elektron-pozitron (obr. 1). Délka života pozitronu pak závisí na hustotě elektronů v prostředí, v němž se pohybuje.

1) GeV = 10^9 eV, 1 TeV = 1000 GeV.

2) 1 parsek = $3{,}1 \cdot 10^{16}$ m.

1. Dráhy elementárních částic vyfotografované v mlžné komoře. Červená křivka sleduje dráhu přilétajícího pozitronu, který se anihilací přemění na gama částici (vysokoenergetický foton), ze kterého vzniká dvojice elektron-pozitron po průletu krátké dráhy (11 cm). Díky přítomnosti magnetického pole se dráha elektronu (modrá křivka) zatáčí opačným směrem než dráha pozitronu (zelená křivka). Obrázek podle http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2002/Bubblech/flight.html.



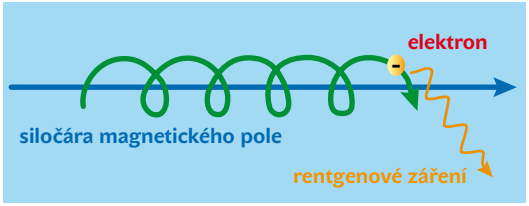
Energetické ztráty elektricky nabitých částic

Částice nesoucí elektrický náboj si nemohou nekonečně dlouhou dobu udržet kinetickou energii a během svého putování vesmírem o ni různými procesy přicházejí. Současná fyzika dokáže popsat procesy, kterými relativistické elektrony a pozitrony mohou ztrácet svou kinetickou energii. Tyto procesy se odehrávají při průchodu částice buď magnetickým polem, nebo hmotným prostředím. V této kapitole budou popsány dva nejvýznamější procesy, které ovlivňují energetickou bilanci elektronů a pozitronů v oblasti energií 1 GeV až 1 TeV.[1]

Rádiová astronomie odhalila přítomnost magnetických polí v okolí hvězd, v prachových a vodíkových mračnech i v mezihvězdném prostoru naší Galaxie. Magnetická pole zatím nejsou dostatečně prozkoumána a v současnosti dokážeme pouze hrubě popsat jejich strukturu, orientaci magnetických siločar a sílu magnetické indukce. Pro studium pohybu kosmického záření s energií v oblasti jednotek až stovek GeV naštěstí stačí základní popis zmagnetizovaných oblastí.

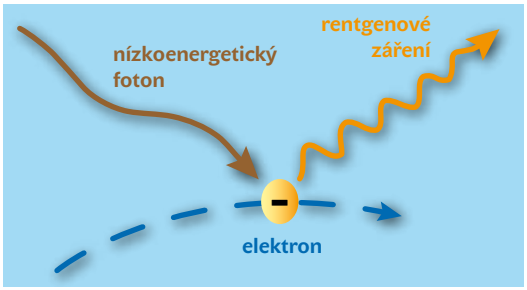
Pro úplnost dodejme, že typická hodnota magnetické indukce magnetických polí v naší Galaxii se pohybuje v jednotkách až desítkách mikrogaussů (1 mikrogauss = 10^{-10} tesla) a jejich typická velikost leží v rozmezí jednotek (typická mezihvězdná vzdálenost) až desítek parseků.[2]

Pohybující se nabitá částice je v magnetickém poli nucena k pohybu kolem magnetických siločar. Částice, která mění velikost nebo směr své rychlosti, vyzařuje elektromagnetické záření – v tomto případě synchrotronové záření (viz obr. 2). Vyzařování má směrovou závislost, ale integrací přes prostorový úhel se dá spočítat celkový vyzářený výkon, a tedy změna kinetické energie zkoumané částice. Synchrotronové záření bylo poprvé pozorováno v galaxii M 87 v padesátých letech minulého století a od té doby u mnoha dalších galaktických i extragalaktických objektů. Protože celkový vyzářený výkon



2. Schematické znázornění vzniku synchrotronového záření při šroubovicovém pohybu elektronu kolem silokřivky magnetického pole.

