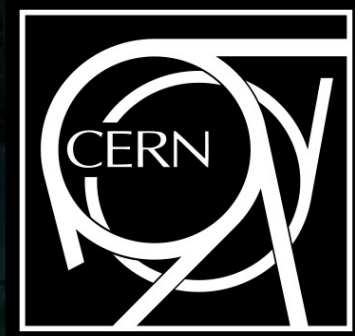


Wstęp do Akceleratorów

wykład dla nauczycieli



Mariusz Sapiński
CERN, Departament Wiązek
12 kwietnia 2010

Definicja

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

- produkcja cząstek (źródła)
- przyśpieszanie (wnęki przyśpieszające)
- wytwarzanie i magazynowanie wiązki
(magnesy)
- zderzanie wiązek (zderzacz)

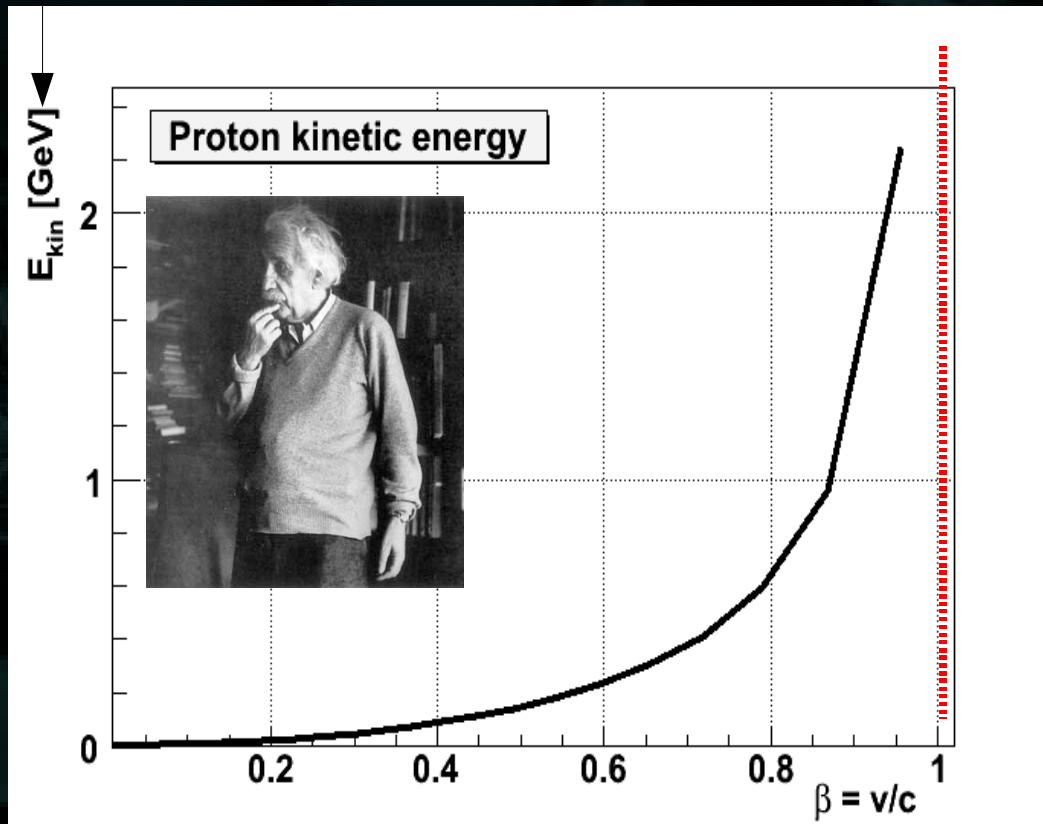
Czy istnieją wiązki bez akceleratora?

Tak, np. wiązki promieniowania alfa produkowane poprzez kolimację promieniowania pochodzącego z rozpadów izotopów radioaktywnych.

Przyśpieszanie ma granice

(przypomnienie z relatywistyki)

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



**granica przyśpieszania
jest prędkość światła**

W LEPie elektrony poruszały się z prędkością 99.9999...% prędkości światła. Czyli nazwa “akcelerator” lub “przyśpieszacz” jest w pewnym sensie mylna, prędkość rośnie bardzo nieznacznie dla cząstek relatywistycznych – rośnie ich energia.

Dlatego w CERNie nie mówi się o przyśpieszaniu do prędkości ale do ENERGII (3.5 TeV)

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

Wiązki wiążce nierówna czyli jakie wiązki produkujemy w CERNie

Fizycy potrzebują wiązek:

- wybranego rodzaju cząstek (protonów)
- o wybranej energii (7 TeV)
- Intensywności (10^{14} cząstek)
- o wybranych rozmiarach (0.1 – 0.02 mm)
- w dobrze kontrolowanych warunkach (stabilność, ochrona przed uszkodzeniem)

Obecna technologia pozwala na generację wiązki jonów każdego właściwie pierwiastka (w tym krótkożyjących izotopów).
Istnieją też wiązki **wtórne** mionów, neutrin, neutronów, fotonów...

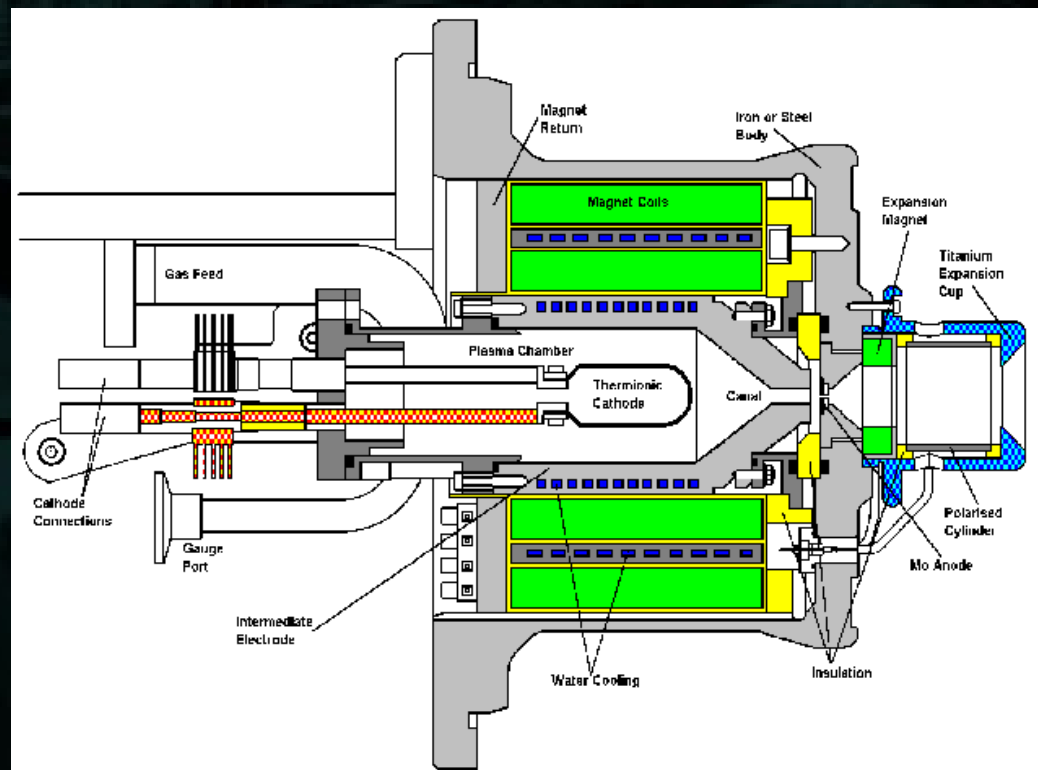
Spis treści

- Źródła cząstek
- Przyśpieszanie elektrostatyczne
- Wnęki rezonansowe. Surfowanie na fali.
- Warunek synchroniczności
- Ciekawostki: mechanizm Fermiego, akceleratorzy plazmowe
- Akceleratorzy kołowe: cyklotron
- Synchrotrony.
- Zderzacze: światłość. Wiązka LHC.
- Przyszłość akceleratorów

Źródła cząstek

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

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



Kolejne etapy:

1. kolimacja
2. formowanie paczek
3. przyśpieszanie

Jak przyśpieszać ?

