

Pierre Auger Observatory
studying the universe's highest energy particles



Fluorescenční detektory kosmického záření

Dušan Mandát



SPOLEČNÁ LABORATOŘ OPTIKY
Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie
Email: mandat@fzu.cz
<http://jointlab.upol.cz>



Obsah

- Z čeho se skládá náš svět?
- Jak vypadá svět v mikroměřítku?
- Jak tento miniaturní svět zkoumáme?
- Co nám nachytala sama příroda?
- Co nám padá na hlavu z vesmíru?
- Největší experimenty současné částicové fyziky
- Stopy českých fyziků v těchto experimentech

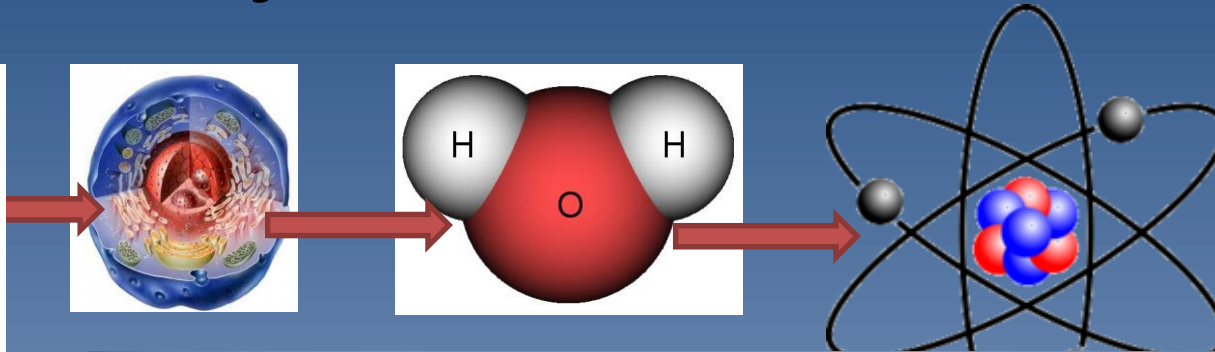
Odborné zaměření Společné laboratoře optiky

Základní a aplikovaný výzkum v oborech:

- Optika: kvantová, nelineární, statistická, vlnová a holografie
 - Speckle interferometry, součástky pro plně kvantový počítač
- Stavba přístrojů a zařízení na bázi optiky, optoelektroniky a jemné mechaniky
- Výzkum vysokoenergetických částic
 - CERN, Pierre Auger Observatory, CTA, FAST
- Laserové technologie
- Mechanické a tribologické zkoušky tenkých vrstev a povrchů



Z čeho jsme vlastně složeni?



letí -

itos
objev

- objev

vantový

- Re
-
- el
-
- já
-
- m

118 známých prvků, z nichž 94 se přirozeně vyskytuje na Zemi

PERIODICKÁ SOUSTAVA PRVKŮ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I. A	II. A	III. B	IV. B	V. B	VI. B	VII. B	VIII. B			I. B	II. B	III. A	IV. A	V. A	VI. A	VII. A	VIII. A
1	H VODÍK Hydrogenium 1,00794																	He HELIUM Helium 4,0026
2	Li LITHIUM Lithium 6,941																	Ne NEON Neonum 20,1797
3	Na SODÍK Natrium 22,98977																	Ar ARGON Argonum 39,948
4	K DRASLÍK Kalium 39,0983																	Kr KRYPTON Kryptonum 83,798
5	Rb RUBIDIUM Rubidium 85,4678																	Xe XENON Xenonum 131,293
6	Cs CESIUM Caesium 132,90545																	Rn RADON Radonum 222,0176
7	Fr FRANCIUM Francium (223)																	Uuo Ununoctium (294)

6	-IV, II, IV	4
C		2
uhlík		
carboneum		
2,55		12,011

71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----

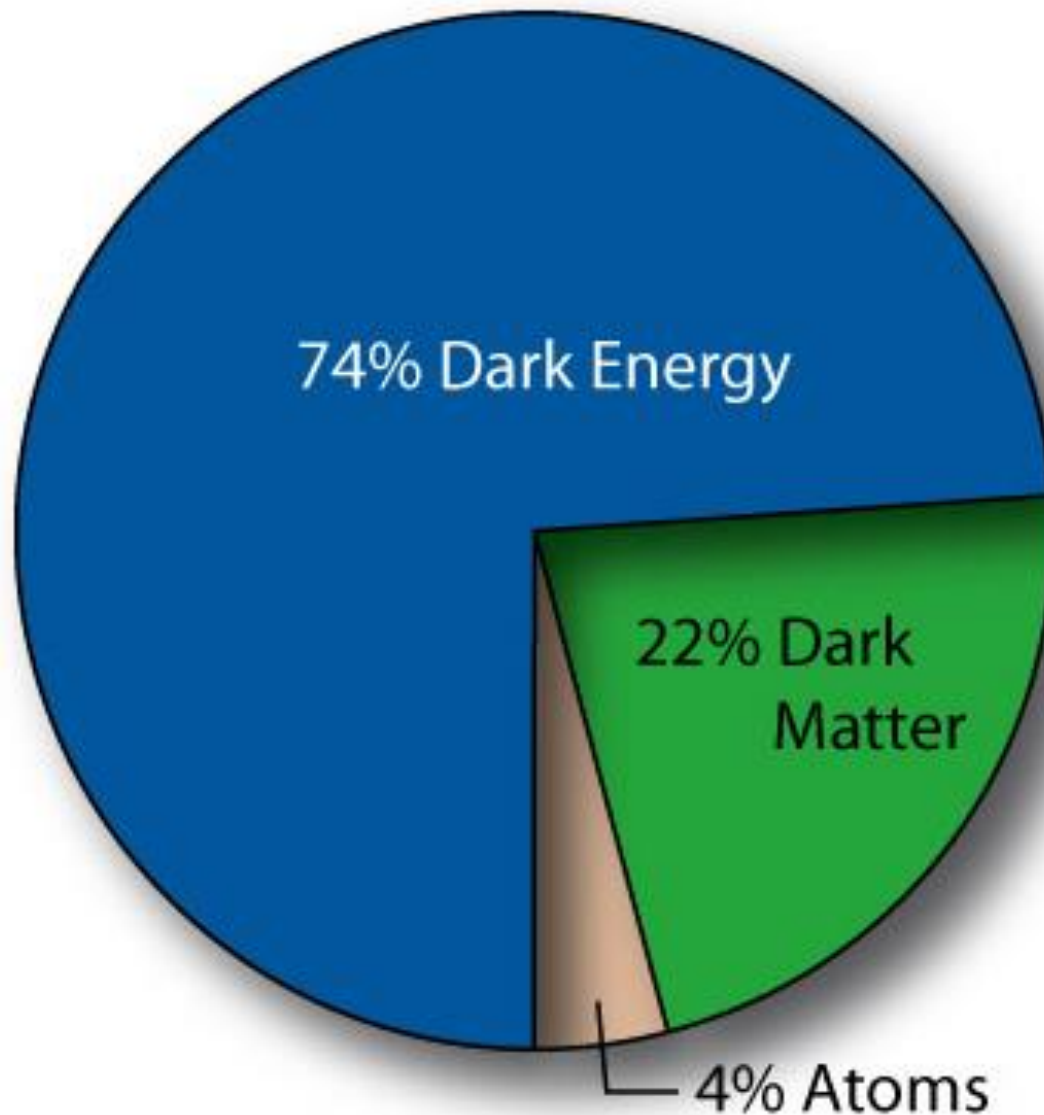
kučka
nakladatelství
www.kupkanet.com

Složení vesmíru

79 % H

19 % H

2 % Fe



Složení Země

34,6%

Železo

29,5%

Kyslík

15,2%

Křemík

12,7%

Hořčík

2,4%

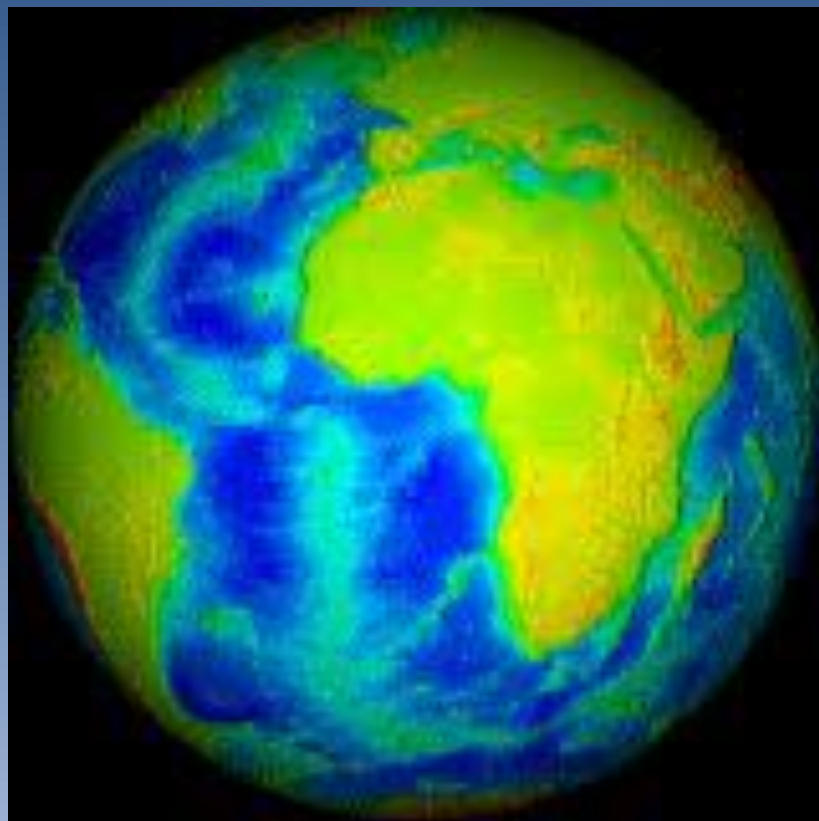
Nikl

1,9%

Síra

0,05%

Titan



Složení lidské tkáně

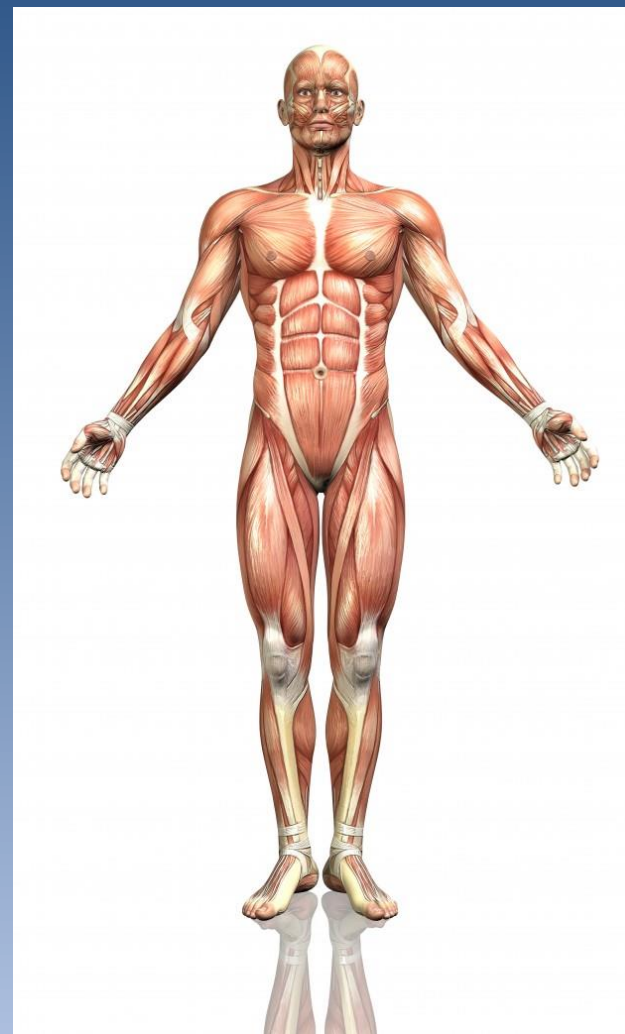
63 % O

19 % C

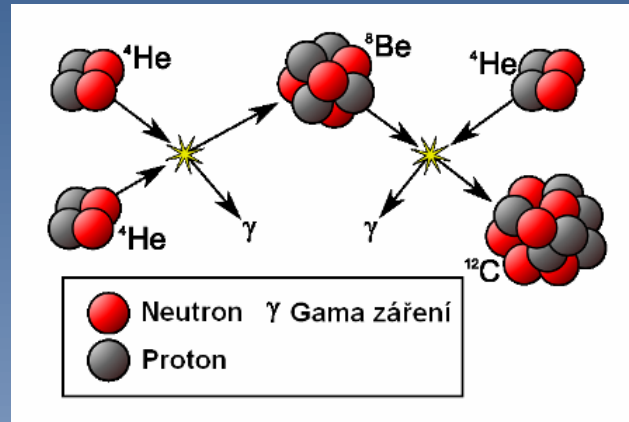
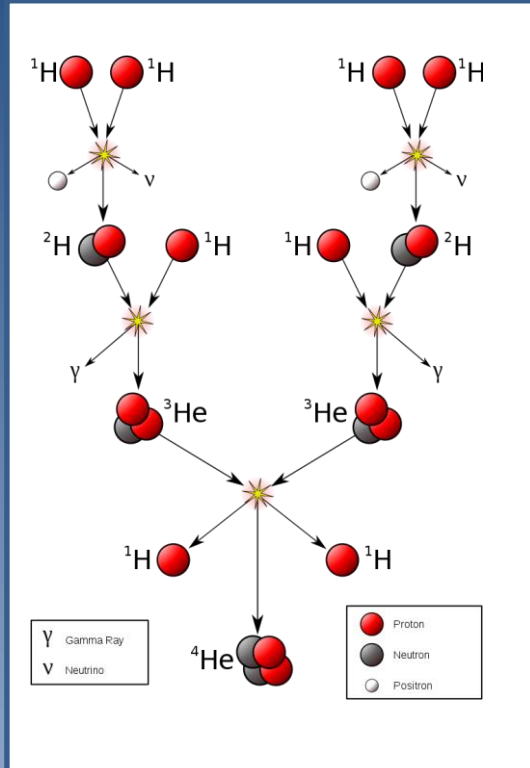
9 % H

5 % N

1% F, Na, K ...

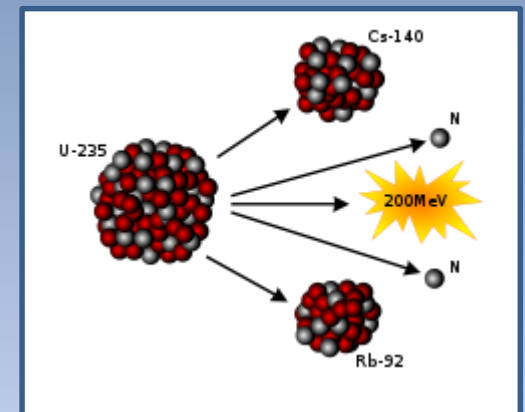


Vznik těžkých prvků



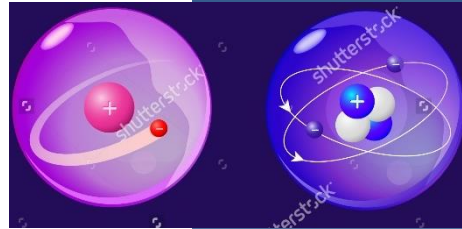
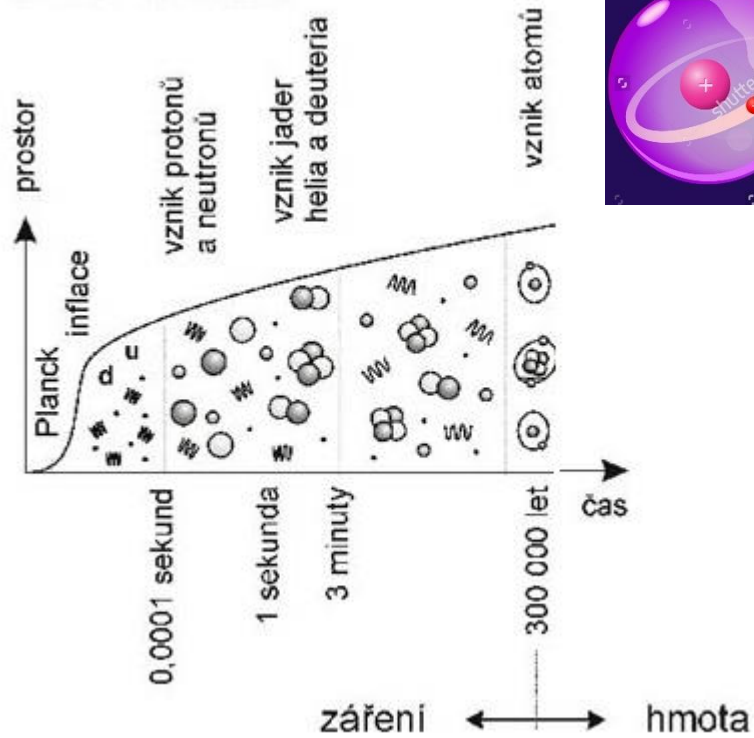
Jaderná fúze

Jaderné štěpení

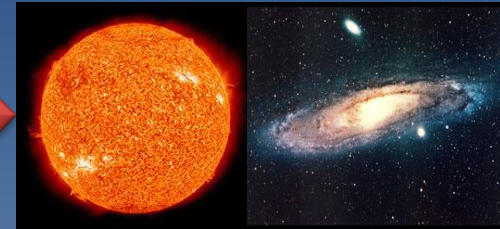


Historie našich atomů

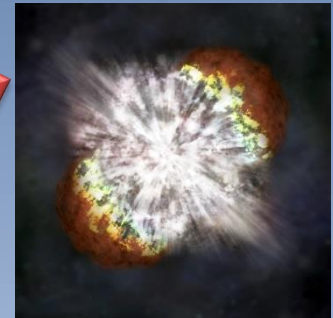
vznik Vesmíru



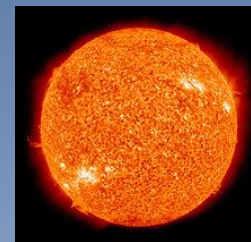
Stovky miliónů let



3 miliardy let



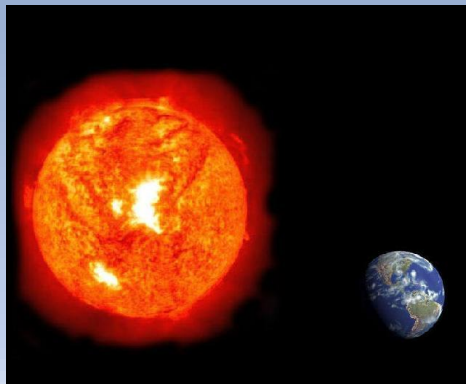
Stovky miliónů let



5 miliard let

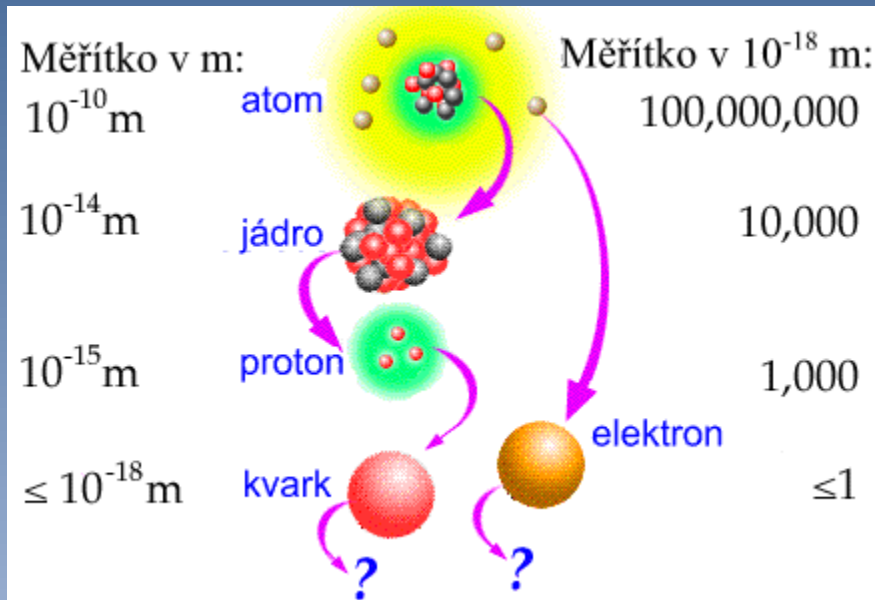


Stovky miliónů let



Proton, elektron... A co dál?

