

# Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

## Wszechświat Cząstek Elementarnych

### Wykład 5

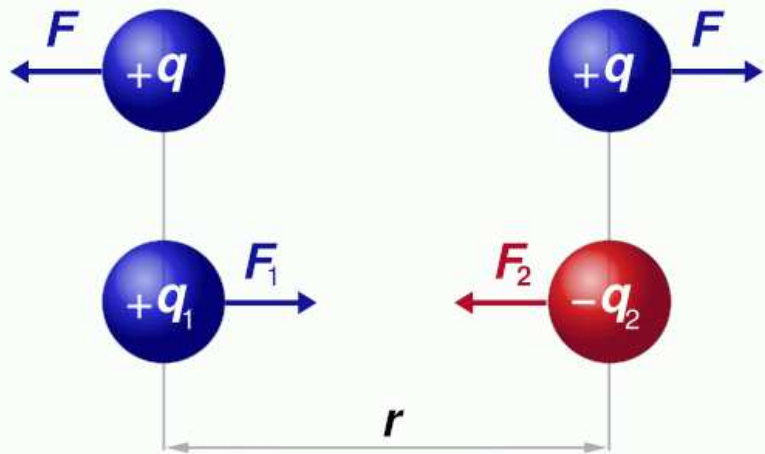
- Wprowadzenie
- Naturalne źródła cząstek
  - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
  - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
  - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

# Wprowadzenie

## Pole elektryczne

Prawo Coulomba

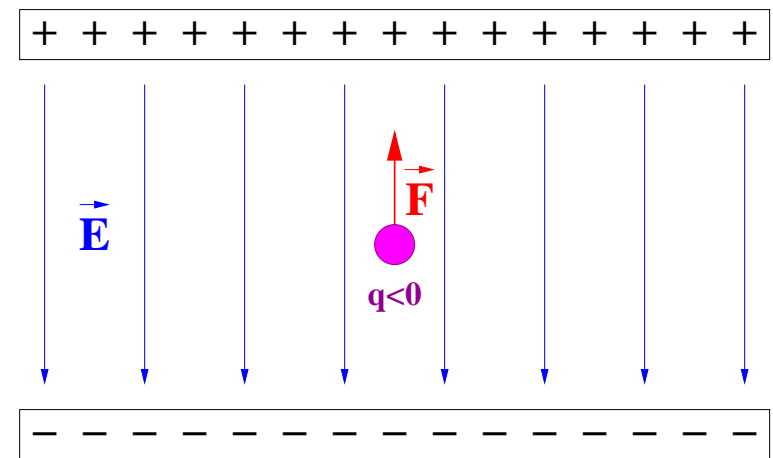
siła oddziaływania między ładunkami:



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

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"  $\vec{E}$ :



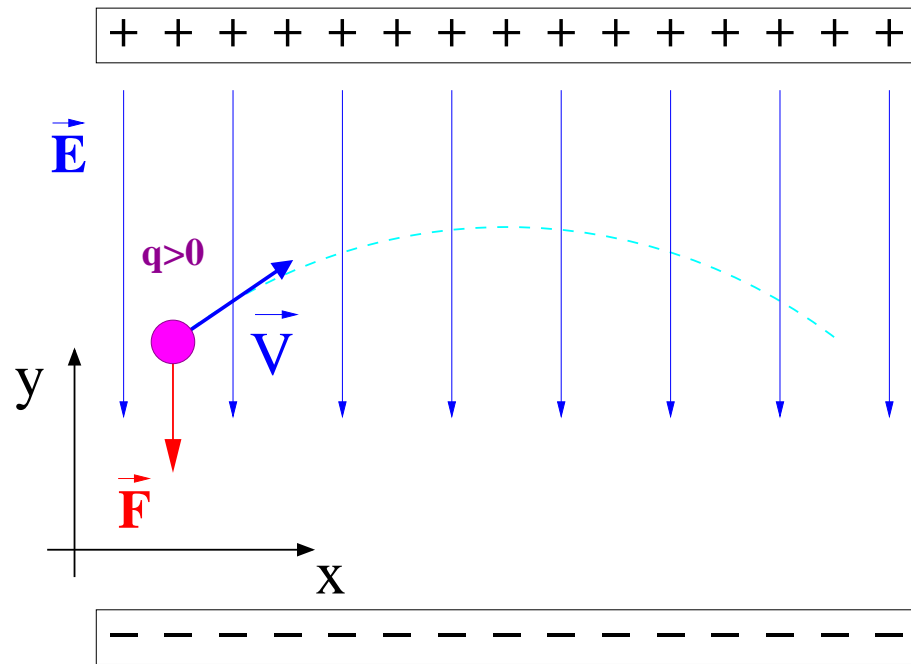
Siła działająca na ładunek  $q$ :

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

# Wprowadzenie

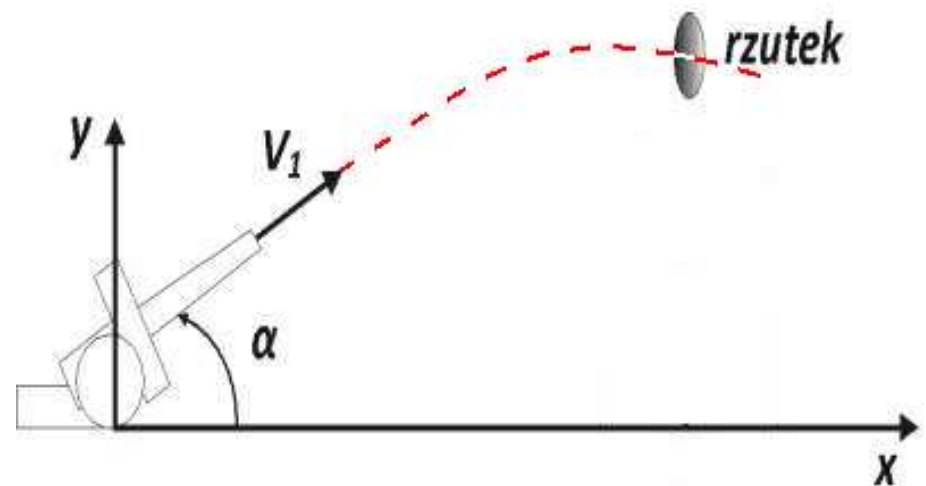
## Pole elektryczne

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



Torem ruchu jest parabola.

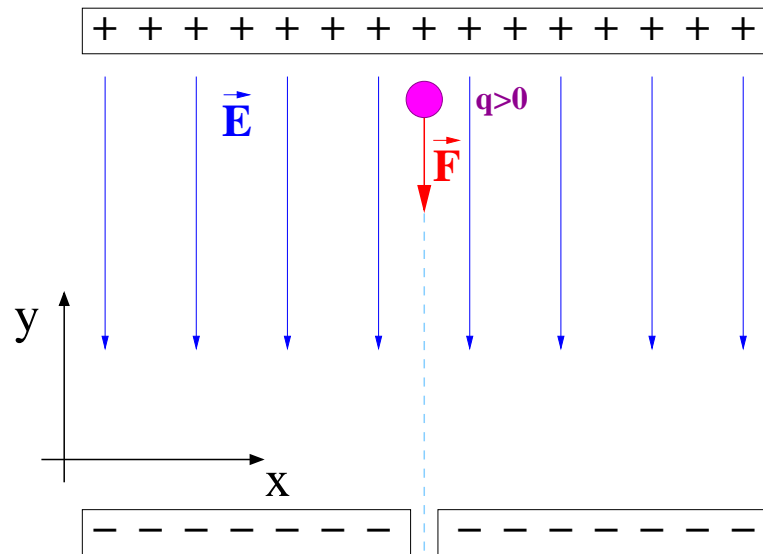
Ruch pod wpływem stałej siły:  
dokładnie tak jak w “rzucie ukośnym”...



# Wprowadzenie

## Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w jednorodnym polu:

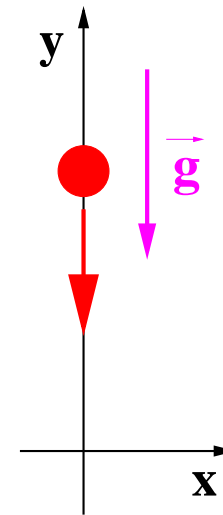


Tor jest prostoliniowy.

Ładunek porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.

Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii potencjalnej.