3. Foton získávající energii na úkor kinetické energie elektronu při inverzním Comptonově procesu.



protonů je o 13 řádů nižší než u elektronů se stejnou energií, dá se předpokládat, že pozorované synchrotronové záření pochází právě od vysokoenergetických elektronů.

K další významné ztrátě energie elektronu dochází při jeho interakci s nízkoenergetickými fotony (rádiové, infračervené a optické záření). Po srážce s elektronem si foton odnáší část energie elektronu a přechází z rádiové oblasti do rentgenové, nebo dokonce až do gama oblasti (obr. 3). Pro přesný výpočet energetických ztrát elektronů musíme znát hustotu fotonů v oblasti, kterou elektron prochází. V odborné literatuře se tento typ interakce nazývá inverzní Comptonův proces.

Současné představy o zdrojích

Pozorování vysokoenergetických elektronů a pozitronů vyvolává otázky o jejich původu. Při podrobném studiu procesů popsaných v předchozí kapitole se dá ukázat, že elektrony a pozitrony s energií několika desítek GeV mohou přicházet jen z velmi blízkého okolí naší sluneční soustavy.

Elektrony by si při putování z oblastí vzdálenějších více než několik stovek parseků neudržely vysokou kinetickou energii a vyzářily by ji dříve, než by doputovaly ze zdroje na Zem. Radiační doba života elektronu (tj. doba, po které elektron ztratí 1/e své kinetické energie, kde Eulerovo číslo $e \approx 2{,}7$) s počáteční energií stovky GeV je řádově sto tisíc let.

Foton by za tu dobu proletěl celou Galaxii. Elektricky nabitý elektron se však nepohybuje po přímé dráze. Pro popsání jeho pohybu v komplikovaném prostředí Galaxie je nevyhnutelné použít přibližný model šíření. Prostor Mléčné dráhy se aproximuje jako soubor oblastí s různou hustotou mezihvězdné látky a náhodnou orientací i velikostí magnetického pole. U zkoumaného elektronu je pak sledována jeho kinetická energie (může ji ztrácet a za příznivých okolností i nějakou získat), interakce s okolní látkou a zakřivení směru vektoru rychlosti v magnetických polích. Z těchto výpočtů pak vyplývá radiační doba života elektronů.

Sousedství sluneční soustavy je dobře zmapováno astronomickými pozorováními. Víme, že se zde nachází několik oblastí, v nichž se vyskytují podmínky pro účinné urychlování elektronů. Jedním z takových míst je okolí jednoho z nejbližších pulzarů, který se nachází v souhvězdí Plachty (latinsky Vela). Tento pulzar obklopený mlhovinou leží ve vzdálenosti 250 parseků od Slunce. Zhruba před jedenácti tisíci lety zde vybuchla supernova a nyní zde pozorujeme rozpínající se oblaky plynu s rychle rotující neutronovou hvězdou uprostřed. Celá tato oblast je tvořena jasnými zdroji v rádiové, optické i rentgenové oblasti.

Přesvědčivým důkazem, že naše představa o urychlování částic kosmického záření na vysoké energie je správná, přinesla pozorování gama částic s energií v oblasti TeV pomocí čerenkovských teleskopů (obr. 4). Přítomnost záření gama s nejvyššími dosud pozorovanými energiemi se vysvětluje srážkami urychlovaných částic kosmického záření (což jsou především protony, které díky menším energetickým ztrátám získají výrazně vyšší energie než elektrony) s atomovými jádry okolní mezihvězdné látky.

Modely pro studium šíření elektronů se dají aplikovat i na studium pohybu jiných částic kosmického záření. Z těchto simulací plyne, že při interakcích částic kosmického záření vzniká velké množství pozitronů, které můžeme pozorovat v okolí Země. Důležité je zdůraznit, že podle našich představ vznikají pozitrony jen jako sekundární částice při procesech v mezihvězdném prostoru. Nepředpokládá se žádný primární zdroj produkující antičástice elektronu.

