

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Akceleratorzy

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

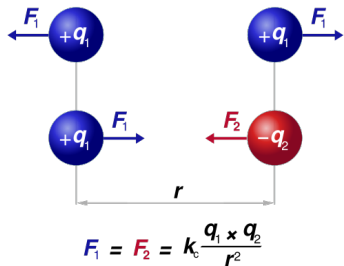
17 października 2017

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratory
- 4 Akceleratory wokół nas

- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratory
- 4 Akceleratory wokół nas

Pole elektryczne

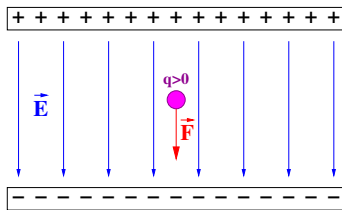
Prawo Coulomba
siła oddziaływania między
punktowymi ładunkami:



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

Jeśli wytworzymy odpowiedni układ ładunków, możemy wpływać na ruch cząstki naładowanej.

Wygodnie jest wprowadzić pojęcie "pola elektrycznego" \vec{E} :

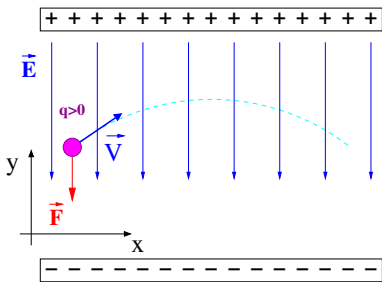


Siła działająca na cząstkę:

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

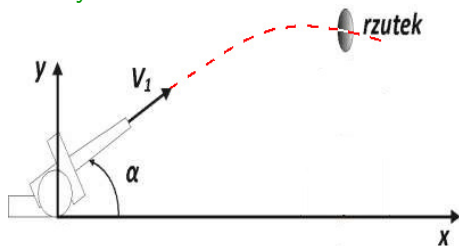
Pole elektryczne

Ładunek poruszający się w
jednorodnym polu elektrycznym:



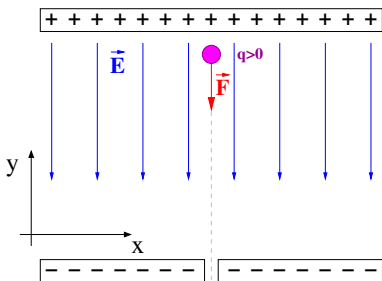
Torem ruchu jest parabola.

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

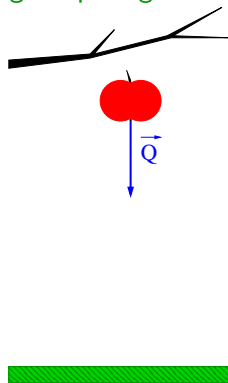


Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek “spada” w polu elektrycznym:



Sytuacja analogiczna do spadku swobodnego w polu grawitacyjnym



Tor jest prostoliniowy.

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

Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...

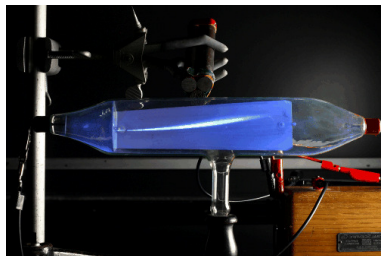
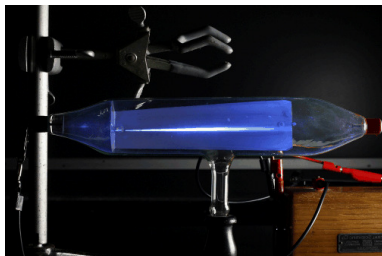
Rura Crookesa - pokaz

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...

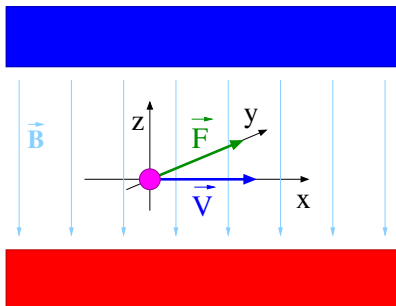
Przy braku pola w tym obszarze poruszają się po linii prostej.

Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



Pole magnetyczne

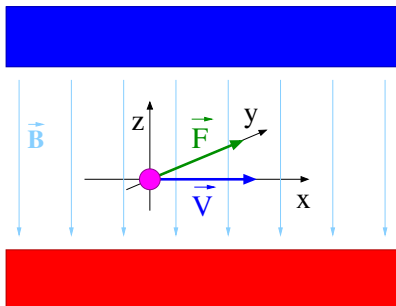
Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



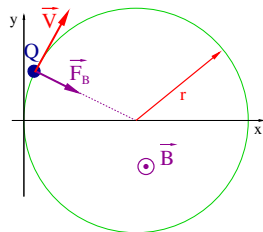
Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza
Jest to “dziwna” siła: działa prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu.
⇒ nie zmienia prędkości (energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się prostopadle do pola jednorodnego:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

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

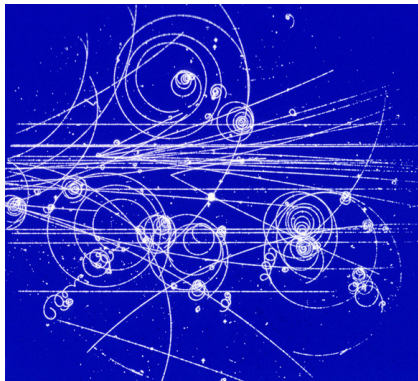
Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza

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

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

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 akceleratory
- 4 Akceleratory wokół nas

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** $e^+ e^-$:



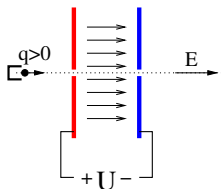
Aby wyprodukować **nowe cząstki** musimy dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy (**zasada zachowania energii** + $E = mc^2$).

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**.



$$E = U \cdot q$$

$$1 \text{ eV} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ e}$$

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

Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokich napięć przyspieszających:

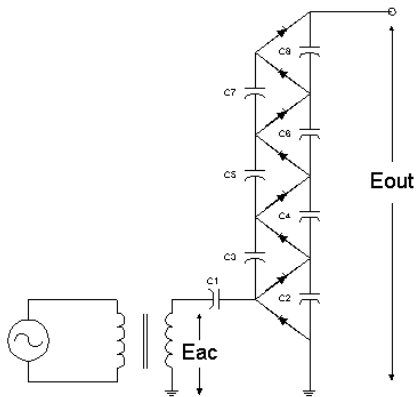
⇒ generator **Van de Graaffa** (1929): 1.5 MV

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

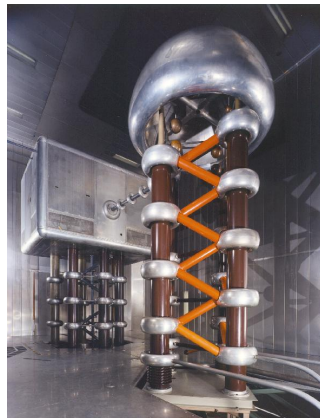
W pewnych dziedzinach wciąż używane...

Generator Cockrofta-Waltona

Zasada działania

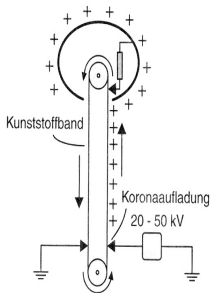


Źródło jonów H^- w CERN



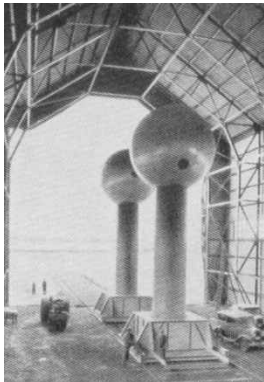
Generator Van de Graaff

Zasada działania



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesność



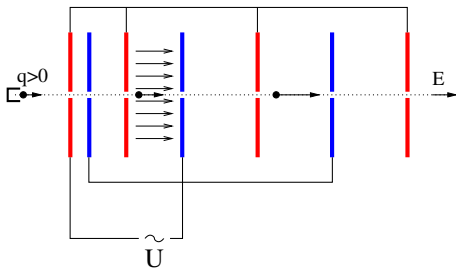
Różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV
 $\Rightarrow E \sim 30 \text{ MeV}$ \Rightarrow **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

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.



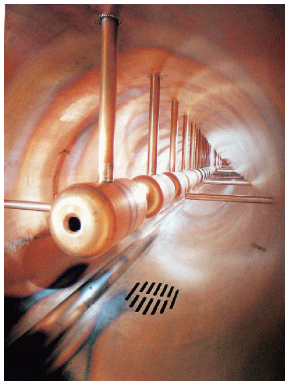
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwiokrotnienie uzyskiwanych energii

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA

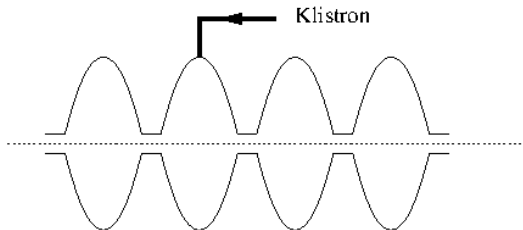


CERN, Genewa



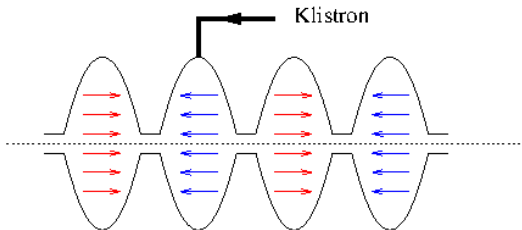
Wnęka rezonansowa

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



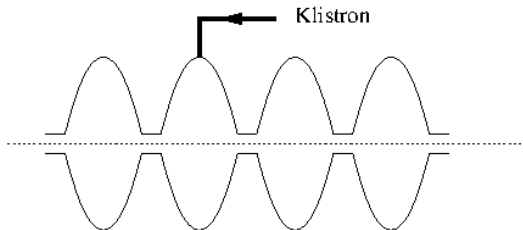
Wnęka rezonansowa

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



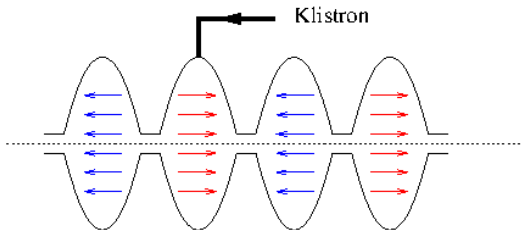
Wnęka rezonansowa

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



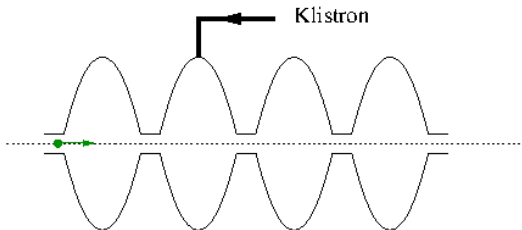
Wnęka rezonansowa

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



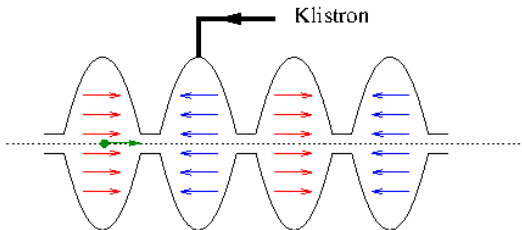
Wnęka rezonansowa

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



Wnęka rezonansowa

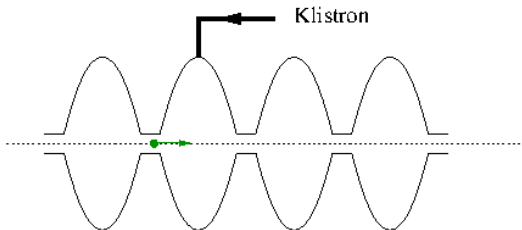
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

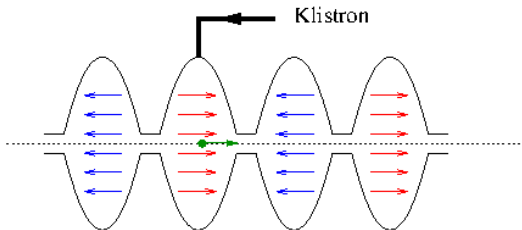
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

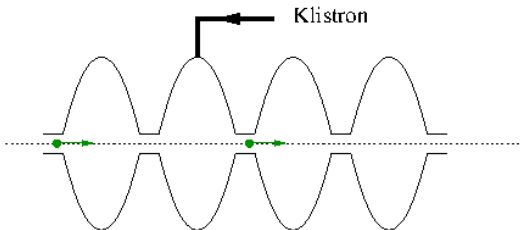
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

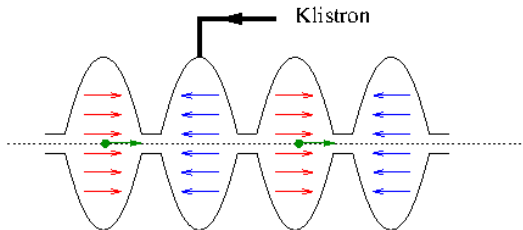
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

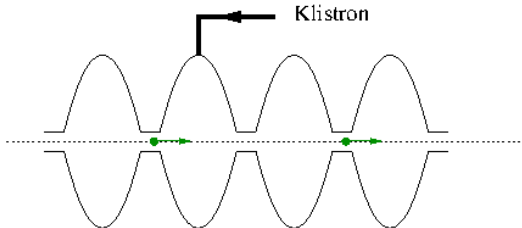
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

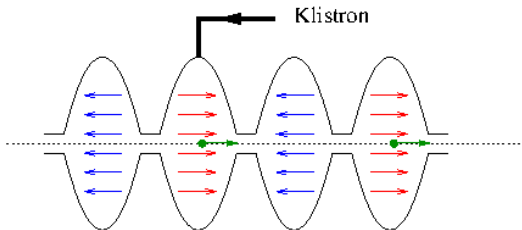
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

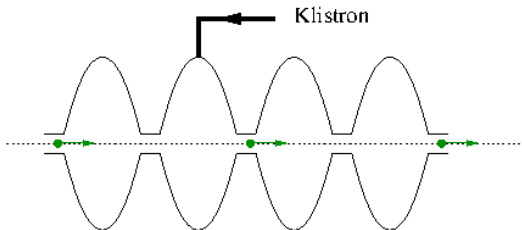
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

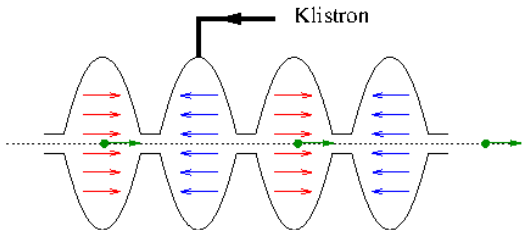
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

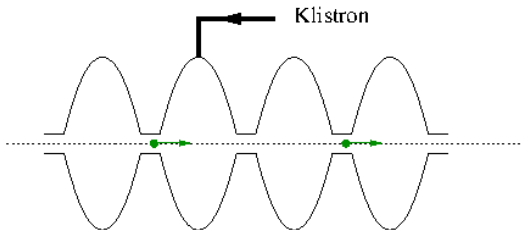
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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**

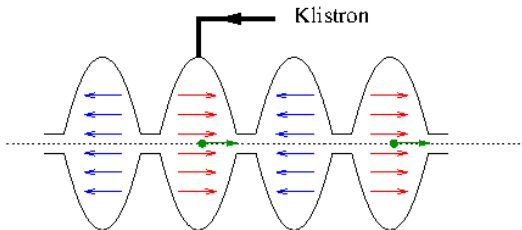


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskiwać 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**

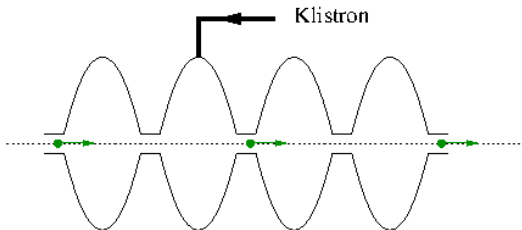


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskiwać 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**

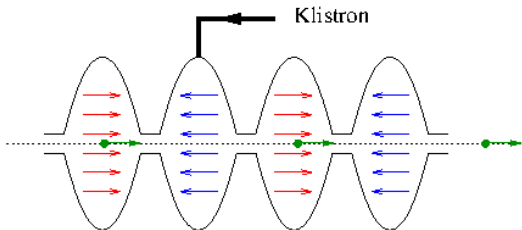


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

Wnęki rezonansowe pracują przy częstotliwościach rzędu 100 MHz do 10 GHz. Pozwalają uzyskiwać 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**

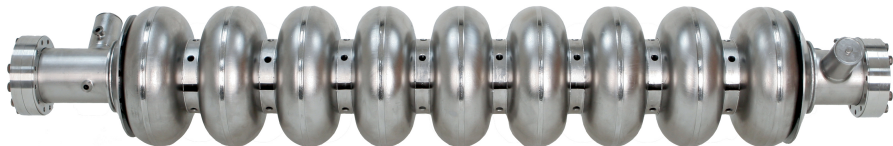


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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

Wnęka rezonansowa

Widok prototypowej wnęki rezonansowej zbudowanej w projekcie ILC



długość ok. 1 m

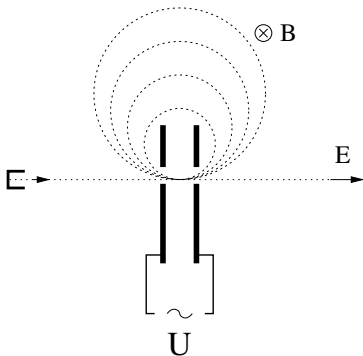
Dzięki wykorzystaniu nadprzewodnictwa (brak strat energii w ściankach wnęki) możliwe jest uzyskanie pól przyspieszających do 30 MV/m

Cyklotron

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

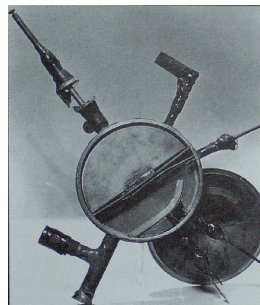
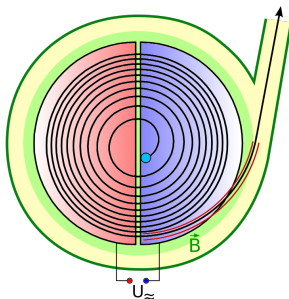
Cząstka przechodzi przez ten sam obszar pola elektrycznego wiele razy...

Schemat ideowy:



Cyklotron

Pierwszy tego typu akcelerator zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence.



Promień orbity cząstki rośnie w miarę przyspieszania

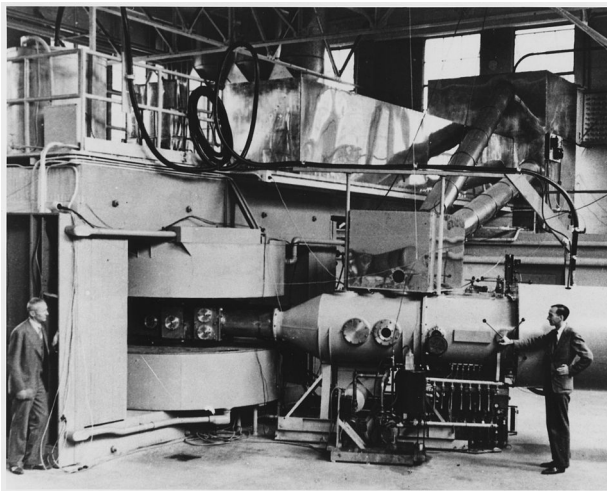
⇒ pole magnetyczne musi być jednorodne w dużym obszarze

⇒ problem budowy bardzo dużych magnesów ⇒ ograniczenie energii

Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

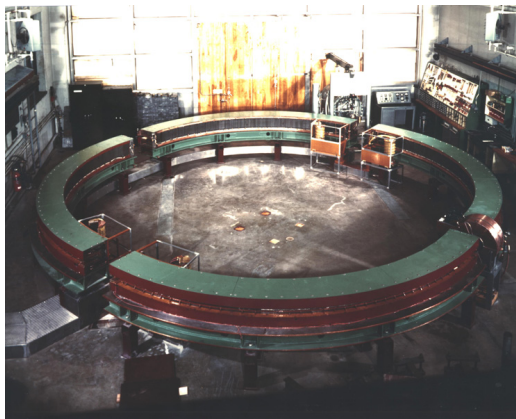
Berkeley 1939
średnica 1.5 m



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

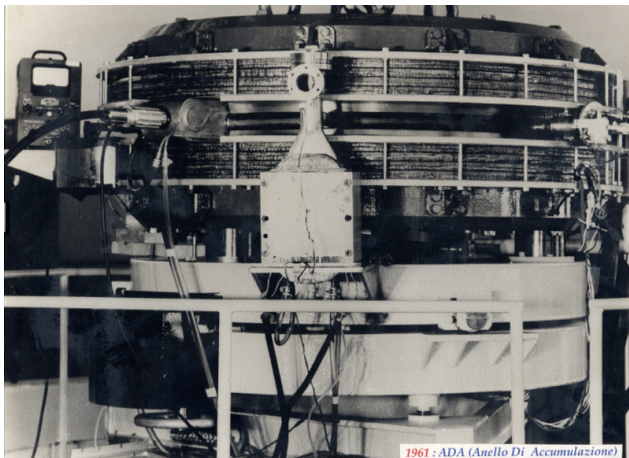


Orbita nie musi być ściśle kołowa. Możemy użyć wielu małych magnesów...

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)

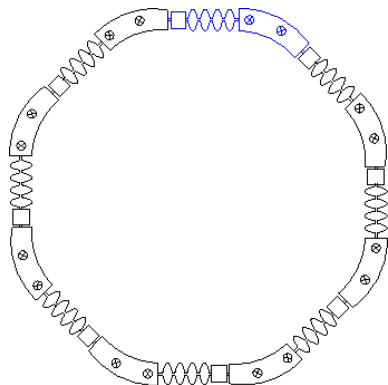
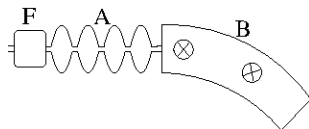
- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratory**
- 4 Akceleratory wokół nas

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

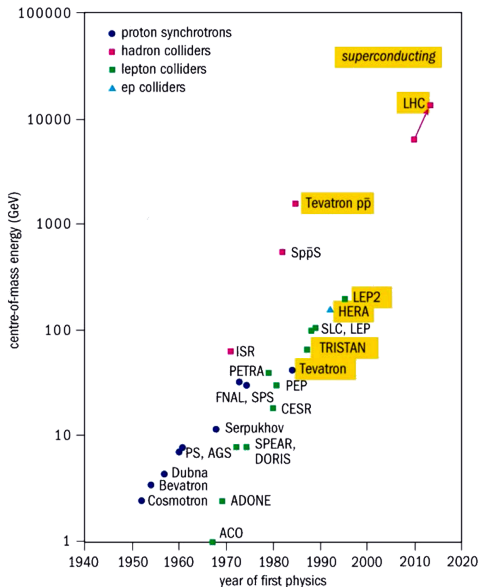


Tunel akceleratora LHC w CERN, Genewa



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

Dlaczego?



Akceleratory kołowe

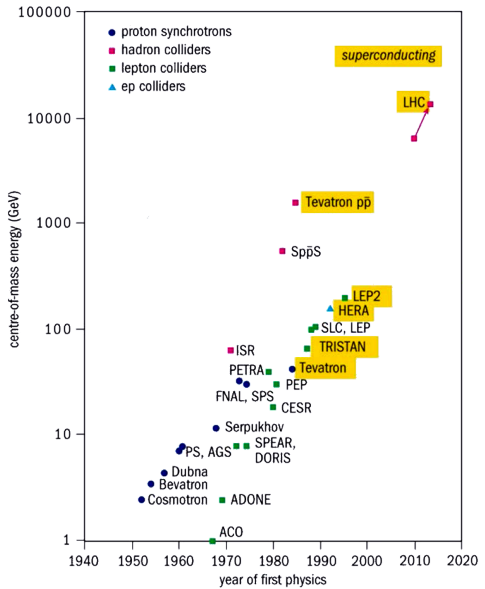
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

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

Docelowo 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 **utrzymywać** 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**.

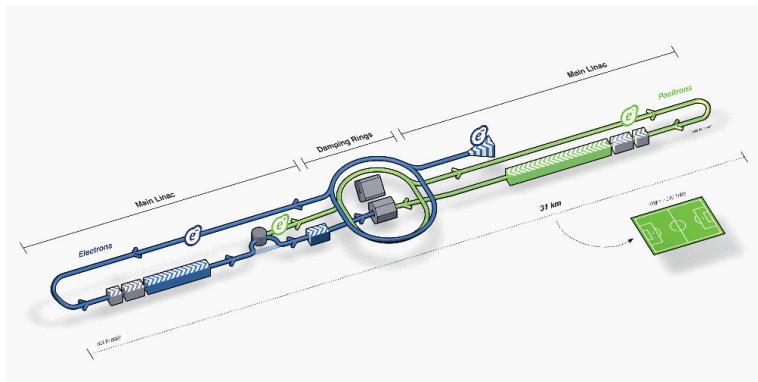
Rośnie ono bardzo szybko z energią ($\text{moc} \sim E^4/R^2$).

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



Szczegółowy projekt jest gotów do realizacji.

Budowa w Japonii(?)

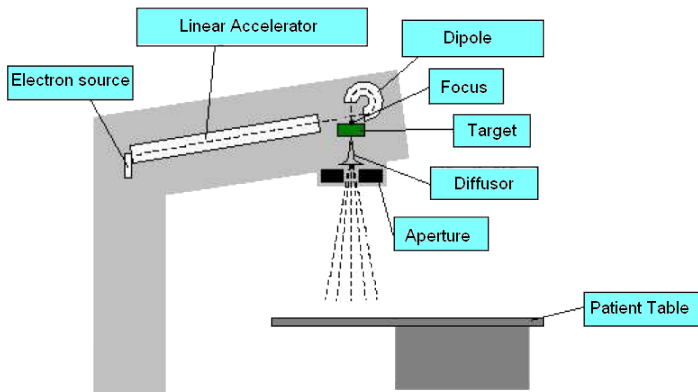
- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Współczesne akceleratory
- 4 Akceleratory wokół nas**

Radioterapia

Radioterapia jest stosowana w prawie połowie przypadków nowotworów. Głównym narzędziem są **akceleratory elektronowe** o energii 8 do 30 MeV.

Energia uzyskiwana z klasycznych lamp rentgenowskich jest zbyt mała.

Elektrony hamowane w tarczy produkują promieniowanie γ :



Radioterapia

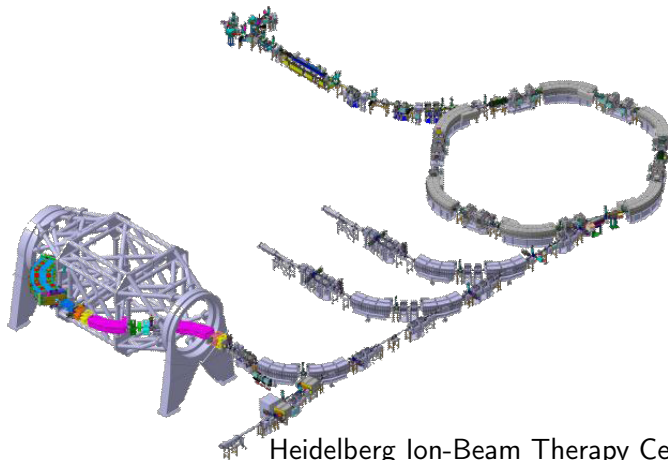
Radioterapia jest stosowana w prawie połowie przypadków nowotworów. Głównym narzędziem są **akceleratory elektronowe** o energii 8 do 30 MeV.

Energia uzyskiwana z klasycznych lamp rentgenowskich jest zbyt mała.

Nowoczesne urządzenie zintegrowane z CT (Varian Medical Systems):



Terapia hadronowa protonami lub jonami węgla
Daje dużo lepsze efekty terapeutyczne (radio-oporne nowotwory, dzieci).
Wiązka hadronowa dostarczana przez duży kompleks akceleratorów



Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

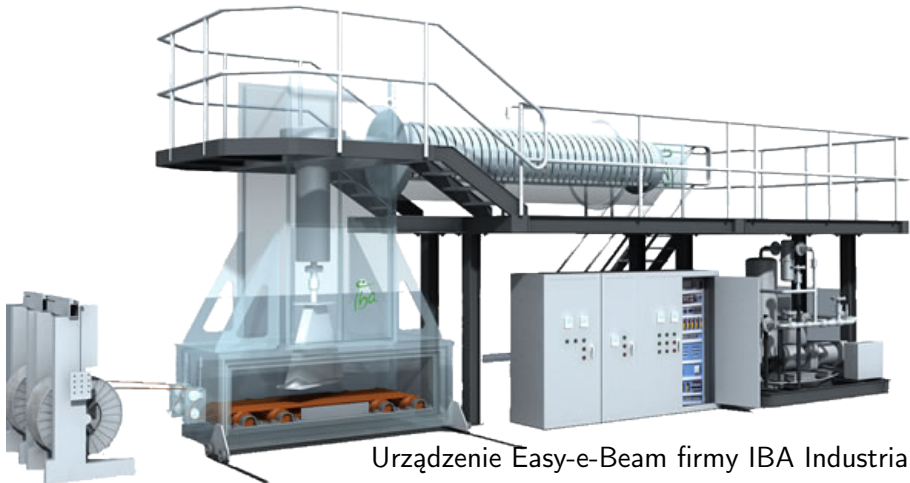
Terapia hadronowa

Synchrotron w ośrodku MedAustron, Austria



Naświetlanie wiązką elektronów

Najszerzej wykorzystywane w produkcji kabli i rur odpornych na wysoką temperaturę i czynniki chemiczne



Urządzenie Easy-e-Beam firmy IBA Industrial

Naświetlanie wiązką elektronów

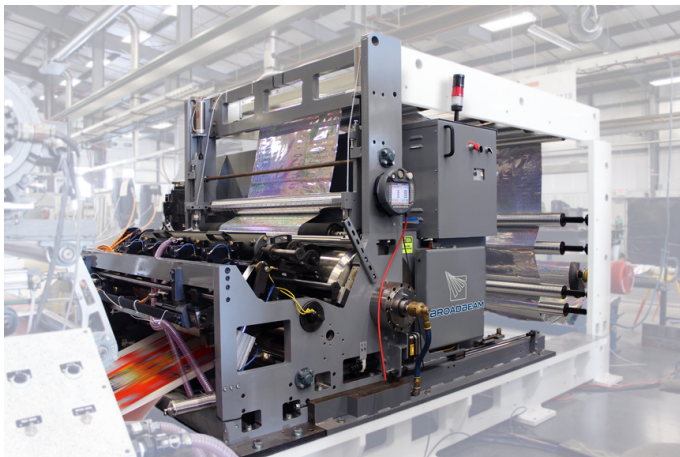
Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,



Naświetlanie wiązką elektronów Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),



Naświetlanie wiązką elektronów Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),



Naświetlanie wiązką elektronów

Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),
- sterylizacji radiologicznej (sprzęt i materiały medyczne, kosmetyki),



Naświetlanie wiązką elektronów Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),
- sterylizacji radiologicznej (sprzęt i materiały medyczne, kosmetyki),
- przetwórstwie owocowo-warzywnym (zabijanie owadów, pasożytów),



Naświetlanie wiązką elektronów Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),
- sterylizacji radiologicznej (sprzęt i materiały medyczne, kosmetyki),
- przetwórstwie owocowo-warzywnym (zabijanie owadów, pasożytów),
- konserwacji żywności (ziarno, mięsa, ziół i przypraw).



Naświetlanie wiązką elektronów

Wykorzystywane też w:

- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),
- sterylizacji radiologicznej (sprzęt i materiały medyczne, kosmetyki),
- przetwórstwie owocowo-warzywnym (zabijanie owadów, pasożytów),
- konserwacji żywności (ziarno, mięsa, ziół i przypraw).



Akceleratory w liczbach

Na świecie działa ponad 35 000 akceleratorów



Radioterapia to rocznie ok. 4 000 000 pacjentów

Wartość przetworzonych produktów to rocznie ponad \$ 500 000 000 000