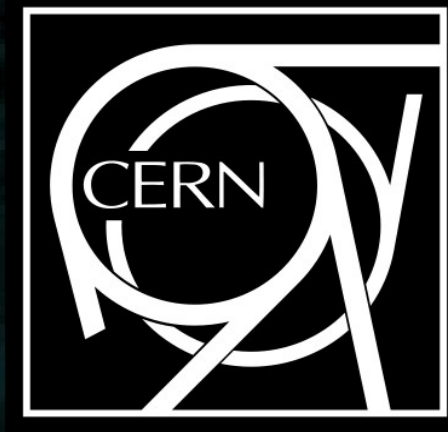


Wstęp do Akceleratorów wykład dla uczniów



Mariusz Sapiński

CERN, Departament Instrumentacji Wiązki

22 marca 2010

Definicja

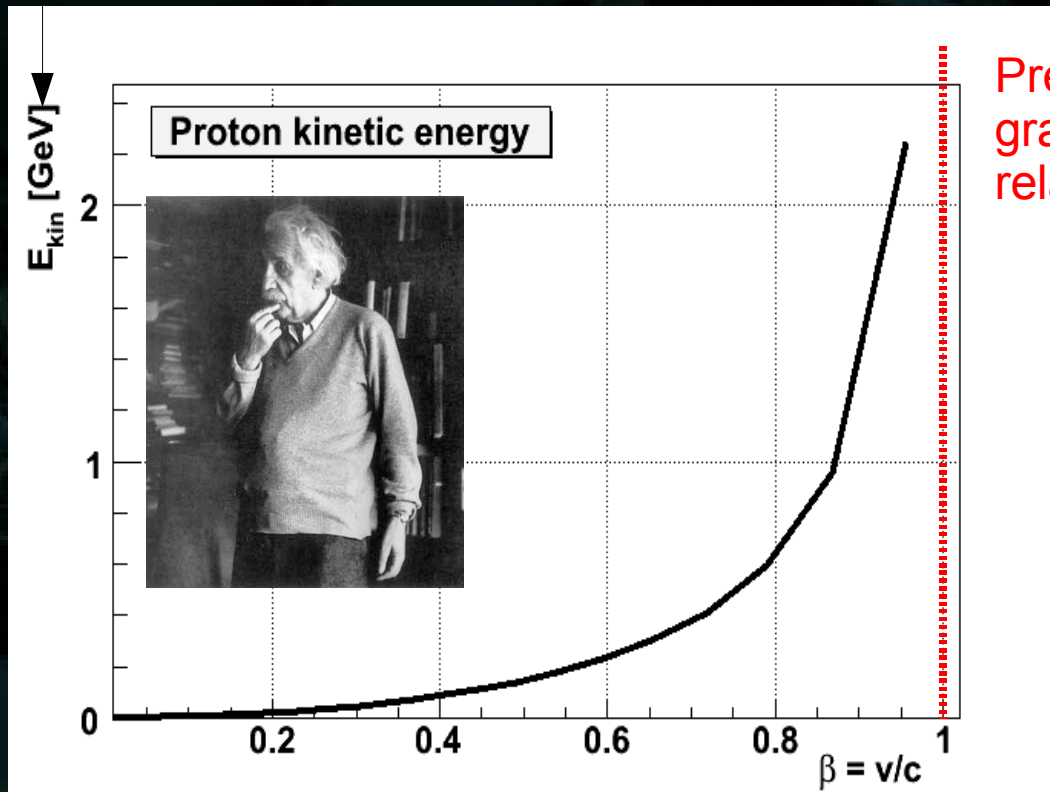
Akcelerator cząstek:
urządzenie produkujące wiązkę cząstek
(jonów lub cząstek subatomowych)

- produkcja cząstek (źródła),
- Przyśpieszanie (prędkość),
- "magazynowanie" wiązki,
- zderzanie wiązek (zderzacz)

- Istnieją prace nt. przyśpieszania cząstek makroskopowych (mikrometry) w urządzeniach działających identycznie jak akceleratory cząstek

Kwestia dużych prędkości...

(eV - energia jaką cząstka o jednym ładunku elementarnym nabiera w polu o różnicy potencjałów 1 V)



Prędkość światła –
granica
relatywistyczna

Czyli nazwa “akcelerator” lub “przyśpieszacz” jest w pewnym sensie mylna, prędkość rośnie bardzo nieznacznie dla cząstek relatywistycznych – rośnie ich masa relatywistyczna.

Pod koniec lat 40-tych proponowano nawet nazwę “Ponderator”, ale się ona nie przyjęła.

Spis treści

- Po co przyśpieszać cząstki? Zastosowania.
- Jak przyśpieszać?
- Źródła cząstek
- Przyśpieszacze liniowe. Surfowanie na fali.
- Przyśpieszacz w zasadzie kołowy: cyklotron
- Synchrotrony.
- Punkt zderzenia. Światłość.
- LHC i system CERNowskich akceleratorów
- Przyszłe zderzacze

Po co przyśpieszać

- Żeby badać/generować zjawiska towarzyszące przyśpieszaniu (np. promieniowanie synchrotronowe)
- Żeby osiągnąć wysoką energię kinetyczną:
 - Fizyka podstawowa,
 - Biologia, badanie struktury,
 - Medycyna (terapia rakowa),
 - Implantacja jonów (przemysł półprzewodnikowy),
 - Produkcja izotopów.

Wiązki na potrzeby fizyki podstawowej (np. CERN)

Fizycy potrzebują wiązek:

- wybranego rodzaju cząstek (np. protonów)
- o wybranej energii
- intensywności (najczęściej dużej)
- o wybranych rozmiarach
- w dobrze kontrolowanych warunkach (stabilność).

Obecna technologia pozwala na generację wiązki jonów każdego właściwie pierwiastka.

Istnieją też wiązki **wtórne** mionów(*), neutrin, neutronów, fotonów...

Jak przyśpieszać ?

Zamiana jakiejś formy energii na ruch

- Samochód: energia chemiczna - termiczna - mechaniczna

Skomplikowany mechanizm

- nieadekwatny do pojedynczych cząstek!

- Spadek w polu grawitacyjnym: $a = mG/r^2$

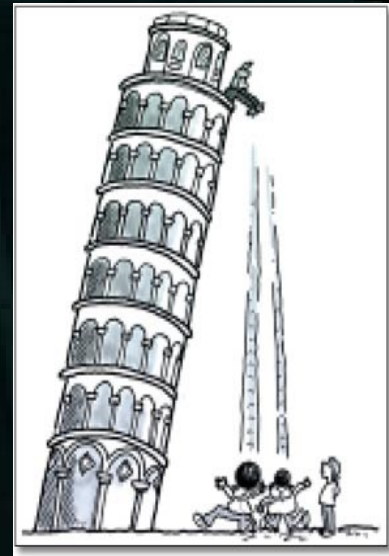
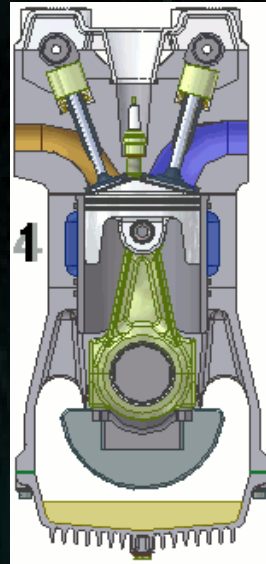
G-małe - słaba siła

- Pole elektryczne: $a = qE/m$

- Magnetycznie

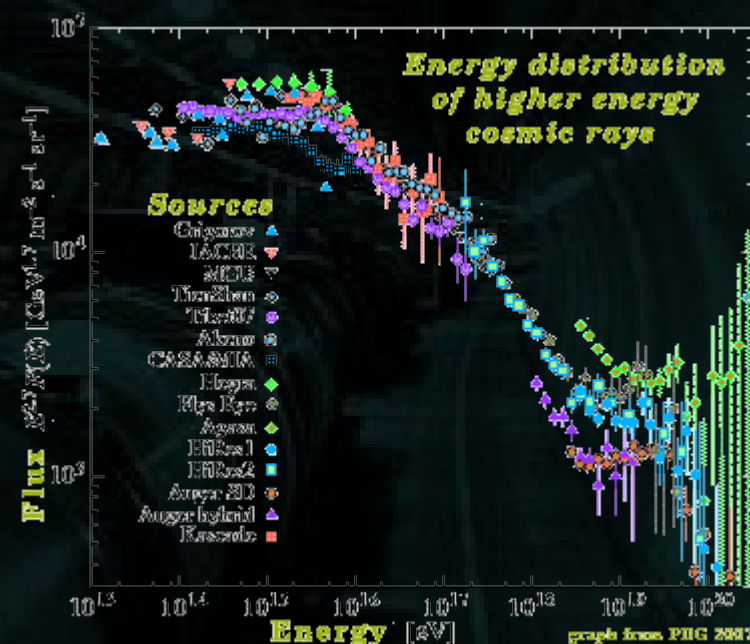
Do przyśpieszania pojedynczych cząstek można wykorzystywać efektywnie te 2 pola.

Siła generowana przez pole magnetyczne działa prostopadle do kierunku ruchu cząstki - trudno ją użyć do przyśpieszania.



Przykłady z natury?

