

Źródła cząstek

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład II

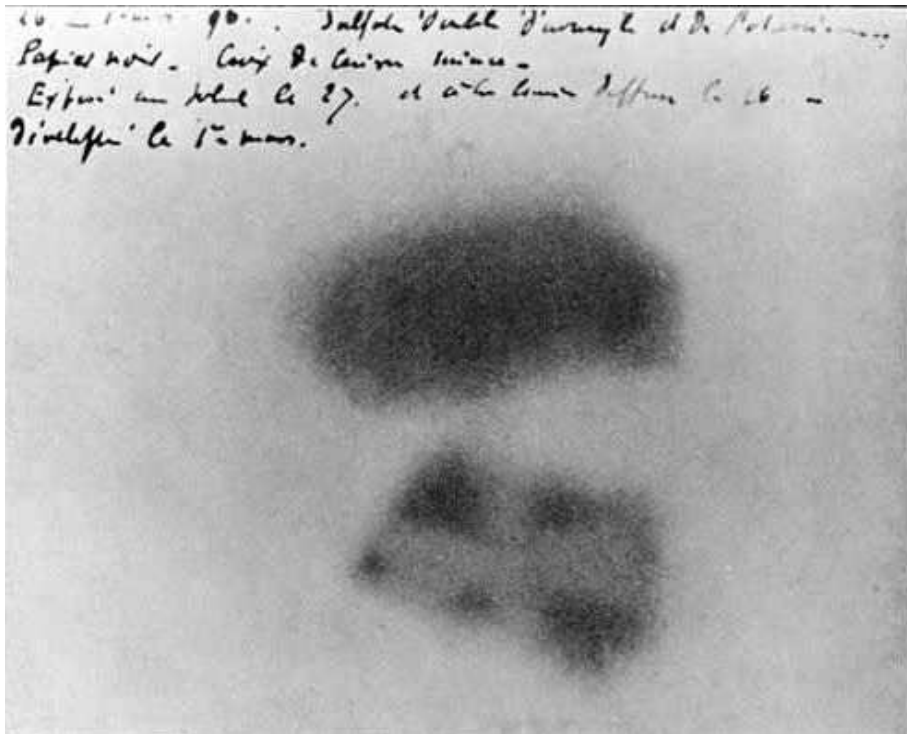
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze
 - Promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory
 - Ograniczenia i świetlność

Źródła cząstek

Pierwiastki radioaktywne

Promieniotwórczość odkrył **H. Becquerel** w roku **1896**.

Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.



Na początku XX wieku wyodrębniono 3 rodzaje promieniowania:

- α - jądra helu ($2p2n$)
- β - elektrony
 β^+ - pozytony
- γ - fotony

Badania z użyciem źródeł promieniotwórczych doprowadziły do wielu ważnych odkryć (np. odkrycie jądra atomowego)

Podstawową wadą źródeł promieniotwórczych była mała energia emitowanych cząstek.

Promieniowanie kosmiczne

Początkowo uważane było za przejaw naturalnej promieniotwórczości Ziemi.

Dopiero w 1912 roku Victor Hess pokazał, że obserwowane cząstki pochodzą z kosmosu.

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie piony i kaony:

$$p + N \rightarrow X + n \pi + m K + \dots$$

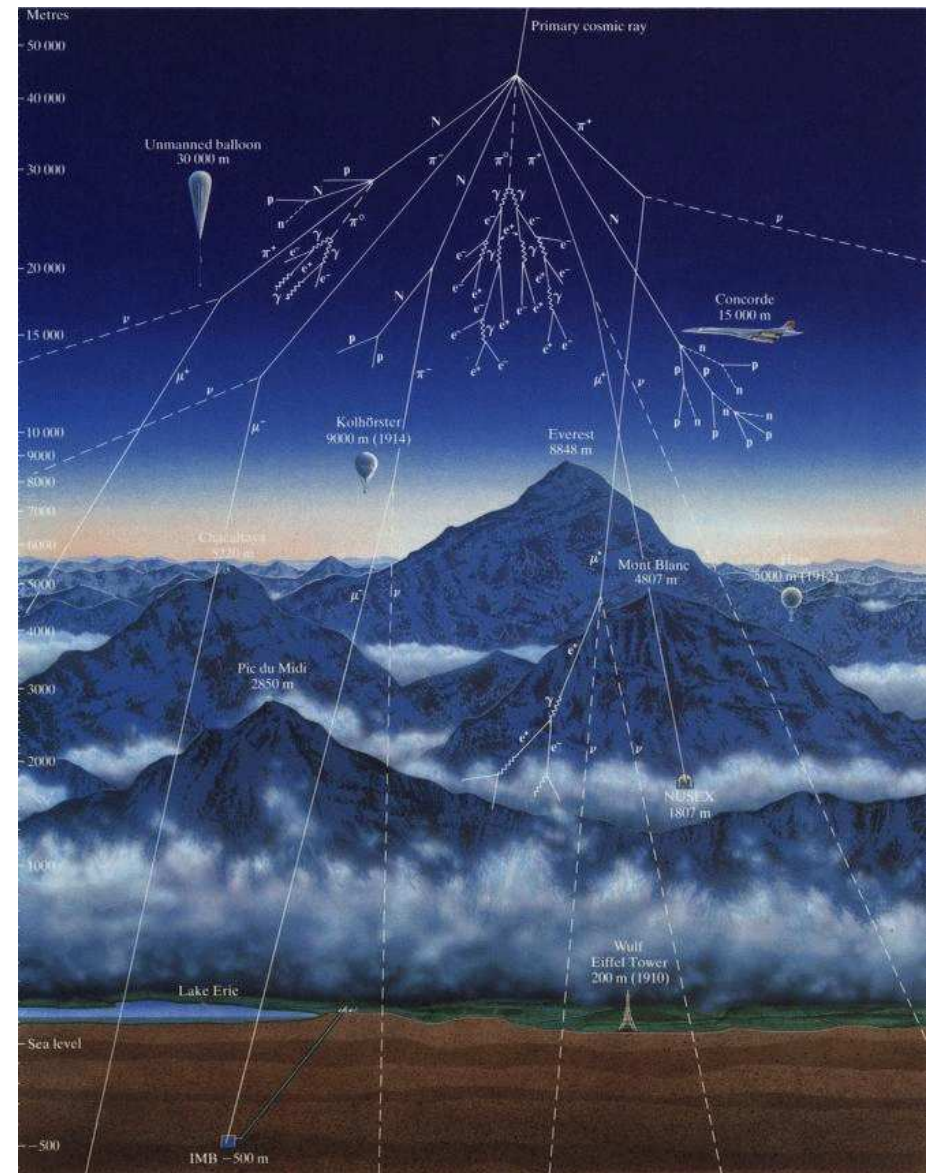
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Docierają do powierzchni Ziemi

- miony $\mu^\pm \sim 70\%$
- elektrony $e^\pm \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^\pm \sim 3\%$

