

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Akceleratory

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



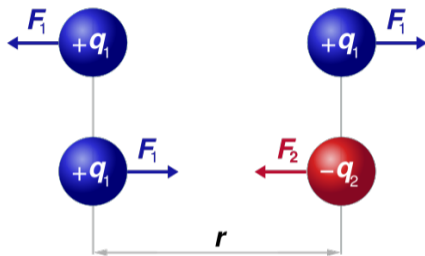
25 października 2022

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorzy

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorory

Pole elektryczne

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



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

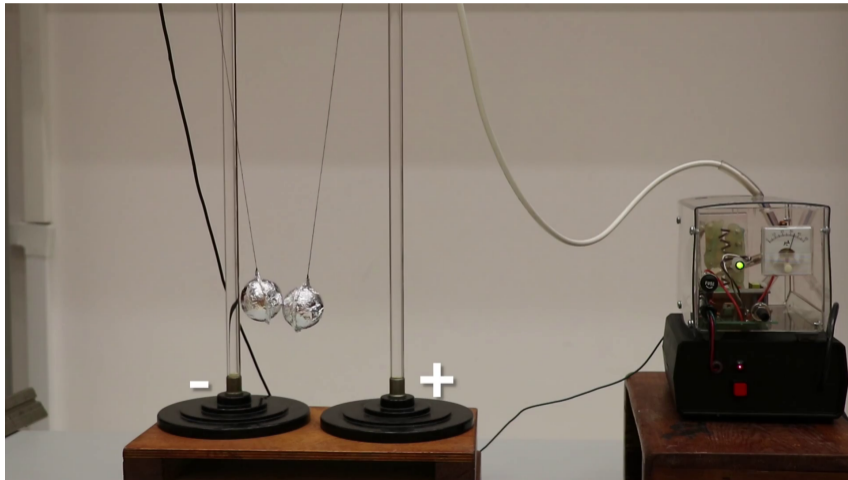
$$k_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

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



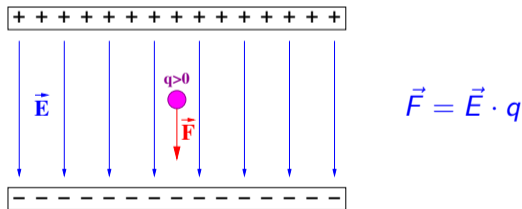
Pole elektryczne

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

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

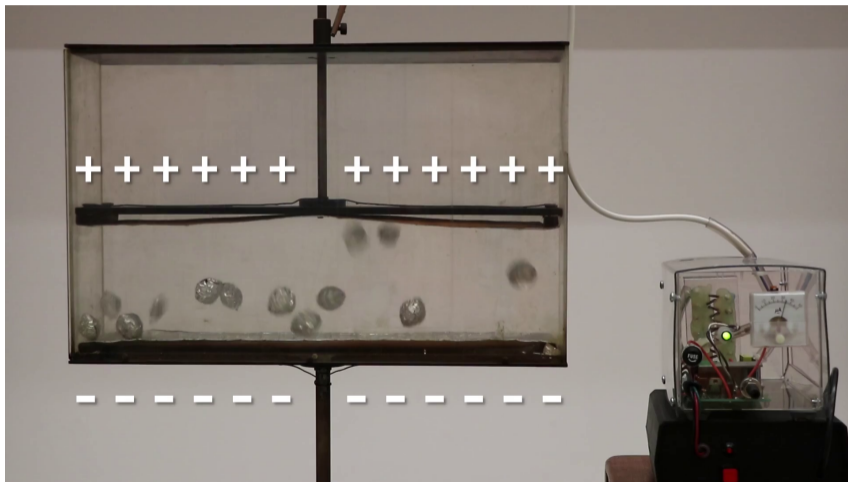
Rozkład pola elektrycznego w przestrzeni wynika z rozkładu ładunków.

Siła działająca na cząstkę naładowaną zależy od lokalnego natężenia pola:



Pomiędzy dwoma płaszczyznami z przeciwnym ładunkiem: pole jednorodne.

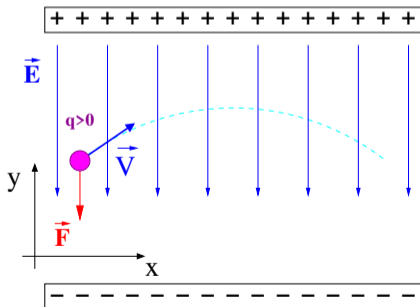
Pole elektryczne - pokaz



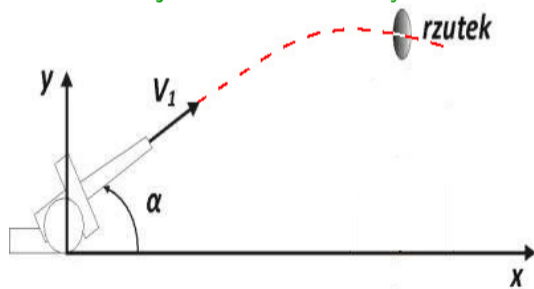
Pole elektryczne

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

Ładunek poruszający się w jednorodnym polu elektrycznym:



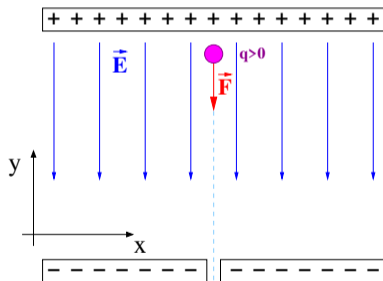
Ruch pod wpływem stałej siły:
dokładnie tak jak w "rzucie ukośnym"...



⇒ Torem ruchu jest parabola.

Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w polu elektrycznym:

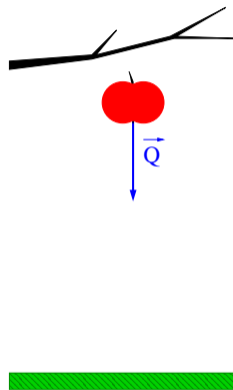


Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w polu grawitacyjnym

Tor jest prostoliniowy.

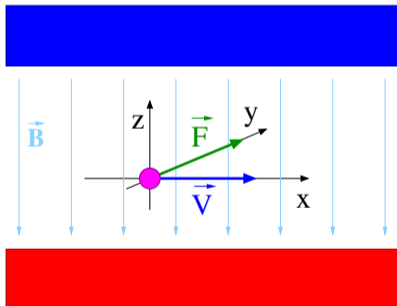
Ładunek (jabłko) porusza się ruchem przyspieszonym. **Rozpędza się!**

Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...
(pola grawitacyjnego)



Pole magnetyczne

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



Na poruszający się ładunek działa tzw. **siła Lorentza**

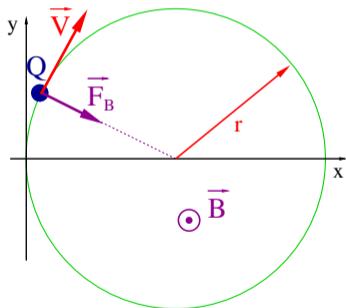
Jest to “dziwna” siła:

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:



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

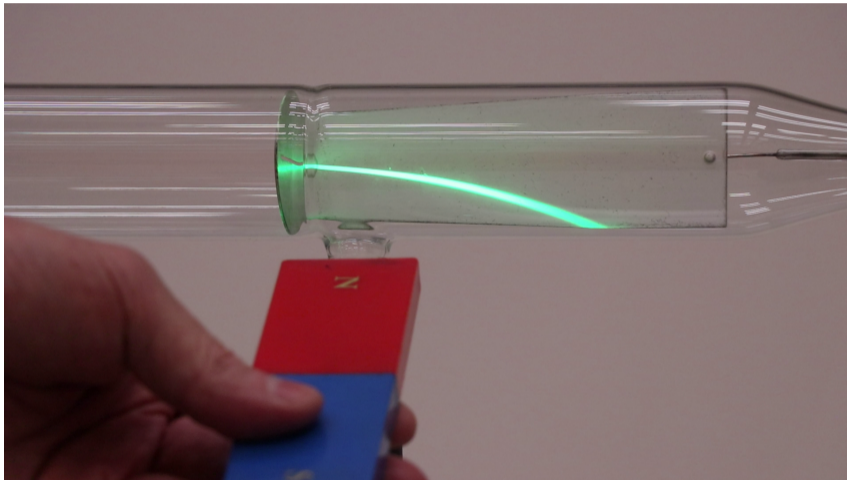
Na poruszający się ładunek działa tzw. **siła Lorentza**

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

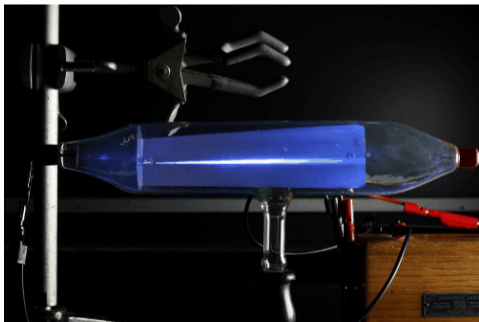


Rura Crookesa - opis

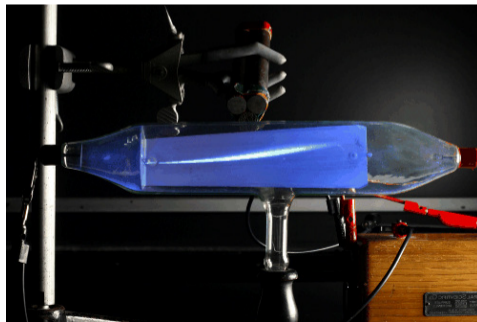
Elektrony uwalniane z katody są przyspieszane w polu elektrycznym, przez wąską szczelinę kierowane są na ekran luminescencyjny. Uderzając w ekran pobudzają luminofor do świecenia...

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

Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



A.F. Żarnecki

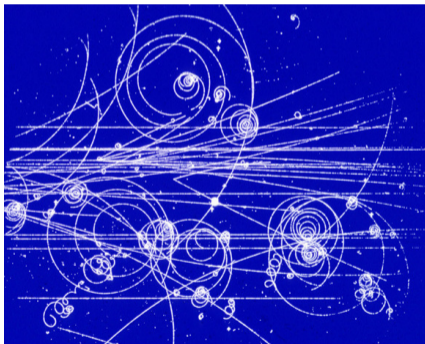


WCE

Wykład 3

Pole magnetyczne

Ruch w jednorodnym polu magnetycznym



Tory cząstek 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 pędzący bobslej:



- 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: $E = mc^2$).

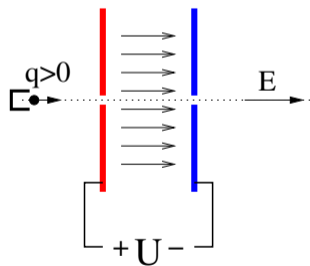
Im wyższa masa cząstki, którą chcemy wyprodukować, tym większa musi być energia zderzających się cząstek!

Najwyższe energie uzyskujemy zderzając dwie przeciwbieżne wiązki...

Akseleratory 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.

