

Akceleratorzy

- fizyka cząstek elementarnych – fizyka wysokich energii
- ruch cząstki w polu magnetycznym i elektrycznym
- akceleratorzy elektrostatyczne
- akceleratorzy liniowe
- akceleratorzy kołowe (cykliczne):
 - cyklotron
 - synchrotron
- eksperymenty ze stacjonarną tarczą / eksperymenty na zderzaczach
- zderzacze
- światłość akceleratora
- promieniowanie synchrotronowe
- zderzacze e^+e^- i proton-(anty)proton
- największe akceleratorzy
- kierunki rozwoju

Lidia.Goerlich@ifj.edu.pl

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

- **Fizyka cząstek elementarnych :**

badania fundamentalnych / elementarnych składników materii i ich oddziaływań

- **Metoda doświadczalna :**

- zderzenia cząstek o dużej energii, przyspieszanych w akceleratorach
- badania cząstek promieniowania kosmicznego

Do początku lat 50-tych ubiegłego wieku promienie kosmiczne stanowiły jedyne źródło cząstek wysokich energii, odkryto w nim wiele nowych cząstek niewystępujących w otaczającej nas materii

Eksperyment fizyki cząstek obejmuje kilka ważnych etapów :

- przyspieszanie stabilnych cząstek naładowanych/ formowanie wiązek cząstek wtórnych
 - detekcja cząstek produkowanych w zderzeniach
 - analiza danych doświadczalnych pozwala na pomiar wielu wielkości fizycznych i ich charakterystyk
- podstawowe mierzalne wielkości fizyczne : przekroje czynne dla badanych procesów
średnie czasy życia dla rozpadów cząstek
- porównanie wyników doświadczalnych z przewidywaniami teoretycznymi

**Postęp w fizyce cząstek wynika ze wzajemnego oddziaływania
teorii i doświadczenia**

• Fizyka cząstek elementarnych – fizyka wysokich energii

wysokie energie
zderzających się cząstek

→ duża energia dostępna dla produkcji nowych
cząstek, także tych o dużej masie ($E = mc^2$)

wysokie energie
zderzających się cząstek

→ badanie struktury materii na coraz mniejszych
odległościach

Procesy rozproszeniowe (np. rozpraszanie elektronów na protonach) są tradycyjną metodą badania struktury materii

cząstkom o dużej energii odpowiadają małe długości fal de Broglie'a $\lambda = h / p$

długość fali stowarzyszonej z cząstką – sondą (elektronem) mała
w porównaniu z promieniem cząstki złożonej (protonem, $r_p \sim 10^{-15} \text{ m}$)

————→ wysoka przestrzenna zdolność rozdzielcza

h – stała Plancka, p – pęd cząstki

dla cząstki o pędzie ($p \cdot c$) = 1 GeV, $\lambda \sim 1 \text{ fm}$ (femtometr) = 10^{-15} m

Przestrzenna zdolność rozdzielcza Δr w badaniach struktury materii

$$\Delta r \sim \hbar c / q$$

$\hbar \equiv h / 2\pi$ – zredukowana stała Plancka ($\hbar c = 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}$, c - prędkość światła)

q – przekaz (cztero)pędu pomiędzy cząstką – sondą i badanym złożonym obiektem

- Akceleratory są urządzeniami służącymi do przyspieszania stabilnych cząstek naładowanych do wysokich energii
- Dotychczas przyspieszane cząstki : elektron, pozyton, proton, antyproton, ciężkie jądra trwałych atomów
(najcięższe jony przyspieszane do energii relatywistycznych to jony ołowiu, Pb liczba protonów 82, liczba neutronów 125, liczba masowa 207.2)
- Fizyka akceleratorów bazuje na wielu dziedzinach wiedzy
 - dynamice cząstek relatywistycznych
 - klasycznej teorii elektromagnetyzmu (równaniach Maxwella)
 - fizyce ciała stałego (własności materiałów)
 - nadprzewodnictwie
 - ...

Energia relatywistyczna

$$E = mc^2 = m_0 \gamma c^2$$

Pęd relatywistyczny

$$p = mv = m_0 \gamma \beta c$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

Związek m-dzy energią i pędem

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Energia kinetyczna

$$T = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

m_0 – masa spoczynkowa cząstki, v – prędkość cząstki, c – prędkość światła

użyteczne relacje $\gamma = E / m_0 c^2$, $\beta = p / E c$; $c \equiv 1$

- Naturalną jednostką energii w fizyce cząstek elementarnych jest 1 elektronowolt

1 eV – energia uzyskiwana przez cząstkę o ładunku elementarnym 1 e
(ładunek elektronu) przy przejściu różnicy potencjałów 1 V

$1\text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

- Za jednostkę masy przyjmujemy jednostkę energii ($E = mc^2$, $c \equiv 1$)

$1\text{ eV} / c^2 \equiv 1\text{ eV} = 1.8 \cdot 10^{-36}\text{ kg}$

Prędkość światła	$c = 2.9979 \cdot 10^8\text{ m / s}$
Masa spoczynkowa elektronu	$m_e = 511\text{ keV} / c^2$
Masa spoczynkowa protonu	$m_p = 939.3\text{ MeV} / c^2$
Ładunek elektronu (ładunek elementarny)	$1\text{ e} = 1.6021 \cdot 10^{-19}\text{ C}$

● Skala energii :

1 TeV = 10³ GeV = 10⁶ MeV = 10⁹ keV = 10¹² eV

tera giga mega kilo

kilo	:	1 keV = 10 ³ eV
mega	:	1 MeV = 10 ⁶ eV
giga	:	1 GeV = 10 ⁹ eV
tera	:	1 TeV = 10 ¹² eV
peta	:	1 PeV = 10 ¹⁵ eV

Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym i elektrycznym

Na cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym q poruszającą się w polu elektromagnetycznym

działa **siła Lorentza $\vec{F}$**

$\vec{E}$ – natężenie pola elektrycznego

$\vec{B}$ – indukcja magnetyczna

$\vec{v}$ – prędkość cząstki

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

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

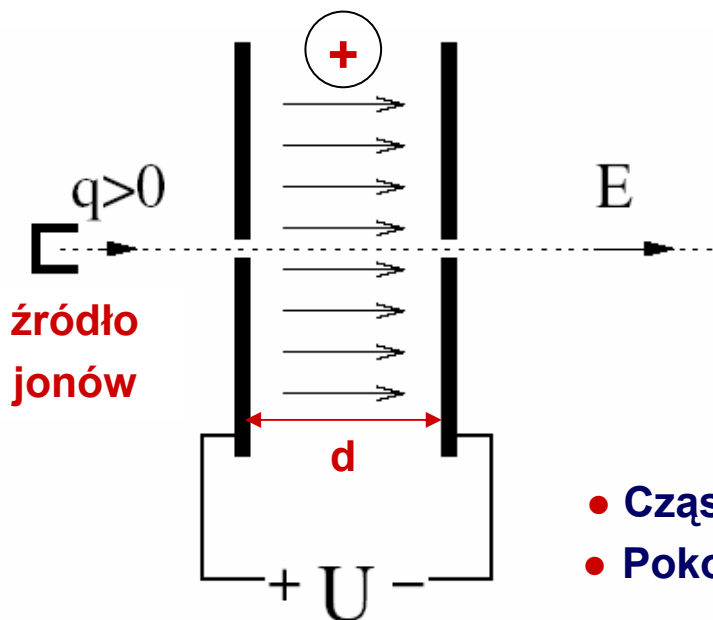
$$\Rightarrow E \frac{dE}{dt} = c^2 \vec{p} \frac{d\vec{p}}{dt} = qc^2 \vec{p}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = qc^2 \vec{p} \vec{E}$$

- pole magnetyczne nie zmienia energii cząstki
- energia cząstki ulega zmianie pod wpływem pola elektrycznego
- problem techniczny : jak uzyskać silne pole elektryczne

Akceleratory elektrostatyczne

Najprostszy akcelerator :

układ dwóch elektrod, pomiędzy którymi istnieje stała różnica potencjałów U



Cząstka o dodatnim ładunku q przemieszcza się w kierunku elektrody ujemnej w polu elektrycznym E i uzyskuje pewną energię kinetyczną ΔE_k

$$\vec{F} = q\vec{E} = q \frac{U}{d}$$

$$\Delta E_k = F \cdot d = q \cdot U$$

- Cząstki są przyspieszane w próżniowej rurze akceleracyjnej
- Pokonują tylko raz obszar ze stałą różnicą potencjałów

źródło stałego wysokiego napięcia

- Problem techniczny : jak uzyskać odpowiednio dużą różnicę potencjałów

Akceleratory elektrostatyczne

z generatorem Cockrofta - Waltona

1932 (700kV) – rozszczepienie jąder Li przy użyciu wiązki protonów o energii 400 keV

**Obecnie wytwarzane różnice napięć
~ 10MV**



**obecnie
maksymalne energie
cząstek do 20 - 30 MeV

zbyt małe energie
dla badań fizyki cząstek**

**Współczesne urządzenie do
wstępnego przyspieszania protonów**

z generatorem Van de Graaffa

1931 (1.5MV) – protony i deuterony przyspieszane do energii 0.6 MeV

Obecnie wytwarzane różnice napięć 20-30 MV



**Generator Van de Graaffa (1931)
Zdjęcie z Muzeum Nauki MIT**

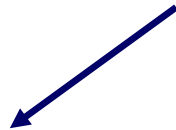
**Akceleratory elektrostatyczne : zastosowanie w fizyce jądrowej,
w fizyce cząstek używane jako pierwszy stopień przyspieszający**

Akceleratory liniowe i kołowe

Uzyskanie wiązek cząstek o większych energiach wymaga :

- zastosowania źródeł zmiennego napięcia o wysokiej częstotliwości
- synchronizacji ruchu paczek/pęczków cząstek ze zmianami napięcia

dwa rozwiązania techniczne



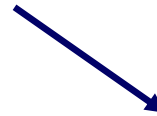
akceleratory liniowe

Elementy przyspieszające z oscylującym polem elektrycznym są ustawione jeden za drugim

Pierwsze akceleratory liniowe :

Rolf Wideroe 1927

Ernest Lawrence 1931



akceleratory cykliczne

Cząstki wielokrotnie przebiegają przez ten sam obszar z polem elektrycznym oscylującym z częstością radiową

Pierwszy akcelerator kołowy - cyklotron

Ernest Lawrence 1931 – Nagroda Nobla 1939

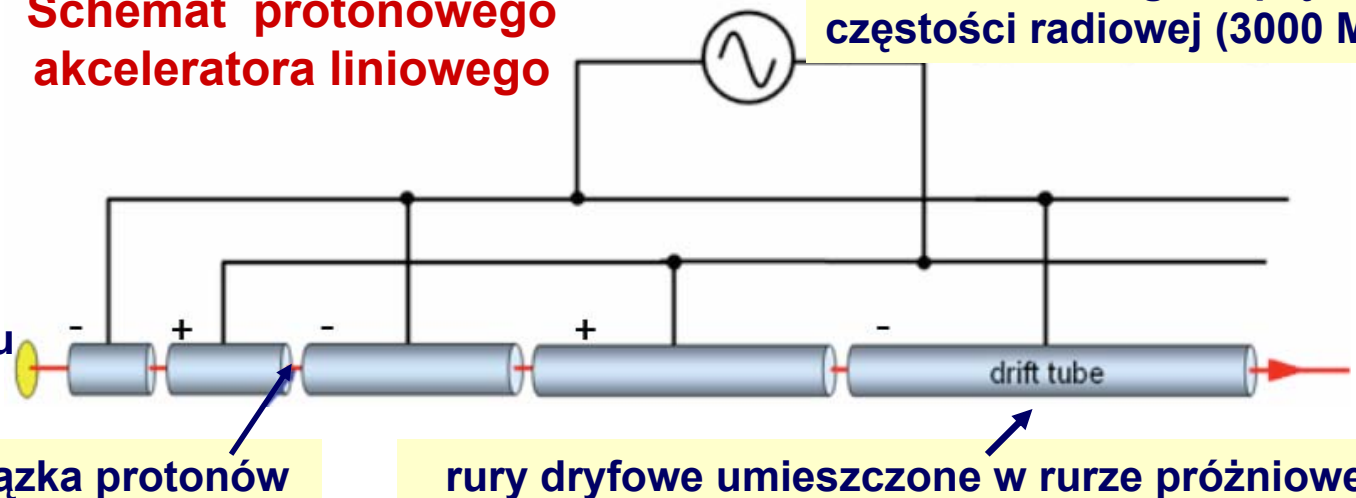


Akcelerator liniowy

Norweski inżynier Wideroe – cząstka przechodząca kolejno przez dwie szczeliny z polem elektrycznym podwaja swoją energię. Wzrost energii zachodzi więc bez podwajania napięcia.

