

**PIERRE  
AUGER**  
OBSERVATORY

## **Kosmické záření o extrémních energiích (Projekt Pierre Auger Observatory)**

*Jiří Grygar, Fyzikální ústav AV ČR, Praha*

### 1. Objev kosmického záření

Počátkem XX. stol. si fyzikové povšimli, že jednoduché elektroskopy zaznamenávají vybíjení elektrického náboje i tehdy, když jsou od okolního prostředí odstíněny olověným obalem, což znamená, že do elektroskopu vstupuje zvenčí neznámé ionizující záření. Nejprve se zdálo, že toto záření vychází z nitra Země, ale v r. 1912 dokázal rakouský fyzik **Victor Franz Hess** (1883-1964) při pokusech s elektroskopy, vynášenými do výšky až 5 km v balonech, s nimiž startoval většinou z území jižní Moravy, resp. z Ústí n. L., že vybíjení je tím rychlejší, čím výše se elektroskop nachází, tj. že zdroj záření je ve vesmíru. Ve dvacátých letech XX. stol se pro tento úkaz ujal nešťastný název kosmické paprsky, který byl později zaměněn za poněkud výstižnější kosmické záření. Victor Hess byl za svůj klíčový objev právem vyznamenán r. 1936 Nobelovou cenou za fyziku.

V r. 1933 prokázal americký fyzik **Arthur Compton**, že kosmické záření obsahuje částice elektricky nabitě, neboť podléhá vlivům magnetických polí. Tento objev zarmoutil astronomy, neboť následkem toho nelze ze směru přiletu částice k Zemi vůbec usuzovat na polohu zdroje záření ve vesmíru. Proto byl další pokrok ve studiu kosmického záření velmi pomalý. V r. 1938 ukázali francouzští fyzikové **Pierre Auger** (1899-1993) a **Roland Maze** při experimentech v sedle Jungfrauoch ve švýcarských Alpách, že záření přichází na Zemi souběžně ve sprškách, tj. že původní (primární) částice z vesmíru se v nízké atmosféře rozdrobí na množství sekundárních částic v podobě kaskády, která je při zemském povrchu tím širší, čím vyšší byla energie primární částice kosmického záření. Každá sprška sestává ze tří soustředných složek - nejúžší spršky nukleonové, širší elektromagnetické a nejširší mionové.

To byl klíčový objev, který od té doby umožňuje sledovat částice primárního kosmického záření velmi vysokých energií nepřímo až na zemském povrchu, kde "posbíráme" aspoň zčásti sekundární spršku a odtud spočítáme energii, směr přiletu a případně i povahu nedostupné primární částice. Primární částice vyšších energií

(protony, jádra těžších prvků, popřípadě i dosud neznámé částice) totiž nelze účinně zachycovat ani za hranicemi zemské atmosféry, např. z umělých družic, neboť jde o částice tak vzácné, že by prakticky nikdy nezasáhly poměrně malou družici. Zemská atmosféra je naproti tomu dostatečně rozlehlá, aby se do ní primární částice občas strefily, a následná sprška sekundárních částic jednak zasvítí v nízké atmosféře Země a jednak pokryje na povrchu Země už tak velké území (u částic nejvyšších energií až 15 čtverečních kilometrů), že to podstatně zvyšuje pravděpodobnost zachycení takového úkazu.

## 2. Současný stav výzkumu kosmického záření extrémních energií

Na detekci spršek sekundárního kosmického záření jsou založena všechna moderní zařízení pro detekci vysoce energetického kosmického záření, která byla postupně uváděna do chodu ve druhé polovině XX. stol.:

### a) Pozemní detektory

*Volcano Ranch*, USA (1959 — 1963) - scintilační detektory

*SUGAR*, Austrálie (1968 — 1979) - scintilační d.

*Haverah Park*, Velká Británie (1968 — 1987) - Čerenkovovy d.

*Jakutsk*, Rusko (1970 — dosud) - scintilační d.

*AGASA*, Japonsko (1990 — 2004) - scintilační d.

