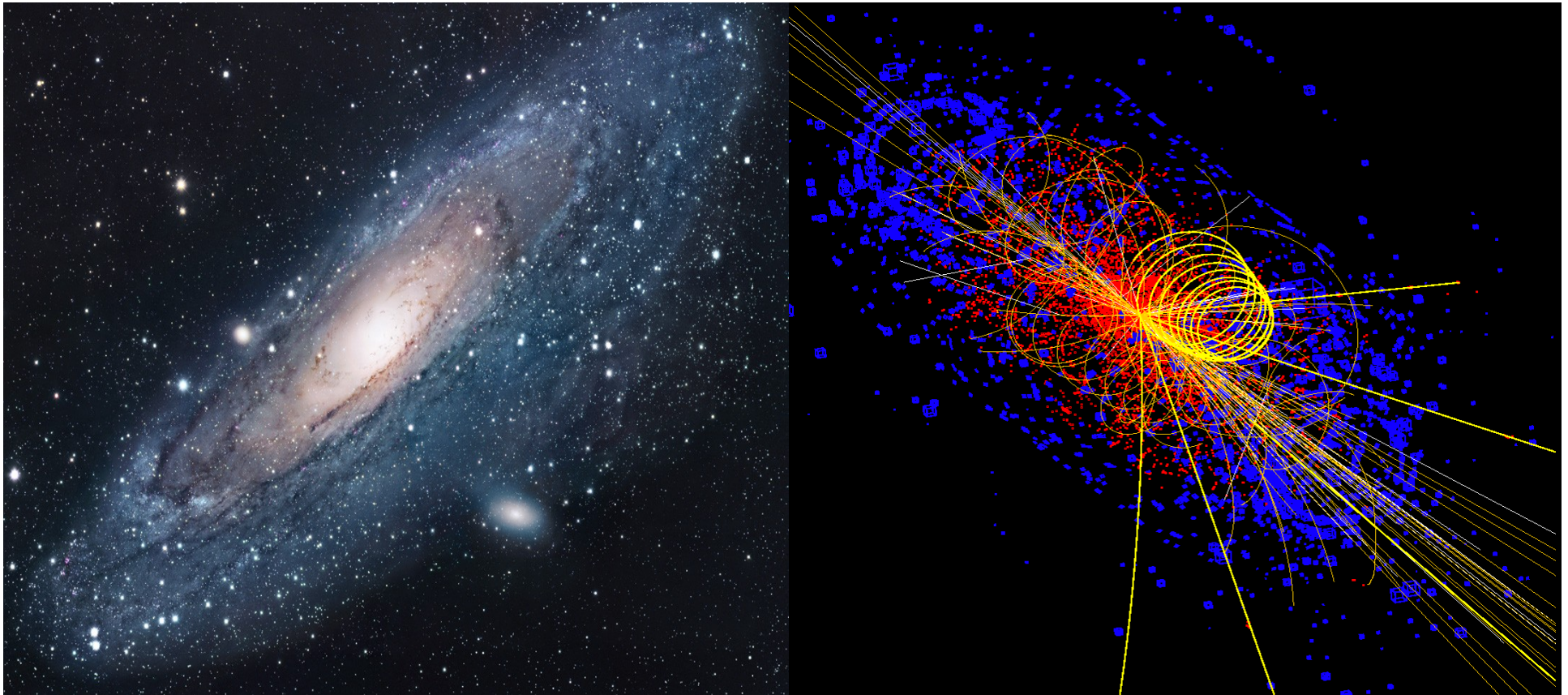


# Vlastnosti nejenergetičtějších částic ve vesmíru

Radomír Šmída  
Fyzikální ústav AV ČR  
smida@fzu.cz

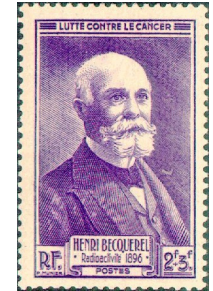
# Kosmické záření a Astročásticová fyzika



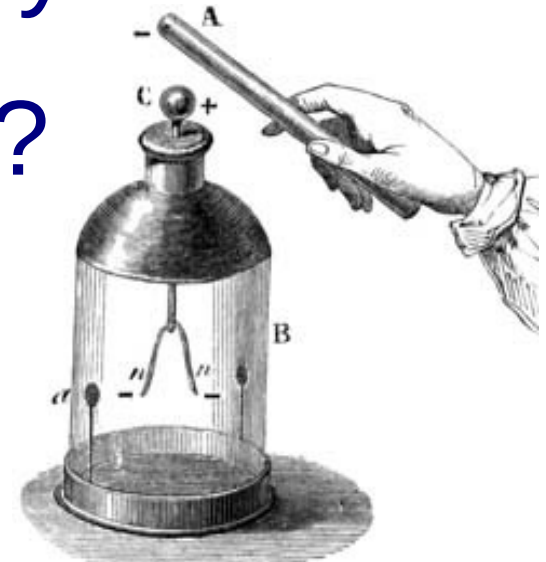
# Objev kosmického záření



- Zkoumání radioaktivity (1896 H. Becquerel)

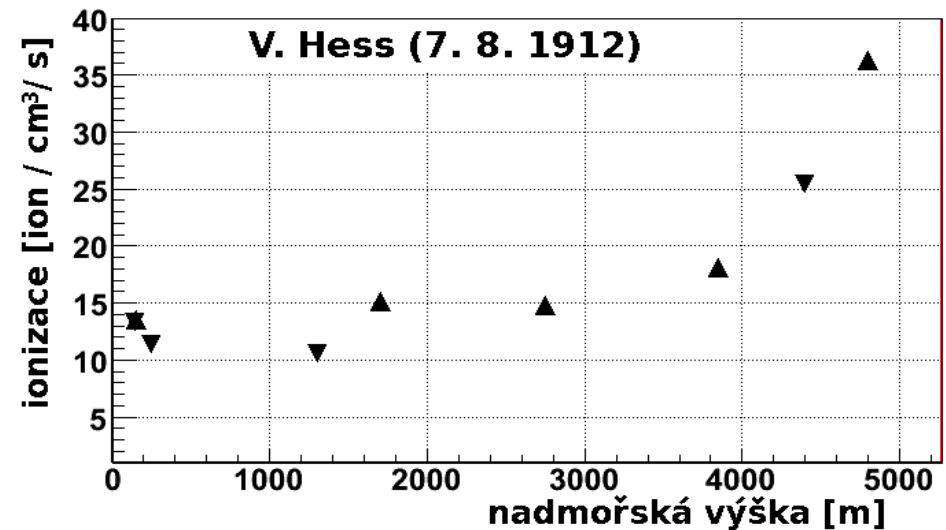


- Změny ionizace vzduchu s výškou
- Způsobuje radiace ze země?
- T. Wulf: měření v dolech, na Eiffelově věži (1909)
- Nadbytek i pro "pronikavé"  $\gamma$  záření



# Victor Hess (1912)

- Rakouský fyzik
- Balónové lety
- z Ústí nad Labem
- Radiace roste s výškou (4.8 km)
- Přichází z kosmu
- Nobelova cena v roce 1936



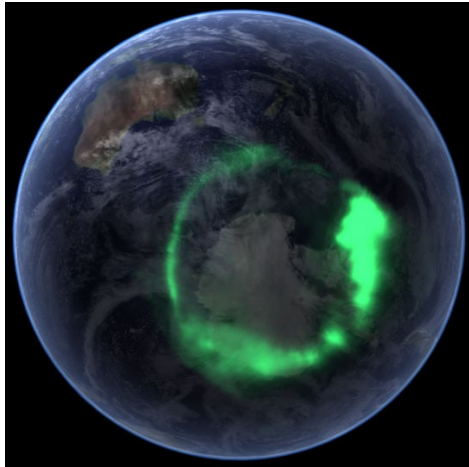
# Důkaz mimozemského původu částic



- Robert Millikan (1925)
- Detektory ponořené v jezeře
- Ekvivalent několika atmosfér
- "cosmic radiaton"  
kosmické záření (KZ)



# Částice s elektrickým nábojem



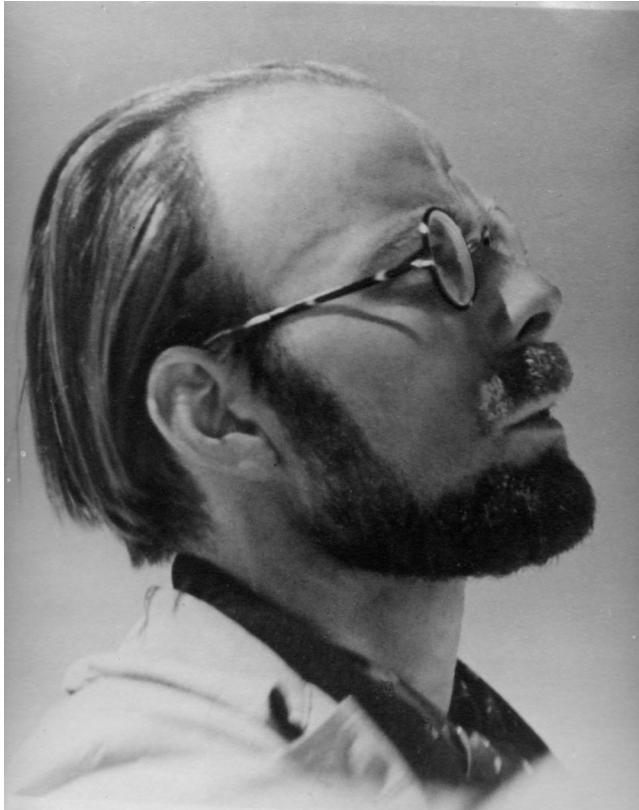
➤ Carl Störmer (1930):  
trajektorie nabitých částic  
v geomagnetickém poli

➤ A. Compton (1933):  
závislost intenzity na zeměpisné  
šířce (vzrůst směrem k pólům)



- Asymetrie v zem. délce: více KZ přilétá  
ze západu (částice jsou kladně nabitě)
- Nemíří ke svým zdrojům !

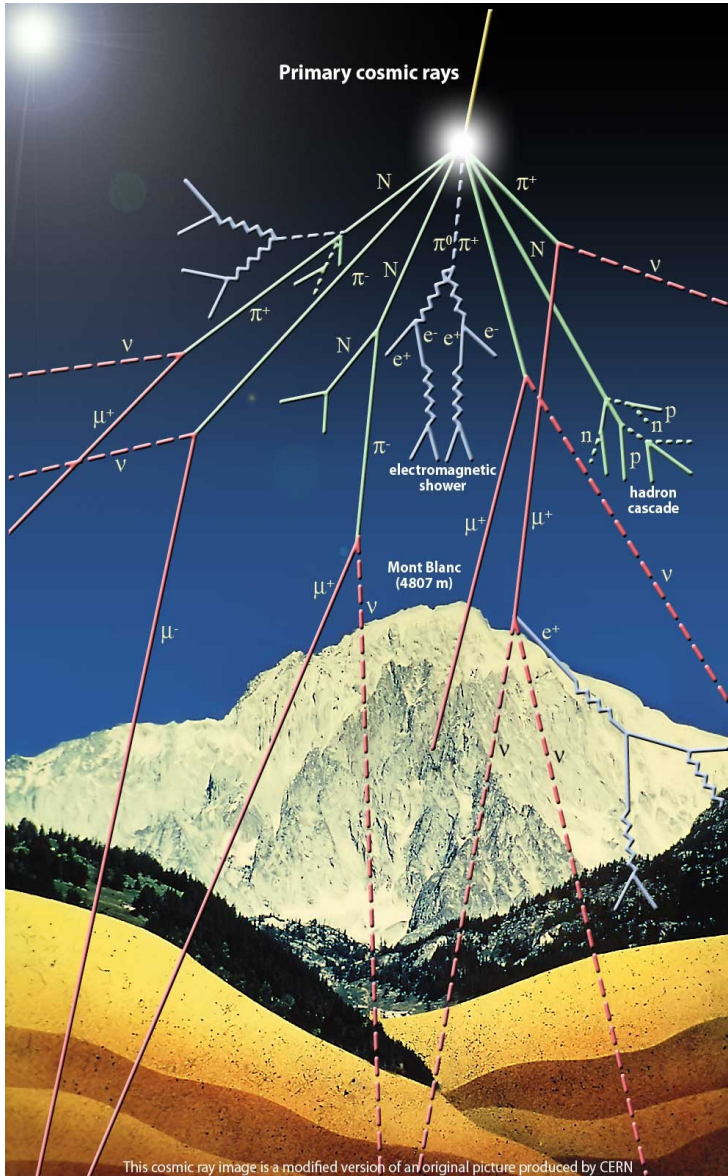
# Pierre Auger (1939)



- Koincidenční detekce ve velké vzdálenosti
- detektor  $S = 1 \text{ dm}^2$
- vzdálenost  $L = 200 \text{ m}$
- $\pi L^2 / S \sim 10 \text{ mil. částic}$

Atmosférické spršky způsobují částice s ohromnými energiemi (milióny GeV)

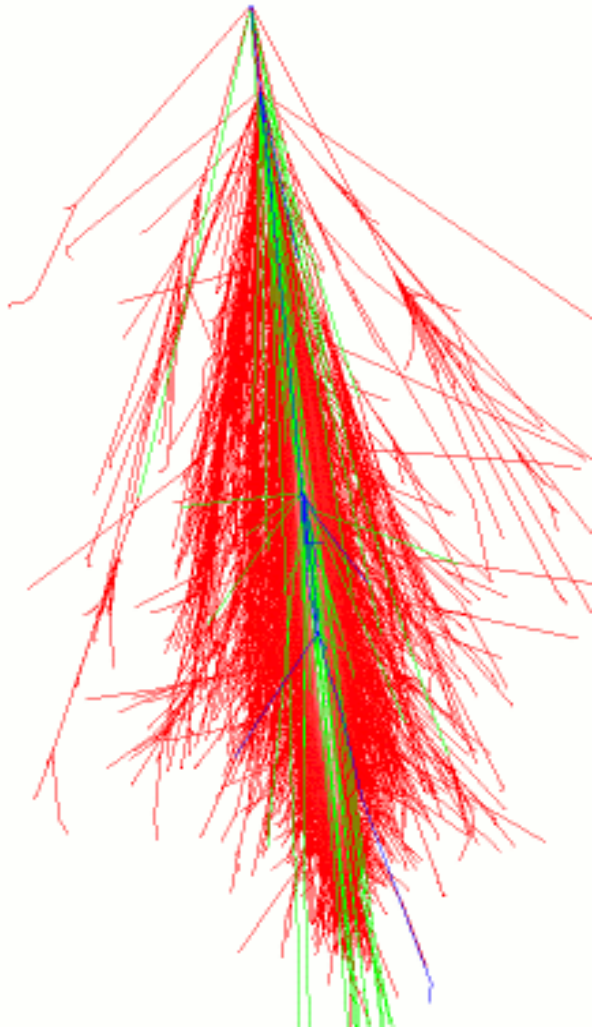
# Atmosférické spršky



- Vysoceenergetické primární částice
- Srážky s molekulami vzduchu
- 10 částic / 1 srážka
- Po 7 interakčních délkách vznikne  $10^7$  sekundárních částic