Schemat protonowego akceleratora liniowego

Źródło zmiennego napięcia o częstotliwości radiowej (3000 MHz)



źródło jonów wodoru (protonów)

wiązka protonów

rury dryfowe umieszczone w rurze próżniowej

- Kolejne elementy rur dryfowych są podłączone do przeciwnych biegunów zmiennego napięcia
- Protony są przyspieszane w obszarze pola elektrycznego m-dzy rurami dryfowymi
- Gdy różnica napięć zmienia znak protony znajdują się wewnątrz rury dryfowej, w obszarze wolnym od pola elektrycznego
- Długości kolejnych rur dryfowych rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki, aby zapewnić stały czas przelotu cząstek przez rury

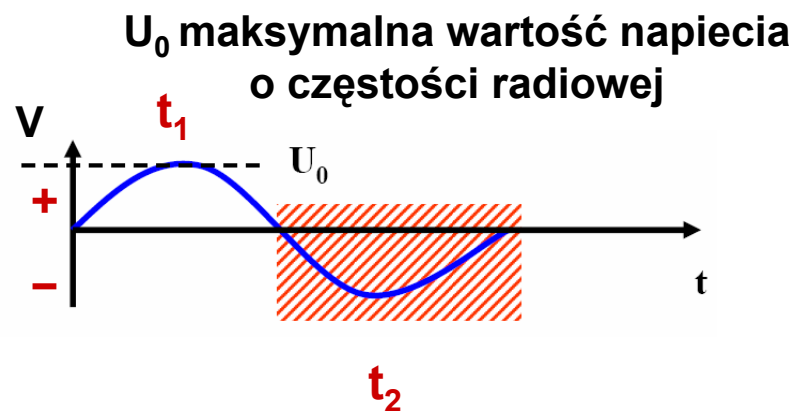
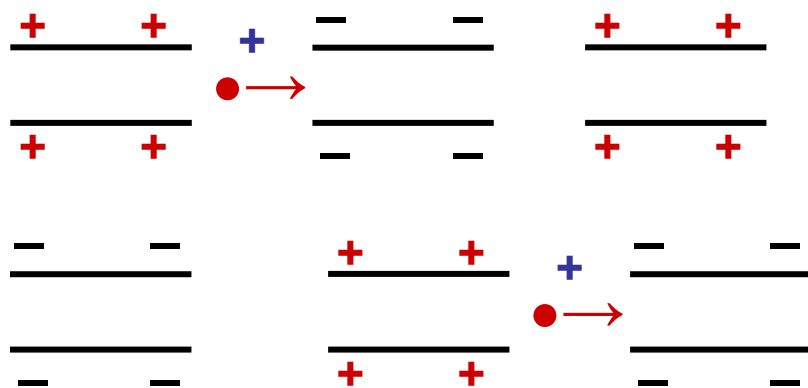
Odpowiednio dobrane długości rur dryfowych i (stałe) częstotliwości napięcia zasilającego

→ cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające m-dzy rurami

Idea akceleratora liniowego :

cząstka jest poddana kilkakrotnie działaniu względnie małego napięcia przyspieszającego

Protony doznają działania pola elektrycznego skierowanego wzdłuż kierunku ich lotu



- Konieczna zmiana znaku zasilającego napięcia, aby po wyjściu z rury dryfowej cząstka podlegała działaniu odpowiednio skierowanego pola elektrycznego, powodującego jej przyspieszenie
- **Mechanizm samoogniskowania się cząstek** (trochę za wolne cząstki trafiają na obszar pola o większym natężeniu i nadržają stratę prędkości, zbyt szybkie cząstki trafiają na słabsze pole i zwalniają)
- **Typowe wartości pól to kilka MV / m**
- Liniowe akceleratory protonów o długościach $\sim 10-70$ m dostarczają cząstek o energiach kinetycznych 30-200 MeV
- **Stosowane są jako układy wprowadzające dla akceleratorów cyklicznych**

Akcelerator liniowy : końcowa energia wiązki zależy od różnicy napięć m-dzy rurami dryfowymi i całkowitej długości układu przyspieszającego

**Liniowy akcelerator protonów (LINAC III)
w ośrodku DESY / Hamburg**

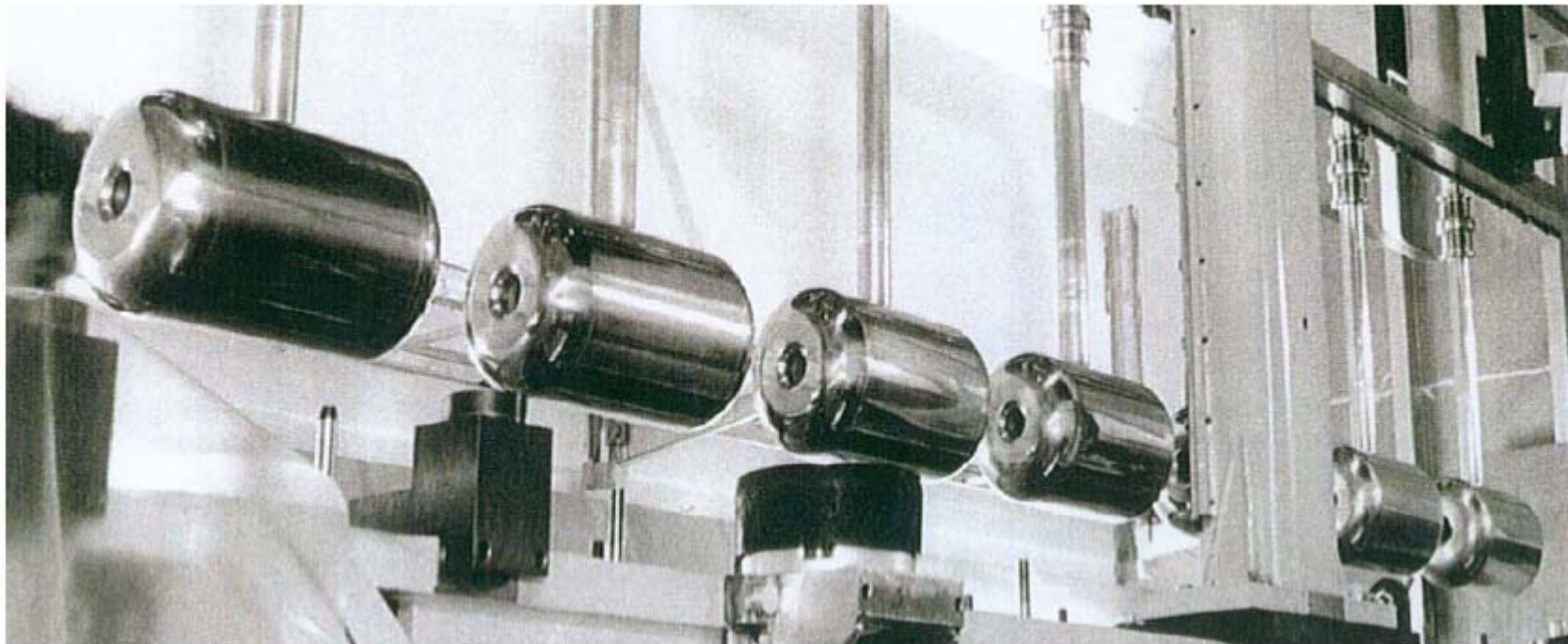
$$E_{total} = 988 MeV$$

$$E_{kin} = E_{total} - m_0 c^2$$

$$E_{kin} = 50 MeV$$

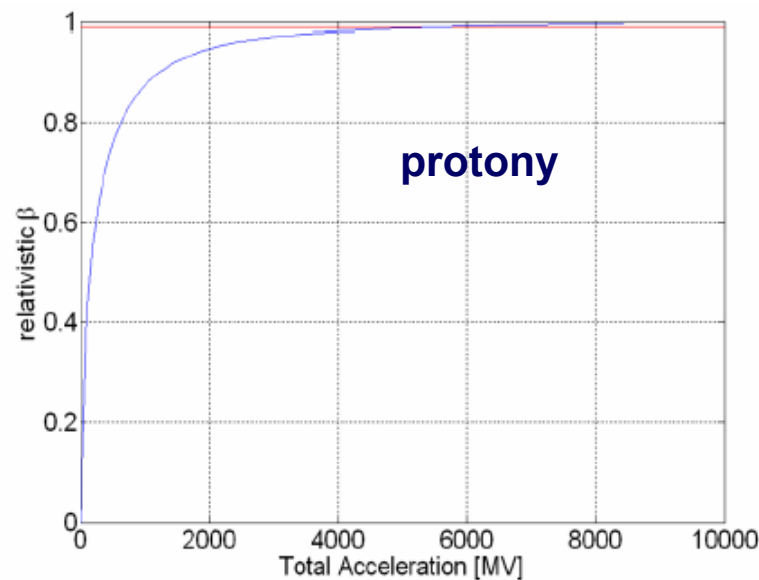
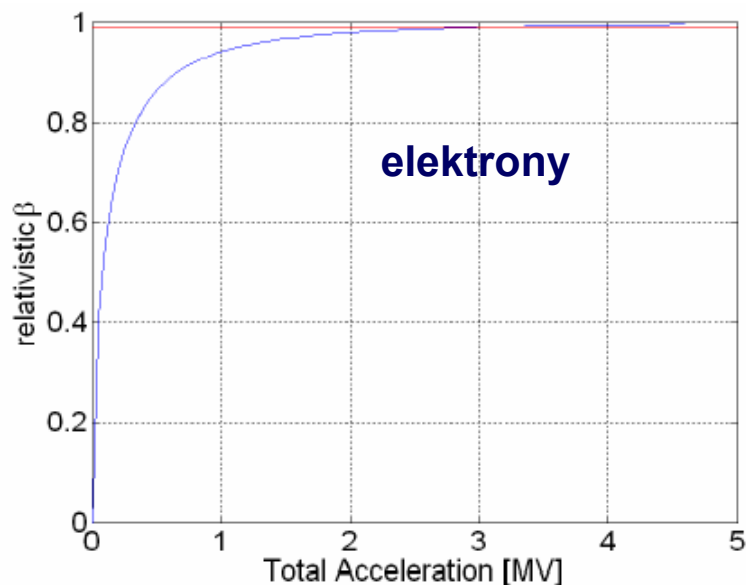
$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$$

