

Wstęp do fizyki akceleratorów



Mariusz Sapiński

(mariusz.sapinski@cern.ch)

CERN, Departament Wiązek

21 października 2014

Definicja akceleratora

Akcelerator cząstek to urządzenie które rozpędza cząstki naładowane elektrycznie do dużych prędkości formując z nich wiązki.

Definicja wiązki

Wiązka to strumień cząstek.

- Istnieją wiązki cząstek neutralnych (lasery, wiązki neutronów i neutrin)
- Istnieją wiązki produkowane bez akceleratora (źródło, kolimatory)
- Typowe właściwości wiązki: kierunek, zbieżność, energia itd...

Jako że to nie jest wykład o laserach...

skupmy się na wiązках cząstek naładowanych, którymi można względnie łatwo manipulować przy pomocy pól:

- Elektrycznego $F=qE$
- Magnetycznego $F=q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

Dylemat: które wybrać?



E czy B?

Weźmy relatywistyczny ładunek elementarny w typowym magnesie 2 T, o polu prostopadłym do kierunku ruchu:

$$F = e \cdot c \cdot B = 96 \text{ pN}$$

Żeby wytworzyć podobną siłę polem elektrycznym:

$$E = 96 \text{ nN}/e = 600 \text{ MV/m (!)}$$

Przebiecie elektryczne w próżni: $\sim 5\text{-}50 \text{ MV/m}$

E czy B?



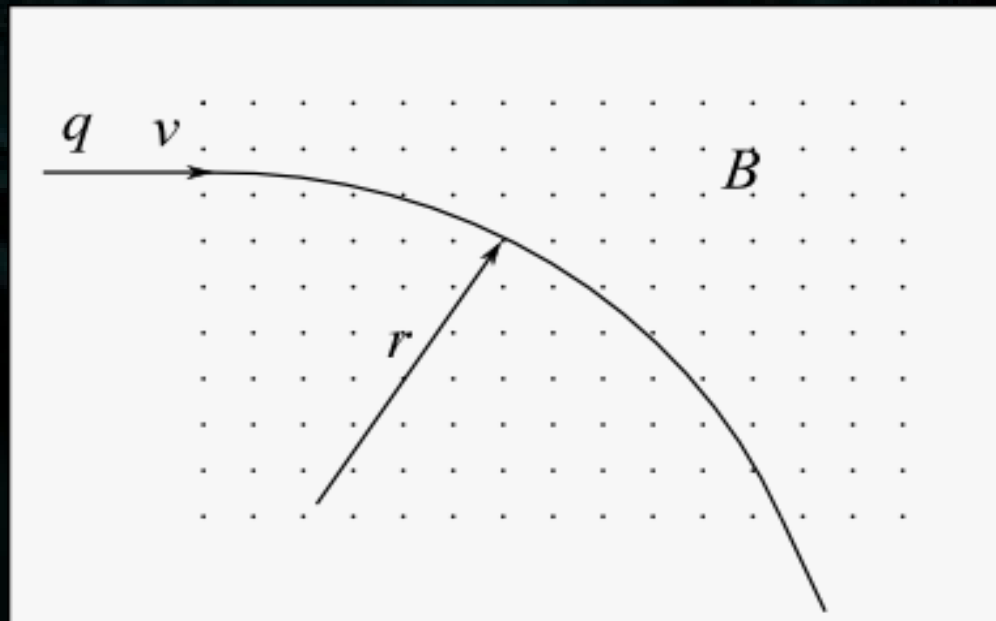
Magnetyzm: 1

-

Elektryczność: 0

E czy B?

Ale jest problem: pole magnetyczne działa prostopadle do kierunku ruchu...
Czyli nie może przyspieszać cząstek!



Rozwiązanie

- Do przyśpieszania cząstek używamy pola elektrycznego
- Do efektywnej zmiany trajektorii (zakrzywiania) wiązki używamy pola magnetycznego

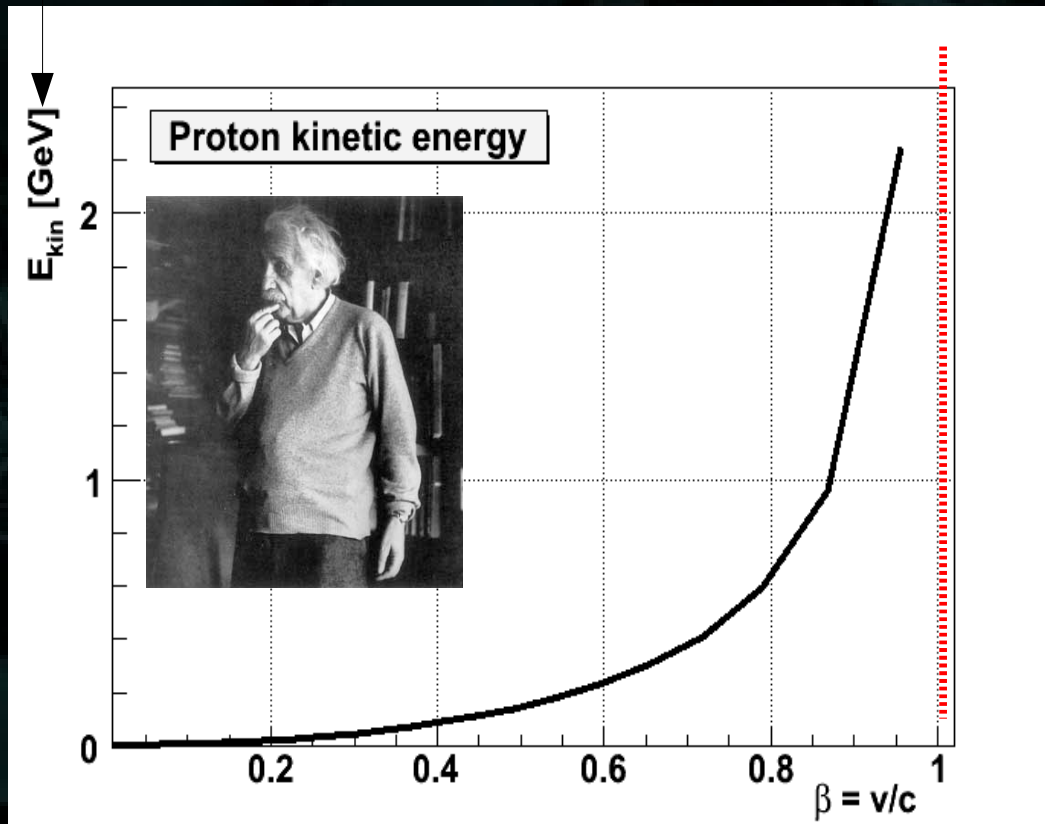


Uwaga: od obu reguł są wyjątki. Dużo wyjątków!

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.

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.

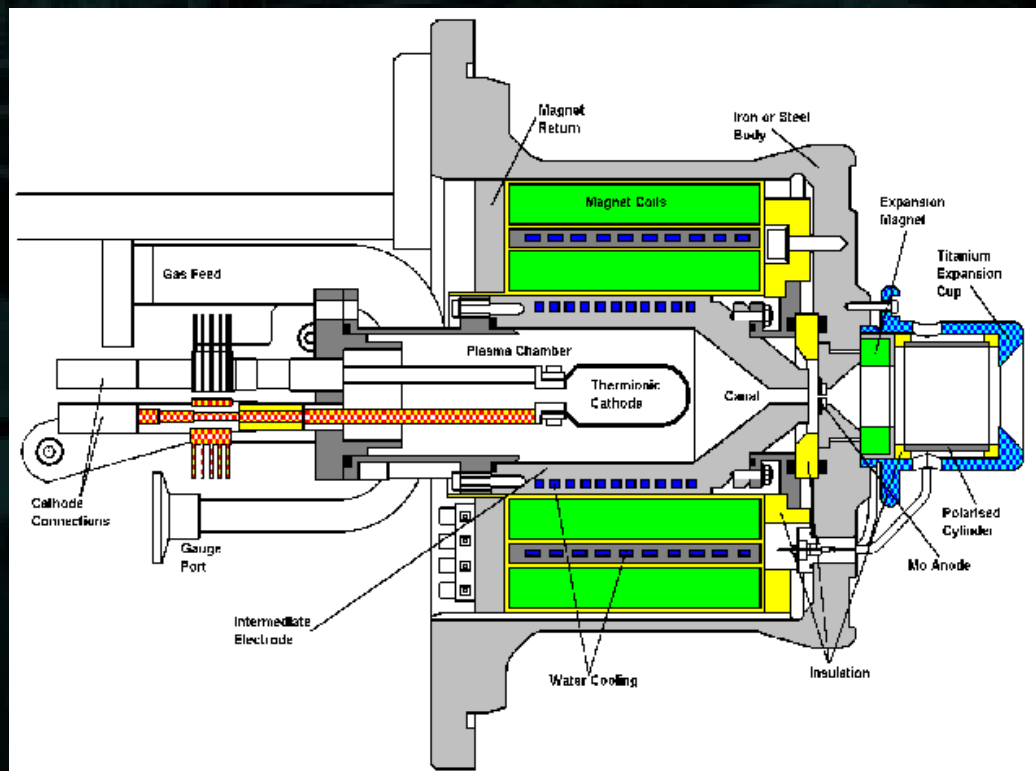
Spis treści

- Źródła cząstek
- Przyśpieszanie elektrostatyczne
- Wnęki rezonansowe. Surfowanie na fali.
- Promieniowanie kosmiczne: mechanizm Fermiego
- Przyśpieszanie plazmowe
- Akceleratory kołowe: cyklotron
- Synchrotrony
- Zderzacze: ogniskowanie i światłość.
- Akceleratory CERNowskie.
- Przyszłość akceleratorów

