

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Akceleratorzy

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



19 października 2021

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorzy

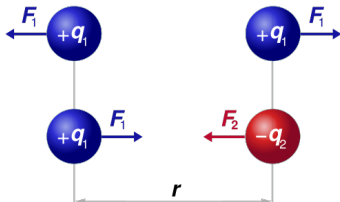
1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Współczesne akceleratorzy

Pole elektryczne

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



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

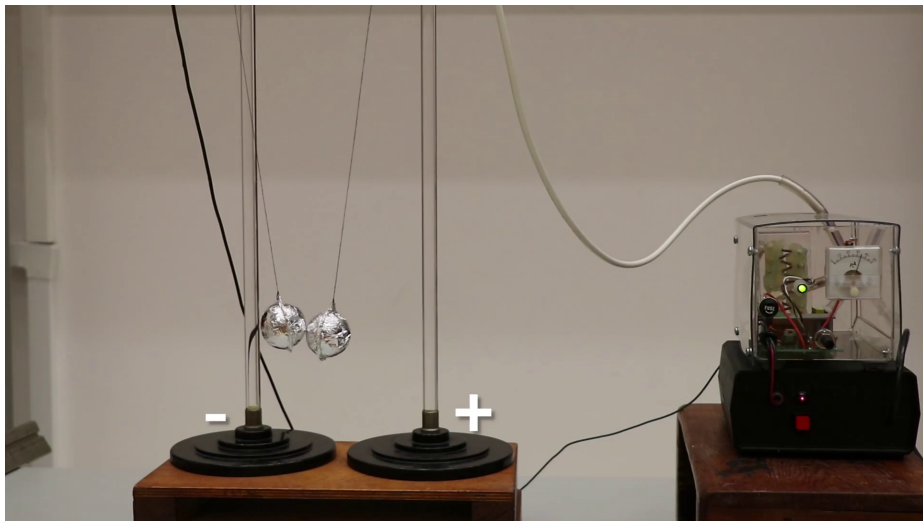
gdzie: $k_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$

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



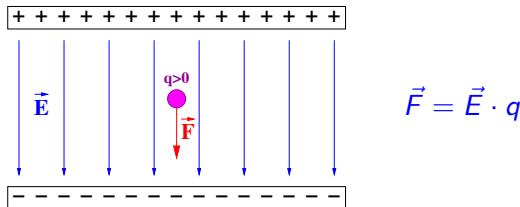
Pole elektryczne

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} .

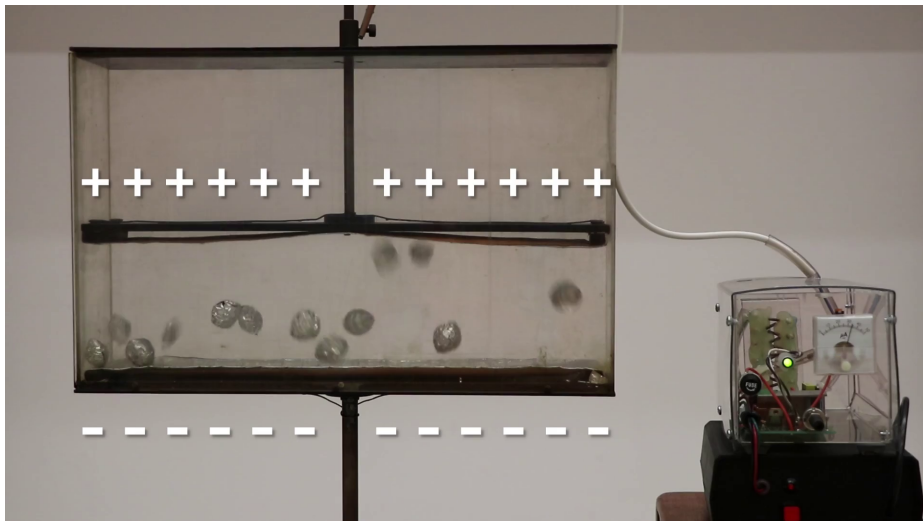
Rozkład pola elektrycznego w przestrzeni wynika z rozkładu ładunków.

Siła działająca na cząstkę naładowaną zależy od lokalnego natężenia pola:



Pomiędzy dwoma płaszczyznami z przeciwnym ładunkiem: pole jednorodne.

