

Potencjalne źródła

Aktywne Jądra Galaktyk (AGNs)

Galaktyki Gwiazdotwórcze

Naładowane cząstki przylatujące do Ziemi z kosmosu

Dariusz Góra
Instytut Fizyki Jądrowej PAN

Wielki pęk atmosferyczny

Obserwatorium Pierre Auger

Jakie jest pochodzenie promieni kosmicznych o ultra wysokich energiach ($>10^{18}$ eV) ?

Promienie Kosmiczne

- ❖ **Promienie kosmiczne** -- cząstki przybywające do Ziemi z głębi kosmosu. Są to głównie cząstki naładowane – **protony i jądra atomów cięższych pierwiastków**, ale także cząstki neutralne: **neutrony, neutrina i fotony**. Być może, są wśród nich również jeszcze inne cząstki, których do tej pory nie zidentyfikowano.

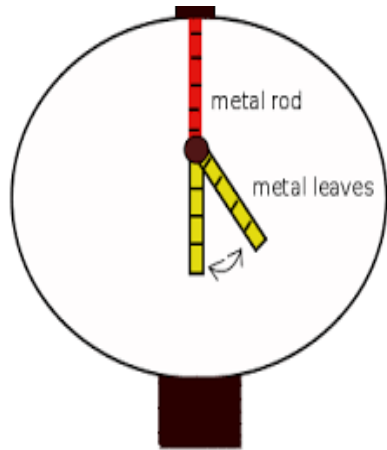


Kluczowy przełom nastąpił dzięki austriackiemu fizykowi, **Victorowi Hessowi**. Postanowił on sprawdzić, **jak intensywność jonizacji powietrza zmienia się wraz z wysokością**.

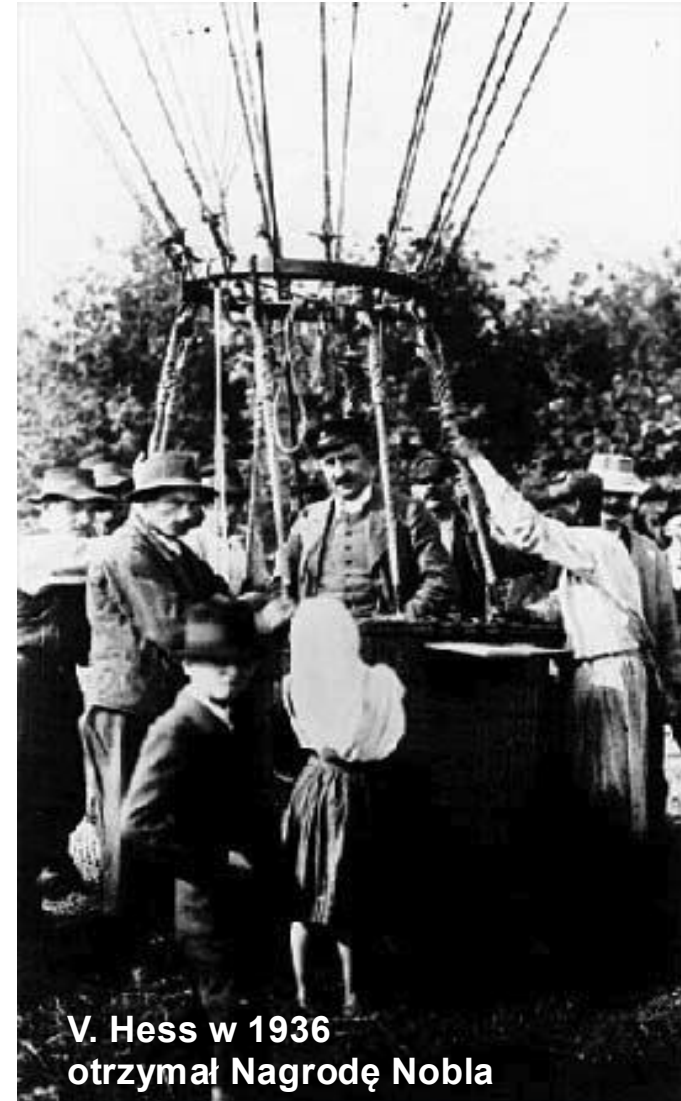


Promienie Kosmiczne

- ❖ **Eksperyment:** Hess wzbił się balonem na wysokość ponad **5300 metrów**, zabierając ze sobą **elektroskop**.



- ❖ **Wynik:** Ku jego zaskoczeniu, powyżej pewnej wysokości poziom jonizacji zaczął gwałtownie rosnąć, zamiast spadać. Na wysokości 5 km był on kilkukrotnie wyższy niż na powierzchni ziemi.
- ❖ **Wniosek:** Źródło tego promieniowania nie znajduje się w Ziemi, lecz **pochodzi z przestrzeni kosmicznej**.



V. Hess w 1936
otrzymał Nagrodę Nobla

Promienie Kosmiczne

❖ **Pozyton (1932):** pierwszy dowód na istnienie antymaterii

Odkrycie pozytonu to jeden z najbardziej fascynujących momentów w historii fizyki, ponieważ był to pierwszy raz, kiedy potwierdzono istnienie **antymaterii**. To nie był tylko szczęśliwy traf w laboratorium, ale wielki triumf teorii doganiającej rzeczywistość.

ODKRYCIE POZYTONU: OD TEORII DO OBSERWACJI I ZASTOSOWANIA

1. PRZEWIDYWANIA TEORETYCZNE (1928)



PAUL DIRAC

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (c\alpha \cdot \vec{p} + \beta mc^2) \psi$$

Equation of Dirac



ENERGIA > 0

ELEKTRON (e^-)

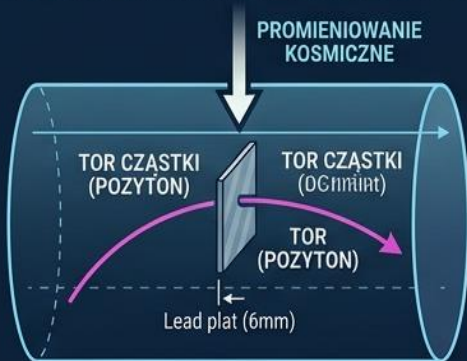


ENERGIA < 0

POZYTON (e^+)

Równanie Diraca dopuszczało rozwiązania dla cząstek o ładunku dodatnim i masie elektronu.

2. EKSPERYMENT ANDERSONA (1932)



KOMORA MGŁOWA ANDERSONA

ZAKRZYWIENIE W SILNYM POLU MAGNETYCZNYM

TOR POZYTONU (e^+)

TOR ELEKTRONU (e^-)

Masa elektronu, ładunek dodatni. Pierwsza obserwacja antymaterii.

3. POTWIERDZENIE ANTYMATERII (1933-1934)

TWORZENIE PAR

γ -HIGH ENERGY PHOTON



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

ANIHILACJA



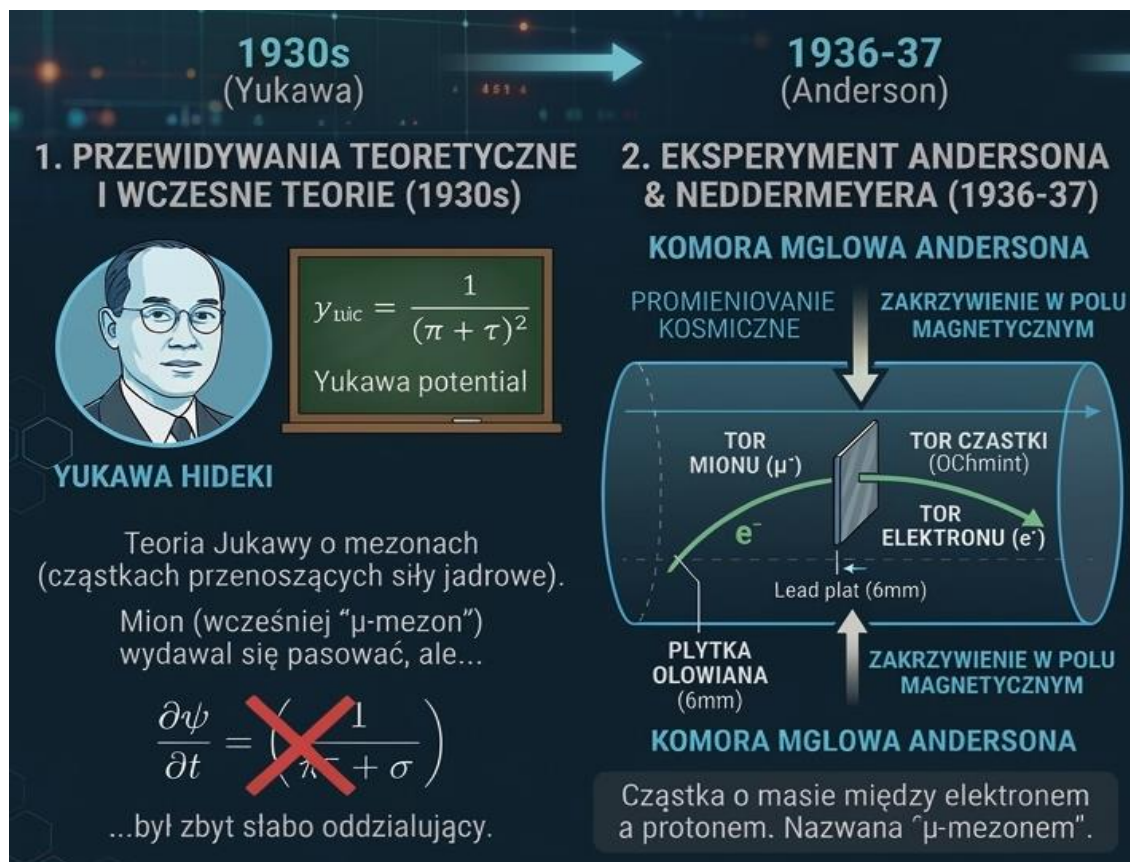
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma (511 \text{ keV})$$

4. WSPÓŁCZESNE ZASTOSOWANIE: PET



Promienie Kosmiczne

- ❖ **Mion (1936):** docierają do powierzchni Ziemi tylko dzięki efektowi dylatacji czasu (efektowi z teorii względności Einsteina) – dla pędzącego mionu czas płynie wolniej, co pozwala mu przetrwać podróż do naszych detektorów. Miony powstają wysoko w atmosferze w wyniku zderzeń promieniowania kosmicznego z atomami powietrza. Mimo że żyją tak krótko, że teoretycznie powinny rozpaść się po przelecie kilkuset metrów, docierają do powierzchni Ziemi.



- ❖ **Carl Anderson w 1936 otrzymał Nagrodę Nobla za odkrycie pozytonu i współdział w odkryciu mionu**

Promienie kosmiczne najwyższych energii $>10^{17}$ eV

Najbardziej energetyczne cząstki we Wszechświecie, ale bardzo rzadkie

300 000 000 000 000 000 000 000 eV

1.5 eV



❖ **Foton światła widzialnego**
ok. 2 - 3 eV To, co widzą Twoje oczy.

❖ **LHC (CERN) $7 \cdot 10^{12}$ eV (7 TeV)**
Szczyt ludzkiej technologii.



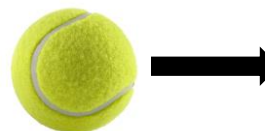
LHC

CREDIT: (© CERN, Ordan, Julien Marius)

❖ **Cząstka „O-mój-Boże” (Oh-My-God)**
 $3 \cdot 10^{20}$ eV

Najpotężniejsza zmierzona cząstka

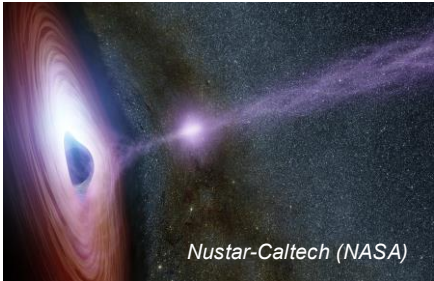
15 października 1991 r. przez eksperyment Fly's Eye w Utah, USA.



Tyle samo energii ma **piłka tenisowa (145g)**
leżąca z prędkością ok. 95 km/h (około 50 dżuli)



Skala energii



Aktywne Jądra Galaktyk

Najwyższej energii cząstka promieni kosmicznych ma energię 300 milionów razy wyższą niż protony w Tevatronie

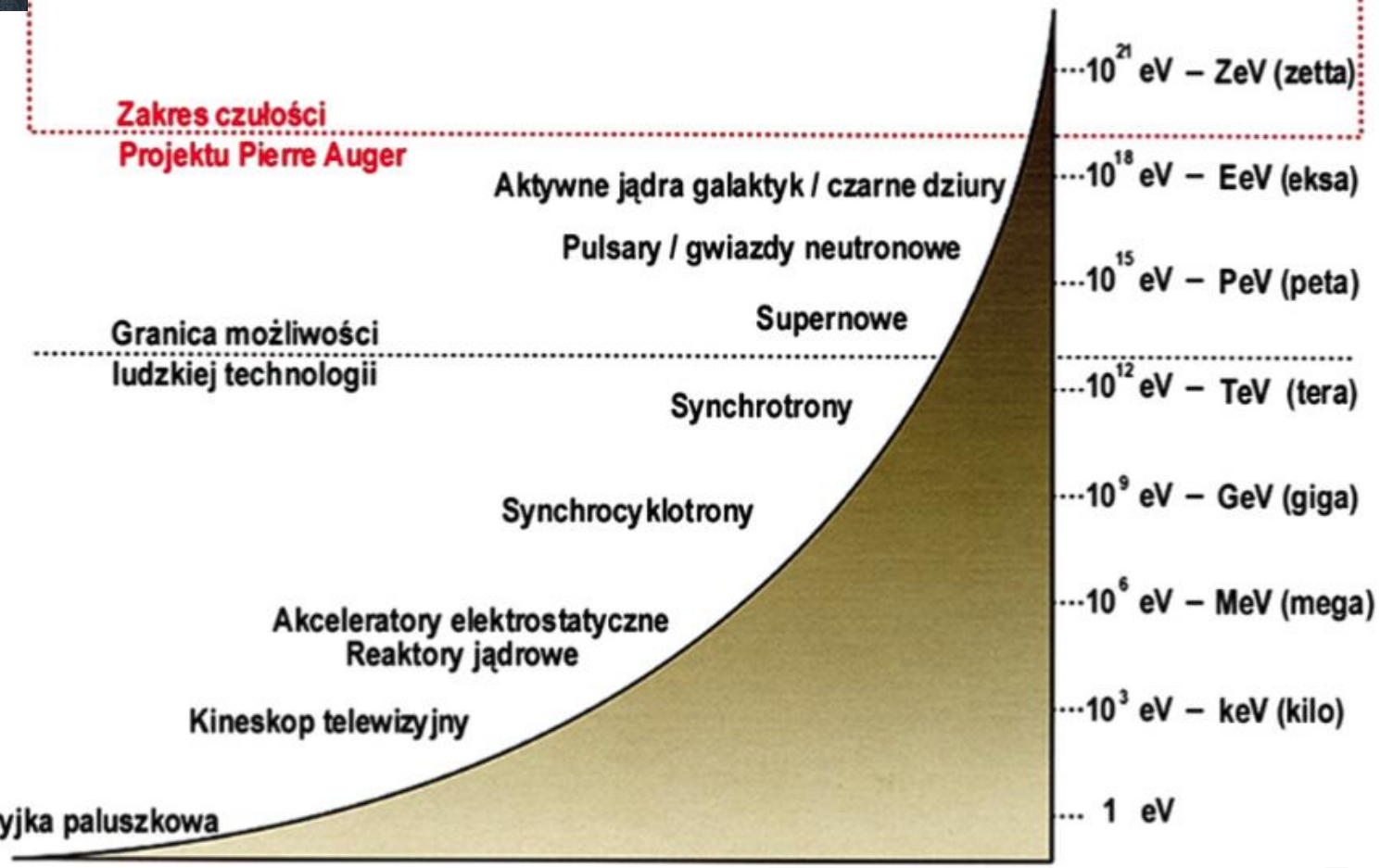
Zakres czułości
Projektu Pierre Auger

Granica możliwości
ludzkiej technologii

1.5 eV



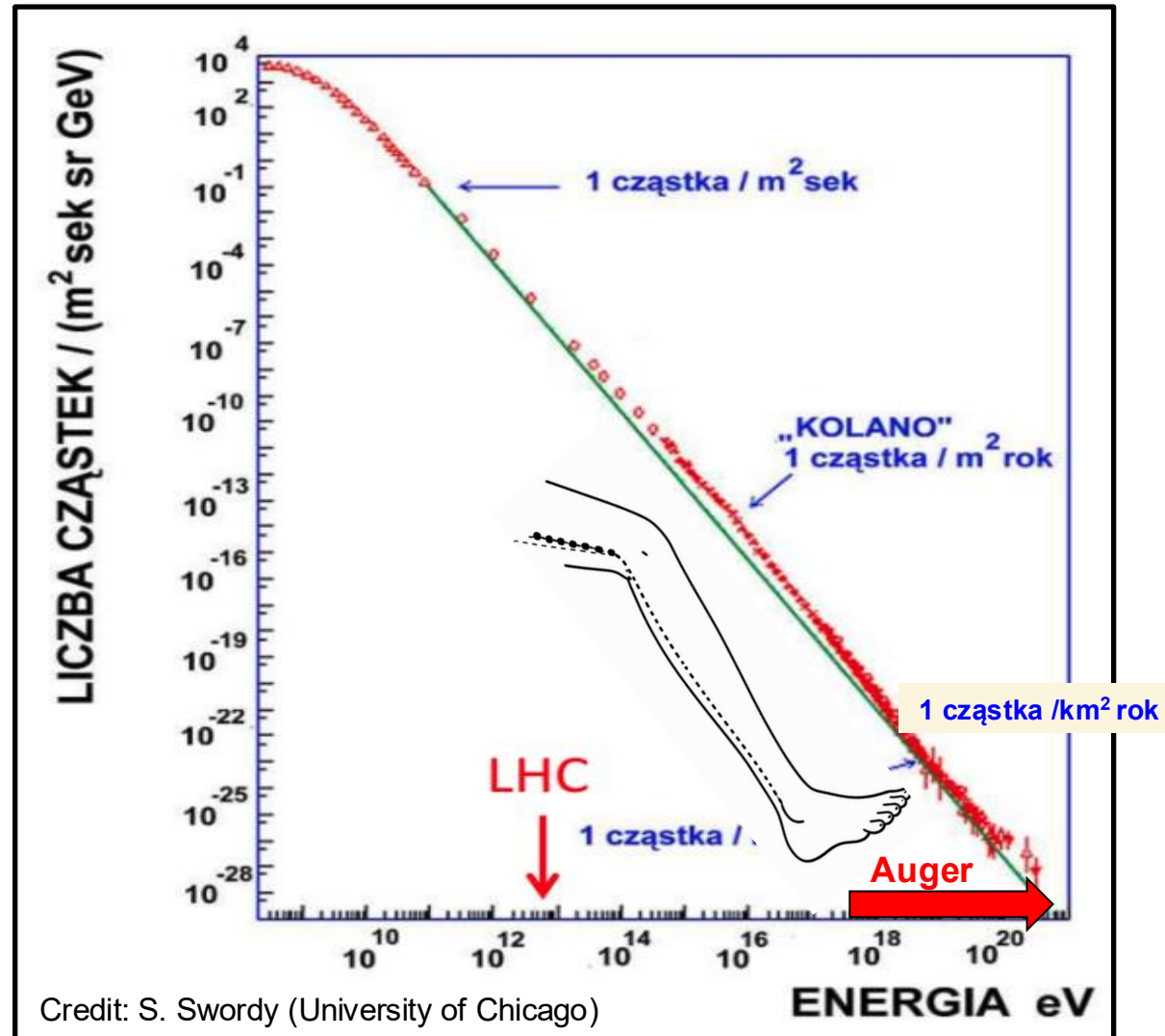
Baterijka paluszkowa



Widmo promieni kosmicznych

- Rozkład energii tych cząstek, czyli widmo energetyczne rozciąga się na wiele rzędów wielkości: od energii bardzo niskich, do nieosiągalnych w akceleratorach na Ziemi.

