

CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

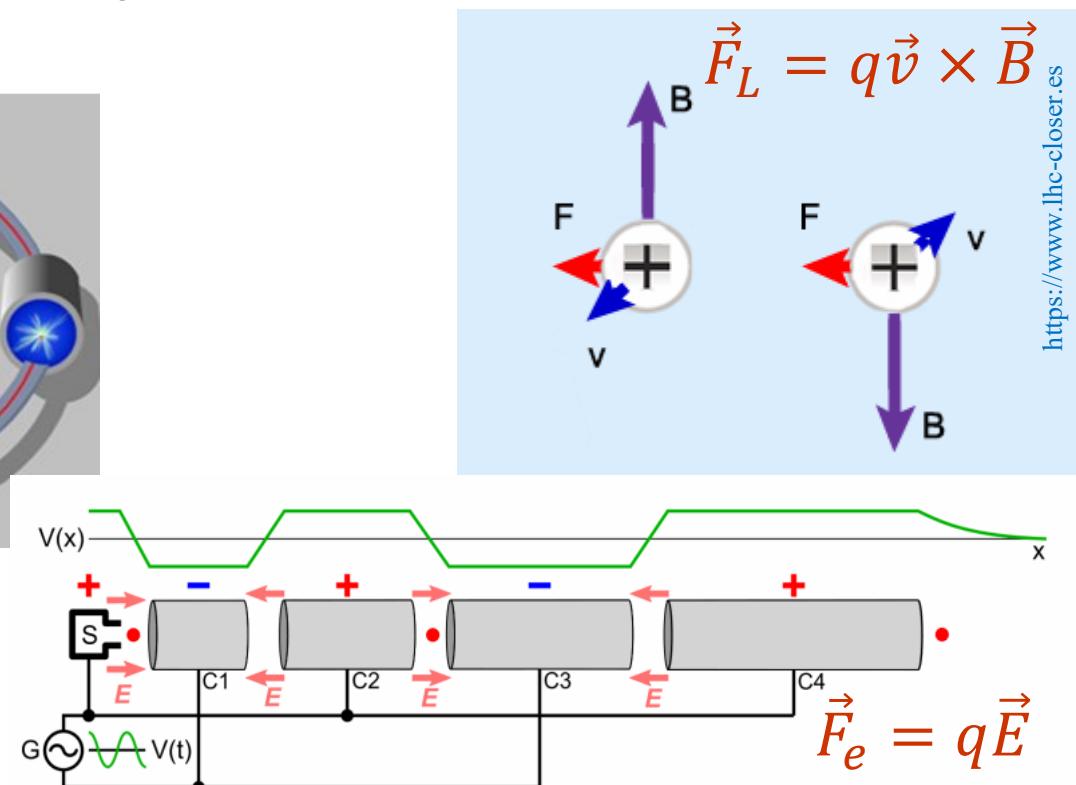
ŽRÓDŁA CZĄSTEK WYSOKICH ENERGII

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Fizyka akceleratorów w pigułce

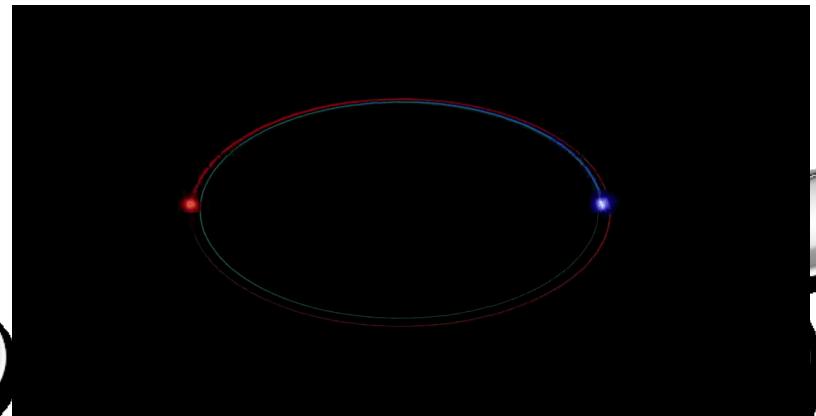
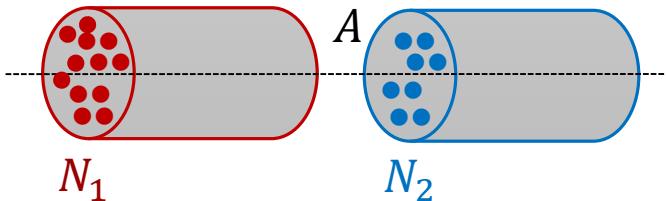
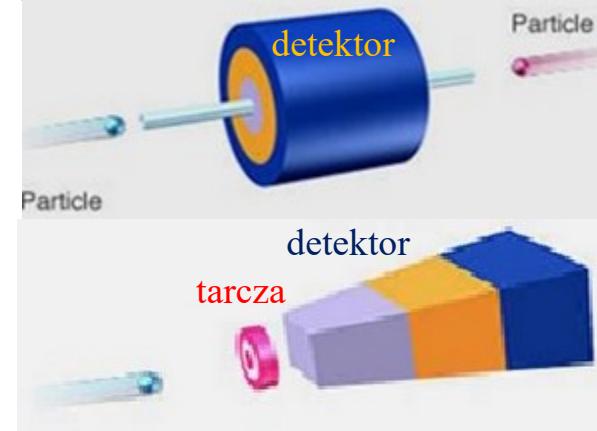
- Akceleratory to urządzenia do przyspieszania cząstek, głównie naładowanych.
- Najefektywniej jest przyspieszać je wielokrotnie w tych samych elementach.
- Musimy zatem mieć:
 - pole magnetyczne do zakrzywiania toru i ogniskowania cząstek,
 - pole elektryczne do przyspieszania



From Wikimedia Commons

Akceleratory – parametry

- Przyspieszać możemy wiązki przeciwbieżne cząstek lub jedną wiązkę i zderzać ją z tarczą.
- W akceleratorach zależy nam na uzyskaniu odpowiedniej energii:
 - największej, gdy chodzi o produkcję nowych cząstek,
 - dokładnie określonej, gdy celem jest zbadanie konkretnych stanów, np. produkcja Z^0 czy mezonów B .
- Ważne również jest, aby było możliwie dużo zderzeń – dlatego zderza się wiązki z pęczkami cząstek , np. o liczności rzędu 10^{11} .
- Zderzenia będą częstsze, gdy wiązki mają małe przekroje poprzeczne, np. $10 \mu\text{m}$.

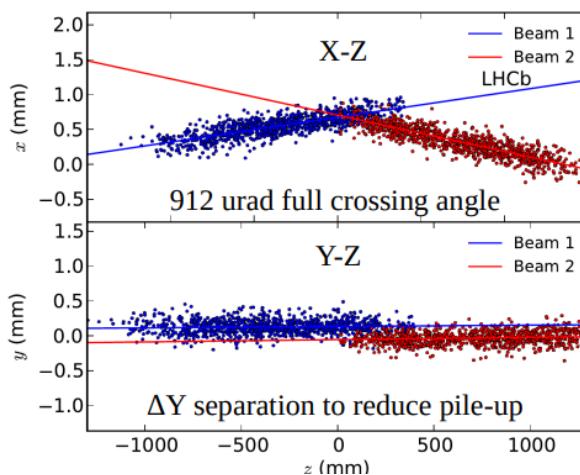


Świetlność akceleratora

- O jakości akceleratora świadczy parametr nazywany świetlnością (**luminosity**).
- Jest to liczba decydująca o tym ile i jak częstych zderzeń możemy oczekiwac.
- Jeżeli **świetlność** będzie za mała, to np. rzadkich procesów możemy się nie doczekać.

$$\mathcal{L} = n_b \frac{N_1 N_2}{\sigma_x \sigma_y} f$$

$$[\mathcal{L}] = \frac{1}{cm} \frac{1}{cm} \frac{1}{s} = cm^{-2} s^{-1}$$



Świetlność podawana jest w pewnym okresie zbierania danych, jako „skałkowana” świetlność:

$$\int \mathcal{L} dt = L$$
$$[L] = cm^{-2} \quad [L] = GeV^{-2}$$

Dlaczego wiązki zderzane są względem siebie pod kątem?



Yield, czyli o uzysku przede wszystkim chodzi....

Świetlność LHC w latach 2015-18 wynosiła (proszę obliczyć):

- zderzano wiązki $1.6 \cdot 10^{11}$ protonów o przekrojach poprzecznych $40 \mu\text{m}$ z częstotliwością 25 ns.
- znając rozmiar protonów, można oszacować, ile pustej przestrzeni było pomiędzy protonami (długość pęczku to ok. 4 cm) oraz prawdopodobieństwo zderzenia.

- Jeżeli eksperyment trwa 3 miesiące, to ile wynosi scałkowana świetlność?
- Liczba obserwowanych przypadków zależy od:

- przekroju czynnego,
- świetlności akceleratora,
- wydajności (detekcji, rekonstrukcji, identyfikacji, itp.)

