

Podstawy fizyki kwantowej i budowy materii

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej



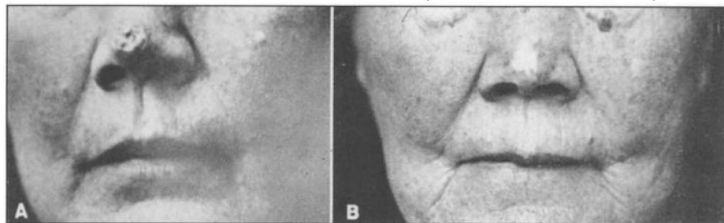
Wykład 14
23 stycznia 2017

- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory wokół nas

- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory wokół nas

Początki

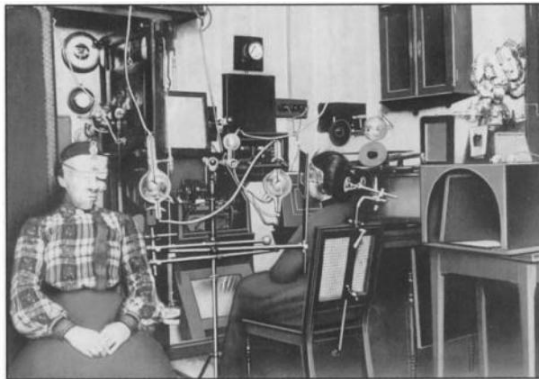
- 1895: odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)



Basal cell carcinoma przed terapią (A) i po 30 latach (B).

Początki

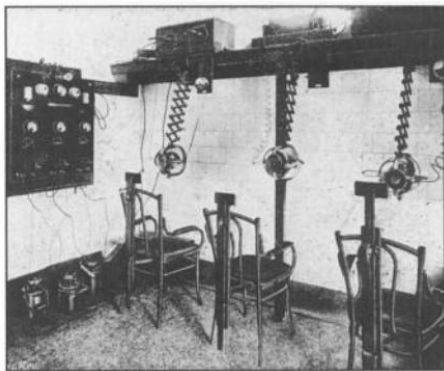
- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)



Pokój do terapii promieniami X w Monachium (1900-1904).

Początki

- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)



Pokój radioterapii w Londynie (1905).

Początki

- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)
- 1896: odkrycie **promieniotwórczości naturalnej** przez Henri Becquerela
- 1898: odkrycie radu przez Marię Skłodowską-Curie i Pierra Curie
- 1901: pierwsze wykorzystanie terapeutyczne radu (Paryż)

Początki

- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)
- 1896: odkrycie **promieniotwórczości naturalnej** przez Henri Becquerela
- 1898: odkrycie radu przez Marię Skłodowską-Curie i Pierra Curie
- 1901: pierwsze wykorzystanie terapeutyczne radu (Paryż)
- 1906: pierwszy dedykowany instytut badawczy (Heidelberg)
- 1913: nowa, wydajniejsza konstrukcja lampy rentgenowskiej (USA)
- 1920: komercyjna produkcja aparatów do naświetlań (Niemcy)

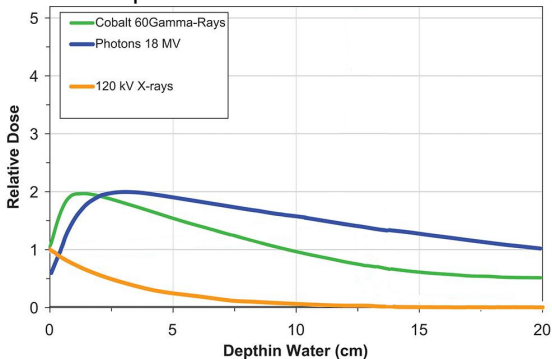
Początki

- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)
- 1896: odkrycie **promieniotwórczości naturalnej** przez Henri Becquerela
- 1898: odkrycie radu przez Marię Skłodowską-Curie i Pierra Curie
- 1901: pierwsze wykorzystanie terapeutyczne radu (Paryż)
- 1906: pierwszy dedykowany instytut badawczy (Heidelberg)
- 1913: nowa, wydajniejsza konstrukcja lampy rentgenowskiej (USA)
- 1920: komercyjna produkcja aparatów do naświetlań (Niemcy)
- 1951: pierwsze urządzenie ze źródłem kobaltu (Kanada)

Problem energii

Lampy rentgenowskie dostarczają promieniowania o energii 50-160 keV.
Promieniowanie gamma emitowane przez ^{60}Co ma około 1 250 keV.

- ⇒ dużo większa penetracja
- ⇒ mniejsza dawka powierzchniowa

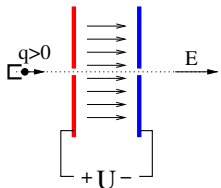


Optymalna byłaby wiązka o energii powyżej 10 MeV (10 000 keV).

- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory wokół nas

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

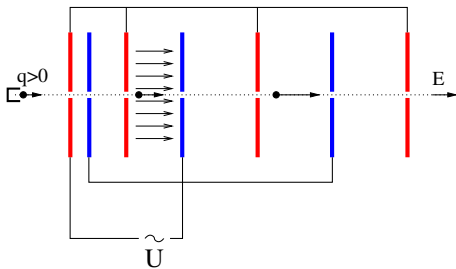
W pewnych dziedzinach wciąż używane...

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.