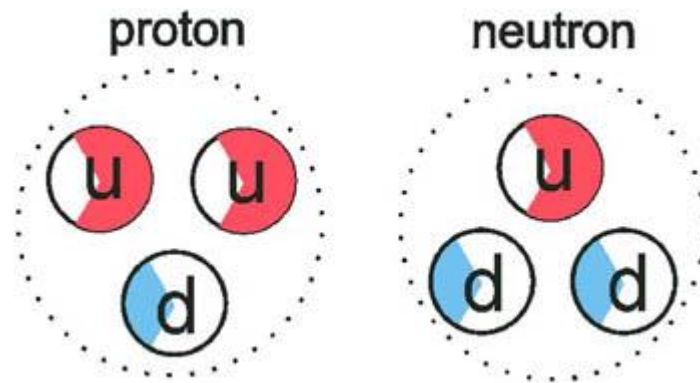
- 1964 – Kvark byl teoretiky předpovězen (Murray Gell-Mann, George Zweig)
- 1969 – Kvark byl experimentálně potvrzen na urychlovači SLAC (Stanford - USA)



Postupně objeveno 6 kvarků



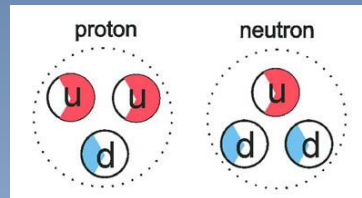
Kvarky se nevyskytují jako volné částice, pouze vázané v hadronech



Standartní model

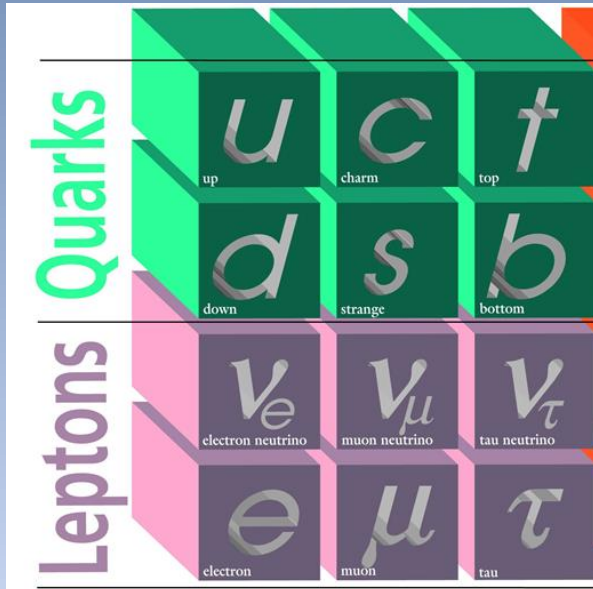
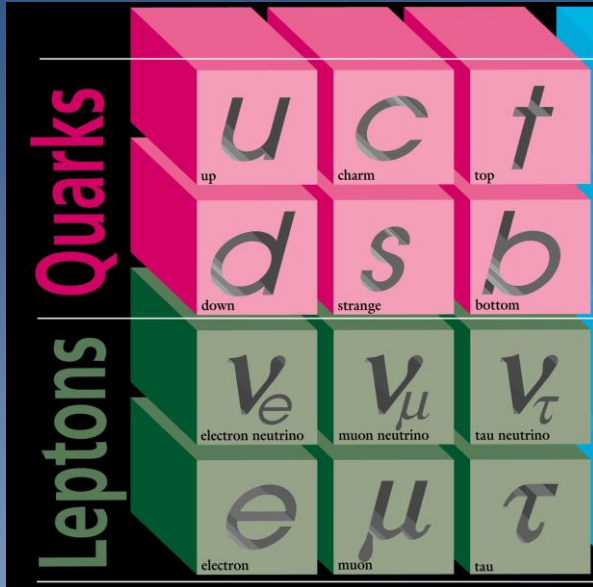
„Veškerá známá hmota ve vesmíru se skládá ze šesti druhů kvarků a šesti druhů leptonů a všechny jevy, které ve vesmíru pozorujeme, dovedeme vysvětlit pomocí čtyř druhů interakcí“

Částice



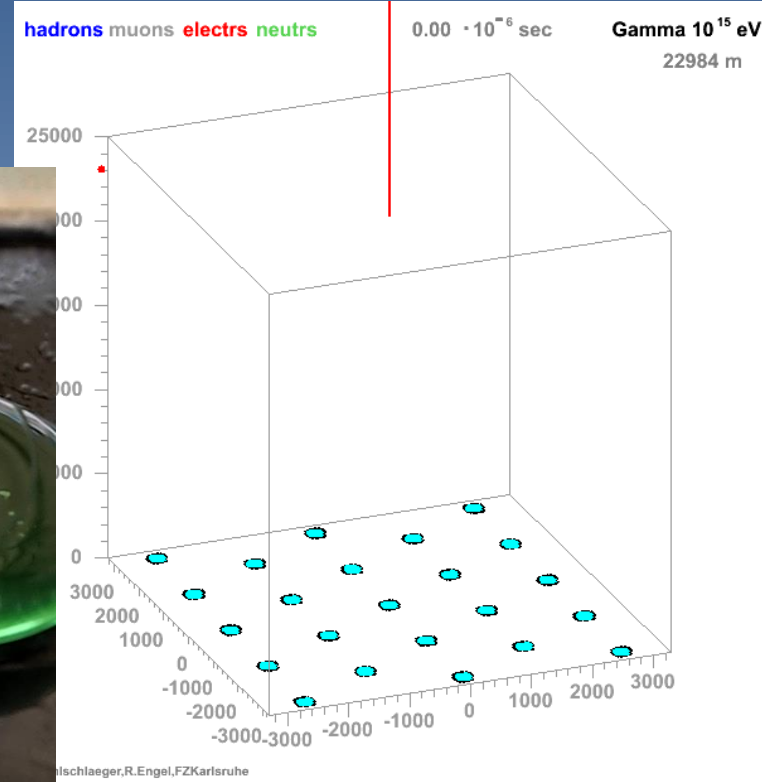
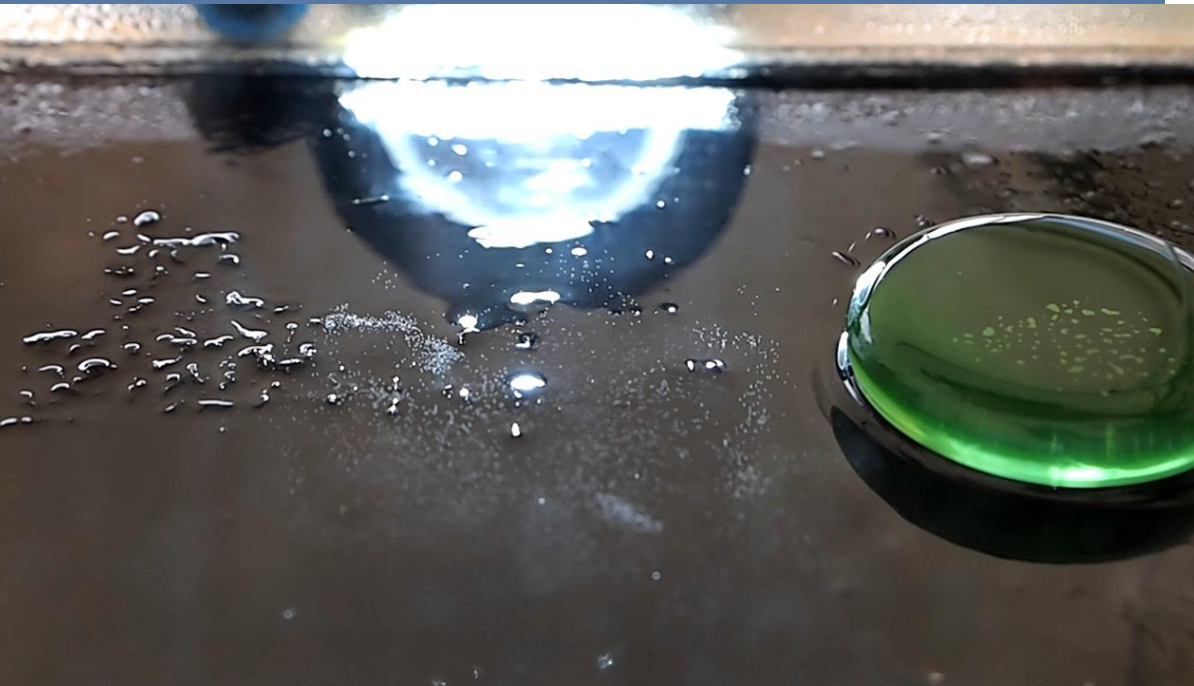
Antičástice

Má svoje nedostatky – neskutečně ošklivý model, nemá volné kandidáty na částice temné hmoty, plně nevysvětluje gravitaci



Jak se studují tyto částice?

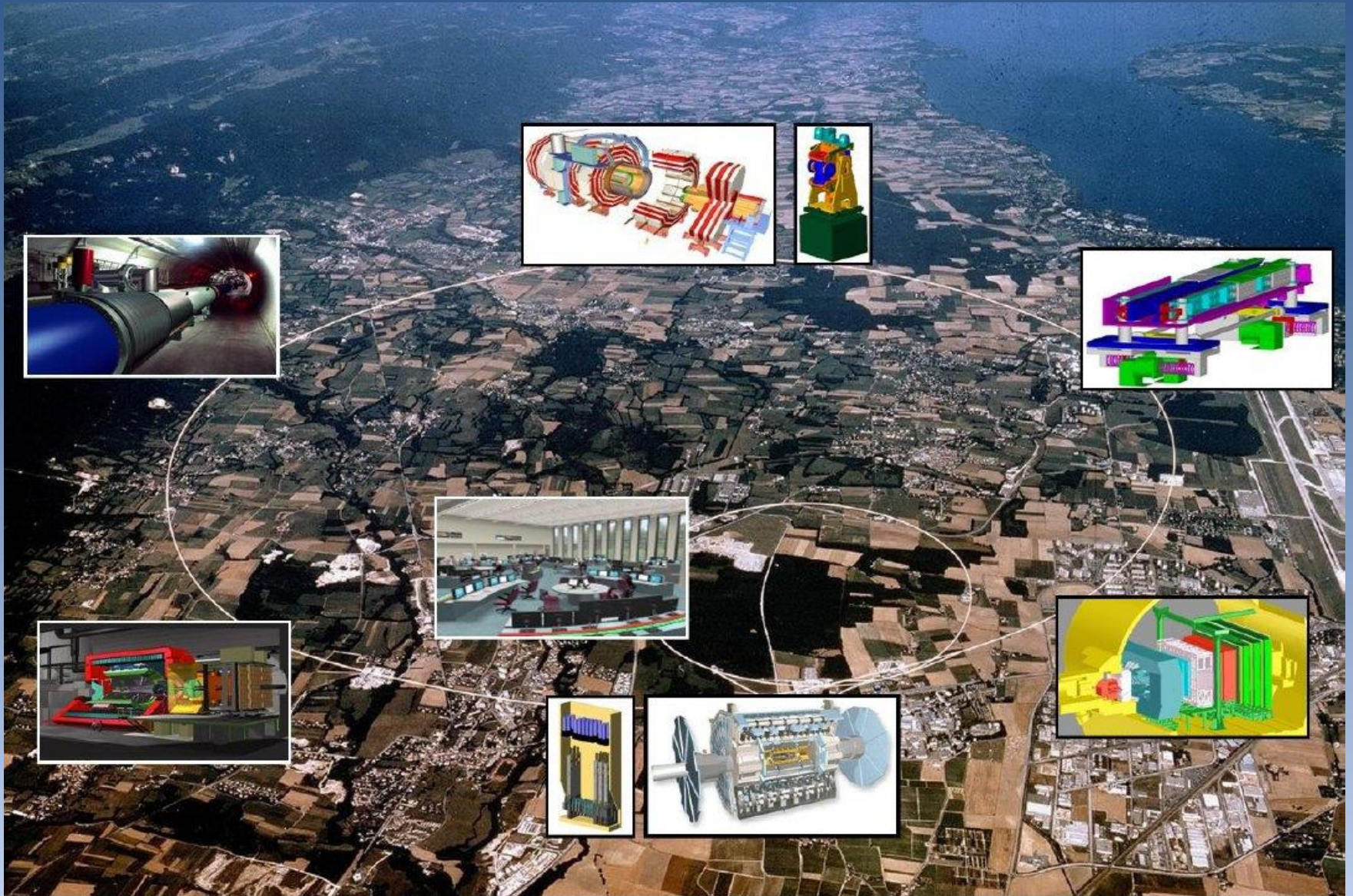
- Mlžná komora



CERN, Fermilab, Brookhaven, DESY



Urychlovač CERN



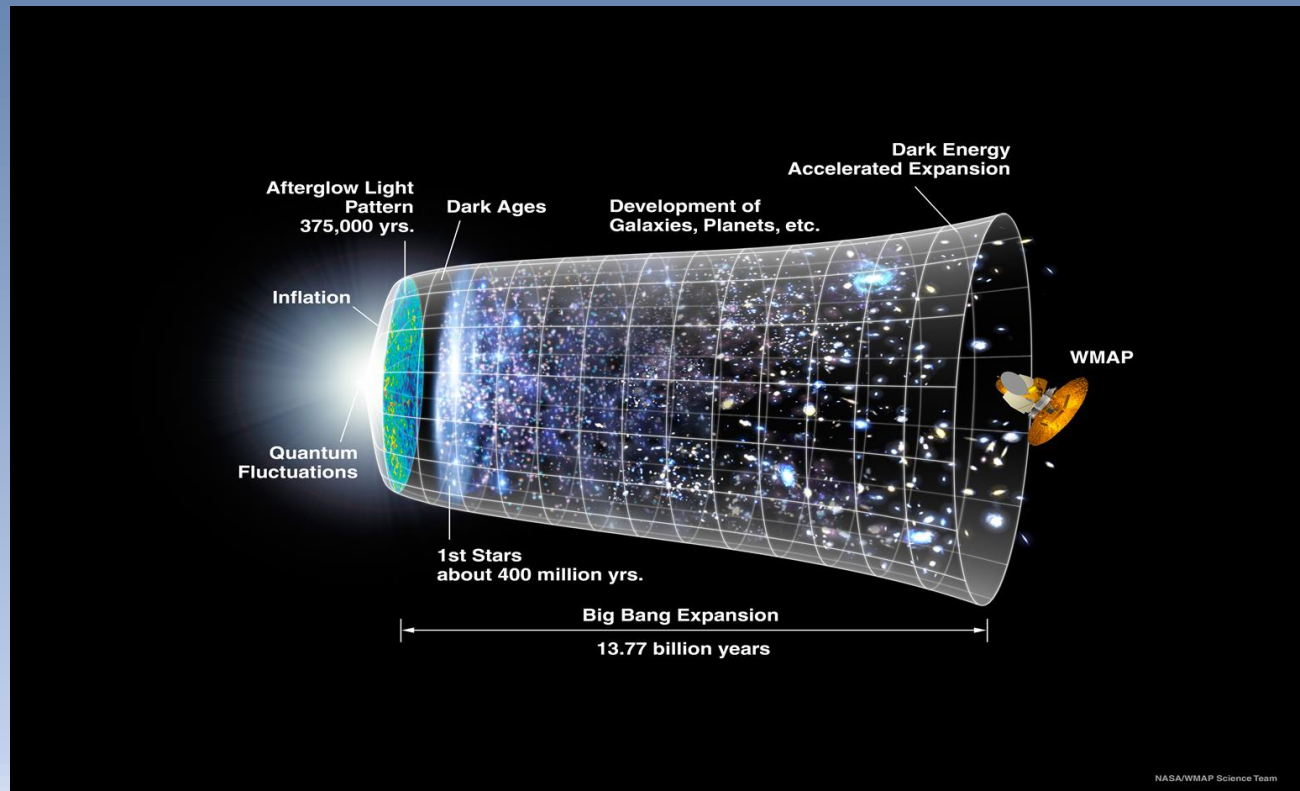
LHC

- Sráží protony při velkých energiích s frekvencí 40MHz pro hledání vzácných procesů, zatím neznámých částic, a vytváří podmínky jako těsně po Velkém třesku.
- Délka 27 km, průměr 8,7km, 100m pod zemí



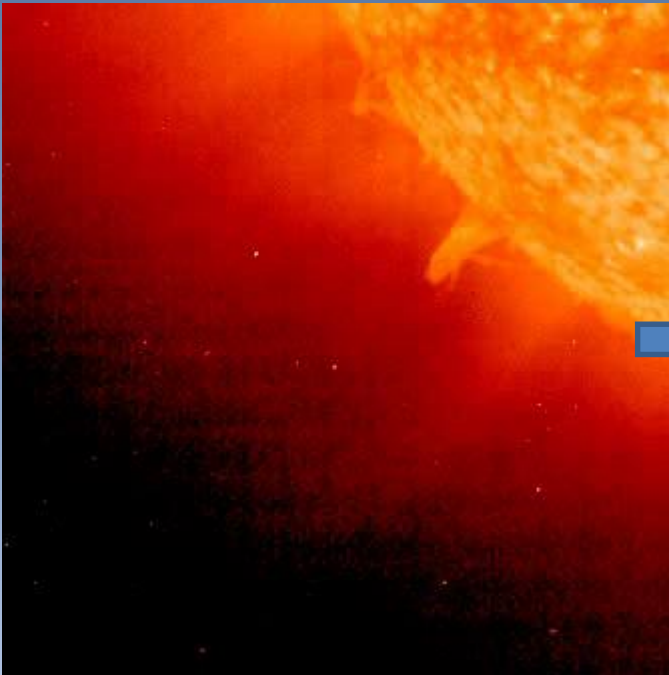
Co se v CERNu studuje?

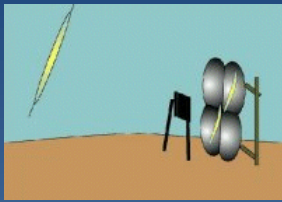
- Jaké jsou síly v přírodě?
- Kolik máme rodin částic?
- Proč tady jsme?
- Proč je Vesmír z hmoty a ne z antihmoty?
- Co je to temná hmota a temná energie?
- Jsou další síly či částice v přírodě?



