

Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory

Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory”, P. Homola, et al. (CREDO Collab.),
Symmetry 2020, 12(11), 1835, 2020.[arXiv:2010.08351, DOI:10.3390/sym12111835].



Jerzy Pryga
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
13.01.2021

Opiekun:
dr hab. Krzysztof Woźniak
IFJ PAN w Krakowie

Weronika Stanek
AGH im. Stanisława Staszica w Krakowie

CREDO
JOURNEY

Czego szuka CREDO?

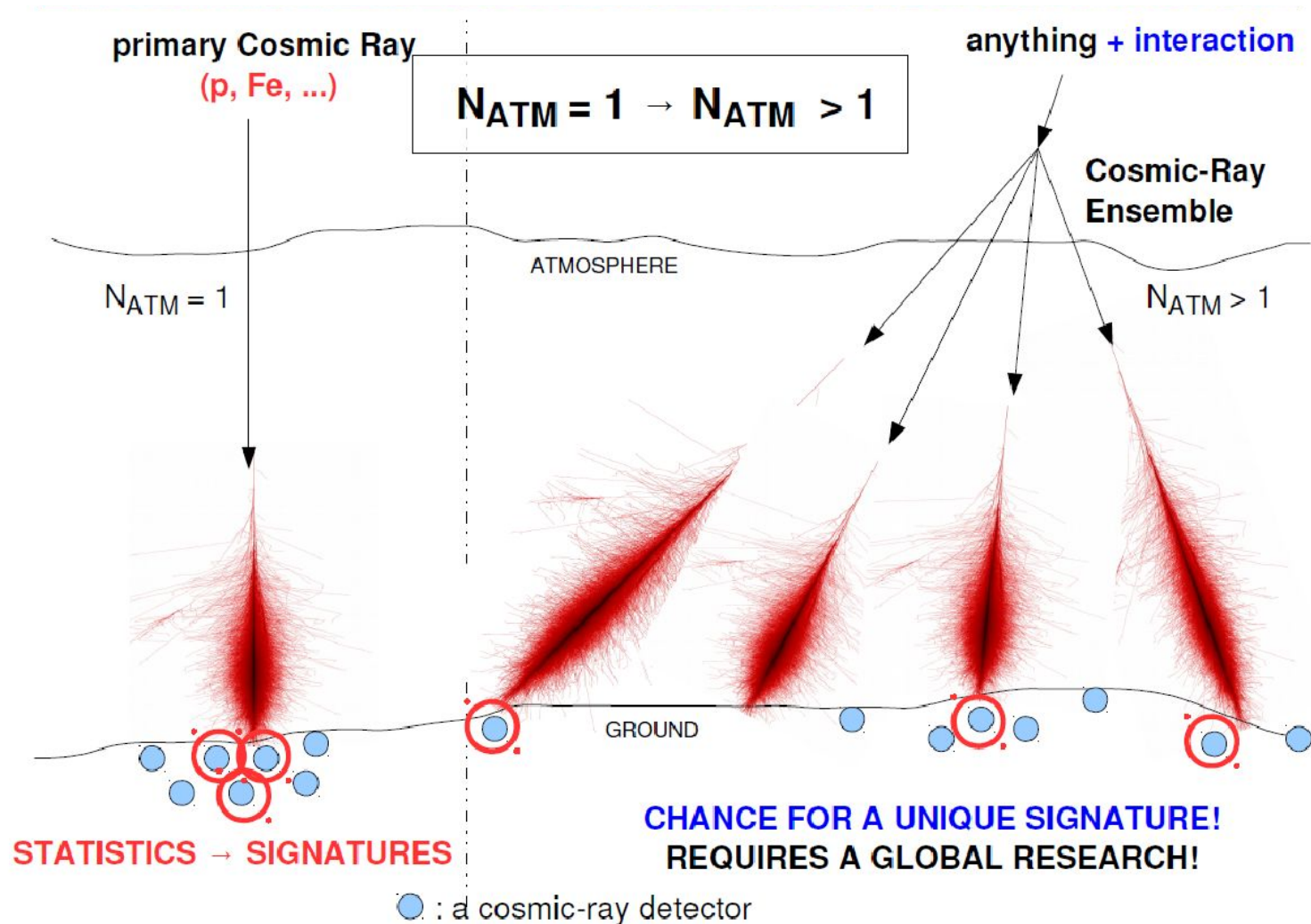
- Grup kaskad promieniowania kosmicznego (EAS) skorelowanych w czasie - (SPS).

Jak to robi?

- Szukanie korelacji we wszystkich możliwych źródłach danych z całego świata: smartphony, małe detektory, profesjonalne obserwatoria itd.

Dlaczego to robi?

- Potwierdzenie istnienia SPS, a następnie ich badanie może potwierdzić istnienie wielu nieznanych zjawisk (np. ciemnej materii) i otworzy zupełnie nowe drzwi w badaniu kosmosu.



Całkowicie globalne obserwacje promieniowania kosmicznego

Nowatorskie rozwiązanie - tzw. Citizen Science



DID YOU KNOW THAT YOU HAVE
**AN INTERGALACTIC
PARTICLE DETECTOR
RIGHT IN YOUR
POCKET?**

Install CREDO Detector app for Android
and hunt for the deeply hidden
treasures of the Universe.

Find CREDO Detector on

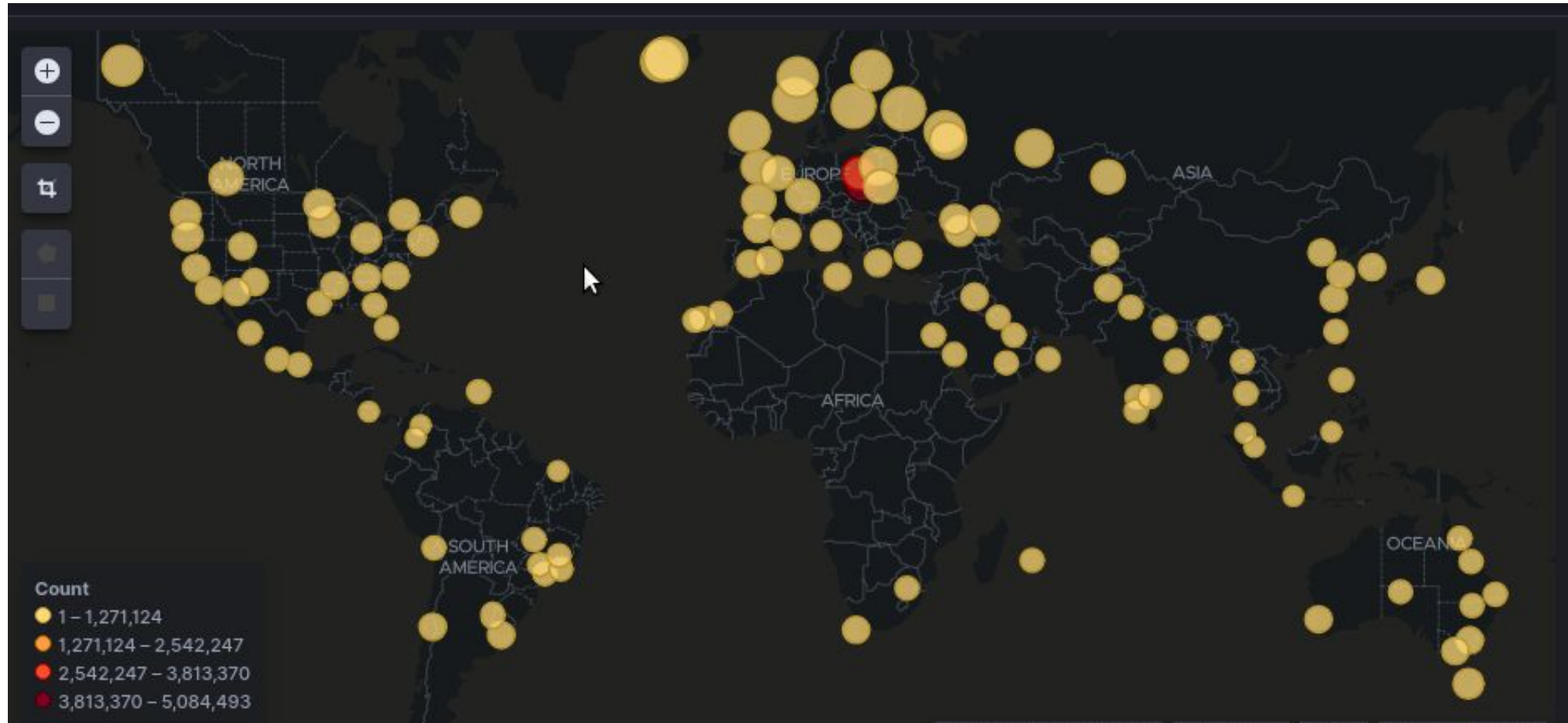


or scan QR



Sieć CREDO

CREDO Detector app

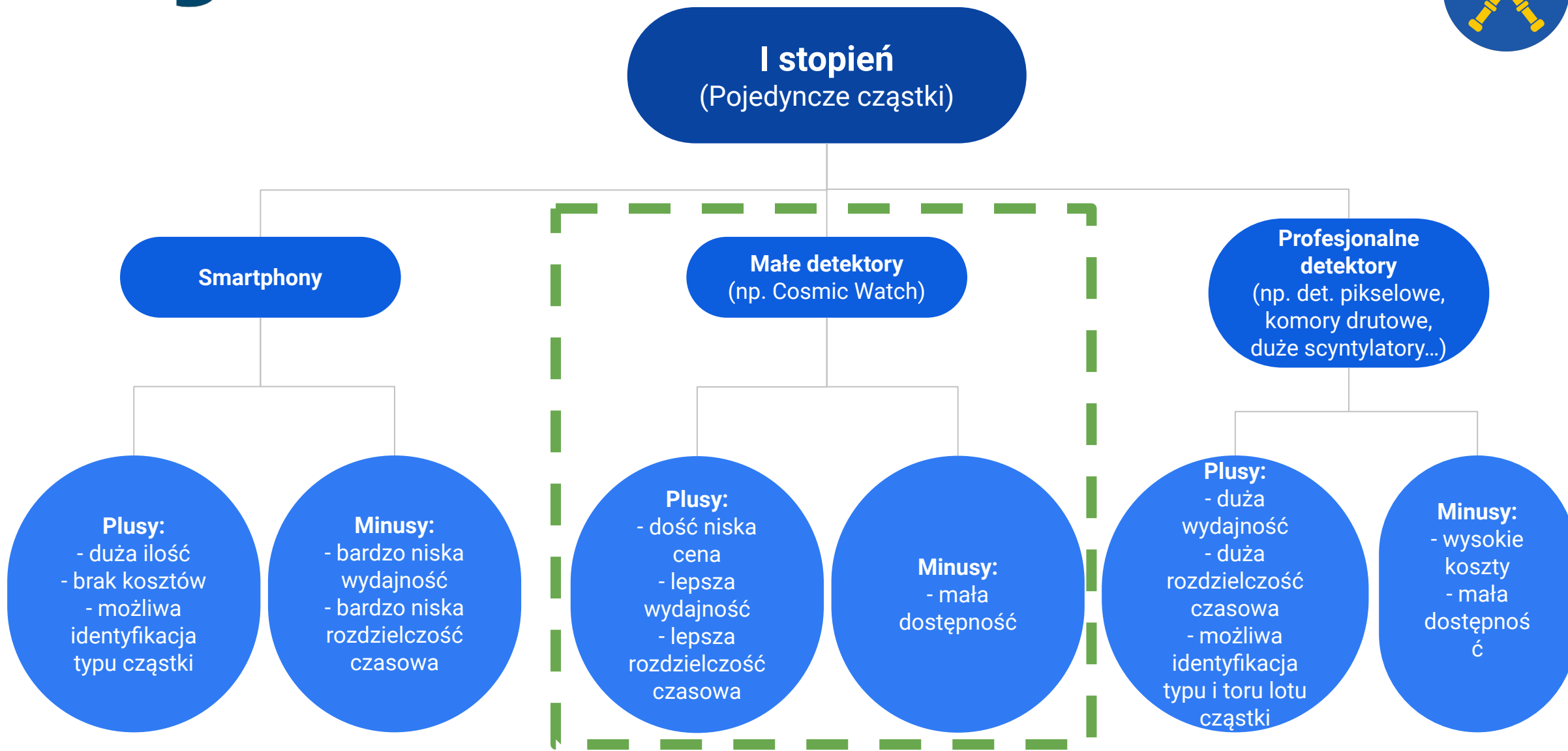


Na ten moment:

42 instytucji / 19 krajów / 5 kontynentów / ~ 11 900 użytkowników / ~ 4400 drużyn / > 10 000 000 detekcji za pomocą smartphonów / > 1100 lat łącznego czasu pomiarów

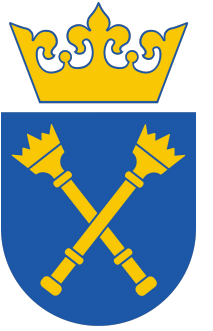


Co i jak możemy wykrywać?





