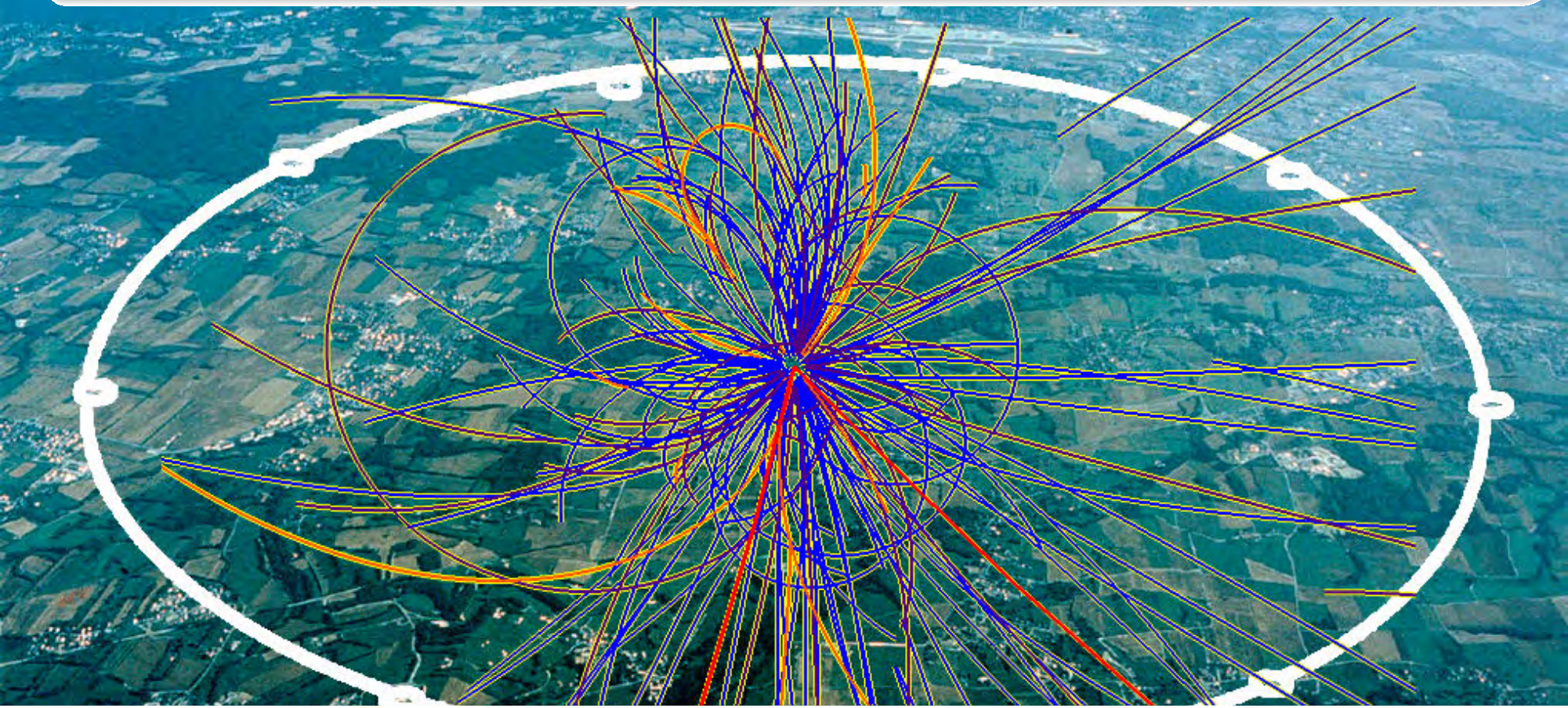
Akceleratory wokół nas

Aleksander Filip Żarnecki, Wydział Fizyki UW



Akcelerator cząstek naładowanych

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

encyklopedia.pwn.pl

CERN pod Genewą

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

CERN pod Genewą

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

Przyspiesza protony do prędkości

$$v = 0.999\,999\,99 \cdot c\ ,$$

która odpowiada energii kinetycznej

$$E_k = 7\ \mathrm{TeV} = 7\,000\,000\,000\,000\ \mathrm{eV}\ .$$

CERN pod Genewą

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

Przyspiesza protony do prędkości

$$v = 0.999\,999\,99 \cdot c\ ,$$

która odpowiada energii kinetycznej

$$E_k = 7\ \mathrm{TeV} = 7\,000\,000\,000\,000\ \mathrm{eV}\ .$$

Budowa kosztowała 6.5 mld CHF.

CERN pod Genewą

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

Przyspiesza protony do prędkości

$$v = 0.999\,999\,99 \cdot c\ ,$$

która odpowiada energii kinetycznej

$$E_k = 7\ \mathrm{TeV} = 7\,000\,000\,000\,000\ \mathrm{eV}\ .$$

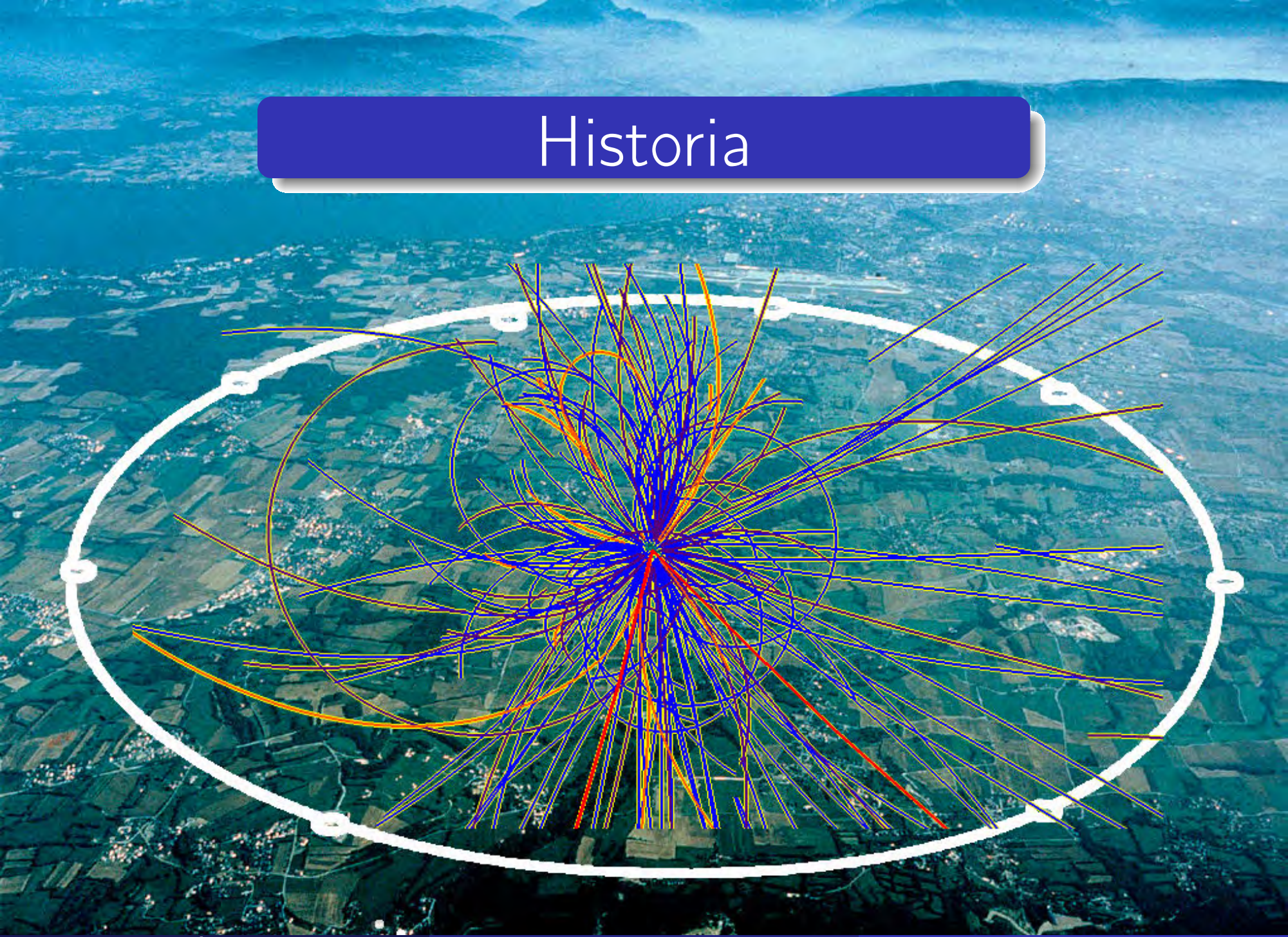
Budowa kosztowała 6.5 mld CHF.

Czy to dobra inwestycja?

Plan wykładu

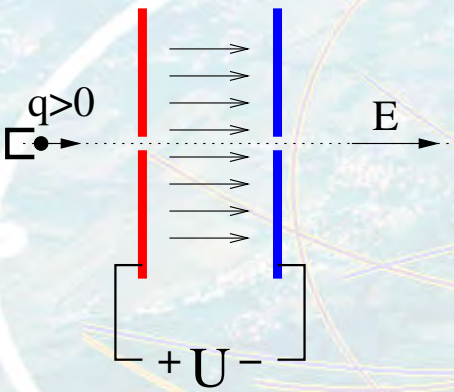
1. Historia
2. Akceleratory w nauce
3. Akceleratory w medycynie
4. Akceleratory w przemyśle
5. Inne zastosowania
6. Podsumowanie

Historia



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.



$$E = U \cdot q$$

$$1\,\mathrm{eV} = 1\,\mathrm{V} \cdot 1\,\mathrm{e}$$

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

Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokich napięć przyspieszających:

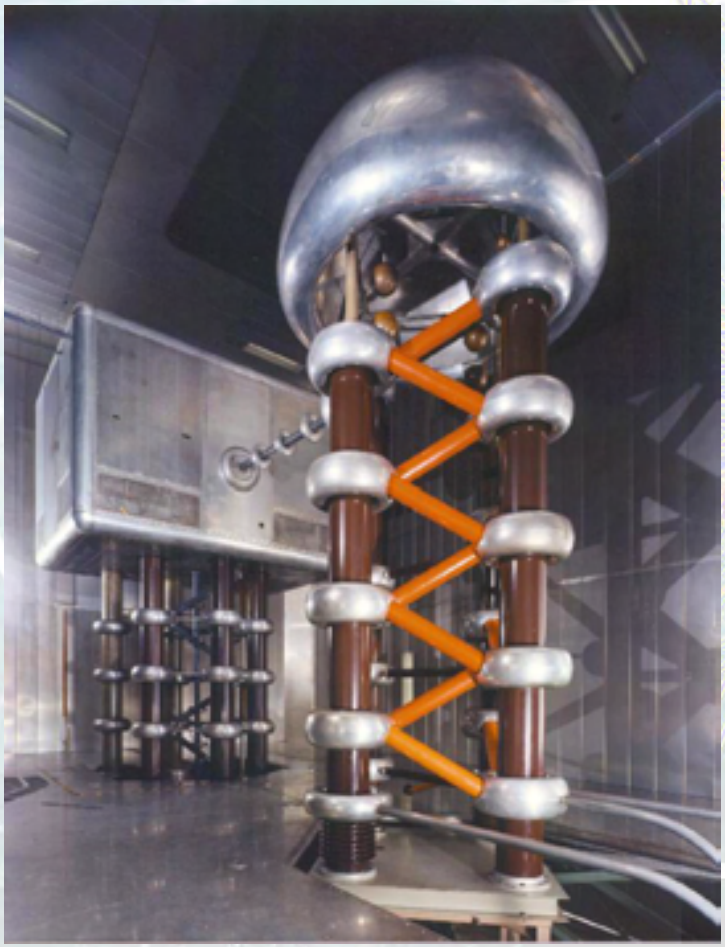
⇒ generator Van de Graaffa (1929): 1.5 MV

⇒ generator Cockrofta-Waltona (1932): 750 kV

W pewnych dziedzinach wciąż używane...