Zamiana jakiejś formy energii na energię kinetyczną

- Samochód: energia chemiczna – termiczna – mechaniczna

Skomplikowany mechanizm – nieadekwatny do cząstek elementarnych – trzeba użyć pól elementarnych

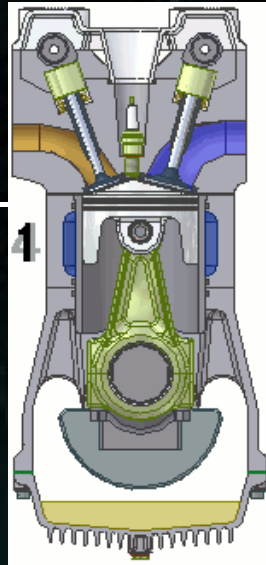
- Pole grawitacyjne: $\alpha_G = Gm_e^2/\hbar c = 1.8 \cdot 10^{-14}$

- Pole magnetyczne: $F = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$

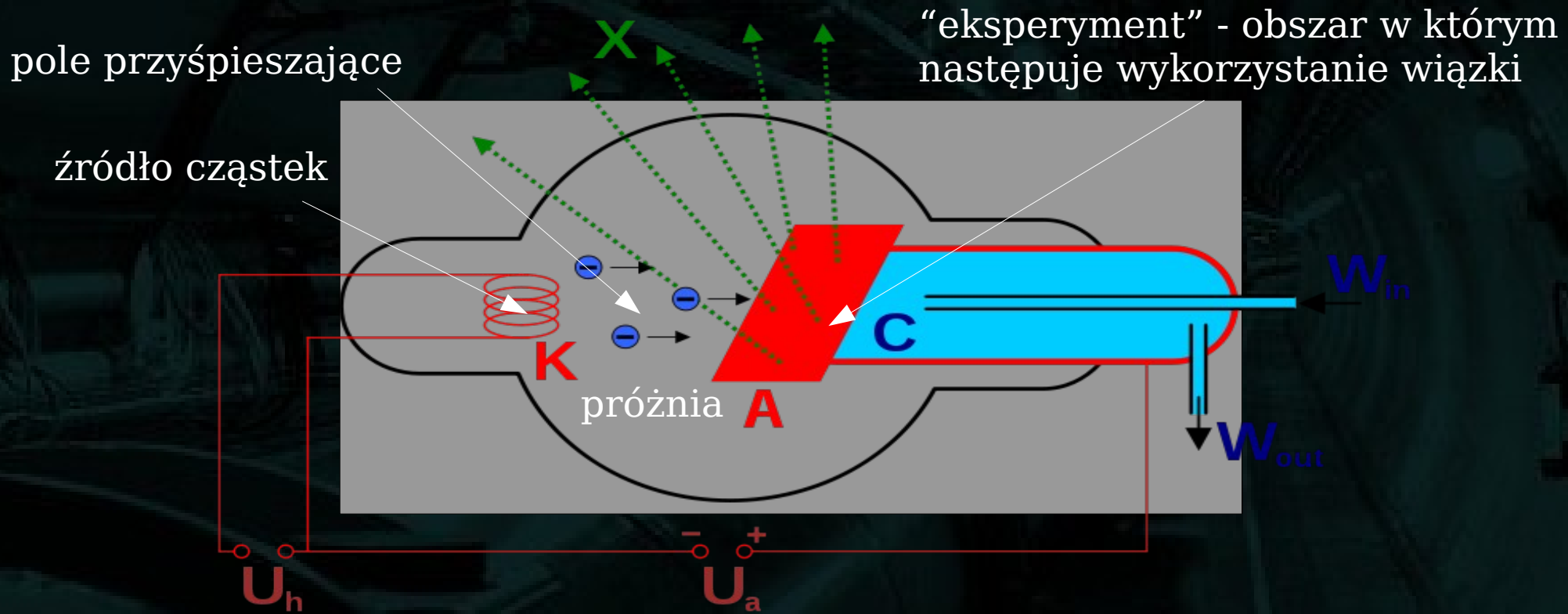
Statyczne pole magnetyczne działa prostopadle do kierunku ruchu – nie może być użyte do przyśpieszania (ale przydaje się do czego innego)

- Pole elektryczne:

$$\alpha_{EM} = e^2/4\pi\hbar c\epsilon_0 = 7.3 \cdot 10^{-3}$$

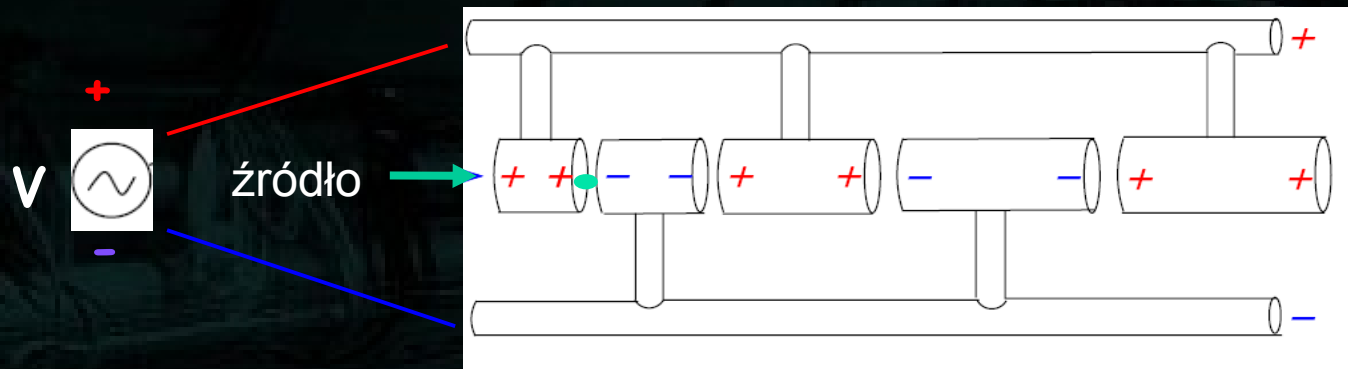


Najprostszy akcelerator elektrostatyczny (XIX wiek!)



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

Jak obejść ograniczenie wysokiego napięcia ?

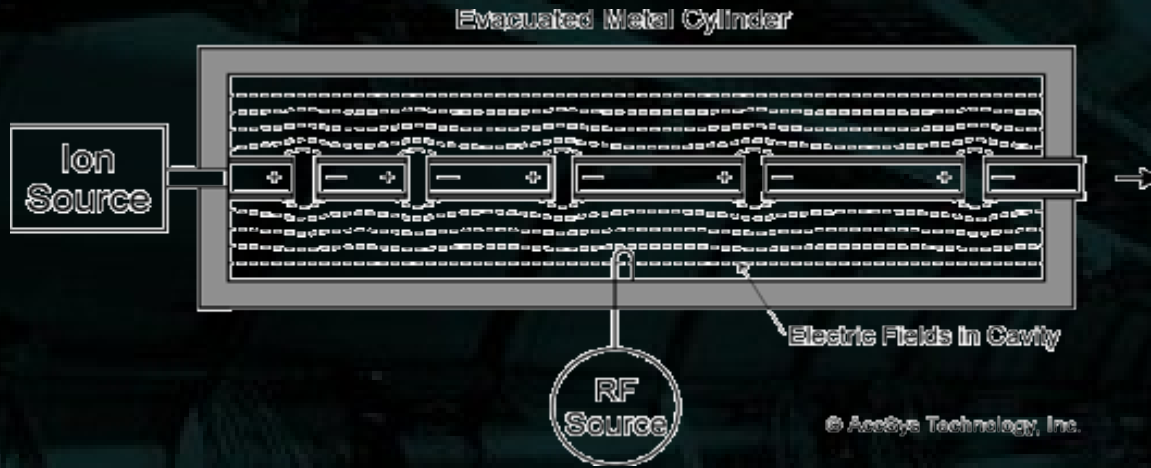


Wideroe

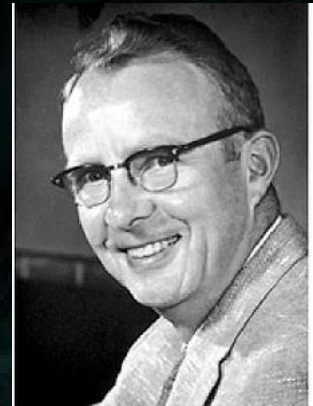
Pierwszy system: 1928

- Cząstki przyspieszane pomiędzy komorami dryfowymi
- Ograniczenia: **rozmiar** (dla 7 MHz, proton 1MeV pokonuje 2m/cykl), straty radiacyjne dla wyższych częstotliwości (ponad 10 MHz)
- Tak przyśpieszana wiązka nie może być ciągła - paczki!

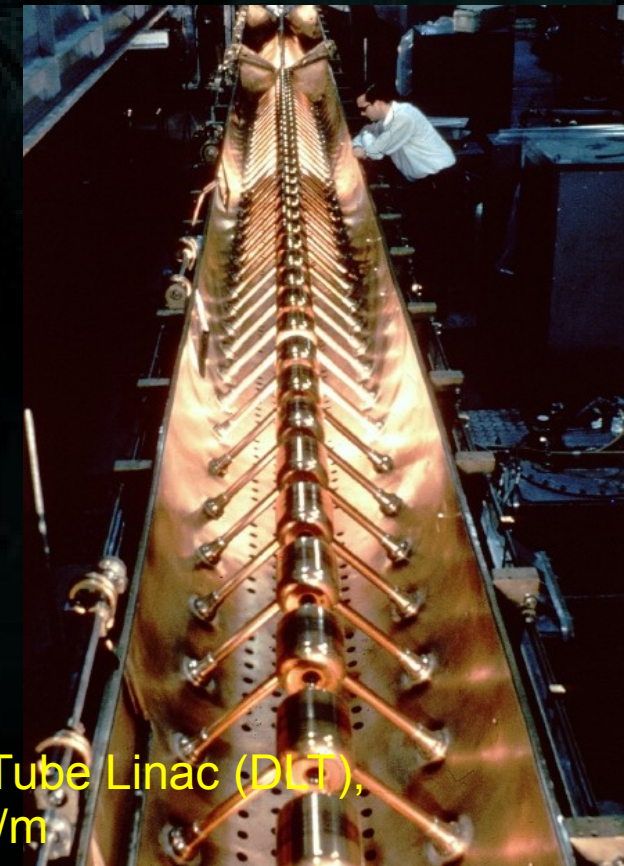
Ulepszenie: system Alvareza



1947, kiedy
technika
radarowa
(klystrony) była
już rozwinięta



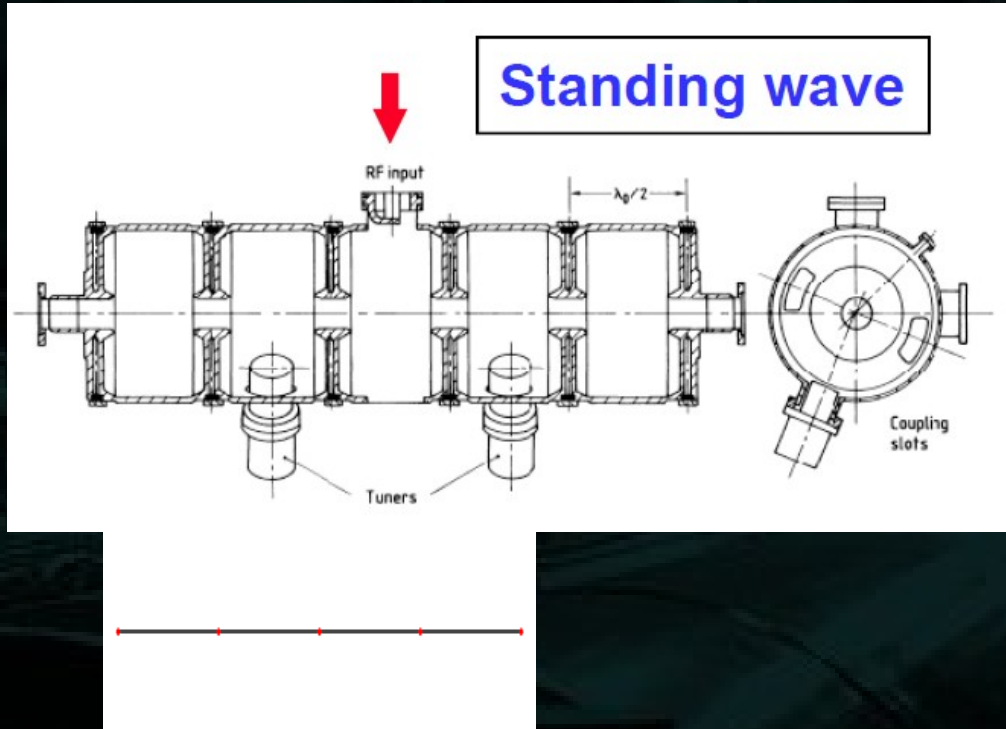
- Dołożenie zbiornika zbudowanego tak, aby jego częstość rezonansowa odpowiadała częstości fali potrzebnej do przyspieszania
- Fala stojąca z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi zbiornika generowana przez klistron
- Częstość fali: **200 MHz**
- System Alvareza jest używany do dziś



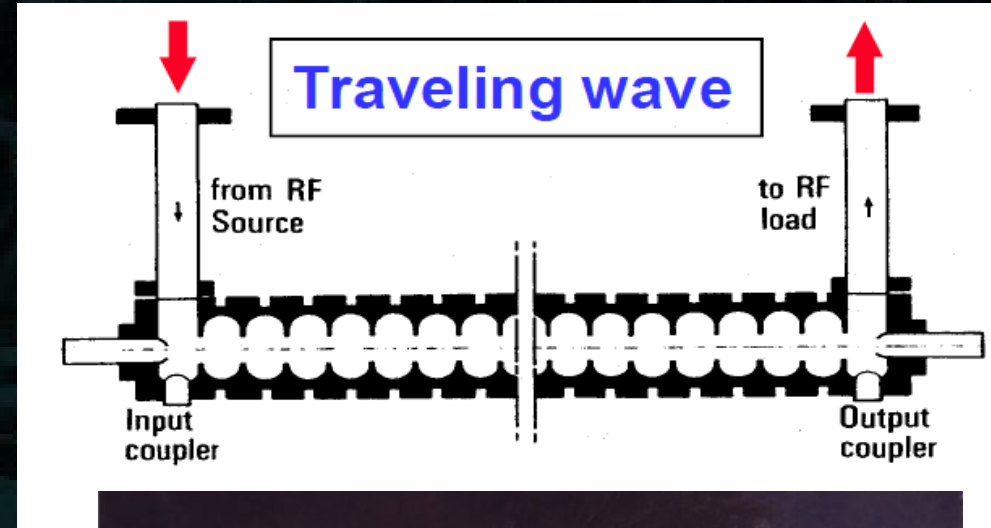
Drift Tube Linac (DLT),
3 MV/m

Fala stojąca a biegnąca

(dwa sposoby napędzania cząstki)

