

Projekt AUGER v České republice 2 002

Petr Schovánek, Miroslav Palatka, Martin Vlček, Miroslav Hrabovský
Společná laboratoř optiky UP a FzÚ AV ČR, Olomouc
Jiří Grygar, Jan Řídký, Ladislav Soukup, Michael Prouza, Martina Boháčová
FzÚ AV ČR, Praha
Dalibor Nosek, MFF UK, Praha

Tento příspěvek navazuje na článek uveřejněný v JMO, 46, 2001. Autoři přinášejí podrobnější pohled na účast pracovníků Výzkumného centra částicové fyziky na významném mezinárodním projektu pro studium vysokoenergetických částic kosmického záření, observatoře Pierre Auger.

1. Úvod

Již několik desítek let poutá pozornost teoretických fyziků a astrofyziků problém, který je spojen s detekcí částic kosmického záření o tak vysoké energii, že podle všech zatím známých pravidel fyziky nedokážeme jejich existenci vysvětlit. Takových případů nebylo sice až do současné doby potvrzeno mnoho, ale na experimentech jako jsou Fly's Eye, Haverah Park, AGASA či HiRes bylo pozorováno asi 20 těchto vyjímečných eventů, potvrzujících existenci částic kosmického záření o energii vyšší než 10^{19} elektronvoltů. Dosud není znám fyzikální princip ani zdroj částic, který by byl schopen dodat částici tak vysokou energií. Navíc, podle GZK kriteria, nazvaného podle pánů Greisena, Zatsepina a Kuzmina, by takový hypotetický zdroj musel ležet na kosmická měřítká v relativní blízkosti naší Země. Jinak by tato vysokoenergetická částice díky interakcím s mikrovlnným pozadím vesmíru ztratila část své energie a na velké vzdálenosti by již putovala s energií nižší jak oněch kritických 10^{19} elektronvoltů. Toto jsou tedy otevřené otázky, na které současná fyzika zatím marně hledá odpovědi [5]. Nové poznatky k těmto problémům by mohl přinést právě budovaný projekt, který nese jméno Pierre Auger a do kterého jsou zapojeni i vědci z České republiky.

Objevitelem kosmického záření se stal Victor Hess roku 1912. Ne, že by předtím nebylo toto záření známé, ale fyzikové se mylně domnívali, že pochází z nitra naší Země. Právě roku 1912 uskutečnil vídeňský fyzik Victor Hess na našem území blízko Ústí nad Labem řadu balónových letů /obr.1/, při kterých chtěl měřit úbytek tohoto záření s nadmořskou výškou. Ke svému obrovskému překvapení zjistil pravý opak a převratný objev byl na světě. Neznámé záření nepřichází ze Země, ale z vesmíru.

Co se tedy děje při vstupu vysoce energetické částice do naší atmosféry? Samozřejmě se srazí s nějakou molekulou vzduchu, s největší pravděpodobností dusíku, který je v atmosféře nejvíce obsažen, taková srážka vede k produkci dalších takzvaných sekundárních částic. V atmosféře tak vzniká postupně se rozrůstající sprška mnoha miliónů částic, původně iniciovaná pouze jednou /obr.2/. A to je jev, který se snažíme pozorovat a ze kterého určujeme fyzikální vlastnosti primární částice jako je její směr příletu a energie. Objevitelem těchto vzdušných spršek byl právě Francouz Pierre Auger, který si během svých experimentů v Alpách v roce 1939 všimnul, že dva detektory vzdálené od sebe několik desítek metrů signalizují průlet nabitých částic přesně ve shodný čas a musejí tedy spolu nějak souviset.

Projekt Pierre Auger je velice rozsáhlý, jak objemem prací, které bude třeba vykonat, tak ekonomicky, jeho realizace nezbytně vyžaduje širokou mezinárodní spolupráci. U počátků projektu stáli pánové Alan Watson z Anglie a nositel Nobelovy ceny Jim Cronin z USA, kteří si uvědomili, že zatím neexistuje zařízení pro pozorování kosmického záření, které by bylo schopno pracovat na dvou různých na sobě nezávislých principech detekce. Výhody takového pozorování jsou zřejmé již na první pohled. Pokud dojde k detekci spršky (eventu) na obou detektorech mohou být výsledky vzájemně porovnány a celkový pohled na studovaný jev bude ucelenější. Navíc data z jednoho typu detektoru mohou sloužit ke kalibraci druhého. Budované hybridní zařízení bude schopno využívat data z pozemního Čerenkovského a z atmosferického fluorescenčního detektoru.

Fluorescenční detektor je určen k pozorování nanosekundových světelných pulsů o vlnové délce kratší než 400nm. Kosmickým zářením excitované molekuly atmosferického dusíku při návratu na svou původní energetickou hladinu vyzařují fotony, v atmosféře tak vznikají záblesky ultrafialového světla, které jsou pozorovatelné citlivými fotonásobiči fluorescenčního detektoru. FD je navržen tak, že čtyři skupiny zrcadlových teleskopů vhodně umístěné na vyvýšených místech sledují rozvoj spršek sekundárního záření v atmosféře, pozorování z různých úhlů přináší prostorovou informaci. Tyto spršky budou současně pozorovány přímo na zemském povrchu. Zde bude vybudována 3000 kilometrů čtverečních rozsáhlá síť speciálních barelů naplněných superčistou vodou, ve kterých při průletu částic spršky vzniká takzvané Čerenkovovo záření, opět pozorovatelné citlivými fotonásobiči /obr.3/. Vlastnosti spršky jsou pak měřitelné jednak z velikosti zasažené plochy a jednak z rozdílů časů detekce v jednotlivých barelech.

Vhodné místo pro výstavbu tohoto detektoru bylo nalezeno na jižní polokouli v rozsáhlých a téměř pustých pampách Argentiny. Výstavba byla zahájena roku 1999 a předpokládaný termín dokončení je rok 2005. Poté by měl být identický detektor vystavěn i na severní polokouli v americkém státě Utah. Dostavba druhého hybridního detektoru na severní polokouli by umožnila sledovat spršky od částic přicházejících z celého vesmíru.

2. Fluorescenční detektor.

Podobně jako je nezbytné, aby do realizace tak rozsáhlého projektu, jakým AUGER je, bylo zapojeno mnoho vědců z řady zemí z celého světa, pracuje na projektu v rámci Výzkumného centra částicové fyziky několik institucí z České republiky. Především k získávání, opracování a interpretaci dat z detektorů je zaměřena práce kolegů z FzÚ AVČR a MFF UK. Schopnost vyrobit zrcadla pro fluorescenční detektor kvalifikovala do projektu AUGER pracovníky SLO. V počáteční fázi jednání o vstupu České republiky do projektu jsme se mohli opřít o pozitivní reference z výroby zrcadlových systémů pro projekty CAT a CELESTE ve francouzských Pyrenejích [4]. Později jsme mohli uplatnit i zkušenosti s návrhy a výpočty optických systémů

Optická soustava fluorescenčního detektoru musí splňovat následující požadavky. Musí mít poměrně velké zorné pole, požadováno je 30 x 30 stupňů. Detekovaný optický signál je velmi krátký a slabý. Proto je potřeba, aby měl teleskop velkou vstupní aperturu, která pojme maximum energie ve vlnovém rozsahu cca 300 – 400 nm. Toto záření je potom optickou soustavou fokusováno do ohniskové plochy teleskopu, kde je umístěn detektor tvořený maticí rychlých fotonásobičů vysoce citlivých v uvedené ultrafialové oblasti spektra. Vedle velké vstupní apertury teleskopu je logickým požadavkem minimalizace relativní apertury, která by měla mít hodnotu minimálně $f_{no} = 1$.

Původním návrhem [1] bylo využít vlastnosti optické stavby poměrně dlouho známé v klasické astronomii pod názvem Schmidtova kamera a to ve variantě bez tzv. korekční desky. Základní vlastností této soustavy je skutečnost, že prakticky nemá definovanou optickou osu a zjednodušeně řečeno jedinou aberací mající vliv na tvar stopy v zastavovací rovině je otvorová vada, která je stejná pro všechny úhly dopadajícího záření (předmět v nekonečnu). Stopa optického svazku (spot) má stejnou velikost pro celé zorné pole soustavy, přičemž ohnisková plocha je koncentrická se zrcadlem (Petzvalova křivost).

Jak již bylo uvedeno, detektor je tvořen maticí fotonásobičů. Tyto fotonásobiče šestiúhelníkového průřezu jsou rozloženy na ploše cca 900 x 800 mm, přičemž tato plocha je kulová, tak jak vyplývá ze základních vlastností Schmidtovy stavby.

Každý fotonásobič kamery tvoří prakticky jeden pixel detekční plochy ne nepodobné svou funkcí CCD snímači. Velikost „pixelu“ byla určena na hodnotu 1.5 úhlového stupně [5]. Dovolená úhlová velikost otvorové vady soustavy teleskopu byla stanovena na 0.5 úhlového stupně. Pro zvolený poloměr křivosti zrcadla soustavy $R = 3400$ mm je potom velikost spotu definovaná otvorovou vadou a to průměrem spotu blízkým hodnotě 15 mm.

Konečný optický systém fluorescenčního detektoru prošel od svého prvního návrhu kvalitativním vývojem na kterém se naše pracoviště celou dobu výrazně podílelo. Jeho optické schéma a zjednodušený 3D pohled je vidět na následujícím obrázku č.4 .

Zrcadlo soustavy má přibližně čtvercový tvar o rozměru cca 3600 x 3600 mm. Pro zjednodušení výroby zrcadla (limity výrobní technologie) bylo nutné rozdělit plochu na menší segmenty šestiúhelníkového tvaru přičemž průměr opsané kružnice jednoho segmentu přesahuje 600 mm. Dovolená hodnota celkové vady zrcadla daná velikostí spotu umožnila podstatně minimalizovat tloušťku segmentu zrcadla na hodnotu 15 mm. Tato tloušťka, sice nedovoluje udržet kvalitu funkční plochy zrcadla, která dosahuje hranice tzv. difrakčního limitu, ale pro dané použití překračuje požadavky projektu. Přitom díky malé tloušťce segmentu jsou úspory na váze celého zrcadla značné a umožňují tak zjednodušení nosné konstrukce, manipulace a pod. Dílčí zrcadlové segmenty lze zařadit mezi tzv., ultralehká zrcadla.

Bylo by jistě možné rozdělit zrcadlo na segmenty jiného tvaru než šestiúhelníky. Šestiúhelník se ale tvarem podobá kruhu, což je tvar optimální z hlediska klasických metod opracování skleněných polotovarů.

Na přibližně čtvercové segmenty se rozhodli rozdělit zrcadlo kolegové v projektu z Německa a další spolupracující skupina z Itálie. Volbu tohoto tvaru umožnila odlišná technologie výroby a tou je u německých zrcadel jednohrotové diamantové obrábění hliníkového polotovaru, kdy není uplatňován rotační pohyb obráběné části. Italové zase potřebný poloměr křivosti segmentů zrcadel dosahovali technikou tzv. propadání rovinných polotovarů. Na základě náročných testů všech zrcadlových segmentů bylo rozhodnuto použít první dva typy zrcadel. Na následujícím obrázku č.5 je zrcadlo prototypu fluorescenčního detektoru, které je z poloviny sestaveno z německých „čtvercových“ hliníkových zrcadel a našich skleněných šestiúhelníkových. Tento „hybrid“ byl sestaven pouze pro zkušební testy.

Během analýz optických vlastností soustavy teleskopu byla tato doplněna o prvek všeobecně nazývaný v rámci projektu korekčním prstencem. Idea vylepšit optické vlastnosti soustavy zařazením tzv. Schmidovy desky nemohla být plně využita vzhledem k velkému zornému poli soustavy, což vede pro velké dopadové úhly k razantnímu nárůstu aberací vyššího řádu. Byla ale přijata myšlenka zařadit do soustavy korekční prvek prstencového tvaru, který zvýší světelnost celé soustavy a přitom budou zachovány maximálně dovolené příčné aberace, reprezentované dovoleným průměrem světelné stopy (spotu) 15 mm pro zorné úhly do 20 stupňů. Řešení tohoto úkolu se ujalo několik zahraničních skupin, přičemž jako konečná byla přijata verze navržená na našem pracovišti. Výsledkem je prvek, který přibližně dvojnásobně zvyšuje plochu vstupní apertury a tedy i původní světelnost soustavy při zachování maximálního průměru spotu 15 mm pro úhly zorného pole 0 – 20 stupňů. Relativní apertura vzrostla na hodnotu cca $f_{no} = 0.7$.