- liczba przypadków/czas (**rate**)
- liczba przypadków/rok (**yield**)

$$\frac{dN}{dt} = \mathcal{L} \sigma \mathcal{E}$$

$$\left[\frac{1}{s} = \frac{1}{cm^2} \frac{1}{s} \text{ cm}^2 \right]$$

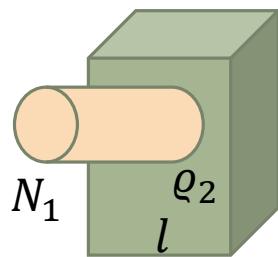
$$y = \int \frac{dN}{dt} dt = \int \mathcal{L} \sigma \mathcal{E} dt = L \sigma \mathcal{E}$$

$$\begin{aligned} & [cm^{-2} \text{ cm}^2] \\ & [fb^{-1} \text{ fb}^1] \end{aligned}$$

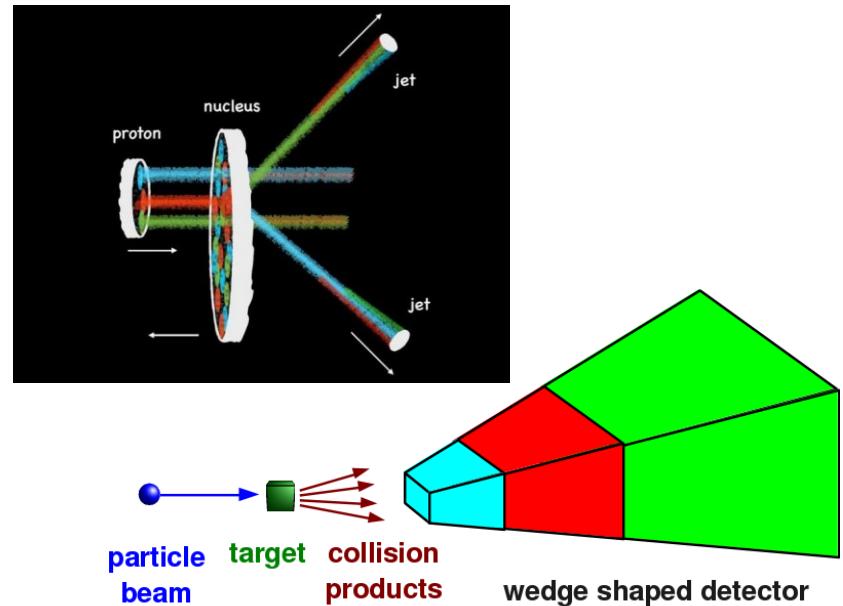
Przykład: Eksperyment zebrał 100 fb^{-1} danych, a przekrój czynny na produkcję cząstki Higgsa wynosi 1 fb^1 . Ile cząstek Higgsa zaobserwowano przy wydajności 1%?

Zderzenia z tarczą

Dla zderzeń z tarczą:



$$\mathcal{L} = N_1 \rho_2 l$$



Wiązka 10^{13} protonów zderzana z tarczą wodorową o grubości 1m:

$$\mathcal{L} = 10^{38} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

po zderzeniu wiązka jest tracona.



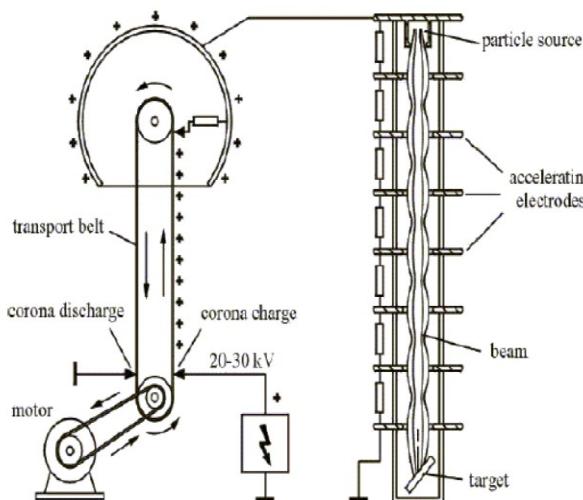
Akceleratory – rodzaje

Urządzenia służące do przyspieszania trwałych cząstek naładowanych:
elektronów, protonów, ciężkich jąder



LINIOWE

kondensatory ustawione liniowo,
 $U = \text{const}$,
rury dryfowe, źródła zmiennego napięcia



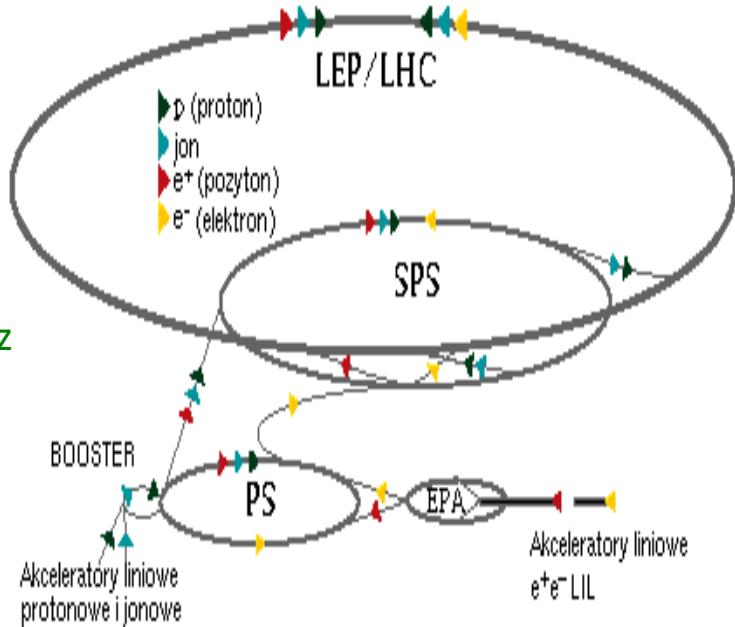
$U_{\max} \sim 10 \text{ MeV}$

$$E_n = n q U$$

KOŁOWE (cykliczne)

cząstki przechodzą wielokrotnie przez te same źródła napięć oscylujących z radiową częstotliwością

współczesne zespoły
przyspieszające składają się z
obydwóch typów, przy czym
„liniaki” stanowią układy
przyspieszania wstępnego



Akceleratory – rodzaje

Naładowana cząstka w polu elektrycznym (stałym lub zmiennym).

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q \cdot \vec{E}$$

- przyspieszanie – pole elektryczne,
- zmiana kierunku (utrzymanie na orbicie) – pole magnetyczne.

Akceleratory elektrostatyczne DC- maksymalizacja uzyskiwanej różnicy potencjałów, cząstki pokonują ją tylko jeden raz (kaskadowy, van der Graaffa, tandem Cockcrofta-Waltona).

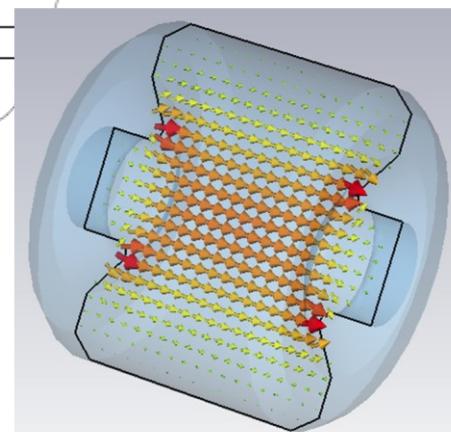
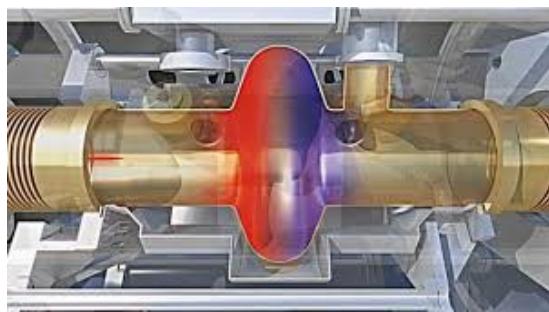
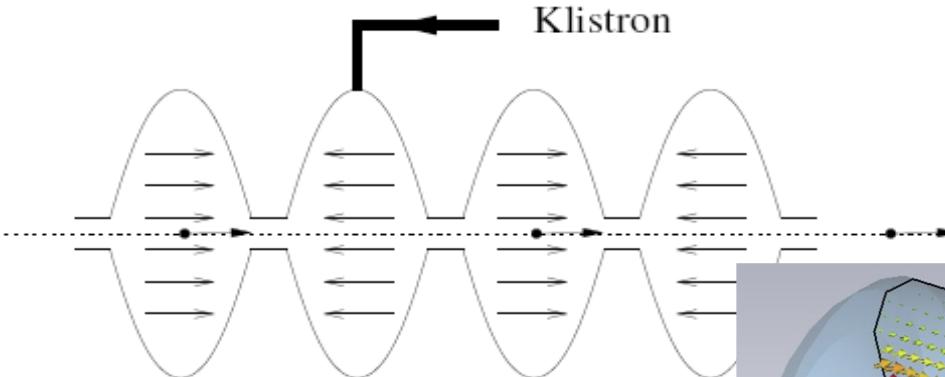
Akceleratory liniowe AC- cząstki przyspieszane są wzdłuż całej drogi, o długości akceleratora i maksymalnej osiąganej energii cząstek decyduje uzyskany gradient napięcia na metr długości akceleratora.

- o napięciu przyspieszającym wysokiej częstotliwości (liniowy z falą bieżącą, liniowy z falą stojącą).

Akceleratory cykliczne - cząstki wielokrotnie przechodzą przez te same wnęki przyspieszające, każdorazowo uzyskując dodatkową energię, ograniczenie stanowi osiągane natężenie pola magnetycznego w magnesach zakrywiających cząstki w akceleratorze, a w przypadku przyspieszania elektronów i pozytonów może nim być energia tracona na skutek promieniowania synchrotronowego.

Akceleratory liniowe

Obecnie do przyspieszania stosuje się wnęki rezonansowe, również nadprzewodzące (ILC)



cavity

Wewnątrz wnęki wytwarzana jest fala elektromagnetyczna.

- częstotliwości rzędu 1 GHz – mikrofale, tak dobrane, aby prędkość fazowa pola była równa prędkości cząstek, które są stale przyspieszane (elektrony)
- natężenia pola ok. 10 MV/m (nadprzewodzące),
- do uzyskania energii wiązki 1 GeV potrzeba 100m akceleratora

Akceleratory kołowe

Siła Lorentza w polu magnetycznym:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{B} \perp \vec{v} \Rightarrow m\gamma \frac{v^2}{r} = evB \Rightarrow p = m\gamma v = eRB$$

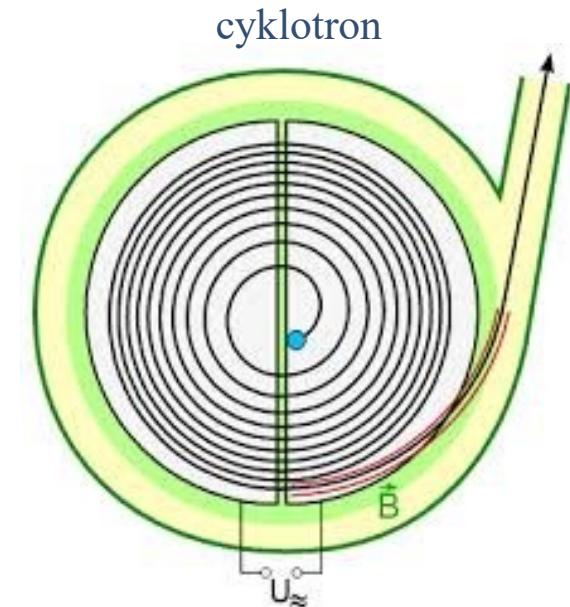
czyli: **p=0.3 R B GeV/c, gdy [R]=m, [B]=T**

okres obiegu: $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R}{p/m\gamma} = \frac{2\pi m\gamma}{eB}$

częstość kołowa:

$$\omega = \frac{eB}{m\gamma}$$

zmienia się ze wzrostem prędkości cząstek!