$$p = 310 MeV / c$$



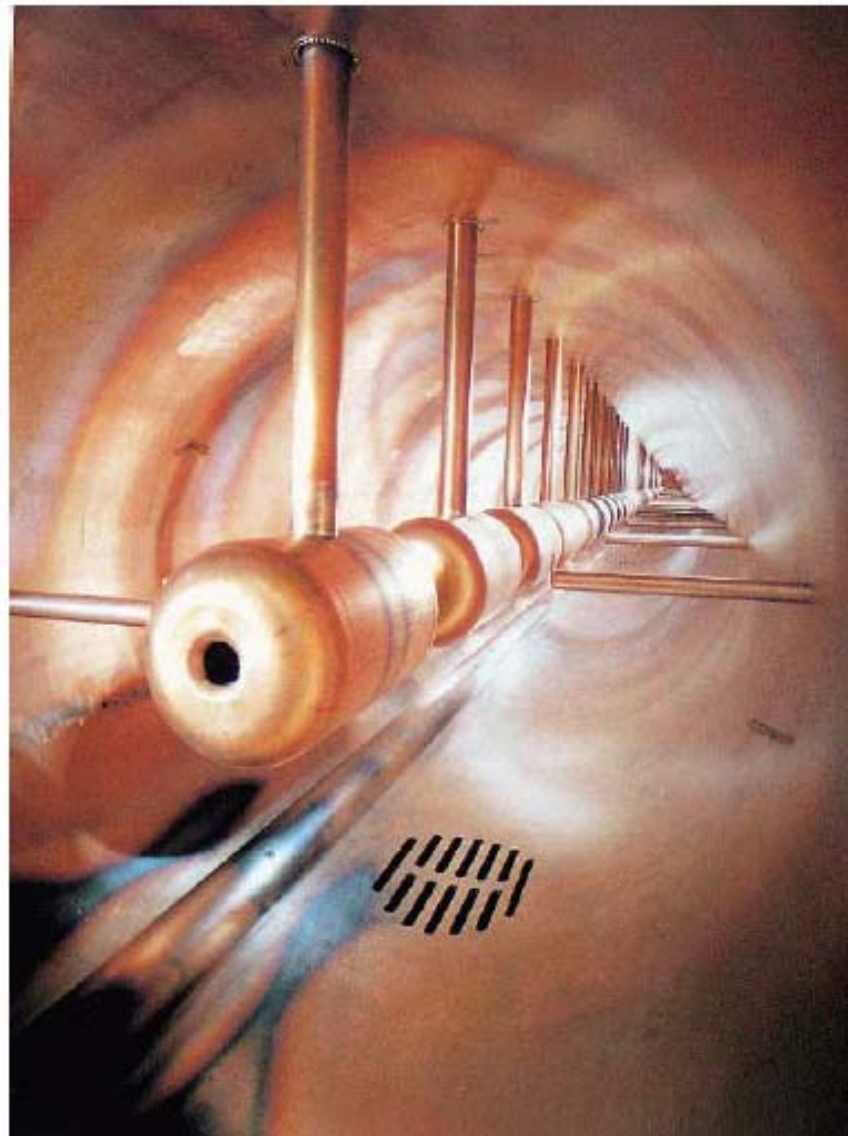
Cząstki relatywistyczne : $E \gg m$, $\beta = v / c \rightarrow 1$

- Przyspieszanie cząstki o prędkości v bliskiej prędkości światła c powoduje nieograniczony wzrost jej energii kinetycznej
- Elektrony o energiach powyżej kilku MeV poruszają się z prędkościami b. bliskimi prędkości światła; oprócz krótkiej fazy początkowej przyspieszanie elektronów praktycznie nie zmienia ich prędkości, jedynie prowadzi do wzrostu energii cząstek
 - rury dryfowe w elektronowych akceleratorach liniowych mają stałą długość
 - stała prędkość przesuwania się fali pola przyspieszającego



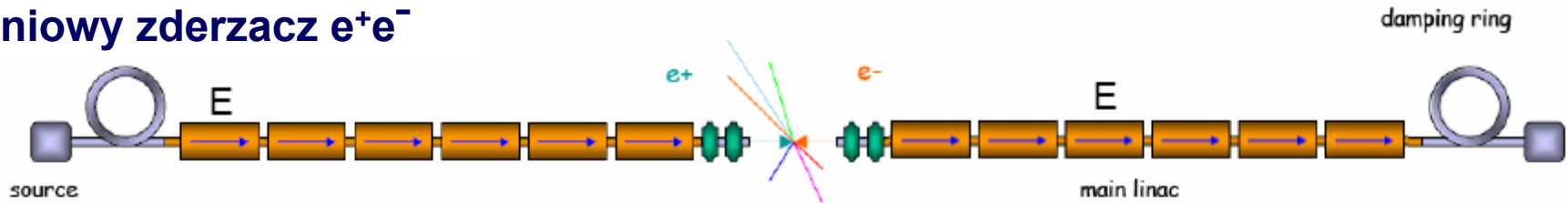
elektrony $\beta > 0.99$ przy energii 3.7 MeV
protony $\beta > 0.99$ przy energii 6.7 GeV

**Liniowy akcelerator protonów
w laboratorium Fermilab (USA)
przyspiesza protony do energii
kinetycznej 116 MeV**

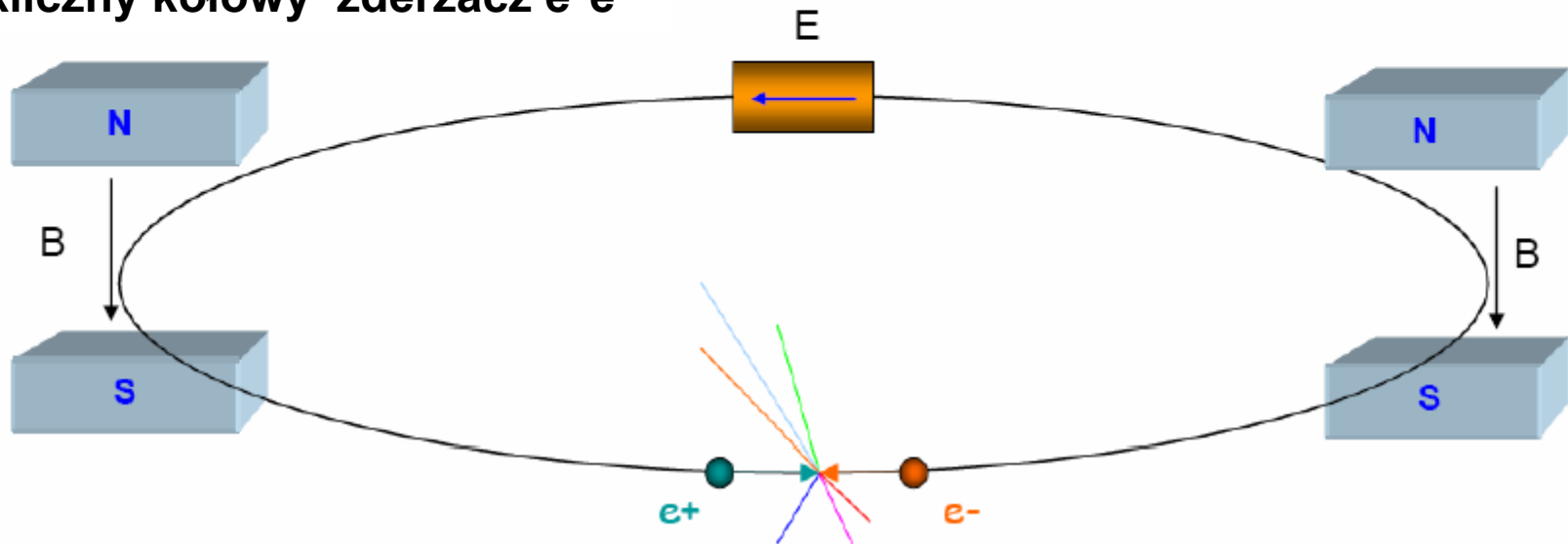


Dwa rodzaje akceleratorów : liniowe i cykliczne

Liniowy zderzacz e^+e^-

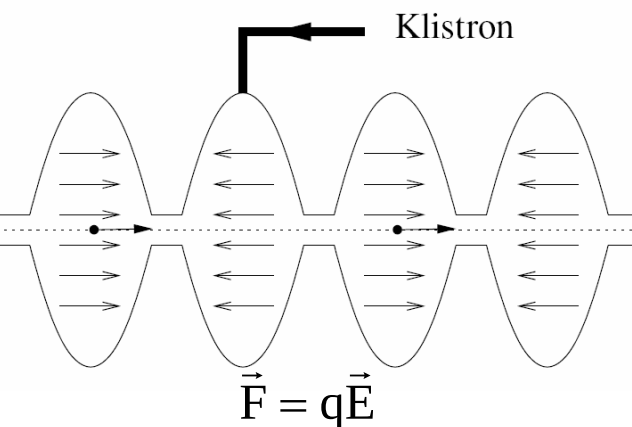


Cykliczny kołowy zderzacz e^+e^-



W obu typach akceleratorów cząstki są przyspieszane w polu elektrycznym we wnękach mikrofalowych (Radio Frequency cavity – RF cavity).

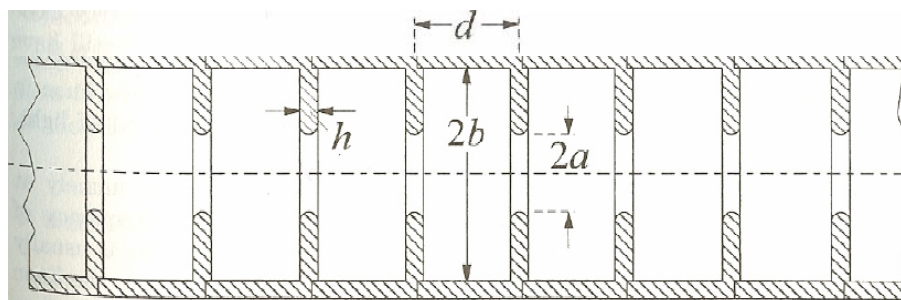
Mikrofalowa wnęka rezonansowa



Prace w laboratorium BNL / USA
przy przygotowywaniu
materiału do budowy wnęk
rezonansowych.

