
A composite image showing a bright purple and blue streak representing a cosmic ray entering Earth's atmosphere from the top left. In the background, a distant galaxy is visible against a starry space. The Earth's surface is shown at the bottom, with blue oceans and white clouds.

# Promienie kosmiczne najwyższych energii: co przyniósł rok 2009?

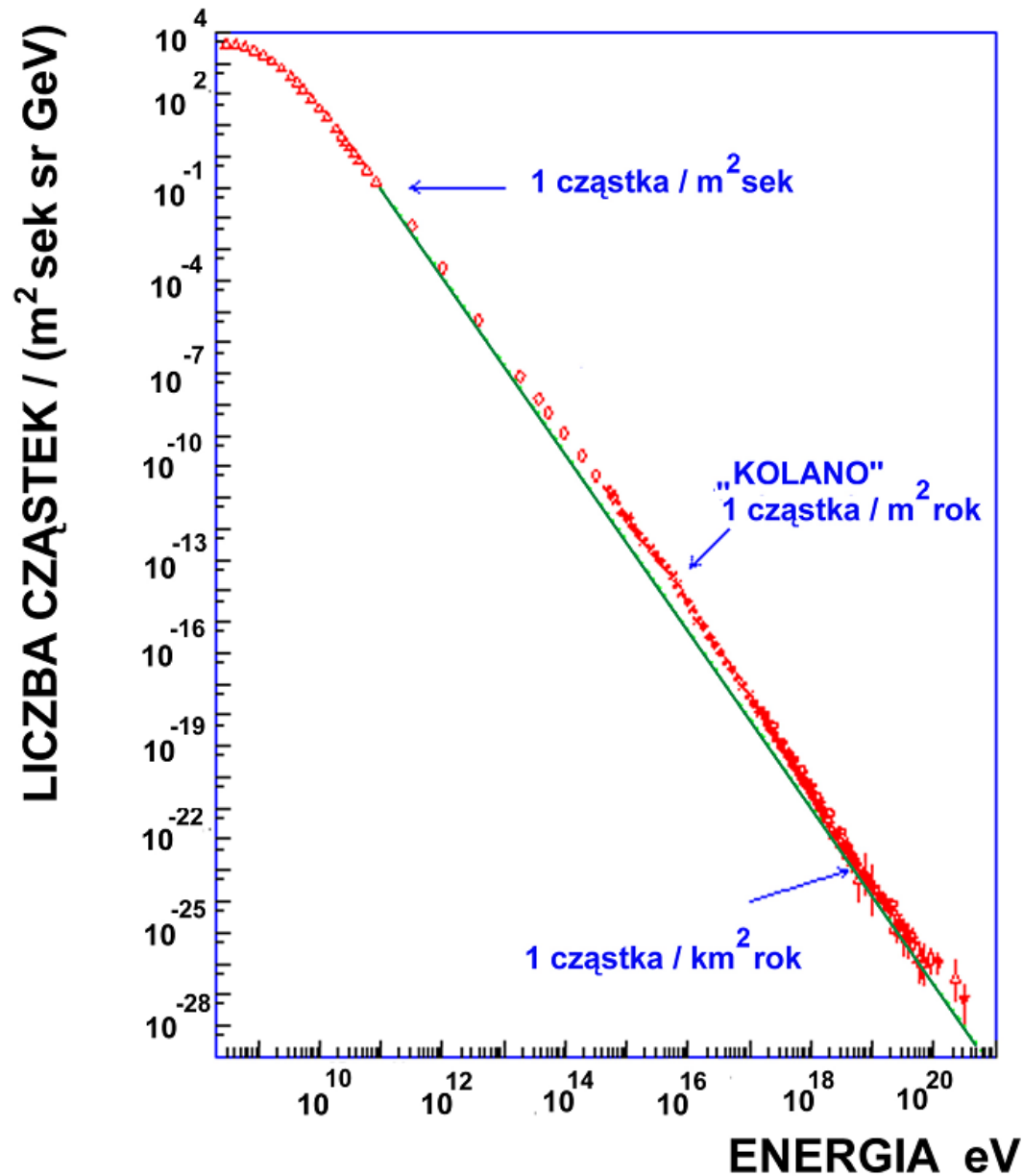
Henryk Wilczyński  
IFJ PAN

Warszawa, 22 stycznia 2010

A composite image featuring a bright purple streak representing a cosmic ray of ultra-high energy, streaking across the Earth's atmosphere from the top left towards the bottom right. The Earth's surface, showing clouds and landmasses, is visible in the lower half. In the upper left background, a bright galaxy or nebula is visible against a dark starry sky.

# Promienie kosmiczne ultrawysokich energii

# Widmo energii promieni kosmicznych





# Promienie kosmiczne ultrawysokich energii

Pochodzenie promieni kosmicznych ultrawysokich energii ( $E > 1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$ )  
pozostaje niewyjaśnione:

Przyśpieszanie w znanych obiektach astrofizycznych (bottom-up)?

radiogalaktyki, aktywne jądra galaktyk, ...  
jądra o dużym  $Z$  łatwiej przyśpieszać  
cząstki neutralne tylko wtórne

Procesy egzotyczne (top-down)?

defekty topologiczne, cząstki reliktowe, ...  
dominacja fotonów i neutrin  
brak ciężkich jąder

Scenariusze „hybrydowe”, np. nowe własności znanych cząstek?

nowe cząstki, łamanie niezmienniczości Lorentza, ...

Potrzebne pomiary

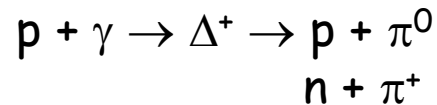
kierunków przylotu  
widma energii  
składu



# Efekt GZK

## Efekt Greisena-Zatsepina-Kuzmina:

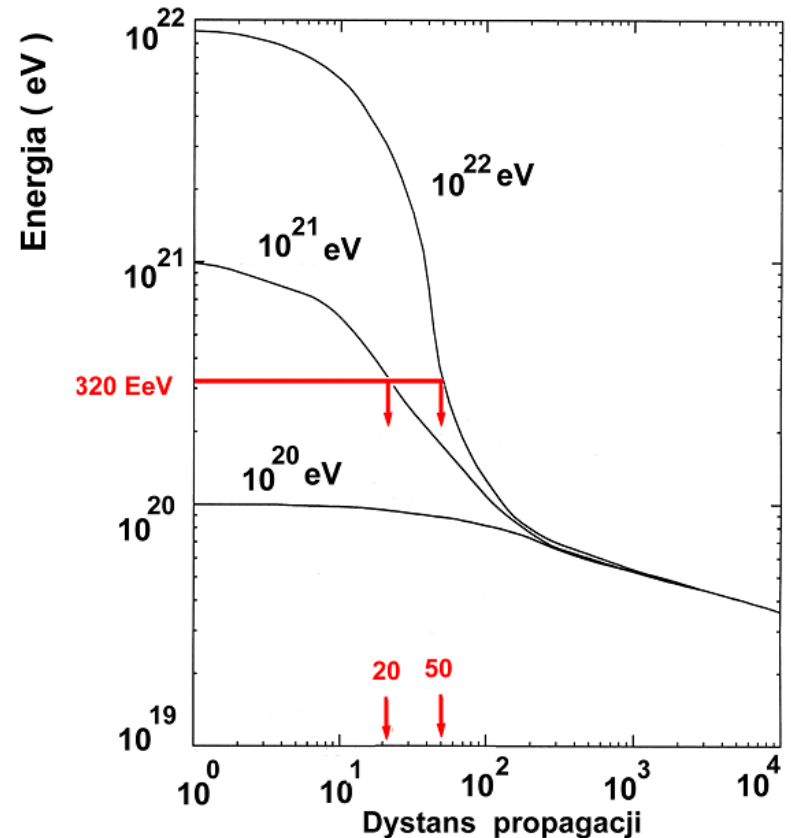
Oddziaływania z fotonami tła relikтового przy  $E > \sim 5 \times 10^{19}$  eV:



- redukcja energii protonu
- stłumienie widma powyżej  $5 \times 10^{19}$  eV

Dla  $E > 10^{20}$  eV źródła muszą być nie dalej niż  $\sim 50$  Mpc  
identyfikacja źródeł powinna być łatwa??

