

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky



Bakalářská práce

Analýza dat z robotického dalekohledu
FRAM

Autor: Martin Miho
Vedoucí práce: RNDr. Michael Prouza, Ph.D.
Studijní obor: Aplikovaná fyzika
Forma studia: Prezenční
Rok: 2023

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Martin Miho
Název práce:	Analýza dat z robotického dalekohledu FRAM
Typ práce:	bakalářská
Pracoviště:	Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce:	RNDr. Michael Prouza, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2023
Počet stran:	43
Počet příloh:	1
Jazyk:	český
Abstrakt:	<p>Tato práce má za cíl seznámit s koncepcí Observatoře Pierra Augera, jejími základními komponenty, rolí robotického teleskopu FRAM v monitorování atmosféry a podílet se na analýze dat z tohoto teleskopu. Cílem analýzy dat bylo prozkoumat homogenitu aerosolů v atmosféře v závislosti na azimutu, která byla předpovězena, avšak nepotvrzena. Tato analýza byla provedena pro naměřená data během roku 2020. Během analýzy jsme objevili části dat (několik nocí), které mají hodnoty vertikální aerosolové hloubky až desetkrát vyšší než běžné noci. U tohoto jevu jsme se snažili prozkoumat, zda tyto výkyvy nebyly způsobeny atmosférickými podmínkami (vítr, teplota, vzdušná vlhkost), avšak tento předpoklad se nám nepotvrdil. Při náhledu do interního materiálu observatoře jsme zjistili, že tento výkyv byl způsoben rozsáhlým požárem vegetace v pampě. Dále jsme provedli výzkum závislosti vertikální aerosolové hloubky na čase (během jedné noci) pro 7 lednových nocí a nezjistili jsme žádnou časovou závislost. Na základě analyzovaných dat by jsme tedy potvrdili předpoklad dobré homogenity aerosolů v atmosféře pro obyčejné i pro „abnormální“ noci, u kterých nedocházelo k významnému poklesu nebo nárůstu vertikální aerosolové hloubky v závislosti na azimutu.</p>
Klíčová slova:	Observatoř Pierra Augera, FRAM, VAOH, pozemní detektory, fluorescenční detektory, hvězdná fotometrie

Bibliographical identification

Author's first name and surname: Martin Miho
Title: Data analysis from the robotic telescope FRAM
Type of thesis: bachelor
Department: Joint Laboratory of Optics
Supervisor: RNDr. Michael Prouza, Ph.D.
Year of presentation: 2023
Number of pages: 43
Number of appendices: 1
Language: Czech
Abstract: The goal of this work is to familiarize with the concept of the Pierre Auger Observatory, its basic components, the role of a robotic telescope FRAM in atmospheric monitoring and to participate in data analysis of data from this telescope. The goal of the data analysis was to investigate homogeneity of the aerosols in the atmosphere as a function of azimuth, which has been predicted but not proven so far. This analysis was performed for measured data during 2020. During the analysis, we discovered parts of data (several nights) that have vertical aerosol optical depth values up to ten times higher than normal nights. For this phenomenon, we tried to investigate if these fluctuations were caused by atmospheric conditions (such as wind, temperature, air humidity), but this assumption was not confirmed. Looking at the observatory's internal material, we found that this abnormality was caused by an extensive vegetation fire in the pampas. We further investigated the time dependence of vertical aerosol optical depth (over one night) for seven nights in January and found no time dependence. Based on analyzed data, we would thus confirm the assumption of good homogeneity for the aerosols in the atmosphere for both ordinary and „abnormal“ nights, in which there was no significant decrease or increase in vertical aerosol optical depth as a function of azimuth.

Keywords: Pierre Auger Observatory, FRAM, VAOD, surface detectors, fluorescence detectors, stellar photometry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Michaela Prouzy, Ph.D., a že jsem použil zdroje, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce RNDr. Michaelu Prouzovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky. Dále bych rád poděkoval Mgr. Janu Ebrovi, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při zpracování dat.

Obsah

Úvod	7
1. Původ Observatoře Pierra Augera.....	8
2. Hybridní observatoř.....	9
2.1 Pozemní detektory	10
2.2 Fluorescenční detektory	12
2.3 Datová komunikace.....	16
2.4 Atmosférický monitoring	17
3. Robotický dalekohled FRAM	19
3.1 Hvězdná fotometrie	19
3.2 Pozorovací režimy dalekohledu FRAM.....	20
3.3 Hardware FRAMu.....	22
3.4 Ovládání FRAMu	25
4. Měření VAOH pomocí robotického teleskopu FRAM	26
4.1 Měření homogenity aerosolů	27
Závěr	39
Seznam použité literatury	41
Seznam použitých symbolů a zkratek	43

Úvod

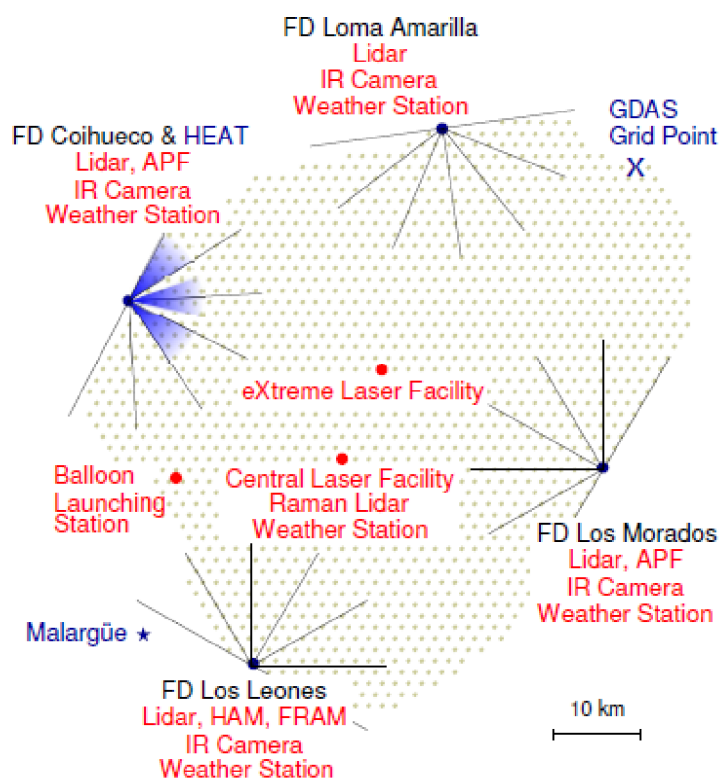
Observatoř Pierra Augera [1] je mezinárodní observatoř ležící poblíž města Malargüe v Argentině. V současnosti se jedná o největší observatoř určenou k detekci vysoce energetického kosmického záření na Zemi. Vysoce energetické kosmické záření je proud subatomárních částic, které mají energii vyšší než 10^{17} eV [2], a které při průchodu zemskou atmosférou interagují s částicemi vzduchu za vzniku dalších částic, které opět dále interagují s atmosférou a vzniká tzv. sprška. Jelikož dochází k rozpadu původní vysokoenergetické částice při jejím vstupu do atmosféry, není možné měřit tyto částice přímo na zemském povrchu, a proto se uchylujeme ke studiu parametrů spršek kosmického záření. Pravděpodobnost dopadu tohoto vysokoenergetického záření je velmi malá, proto zaujímá observatoř plochu o rozloze 3000 km^2 (jen o něco méně než je plocha např. Libereckého kraje v ČR). Observatoř k tomuto účelu využívá pole pozemních detektorů částic a čtyři stanice s optickými teleskopy [1], které pozorují spršku z různých stran a detekují slabé fluorescenční světlo, které vzniká při interakci kosmického záření s atmosférou. Zatímco pozemní detektory mohou pracovat nepřetržitě, fluorescenční detektory mohou být využity pouze během noci při slabém měsíčním světle. Při využití fluorescenčních detektorů je potřeba monitorovat atmosféru a znát vlastnosti (teplotu, tlak, vlhkost vzduchu, přítomnost mraků, aerosolů v atmosféře atd.), které atmosféra měla při pozorování spršky. K určení vlivu aerosolů (jejich absorpce fluorescenčního světla, které vzniká ve spršce) a přítomnosti mraků na pozorování se využívá robotického dalekohledu FRAM (Fotometric Robotic Atmospheric Monitor), který jako pasivní monitorovací systém neprodukuje žádné záření, které by mohlo ovlivnit pozorování pomocí fluorescenčních detektorů. FRAM v současné době slouží k monitorování atmosférických podmínek v oblasti pozorované spršky. Toto monitorování probíhá porovnáváním aktuální detekované jasnosti viditelných hvězd s hvězdnými katalogy (v současnosti s hvězdným katalogem Tycho2 [3]). V závislosti na rozdílu mezi detekovanou jasností a jasností uvedenou v katalogu lze určit extinkční koeficient pro aerosoly v atmosféře, či přítomnost oblačnosti [4]. Cílem této práce je seznámit se s koncepcí observatoře, s robotickým teleskopem FRAM, s principy pozorování kosmického záření a podílet se na analýze atmosférických snímků z robotického dalekohledu FRAM.

1. Původ Observatoře Pierra Augera

Observatoř Pierra Augera byla navržena v roce 1991 dvojicí fyziků – Jimem Croninem a Alanem Watsonem a její první koncept byl představen na Mezinárodní konferenci kosmického záření v Dublinu jako způsob, kterým zkoumat tajemství původu a chování vysokoenergetického záření. V roce 1995 se v Paříži uskutečnilo setkání, které vybralo argentinskou provincii Mendoza jako lokaci pro plánovanou observatoř [1].

Tato observatoř byla pojmenována po francouzském fyzikovi Pierrovi Victoru Augerovi, který se svou vědeckou skupinou během třicátých let dvacátého století zkoumal atmosférické spršky a je považován za jejich objevitele [5].

Stavba observatoře začala v roce 2002 poblíž města Malargüe a oficiálně byla dokončena v roce 2008. Na stavbě observatoře se podílelo celkem 18 států, jedním z nich byla i Česká republika. Jedná se o observatoř s hybridním způsobem měření, které probíhá pomocí rozsáhlého pole pozemních detektorů (PD) a fluorescenčních detektorů (FD) [1].



Obr. 1: Schéma Observatoře Pierra Augera. Čtyři silnější tečky na okrajích zobrazují stanice fluorescenčních detektorů, u nichž jsou umístěny, lidary, infračervené kamery a pozemní meteorologické stanice (na stanici Los Leones je dále umístěn FRAM). Světlejší tečky zobrazují pole pozemních detektorů, v jejichž středu jsou dvě laserová zařízení Central Laser Facility (CLF) a eXtreme Laser Facility (XLF) (Převzato z [1]).

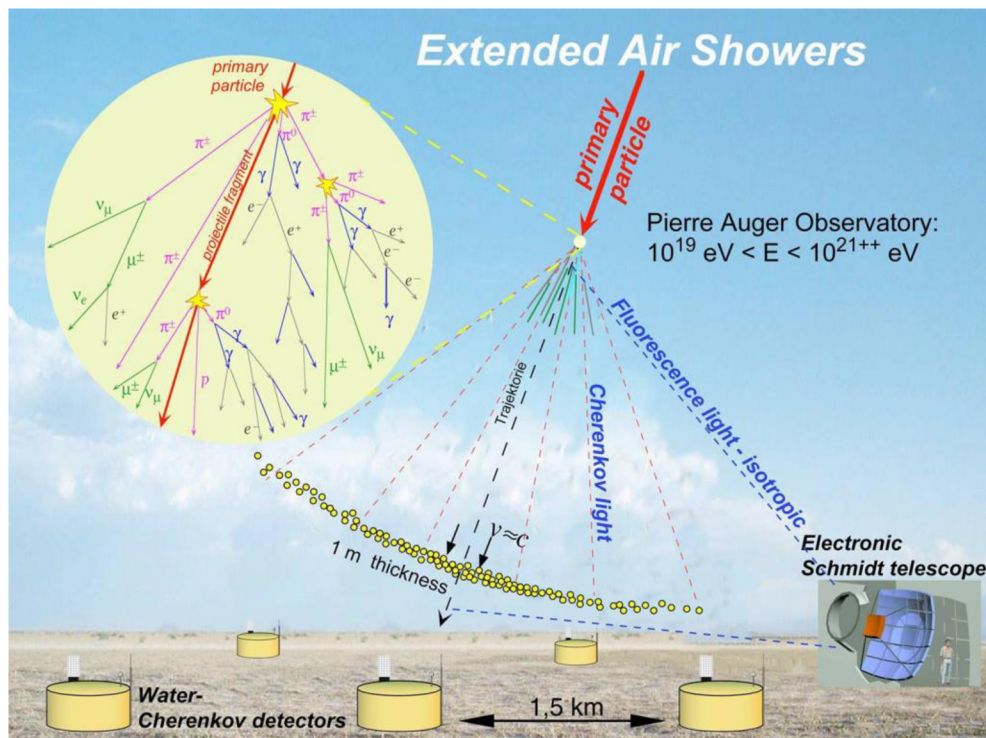
2. Hybridní observatoř

Hlavní výhodou observatoře je její schopnost měřit vysokoenergetické záření současně pomocí pozemních a fluorescenčních detektorů. Tyto dvě techniky jsou využívány k měření atmosférických spršek doplňkovou metodou, která nám umožňuje využít data z obou technik pro jejich vzájemnou kontrolu a doplnění [1].

Pozemní detekce probíhá pomocí pole o velikosti přibližně 3000 km², které se skládá z 1660 vodních Čerenkovových stanic, které jsou umístěny v trojúhelníkové mřížce, v níž jsou detektory od sebe vzdáleny právě 1500 m. Pozemní detektory (PD) provádí měření nepřetržitě. Jejich úkolem je měřit čelní část spršky, jak dopadá na zemský povrch. Z naměřených dat dále určují směr dopadu spršky a odhadují energii primární částice, která zapříčinila vznik spršky při vstupu do atmosféry. Dopadová oblast spršky je zvláště pro energie nad $3 \cdot 10^{18}$ eV detekována se 100% účinností nezávisle na energii původní částice a výpočet této oblasti probíhá formou součtu aktivovaných detektorů (detektorů, které tuto spršku zachytily) vynásobeným hexagonální buňkou, která odpovídá 4,59 km² (pro zenitový úhel spršky menší než 60°). Důležitou vlastností povrchových detektorů je skutečnost, že se kvalita jejich měření zlepšuje společně s energií spršky [1].