Měření elektronů a pozitronů kosmického záření

Dnešní měřicí aparatury mají několik nezbytných prvků zaznamenávajících různé vlastnosti zachycených částic (obr. 5). Přesný čas a místo příletu částice vstupující do detektoru je detekován při průletu plastickým scintilátorem. Další součástí aparatury bývá magnetický spektrometr, v jehož magnetickém

K dalšímu čtení

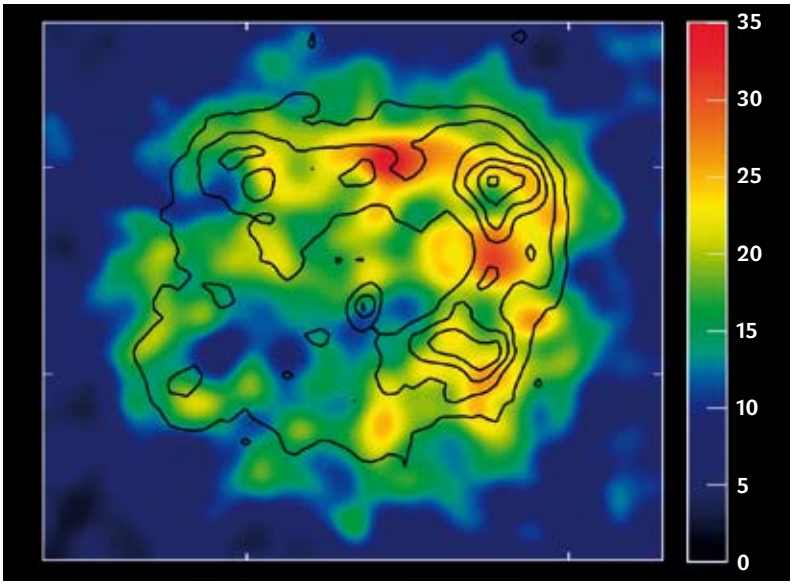
Kobayashi T. et al.: ApJ 601 (2004)
Aharonian F. A. et al.: Nature 432 (2004)
http://pamela.roma2.infn.it/index.php
http://atic.phys.lsu.edu/aticweb/
Adriani O. et al.: An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1,5–100 GeV, Nature 458, 607–609, 2009 (doi:10.1038/nature07942) arXiv:0810.4995
Y. M. Butt: A message from the dark side, Nature 456, 329–330, 2008
J. Chang et al.: An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV, Nature 456, 362–365, 2008
Adriani O. et al.: Phys. Rev. Lett. 102, 051101 (2009)

Radomír Šmída (*1978) se zabývá kosmickým zářením a astrofyzikou v Centru částicové fyziky Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i.

ELEKTRONY A POZITRONY

Elektrony jsou elementární částice, které nás obklopují v běžném světě a ze kterých je poskládán každý z nás. Jsou již dobře prozkoumané. Obíhají v atomech okolo kladně nabitých jader a jejich svět popisuje kvantová teorie. Elektron je nositelem jednotkového elektrického náboje, a proto interaguje s okolím elektromagnetickou silou. Dále na elektrony působí gravitační a slabá síla (odpovědná za rozpady některých atomových jader). Kvůli nízké hmotnosti (klidová hmotnost je $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, což se dá vyjádřit pomocí rychlosti světla c a Einsteinova vztahu $E = mc^2$ jako klidová energie $E = 511$ keV, $1\,\text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J) je gravitační působení hmotných objektů na elektron za běžných podmínek tak slabé, že se dá zanedbat.