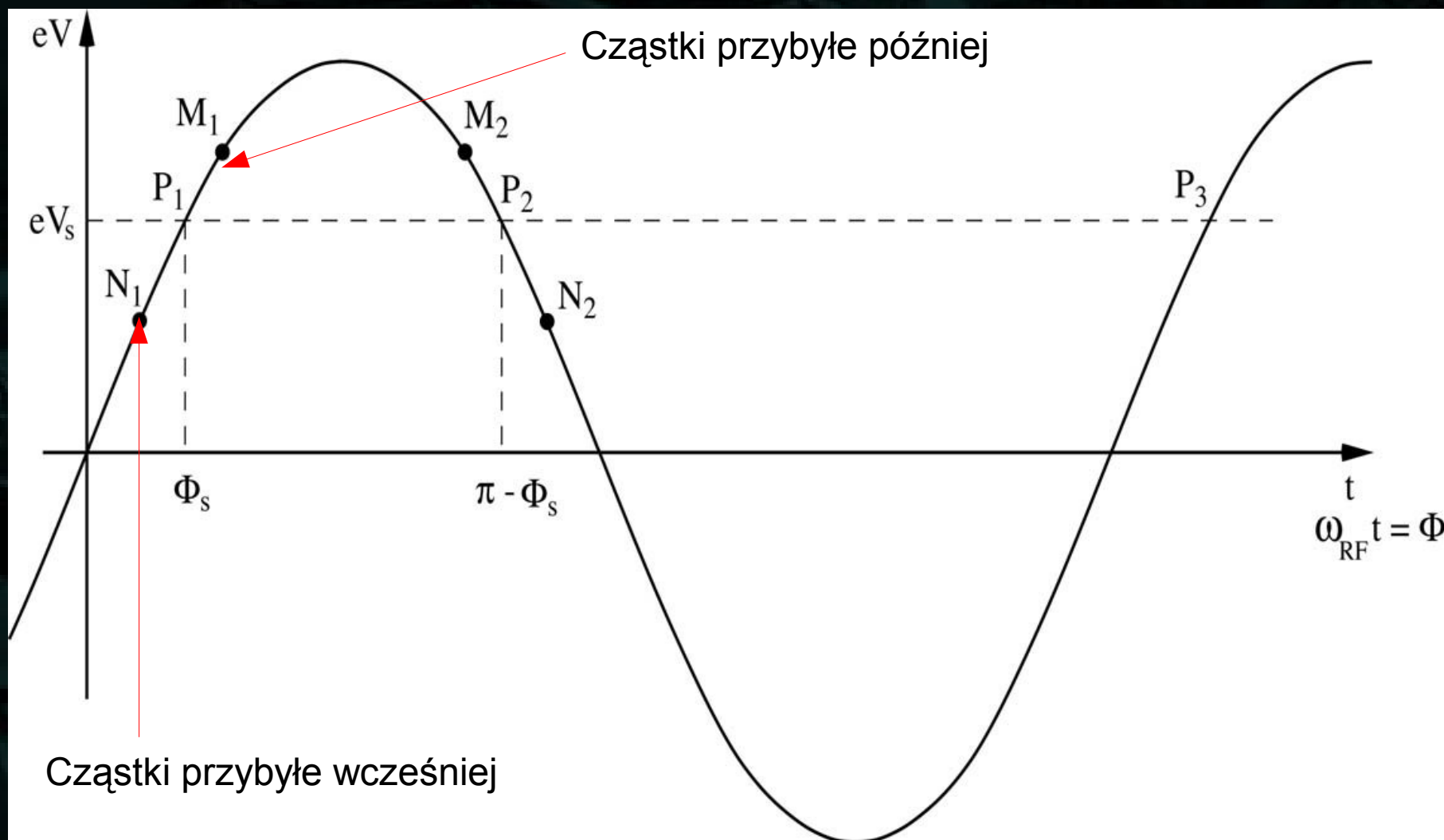


Przyśpieszanie na fali stojącej
gradienty ok. 5 MV/m
ale jednorodne, podczas gdy w
przypadku fali biegnącej przekaz
energii maleje wzdłuż struktury



Przyśpieszanie na fali biegnącej
gradienty ok. 20 -30 MV/m
(wnęki nadprzewodzące)

Stabilność: warunek synchroniczności



Skąd się bierze promieniowanie kosmiczne?

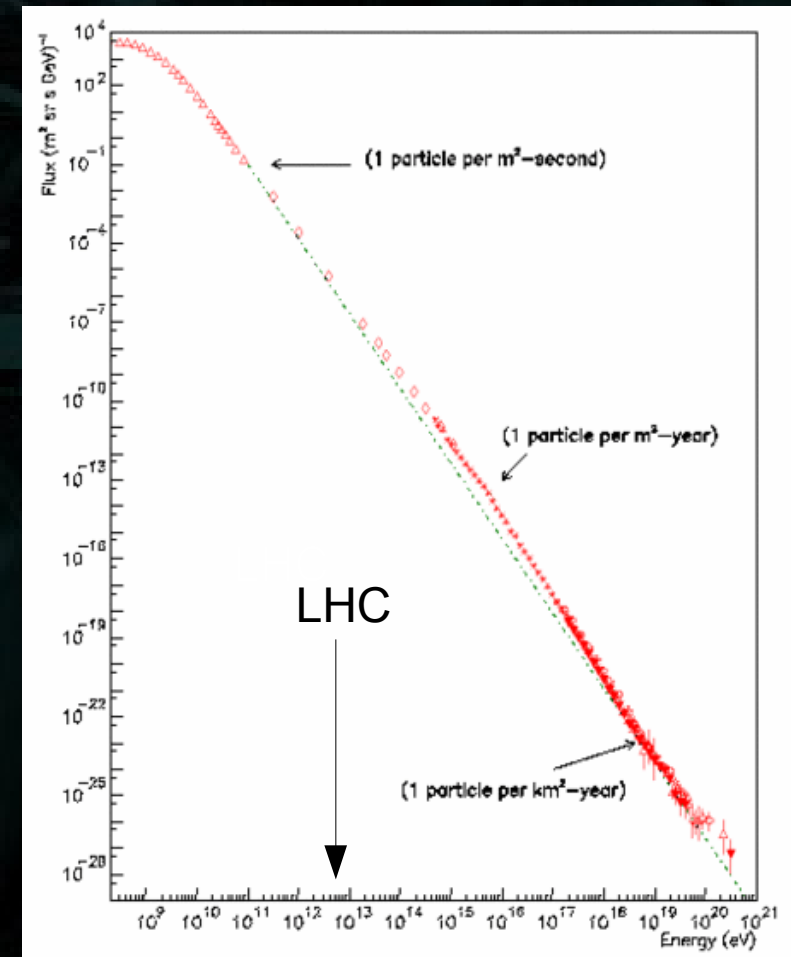
- Największe energie – promieniowanie kosmiczne:
 10^{20} eV, LHC: $7 \cdot 10^{12}$ eV

(Oh-my-God particle: 50 dzuli!)

- Promienie kosmiczne o najwyższych energiach może być produkowane przez **akcelerację Fermiego**:
przyśpieszanie przez magnetyczną falę uderzeniową

Ta metoda nie jest zbyt użyteczna dla nas:

- wymagana ogromna przestrzeń,
- cząstki przyśpieszane są izotropowo.



Nowe pomysły: akcelerator plazmowy

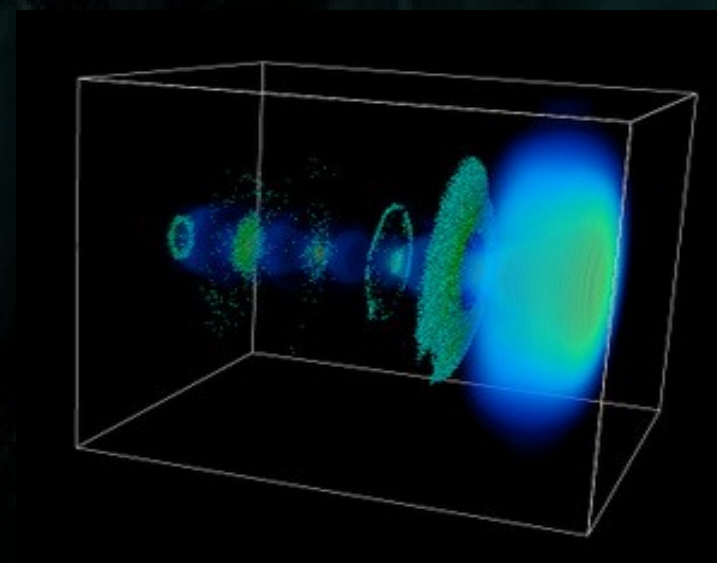
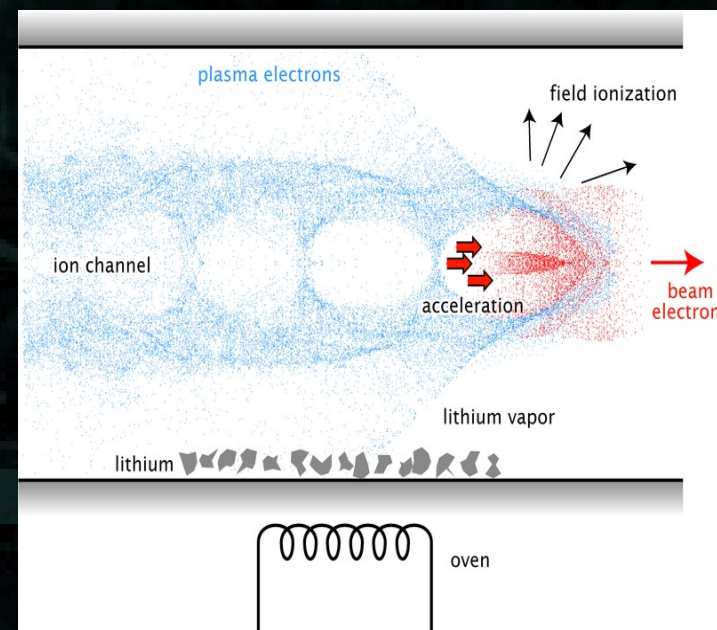
- Idea: pole elektryczne impulsu laserowego wstrzelonego w plazmę rozdziela elektrony od jonów tworząc **lokalnie bardzo wysoki gradient pola** (tzw. wakefield), który można wykorzystać do przyspieszania cząstek.