Całkowity strumień promieniowania kosmicznego docierający **do górnych warstw atmosfery jest rzędu $1000 \text{ cząstek}/\text{m}^2$** , lecz ich zdecydowana większość – to cząstki o energiach niskich.

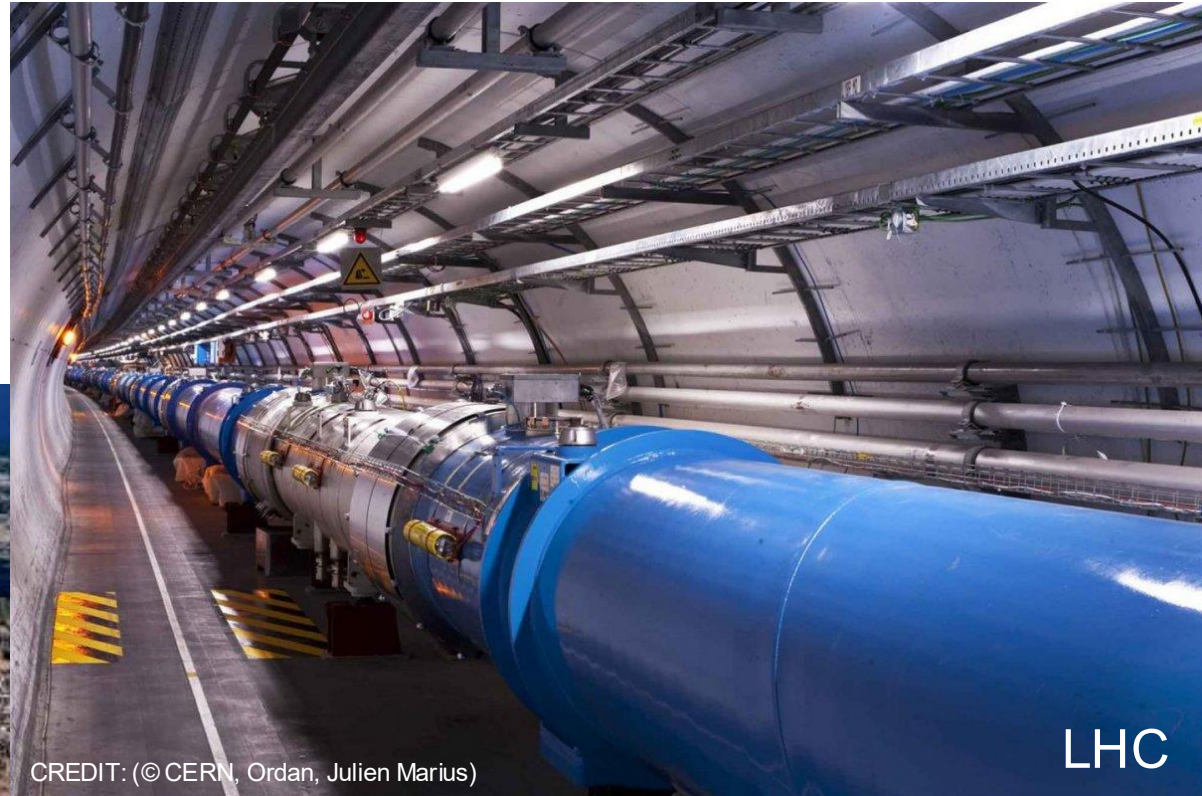


Promienie kosmiczne najwyższych energii

- [illegible]

Protony w LHC osiągają prędkość równą **prędkości światła (99,9999991% - C)**. Przy tej prędkości cząstki okrążają tunel o długości **27 km 11 000** razy w w ciągu jednej sekundy.

Widok na CERN. Biała linia pokazuje przebieg tunelu o długości 27 km, gdzie znajdują się pod ziemią akceleratory.



LHC (CERN)

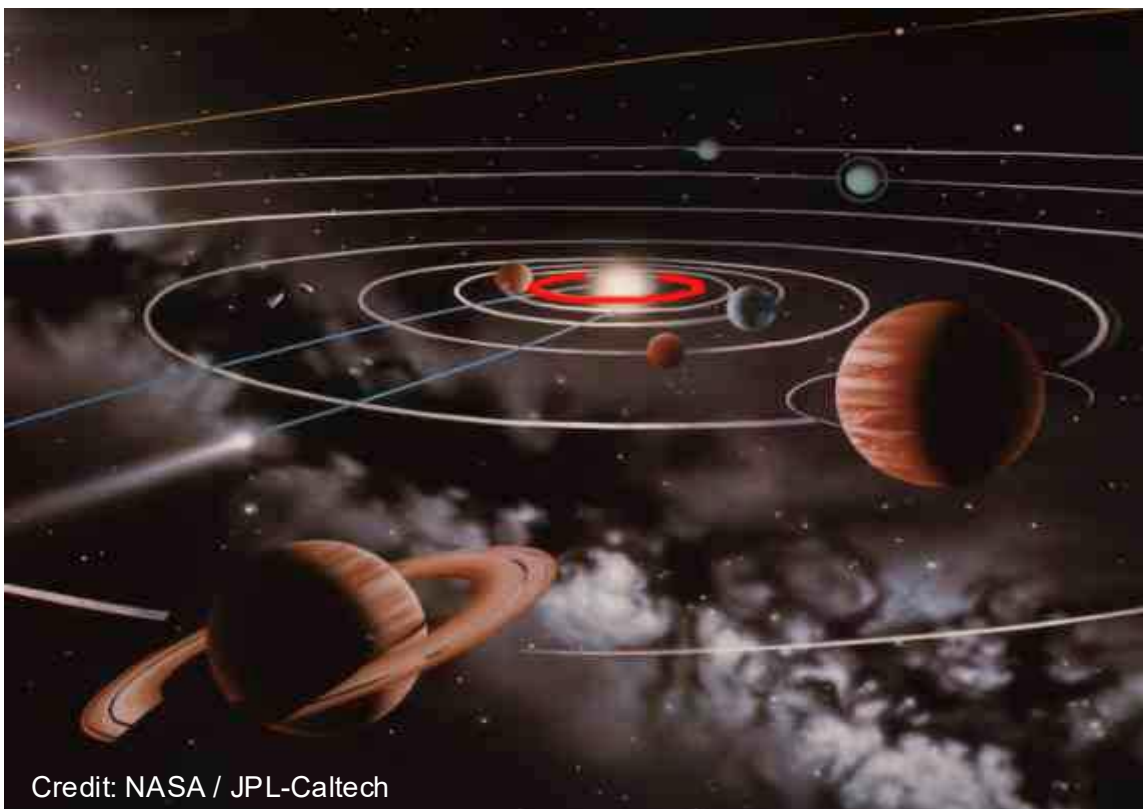
CREDIT: (© CERN, Ordan, Julien Marius)

LHC

CREDIT: (© CERN)

Promienie kosmiczne najwyższych energii

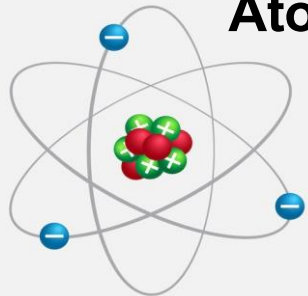
- ❖ Przyspieszenie do 10^{20} eV przy użyciu technologii LHC wymagałoby akcelatora o wielkości orbity Merkurego; czas przyspieszania: > 800 lat...



- ❖ **Dlaczego to jest niesamowite?** Gdyby taka cząstka uderzyła w Twój palec, nie poczułbyś nic, bo pozostawi w palcu za mało energii, by wywołać makroskopowy efekt. Jednak w skali atomowej to prawdziwa "bomba", która po zderzeniu z atmosferą tworzy kaskadę miliardów innych cząstek tzw. wielki pęk atmosferyczny

Trzej Muszkieterowie Mikroświata i ich Tajemniczy Przyjaciele

Atom

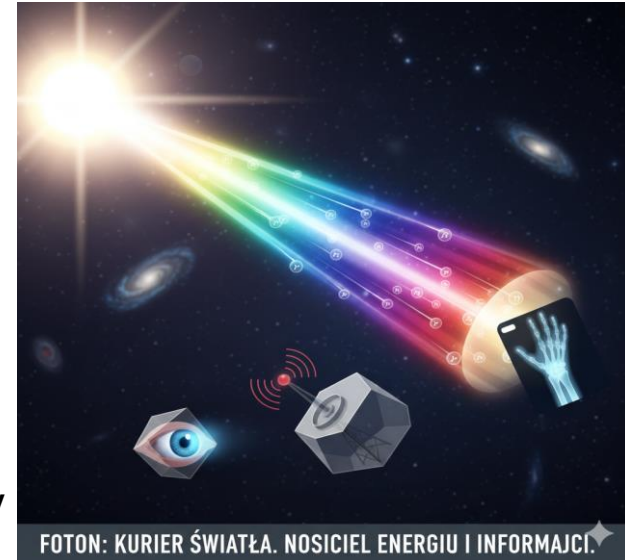


Electron Proton Neutron

❖ **Proton, Elektron i Neutron** to trio, które buduje materię (Ciebie, stół, Ziemię)

❖ **Foton to energia**, dzięki której widzisz ten tekst

❖ **Mion** to „cięższy brat” elektronu (masa około 200 razy większa). Jest identyczny pod względem ładunku, ale ma jedną dziwną cechę: jest bardzo niestabilny.



FOTON: KURIER ŚWIATŁA. NOSICIEL ENERGII I INFORMACJI.

❖ **Neutrino** to cząstka, która jest tak nieuchwytna, że nazywamy ją „duchem” wszechświata. Przenika przez wszystko, rzadko wchodząc w interakcje

❖ **Mion i Neutrino** to **kosmiczni goście**, którzy nieustannie nas przenikają, choć zazwyczaj ich nie czujemy.



MIKROŚWIAT Z KOSMOSU: NARODZINY MIONÓW

Wielki pęk atmosferyczny

Wielki pęk atmosferyczny

...wywołany przez cząstkę pierwotną
o energii 10^{20} eV zawiera w swoim maksimum
około 100-200 miliardów cząstek

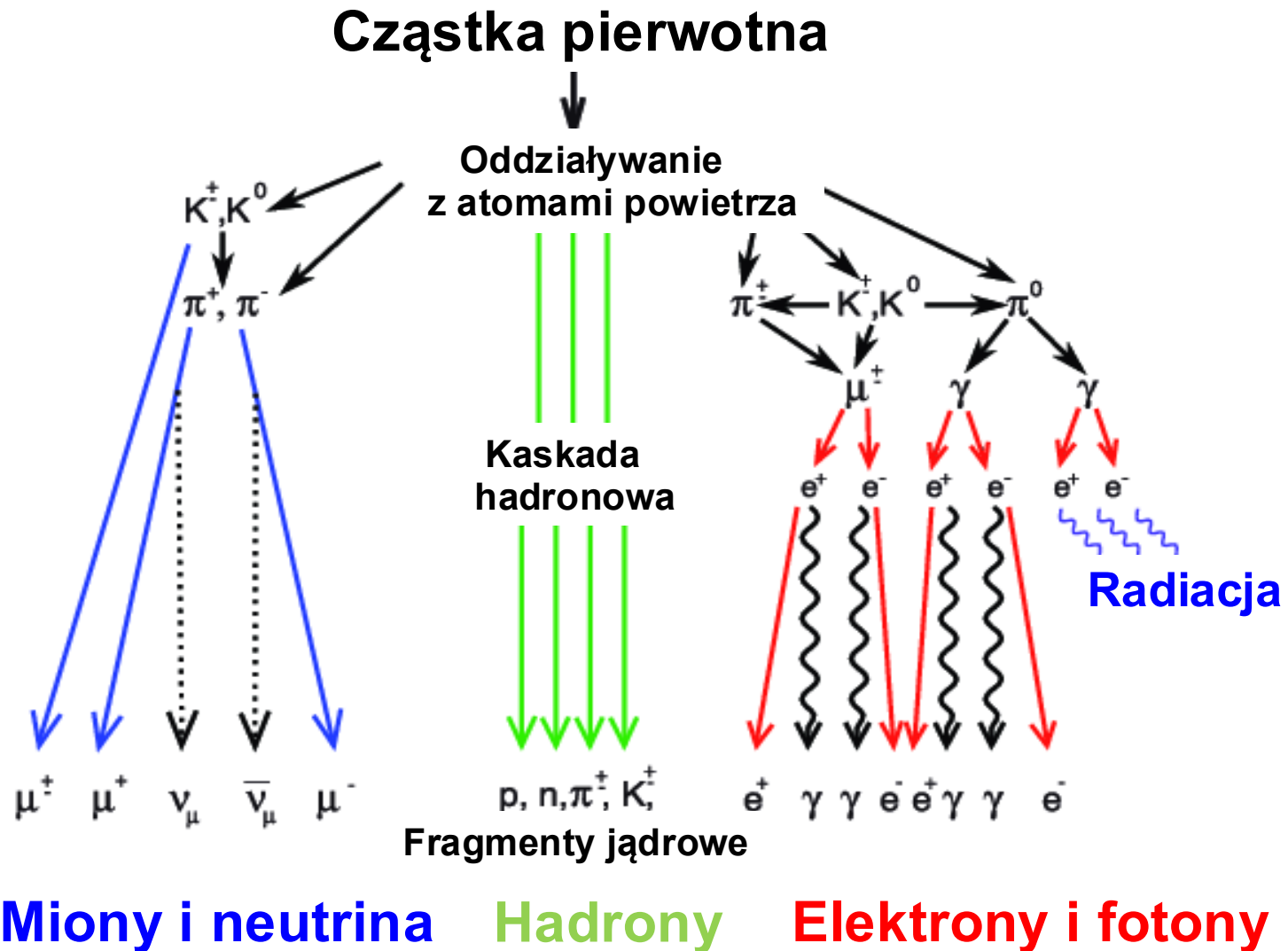


kilka kilometrów (3-6 km)

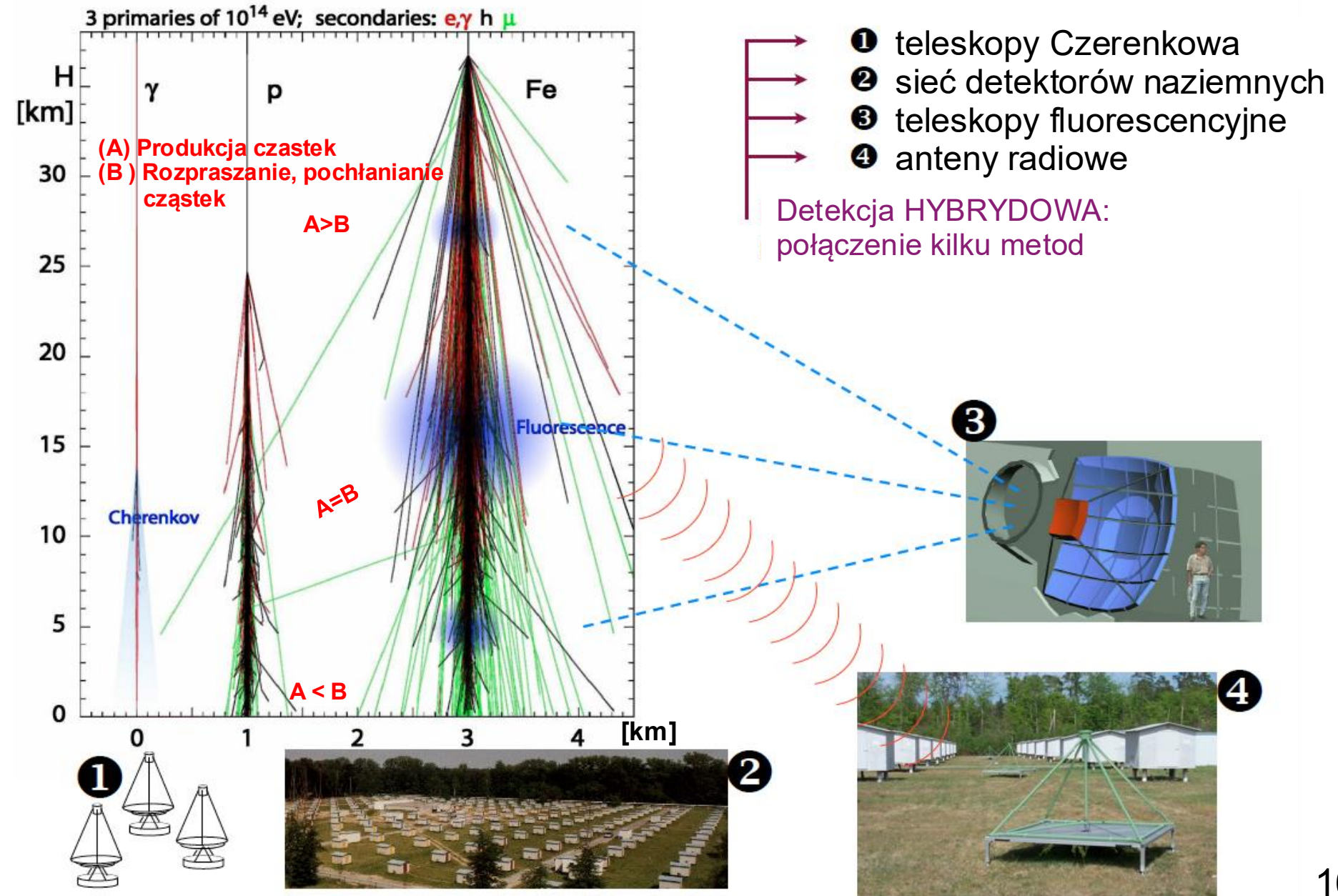
Wielki pęk atmosferyczny



Wielki pęk atmosferyczny



Techniki detekcji wielkich pęków atmosferycznych

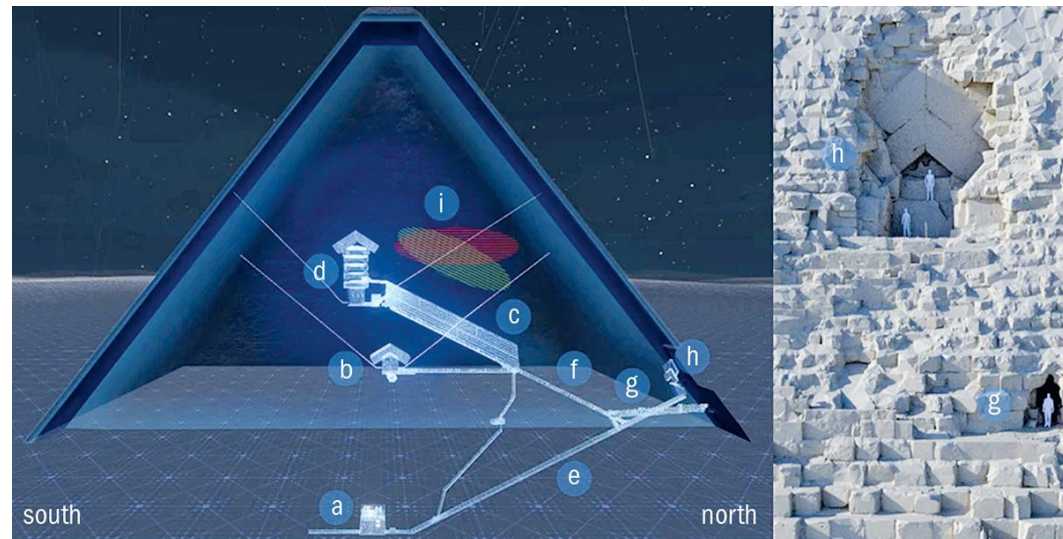
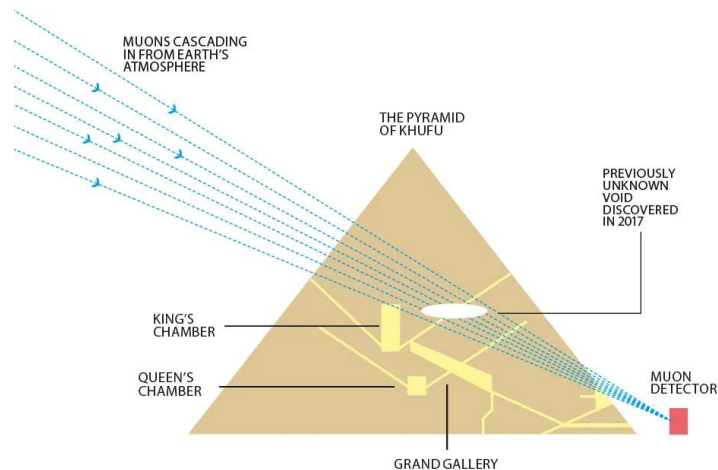


Ciekawostki

❖ Archeologia mionowa: Prześwietlanie piramid

Miony to "ciężsi kuzyni" elektronów, którzy powstają, gdy promienie kosmiczne uderzają w atmosferę. Są niezwykle przenikliwe – potrafią przejść przez setki metrów skały.