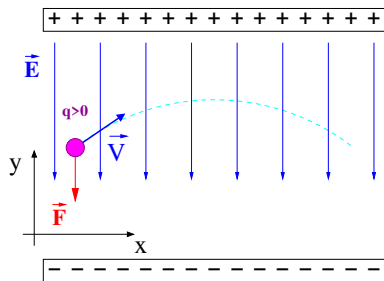
Pole elektryczne - pokaz



Pole elektryczne

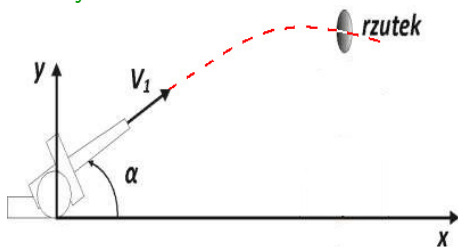
Wytwarzając odpowiedni układ ładunków (odpowiednie pole elektryczne), możemy wpływać na ruch cząstki naładowanej.

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



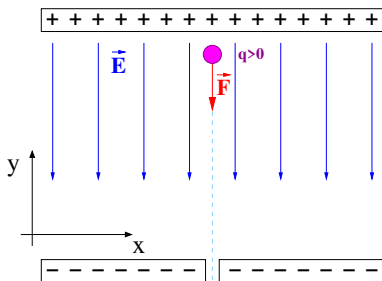
Torem ruchu jest parabola.

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



Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w polu elektrycznym:

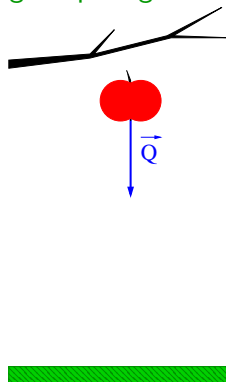


Tor jest prostoliniowy.

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

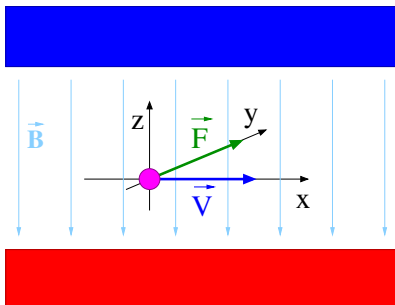
Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...

Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w polu grawitacyjnym



Pole magnetyczne

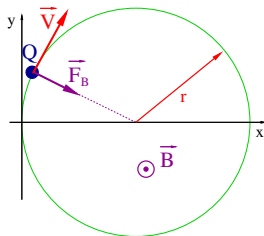
Cząstka naładowana poruszająca się w jednorodnym polu magnetycznym, między biegunami magnesów lub elektromagnesów:



Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza
Jest to “dziwna” siła: działa **prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu**.
⇒ **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:



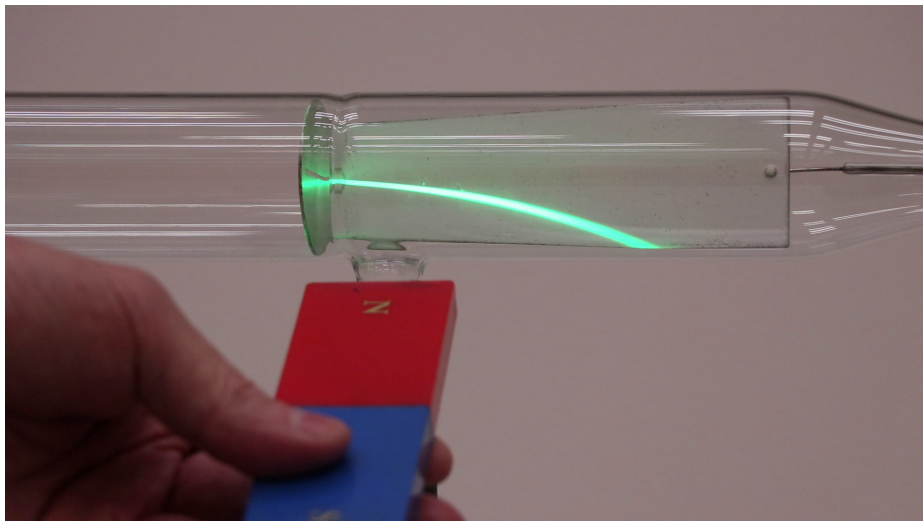
$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

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

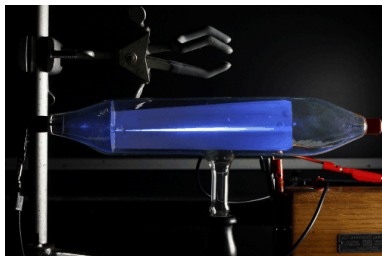


Rura Crookesa - opis

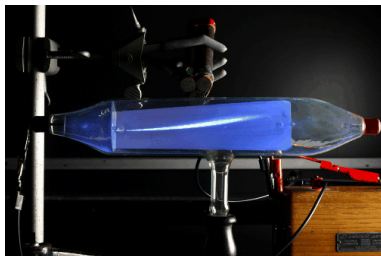
Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym. Przez wąską szczelinę kierowane są na ekran luminescencyjny.

Uderzając w ekran elektrony pobudzają luminofor do świecenia...