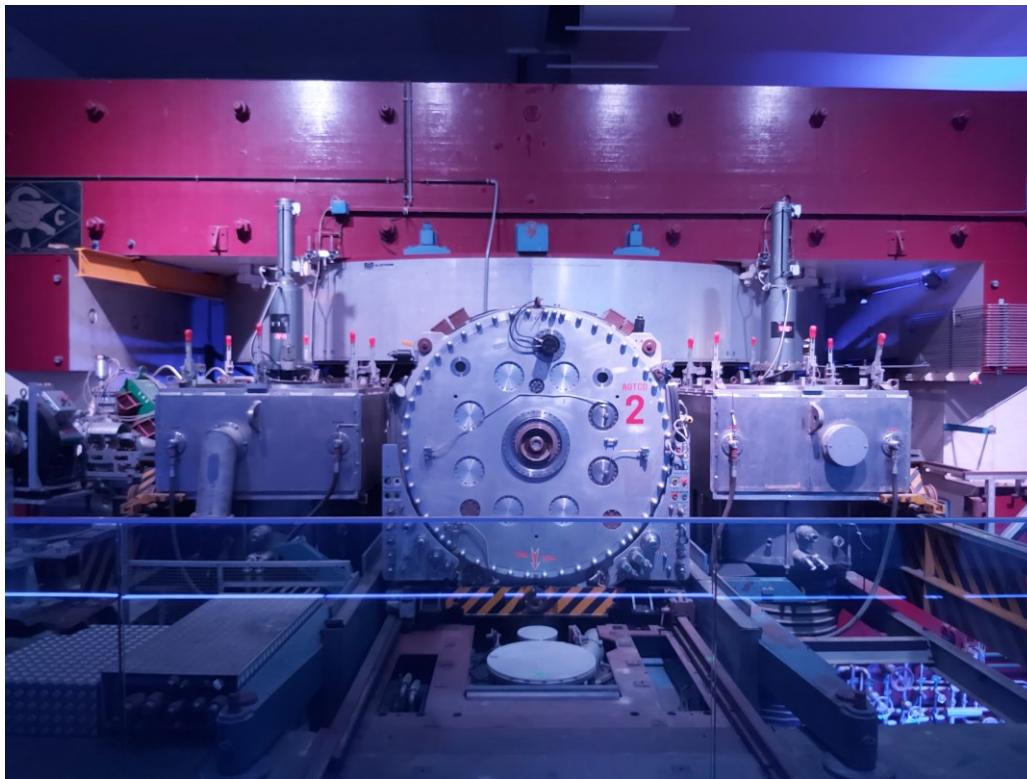
co się tutaj dzieje?
wraz ze wzrostem pędu,
wzrasta promień v<<c

$$B R = p/q$$
$$\omega = \frac{q}{m} B$$

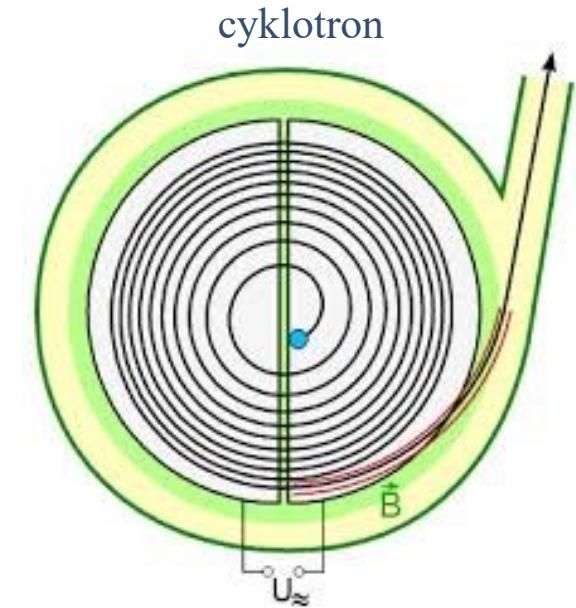
Częstość nie zależy od pędu,
ale im większy pęd – olbrzymi magnes

Akceleratory kołowe

Pierwszy akcelerator w CERN (1957) **Synchro-Cyclotron**
15.7 m



częstotliwość jest obniżana w celu skompensowania
relatywistycznego wzrostu masy

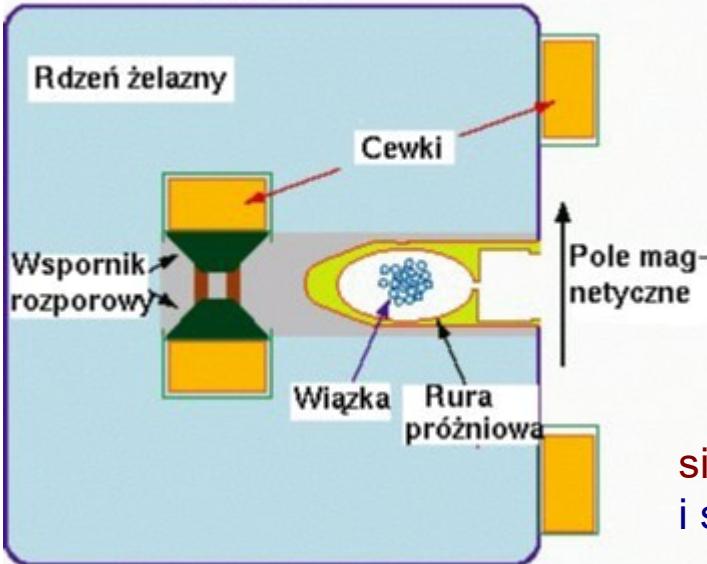


co się tutaj dzieje?
wraz ze wzrostem pędu,
wzrasta promień $v \ll c$

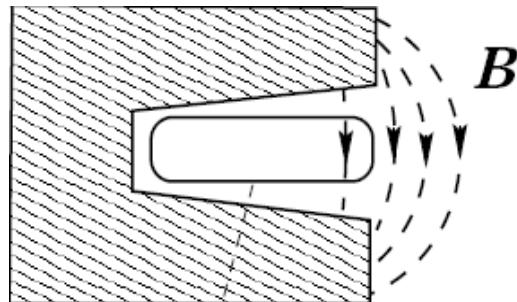
$$B R = p/q$$
$$\omega = \frac{q}{m} B$$

Akceleratory kołowe

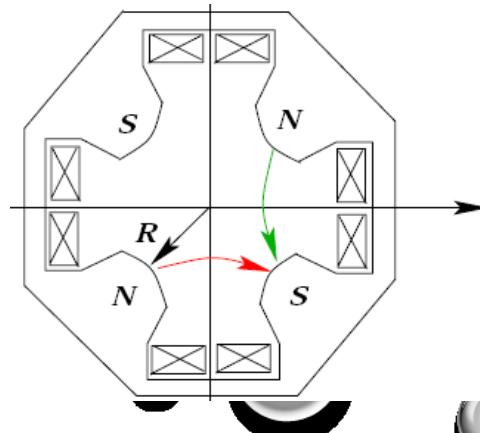
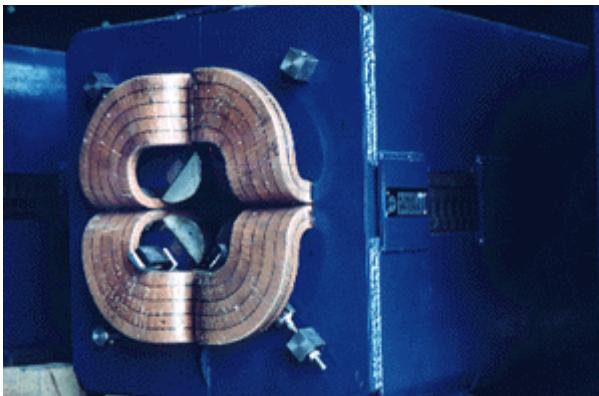
Magnes dipolowy w LEP-ie
(Schemat)



do zakrzywiania toru cząstek – magnes dipolowy,



silneogniskowanie za pomocą magnesów kwadrupolowych i sekstupolowych



Akceleratory – ograniczenia

Podstawowym parametrem akceleratora jest **maksymalna energia**.

- Akceleratory **elektrostatyczne** - po przekroczeniu pewnej wartości gradientu pola następuje przebicie elektryczne. Obecnie generatory Van de Graffa osiągają 20-30 MV i są używane jako pierwszy stopień przyspieszający np. ciężkich jonów.
- Akceleratory **liniowe** – dodając kolejne km wnęk rezonansowych można osiągnąć coraz wyższe energie, ale zawsze decyduje tu koszt urządzenia, bowiem:

$$E_{max} \propto L \times \text{średnie pole el.}$$

Dla przyspieszaczów **kołowych**:

- protony – wymagają coraz większego pola magnetycznego, które musi je utrzymać wewnętrz rury. Maks pole, to ok. 8 T.

Ogranicza to dostępne energie do:

$$E_{max} = e c R B_{max}$$

(magnesy nadprzewodzące).

Po przekroczeniu E_{max} , protony „uciekną” z akceleratora.

Akceleratory elektronów

Elektrony krążące po orbicie tracą energię na promieniowanie synchrotronowe.

