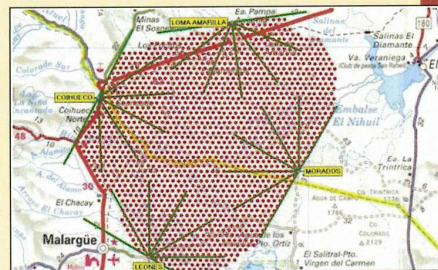


# Observatoř Pierra Augera v poločase



Mapa rozložení pozemních detektorů (červené tečky) a širokouhých kamer (žluté rámečky a zelené průměty optických os) na ploše 3 000 km<sup>2</sup> v pampě Amarilla. Centrála v Malargüe se nachází vlevo dole mimo plochu observatoře PAO.



Centrální budova PAO na severním okraji města Malargüe. V prvním patře je vidět okno sálu, kde je soustředěno řízení technického provozu pozemních detektorů, optických kamer i lidarů. Zadní část budovy slouží jako montážní hala a destilační kolona. Anténní stožár má optickou viditelnost na všechna zařízení observatoře.

Observatoř Pierra Augera (PAO) pro výzkum extrémně energetických částic kosmického záření má za sebou už dlouhou historii. U jejího zrodu před 24 lety stáli dva vynikající fyzikové: James Cronin (\*1931) z Chicaga a Alan Watson (\*1938) z Leedsu. O důvodech, proč s koncepcí nové a doslova gigantické observatoře přišli, jsem už v Kozmosu v roce 2005 psal (č. 2, str. 2 a č. 6, str. 3), takže případné zájemce o historii projektu odkazují na zmíněné články.

Rád bych ještě připomněl, že téměř od počátku se do mezinárodního projektu zapojili také čeští odborníci z iniciativy Prof. Jana Rídkého z Prahy, odborníka v částicové fyzice a Prof. Miroslava Hrabovského z Olomouce, odborníka v optice. Kolem těchto průkopníků se postupně zformoval tým fyziků, astronomů a informatiků především v odd. astročásticové fyziky Fyzikálního ústavu AV ČR v Praze, které vede RNDr. Petr Trávníček, Ph.D. a ve Společné laboratoři optiky Fyzikálního ústavu a Univerzity Palackého v Olomouci řízené prof. Hrabovským. K nim se později ještě přidali pracovníci z Ústavu částicové a jaderné fyziky MFF UK v Praze pod vedením RNDr. Dalibora Noska, DrSc.

## Amarilla (Žlutá pampa)

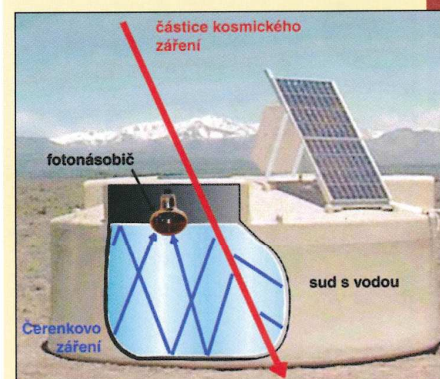
V r. 1999 započaly stavební práce spojené s budováním Observatoře v argentínské provincii Mendoza v pampě Amarilla (Žlutá pampa) těsně pod Andami. Ve velmi dělné mezinárodní

spolupráci odborníků z 18 států Evropy, obou Amerik a Austrálie tak vyrůstala observatoř na nevidané ploše 3 000 km<sup>2</sup> v nadmořské výšce 1 400 m v jižní zeměpisné šířce kolem 35° s centrálnou na okraji městečka Malargüe (~25 tis. obyvatel).

V porovnání s předešlými pozorovacími komplexy má PAO dvě hlavní přednosti, tj. více než o řád větší sběrnou plochu pro zachycování částic kosmického záření než předešlé observatoře, a dále kombinaci dvou (a posléze tří) různých metod detekce těchto částic různými typy aparatur. Šlo tedy o první hybridní observatoř pro studium kosmického záření vůbec.