- Największe energie - promieniowanie kosmiczne: 10^{20} eV, LHC: $7 \cdot 10^{12}$ eV
- Promienie kosmiczne o najwyższych energiach może być produkowane przez tzw. akcelerację Fermiego:
cząstki przyśpieszane przez magnetyczną falę uderzeniową



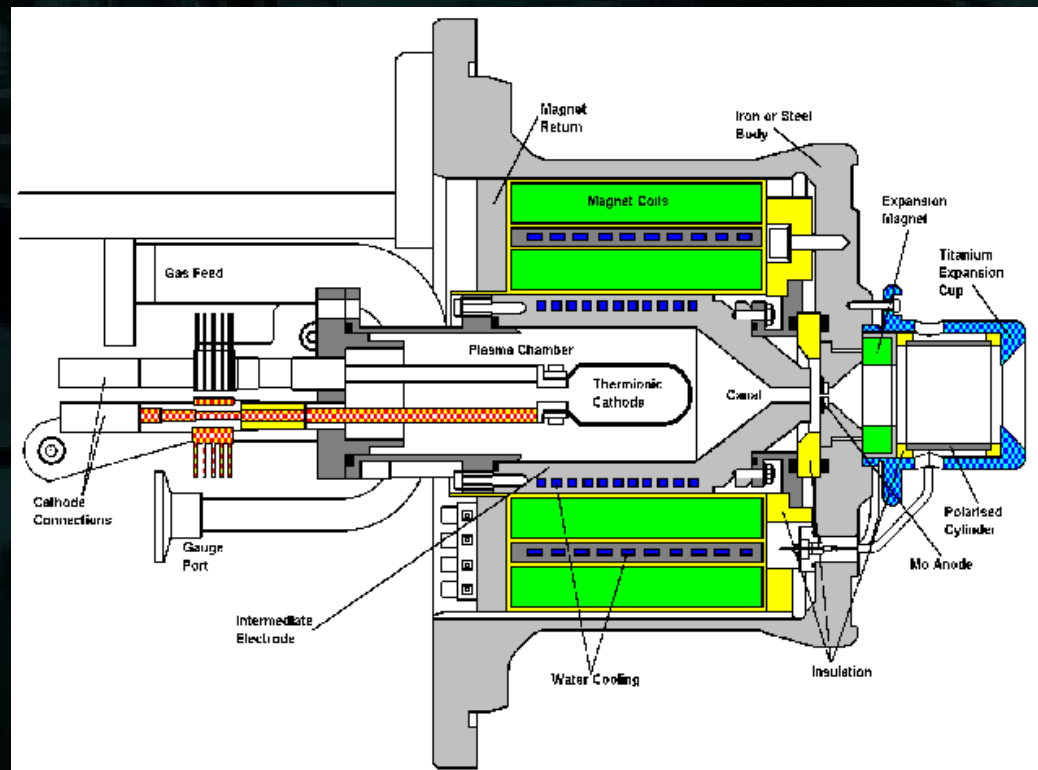
Ta metoda nie jest zbyt użyteczna dla nas - wymagana ogromna przestrzeń,
- cząstki przyśpieszane izotropowo.

Np. wiązki promieniowania alfa otrzymywane z radioaktywnych izotopów:
dzięki odpowiednim przesłonom tworzy się monoenergetyczna wiązka
- bez akceleratora !

Źródła cząstek

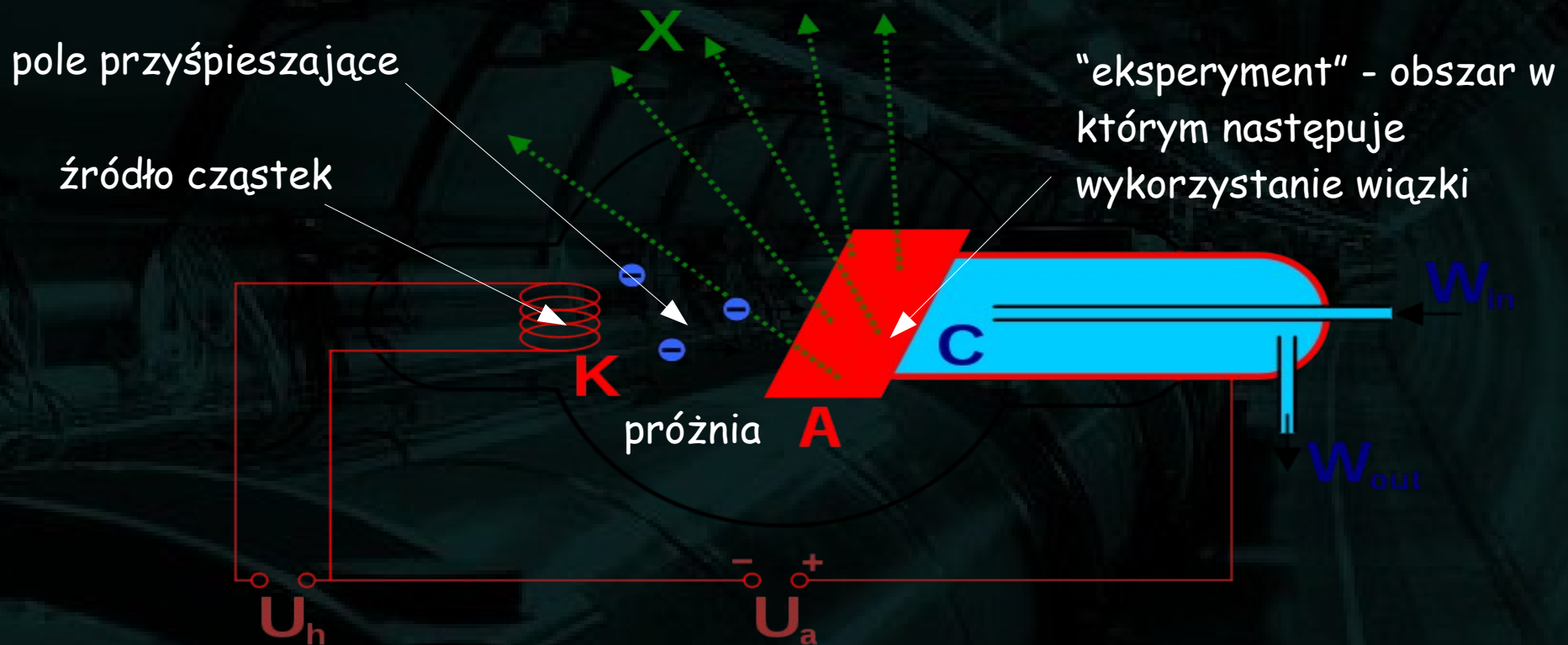
Elektrony: termoemisja (rozżażona katoda, jak w starych telewizorach) lub emisja pobudzana laserowo (fotoemisja).

Jony/protony: jest wiele konstrukcji - jonizacja gazu a następnie zastosowaniu pola elektrycznego/magnetycznego do wypchnięcia jonów w jednym kierunku - duoplasmotron



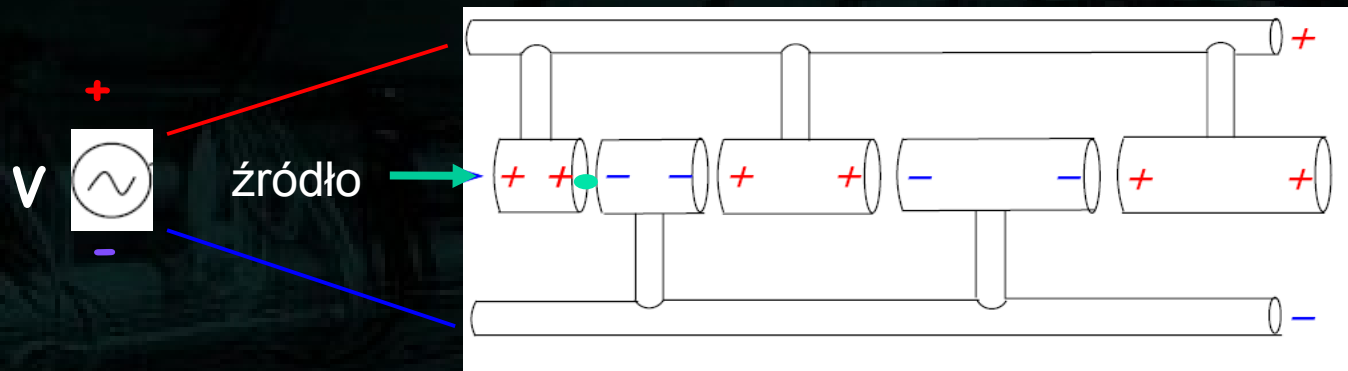
Następny etap:
kolimacja i
formowanie paczek

Zaczniemy od najprostszego: przyśpieszanie elektrostatyczne



- lampa rentgenowska: $E \sim 10^5$ eV (napięcie 100 kV)
- główne ograniczenie: możliwość wygenerowania wysokiego napięcia elektrostatycznego (przebiecie elektryczne)
- próżnia - niezbędny element akceleratorów

Jak pokonać konieczność wygenerowania wysokiego napięcia ?