Średnia energia tracona na obieg:

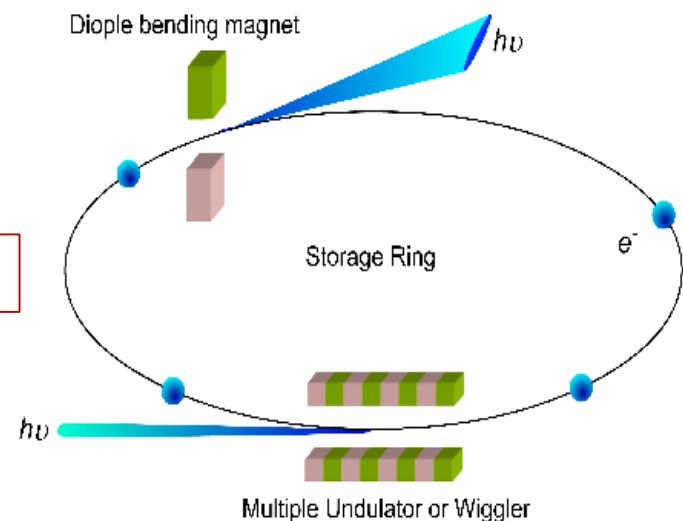
$$\Delta E^- \propto \frac{E^4}{R} \frac{1}{m^4}$$

a energia dostarczana:

$$\Delta E^+ \propto 2\pi R \times \text{pole el.}$$

maksymalna osiągana energia:

$$E_{max} \propto \sqrt{R}$$



LEP: przy $R = 4\ 300\ m$, $E = 45\ GeV$ $\Delta E^- = 84\ MeV/\text{obieg}$

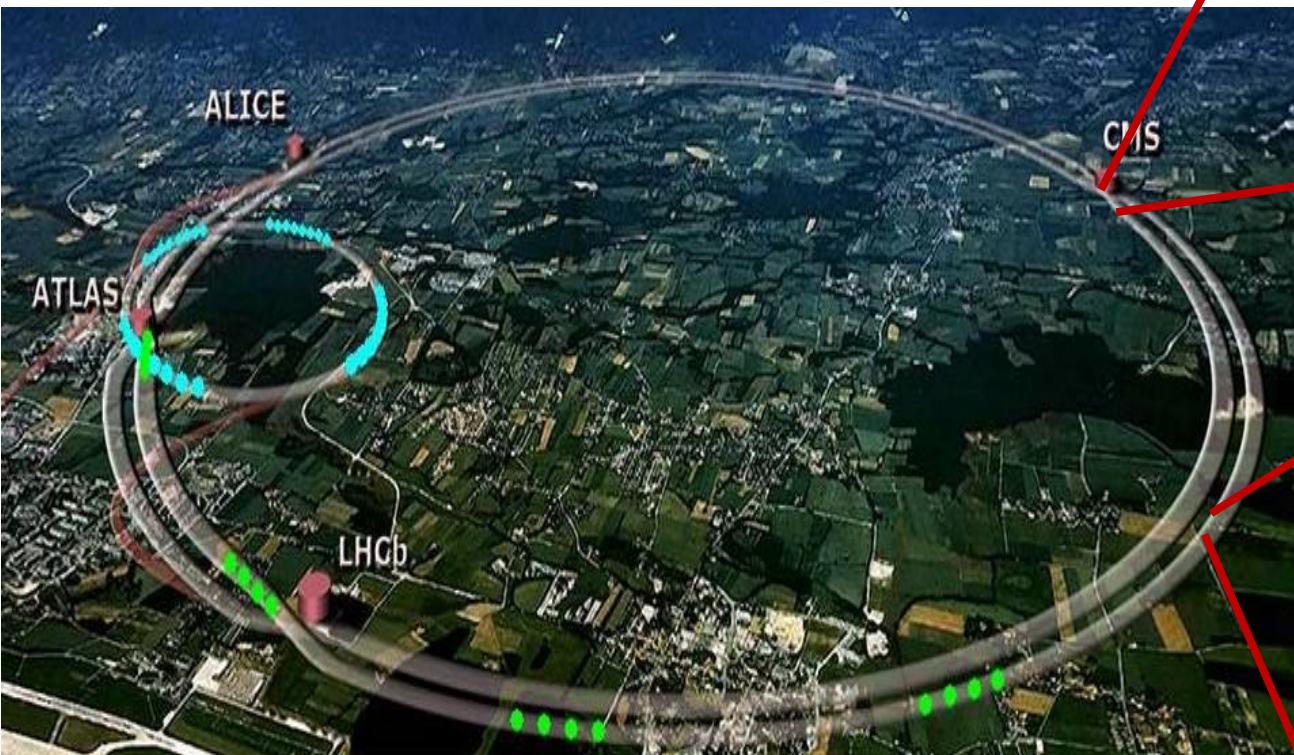
przy $E = 100\ GeV$ $\Delta E^- = GeV/\text{obieg}$

był to ostatni akcelerator kołowy elektronów,

planuje się budowę ILC (International Linear Collider) z energiami wiązek elektron – pozyton po 500 GeV

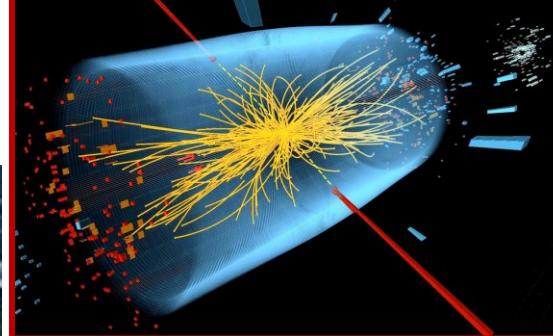
LHC Wielki Zderzacz Hadronów 2010-2023

LHC to zespół akceleratorów protonów, zbudowany pod Genewą, w ośrodku CERN

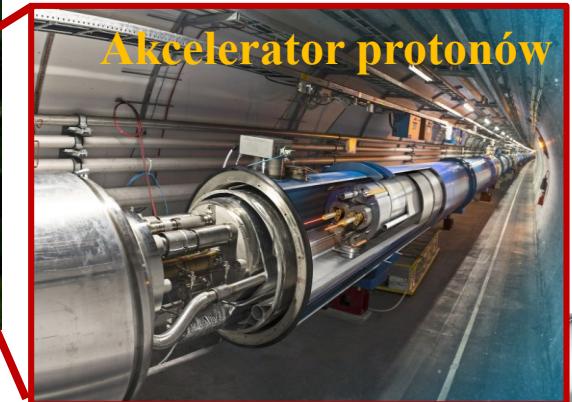


Największy pierścień ma 27 km obwodu, urządzenia zbudowane są w tunelu, na głębokości do 100 metrów.

DETTEKTOŘI ZDERZENÍ



Akcelerator protonów

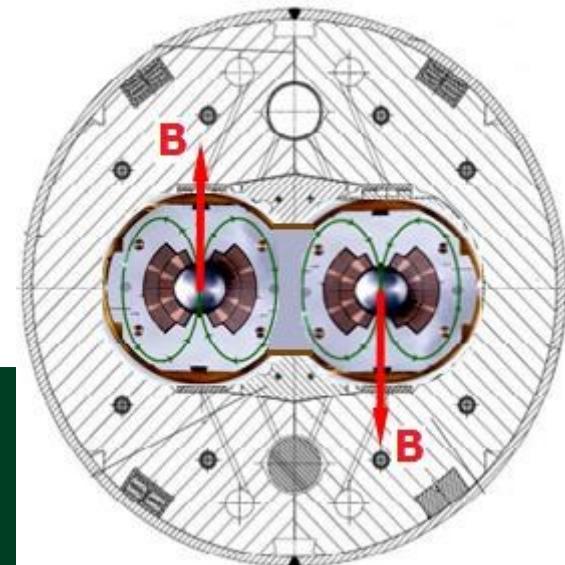
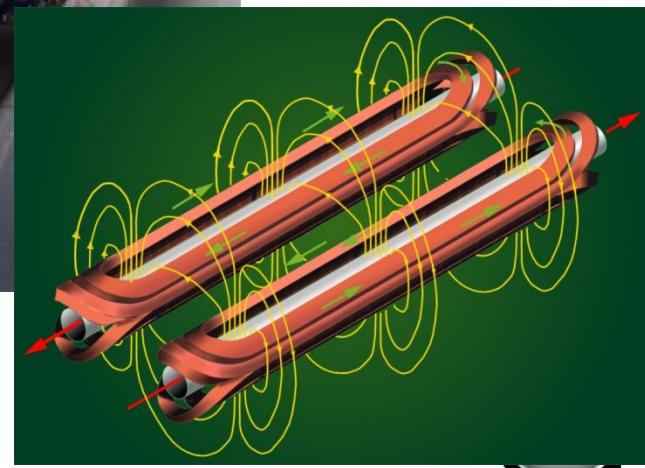
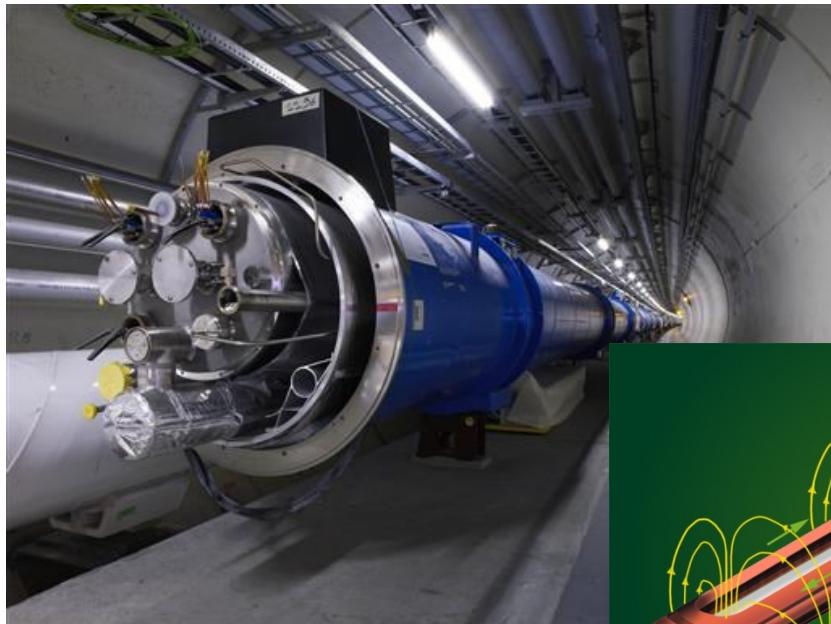


LHC Wielki Zderzacz Hadronów

Do zakrzywienia toru protonów konieczne jest **pole magnetyczne**. Im większy pęd, tym pola musi być większe.