Źródła cząstek

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

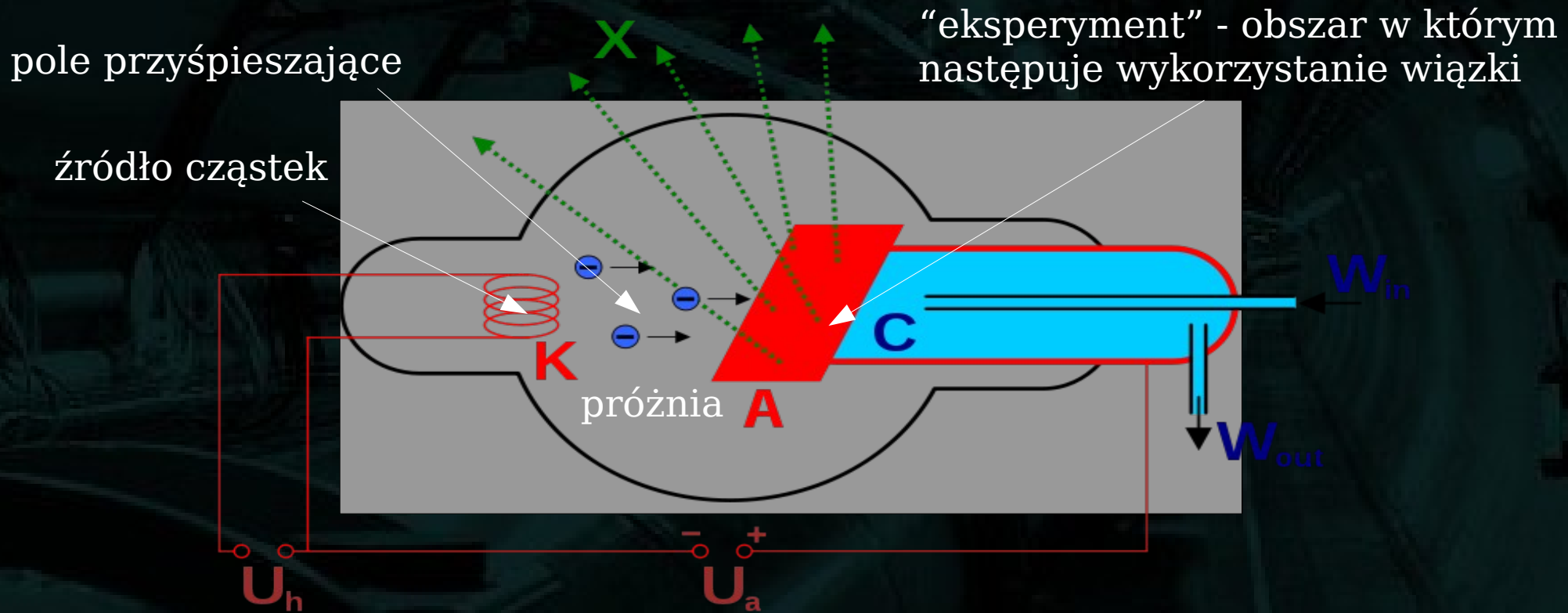
Jony/protony: wiele konstrukcji - jonizacja gazu a następnie zastosowaniu pola elektrycznego/magnetycznego do wypchnięcia jonów w jednym kierunku - duoplasmotron



Kolejne etapy:

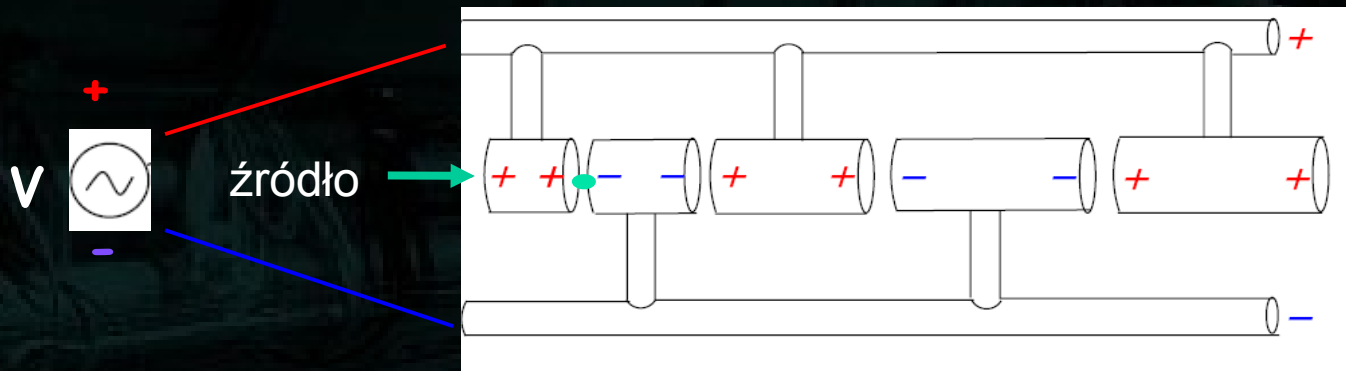
1. kolimacja
2. formowanie paczek
3. przyspieszanie

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 ?

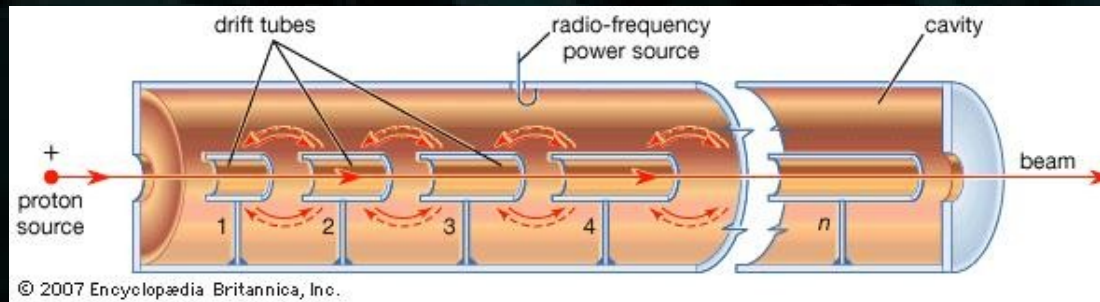


Wideroe

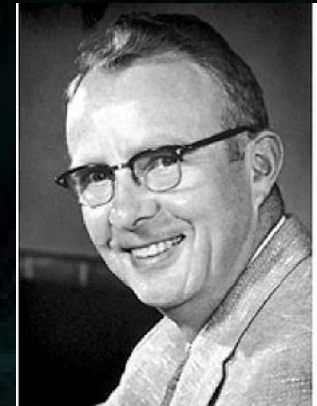
Pierwszy system: 1928

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

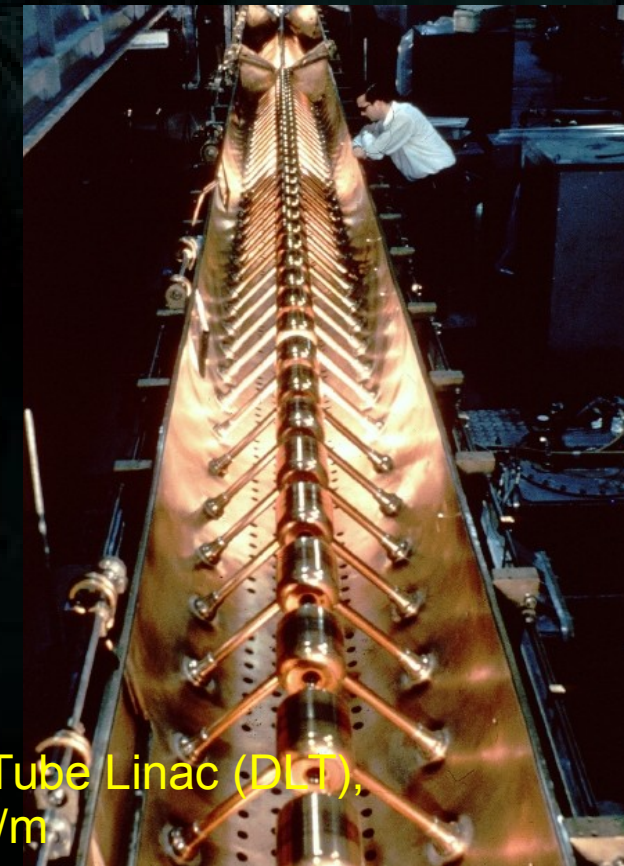
Ulepszenie: system Alvareza



1947, kiedy technika radarowa (klystrony) była już rozwinięta

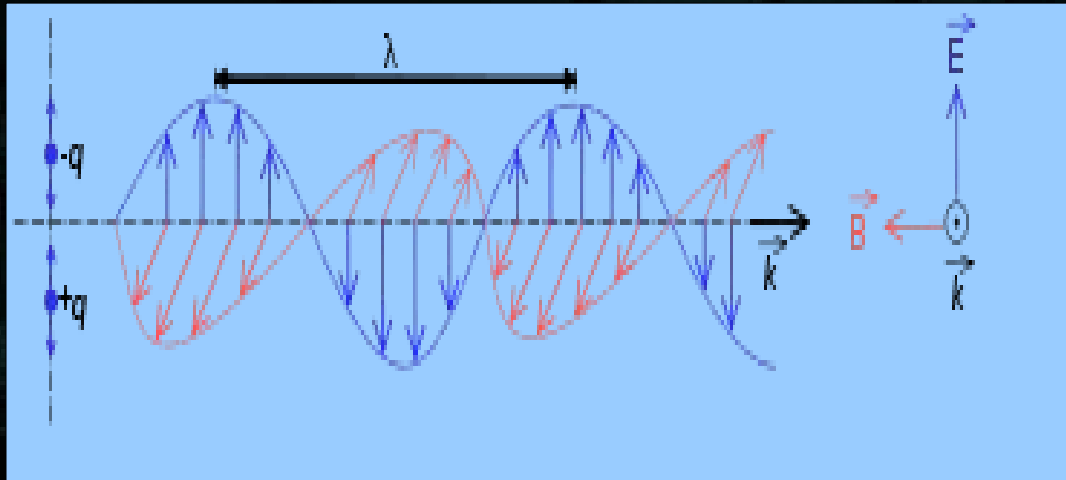


- Dołożenie zbiornika zbudowanego tak, aby jego częstota rezonansowa odpowiadała częstoci fali potrzebnej do przyspieszania
- Fala stojąca z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi zbiornika generowana przez klistron
- Częstotliwość fali: **200 MHz**