Łącznie około $180 \text{ na } m^2 \cdot s$



Promieniowanie kosmiczne

Pomiary

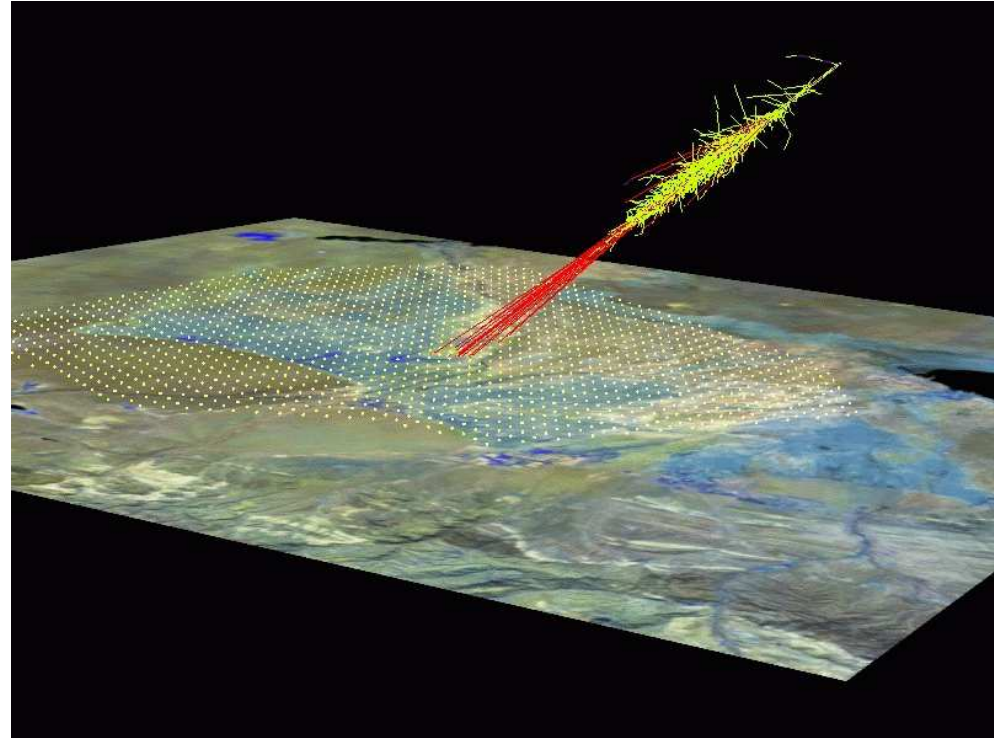
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Budowane są coraz większe detektory do pomiaru promieniowania kosmicznego najwyższych energii.

Projekt “**Pierre Auger Observatory**”:
obserwacja promieniowania czerenkowa i fluorescencji powstających w trakcie rozwoju kaskady w atmosferze.

1600 detektorów rozmieszczonych na obszarze 3000 km²



**Pierre Auger
Observatory**



Promieniowanie kosmiczne

Rozkład energii

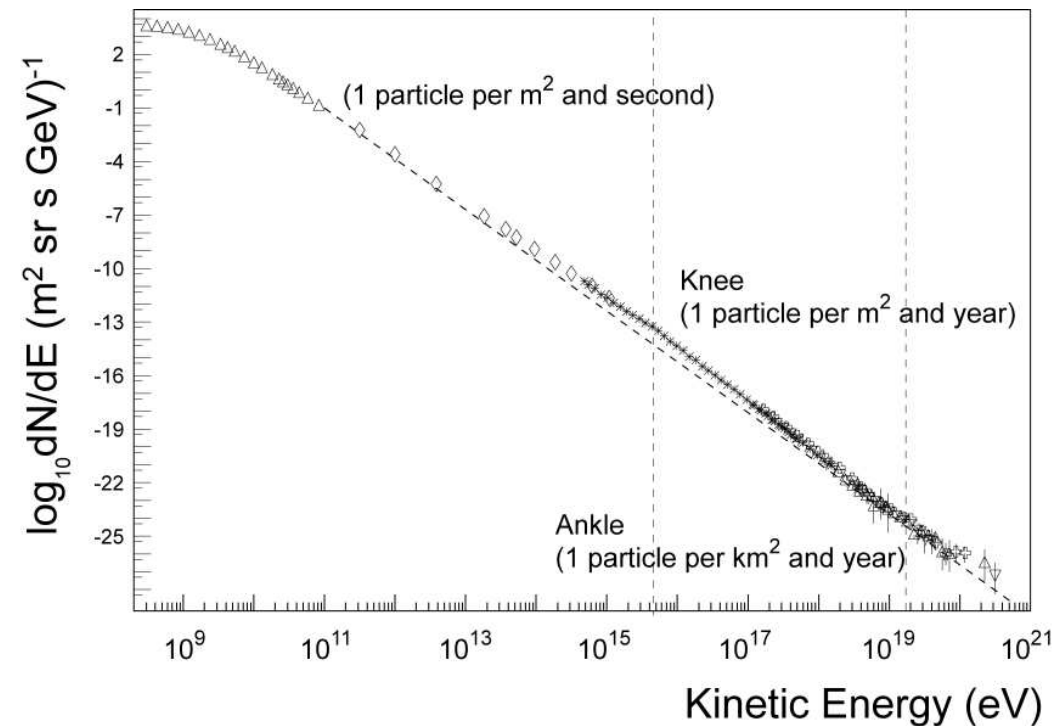
Okazuje się, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV.

Wciąż nie rozumiemy skąd to promieniowanie pochodzi:

- **supernowe**
- **aktywne jądra galaktyk**
- **???**

Nie rozumiemy także dlaczego dociera do Ziemi !...

(powyżej $5 \cdot 10^{19}$ eV powinno być pochłaniane w oddziaływaniu z mikrofalowym promieniowaniem tła)



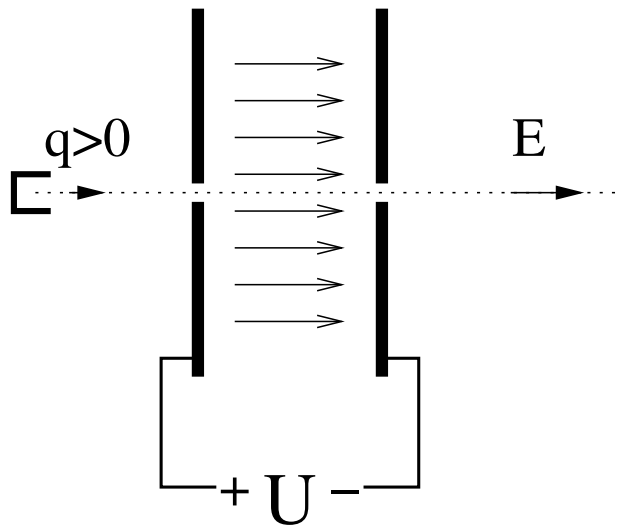
Akceleratory

Akceleratory elektrostatyczne

W 1919 roku Rutherford wskazał na korzyści z przyspieszania cząstek.

Najprostszym akceleratorem cząstek jest pole elektrostatyczne:

np. kondensator



Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokiej różnicy napięć:

- ⇒ generator [Cockrofta-Waltona](#) (1932): 750 kV
- ⇒ generator [Van de Graaffa](#) (1931): 1.5 MV

W pewnych dziedzinach wciąż używane

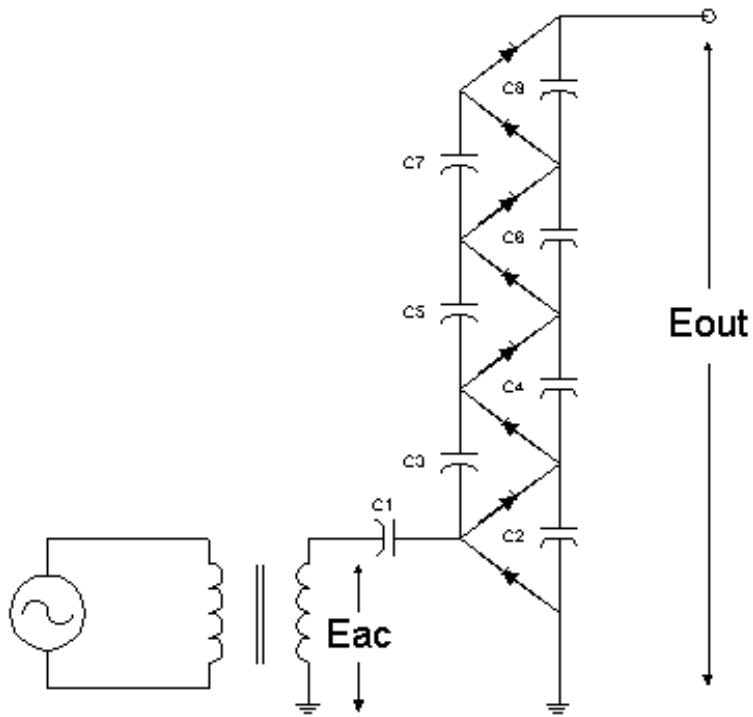
Uzyskiwana energia:

$$E = E_0 + U \cdot q$$

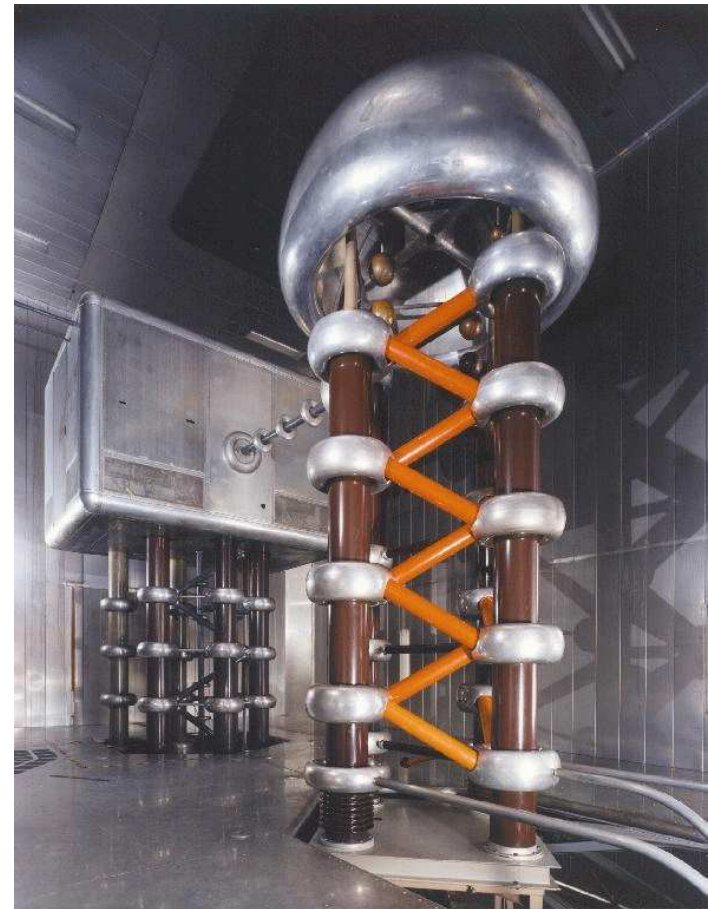
Akcelerator

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



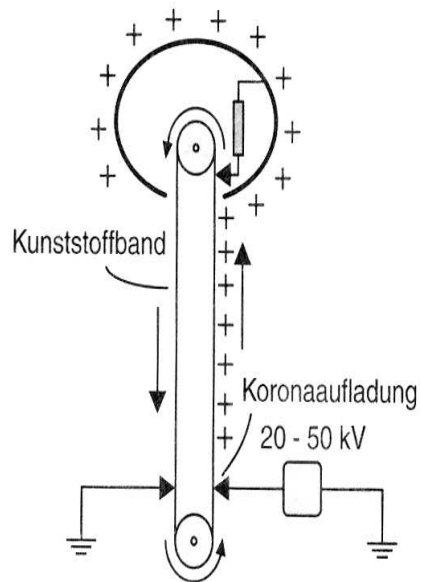
Współczesne urządzenie



Akceleratory

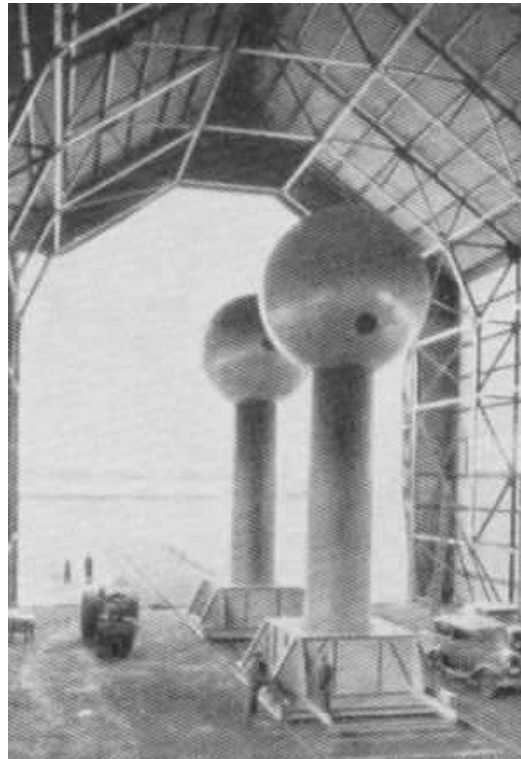
Generator Van de Graaffa

Schemat



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesne urządzenie



Obecnie różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV

$$\Rightarrow E \sim 30 \text{ MeV}$$

\Rightarrow **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

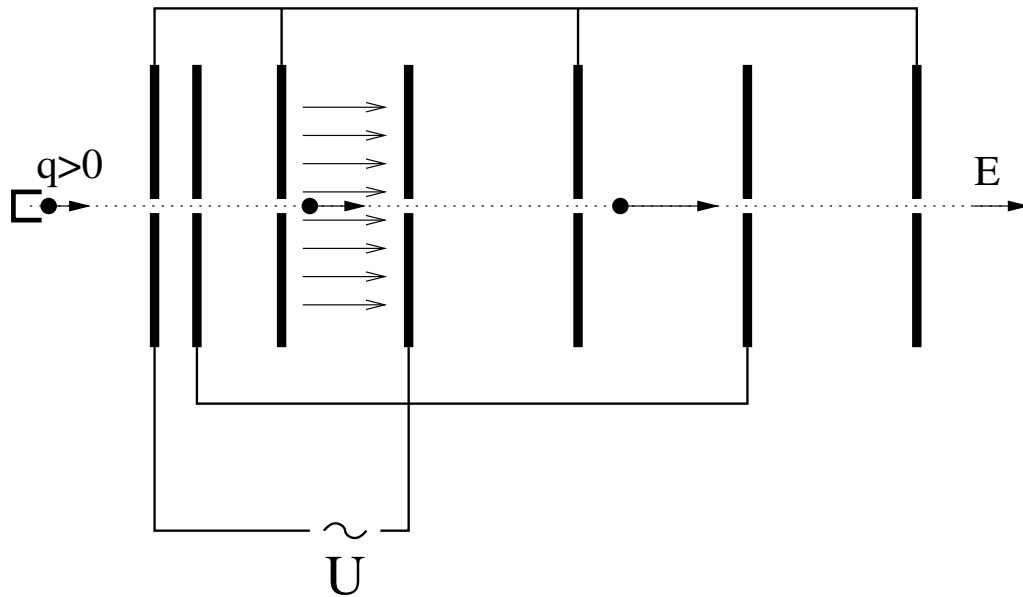
Akcelerator

Akcelerator liniowy

Idea: **Gustav Ising 1924.**

Pierwsze urządzenia: **Rolf Wideroe 1927**, Lawrence 1931.

