

Akcelerator

Urządzenia do wytwarzania strumieni cząstek o znacznej energii kinetycznej

- Przegląd ważniejszych typów akceleratorów: akceleratory elektrostatyczne, akceleratory liniowe ze zmiennym polem elektrycznym, akceleratory cykliczne ze zmiennym polem elektrycznym (cyklotron, synchrociklotron, synchrotron ze słabym i z silnym ogniskowaniem, akceleratory wiązek przeciwbieżnych).
- Istotne pojęcia: energia na produkcję cząstek, świetlnosc akceleratora, kilkustopniowy proces przyspieszania, promieniowanie synchrotronowe, wtórne wiązki cząstek.
- Elementy budowy współczesnego akceleratora: komora próżniowa, magnesy odchylające, magnesy skupiające, wnęki rezonansowe, urządzenia do wprowadzania i wyprowadzania wiązek, punkty przecięcia wiązek w przypadku akceleratorów wiązek przeciwbieżnych.
- Przyszłość: wyższe energie i świetlnosci, być może przyspieszanie mionów i radioaktywnych jąder do wysokich energii.

Podstawowe pojęcia

- Nieodzowne elementy budowy akceleratora: źródło jonów (dodatnich lub ujemnych), różnica potencjałów (V_0), którą pokonują cząstki, podlegając przyspieszeniu, rura próżniowa, aby przyspieszane cząstki nie zderzały się z atomami gazu.
- Najprostszy akcelerator: układ dwu elektrod z różnicą potencjałów między nimi, np. rurki katodowe (czyli akcelerator w prawie każdym domu, bo mało kto nie ma w domu telewizora)
- Energia przyspieszanej cząstki o ładunku elementarnym:
$$E = e V_0$$

e - ładunek elektronu, V_0 - różnica potencjałów
- Jednostka energii: 1eV
 - energia uzyskiwana przez cząstkę o ładunku takim jak ładunek elektronu przyspieszana różnicą potencjałów 1V
- Skala energii:
$$1\text{TeV} = 10^3\text{GeV} = 10^6\text{MeV} = 10^9\text{keV} = 10^{12}\text{eV}$$

Przyspieszane cząstki

- **Dotychczas naładowane i trwałe**
- Pierwotnie przyspieszane były elektrony i lżejsze jony dodatnie, w szczególności protony
- Obecnie przyspiesza się też pozytony, antyprotony i ciężkie jony trwałych atomów - najcięższe dotychczas przyspieszane jony (do energii relatywistycznych) to jony ołowiu
- Najwyższe osiągnięte dotąd energie to trochę ponad 100 GeV w przypadku wiązek elektronów i pozytonów (akcelerator LEP w CERN, zamknięty w 2000 roku) oraz 1 TeV w przypadku wiązek protonów i antyprotonów (akcelerator Tevatron w Fermilab, planowane zamknięcie w 2009 roku), 160 GeV/n dla jonów ołowiu
- **Przyszłość? Wyższe energie, większe intensywności wiązek, być może przyspieszane będą miony i do wysokich energii radioaktywne jądra**

**2008 rok – start akceleratora LHC
(docelowo 7 TeV/ wiązkę protonów)**

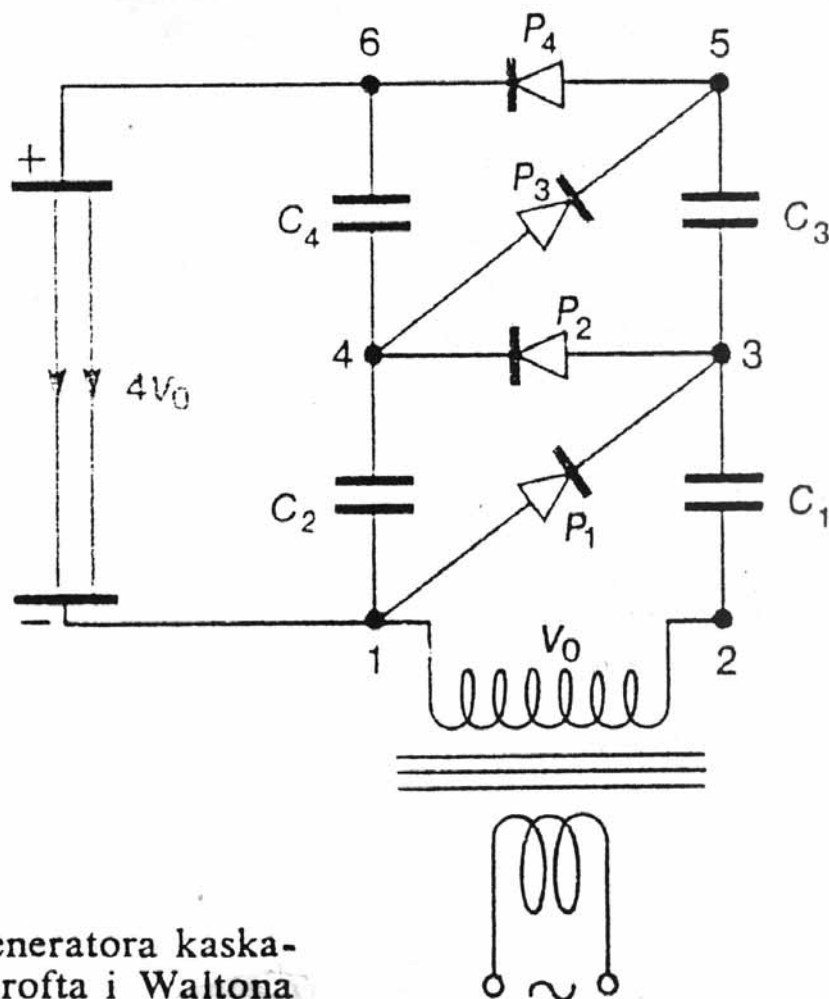
Typy akceleratorów

- **Akceleratory elektrostatyczne**
— maksymalizacja uzyskiwanej różnicy potencjałów, cząstki pokonują ją tylko jeden raz
- **Akceleratory liniowe**
— cząstki przyspieszane są wzdłuż całej drogi, o długości akceleratora i maksymalnej osiąganey energii cząstek decyduje uzyskany gradient napięcia na metr długości akceleratora
- **Akceleratory cykliczne**
— cząstki wielokrotnie przechodzą przez te same wnęki przyspieszające, każdorazowo uzyskując dodatkową energię, ograniczenie stanowi osiągnane natężenie pola magnetycznego w magnesach zakrzywiających cząstki w akceleratorze, a w przypadku przyspieszania elektronów i pozytonów może nim być energia tracona na skutek promieniowania synchrotronowego

Akcelerator elektrostatyczny z generatorem Cockrofta-Waltona

- Budowa: transformator z różnicą potencjałów V_0 na uzwojeniu wtórnym, układ kaskadowy prostowników i kondensatorów,
- Zasada działania: zwielokrotnienie różnicy potencjałów V_0 w kaskadzie (nV_0 przy n stopniach kaskady),
- Ograniczenie: przebicie elektryczne,
- Pierwszy akcelerator tego typu: zbudowany w 1932 roku, dawał różnicę potencjałów 600 kV w ostatnim stopniu kaskady, służył do badań jądrowych,
- Obecne akceleratory tego typu osiągają 10 MV i używane są jako pierwszy stopień przyspieszający, gdyż dają dużą moc prądu.