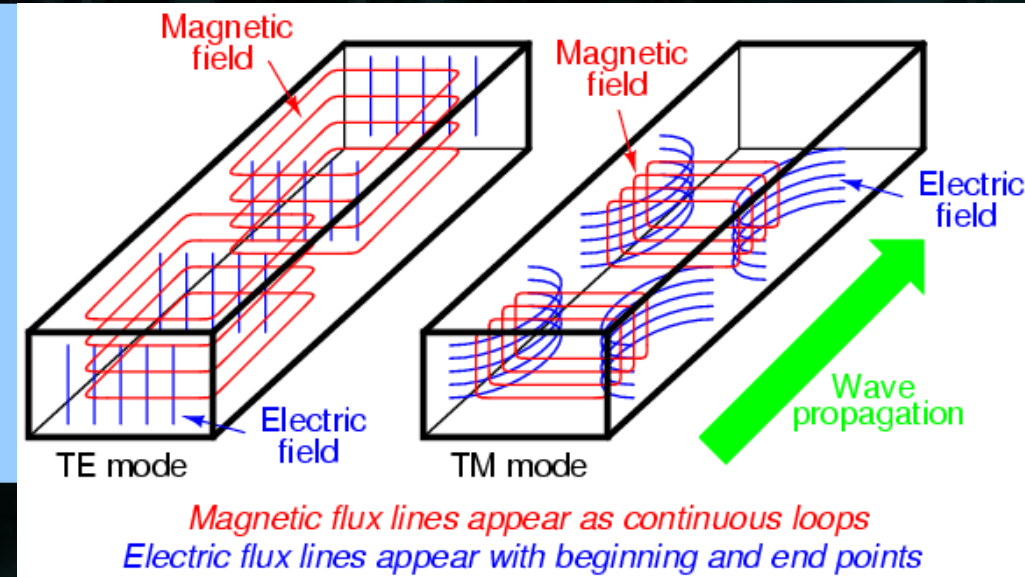


Drift Tube Linac (DLT),
3 MV/m

Pola fali elektromagnetycznej

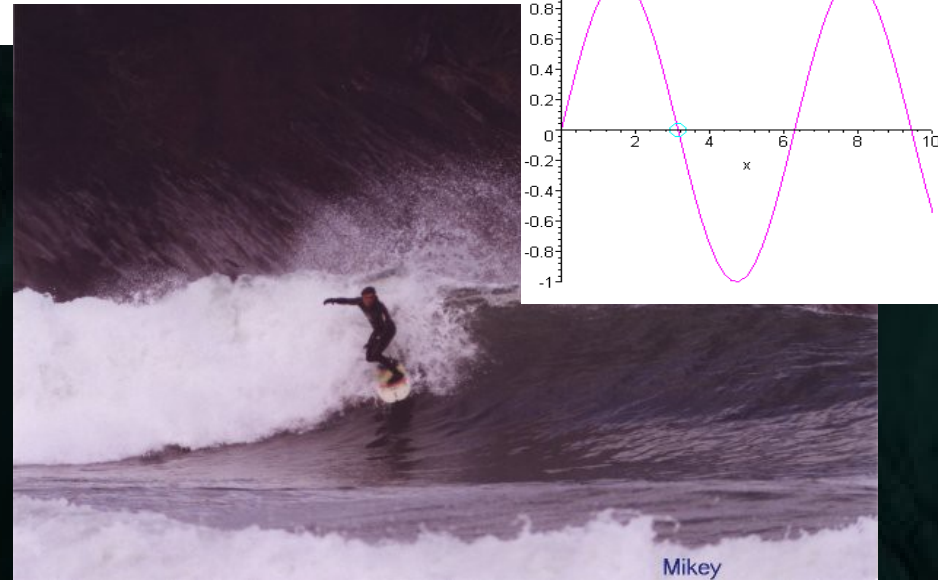
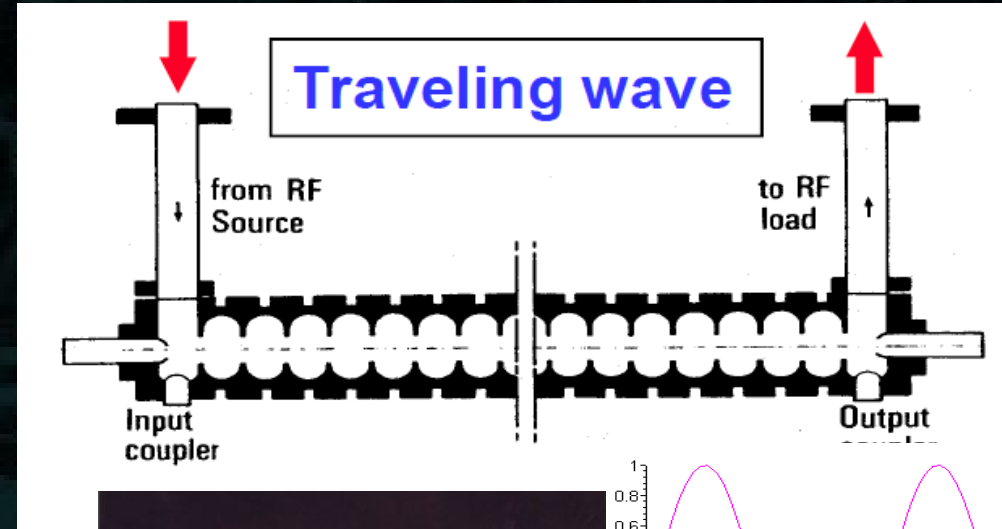
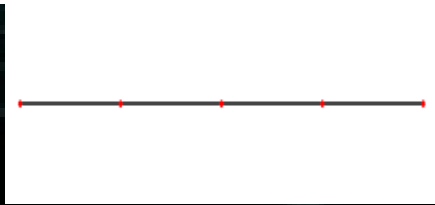
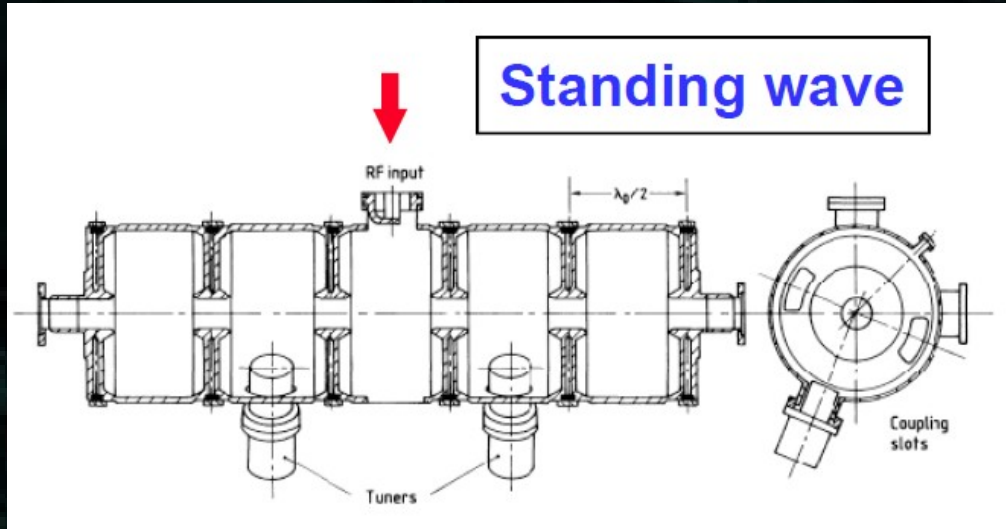


Fala w pustej przestrzeni



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?

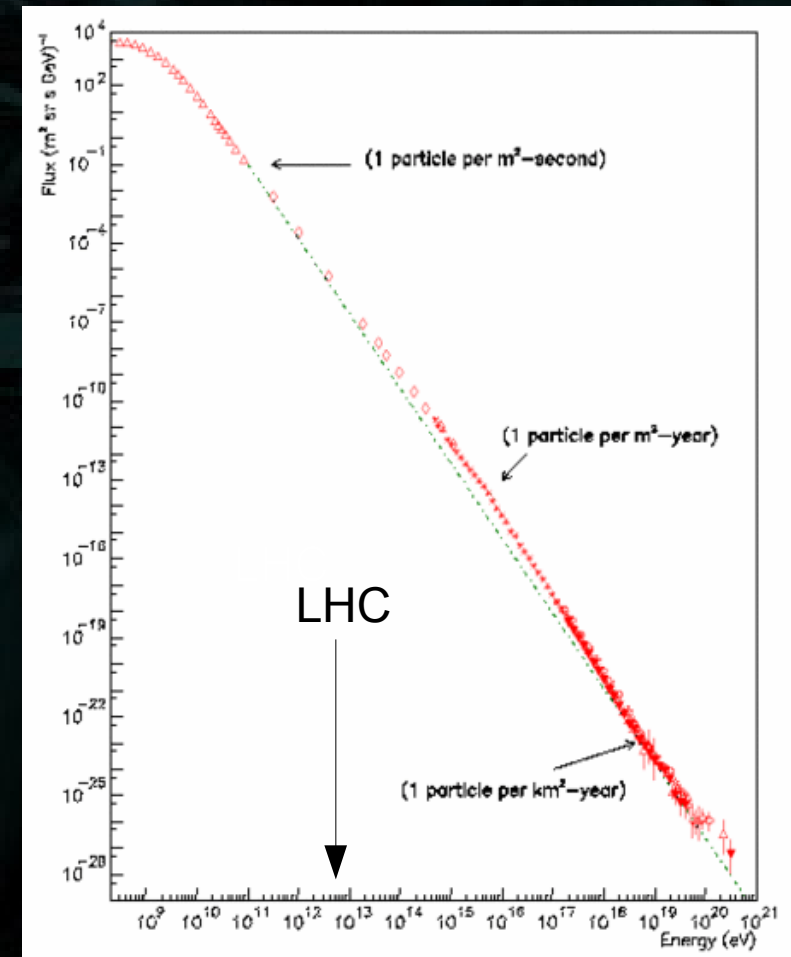
- Największe energie – promieniowanie kosmiczne: 10^{20} eV, LHC: $7 \cdot 10^{12}$ eV

(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.**



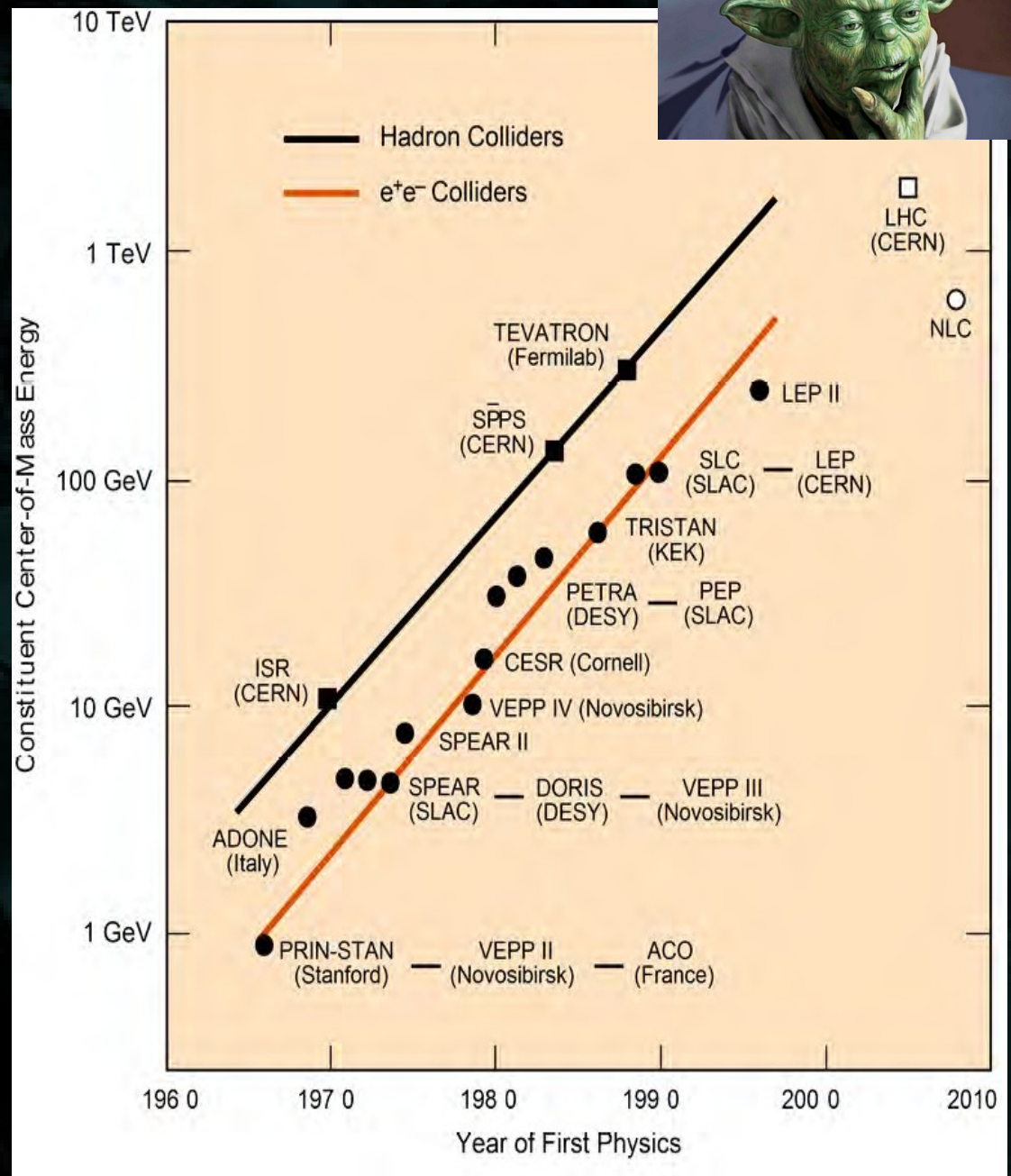
Tendencja historyczna

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.

Impossible to see the future is....



Nowe pomysły: akcelerator plazmowy

- Idea: pole elektryczne impulsu laserowego wstrzelonego w plazmę rozdziela elektrony od jonów tworząc **lokalnie bardzo wysoki gradient pola** który może przyśpieszać cząstki.

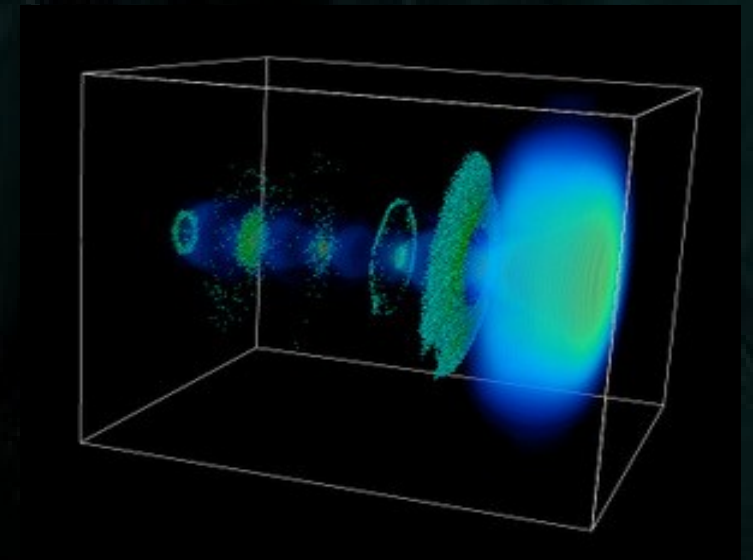
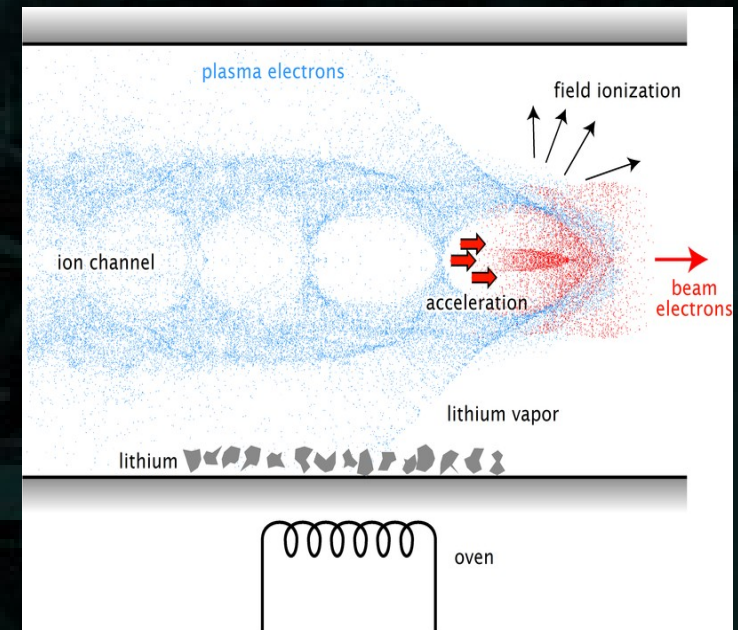
Porównanie gradientów:

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

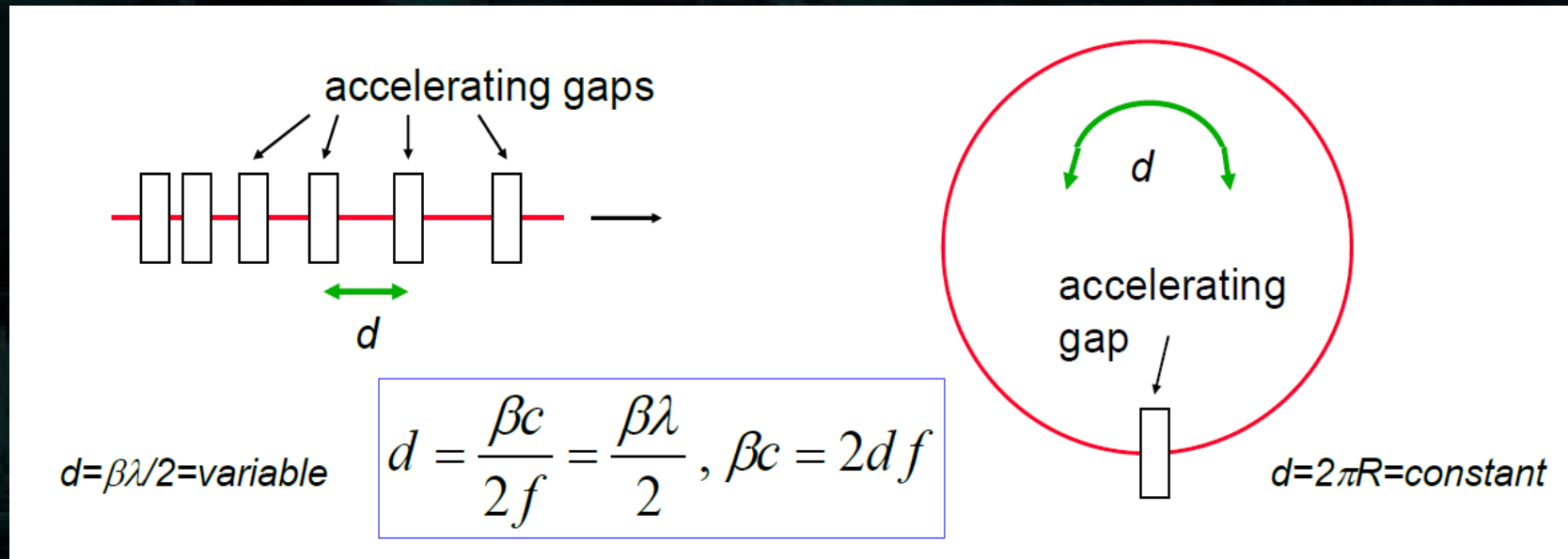
femtosekundowa synchronizacja

rekord: 42 GeV na dystansie 85 cm!

dla porównania: SLAC: 50 GeV – 3 km



Akceleratory liniowe a kołowe



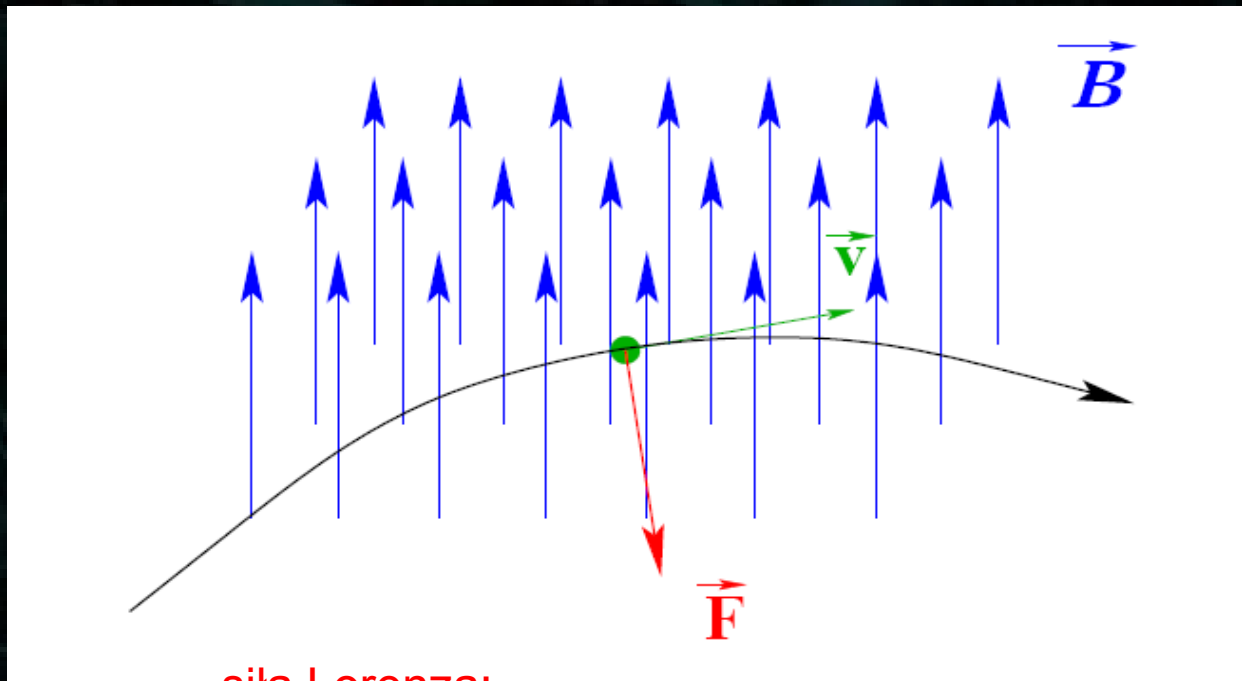
Liniowy:

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

Zakrzywianie wiązki



siła Lorentza:

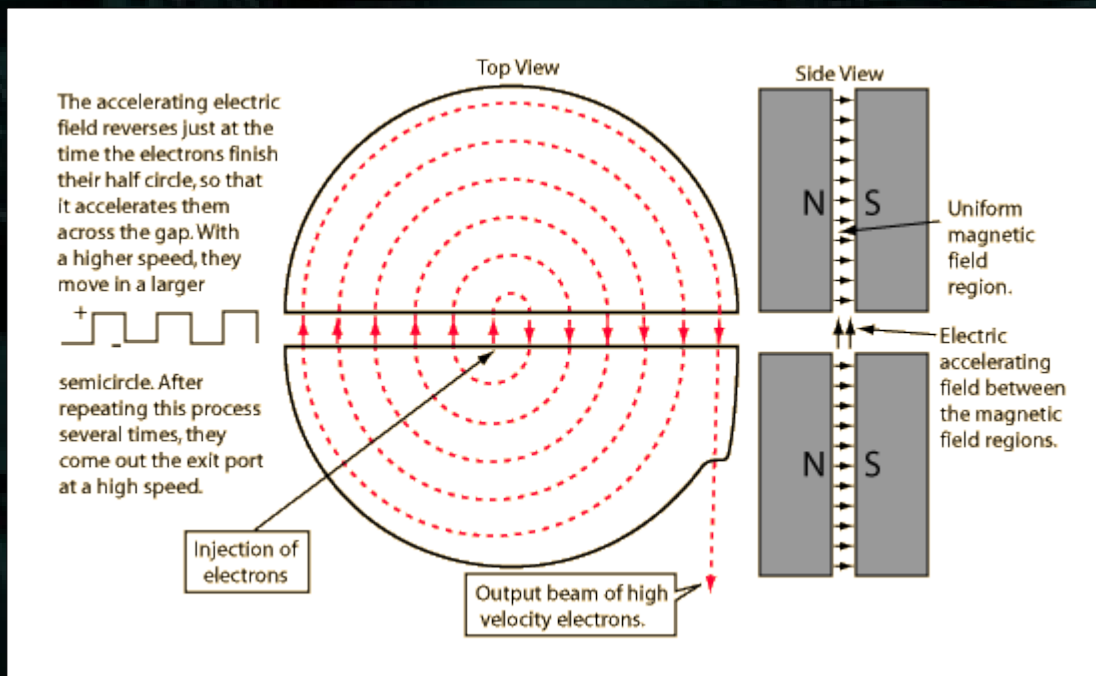
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Sztywność magnetyczna:

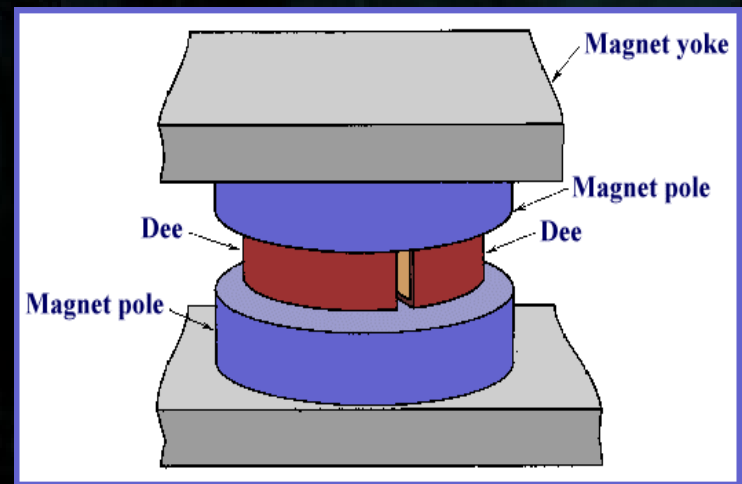
$B * r = p / e$ Znając maksymalne pole (8.5 T) oraz promień (2.8 km) można obliczyć maksymalny pęd uzyskiwany w akceleratorze (7 TeV)

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

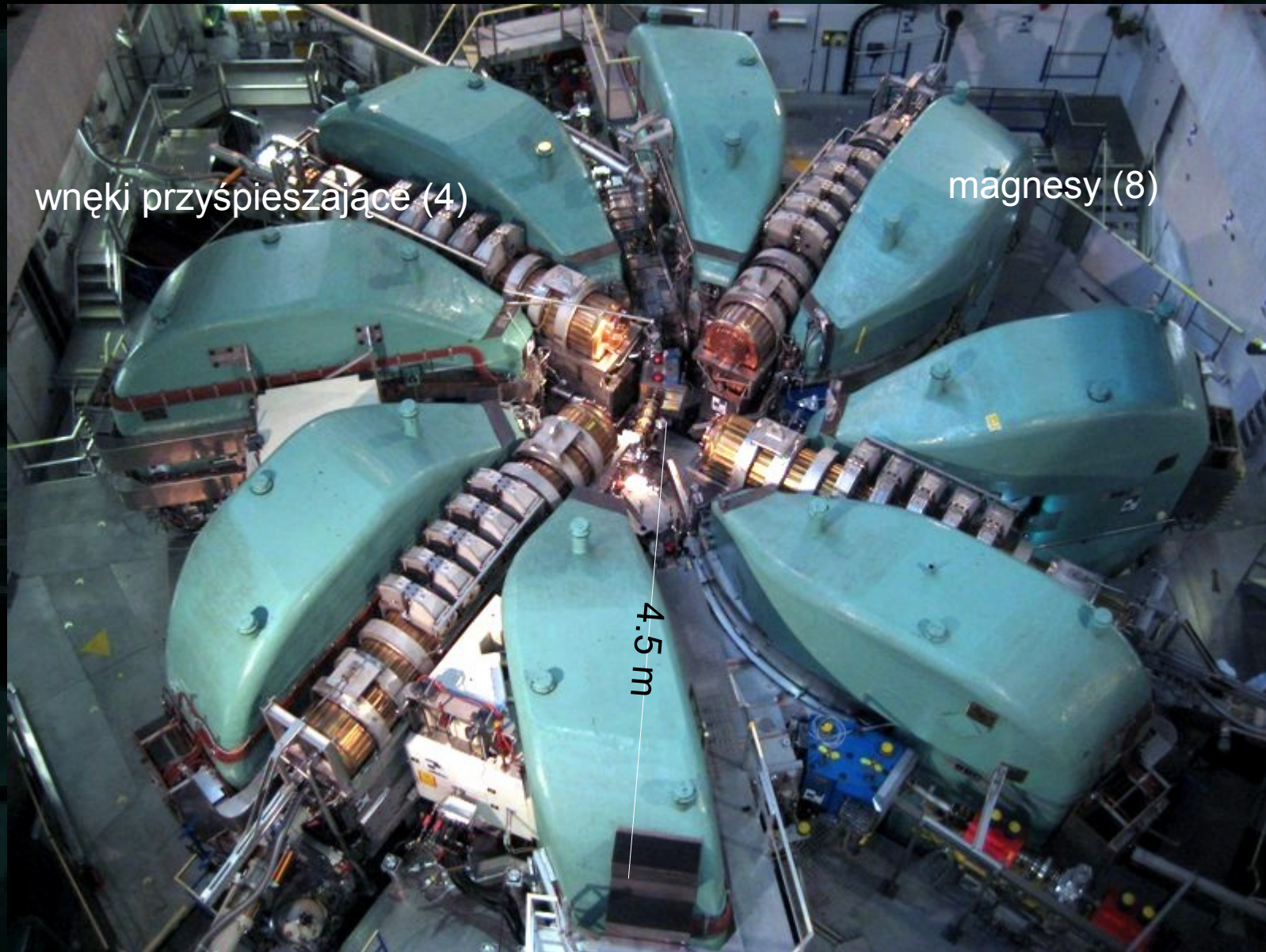


Lawrence, Nobel 1939
(ale też Widroel!)



Za każdym razem wykorzystuje się inną część szczeliny przyśpieszającej

Cyklotrony

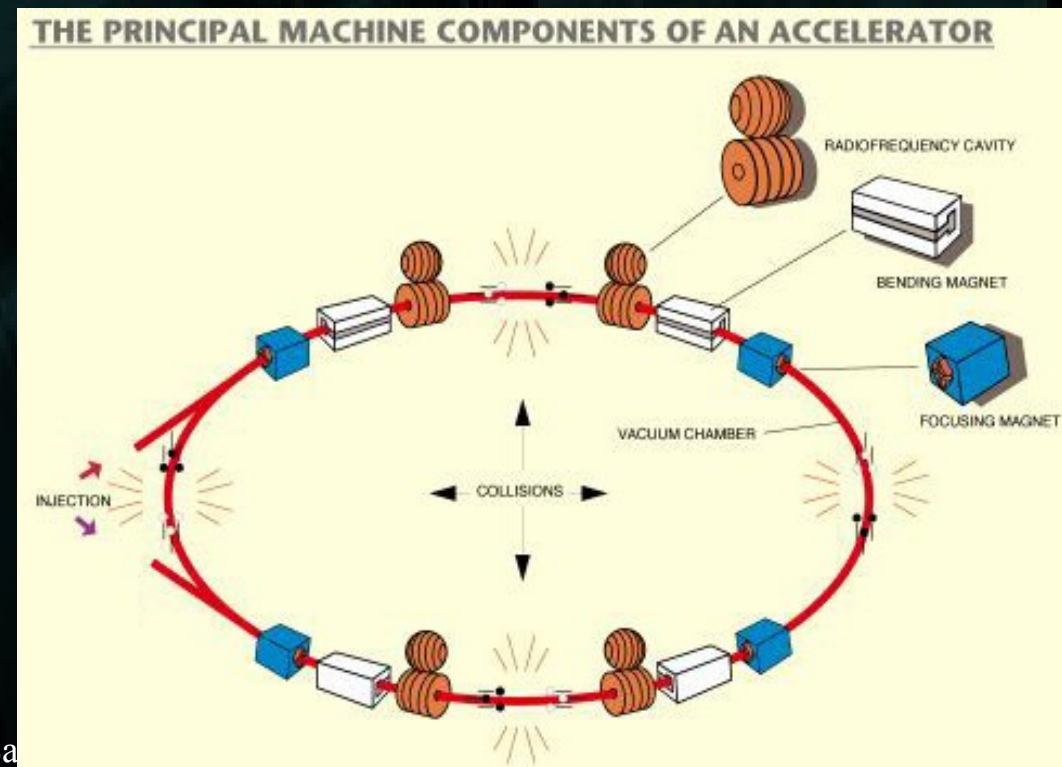


Cyklotron w PSI, przyspieszający protony z 72 do 590 MeV, moc wiązki 1.3 MW.

Synchrotrony

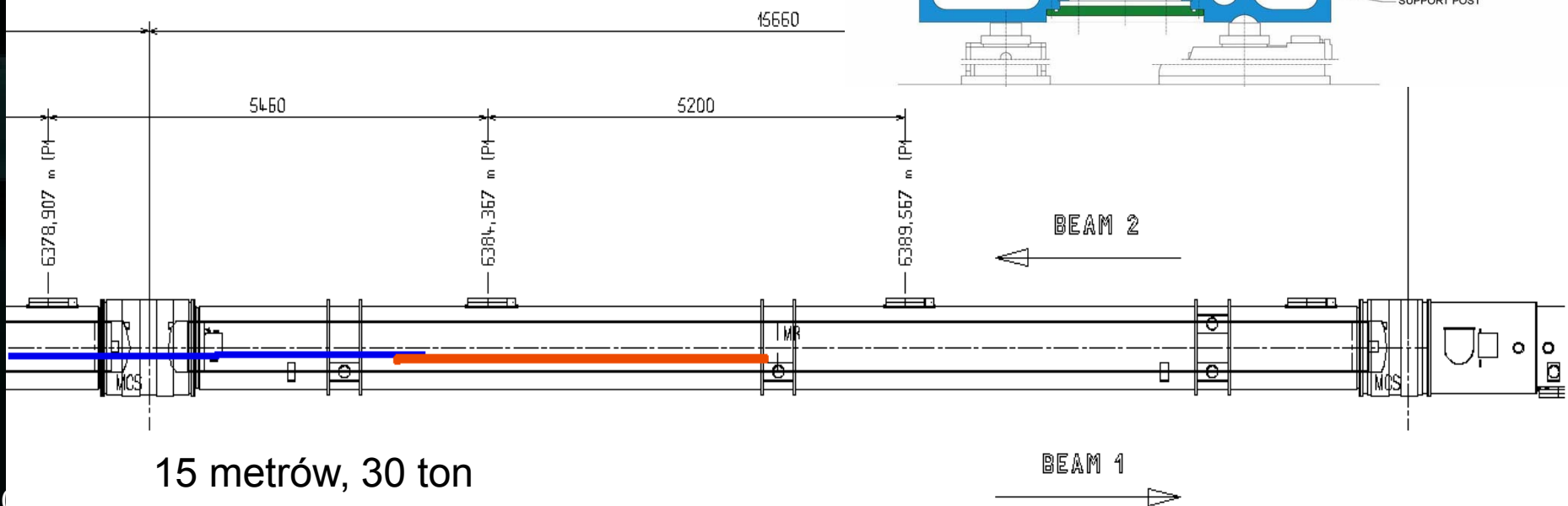
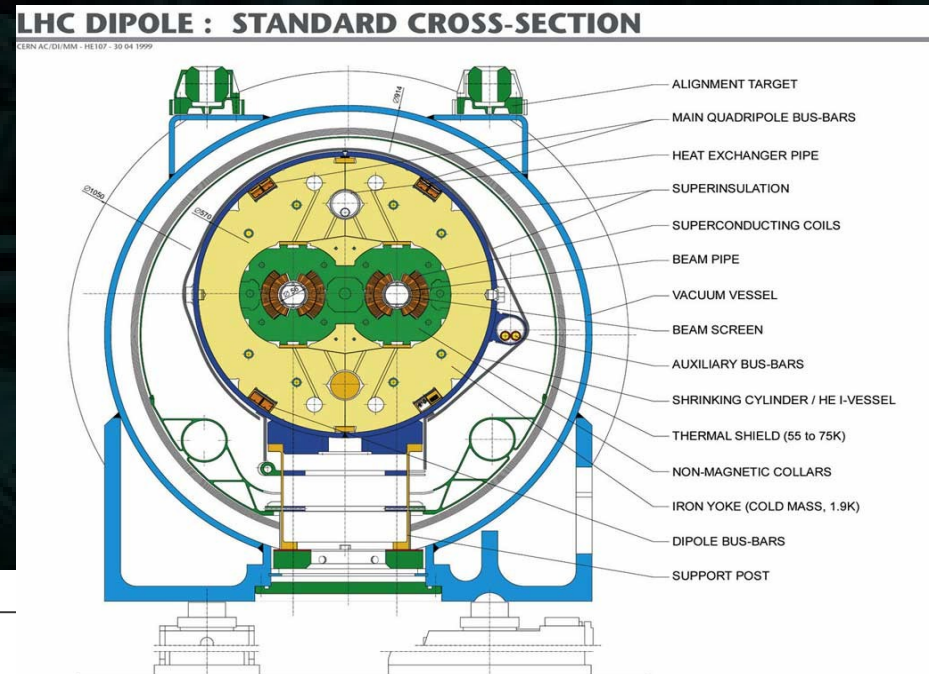
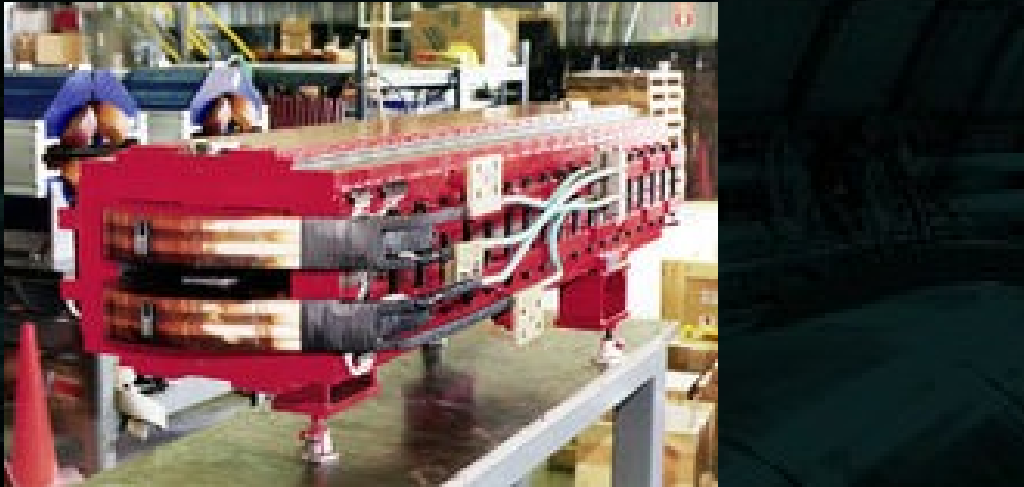
M. Oliphant - idea
E. McMillan - realizacja

- 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



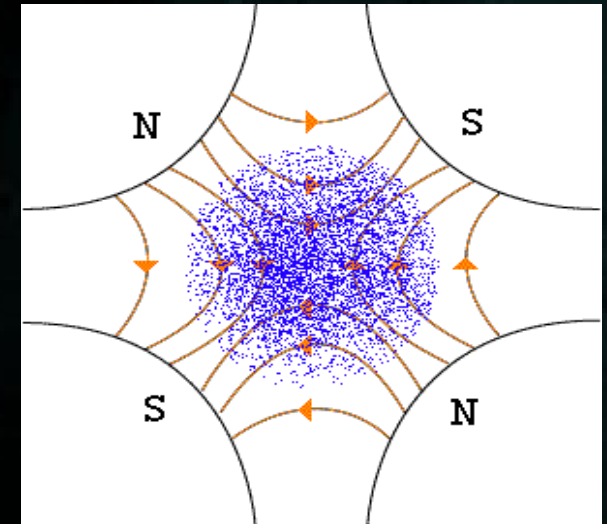
Magnesy zakrzywiające wiązkę

- Dipole o wertykalnym polu zakrzywiają wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej

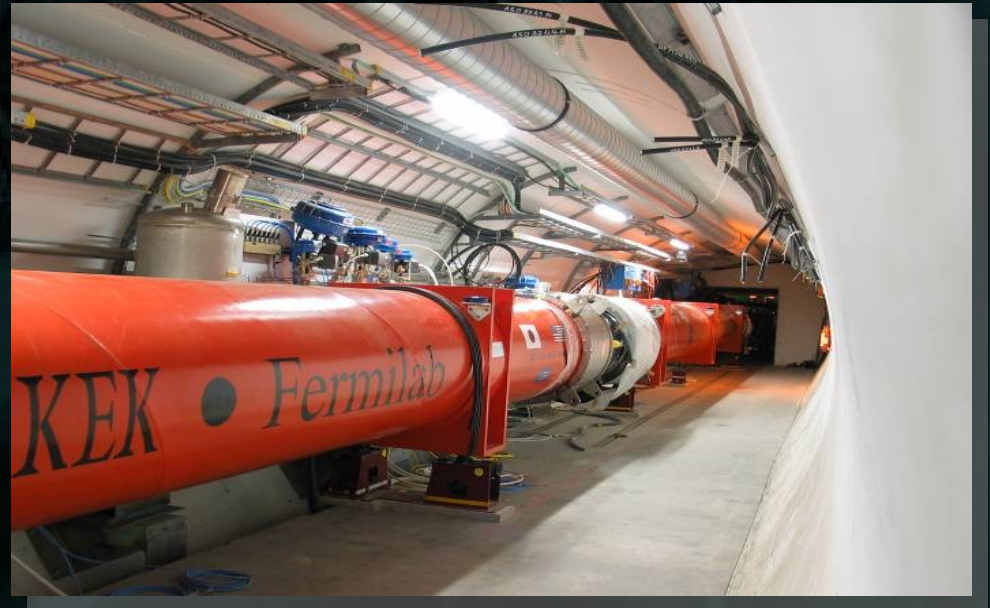
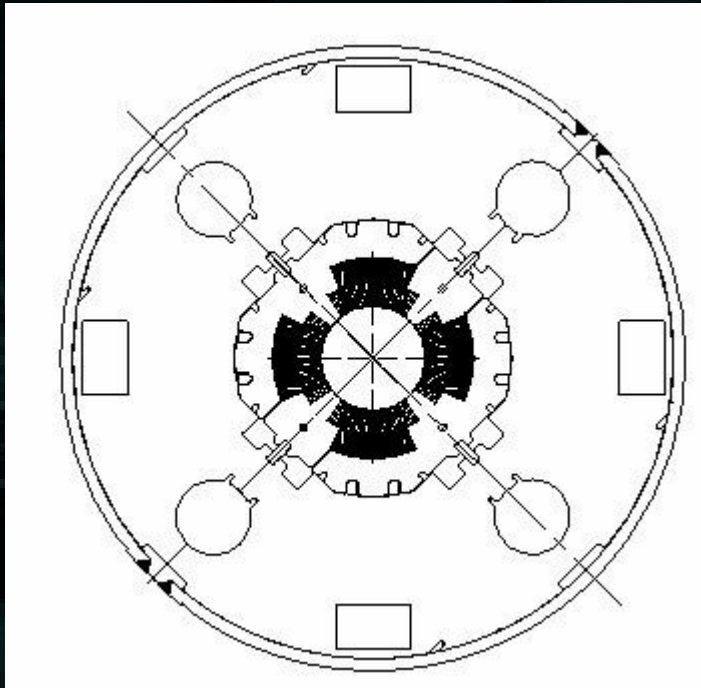


Stabilność wiązki

- 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

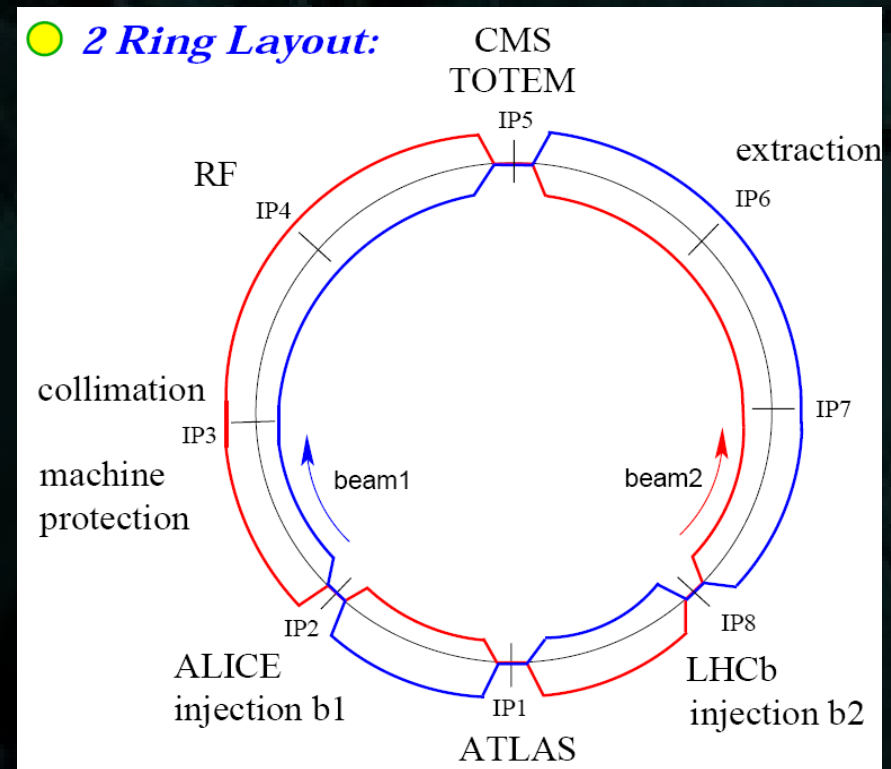
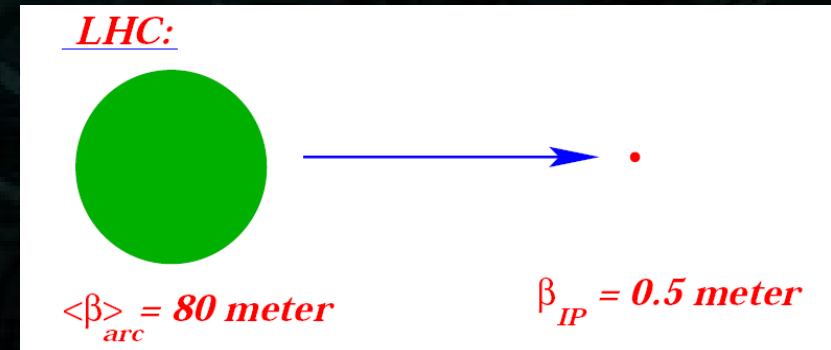


Kwadrupole (specjalne) LHC

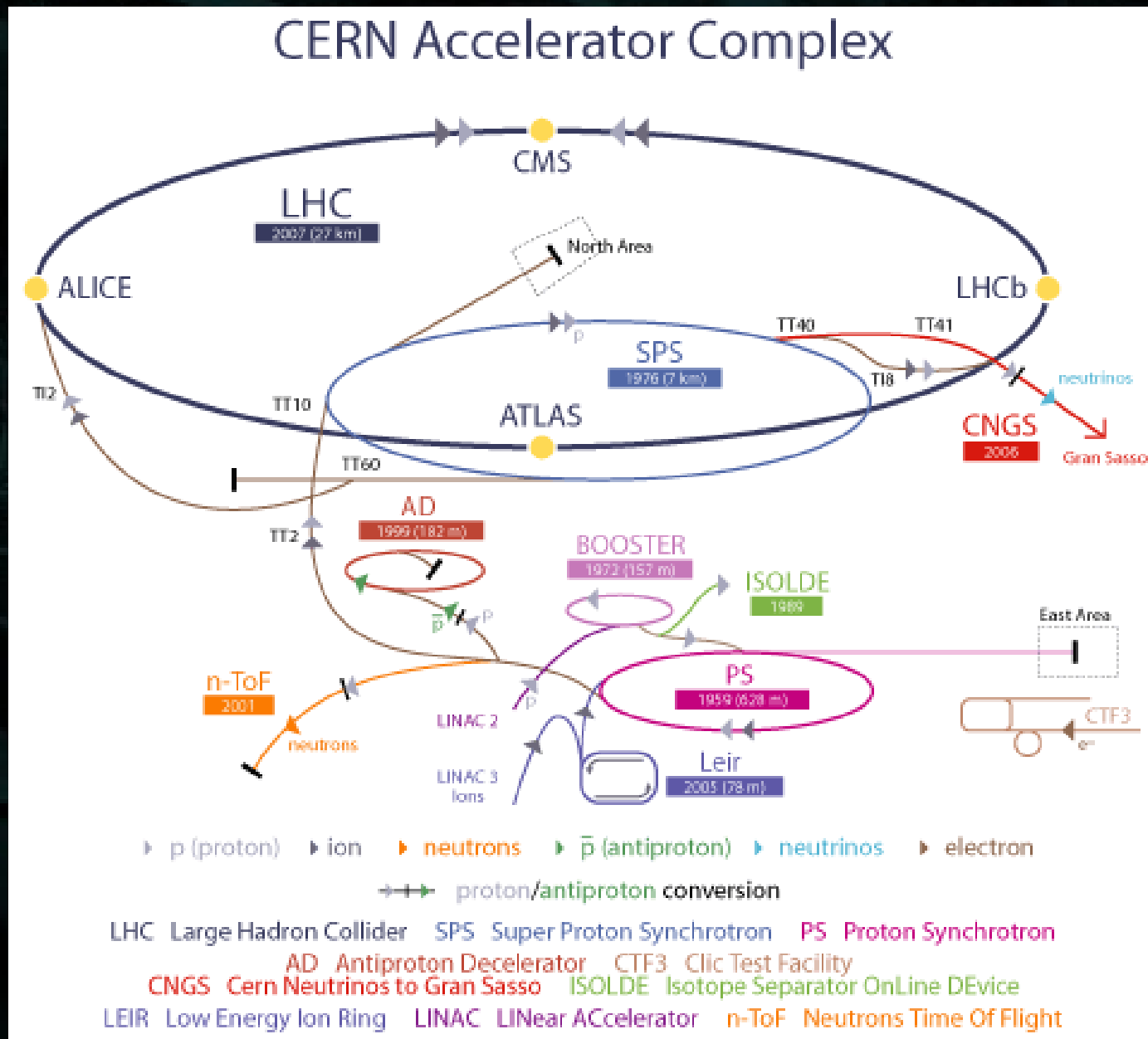


Punkt zderzenia

- 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



Kompleks akceleratorów CERN



Przyszłość dużych akceleratorów

Fizyka podstawowa - maksymalizacja:

- Liniowy zderzacz leptonów: CLIC lub ILC (30-50 km)
- Future Circular Collider: CERN, China (?) (80-100 km)



Wróżenie z fusów
wskazuje na FCC...

Synchrotronowe źródła światła - miniaturyzacja:

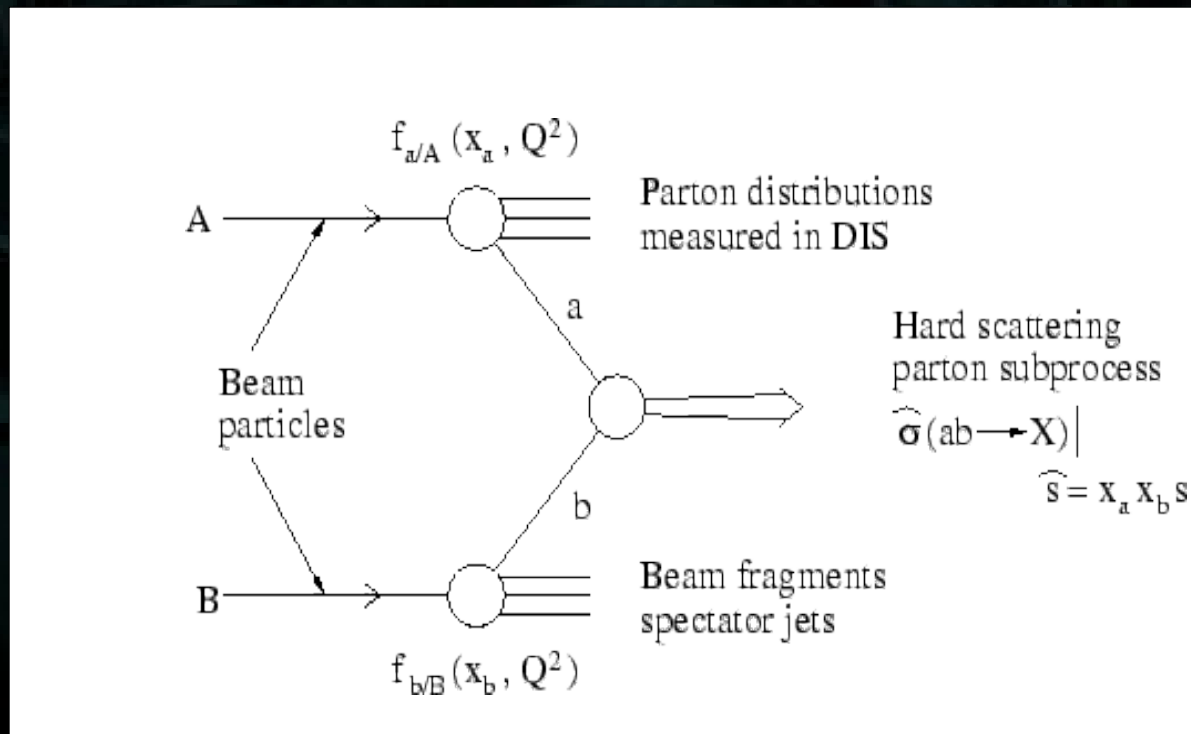
- Lasery Rentgenowskie na swobodnych elektronach
- piąta generacja oparta na zaawansowanych schematach
przyspieszania (plazmowe, laserowe itd)

Spalacyjne źródła neutronów:

- Nowe powstaje w Lund (European Spallation Source)

CLIC/ILC – dlaczego wracamy do elektronów?

- Dwie wiązki elektronów w akceleratorze **liniowym** (bez promieniowania synchrotronowego) o długości 30-50 km
- Protony są cząstkami złożonymi, w związku z czym kiedy się zderza 2 protony to oddziałują 2 kwarki lub gluony o nieznannej energii!



Podsumowanie

- Akceleratory służą otrzymywaniu wiązek cząstek naładowanych o wysokich energiach
- Metody przyspieszania: elektrostatyczne, na fali elektromagnetycznej lub w plazmie (przyszłościowe)
- Akceleratory liniowe i kołowe -komplementarność
- Synchrotrony: zmiana pola magnetycznego z energią
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole)
- Punkt zderzenia – **światłość**
- Po LHC: CLIC/ILC - liniowy zderzacz elektronów
FCC - nowy, 80-cio kilometrowy tunel

Dodatkowe slajdy

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.

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 magnesów:

