Źródła cząstek

Elementy fizyki cząstek elementarnych

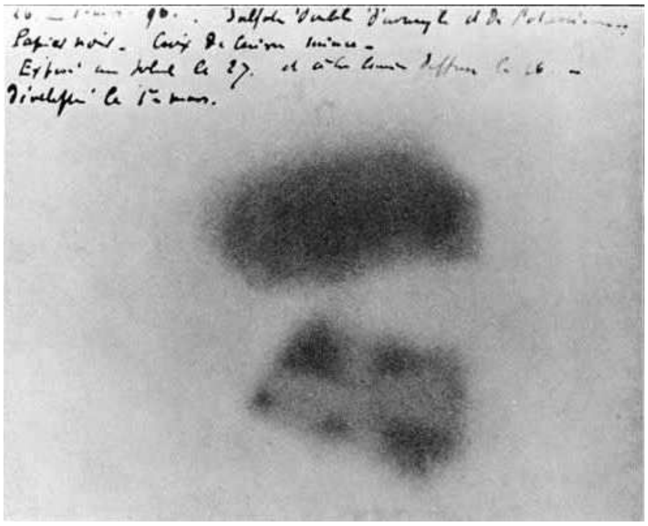
Wykład II

- 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.

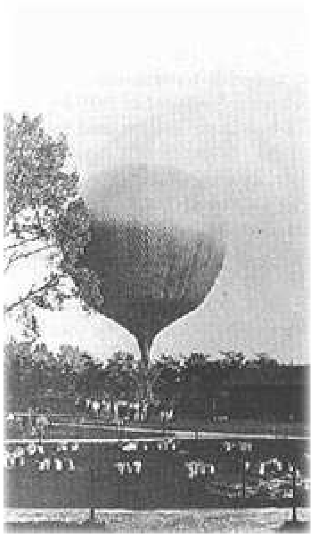
Dopiero w 1912 roku Victor Hess pokazał, że obserwowane cząstki pochodzą z kosmosu.

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:

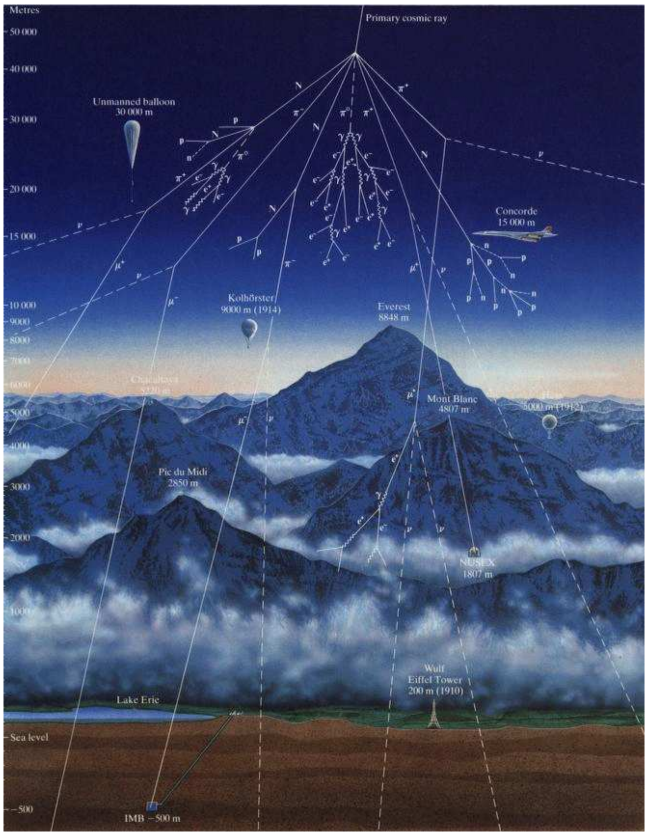
$$p + N \rightarrow X + \mathrm{n}\,\pi + \mathrm{m}\,K + \ldots$$

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

Docierają do powierzchni Ziemi

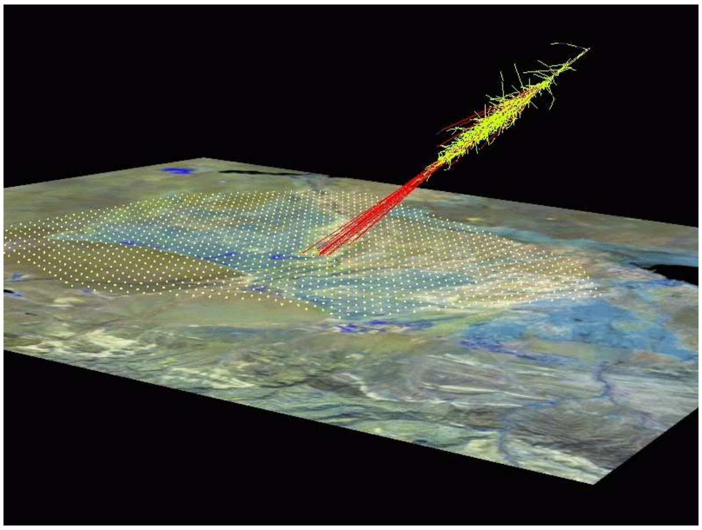
- miony $\mu^\pm$ ~70%
- elektrony $e^\pm$ ~25%
- protony, piony $\pi^\pm$ ~3%

