

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Akceleratorzy

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



14 lipca 2021

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorzy

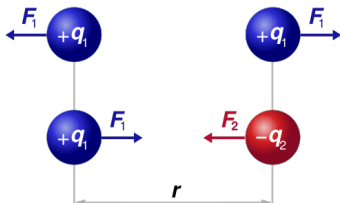
1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Współczesne akceleratorzy

## Pole elektryczne

W 1785 Charles Coulomb zaproponował wzór opisujący siłę oddziaływania między punktowymi ładunkami (Prawo Coulomba):



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

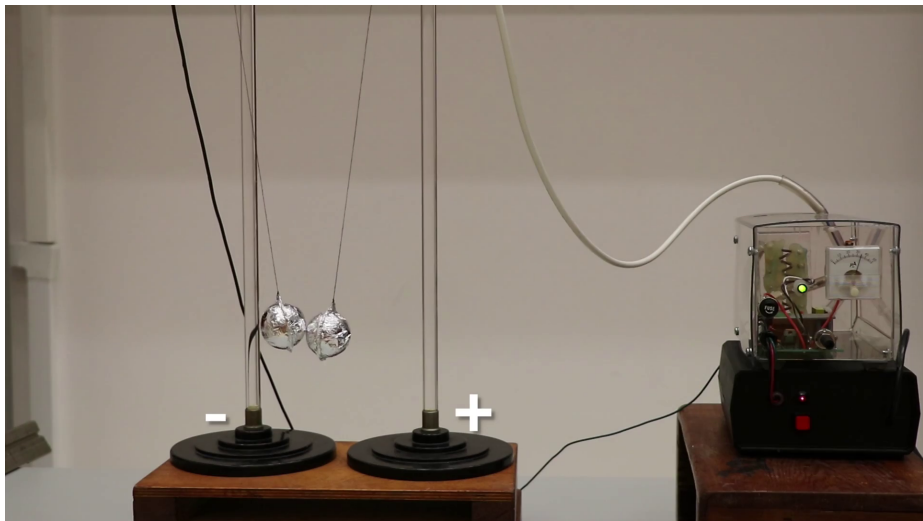
gdzie:  $k_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$

Postać wzoru jest analogiczna do prawa powszechnego ciążenia Newtona.

Istotna różnica: ładunki mogą być dodatnie i ujemne.

Ładunki jednoimienne odpychają się, ładunki różnoimienne przyciągają...

## Prawo Coulomba - pokaz



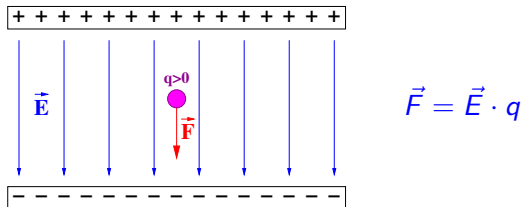
## Pole elektryczne

Znając rozkład ładunków w przestrzeni możemy wykorzystać Prawo Coulomba do policzenia jak wpływają na ruch cząstki naładowanej.

Wygodnie jest jednak wprowadzić pojęcie **pola elektrycznego**,  $\vec{E}$ .

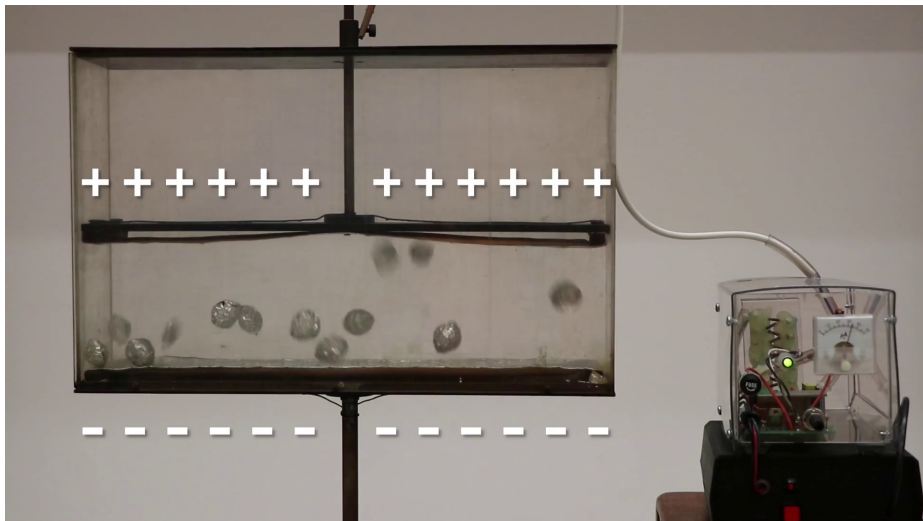
Rozkład pola elektrycznego w przestrzeni wynika z rozkładu ładunków.

Siła działająca na cząstkę naładowaną zależy od lokalnego natężenia pola:



Pomiędzy dwoma płaszczyznami z przeciwnym ładunkiem: pole jednorodne.