Akcelerator elektrostatyczny z generatorem Cockrofta-Waltona



Rys. 1. Schemat generatora kaskadowego typu Cockrofta i Waltona

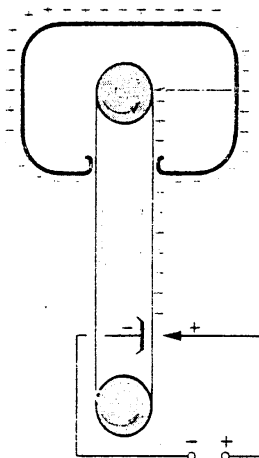
Po ukłpływie czterech półokresów prądu zmiennego między punktem 1 i punktem 6 kaskady występuje różnica potencjałów równa $4V_0$

Akcelerator elektrostatyczny z generatorem Van de Graaffa

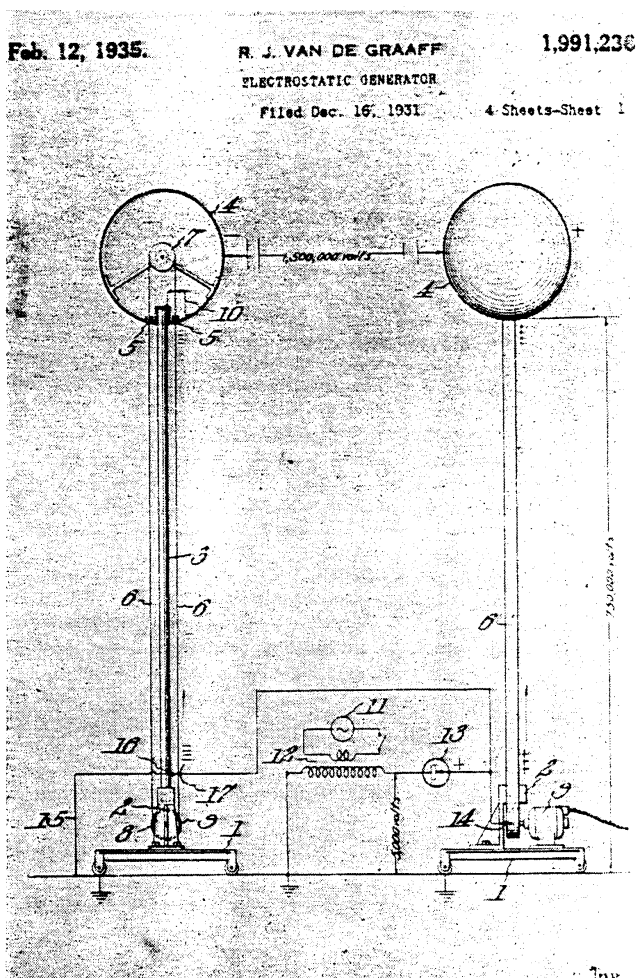
- Budowa: generator stosunkowo niskiego napięcia ładuje powierzchnię jedwabnego pasa przenoszącego ładunek do wnętrza metalowej puszkii, gdzie ładunek zdzierany jest z pasa za pomocą metalowej szczotki
- Ograniczenie stanowi przebicie elektryczne
- Pierwszy generator Van de Graaff zbudował w 1931 roku, składał się on z dwu identycznych urządzeń generujących przeciwny potencjał (750 kV względem ziemi, 1.5 MV względem siebie) -- *patrz rysunek na następnej stronie*
- Pierwszy akcelerator z generatorem tego typu: zbudowany na początku lat trzydziestych, przyspieszał protony i deuterony do energii 0.6 MeV
- Obecne generatory Van de Graaffa osiągają 20-30 MV, używane są jako pierwszy stopień przyspieszający, np. w zespole akceleratorów w Brookhaven

Akcelerator elektrostatyczny z generatorem Van de Graaffa

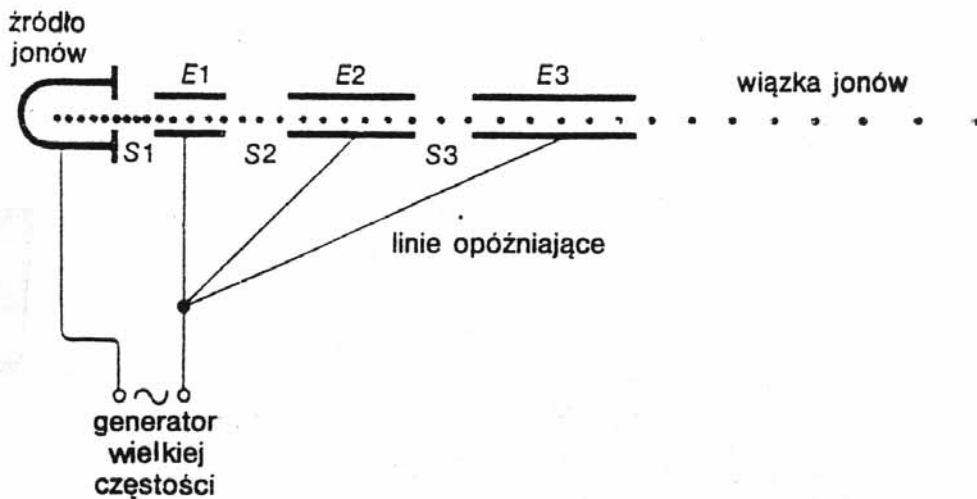
Rysunek z ogłoszenia patentowego generatora Van de Graaffa z 1935 roku



Rys. 4. Schemat generatora Van de Graaffa



Akcelerator liniowy ze zmiennym polem elektrycznym

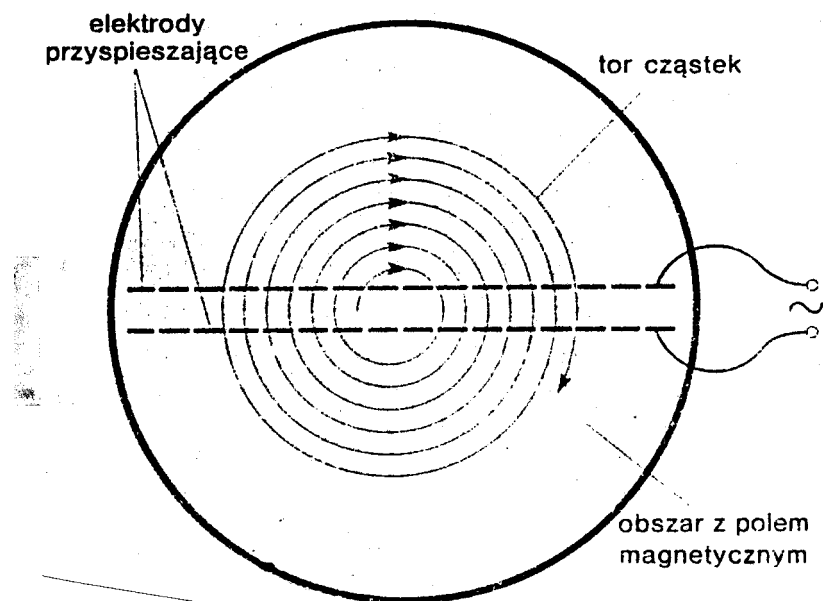


- W pierwszych akceleratorach liniowych (rysunek, lata 30-te XX-go wieku)) generator zmiennego napięcia połączony był z elektrodami (E_i) przez linie opóźniające, a zmienne pole elektryczne w obszarach między elektrodami (S_i) przyspieszało cząstki
- Elektrody osłaniały cząstki w czasie, gdy w obszarach S_i znana była pole było przeciwny niż potrzebny do przyspieszania, stąd wydłużające się elektrody w miarę wzrostu prędkości cząstek
- Po wojnie duży postęp w akceleratorach liniowych dzięki rozwojowi techniki mikrofal i generatorów wysokiej częstotliwości -- pole przyspieszające porusza się wraz z cząstkami wzdłuż rury akceleratora
- Inną ważną rzeczą w konstrukcji tych akceleratorów jest samoogniskowanie się cząstek (trochę za wolne cząstki trafiają na silniejsze pole i nabierają więcej energii, a trochę za szybkie cząstki trafiają na słabsze pole i zwalniają)
- Największy współczesny akcelerator liniowy działał w SLAC (USA), dając energię w środku masy zderzenia ~ 90 GeV

Akceleratorzy cykliczne

- Pod wpływem pola magnetycznego cząstki poruszają się po torach zbliżonych do okręgu i przyspieszane są za pomocą zmiennego pola elektrycznego

Cyklotron



- Historycznie pierwszy akcelerator cykliczny
- Cząstki poruszają się w jednorodnym polu magnetycznym prostopadle do linii pola z czasem obiegu
$$T = 2 \pi r / v = 2 \pi m c / e B$$
gdzie r jest promieniem orbity cząstki, v , m , e to jej prędkość, masa i ładunek, B - natężenie pola magnetycznego, c - prędkość światła. Cząstki przyspieszane są w każdym obiegu przy przejściu między elektrodami przyspieszającymi
- Czas obiegu cząstki początkowo nie zależy od energii cząstek promień toru rośnie z prędkością cząstki
- Ograniczenie stanowi relatywistyczny wzrost masy cząstki, przez co rośnie też T i cząstka zaczyna być nie w fazie z polem elektrycznym, kiedy dociera do przerwy między elektrodami

Akceleratory cykliczne

Problem próbowano rozwiązać na trzy sposoby:

1. Synchrocyclotron

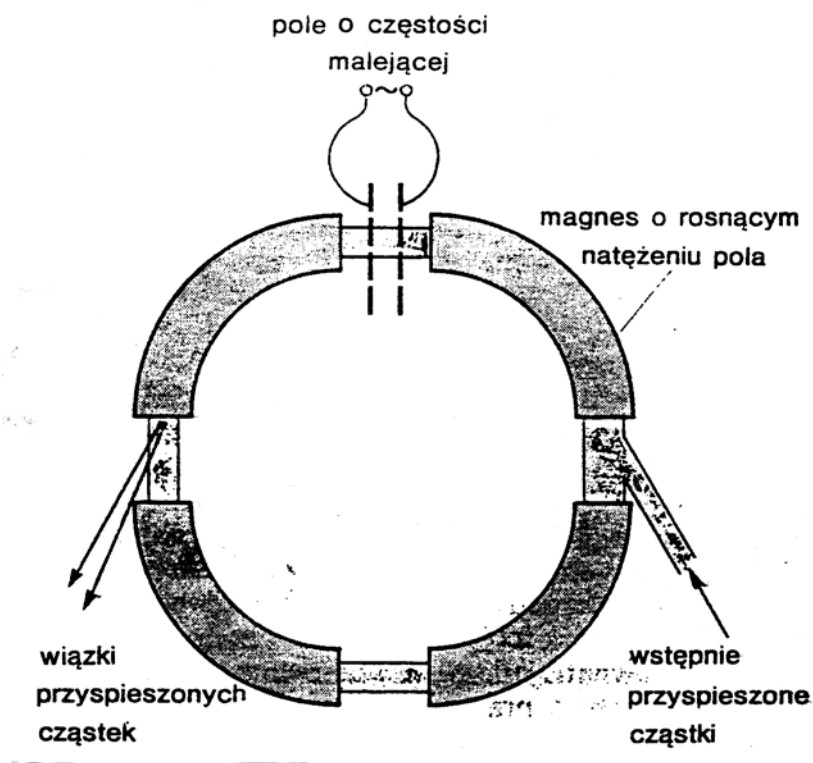
Ze wzrostem energii i okresu obiegu cząstki zmniejsza się częstość przyspieszającego pola -- częstość pola i okres obiegu cząstki są zsynchronizowane, stąd nazwa akceleratora, w synchrocyclotronie osiągnięto energię ok. 700 MeV, dalszy wzrost energii ograniczony był możliwościami i kosztami budowy większego magnesu (w cyclotronie i synchrocyclotronie duanty magnesu są dużymi dyskami, obejmującymi cały tor cząstki od jej praktycznie zerowej energii początkowej po energię końcową)

2. Cyclotron izochroniczny

Utrzymywano stały okres obiegu cząstki przez zwiększenie natężenia pola magnetycznego kompensujące wzrost masy cząstki, modulacja pola magnetycznego przez odpowiednie modyfikacje kształtu nabiegunników magnesu -- dobre zrobienie tego jest trudne technicznie, więc dużo cząstek wypadało z procesu przyspieszania -- to rozwiązanie stanowiło raczej ślepą ścieżkę w rozwoju techniki akceleratorowej

Akceleratory cykliczne

3. Synchrotron

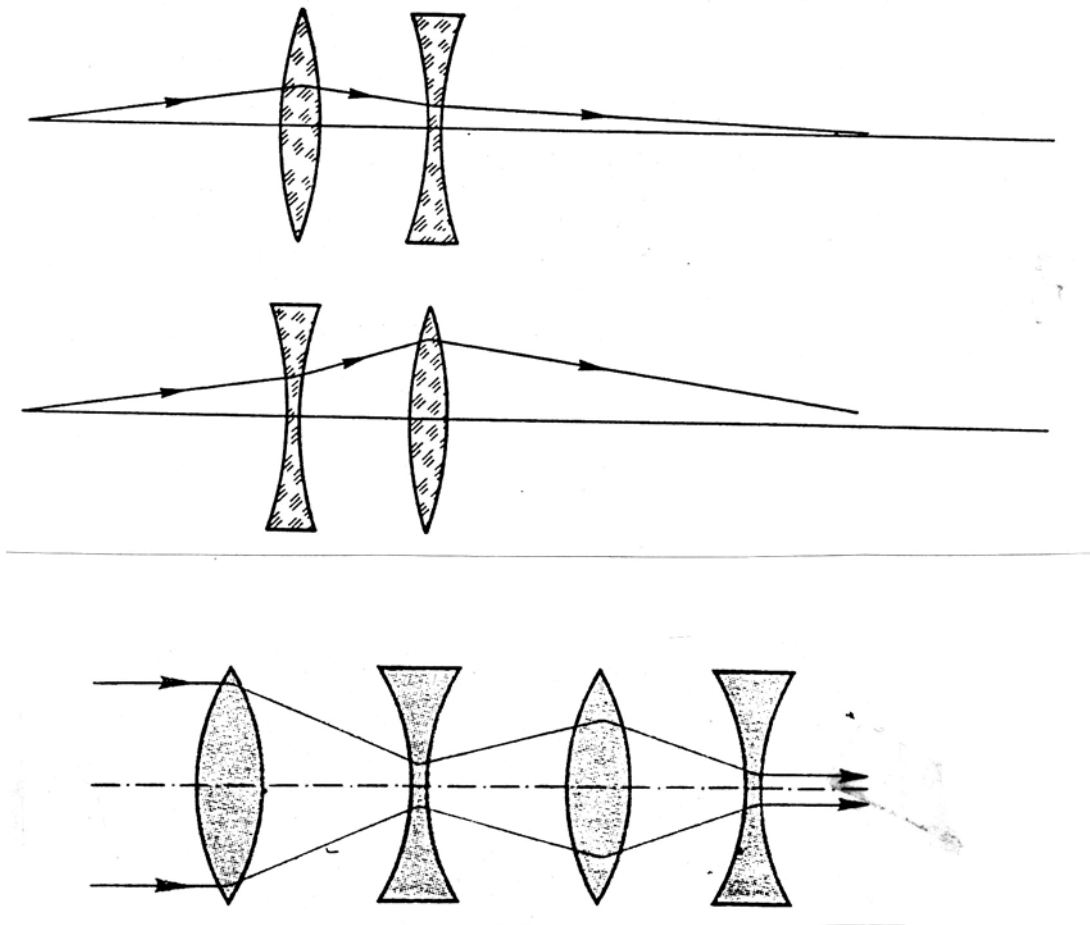


Współczesny akcelerator cykliczny

- Przyspieszane cząstki krążą po stałych orbitach, co otworzyło (technicznie i finansowo) możliwość przyspieszania cząstek do naprawdę wysokich energii
- Procesowi przyspieszania cząstek towarzyszy zarówno zmiana natężenia pola magnetycznego, jak i częstości przyspieszającego pola elektrycznego
- Pierwsze synchrotrony funkcjonowały w oparciu o tzw. słabe ogniskowanie czyli wyposażone były tylko w magnesy dipolowe do zakrzywiania torów cząstek, przez co próżniowa rura wokół stałej orbity i magnesy obejmujące rurę były duże, najwyższa energia uzyskana w tego typu synchrotronie wynosiła 10 GeV

Synchrotron z silnym ogniskowaniem

Zasadniczy postęp w rozwoju synchrotronów nastąpił dzięki wynalazkowi tzw. silnego ogniskowania -- wszystkie współczesne akceleratory cykliczne to synchrotrony z silnym ogniskowaniem.

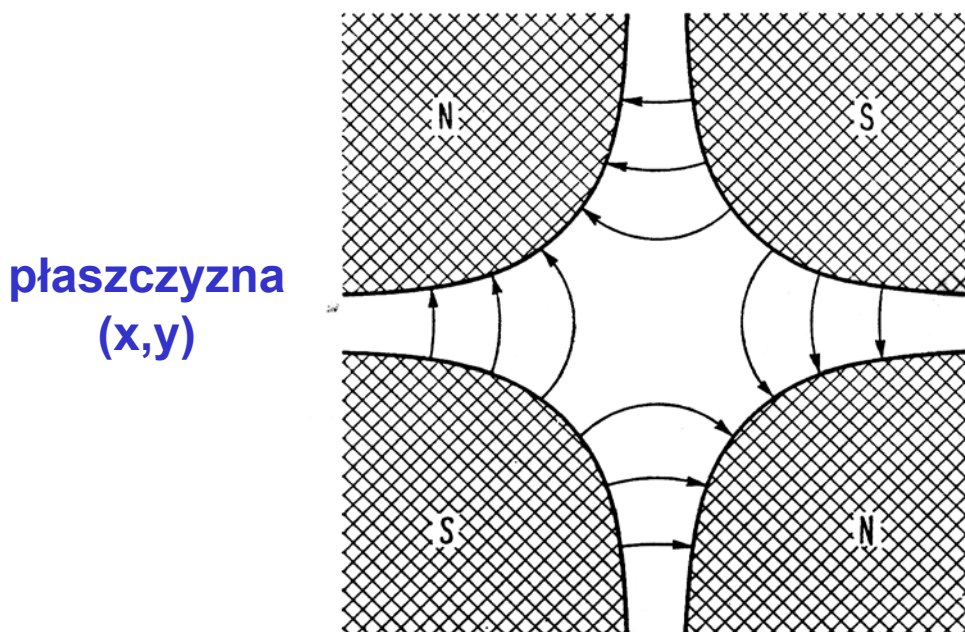


Analogia optyczna ilustrująca zasadę silnego ogniskowania

Wiązka optyczna przechodząca przez układ złożony z soczewek skupiających i rozpraszających podlega ostatecznie skupieniu. Podobnie jest z wiązką cząstek przechodzących kolejno przez magnesy skupiające i rozpraszające.