# Sekundární částice



- 1. interakce  
(ve výšce 10 až 30 km)
- 1) elektromagnetická  
komponenta (červená)  
elektrony, pozitrony,  $\gamma$
- 2) hadrony (modré)  
protony, neutrony, piony,...
- 3) pronikavé miony (zelená) a neutrina

# Měření kosmického záření

## 1) přímá (primární částice)

- stratosféra (30 - 50 km)
- v kosmickém prostoru

limitováno  
velikostí  
detektoru

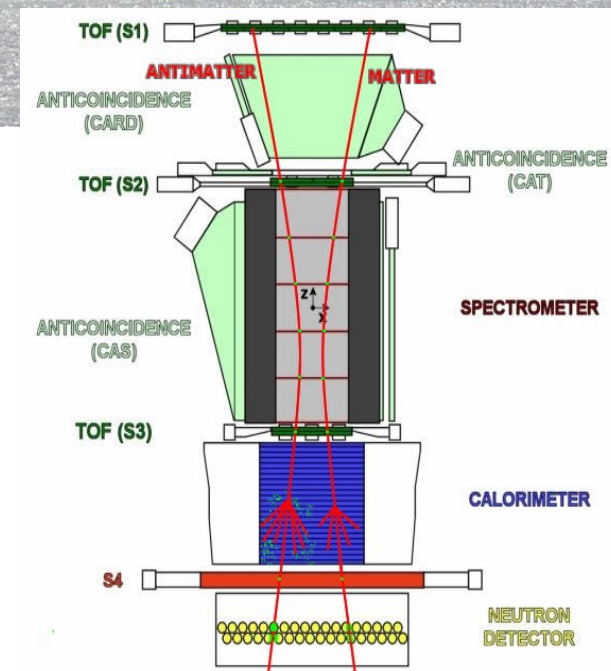
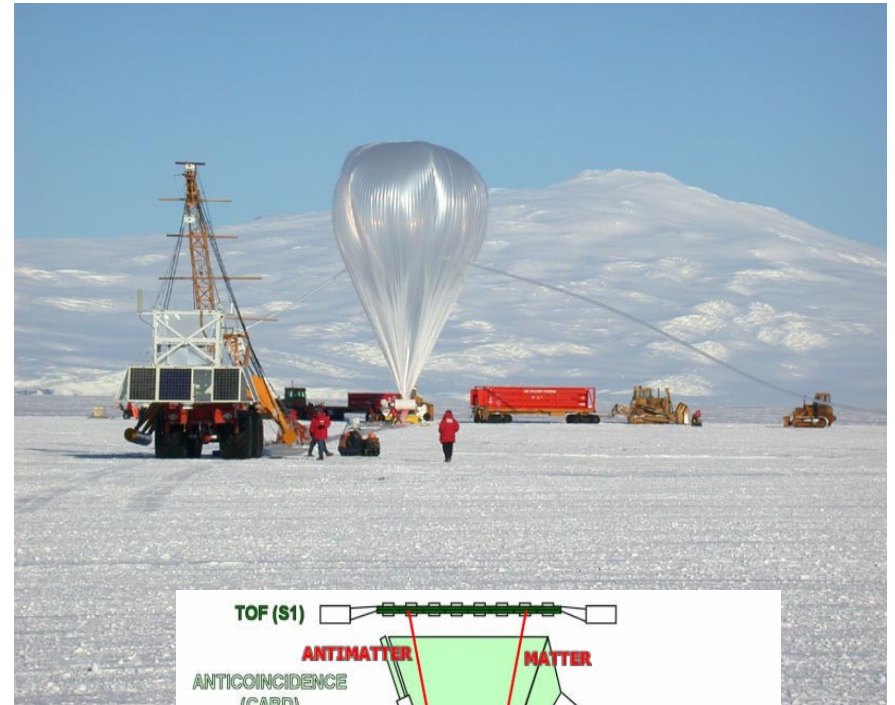
## 2) nepřímá (atmosférické spršky)

- Čerenkovovo záření ( $v > c_{\text{air}}$ )
- sekundární částice na povrchu (i pod)
- fluorescence (deexcitace  $N_2$ )

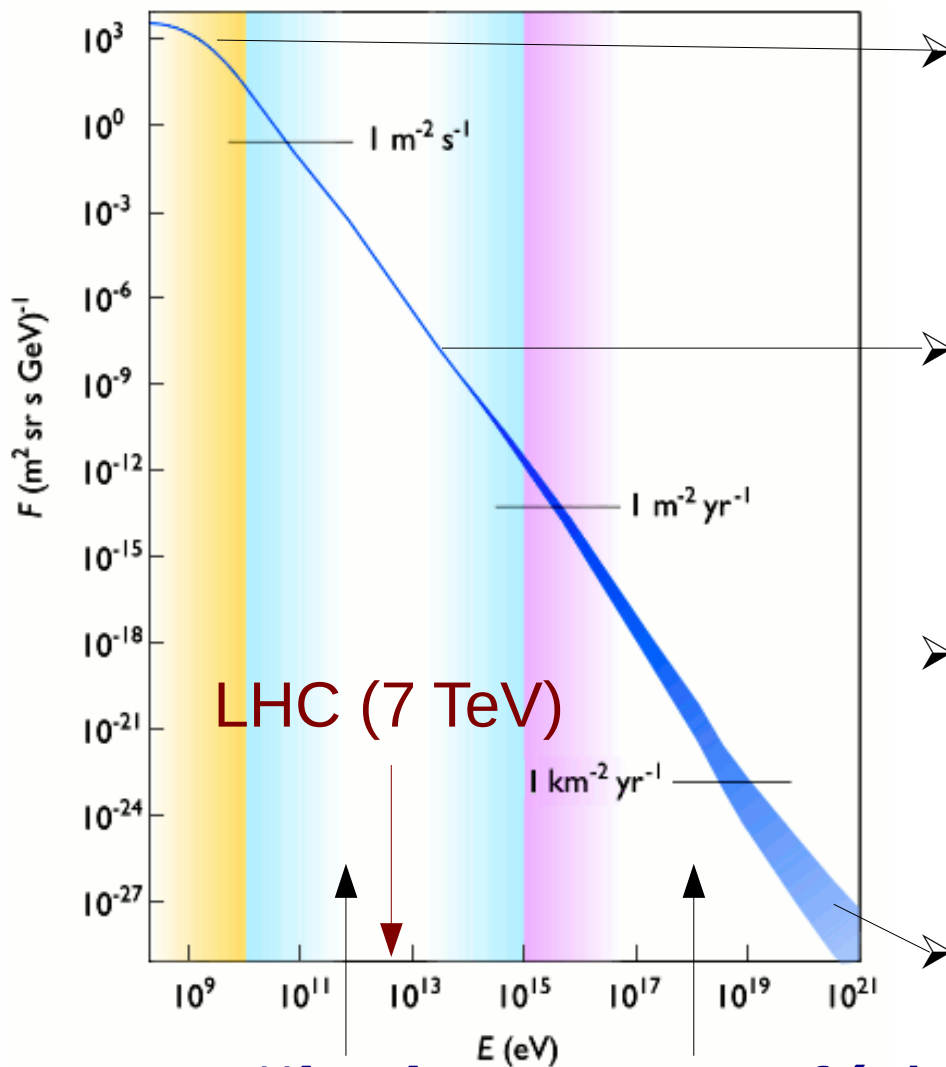


# Družice a balóny

- přímé měření  
(energie, hmotnosti,  
náboje)
- směr příletu
- izotopy
- antičástice (anti He?)
- družice do 500 GeV
- stratosférické balóny



# Spektrum kosmického záření



➤ modulace sluneční činností ( $E < 10 \text{ GeV}$ )

➤ strmý pokles toku ( $dN / dE \sim E^{-\alpha}$ )

➤ konst. spektrální index ( $\alpha \sim 3$ )

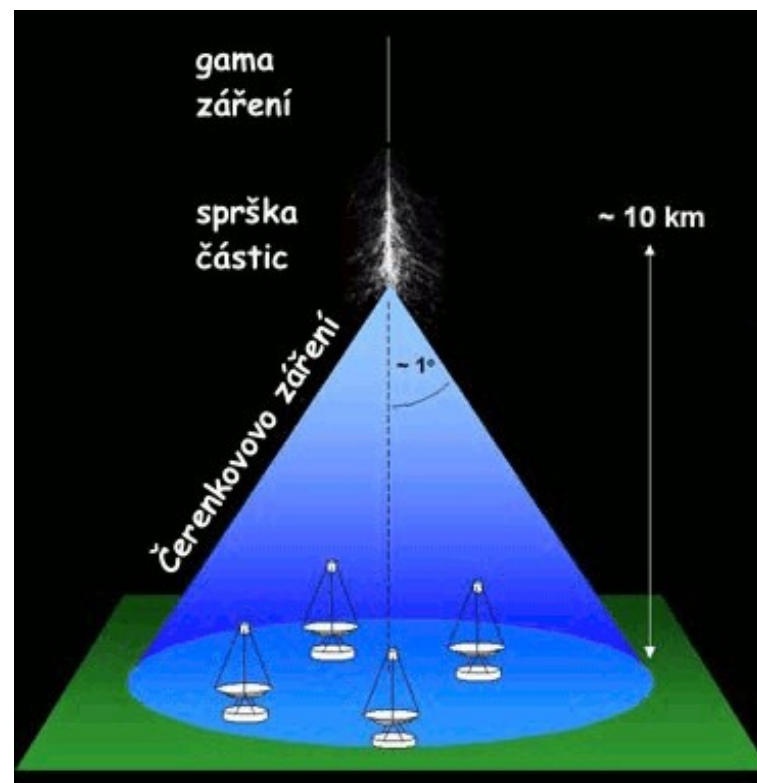
➤ konec spektra ?

přímá měření

atmosférické spršky

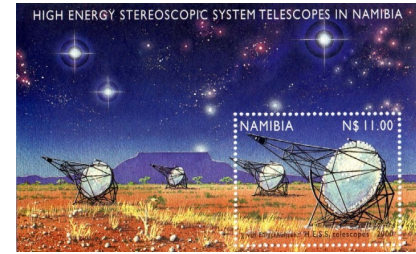
# Čerenkovské teleskopy

- Elektromagnetické spršky vyvolané gama částicemi
- Pouze 1 z 1000 je  $\gamma$



- 3. generace (HESS, MAGIC, Whipple,...)

# Astronomie v TeV



➤ Neutrální  $\gamma$  ukazují směrem ke zdroji

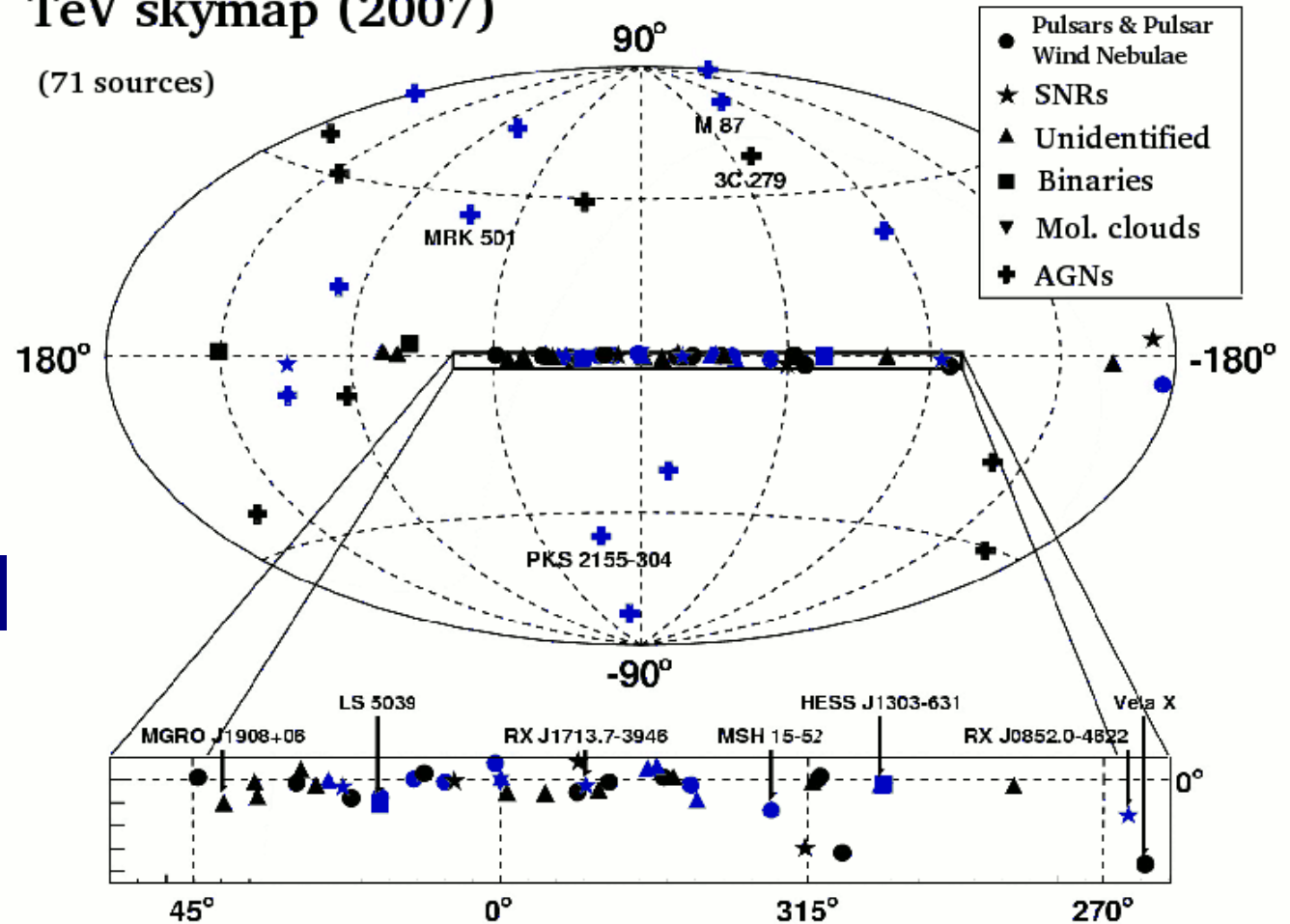
➤ úhlové rozlišení desetina stupně

➤ zorný úhel typicky  $3^\circ - 5^\circ$

➤ 51 galaktických zdrojů

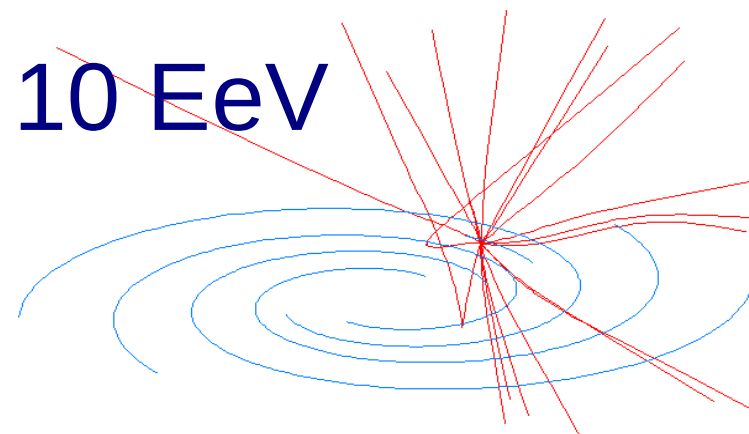
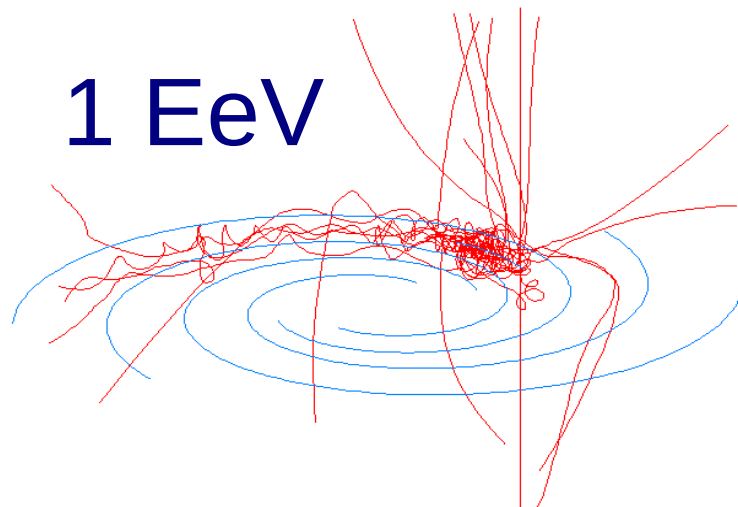
TeV skymap (2007)