V porovnání s přírodou jsme amatéři

- CERN 8 miliard USD – $1,4 \cdot 10^{12}$ eV = 14TeV – energie letícího komára
- přírodní vesmírné urychlovače 10^{21} eV (miliardkrát více!!!) – energie tenisového míčku





Způsoby detekce

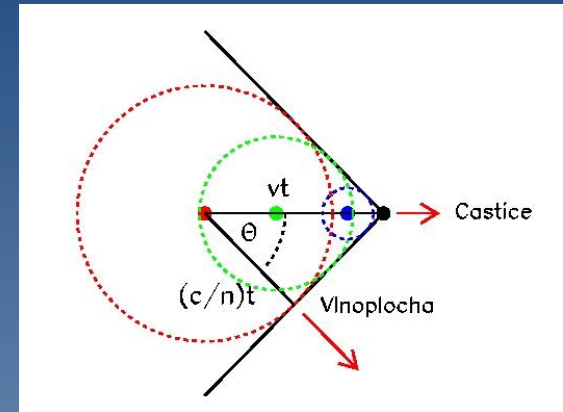
- 1) Detekce fluorescenčního světla – fluorescenční světlo vznikající v atmosféře
- 2) Detekce nabitých částic – na zemi většinou pomocí scintilačních detektorů
- 3) Detekce Čerenkovova záření: a) detekce záření vznikajícího v atmosféře
b) Čerenkovovské detektory

Určení hmotnosti iontů – magnetické a elektrické pole – hmotové spektrometry

Kosmické sondy - primární kosmické záření – prvotní informace, lze i nižší energie, nelze velmi vysoké $E < 10^8$ MeV (malá plocha detektorů)

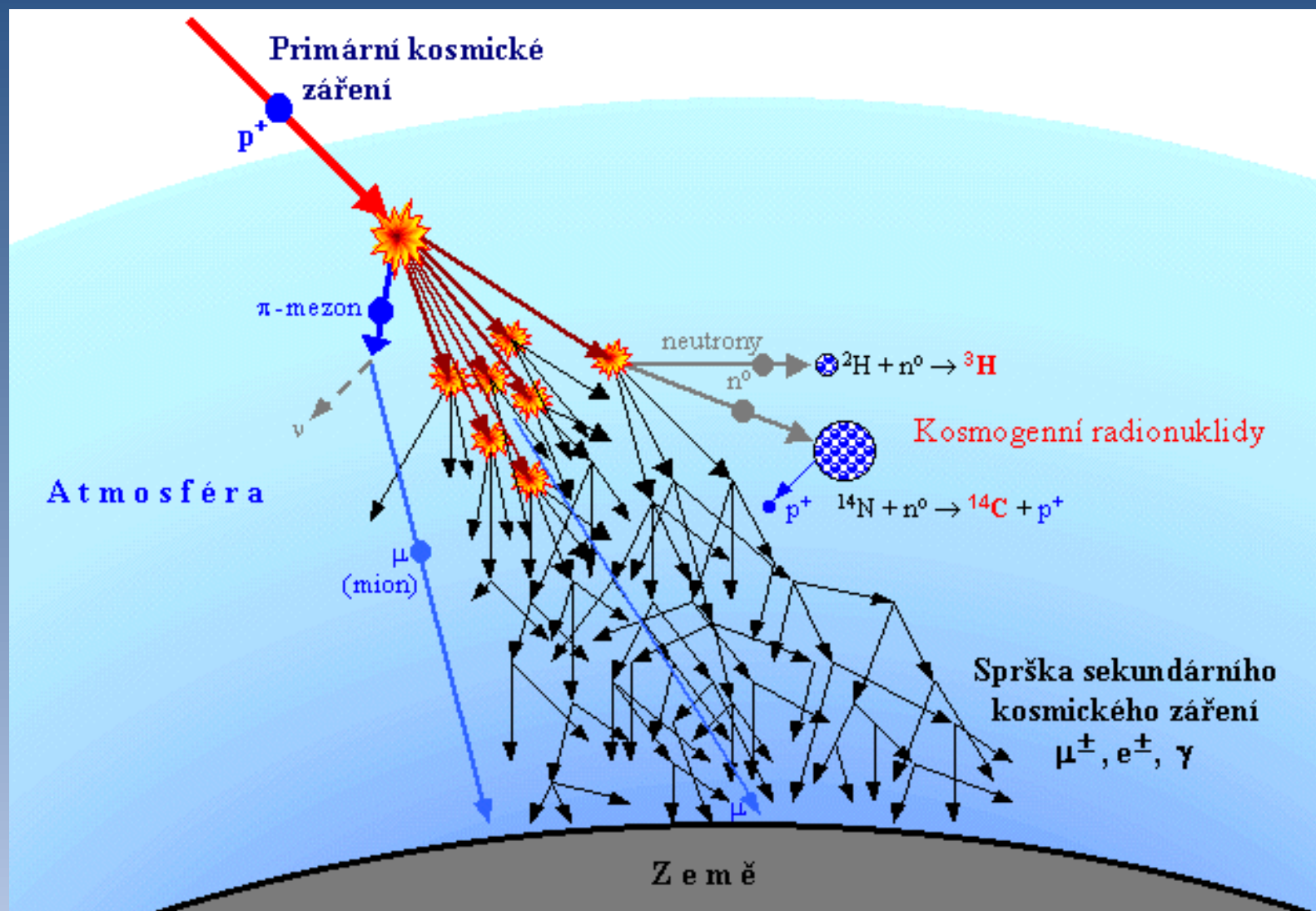
Balónové experimenty – primární a sekundární záření (závisí podle výšky letu)

Pozemní detektory – sekundární spršky – možno pokrýt velmi velké plochy (km^2) → detekce částic s velmi vysokou energií nelze studovat nižší energie (nerozvine se dostatečná sprška)



Princip vzniku Čerenkovova záření



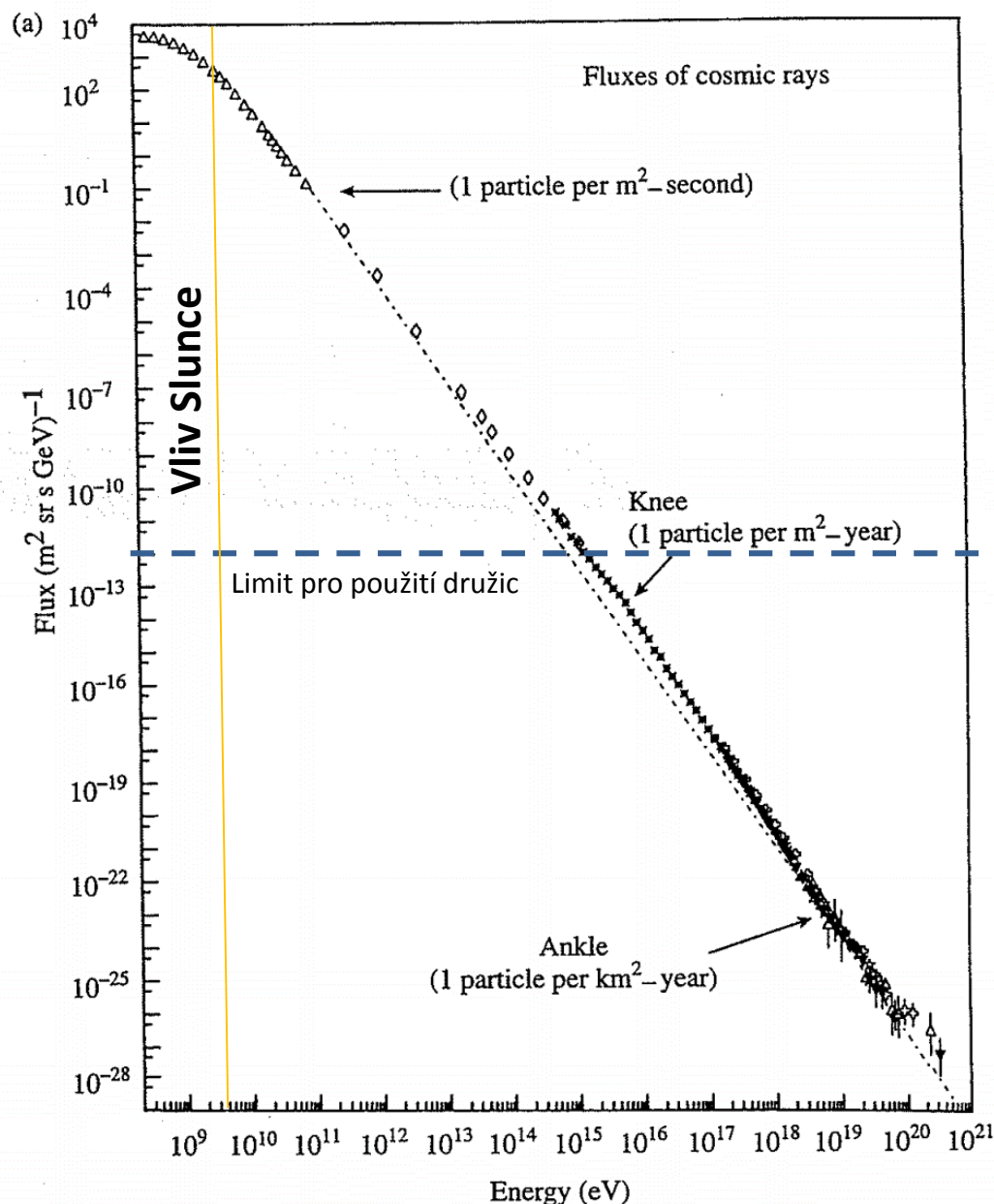


Jaké množství částic na jakých energiích je pozorováno?

Velmi nízká četnost částic na
nejvyšších energiích



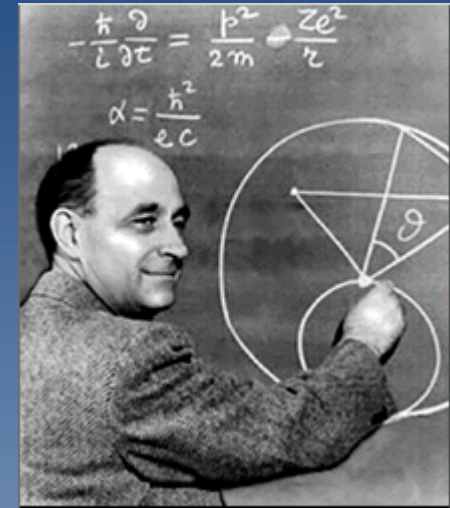
Nutnost velkých detekčních
ploch řádu tisíců km^2



Pozvolné urychlování

V roce 1949 navrhl Enrico Fermi

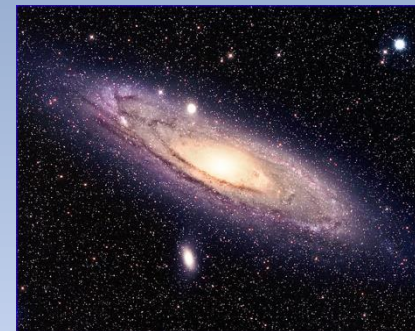
Mnohonásobné srážky s částicemi pohybujícího se oblaku plazmy
(spolupůsobení magnetických a elektrických polí)
oblaka jsou velmi rozsáhlá a velmi dlouhodobým
urychlováním můžeme získat i částice s velmi vysokou energií



Enrico Fermi

V tomto případě apriori izotropní
a homogenní rozložení

Možná koncentrace do roviny galaxie
(výskyt ionizovaných oblaků)



Galaxie v Andromedě
(snímek J. Ware)



Jedna z mlhovin v souhvězdí Carina (snímek Hubbleova dalekohledu)

Explozivní procesy

Možná souvislost se záblesky gama

Supernovy – asymetrická exploze (např. model dělové koule, asymetrický kolapsárový model), výtrysky hmoty – vysokoenergetických částic

Srážky neutronových hvězd ve dvojhvězdách

Zhroucení neutronové hvězdy do černé díry

Nestabilní jevy při akreci materiálu na kompaktní objekty

Aktivní jádra galaxií -
výtrysky

Srážky galaxií

Možnost ohrožení Země

Velké množství mionů

Vznik radioaktivních prvků – velmi vysoká radioaktivita atmosféry

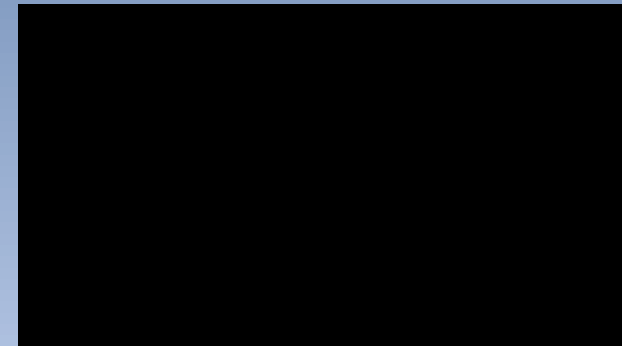
Energetické procesy exotických částic ??



Pohlcení neutronové hvězdy
černou dirou



Výbuch supernovy



Kolapsarový model vzniku
záblesku gama

Co byste měli vědět o vysokoenergetickém kosmickém záření

- Nabité částice, převážně protony dopadající na Zemi ze všech směrů
- Energie až stomilionkrát vyšší než v pozemských urychlovačích
- Výzkum kosmického záření na našem území má stoletou tradici



1912: Victor F. Hess v Ústí nad Labem

Pozemní experimenty

Snaha pokrýt co největší plochu

**AGASA – scintilační detektory – detekují dopadající spršku hlavně mionů sekundárního záření
pracuje celý den**

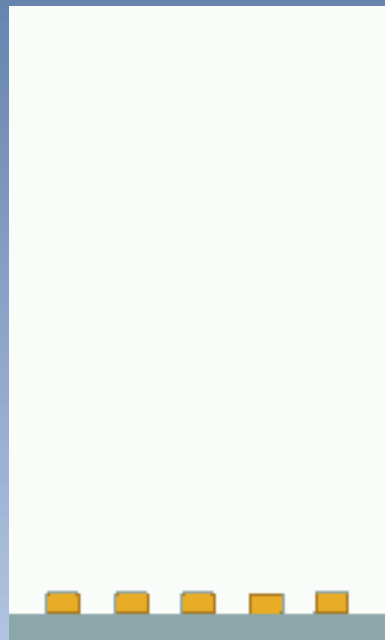
**HiRes (Fly's Eye – Muší oko) – optické teleskopy detekující fluorescenční záření –
pracují jen v noci**

(Každý zaznamenal jeden superenergetický případ)

Haverah Park (Leeds, Anglie) – čerenkovské detektory



Detekce fluorescenčního světla (HiRes)



**Sprška zasáhne detektory lze
určit směr a profil
(Haverah Park experiment WWW)**



**Teleskop pro pozorování
Čerenkovova záření
(Telescope Arrey)**

Kosmické sondy

Zkoumání složení primárního kosmického záření často společně i záření gama a X

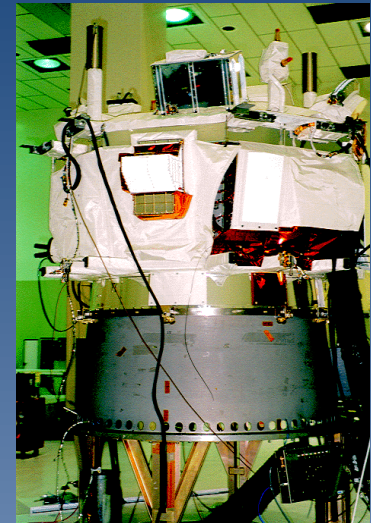
Zatím do energie 10^8 MeV

Záření gama zachovává směr a doprovází také vysokoenergetické procesy

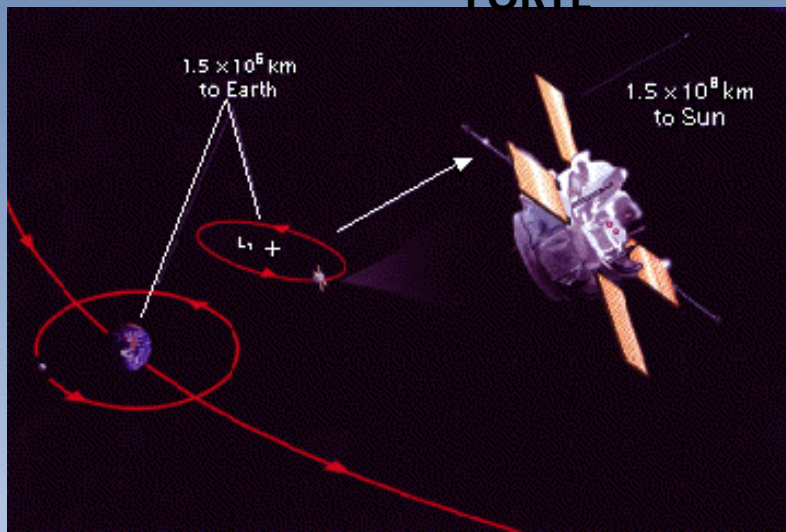
Spojení detekce kosmického záření a hlídání jaderných výbuchů - družice FORTE



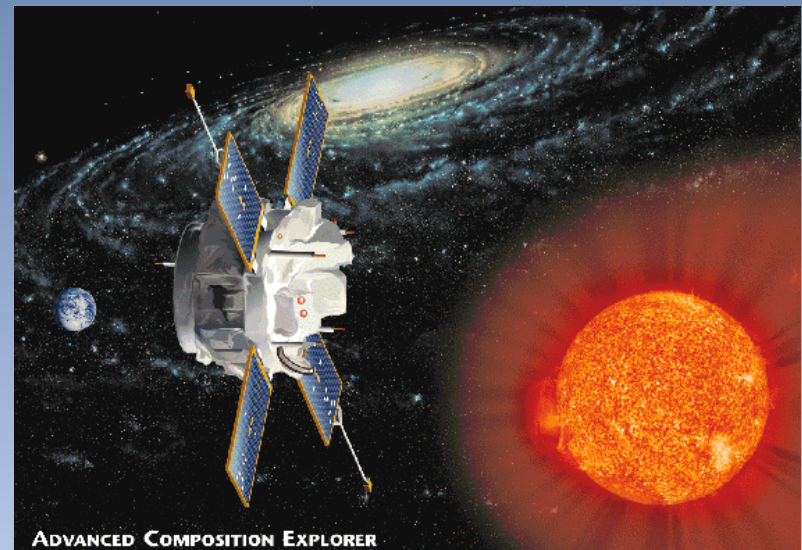
Družice HEAO 3



Družice ACE



Umístění družice ACE do libračního bodu L1



Družice ACE studuje složení částic kosmického záření jak slunečního tak i galaktického původu

The Pierre Auger Observatory



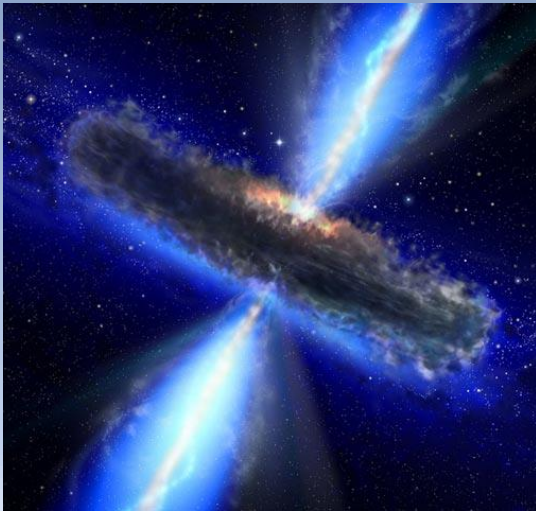
provincia **Mendoza, Argentina**

Proč jsou tyto částice zajímavé?

- Rekordní energie detekované částice $3 \cdot 10^{20}$ eV $\approx$ energie tenisového míčku při rychlosti 80 km/h.

