



WSTĘP DO FIZYKI JADRA ATOMOWEGO

Wykład – 12

Wiedza i Życie

IV ROK FIZYKI - semestr zimowy

Janusz Braziewicz - Zakład Fizyki Atomowej IF AŚ

Metody przyspieszania cząstek - akceleratory cząstek

Akcelerator – urządzenie służące do wytwarzania promieniowania jądowego przez przyspieszanie cząstek naładowanych do wysokich energii

Typy:

- akceleratory liniowe – cząstka porusza się w procesie przyspieszania po linii prostej
- akceleratory kołowe – tor cząstki jest zakrzywiany w odpowiednim polu magnetycznym
- akceleratory hybrydowe



Metody przyspieszania cząstek - akceleratory cząstek

Własności akceleratorów charakteryzują:

- typy cząstek, jakie mogą być przyspieszane
- energie do jakich akcelerator może przyspieszać cząstki
- rozrzut energii cząstek otrzymywanych z akceleratora
- zachowanie się akceleratora w czasie
- natężenie i geometria wiązki

Każda instalacja akceleracyjna zawiera następujące elementy:

- źródło cząstek,
- akcelerator, w którym cząstki są przyspieszane
- system transportu i rozprowadzania wiązki

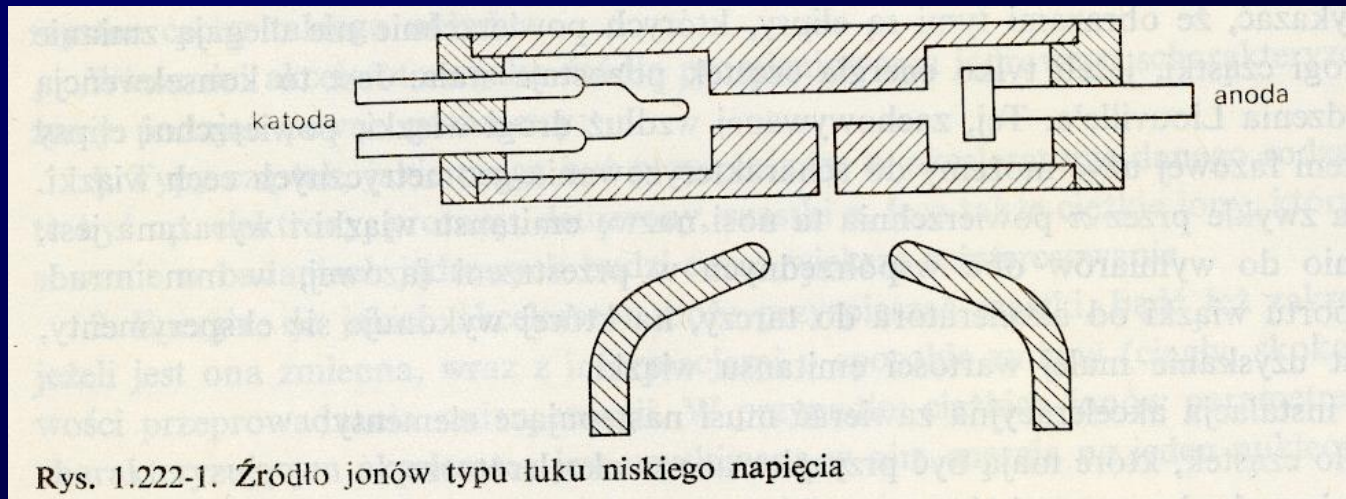
Źródła jonów

Jony wytwarza się w wyładowaniu elektrycznym

Warunki jakie musi spełniać źródło jonów:

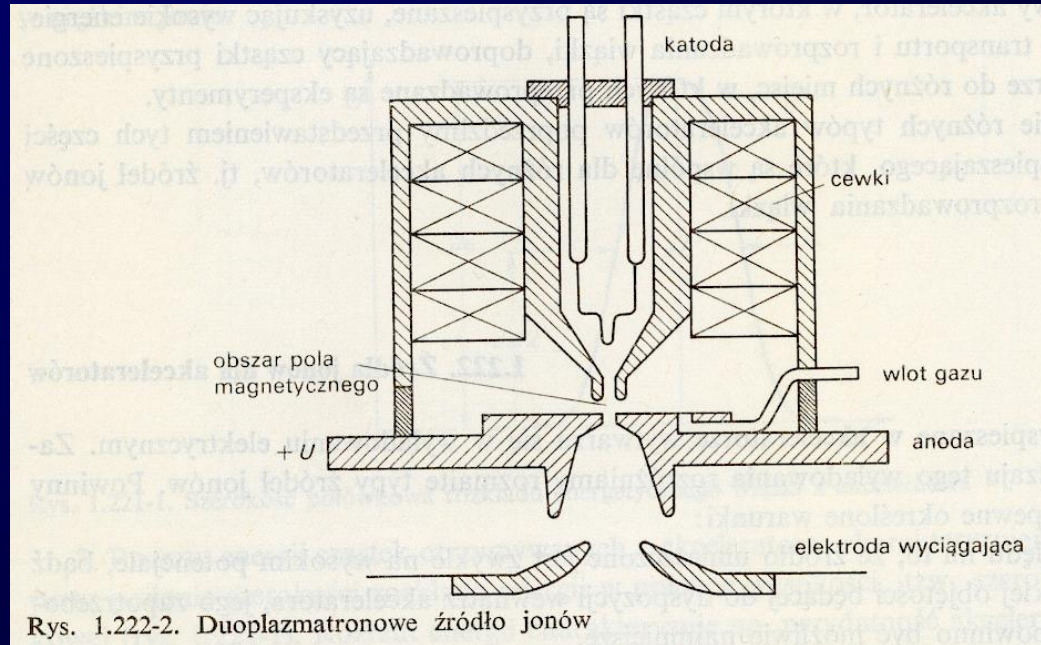
- ze względu na to, że źródło umieszczone jest zwykle na wysokim potencjale, bądź też w niewielkiej objętości będącej do dyspozycji wewnątrz akceleratora, jego zapotrzebowanie mocy winno być jak najmniejsze
- do źródła jonów doprowadzamy gaz, który ma być zjonizowany. Z drugiej strony, w systemie akceluracyjnym musimy utrzymywać bardzo dobrą próżnię, by unikać strat w zderzeniach z resztkami gazu. Ponieważ źródło jest połączone bezpośrednio z akceleratorem, żądamy, by ilości gazu wprowadzane przez nie do systemu akceluracyjnego były możliwie najmniejsze
- źródła winny dostarczać jonów jednego rodzaju

Źródło łukowe



Źródło duoplazmatronowe

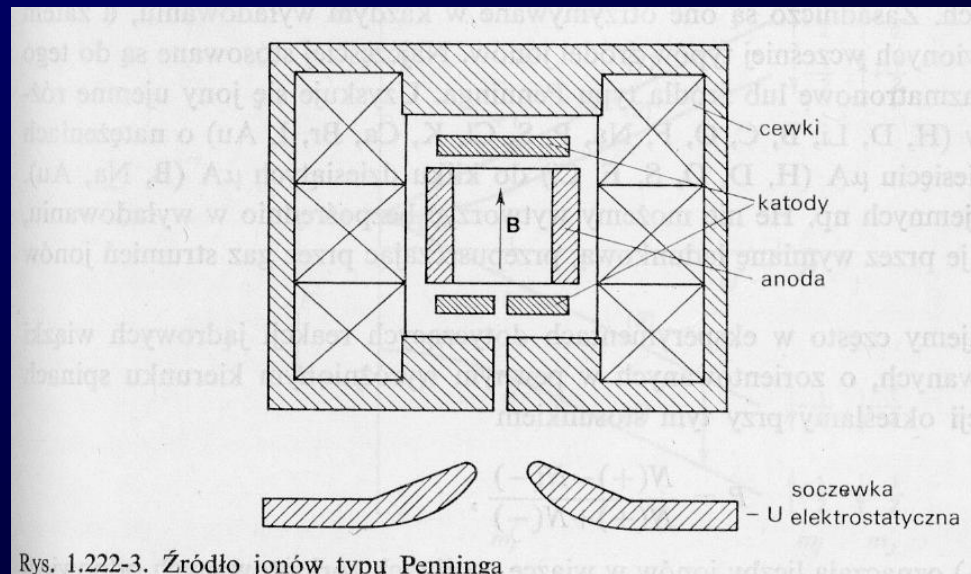
- Jeszcze większe gęstości, dzięki zastosowaniu silnego pola magnetycznego w obszarze między jedną płaską a drugą stożkową elektrodą