Łącznie około 180 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 km^2

Pierre Auger Observatory

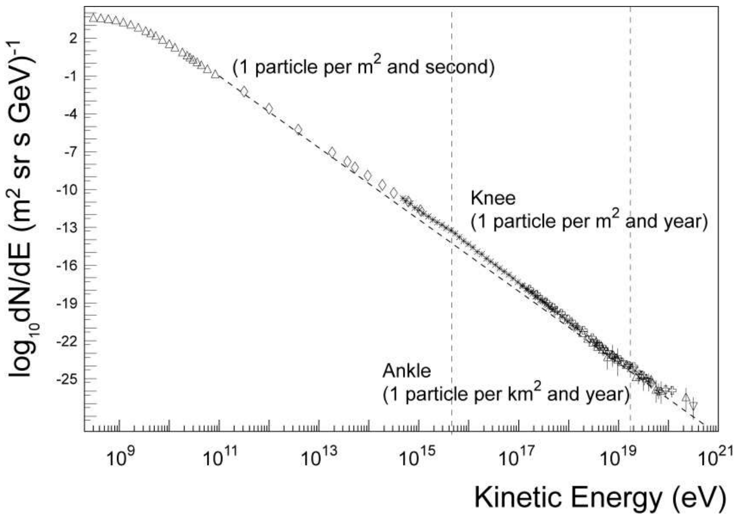
Promieniowanie kosmiczne

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)

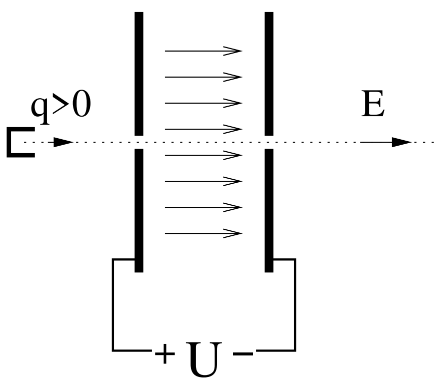
Akceleratory

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

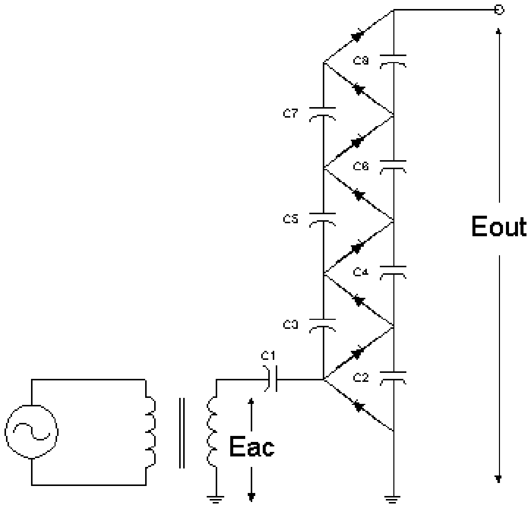
Uzyskiwana energia:

$$E = E_\circ + U \cdot q$$

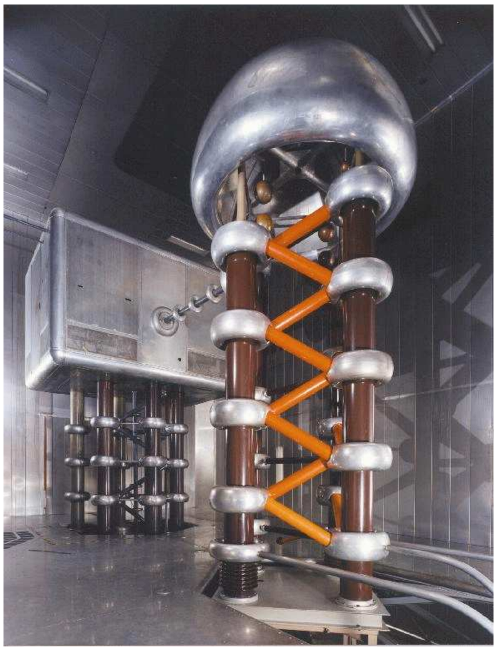
Akceleratory

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



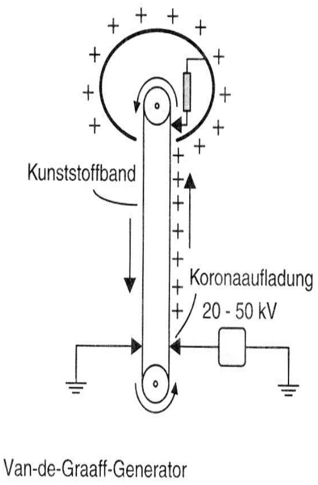
Współczesne urządzenie



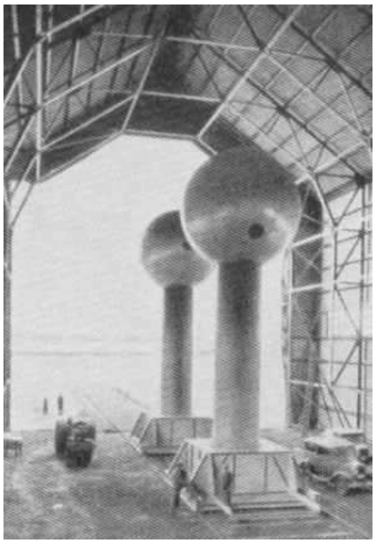
Akceleratory

Generator Van de Graaffa

Schemat



Historia



Współczesne urządzenie

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

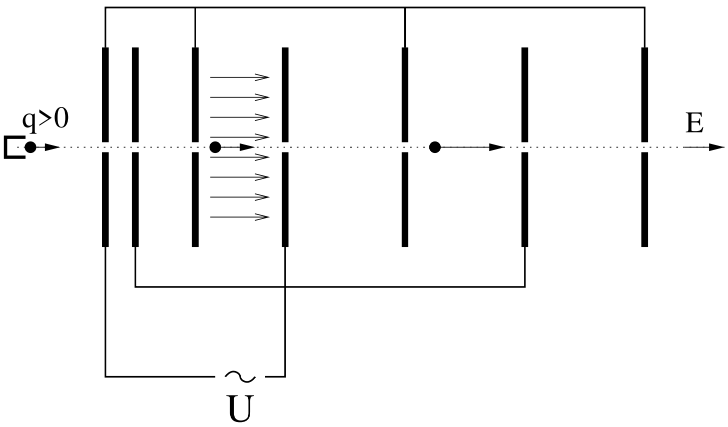
$\Rightarrow E \sim 30\ MeV$ $\Rightarrow$ **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Akceleratory

Akcelerator liniowy

Idea: Gustav Ising 1924. Pierwsze urządzenia: Rolf Wideroe 1927, Lawrence 1931.

Cząstka przechodzi przez kolejne "kondensatory"



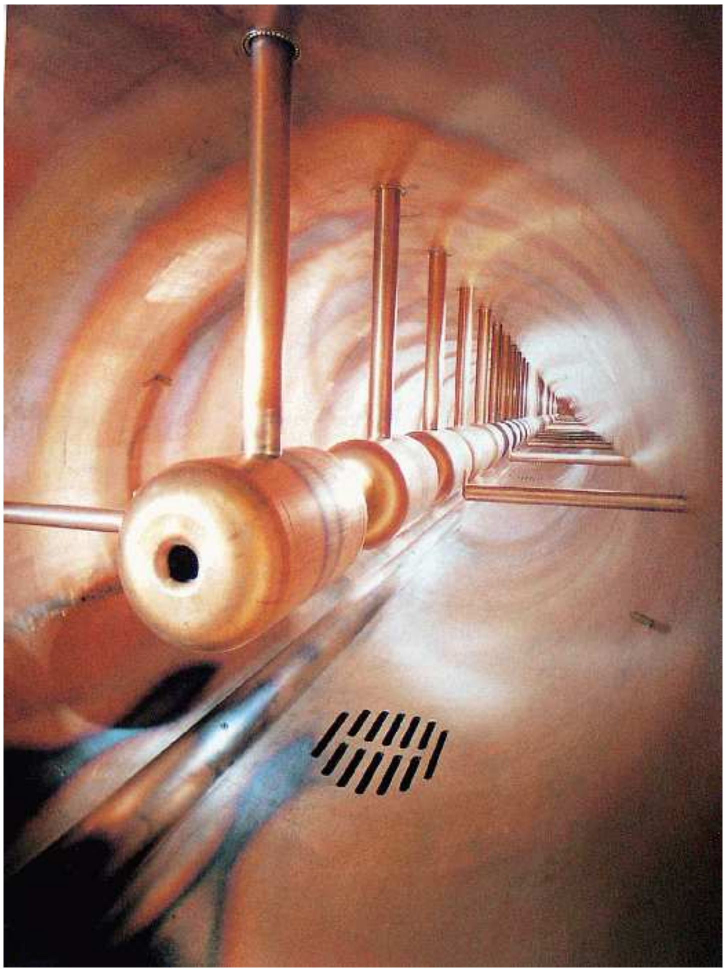
Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwielokrotnienie uzyskiwanych energii

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

Dla $E \gg m$, prędkość $\beta \to 1$: L=const.

