

Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 4

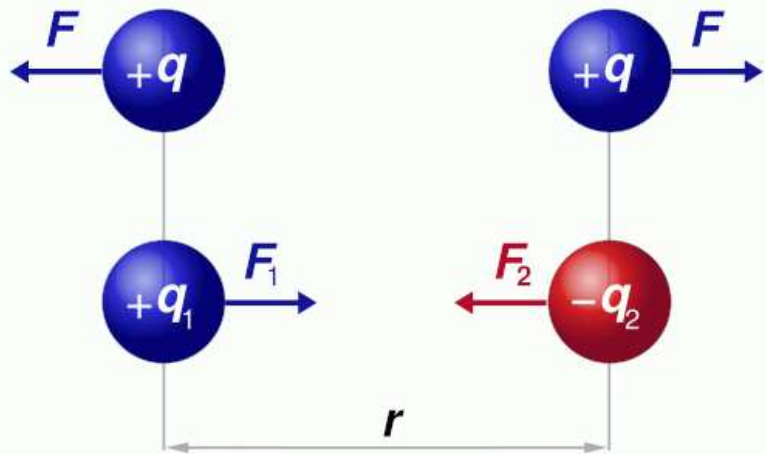
- Wprowadzenie
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

Wprowadzenie

Pole elektryczne

Prawo Coulomba

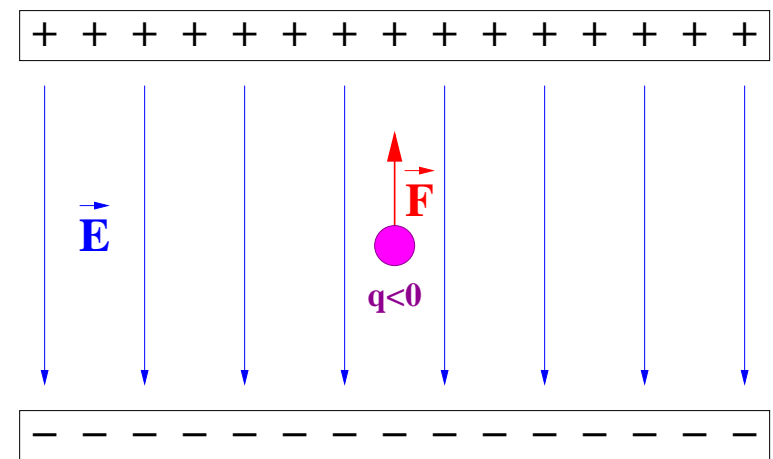
siła oddziaływania między ładunkami:



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

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} :



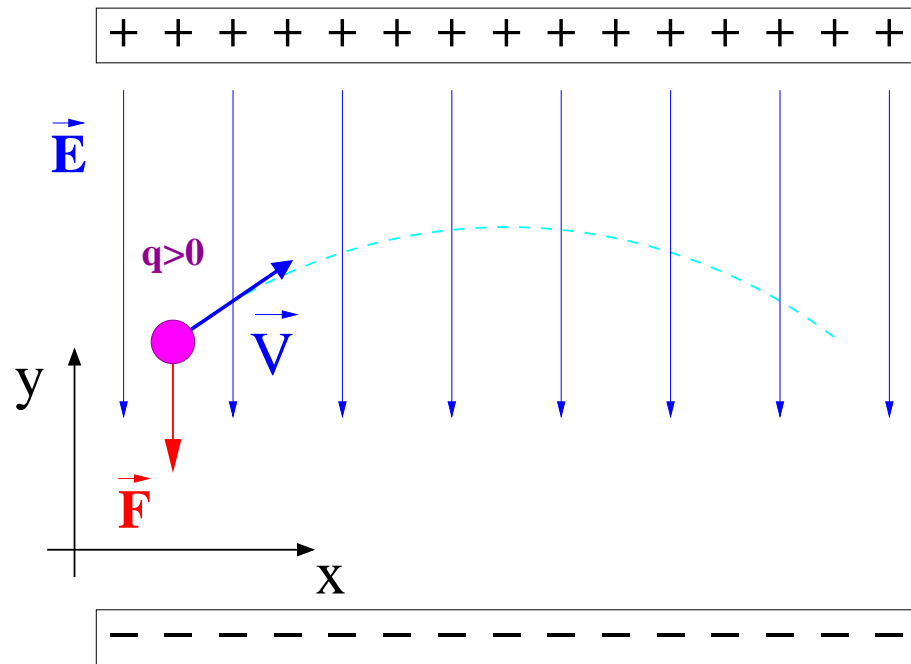
Siła działająca na ładunek q :

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

Wprowadzenie

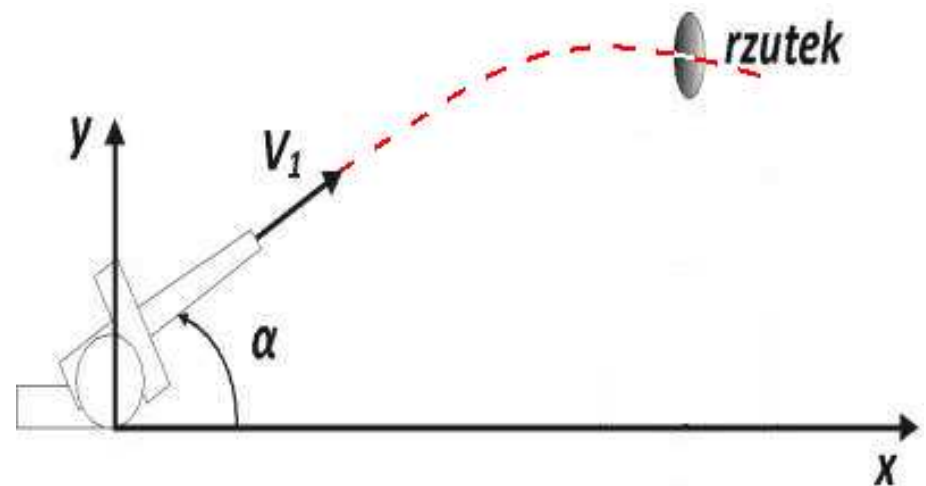
Pole elektryczne

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



Torem ruchu jest parabola.

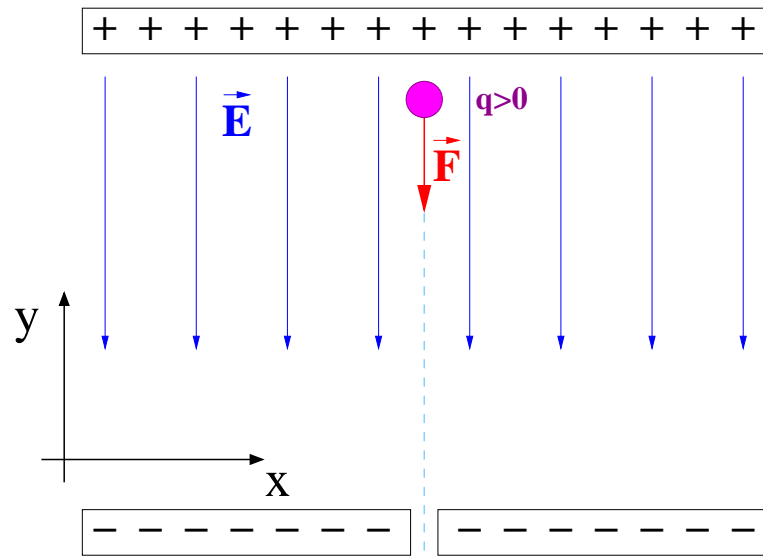
Ruch pod wpływem stałej siły:
dokładnie tak jak w “rzucie ukośnym”...



Wprowadzenie

Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w jednorodnym polu:

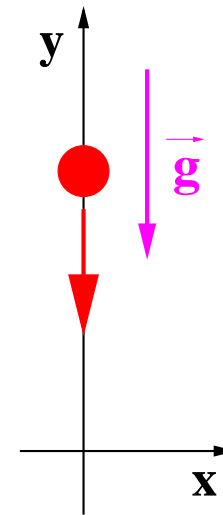


Tor jest prostoliniowy.

Ładunek porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.

Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii potencjalnej.

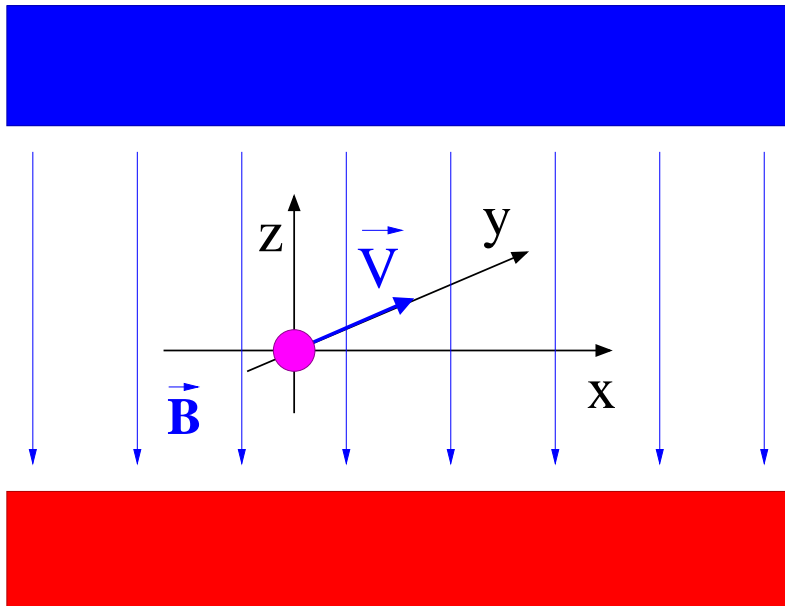
Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w jednorodnym polu grawitacyjnym



