

Záření gama – okno do nejenergetičtějších částí vesmíru

Vladimír Wagner

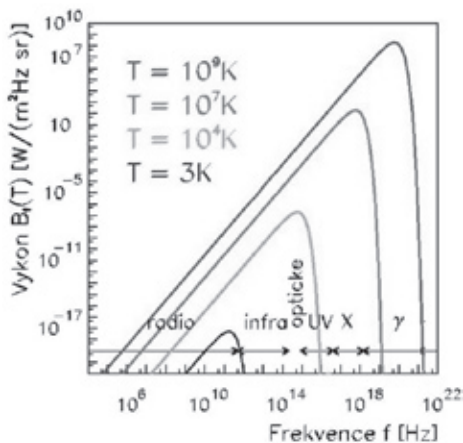
V tomto článku se budeme věnovat zkoumání záření gama, tedy té nejenergetičtější části elektromagnetického spektra. Jeho vznik je spojen s procesy ve vesmíru, při kterých se uvolňují obrovská množství energie. Záření gama tak může být skvělým zdrojem jejich studia. Erupce na Slunci, výbuchy supernov, aktivní jádra galaxií, procesy v blízkosti neutronových hvězd či horizontu černých děr (hvězdných i supermasivních v nitrech galaxií) můžeme zkoumat právě pomocí jejich záření gama. Stejnou službu nám toto záření může poskytnout při určování množství a rozložení antihmoty ve vesmíru a řešení řady dalších velmi exotických otázek struktury a vývoje našeho světa.

Energie fotonů, frekvence a vlnové délky záření gama

Spodní hranice pro energii fotonů záření gama je definována značně volně, i když často se za ni považuje energie fotonu 100 keV. Nepřesnost stanovení hraniční energie mezi rentgenovým a gama zářením je dána tím, že jejich označení je založeno na původu záření.

Jestliže elektromagnetické záření s vysokou frekvencí vzniklo v procesech v elektronovém obalu atomu, mluvíme o rentgenovém záření. Vazebná energie elektronů u prvku s vyšším protonovým číslem však může být větší než výše uvedená hraniční. Pokud bylo záření vyzařeno při procesech v jádře, mluvíme o záření gama, ačkoliv tyto procesy mohou produkovat fotony s menší než hraniční energií.

Následkem toho se fyzika i detekce velmi tvrdého rentgenového záření a velmi měkkého záření gama často překrývají a sondy, které zkoumají vysokoenergetické záření z vesmíru, studují rentgenové a gama záření společně.



Spektra elektromagnetického záření pro různé teploty

Kde záření gama vzniká

Jak jsme si už řekli, je záření gama spojeno s procesy probíhajícími v jádře. V řadě procesů se jádro může dostat do vybuzeného stavu s přebytkem energie, kterého se zbavuje vyzařením jednoho nebo více fotonů záření gama. Přeměna gama, při které se jádro zbavuje energie vyzařením fotonů, probíhá elektromagnetickou interakcí a většinou velmi rychle (řádově 10^{-15} s). Při přeměně gama se vyzařují fotony s přesně danou energií, která je charakteristická pro izotop, který je vyzařuje. Jejich zachycení nám tak umožňuje získat informaci o tom, kde vznikají příslušné radioizotopy.

Také při reakcích částic se mohou produkovat gama fotony. Existují například *rozpady částic spojené se vznikem gama záření*. Energie vzniklých kvant gama je dána klidovou hmotností původní částice. Často se stává, že tyto částice vznikají ve vysokoenergetických procesech při srážkách urychlených částic. Mají tak velmi vysokou kinetickou energii, kterou předávají fotonům vzniklým v rozpadu, a ty mohou pak mít i velmi vysokou energii.

Dále existuje několik možností, jak může už existující foton elektromagnetického záření získat vysokou energii. Jednou z nich je proces, který se označuje jako *obrácený Comptonův rozptyl*. Při něm dochází ke srážce fotonu s nízkou energií a elektronu s vysokou energií, při které předá elektron část své energie právě fotonu. Další možností je *Dopplerův posun* v případě, že se zdroj, který vyzařuje elektromagnetické záření s nízkou frekvencí, k nám extrémně rychle přibližuje.

Při pohybu lehké nabitě částice s rychlostí velmi blízkou rychlosti světla v elektrickém poli dochází k jejímu brzdění nebo urychlení. Přitom částice vyzařuje *brzděné elektromagnetické záření* s frekvencí v oblasti gama. Pokud

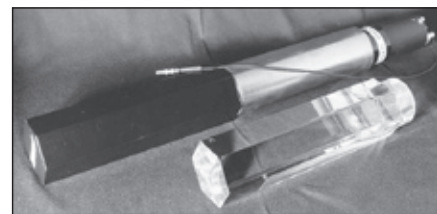
se pohybuje stejná nabitá částice v magnetickém poli, velikost rychlosti se nemění, mění se však směr letu částice a opět se vyzařuje elektromagnetické záření, v případě intenzivních magnetických polí s frekvencemi až v oblasti gama (*synchrotronové záření*).

Záření gama může vznikat i při *anihilaci* probíhající při setkání částice s antičásticí. Nejznámější je v tomto případě anihilace elektronu a pozitronu. Záření gama může také vznikat jako *tepelné záření při extrémně vysokých teplotách*.