(71 sources)



# Pohyb nabitých částic

- nabité částice (protony, atom. jádra)
- mezihvězdná a mezigalaktická magnetická pole
- zakřivené trajektorie
- **částicová astronomie  $> 50$  EeV**



# John Linsley (1963)

## EVIDENCE FOR A PRIMARY COSMIC-RAY PARTICLE WITH ENERGY $10^{20}$ eV†

John Linsley

Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 10 January 1963)

Analysis of a cosmic-ray air shower recorded at the MIT Volcano Ranch station in February 1962 indicates that the total number of particles in the shower (Serial No. 2-4834) was  $5 \times 10^{10}$ . The total energy of the primary particle which produced the shower was  $1.0 \times 10^{20}$  eV. The shower was about twice the size of the largest we had reported previously (No. 1-15832, recorded in March 1961).<sup>1</sup>

The existence of cosmic-ray particles having such a great energy is of importance to astrophysics because such particles (believed to be atomic nuclei) have very great magnetic rigidity. It is believed that the region in which such a particle originates must be large enough and possess a strong enough magnetic field so that  $RH \gg (1/300) \times (E/Z)$ , where  $R$  is the radius of the region (cm) and  $H$  is the intensity of the magnetic field (gauss).  $E$  is the total energy of the particle (eV) and  $Z$  is its charge. Recent evidence favors the choice  $Z = 1$  (proton primaries) for the region of highest cosmic-ray energies.<sup>2</sup> For the present event one obtains the condition  $RH \gg 3 \times 10^{17}$ . This condition is not satisfied by our galaxy (for which  $RH \approx 5 \times 10^{17}$ , halo included) or known objects within it, such as supernovae.

The technique we use has been described elsewhere.<sup>1</sup> An array of scintillation detectors is used to find the direction (from pulse times) and size (from pulse amplitudes) of shower events which satisfy a triggering requirement. In the present case, the direction of the shower was nearly vertical (zenith angle  $10 \pm 5^\circ$ ). The values of shower density registered at the various points of the array are shown in Fig. 1. It can be verified by close inspection of the figure that the core of the shower must have struck near the

point marked "A," assuming only (1) that shower particles are distributed symmetrically about an axis (the "core"), and (2) that the density of particles decreases monotonically with increasing distance from the axis. The observed densities

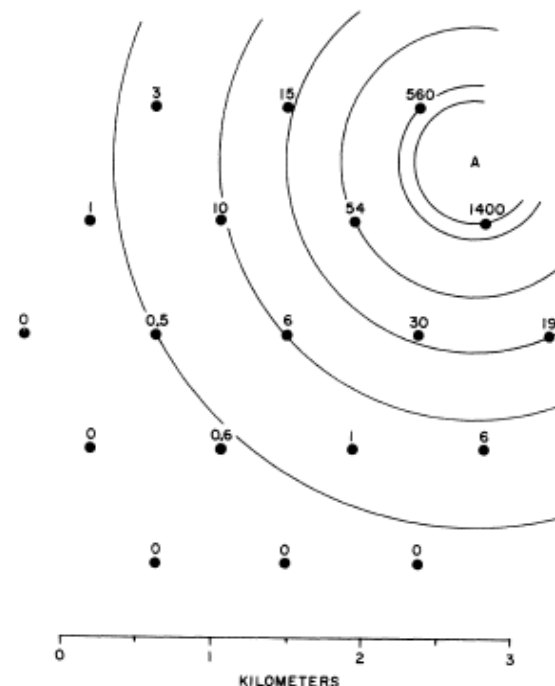
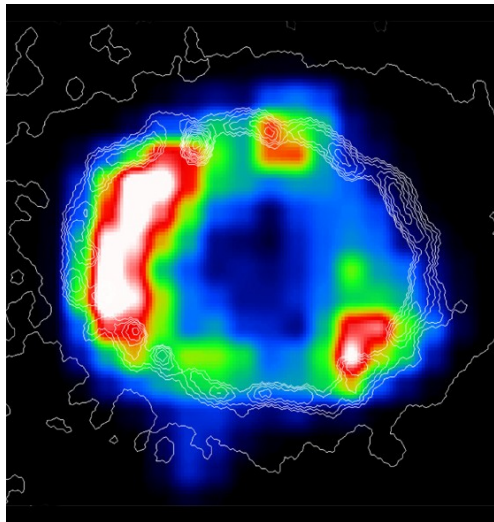


FIG. 1. Plan of the Volcano Ranch array in February 1962. The circles represent  $3.3\text{-m}^2$  scintillation detectors. The numbers near the circles are the shower densities (particles/ $\text{m}^2$ ) registered in this event, No. 2-4834. Point "A" is the estimated location of the shower core. The circular contours about that point aid in verifying the core location by inspection.



# Nepřímé důkazy zdrojů

- brzdné a synchrotronové záření
- interakce s okolní hmotou
- zdroje rádiového a gama záření

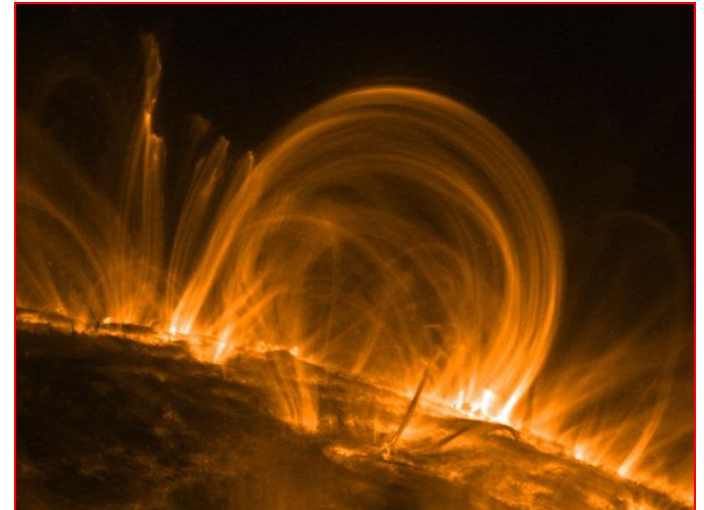


Expandující slupky  
po výbuších supernov  
(10% energie do KZ)

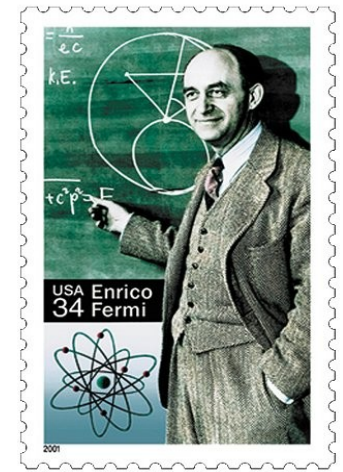
Ne nad 1 EeV !

# Urychlování

- magnetická rekonekce v plazmě (uvolnění kinetické energie přepojením magnetických siločar)
  - ✓ magnetosféra Země
  - ✓ Slunce
  - ✓ magnetary
  - ✓ laboratoře
- urychlování v elektrických polích
- Fermiho urychlování (II. a I. typu)



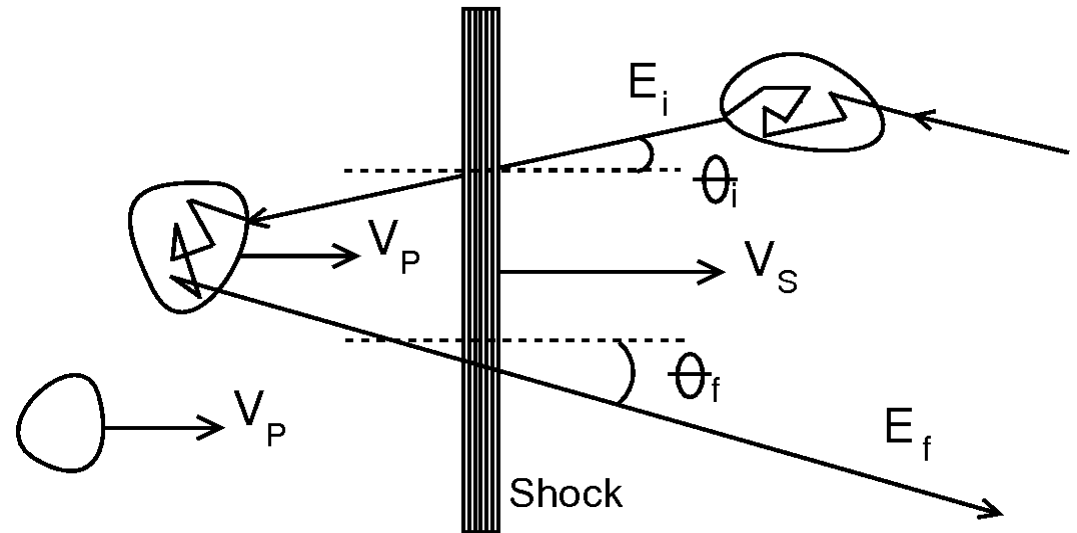
# Fermiho mechanismus urychlování



- E. Fermi (1949): urychlování nabitých částic v pohybujících se mezihvězdných zmagnetizovaných oblacích (rychlost  $\sim$  desítky km/s)
- málo účinný mechanismus
- urychlování v rázových vlnách (tisíce km/s, např. supernovy)

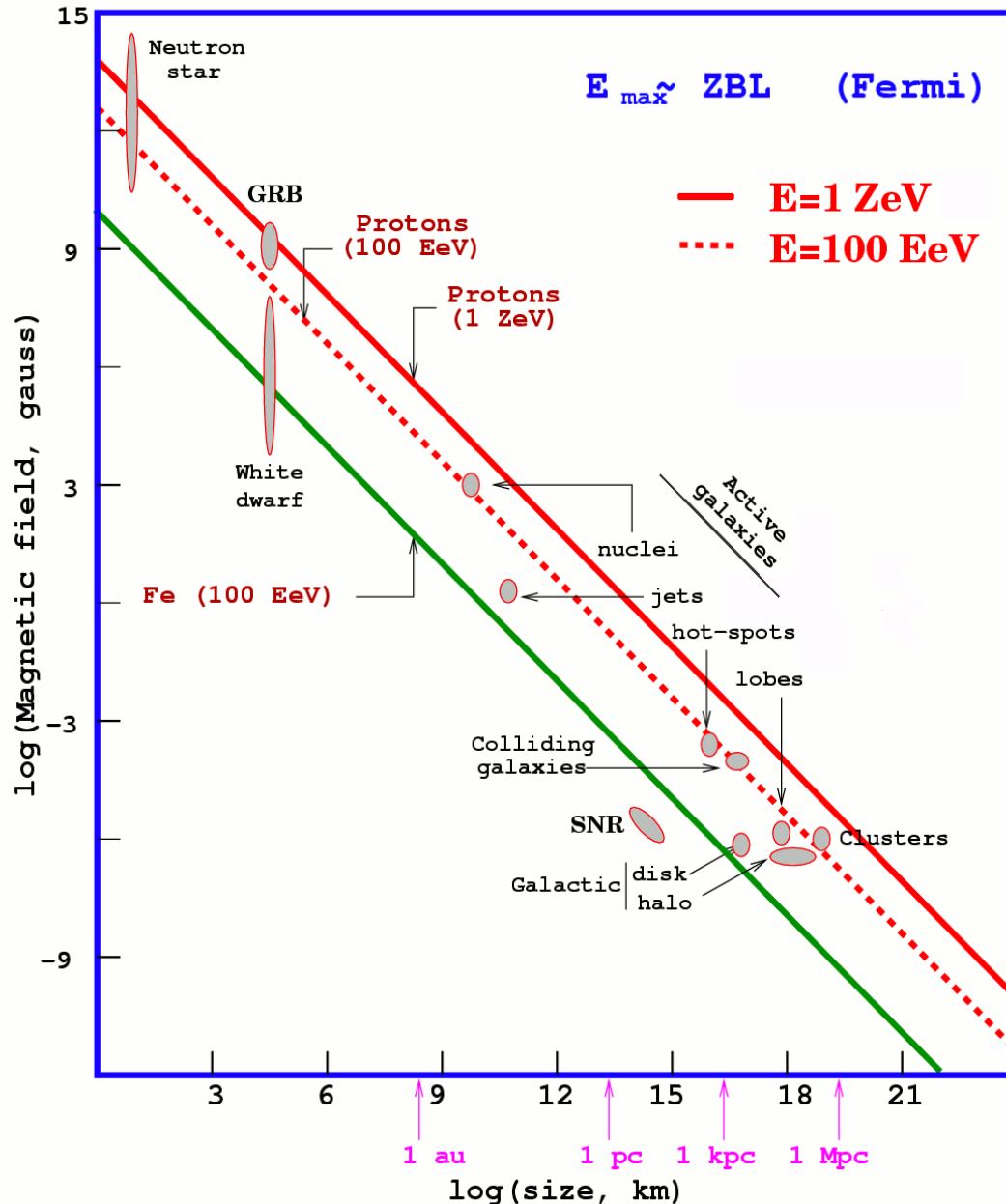
# Fermiho urychlování I. typu

- Mnohonásobný přechod přes rázovou vlnu



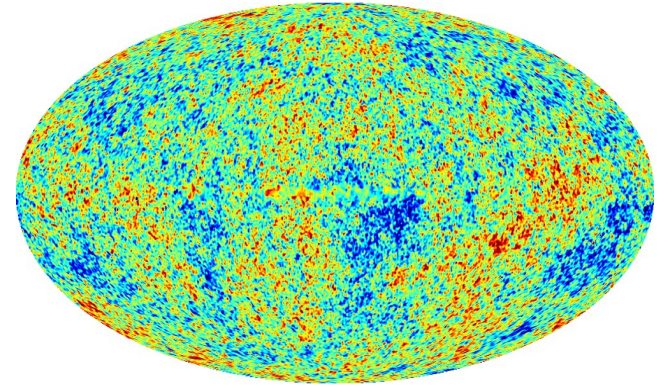
- Lorentzova transformace
- Zisk energie při každém průchodu
- Mocninné spektrum  $\sim E^{-\alpha}$ ,  $\alpha > 2$