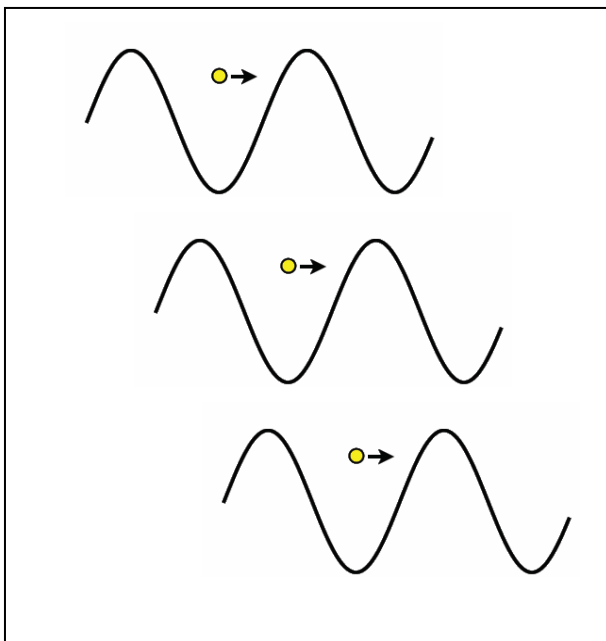
- klistron – system generacji promieniowania mikrofalowego (częstość $f \sim 1 \text{ GHz}$)
- mikrofae są transportowane w falowodzie do wnęki rezonansowej
- we wnęcie rozchodzi się elektromagnetyczna fala biegnąca (istnieją również akceleratory z falą stojącą)

- transfer energii od mikrofae do wiązki składającej się pęczków / paczek cząstek naładowanych zapewnia przyspieszanie cząstek
- transfer energii zachodzi gdy prędkość fazowa mikrofae jest równa prędkości cząstek
- dopasowanie prędkości fazowej mikrofae → poprzez konstrukcję wnęki z układem przysłón



odpowiedni rozkład pola elektrycznego
powoduje ciągłe przyspieszanie cząstek przy
przechodzeniu przez układ wnęk

Elektronowe akceleratory liniowe



Akcelerator liniowy z falą biegnącą :

Prędkość fazowa mikrofali równa się prędkości elektronów, elektrony są przyspieszane w kierunku osi akceleratora

Elektrony są unoszone na grzbiecie fali elektromagnetycznej

Stanford Linear Accelerator Centre

największy akcelerator liniowy elektronów
o długości 3 km

przyspieszał elektrony / pozytony
do energii 50 GeV

zderzacz $e^+ e^-$ $\xrightarrow{e^+} \xleftarrow{e^-}$

działał od połowy lat 60-tych

częstość źródła dużej mocy $\nu = 2.8$ GHz,
240 wnęk, dających krótkie impulsy o dużej
mocy

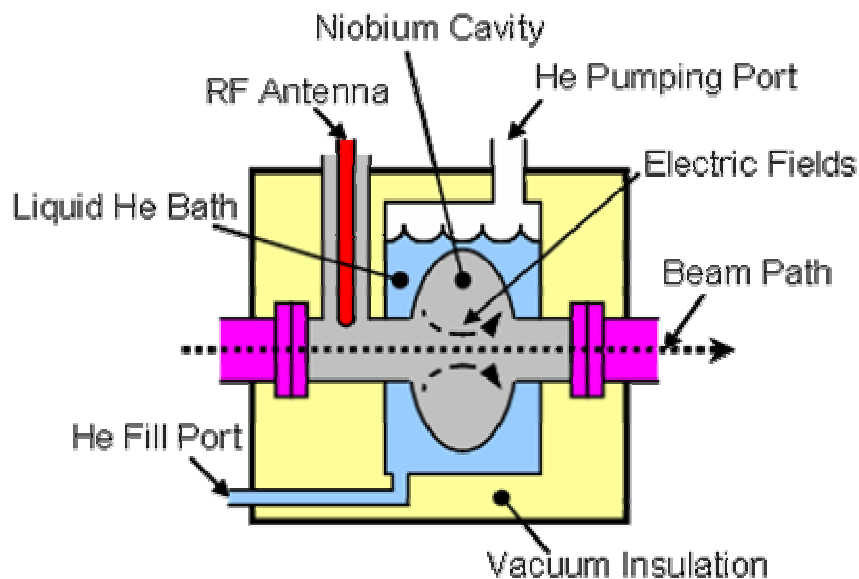


Następna generacja akceleratorów :
energie ~ kilkaset GeV

Mikrofalowa wnęka rezonansowa

- konwencjonalne wnęki rezonansowe są zbudowane z metalu o dobrym przewodnictwie (Cu)
- nadprzewodzące wnęki rezonansowe pozwalają typowo uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV / m → energię 1 GeV można uzyskać w akceleratorze liniowym o długości 100 m

konstrukcja nadprzewodzącej
wnęki z niobu pracującej
w niskiej temperaturze



Zalety wnęk nadprzewodzących

- Duże wartości współczynnika dobroci (stosunek energii gromadzonej we wnęcie do strat energii w jej ściankach) :
 Q rzędu 10^9 → wzrost współczynnika wydajności zamiany mocy elektrycznej z sieci na moc wiązek elektronów

Porównanie strat energii dla wnęk z częstotliwością 500 MHz dla gradientu pola $E = 1 \text{ MV / m}$:

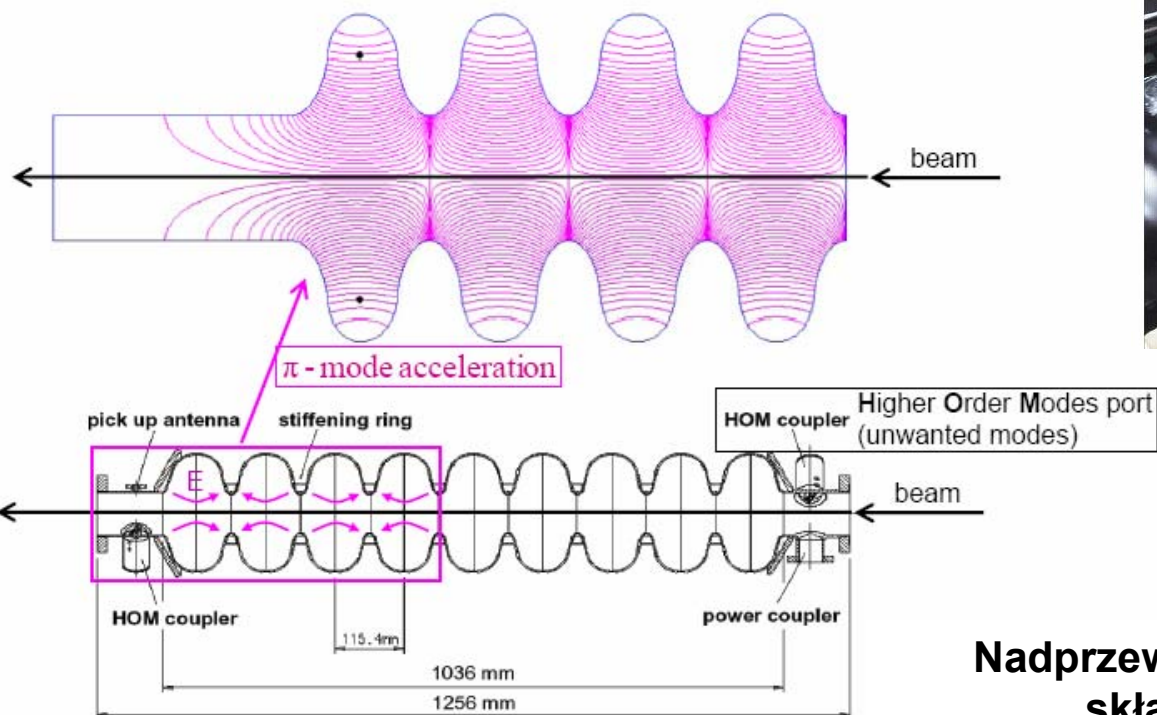
w. nadprzewodząca - 1.5 W / m (w temp. 2 K)

w. konwencjonalna - 56 kW / m

- Wnęki nowej generacji → natężenia pól rzędu 35 MV / m (prototypy $40 - 52 \text{ MV / m}$)
wyniki testów w laboratorium DESY/ Niemcy dla liniowego akceleratora elektronów
→ przyspieszanie elektronów do wysokich energii

Wnęki nadprzewodzące z niobu testowane w laboratorium DESY w Hamburgu

Symulacja pola elektrycznego we wnęcie



**Nadprzewodząca wnęka rezonansowa
składająca się z 9 komórek
(długość całego modułu 1.036 m)**

Ruch naładowanej cząstki w stałym polu magnetycznym ($B = \text{const}$, $E = 0$)

- Siła $\mathbf{F}$ działająca na cząstkę jest prostopadła do jej prędkości $\mathbf{v}$ i pola magnetycznego $\mathbf{B}$
- Energia cząstki pozostaje stała
- W jednorodnym polu magnetycznym cząstka porusza się po trajektorii spiralnej

Cząstka o masie m i ładunku q ,
prędkość v prostopadła do pola magnetycznego B :

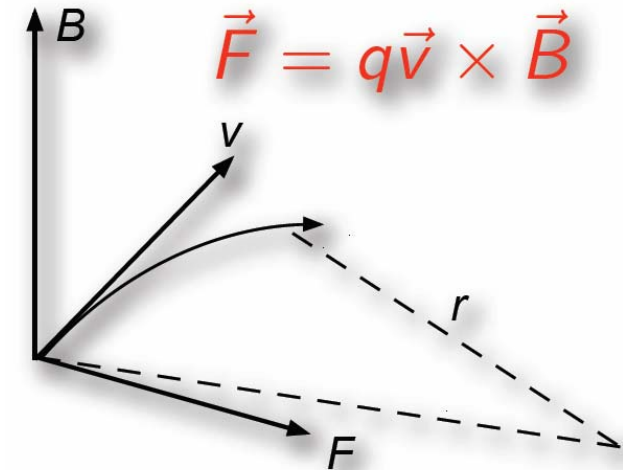
siła Lorentza = siła dośrodkowa

$$q v B = m v^2 / r$$
$$q B = p / r$$

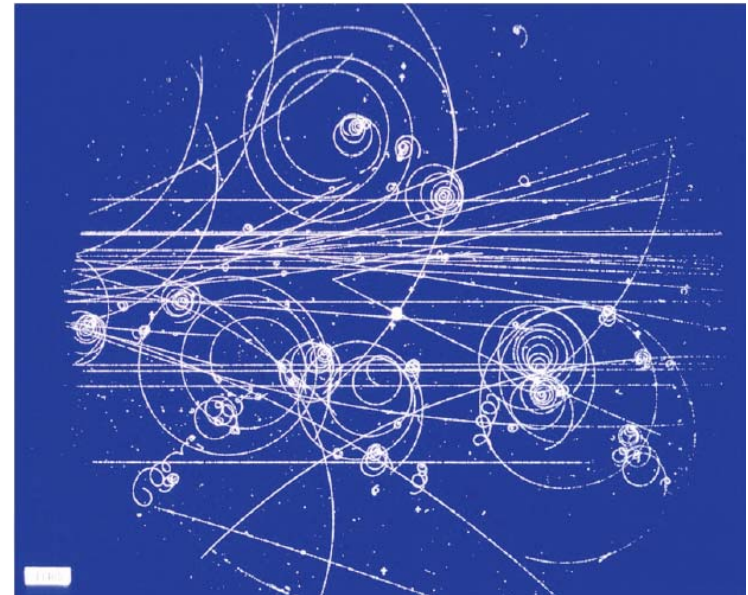
$$p = 0.3 B r$$

pęd p [GeV / c], indukcja magnetyczna B [T],
promień r [m], q [e]

Siła Lorentza $\mathbf{F}$



Zdjęcie z komory pęcherzykowej

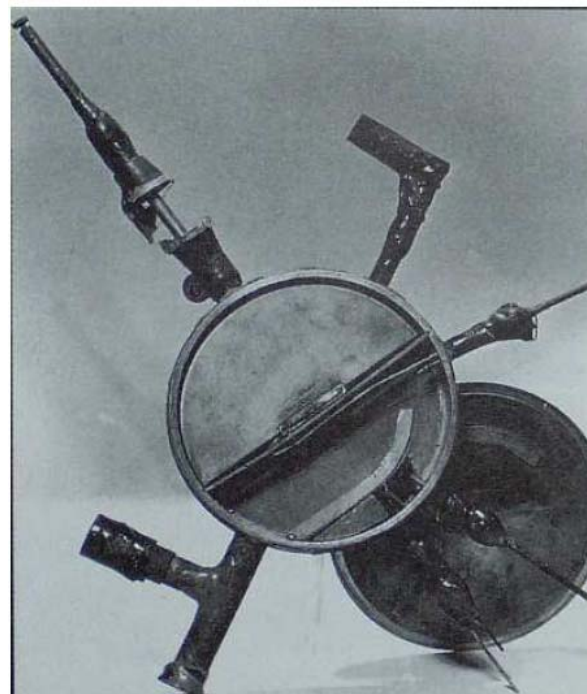


Akceleratory cykliczne

- Cząstki wielokrotnie przechodzą przez te same wnęki przyspieszające i każdorazowo uzyskują dodatkowa energię
- Pod wpływem pola magnetycznego poruszają się po torach zbliżonych do okręgu
- Ograniczenia : natężenie pola magnetycznego w magnesach zakrzywiających
energia tracona na skutek promieniowania synchrotronowego ($e^{\pm}$)