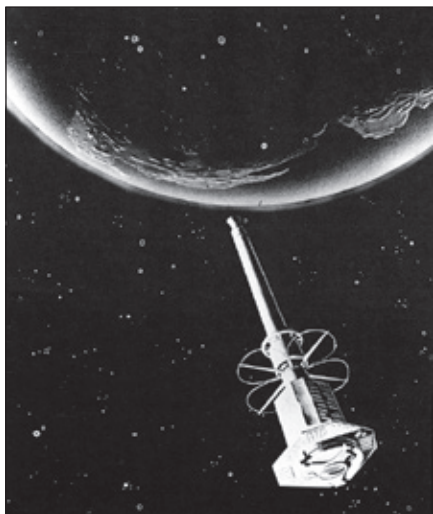
Velmi důležitou informaci, jak vzniklo pozorované záření gama z vesmíru, nese jeho energetické spektrum. Pokud se nám podaří identifikovat, který konkrétní proces stojí za jeho původem, můžeme získat velmi cenné informace o objektu, který je vyzařuje.

Detekce gama záření

Abychom si vysvětlili, jaké detektory se pro zachycení záření gama používají, podívejme se nejdříve na to, jak záření gama interaguje s hmotou. Prvním procesem je *fotoefekt*, při kterém předá foton záření gama veškerou svou energii elektronu v atomovém obalu atomu, a ten vyletí ven. Fotoefekt se s největší pravděpodobností uplatňuje při nízkých energiích a jeho pravděpodobnost rychle klesá s rostoucí energií záření. Druhým procesem je *Comptonův*



Ukázka krystalu BaF_2 využívaného jako scintilační detektor



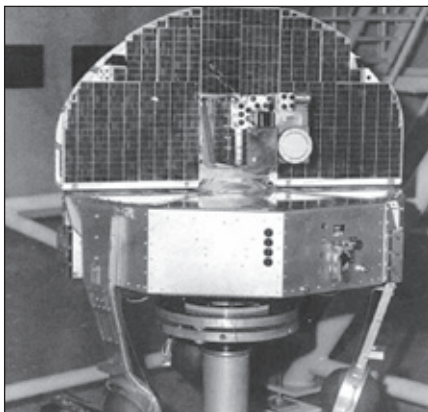
Umělecká představa družice Explorer 11, první sondy zaměřené na detekci gama záření

rozptýl. Při něm se foton záření gama rozptýlí na elektronu a předá mu pouze část své energie. Tento proces se uplatňuje už od nízkých energií, ale dominantním se stává až od jisté energie záření gama, která závisí na protonovém čísle daného materiálu. Třetím procesem je *produkce páru elektronu a pozitronu*. K němu může dojít jen při dostatečné energii fotonu záření gama, protože ke společné produkci pozitronu a elektronu je potřeba energie rovná dvojnásobku klidové energie elektronu.

Ve všech těchto případech je produktem elektron (případně pozitron), který převzal část nebo veškerou energii původního fotonu. Jde o nabitou částici, kterou už lze zaznamenat pomocí ionizace. V případě, že je její energie dostatečně velká na to, aby její rychlost byla velmi blízká rychlosti světla ve vakuu, jde to nejsnáze pomocí Čerenkovova záření. *Ionizace* vzniká při průchodu nabitě částice hmotou, kdy svým elektrickým polem vyráží elektrony z obalů atomů a ionizuje je. *Čerenkovovo záření* pak vzniká, když se nabitá částice pohybuje prostředím rychleji, než se jím pohybuje světlo.

Jednotlivé typy detektorů

Pokud je energie záření gama nízká, překrývá se nebo jen mírně překračuje energii rentgenového záření, používají se scintilační nebo polovodičové detektory. V případě *scintilačních detektorů* vznikají vlivem ionizace i excitované stavy v molekulách, které se vybíjejí vyzářením světla. To lze zachytit pomocí fotonásobičů či fotodiod. Pravděpodobnost fotoefektu velmi prudce roste s protonovým číslem prvku. Vhodnými materiály pro nižší energie jsou CsI a NaI, pro vyšší pak velké krystaly BaF₂, BGO nebo PbWO₄. Scintilační detektory mají velmi



Fotografie družice OSO 3, která jako první zaznamenala gama záření ze Slunce

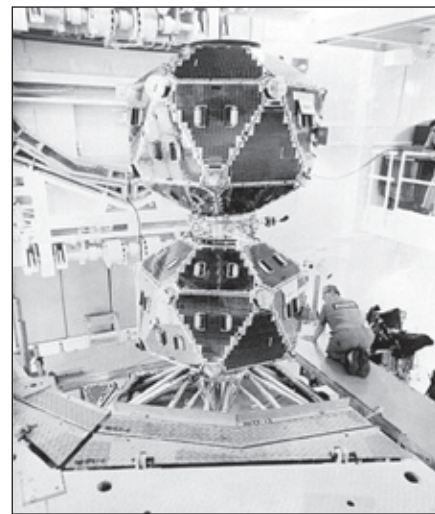
vysokou účinnost detekce, ale energetické rozlišení scintilačních detektorů je relativně nízké.