Pole magnetyczne wytwarzane jest przez prąd – żeby utrzymać 4 TeV-owe protony na orbicie indukcja pola musi być ponad **8 Tesli**, a natężenie prądu ponad **10 000 Amperów!**

NADPRZEWODZĄCE cewki magnesu





High
Luminosity
LHC

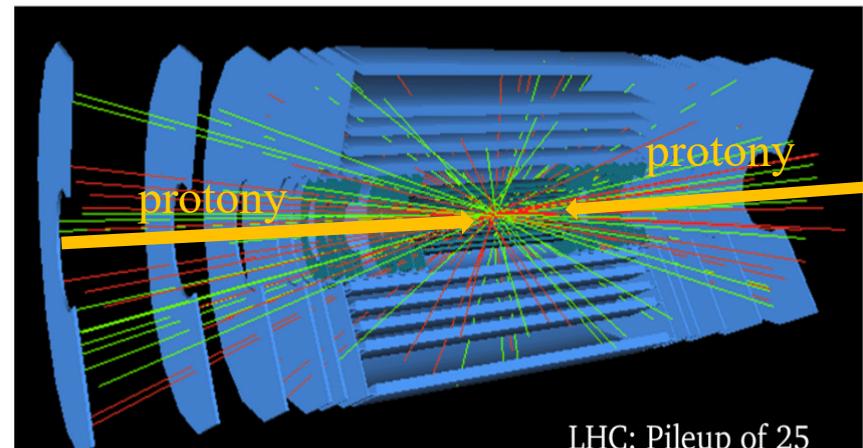
LHC 2023-2026

W LHC Run 3 co 25 ns zderzane są wiązki (ok. 10^{11}) protonów.

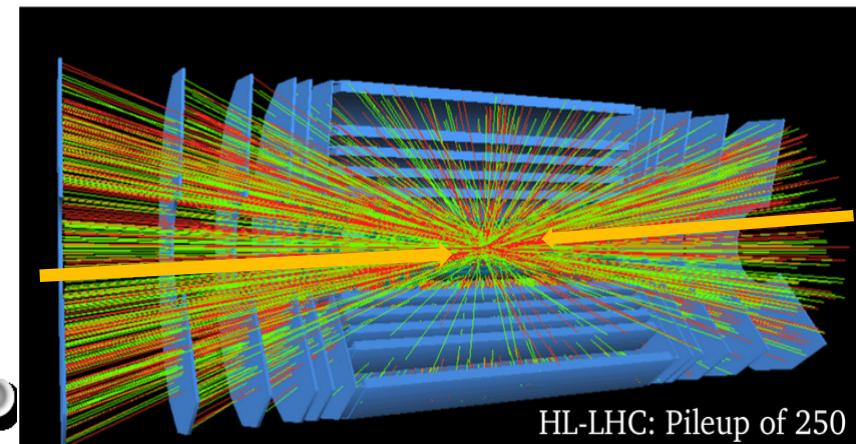
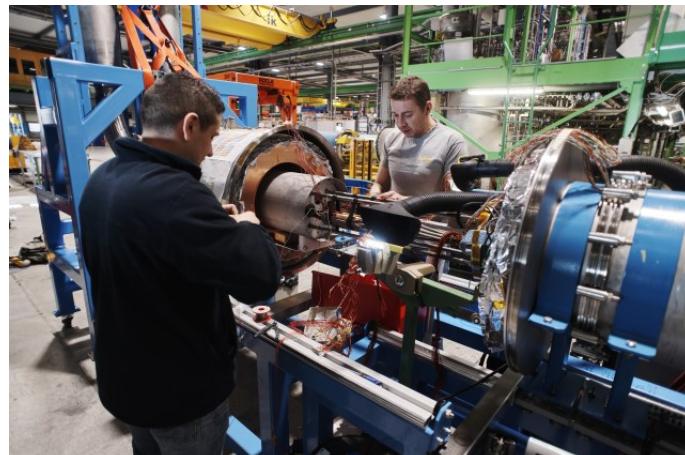
Jednak czekanie na bardzo rzadkie procesy (jak powstanie cząstki Higgsa) jest zbyt długie i planowane jest zwiększenie efektywności zderzeń.

Najważniejsza modernizacja LHC (2023-2026) polegać będzie na projekcie nowego systemu prowadzenia i zderzania protonów, co **zwiększy liczbę zderzeń o 5-7 razy**.

Wszystkie magnesy będą wymienione na nowe, a detektory zostaną gruntownie przebudowane.



LHC: Pileup of 25



HL-LHC: Pileup of 250

Akceleratory – nowe projekty

Opóźnienie!!

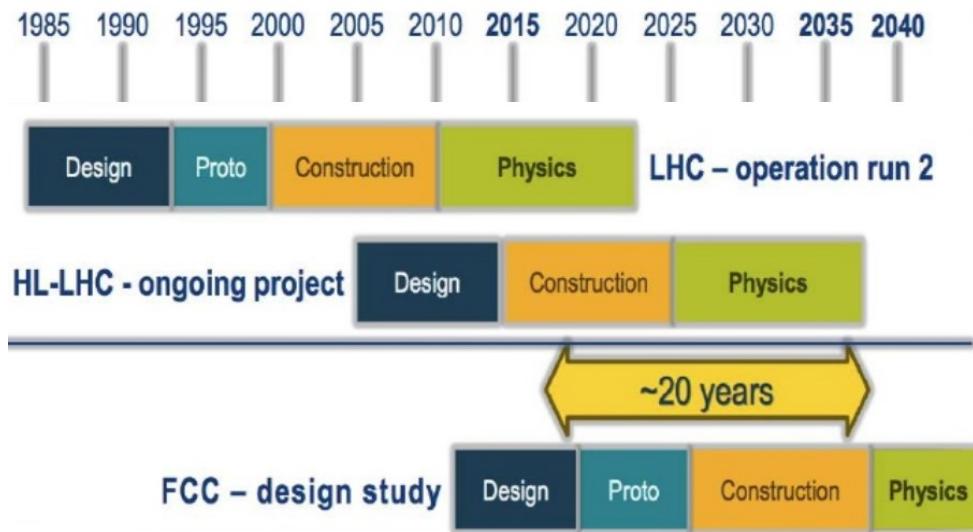


Akceleratory – nowe projekty FCC

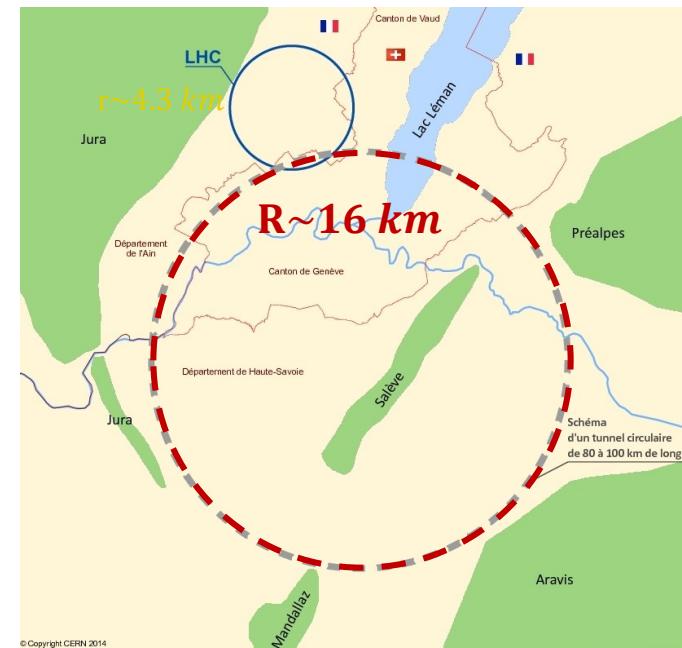
W roku 2019 zatwierdzony został plan konstrukcji nowego akceleratora o długości 100 km o nazwie:

Future Circular Collider (FCC).

Budowa planowana jest na lata 2028-2038.



Oczekuje się, że wiązkę protonów o energii **100 T** utrzyma na orbicie o promieniu 16 km pole magnetyczne o indukcji **16 T**.

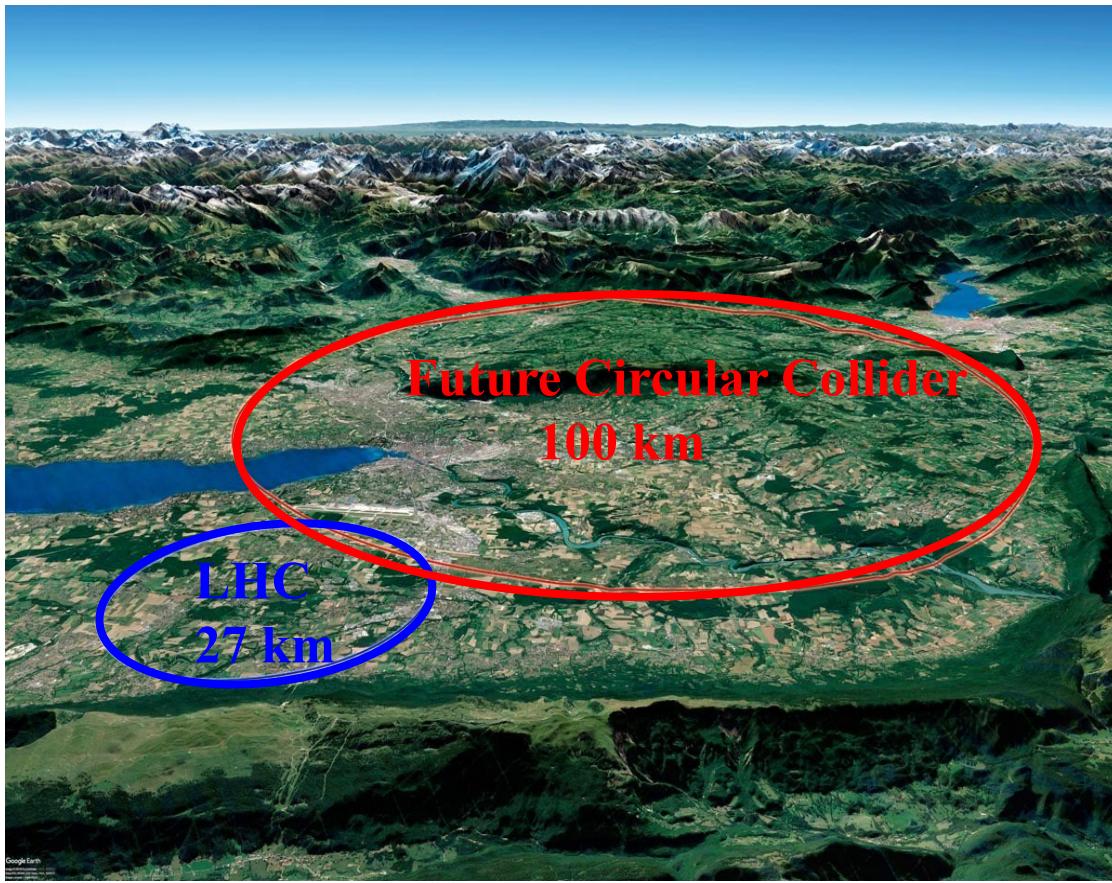


W pierwszym okresie (2038-2053) przyspieszane i zderzane mają być elektrony.