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

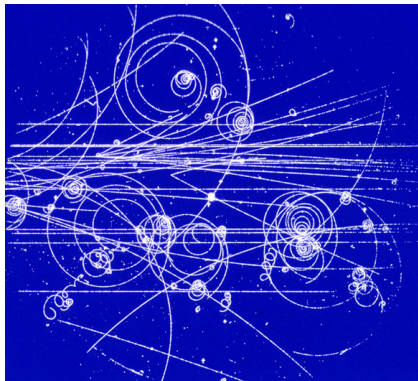


Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



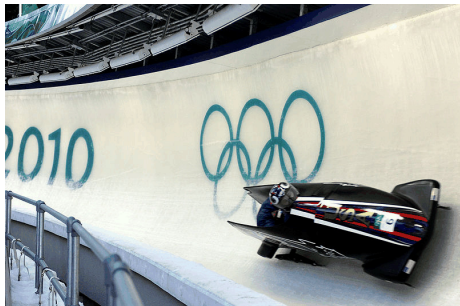
Pole magnetyczne

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^- :



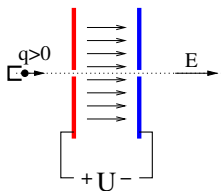
Aby wyprodukować **nowe cząstki** musimy dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy (**energii spoczynkowej**: $E = mc^2$).

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.

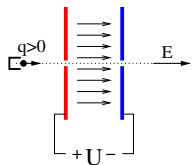
Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokich napięć przyspieszających:

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

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

W pewnych dziedzinach wciąż używane...

Jednostki



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

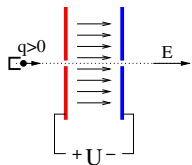
Naturalną jednostką energii w fizyce mikroświata jest **1 elektronowolt (1 eV)** - energia jaką zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

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

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:

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

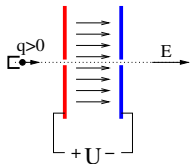
Jednostki energii możemy też wykorzystać jako jednostki masy ($E = mc^2$)

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

Przykładowe masy:

elektron	e	511 keV/c ²	(9.1 · 10 ⁻³¹ kg)
proton	p	938 MeV/c ²	(1.7 · 10 ⁻²⁷ kg)
neutron	n	940 MeV/c ²	

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:

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

Jednostki energii możemy też wykorzystać jako jednostki masy ($E = mc^2$)

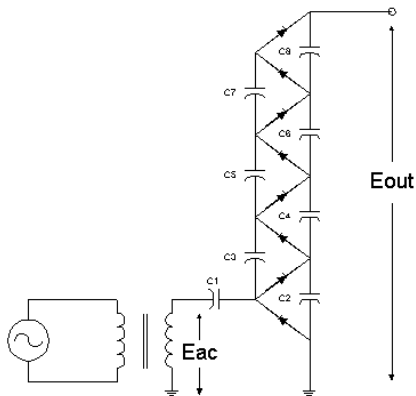
$$1 eV/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} kg$$

Wystarczy pamiętać:

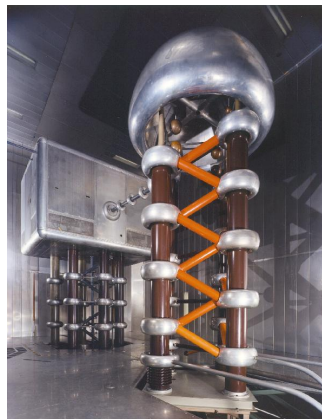
elektron	e	$\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$
proton	p	$\sim 1 \text{ GeV}/c^2$
neutron	n	$\sim 1 \text{ GeV}/c^2$