Cząstka przechodzi przez kolejne
“kondensatory”



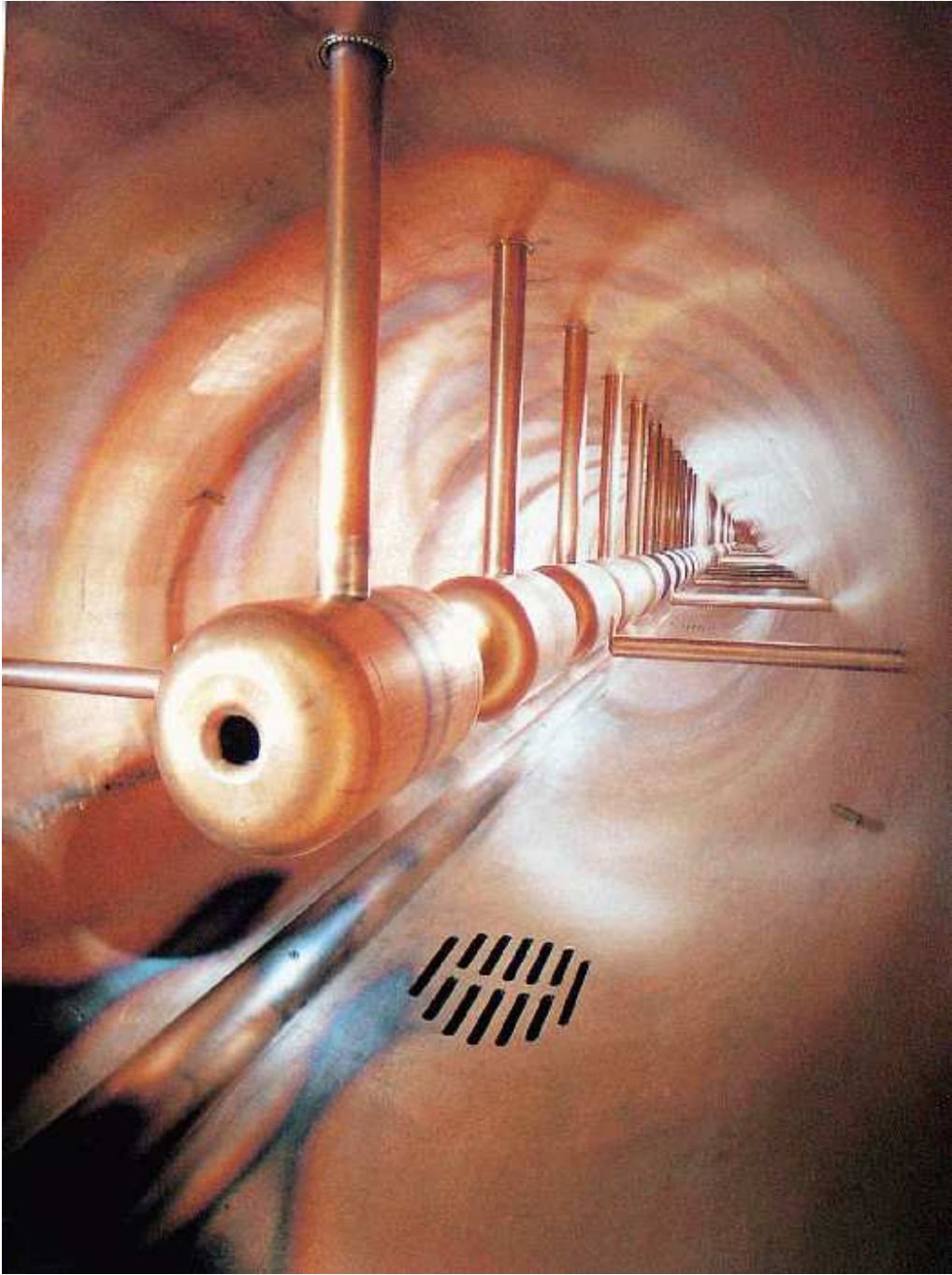
Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

Częstość jest zazwyczaj stała. Długości kolejnych elementów rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki.

Dla $E \gg m$, prędkość $\beta \rightarrow 1$: $L = \text{const.}$

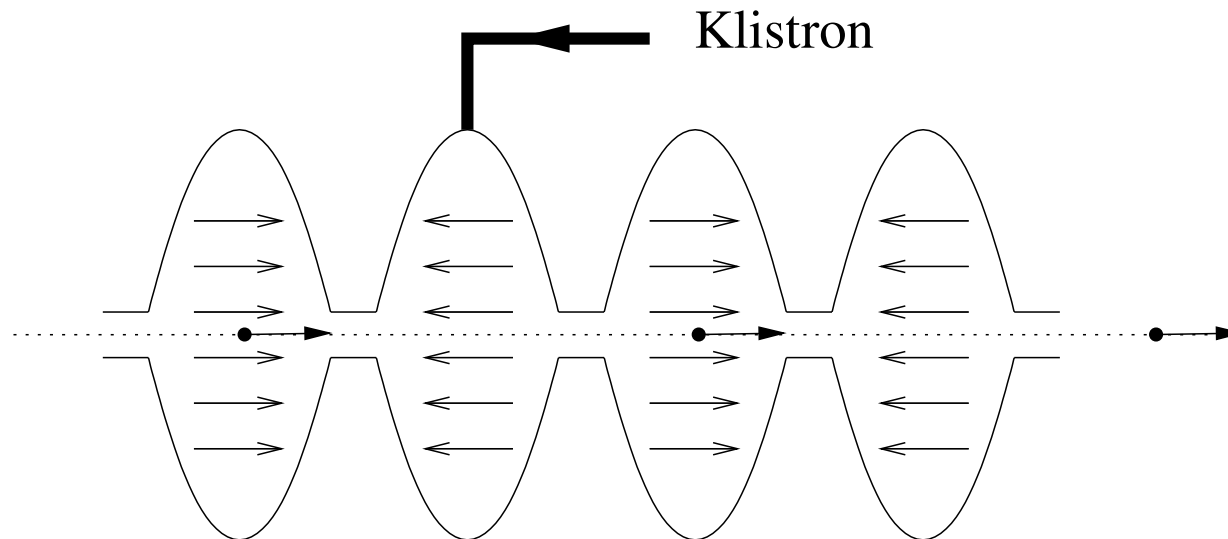
Liniowy akcelerator protonów
w ośrodku Fermilab (USA)



Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofałe.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m

⇒ dla uzyskania energii 1 GeV potrzebny jest akcelerator liniowy o długości ~ 100 m

Wnęka rezonansowa



Akceleratory

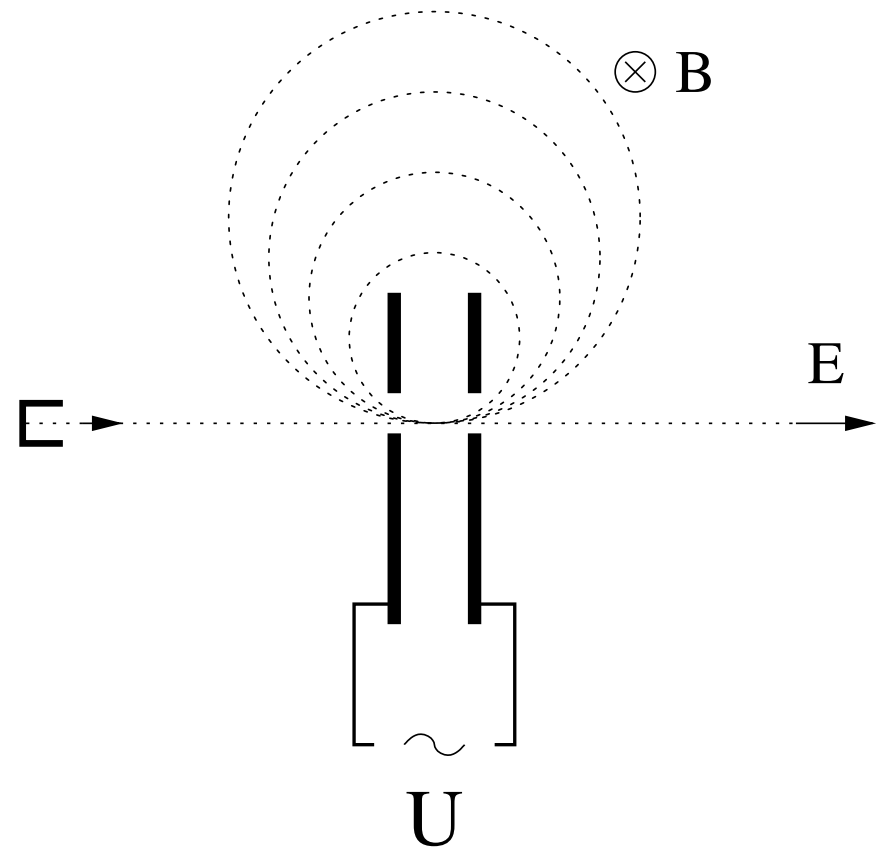
Akcelerator kołowy

Zamiast używać wielu wnęk możemy wykorzystać pole magnetyczne do “zapętlenia” cząstki.

Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Pierwszy tego typu akcelerator (**cyklotron**) zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence

Schemat poglądowy:



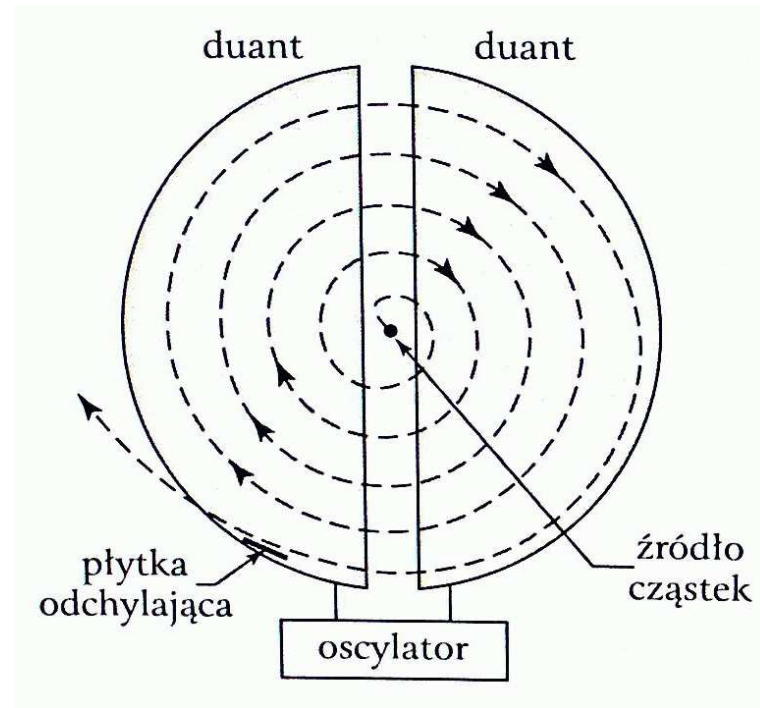
Akceleratorzy

Cyklotron

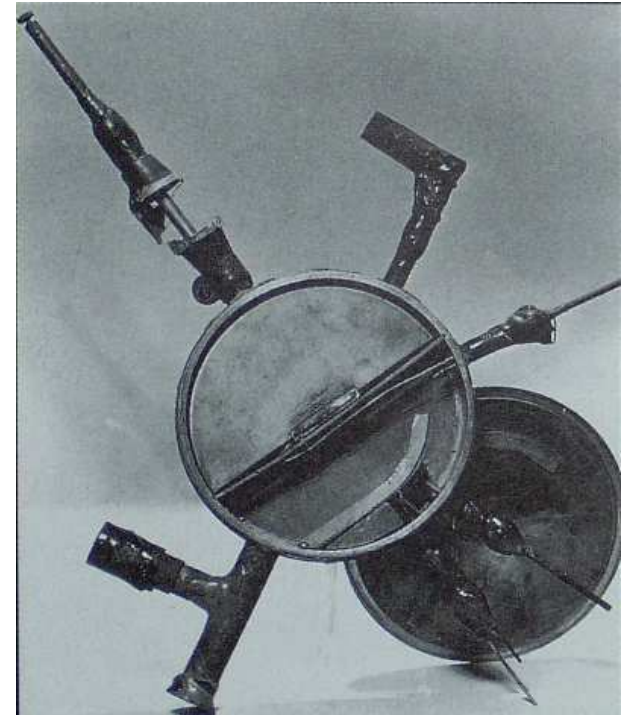
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratory

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie



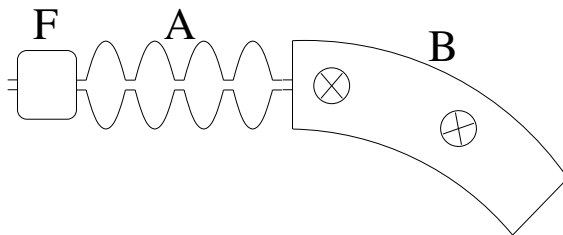
Akcelerator

Akcelerator kołowy

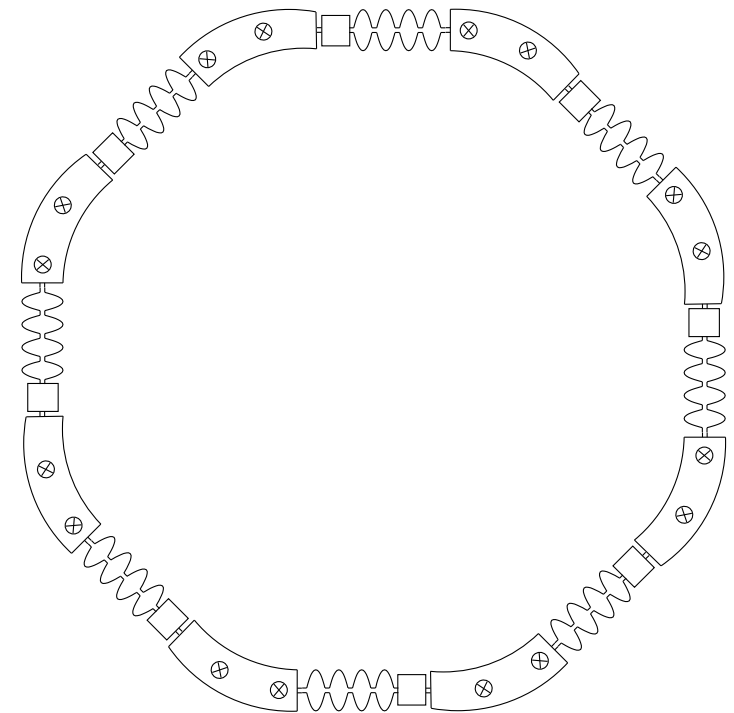
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