❖ Ukryte komnaty: Naukowcy wykorzystują miony do tworzenia czegoś w rodzaju "RTG budowli". Dzięki tej metodzie (muografii) w 2017 roku w **Wielkiej Piramidzie w Gizie** odkryto ogromną, wcześniej nieznaną pustą przestrzeń (tzw. *Big Void*).



- ❖ **Wulkanologia:** Miony pomagają też "zaglądać" do wnętrza aktywnych wulkanów, aby mapować kanały magmowe i lepiej przewidywać erupcje.

- ❖ **Naturalne błędy w elektronice**

Promienie kosmiczne nie tylko badają piramidy, ale też uprzykrzają nam życie na co dzień.

Bit flip: Miony mogą uderzyć w mikroprocesor i zmienić wartość bita z 0 na 1.

To zjawisko (SEU – *Single Event Upset*) było odpowiedzialne za błędy w maszynach do głosowania czy nagłe restarty komputerów pokładowych w samolotach.



Przed błędem

[0][1][1]

^ ^ ^

Bit1 Bit2 Bit3

(1)

Po błędzie (Bit Flip)

[0][0][1]

^ ^ ^

Bit1 Bit2 Bit3

(0)

+-----> **PRZESKOK** <-----+

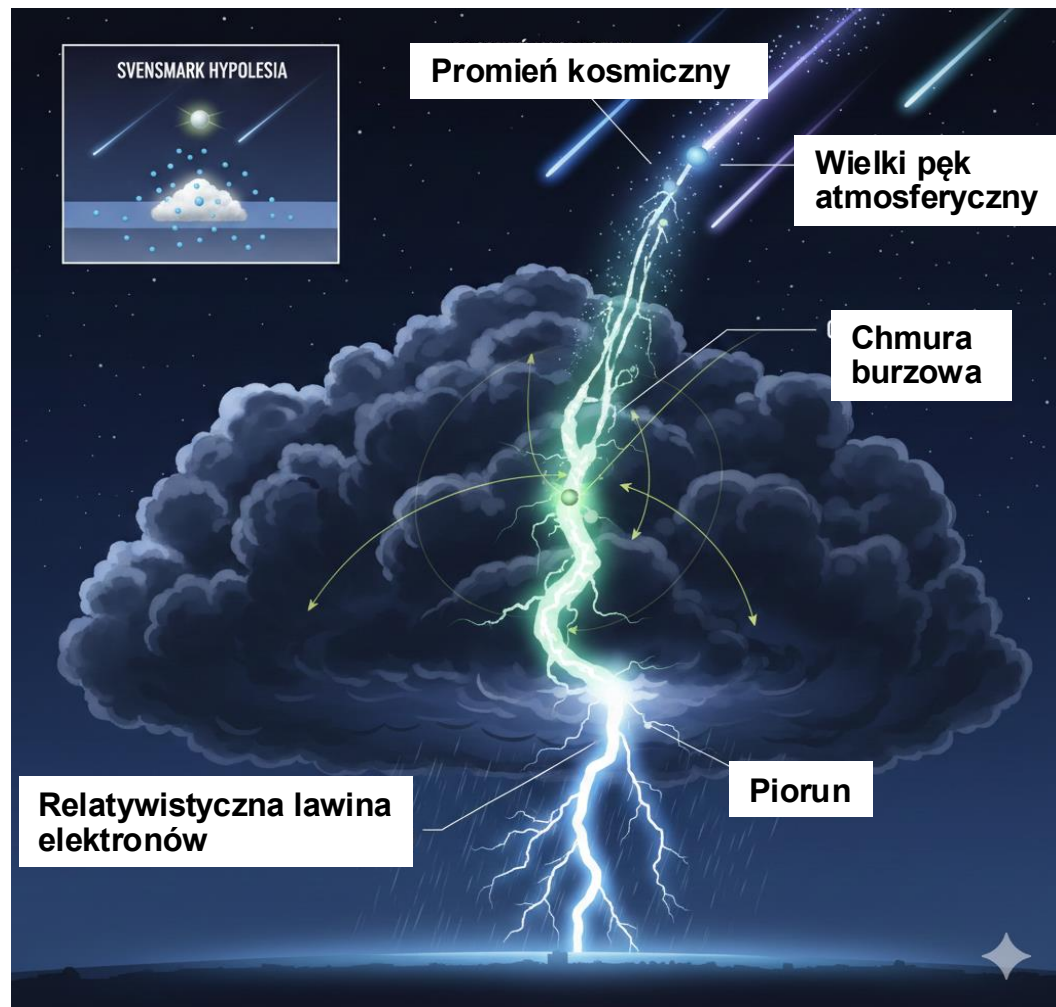
(0 <-> 1)

Oszacowano, że komputer z 256 MB RAM może doświadczać jednego takiego błędu miesięcznie

- ❖ Promieniowanie kosmiczne działa jak „**iskra zapłonowa**”, która poprzez jonizację powietrza i tworzenie lawin elektronów umożliwia powstanie pioruna w pobliżu chmury burzowej.



Cząstki te mogą również wpływać na formowanie się samych chmur, ułatwiając skraplanie się pary wodnej wokół zjonizowanych jąder kondensacji. W efekcie zjawiska zachodzące w głębokim kosmosie bezpośrednio współkształtują dynamikę i intensywność ziemskiej pogody.



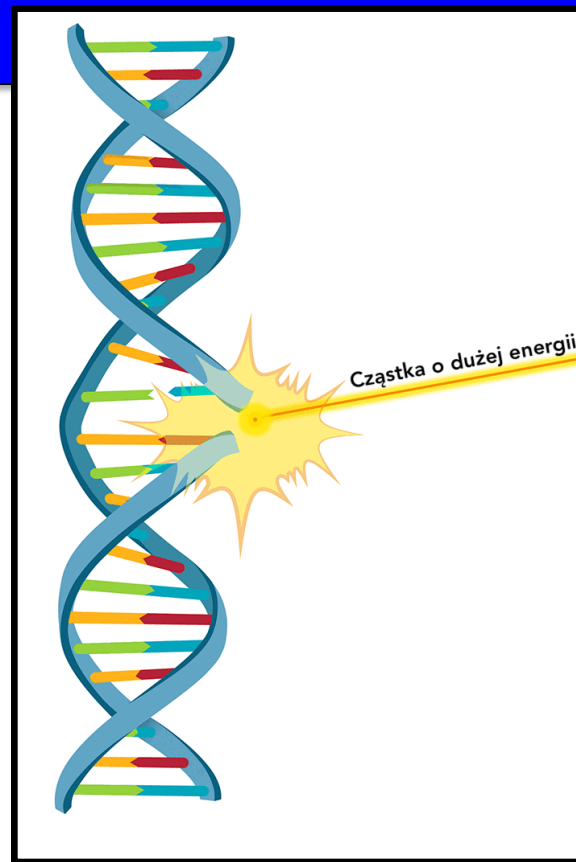
❖ Mechanizm uszkodzeń DNA

Kiedy taka wysokoenergetyczna cząstka (lub jej wtórny produkt) uderza w komórkę, może uszkodzić helisę DNA na dwa sposoby:

Atak bezpośredni: Cząstka fizycznie uderza w wiązanie chemiczne w nici DNA, zrywając ją.

Może to być pęknięcie jednej nici (łatwiejsze do naprawy) lub obu nici jednocześnie (**DSB – Double Strand Break**), co jest znacznie groźniejsze.

Atak pośredni (Radioliza): Cząstka uderza w cząsteczkę wody wewnątrz komórki, tworząc **wolne rodniki**. Te agresywne związki chemiczne „podgryzają” DNA, powodując uszkodzenia oksydacyjne.



❖ **Mimo to, nasze organizmy wykształciły genialne systemy naprawcze (enzymy), które „patrolują” helisę DNA i niemal natychmiast łatają powstałe dziury.**

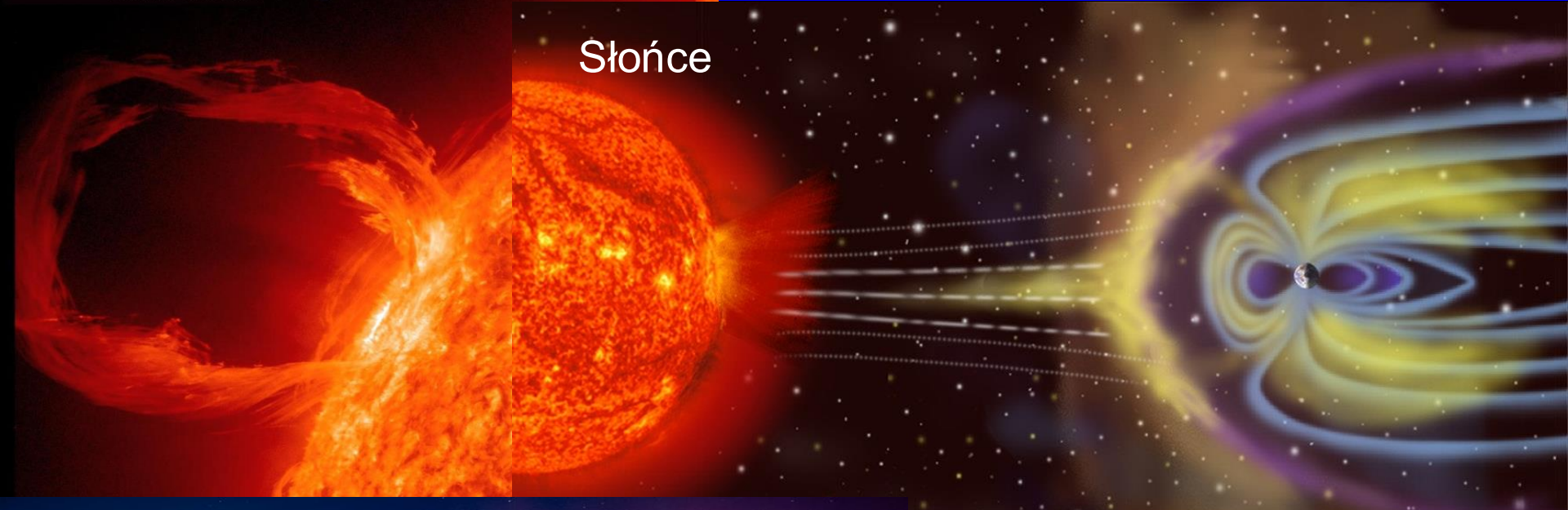
❖ **To największa bariera dla załogowych lotów na Marsa. Poza polem magnetycznym Ziemi dawki promieniowania są tak wysokie, że DNA astronautów uległoby degradacji w tempie uniemożliwiającym regenerację.**

Potencjalne źródła promieni kosmicznych

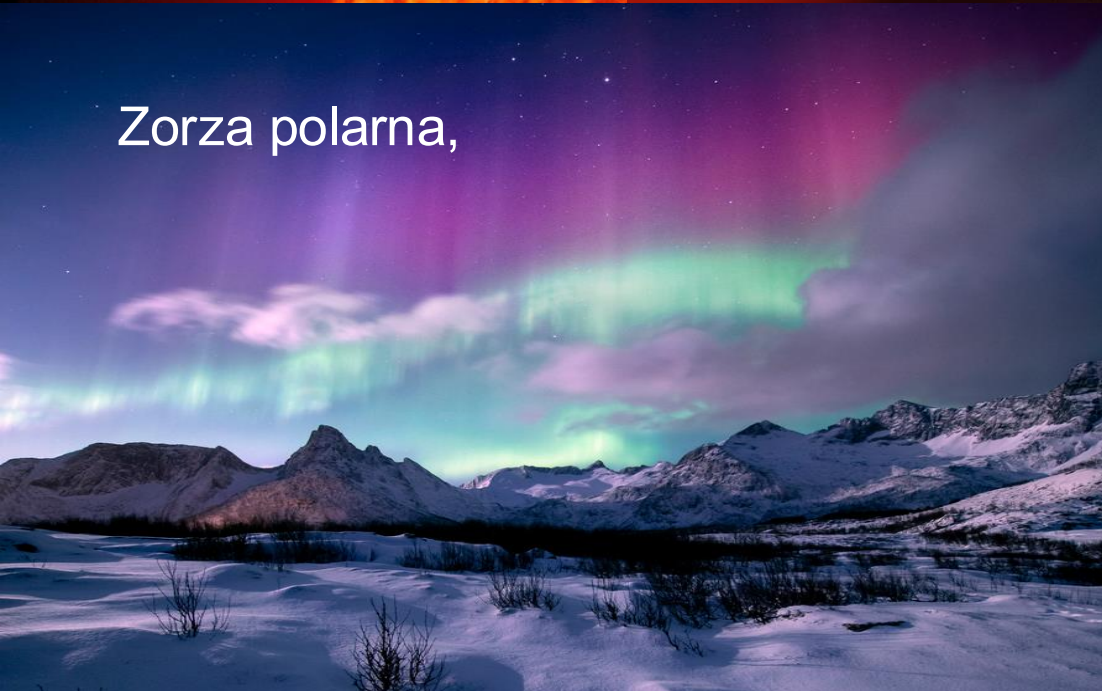
Skąd pochodzą? Słońce ($\sim 10^6 \text{eV}$)

Ziemia dla skali $\rightarrow$ 

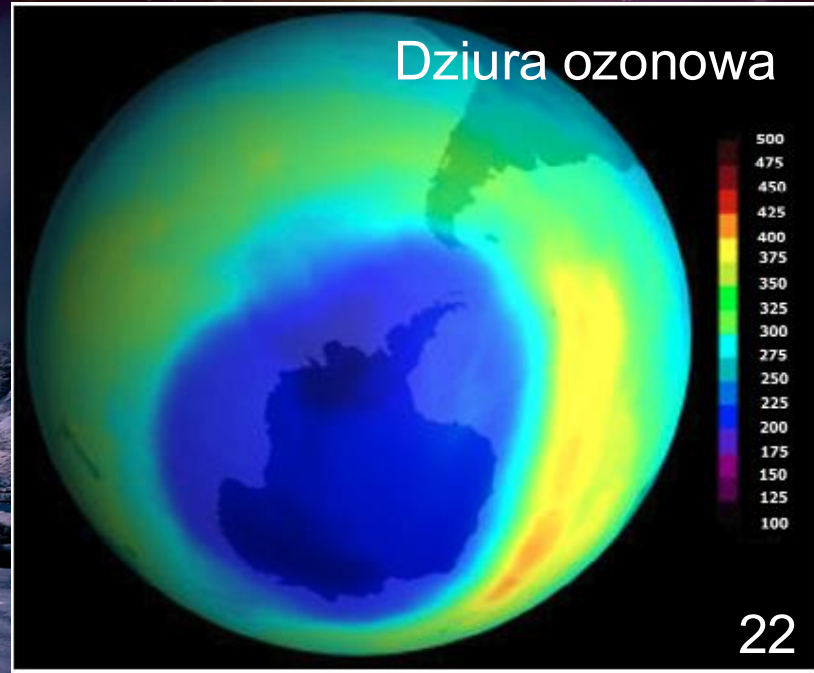
Słońce



Zorza polarna,



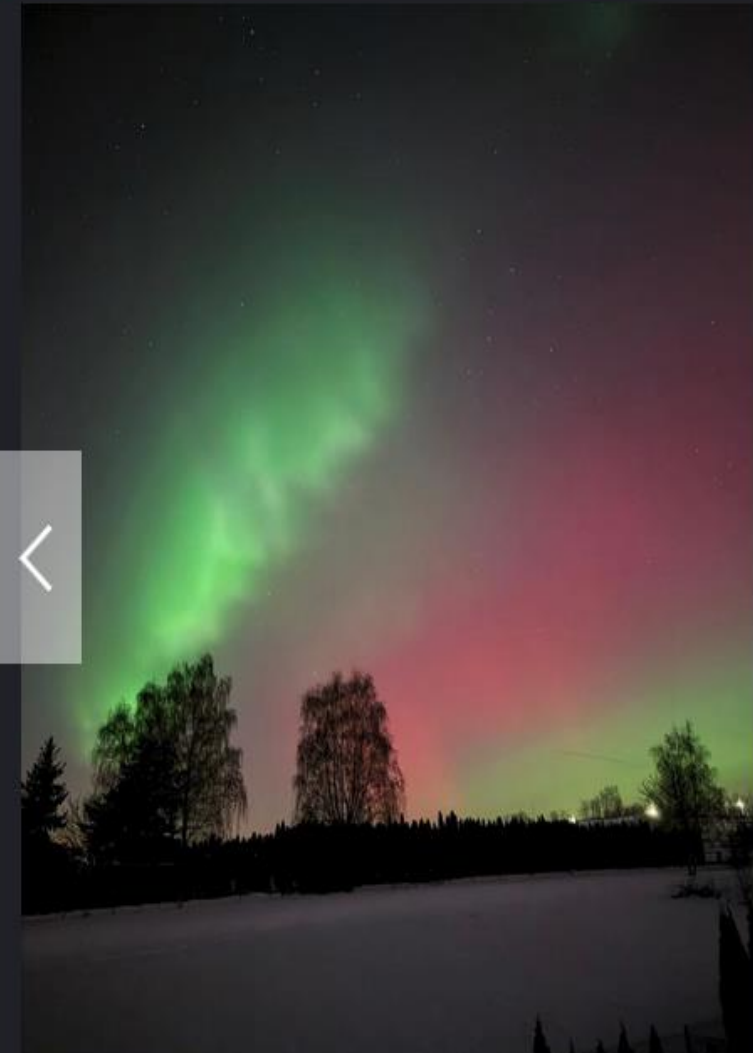
Dziura ozonowa



Skąd pochodzą? Słońce ($\sim 10^6 \text{eV}$)