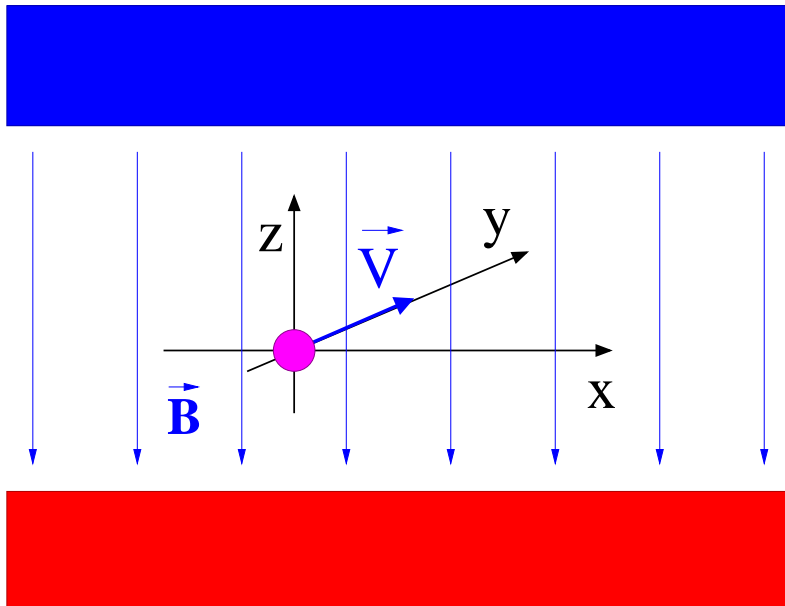
Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w jednorodnym polu grawitacyjnym



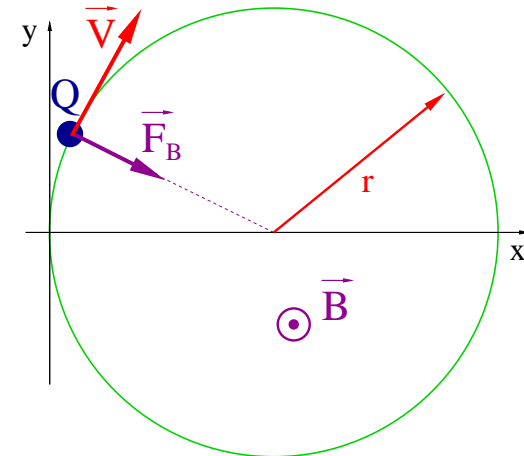
# Wprowadzenie

## Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się w płaszczyźnie prostopadłej do pola:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

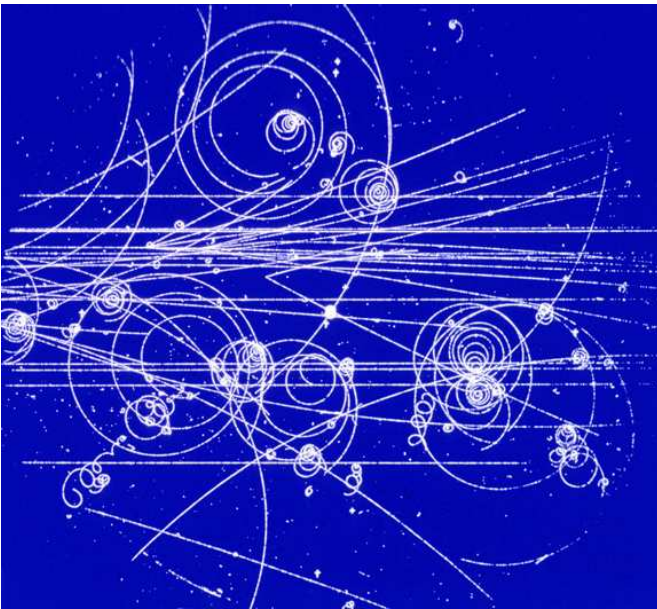
$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

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:



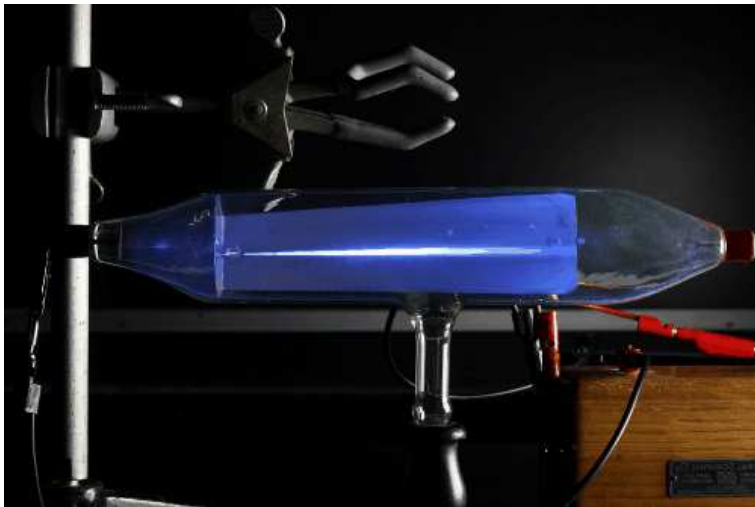
# Wprowadzenie

## Rura Crookesa - pokaz

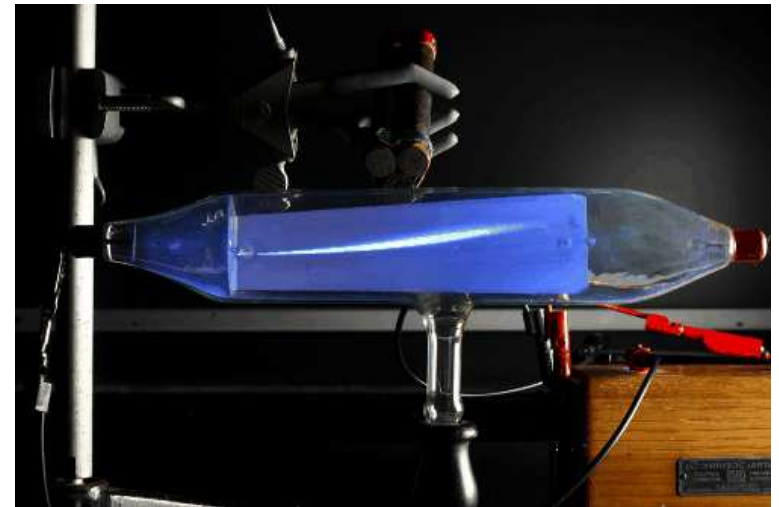
Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym.

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:

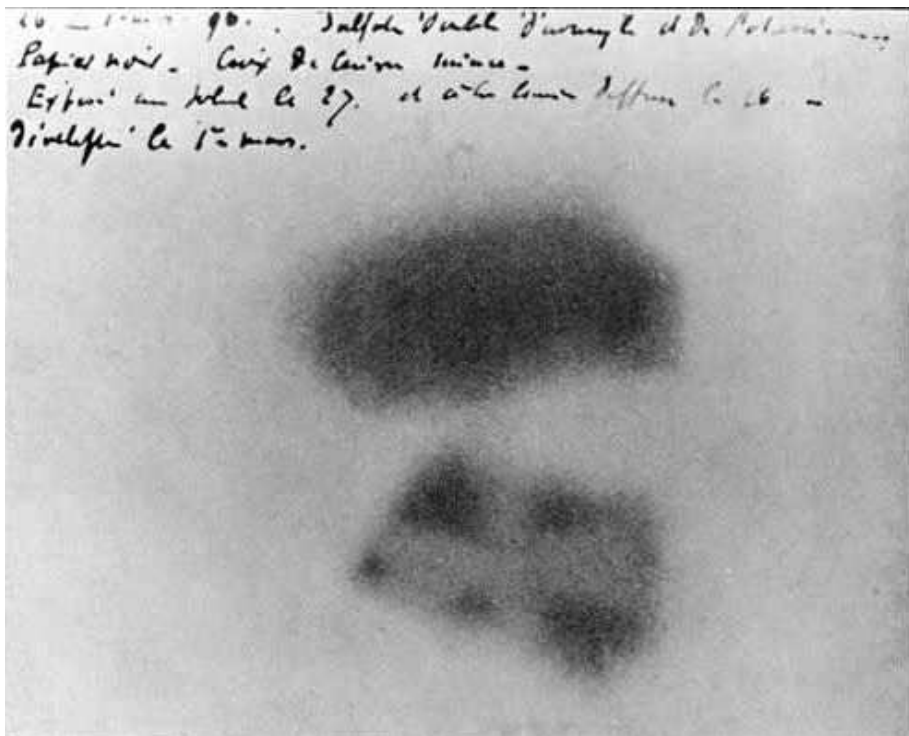
elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

# 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:  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ .

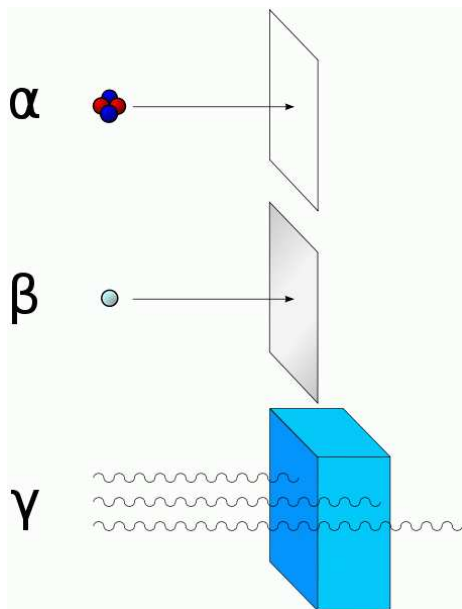
Dziś wiemy, że są to:

- $\alpha$  - jądra helu ( $2p2n$ )
- $\beta$  - elektrony
- $\beta^+$  - pozytony
- $\gamma$  - fotony

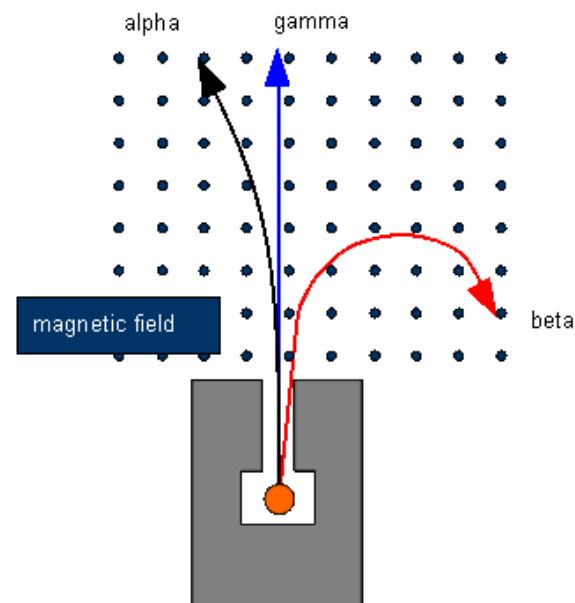
# Źródła cząstek

## 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  $\alpha$  (jądra He)  $\sim 13\%$
- cięższe jądra  $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony  $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



