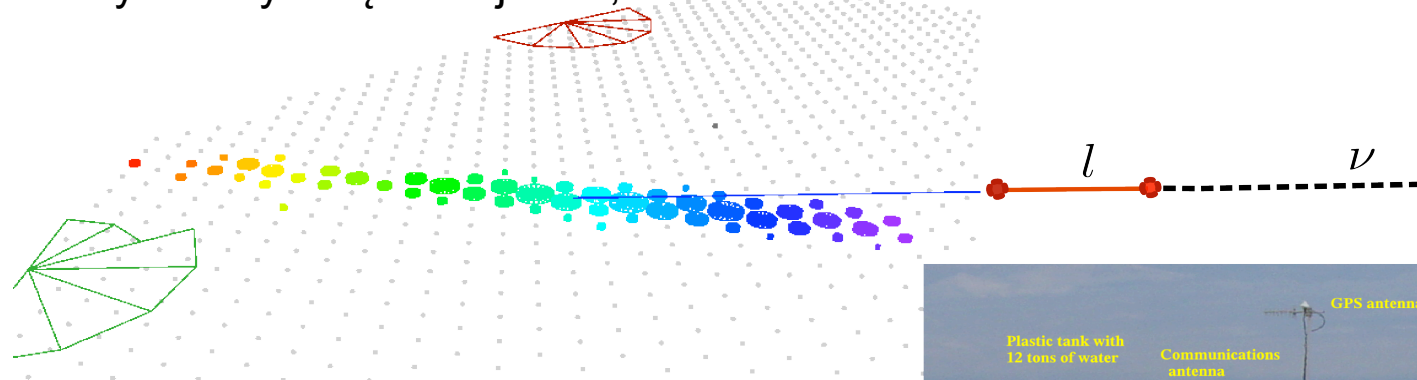


Perspektywy detekcji neutrin skrajnie wysokich energii w Obserwatorium Pierre Auger

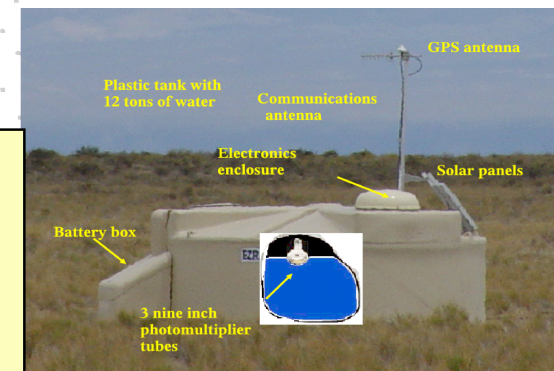
D. Góra^{1,2}

¹ Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

² Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków



- Wstęp (astrofizyczne źródła neutrin, własności ν pęków) ...
- Kryteria identyfikacji neutrinowych pęków atmosferycznych
- Limity obserwatorium Auger dla neutrin
- Obliczenia MC (liczba przypadków, wpływ topografii)



Promienie kosmiczne najwyższych energii

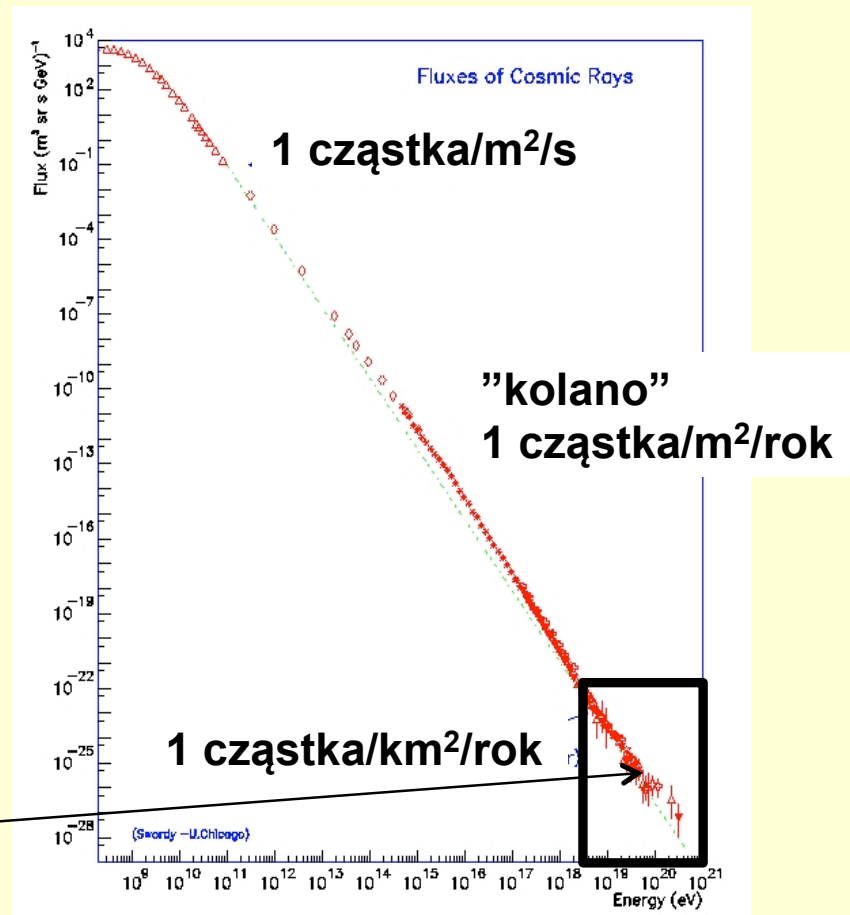
- ◆ Promienie kosmiczne naładowane cząstki docierające do Ziemi z Kosmosu
- ◆ Promienie kosmiczne najwyższych energii, powyżej 10^{17} eV

Jaki jest skład promieni kosmicznych ???

W jaki sposób są one przyspieszane ???

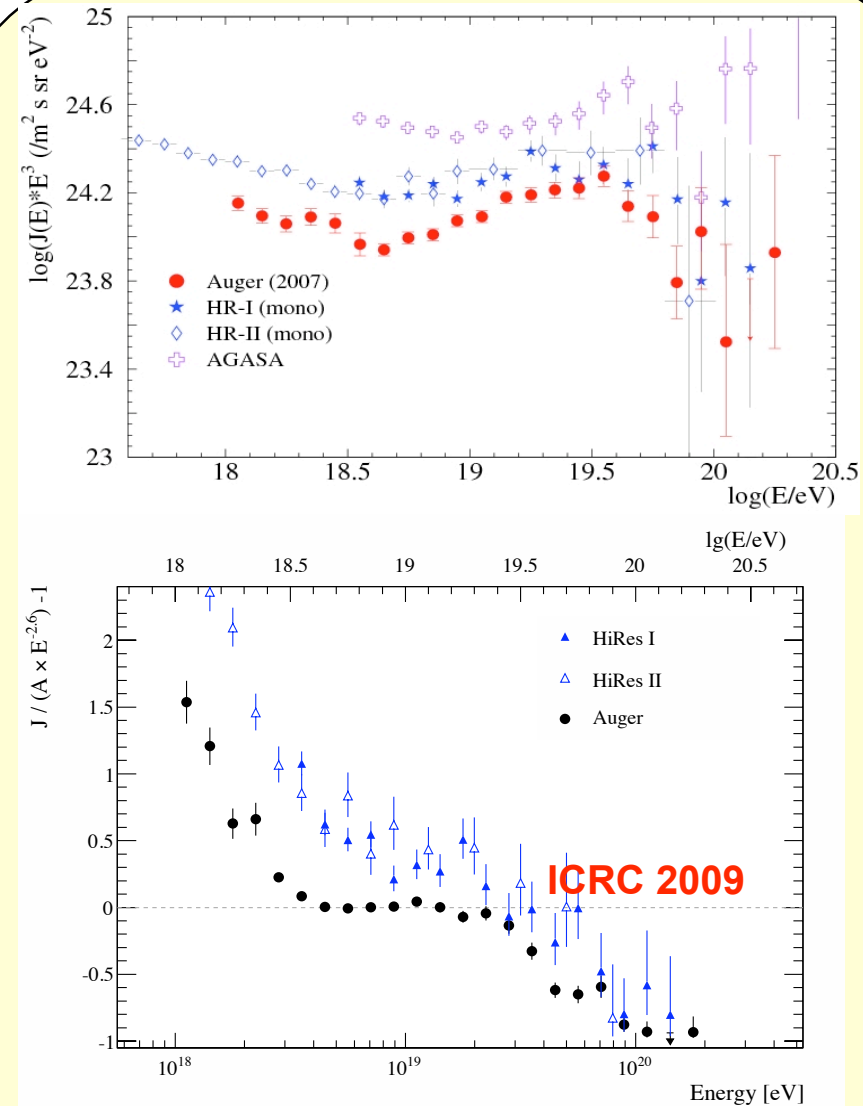
Jakie są źródła promieni kosmicznych ???

Widmo energetyczne



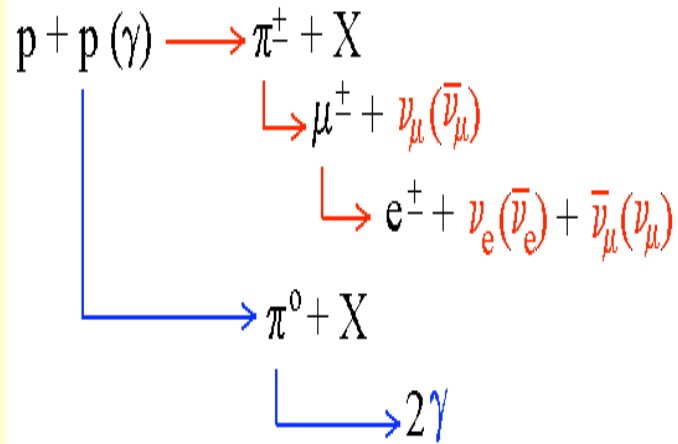
Promienie kosmiczne najwyższych energii

- Promienie kosmiczne (protony lub ciężkie jądra) oddziałują z fotonami mikrofalowego tła tzw. rezonans Δ , produkując piony, które unoszą część energii cząstki pierwotnej.
- Droga oddziaływania dla protonu o energii $E=2 \times 10^{18}$ eV wynosi około 30 Mpc. Promienie kosmiczne emitowane ze źródeł ulokowanych na większych dystansach nie powinny docierać do Ziemi bez utraty znacznej części swojej energii.
- Powinniśmy nie obserwować promieni kosmicznych najwyższych energii powyżej około $\sim 5 \times 10^{19}$ eV tzw. obcięcie GZK (Greisena, Zatsepina, Kuzmina)



Neutrina

Fotoprodukcja hadron-foton



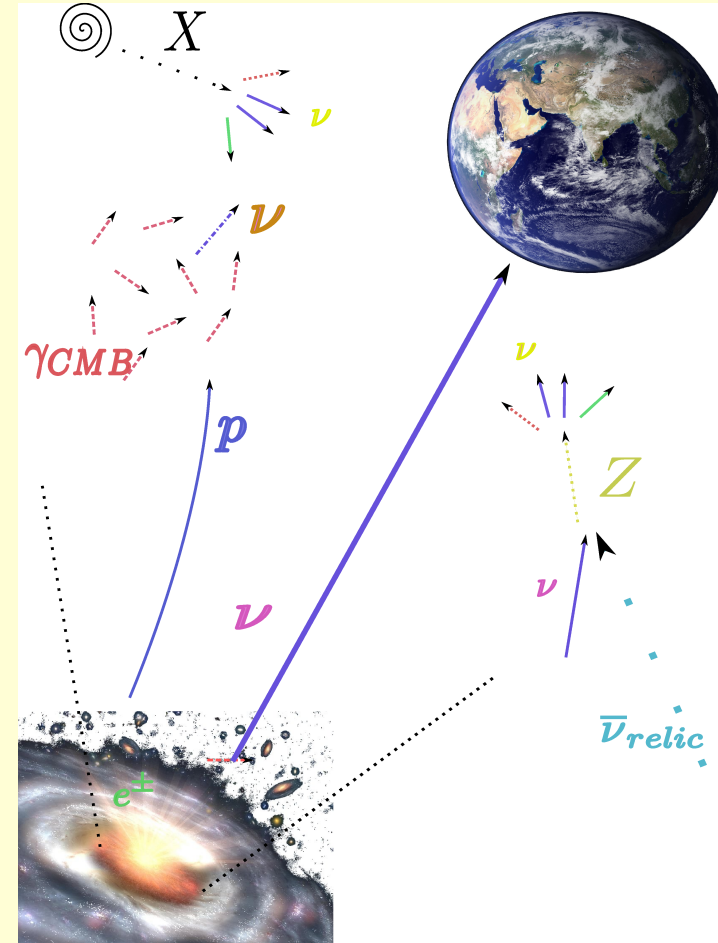
W źródłach (AGN, GRB, supernowe ...)

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1:2:0$$

W wyniku procesu oscylacji
(zakładając maks. mieszanie)

$$\Rightarrow \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1:1:1$$

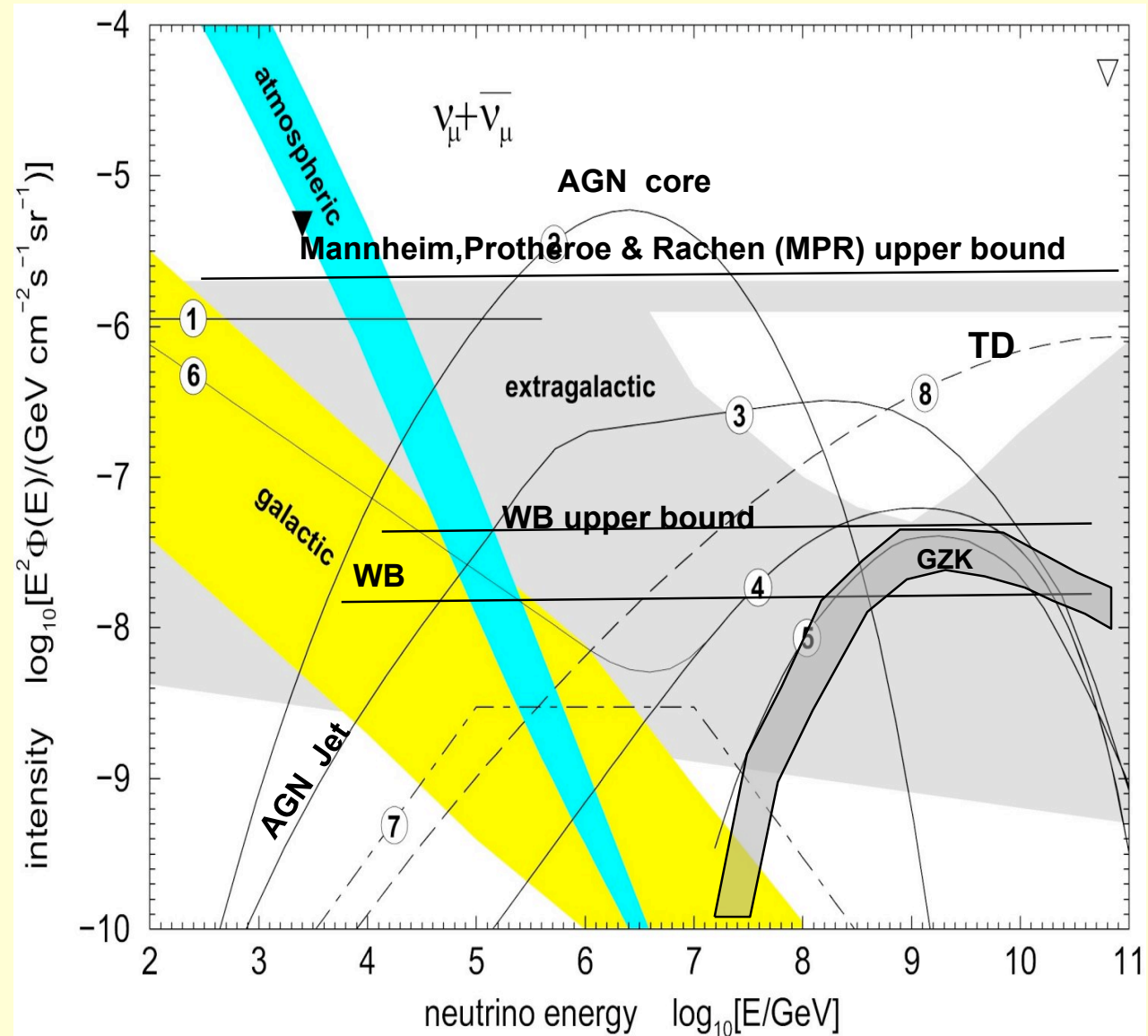
do Ziemi docierają również ν_τ



Neutrino GZK pochodzą z rozpraszania promieni kosmicznych (protonów) na promieniowaniu reliktywnym tła.

