

Wstęp do akceleratorów

Mariusz Sapinski BE/BI

CERN/Lipiec 2009

Spis treści

- Co to jest przyśpieszenie?
- Po co przyśpieszać?
- Jak przyśpieszać?
- Przyśpieszacze liniowe
- Zderzacze kołowe: cyklotron i synchrotron
- Magnesy i optyka wiązki. Emitancja.
- Punkt zderzenia. Świetlność
- LHC i system CERNowskich akceleratorów
- Przyszłe zderzacze

Co to jest przyśpieszenie?

- $\vec{a} = d\vec{v}/dt$ (wektory!)
- $\vec{a} = \vec{F}/m$
- $a_r = v^2/r$ (przyśpieszenie dośrodkowe)

Po co przyśpieszać

- Żeby badać/generować zjawiska towarzyszące przyśpieszaniu (np. promieniowanie synchrotronowe)
- Żeby osiągnąć dużą prędkość
czyli dużą energię kinetyczną
 - Fizyka podstawowa
 - Medycyna
 - Biologia, badanie materiałów...

Po co przyśpieszać: potrzeby fizyki podstawowej

Fizycy potrzebują wiązek:

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

Jak przyśpieszać ?

Zamiana energii na ruch, siła odrzutu, $a=F/m$

- Energia termiczna
- Energia chemiczna
- Mechanicznie (sprężyna)

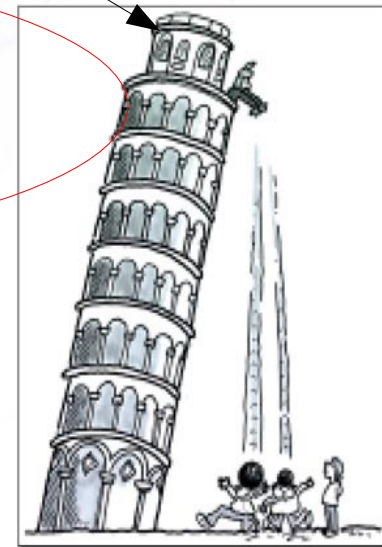
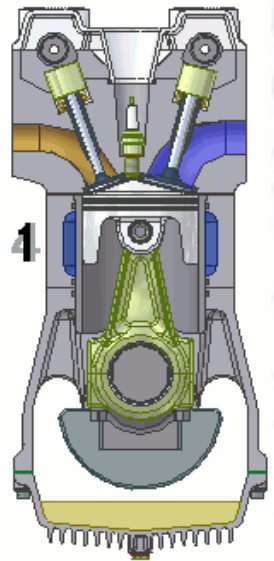


Kilkugodzinna eksplozja

OTW

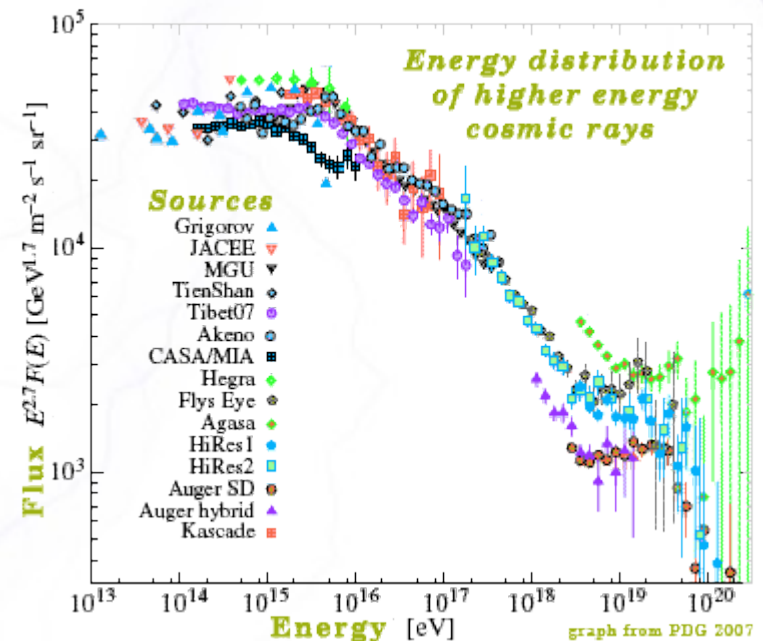
- Grawitacyjnie: $a = mG/r^2$
- Elektrostatycznie: $a = qE/m$
- Magnetycznie

Do przyśpieszania pojedynczych cząstek można wykorzystywać tylko te 2 pola



Przykład: jak to robi natura?

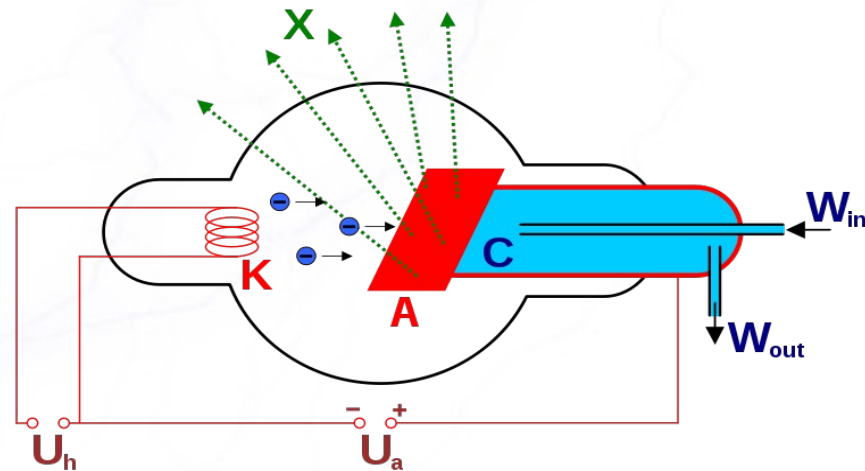
- Największe energie – promieniowanie kosmiczne: 10^{20} eV, LHC tylko $7 \cdot 10^{12}$ eV
- Uważa się że promienie kosmiczne o najwyższych energiach może być produkowane przez tzw. akcelerację Fermiego czyli swobodne cząstki przyśpieszane przez magnetyczną falę uderzeniową



Homo Sapiens ma swoje sposoby...

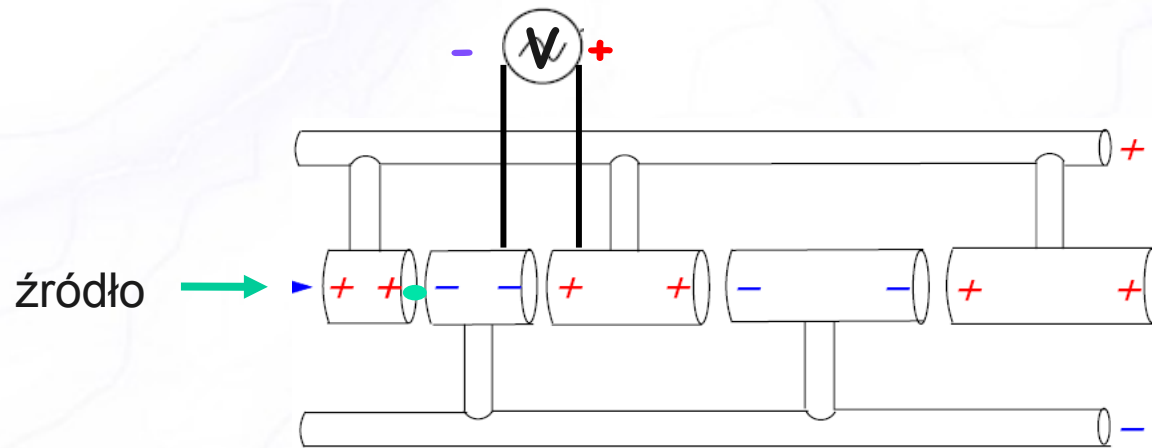
- Używamy akceleratorów
- Kontrolujemy parametry przyśpieszanych cząstek (prędkość, kierunek)
- Prosty akcelerator – lampa rentgenowska:

$$E \sim 10^5 \text{ eV}$$



Nieco większe energie:

- 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)

