

## DEFORMATION OF THE MIRROR SEGMENTS FOR FLUORESCENT DETECTOR IN PIERRE AUGER OBSERVATORY BY ITS OWN WEIGHT

M. Pech\*, M. Hrabovský\*, P. Schovánek\*, M. Palatka\*, L. Nožka\*, M. Vlček\*,  
J. Řídký†, J. Grigar†

**Summary:** *The Pierre Auger Observatory is designed for study of the universe's highest energy showers, which evolve in high layers of atmosphere, where an elementary particle strike with energy above  $10^{19}$  eV. One of the detection technique of this showers is to observe it by fluorescent detectors, which are able to record the cascade development where the secondary particle cause atmospheric nitrogen to fluoresce. This detectors are optical telescopes, mirror in the each of them is composed of 60 hexagonal ultrathin segments. An example and result of tilt-dependence analysis of this segments in gravitational field of the Earth are here presented.*

### 1 Úvod

V současnosti snad nejdiskutovanější problém na poli astrofyziky a kosmologie je původ vysokoenergetických částic, které se šíří vesmírem a také dopadají na naši planetu. Tyto částice jsou především protony, neutrony, jádra atomů a neutrina s energií i více než  $10^{20}$  eV  $\sim 16$  J (dodnes bylo detekováno asi 20 těchto eventů - projekty Fly's eye, AGASA, HiRes). Pro srovnání na pozemských urychlovačích byly zatím vyprodukovány částice s energií  $10^{12}$  eV. Pro teoretiky je existence takových energetických částic značným překvapením, neboť by se v okolí naší Sluneční soustavy neměly vyskytovat. Jak ukázal pan Greisen a nezávisle na něm pánové Zatsepin a Kuzmin, částice s tak velikou energií mají poměrně krátkou střední vzdálenost doletu, jelikož interagují s fotony reliktního záření a tím za vzniku pionů postupně přicházejí o energii až na onu kritickou hranici  $10^{19}$  eV [1]. Střední vzdálenost doletu pro částici s energií  $10^{20}$  eV je 30 Mpc a pro větší energie tato vzdálenost prudce klesá. Ve spektru kosmického záření existuje tzv. GZK cut-off - spektrální intenzita u energie  $5 \times 10^{19}$  eV má zlom a poté s rostoucí energií prudce klesá. Limitní vzdálenost pro potenciální zdroj těchto částic je 100 Mpc, což je asi hranice nám "dobře známého" vesmíru (střední vzdálenost nejbližší kupy galaxií v souhvězdí

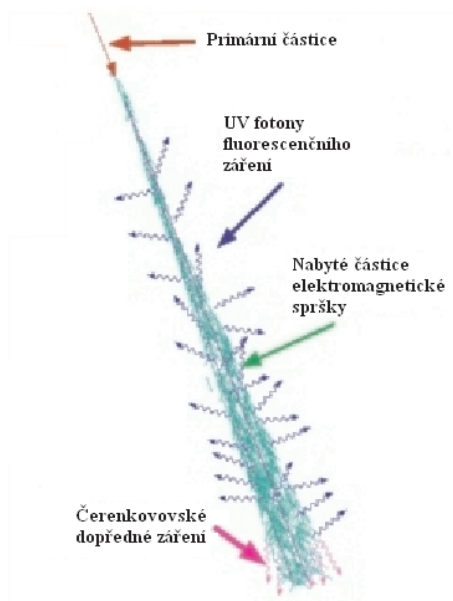
\*Mgr. Miroslav Pech, RNDr. Petr Schovánek, RNDr. Miroslav Palatka, Mgr. Libor Nožka, Mgr. Martin Vlček: Společná laboratoř optiky Olomouc, Tř.17 listopadu 50, 77900 Olomouc, tel.+420585631520, fax.+4205224047, email: pech@sloup.upol.cz

†RNDr. Jan Řídký, CSc., RNDr. Jirí Grygar CSc. Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21, Praha 8, tel.+420266052666, fax.: +420286585443, email: pra-hep@fzu.cz

Panny je 150  $MPC$ ). Tyto částice tedy nemohou vzniknout ve vzdálenosti větší než je několik desítek  $MPC$ , ale na druhé straně je nemyslitelné, že by se takové zdroje vysokoenergetických částic již dávno neidentifikovaly v jiných energetických oblastech (viditelné, rádiové nebo rentgenové záření). Z těchto úvah plyne nutnost detekce takovýchto částic a určení jejich trajektorií, abychom mohli pomocí klasické astronomie určit zdroj tohoto záření.

