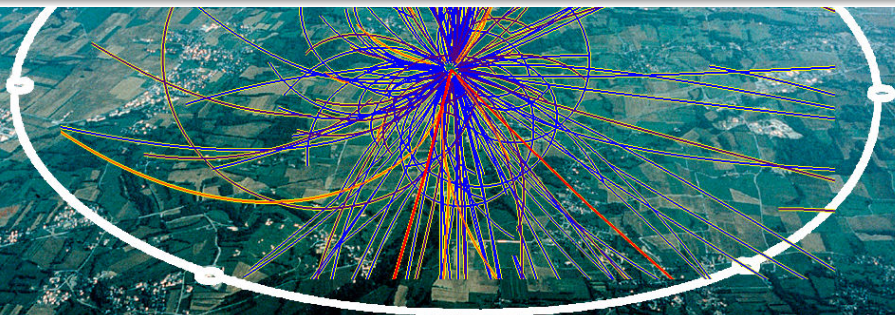


# Świat okiem fizyka cząstek (2)

## Akceleratory wokół nas

Aleksander Filip Żarnecki

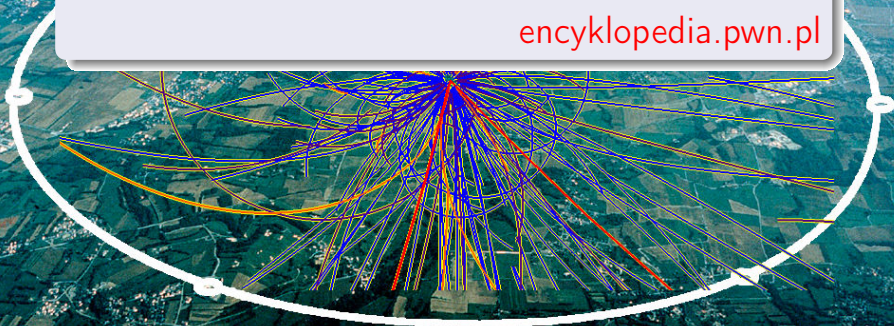
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD



## Akcelerator cząstek naładowanych

Urządzenie do przyspieszania naładowanych mikrocząstek, czyli do nadawania im wielkich energii kinetycznych.

[encyklopedia.pwn.pl](http://encyklopedia.pwn.pl)

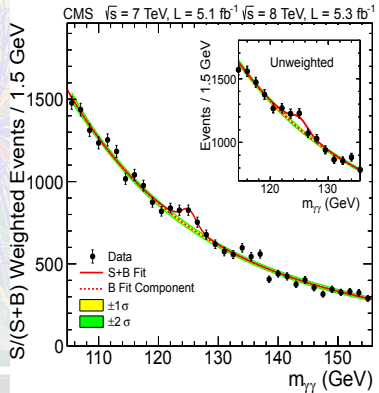
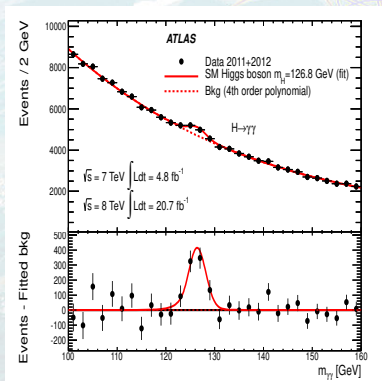




Run I 2009-2012

Wyniki przedstawione przez współpracę ATLAS i CMS w lipcu 2014.

Signal widoczny ponad wszelką wątpliwość





## CERN pod Genewą

Największy na świecie akcelerator cząstek - obwód ok. 27 km.

Przyspiesza protony do energii

$$E_k = 7 \text{ TeV} = 7\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$$

Największy (jedyny ?) sukces:

odkrycie bozonu Higgosa w roku 2012  
(Nagroda Nobla 2013)



## CERN pod Genewą

Największy na świecie akcelerator cząstek - obwód ok. 27 km.

Przyspiesza protony do energii

$$E_k = 7 \text{ TeV} = 7\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$$

Największy (jedyny ?) sukces:

odkrycie bozonu Higgosa w roku 2012  
(Nagroda Nobla 2013)

Projekt zatwierdzony w roku 1994.  
Budowa trwała 15 lat i pochłonęła  
około 6.5 mld CHF.

**Czy to dobra inwestycja?**



- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Akceleratory w nauce
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory w przemyśle
- 6 Inne zastosowania
- 7 Podsumowanie

1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Akceleratory w nauce

4 Akceleratory w medycynie

5 Akceleratory w przemyśle

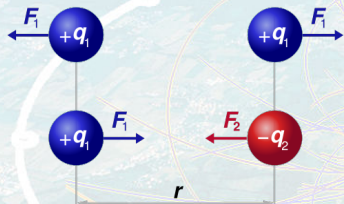
6 Inne zastosowania

7 Podsumowanie



## Pole elektryczne

Prawo Coulomba  
siła oddziaływania między  
punktowymi ładunkami:

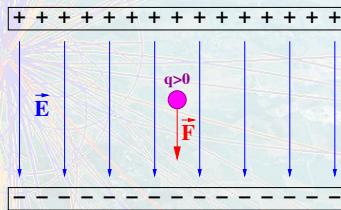


$$F_1 = F_2 = k_c \frac{q_1 \times q_2}{r^2}$$

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

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

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

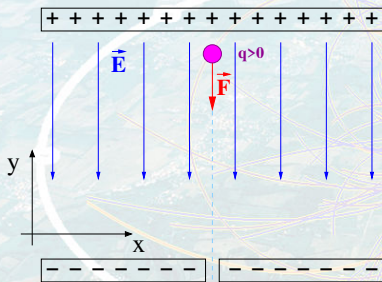


Siła działająca na cząstkę:

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

## Pole elektryczne

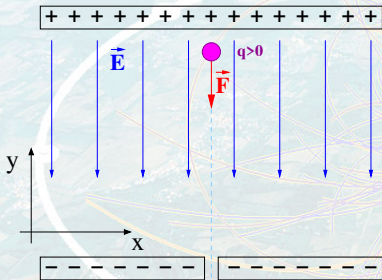
Początkowo nieruchomy ładunek  
"spada" w polu elektrycznym:



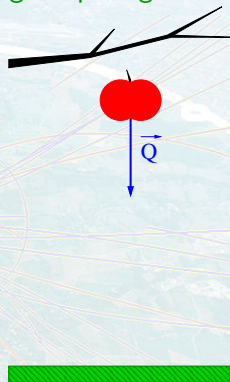
Ładunek porusza się ruchem przyspieszonym. Rozpędza się!  
Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...

## Pole elektryczne

Początkowo nieruchomy ładunek  
"spada" w polu elektrycznym:



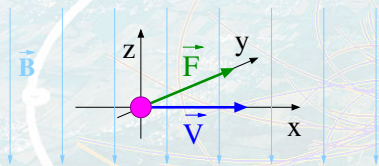
Sytuacja analogiczna do spadku  
swobodnego w polu grawitacyjnym



Ładunek porusza się ruchem przyspieszonym. Rozpędza się!  
Uzyskuje energię kinetyczną, kosztem energii pola elektrycznego...

## Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów

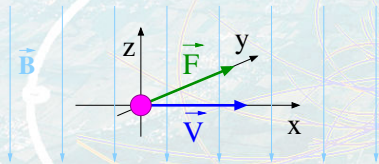


Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza  
Jest to “dziwna” siła: działa prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu.  
⇒ nie zmienia prędkości (energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

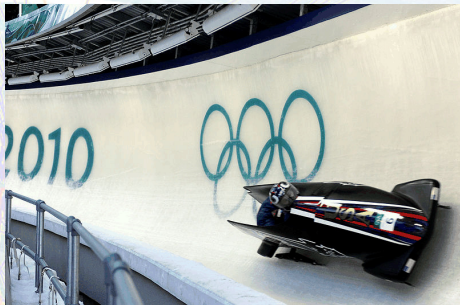


## Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



To tak jak tor lodowy działa na pędzący bobslej:



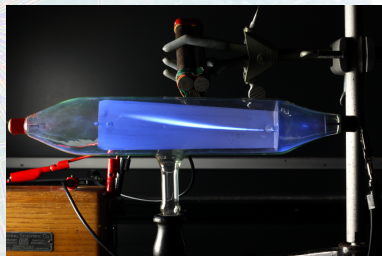
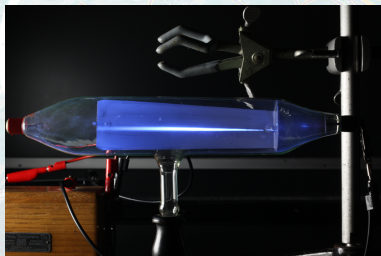
Na poruszający się ładunek działa tzw. siła Lorentza  
Jest to “dziwna” siła: działa prostopadle do kierunku pola i kierunku ruchu.  
⇒ nie zmienia prędkości (energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

## Rura Crookesa - pokaz

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

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

Pole magnetyczne powoduje zakrzywienie ich biegu.



1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Akceleratory w nauce

4 Akceleratory w medycynie

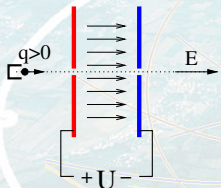
5 Akceleratory w przemyśle

6 Inne zastosowania

7 Podsumowanie

## 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

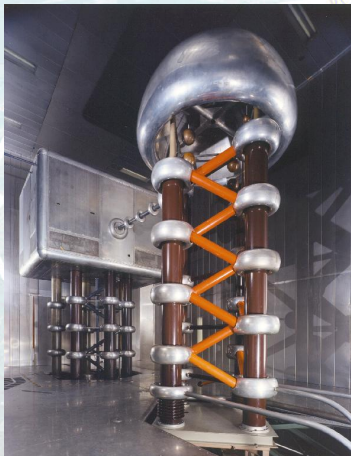
⇒ generator Cockrofta-Waltona (1932): 750 kV

W pewnych dziedzinach wciąż używane...



## Generator Cockrofta-Waltona

Źródło jonów  $H^-$  w CERN



## Generator Van de Graaffa

Element układu akceleratora AGS  
Brookhaven National Laboratory (USA)

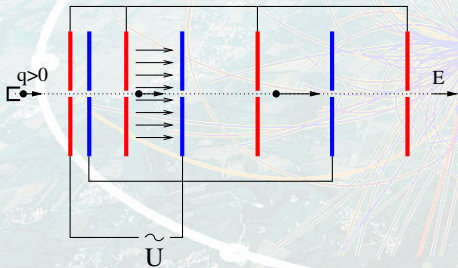


## Akceleratory liniowe

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.



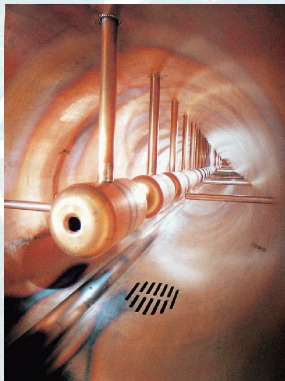
Przy odpowiednim doborze długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ zwiokrotnienie uzyskiwanych energii

## Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA



CERN, Genewa



## Cyklotron

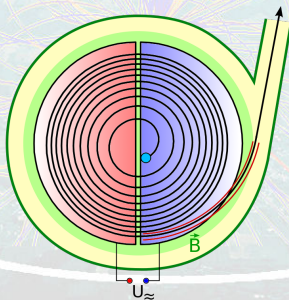
Zamiast używać elementów przyspieszających możemy wykorzystać **pole magnetyczne** do “zapętlenia” cząstki.

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

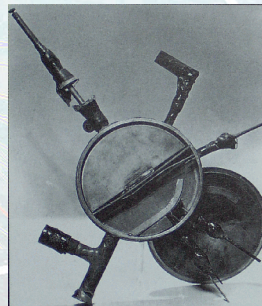
Pierwszy tego typu akcelerator zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence.



A.F. Żarnecki



Cząstki i ich oddziaływanie

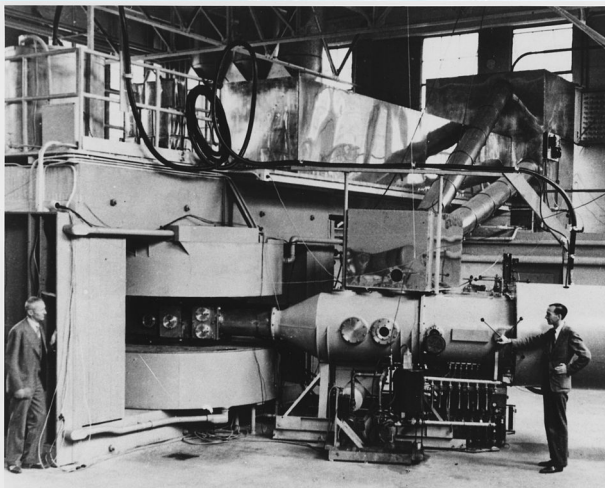




## Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

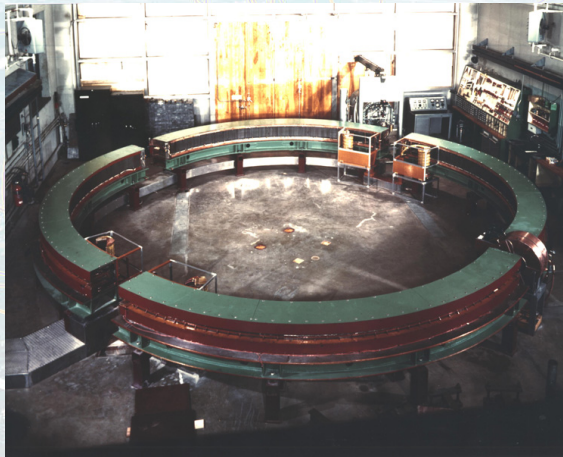
Berkeley 1939  
średnica 1.5 m



Największy cyklotron z pojedynczym magnesem miał 4.6 m średnicy.

## Synchrotron

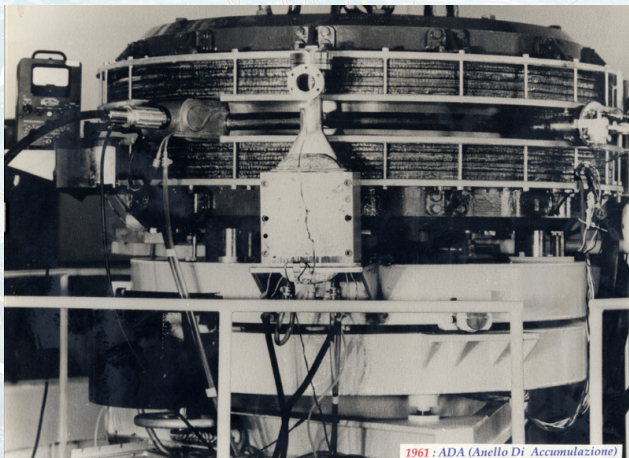
Kolejnym przełomem było wynalezienie synchrotronu (1955):  
elektromagnesy utrzymują przyspieszane cząstki na stałej orbicie.