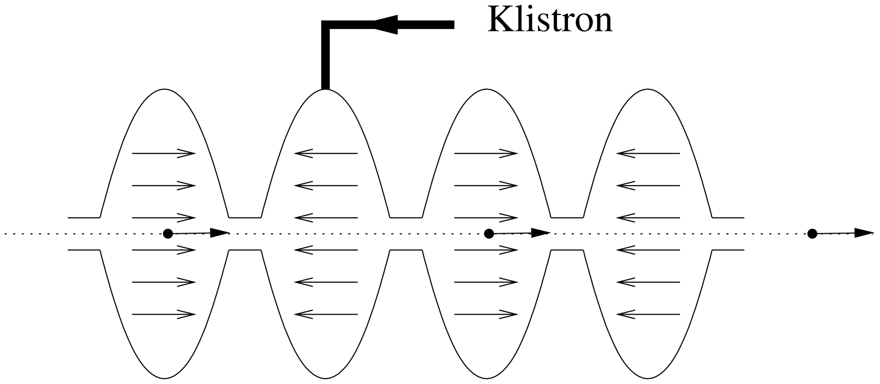
Liniowy akcelerator protonów w ośrodku Fermilab (USA)



Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofale.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m

$\Rightarrow$ dla uzyskania energii 1 GeV potrzebny jest akcelerator liniowy o długości $\sim$ 100 m

Akceleratory

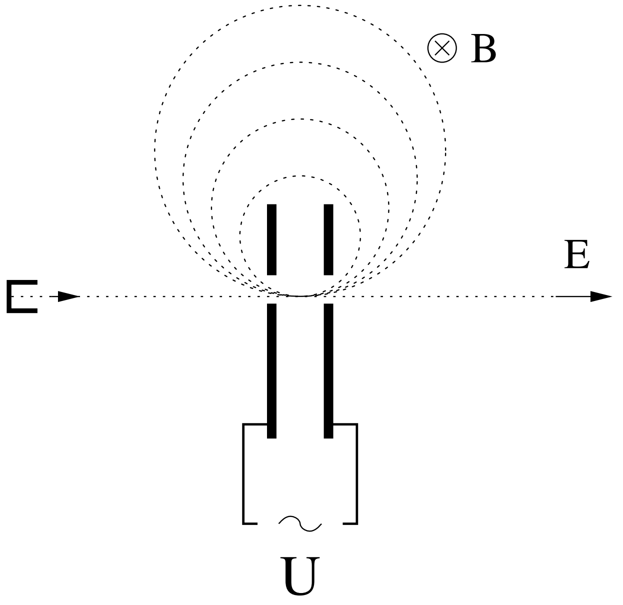
Akcelerator kołowy

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:

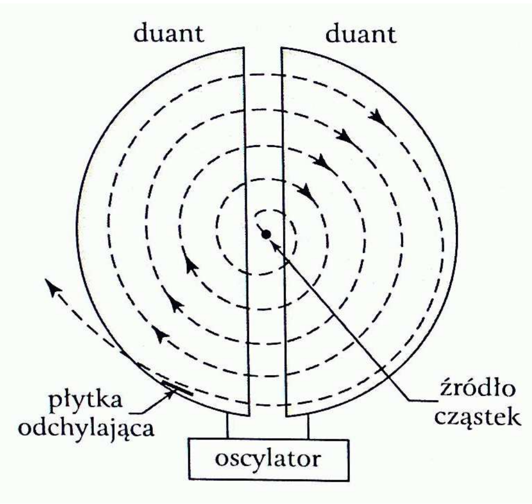


Akceleratory

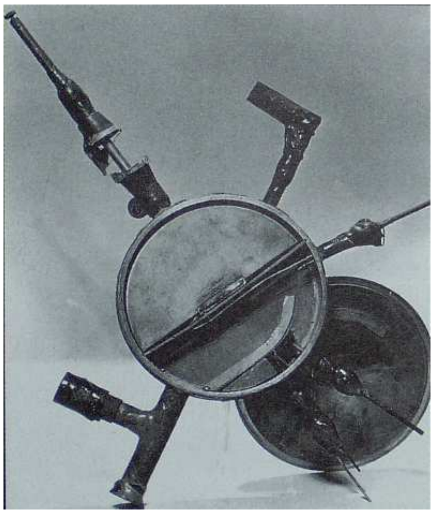
Cyklotron

Ernest Lawrence

Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratory

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie

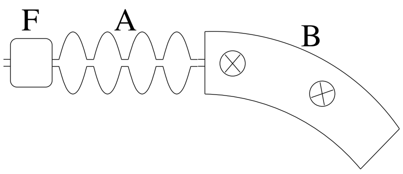
Akceleratory

Akcelerator kołowy

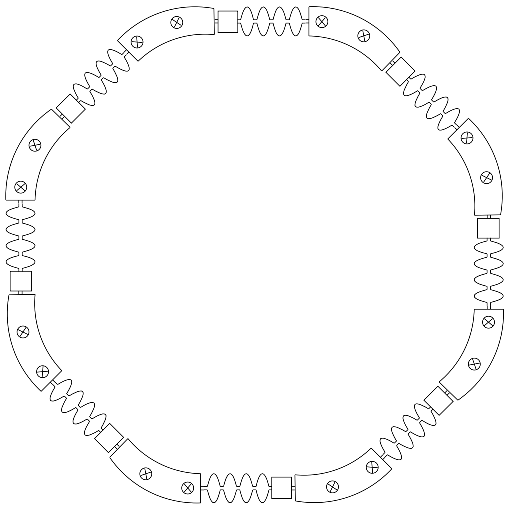
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