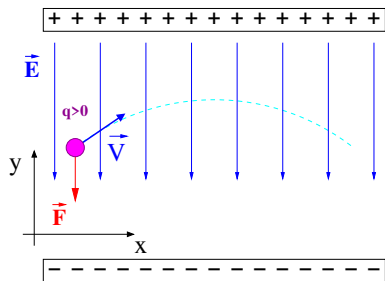
## Pole elektryczne - pokaz



## Pole elektryczne

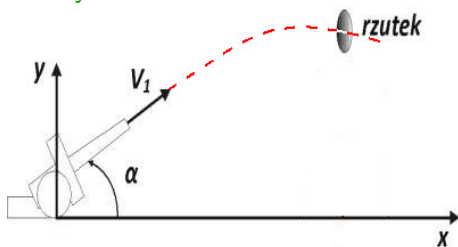
Wytwarzając odpowiedni układ ładunków (odpowiednie pole elektryczne), możemy wpływać na ruch cząstki naładowanej.

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



Torem ruchu jest parabola.

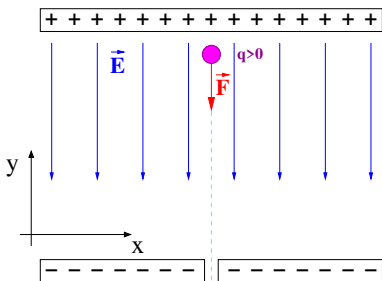
Ruch pod wpływem stałej siły: dokładnie tak jak w "rzucie ukośnym"...





## Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek "spada" w polu elektrycznym:

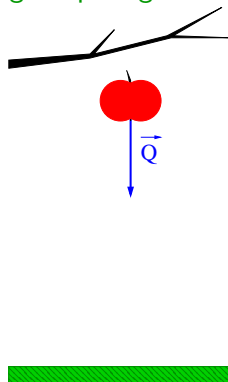


Tor jest prostoliniowy.

Ładunek porusza się ruchem przyspieszonym. **Rozpędza się!**

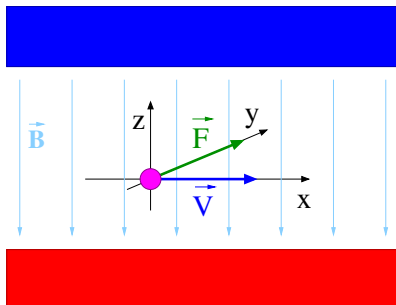
**Uzyskuje energię** kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...

Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w polu grawitacyjnym



## Pole magnetyczne

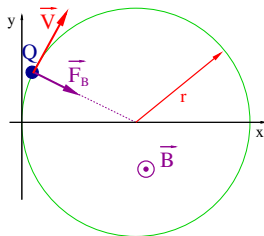
Cząstka naładowana poruszająca się w jednorodnym polu magnetycznym, między biegunami magnesów lub elektromagnesów:



Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza  
Jest to “dziwna” siła: działa **prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu**.  
 $\Rightarrow$  **nie zmienia prędkości** (energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

## Pole magnetyczne

Cząstka naładowana poruszająca się w jednorodnym polu magnetycznym, między biegunami magnesów lub elektromagnesów:



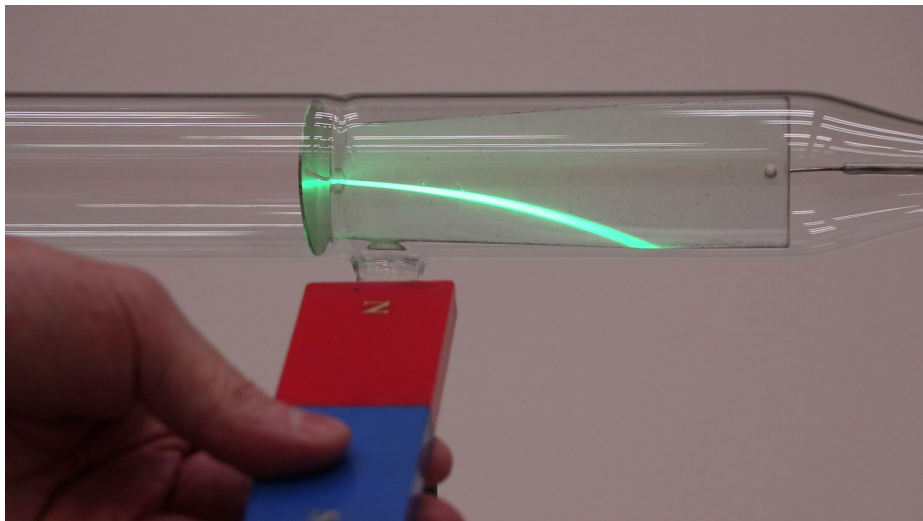
$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza

Jest to “dziwna” siła: działa **prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu**.

⇒ **nie zmienia prędkości** (energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

## Rura Crookesa - pokaz



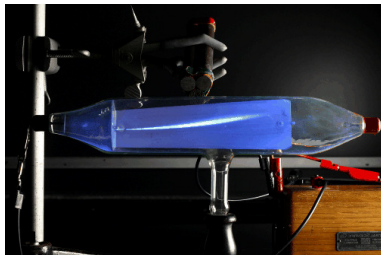
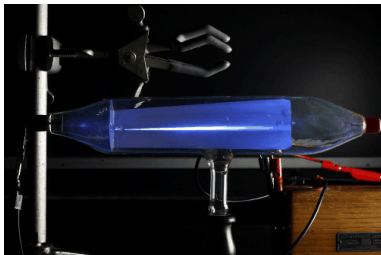
## Rura Crookesa - opis

Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym. Przez wąską szczelinę kierowane są na ekran luminescencyjny.