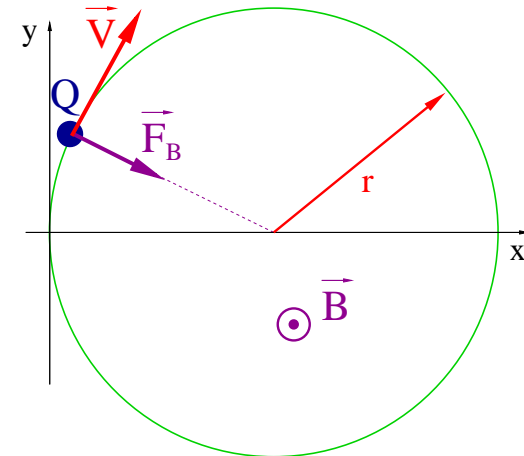
Wprowadzenie

Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się w płaszczyźnie prostopadłej do pola:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

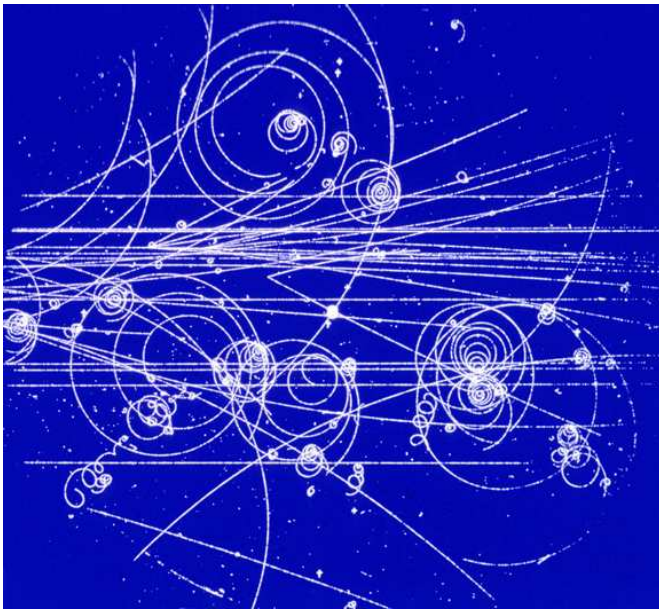
$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

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

Wprowadzenie

Pole magnetyczne

Ruch w jednorodnym polu magnetycznym



Tory cząstek rejestrowane w komorze pęcherzykowej.

Cząstki tracą energię na jonizację, dlatego otrzymujemy spirale a nie okręgi...

Pole magnetyczne zakrzywia tor cząstek, nie zmieniając ich prędkości.

To tak jak tor lodowy działa na bobsleja:



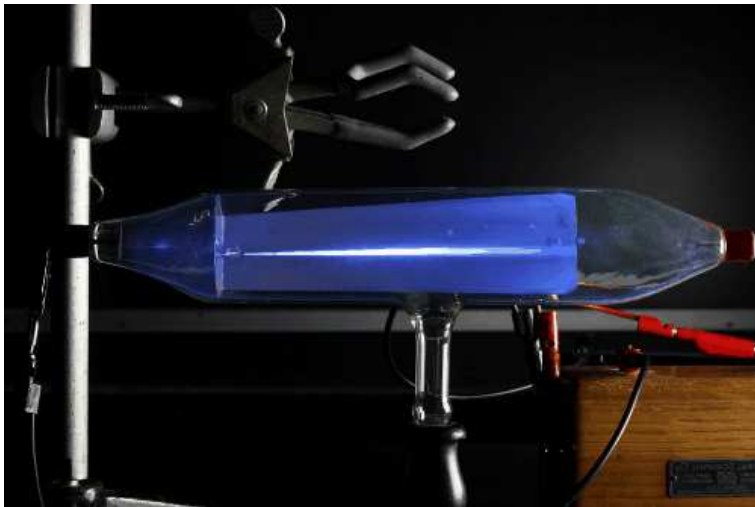
Wprowadzenie

Rura Crookesa - pokaz

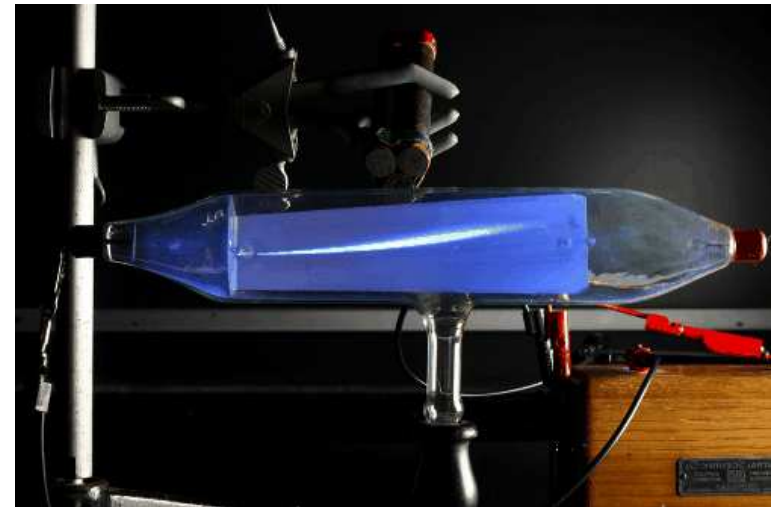
Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym.

Przez wąską szczelinę kierowane są na ekran luminescencyjny.

Przy braku pola w tym obszarze poruszają się po linii prostej.



Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



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:

$$\begin{aligned} \textit{kilo} - 1 \textit{keV} &= 10^3 eV \\ \textit{mega} - 1 \textit{MeV} &= 10^6 eV \\ \textit{giga} - 1 \textit{GeV} &= 10^9 eV \\ \textit{tera} - 1 \textit{TeV} &= 10^{12} eV = 1.6 \cdot 10^{-7} J \end{aligned}$$

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:

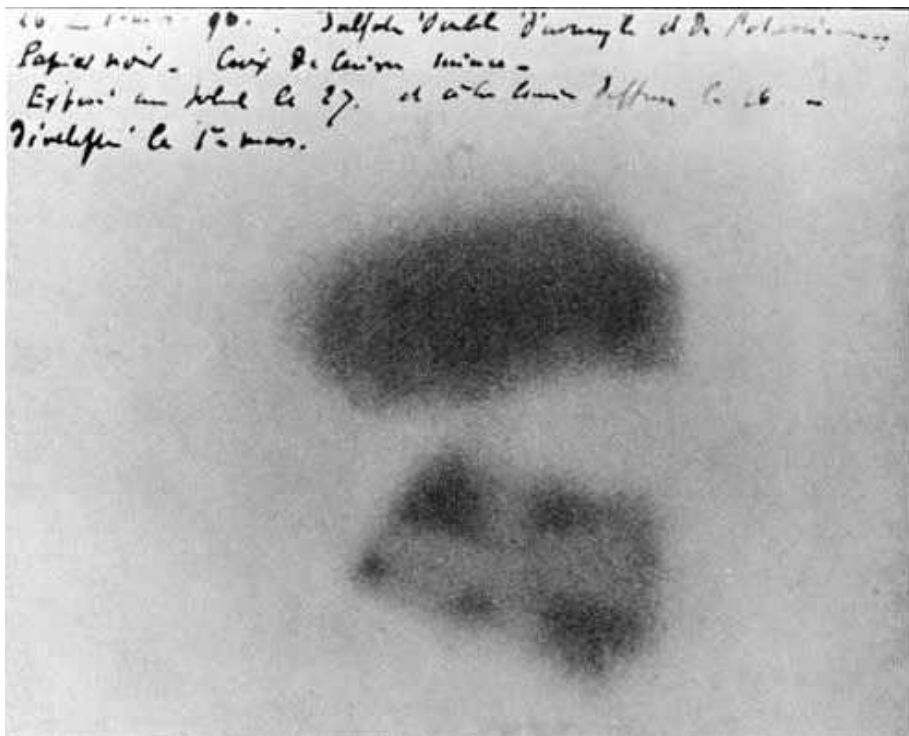
elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Źródła cząstek

Pierwiastki radioaktywne

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

Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.



Początkowo przypuszczano, że emitowane jest promieniowanie X (Röntgen, 1895).

Na początku XX wieku wyodrębniono **3 rodzaje** promieniowania: α , β i γ .

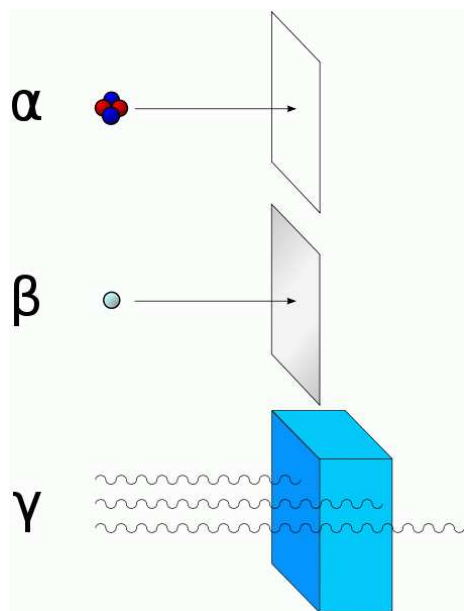
Dziś wiemy, że są to:

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

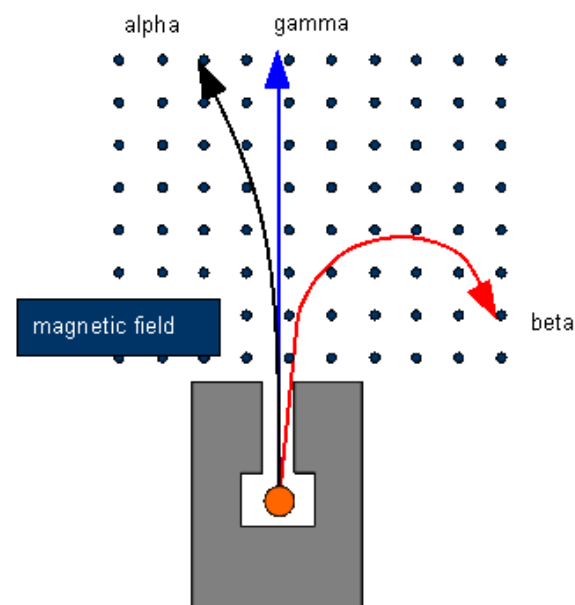
Źródła cząstek

Pierwiastki radioaktywne

Rodzaje promieniotwórczości naturalnej pierwszy zaobserwował Rutherford badając przenikliwość promieniowania.