Porównanie gradientów:

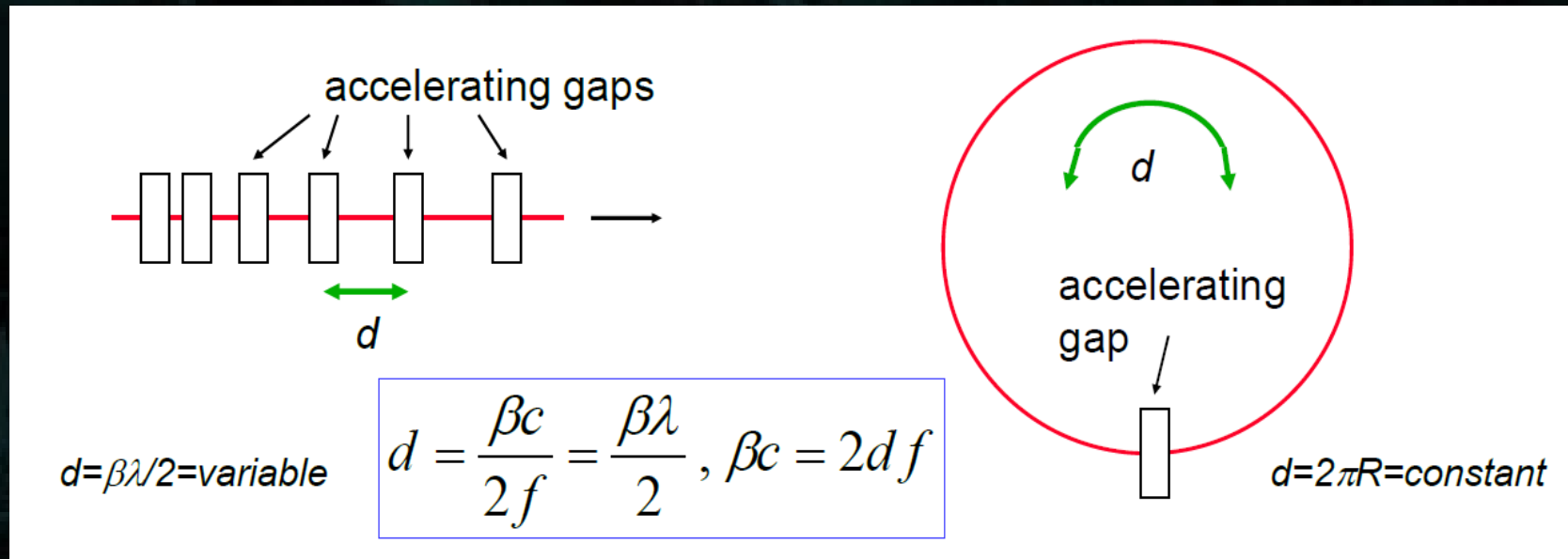
- wnęka rezonansowa: 30 MV/m
- plazma gazowa: 100 GV/m
- plazma w ciele stałym: 100 GV/cm

femtosekundowa synchronizacja

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



Akceleratorzy liniowe a kołowe



Liniowy:

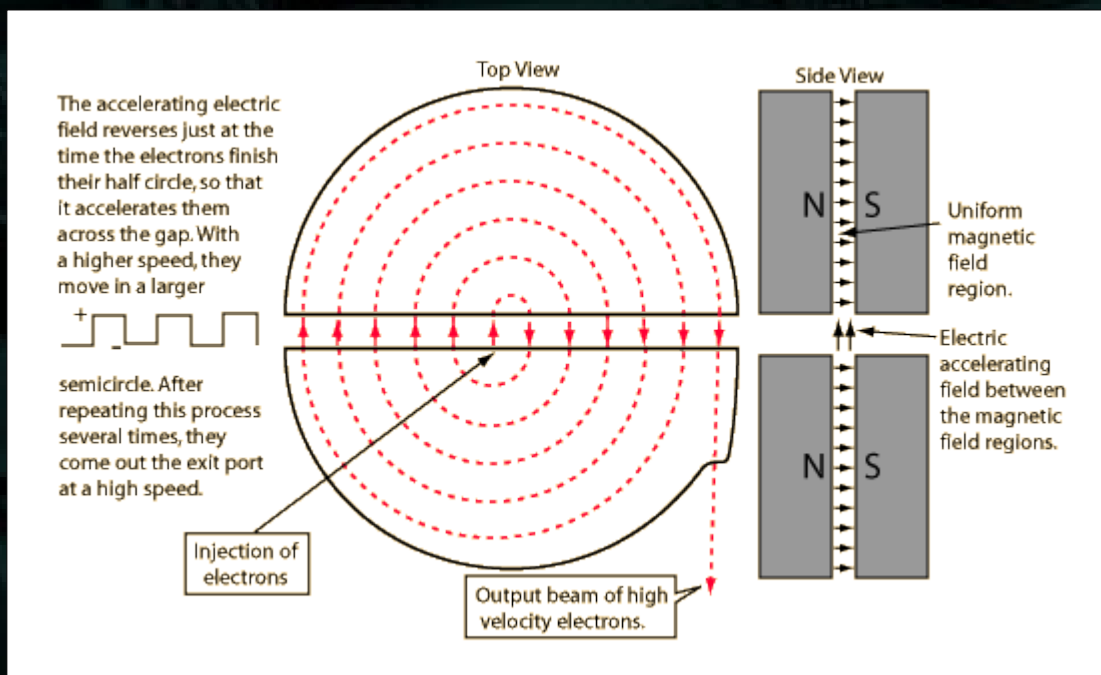
- Każdy element przyspieszający jest używany raz,
- Odległość między elementami przyspieszającymi może rosnąć tak, aby częstotliwość fali przyspieszającej dostosować do prędkości cząstki

Kołowy:

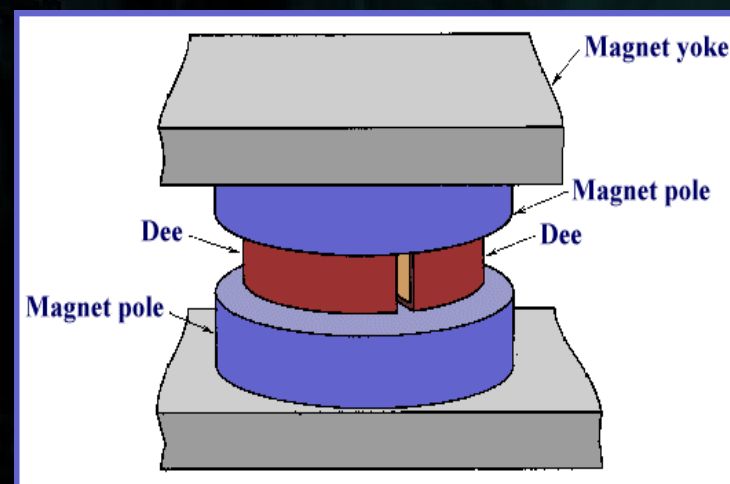
- Element przyspieszający jest używany wielokrotnie,
- Jeśli akcelerator jest zderzaczem to te same paczki cząstek można wykorzystywać wielokrotnie
- **$B\rho = p/e$** - w trakcie przyspieszania zmienia się **B** lub **ρ**

Akceleratory kołowe – historia równoległa

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



Lawrence, Nobel 1939
(ale też Widroel!)