Przewidywania teoretyczne widm energetycznych neutrin

- 1 pp core AGN (Nellen)
- 2 p γ core AGN (Stecker Salomon)
- 3 p γ „maximum model“ (Mannheim et al.)
- 4 p γ blazar jets (Mannh)
- 5 p γ AGN (Rachen & Biermann)
- 6 pp AGN (Mannheim)
- 7 GRB (Waxman & Bahcall)
- 8 TD (Sigl)



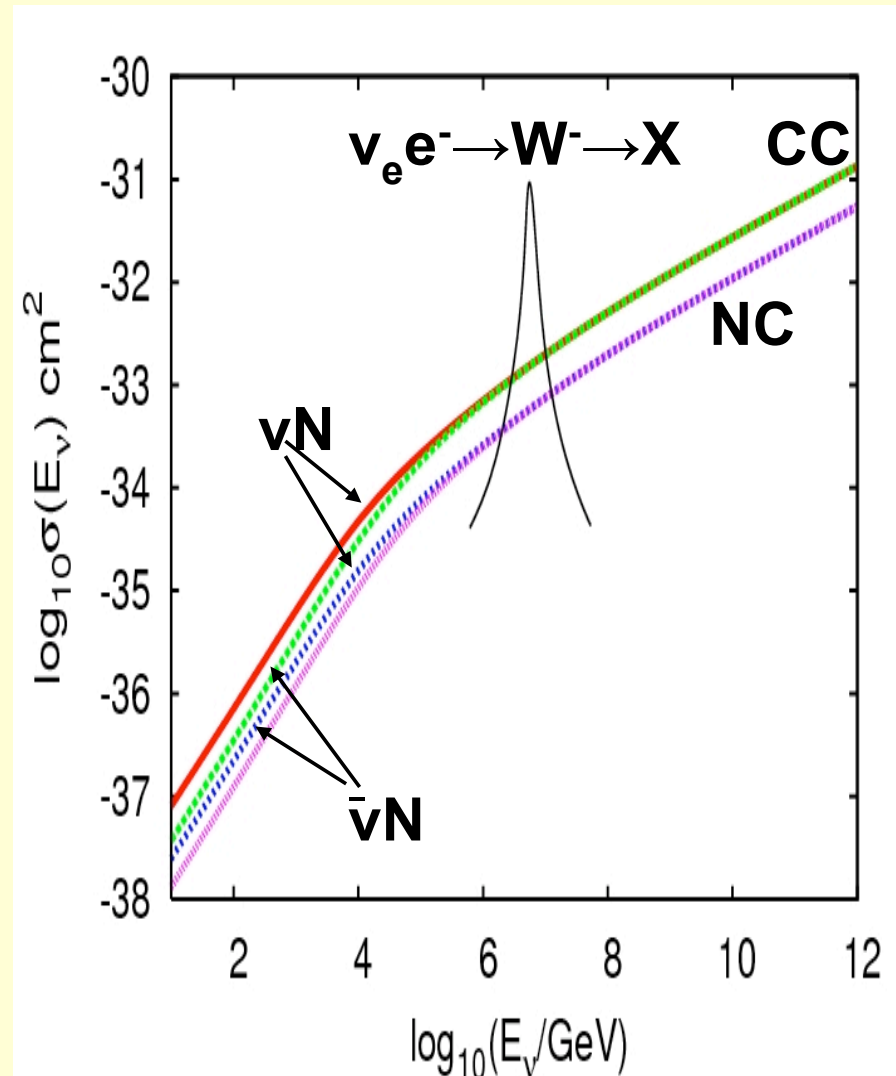
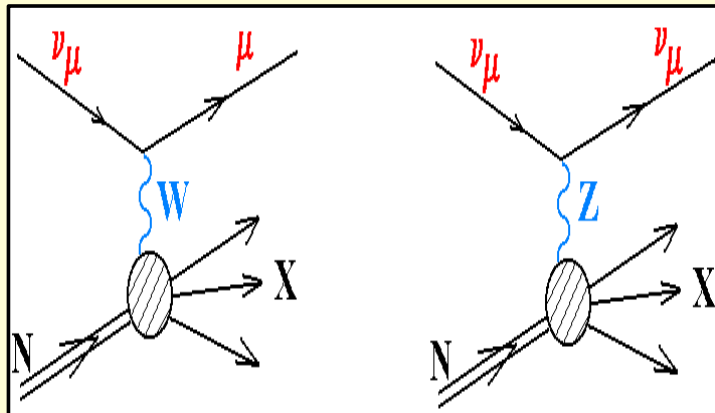
Przekrój czynny neutrin na oddziaływanie z materią

W Modelu Standardowym
słabe oddziaływania
via bozon Z^0 and $W^{+/-}$:

$$\nu_l + N \rightarrow W^{\pm} \rightarrow l + X \quad (\text{CC})$$

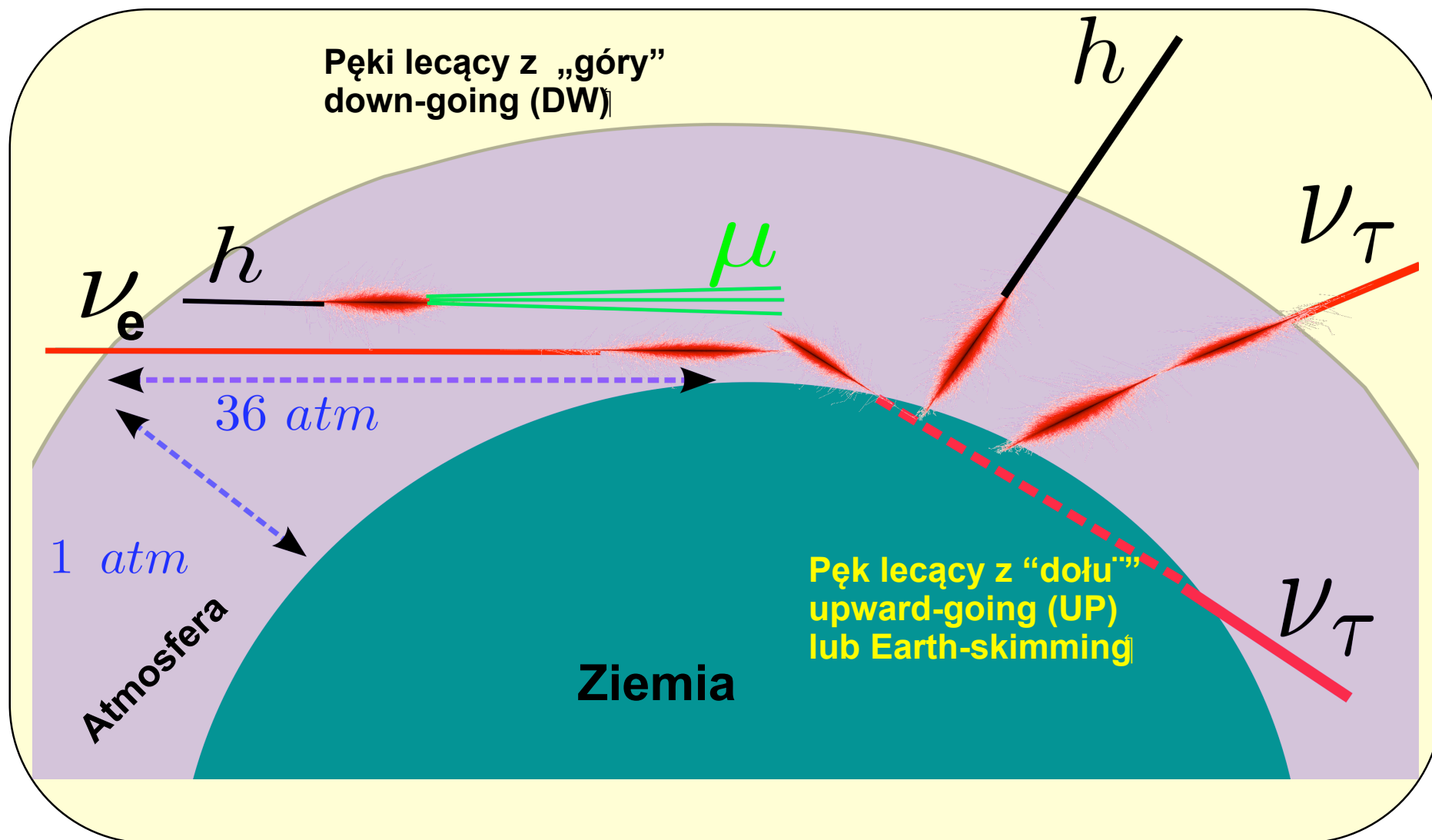
$$\nu_l + N \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_l + X \quad (\text{NC})$$

gdzie $l=e,\mu,\tau$ X stan hadronowy



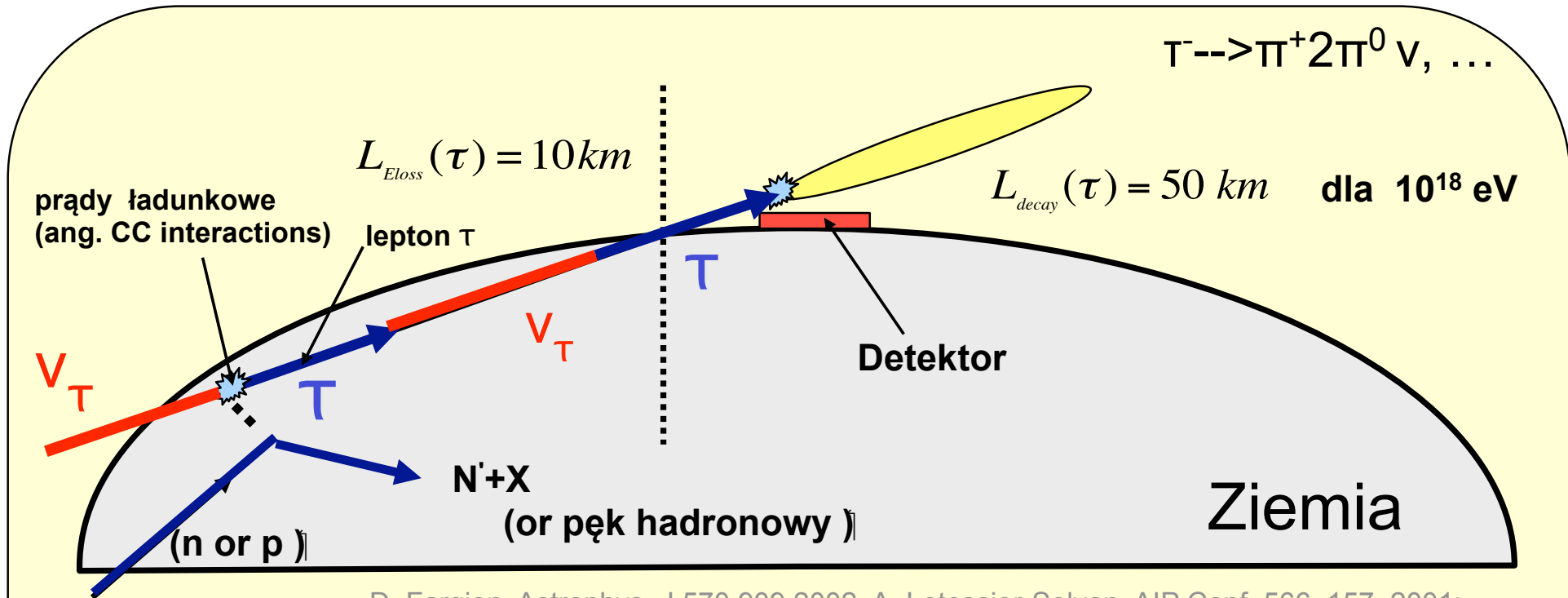
Ze względu na mały przekrój czynny neutrin na oddziaływanie z materią wymagana jest duża "tarcza", ażeby zarejestrować znaczącą liczbę neutrin

Detekcja neutrin wysoko-energetycznych



Detekcja neutrinowych peków ($>10^{15}$ eV) oparta na obserwacji poziomych pęków inicjowanych przez neutrino taonowe lub neutrino elektronowe. (dla tych energii Ziemia przestaje być „przezroczysta” dla neutrin)

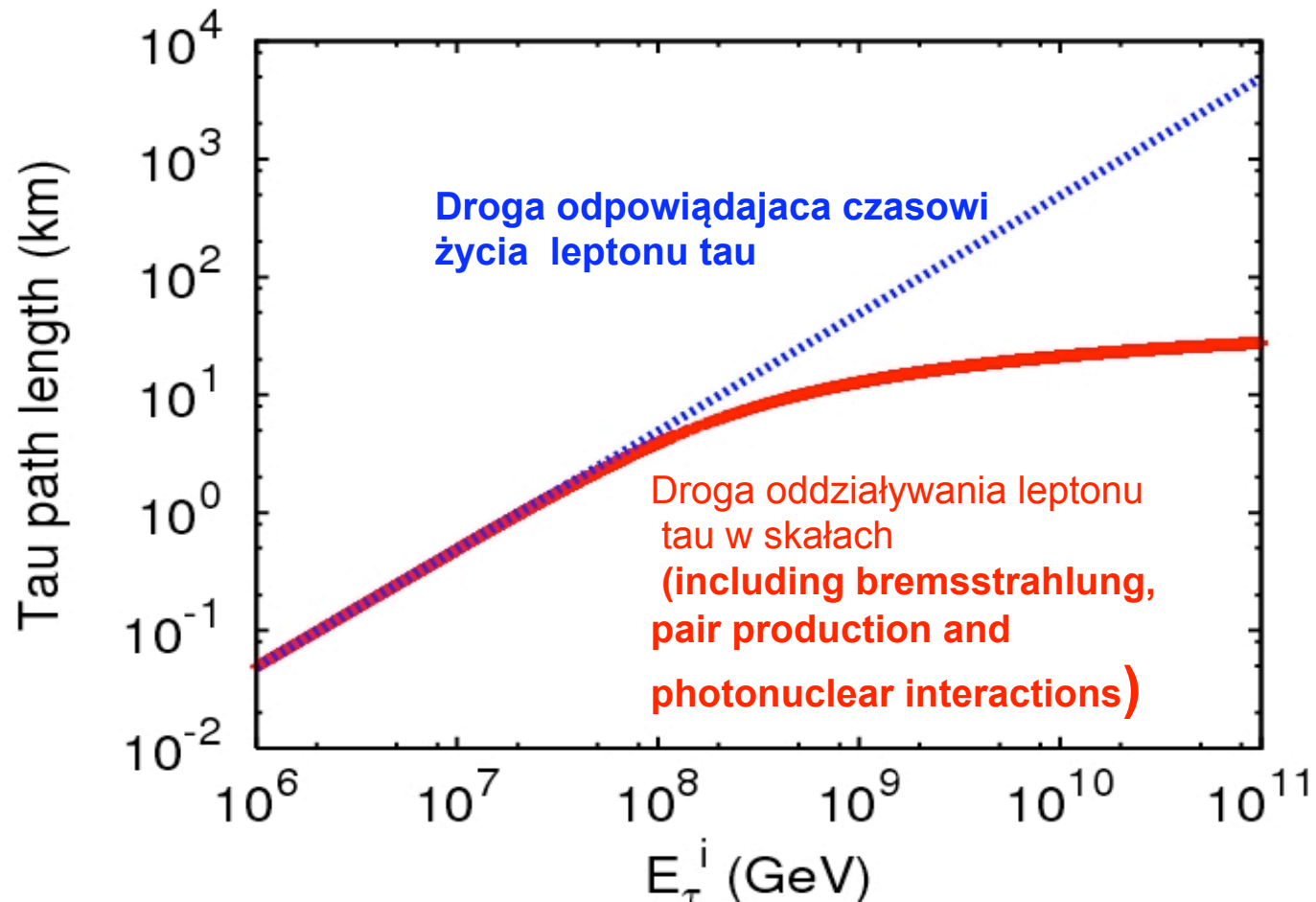
Poziome pęki inicjowane przez neutrino taonowe



D. Fargion. *Astrophys. J* 570,909,2002, A. Letessier-Selvon, *AIP Conf.* 566, 157, 2001; J.L.Feng et al., *Phys. Rev. Lett.* 88 161102 2002.

- droga oddziaływania dla leptonu τ rzędu kilku km (skały), lepton τ wyprodukowany w pobliżu Ziemi może ją opuścić i zapoczątkować potencjalnie obserwowalny przez detektor pęk atmosferyczny.
- tylko poziome (90° - 95°) wielkie pęki atmosferyczne potencjalnie obserwowane przez detektor
- detektor "czuły" tylko na oddziaływania typu ν_τ CC (neutrino elektronowe i mionowe absorbowane podczas propagacji w Ziemi)
- "gęsta tarcza" spodziewana znacznie większa liczba przypadków niż dla pęków lecących z dołu

Propagacja leptonu tau

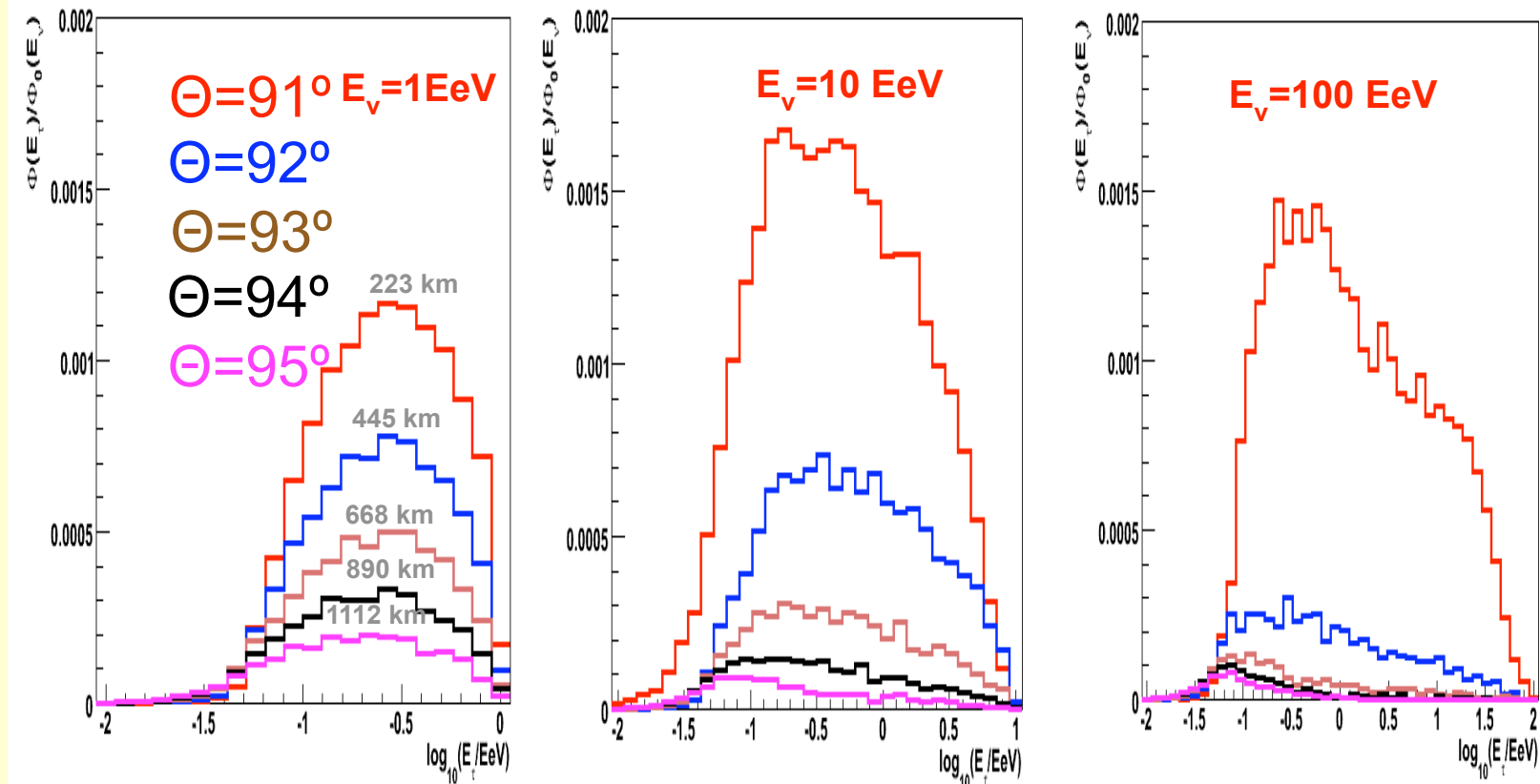


Droga oddziaływania dla leptonu tau rzędu kilku km, lepton tau wyprodukowany w pobliżu powierzchni Ziemi może ją opuścić i zapoczątkować potencjalnie obserwowalny przez detektor pęk atmosferyczny.

