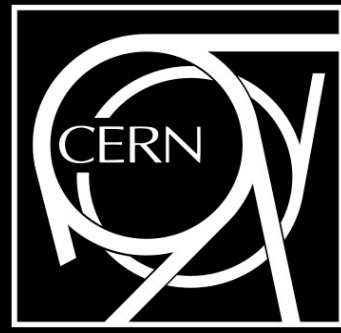


Jak fizycy przyśpieszają cząstki?



Mariusz Sapiński

(mariusz.sapinski@cern.ch)

CERN, Departament Wiązek

10 października 2011

Definicja

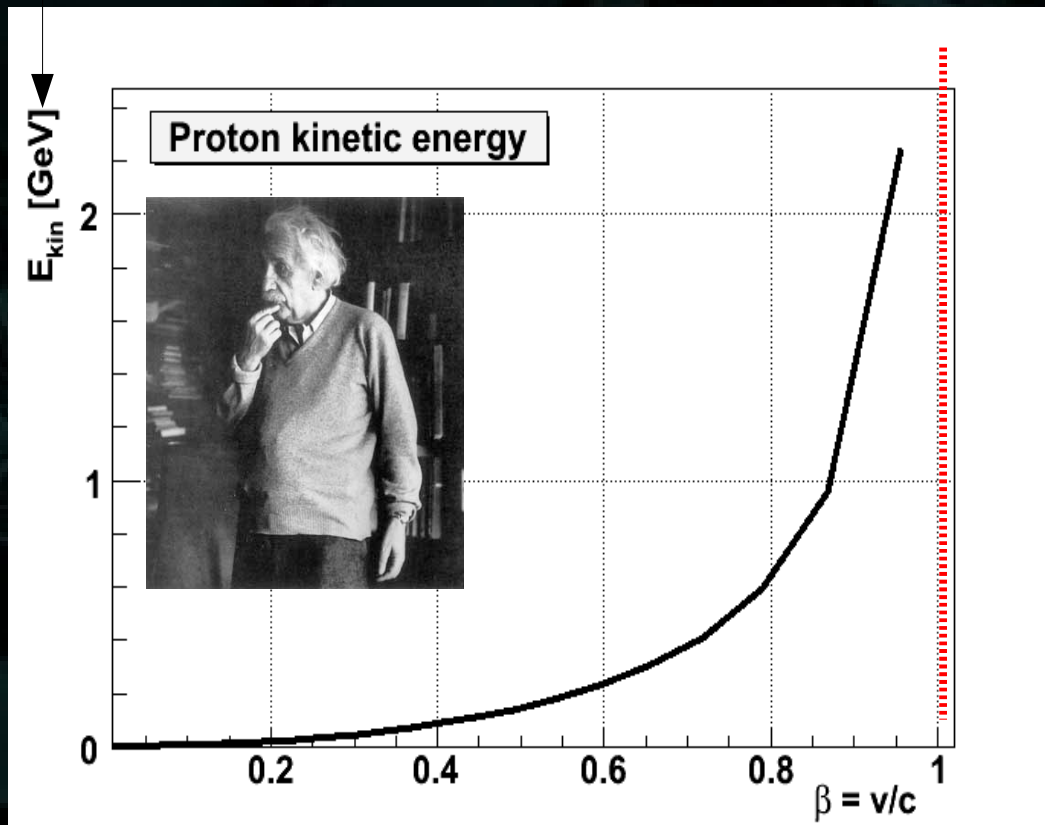
Akcelerator cząstek:
urządzenie produkujące **wiązkę** cząstek
(jonów lub cząstek subatomowych)

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

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 mylna, prędkość rośnie bardzo nieznacznie dla cząstek relatywistycznych – rośnie ich energia.

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

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

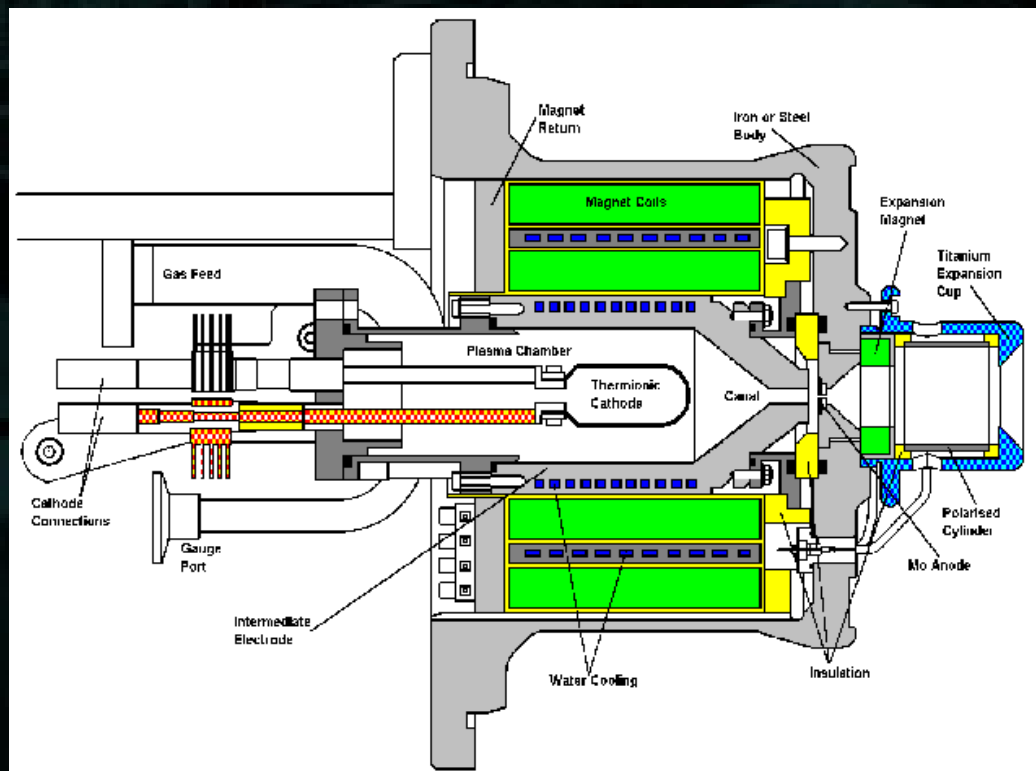
Spis treści

- Źródła cząstek
- Przyśpieszanie elektrostatyczne
- Wnęki rezonansowe. Surfowanie na fali.
- Ciekawostki: mechanizm Fermiego, akceleratory plazmowe
- Akceleratory kołowe: cyklotron
- Synchrotrony.
- Zderzacze: światłość.
- Akceleratory CERNowskie.
- Przyszłość akceleratorów

Źródła cząstek

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

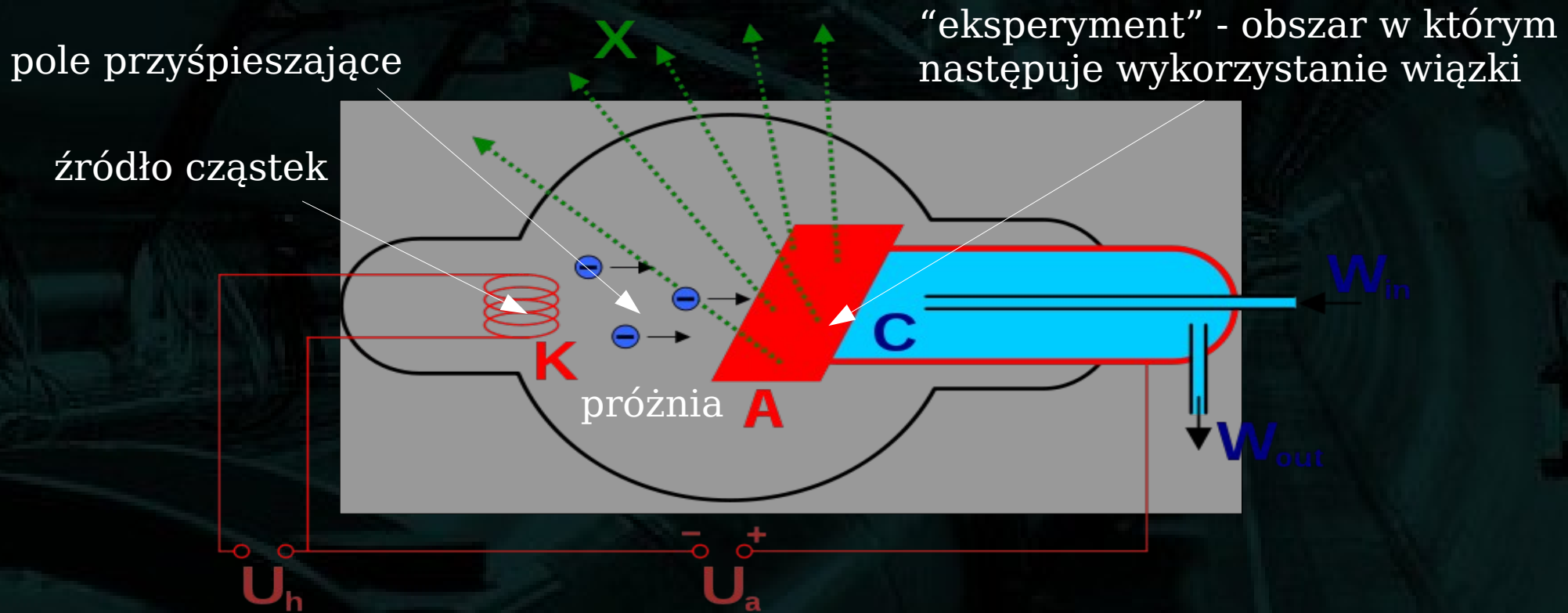
Jony/protony: wiele konstrukcji - jonizacja gazu a następnie zastosowaniu pola elektrycznego/magnetycznego do wypchnięcia jonów w jednym kierunku - duoplasmotron