Zorza nad Rzeszowem

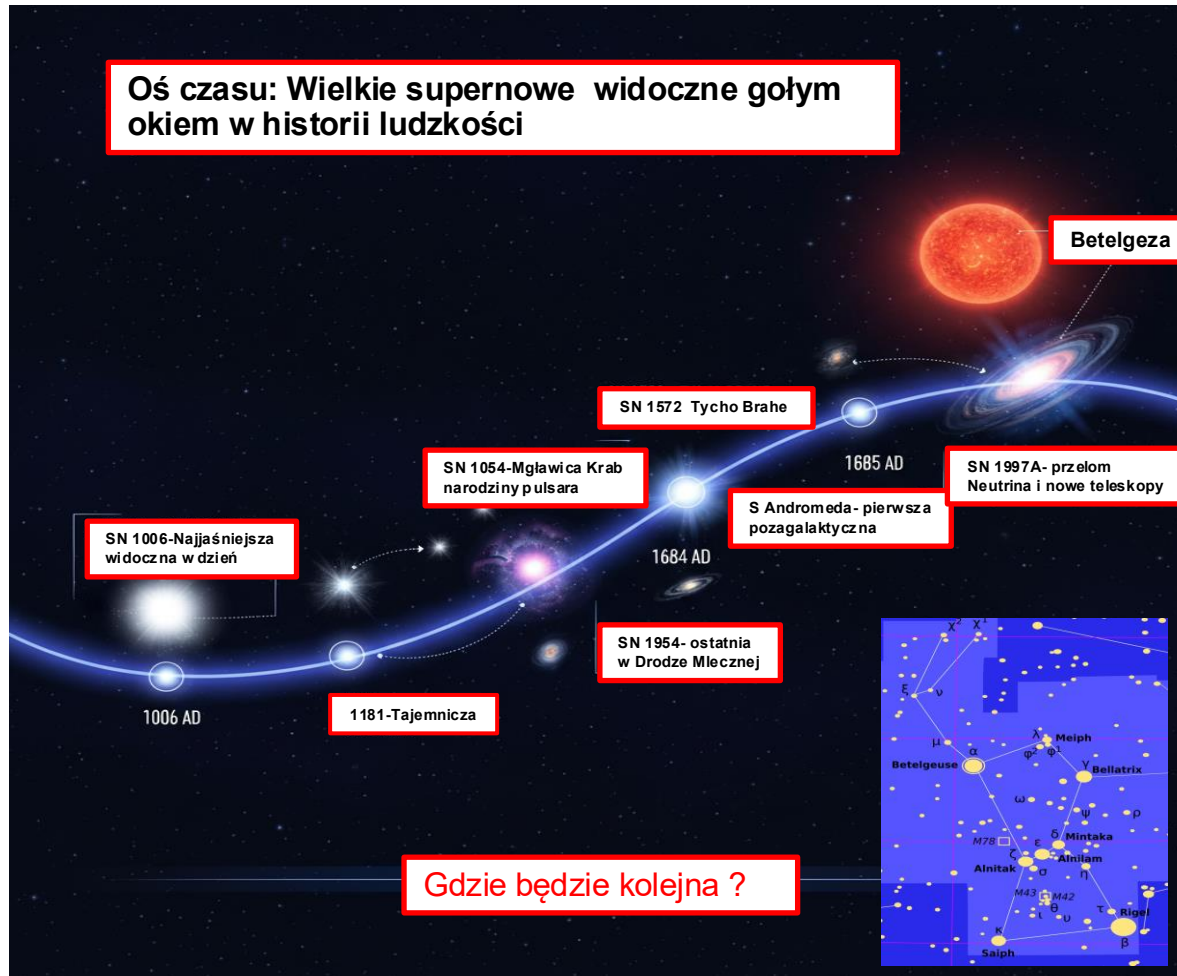
Kontakt24 | Najnowsze 20 stycznia 2026, 7:18



WIELKI OBŁOK MAGELLANA I SUPERNOWA 1987A ($<10^{15}\text{eV}$)

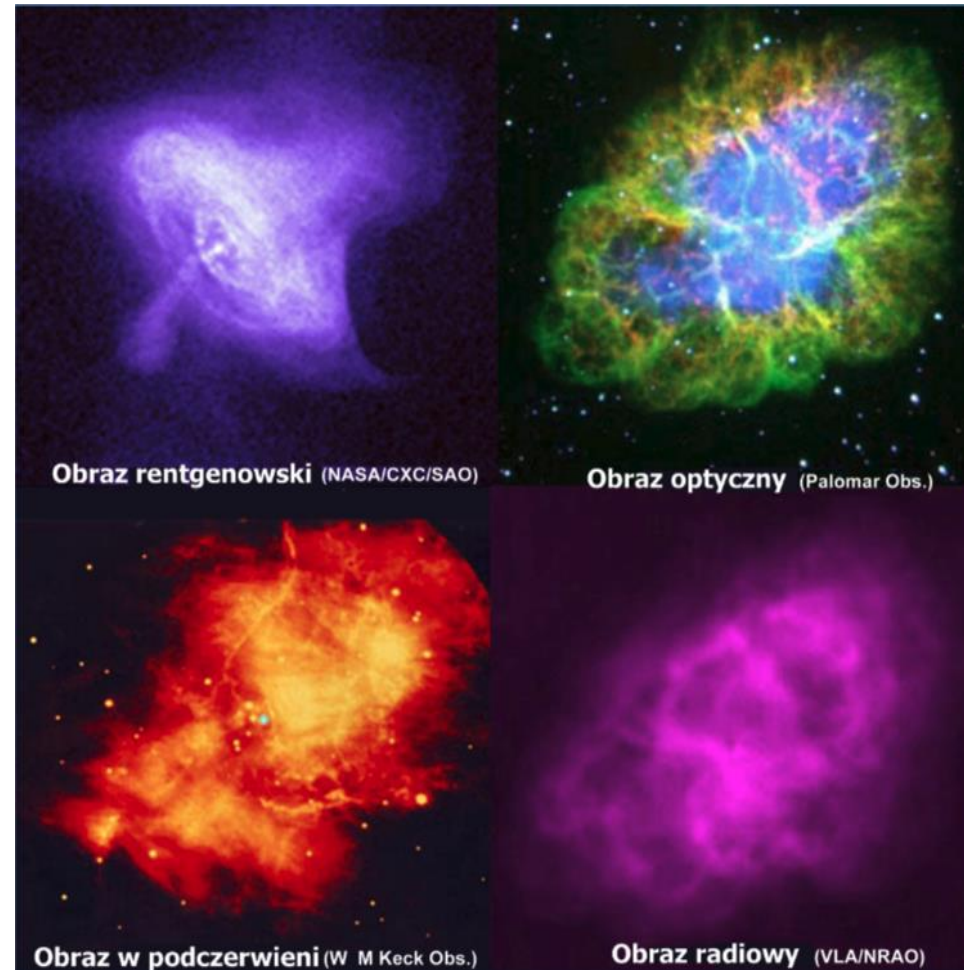
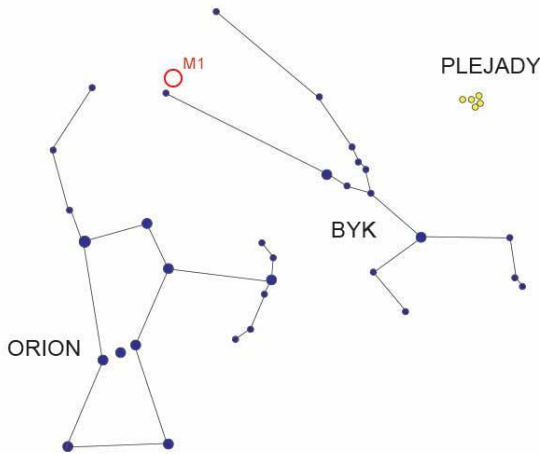
Supernowa to jeden z najbardziej gwałtownych i energetycznych procesów. We Wszechświecie **wybuch supernowej następuje średnio co 10 sekund, w naszej galaktyce co 25-50 lat**. To gigantyczna **eksplozja gwiazdy**, która w jednej chwili potrafi wyemitować tyle energii, co cała galaktyka składająca się z miliardów gwiazd.

WIELKI OBŁOK MAGELLANA I SUPERNOWA 1987A



Skąd pochodzą? Mgławica Krab ($<10^{15}$ eV)

- ❖ **Mgławica Krab** jest pozostałością po supernowej, której wybuch zaobserwowano na Ziemi w roku 1054. Znajduje się ona w konstelacji Byka i dzieli ją od Ziemi 6000 lat świetlnych. W centrum mgławicy znajduje się szybko wirująca gwiazda neutronowa, która widoczna jest jako pulsar pulsujący z częstotliwością 30 razy na sekundę.



Obraz rentgenowski (NASA/CXC/SAO)

Obraz optyczny (Palomar Obs.)

Obraz w podczerwieni (W M Keck Obs.)

Obraz radiowy (VLA/NRAO)

Lewy górny rysunek przedstawia obraz samego pulsara, a więc samo centrum mgławicy, na pozostałych widać całą mgławicę. Pierścienie widoczne na zdjęciu zostały wytworzone przez wysokoenergetyczne cząstki krążące wokół gwiazdy neutronowej. Promień wewnętrznego pierścienia jest 1000 razy większy od promienia naszego Układu Słonecznego.

Skąd pochodzą? Galaktyka Centaur A ($>10^{16}$ eV)

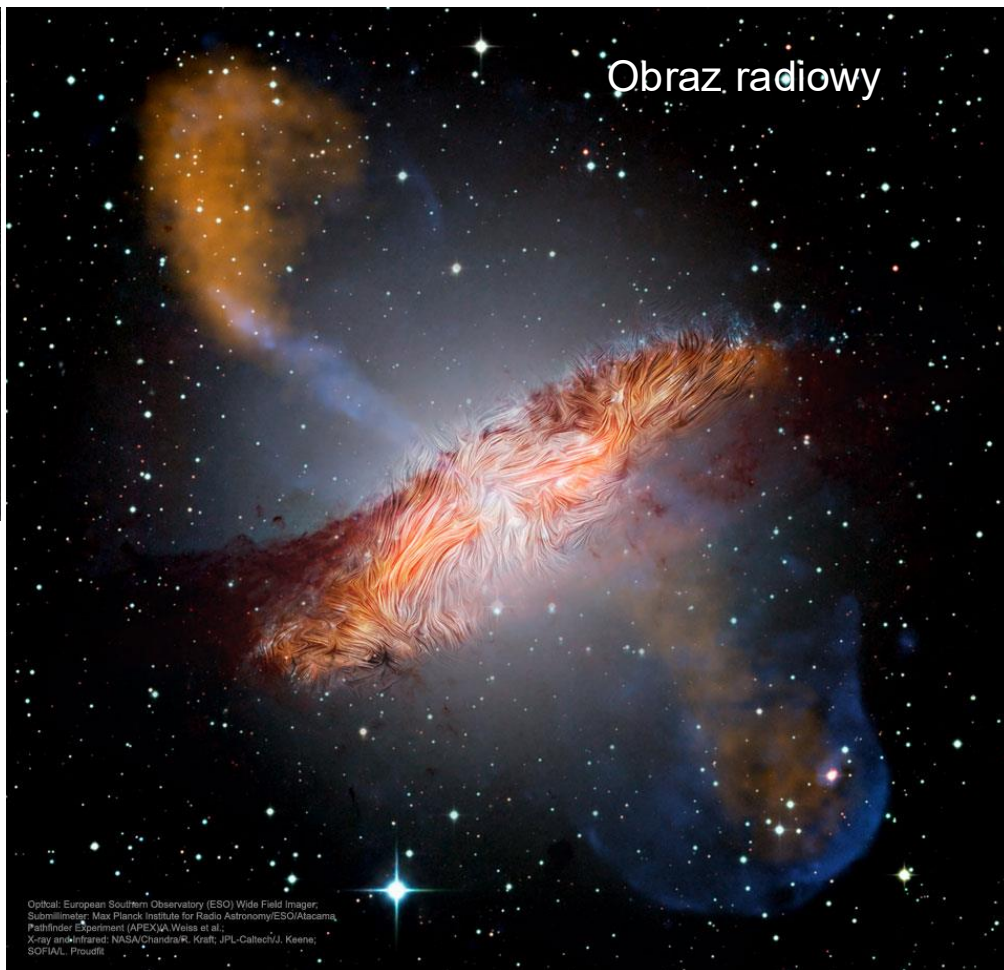
- ❖ **Centaurus A (NGC 5128)** to jedna z najbliższych i najjaśniejszych radiogalaktyk, położona ok. 10–16 mln lat świetlnych od Ziemi w gwiazdozborze Centaura. Jest to unikalna galaktyka eliptyczna z pasem pyłowym, powstała prawdopodobnie w wyniku zderzenia dwóch galaktyk.

Obraz optyczny

Credit: NASA

Obraz radiowy

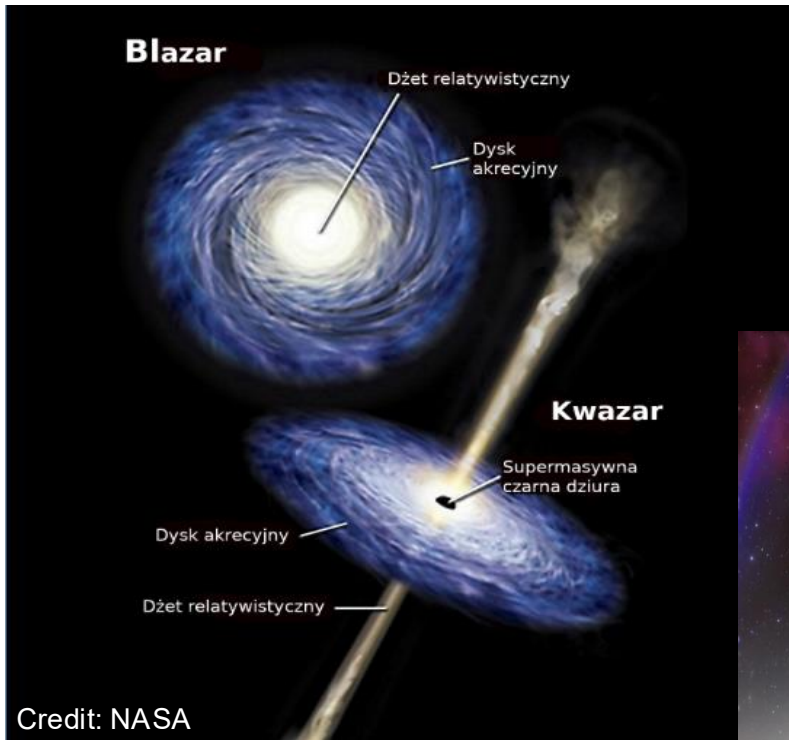
Z aktywnego jądra galaktyki wypływają ogromne ilości energii w strugach, widocznych zarówno na mapach radiowych, jak i w obrazach rentgenowskich. Centaur A, to raczej słabe radioźródło, choć ma rozległe obszary radio emisji. Kiedyś zapewne emitowało promieniowanie o ogromnej energii.



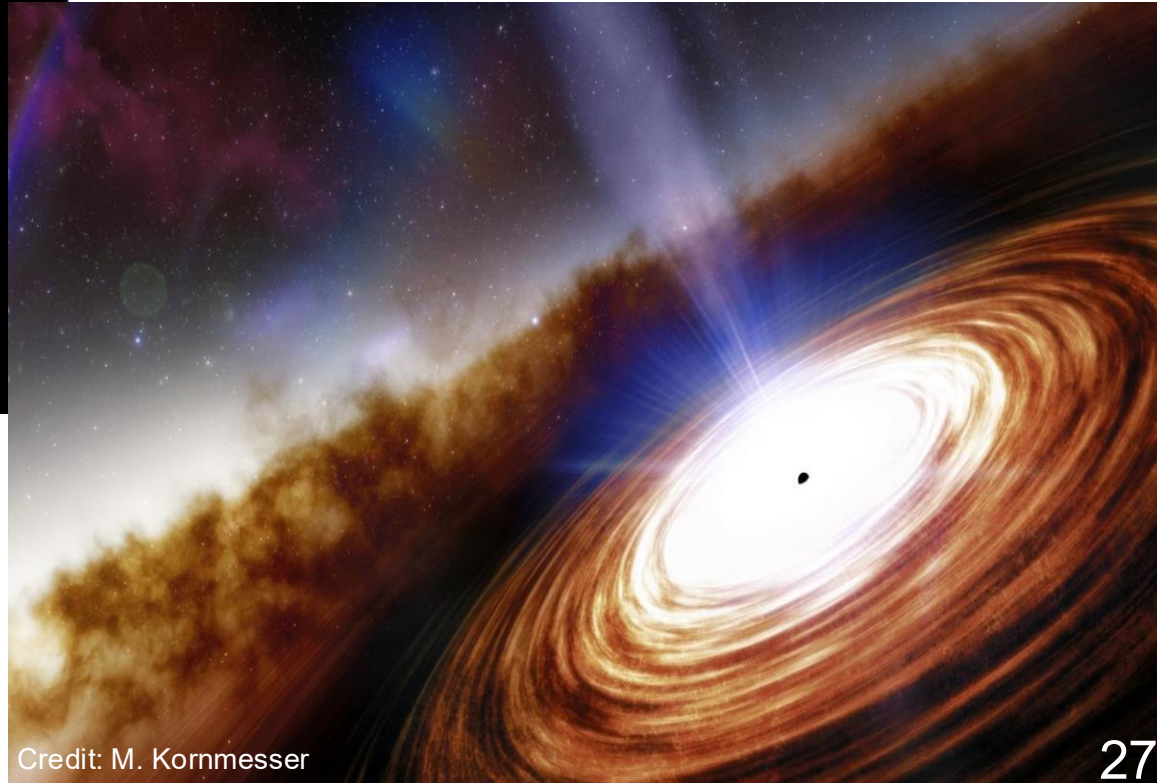
Optical: European Southern Observatory (ESO) Wide Field Imager;
Submillimeter: Max Planck Institute for Radio Astronomy/ESO/Atacama
Pulsar Interferometer (APEX)/Wells et al.;
X-ray and Infrared: NASA/Chandra X-ray Observatory; Keck;
SOFIA/L. Proud

Skąd pochodzą ($>10^{16}\text{eV}$) ?

- ❖ **Blazary** to galaktyki aktywne, emitujące ze swoich centrów wąskie strugi zjonizowanej materii wycelowane w kierunku Ziemi.