Co i jak możemy wykrywać?



II stopień (Kaskady promieniowania)

Układy małych detektorów (np. kilku Cosmic Watchy)

Plusy:
- dość niska cena
- lepsza rozdzielczość czasowa

Minusy:
- niska wydajność
- mała dostępność (chwilowo)

Układy profesjonalnych detektorów (np. det. pikselowe, komory drutowe, duże scyntylatory...)

Plusy:
- duża wydajność
- duża rozdzielczość czasowa

Minusy:
- wysokie koszty
- mała dostępność

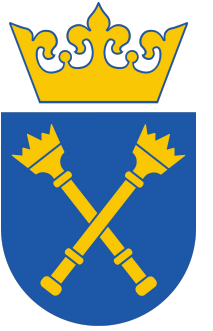
Duże obserwatoria (np. Pierre Auger w Argentynie)

Plusy:
- maksymalna wydajność i rozdzielczość czasowa
- możliwość określenia kierunku przylotu i energii cząstki pierwotnej

Minusy:
- ogromne koszty
- jest takich na Ziemi bardzo niewiele



Co i jak możemy wykrywać?



III stopień (Zespoły kaskad)

Duże obserwatoria
(np. Pierre Auger w Argentynie)

Plusy:

- maksymalna wydajność i rozdzielczość czasowa
- możliwość określenia kierunku przylotu i energii cząstki pierwotnej

Minusy:

- ogromne koszty
- jest takich na Ziemi bardzo niewiele
- możliwa detekcja tylko niewielkich SPS

Globalna sieć detektorów CREDO

Plusy:

- duża ilość źródeł danych
- możliwość badania różnych scenariuszy SPS
- możliwość zaangażowania społeczności nienaukowej

Minusy:

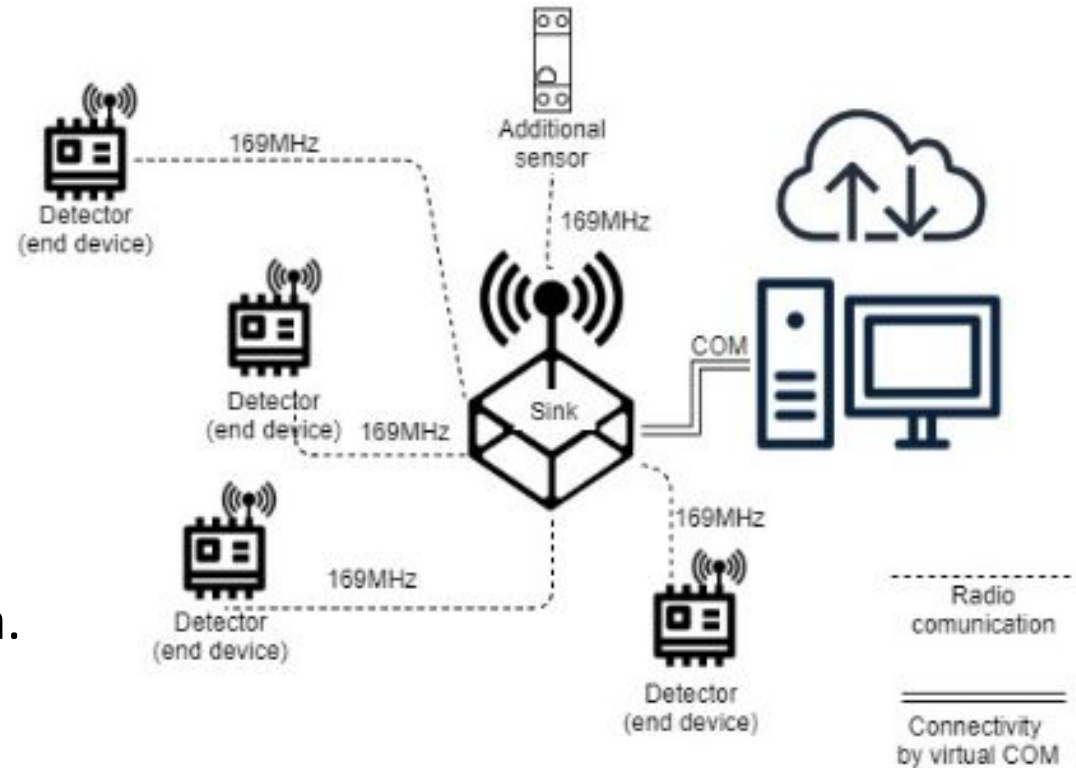
- konieczność budowy ogromnej infrastruktury

Sieć CREDO

Plany na przyszłość

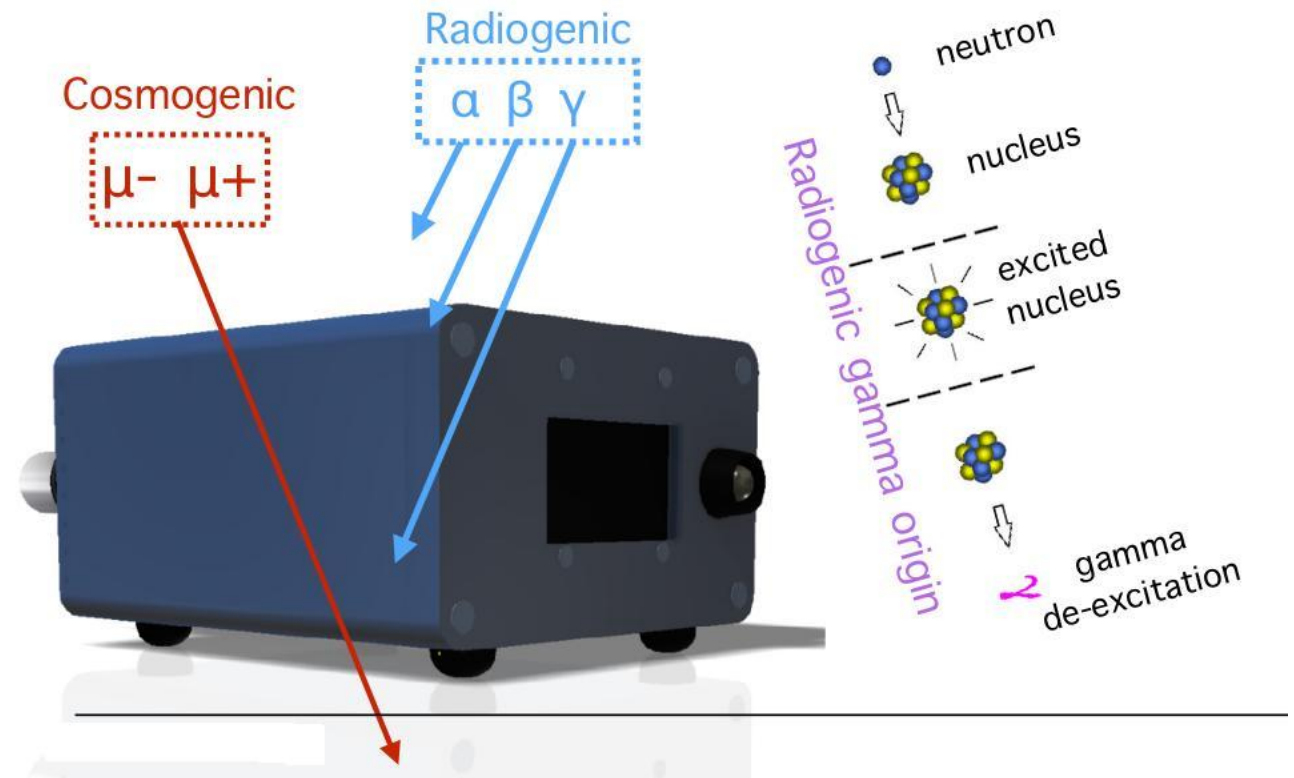


- Detektory rozmieszczone w różnych miejscach (np. góry, dachy budynków).
- Niezależne energetycznie i zdolne pracować długo bez interwencji człowieka.
- Przesyłające dane do czegoś w rodzaju “bazy” - czyli urządzenia obsługującego pewną liczbę detektorów i wysyłającego dane do bazy danych przez internet.



Cosmic Watch

- Opracowany na MIT.
- Detektor scyntylacyjny.
- Prosty w obsłudze.
- Niedrogi.

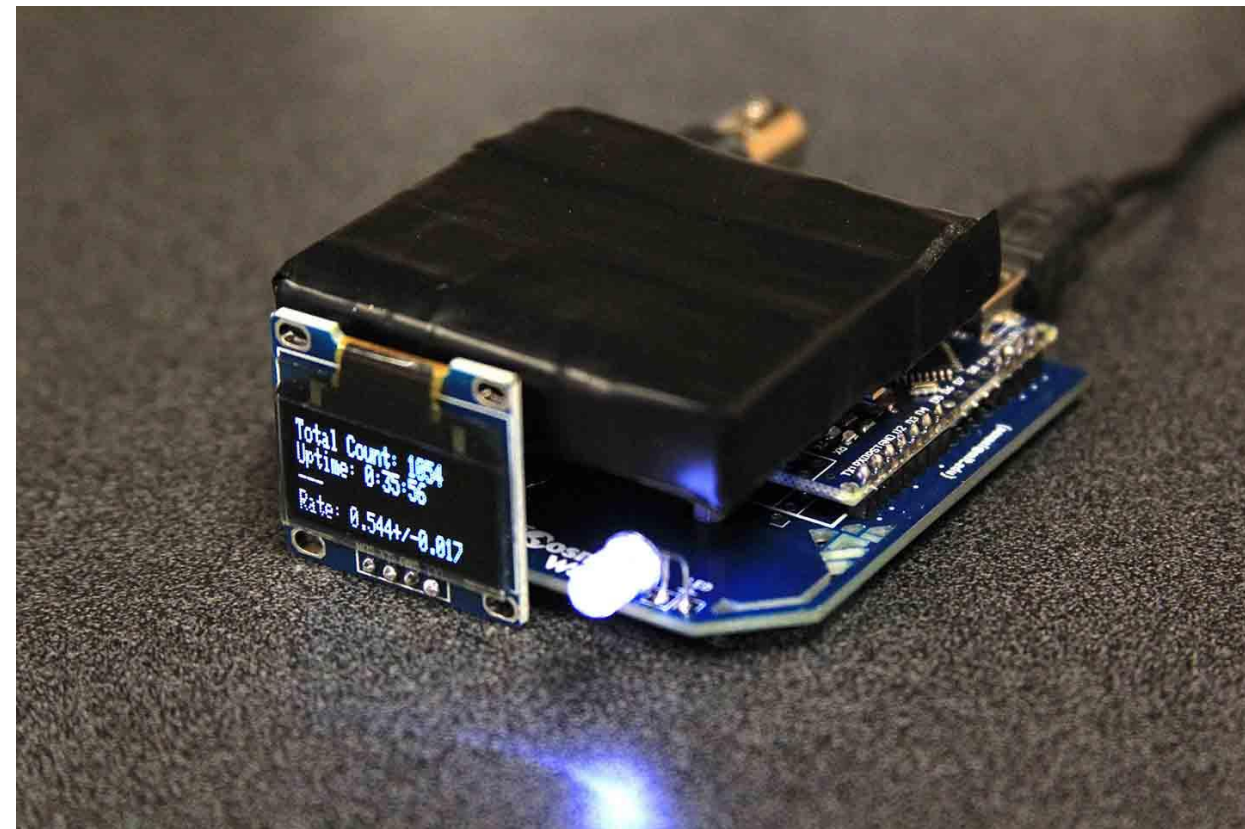


S.N. Axani *et al* 2018 *JINST* 13 P03019

Aktualnie badany układ

Założenia:

1. 4 Cosmic Watch'e połączone w układ koincydencji.
2. Okno czasowe koincydencji: 200 ns.
3. Powierzchnia detektora: 25 cm².
4. Efektywność detektora wynosi: $\eta = 95\%$

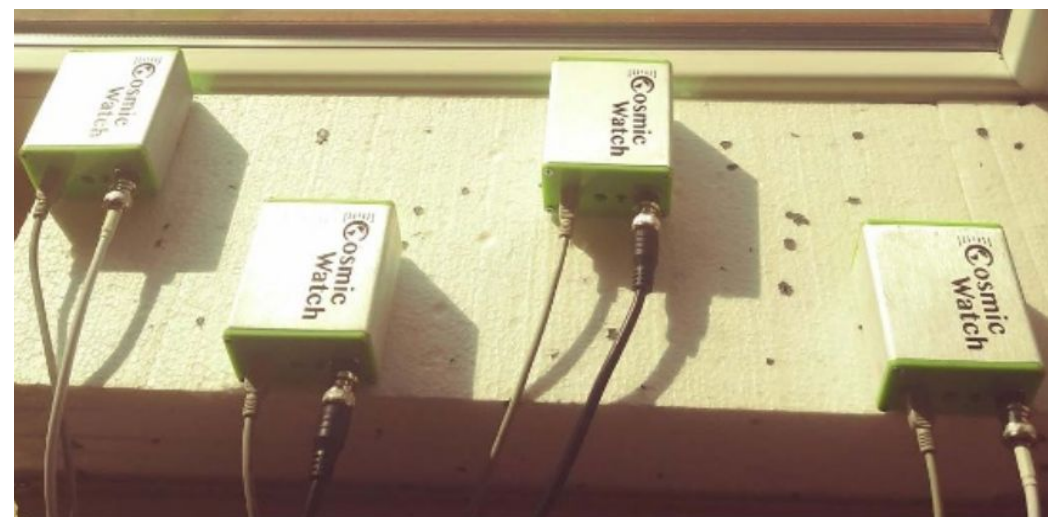


S.N. Axani *et al* 2018 *JINST* 13 P03019

Aktualnie badany układ

Założenia:

1. Wszystkie detektory są identyczne.
2. Szansa na sygnał zależy tylko od, efektywności detektora, jego powierzchni i gęstości cząstek.
3. Żaden moment w czasie nie jest wyróżniony.
4. Detektor daje sygnał dla cząstek konkretnego typu i w danym zakresie energii.
5. Układ wykrywa kaskady nadlatujące ze wszystkich kierunków.