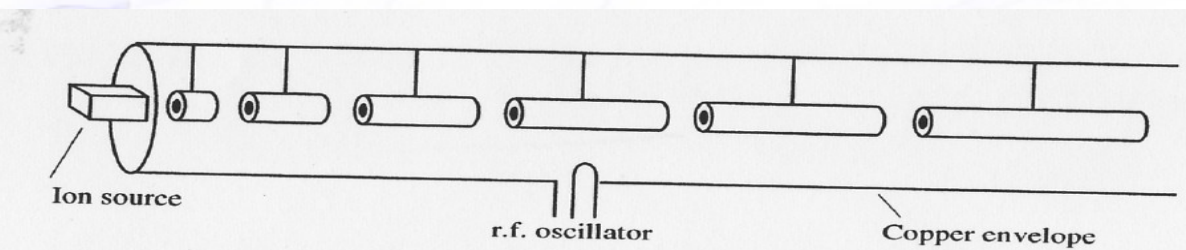
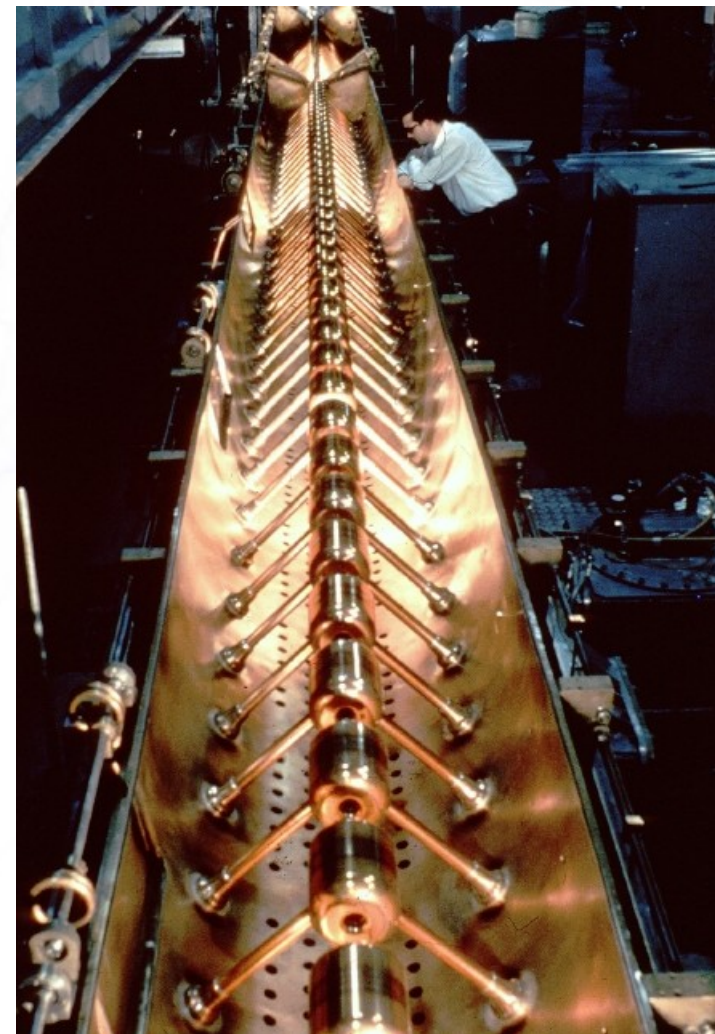
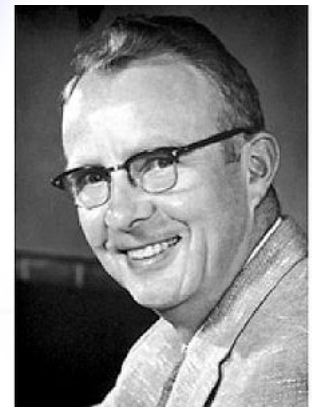


Wideroe

Tak przyspieszana wiązka nie może być ciągła - paczki

System Alvareza

- Zbiornik rezonansowy, mikrofałe generują przemienne pole w obszarze między rurami dryfowymi: cząstki wpadające w odpowiedniej fazie są przyśpieszane (200 MHz)
- System Alvareza jest wciąż używany (np. budowany właśnie LINAC 4, gdzie cząstki są jeszcze nierelatywistyczne)



Podążając tą drogą... RF-cavities

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

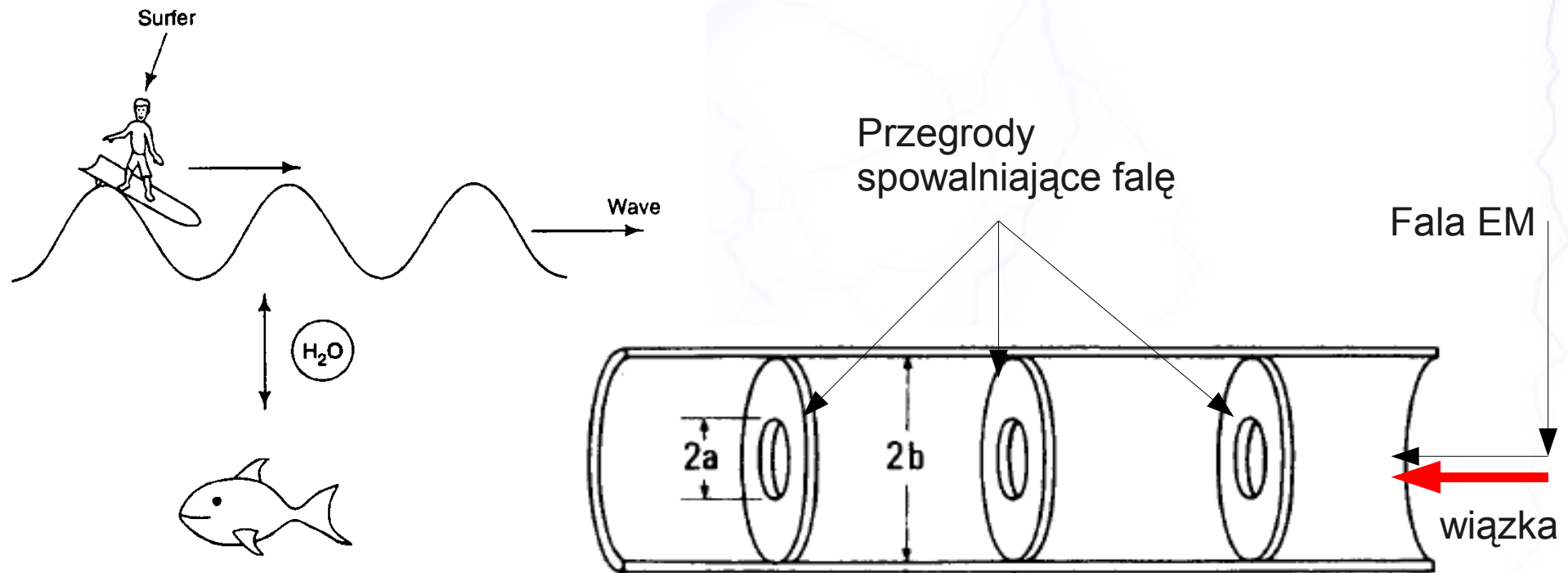
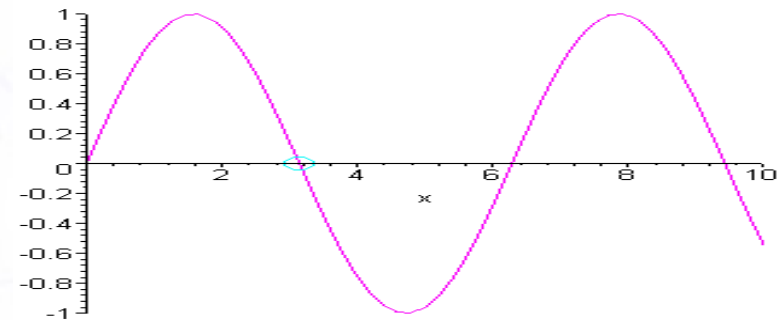
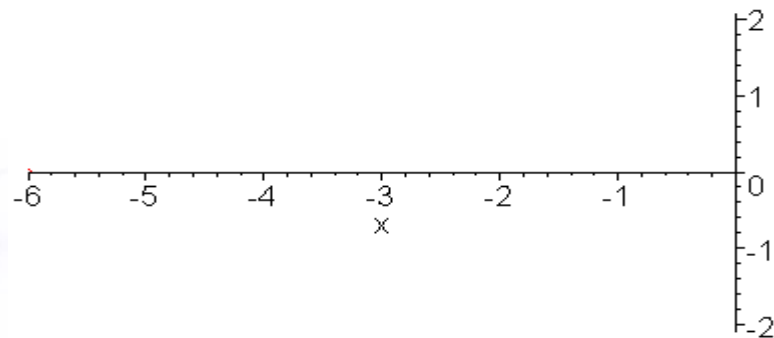
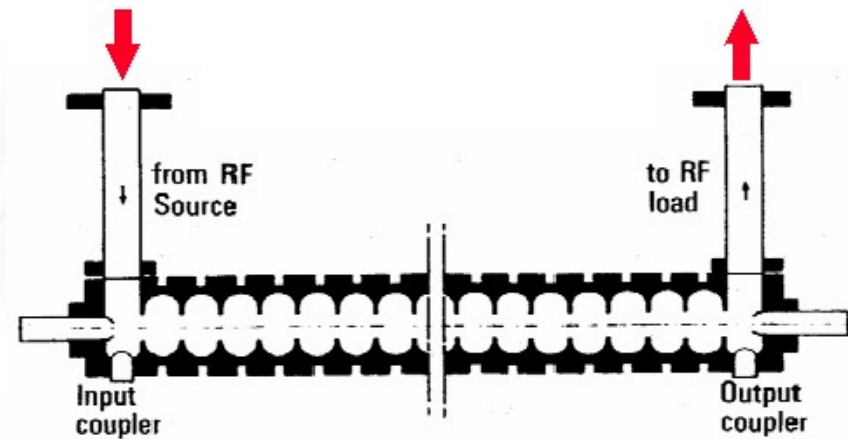
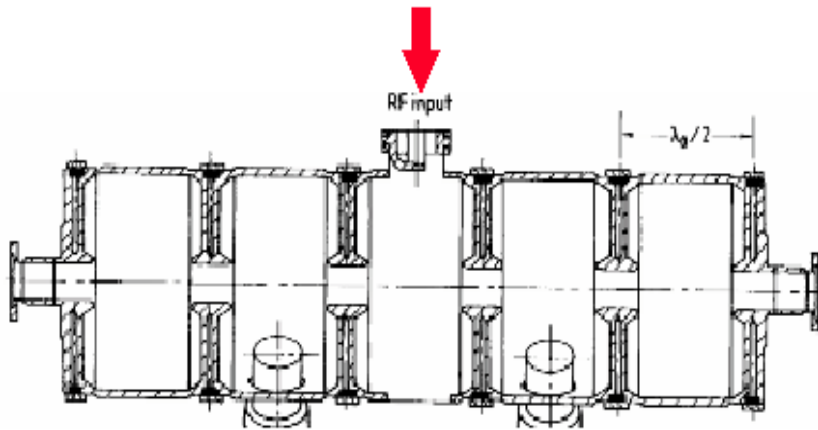