Generator Cockrofta-Waltona

Źródło jonów H^- w CERN



Generator Van de Graaffa

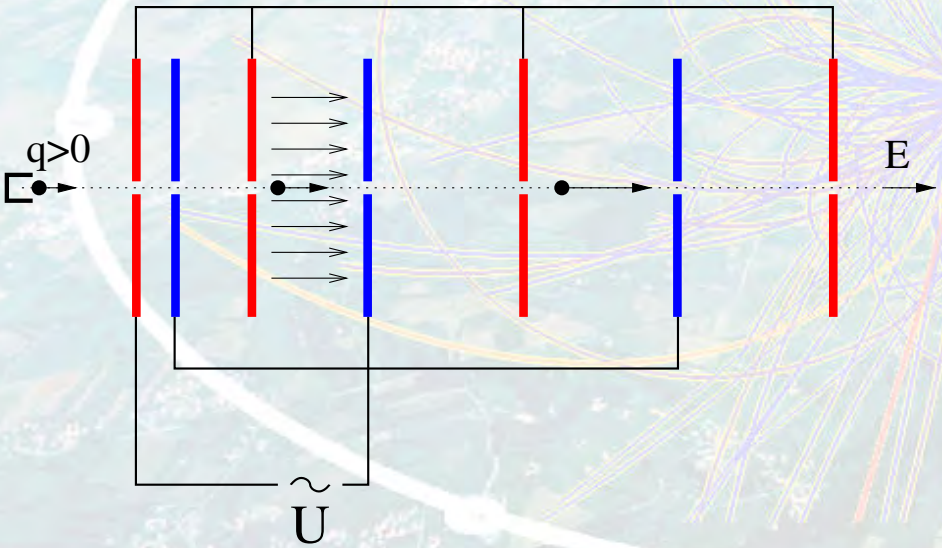
Element układu akceleratora AGS
Brookhaven National Laboratory (USA)

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.

$\Rightarrow$ zwielokrotnienie uzyskiwanych energii

Akceleratory liniowe

Akceleratory liniowe do wstępnego przyspieszania protonów

Fermilab, USA

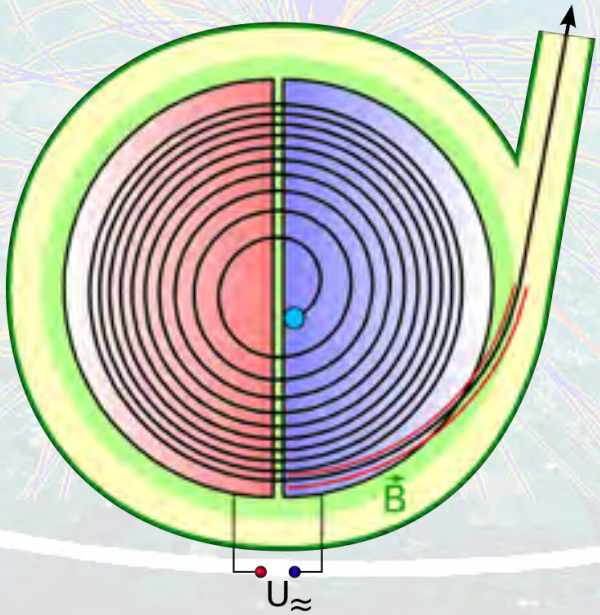
CERN, Genewa

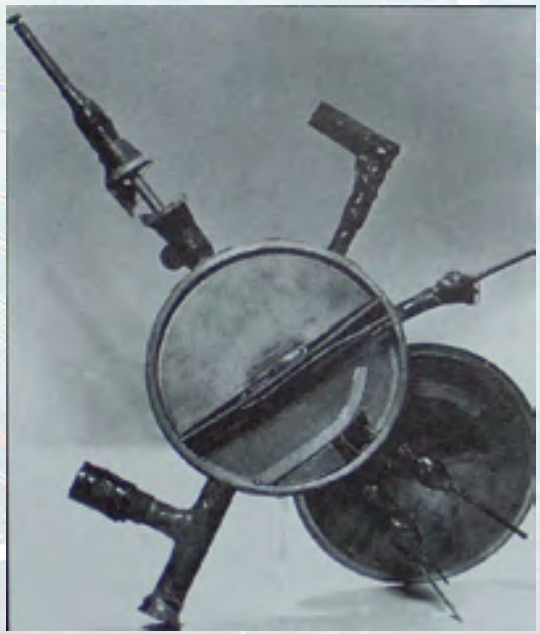
Cyklotron

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.

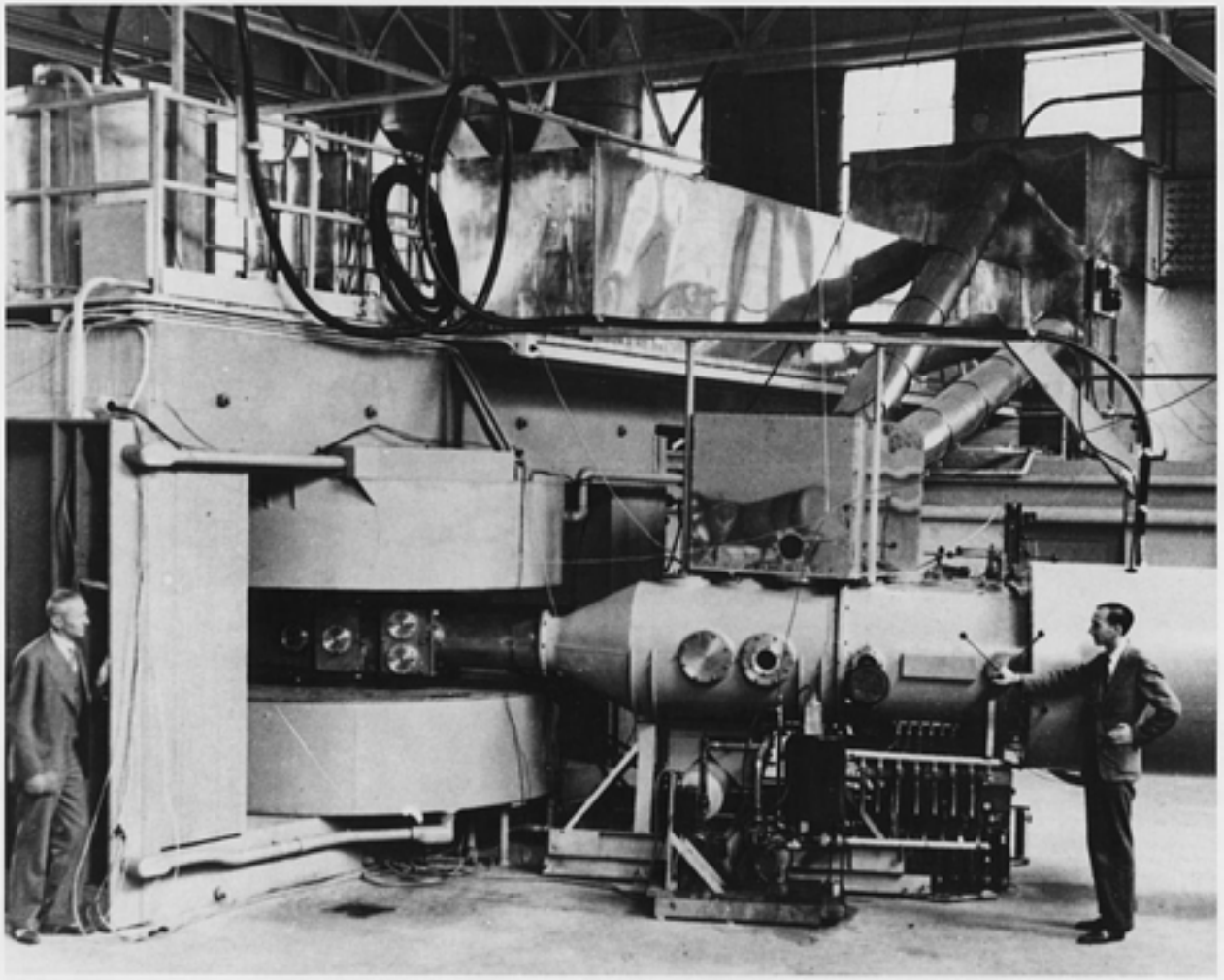




Cyklotron

W ciągu kilku lat cyklotron stał się potężnym narzędziem badawczym.

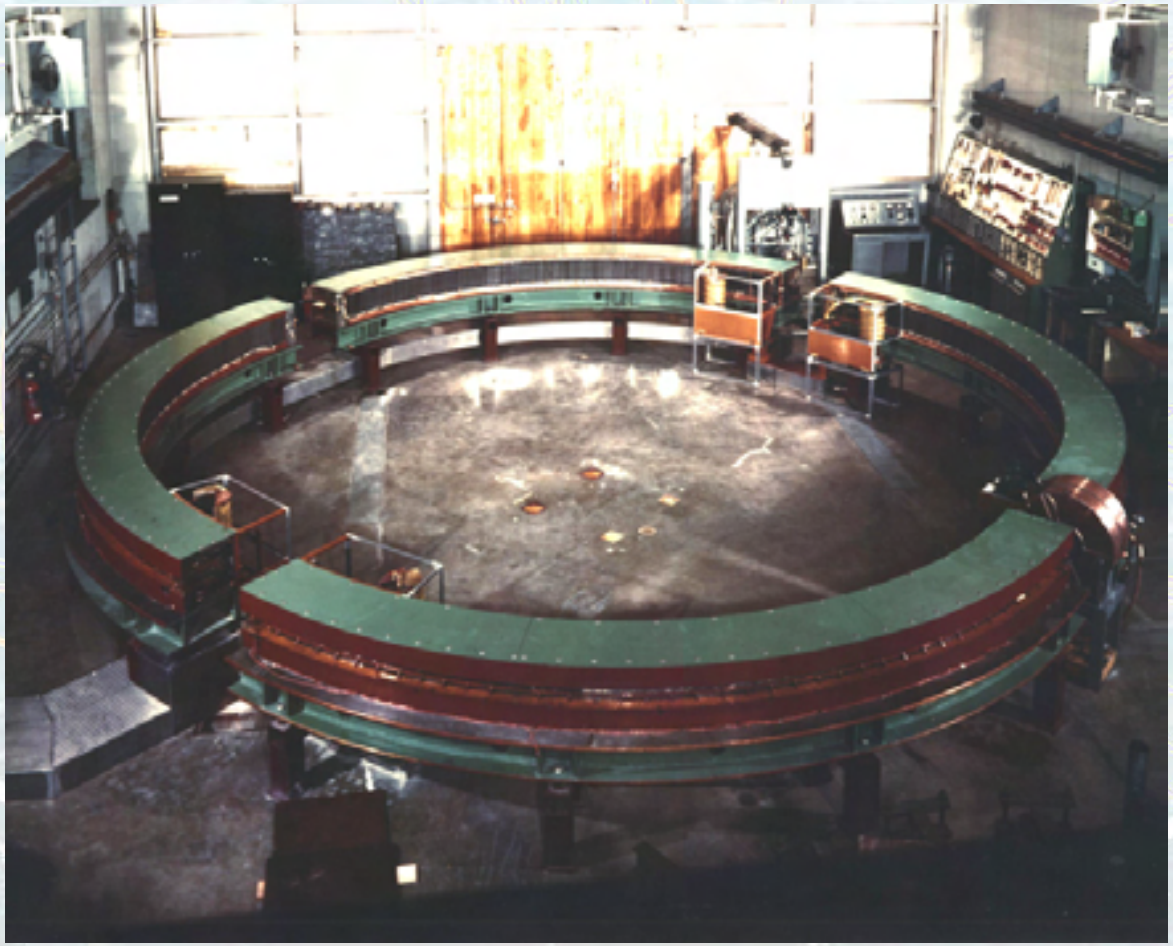
Berkeley 1939
średnica 1.5 m



Największy cyklortron z pojedynczym magnesem miał 4.6 m średnicy.

Synchrotron

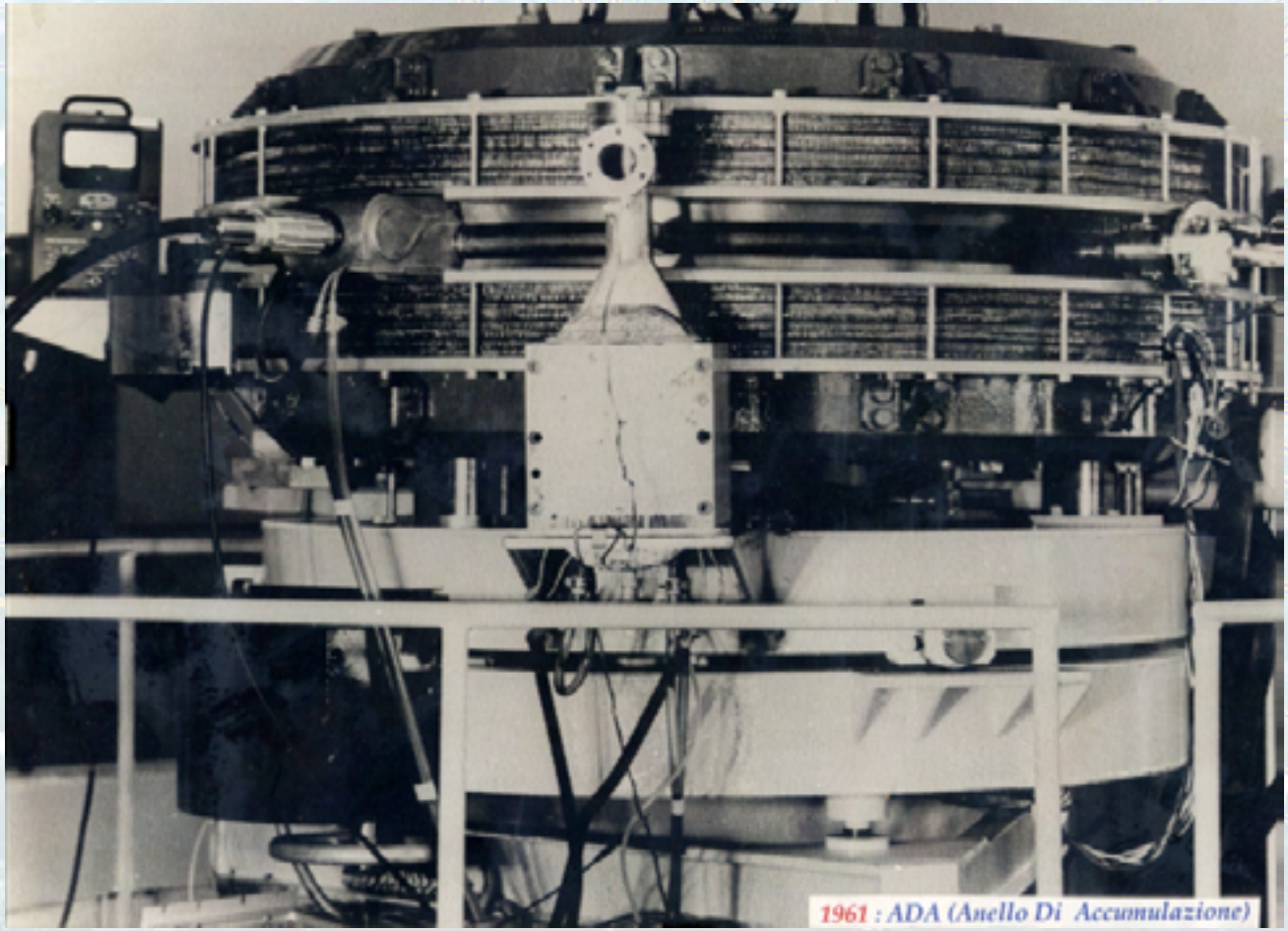
Kolejnym przełomem było wynalezienie synchrotronu (1955): elektromagnesy utrzymują przyspieszane cząstki na stałej orbicie.



Zderzacze cząstek (kolajdery)

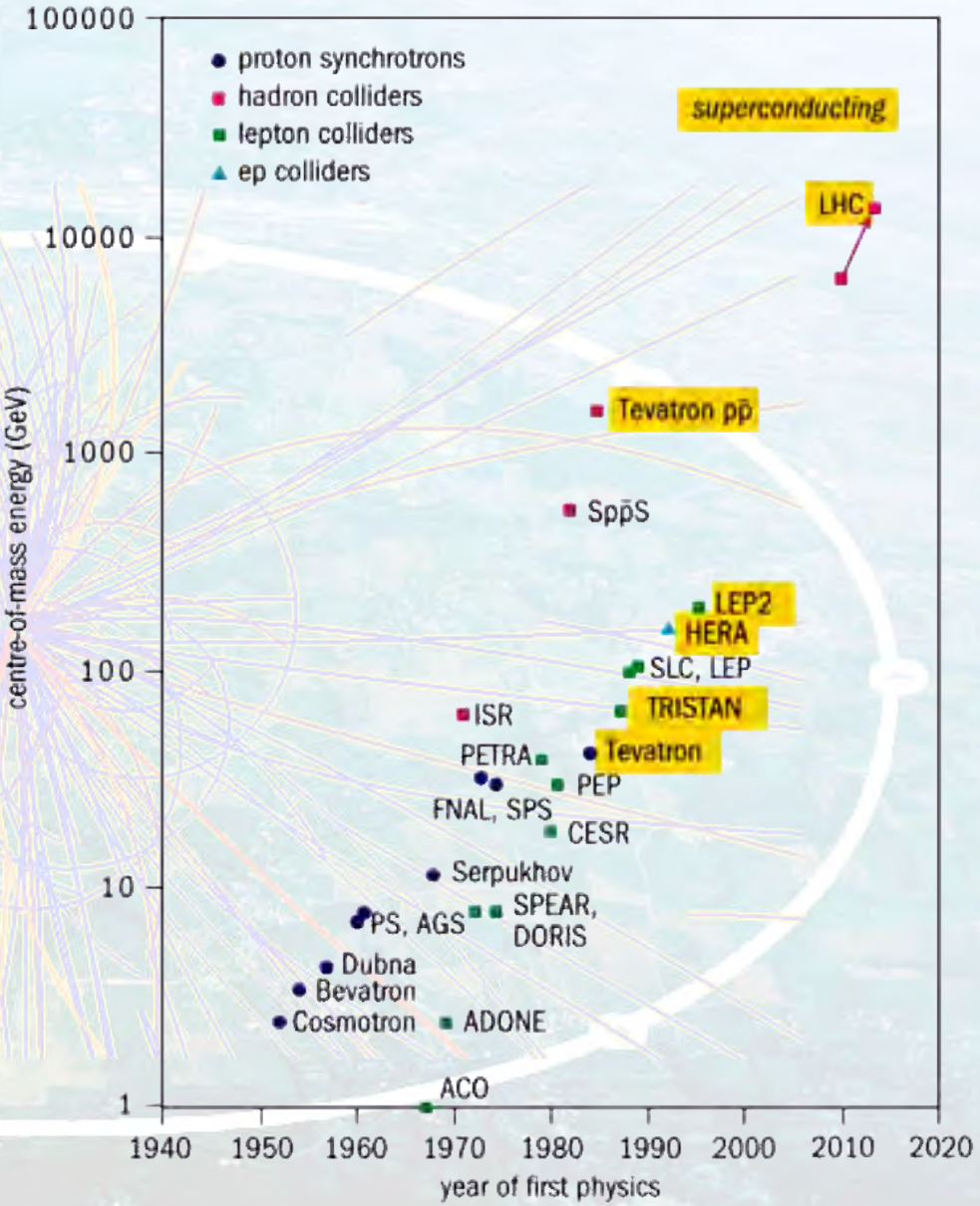
Energię możemy zwielokrotnić zderzając dwie wiązki przeciwbieżne.

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



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

Dlaczego?

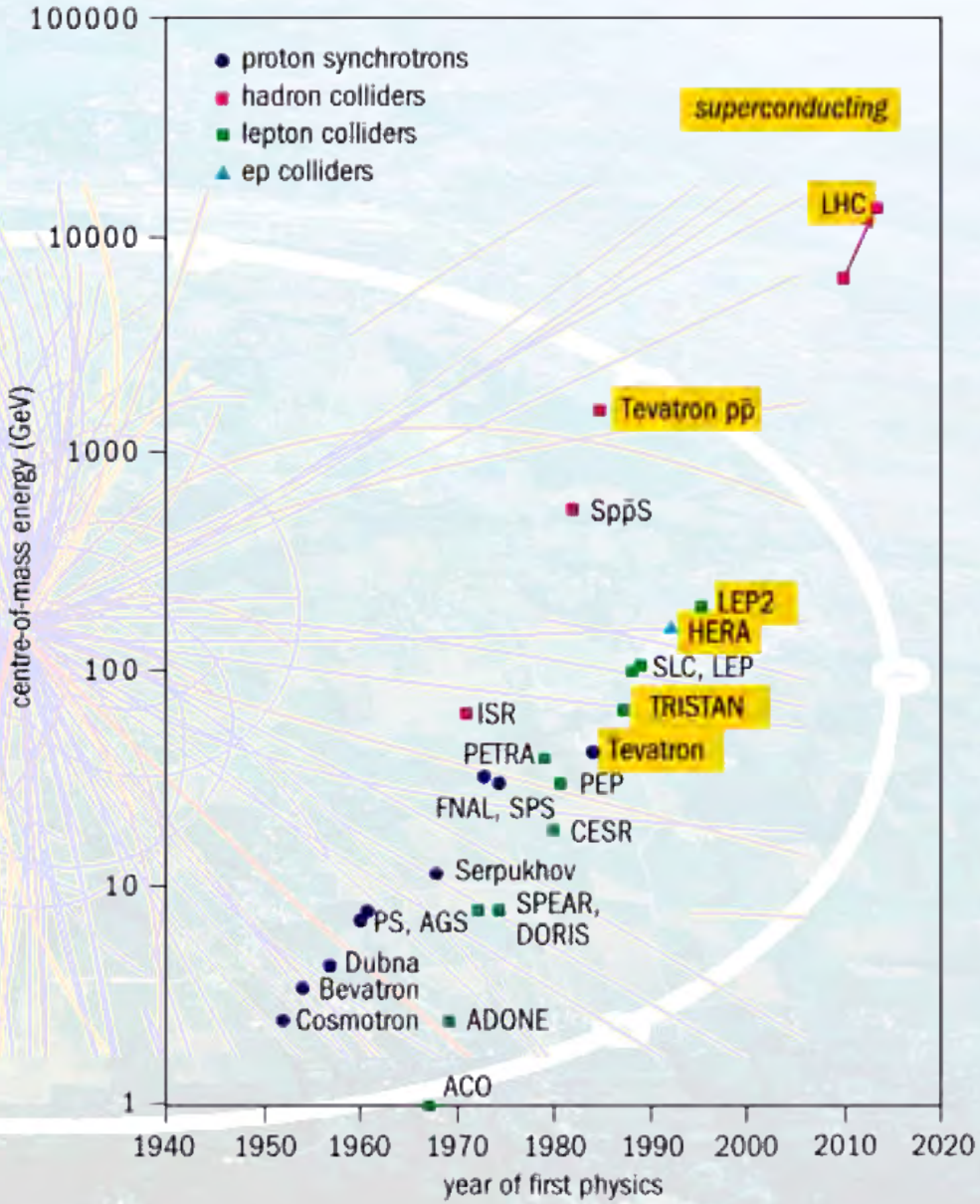


W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

Dlaczego?