W drugim: protony (2063-2090).



FCC



FCC ma stać się kluczem do Nowej Fizyki:

- wyższe energie zbliżają nas coraz bardziej do Wielkiego Wybuchu,
- oczekujemy obserwacji nowych cząstek i zjawisk,
- rozwiązania zagadek neutrin,
- wyjaśnienia składu ciemnej materii,
-

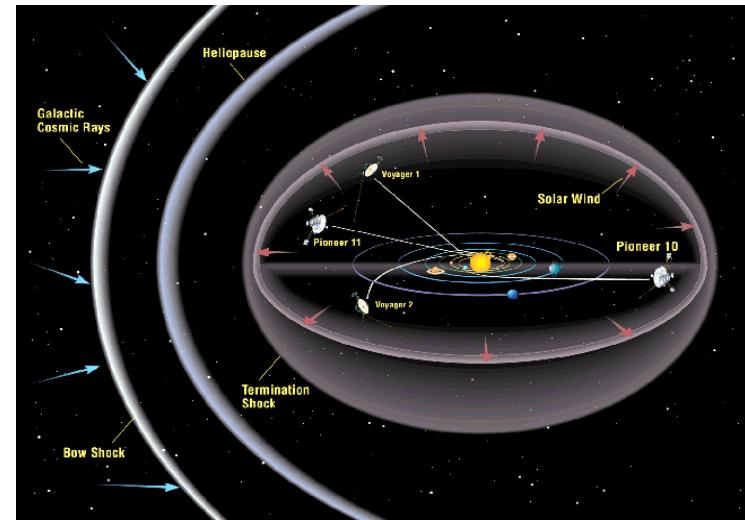
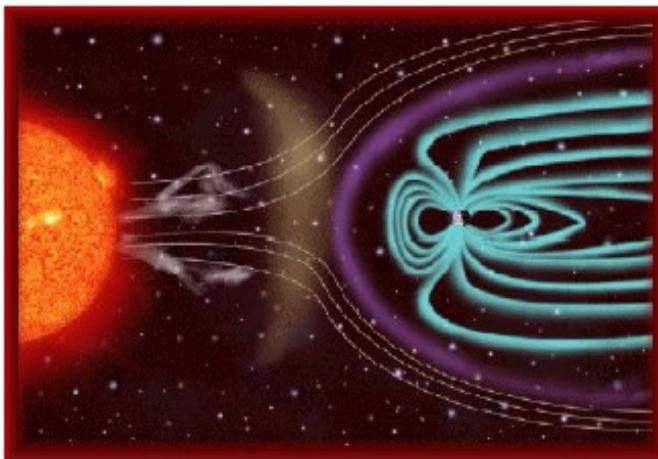
Promieniowanie kosmiczne

II

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne:

- pochodzi spoza heliosfery, są to: pozostałości po Big-Bangu, nukleosyntezie.
- pochodzi ze Słońca (wiatr słoneczny modyfikowany przez pole magnetyczne Ziemi).
- promieniowanie o najwyższych energiach pochodzi z wybuchów supernowych

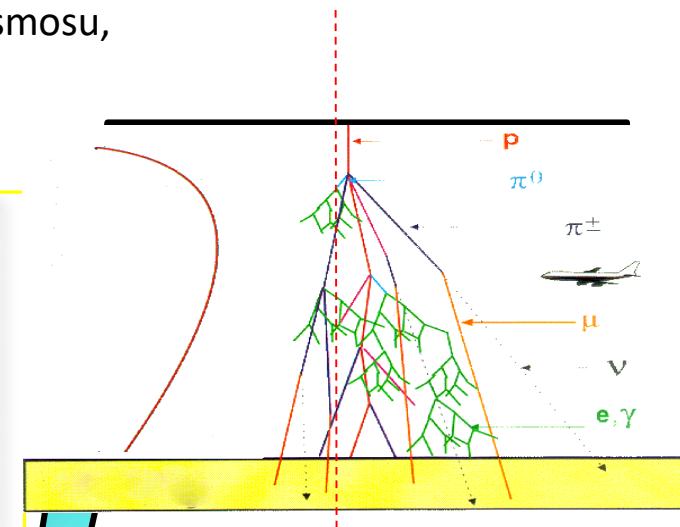
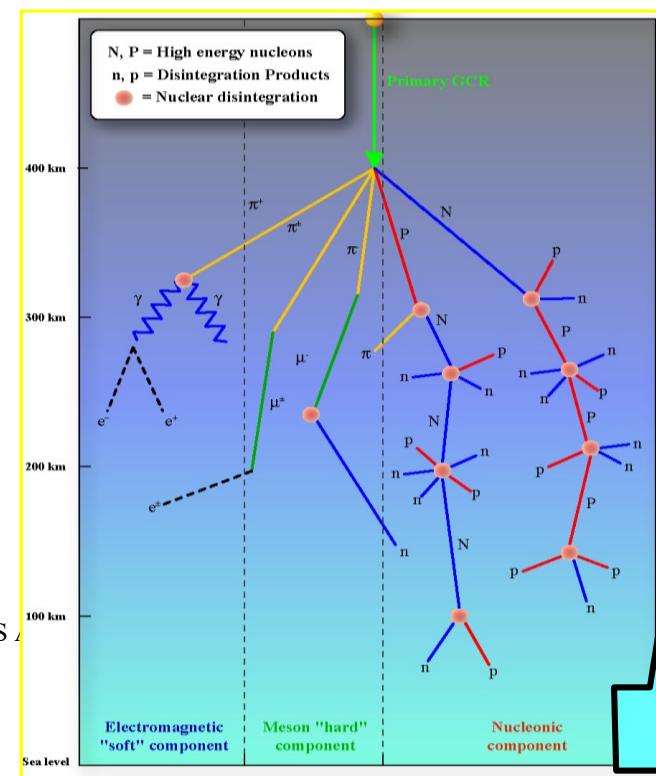


Hipotetyczne źródła:

- przyspieszanie stopniowe w dużych obiektach np.: radiogalaktyki, zderzenia galaktyk, gromady galaktyk
- silne pola elektromagnetyczne wokół zwartych obiektów np.: pulsary (magnetary!)
- źródła błysków gamma (relatywistyczne fale uderzeniowe)
- źródła egzotyczne: defekty topologiczne, cząstki reliktowe, itp.
- np. hipotetyczne cząstki $X \rightarrow$ kwarki, leptony \rightarrow promienie kosmiczne

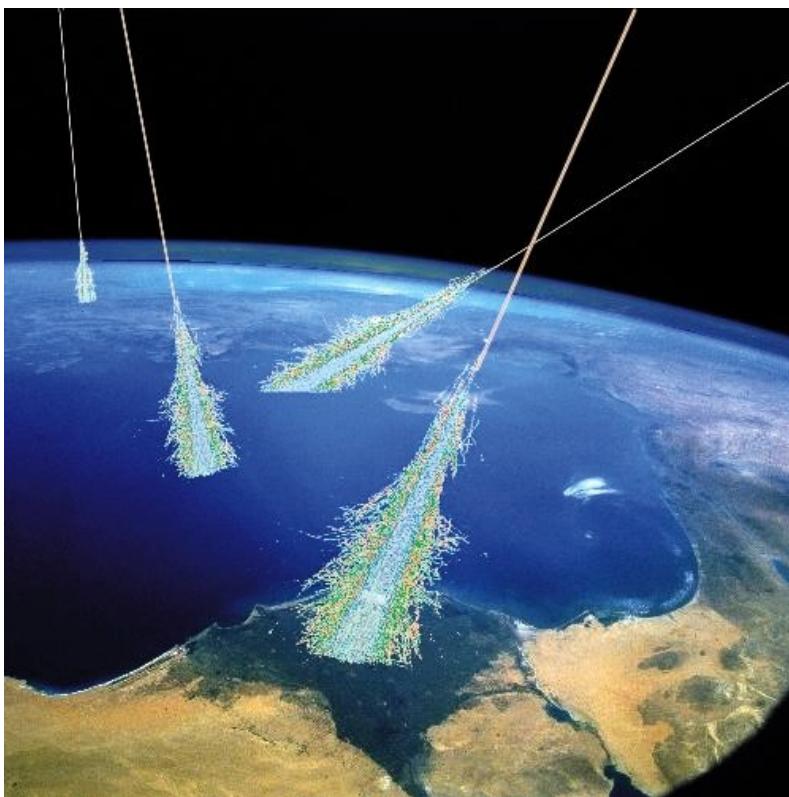
Promieniowanie kosmiczne

- Naturalne źródło wysokoenergetycznych cząstek (do lat 1950 - jedyne źródło).
- T. Wulf umieścił na szczycie wieży Eiffla detektory i zauważył, że „na górze” promieniowanie jest większe niż na dole.
- W 1912 r. V.F. Hess – loty balonowe – promieniowanie z kosmosu,
- W ciągu godziny przelatuje przez nas ok. 100 tys różnych promieniowania pochodzenia kosmicznego.