Energia u źródła

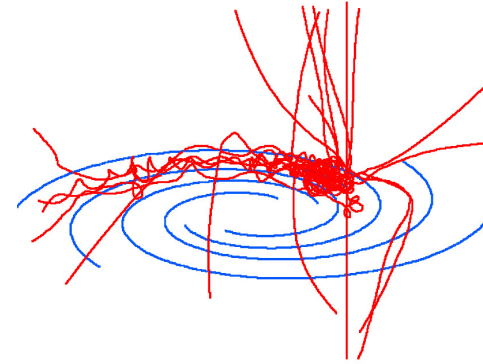


# Propagacja promieni kosmicznych w Galaktyce

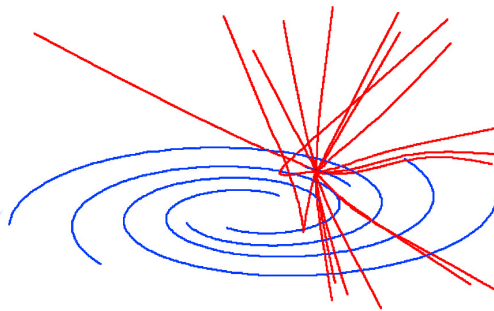
uwięzienie protonów



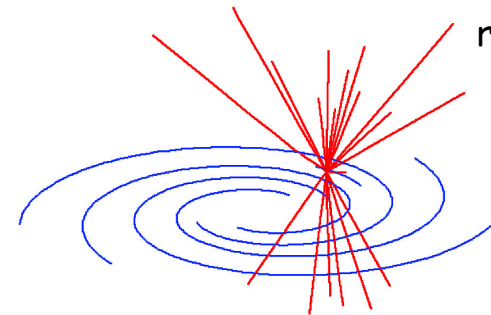
$10^{17}$  eV



$10^{18}$  eV



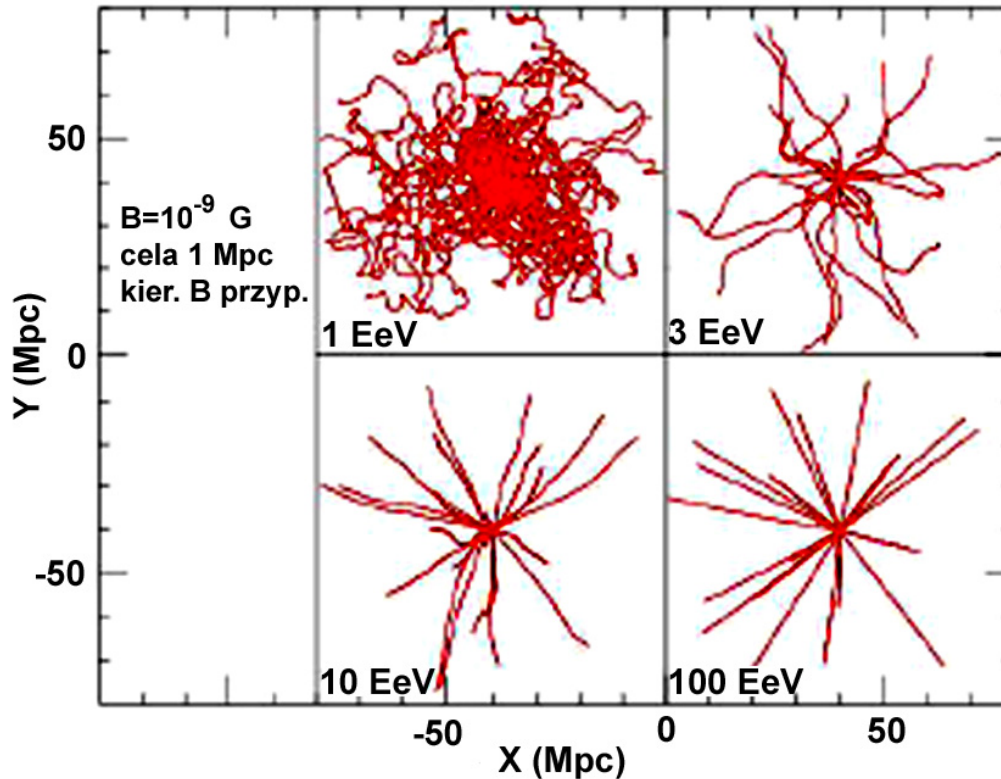
$10^{19}$  eV



ruch ~prostoliniowy

$10^{20}$  eV

# Propagacja promieni kosmicznych poza Galaktyką



protony

rzut trajektorii 3D  
na płaszczyznę XY

Odchylenie toru przy skrajnie wysokich energiach

$$\Theta \approx 0.3^\circ (L_{\text{Mpc}} Z B_{\text{nG}}) / E_{20}$$

$$\Theta \approx 0.3^\circ \text{ dla } L=1\text{Mpc}, B=1 \text{ nG}, E=100 \text{ EeV}$$

$$\Theta \approx 10^\circ \text{ dla } L=100 \text{ Mpc}, E=300 \text{ EeV}$$

⇒ kierunek do źródła - „astronomia cząstek naładowanych“!





A composite image showing a cosmic ray shower. A bright purple and blue streak descends from the top left towards the Earth's surface. The Earth is shown from space, with blue oceans and white clouds. In the background, a galaxy is visible against a starry sky.

**Observatorium  
Pierre Auger**

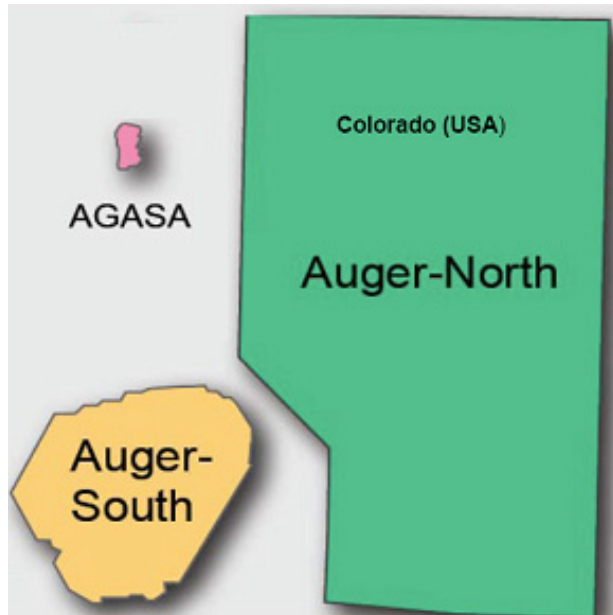


# Obserwatorium Pierre Auger

Badanie promieni kosmicznych w zakresie energii  $E > 10^{19}$  eV:

hybrydowa detekcja wielkich pęków:  
dwa układy detektorów  
(sieć powierzchniowa i detektory fluorescencyjne)

obserwacja całego nieba - detektory w Argentynie i w USA

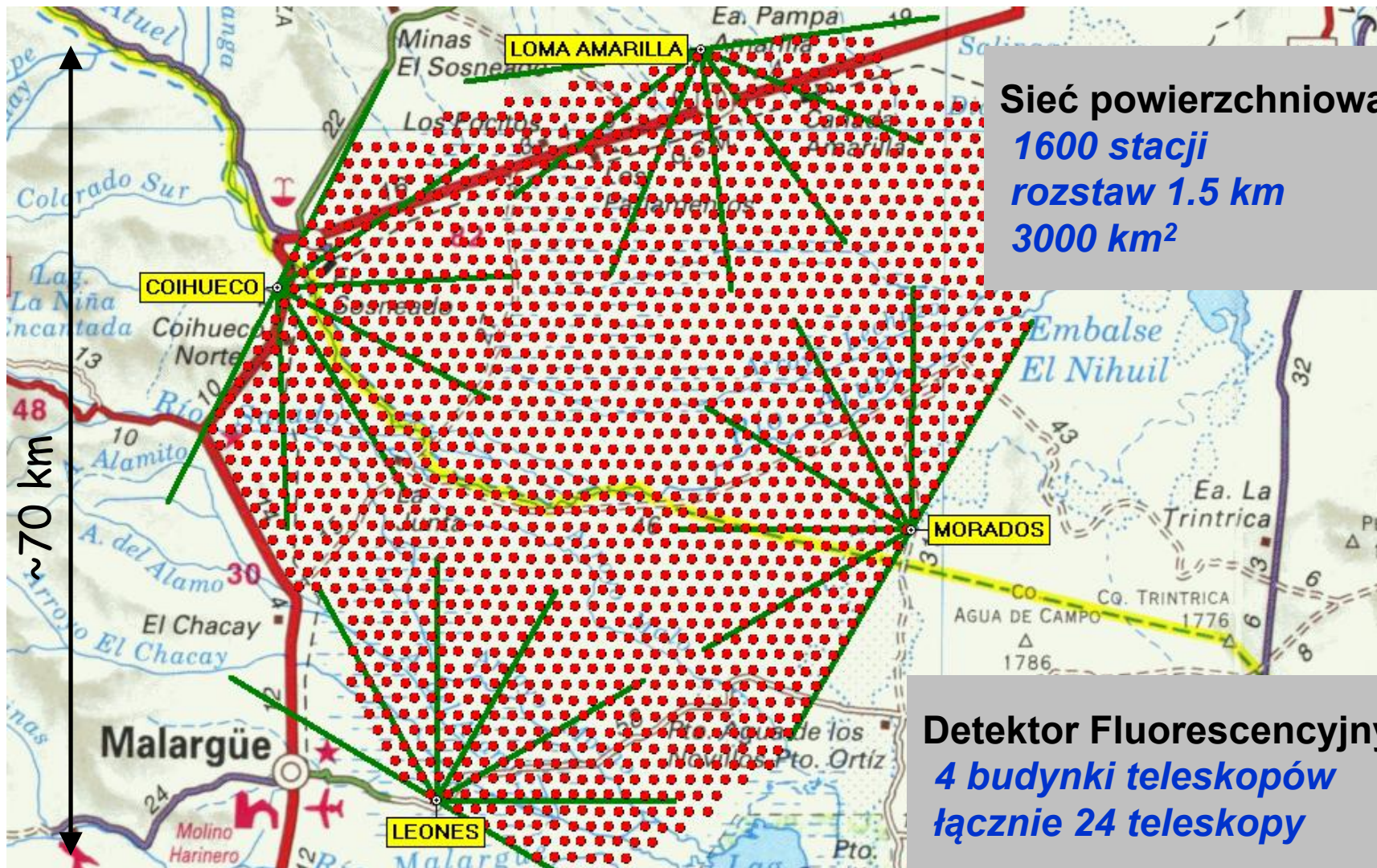


Obserwatorium południowe (3000 km<sup>2</sup>):  
budowa ukończona w 2008r.

Obserwatorium północne (21 000 km<sup>2</sup>):  
budowa planowana od 2010r.



# Plan południowego Obserwatorium Pierre Auger



**Sieć powierzchniowa**  
**1600 stacji**  
**rozstaw 1.5 km**  
**3000 km<sup>2</sup>**

**Detektor Fluorescencyjny**  
**4 budynki teleskopów**  
**łącznie 24 teleskopy**



# Migawki z budowy

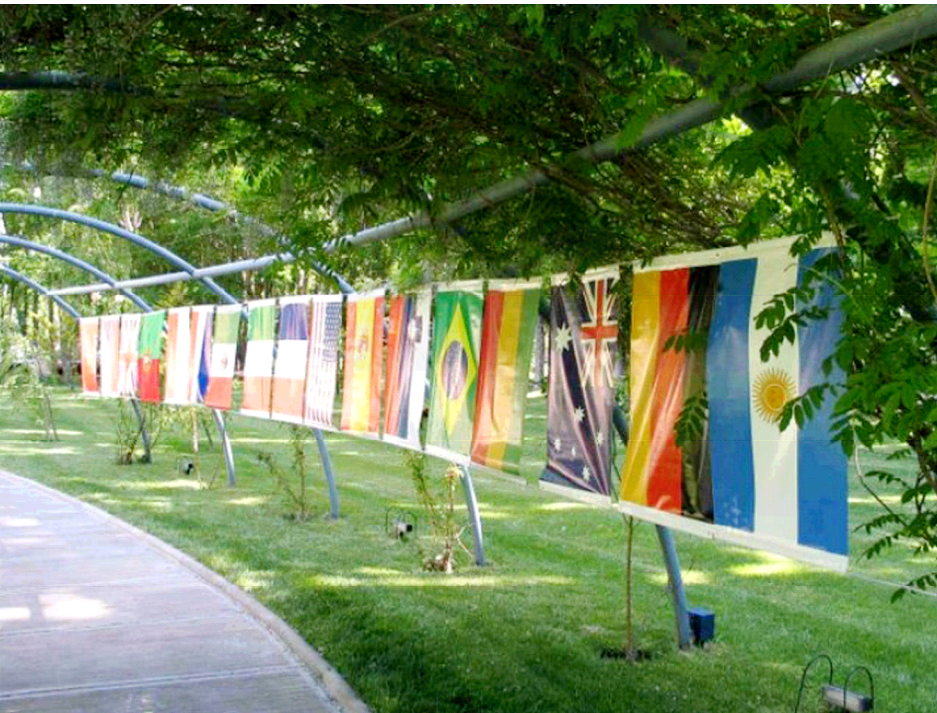


**Honey production**



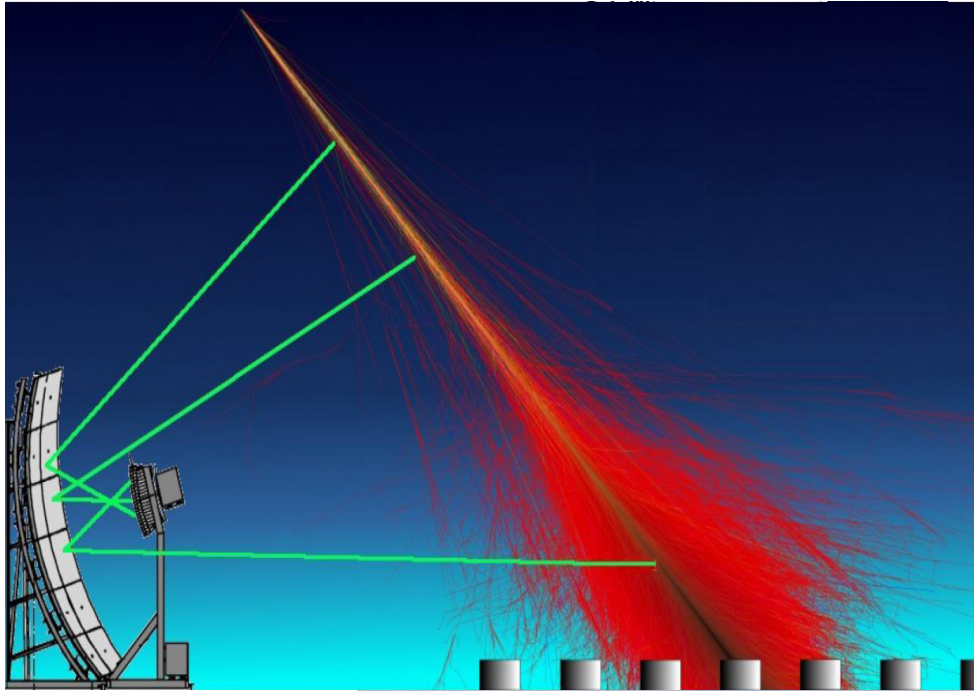
# Auger: kamienie milowe

- 1991 idea wielkiej sieci detektorów
- 1999 kamień węgielny
- 2007 pierwsze ważne rezultaty
- 2008 południowe obserwatorium gotowe
- 2008 oficjalna inauguracja**





# Detekcja hybrydowa wielkich pęków atmosferycznych



Obserwatorium Pierre Auger



A composite image featuring a galaxy in the upper left and a view of Earth from space in the lower right. A bright purple laser beam originates from the top left and points towards the Earth. The background is a dark starry sky.

**Rozkład kierunków**



# Anizotropia 2007

Auger Coll., *Science* (2007)

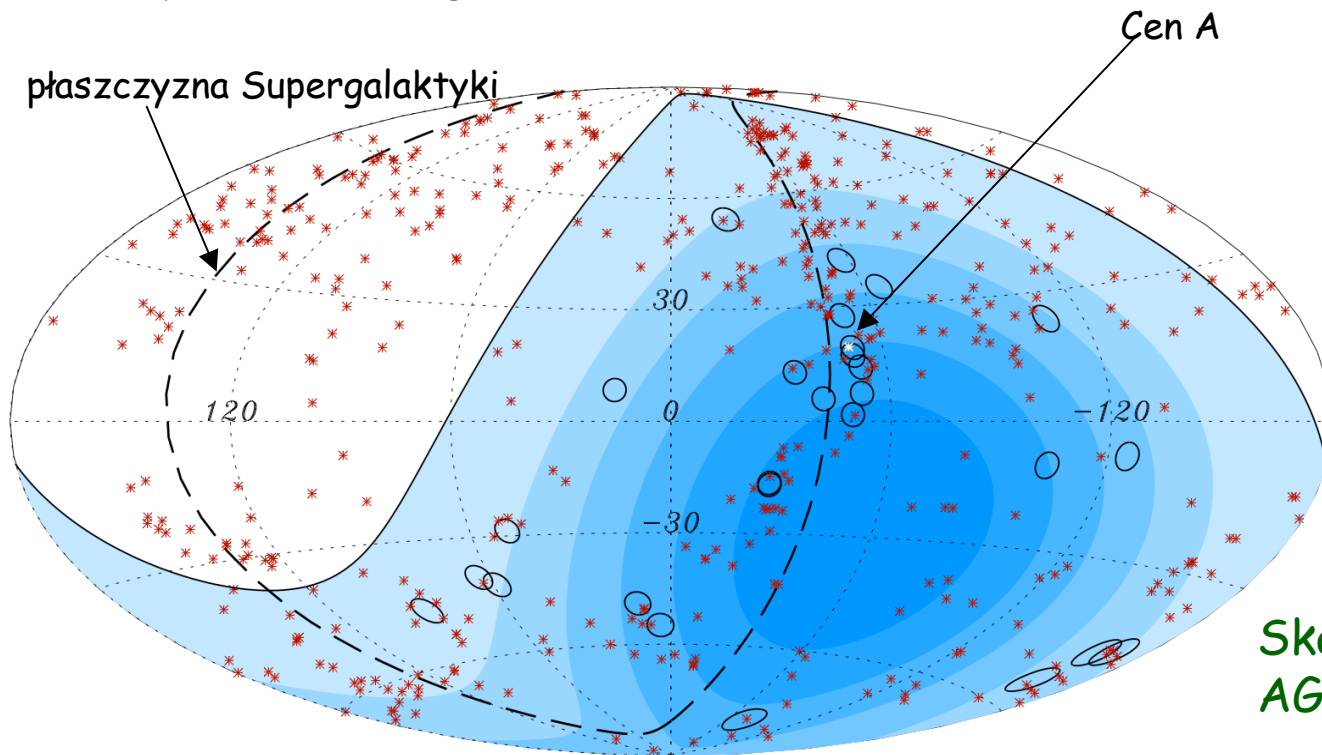
Korelacja kierunków PK z położeniami obiektów w katalogu Veron-Cetty & Veron  
korelacja z aktywnymi jądrami galaktyk (na poziomie ufności 99%)

→ pozagalaktyczne pochodzenie PK?

brak identyfikacji (klas) źródeł

\* 472 AGN  $d < 75$  Mpc  
(318 w polu widzenia Auger)

○ przyp.  $E > 57$  EeV



27 przypadków:  
 $E > 57$  EeV  
 $D < 75$  Mpc ( $z < 0.018$ )  
 $\psi < 3.1^\circ$

Skala kątowa korelacji z  
AGN wskazuje na protony

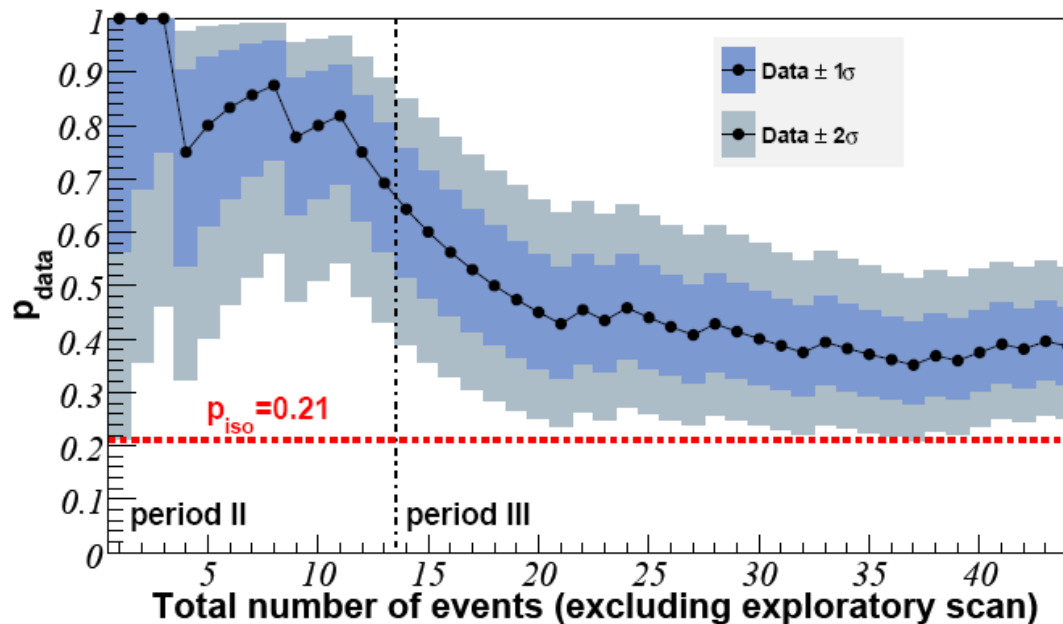


# Anizotropia 2009

Nowe dane Auger (2009): 31 nowych przypadków  $E > 55 \text{ EeV}$

Stopień korelacji z AGN zmniejszył się ( $70\% \rightarrow 40\%$ ), ale ciągle  $> 2\sigma$

Razem od stycznia 2004: 58 przypadków  $E > 55 \text{ EeV}$ , anizotropia 99% C.L.



Czy aktywne jądra galaktyk są źródłami?

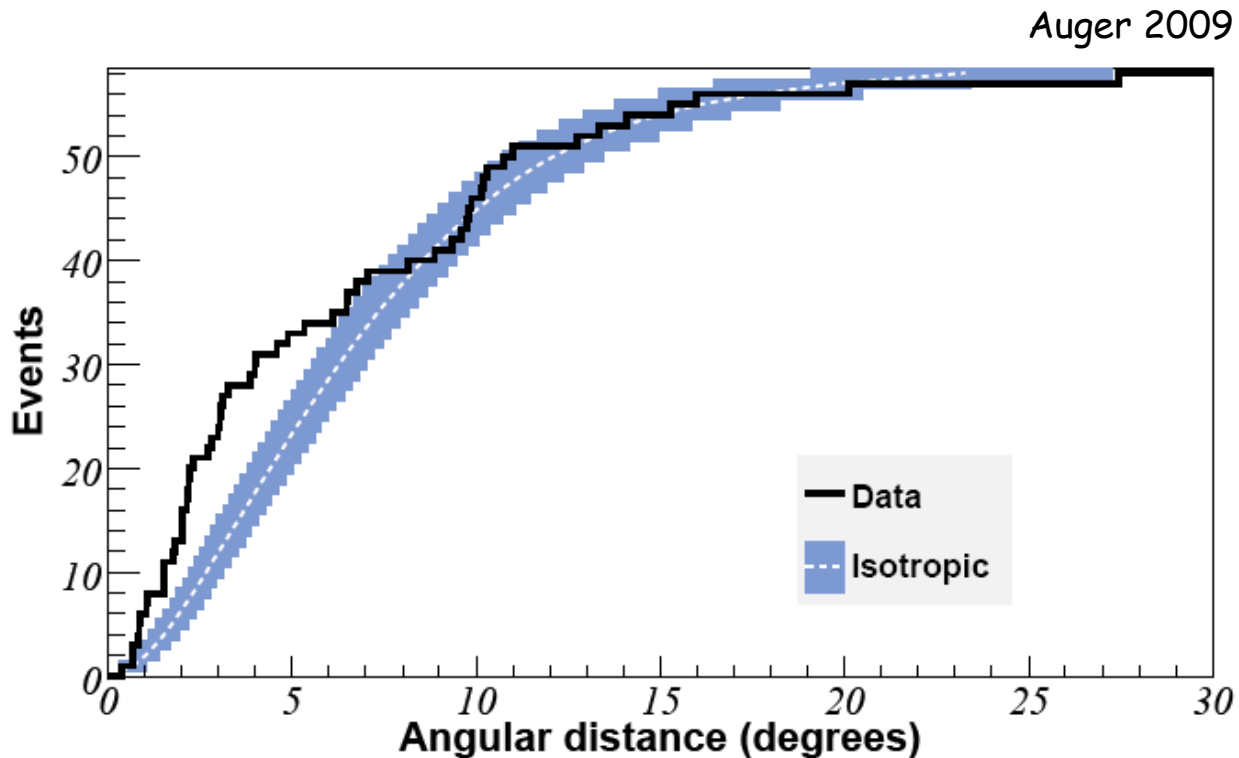
znacznikami źródeł?

HiRes: 10 przypadków  $E > 55 \text{ EeV}$ , spójne z izotropią

Telescope Array: 4 przypadki - 3 skorelowane z AGN

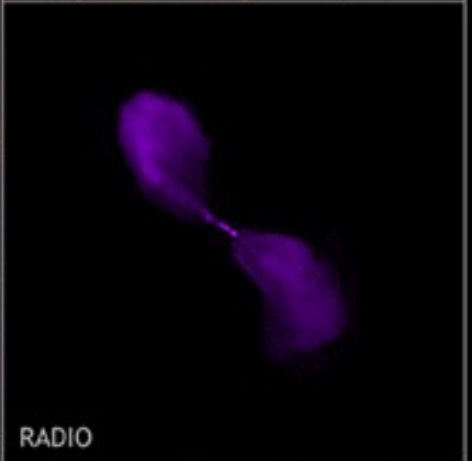
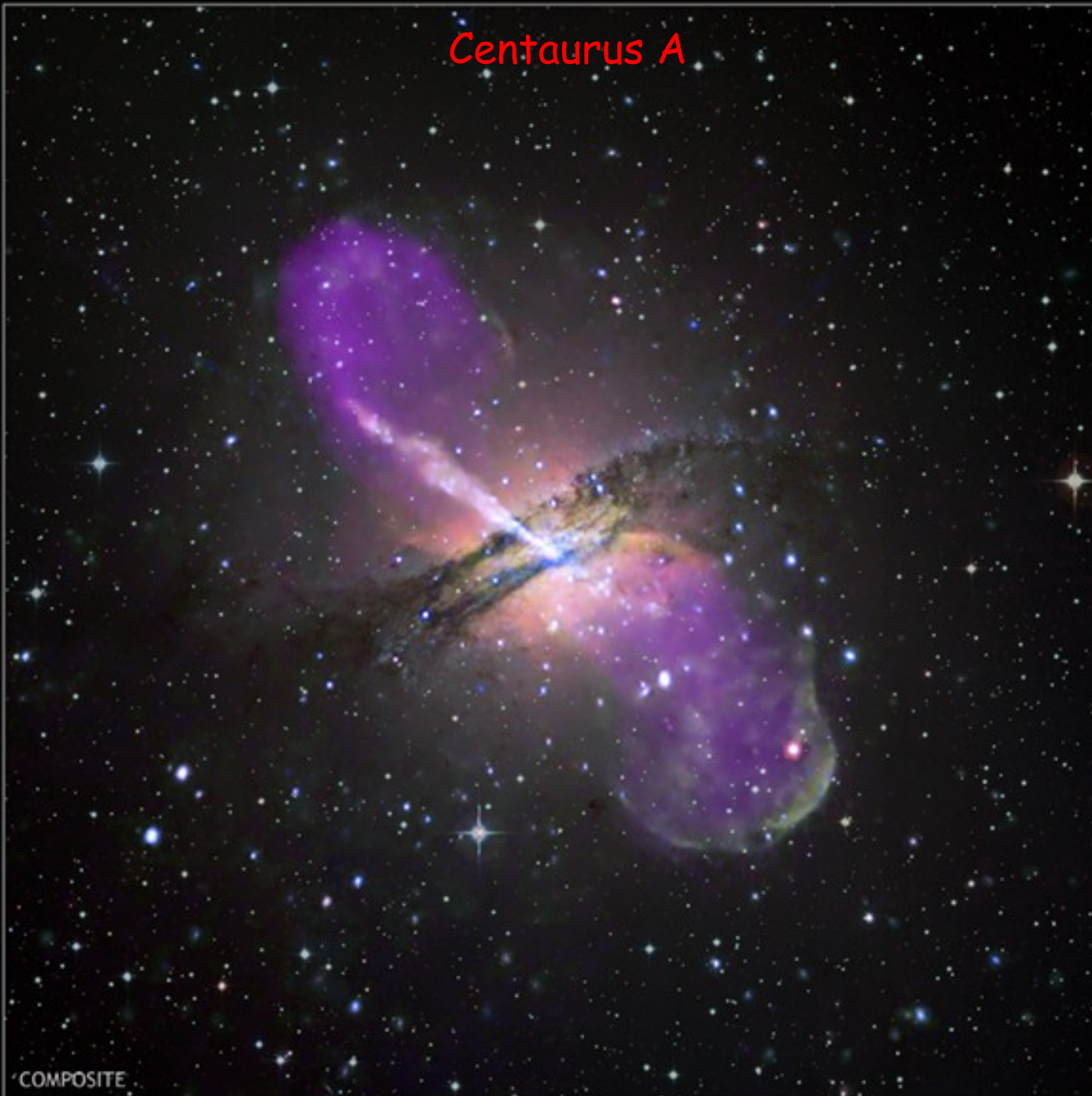
# Korelacja z aktywnymi jądrami galaktyk

Odległość kątowna kierunków promieni kosmicznych od najbliższego aktywnego jądra galaktyki



Maksymalna korelacja przy  $\sim 3^\circ$

# Centaurus A

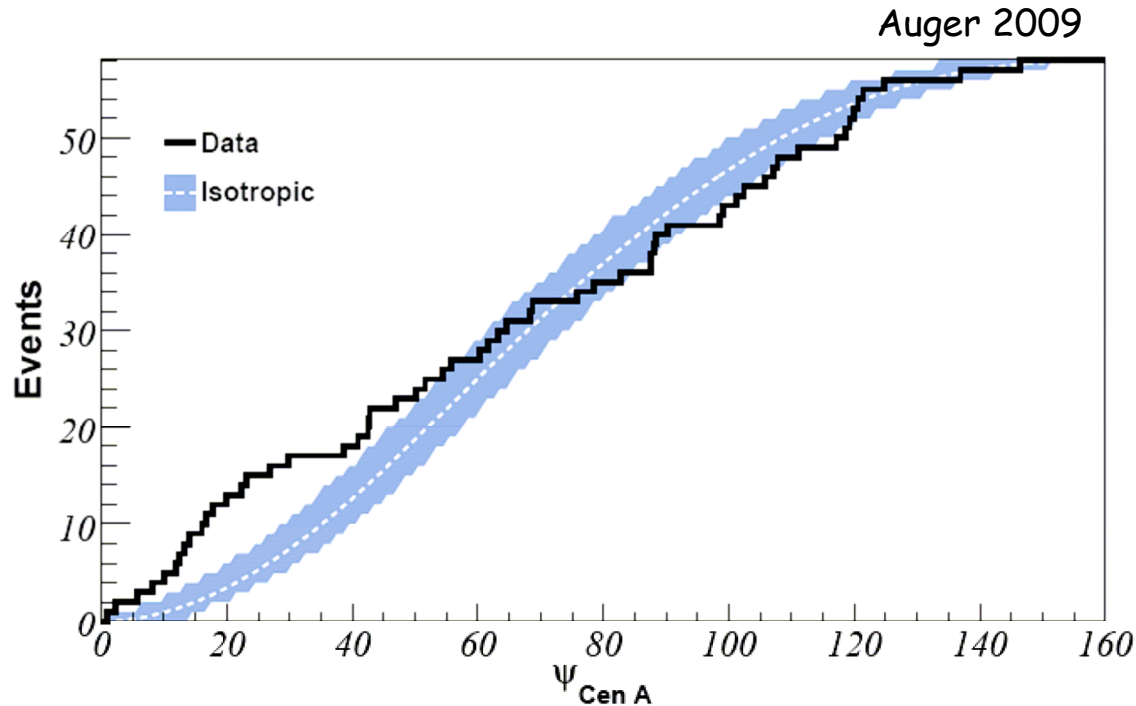


COMPOSITE

OPTICAL

# Centaur A

Radiogalaktyka Cen A: najjaśniejsze radioźródło na niebie ( $d \sim 3.5$  Mpc)




Korelacja kierunków promieni kosmicznych z położeniem Cen A

12 przypadków w promieniu  $18^\circ$

(2.7 oczekiwanych)

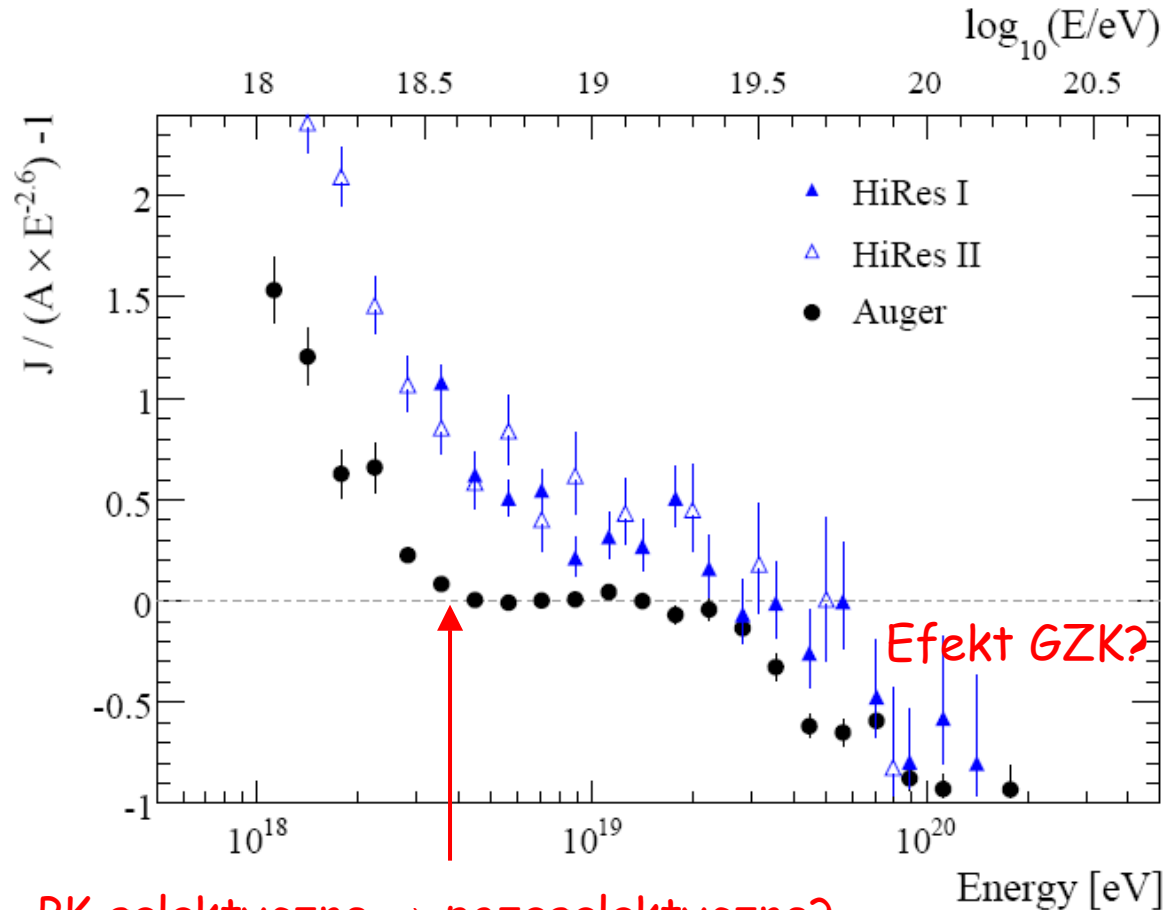
→ obiecujący obiekt dalszych badań



A composite image showing a galaxy in the upper left and the Earth's surface in the lower right. A thick, bright purple beam of light, representing cosmic rays, originates from the galaxy and points towards the Earth. The background is a dark space filled with stars.

**Widmo energii**

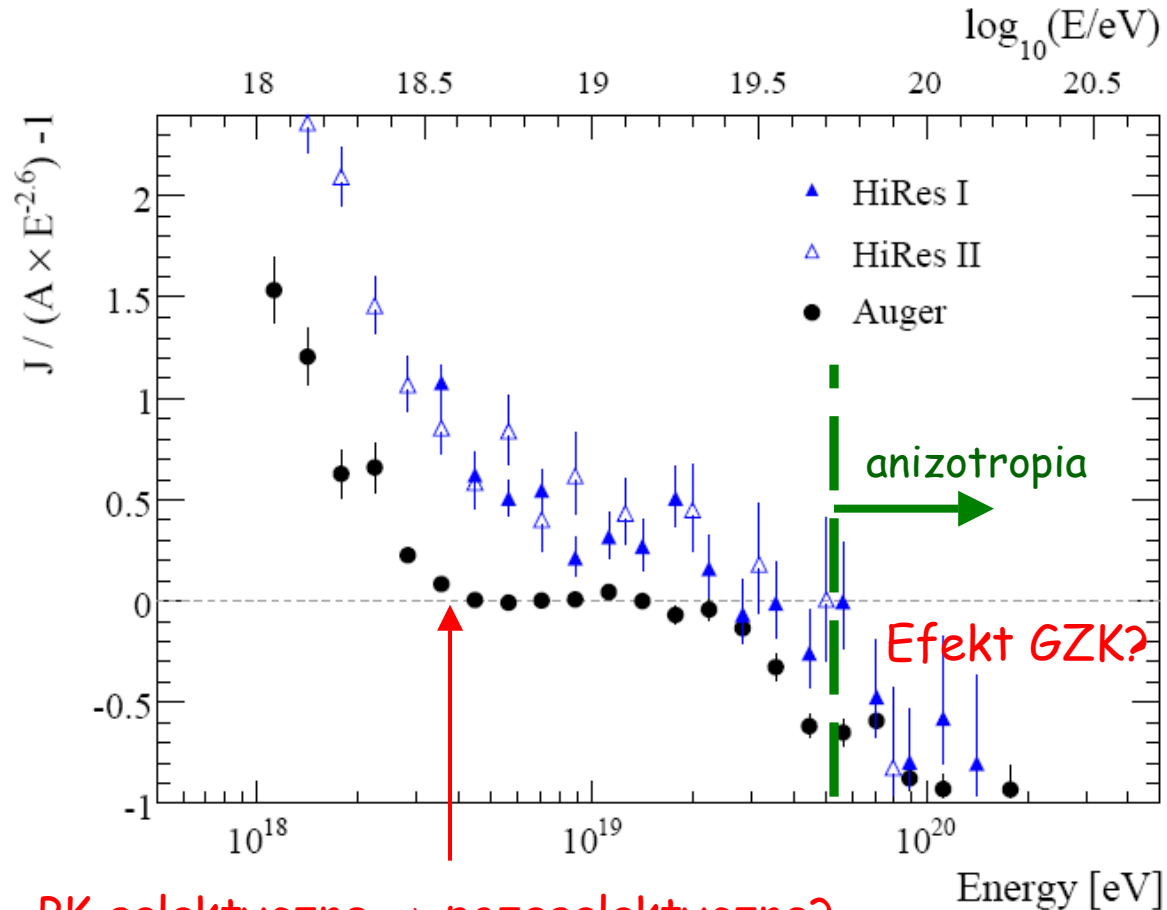
# Widmo energii 2009



PK galaktyczne → pozagalaktyczne?