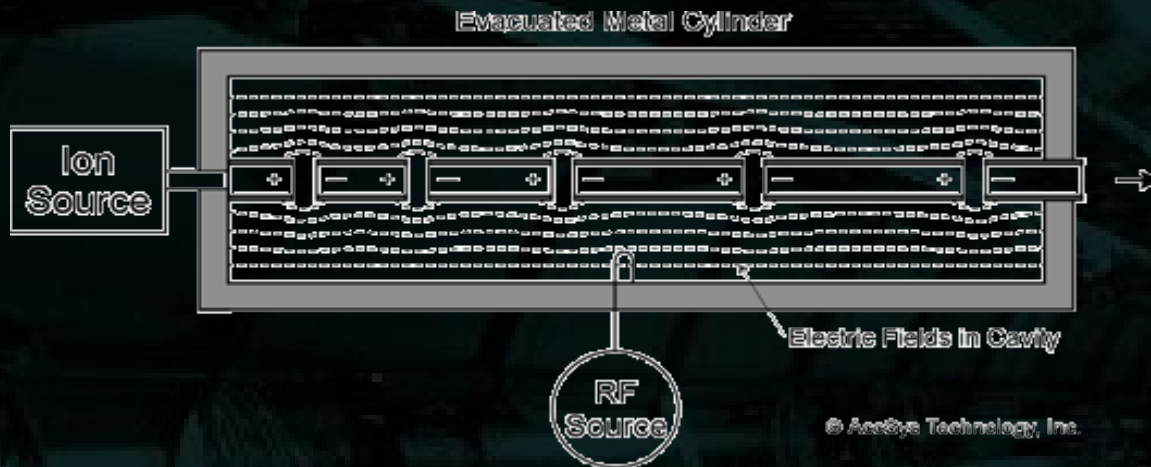


Wideroe

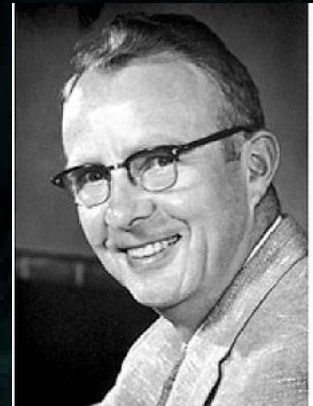
Tak przyśpieszana wiązka nie może być ciągła - paczki

- Cząstki (w paczkach!) przyspieszane pomiędzy komorami dryfowymi; pierwszy system 1928
- Ograniczenia: **rozmiary** (dla 7 MHz, proton 1MeV pokonuje 2m/cykl), straty radiacyjne dla wyższych (10 MHz) częstotliwości

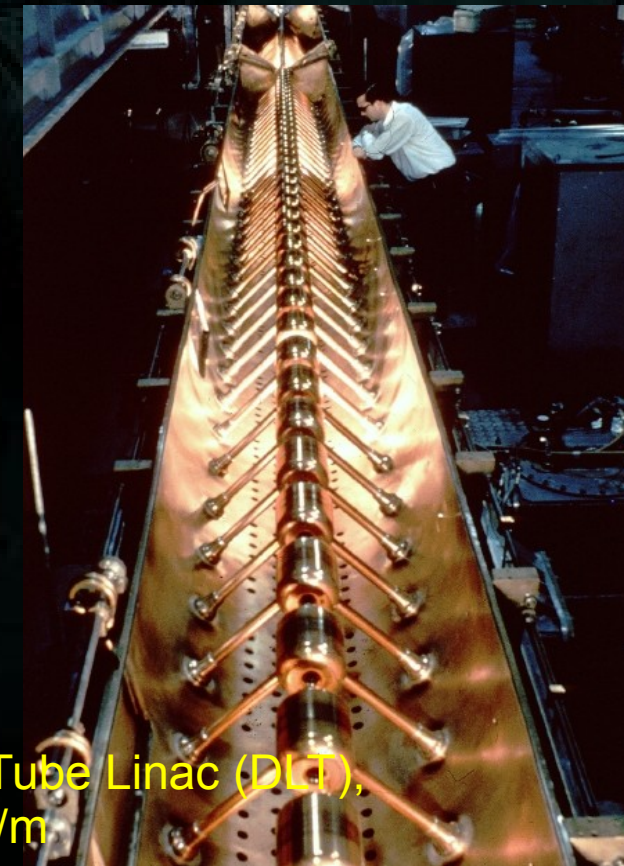
Ulepszenie: system Alvareza



1947, kiedy
technika
radarowa
(klystrony) była
już rozwinięta



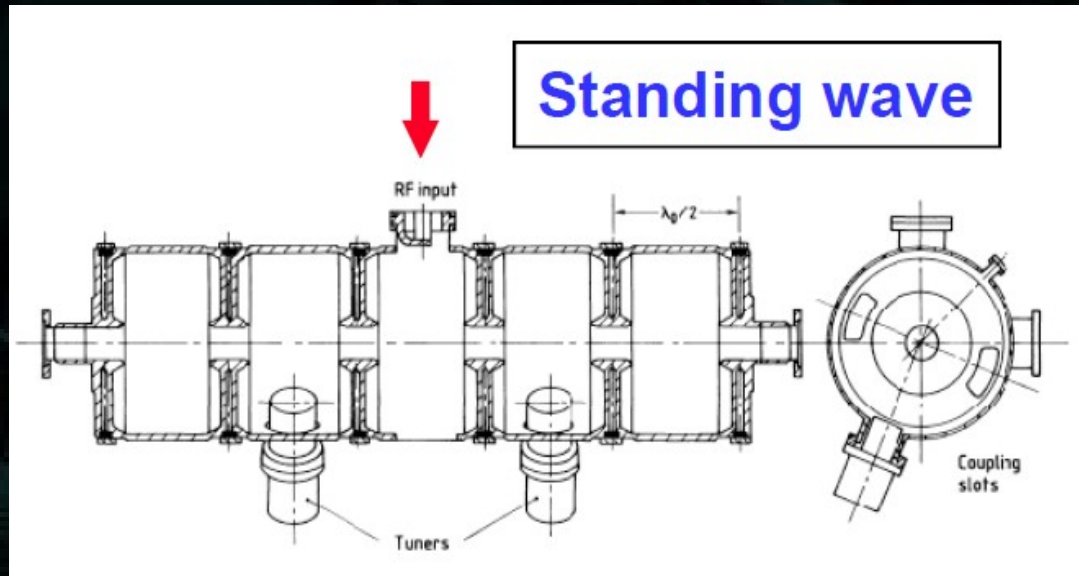
- Dołożenie zbiornika zbudowanego tak, aby jego częstota rezonansowa odpowiadała częstoci fali potrzebnej do przyśpieszania
- Fala stojąca z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi zbiornika generowana przez klistron
- Częstotliwość fali: **200 MHz**
- System Alvareza jest używany do dziś szczególnie we wczesnych fazach przyśpieszania (np. LINIAC4 budowany w CERNie koło R2)



Drift Tube Linac (DLT),
3 MV/m

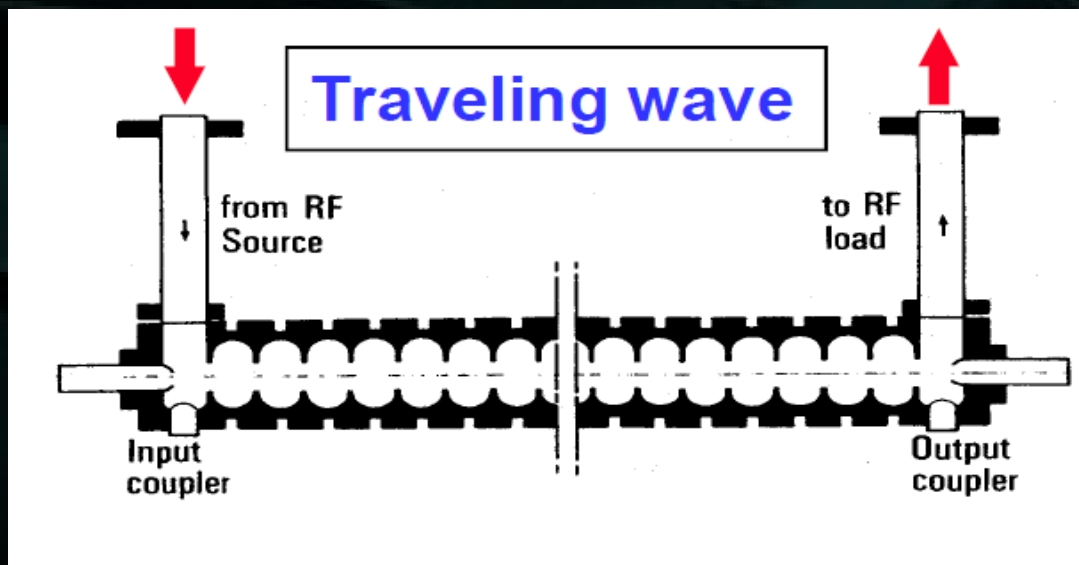
Jak to wygląda dla $v \sim c$

Rozmiary "komór dryfowych" nie rosną wzdłuż drogi cząstki.