Již v roce 1912 rakouský fyzik Victor Hess v Ústí nad Labem vyletěl v balóne s ionizační komorou do výšky 5300  $m$  a proti očekávání zjistil, že intenzita ionizačního záření s výškou roste, čímž dokázal, že záření má původ ve vesmíru a ne uvnitř Země. Za tento objev dostal v roce 1936 Nobelovu cenu. Objevitelem atmosférických spršek byl v roce 1938 francouzský fyzik Pierre Auger, který zjistil, že dva od sebe vzdálené detektory mají časté časové koincidence v průletu nabitých částic, a tak musí tyto částice spolu souviset. Z tohoto faktu usoudil, že vysokoenergetická částice se v horních částech atmosféry rozpadá na kaskádu sekundárních částic, které po mnohonásobném rozpadu dopadají na povrch Země.

Sekundární částice při průletu atmosférou ionizují molekuly  $N_2$ , které následně září v blízké UV oblasti ( $300 \div 400 \text{ nm}$ ). Pomocí detekce tohoto fluorescenčního záření a dopadnutých částic je možné zjistit směr, ze kterého tato částice dopadla do atmosféry, a tedy i zdroj, ze kterého částice pochází. Částice s tak obrovskou energií téměř neovlivňují okolní magnetická pole, a tedy prostorem se šíří téměř po přímce [2].



Obrázek 1: Příklad spršky sekundárních částic

## 2 Projekt Pierre Auger

Observatoř Pierre Auger je celosvětový projekt, na kterém se podílí asi 300 vědců z 50 institucí v 19 zemích. Tento "detektor nové generace" má za cíl detekovat vysokoenergetické částice z vesmíru a s velkou přesností určit zdroje těchto částic. Na počátku projektu stáli prof. Alan Watson a nositel Nobelovy ceny Jim Cronin, kteří si byli vědomi toho, že ještě nevznikl projekt, který by obsahoval oba dva známé způsoby detekce - pomocí sítě pozemních Čerenkovových [3] a atmosférických fluorescenčních detektorů [4]. Záblesky ultrafialového ionizačního záření jsou sledovány čtyřmi vhodně umístěnými skupinami teleskopů tak, že máme možnost dostat prostorové informace, jak o této spršce, tak i o energii prvotní částice. Po dopadu spršky sekundárních částic na povrch Země jsou tyto částice detekovány soustavou 1600 barelů se superčistou vodou v níž jsou pozorovány záblesky Čerenkovova záření fotonásobiči. Tyto barely jsou rozprostřeny do sítě na ploše  $3000 \text{ km}^2$ . Takto velká plocha je pro tento projekt nezbytná, neboť průměrný tok částic s energií nad  $10^{20} \text{ eV}$  je asi 1 částice na  $1 \text{ km}^2$  za století! Informace o vlastnostech spršky jsou získatelné z velikosti zasažené oblasti a z rozdílů časů dopadu na pozemním detektoru a z jasnosti a směru fluorescenční stopy detektorem fluorescenčním. První část projektu je vybudování tohoto hybridního detektoru na jižní polokouli, a to v neobydlených pampách Argentiny. Dokončení první části je plánováno na rok 2005. Pokud experiment bude mít očekávané výsledky, připravuje se stavba obdobného detektoru na severní polokouli, pravděpodobně v USA ve státě Utah.

Stavba projektu na jižní polokouli v Argentině je prozatím v první etapě, je nainstalováno 40 Čerenkovových detektorů. Byly také postaveny dvě budovy pro fluorescenční detektory, první "Los Leones" je již osazena dvěma prototypy teleskopů a druhá budova "Coihueco" je těsně po dokončení. Zatím bylo zaznamenáno 78 hybridních eventů, z toho tři byly s energií vyšší než  $10^{19} \text{ eV}$ , přesně měly 2, 9, 3, 3 a  $4, 0 \times 10^{19} \text{ eV}$ .

### Technická data projektu:

- Cíl měření: Určit typ, energii a směr příchodu částic primárního kosmického záření s energiemi vyššími než  $10^{19} \text{ eV}$
- Druh detekce: Hybridní observatoř
  - pozemní síť vodních Čerenkovových detektorů
  - soustavy atmosférických fluorescenčních teleskopů
- Četnost detekcí: 30 detekovaných spršek za rok, vyvolaných primárními částicemi s energiemi vyššími než  $10^{19} \text{ eV}$
- Umístění observatoří:
  1. Malargüe, provincie Mendoza, Argentina, jižní polokoule, dokončení v roce 2005
  2. plánuje se pravděpodobně v USA, ve státě Utah, severní polokoule
- Pozemní detektor:

- Pokrytá plocha:  $3000 \text{ km}^2$  na každé polokouli
- Počet detekčních barelů: 1600 na každé polokouli
- Typ detektoru: detektor Čerenkovova záření, každý obsahuje 12 000 litrů čištěné vody a tři fotonásobiče
- Vzdálenost mezi detektory:  $1,5 \text{ km}$

- **Fluorescenční detektor:**

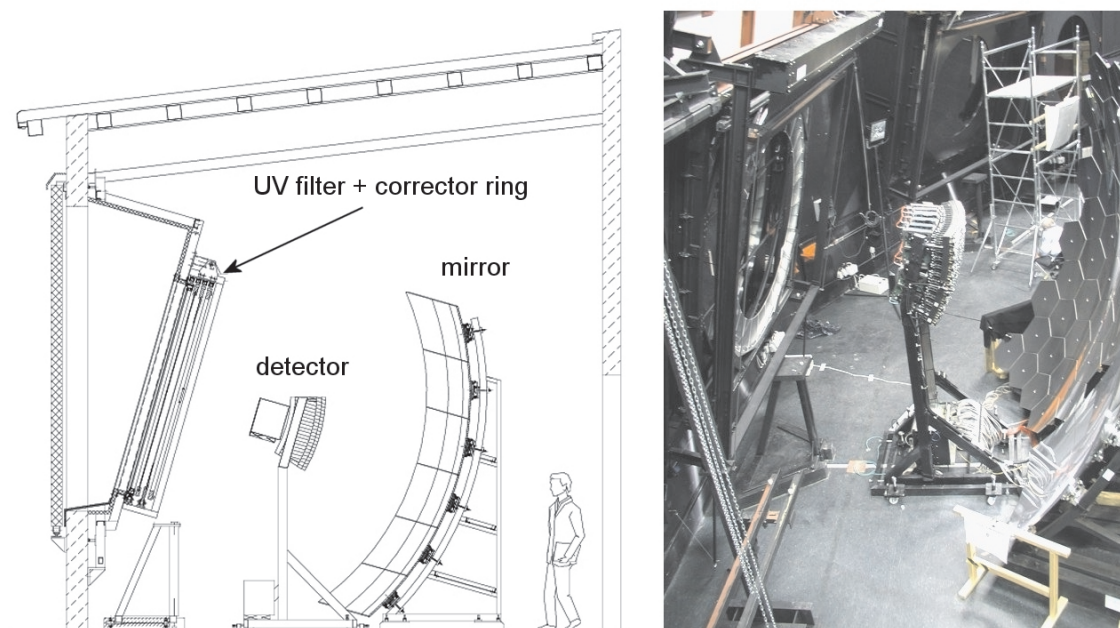
- Počet: 24 teleskopů umístěných ve čtyřech budovách
- Dosah:  $20 \text{ km}$  pro spršky s energií  $10^{20} \text{ eV}$
- Druh teleskopu: Schmidtova komora, se segmentovaným sférickým zrcadlem s  $R = 3400 \text{ mm}$ :
  - \* 12 teleskopů po 60 hexagonálních skleněných segmentech
  - \* 12 teleskopů po 36 čtvercových hliníkových segmentech
- Parametry teleskopu: zrcadlo s rozměry  $3,6 \text{ m} \times 3,6 \text{ m}$ , zorné pole  $30^\circ \times 30^\circ$ , elevační úhel  $16^\circ$ , každý teleskop je vybaven 440 fotonásobiči.

### 3 Fluorescenční detektor

Pro detekci fluorescenčního záření je použito soustavy 24 teleskopů umístěných ve čtyřech budovách. Všechny budovy budou na umístěny se 6 teleskopy na okraji sledované oblasti, takže budou mít zorné pole  $180^\circ$ , čímž se dosáhne stereoskopického pozorování spršek. Každý z těchto fluorescenčních teleskopů je v principu Schmidtova komora (v současnosti největší na světě) [5] - ve vstupní kruhové apertuře o průměru  $2200 \text{ mm}$  je korekční prstenec, primární zrcadlo je sférické s poloměrem křivosti  $3400 \text{ mm}$  a jako detektor je použita matice šestiúhelníkových fotonásobičů ( $900 \times 800 \text{ mm}$ ) uspořádaných na kulové ploše. Tato konfigurace má tu vlastnost, že mimoosové zobrazení má stejnou aberaci jako zobrazení na ose. Fotonásobiče jsou uspořádány tak, aby tvořily kameru s rozlišením  $1,5^\circ$ , přičemž povolená velikost spotu způsobená aberacemi je  $0,5^\circ$ , v ohniskové rovině je to  $15 \text{ mm}$ . Ve vstupní apertuře dalekohledu je dále ochranný optický filtr propustný v pásmu  $300 \div 400 \text{ nm}$ .