Kolejne etapy:

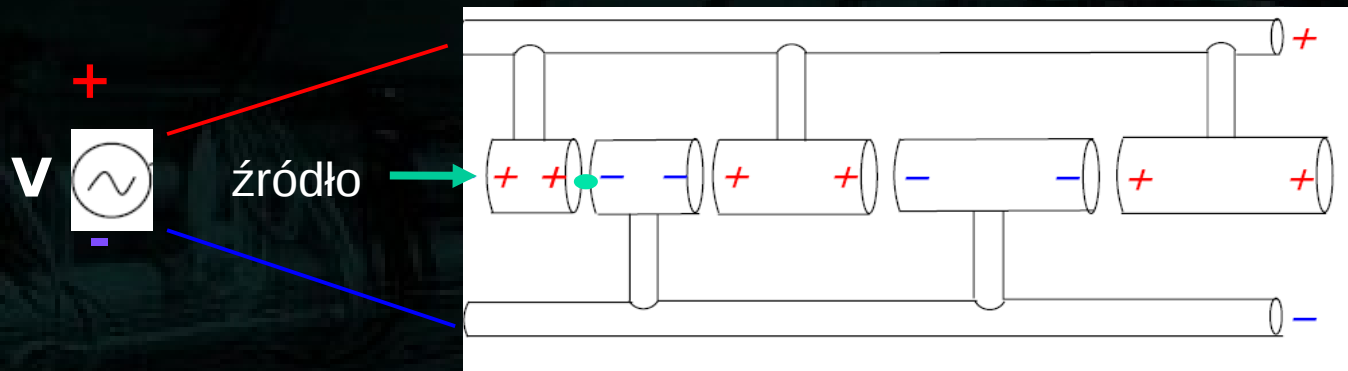
1. kolimacja
2. formowanie paczek
3. przyśpieszanie

Najprostszly 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 ?

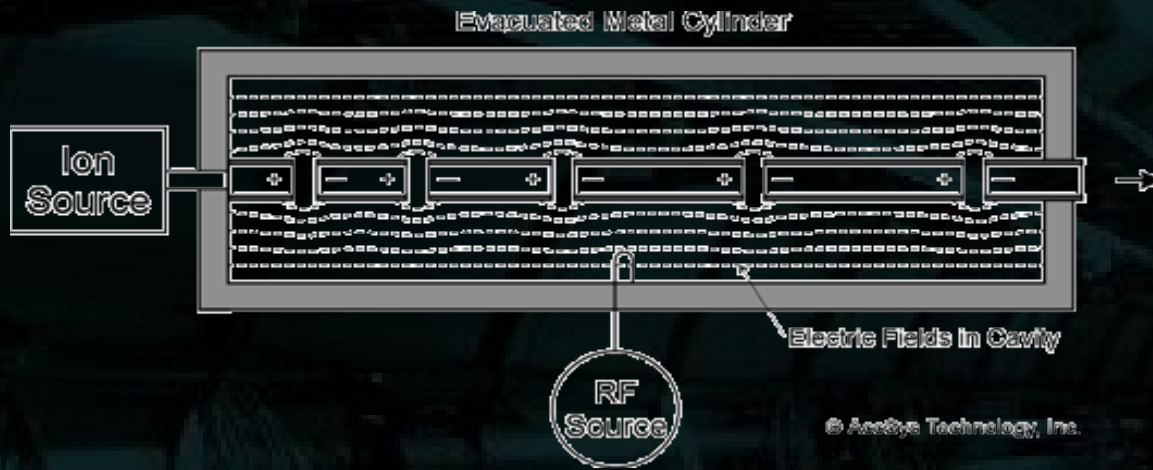


Wideroe

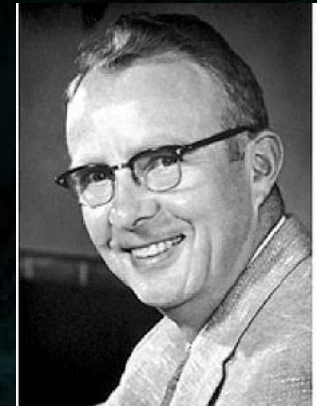
Pierwszy system: 1928

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

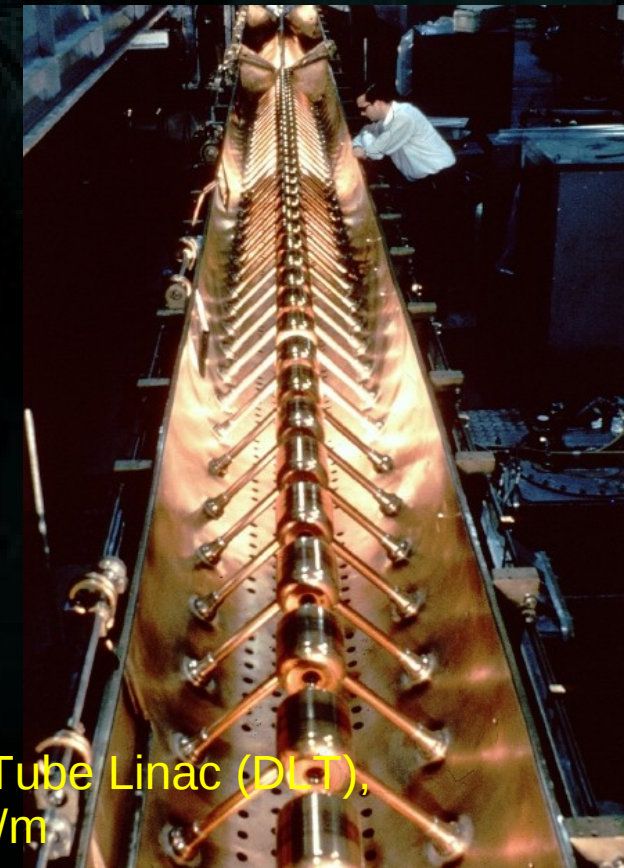
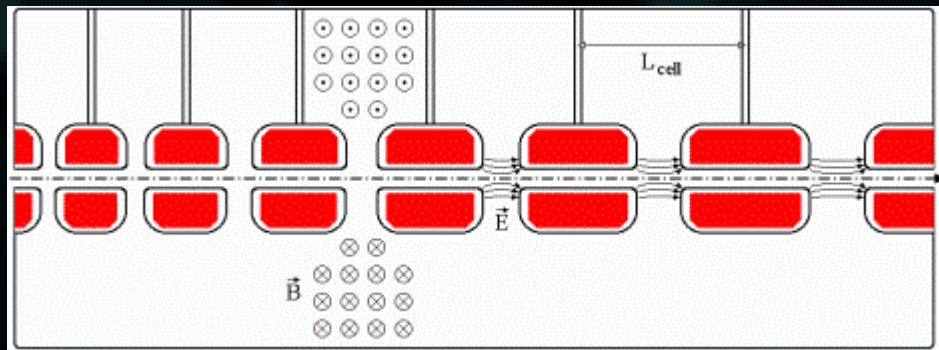
Ulepszenie: system Alvareza



1947, kiedy technika radarowa (klystrony) była już rozwinięta

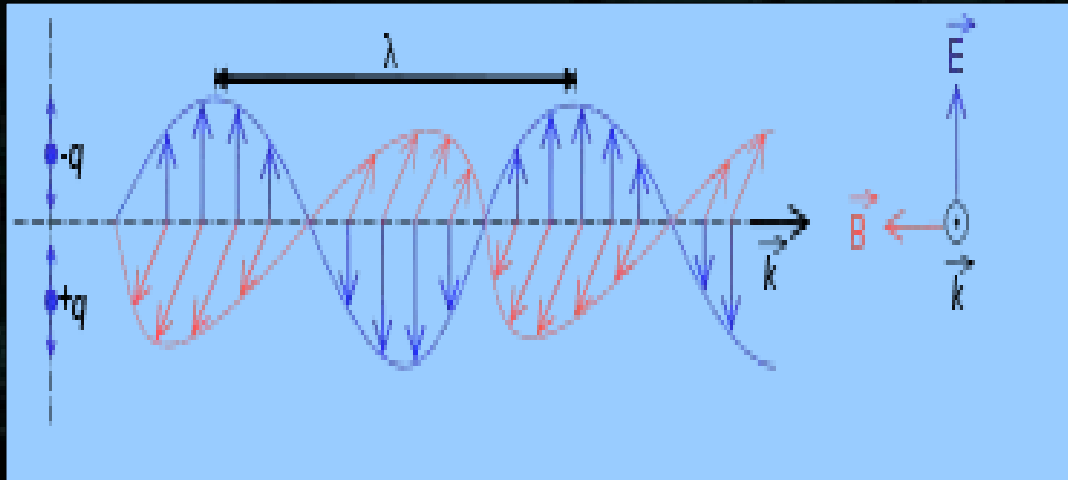


- Dołożenie zbiornika zbudowanego tak, aby jego częstota rezonansowa odpowiadała częstoci fali potrzebnej do przyspieszania
- Fala stojąca z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi zbiornika generowana przez klistron
- Częstotliwość fali: **200 MHz**