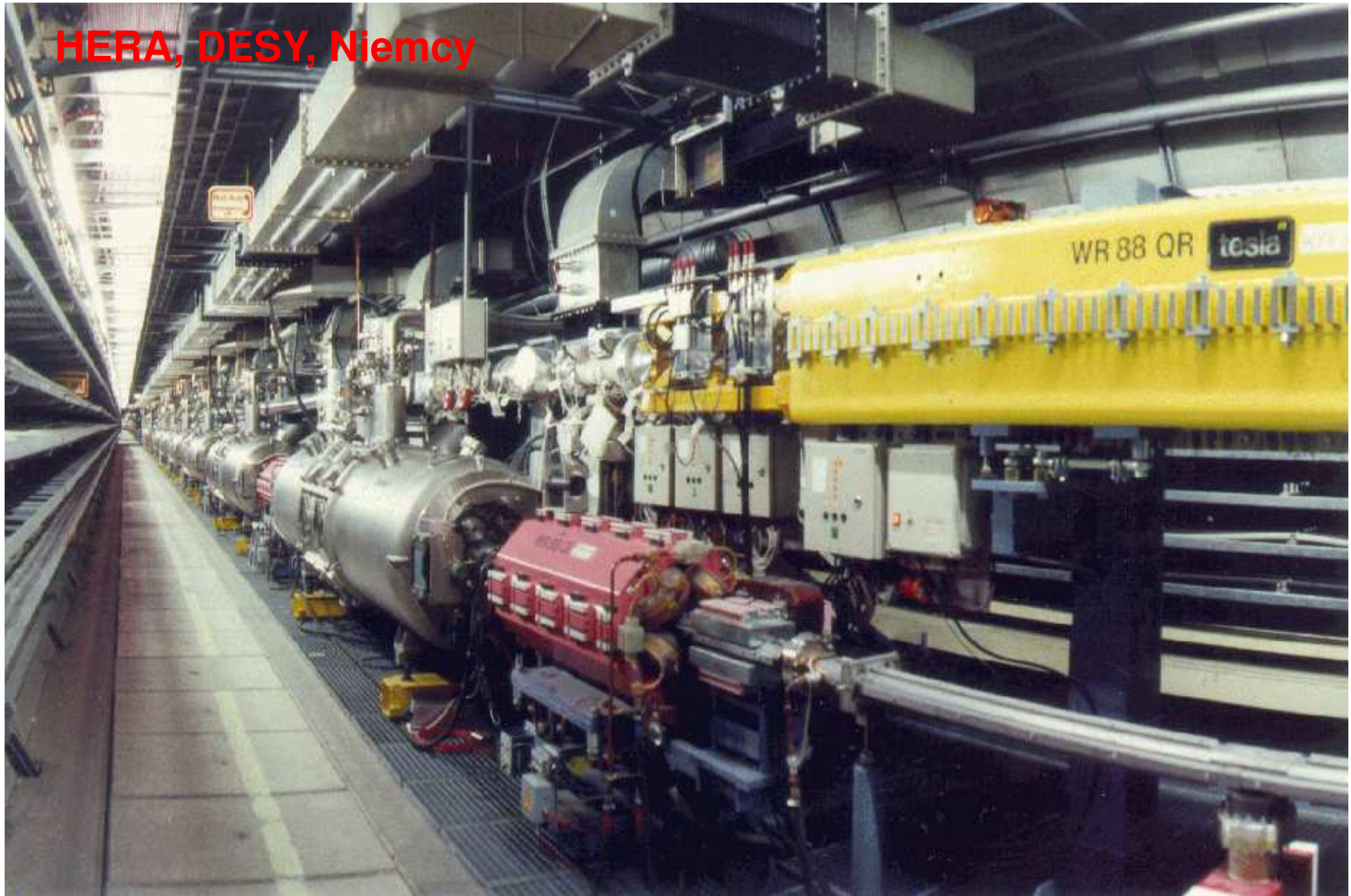
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:

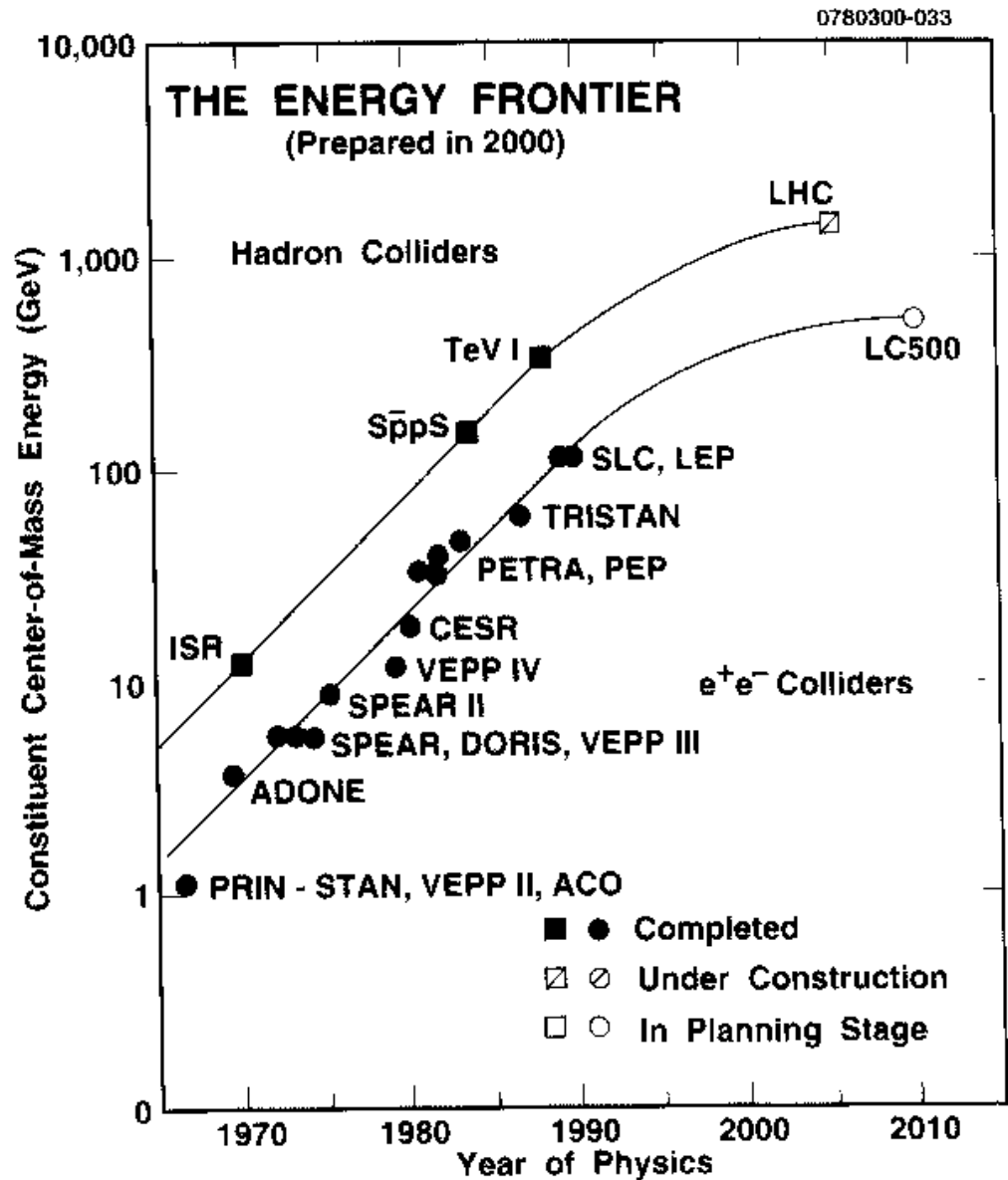


HERA, DESY, Niemcy



Akceleratorzy

Kolejne etapy w rozwoju fizyki cząstek są nierozdzielnie związane z budową nowych akceleratorów.