Fig. 6 Disk-loaded structure

Uwaga: falowód skonstruowany tak, aby RF było w modzie TM – czyli pole elektryczne oscyluje w kierunku ruchu wiązki. **Pole elektryczne przyśpiesza.**

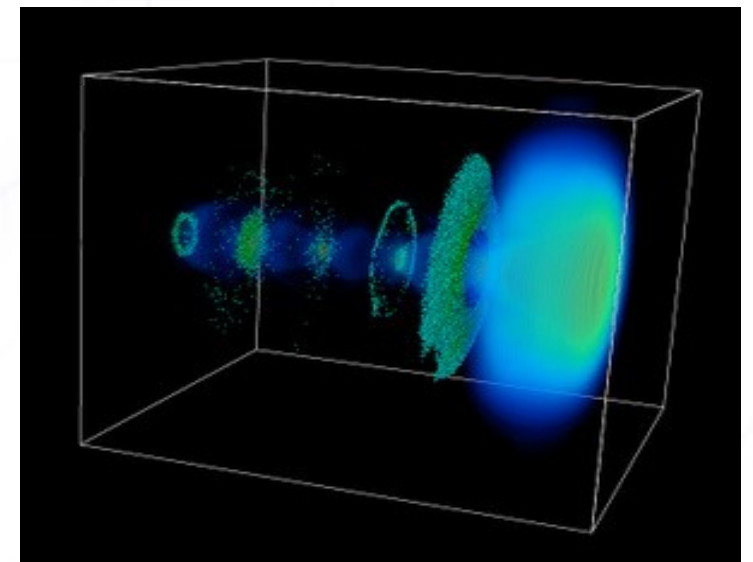
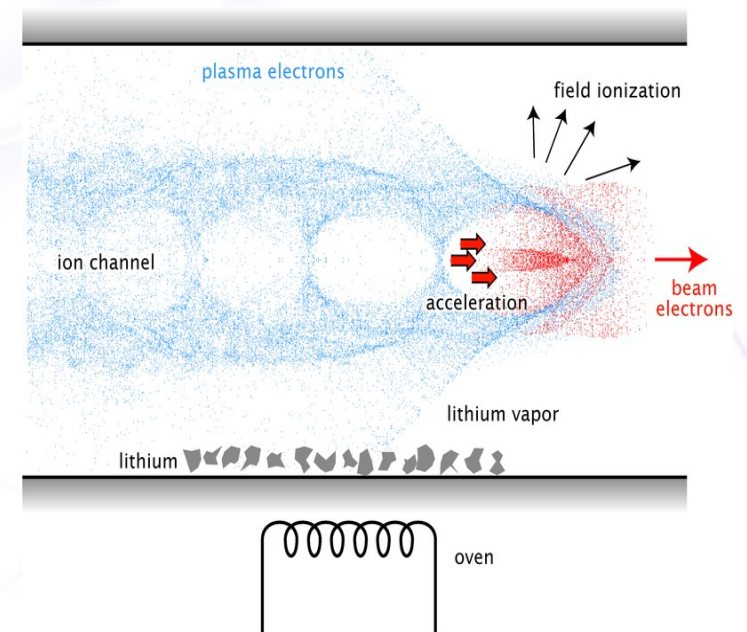
2 rodzaje: fala stojąca i biegnąca



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 przyśpieszania cząstek

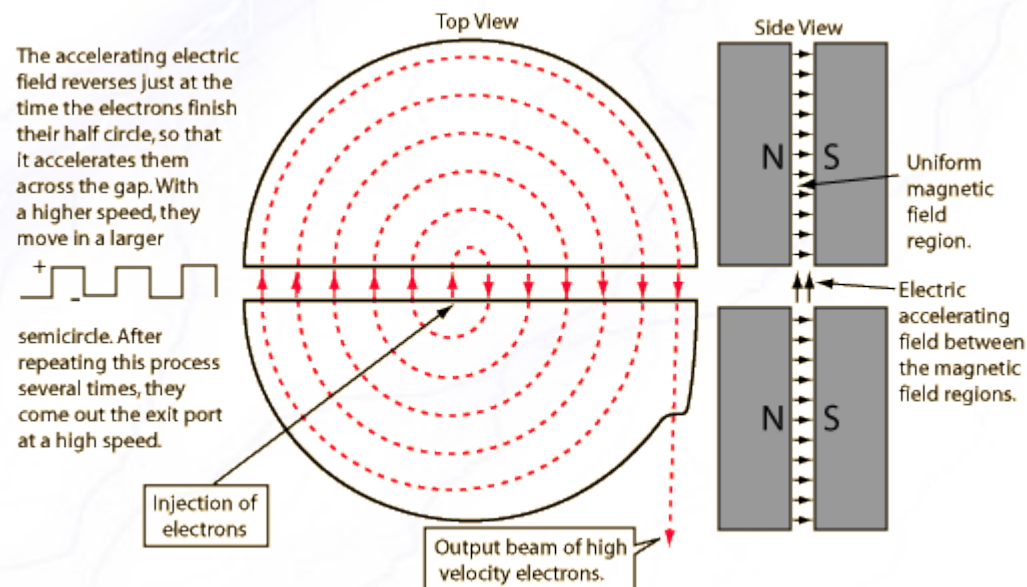
Rekord: 42 GeV na dystansie 85 cm!
(normalny liniowy akcelerator potrzebuje kilkudziesięciu metrów aby osiągnąć podobne energie)



A może przyśpieszać cząstki po okręgu?