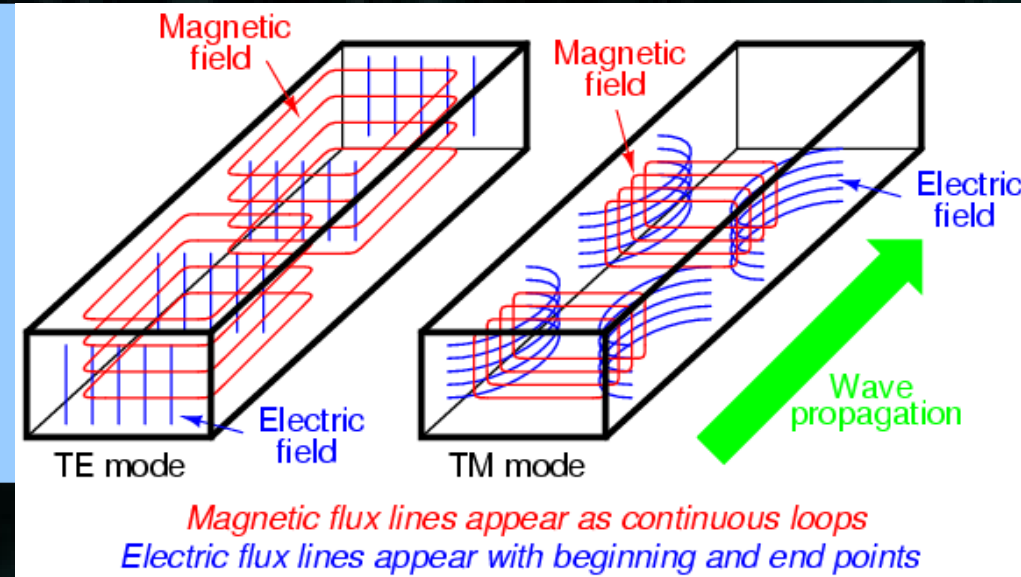


Drift Tube Linac (DTL), 3 MV/m

Pola fali elektromagnetycznej



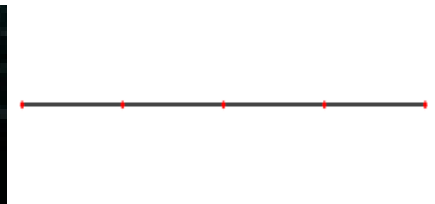
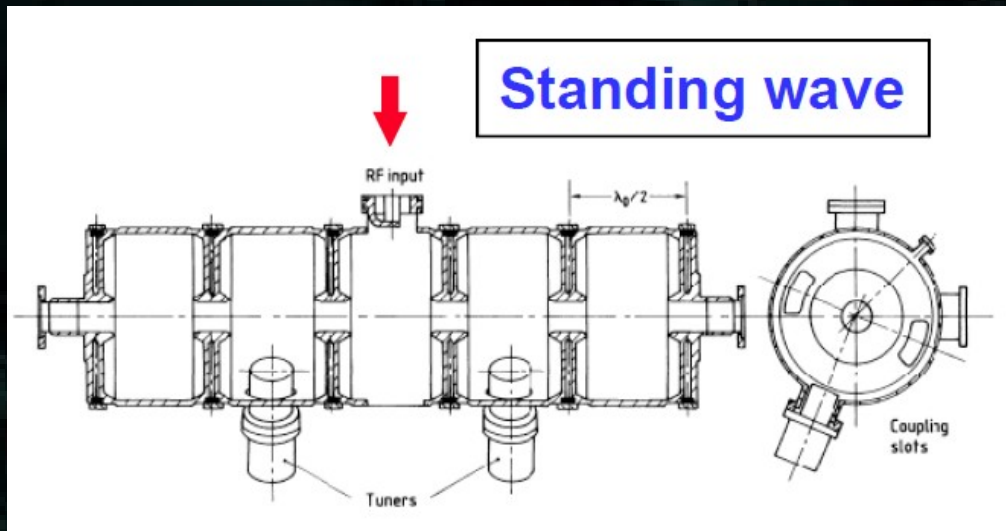
Fala w pustej przestrzeni



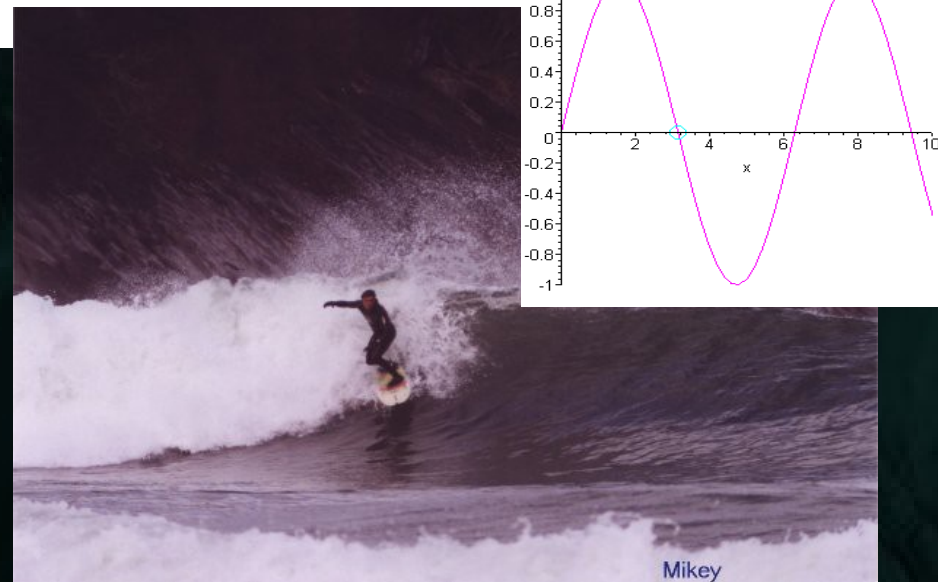
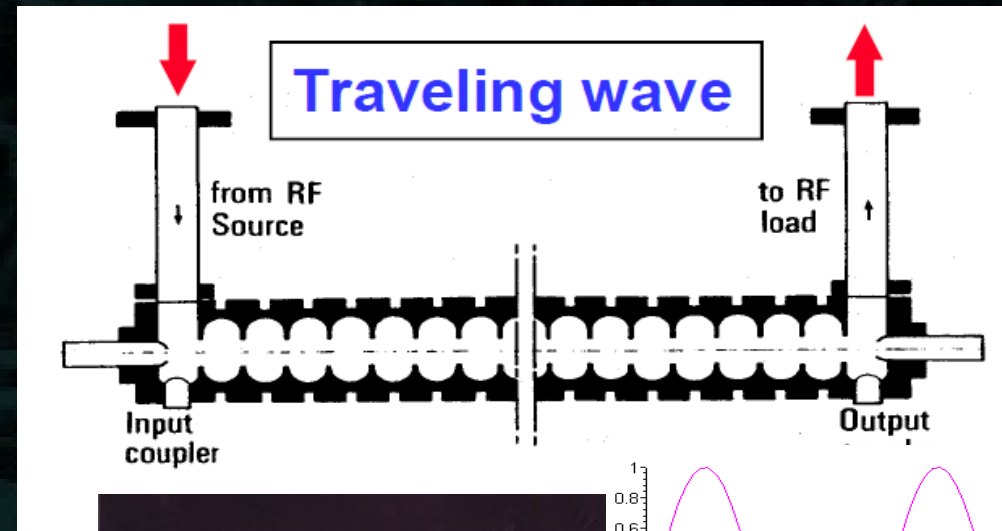
Fala w falowodzie

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)

Skąd się bierze promieniowanie kosmiczne?

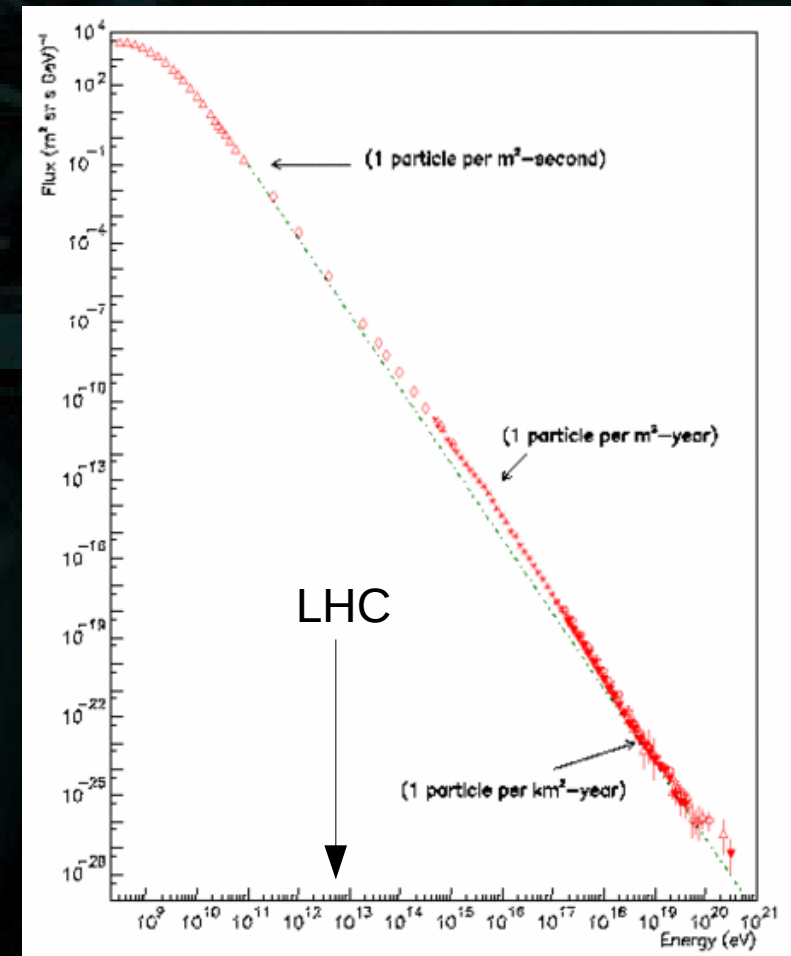
- Największe energie – promieniowanie kosmiczne: 10^{20} eV, LHC: $7 \cdot 10^{12}$ eV