Uderzając w ekran elektrony pobudzają luminofor do świecenia...

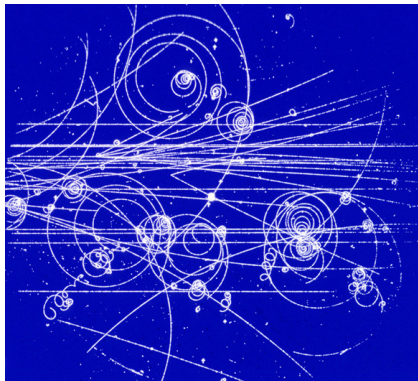
Przy braku pola w tym obszarze poruszają się po linii prostej.

Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



## Pole magnetyczne

Ruch w jednorodnym polu magnetycznym



Pole magnetyczne zakrzywia tor cząstek, nie zmieniając ich prędkości.

To tak jak tor lodowy działa na pędzący bobslej:



Tory cząstek w komorze pęcherzykowej

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

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia**
- 3 Współczesne akceleratorzy

## Dlaczego je budujemy?

Chcemy badać oddziaływania cząstek w **dobrze kontrolowanych warunkach**: znać rodzaj zderzających się cząstek, ich energię i dokładny czas zderzenia

Wiemy też, że oddziaływania cząstek zależą od ich energii.

Im wyższa energia zderzenia, tym więcej procesów może zajść...

Przykład - **anihilacja**  $e^+e^-$ :



Aby wyprodukować **nowe cząstki** musimy dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy (**energii spoczynkowej**:  $E = mc^2$ ).

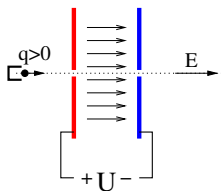
Im wyższa masa cząstki, którą chcemy wyprodukować, tym większa musi być energia zderzających się cząstek!

Najwyższe energie uzyskujemy zderzając dwie przeciwbieżne wiązki...



## Akceleratory elektrostatyczne

Już w 1919 roku E. Rutherford wskazał na potencjalne korzyści z przyspieszania cząstek. Cząstki naładowane i jądra atomowe można łatwo przyspieszać w polu elektrycznym wytworzonym przez **przyłożone napięcie**.



$$E = U \cdot q$$

Im wyższe napięcie tym większa energia końcowa uzyskana przez przyspieszaną cząstkę.

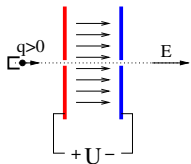
Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokich napięć przyspieszających:

⇒ generator **Van de Graaffa** (1929): 1.5 MV

⇒ generator **Cockrofta-Waltona** (1932): 750 kV

W pewnych dziedzinach wciąż używane...

## Jednostki



$$\Delta E = U \cdot q$$

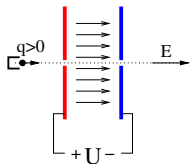
Naturalną jednostką energii w fizyce mikroświata jest **1 elektronowolt (1 eV)** - energia jaką zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

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

Jednostki pochodne:

$$1 keV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV.$$

## Jednostki



Naturalną jednostką energii w fizyce mikroświata jest **1 elektronowolt (1 eV)** - energia jaką zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

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

$$\Delta E = U \cdot q$$

Jednostki pochodne:

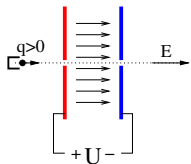
$$1 keV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV.$$

Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy ( $E = mc^2$ )

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

Przykładowe masy:	elektron	e	511 keV/c <sup>2</sup>	(9.1 · 10 <sup>-31</sup> kg)
	proton	p	938 MeV/c <sup>2</sup>	(1.7 · 10 <sup>-27</sup> kg)
	neutron	n	940 MeV/c <sup>2</sup>	

## Jednostki



Naturalną jednostką energii w fizyce mikroświata jest **1 elektronowolt (1 eV)** - energia jaką zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

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

$$\Delta E = U \cdot q$$

Jednostki pochodne:

$$1 keV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV.$$

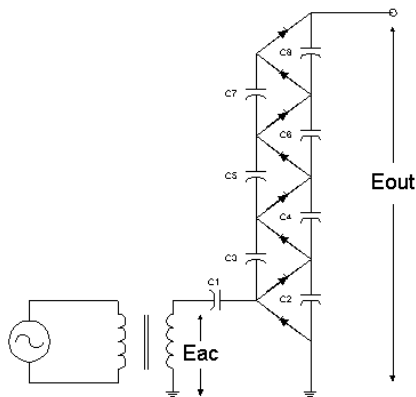
Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy ( $E = mc^2$ )

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

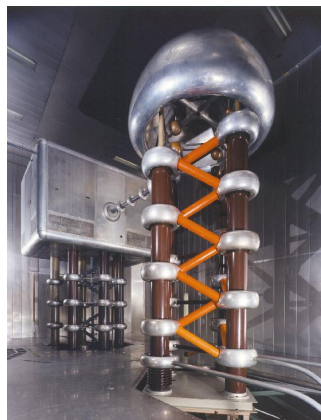
Wystarczy pamiętać:	elektron	e	$\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$
	proton	p	$\sim 1 \text{ GeV}/c^2$
	neutron	n	$\sim 1 \text{ GeV}/c^2$