Pozemní detektory tvoří plastové nádrže naplněné demineralizovanou a destilovanou vodou, v níž lze v úplné tmě pozorovat třemi zapuštěnými fotonásobiči záblesky Čerenkovova záření, jež vzniká průletem sekundárních částic kosmického záření relativně nadsvětelnou rychlostí. Jejich výhodou je schopnost pracovat nepřetržitě ve dne i v noci bez ohledu na počasí. Nevýhodou je řídké pokrytí observatoře kruhovými detektory o ploše 10 m<sup>2</sup> × 1,2 m výšky s roztečemi 1,5 km od sebe, takže z celé sekundární spršky řádově miliard částic je zachycen jen malý vzorek. Parametry detekčního pole tak zaručovaly, že budou zaznamenávány jen spršky s minimální energií primární částice >3 EeV (1 exaelektronvolt = 10<sup>18</sup> eV).

Vzorkování ovšem vyžadovalo násled-



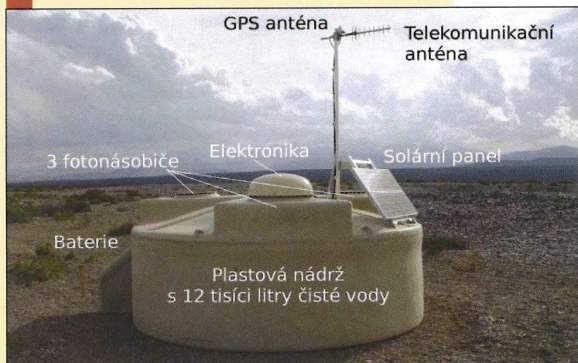
Sekundární částice kosmického záření prolétá vodou relativně nadsvětelnou rychlostí, takže způsobí záblesk modrého Čerenkovova záření, které znamená fotonásobič.



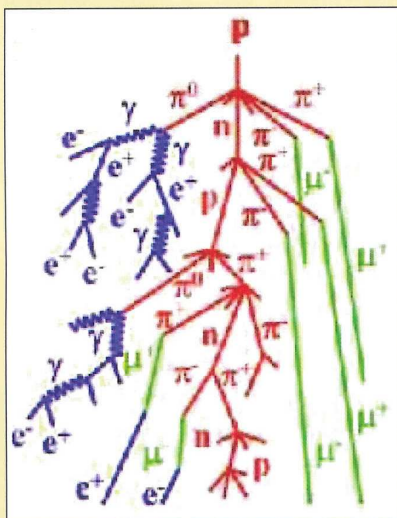




Ukládání pozemního detektoru v pampě.



Hlavní součásti pozemního detektoru sekundárních částic kosmického záření. Anténa GPS slouží k určování přesného času (požadovaná přesnost <10 ns).  
Foto: R. Šmída



Rozpad částice (p – proton) primárního kosmického záření v zemské atmosféře na sekundární spršku hadronovou (červená), elektromagnetickou (modrá), a mionovou (zelená). Při rekordních energiích tak z jediné primární částice doletí k zemi až 10 mlrd. sekundárních částic.

Schéma fluorescenčního detektoru. Světlo spršky přichází zprava přes filtr UV a korekční prstence. Dopadá na segmentované zrcadlo a zobrazí se na kamere pomocí fotonásobičů.  
Foto R. Šmída

né kalibrování energetické stupnice a kvůli tomu bylo na čtyřech stanicích observatoře instalováno celkem 24 obřích Schmidtových kamer se zorným polem  $28,5^\circ \times 30^\circ$  a sběrnou plochou každé kamery  $13 \text{ m}^2$ . V zakřivené ohniskové ploše každé kamery je umístěno 440 citlivých a rychlých fotonásobičů, které zaznamenávají průlet celé spršky vysokými vrstvami ovzduší s časovým rozlišením 25 nanosekund. Optické osy kamer jsou fixní a naměřeny tak, aby se zhruba protínaly ve výšce 20 km nad povrchem Země, přičemž spodní okraje zorných polí míří jen  $1,5^\circ$  nad obzor! Tím bylo zaručeno, že kamery budou citlivé pouze na primární kosmické záření s energií  $>1 \text{ EeV}$  ( $>10^{18} \text{ eV}$ ). Tak lze z trigonometrických měření průletu spršek určit jednak parametry dráhy spršky v zemské atmosféře, ale také místo maxima jejího svícení mechanismem fluorescence. Jakmile známe přesně vzdálenost, lze dále spolehlivě určit i energii obsaženou ve spršce a tím kalibrovat signály v pozemních detektorech. Nevýhodou je přirozeně závislost provozu kamer na noční době a jasné obloze. Fotonásobiče jsou tak citlivé, že by je zničilo světlo Slunce odražené od Měsíce, ba i od jasných planet – Venuše a Jupiteru. Proto mohou v nejlepším případě pracovat jen po 13 % času, po který pracují spolehlivě pozemní detektory.

