Astrofizyka promieni kosmicznych-5

Henryk Wilczyński

Widmo AGASA i HiRes



niezgodność widm wynikiem użycia różnych technik detekcji?

Detekcja metodą fluorescencyjną



Rejestracja wielkiego pęku metodą fluorescencyjną



Teleskop fluorescencyjny



Kamera teleskopu



Ślad pęku w kamerze



Obraz chwilowy pęku



które piksele zawierają prawdziwy sygnał?

Profil podłużny



Sygnał i szum



Poprawka na światło czerenkowskie

Rozpraszanie światła na drodze między wielkim pękiem a detektorem \rightarrow Osłabienie sygnału fluorescencji

→ Rozpraszanie fotonów czerenkowskich w kierunku detektora



Profil podłużny rozwoju pęku





Kalibracja detektora fluorescencyjnego

Wydajność fluorescencji

Efekty atmosferyczne: monitorowanie aerozoli (laser, Lidar) monitorowanie rozkładów gęstości atmosfery monitorowanie chmur

Kalibracja optyczna i elektroniczna detektora

Modelowanie rozwoju i detekcji wielkiego pęku

Widmo fluorescencji azotu



Rozpraszanie światła w atmosferze F = $F_0 \exp(-x/d)$ d ~ λ^4 (Rayleigh)



wydajność fluorescencji

Rozkłady poprzeczne cząstek w pęku

proton $E_0=10^{19} eV$



Czy wielki pęk wygląda jak świecący punkt?

Obraz optyczny pęku



obraz frontu pęku jest zawsze kołowy!

Zbieranie światła pęku



Rozciągły obraz pęku \rightarrow gubienie części sygnału poza $\chi_{\text{S/N}}$

 \rightarrow konieczna poprawka w procedurze wyznaczania energii

Emisja światła fluorescencji

- proporcjonalnie do stopnia wzbudzenia molekuł ośrodka



Obraz pęku zależy od rozkładu energii pozostawionej w powietrzu, a nie od rozkładu liczby cząstek!

Rozkład światła w obrazie pęku



rozkład energii pozostawionej różni się od rozkładu gęstości cząstek symulacja rozwoju pęku i energii pozostawionej w powietrzu (jonizacja, wzbudzenia)



"Widoczna" część energii pęku



Korekcja energii pęku

Część sygnału zawarta w kącie ζ

 $F(r/r_{M}) = 1 - (1-a(s) r/r_{M})^{-b(s)}$



Skala poprzeczna wielkiego pęku: promień Molière'a r_M = 9.6 [g/cm²] /p_{air}

Parametr wieku S = $3/(1+2X_{max}/X)$

Korekcja zarejestrowanego sygnału $r_0 = R_0 \tan \zeta$ $L_{total} = L_{\zeta} / F(r_0)$

-> korekcja profilu podłużnego peku -> korekcja E₀, X_{max}

Nowy standard rekonstrukcji pęku

Rejestracja wielkiego pęku metodą fluorescencyjną



Rozpraszanie światła w atmosferze

Rayleigh: rozpraszanie na molekułach

$$T_R(\lambda) = \exp\left[-\frac{(X_v^{eye} - X_v(h))}{\cos(\beta)X_R} \left(\frac{400nm}{\lambda}\right)^4\right], \quad d\sigma/d\Omega \propto 1 + \cos^2\theta$$

Mie: rozpraszanie na aerozolach

$$T_{Mie} = \exp\left[\frac{1}{L_{Mie}^{h=0}} \frac{h_{Mie}}{\cos(\beta)} \left(\exp\left(-\frac{h}{h_{Mie}}\right) - \exp\left(-\frac{h_{eye}}{h_{Mie}}\right)\right)\right], \qquad d\sigma/d\Omega \propto e^{-\theta/26.7^{\circ}}$$

Rozpraszanie światła na drodze między wielkim pękiem a detektorem:

 \rightarrow osłabienie sygnału

W dotychczasowej procedurze rekonstrukcji pęku uwzględnione pojedyncze rozpraszanie fotonów czerenkowskich w kierunku detektora \rightarrow dodatkowe tło

Wielokrotne rozpraszanie \rightarrow dodatkowy sygnał w detektorze



kąt od centrum obrazu pęku [deg]

Wkład wielokrotnego rozpraszania



Wielkość ζ_{s/N} z danych Auger porównana z rozmiarem obrazu pęku



Przy dużych odległościach do pęku $\zeta_{S/N}$ > obraz pęku

 \rightarrow Zawyżamy rejestrowany sygnał!

Wkład rozproszonego światła w funkcji wysokości w ustalonym kącie ζ

zeta = 1.5 deg



Wyznaczanie energii pęku w detektorze powierzchniowym Obserwatorium Auger

Sygnał w odległości 1000 m od osi pęku S(1000) wyznaczony dla każdego pęku

kompensacja nachylenia pęku:

S₃₈ = S(1000)/CIC(θ) proporcjonalny do energii pęku



Constant Intensity Cut (CIC)

- Założenie: strumień promieni kosmicznych stały dla różnych kątów zenitalnych
- Wybieramy tę samą liczbę największych pęków o różnych nachyleniach
 - → wartości progowe S(1000) odpowiadają tej samej energii



Niezależnie od modelu oddziaływań, rozwoju pęku, własności detektora

$$S(1000 \,\mathrm{m}) = S_{38^\circ}(1 + a \cdot x + b \cdot x^2)$$
 $x = \cos^2 heta - \cos^2(38^\circ)$

Kalibracja energii FD -SD





Widmo wyznaczone różnymi metodami



Test spójności danych, rozszerzenie zakresu energii

Kształt widma



Obserwacja obcięcia GZK!

Widmo Auger i HiRes



Lepsza dokładność pomiaru energii i apertury detektora \rightarrow wyznaczenie szczegółów widma

Propagacja promieni kosmicznych



⇒ kierunek do źródła - "astronomia cząstek naładowanych"!

Anizotropia promieni kosmicznych?

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



 \rightarrow galaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o E ~ 1 EeV?
Anizotropia promieni kosmicznych?



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

 \rightarrow galaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o E ~ 1 EeV?

Rozkład kierunkowy promieni kosmicznych



Izotropia w dużej skali – pochodzenie pozagalaktyczne?

360

Autokorelacja kierunków

Pary przypadków AGASA E > 40 EeV: korelacja 3.2σ p < 10^{-4} \rightarrow źródła punktowe?

p~8%?



Niepewna interpretacja, znaczącość statystyczna? Brak korelacji w danych HiRes

 \rightarrow "astronomia cząstek naładowanych" nie działa ?

Poszukiwanie źródeł promieni kosmicznych

```
Dane uzyskane w okresie budowy Obserwatorium Pierre Auger
od 1.01.2004 (154 stacje SD)
do 31.08.2007 (1388 stacji SD)
E > 40 EeV
θ < 60°</li>
Wiarygodna rekonstrukcja
```

```
σ<sub>E</sub>< 28% σ<sub>θ</sub>< 1°
```

```
Potencjalne źródła?
```

```
Katalog Véron-Cetty, 12. edycja:
85 221 kwazarów
1 122 obiektów BL Lac
21 737 aktywnych galaktyk (AGN), w tym 694 AGN przy z<0.024,
tj. d<100 Mpc
katalog niekompletny dla d > 100 Mpc oraz blisko płaszczyzny Galaktyki
```

Badanie anizotropii

Uprzednio zgłoszone obserwacje anizotropii

Centrum Galaktyki autokorelacja (klastry - źródła punktowe?) BL Lac

były wynikiem testów a posteriori - niepewne znaczenie statystyczne

⇒ Zasada Współpracy Auger: ustalone *a priori* reguły poszukiwania anizotropii wynik potwierdzony na niezależnej próbce danych

Hipoteza bazowa: izotropia kierunków Prawdop. błędnego odrzucenia hipotezy bazowej α=1% Prawdop. błędnego zaakceptowania hipotezy bazowej β=5%

Dotychczasowe rezultaty Auger Nie obserwuje się nadmiaru z centrum Galaktyki anizotropii wielkoskalowej (dipol) klasteryzacji [AGASA] Brak znaczącej korelacji z obiektami typu BL Lac [HiRes]

Anizotropia - centrum Galaktyki

Auger:

Obszar AGASA (20°, 1-2.5 EeV): 2116 przyp. obs., 2160 spodz. (próbka danych: 4 x AGASA)



Anizotropia - centrum Galaktyki



 \rightarrow nie widać nadmiaru z centrum Galaktyki

Testowanie korelacji z AGN

Prawdop. przypadkowej korelacji (w promieniu ψ) z jednym ze źródeł-kandydatów:

- p = ułamek nieba pokryty przez obszary o promieniach ψ wokół każdego z kandydatów
- p=0.21 dla ψ=3.1°
- p=0.6 dla ψ =6°

Prawdop. przypadkowej korelacji co najmniej k spośród N przypadków

$$P = \sum_{j=k}^{N} \binom{N}{j} p^{j} (1-p)^{N-j}$$

Szukamy minimum P w funkcji ψ , z_{max} , E_{min}

Rozpoznawczy przegląd danych (1.01.2004 - 27.05.2006): minimum P dla ψ=3.1° z_{max}=0.018 (d_{max} = 75 Mpc) E_{min}= 56 EeV spośród 15 przypadków 12 skorelowanych z AGN (3.2 spodziewane z izotropii)

Procedura

Potwierdzenie anizotropii na niezależnej próbce danych (28.05.2006-31.08.2007): Rekonstrukcja taka, jak w przeglądzie rozpoznawczym

"Przepis biegnący" Analiza sekwencyjna: sprawdzamy korelację po detekcji każdego nowego przypadku Długość sekwencji przypadków N zależy od β (5%) i minimalnego spodziewanego stopnia korelacji z przeglądu rozpoznawczego (53%)

N	4	6	8	10	12	13	•••	34
k _{min}	4	5	6	7	8	8	•••	15

Test kończy się po zarejestrowaniu k_{min}(N) przypadków skorelowanych z AGN – konkluzja o anizotropii na poziomie ufności 99% lub konkluzja o niewykryciu anizotropii, jeśli k < k_{min}

Rezultat

Sekwencyjny test nowych przypadków 8 przypadków skorelowanych spośród 13 (E>56 EeV, ψ=3.1°, d<75 Mpc) 2.7 przyp. spodziewanych z izotropii

Prawdopodobieństwo takiej konfiguracji z rozkładu izotropowego = 0.0017

⇒ Odrzucenie hipotezy izotropii na poziomie ufności 99%

Pełna próbka danych Powtórna analiza całej próbki danych, z najnowszym algorytmem rekonstrukcji: minimum P dla 27 przypadków o E>57 EeV, w tym 20 przypadków skorelowanych z AGN 5 przypadków blisko płaszczyzny Galaktyki (|b|<12°)

Korelacja z aktywnymi jądrami galaktyk



9 November 2007 | \$10 Science

Media relacjonują

Reuters National Geographic Scientific American BBC News New York Times The Economist La Repubblica Le Figaro CERN Courier Physics World Sky and Telescope

Polskie Radio I Rzeczpospolita Dziennik Polski Świat Nauki

AAAS

Jak to widzą inni

Science Scientific Breakthrough of 2007 - 3. miejsce

American Institute of Physics Top Ten Physics Stories of 2007

Physics World Best Physics Stories in 2007 - November

Nature Best stories in 2007 not published in Nature

Co to znaczy?

Rozkład kierunków promieni kosmicznych nie jest izotropowy - skorelowany z rozkładem aktywnych jąder galaktyk

 \Rightarrow astronomia cząstek naładowanych działa !

źródła UHECR mają rozkład podobny do rozkładu AGN (czy źródłami są AGN?) Dwa przypadki skorelowane z galaktyką Cen A (d=3.4 Mpc)

Skala kątowa korelacji charakterystyczna dla protonów Efekt GZK jak dla protonów ⇒ skład zdominowany przez protony?

Energie akceleratorów i promieni kosmicznych



w badaniach wielkich pęków trzeba <mark>ekstrapolować</mark> własności oddziaływań jądrowych do wysokich energii

Akceleratory a promienie kosmiczne



w zderzaczu cząstek badamy obszar centralny o rozwoju wielkiego pęku decydują cząstki w obszarze fragmentacji pocisku ("w przód")

Symulacje wielkich pęków

produkcja cząstek propagacja, rozpady straty energii, wpływ pola magn.

CORSIKA (Heck et al.) AIRES (Sciutto et al.) SENECA (Drescher et al.)

. . .

najważniejsze źródło błędów systematycznych: niepewność charakterystyk produkcji wielorodnej



Symulacje wielkich pęków

```
wymagania:

czas ~1h * E/10<sup>15</sup> eV, plik wynikowy ~300 MB * E/10<sup>15</sup> eV na przypadek

\rightarrow przy 10<sup>20</sup> eV: 10<sup>11</sup> cząstek \rightarrow 11 lat CPU, 30 TB na przypadek!

"odchudzanie" wielkiego pęku (thinning)

wprow. próg energii: E<sub>th</sub> = \varepsilon E<sub>0</sub> (typowo \varepsilon= 10<sup>-4</sup> - 10<sup>-7</sup>)

śledzimy wszystkie cząstki E>E<sub>th</sub>

nieliczne cząstki E<E<sub>th</sub> (z większą wagą)
```

→ zachowanie energii, krotności cząstek, zwiększenie fluktuacji

Skład promieni kosmicznych

Głębokość maksimum rozwoju wielkiego pęku w funkcji energii



interpretacja danych zależy od modelu!

Skład - dane Auger

skład mieszany przy najwyższych energiach?



Promienie kosmiczne: fotony?

Scenariusze egzotyczne pochodzenia promieni kosmicznych ("top-down"): dominacja fotonów i neutrin



Strumień fotonów w scenariuszach "egzotycznych"



spodziewana dominacja fotonów przy najwyższych energiach

Fotony: kaskada wstępna



Efekt istotny dla $E_{\gamma} > 10^{19} \text{ eV}$ zależy od E_{γ} i B_{T}

Xmax



Efekt LPM (Landau-Pomeranczuk-Migdał) redukcja przekr. cz. na prod. par i prom.hamowania efekt rośnie z energią i gęstością powietrza → spowolnienie rozwoju pęku

Profil "fotonowego" wielkiego pęku



Przypadek o rekordowej energii

CORSIKA + PRESHOWER: 1000 w. pęków inicjowanych przez fotony



bezpieczny wniosek:

hipoteza, że to był foton nie jest poparta danymi, ale nie może być odrzucona !

Eksperymentalne ograniczenia na strumień fotonów



Pole geomagnetyczne



Cechy pęku fotonowego zależą od położenia geograficznego - możliwa lepsza identyfikacja źródeł

Neutrina



→ neutrina "z góry" rzadko oddziałują w powietrzu "z dołu" nie przechodzą przez Ziemię

 \rightarrow "poziome" wielkie pęki?

Neutrina

Poziome wielkie pęki

"hadronowe" zaczynają się wysoko w atmosferze składowa e.m. rozwija się i wygasa wysoko nad gruntem, miony docierają do gruntu – "stary" pęk → cienki, płaski front pęku R_{curv}~ 100 km



"neutrinowe" mogą zaczynać się głęboko w atmosferze na gruncie "młody" pęk \rightarrow gruby, zakrzywiony front pęku R_{curv} ~ 10 km



Struktura czasowa frontu pęku



Neutrina: poziome pęki atmosferyczne



Sygnał: kilka przypadków rocznie obfite EM, wypukły gruby front pęku długotrwały impuls Tło: tysiące przypadków rocznie ubogie EM, bogate w μ, płaski cienki front krótkotrwały impuls

Auger: obserwacja młodego pęku







Auger: obserwacja starego pęku






Detekcja neutrin taonowych

Zasady:

- Długość oddziaływania w gruncie ~ 300 km przy 1018 eV
- Droga rozpadu tau ~ 50 km przy 10¹⁸ eV
- 1° pod horyzontem \Rightarrow 200 km skał
- Maksimum pęku ~10 km po rozpadzie

W praktyce $85^{\circ} < \theta_z < 95^{\circ}$ Okno AUGER: $10^{17} - 10^{20}$ eV



Detekcja v_{τ} z wielokrotną regeneracją



Promienie kosmiczne o energiach < 10¹⁵ eV pochodzą z Galaktyki - wybuchy supernowych głównym kandydatem

Załamanie ("kolano") w widmie energii wynikiem zmiany procesu przyspieszania? warunków propagacji? ??

Niezła zgodność rożnych eksperymentów co do istnienia, położenia i kształtu "kolana"

Skład zmienia się na rzecz ciężkich pierwiastków - spójne z przyspieszaniem przez supernowe – ale brak dowodu

Dane doświadczalne z pomiarów bezpośrednich są zbyt ubogie dla ustalenia natury "kolana"

Dotychczasowe dane eksperymentalne (przed Projektem Auger) nie pozwalały na rozstrzygnięcie

czy istnieje obcięcie GZK w widmie energii? czy istnieją "punktowe" źródła promieni kosmicznych? jaki jest skład promieni kosmicznych?

Źródła promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii pozostają nieznane:

przyspieszanie w znanych obiektach astrofizycznych? procesy egzotyczne? scenariusze "hybrydowe"?

Pierwsze rezultaty Obserwatorium Pierre Auger

Rozkład kierunków promieni kosmicznch najwyższych energii nie jest izotropowy Widoczna korelacja z rozkładem pobliskich aktywnych jąder galaktyk Efekt GZK widoczny w widmie energii ⇒ Promienie kosmiczne najwyższych energii pochodzą ze źródeł

pozagalaktycznych

Astronomia cząstek naładowanych: nowe okno na pobliską część Wszechświata badanie źródeł, pól magnetycznych

Skład mieszany przy najwyższych energiach? → czy modele oddziaływań jądrowych są poprawne?
Skład zdominowany przez protony?
nowe możliwości badania oddziaływań jądrowych

Widmo energii: załamanie przy $3.4 \times 10^{19} \text{ eV} \rightarrow \text{obcięcie GZK}$?

Projekt Pierre Auger już dostarcza danych eksperymentalnych potrzebnych do wyjaśnienia zagadki promieni kosmicznych najwyższych energii

Instytut Fizyki Jądrowej PAN uczestniczy w Projekcie Pierre Auger

 \rightarrow znakomite perspektywy pracy badawczej!

Prace magisterskie (do tej pory wykonano 7 prac mgr z tematyki Auger) Międzynarodowe Studium Doktoranckie IFJ PAN do tej pory w ramach Projeku Auger uzyskano 2 doktoraty + 1 doktorat w toku

henryk.wilczynski@ifj.edu.pl