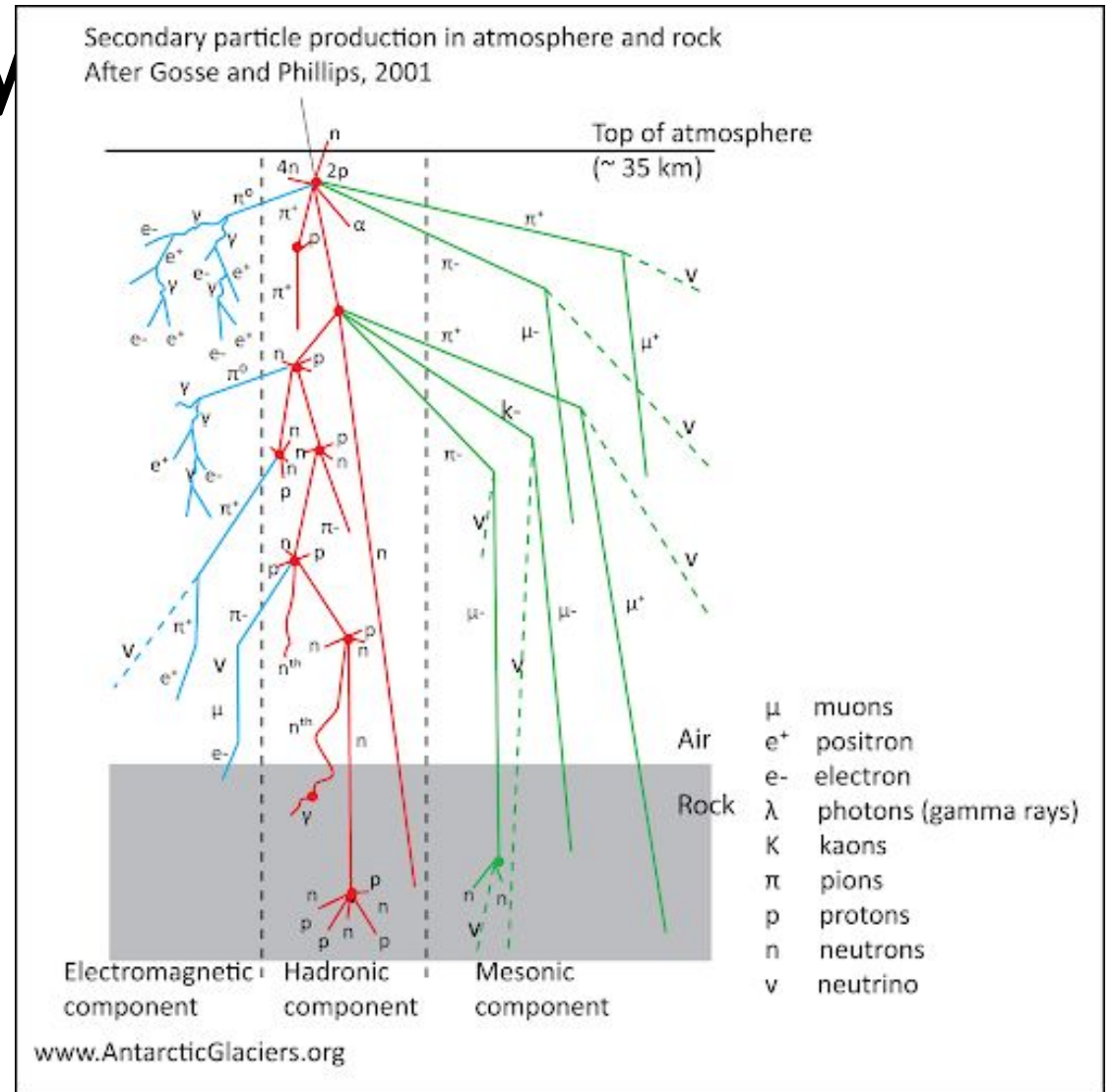
Michał Karbowski *et al* 2020 *Phys. Educ.* 55 055021

Wielkie pęki atmosferyczne - kaskady

Charakteryzacja kaskad:

1. Przeprowadzona na podstawie symulacji programu CORSIKA.
2. Wszystkie kaskady zachowują się tak samo jak kaskady protonowe (74 %).
3. Wszystkie kaskady są symetryczne względem swojego centrum.

- P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

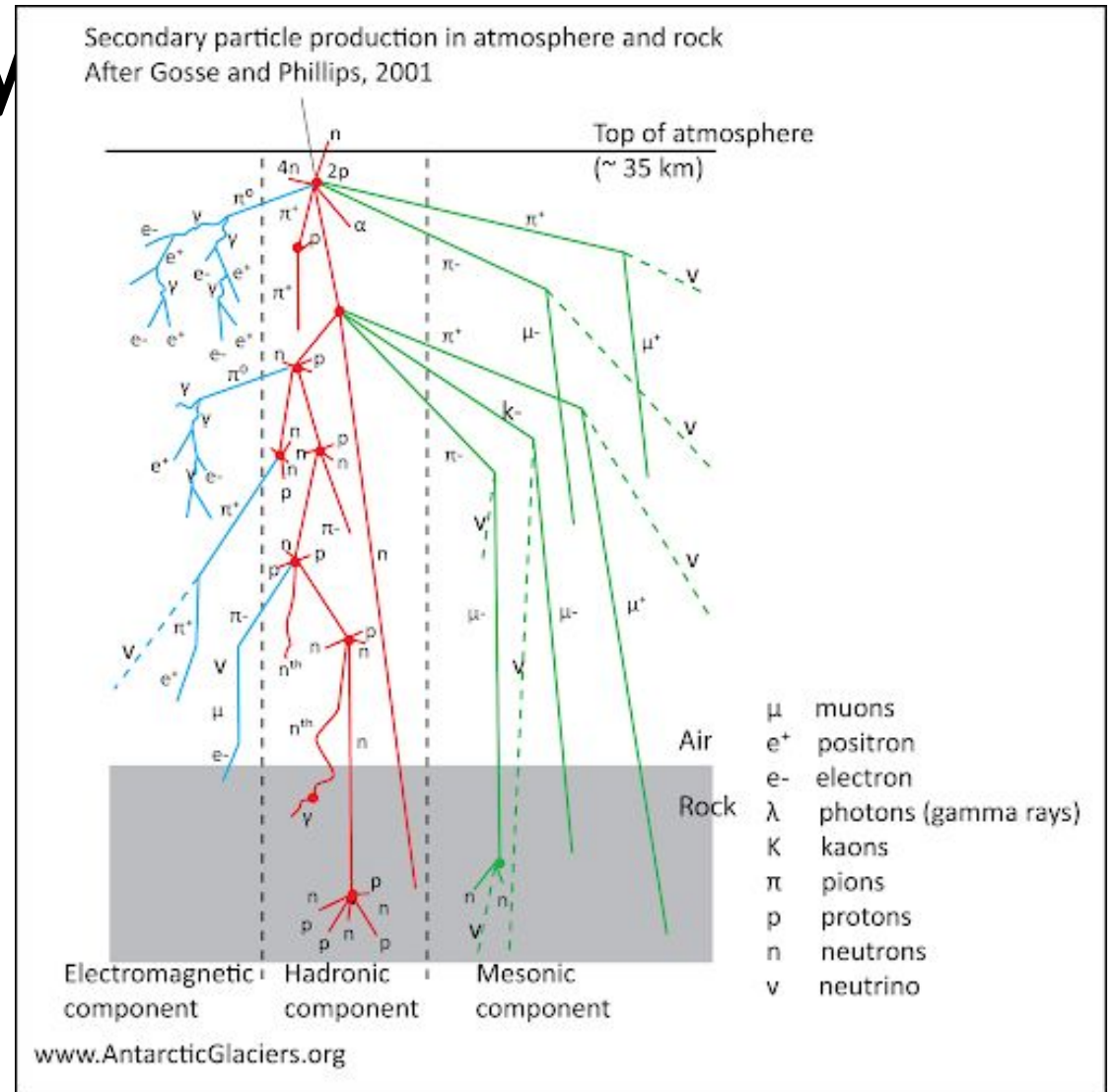


Wielkie pęki atmosferyczne - kaskady

Charakteryzacja kaskad:

1. Gęstość cząstek pęków jest funkcją: odległości od jej centrum r , energii cząstki pierwotnej E i całkowitej ilości wyprodukowanych cząstek N .
2. Rozkład ilości cząstek wyprodukowanych w kaskadzie jest normalny i zależy od energii E .
3. Rozmycie czasowe kaskad jest zaniedbywalne - to znaczy krótsze niż czas koincydencji.

- P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

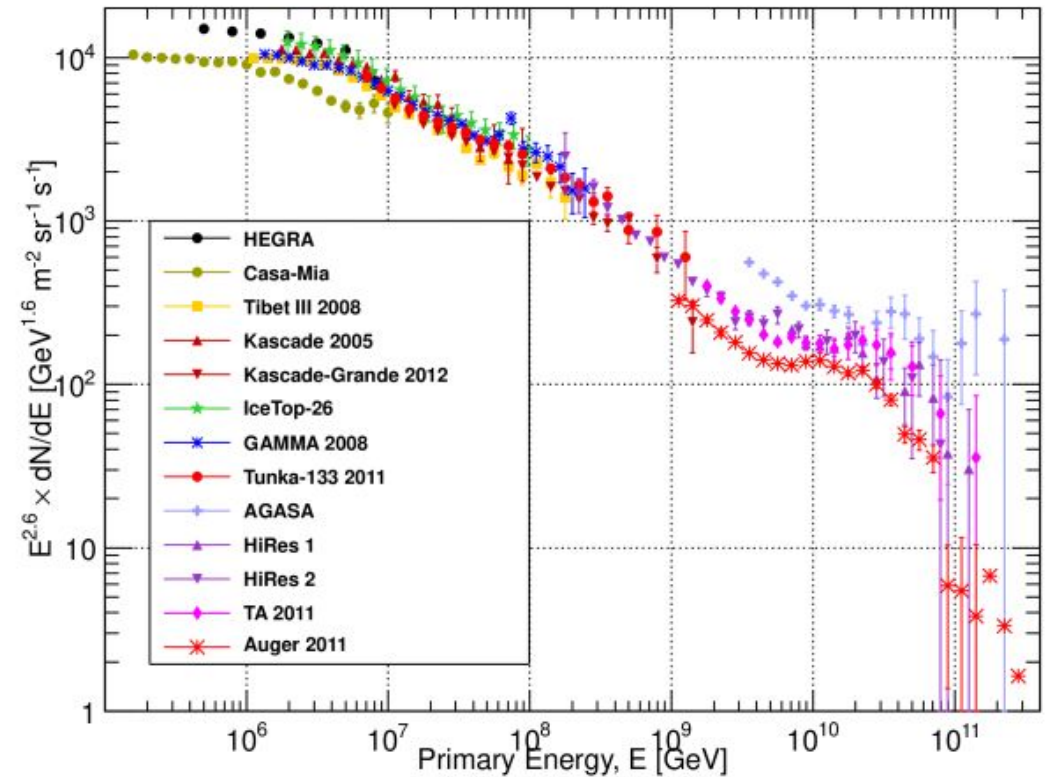


Wielkie pęki atmosferyczne - kaskady

Charakteryzacja kaskad:

1. Częstotliwość kaskad jest funkcją energii E postaci*:

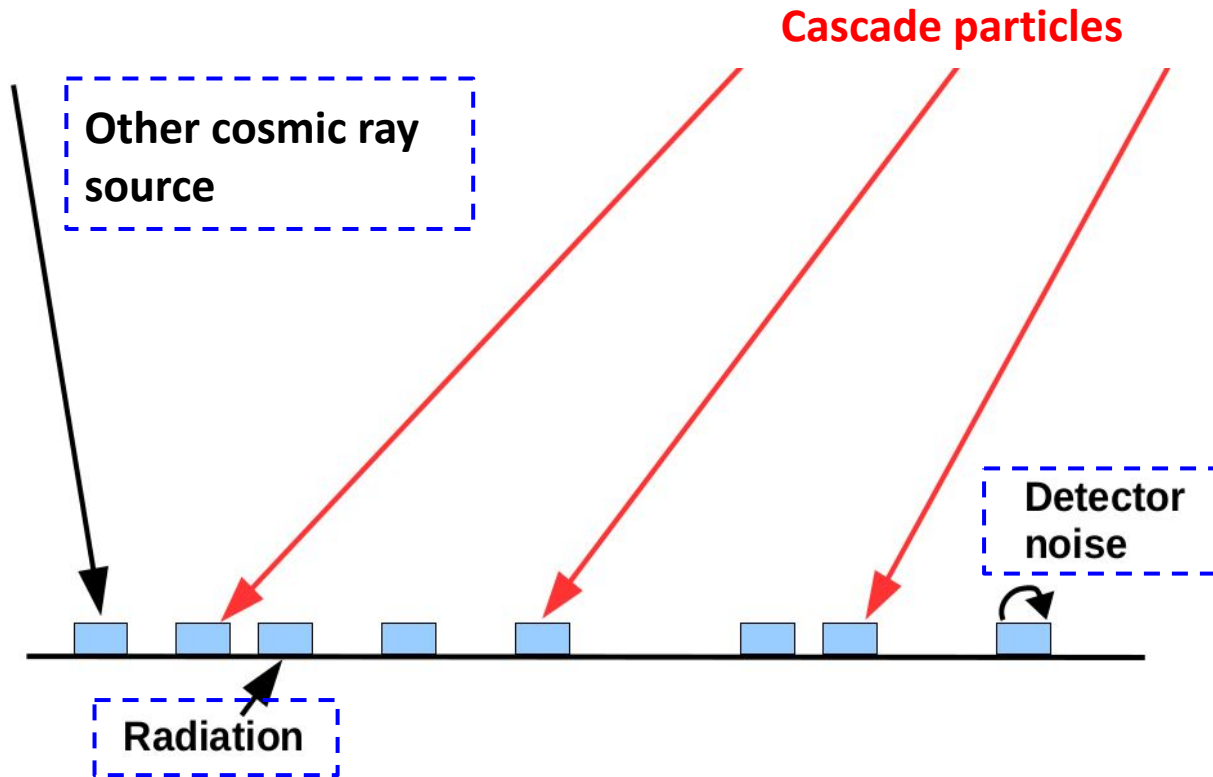
$$j(E) \cong j_0 \left(\frac{E}{1 \text{ GeV}} \right)^{-\gamma},$$



* - Aartsen, M. G., et al. "Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73." *Physical Review D* 88.4 (2013): 042004

• [P.A. Zyla et al. \(Particle Data Group\), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 \(2020\).](#)

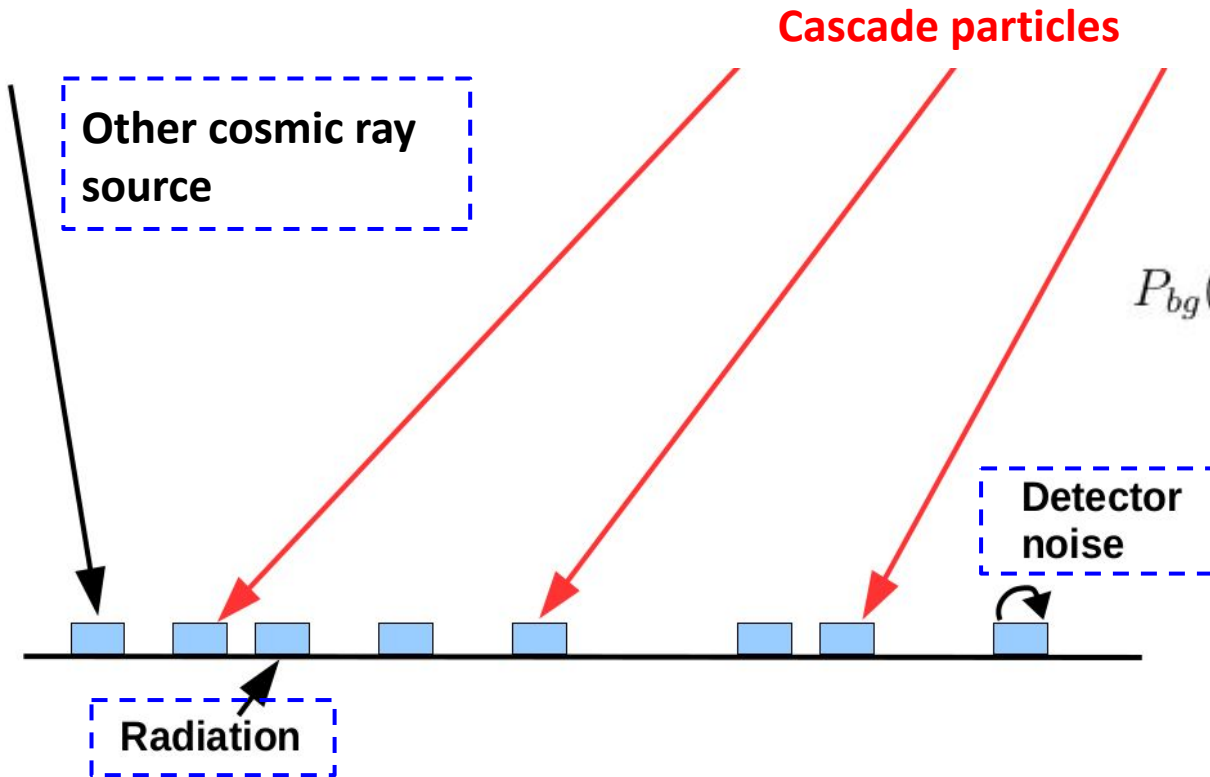
Niepożądane tło



Założenia odnośnie tła:

1. Źródłem tła są pojedyncze cząstki pochodzenia kosmicznego (niepochodzące z kaskad), radioaktywność otoczenia oraz przypadkowe sygnały pochodzące z elektroniki samego urządzenia lub innych zakłóceń.
2. Poziom tła jest stały w czasie.

Sygnaly od tła



Prawdopodobieństwo sygnału:

$$P_{bg}(\delta T, \eta, A, I_{bg}, f_{bg}) = 1 - \exp[-\delta T \cdot \eta \cdot (A \cdot I_{bg} + f_{bg})]$$

δT - Czas koincydencji [s].

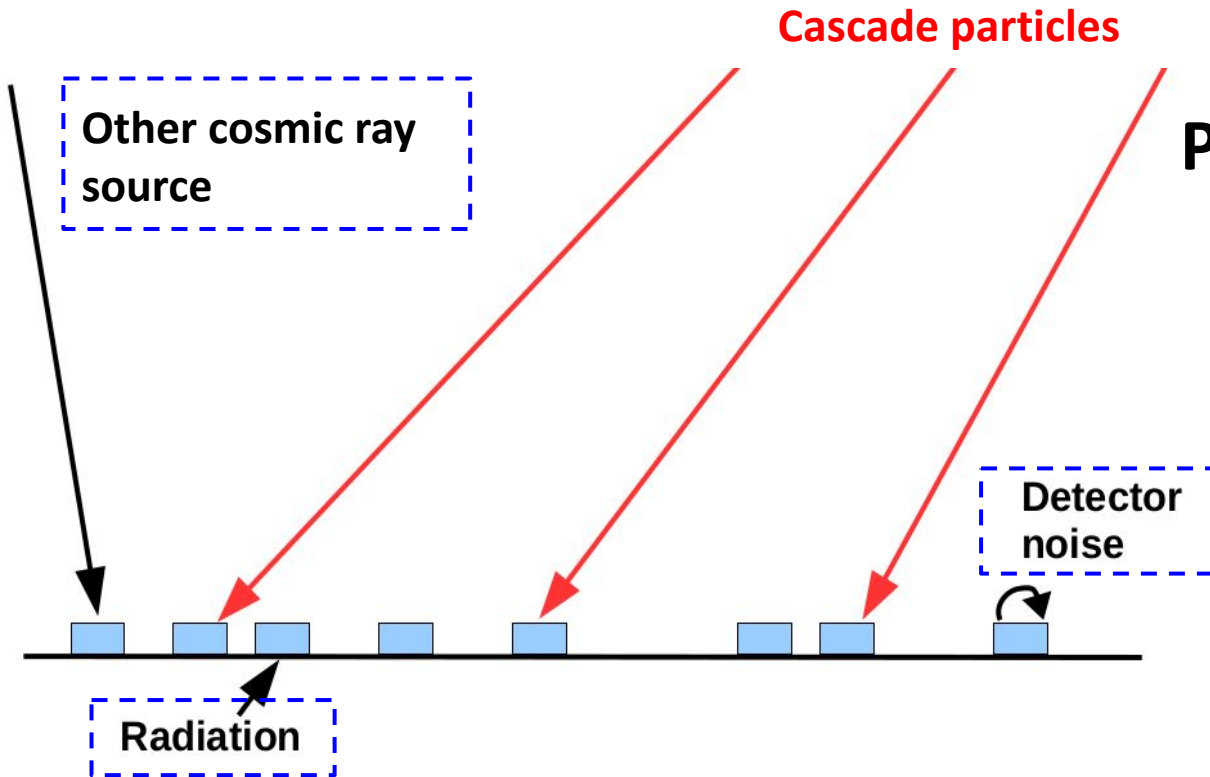
η - Wydajność detektora [%].

A - Powierzchnia detektora [cm²].

I_{bg} - Strumień cząstek tła [1/s cm²].

f_{bg} - częstotliwość fałszywych sygnałów (innego pochodzenia niż cząstki tła np. od elektroniki) [1/s].

Sygnaly od tła



Prawdopodobieństwo koincydencji:

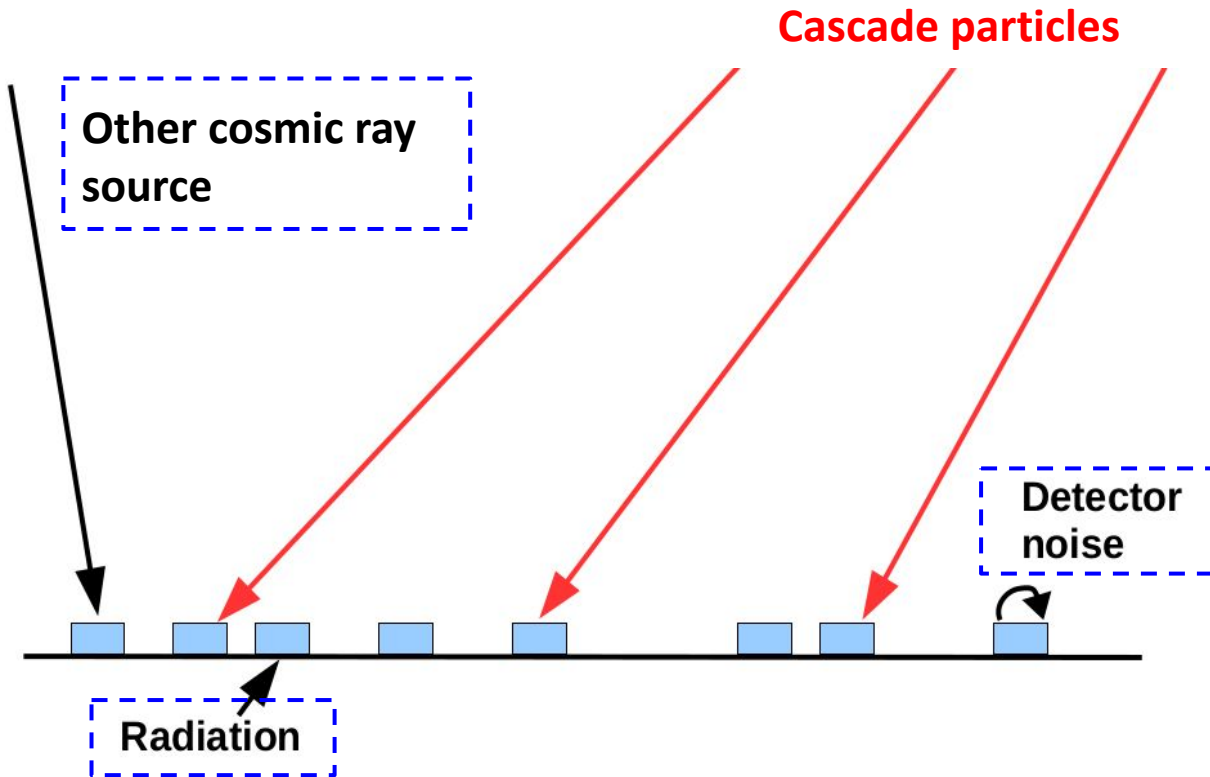
$$Q_{bg}(n, k, P_{bg}) = \binom{n}{k} P_{bg}^k (1 - P_{bg})^{n-k}$$

P_{bg} - Prawdopodobieństwo sygnału od tła.

n - Ilość detektorów w układzie.

k - Ilość detektorów dających sygnał.