Akceleratory

Największe akceleratory

Już zbudowane

SPS	$p\bar{p}$	1981-1990	do 315 GeV	
LEP	e^+e^-	1989-2000	≤ 105 GeV	
SLC	e^+e^-	1989-1998	50 GeV	
HERA	$e^\pm p$	1992/2001 –	27 GeV (e) \times 920 GeV (p)	(modernizacja)
Tevatron	$p\bar{p}$	1987/2000 –	0.9-1 TeV	
RHIC	$Au Au$	2000 –	100 GeV/u	

Budowane i projektowane

LHC	pp	2007 –	7 TeV	
ILC	e^+e^-	2015(?) –	250-500 GeV	
CLIC	e^+e^-	2020(?) –	1500-2500 GeV	

Akceleratory

Największe akceleratory

Badania fizyki cząstek koncentrują się dużych ośrodkach:

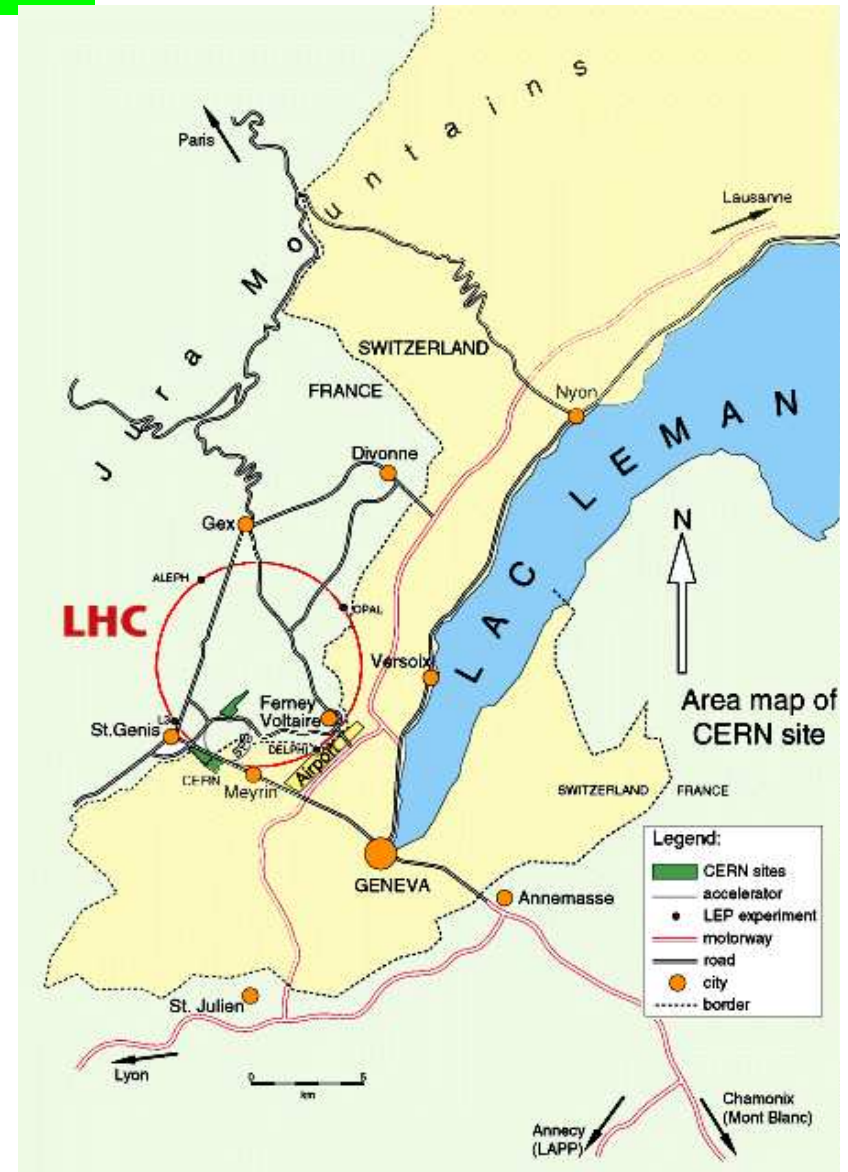
- CERN w Genewie (LEP, SPS, LHC)
- DESY w Hamburgu (HERA)
- Fermilab pod Chicago (Tevatron)
- SLAC w Stanford, Kalifornia (SLC)
- KEK w Japoni

Akceleratory

LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.



DESY, Hamburg



Tevatron, Fermilab, USA



SLAC Stanford, USA



KEK Japonia



Akceleratory

Ograniczenia

Aby uzyskiwać coraz wyższe energie zderzających się wiązek musimy budować coraz większe i większe akceleratory...

Dlaczego !?

Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

W przypadku kołowych akceleratorów protonów \Rightarrow **pole magnetyczne**

Pole magnetyczne musi rosnać wraz ze wzrostem energii wiązki, aby utrzymać cząstki wewnątrz rury akceleratora. W praktyce nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż $B_{max} \sim 8$ T. Ogranicza to dostępne energie do

$$E_{max} \approx e R \cdot B_{max} \cdot c$$

Jeśli przekroczymy E_{max} cząstki 'uciekną' z akceleratora.

W przypadku protonów akcelerator liniowy musiałby być wielokrotnie większy niż akcelerator kołowy...

Akceleratory

Ograniczenia

W przypadku akceleratorów kołowych e^\pm : \Rightarrow **pole przyspieszające**

Elektrony krążące po orbicie tracą energię na **promieniowanie hamowania**.

Średnia **energia tracona** na jeden obieg:

$$\Delta^- E \sim E^4 / R \quad (!)$$

Energia którą możemy **dostarczyć** jest proporcjonalna do obwodu akceleratora i średniego pola \mathcal{E}

$$\Delta^+ E \sim 2\pi R \langle \mathcal{E} \rangle$$

\Rightarrow maksymalna dostępna energia

$$E_{max} \sim \sqrt{R}$$

LEP (obwód 27 km) był prawdopodobnie **ostatnim akceleratorem kołowym e^+e^-** .

Dalej bardziej opłacalne są **akceleratory liniowe**: $E_{max} \sim L \langle \mathcal{E} \rangle$

Projekt akceleratora
kołowego e^+e^-
o energii 1000 GeV

“LEP 1000”
2 TeV in Center-of-Mass
Diameter \approx 900 km
Linear Collider at 50 MeV/m
Length = 40 km $\rightarrow\leftarrow$



**Why LEP 1000 gave
way to the idea of
linear colliders**

Akceleratory

Świelność

Energia nie jest jedynym istotnym parametrem akceleratora.

W zderzeniach wiązek przeciwbieżnych niezmiernie istotna jest też **świelność** \mathcal{L} .

Świelność określa **liczbę reakcji** zachodzących w jednostce czasu.

Dla procesu o przekroju czynnym σ :

$$\frac{dN}{dt} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Ponieważ przekroje czynne maleją zazwyczaj jak E^{-2}

(patrz przykład analizy wymiarowej)

⇒ potrzebujemy coraz większych świelności

Akceleratory

Świetlność

Świetlność zależy od:

- częstości f przecięć wiązek (paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce n
- poprzecznych rozmiarów wiązki: σ_x, σ_y

Z definicji przekroju czynnego:

$$\mathcal{L} = f \cdot \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

Problem zwłaszcza w akceleratorach liniowych:
po jednym “przecięciu” wiązka jest tracona

⇒ trudno uzyskać jednocześnie duże f i duże n

⇒ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

LEP:

$$\sigma_x \approx 300 \mu m$$

$$\sigma_y \approx 8 \mu m \quad \mathcal{L} \sim 6 \cdot 10^{31} \frac{1}{cm^2 s}$$

Proj. ILC:

$$\sigma_x \approx 0.5 \mu m$$

$$\sigma_y \approx 5 \text{ nm (!)} \quad \mathcal{L} \sim 3 \cdot 10^{34} \frac{1}{cm^2 s}$$