## Generator Cockrofta-Waltona

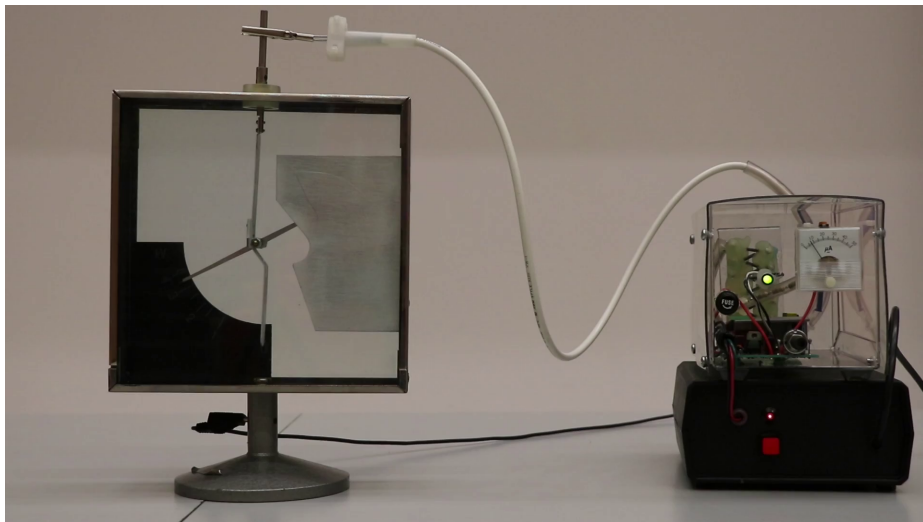
Zasada działania



Źródło jonów  $H^-$  w CERN

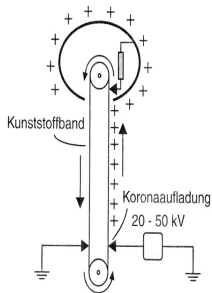


## Generator Cockrofta-Waltona - pokaz



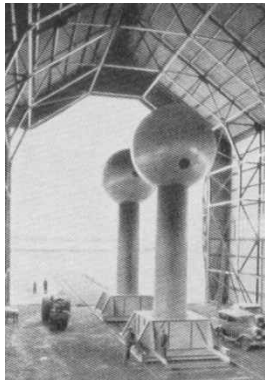
## Generator Van de Graaffa

Zasada działania



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesność

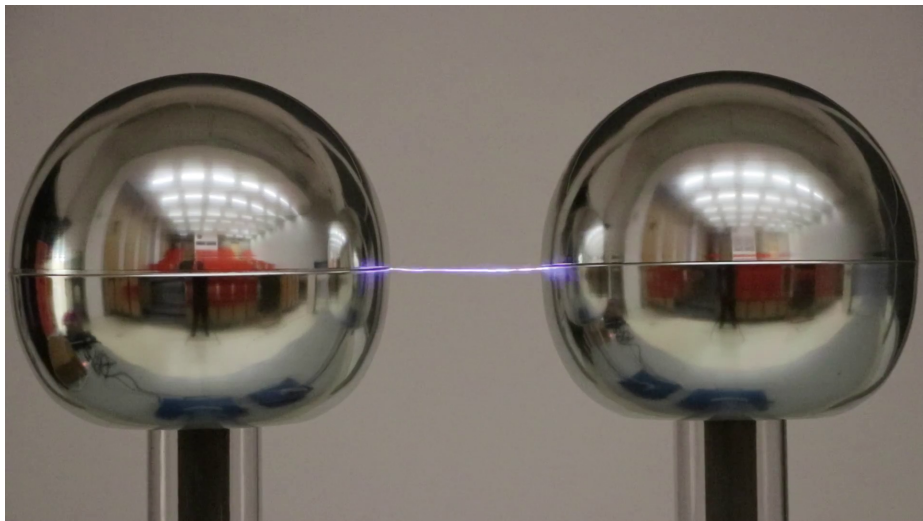


Różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV

⇒  $E \sim 30 \text{ MeV}$

⇒ **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

## Generator Van de Graaffa - pokaz



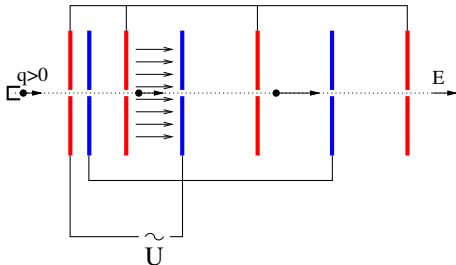


## Akceleratory liniowe

Aby uzyskać wyższe energie musimy zestawić układ składający się z wielu elementów przyspieszających.

Idea: **Gustav Ising 1924.**

Pierwsze urządzenia: **Rolf Wideroe 1927**, Ernest Lawrence 1931.