(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.**

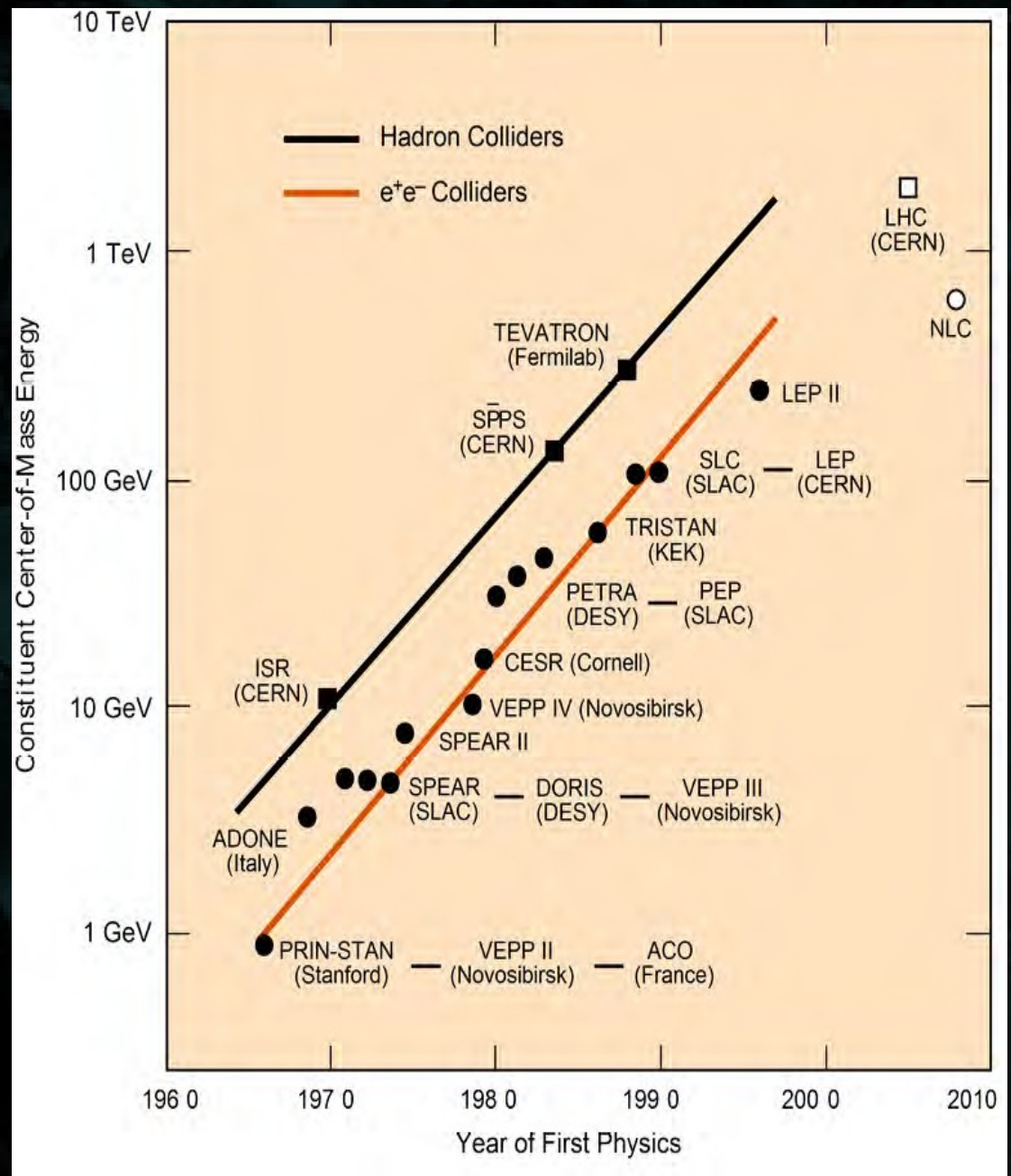


Tendencja historyczna

W przeszłości energia wiązek nowych maszyn rosła liniowo z czasem.

Teraz osiągamy saturację, pokazującą limity współczesnej technologii.

LHC jest maszyną o największej energii działającą w oparciu o wnęki rezonansowe.



Nowe pomysły: akcelerator plazmowy

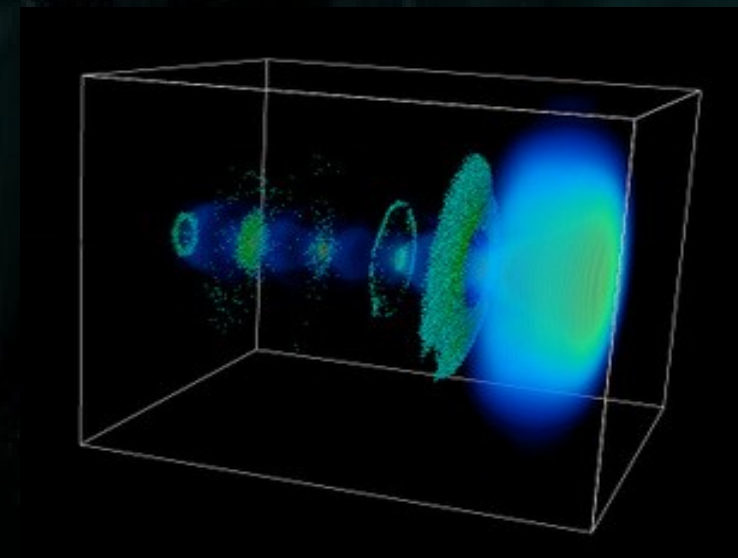
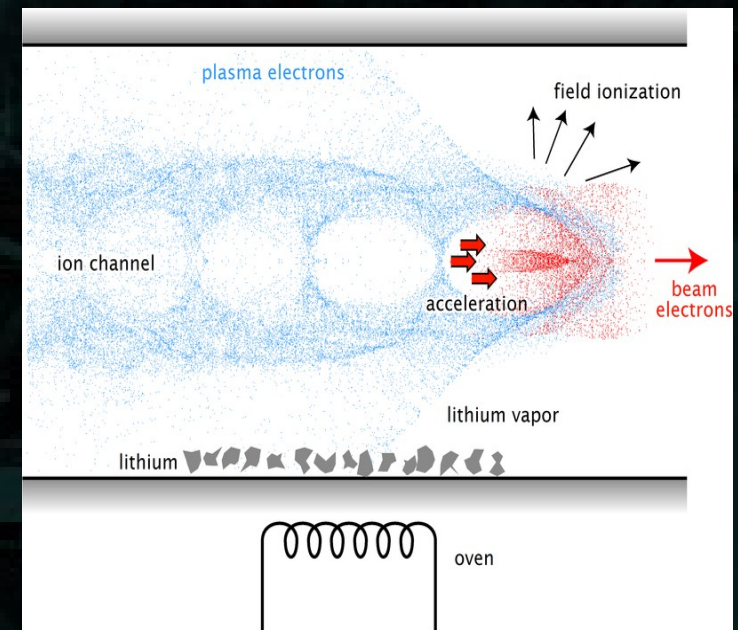
- Idea: pole elektryczne impulsu laserowego wstrzelonego w plazmę rozdziela elektrony od jonów tworząc **lokalnie bardzo wysoki gradient pola** (tzw. wakefield), który można wykorzystać do przyspieszania cząstek.