Fluorescenční detektory (FD) slouží k určení podélného vývoje sprškové kaskády v atmosféře. Cílem těchto detektorů je zachytit a analyzovat fluorescenční světlo, které je emitováno v ultrafialové oblasti spektra při srážkách primární a posléze sekundárních částic v atmosféře. Právě díky tomuto způsobu měření je možné provádět měření pouze v noci bez přítomnosti oblačnosti. Tato značná nevýhoda je ovšem kompenzována možností sledovat profil spršky. Vzhledem k tomu, že je pozorované fluorescenční světlo proporcionální k energii uvolnění při vzniku spršky, můžeme téměř kalorimetrickou metodou určit energii původní primární částice. Další schopností fluorescenčních detektorů je možnost určit hmotnostní složení a směr dopadu primární částice [1].

Důvodem pro měření stejných vlastností (energie, hmotnost, směr dopadu) jak pozemními, tak i fluorescenčními detektory je provést vzájemnou kontrolu jimi naměřených dat a zajistit správnou energetickou kalibraci pozemních detektorům, které pracují nepřetržitě, i během dne, kdy není možná jejich vzájemná kontrola s fluorescenčními detektory, které ve dne pracovat nemohou kvůli dennímu světlu. Tento způsob nám také dovoluje zajistit lepší kvalitu naměřených dat, které jsou potřeba pro přesnější měření směru příletu částice [1].

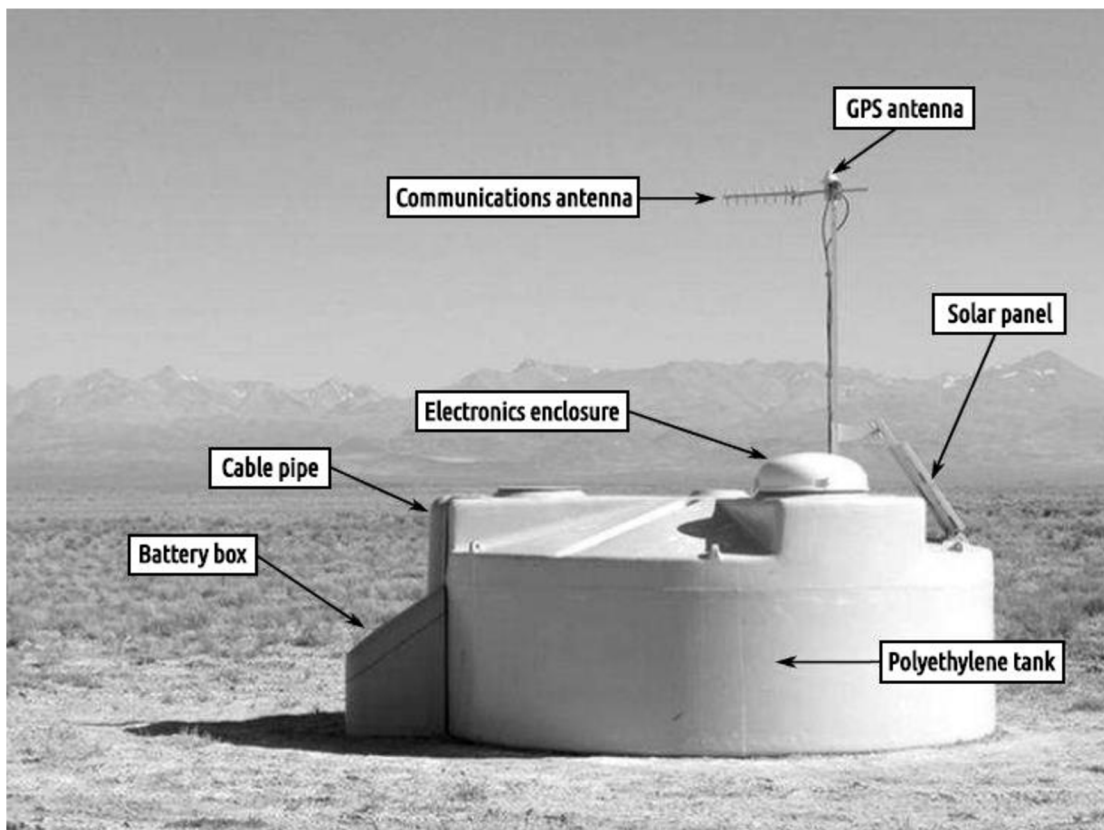


Obr. 2: Detekce atmosférické spršky hybridní metodou (Převzato z [6]).

2.1 Pozemní detektory

Pozemní detektory [1] (Obr. 3) jsou tvořeny plastovými vodními nádržemi o průměru 3,6 m, výškou 1,2 m s reflexním vnitřním povrchem (vločkou). Každá nádrž obsahuje 12 000 litrů ultračisté vody, jejíž kvalita (rezistivita) přesahuje 15 MΩcm. Tři devítipalcové fotonásobiče Photonis XP1805/D1 jsou rozmístěny nad hladinou ve vzdálenosti 1,2 m od středu nádrže a shlíží do vody skrze okna z čistého polyethylenu. Jejich úkolem je zaznamenat Čerenkovovo záření, které vzniká při průchodu dopadajících částic do vody. Každý pozemní detektor je vybaven dvěma solárními panely s průměrným výkonem 10 W (55 Wp (Watt-peak)), elektronikou (procesorem, GPS přijímačem, rádiovým přijímačem a regulátorem výkonu) a dvěma 12V, 115Ah bateriemi zapojenými do série, jejichž životnost je 4,5-6 let. Součástí elektroniky PD jsou i ovládací jednotky výkonu nádrže, které monitorují úroveň výkonu a zajišťují možnost vzdáleně uvést pozemní detektor do hibernace v případě, že úroveň baterie spadne pod kritickou hodnotu, nicméně tato funkce zatím nebyla využita vzhledem k dostatečným kapacitám baterií. Baterie jsou umístěny v rotačně lisovaném polyetylenovém bateriovém boxu, který je izolován polystyrenovými deskami pro minimalizaci teplotních výkyvů během dne a noci. Jelikož se životnost baterií snižuje s rostoucí teplotou, je box umístěn na stinnou stranu detektoru pro dodatečnou ochranu vůči slunečnímu svitu. Solární panely jsou namontovány na

hliníkových konzolích, které dále slouží jako opora pro stožár antény. Celý tento systém je navržen tak, že odolává větru o rychlosti až 160 km/h. Vnitřní stěny nádoby jsou pokryté pružným plastovým materiálem (vločkou), který má tři vrstvy, které zajišťují světlotěsné prostředí a difúzně odráží Čerenkovovo záření, které je produkováno uvnitř nádoby (ve vodě). Vložka má tři okna, která jsou určena pro fotonásobiče, které detekují Čerenkovovo záření. Každý pozemní detektor obsahuje GPS přijímač a komunikační anténu, která slouží k přesnému časovému záznamu události a synchronizaci s ostatními pozemními detektory (v současné době se využívá přijímač Motorola (OEM) Oncore UT+). Čerenkovovo záření je měřeno v jednotkách signálu produkovaného mionem procházejícím nádrží po vertikální trajektorii. Tyto jednotky se nazývají Vertikální Ekvivalent Mionu (VEM). Během rekonstrukce spršky se signál zaznamenaný pozemním detektorem převádí na VEM a celková energie spršky a směr dopadu jsou fitovány pomocí laterální distribuce a přeměny energie na základě hybridní analýzy pomocí fluorescenčních detektorů. Důvodem převodu na jednotky VEM je zajištění společné referenční úrovně mezi nádržemi a pro kalibraci oproti simulacím detektoru. Fotonásobiče a elektronika tvoří nejkritičtější součást pozemních detektorů, jelikož jsou vystaveny nepříznivým podmínkám (rozdíly teplot, vzdušná vlhkost, salinita a prach). Průměrná míra selhání je přibližně 20 detektorů za rok. Co se týče samotných vodních čerenkovových detektorů, bylo zjištěno jen velmi málo poruch. Krátce po instalaci byla pozorována netěsnost několika vložek. V tomto případě, který tvoří nejhorší poruchový režim, bylo potřeba nádrž vypustit a převést zpět do montážní budovy k výměně vnitřních součástí. Operace celého pole je monitorována online s cílem nemít více jak 20 pozemních detektorů mimo provoz. Údržba pole si vyžaduje přibližně 3 cesty za týden a většina problémů lze opravit přímo na místě [1].



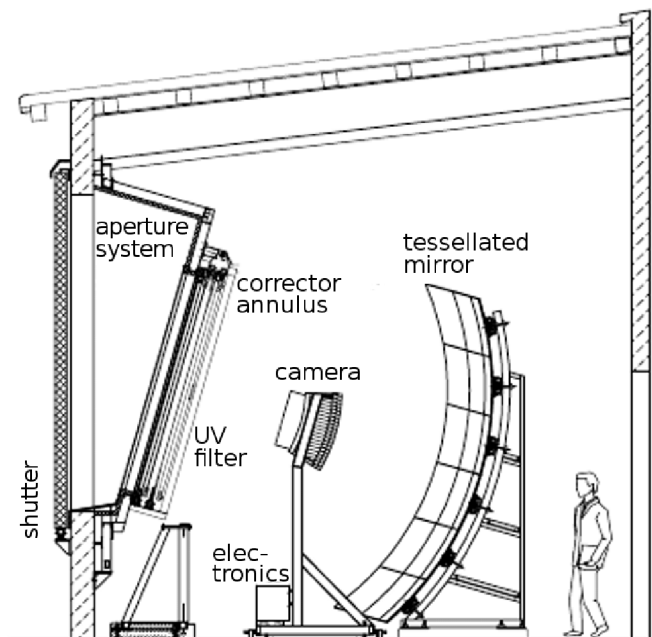
Obr. 3: Pozemní detektor (Převzato z [1]).

2.2 Fluorescenční detektory

Fluorescenční detektory [1] (Obr. 4) detekují fluorescenční záření molekul dusíku, které vzniká izotropně při průchodu spršky atmosférou. Toto světlo vstupuje přes kruhovou aperturu o poloměru 1,1 m, která je zakryta skleněným filtrem Schott MUG-6, jehož propustnost se pohybuje nad 50 % (80 %) mezi 310 a 390 nm (330 a 380 nm). Filtr slouží ke snížení světelného toku pozadí a tím zlepšuje poměr signálu k šumu měřeného signálu spršky. Slouží také jako mechanická zábrana, která udržuje prostor obsahující dalekohledy a elektroniku čistý se stabilním klimatem. Okenice (Shutter) zobrazená na obrázku 5 se automaticky zavírá během denního světla a v noci, když je vítr příliš silný nebo je detekován déšť. Kromě toho je za vstupní aperturu namontována bezpečnostní clona, která zabraňuje osvětlení kamery denním světlem v případě poruchy závěrky nebo selhání systému, který se stará o automatické zavření. Ve vnější části apertury je umístěna zjednodušená segmentovaná prstencová čočka, která koriguje sférickou aberaci a eliminuje koma aberaci [1].

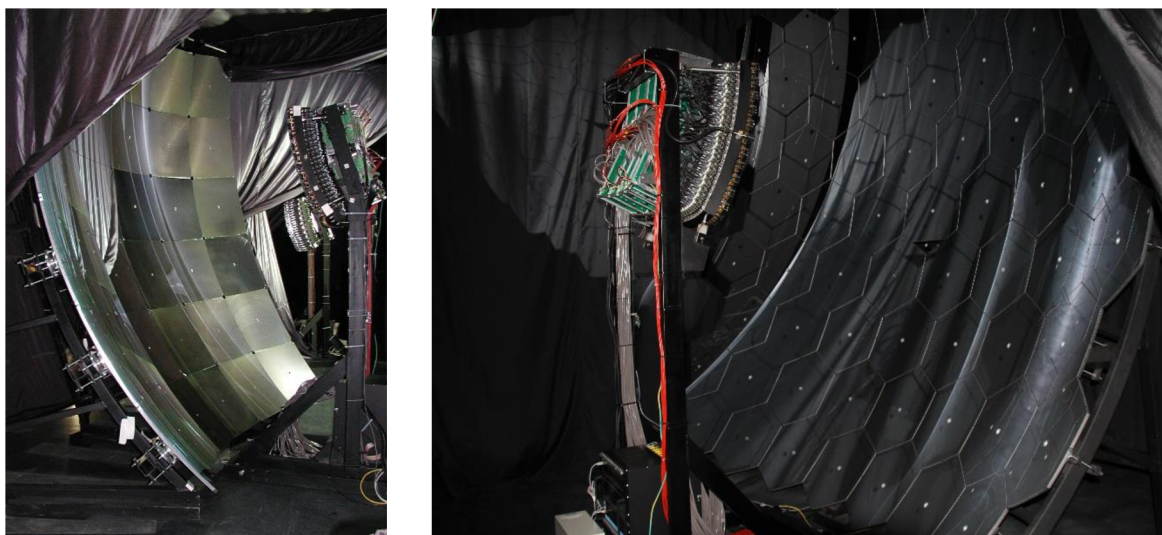


Obr. 4: *Fluorescenční detektor* (Převzato z [1]).



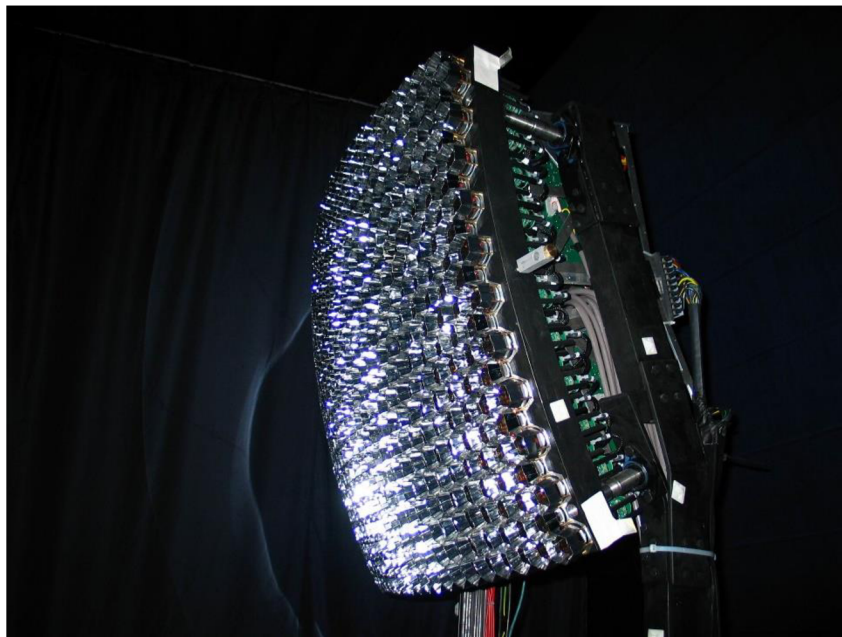
Obr. 5: Schéma fluorescenčního detektoru (Převzato z [1]).