## Zderzacze cząstek (kolajdery)

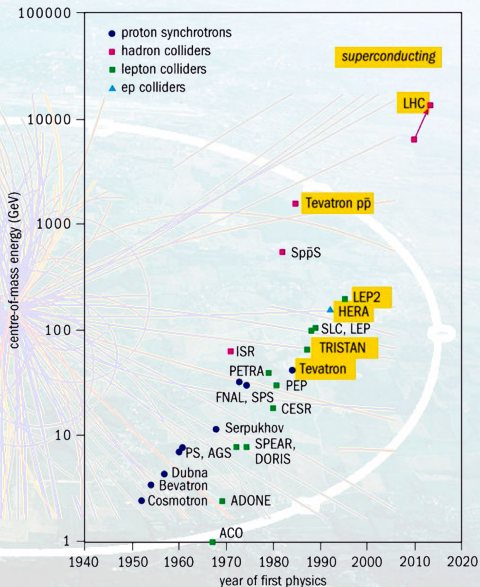
Energję możemy zwielokrotnić zderzając dwie wiązki przeciwbieżne.

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



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

**Dlaczego?**

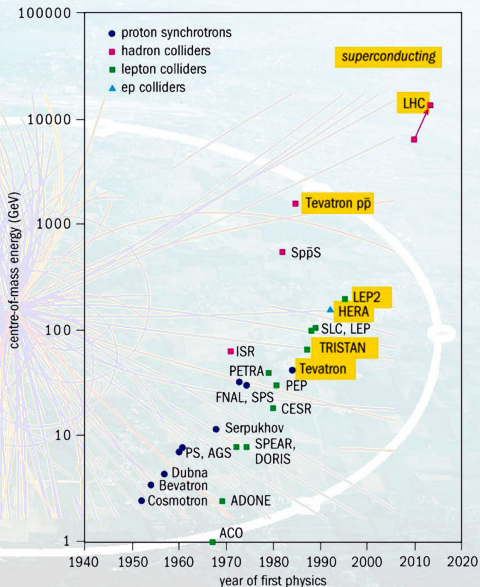


W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

**Dlaczego?**

Żeby móc produkować nowe, cięższe cząstki. Niezbędna energia

$$E = mc^2$$





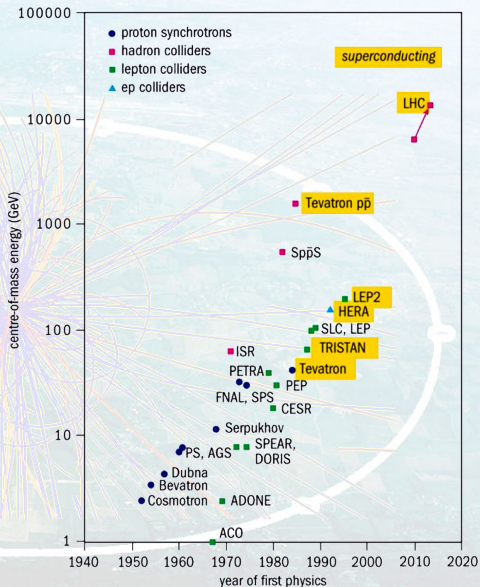
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

**Dlaczego?**

Żeby móc produkować nowe, cięższe cząstki. Niezbędna energia

$$E = mc^2$$

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



## Tunel akceleratora LHC

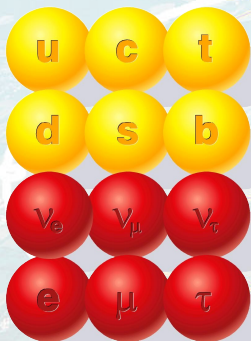


- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Akceleratory w nauce**
- 4 Akceleratory w medycynie
- 5 Akceleratory w przemyśle
- 6 Inne zastosowania
- 7 Podsumowanie

## Fizyka cząstek

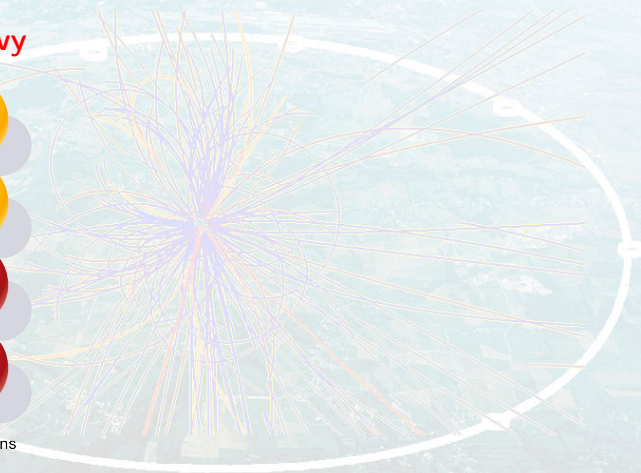
Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

## Model Standardowy



● Quarks

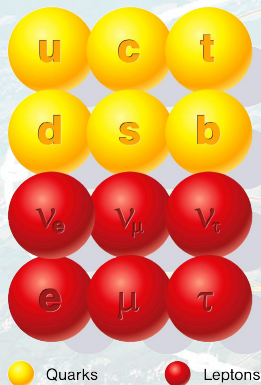
● Leptons



## Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

### Model Standardowy



### Odkrycia kolejnych "cegiełek":

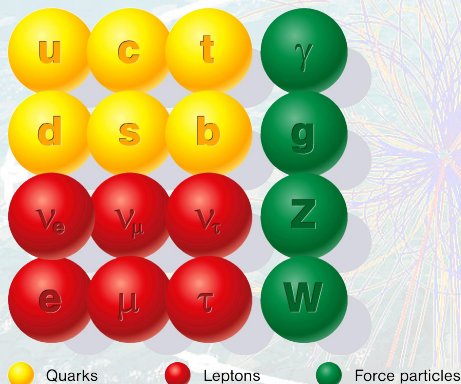
- 1962 - neutrino mionowe  $\nu_\mu$
- 1974 - kwark  $c$
- 1975 - lepton  $\tau$
- 1977 - kwark  $b$
- 1995 - kwark  $t$
- 2000 - neutrino taonowe  $\nu_\tau$



## Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

## Model Standardowy



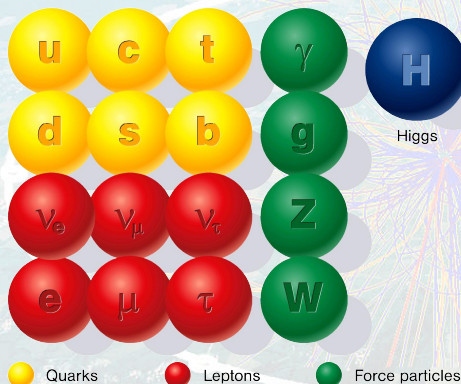
## Odkrycia kolejnych "cegiełek":

- 1962 - neutrino mionowe  $\nu_\mu$
- 1974 - kwark c
- 1975 - lepton  $\tau$
- 1977 - kwark b
- 1995 - kwark t
- 2000 - neutrino taonowe  $\nu_\tau$
- 1979 - gluon g
- 1983 - bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$

## Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

## Model Standardowy



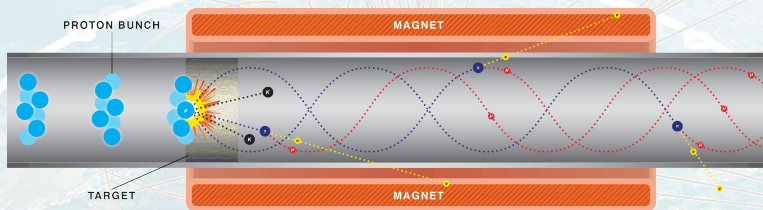
## Odkrycia kolejnych "cegiełek":

- 1962 - neutrino mionowe  $\nu_\mu$
- 1974 - kwark  $c$
- 1975 - lepton  $\tau$
- 1977 - kwark  $b$
- 1995 - kwark  $t$
- 2000 - neutrino taonowe  $\nu_\tau$
- 1979 - gluon  $g$
- 1983 - bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2012 - bozon Higgosa

## Wiązki wtórne

W akceleratorach możemy tylko przyspieszać stabilne cząstki naładowane (elektrony, pozytony, protony, antyprotony) i jony.