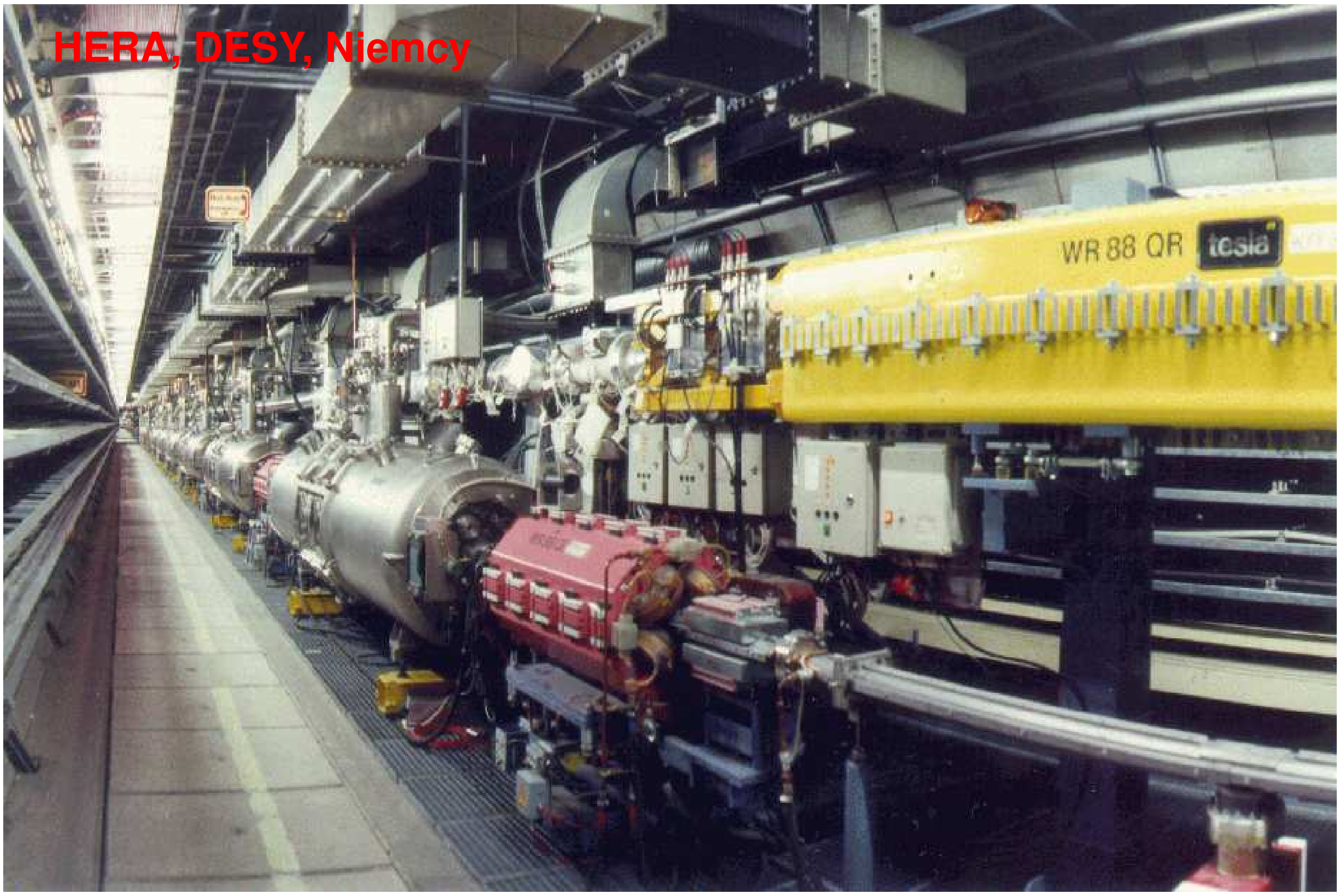
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:

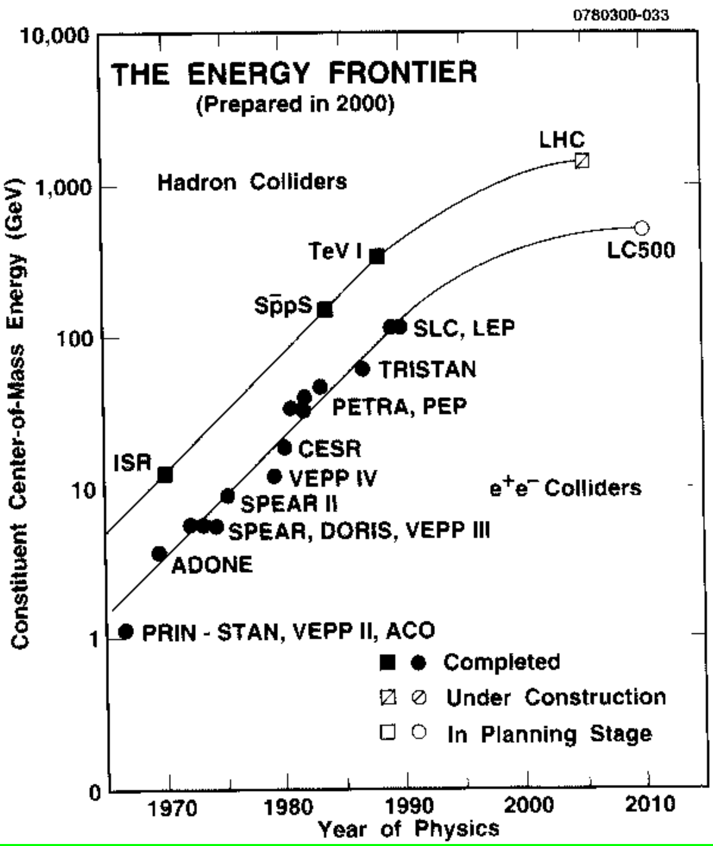


HERA, DESY, Niemcy



Akceleratory

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



Akceleratory

Największe akceleratory

Już zbudowane

SPS	$p\bar{p}$	1981-1990	do 315 GeV	
LEP	e^+e^-	1989-2000	$\leq$ 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

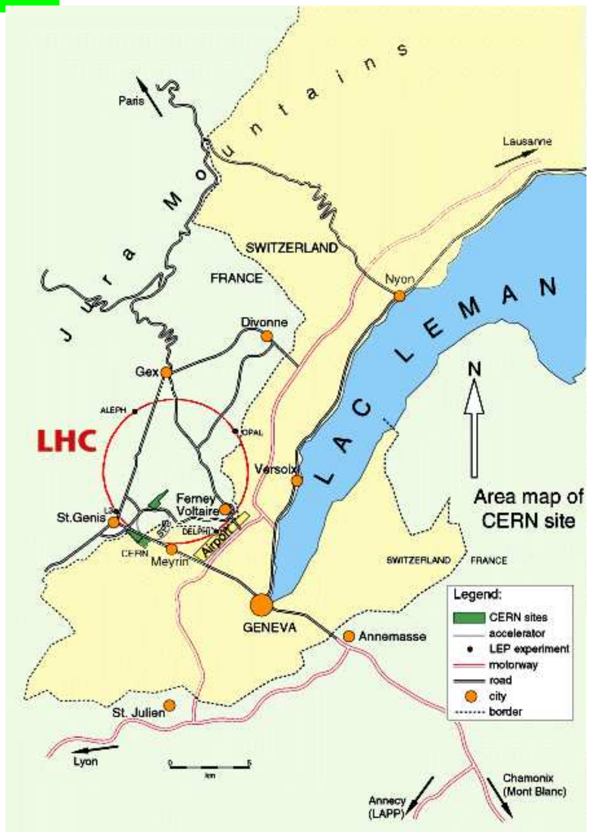
Badania fizyki cząstek koncentrują się dużych ośrodkach:

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

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.



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 rosnąć wraz ze wzrostem energii wiązki, aby utrzymywać 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 energie 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 $\mathcal{E}$