Żeby móc produkować nowe, cięższe cząstki. Niezbędna energia

$$E = mc^2$$



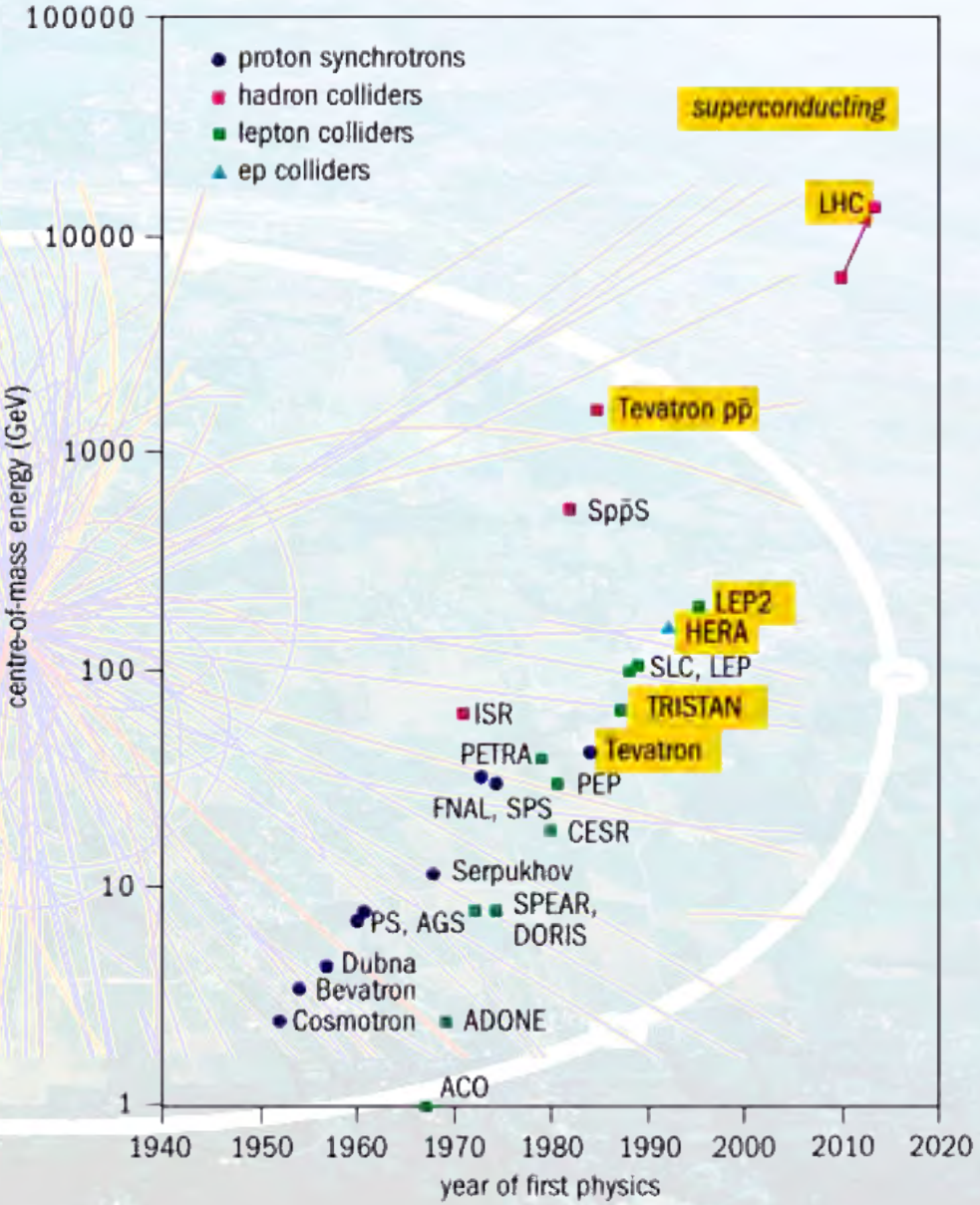
W drugiej połowie XX w. budowaliśmy akceleratory uzyskujące coraz wyższe energie.

Dlaczego?

Żeby móc produkować nowe, cięższe cząstki. Niezbędna energia

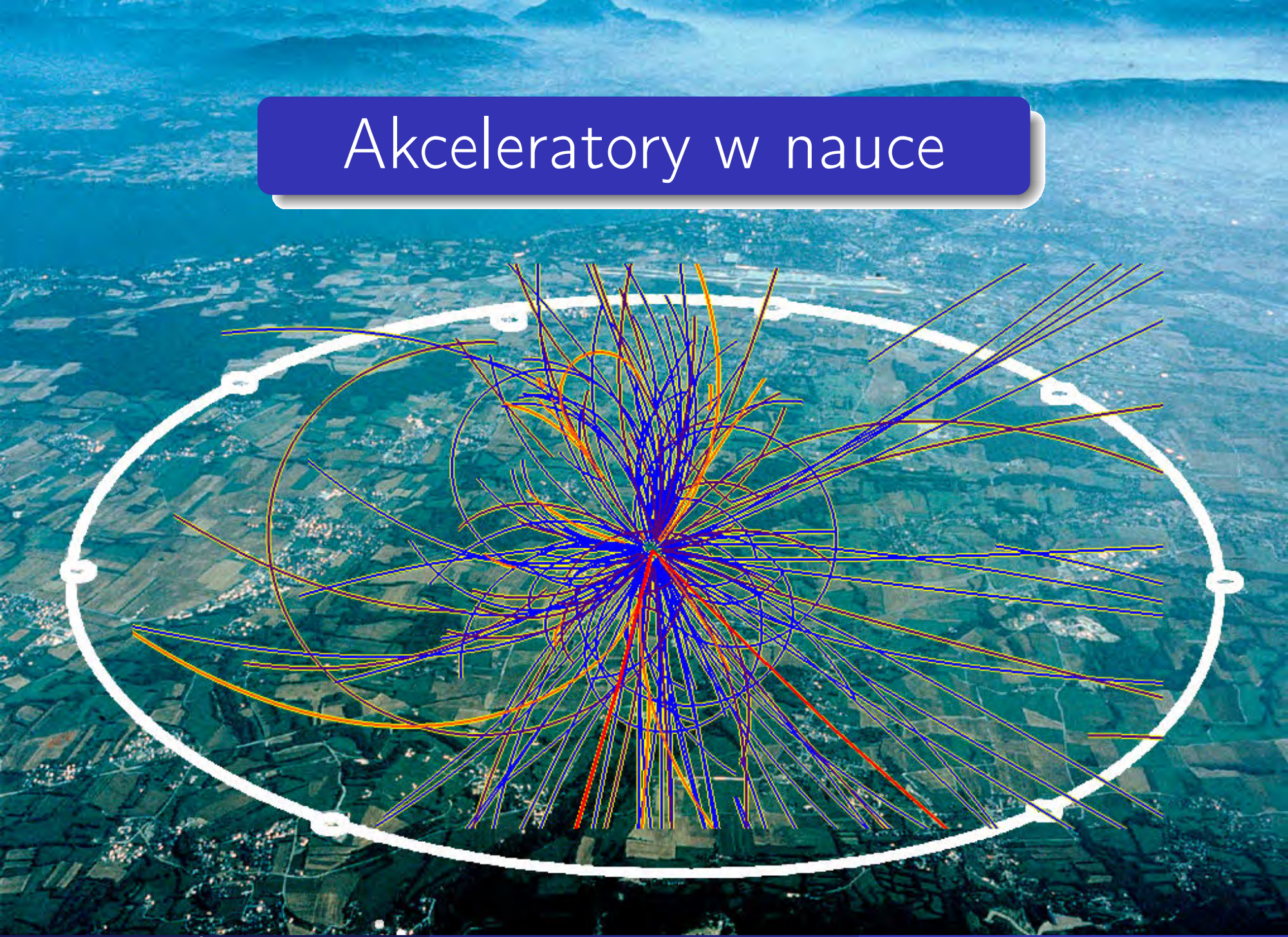
$$E = mc^2$$

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



Tunel akceleratora LHC

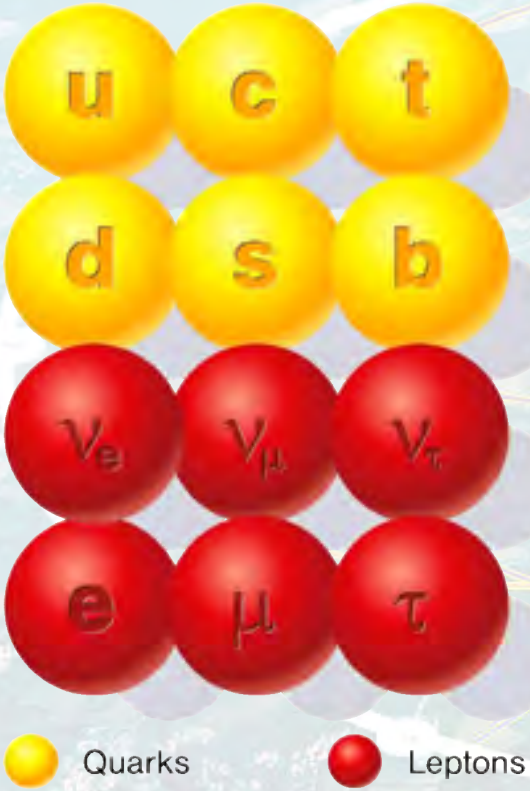
Akceleratory w nauce



Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

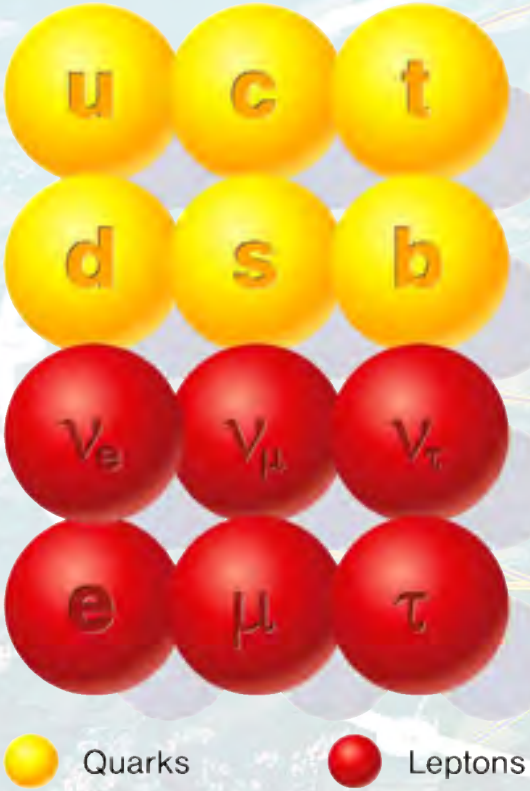
Model Standardowy



Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

Model Standardowy



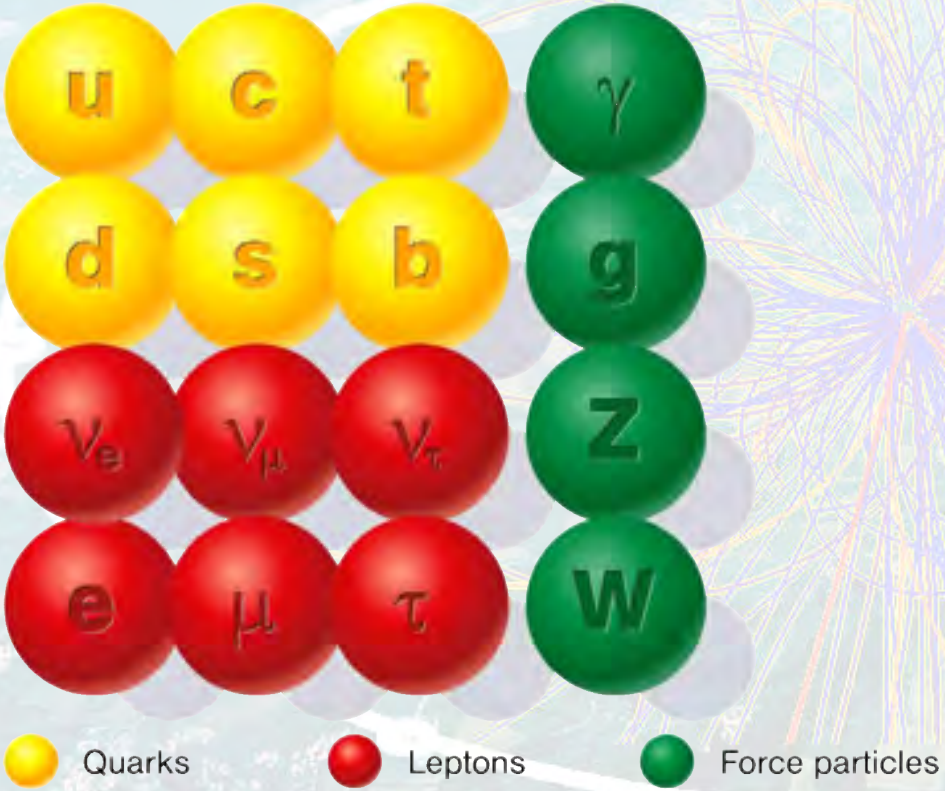
Odkrycia kolejnych "cegiełek":

- 1962 - neutrino mionowe ν_μ
- 1974 - kwark c
- 1975 - lepton τ
- 1977 - kwark b
- 1995 - kwark t
- 2000 - neutrino taonowe ν_τ

Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

Model Standardowy



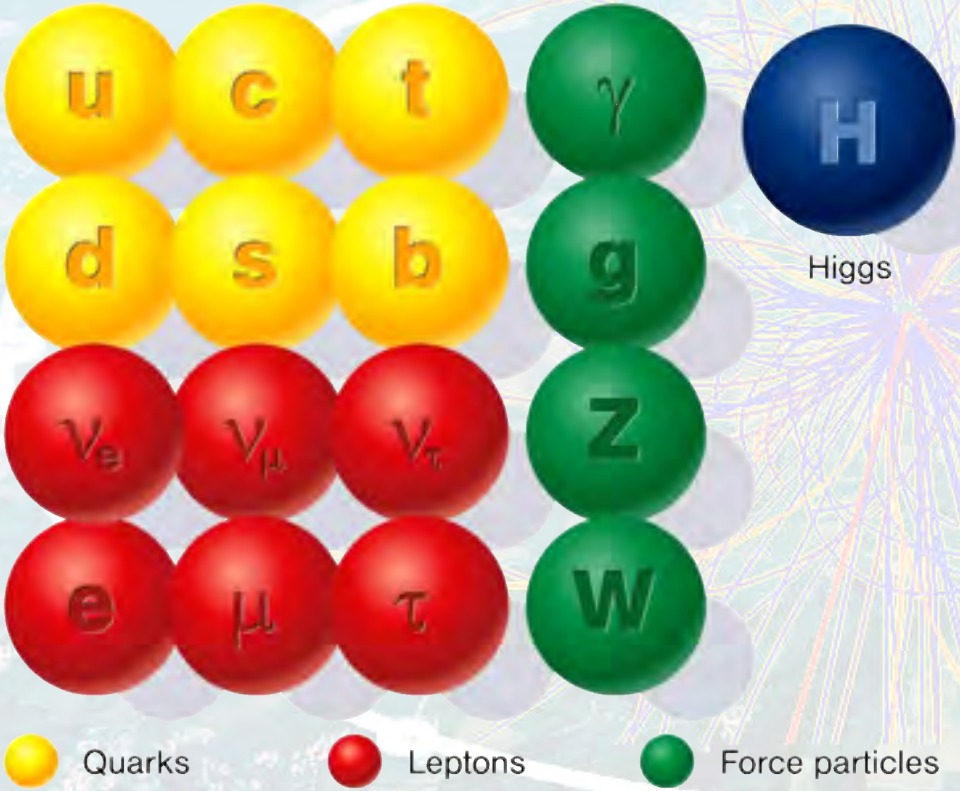
Odkrycia kolejnych "cegiełek":

- 1962 - neutrino mionowe ν_μ
- 1974 - kwark c
- 1975 - lepton τ
- 1977 - kwark b
- 1995 - kwark t
- 2000 - neutrino taonowe ν_τ
- 1979 - gluon g
- 1983 - bozony $W^\pm$ i Z°

Fizyka cząstek

Akceleratory były podstawowym narzędziem badań przez ostatnie pół wieku

Model Standardowy

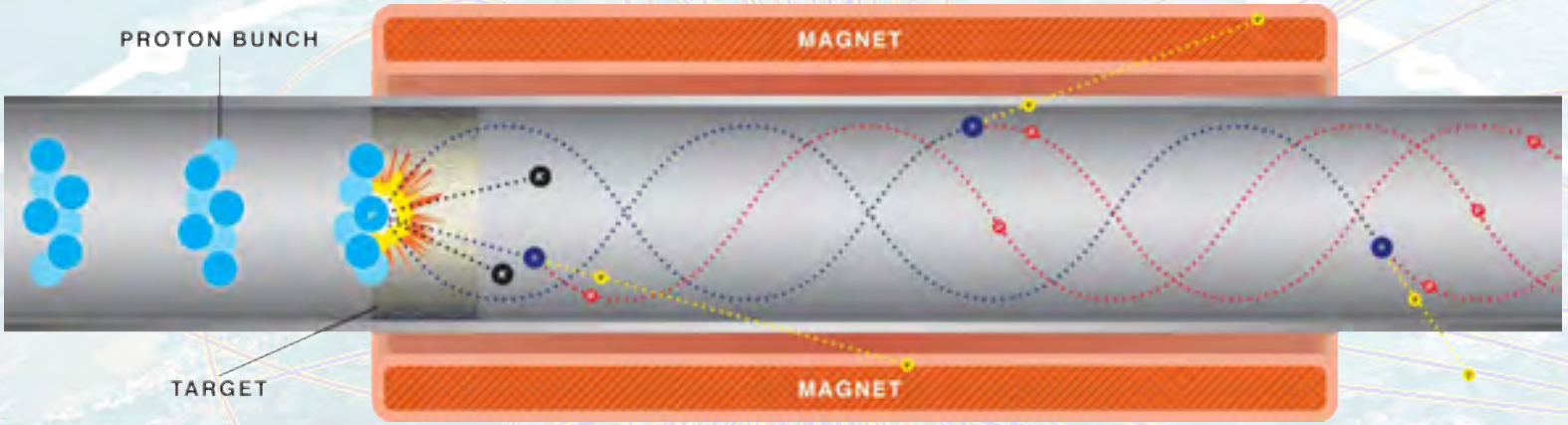


Odkrycia kolejnych "cegiełek":

- 1962 - neutrino mionowe ν_μ
- 1974 - kwark c
- 1975 - lepton τ
- 1977 - kwark b
- 1995 - kwark t
- 2000 - neutrino taonowe ν_τ
- 1979 - gluon g
- 1983 - bozony $W^\pm$ i Z°
- 2012 - bozon Higgsa

Wiązki wtórne

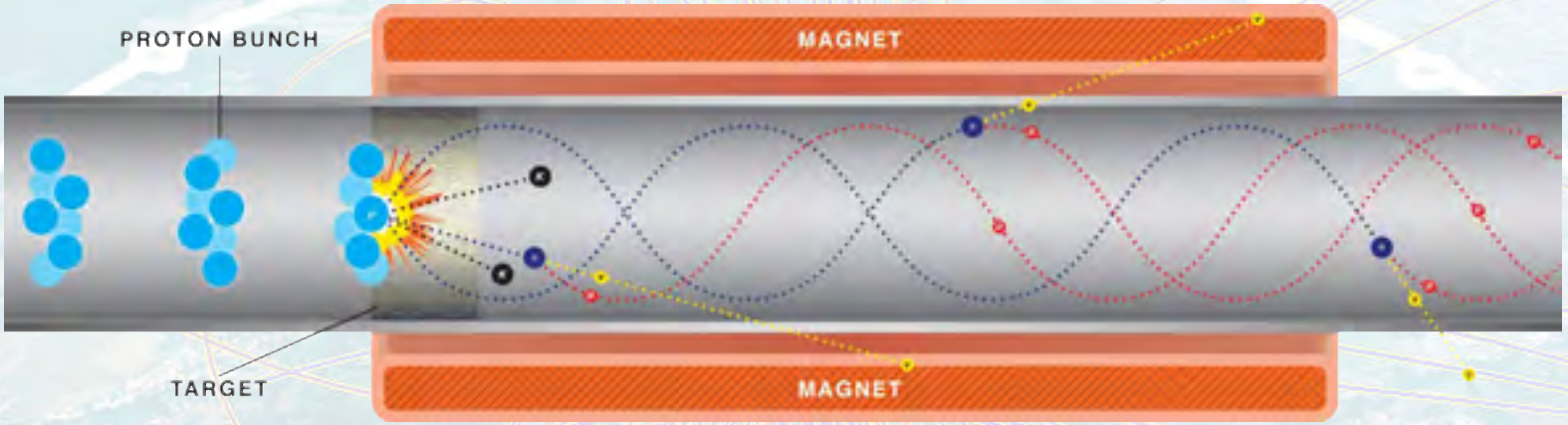
W akceleratorach możemy tylko przyspieszać stabilne cząstki naładowane (elektrony, pozytony, protony, antyprotony) i jony.
Ale możemy je potem wykorzystać do produkcji wiązek wtórnych:



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

Wiązki wtórne

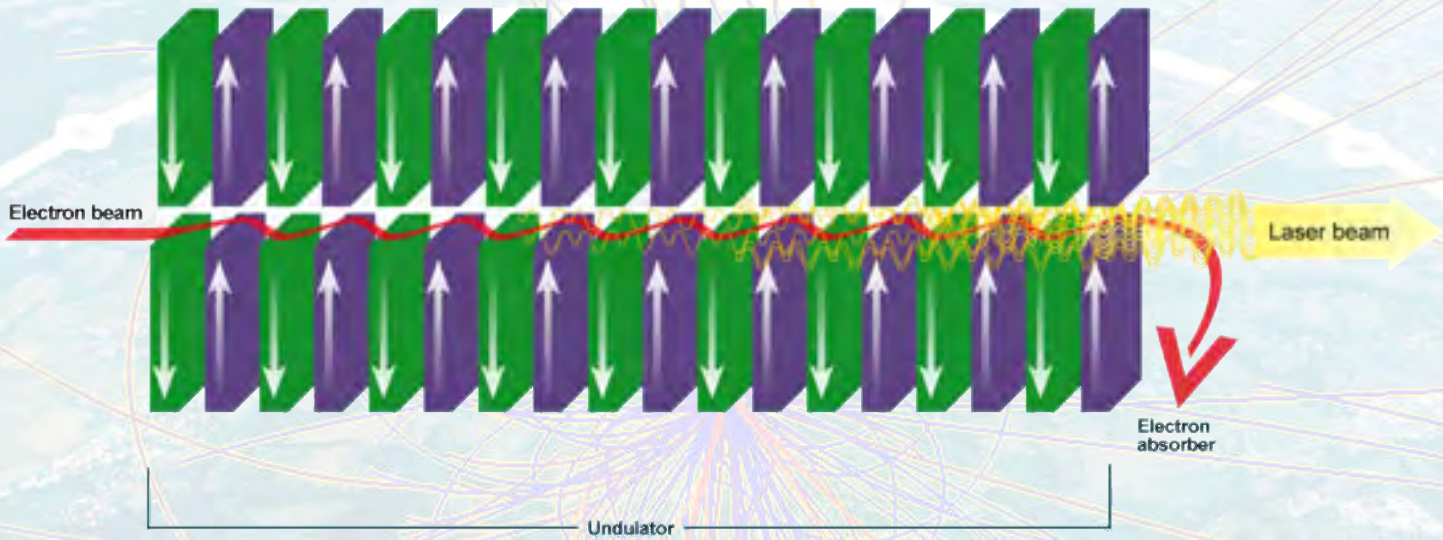
W akceleratorach możemy tylko przyspieszać stabilne cząstki naładowane (elektrony, pozytony, protony, antyprotony) i jony.
Ale możemy je potem wykorzystać do produkcji wiązek wtórnych:



- 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.