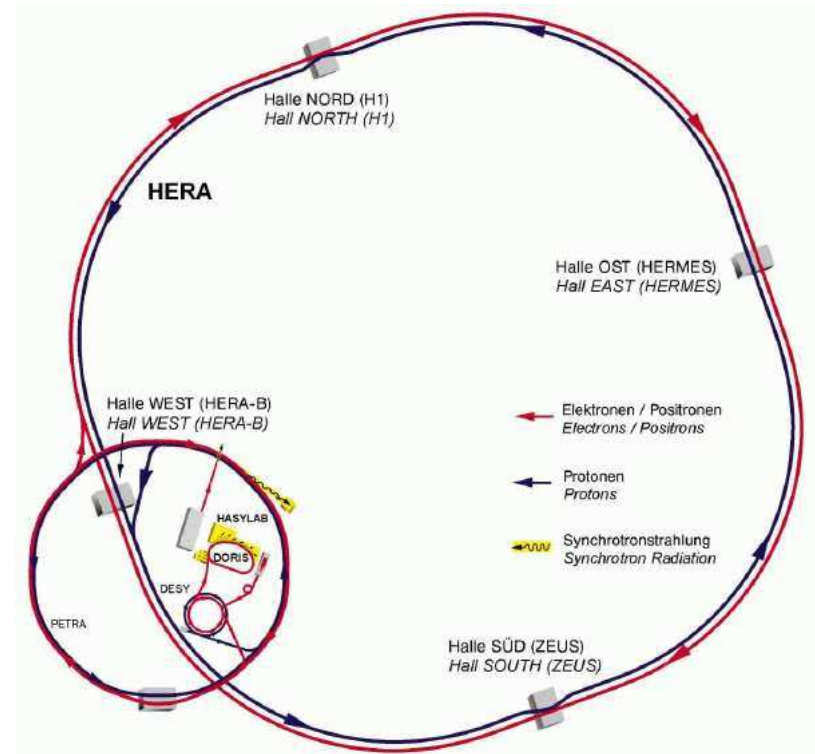
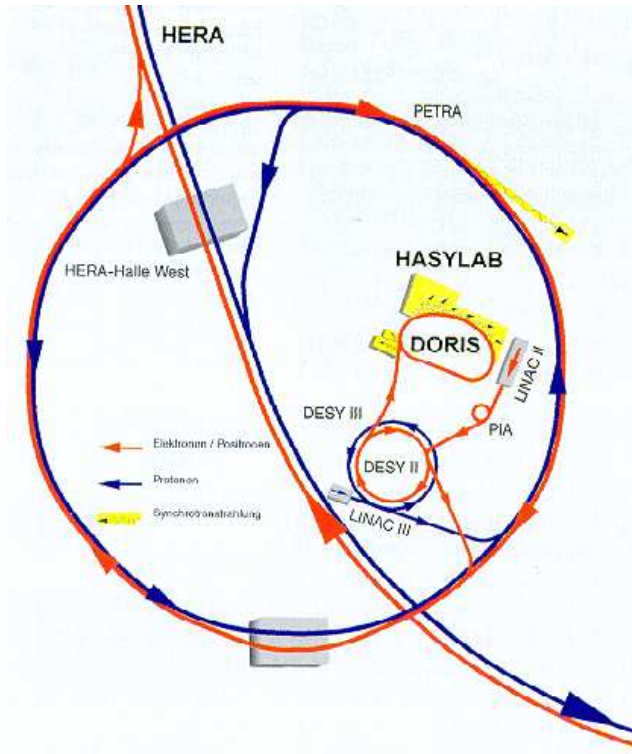
rok “roboczy”: $1y \approx 10^7 s \Rightarrow \sim 300 \text{ fb}^{-1} y^{-1}$

Akceleratory

Zespoły akceleratorów

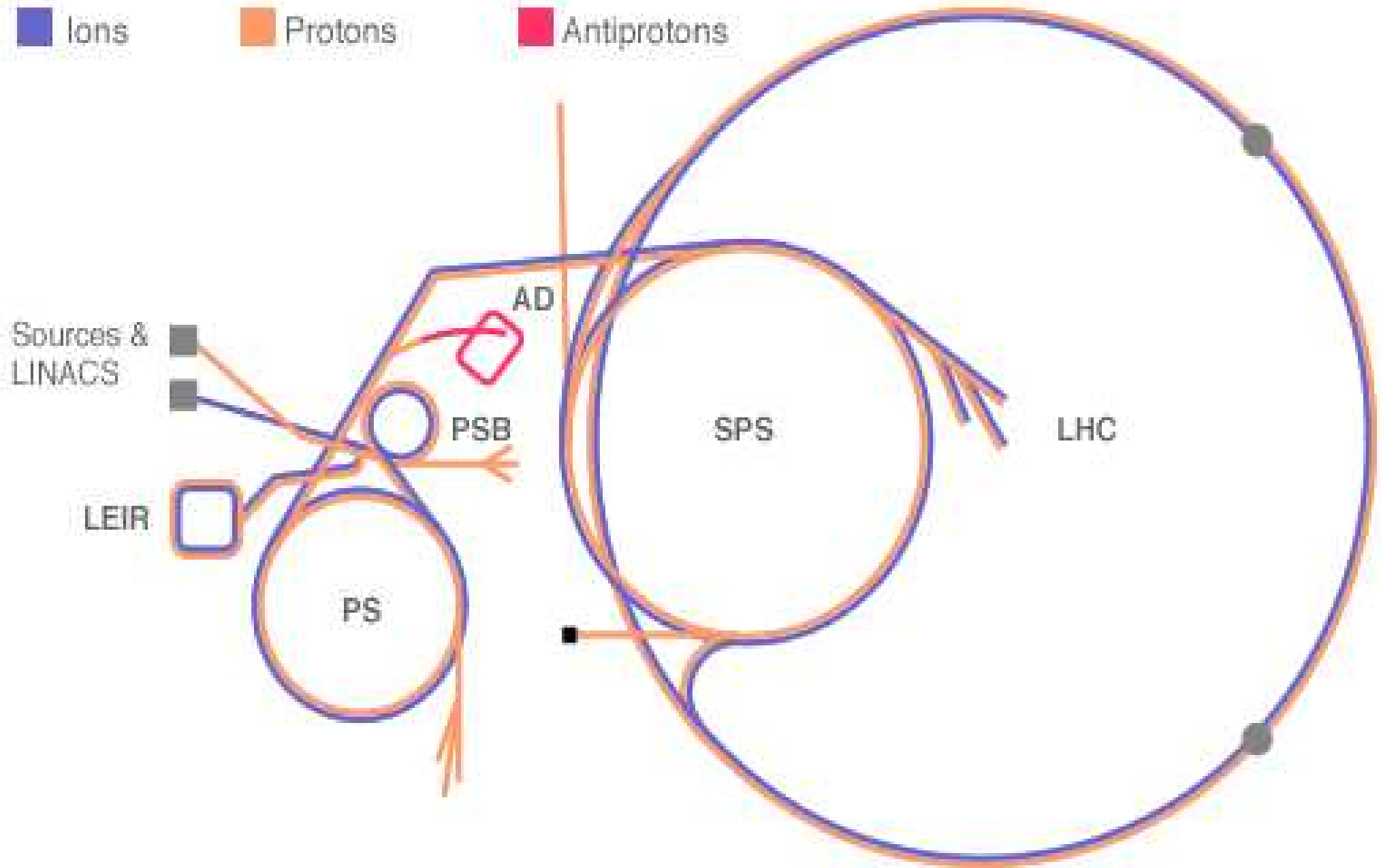
W praktyce nie można zbudować akceleratora kołowego przyspieszającego cząstki od “zera” do najwyższych energii. Cząstki muszą być przyspieszane etapami.

Zespół akceleratorów w ośrodku DESY:



Zespół akceleratorów w CERN

■ Ions ■ Protons ■ Antiprotons



LHC, CERN, Genewa





A.F. Żarnecki

Elementy Fizyki Cząstek Elementarnych

Wykład dla studentów III roku Wydziału Fizyki
semestr letni roku akademickiego 2005/2006.

Poniedziałki, 12:30-14:00, sala SSD

Świat cząstek elementarnych

wykład 20.02.2006 : [PS](#), [PS2](#) (po 2 strony), [PDF](#)

Źródła cząstek

wykład 27.02.2006 : [PS](#), [PS2](#), [PDF](#)

Zobacz też:

[Materiały z wykładu prowadzonego w roku akademickim 2004/2005](#)

[Materiały z wykładu prowadzonego w roku akademickim 2003/2004](#)

Wszystkie materiały przeznaczone są wyłącznie dla studentów Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego