

Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 5

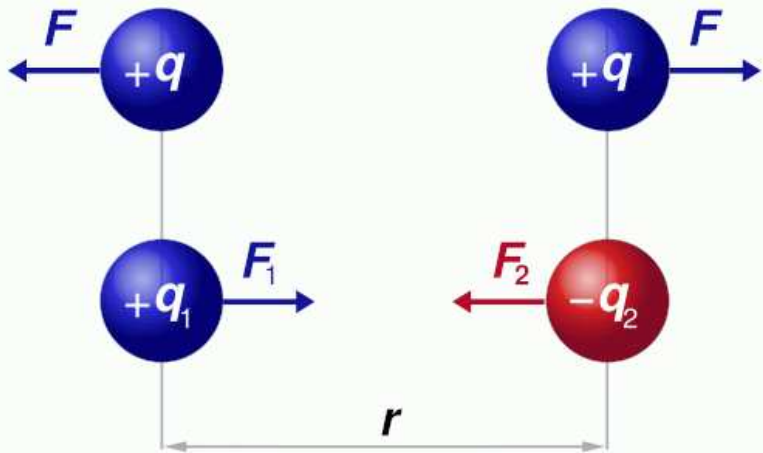
- Wprowadzenie
 - Pole elektryczne i magnetyczne, jednostki
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

Wprowadzenie

Pole elektryczne

Prawo Coulomba

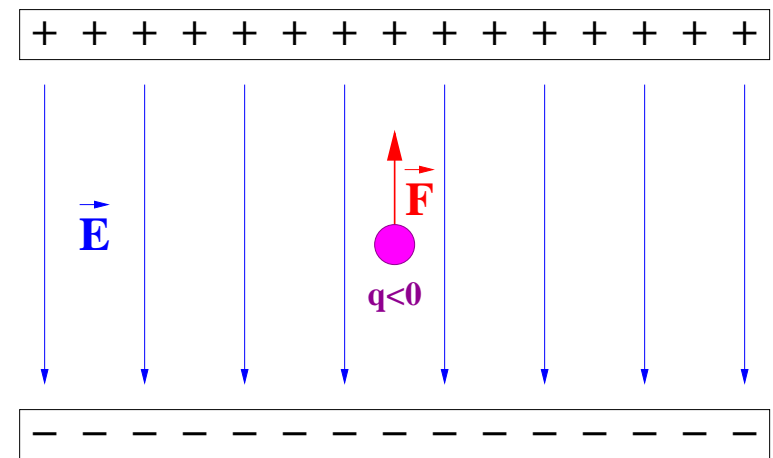
siła oddziaływania między ładunkami:



$$F_1 = F_2 = k_c \frac{q_1 \times q_2}{r^2}$$

gdzie: $k_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$

Gdy opisujemy ruch cząstki pod wpływem siły Coulomba wygodnie jest wprowadzić pojęcie "pola elektrycznego" \vec{E} :



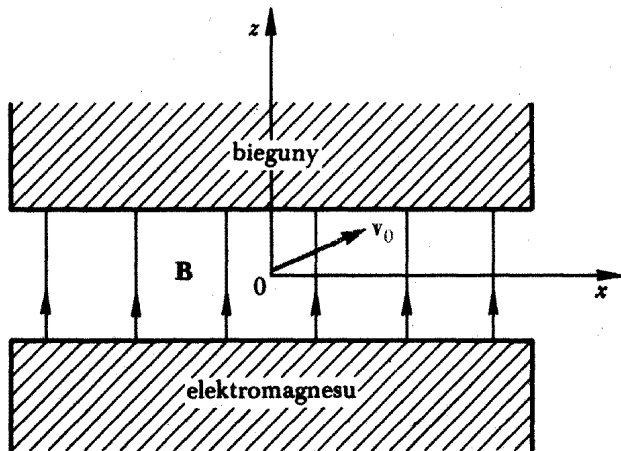
Siła działająca na ładunek q :

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

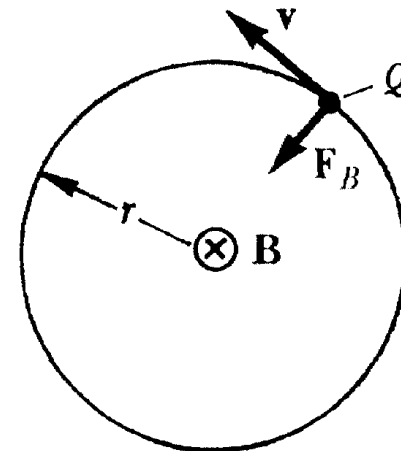
Wprowadzenie

Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się w płaszczyźnie prostopadłej do pola:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Siłą działa prostopadle do kierunku ruchu - nie zmienia prędkości (pędu, energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

Jednostki

Energia

Naturalna jednostka w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt**

1 eV - energia jaka zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$\Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$\begin{aligned} \text{kilo} - & 1 \text{ keV} = 10^3 eV \\ \text{mega} - & 1 \text{ MeV} = 10^6 eV \\ \text{giga} - & 1 \text{ GeV} = 10^9 eV \\ \text{tera} - & 1 \text{ TeV} = 10^{12} eV \end{aligned}$$

Jednostki

Masa

Masa jest równoważna energii spoczynkowej cząstki:

$$E = mc^2$$

Gdzie prędkość światła:

$$c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{dokładnie !!!})$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Ale w fizyce cząstek powszechnie przyjmujemy $c \equiv 1$.

Jednostkę energii możemy wtedy przyjąć też za jednostkę masy ($E = mc^2$; $c \equiv 1$)

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

Przykładowe masy:

elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Jednostki

Sprzężenie

Stała sprzężenia oddziaływań elektromagnetycznych zwana też historycznie stałą struktury subtelnej

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

Może być rozumiana jako "moc" oddziaływania elektrostatycznego dwóch ładunków elementarnych wyrażona w jednostkach stałej Plancka:

$$\hbar \approx 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \hbar c \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Zwyczajowo przyjmujemy $c \equiv \hbar \equiv \epsilon_0 \equiv 1$

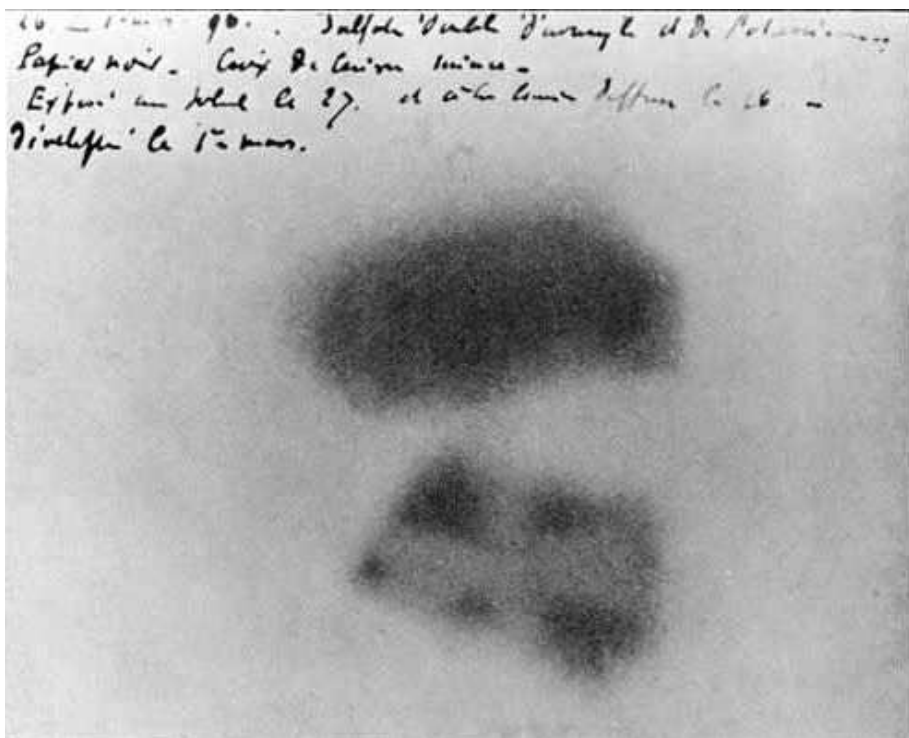
$$\Rightarrow \alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi}$$

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 $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

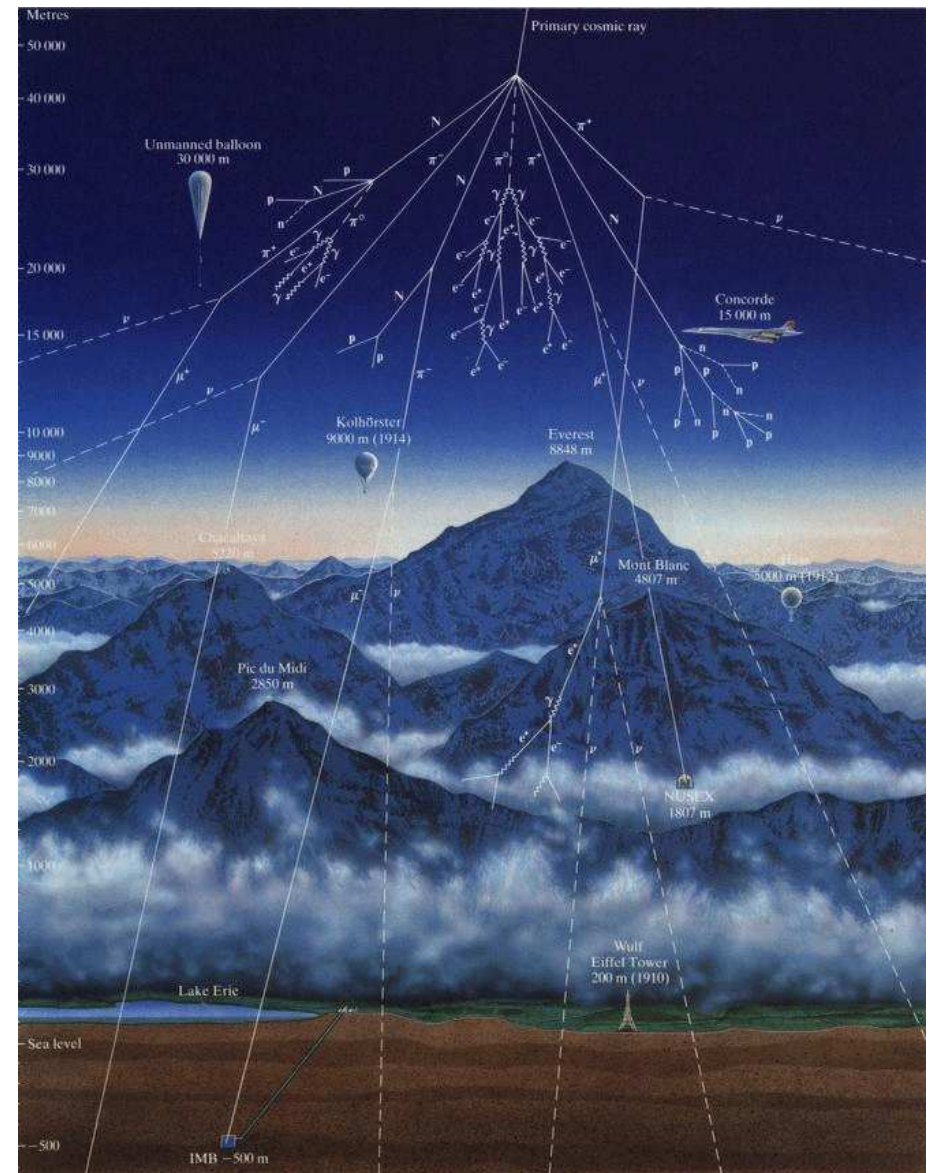
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

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

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

Nie licząc bardzo licznych neutronów...



Promieniowanie kosmiczne

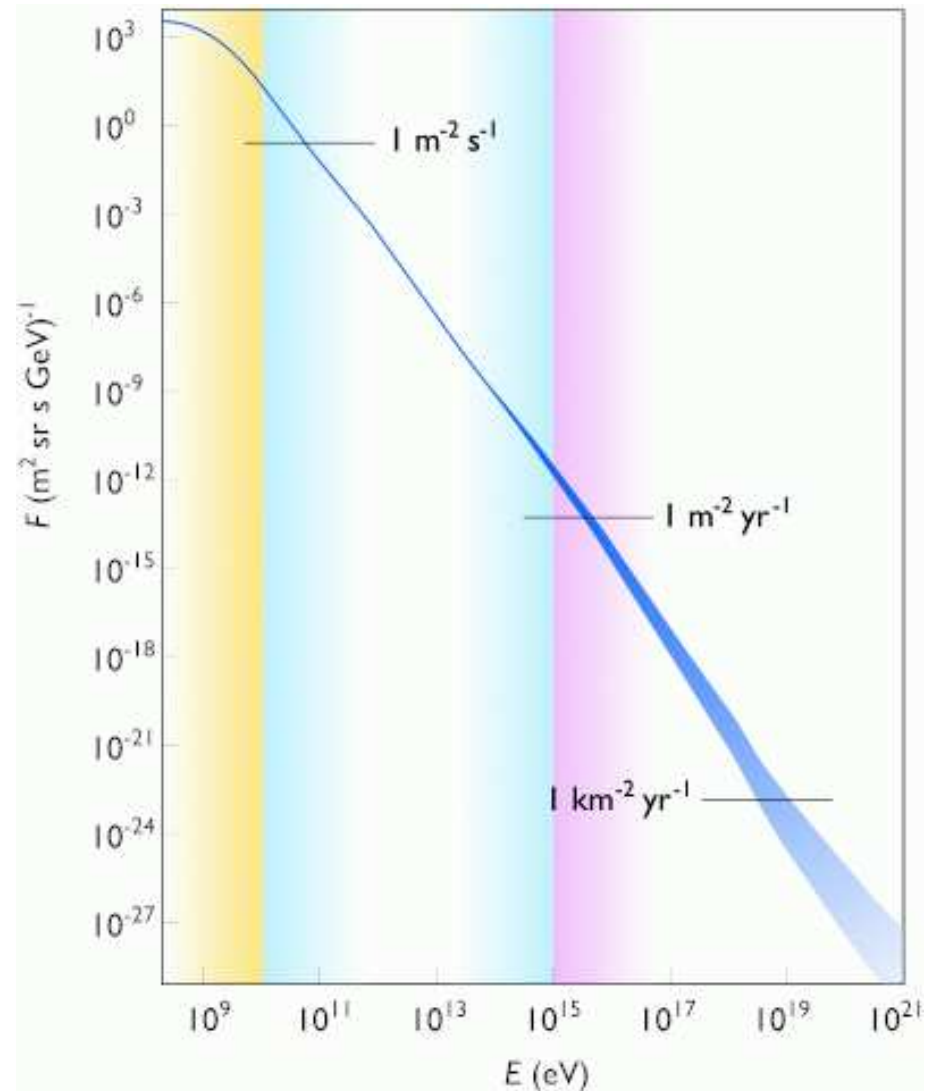
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Okazuje się, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do $5 \cdot 10^{19}$ eV ~ 10 J (!!!).

Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...

Wciąż nie rozumiemy skąd to promieniowanie pochodzi i jak może powstawać...



Akceleratory

Dlaczego je budujemy?

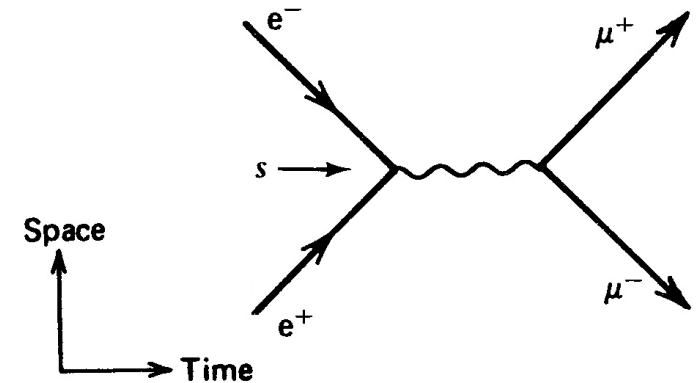
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

Wiemy też, że oddziaływania cząstek zależą od ich energii.

Przykład - **anihilacja** e^+e^- :



Aby wyprodukować nowe cząstki musimy spełnić zasadę zachowania energii - dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy.



Im wyższa masa cząstki, którą chcemy wyprodukować, tym większa musi być energia zderzających się cząstek.

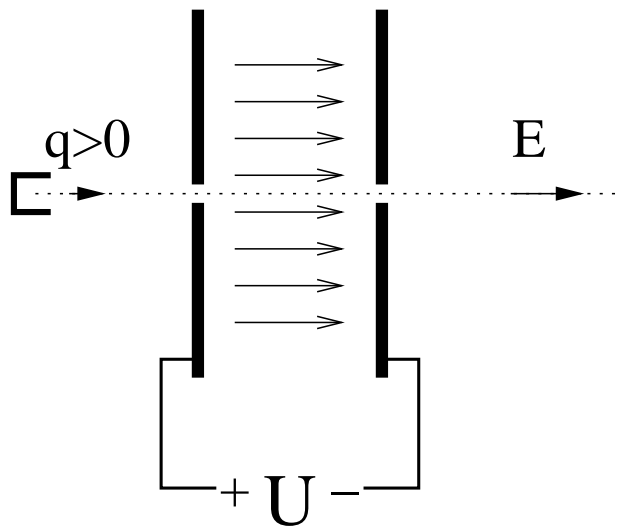
Akceleratory

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

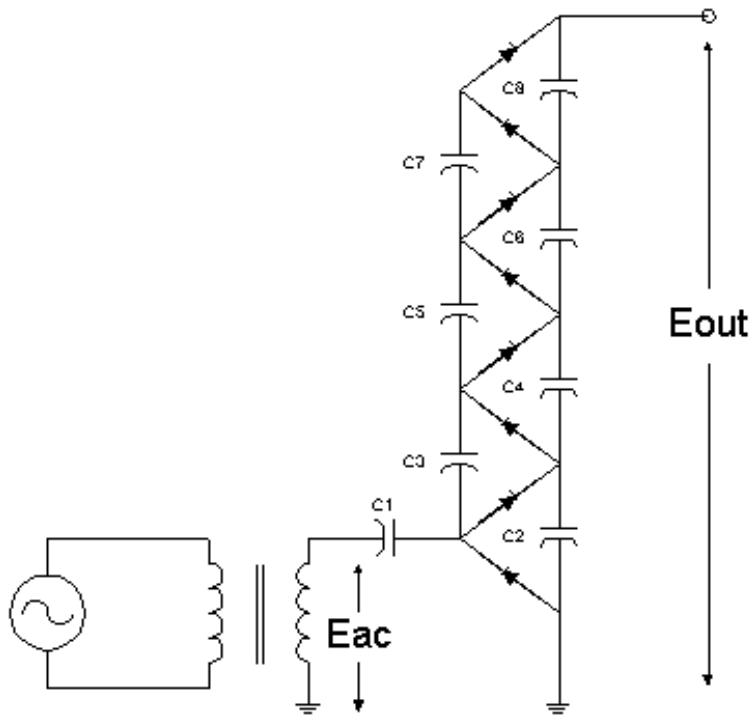
Uzyskiwana energia:

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

Akceleratory

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



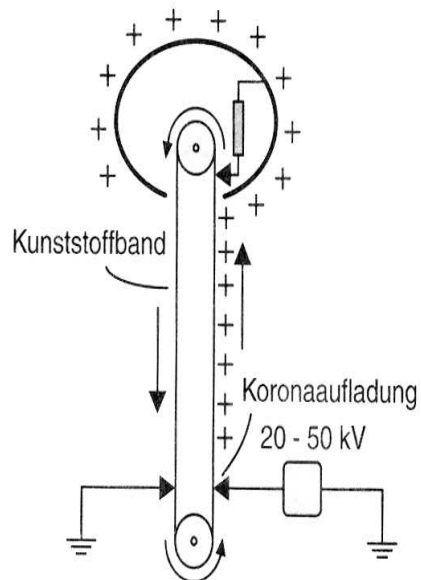
Współczesne urządzenie



Akceleratory

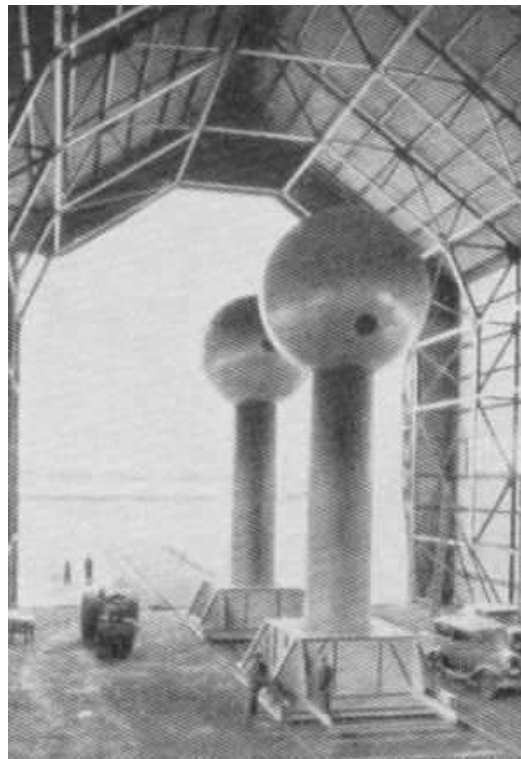
Generator Van de Graaffa

Schemat



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesne urządzenie



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

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

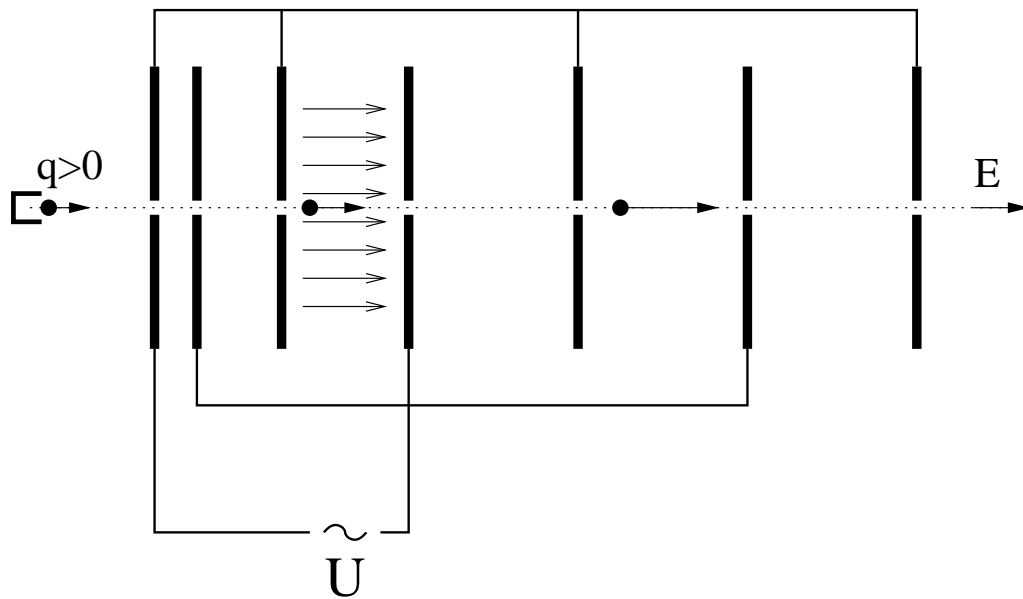
\Rightarrow **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Akceleratory

Akcelerator liniowy

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

Cząstka przechodzi przez kolejne “kondensatory”



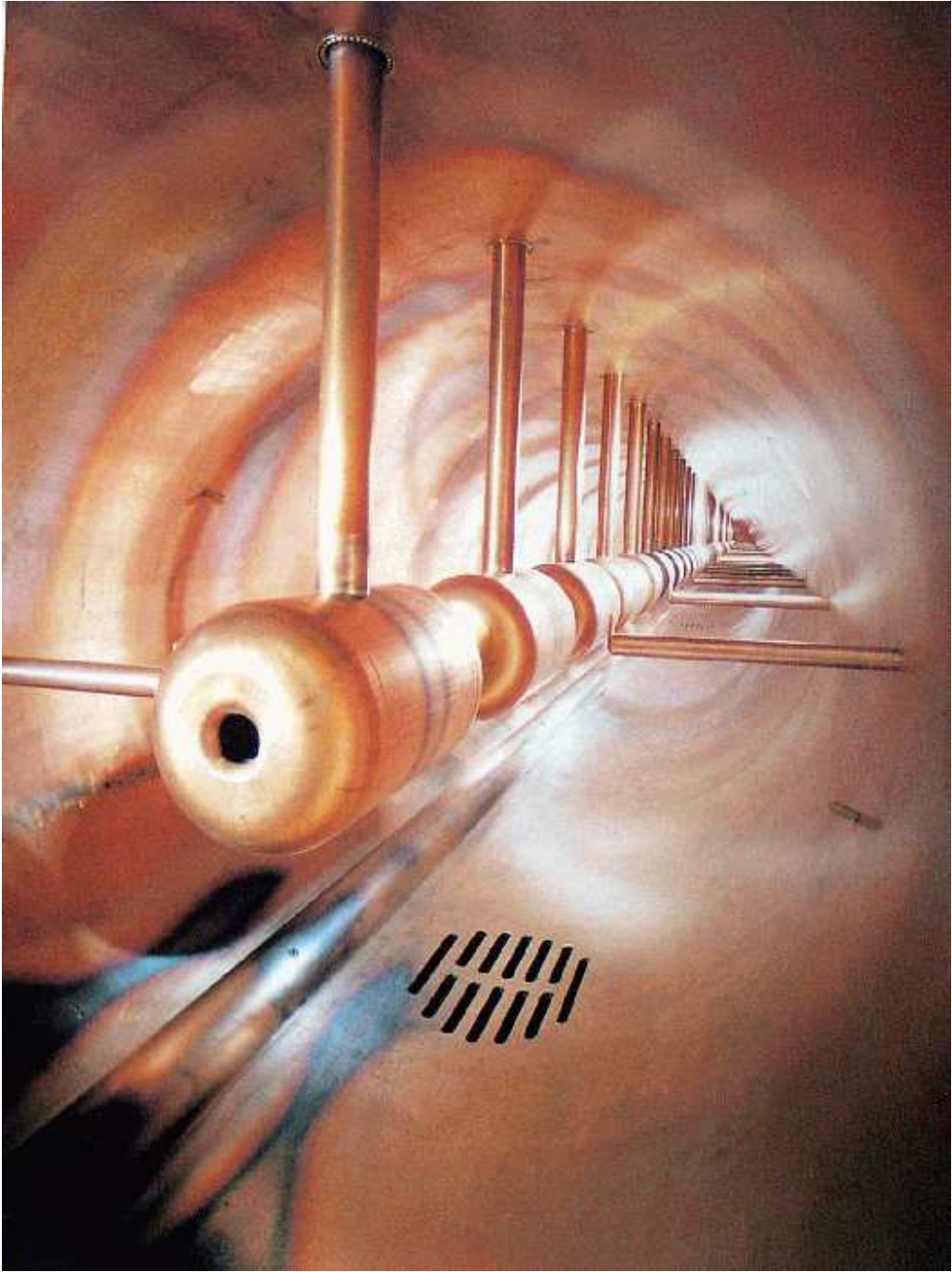
Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