Synchrotron z silnym ogniskowaniem

Zasada silnego ogniskowania wiązki polega na zastosowaniu układu magnesów, które na przemian skupiają i rozpraszają wiązkę przyspieszanych cząstek, przez co ostatecznie otrzymuje się wiązkę bardzo małych rozmiarów



II.16. Pole w soczewce kwadropolowej

Soczewki kwadropolowe i wyżej polowe służą do skupiania wiązek w akceleratorach

Pojedyncza soczewka kwadropolowa skupia wiązkę w jednej współrzędnej (np x) i rozprasza w drugiej (np y). Układ dwu soczewek z nagiegunnikami obróconymi o 90° względem siebie działa skupiająco w obu płaszczyznach.

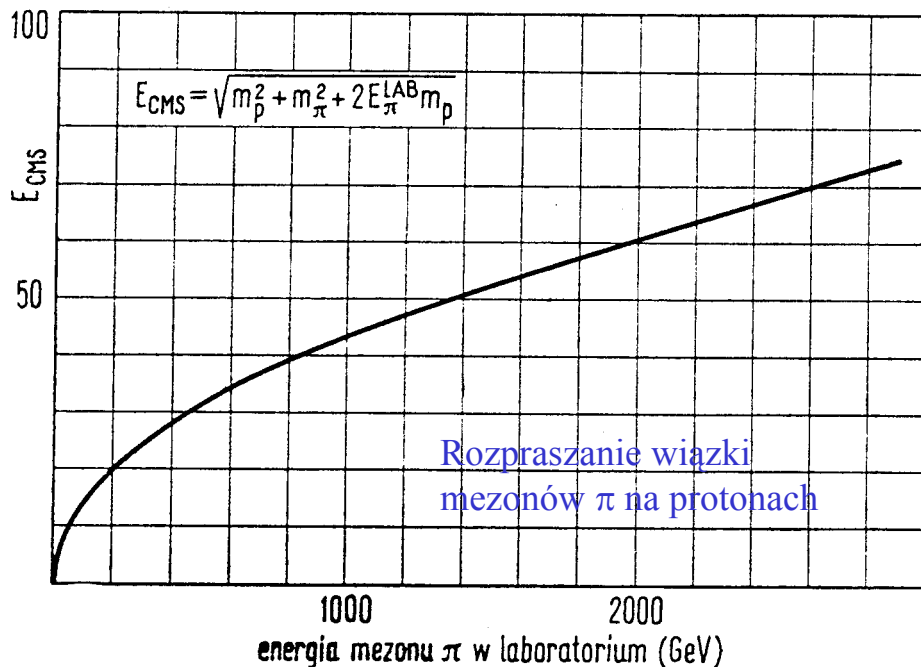
Dla przykładu, akcelerator LEP posiadał kilka tysięcy magnesów skupiających wiązki. Dzięki temu komora próżniowa obejmująca wiązki e^+ i e^- miała średnicę kilkunastu cm.

Energia na produkcję cząstek

To energia w układzie środka masy zderzenia - im wyższa, tym większe możliwości znalezienia nowych cząstek o dużej masie (np. kwark t został odkryty dopiero kilka lat temu, bo “waży” ponad 170 GeV)

Energia w środku masy dla zderzenia cząstki z wiązki z akceleratora (o masie m_2 i energii E) ze spoczywającą cząstką tarczy (o masie m_1 wynosi:

$$E^* = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2 E m_2}$$



Związek między energią w układzie środka masy a energią wiązki dla zderzenia wiązki mezonów π z tarczą protonową

Jak widać z wykresu, zaledwie mała część energii wiązki idzie na produkcję nowych cząstek, dużo energii traci się na ruch układu środka masy zderzenia

Energia na produkcję cząstek; Zderzacze

Z punktu widzenia wykorzystania energii na produkcję cząstek idealna sytuacja ma miejsce w przypadku czołowego zderzenia cząstek (elementarnych) z dwu wiązek, z których każda przyspieszona została do energii E :

$$E^* = 2 E$$

gdyż cała energia uzyskana w procesie przyspieszania idzie na produkcję cząstek. Taka sytuacja realizuje się w zderzeniu e^+e^- . W zderzeniu pp czy anty-pp jest trochę gorzej, gdyż energia rozkłada się między kwarki.

Akselatory wiązek przeciwbieżnych (zderzacze)

- To urządzenia, w których przyspiesza się i zderza cząstki z dwu przeciwbieżnych wiązek, a więc maksymalizuje energię na produkcję cząstek.
- **Pierwszy taki akcelerator dla zderzeń pp zbudowany został w CERN-ie na samym początku lat siedemdziesiątych**
- **Najwyższe dotychczas uzyskane energie w akceleratorach wiązek przeciwbieżnych: 2 TeV- w zderzeniach p-antyp (Fermilab w USA), 209 GeV w zderzeniach e^+e^- (LEP w CERN-ie)**
- W dotychczas zbudowanych zderzaczach zderzają się wyłącznie cząstki trwałe, ale rozpoczęły się prace nad możliwością zbudowania zderzacza leptonów μ

Świetlność akceleratora $\circ$

Jest to współczynnik proporcjonalności między liczbą zarejestrowanych zdarzeń odpowiadających określonemu procesowi fizycznemu (np. produkcji kwarku t w zderzeniach pp przy energii 2TeV) a fizycznym przekrojem czynnym na ten proces

$$N_{\text{zdarzeń}} = \circ \sigma$$

Im wyższa świetlność akceleratora, tym rzadsze procesy możemy zmierzyć, nie poświęcając na zbieranie danych zbyt wielu lat (10 lat - typowa skala czasowa eksperymentu z fizyki cząstek).

Świetlność charakteryzuje akcelerator -- dla akceleratora przeciwbieżnych wiązek najprościej definiuje się ją następująco:

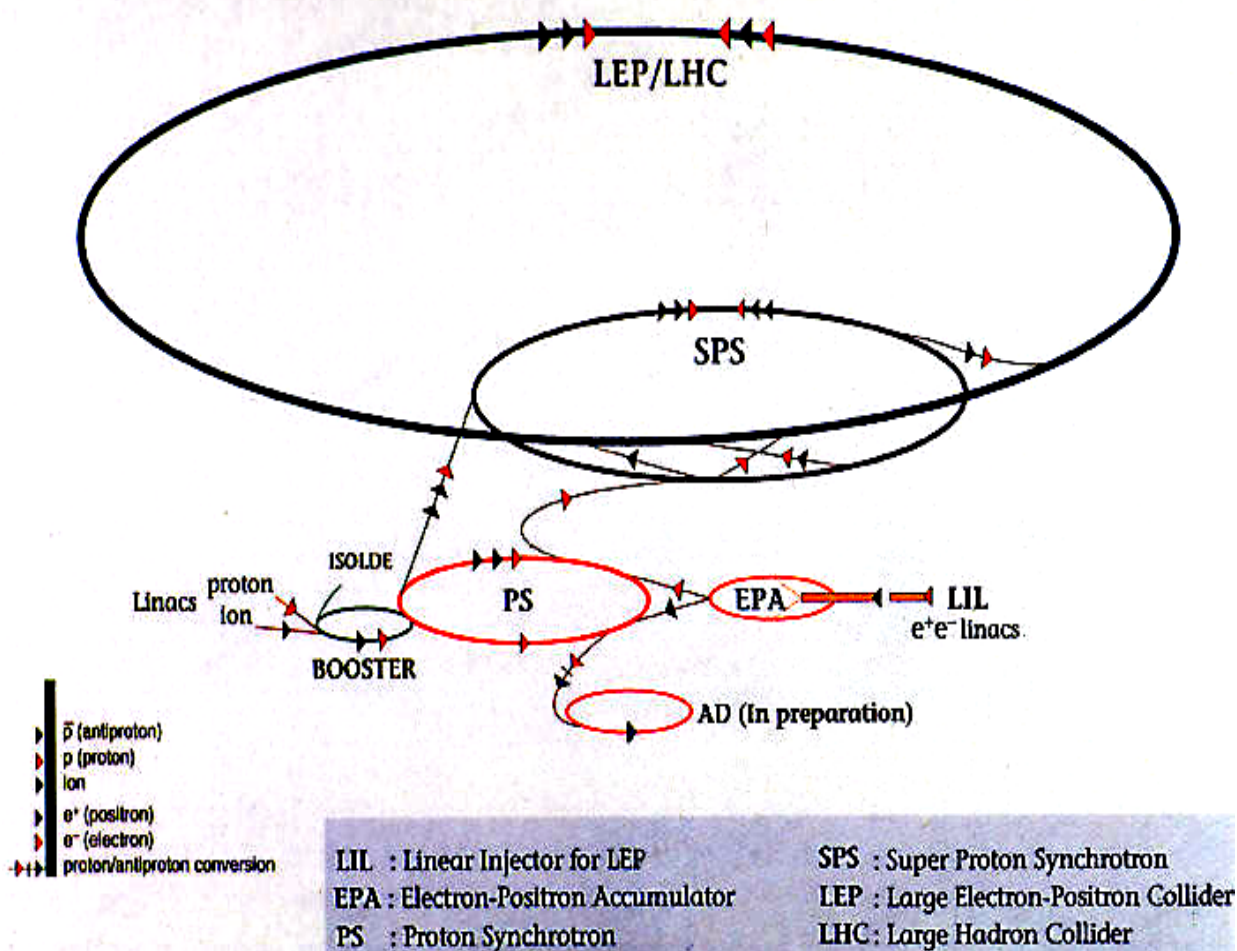
$$\circ @ 427\pi (k_b N_1 N_2 f_{\text{rev}}) / (\sigma_x \sigma_y)$$

gdzie k_b to liczba krążących pęczków, N_1 i N_2 to liczby cząstek w pojedynczym pęczku każdej wiązki, f_{rev} to częstość obiegu cząstek w akceleratorze, a σ_x i σ_y to poprzeczne wymiary przenikających się wiązek w punkcie zderzenia

Licznik wzoru charakteryzuje więc całkowitą liczbę przyspieszanych cząstek na jednostkę czasu (im więcej cząstek, tym większa świetlność akceleratora), a mianownik stopień skupienia wiązek w miejscu zderzenia (im lepiej potrafimy je skupić, tym wyższa jest świetlność akceleratora). Zwiększanie liczby przyspieszanych cząstek jest kosztownym sposobem zwiększania świetlności, więc opłaca się włożyć wysiłek w coraz lepsze skupianie wiązek

Wielostopniowy proces akceleracji na przykładzie akceleratorów w CERNie

CERN's Chain of Accelerators



Przyspieszenie cząstek od prawie zerowej energii do energii rzędu GeV czy TeV wymaga kilku akceleratorów, z których każdy zoptymalizowany jest dla części tego zakresu energii -

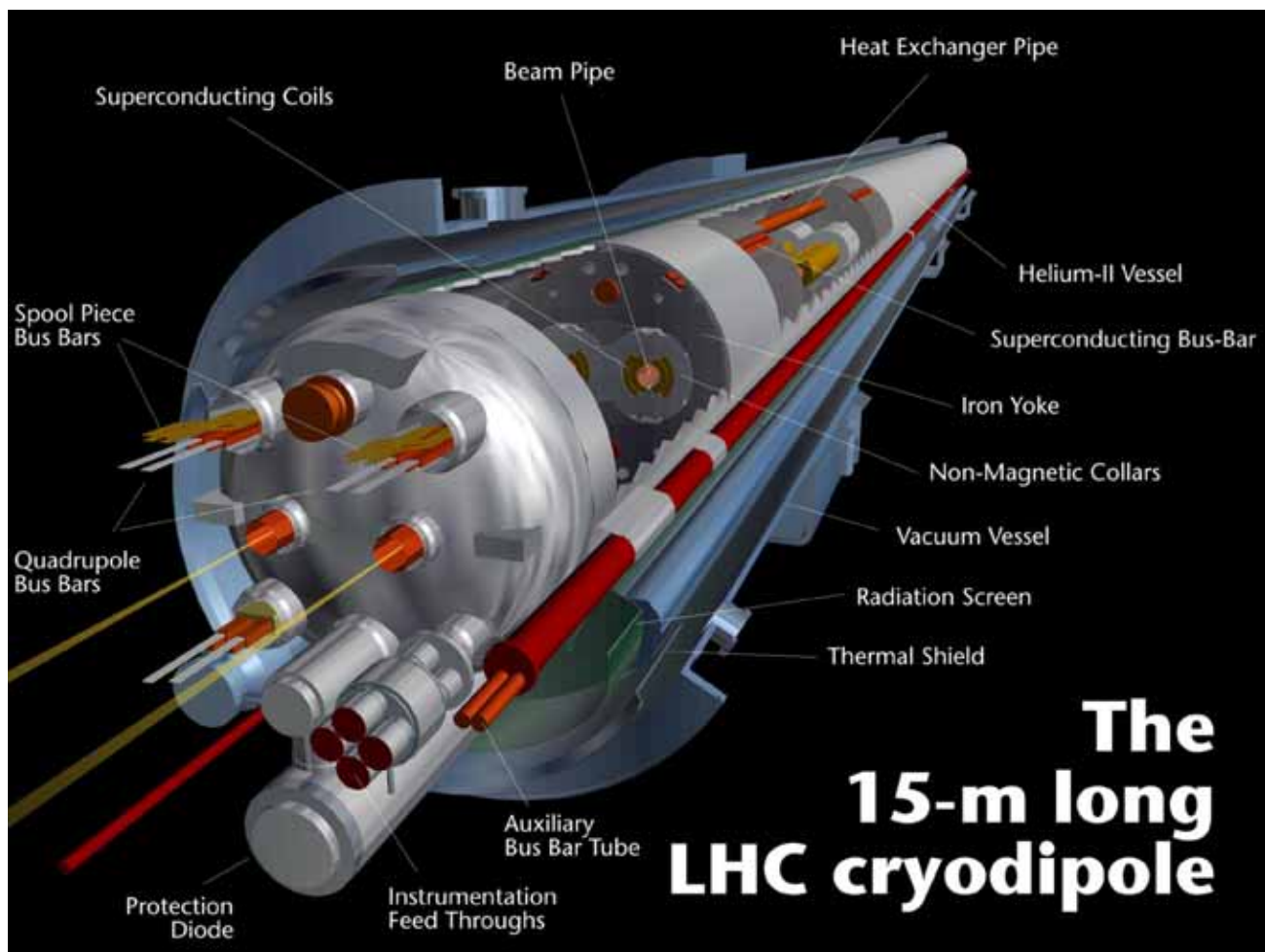
Na następnych stronach pokazane są fotografie z budowy akceleratora LHC oraz akceleratorów, stanowiących kolejne stopnie przyspieszania protonów w Fermilabie