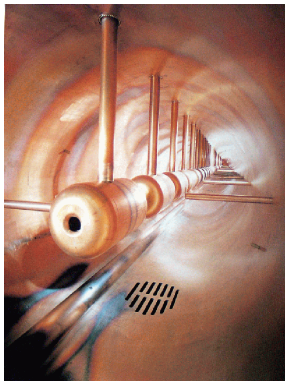
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwiokrotnienie uzyskiwanych energii

## Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA

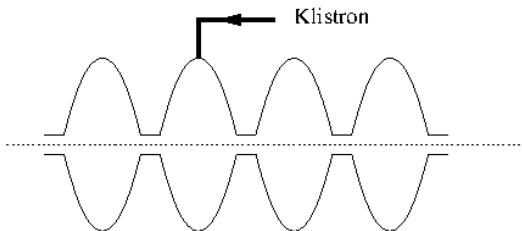


CERN, Genewa



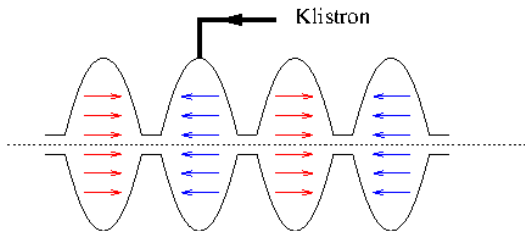
## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



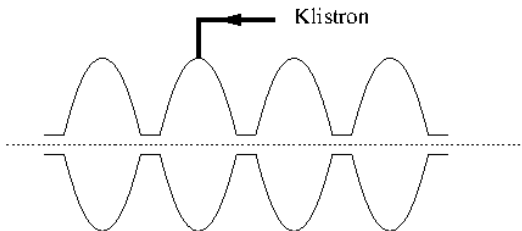
## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



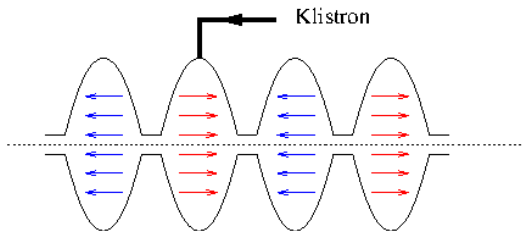
## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



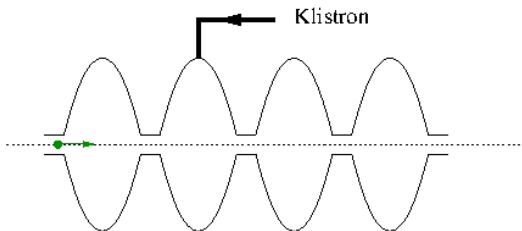
## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



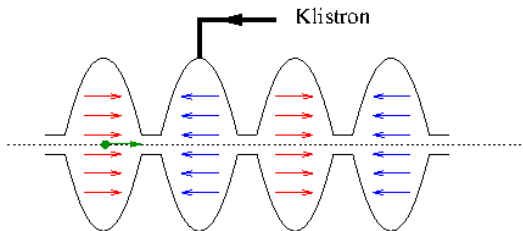
## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**

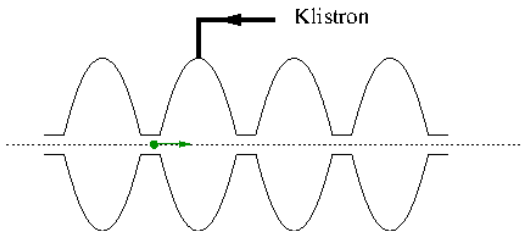


**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**



## Wnęka rezonansowa

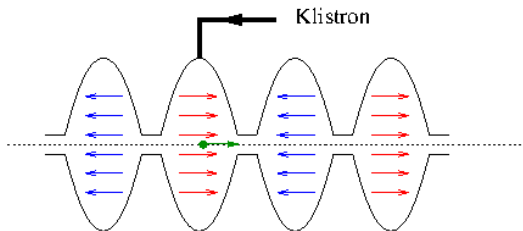
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

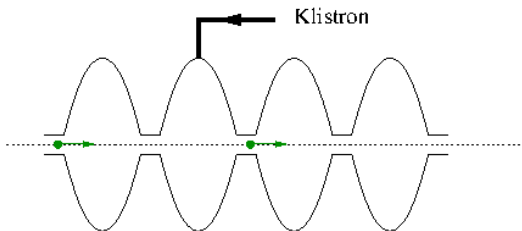
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

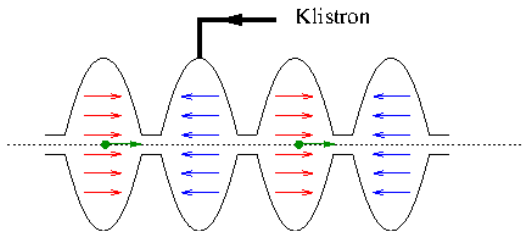
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

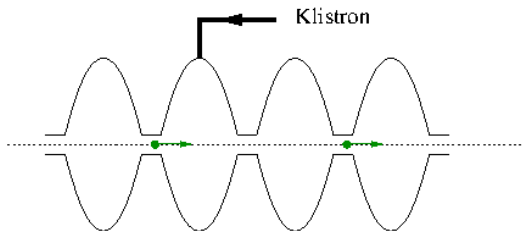
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

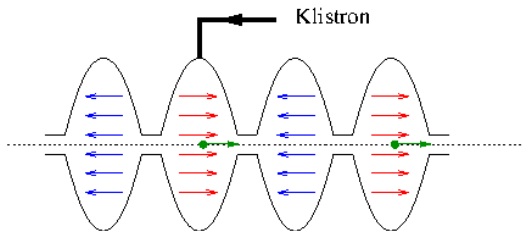
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

