

Astrofizyka promieni kosmicznych-3

Henryk Wilczyński

Propagacja promieni kosmicznych w Galaktyce

Promień Galaktyki: ~ 15 kpc
grubość dysku: 200 - 300 pc

W skali $\sim$ kpc

pole regularne, wzdłuż ramion spiralnych

$B \sim 2 - 3 \mu G$

w skali $\sim$ pc

obłoki magnetyczne - fluktuacje B

Niskie energie ($E < 10^{15}$ eV)

uwięzienie

„dyfuzja”

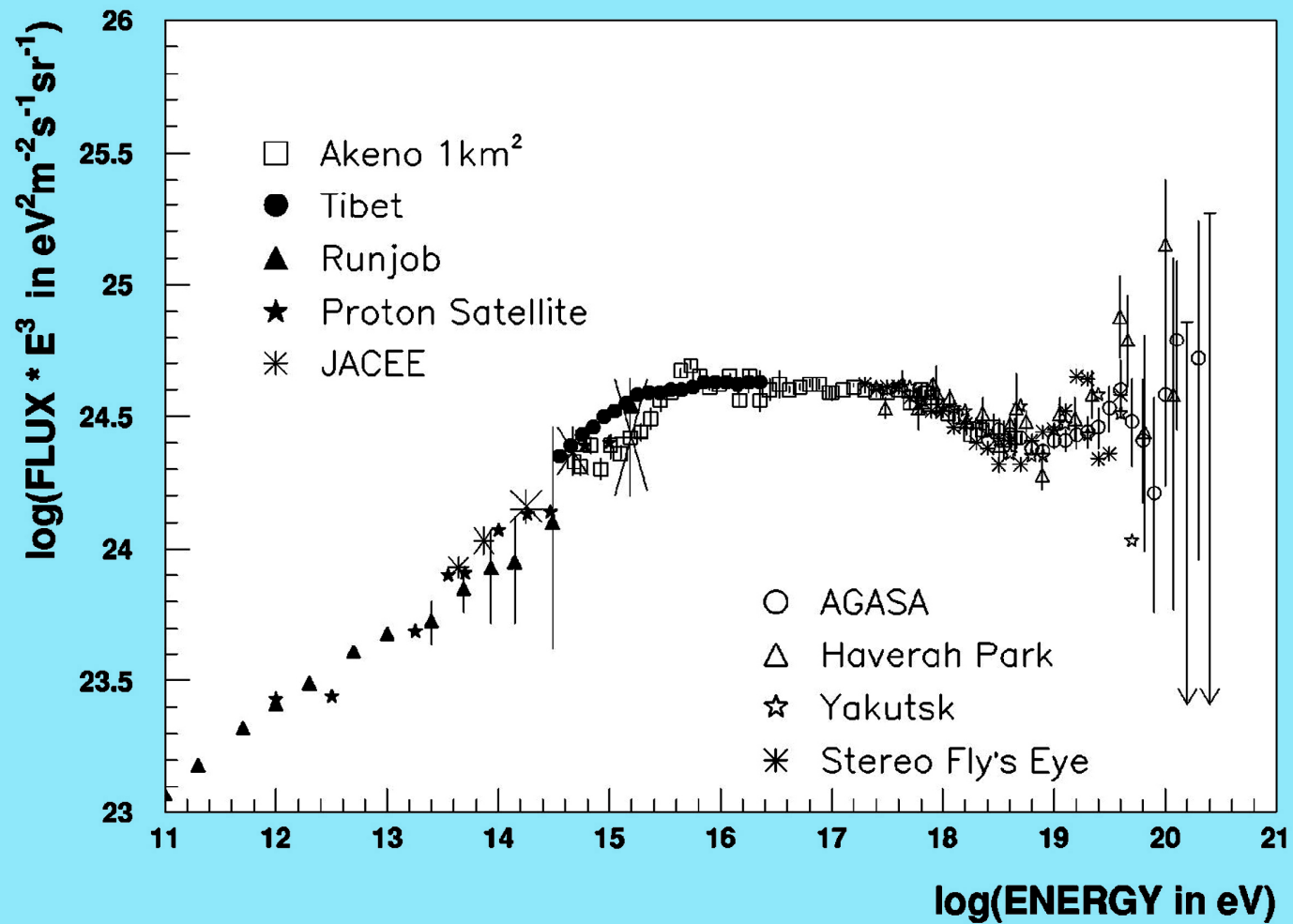
→ izotropia promieni kosmicznych

Wysokie energie ($E > 10^{18}$ eV)

$$R_{\text{kpc}} \approx E_{18} / (Z B_{\mu G})$$

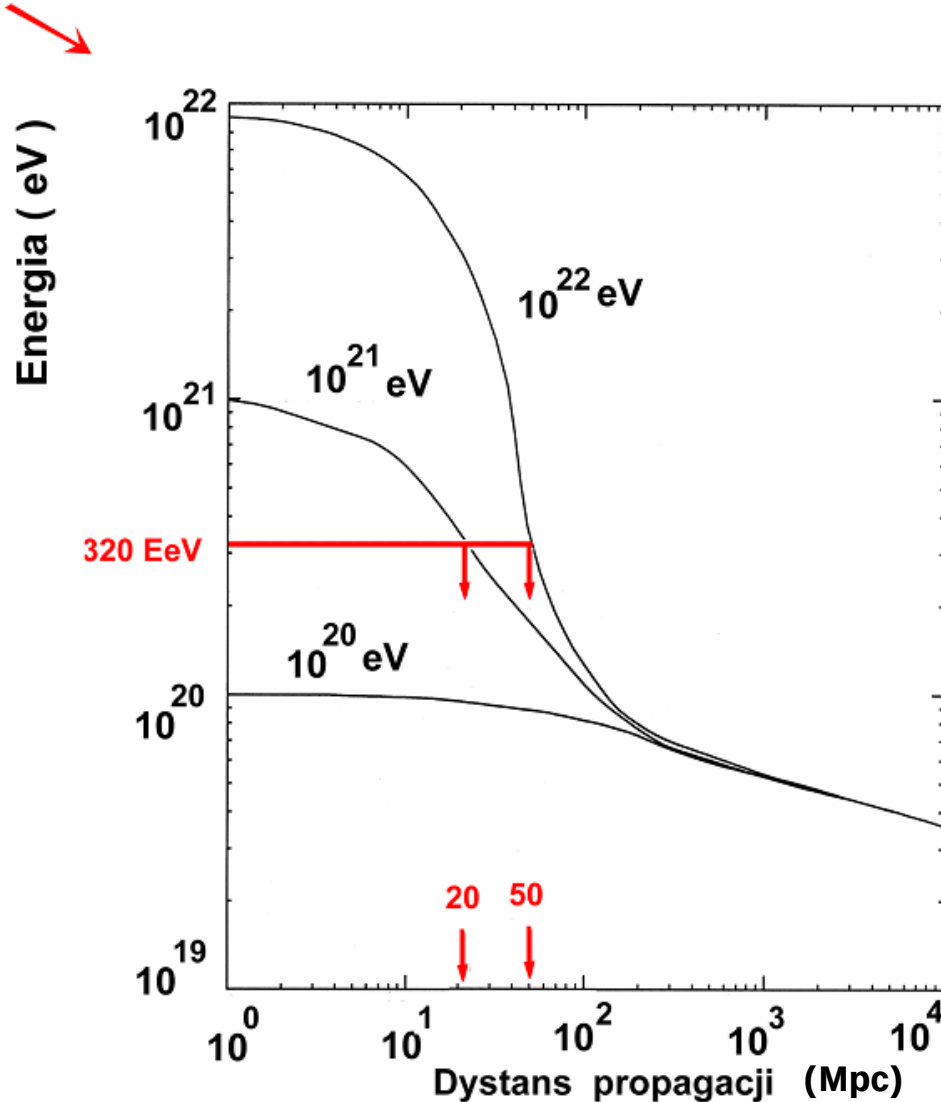
→ pozagalaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o $E > 10^{19}$ eV

WIDMO PROMIENI KOSMICZNYCH

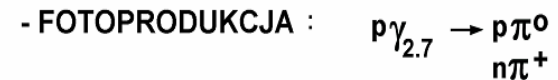


Obcięcie Greisena-Zatsepina-Kuzmina (GZK)

Energia
u źródła

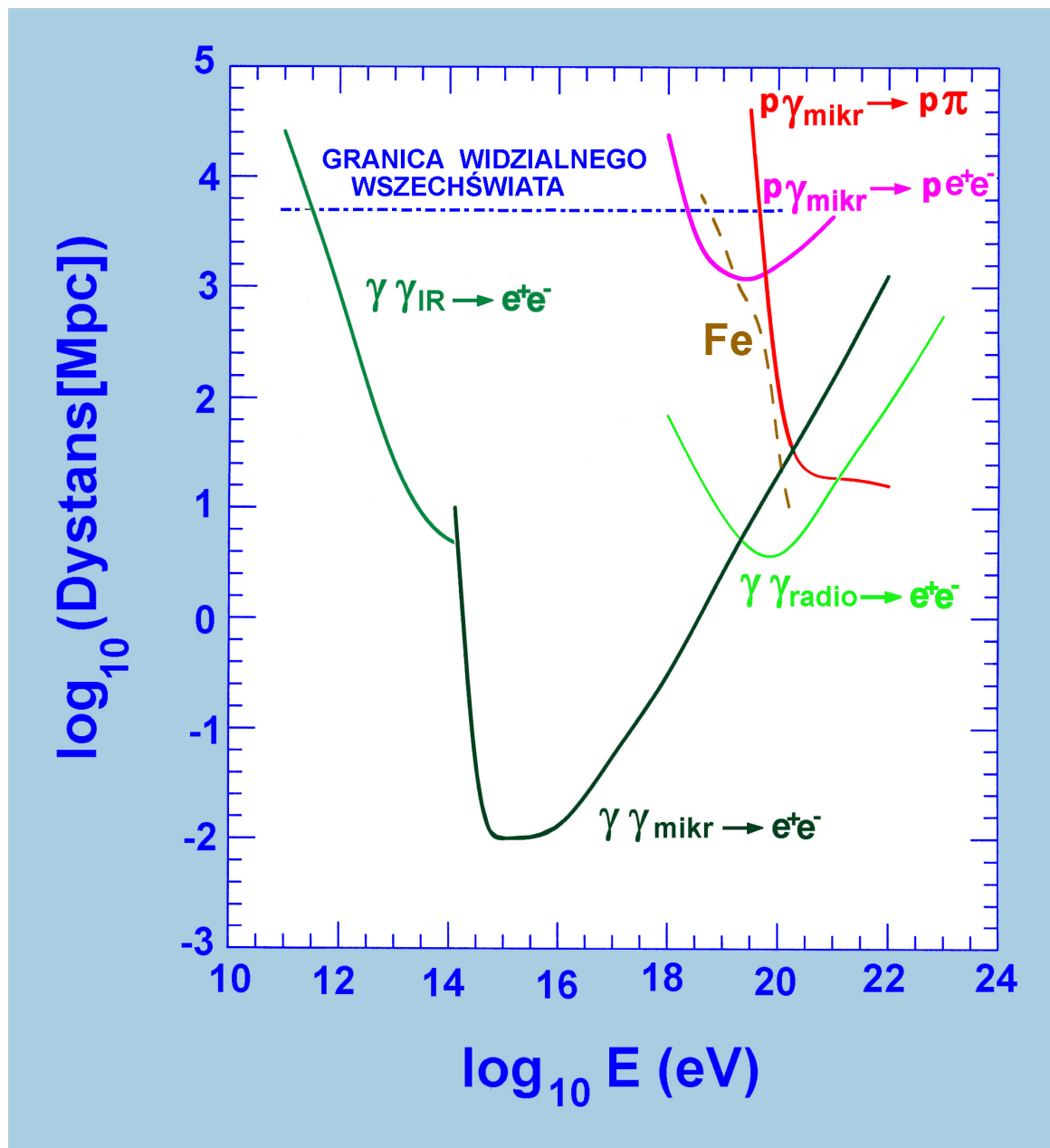


ODDZIAŁYWANIA Z MIKROFALOWYM PROMIENIOWANIEM
RELIKTOWYM PRZY $E \gtrsim 5 \cdot 10^{19}$ eV



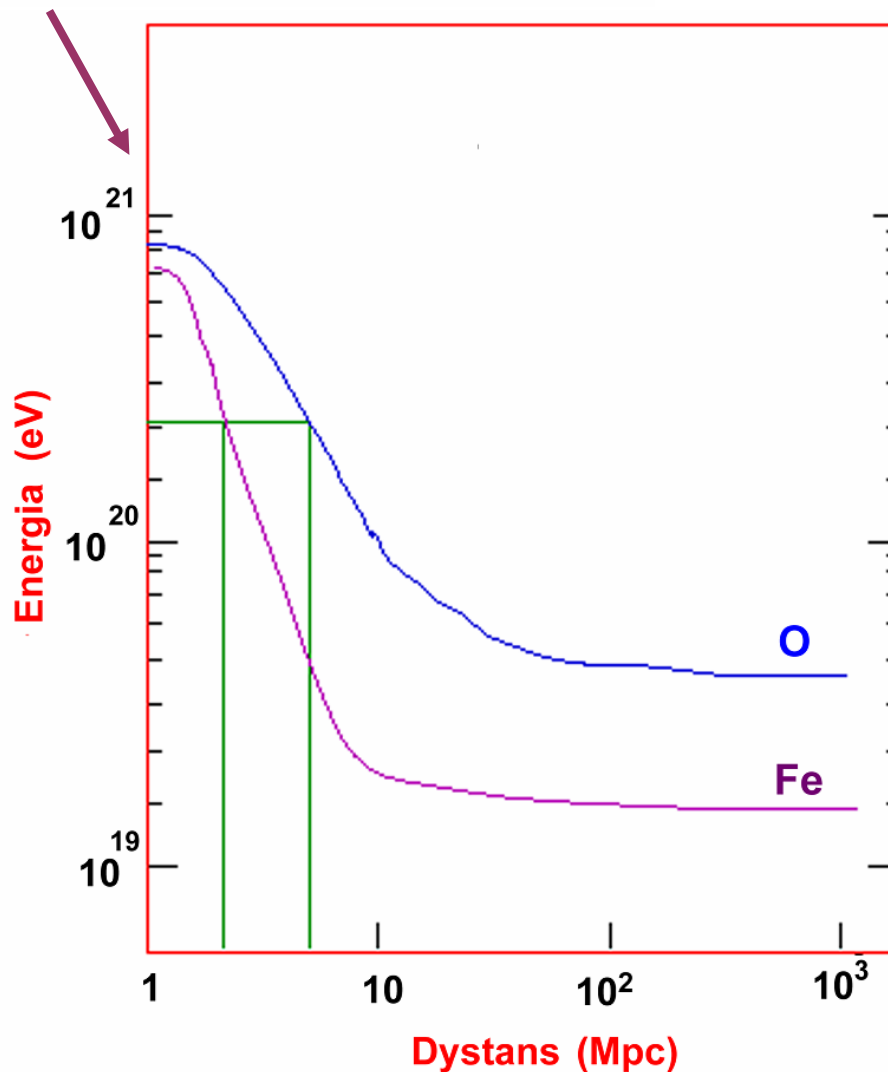
Dla $E > 100$ EeV źródła muszą być bliżej
niż ~ 50 Mpc

Droga attenuacji protonów i fotonów we Wszechświecie



Efekt GZK dla jąder

Energia przeżywającego jądra
(Energia początkowa $E_0 = 1 \text{ ZeV}$)