Konstrukcja akceleratora LHC w CERN-ie – rok 2007

Underground

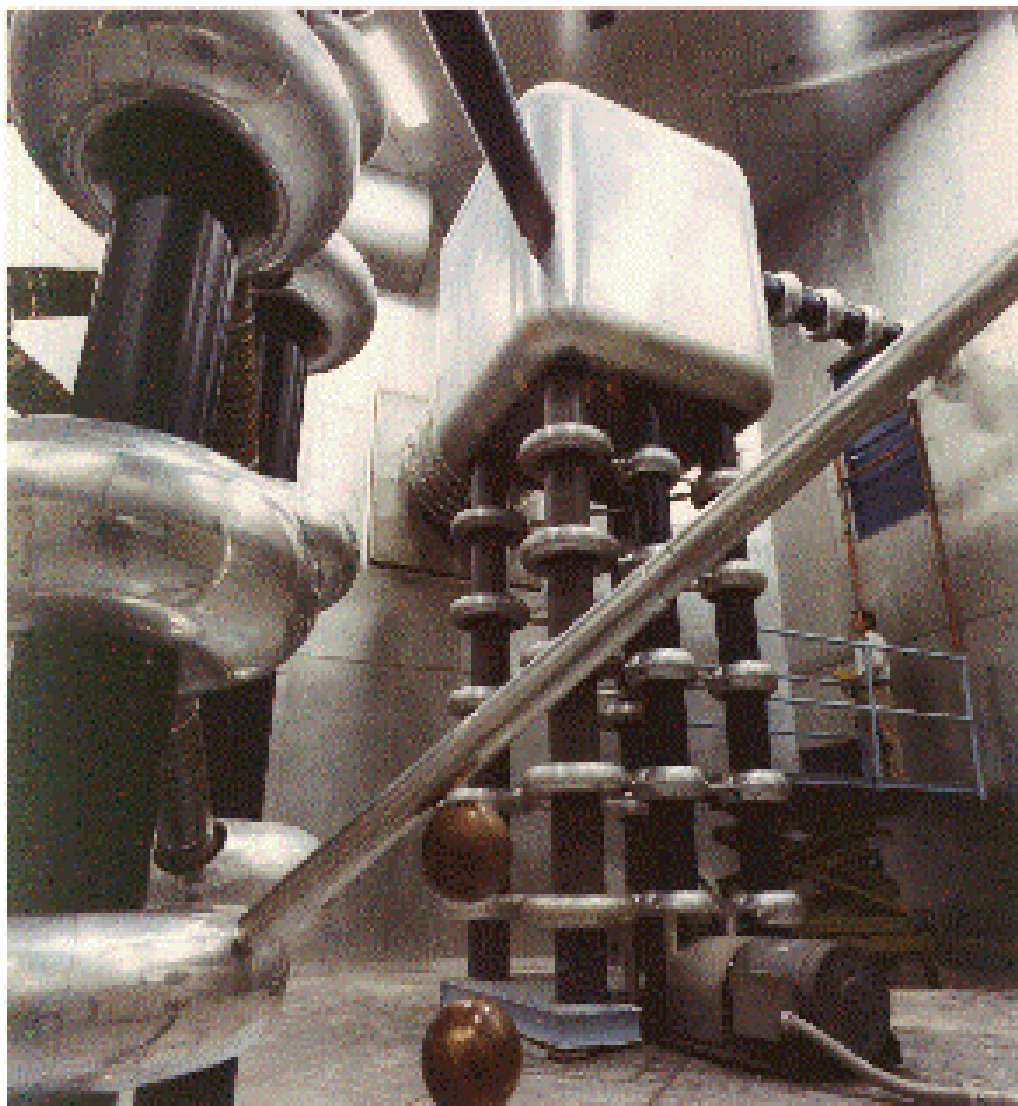


Prace z udziałem inżynierów i techników
z IFJ w Krakowie



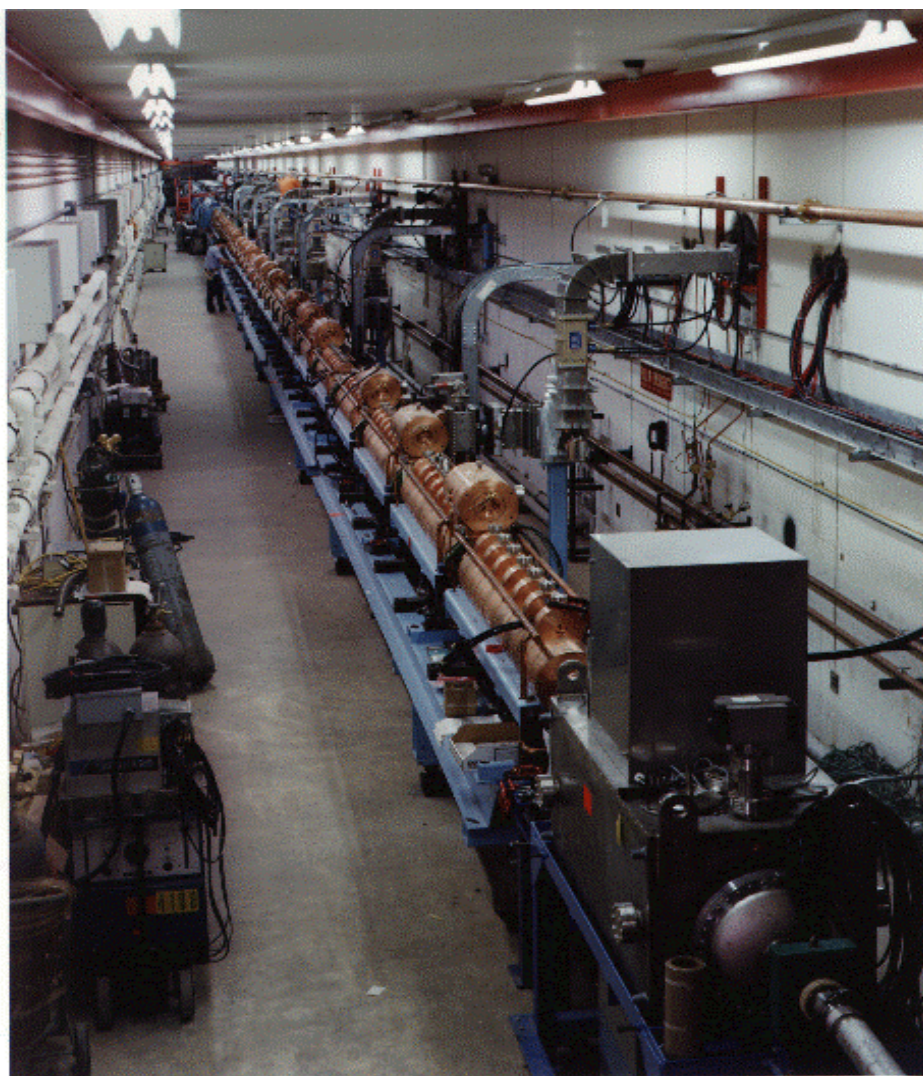
1232 dipole nadprzewodzące

Akceleratorzy w Fermilab (USA)



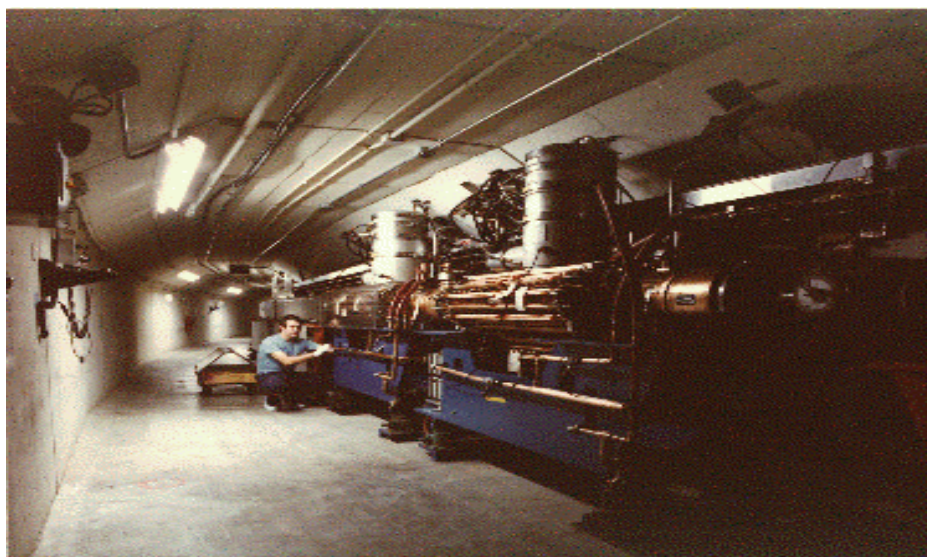
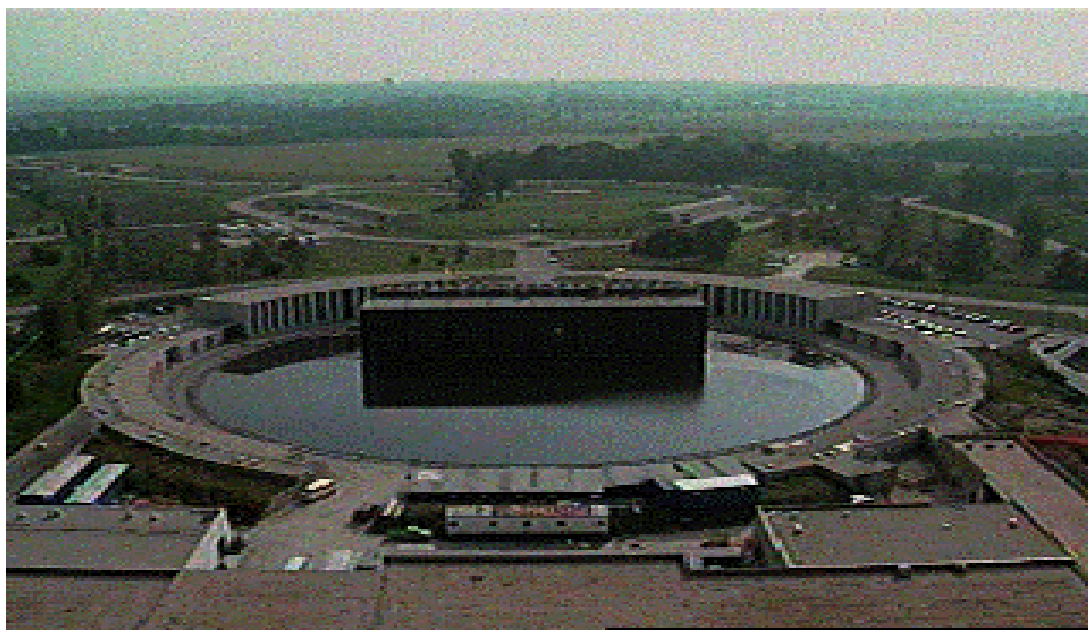
Źródło jonów i akcelerator elektrostatyczny z generatorem Cockrofta-Waltona, stanowiący pierwszy stopień przyspieszania protonów do energii 750 keV