Sygnały od tła



Oczekiwana ilość koincydencji:

$$\langle N_{bg}(k) \rangle = Q_{bg}(n, k, P_{bg}) \cdot \frac{T}{\delta T}$$

$Q_{bg}(n, k, P_{bg})$ - Prawdopodobieństwo koincydencji.

T - Czas pomiaru [s].

δT - Czas koincydencji [s].

Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady*:

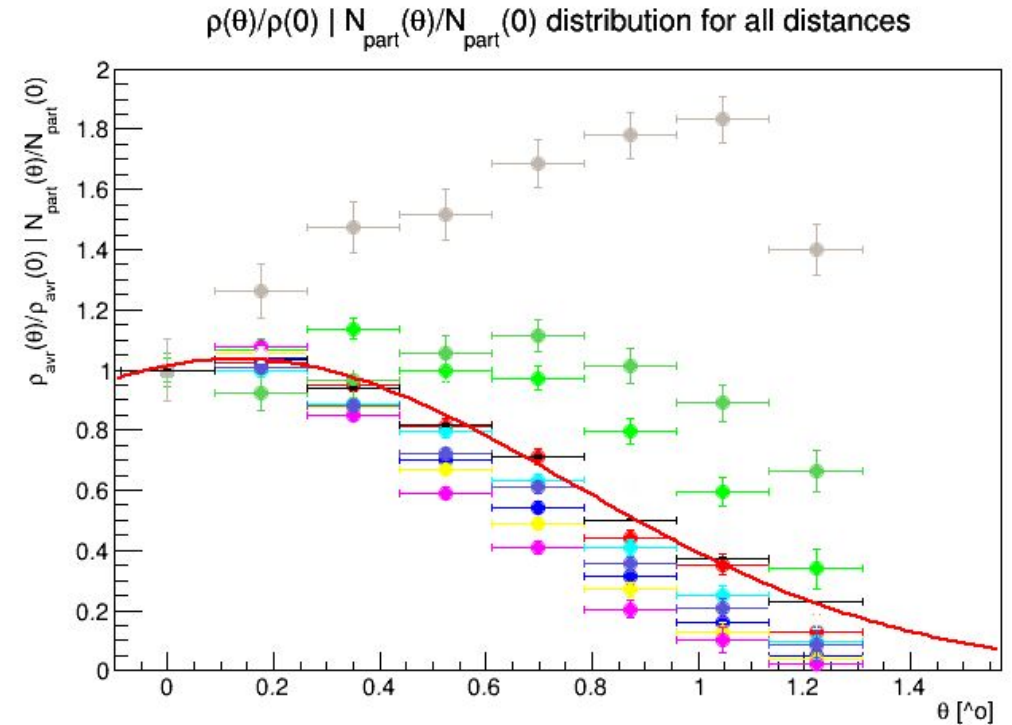
$$\rho(\theta, N_{part}(E), r) = F_{\theta}(\theta) \cdot \frac{1.25 N_{part}(E)}{2\pi\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}$$

r - Odległość od centrum kaskady [m].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

N_{part} - Liczba cząstek kaskady.

E - Energia cząstki pierwotnej [TeV].



* - P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady*:

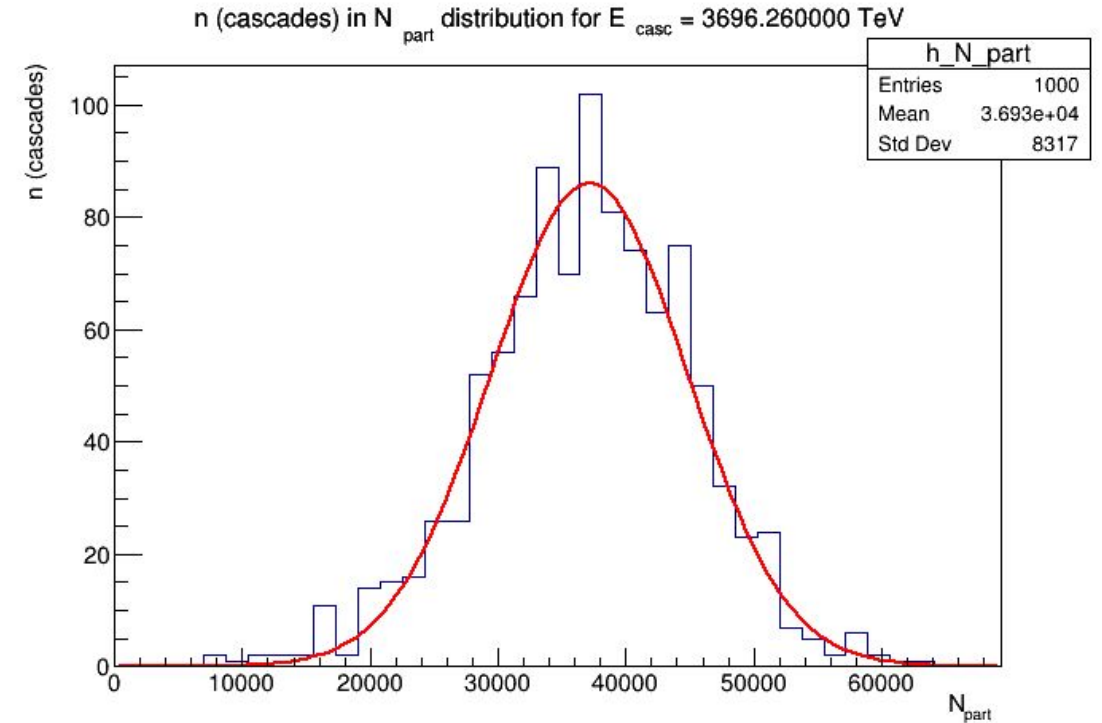
$$\rho(\theta, N_{part}(E), r) = F_{\theta}(\theta) \cdot \frac{1.25 N_{part}(E)}{2\pi\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}$$

r - Odległość od centrum kaskady [m].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

N_{part} - Liczba cząstek kaskady.

E - Energia cząstki pierwotnej [TeV].



* - P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady*:

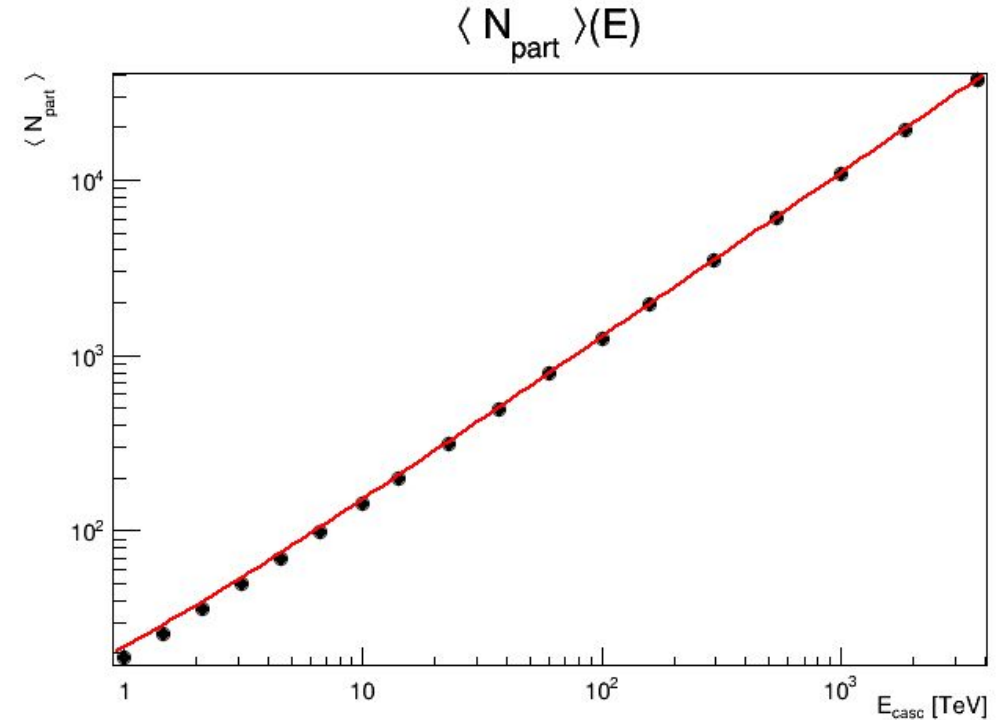
$$\rho(\theta, N_{part}(E), r) = F_{\theta}(\theta) \cdot \frac{1.25 N_{part}(E)}{2\pi\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}$$

r - Odległość od centrum kaskady [m].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

N_{part} - Liczba cząstek kaskady.

E - Energia cząstki pierwotnej [TeV].



* - P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady*:

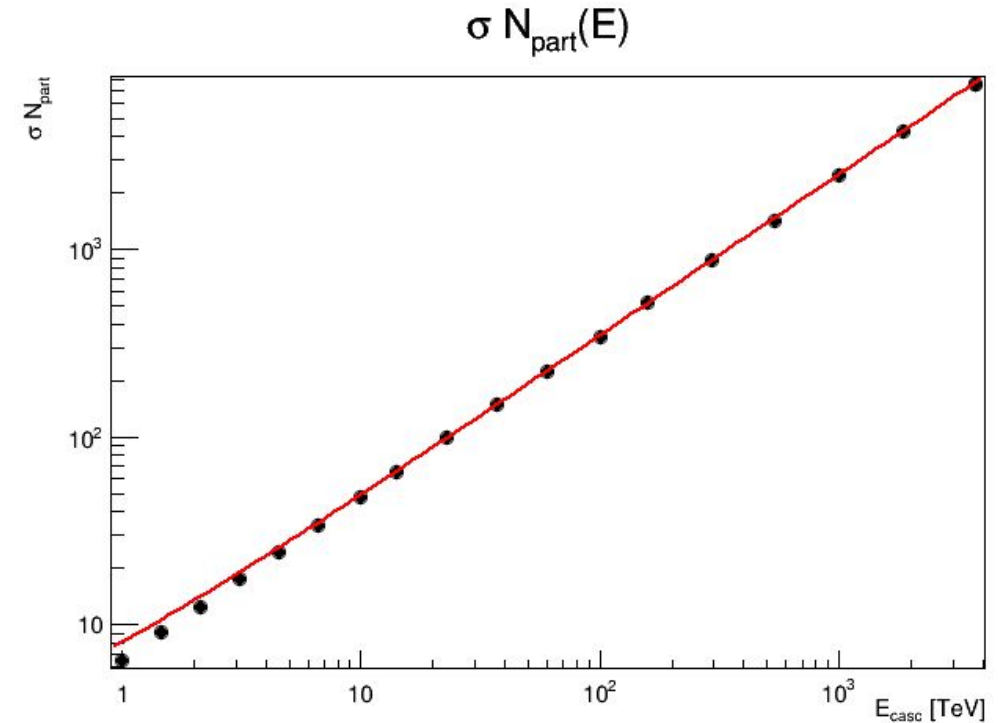
$$\rho(\theta, N_{part}(E), r) = F_{\theta}(\theta) \cdot \frac{1.25 N_{part}(E)}{2\pi\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}$$

r - Odległość od centrum kaskady [m].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

N_{part} - Liczba cząstek kaskady.

E - Energia cząstki pierwotnej [TeV].



* - P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady*:

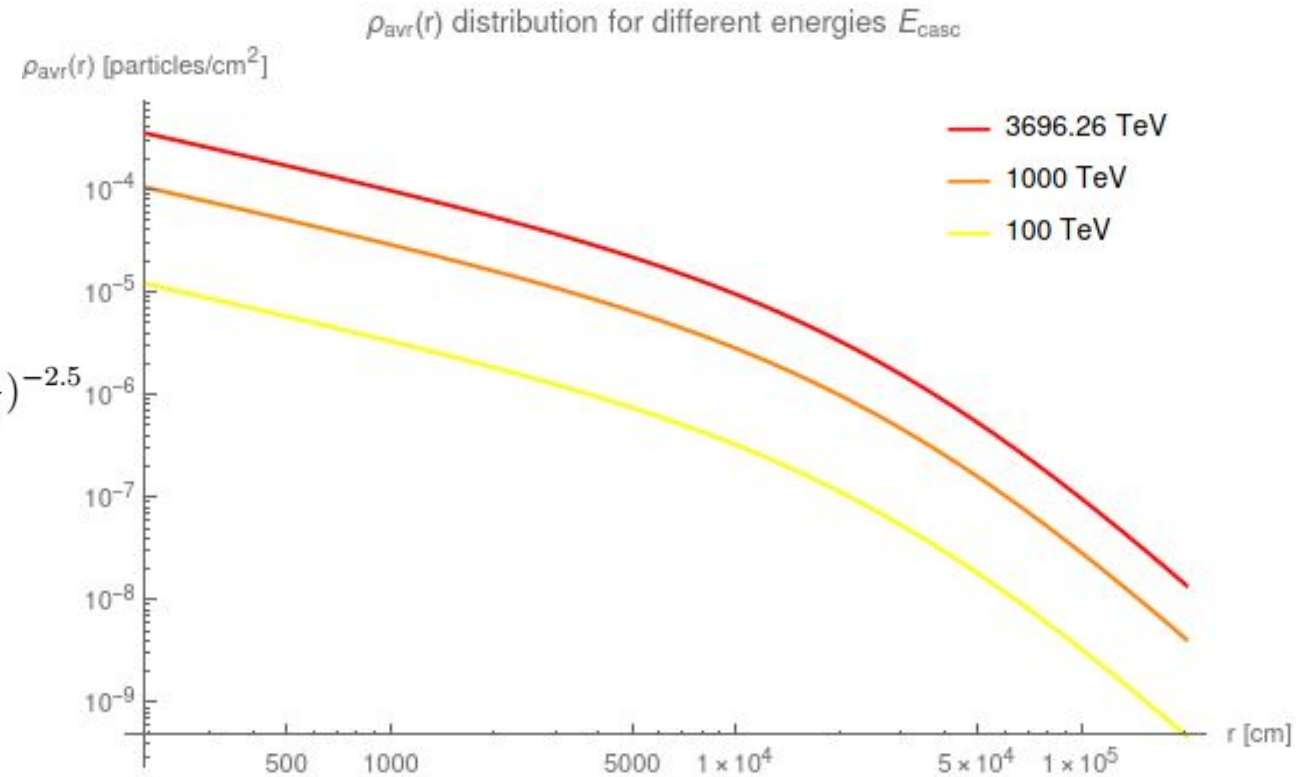
$$\rho(\theta, N_{part}(E), r) = F_{\theta}(\theta) \cdot \frac{1.25 N_{part}(E)}{2\pi\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}$$

r - Odległość od centrum kaskady [m].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

N_{part} - Liczba cząstek kaskady.

E - Energia cząstki pierwotnej [TeV].



* - P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

Detekcja kaskad

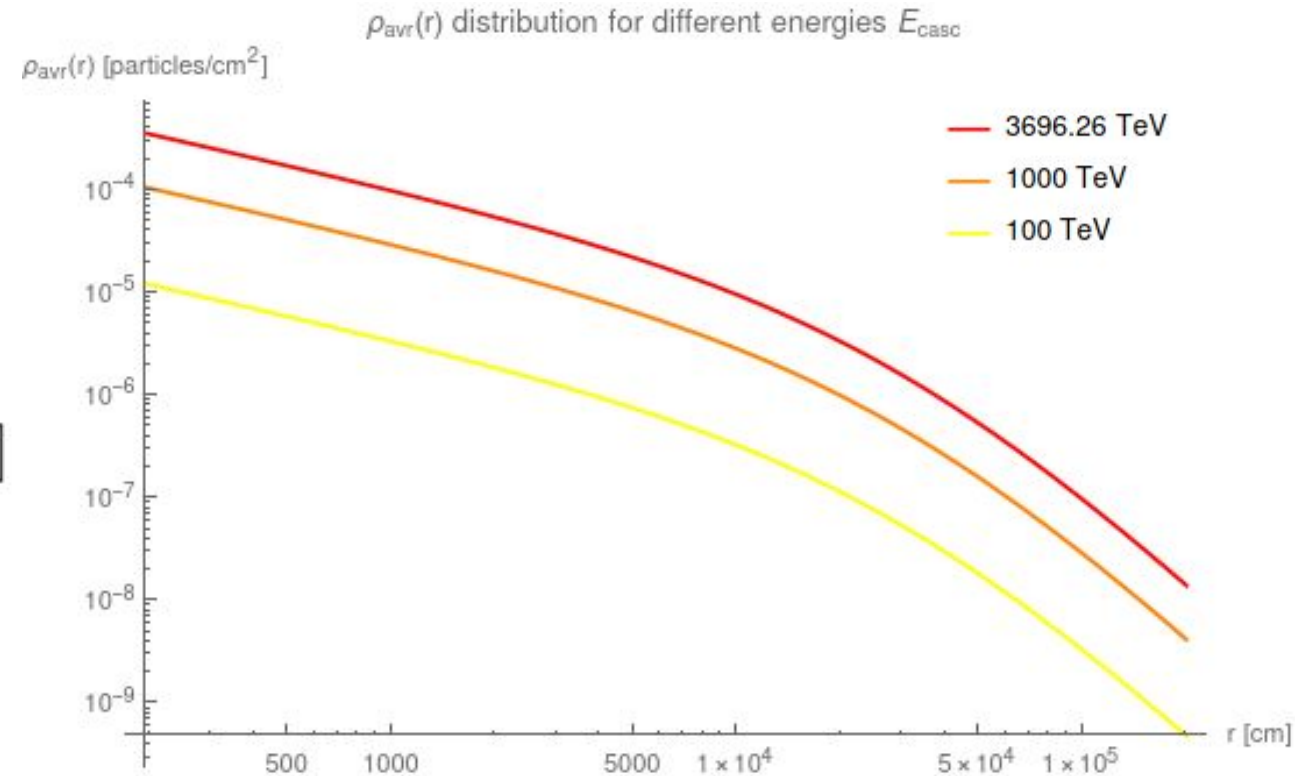
Prawdopodobieństwo sygnału:

$$P(A, \eta, \rho) = 1 - \exp[-A \cdot \eta \cdot \rho(\theta, N_{part}(E), r)]$$

$\rho(\theta, N_{part}, r)$ - Funkcja gęstości kaskady [parts/cm²].

η - Wydajność detektora [%].

A - Powierzchnia detektora [cm²].



Detekcja kaskad

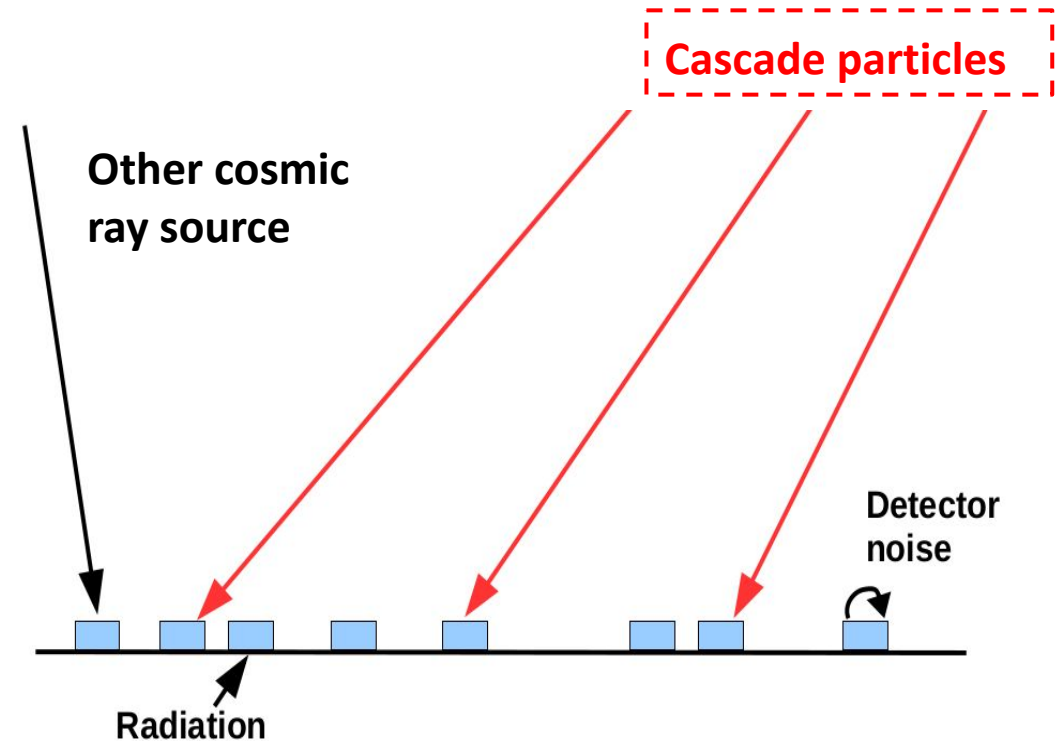
Prawdopodobieństwo koincydencji:

$$Q(n, k, P) = \binom{n}{k} P^k (1 - P)^{n-k}$$

P - Prawdopodobieństwo sygnału od cząstki z kaskady.

n - Ilość detektorów w układzie.

k - Ilość detektorów dających sygnał.



Detekcja kaskad

Oczekiwana ilość koincydencji:

$$\langle N(k) \rangle = \int_0^{r_{max}} \int_{E_{min}}^{E_{max}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} Q(n, k, P) 2\pi r j(E) T d\Omega dE dr$$

$Q(n, k, P)$ - Prawdopodobieństwo koincydencji.

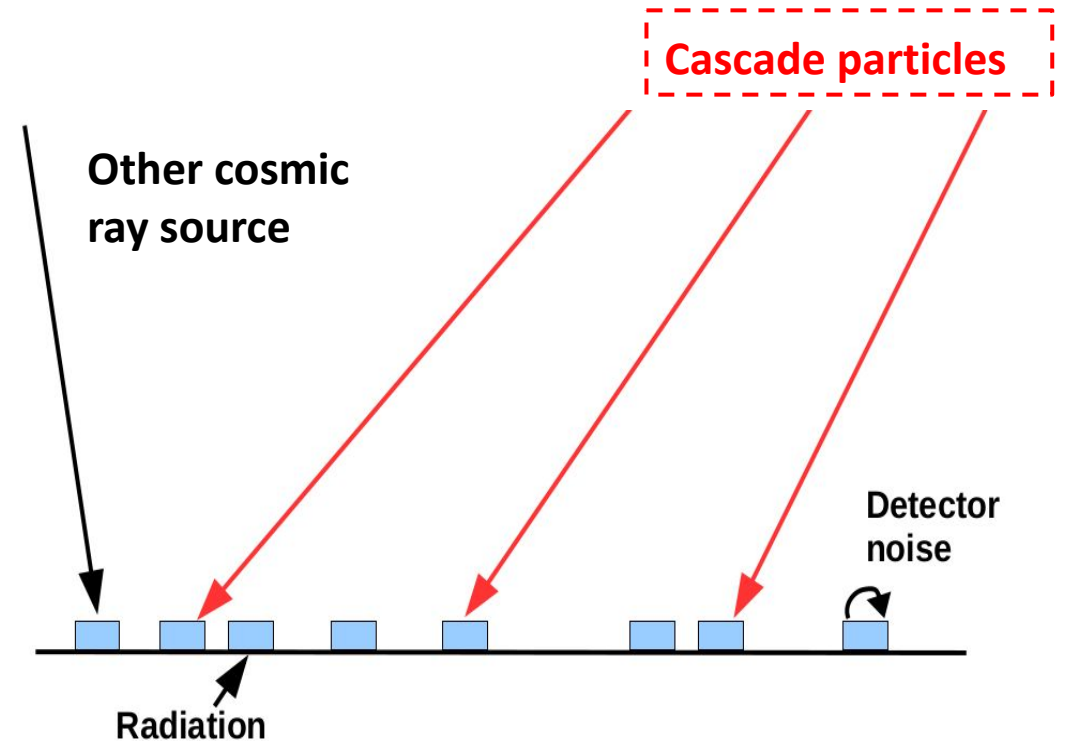
r - Odległość od centrum kaskady [cm].

$j(E)$ - Funkcja częstotliwości kaskad [$1/s m^2$].

E - Energia kaskady [TeV].

T - Czas pomiaru [s].

\square - Kąt bryłowy.



Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady (znaleziona):

$$\rho(E, \theta, N_{part}, r) = \rho_{par}(r) \cdot F_{\theta}(\theta) \cdot F_E(E, r) \cdot F_N(N_{part}, r)$$

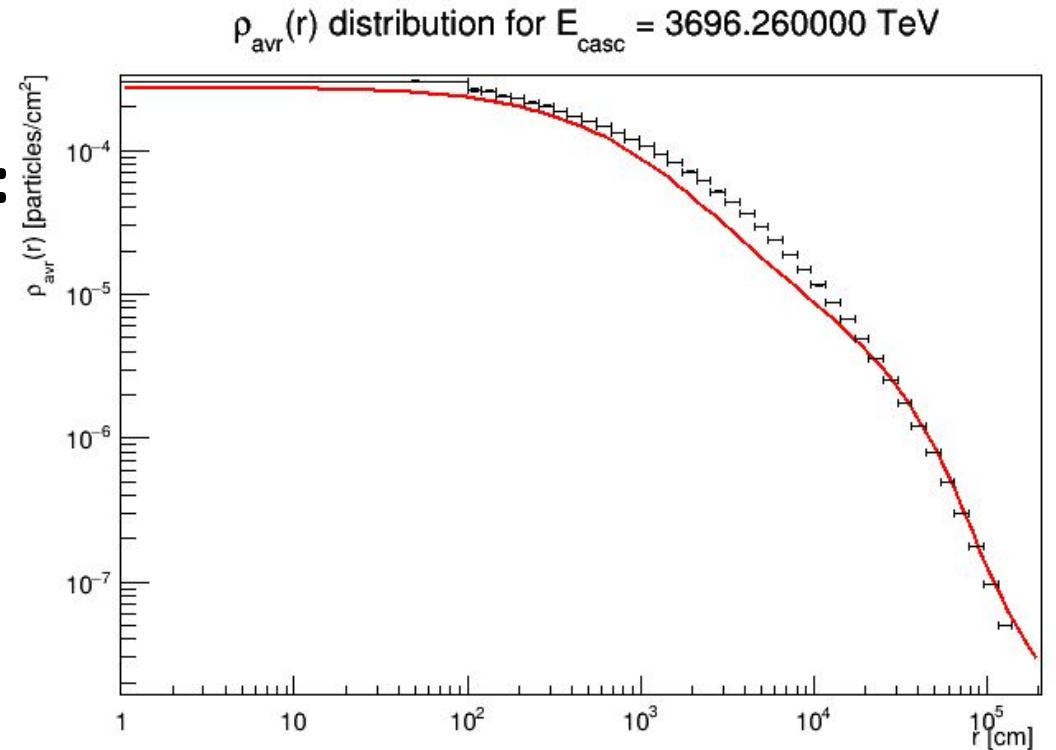
r - odległość od centrum kaskady [cm].

$\rho_{par}(r)$ - Funkcja gęstości, do której parametryzowaliśmy [parts/cm²].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

$F_E(E, r)$ - Czynniki zależności od energii.

$F_N(N_{part}, r)$ - Czynniki fluktuacji całkowitej ilości cząstek.



Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady (znaleziona):

$$\rho(E, \theta, N_{part}, r) = \rho_{par}(r) \cdot F_{\theta}(\theta) \cdot F_E(E, r) \cdot F_N(N_{part}, r)$$

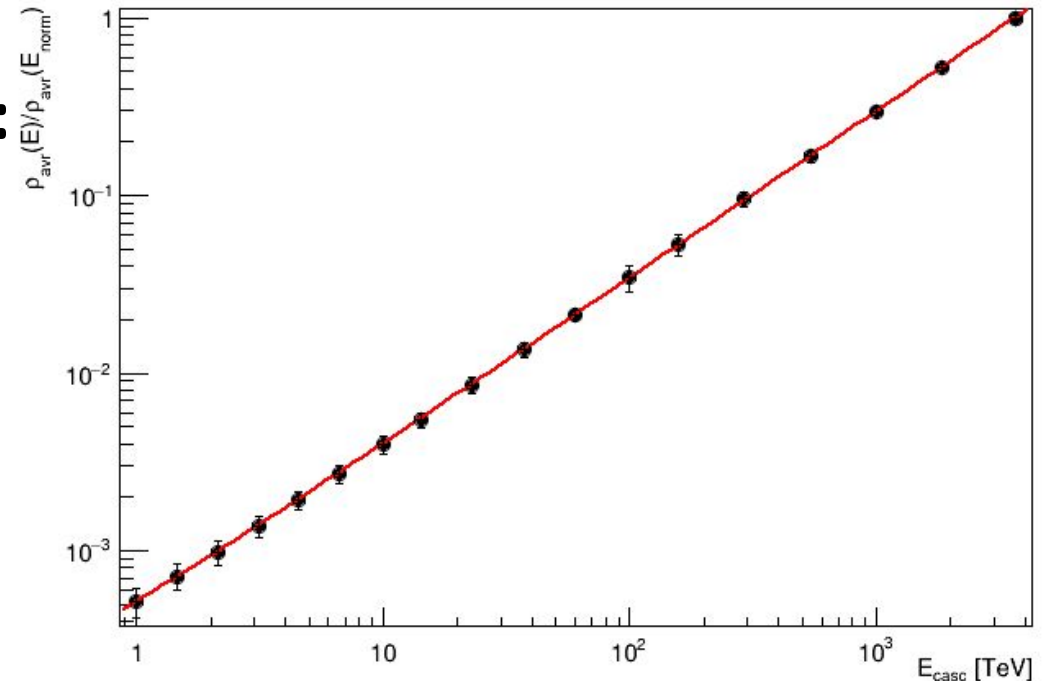
$\rho_{par}(r)$ - Funkcja gęstości, do której parametryzowaliśmy [parts/cm²].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

$F_E(E, r)$ - Czynniki zależności od energii.

$F_N(N_{part}, r)$ - Czynniki fluktuacji całkowitej ilości cząstek.

$\rho_{avr}(E)$ distribution for $r = 32469.476445$ cm



Detekcja kaskad

Funkcja gęstości kaskady (znaleziona):

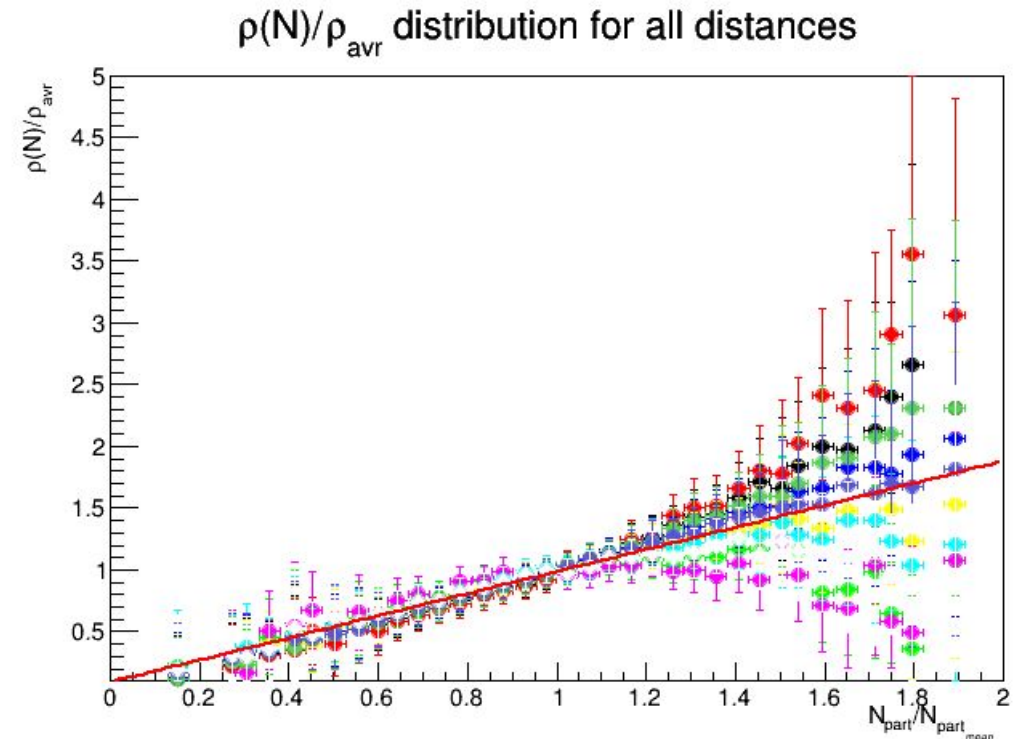
$$\rho(E, \theta, N_{part}, r) = \rho_{par}(r) \cdot F_{\theta}(\theta) \cdot F_E(E, r) \cdot F_N(N_{part}, r)$$

$\rho_{par}(r)$ - Funkcja gęstości, do której parametryzowaliśmy [parts/cm²].

$F_{\theta}(\theta)$ - Czynniki zależności od kąta.

$F_E(E, r)$ - Czynniki zależności od energii.

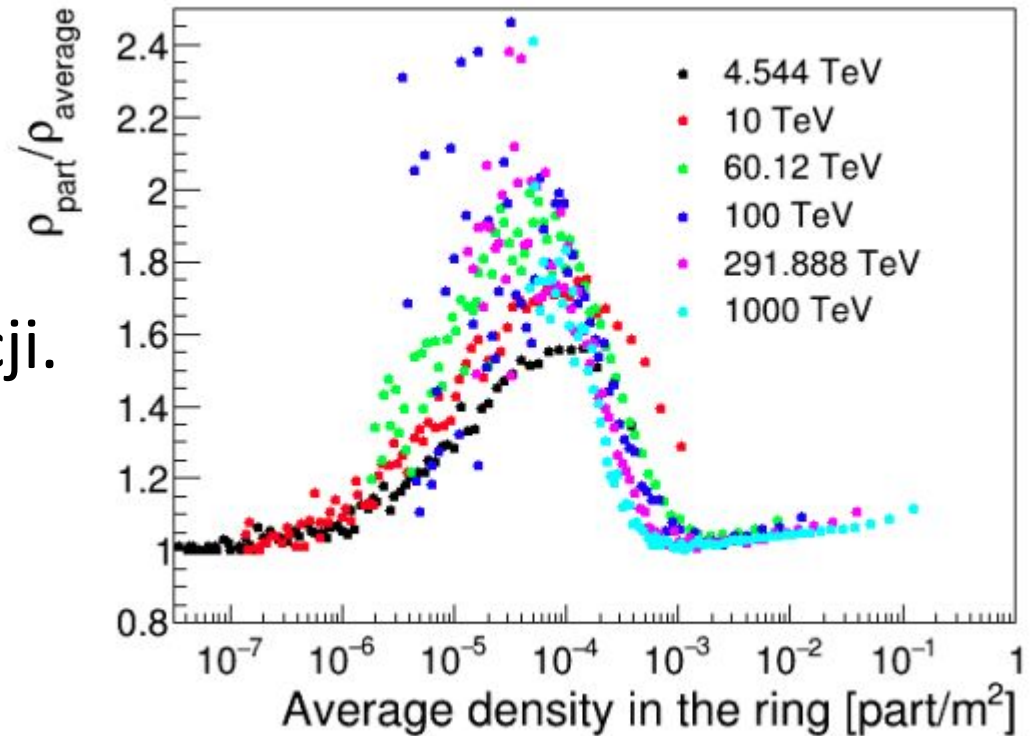
$F_N(N_{part}, r)$ - Czynniki fluktuacji całkowitej ilości cząstek.