# Zdroje nejvyšších energií

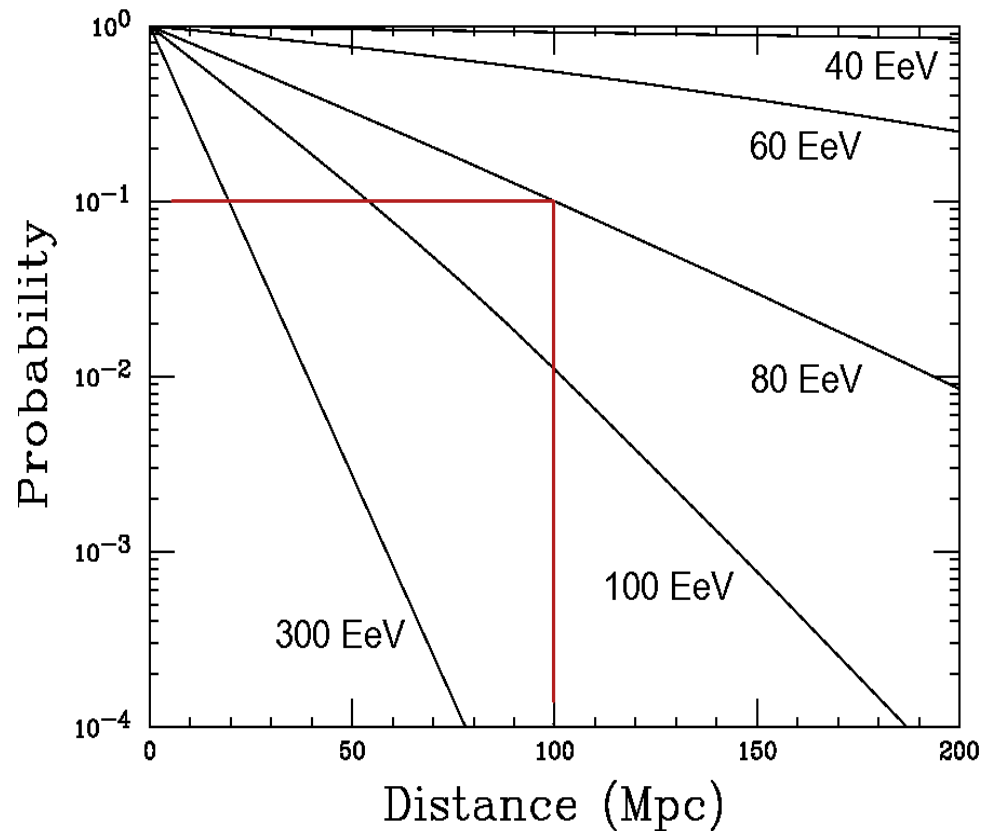


- $E_{\max} \sim L \times B$
- Relativně málo kandidátů
- Stovky EeV jsou hranicí možného
- Energetické ztráty (ve zdroji a během šíření)

# GZK mez

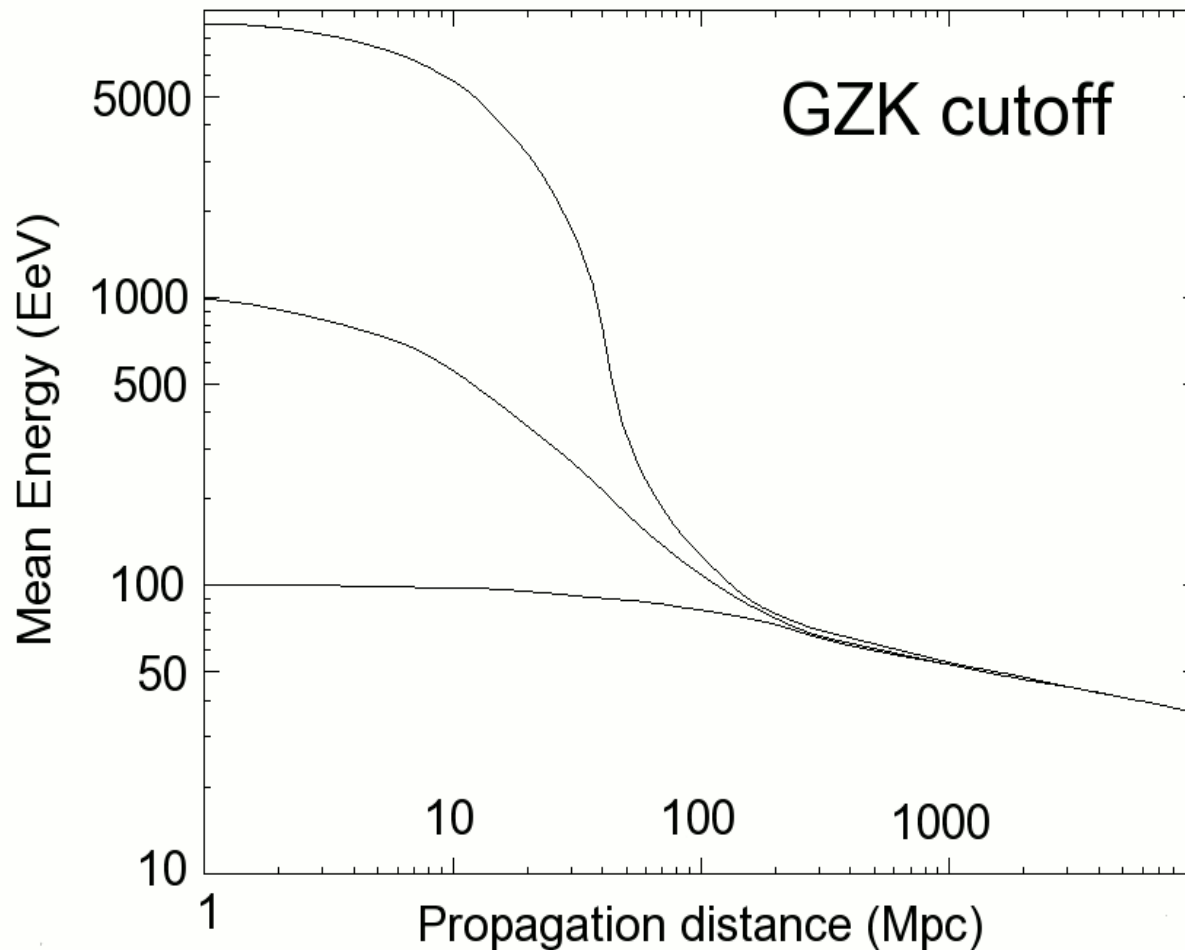


- Reliktní záření (1965)
- Greisen, Zatsepin & Kuzmin (1966)
- Ztráty energie při interakcích s reliktními fotony (2.7 K)
- Projevuje se pro  $E > 40 \text{ EeV}$



# Vzdálenost zdrojů

- do 100 Mpc pro nejvyšší energie

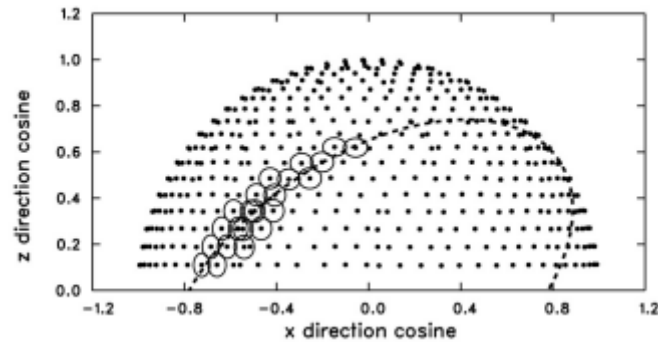


# Experimenty

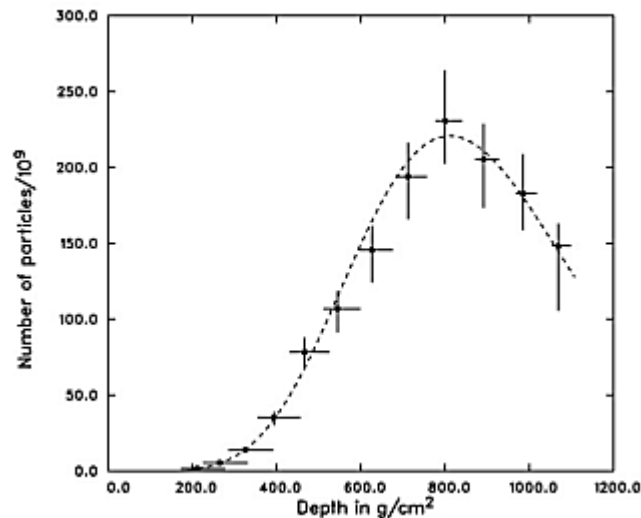
Experiment	Operation	Latitude	Longitude	Altitude [ m]	Depth [ g·cm <sup>-2</sup> ]	Area [ km <sup>2</sup> ]	Detection	Events > 40 EeV
Volcano Ranch	1959-63	35°09' N	106°47' W	1770	843	8	SC	8
SUGAR	1968-79	30°32' S	149°43' E	250	1015	60	SC	80
Haverah Park	1968-87	53°58' N	1°38' W	200	1016	12	WČ	26
Yakutsk	1974-	61°36' N	129°24' E	105	1020	18/10	SC/AČ	9
Fly's Eye	1981-93	40° N	113° W		869		F	> 1
HiRes	1997-06	40.3°N	112.5° W		869		F	(27)
AGASA	1990-04	35°47' N	138°30' E	900	920	100	SC	72
Auger S	2004-	35°20' S	69°20' E	1400	870	3000	F/WČ	