# Promieniowanie kosmiczne

## Wtórne promieniowanie kosmiczne

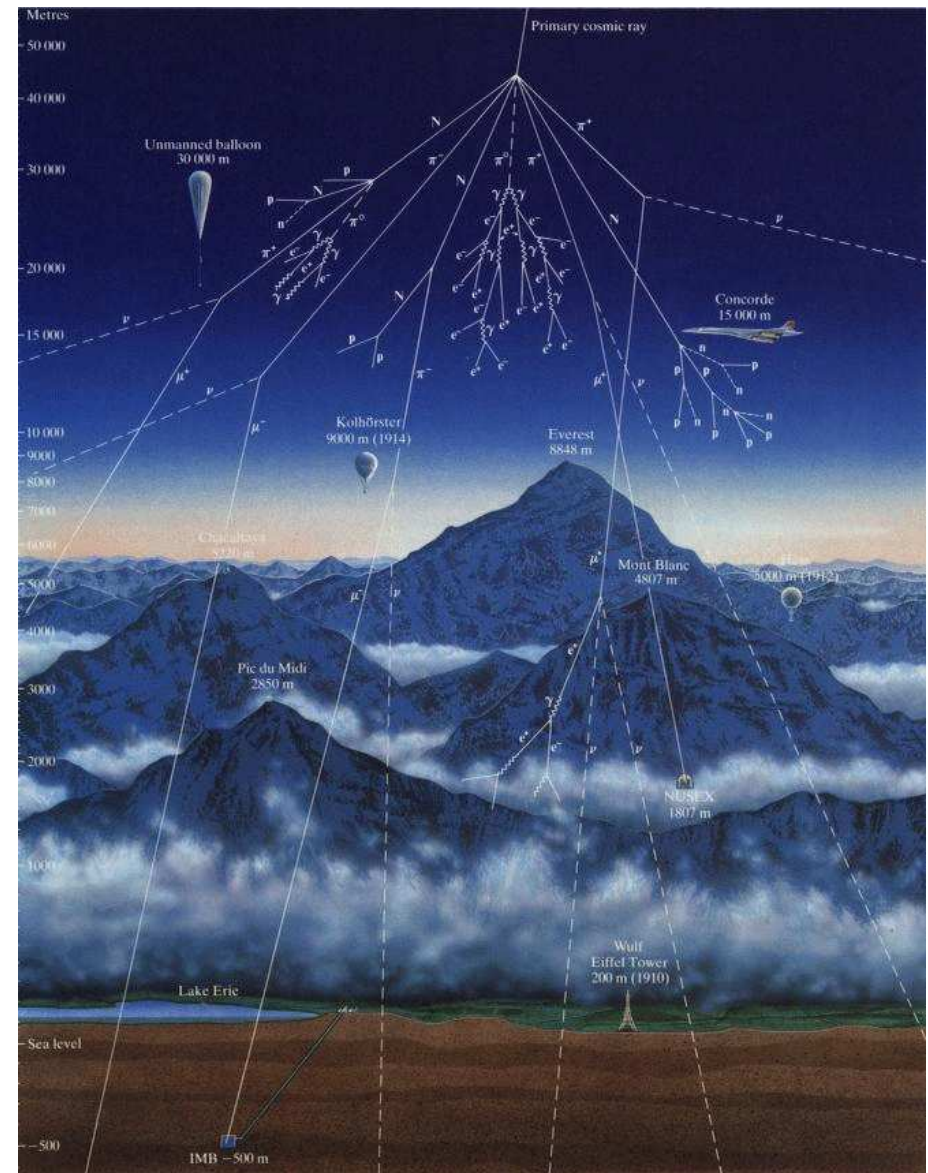
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

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

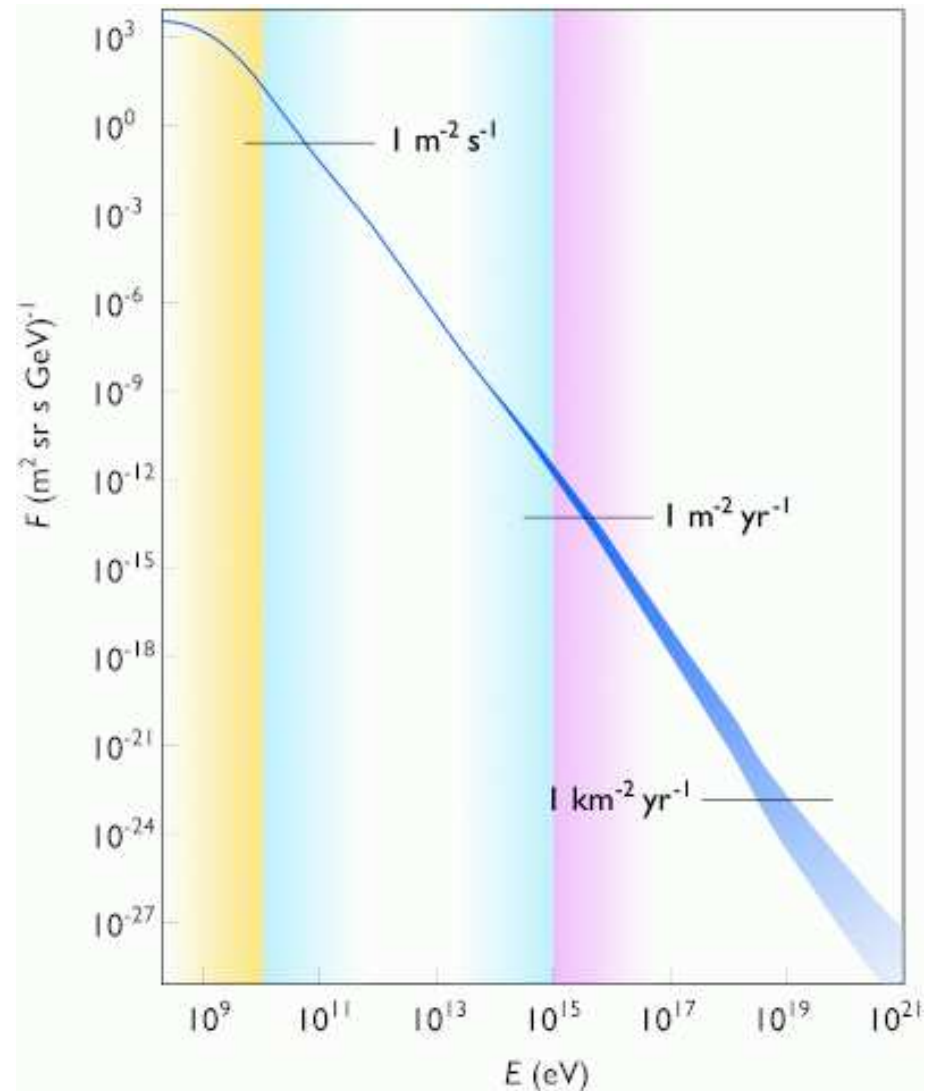
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Okazuje się, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do  $5 \cdot 10^{19}$  eV  $\sim 10$  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?

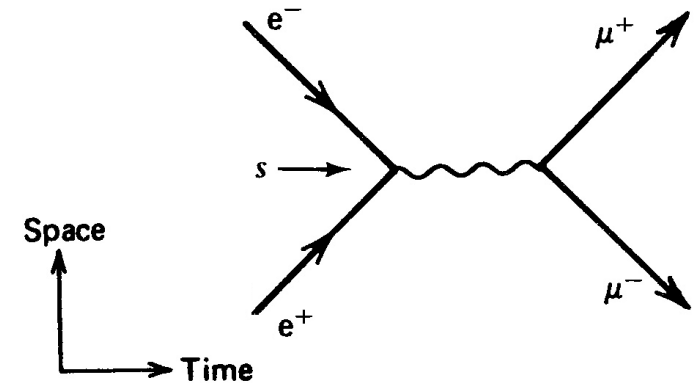
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

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.