Světlo je zaostřeno pomocí sférického zrcadla o poloměru zakřivení 3400 mm na sférickou ohniskovou plochu s poloměrem zakřivení 1700 mm. Vzhledem ke své velké ploše (13 m²) je primární zrcadlo segmentováno, aby se snížily náklady a hmotnost optického systému. Jsou použity dvě alternativní konfigurace segmentace: jedna je mozaika 36 obdélníkových eloxovaných hliníkových zrcadel tří různých velikostí a druhá je struktura 60 šestihránných skleněných zrcadel (čtyř tvarů a velikostí) s vakuově nanesenými reflexními povlaky. Oba tyto typy zrcadel si můžeme prohlédnout na obrázku 6. Průměrná odrazivost vyčištěných zrcadlových segmentů na vlnové délce 370 nm je více než 90 % [1].



Obr. 6: Sférická zrcadla: vlevo obdélníková zrcadla (Převzato z [7]) a vpravo šestihránná (Převzato z [8]).

Tělo kamery (obrázek 7) je vyrobeno z hliníkového bloku o tloušťce 60 mm s vnějším poloměrem zakřivení 1701 mm a vnitřním poloměrem zakřivení 1641 mm. Šestihranné trubice fotonásobiče, model XP3062 vyráběné společností Photonis, jsou umístěny uvnitř otvorů o průměru 40 mm, které jsou vyvrtány skrz blok kamery v místech středů pixelů. Pixely jsou uspořádány v matici 22 řádků a 20 sloupců. Trubice mají tvar šestiúhelníků se vzdáleností mezi hranami 45,6 mm. Trubice jsou odděleny zjednodušenými Winstonovými kužely připevněnými k tělu kamery, které shromažďují světlo k aktivní katodě trubice fotonásobiče. Světelné kolektory slouží k zabránění dopadu fotonů v mrtvých prostorech mezi trubicemi katody. Horní hrana světelných kolektorů leží na ohniskové ploše o poloměru 1743 mm. Zorné pole pixelů definované horními okraji odpovídá úhlové velikosti 1,5°. Všechny nosné konstrukce a kabely jsou rozmístěny tak, aby se minimalizovalo jakékoli zatemnění v dráze světla. Čistění a údržba vnější části probíhá na pravidelné bázi a zahrnuje čištění UV filtrů z vnější strany kvůli nánosům prachu (tato údržba probíhá třikrát ročně). Zařízení uvnitř budovy se čistí méně často, jelikož není vystaveno vnějšímu prostředí. Vždy jednou či dvakrát ročně probíhá měření odrazivosti několika vybraných zrcadlových segmentů. Z těchto měření byl zjištěn nárůst odrazivosti o méně než 1%, který byl způsoben čištěním zrcadel, které probíhalo přibližně po šesti letech od instalace zrcadla [1].



Obr. 7: Kamera (Převzato z [7]).

Důležitými vlastnostmi pro elektroniku fluorescenčních detektorů je schopnost poskytnutí velkého dynamického rozsahu a schopnost silného potlačení pozadí při zaznamenání spršky. Elektronika je zodpovědná za antialiasing filtrování, digitalizaci a ukládání signálů z fotonásobiče XP3062, který má formu 8-stupňové jednotky s bi-alkalickou fotokatodou s kvantovou účinností cca 25 % v rozsahu vlnových délek 350 až 400 nm. Vysoké napětí fotonásobiče zajišťuje vysokonapěťový dělicí řetězec, který tvoří spolu s obvody budiče signálu jednu fyzickou jednotku. Tato hlavní elektronická jednotka je připájena k letným

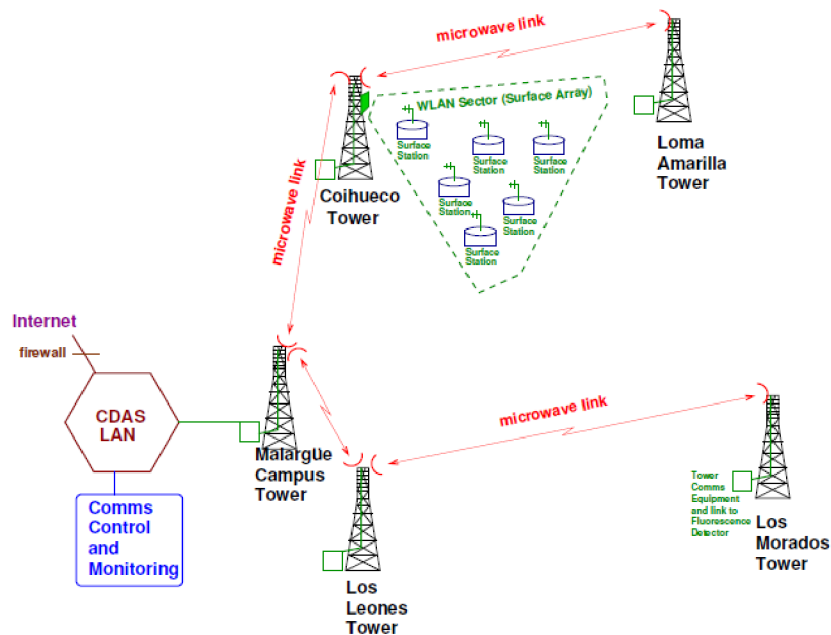
vodičům fotonásobiče. Stabilizace vysokonapětového potenciálu pro velké pulzy a za přítomnosti nízké, ale nezanedbatelné intenzity světla na pozadí tmavé oblohy je realizována využitím aktivní sítě, která využívá bipolární tranzistory v posledních třech stupních fotonásobiče. Aktivní dělič zajišťuje, že posun zesílení v důsledku dělicího řetězce je menší než 1 % pro anodové proudy do cca 10 mA. Normální tmavé pozadí oblohy za bezměsíčných nocí indukuje anodový proud asi 0,8 μA na každém fotonásobiči. Elektronika hlavy pro každý fotonásobič je připojena k rozvodné desce umístěné hned za tělem kamery, která obsluhuje 44 fotonásobičů a poskytuje vysoké a nízké napětí a přijímá výstupní signály. Signál je pak tvarován a digitalizován ve frontendu elektroniky, kde jsou také generovány prahové a geometrické spouštěče. Analogové desky v jednotce frontendu jsou navrženy tak, aby zvládly velký dynamický rozsah požadovaný pro měření fluorescence vzduchu, to znamená rozsah 15 bitů a časování 100 ns. Jakmile jsou data fotonásobiče zpracovávána, tak procházejí flexibilním třístupňovým spouštěcím systémem, který je implementovaný ve firmwaru a softwaru. Frekvence spouštění každého pixelu ve fotoaparátu (spouštění první úrovně) je udržována kolem 100 Hz úpravou prahové úrovně pixelu. Algoritmus spouštěče druhé úrovně vyhledává v kameře segmenty stopy o délce alespoň pěti pixelů. Typická frekvence spouštění na kameru se pohybuje mezi 0,1 a 10 Hz. Spouštěč třetí úrovně je softwarový algoritmus navržený k čištění datového proudu vzduchové sprchy od šumu, který přežije nízkourovňové hardwarové spouštěče. Je optimalizován pro rychlé potlačení spouštění způsobených bleskem, spouštění způsobených mionovými dopady kosmického záření na kameru a náhodně spouštěnými pixely. Každý dalekohled je připojen k počítači, který slouží k odečtení dat událostí z frontendu elektroniky přes rozhraní FireWire. Počítače na každém stanovišti jsou připojeny přes 100 Mbitový ethernetový LAN přepínač k centrálnímu odečítacímu počítači na místě, nazývanému „EyePC“, který zajišťuje spojení mezi komunikační sítí a počítači. Jelikož jsou počítače bezdiskové, ukládají svá data přímo na pevný disk EyePC. Události, které přežívají všechny úrovně spouštění, jsou odesílány přes počítače do EyePC, který sestavuje událost ze shodných dat ve všech dalekohledech na daném místě a generuje hybridní spouštěč pro povrchové pole. Frekvence událostí je asi 0,012 Hz na stanoviště pro 24 základních dalekohledů. Během každé noci provozu FD jsou do atmosféry směřovány tisíce kolimovaných UV laserových pulzů (355 nm) ze dvou zařízení umístěných blízko středu sítě pozemních detektorů (XLF a CLF). Světlo rozptýlené z laserových pulzů generuje stopy ve stejných dalekohledech fluorescenčních detektorů, které také zaznamenávají stopy generované vzduchovými sprchami. Na rozdíl od vysokoenergetických vzduchových spršek lze směr, rychlost a energii laserových pulzů předem naprogramovat podle potřeby. Laserové pulsy mohou být vystřelovány ve specifických směrech vzhledem k zemi, například vertikálně, nebo ve specifických směrech vzhledem k obloze jako například střed aktivní galaxie Centaurus A, která je potenciálním zdrojem kosmického záření. Optické vlákno u každého laseru směřuje malé množství světla do sousední stanice pozemního detektoru a zajišťuje hybridní laserové události. Naměřená data poté slouží k určení citlivosti fluorescenčních detektorů, měření časových posunů mezi pozemními a fluorescenčními detektory a provádění hodinových měření vertikálních profilů optické hloubky aerosolů [1].

2.3 Datová komunikace

Pro observatoř byl navržen a implementován vlastní systém založený na dvouvrstvé hierarchii. Povrchové detektory jsou propojeny vlastní WLAN, která je sektorována a podporována čtyřmi koncentračními uzly. Síť WLAN je obsluhována vysokokapacitní mikrovlnnou páteří, která také podporuje komunikaci mezi čtyřmi místy fluorescenčních detektorů a hlavním střediskem pro sběr dat a řízení. Vyšší vrstvu celého systému tvoří vysílače a přijímače namontované na pěti komunikačních věžích, které jsou umístěny po obvodu observatoře (obr.8). Tato vrstva zajišťuje sběr dat z pozemních detektorů a vysokorychlostní komunikaci mezi fluorescenčními detektory a hlavním kampusem observatoře. Nižší vrstvu systému tvoří rozsáhlá WLAN, která obsahuje vlastní jednotky pracující v pásmu 902 až 928 MHz ISM. Mezi každou stanicí povrchového detektoru a jedním ze čtyř koncentračních uzlů namontovaných na čtyřech věžích je vytvořeno dvousměrné komunikační spojení bod-bod. Komunikace se dosahuje podobným způsobem jako u mobilního telefonního systému rozdělením pole na 28 sektorů, z nichž každý obsahuje až 68 stanic. Na obrázku 9 si můžeme prohlédnout celkové schéma komunikační sítě [1].



Obr. 8: Komunikační věže (Převzato z [7]).



Obr. 9: Schéma komunikačního systému Observatoře Pierra Augera (Převzato z [1]).

2.4 Atmosférický monitoring

Jelikož událost spršky probíhá v atmosféře, je nezbytné neustále monitorovat její stav. Detailní znalost fyzikálních veličin jako tlak, vlhkost, teplota a další jsou klíčové pro zpětnou rekonstrukci spršky. Tyto veličiny jsou měřeny pozemně i přímým zkoumáním jednotlivých vrstev atmosféry, které byly dříve zkoumány pomocí meteorologických balónů. [1, 3].

Pozemní měření probíhá pomocí meteorologických stanic, které jsou umístěny na stanovištích fluorescenčních detektorů a na středu pole pozemních detektorů. Data z těchto stanic jsou nezbytná pro rekonstrukci spršky. Meteorologické stanice jsou vybaveny pro měření teploty, tlaku, vzdušné vlhkosti a rychlosti větru, které provádí měření každých 5 minut. Zjišťování dalších parametrů atmosféry je prováděno pomocí systému GDAS (Global Data Assimilation System), který poskytuje výsledky atmosférické analýzy prováděné počítačem, která probíhá několikrát denně a je založena na datech meteorologických stanic z celého světa. GDAS nahradil původní systém meteorologických radiosond připevněných na heliem plněné meteorologické balóny, který probíhal mezi roky 2002 až 2010. [1, 3].

Důležitým dějem, který může ovlivnit rekonstrukci spršky je přítomnost mraků, tento jev je měřen pomocí infračervených kamer a lidarových systémů. Jelikož má mrak vyšší teplotu než okolní atmosféra, produkuje infračervené záření, které je úměrné jeho teplotě a emisivitě. Toto záření je zachyceno pomocí infračervených kamer, které jsou namontovány na každém FD a snímají zorné pole teleskopů každých 5 minut a každých 15 minut je vytvořen obraz celé hemisféry. Při detekci mraků se dále využívá satelitních snímků, které

jsou pořizovány každých 30 minut. Detekci mračen zajišťují také celooblohové kamery, které detekují oblačnost pomocí počítání viditelných hvězd. Součástí atmosférického monitoringu jsou dále dvě laserová zařízení (XLF a CLF), která jsou umístěna poblíž středu observatoře. Tyto zařízení jsou využívána jako referenční zdroje světla ke kalibraci FD [1, 3].

Čtyři elastické lidary (obr. 10) jsou nainstalovány vedle FD stanic a jsou využívány pro určení oblačnosti, výšky mračen a aerosolů. Každý lidar má Nd:YLF laser, který produkuje pulsy o vlnové délce 351 nm. Lasery jsou ovládány dálkově s opakovací frekvencí 333 Hz. Tisíce pulsů jsou zprůměrovány analogovými systémy a systémy pro počítání fotonů. Dvě stopy z těchto paralelních čtecích cest jsou pak kombinovány k pokrytí od 200 m do 25-30 km. Aby nedocházelo k interferenci se sběrem dat FD, je většina snímaných snímků zaměřena mimo zorné pole FD. [1]

CLF a XLF produkují YAG laserové pulsy o vlnové délce 355 nm, které jsou měřeny každých 15 minut pomocí fluorescenčních detektorů během každé noci. Výsledky těchto měření jsou poté využity k určení profilu aerosolové optické hloubky pomocí dvou metod: první metoda spočívá v porovnání naměřených pulsů s pulsy, které byly zaznamenány během jasných nocí a druhá metoda spočívá v porovnání se simulacemi generovanými s různými hodnotami aerosolové extinkce [1].