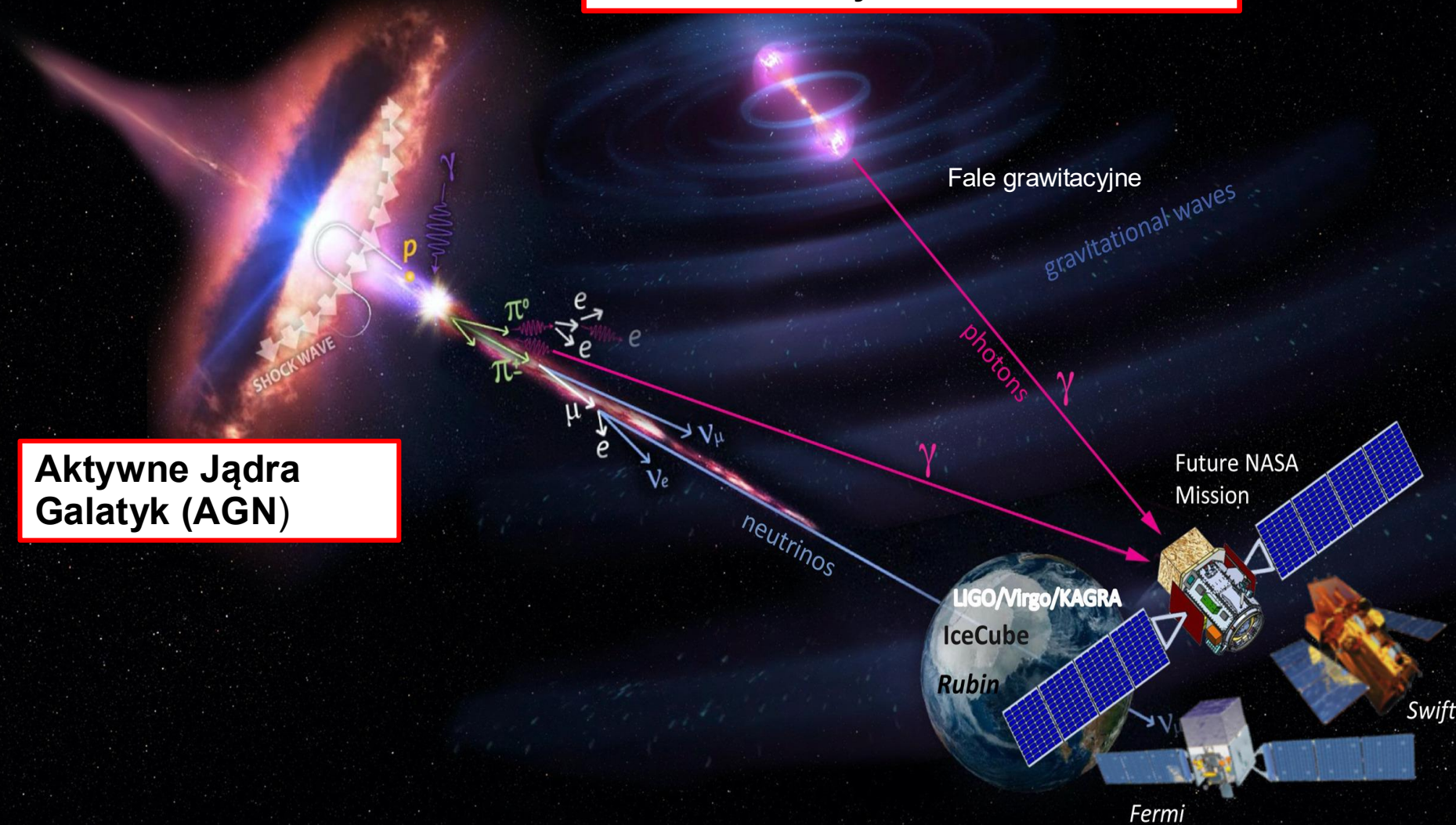
- ❖ **J0313-1806** to najbardziej oddalony od Ziemi kwazar z dotychczas odkrytych. Znajduje się ponad 13 mld lat świetlnych od Ziemi.



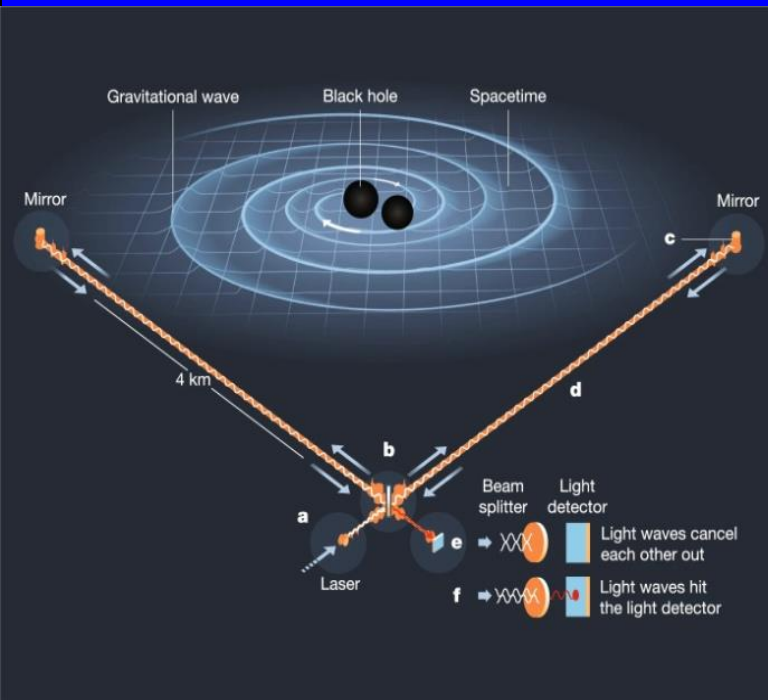
Detekcja wielokanałowa: poszukiwanie neutrin i fotonów

Fuzja: białe karły, gwiazdy neutronowe
lub czarne dziury

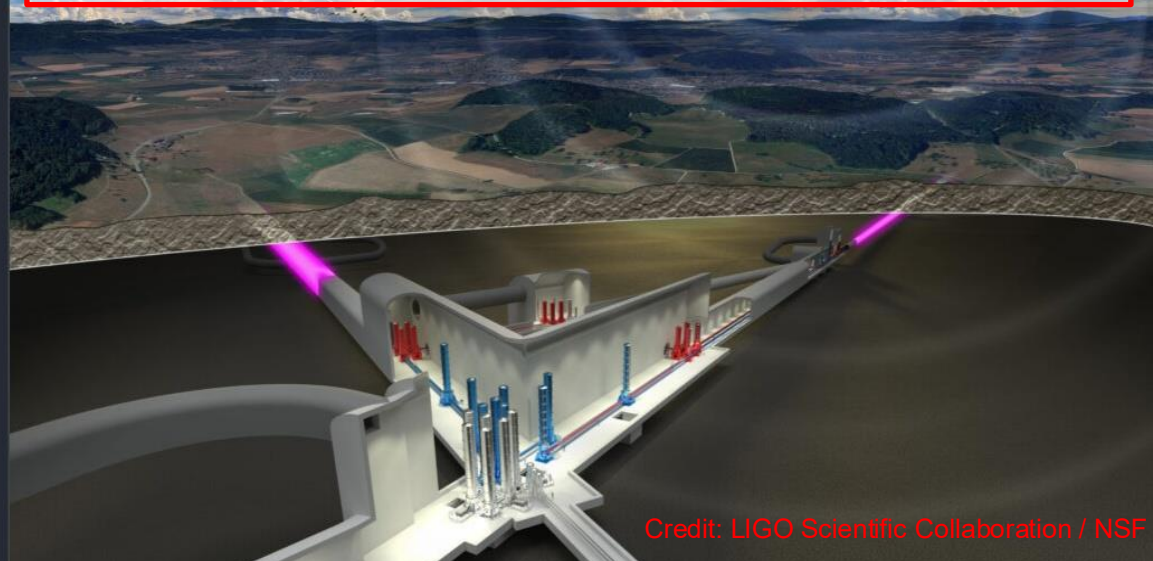
Aktywne Jądra
Galatyk (AGN)



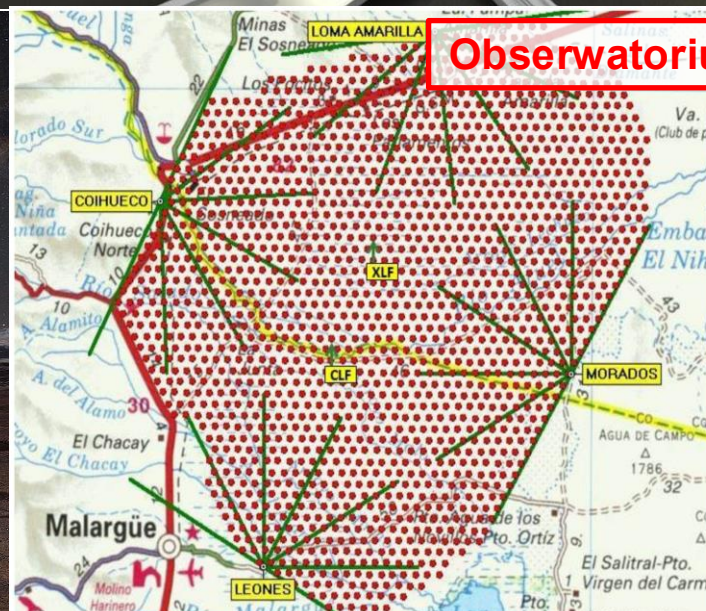
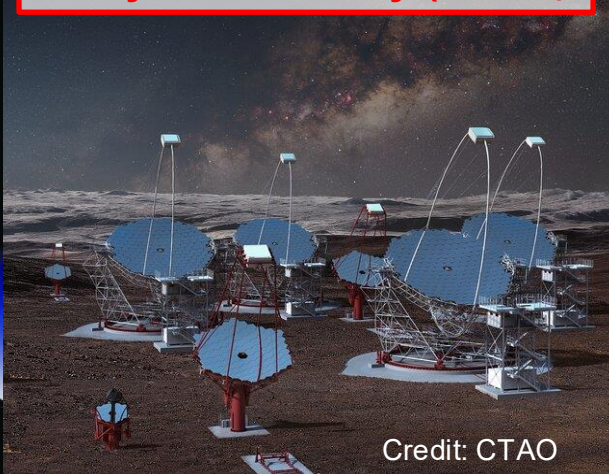
Ekscytujące eksperymenty przyszłości



Obecne detektory fal grawitacyjnych: LIGO, VIRGO
Przyszłe: Einstein Telescope



Cherenkov Telescope
Array Observatory (CTAO)



Obserwatorium Pierre Auger



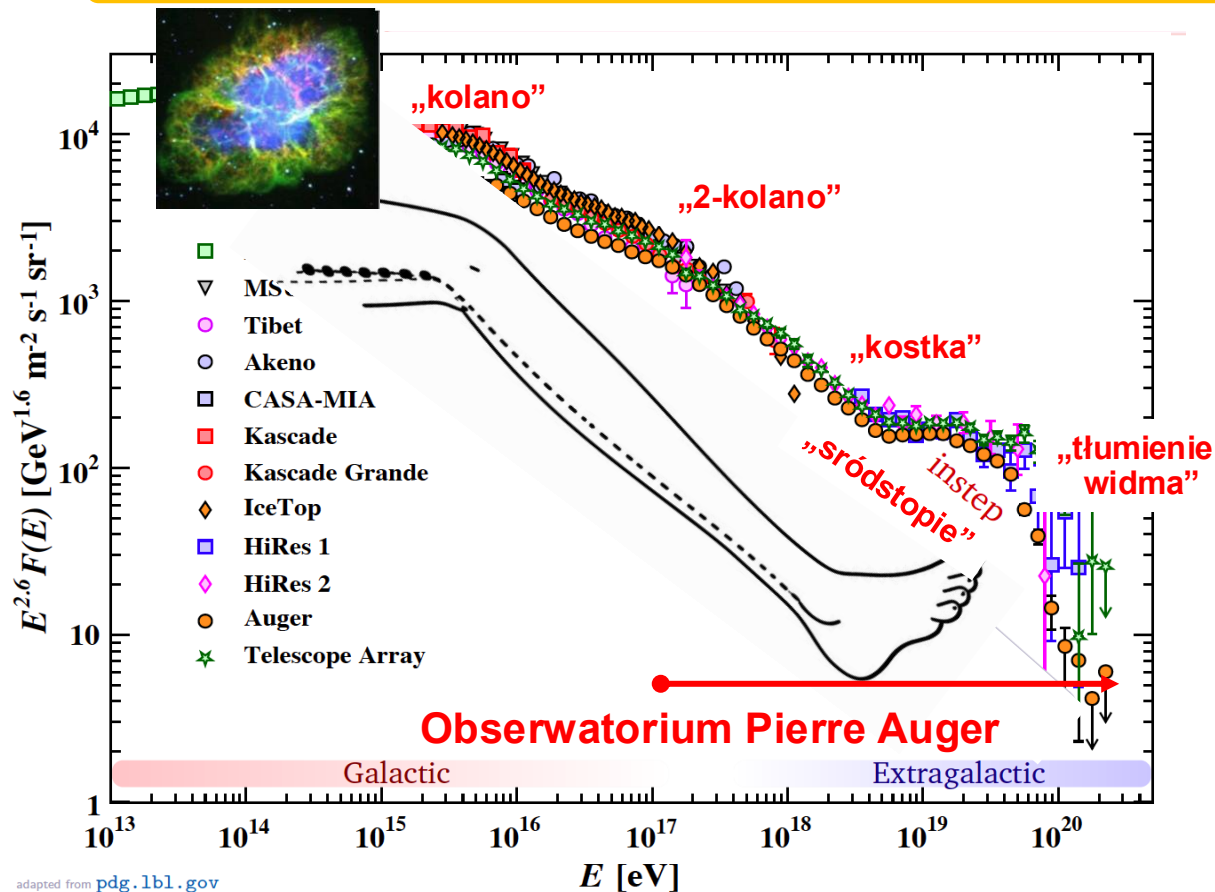
Dariusz Góra
Instytut Fizyki Jądrowej PAN

20 YEARS
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY



Zakres energii Obserwatorium Pierre Auger

Główny cel (od 1912 r.): znalezienie źródeł promieniowania kosmicznego

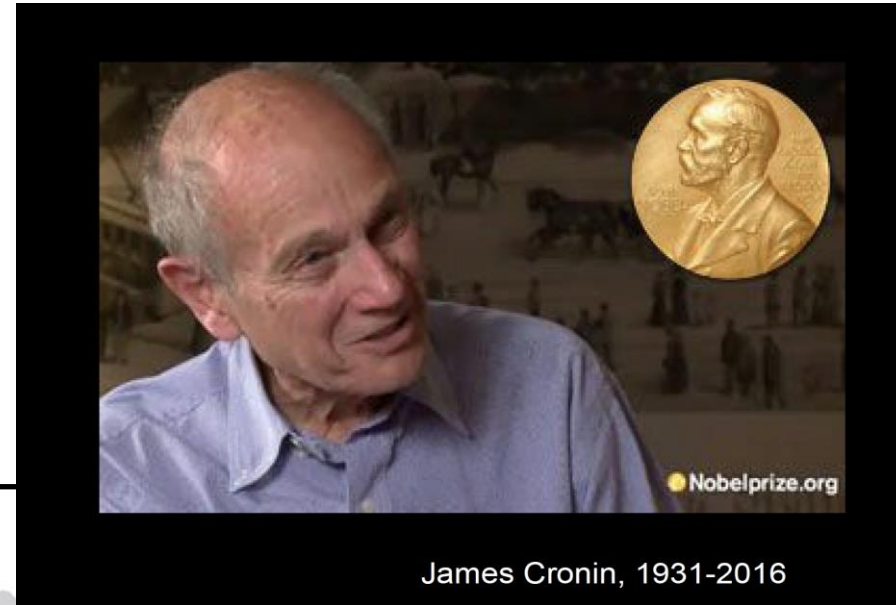


Wkład w rozwój astrofizyki:

- ❖ Anizotropie w kierunkach przybycia
- ❖ Skład masowy
- ❖ Cechy widma energii
- ❖ lub po prostu wykrywać fotony i/lub neutrino

Współpraca Pierre Auger

- ❖ **1991:** propozycja budowy Obserwatorium Pierre'a Augera (James Cronin i Alan Watson),
- ❖ Współpraca międzynarodowa:
Obecnie:
17 krajów, 85 instytucji, 500+ członków



James Cronin, 1931-2016



- ❖ Grupa z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, pod kierownictwem prof. Henryka Wilczyńskiego w eksperymencie od 1997

Obserwatorium Pierre Auger: detekcja hybrydowa

Detektor Fluorescencyjny (FD): 24+3

Detector powierzchniowy (SD): 1665 stacji

średni czas pracy 15%

czas pracy 24/7

The Pierre Auger Observatory

Phase I (2004 – 2023)



Pierre Auger Observatory
Province Mendoza, Argentina



Underground muon detectors (24+)



High elevation telescopes (3)

More than 400 members,
90 institutes, 17 countries

Southern hemisphere: Malargüe,
Province Mendoza, Argentina



Radio antenna array
(153 antennas, 17 km²)



Sub-array of 750 m
(63 stations, 23.4 km²)