Główne kanały rozpadu leptonu tau

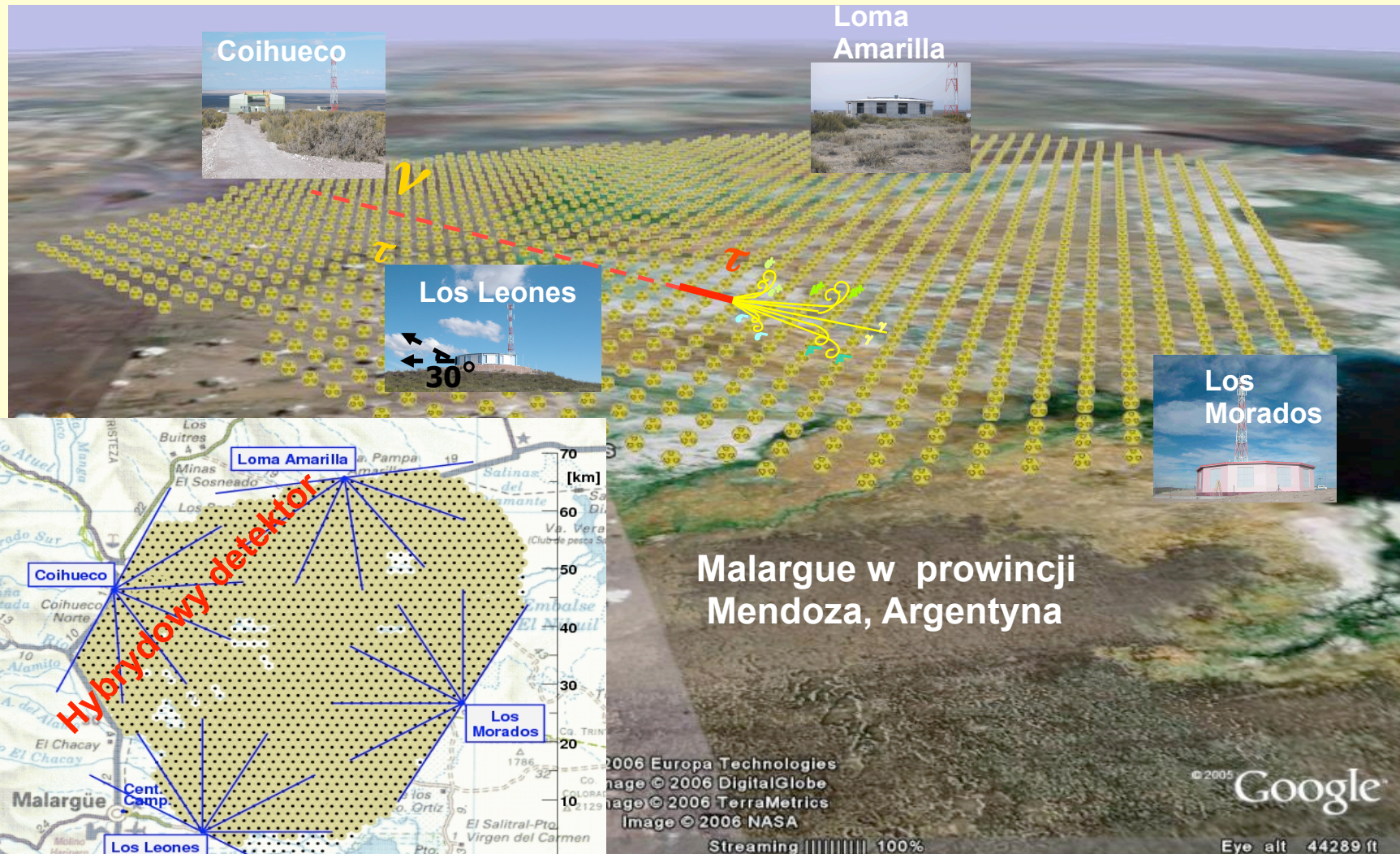
Decay	Secondaries	Probability	Air-shower
$\tau \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	μ^-	17.4%	Unobservable
$\tau \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	e^-	17.8%	1 Electromagnetic
$\tau \rightarrow \pi^- \nu_\tau$	π^-	11.8%	1 Hadronic
$\tau \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$	$\pi^-, \pi^0 \rightarrow 2\gamma$	25.8%	1 Hadronic, 2 Electromagnetic
$\tau \rightarrow \pi^- 2\pi^0 \nu_\tau$	$\pi^-, 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$	10.79%	1 Hadronic, 4 Electromagnetic
$\tau \rightarrow \pi^- 3\pi^0 \nu_\tau$	$\pi^-, 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	1.23%	1 Hadronic, 6 Electromagnetic
$\tau \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$	$2\pi^-, \pi^+$	10%	3 Hadronic
$\tau \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$	$2\pi^-, \pi^+, \pi^0 \rightarrow 2\gamma$	5.18%	3 Hadronic, 2 Electromagnetic

Widmo energetyczne leptonów tau



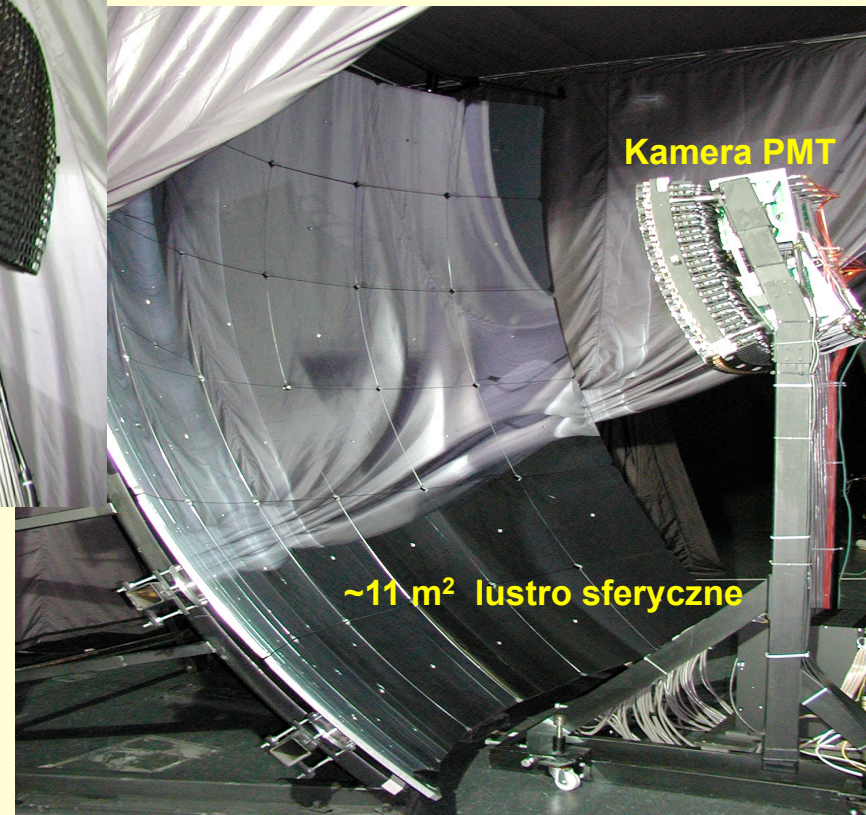
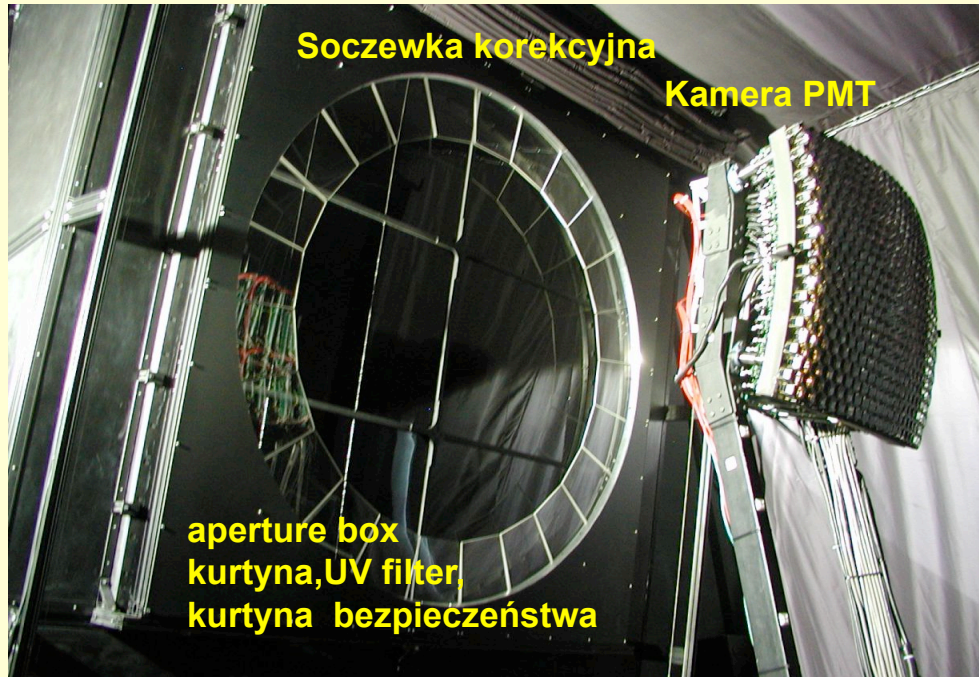
Tylko poziome wielkie pęki atmosferyczne inicjowane przez lepton tau mogą być potencjalnie obserwowane przez detektor naziemny

Obserwatorium Pierre Auger (największy naziemny detektor neutron ?)



Obserwatorium Pierre Auger

Detektor fluorescencyjny FD
(rejestruje świecenie wywołane przez zderzenia cząstek pęku z molekułami powietrza)

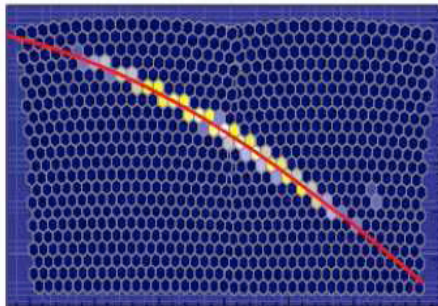
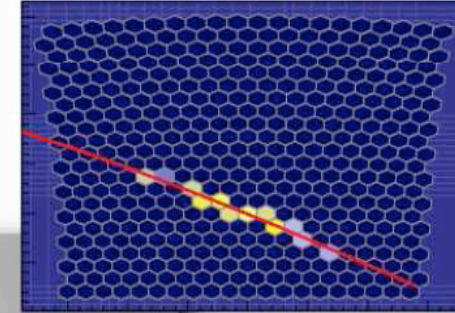


Kamera z 440 fotopowielaczami każdy o polu widzenia 1.5°, sygnał mierzony co 100 ns ⇒ Informacja o podłużnym rozwoju wielkiego pęku

Przykład rzeczywistego pęku

Event: 1364365

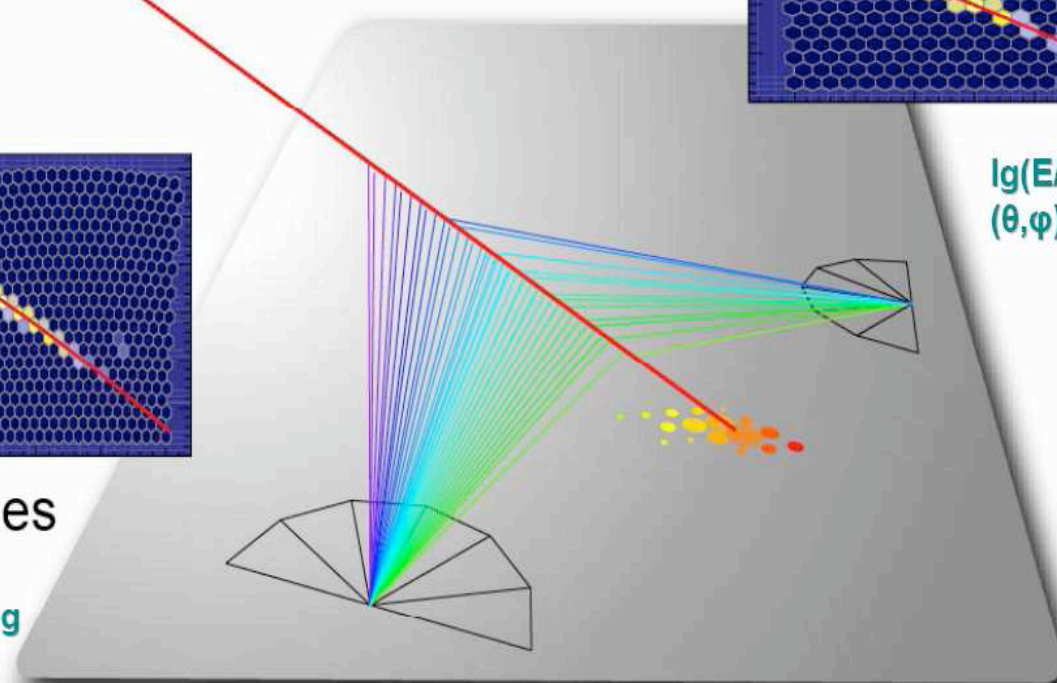
Los Morados



Los Leones

$\lg(E/eV) \sim 19.3$
 $(\theta, \varphi) = (63.7, 148.3)$ deg

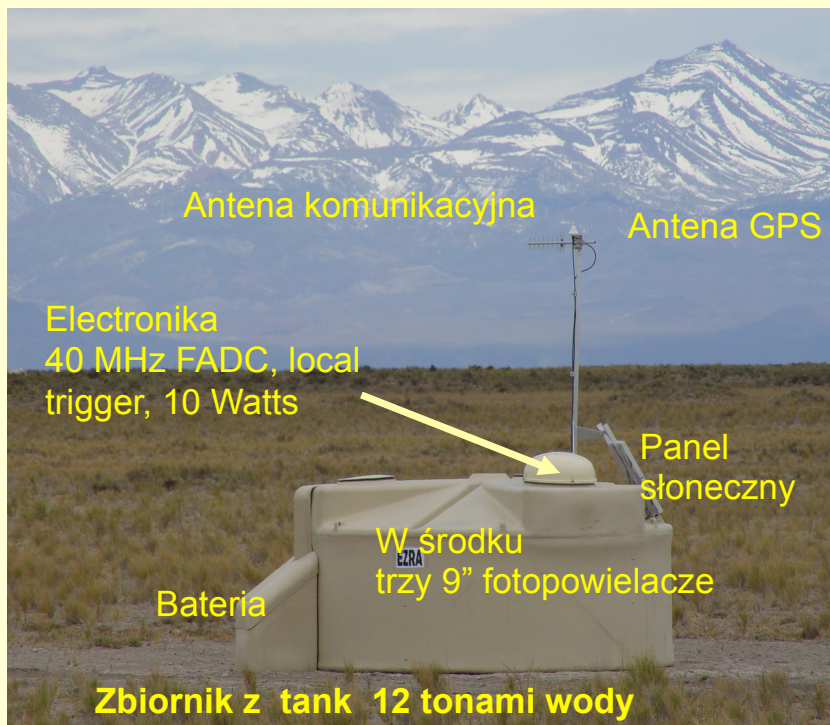
$\lg(E/eV) \sim 19.2$
 $(\theta, \varphi) = (63.7, 148.4)$ deg



