

Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 4

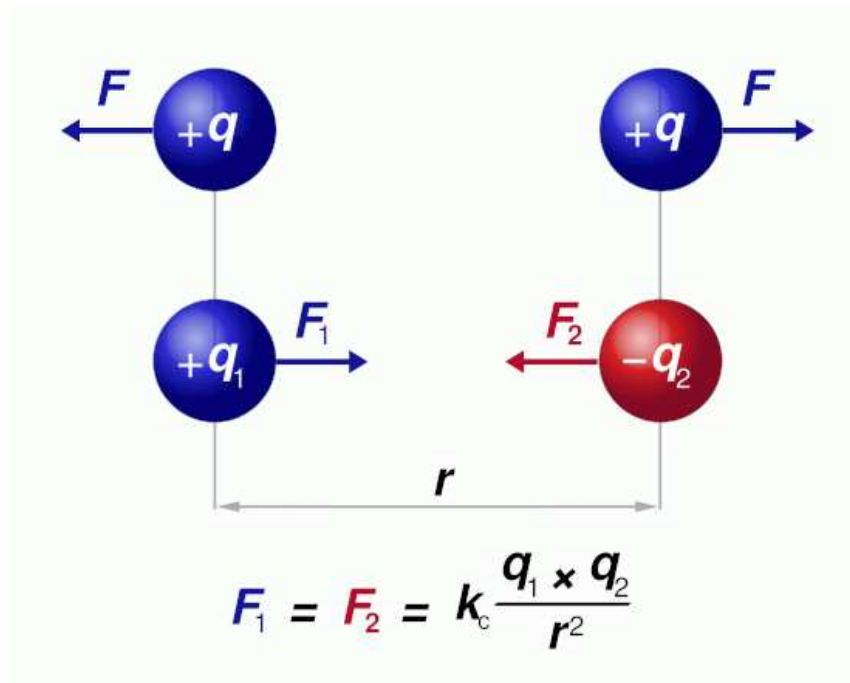
- Wprowadzenie
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

Wprowadzenie

Pole elektryczne

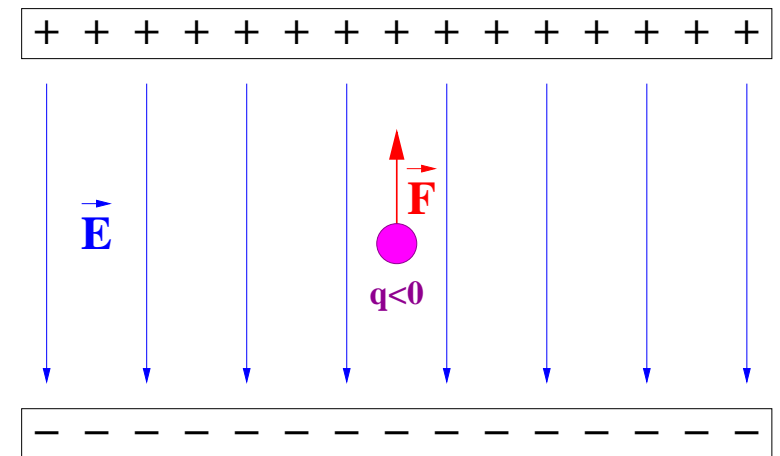
Prawo Coulomba

siła oddziaływania między ładunkami:



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} :



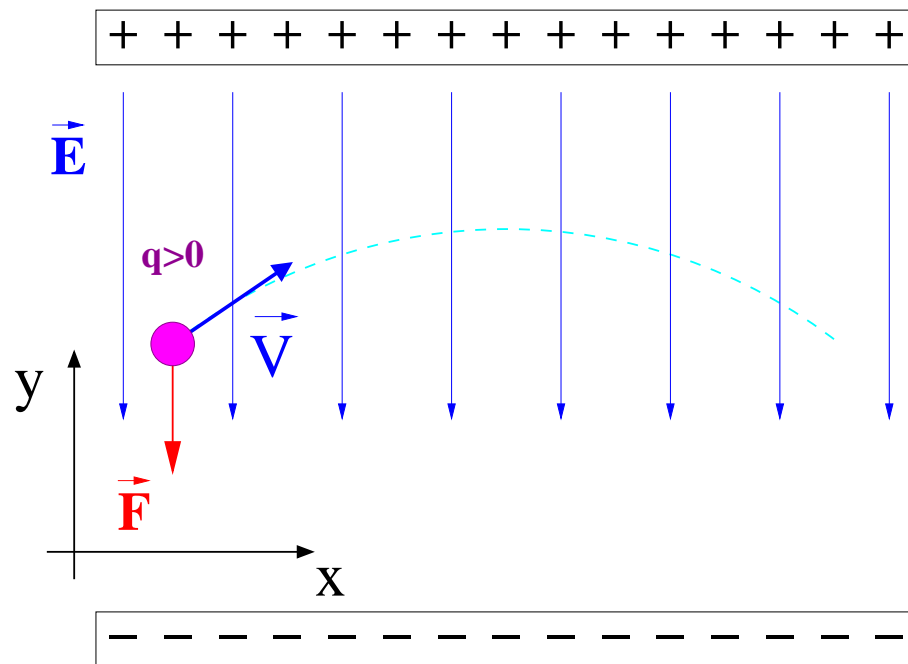
Siła działająca na ładunek q :

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

Wprowadzenie

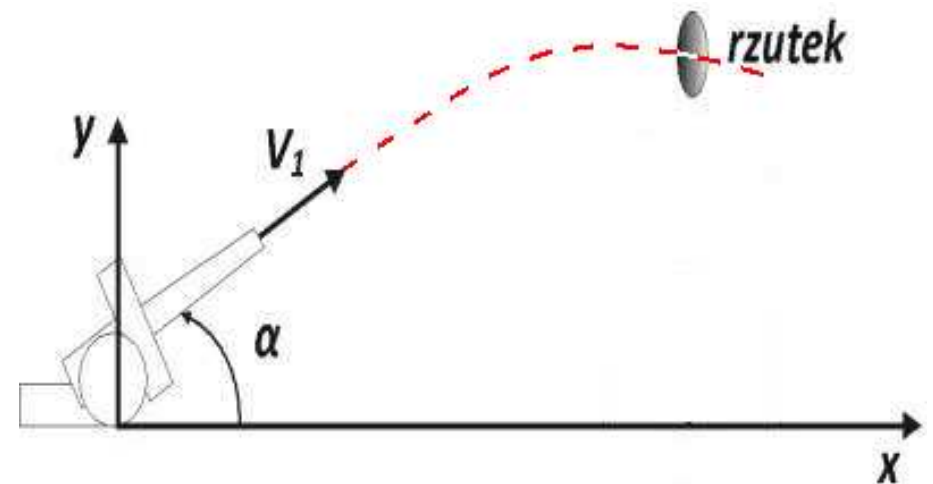
Pole elektryczne

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



Torem ruchu jest parabola.

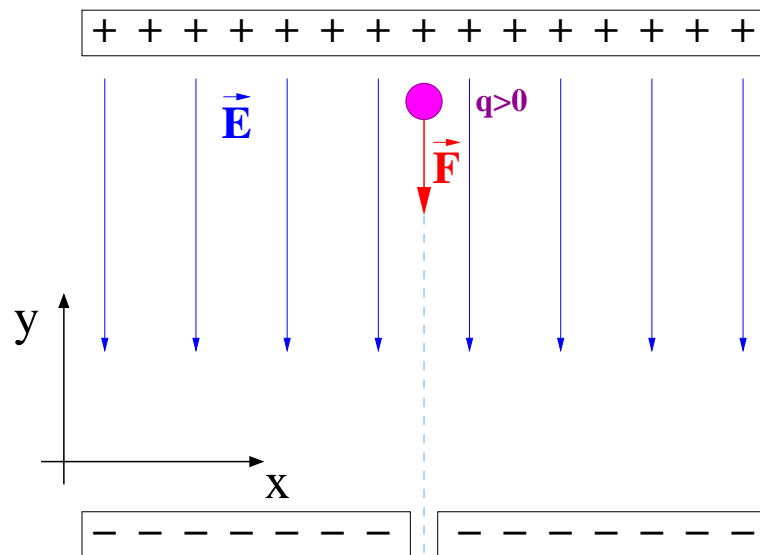
Ruch pod wpływem stałej siły:
dokładnie tak jak w "rzucie ukośnym"...



Wprowadzenie

Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w jednorodnym polu:

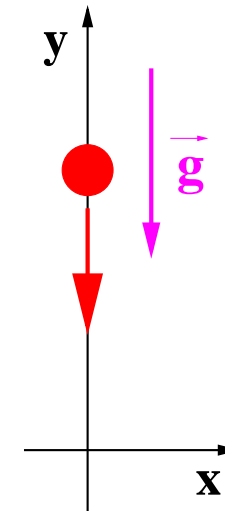


Tor jest prostoliniowy.

Ładunek porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.

Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii potencjalnej.

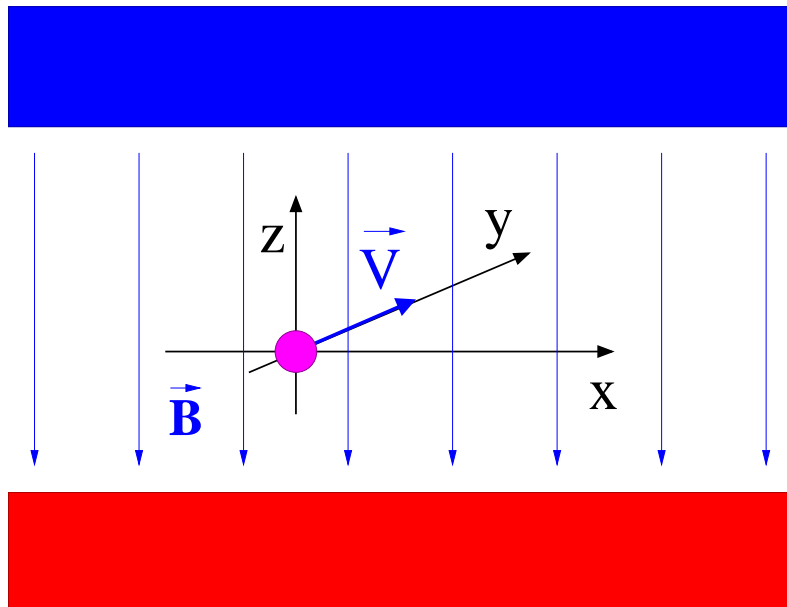
Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w jednorodnym polu grawitacyjnym



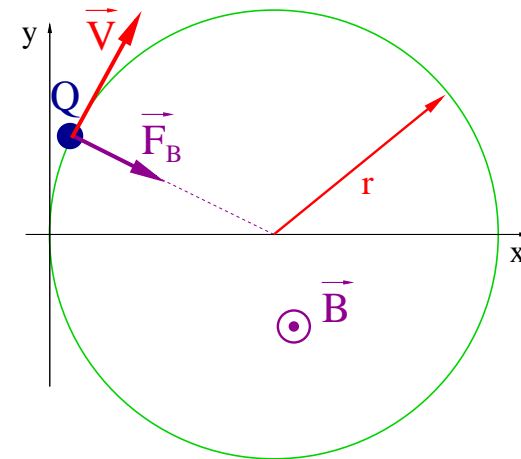
Wprowadzenie

Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się w płaszczyźnie prostopadłej do pola:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

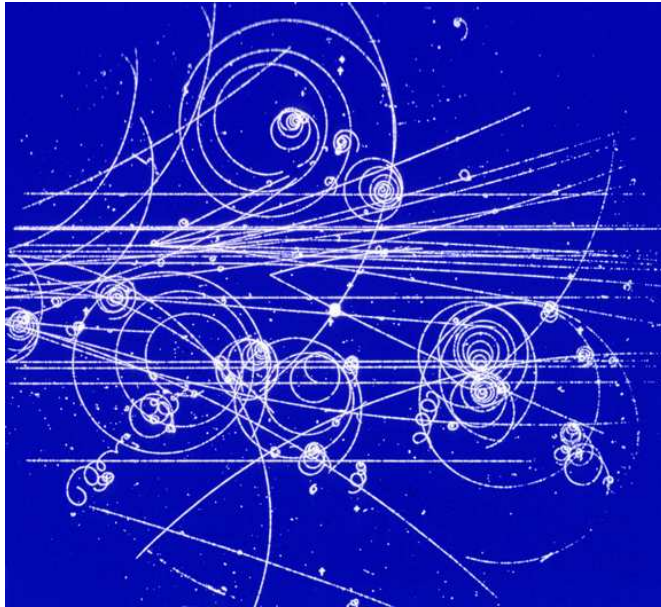
$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

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:



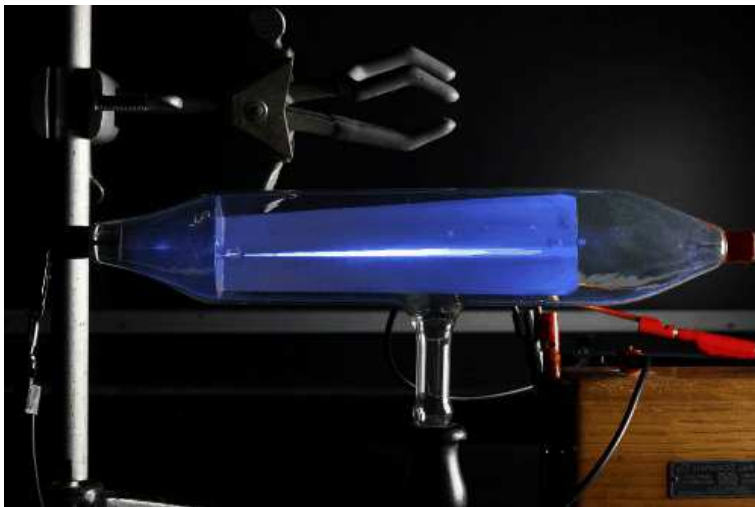
Wprowadzenie

Rura Crookesa - pokaz

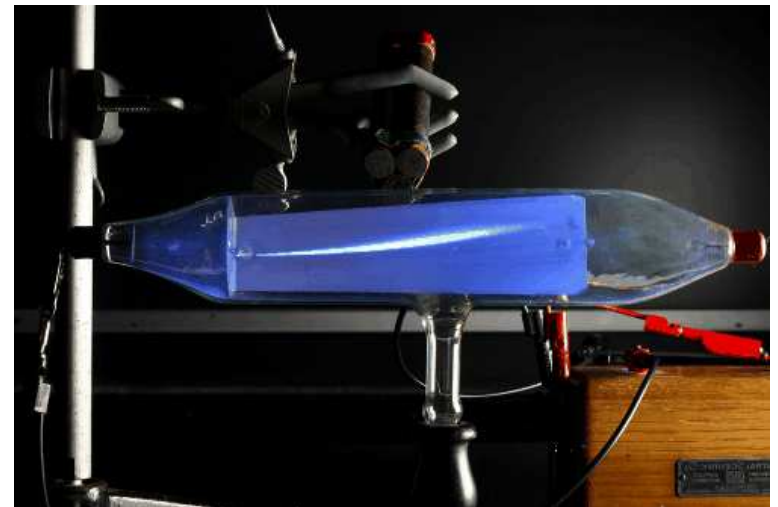
Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym.

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:

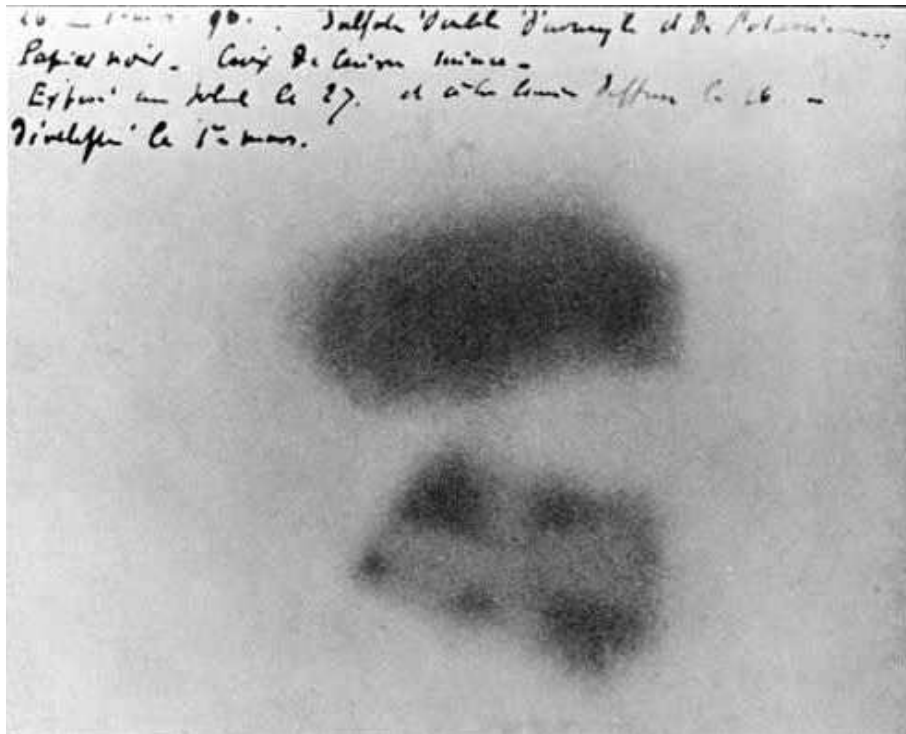
elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

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:

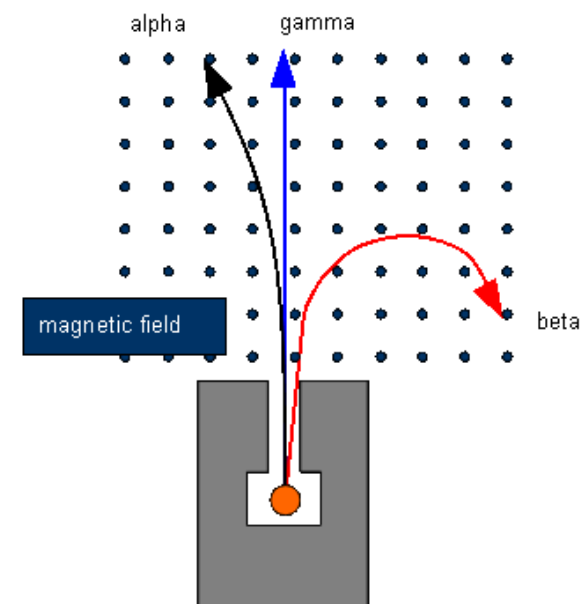
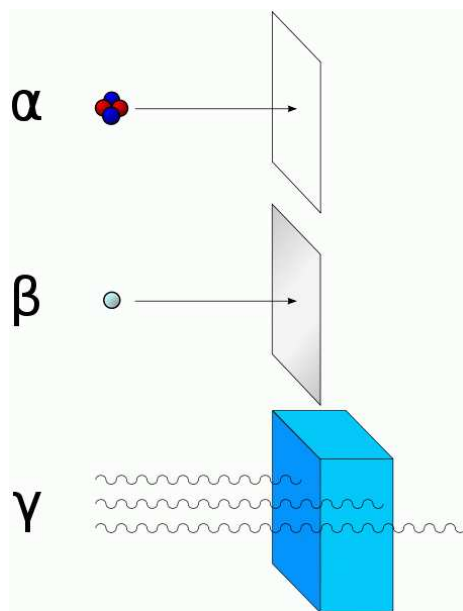
- α - jądra helu ($2p2n$)
- β - elektrony
 β^+ - pozytony
- γ - fotony

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...

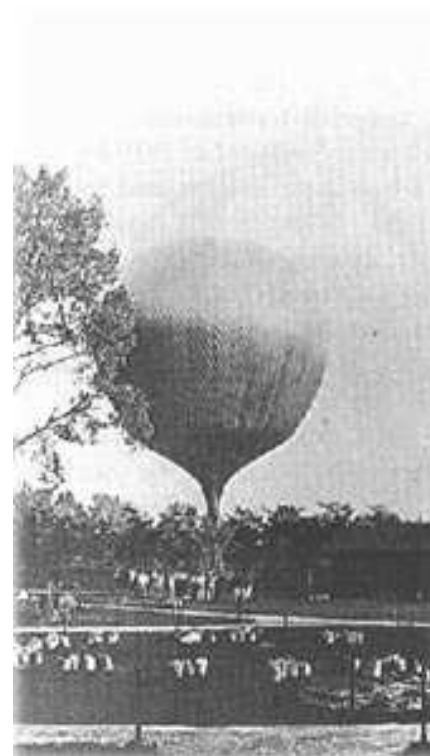
Pierwotne promieniowanie kosmiczne

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

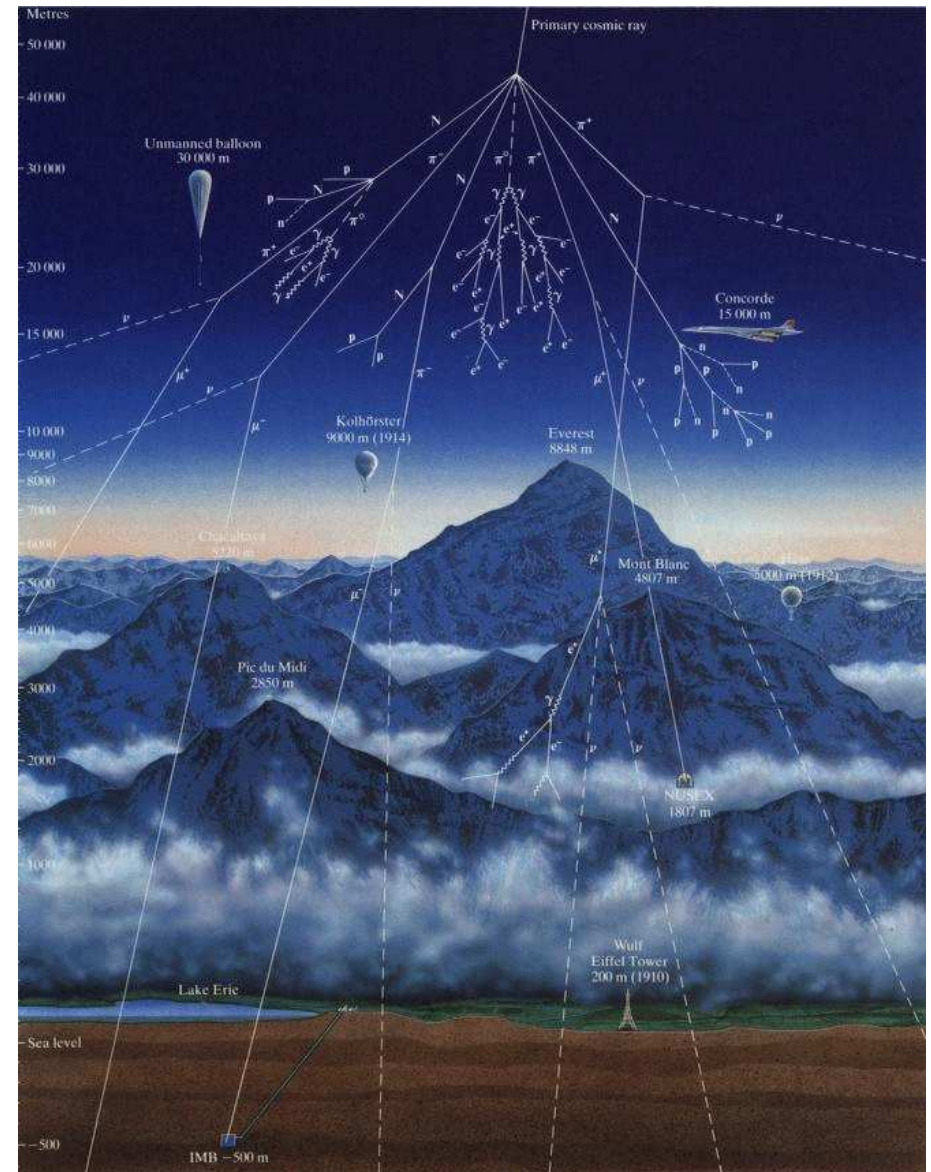
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

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

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

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



Promieniowanie kosmiczne

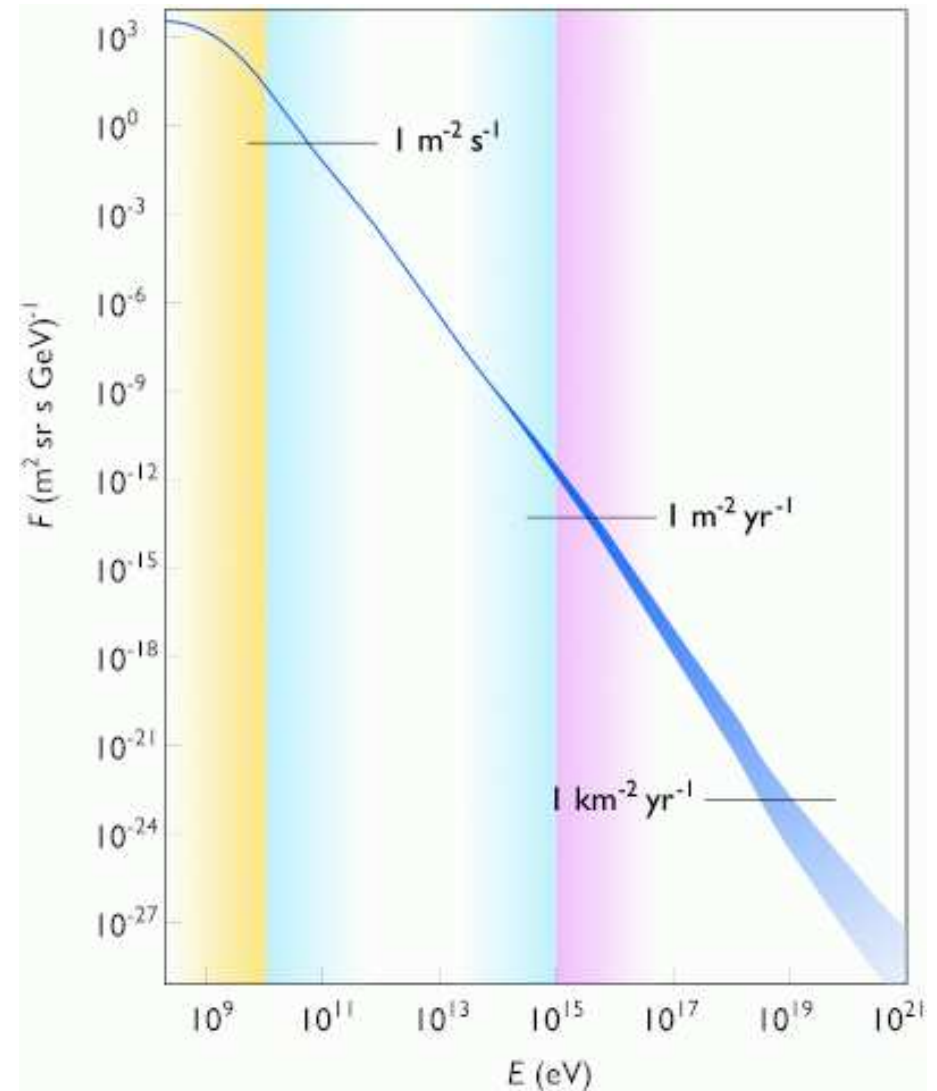
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

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...



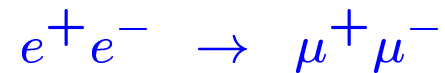
Akcelerator

Dlaczego je budujemy?

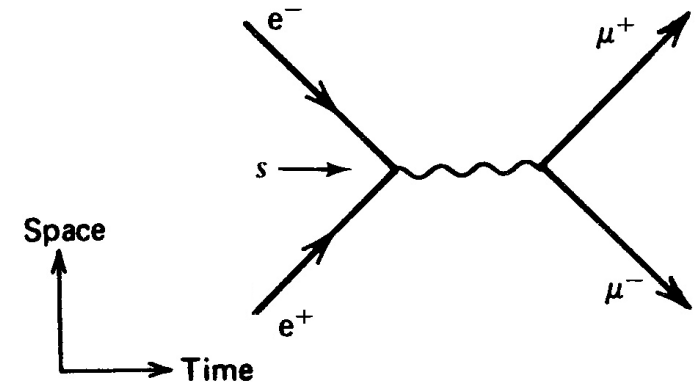
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

Wiemy też, że oddziaływania cząstek zależą od ich energii.

Przykład - **anihilacja** e^+e^- :



Aby wyprodukować nowe cząstki musimy dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy (zasada zachowania energii).



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

Najwyższe energie uzyskujemy zderzając dwie przeciwbieżne wiązki...

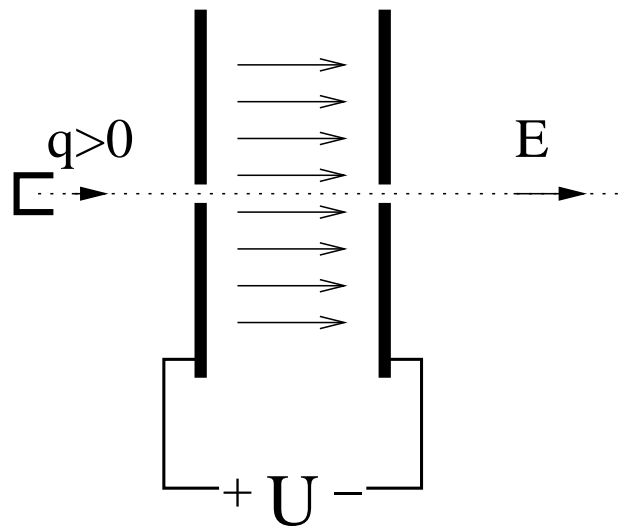
Akceleratory

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 końcową cząstki (jak spadek swobodny z coraz większej wysokości).

Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokiej różnicy napięć:

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

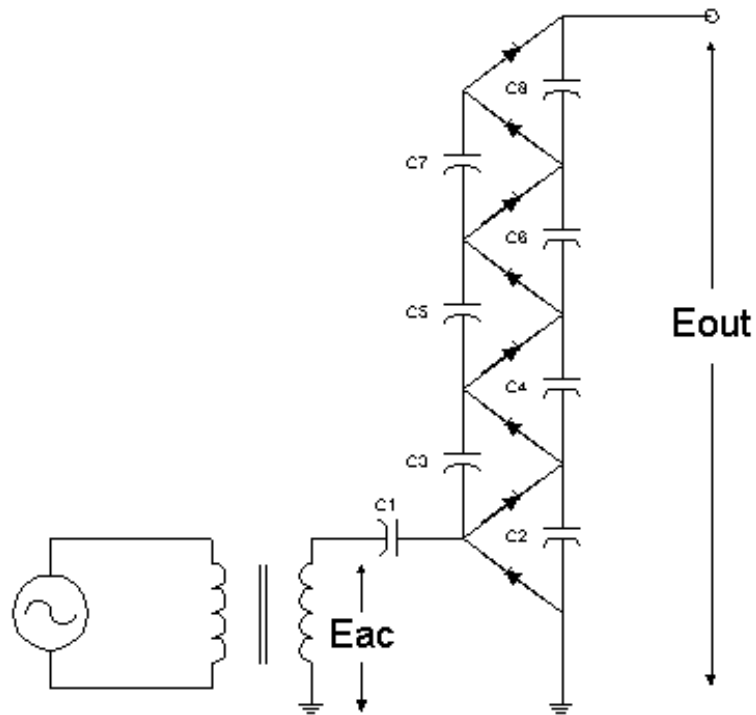
⇒ generator [Van de Graaffa](#) (1931): 1.5 MV

W pewnych dziedzinach wciąż używane

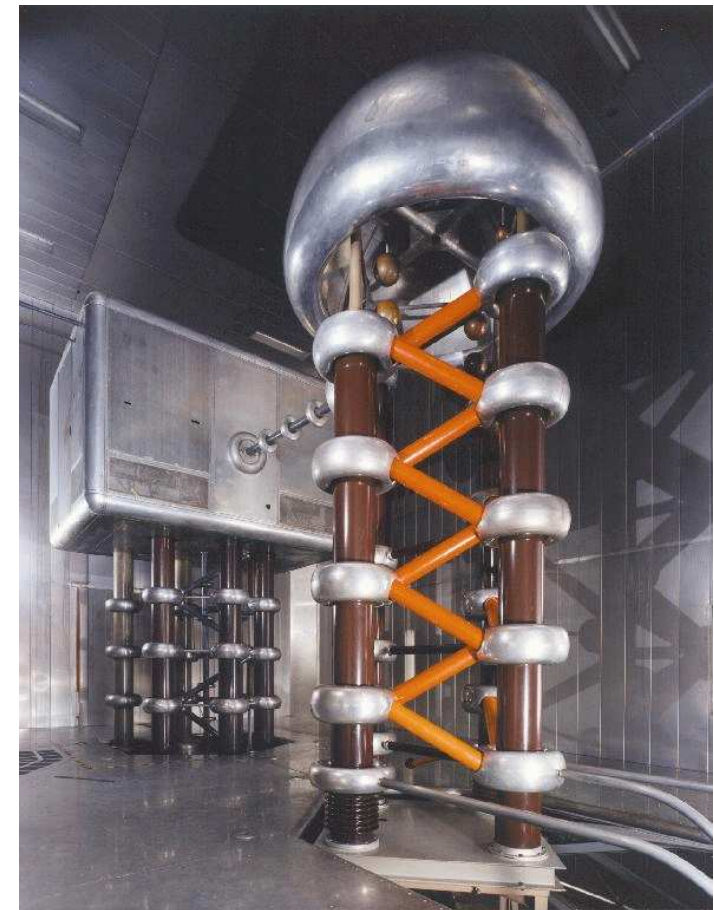
Akcelerator

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



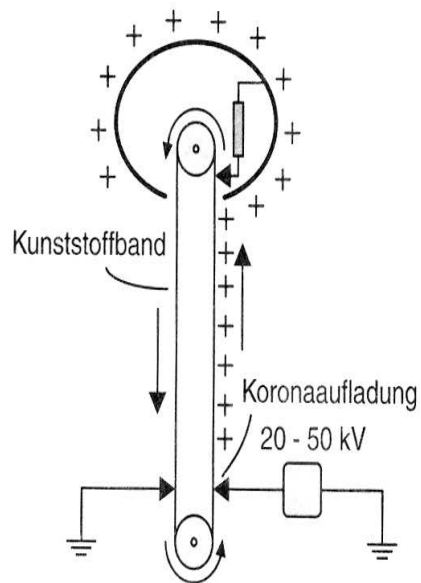
Współczesne urządzenie



Akceleratorzy

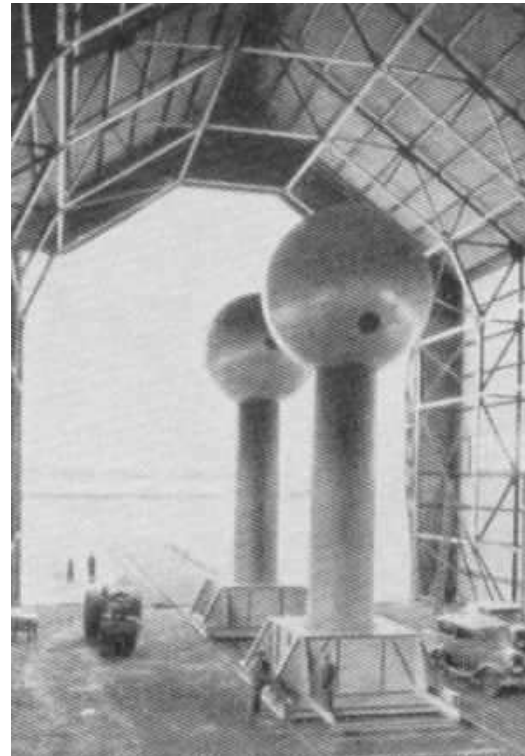
Generator Van de Graaffa

Schemat



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesne urządzenie



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

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

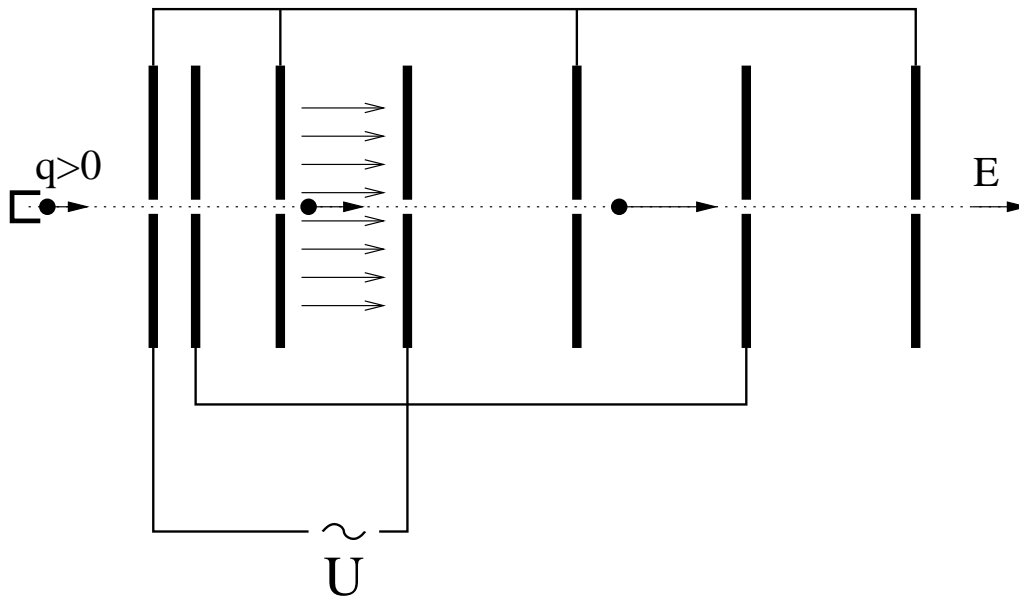
\Rightarrow **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

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.

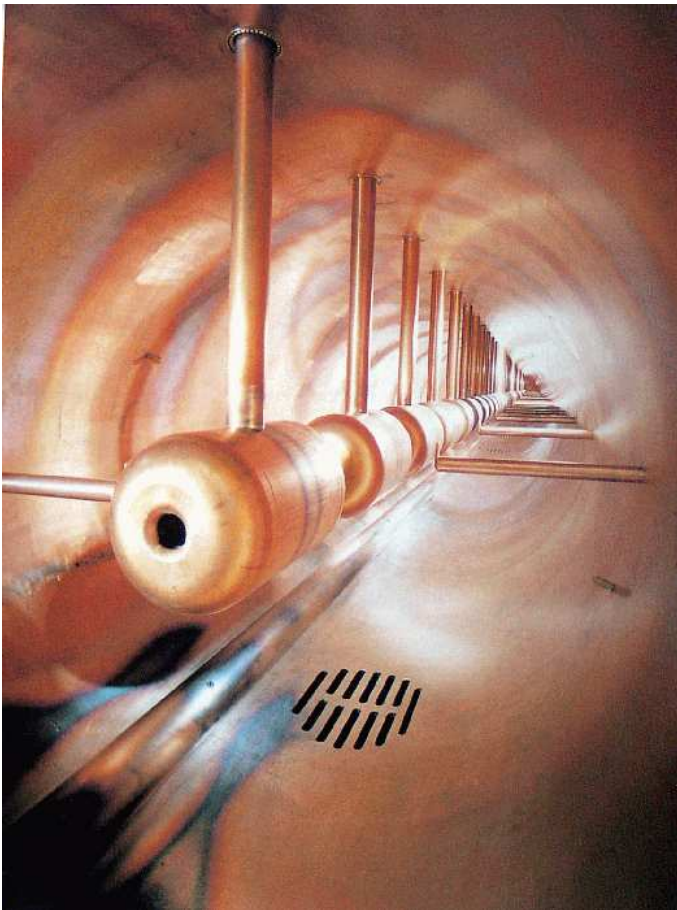
⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

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

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

Akceleratory

Liniowy akcelerator protonów
w ośrodku Fermilab (USA)



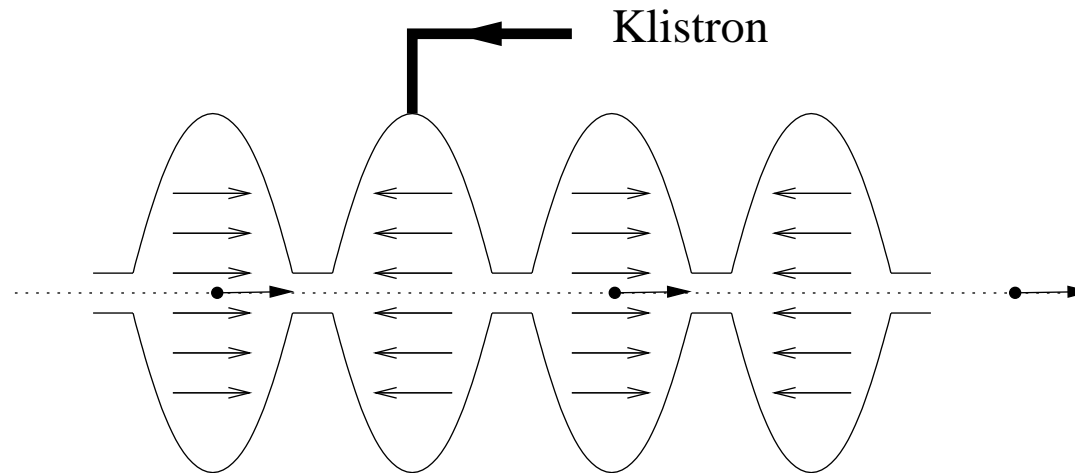
Lioniowy akcelerator protonów
przy CERN SPS



Akcelerator

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

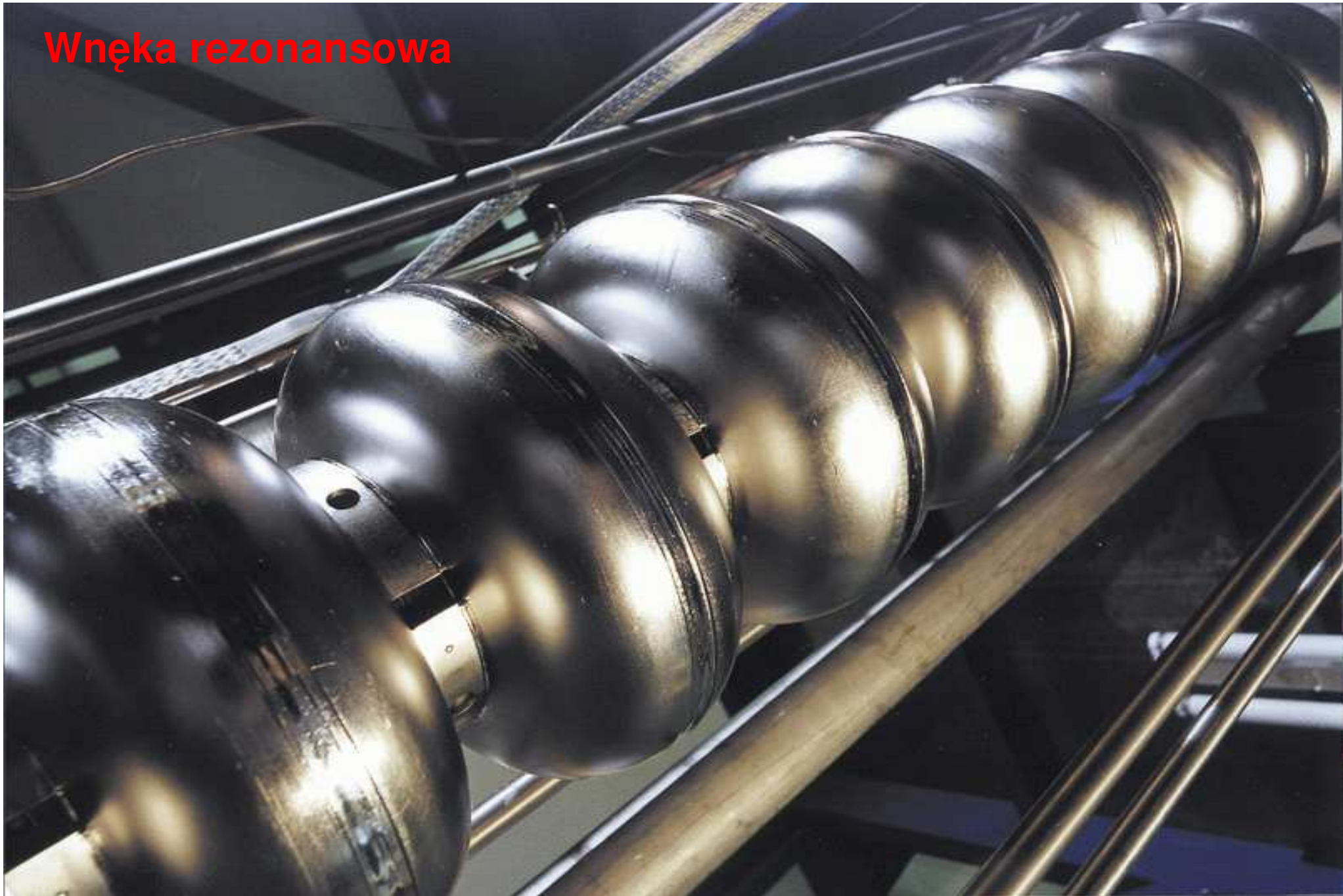
Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