Przyśpieszanie na fali stojącej
(jak w systemie Alvareza)

gradienty ok. 5 MV/m

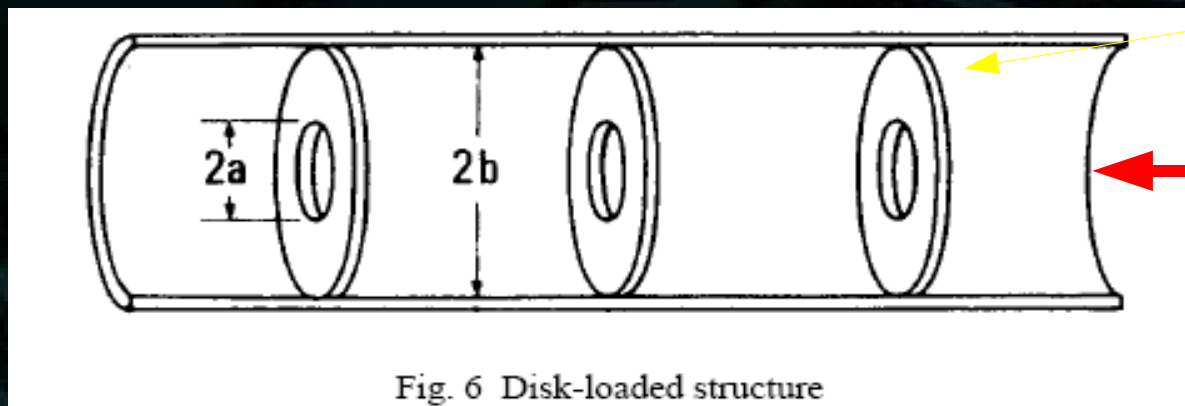


Przyśpieszanie na fali biegnącej

gradienty ok. 20 MV/m

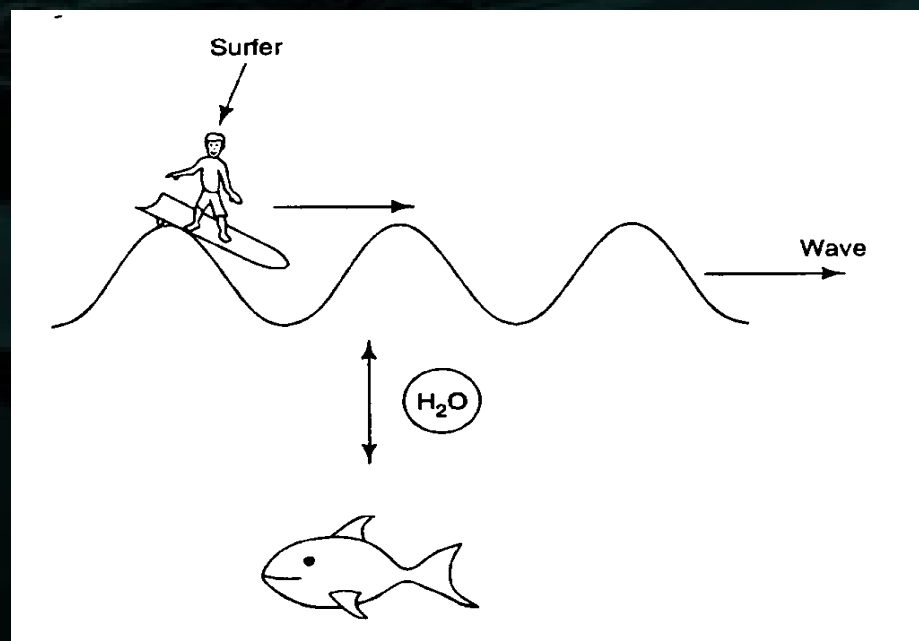
rekord to ok. 30 MV/m
(wnęki nadprzewodzące)

Surfowanie na fali biegnącej



przegrody
spowalniające falę

wiązka oraz fala
elektromagnetyczna
(w modzie TM)