Źródła pozagalaktyczne przy najwyższych energiach

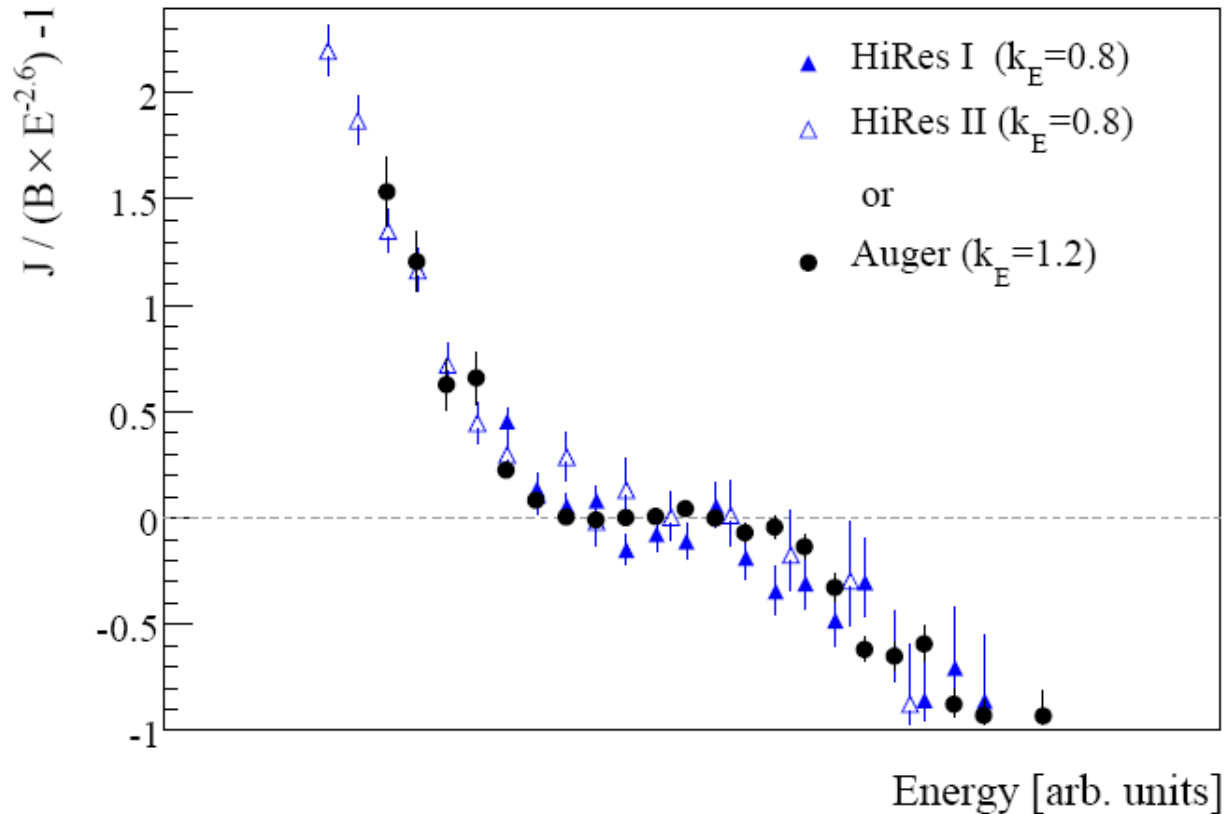
# Widmo energii 2009



Źródła pozagalaktyczne przy najwyższych energiach



# Widmo energii 2009

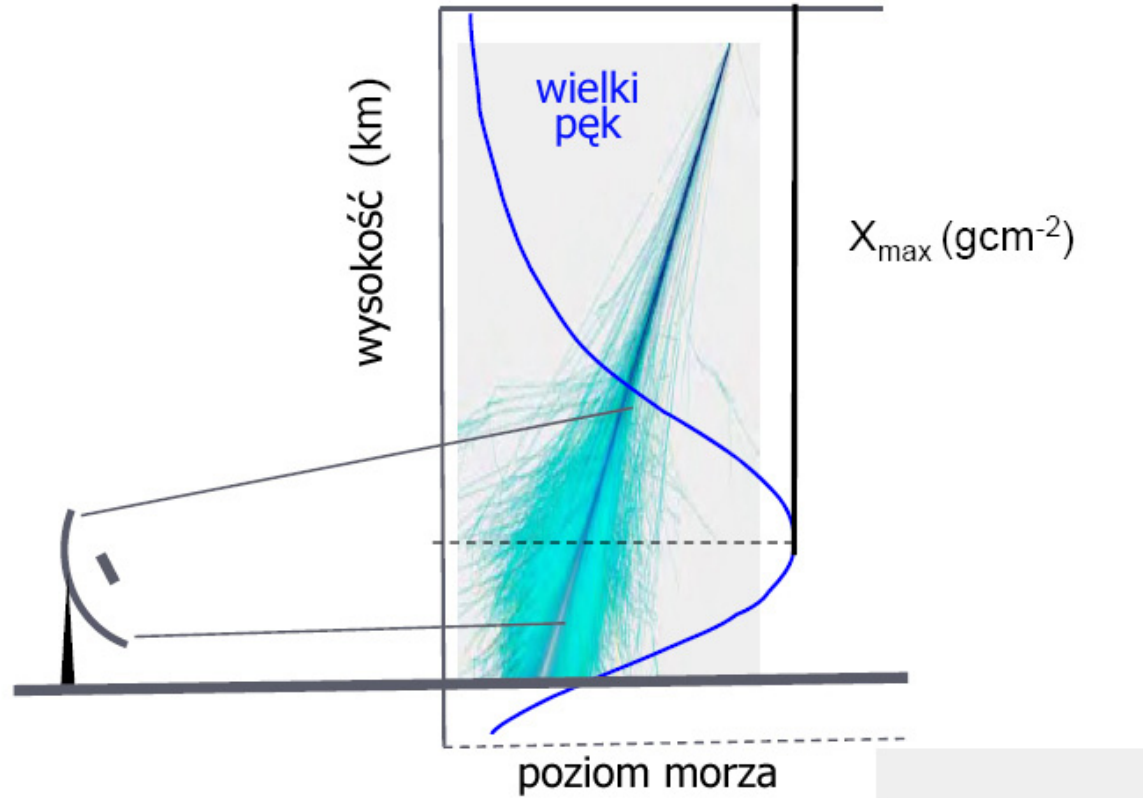


Różnica widm zgodna z dokładnością pomiaru energii  $\sim 25\%$



**Skład**

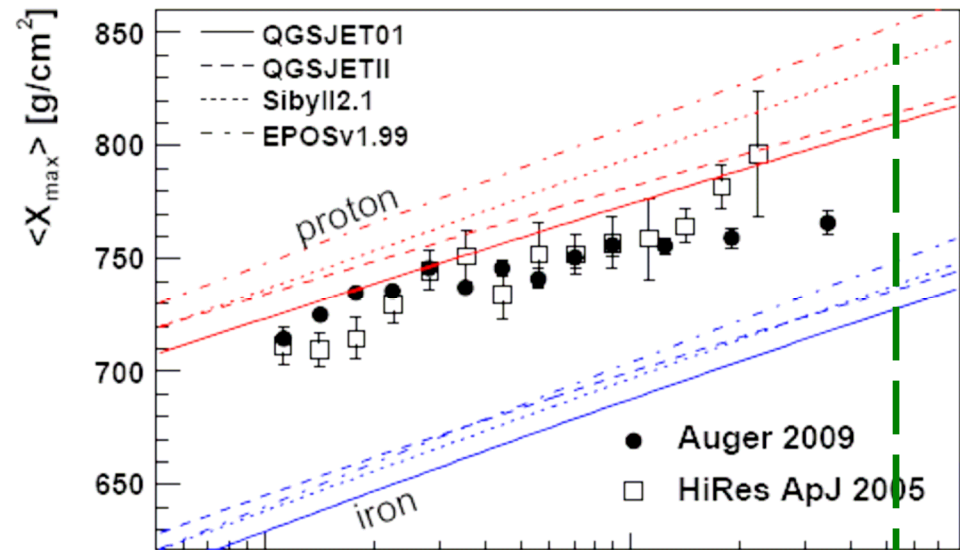
# Pomiar składu promieni kosmicznych



Wyznaczanie profilu podłużnego rozwoju pęku - pomiar  $X_{\max}$



# Skład promieni kosmicznych



Głębokość maksimum pęku w funkcji energii

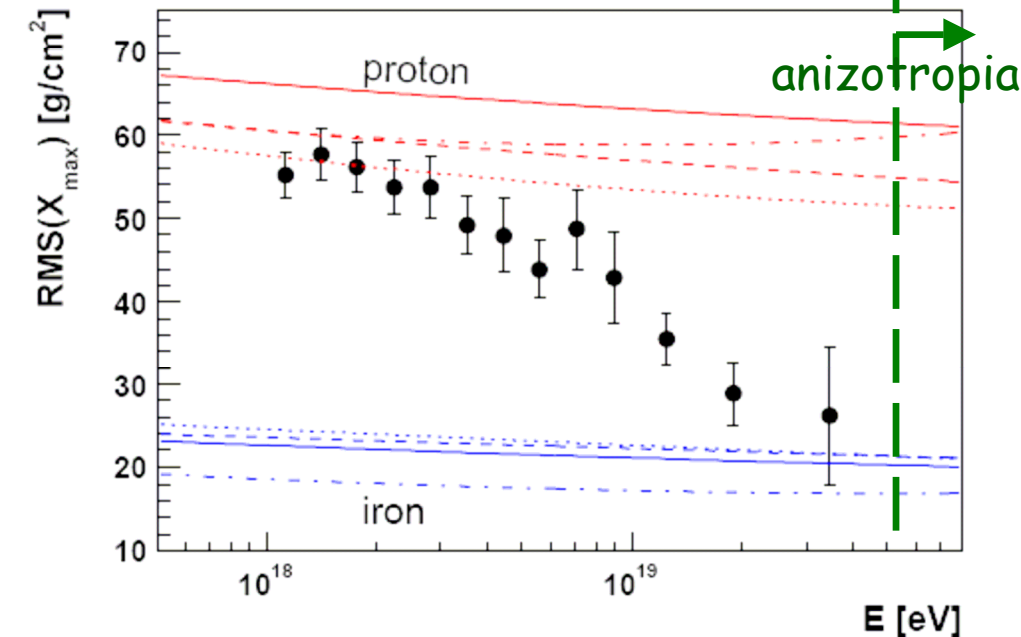
Duży przekrój czynny i duża krotność przy wysokich energiach?

→ ciężkie jądra?

protony oddziałują jak ciężkie jądra?