Na zařízení CLF je dále instalován Ramanův lidar [1], který oproti elastickým lidarům přímo měří extinkční koeficient, zatímco elastické lidary jej odvozují. Tento fakt je možný díky schopnosti detekovat kromě zpětného rozptylu na vlnové délce lidaru také signály na různých vlnových délkách, které vznikly při nepružném rozptylu na molekule v atmosféře [9]. Jeho nevýhodou je ovšem silné záření, které ruší pozorování pomocí FD a používá se tedy 50 minut před začátkem měření FD a těsně po jeho konci [10].



Obr. 10: *Elastický lidar* (Převzato z [7]).

3. Robotický dalekohled FRAM

FRAM (F/Photometric Robotic Atmospheric Monitor) je robotický teleskop, který byl instalován na první stanici fluorescenčního teleskopu (Los Leones) v roce 2005 [1]. Jeho hlavními účely jsou:

Rychlé monitorování atmosférických podmínek podél zdánlivé dráhy spršek, které mohou mít anomální podélný profil. Znalost skutečných atmosférických podmínek pro tyto spršky nám umožňuje vyloučit možnost, že taková anomálie byla způsobena přítomností jakýchkoli mraků podél dráhy spršek a hadronové interakce mohou být podrobně studovány. Díky použití hvězd jako referenčních zdrojů má FRAM výhodu pasivního způsobu monitoringu, při němž nedochází k emisi žádného světla, které by mohlo ovlivnit měření fluorescenčních dalekohledů. V současnosti se jedná o hlavní funkci teleskopu [3].

Dalším účelem je přesné měření aerosolů pomocí výškových skenů, které nám umožňují zároveň atmosférickou extinkci a kalibrační konstantu [3, 4]. Touto funkcí se budeme dále zabývat v další části práce a provedeme analýzu naměřených dat.

Dále dalekohled provádí pozorování astronomických zdrojů v době „volna“, kdy není potřeba analyzovat spršky nebo provádět měření vertikální aerosolové hloubky (VAOH). Jedná se o pozorování astronomických objektů, jako jsou např. proměnné hvězdy, planetky, komety, nebo optické protějšky záblesků záření gama [3].

3.1 Hvězdná fotometrie

Hvězdná fotometrie [3, 4] funguje na principu porovnání pozorované jasnosti hvězdy s její předpovídanou jasností, která se odvíjí od jejích známých vlastností. Pro každou hvězdu je její předpovídaná jasnost vypočítána v jednotkách magnitud z katalogové hodnoty pomocí vzorce

$$m_{model} = M(m_{cat} + Z + f(C, x, y) + g(A, k, C)), [3] \quad (1)$$

kde M zohledňuje možnou nelinearitu celého systému, Z značí kalibrační konstantu systému, f označuje korekci v důsledku různé odezvy systému na hvězdy různých barev prostřednictvím barevného indexu C a v různých částech zorného pole a g je extinkční model v závislosti na vzdušné hmotě A , barvě hvězdy a extinkční konstantě k , která se rovná extinkci naměřené v zenitu. Vzdušná hmota A je bezrozměrná veličina vyjadřující integrální hmotnost atmosféry (nebo její složky), na kterou narazilo světlo hvězdy v dané výšce nad obzorem vzhledem ke stejné veličině v zenitu. Jsou-li hvězdy s různými hodnotami vzdušné hmoty pozorovány najednou nebo v krátkém časovém okně, mohou být parametry přístroje a atmosféry určeny současně, protože první nezávisí na vzdušné hmotě, zatímco druhá ano, a lze je tak oddělit pomocí Langleyovy metody. Protože se některé instrumentální parametry mění v čase jen pomalu, mohou být přizpůsobeny většímu souboru pozorování globálně.

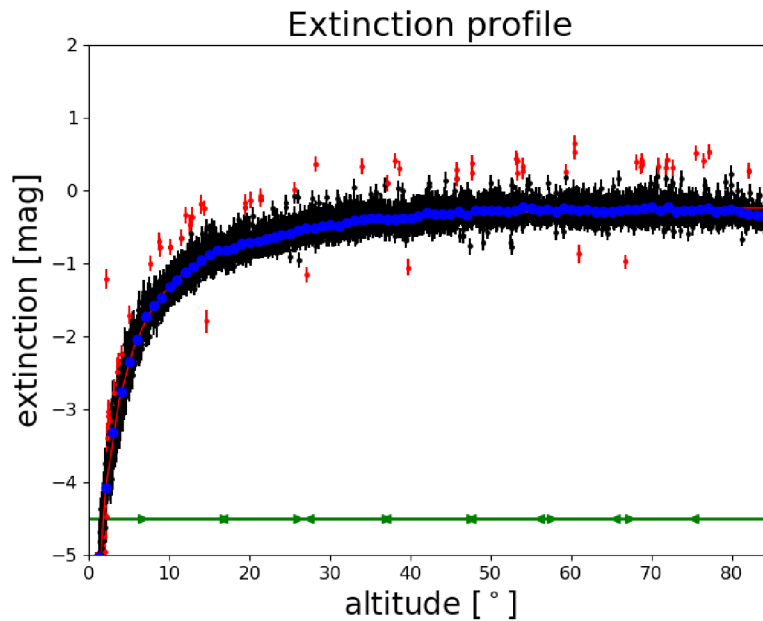
Ve skutečnosti je pozorovaná i předpokládaná jasnost ovlivněna nejistotami, které určují použitelnost metody pro různé účely a optimální nastavení detekce. [3, 4]

Přesnost fotometrických dat se liší hvězda od hvězdy, jelikož existuje mnoho katalogů s různými úrovněmi pokrytí oblohy. Ve standardních fotometrických polích se vyskytuje na malých polích oblohy mnoho hvězd, pro něž existují přesná data pro různé vlnové délky, ale použití pouze těchto dat by vážně omezilo možnost provádět měření v libovolném směru. Kromě toho jsou tato izolovaná pole typicky nevhodná pro jakoukoli metodu využívající Langleyho kalibraci, protože jediný způsob, jak je pozorovat při různých hodnotách vzdušné hmoty, je počkat, až se pohnou v důsledku rotace Země – během této doby se však podmínky mohou změnit. Pro zde popsany účel je proto lepší použít vhodný celooblohový katalog, jako je Tycho2. Navzdory tomu, že přesnost Tycho2 pro jednotlivé hvězdy je nižší než u specializovaných fotometrických průzkumů, homogenita jeho dat na celé obloze je mimořádně cenná, protože zabraňuje vnesení jakýchkoli zkreslení při současném zpracování měření hvězd z velkých oblastí oblohy. Nejistota fotometrického měření závisí na úrovni šumu, stabilitě elektroniky kamery a dalších hardwarových efektech a pak především na množství světla registrovaného z hvězdy. To zase závisí na délce expozice a cloně optiky, pro danou aperturu je maximální zorné pole omezeno praktickými limity optiky, a proto vždy existuje kompromis mezi přesností měření pro jednotlivé hvězdy a počtem pozorovaných hvězd [3, 4].

3.2 Pozorovací režimy dalekohledu FRAM

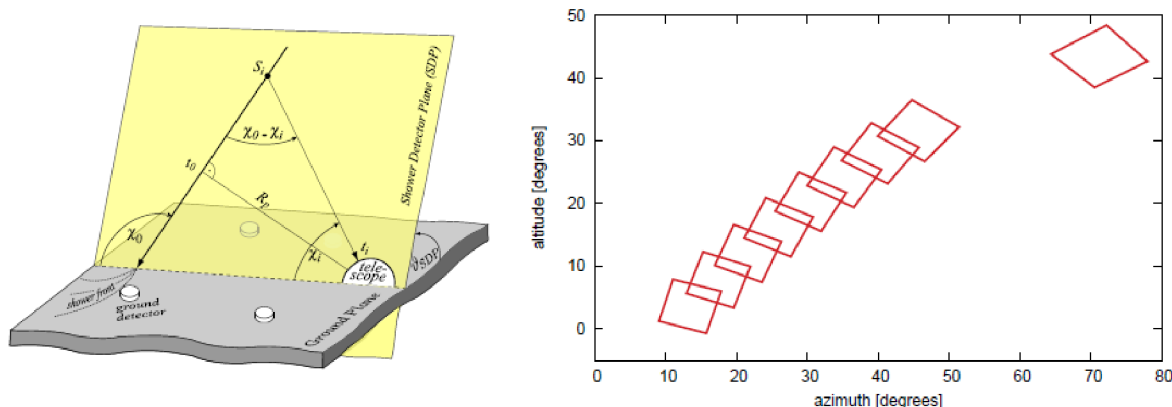
Článek [3] popisuje schopnosti robotického dalekohledu FRAM pracovat ve třech základních režimech:

První režim spočívá v přesném měření aerosolů pomocí výškových skenů (Obr. 11). Jedná se o pořizování série snímků v různých výškách nad obzorem, a tedy i za rozdílných hodnot vzdušné hmoty A . Díky tomuto způsobu je možné současně měřit atmosférickou extinkci i kalibrační konstantu přístroje. Toho je dosaženo fitováním rozdílu mezi předpovězenou a pozorovanou jasností hvězd v závislosti na výšce nad obzorem za předpokladu horizontální stratifikace aerosolů v atmosféře. Tato metoda určuje hodnotu integrální optické hloubky aerosolů pomocí fitování (proložení) závislosti vertikální optické hloubky aerosolů na výšce nad obzorem a nevyžaduje tedy předchozí znalost kalibrační konstanty Z . Aby tento způsob fungoval, nesmí být měřená extinkce ovlivňována oblačností. V případě oblačnosti, lze zvýšit pravděpodobnost úspěšného měření použitím externích dat pro výběr cesty bez mraků pro skenování na obloze (toto je implementováno na všech současných FRAM pomocí dat z All-Sky kamer, které jsou přítomné na observatoři). Metodu lze také použít ke zkoumání malých nehomogenit v distribuci aerosolů snímáním skenů v různých směrech azimutu, a to lze také opakovat s vysokým časovým rozlišením, aby se kvantifikovaly změny v podmínkách aerosolů. [3]



Obr. 11: Příklad výškového skenu měření aerosolů v prvním režimu (každý bod reprezentuje jednu hvězdu). Proložení extinkce jako funkce výšky nad obzorem umožňuje určení vertikální optické hloubky aerosolů.

U fluorescenčních detektorů, které mají velké zorné pole není možné trvale monitorovat toto pole celé, ale pro včasné stanovení podmínek ve vybrané části zorného pole lze použít robotický dalekohled v **druhém režimu** neboli „Shoot-the-shower“. Pro spuštění takového vyhrazeného měření lze použít kvazi-online rekonstruovaná data z fluorescenčních dalekohledů, která indikují „zajímavé“ události, na základě sady konfigurovatelných režů. Když je pro pozorování pomocí FRAM vybrána sprška, geometrické parametry její trajektorie jsou předány systému FRAM, který generuje sadu polí k pozorování tak, aby byla trajektorie dobře pokryta, viz obr. 12. Zkoumaná trajektorie pak také tvoří výškové skenování, a tedy metodu prvního režimu lze použít přímo pro získání kalibrovaného měření. Pokud je však cílem identifikovat nehomogenity ve zkoumané oblasti, stačí pouze hledat odchylky od teoretické extinkce závislé na výšce nad obzorem a metoda je tak extrémně citlivá na jakékoli takové poruchy, protože jsou zcela nezávislé na kalibraci systému. Na druhé straně je horizontálně stejnoměrná vrstva zcela nedetekovatelná pomocí hvězdné fotometrie, ale může být pro daný subjekt důležitá, protože vrstvou může procházet například rozsáhlá sprška kosmického záření, která způsobí, že její světlo bude ovlivněno extinkcí ve vrstvě pouze z části jeho trajektorie. V zásadě by podobná metoda mohla být použita pro jakýkoli jiný účel, kde lze určit oblasti zájmu ve větším zorném poli. Pokud jsou zajímavé pouze odchylky od teoretické závislosti na výšce nad obzorem, může mít oblast jakýkoli tvar, jsou-li potřebná přesná měření aerosolů, musí oblast buď pokrývat velký rozsah vzdušné hmoty, nebo se pro kalibraci musí provést samostatné skenování výšky nad obzorem v prvním režimu.[3]



Obr. 12: Sada polí k pozorování dalekohledem FRAM (Převzato z [12]).

Třetí režim spočívá v nepřetržitém měření malého zorného pole. V případě, kdy je námi zkoumaná oblast na obloze dostatečně malá na to, aby mohla být celá obsažena v zorném poli robotického dalekohledu, lze ji nepřetržitě monitorovat pro změny extinkce. Stejně jako v druhém režimu je mnohem snazší detekovat změny v extinkci než měřit její absolutní hodnotu v jediném poli. Nicméně i to druhé je snadno možné pomocí kalibrace poskytované skenováním výšky nad obzorem (první režim) v pravidelných intervalech, i když přesnost naměřené extinkce je menší než přesnost hodnoty získané z úplného skenování, protože kombinuje nejistotu měření malého zorného pole a kalibrace zjištěné ze skenů. [3]

3.3 Hardware FRAMu

Článek [3] popisuje robotický teleskop FRAM na základě několika základních částí: kryt chránící teleskop proti povětrnostním vlivům, německá rovníková astronomická montáž, dva systémy detekce světla (společně umístěné na stejnou montáži) – malý (20–30 cm) dalekohled vybavený CCD kamerou („narrow-field“) a fotografickým objektivem s CCD kamerou („wide-field“) – a sadou řídicích a pomocných zařízení. Širokouhlé pole (wide-field) umožňuje měření velkého počtu hvězd pro účely přesného měření aerosolů a rychlé pokrytí velkého nepřerušovaného pásma oblohy pro účely detekce oblačnosti, díky čemuž se jedná o primární nástroj pro monitorování atmosféry. Úzké pole (narrow-field) v současné době poskytuje možnost dalších astronomických pozorování (jako je astrometrie a fotometrie asteroidů, komet a proměnných hvězd a sledování záblesků gama), které jsou možny provádět během volného času. Nicméně úzké pole je vyvíjeno pro použití při monitorování atmosféry.

Jednou z výhod použití hvězdné fotometrie pro monitorování atmosféry je možnost sestavit vysoce schopné zařízení z cenově dostupných produktů. Jelikož se jedná o robotický dalekohled, probíhá pozorování atmosféry nepřetržitě, pokud to okolní podmínky dovolují.