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

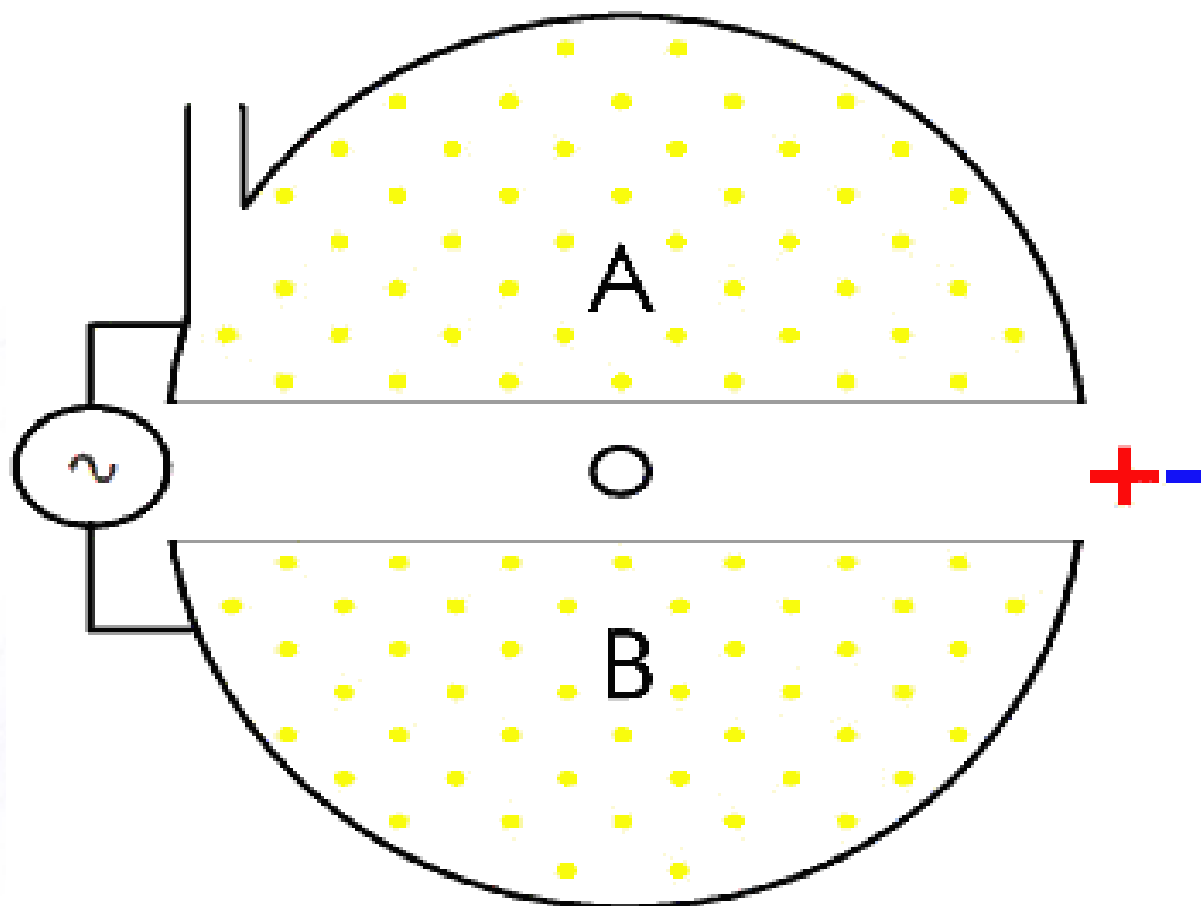
$$\omega_{\text{cyclotron}} = \frac{qB}{m}$$



Lawrence,
Nobel 1939

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

Cyklotron w działaniu

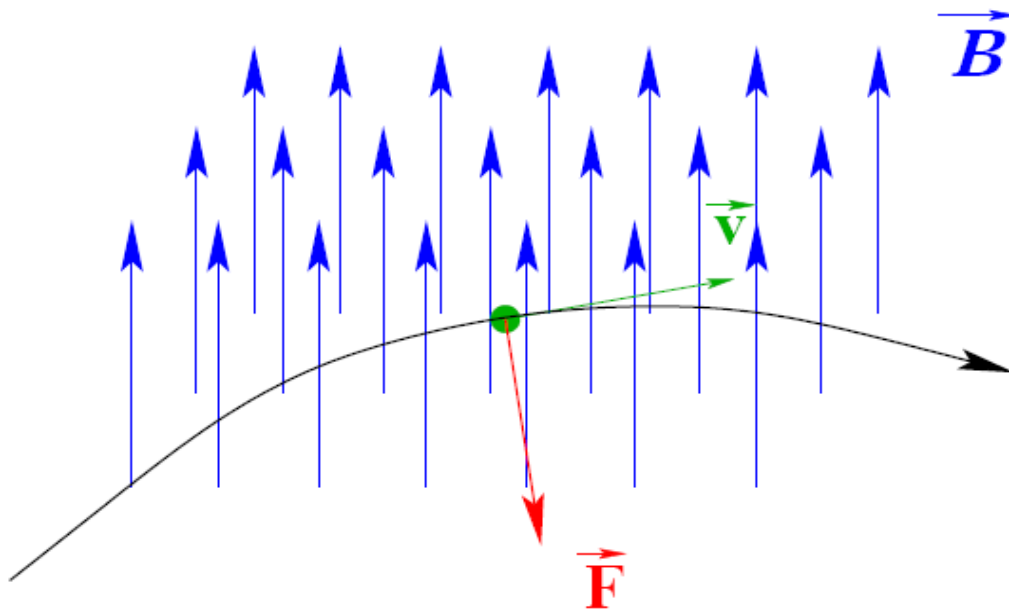


Gdy zbliżamy się do energii relatywistycznych rośnie masa cząstek:
żeby zachować stałą częstotliwość trzeba zwiększyć pole na zewnątrz okręgu!
(cyklotron izochroniczny)

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 Lorentza $\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right)$
- Pierwszy synchrotron: 1952, 3 GeV, BNL