Velké rozměry tohoto asferického prvku kladou vysoké nároky na jeho výrobu, kterou zpočátku otestovali kolegové z Karlsruhe, kteří použili technologii jednohrotového diamantového obrábění speciálního akrylátu. Vyroběný prototyp potvrdil funkčnost tohoto prvku v soustavě teleskopu. Jeho finální podoba je vidět z obr. č.4 . Prsteneček je z technologických důvodů rozdělen na 24 segmentů shodného tvaru.

Výrobu prstenců převzali kolegové z Brazílie, kteří se rozhodli pro aplikaci klasické optické technologie a akrylát byl nahrazen optickým sklem. Materiál vhodný pro použití v soustavě musí zajistit maximální propustnost vlnových délek v rozsahu 300 - 400 nm. Dostupnost takových materiálů je velmi omezená a proto je i jejich cena vysoká.

Základní optická stavba teleskopu fluorescenčního detektoru je dále doplněna o ochranný optický filtr pro pásmo 300 – 400 nm, který je umístěn v blízkosti korekčního prstence. Je použito filtrové sklo fy Schott, konkrétně UG6.

3. Skleněná zrcadla pro fluorescenční detektor

Požadavky na parametry jednotlivých segmentů zrcadla jsou zřejmé z předešlého odstavce. Metodou konečných čtverců jsme provedli pevnostní výpočty a po zvážení technologických možností jsme se rozhodli pro výrobu zrcadel o tloušťce 15 mm.

Technologie výroby začíná ve sklárnách Kavalier na Sázavě, kde již tradičně skláři lisují pro naše potřeby polotovary zrcadel. Polotovary jsou ze SIMAXU, což je sklovina podobná ve světě známému PYREXU. Volba skloviny není náhodná, SIMAX je velice dobře opracovatelný, má výborné pevnostní charakteristiky a je tepelně i chemicky stabilní. V neposlední řadě lidé v Kavalieru opravdu rozumí svému řemeslu a našli si cestu k chápání našich často velice specifických požadavků.

Výlisky jsou v optické dílně SLO dále opracovány v několika krocích klasickou optickou technologií pomocí volných brusiv a leštiv /obr.6/. Neobvyklé množství technologických problémů zásadního významu jsme museli vyřešit vzhledem k nestandardním rozměrům segmentů. Opracování zrcadel s průměrem opsané kružnice 630 mm vyžaduje nejen strojní vybavení odpovídajících rozměrů, ale velice často zcela jiné technologické postupy, než jsou obvyklé pro běžnou optickou praxi.

Další samostatnou kapitolou ve výrobě zrcadel pro FD je napařování tenkých vrstev. Rozhodli jsme se pro klasické odporové napařování reflexní hliníkové vrstvy kryté ochranou vrstvou SiO_2 , kterou napařujeme pomocí elektronového děla. Rozměry a hmotnost zrcadlových segmentů a nutnost umístit zrcadlo při napařování vrstev nad zdroje napařovaných materiálů nás vedla k rozhodnutí o konstrukci a výrobě napařovací aparatury podle našich specifických požadavků.

Úspěšný provoz napařovací aparatury je úzce svázán s vytvořením čistých prostor pro její provozování. Z tohoto důvodu jsme přestavěli a technologicky vybavili několik místností v budově SLO.

V průběhu výrobního procesu je soustavně sledována kvalita technologických operací. Kvalita opracování odrazné plochy zrcadla je testována pomocí Ronchi testu a nožovým testem. Na obrázku č.7 je snímek zrcadla na Ronchi testu. Reflektivita zrcadel je kontrolována pomocí komparačního reflektometru, kdy je porovnávána naměřená hodnota s hodnotou získanou na testovacím zrcadle pro určenou vlnovou délku. Na grafu č.1 jsou hodnoty reflektivity zrcadel pro první dva fluorescenční detektory, které jsme již odeslali do Argentiny k namontování na FD. Následující graf č.2 dokumentuje rozptyl hodnot rádiusů zrcadlových segmentů okolo nominální hodnoty 3 400 mm.