Dynamiczne działanie tego pola na prąd jonów powoduje znaczne skurczenie strugi prądu, tak że uzyskujemy w małej objętości silnie zjonizowaną plazmę, z której wyciągać możemy z dużą wydajnością jony

Źródło Penninga

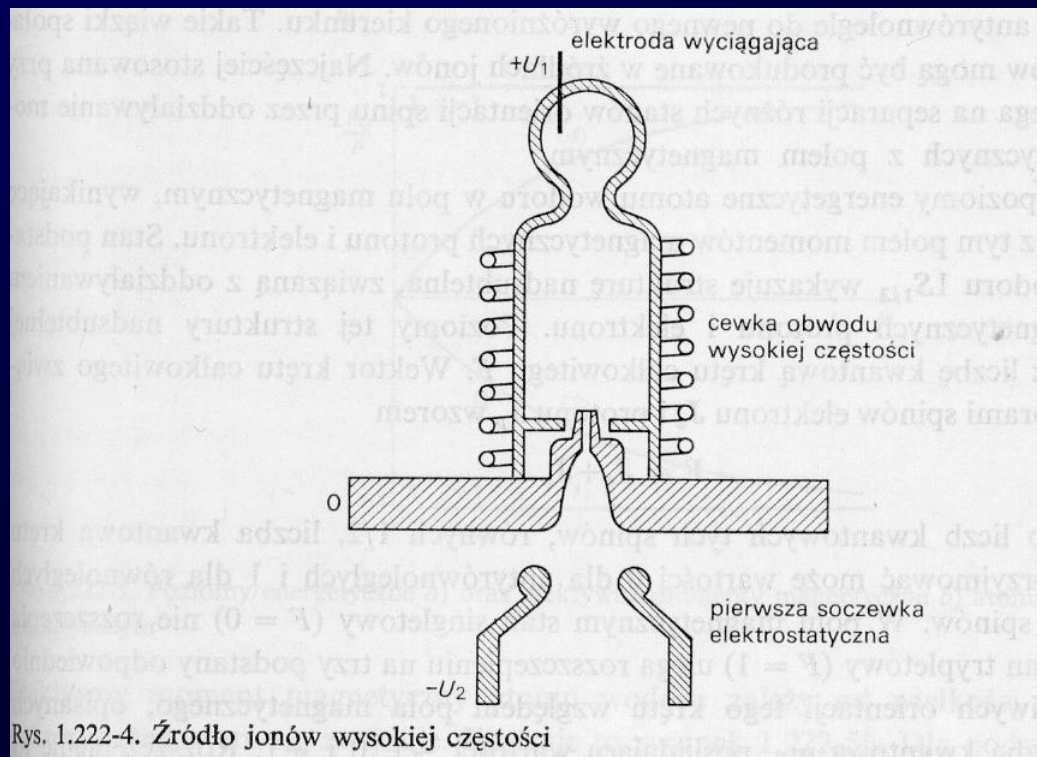
- powiększenie wydajności jonizacji przez zwiększenie drogi elektronów, zmuszając je do oscylacji w obszarze wewnątrz cylindrycznej anody między dwoma zamykającymi ten cylinder płaskimi katodami



Zastosowanie osiowego pola magnetycznego zakrzywiającego tory jonów w spirale powiększa jeszcze efektywność jonizacji. Wyciąganie jonów ze źródła następować może wzdłuż osi lub też prostopadle do niej.

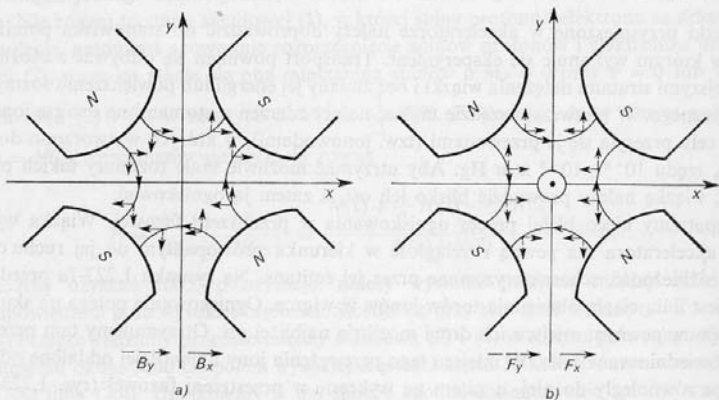
Źródło jonów wysokiej częstotliwości

- Dobre wyniki uzyskuje się wytwarzając wyładowanie bezelektrodowe w polu w.cz. wewnątrz cewki włączonej w obwód generatora. W wypełnionej gazem bańce szklanej umieszczonej w tym polu następuje silna jonizacja. Z obszaru plazmy wyciągamy jony napięciem przyłożonym między dodatkową elektrodą wyciągającą a kanalikiem wyprowadzającym jony ze źródła do systemu akceleracyjnego

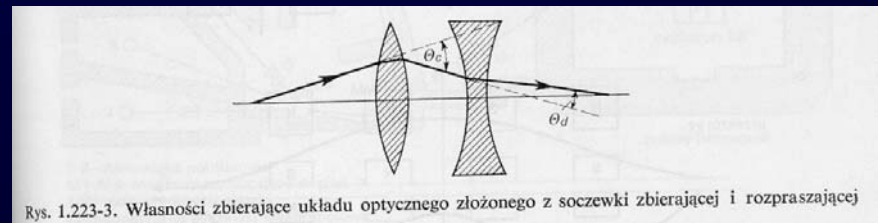


Systemy transportu wiązki

- doprowadzenie wiązki do stanowiska pomiarowego
 - możliwie najmniejsze straty w nateżeniu
 - możliwie najmniejsze rozmycie energetyczne
 - jonowody, w których panuje próżnia $\sim 10^{-6}$ mm Hg
 - aby utrzymać możliwe małe rozmiary takich przewodów, wiązkę należy prowadzić blisko ich osi, czyli ją ogniskować – ogniskowanie uzyskujemy przez odchyłanie torów jonów w odpowiednio ukształtowanych polach elektrycznych i magnetycznych.
- Najskuteczniejsze jest działanie tzw. soczewek kwadrupolowych



Rys. 1.223-2. Rozkład pola magnetycznego w soczewkach kwadrupolowych a) i siły działające na dodatnio poruszające się ku nam w kwadrupolowej soczewce magnetycznej b)



Rys. 1.223-3. Własności zbierające układu optycznego złożonego z soczewki zbierającej i rozpraszającej