### 4 Zrcadla pro fluorescenční detektor

Úkolem našeho pracoviště je výroba zrcadel pro 12 těchto teleskopů, zbylých 12 vyrábějí němečtí kolegové a to technologií jednobřítového obrábění diamantovým nástrojem z hliníkových výlisků sendvičové konstrukce. Výrobní technologie u nás vyráběných zrcadel se více blíží výrobě klasických astronomických zrcadel až na to, že pro tuto aplikaci nejsou tak velké nároky na kvalitu zobrazení. U zobrazovacích astronomických dalekohledů je třeba v zájmu stability optické plochy zachovat poměr průměr:tloušťka minimálně  $15 : 1$ , takže naše zrcadlo o průměru opsané kružnice  $630 \text{ mm}$  by muselo mít tloušťku  $42 \text{ mm}$  a tím i váhu asi  $40 \text{ kg}$ . Vyráběná zrcadla mají tloušťku  $15 \text{ mm}$ , čímž se značně zmenší váha na  $4,7 \text{ kg}$  a tím i sníží požadavky na konstrukci teleskopu, ale tím se i zvětší možnost tvarové deformace pod vlivem vlastní váhy.



Obrázek 2: Konstrukce fluorescenčního detektoru

### Charakteristiky zrcadel:

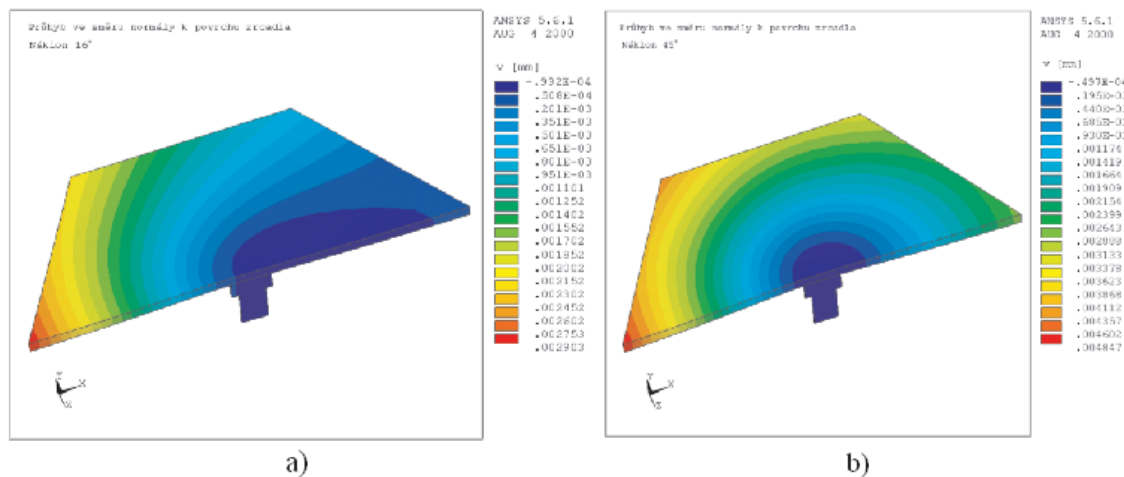
- Použitá sklovina: SIMAX - borokřemičité sklo typu PYREX
  - Hustota:  $2230 \text{ kg/m}^3$
  - Střední součinitel délkové teplotní roztažnosti:  $3,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
  - Modul pružnosti:  $6,4 \times 10^{10} \text{ Pa}$
- Tvar: hexagonální, 4 druhy podle vzdálenosti od pomyslného rovníku zrcadla
- Velikost segmentů: největší segment má průměr opsané kružnice  $630 \text{ mm}$  u prototypového zrcadla  $496 \text{ mm}$
- Tloušťka:  $15 \text{ mm}$ , u prototypového zrcadla  $12 \text{ mm}$
- Poloměr křivosti:  $3406 \pm 6 \text{ mm}$
- Reflexní vrstva: hliník + ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$
- Reflektivita: střední hodnota pro  $\lambda = 370 \text{ nm}$  je  $90,5 \%$

Výroba těchto zrcadel začíná ve firmě KAVALIER na Sázavě, kde lisují polotovary z PYREXu, což je sklovina dobře opracovatelná, chemicky a tepelně stabilní a má dobré pevnostní charakteristiky. Tyto polotovary se dále ořezávají na požadovaný tvar a poté frézují na daný poloměr křivosti. Po vybroušení a vyleštění se precizně vyčistí a ve vakuové komoře se napaří vrstvy hliníku a  $\text{SiO}_2$ . V průběhu výrobního procesu je každé zrcadlo testováno, tvar optické plochy je kontrolován Ronchiho testem, reflektivita je kontrolována komparačním reflektometrem a dále se zrcadla testují na adhezi napařené vrstvy.