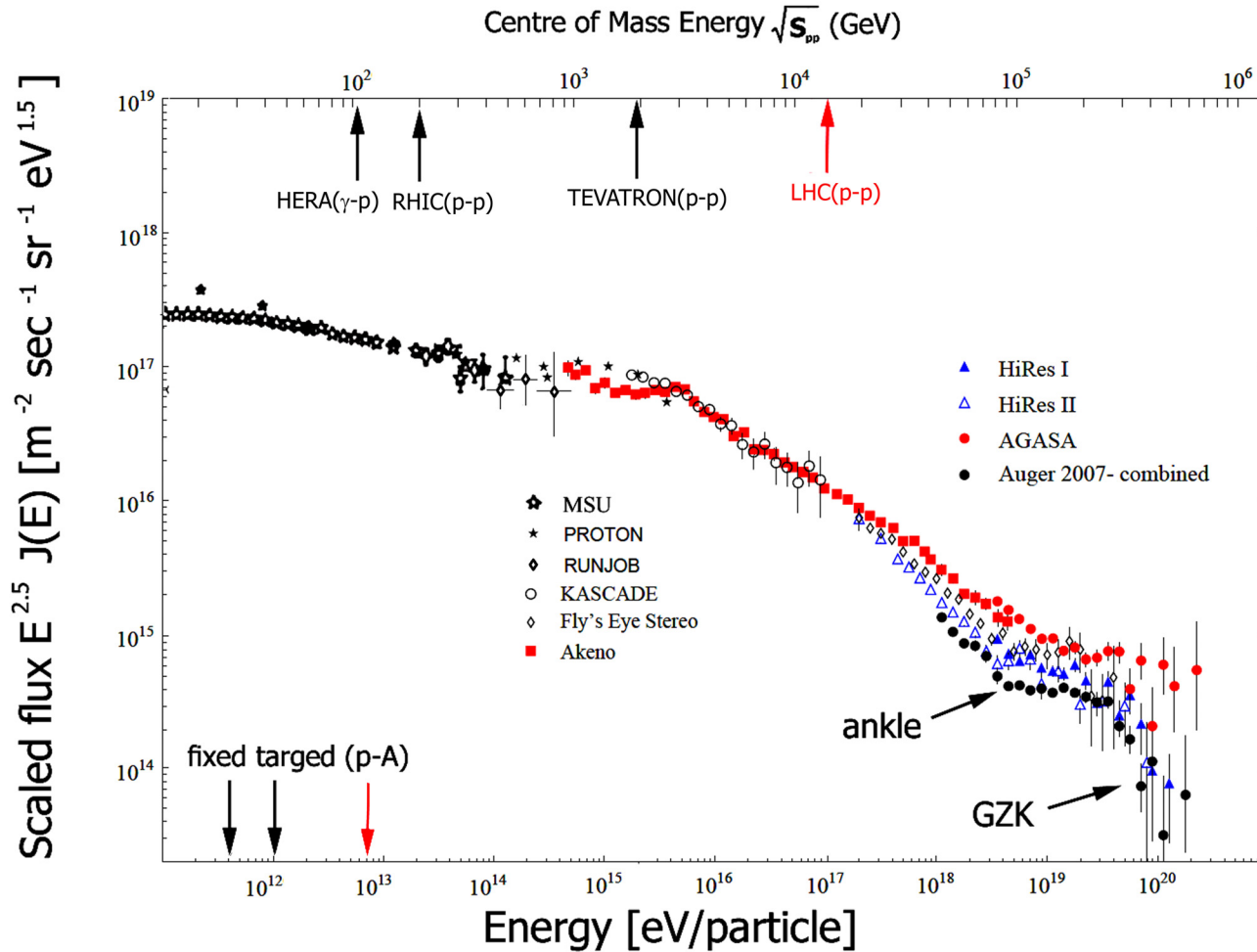
skala kątowna korelacji z AGN wskazuje na protony

Brak danych w zakresie energii GZK



# Energie akceleratorów i promieni kosmicznych

Cosmic ray energy spectrum - 2008

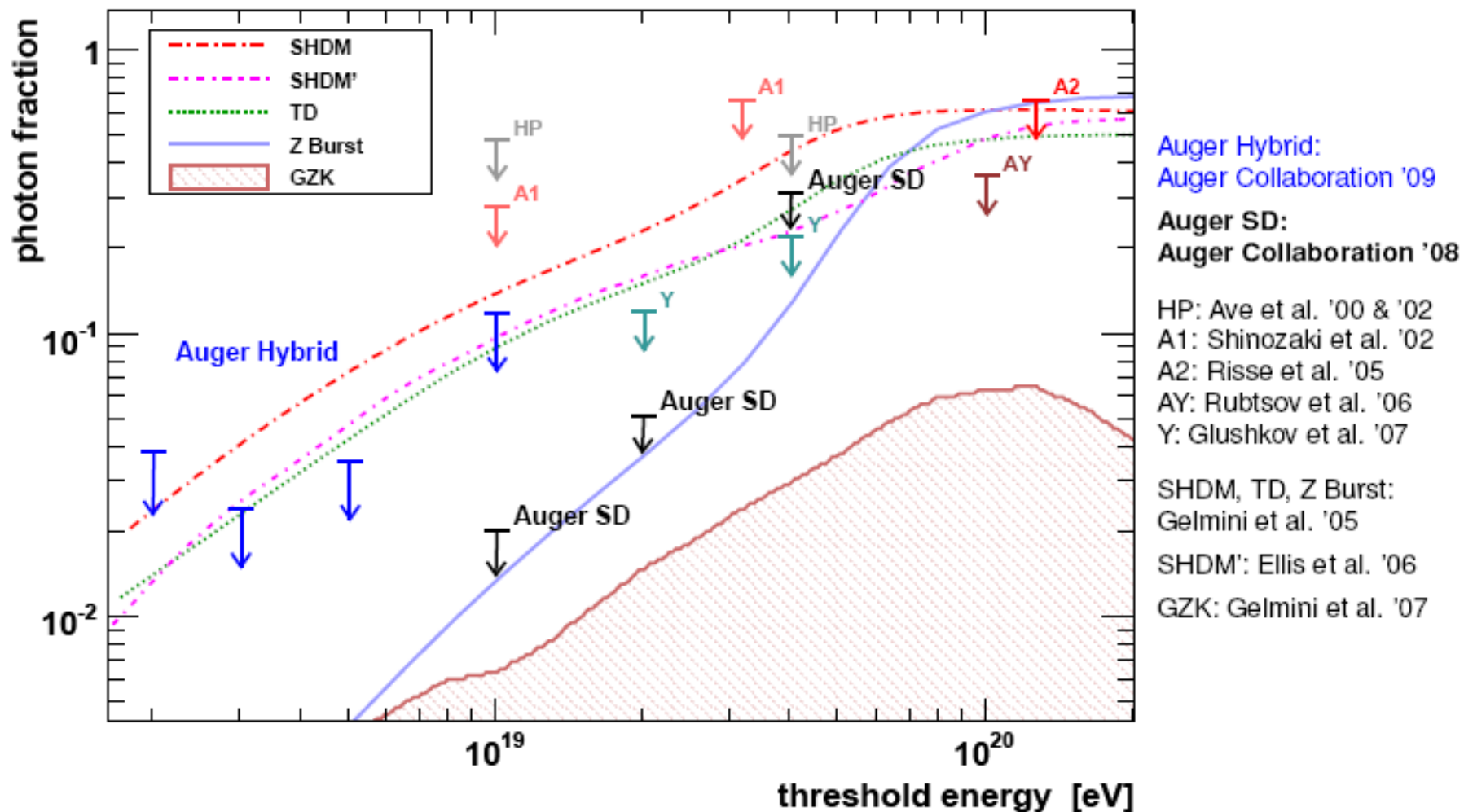


w badaniach wielkich pęków

trzeba **ekstrapolować** własności oddziaływań jądrowych do wysokich energii

# Fotony wśród promieni kosmicznych

Nie zidentyfikowano fotonów - wyznaczono górne limity strumienia  
→ Silne ograniczenia na egzotyczne modele pochodzenia PK





# Podsumowanie

Budowa południowej części Obserwatorium Pierre Auger ukończona w 2008r.

Kierunki przylotu promieni kosmicznych:

rozkład kierunków PK najwyższych energii nie jest izotropowy

aktywne jądra galaktyk: źródła? znaczniki źródeł?

Astronomia cząstek naładowanych:

nowe okno na pobliską część Wszechświata

badanie źródeł, pol magnetycznych

Widmo energii:

obcięcie GZK zaobserwowane → pobliskie źródła pozagalaktyczne?

Skład:

protony? ciężkie jądra?

→ zmiana własności oddziaływań jądrowych?

limity fotonów i neutrin → astrofizyczne pochodzenie PK?