SD array: $\lg(E/eV) \sim 19.1$
 $(\theta, \varphi) = (63.3, 148.9)$ deg

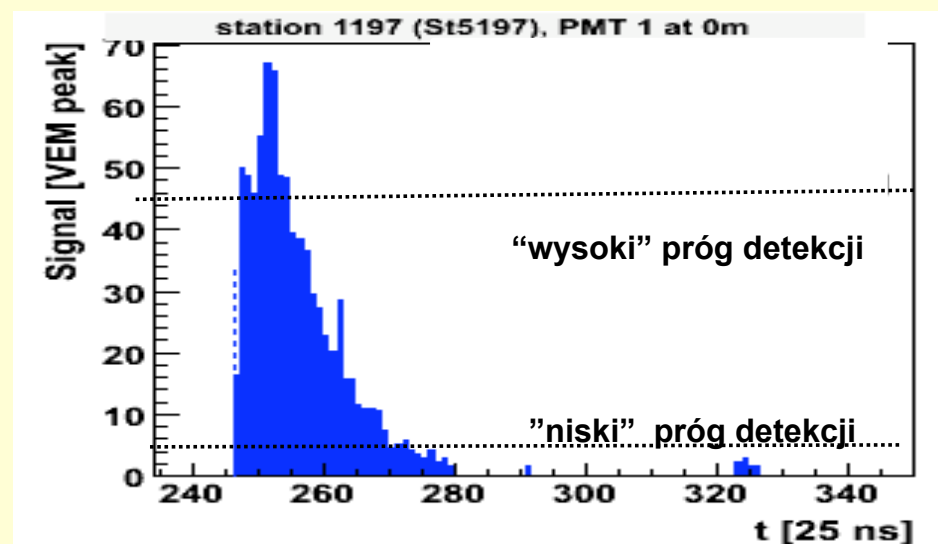
Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy (wodny licznik czerenkowski)



Lokalny trigger (na poziomie stacji): logiczne *lub* dwóch warunków:

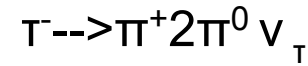
- każdy wysoki poziom progu przekroczony conajmniej przez jeden bin śladu FADC
- niski poziom progu jest przekroczony conajmniej N razy w zadanym czasie tzw. *time over threshold (ToT)*:



25 ns czasowa zdolność rozdzielcza i konstrukcja triggera licznika czerenkowskiego pozwala rozróżnić sygnały długie i krótkie

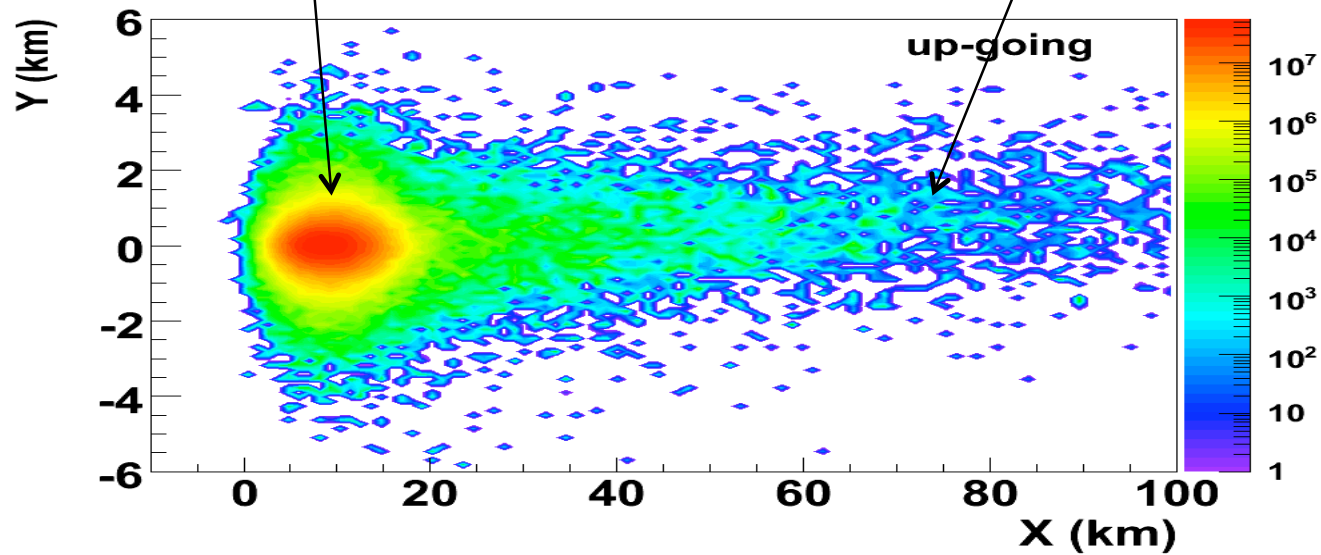
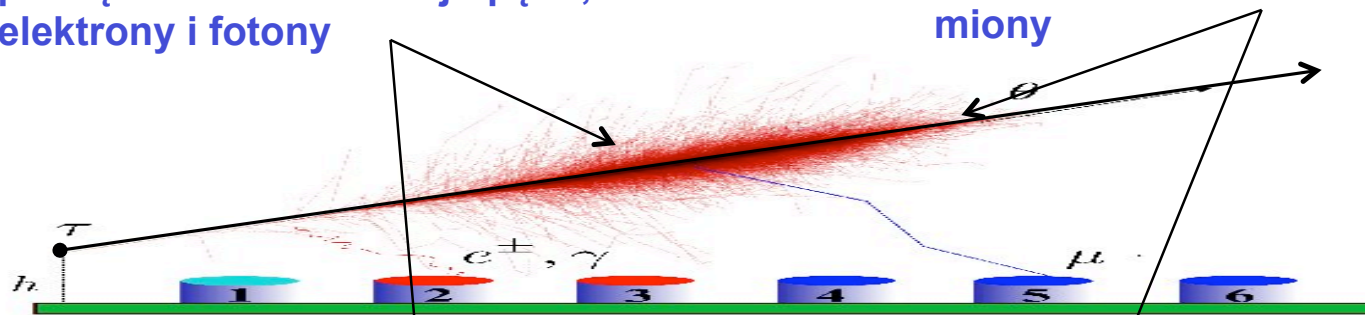
Obraz pęku (ślad) dla poziomego pęku tauonowego

$E=10^{18}$ eV, $\Theta=91^\circ$, $\varphi=180^\circ$, $h_{\text{decay}}=500$ m



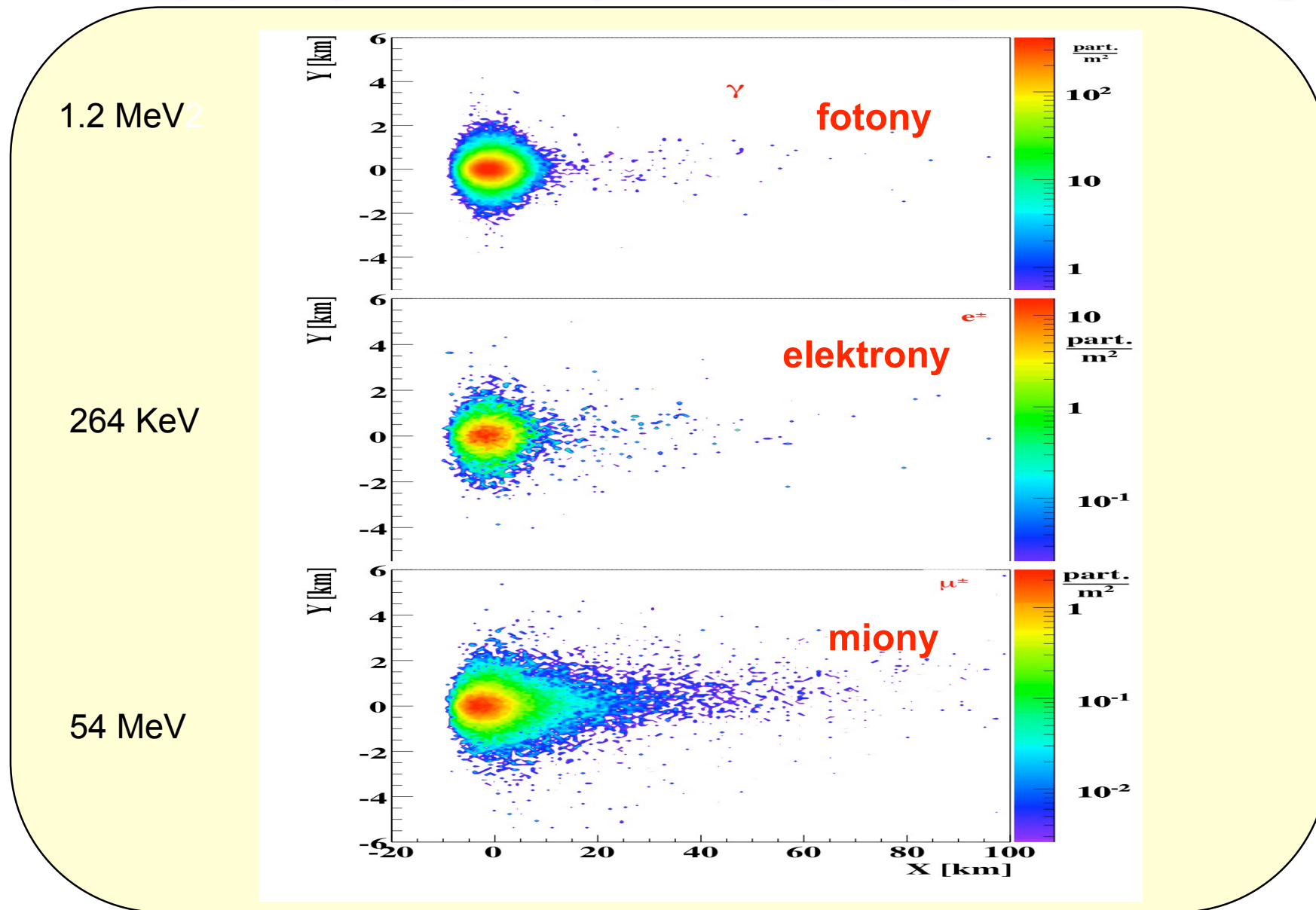
początkowa faza rozwoju pęku,
elektrony i fotony

późna faza rozwoju pęku,
miony



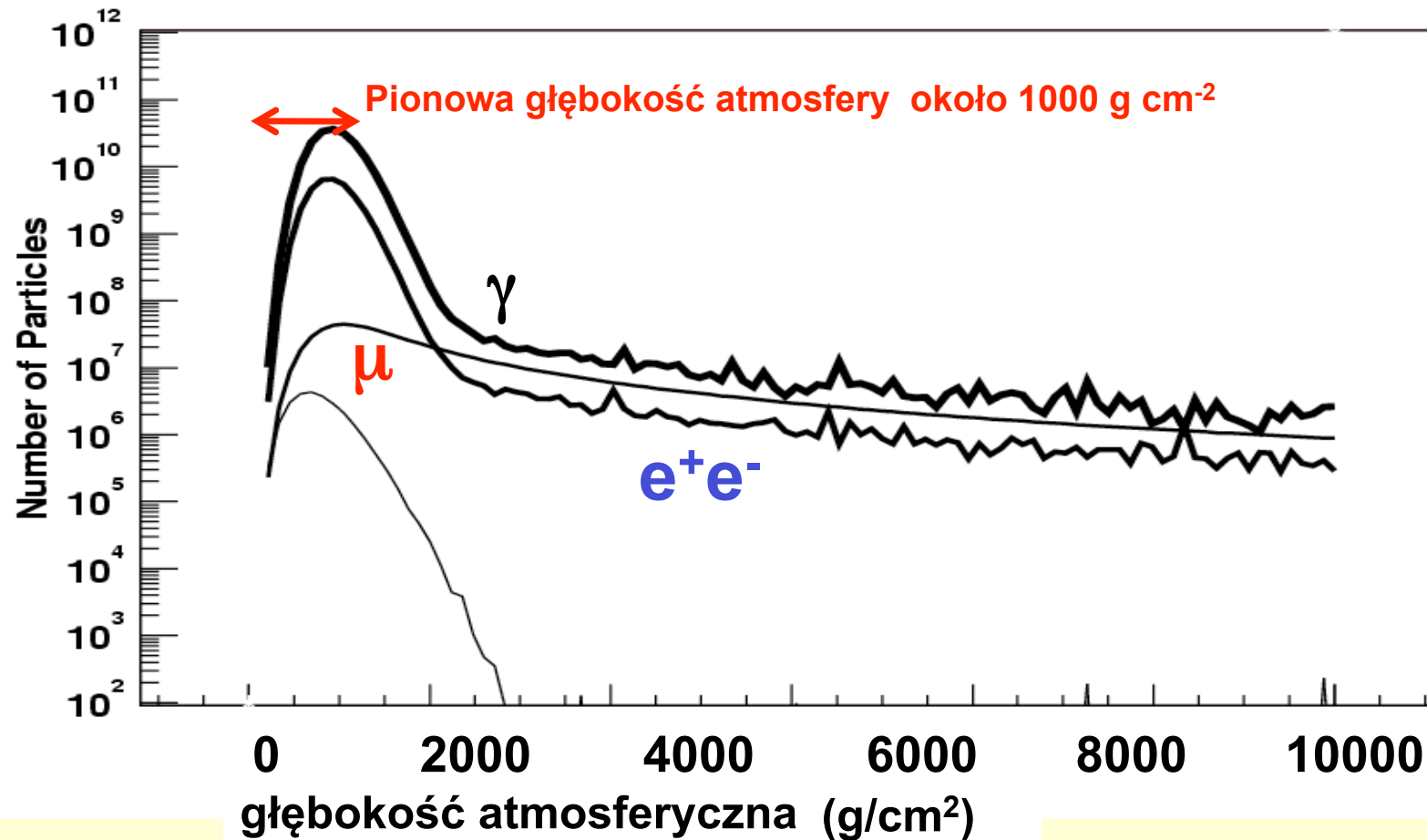
Rozkład gęstości cząstek na powierzchni Ziemi

Obraz pęku (ślad) dla poziomego pęku taonowego



Rozkład gęstości cząstek na powierzchni Ziemi,
wydłużony ślad z silną składową elektromagnetyczną (EM)

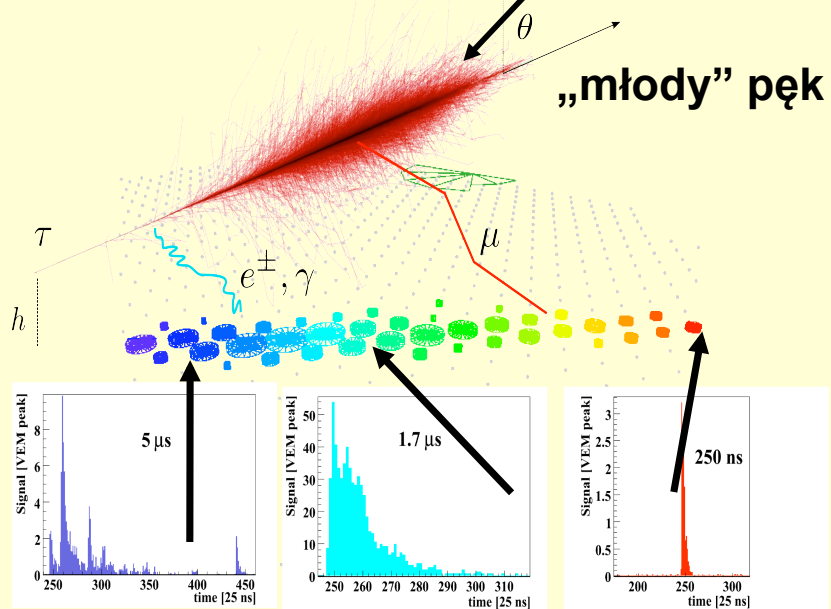
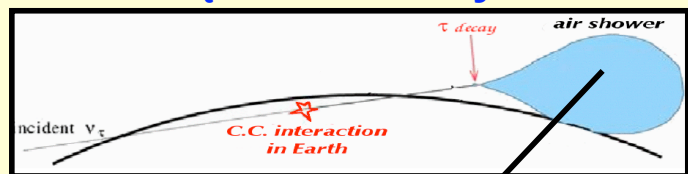
Poziome wielkie pęki atmosferyczne



Składowa elektromagnetyczna (EM) wygaszana po około 2000 g cm^{-2} (dla wielkich pęków z kątem zenitalnym większym niż $\sim 64^\circ$)

Jak szukać neutrinowych pęków ?