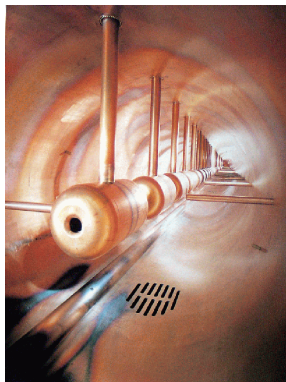
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwiokrotnienie uzyskiwanych energii

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA

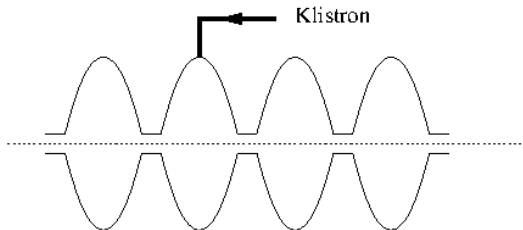


CERN, Genewa



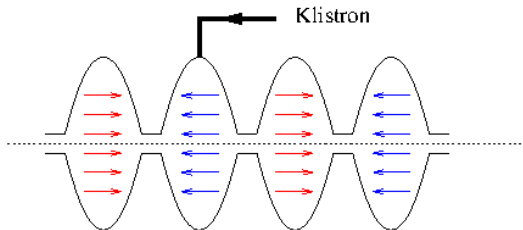
Wnęka rezonansowa

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



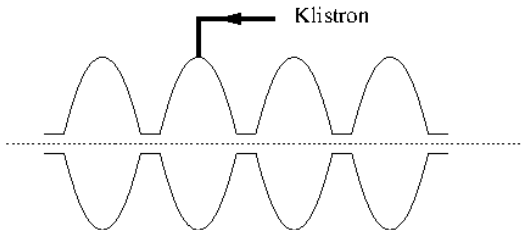
Wnęka rezonansowa

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



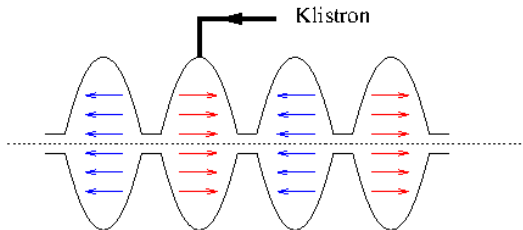
Wnęka rezonansowa

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



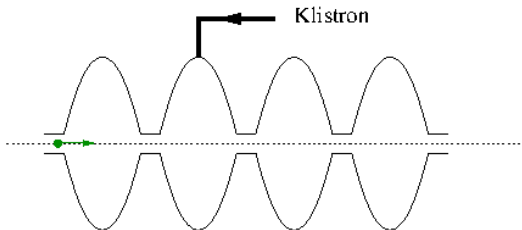
Wnęka rezonansowa

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



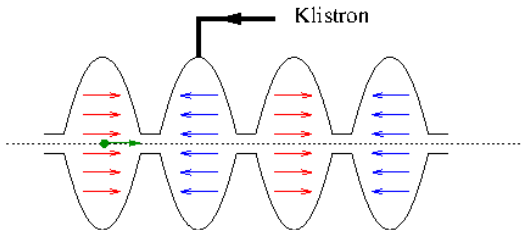
Wnęka rezonansowa

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



Wnęka rezonansowa

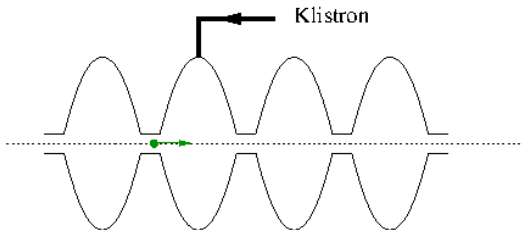
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

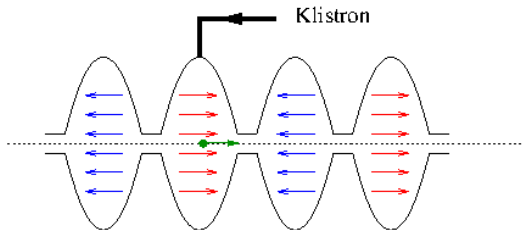
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

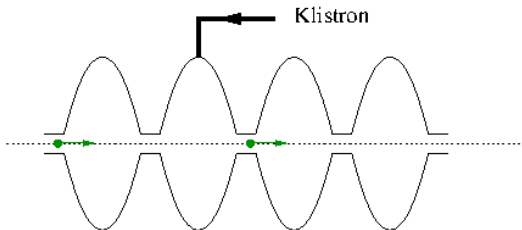
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

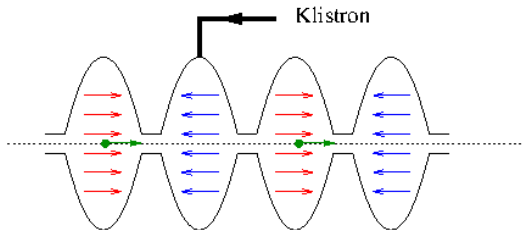
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

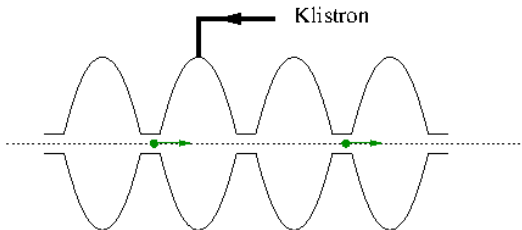
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

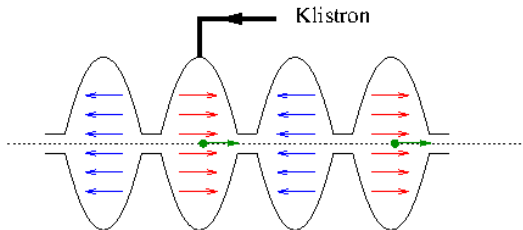
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