Ale możemy je potem wykorzystać do produkcji wiązek wtórnych:

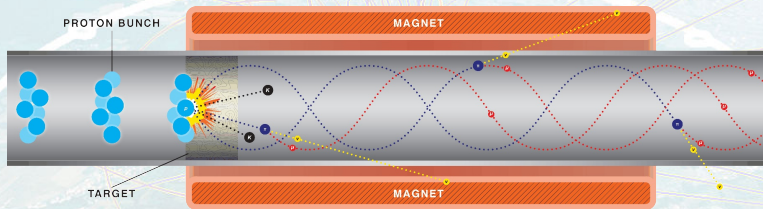


- cząstki naładowane: miony ( $\mu^\pm$ ), piony ( $\pi^\pm$ ), kaony ( $K^\pm$ )
- neutrina

## Wiązki wtórne

W akceleratorach możemy tylko przyspieszać stabilne cząstki naładowane (elektrony, pozytony, protony, antyprotony) i jony.

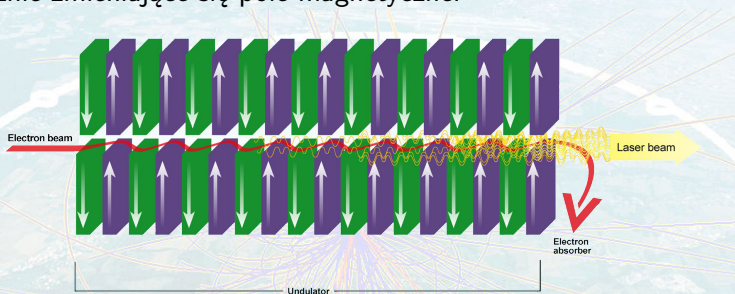
Ale możemy je potem wykorzystać do produkcji wiązek wtórnych:



- cząstki naładowane: miony ( $\mu^\pm$ ), piony ( $\pi^\pm$ ), kaony ( $K^\pm$ )
- neutrina
- neutrony
- promieniowanie gamma

## Laser na swobodnych elektronach - FEL

Intensywna, silnie skolimowana wiązka elektronów przechodzi przez periodycznie zmieniające się pole magnetyczne.



W odpowiednich warunkach może nastąpić emisja wiązki laserowej **promieniowania rentgenowskiego**:

- monochromatycznej,
- niezwykle intensywnej,
- w postaci bardzo krótkich impulsów.



## Laser na swobodnych elektronach - FEL

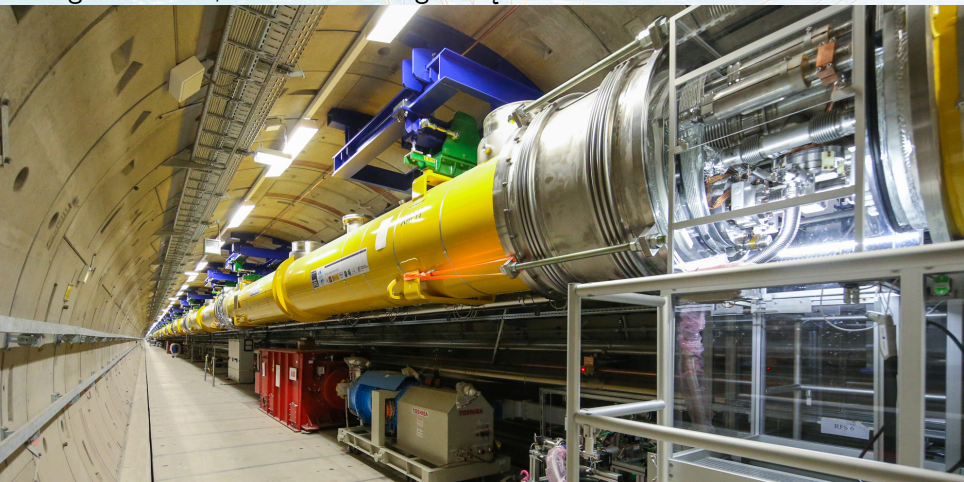
Nowe możliwości badawcze w wielu dziedzinach:  
biologii, medycynie, farmacji, chemii, fizyce materiałów, nanotechnologii,  
energetyce, elektronice, fotonice, ochronie środowiska.



Temat na osobny wykład...

## Laser na swobodnych elektronach - FEL

X-FEL w Hamburgu zbudowany przez międzynarodowe konsorcjum:  
długość 3.4 km, nominalna energia wiązki  $e^-$  17.5 GeV  $\Rightarrow \lambda = 0.05$  nm.



- 1 Wprowadzenie
- 2 Historia
- 3 Akceleratory w nauce
- 4 Akceleratory w medycynie**
- 5 Akceleratory w przemyśle
- 6 Inne zastosowania
- 7 Podsumowanie

## Radioterapia

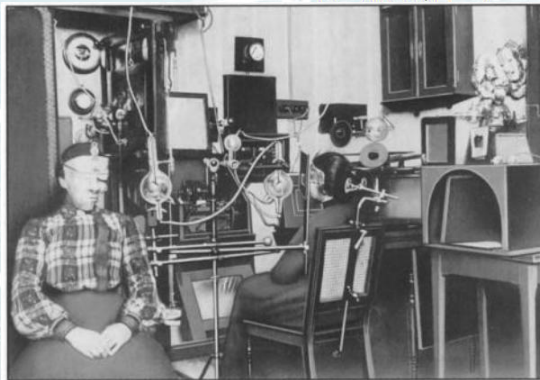
- 1895: odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1895: pierwsza próba wykorzystania terapeutycznego (Chicago)
- 1899: pierwszy wyleczony pacjent (rak skóry; Szwecja)



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

## Radioterapia

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

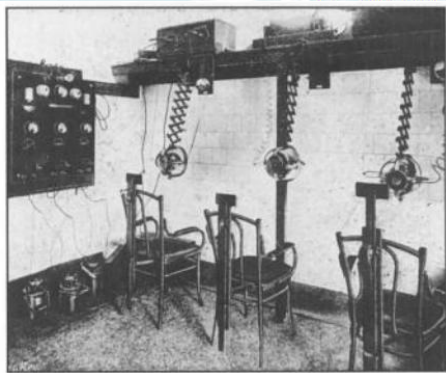


Pokój do terapii promieniami X w Monachium (1900-1904).



## Radioterapia

- 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).

## Radioterapia

- 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)

## Radioterapia

- 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)

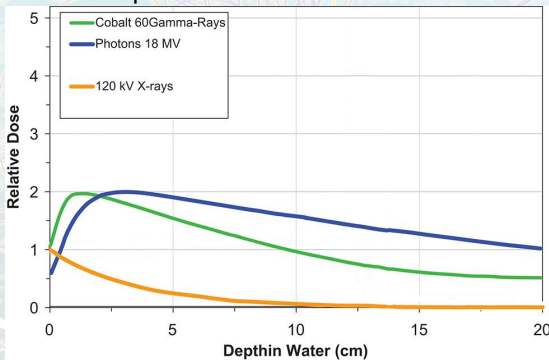
## Radioterapia

- 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  $^{60}\text{Co}$  ma około 1 250 keV.