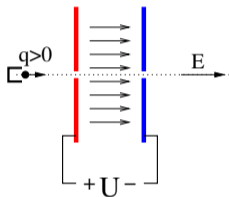
Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokich napięć przyspieszających:

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

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

W pewnych dziedzinach wciąż używane...

Jednostki



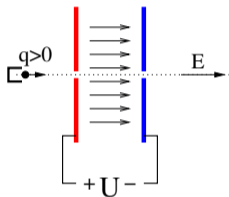
$$\Delta E = U \cdot q$$

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



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

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**.

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

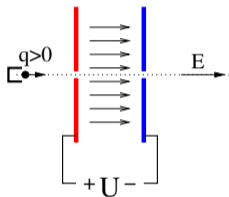
Jednostki pochodne: $1 keV = 10^3 eV$, $1 MeV = 10^6 eV$, $1 GeV = 10^9 eV$.

Jednostki 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



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

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

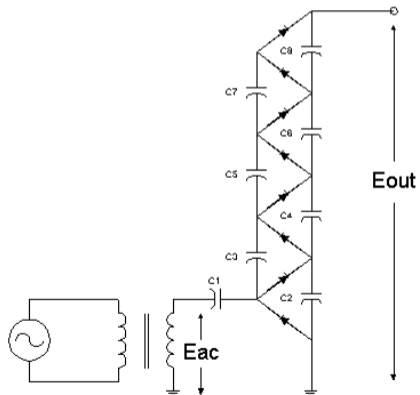
$$1 eV/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} kg$$

Wystarczy pamiętać:

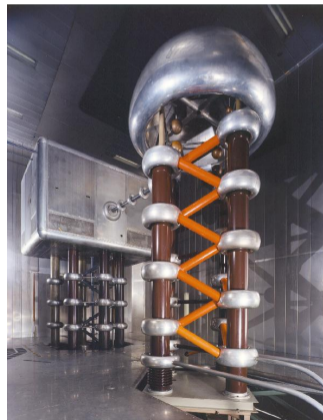
elektron	e	$\sim 0.5 MeV/c^2$
proton	p	$\sim 1 GeV/c^2$
neutron	n	$\sim 1 GeV/c^2$

Generator Cockrofta-Waltona

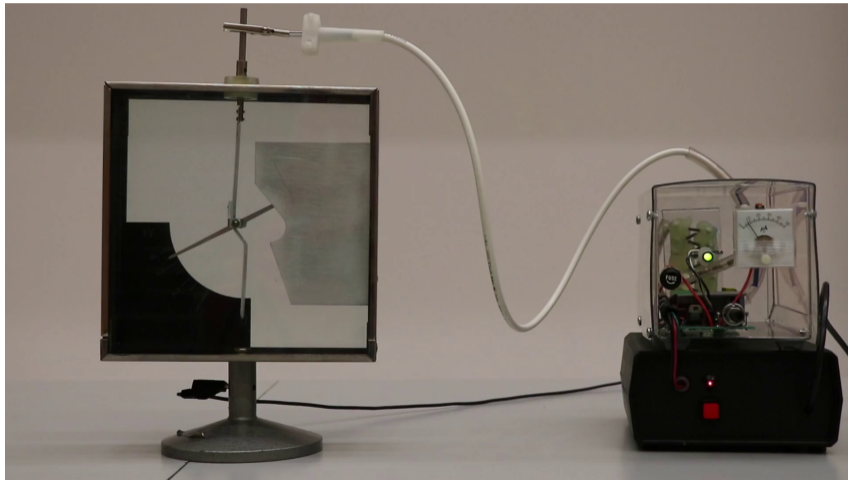
Zasada działania



Źródło jonów H^- w CERN

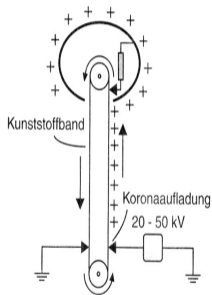


Generator Cockrofta-Waltona - pokaz



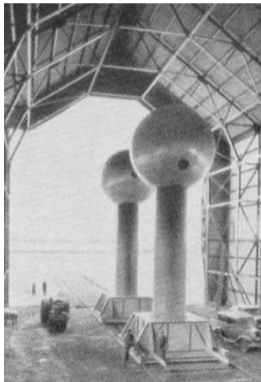
Generator Van de Graaffa

Zasada działania



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesność

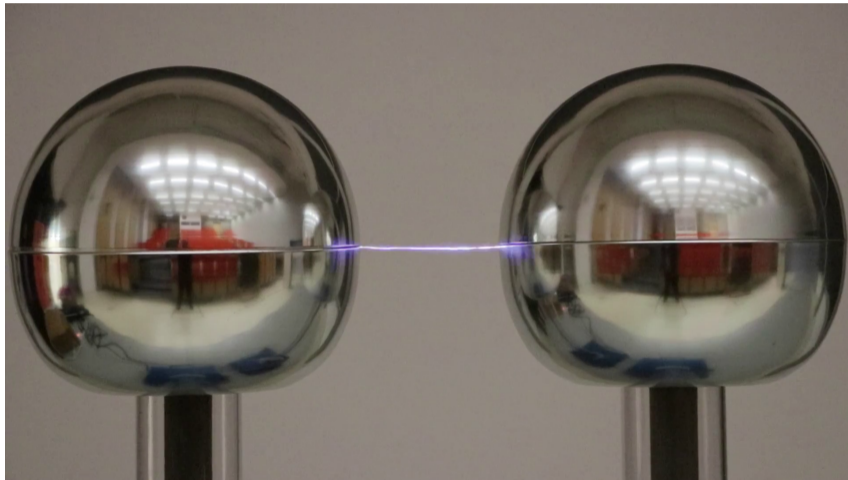


Różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV

⇒ $E \sim 30 \text{ MeV}$

⇒ **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Generator Van de Graaffa - pokaz

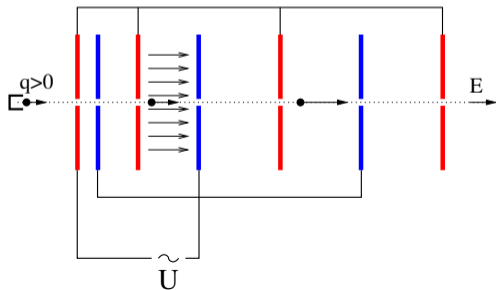


Akceleratory liniowe

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.