Detektory polovodičové využívají germanium nebo křemík. Elektron vzniklý v interakci gama produkuje ionizaci dvojice elektron-díra v polovodiči, na kterém je přiloženo vysoké napětí. Vzniklé nosiče náboje jsou tak svedeny a vytvoří signál, jehož velikost je úměrná počtu nosičů. Energetické rozlišení polovodičových detektorů je mnohem lepší než scintilačních, naopak účinnost detekce je u nich mnohem nižší.

Pro vyšší energie fotonů lze také použít už zmíněné scintilační detektory, nebo se dá použít vhodný průhledný čirý materiál, který má velkou pravděpodobnost reakce fotonů a vytvoření elektromagnetické spršky a zároveň umožňuje elektronům a pozitronům vytvářet Čerenkovovo záření, které se zachycuje pomocí fotonásobičů. Typickým materiálem pro výrobu takových detektorů je olovnaté sklo.

Další možností hlavně pro vyšší energie gama je využití vhodného materiálu pro konverzi energie fotonu na energii nabitých částic pomocí Comptonova rozptylu či produkce páru a libovolných detektorů, které jsou schopny detekovat tyto nabitě částice. Při Comptonově rozptylu je shoda směru letu původního fotonu a odraženého elektronu jen částečná, s rostoucí energií se však tato korelace zvyšuje. Pokud určíme směr letu elektronu i pozitronu v párové produkci, můžeme určit směr letu původního gama fotonu i velmi přesně. Pro nízké energie gama můžeme využít toho, že takové záření lze odstínit už relativně slabou vrstvou materiálu a využít pro určení směru vhodnou sestavu kolimátorů.

Velice důležitou vlastností záření gama je jeho polarizace, která na mikroskopické úrovni souvisí s projekcí spinu fotonu do směru jeho



Družice Vela byly první, které zaznamenaly záblesky gama

pohybu. Procesy, ve kterých detekované záření gama vzniklo, do značné míry určují, zda a jakou bude mít polarizaci.

Interakcí kosmického záření v atmosféře vzniká záření gama, které vytváří nežádoucí pozadí. Pokud tedy chceme detekovat záření gama ze zdrojů ve vesmíru, musíme náš detektor od tohoto zdroje odstínit. Stejně tak je třeba odstínit jej od nabitých částic. Toto stínění může být pasivní, když využijeme dostatečně silnou vrstvu materiálu pohlcujícího záření gama a nabitě částice. Často je vhodnější použít stínění aktivní, kdy stínící vrstva slouží jako veto detektor. V případě, že signál zaznamená hlavní detektor i veto detektor, víme že šlo o částici z pozadí.

Počátky vesmírných pozorování

Abychom mohli pozorovat záření gama z vesmíru, musíme detektor vynést mimo atmosféru Země, která velmi úspěšně toto záření pohlcuje a navíc jsou její vnější vrstvy i jeho intenzivním zdrojem. Proto se první úspěšné pokusy o jeho zachycení uskutečnily až s nástupem kosmické éry. První sondou, která byla vypuštěna s cílem zachytit fotony záření gama, byl *Explorer 11*, který se dostal na oběžnou dráhu 27. dubna 1961. Na palubě nesl přístroj, který se skládal ze dvou vrstev scintilačních detektorů citlivých na záření gama (NaI a CsI). V nich foton gama vyprodukoval elektron-pozitronový pár. Tyto částice s kinetickou energií mnohem vyšší, než je jejich klidová energie, pak vletěly do detektoru, který zachytil Čerenkovovo záření. Celá sestava byla obklopena plastikovým scintilátorem, který je citlivý pouze pro nabitě částice. Jako fotony gama pak byly identifikovány pouze případy, kdy nebyl signál v plastikovém

scintilátoru. Bylo získáno pouze devět hodin čistého času měření, během kterých bylo zachyceno 127 gama fotonů. Z nich 105 letělo ze směru od Země. Zbývajících 22 pak přiletělo z vesmíru a šlo o první případy zaznamenaného vesmírného záření gama. Zachycené fotony přicházely z vesmíru izotropně a nepodařilo se identifikovat žádný definovaný zdroj.

První gama záření ze Slunce bylo pozorováno satelity *OSO* v průběhu slunečních erupcí. Intenzivnější pozorování záření gama zahájila družice *OSO 3* vypuštěná v březnu 1967, která zahájila éru sluneční gama spektroskopie. První galaktické záření gama i první záření extragalaktické zaznamenala také družice *OSO 3*.

Ve stejném období zaznamenaly americké vojenské družice *Vela* i vesmírné záblesky gama. Tyto družice byly určeny pro detekci záření gama vznikajícího při jaderných výbuších. Byly vypuštěny, aby kontrolovaly dodržování dohody z roku 1963 o zákazu jaderných zkoušek ve vesmíru, v atmosféře a ve vodě. Družice *Vela 3* a *4* zaznamenaly 2. července 1967 záblesk záření gama, který neodpovídal žádnému jadernému výbuchu. Další družice *Vela 5a*, *5b*, *6a* a *6b*, vypuštěné v letech 1969 a 1970, měly několik detektorů gama obsahujících krystal CsI. Ty umožňovaly detekci záření gama s daleko vyšší citlivostí a hlavně časovým rozlišením. Analýzou rozdílů doby detekce záblesku různými satelity se tak podařilo prokázat, že nepocházejí ze Země ani ze Slunce. Teprve v roce 1973 byly výsledky odtajněny a publikovány v časopise *Astrophysical Journal*.

Záření gama ze Slunce

Ze Slunce přichází záření všeho druhu. Zdrojem záření gama je několik jevů. Jedním z nich je tepelné záření koróny, jejíž teplota dosahuje až

dva milióny stupňů, ovšem v gama oboru už je jeho intenzita poměrně slabá.

Intenzivním zdrojem gama záření jsou naopak sluneční erupce. Při nich dochází k urychlování částic i na značně vysoké energie. Záření gama vzniká v řadě procesů, které jsou s tímto urychlováním spojeny. Tepelné záření vzniká v počáteční fázi erupce a je spojeno s ohřevem plazmy koróny průchodem urychlených částic a dosahuje teplot deset až dvacet milionů stupňů. Při průchodu urychlených elektronů korónou vzniká brzdné záření i záření synchrotronové. Ze studia spektra rentgenového a gama záření si lze udělat představu o teplotách zasažených plazmy, hustotě prostředí v různých částech koróny a intenzitách magnetických polí.

Připomeňme ještě, že zdrojem fotonů gama by mohly být rozpady exotických částic, ať už přímo nebo jako sekundární produkty, například anihilace pozitronů vzniklých z rozpadu těchto exotických částic.

Jen pro úplnost je třeba říci, že našimi současnými družicemi pozorovatelný zdroj záření gama v naší sluneční soustavě je kromě Slunce a Země také Měsíc. Zde záření vzniká v interakcích částic kosmického záření, tentokrát však s pevným povrchem Měsíce.

Sonda Wind

Tato sonda byla vypuštěna v roce 1994 a umístěna do bodu mezi Zemí a Sluncem, který je ideální pro studium slunečního větru. Sonda však studuje činnost Slunce mnohem komplexněji. Ke studiu rentgenového a gama záření na ni byly umístěny dva přístroje. Prvním byl *TGRS* (*Transient Gamma Ray Spectrometer*). Jeho hlavní část je polovodičový detektor z velmi čistého germania (HPGe), který umožňuje studovat rentgenové a gama záření s velmi dobrým rozlišením. Druhý přístroj jsou dva scintilační detektory umístěné v ose rotace na opačných koncích sondy. Jejich energetické rozlišení je nižší. Větší účinnost, konstrukce a umístění detektorů umožňuje nepřetržitě velmi široké pokrytí oblohy. Oba popsané přístroje se vzájemně velmi dobře doplňují.

Sonda Ulysses

Sonda pracovala do 30. června 2009 a byla určena pro podrobné studium Slunce, zejména v jeho polárních oblastech. Na její palubě bylo deset přístrojů. Z hlediska našeho zájmu byl nejdůležitější přístroj *GRB* (*Solar X-Ray/Cosmic-Ray Burst Experiment*). Skládal se ze dvou scintilačních CsI(Tl) detektorů propojených pomocí plastických světlovodů s fotonásobiči. Sonda byla vypuštěna v roce 1990 a s pomocí energie získané při průletu okolo Jupitera se dostala na oběžnou dráhu okolo Slunce, která ji zavedla do velkých vzdáleností od ekliptiky a umožnila jí nerušený pohled na sluneční póly. Během svého devatenáctiletého působení dokončila tři úplné oběhy Slunce. Kromě studia slunečních erupcí pomohla sonda *Ulysses* významně ke studiu záblesků gama. Díky své velké vzdálenosti od Země umožnila ve spolupráci s dalšími meziplanetárními sondami s gama detektory i sondami na zemské orbitě určovat poměrně přesně směr, odkud záblesky gama přicházely.

Sonda RHESSI

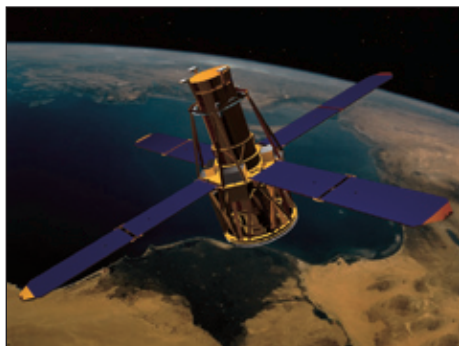
Sluneční sonda *RHESSI* (*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*) je určena pro velmi přesné a detailní studium slunečních erupcí. Soustřeďuje se hlavně na procesy urychlování částic během vzniku a vývoje erupce. Tehdy vzniká rentgenové záření hlavně díky urychleným elektronům a gama záření v procesech spojených s urychlenými protony i těžšími jádry. Sonda byla vypuštěna v únoru roku 2002. Pro velmi přesnou spektroskopii gama měla na palubě devět detektorů z velmi čistého germania (HPGe). Detektory byly podobné tomu, který byl umístěn na sondě Wind.

Tyto detektory jsou součástí teleskopu, který se dále skládá z páru mřížek v předem definované vzdálenosti od detektoru a od sebe. Rentgenové a gama záření se jen velice špatně fokusuje, proto se směr určuje pomocí zmíněných mřížek, které propouští záření gama jen z přesně daného směru. Musí být vyrobeny z materiálu, který je velmi hustý a dobře absorbuje rentgenové a gama záření. V případě mřížek spektrometru sondy *RHESSI* byl použit molybden a wolfram. Jedná se o velmi jemnou strukturu, štěrbiny mřížek jsou jemné jako vlasy. Vzájemná vzdálenost mřížek je 1,7 m a musí být nastavena s velmi vysokou přesností.