Magnesy soczewki sekstupolowej w CERN'ie

Akselatory

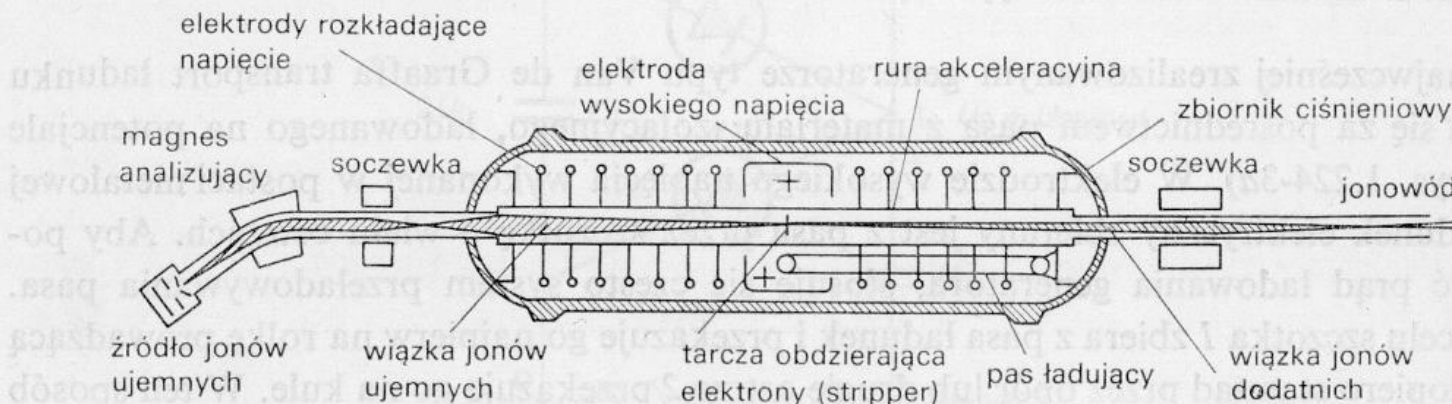
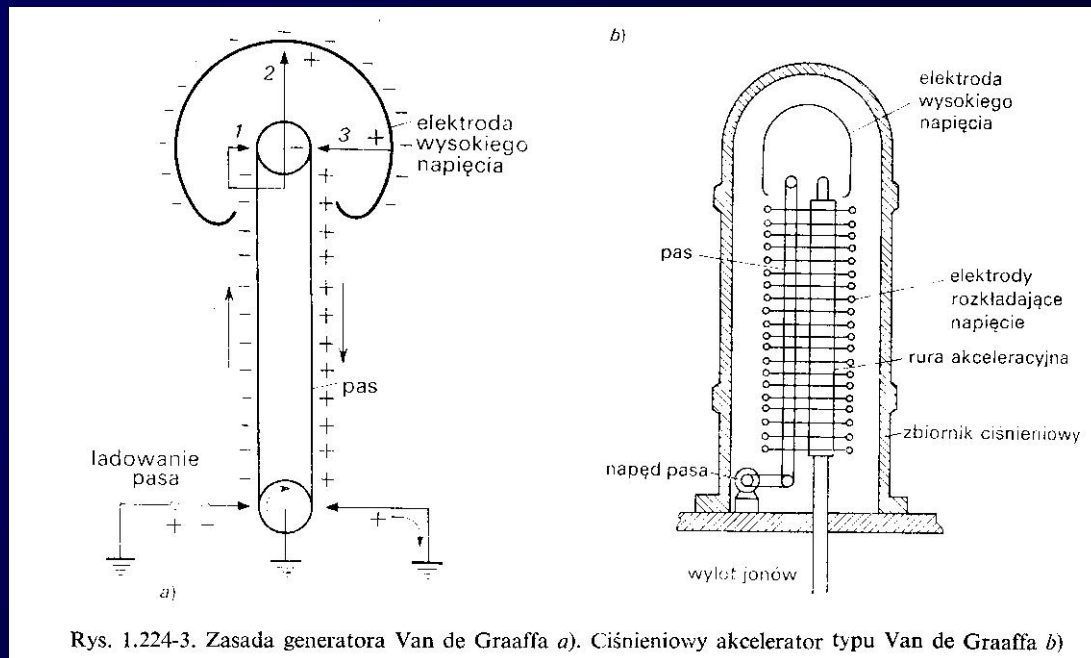
- na początku naszego wieku - eksperymenty z wykorzystaniem naładowanych cząstek; pierwszym źródłem, z którego pozyskiwali takie cząsteczki były substancje promieniotwórcze
- cząsteczki alfa o energiach do 6 MeV wykorzystywano w pierwszych sztucznych reakcjach jądrowych
- wytwarzane cząsteczki posiadały za małą energię do przeprowadzenia wielu doświadczeń
- potrzeba nowego sposobu pozyskiwania wysokoenergetycznych cząsteczek.

Akceleratorzy liniowe

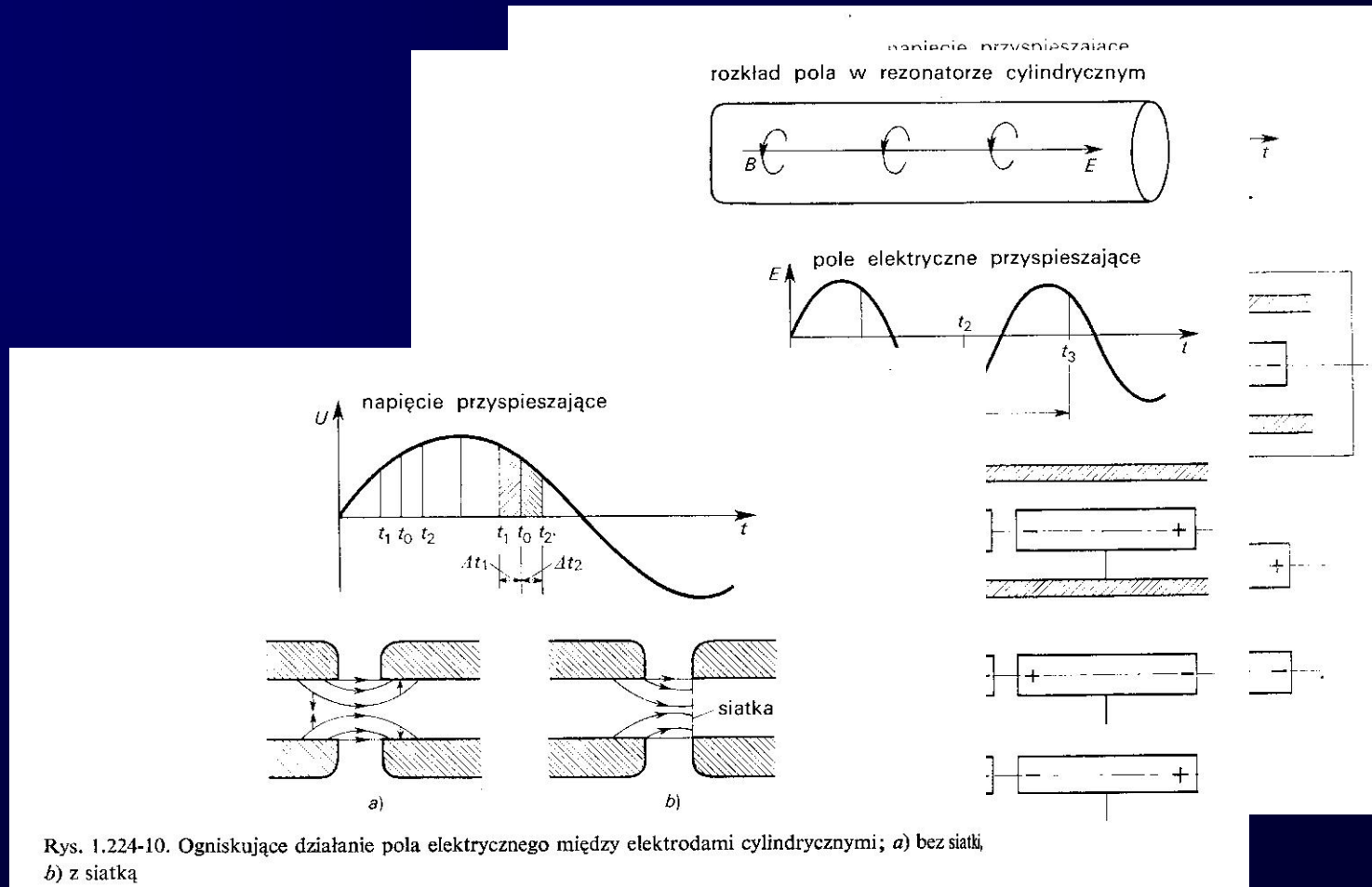
Zależnie od rodzaju pola :