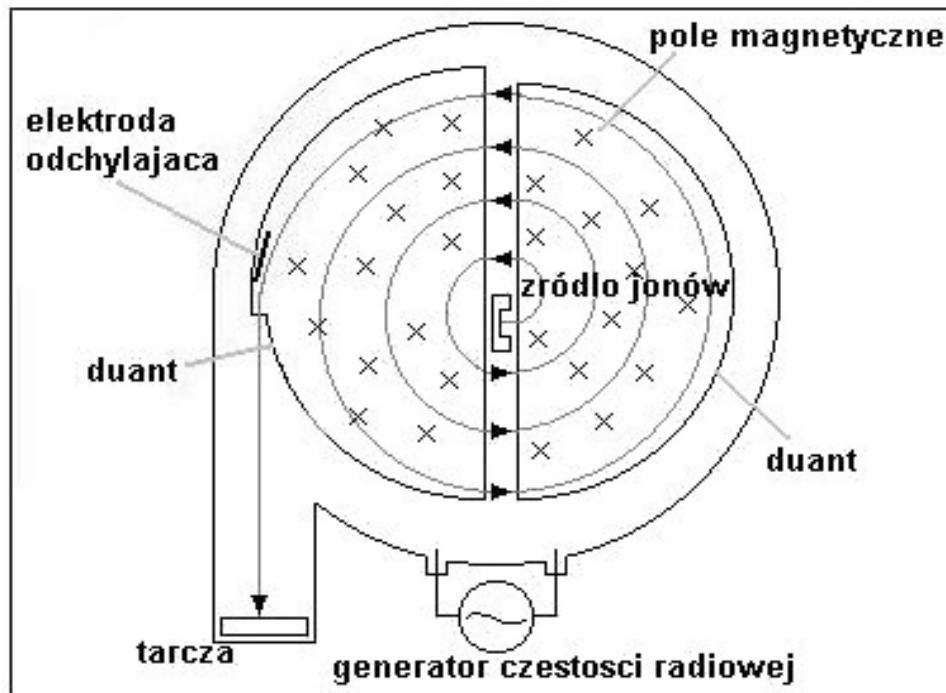
E. Lawrence opracował teoretyczne podstawy konstrukcji cyklotronu w latach 1929 - 30



Konstrukcja pierwszego cyklotronu ($r \sim 10$ cm) stanowiła przełom w technice akceleracji cząstek.

Pierwsze cyklotrony – badania sztucznej promieniotwórczości

Cyklotron



- Umieszczone w próżni półkoliste wnęki (duanty) znajdują się w jednorodnym polu magnetycznym. Duantry są połączone ze źródłem zmiennego napięcia o stałej częstotliwości.
- Jony dodatnie wytwarzane wewnątrz urządzenia są wielokrotnie przyspieszane w szczelinie między duantami. Zmiana napięcia następuje w momencie przejścia cząstki przez szczelinę.
- Cząstki zataczają coraz większe tory kołowe prostopadłe do kierunku pola ($B r = p / q$)
- Czas jednego pełnego obiegu :
$$T = 2\pi \cdot r / v = 2\pi \cdot m / qB$$

Cyklotron

- $B = \text{const}$, dla cząstek nierelatywistycznych ($m = \text{const}$) częstość obiegu po orbicie jest stała

częstość cyklotronowa $\omega = 2\pi / T = B q / m = \text{const}$ ($T = 2\pi m / qB$)

- stała częstość zmian napięcia przyspieszającego
cząstki przechodzące przez szczelinę m-dzy duantami doznają zawsze działania przyspieszającego pola elektrycznego

• Ograniczenia :

uzyskiwanie cząstek z dużymi pędami wymaga dużych pól magnetycznych ($Br = p / q$)
relatywistyczny wzrost masy cząstki → wzrost okresu T jej obiegu po orbicie,
powodujący że cząstka docierająca do przerwy m-dzy elektrodami nie jest w fazie z polem elektrycznym

Cyklotron $B = \text{const}$, stała częstość napięcia przyspieszającego,
typowe energie protonów do 30 MeV

Budowa Centrum Cyklotronowego Bronowice przy IFJ PAN

$E_p = 230 - 250$ MeV, zastosowanie cyklotronu do celów medycznych

→ Centrum Radioterapii Protonowej (www.ifj.edu.pl)

Synchrotron

~1950 Renesans badań w fizyce cząstek elementarnych

Odkrycie w promieniowaniu kosmicznym nowych cząstek elementarnych obdarzonych dziwnością wpłynęło na budowę **akceleratorów wysokich energii opartych na zasadzie synchrotronu**

1952 Zasada silnego ogniskowania

Pierwsze synchrotrony protonowe w USA :

1952 $E_p = 3 \text{ GeV}$ Cosmotron w Brookhaven
w Brookhaven National Laboratory

1954 $E_p = 6 \text{ GeV}$ Bevatron
w Lawrence Berkley Laboratory

Synchrotron :

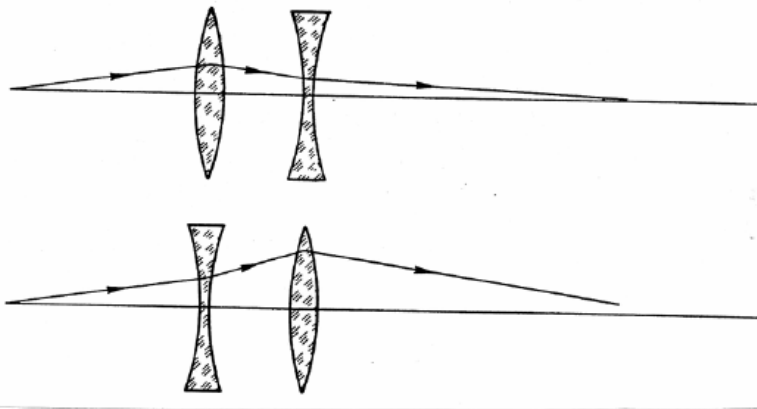
Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie

Silne ogniskowanie wiązek cząstek



- **Przyspieszane cząstki krążą po stałych orbitach**
możliwość przyspieszania do naprawdę wysokich energii
- Procesowi przyspieszania towarzyszy zarówno zmiana natężenia pola magnetycznego, jak i częstości przyspieszającego pola elektrycznego
Wzrost pola magnetycznego jest zsynchronizowany ze wzrostem pędu cząstki
- **Zasada silnego ogniskowania** – wiązka cząstek przechodzi przez układ magnesów, które ją na przemian skupiają i rozpraszają

Analogia optyczna ilustrująca zasadę silnego ogniskowania

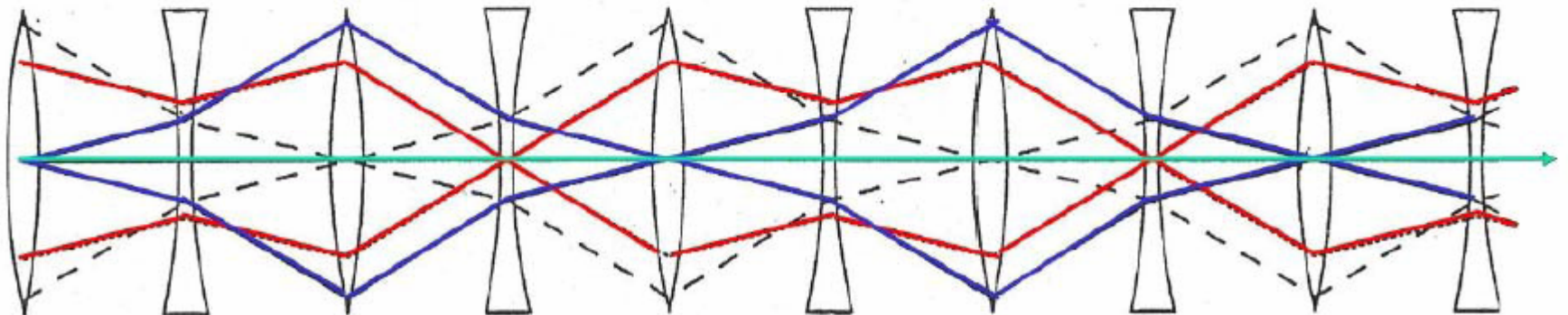
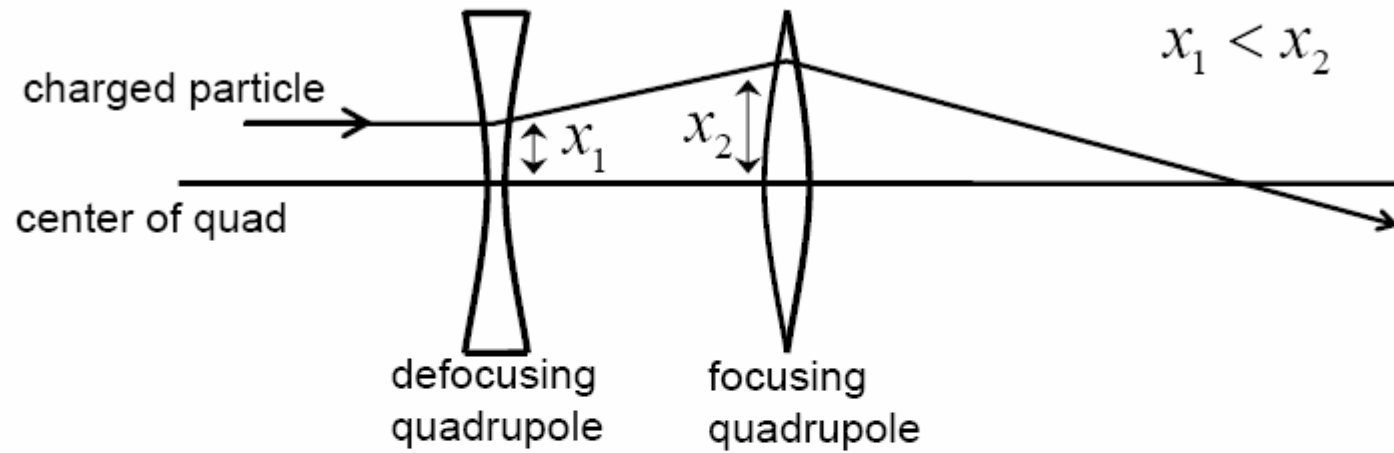


Wiązka optyczna przechodząca przez układ złożony z soczewek skupiających i rozpraszających podlega ostatecznie skupieniu. Podobnie jest z wiązką cząstek przechodzących kolejno przez magnesy kwadrupolowe skupiające i rozpraszające.