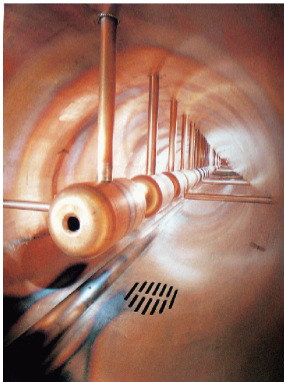
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA



A.F. Żarnecki

CERN, Genewa

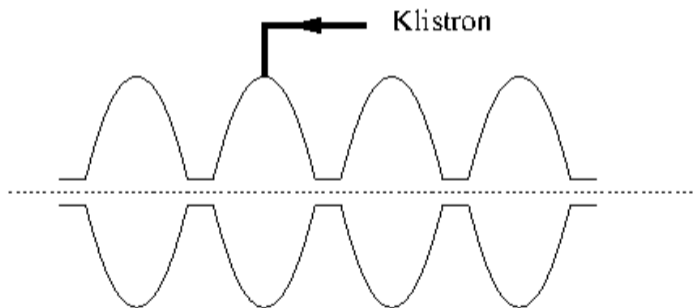


WCE

Wykład 3

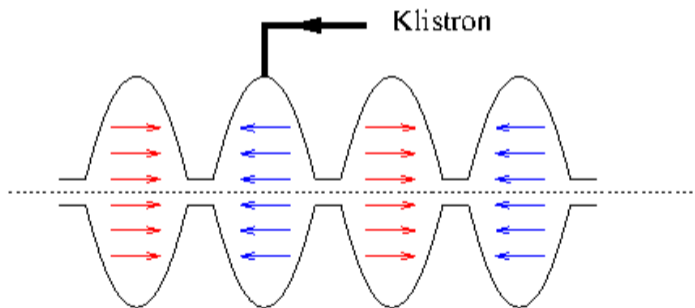
Wnęka rezonansowa

Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



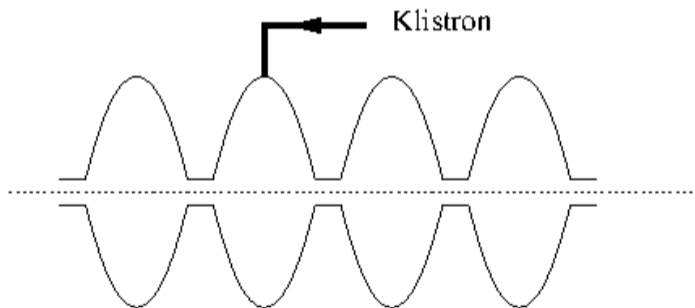
Wnęka rezonansowa

Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



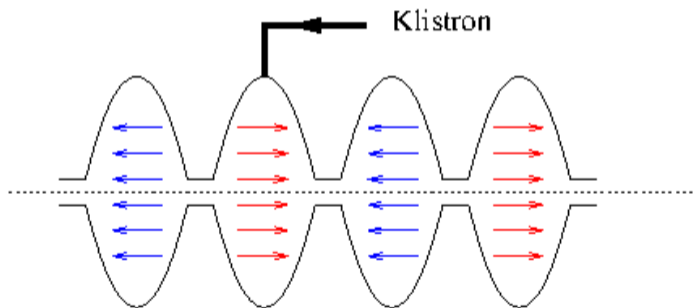
Wnęka rezonansowa

Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



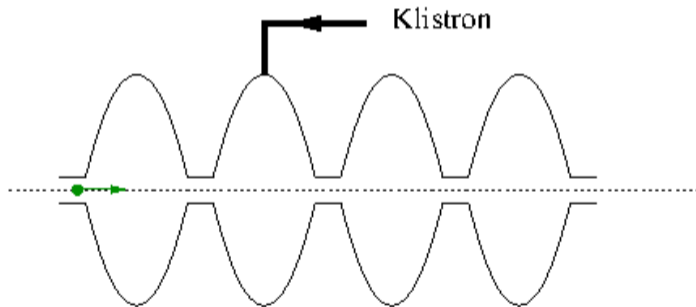
Wnęka rezonansowa

Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



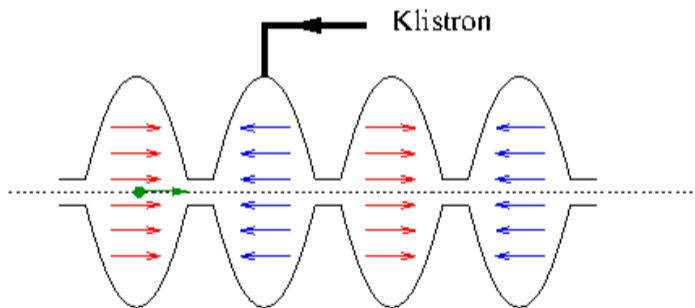
Wnęka rezonansowa

Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



Wnęka rezonansowa

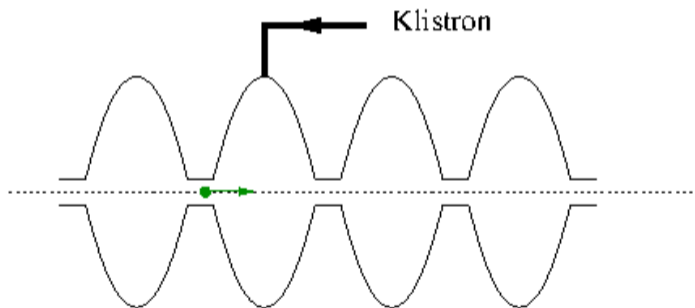
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