LIDARs and laser facilities



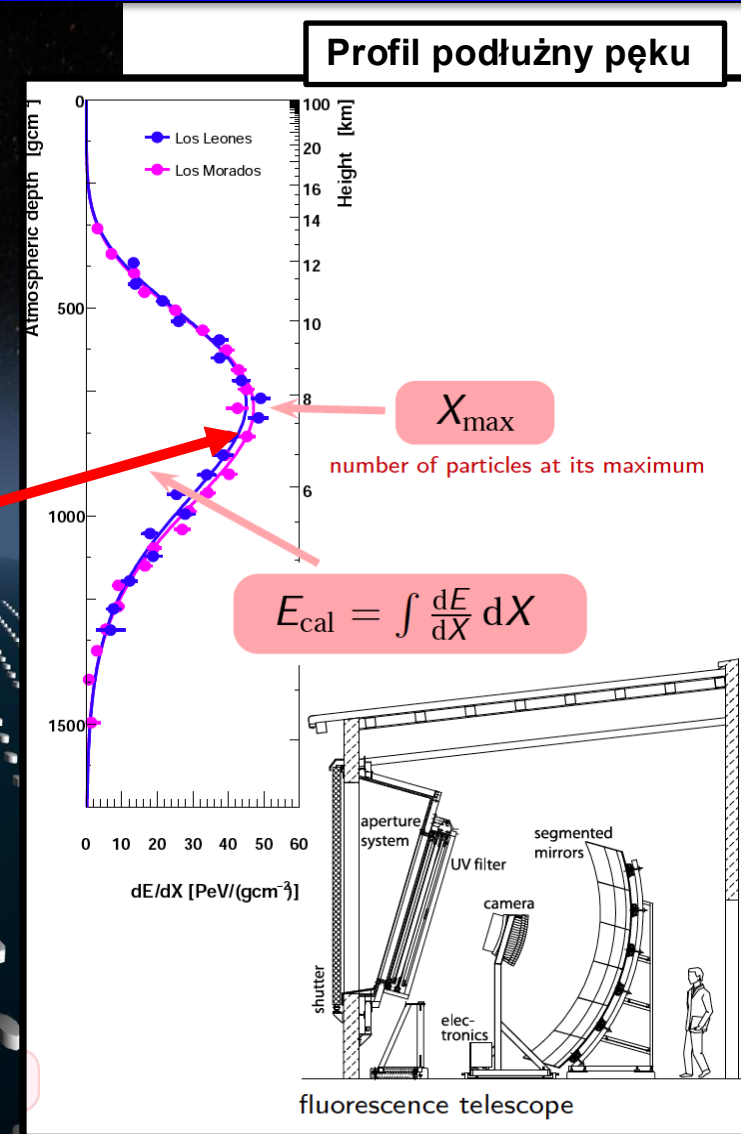
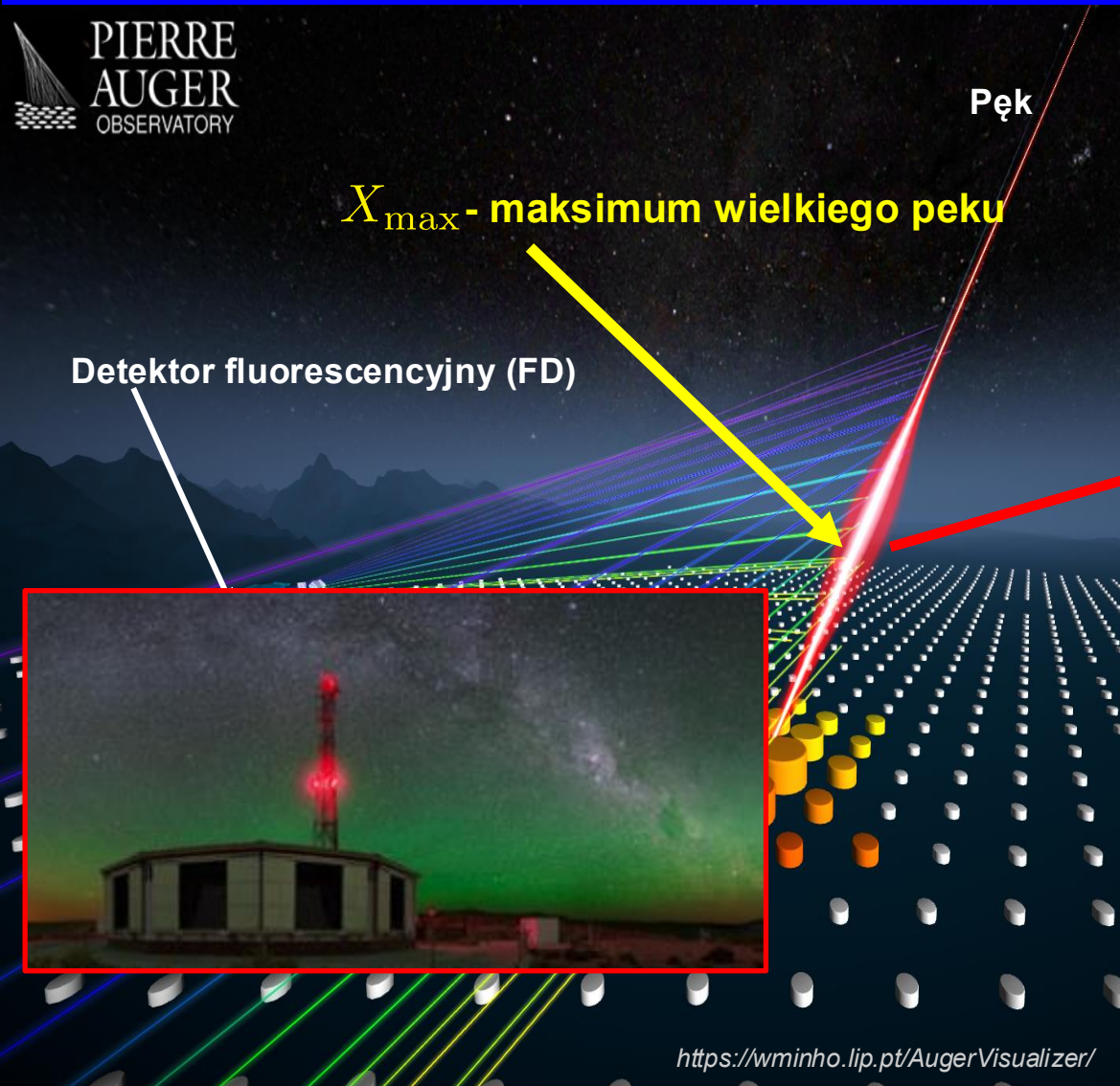
4 fluorescence detectors
(24 telescopes up to 30°)



1665 surface detectors:
water-Cherenkov tanks
(grid of 1.5 km, 3000 km²)

Water-Cherenkov
detectors and
Fluorescence
telescopes

Oszacowanie energii wielkiego pęku atmosferycznego



Pomiar energii poprzez wykrywanie światła fluorescencyjnego

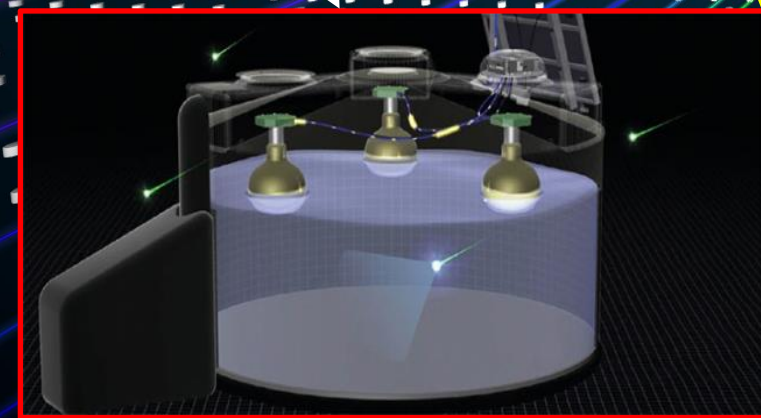
Pomiar profilu poprzecznego wielkiego pęku atmosferycznego



Pęk

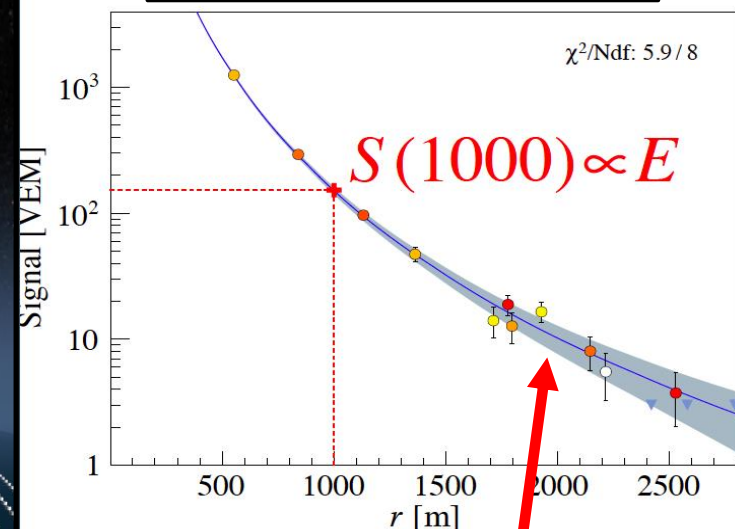
N_μ - liczba muonów

Detektor powierzchniowy (SD):
wodny licznik czerenkowski

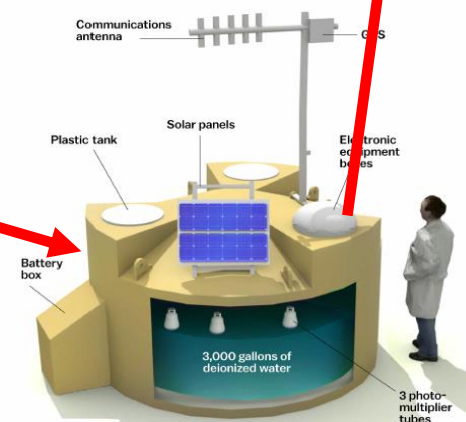


<https://www.inho.lip.pt/AugerVisualizer/>

Profil poprzeczny pęku



Auger Observatory surface detector



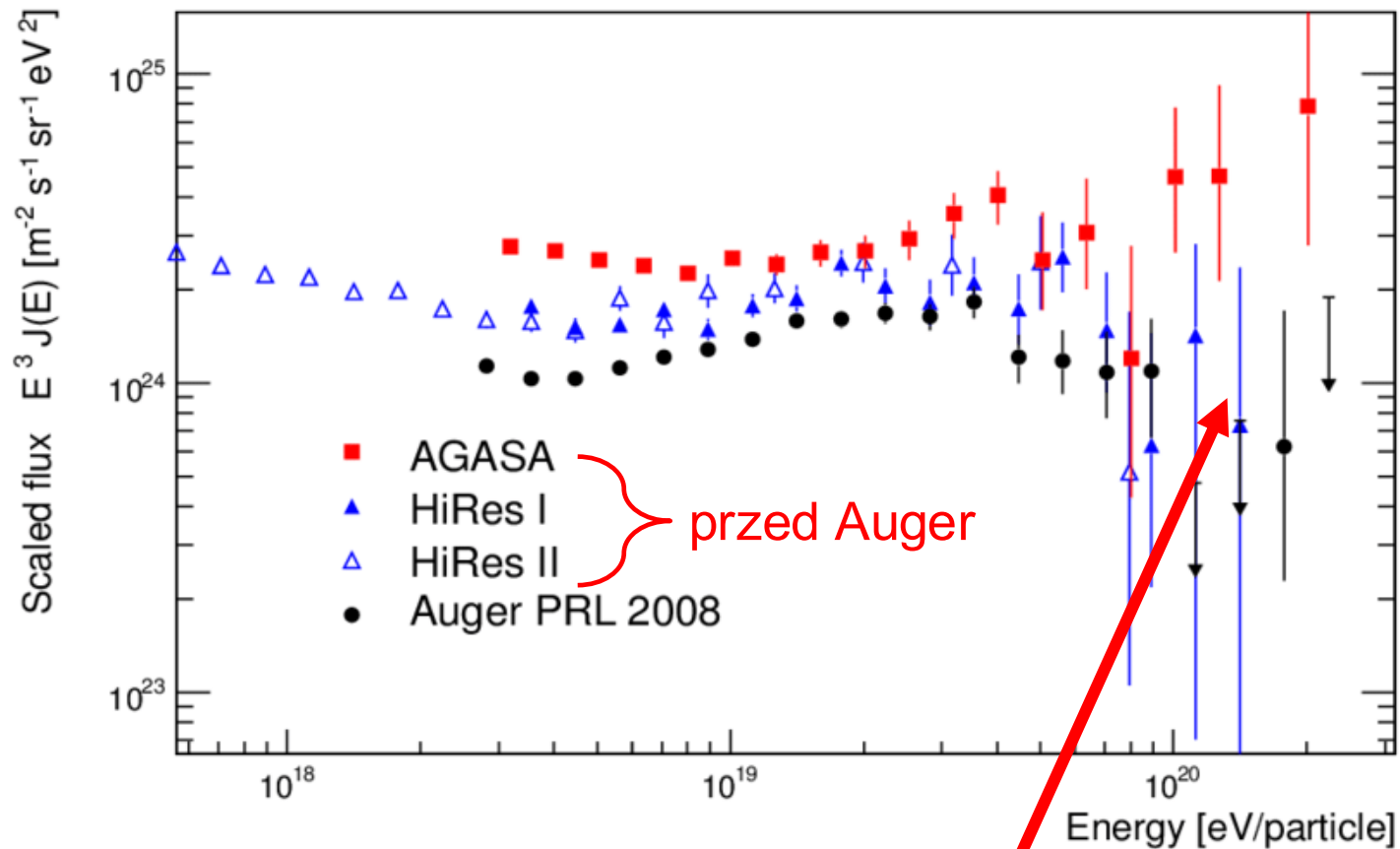
Pomiar sygnału w wodnym liczniku Czerenkowa

Wybrane wyniki Obserwatorium Pierre Auger (Faza I: 2004-2023)

spektrum, skład, źródła

Widmo promieni kosmicznych o najwyższych energiach (2008)

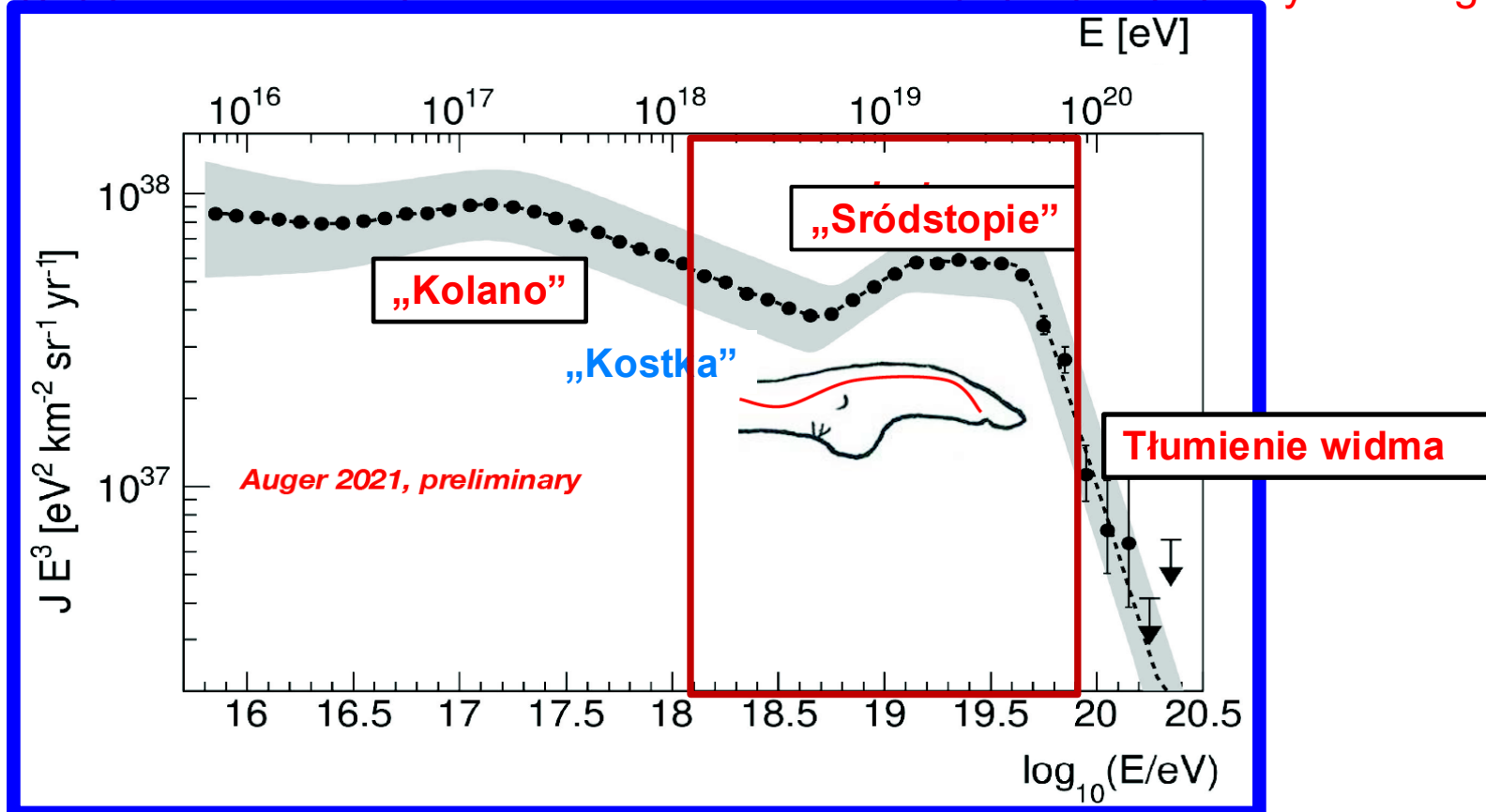
- ❖ Widmo promieniowania kosmicznego AGASA i HiRes przy najwyższych energiach



Czy obserwujemy stłumienie widma ?

Widmo wyznaczone przez Obserwatorium Pierre Auger w fazie I (2004–2023)

- ❖ Precyzywny pomiar widma promieniowania kosmicznego przy najwyższych energiach

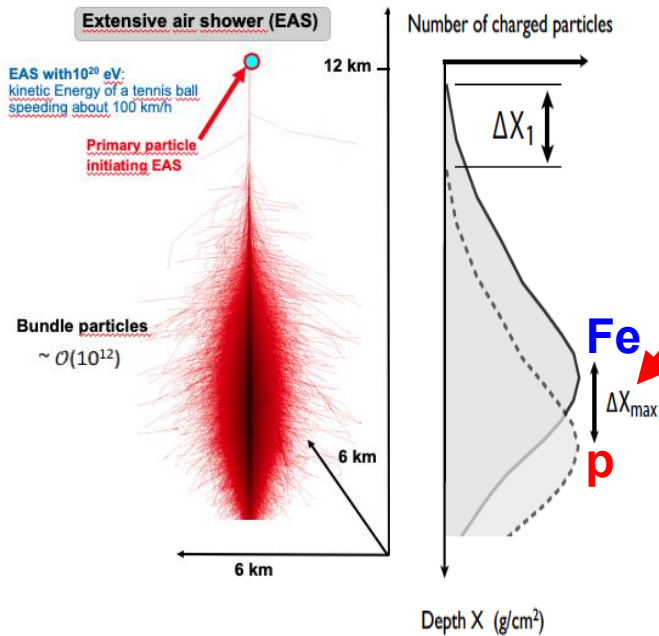


Natura stłumienia widma pozostaje wciąż nieznana:

- efekt propagacji promieni kosmicznych?
- kres wydajności źródeł?

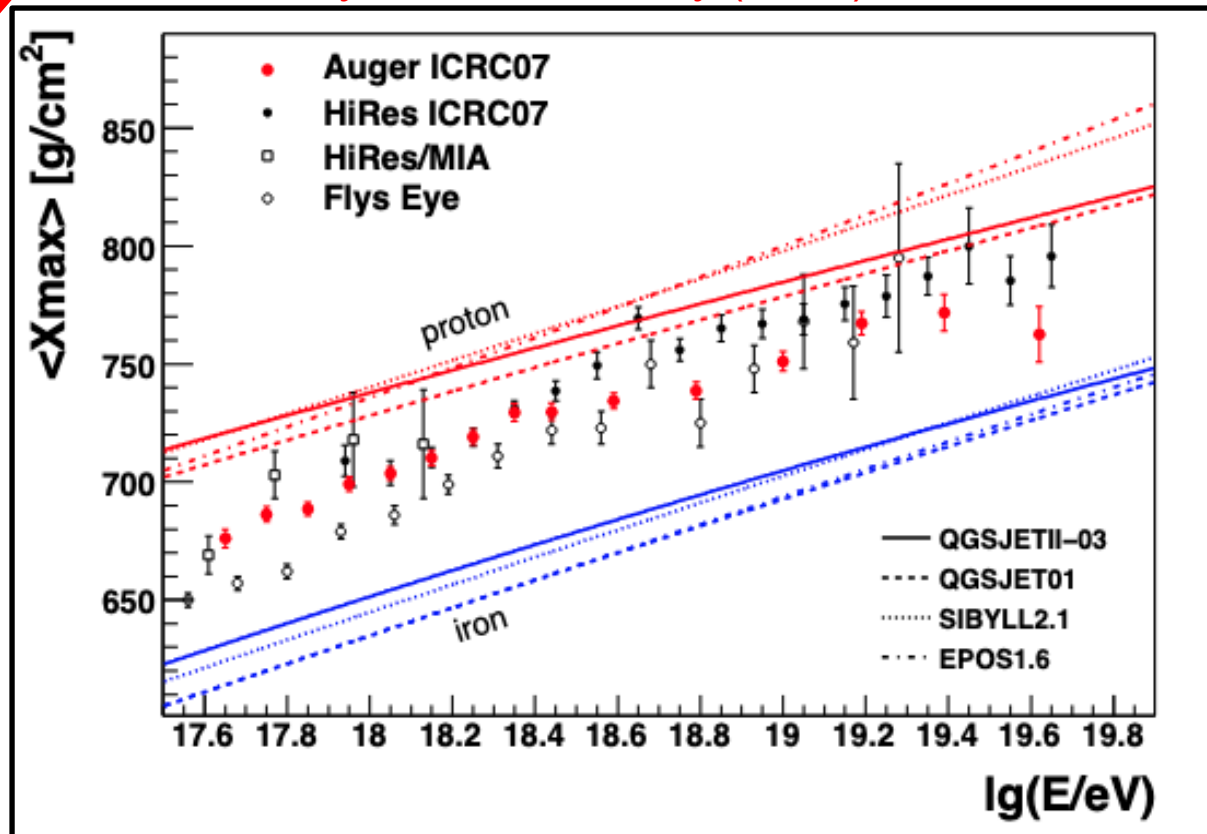
- ❖ Niezbędny dokładny pomiar składu masowego, np. poprzez pomiar liczby mionów w wielkich pękach!!!