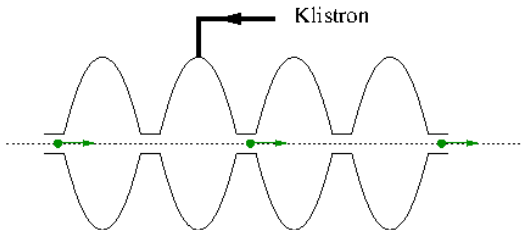
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

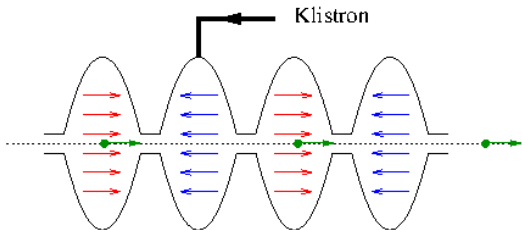
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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

Wnęka rezonansowa

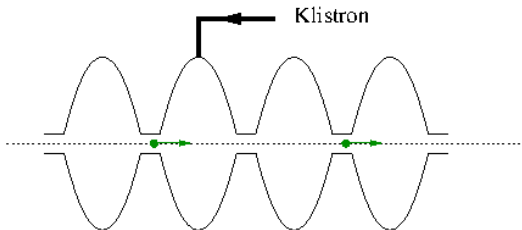
Gdy przyspieszane cząstki poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, najefektywniejszą metodą przyspieszania jest wykorzystanie stojącej fali elektromagnetycznej w tzw. **wnękach rezonansowych**



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**

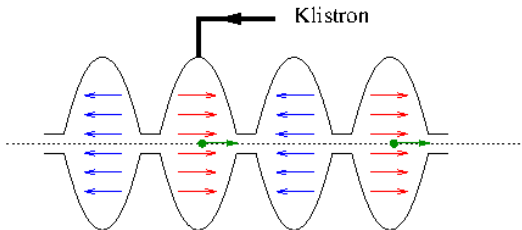


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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**

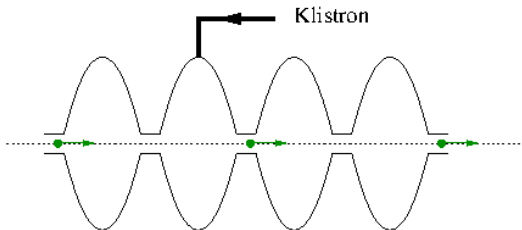


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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**

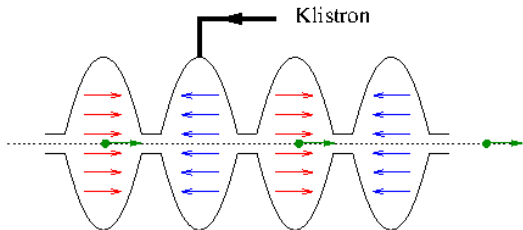


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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**

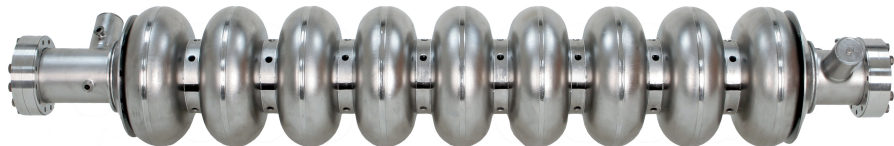


Paczki przyspieszanych cząstek wstrzeliwane są tak, że zawsze trafiają na **pole przyspieszające**

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

Historia akceleratorów

Cyklotron

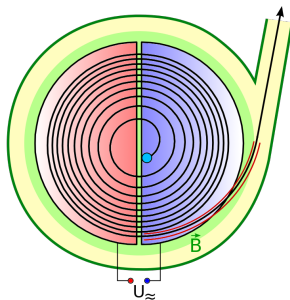
Zamiast używać elementów przyspieszających możemy wykorzystać **pole magnetyczne** do “zapętlenia” cząstki.

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

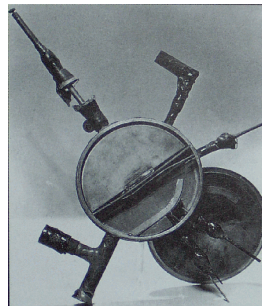
Pierwszy tego typu akcelerator zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence.



A.F. Żarnecki



Podstawy fizyki kwantowej...

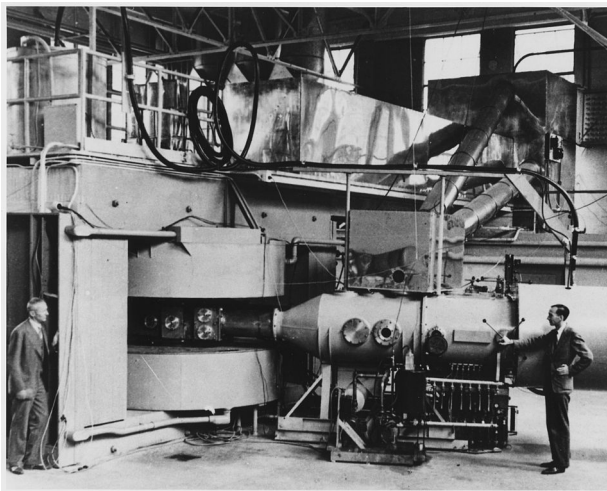


Wykład 14

Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

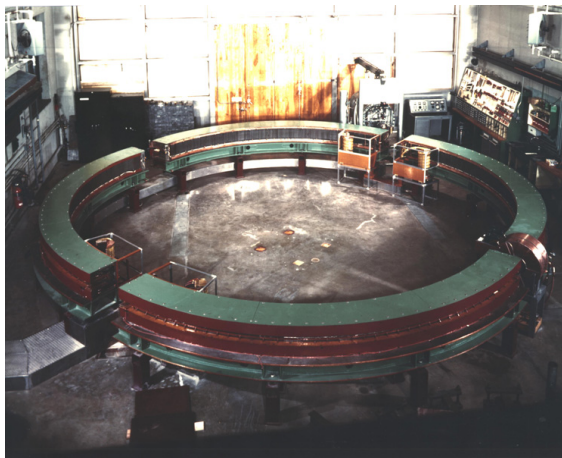
Berkeley 1939
średnica 1.5 m



Największy cyklotron z pojedynczym magnesem miał 4.6 m średnicy.

Synchrotron

Kolejnym przełomem było wynalezienie synchrotronu (1955):
elektromagnesy utrzymują przyspieszane cząstki na stałej orbicie.

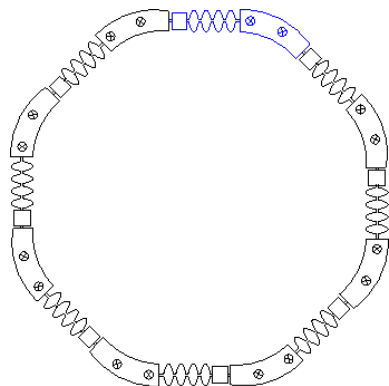
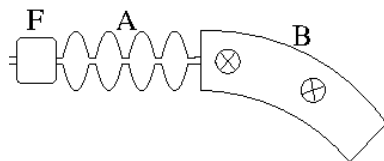


Schemat akceleratora kołowego

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)



Historia akceleratorów

LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km. W tym samym tunelu działa obecnie LHC!

Dwie wiązki protonów o energii do 7 TeV

W każdej do 2800 "paczek" po 10^{11} protonów \Rightarrow energia paczki $\sim 10^5$ J

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

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

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)





Tunel LHC

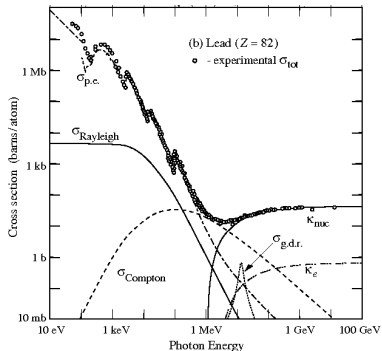
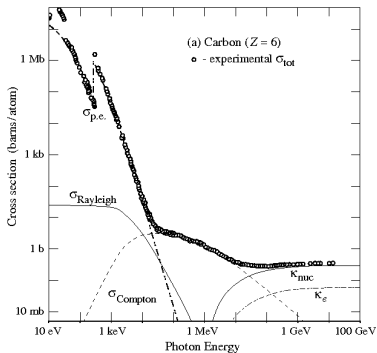


- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią**
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory wokół nas

Oddziaływanie cząstek z materią

Fotony (kwanty γ)

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii fotonu (miara prawdopodobieństwo oddziaływania na pojedynczym atomie)



W obszarze $E_\gamma < m_e c^2$ dominuje efekt fotoelektryczny ($\sigma_{p.e.}$)

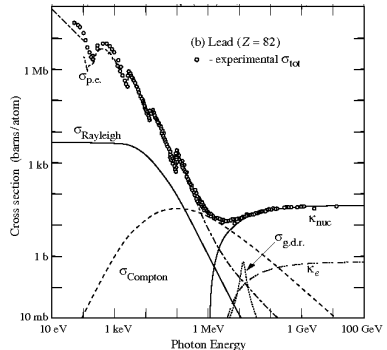
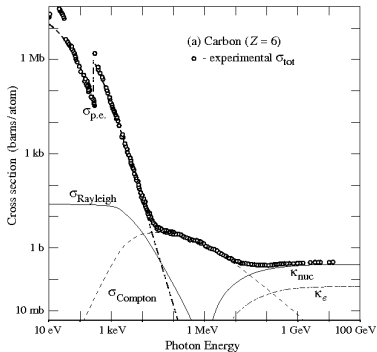
Przekrój czynny bardzo silnie maleje z energią (skala logarytmiczna!)

⇒ wraz ze wzrostem energii fotony coraz głębiej wnikają

Oddziaływanie cząstek z materią

Fotony (kwanty γ)

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii fotonu
 (miara prawdopodobieństwo oddziaływania na pojedynczym atomie)

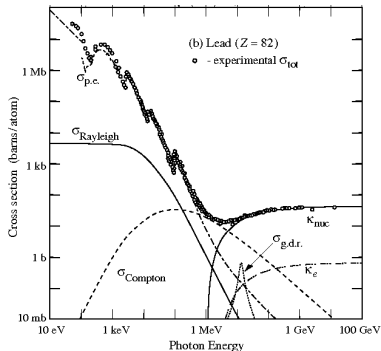
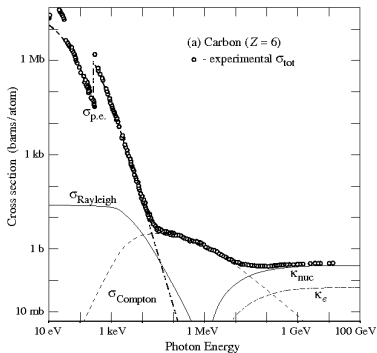


Dla energii rzędu 1 MeV istotny wkład od efektu Comptona ($\sigma_{Compton}$)
 Foton przekazuje elektronowi tylko część swojej energii
 \Rightarrow możliwe kolejne oddziaływania, na większych głębokościach