**Výsledky desetileté práce**

První vědecky využitelná data získala observatoř v r. 2005 a do plného chodu byla uvedena koncem r. 2008. Do závěru r. 2015 byly výsledky práce PAO zveřejněny ve více než 60 vědeckých pracích v recenzovaných mezinárodních ča-

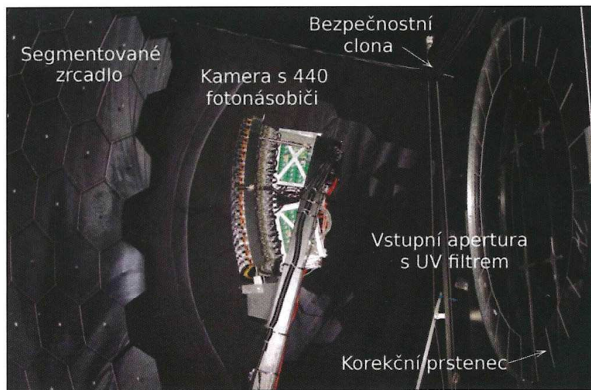
sopisech, jež až dosud získaly přes 7,3 tis. citací. Prvním hlavním cílem PAO bylo zjistit, jak vypadá průběh toku kosmického záření pro energie primárních částic v pásmu energií  $>10 \text{ EeV}$  (pro srovnání: rekordní energie dosažené v r. 2015 v urychlovači LHC v mezinárodní laboratoři CERN jsou na úrovni 13 TeV, tj. o 6 řádů nižší.) Nebyl to snadný úkol, protože tak energetické částice zaznamenává PAO v průměru jen jednou za dva týdny, ale dnes už je toto energetické spektrum dobře proměřeno.

K tomu cíli bylo potřeba zapsat a uložit na 500 mil. údajů z 12 tis. fotonásobičů na dobu minimálně 10 roků, a k tomu údaje o průzračnosti atmosféry v modré a fialové oblasti optického spektra jednak z pěti atmosférických lidarů, ale také z robotického teleskopu FRAM, jež měří průzračnost v čase a pomocí fotometrických hvězdných standardů. Podobně se musela uchovávat data z 1,6 tis. pozemních detektorů, které na rozdíl od kamer pracují nepřetržitě. Za 10 let provozu získala observatoř údaje o toku primárních částic kosmického záření v intervalu 0,5 až  $>100 \text{ EeV}$  na základě pozorování 190 tis. primárních částic, což je obsáhlejší materiál než u všech předešlých experimentů dohromady.

Díky hybridnímu charakteru pozorování se tak podařilo zpřesnit kalibraci energií primárních částic natolik, že se zřetelně ukázalo, jak tok primárního záření klesá od energií 0,3 EeV až po energie 5 EeV, načež začíná mírně stoupat k plochému lokálnímu maximu pro energie  $\sim 40 \text{ EeV}$ . Pak však nastává prudký pokles toku až do energie 140 EeV; pro vyšší energie nebyl za celou dobu získán ani jediný signál, takže lze uvádět pouze čím dál tím nižší horní meze toku. Zatímco původně teoretici soudili, že takový pokles je vyvolán degradací extrémně vysokých energií částic kosmického záření vinou srážek s fotony reliktního záření (efekt GZK), všechno dnes nasvědčuje díky novým pozorováním tomu, že mechanismy urychlování kosmického záření na tyto a vyšší energie jsou prostě u konce s dechem. Existuje několik návrhů, jak dosáhnout zmíněných energií různými urychlovacími mechanismy, ale popravdě nikdo neví, o jaké fyzikální procesy přesně jde.