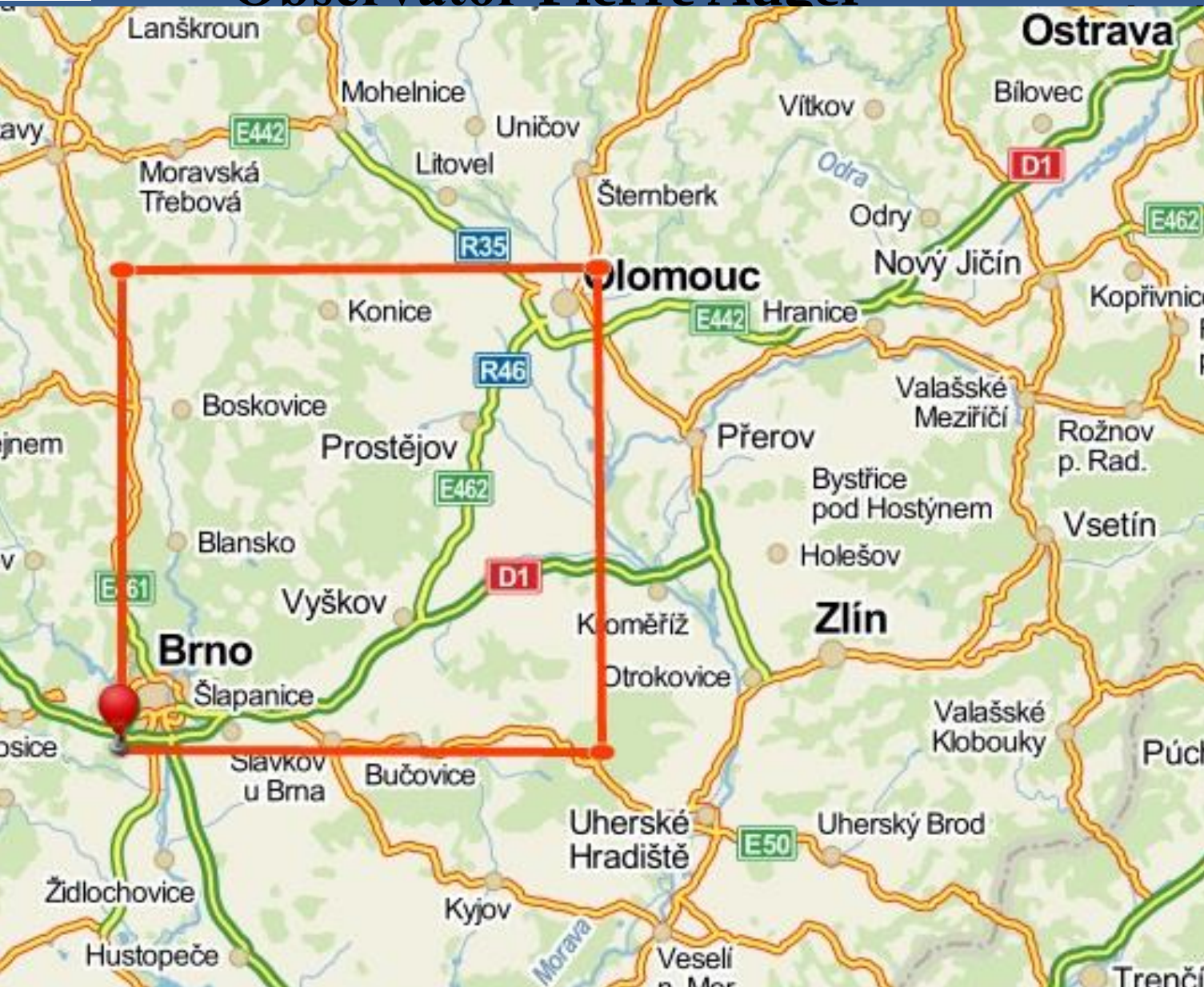
Motivace pro projekt Pierre Auger:

- Odkud přicházejí?
 - Co jsou to za částice?
 - Kolik jich vlastně přilétá a jakou mají energii?
 - Jak se urychlují?
 - Jak se šíří vesmírem?
- ... jak to, že vůbec existují?



- malé zakřivení v kosmických mag. polích – směry příletu ukazují ke zdroji
 - při cestě z hlubin vesmíru částice ztrácejí energii ve srážkách s reliktním zářením (tzv. mez GZK)
 - neznáme mechanismus, který by produkoval takto vysoké energie v blízkých zdrojích (do 70 Mpc)
- V úvahu přicházejí exotické scénáře, jako rozpady dosud neznámých částic nebo pozůstatků velkého třesku, apod.

Observatoř Pierre Auger



USA (zrušený plán)



Malargüe,
Province
Mendoza,
ARGENTINA

3 000 km²

Nepřímá detekce kosmického záření

Primární kosmická částice



sprška sekundárních částic



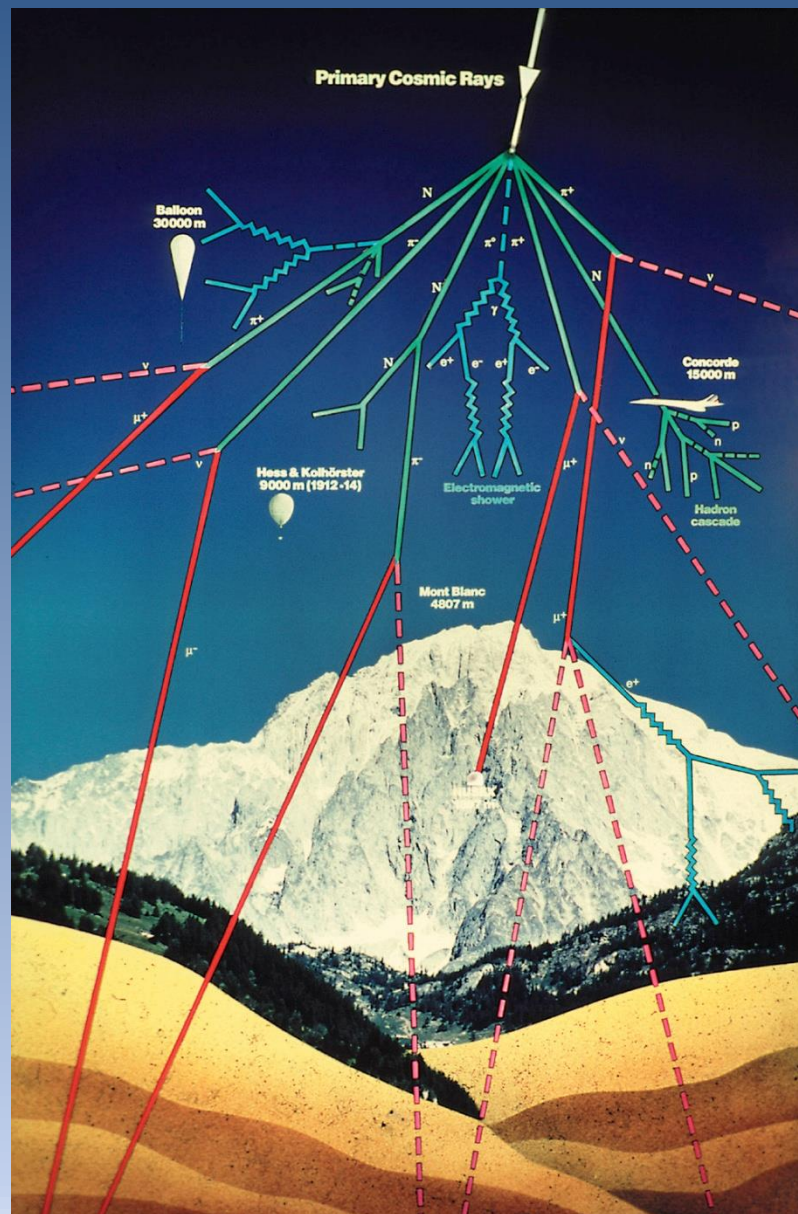
- fluorescence excitovaných molekul

+

- na zem dopadající sekundární částice
„atmosférické spršky“

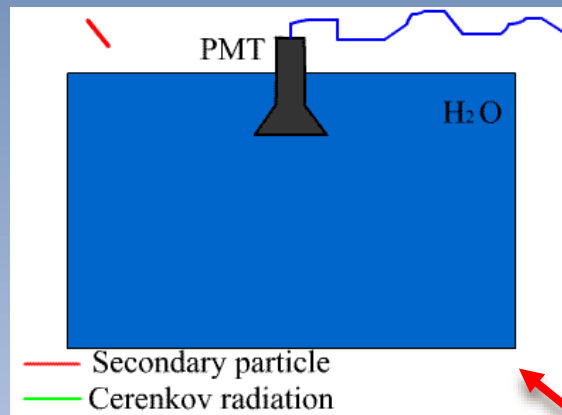
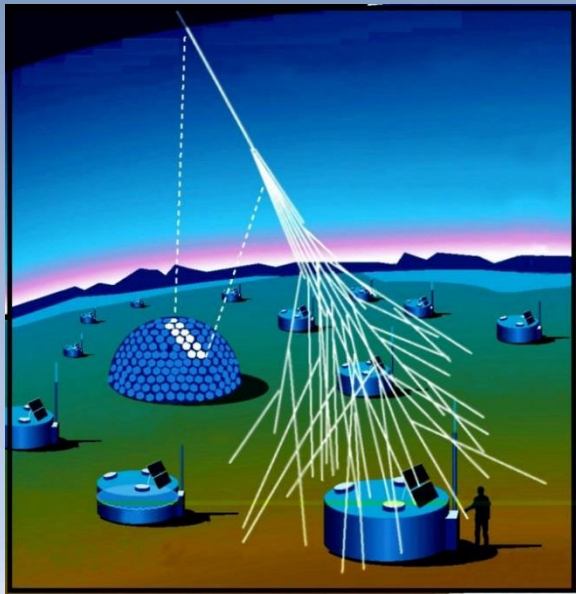
sprška ve svém
maximu obsahuje
miliardy částic

sprška dopadající na
zem pokrývá plochu
desítek čtverečních
kilometrů



Nepřímá detekce kosmického záření

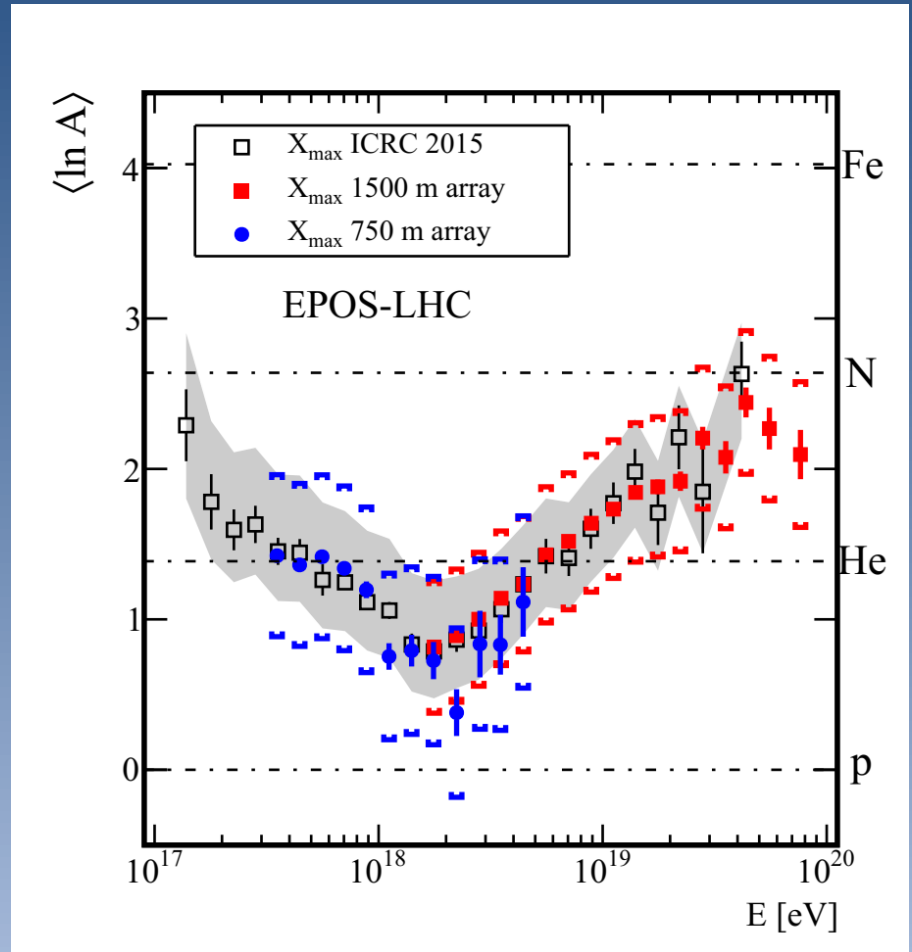
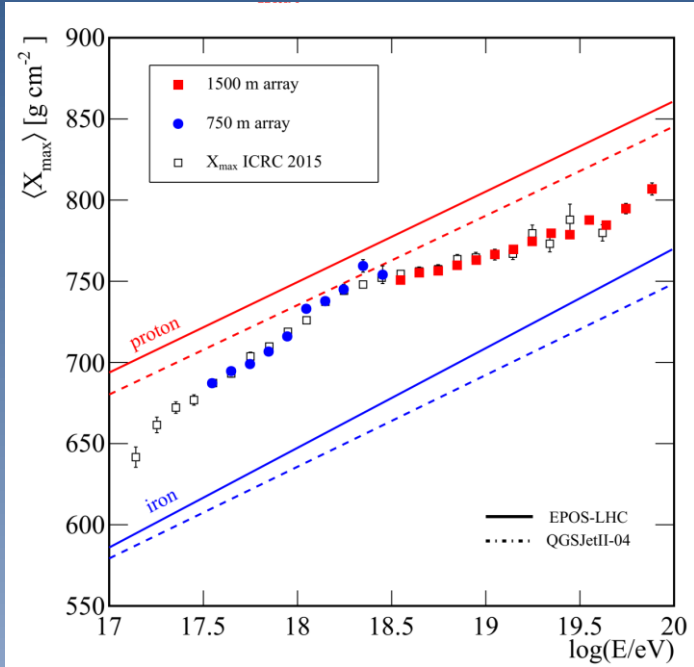
- Původní částice vyvolá spršku sekundárních částic
 - Barely SD zachytí částice co přežily průlet atmosférou a dopadnou až na zem
 - Všesměrový fluorescenční záblesk z průletu spršky sekundárních částic je zachycen a zobrazen zrcadly FD teleskopů.



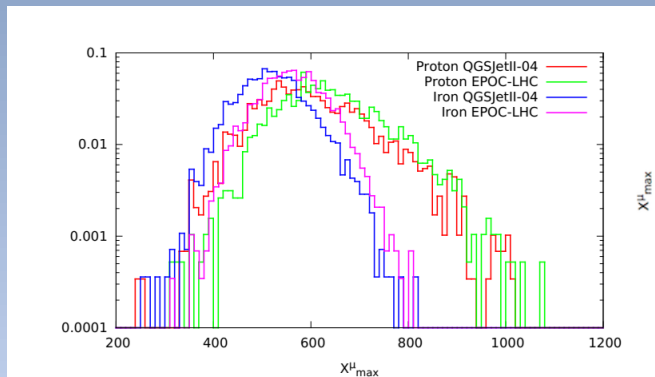
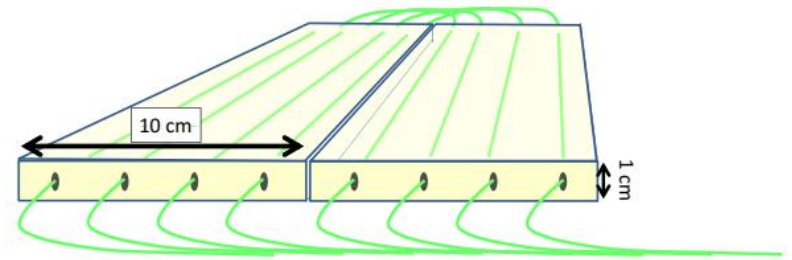
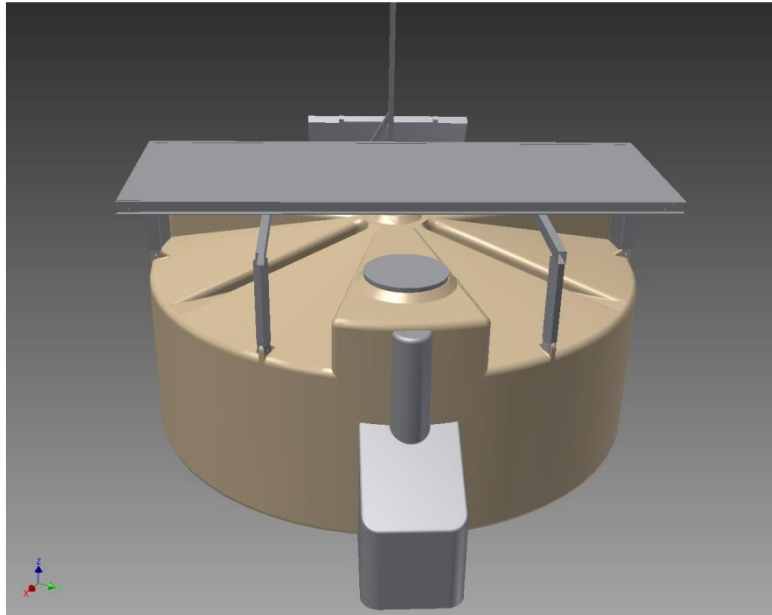
Test Video Collection
<http://www.mhhe.com/10e>

© 2004 McGraw-Hill Education
All rights reserved.

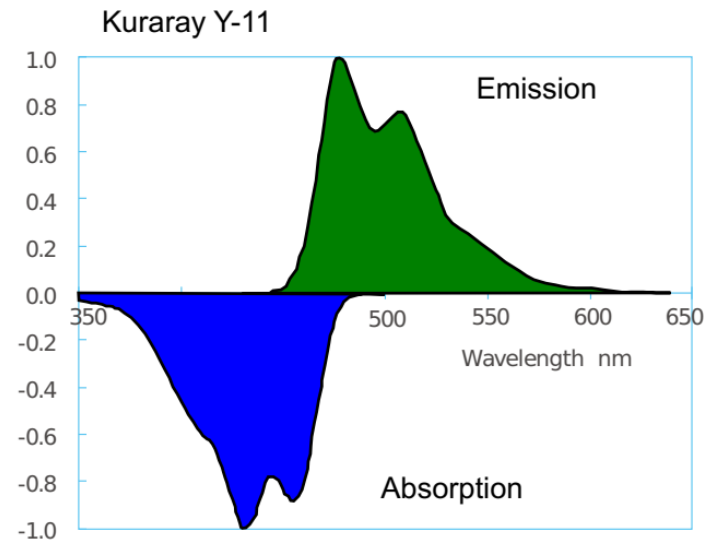
Složení kosmického záření



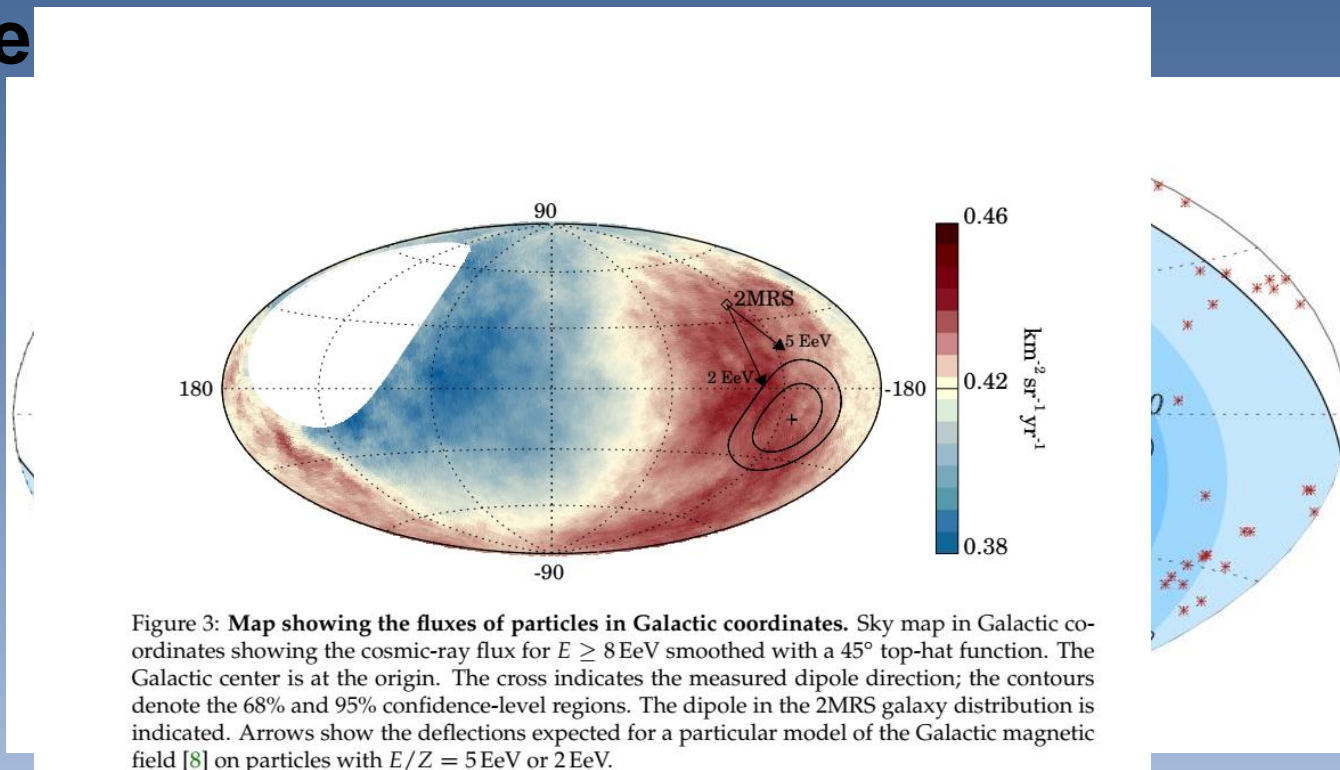
Pierre Auger Observatory upgrade



!