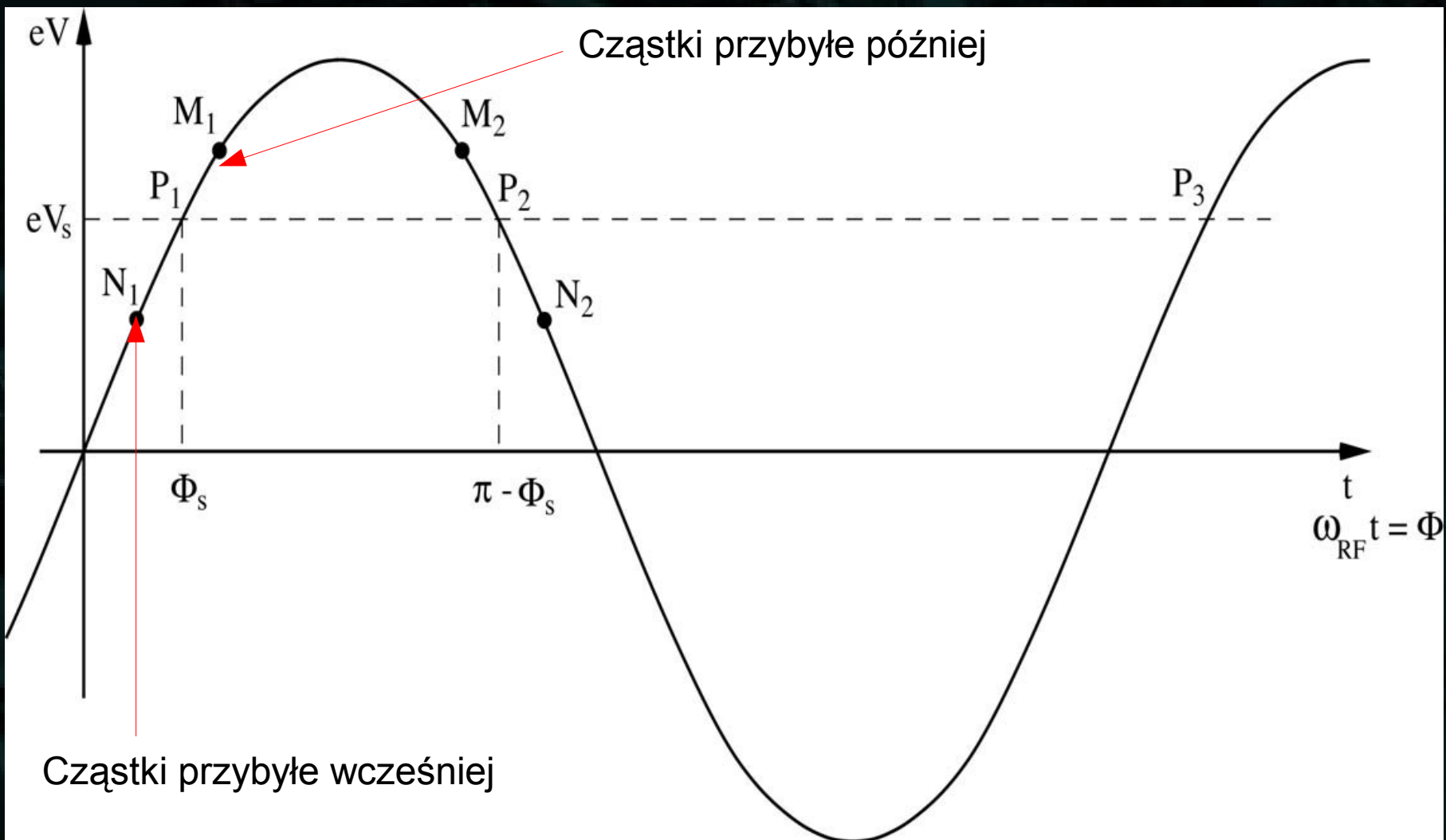


Przyśpieszanie we wnękach
rezonansowych można porównać
do surfowania po falach

Przyśpieszanie polem elektrostatycznym a falą biegnącą



Stabilność



Nowe pomysły - akcelerator plazmowy

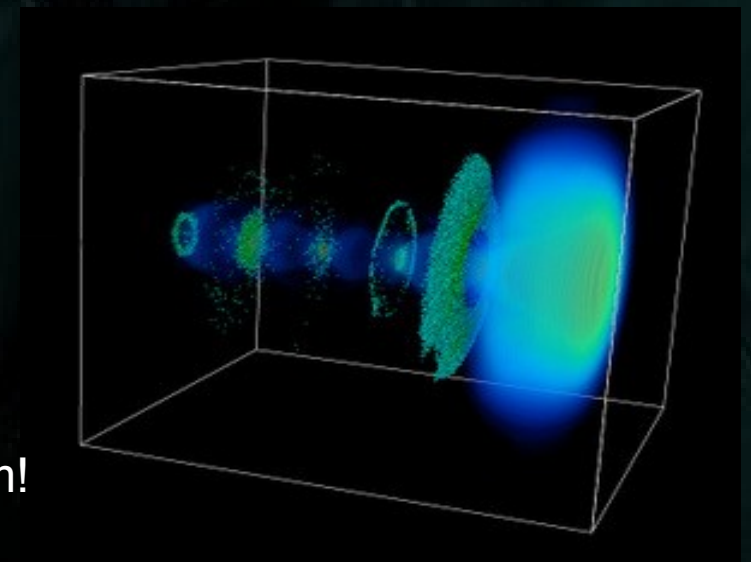
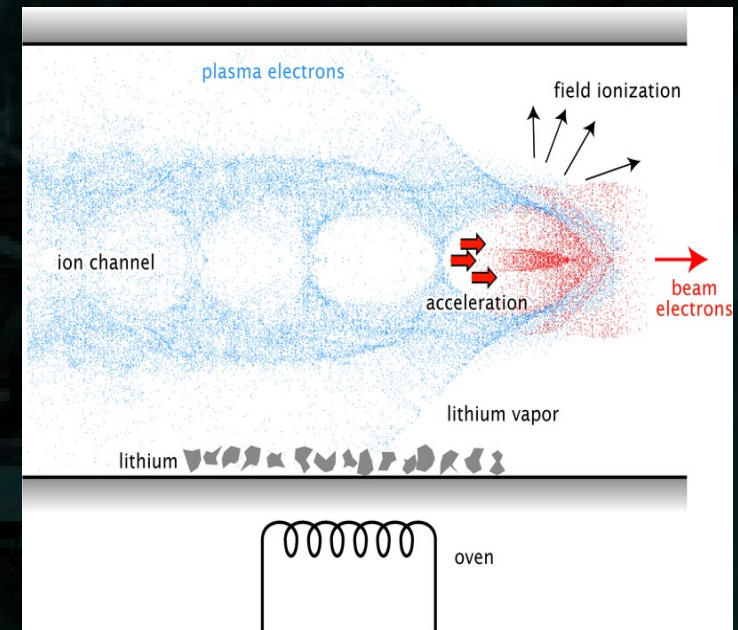
• Idea: pole elektryczne impulsu laserowego wstrzelonego w plazmę rozdziela elektrony od jonów tworząc **lokalnie bardzo wysoki gradient pola** (tzw. Wakefield), który można wykorzystać do przyspieszania cząstek.

Porównanie gradientów:

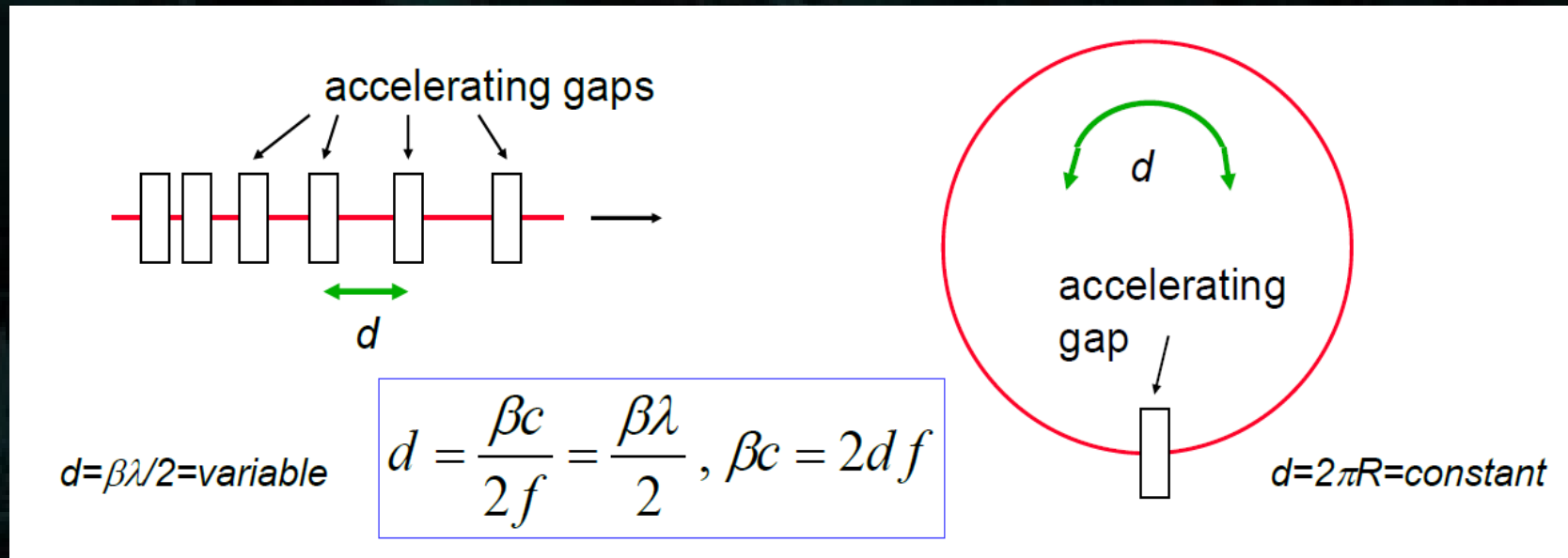
- wnęka rezonansowa: 30 MV/m
- plazma gazowa: 100 GV/m
- plazma w ciele stałym: 100 GV/cm

femtosekundowa synchronizacja

rekord: 42 GeV na dystansie 85 cm!
dla porównania: SLAC: 50 GeV – 3 km!



Po linii czy po okręgu



Liniowy:

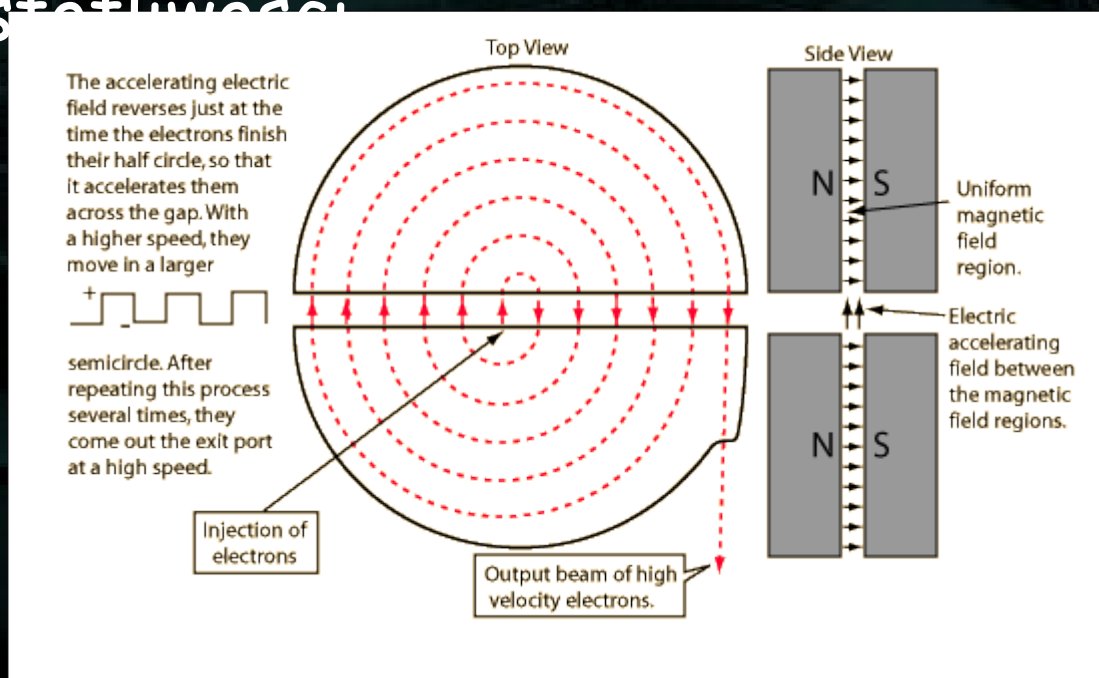
- Każdy element przyśpieszający jest używany raz,
- Odległość między elementami przyśpieszającymi może rosnąć tak, aby częstotliwość fali przyśpieszającej dostosować do prędkości cząstki

Kołowy:

- Element przyśpieszający jest używany wielokrotnie,
- Prędkość cząstek musi być relatywistyczna i gdyż obwodu okręgu nie można zmienić
- Jeśli akcelerator jest zderzaczem to te same paczki cząstek można wykorzystywać wielokrotnie

Akceleratory kołowe – historia równoległa

- Cyklotron (historycznie nazywany betatronem jeśli przyśpiesza się elektrony): stałe pole magnetyczne zakrzywia tor cząstek, między półówkami przykładana się zmienne pole elektryczne o stałej częstotliwości



$$\omega_{\text{cyclotron}} = \frac{qB}{m}$$

Lawrence,
Nobel 1939
(ale też Widroe!)

