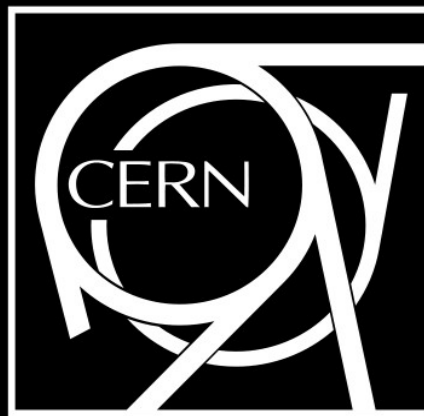


Wstęp do Akceleratorów



Mariusz Sapiński
CERN BE/BI
22 września 2009

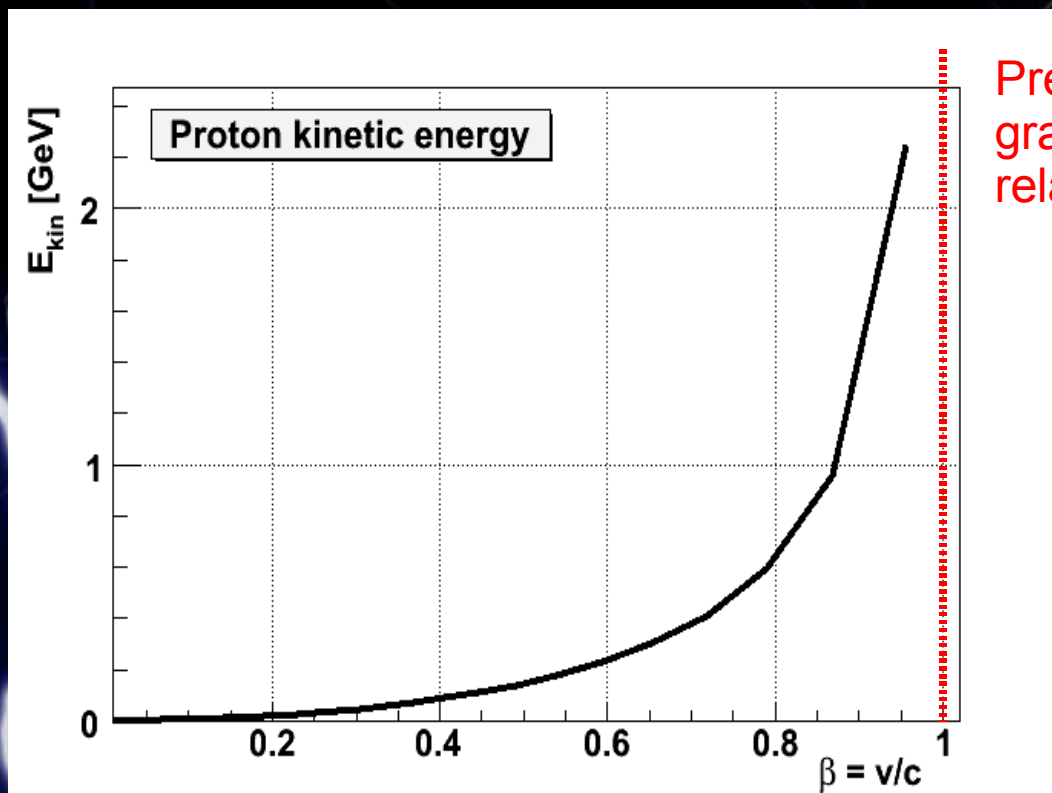
Spis treści

- Po co przyśpieszać? Zastosowania.
- Co i jak przyśpieszać?
- Przyśpieszacze liniowe. Surfowanie na fali.
- Zderzacze kołowe: cyklotron i synchrotron.
- Magnesy i optyka wiązki.
- Punkt zderzenia. Światłość.
- LHC i system CERNowskich akceleratorów
- Przyszłe zderzacze

Po co przyśpieszać

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

Kwestia dużych prędkości...



Prędkość światła –
granica
relatywistyczna

Czyli nazwa “akceleratorzy” lub “przyśpieszacze” 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.

Wiązki na potrzeby fizyki podstawowej

Fizycy potrzebują wiązek:

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

Obecna technologia pozwala na generację wiązki jonów każdego właściwie pierwiastka. Istnieją wiązki mionów i neutrin. Z drugiej strony istnieją też akceleratory przyśpieszające molekuły, a prace teoretyczne pokazują jak przyśpieszać mikrometrowe obiekty.

Jak przyśpieszać ?

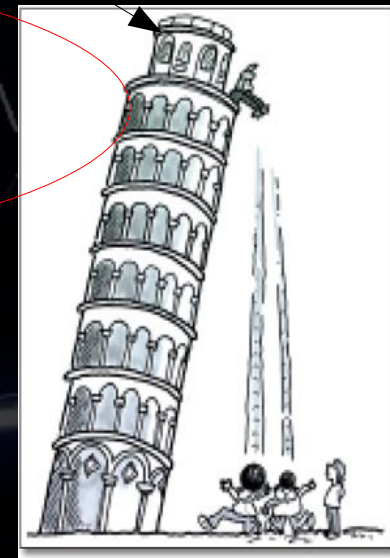
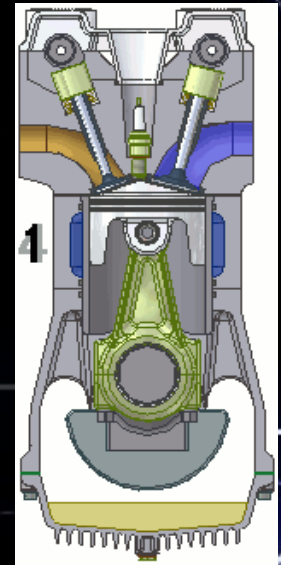
Zamiana energii na ruch

- Energia termiczna
- Energia chemiczna
- Mechanicznie (sprężyna)
- Grawitacyjnie: $a = mG/r^2$
- Elektrostatycznie: $a = qE/m$
- Magnetycznie

Do przyśpieszania pojedynczych cząstek
można wykorzystywać tylko te 2 pola



Kilkugodzinna eksplozja



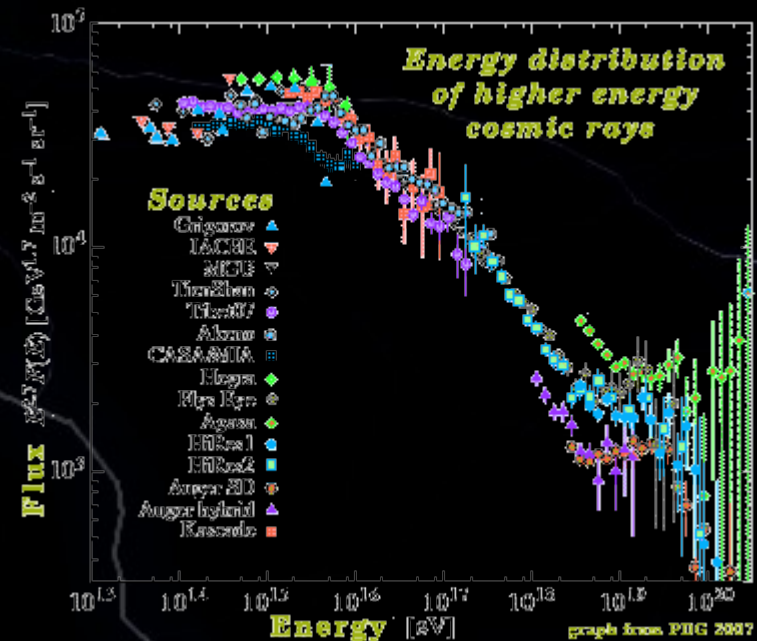
Przykłady z natury?