### b) Fluorescenční detektory

*Fly's Eye*, USA (1981 — 1992)

*Hires*, USA (1998 — dosud)

Pozemní detektory mohou pracovat nepřetržitě ve dne i v noci, na rozdíl od fluorescenčních detektorů, což jsou širokoúhlé světelné dalekohledy, které mohou získávat údaje pouze za jasných bezměsíčných nocí.

Z dosavadních měření vyplynulo, že četnost částic (protonů, těžších jader atomů, elektronů) přicházejících z vesmíru rychle klesá s jejich rostoucí energií. Částic s energiemi kolem 1 GeV (1 eV odpovídá energii  $10^{-19}$  J) dopadá na Zemi poměrně hodně — zhruba 10 tisíc na čtvereční metr za sekundu, ale s rostoucí energií jejich počet rychle klesá (bývá to okrouhle tisíckrát méně částic pro desetkrát vyšší energii), takže za rok na kilometr čtvereční dopadne pouze jediná částice s energií 10 EeV. Nelze se proto divit, že *za uplynulá čtyři desetiletí byly všemi vyjmenovanými detektory zaznamenány pouhé dva tucty částic s energiemi nad 100 EeV*. (Pro srovnání, obří urychlovač částic LHC, budovaný v laboratoři CERN poblíž Ženevy, umožní urychlovat protony na energie nanejvýš 10 TeV.) V r. 1991 zaznamenala aparatura *Fly's Eye* v Utahu dosud nepřekonaný energetický rekord 320 EeV (51 joulů!).

Zatímco nízkooenergetické kosmické záření má svůj původ především ve Slunci, kde jsou urychlovací procesy dobře známé díky smyčkám silných magnetických polí v erupcích a v koróně, jisté pochybnosti přetrvávají, pokud jde o původ středně energetického záření v rozmezí 100 TeV ÷ 100 PeV, i když se většina odborníků shoduje v tom, že zdrojem tohoto záření jsou především *supernovy v naší Galaxii*. Naprosto nejasné jsou však mechanismy urychlování částic vysoce energetického kosmického záření od 100 PeV výše. Kvůli komplexním magnetickým polím uvnitř i vně naší Galaxie nemůžeme ani přibližně určit polohu případných

zdrojů tak energetického záření. Dosavadní měření poloh neukazuje na žádné shlukování do přednostního směru či oblasti; rozložení po obloze je zcela náhodné.

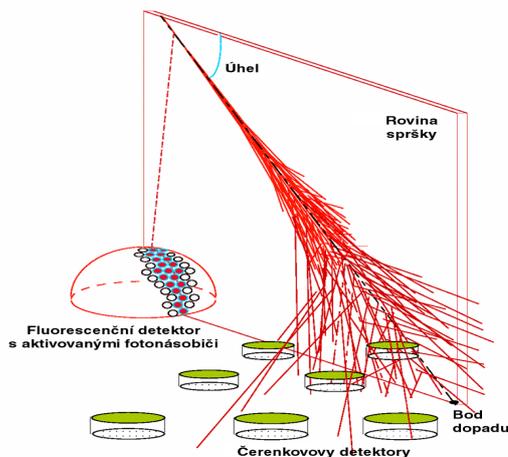
Nečekaný problém, týkající se *ultrarelativistického kosmického záření extrémních energií* (UHE > 10 EeV), se vynořil po objevu tzv. reliktního záření kosmického pozadí v r. 1965. Toto velmi chladné (3 K) mikrovlnné záření vyplňuje rovnoměrně celý vesmír a všeobecně se považuje za pozůstatek (relikt) po žhavém záření, které dominovalo vesmíru v prvních 400 tis. letech po velkém třesku. Jak nezávisle ukázali **K. Greisen** a **G. Zacepin** a **V. Kuzmin** v r. 1966, představují nízkoenergetické fotony reliktního záření mocnou překážku pro šíření kosmického záření UHE na vzdálenosti větší než je střední volná dráha částic kosmického záření mezi dvěma následujícími srážkami s reliktními fotony. Při těchto srážkách totiž ztrácí původní částice hodně energie a nemůže proto doletět astronomicky vzato příliš daleko. Výpočty zmíněných autorů ukázaly, že touto mezí je vzdálenost nanejvýš 200 mil. světelných let. Když však opíšeme kolem Země pomyslnou kouli o tomto poloměru, zjistíme, že v tomto kosmickém okolí nejsou žádné potenciální zdroje takto energetického záření, což by mohly být snad jediné kvasary, aktivní jádra galaxií nebo zábleskové zdroje záření gama. Energetická mez, zvaná na počest zmíněných autorů *limit GZK*, představuje hodnotu kolem 60 EeV. Dosavadní měření však našla příliš mnoho částic nad tímto limitem; to je další důvod k tomu, aby se kosmickému záření UHE věnovala mimořádná pozornost.