- akceleratorzy liniowe stałego napięcia
- akceleratorzy liniowe wysokiej częstotliwości

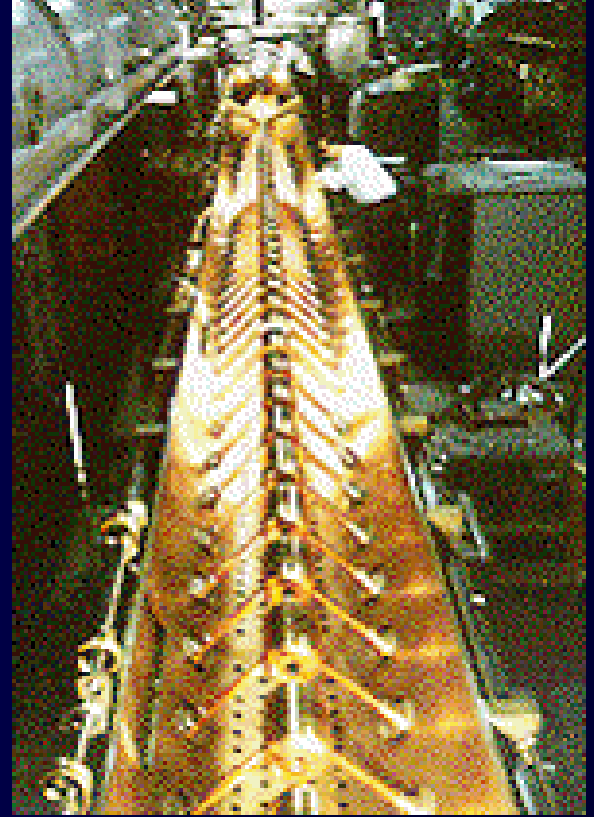
Akcelerator Van de Graaffa



Akcelerator typu wysokiej częstotliwości



- szczególnie dobre do przyspieszania ciężkich jonów
- UNILAC w Heidelbergu umożliwia przyspieszanie jonów aż do U do ~ 10 MeV/u z prądem ~ 0.3 μ A/jednostkowy ładunek elementarny



W Stanford (USA) działa akcelerator liniowy z falą bieżącą (o długości 3 km) przyspieszający elektrony do energii 20 GeV (ostatnio przekonstruowany na nietypowy akcelerator wiązek przeciwbieżnych).

Akceleratory kołowe

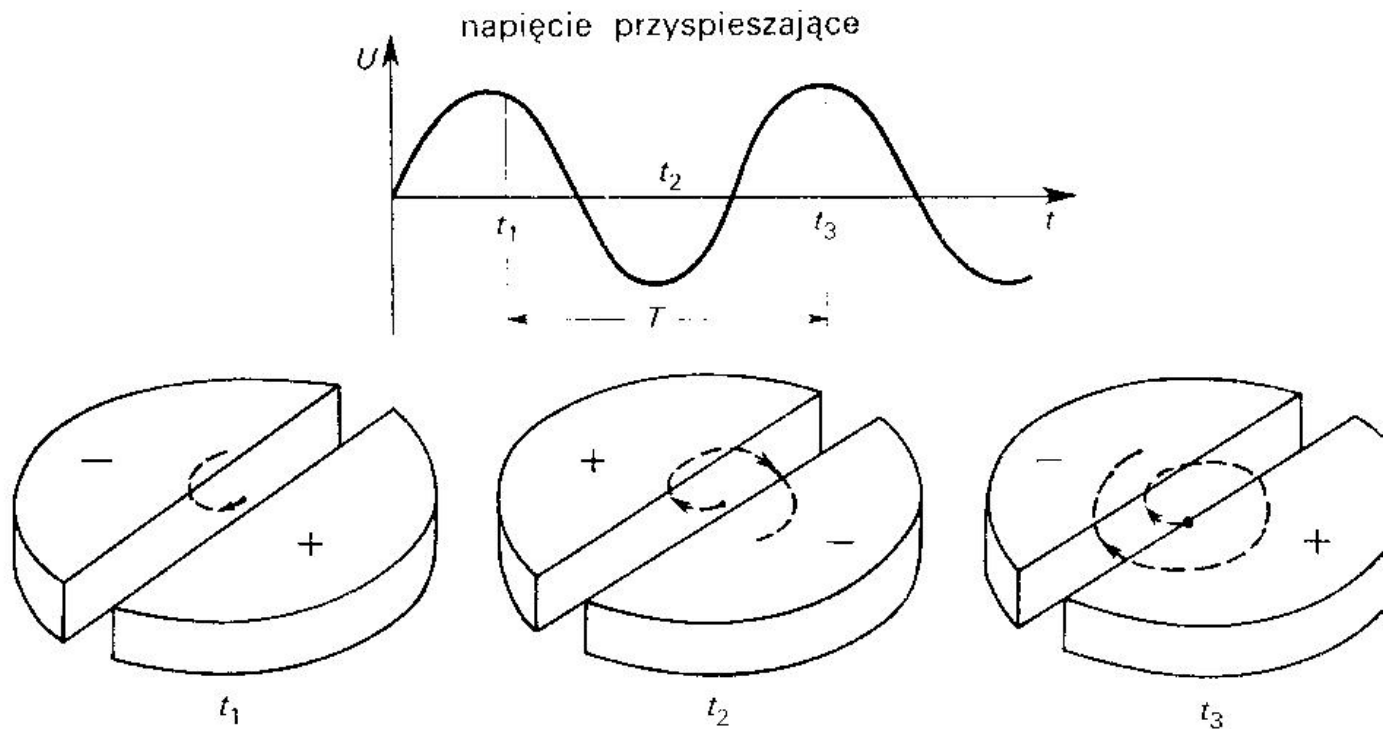
- cząstka porusza się w polu magnetycznym po zamkniętej krzywej, najczęściej po okręgu
- akceleratory indukcyjne – betatrony, których zasada oparta jest na drugim prawie Maxwella, prawie indukcji
- akceleratory cykliczne – typowymi przedstawicielami są cyklotrony, przyspieszające cząstki w periodycznym polu elektrycznym, zmiennym ze stałą częstością między elektrodami przyspieszającymi
- akceleratory synchroniczne – w których zmiana częstości obiegu przyspieszanych cząstek, wynikająca z efektów relatywistycznych przyrostu masy, jest kompensowana przez odpowiednią zmianę częstości zmiennego pola przyspieszającego lub pola magnetycznego wywołującego ruch cząstek po orbicie

Akselatory kołowe

- Wszystkie wiązki cząstek elementarnych w CERN-ie biorą swój początek w akseleratorach liniowych.
- Akselatory kołowe zmuszają cząstki do krążenia po okręgu, za każdym obrotem nadając im coraz większą energię. Silne magnesy sprawiają, że cząstki krążą po okręgu, podczas gdy pole elektryczne dostarcza siły przyspieszającej.
- W 1931 roku amerykański fizyk Ernest O. Lawrence i jego student Stanley Livingstone zbudowali pierwszy akselerator kołowy - cyklotron.