Během velmi intenzivních slunečních erupcí se před spektrometr předsouvá pohlcovací clona, která snižuje intenzitu rentgenového a gama záření. Úhlové rozlišení při zobrazování je od zhruba dvou úhlových vte-



Meziplanetární sonda *Ulysses* byla určena především k výzkumu polárních oblastí Slunce, na své dráze však navštívila i Jupiter



Umělecká představa družice RHESSI (vlevo) a fotografie jejích germaniových detektorů (vpravo)

řin v dolní části energetického rozsahu do třiceti šesti v horní. Časové rozlišení dosahuje deseti milisekund. Velmi přesné prostorové, energetické a časové rozlišení umožňuje studovat velmi detailně dynamiku slunečních erupcí a procesy, které za ní stojí.

Záření gama ze vzdáleného vesmíru

Většinou je vznik záření gama spojen s interakcemi vysoce urychlených částic a různými procesy, při kterých se uvolňuje velké množství energie. Je tak velice důležitým prostředkem pro studium takových objektů, jako jsou supernovy, neutronové hvězdy, černé díry. Záření gama vzniká i při anihilaci a je důležitým prostředkem pro studium výskytu antihmoty ve vesmíru.

Záření naší Galaxie

Už v roce 1958 dokazoval P. Morrison význam gama astronomie pro její možné uplatnění při zkoumání toků a interakcí částic kosmického záření ve vzdálených oblastech naší Galaxie. Ovšem teprve po vypuštění družic *SAS-2* v roce 1972 a *COS-B* v roce 1975 se podařilo uskutečnit první věrohodná pozorování. Jejich teleskop byl složen střídavě z wolframových desek a modulů jiskrové komory. Ve wolframu interagovaly fotony gama a rozvíjela se elektromagnetická sprška, v modulech jiskrové komory se pak detekovaly vzniklé elektrony a pozitrony. Teleskop byl obklopen scintilačními detektory, které identifikovaly nabitě částice a pozadí. Obě družice zaznamenaly silné záření gama z galaktického disku, velmi vysoká je intenzita hlavně ve směru od centra naší Galaxie. Na ostatních částech oblohy se pozorovala mnohem slabší intenzita záření gama s daleko rychlejším poklesem intenzity s energií.

Diskrétní zdroje

Už zmíněné družice *SAS-2* a *COS-B* zaznamenaly i první diskrétní vesmírné zdroje

záření gama. Pozdější družice pak objevily řadu dalších. Značná část z nich jsou pulsary a dvojhvězdy obsahující kompaktní složku, na kterou přetéká hmota ze složky druhé. Mezi první pozorované patřil pulsar PSR 0531+21 v Krabí mlhovině.

Zajímavým počinem bylo pozorování záření gama supernovy 1987A pomocí balónového experimentu. Podařilo se poprvé identifikovat záření gama radioizotopů, jejichž produkce se v supernovách do té doby pouze předpokládala.

Mimogalaktické zdroje

Ve vesmíru existují galaxie, jejichž střed je ještě daleko aktivnější než jádro naší Galaxie. Některé z těchto galaxií jsou natolik intenzivními zdroji záření gama, že je možné je pozorovat na velmi velké vzdálenosti. Tyto objekty se souhrnně označují jako blazary a většinou jde o aktivní jádra galaxií a kvazary. Předpokládá se, že za chováním blazarů a dalších typů aktivních galaxií (Seyfertovy, radiové) stojí procesy spojené se supermasivní černou dírou v jejich středu. To potvrzují i relativně rychlé změny v intenzitě těchto zdrojů. Ukazuje se, že hlavním zdrojem budou procesy související s akrecí hmoty do této černé díry a vznik výtrysků hmoty urychlených na relativistické energie. Při těchto procesech se uvolňuje extrémní množství energie a záření gama nám umožňuje nahlédnout pod pokličku právě takových dějů.

Lov antihmoty

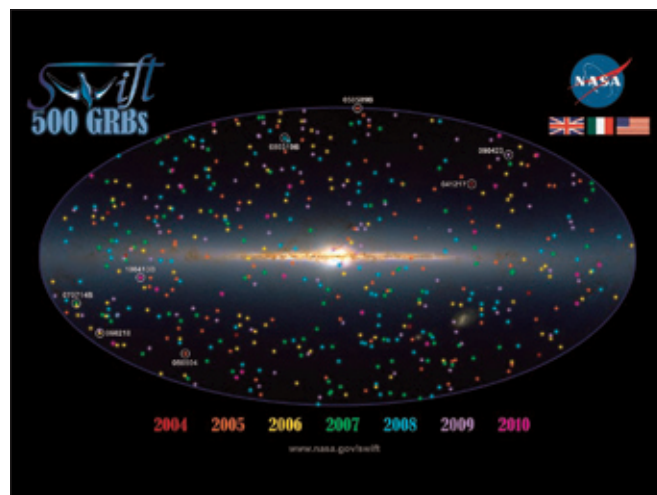
Jak bylo zmíněno, dochází při setkání hmoty

a antihmoty k anihilaci. A při ní vznikají i kvanta záření gama. Buď přímo, jako je tomu při anihilaci elektronu a pozitronu, nebo nepřímo, jako je tomu při anihilaci nukleonů a antinukleonů. Místa, kde se setkává hmota a antihmota, by tak měla být intenzivním zdrojem záření gama. Velice důležitou informací, kterou díky studiu záření gama z vesmíru máme, je, že v pozorovatelné části vesmíru nejsou oblasti složené z antihmoty. Pozorovaná antihmota vzniká pouze v interakci částic kosmického záření.