Fotofragmentacja

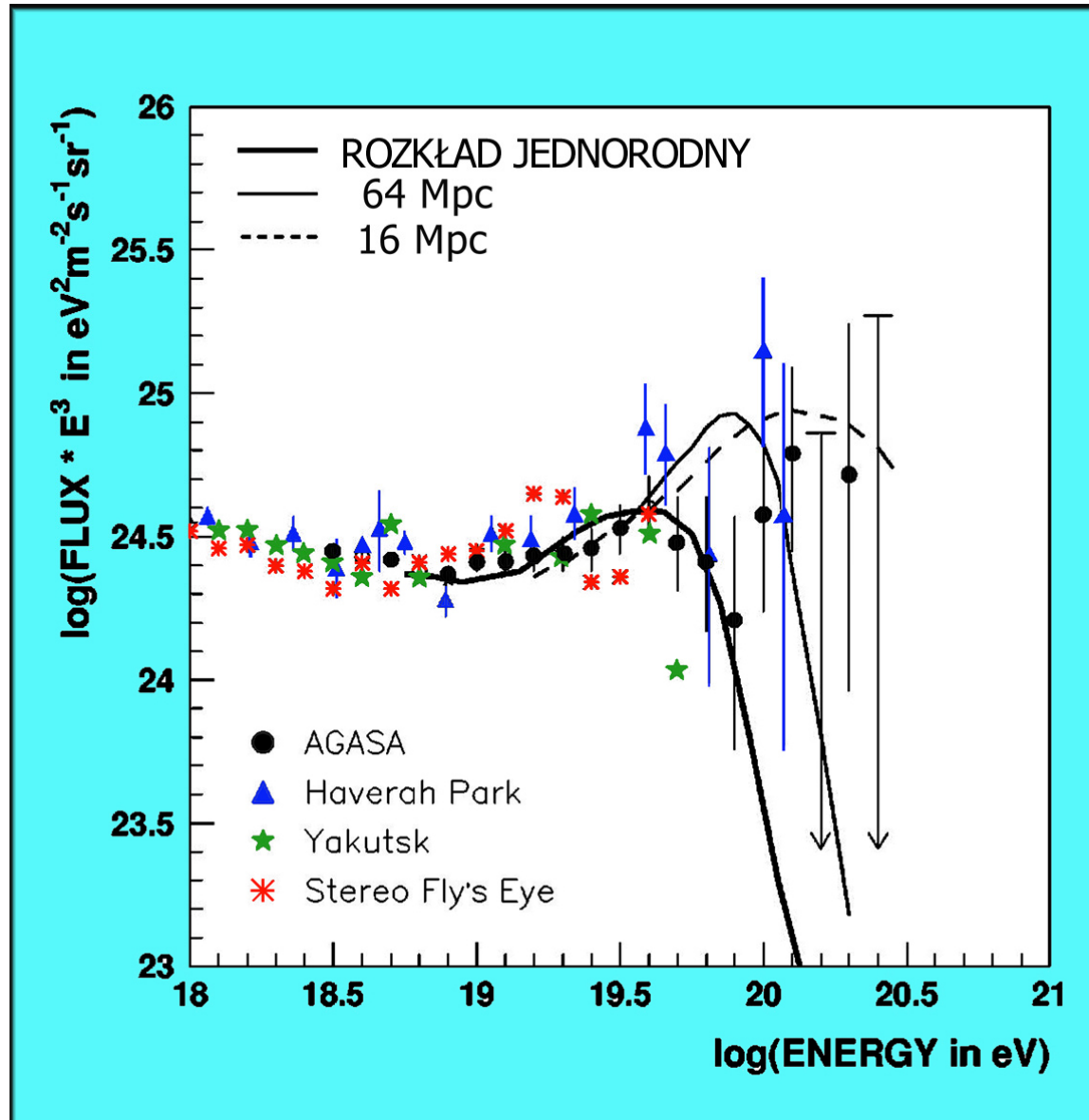


strata ~ 4 nukleony/Mpc

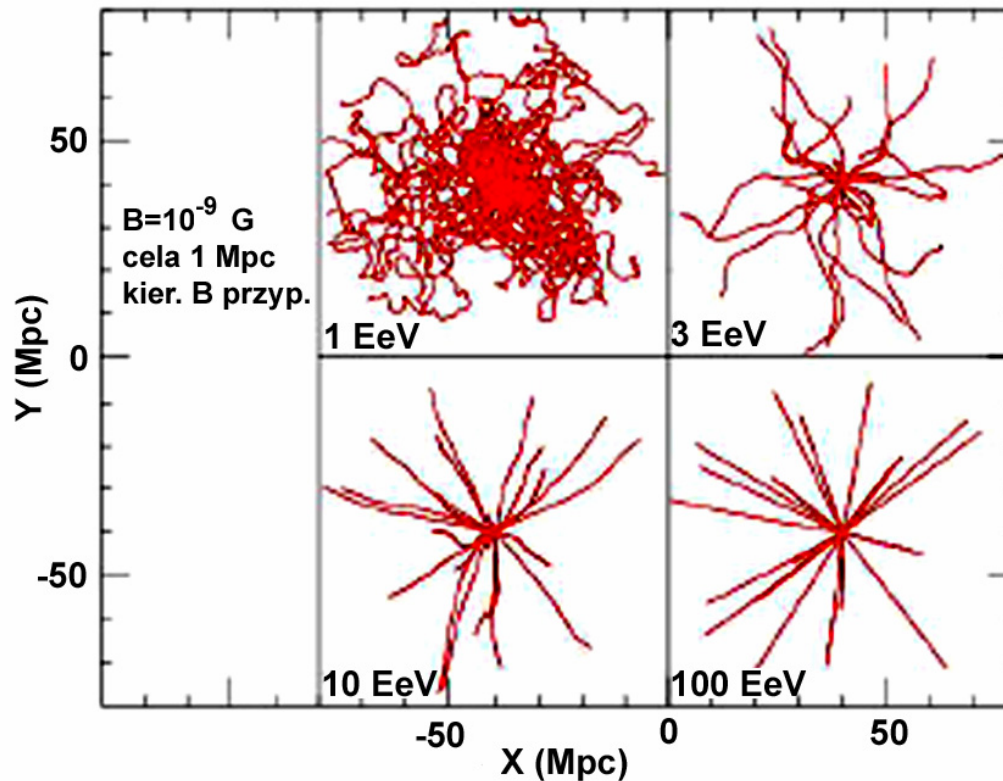
nowa analiza

$$E_{GZK}(3K) \sim 200 \text{ EeV}$$

Efekt GZK w widmie energii



Propagacja poza Galaktyką



rzut trajektorii 3D
na płaszczyznę XY

Odchylenie toru przy skrajnie wysokich energiach

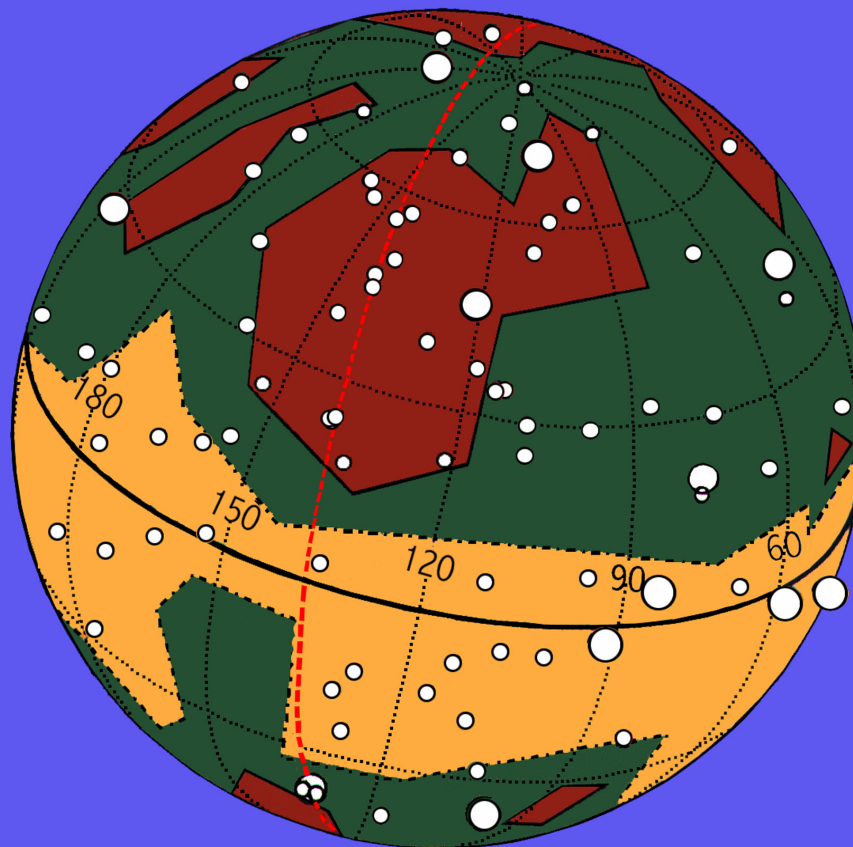
$$\Theta \approx 0.3^\circ (L_{\text{Mpc}} Z B_{\text{nG}}) / E_{20}$$

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

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

⇒ kierunek do źródła - „astronomia cząstek naładowanych”!

ROZKŁAD KĄTOWY PROMIENI KOSMICZNYCH NAJWYŻSZYCH ENERGII



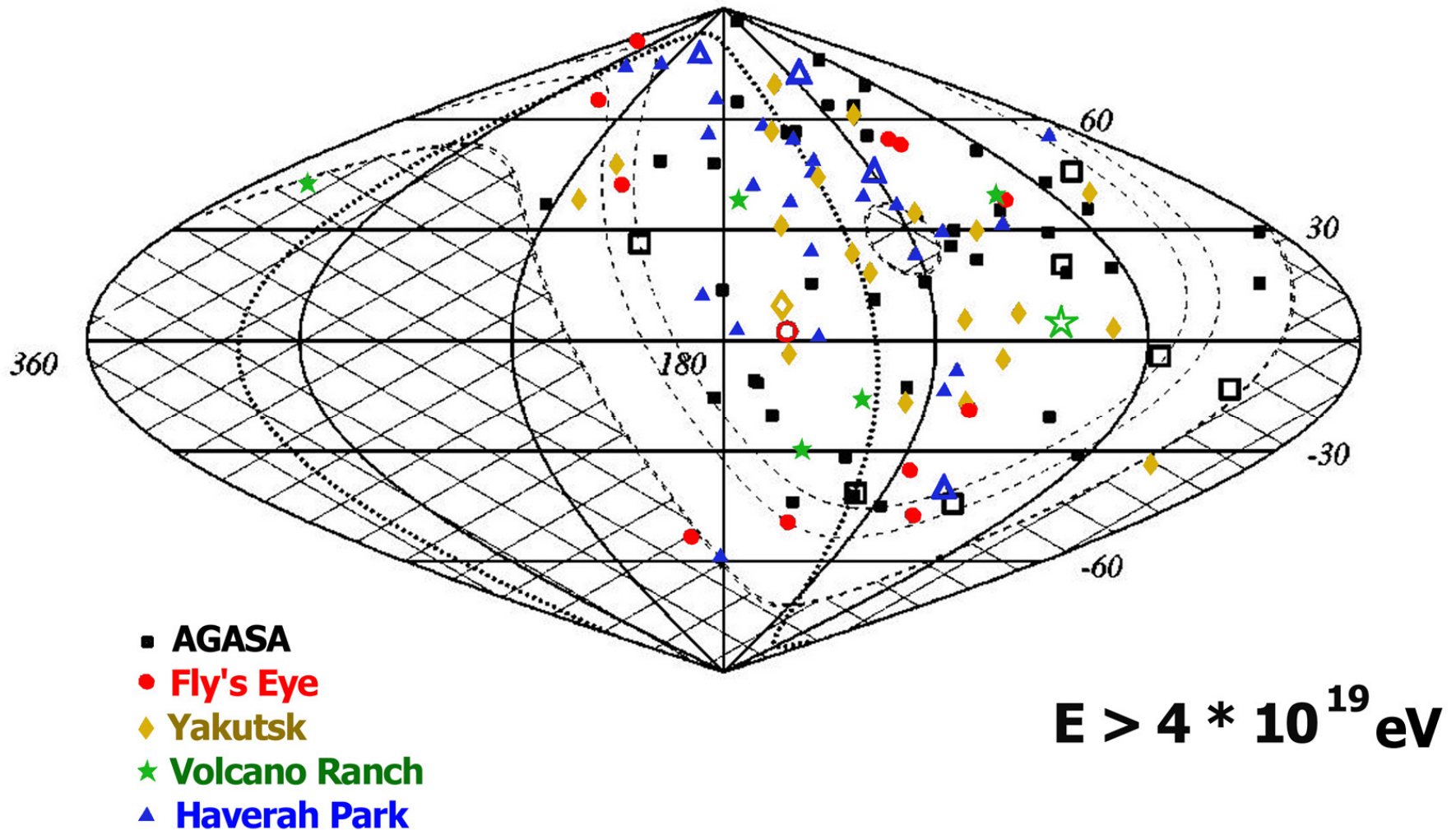
■ Duża koncentracja
bliskich galaktyk

■ Obszary puste

• $E > 40 \text{ EeV}$

● $E > 100 \text{ EeV}$

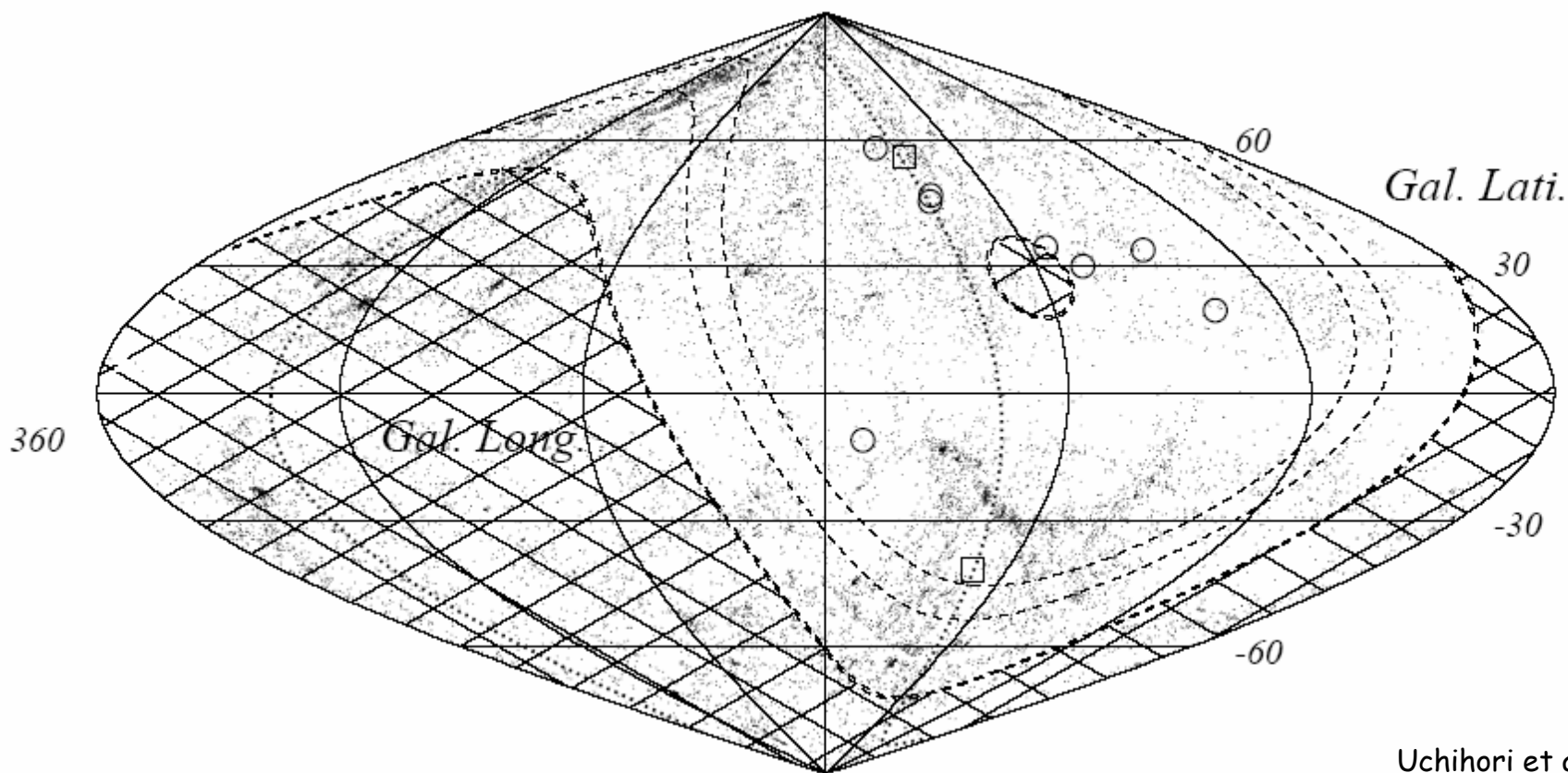
Rozkład kierunkowy promieni kosmicznych



Izotropia w dużej skali – pochodzenie pozagalaktyczne?

Rozkład pobliskich galaktyk

Galaktyki w odległościach < 100 Mpc



Uchihori et al. 1999

Nie widać korelacji kierunków z rozkładem galaktyk w odległościach < 100 Mpc, ale obserwuje się korelacje w małej skali $\Delta\Theta < 2.5^\circ$

Kierunki przylotu

Dane z 4 eksperymentów:

92 przypadki o energiach powyżej 40 EeV

AGASA 47 przypadków

Haverah Park 27

Jakuck 12

Volcano Ranch 6

w tym

12 par przypadków w kącie $< 0.3^\circ$

(prawdop. 1.5 % z rozkładu
jednorodnego)

2 trójki

(1.4 %)

Jeśli ich kierunki wskazują położenia źródeł,
międzygalaktyczne pola magnetyczne muszą być znacznie słabsze, niż
górna granica 1 nG, wyznaczona z obserwacji astronomicznych!

Przypadek najwyższej energii

Oko Muchy - 15 paźdz. 1991

$$E = 320 \pm 90 \text{ EeV}$$

kierunek:

$$\alpha = 85.2^\circ \quad \delta = 48.0^\circ \quad (\text{Woźnica})$$

$$l_G = 163.4^\circ \quad b_G = 9.6^\circ$$

Pochodzenie galaktyczne?

w polu mgł Galaktyki $R_L \sim 150 \text{ kpc}$ (p)
6 kpc (Fe)

Brak kandydata na źródło w Galaktyce

→ spoza Galaktyki

Neutron?

droga rozpadu $D \sim 10 E_{18} \text{ kpc}$
(dla $E=300 \text{ EeV}$ $D \sim 3 \text{ Mpc}$)

→ nie neutron

Przypadek najwyższej energii

Foton?

konwersja $\gamma \rightarrow e^+e^-$ w polu magnetycznym:

zależy od

$$\kappa = (E_\gamma / 2m_e c^2) (B_\dagger / B_{cr}) \quad \text{gdzie } B_{cr} = 4.4 \cdot 10^{13} \text{ G}$$

konwersja, gdy $\kappa = (B_\dagger / 0.1 \text{ G}) (E_\gamma / 100 \text{ EeV}) > 1$

W magnetosferze Ziemi

dla $B \sim 0.3 \text{ G}$, $E = 100 \text{ EeV}$ $\lambda_{konw} \sim 47 \text{ km}$

→ konwersja

$\lambda_{synchr} \sim 6 \text{ km}$ → pr. hamowania

Do atmosfery dociera kaskada elektronów i fotonów o niższych energiach

W przestrzeni międzygalaktycznej

$\gamma\gamma_{radio} \rightarrow e^+e^-$ ($\lambda \sim 6 \text{ Mpc}$)

jeśli pole magnetyczne $B < 10^{-11} \text{ G}$

odwrotny efekt Comptona → regeneracja fotonów

wysokiej energii

dla $B > 10^{-11} \text{ G}$

promieniowanie synchrotronowe elektronów - kaskada

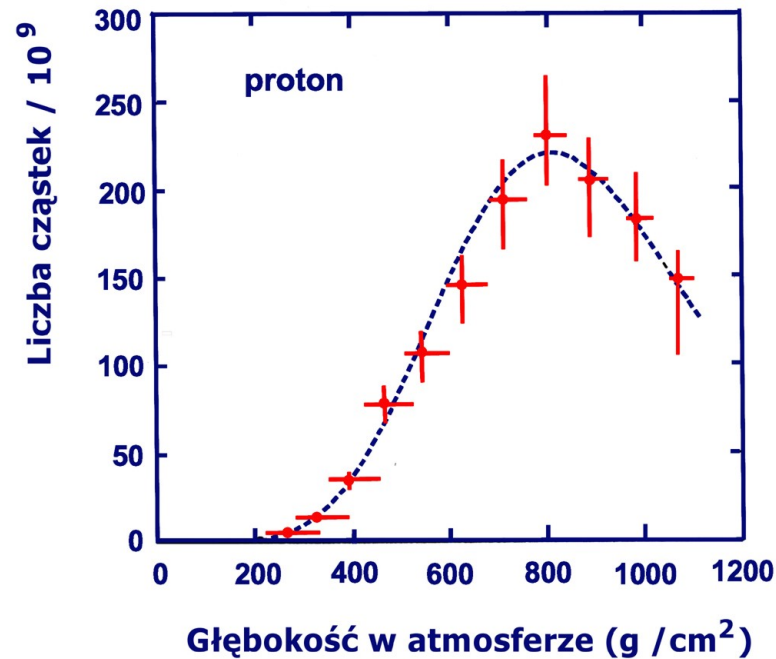
e/γ niższych energii

→ nie foton

Przypadek najwyższej energii

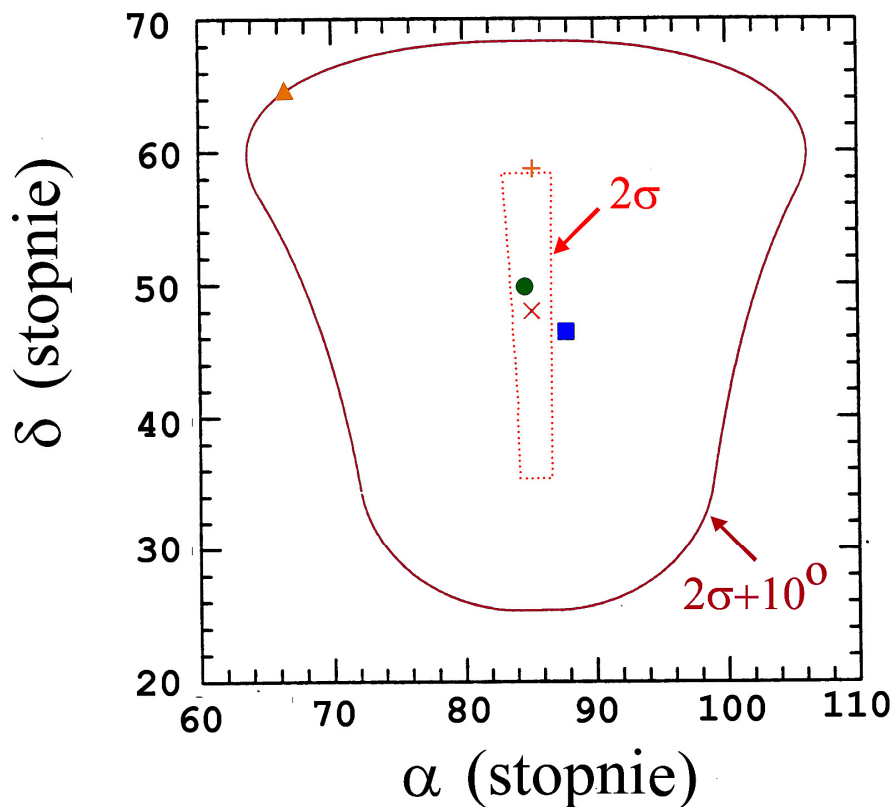
Proton?

profil rozwoju pędu



Obcięcie GZK $\rightarrow$ odległość do źródła < 50 Mpc

Możliwe źródła przypadku 320 EeV ?