Generator Cockrofta-Waltona

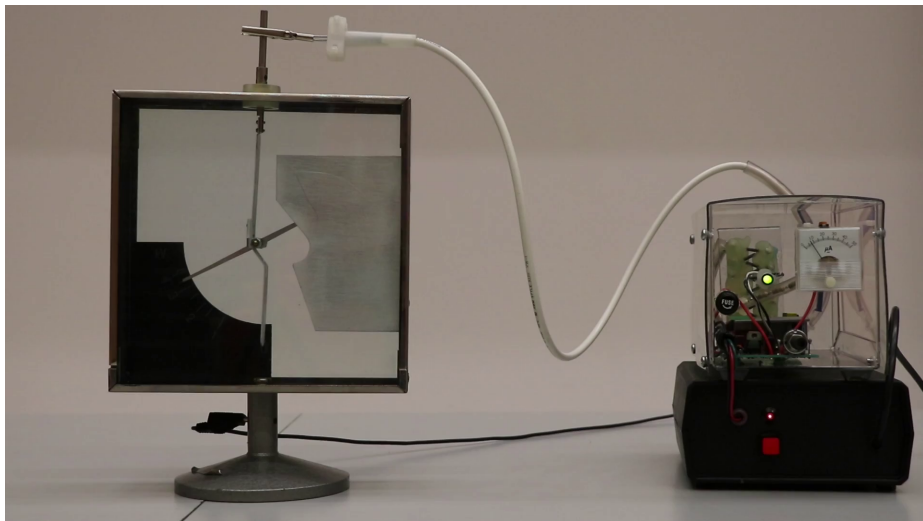
Zasada działania



Źródło jonów H^- w CERN

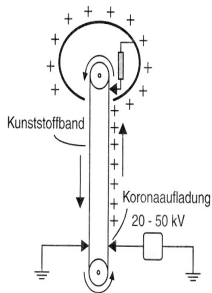


Generator Cockrofta-Waltona - pokaz



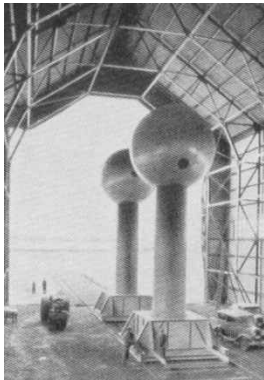
Generator Van de Graaffa

Zasada działania



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesność

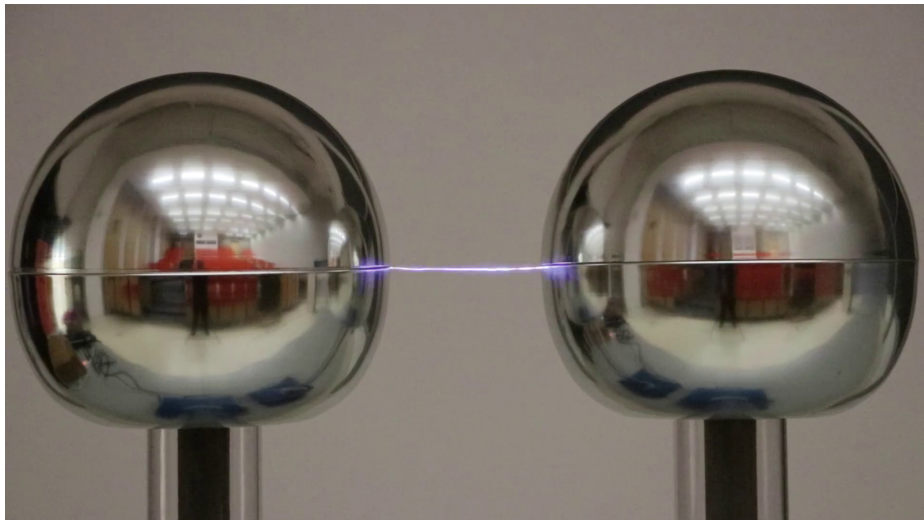


Różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV

⇒ $E \sim 30 \text{ MeV}$

⇒ **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Generator Van de Graaffa - pokaz

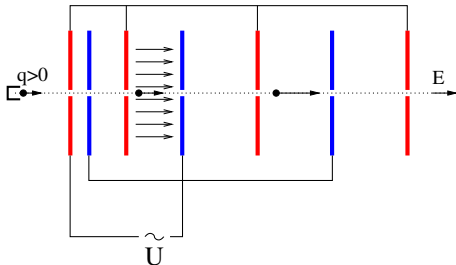


Akceleratory liniowe

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.



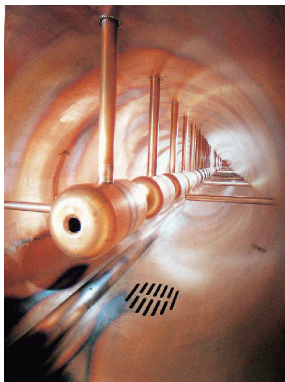
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwiokrotnienie uzyskiwanych energii