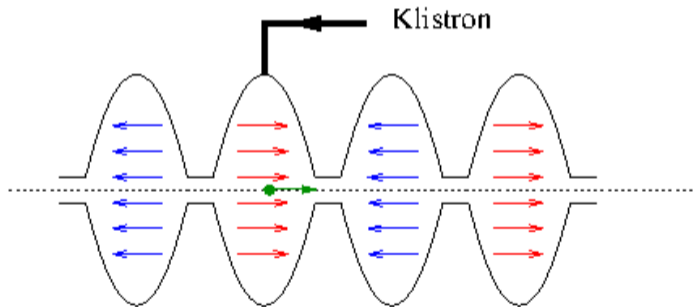
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

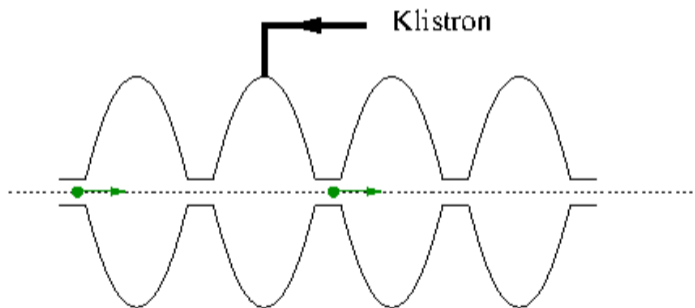
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

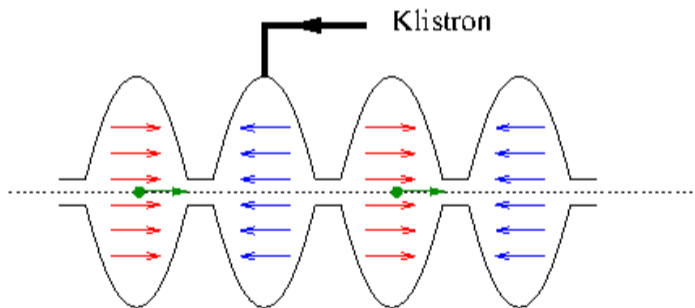
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

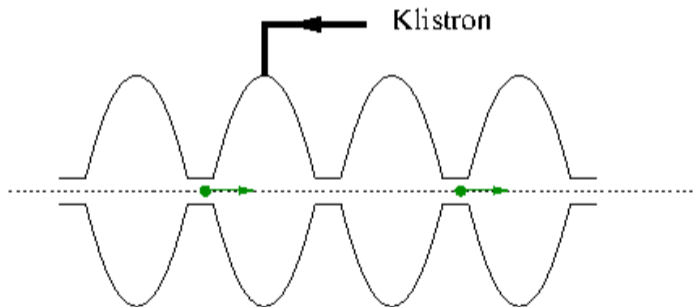
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

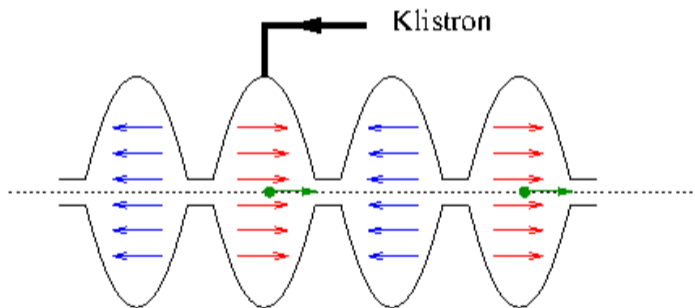
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

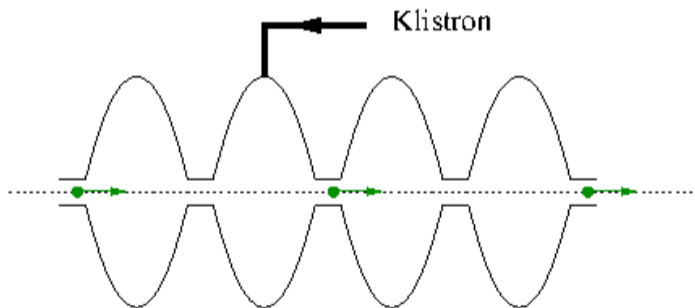
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

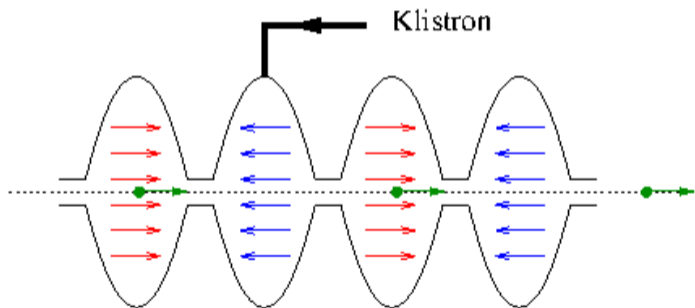
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