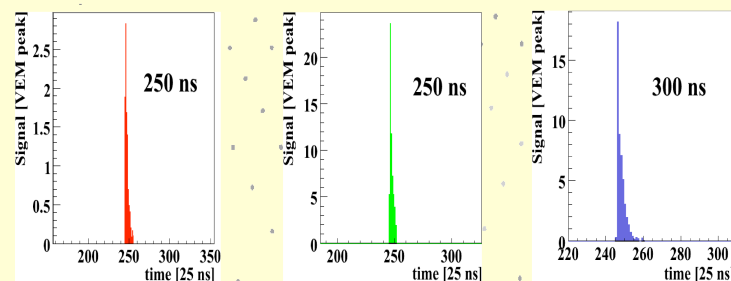
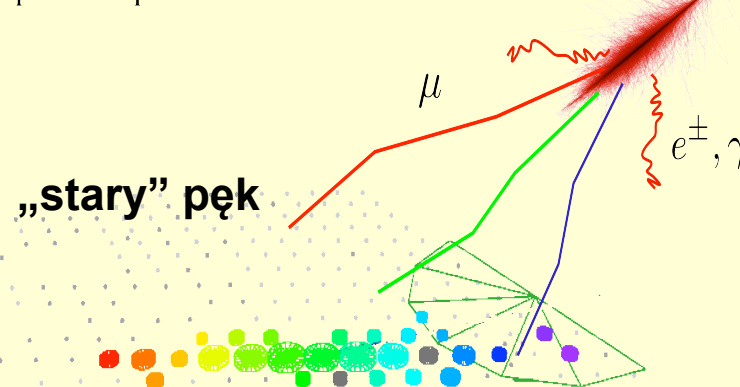
Pęk neutrinowy



Długi sygnał głównie w początkowej fazie rozwoju wielkiego pęku indukowany przez składową EM

Tło: pęk poziomy hadronowy

Top of the atmosphere



Krótki sygnał pochodzący od mionów

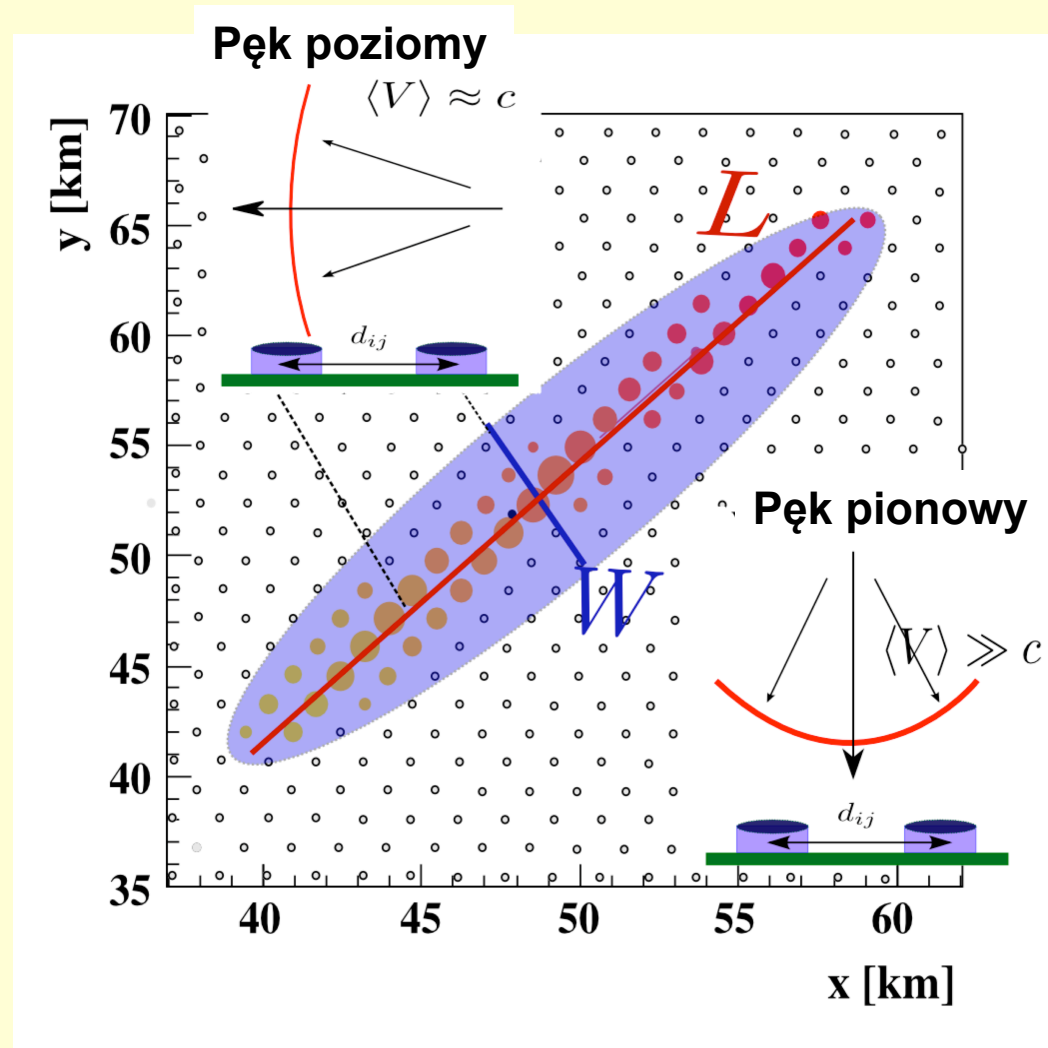
Sygnatura: poziomy pęk z silną składową elektromagnetyczną

Observable

(analiza śladu pęku widzianego przez detektor powierzchniowy)

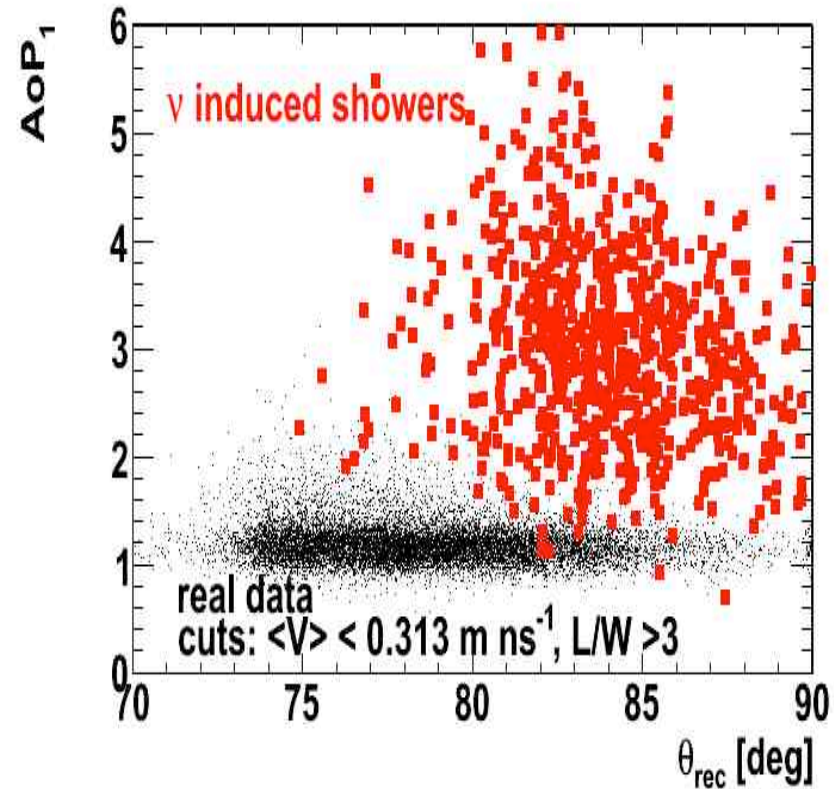
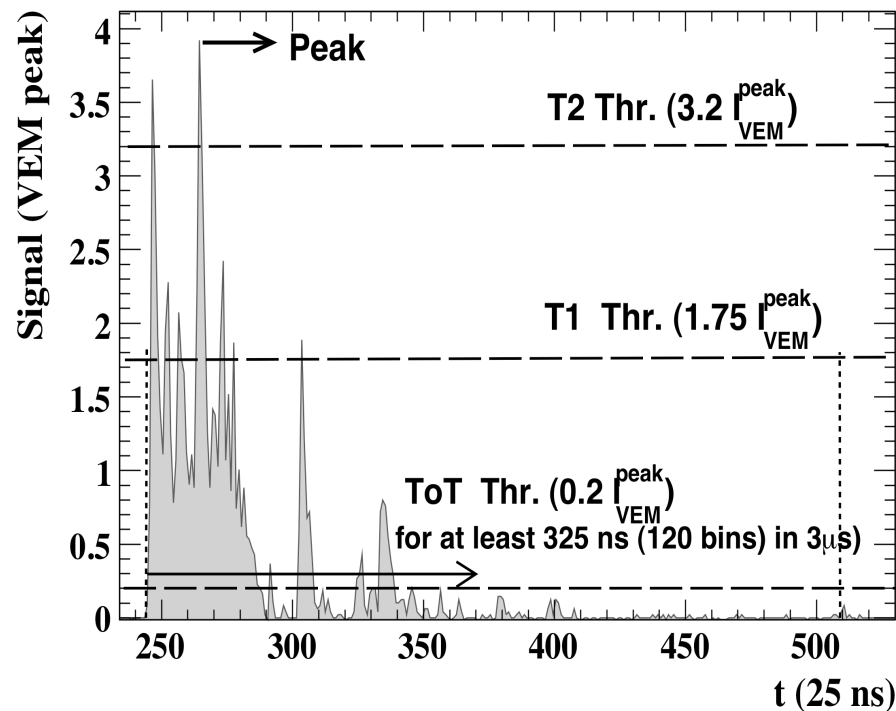
(P. Billoir, O. Blanch Bigas, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 168 (2007) 225-231)

- długość L i szerokość W :
główna i boczna oś
elipsoidy inercji ważonej
przez sygnał stacji.
- prędkość efektywna $\langle V \rangle$:
dla każdej pary stacji
(odległość zrzutowana na
główną oś elipsoidy/ różnica
pomiędzy czasem triggera)
- odchylenie standartowe
prędkości efektywnej $\sigma_{\langle V \rangle}$



Observable

(analiza śladu FADC rejestrowanego przez detektor powierzchniowy)

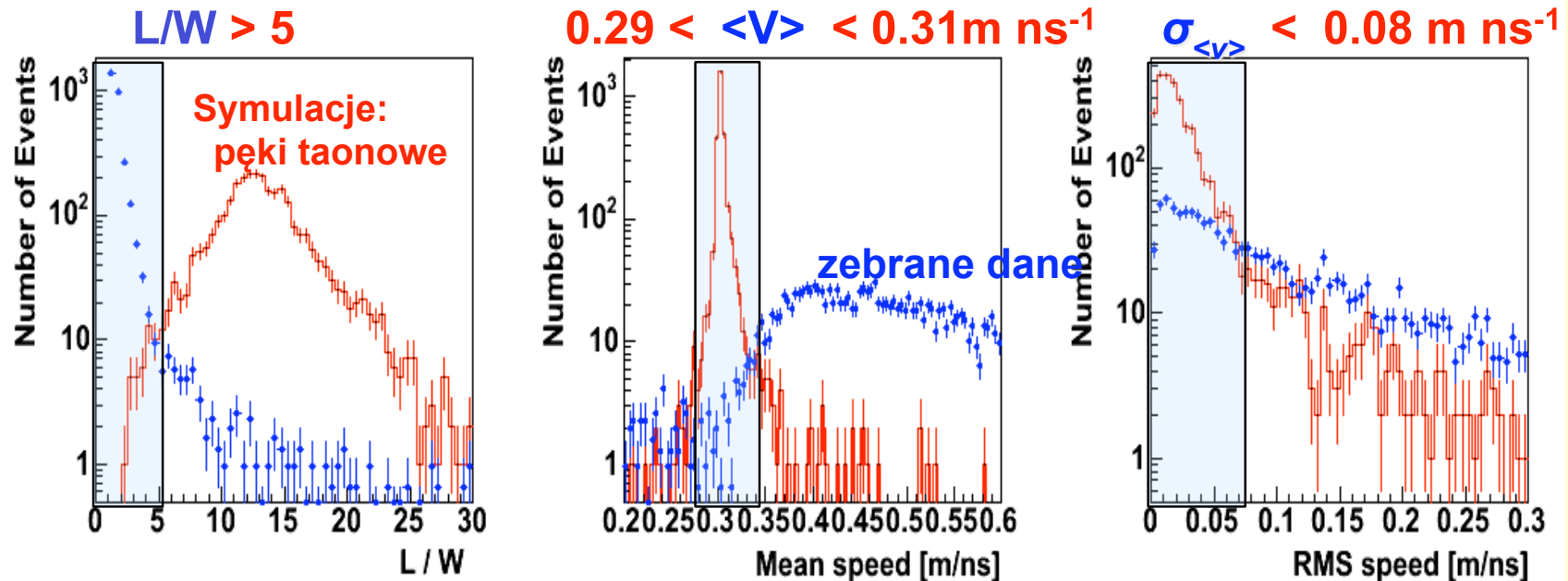


- całka z sygnału / maksymalna wartość sygnału tzw. Area-over Peak (AoP)
- aby rozpoznać neutrinowe pęki, żądamy aby pęk posiadał większość stacji z sygnałem ToT

Kryteria selekcji neutronowych pęków

(dla pęków lecących z dołu , dla obserwatorium Auger)

Selekcja pęków poziomych



Selekcja pęków z silną składową EM

60% stacji z sygnałem ToT

-powyższe kryterium + dane z obs. Auger **01/2004-08/2007** => **0** kandydatów

The Pierre Auger Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 100, 211101 (2008)

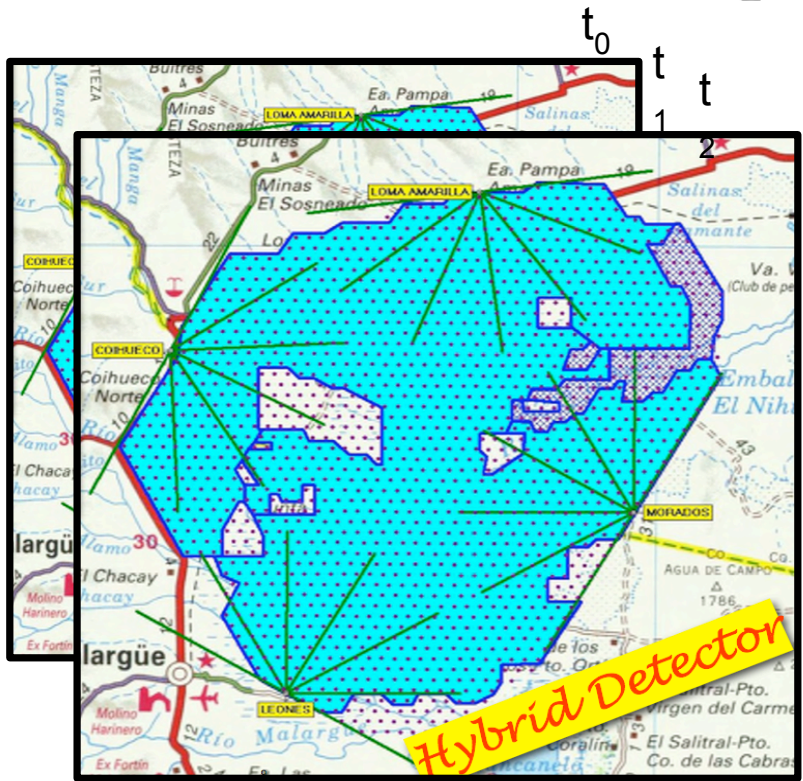
-aktualizacja: powyższe kryterium+dane **01/2004-02/2009** => znów **0** kandydatów

The Pierre Auger Collaboration, *Phys. Rev. D* 79, 102001 (2009)

Limit obserwatorium Auger dla pęków taonowych

$$\text{Expos} = \int_{\Omega} d\Omega \int_0^{E_{\nu}} dE_{\tau} \int_0^{\infty} dh_c \frac{d^2 N_{\tau}}{dE_{\tau} dh_c} P_{\tau},$$

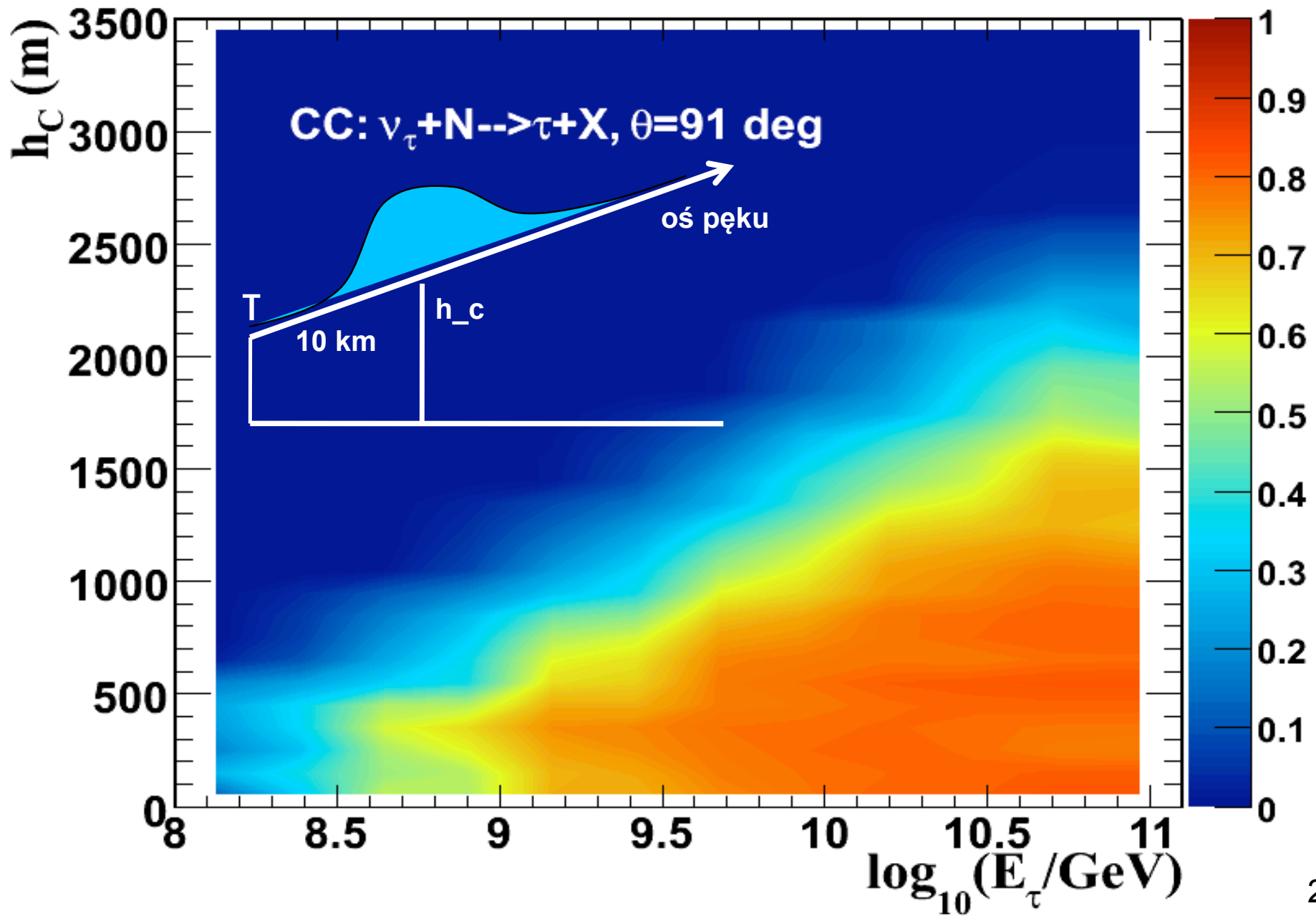
$$P_{\tau}(E_{\tau}, h_c) = \int_T dt \int_S dx dy \cos \theta \epsilon(E_{\tau}, h_c, x, y, t),$$