- ⇒ dużo większa penetracja
- ⇒ mniejsza dawka powierzchniowa



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

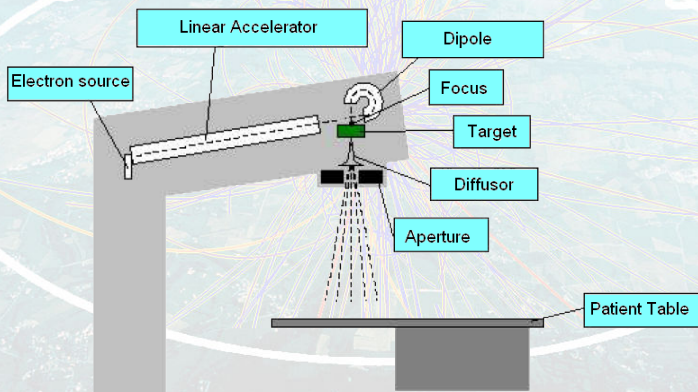


## Radioterapia

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  $\gamma$ :



## Radioterapia

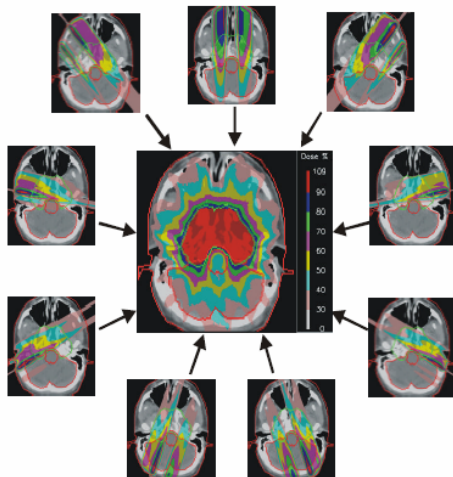
Radioterapia jest stosowana w prawie połowie przypadków nowotworów. Głównym narzędziem są **akceleratory elektronowe** o energii 8 do 30 MeV.

Energia uzyskiwana z klasycznych lamp rentgenowskich jest zbyt mała.

Nowoczesne urządzenie zintegrowane z CT (Varian Medical Systems):



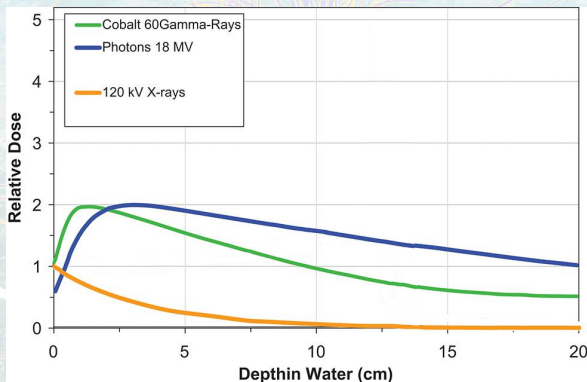
## Intensity Modulated Radiation Therapy



Problemy radioterapii  $e/\gamma$ :

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

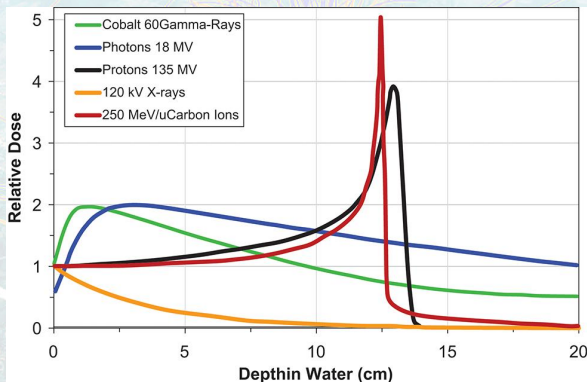
Głębokość na jakiej pochłanianie jest promieniowanie:



Problemy radioterapii  $e/\gamma$ :

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

Głębokość na jakiej pochłaniane jest promieniowanie:

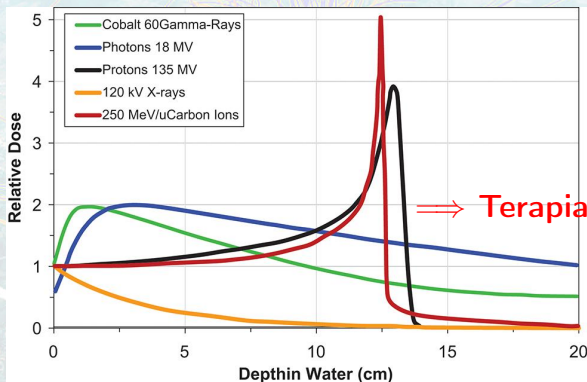




Problemy radioterapii  $e/\gamma$ :

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

Głębokość na jakiej pochłaniane jest promieniowanie:



## 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

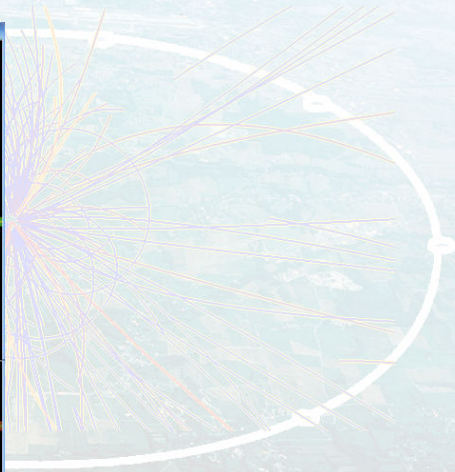
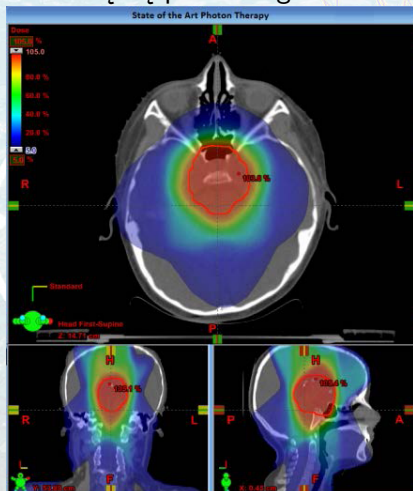
## Terapia hadronowa

- 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



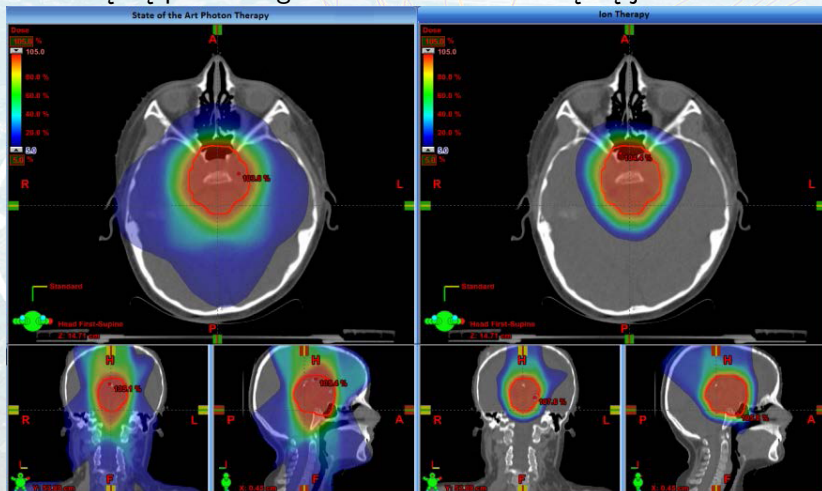


## Terapia hadronowa

Rozkład dawki przy optymalnym naświetlaniu (guz przysadki)