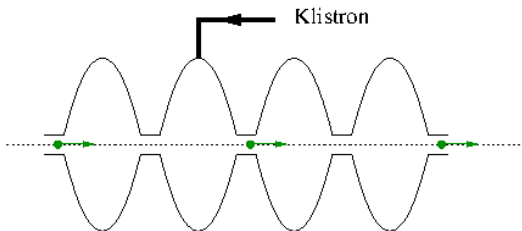
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

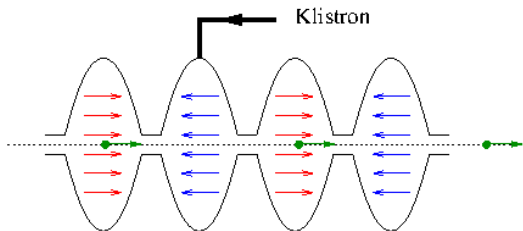
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**

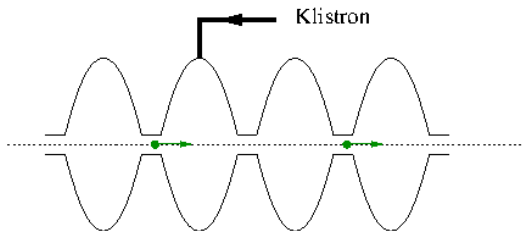


**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**



## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**

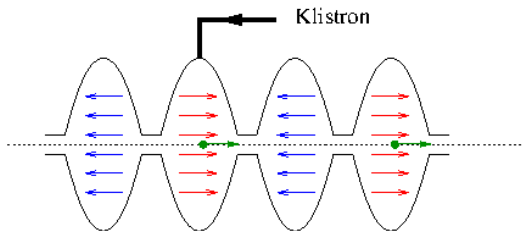


**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskać pola rzędu 10 MV/m.

## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**

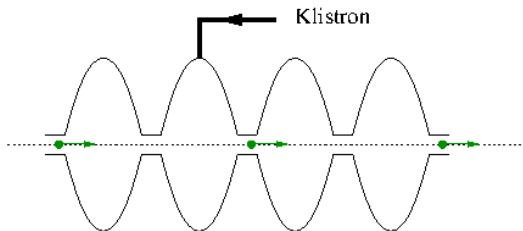


**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskać pola rzędu 10 MV/m.

## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**

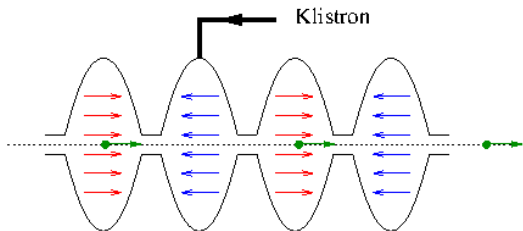


**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskać pola rzędu 10 MV/m.

## Wnęka rezonansowa

Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



**Paczki** przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskać pola rzędu 10 MV/m.

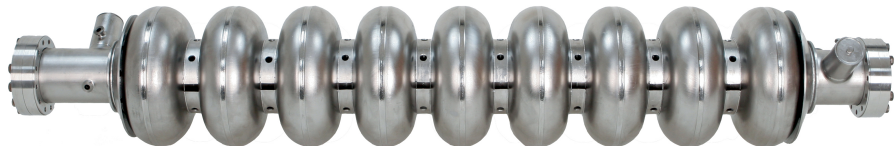
## Wnęka rezonansowa

Paczki cząstek poruszają się tak, że cały czas towarzyszy im pole przyspieszające



## Wnęka rezonansowa

Widok prototypowej wnęki rezonansowej zbudowanej w projekcie ILC



długość ok. 1 m

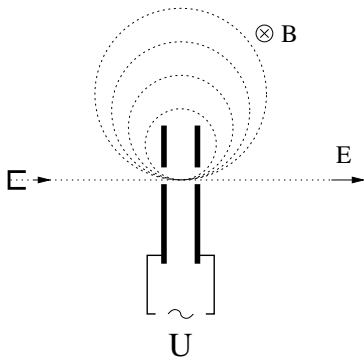
Dzięki wykorzystaniu nadprzewodnictwa (brak strat energii w ściankach wnęki) możliwe jest uzyskanie pól przyspieszających do 30 MV/m

## Cyklotron

Zamiast używać elementów przyspieszających możemy wykorzystać **pole magnetyczne** do “zapętlenia” cząstki.

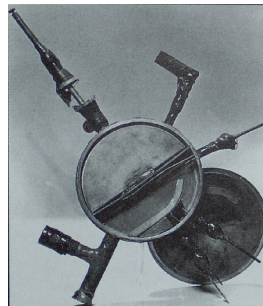
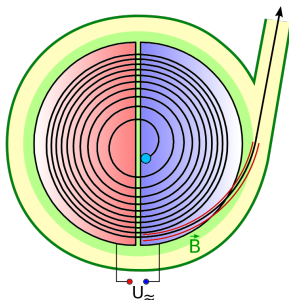
Cząstka przechodzi przez ten sam obszar pola elektrycznego wiele razy...