S tím souvisí další překvapení, protože až do publikací nejnovějších údajů se předpokládalo, že nejvýše urychlované primární částice kosmického záření jsou protony. Nyní z dat PAO vychází, že to nespíš není pravda, a pro energie vyšší než 5 EeV se složení primárních kosmických paprsků postupně mění, tj. přibývá jader těžších prvků (He, N a nakonec Fe!) na úkor podílu protonů. Zatím není známa příčina tohoto trendu.

Data z observatoře PAO měla ovšem také zjistit, zda existují nějaké koincidence mezi směry příchodů nejenergetičtějších částic a známými astronomickými objekty mimo naší Galaxie (prakticky je jisté, že zdroje těchto paprsků nemohou být uvnitř naší Galaxie). Původní naděje, že dobrým kandidátem bude galaxie





třídě AGN (aktivní jádro galaxie) **Centaurus-A**, která je od nás vzdálena jen ~4 Mpc a má ve svém těžišti černou veledíru o hmotnosti  $55 M_{\odot}$ , z níž vybíhají relativistické výtrysky hmoty ve dvou protilehlých směrech, se nepotvrdila. Současná data sice mívají přebytek výskytu částic v širším okolí zmíněné galaxie potvrzují, ale nejsou statisticky příliš významná. Problém spočívá – jak známo – v tom, že směr šíření primárních kosmických paprsků, které nesou elektrický náboj, ovlivňují magnetická pole: interstelární i intergalaktické, popř. interplanetární. Průběh siločar těchto polí ani jejich magnetickou indukci většinou vůbec neznáme, takže je téměř nemožné prokázat příslušnost konkrétní částice ke konkrétnímu víceméně bodovému vzdálenému zdroji.

### Observatoře Telescope Array a IceCube na jižním pólu

Pro pořádek je třeba uvést, že PAO má svůj skrovnější protějšek na severní polokouli v podobě soustavy Telescope Array (TA) provozované v Utahu (39° s. š.; 1 400 m n.m.) konzorciem amerických, japonských, jihokorejských, ruských a belgických odborníků. Observatoř pokrývá plochu 700 km<sup>2</sup> a rozteče více než 500 pozemních detektorů (plastových scintilátorů o objemu [2x] 3 m<sup>2</sup> x 12 mm) činí 1,2 km. Observatoř má navíc na třech stanicích celkem 36 kamer, každou o sběrné ploše 6,8 m<sup>2</sup>, resp. 3 m<sup>2</sup> se zorným polem 16° x 14°, resp. 18° x 15°. V každé ohniskové rovině se nachází 256 fotonásobičů. Observatoř se stavěla od r. 2003 a začala získávat data v r. 2008. Nyní se ukazuje, že shodou okolností jsou obě observatoře umístěny v optimálních zeměpisných šířkách a ve stejné nadmořské výšce, což usnadňuje srovnávání výsledků, byť samozřejmě s ohledem na skromnější parametry severní observatoře je jich méně a mají méně přesné kalibrace. Nicméně v poslední době se využívá okolnosti, že oblast kolem zeměpisného rovníku je pozorovatelná z PAO i TA, což umožňuje jednak lépe a univerzálně kalibrovat data, ale hlavně sjednotit údaje z obou observatoří do zajímavých statistik.

Tak se například ukázalo rozbořením poloh 231 primárních částic s energiemi >52 EeV z PAO a 87 poloh částic s energiemi >57 EeV z TA, že existuje jistá souvztažnost se statistikou neutrin na observatoři IceCube na jižním pólu. Neutrina zachovávají přesně směr svého letu, takže mohou být vodítkem pro další výzkum globální (dipólové) anizotropie kosmického záření.

Vysoké energie primárního kosmického záření jsou přirozeně lákavé také pro prodloužení stupnice účinných průřezů částic při jejich vzájemných interakcích. Přitom lze ovšem využít pouze energie uvolněné v těžišti srážky, ale i tak se již podařilo změřit příslušné parametry pro rekordní energie 39 a 55 TeV. Podobně se podařilo pomocí kamer PAO zlepšit o řád horní mez pro výskyt magnetických monopólů s intermediální hmotností a velkými Lorentzovými faktory.