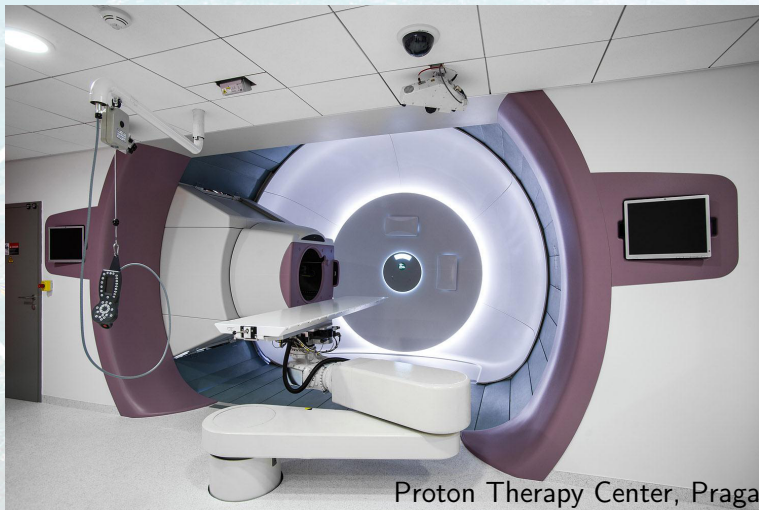
wiązką promieni gamma

i wiązką jonów



## Terapia hadronowa

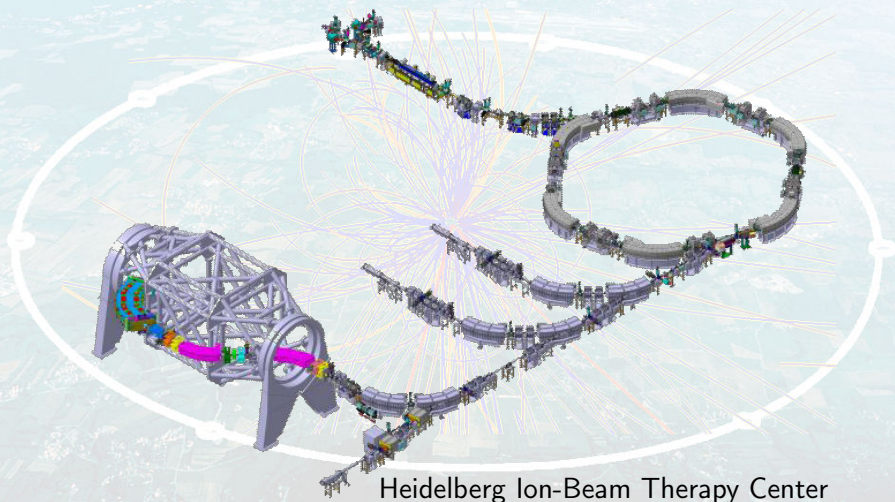
Z punktu widzenia pacjenta bardzo podobne do standardowej radioterapii



Proton Therapy Center, Praga

## 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  $360^\circ$ )



Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

## Terapia hadronowa

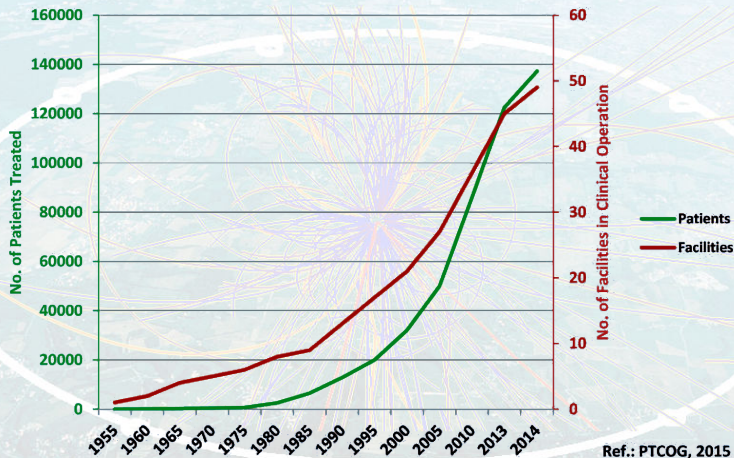
Synchrotron w ośrodku MedAustron, Austria



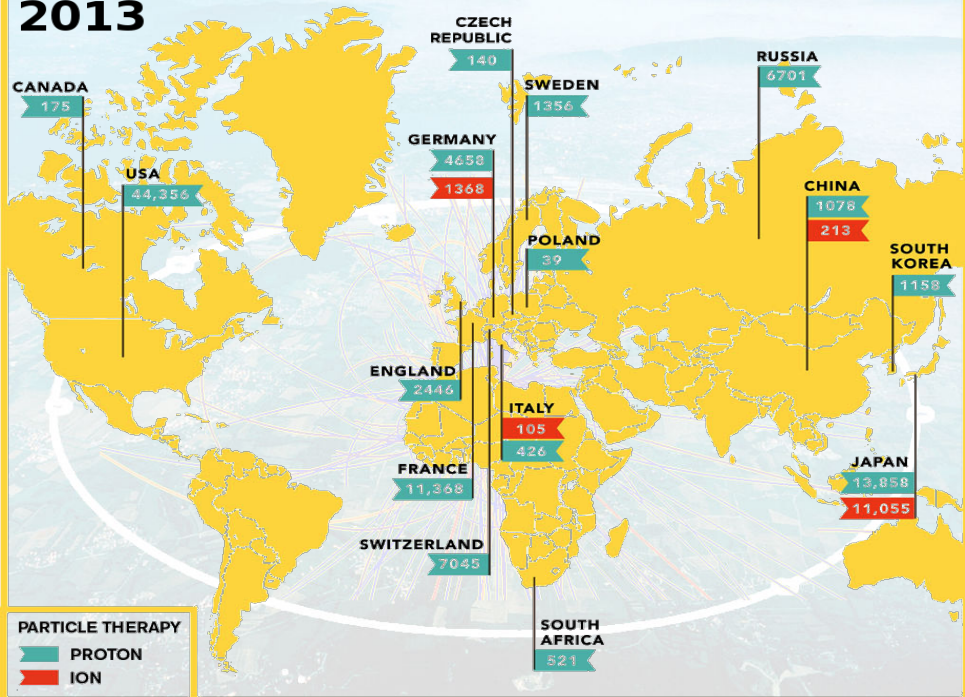


## Terapia hadronowa

Liczba ośrodków oferujących terapię protonową lub jonową szybko rośnie



# 2013



## 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)

Budowa ukończona w 2015 (400 mln. zł) ale ośrodek ponad rok stał pusty!  
Dopiero w listopadzie 2016 przyjęto pierwszego pacjenta.

Ośrodek mógłby przyjmować do 600 pacjentów rocznie, **przyjmuje ok. 60**.  
Problemem są (bardzo wąskie) kryteria kwalifikacji, ale też pieniądze.

Centrum musi działać w oparciu o umowy zawierane z odpowiednimi placówkami służby zdrowia, które kwalifikują chorych na terapię protonową.

**Brakuje chętnych do współpracy, bo to się najwyraźniej nie opłaca...**

**Jednocześnie NFZ wciąż płaci za terapie prowadzone w Niemczech i Czechach...**

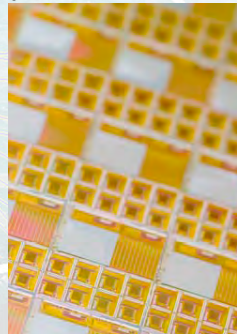


- 
- 1 Wprowadzenie
  - 2 Historia
  - 3 Akceleratory w nauce
  - 4 Akceleratory w medycynie
  - 5 Akceleratory w przemyśle**
  - 6 Inne zastosowania
  - 7 Podsumowanie

## Implantacja jonów

Akceleratory pozwalają precyzyjnie umieszczać pojedyncze atomy (“domieszki”) w różnych materiałach, modyfikując ich właściwości mechaniczne, elektryczne i optyczne.