Otrzymujemy wiązkę bardzo małych rozmiarów :
wpływ na rozmiary rury próżniowej - przekroje poprzeczne rzędu kilku cm^2 , rozmiary magnesów, redukcja kosztów

QD + QF = net focusing effect:

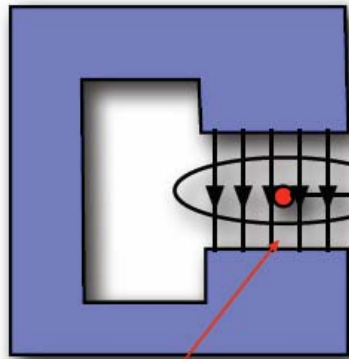
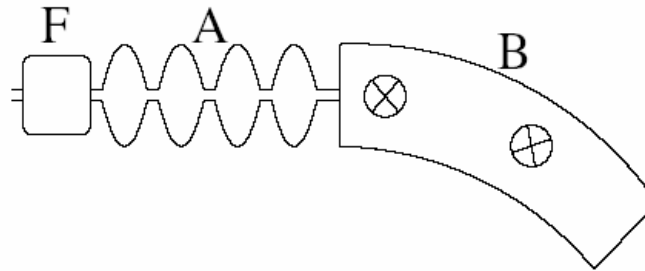


Akceleratory cykliczne

Akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów .

Każdy segment składa się z :

- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)

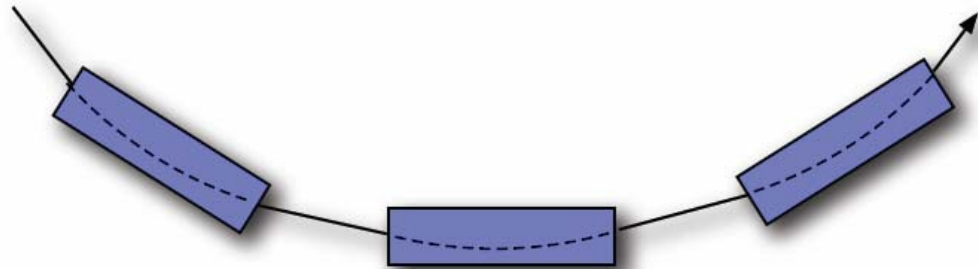


Siła w kierunku
środku pierścienia

Pole magnetyczne

Magnesy dipolowe utrzymują
cząstki na stałej orbicie kołowej

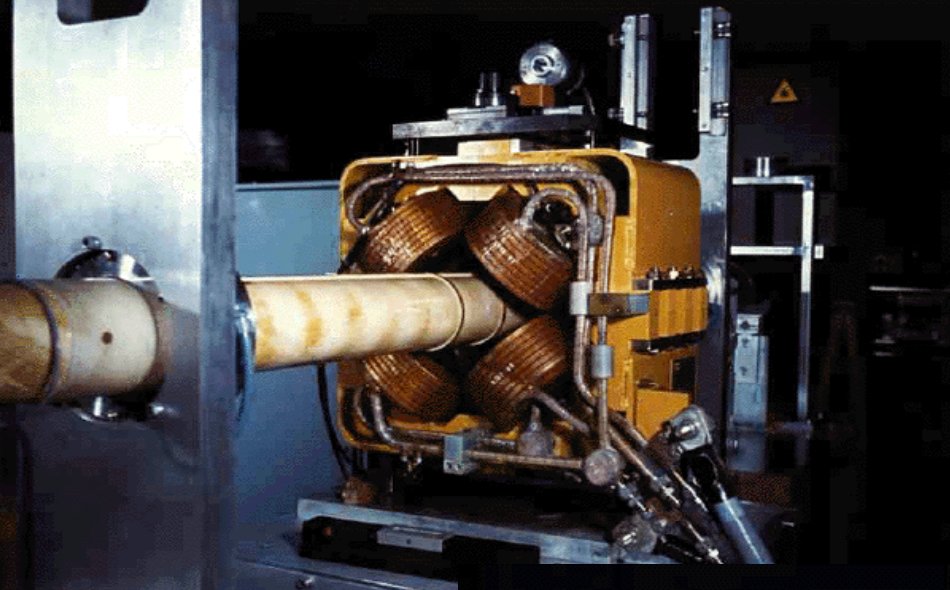
$$p = 0.3 \text{ Br}$$



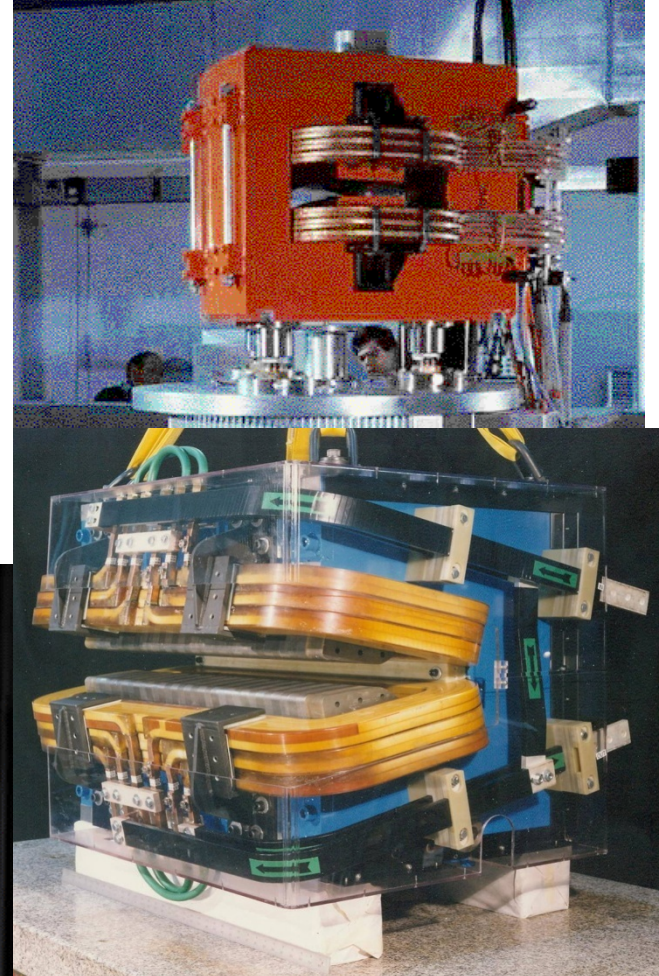
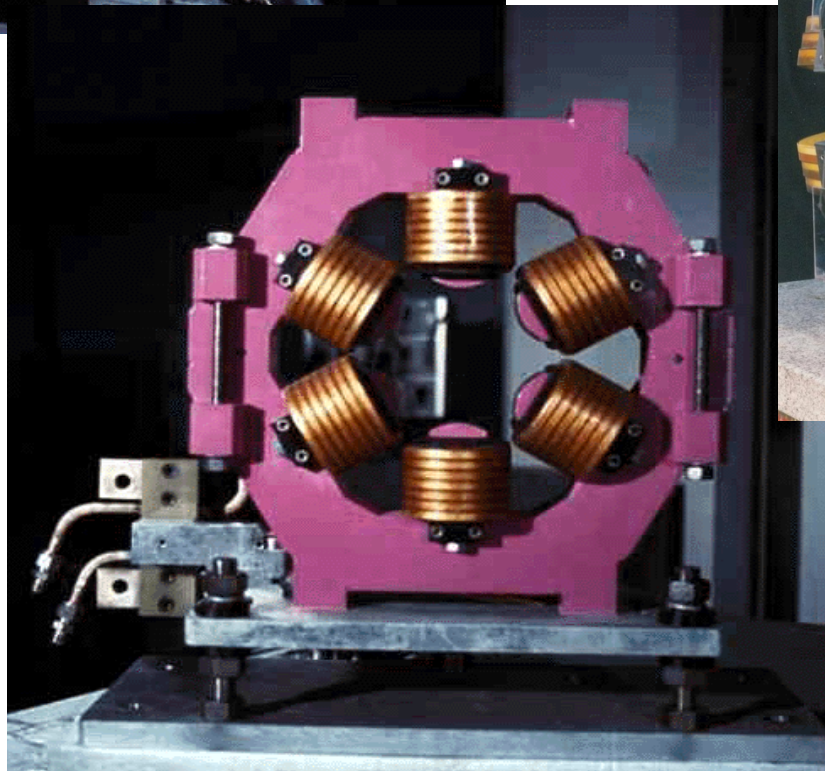
Magnesy kwadrupolowe i wyżej polowe służą do skupiania wiązek w akceleratorach

Synchrotrony protonowe – maksymalna energia ograniczona przez wielkość pola magnetycznego B i promień akceleratora

Synchrotrony elektronowe – straty energii związane z promieniowaniem synchrotronowym



**Magnesy
kwadrupolowe**



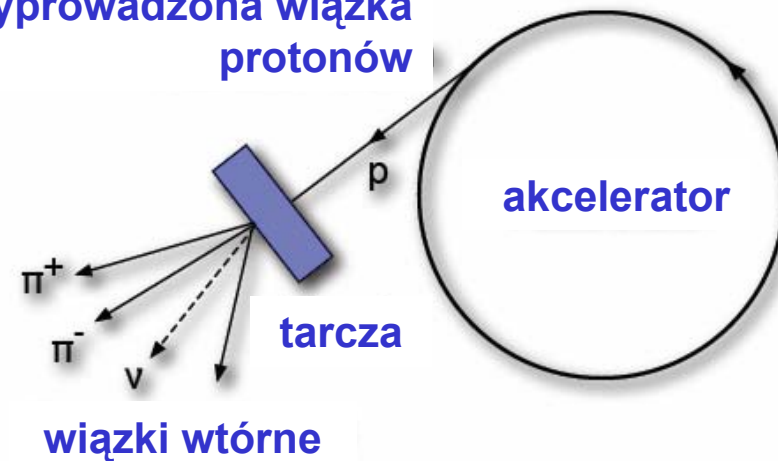
**Magnesy
sestupolowe**

- **Eksperymenty ze stacjonarną tarczą**

Wiązki protonów lub elektronów z akceleratorów wyprowadzone i kierowane na zewnętrzną tarczę

Badania oddziaływań cząstek nietrwałych lub neutralnych prowadzi się w oparciu o wiązki wtórne, formowane po wyprowadzeniu z akceleratora wiązki protonów

wyprowadzona wiązka protonów



Cząstki we wiązkach wtórnych :

piony ($\pi^\pm$), kaony ($K^\pm, K^0$), protony i antyprotony, neutrony i antyneutrony, $e^\pm$,
miony ($\mu^\pm$), neutrina i antyneutrina, ...

- **Eksperymenty na zderzaczach**

Dwie przeciwbieżne wiązki cząstek zderzają się w pierścieniu akceleratora w kilku obszarach skrzyżowania wiązek, w których ustawiona jest aparatura detekcyjna eksperymentów

Świetlność akceleratora

Oprócz energii ważnym parametrem określającym własności akceleratora jest światlność L.

Światlność określa liczbę reakcji zachodzących w jednostce czasu.

Parametr ten jest szczególnie ważny dla zderzaczy, dla których częstość zderzeń w obszarze przecięcia się wiązek jest mała.

Dla procesu o przekroju czynnym σ światlność L wyraża się wzorem :

$$dN / dt = L \cdot \sigma$$

$$L [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Im wyższa światlność akceleratora tym radsze procesy możemy zmierzyć
nie poświęcając na zbieranie danych zbyt wiele lat
(10 lat – typowa skala czasowa zbierania danych w eksperymentach z fizyki cząstek)

Precyzja pomiarów zależy nie tylko od zrozumienia błędów systematycznych pomiarów, ale również od statystyki zebranej próbki danych.