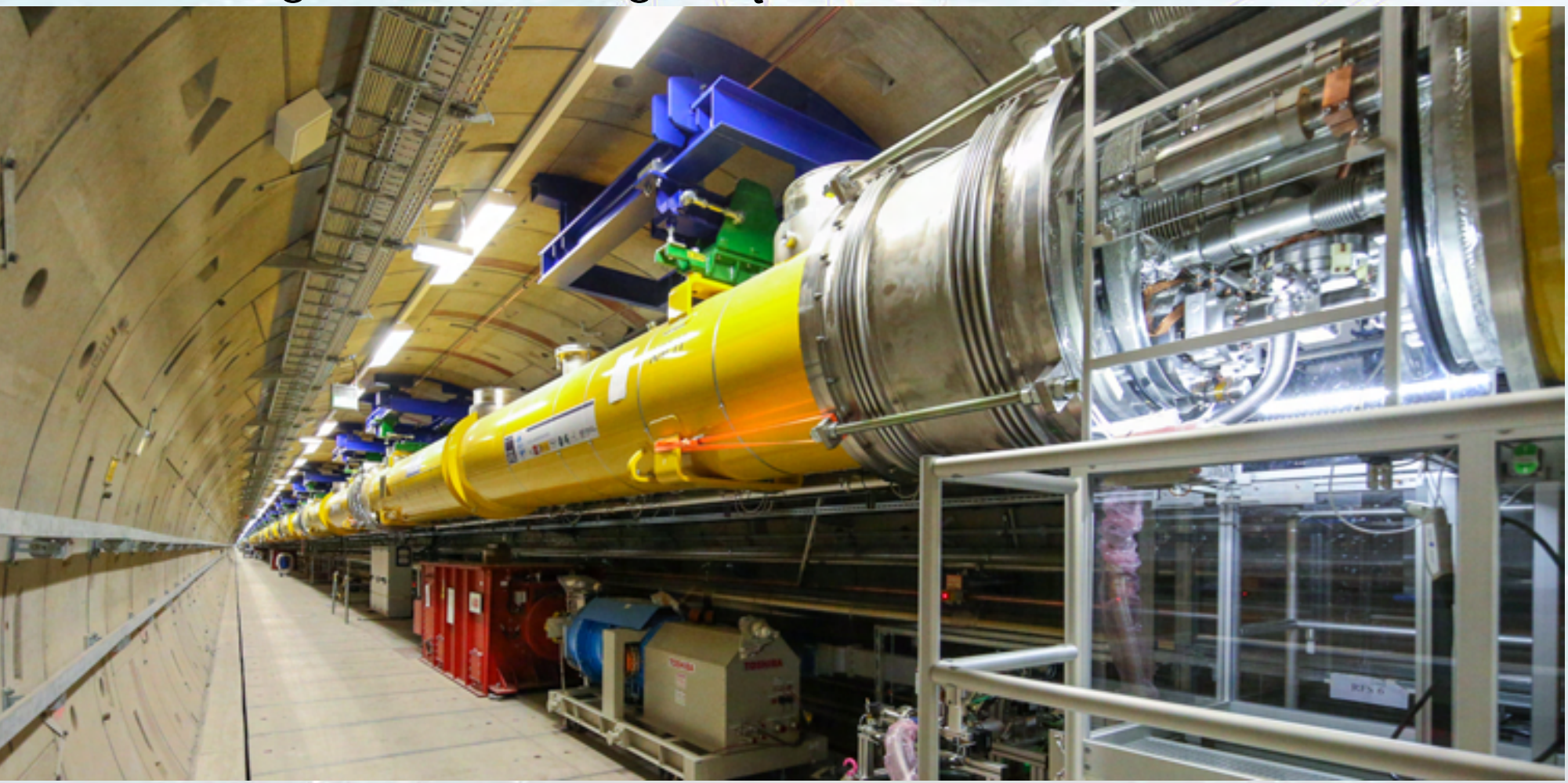
Laser na swobodnych elektronach - FEL

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

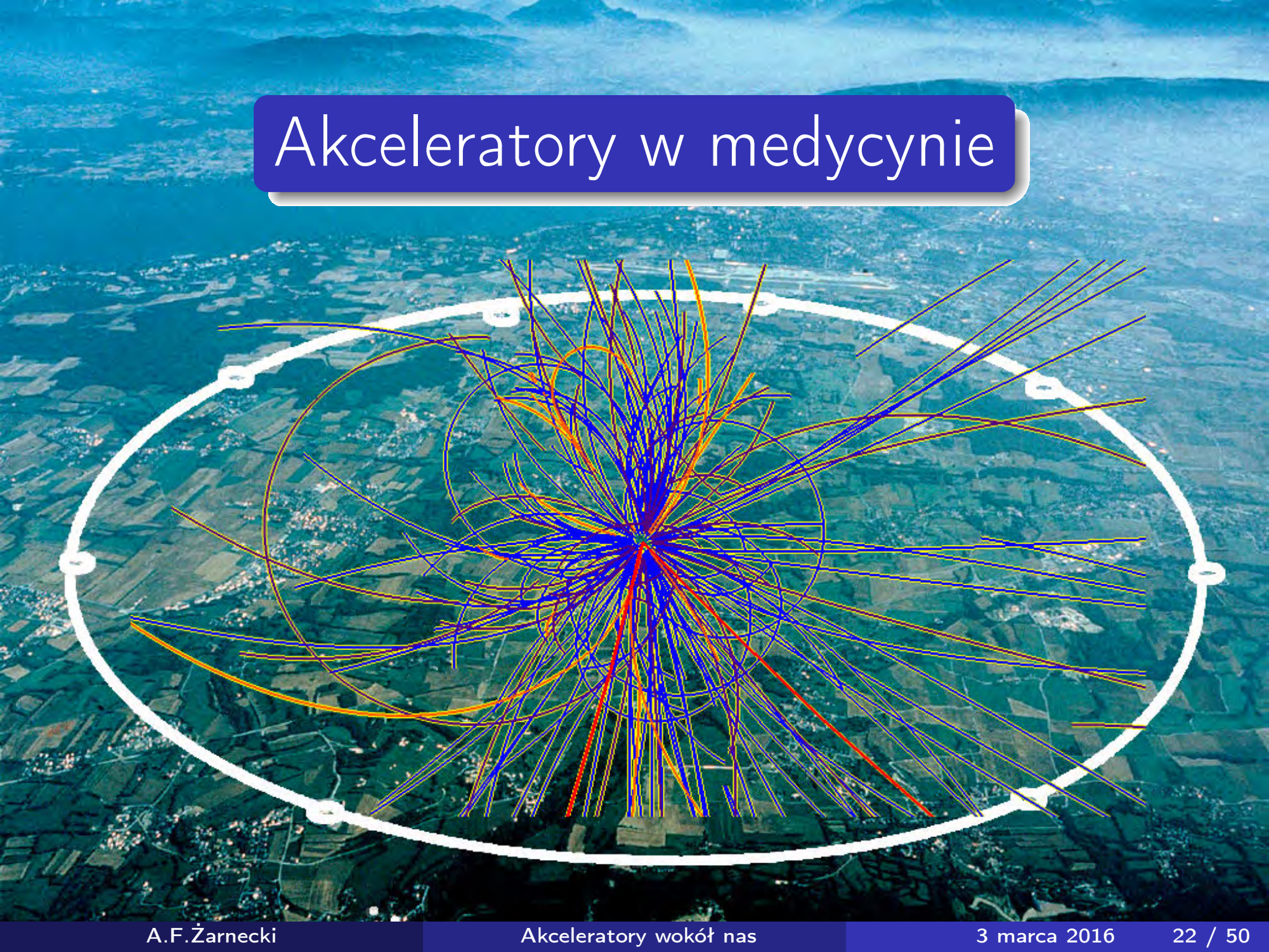
Temat na osobny wykład...

Laser na swobodnych elektronach - FEL

Akcelerator w Hamburgu budowany przez międzynarodowe konsorcjum X-FEL : długość 3.4 km, energia wiązki e^- do 17.5 GeV $\Rightarrow$ λ =0.05 nm.



Akceleratory w medycynie



Radioterapia

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

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)
- 1949: pierwszy akcerator liniowy do naświetlań (Anglia)

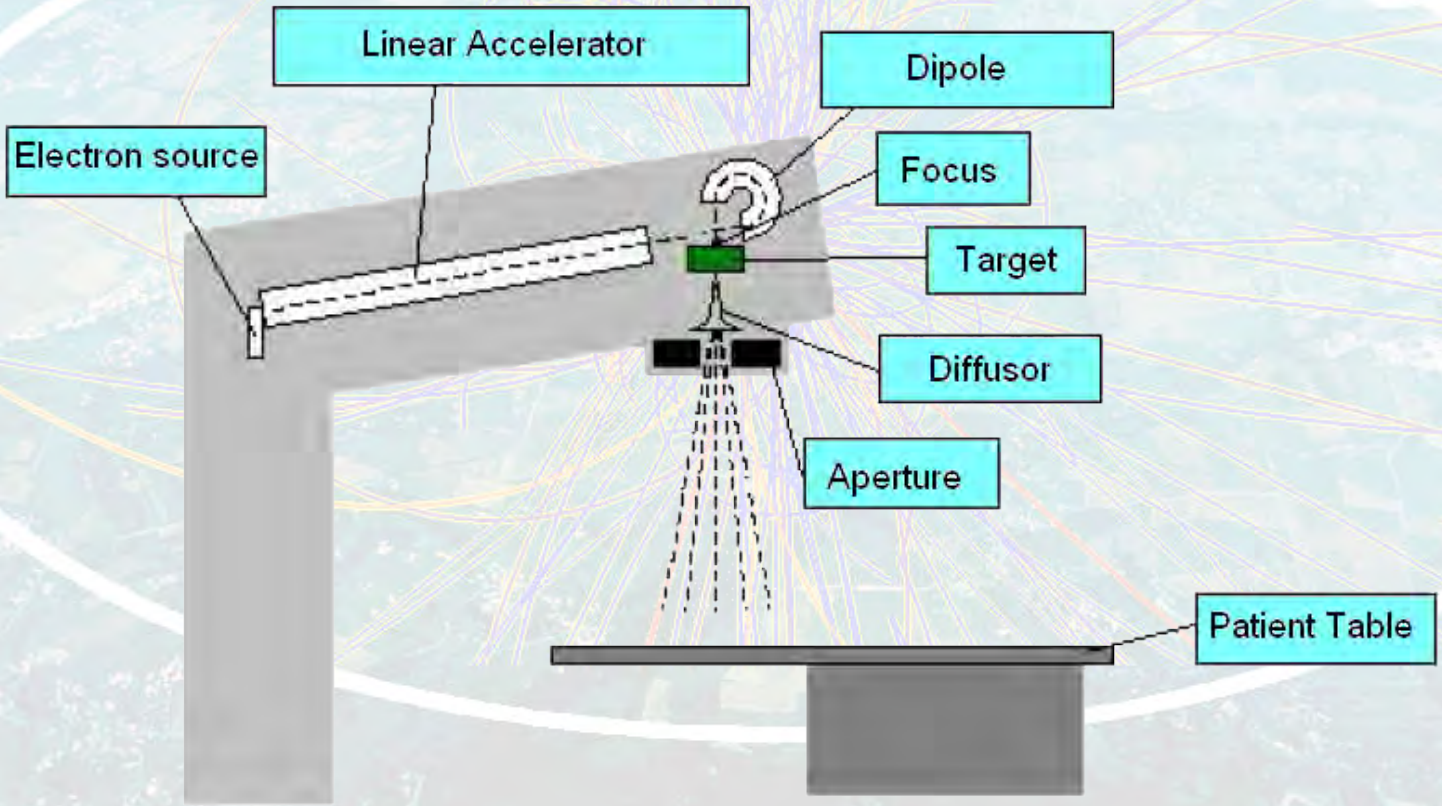
Radioterapia

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.

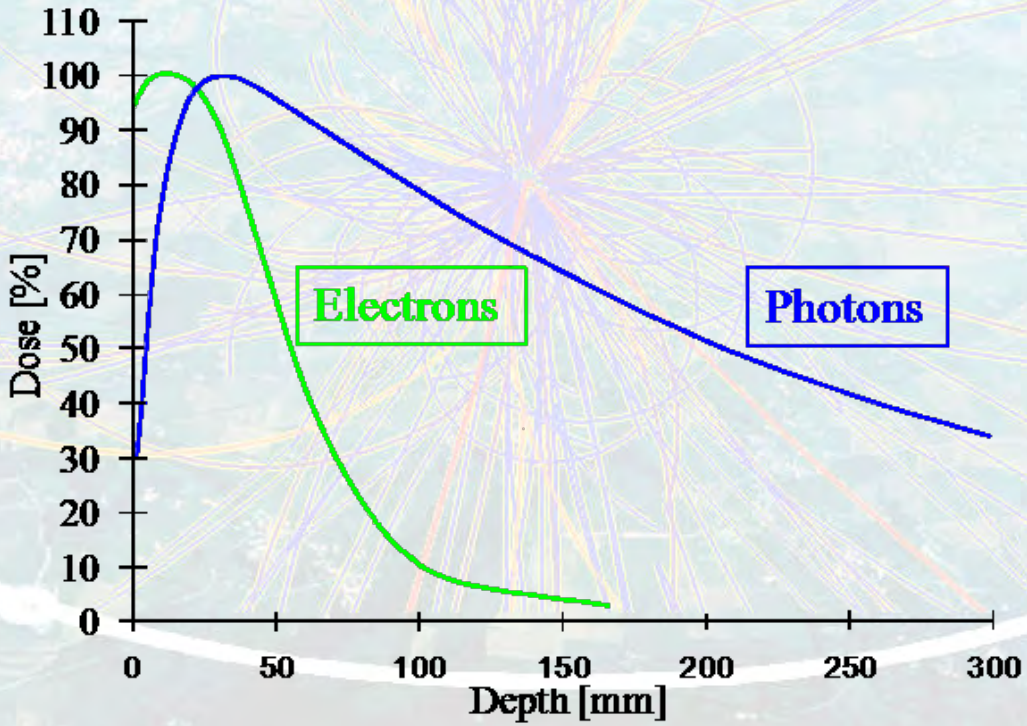
Nowoczesne urządzenie zintegrowane z CT (Varian Medical Systems):