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

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

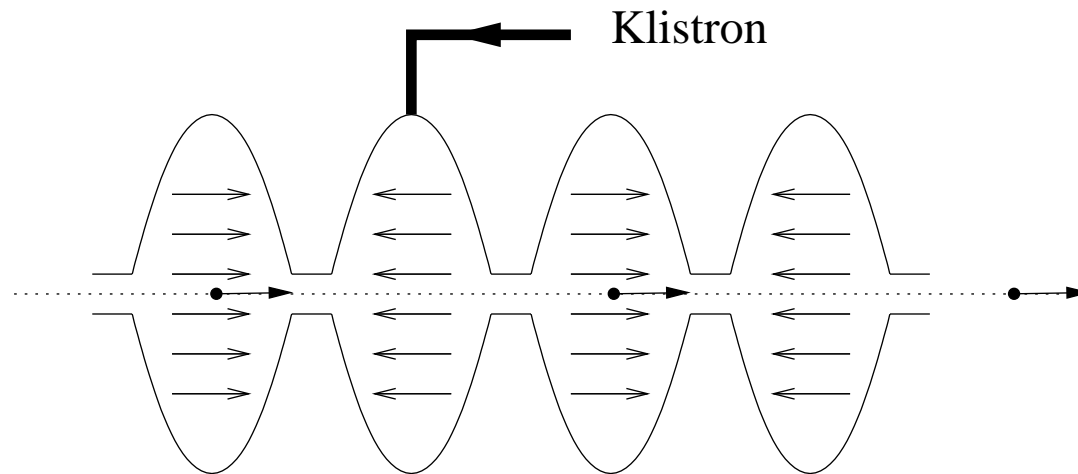
Liniowy akcelerator protonów
w ośrodku Fermilab (USA)



Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

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

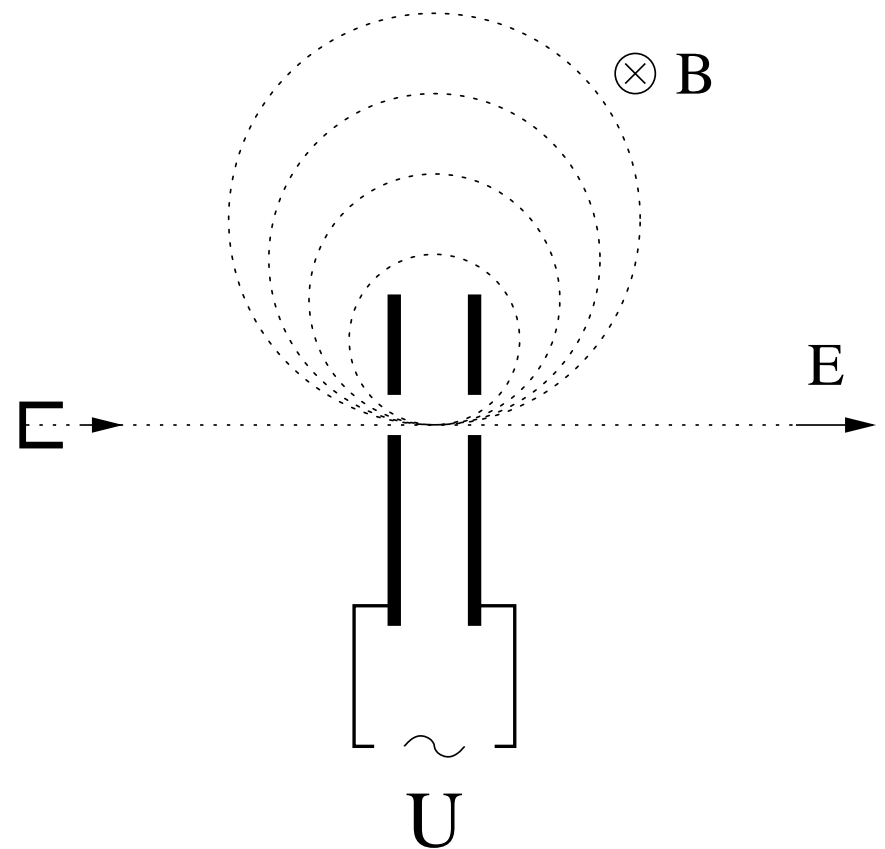
Akcelerator kołowy

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:



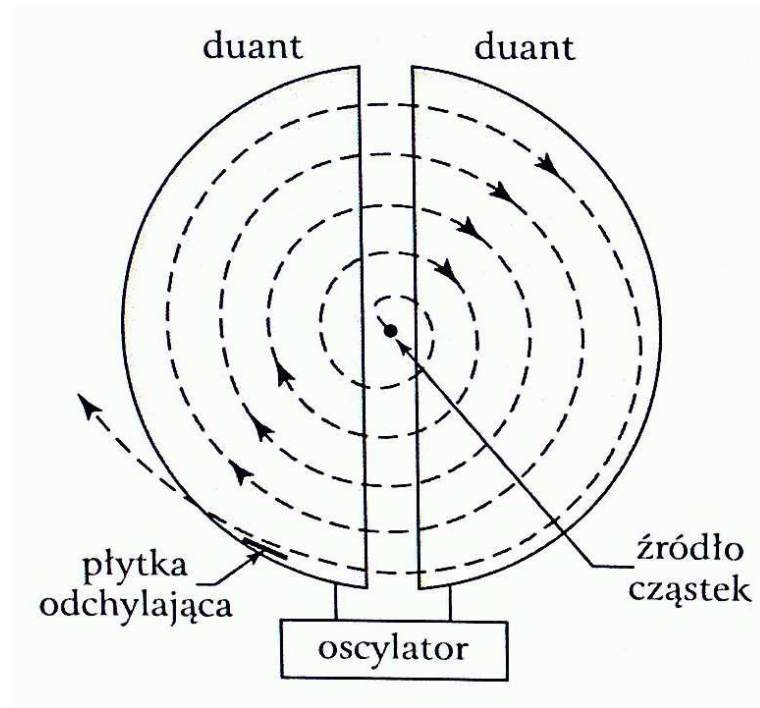
Akceleratory

Cyklotron

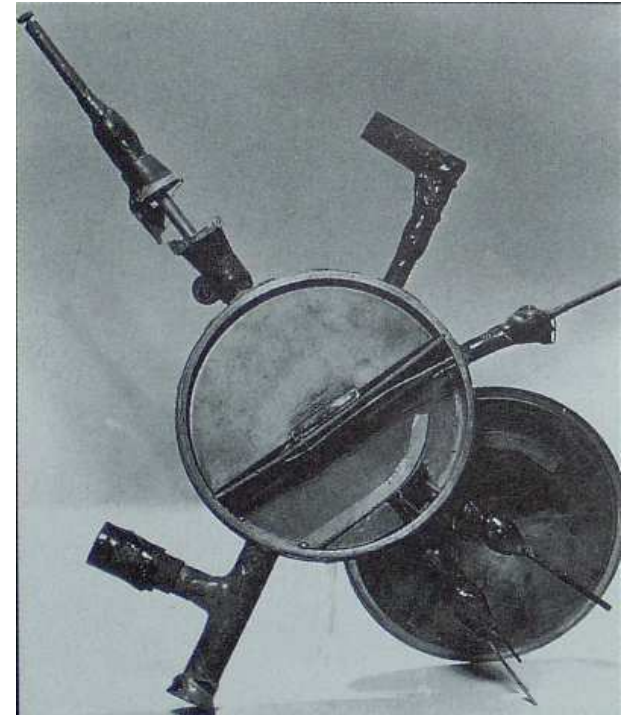
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratory

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie



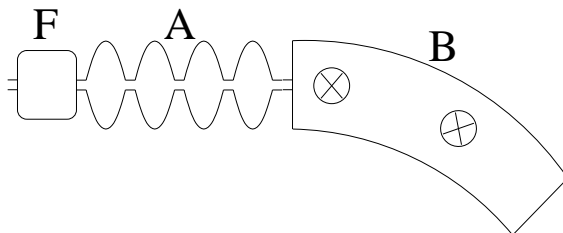
Akceleratory

Akcelerator kołowy

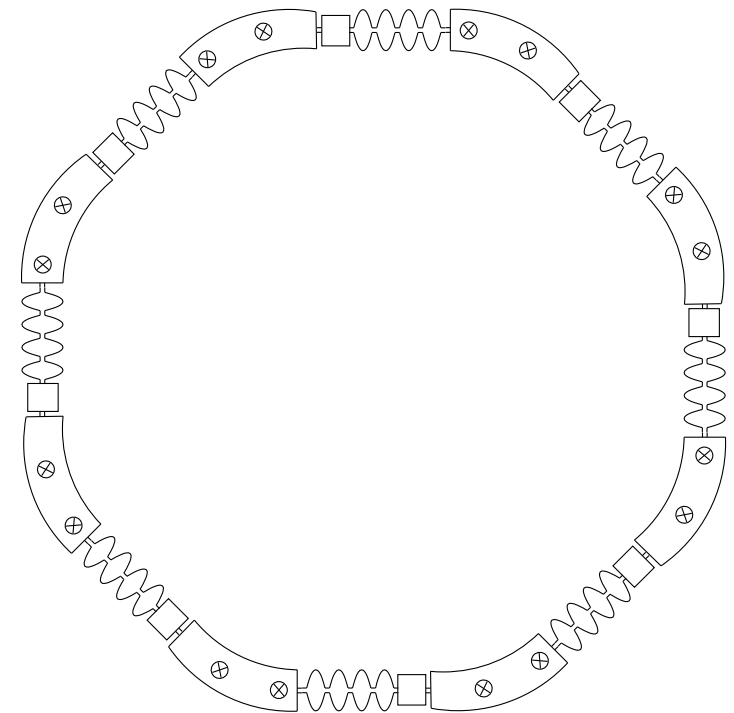
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

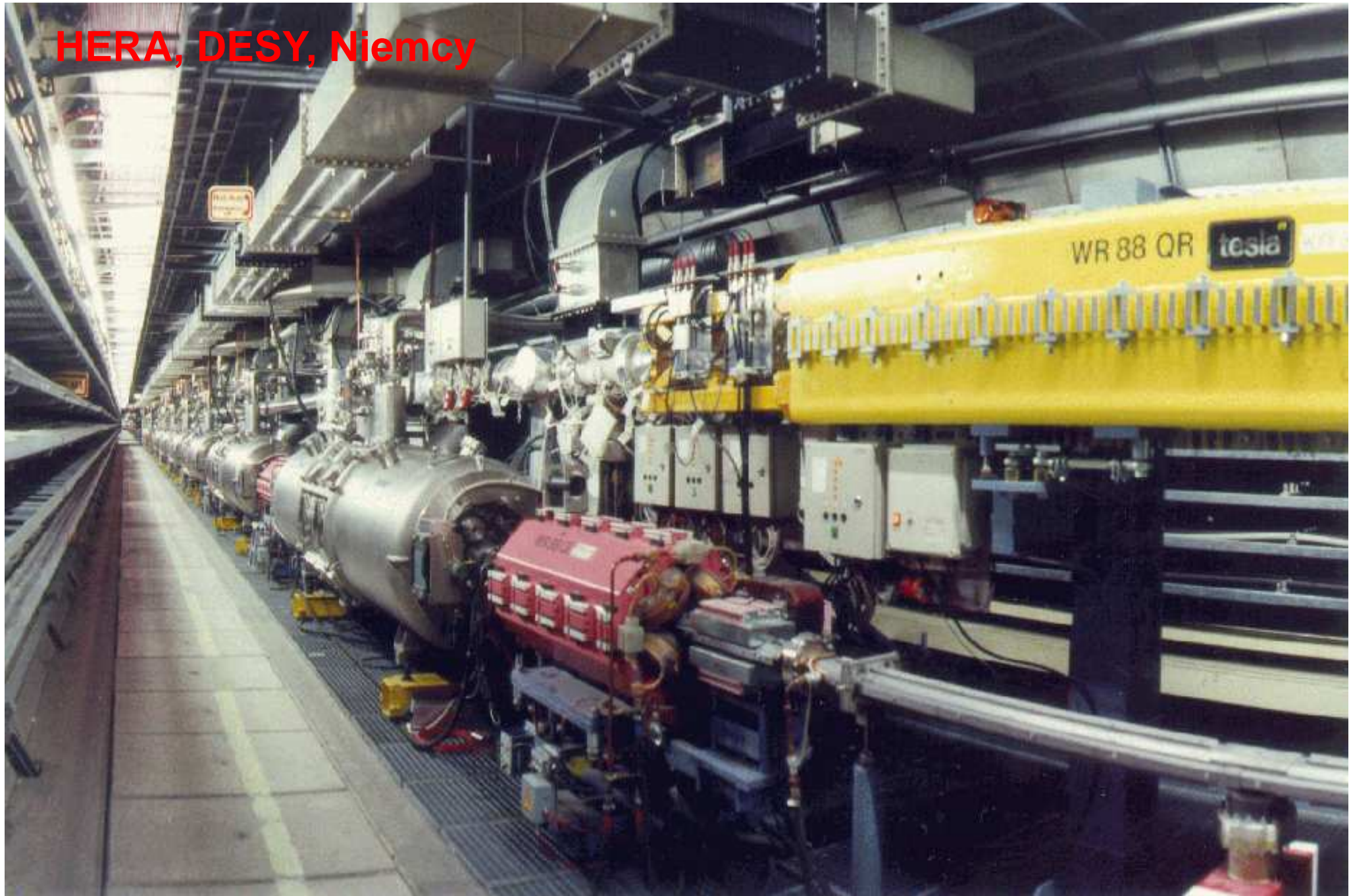
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