Schemat ideowy:



## Cyklotron

Pierwszy tego typu akcelerator zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence.



Promień orbity cząstki rośnie w miarę przyspieszania

⇒ pole magnetyczne musi być jednorodne w dużym obszarze

⇒ problem budowy bardzo dużych magnesów ⇒ ograniczenie energii



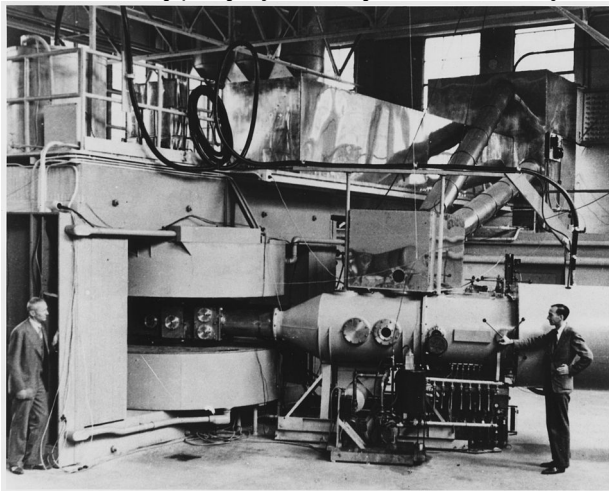
## Akcelerator kołowy - pokaz



## Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

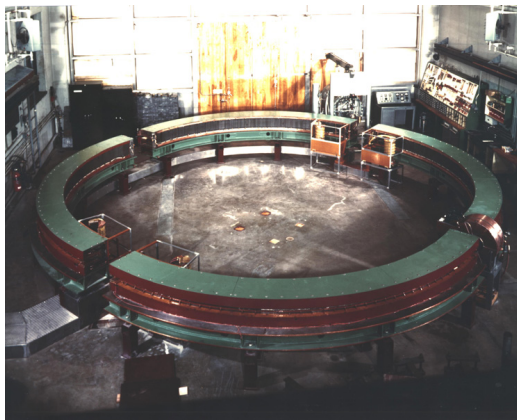
Berkeley 1939  
średnica 1.5 m



Największy cyklotron z pojedynczym magnesem miał 4.6 m średnicy.

## Synchrotron

Kolejnym przełomem było wynalezienie synchrotronu (1955):  
zmieniające się pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie

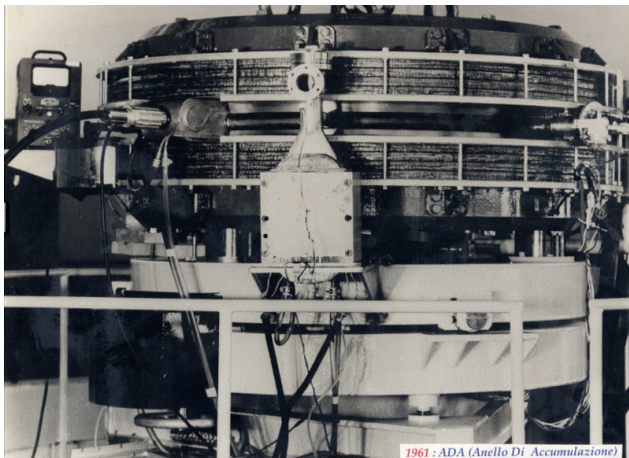


Orbita nie musi być ściśle kołowa. Możemy użyć wielu małych magnesów...

## Zderzacze cząstek (kolajdery)

Energję możemy zwielokrotnić zderzając dwie wiązki przeciwbieżne.

Pierwszy zderzacz  $e^+e^-$  AdA zbudowany we Frascati (Włochy) w 1961.



1961: ADA (Anello Di Accumulazione)

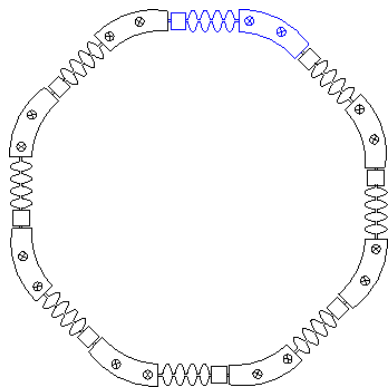
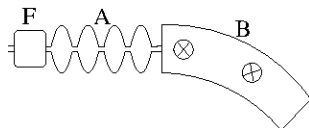
- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorzy**