Rozhodujícím kritériem pro posuzování kvality ploch zrcadel je velikost stopy svazku po odrazu na zrcadle v rovině středu křivosti zrcadla. V textu jsme uvedli, že zrcadlové segmenty řadíme do kategorie nezobrazovacích optických prvků, proto jejich použitelnost pro daný účel posuzujeme podle schopnosti přenést světelný bod umístěný ve středu křivosti zrcadla na plošku v téže rovině. Vzhledem k velikosti pixelu kamery (45 mm) a teoretické hodnotě velikosti otvorové vady celého teleskopu (15 mm) překračuje kvalita zrcadel, s běžně dosahovaným průměrem odražené stopy do 1,5 mm, stanovené požadavky s velkou rezervou.

4. Postup prací na projektu

Projekt AUGER přešel v současné době z fáze testování do fáze stavby definitivního zařízení. V první etapě byla postavena budova pro první FD (Los Leones obr.8.), ve které byly nainstalovány dva prototypy teleskopů [6,7]. Budova pro druhý FD (Coihueco) je těsně před dokončením. Pro testy pozemního detektoru bylo nainstalováno 40 výše zmíněných vodních kontejnerů s fotonásobiči.

Byla prověřena funkčnost obou typů detektorů a odzkoušena technologie pro korelaci naměřených dat. Na obrázku č.9 je jeden z eventů získaných na FD. Za potvrzení schopnosti projektu dosáhnout vytyčeného cíle, lze považovat zaznamenání eventu o energii 47 EeV, což je prahová hodnota energií částic, které jsou předmětem zájmu projektu.

Ještě v letošním roce předpokládá časový harmonogram prací na projektu osazení teleskopů na FD Los Leones a Coihueco tak, aby byl využit stereoeffekt pozorování atmosféry mezi dvěma detektory a tím byly zvětšeny možnosti prostorové identifikace zdrojů částic kosmického záření.

Další zvyšování počtu detekčních vodních kontejnerů pozemního detektoru až do plánovaného počtu 1 500 bude výrazně zvětšovat pravděpodobnost zaznamenání průchodů částic s velmi vysokými energiemi.

Projekt bude dokončen v roce 2 005, jeho plánovaná životnost je 15 let.

Poděkování

Těchto výsledků bylo dosaženo za finančního přispění:
Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy podporou projektů výzkumu a vývoje LN00A006 a LA 134
Grantové agentury AV ČR podporou projektu A 1010928.

Literatura

- [1] Cordero, A. et al : Proposal for the Optical System of the Fluorescence Detectors of the Auger Project, GAP-1996-036,
- [2] Palatka, M. et al : Bifocal Optical System of the Schmidt Camera. (Design of the Corrector Ring), GAP-2000-002, www.auger.org/admin-cgi-bin-woda-gap_notes.pl
- [3] Palatka, M. et al : Analysis of Possible Substitution of the Aspheric Surface of the Corrector Annulus by a Shape with Simpler Production Technology, GAP-2000-003, www.auger.org/admin-cgi-bin-woda-gap_notes.pl
- [4] Schovánek, P., Vlček, M., Hrabovský, M., Palatka, M.: Podíl Společné laboratoře optiky UP a FZÚ AV ČR v Olomouci na stavbě atmosférických optických detektorů vysokoenergetických částic kosmického záření. *Jemná mechanika a optika* 2 (2001) 60- 6
- [5] The Collaboration Pierre AUGER Project: Technical Design Report 2001, <http://tdpc01.fnal.gov/org/tdr/index.html> – v tisku
- [6] Matthiae, G.; THE PIERRE AUGER OBSERVATORY COLLABORATION, Optics and Mechanics of the Auger Fluorescence Detector, Proc. 27th ICRC, Hamburg, Germany, August 2001, Copernicus Gesellschaft, Vol.HE, pp.733-736, 2001.
- [7] Klages, H.; THE PIERRE AUGER OBSERVATORY COLLABORATION, Calibration of the Auger Fluorescence Telescopes, Proc. 27th ICRC, Hamburg, Germany, August 2001, Copernicus Gesellschaft, Vol.HE, pp.741-744, 2001.
- [8] www.AUGER.org