### 3. Vznik a výstavba Pierre Auger Observatorie (PAO)

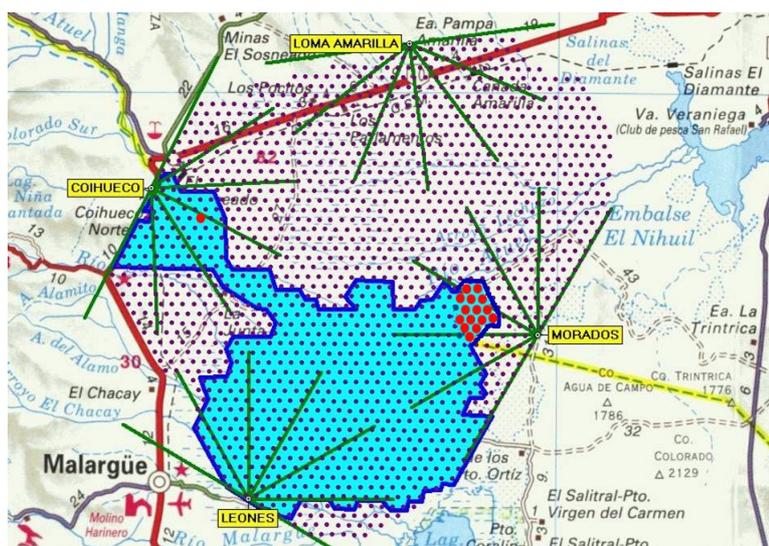
Myšlenka výstavby nové observatoře pro kosmické záření UHE se vynořila z debat, které spolu od počátku devadesátých let minulého století vedli **James W. Cronin** (\*1931) z Fermilabu v Chicagu a **Alan Watson** (\*1939) z Univerzity v Leedsu. Prof. Cronin patří k nejvýznamnějším žijícím fyzikům částic. V r. 1980 získal společně s V. Fitchem Nobelovu cenu za experimentální důkaz narušení parity ve slabých jaderných interakcích. Prof. Watson se věnuje výzkumu energetického kosmického záření po celý život. Mj. byl iniciátorem a vedoucím projektu v Haverah Parku. Oba duchovní otcové projektu dobře věděli, že má-li se v tomto perspektivním oboru docílit zásadního pokroku, je potřeba získat statisticky významná data v relativně krátké době. Navíc musí jít o data pečlivě kalibrovaná s ohledem na problém limitu GZK. Proto zvolili koncepci *velmi rozsáhlé soustavy pozemních (Čerenkovových) detektorů*, která pokryje asi 30krát větší plochu, než dosud největší zařízení AGASA. Pro kalibraci energií a přesné určení směru příletu primárních částic navrhli postavit na témže místě také *fluorescenční detektory s fotonásobiči*, takže by vznikl první hybridní přístroj svého druhu. Náklady na výstavbu takového monstra odhadli na 50 milionu dolarů, což je v porovnání s nákladnými urychlovači částic téměř pakatel: urychlené částice UHE dodává vesmír bezplatně.