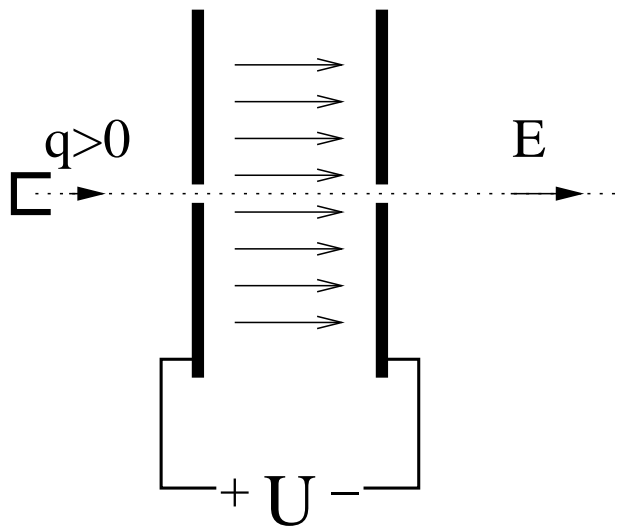
# Akceleratory

## 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

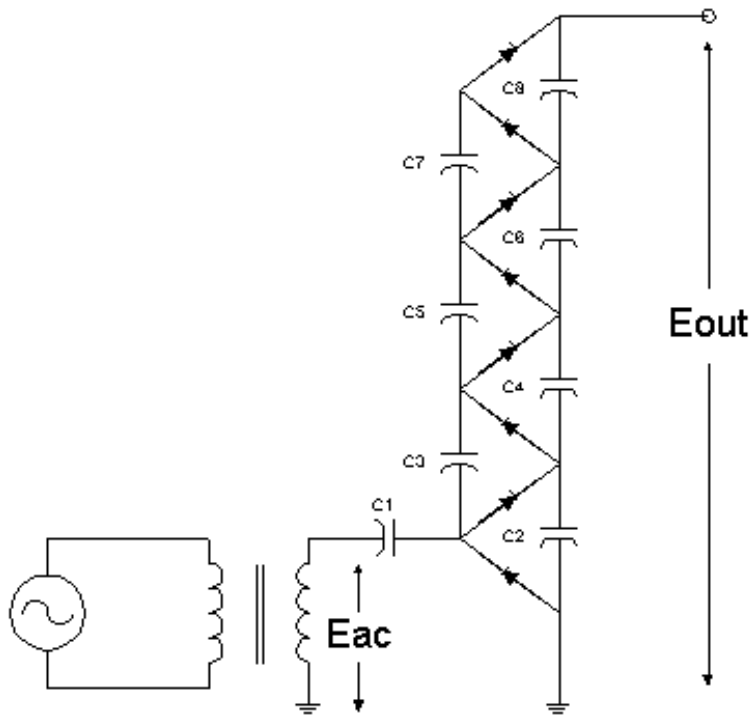
W pewnych dziedzinach wciąż używane



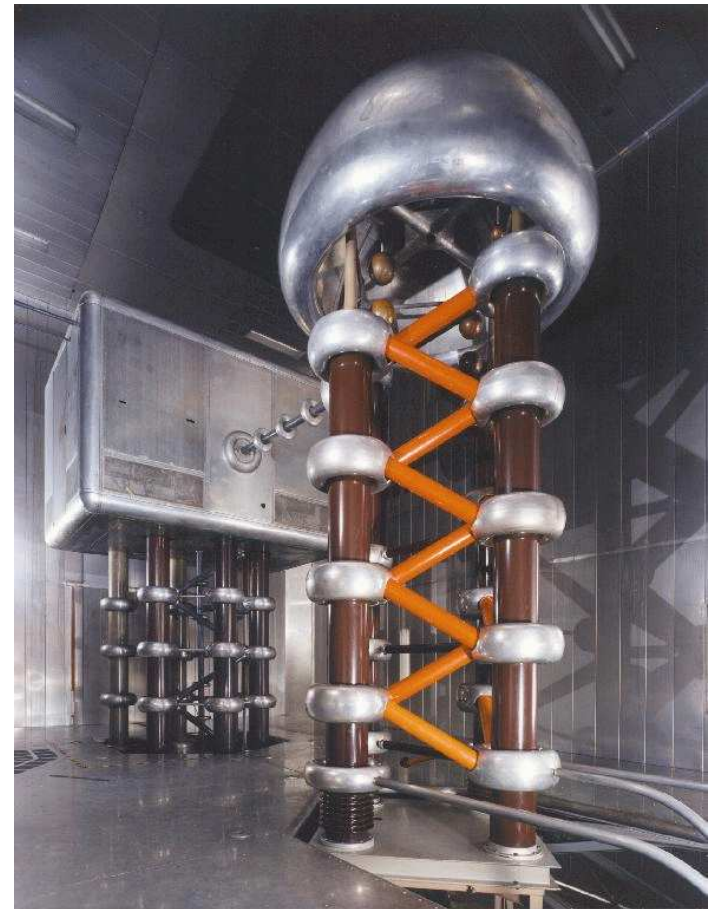
# Akceleratory

## Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



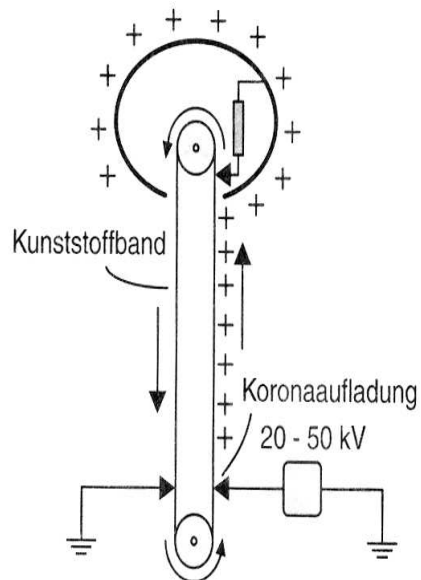
Współczesne urządzenie



# Akceleratory

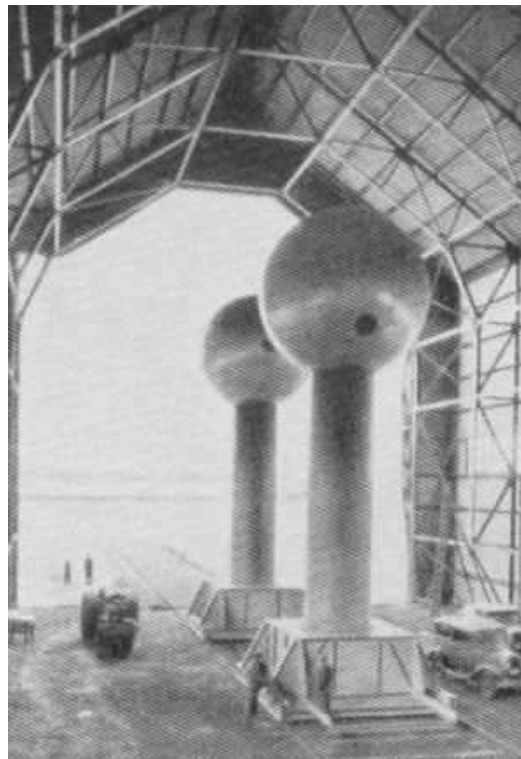
## Generator Van de Graaffa

### Schemat



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...**

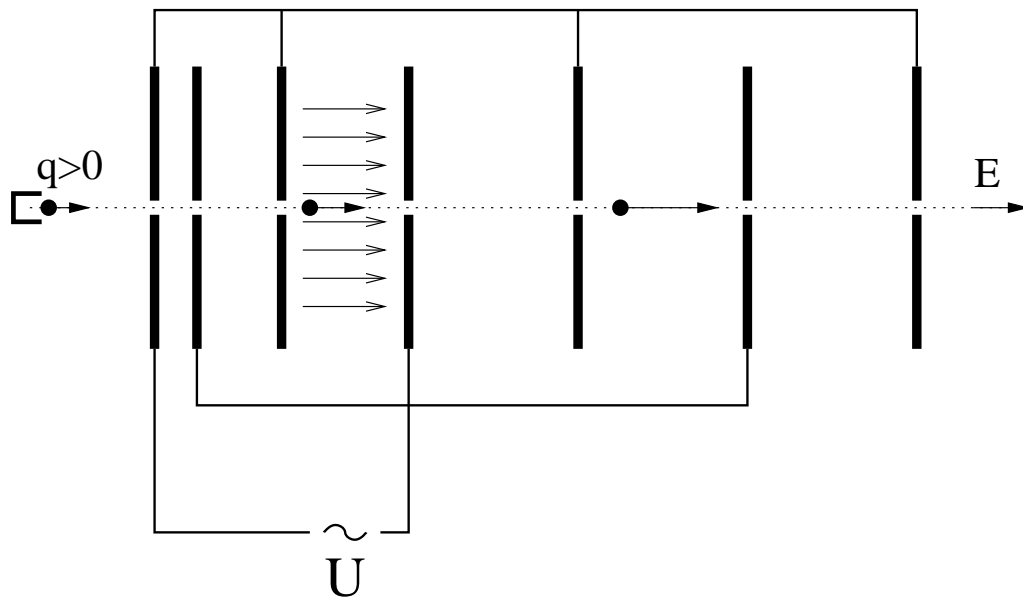
# Akceleratory

## 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.

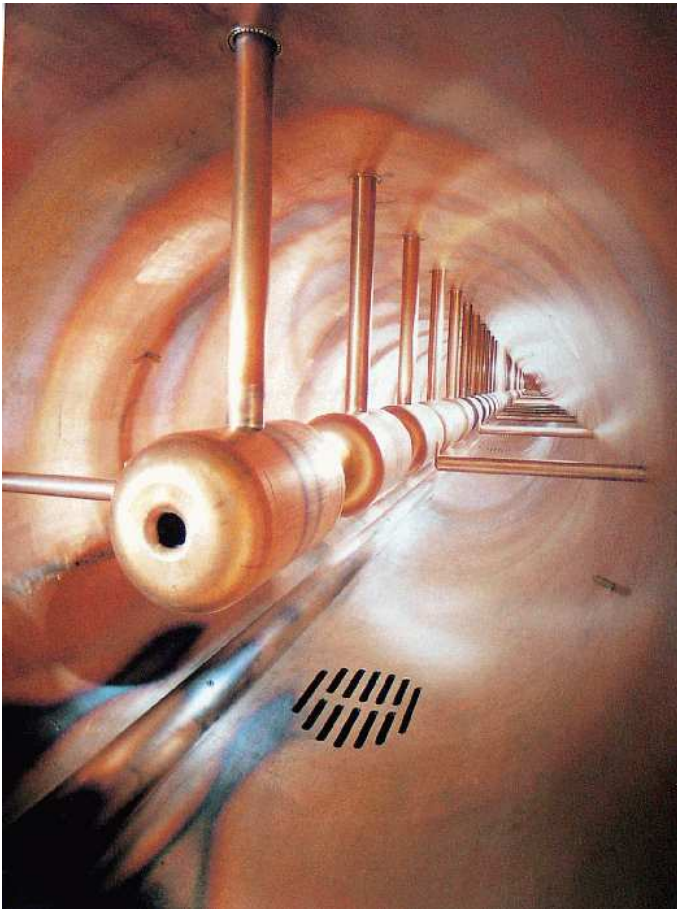
⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

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

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

# Akceleratory

Liniowy akcelerator protonów  
w ośrodku Fermilab (USA)