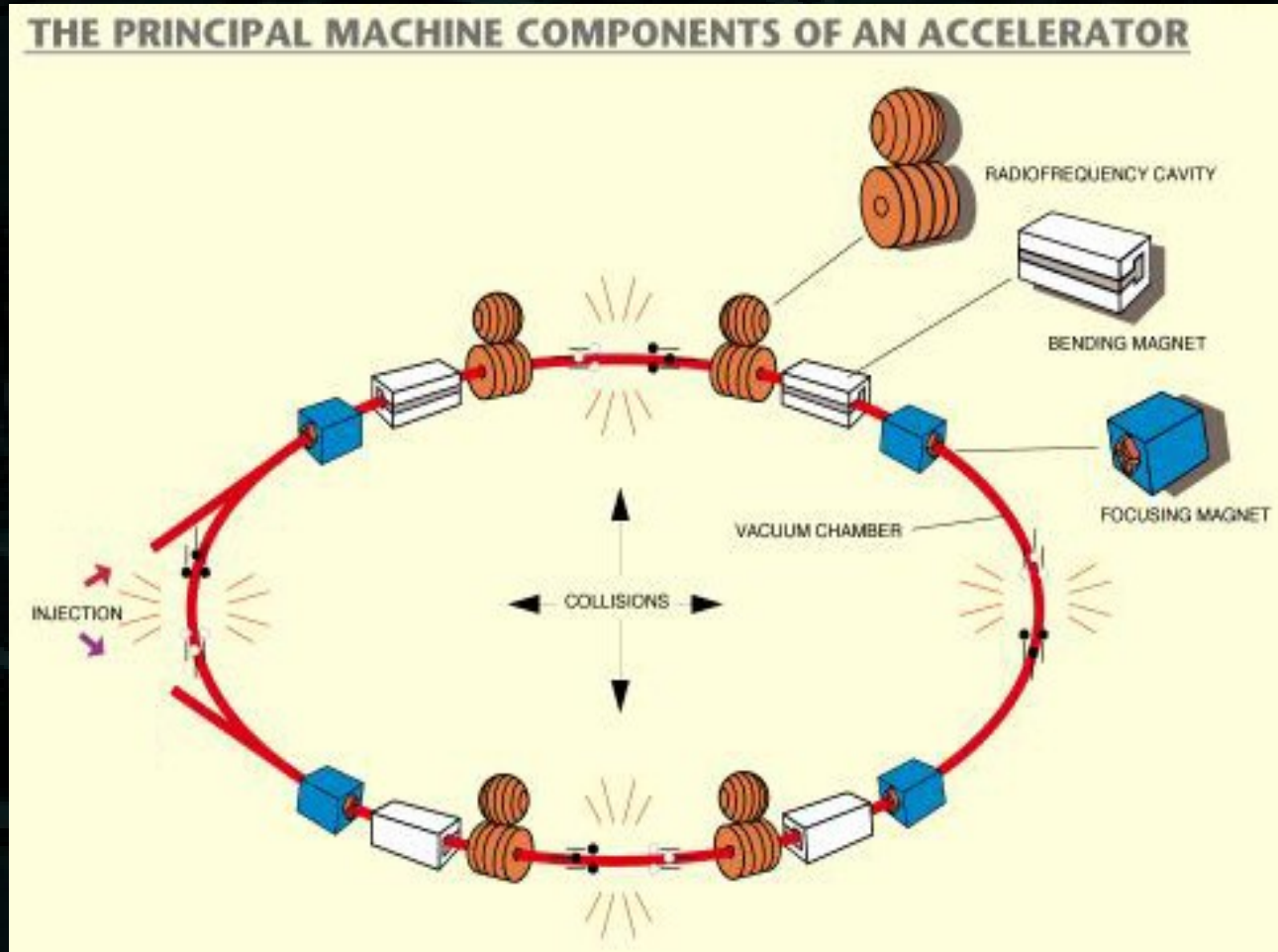
Dygresja: akcelerator jest kołowy ale samo przyśpieszanie odbywa się w jego "liniowej" części.

Za każdym razem wykorzystuje się inną część szczeliny przyśpieszającej

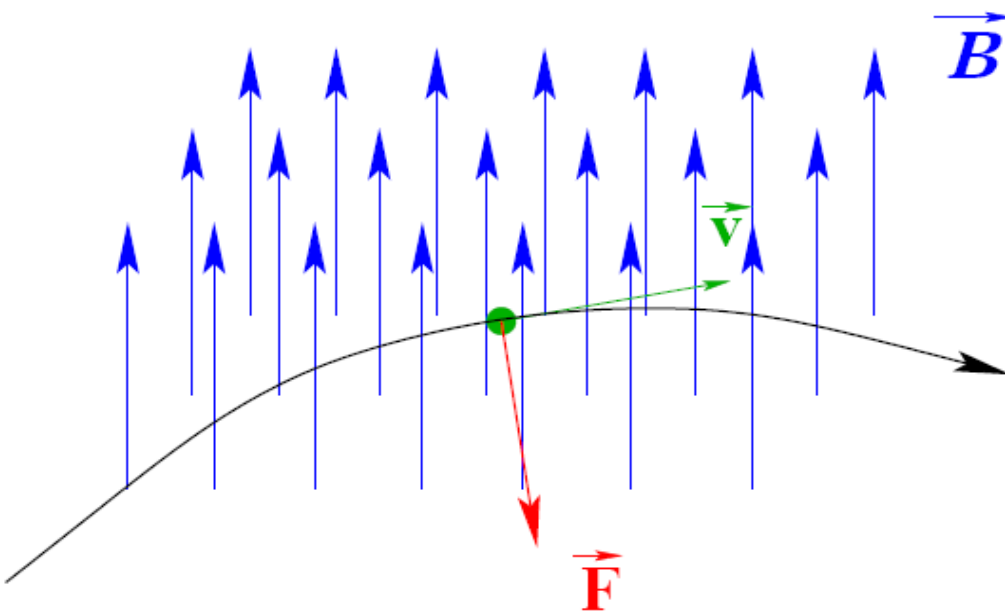
Synchrotrony

- Tutaj zmieniamy (**SYNCHRONICZNIE**) oba pola: elektryczne (jak w cyklotronie, choć raczej używam wnęk rezonansowych) i magnetyczne, za to cząstki poruszają się po ustalonej orbicie
- Główne elementy synchrotronu:
 - Magnesy zakrzywiające
 - Magnesy ogniskujące i korygujące
 - Wnęki rezonansowe (omówiliśmy)
- Pierwszy synchrotron: 1952, 3 GeV, BNL

Zasadnicze elementy synchrotronu



Magnesy zakrzywiające wiązkę



siła Lorentza:

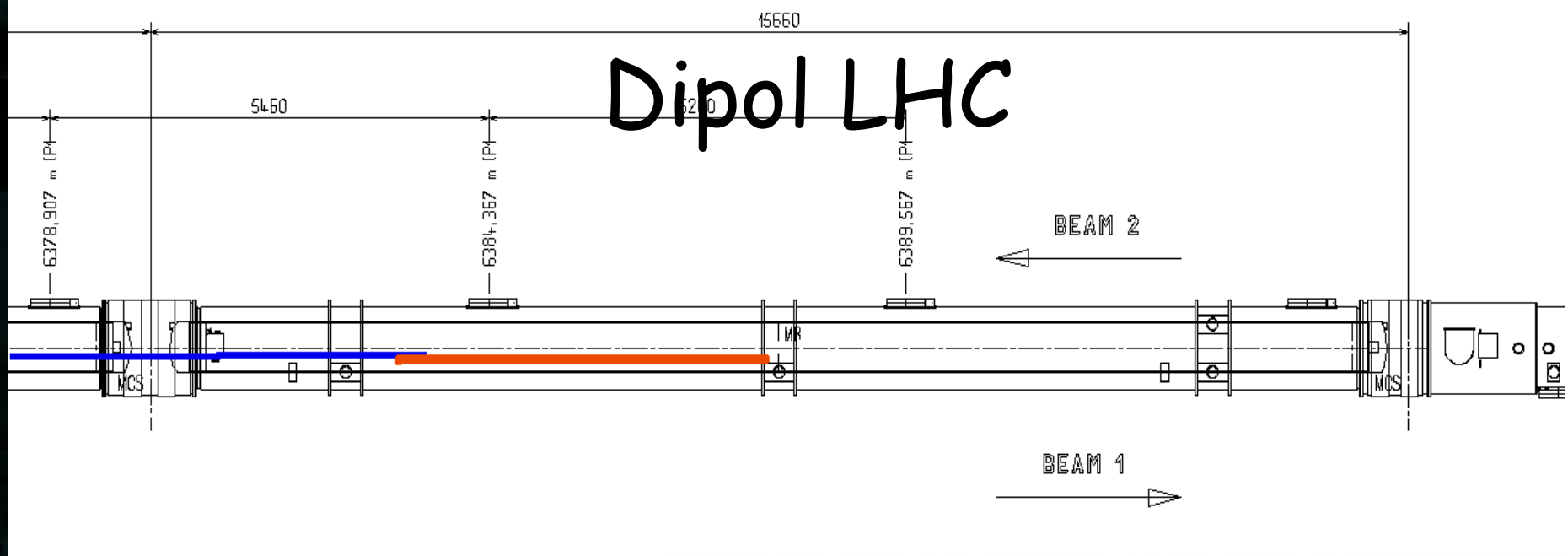
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Podstawowa relacja – sztywność magnetyczna:

$B \cdot r = p/e$ np. znając maksymalne pole (8.5 T) oraz promień (tunel = 2.8 km) można obliczyć maksymalny pęd uzyskiwany w akceleratorze (7 TeV)

- Dipole o wertykalnym polu zakrzywiają wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej

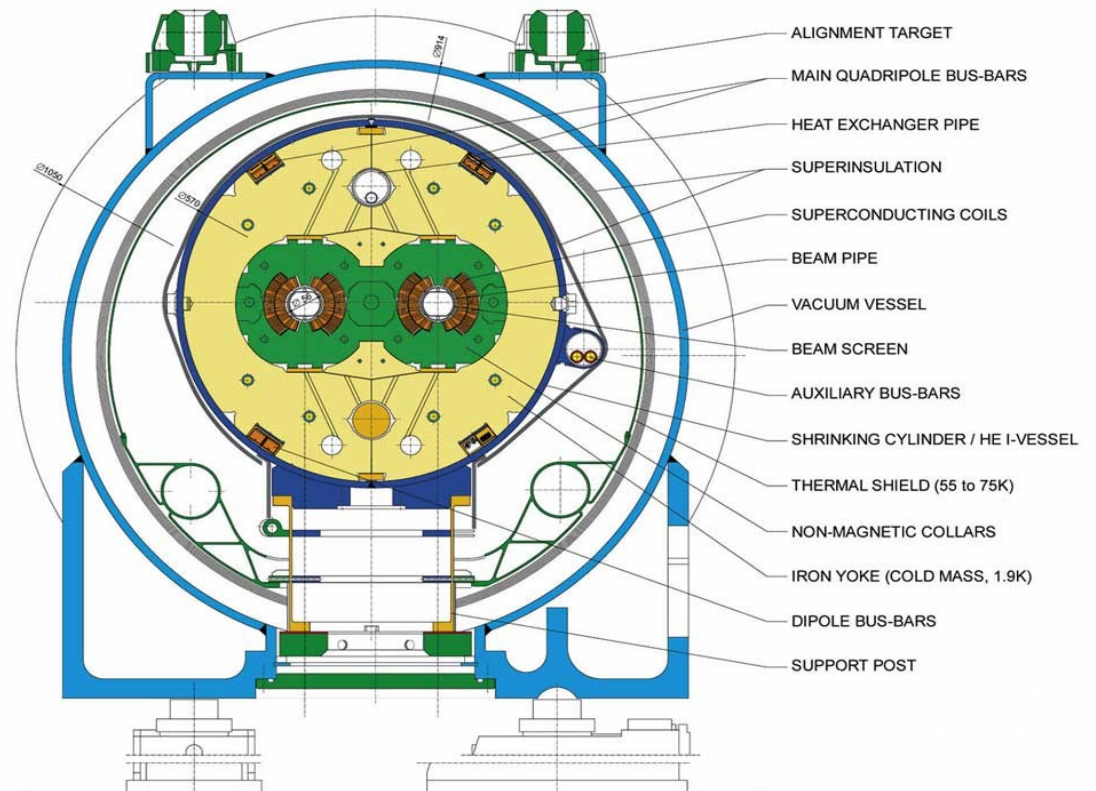




- Nadprzewodzący
- Długość ok. 15 m
- Waga ok. 22 ton
- Nominalne pole (środek rury): 8.33 T
- Promień zakrzywienia: 2.8 km

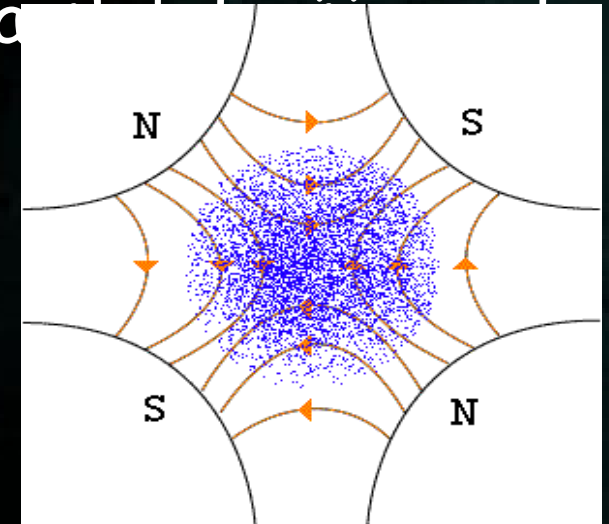
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999



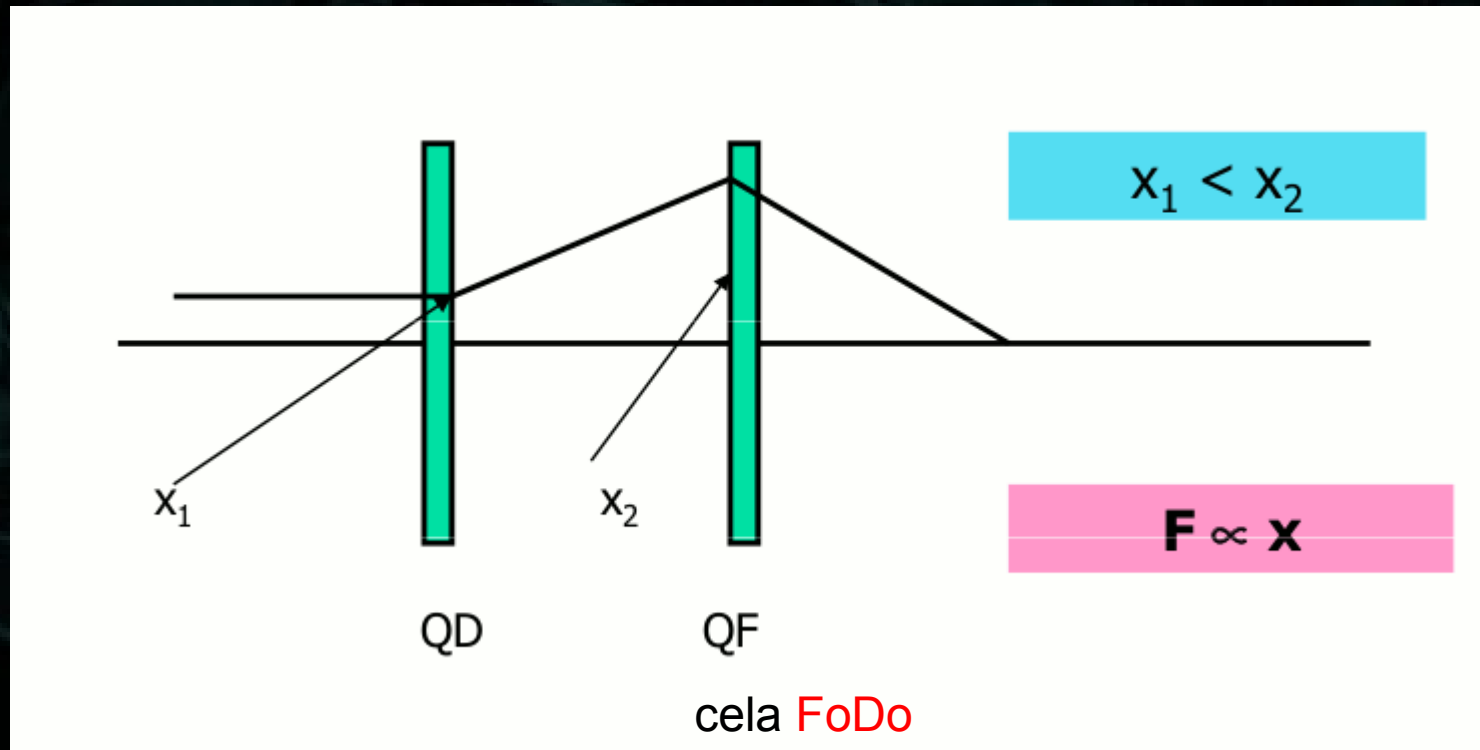
Stabilność wiązki

- W idealnej maszynie potrzebujemy tylko dipoli, ale
- Świat nie jest idealny - cząstki w wiązce są poddawane:
 - grawitacji
 - stratom energii w wyniku radiacji
 - oddziaływaniom międzycząstkowym
 - oddziaływaniom z materiałem akceleratora
- Większość z tych efektów źle wpływa na stabilność wiązki
- Trzeba wiązkę ogniskować!
- Efekt ogniskujący mają kwadrupole
- Ogniskowanie w płaszczyźnie x jest



Stabilność wiązki

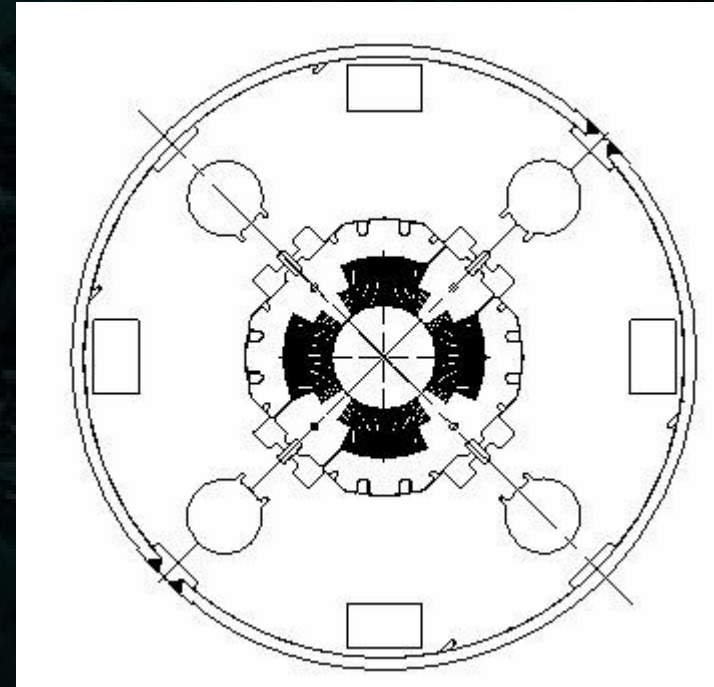
- Kwadrupole są jak soczewki - analogia optyczna