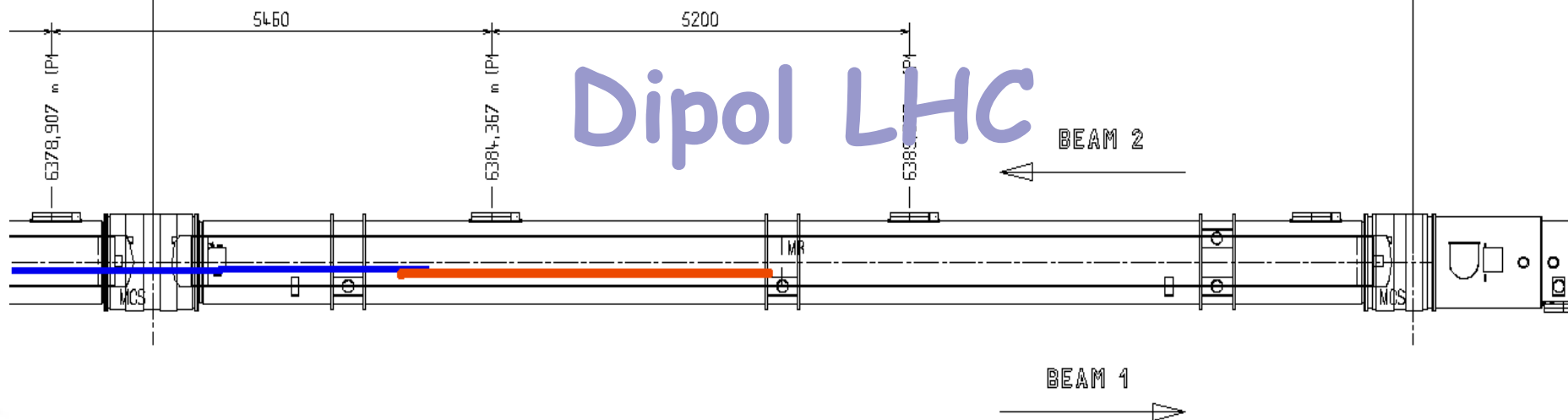
Magnesy zakrzywiające wiązkę



- Dipole o wertykalnym polu zakrzywia wiązkę w płaszczyźnie horyzontalnej

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

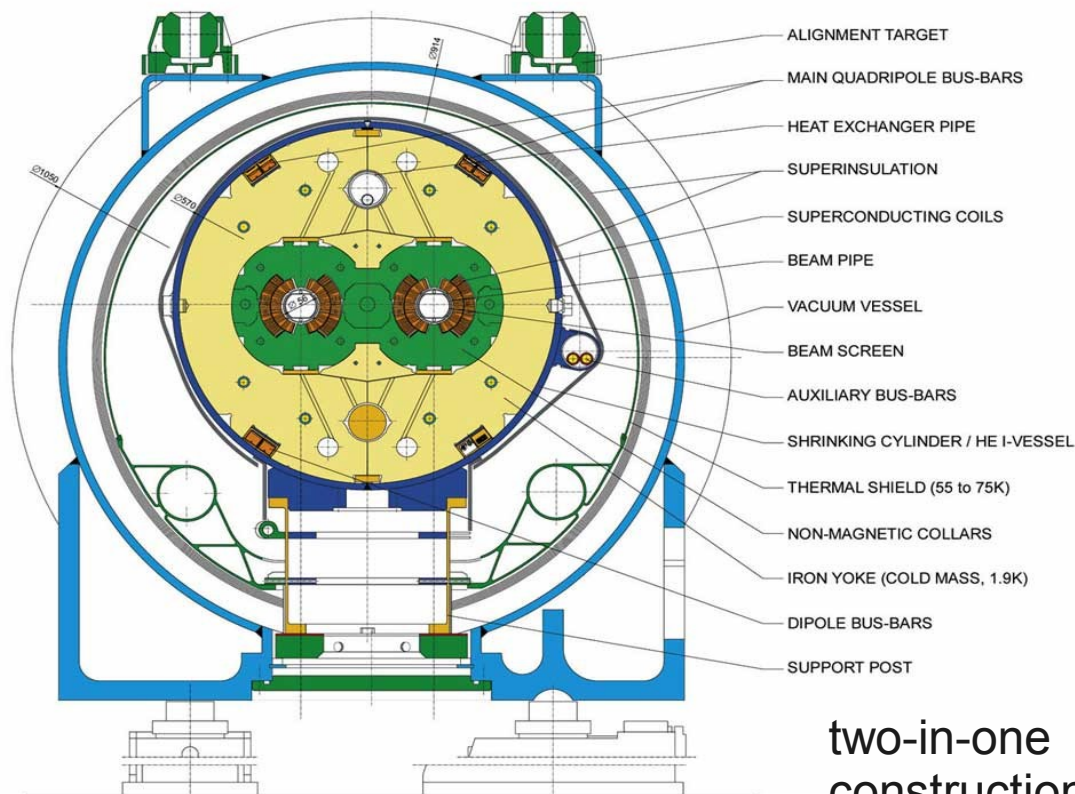




- Nadprzewodzący
- Długość ok. 15 m
- Waga ok. 22 ton
- Nominalne pole (środek rury): 8.33 T
- Promień zakrzywienia: 2.8 km

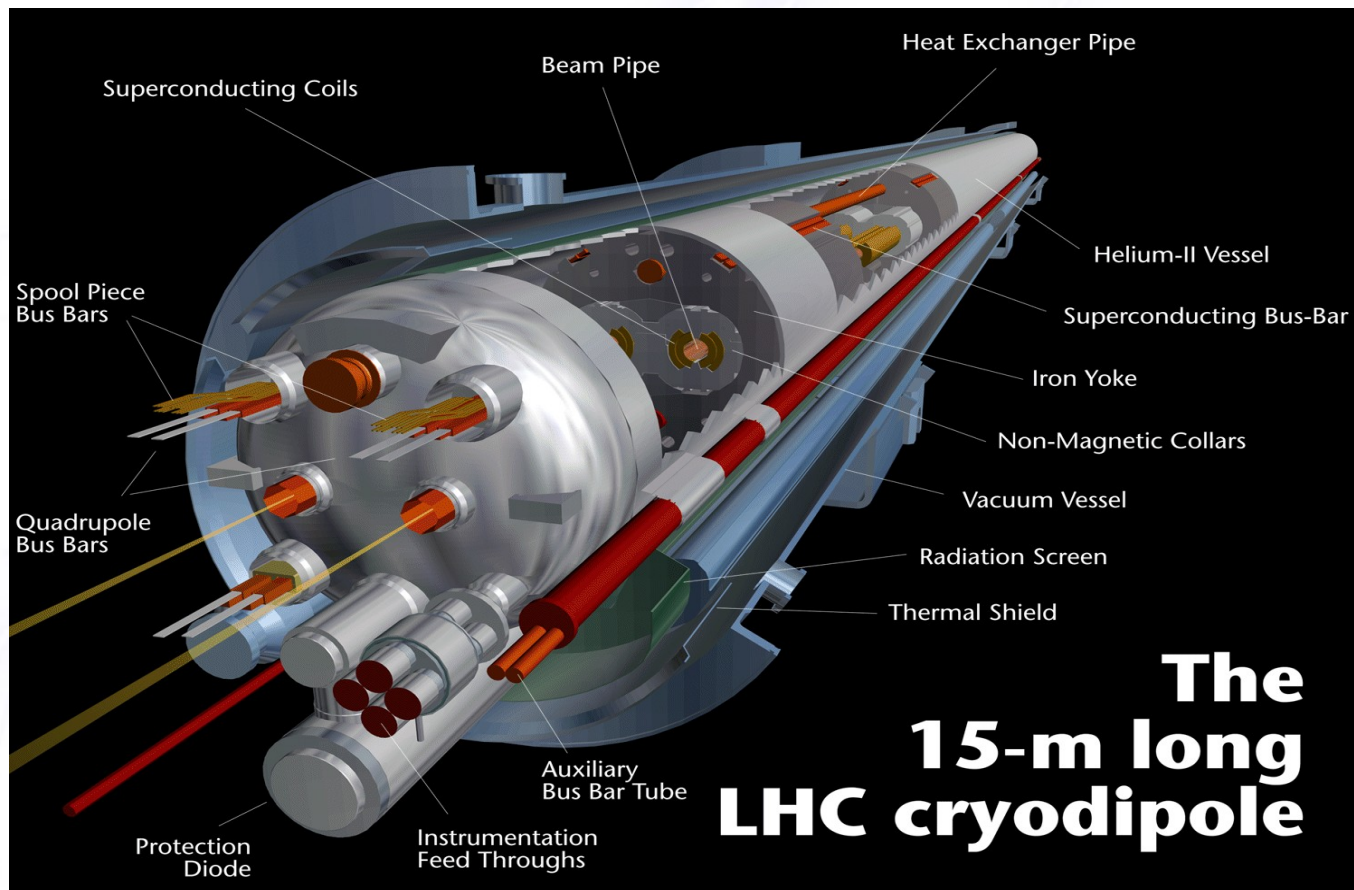
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

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



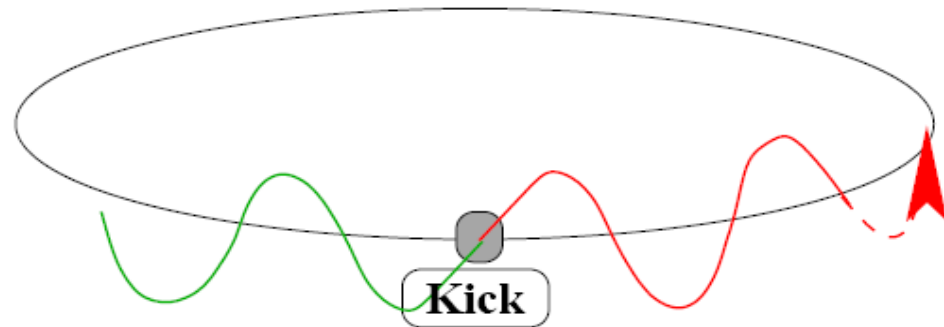
two-in-one
construction

Dipol LHC



Ogniskowanie wiązki

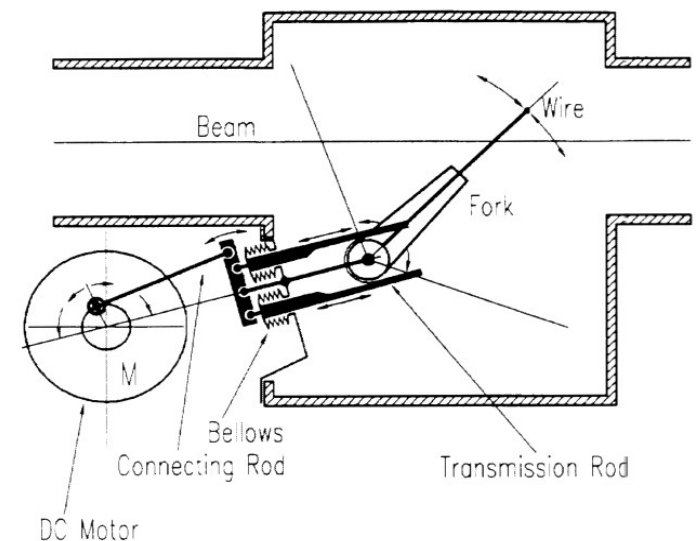
- Cząstki w wiązce **oscylują** wokół idealnej orbity:



- Emitancja ε = pole przestrzeni fazowej zajmowanej przez wiązkę (amplituda oscylacji * maksymalna prędkość oscylacji)
- Na samym początku wiązka jest produkowana z **emitancją** ε – emitancja nie maleje (chyba że stosujemy tzw. chłodzenie wiązki albo jeśli przyśpieszamy)