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



Akcelerator

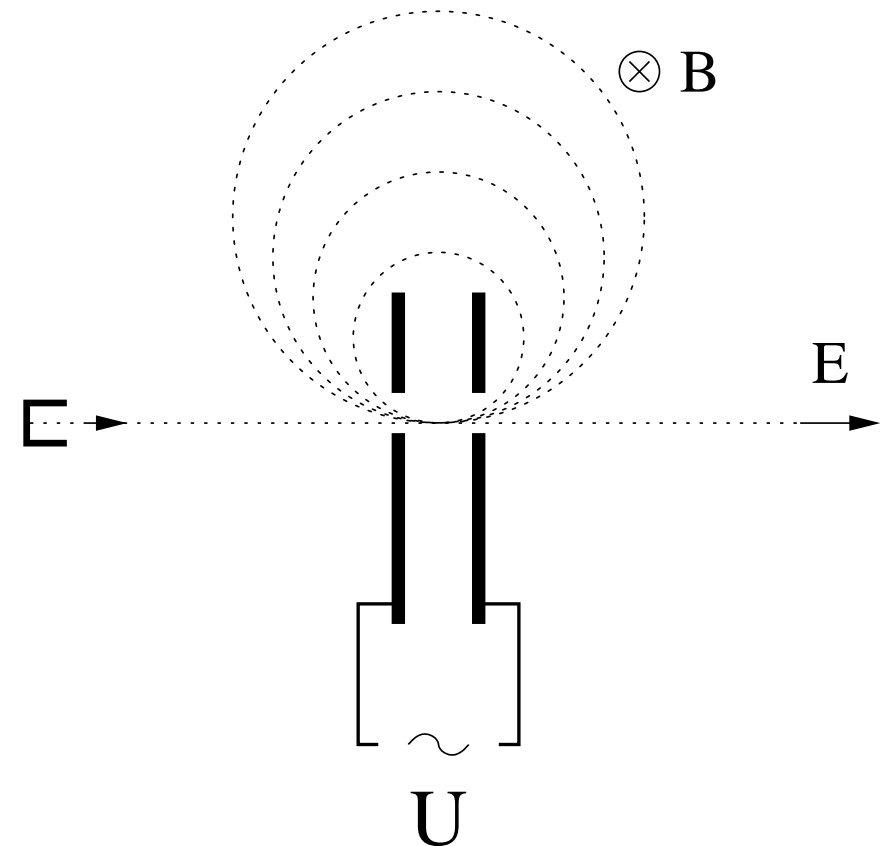
Akcelerator kołowy

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:



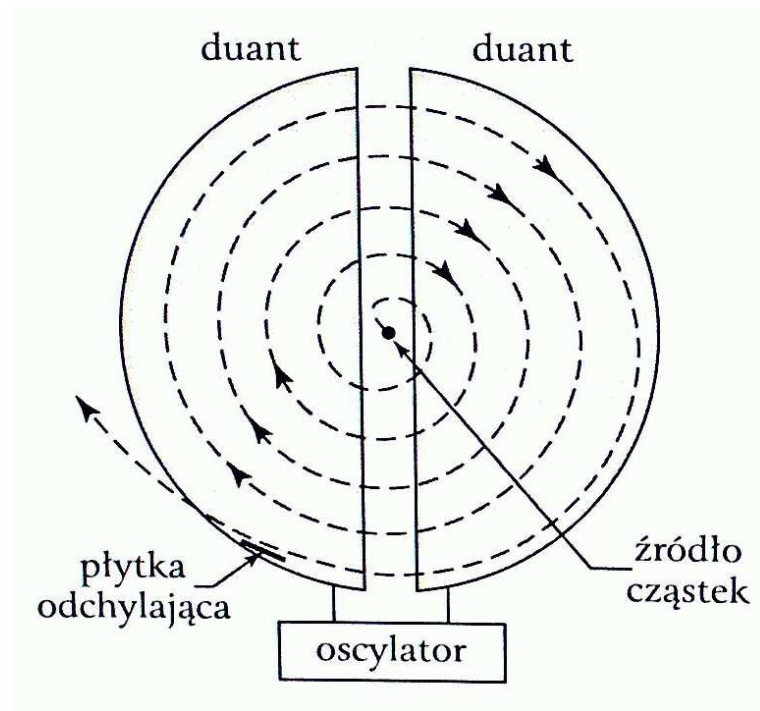
Akcelerator

Cyklotron

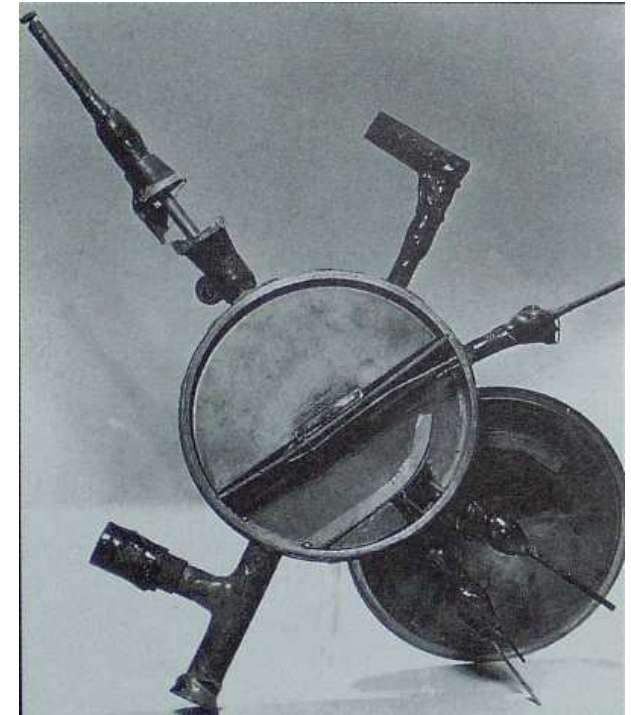
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratorzy

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie



Akceleratorzy

Tunel LHC



Akceleratorzy

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 okrążenie

Ale protony robią 11 tys.
okrążeń na sekundę...



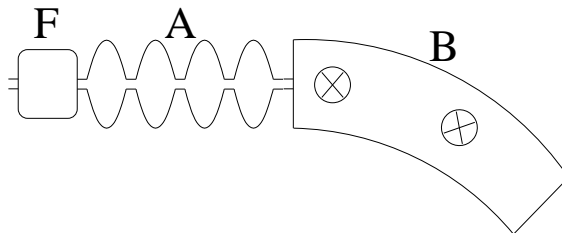
Akcelerator

Akcelerator kołowy

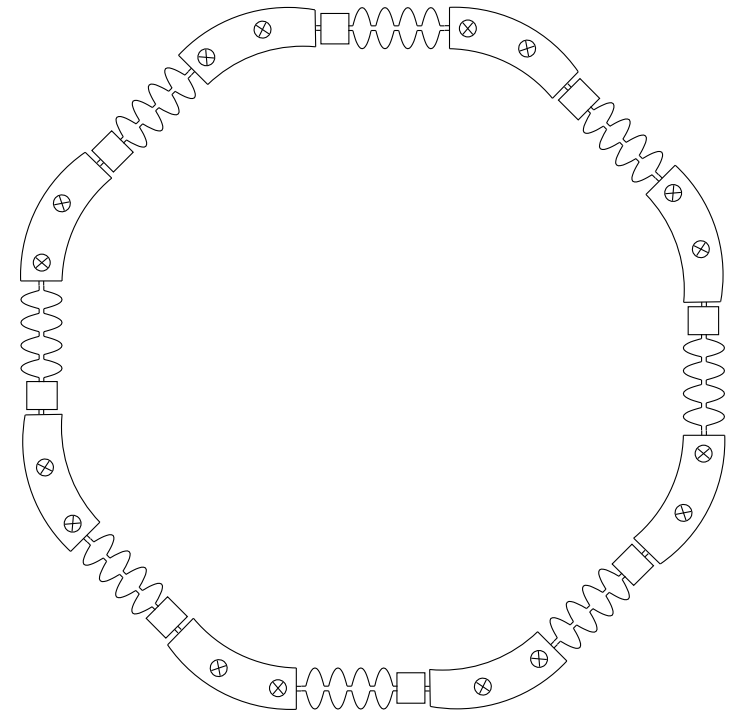
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

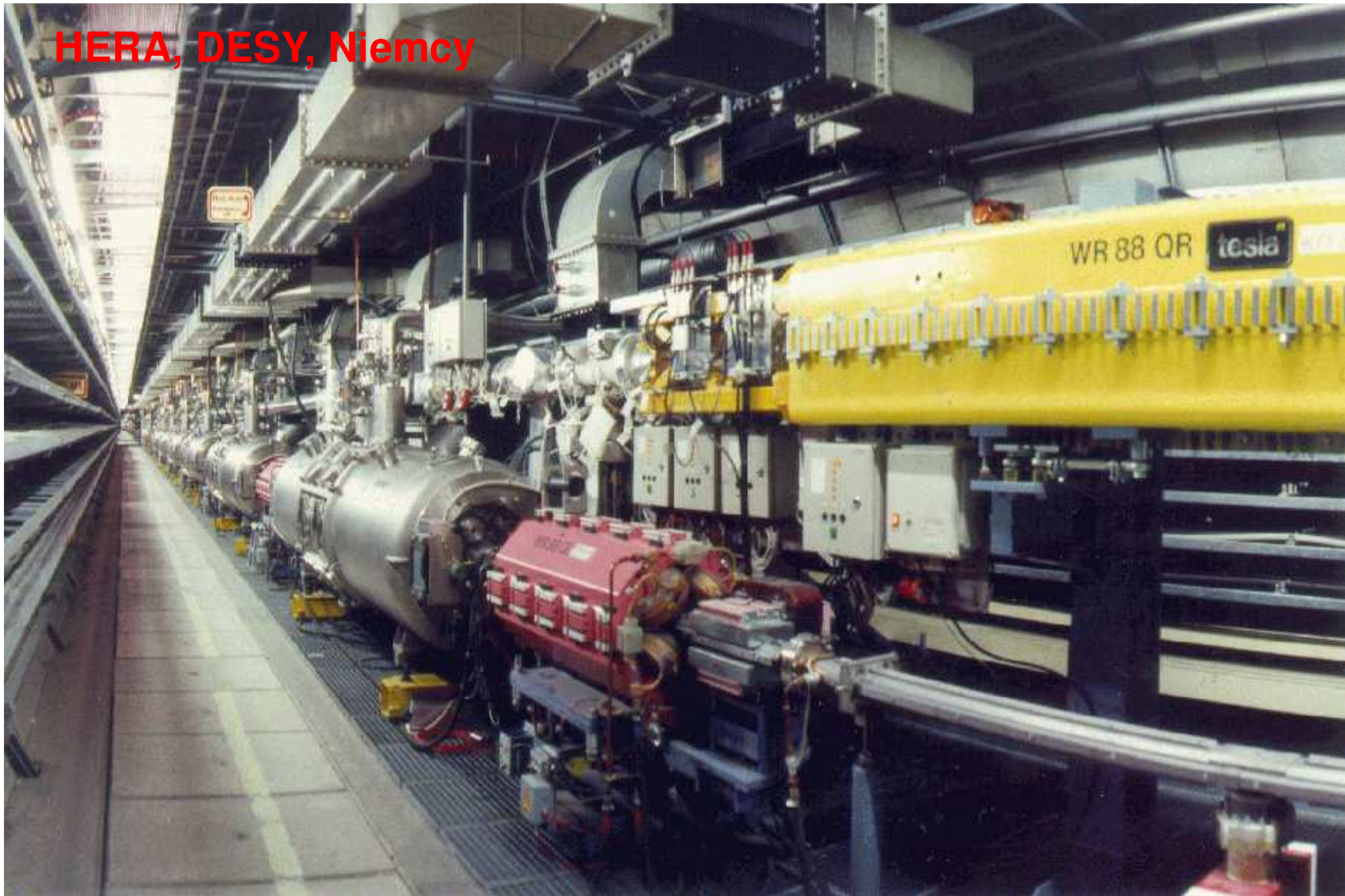
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



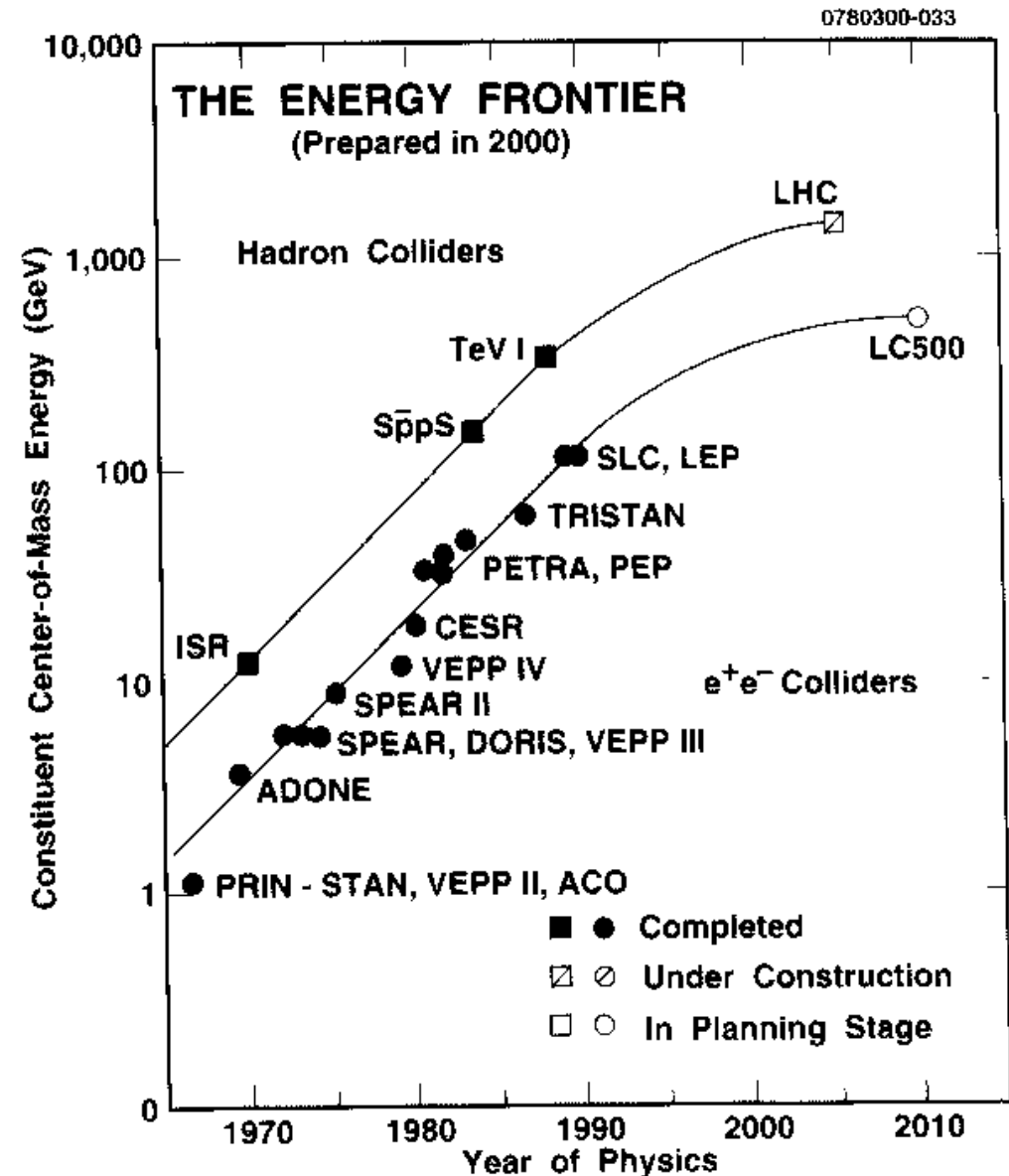
HERA, DESY, Niemcy



Akceleratorzy

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

Niestety, mechanizm przyspieszania cząstek pozostał niezmienny - akceleratorzy 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



Akceleratorzy

Ograniczenia

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

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.

Ale napotykamy **ograniczenie technologiczne**:

obecnie nie potrafimy stabilnie wytwarzać pól silniejszych niż $B_{max} \sim 10$ T.