Skład masy: Maksimum wielkiego pęku atmosferycznego

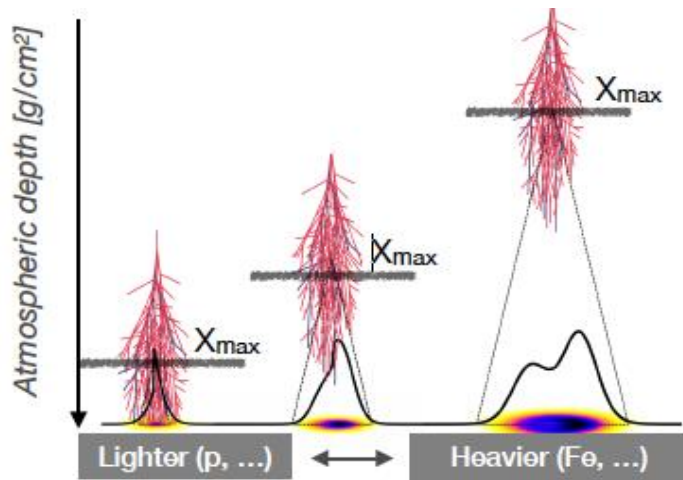


Maksimum wielkiego pęku ($X_{\max}$) odnosi się do punktu w pęku, w którym liczba cząstek wtórnych osiąga swój absolutny szczyt.

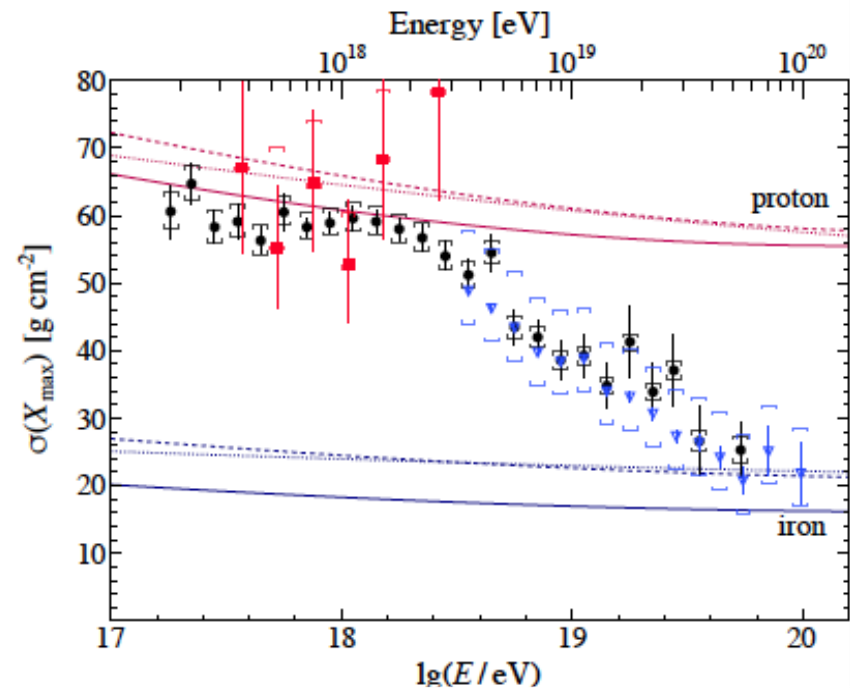
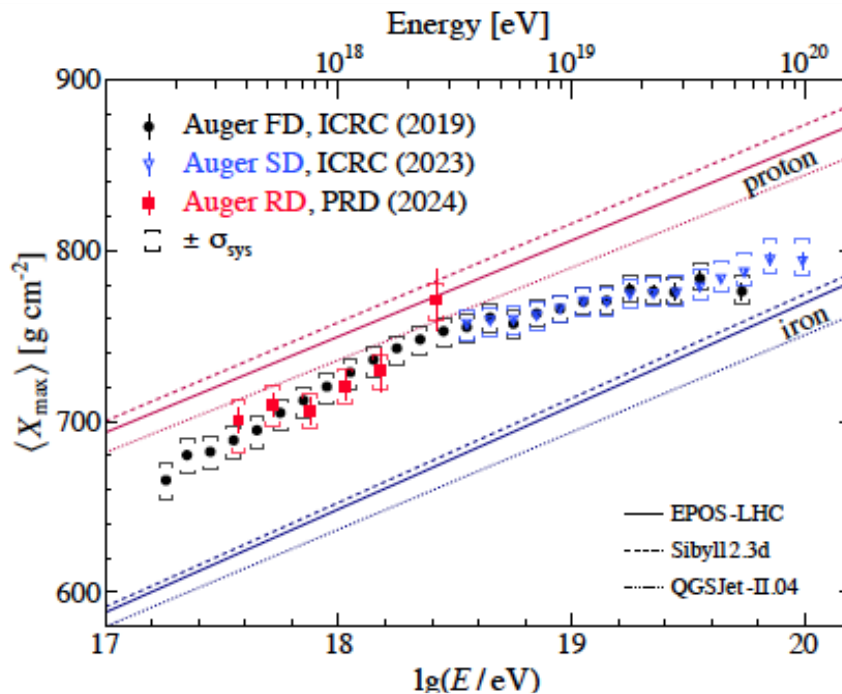
Wyniki składu masy (2007)



Skład masy: Maksimum wielkiego pęku atmosferycznego

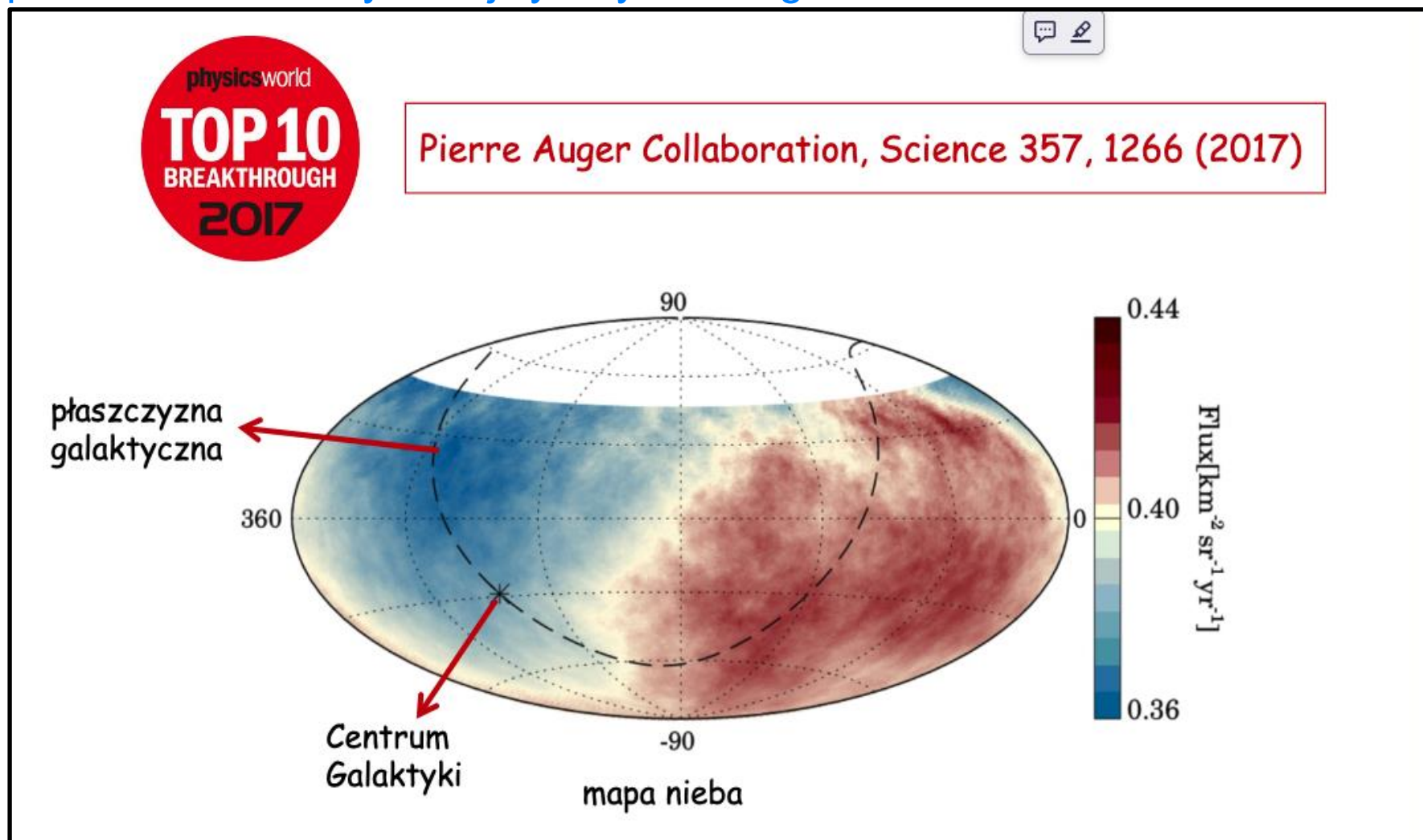


Wyniki składu masowego



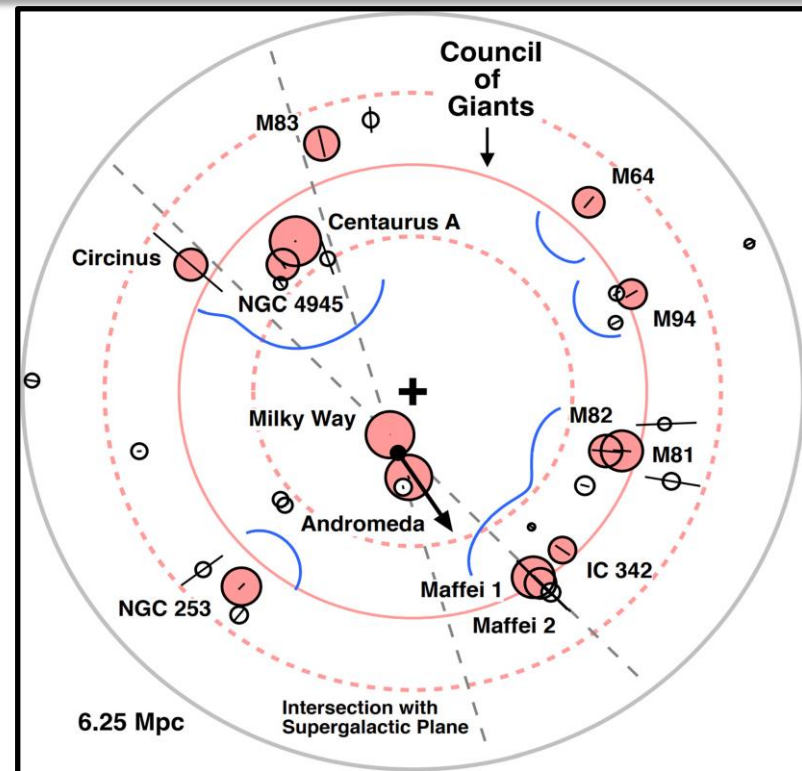
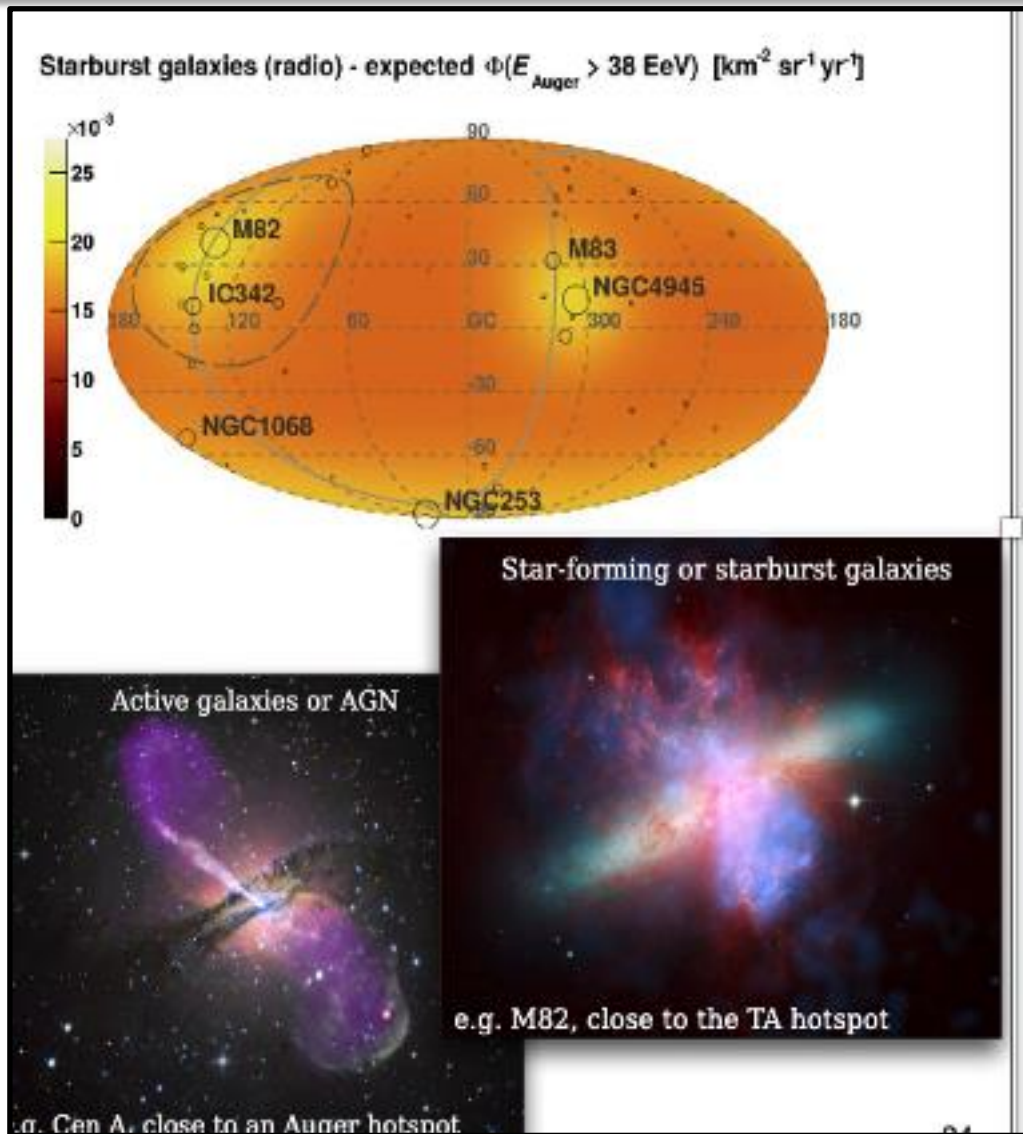
Wyniki Obserwatorium z fazy I (2004–2023)

- ❖ Wykrycie po raz pierwszy anizotropii dipolowej w rozkładzie kierunków promieni kosmicznych najwyższych energii



- ❖ Pozagalaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych powyżej 1-2 EeV

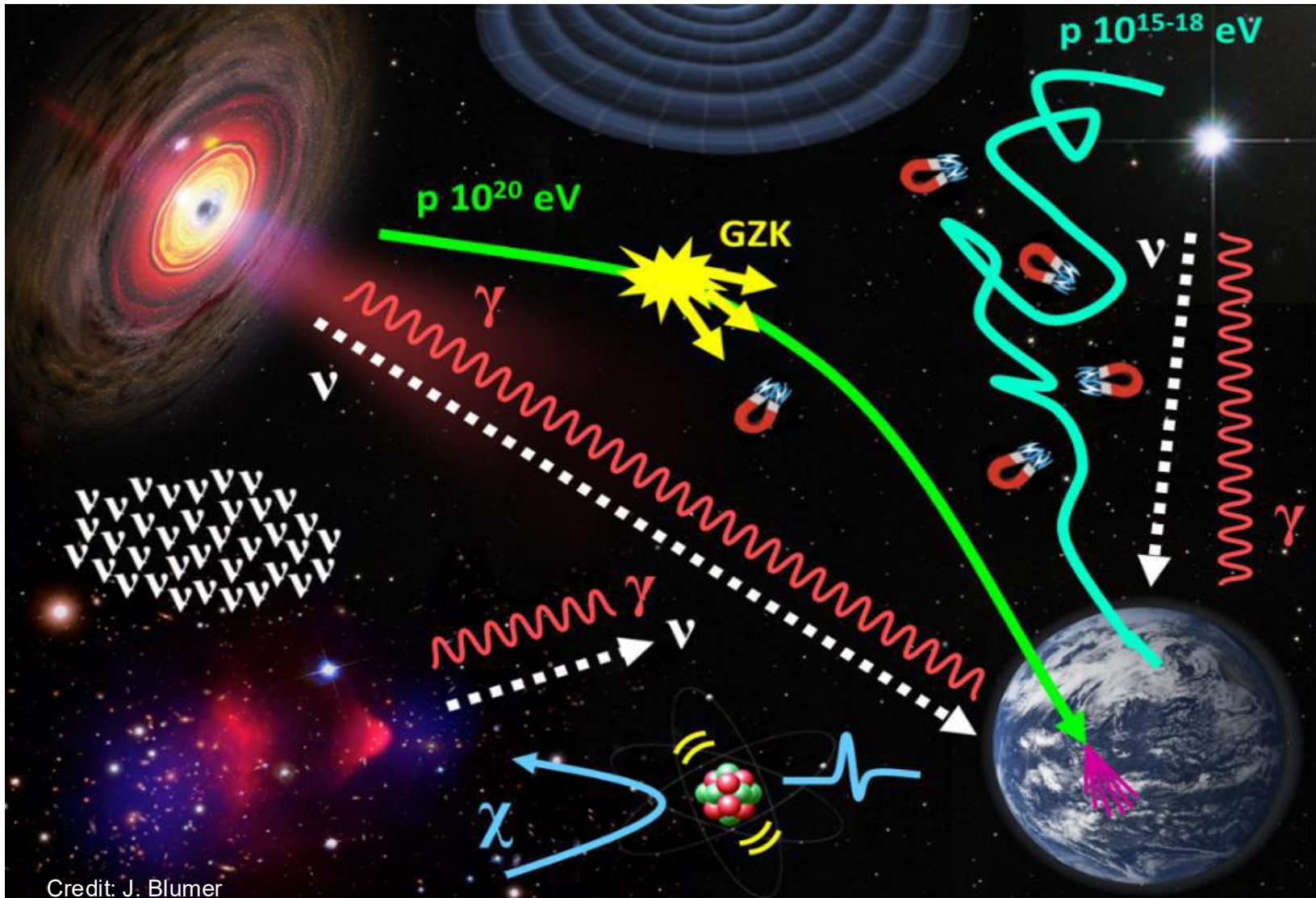
Wyniki Obserwatorium z fazy I (2004–2023)