$\frac{d^2 N_{\tau}}{dE_{\tau} dh_c}$ - flux of emerging tau leptons

$\epsilon(E_{\tau}, h_c, x, y, t)$ - identification efficiency

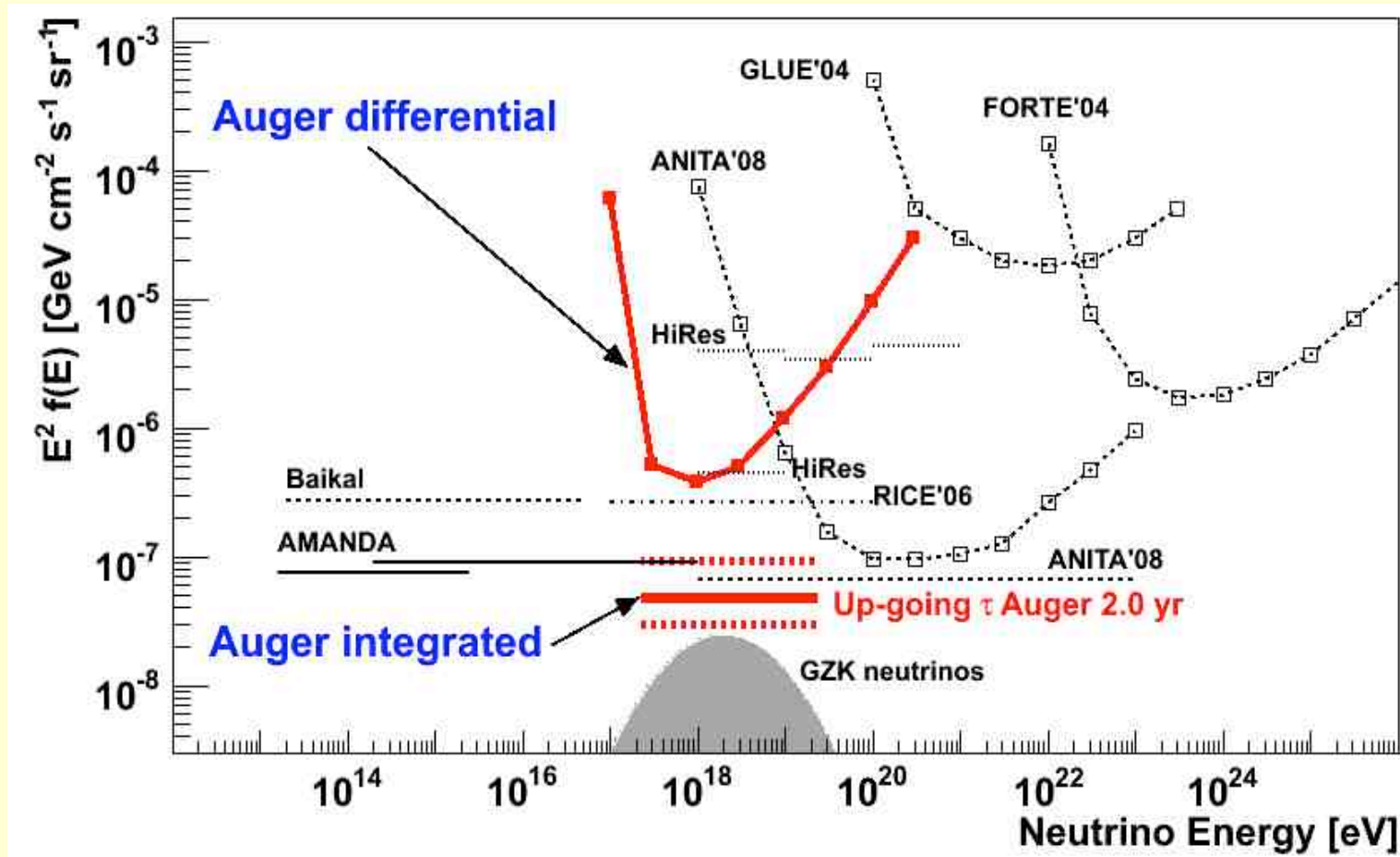
Wydajność detekcji pęków taonowych



Limit obserwatorium Auger dla neutrin taonowych

(The Pierre Auger Collaboration, *Phys. Rev. D* 79, 102001, 2009)

90% CL for each flavour with the worst systematic scenario



The flux limit for E^{-2} flux of tau neutrino:

$$E_\nu^2 \Phi(E_\nu) < 4.7 \times 10^{-8} \left(\begin{matrix} -2.5 \\ +2.2 \end{matrix} \right) \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

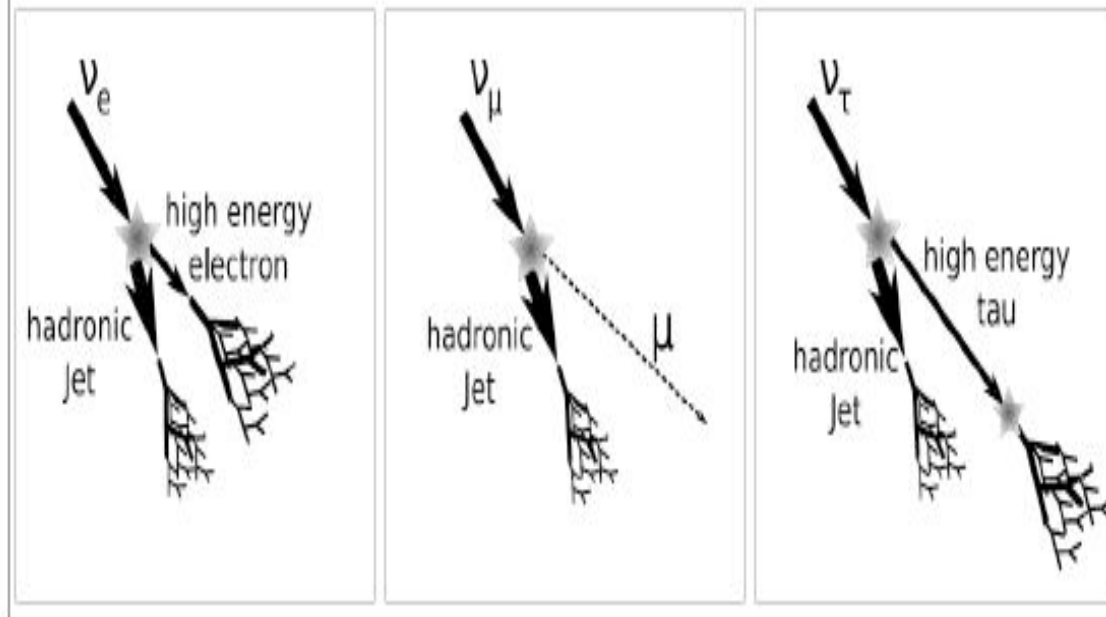
Neutrinowe pęki lecące z góry

- detektor “czuły” na 3 stany zapachowe neutrin

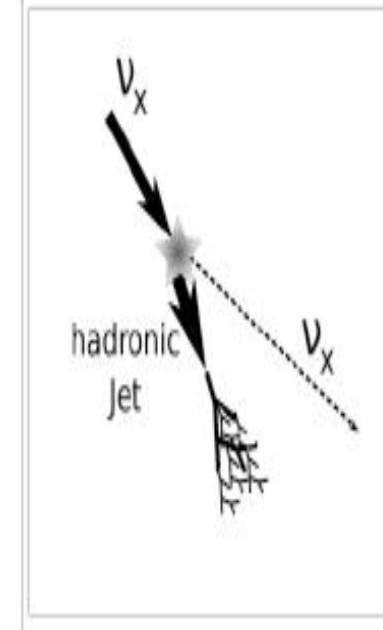
$$\nu_e, \nu_\tau, \nu_\mu$$

- detektor czuły na oddziaływania przez prądy neutralne (NC) i prądy ładunkowe (CC)

Charged Current



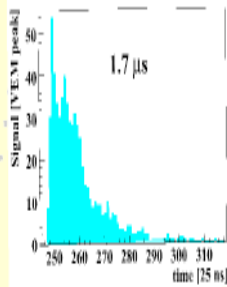
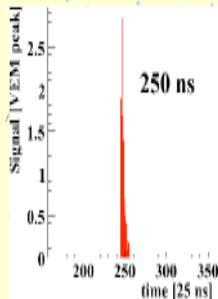
Neutral Current



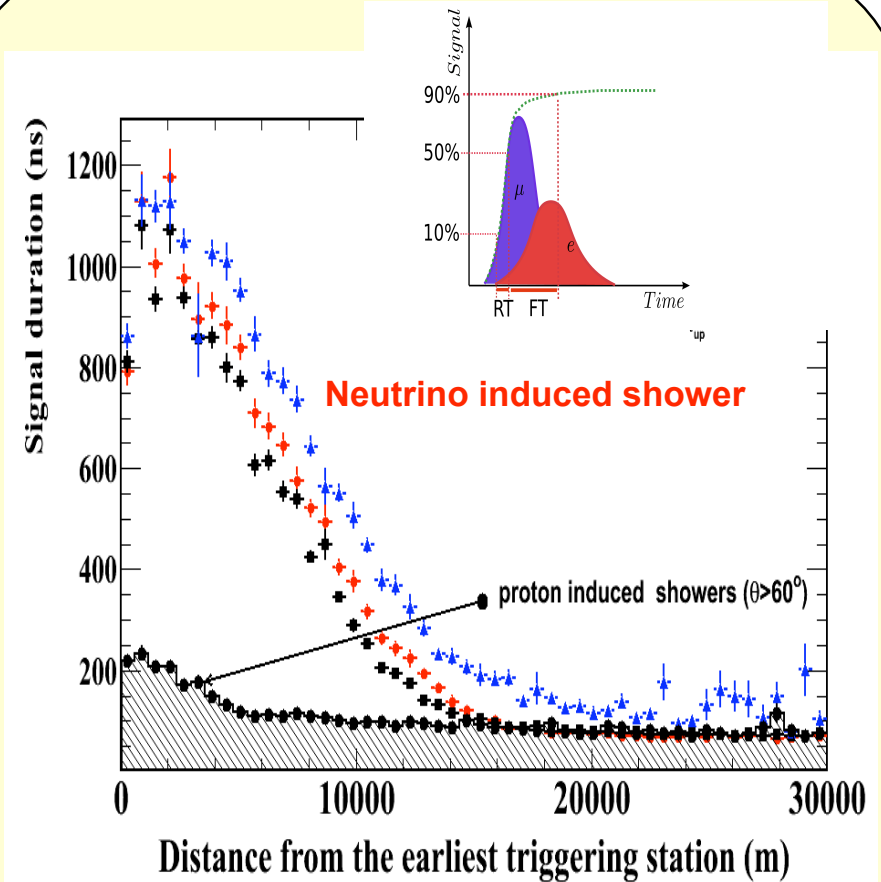
Neutrinowe pęki lecące z góry

Neutrino oddziałuje głęboko w atmosferze

końcowa faza rozwoju pęku: miony



początkowa faza rozwoju pęku: e fotony



Sygnatura: poziome pęki ze składową EM, obecną głównie na początku śladu pęku na powierzchni Ziemi

Kryterium selekcji neutrinowych pęków lecących w dół

Większy zakres obserwowanych katów zenitalnych ($75^\circ \sim 90^\circ$)

=> większe tło

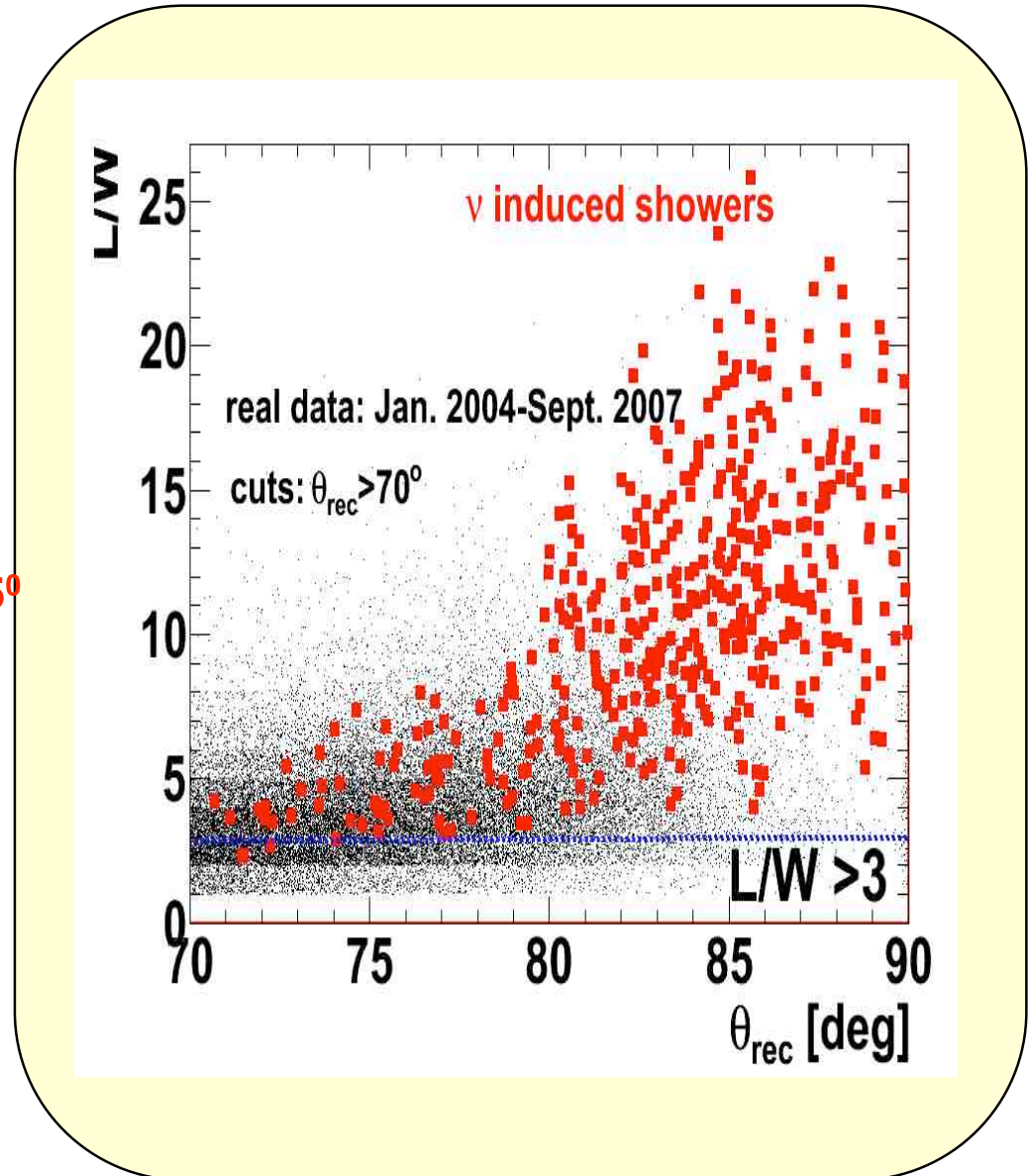
=> bardziej wymagające kryterium selekcji

➤ Selekcja pęków poziomych:

- $L/W > 3$
- $0.313 \text{ m/ns} > \langle V \rangle > 0.29 \text{ m/ns}$
- $\sigma_{\langle V \rangle} < 0.08 \text{ m/ns}$
- zrekonstruowany kąt zenitalny $< 75^\circ$

➤ Selekcja pęków z silną składową EM:

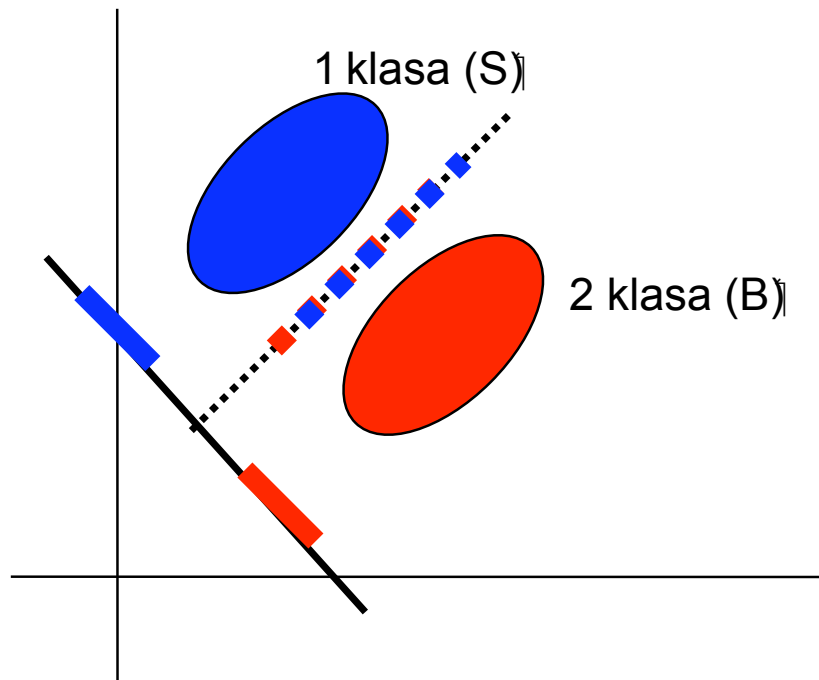
- **Metoda Fishera**
(ang. Fisher discriminant analysis)
zastosowana do 10 obserwacji opisujących zarejestrowany sygnał przez licznik czerenkowski



Metoda Fishera

(R. Fisher Ann of Eugenics 7,179, 1936)

Analiza dyskryminacyjna (ang. discriminant analysis) pozwala znajdować takie liniowe kombinacje zmiennych, które w najlepszy sposób reprezentują różnice (rozróżniają) pomiędzy wybranymi grupami (klasami) w wielowymiarowym zbiorze danych.