Trvalo však překvapivě dlouho, než se podařilo oběma badatelům přesvědčit vědeckou veřejnost, že by se měla do projektu zapojit; bylo totiž zřejmé, že tak velký projekt nebude moci financovat žádná instituce samostatně, nehledě k tomu, že pro výstavbu i provoz jsou zapotřebí odborníci mnoha profesí, které je třeba vyhledat po celém světě. Teprve v r. 1995 dostal projekt PAO zelenou, když se podařilo vybrat vhodné místo pro výstavbu na *jižní polokouli* - s jedinou výjimkou byly totiž všechny dosavadní aparatury vybudovány na polokouli severní, což je astronomicky poměrně nevýhodné: na jižní polokouli je totiž dobře vidět centrum Galaxie se supermasivní černou dírou o hmotnosti třímilionnásobku hmotnosti Slunce a dvě velké satelitní galaxie - Velké a Malé Magellanovo mračno. Ze tří uvažovaných lokalit (Austrálie, Jižní Afrika, Argentina) nakonec zvítězila ta poslední, díky vstřícnosti argentinské

vlády, která nabídla nejvýhodnější podmínky pro pronájem obrovského pozemku v pampě pod Andami v provincii *Mendoza*.



*Schema hybridního detektoru kosmického záření. Dvojitý způsob detekce těžé spršky (fluorescenčním detektorem v atmosféře a Čerenkovovými detektory na zemi) umožňuje spolehlivé určení směru letu, jejího dopadu na Zemi i úhnné energie spršky s dříve nedosažitelnou přesností.*



*Schema rozmístění pozemních detektorů (modré body) a poloha stanic fluorescenčních detektorů (jména ve žlutých rámečcích) s centrálou v Malargüe*

Do projektu se na začátku zapojilo přibližně 250 fyziků a techniků ze 30 institucí 19 zemí obou Amerik, Evropy a Austrálie. Tyto počty se však v průběhu výstavby měnily v tom smyslu, že lidí a institucí přibývá, zatímco zemí (kvůli finanční náročnosti účasti) ubývá. V současné době pracuje v projektu přes 350 odborníků z více než 70 institucí ze 16 zemí.

V řídicím výboru projektu jsou všechny země zastoupeny svými národními představiteli, kteří přijímají rozhodnutí hlasováním. Tento výbor také volí vědeckého mluvčího projektu. Tím prvním byl prof. Cronin, po němž tuto úlohu převzal prof. Watson. Výbor také rozhoduje o finančních příspěvcích jednotlivých států, z nichž je projekt financován.

Projekt formálně započal 17. března 1999 položením základního kamene řídicí stanice celé observatoře na okraji městečka *Malargüe*, které se nachází těsně pod Andami uprostřed rozsáhlé Žluté pampy (*Pampa Amarilla*) necelých 400 km na jih od hlavního města provincie Mendoza na 35,4° j.š. a 69,6° z.d. v nadmořské výšce 1450 m.

Během roku tak vyrostla krásná budova, obklopená pěstěným trávníkem a chráněná větrolamy topolů, v níž se nachází řídicí počítače, pracovní vědecké i technické obsluhy a technické provozy, tj. zejména montážní hala pro pozemní detektory a destilační kolona pro přípravu superčisté demineralizované vody, tvořící náplň detektorů. Vedle budovy se tyčí stožár s přijímacími anténami pro komunikaci se všemi detektory observatoře, vzdálenými často mnoho desítek km a parabolická anténa pro družicové internetové spojení s výpočetními centry v USA a v Evropě.