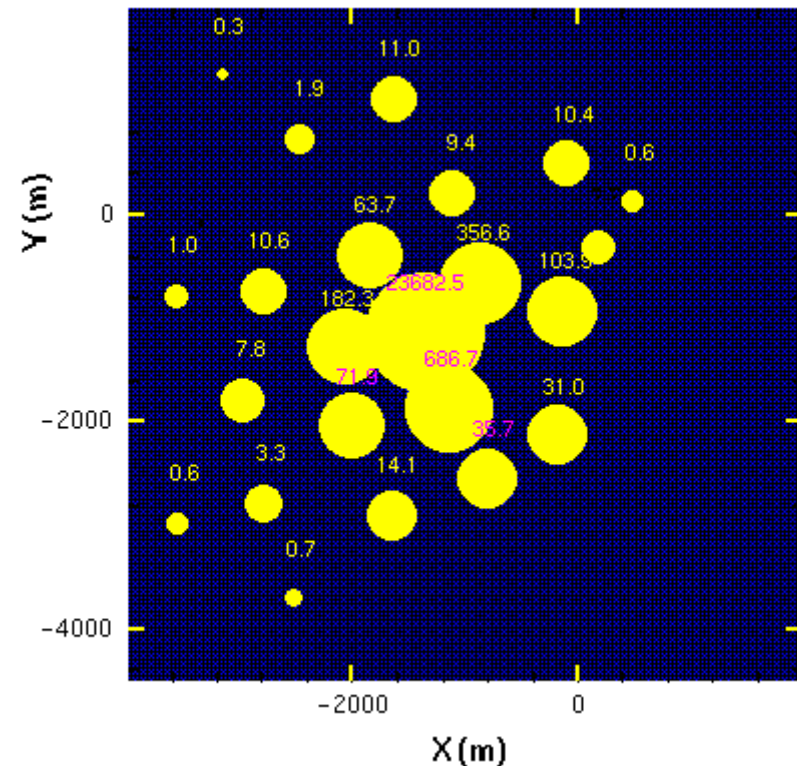
# Nejvyšší energie



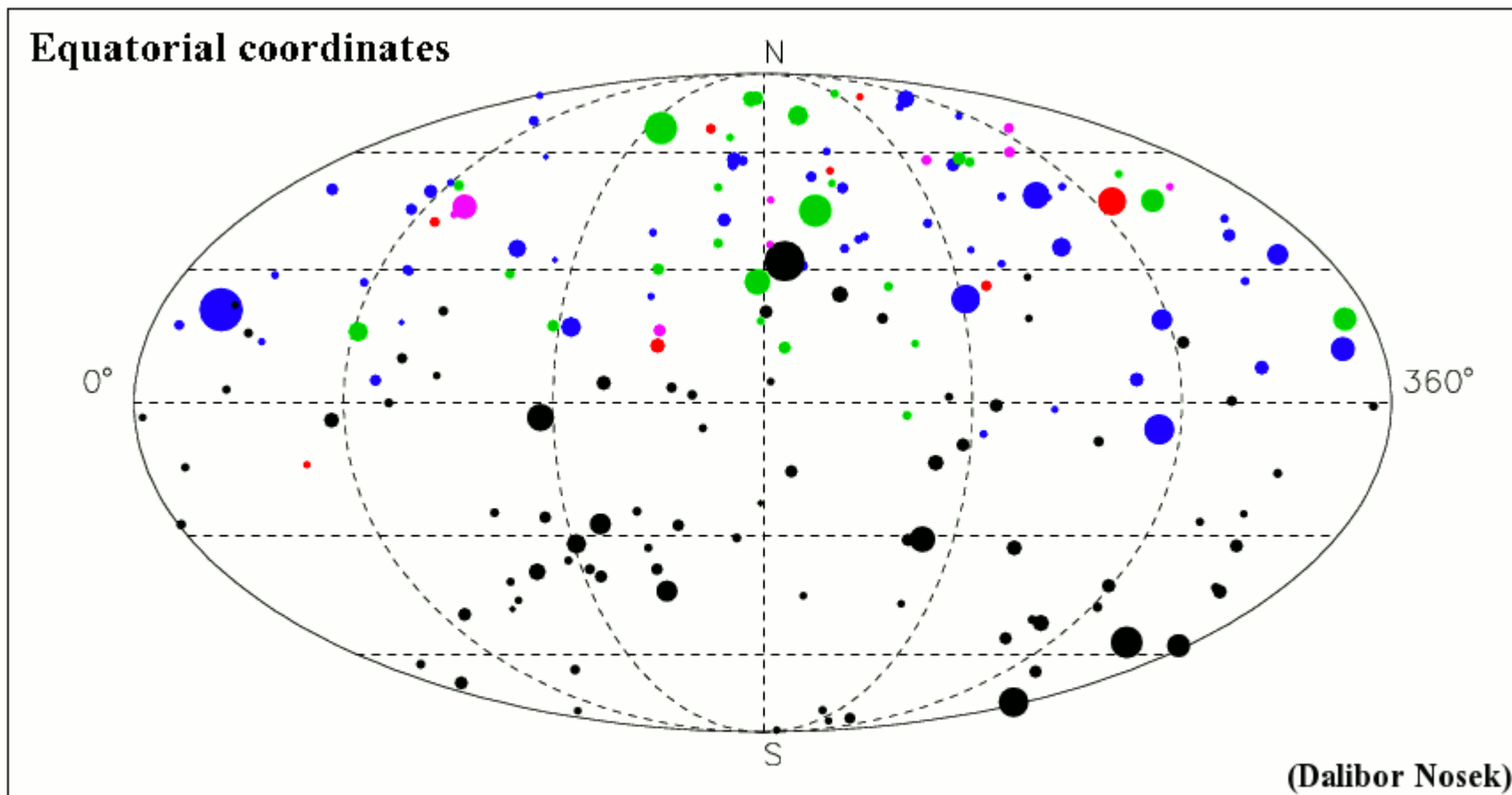
Fly's Eye  
(15. říjen 1991)  
320 EeV



AGASA  
(3. prosinec 1993)  
213 EeV



# Směry příletu

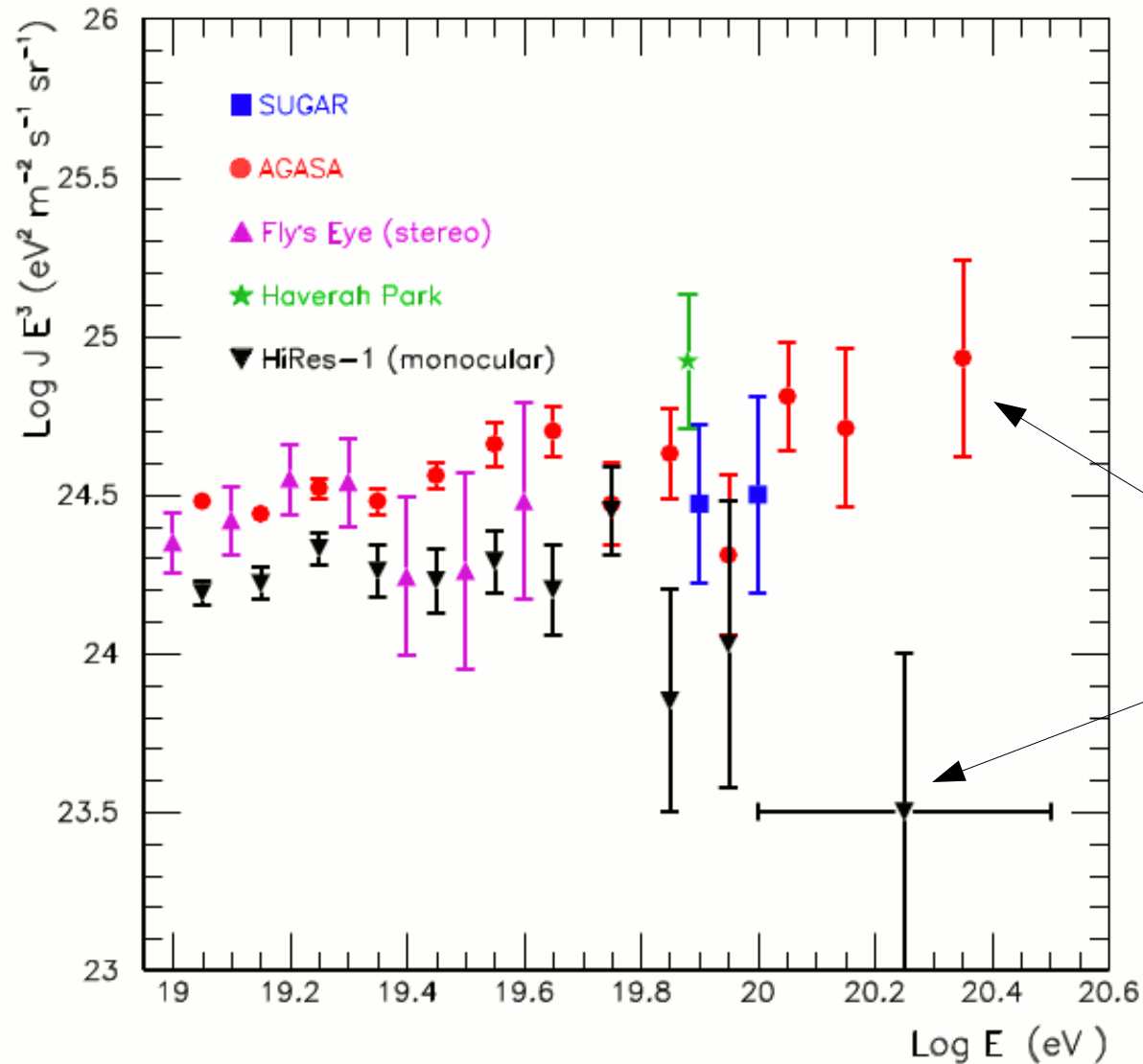


$E > 40$  EeV

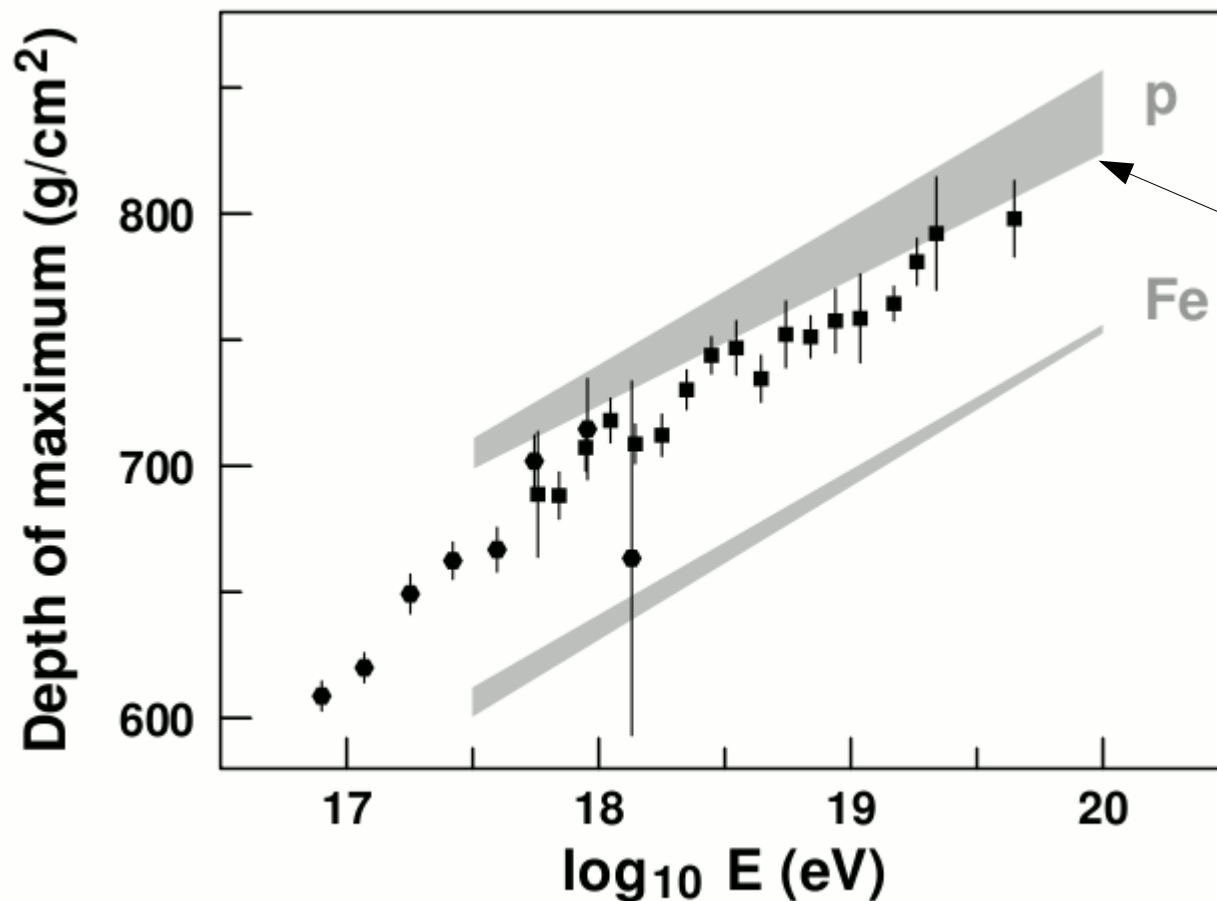
Blue ... AGASA (58), Black ... SUGAR (80), Red ... Volcano Ranch (8),

Green ... Haverah Park (26), Magenta ... Yakutsk (9)

# Spektrum



# Chemické složení



Nejistoty  
interakčních  
modelů

HiRes Collaboration, *Astrophys.J.* **622** (2005) 910-926, astro-ph/0407622

# Hypotézy o původu extrémě energetických částic

- Nadbytek částic nad GZK mezí:
  - a) urychlování v astronomických objektech (magnetary, AGN, GRB)
  - b) rozpady superhmotných částic (relikty z Velkého třesku, topologické defekty, temná hmota, SUSY, ...)
  - c) narušení teorie relativity

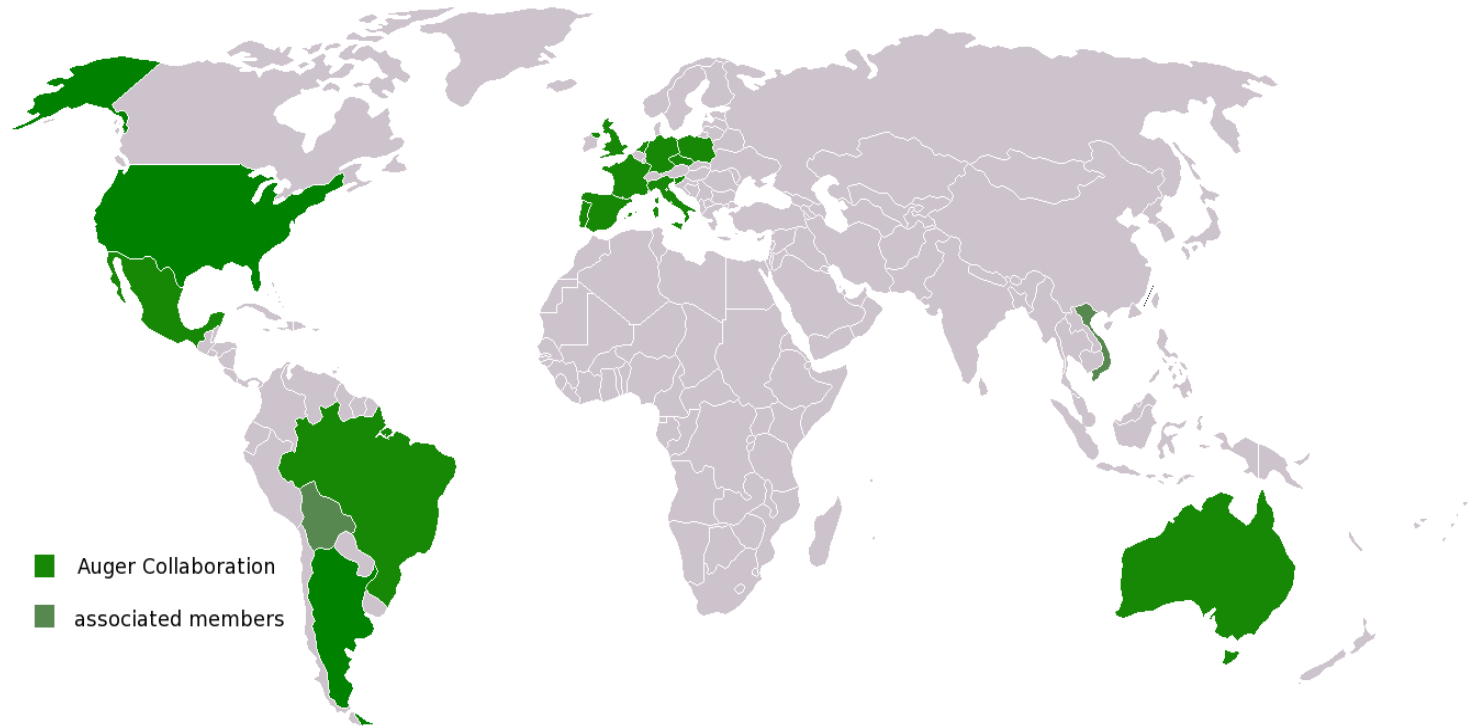
# Situace před AUGERem

	AGASA	HiRes
Type of detectors	scintillators	fluorescence
Super GZK events	yes	yes
GZK cutoff observed	no	yes
Large scale isotropy	yes	yes
Small scale isotropy	no	yes
Change of composition	3 EeV	1 EeV
Observation of photons	no	no

# Motivace pro novou observatoř

- existence GZK meze
- anizotropie
- signál z centra Galaxie
- korelace s extragalaktickými objekty
- složení kosmického záření
- podíl fotonů