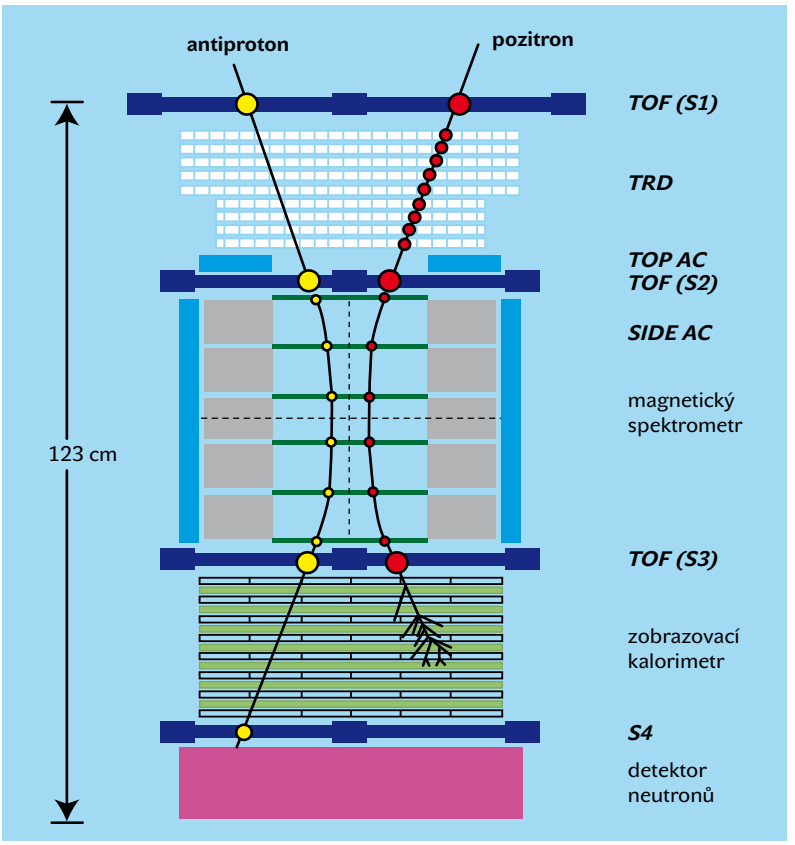
Pozitron byl první teoreticky předpovězenou a poté experimentálně pozorovanou částicí. Jeho existenci předpověděl již v roce 1928 Paul Dirak. O sedm let později zaznamenal Carl Anderson při studování kosmického záření novou částici, která měla stejné vlastnosti jako elektron, jenže měla kladný elektrický náboj. Proto pak tato částice, předpovězená Dirakem, dostala název pozitron. Z Dirakovy předpovědi plyne, že každá částice má svou antičástici, která má stejné vlastnosti jako částice, jen její náboje mají opačné znaménko. V důsledku toho se dráha pozitronu při průletu magnetickým polem zatočí opačným směrem než dráha elektronu.



4. Pozorování objektu se jménem RX J1713.7-3946 teleskopem HESS. Tento objekt byl identifikován se zbytkem po výbuchu supernovy. Barevná stupnice ukazuje změřenou intenzitu zaznamenaných částic gama.

poli s indukcí až 0,5 tesla se zakřivuje dráha nabité částice a velikost zakřivení závisí na elektrickém náboji a rychlosti částice. Pomocí dat z magnetického spektrometru lze rozpoznat různé izotopy atomových jader, odlišit proton od pozitronu nebo elektron od antiprotonu.

Po průletu dalším plastickým scintilátorem, zaznamenávajícím čas a místo průletu, následuje zobrazovací kalorimetr. To je obvykle soubor kovových desek proložených křemíkovými senzory, které zaznamenávají prolétající částice. Elektrony i pozitrony interagují narozdíl od ostatních částic kosmického záření již v první nebo druhé desce za vzniku nových částic. Podélný a příčný profil zaznamenaných sprškek pak dovoluje rozeznat pozitron od protonu s velmi vysokou přesností.