Mogą też być rozdzielone w polu magnetycznym



Badania z użyciem źródeł promieniotwórczych doprowadziły do wielu ważnych odkryć (np. doświadczenie Rutherforda - 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.

Natężenie promieniowania rosło wraz z wysokością...

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

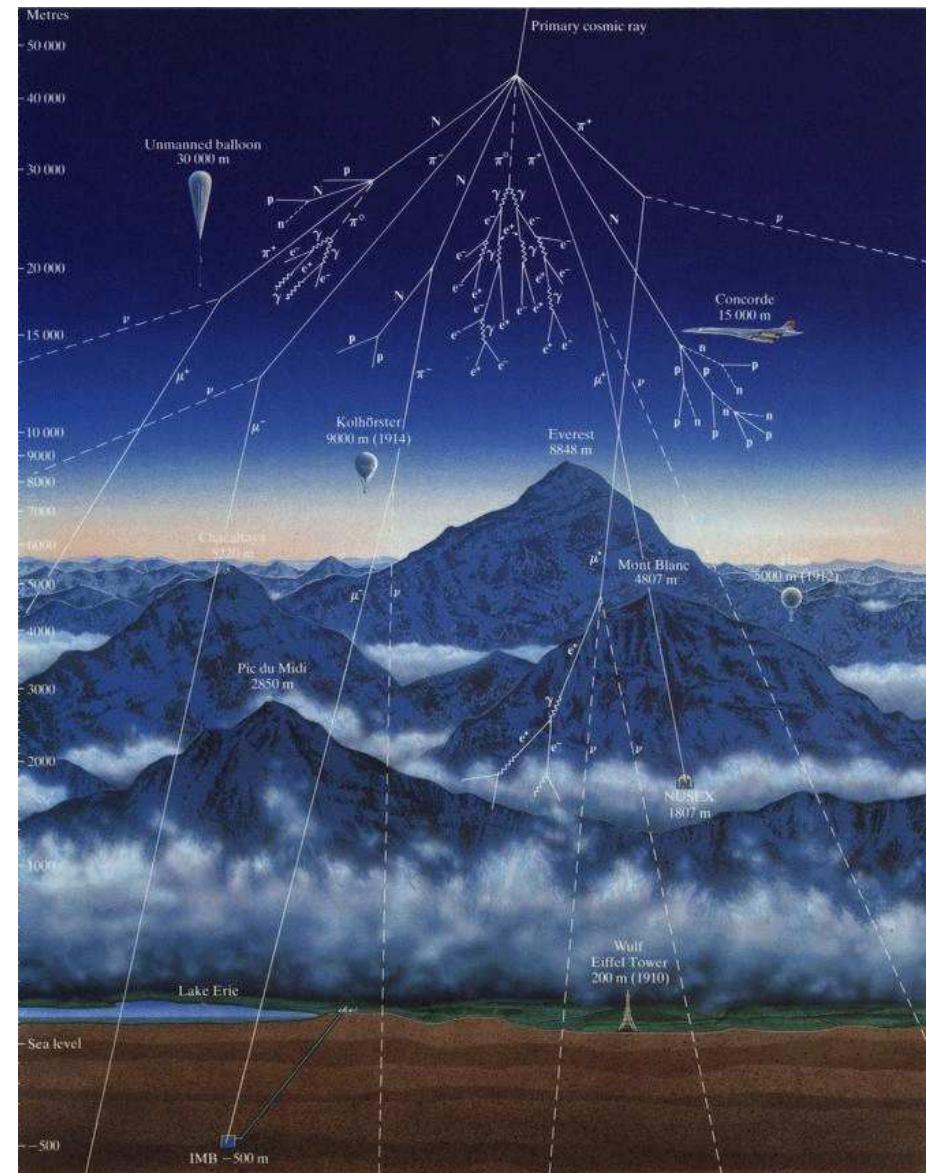
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

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

Łącznie około 180 na $m^2 \cdot s$

Nie licząc bardzo licznych neutrin, o których jeszcze będzie mowa...



Promieniowanie kosmiczne

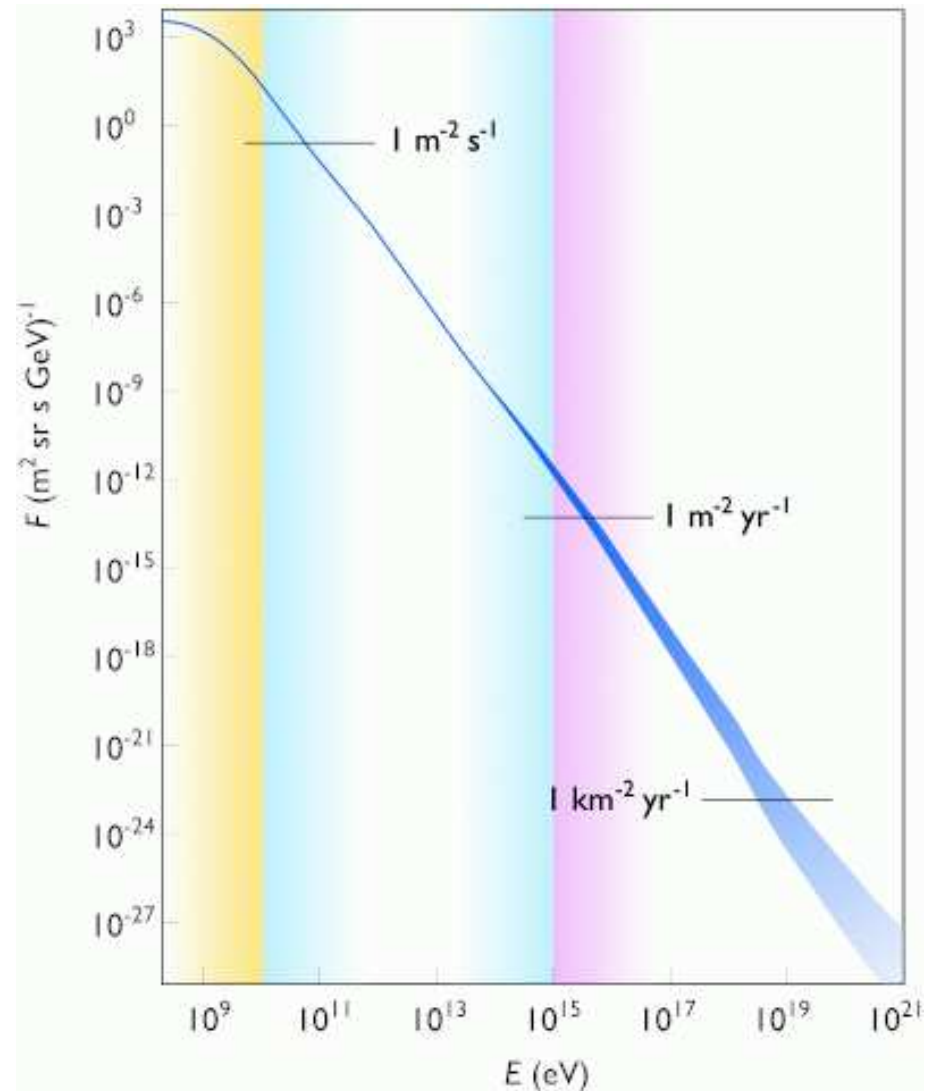
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

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?

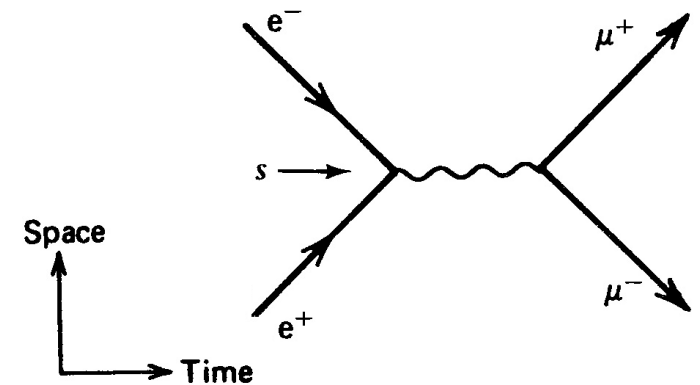
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

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.