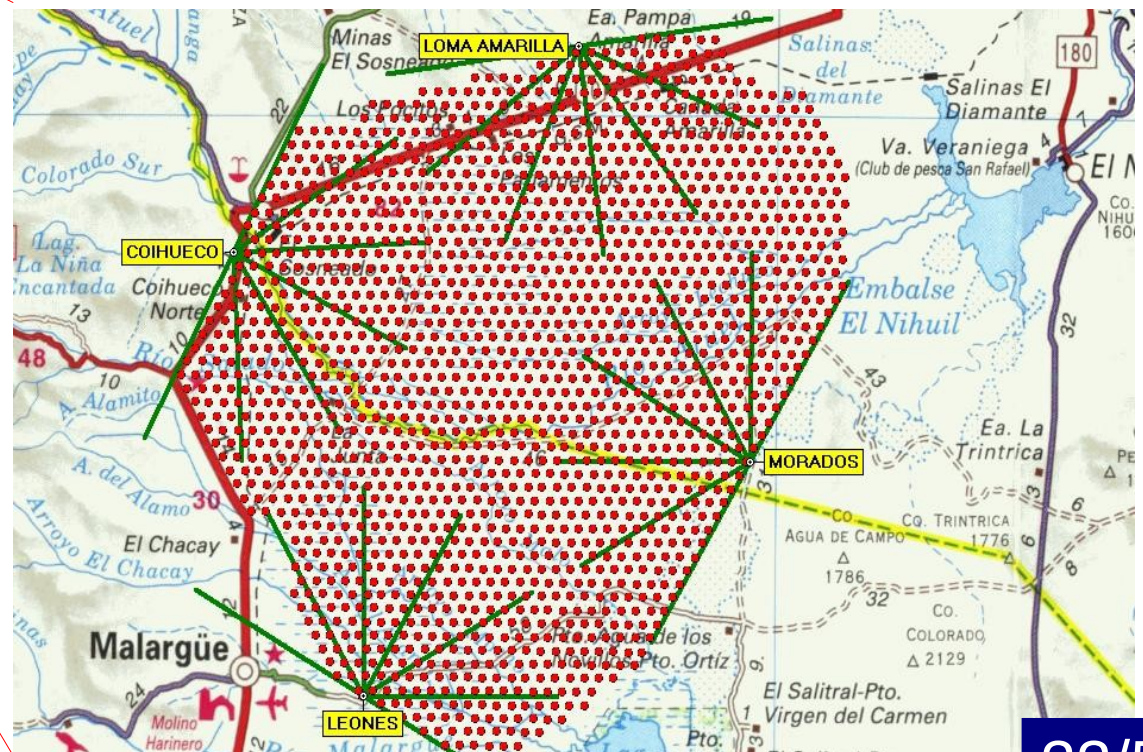
# Observatoř Pierra Augera





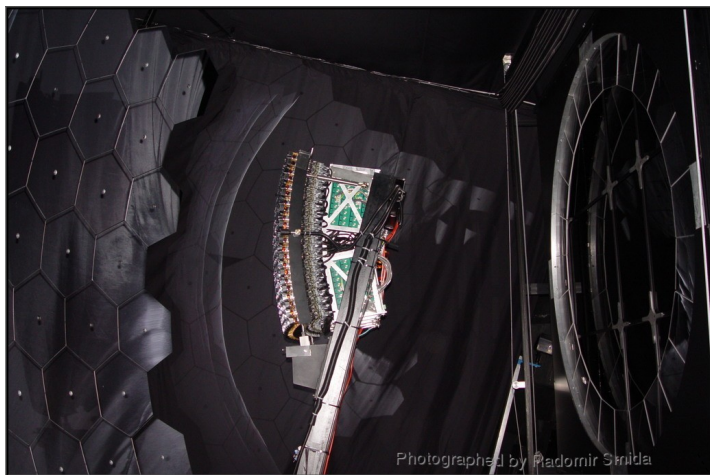
# Jižní observatoř

- Argentina
- Pampa Amarilla
- 1350 m. n. m.



- 3000 km<sup>2</sup>
- hybridní detektor

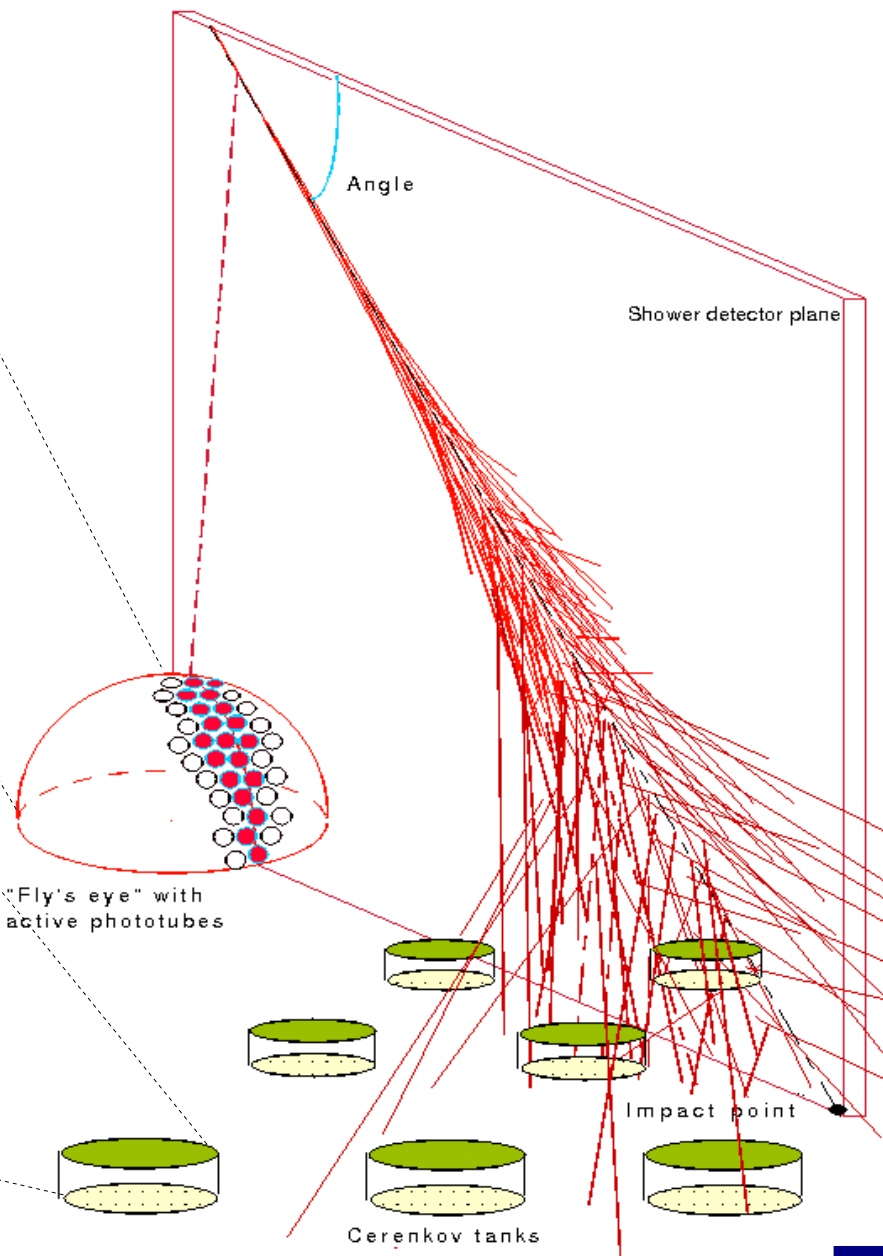
# Hybridní detektor



fluorescenční teleskop



povrchový detektor



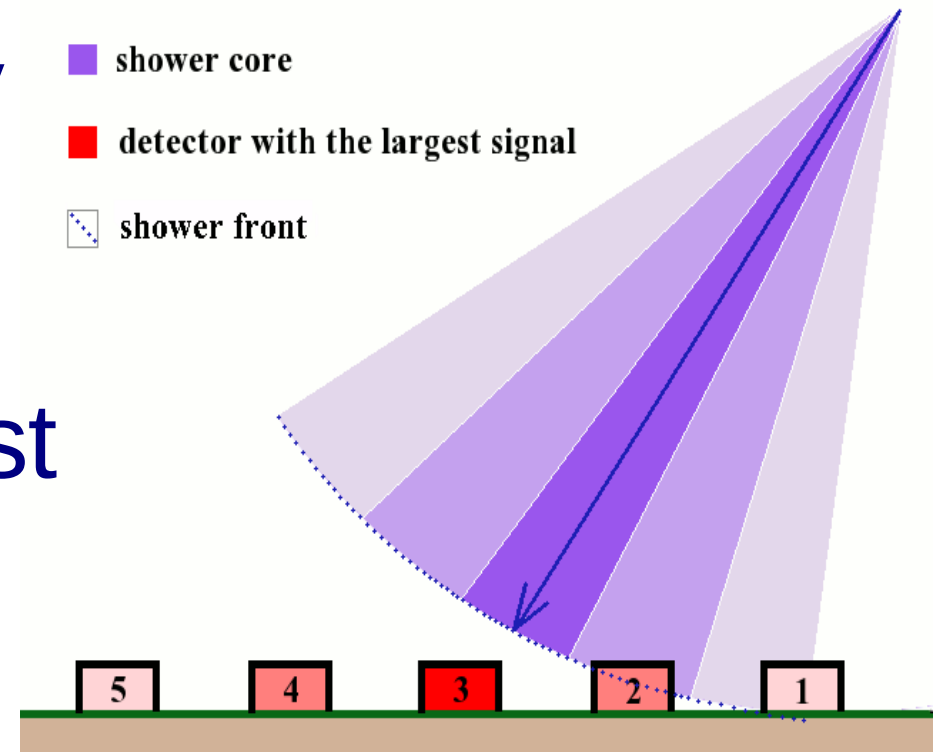
# Výhody hybridního detektoru

Typ detektoru	Hybridní	pouze SD	pouze FD mono (stereo detekce vidí málo spršek)
Úhlové rozlišení	~ 0.2°	~ 1 - 2°	~ 3 - 5°
Apertura	modelově nezávislá (určena z geometrie)		předpoklady (E, A, spektrální index) a modelově závislá
Energie	nezávisí na chem. složení ani modelech	závisí na chem. složení a modelech	nezávisí na chem. složení ani modelech

SD povrchový, FD fluorescenční

# Povrchový detektor

- síť povrchových detektorů
- vodní Čerenkovovy
- měří bez přerušení
- čas příletu a velikost signálu na zemi
- rekonstrukce energie závisí na interakčních modelech (velké nepřesnosti)



# Povrchový detektor

- plocha 10 m<sup>2</sup>
- výška 1.2 m
- Čerenkovovo záření ve vodě

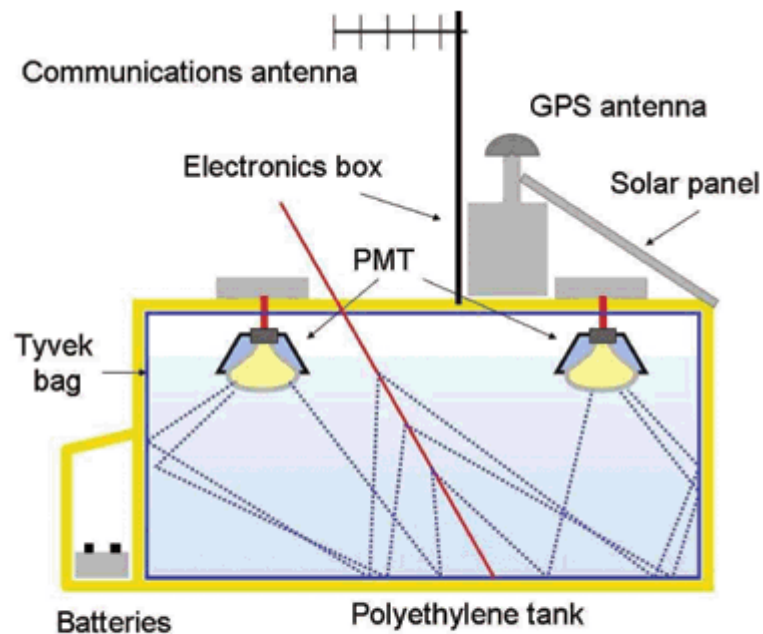
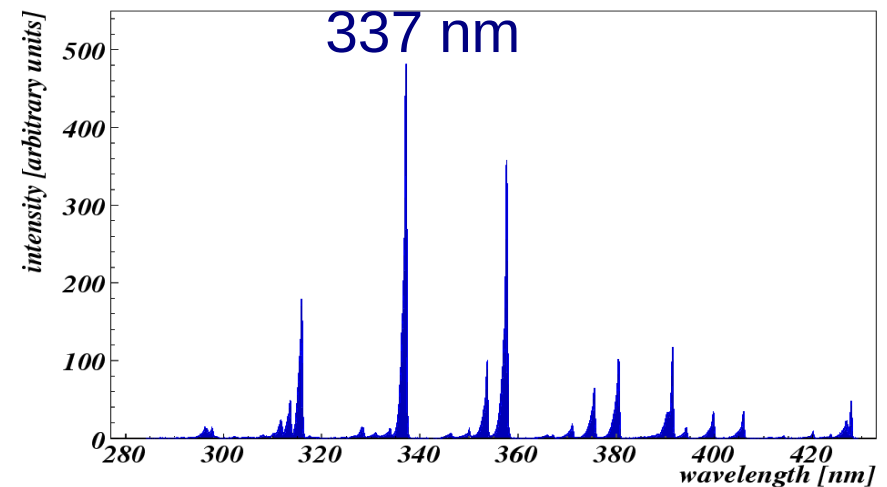


FIG. 2: A schematic view of the Cherenkov water tanks, with the components indicated in the figure.