Ano....a Ne! První data ukázala korelaci s AGN, nicméně pozdější to neprokázala – stále



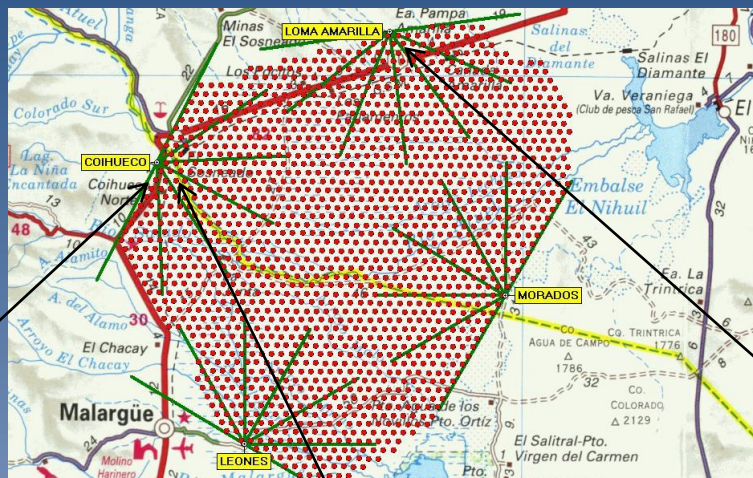
Modře – co PAO vidí (polovina oblohy nevidíme, potřebujeme severní Auger)

Červené hvězdičky – aktivní galaktická jádra do vzdálenosti 75 Mpc (megaparseků)
– to odpovídá našemu očekávání o limitu GZK



Česká stopa

Výroba segmentů zrcadla v Olomouci



Coihueco

6 x 60 segmentů zrcadla
6 x 4 náhradní segmenty



HEAT

3 x 60 segmentů zrcadla
3 x 4 náhradní segmenty



Loma Amarilla

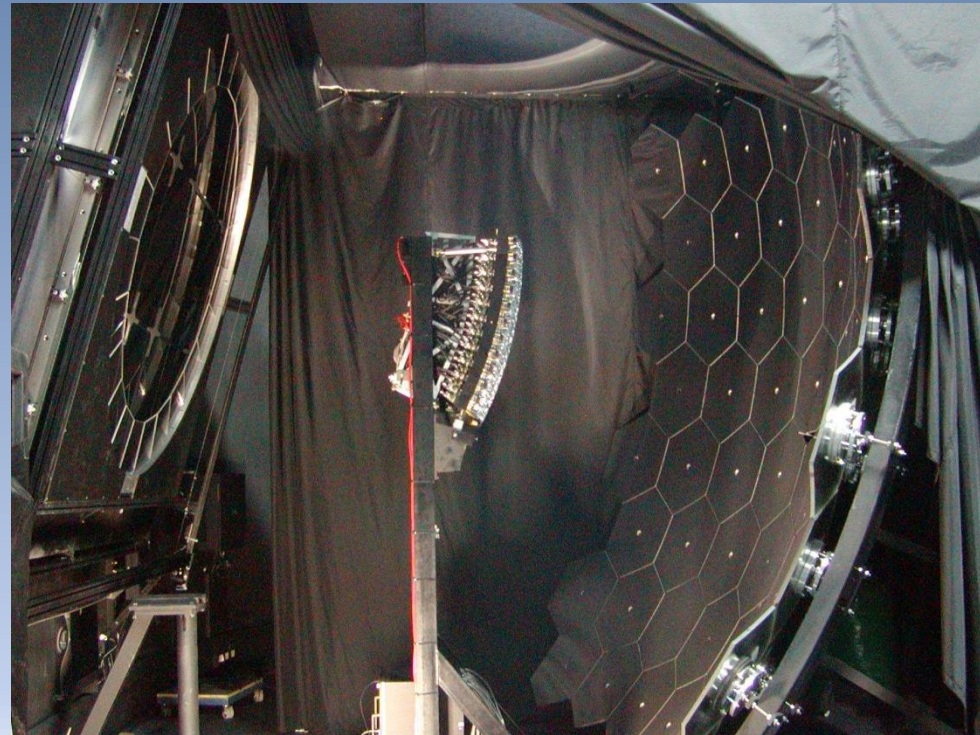
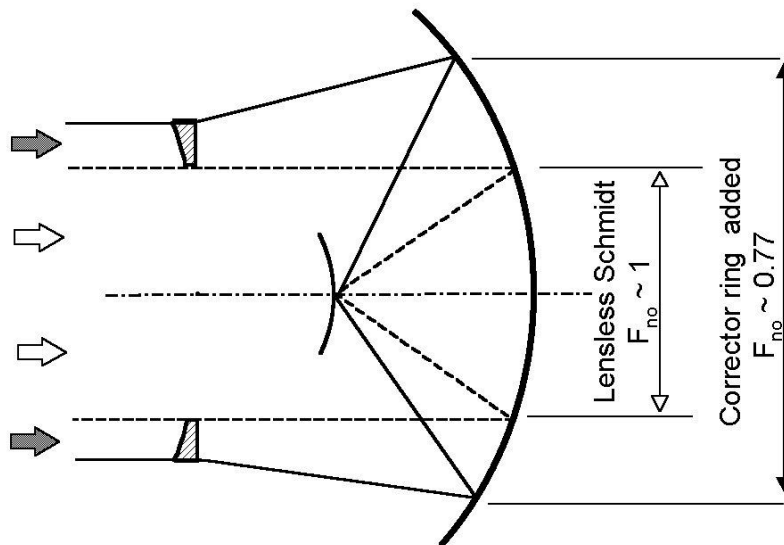
6 x 60 segmentů zrcadla
6 x 4 náhradní segmenty



= 960 zrcadlových segmentů

Fluorescenční detektory

- Počet: 27 teleskopů umístěných ve čtyřech budovách, za UV transparentním filtrem
- Dosah: 20 km pro spršky s energií 10^{20} eV
- Druh teleskopu: Schmidtova komora, se segmentovaným sférickým zrcadlem s $R=3400$ mm
- Parametry teleskopu: zrcadlo s rozměry $3,6 \times 3,6$ m, zorné pole $30^\circ \times 30^\circ$, elevační úhel 16° , každý teleskop je vybaven 440 fotonásobiči.



Monitorování atmosféry Lidar

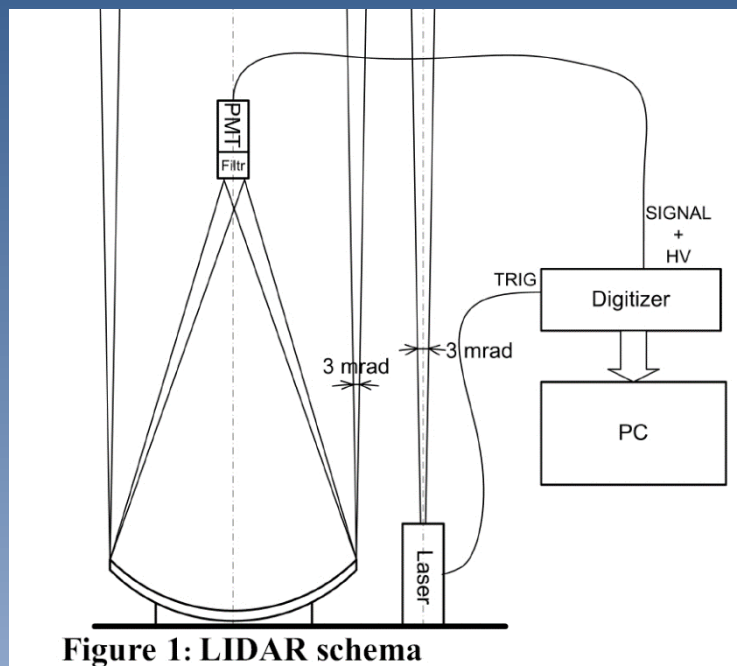
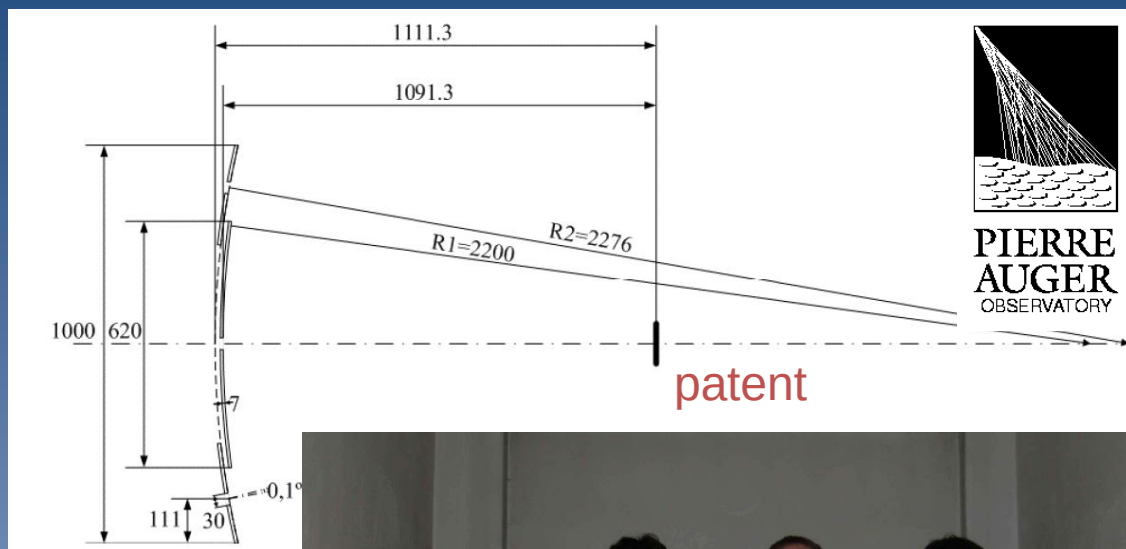
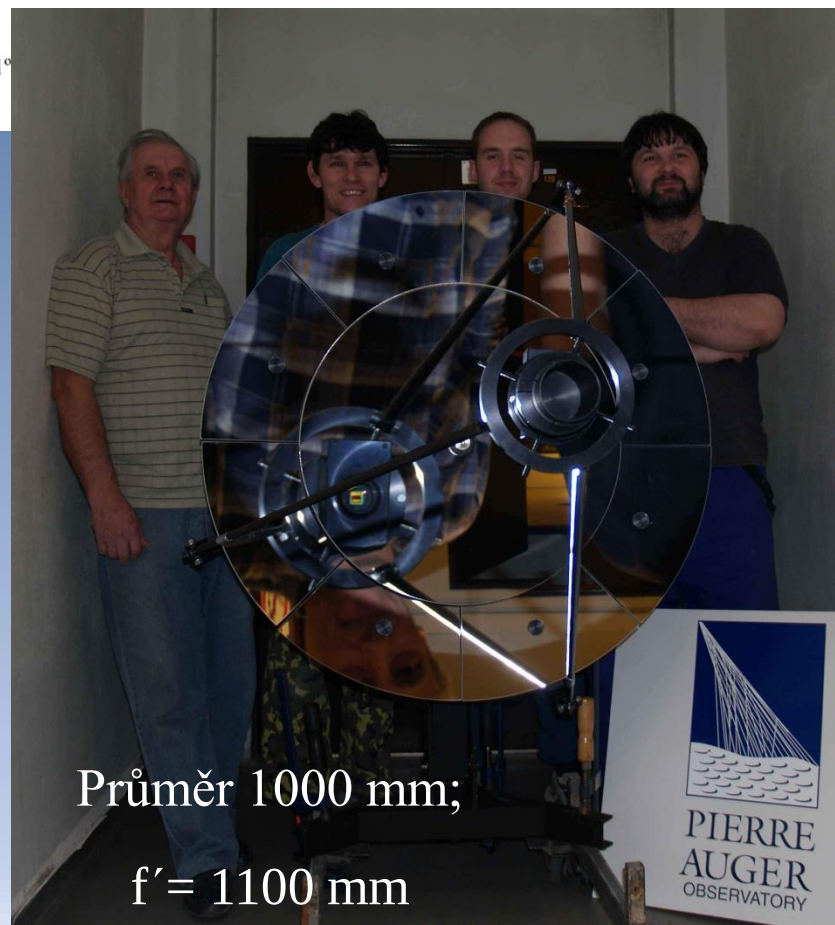


Figure 1: LIDAR schema

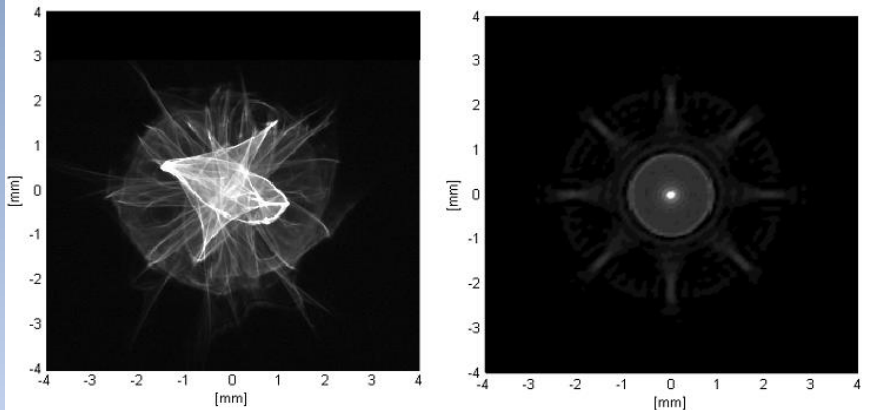


patent



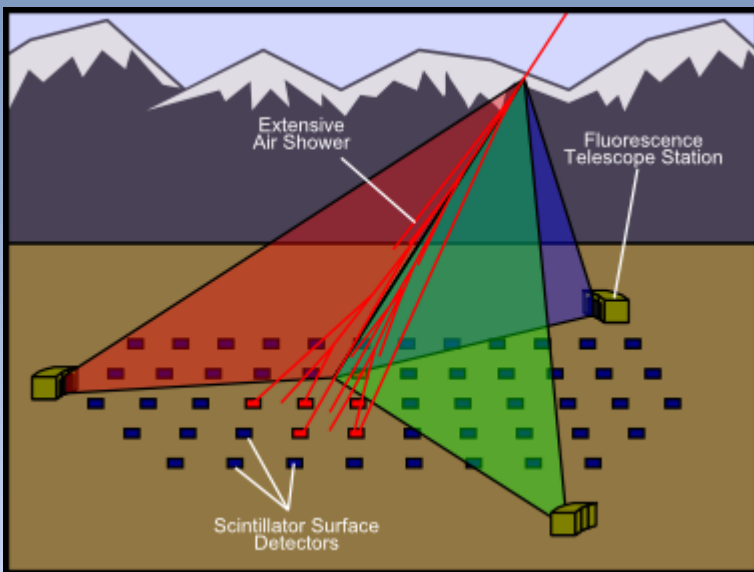
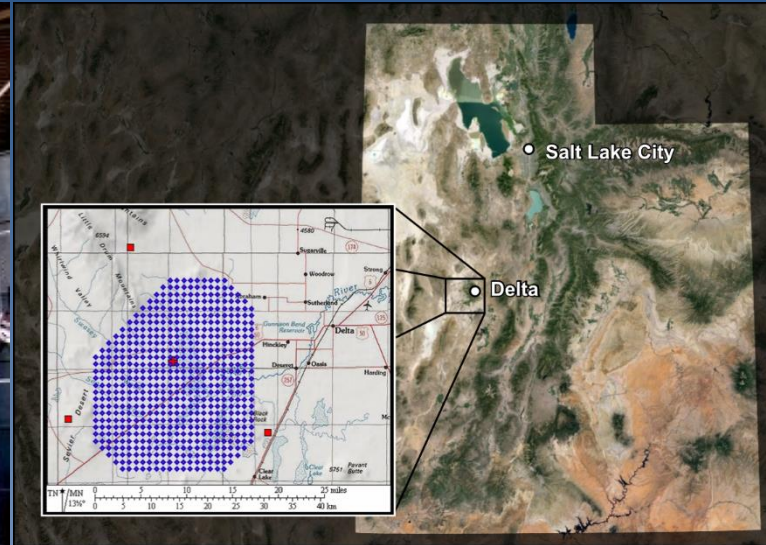
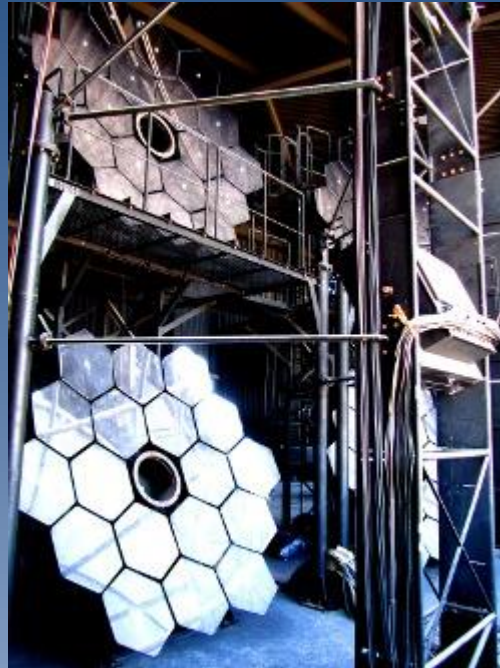
Průměr 1000 mm;

$f' = 1100$ mm

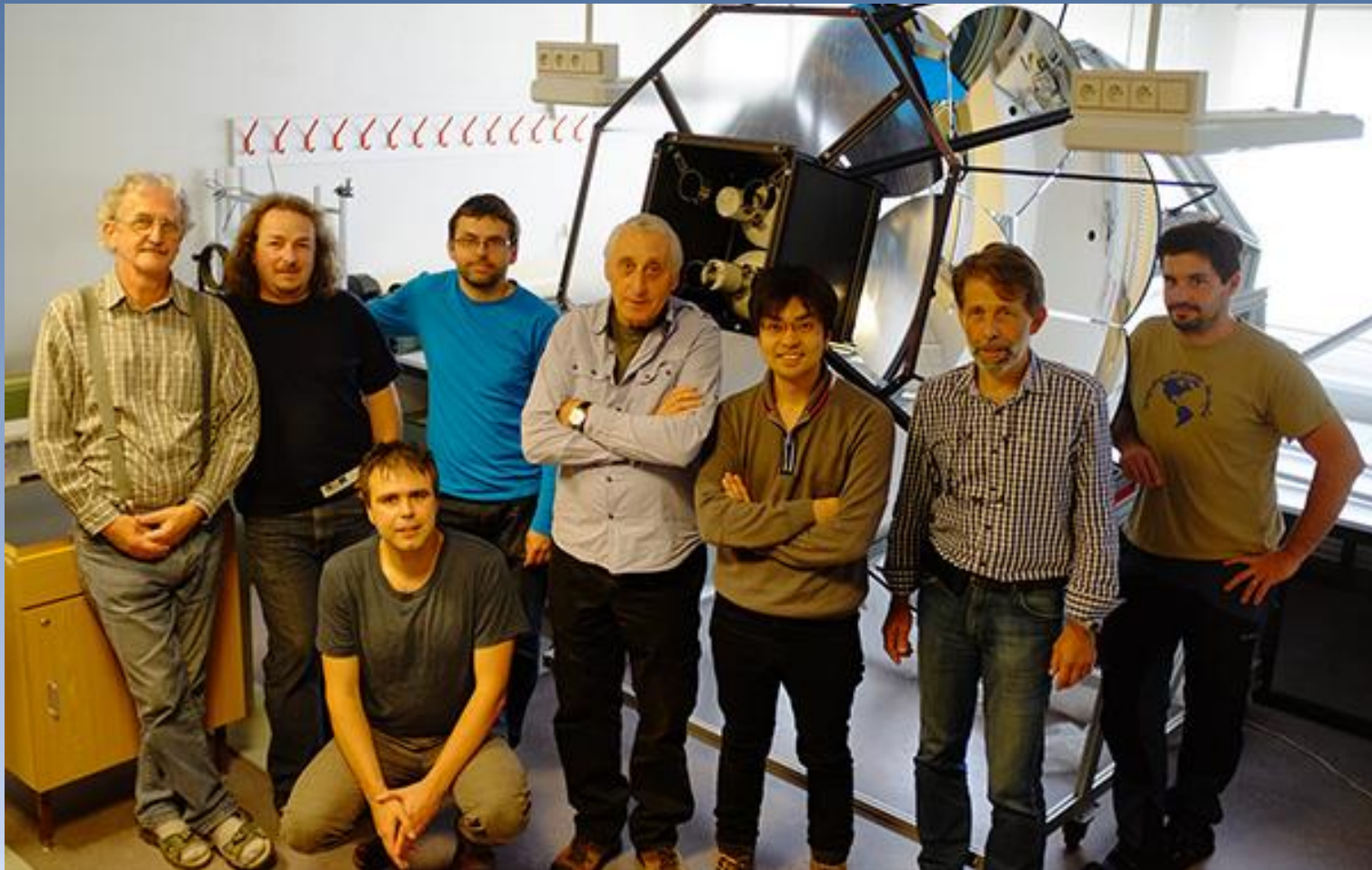


Srovnání velikostí reálné a vypočtené stopy na PMT.