## 5 Tvarová stabilita zrcadel

Kvalita zobrazení zrcadla nezávisí jenom na tvarové a odrazné kvalitě optické plochy, ale další důležitý faktor je stabilita optické plochy v důsledku působení tíhové síly. V jiných aplikacích (například pro zrcadla na projekt CAT nebo CELESTE) se dělali analýzy deformací i pro velkou škálu teplot, protože pozorování probíhá po celou noc, každou jasnou noc v roce jsou teleskopy vystaveny vlivu venkovních teplot. Teleskopy v projektu Pierre Auger jsou uzavřeny v klimatizovaných místnostech, takže vliv teplot není natolik důležitý.

Deformace se analyzovaly pro zrcadlový segment typu I, tedy největší segment s opsanou kružnicí o průměru  $496\text{ mm}$  a s tloušťkou  $12\text{ mm}$ . Analýza deformací pro námi zadané parametry byla provedena ve spolupráci s firmou DISTIFF. Výpočet byl proveden programem ANSYS metodou konečných prvků. Tato metoda pro řešení dané úlohy používá rozdělení zkoumané oblasti na podoblasti, tj. tělesa na konečné prvky, v rovině jsou to obvykle trojúhelníky nebo obdélníky a variační metodou hledána minima celkové potenciální energie a tedy i stacionární řešení daného systému. Analýzy byly provedeny pro úhel náklonu zrcadla od horizontálního směru  $16^\circ$  (náklon segmentu uprostřed zrcadla) a  $45^\circ$  (náklon segmentu ve spodní části zrcadla).



Obrázek 3: Deformace segmentu zrcadla: a)úhel náklonu  $16^\circ$  b)úhel náklonu  $45^\circ$

Ze simulace vyplývá (viz. obrázek 3), že deformace ve směru normály jsou řádově v desítkách mikrometrů. Odchylka paprsků způsobená deformací segmentu zrcadla závisí na derivaci této odchylky a je tedy natolik minimální, že téměř vůbec neovlivní velikost spotu v ohniskové rovině. V této analýze se počítalo s uchycením segmentů ve středové díře pomocí úchytného trnu, neboť to byla původní idea. Nyní se tyto segmenty uchycují pomocí hliníkového prstence, který se na segment nalepí, přičemž deformace vlivem vlastní váhy předpokládáme menší, než v simulovaném případě (úchytná plocha je mnohem větší a uchycení není úplně pevné).

## 6 Závěr

Observatoř Pierre Auger se po svém dokončení stane jedním z nejsledovanějších projektů ve fyzice elementárních částic, neboť má potenciál pro rozřešení záhady vysokoenergetických částic z vesmíru. Naše pracoviště vyvinulo a vyrábí ultra tenká segmentová zrcadla pro fluorescenční detektor, kterým se sledují fluorescenční stopy spršky sekundárních částic. Jak je ukázáno v tomto článku, deformace těchto segmentů vlivem vlastní váhy jsou zanedbatelné, vliv na velikost spotu je tedy minimální.

## 7 Poděkování

Děkujeme Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy České republiky za podporu grantem LN00A006, INGO LA 134 a děkujeme firmě DISTIFF za spolupáci.

## Literatura

- [1] Dawson B.R.(1998) The Highest Energie Astrophysics. Pierre Auger GAP note 98-064, <http://www.auger.org>.
- [2] Prouza M., Šmída R.(2002): The Galactic magnetic field and propagation of ultra-high energy cosmic rays. *Astronomy and Astrophysics*, in print.
- [3] Bauleo P. et al.(1997) A Water Tank Cerenkov Detector for Very High Energy Astroparticles. Pierre Auger GAP note 97-023, <http://www.auger.org>.
- [4] Dawson B.R.(1996) Fluorescence Detector Techniques. Pierre Auger GAP note 96-017, <http://www.auger.org>.
- [5] Palatka M. et al.(2000) Bifocal Optical System of the Schmidt Camera (Design of the Corrector Ring). Pierre Auger GAP note 200-002, <http://www.auger.org>.