Detekcja kaskad

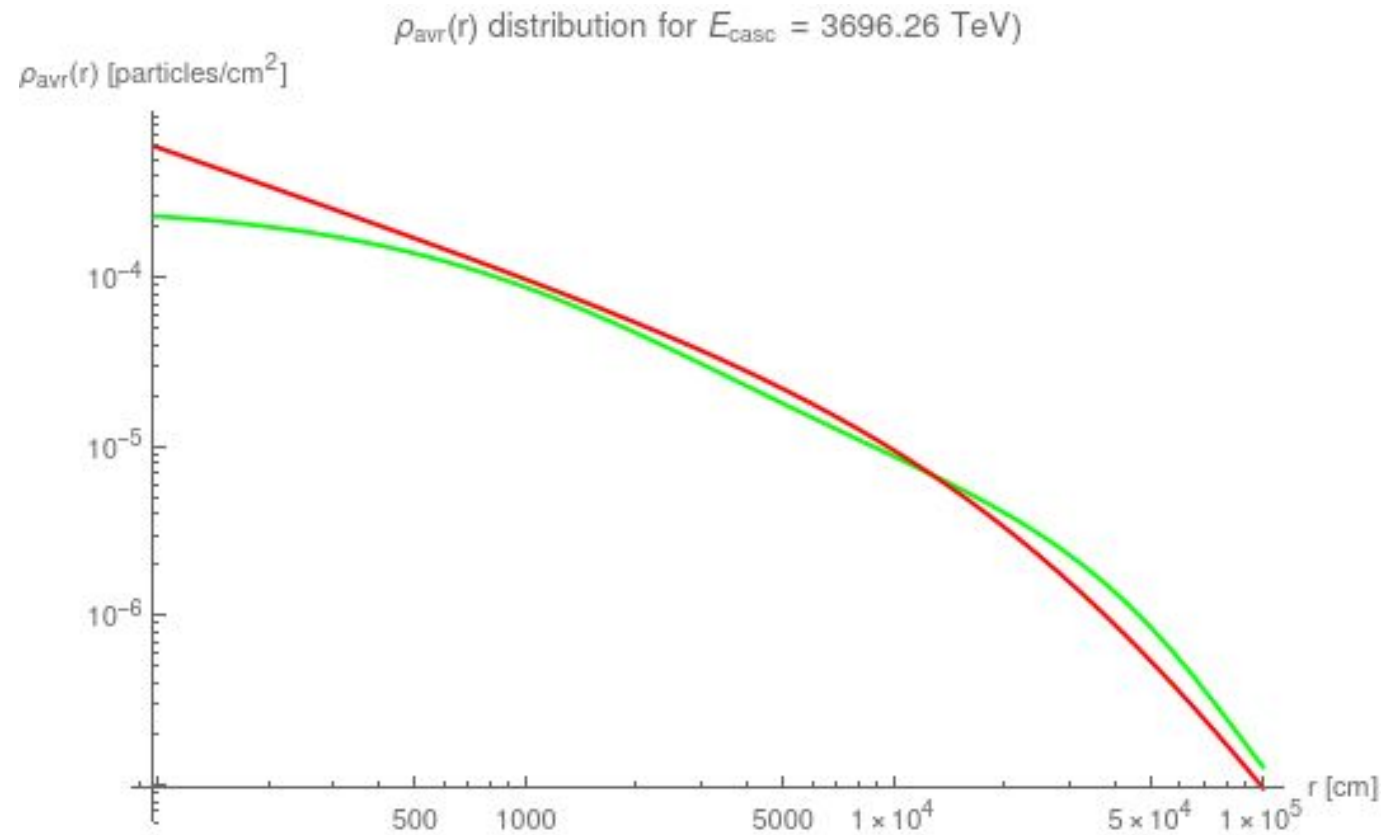
Dodatkowy efekt:

- “clustering” - zwiększa prawdopodobieństwo koincydencji.



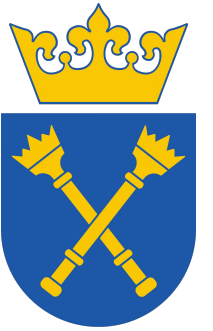
Detekcja kaskad

Porównanie przybliżenia i analizy:





Kilka uwag



Inne mniej istotne aspekty:

1. Szanse na koincydencje sygnału od tła z sygnałem od kaskady zostały oszacowane i okazały się pomijalne.
2. Istnieje wiele innych efektów wpływających na wyniki, które jednak wymagają dużo więcej pracy aby zostać uwzględnione.



Otrzymane wyniki



Tabela podsumowująca całą dotychczasową pracę:

Koincydencja	Oczekiwane sygnały od kaskad (przybliżenie)	Oczekiwane sygnały od kaskad (analiza)	Oczekiwane sygnały od tła	Wyniki pomiarów
1	133500	184300	1.168×10^6	-
2	0.448	0.437	0.169	94
3	0.00387	0.00281	1.01×10^{-8}	2
4	0.000228	0.000223	$\ll 1$	1

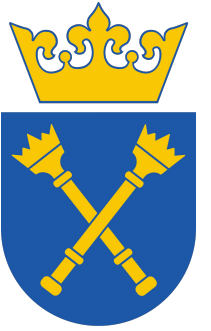


Otrzymane wyniki



Tabela podsumowująca całą dotychczasową pracę:

Koincydencja	Oczekiwane sygnały od kaskad (przybliżenie)	Oczekiwane sygnały od kaskad (analiza)	Oczekiwane sygnały od tła	Wyniki pomiarów
1	13,2 na 1 min	18,3 na 1 min	1.93 na 1 s	-
2	1 na 15,5 dni	1 na 16 dni	1 na 41 dni	1 na 2 h
3	< 1 na rok	< 1 na rok	<< 1 na rok	1 na 3,5 dnia
4	<< 1 na rok	<< 1 na rok	<< 1 na rok	1 na tydzień

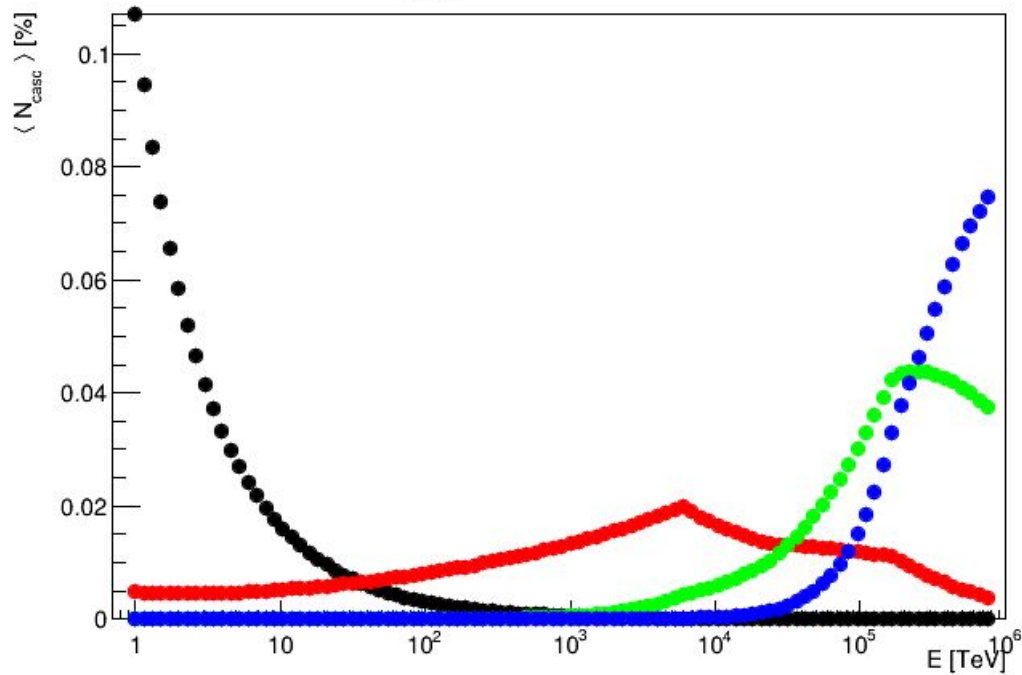


Otrzymane wyniki

Ilość sygnałów a energia kaskad:

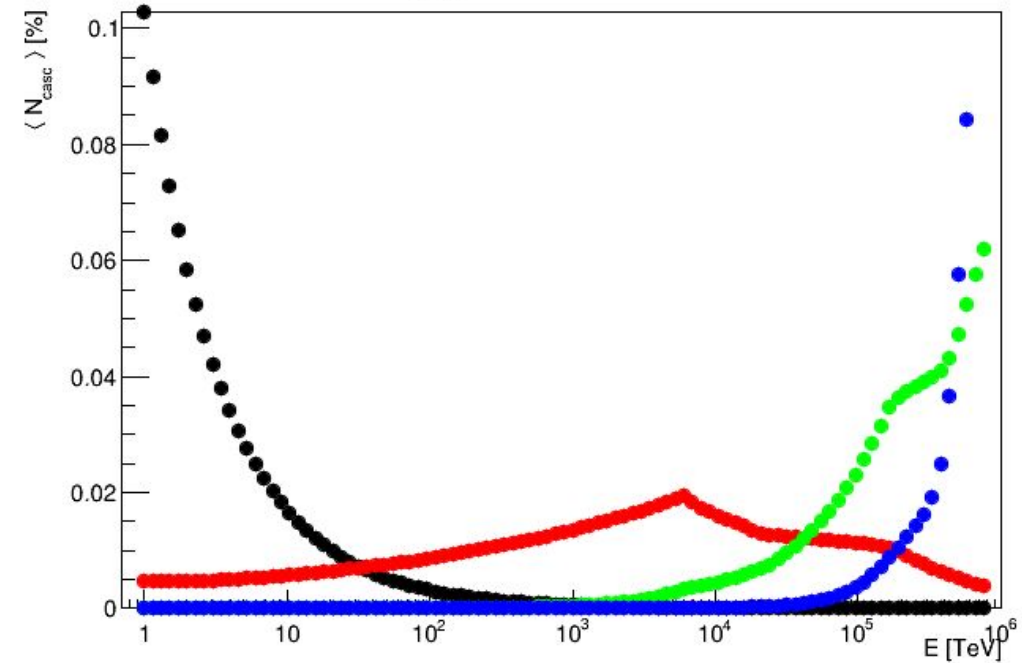
Przybliżenie

$\langle N_{\text{casc}}(k, E) \rangle$ for $k: 1 - 4$



Analiza

$\langle N_{\text{casc}}(k, E) \rangle$ for $k: 1 - 4$





Podsumowanie



Czy rozbieżność z pomiarem jest duża?

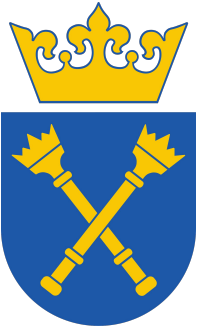
- Tak, ale chyba wiemy dlaczego.

Dlaczego rozbieżność z pomiarem jest tak duża?

- Istnieje szereg innych efektów wpływających na wyniki, które trudno uwzględnić, albo jest to wręcz niemożliwe:
 - Wysokość nad poziomem morza.
 - Trudność w oszacowaniu co dokładnie daje sygnał w detektorze.
 - Błędy w oszacowaniu poziomu tła.
- Mógł zostać wybrany zły model formowania się kaskad podczas symulacji.
 - Nie uwzględniono kaskad tworzonych przez cięższe pierwiastki.
 - Inne uproszczenia w założeniach.
 - Czas pomiaru był niedługi.



Podsumowanie



Jakie są najważniejsze wnioski z tej pracy?

- Szansa, że sygnały koincydencyjne o $k = 2, 3$ i 4 pochodzą od tła jest znikoma, zatem można założyć, że pochodzą od kaskad.
- Ilość koincydencji może pozwolić oszacować zakres energii kaskady, która je wywołała.

Jakie są dalsze plany rozwoju?

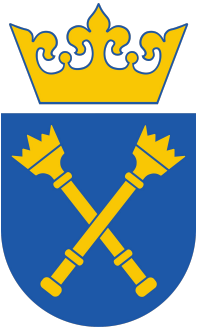
- Dokładne przetestowanie detektora w celu lepszego zrozumienia dla jakich zjawisk daje on sygnał.
 - Rozbudowa analizy i poszerzenie zakresu jej stosowalności.
 - Więcej pomiarów w różnych warunkach.
 - Publikacja :)

Bibliografia:

- P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).
(<https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-cosmic-rays.pdf>)
- Michał Karbowski *et al* 2020 *Phys. Educ.* 55 055021
- Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory”, P. Homola, et al. (CREDO Collab.), Symmetry 2020, 12(11), 1835, 2020.[arXiv:2010.08351, DOI:10.3390/sym12111835].
(<https://doi.org/10.3390/sym12111835>)
- CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers., by Heck, D.; Knapp, J.; Capdevielle, J. N.; Schatz, G.; Thouw, T.. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe (Germany)., Feb 1998, V + 90 p., TIB Hannover, D-30167 Hannover (Germany).
(https://web.iikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf)
- Aartsen, M. G., et al. "Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73." *Physical Review D* 88.4 (2013): 042004
(<https://arxiv.org/pdf/1307.3795.pdf>)
- S.N. Axani *et al* 2018 *JINST* 13 P03019
(<https://arxiv.org/pdf/1801.03029.pdf?>)



Cena i rozmieszczanie detektorów



1 detektor = 4 Cosmic Watch'e (2500 zł)
+ Baterie słoneczne, obudowa,
tracker GPS, urządzenia do
przesyłu i zbierania danych,
koszty administracyjne itd.
(≈ 2000 zł)

Żądana gęstość detektorów = $1/\text{km}^2$

Obszar = $15\,108\text{ km}^2$

Koszty =

= Cena detektora * Gęstość * Obszar =

= $4500\text{ zł} * 1/\text{km}^2 * 15\,108\text{ km}^2$

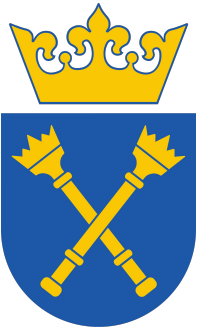
Małopolskie

Obszar: 15 108 km²





Cena i rozmieszczanie detektorów



Koszty = 67 986 000 zł
≈ 0,971 Sasina