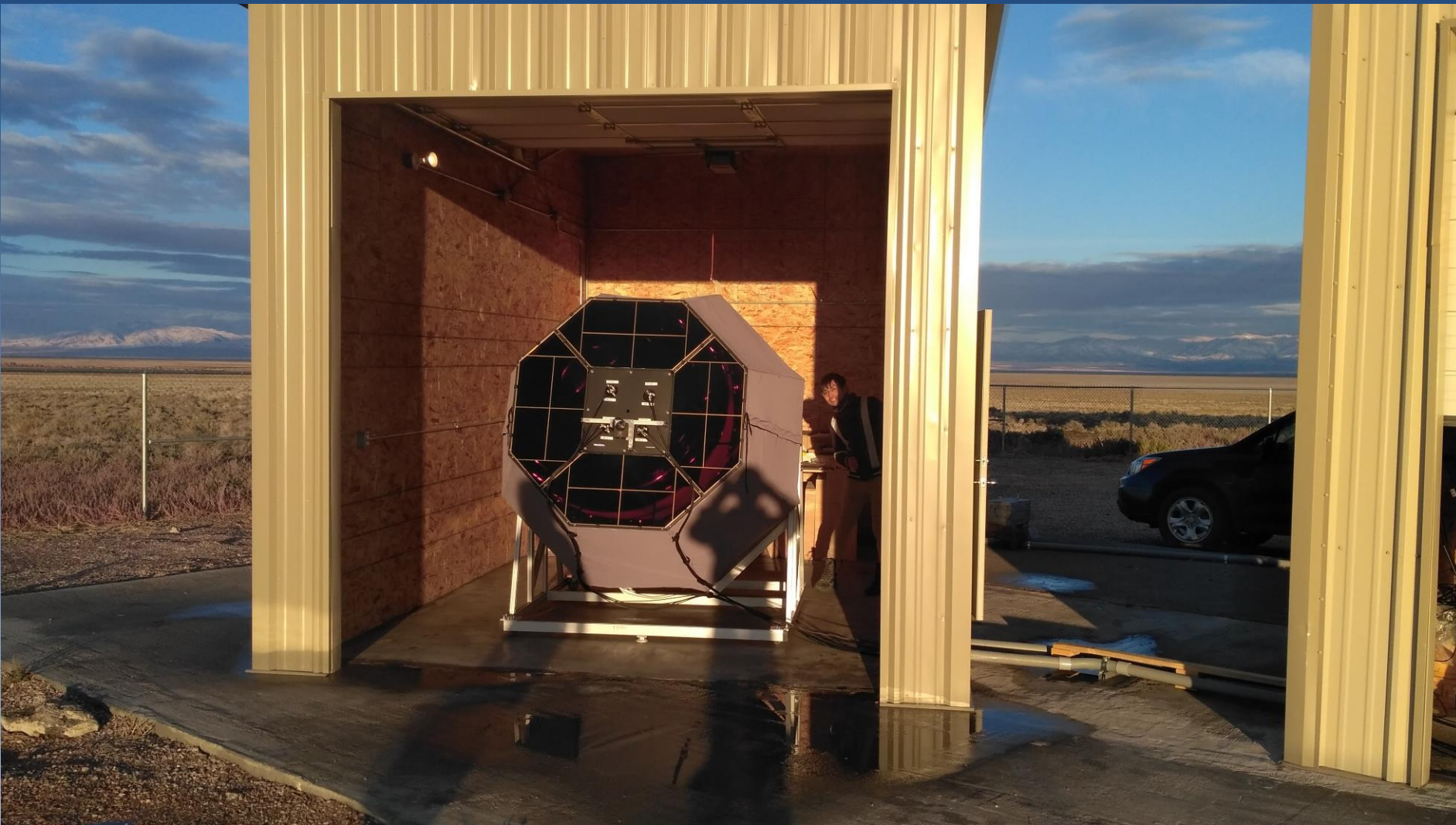
The Telescope Array project - UTAH, USA



Nová generace teleskopu FAST









Nová observatoř pro zkoumání kosmického záření

CTA (Cherenkov Telescope Array)

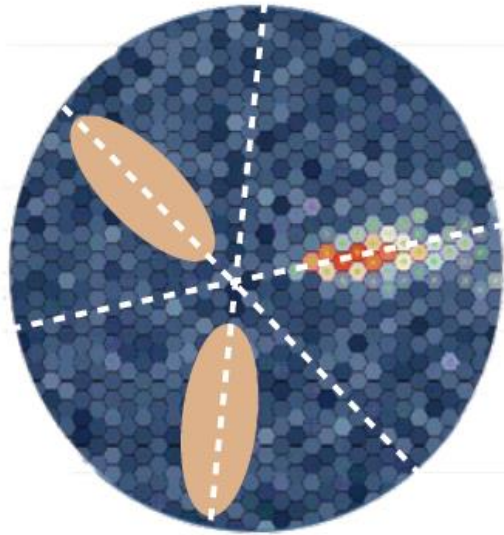


Cherenkov Telescope Array (CTA)

MOTIVACE

- Gamma záření o energiích GeV to TeV má odlišný původ než nízko-energetické fotony – není generováno tepelnou emisí horkých vesmírných objektů
- Urychlení v gigantických rázových vlnách (SN) NEBO rozpad strun nebo částic temné hmoty nebo velmi těžkých neznámých částic.
- CÍLE: porozumět mechanismům urychlování kosmických částic a jejich vlivu na vesmír; hledání temné hmoty; kosmologie; teoretická fyzika

Operation Principle of IACTs



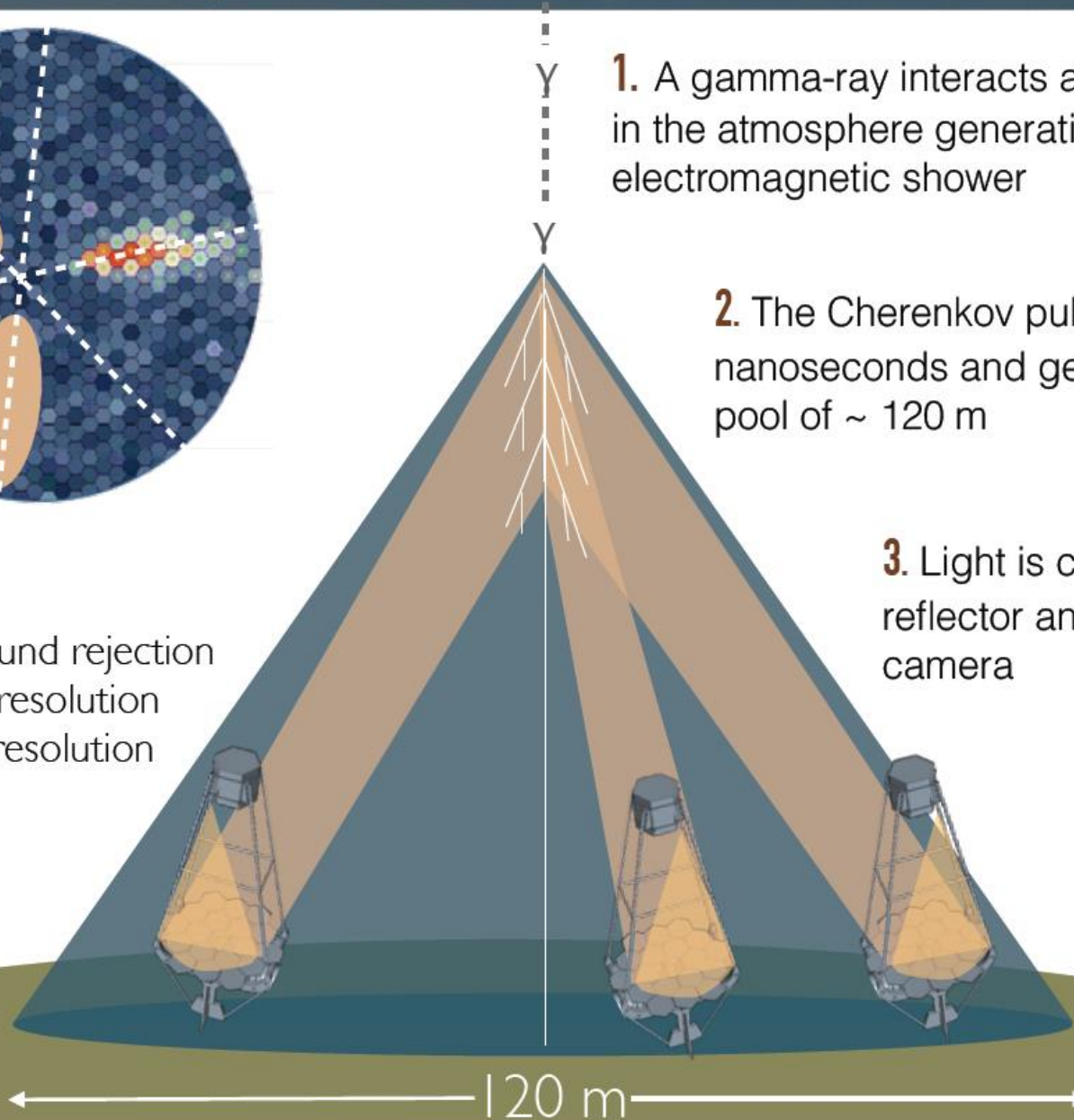
ARRAY

Better background rejection
Better angular resolution
Better energy resolution

1. A gamma-ray interacts about $\sim 20\text{km}$ in the atmosphere generating an electromagnetic shower

2. The Cherenkov pulse lasts few nanoseconds and generates a light pool of $\sim 120\text{ m}$

3. Light is collected by a reflector and focused on a camera



Stávající experimenty

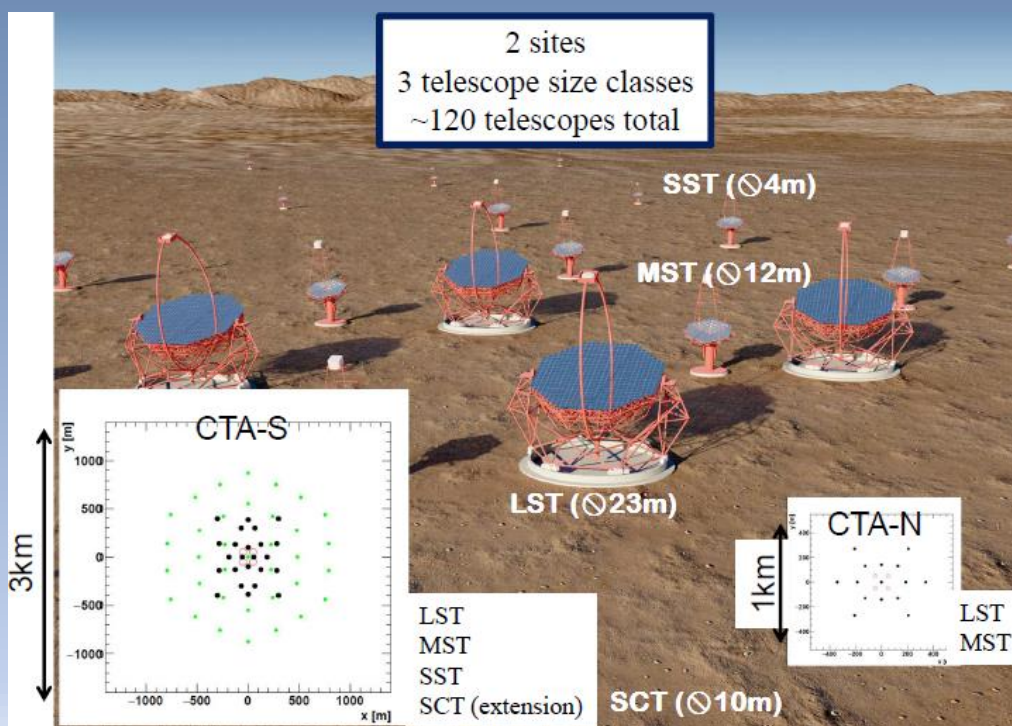


Cherenkov Telescope Array (CTA)

sever: La Palma, Kanárské ostrovy

jih: Atacama, Chile

- Pozemní detektory pro UHE gama záření
- Sledování celé oblohy
- 3 typy čerenkovských teleskopů (120 teleskopů celkem)
celkem 10 000 m² zrcadlové plochy! - 2 fotbalové hřiště

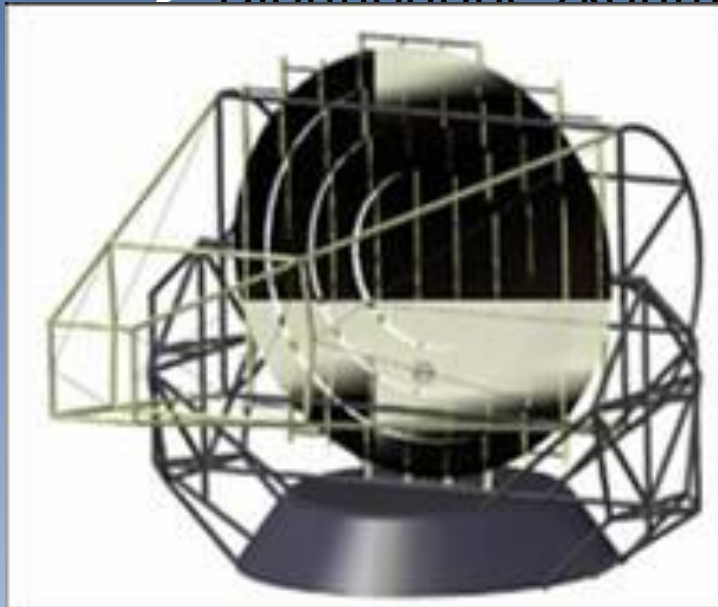


Detektor nízkých energií



Detektor středně velkých teleskopů

- Středně velké teleskopy (MSV)
- Energie od 100 GeV po 10 TeV
- Dlouhodobě zkoumaná oblast

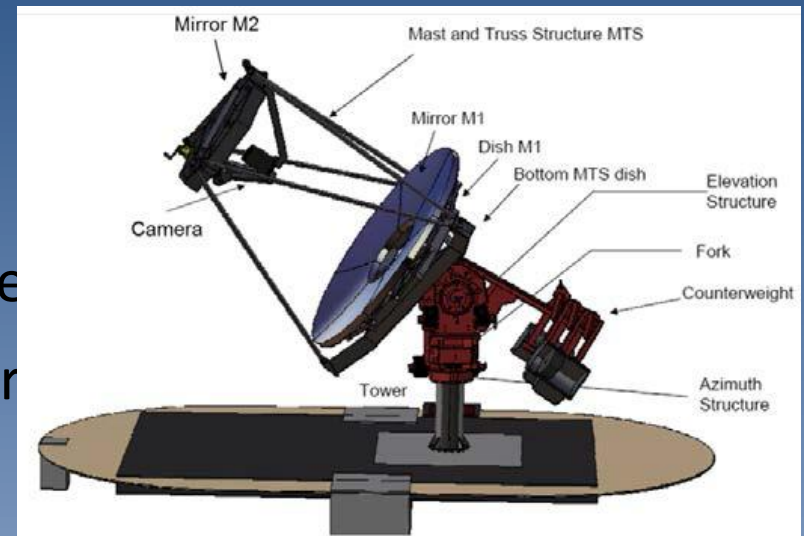


RITAS
servatoř
použití
d sebe
álenost,
- větší p
sprsky – sprsky zachyceny v
současných observatořích



Detektor vysokých energií

- Malé teleskopy (SSTs)
- Energie nad 10 TeV
- Potřeba pokrýt velké oblasti de
- 70 SSTs na jižním severní obser
- Průměr 4.3 m, 9.6° FOV



eme na

Propojení výzkumných projektů

Multi-messenger observations of GW170817

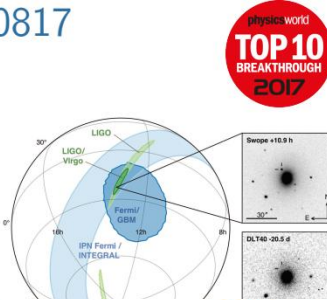
V002 [J10: ApJL 848 (2017) L12]