× kierunek przylotu

● kwazar 3C 147 ($d \sim 2.2$ Gpc)

■ galaktyka Seyferta MCG 8-11-11
(brak pr. kosm. niższych en.)

+ galaktyka UCG 03351 („megamaser”;
słaba radiowo)

▲ galaktyka NGC 1569 (słaba)

Aktywna galaktyka M 87 ($d \sim 20$ Mpc) odległa o 88 deg od kierunku
przypadku 320 EeV

Radiogalaktyka Cen A ($d \sim 3.5$ Mpc) odległa o 134 deg

Gdzie jest źródło?

Galaktyka jako spektrometr magnetyczny

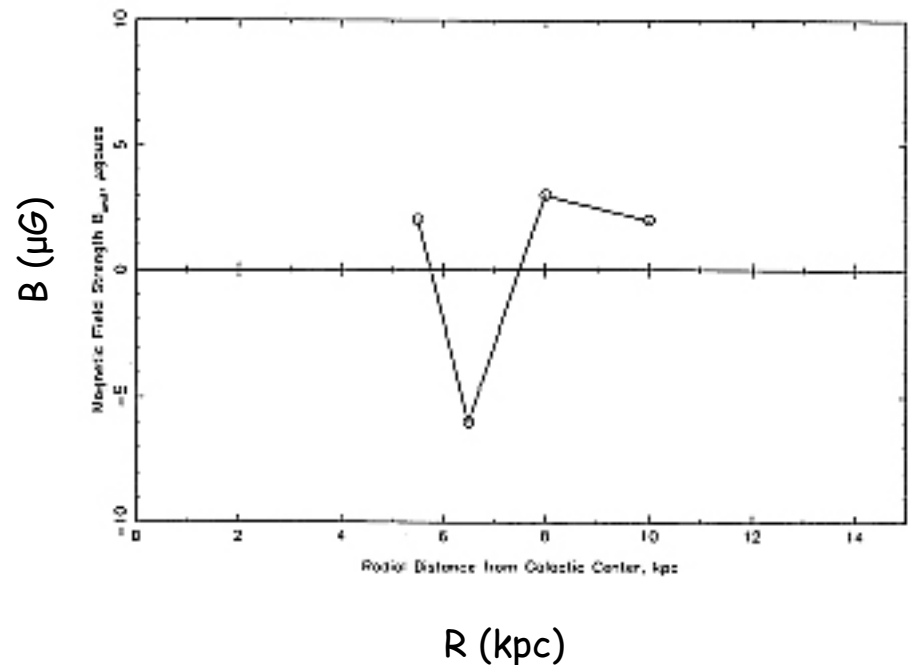
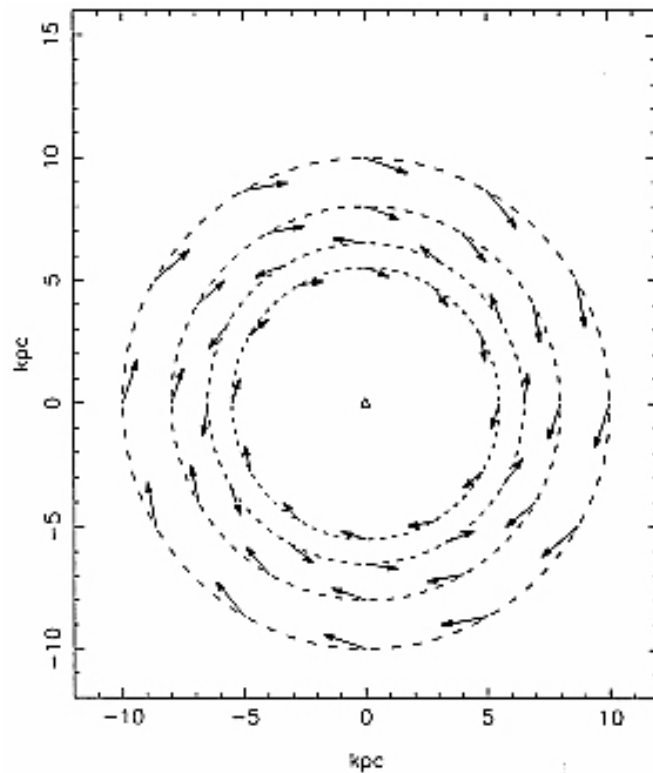
Pole magnetyczne Galaktyki

model Valee:

pole regularne ~ koncentryczne,

$$B(z) = B_0 \exp(-(z/0.8 \text{ kpc})^2)$$

pola nieregularne: długość koherencji ~ 100 pc



Galaktyka jako spektrometr magnetyczny

AGASA

Pary przypadków odległych o $< 2.5^\circ$

Para o najwyższych energiach:

E	l_G	b_G	b_{SG}	ρ_μ/S	data
210	131	-41	0.4	0.08	93/12/03
51	130	-42	1.1	0.14	95/10/29

- z płaszczyzny Supergalaktyki (ale z obszaru o małej koncentracji radiogalaktyk)
- hadrony, nie fotony
- spoza Galaktyki

Założenie:

cząstki w parze pochodzą ze wspólnego źródła

energie $E_1/E_2 = 4$, wspólny kierunek

→ ładunki $Z_1/Z_2 = 4$?

(mało prawdopodobne - fragmentacja!)

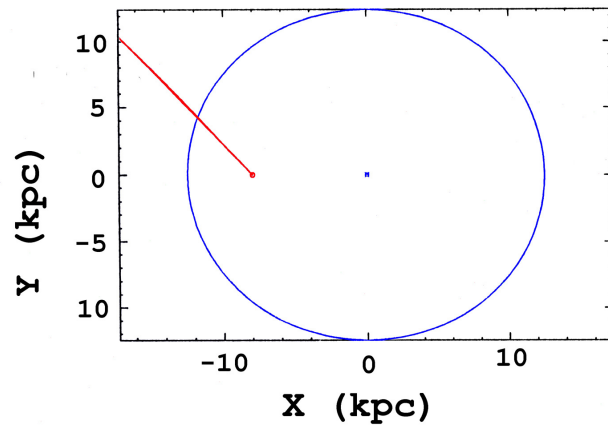
→ $Z_1 = Z_2$

Galaktyka jako spektrometr magnetyczny

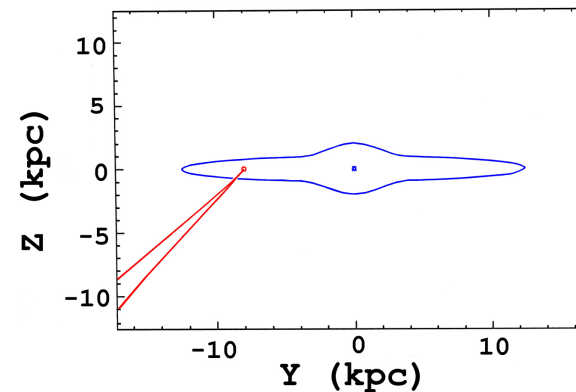
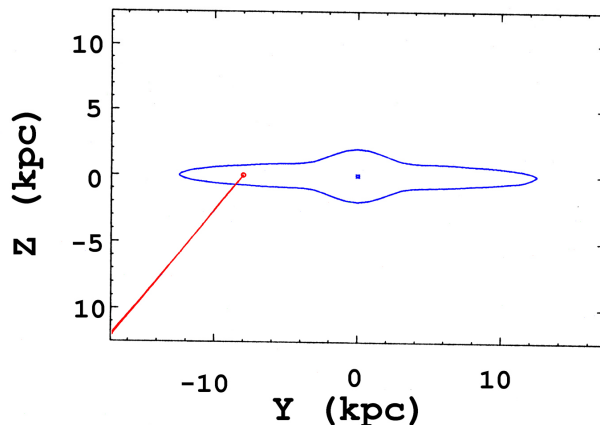
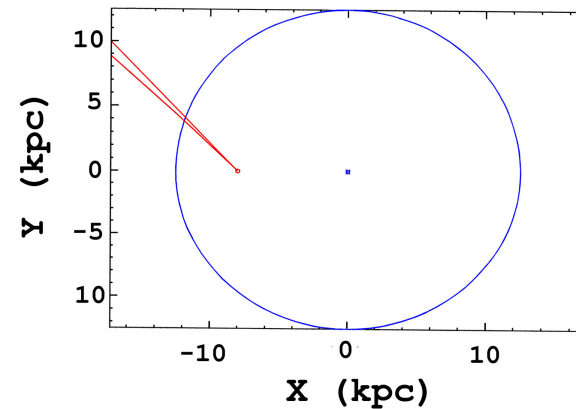
AGASA

kierunki pary przypadków o najwyższych energiach poza Galaktyką

Z=1



Z=2



Galaktyka jako spektrometr magnetyczny

Śledzenie cząstek pierwotnych wstecz:

kąt rozbieżności pary poza Galaktyką:

0.9° jeśli protony

3.3° He

16.1° C

→ $Z \leq 2$

Pola pozagalaktyczne

długość koherencji = 1 Mpc

kąt rozproszenia cząstki

$\Theta \approx 3.6^\circ (D / 50 \text{ Mpc})^{1/2} (\lambda / 1 \text{ Mpc})^{1/2} (B / 1 \text{ nG}) (100 \text{ EeV} / E)$

Obserwowany kąt otwarcia pary → pola międzygalaktyczne $B < 1 \text{ nG}$

Jeśli $Z_1 = Z_2$

Cząstka 51 EeV odchyła się o $< 2^\circ$ od cząstki 210 EeV

→ 210 EeV odchyła się od kierunku źródła o $< 1^\circ$

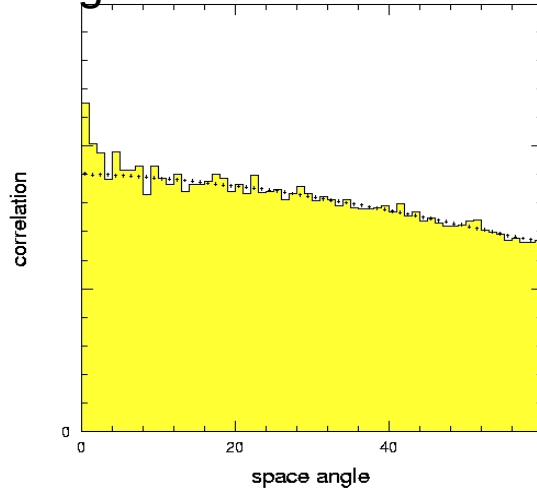
Źródło?

zderzające się galaktyki N 672 i U 1249 ($l_G = 138$, $b_G = -34$) odległe o 8.2° !

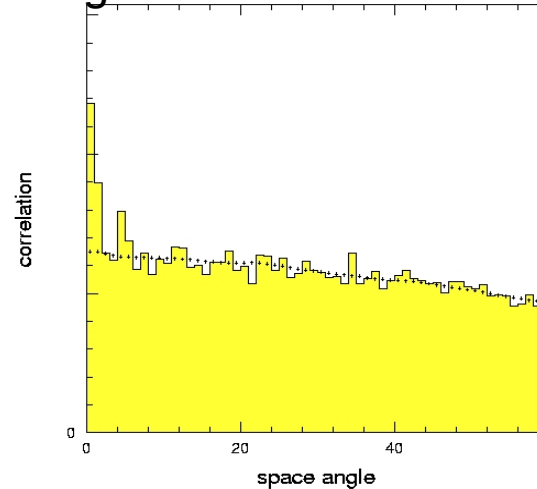
Autokorelacja kierunków

AGASA: pary przypadków $\Delta\Theta < 2.5^\circ$

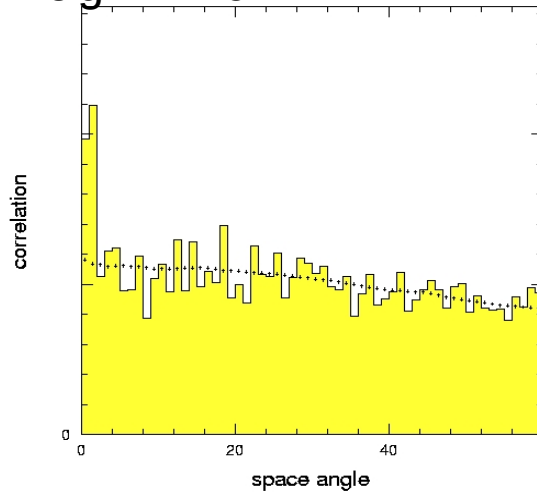
Log E > 19.0 AGASA 894



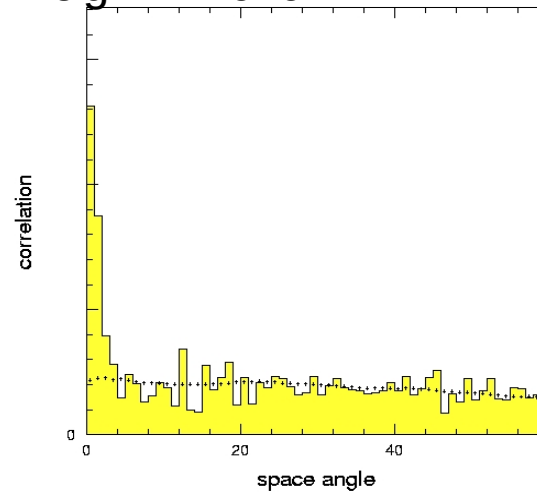
Log E > 19.2 AGASA 375



Log E > 19.4 AGASA 161



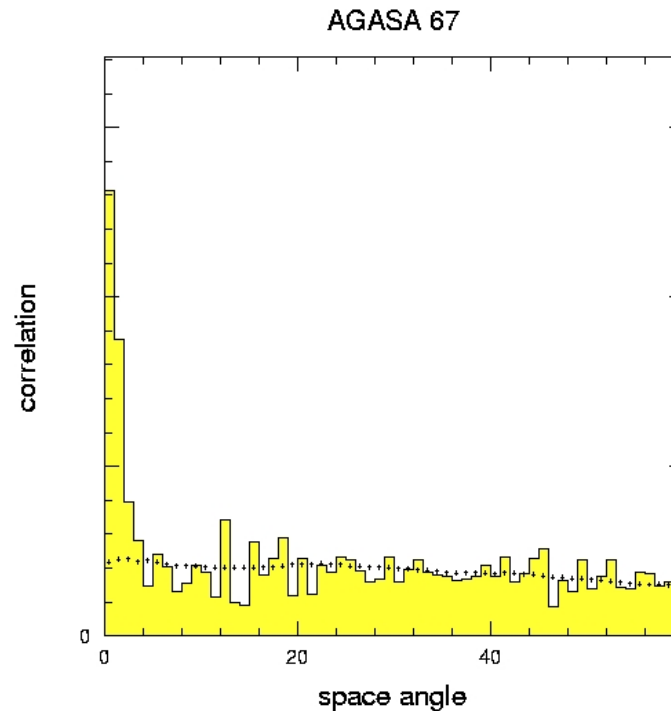
Log E > 19.6 AGASA 67



Autokorelacja kierunków

Pary przypadków AGASA $E > 40$ EeV: korelacja 3.2σ

→ źródła punktowe?



Niepewna interpretacja, znaczącość statystyczna?
Brak korelacji w danych HiRes

→ „astronomia cząstek naładowanych” nie działa ?