Cyklotron

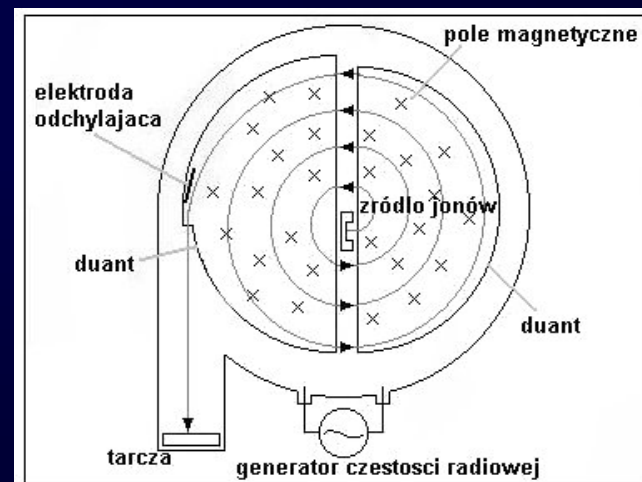
- to pierwszy akcelerator kołowy
- to pierwszy akcelerator dostarczający cząstek do energii powyżej 1 MeV



Rys. 1.225-5. Zasada przyspieszania jonów w cyklotronie

Na początku lat trzydziestych na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley dwaj naukowcy Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) i M.S Livingston skonstruowali nowy typ przyrządu służącego do przyspieszania jonów. Składał się ono z dwóch pustych w środku, półkolistych metalowych komór - duantów. Komory te zestawione są tak, iż między nimi znajduje się wąski pusty obszar. Zasilane są zmiennym napięciem o częstotliwości radiowej. Duanty znajdują się w komorze próżniowej pomiędzy biegunami potężnego elektromagnesu. Jony powstają w źródle umieszczonym w środku pomiędzy duantami. Po opuszczeniu źródła tor jonów zostaje zakrzywiony w silnym polu magnetycznym. Podlegają one bowiem wpływowi siły magnetycznej w tym przypadku (wektor indukcji skierowany prostopadle do wektora prędkości) danej wzorem:

$$F = q \cdot v_0 \cdot B$$

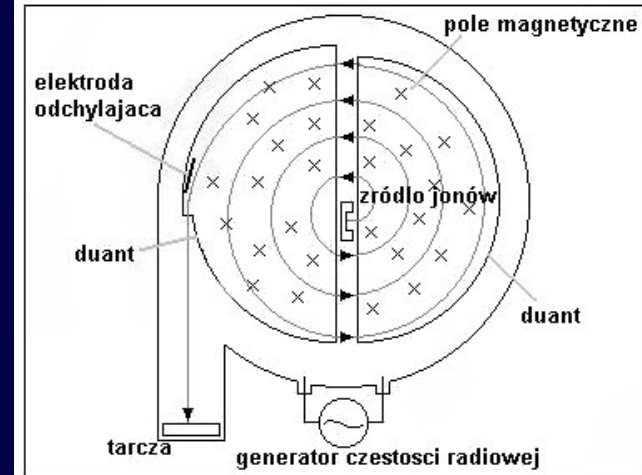


Cyklotron. Jony dodatnie wytwarzane wewnątrz urządzenia, są wielokrotnie przyspieszane między duantami - zataczają coraz większe tory kołowe prostopadle do kierunku pola.

Zgodnie z prawem Newtona dla ruchu po okręgu jest:

$$F = m \cdot \frac{v_0^2}{r_0}$$

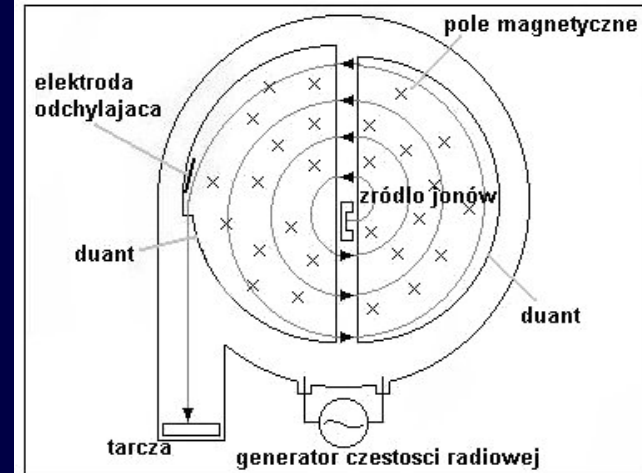
$$r_0 = \frac{m \cdot v_0}{q \cdot B}$$



Cyklotron. Jony dodatnie wytwarzane wewnątrz urządzenia, są wielokrotnie przyspieszane między duantami - zataczają coraz większe tory kołowe prostopadle do kierunku pola.

W momencie, gdy jon przelatuje przez obszar między duantami zostaje przyspieszony dzięki polu elektrycznemu panującemu między nimi, wytworzonemu przez źródło o częstotliwości radiowej. Teraz jon ma nieco większą prędkość. Porusza się w drugim duancie po trochę większym promieniu. Źródło zmiennego prądu o częstotliwości radiowej jest tak zsynchronizowane, że za każdym razem gdy jon przelatuje w strefie między duantami jest "popychany" do przodu, zwiększa swoją prędkość i promień toru ruchu. Końcowa prędkość jonu uzależniona jest więc od ładunku jonu, jego masy, natężenia pola magnetycznego (B) oraz od promienia duantów. Ostateczna energia kinetyczna cząsteczki dana jest wzorem:

$$E_k = \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2 \cdot B^2 \cdot r_{\max}^2}{m}$$



Cyklotron. Jony dodatnie wytwarzane wewnątrz urządzenia, są wielokrotnie przyspieszane między duantami - zataczają coraz większe torry kołowe przestapadłe do kierunku pola.

Cyklotron

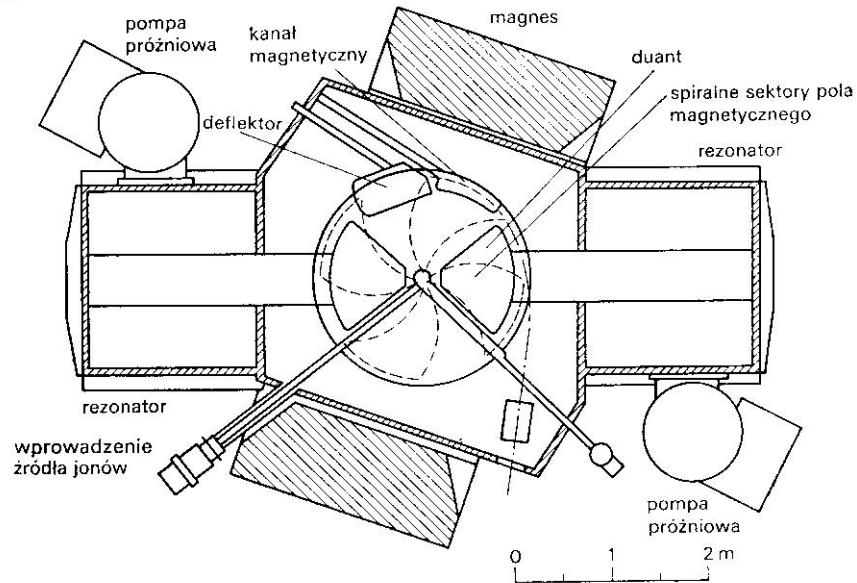
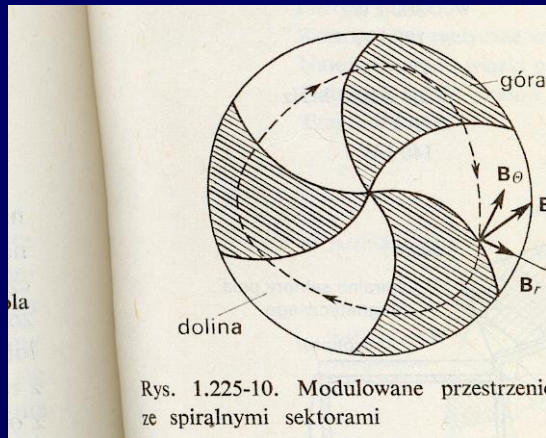
Ograniczeniem energii osiąganych za pomocą cyklotronu są efekty relatywistyczne wpływające na opóźnianie się cząstek o dużych energiach względem zmian pola, co doprowadza do utraty efektywności przyspieszania. Częściowo można temu zaradzić, zwiększając pole magnetyczne wraz z promieniem, co prowadzi do konstrukcji nazywanej cyklotronem izochronicznym.