August 17, 2017, 12:41:04 UTC: LIGO-Virgo GW detection

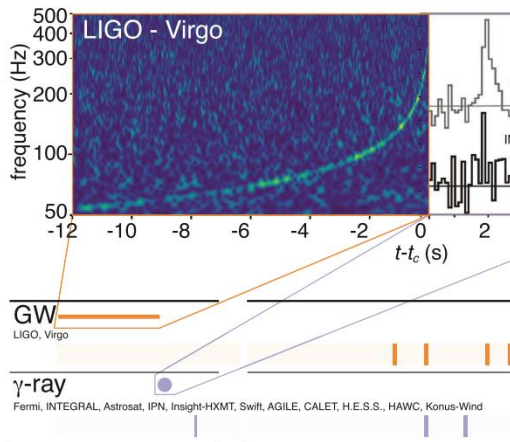
neutron star masses: $0.86 M_{\odot}$ and $2.26 M_{\odot}$

luminosity distance, host galaxy: 40 ± 8 Mpc, NGC4993

observed in γ -ray, X-ray, UV, optical, IR, Radio



physic-world
TOP 10
BREAKTHROUGH
2017



Neutrinos from GW170817: Antares, IceCube, Auger

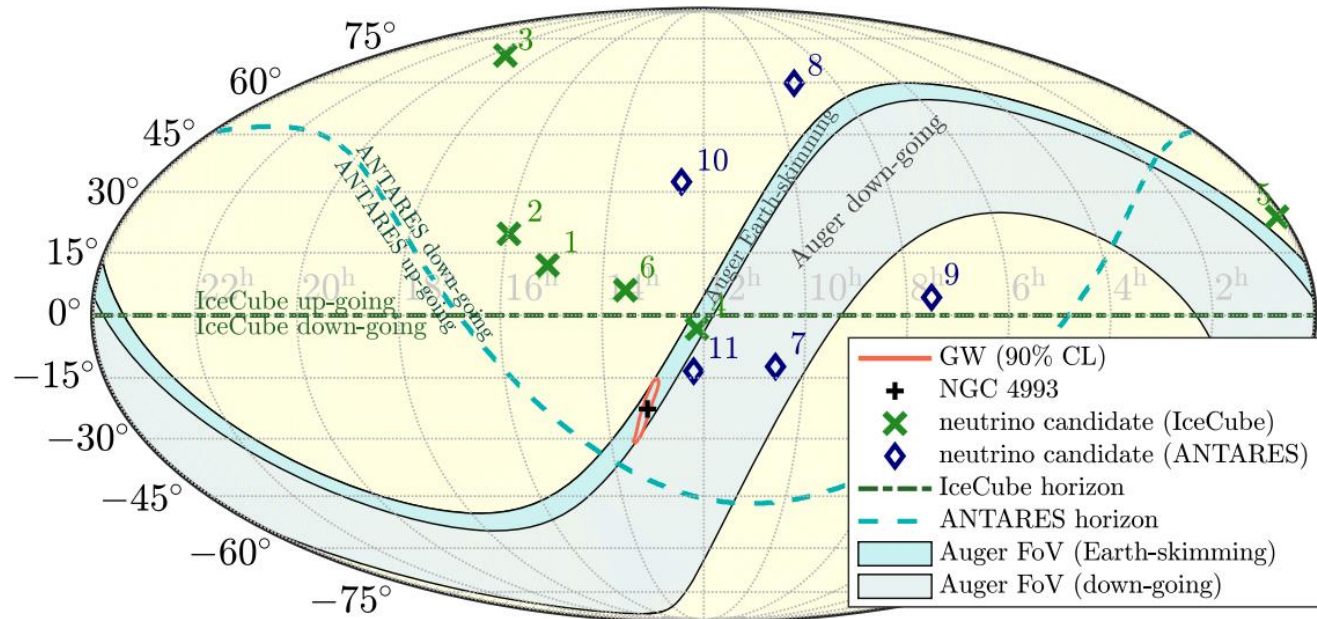
V002 [J13: ApJL 850 (2017) L35]

Search time windows: ± 500 s, 14 days following GW170817

Energy range of Auger: $E_{\nu} > 10^{17}$ eV

Zenith angle of optical counterpart within ± 500 s: $(90.4^{\circ}; 93.3^{\circ})$, Earth-skimming

Search results: no candidates in both time windows



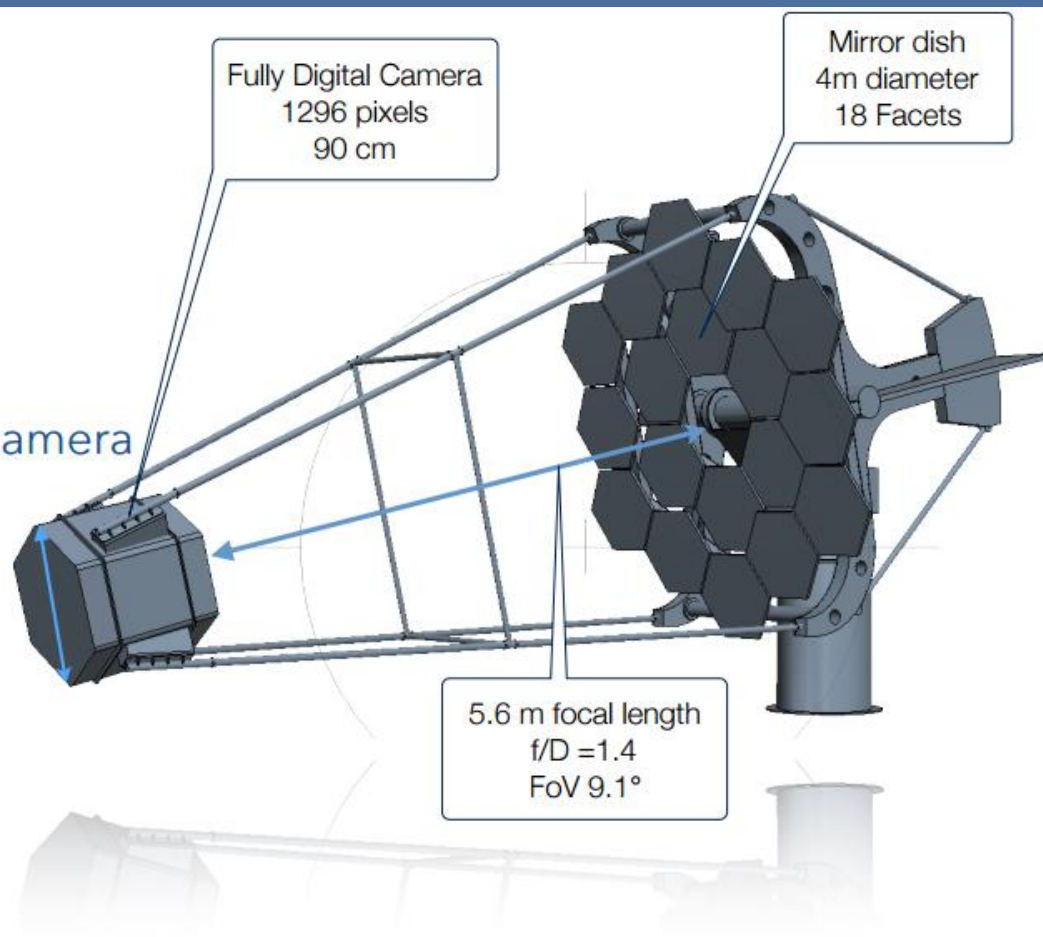
A co Olomouc?

Společná laboratoř optiky je součástí kolaborace CTA

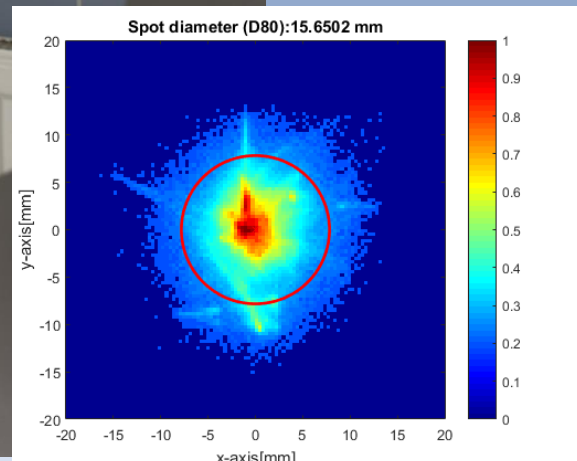
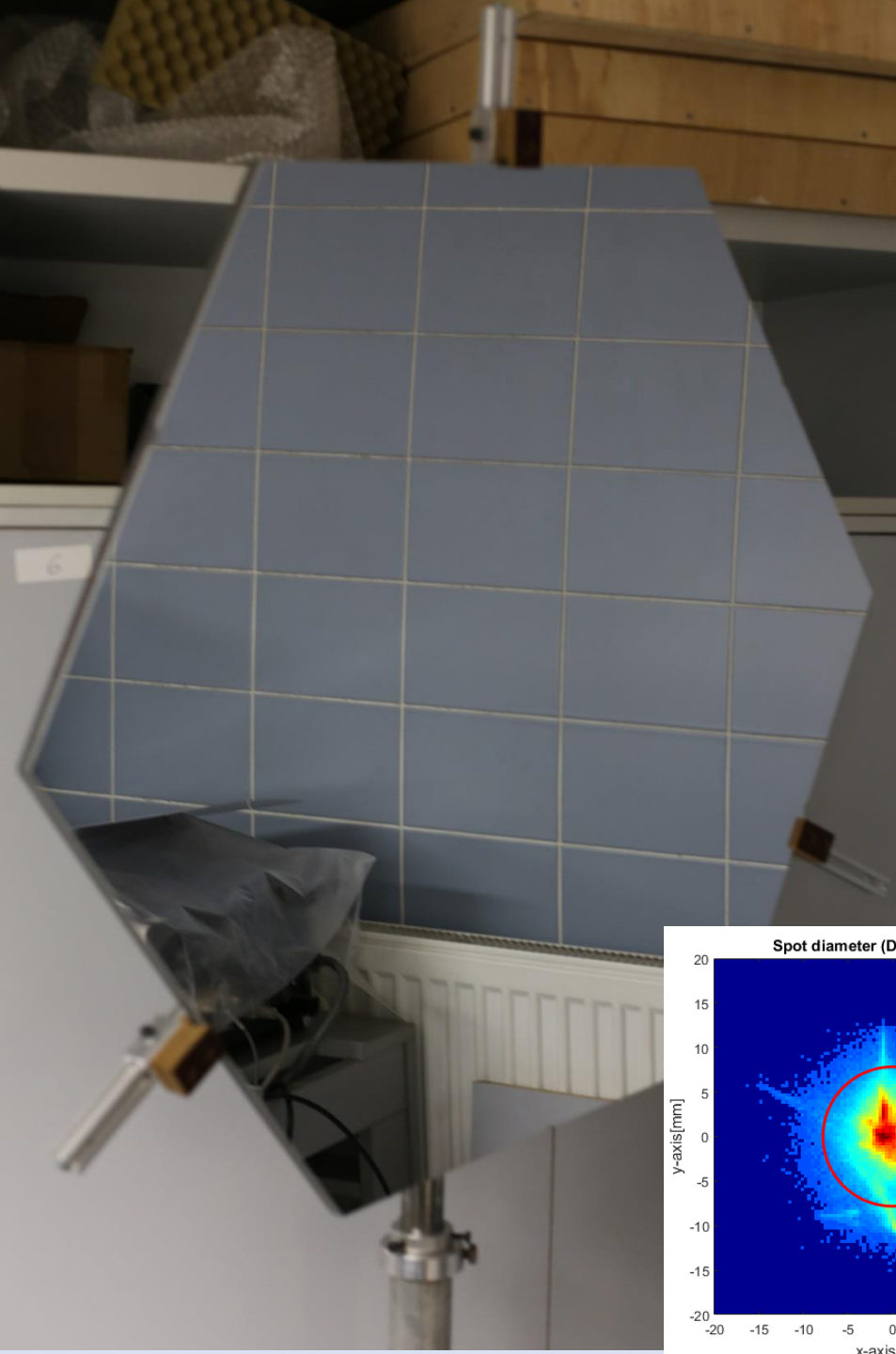
➤ Spolupráce na polském designu SST 1M – zrcadlových segmentů

• Davies-Cotton Design

- Lightweight ~ 8.6 t
- Low Cost
- Easy Installation
- Fully digital readout
- Innovative SiPM based camera
- Easy maintenance

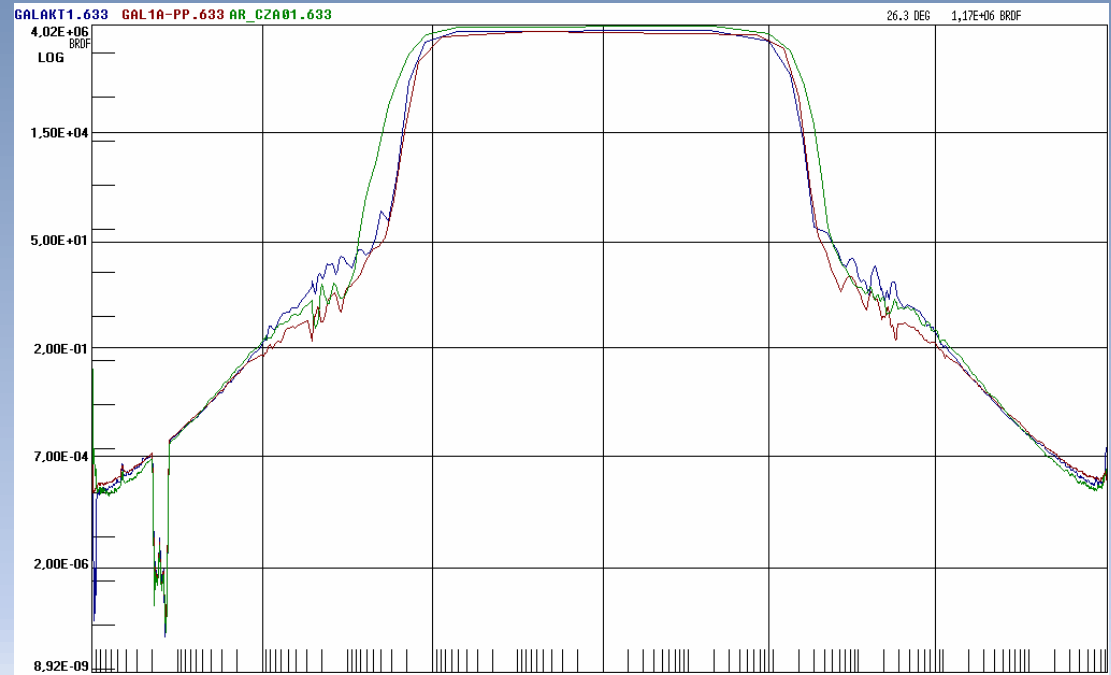
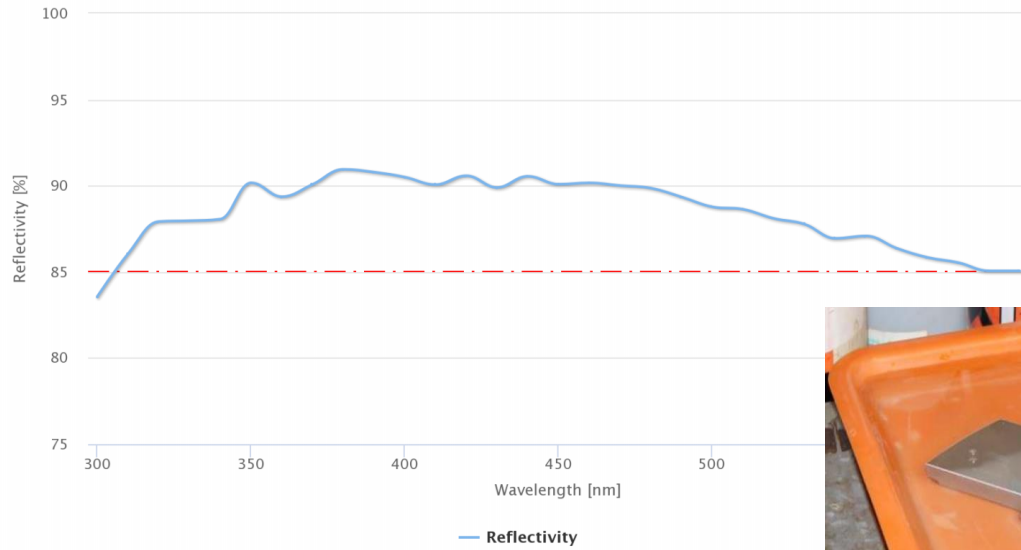


Bokeh alignment



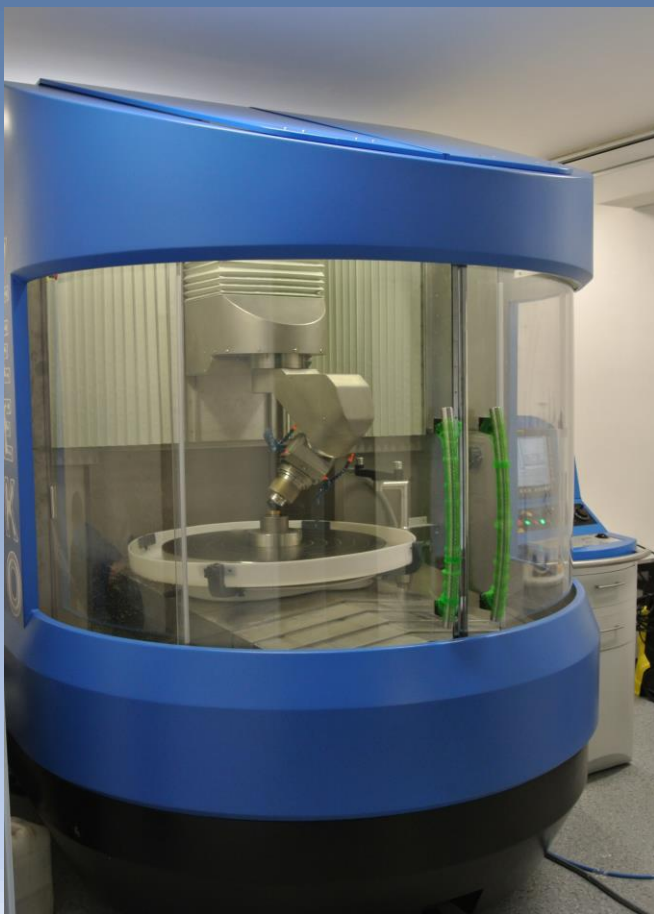
Reflectivity

Mirror DOJLO_13732, measurement 2F



Vyrábíme zrcadla

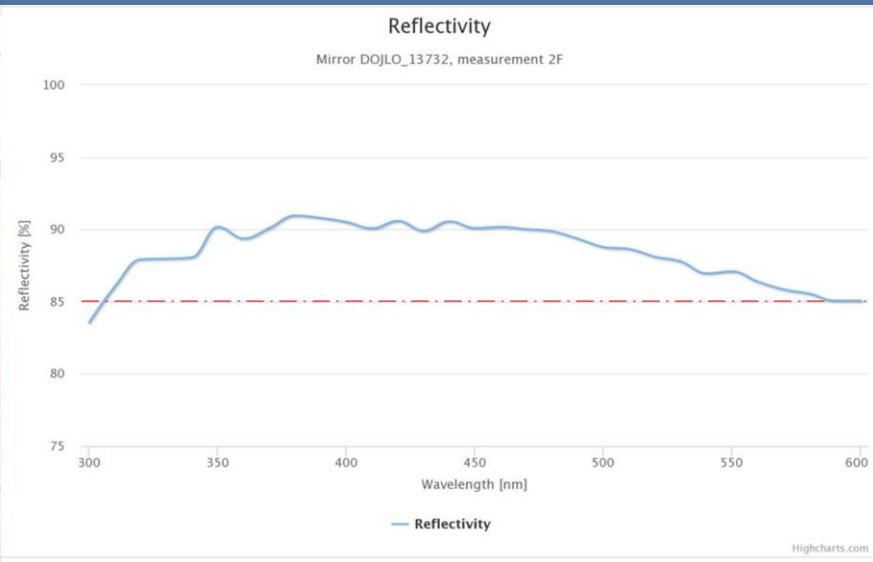
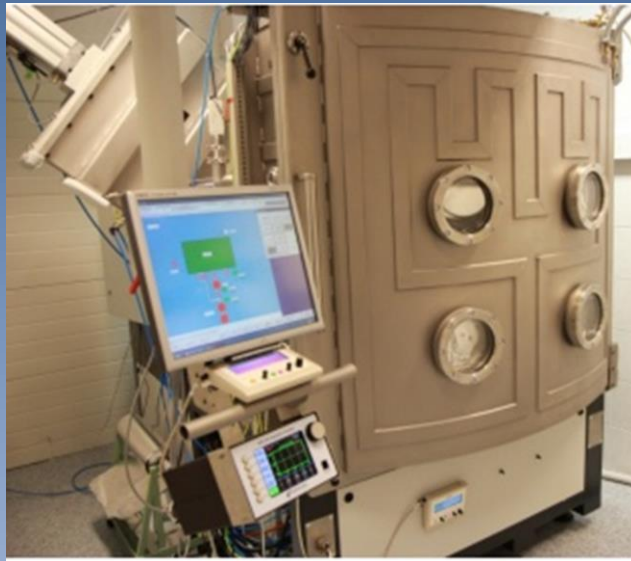
Brousící CNC – bruska pro velké optické elementy (sféry, asféry a volné formy) do 1 200 mm průměru