Hipotetyczne źródła promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii

Scenariusze „bottom-up” (przyspieszanie cząstek)

- przyspieszanie stopniowe w dużych obiektach
(proces Fermiego I rzędu)
np.: radiogalaktyki, zderzenia galaktyk, gromady galaktyk
- silne pola elektromagnetyczne wokół zwartych obiektów
np.: pulsary (magnetary!)
- źródła błysków gamma (relatywistyczne fale uderzeniowe)

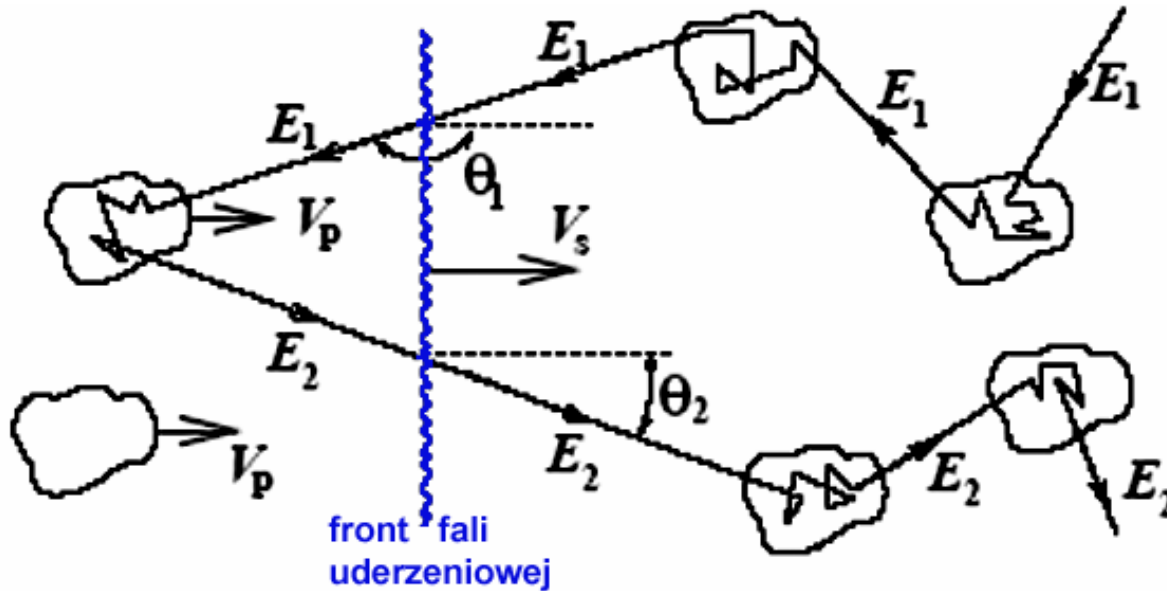
Akceleracja

Proces Fermiego I rzędu

Przyspieszanie na froncie fali uderzeniowej

$$\Delta E = \xi E$$

$$E_n = E_0(1+\xi)^n = E_0(1+\xi)^{t/\tau}$$

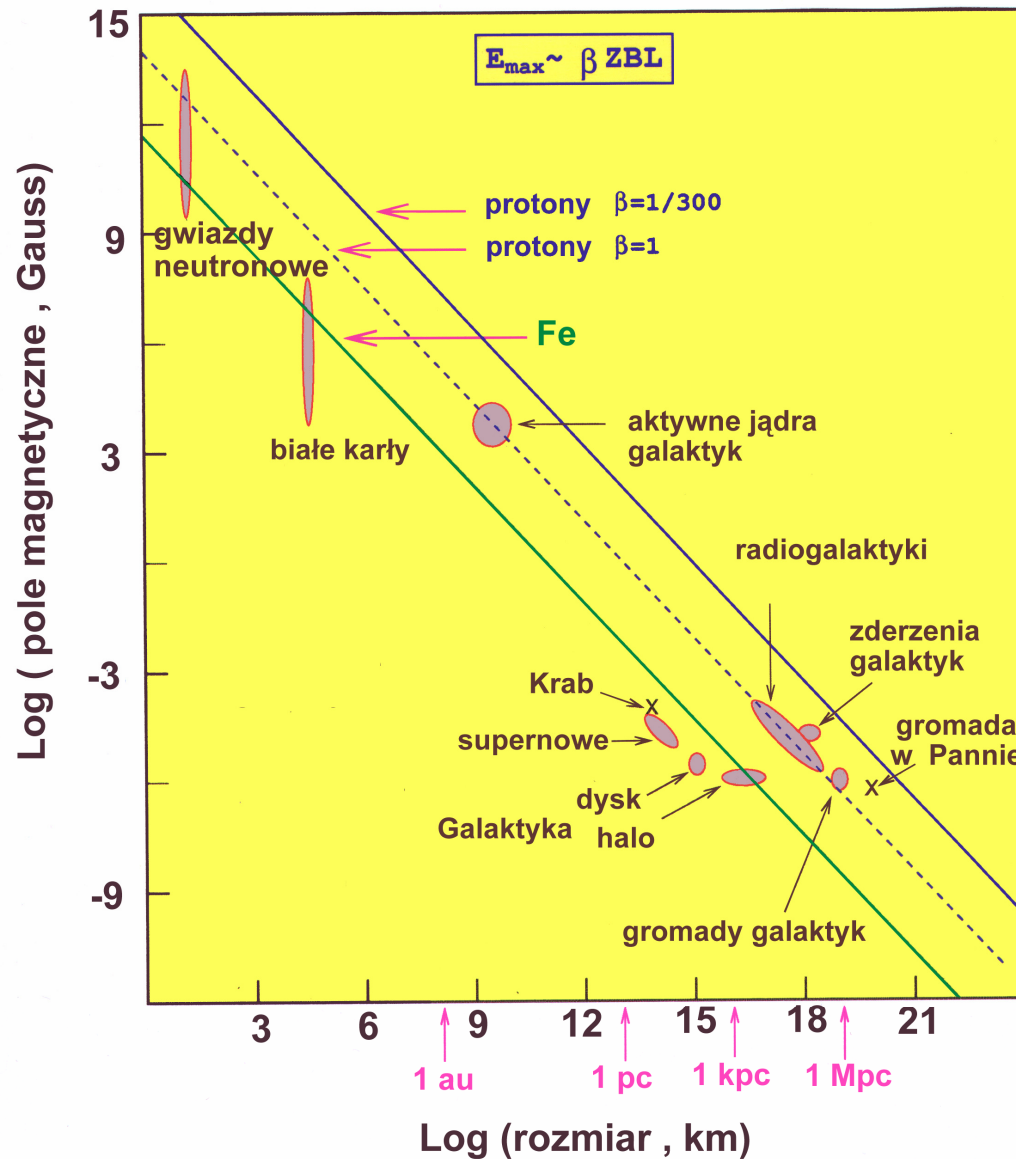


Energia ograniczona przez czas przyspieszania:

- czas życia źródła
- czas uwięzienia cząstek
- rozmiar obszaru przyspieszania $R_B < L_{acc}$

$$\Rightarrow E < \beta c Z B L_{acc}$$

Obiekty zdolne do przyspieszania cząstek do energii $E > 100 \text{ EeV}$



cząstki naładowane: ciężkie jądra ?

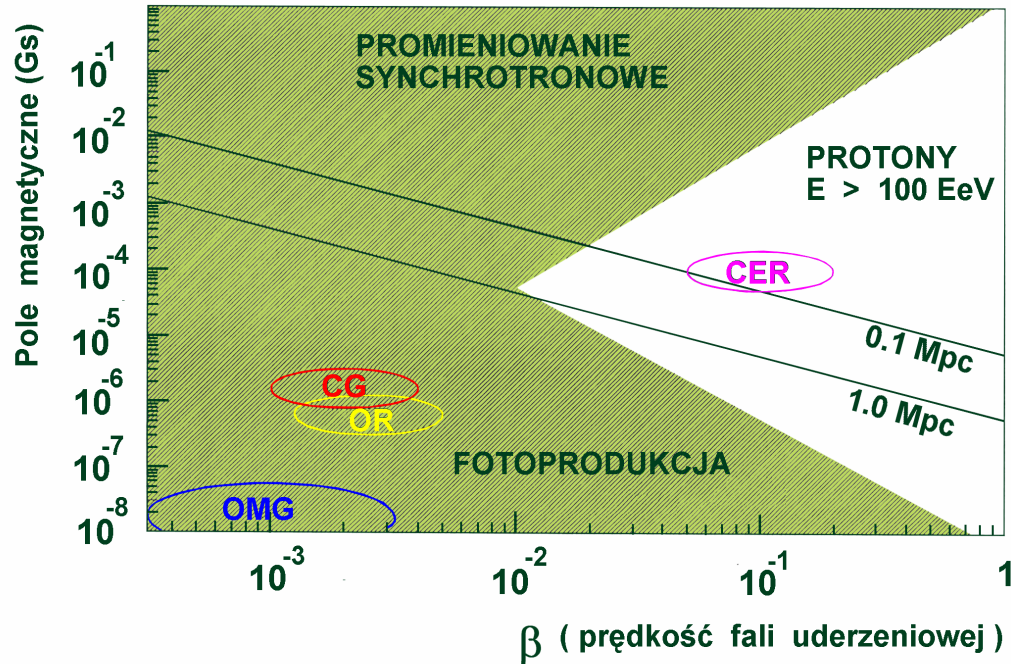
neutralne tylko wtórne

STRATY ENERGII PODCZAS PRZYSPIESZANIA

- PROMIENIOWANIE SYNCHROTRONOWE

$$\tau_s \sim 1 / (E \cdot B^2)$$

- FOTOPRODUKCJA : $p\gamma \rightarrow p\pi^0$
 $n\pi^+$



GC - CENTRUM GALAKTYKI

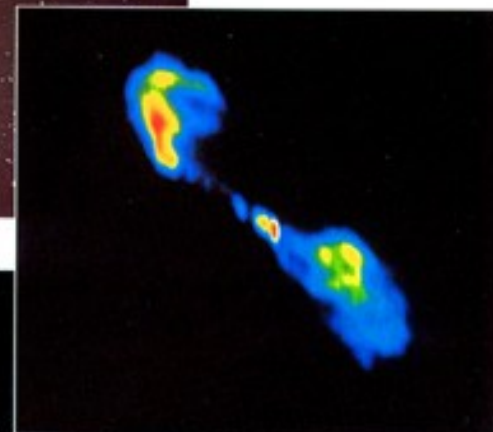
OR - OBŁOKI RADIOWE

OMG - OŚRODEK MIĘDZYGALAKTYCZNY

CER - CENTRA EMISJI RADIOGALAKTYK

Radiogalaktyki

Centaur A lub NGC 5128 jest najbliższą nam położoną galaktyką z aktywnym jądrem. Jest oddalona od nas tylko 15 milionów lat świetlnych. Jest to dość niezwykła galaktyka eliptyczna przepasana ukośnym ciemnym pasmem gazów i pyłów. Dwa rozległe obszary radioemisji położone są po dwóch stronach widocznej w świetle widzialnym galaktyki. Z aktywnego jądra galaktyki wypływają ogromne ilości energii w strugach, widocznych zarówno na mapach radiowych, jak i w obrazach rentgenowskich.



**GALAKTYKA
"CENTAUR A"**

Radiogalaktyki

Cygnus A (3C 405)

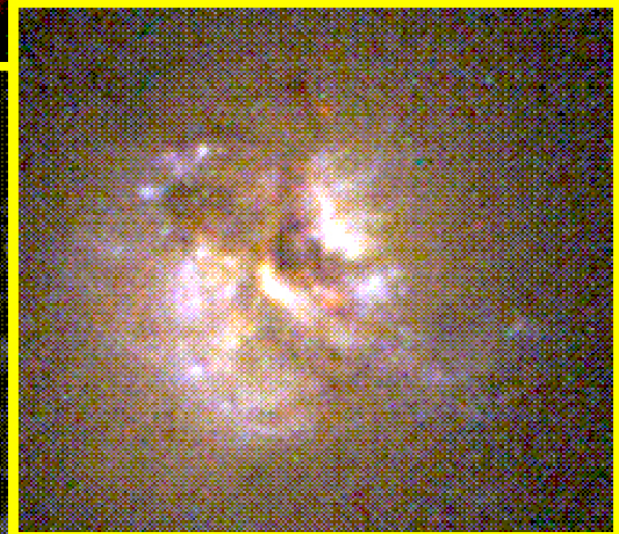
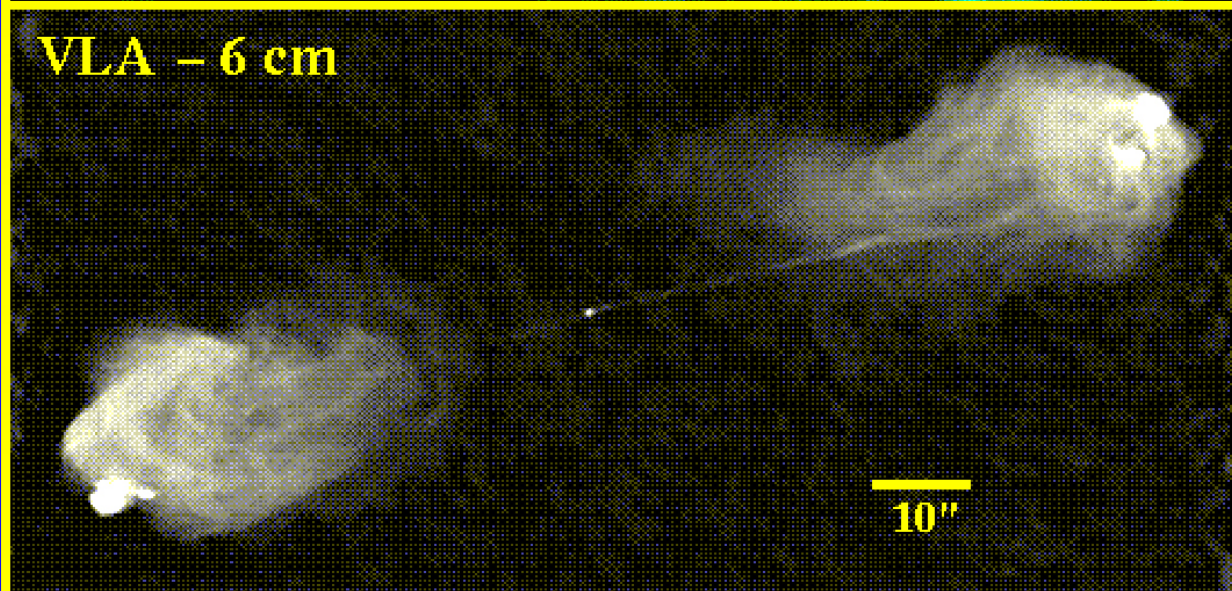
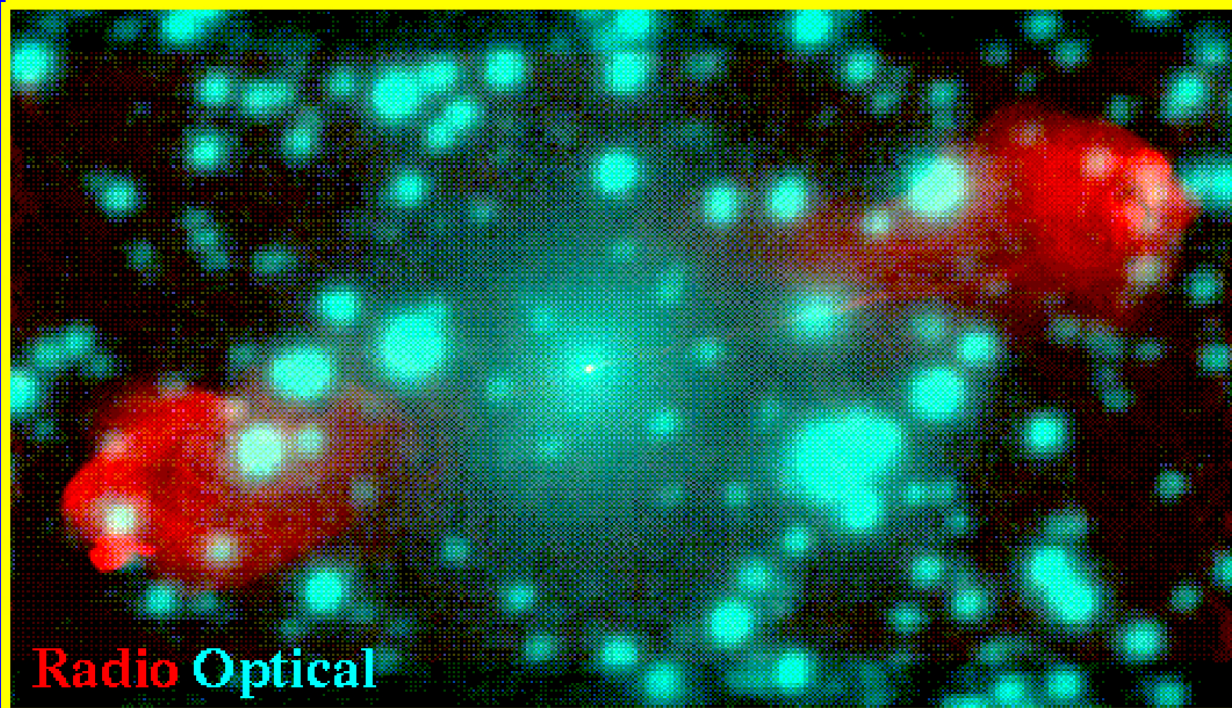
Obraz galaktyki
z Teleskopu Hubble'a

Radio Optical

VLA – 6 cm

10"

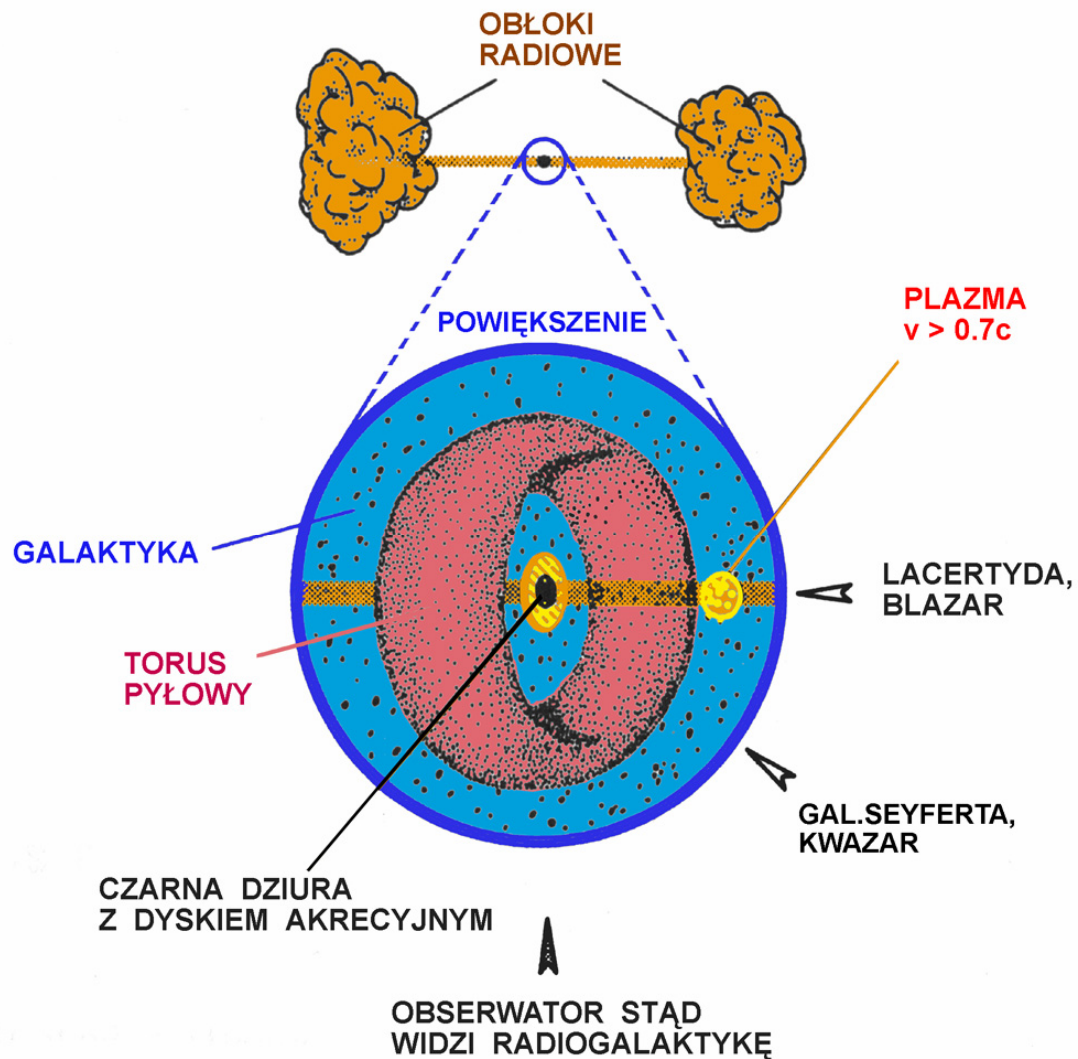
5"