Porównanie gradientów:

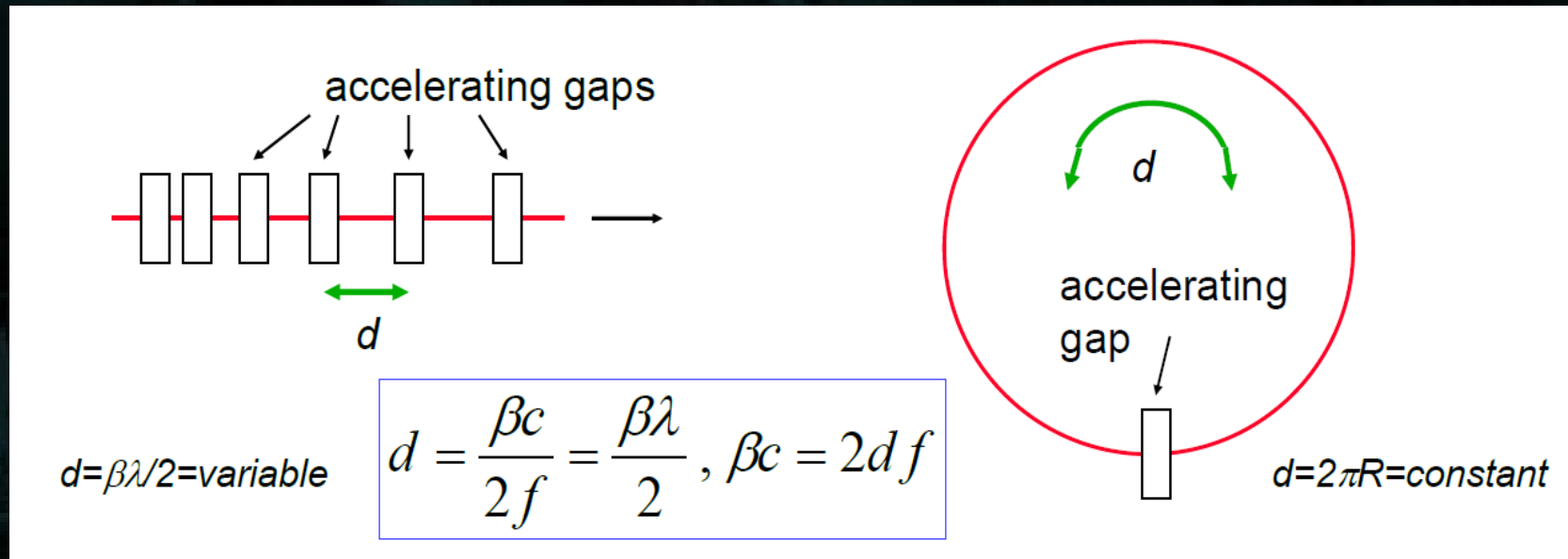
- wnęka rezonansowa: 30 MV/m
- plazma gazowa: 100 GV/m
- gradienty w ciele stałym:
100 GV/cm

femtosekundowa synchronizacja

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



Akceleratory liniowe a kołowe



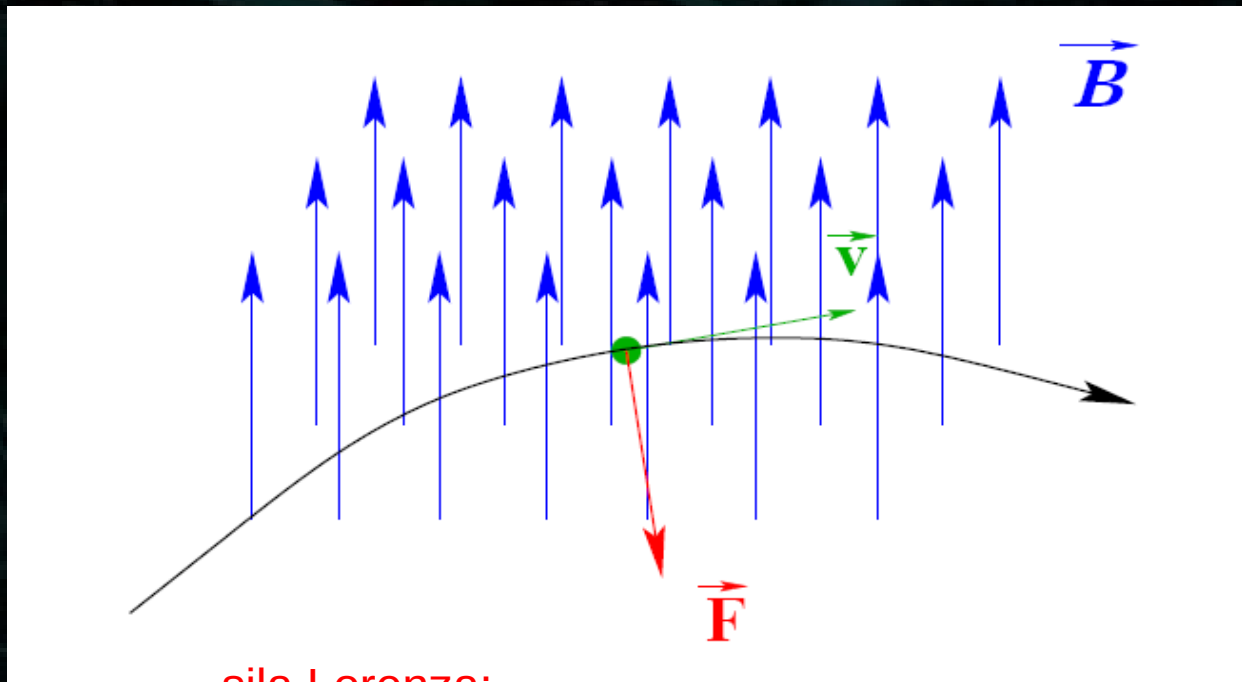
Liniowy:

- Każdy element przyspieszający jest używany raz,
- Odległość między elementami przyspieszającymi może rosnać 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**

Zakrzywianie wiązki



siła Lorentza:

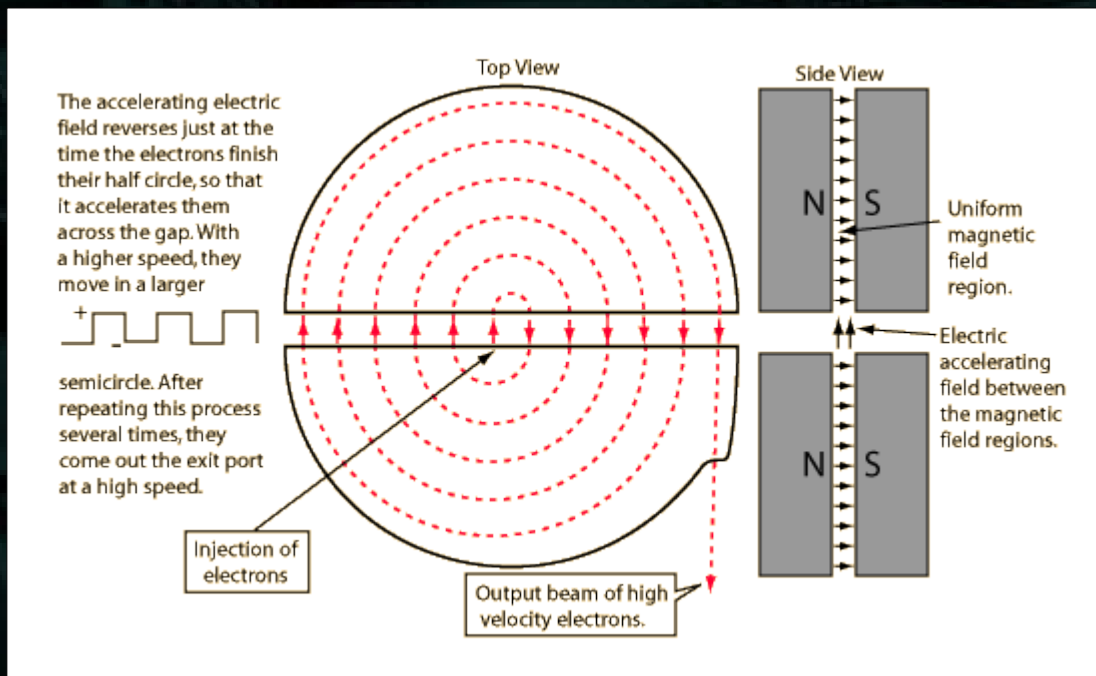
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Sztywność magnetyczna:

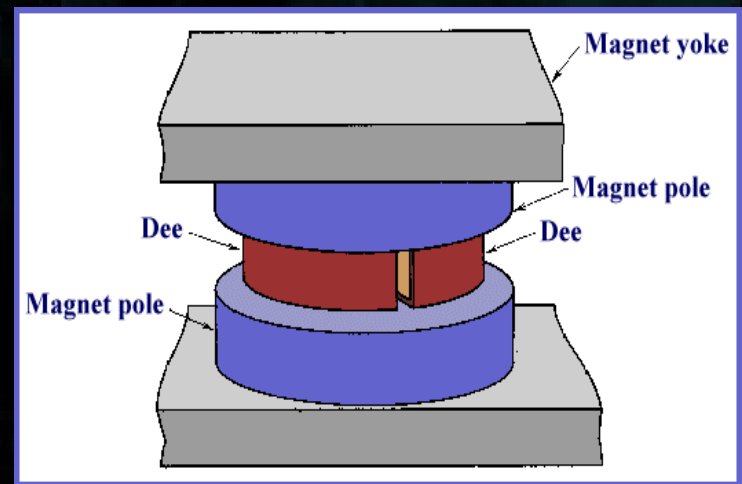
$B*r = p/e$ np. znając maksymalne pole (8.5 T) oraz promień (tunel = 2.8 km) można obliczyć maksymalny pęd uzyskiwany w akceleratorze (7 TeV)