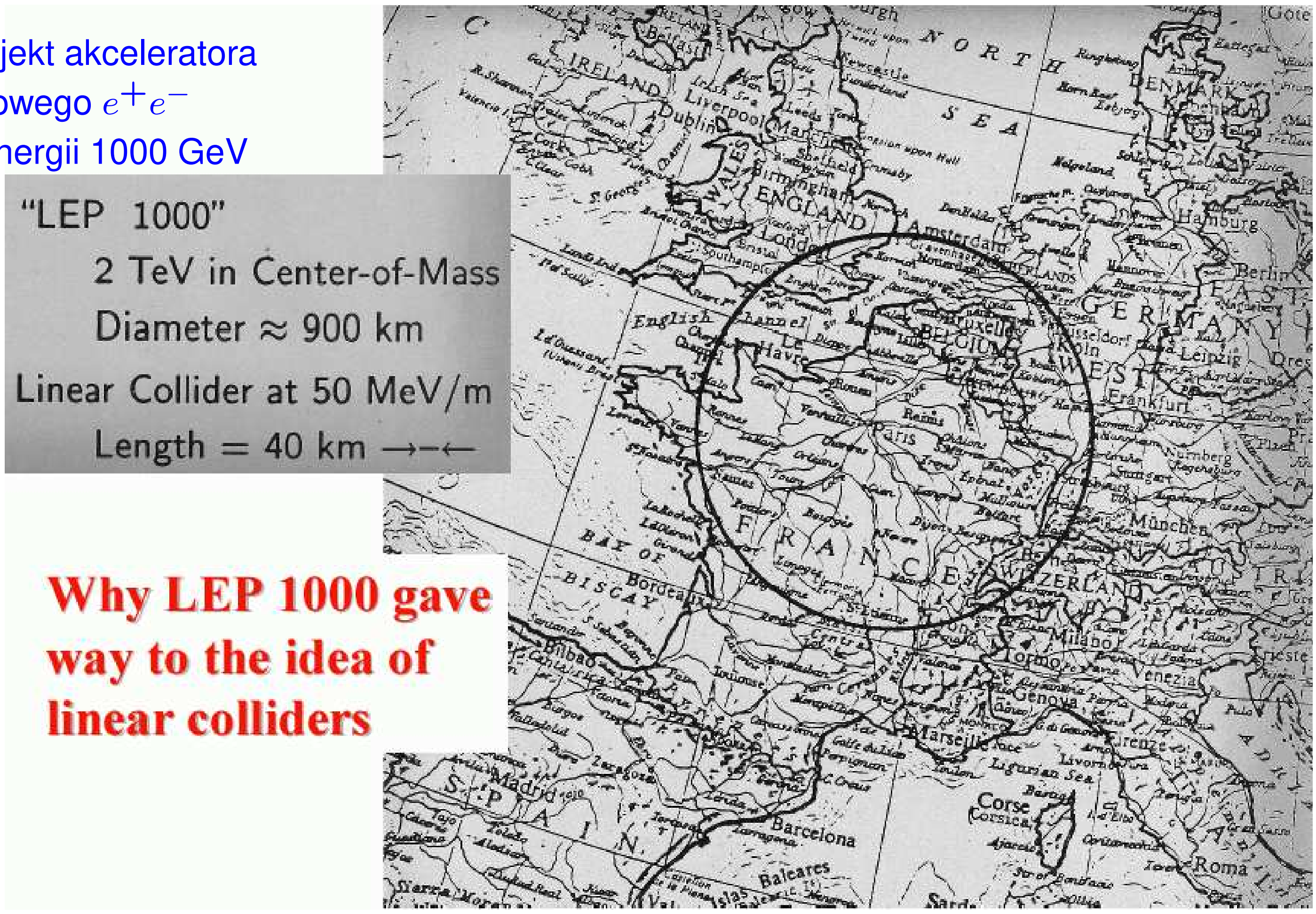
$$\Delta^{+}E \sim 2\pi R \langle \mathcal{E} \rangle$$

$\Rightarrow$ 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



Akceleratory

Świetlność

Energia nie jest jedynym istotnym parametrem akceleratora.

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

Świetlność 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)

$\Rightarrow$ potrzebujemy coraz większych świetlności

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

$\Rightarrow$ trudno uzyskać jednocześnie duże f i duże n

$\Rightarrow$ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

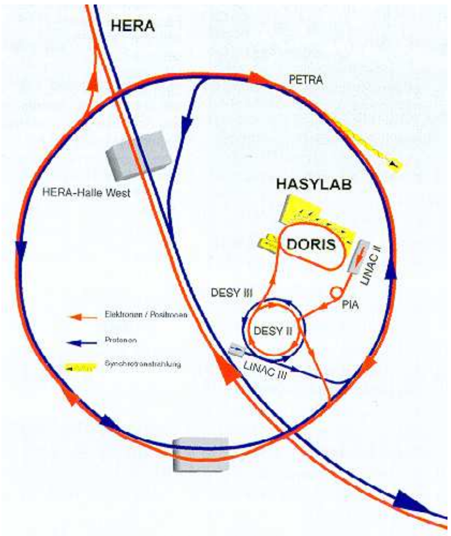
LEP:	$\sigma_x \approx 300\ \mu m$	
	$\sigma_y \approx 8\ \mu m$	$\mathcal{L} \sim 6 \cdot 10^{31}\ \frac{1}{cm^2 s}$
Proj. ILC:	$\sigma_x \approx 0.5\ \mu m$	
	$\sigma_y \approx 5\ nm$ (!)	$\mathcal{L} \sim 3 \cdot 10^{34}\ \frac{1}{cm^2 s}$
rok "roboczy":	$1y \approx 10^7 s$	$\Rightarrow \sim 300\ fb^{-1} y^{-1}$