## Akceleratory kołowe

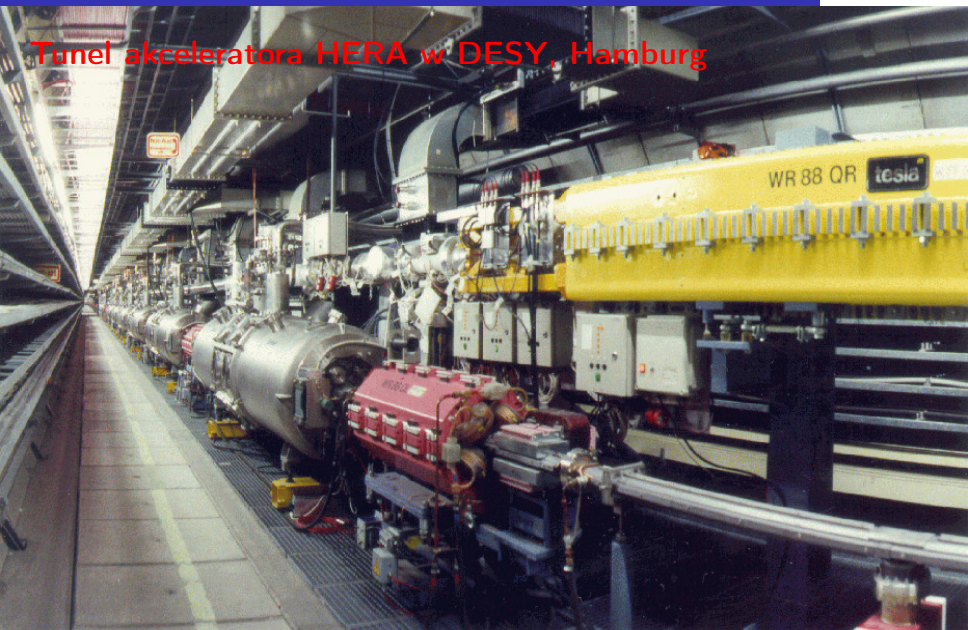
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

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



## Tunel akceleratora HERA w DESY, Hamburg



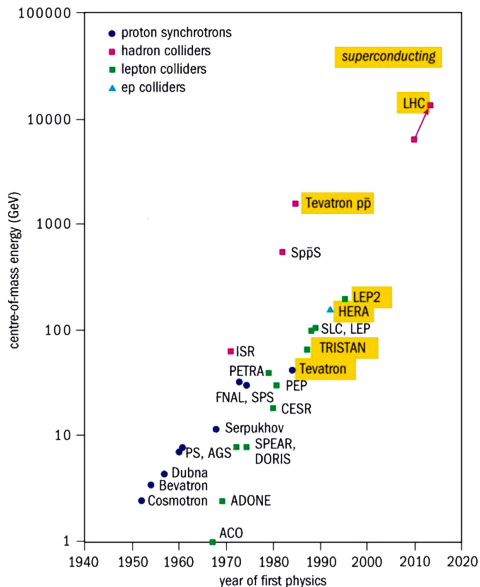
## Tunel akceleratora LHC w CERN, Genewa





W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

**Dlaczego?**



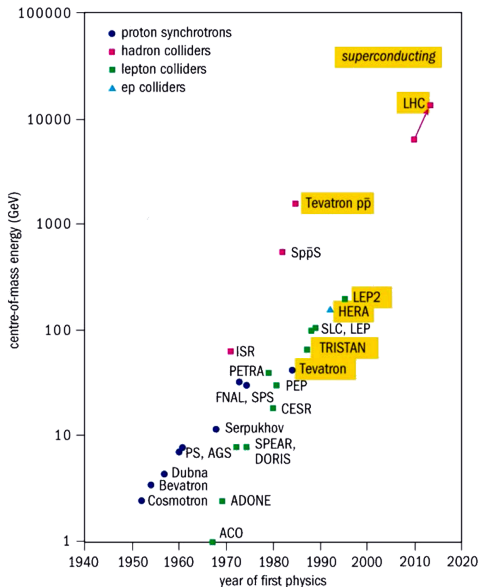
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

## Dlaczego?

Żeby móc produkować nowe, cięższe cząstki. Niezbędna energia

$$E = mc^2$$

Im wyższa energia, tym większy musi być akcelerator...



## 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  $E = 7 \text{ TeV}$

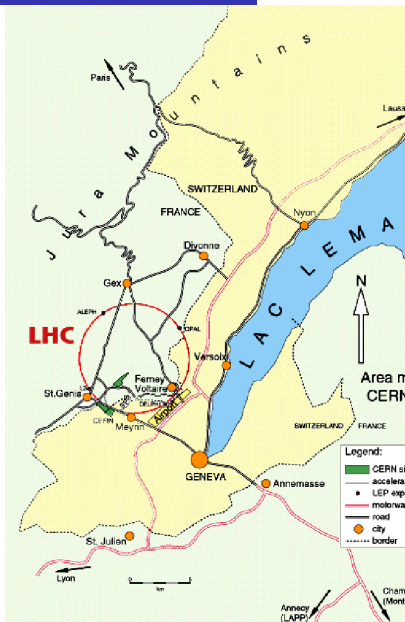
W każdej do 2800 "paczek" po  $10^{11}$  protonów

Energia jednej paczki:  $\sim 10^5 \text{ J}$

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

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

Zderzenia paczek co 25 ns  
(40 milionów na sekundę)





## 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 **utrzymać** cząstki wewnątrz rury akceleratora.

Ale napotykamy **ograniczenie technologiczne**:

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

Dlatego musimy budować coraz większe urządzenia...

**Równolegle poszukujemy nowych maneriałów nadprzewodzących...**

## 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  $e^\pm \Rightarrow$  **pole elektryczne**

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

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

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

Aby zmniejszyć promieniowanie hamowania musimy zwiększyć promień akceleratora  $R$ , albo...

## ILC - International Linear Collider

Promieniowanie hamowania nie jest problemem w akceleratorze liniowym. Wkrótce może zostać podjęta decyzja o budowie akceleratora  $e^+e^-$  ILC w Japonii. Będzie to projekt "globalny", ogólnoświatowy...