Problemy radioterapii e/γ:

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczanej dawki

  $\Rightarrow$ silne naświetlanie także zdrowych tkanek

Głębokość na jakiej pochłaniane jest promieniowanie:

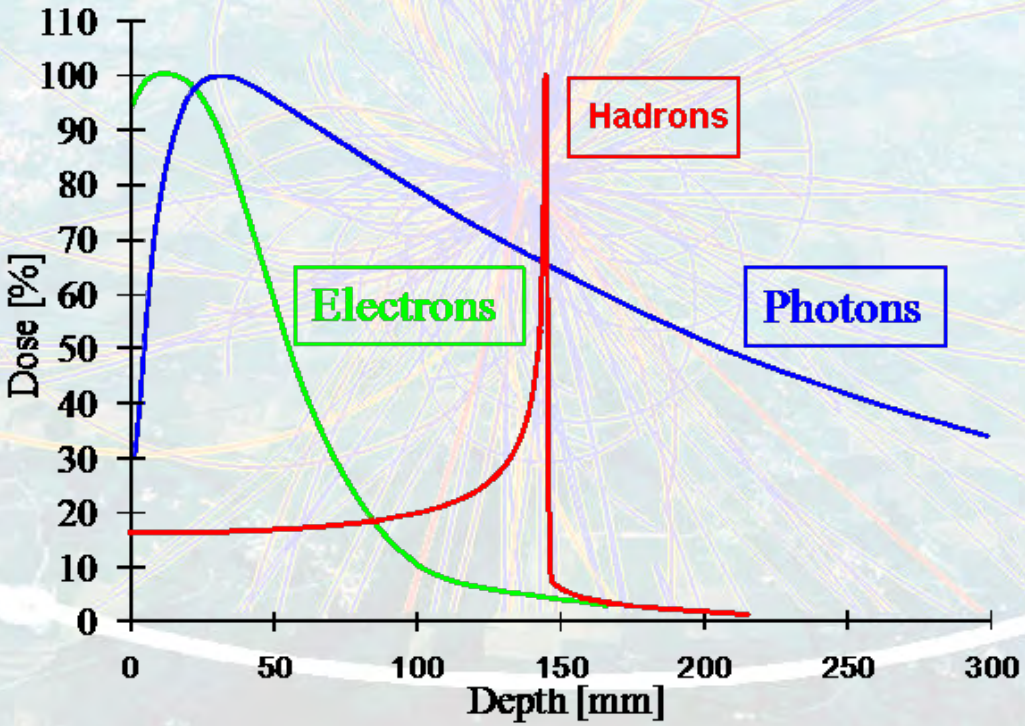


Problemy radioterapii e/γ:

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczanej dawki

  $\Rightarrow$ silne naświetlanie także zdrowych tkanek

Głębokość na jakiej pochłaniane jest promieniowanie:

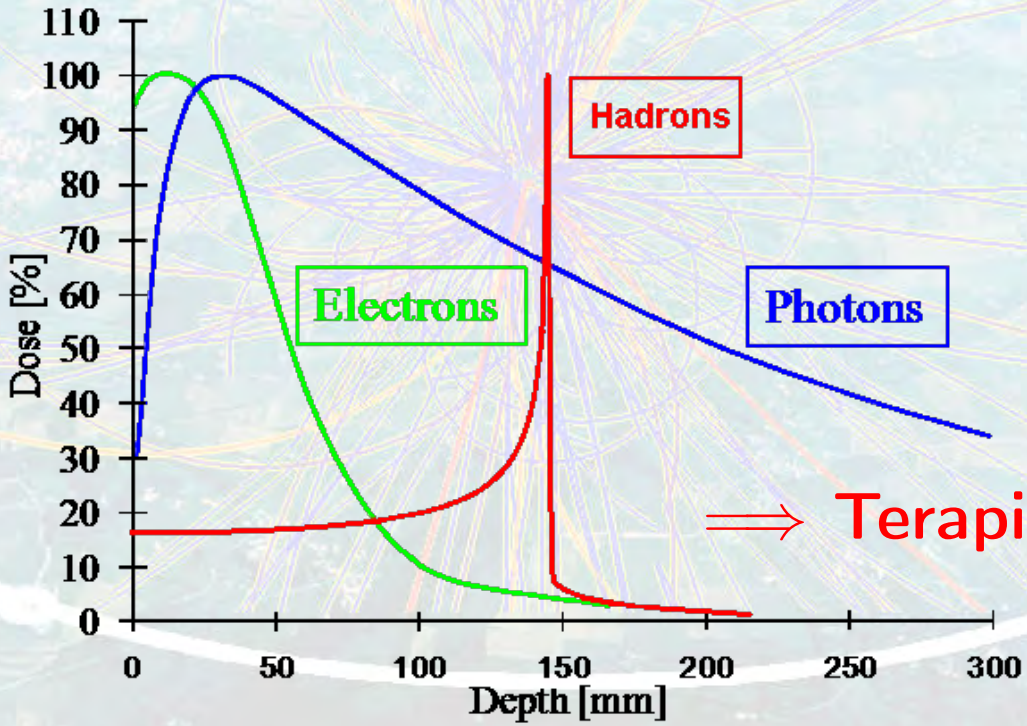


Problemy radioterapii e/γ:

- nowotwory radio-oporne (ok. 5% przypadków)
- szeroki rozkład przestrzenny dostarczanej dawki

  $\Rightarrow$ silne naświetlanie także zdrowych tkanek

Głębokość na jakiej pochłaniane jest promieniowanie:



$\Longrightarrow$ 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

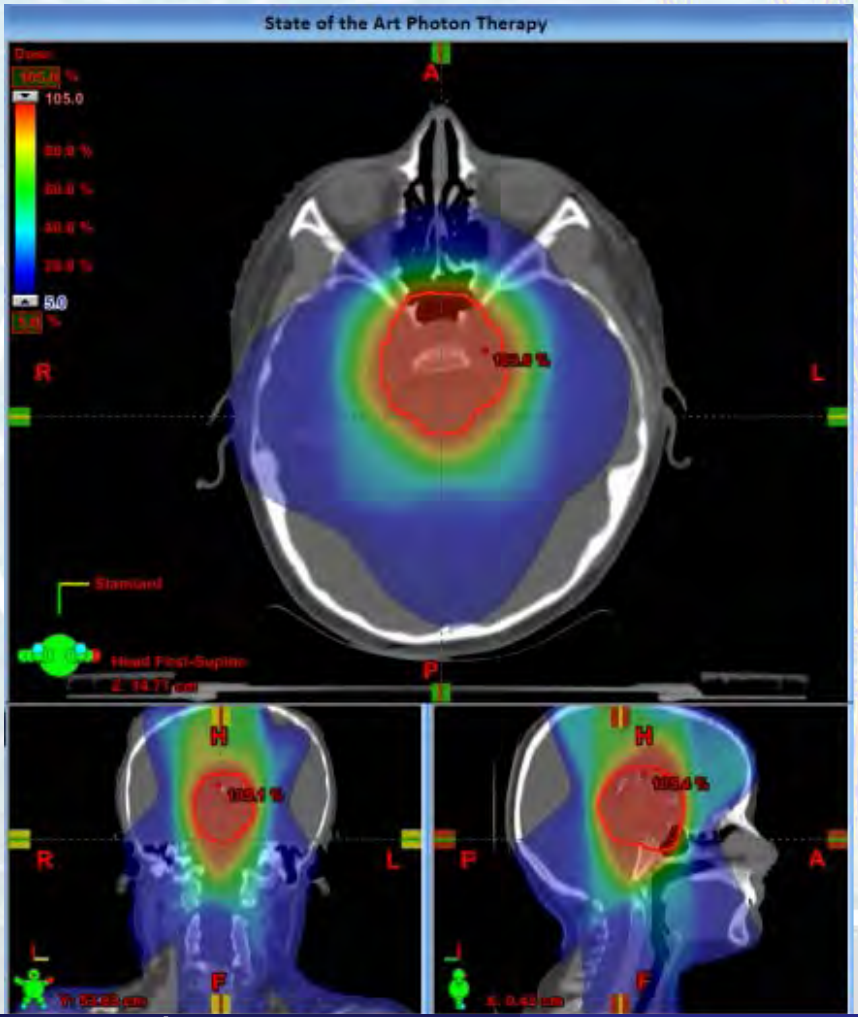
- 1931: pierwszy cyklotron (Ernest Lawrence)
- 1935: pierwsze próby zastosowania medycznego
  - produkcja radio-izotopów
  - terapeutyczne naświetlanie neutronami
- 1946: propozycja wykorzystania wiązek protonów i jonów (R.Wilson)
- 1954: pierwszy przypadek terapii z użyciem protonów (Berkeley,USA)
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

UW Dwa stulecia Dobry początek

Terapia hadronowa

Rozkład dawki przy optymalnym naświetlaniu (guz przysadki)

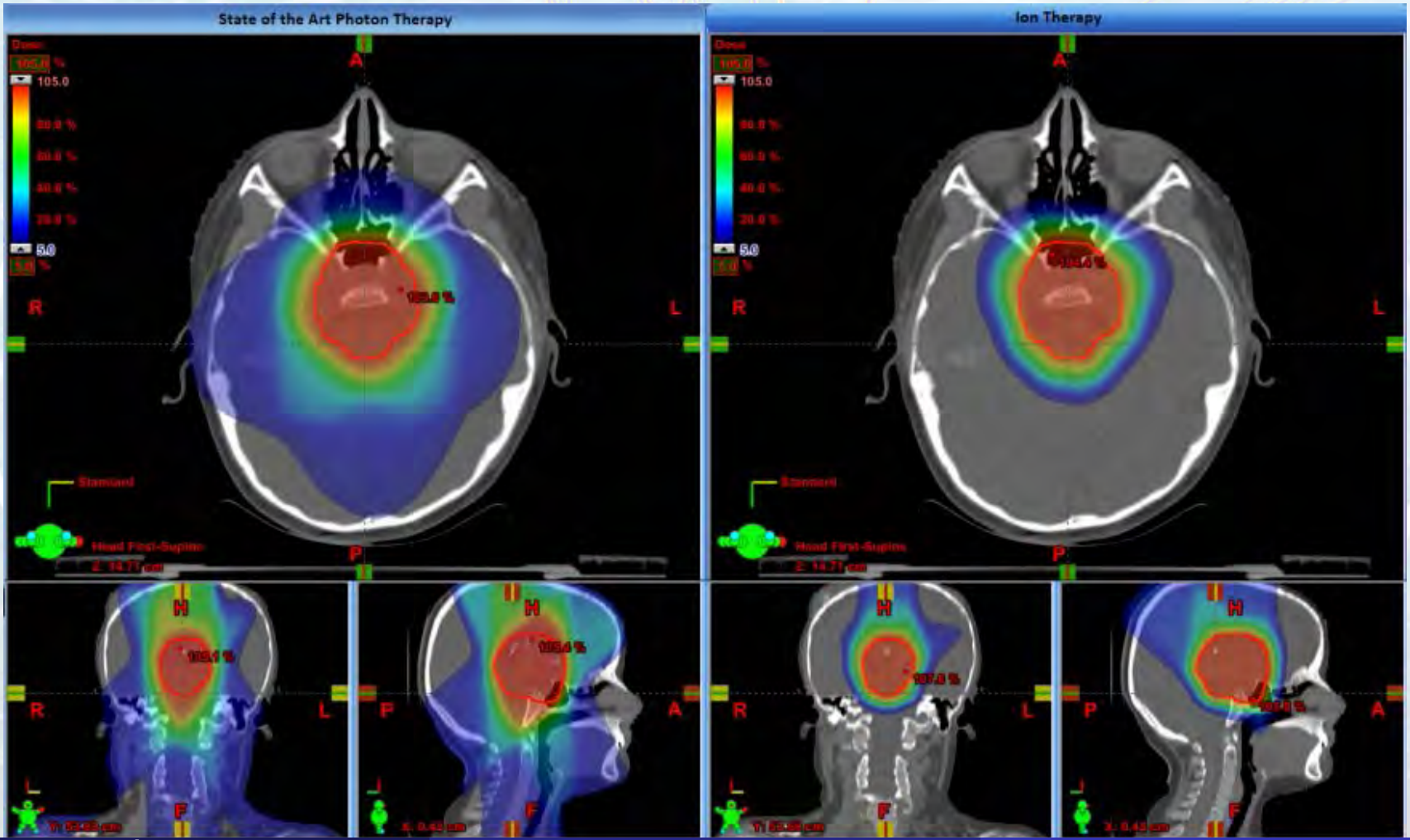
wiązką promieni gamma



Terapia hadronowa

Rozkład dawki przy optymalnym naświetlaniu (guz przysadki)