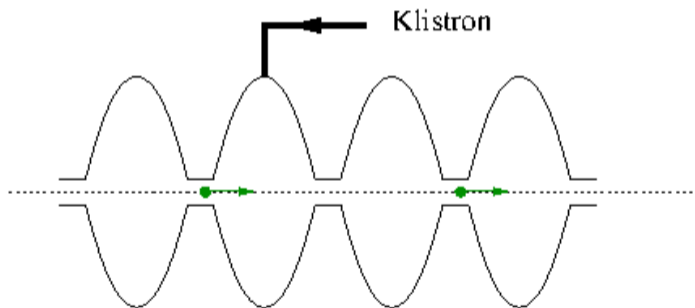
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



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

Wnęka rezonansowa

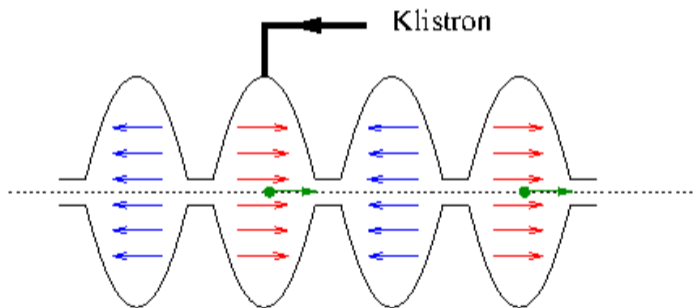
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**
Wnęki pracujące przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. \Rightarrow pola rzędu 10 MV/m.

Wnęka rezonansowa

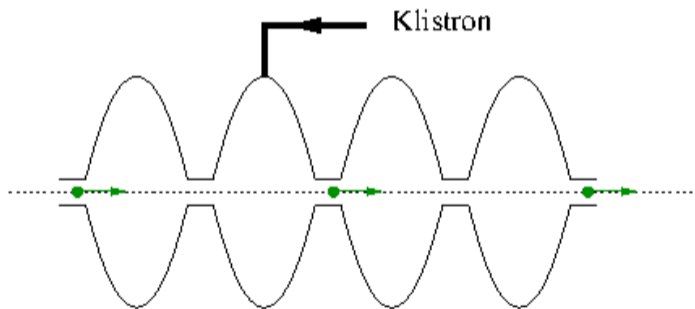
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**
Wnęki pracujące przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. \Rightarrow pola rzędu 10 MV/m.

Wnęka rezonansowa

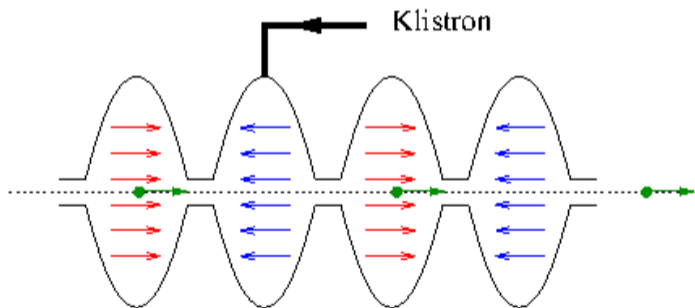
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**
Wnęki pracujące przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. \Rightarrow pola rzędu 10 MV/m.

Wnęka rezonansowa

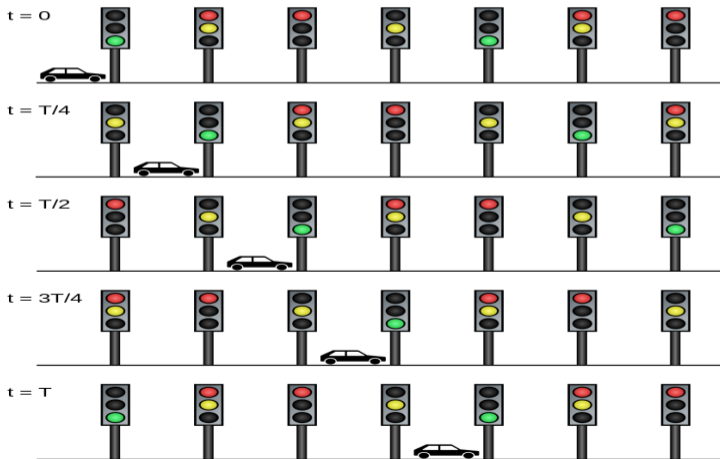
Gdy cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie **stojącej fali elektromagnetycznej** we **wnękach resonance**



Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**
Wnęki pracujące przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. \Rightarrow pola rzędu 10 MV/m.

Wnęka rezonansowa

Synchronizacja pola we wnęce z ruchem paczek przyspieszanych cząstek przypomina synchronizację światła 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

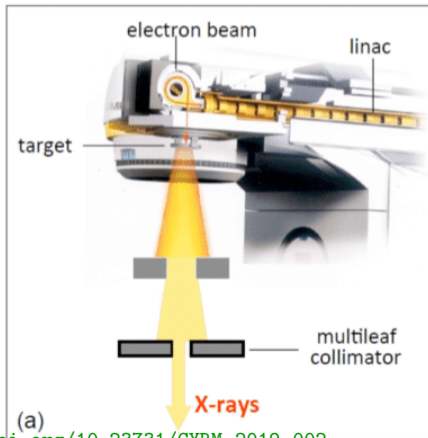


długość ok. 1 m

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:

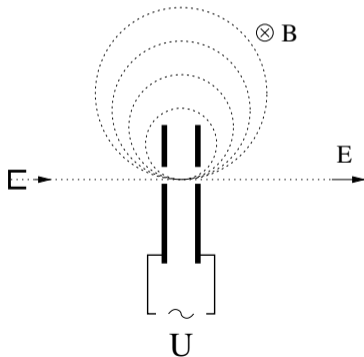


Cyklotron

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

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

Schemat ideowy:

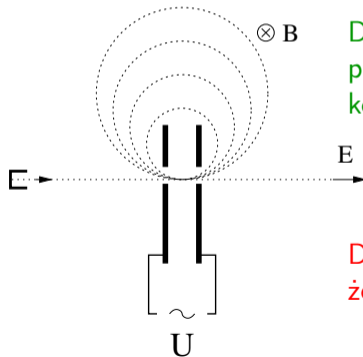


Cyklotron

Zamiast używać elementów przyspieszających możemy wykorzystać **pole magnetyczne** do "zapętlenia" toru cząstki.