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

- Uważa się że promienie kosmiczne

o najwyższych energiach może być
produkowane przez tzw.

akcelerację Fermiego czyli swobodne
cząstki przyśpieszane przez magnetyczną
falę uderzeniową



Niestety ta metoda nie jest zbyt użyteczna dla nas (ogromna przestrzeń, nie produkuje skolimowanej wiązki)

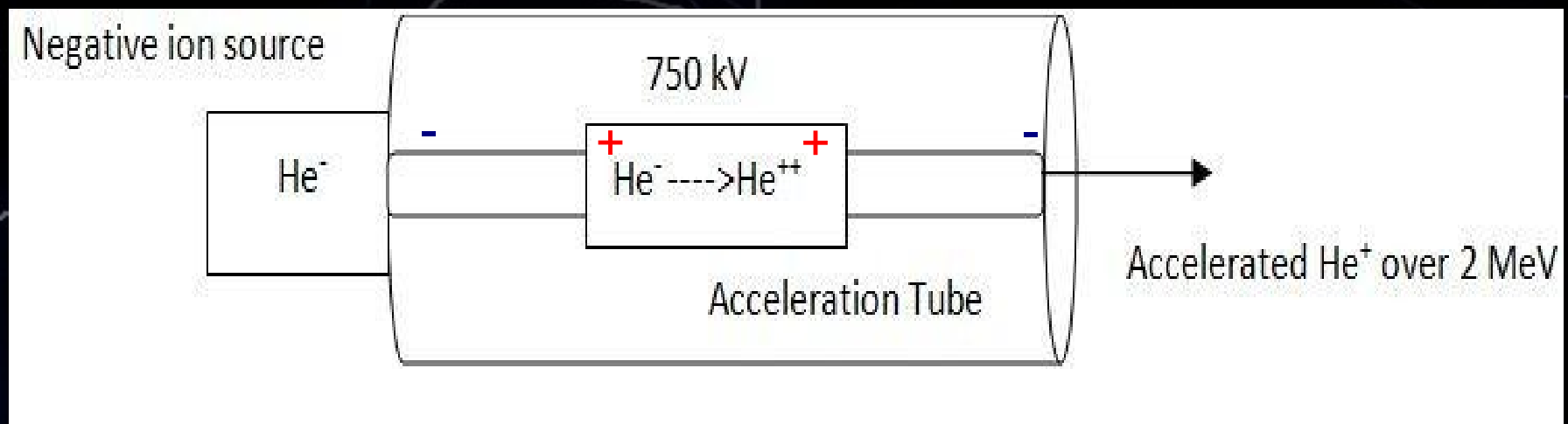
Ale np. wiązki promieniowania alfa są otrzymywane z radioaktywnych izotopów, dzięki odpowiedniej kolimacji - energia jest dobrze zdefiniowana i nie potrzeba żadnych urządzeń oprócz przysyłon.

Zaczniemy od czegoś prostego: przyśpieszanie elektrostatyczne



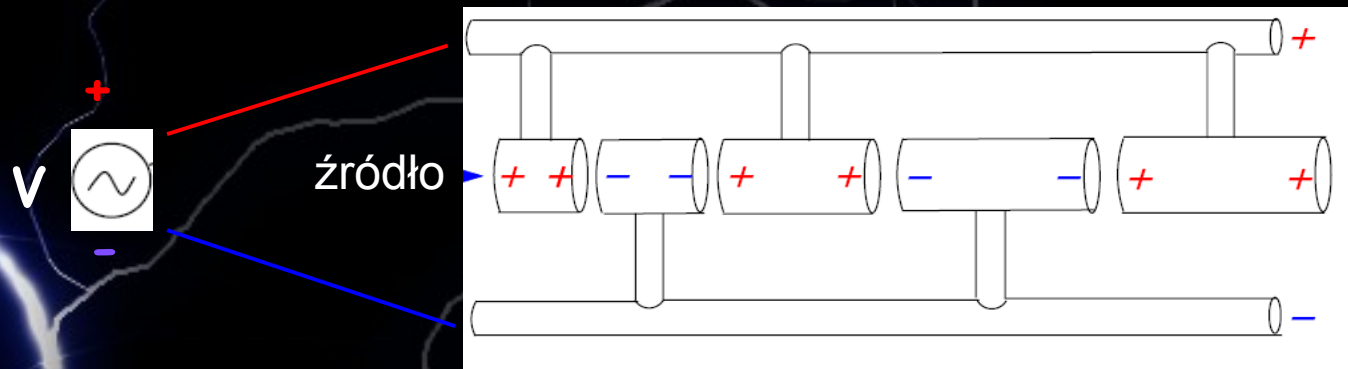
- lampa rentgenowska: $E \sim 10^5 \text{ eV}$
- główne ograniczenie: możliwość wygenerowania wysokiego napięcia elektrostatycznego

Mały trik aby zdublować energię



Jak pokonać konieczność wygenerowania wysokiego napięcia?

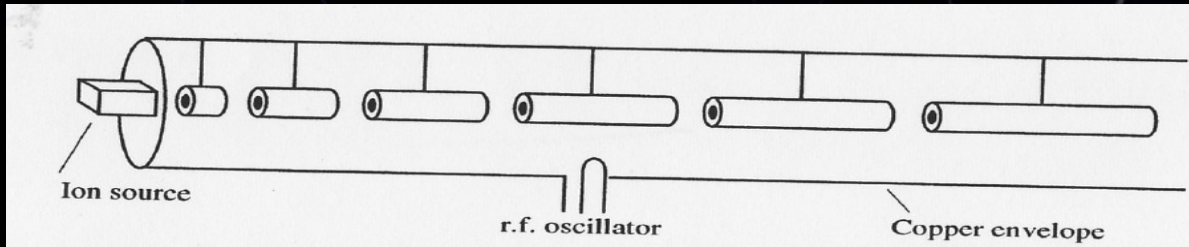
Wideroe



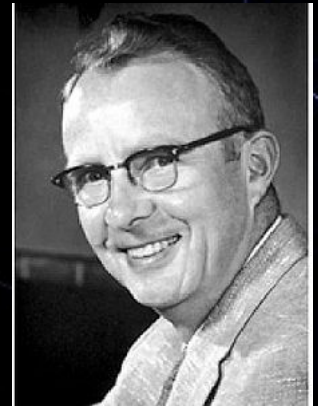
Tak przyśpieszana wiązka nie może być ciągła - paczki

- Cząstki (w paczkach!) przyspieszane pomiędzy komorami dryfowymi; pierwszy system 1928
- Konieczność coraz dłuższych komór
- Ograniczenia: rozmiary (dla 7 MHz, proton 1MeV pokonuje 2m/cykl), straty radiacyjne dla wyższych (10 MHz) częstotliwości (cała struktura zamykana w rezonatorze)

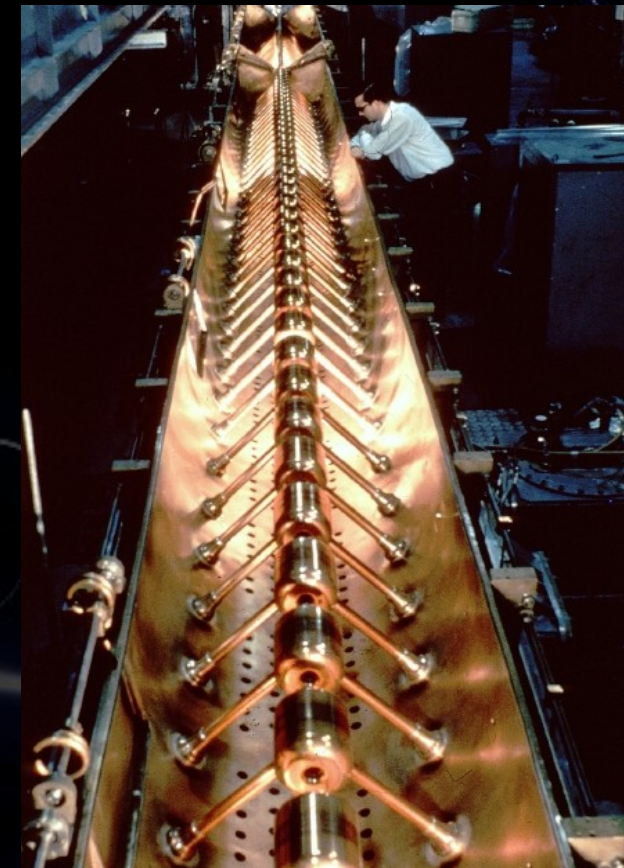
Ulepszenie: system Alvareza



1947, kiedy
technika
radarowa
(klystrony) była
już rozwinięta

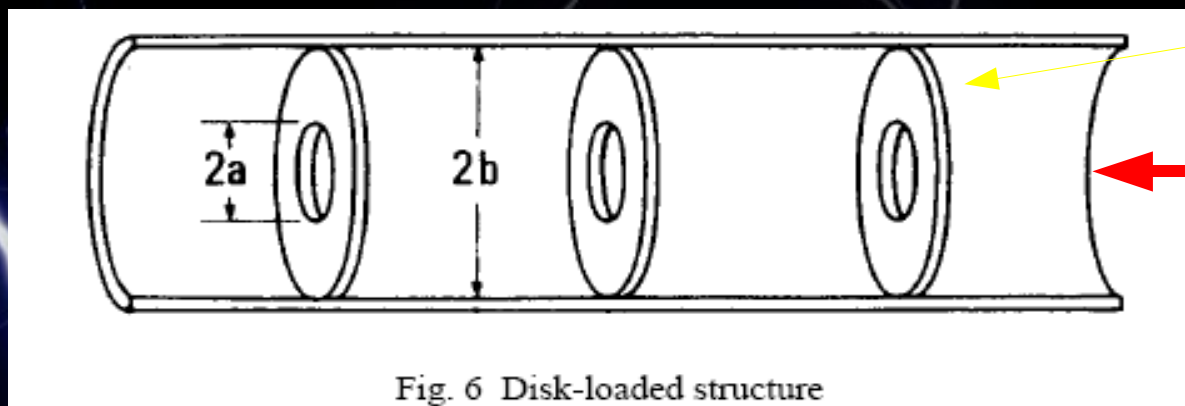


- Zbiornik rezonansowy w którym generowana jest elektromagnetyczna fala stojąca z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi zbiornika (tzw. mod TM)
- Częstość mikrofali: ok 200 MHz
- System Alvareza jest używany do dziś szczególnie we wczesnych fazach przyspieszania (np. LINIAC4 budowany w CERNie jako część nowego zespołu pre-akceleratorów LHC)