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA

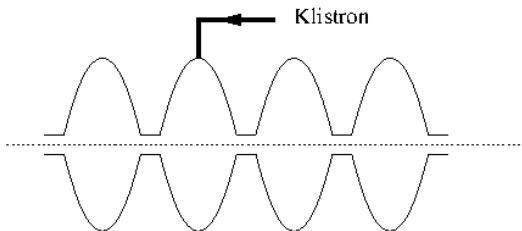


CERN, Genewa



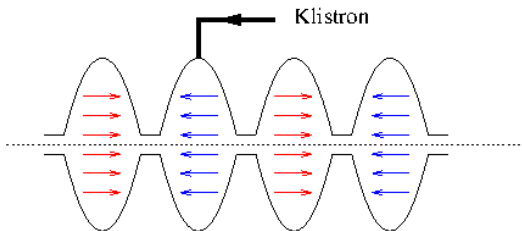
Wnęka rezonansowa

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



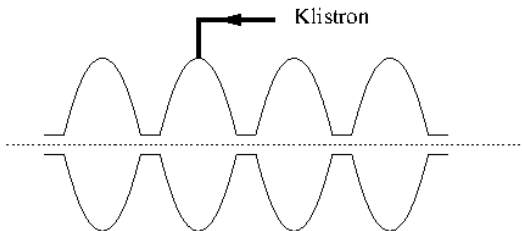
Wnęka rezonansowa

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



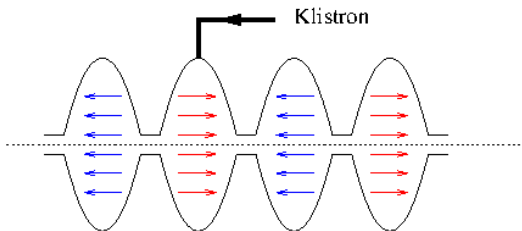
Wnęka rezonansowa

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



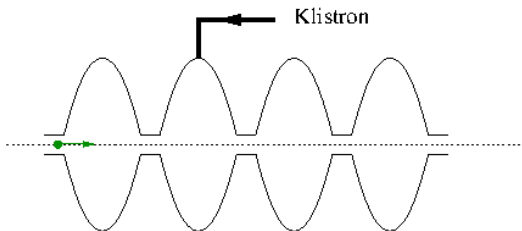
Wnęka rezonansowa

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



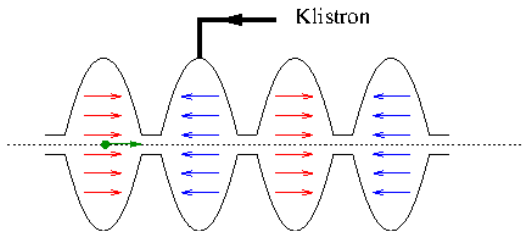
Wnęka rezonansowa

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



Wnęka rezonansowa

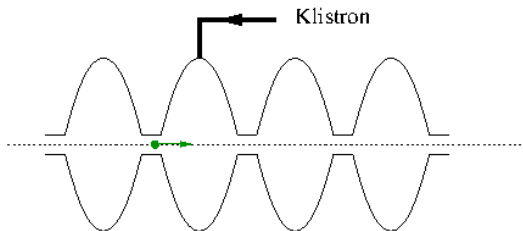
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

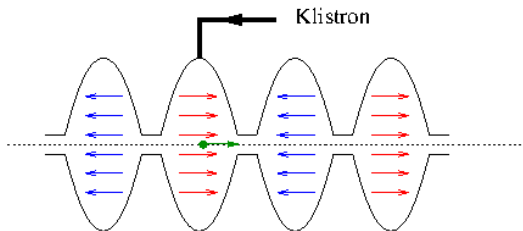
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

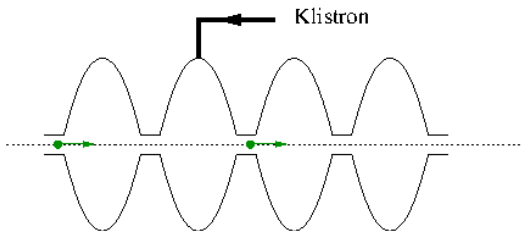
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

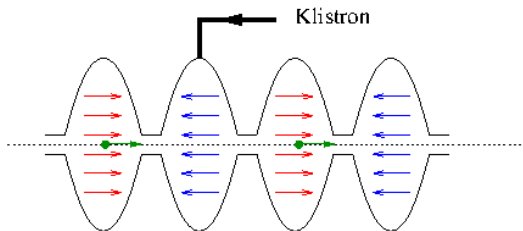
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

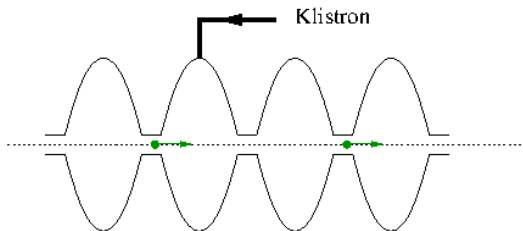
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

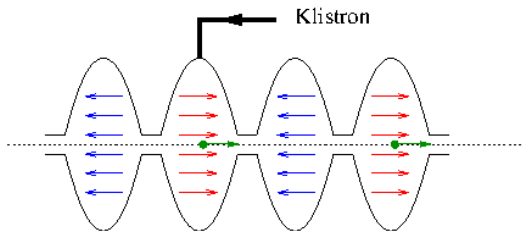
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