Lov záblesků gama

Důležitým typem mimogalaktických zdrojů záření gama jsou i gama záblesky. Historii jejich objevu na rozhraní šedesátých a sedmdesátých let jsme už popsali. Přelomovou událostí v jejich zkoumání se stalo vypuštění družice *Compton* v roce 1991. Ta pozorovala během velmi úspěšné mise, která trvala až do poloviny roku 2000, velký počet záblesků gama. Čekání na nový záblesk zkrátila na zhruba jeden den a pozorovala jich dohromady více než 2700. Prokázala, že jejich rozložení je izotropní a není korelováno s rozložením objektů v naší Galaxii. Tak byl potvrzen jejich mimogalaktický původ, a tím i velké vzdálenosti a extrémní hodnoty energie, která se při nich uvolňuje. Důležité bylo pozorování stejných záblesků sondami s gama detektory v různých místech sluneční soustavy.

Přímým potvrzením obrovských vzdáleností zdrojů záblesků gama se stala identifikace jejich protějšků v jiných oblastech spektra. V roce 1997 zaznamenala družice *BeppoSax*, postavená ve spolupráci Itálie a Holandska, rentgenové záření ze záblesku GRB970228. Zároveň se podařilo pozem-



Pětistovka záblesků gama zachycených přístroji družice SWIFT

skými dalekohledy najít i optický protějšek a později identifikovat i hostitelskou galaxii. U záblesku GRB970508 zaznamenaného stejnou družicí se podařilo naměřit spektrum, a z rudého posuvu, způsobeného vzdalováním, určit rychlost tohoto vzdalování a tím i vzdálenost okolo 6 miliard světelných let.

V následujícím roce se podařilo v místě záblesku gama GRB980425 pozorovat supernovu SN1998bw a poprvé tak s velkou pravděpodobností potvrdit souvislost mezi zábleskem gama a supernovou.

První desetiletí nového století bylo ve znamení široké flotily družic zkoumajících záření gama, v čele se sondami *HETE-2* (před dvěma lety ukončila úspěšnou činnost), *INTEGRAL*, *SWIFT* a *Fermi*, vypuštěnými v roce 2000, 2002, 2004 a 2008. Na palubě mají kromě zařízení pro detekci záření gama i přístroje pracující v dalších oblastech spektra. Zároveň jsou údaje o detekci velmi rychle přenášeny k dalším družicím a pozemním observatořím. Tak se daří hledání optických protějšků a dosvitů záblesků gama i identifikace mateřských galaxií. Přibývá

případů se uplatňují asymetrie vznikající intenzivními výtrysky částic urychlených na relativistické energie.

Družice Fermi

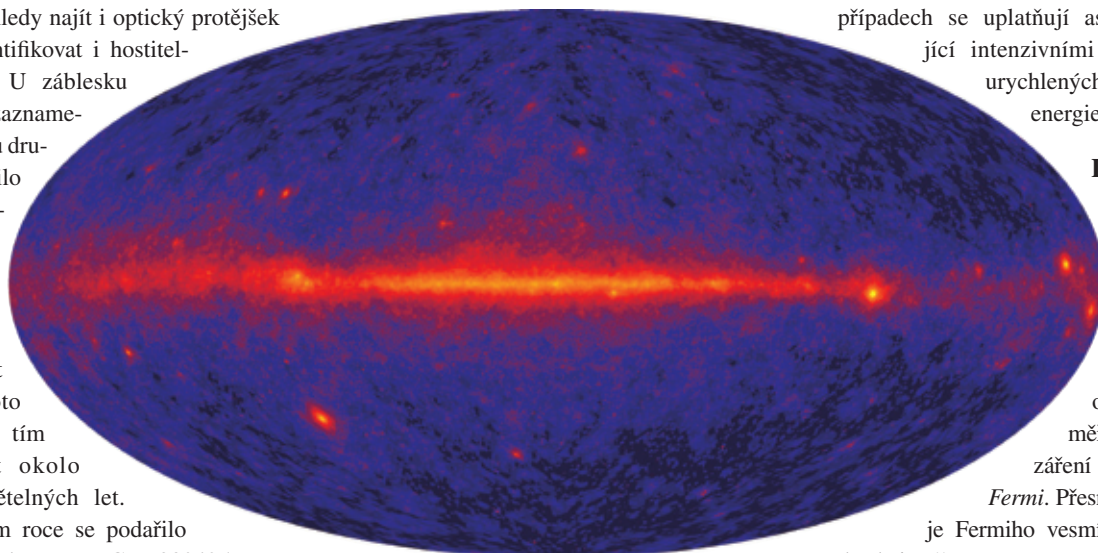
Jednou z nejmodernějších a největších družic, které jsou v současné době na oběžné dráze a zaměřují se na studium záření gama, je sonda

Fermi. Přesnější její označení

je Fermiho vesmírný teleskop pro detekci záření gama *FGST* (*Fermi Gamma-ray Telescope*), přičemž původně se sonda označovala jako *GLAST*. Sonda je společným projektem USA a několika evropských států. Byla vypuštěna v červnu 2008. Je 2,8 m vysoká a její průměr je 2,5 m. Jejími hlavními přístroji jsou *GBM* (*Gamma-ray Burst Monitor*) a *LAT* (*Large Area Telescope*).