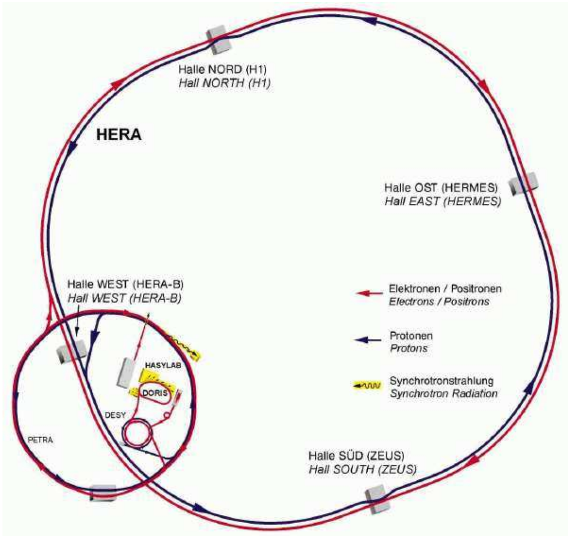
Akceleratory

Zespoły akceleratorów

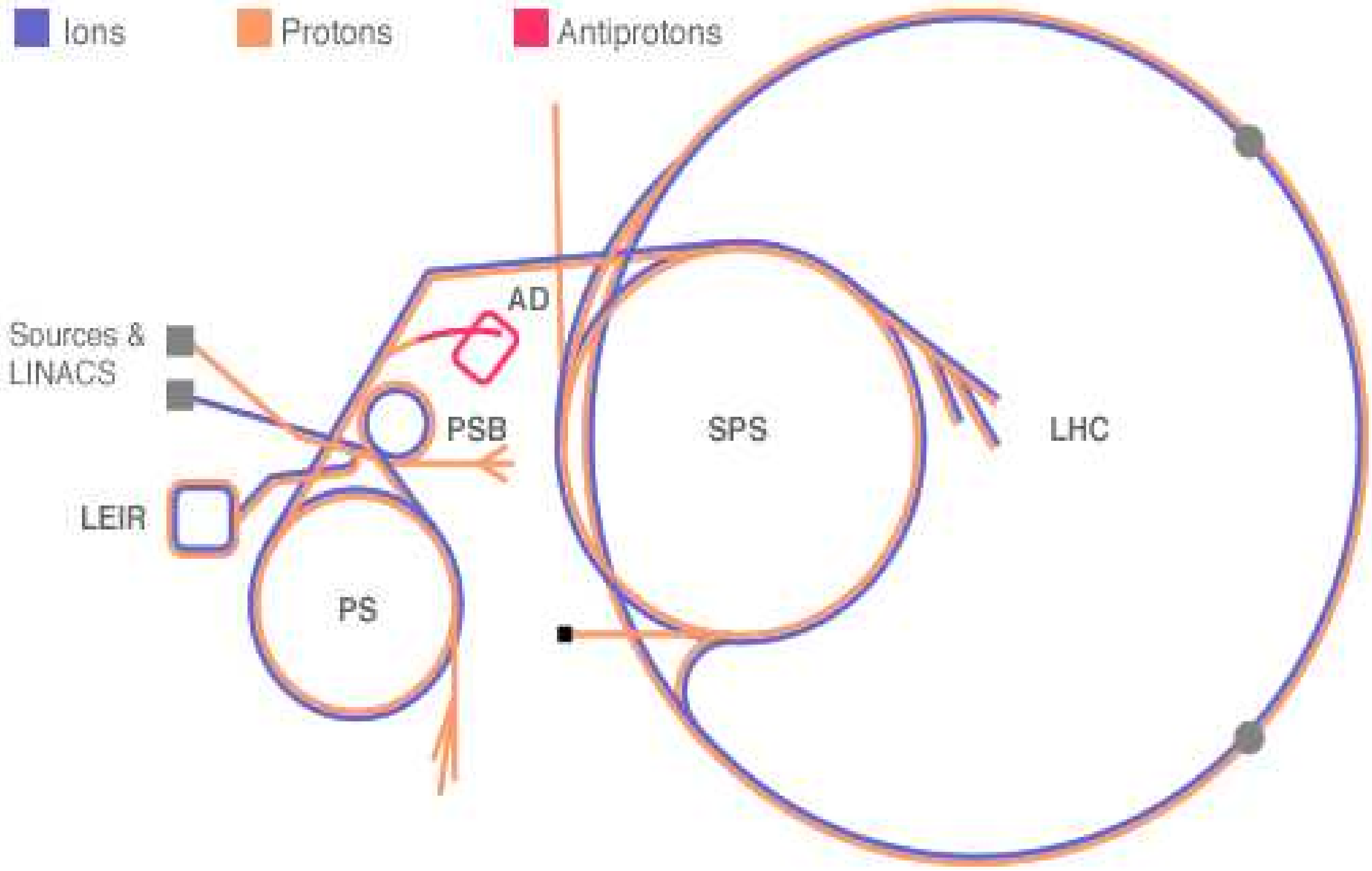
W praktyce nie można zbudować akceleratora kołowego przyspieszającego cząstki od “zera” do najwyższych energii. Cząstki muszą być przyspieszane etapami.

Zespół akceleratorów w ośrodku DESY:





Zespół akceleratorów w CERN



LHC, CERN, Genewa

http://www.fuw.edu.pl/∼zarnecki/elementy/elementy06.html

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