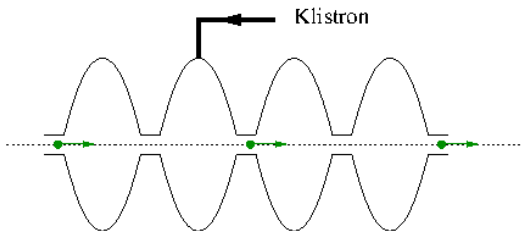
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

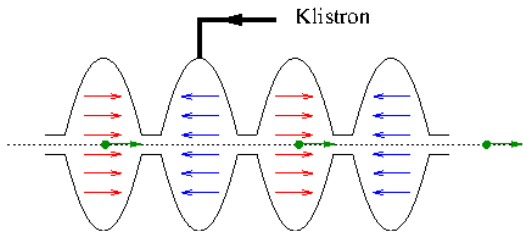
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

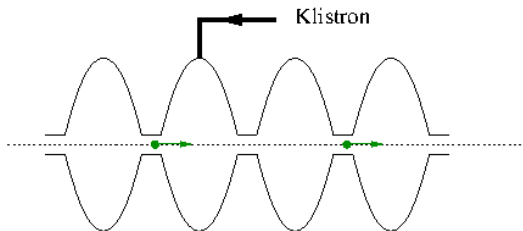
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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**

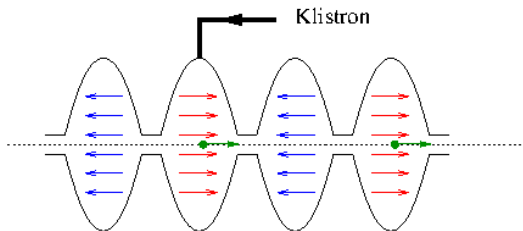


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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**

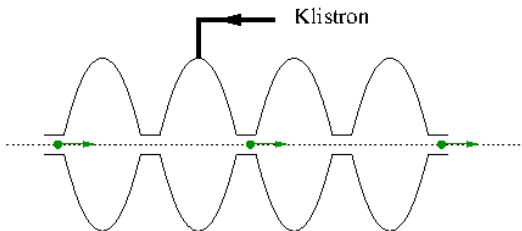


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstościach 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**

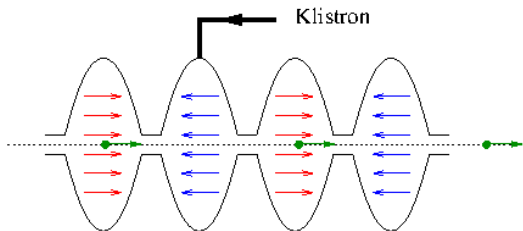


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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**

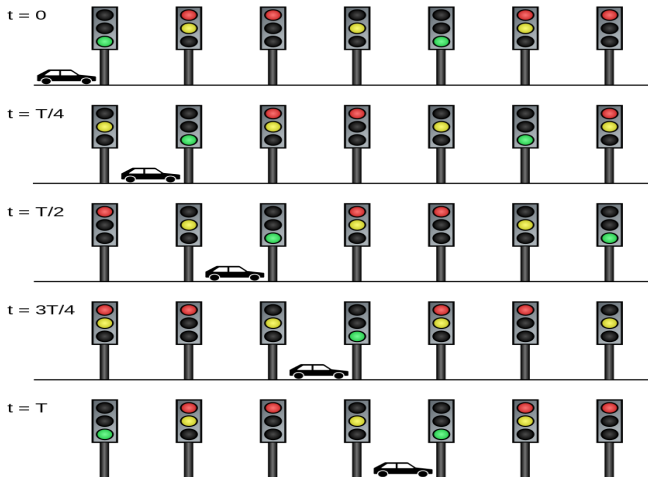


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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

Wnęka rezonansowa

Synchronizacja pola we wnęce z ruchem paczek przyspieszanych cząstek przypomina synchronizację świateł i ruchu samochodów w "zielonej fali"



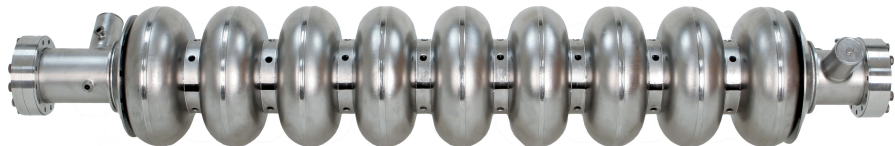
Wnęka rezonansowa

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



Wnęka rezonansowa

Widok prototypowej wnęki rezonansowej zbudowanej w projekcie ILC



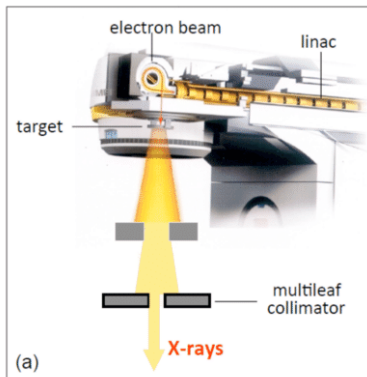
długość ok. 1 m

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

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe znalazły szereg zastosowań także poza nauką, w przemyśle i w medycynie, w szczególności w **radioterapii**