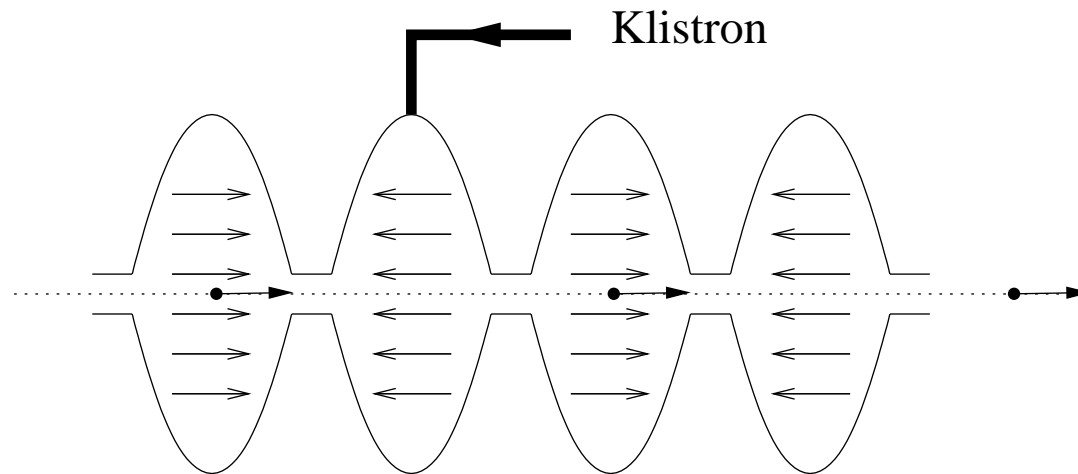
Lioniowy akcelerator protonów  
przy CERN SPS



# Akceleratory

## Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

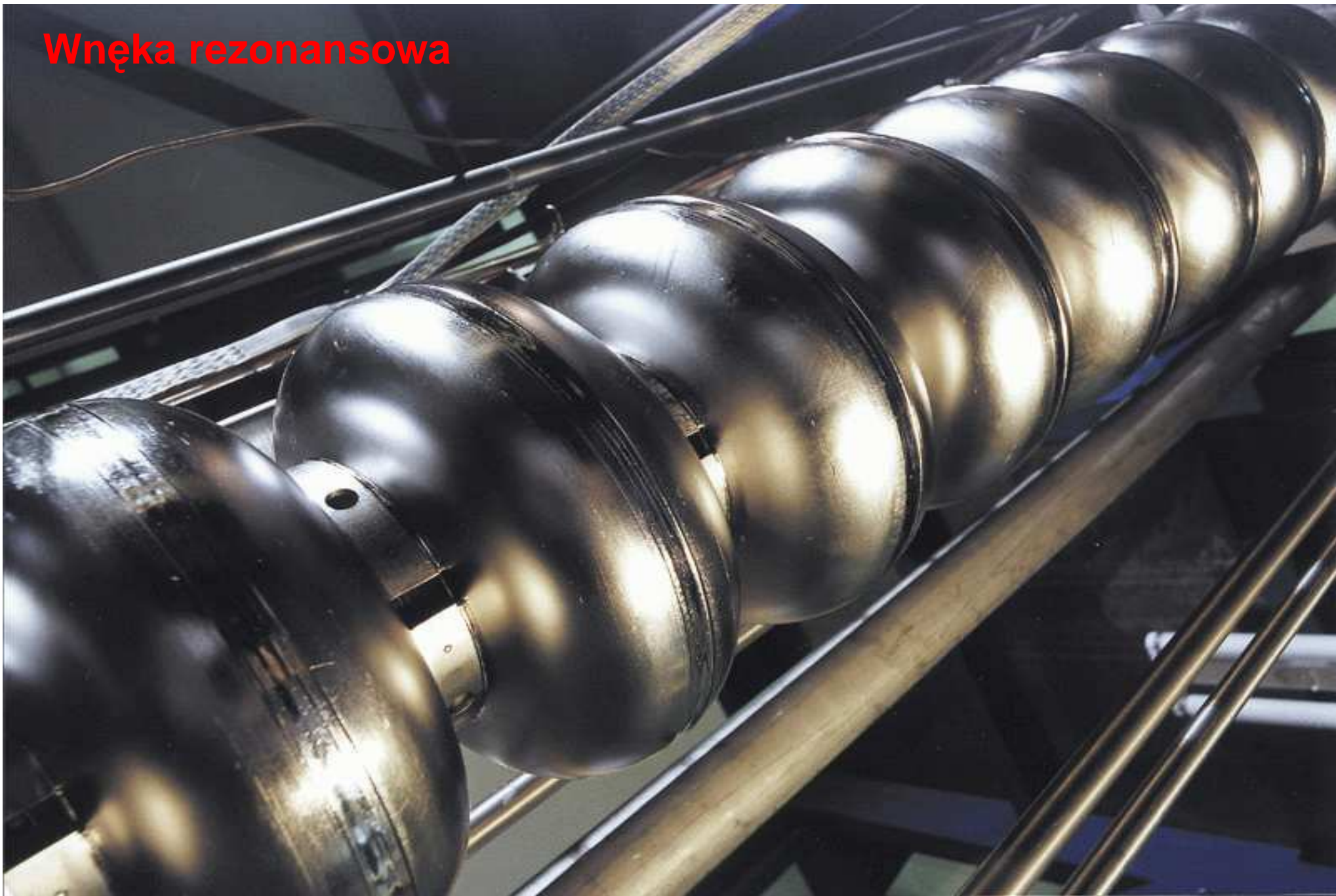
Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

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  $\sim 100$  m

## Wnęka rezonansowa



# Akceleratory

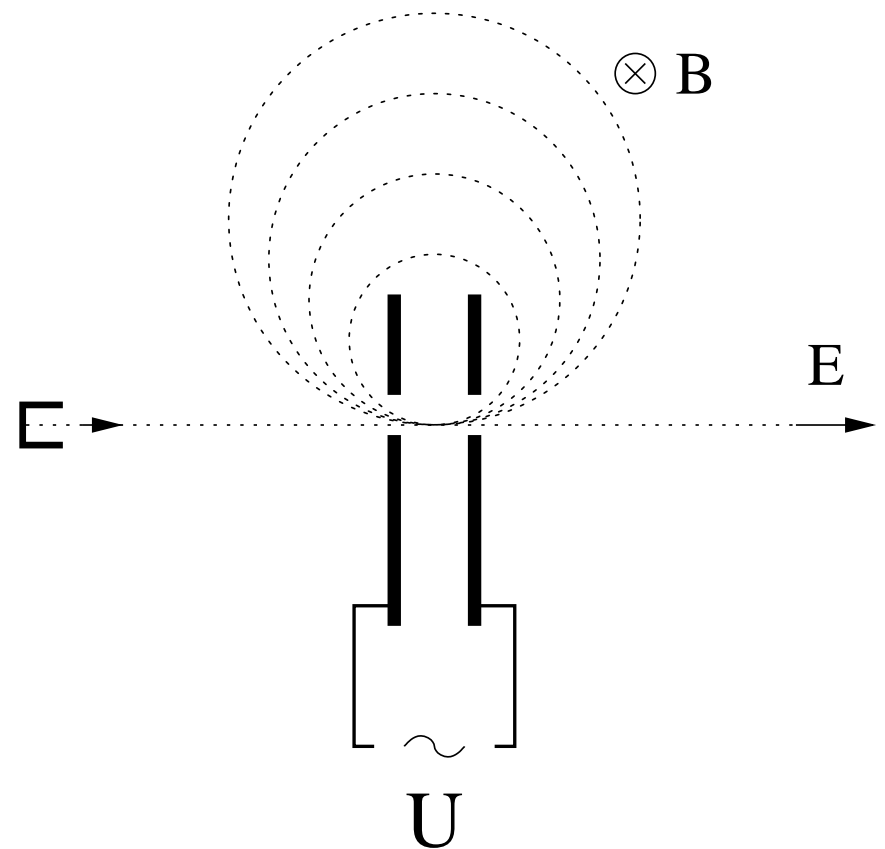
## Akcelerator kołowy

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:



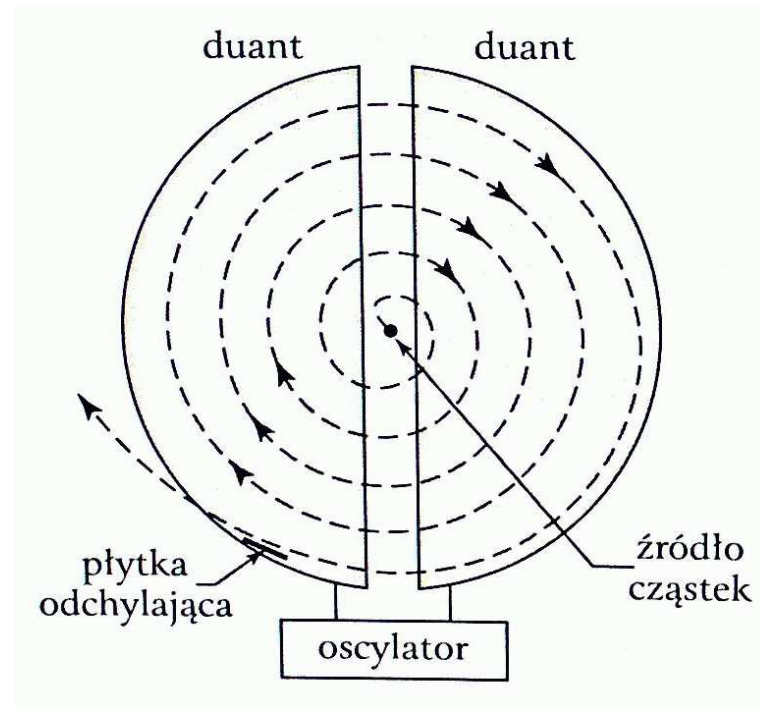
# Akceleratory

## Cyklotron

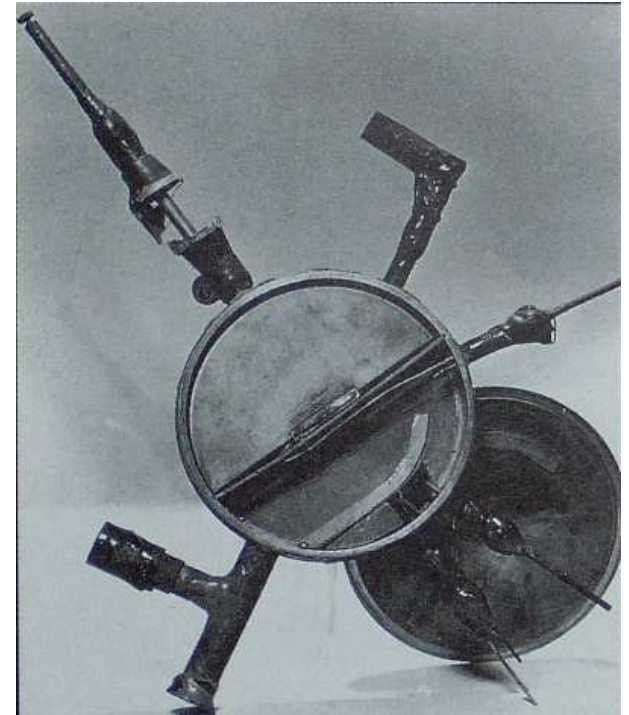
Ernest Lawrence



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 okrążenie**



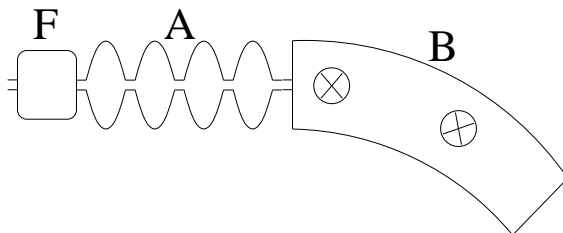
# Akceleratory

## Akcelerator kołowy

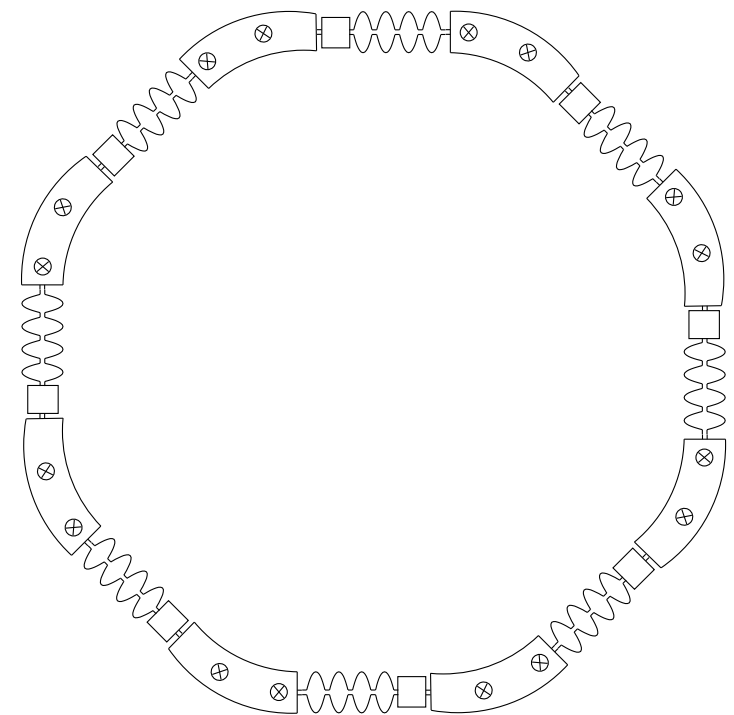
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

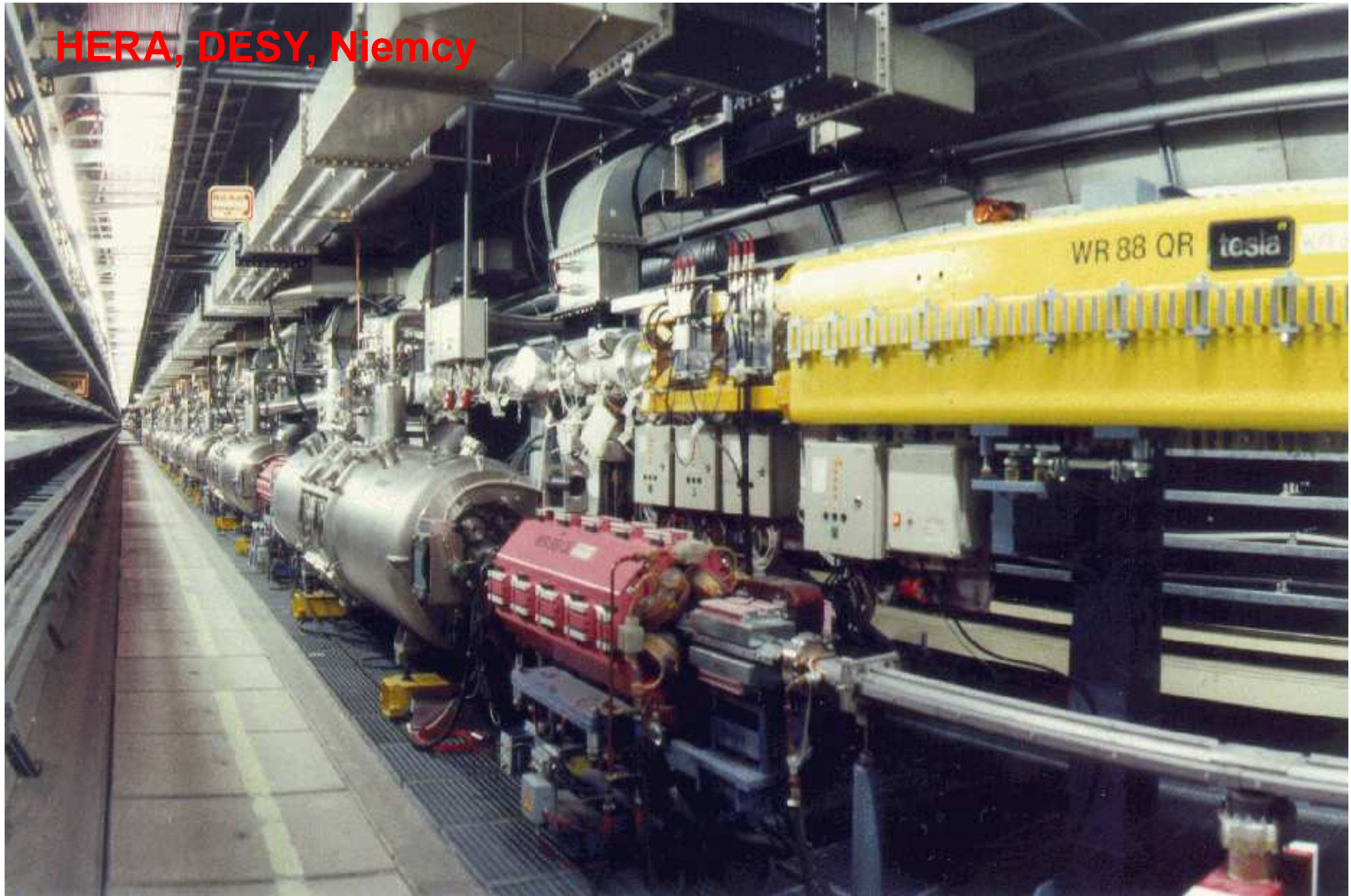
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