Cyklotrony

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

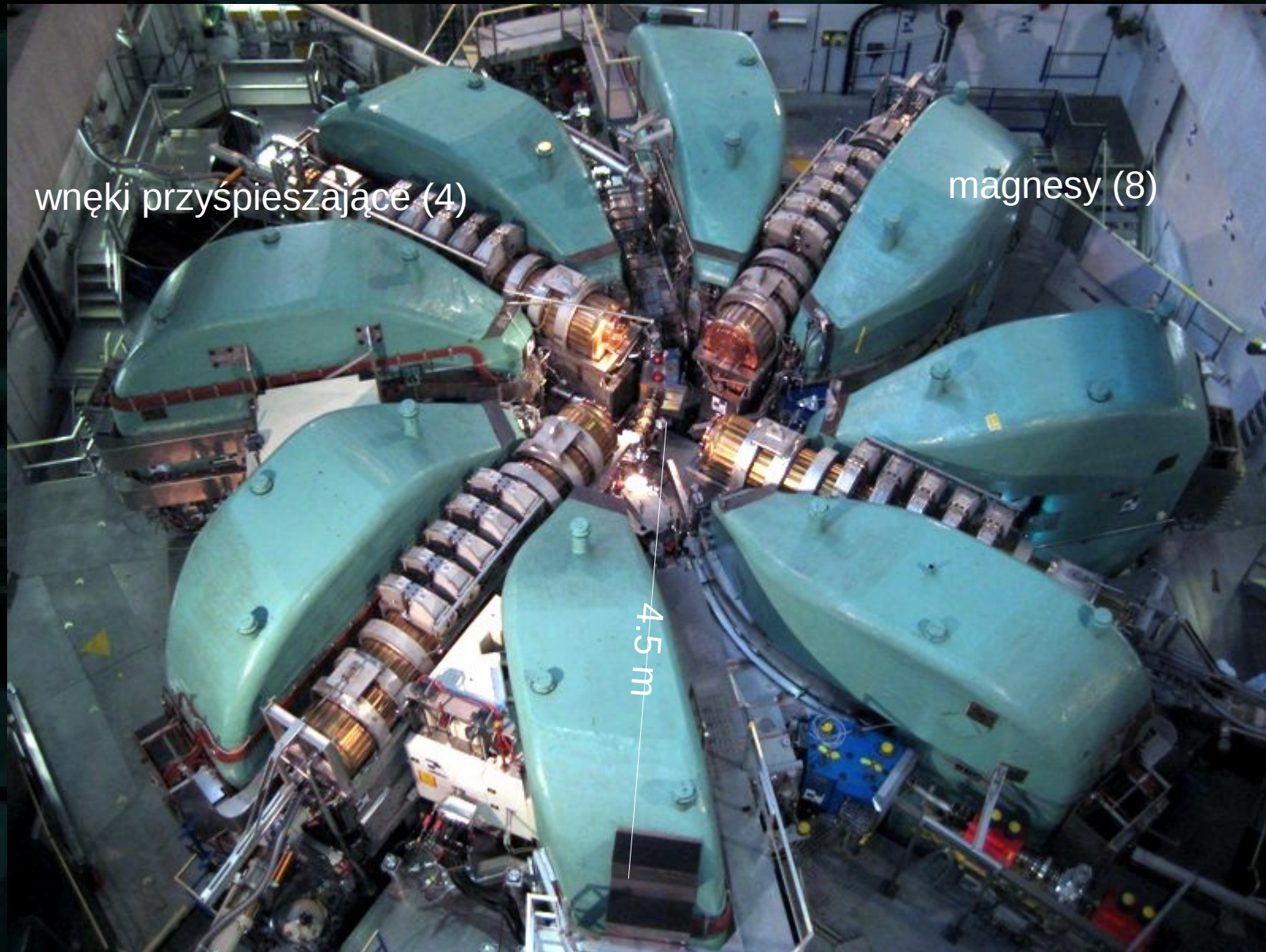


Lawrence, Nobel 1939
(ale też Widroie!)



Za każdym razem wykorzystuje się inną część szczeliny przyśpieszającej

Cyklotrony

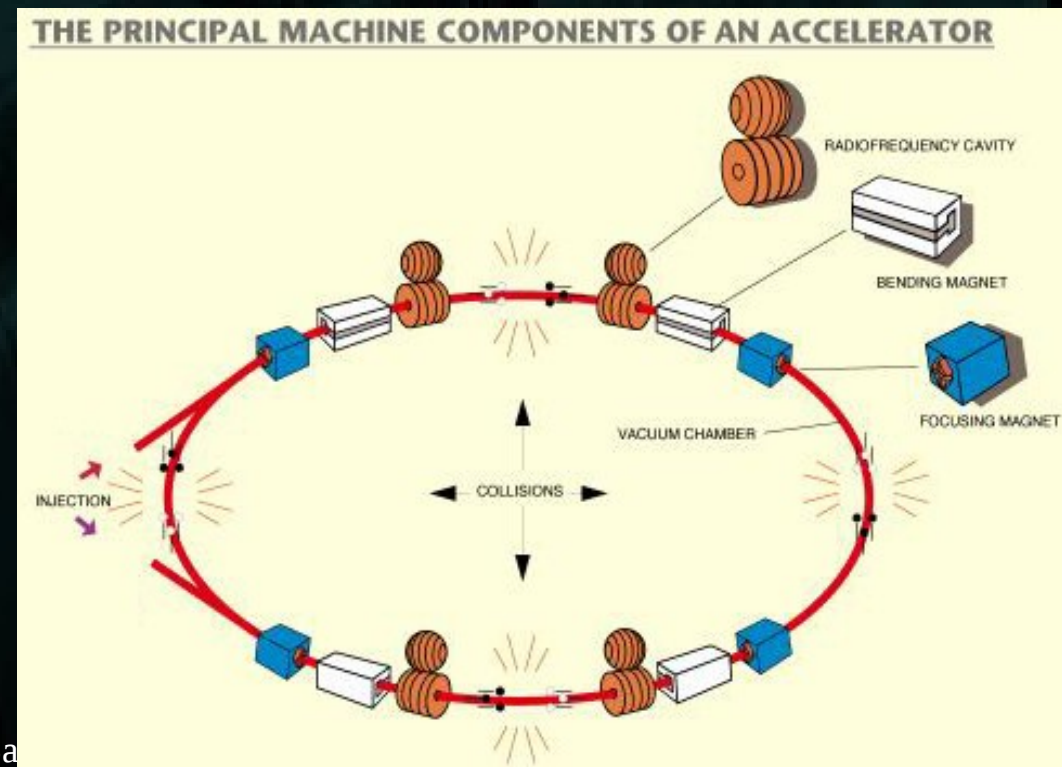


Cyklotron w PSI, przyspieszający protony z 72 do 590 MeV, moc wiązki 1.3 MW.

Synchrotrony

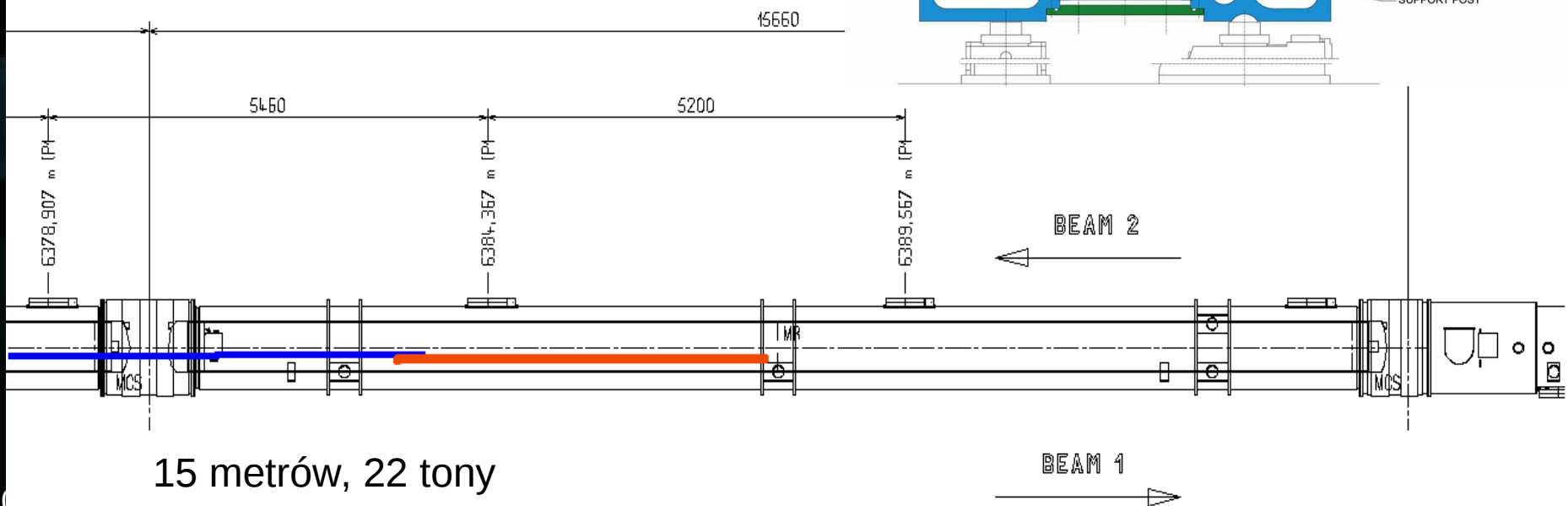
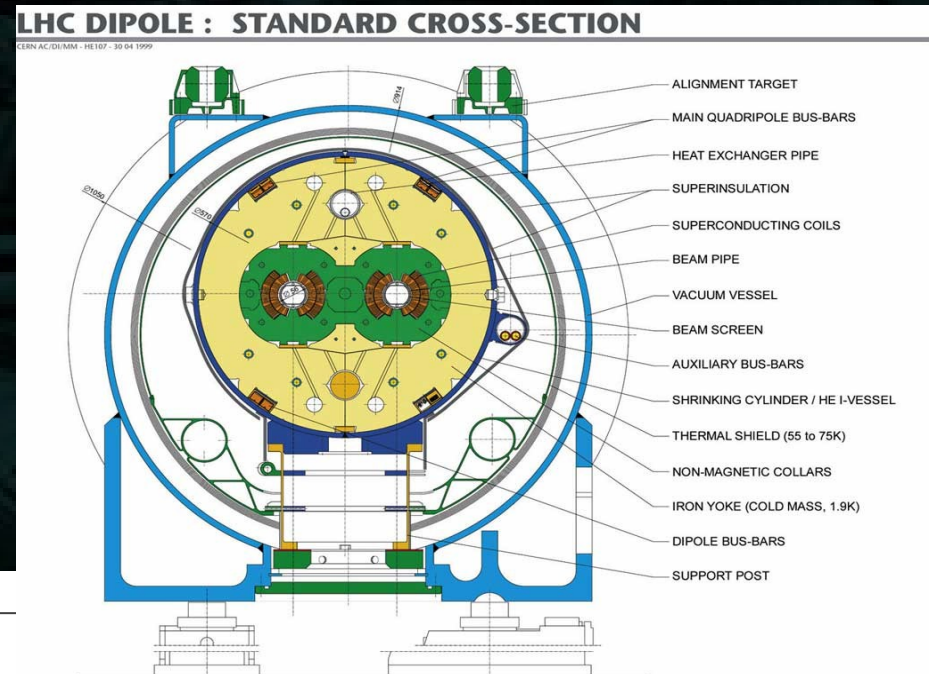
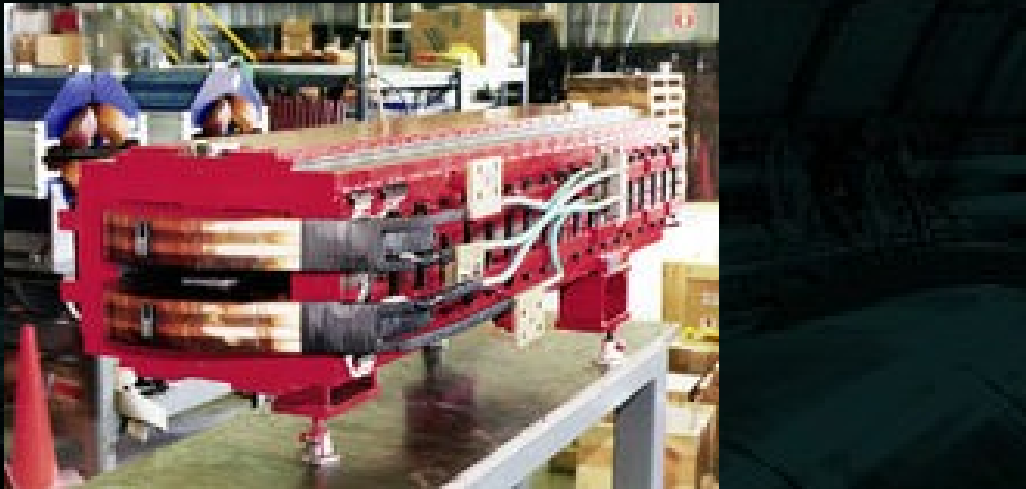
M. Oliphant - idea
E. McMillan -
realizacja