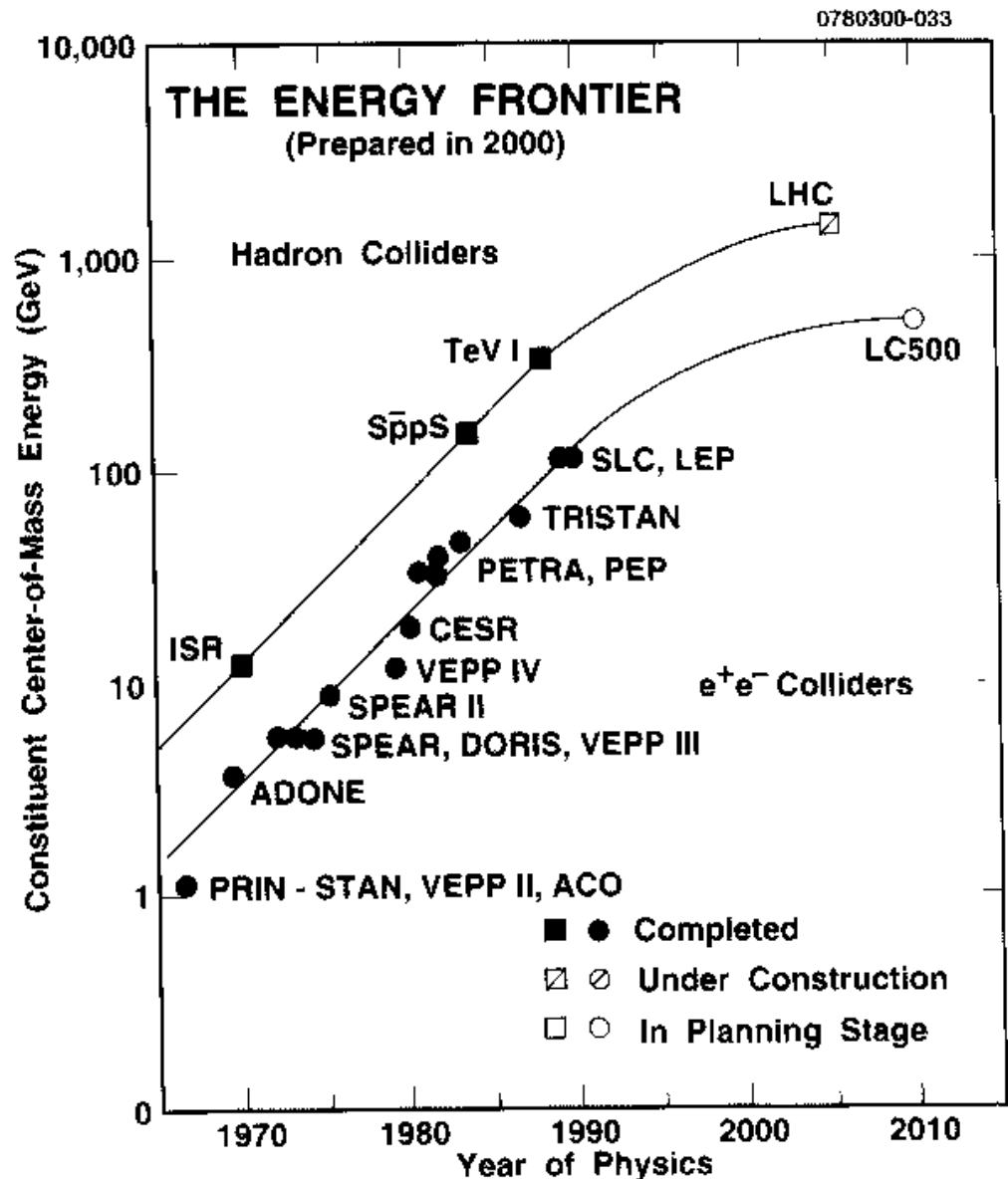
HERA, DESY, Niemcy



Akceleratory

Kolejne etapy w rozwoju fizyki cząstek są nierozdzielnie związane z budową nowych akceleratorów, o coraz wyższych energiach.

Niestety, mechanizm przyspieszania cząstek pozostał niezmienny - akceleratory muszą być coraz większe i coraz... kosztowniejsze.



Akceleratory

Największe akceleratory

Badania fizyki cząstek z wykorzystaniem akceleratorów koncentrują się w kilku dużych ośrodkach na całym świecie:

- **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.

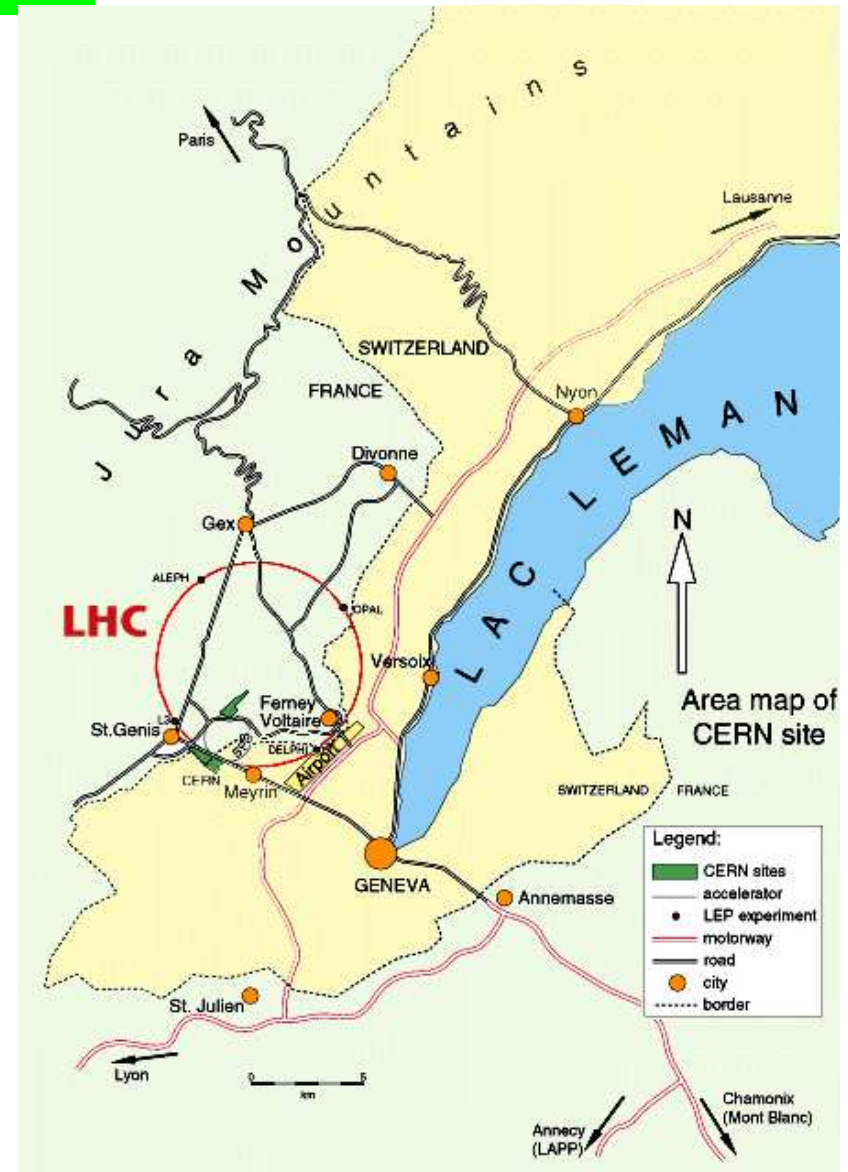
Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