Za każdym razem wykorzystuje się inną część szczeliny przyspieszającej

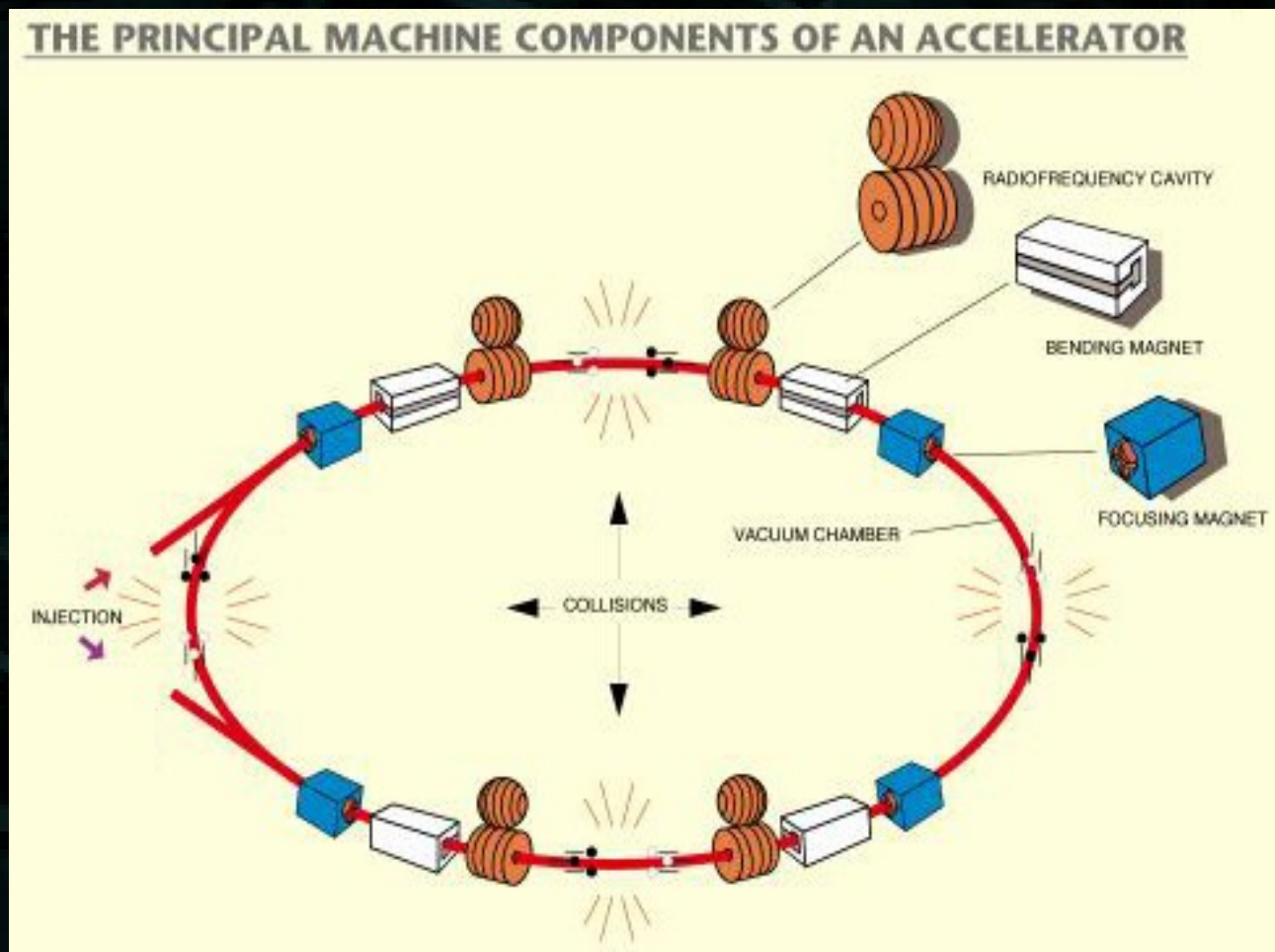
Synchrotrony

M. Oliphant - idea

E. McMillan - realizacja

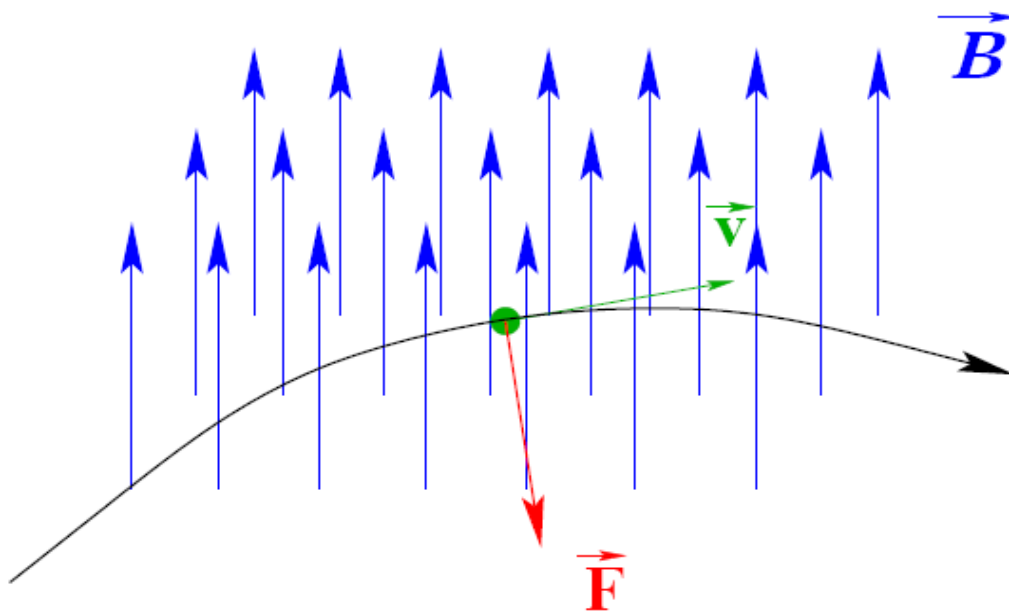
- Zmieniamy (**synchronicznie**) oba pola: elektryczne (gradient we wnękach rezonansowych) i magnetyczne
- Cząstki poruszają się po orbicie o stałym promieniu
- Główne elementy synchrotronu:
 - Magnesy zakrzywiające
 - Magnesy ogniskujące
 - Wnęki rezonansowe (omówiliśmy)
- Pierwszy synchrotron: 1952, 3 GeV, BNL

Zasadnicze elementy synchrotronu



Magnesy zakrzywiające wiązkę

- Dipole o wertykalnym polu zakrzywiają wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej



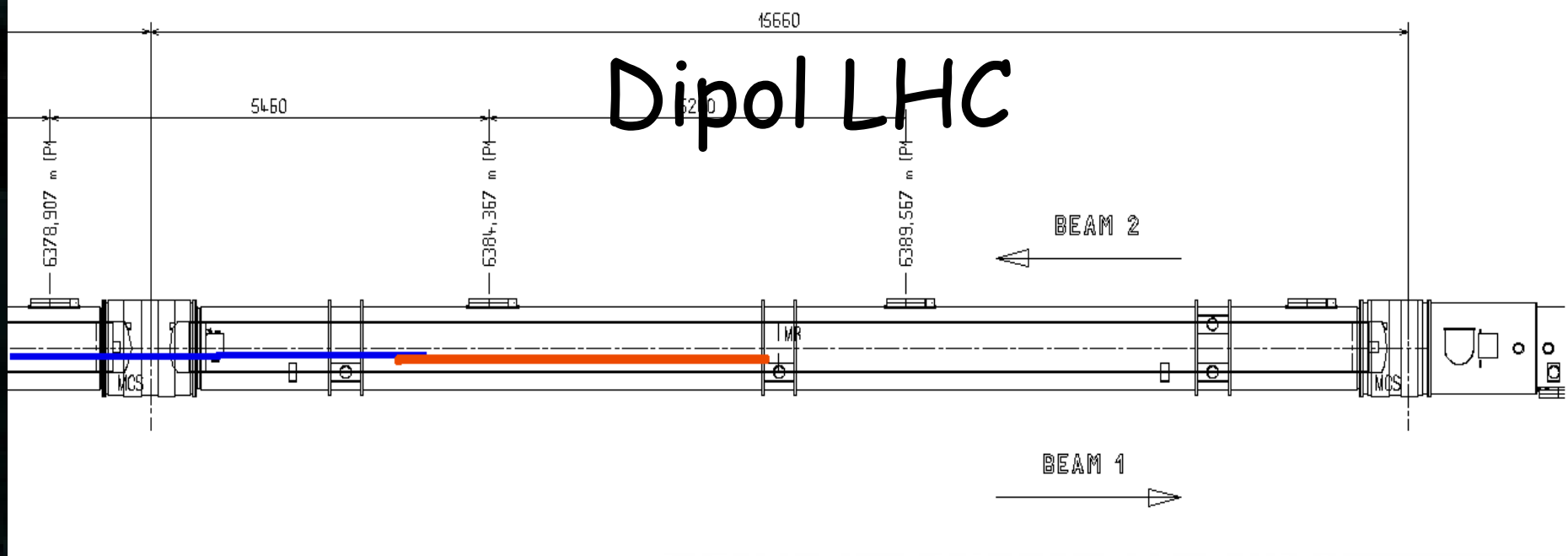
siła Lorentza:

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

Podstawowa relacja - sztywność magnetyczna:

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

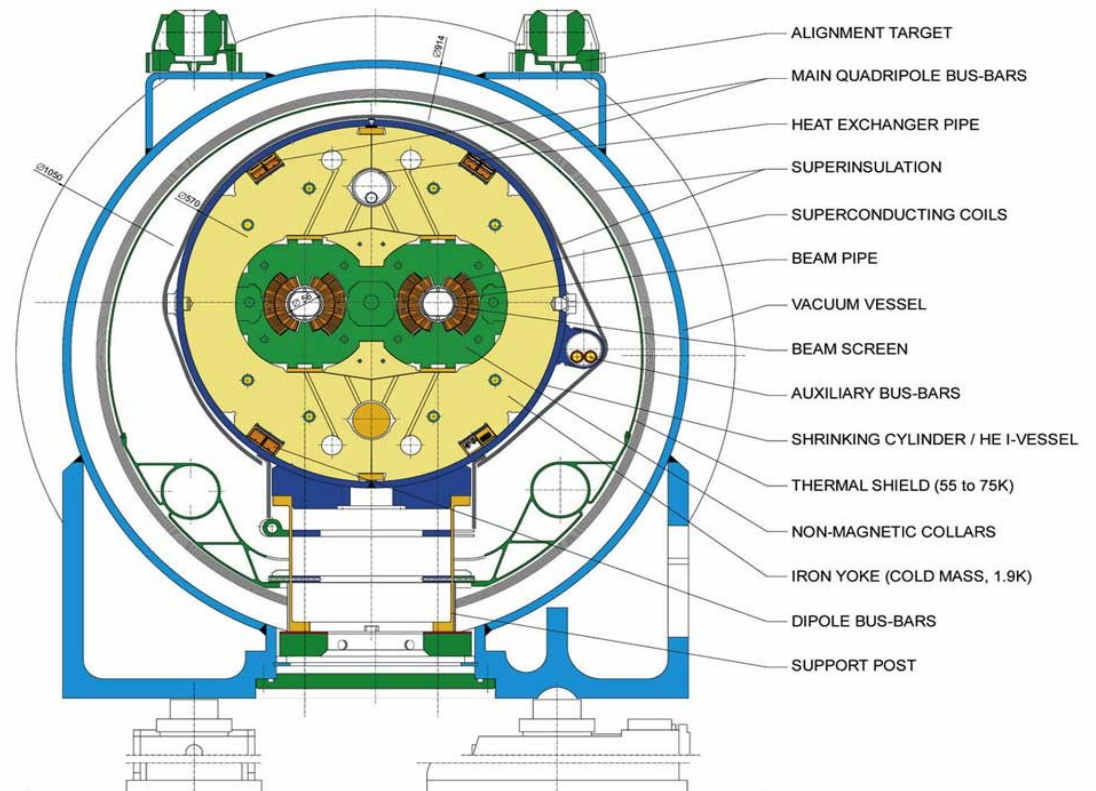




- Nadprzewodzący
- Długość ok. 15 m
- Waga ok. 22 ton
- Nominalne pole (środek rury): 8.33 T
- Promień zakrzywienia: 2.8 km

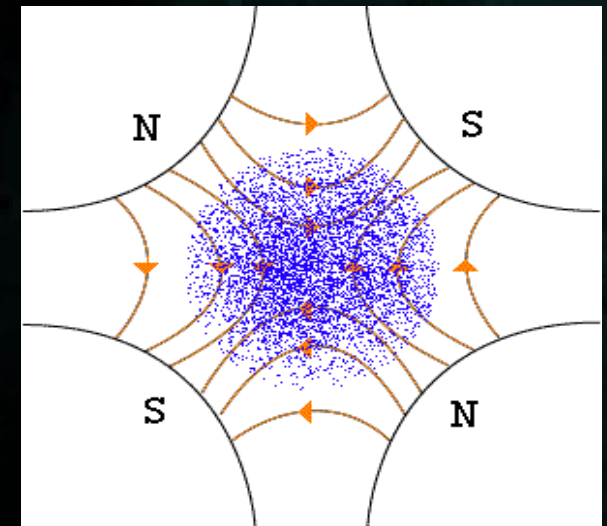
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

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

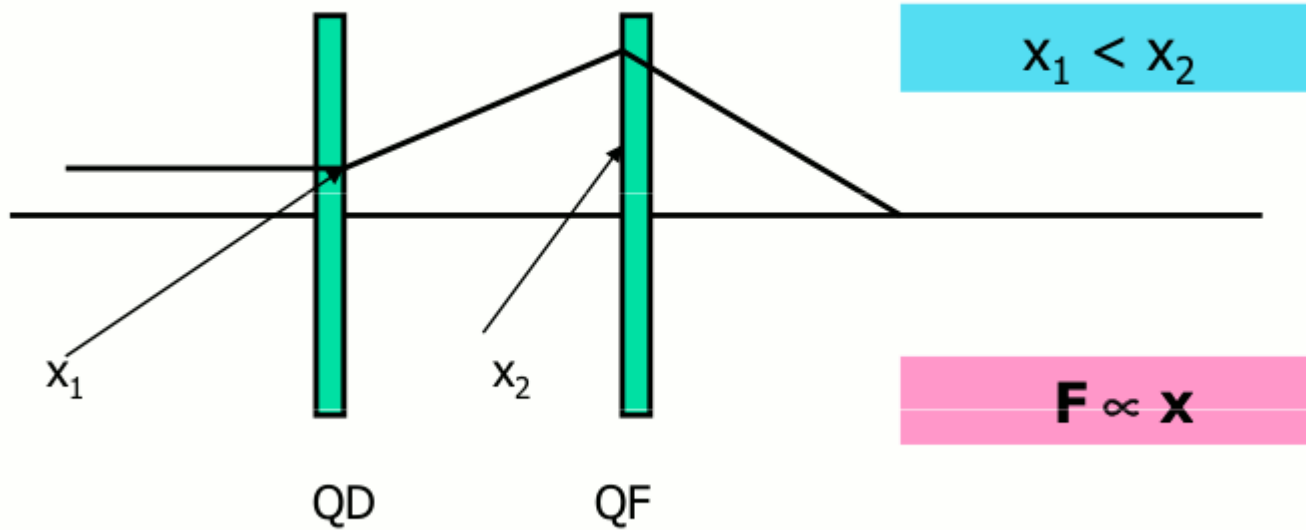


Stabilność wiązki

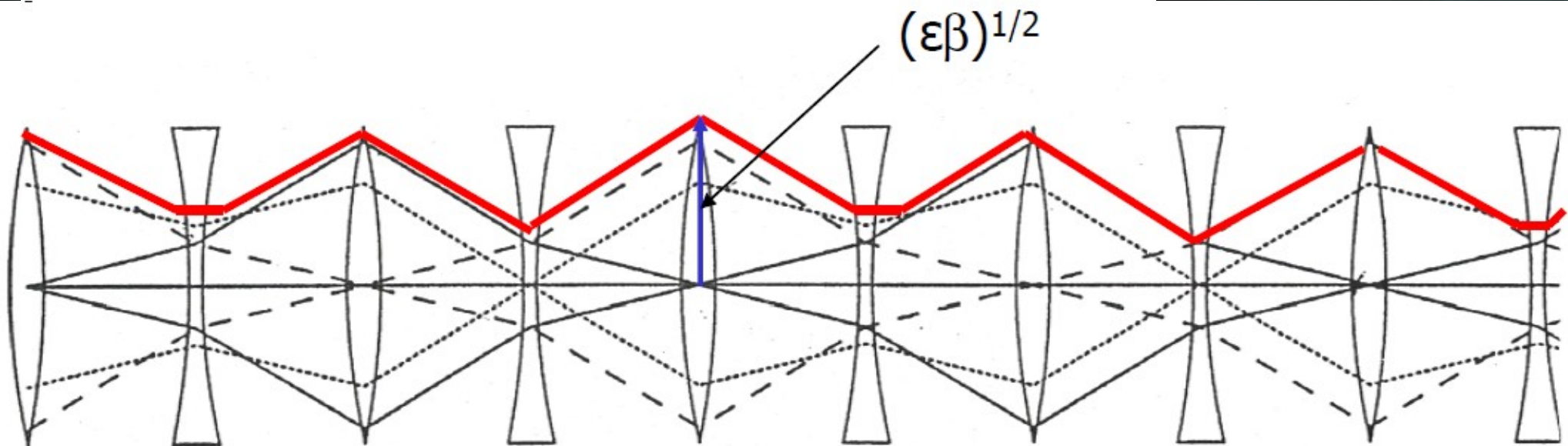
- W idealnej maszynie potrzebujemy tylko dipoli, ale
- Świat nie jest idealny – cząstki w wiązce są poddawane:
 - grawitacji
 - stratom energii w wyniku radiacji
 - oddziaływaniom międzycząstkowym
 - oddziaływaniom z materiałem akceleratora
- Te efekty źle rozogniskowują wiązkę
- Efekt ogniskujący dają kwadrupole
- Ogniskowanie w płaszczyźnie x jest jednoznaczne z rozogniskowaniem w płaszczyźnie y