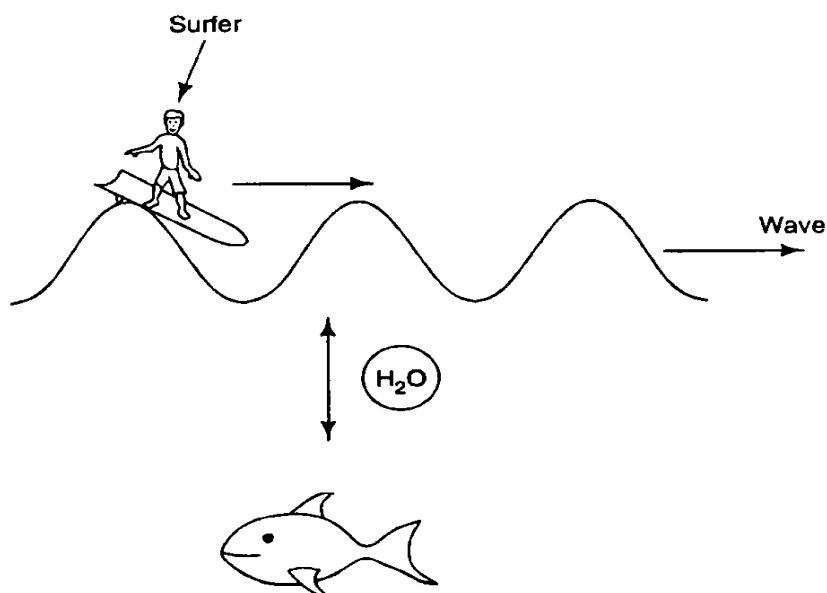
Podążając tą drogą: wnęki rezonansowe

Zlikwidujemy rury dryfowe (drift tubes), użyjemy RF (radio-frequency) bezpośrednio do przyspieszania cząstek:



przegrody spowalniające
falę

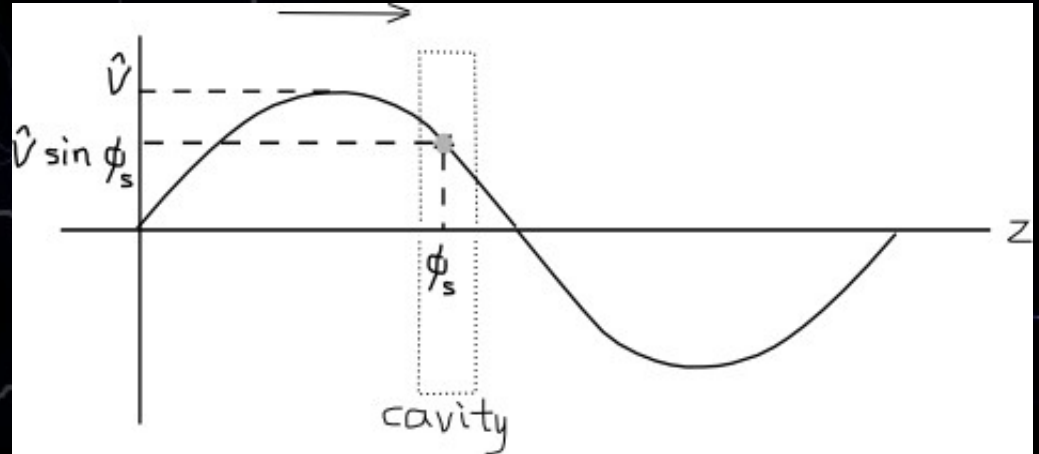
wiązka oraz fala
elektromagnetyczna
(w modzie TM)



Przyspieszanie we wnękach
rezonansowych można porównać
do surfowania po falach

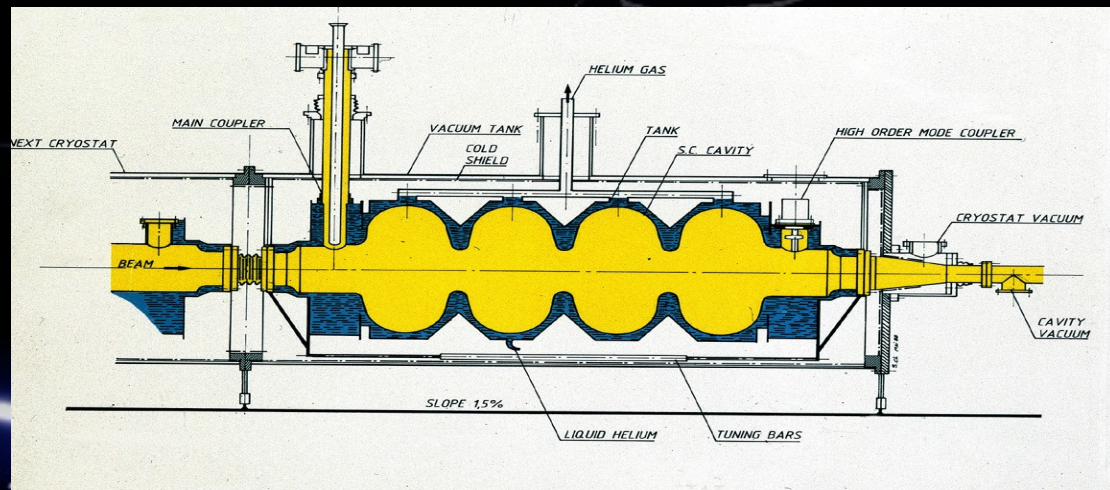
Zalety wnęk rezonansowych

- Stabilność fazowa
- Wnęka rezonansowa
 - fala pobudzająca ma częstotliwość



= częstotliwości własnej wnęki – redukcja strat mocy

- Te straty jeśli nie ma pudła rezonansowego, są proporcjonalne do częstotliwości fali wzбудzającej – wnęki rezonansowe szczególnie nadają się do wysokich energii.
- Optymalizacja kształtu:



Nowe pomysły - wakefield acceleration

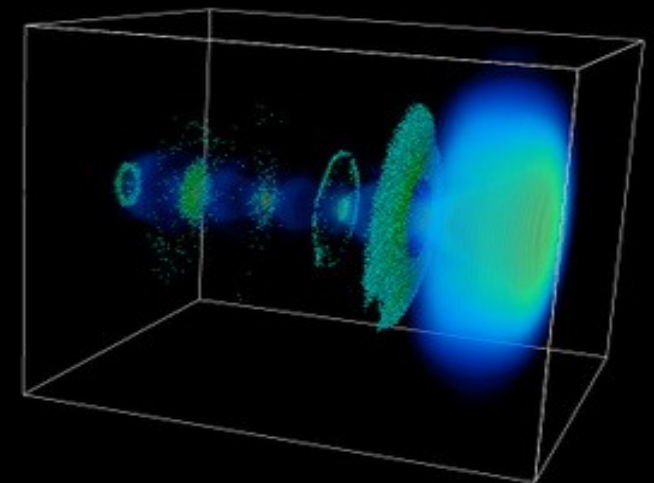
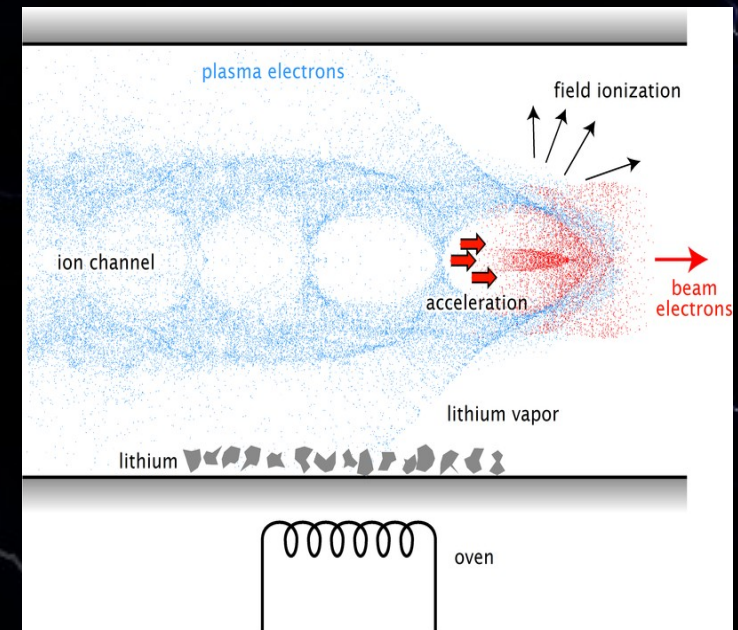
• Idea: pole elektryczne impulsu laserowego wstrzelonego w plazmę rozdziela elektrony od jonów tworząc **lokalnie bardzo wysoki gradient pola** (tzw. Wakefield), który można wykorzystać do przyspieszania cząstek.