Kromě toho jsou expozice typicky krátké a v mnoha režimech pozorování se cílová oblast na obloze mezi každou dvojicí expozic mění, což má za následek mnoho pohybů závěrky fotoaparátu a montáže. Jelikož je FRAM umístěn na vzdáleném místě, je zcela autonomní a většinu problémů lze vyřešit na dálku bez potřeby místního zásahu. Pravidelná údržba FRAMu probíhá jednou ročně. [3]

Kryt (obr. 13) sloužící jako ochrana FRAMu před okolním prostředím je tvořen jehlanovou střechou, která se skládá ze dvou nezávisle ovládaných polovin, které jsou posouvány dvojicí paralelně zapojených hydraulických válců umístěných v rozích kopule a slouží k vyrovnávání zátěže, kterou působí vítr a otevření krytu při pozorování (každá polovina lze otevřít na 180°). Hydraulický tlak je zajištěn pomocí čerpadla, které je poháněno jednofázovým střídavým motorem. Kryt je automaticky řízen pomocí programovatelného relé Schneider Zelio, které řídí polohu hydraulických ventilů, výkon motoru čerpadla, zdroj napájení a zapínání/vypínání záložního měniče. Kromě toho ovládá napájení držáku, kamer a dalších zařízení, aby poskytoval spolehlivý způsob jejich restartování, a také poskytuje speciální výstup pro ovládání zapnutí/vypnutí montáže. Pro každou polovinu střechy jsou ke vstupům modulu připojeny mechanické koncové spínače, které indikují polohu plně otevřené a plně zavřené střechy. Další vstupy poskytují napětí (normálně trvale nabitě) baterie používané k zajištění 12V stejnosměrného napětí pro ventily a střídavého napájení systému. V případě výpadku elektřiny na observatoři je FRAM vybaven čtyřmi olovenými bateriemi, které v případě výpadku slouží jako zásobní zdroj energie. Údržba krytu probíhá jednou ročně na bázi kontroly hydrauliky a úrovně oleje. [3]



Obr. 13: Kryt FRAMu s levou polovinou otevřenou (Převzato z [3]).

Montáž slouží k namíření kamery teleskopu k cílové oblasti a následné sledování pohybu cíle v důsledku pohybu Země. V případě výpadku energie je třeba obnovit pozorování automaticky bez lidského zásahu, což vytváří požadavek na schopnost vrácení se do původní pozice. Tento děj je vykonáván montáží, která má absolutní snímače polohy, díky

nimž je její poloha v každém okamžiku přesně známa a obsahuje vlastní řídicí počítač. Od uvedení do provozu v září 2018 nebylo potřeba provádět údržbu. [3]

Detektory světla – V současné době jsou používány pro detekci světla CCD kamery. V minulosti probíhal test využití fotoelektrického fotometru jako hlavního detektoru světla, ale vzhledem k pomalému měření jen velmi omezeného počtu hvězd, a dokonce i pro špatnou reprodukovatelnost měření jednotlivých hvězd byl tento detektor nahrazen CCD kamerami. CCD kamery mají oproti fotoelektrickým fotometrům, výhodu v měření velkého množství světelných zdrojů (několik tisíc hvězd na jednom snímku), díky nimž je následný fit při zpracování velmi přesný. [3]

Wide-field využívá objektivu Nikkor 300/2.8 (který pokrývá plochu $7^\circ \times 7^\circ$) a velkoformátové $36 \times 36 \text{ mm}^2$ kamery MI G4-16000. Jelikož je CCD čip větší než tradiční filmové políčko, pro které byl objektiv původně navržen, dochází k poklesu optické kvality objektivu Nikkor směrem k rohům obrazu. Pro měření přítomnosti mraků je tento fakt přijatelný, nicméně v případě přesného měření aerosolů se pracuje pouze s vnitřní kruhovou částí o průměru zhruba $6,3^\circ$. [3]

Narrow-field je malý astronomický 30cm Dall-Kirkham dalekohled s fotoaparátlem G4-16000, s čipem $36 \times 36 \text{ mm}^2$ který Dall-Kirkham plně pokrývá, byť s výraznou vinětací. Aby nedocházelo k vinětaci, je systém vybaven tří-palcovým okulárovým výtahem od Astro Systeme Austria, který je vybaven korektorem pole. Wide-field i Narrow-field systém si můžeme prohlédnout na obrázku 14. [3]



Obr. 14: Robotický teleskop FRAM s širokoúhlým polem dole a úzkým polem nahoře (Převzato z [3]).

3.4 Ovládání FRAMu

Komponenty FRAMu jsou ovládány z počítače pracujícím na operačním systému Linux. Jelikož se observatoř nachází ve vzdálené oblasti a přenos velkého množství dat s nízkou prioritou (např. nezpracované snímky z CCD kamer) není vždy možný, je požadavek na místní úložiště značný, proto byl počítač vybaven rozhraním IPMI umožňujícím vzdálenou správu a řízení napájení pomocí vyhrazeného druhého ethernetového rozhraní. Celá operace FRAM je prováděna pomocí open-source balíčku pro robotické operace RTS2, který byl původně vyvinut pro sledování gama záblesků, ale s postupem času byl rozšířen pro více účelů a nyní se používá na mnoha observatořích po celém světě. RTS2 dokáže provozovat dalekohled s jeho veškerým příslušenstvím autonomně bez nutnosti lidského zásahu. Během noci lze cíle vybrat z databáze na základě priorit, které jim byly přiděleny, nebo nastavit dalekohled tak, aby sledoval noční fronty plánovaných pozorování v daném pořadí. Pro program Shoot-the-Shower byl vyvinut speciální modul pro příjem a zpracování dat téměř v reálném čase z centrálního systému sběru dat Augerovy observatoře a rozhodnutí o sledování sprchy kosmického záření na základě nastavitelné sady parametrů. I přes autonomní schopnost balíčku RTS2 dosahuje FRAM nejlepších výsledků (vzhledem k době provozuschopnosti a kvalitě dat) s lidským dohledem. V současnosti se tedy observatoř spoléhá na specializovaného pozorovatele, který každý den kontroluje stav FRAMu a řeší různé problémy, které se mohou vyskytnout. Postupem času jsou identifikovány nejčastější problémy (nesprávný záznam metadat, nesprávná manipulace s překlopením meridiánu montáže atd.), které jsou řešeny buď vylepšením hardwaru nebo softwarovými řešeními, čímž se postupně eliminuje nutnost lidského dohledu. Jelikož však není stále jasné, jak posuzovat kvalitu dat pořízených automaticky vzhledem k proměnlivým atmosférickým podmínkám (zda jsou problémy s daty způsobeny nepříznivými podmínkami nebo problémem systému) je lidský dohled stále nutný. Nejběžnější softwarové řešení provozních problémů je použití tzv. „hlídacích psů“ nad ovladači potřebných zařízení. Každý z ovladačů běží jako samostatný proces a v případě havárie se restartuje, někdy včetně automatického vypnutí přidruženého zařízení. Důležitým vylepšením je vývoj rutiny pro automatické ostření, které dokáže spolehlivě rozhodnout, zda skutečně detekuje hvězdy a zda jsou výsledky smysluplné. Toto rozhodování spočívá v analýze souboru hvězd, které jsou automaticky detekovány v sekvenci snímků pořízených s různými polohami zaostření. Snímky jsou křížově porovnány, aby se vyloučily falešné detekce, a pak se v měřené sekvenci hvězdných FWHM najde společné minimum. Pokud není detekováno dostatečné množství sekvencí hvězd nebo pokud v jejich FWHM nejsou vidět žádná jasná minima, rutina správně identifikuje selhání zaostření a neaktualizuje optimální odhad zaostření, čímž se zabrání umělému posunu zaostření za špatných nebo nestabilních povětrnostních podmínek. [3]

4. Měření VAOH pomocí robotického teleskopu FRAM

Vertikální aerosolová optická hloubka (VAOH) označuje množství světla ztraceného díky přítomnosti aerosolů po vertikální trajektorii průchodu světla atmosférou (vlivem absorpce a rozptylu).

Měření je prováděno na principu hvězdné fotometrie (popsané v sekci 3.1). Data jsou měřena pomocí kamer vybavených fotometrickými filtry Johnson-Cousins BVRI. K naší analýze jsme používali data pořízená s využitím krátkovlnného filtru B, protože s klesající vlnovou délkou typicky roste extinkce aerosolů. Filtr B je zároveň nejvýznamnější i z hlediska analýzy dat kosmického záření – fluorescenční záření je rovněž na krátkovlnném konci viditelného spektra, využitím filtru B se tedy nejvíce blížíme podmínkám při pozorování fluorescenčním detektorem. Při analýze dat se pracuje se skeny, které se provádí od horizontu k zenitu v sedmi snímcích s 30 sekundovými expozicemi na snímek. Pro analýzu VAOH je bezpodmínečně nutné, aby u všech snímků byl zaznamenán správný čas začátku expozice (který je v našem případě synchronizován s časovou stupnicí UTC pomocí protokolu NTP s přesností větší než 1 sekunda) a všechny snímky na skenu byly pořízeny se stejnou délkou expozice. Pořízené snímky jsou uloženy na serveru společně s údaji o jejich měření (juliánské datum expozice, filtr, doba expozice, výška a azimut pozorovaného pole, číslo pozorování atd.). Při měření dochází k porovnání naměřené jasnosti hvězdy m_{nam} s její katalogovou jasností m_{kat} skrze následující rovnici

$$\frac{m_{nam}}{M} = m_{kat} + Z_i + g(A_M, A_A, A_O, k_i, B - V) + f(B - V, x, y), [4] \quad (2)$$

v níž Z_i označuje okamžitou kalibrační konstantu (tzv. nulový bod), M je korekční konstanta pro nelinearitu systému. Funkce f udává korekci v důsledku různé odezvy systému na hvězdy různých barev, tato korekce závisí na rozdílu magnitud hvězdy mezi B a V filtry (člen $B - V$) a na poloze v zorném poli (x, y). Funkce g je model extinkce v závislosti na vzduchové hmotě, barvě hvězdy a aktuálním množství VAOH. [4]

V prvním kroku analýzy je potřeba vyřadit všechny snímky pořízené během přítomnosti mraků na obloze. Jelikož nebyl vyvinut žádný automatický systém pro tuto činnost, probíhá tento úkon manuálně. Pro usnadnění tohoto procesu je pro každý sken produkován graf závislosti extinkce na výšce, při čemž se funkce f , g a korekční konstanta (která označuje skutečnou hodnotu VAOH) M bereme jako fixní hodnotu, která je určena na základě dříve zpracovaných dat nebo hrubého odhadu a probíhá fitování (Z, k) skenu. Tyto grafy jsou dále doplněny vizuálními ukazateli středních odchylek od fitované hodnoty. Vhodné skeny (bez přítomnosti mraků) jsou poté seskupeny do souborů po 50 až 100 skenech, pro něž lze využitím rovnice (2) fitovat všechny skeny současně, s volnými parametry (Z, k) pro všechny skeny. Poté, co se proložení sblíží, jsou hvězdy pro každý sken seřazeny v nadmořské výšce a odlehle hodnoty nad 3 standardní odchylky v každém binu jsou odstraněny a fitování se opakuje. Příklad tohoto fitování si můžeme prohlédnout výše na obrázku 11. [4]

4.1 Měření homogenity aerosolů

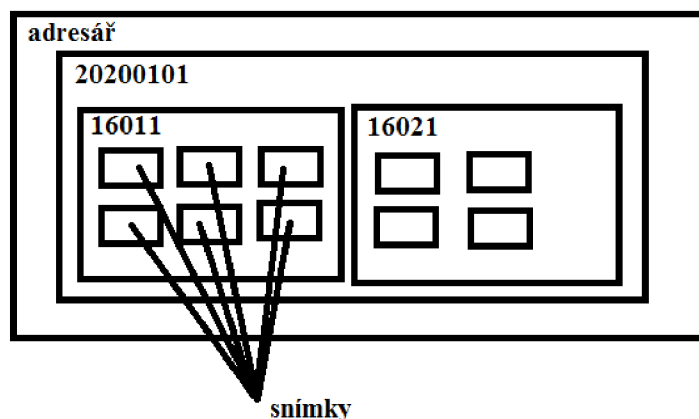
Autorským vkladem této práce je měření homogenity aerosolů v závislosti na azimutu. Pro toto měření jsme využili naměřených snímků z robotického dalekohledu FRAM mezi 1. lednem a 30. prosincem roku 2020. Výsledky neobsahují data z každého dne, jelikož některé skeny nemohly být zpracovány kvůli výskytu oblačnosti, která by znemožnila správné vyhodnocení dat.

Celý proces jsme si rozdělili na dvě části, které jsme zautomatizovali pomocí námi naprogramovaných BASH skriptů (veškeré skripty jsou součástí elektronické formy této práce).

První BASH skript s názvem „první_krok.sh“ plnil funkci vyhledání a následného kopírování všech snímků námi zadaného měsíce do našeho adresáře, v němž jsme prováděli analýzu (po spuštění skriptu jsme vždy zadali číslo měsíce, např. 01 pro leden). Tento skript zároveň před každým kopírováním snímku provedl ověření, zda je příslušný snímek vyfocen s B filtrem (jelikož právě tato data jsme analyzovali). Příklad těchto snímků si můžeme prohlédnout na obrázku 15 níže. Tyto snímky se dále uložily do složek nesoucích jejich číslo skenu (OBSID), které byly uloženy do složek pojmenovaných podle data jejich pořízení (ve formě RokMěsícDen). Tuto formu uložení jsme zvolili pro lepší identifikaci snímků a následnou práci. Tuto strukturu si můžeme prohlédnout na obrázku 16 níže.