Cyklotron

W Polsce pierwszy cyklotron uruchomiony został w latach powojennych na Uniwersytecie Jagiellońskim, następnie został przeniesiony do Instytutu Fizyki Jądrowej (IFJ, również w Krakowie), gdzie był modernizowany i pracował do początku lat 90., osiągając energię protonów równą 3 MeV. Od lat 60. w IFJ pracuje większy cyklotron, pozwalający osiągać dwukrotnie wyższe energie protonów i przyspieszać cząstki alfa do energii 29 MeV. Aktualnie kończona jest w IFJ budowa cyklotronu izochronicznego.

Obecnie największym w Polsce cyklotronem jest cyklotron znajdujący się w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów w Warszawie. Średnica nabiegunnika głównego magnesu wynosi 2 m. Jest to cyklotron przyspieszający ciężkie jony do maksymalnej energii 10 MeV na jednostkę masy atomowej przyspieszanego jonu.

Cyklotron



Rys. 1.225-12. Cyklotron izochroniczny Uniwersytetu w Louvain

CYKLOTRON WARSZAWSKI

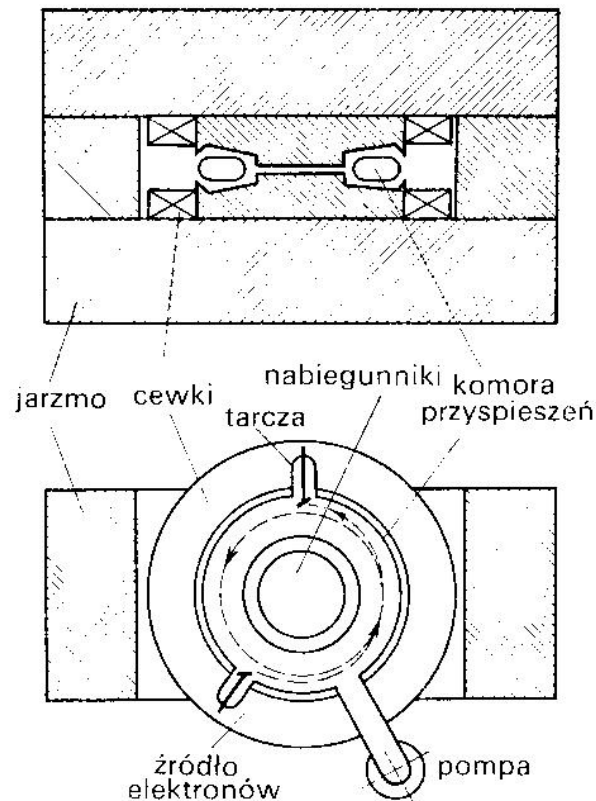
Betatron

Na początku lat czterdziestych D.W. Kerst z University of Illinois skonstruował nowe urządzenie rozpędzające jony - betatron. Składał on się z komory próżniowej w kształcie torusa umieszczonej między nadbiegunnikami bardzo silnego elektromagnesu. W komorze tej znajdowało się źródło elektronów. Cewki zasilane prądem zmiennym indukują zmienne pole elektromagnetyczne pomiędzy biegunami elektromagnesu. Pole rozpędza elektrony i jednocześnie utrzymuje je na orbicie kołowej. Dzięki temu znikają ograniczenia, które miał cyklotron. Nie zwiększa się bowiem promień toru, po którym krąży elektron



Pierwszy betatron zbudowany w 1940 r. przez Donalda Kersta

Betatron



Rys. 1.225-1. Schemat betatronu

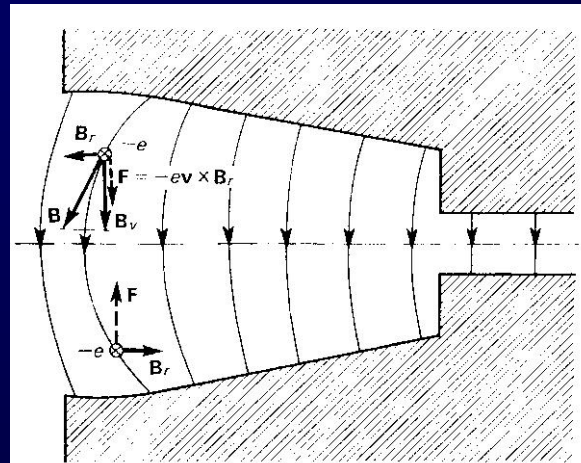
Elektron porusza się w betatronie po torze o stałym w przybliżeniu promieniu, więc komora przyspieszeń może być wykonana w formie wąskiego torusa.

Ważnym problemem jest dobre ogniskowanie wiązki w pobliżu orbity centralnej. Ogniskowanie otrzymuje się poprzez zastosowanie niejednorodnego pola magnetycznego w obszarze przyspieszania²⁷

Betatron

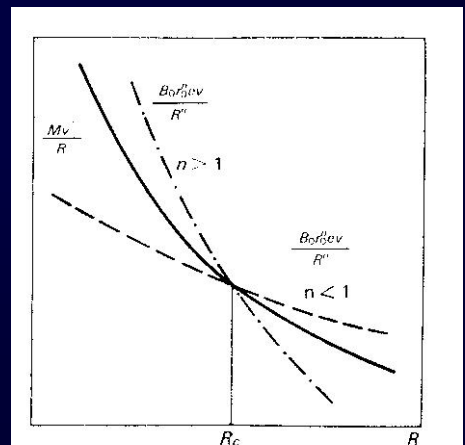
Ważnym problemem jest dobre ogniskowanie wiązki w pobliżu orbity centralnej. Ogniskowanie otrzymuje się poprzez zastosowanie niejednorodnego pola magnetycznego w obszarze przyspieszania

$$B = B_0(r_0/r)^n$$



Rys. 1.225-2. Ogniskowanie elektronów w niejednorodnym polu magnetycznym

$$mv^2/R = B_0 r_0^n e v / R^n$$



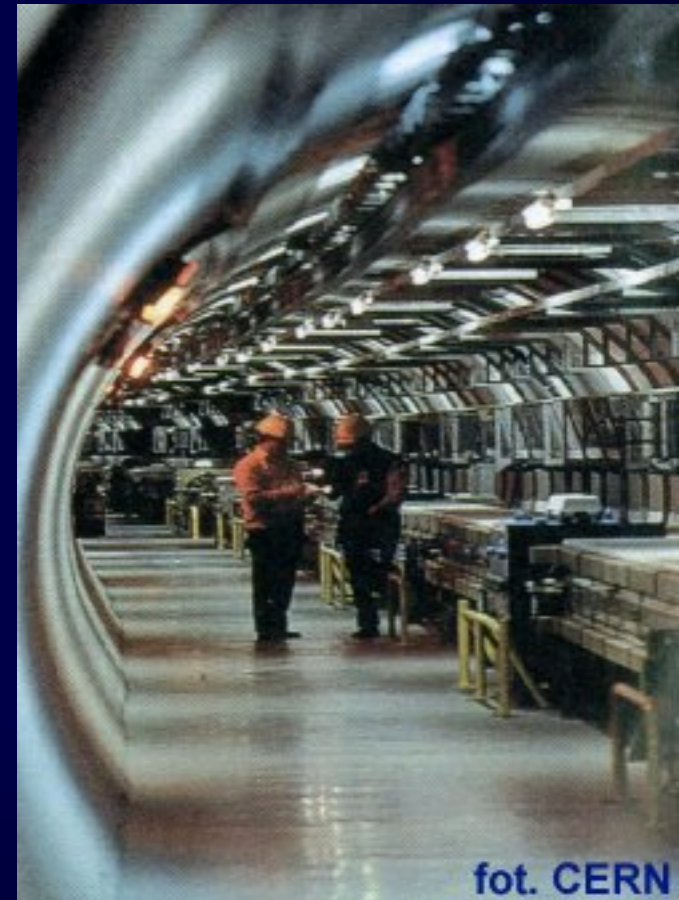
Rys. 1.225-3. Powstawanie siły prowadzącej jon na stabilną orbitę w płaszczyźnie poziomej

Betatron

Maksymalne energie elektronów otrzymywane w beatronie sięgają 200 MeV. Wykorzystywane są w fizyce jądrowej oraz w medycynie nuklearnej (do terapii nowotworowej).