Porównanie gradientów:

- wnęka rezonansowa: 0.0005 GV/cm
- plazma gazowa: 1 GV/cm
- plazma w ciele stałym: 100 GV/cm

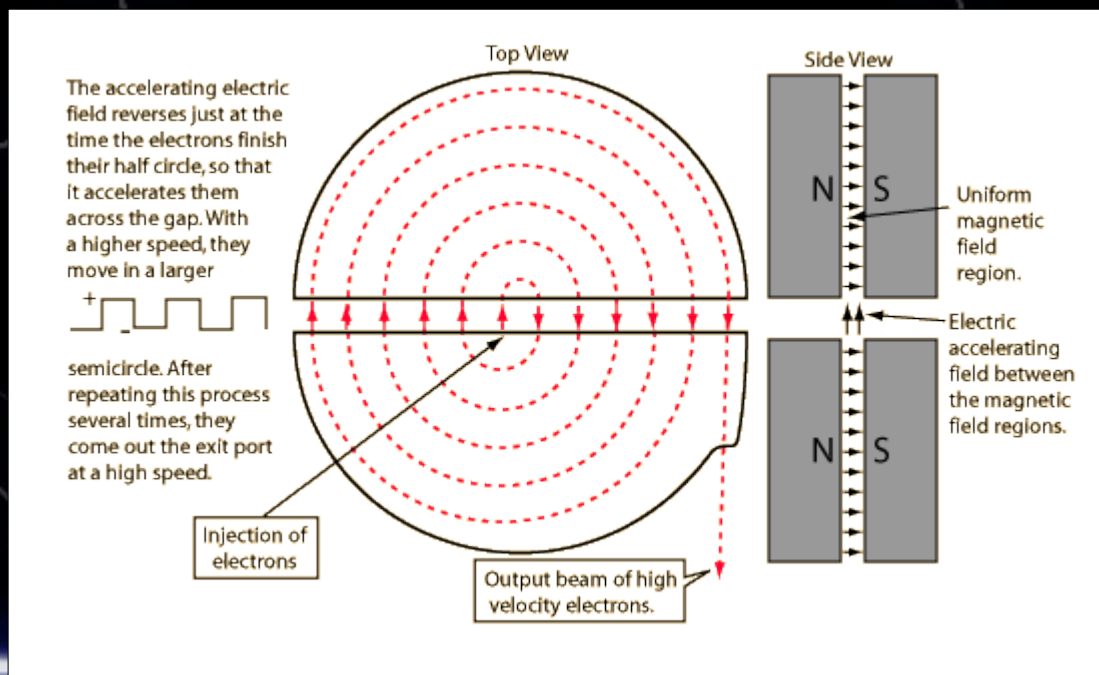
femtosekundowa synchronizacja

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



Akceleratorzy 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



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

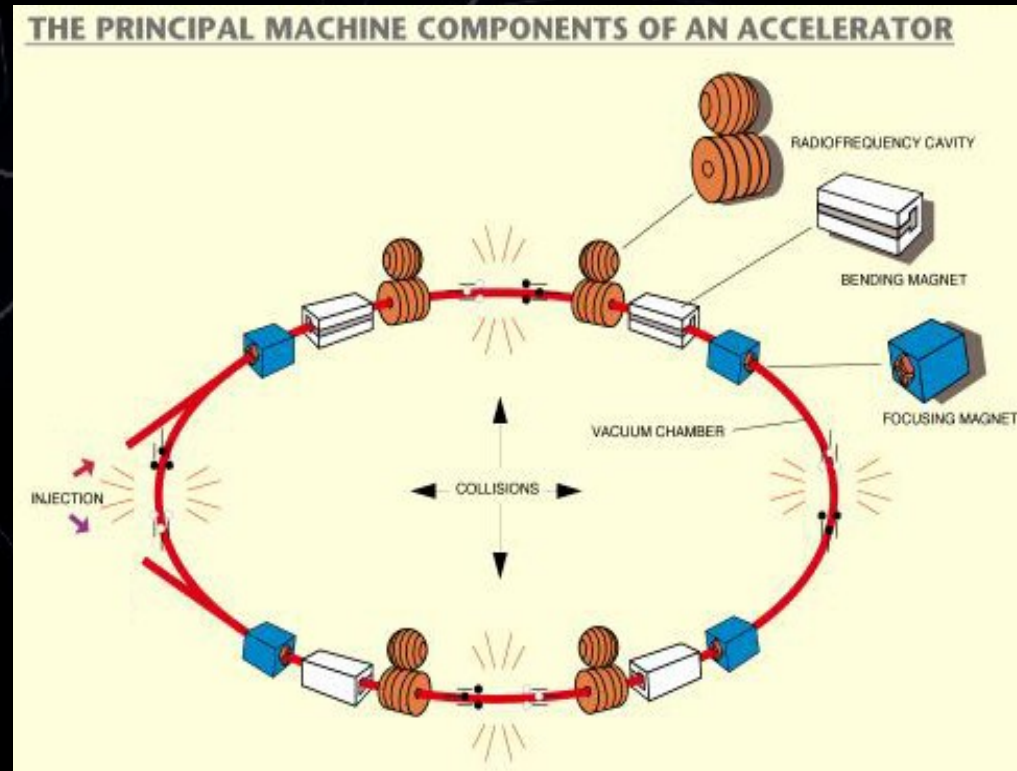
Lawrence,
Nobel 1939
(ale też Widroe!)

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

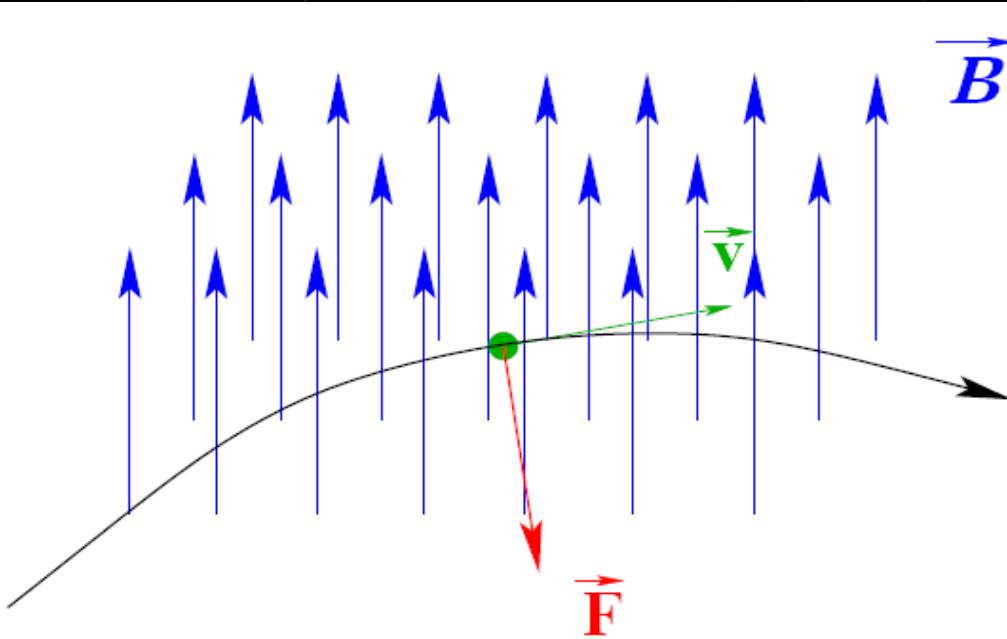
Synchrotrony

- Tutaj zmieniamy (**SYNCHRONICZNIE**) oba pola: elektryczne (jak w cyklotronie, choć raczej używam wnęk rezonansowych) i magnetyczne, za to cząstki poruszają się po ustalonej orbicie
- Na przykład LHC, przepis:
 - Magnesy zakrzywiające
 - Magnesy ogniskujące i korygujące
 - Wnęki rezonansowe (omówiliśmy)
- Wszystkim zarządza siła Lorenza
- Pierwszy synchrotron: 1952, 3 GeV, BNL