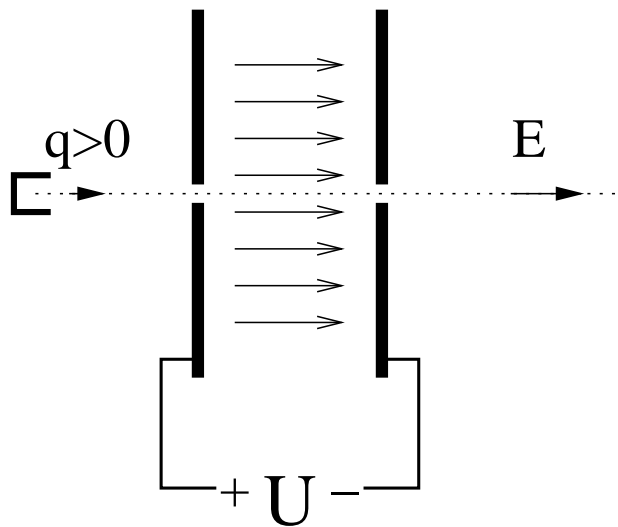
Akceleratory

Akceleratory elektrostatyczne

W 1919 roku Rutherford wskazał na korzyści z przyspieszania cząstek.

Najprostszym akceleratorem cząstek jest pole elektrostatyczne:

np. kondensator



Uzyskiwana energia:

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

Im wyższe napięcie tym większą energią kończą cząstki (jak spadek swobodny z coraz większej wysokości).

Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokiej różnicy napięć:

⇒ generator [Cockrofta-Waltona](#) (1932): 750 kV

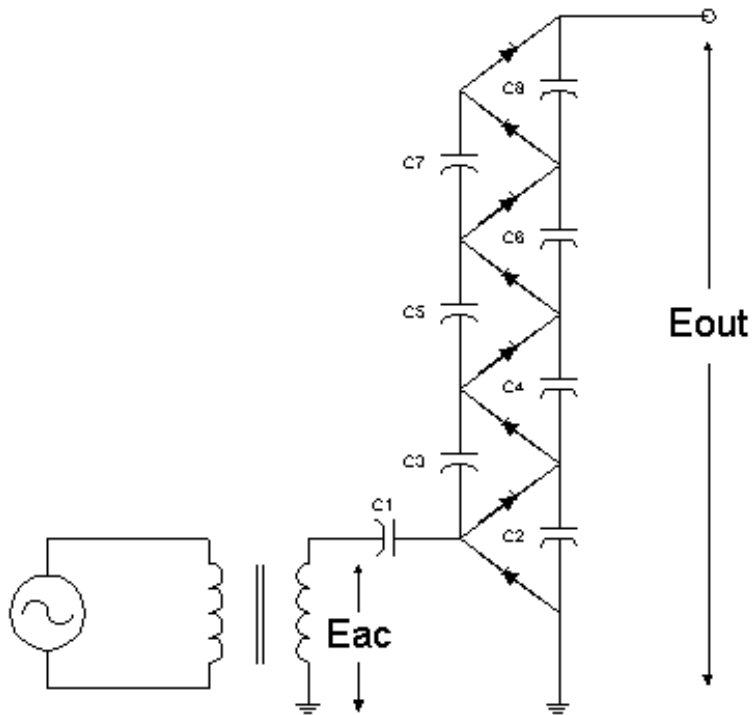
⇒ generator [Van de Graaffa](#) (1931): 1.5 MV

W pewnych dziedzinach wciąż używane

Akceleratory

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



Współczesne urządzenie



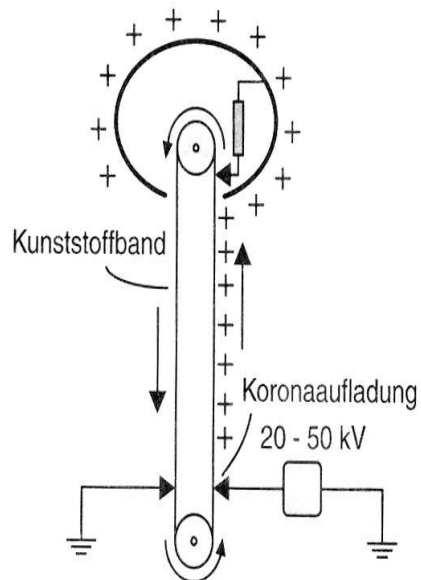
Akceleratory

Generator Van de Graaffa

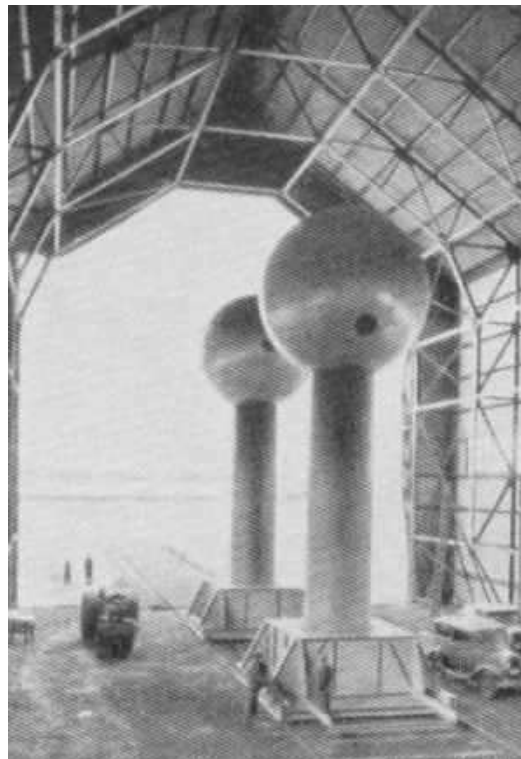
Schemat

Historia

Współczesne urządzenie



Van-de-Graaff-Generator



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

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

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

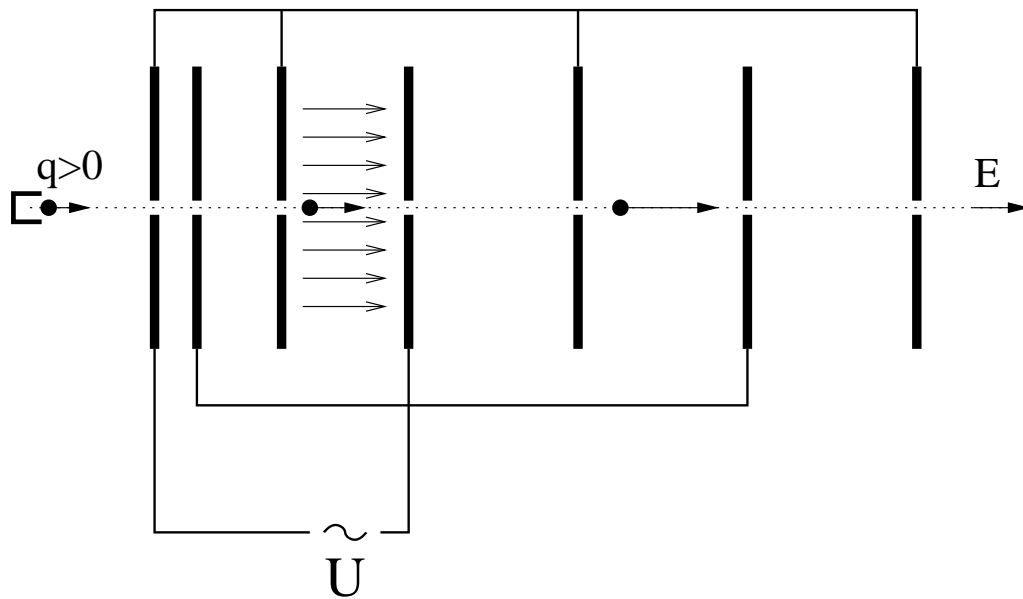
Akceleratory

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.

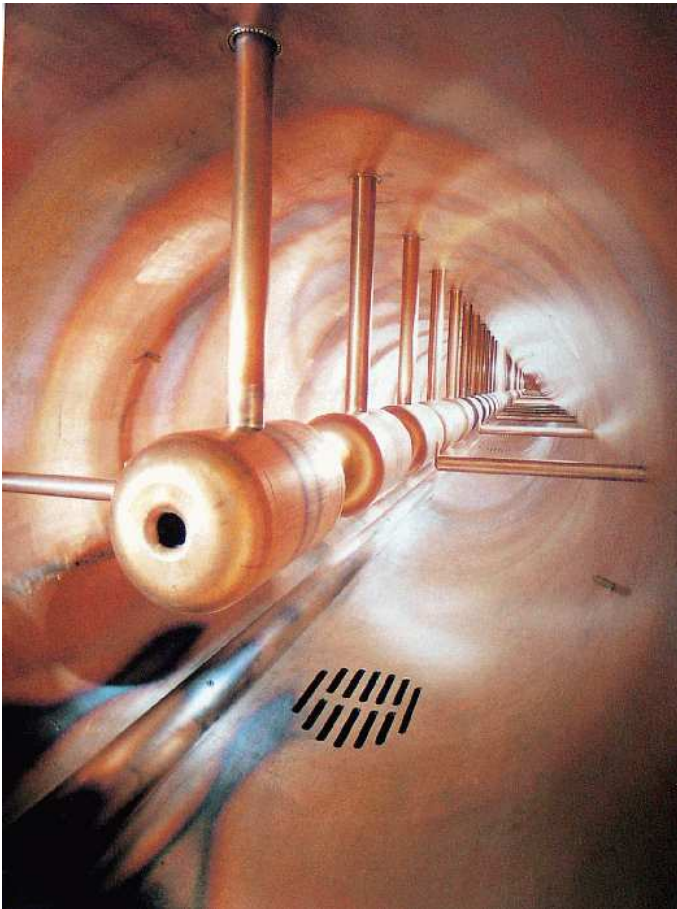
⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

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

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

Akceleratory

Liniowy akcelerator protonów
w ośrodku Fermilab (USA)