Oddziaływanie cząstek z materią

Fotony (kwanty γ)

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii fotonu (miara prawdopodobieństwo oddziaływania na pojedynczym atomie)



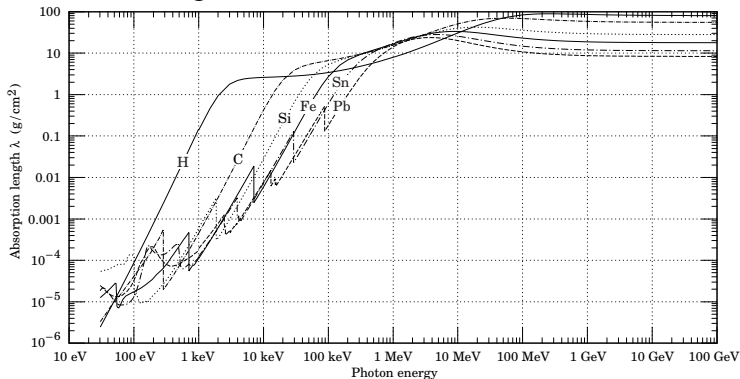
Dla energii powyżej 10 MeV dominuje kracja par e^+e^- w polu jąder (κ_{nuc})
 Przekrój czynny przestaje zależeć od energii fotonu,
 ale powstaje kaskada elektronowo-fotonowa - wiele cząstek wtórnych...

Fotony (kwanty γ)

Wiązkę kwantów gamma jest bardzo trudno zatrzymać. Natężenie

$$I(x) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

gdzie λ to średnia droga swobodna:



Oddziaływanie cząstek z materią

Cząstki naładowane

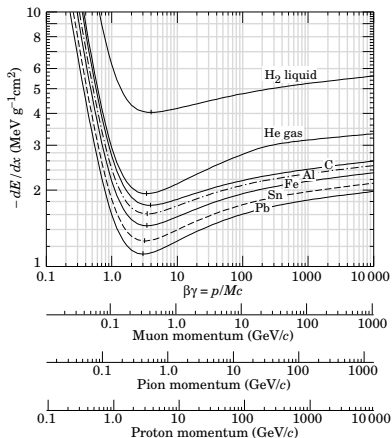
W odróżnieniu od fotonów, które mogą przebyć długą drogę w materii nie oddziałując, cząstki naładowane zawsze jonizują \Rightarrow powoli tracą energię

Zależność straty energii na jonizację od energii ma **uniwersalny kształt!**
Dla różnych cząstek skaluje się z $\beta\gamma$.

Dla cząstek relatywistycznych straty są małe, słabo zależą od energii

Dla cząstek powolnych straty jonizacyjne szybko rosną.

Najsilniejsze straty tuż **przez zatrzymaniem** cząstki \Rightarrow **pik Bragga**

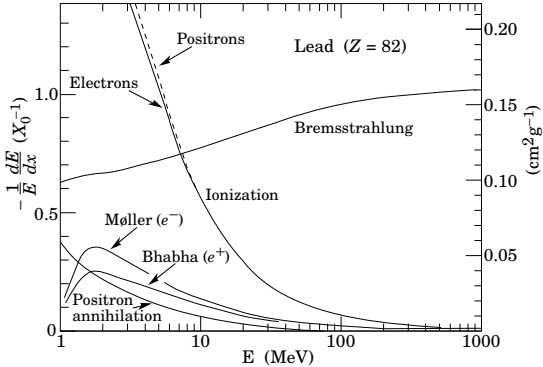


Oddziaływanie cząstek z materią

Elektrony

Elektrony zachowują się inaczej niż inne cząstki naładowane ze względu na swoją małą masę. **Prawdopodobieństwo emisji fotonu w polu jądra $\sim \frac{1}{m^2}$**

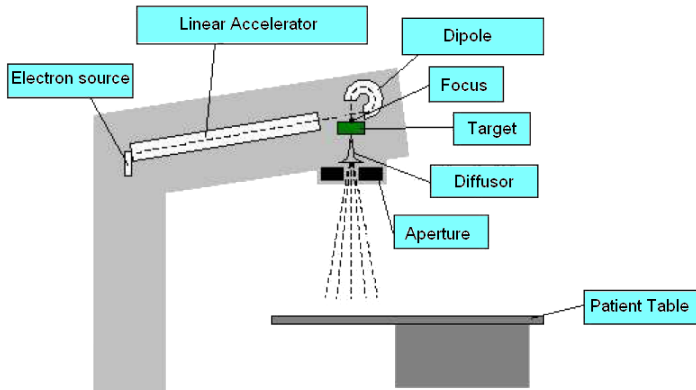
Wysokoenergetyczne (> 10 MeV) elektrony (i pozytony) tracą energię praktycznie wyłącznie na promieniowanie hamowania



- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią
- 4 Akceleratory w medycynie**
- 5 Akceleratory wokół nas

Radioterapia

Radioterapia jest stosowana w prawie połowie przypadków nowotworów. Głównym narzędziem są **akceleratory elektronowe** o energii 8 do 30 MeV. Elektrony **hamowane** w tarczy produkują promieniowanie γ :