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

Schemat ideowy:

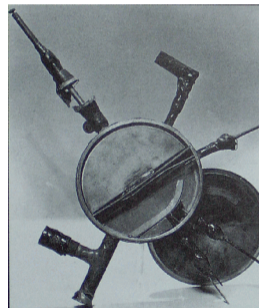
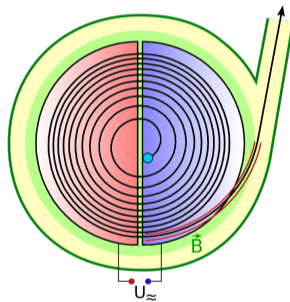


Dla stałego napięcia taka koncepcja nie działa, bo pole elektryczne rozciąga się także na zewnątrz kondensatora i hamuje wracającą cząstkę...

Dlatego przyłożone napięcie musi być przemienne, żeby przyspieszać cząstkę w obu kierunkach...

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

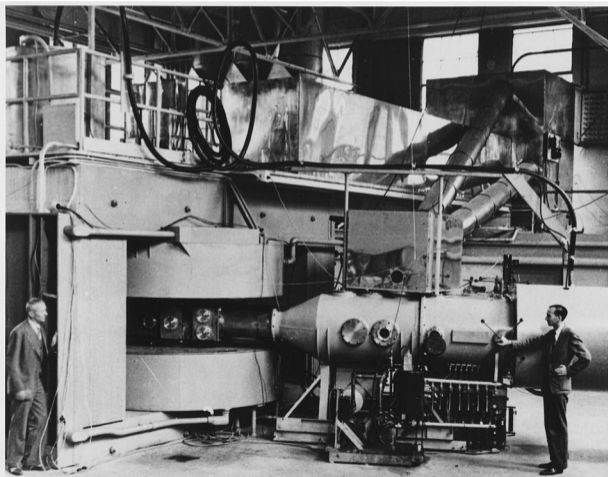
⇒ problem budowy bardzo dużych magnesów ⇒ ograniczenie energii

Akcelerator kołowy - pokaz



Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.



Cyklotron w Berkeley, 1939
średnica 1.5 m

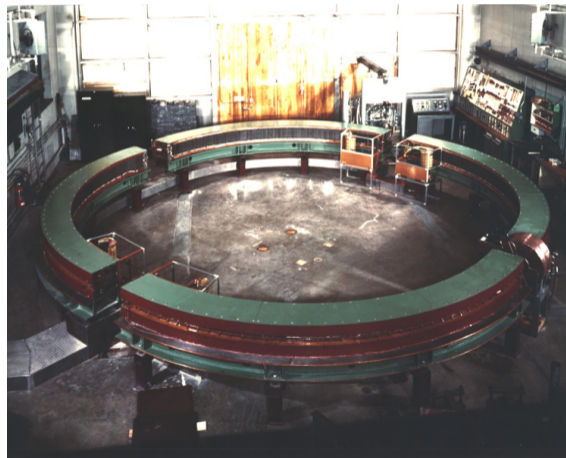
Największy cyklotron z pojedynczym
magnesem miał 4.6 m średnicy.

Synchrotron

Kolejnym przełomem było wynalezienie **synchrotronu** (1955):

Pole magnetyczne zwiększające się w trakcie przyspieszania utrzymuje cząstki na stałej orbicie

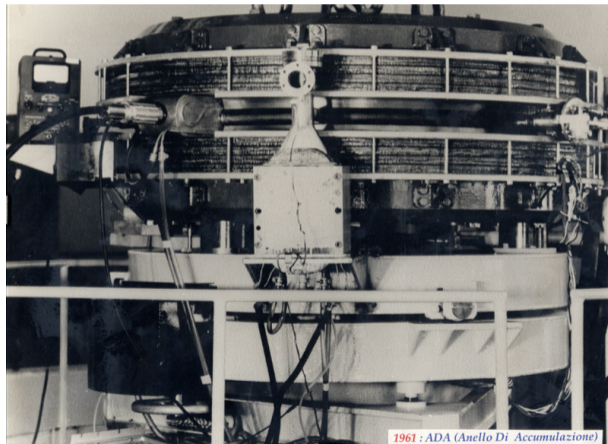
Orbita nie musi być ściśle kołowa.
Możemy użyć wielu małych magnesów...



Zderzacze cząstek (kolajdery)

Energię możemy zwielokrotnić zderzając dwie wiązki przeciwbieżne.