- Półprzewodniki
  - Podstawowa metoda produkcji układów scalonych (typowo ok. 25 etapów implantacji domieszek)
  - Produkcja sensorów CCD i CMOS dla kamer cyfrowych



## Implantacja jonów

Akceleratory pozwalają precyzyjnie umieszczać pojedyncze atomy (“domieszki”) w różnych materiałach, modyfikując ich właściwości mechaniczne, elektryczne i optyczne.

- Półprzewodniki
  - Podstawowa metoda produkcji układów scalonych (typowo ok. 25 etapów implantacji domieszek)
  - Produkcja sensorów CCD i CMOS dla kamer cyfrowych
- Metale
  - Materiały o większej twardości (ostrza)
  - Zmiana struktury powierzchni (mniejsze tarcie)
  - Materiały do zastosowań medycznych



## Implantacja jonów

Akceleratory pozwalają precyzyjnie umieszczać pojedyncze atomy (“domieszki”) w różnych materiałach, modyfikując ich właściwości mechaniczne, elektryczne i optyczne.

- Półprzewodniki
  - Podstawowa metoda produkcji układów scalonych (typowo ok. 25 etapów implantacji domieszek)
  - Produkcja sensorów CCD i CMOS dla kamer cyfrowych
- Metale
  - Materiały o większej twardości (ostrza)
  - Zmiana struktury powierzchni (mniejsze tarcie)
  - Materiały do zastosowań medycznych
- Ceramika
  - Zwiększanie twardości powierzchni
  - Zmiana własności optycznych
  - Koloryzowanie kamieni szlachetnych

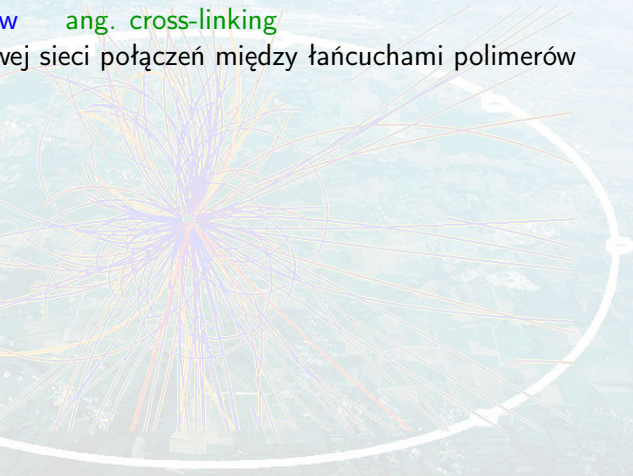
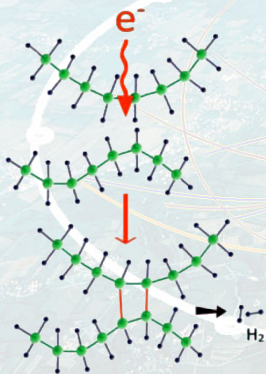


## Naświetlanie wiązką elektronów

Wiązka elektronów może pełnić rolę katalizatora wielu reakcji chemicznych.

“Sieciovanie” polimerów      ang. **cross-linking**

tworzenie trójwymiarowej sieci połączeń między łańcuchami polimerów



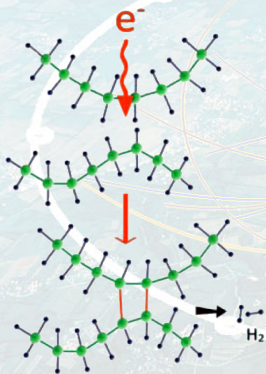


## Naświetlanie wiązką elektronów

Wiązka elektronów może pełnić rolę katalizatora wielu reakcji chemicznych.

“Sieciovanie” polimerów    ang. **cross-linking**

tworzenie trójwymiarowej sieci połączeń między łańcuchami polimerów

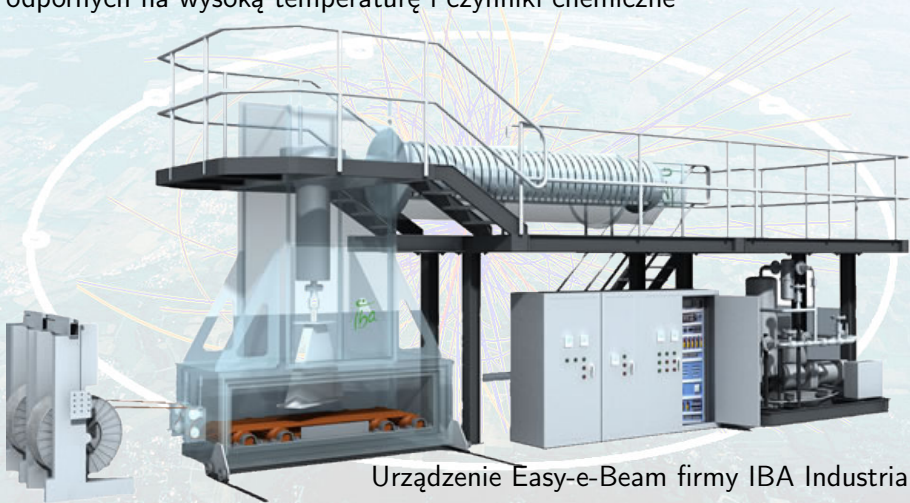


Możemy uzyskać nowe materiały o specjalnych właściwościach

- większa wytrzymałość
- większa elastyczność
- odporność na temperaturę
- odporność na rozrywanie
- termokurczliwość

## 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:

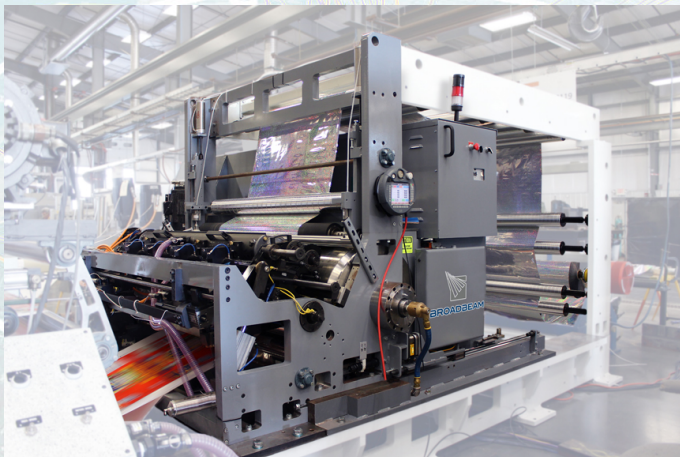
- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,



## 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).



1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Akceleratory w nauce

4 Akceleratory w medycynie

5 Akceleratory w przemyśle

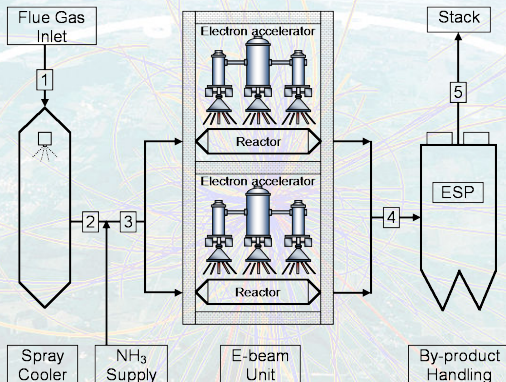
6 **Inne zastosowania**

7 Podsumowanie



## Redukcja emisji zanieczyszczeń

Schemat instalacji do redukcji zawartości tlenków azotu i siarki w spalinach elektrowni węglowych:



Rozwiązanie tańsze od wielu metod "tradycyjnych"