Kwadrupole – analogia optyczna

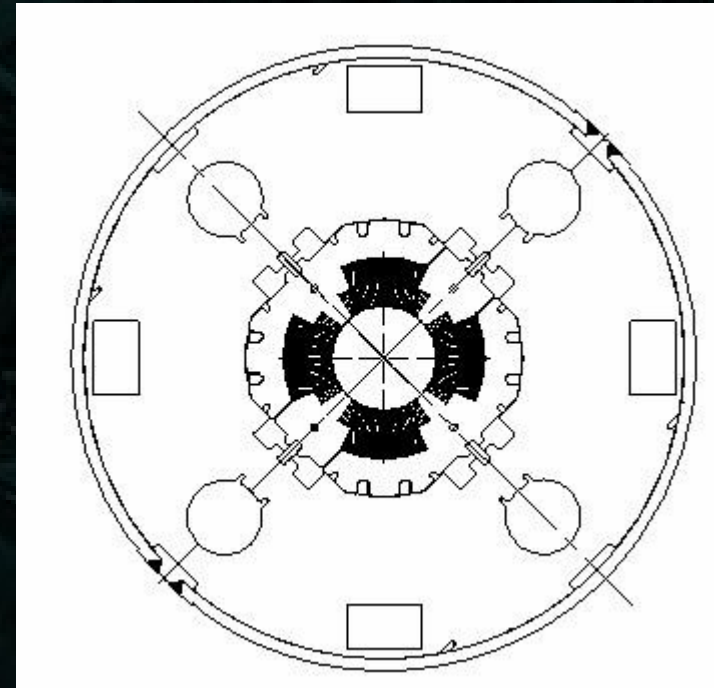


Cela FODO
funkcja beta



Kwadrupol LHC

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

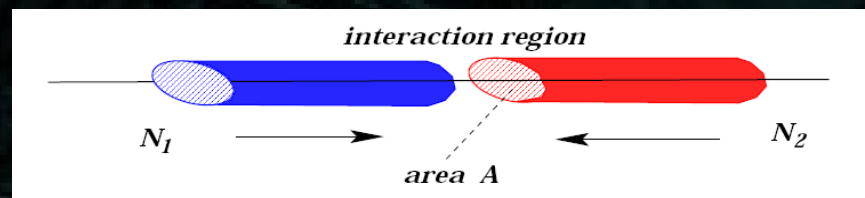
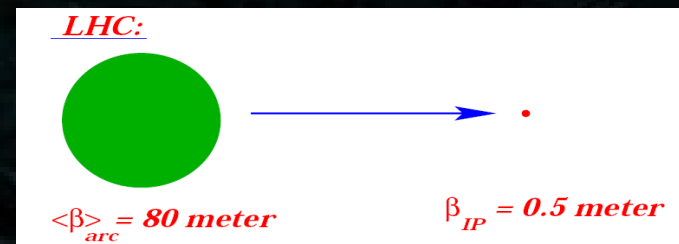


Punkt zderzenia

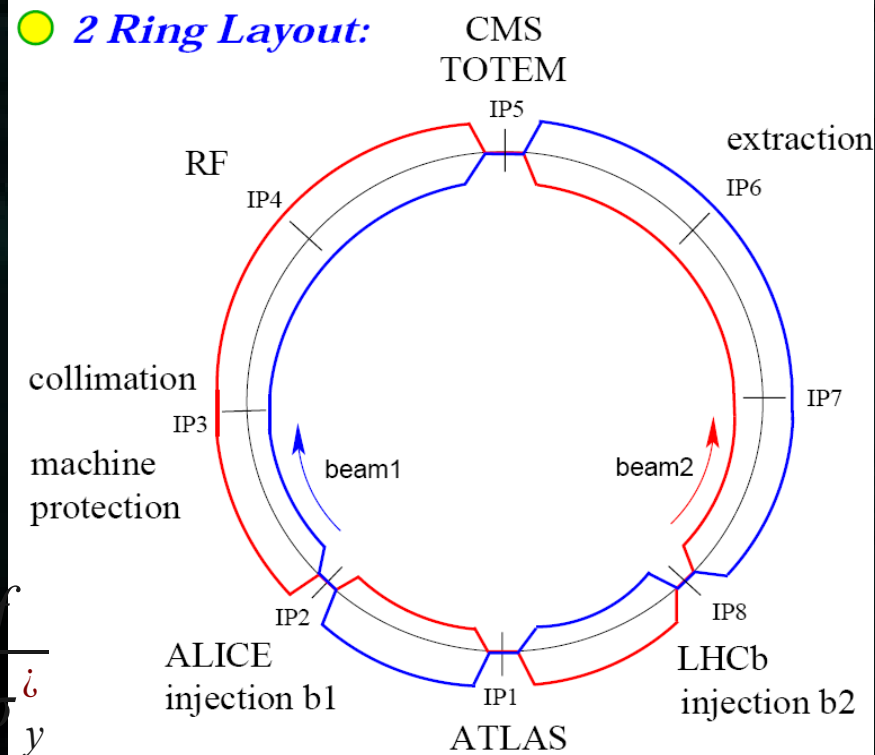
- Wiązki ogniskowane z około 0.1 mm do około 0.02 mm, (ludzki włos – 0.05 mm)
- Miliony zderzeń na sekundę (f)
- Świetlność chwilowa:
 $L = f / \sigma$
- Co to jest odwrotny femtobarn?

częstość zderzeń $\rightarrow$ liczba zderzeń

1 barn = 10^{-24} cm^2



2 Ring Layout:



Wiązka LHC

- 10^{14} protonów o energii 7 TeV (chwilowo 3.5 TeV) poruszających się po wspólnej trajektorii (odchylenie 0.1 mm)
- Energia kinetyczna zawarta w wiązce: 362 MJ
- Dla ilustracji: 10^{13} protonów, 450 GeV ekstrakcja z SPS, październik 2004, konieczna wymiana magnesu



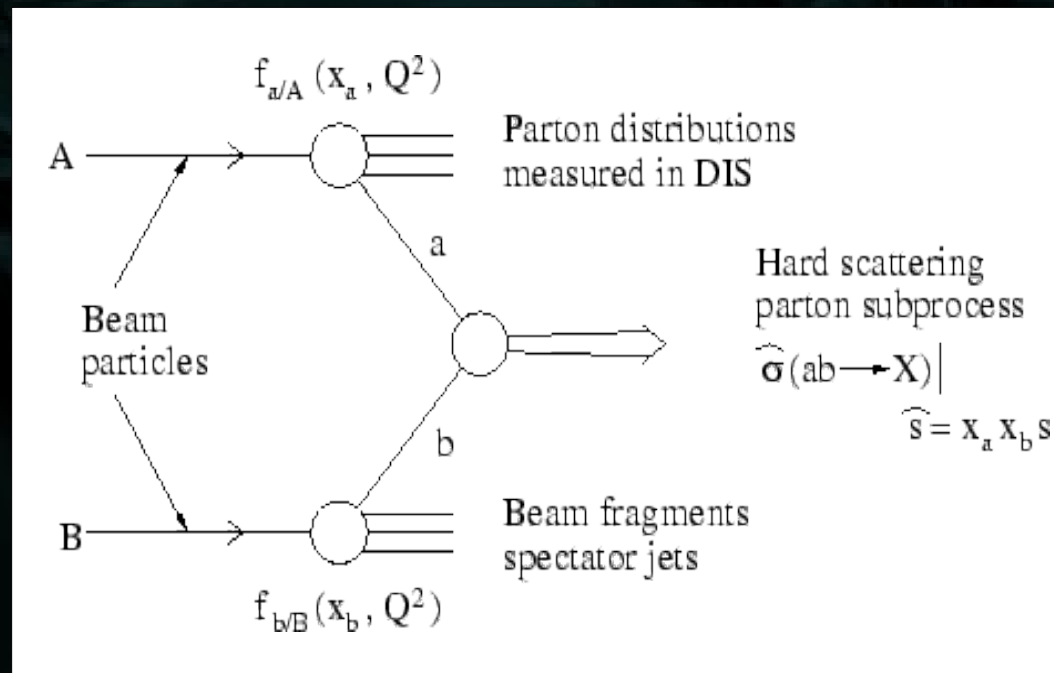
Przyszłość akceleratorów

- XFEL oraz inne “Light sources” - badania materiałowe
- Terapia hadronowa (kilka akceleratorów jest budowanych)
- Następne giganty (CLIC oraz NLC) – liniowe, elektronowe
- 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** (bez promieniowania synchrotronowego) o długości 50 km
- Protony są cząstkami złożonymi, w związku z czym kiedy się zderza 2 protony to oddziałują 2 kwarki lub gluony o nieznanej energii!



Podsumowanie

- Akceleratory służą otrzymywaniu wiązek cząstek naładowanych o wysokich energiach
- Źródła cząstek – termoemisja oraz plazma
- Kilka metod przyśpieszania: elektrostatyczne, na fali elektromagnetycznej stojącej lub biegnącej (wnęki rezonansowe), w plazmie paczki cząstek
- Akceleratory liniowe oraz kołowe
- Cyklotron: zmiana promienia z energią
- Synchrotrony: zmiana pola magnetycznego z energią
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole)
- Punkt zderzenia – światłość optyka wiązki
- Po LHC: CLIC liniowy zderzacz elektronów