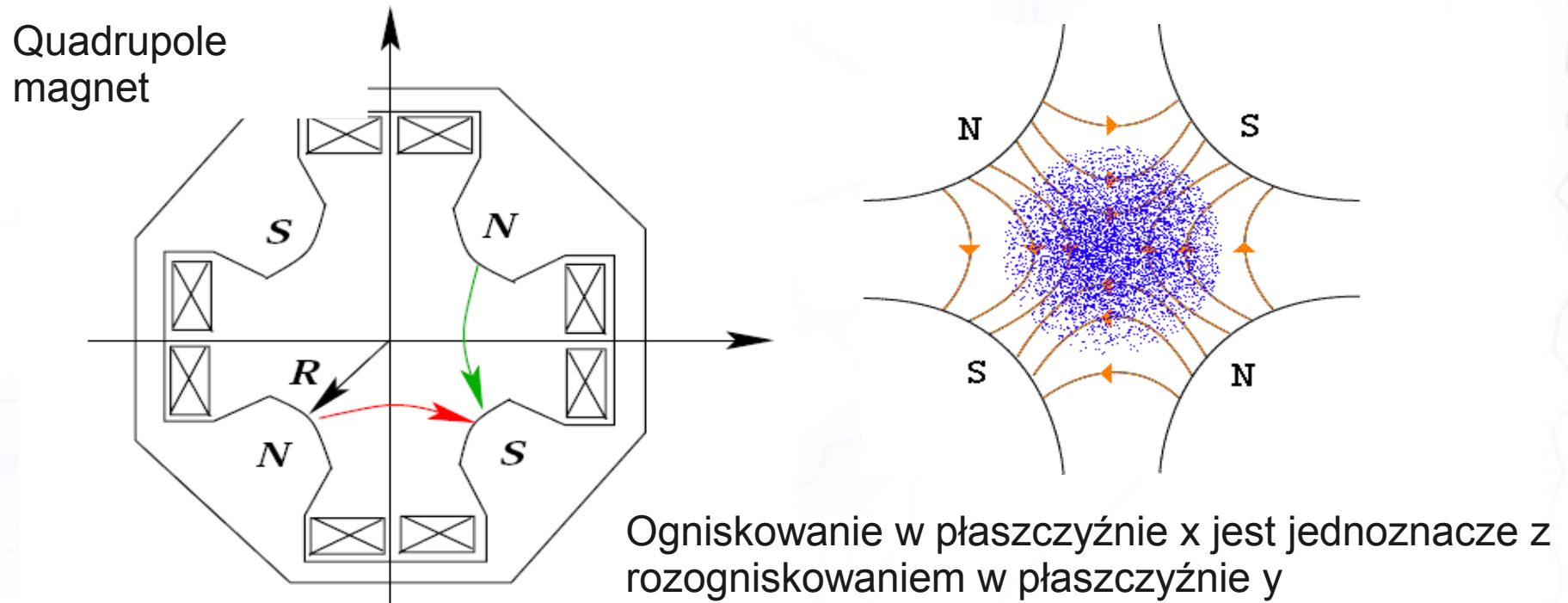
Jak mierzyć emitancję

- Emitancja wiązki gaussowskiej jest:
 $\varepsilon = \pi \sigma^2 / \beta$ – proporcjonalna do kwadratu rozmiaru wiązki
- Pomiar rozmiaru wiązki przy skanera (wire scanner)
- Rozmiar włókna węglowego:
30 mikronów
- Rozmiar wiązki ok.
200 mikronów
- Prędkość włókna ok 20 m/s
- Dokładność wyznaczenia pozycji ok. 10 mikronów



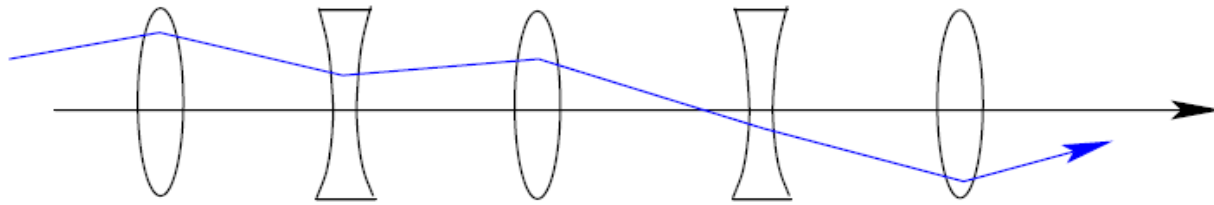
Ogniskowanie (cd):

- Żeby wiązka była stabilna musimy stworzyć coś, co w optyce przypominałoby zakrzywiony obiektyw w którym przód łączyłby się z tyłem
- Kwadrupole są jak soczewki w tym obiektywie

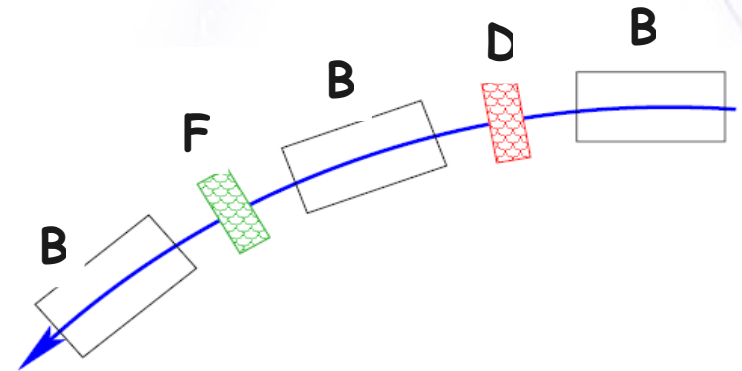


- Pierwsze synchrotrony obydwały się bez kwadrupoli ze względu na ogniskowanie dipolowe (słabe!)

Optyka wiązki

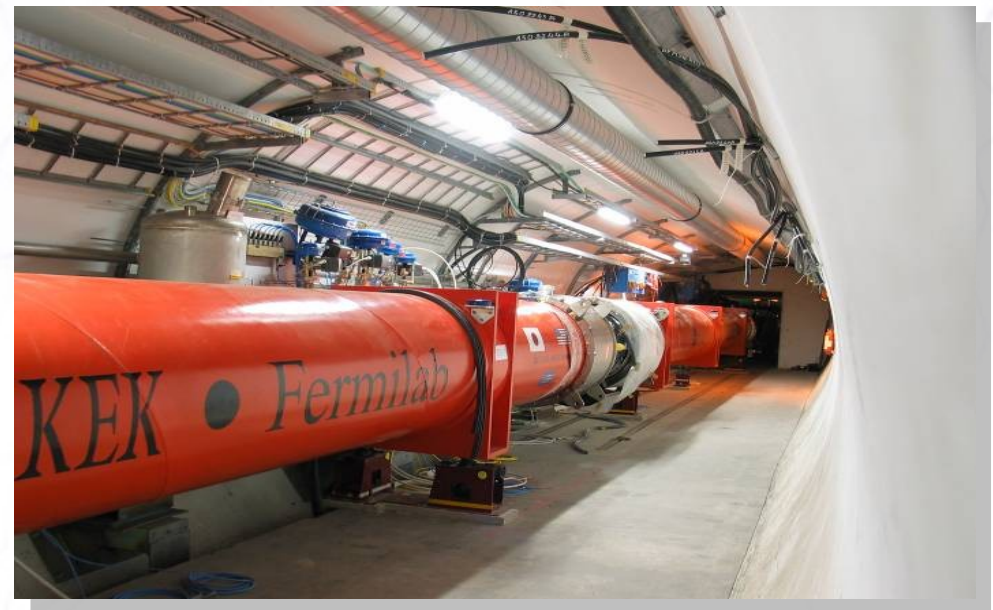
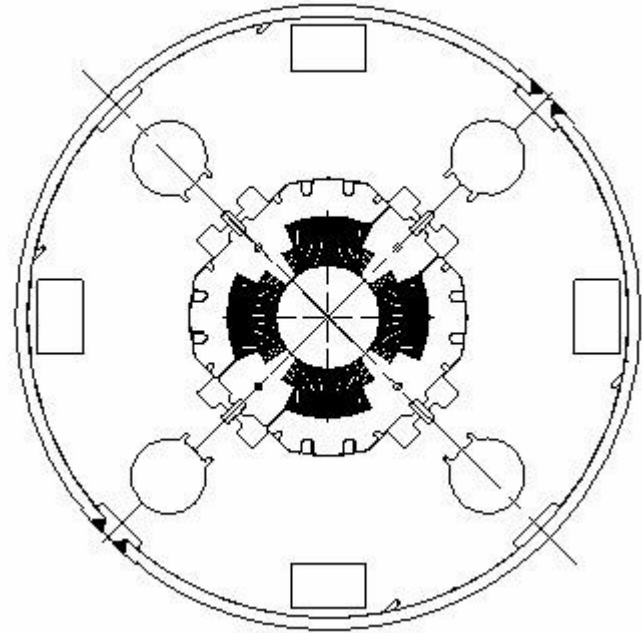


- Taki układ zapewni kontrolę emitancji
- Wiązka nie “eksploduje”
- Amplitudy drgań nie rosną
- Ewolucję rozmiaru wiązki wzdłuż akceleratora nazywamy funkcją β