Kryterium Fishera:

$$R(\lambda) = \frac{(\langle y \rangle(B) - \langle y \rangle(S))^2}{(\sigma_y^2(B) + \sigma_y^2(S))}$$

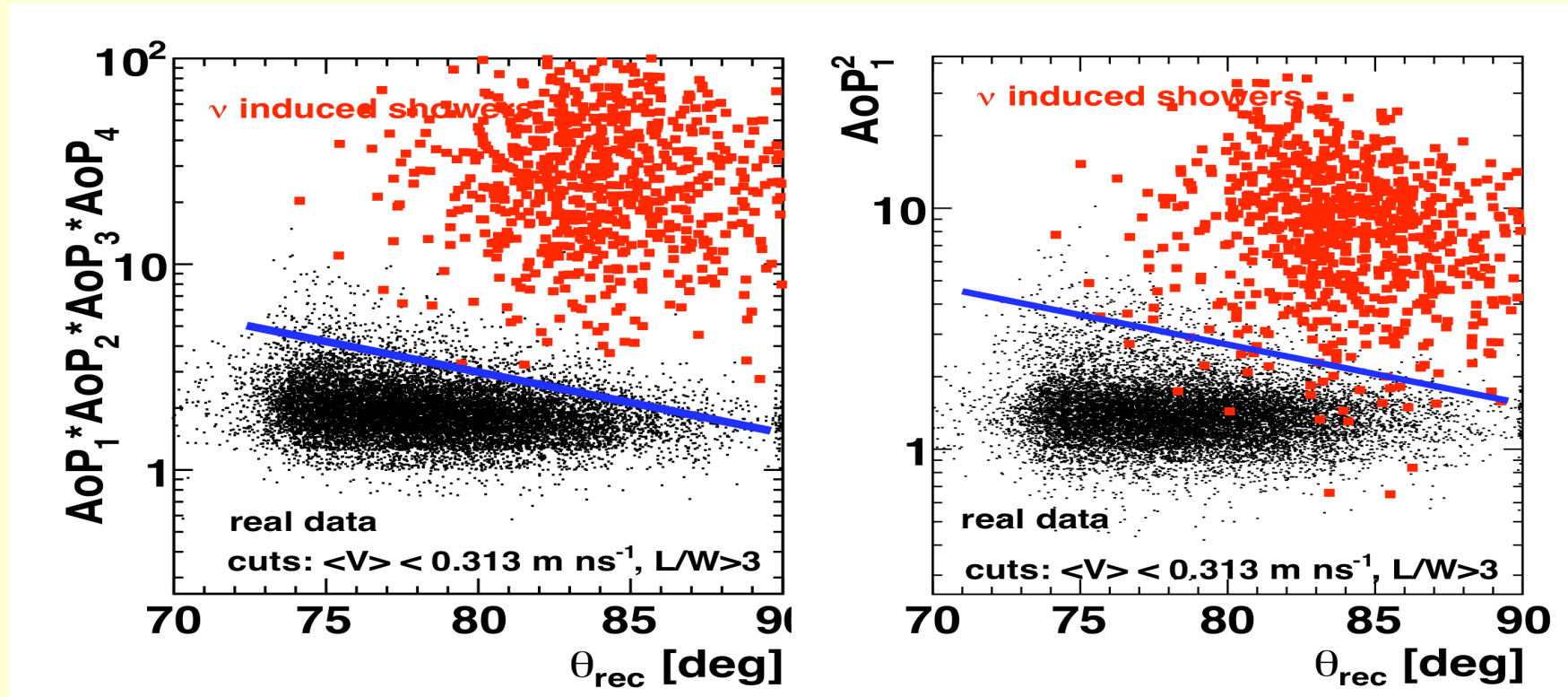
Wynik Fishera (ang. Fisher score)

$$y(i) = \sum \lambda_{0,k} x_k(i)$$

$$\vec{x}_{S(B)} = (AoP_j, AoP_j^2, \prod AoP_j)$$

Selekcja pęków lecących z góry

(D. Góra for the Pierre Auger Collab. , ICRC 2009, Łódź)

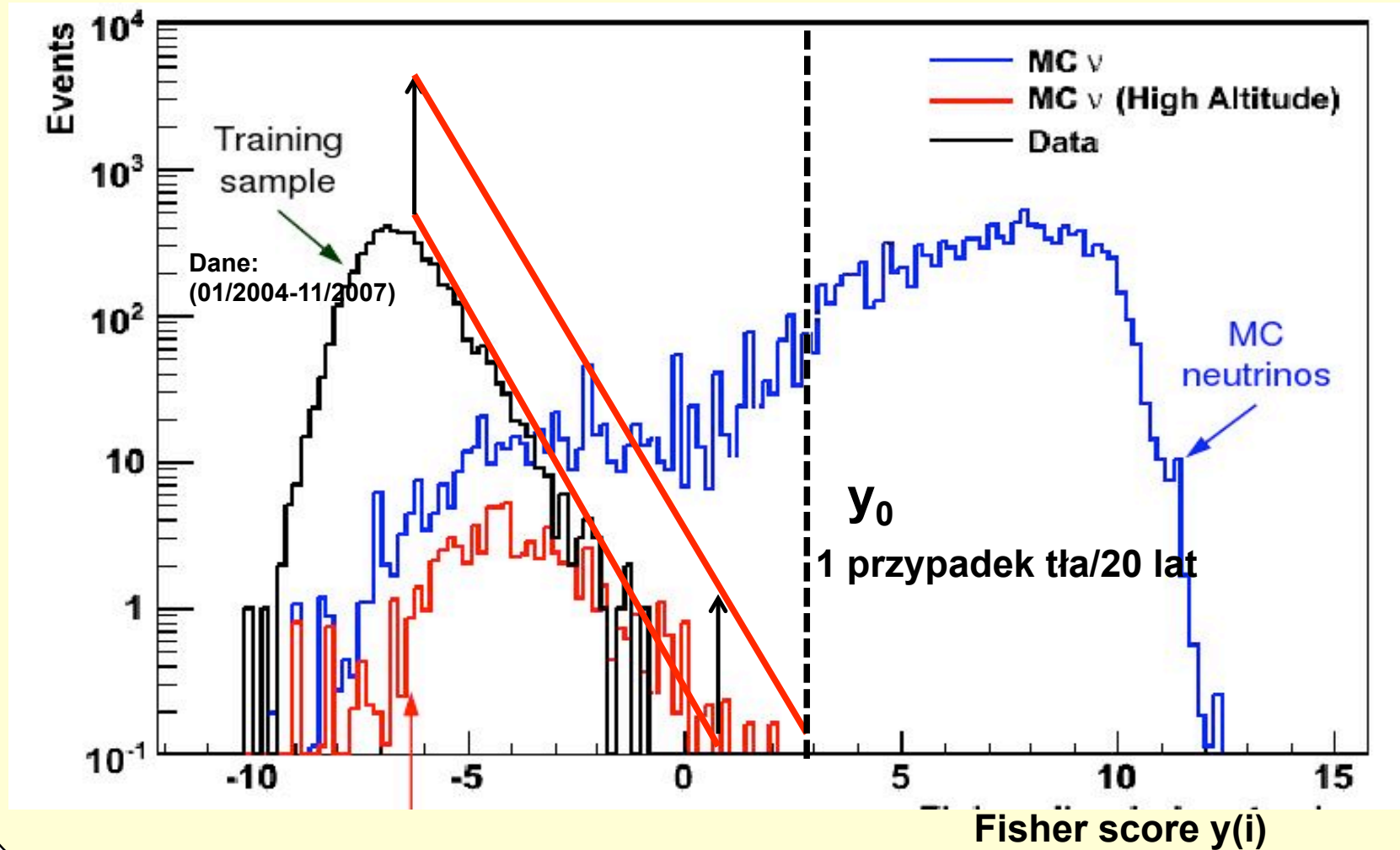


Sygnal: neutrinowe pęki wysymulowane dla 3 zapachów z uwzględnieniem oddziaływań przez prądy neutralne i ładunkowe, rozkłady ważone przez strumień E^{-2}
Tło: dane zebrane przez obserwatorium Auger (01/2004-11/2007)

Metoda Fishera

(J. Tiffenberg for Pierre Auger Collab. , ICRC 2009)

Rozkład Fishera dla przypadków z $6 < \# \text{ stacji} < v12 <$



Bardzo dobra separacja pomiędzy klasami (pęki hadronowe vs pęki neutrinowe)

Liczba kandydatów

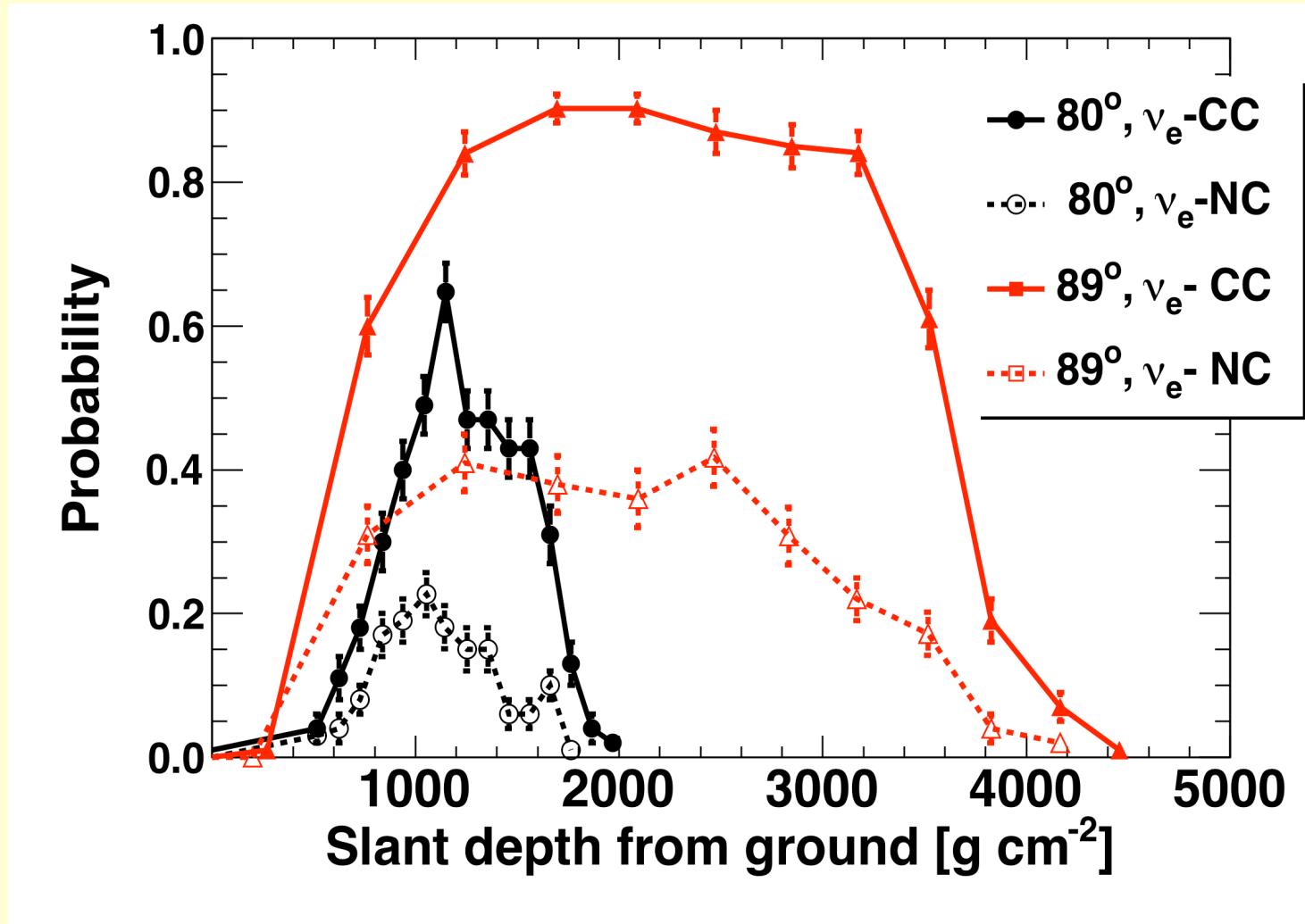
Zastosowanie powyższego kryterium Fishera do zebranych danych (poziomych peków) przez obserwatorium Auger w okresie **01/10/2007-28/02/2009** znów daje

0

neutrinowych kandydatów

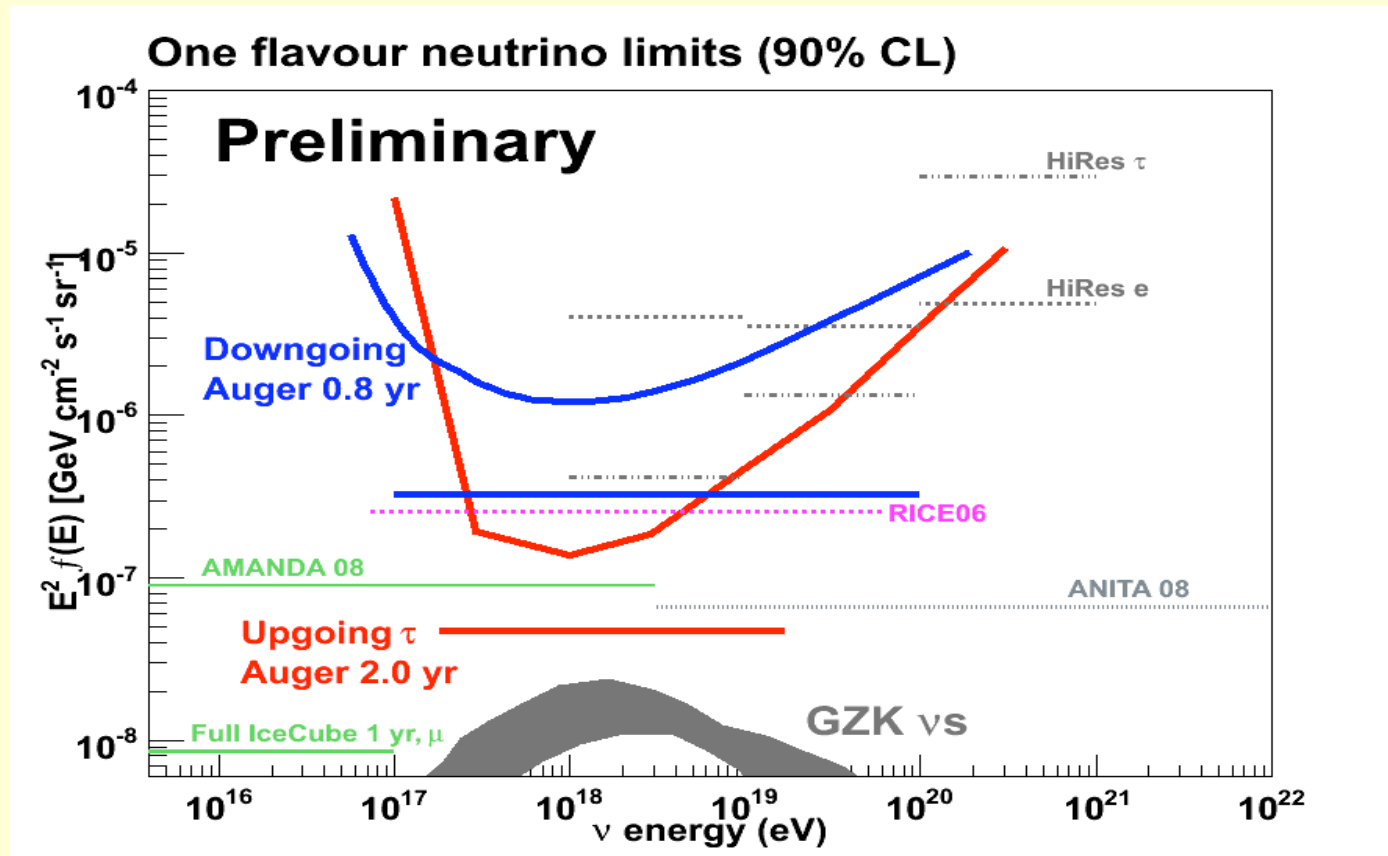
To możliwe podanie górnego ograniczenia na strumień neutrin lecących z góry.