Akceleratorzy w Fermilab (USA)



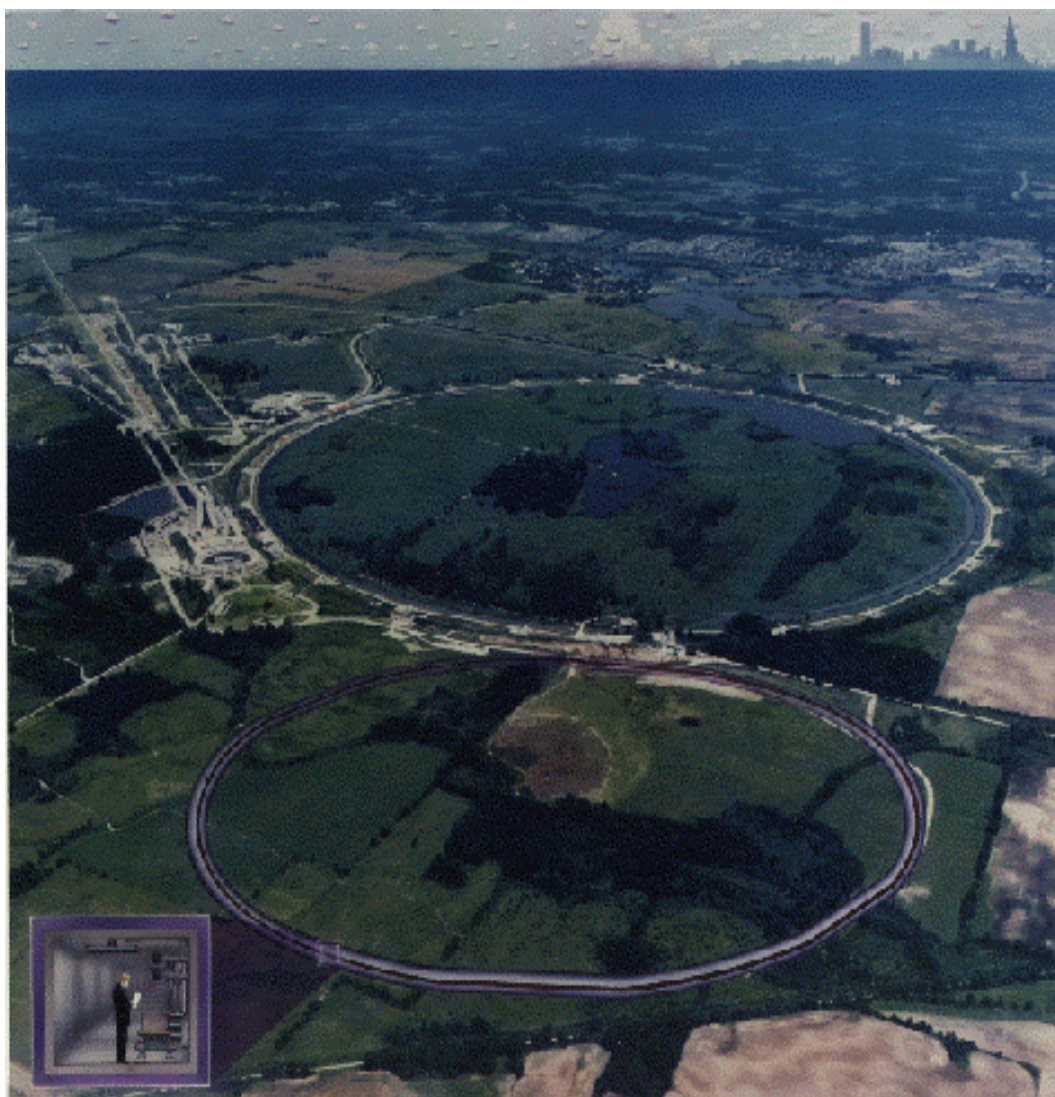
Drugi stopień przyspieszania stanowi akcelerator liniowy — cząstki przyspieszane są w nim do energii 400MeV. Pierwsze cztery sekcje zawierają elektrody osłaniające o zmiennej długości, pozostałe sekcje (na obrazku) są tej samej długości

Akceleratorzy w Fermilab (USA)



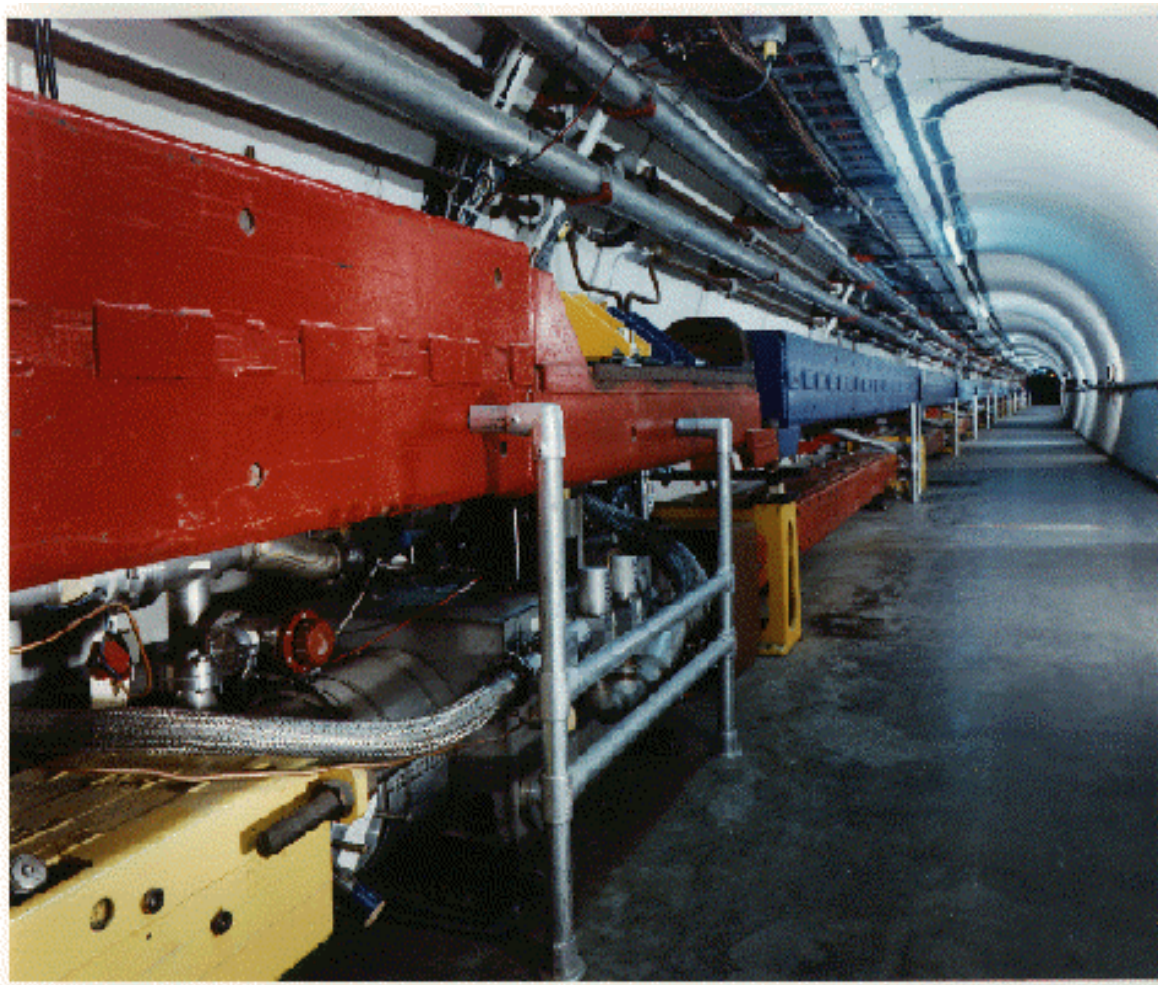
Trzeci stopień przyspieszania stanowi booster — synchrotron przyspieszający cząstki do energii 8GeV po około 20 tysiącach obiegów