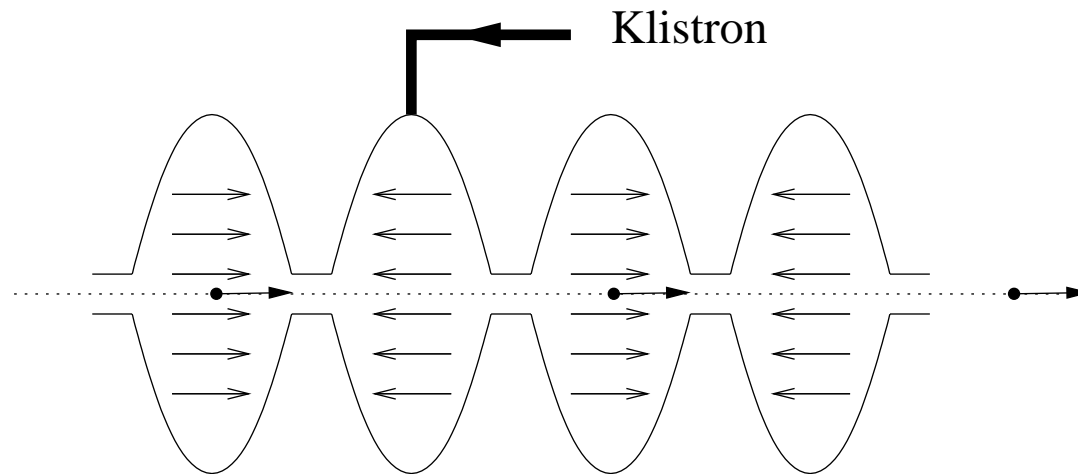
Lioniowy akcelerator protonów
przy CERN SPS



Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

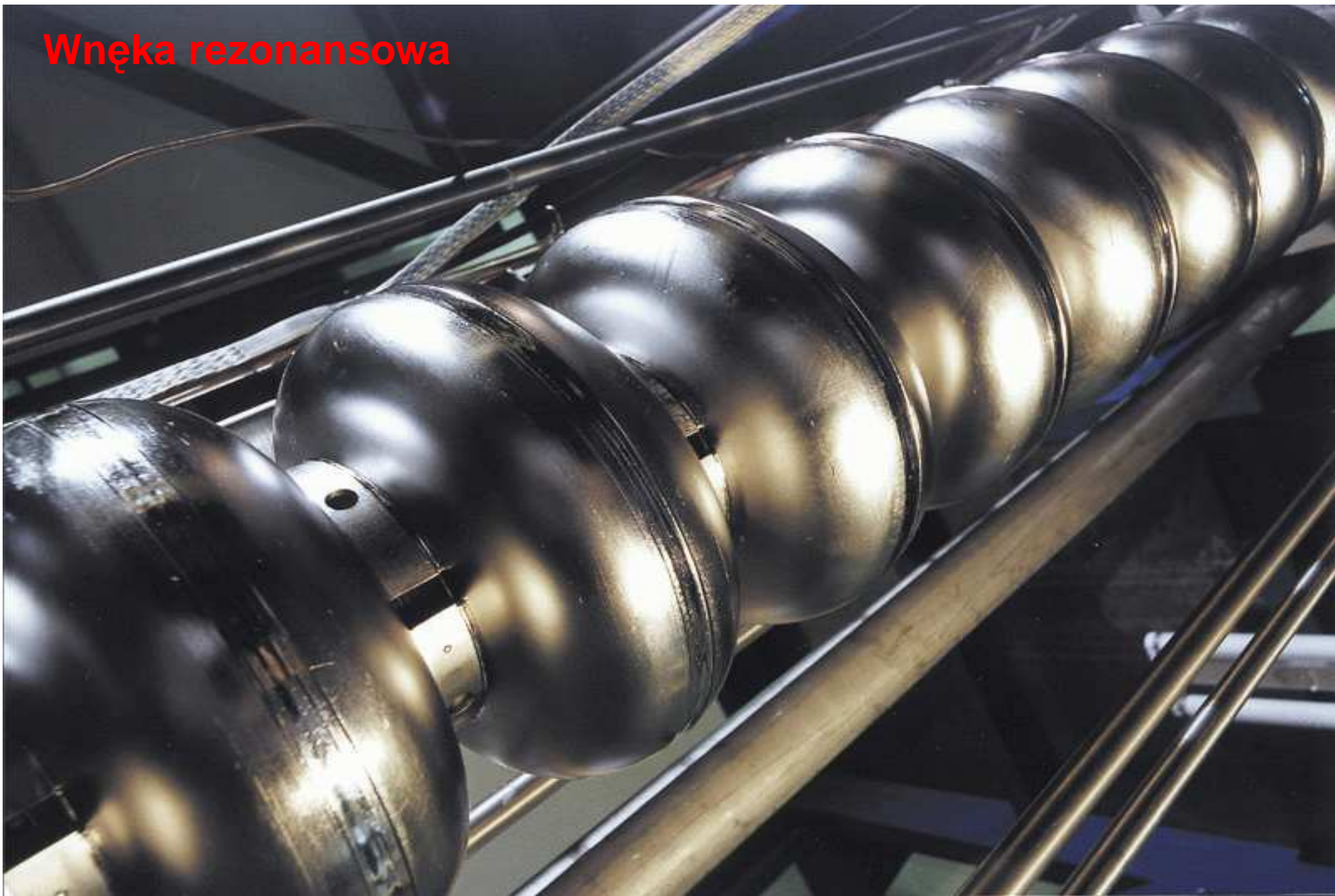
Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

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

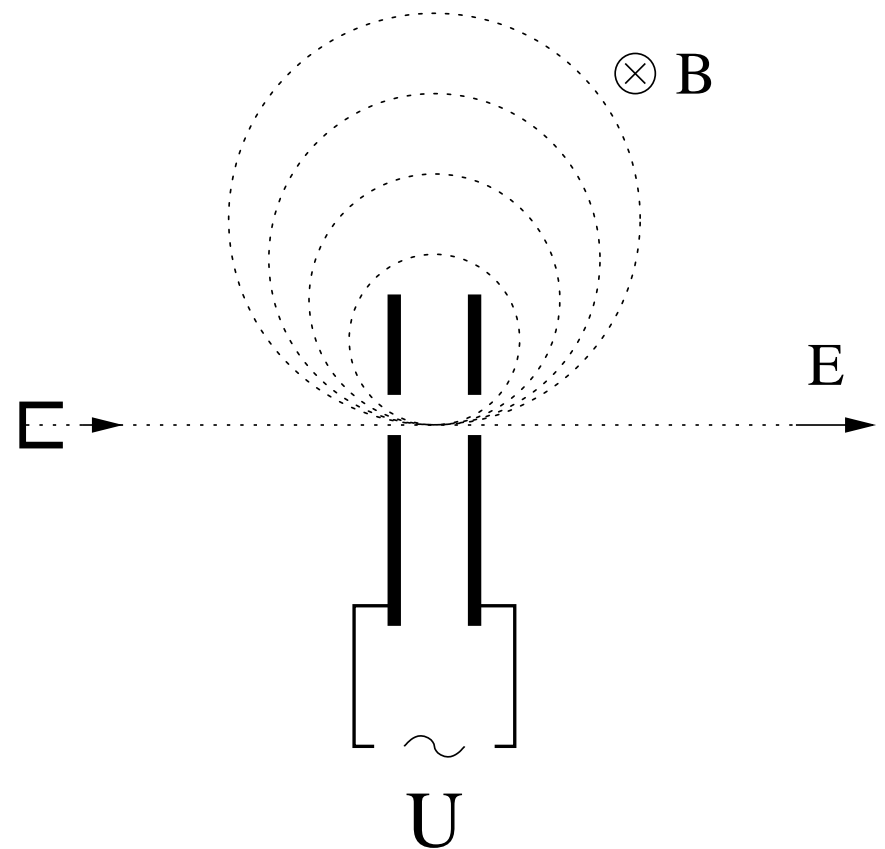
Akcelerator kołowy

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:



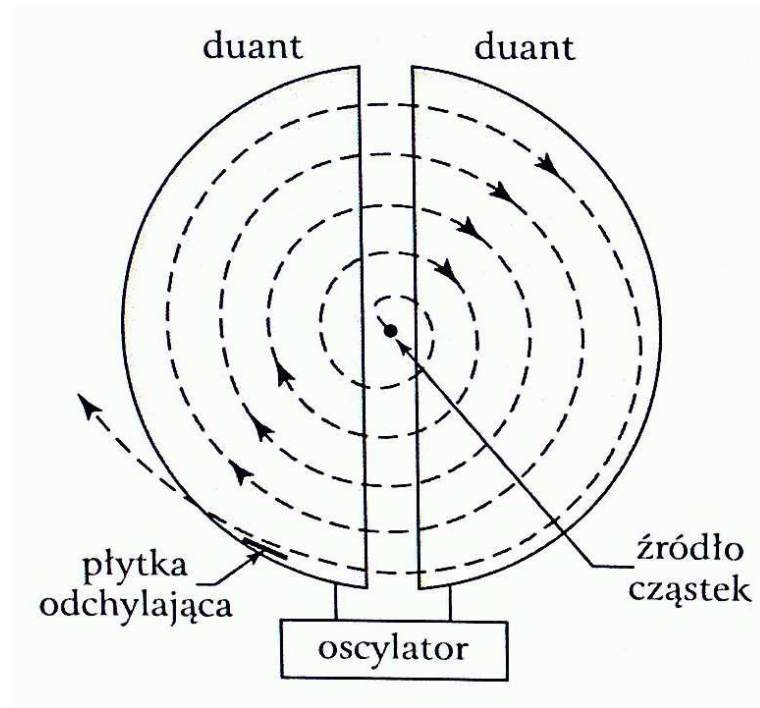
Akceleratory

Cyklotron

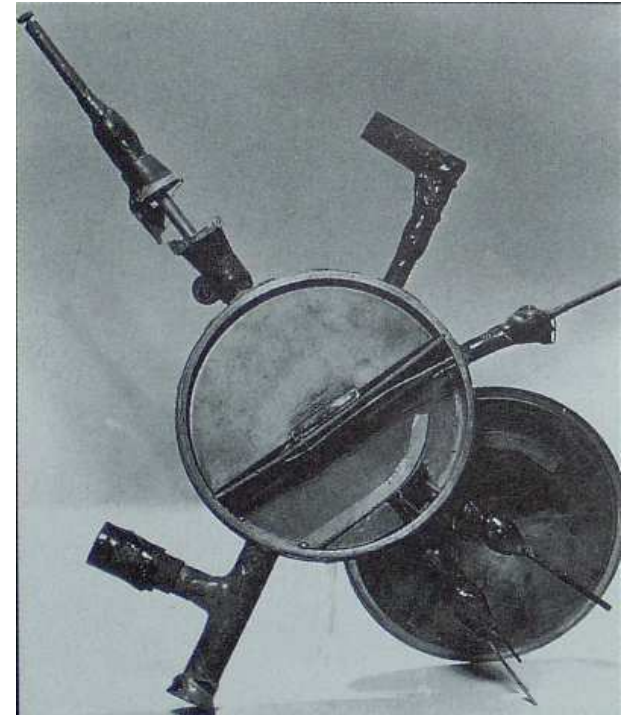
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratory

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie



Akceleratory

Tunel LHC



Akceleratory

Wnęka rezonansowa w LHC

Częstość pracy **400MHz**

Łącznie 16 wnęk,
8 wnęk na wiązkę

Napięcie przyspieszające:
2 MV na wnękę

Przekaz energii:
16 MeV na okrażenie



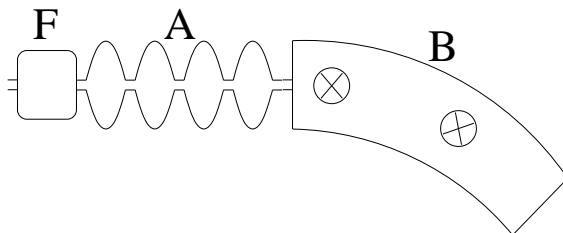
Akceleratory

Akcelerator kołowy

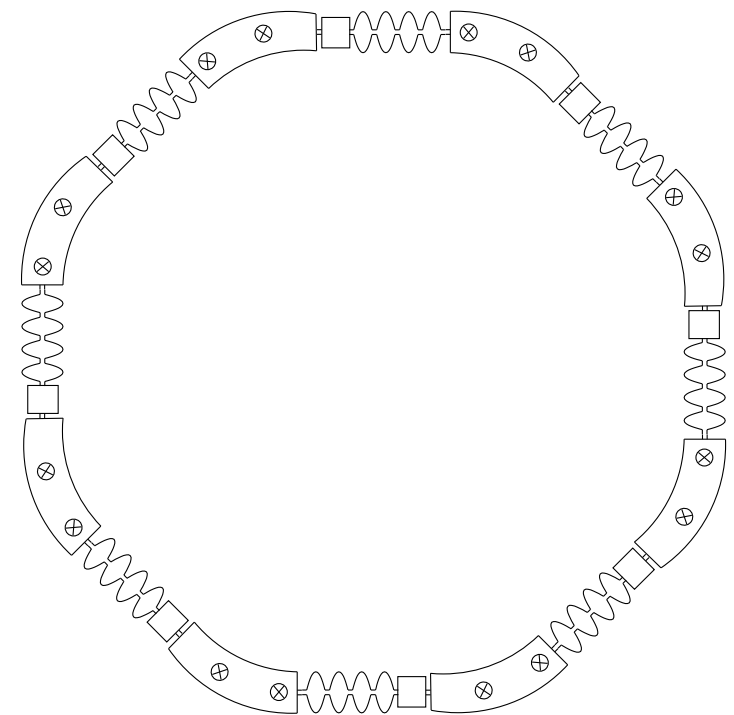
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

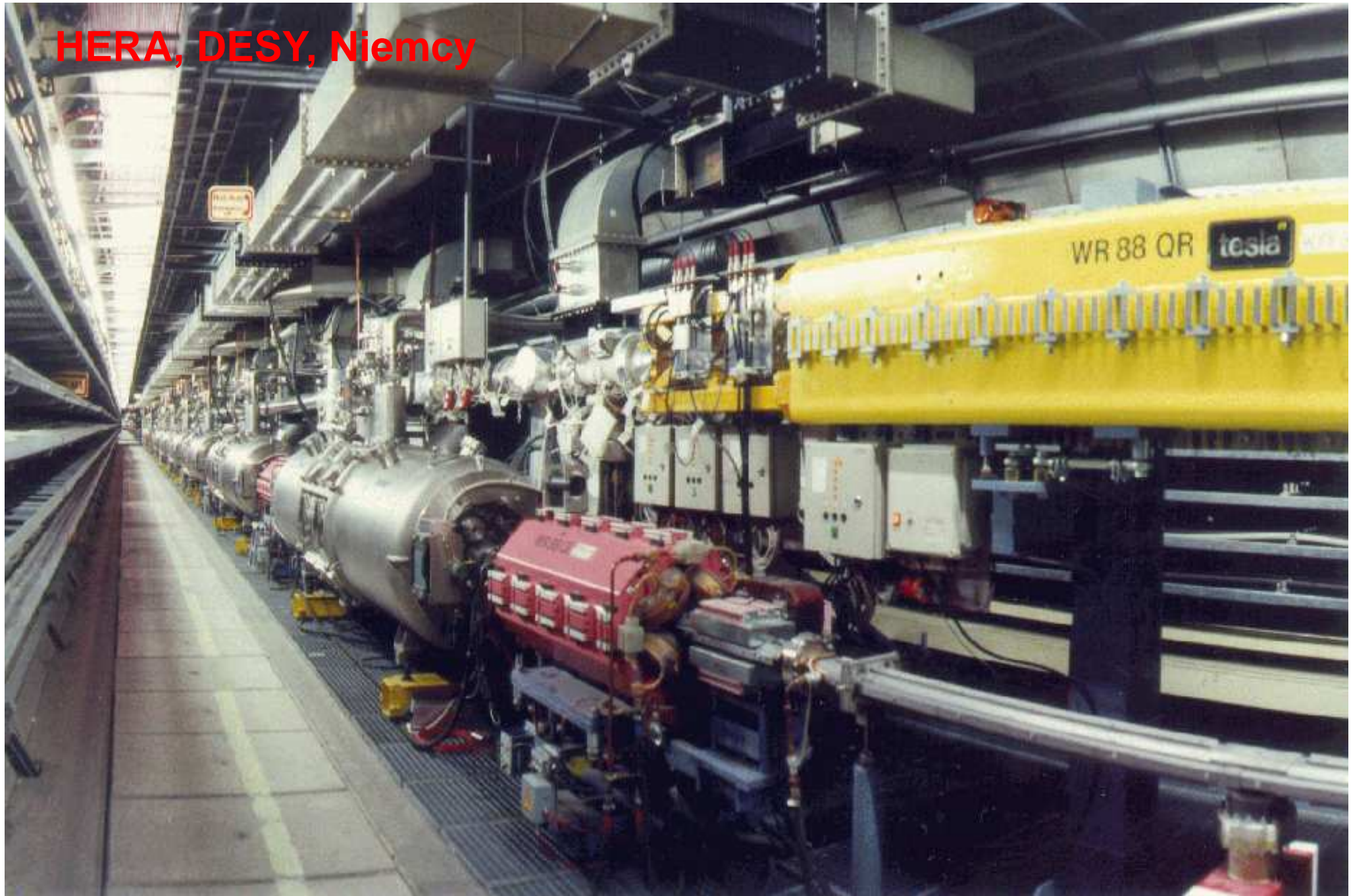
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