Podobně se podařilo určit zatím nejostřejší horní mez pro zastoupení extrémně energetických reliktních fotonů v kosmickém záření a zastoupení reliktních neutrin. Nové meze jednoznačně poukazují na to, že kosmické záření nejvyšších energií vzniká v relativně mladých

konkrétních kosmických zdrojích vně naší Galaxie. Observatoř PAO se čím dál tím více začala podobat průzkumnému oddílu, který se pohybuje v neprobádané oblasti, což přirozeně nutí vědeckou komunitu observatoře k neustálým změnám taktiky výzkumu.

### Kamerová stanice Coihueco

Především se ukázalo že průzkum se pohyboval příliš daleko od pásma nižších energií, kde probíhaly úspěšně předešlé méně ambiciózní experimenty. Kvůli lepšímu navázání předešlých výsledků s daty získávanými v PAO byly na jedné z kamerových stanic (Coihueco) instalovány tři další kamery stejného typu, které však mířily do větších úhlových výšek 30° – 60° s cílem získat údaje o sprškách s nižšími energiemi již od 0,1 EeV (projekt HEAT). Podobně byly na přilehlém povrchu observatoře rozestaveny další Čerenkovovy nádrže s roztečí mezi sebou jen 750 m, takže na ploše 23,5 km<sup>2</sup> se od té doby daří zaznamenávat i početné částice s energiemi od 0,3 EeV. Současně se zde instalovaly podzemní plastové scintilátory kvůli rozlišení různých součástí spršek (elektromagnetické, mionové a hadronové).

### Projekt Auger Prime

Jelikož PAO sbírá data již celých 10 let, dospěli členové mezinárodní spolupráce k rozhodnutí upravit hardware tak, aby se lépe využilo dosavadních zkušeností ke zrychlení a zkvalitnění práce observatoře. Projekt dostal své jméno **Auger Prime** a podle závazného rozhodnutí z plenárního zasedání v listopadu 2015 se má uskutečnit během nejbližších tří let.

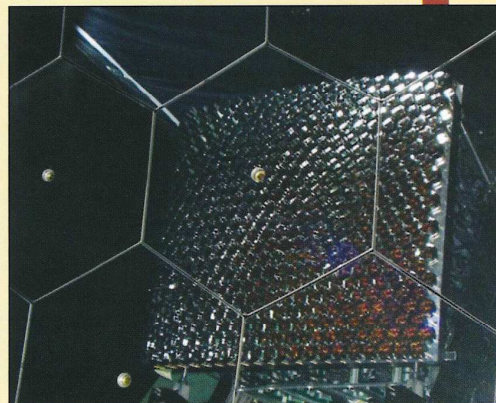
Kvůli snížení cestovních nákladů se připravuje dálkové ovládání obřích kamer z Německa a kvůli prodloužení expozičních časů kamer v době, kdy ruší Měsíc, se bude pracovat se sníženým napětím na fotonásobičích. Tím se získá více dat o neenergetičtějším sprškách.

Úprav doznají také pozemní Čerenkovovy nádrže. Nad každou z nich bude umístěn plastový scintilátor o ploše 4 m<sup>2</sup>, což dá možnost lepšího odlišení mionové a elektromagnetické složky spršek. Tím se výrazně zpřesní údaje o hmotnostním složení primárních částic nejvyšších energií. Součástí úpravy bude také instalace třikrát rychlejší elektroniky, která rozšíří dynamický rozsah měření. Přibudou i další podzemní scintilační detektory a pokusně bude probíhat i zapojení antén detekujících rádiové signály na frekvencích 30 – 80 MHz, které doprovázejí vysokoenergetické spršky (projekt AERA).

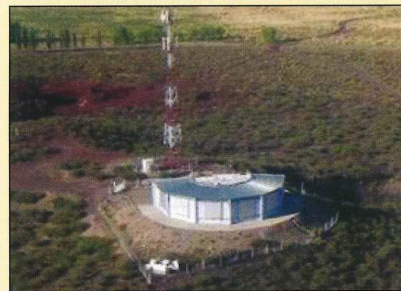
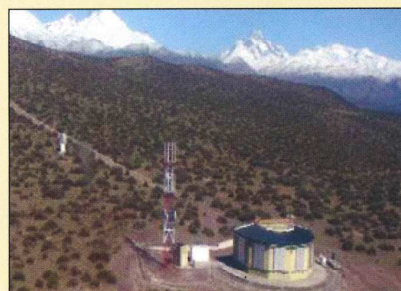
### Český podíl na projektech

Český přínos k budování a vědeckému provozu observatoře v průběhu let neustále roste. Po slibném začátku, kdy olomoucká zrcadla pro obří kamery prokázala své kvality ve výběrovém řízení, takže jimi bylo osazeno 12 kamer na dvou ze čtyř pozorovacích stanic, a prof. Řídký se stal vedoucím skupiny fluorescenčních detektorů observatoře, přibývalo mladých diplomantů a doktorandů jak z MFF UK v Praze a Přírodověd. fak. UP v Olomouci, tak také z JFJI ČVUT v Praze.