*Hlavní bulvár v Malargüe s městskou zvonici jako dominantou městečka*



*Plaketa, odhalená při položení základního kamene observatoře PAO*

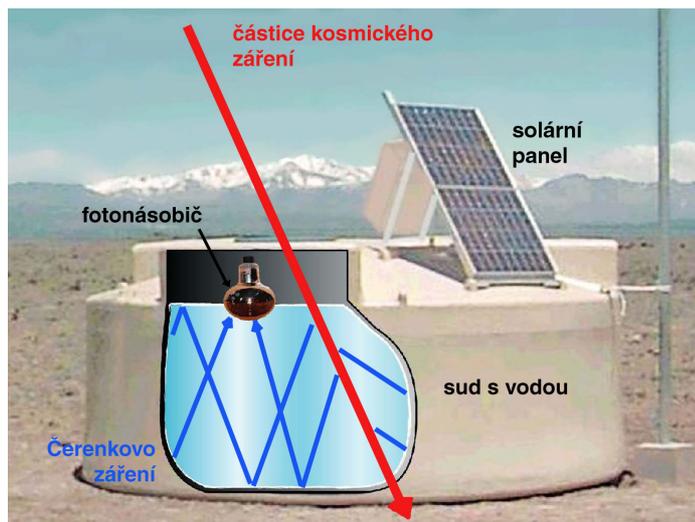


*Řídící centrum Pierre Auger Observatoře na okraji Malargüe*



*Plastové nádrže Čerenkovových detektorů v montážní hale*

V první fázi výstavby byly postaveny prototypy obou detektorů. *Pozemní detektor* tvoří válcová plastová nádoba o průměru necelé 3 m a výšce 1,5 m, v níž je ve tmě uzavřeno 12 t čisté vody. Do víka nádoby jsou zapuštěny tři velké fotonásobiče, jejichž úlohou je zaznamenávat kratičké záblesky modrého Čerenkovova záření, které v nádobě vzniká při průletu částice spršky kosmického záření. Signál je elektronicky zpracován, opatřen přesným časovým údajem pomocí přijímače GPS a odeslán směrovým pojítkem do centrální stanice observatoře. Zásobování detektoru elektřinou obstarává sluneční panel pevně nakloněný k severu a kapacitní akumulátor.



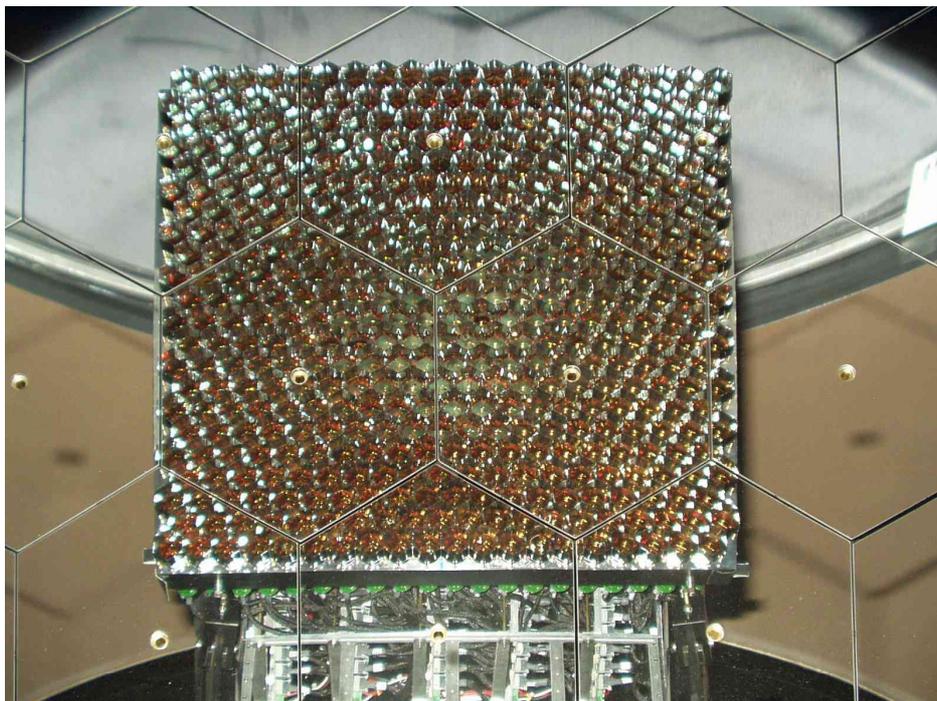
*Řez prototypem pozemního Čerenkovova detektoru instalovaného v pampě.  
V pozadí jsou patrné vrcholky And*

Podstatně komplikovanější jsou *fluorescenční detektory*, jejichž úkolem je zaznamenávat slabé a krátkotrvající fluorescenční záblesky fialového světla, které vznikají při interakci spršky sekundárního kosmického záření s atomy dusíku v zemské atmosféře ve výškách  $10 \div 20$  km nad zemí. Jde totiž o velmi světelné a širokouhlé optické komory, které musejí vykryt celý prostor v atmosféře nad všemi pozemními detektory. V zakřivené ohniskové ploše každé komory se pak nachází 440 citlivých fotonásobičů a signál z nich se pak předává do řídicího centra obdobným způsobem jako je tomu u detektorů pozemních. Navíc však musí být zabezpečen zcela automatický provoz komor na dálku, tj. večerní kontrola, zda neprší nebo nefouká silný vítr, zda je jasno a tma, aby bylo možné vystavit citlivé fotonásobiče noční obloze. Tým systém musí též ukončit expozici, když se počasí zhorší nebo začíná svítat.