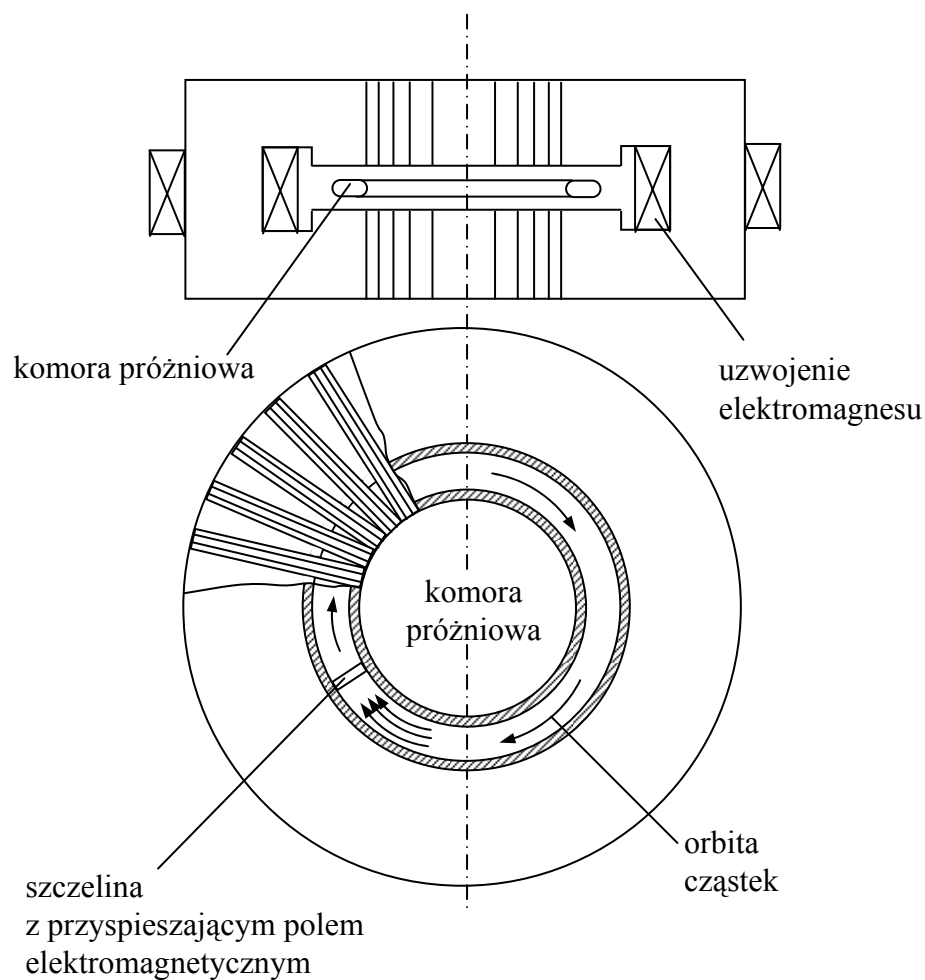
Synchrotron

Jest to rodzaj kołowego akceleratora cząsteczek naładowanych. Cząstki krążą po stałych orbitach, na których utrzymuje je zwiększane wraz ze wzrostem prędkości cząsteczek pole magnetyczne. Cząstki są przyśpieszane za każdym razem gdy przelatują przez fragment synchrotronu zwanego szczeliną rezonatora. Szczelina ta jest zasilana przez generator wielkiej częstotliwości.



fot. CERN

Synchrotron



Synchrotron - rodzaj akceleratora cyklicznego służącego do impulsowego, cyklicznego przyspieszania elektronów lub protonów. Cząstki poruszają się po stałej orbicie w rosnącym w trakcie cyklu przyspieszania polu magnetycznym, przy stałej rezonansowej częstotliwości przyspieszającego pola elektrycznego.

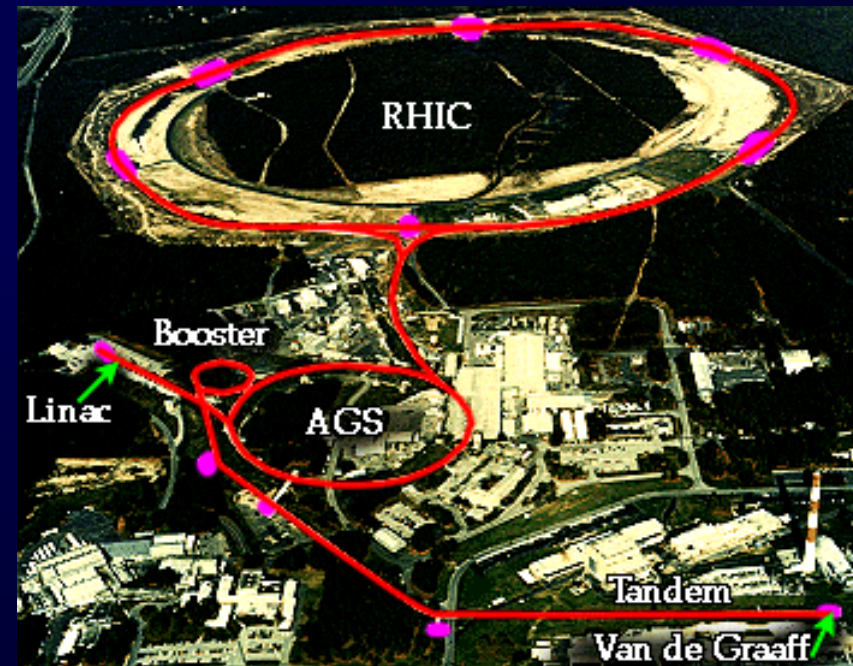
Nowe systemy akceleracyjne

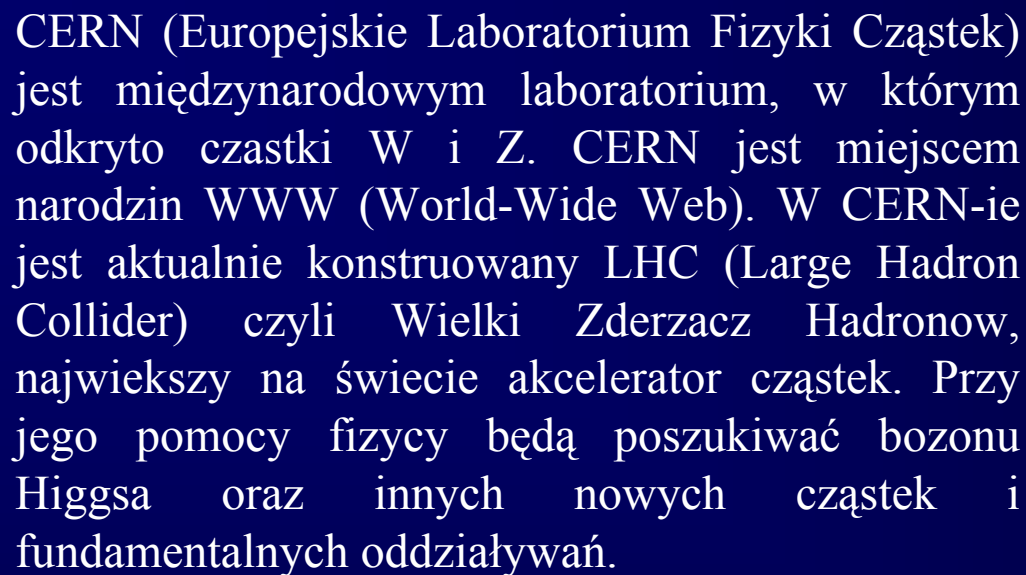
Państwowe Laboratorium Brookhaven (Brookhaven National Laboratory - BNL) jest położone na Long Island, w stanie Nowy York. Odkryto tu, równocześnie z laboratorium SLAC, kwark powabny z drugiej generacji. Pierścień głównego akceleratora (RHIC) ma promień 0.6 km.