Eliminacja do 95% tlenków siarki i 75% azotu ⇒ produkcja nawozów

## Badania niedestrukcyjne

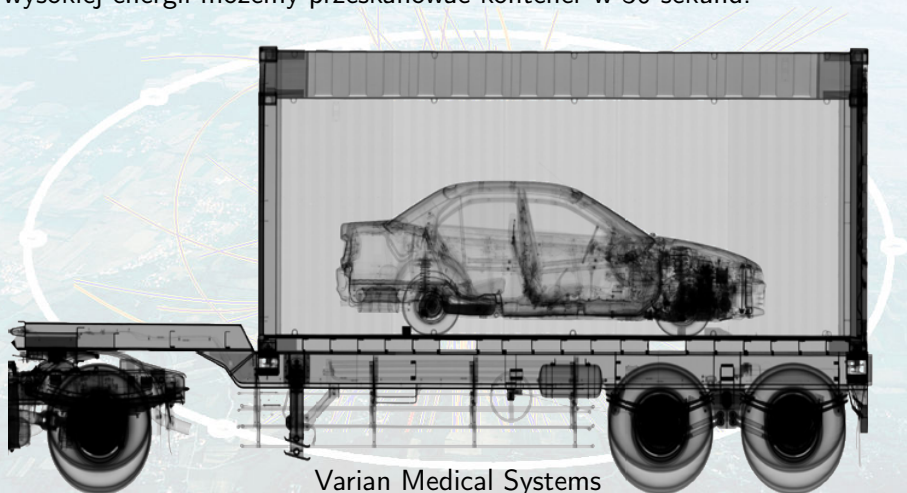
Indukowana wiązka protonów lub jonów emisja promieniowania X pozwala na bardzo precyzyjne określenie składu chemicznego



Badanie obrazu "Portret mężczyzny" Antonello da Messina (INFN, Włochy)

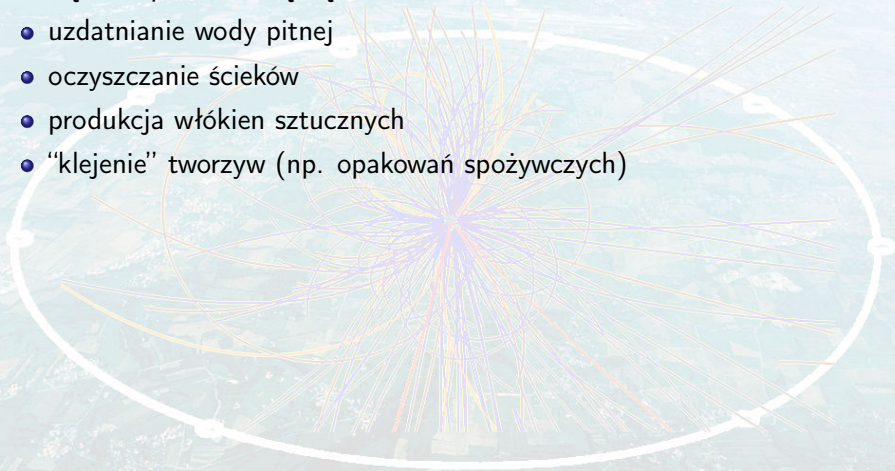
## Kontrola graniczna

Wykorzystując akcelerator elektronów do wytworzenia promieniowania  $\gamma$  wysokiej energii możemy przeskanować kontener w 30 sekund.



## Wdrożone technologie

- cięcie i spawanie wiązką elektronów
- uzdatnianie wody pitnej
- oczyszczanie ścieków
- produkcja włókien sztucznych
- “klejenie” tworzyw (np. opakowań spożywczych)



## Wdrożone technologie

- cięcie i spawanie wiązką elektronów
- uzdatnianie wody pitnej
- oczyszczanie ścieków
- produkcja włókien sztucznych
- “klejenie” tworzyw (np. opakowań spożywczych)

## Rozwijane technologie

- skraplanie gazu ziemnego
- przetwarzanie ropy naftowej
- utwardzanie nawierzchni szos
- bezpieczne reaktory jądrowe
- utylizacja odpadów radioaktywnych



1 Wprowadzenie

2 Historia

3 Akceleratory w nauce

4 Akceleratory w medycynie

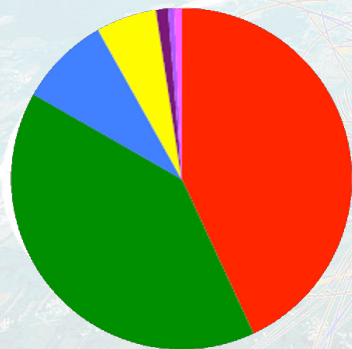
5 Akceleratory w przemyśle

6 Inne zastosowania

7 Podsumowanie

## Akceleratory w liczbach

Na świecie działa ponad 35 000 akceleratorów



- Akceleratory do radioterapii
- Implantacja jonów
- Przetwarzanie produktów
- Akceleratory badawcze niskich energii
- Produkcja radioizotopów
- Źródła promieniowania synchrotronowego
- Akceleratory badawcze wysokich energii

Accelerators for Americas Future, Raport DoE, USA 2011

## Akseleratory 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

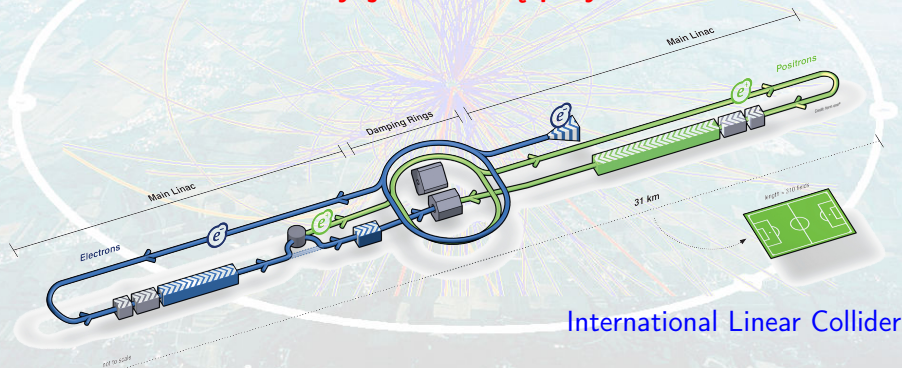
Rocznie wydaje na budowę akseleratorów \$ 3 500 000 000

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

## Przyszłe akceleratory

Choć Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) ma jeszcze pracować prawie 20 lat, fizycy rozwijają nowe metody przyspieszania cząstek i planują budowę kolejnych akceleratorów wysokiej energii.

To inwestycja w naszą przyszłość!



International Linear Collider



An aerial photograph of a city, likely Warsaw, with a white circle overlaid on the center. From the center of the circle, a dense network of thin, colorful lines (red, blue, orange, purple) radiates outwards, resembling a particle detector or a complex network diagram. The lines are most concentrated in the center and become sparser as they move towards the edges of the circle. The background shows a mix of urban buildings and green fields.

Dziękuję za uwagę!



- Particle Physics News and Resources:  
<http://www.interactions.org/>
- European XFEL, Research:  
<http://www.xfel.eu/research/>
- Particle Therapy Co-Operative Group:  
<http://www.ptcog.ch/>
- Accelerators for Society:  
<http://www.accelerators-for-society.org/>
- Accelerators for America's Future, Raport DoE, 2011:  
<http://www.acceleratorsamerica.org/>
- CERN Academic Training Lectures:  
<https://indico.cern.ch/category/72/>
- *Symmetry* magazine:  
<http://www.symmetrymagazine.org/>
- Nigel S. Lockyer, prezentacja na Seminarium ICFA, Pekin 2014:  
<http://indico.ihep.ac.cn/event/3867/>