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



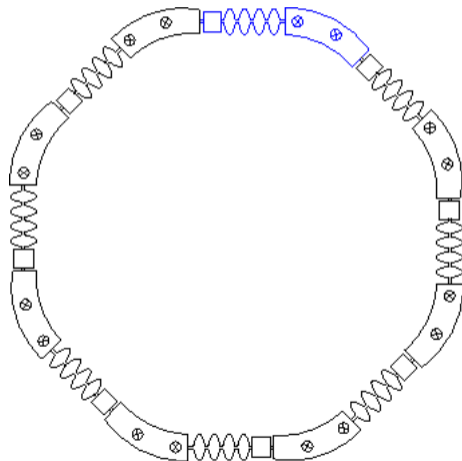
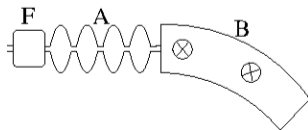
- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratorzy**

Akceleratory kołowe

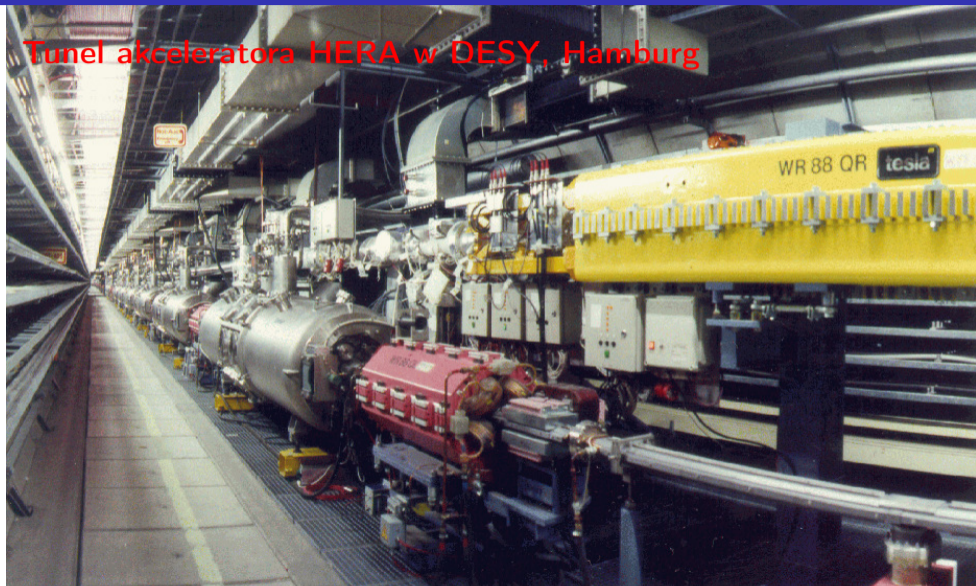
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

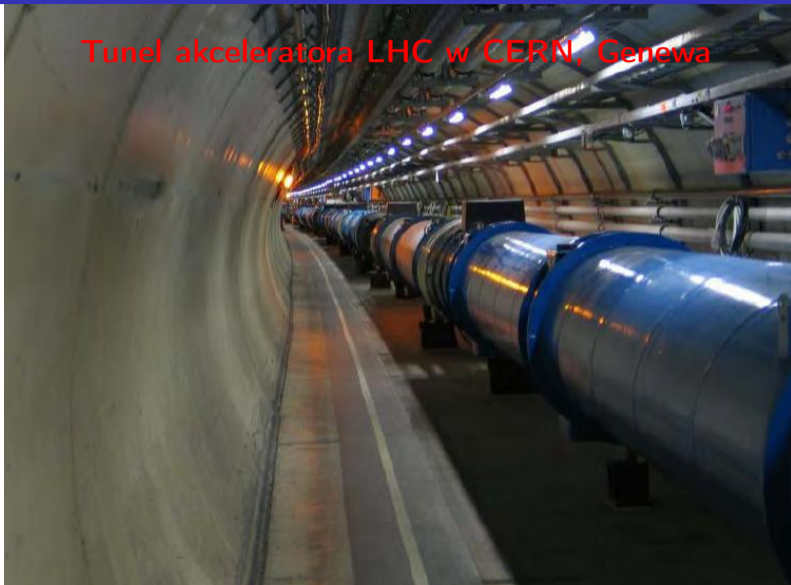
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Tunel akceleratora HERA w DESY, Hamburg

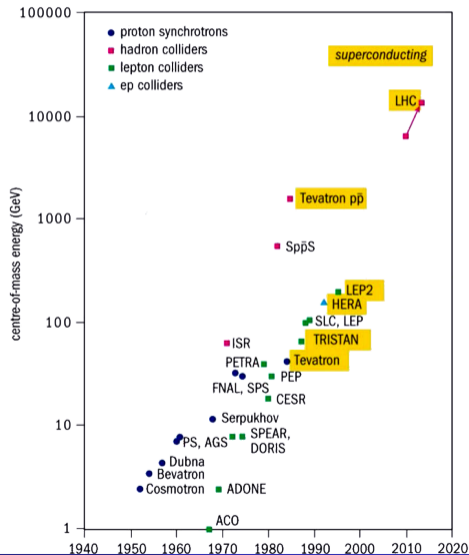


Tunel akceleratora LHC w CERN, Genewa



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

Dlaczego?



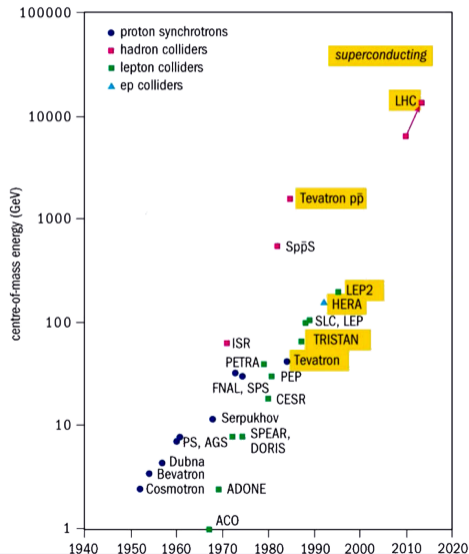
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

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 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...

Ale napotykaamy **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 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 energie 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 **pola 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!

Najbardziej zaawansowany jest obecnie projekt budowy akceleratora e^+e^- ILC w Japonii.

Są też inne opcje, ale w każdym przypadku będzie to projekt "globalny", ogólnoświatowy...