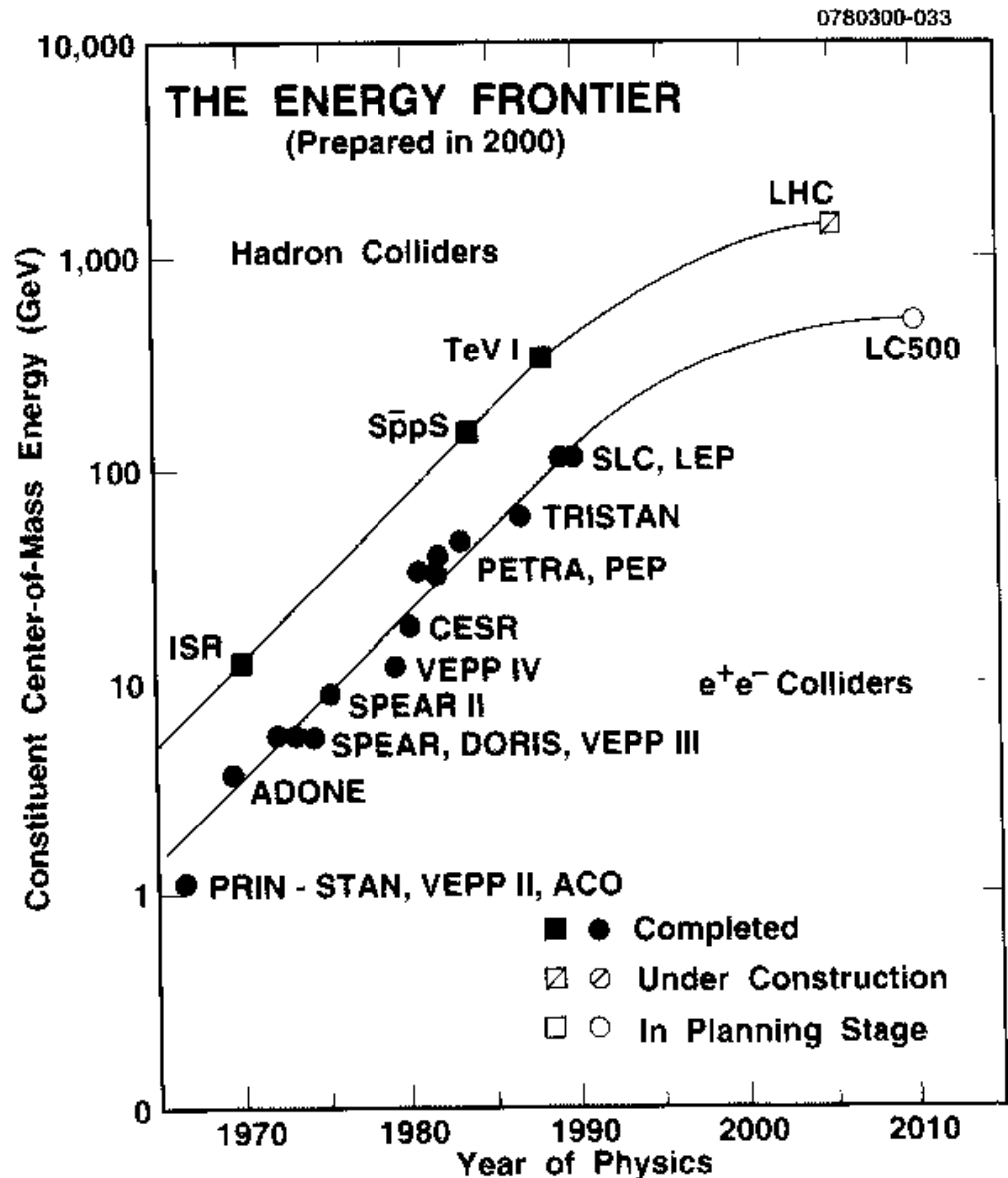
HERA, DESY, Niemcy



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 rozwijane były 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 (!) działa obecnie LHC.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii do 7 TeV

W każdej do 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

Docelowo zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



LHC, CERN, Genewa



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 jednak nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż $B_{max} \sim 10$ T. Dlatego musimy budować coraz większe urządzenia...

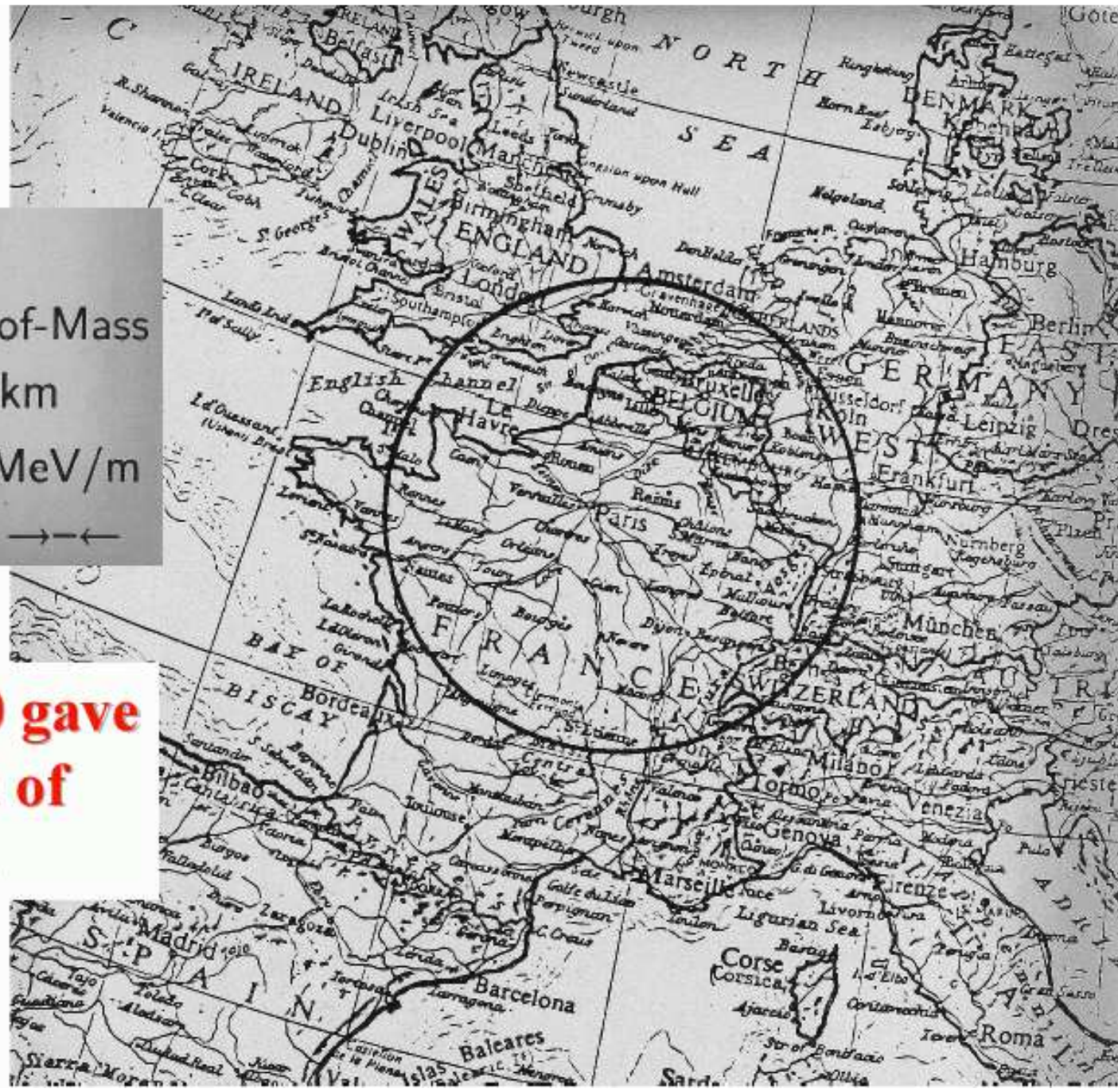
W przypadku akceleratorów kołowych e^{\pm} : \Rightarrow **przyspieszające pole elektryczne**

Elektrony krążące po orbicie tracą energię na **promieniowanie hamowania**, rośnie ono bardzo szybko z energią. **Energia** którą możemy dostarczyć jest proporcjonalna do obwodu akceleratora i średniego **pola przyspieszającego** jakie potrafimy wytworzyć. Aby zmniejszyć promieniowanie hamowania musimy zwiększyć promień akceleratora.

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**



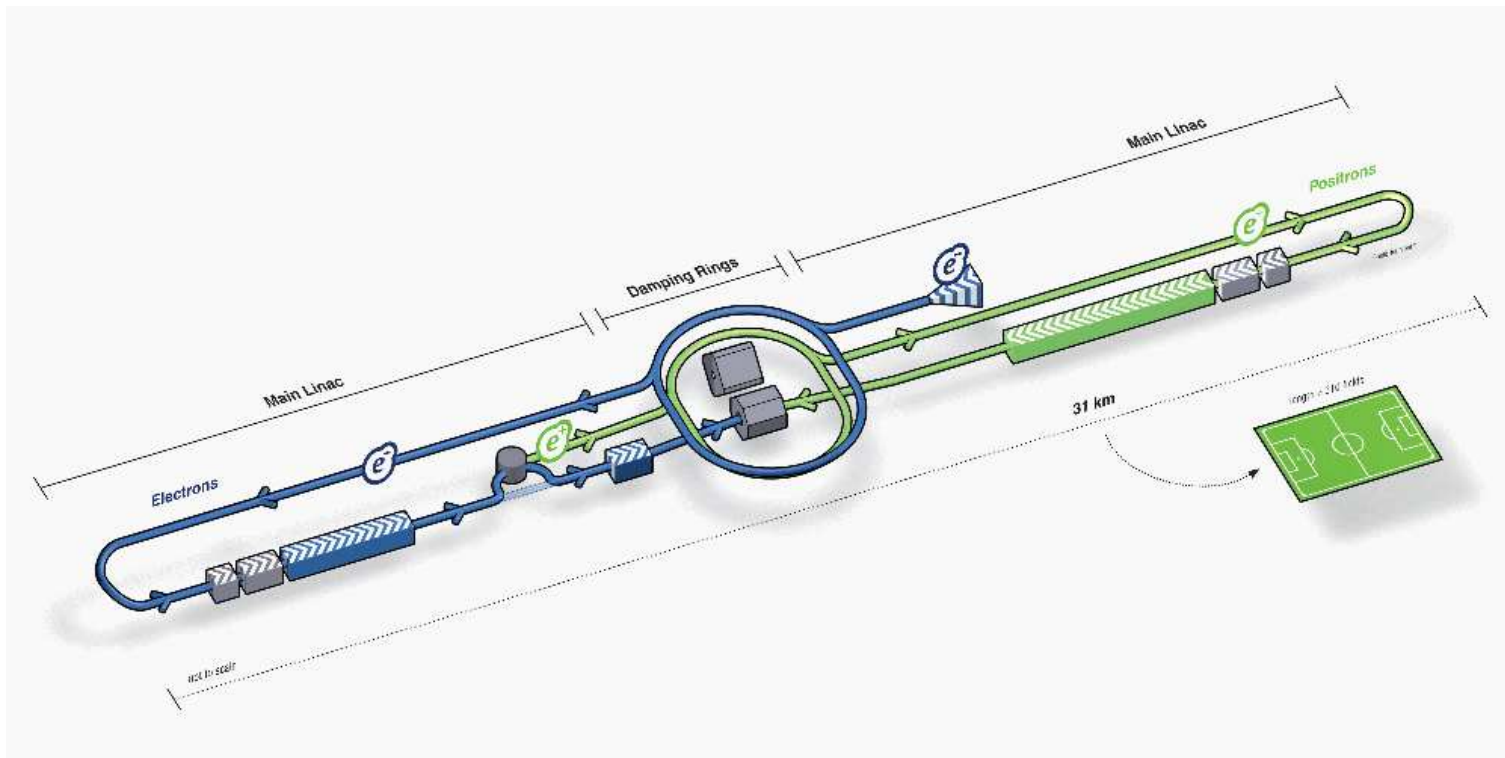
Akceleratory

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":

$$E^* = 2 \cdot E_{beam} \quad \text{dla wiązek przeciwbieżnych}$$

$$E^* = \sqrt{2 \cdot E_{beam} \cdot m} \quad \text{dla zderzenia cząstki wiązki ze spoczywającą cząstką ("tarczą")}$$