Świetlność dla dwóch przeciwbieżnych wiązek relatywistycznych

$$L = n \cdot f \cdot N_1 \cdot N_2 / (\sigma_x \sigma_y)$$

n — liczba krążących pęczków w każdej z wiązek

N_1, N_2 — liczby cząstek w każdym pęczku wiązki ($\sim 10^{10}$)

f — częstość przecięć wiązek (45 kHz - 40 MHz)

σ_x, σ_y — poprzeczne rozmiary wiązek

Licznik wzoru — całkowita liczba przyspieszanych cząstek na jednostkę czasu, im więcej cząstek tym większa świetlność

Mianownik wzoru — stopień skupienia wiązek w miejscu zderzenia, im bardziej skolimowane wiązki tym większa świetlność

Zwiększanie liczby przyspieszanych cząstek – kosztowny sposób zwiększania L , konieczne jest uzyskanie b. małych rozmiarów poprzecznych wiązek

zderzacz e^+e^-

LEP

$$\sigma_x \sim 300 \mu\text{m}$$

$$\sigma_y \sim 8 \mu\text{m}$$

$$L \sim 6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Projekt przyszłego

liniowego zderzacza e^+e^-

ILC (energia w układzie środka masy $E_{\text{CM}} = 500 \text{ GeV}$)

$$\sigma_x \sim 0.5 \mu\text{m}$$

$$\sigma_y \sim 5 \text{ nm (!!)}$$

$$L \sim 3 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Energia układu środka masy (Centre of Mass Energy, E_{CM})

Definicja układ środka masy $\sum \vec{p} = 0$

Pojedyncza cząstka o masie spoczynkowej m_0 : $E_{CM}^2 = P^2 = m_0^2$, P – czteropęd cząstki

Kwadrat czteropędu P^2 jest niezmiennikiem transformacji Lorentza : $P_{LAB}^2 = P_{CM}^2$

LAB : cząstka **A** o masie spoczynkowej m_A , energii E_A i pędzie p_A zderza się z cząstką tarczy o masie m_B (w układzie LAB $E_B = m_B$, $p_B = 0$)

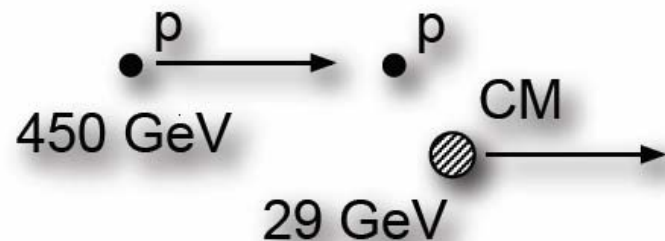
$$E_{CM}^2 = (P_A + P_B)^2 = P^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2 E_A m_B$$

Jeśli cząstka **A** jest wysoce relatywistyczna $E_A \gg m_A, m_B$

Energia w układzie środka masy odpowiada energii dostępnej do produkcji nowych cząstek

$$E_{CM} = \sqrt{2m_B E_A}$$

Dla akceleratora ze stacjonarną tarczą, energia w układzie środka masy rośnie jak pierwiastek z energii cząstki padającej



W zderzeniu protonu o energii 450 GeV ze spoczywającym protonem $E_{CM} = 29$ GeV.

Tylko mała część energii wiązki jest dostępna dla produkcji nowych cząstek, pozostała energia jest zamieniana na energię kinetyczną cząstek wtórnych.

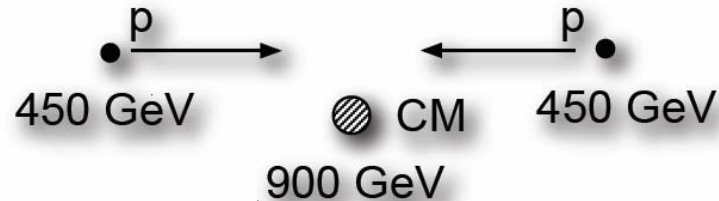
Energia układu środka masy (Centre of Mass Energy, E_{CM})

Zderzenie 2 relatywistycznych cząstek o takiej samej energii poruszających się w przeciwnych kierunkach (układ LAB $\equiv$ układ CM):

$$E_{CM} = E_A + E_B = 2E_A \quad (\vec{p}_A = - \vec{p}_B)$$

Zderzenie 2 protonów o energii 450 GeV

$$E_{CM} = 900 \text{ GeV}$$



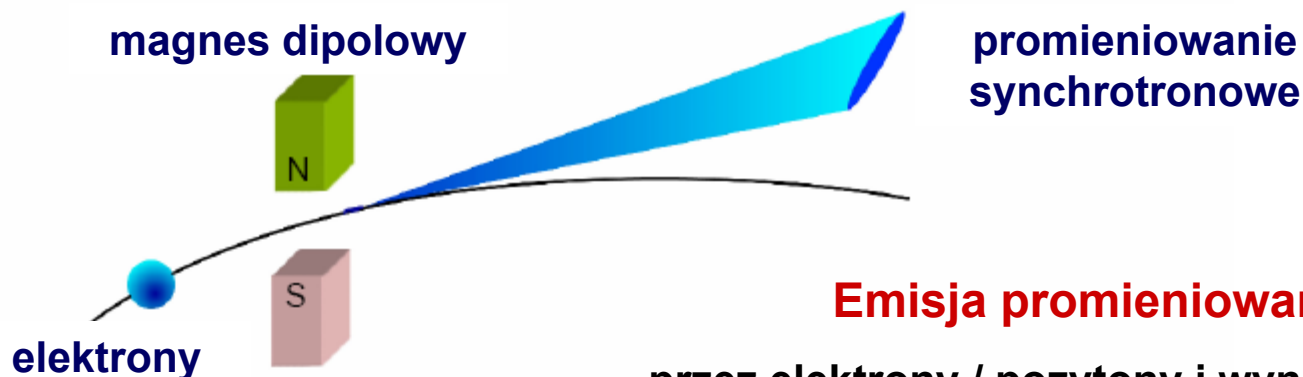
Praktycznie cała energia dostępna dla produkcji nowych cząstek.

Akcelaratory wiązek przeciwbieżnych (zderzacze) :

- dwie wiązki cząstek biegnące w przeciwnych kierunkach zderzają się w pierścieniu w kilku obszarach skrzyżowania wiązek, w których zainstalowano eksperymenty
- Duża energia w układzie CM dostępna dla produkcji nowych cząstek !!
- Dla zderzaczy e^+e^- i proton-antyproton wystarczyłby tylko **jeden pierścień**, ponieważ cząstki o takiej samej masie i przeciwnych ładunkach mogą być przyspieszane w przeciwnych kierunkach przy użyciu tych samych magnesów.
Dla zderzaczy pp i $e^\pm$ konieczne są dwie rury próżniowe z różnymi magnesami.
- Świetlności zderzaczy są mniejsze niż akceleratorów ze stacjonarną tarczą – „tarcza” jest o wiele mniejsza

Promieniowanie synchrotronowe

- Naładowana cząstka poruszająca się po orbicie kołowej traci energię na promieniowanie hamowania



Emisja promieniowania synchrotronowego
przez elektrony / pozytony i wynikająca stąd konieczność
kompensacji strat przez doprowadzenie energii przy częstościach radiowych

→ **duże utrudnienie przy przyspieszaniu elektronów w akceleratorach kołowych**

Jednakże fakt, że akceleratory są źródłem światła w szerokim zakresie częstości znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauk przyrodniczych jak

krystalografia, fizyka powierzchni, geofizyka, chemia, biologia molekularna ...

Polski synchrotron – nowy kampus UJ

Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego "SOLARIS"

planowana energia elektronów – 1.5 GeV

planowany termin ukończenia budowy – koniec 2014 r

Promieniowanie synchrotronowe

- Energia wypromieniowana przez cząstkę na jedno okrążenie wynosi :

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2 \beta^2 \gamma^4}{3R} \quad \beta = v/c \text{ and } \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} = E/m$$

- Straty radiacyjne rosną z malejącą masą cząstki i rosnącą energią jak czwarta potęga – problem przy przyspieszaniu elektronów i pozytonów.
- Zwiększanie promienia akceleratora niewiele daje – straty radiacyjne maleją liniowo z R

$$\frac{\Delta E_{\text{electron}}}{\Delta E_{\text{proton}}} = \left(\frac{m_p}{m_e} \right)^4 \simeq 10^{13}$$

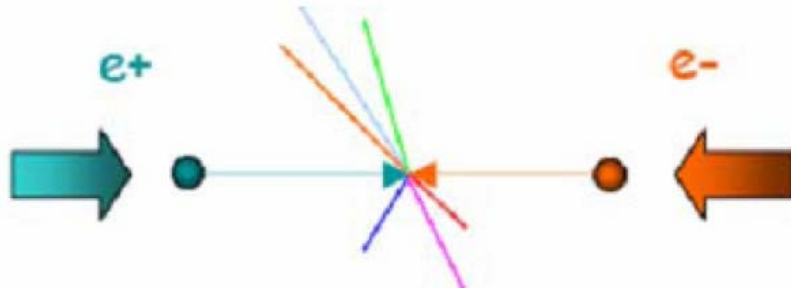
Porównanie strat radiacyjnych dla relatywistycznych elektronów i protonów o takim samym pędzie

Zderzacz LEP (obwód 27 km) przyspieszający wiązki $e^\pm$ - straty radiacyjne na pojedynczą cząstkę przyspieszoną do energii 45 (100) GeV wynosiły 0.084 (2.058) GeV na jeden obieg.

LEP był prawdopodobnie ostatnim akceleratorem kołowym e^+e^- . Następny zderzacz e^+e^- będzie akceleratorem liniowym.

Zderzacze e^+e^- i proton-proton

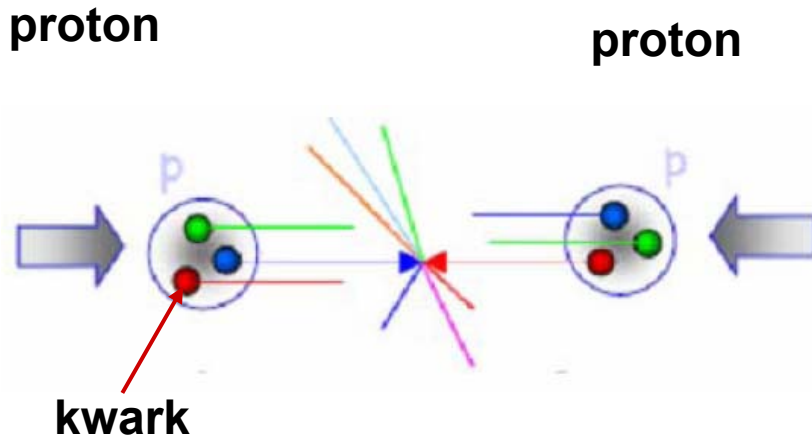
Zderzacze elektron - pozyton



- zderzenia fundamentalnych cząstek
- → czysty proces
- energia zderzenia dobrze znana
- niższe energie (LEP, $E_{\text{CM}} \sim 200 \text{ GeV}$)
(promieniowanie synchrotronowe)

PRECYZYJNE POMIARY

Zderzacze proton- (anty)proton



- zderzenia złożonych cząstek
- zderzenia kwark-(anty) kwark
→ resztki hadronów "zaciemniają"
pomiar i interpretację wyników
- energia układu kwark-(anty)kwark
nie jest dobrze znana
- wyższe energie (LHC, $E_{\text{CM}} \sim 7 \text{ TeV}$)

ODKRYCIA NOWYCH CZĄSTEK

Duże ośrodki naukowe

które posiadały / posiadają akceleratory :