Liniac:

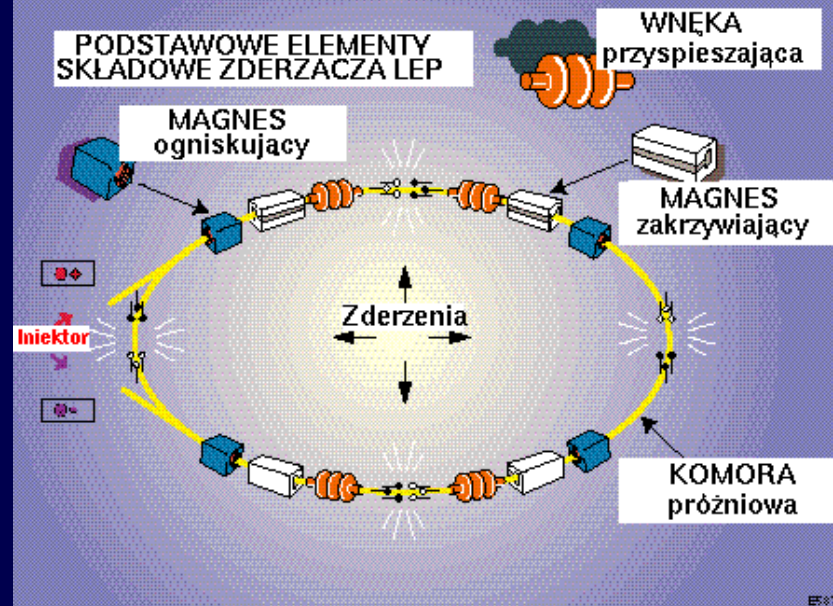
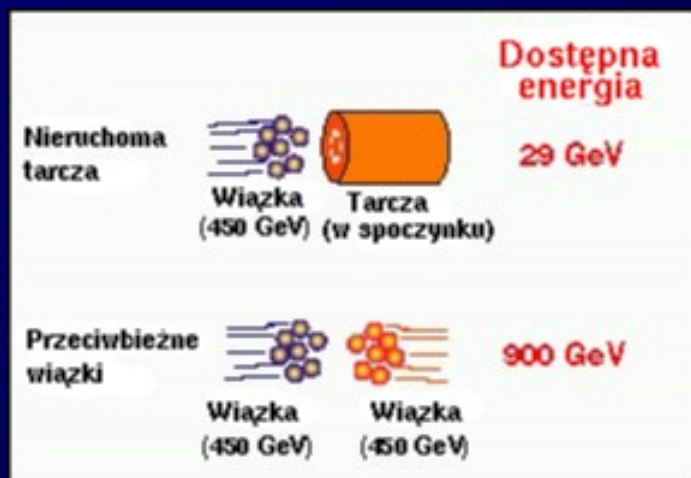
Liniiowy akcelerator o długości 145 m
Przyspiesza protony do energii 0.2 GeV, które
a następnie kierowane do następnego
Generator Van de Graaffa:
akceleratorów, tzw. 'boostera' i AGS. W
Przyspieszanie wstępne: w tym celu
wysokich energii cząstek (protony i jony ciężkie)
Relativistic Heavy Ion Collider – jego obwód
resztami obrotu. Przyspieszanie wstępne w 3
kierunkach: 2 km. Długość wiązki ciężkich jonów
protonów i jony takie jak O, S, Au do
przez najmniejszą w 6 miejscach wokół
energii 10-15 GeV, badano z linią do
energii 1.5 GeV lub jony przed
40 TeV
wprowadzeniem ich do głównego akceleratora
AGS.





SpS: Super-Synchrotron Protonowy SpS (Super Proton Synchrotron) jest 450 GeV akceleratorem protonów i antyprotonów. $W^+ W^-$ i Z zostały odkryte w 1983 właśnie na SpS.

LEP



Akcelerator elektronowo-pozytonowy LEP jest zderzaczem. 3368 magnesów zakrzywia dwie wiązki cząstek i utrzymuje je na orbicie. Ujemnie naładowane elektrony zakrzywane są w jedną stronę, a dodatnio naładowane pozytony w drugą. To pozwala, przy użyciu tych samych magnesów, uzyskać w akceleratorze LEP wiązki elektronów i pozytonów o energii 90 GeV (*) każda, krążące w przeciwnych kierunkach. Inny akcelerator znajdujący się w CERN-ie, również będący zderzaczem, to supersynchrotron protonowy SPS. Używając tego samego sposobu jak w akceleratorze LEP, w SPS przyspieszane są wiązki protonów i antyprotonów, krążące w przeciwnych kierunkach.

Chociaż akceleratory zostały wynalezione dla fizyki cząstek elementarnych, to tysiące z nich używa się w innych gałęziach nauki, a także w przemyśle i medycynie. Większość z nich to małe akceleratory liniowe używane w fabrykach do polimeryzowania plastyków, utylizacji odpadów i sterylizacji żywności oraz w szpitalach do różnego rodzaju zabiegów. W dziedzinie medycyny możemy się również spotkać z cyklotronami (akceleratorami kołowymi) używanymi do produkcji izotopów w celu zaopatrywania szpitali w zmodyfikowane biologicznie związki chemiczne, których położenie w organizmie możemy wykrywać dzięki cząstkom, które emitują. Niektóre z nich, z uwagi na ich biochemiczny charakter, mogą nawet "wybierać" określone części ciała, które chcemy zbadać lub leczyć.

Ostatnio dużym zainteresowaniem, szczególnie w Europie, USA i Japonii, cieszą się pomysły budowania akceleratora protonowego o energii kilkuset MeV, który wykorzystuje się do niszczenia głębokich nowotworów. Protony, z milimetrową precyzją, deponują większość energii na końcu swojej drogi, minimalnie niszcząc powierzchnię tkanek i oszczędzając delikatne organy znajdujące się wokół nowotworu.

ZASTOSOWANIE

Powracając do przemysłu, wiązka ciężkich jonów, np. taka jaką dysponuje GSI w Darmstadt, jest stosowana do wszczepiania atomów na powierzchniach nadprzewodników, używanych do produkcji układów scalonych do nowoczesnych komputerów. Inne zastosowanie w przemyśle to hartowanie powierzchni metali dla zwiększenia ich wytrzymałości i rzeźbienie w krzemie z mikronową precyzją.

Źródła promieniowania synchrotronowego, takie jakie znajdują się w ESRF w Grenoble, rozprzestrzeniły się po świecie, a ich dobrze skolimowane wiązki i możliwość dostrajania długości fali, pozwala na wiele różnych zastosowań. W pracy badawczej technika dyfrakcji promieni rentgenowskich pozwala na "obejrzenie" struktury protein, enzymów oraz kryształów, nowych i ekscytujących materiałów takich jak np. nadprzewodniki wysokotemperaturowe.

Jeszcze większe wrażenie robią akceleratory rozpędzające cząstki do energii rzędu GeV, ale mające wiązki o bardzo dużej intensywności, których używa się w badaniach samopodtrzymujących się reakcji termojądrowych. Silne akceleratory liniowe mogłyby również służyć do przeobrażenia długożyciowych odpadów jądrowych w izotopy, które szybko ulegają rozpadowi i stają się bezpieczne dla środowiska, lub dostarczyć wiązki, której można by użyć jako "wzmacniacza energii" - poszukiwanej bezpiecznej formy reaktora jądrowego, pozwalającej na zastosowanie stosunkowo nieszkodliwego toru jako paliwa.

The End

see you soon