Promieniowanie kosmiczne

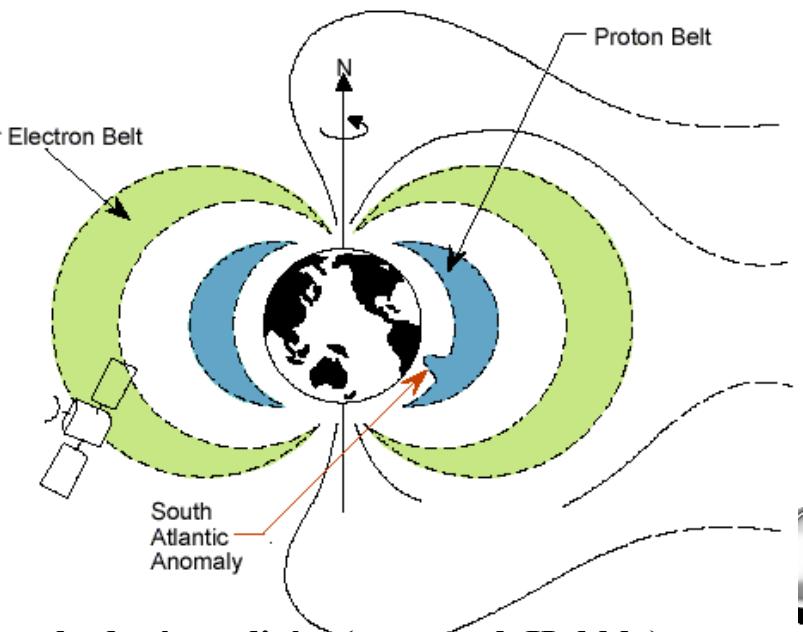
Atmosfera ziemska zapewnia dodatkową osłonę przed promieniowaniem, równoważną blokowi metalu o grubości 1m.



Do Ziemi $\sim 1000 \text{ cz}/(\text{m}^2\text{s})$, 180 - miony

Podróże do innych planet są obecnie niemożliwe ze względu na otrzymanie śmiertelnej dawki promieniowania (podróż na Marsa – 520 dni, 1 Sv).*

* dzienna dawka „naturalna” – 0.1 mSv

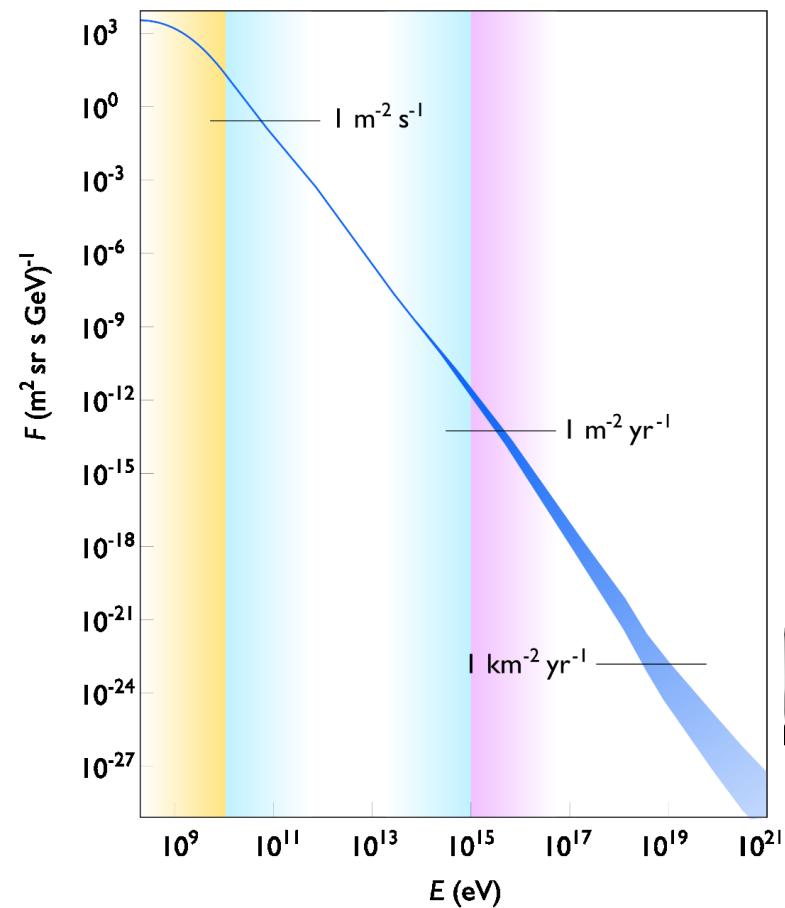
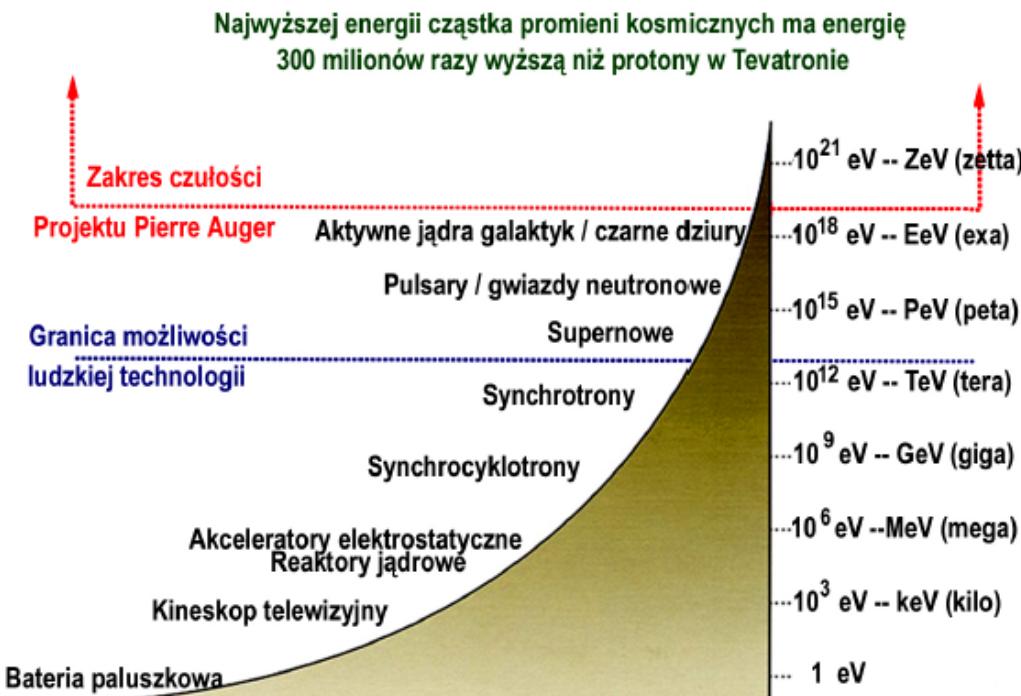


Wiekszość uszkodzeń satelitów (w tym tel. Hubble'a) spowodowana była promieniowaniem

Promieniowanie kosmiczne

Strumień promieniowania docierający do powierzchni Ziemi jest wynikiem oddziaływania **pierwotnego promieniowania kosmicznego** z atmosferą.

Bardzo szerokie widmo energetyczne – do 10^{20} eV (100 EeV), (różne pochodzenie)
Ale bardzo słaby strumień –
1 cząstka/m²/100 lat.



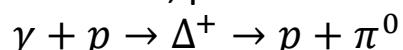
Pierwotne promieniowanie kosmiczne - widmo

Ultra-high energy cosmic rays – pochodzą z obszarów międzygalaktycznych, głównie protony z domieszką helu.

- Widmo opisywane szeregiem modeli – charakterystyczne „kolano” i „kostka” oraz b.silny spadek przy ultrawysokich energiach.
- E_{CM} dla prom. kosmicznego o $E = 10^{20}$ eV wynosi:

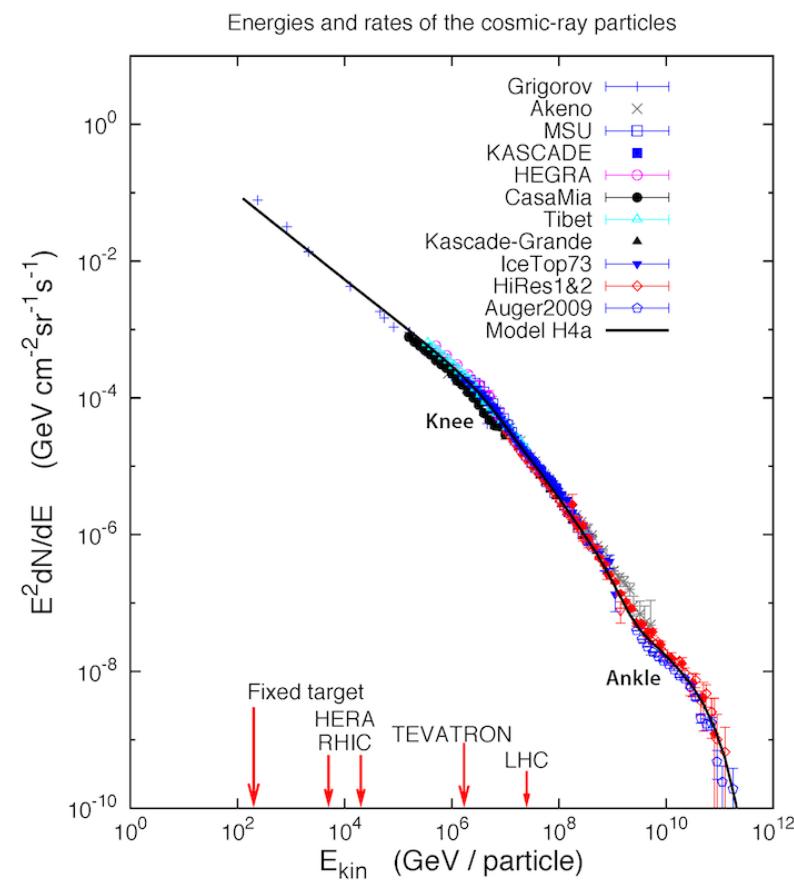
$$\sqrt{s} \cong \sqrt{2Em_p} = 430 \text{ TeV}$$

- GZK (1966) Greisen, Zatsepin, Kuzmin: przewidywanie spadku strumienia dla $E \sim 6 \times 10^{19}$ eV
- Jest to energia progowa dla procesu oddz. z CMB (prom. mikrofalowe tła, prom. reliktywe):



końcowy proton ma niższą energię niż początkowy

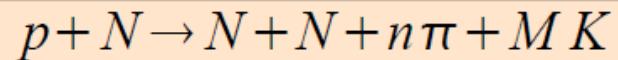
- protony z galaktyk – rzadko oddziałują z CMB



Wtórne promieniowanie

Do górnej warstwy atmosfery dociera: 85% protonów, 12% cząstek alfa, 1% ciężkich jąder (nukleosynteza) i 2% elektronów oraz niskoenergetyczne promieniowanie ze Słońca.