Obr. 15: Ukázka snímku z robotického teleskopu FRAM



Obr. 16: Schéma zápisu dat v našem adresáři pro 1. leden 2020

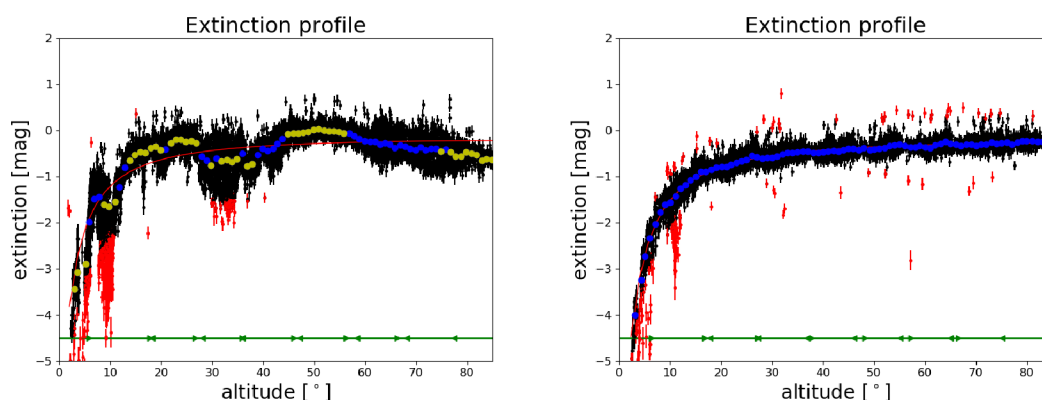
Jelikož tyto snímky nebyly kalibrovány, provedl nám skript po nakopírování snímků i jejich kalibraci, kalibrace byla provedena pomocí python skriptu „proc_images.py“, který byl již dříve naprogramován doktorem Jiřím Eliáškem (stejně jako další python skripty, s kterými jsme pracovali). Po provedení kalibrace nám vznikl nový kalibrovaný snímek a starý snímek nám skript smazal (jelikož již nebude potřeba).

Kalibrované snímky (z jednoho skenu) nám poté zpracoval pomocí pythonového skriptu „vymeteno.py“, který provedl výpočet pomocí vzorce (2) při konstantním f , g a M a provedl fitování grafu. V této části jsme si pomohli dalším skriptem „vymeteno.sh“, který jsme si vytvořili pro usnadnění programování prvního skriptu, který jej vždy pouze nakopíroval do složky kalibrovaných snímků a spustil jej („vymeteno.sh“ poté provedl zpracování pomocí „vymeteno.py“ a provedl úpravu výsledných souborů pro následnou lepší manipulaci).

Vymeteno.py nám vyprodukoval 10 souborů, z nichž nám „vymeteno.sh“ ponechal jen dva textové soubory (good_stars.txt, který obsahuje „dobré“ hvězdy, vybrané podle fitu a hvezdy.txt, který obsahuje všechny hvězdy) a jeden png obrázek (graf) pro kontrolu přítomnosti mraků. Tyto soubory byly skriptem „vymeteno.sh“ přejmenovány z good_stars.txt na „hvezdyXXX“, hvezdy.txt na XXX.txt a obrázek na XXX.png, kde XXX u všech souborů značí číslo skenu (OBSID). Jelikož zpracování dat probíhalo na vzdáleném linux serveru bez možnosti prohlížení obrázků, bylo potřeba png soubory stáhnout na osobní počítač a manuálně je roztřídit na použitelné a nepoužitelné (oblačné noci).

Na osobním počítači jsme rozdělili skeny na „dobré“ a „špatné“ (příklad dobrého a špatného skenu můžeme vidět na obrázku 17). Celkem jsme zpracovali 1295 skenu, z nichž bylo 963 dobrých a 332 špatných (74,36% bylo vhodných pro další zpracování).

Špatné skeny jsme smazali a dobré skeny jsme poté zpracovali přes náš další skript „vysledky.sh“, který dále provedl globální fitování opět pomocí rovnice (2), tentokrát s volnými parametry (Z , k). Při tomto úkonu jsme využili prvního textového souboru „good_stars.txt“, který byl dříve pomocí skriptu přejmenován na tvar hvezdyXXX (toto přejmenování bylo nutné pro spuštění globálního fitování).



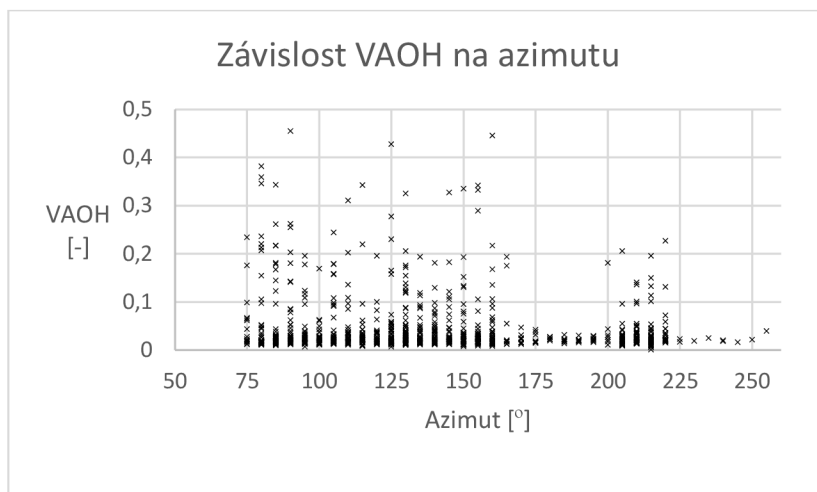
Obr. 17: Ukázka dobrého skenu (vpravo) a špatného skenu (vlevo) během oblačné noci. Na špatném skenu si můžeme všimnout propadů, které jsou způsobeny přítomností mraků.

Následně náš skript provedl korekci na polohu hvězdy na snímku – výpočet umělého flatfieldu, který dále aplikoval na whatever.py pro získání konečných výsledků, které jsme získali ve formě textového souboru.

V textovém souboru byly obsaženy informace pro jednotlivé skeny (OBSID) a ke každému skenu jsme získali hodnoty VAOH, ke kterým jsme však museli přičíst stratosféru (0,0064 – kterou jsme převzali ze zdroje [4]), která je díky přítomnosti stálých aerosolů v této výšce také odpovědná za extinkci světla a použitý software s ní nepočítá, tudíž je potřeba ji doplnit ručně. Dále jsme výslednou hodnotu (která je v magnitudách) vynásobili konstantou 0,921, která odpovídá výrazu $\frac{\sqrt[5]{100}}{e}$. Pátá odmocnina ze sta vychází z definice magnitudy, pro kterou platí, že rozdíl pěti magnitud odpovídá stonásobnému poklesu jasnosti a podíl číslem e odpovídá tomu, že při VAOH = 1 dochází k poklesu signálu na $\frac{1}{e}$. Obecný vzorec, kterým jsme tedy pronásobovali získané výsledky byl

$$\text{VAOH} = 0,921(k_A + 0,0064), \quad (3)$$

kde jsme jako k_A označili námi získané výsledky. Jelikož bylo potřeba k námi získaným výsledkům přiřadit jim odpovídající azimuty, vytvořili jsme skript „hledej.sh“, který nám ke každému skenu vypsal jeho datum měření (ve formě Juliánského data) a azimut. Hodnoty VAOH jsme přiřadili k jim odpovídajícím azimutům a získali závislost VAOH na azimutu, kterou si můžeme prohlédnout na grafu číslo 1.



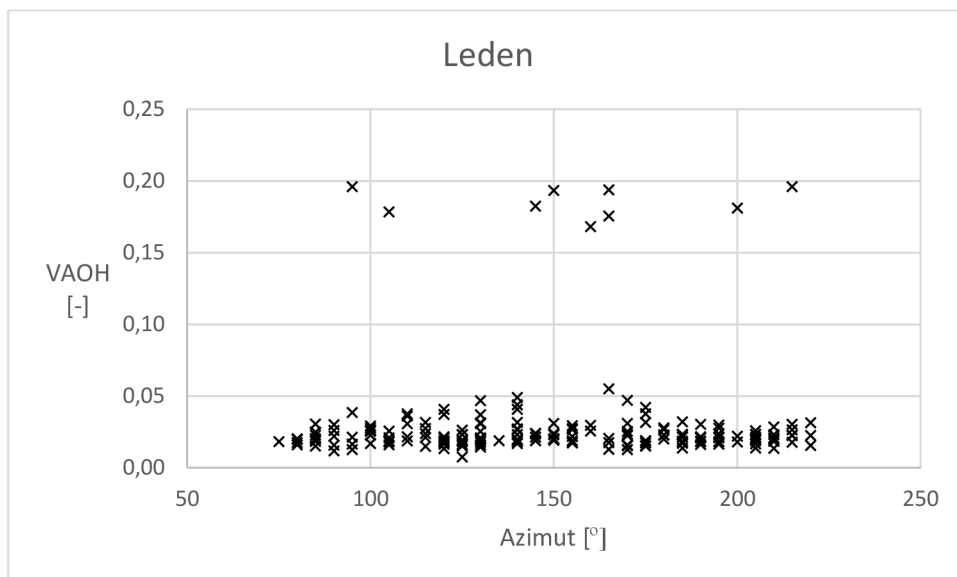
Graf 1: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během celého roku.

Z grafu je patrné, že se většina dat nachází pod hranicí 0,1 VAOH (na grafech 2-4 uvádíme výsledky pro první tři měsíce roku 2020 odděleně po jednom měsíci pro lepší názornost rozložení dat v grafu). Dále jsme si všimli, že neobvyklé hodnoty VAOH spolu sdílí množiny o stejném datu, tudíž se nejedná o neobvyklé skeny, ale o neobvyklé noci, během nichž bylo naměřeno vysoké VAOH. Tudíž se nejedná o nehomogenitu v závislosti na azimutu, ale na čase (přesněji dnech/nocích). Dále si můžeme všimnout malého množství dat v oblasti mezi 220° a 260° azimutu, tato malá četnost dat je způsobena přítomností stanice FD, která způsobuje omezení dat na nejvyšší výšky nad obzorem, díky čemuž je i menší pravděpodobnost zachycení anomálií, které se nacházejí typicky v nižších výškách nad obzorem. Poloha FD stanice vůči FRAMu je zobrazena na obrázku 18.

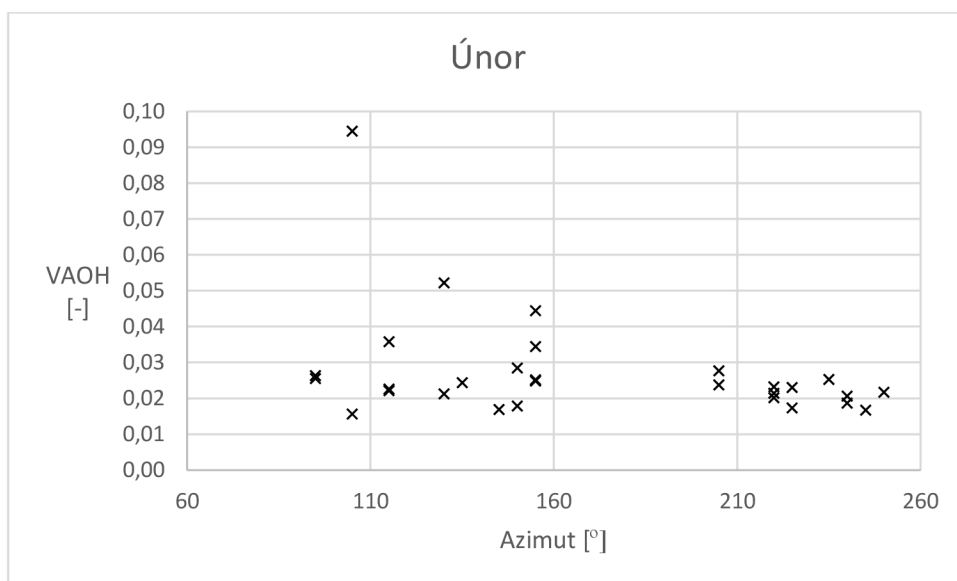


Obr. 18: Snímek z Google Maps doplněný o azimutální úhly vůči FRAMu. Z obrázku je patrné částečné „zastínění“ FRAMu stanicí FD v intervalu azimutů mezi 220° a 260° (hvězdy na nízkých výškách nad obzorem nejsou v tomto rozsahu azimutů pozorovatelné).

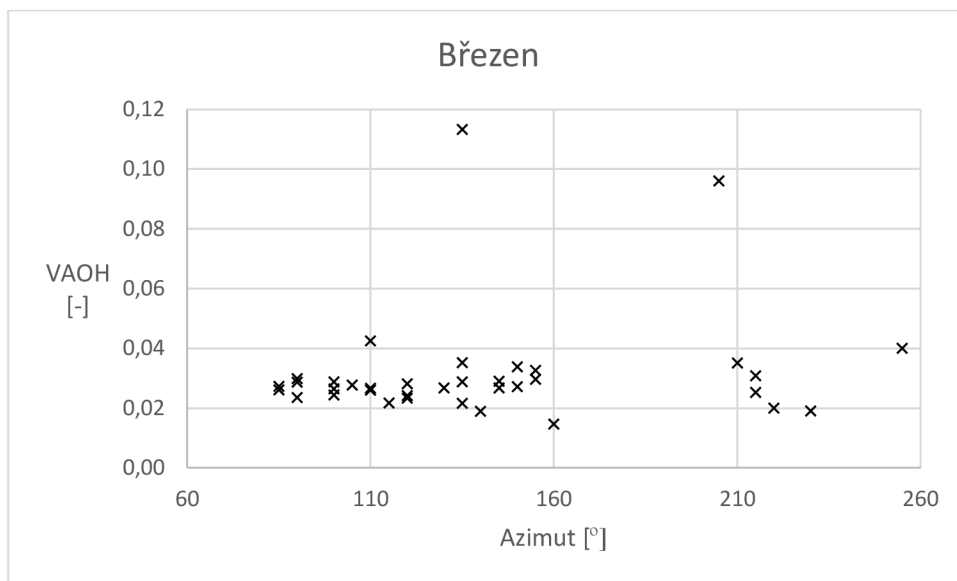
Hodnoty mezi 160° a 200° azimutu také tvoří oblast s menším počtem dat a bez výskytu abnormalit. Menší četnost dat je způsobena tím, že v této oblasti (jižně od Los Leones) se nenachází žádné pozemní detektory a nedetekují se žádné hybridní spršky.



Graf 2: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během ledna.



Graf 3: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během února.