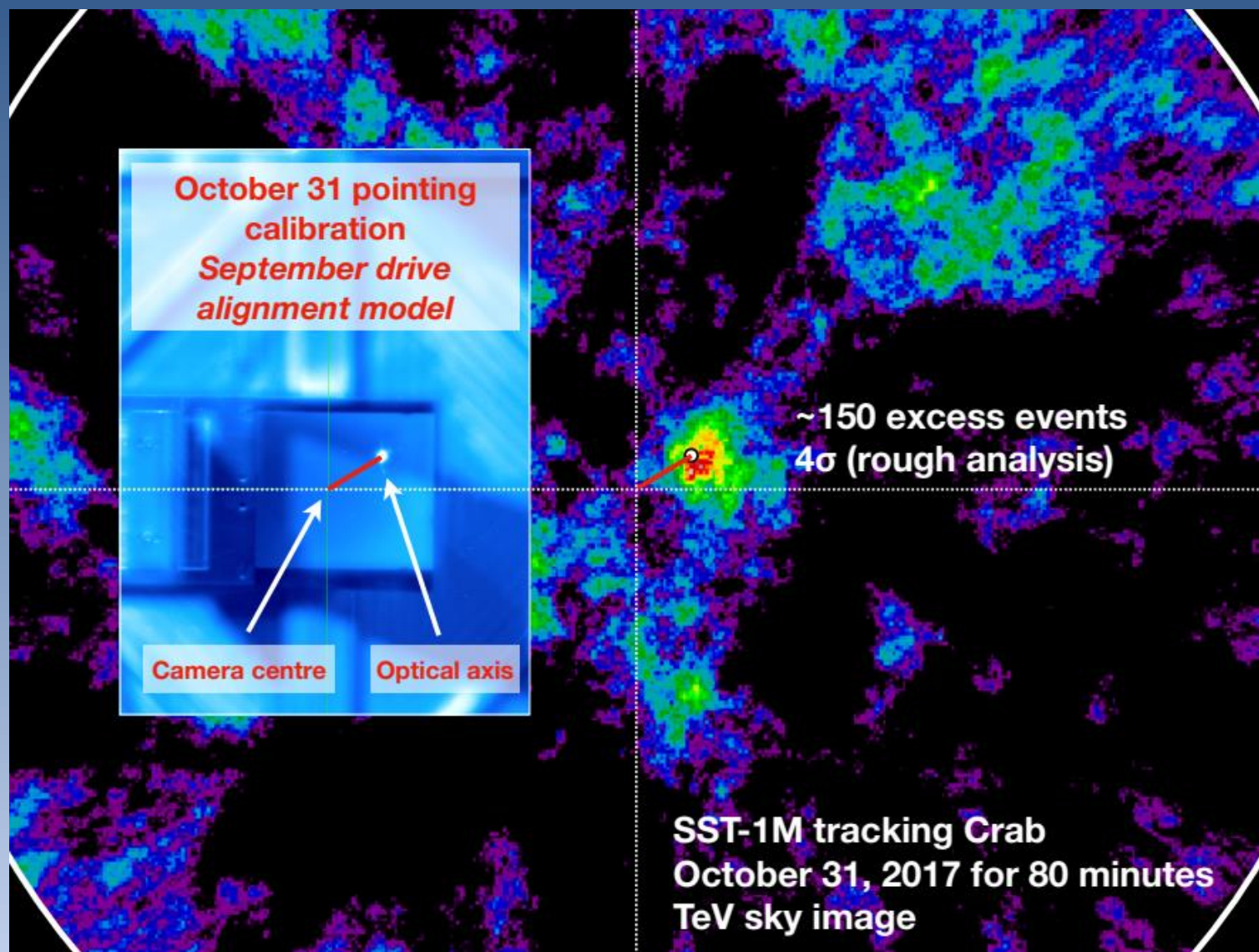
Leštící CNC – dokončovací stroj pro velké optické elementy (sféry, asféry a volné formy) do 1 200 mm průměru

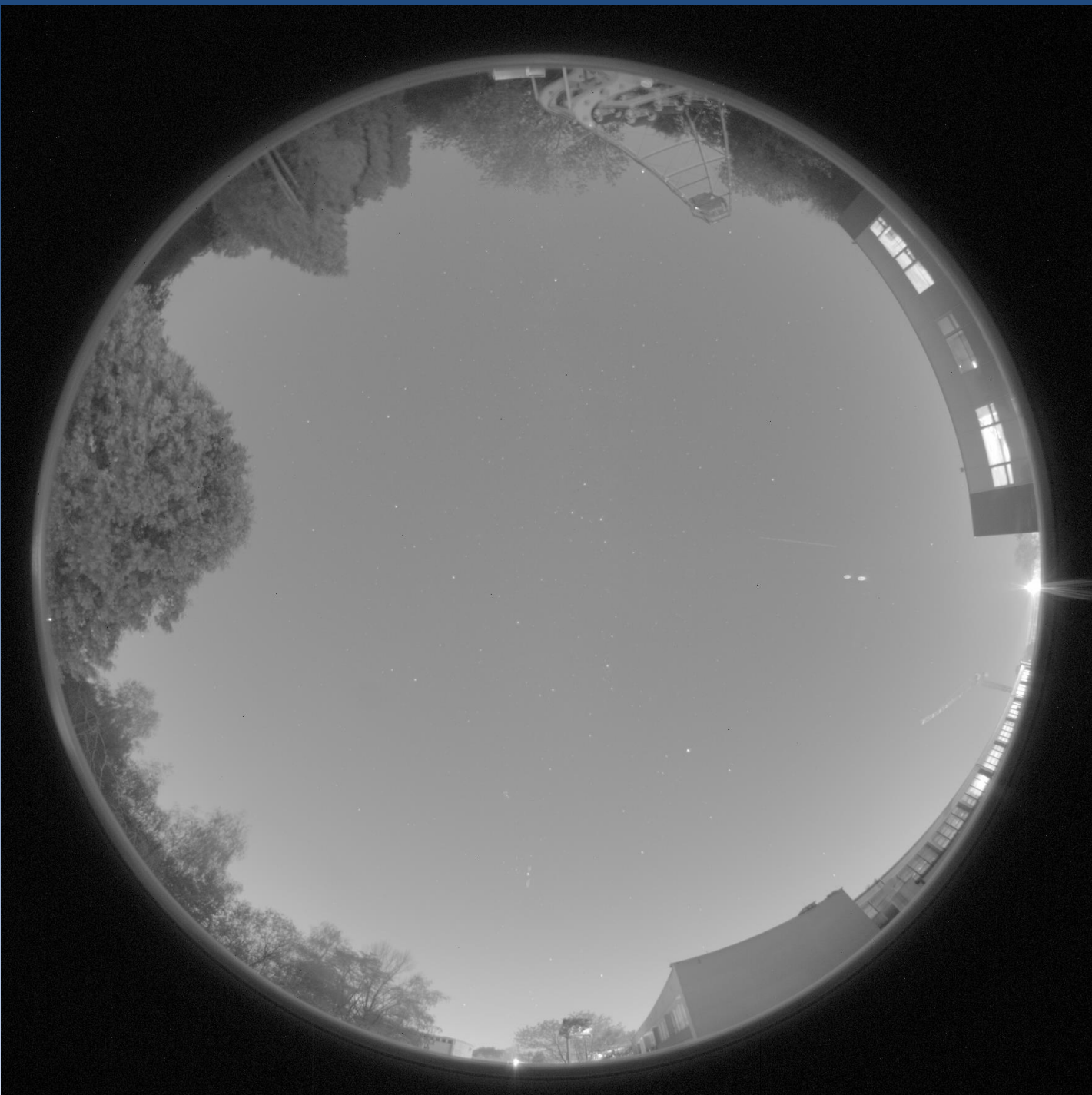


Vrstvíme odrazné plochy



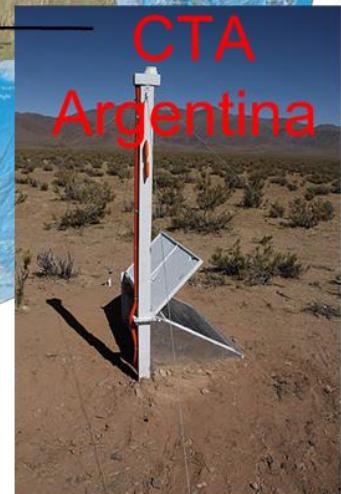
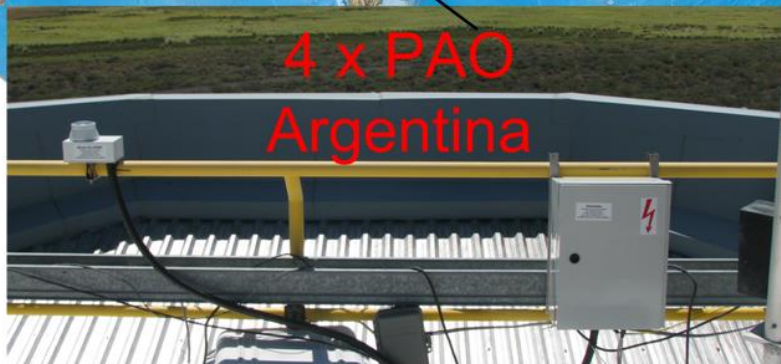
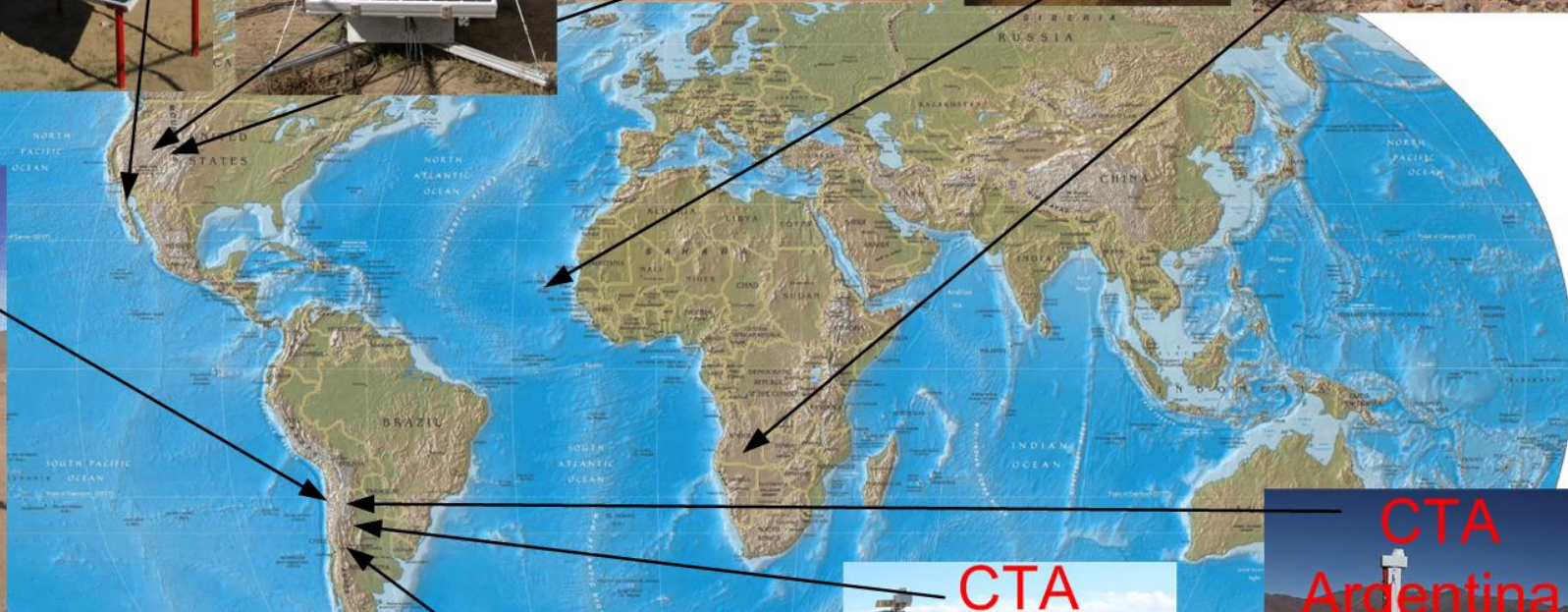
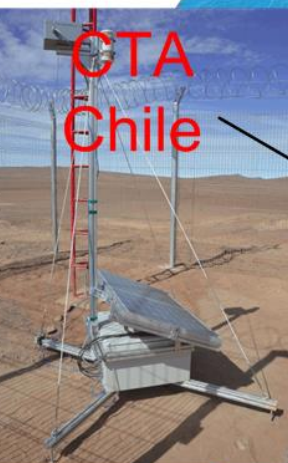
Výsledkem jsou zatím první pozorování gamma zdrojů





M
o
n
i
t
o
r
u
j
e
m
e

o
b
l
o
h
u

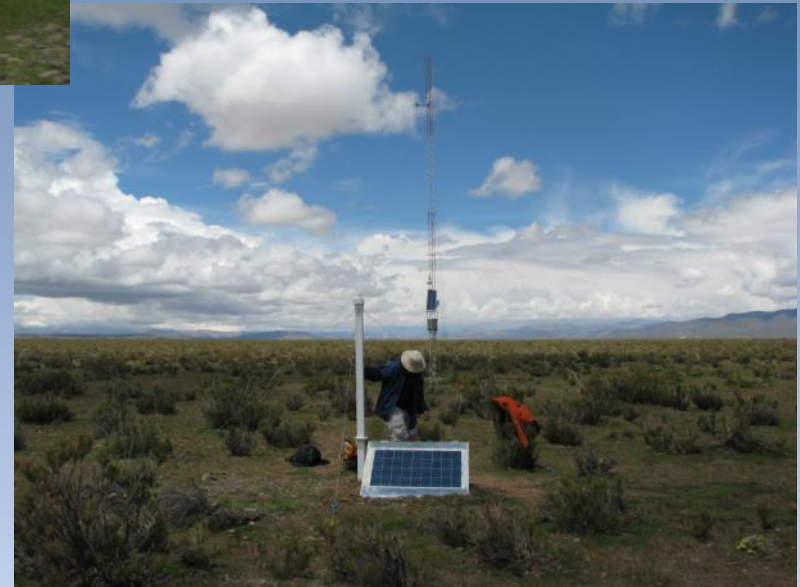


Argentina

San Antonio de Los Cobres

Lokalita: Provincie Salta

4100mm





Argentina

Observatorio Astronómico El Leoncito

Lokalita: Provincie Mendoza, Leoncito

2000mm

Teleskop: 2,15 m



Chile

Jižní Evropská Observatoř

Lokalita: Provincie Antofagosta

2100mm

Jižní Evropská Observatoř

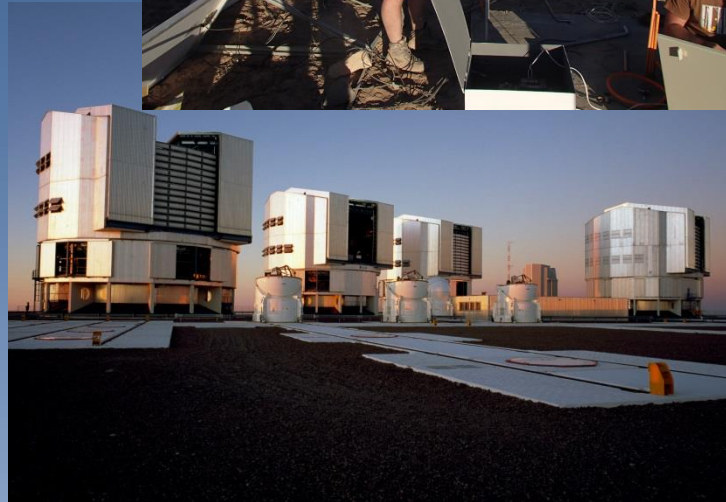
La Silla – 2,4 m

ESO - 3,6 m

New Technology Telescope – 3,8 m

VLT – 4x 8,2 m

ELT – 39 m



Jižní Namibie

Lokalita: Blízko městečka Aar
1600mnm

HESS observatory
4x 12 m
1x 28 m





Mexiko
Observatorio San Pedro Martir
Lokalita: Baja California
2200mnn

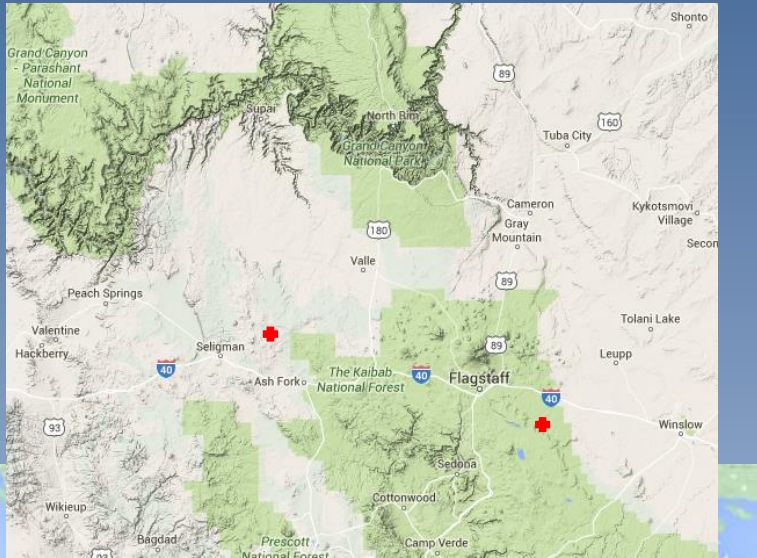
Teleskop: 2,1 m



USA

Lokalita: 2 x Arizona, blízko městečka Flagstaff
1600mm

Lowel Observatory: 0,61 m (Pluto)





Španělsko

Lokalita: Kanárské ostrovy, Tenerife

2200mm

Sluneční observatoř



Španělsko

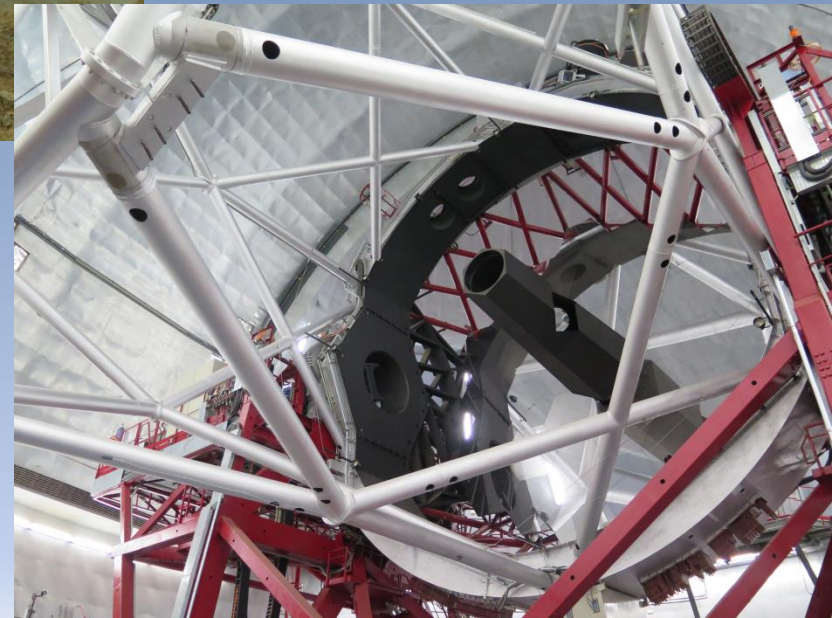
Lokalita: Kanárské ostrovy, La Palma

2200mm

Magic – 2 x 17m

Gran Telescopio Canarias– 10,4 m

3,6 m, 2,6 m, 2,5m ...





OBČAS SE
NEDAŘÍ !!!!





DĚKUJI ZA POZORNOST

Email: miroslav.pech@upol.cz



Argentina

Pierre Auger Observatory

Lokalita: Provincie Mendoza, Malague

1600mm, 35 rovnoběžka