- **CERN** na granicy francusko - szwajcarskiej pod Genewą :
 - zderzacz elektron - pozyton **LEP** (**L**arge **E**lectron – **P**ositron collider)
 - supersynchrotron protonowy **SPS** (**S**uper **P**roton **S**ynchrotron)
 - wielki zderzacz hadronów **LHC** (**L**arge **H**adron **C**ollider)
- **DESY** w Hamburgu : zderzacz elektron – proton **HERA**
- **Fermilab** pod Chicago : zderzacz proton – antyproton **Tevatron**
- **SLAC** w Stanford (Kalifornia / USA) : liniowy zderzacz elektron – pozyton **SLC**
- **KEK** w pobliżu Tsukuby / Japonia : zderzacz elektron – pozyton **KEKB**

Największe akceleratory

nazwa	cząstki	energie	lokalizacja	status
SLC	e^+e^-	50 + 50 GeV	Stanford USA	zderzacze, które zakończyły pracę
LEP	e^+e^-	100 + 100 GeV	CERN Genewa	
HERA	$e^\pm p$	30 + 820 GeV	DESY Hamburg	
PEP II	e^+e^-	9 + 3.1 GeV	Stanford USA	
KEKB	e^+e^-	8 + 3.5 GeV	Tsukuba Japonia	modernizacja (2010 - 2014)
Tevatron	$p\bar{p}$	1 + 1 TeV	Fermilab USA	koniec działania X 2011
LHC	pp	3.5 + 3.5 TeV	CERN Genewa	Start 2009

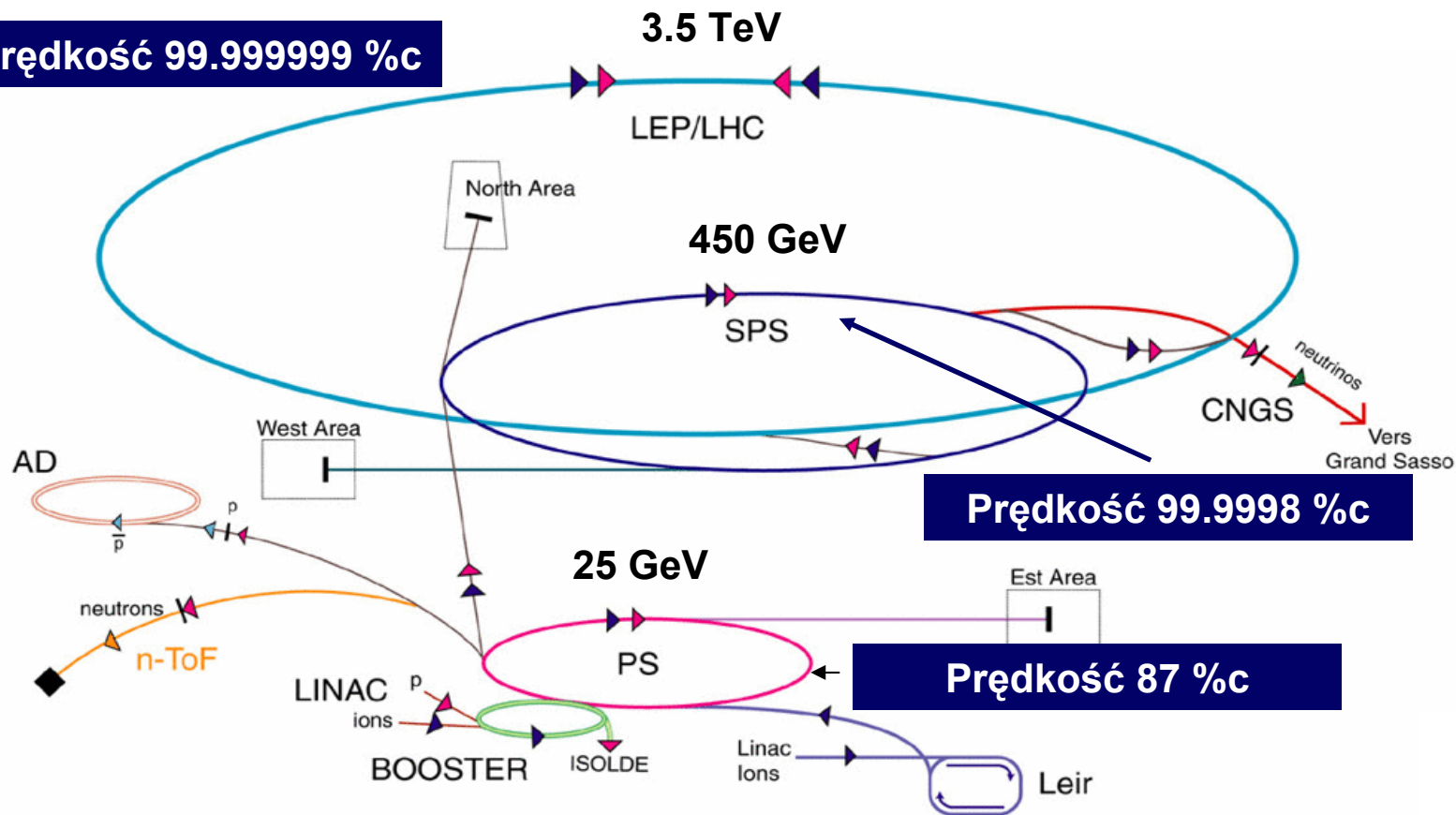
HERA – 30 + 920 GeV w drugiej fazie, pęczki wiązek zderzały się co 96 nsec

LHC – planowana energia 7 + 7 TeV, planowane zderzenia pęczków co 25 nsec

Zespoły akceleratorów

W praktyce nie można zbudować akceleratora kołowego przyspieszającego cząstki od “zera” do najwyższych energii. Cząstki muszą być przyspieszane etapami.

Zespół akceleratorów służących do przyspieszania protonów w LHC



LHC - protony przyspieszane etapami do $\beta = 0.999999$

Kierunki rozwoju akceleratorów

- Coraz większe energie w celu poszukiwania i badania nowych ciężkich cząstek :
 - LHC – docelowo 2×7 TeV w zderzeniach pp
 - prace nad przyszłym liniowym zderzaczem e^+e^- :
 - ILC (International Linear Collider) : E_{CM} 250 - 500 GeV
 - CLIC (Compact Linear Collider) : E_{CM} 0.5 - 5 TeV
- Coraz wyższe świetlności umożliwiające pomiary bardzo rzadkich procesów
np. fabryki B (SuperKEKB, SuperB) i fabryki K
- Pierwszy zderzacz ciężkich jonów rozpoczął pracę w 2000 roku
w laboratorium Brookhaven (BNL), zderzenia ciężkich jonów w LHC,
planowany zderzacz elektronów i ciężkich jonów (USA)
- Prowadzone są prace nad nowymi typami akceleratorów jak fabryki neutrin,
zderzacze mionów czy przyspieszanie radioaktywnych jąder do wysokich energii

Large Hadron Collider LHC, Europejski Ośrodek Badań Jądrowych, CERN Genewa

**Zderzacz proton-proton
w tunelu zderzacza e^+e^- LEP
o długości $L = 27$ km**

Pole magnetyczne w pierścieniu
LEP / LHC o indukcji $B = 8.4$ T

1600 nadprzewodzących
magnesów dipolowych, każdy o
wadze 27 ton

Planowana energia

$$E_{\text{CM}} = 7 + 7 = 14 \text{ TeV},$$

2010 / 2011 - osiągnięto

$$3.5 + 3.5 = 7 \text{ TeV}$$

kwiecień 2012 - rozpoczęto zderzenia pp

$$4 + 4 = 8 \text{ TeV}$$



Zderzacz SPS w CERN



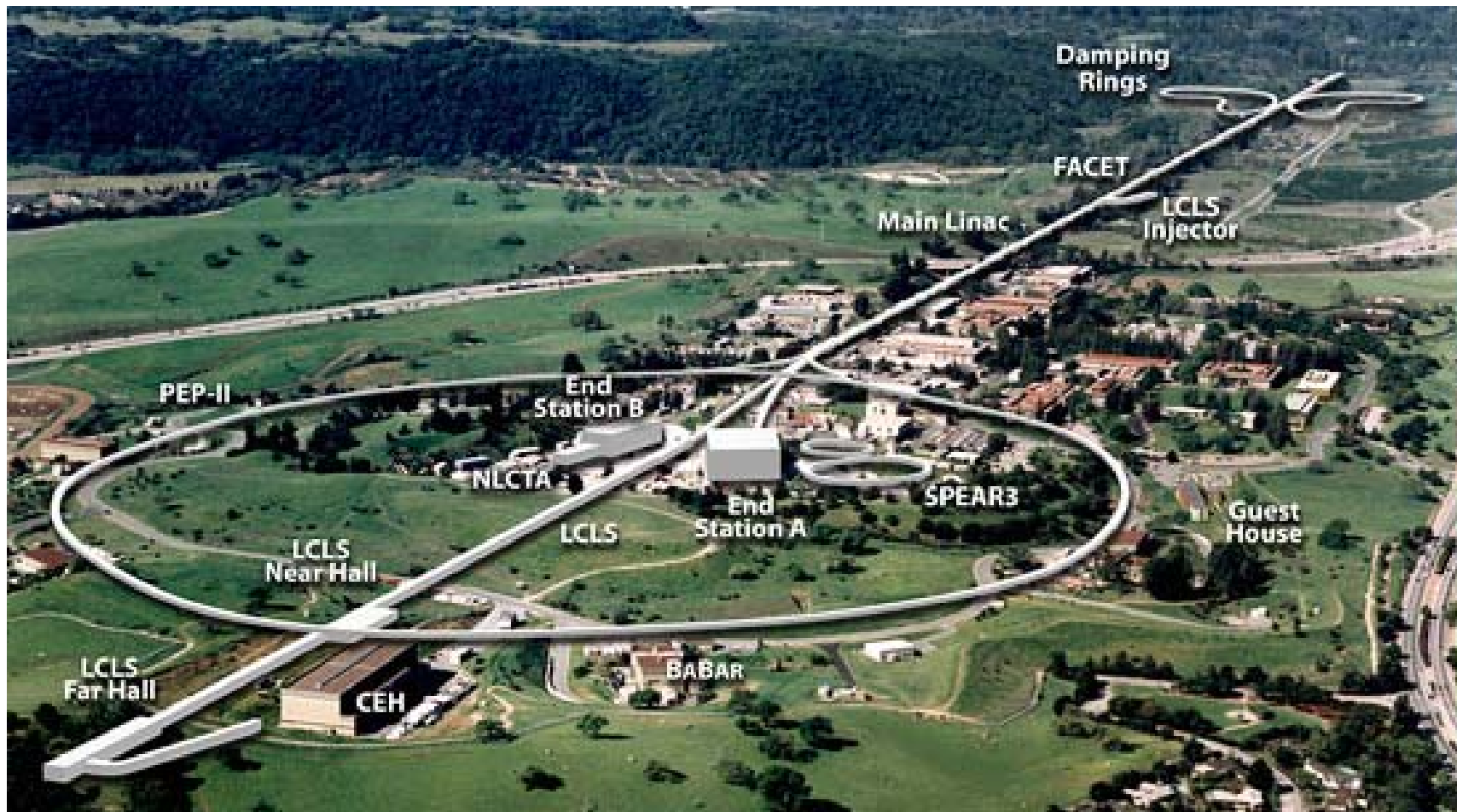
Zderzacz elektronów i protonów HERA w DESY



Tevatron w ośrodku Fermilab (USA)



Linowy zderzacz elektron-pozyton SLAC w Stanford / USA



Akcelerator KEKB w Tsukubie / Japonia