Po úspěšném testování prototypů v r. 2001 se od léta 2002 rozeběhla vlastní výstavba na obrovské ploše  $3000 \text{ km}^2$ . Pozemní detektory jsou umístovány do pomyslné čtvercové mříže s roztečí 1,5 km a fluorescenční detektory se montují do 4 baterií po 6 komorách na vnějším okraji pozemní mříže (stanice *Los Leones*, *Coihueco*, *Los Morados*, *Loma Amarilla*) tak, že každá baterie pevně nastavených komor pokrývá půlkruh v azimutu v pás do výšky  $30^\circ$  od obzoru.

V příznivém případě se daří zaznamenat tutéž spršku ze dvou sousedních baterií - to pak dává možnost určit stereoskopicky všechny parametry dráhy spršky v zemské atmosféře. V ideálním případě k tomu přibývá ještě údaj o zásazích pozemních

detektorů - takové úkazy jsou pak doslova zlatým dolem pro následnou analýzu a interpretaci měření.



*Pohled na skládaná šestiboká zrcadla světelné komory na stanici Coihueco.  
V obraze se zrcadlí ohnisková plocha tvořená 440 citlivými fotonásobiči*

Od poloviny r. 2003 se získávají vědecké údaje na stále se rozšiřující ploše observatoře a od října 2003 jde o největší observatoř pro výzkum kosmického záření UHE na světě. Již 24. října 2003 se podařilo zaznamenat první stereoskopický a současně hybridní úkaz na světě o spolehlivě určené energii 20 EeV.

Kvůli často těžce přístupnému terénu (do terénu pampy mimo jakékoliv cesty musejí na vzdálenost mnoha desítek km zajíždět cisterny s 12 t vody) je instalace pozemních detektorů obtížná a vyžaduje zručnost i velké pracovní nasazení argentinských dělníků a řidičů.



*Cesta z Malargüe na  
stanici Los Leones  
(stožár na kopci vlevo)  
po větším dešti*

Přesto však probíhá výstavba observatoře úspěšně zejména díky modulové koncepci - u obou typů detektorů se znamenitě uplatňuje sériová výroba. V létě r. 2005 byla již v plném provozu více než polovina z plánovaných 1600 pozemních nádrží a tři čtvrtiny (18) fluorescenčních detektorů. První výsledky pozorování byly zveřejněny v sérii referátů a posterů na mezinárodních konferencích o fyzice částic a o kosmickém záření v Praze a v Pune v Indii v červenci 2005. Jak je u těchto projektů pravidlem, jsou seznamy spoluautorů delší než abstrakt příslušného vědeckého sdělení.

#### 4. Účast českých fyziků v projektu PAO

Z iniciativy **Jana Řídkého** z Fyzikálního ústavu AV ČR se ČR zapojila do projektu PAO již v r. 1998. V r. 1999 jsme získali čtyřletý úvodní grant od *GA AV ČR*, který nám umožnil účastnit se prvních porad o koncepci observatoře a nabídnout závazně i potřebné vědecké a konstrukční kapacity. V letech 2000-2004 byl projekt podpořen též prostřednictvím *Centra částicové fyziky* FZÚ AV a MFF UK. Od r. 2001 až dosud máme podporu z projektu *INGO MŠMT ČR*. V současné době se u nás na PAO podílí 7 vědeckých pracovníků a 6 doktorandů z FZÚ AV ČR, Společné laboratoře FZÚ a UP v Olomouci a MFF UK v Praze a J. Řídký je národním představitelem ČR v řídicím výboru PAO.