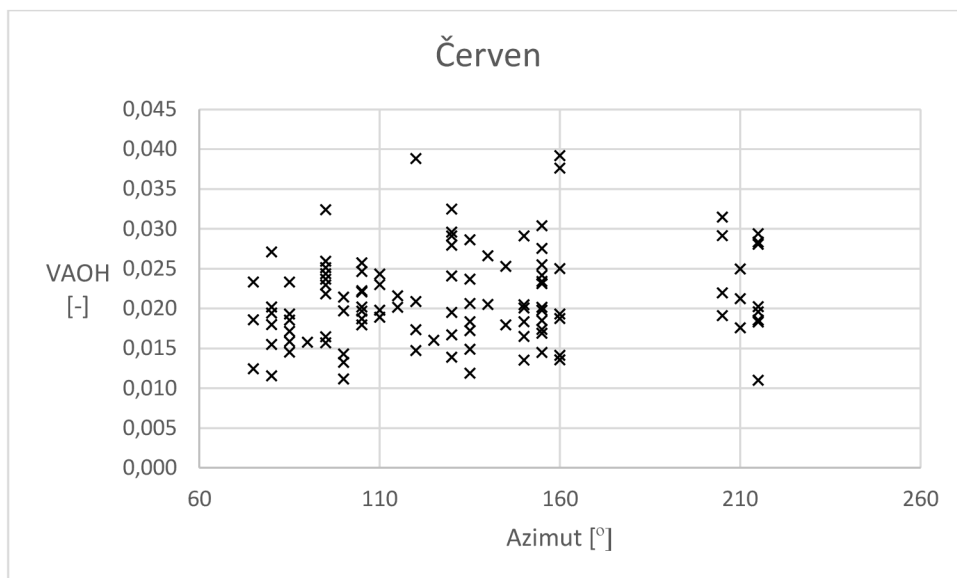
Graf 4: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během března.

Při porovnání grafů je patrné, že leden má mnohem více dat než únor. Toto je způsobeno menším počtem pořízených snímků během února a vysokým procentem dobrých skenů během ledna. Tento rozdíl je uveden v tabulce 1.

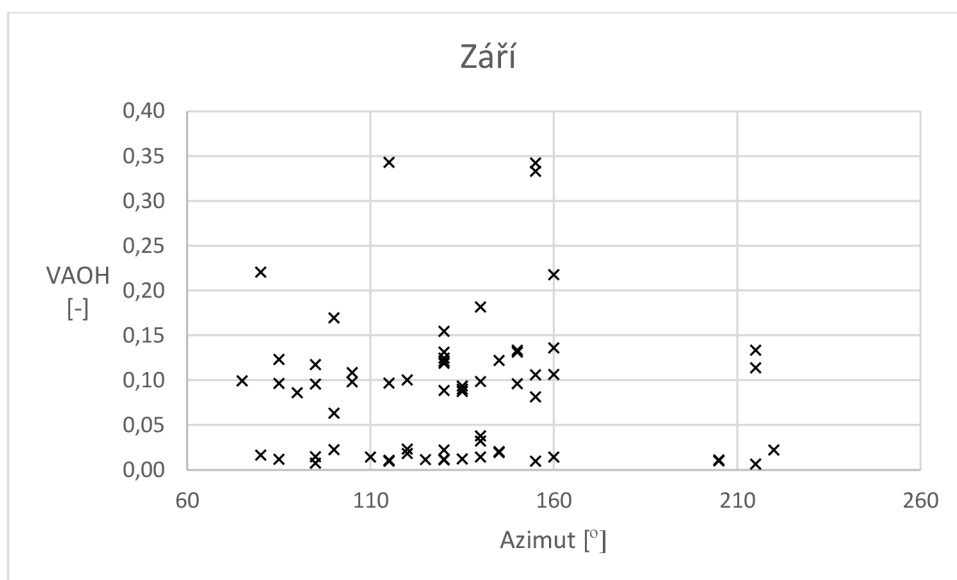
měsíc [-]	počet skenů [-]	dobré skeny [-]	špatné skeny [-]	podíl dobrých skenů [%]
leden	192	185	7	96,4
únor	57	32	25	56,1
březen	57	42	15	73,7
červen	134	109	25	81,3
září	99	64	35	64,6

Tabulka 1: Porovnání uvedených měsíců na základě dobrých a špatných skenů. Důvodem šestinásobného množství dat v lednu oproti únoru je malé množství skenů během února a 40% rozdíl v podílu dobrých skenů, které bylo možné zpracovat.

Při podrobnější analýze jsme zjistili, že některé měsíce byly bez abnormalit (nepřirozeně vysokých hodnot VAOH), jako například červen (Graf 5) a jiné jich měli zase vysokou četnost (září na Grafu 6). Jelikož však porovnáváme měření pouze z jednoho roku a ne z více let, nemůžeme z tohoto faktu vyvozovat konečné výsledky.



Graf 5: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během června.



Graf 6: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na azimutu během září.

V následujícím kroku jsme se rozhodli porovnat meteorologická data během jednotlivých nocí (porovnávali jsme teplotu, rychlost větru a vzdušnou vlhkost). K tomuto porovnání jsme využili 27. a 30. leden jejichž hodnoty se lišily desetinásobně. Důvodem výběru těchto dní byl jejich krátký časový rozestup (porovnávaly jsme data od sebe vzdálená 3 dny) a množství jim odpovídajícím skenům (každý den měl 7 skenů). Porovnání meteorologických dat můžeme vidět v tabulce 2.

VAOH [-]	Čas [-]	Teplota [°C]	Vzdušná vlhkost [%]	Rychlost větru [km/h]
0,018	18:02:00	32,30	17,06	5,83
0,020	19:00:00	30,48	19,14	4,50
0,015	20:04:00	30,30	19,50	6,84
0,017	21:02:00	29,85	22,89	3,14
0,018	23:30:00	25,61	34,23	16,75
0,024	01:30:00	24,52	35,28	14,73
0,012	03:51:00	19,04	58,97	7,59
0,168	18:36:00	29,10	14,95	4,73
0,178	19:11:00	29,86	13,64	7,99
0,182	19:54:00	30,03	12,17	17,51
0,176	20:54:00	32,24	11,46	4,89
0,181	22:00:00	31,17	11,83	2,82
0,193	23:10:00	29,91	13,85	7,90
0,194	00:19:00	25,62	14,14	22,81

Tabulka 2: Porovnání atmosférických podmínek mezi 27. (modrá) a 30. lednem (oranžová).

Z těchto dat není patrná žádná abnormalita (žádné z těchto dat nevysvětluje desetinásobný nárůst hodnoty VAOH). Data ovšem nasvědčují, že tento nárůst VAOH není úměrný teplotě, vzdušné vlhkosti ani rychlosti větru.

Po nahlédnutí do FD reportu [11] jsme zjistili, že za tento nárůst může rozsáhlý požár vegetace v pampě 29. ledna (viz obr. 19), který trval až do 31. ledna. Naměřená data během úseku před požárem až po návrat VAOH do původní úrovně si můžeme prohlédnout v tabulce 3 níže, ve které jsme barevně seskupili data podle azimutu od doby před požárem až po dobu po požáru. Toto zjištění nám pomohlo také lépe objasnit důvod, proč v oblasti mezi 160° a 200° azimutu nebyly pozorovány vysoké hodnoty VAOH. Absence vysokých hodnot VAOH je způsobena tím, že jižně od Los Leones neprobíhal požár a aerosoly z popela se zde nerozšířily.

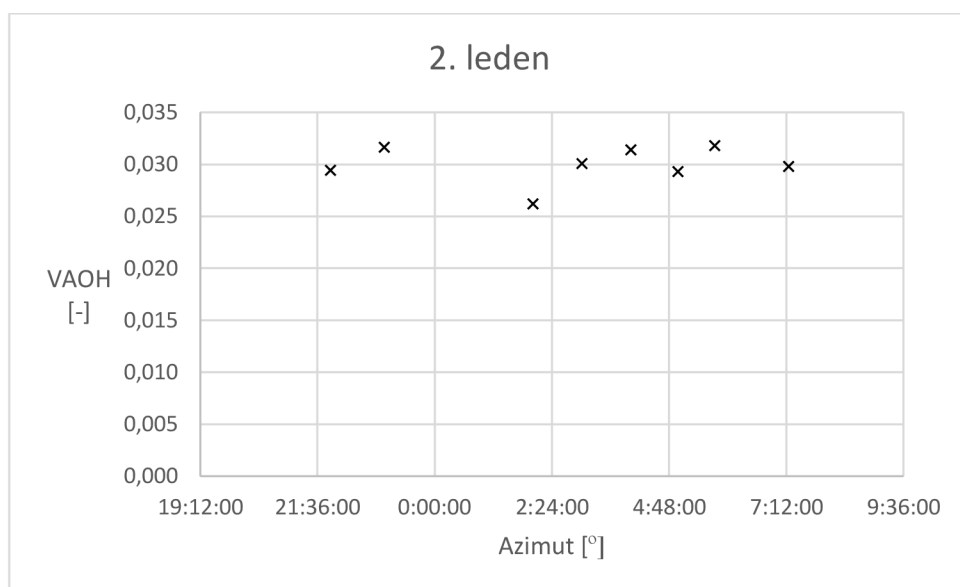


Obr. 19: Snímek požáru vegetace v pampě pořízený 29. ledna (Převzato z [11]).

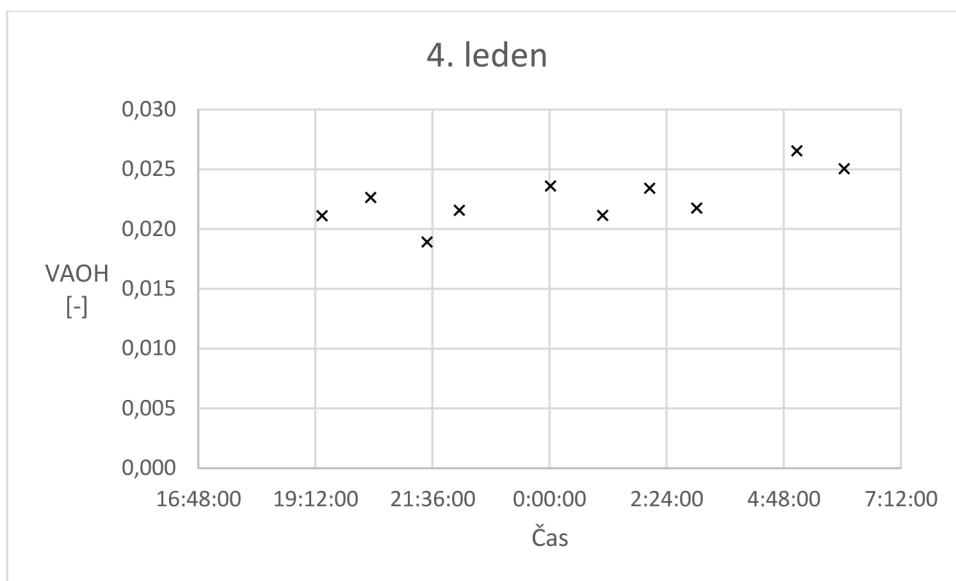
Datum a čas [-]	VAOH [-]	Azimut [°]
28.1.2020 00:00:00	0,017	100
28.1.2020 02:30:00	0,018	155
28.1.2020 04:30:00	0,024	145
28.1.2020 06:50:00	0,012	90
29.1.2020 00:30:00	0,501	140
29.1.2020 22:50:00	0,184	150
30.1.2020 21:35:00	0,168	160
30.1.2020 22:10:00	0,178	105
30.1.2020 22:55:00	0,182	145
30.1.2020 23:55:00	0,176	165
31.1.2020 02:10:00	0,193	150
31.1.2020 03:20:00	0,194	165
31.1.2020 05:45:00	0,196	95
02.02.2020 01:30:00	0,016	105
02.02.2020 02:30:00	0,018	150

Tabulka 3: Data mezi 28. lednem a 2. únorem. Zelená barva značí azimuty v rozmezí mezi 150° a 165°. Modrá značí rozmezí 100° až 105°, šedá 140° až 145° a oranžová 90° až 95°.

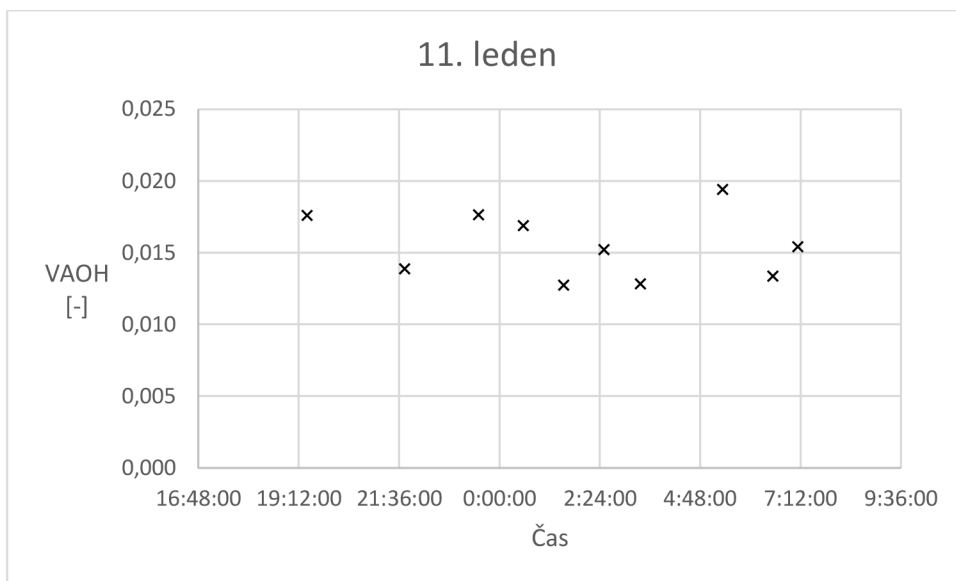
Dále jsme se rozhodli prozkoumat závislost VAOH na čase. Jako časový úsek jsme zvolili jednu noc a posuzovali jsme celkově 7 nocí z měsíce ledna, pro něž jsme měli relativní množství skenů (aspoň 8 snímků). Tyto výsledky jsou znázorněny na grafech 7 až 13.