- Zmieniamy (**synchronicznie**) oba pola: elektryczne (gradient we wnękach rezonansowych) i magnetyczne
- Cząstki poruszają się po orbicie o stałym promieniu
- Główne elementy:
 - Magnesy zakrzywiające
 - Magnesy ogniskujące
 - Wnęki rezonansowe



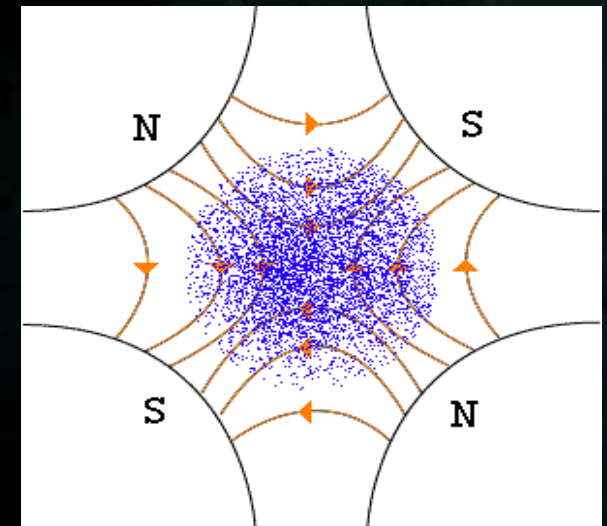
Magnesy zakrzywiające wiązkę

- Dipole o wertykalnym polu zakrzywiają wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej

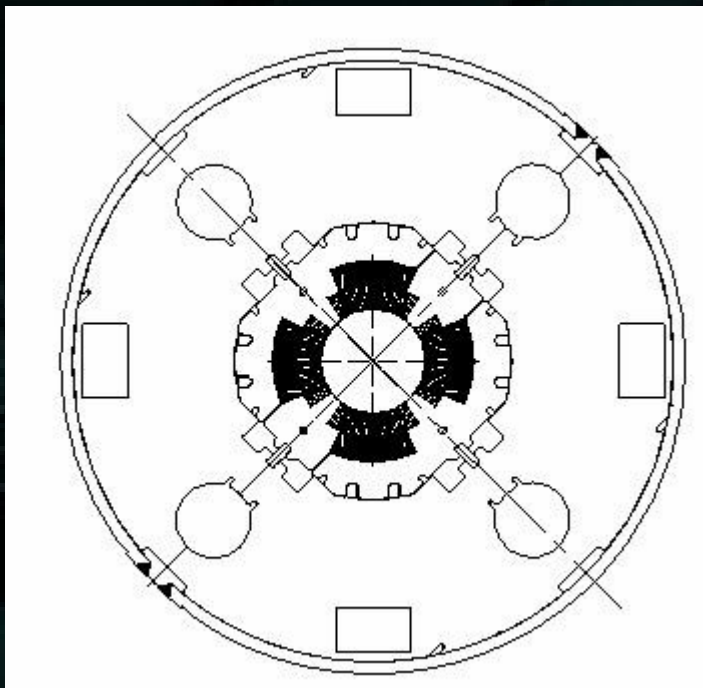


Stabilność wiązki

- 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 rozogniskowują wiązkę
- Efekt ogniskujący dają kwadrupole
- Ogniskowanie w płaszczyźnie x jest jednoznacznie z rozogniskowaniem w płaszczyźnie y

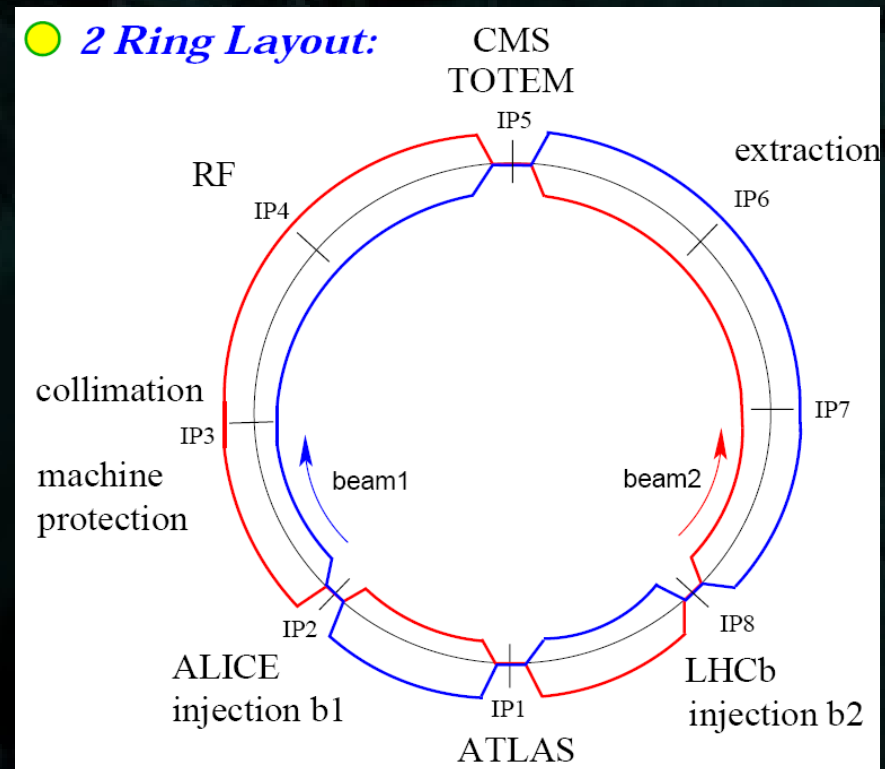
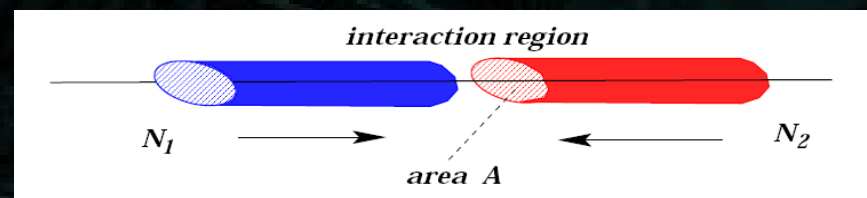
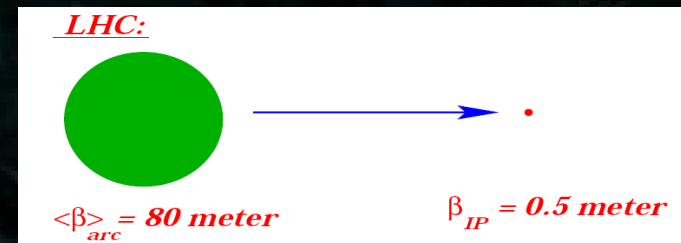


Kwadrupol LHC



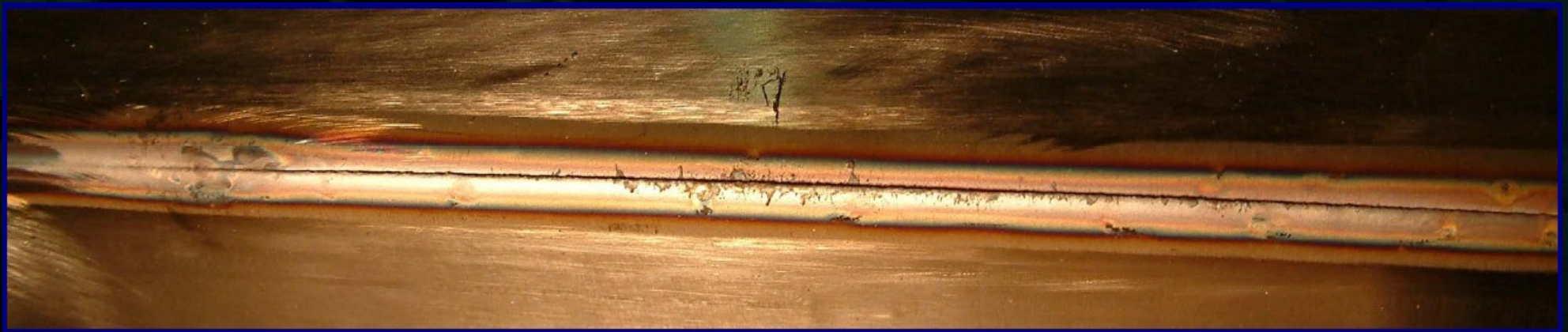
Punkt zderzenia

- Wiązki ogniskowane z około 0.1 mm do około 0.02 mm, (ludzki włos - 0.05 mm)
- Miliony zderzeń na sekundę (f)
- Świetlność chwilowa:
 $L = f / \sigma$
f - częstość zderzeń
 σ - przekrój czynny

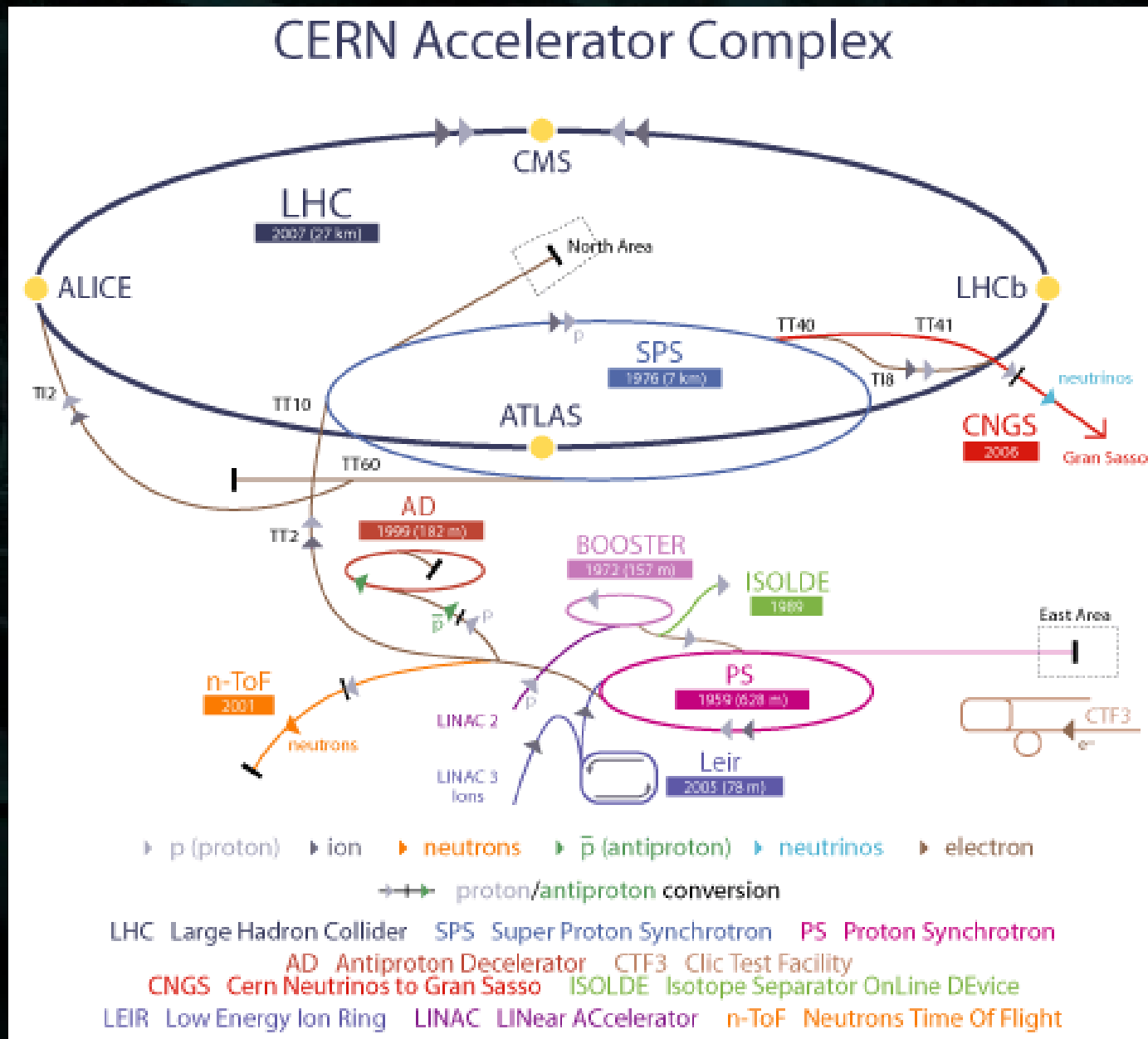


Wiązka LHC

- 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:

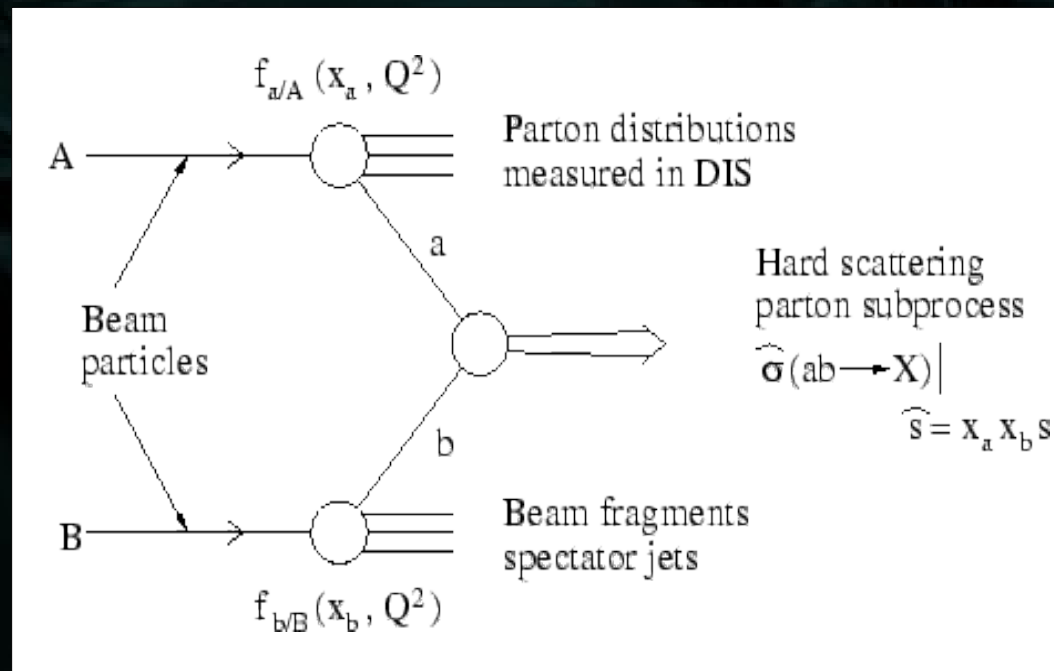


Kompleks akceleratorów CERN



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!



Akceleratory w Polsce

Mamy kilka małych akceleratorów.

Najnowsze:

- Synchrotron protonowy dla terapii hadronowej (IFJ Kraków)
- Synchrotron elektronowy do produkcji promieniowania synchrotronowego (UJ Kraków)
- Planuje się budowę XFELa (Warszawa)

Ponadto Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku buduje fragmenty LINACa4.

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
- Akceleratory liniowe oraz kołowe
- Cyklotron: zmiana promienia z energią
- Synchrotrony: zmiana pola magnetycznego z energią
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole)
- Punkt zderzenia – **światłość**
- Po LHC: CLIC liniowy zderzacz elektronów

paczki cząstek

optyka wiązki

Dodatkowe slajdy

Przyszłość akceleratorów

- XFEL oraz inne “Light sources” - badania materiałowe
- Terapia hadronowa (kilka akceleratorów jest budowanych)
- Następne giganty (CLIC lub 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 |