Typowe urządzenie do radioterapii:



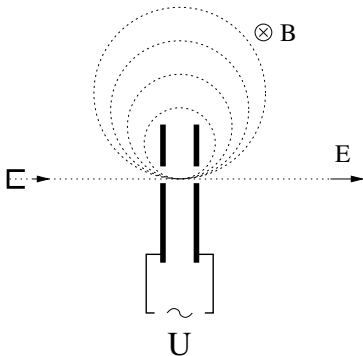
<https://doi.org/10.23731/CYRM-2019-002>

Cyklotron

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

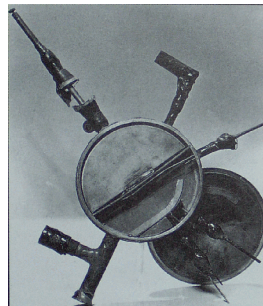
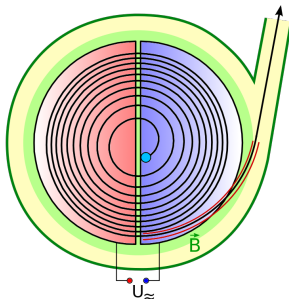
Cząstka przechodzi przez ten sam obszar pola elektrycznego wiele razy...

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

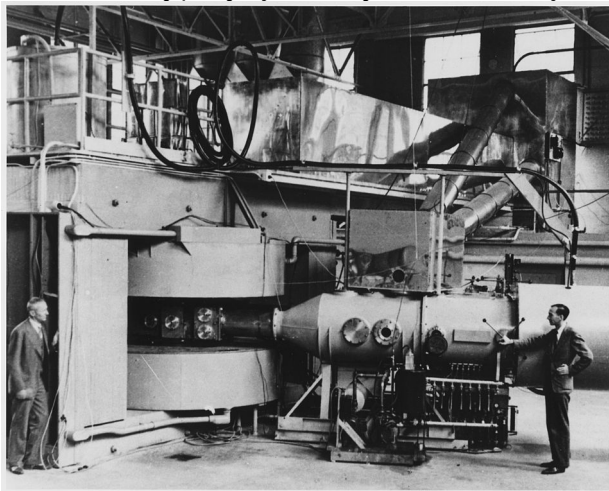
Akcelerator kołowy - pokaz



Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

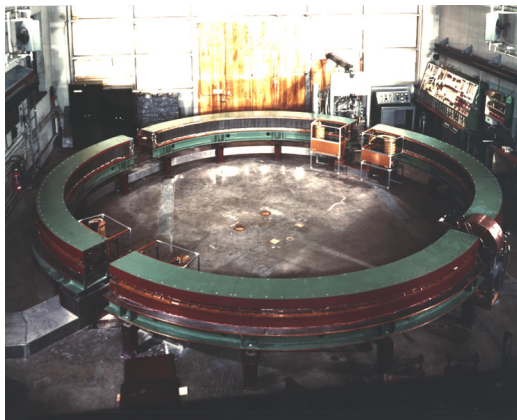
Berkeley 1939
średnica 1.5 m



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

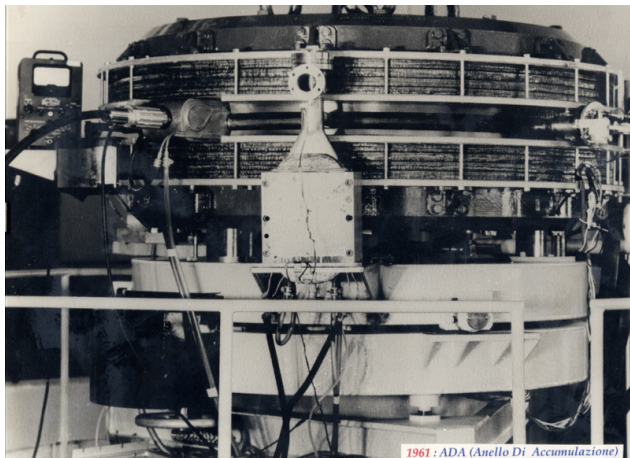


Orbita nie musi być ściśle kołowa. Możemy użyć wielu małych magnesów...

Zderzacze cząstek (kolajdery)

Energję możemy zwielokrotnić zderzając dwie wiązki przeciwbieżne.