W każdej 2800 "paczek" po 10^{11} protonów.

Energia jednej paczki: $\sim 10^5$ J

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia: $\sim 6 \cdot 10^8$ J



LHC, CERN, Genewa



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 utrzymywać cząstki wewnątrz rury akceleratora. W praktyce jednak nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż $B_{max} \sim 10$ T.

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

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

Energia którą możemy **dostarczyć** jest proporcjonalna do obwodu akceleratora i średniego pola przyspieszającego jakie potrafimy wytworzyć.

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**



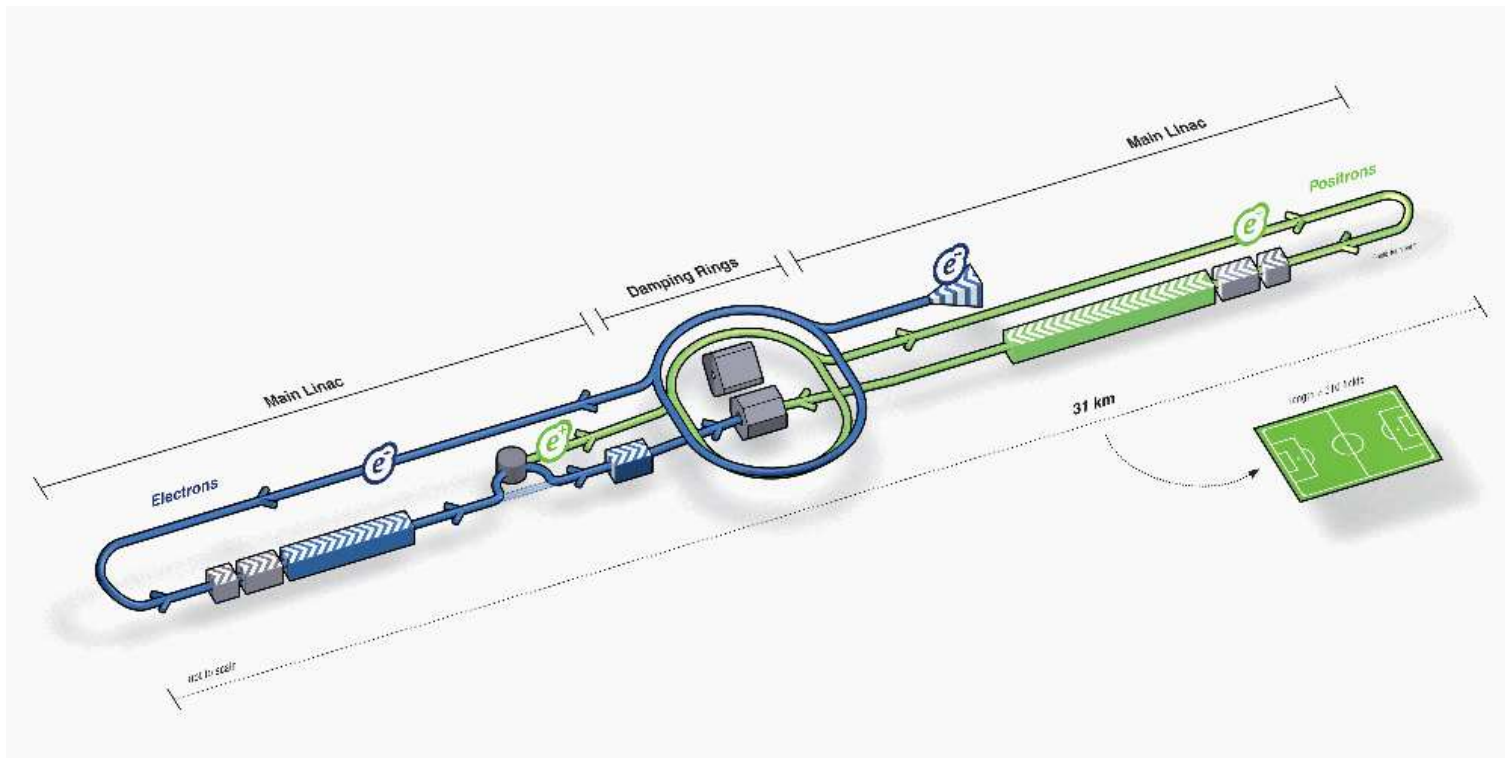
Akceleratory

ILC

Wszystko wskazuje na to, że LHC będzie ostatnim akceleratorem kołowym.

Kolejnym będzie prawdopodobnie akcelerator liniowy e^+e^-

ILC - International Linear Collider



Kolajdery

Większość budowanych obecnie akceleratorów to "kolajdery". Jeden/dwa akceleratory przyspieszające a następnie zderzające ze sobą cząstki z dwóch przeciwbieżnych wiązek. W ten sposób uzyskujemy dużo wyższą "energię dostępną":

$$E = \sqrt{4E_1E_2} \quad \text{dla wiązek przeciwbieżnych}$$

$$E = \sqrt{2E_1m_2} \quad \text{dla zderzenia cząstki wiązki ze spoczywającą cząstką ("tarczą")}$$

Jest jednak wysoka "cena", która musimy zapłacić.

W przypadku zderzeń wiązki z tarczą praktycznie wszystkie cząstki oddziałują.

W przypadku wiązek przeciwbieżnych jedynie nieliczne - bardzo trudno jest uzyskać odpowiednią częstość zderzeń.

Kolajdery

Świelność

Świelność \mathcal{L} określa liczbę reakcji zachodzących w jednostce czasu.

Wraz ze wzrostem energii zderzenia potrzebujemy coraz większych świelności!

Świelność zależy od:

- częstości przecięć wiązek (liczby paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce
- poprzecznych rozmiarów wiązki

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

⇒ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

LEP: $\sigma_x \approx 300 \mu m$ $\sigma_y \approx 8 \mu m$

Proj. ILC: $\sigma_x \approx 0.5 \mu m$ $\sigma_y \approx 5 nm$ (!)