Zasadnicze elementy synchrotronu



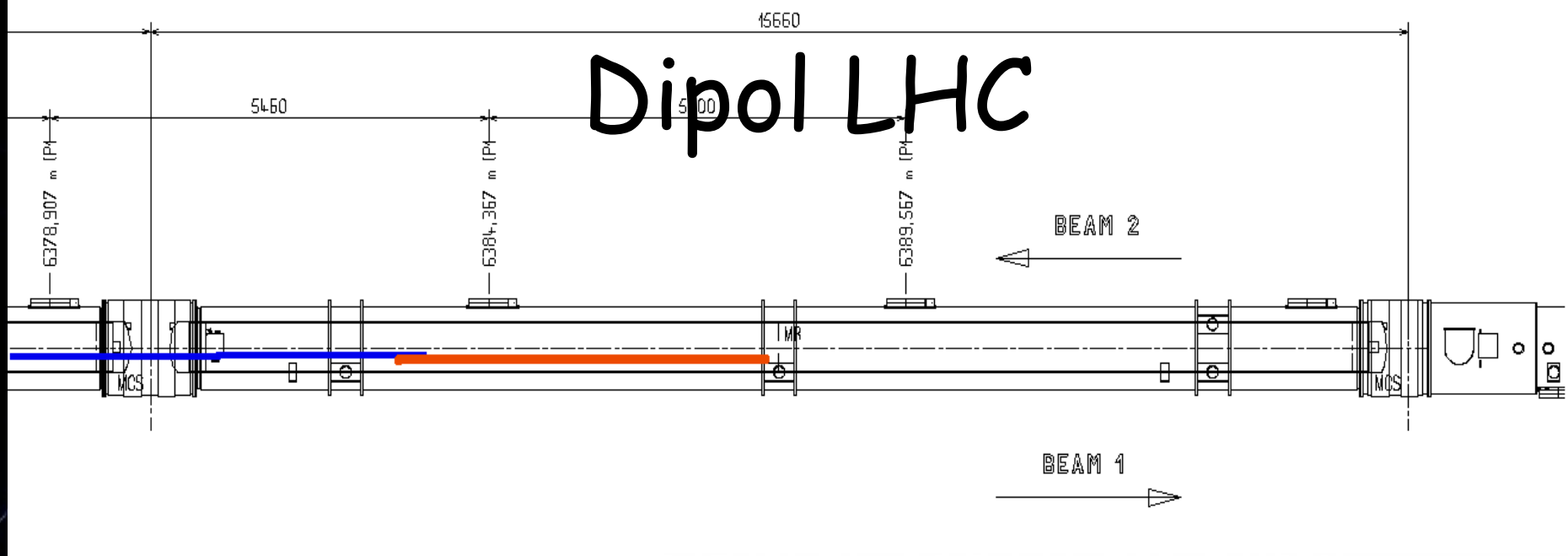
Magnesy zakrzywiające wiązkę



- Dipole o wertykalnym polu zakrzywia wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej

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

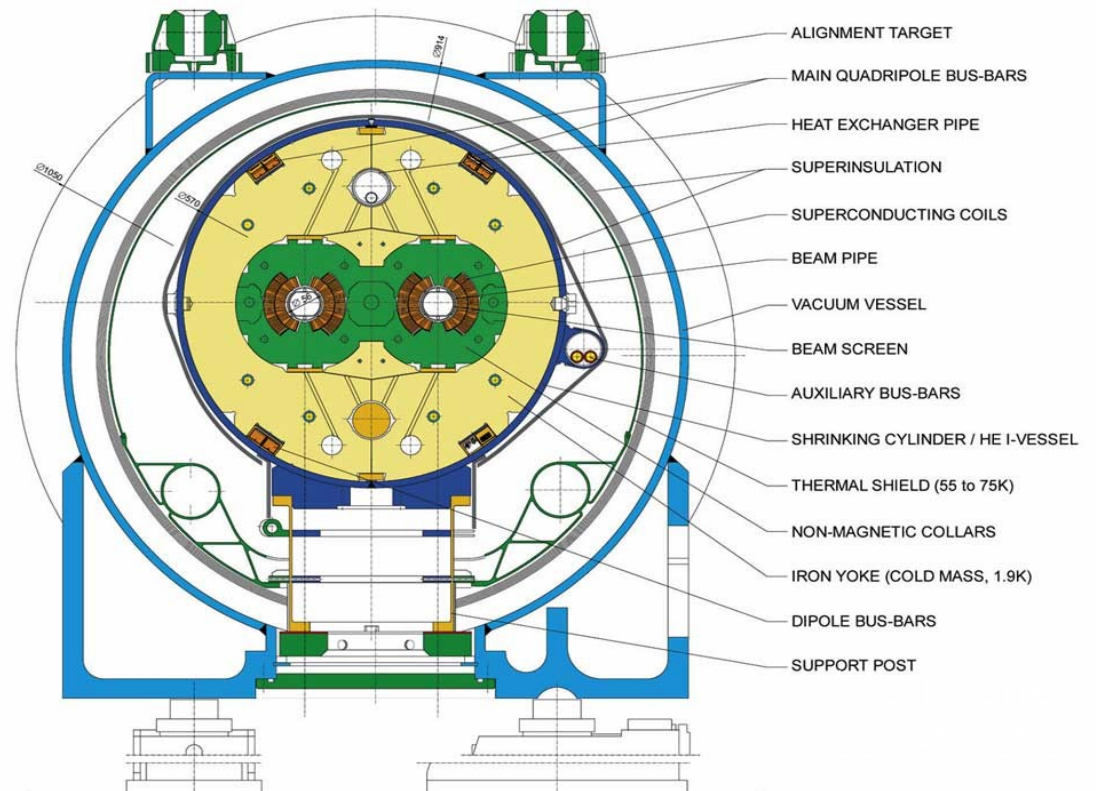




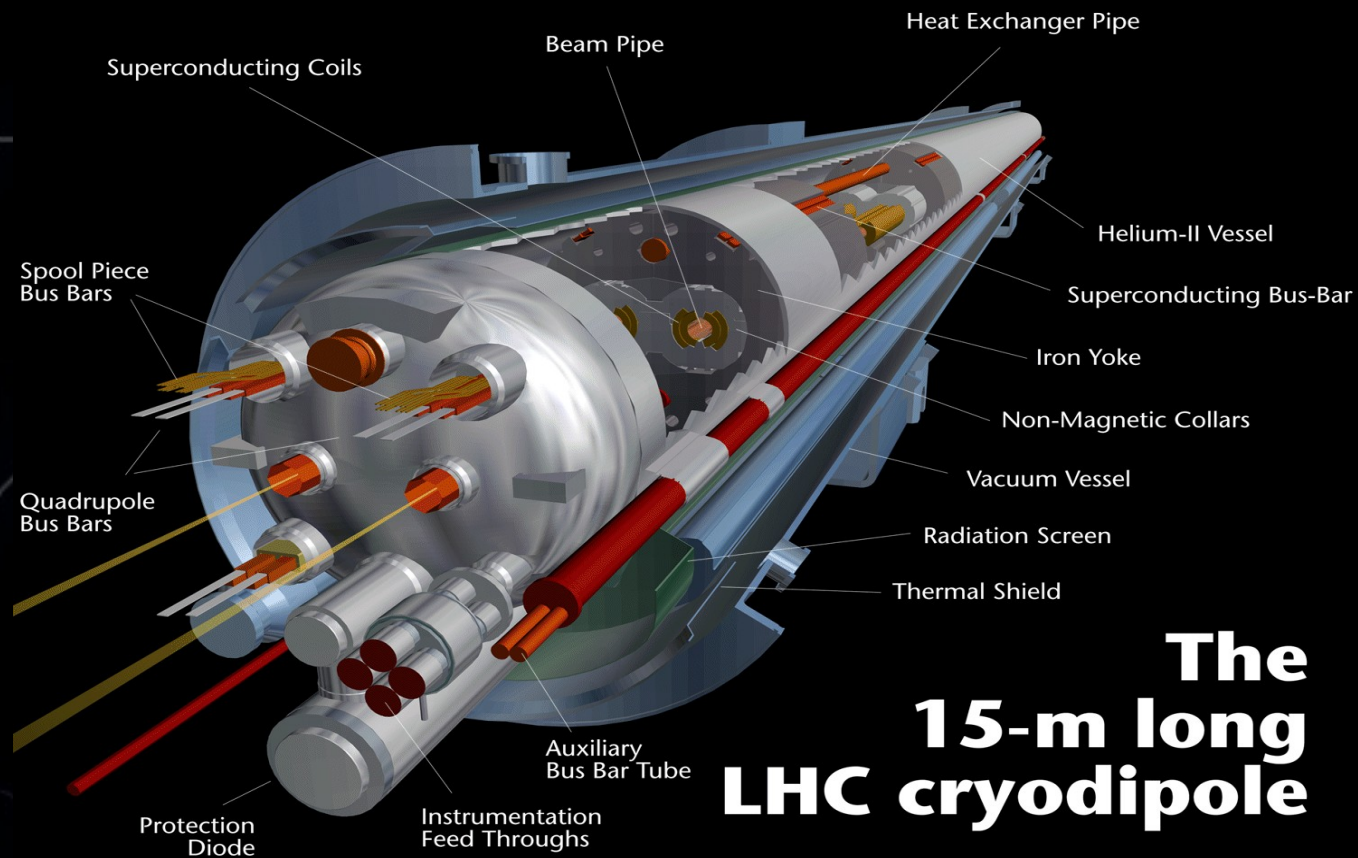
- Nadprzewodzący
- Długość ok. 15 m
- Waga ok. 22 ton
- Nominalne pole (środek rury): 8.33 T
- Promień zakrzywienia: 2.8 km