Akceleratorzy w Fermilab (USA)



Kolejne dwa synchrotrony to „Main Injector” przyspieszający protony i antyprotony do 150GeV oraz Tevatron (akcelerator przeciwbieżnych wiązek), w którym obie wiązki przyspieszane są do docelowej energii 1TeV -y

Akceleratorzy w Fermilab (USA)



**Akceleratorzy w głównym tunelu — Tevatron i „Main Ring” (poprzednik „Main Injector-a”)
- poprzednia sytuacja, obecnie Main Injector znajduje się w oddzielnym tunelu**

Wiązki wtórne

Badania oddziaływań cząstek nietrwałych lub neutralnych, np. mezonów π i K , leptonów μ , fotonów, neutrin prowadzi się w oparciu o wiązki wtórne, formowane po wyprowadzeniu z akceleratora pierwotnej wiązki protonów



**Eksperymenty wykorzystujące wiązki wtórne
— widok linii wiązek w Fermilab-ie w USA**

Promieniowanie synchrotronowe

Cząstki krążące po orbicie kołowej tracą energię na wypromieniowanie fotonów. Radiacyjne straty energii na jeden obrót dla pojedynczej cząstki wynoszą:

$$U_0 = \text{const} \times (E_b^4 / \rho), \quad \text{const} = 4 \pi / c (r_e / E_0^3)$$

gdzie r_e to promień elektronu, E_0 - energia spoczynkowa cząstek wiązki, E_b - energia wiązki, a ρ - promień akceleratora.

Jak widać, straty radiacyjne rosną z malejącą masą cząstki i rosnącą energią jak czwarta potęga i stanowią rzeczywiste ograniczenie dla przyspieszania wiązek e^+ i e^- w akceleratorach cyklicznych. Zwiększanie promienia akceleratora niewiele daje, gdyż straty radiacyjne maleją z promieniem zaledwie liniowo.

Dla przykładu, w akceleratorze LEP o promieniu ok. 4300 m przyspieszającym wiązki e^+ i e^- , straty radiacyjne na pojedynczą cząstkę przyspieszoną do energii 45 GeV (energia dla badań bozonu Z) wynosiły 0.084 GeV na obieg, a dla cząstki przyspieszonej do energii 100 GeV - już 2.058 GeV na obieg.

Oznacza to znaczny wzrost kosztów akceleracji i dlatego LEP był ostatnim akceleratorem kołowym do przyspieszania wiązek e^+ , e^- . Następny zderzacz e^+e^- musi być akceleratorem liniowym.

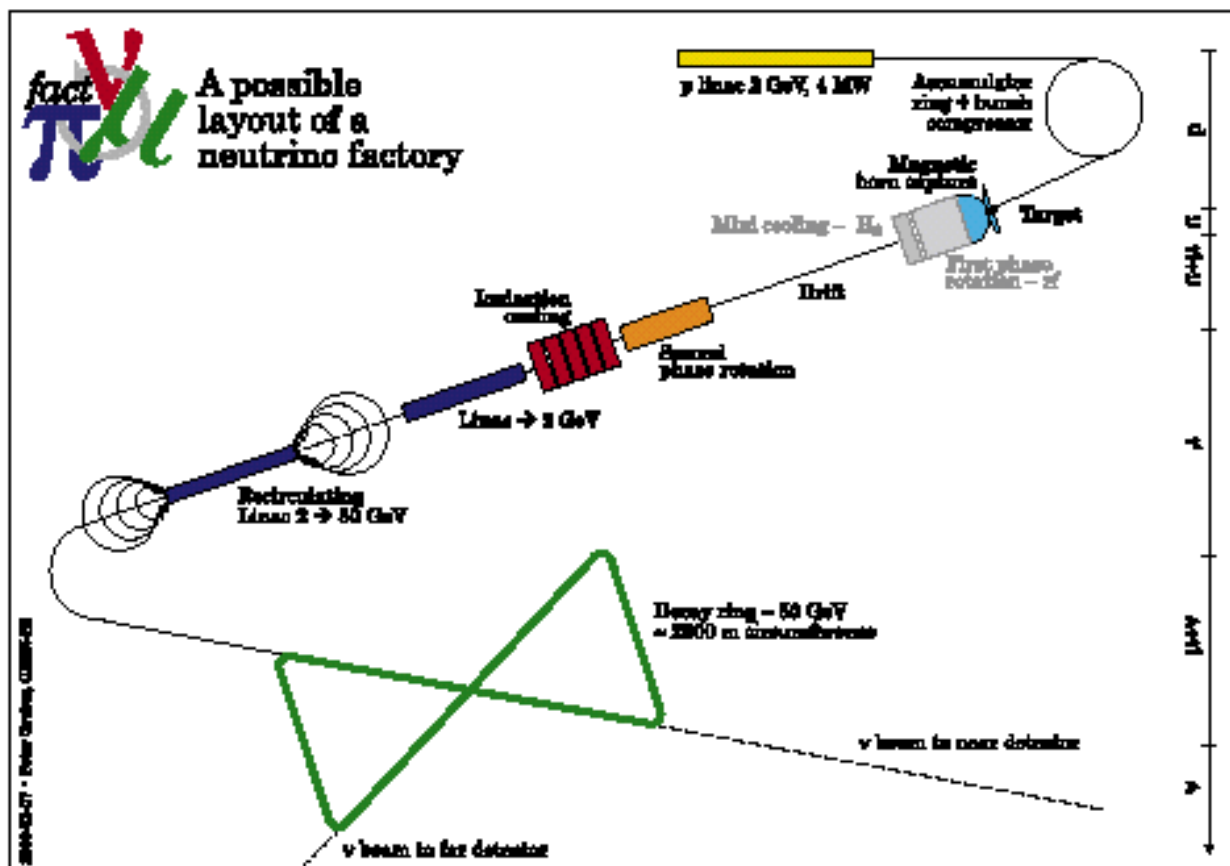
Podstawowe elementy budowy cyklicznego zderzacza

- Komora próżniowa (typowo o średnicy kilkunastu cm)
- Zakrzywiające magnesy dipolowe, służące do prowadzenia wiązek po orbicie wyznaczonej kształtem komory próżniowej
- Kwadrupolowe i wyżej polowe magnesy do skupiania wiązek na dobrze określonej orbicie
- Wnęki rezonansowe do przekazywania energii przyspieszanym cząstkom
- Miejsca przecięcia wiązek, które otacza się detektorami do rejestracji cząstek powstających w wyniku zderzeń cząstek z wiązek

Kierunki rozwoju

- Coraz wyższe energie celem poszukiwania i zbadania nowych, ciężkich cząstek:
LHC (2008, CERN) -- 2* 7TeV w zderzeniach pp, prowadzone są prace nad przyszłym liniowym zderzaczem e^+e^- (od 350 GeV do 1 TeV)
- Coraz wyższe świetlności celem zmierzenia bardzo rzadkich procesów, np. tzw. fabryki B i fabryka K.
- Pierwszy zderzacz ciężkich jonów w 2000 roku rozpoczął pracę w Brookhaven, a planowane są zderzenia ciężkich jonów w LHC.
- Prowadzone są prace nad nowymi typami akceleratorów jak fabryki neutrin, zderzacze mionów czy przyspieszanie radioaktywnych jąder do wysokich energii

XXI wiek - fabryki neutrin, zderzacze mionów



Wytwarzanie wiązek neutrin:

- obecnie: neutrina mionowe z rozpadów mezonów π
- Przyszłość: neutrina mionowe i elektronowe z rozpadów mionów