Radiogalaktyka w Piecu



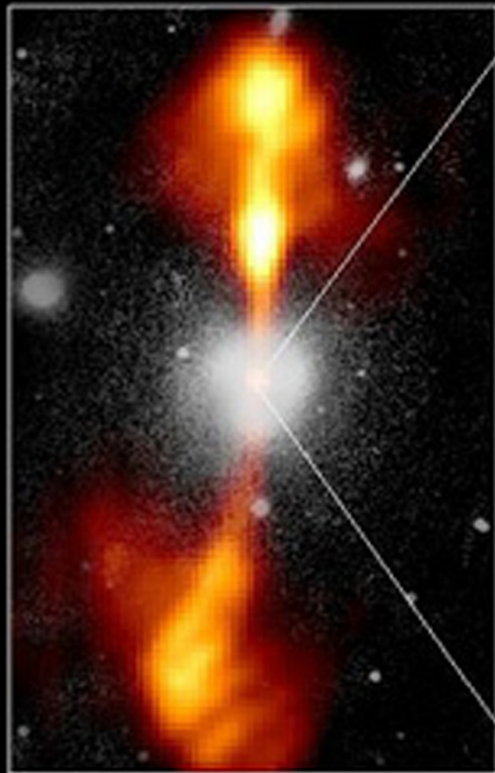
Aktywne jądra galaktyk



JĄDRO GALAKTYKI NGC 4261

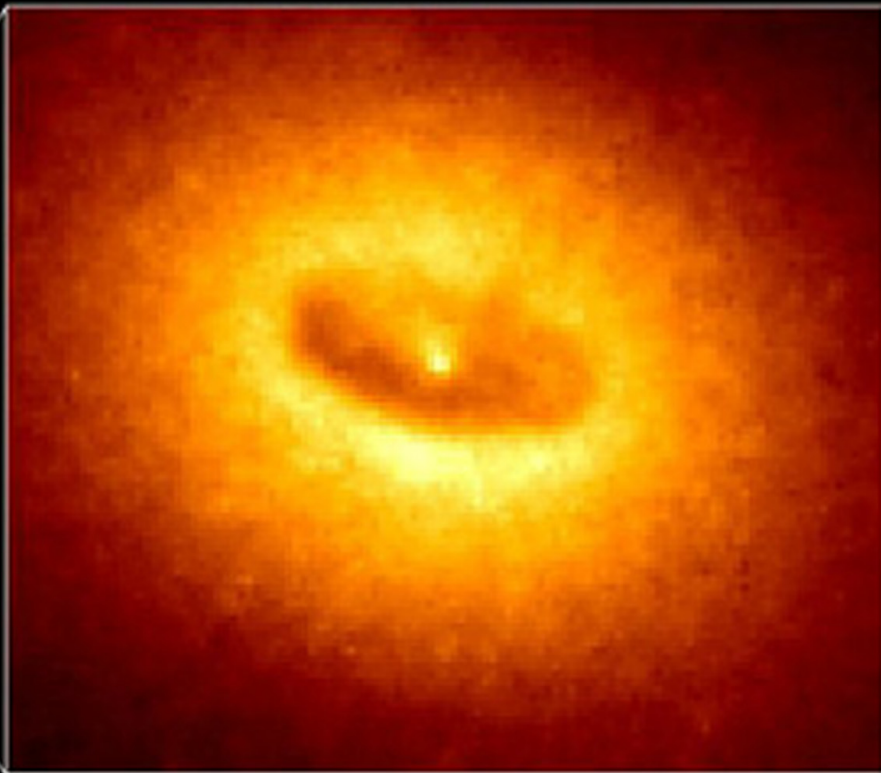
Teleskop Kosmiczny Hubble'a

Teleskop naziemny / obraz radiowy



380 sek łuku
88,000 LAT ŚWIETLNYCH

Obraz teleskopu Hubble'a



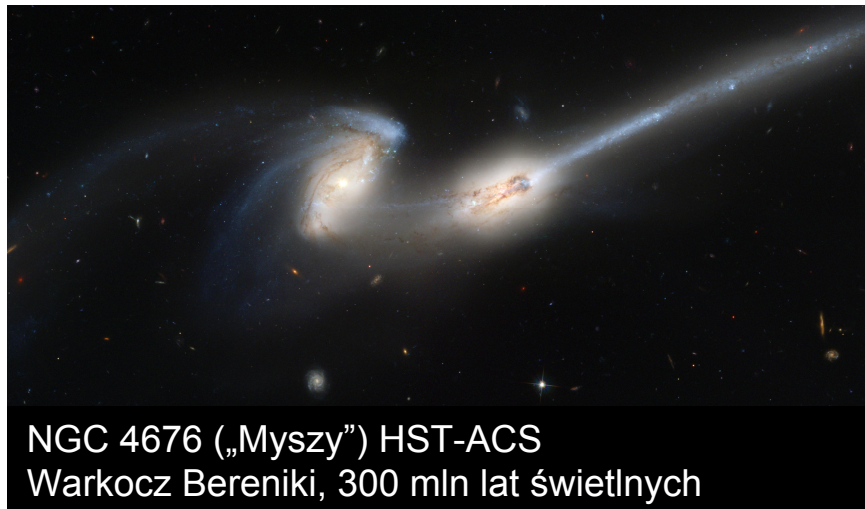
17 sek łuku
400 LAT ŚWIETLNYCH

Aktywne jądro galaktyki

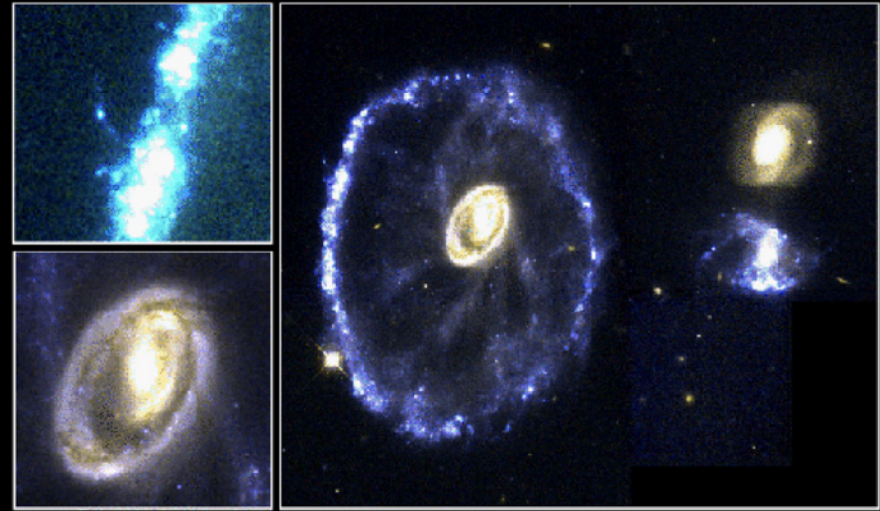


Zderzenia galaktyk

Zdjęcia wykonane przez Teleskop kosmiczny Hubble'a przedstawiają wspaniały "pokaz fajerwerków" towarzyszący zderzeniu galaktyk.



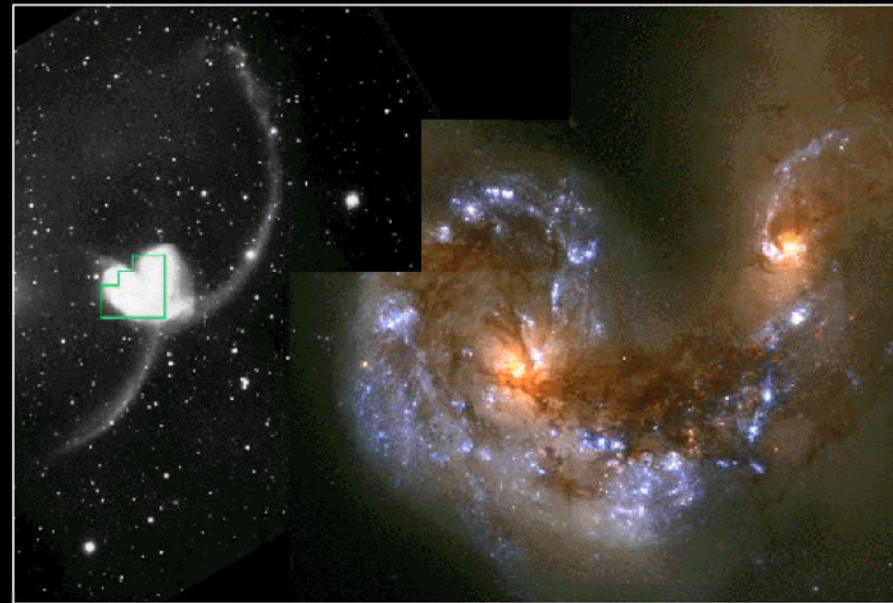
NGC 4676 („Myszy”) HST-ACS
Warkocz Bereniki, 300 mln lat świetlnych



Cartwheel Galaxy

PR 95 - 02 - ST Sci OPO - JANUARY 1995 K.Dorne(ST Sci), Nasa

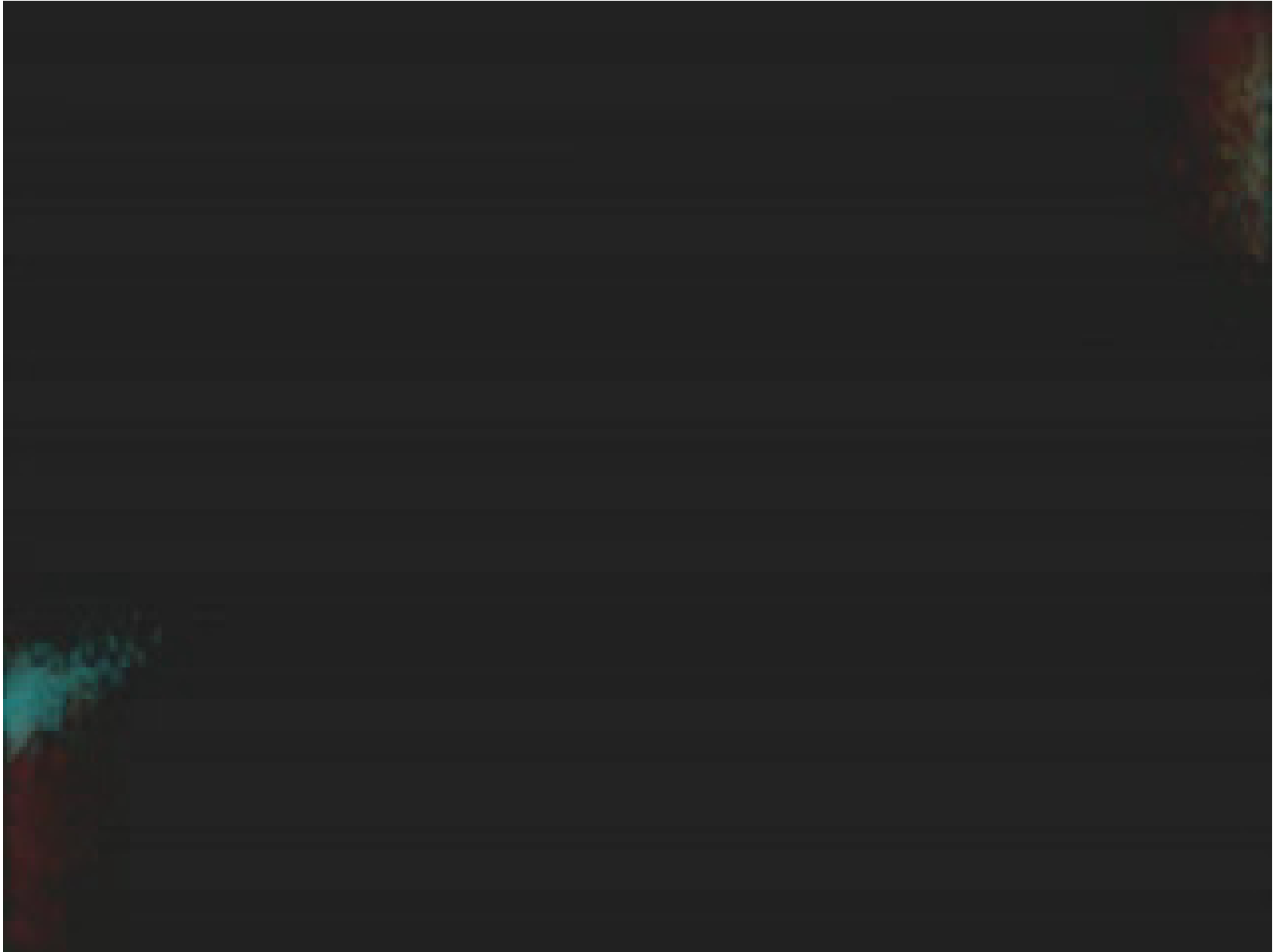
HTS • WFPC2



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039 HTS • WFPC2

PRC 97 - 34a - ST Sci OPO - OcTOBER 21, 1997 - B.Whitmore(ST Sci) Nasa

Zderzenia galaktyk



Pulsary, błyski gamma

Pulsary

- indukcja silnych pól elektrycznych
- ruch cząstek w polu magnetycznym → straty energii?
- pulsary w Galaktyce - izotropia???
- magnetary w innych galaktykach?

Błyski gamma

- silne relatywistyczne fale uderzeniowe
- bilans energii: $E(10^{14} \text{ MeV}) \sim E(\text{MeV})?$
- obcięcie GZK?

Hipotetyczne źródła promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii

Scenariusze „bottom-up” (przyspieszanie cząstek)

- przyspieszanie stopniowe w dużych obiektach (proces Fermiego I rzędu)
np.: radiogalaktyki, zderzenia galaktyk, gromady galaktyk
- silne pola elektromagnetyczne wokół zwartych obiektów
np.: pulsary (magnetary!)
- źródła błysków gamma (relatywistyczne fale uderzeniowe)

Scenariusze „top-down” (rozpady superciężkich cząstek)

- źródła egzotyczne: defekty topologiczne, cząstki reliktowe, itp.
np. hipotetyczne cząstki $X \rightarrow$ kwarki, leptony $\rightarrow$ promienie kosmiczne

Defekty topologiczne

Teorie Wielkiej Unifikacji (GUT): skala energii $\sim 10^{24}$ eV

wynik spontanicznego łamania symetrii pól Higgsa we wczesnym Wszechświecie $\rightarrow$ powstanie defektów czasoprzestrzeni o dużej gęstości energii: struny kosmiczne; monopole; ściany domen, ...

pękanie strun, anihilacja, rozpady $\rightarrow$ emisja hipotetycznych cząstek X ($M_X \sim 10^{24}$ eV)

rozpady $X \rightarrow$ kwarki, leptony $\rightarrow$ promienie kosmiczne

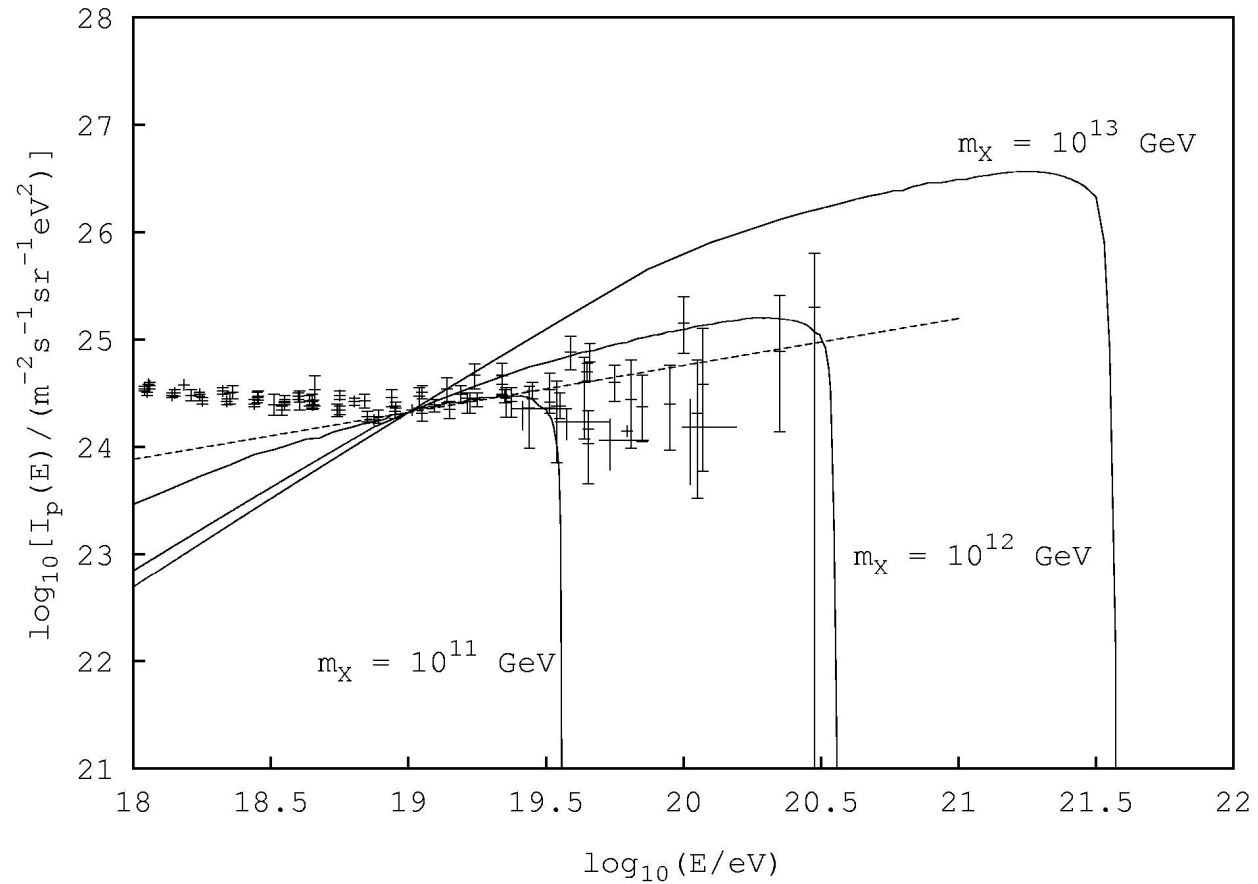
rozpady metastabilnych cząstek reliktowych $\rightarrow X \rightarrow$ prom.kosm.