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

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

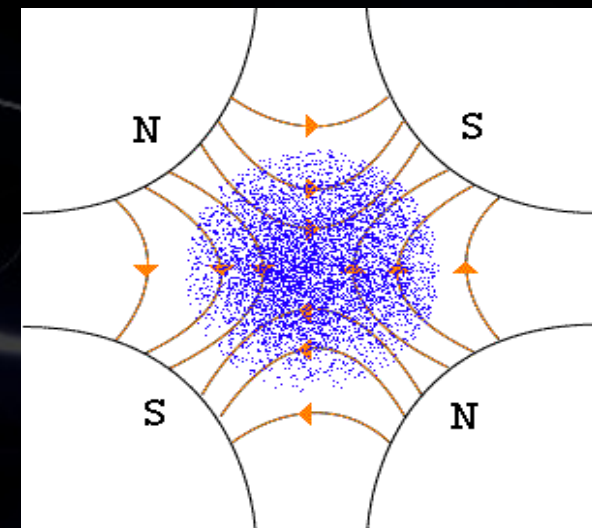


Dipol LHC



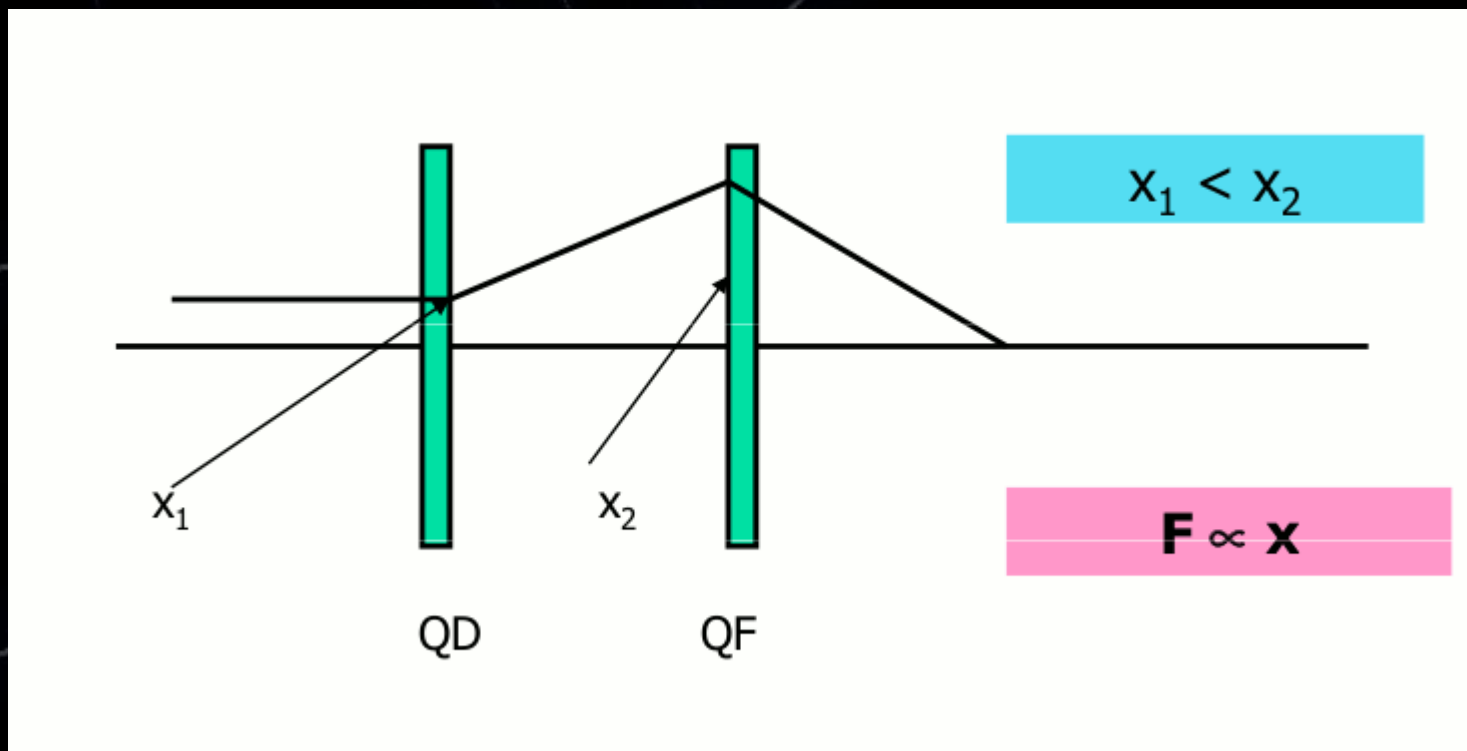
Stabilność wiązki

- 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 jednoznaczne z rozogniskowaniem w płaszczyźnie y



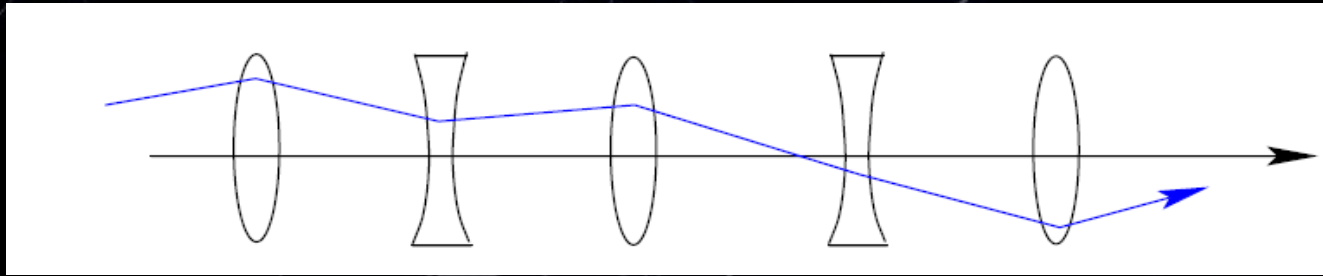
Stabilność wiązki

- Kwadrupole są jak soczewki – analogia optyczna

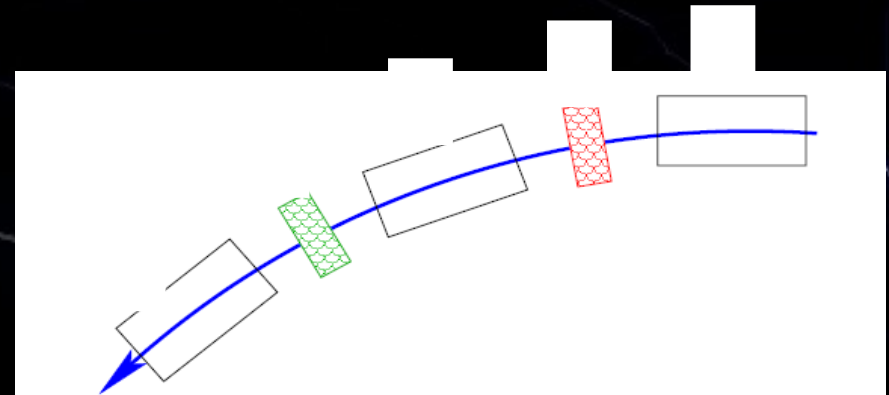


- Pierwsze synchrotrony obydwały się bez kwadrupoli ze względu na ogniskowanie dipolowe – na dużych maszynach jest ono słabe ($1/R^2$) i działa tylko w płaszczyźnie w której wiązka się zakrzywia.