- *Pierwsze synchrotrony obydwały się bez kwadrupoli ze względu na ogniskowanie dipolowe - na dużych maszynach jest ono słabe ($1/R^2$) i działa tylko w płaszczyźnie w której wiązka się zakrzywia.*

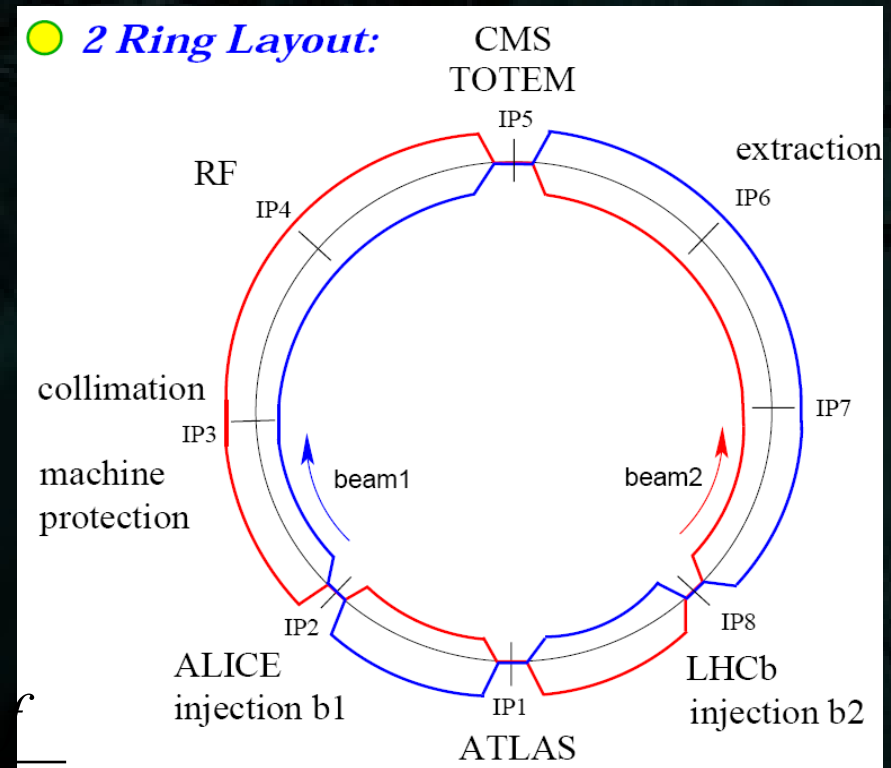
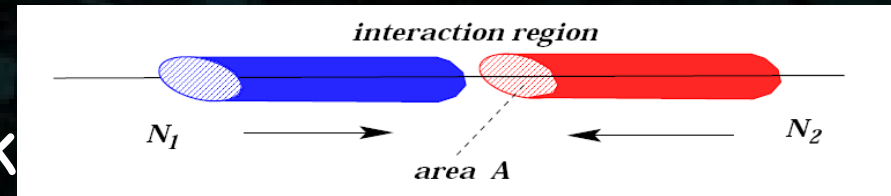
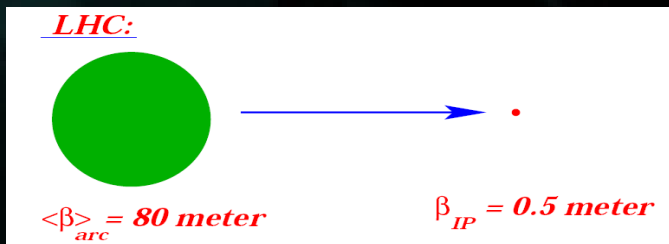
Kwadrupol LHC

- Nadprzewodzący
- Długość ok 3.5 m
- Istnieje kilka rodzajów
- W punkcie zderzenia - specjalne kwadrupole
- Inne magnesy: sextupole, oktupole, dekatupole



Punkt zderzenia

- Wiązki które normalnie mają rozmiar około 0.2 mm są ogniskowane do rozmiarów ok 0.02 mm, mniej niż ludzki włos
- Dzięki temu mamy miliony zderzeń na sekundę (f)
- Świetłość: $L=f/\sigma$



Przyszłość akceleratorów

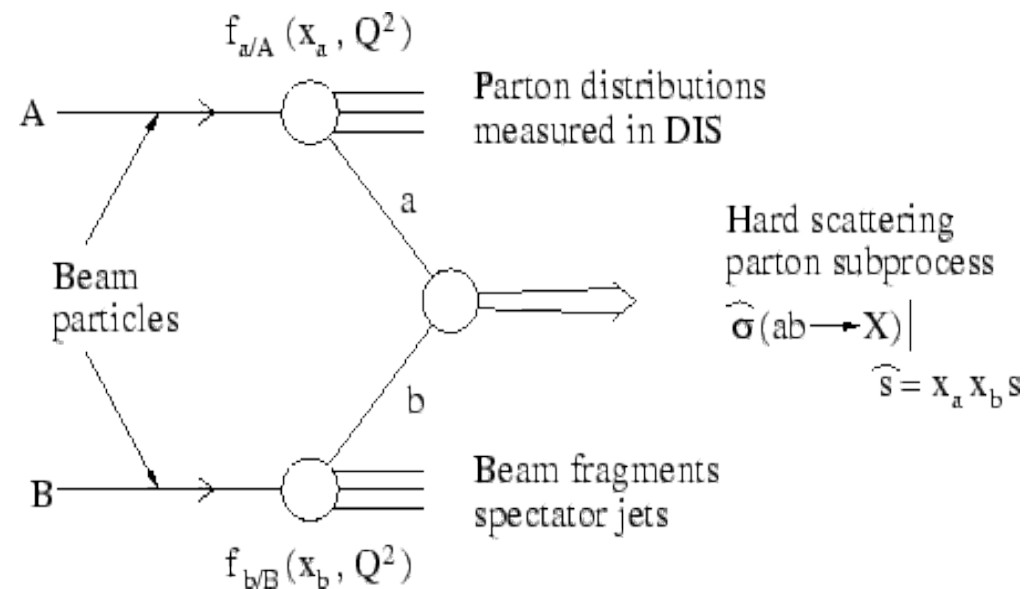
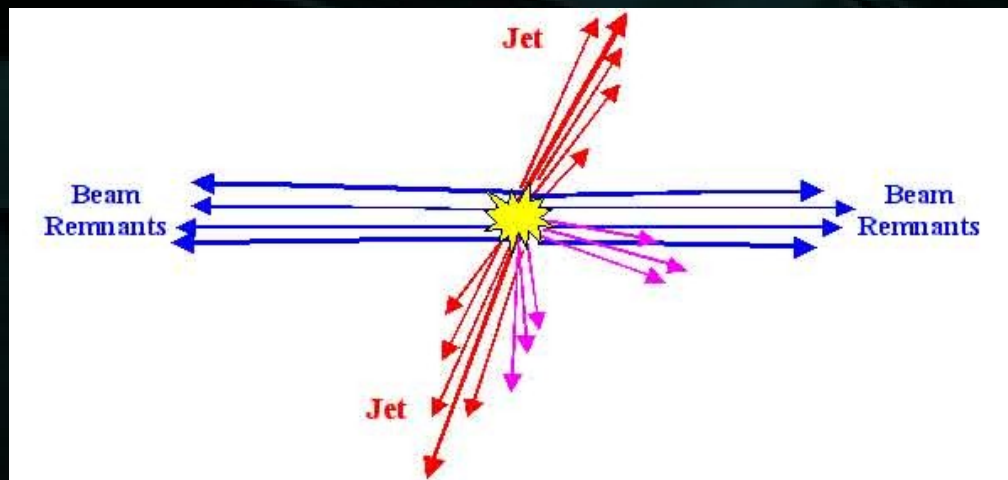
- XFEL oraz inne "Light sources" - badania materiałowe
- Terapia hadronowa (kilka akceleratorów jest budowanych)
- Akceleratorzy przemysłowe (implantacja jonów, etc...)
- Następne giganty (CLIC oraz NLC) - liniowe!
- Może fuzja

wspomagana
akceleratorami?

Basic and Applied Research		Medicine	
High-energy phys.	120	Radiotherapy	7500
S.R. sources	50	Isotope Product.	200
Non-nuclear Res.	1000	Hadron Therapy	20
Industry			
Ion Implanters	7000		
Industrial e- Accel.	1500	Total:	17390

CLIC - dlaczego wracamy do elektronów?

- Dwie wiązki elektronów w akceleratorze liniowym o długości 50 km
- Protony są cząstkami złożonymi, w związku z czym kiedy się zderza 2 protony to na prawdę zderzane są 2 kwarki lub gluony o nieznanej energii!



Podsumowanie

- Akceleratory służą otrzymywaniu wiązek cząstek naładowanych o wysokich energiach
- Kilka metod przyśpieszania: elektrostatyczne, na grzbiecie fali (wnęki rezonansowe), w plazmie
- Źródła cząstek - termoemisja oraz plazma
- Akceleratory liniowe oraz kołowe
- Cyklotrony oraz synchrotrony
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole)
- Punkt zderzenia - **światłość**
- Po LHC: liniowy zderzacz elektronów

paczki cząstek

optyka wiązki

energia w środku masy