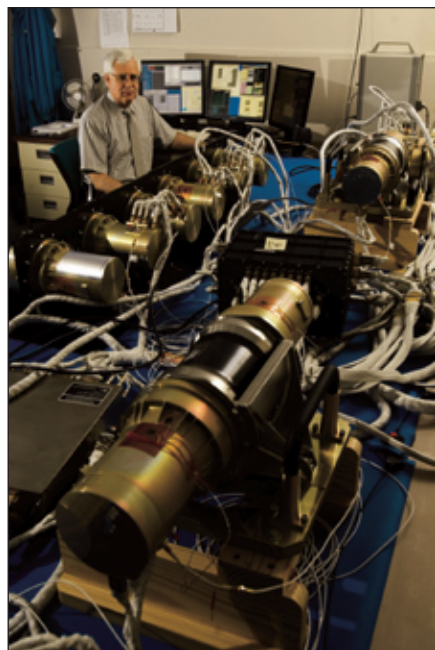
Zařízení *GBM* se skládá ze čtrnácti scintilačních detektorů. Scintilační detektory pokrývají celou oblohu, kromě části, kde vadí pozadí Země a mají velmi dobré časové rozlišení. *Gama teleskop LAT* je zaměřen na detekci fotonů gama s vysokou energií. Jeho hlavním cílem je co nejpřesnější určení směru a času přiletu fotonu gama i jeho energie. Při zorném poli pětiny oblohy je úhlové rozlišení teleskopu zhruba jedna úhlová minuta. Přístroj je třicetkrát citlivější než nejlepší předchozí, které se ve vesmíru objevily.

Sonda *Fermi* představuje vstup gama astronomie do druhého desetiletí tohoto století. Její životnost by měla být nejméně pět let, ale předpokládá se její prodloužení až na deset. Měla by rozšířit počet známých stálých zdrojů záření gama na tisícovku a detekovat každý rok zhruba dvě stě záblesků gama. Kromě mimogalaktických zdrojů gama je naděje, že se zvýší ze současných jednotek až na stovky počet známých pulsarů vyzařujících záření gama. Velmi výhodné je i časování vzhledem ke slunečnímu cyklu. Sonda *Fermi* by mohla v průběhu současného slunečního cyklu pozorovat stovku erupcí. Velkou výhodou teleskopu *LAT* je, že umožňuje studovat gama s velmi vysokou energií. V této oblasti je třeba vyřešit řadu záhad. Cesta k detekci záření gama s ještě většími energiemi však už nevede přes družice, ale musíme sestoupit zpátky na zem.

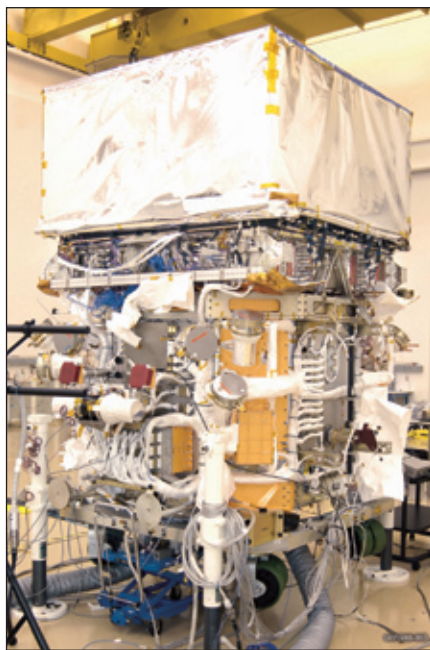


Pomocí družice *Fermi* byl získán obraz celé oblohy v oboru gama

počet záblesků s přesně určenou vzdáleností a případně i související supernovou. V současné době panuje poměrně dobrá shoda, že záblesky můžeme rozdělit na dva typy: krátké záblesky gama s dobou trvání kratší než zhruba dvě sekundy a dlouhé s dobou trvání delší. Zdá se, že se liší nejen některé další jejich charakteristiky, ale mohly by mít i rozdílný původ. O souvislosti těch dlouhých se supernovami se již příliš nepochybuje. O povaze těch krátkých se ještě vedou diskuze, ale často se uvádí možnost, že alespoň část z nich je důsledkem splnutí dvou kompaktních objektů. V obou



Test detektorů monitoru záblesků gama připraveného pro sondu *Fermi*



Celkový pohled na družici *Fermi* v pozemské laboratoři

Pozemní gama astronomie

Se zvyšující se energií záření gama z vesmíru klesá velmi prudce jeho intenzita. Detektory na družicích jsou relativně malé a tak už na zachycení fotonů s velmi vysokou energií nestačí. Vysokoenergetické fotony gama vyprodukují v atmosféře elektromagnetickou spršku. Pokud je energie fotonu dostatečně velká, může být vzniklá sprška natolik mohutná, že její projevy mohou být zaznamenány z povrchu Země.

První možností detekce fotonu vysokoenergetického záření gama je pozorování Čerenkovova světla, které vzniká při průchodu velmi rychlých elektronů a pozitronů elektromagnetické spršky atmosférou. Takové pozorování lze však provádět pouze za bezměsíčné noci s velmi dobrými povětrnostními podmínkami.