Dlatego musimy budować coraz większe urządzenia...

Równolegle poszukujemy nowych materiałów nadprzewodzących...

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

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

Rośnie ono bardzo szybko z energią (**moc** $\sim E^4/R^2$).

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

Aby zmniejszyć promieniowanie hamowania musimy zwiększyć promień akceleratora R .

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**

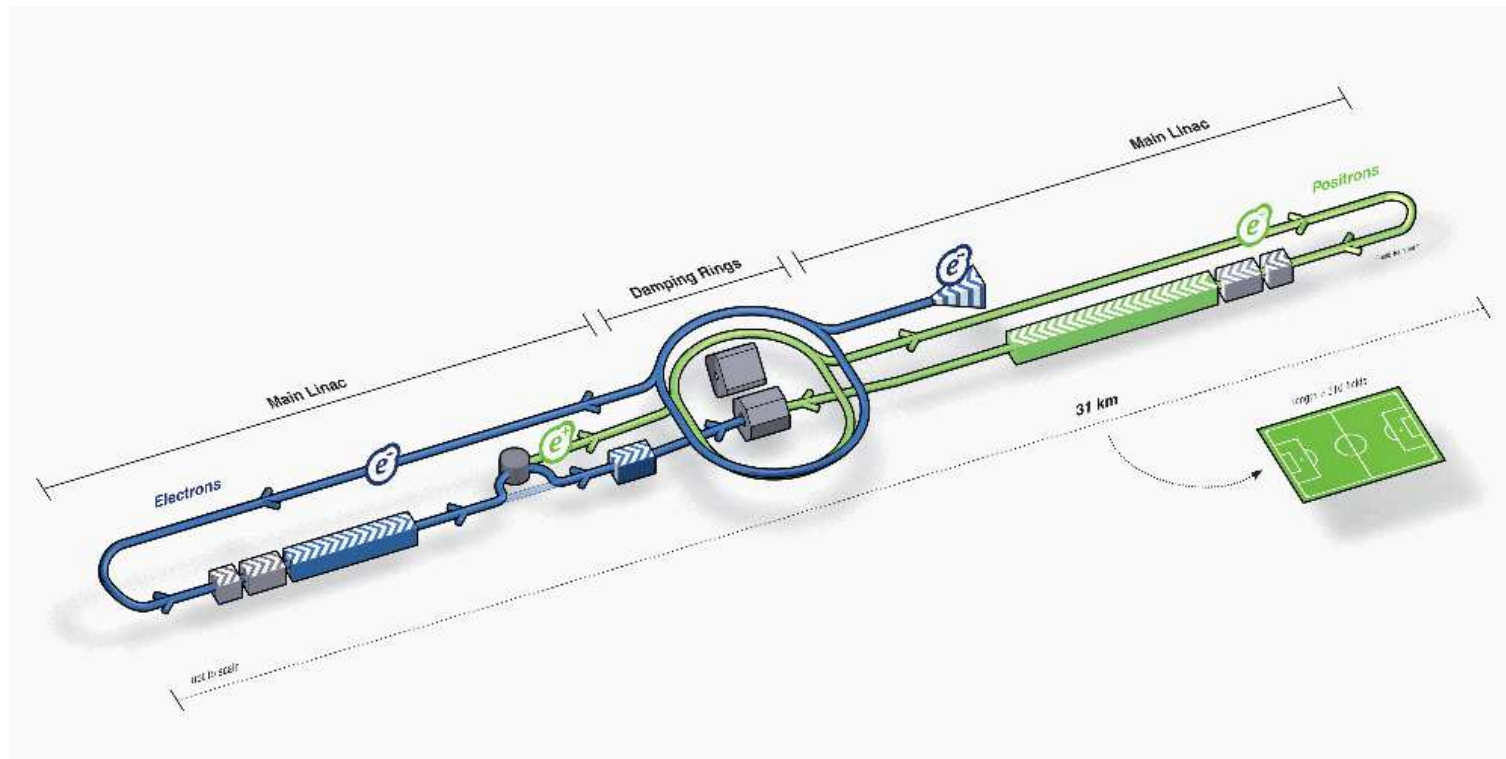


Akceleratory

ILC

Rozważa się budowę kolejnego, po LHC, akceleratora kołowego, o obwodzie 80-100 km. Ale powstanie nie wcześniej niż ok. 2050.

Wcześniej (~ 2025) zbudowany będzie prawdopodobnie **akcelerator liniowy e^+e^-**
ILC - International Linear Collider



Kolajdery

Większość budowanych obecnie akceleratorów to "kolajdery".

Jeden lub dwa akceleratory przyspieszające, a następnie zderzające ze sobą cząstki z dwóch **przeciwbieżnych wiązek**.

W ten sposób uzyskujemy dużo wyższą "energię dostępną", którą można wykorzystać na produkcję nowych cząstek:

$$E^* = 2 \cdot E_{beam}$$

dla wiązek przeciwbieżnych

$$E^* = \sqrt{2 \cdot E_{beam} \cdot m}$$

dla zderzenia cząstki wiązki

ze spoczywającą cząstką ("tarczą")

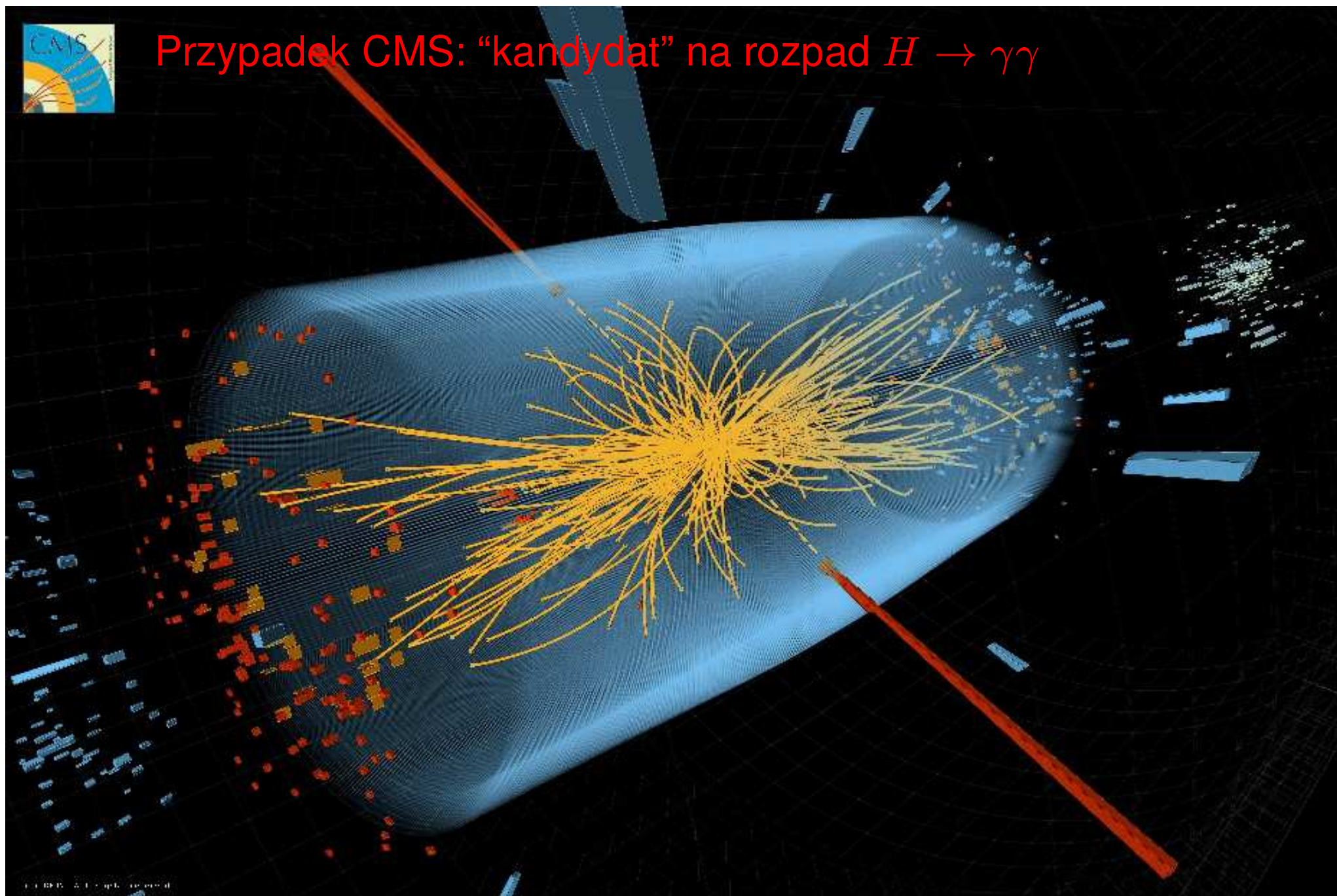
Relatywistyczna redukcja E^* znacznie silniejsza niż w przypadku klasycznym.

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

Przy energiach LHC: o czynnik ~ 100 !...



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





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