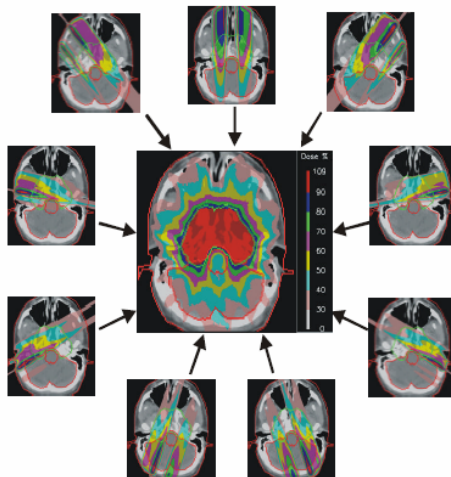


Radioterapia

Radioterapia jest stosowana w prawie połowie przypadków nowotworów. Głównym narzędziem są **akceleratory elektronowe** o energii 8 do 30 MeV. Nowoczesne urządzenie **zintegrowane z CT** (Varian Medical Systems):



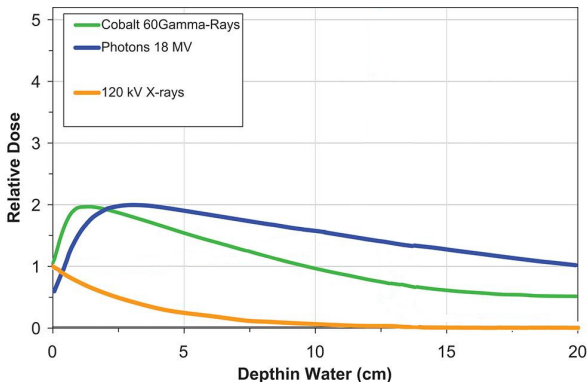
Intensity Modulated Radiation Therapy



Problemy radioterapii e/γ :

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczonej dawki
⇒ silne naświetlanie także zdrowych tkanek

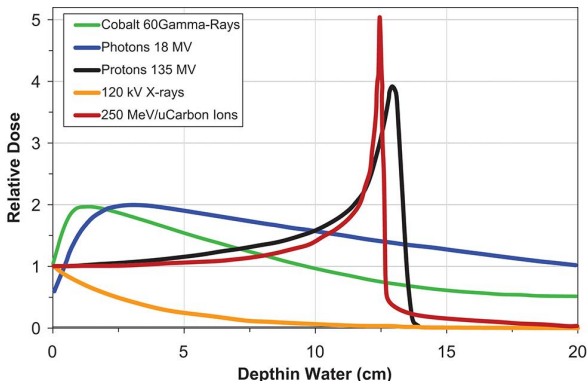
Głębokość na jakiej pochłanianie jest promieniowanie:



Problemy radioterapii e/γ :

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczonej dawki
⇒ silne naświetlanie także zdrowych tkanek

Głębokość na jakiej pochłanianie jest promieniowanie:

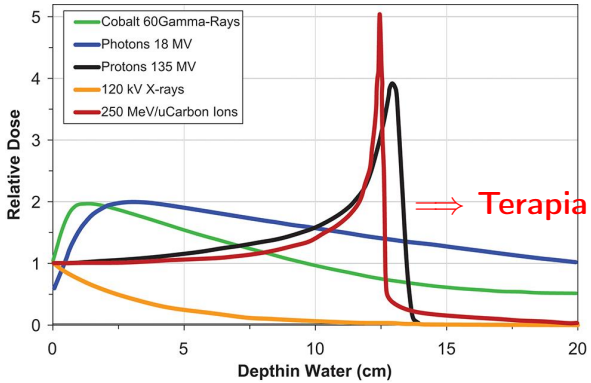


Akceleratory w medycynie

Problemy radioterapii e/γ :

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczonej dawki
 \Rightarrow silne naświetlanie także zdrowych tkanek

Głębokość na jakiej pochłanianie jest promieniowanie:



\Rightarrow **Terapia hadronowa**

Terapia hadronowa

- 1931: pierwszy cyklotron (Ernest Lawrence)
- 1935: pierwsze próby zastosowania medycznego
 - produkcja radio-izotopów
 - terapeutyczne naświetlanie neutronami

Terapia hadronowa

- 1931: pierwszy cyklotron (Ernest Lawrence)
- 1935: pierwsze próby zastosowania medycznego
 - produkcja radio-izotopów
 - terapeutyczne naświetlanie neutronami
- 1946: propozycja wykorzystania wiązek protonów i jonów (R.Wilson)
- 1954: pierwszy przypadek terapii z użyciem protonów (Berkeley, USA)
 - 1957: próby terapii jonami helu
 - 1975: próby terapii jonami argonu i neonu

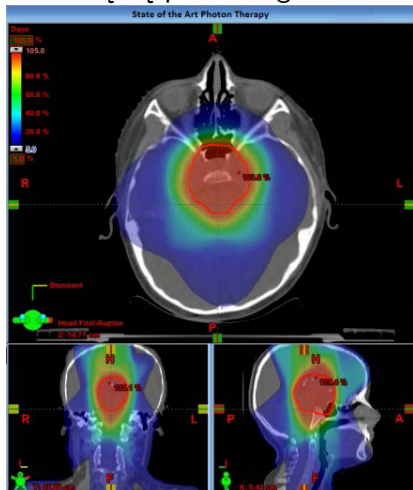
Terapia hadronowa

- 1931: pierwszy cyklotron (Ernest Lawrence)
- 1935: pierwsze próby zastosowania medycznego
 - produkcja radio-izotopów
 - terapeutyczne naświetlanie neutronami
- 1946: propozycja wykorzystania wiązek protonów i jonów (R.Wilson)
- 1954: pierwszy przypadek terapii z użyciem protonów (Berkeley, USA)
 - 1957: próby terapii jonami helu
 - 1975: próby terapii jonami argonu i neonu
- 1994: pierwszy ośrodek terapii jonami węgla (Japonia)