Optyka wiązki

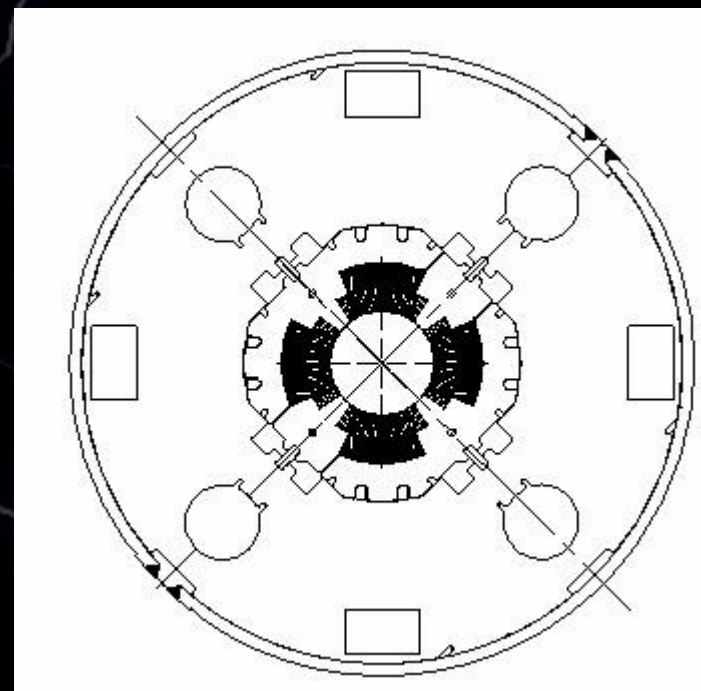


- Wiązka nie “eksploduje”
- Amplitudy drgań nie rosną
- Ewolucję rozmiaru wiązki wzdłuż akceleratora nazywamy funkcją β



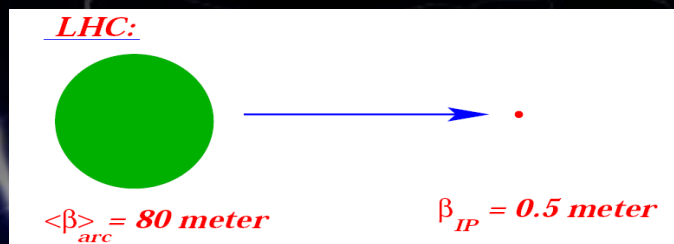
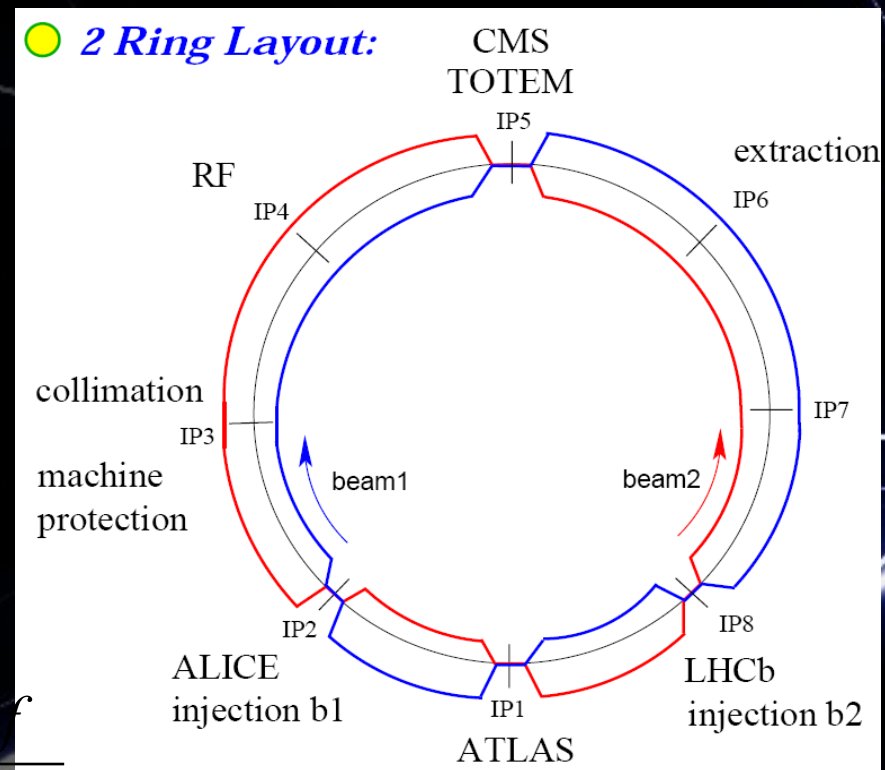
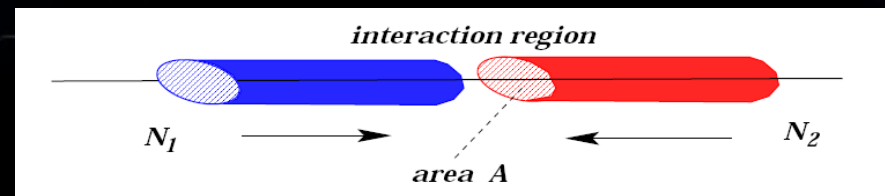
Kwadrupol LHC

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

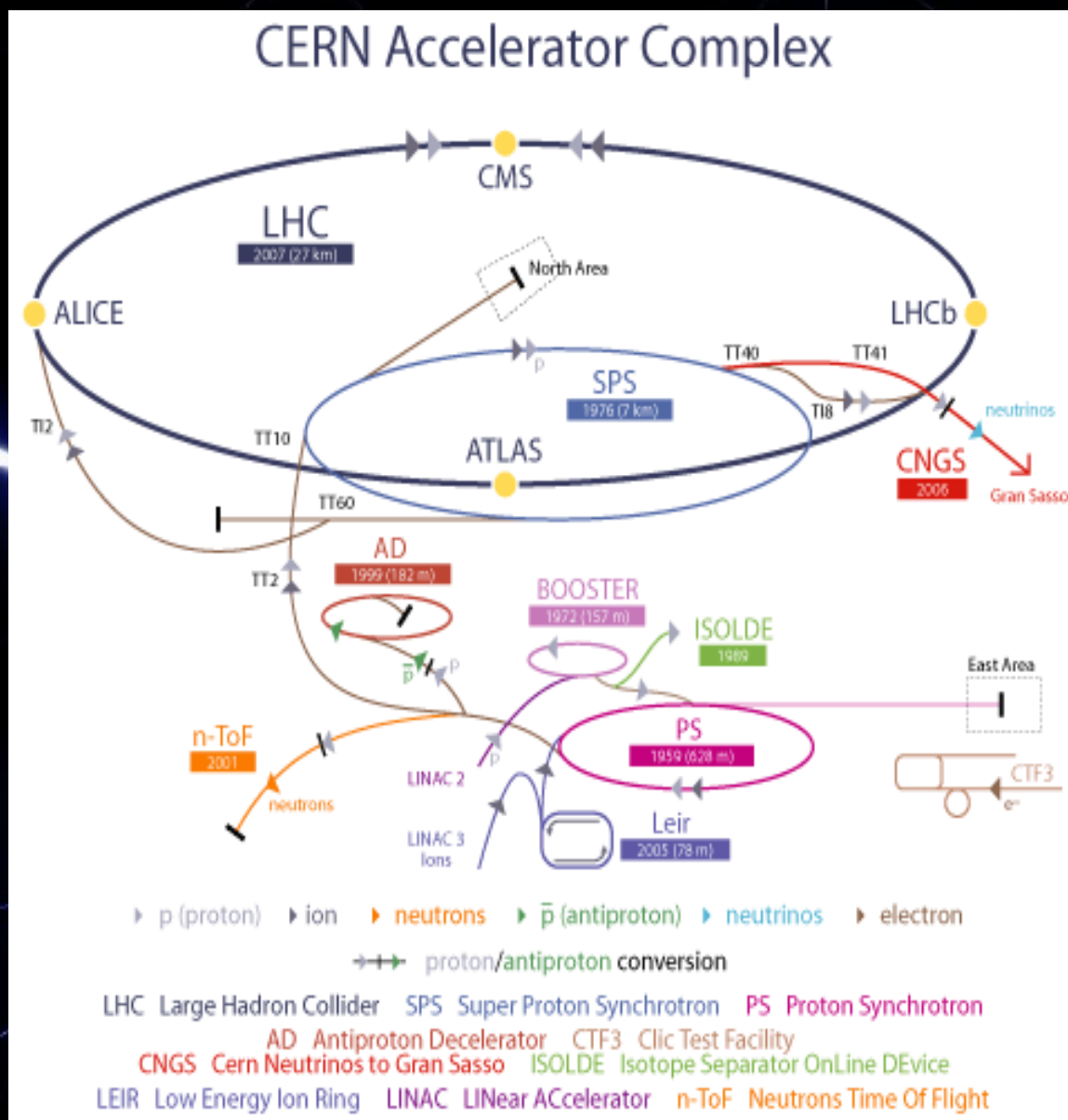


Punkt zderzenia

- 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)
- Świetlność: $L=f/\sigma$



System akceleratorów w CERNie



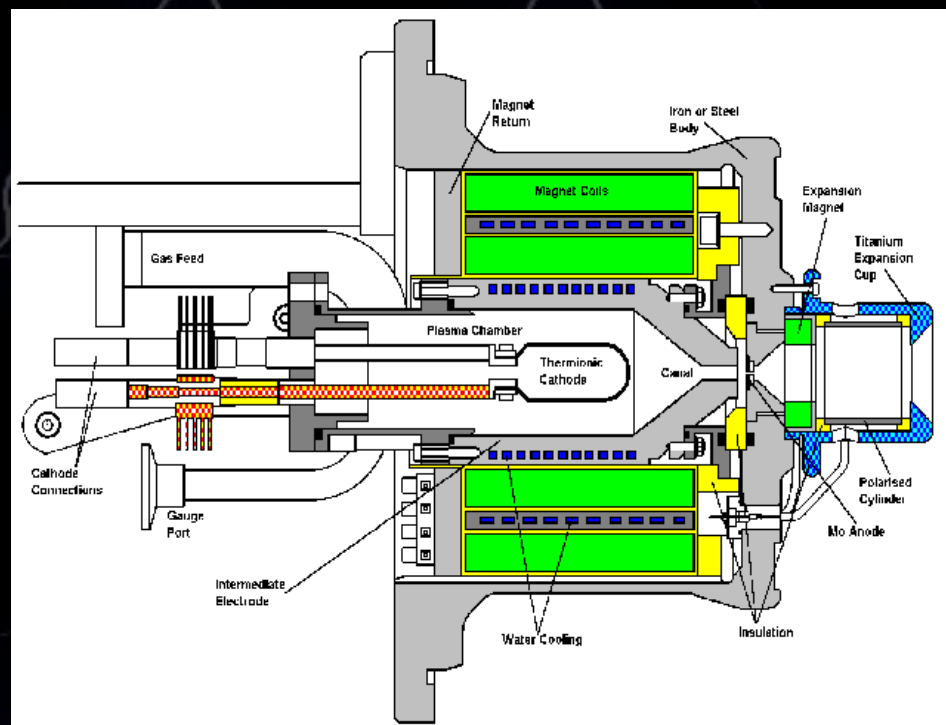
1. źródło protonów
(+ LINAC 2, 50 MeV Alvarez)
lub jonów Pb (+ LINAC 3)
2. PS BOOSTER: najmniejszy
synchrotron w CERNie,
energia 1.4 GeV
3. Proton Synchrotron (PS):
energia 28 GeV
4. Super Proton Synchrotron
(SPS): 450 GeV
5. LHC: 7 TeV

Nie mówiliśmy jeszcze o źródłach

W przypadku elektronów: termoemisja (rozżazona katoda, jak w starych telewizorach) lub emisja pobudzana laserowo.

W przypadku jonów jest wiele opcji.

W CERNie duoplasmotron (dla protonów):



obecny stan technologii pozwala na tworzenie wiązek dowolnych jonów

Dlaczego zderzenia dwu wiązek są lepsze niż zderzenie wiązki z tarczą?

- Zderzenia wiązek, dostępna energia = $E_1 + E_2$
 $7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$
- Zderzenia z tarczą: część energii jest unoszona przez wybite cząstki,
dostępna energia = 0.115 TeV

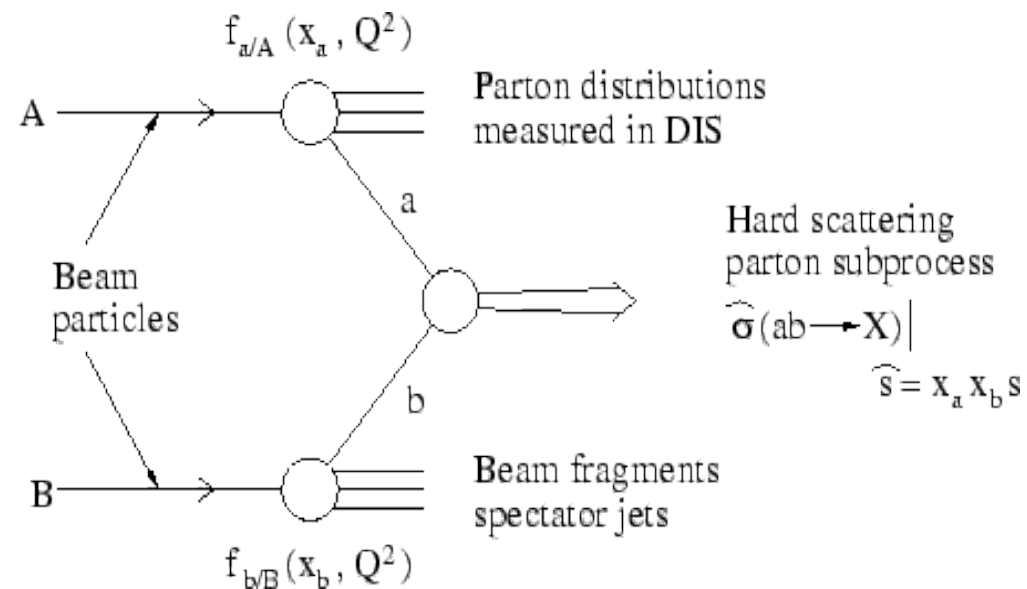
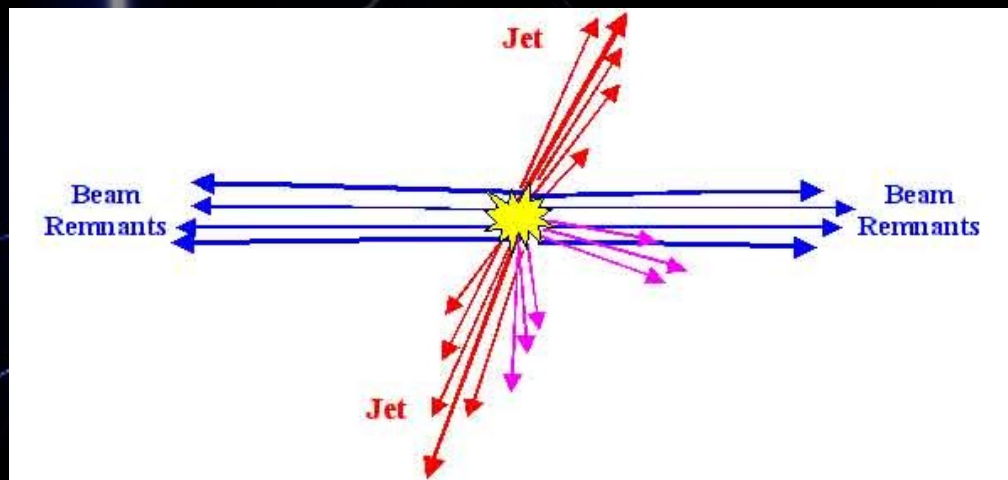
Przyszłość akceleratorów

- XFEL oraz inne "Light sources" - badania materiałowe
- Terapia hadronowa (kilka akceleratorów jest budowanych)
- Akceleratory 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 o wysokich energiach oraz wytwarzaniu promieniowania synchrotronowego
- Kilka metod przyśpieszania: elektrostatyczne, na grzbiecie fali (wnęki rezonansowe), w plazmie paczki cząstek
- Akceleratory liniowe oraz kołowe
- Cyklotrony oraz synchrotrony
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole) optyka wiązki
- Punkt zderzenia - światłość
- Po LHC: liniowy zderzacz elektronów energia w środku masy