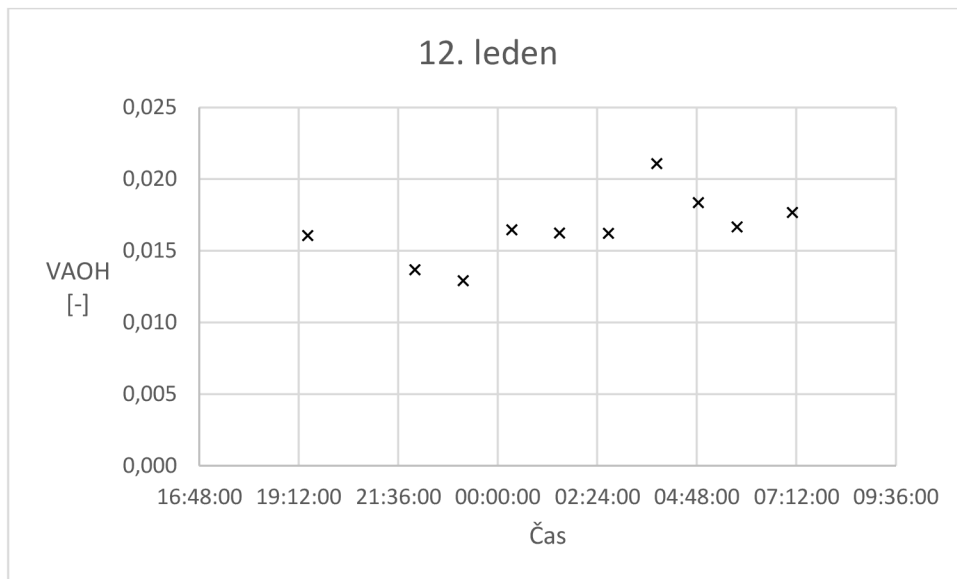
Graf 7: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 2. ledna.



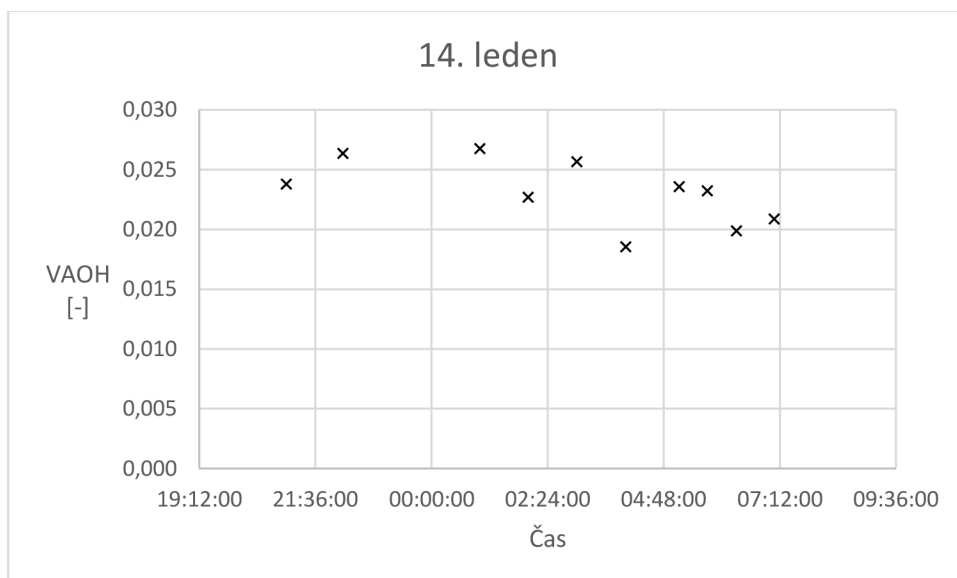
Graf 8: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 4. ledna.



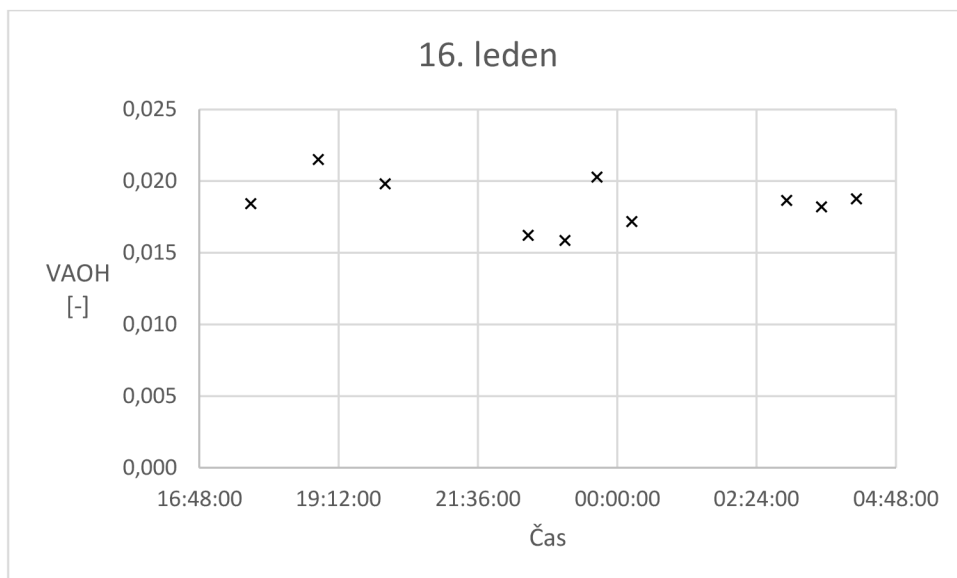
Graf 9: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 11. ledna.



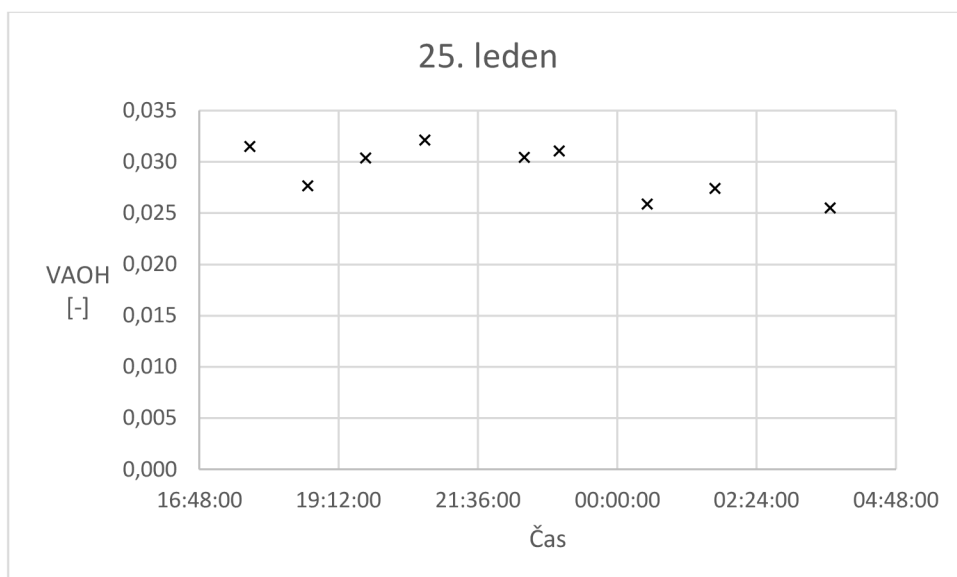
Graf 10: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 12. ledna.



Graf 11: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 14. ledna.



Graf 12: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 16. ledna.



Graf 13: Naměřené hodnoty závislosti VAOH na čase během 25. ledna.

Z grafů můžeme usoudit, že hodnoty VAOH během jasné noci bez oblačnosti významněji nezávisí na čase, což je očekávaný závěr, jelikož analyzujeme pouze čisté profily bez mraků, u kterých je očekávatelné, že VAOH bude setrvale nízká. Toto tvrzení by jsme však doporučili dokázat větší analýzou dat, např. z úseku několika měsíců, případně celého roku.

Závěr

Na úvod bakalářské práce jsme popsali důvod vzniku a samotný vznik Observatoře Pierra Augera. Dále jsme popsali výhody jejího hybridního designu, popsali jsme strukturu, vybavení a princip operace pozemních a fluorescenčních detektorů, které pracují v symbióze a jsou nedílnou součástí observatoře. V této části jsme se také zaměřili na datovou komunikaci a atmosférický monitoring, který je nepostradatelný pro správné fungování observatoře.

V další části jsme se zaměřili na robotický dalekohled FRAM, který provádí na observatoři atmosférický monitoring (měření přítomnosti oblačnosti, množství aerosolů ...) a jeho výhodou rychlého atmosférického měření bez emise světla, které by ovlivnilo měření fluorescenčních detektorů. Poté jsme se věnovali hvězdné fotometrii, kterou FRAM využívá pro monitoring a přiblížili jsme si základní režimy v nichž FRAM operuje. Dále jsme si popsali části a vybavení z nichž je FRAM složen a tuto sekci jsme zakončili popisem jeho ovládání.

V poslední části jsme provedli analýzu téměř 1300 extinkčních profilů z robotického dalekohledu FRAM, které byly získány během roku 2020. Cílem této analýzy bylo proměřit homogenitu vertikální aerosolové optické hloubky (VAOH), která byla do této doby předpokládána, ale neověřena. Na začátku této sekce jsme vysvětlili princip a postup této analýzy. Následně jsme uvedli přesný postup a výsledky zpracování 1295 skenů, z nichž bylo 963 dobrých a 332 špatných.

Při další analýze dobrých skenů jsme objevili výrazné výkyvy VAOH od ostatních měření (v některých případech až desetinásobné hodnoty), jelikož se však jednalo o skeny ze stejných nocí, které byly homogenní v závislosti na azimutu, tak nám tento fakt nijak nevyvrátil výsledky ostatních měření a můžeme konstatovat homogenitu VAOH v závislosti na azimutu.

Následně jsme se pokusili prozkoumat, zda výkyvy VAOH během některých nocí, nesouvisí s atmosférickými podmínkami, nicméně, jak je patrné z tabulky 1, vzdušná vlhkost, síla větru ani teplota tyto výkyvy nezpůsobila. Při náhledu do FD reportu jsme zjistili, že tento výkyv byl způsoben rozsáhlým požárem vegetace v pampě.

Nakonec jsme provedli analýzu závislosti VAOH na čase během jedné noci. K této analýze jsme si vybrali sedm lednových nocí, z nichž jsme měli dostatečné množství skenů (jelikož provádět tuto analýzu pro noci, které mají 2 nebo 3 skeny by nebylo relevantní) a došli jsme k závěru, že VAOH během jasných bezoblačných nocí není prakticky závislá na čase a zůstává přibližně konstantní.

Jelikož jsme neprováděli výzkum důvodu vysoké hodnot VAOH během všech abnormálních nocí (pouze těch koncem ledna), navrhli bychom detailnější prozkoumání tohoto jevu do budoucna. Předběžně ale očekáváme, že během bezoblačných nocí bude takové zvýšení VAOH spojeno s nějakou mimořádnou událostí, analogicky jako jsme na konci ledna 2020 identifikovali požár v pampě.

Dále bychom navrhli opětovné zanalyzování závislosti VAOH na azimutu v časovém úseku několik let a následné porovnání mezi jednotlivými lety.

Jako další možný výzkum by jsme také navrhli pozorování pole ze dvou různých úhlů (z aktuálního FRAMu a z FRAMu2, který byl zprovozněn v roce 2022 u západní stanice fluorescenčního detektoru Coihueco). Pozorování ze dvou různých míst by umožnilo přesnější prostorové rozlišení případných nehomogenit.

Jako poslední by jsme doporučili provést detailnější výzkum závislosti VAOH na čase a také na atmosférických podmínkách, jichž se tato práce týkala jen okrajově. V budoucnu by bylo dobré provést tato měření pro dlouhý časový interval několika měsíců nebo celého roku.

Seznam použité literatury

- [1] The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2015, **798**, 172-213 [cit. 2023-04-26]. ISSN 01689002. Dostupné z: doi:10.1016/j.nima.2015.06.058
- [2] The rapid atmospheric monitoring system of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation* [online]. 2012, **7**(09), P09001-P09001 [cit. 2023-04-26]. ISSN 1748-0221. Dostupné z: doi:10.1088/1748-0221/7/09/P09001
- [3] AAB, A., P. ABREU, M. AGLIETTA, et al. The FRAM robotic telescope for atmospheric monitoring at the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation* [online]. 2021, **16**(06) [cit. 2023-04-26]. ISSN 1748-0221. Dostupné z: doi:10.1088/1748-0221/16/06/P06027
- [4] EBR, Jan, Sergey KARPOV, Jiří ELIÁŠEK, et al. A New Method for Aerosol Measurement Using Wide-field Photometry. *The Astronomical Journal* [online]. 2021, **162**(1) [cit. 2023-04-26]. ISSN 0004-6256. Dostupné z: doi:10.3847/1538-3881/abf7b1
- [5] *The Pierre Auger Project Design Report* [online]. 1996, 37 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://lss.fnal.gov/archive/1996/pub/Pub-96-024.pdf>
- [6] VILLASEÑOR, L. *Ultra high energy cosmic rays: Present status and recent results* [online]. 2007, 5 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/26477415_Ultra_high_energy_cosmic_rays_Present_status_and_recent_results#fullTextFileContent
- [7] *Pierre Auger Observatory's albums* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/134252569@N07/albums/with/72157656013297308>
- [8] *Pierre Auger Observatory* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.vyzkumne-infrastruktury.cz/en/physic/pierre-auger-observatory/>
- [9] *Raman Lidar: Theoretical Background* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.herts.ac.uk/research/centres/cacp/atmospheric-remote-sensing-laboratory/instruments/raman-lidar-theoretical-background>

[10] RIZI, Vincenzo, Aurelio GRILLO, Marco IARLORI, et al. *The Raman LIDAR receiver at Pierre Auger Observatory: installation and hardware tests* [online]. 2006, 11 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z:
[https://www.academia.edu/2734040/The Raman LIDAR receiver at Pierre Auger Observatory installation and hardware tests](https://www.academia.edu/2734040/The_Raman_LIDAR_receiver_at_Pierre_Auger_Observatory_installation_and_hardware_tests)

[11] Antonio Condorelli, Masimo Mastrodicasa, Jonathan Biteau, Sullivan Marafico. FD Shift Report 17.01.2020 – 03.02.2020. 2020, interní materiál observatoře Pierra Augera

Seznam použitých symbolů a zkratek

FRAM	Fotometric Robotic Atmospheric Monitor
PD	Pozemní detektor
FD	Fluorescenční detektor
CLF	Central Laser Facility
XLF	eXtreme Laser Facility
VEM	Vertikální Ekvivalent Mionu
GDAS	Global Data Assimilation System
VAOH	Vertikální aerosolová optická hloubka
Z	kalibrační konstanta systému
f	korekce v důsledku různé odezvy systému na hvězdy různých barev
C	barevný index
g	extinkční model
A	vzdušná hmota
k	extinkční konstanta
m_{nam}	naměřená jasnost hvězdy
m_{kat}	katalogová jasnost hvězdy
M	korekční konstanta pro nelinearitu systému
k_A	získané hodnoty VAOH po softwarovém zpracování