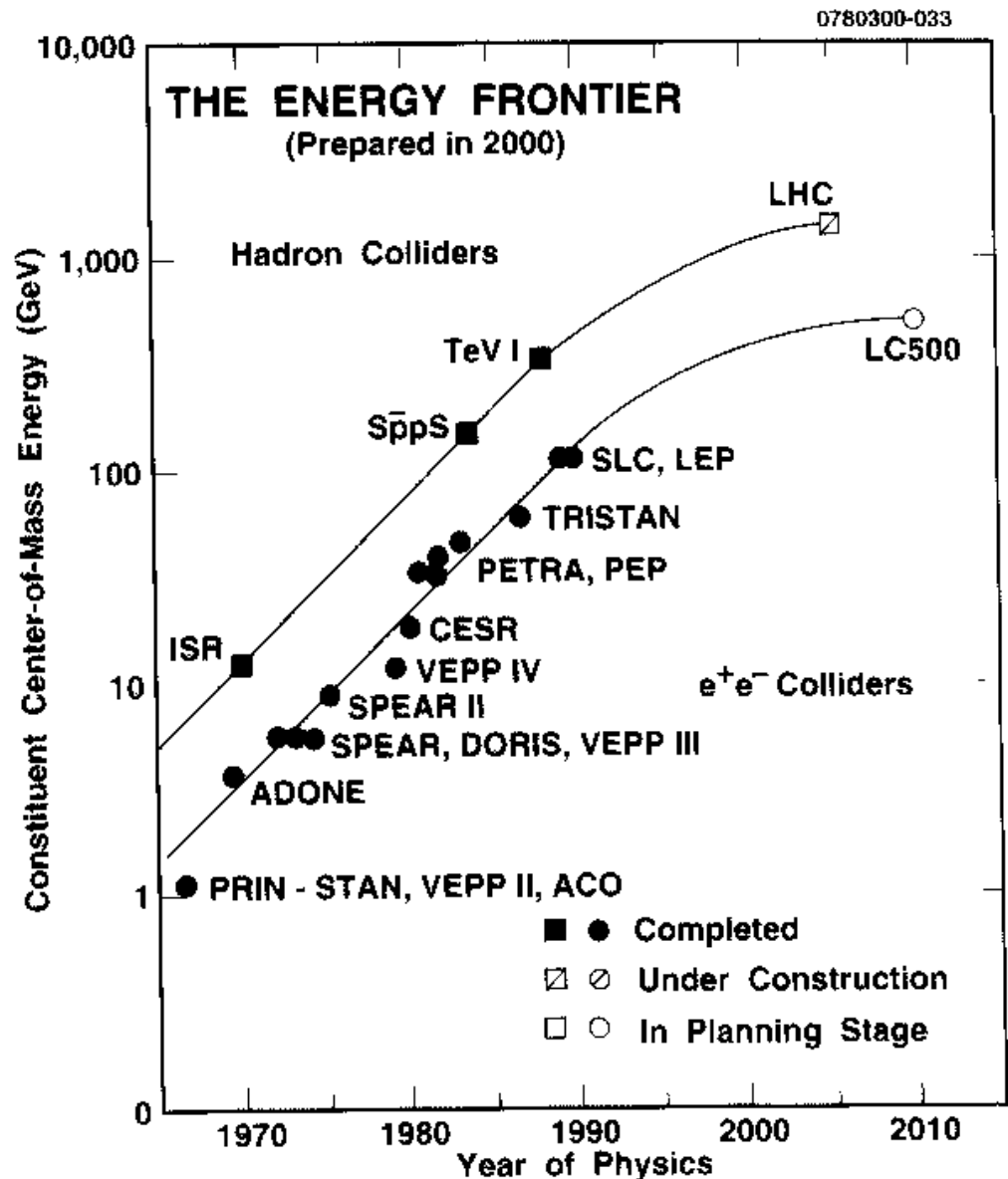
HERA, DESY, Niemcy



# 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 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**



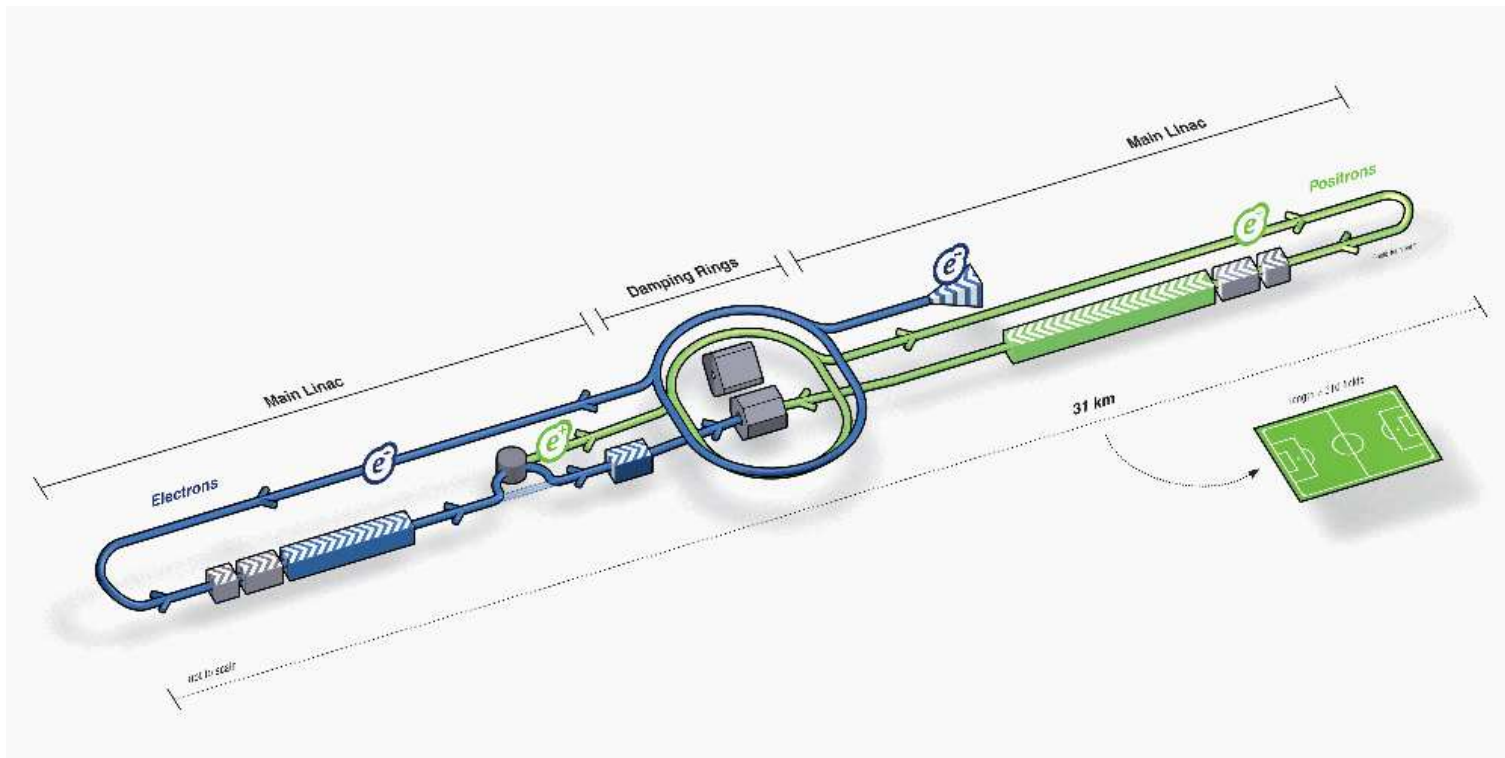
# Akceleratory

## 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":

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

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

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 - bardzo 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:**  $\sigma_x \approx 300 \mu m$   $\sigma_y \approx 8 \mu m$

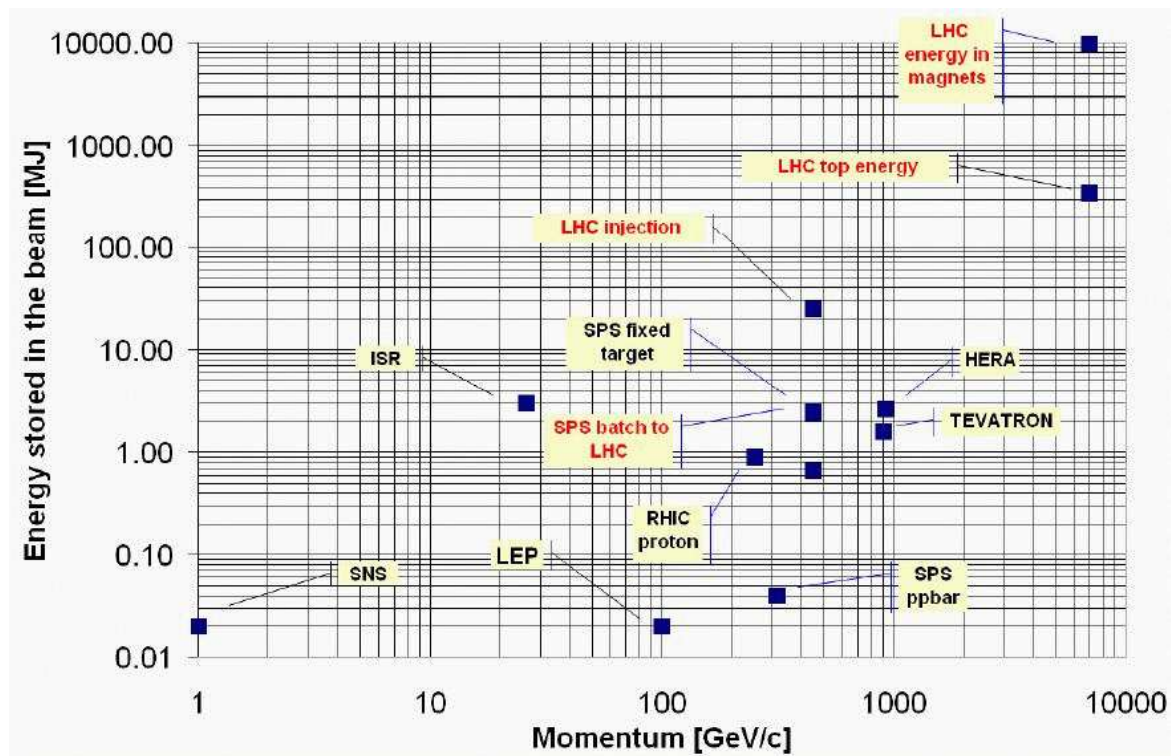
**Proj. ILC:**  $\sigma_x \approx 0.5 \mu m$   $\sigma_y \approx 5 nm$  (!)