- ❖ Stwierdzono, że pobliskie galaktyki gwiazdotwórcze i aktywne jądra galaktyk dobrze pasują do pomiarów kierunku przybycia promieni kosmicznych

Pierre Auger jako obserwatorium wielokanałowe 4π

- ❖ fotony, neutrino, poszukiwania poza standardowym modelem



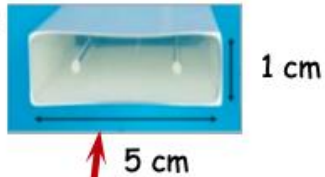
Rozbudowa Obserwatorium Pierre Auger - projekt AugerPrime

- ❖ trudno jest zbudować spójny obraz pochodzenia promieni kosmicznych ultra-wysokich energii oraz natury słumienia ich widma energii.
- ❖ **Pilna potrzeba rozbudowy obserwatoriów promieni kosmicznych pozwalająca na dokładniejsze wyznaczanie składu masowego**
- ❖ Główne komponenty: uzupełnienie sieci detektorów powierzchniowych (SD)
 - o detektory scyntylacyjne (SSD) oraz
 - o stacje radiowe (**największy detektor radiowy świata!!!**)

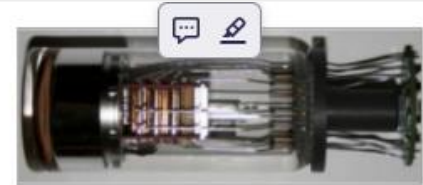


Schemat detektora scyntylacyjnego (SSD)

listwa scyntylacyjna z 2
wydrążonymi otworami,
widok z boku

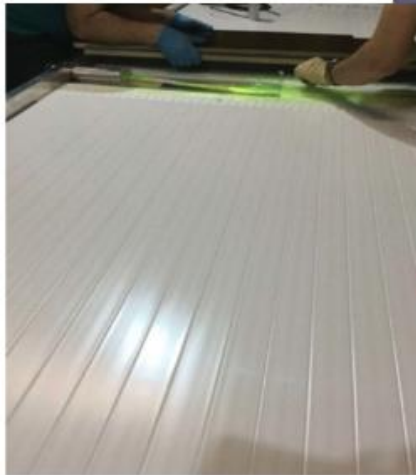
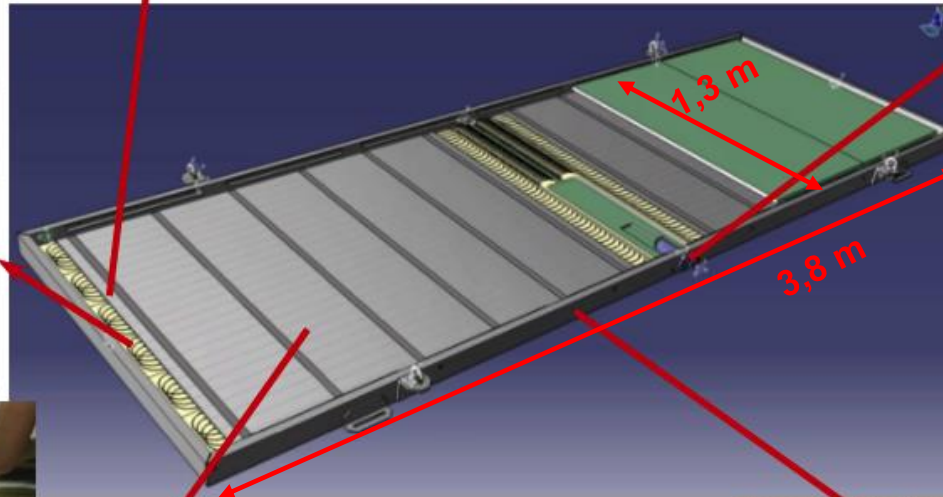


SSD



PMT
fotopowielcz

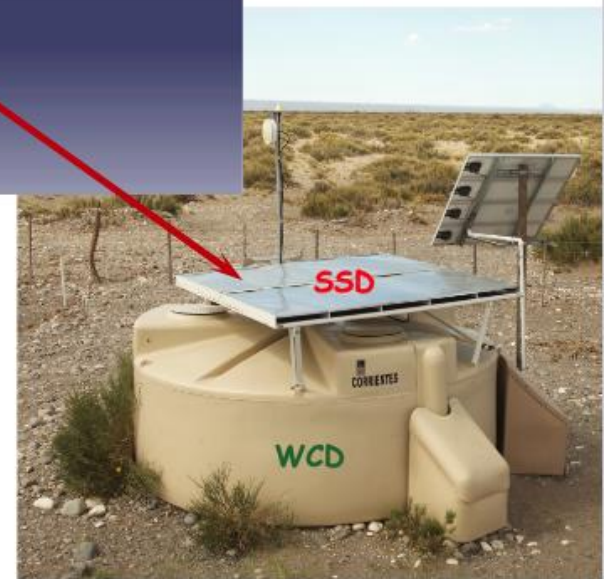
światłowody



Listwy scyntylacyjne 160x5x1 cm,
całkowita powierzchnia 3.8 m²

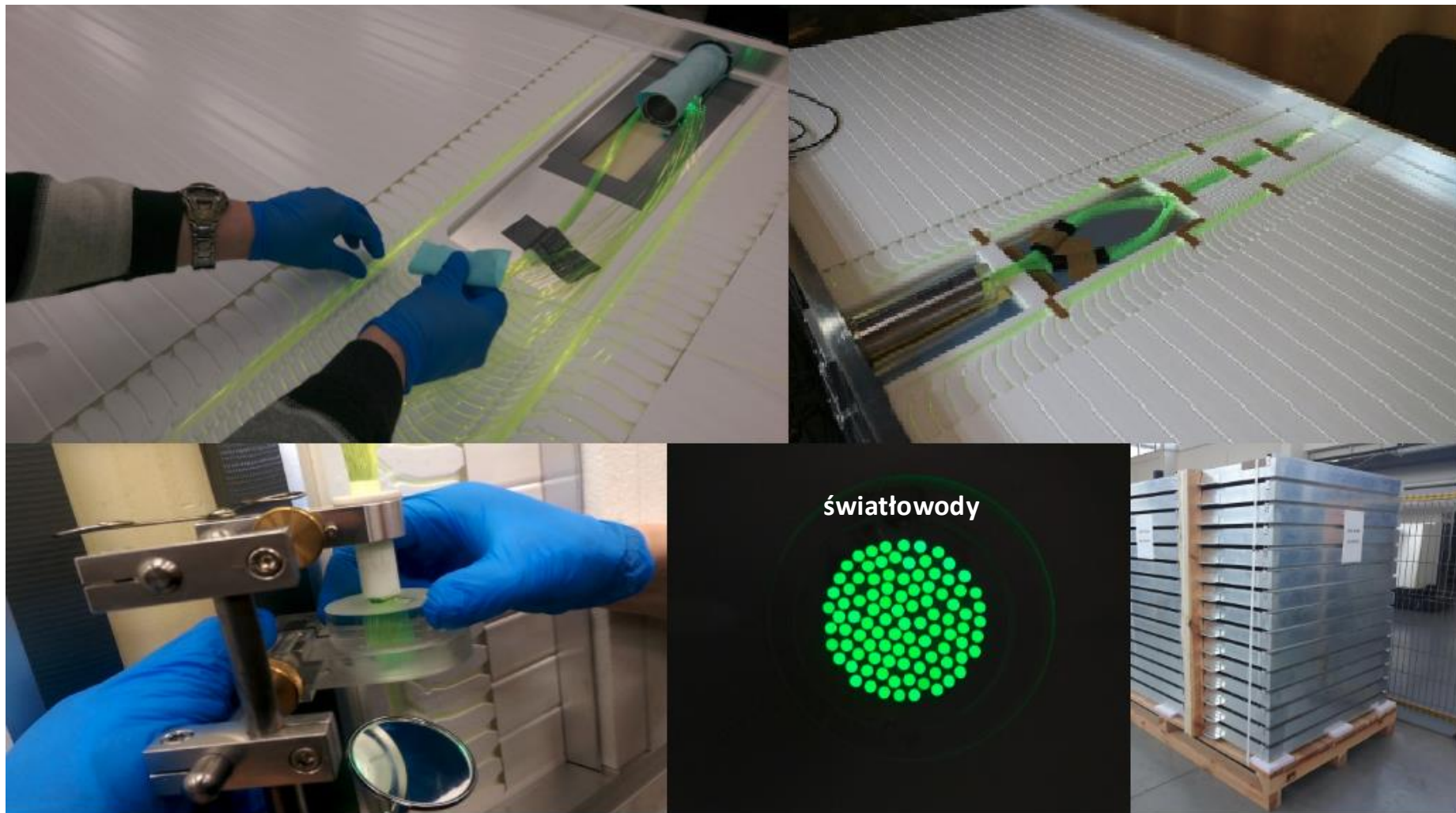


aluminiowa obudowa



Detektory scyntylacyjne

- ❖ Montaż i testy 228 z około 1500 wszystkich detektorów SSD odbywały się w IFJ PAN



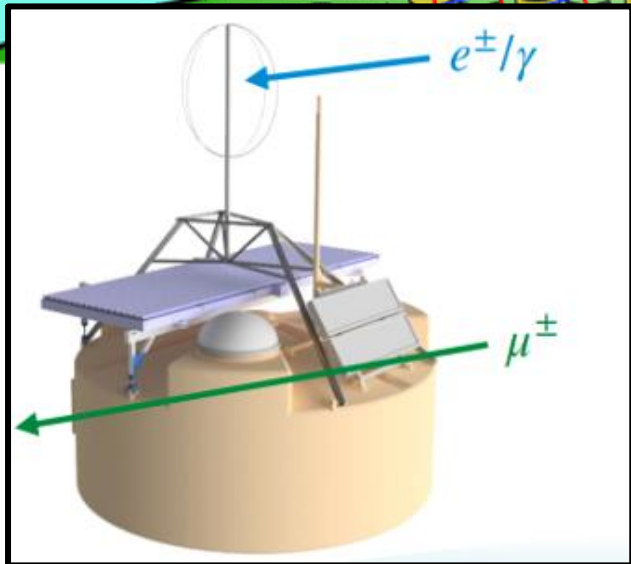
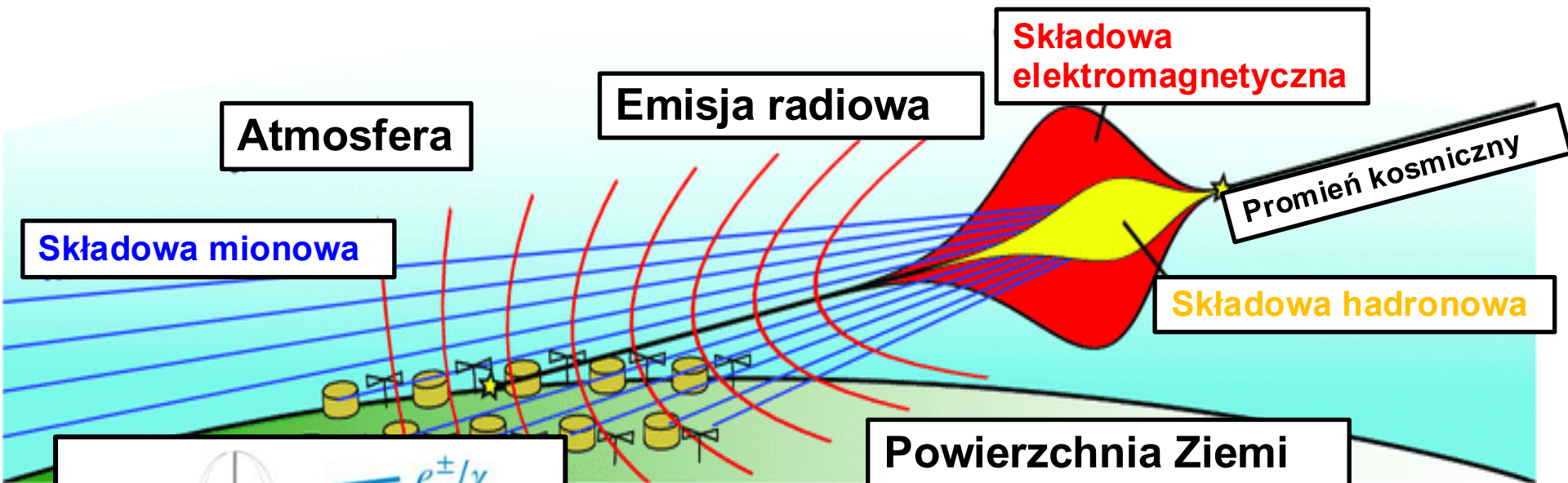
Modernizacja Obserwatorium Pierre Auger



Modernizacja Obserwatorium: AugerPrime (detektor radiowy)

Modernizacja obserwatorium: AugerPrime (detektor radiowy)

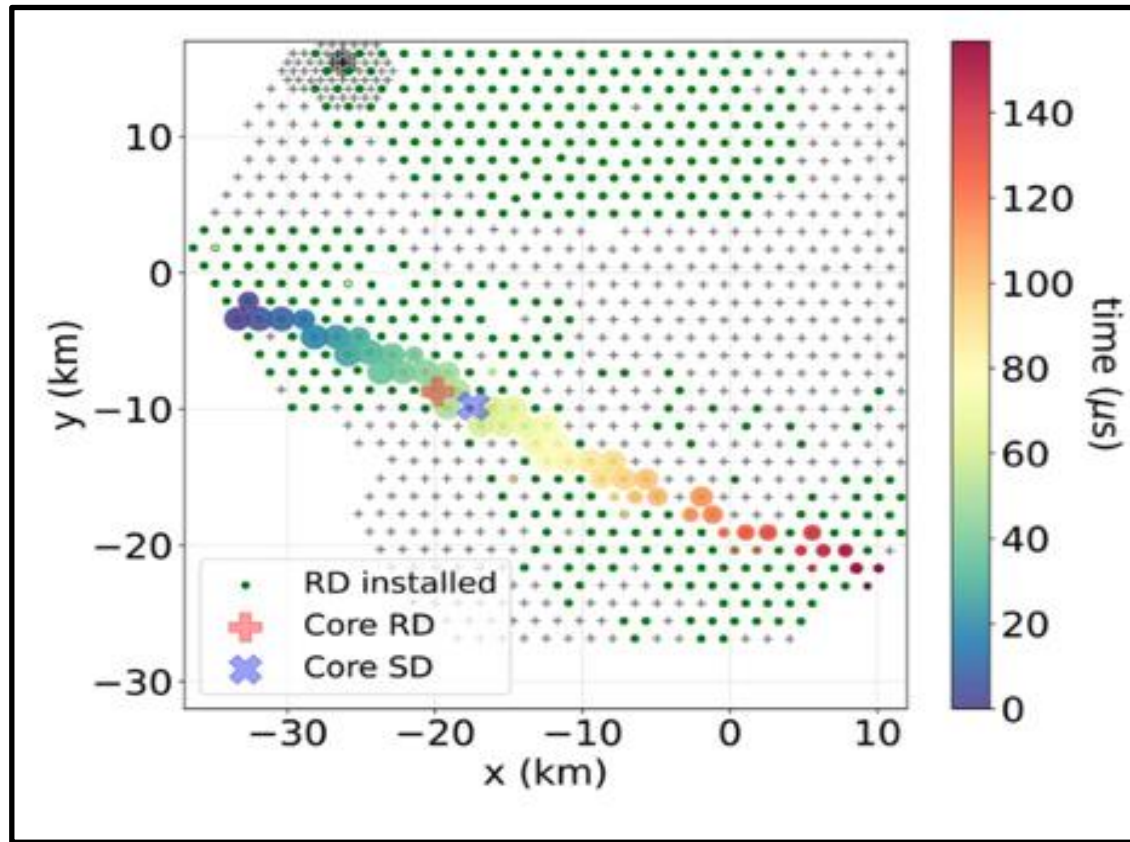
- ❖ Pomiar emisji radiowej EAS w atmosferze (30–80 MHz), emisja niepochłaniana w atmosferze



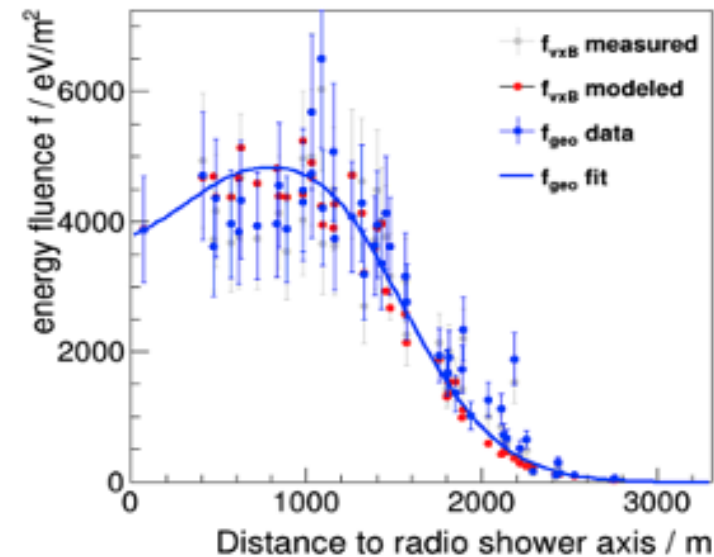
Największy detektor radiowy świata!!!

Modernizacja obserwatorium: AugerPrime (detektor radiowy)

- ❖ Wielokilometrowy ślad pęku na powierzchni ziemi

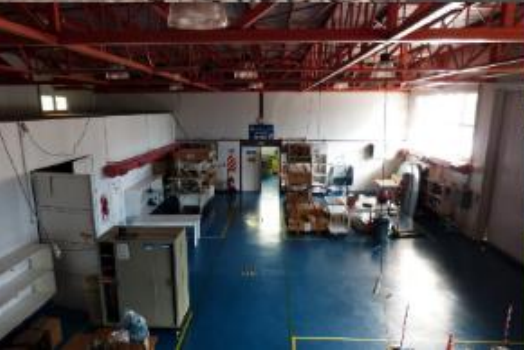


Profil podłużny pęku



- ❖ Technika detekcji radiowej stała się w pełni funkcjonalna, zdolna do samodzielnej detekcji i pomiarów wielkich pęków atmosferycznych.

Udział w eksperymencie Pierre Auger wiąże się z licznymi wyjazdami do Argentyny na spotkania robocze oraz na dyżury akwizycji danych



Podsumowanie

- ❖ Modernizacja **AugerPrime** pozwala na precyzyjne określanie składu chemicznego promieniowania kosmicznego przy zachowaniu pełnej wydajności ogromnej sieci detektorów powierzchniowych.
- ❖ Projekt wszedł w **Fazę II**, wykorzystując ulepszoną infrastrukturę do rozróżniania typów cząstek niezależnie od kąta ich wpadania w atmosferę.
- ❖ Dzięki tym usprawnieniom obserwatorium będzie prowadzić kluczowe badania nad najwyższymi energiami we wszechświecie co najmniej do **2035 roku**.

