

Kosmické záření

Od balonových výstupů
k částicovým detektorům

MARTINA BOHÁČOVÁ

Na Zemi nepřetržitě dopadá obrovské množství částic kosmického původu. Jejich studiu se věnovalo mnoho významných osobností vědeckého světa a dosažené objevy představovaly velký pokrok pro fyziku částic. Už na počátku 20. století vědce znepokojovalo samovolné vybíjení elektroskopů, pozorované na souši i na moři, daleko od jakýchkoliv radioaktivních materiálů. Ernest Rutherford v roce 1902 zjistil, že vybíjení nastává i u elektroskopů uzavřených v pancéřovém obalu. Samovolné vybíjení je důsledkem elektrické vodivosti vzduchu. Nosiče elektrického náboje (elektrony a ionty) vznikají v neutrálním vzduchu ionizací, jejímž původcem může být nějaké záření. Všeobecně se usuzovalo, že zdrojem je radioaktivita zemské kůry. V roce 1910 jezuitský kněz Theodor Wulf¹⁾ vynesl svůj vylepšený model elektroměru na vrchol Eiffelovy věže a tam, ve výšce 330 metrů, naměřil 3,5 iontu na centimetr krychlový – asi polovinu toho, co bylo naměřeno při zemi. Kdyby šlo pouze o záření gama (nejpronikavější paprsky známé v té době) pocházející ze zemského povrchu, měla by jeho intenzita klesnout na polovinu už v 80 metrech. Musel tedy existovat ještě jiný, neznámý zdroj pronikavého záření. T. Wulf navrhl, aby se pomocí balonu zjistilo, jak vysoko záření proniká, sám se ale k experimentu neodhodlal.

Balonové výstupy

Dobrodružství se zhostil rakouský vědec Victor Hess, který v letech 1912–1913 podnikl deset balonových výstupů a dosáhl výšky přes 5 kilometrů. Část jeho elektroskopů byla vzduchotěsná, tudíž rychlost vybíjení nemohla být ovlivněna změnou tlaku vzduchu. Jeho výsledky později potvrdil Kolhörster ve výšce 9 kilometrů. Překvapivé bylo zjištění, že radiace nejen dostatečně rychle neubývá, ale od výšky asi 800



Victor Hess po návratu ze svého balonového výstupu v roce 1912

metrů dokonce vzrůstá. Nabízelo se jediné vysvětlení – záření pochází z kosmického prostoru. Výstupy byly podniknuty jak za denního světla, tak v noci, a dokonce za částečného zatmění Slunce, ale mezi těmito měřeními nebyl zaznamenán významný rozdíl, což nasvědčovalo tomu, že záření není způsobeno paprsky přímo letícími ze Slunce. (Později byla Hessovi za jeho práci udělena Nobelova cena.)

Deset let po Hessově objevu Robert Millikan se svou skupinou z Caltechu (California Institute of Technology) vyrobil elektrometr, který dokázal zaznamenávat měření na film, a nevyžadoval tedy lidskou obsluhu. Toto zařízení na balonu bez posádky mohlo dosáhnout daleko větších výšek. Millikan pochyboval o mimozemském původu záření a na základě svých měření, která Hessovy a Kolhörsterovy výsledky nepotvrdila, jeho existenci popřel. Ve skutečnosti byla jeho měření zatížena značnou chybou v důsledku změn teploty při klesání a stoupání aparatury. V roce 1925 Millikan své výsledky přeměřil a změnil názor. Sám přišel s pojmenováním „kosmické záření“, a r. 1926 dokonce s vlastní teorií jeho původu. Věřil, že jsou to kvanta gama, pocházející z nukleosyntézy ve hvězdách. Ta by však vzhledem k měřením musela být pětikrát pronikavější než záření gama z radioaktivních rozpadů na Zemi.

Přínos částicových detektorů

V roce 1929 umožnil nový vynález, Geigerův-Müllerův čítač, zvýšit přesnost měření. Elektroměry byly nanejvýš schopny demonstrovat, jestli je záření pří-

1) Křestní jméno patera Wulfa se v různých pramenech liší. Bruno Rossi v knize *Cosmic rays* a autoři z něj vycházející uvádějí jméno Thomas. Jiné zdroje, včetně Wulfa samotného ve *Physikalische Zeitschrift* (1907), uvádějí jméno Theodor. Je ovšem nutno dodat, že většina Wulfových článků je podepsána pouze Th. Wulf, což situaci citujících autorů poněkud ztěžuje.

Mgr. Martina Boháčová (*1971) vystudovala částicovou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze. V rámci postgraduálního studia se ve Fyzikálním ústavu AV ČR zabývá výzkumem kosmického záření extrémně vysokých energií. (e-mail: bohacova@fzu.cz)

SLOVNÍČEK

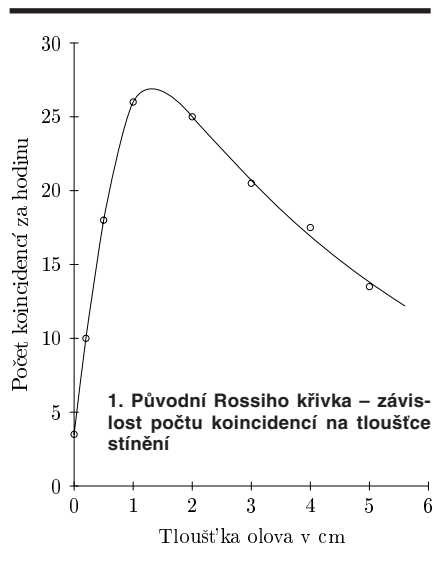
koincidence – aparatura vyšle signál, jen když zaznamená impuls ze všech detektorů v koincidenčním obvodu současně

sprška – vysokoenergetická částice interaguje s materiálem a produkuje množství sekundárních částic, jež jsou samy schopny dále interagovat; sprška se rozvíjí do chvíle, kdy energie vyprodukovaných částic nestačí na vytvoření dalších částic

elektronvolt – eV, energie, kterou získá částice urychlená el. potenciálem jednoho voltu, 1 elektronvolt = $1,6 \cdot 10^{-19}$ joulu

kvantum gama – podle kvantové teorie se energie předává pouze po určitých množstvích neboli kvantech; kvantum elektromagnetického záření se nazývá foton; fotony s energií nad 100 keV se nazývají záření gama

rozpad beta – neutron, ať už volný nebo v jádře, se rozpadá na proton, elektron a antineutrino; při jaderném rozpadu má výsledné jádro stejný počet nukleonů, ale protonové číslo se zvýší o jedničku



Takový proces je málo pravděpodobný. Kvantum gama mohlo také vyrazit elektron takovou silou, že by prošel oběma detektory. Tomu bylo možné zabránit vložením zlaté desky mezi čítače. Přesto však 75 % paprsků stále ještě procházelo oběma přístroji. Další experiment se třemi čítači vyloučil náhodné koincidence nebo mnohonásobný Comptonův rozptyl.

Vědci byli nuceni připustit, že stejná vysoce pronikavá nabitá částice prochází oběma detektory. Podle jejich znalostí ionizačních ztrát byla její energie odhadnuta na 1 GeV ($\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$).

Dosažené výsledky inspirovaly italského fyzika Bruna Rossiho. Umístil tři detektory do trojúhelníka tak, že jedna částice nemohla projít všemi třemi, a nad aparaturu přidal olovené stínění. Měřením shod dokázal, že kosmické záření interaguje v materiálovém prostředí a produkuje celé spršky sekundárních částic schopných dále ionizovat.

Tento výsledek byl plně oceněn spolu s prvními obrázky spršek sekundárních částic z mlžných komor. Rossi pokračoval v detailním studiu kosmického záření. Jeho nejznámějším měřením je závislost počtu koincidence na tloušťce materiálu, ve kterém sprška vznikla. Časové rozlišení přístrojů silně ovlivňuje počet shod. Použití vyššího počtu čítačů snižuje pravděpodobnost koincidence náhodných, avšak určitý počet shod byl zaznamenán, i když bylo odstraněno stínění, v němž se sprška vytvářela. Po několika měřeních v r. 1938 zjistil Pierre Auger, že tyto koincidence nemohou být náhodné a že musí být způsobeny sprškami sekundárních částic vznikajících v samotné atmosféře.

Studium obecných vlastností

Další výzkum kosmického záření byl zaměřen na globální charakteristiky. Jelikož geomagnetické pole ovlivňuje trajektorie nabitých částic, intenzita záření by se měla měnit se zeměpisnou šířkou. Na sklonku dvacátých let se R. Millikan pokusil tento efekt změřit, ale marně. Vrátil se proto zpět k svému názoru, že kosmické částice jsou neutrální. Carl Störmer zkusil vypočítat vliv zemského magnetického pole na přilétající částice. Určováním trajektorií částic přicházejících z různých směrů se snažil vysvětlit úžasný úkaz viditelný občas na severní obloze – polární záři. Správně předpokládal, že je způsobena nabitými částicemi z erupcí na Slunci, ale nevěděl, že geomagnetické pole jejich dráhy zakřivuje natolik, že mohou přiletět z opačné strany. Nicméně jeho výpočty správně popisovaly dráhy energetičtějších

částic ze vzdálenějších zdrojů. Zjistil, že existují oblasti tvaru kužele, v nichž jsou všechny směry přiletu zakázané. Vrcholový úhel kužele závisí jak na energii, tak na zeměpisné šířce přiletu částice. Tento jev se nazývá východo-západní efekt. V letech 1933–1936 Compton tento efekt ověřil dalšími měřeními. Jelikož většina částic přicházela ze západu, usuzovalo se, že většina kosmických částic je nabitá kladně. Dále byl pozorován šířkový efekt, který je způsoben tím, že nabitě částice jsou nuceny se pohybovat po spirále okolo siločar geomagnetického pole. Jako důsledek je pozorováno více částic na pólech. Navíc částice s malou energií nemohou dosáhnout atmosféry v nižších zeměpisných šířkách, takže relativní intenzita kosmického záření se pro různá místa na Zemi liší. Sekundární částice, vznikající s nižší energií, tyto efekty trochu smazávají, ale skutečnost, že je nesmažou úplně, nasvědčuje tomu, že sekundární částice těsně sledují směr letu primární částice.

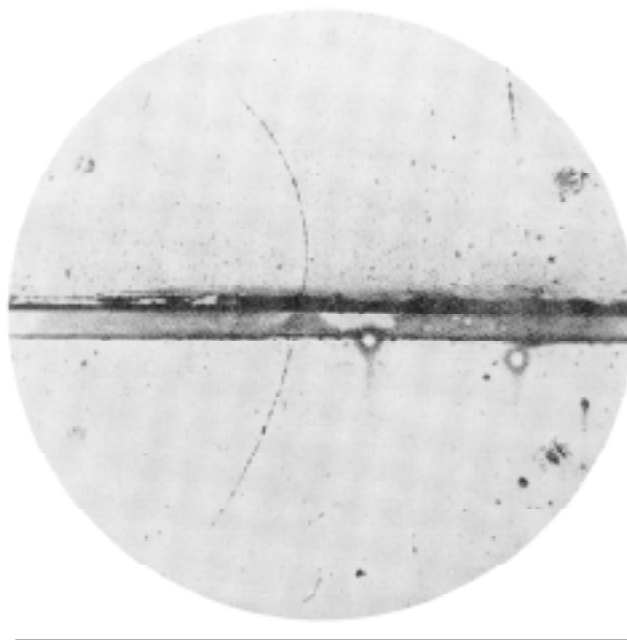
Experimentátoři dělili kosmické záření na měkkou a tvrdou složku. Studium přesného složení a také zúčastněných fyzikálních procesů představovalo opravdový rozkvět fyziky částic. Ve svých dalších výzkumech Rossi našel silnou závislost počtu shod na materiálu stínění. Ionizace a Comptonův rozptyl, tehdy známé procesy ztráty energie, byly ale téměř nezávislé na protonovém čísle materiálu. O novém procesu, brzděném záření, se už vědělo z elektromagnetické teorie záření, nepřikládal se mu však velký význam. Hans Bethe a Walter Heitler tento jev přepočítali s relativistickými korekcemi kvantové teorie a dokázali, že brzděné záření je pro vysoké energie dominantní.

Experimentátoři dělili kosmické záření na měkkou a tvrdou složku. Studium přesného složení a také zúčastněných fyzikálních procesů představovalo opravdový rozkvět fyziky částic. Ve svých dalších výzkumech Rossi našel silnou závislost počtu shod na materiálu stínění. Ionizace a Comptonův rozptyl, tehdy známé procesy ztráty energie, byly ale téměř nezávislé na protonovém čísle materiálu. O novém procesu, brzděném záření, se už vědělo z elektromagnetické teorie záření, nepřikládal se mu však velký význam. Hans Bethe a Walter Heitler tento jev přepočítali s relativistickými korekcemi kvantové teorie a dokázali, že brzděné záření je pro vysoké energie dominantní.

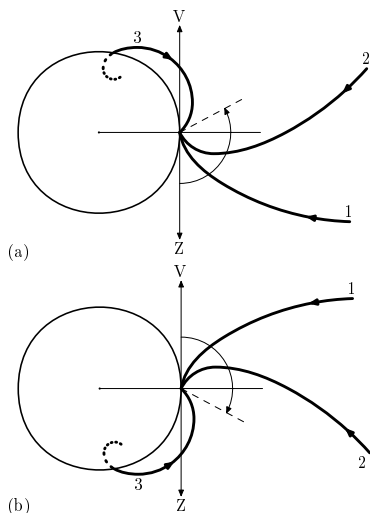
Nové částice

V roce 1932 si Carl Anderson všiml, že část kladně nabitých kosmických částic má hmotnost blízkou hmotnosti elektronu, a usoudil, že by mohlo jít o částice předpovězené Paulem Diracem – pozitrony. Obrázky z mlžných komor potvrdily ještě jednu z Diracových teorií, a to že kvantum gama o dostatečně vysoké energii může interagovat s prostředím a vytvořit elektronově-pozitronový pár.

První Andersonův snímek pozitronu z mlžné komory. Přesycené páry vytvářejí kapičky podél dráhy ionizující částice. Při průletu olovenou deskou (temný pruh napříč snímkem) ztratí částice část svého impulsu a její dráha je pak magnetickým polem v komoře více zakřivena.



2. Dráhy kladně (a) a záporně (b) nabitých částic v rovině geomagnetického rovníku. Magnetické pole míří ven z obrázku. Kladně nabitě částice mohou přiletět ze všech směrů od 90 stupňů západně až po určitý úhel, odpovídající jejich hybnosti, na východ, jako v případě 1, 2. V případě 3 jakoby částice vycházela ze Země – kosmické částice z tohoto směru přiletět nemohou. Kladně nabitě částice tedy přicházejí převážně ze západního směru a záporně z východu.



Tyto dva efekty, vytvoření fotonu brzdným zářením nabitě částice a následné vytvoření páru nabitých částic tímto fotonem, použili Bethe a Heitler ve své teorii elektromagnetických kaskád, v teorii, která vysvětlovala existenci atmosférických spršek pozorovaných Augerem. Část kosmických paprsků s ionizací podobnou elektronu procházela i skrz tlustou vrstvu absorbátoru, což bylo v rozporu s teorií brzdného záření. Idea nové pronikavé částice se shodovala s Yukawovou předpovědí hmotné částice (přibližně dvěstěkrát těžší než elektron), která umožňovala vysvětlit jaderné síly. Částice měla být nestabilní, což vysvětlovalo fakt, že řídký vzduch vysoko v atmosféře absorboval částice lépe než ekvivalentní množství hustého vzduchu při zemi. Na větší vzdálenosti je rozpad pravděpodobnější. Některé vlastnosti této částice však předpovězeným vlastnostem neodpovídaly.

Detekce slabě ionizujících částic ve čtyřicátých letech pokročila díky vývoji fotografických emulzí. Krátce žijící částice zanechávají v jaderných emulzích dráhy viditelné pod mikroskopem. Tímto způsobem bylo zjištěno, že se mezony π vznikající v jádře rozpadají na o něco lehčí leptony μ , čímž se vysvětluje, proč silně interagující záporné piony nejsou opět zachyceny opačně nabitými jádry. Částice pozorované v kosmickém záření nebyly tedy Yukawovy piony, ale slabě interagující, a tudíž pronikavé leptony μ .

Otázka složení kosmického záření

V jaderných emulzích byl později identifikován také mezon K a těžší hadrony. Jelikož všechny tyto částice jsou nestabilní, tvoří sekundární kosmické záření. Miony představují pronikavou složku. Primární kosmické záření je tvořeno převážně protony. Jádra helia jsou zastoupena desetkrát méně a elektrony, pozitrony a kvanta gama tvoří společně nece-

NOBELOVY CENY SOUVISEJÍCÍ S KOSMICKÝM ZÁŘENÍM:

- 1927 CHARLES T. R. WILSON za objev metody zobrazování drah nabitých částic pomocí kondenzace par
- 1936 VICTOR F. HESS za objev kosmického záření
- 1936 Carl D. Anderson za objev pozitronu (při studiu spršek kosmického záření)
- 1948 PATRICK M. S. BLACKETT za zdokonalení metody Wilsonovy komory a za objevy s ní provedené v oblasti jaderné fyziky a kosmického záření
- 1954 WALTHER BOTHE za vynález koincidenční metody a objevy s ní dosažené
- 1958 PAVEL A. ČERENKOV, ILJA M. FRANK a IGOR E. TAMM za práci vedoucí ke konstrukci čítače kosmických částic a za objev a interpretaci Čerenkovova efektu

LAUREÁTI, KTEŘÍ SE VÝZNAMNĚ ZASLOUŽILI O VÝZKUM KOSMICKÉHO ZÁŘENÍ, ALE NOBELOVA CENA JIM BYLA UDĚLENA ZA PRÁCI V JINÉ OBLASTI FYZIKY:

- 1923 ROBERT A. MILLIKAN získal Nobelovu cenu za práci o elementárním náboji a fotoelektrickém jevu a své poznatky využil při studiu základních otázek týkajících se kosmického záření.
- 1949 HIDEKI YUKAWA získal Nobelovu cenu za předpověď existence mezonů na základě teoretického studia jaderných sil a podnítil tak výzkum kosmického záření, ve kterém byly mezony později nalezeny.
- 1950 CECIL F. POWELL získal Nobelovu cenu za fotografickou metodu studia jaderných procesů a objevy v oblasti mezonů; zabýval se zaznamenáváním drah kosmických částic pomocí fotografických emulzí; spoluobjevitel mezonu π .
- 1968 LOUIS W. ALVAREZ obdržel Nobelovu cenu za rozhodující přínos pro fyziku částic, zejména za objev velkého množství rezonančních stavů pomocí metody bublinkové komory; na počátku své vědecké kariéry se věnoval dvěma oborům, optice a kosmickému záření; je spoluobjevitelem východo-západního efektu.
- 1970 HANNES ALFVÉN získal Nobelovu cenu za fundamentální práce a objevy v magneto-hydrodynamice a jejich aplikace v rozličných oblastech fyziky plazmatu; zabýval se pohybem nabitých částic v magnetických polích; v oblasti kosmického záření se zajímal o urychlování částic na extrémní energie, navrhl způsob urychlení, který je dnes znám jako Fermiho mechanismus.

lé 1 % primární složky. Jedinými nestabilními částicemi v primární složce jsou energetické neutrony. V důsledku dilatace času je jejich doba života dostatečně dlouhá na překonání značných vzdáleností.

Na těchto znalostech je možné postavit model produkce sekundárního kosmického záření. Primární částice (nejčastěji proton) interaguje v horních vrstvách atmosféry s atomy vzduchu. V závislosti na energii částice vznikne větší množství hadronů, převážně pionů. Některé z nich mohou opět interagovat s jádry a vytvořit tak hadronovou kaskádu. Nestabilní částice se však vzápětí rozpadají. Miony a neutrina tvoří pronikavou komponentu. Energetické miony mohou snadno dosáhnout povrchu Země, méně energetické se dříve rozpadnou na elektrony a neutrina a přispívají tak k elektromagnetické složce. Na povrchu Země tvoří miony 75 % všech kosmických částic s energií do 1 GeV.

Část sekundárního kosmického záření je tvořena pomalými neutrony, které dávají vzniknout důležité reakci se vzdušným dusíkem. Neutrony jsou zpomaleny srážkami s jádry a následně zachyceny dusíkem. Vzniklé jádro je nestabilní, rozpadá se na ^{14}C a proton. Jádro uhlíku je beta-radioaktivní, rozpadá se s poločasem 5570 let zpět na dusík ^{14}N . Tento radioaktivní uhlík reaguje s kyslíkem a vytváří CO_2 , který pak klesá k zemi a vstupuje do biologických procesů. Archeologická metoda datování je založena na skutečnosti, že je možné určit stáří biologického vzorku (dobu, kdy u něj skončila výměna uhlíku s atmosférou) právě podle množství nerozpadlých uhlíkových jader.

Energie kosmických částic často mnohonásobně převyšují možnosti pozemských urychlovačů. Studium zdrojů a mechanismů urychlování těchto částic je ale ztíženo skutečností, že nabitě částice jsou na své cestě od vzdálených zdrojů rozptylovány v mezigalaktickém magnetickém poli, a zaznamenaný směr přiletu tedy neukazuje směr ke zdroji. Mnoho otázek spojených s původem a šířením kosmického záření tak zůstává i téměř po sto letech výzkumu nezodpovězeno. Díky rozvoji detekčních technik v posledních letech se však kosmickému záření začíná znovu dostávat pozornosti, zvláště v oboru vysokých energií (nad 10 GeV). □