rozpad $M \sim 10^{24}$ eV $\rightarrow$ cząstki $E \sim 10^{20}$ eV: **łatwe!**

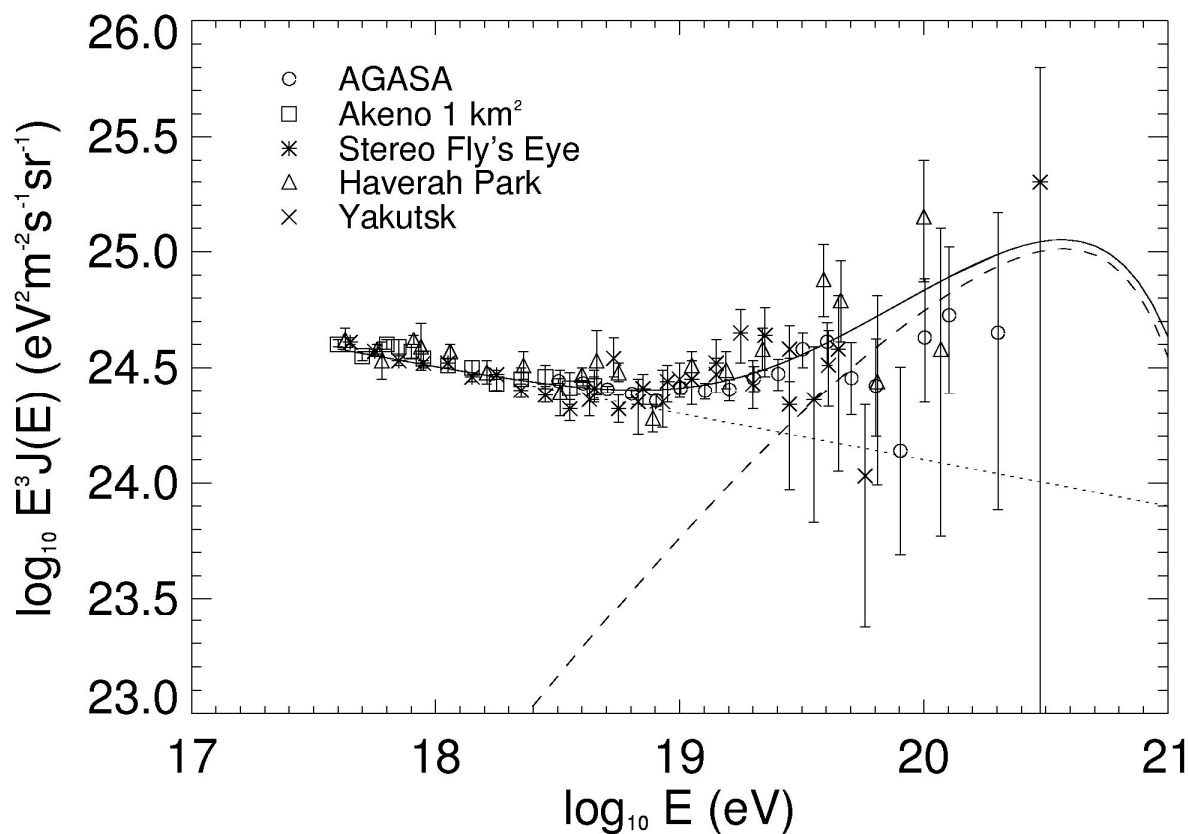
brak korelacji z rozkładem masy - **OK!**

dominacja fotonów i neutrin wśród promieni kosmicznych
brak ciężkich jąder

Rozpady superciężkich cząstek X



Rozpady cząstek reliktowych w halo Galaktyki



$$M_x \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ eV}$$

dominacja fotonów i neutrino
brak ciężkich jąder

Hipotetyczne źródła promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii

Scenariusze „bottom-up” (przyspieszanie cząstek)

- przyspieszanie stopniowe w dużych obiektach (proces Fermiego I rzędu)
np.: radiogalaktyki, zderzenia galaktyk, gromady galaktyk
- silne pola elektromagnetyczne wokół zwartych obiektów
np.: pulsary (magnetary!)
- źródła błysków gamma (relatywistyczne fale uderzeniowe)

Scenariusze „top-down” (rozpady superciężkich cząstek)

- źródła egzotyczne: defekty topologiczne, cząstki reliktowe, itp.
np. hipotetyczne cząstki $X \rightarrow$ kwarki, leptony $\rightarrow$ promienie kosmiczne

Scenariusze „hybrydowe”

- „Z-bursts”
rezonansowa produkcja bozonów Z w oddziaływaniach $\nu\nu$ ($E > 10$ ZeV)
- wzrost przekroju czynnego neutrin
- nowe cząstki neutralne
- łamanie niezmienniczości Lorentza

Z-bursts

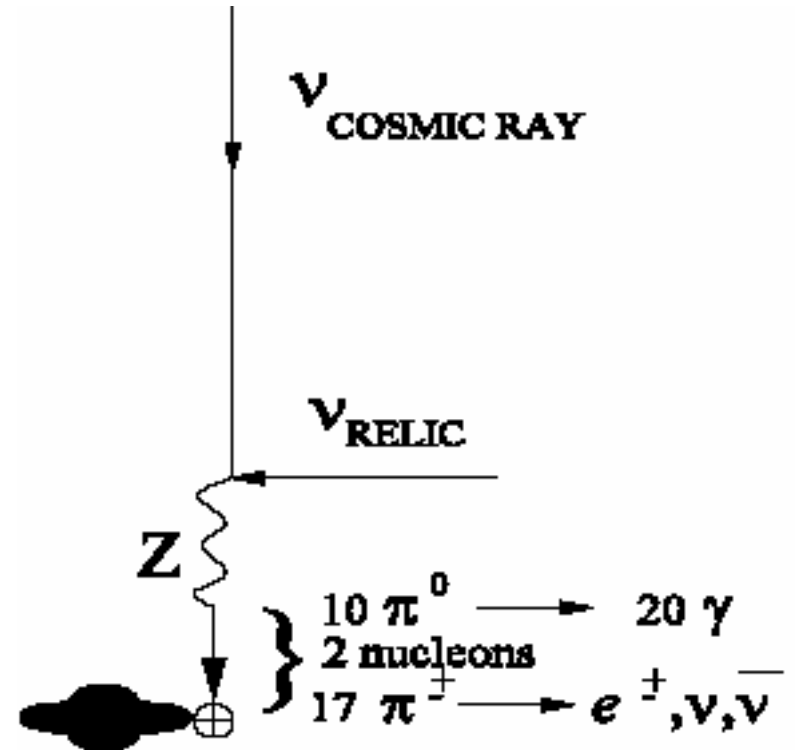
rezonansowa produkcja bozonów Z^0
w oddziaływaniach $\nu\nu$

$$E_\nu \sim M_Z^2 / 2m_\nu \sim 4 \cdot 10^{21} \text{ eV} / m_\nu$$

neutrino nie podlega efektowi GZK

ale

źródło neutrin $\sim 10^{22} \text{ eV} ??$
strumień fotonów $\sim \text{GeV} ??$



Inne scenariusze

Duży przekrój czynny neutrin

modele neutrino jako cząstki złożonej
dodatkowe wymiary czasoprzestrzeni (unifikacja oddziaływań)
produkcja czarnych dziur w oddz. neutrin ...

Nowe cząstki („uhecron“)

nie podlegają GZK - celowanie do odległych obiektów
emisja jako wtórne?

Łamanie niezmienniczości Lorentza

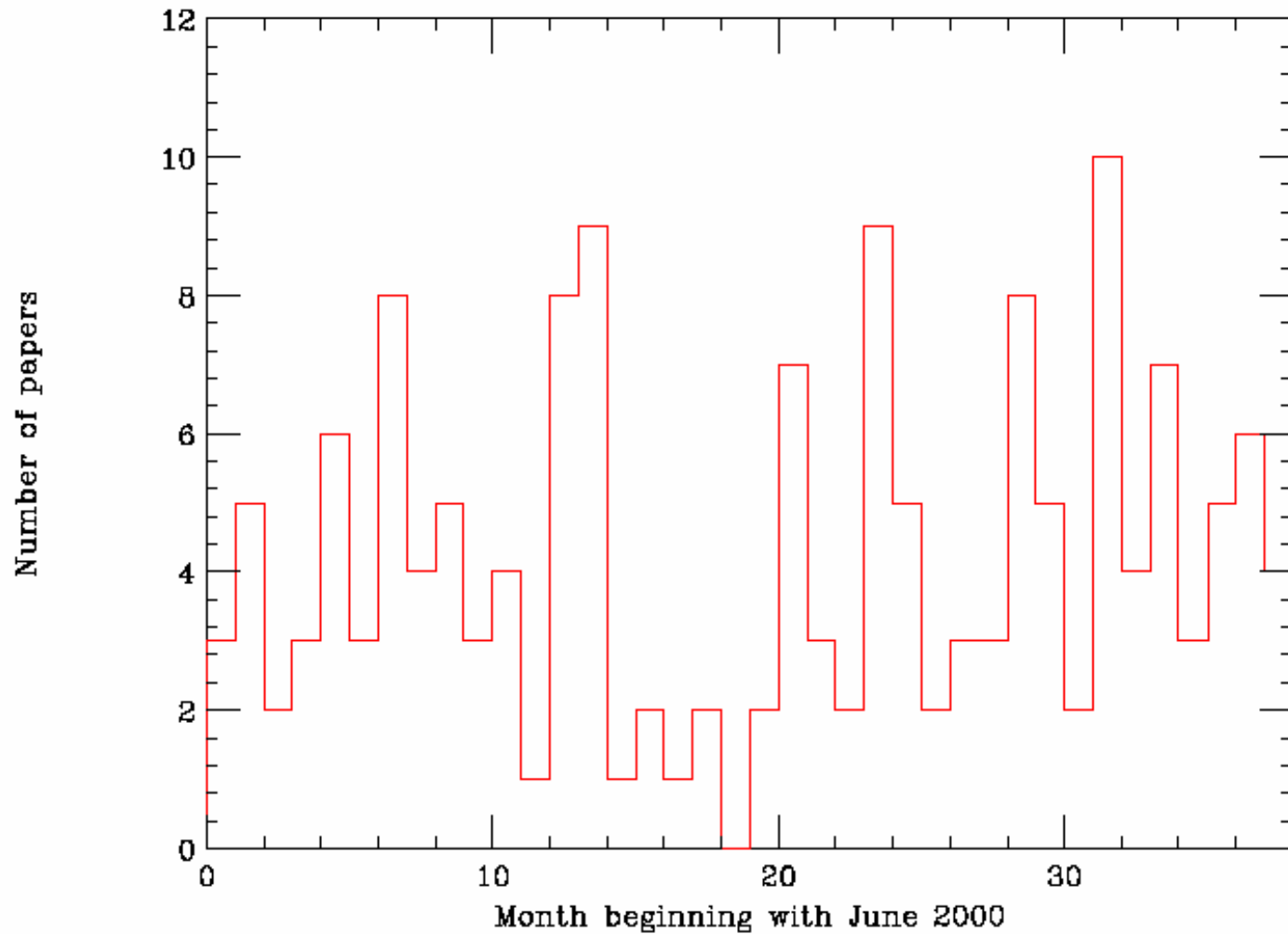
brak GZK

wystarczy efekt $\mathcal{O}(10^{-23})$ - limit eksperymentalny $< \mathcal{O}(10^{-13})$

rozpad $\gamma \rightarrow e^+ e^-$?

Prace teoretyczne w astro-ph

Time Distribution of Theoretical Papers on EHECR: June 2000 – July 2003



[J.Cronin]

Próbka tytułów prac w astro-ph dotyczących promieni kosmicznych

Halo Dark Matter and Ultra-High Energy Cosmic Rays
Acceleration of UHE Cosmic Rays in Gamma-Ray Bursts
On the nature of cosmic rays above the Greisen–Zatsepin–Kuz'min cut off
Comparison of UHECR spectra from necklaces and vortons
Ultra High Energy Cosmic Rays and Gamma Ray Bursts from Axion Stars
Magnetic lensing of ultra high energy cosmic rays
Correlation of Ultra High Energy Cosmic Rays with Compact Radio Loud Quasars
Testing Fundamental Physics with High-Energy Cosmic Rays
Isotropization of Ultra-High Energy Cosmic Ray Arrival Directions by Radio Ghosts
Neutrino-Induced Giant Air Showers in Large Extra Dimension Models
UHECR Production by a Compact Black-Hole Dynamo: Application to Sgr A*
Ultra-High Energy Cosmic Rays and Symmetries of Spacetime
TeV Strings and the Neutrino-Nucleon Cross Section at Ultra-high Energies
Shadows of Relic Neutrino Masses and Spectra on Highest Energy GZK Cosmic Rays
Ultra-High Energy Cosmic Rays and Neutron-Decay Halos from Gamma Ray Bursts
Hadronic interactions, precocious unification, and cosmic ray showers at Auger energies
Ultra-high energy cosmic rays from annihilation of superheavy dark matter
Neutrino cross sections at high energies and the future observations of ultrahigh-energy cosmic rays
Violation of Lorentz Invariance and neutral component of UHECR
Ultra High Energy Cosmic Ray, Superheavy Dark Matter and Extra Dimension

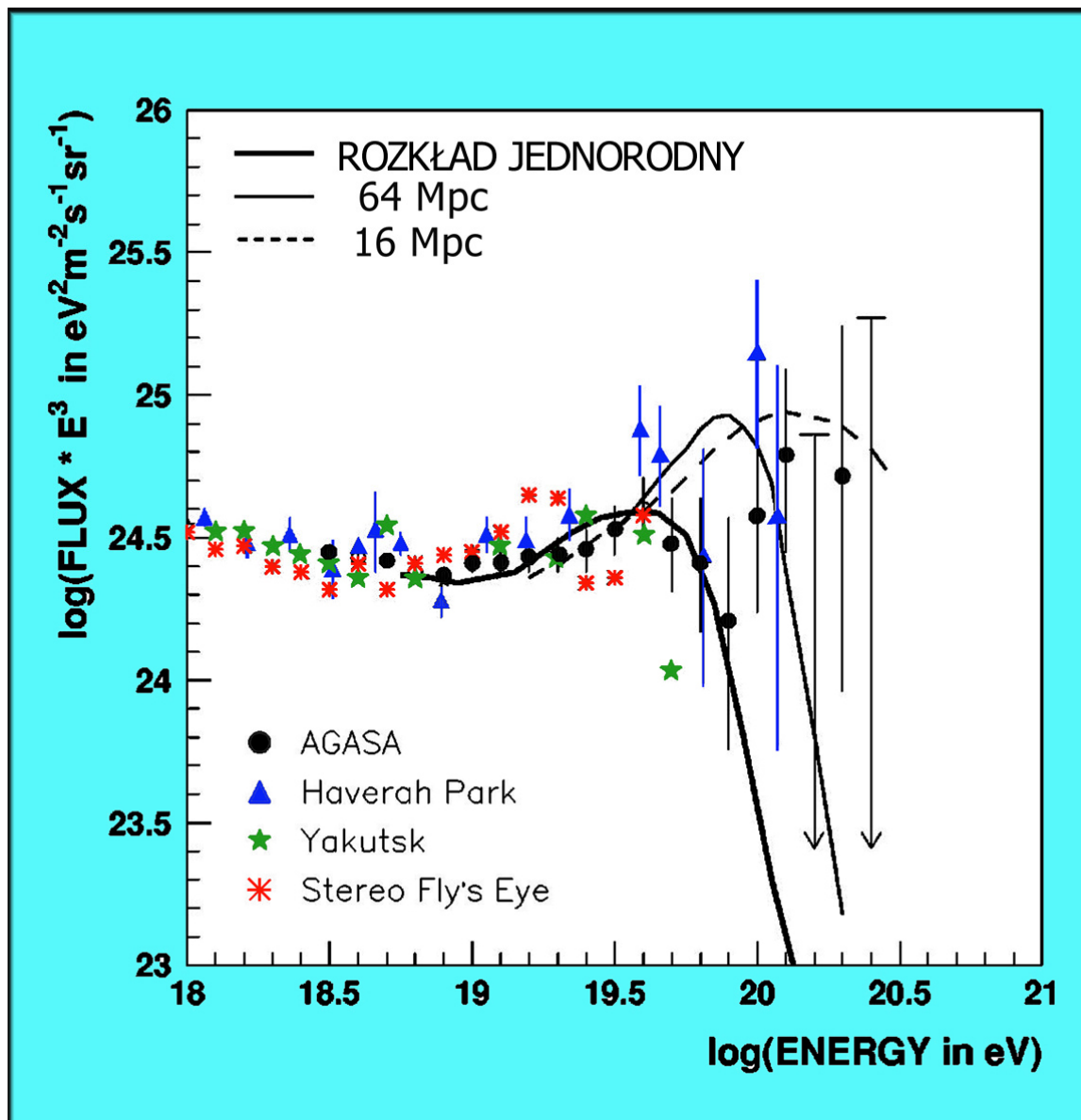
Gdzie są źródła?