5. Řez družicovým experimentem PAMELA. Zaznamenaný pozitron prolétá postupně jednotlivými detektory až do svého zániku v kalorimetru.

Může se zdát, že je nadbytečné využívat magnetický spektrometr i kalorimetr k rozpoznání částic, ale tento přístup se ukázal jako naprosto nezbytný. V oblasti energií desítek GeV totiž připadá na jeden pozitron přibližně deset elektronů a tisíc protonů.[3]

Záhadný nadbytek elektronů

Poslední a nejpřesnější měření elektronů kosmického záření bylo získáno experimentem ATIC,[4] což je program detekce zastoupení částic v kosmickém záření a jejich energetického spektra během balonových letů nad Antarktidou. I když díky zastoupení různých typů částic byla získána spousta zajímavých výsledků, budeme se zabývat jen měřením elektronů (viz Nature 456, 362–365, 2008).

Elektrony jsou v kosmickém záření zastoupeny v závislosti na energii (obr. 6). Nejvýraznější přebytek elektronů se nachází v rozmezí energií 300 až 800 GeV, kde bylo podle teoretického modelu předpokládáno zaznamenání 140 elektronů, a ve skutečnosti bylo naměřeno 210 elektronů.

Při interpretaci výsledků byly vzaty v úvahu dva odlišné modely vysvětlující tento překvapivý nadbytek elektronů. První z nich počítá s příspěvkem signálu pocházejícího z nejbližších pulzarů a zbytků po výbuších supernov. Pro vysvětlení nadbytku v signálu elektronů však musí zdroje produkovat velmi strmé a úzké energetické spektrum, což žádné známé astronomické zdroje nesplňují.

Pozornost se tak obrátila na model počítající s tajemnými částicemi temné látky (anglicky *dark matter*). Z mnoha astronomických měření (např. pozorování supernov v kosmologických vzdálenostech, měření teplotních fluktuací reliktního záření, sledování pohybu hvězd v galaxiích a pohybu galaxií ve vesmíru) víme, že námi neviděná látka výraznou měrou převažuje nad viditelnou látkou. (Do kategorie viditelné látky se řadí mezigalaktický a mezihvězdný plyn, veškeré hvězdy, planety apod.) Temná látka přitom nebyla ještě nikdy pozorována přímo. Její podstata zůstává jednou z největších záhad současné fyziky. Částice temné látky se nechovají moc „společensky“ při setkání s obyčejnou látkou, neboť jsou k ní netečné a neinteragují s ní. Pouze při vzájemných setkáních částic a antičástic temné látky může dojít k jejich anihilaci. Produktem takové anihilace se mohou stát elektrony spolu s pozitrony.

Některé hypotézy částicové fyziky předpovídají existenci částic temné látky a popisují jejich případné vlastnosti. Takovou hypotézou je např. teorie supersymetrie (SUSY). Ta předpovídá existenci stabilní neutrální částice – neutralina. Pokud by byla předpověď teorie správná, existovalo by v současném vesmíru ohromné množství těchto částic a byly by hlavní složkou temné látky. Avšak jak se ukazuje, neutralina by při vzájemných anihilacích produkovala příliš široké spektrum vzniklých elektronů, a jsou tedy (stejně jako dříve diskutované astronomické objekty) málo pravděpodobnými zdroji pozorovaného hrbolu ve spektru elektronů kosmického záření.

Jako nejnadějnější vysvětlení se jeví anihilace Kaluzových-Kleinových částic. Ty jsou předpovězeny teoriemi, jež popisují svět elementárních částic za pomoci minimálně jedné prostorové dimenze navíc k třem známým prostorovým rozměrům – šířce, hloubce, výšce. Těchto extra-dimenzí může být vícero, což znamená, že množina předpovězených nových částic je docela široká. Anihilace Kaluzovy-Kleinovy částice s klidovou energií 620 GeV může přispívat elektrony, které dokážou dobře popsat jejich nadbytek naměřený balony ATIC.