Všichni nováčci dostali brzy příležitost podílet



Ohnisková plocha se 440 fotonásobiči zobrazená českými hexagonálními zrcadly v širokouhlých světelných kamerách PAO.



Letecké snímky stanic s kamerami. Zhora: Coihueco, Loma Amarilla (oba osazené českými zrcadly), Los Leones a Los Morados (oba s německými zrcadly).







Kamery HEAT (Coihueco; 1 750 m n. m.) osazené českými zrcadly pro pozorování spršek s nižšími energiemi částic i přilehlá část pampy s hustěji osazenými pozemními i podzemními detektory a anténami.



Přibližně uprostřed observatoře funguje centrální lidar pro měření průzračnosti atmosféry během nočních pozorování. Vlevo je vidět instalovaný pozemní dektor, v jehož nádrži je 12 t destilované vody.



Český robotický teleskop FRAM během denní údržby s operátorem Martinem Maškem. Archiv autora



Český robotický teleskop FRAM během nočního pozorování na stanici Los Leones. Foto M. Mašek



Logo  
PAO



Poštovní známka vydaná argentinskou poštou v r. 2007 zobrazuje pozemní detektor, stanici s kamerami a nejvyšší energii částic pozorovaných na observatoři.

se na stavbě Observatoře i na prvních experimentálních i teoretických úkolech v rámci přípravy svých diplomových a posléze i disertačních prací. S přibývajícím zkušenostmi mohli o výsledcích své práce referovat na mezinárodních poradách jak v sídle observatoře v Malmargüe, tak také na regionálních setkáních organizovaných v členských státech. Brzy se stalo pravidlem, že taková setkání se konala také v České republice, což svědčilo o vážnosti, s níž mezinárodní společenství, které se postupně rozrostlo na 500 badatelů z 18 států, českou účast na projektu oceňovalo. Českou republiku během výstavby observatoře čtyřikrát navštívil i jeden z otců zakladatelů, nositel Nobelovy ceny za fyziku, americký fyzik prof. James Cronin z Chicaga, mj. čestný člen Učené společnosti ČR.

Olomoučtí optici, kteří byli zásluhou zejména RNDr. Miroslava Palatky autory návrhu optického systému světelných širokoúhlých komor, byli posléze již bez výběrového řízení požádáni o výrobu a testování segmentovaných šestiúhelníkových zrcadel o průměru 0,65 m pro tři kamery soustavy HEAT (High Elevation Auger Telescopes), jež byla instalována na stanici Coihueco v r. 2009 s cílem rozšířit spodní hranici pro pásmo energií primárních částic kosmického záření o řád, tj. až k energii 0,1 EeV. V průběhu devíti let tak čeští optici pod vedením RNDr. Petra Schovánka zhotovili, otestovali, pohlídkovali a instalovali více než 900 hexagonálních zrcadel ze skla Simax, které dodala Sklárna Kavalierglass v Sázavě u Benešova. Složitý transport z Olomouce přes Hamburk, Valparaiso a andské průsmyky až po montáž na stanicích v pampě Amarilla přežila všechna vyrobená zrcadla bez jediné úhony!

Vytrvalým pomocníkem pro kalibraci pozorovacích údajů z širokoúhlých komor se stal také robotický teleskop FRAM, který vznikl v pražském odd. astročásticové fyziky Fyzikálního ústavu pod vedením RNDr. Michaela Prouzy, Ph.D. Byl koncem r. 2005 instalován na stanici Los Leones s cílem měřit okamžitou průzračnost atmosféry ve směru, kde byla pozorována vysoce energetická sprška. Ve volném čase pak FRAM s primárním zrcadlem o průměru 0,3 m a vybavený dvěma digitálními kamerami pozoruje světelné křivky zákrytových dvojhvězd i jiné proměnné hvězdy, ale i vzácné úkazy na nebi, jako jsou optické dosvity zábleskových zdrojů záření gama (GRB), jasné komety a planety křížující zemskou dráhu. FRAM je ovládán dálkově z České republiky.