# Kolajdery

Do końca 2012 roku wiązki LHC będą prawdopodobnie 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 !**



# Kolajdery

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



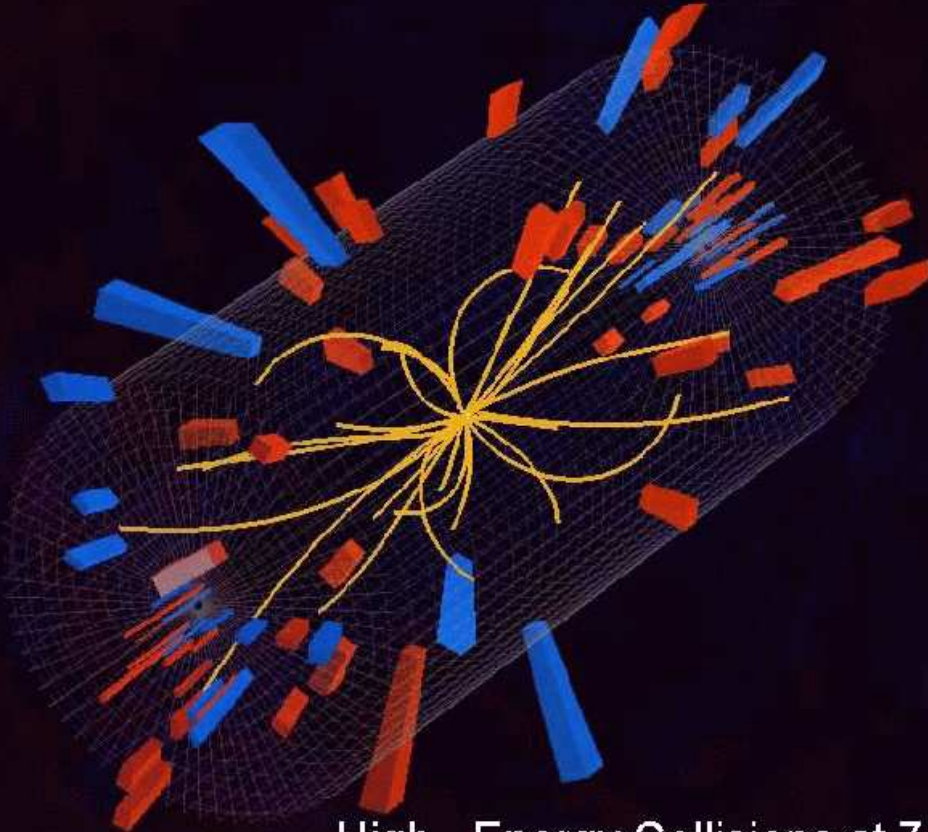
Energia zmagazynowana w jednej **wiązce** (przy docelowej intensywności) odpowiada **90 kg TNT** (lub 15 kg czekolady). **Mniej, ale też może narobić dużo szkody...**



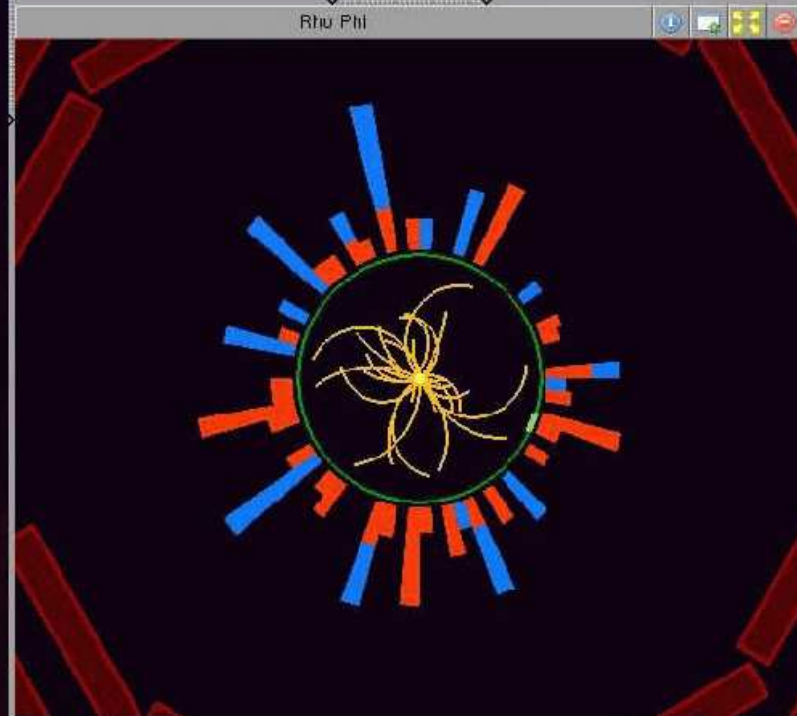
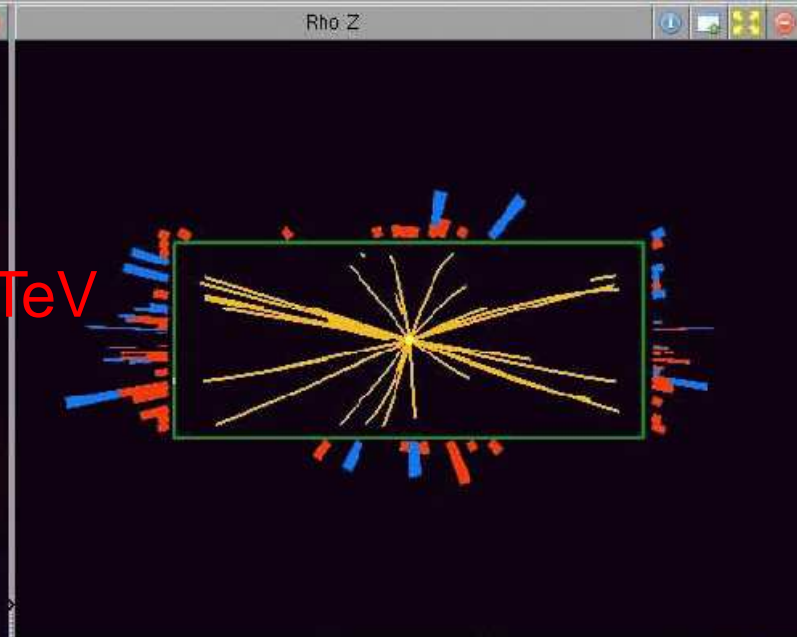


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Tue Mar 30 12:58:48 2010 CEST  
Run/Event: 132440 / 2737921  
Lumi section: 124  
Orbit/Crossing: 32323764 / 1

# Pierwszy przypadek z detektora CMS @ 7 TeV

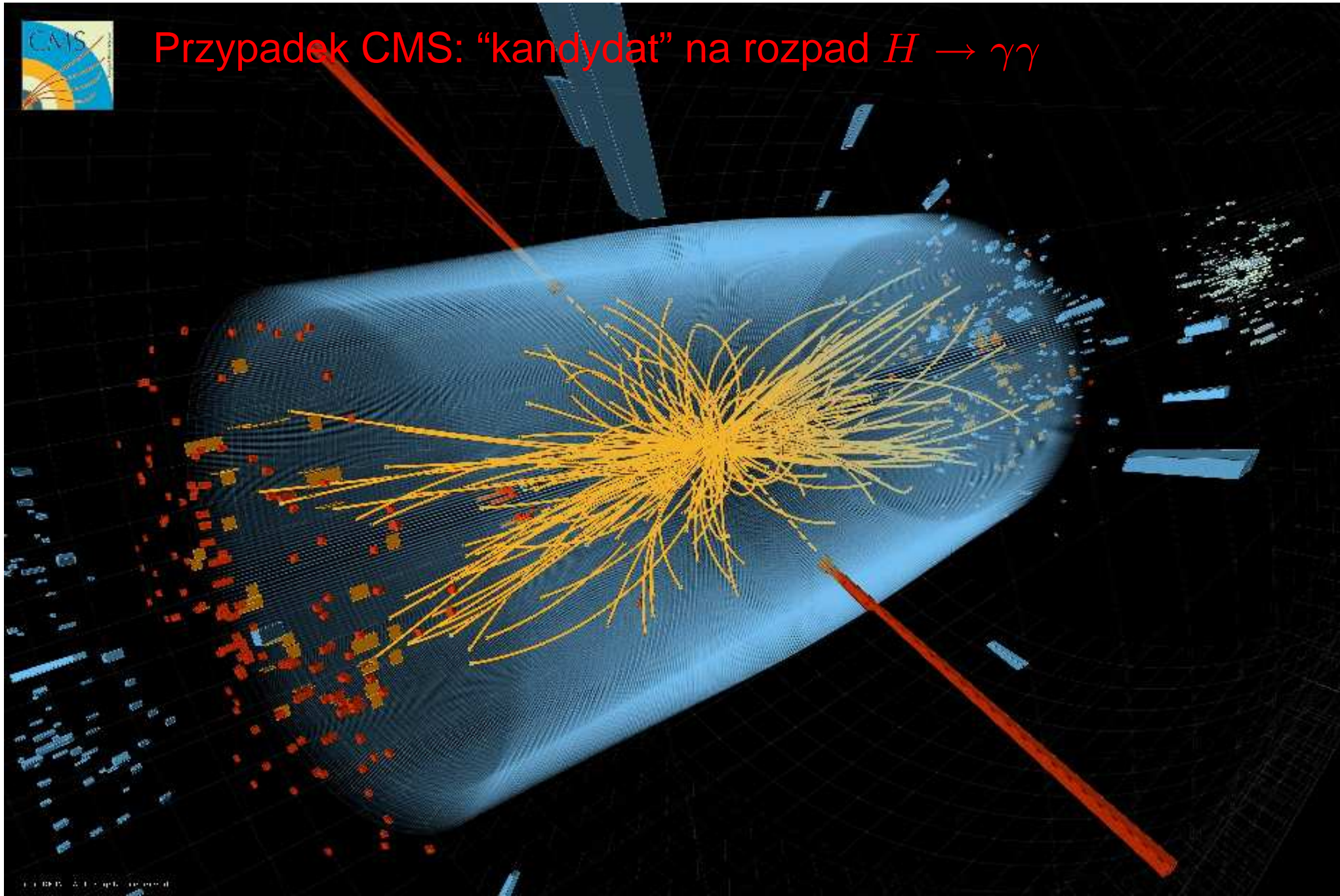


High - Energy Collisions at 7 TeV  
LHC @ CERN  
30.03.2010





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





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