Druhou možností je detekce pomocí detektorů zaznamenávajících částice, které se dostanou až na zem. V případě, kdy je prvotní částicí foton záření gama, se vytvoří v atmosféře zmíněná elektromagnetická sprška a na zem tak dopadají hlavně elektrony, pozitrony a fotony. Ty lze pak zaznamenat různými typy detektorů. Aby sprška pronikla až k povrchu, musí být energie původního fotonu dostatečně velká, větší než pro detekci pomocí Čerenkovova záření spršky. Dalším problémem je odlišení elektromagnetické spršky způsobené fotonem a spršky způsobené částicí kosmického záření.

V současnosti jsou nejznámějšími zařízeními pracujícími v této oblasti *H.E.S.S.* (Namibie), *MAGIC* (La Palma na Kanárských ostrovech), *VERITAS* (Arizona) a *CANGAROO III* (Austrálie). Využívají se velká, většinou segmentová zrcadla, která

soustřeďují slabý svit Čerenkovova záření produkovaného elektromagnetickou sprškou v atmosféře. Pro co nejpřesnější určení směru, kterým se pohybovala sprška částic v atmosféře a tedy i směru, ze kterého k nám foton gama přiletěl, je výhodné mít několik dostatečně od sebe vzdálených teleskopů a získat prostorové zobrazení dráhy spršky v atmosféře. Dolní hranice energie pro detekci je dána tím, jestli má foton dost energie, aby v atmosféře vyprodukoval dostatečně velkou a viditelnou elektromagnetickou spršku. Maximální energie je dána velikostí sledované části atmosféry a tím i reálností zachycení fotonů s velmi vysokou energií, kterých je extrémně malý počet. Zařízení *HEGRA*, které bylo menším předchůdcem observatoře *MAGIC*, se proslavilo detekcí zatím nejenergetičtějšího fotonu s energií zhruba 16 TeV, který k nám přiletěl od extragalaktického objektu. Jeho zdrojem byl s největší pravděpodobností blazar Markarian 501.

Jako příklad pozemních detektorů částic spršek lze uvést detekční systém *Milagro*, který je v USA a je přímo zaměřen na detekci vesmírného záření gama s extrémními energiemi. Druhým je experiment *AUGER* v Argentině, který je zaměřen hlavně na detekci nabitých částic kosmického záření extrémních energií (viz článek J. Ebra v tomto čísle). Podrobný článek M. Prouzy o přístrojích pozemní gama astronomie vyšel v *Astropisu* 3/2007.

Závěr

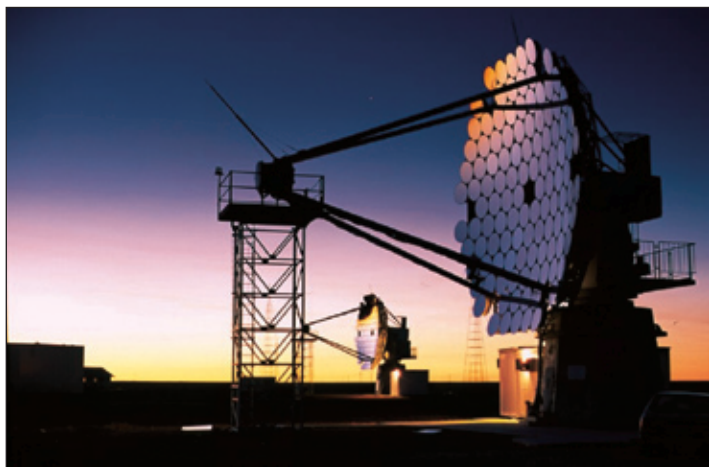
Je vidět, že studium vesmíru v gama okně udělalo od svých počátků v šedesátých letech obrovský pokrok. V současnosti pokrývají



Gama observatoř *Milagro* v USA je vlastně velký vodní bazén

vesmírné i pozemní přístroje obrovský rozsah energií. Umožňují studovat jevy a objekty spojené s těmi nejenergetičtějšími procesy, které ve vesmíru probíhají. Při těchto procesech se produkují i nabitě částice kosmického záření s velmi vysokou energií. Obrovskou výhodou pozorování vysokoenergetického záření gama však oproti nim je, že jeho pohyb není ovlivněn magnetickými poli, které se v mezihvězdném a mezigalaktickém prostoru vyskytují. Tak lze určit směr, kde leží jeho zdroj, a identifikovat příslušný vesmírný objekt. Jedním z největších objevů v této oblasti jsou záblesky gama a potvrzení souvislosti alespoň části z nich se supernovami.

Velmi důležitým aspektem je velice efektivní spolupráce mezi přístroji, které studují různé oblasti frekvencí elektromagnetického spektra. Řada současných družic nese na palubě přístroje pro pozorování různých oblastí spektra. Informace o detekci záření gama se rychle předávají dalším observatořím a umožňují efektivně hledat protějšky záblesků gama v jiné oblasti spektra a identifikovat jejich původce.



Teleskopy observatoře pro detekci záření gama s velmi vysokou energií *CANGAROO III* v Austrálii



Observatoř záření gama s velmi vysokými energiemi *MAGIC* je umístěna na La Palma na Kanárských ostrovech