Olomoučtí optici zejména díky Mgr. Dušanu Mandátovi, Ph.D. a Mgr. Miroslavu Pechovi, Ph.D., mezitím vyvinuli celooblohovou kameru, jež umožňuje v reálném čase odhalit stopy oblačnosti kdekoli na obloze díky průběžnému

počítání viditelných katalogizovaných hvězd v různých částech oblohy. Tento způsob detekce noční oblačnosti se ukázal jako nejvýhodnější, protože na rozdíl od lidarů, které na observatoři rovněž pracují, nenarušuje činnost optických kamer pro fluorescenční detektory, a udává rozložení mračen po celé obloze naráz.

Čeští odborníci pod vedením RNDr. Martiny Boháčové, Ph.D. se podílejí významnou měrou na přesné kalibraci energií spršek pozorovaných fluorescenčními detektory a v průběhu doby tak významně přispěli ke zvýšení přesnosti v určování energií primárního kosmického záření. Není divu, že když skončilo funkční období prof. Řídkého jako vedoucího sekce fluorescenčních detektorů, tak jeho pokračovatelem ve funkci byl jmenován Mgr. Radomír Šmída, Ph.D. z odd. astročásticové fyziky Fyzikálního ústavu AV ČR. Další členové českého týmu koordinují přípravu vědeckých prací a referátů na vědeckých konferencích a podíleli se také na přípravě podkladů týkajících se zmíněné modernizace celé aparatury v právě začínajícím projektu Auger Prime, jež má pokračovat do r. 2024.

S rostoucím objemem uložených dat a nutností časově náročných počítačových simulací se podařilo do projektu zapojit také informatiky Mgr. Jaroslavu Schovancovou, RNDr. Jiřího Chudobu, Ph.D. a Mgr. Petra Janečka, Ph.D., kteří díky zkušenostem z gridového počítání v laboratoři CERN přinesli do projektu Pierra Augera své cenné zkušenosti, jak data zpracovávat a vytěžovat. České postavení v této mezinárodní nevládní spolupráci také posiluje dobře zajištěné financování podílu na výstavbě, provozu a modernizaci Observatoře, za což vděčíme především grantům MŠMT ČR.

Snad zde hraje jistou symbolickou roli i okolnost, že v srpnu r. 1912 objevil existenci kosmického záření rakouský fyzik Viktor Hess (1883 – 1964) při balonovém letu, kdy startoval z Ústí n. Labem, kde získal plynný vodík z chemické továrny Schicht, a balon Böhmen zapůjčil aeroklub z Teplé v Čechách. (Hess obdržel za svůj objev Nobelovu cenu za fyziku v r. 1936.) Posléze prof. František Běhounek (1898 – 1973) měřil v r. 1928 šířkový efekt kosmického záření během dobrodružného letu vzducholodi Italia k severnímu pólu, a po šťastném návratu pak v tomto výzkumu pokračoval, aby předal český štafetový kolík prof. Václavu Petržílkovi (1905 – 1976), jež započal po válce s měřením sekundárního kosmického záření v Praze a později na Lomnickém štítu. Petržílka byl též jedním ze zakladatelů tohoto výzkumu ve Fyzikálním ústavu ČSAV, kde se jeho nejvýznamějším následovníkem stal RNDr. Jaroslav Pernegr, CSc. (1924 – 1988), jež však po sovětské invazi odešel do laboratoře CERN, kde pracoval velmi úspěšně až do své smrti.

Domnívám se, že všechny vyjmenované osobnosti by nejspíš udělily současné generaci českých fyziků, astronomů a informatiků absolutorium za to, jak se v uplynulých patnácti letech podařilo našim odborníkům dotáhnout se v tomto oboru do světové špičky – navíc s vyhlídkou, že ve druhém poločase observatoře Pierra Augera v argentinské pampě budou čeští badatelé skórovat ještě výrazněji.

Jiří Grygar