- vzdálenost 1.5 km
- hexagonální mříž

# Fluorescenční detektor

- fluorescence N<sub>2</sub> (300 - 400 nm)
- "kalibrační" měření
- vidí rozvoj spršky (včetně maxima)
- obtížné stanovení expozice
- nutno sledovat aktuální stav atmosféry
- pouze jasné a bezměsíčné noci (asi 14% pozorovacího času SD)



# Fluorescenční teleskopy

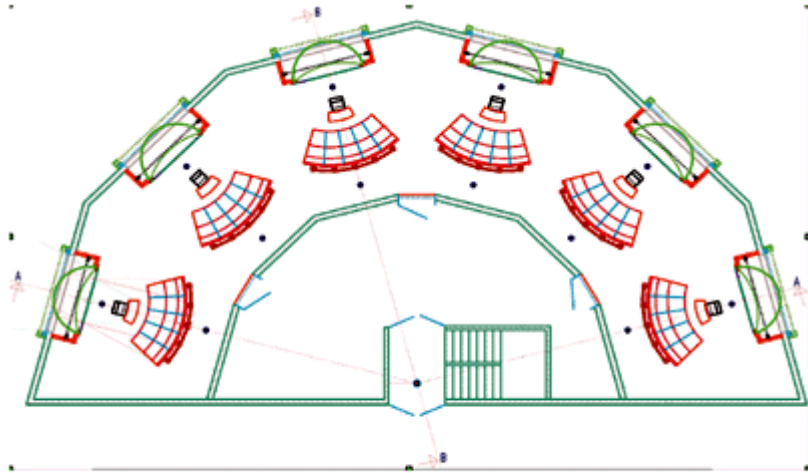
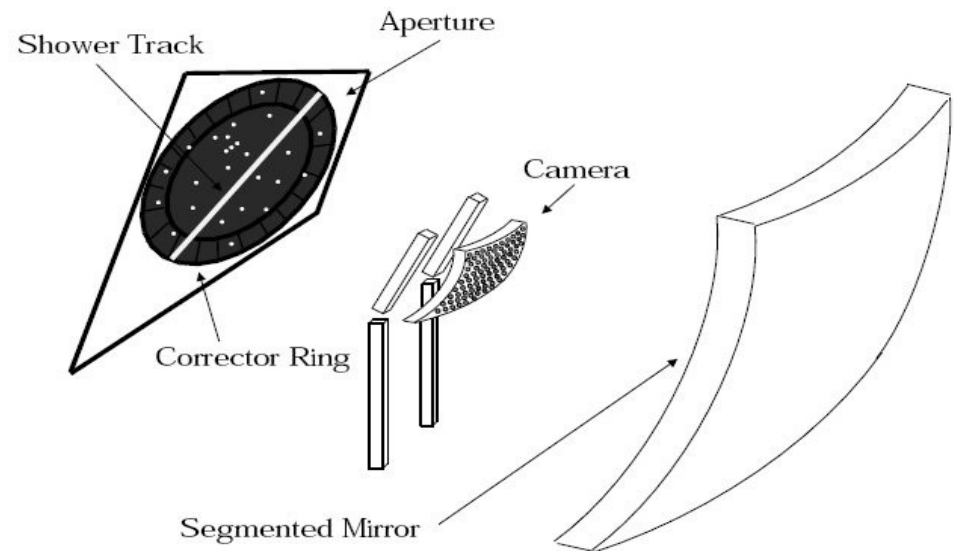


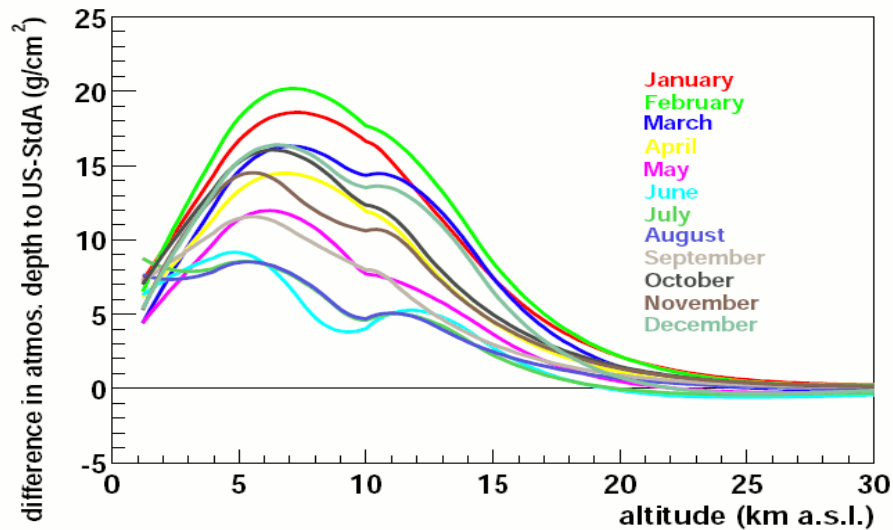
Figure 5. Upper view of a FD station.

- Johnsonův U filtr
- složená zrcadla
- 440 fotonásobičů v kameře

- sférická zrcadla (poloměr 3.4 m)
- FOV  $30^\circ \times 30^\circ$
- apertura 1.7 m



# Sledování atmosféry



Profiles of atmospheric depth of the Malargüe Monthly Models in difference to the US-StdA.

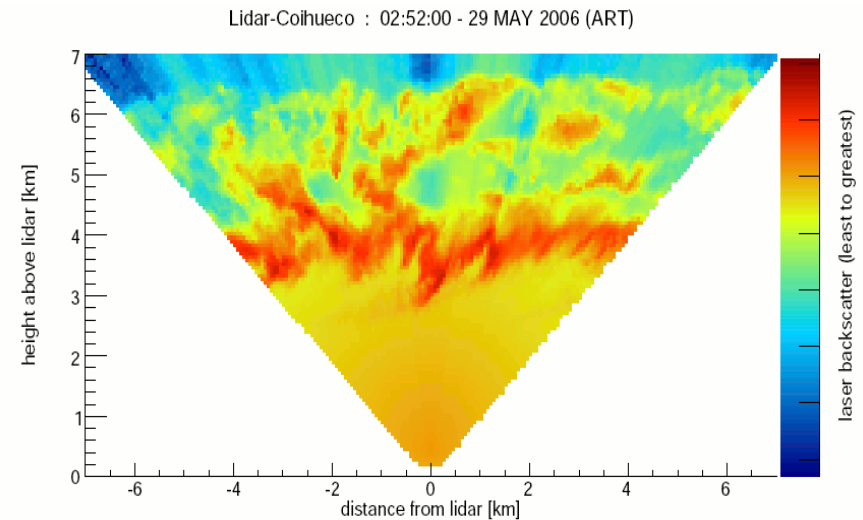


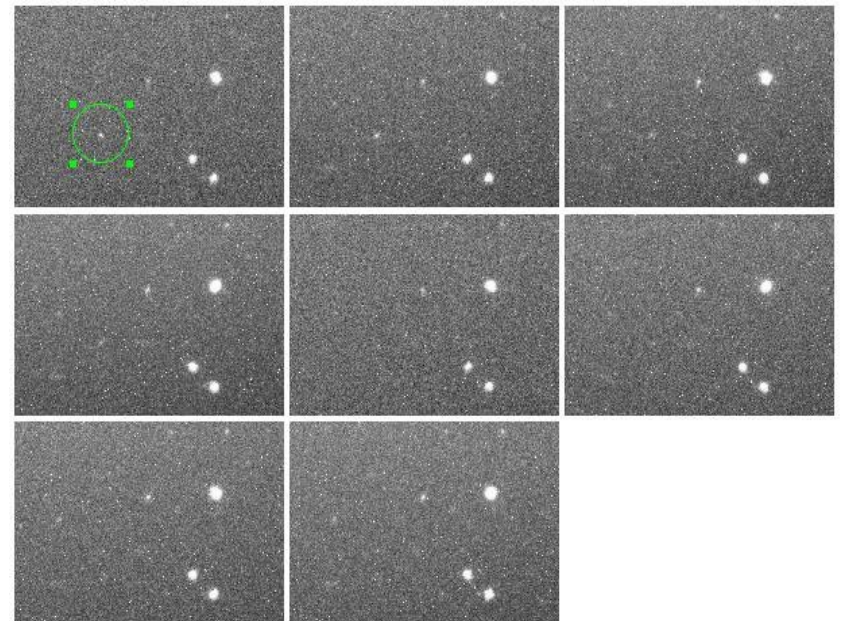
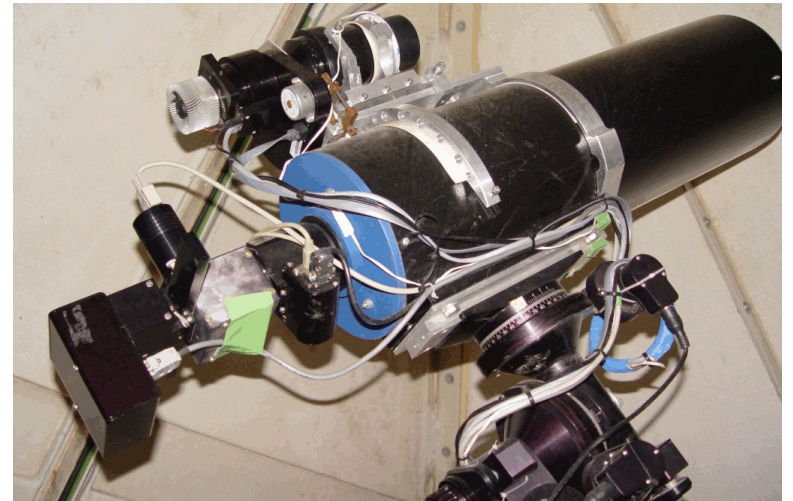
Fig. 8. Result of a typical continuous lidar scan. Shown is the intensity of backscattered light as a function of height and horizontal distance to the lidar station at (0,0). A cloud layer around 3.5 km height is clearly visible in this scan.

- **FD kalibruje SD !**
- **Chyba až 10% pro rekonstrukci spršek**
- **Pravidelná měření teploty, vlhkosti, tlaku a aerosolů**



# Teleskop FRAM

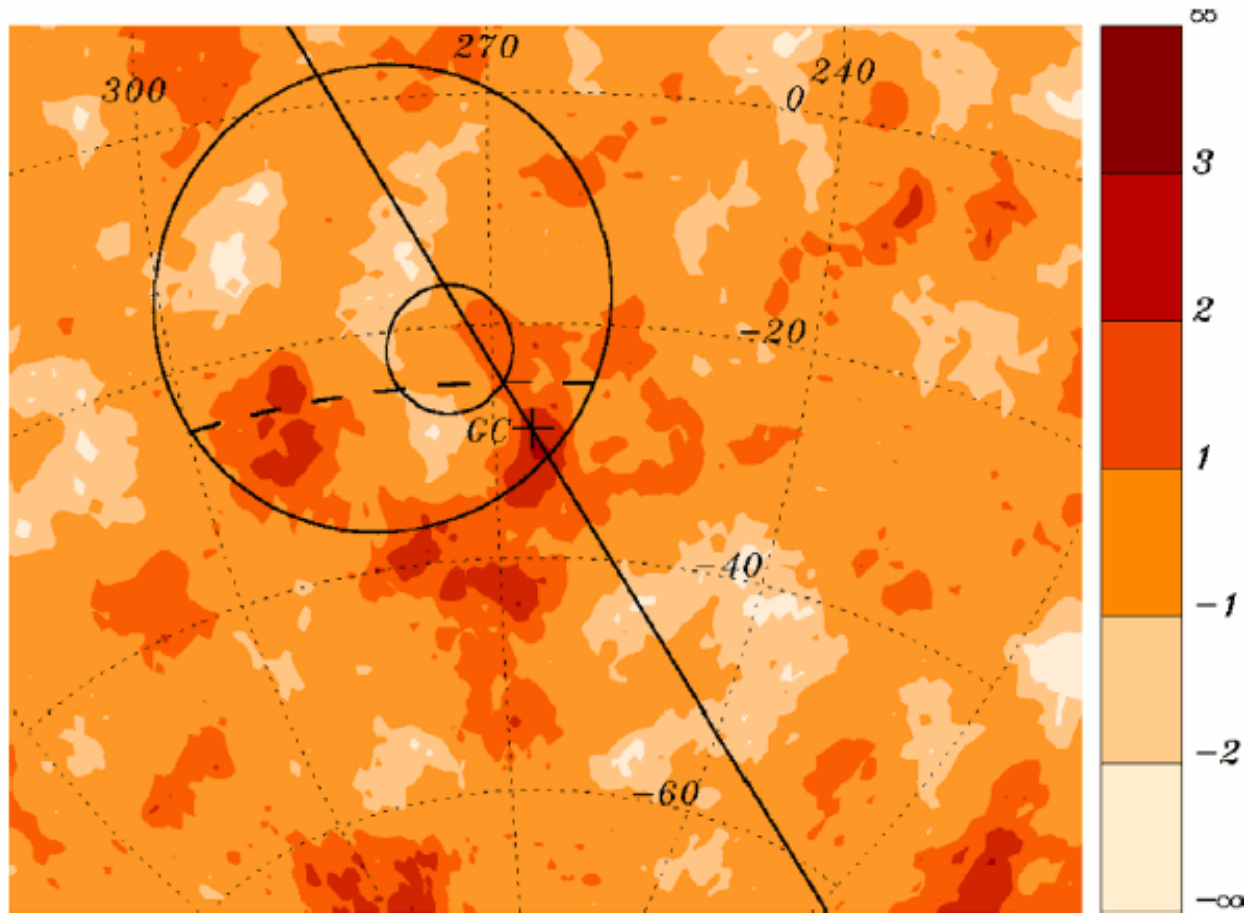
- Závislost extinkčního koeficientu na vlnové délce
- Cassegrain (20 cm)
- ohnisko 297 cm
- fotometr Optec SSP5-A
- Johnsonovy filtry + další
- 2 CCD kamery
- optický protějšek GRB060117 (124 s po družici SWIFT )



# Výsledky AUGERu



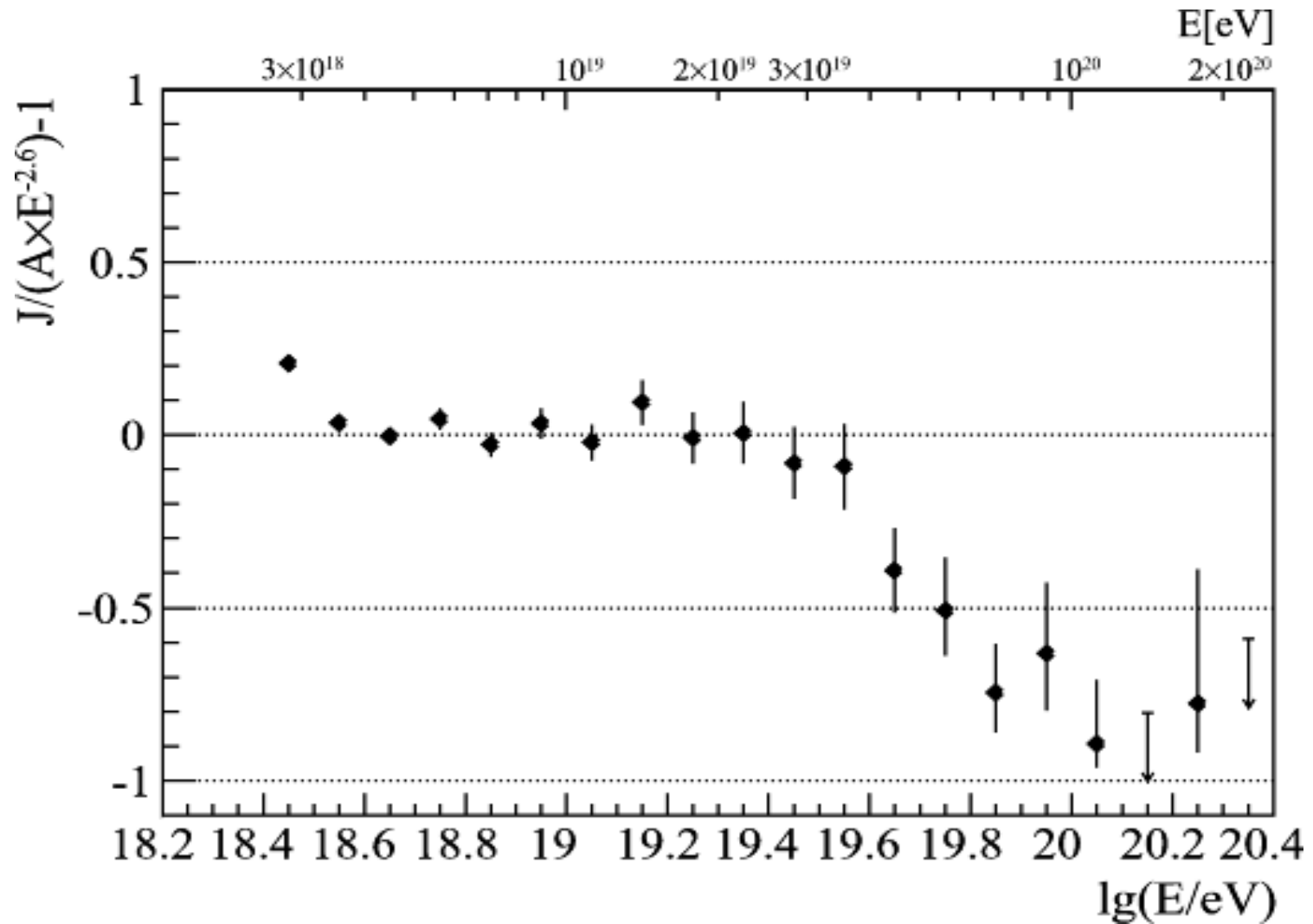
# Galaktické centrum



Map of CR overdensity significances near the GC region on top-hat windows of  $5^\circ$  radius. The GC location is indicated with a cross, lying along the galactic plane (solid line). Also the regions where the AGASA experiment found their largest excess as well as the region of the SUGAR excess are indicated.