Efekt GZK ogranicza dystans propagacji -
identyfikacja źródeł powinna być łatwa, ale nie udaje się

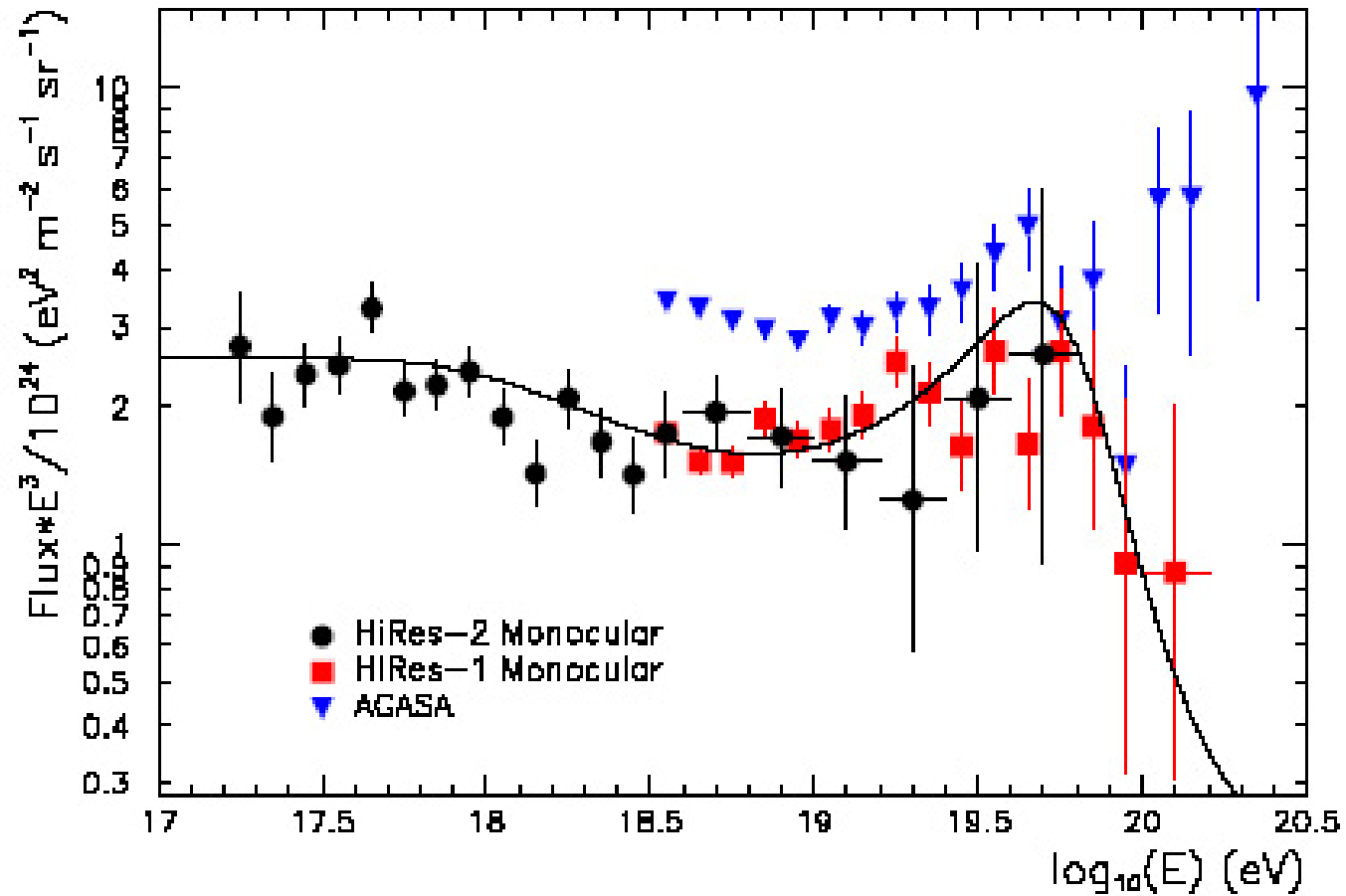
Wiele modeli pochodzenia promieni kosmicznych

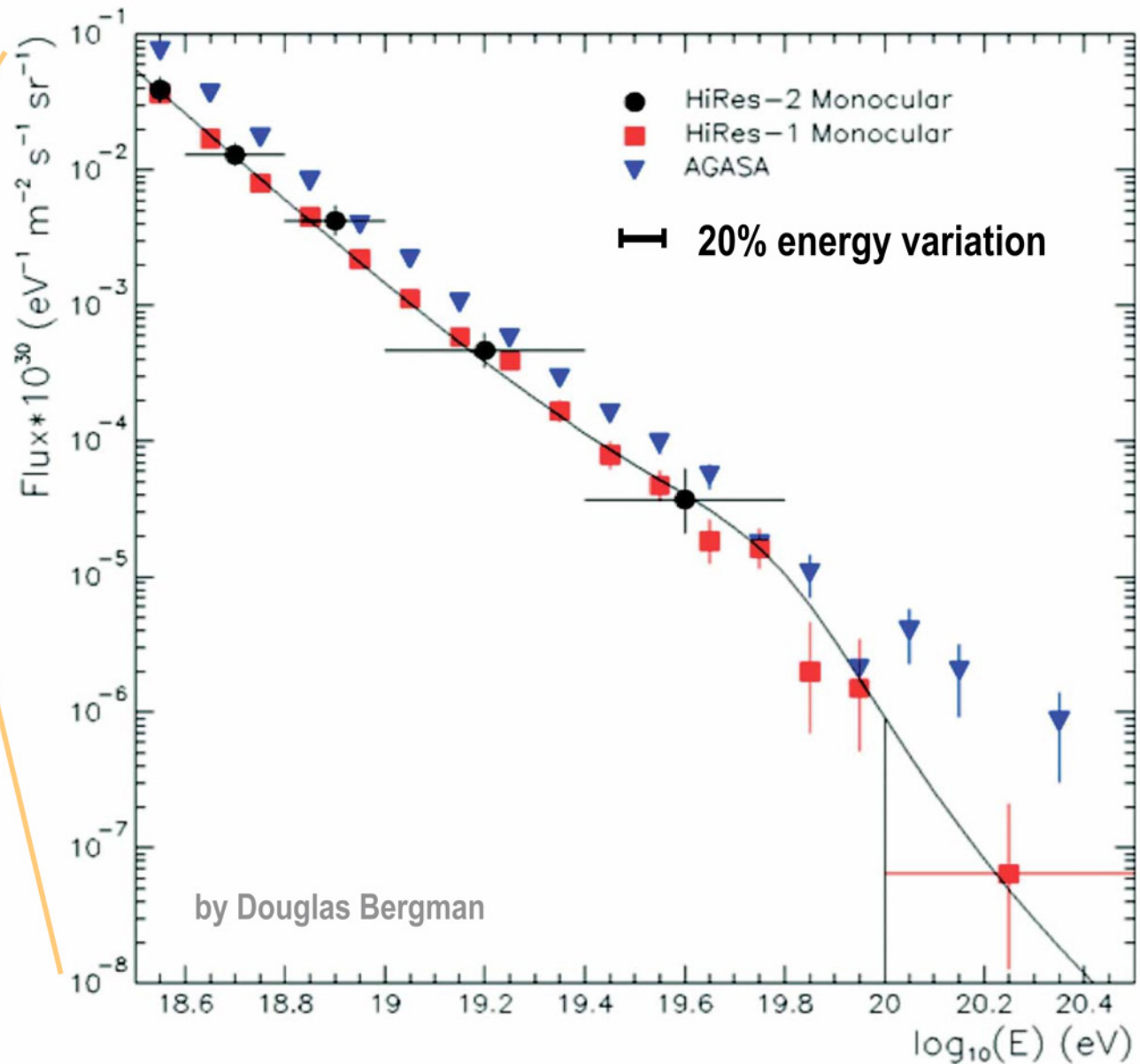
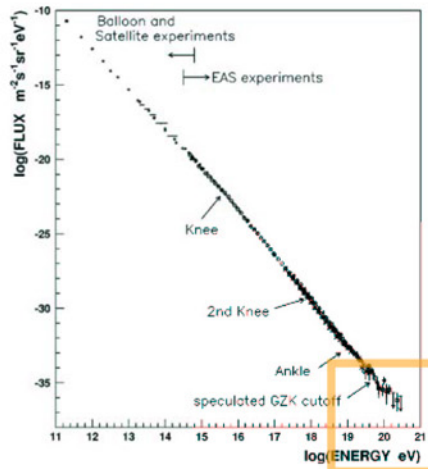
Dane eksperymentalne potrzebne dla weryfikacji modeli

Efekt GZK w widmie energii

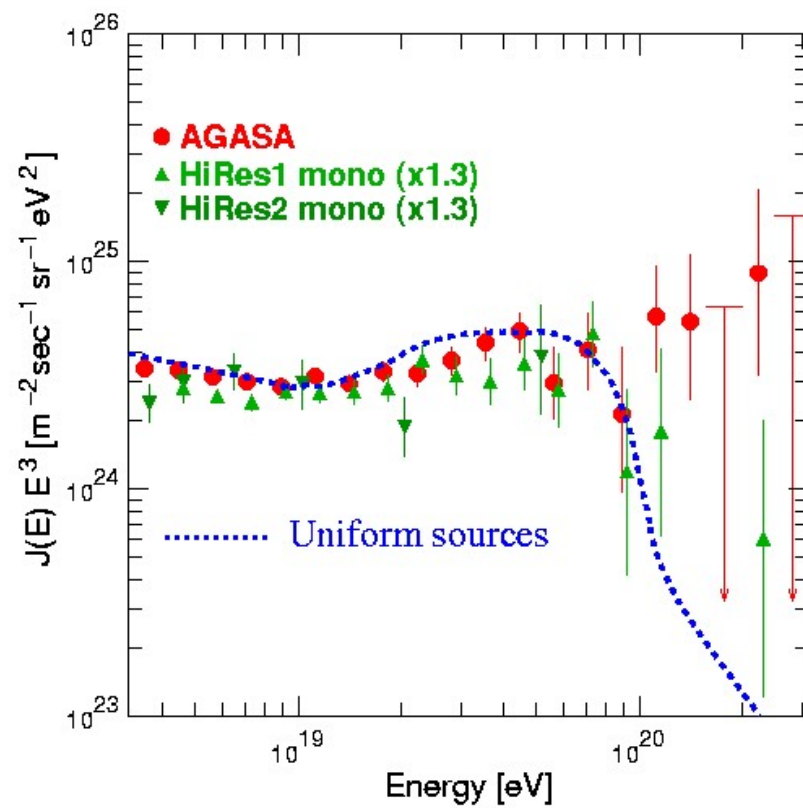
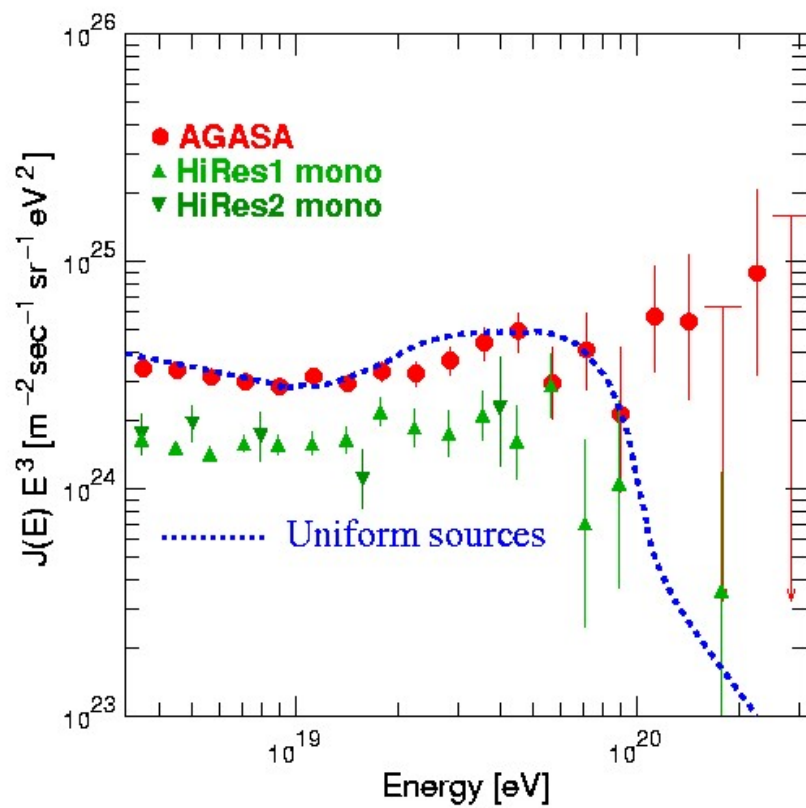


Widmo AGASA i HiRes

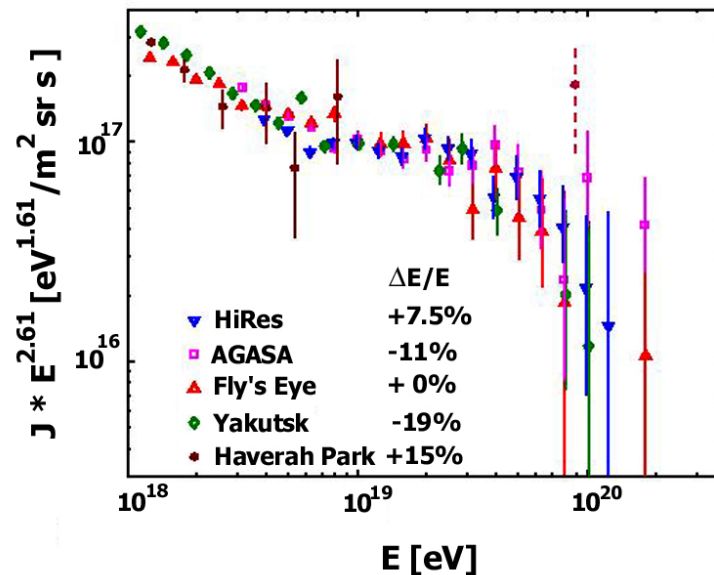
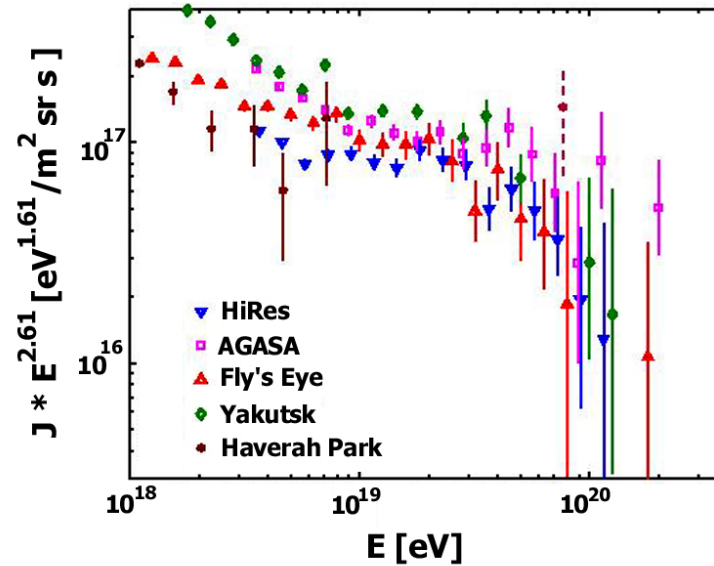




Widmo AGASA i HiRes



„Uzgodnione” widma

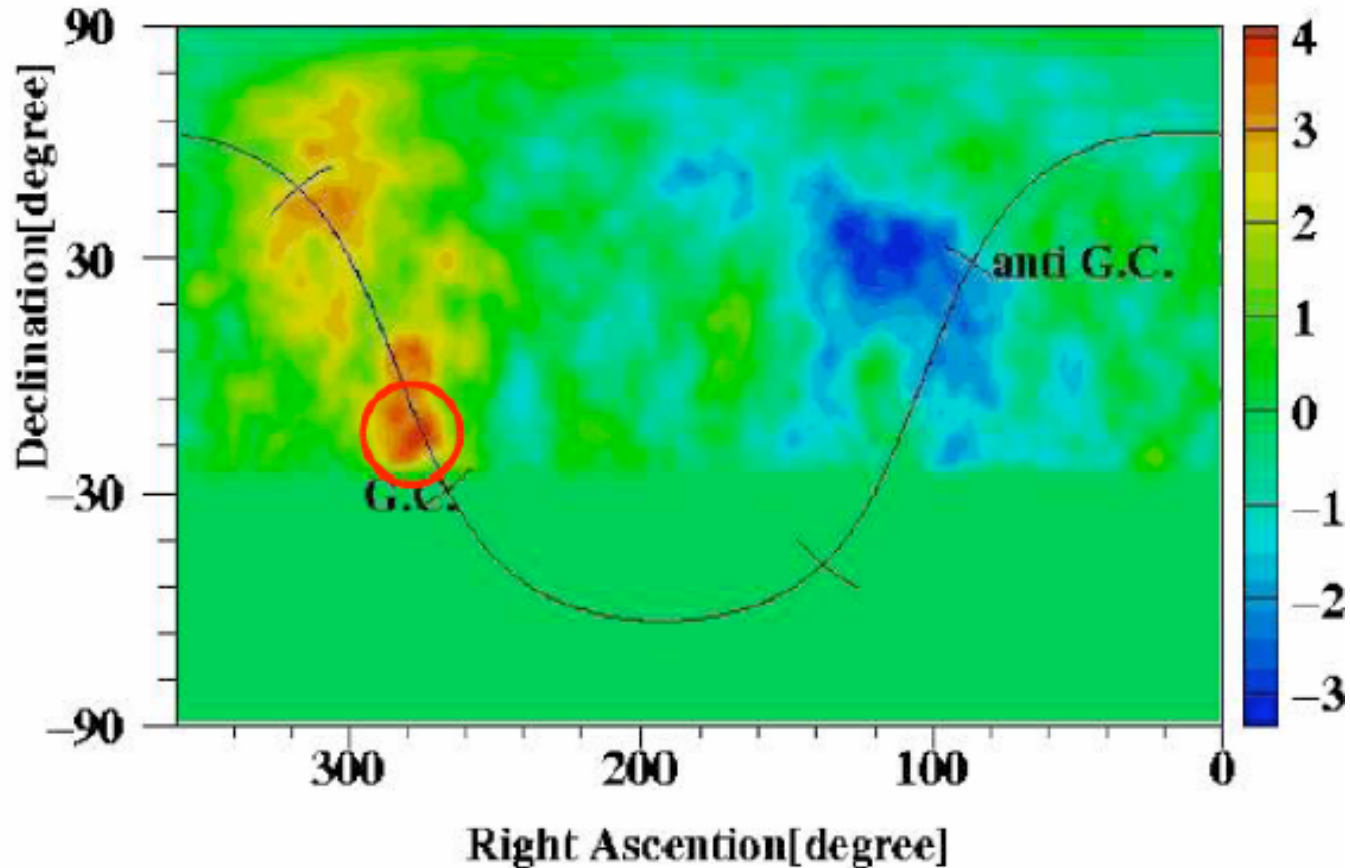


Kształt widma?
GZK?

Potrzebne dokładniejsze dane

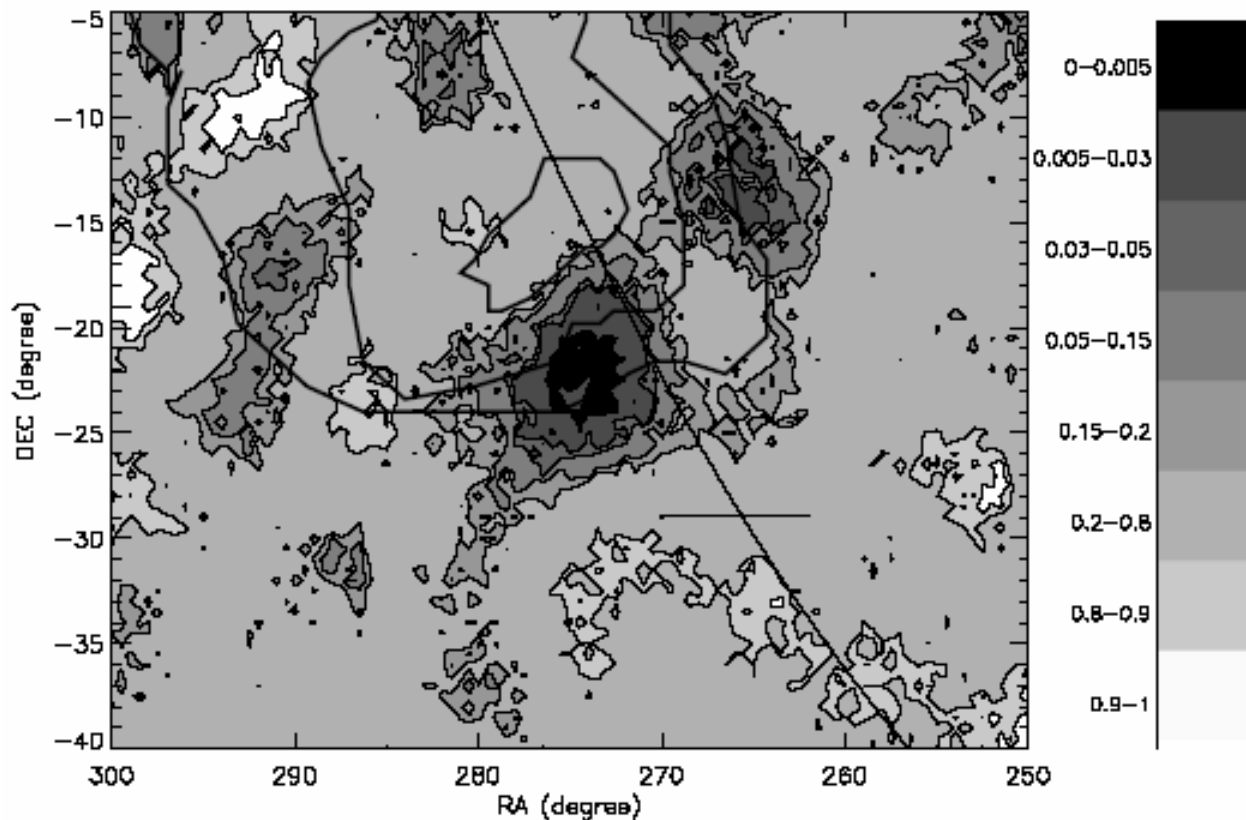
Anizotropia promieni kosmicznych

AGASA: nadmiar $\sim 4.5\sigma$ blisko centrum Galaktyki $1 < E < 2.5$ EeV; 20 deg
413.6 spodziewanych, 506 przyp. obserwowanych (+22%)



→ galaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o $E \sim 1$ EeV?

Anizotropia promieni kosmicznych



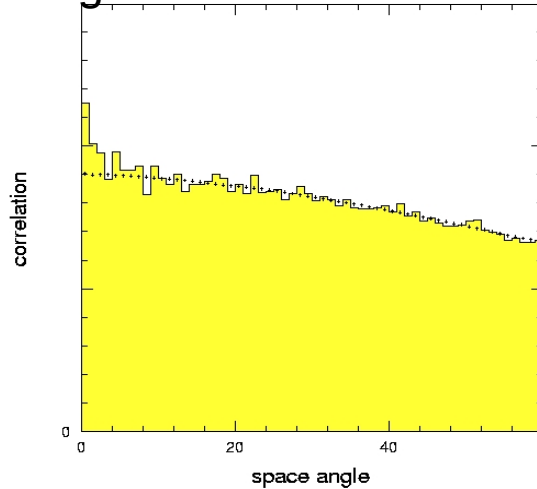
SUGAR: nadmiar $\sim 2.9\sigma$ $0.8 < E < 3.2$ EeV; 5.5 deg źr. punktowe?
11.8 przyp. spodz., 21.8 przyp. obserw. (+85%)

→ galaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o $E \sim 1$ EeV?

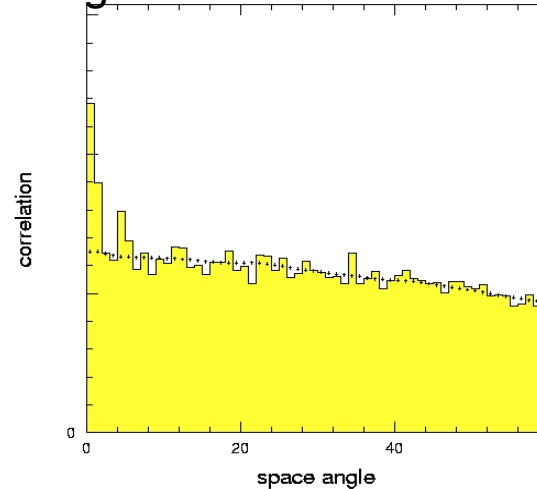
Autokorelacja kierunków

AGASA: pary przypadków $\Delta\Theta < 2.5^\circ$

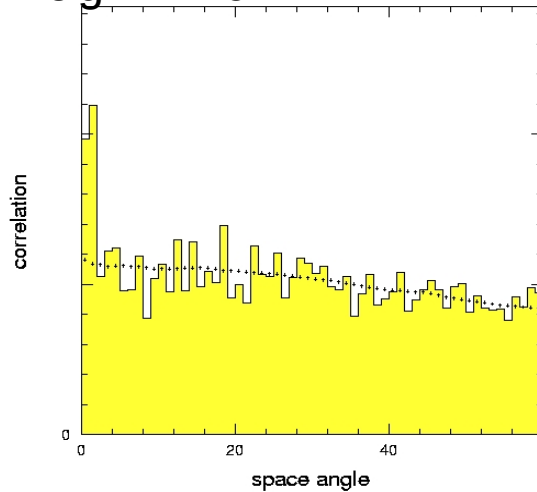
Log E > 19.0 AGASA 894



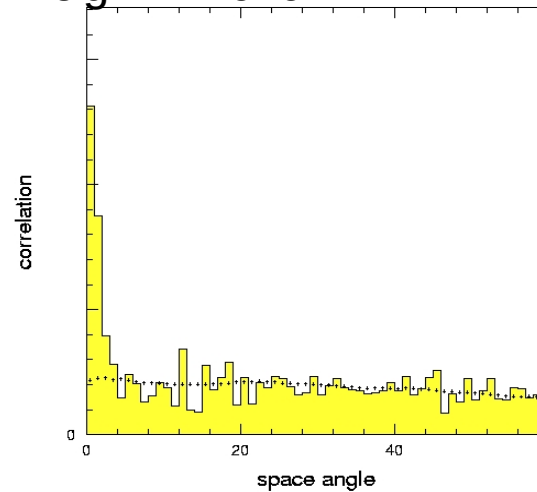
Log E > 19.2 AGASA 375



Log E > 19.4 AGASA 161



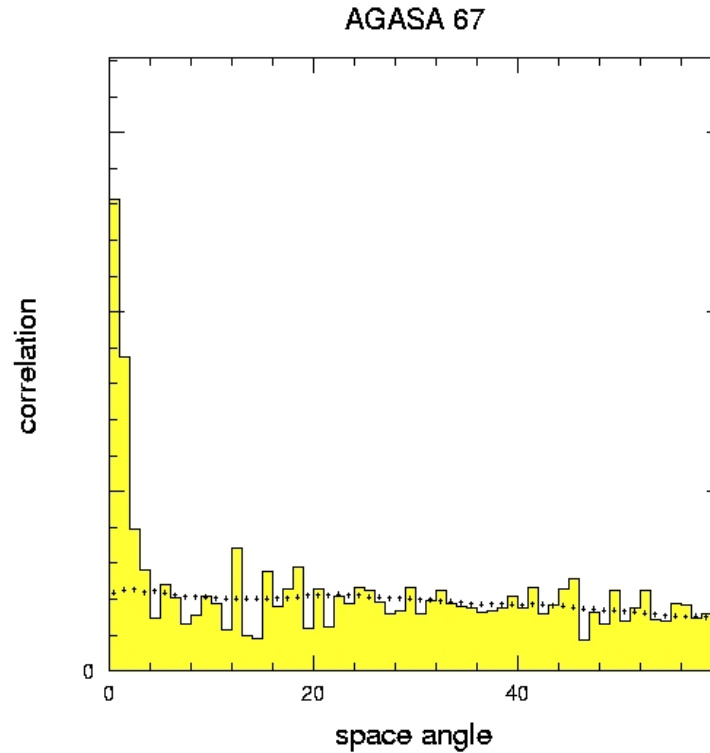
Log E > 19.6 AGASA 67



Autokorelacja kierunków

Pary przypadków AGASA $E > 40$ EeV: korelacja 3.2σ

→ źródła punktowe?

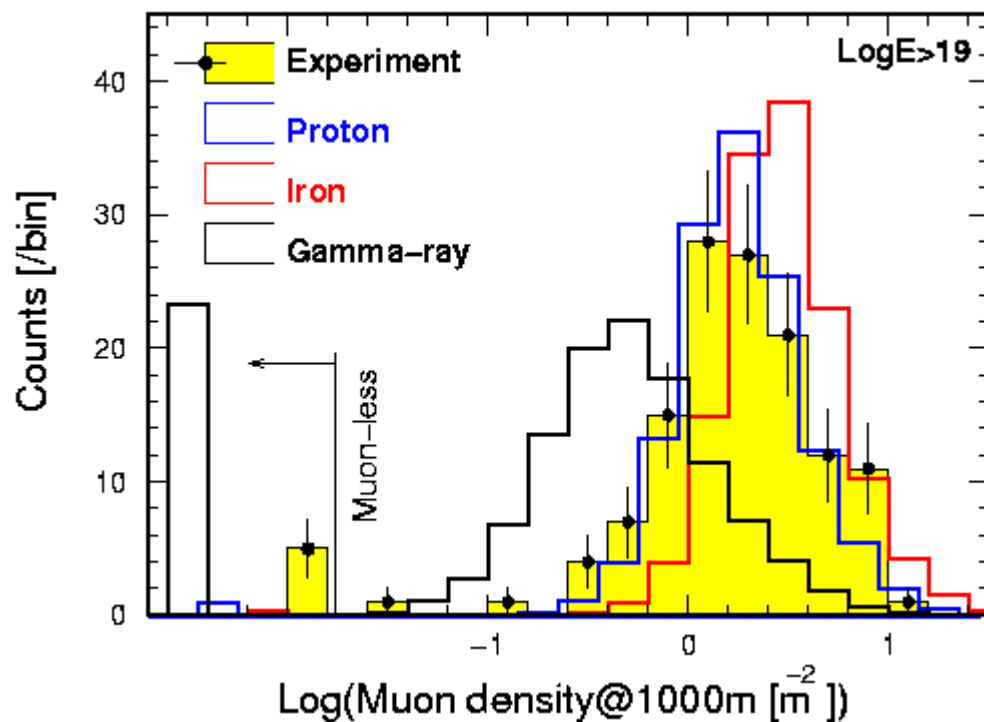
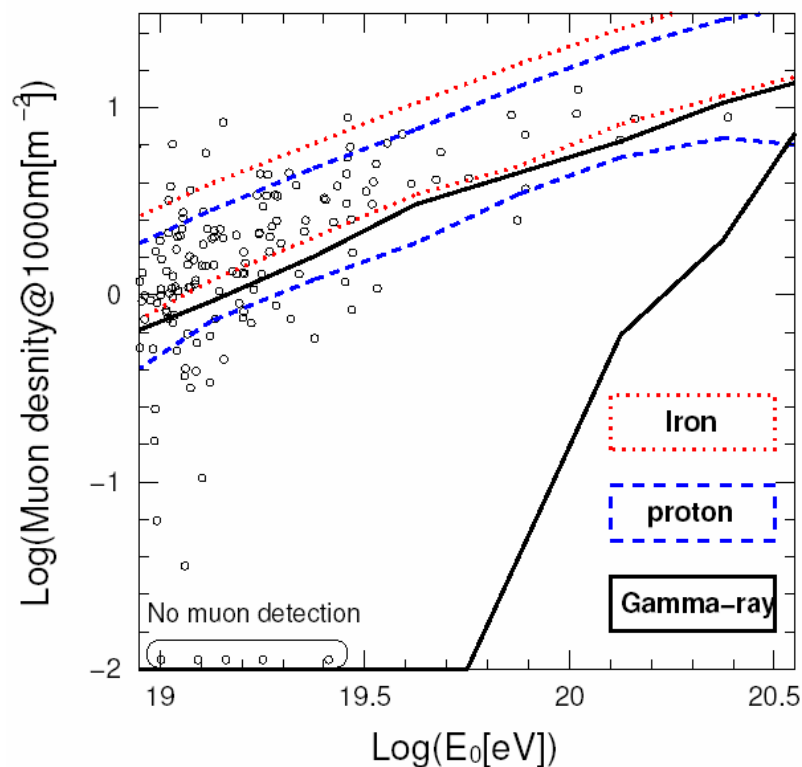


Niepewna interpretacja, znaczącość statystyczna?
Brak korelacji w danych HiRes

Skład promieni kosmicznych

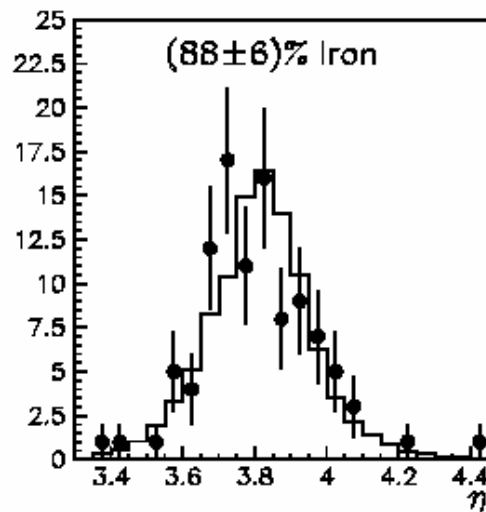
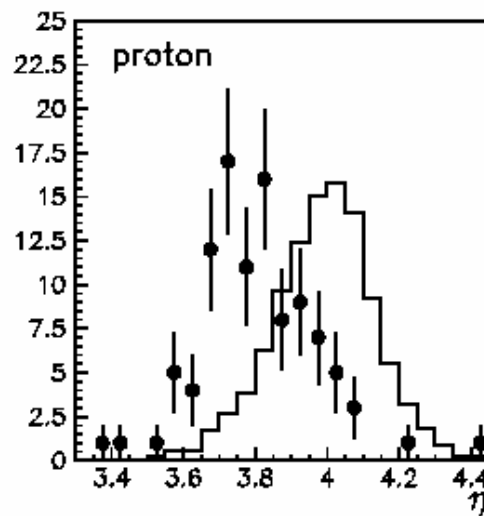
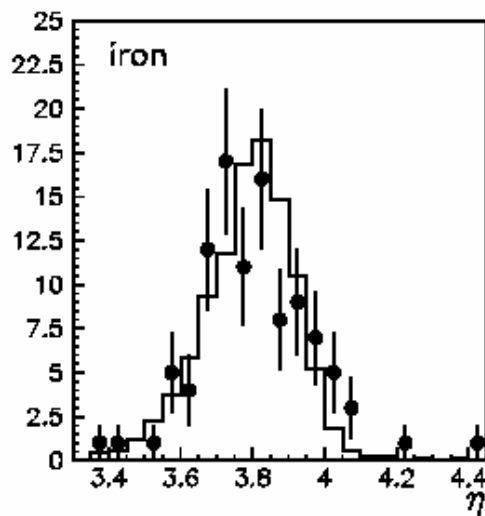
gęstość mionów: AGASA (Shinozaki et al.)

konsystentny z dominacją protonów?



Skład promieni kosmicznych

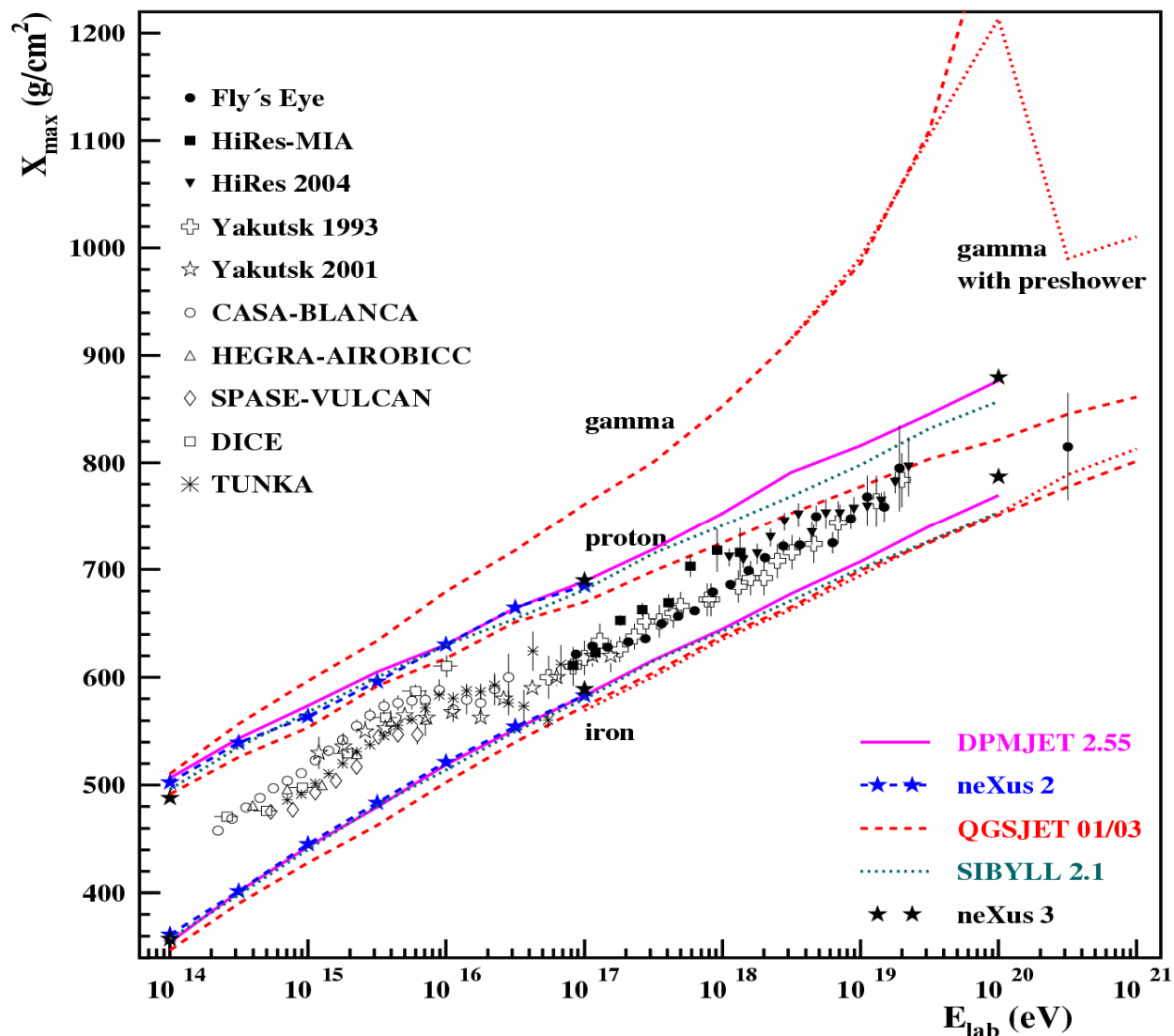
Rozkład poprzeczny cząstek: Volcano Ranch (Dova et al.)



90% żelaza?

Skład promieni kosmicznych

Głębokość maksimum rozwoju wielkiego pęku



Otwarte problemy

Jak Przyroda produkuje cząstki o energiach $\sim 50 \text{ J}$?
gdzie?
jaki proces?

Efekt GZK ogranicza dystans propagacji -
identyfikacja źródeł powinna być łatwa, ale nie udaje się

Dlaczego nie widać obcięcia GZK?

Wiele modeli pochodzenia promieni kosmicznych

Potrzebne znacznie dokładniejsze dane eksperymentalne dla weryfikacji modeli