Naším hlavním příspěvkem v první etapě výstavby PAO se stal návrh konstrukce a výroba *obřích světelných Schmidových komor* se složenými šestiúhelníkovými zrcadly o celkovém rozměru 3,5 m (dosud největší Schmidova komora na světě v Německu má monolitické zrcadlo o průměru 2 m). Pro každou komoru je potřeba zhotovit celkem 60 takových zrcadel, která před namontováním procházejí v olomoucké laboratoři pečlivým testováním.



*Pohled od západu na 2. stanici fluorescenčních detektorů Coihueco v nadmořské výšce 1750 m. Před budovou je vidět stříbrná kopule lidarů pro měření kvality atmosféry, vpravo je anténní stožár pro komunikaci s centrálou; dole se prostírá Pampa Amarilla. Na této stanici pracují od září 2003 české zrcadlové komory.*

V této době je v Argentině v provozu 6 „českých“ komor na stanici *Coihueco*; druhá polovina naší dodávky pro stanici *Loma Amarilla* se uskuteční v létě 2006. Olomoučtí optici se rovněž podíleli na návrhu nekonvenčního korekčního prstence pro obří Schmidty komory namísto nevyrobitelné příliš velké klasické skleněné korekční desky. V letošním roce byl navíc v Argentině instalován též *robotický fotometrický dalekohled* pro neinvazivní měření kvality ovzduší, což je náš původní příspěvek pro kalibraci dat o energiích částic z fluorescenčních detektorů. Kromě toho se zejména naši doktorandi zapojili do získávání laboratorních údajů o závislosti naměřených hodnot na teplotě a tlaku v zemské atmosféře v projektu *AirFly*, do modelování drah částic primárního kosmického záření v magnetickém poli Galaxie a intergalaktického prostoru a do vývoje a ladění analytického a rekonstrukčního software pro zpracování měření.



*Prof. Jim Cronin (vlevo) v rozhovoru s Dr. Janem Řídkým během pravidelné porady projektu PAO v Malargüe na jaře r. 2004. Sedící uprostřed je Dr. Hans Klages z IFK v Karlsruhe, který má na starosti monitorování stavu atmosféry během měření fluorescenčními detektory*

Dosavadní přínos českých odborníků projektu PAO ocenil prof. Cronin, když kvůli tomu na jaře 2004 vykonal zvláštní návštěvu u předsedkyně AV ČR, rektora UK a ředitele FZÚ AV ČR. Prof. Cronin také letos pozval naši doktorandku na tradiční setkání nositelů Nobelových cen s vybranými mladými vědeckými pracovníky v Lindau a zúčastnil se v září 2005 mezinárodní konference „Od urychlovačů ke kosmickému záření“ (C2CR), uspořádané českými fyziky v Praze.



Kromě toho se stalo tradicí, že instalované pozemní Čerenkovovy detektory dostávají jména, navržená premianty argentinských základních škol. V poslední době získaly toto privilegium také české děti, takže dnes v pampě najdete jména jako *Znalek, Ucho, Oko, Sova, Anda, Golem, Kopal* atd.

## 5. Závěr

Když se na počátku XXI. stol. definovaly hlavní otevřené problémy astrofyziky a kosmologie, na prvních místech se ocitly dva okruhy otázek:

I. *Nevidíme nic z toho, co bychom velmi rádi viděli.* Tím se myslí problém existence skryté látky a skryté energie. Tyto složky vesmíru totiž tvoří plných 95% jeho hmotnosti, zatímco veškerá dosavadní astronomie studuje pouze nepatrných 5%.

II. *Vidíme něco, co bychom vidět vůbec neměli.* Tím se myslí kosmické záření nad limitem GZK. Energie ultrarelativistických částic UHE jsou tak vysoké, že zatím nejsou známy přesvědčivé fyzikální mechanismy, jak k tak extrémnímu ultrarelativistickému urychlení může ve vesmíru vůbec docházet. K řešení těchto záhad může v průběhu nejbližšího desetiletí PAO významně přispět.



Další (průběžně aktualizované) podrobnosti o české účasti v projektu PAO lze nalézt na adrese: [www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/](http://www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/)