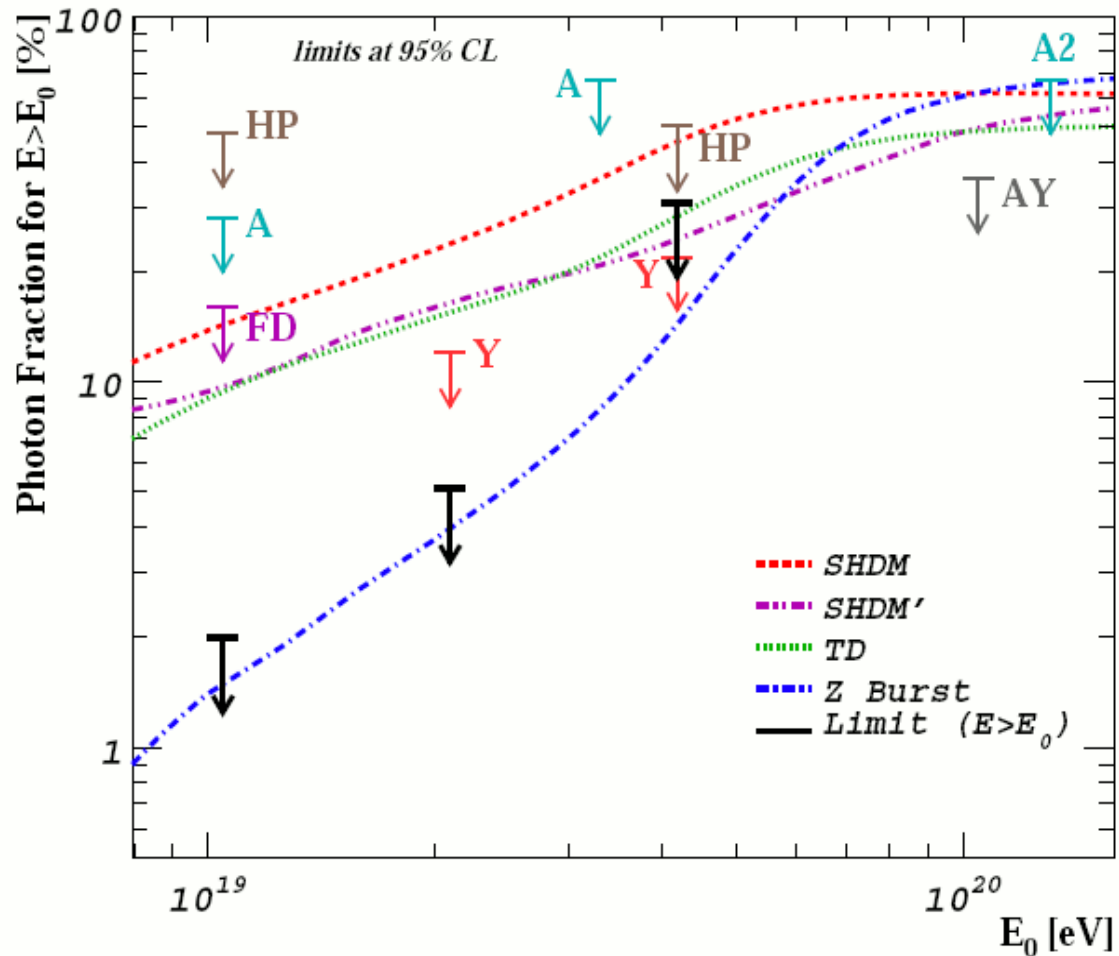
Prozatím žádný nadbytek částic

# Spektrum



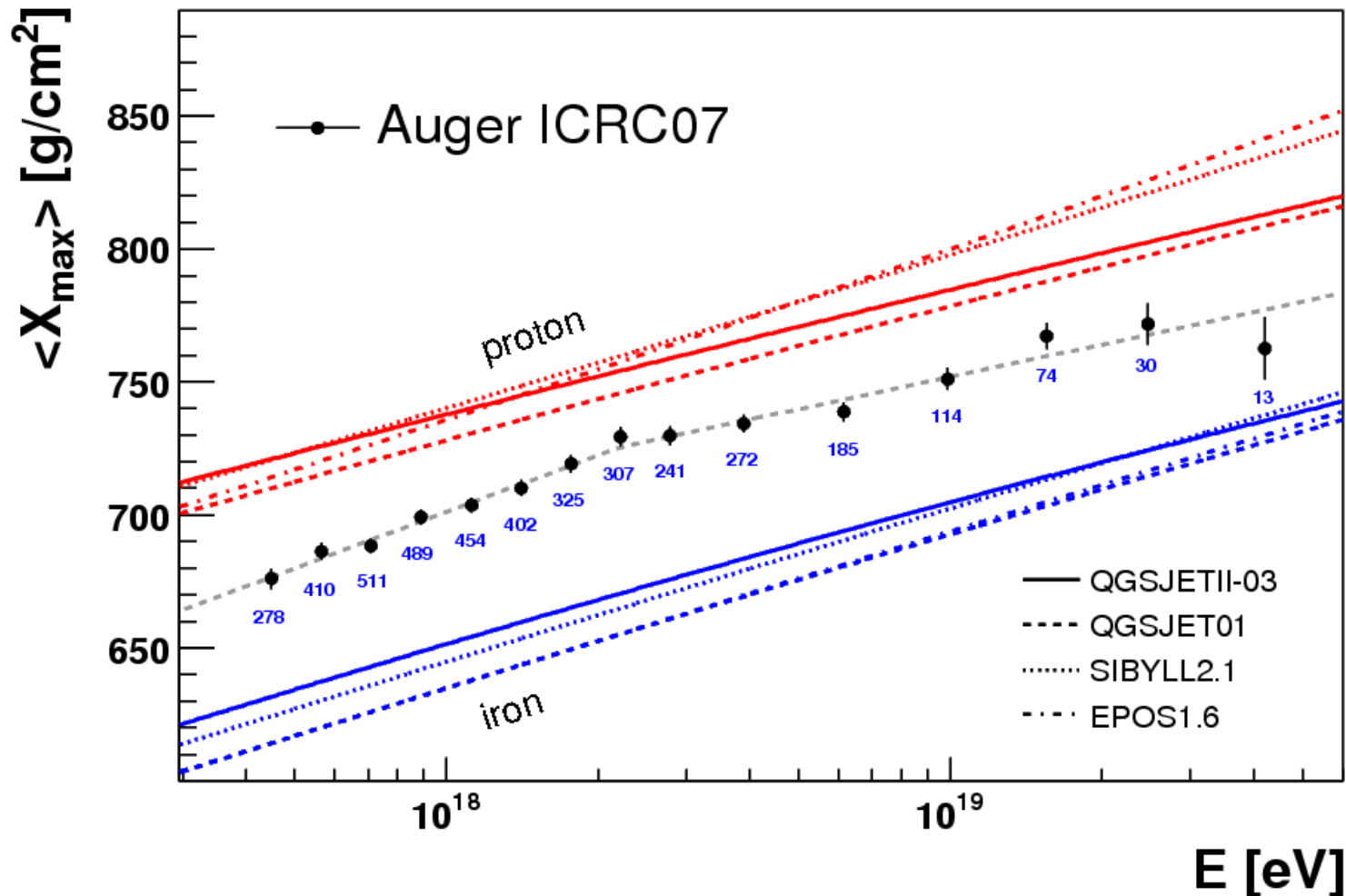
Strmý pokles toku nad 40 EeV

# Fotonový limit



Zastoupení fotonů je nižší než 2%

# Chemické složení



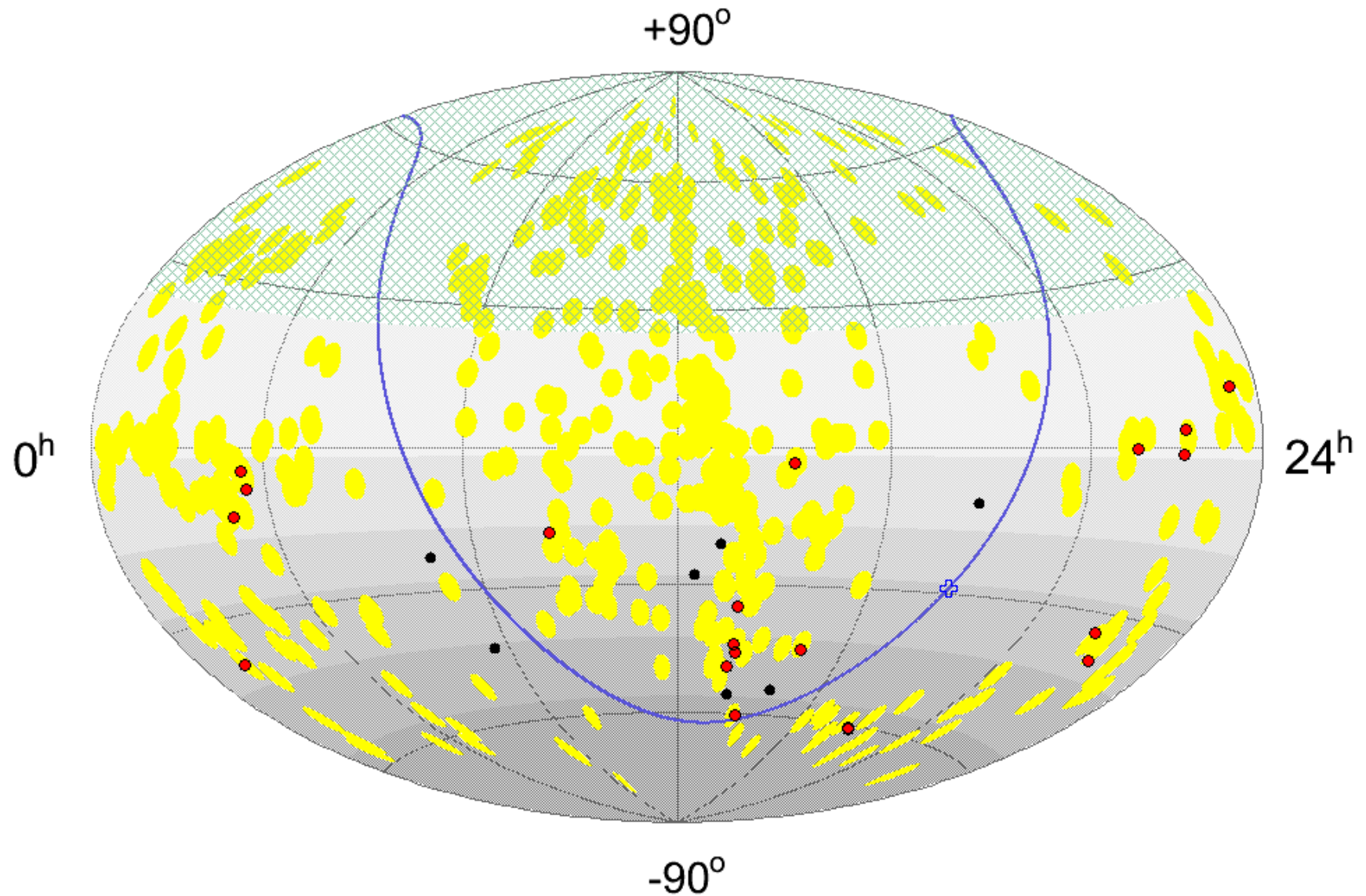
Nárůst podílu těžších atom. jader (?)

# Anizotropie

- Anizotropie směru příletů kosmického záření s energií nad 57 EeV
- Prokázána "a priori" testem na hladině spolehlivosti 99%
- Nadbytek v okolí poloh blízkých AGN (do 75 Mpc) z katalogu Veron-Cetty
- 20 z 27 částic dopadlo blíže než  $3.1^\circ$  (tj. do 21% části oblohy)



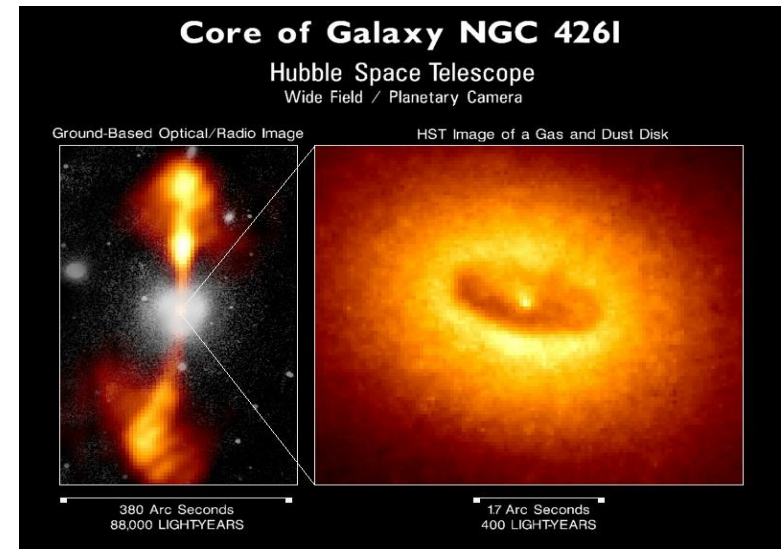
# Pohled na oblohu





# Jak správně interpretovat výsledek

- **Není to důkaz, že zdroji jsou AGN !!!**
- **I když jejich akcie výrazně stouply**
- **Podobné rozložení ve vesmíru mají také jiné astronomické objekty**
- **Nutno naměřit více dat na AUGERu**





10<sup>20</sup> ev

75<sup>c</sup>

OBSERVATORIO  
PIERRE  
AUGER  
MALARGÜE  
MENDOZA  
ARGENTINA

REPÚBLICA ARGENTINA  
CORREO OFICIAL

2007