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



1 Wprowadzenie

2 Historia

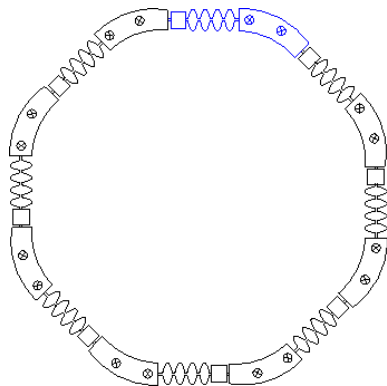
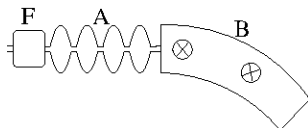
3 Współczesne akceleratorzy

Akceleratory kołowe

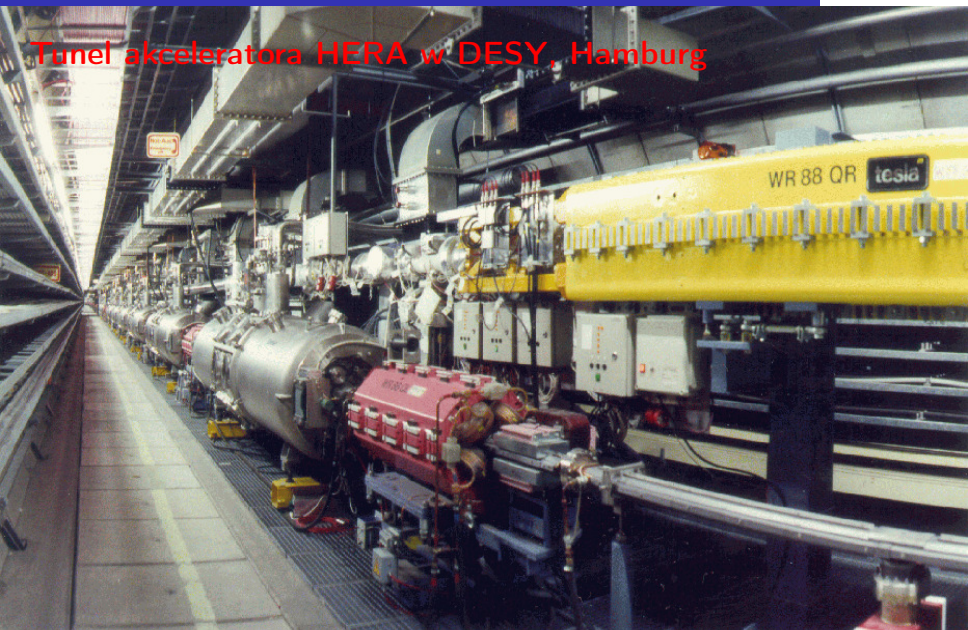
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

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



Tunel akceleratora HERA w DESY, Hamburg

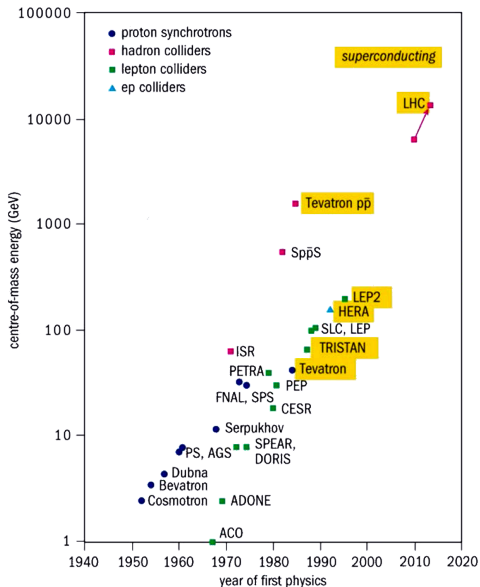


Tunel akceleratora LHC w CERN, Genewa



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

Dlaczego?



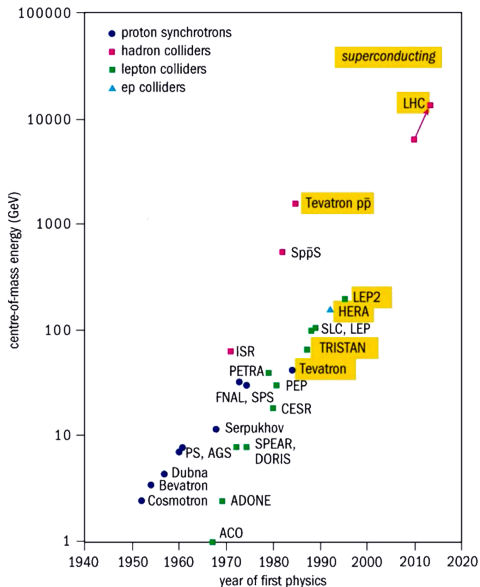
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

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...