Cząstki pierwotne penetrując atmosferę i oddziałując silnie, dają początek kaskadom hadronów i leptonów (promieniowanie wtórne). Powstają głównie piony i kaony.



Gdy energii hadronów jest za mało, strumień maleje, cząstki ulegają rozpadowi.

Do Ziemi dociera składowa „miękką” (1932 rok) (elektrony, fotony 25 %) i twarda (miony 70%), trzecią składową stanowią neutrina oraz nukleony i piony (3%).

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_\mu + \nu_e \\ \pi^0 &\rightarrow 2\gamma \rightarrow e^+e^- + e^+e^- \\ e^+ + N &\rightarrow e^+ + N + \gamma\end{aligned}$$

Proton collides with an atmosphere molecule.

Do Ziemi dociera ok. 180 mionów/m²/s

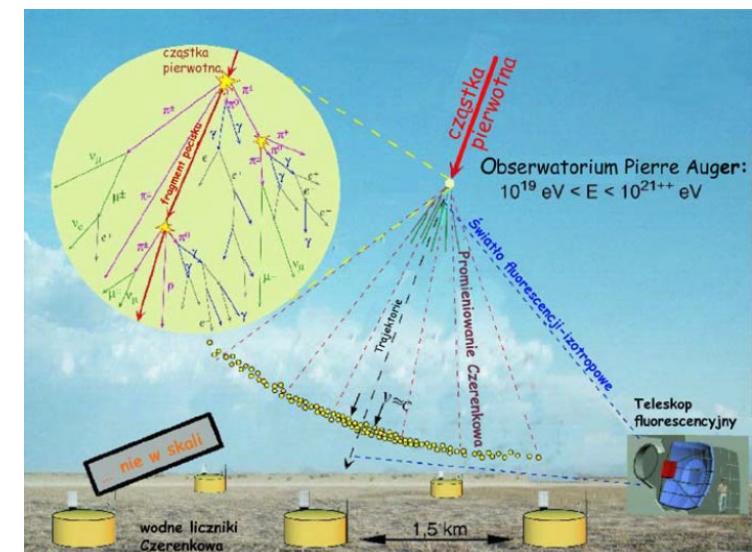
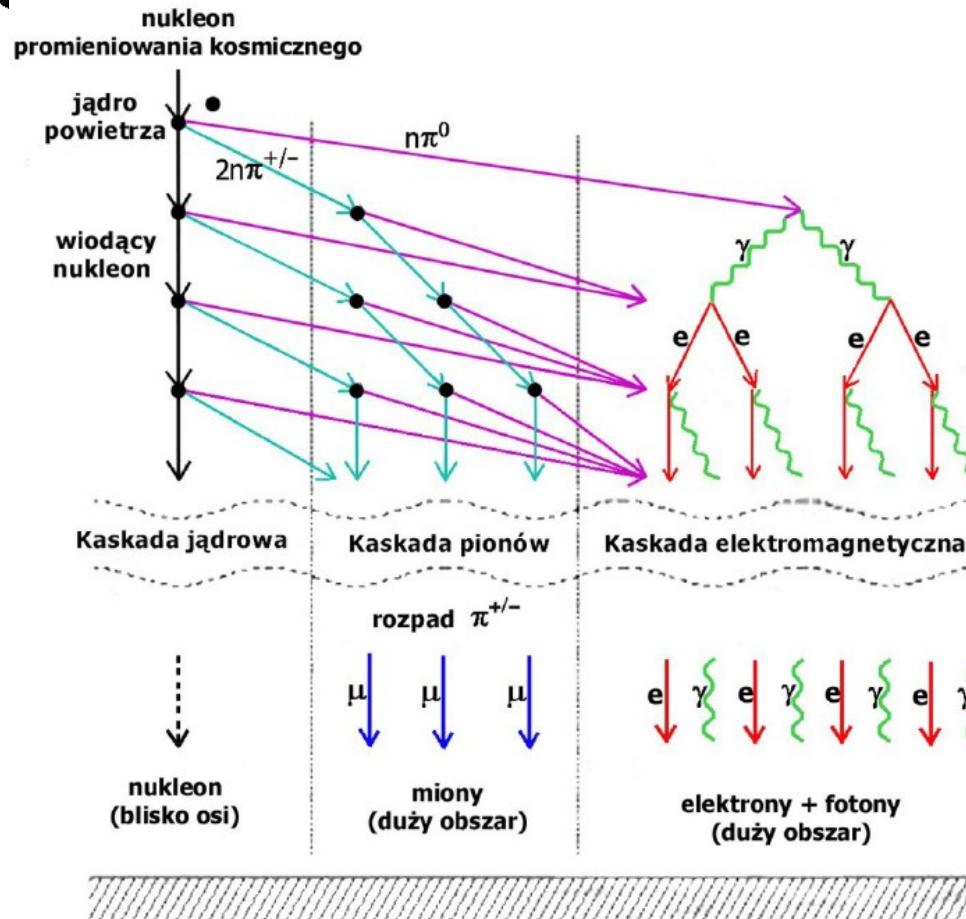
Obserwatorium Pierre Auger w Argentynie ma 3000 km².

Obserwacje kosmiki o energii GeV

Dawki promieniowania

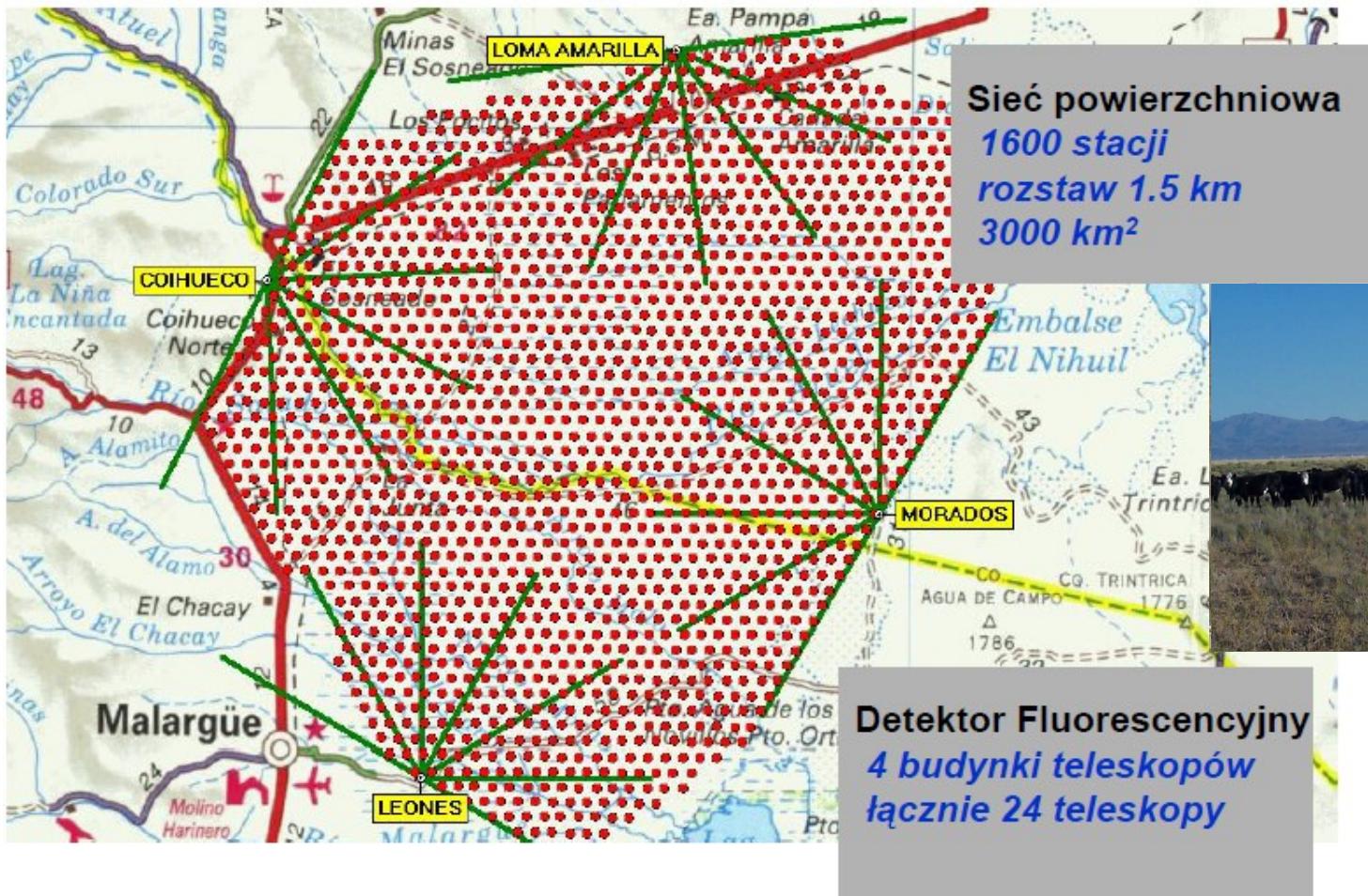
dose	Typical exposure	Number of electron-hole pairs and typical effect
1 mGy	Dose of 1 chest X-ray or 1 year of natural background	10^{12} e-h pairs/cm ³ • effects in insulators (charge trapping), • minor risks in biological cells,
4 Gy		4×10^{15} e-h pairs/cm ³ • transitory effects in semi-conductors, • 50% chance death after 1 month
10-20 Gy		delivered to tumor in radiotherapy
10-100 Gy		Annual dose received by a satellite
100 Gy		• Voltage shift induced in threshold of power MOSFET. • The current gain of a BJT may be cut down by a factor 10.
1 MGy	Dose in sub-detectors of HEP experiments.	• Mechanical properties of materials are altered.

Wtórne promieniowanie kosmiczne - obserwacja



Wtórne promieniowanie kosmiczne-obserwacja

Plan Obserwatorium Pierre Auger



Podsumowanie

- Dlaczego wysokie energie?
- Koniecznie mechanika relatywistyczna. Masa niezmiennicza i czteropędy.
- Układ środka masy i laboratoryjny.
- Zderzenia wiązek przeciwbieżących i zderzenia wiązki z tarczą.
- Światłość, przekrój czynny i spodziewana liczba przypadków.