Terapia hadronowa

Rozkład dawki przy optymalnym naświetlaniu (guz przysadki)

wiązką promieni gamma

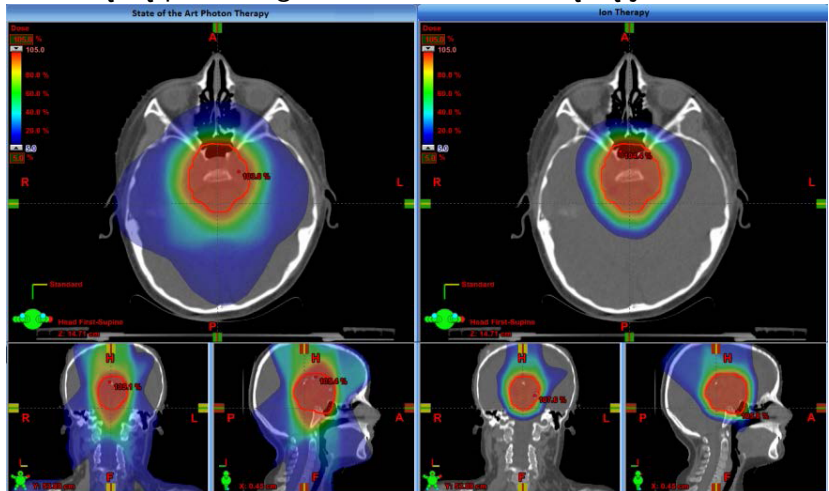


Terapia hadronowa

Rozkład dawki przy optymalnym naświetlaniu (guz przysadki)

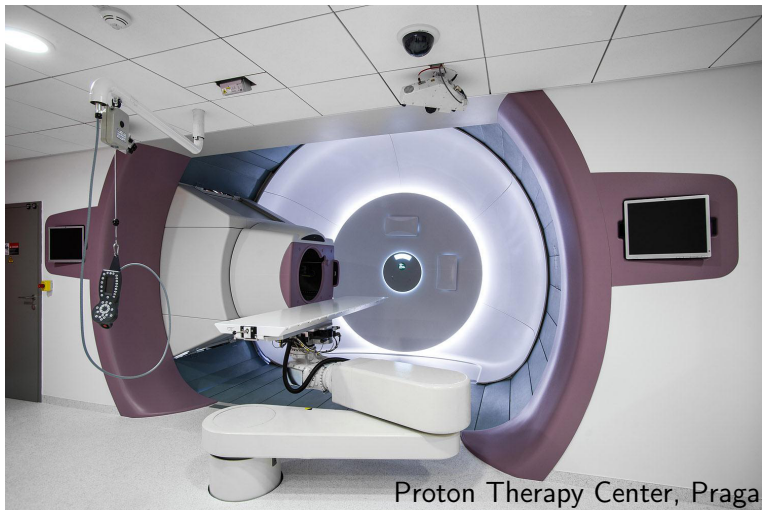
wiązką promieni gamma

i wiązką jonów



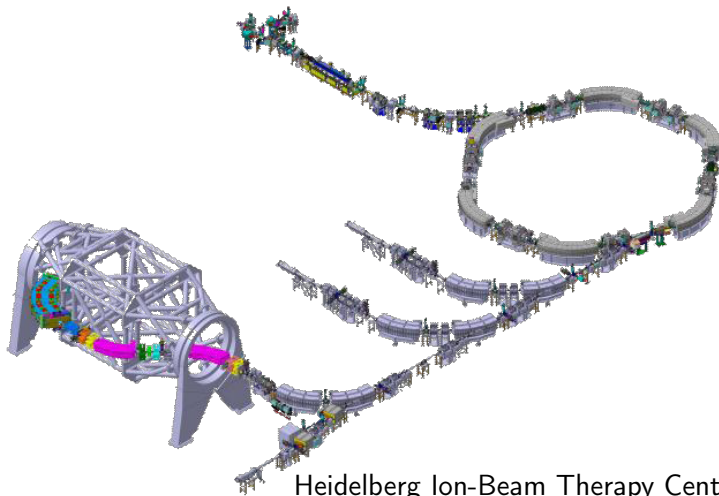
Terapia hadronowa

Z punktu widzenia pacjenta bardzo podobne do standardowej radioterapii



Terapia hadronowa

Wiązka hadronowa dostarczana przez zewnętrzny kompleks akceleratorów



Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

Terapia hadronowa

Gantry: ruchomy układ magnesów doprowadzających wiązkę umożliwia ustawienie dowolnego kąta naświetlania (obrót o 360°)



Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

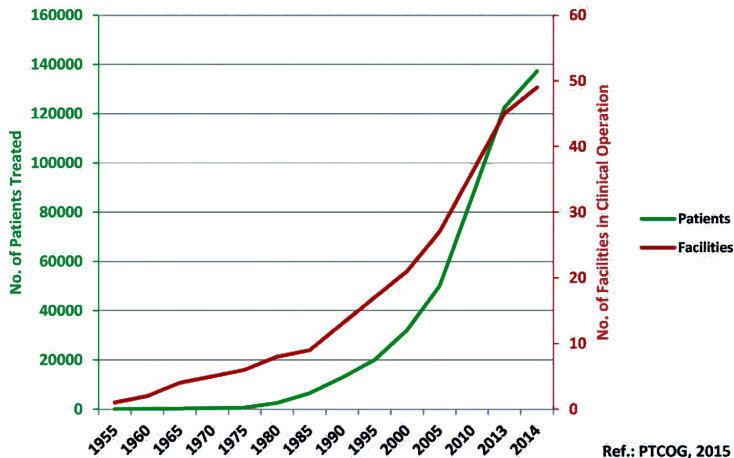
Terapia hadronowa

Synchrotron w ośrodku MedAustron, Austria

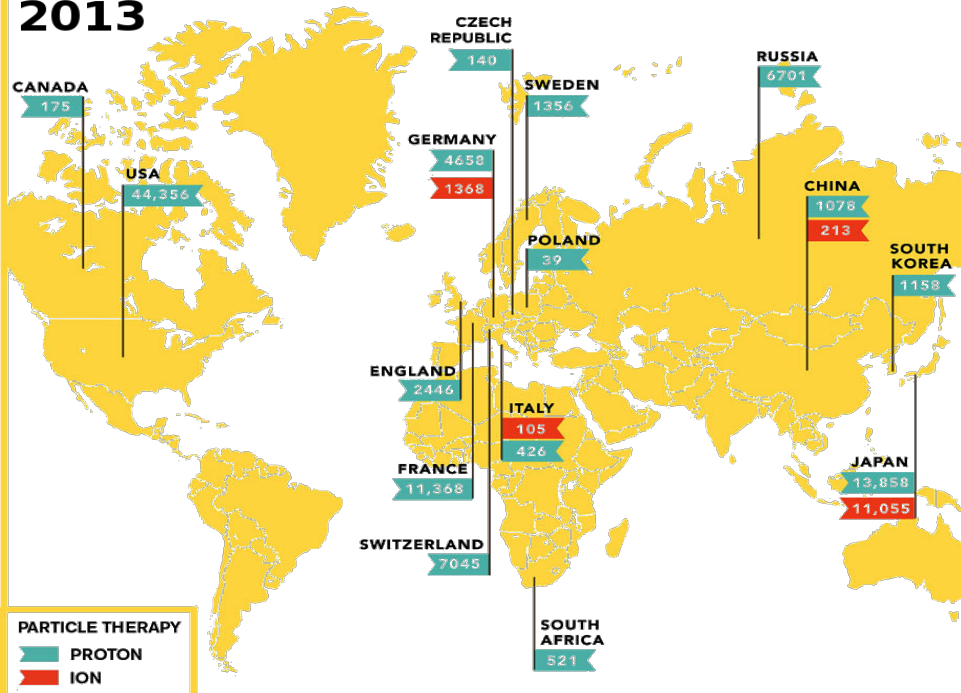


Terapia hadronowa

Liczba ośrodków oferujących terapię protonową lub jonową szybko rośnie



2013



PARTICLE THERAPY

 PROTON
 ION

Terapia hadronowa w Polsce

Narodowe Centrum Radioterapii Hadronowej

Centrum Cyklotronowe Bronowice (IFJ PAN, Kraków)



Terapia hadronowa w Polsce

Narodowe Centrum Radioterapii Hadronowej

Centrum Cyklotronowe Bronowice (IFJ PAN, Kraków)



Terapia hadronowa w Polsce

Narodowe Centrum Radioterapii Hadronowej

Centrum Cyklotronowe Bronowice (IFJ PAN, Kraków)



W grudniu 2016 zakończono terapię pierwszego pacjenta
i podpisano umowę z Centrum Onkologii na rok 2017

Inne zastosowania medyczne

- Produkcja radiofarmaceutyków
 - radio-izotopy do zastosowań diagnostycznych
np. Fluor-18 dla Pozytonowej Tomografii Emisyjnej (PET)
 - radio-izotopy do terapii kontaktowej (brachyterapia)
- Produkcja dedykowanych materiałów
 - ostrza chirurgiczne
 - zastawki serca
 - endoprotezy
 - hydrożele
- Sterylizacja sprzętu

- 1 Początki radioterapii
- 2 Historia akceleratorów
- 3 Oddziaływanie cząstek z materią
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory wokół nas

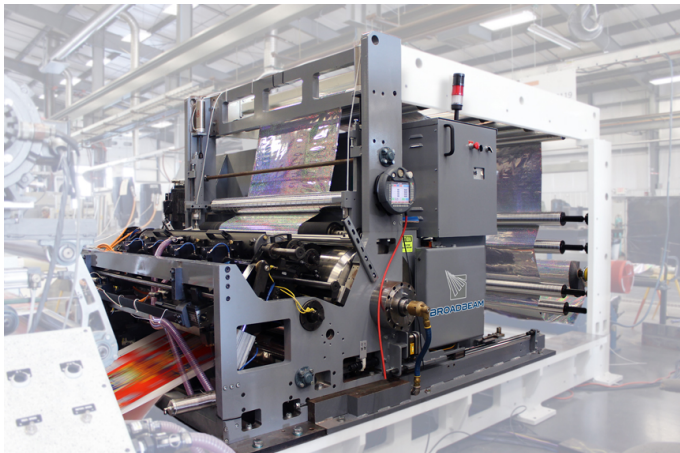
Naświetlanie wiązką elektronów wykorzystywane jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,



Naświetlanie wiązką elektronów wykorzystywane jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),



Naświetlanie wiązką elektronów wykorzystywane jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),



Naświetlanie wiązką elektronów wykorzystywane jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- 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 jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- 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 jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- 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 jest do

- produkcji kabli i rur odpornych na temperaturę,
- 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



Accelerators for Americas Future, Raport DoE, USA 2011

Akceleratory w liczbach

Medycyna

Liczba pacjentów na świecie rocznie

- diagnostyka z użyciem radio-izotopów: ok. 30 000 000
- radioterapia: ok. 4 000 000
- terapia radio-izotopami: ok. 300 000
- terapia hadronowa: ok. 15 000

radio-izotopy także z reaktorów

Przemysł

Rocznie wydaje na budowę akceleratorów \$ 3 500 000 000

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