Relatywistyczna redukcja E^* znacznie silniejsza niż w przypadku klasycznym.

W przypadku wiązki protonów o $E_{beam} = 50 GeV$ różnica jest o czynnik 10 !!!

Jest jednak wysoka "cena", która musimy zapłacić.

W przypadku zderzeń wiązki z tarczą praktycznie wszystkie cząstki oddziałują.

W przypadku wiązek przeciwbieżnych jedynie nieliczne - czasem trudno jest uzyskać odpowiednią częstość zderzeń, liczbę interesujących nas przypadków...

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.

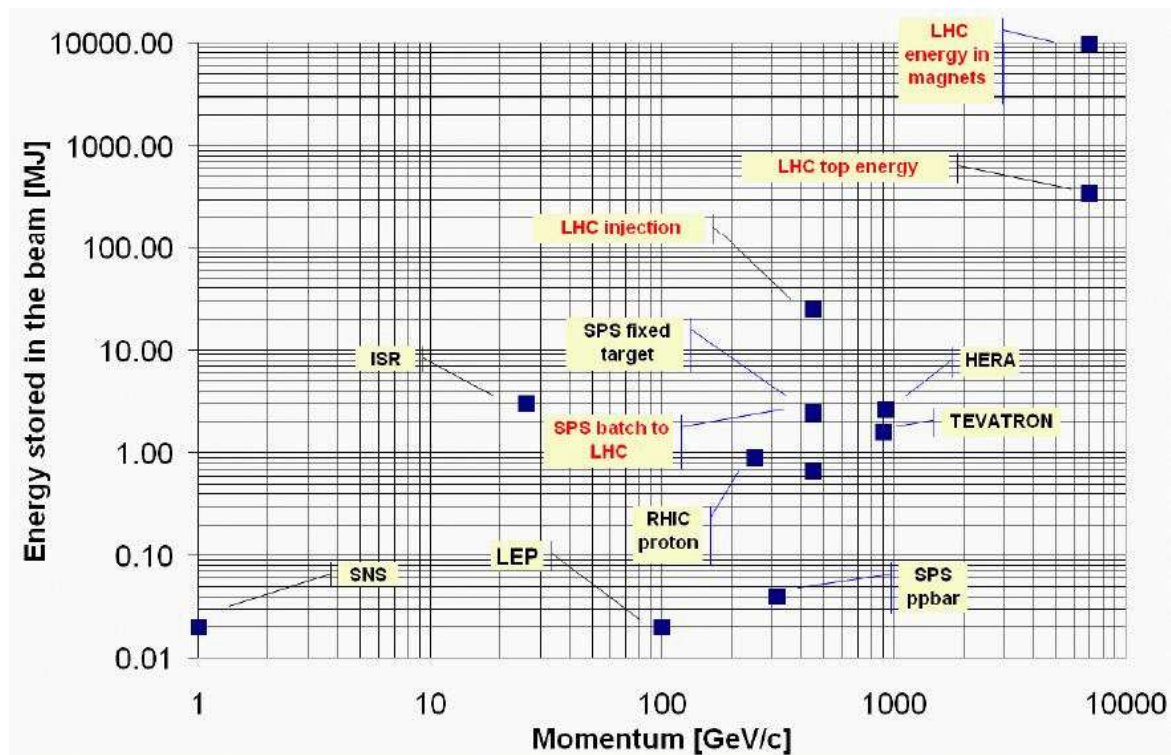
LEP: $\sigma_x \approx 300 \mu m$ $\sigma_y \approx 8 \mu m$

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

Kolajdery

Do końca 2012 roku wiązki LHC były rozpędzane “tylko” do 4 TeV. Dlaczego!?

LHC to niezwykle skomplikowane urządzenie, a jednocześnie najmniejszy błąd może mieć katastrofalne skutki. Energia zmagazynowana w magnesach sięga 10 GJ !



Modernizacja akceleratora 2013-2014 ma umożliwić bezpieczne osiągnięcie 7 TeV.

Kolajdery

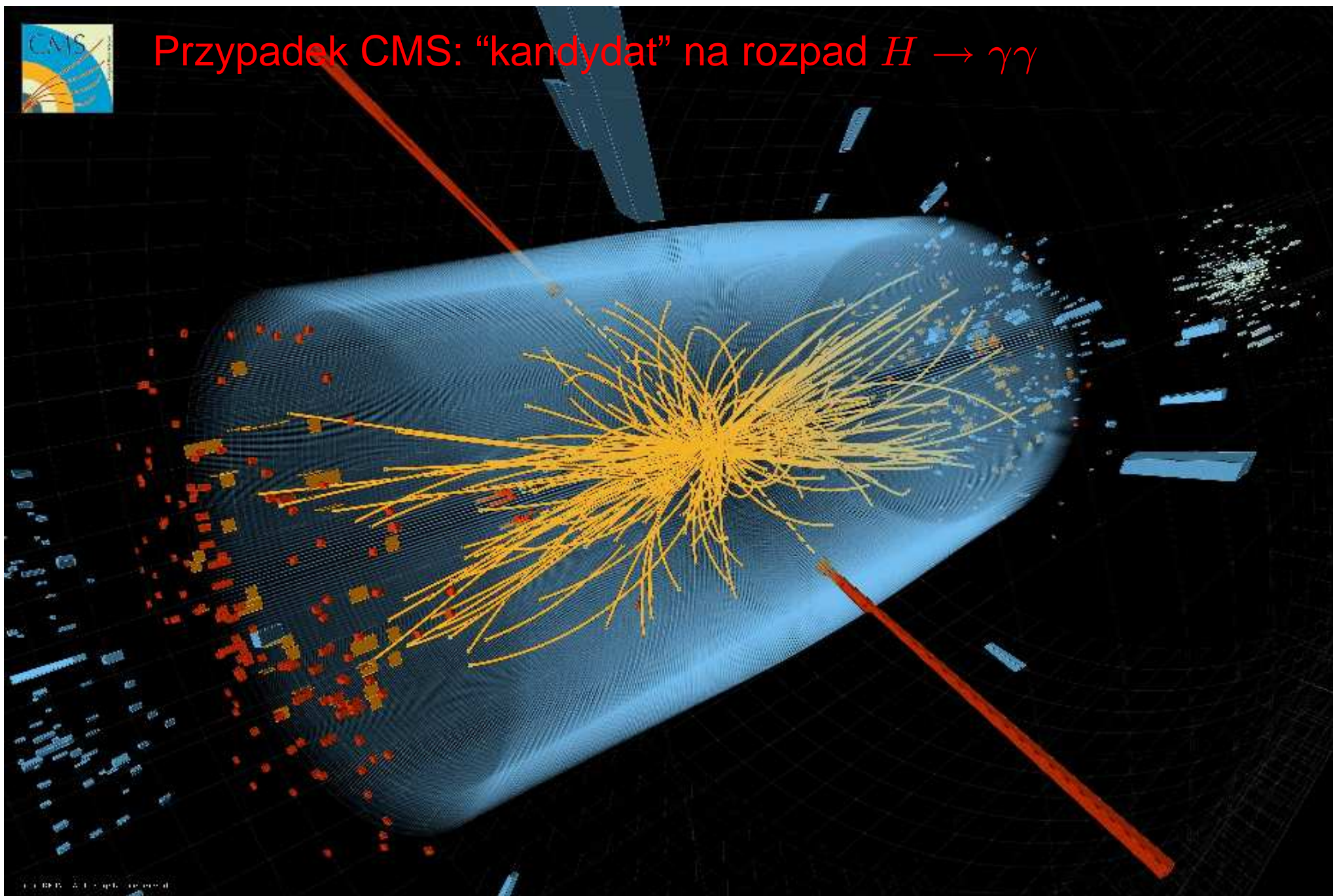
Energia zmagazynowana w **magnesach** LHC (przy nominalnej energii 7 TeV) odpowiada energii **Airbusa A380** lecącego 700 km/h. **Nie stać nas na pomyłkę...**



Energia zmagazynowana w jednej **wiązce** (przy docelowej intensywności) odpowiada **90 kg TNT** (lub 15 kg czekolady). **Mniej, ale też może narobić dużo szkody...**



Przypadek CMS: "kandydat" na rozpad $H \rightarrow \gamma\gamma$





Przypadek CMS: "kandydat" na rozpad $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