Wydajność detekcji pęków taonowych



Górne ograniczenie dla strumienia neutrin

(J. Tiffenberg for Pierre Auger Collab., ICRC 2009)



Flux limits for a E^{-2} neutrino spectrum

AUGER limits	Down 01Nov07- 28Feb09	Up 01Jan04-28Feb09
K [$\text{GeV cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$]	3.2×10^{-7}	4.7×10^{-8}

Oczekiwana liczba przypadków

Pęki neutronowe lecące w dół
Down-going (%)

	ν_e	ν_μ	ν_τ
CC	39.0	13.3	30.0
NC	5.7	5.7	6.3
CC+NC	44.7	19.0	36.3

$$N_{DW} = 0.177 \text{ yr}^{-1}$$

$$\frac{N_{DW}}{N_{UP\tau}} \sim 0.5$$

Pęki neutronowe
Up and down-going (%)

	ν_e	ν_μ	ν_τ
	16.0	4.9	72.0
	2.1	2.1	2.7
	18.3	7.0	74.7

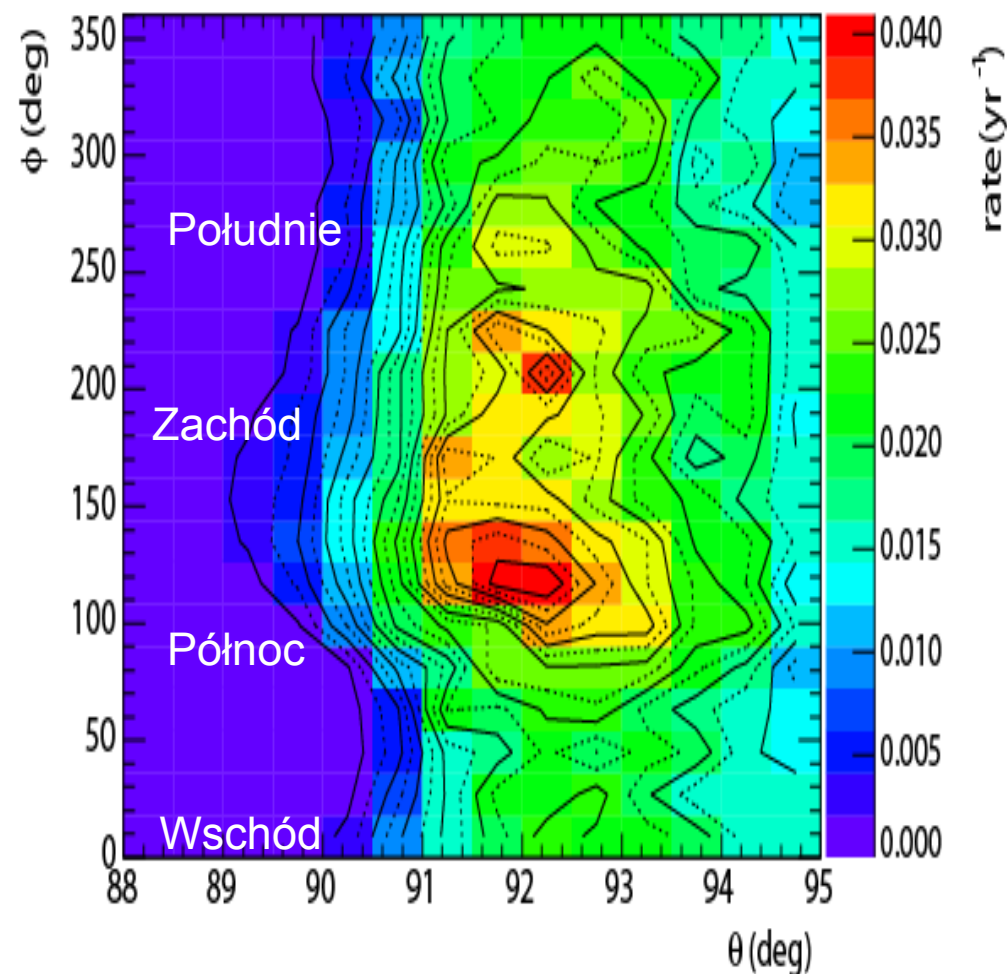
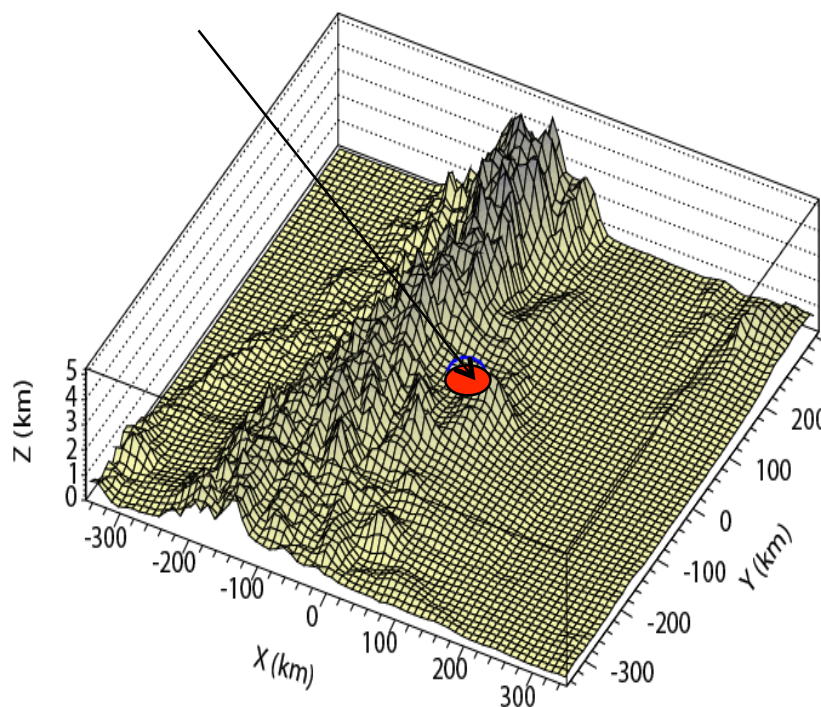
$$DW+UP: N_{TOT} = 0.475 \text{ yr}^{-1}$$

$$UP: N_{UP\tau} = 0.29 \text{ yr}^{-1}$$

Andy jako naturalna tarcza dla neutrinaonowych

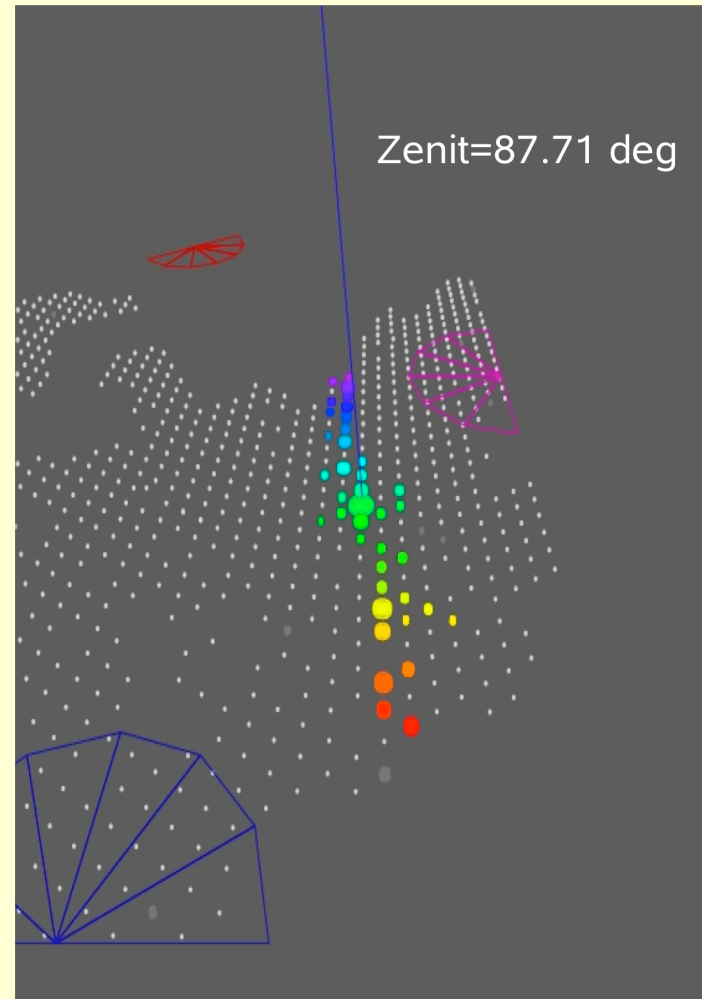
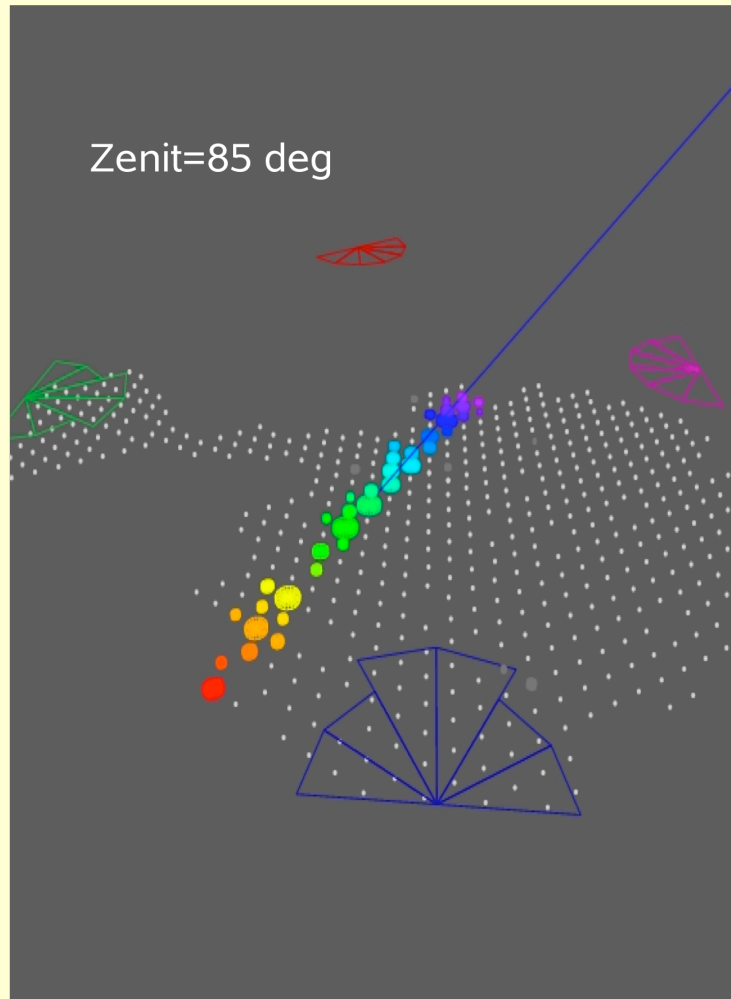
(D. Gora , M. Roth and A. Tamburro, *Astropart. Phys.* 26 (2007) 402)

Obserwatorium Auger



Spodziewana liczba przypadków o około **18% (20%)** większa niż oczekiwana liczba przypadków otrzymana dla sferycznego modelu Ziemi w przypadku pęków **taonowych (lecących w dół)**.

Przykład rzeczywistych śladów



Mikroskopowe czarne dziury

During a subatomic collision of energy E , the distance that are probed are small

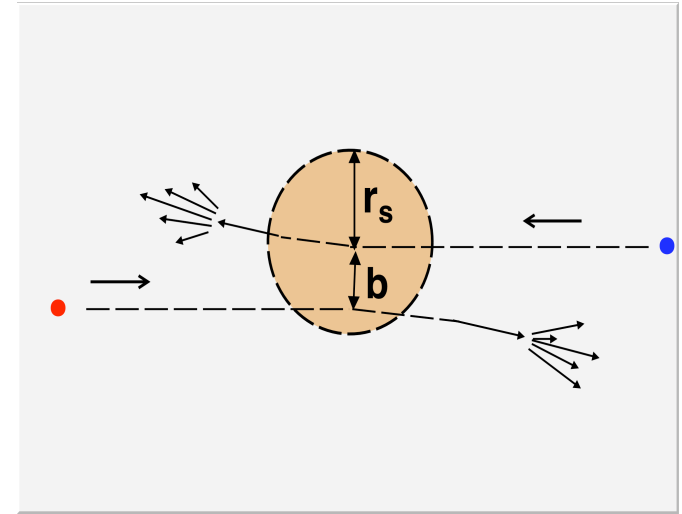
$$\lambda \sim \frac{hc}{E}$$

But the Schwarzschild radius around any such energy concentration is :

$$r_s \sim \frac{2GM}{c^2} \sim \frac{2GE}{c^4}$$

So you may generate a BH if

$$\lambda < r_s \rightarrow E > \left(\frac{hc^5}{G} \right) \sim 10^{19} \text{ GeV}$$



The lightest BH mass corresponds approximately to Planck mass:

$$M_D \simeq 2 \times 10^{-8} \text{ kg} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$

For 3 spatial dimensions, gravity is too weak for this to happen, but with extra dimensions n , gravity becomes stronger, microscopic BH can be created in particle collisions !!!

Mikroskopowe czarne dziury

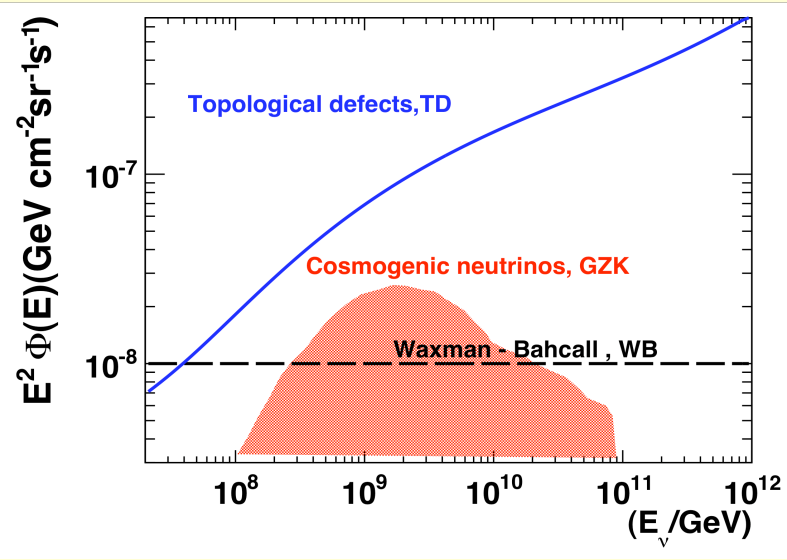
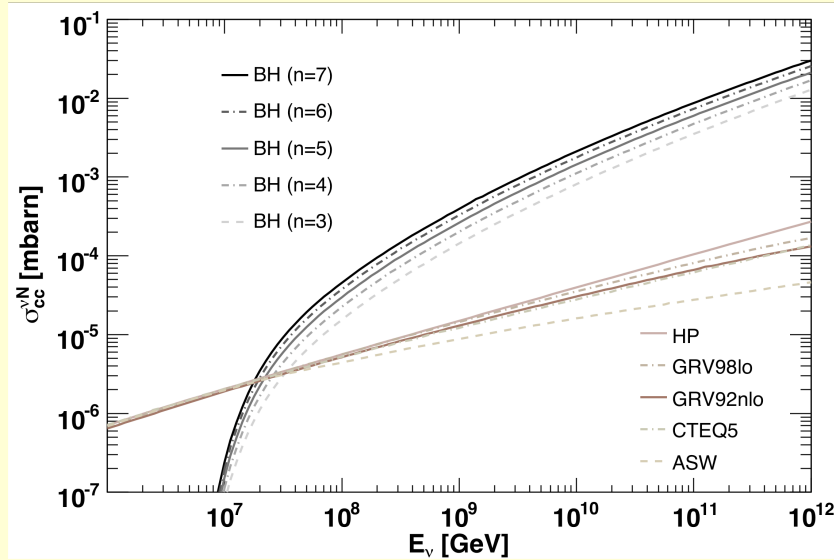
$$N(x_{\min}, n, M_D) = N_A \int dE_\nu \frac{d\Phi}{dE_\nu} A(E_\nu, t) \sigma(E_\nu, x_{\min}, n, M_D)$$

$$x_{\min} = M_{\text{BH}}^{\min} / M_D$$

n : number of extra dimention

M_D : the mass of lightest possible BH

M_{BH}^{\min} : minimal BH mass for which a semiclassical description is valid



Cross-section	Flux	Rate 1/yr Up-going	Rate 1/yr Down-going	Ratio R=UP/DW
GRV92nlo	WB	0.44	0.22	2.0
	GZK	0.12	0.05	2.5
	TD	0.49	0.32	1.6
HP	WB	0.23	0.26	0.9
	GZK	0.07	0.05	1.2
	TD	0.25	0.39	0.7
ASW	WB	0.54	0.13	4.2
	GZK	0.15	0.03	4.8
	TD	0.61	0.17	3.6
BH, n=5	WB	0.02	11.30	≈ 1/500
	GZK	0.01	2.01	≈ 1/300
	TD	0.02	19.31	≈ 1/1000

(D. Góra, M. Haag and M. Roth, ICRC 2009, Łódź)

Podsumowanie

- Analiza śladu pęku na powierzchni Ziemi i zarejestrowanego sygnału FADC pozwalają na rozróżnienie neutrinowych przypadków wśród wielkiej liczby poziomych pęków inicjowanych przez hadrony
- Obserwatorium Auger jest „czułe” na neutrina najwyższych energii (najbardziej obiecujący scenariusz to obserwacja pęków taonowych)
- niemniej jednak możliwa jest również obserwacja pęków lecących z góry (większa niż oczekiwana liczba przypadków po uwzględnieniu topografii obserwatorium)
- Do tej pory **zero** neutrinowych kandydatów wśród zebranych danych, co pozwoliło na wyznaczenie górnego limitu dla neutrin taonowych i pęków neutrinowych lecących w dół (najlepszy limit w tym zakresie energii).