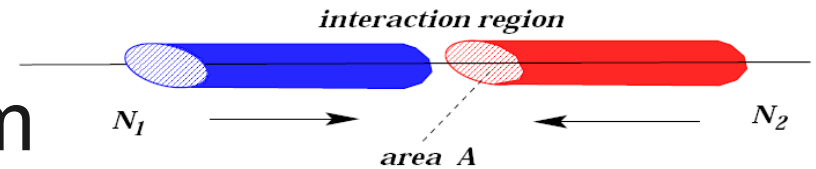
Kwadrupol LHC

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

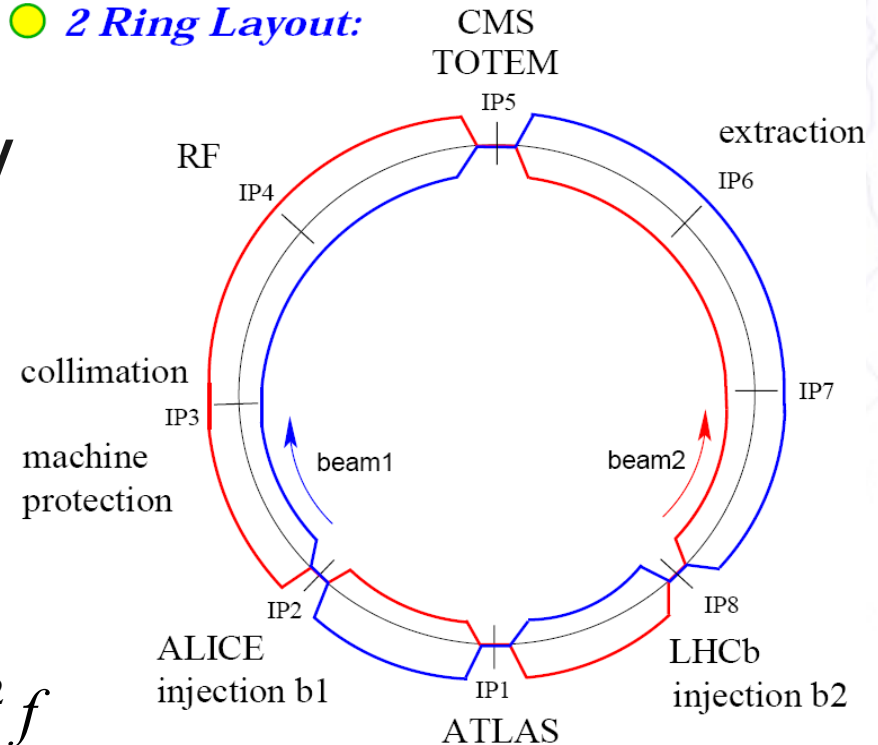


Punkt zderzenia

- Wiazki 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: $L=f/\sigma$



● 2 Ring Layout:



LHC:

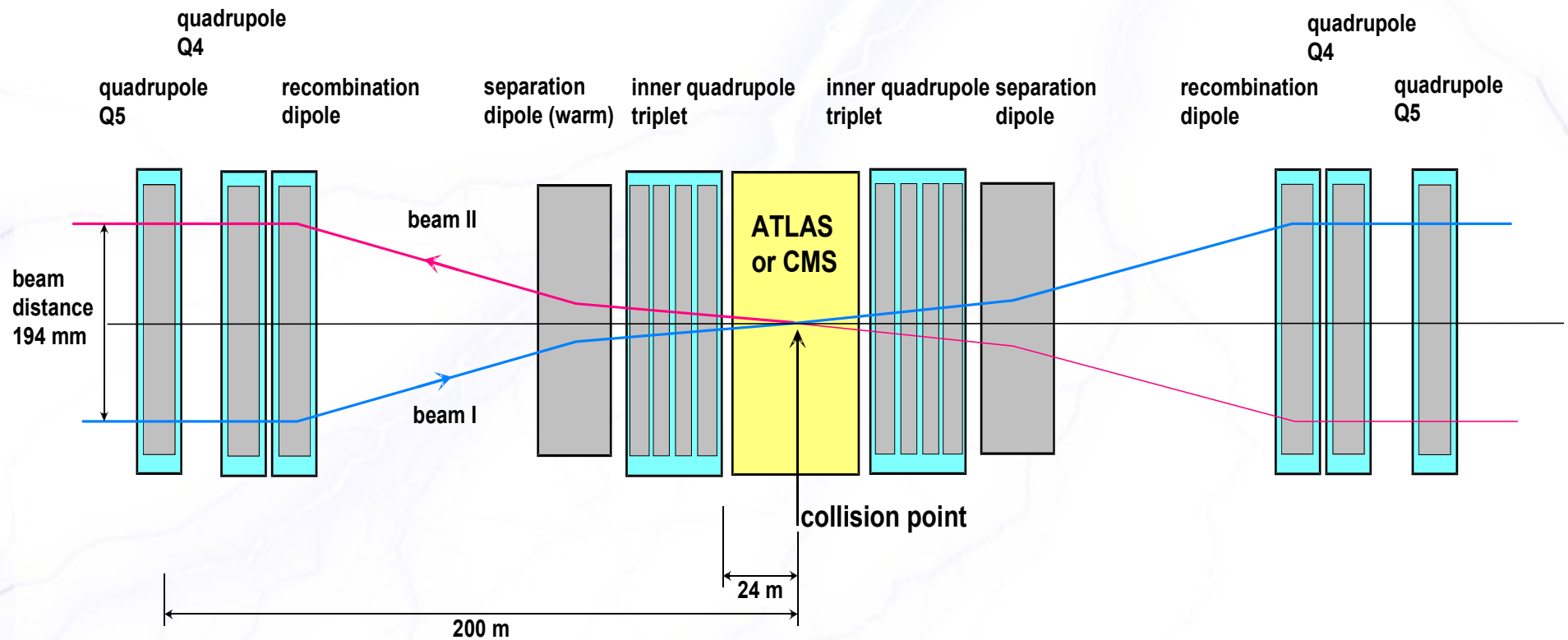


$\langle \beta \rangle_{arc} = 80 \text{ meter}$

$\beta_{IP} = 0.5 \text{ meter}$

$$L = \frac{kN^2 f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*}$$

Optyka punktu zderzenia



Example for an LHC insertion with ATLAS or CMS

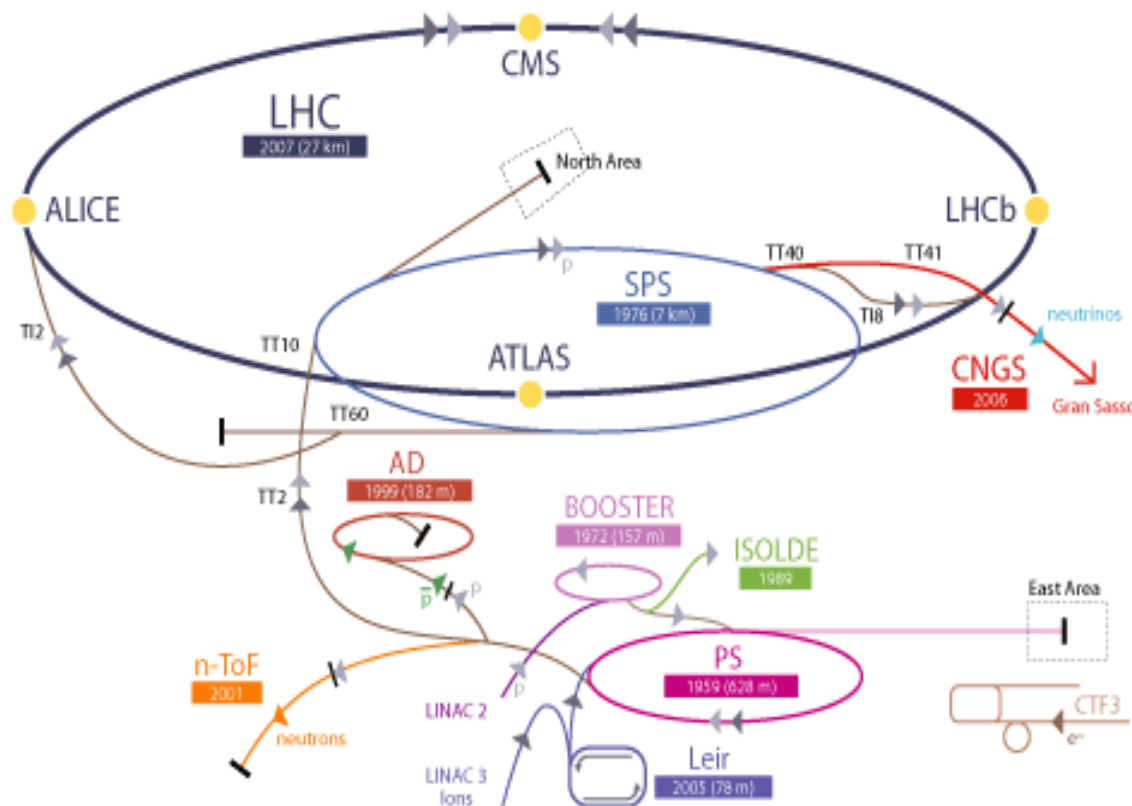
Parametry LHC

Table 2.1: LHC beam parameters relevant for the peak luminosity

		Injection	Collision
Beam Data			
Proton energy	[GeV]	450	7000
Relativistic gamma		479.6	7461
Number of particles per bunch		1.15×10^{11}	
Number of bunches		2808	
Longitudinal emittance (4σ)	[eVs]	1.0	2.5^a
Transverse normalized emittance	[$\mu\text{m rad}$]	3.5^b	3.75
Circulating beam current	[A]	0.582	
Stored energy per beam	[MJ]	23.3	362
Peak Luminosity Related Data			
RMS bunch length ^c	cm	11.24	7.55
RMS beam size at the IP1 and IP5 ^d	μm	375.2	16.7
RMS beam size at the IP2 and IP8 ^e	μm	279.6	70.9
Geometric luminosity reduction factor F^f		-	0.836
Peak luminosity in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	1.0×10^{34}
Peak luminosity per bunch crossing in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	3.56×10^{30}

System akceleratorów w CERNie

CERN Accelerator Complex



1. źródło protonów
(LINAC 2, 50 MeV Alvarez)
lub jonów Pb (LINAC 3)
2. PS BOOSTER: the smallest
CERN synchrotron,
energy 1.4 GeV
3. Proton Synchrotron (PS):
energy 28 GeV
4. Super Proton Synchrotron
(SPS): 450 GeV
5. LHC: 7 TeV

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

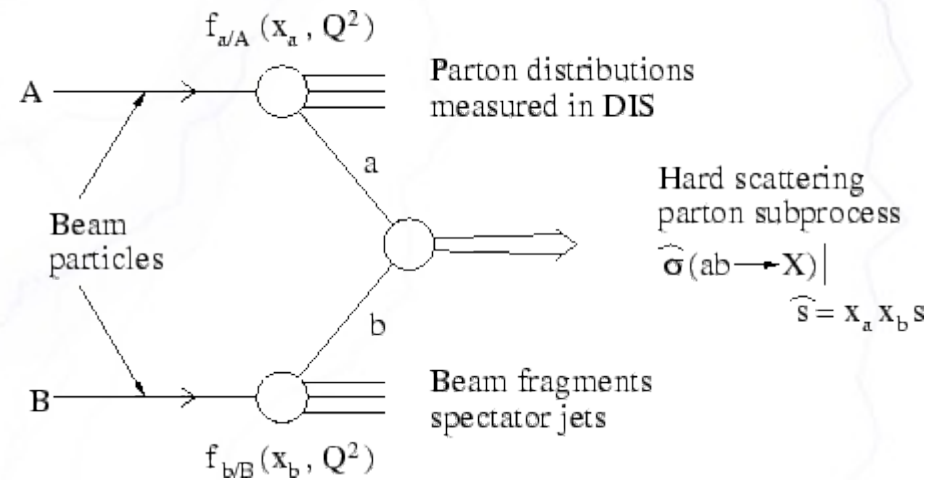
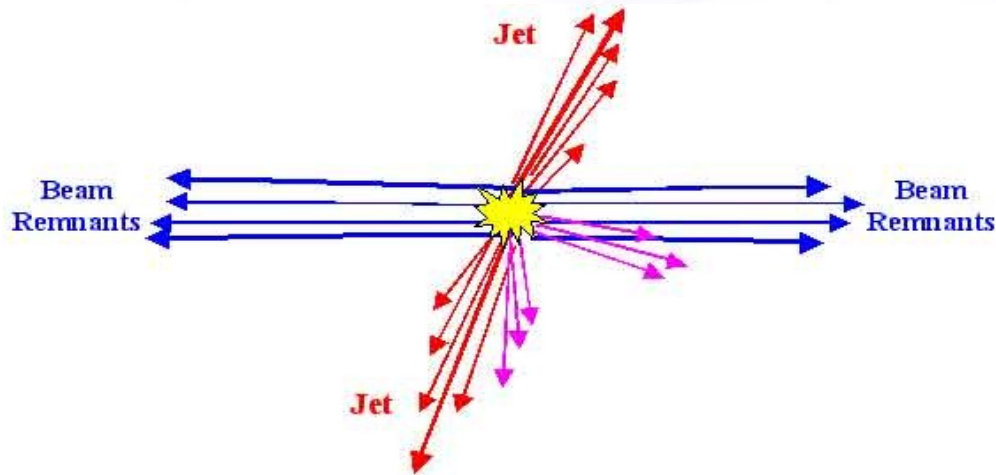
Przyszłe akceleratory

- XFEL oraz inne "Light sources" - badania materiałowe
- Terapia hadronowa
- Akceleratory przemysłowe (radiografia, implantacja jonów, etc...)
- Następne giganty (CLIC oraz NLC) - liniowe!

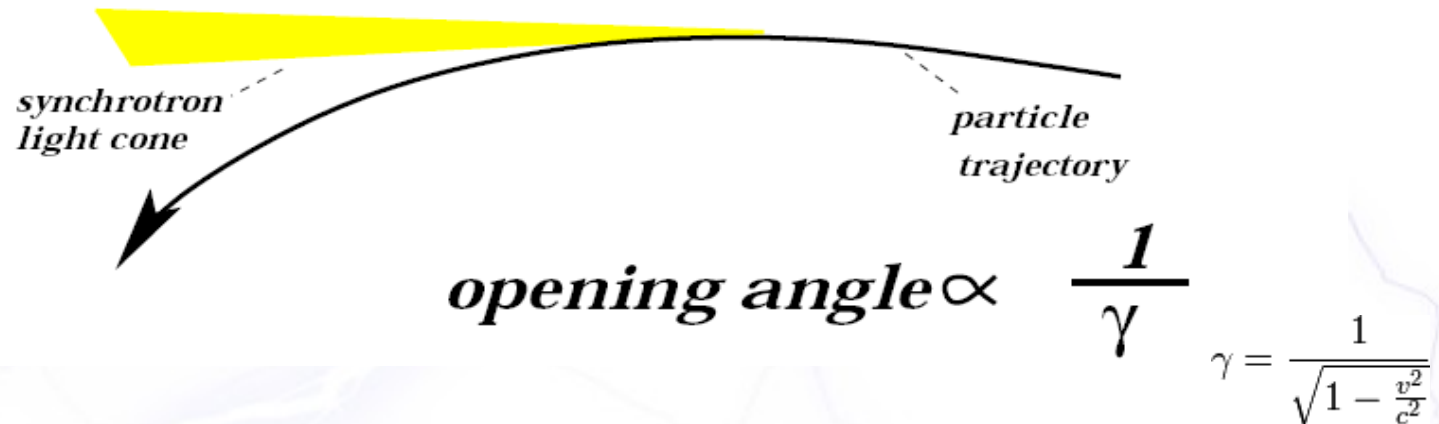
Basic and Applied Research		Medicine	
High-energy phys.	120	Radiotherapy	7500
S.R. sources	50	Isotope Product.	200
Non-nuclear Res.	1000	Hadron Therapy	20
Industry			
Ion Implanters	7000		
Industrial e- Accel.	1500	Total:	17390

Dlaczego po LHC chcemy zbudować liniowe zderzacze elektronów?

- Protony są cząstkami złożonymi, w związku z czym kiedy się zderza 2 protony to na prawdę zderzane są 2 kwarki lub gluony o nieznannej energii!



Więc lepiej zderzać elektrony ale...



- Moc promieniowania synchrotronowego

$$P \propto \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

Protony przy 7 TeV: $\gamma = 7461$
elektrony przy energii 0.1 TeV: $\gamma = 196000$

- LEP składał się z wielu wnęk przyśpieszających, w LHC są one tylko w IP4
- Zderzacze mionowe?

Podsumowanie

- Akceleratorzy służą otrzymywaniu cząstek o wysokich energiach oraz wytwarzaniu promieniowania synchrotronowego
- Kilka metod przyśpieszania: elektrostatyczne, na grzbiecie fali, w plaźmie paczki cząstek
- Akceleratorzy liniowe oraz kołowe emitancja
- Cyklotrony oraz synchrotrony
- Magnesy zakrzywiające (dipole) oraz ogniskujące (kwadrupole) optyka wiązki
- Punkt zderzenia – **światłość** energia w środku masy
- Po LHC: liniowy zderzacz elektronów promieniowanie synchrotronowe