Ještě záhadnější nadbytek pozitronů

Dne 15. června 2006 odstartovala z kosmodromu Bajkonur ruská raketa Sojuz s detektorem PAMELA[5] na palubě. Tento satelit obíhá na eliptické dráze ve výšce v rozmezí 350 a 610 kilometrů nad povrchem Země se sklonem 30 stupňů vůči zemské ose.

Během zhruba 500 dní (od vypuštění do února 2008) družice naměřila více než jednu miliardu událostí, z nichž více než 150 tisíc bylo identifikováno jako elektrony a 9500 jako pozitrony s energiemi v rozmezí 1,5 až 100 GeV. Jde o dosud největší podíl počtu pozitronů vůči součtu všech elektronů a pozitronů zaznamenaných jedním experimentem. Porovnání s teoretickou předpovědí ukázalo nedostatek pozitronů při nízkých energiích a naopak přebytek pozitronů s celkovou energií vyšší než 10 GeV. Tato teoretická předpověď počítá s produkcí pozitronů pouze při interakcích kosmického záření s mezihvězdnou látkou.

Pozitrony – stejně jako každá částice přilétající z prostorů mimo sluneční soustavu s energií nižší než 10 GeV – obtížně překonávají sluneční vítr, tj. proud plazmy, který směřuje od Slunce do meziplanetárního prostoru a jehož intenzita se mění s 22letým cyklem sluneční činnosti. Jeho přesný vliv na intenzitu částic kosmického záření není zatím přesně znám. Pozorování pozitronů, ale i elektronů nebo protonů v této oblasti energií pomáhá lépe poznat vliv sluneční činnosti na proud částic kosmického záření a také může přiblížit vliv centrální hvězdy naší planetární soustavy na meziplanetární prostor.

Nejpřekvapivějším výsledkem je nárůst podílu pozitronů v intervalu vysokých energií. Tento nárůst je velmi významný a pokračuje až do energie 100 GeV. Pokud pozitrony vznikají pouze při interakcích kosmického záření, očekává se pokles jejich podílu s energií. Není-li tomu tak, musíme si klást otázku, odkud tyto pozitrony přicházejí a jakým mechanismem jsou produkovány. Stejně jako v případě elektronů může jít buď o astronomické zdroje (např. produkce pozitronů v extrémně silných magnetických polích v blízkosti blízkých pulzarů), nebo o možný příspěvek z anihilace temné látky. Příspěvek pocházející z temné látky je však nutné omezit měřením antiprotonů prováděným v rámci stejného experimentu. Antiprotony nevykazují žádný nárůst podílu v kosmickém záření ve stejném rozsahu energií, jako byly měřeny pozitrony.

EXPERIMENTÁLNÍ POZOROVÁNÍ

Především není možné částice kosmického záření pozorovat na povrchu Země, neboť částice kosmického záření neproletí zemskou atmosférou. Měřicí aparatura tak musí být vynesena až nad atmosféru. Máme dvě možnosti, jak vyslat detektory do dostatečné nadmořské výšky. První cestou je vyslání balonů s detektory do stratosféry do nadmořské výšky mezi třiceti a čtyřiceti kilometry. Balony jsou nejčastěji vypouštěny v okolí zemských pólů, kde díky nízké hustotě osídlení nikoho neohrožují při pádu, ale především v blízkosti magnetických pólů proniká kosmické záření nejblíže k zemskému povrchu. Bohužel se dosud daří udržet balony v požadované nadmořské výšce maximálně tři týdny.

Při přesném měření elektronů a pozitronů musí být vzaty v úvahu i částice vzniklé při interakci kosmického záření v zemské atmosféře, jimž se podařilo uniknout pryč do vysoké nadmořské výšky. Takové částice se později mohou podél siločar geomagnetického pole vrátit zpět k Zemi na opačné polokouli. Příspěvek těchto částic znepřesňuje výsledky měření, neboť jsou detektorem nesprávně považovány za částice přilétající z meziplanetárního prostoru.

Z tohoto pohledu je perspektivnější měření na družicových experimentech pohybujících se v nadmořské výšce několika stovek kilometrů. Limitujícím faktorem pro družicové experimenty je cena. Každá měřicí aparatura musí být vynesena raketou anebo raketoplánem, což přináší značné finanční náklady. Z téhož důvodu je omezená i velikost měřicí aparatury. Přitom ve fyzice kosmického záření platí pravidlo: čím větší detekční plocha, tím lépe. Tok přicházejících částic strmě klesá s rostoucí energií, a proto velikost detektoru ohraničuje maximální energii částic, kterou je možné měřit. Kupříkladu k Zemi na jeden metr čtvereční přilétá jen jedna částice s energií 100 GeV, ale částic s energií desetkrát vyšší je již tisíckrát méně.

Zvažme všechna možná vysvětlení

Zdá se, že k nám přilétá výrazně vyšší množství elektronů i pozitronů, než plyne z teoretických očekávání. V případě elektronů měřených experimentem ATIC se měřený přebytek dá nejlépe vysvětlit anihilací částic temné látky. Stejně tak i výsledky satelitu PAMELA by se daly vysvětlit příspěvkem pozitronů pocházejícím z temné látky.

V obou případech je však třeba pečlivě zvážit všechna možná vysvětlení rozporu pozorování s teorií. Nejdříve je jistě potřeba se soustředit na modely šíření kosmického záření v naší Galaxii. Tyto modely, ač velmi propracované, mohou v sobě stále obsahovat nepřesné předpoklady. Naše závěry jsou zatím založeny na porovnání výsledků měření s výsledky právě těchto modelů. Přitom si nejsme jisti, jestli v modelech používáme správné parametry mezihvězdného prostředí, správné zastoupení nukleonů v kosmickém záření, nebo zda jsou správně popsány všechny procesy odehrávající se při vysokých energiích.

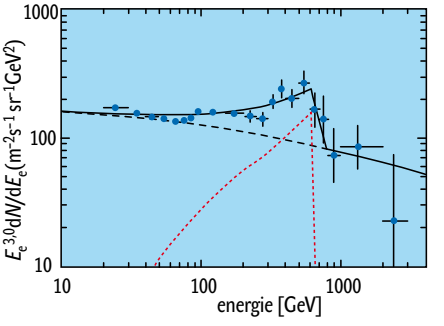
Jistě bude zajímavé sledovat další vývoj pozorování. Družice PAMELA bude pokračovat v měření minimálně do prosince 2009, taktéž se dají očekávat nové balonové experimenty nebo instalace detektoru kosmického záření na mezinárodní vesmírné stanici v dohledné době.

3) Pro úplnost dodejme, že frakce antičástic protonu – antiprotonů – by byla rovna jedné desetině. Protony jsou výrazně majoritním zástupcem v kosmickém záření a je třeba je velmi dobře identifikovat při studiu jiných typů částic. Tento úkol je kruciální zvláště při měření pozitronů, které jsou stejně jako protony kladně elektricky nabité. Právě zkombinováním informací z magnetického spektrometru a kalorimetru se dá dosáhnout požadované přesnosti identifikace protonů a pozitronů.

4) Advanced Thin Ionization Calorimeter.

5) Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics.

Článek vznikl za podpory Grantové agentury AV ČR, grant KJB 300100801.



6. Nadbytek elektronů v kosmickém záření zaznamenaný balonovým experimentem ATIC (modré body). Očekávaný tok elektronů je znázorněn přerušovanou křivkou. Tečkovaná křivka ukazuje možný příspěvek z rozpadů částic temné látky s klidovou energií 620 GeV.