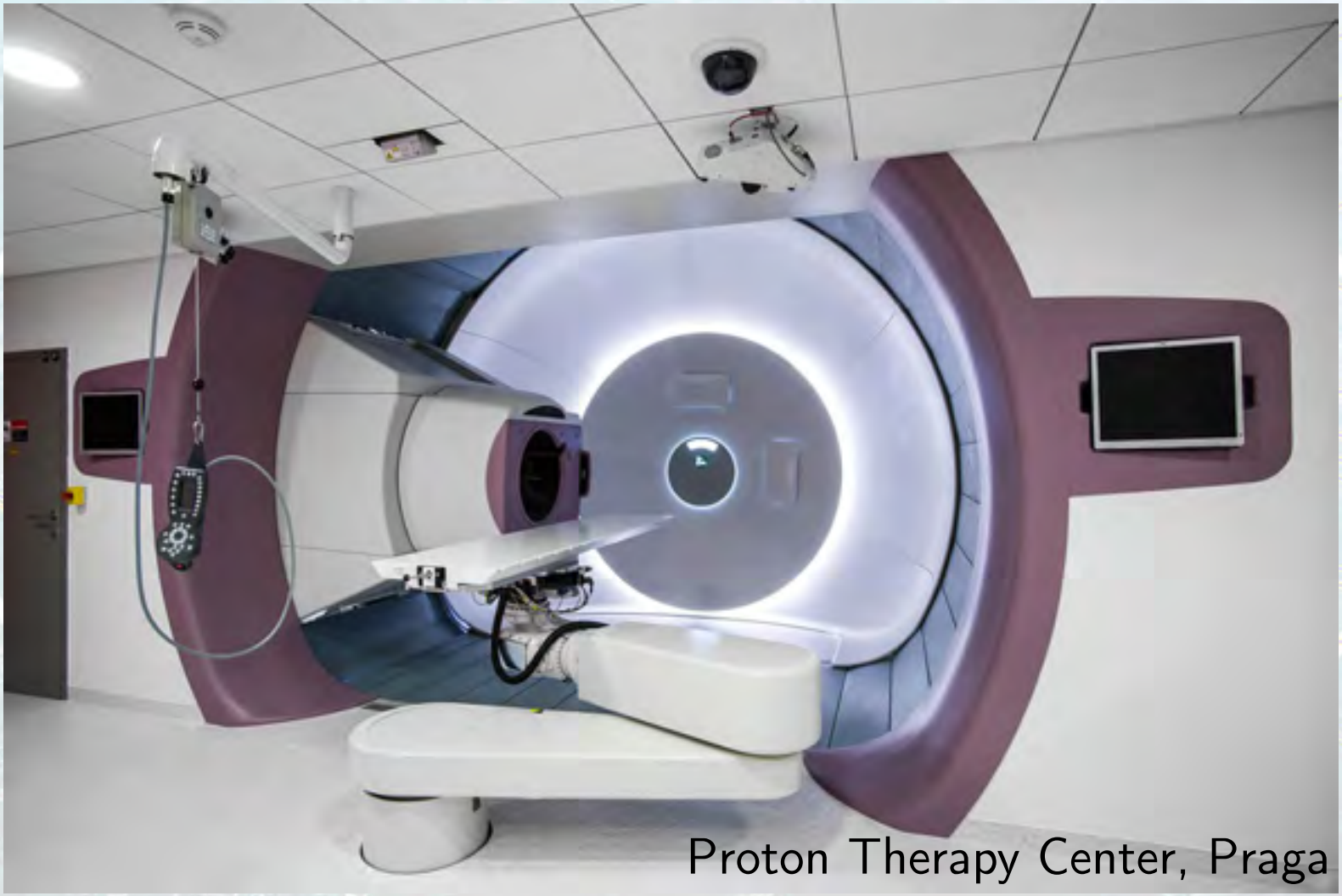
wiązką promieni gamma i wiązką jonów



UW Dwa stulecia Dobry początek

Terapia hadronowa

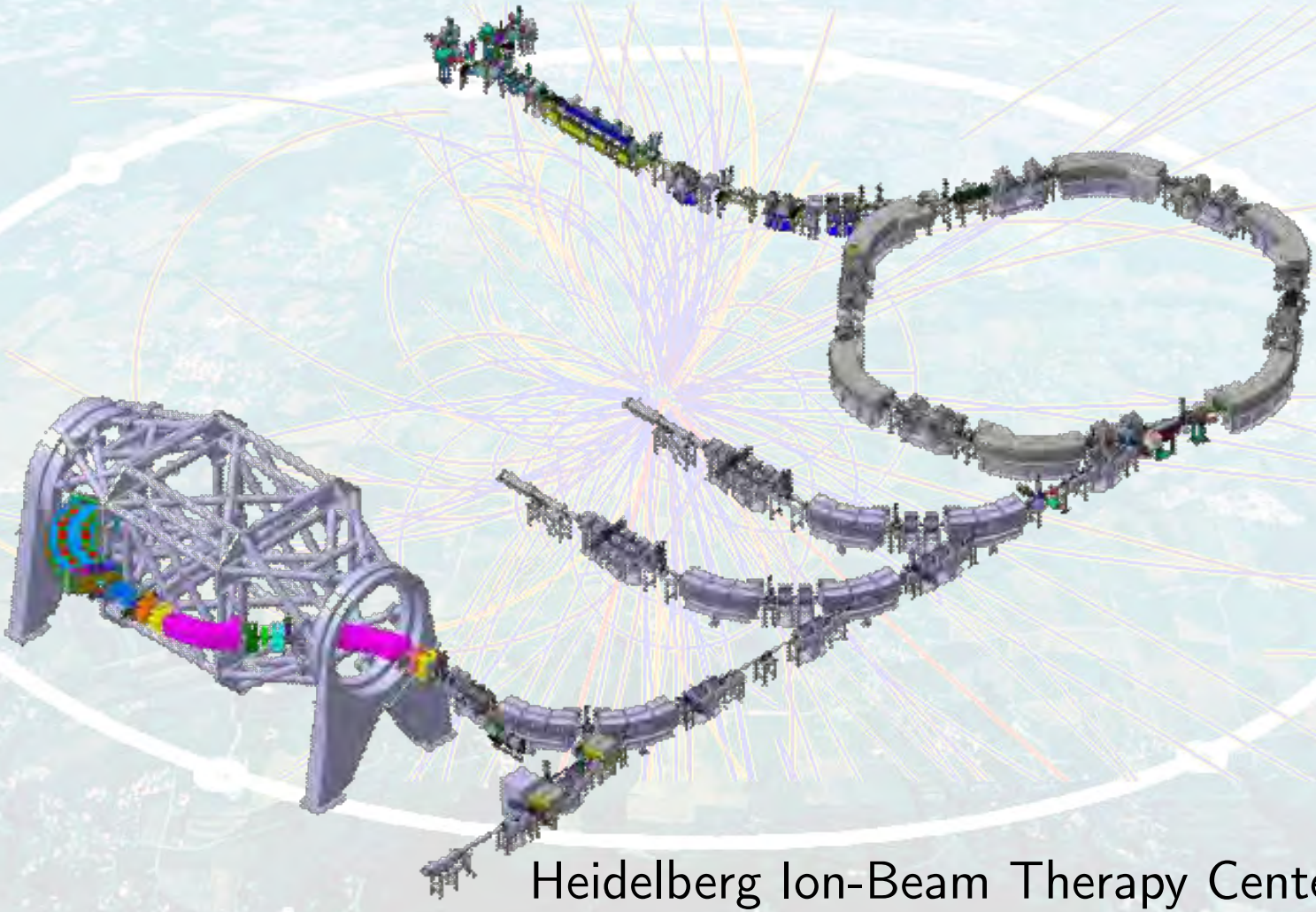
Z punktu widzenia pacjenta bardzo podobne do standardowej radioterapi



Proton Therapy Center, Praga

Terapia hadronowa

Wiązka hadronowa dostarczana przez zewnętrzny kompleks akceleratorów



Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

Terapia hadronowa

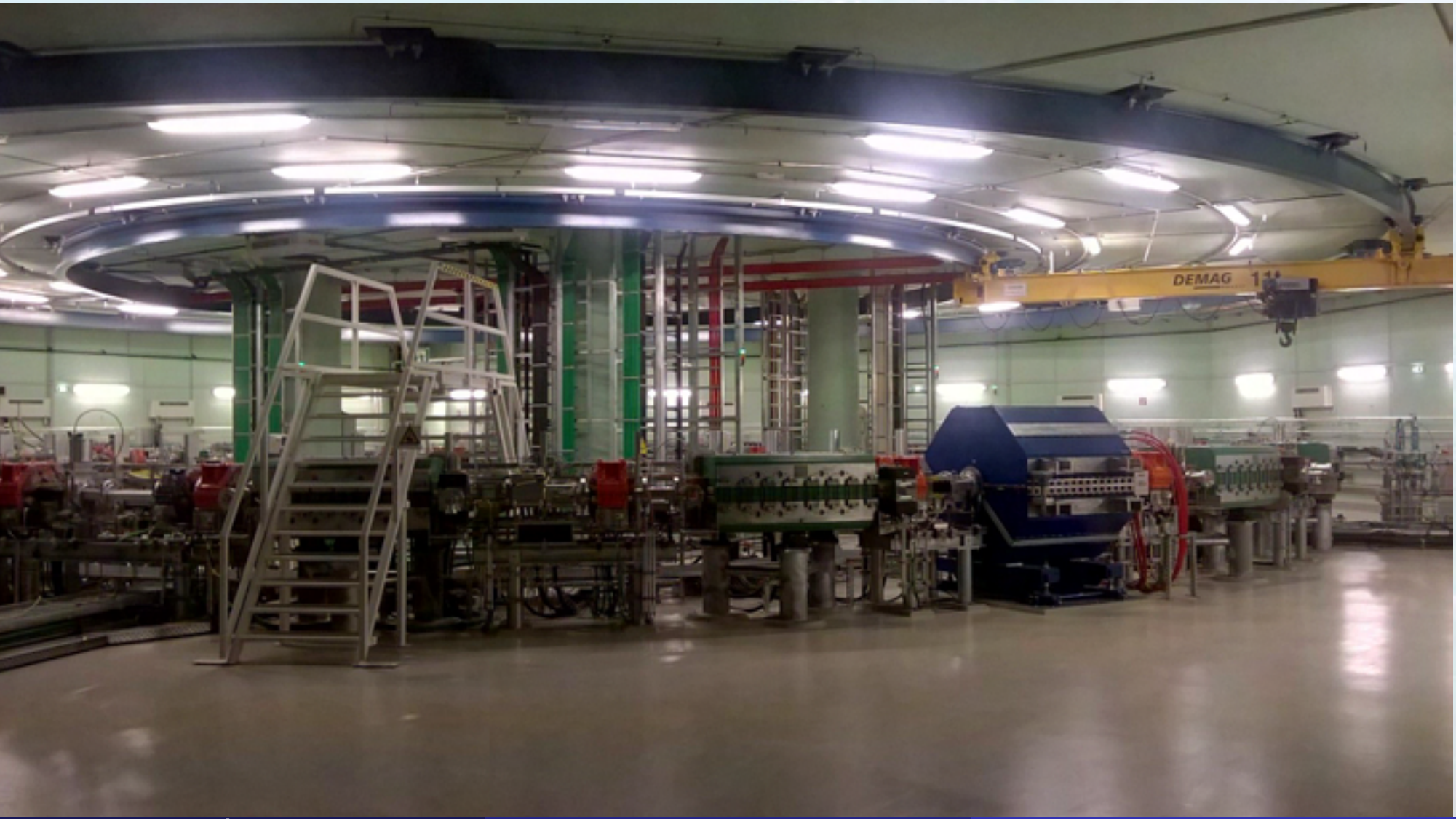
Gantry: ruchomy układ magnesów doprowadzających wiązkę umożliwia ustawienie dowolnego kąta naświetlania (obrót o 360°)

Heidelberg Ion-Beam Therapy Center

UW Dwa stulecia Dobry początek

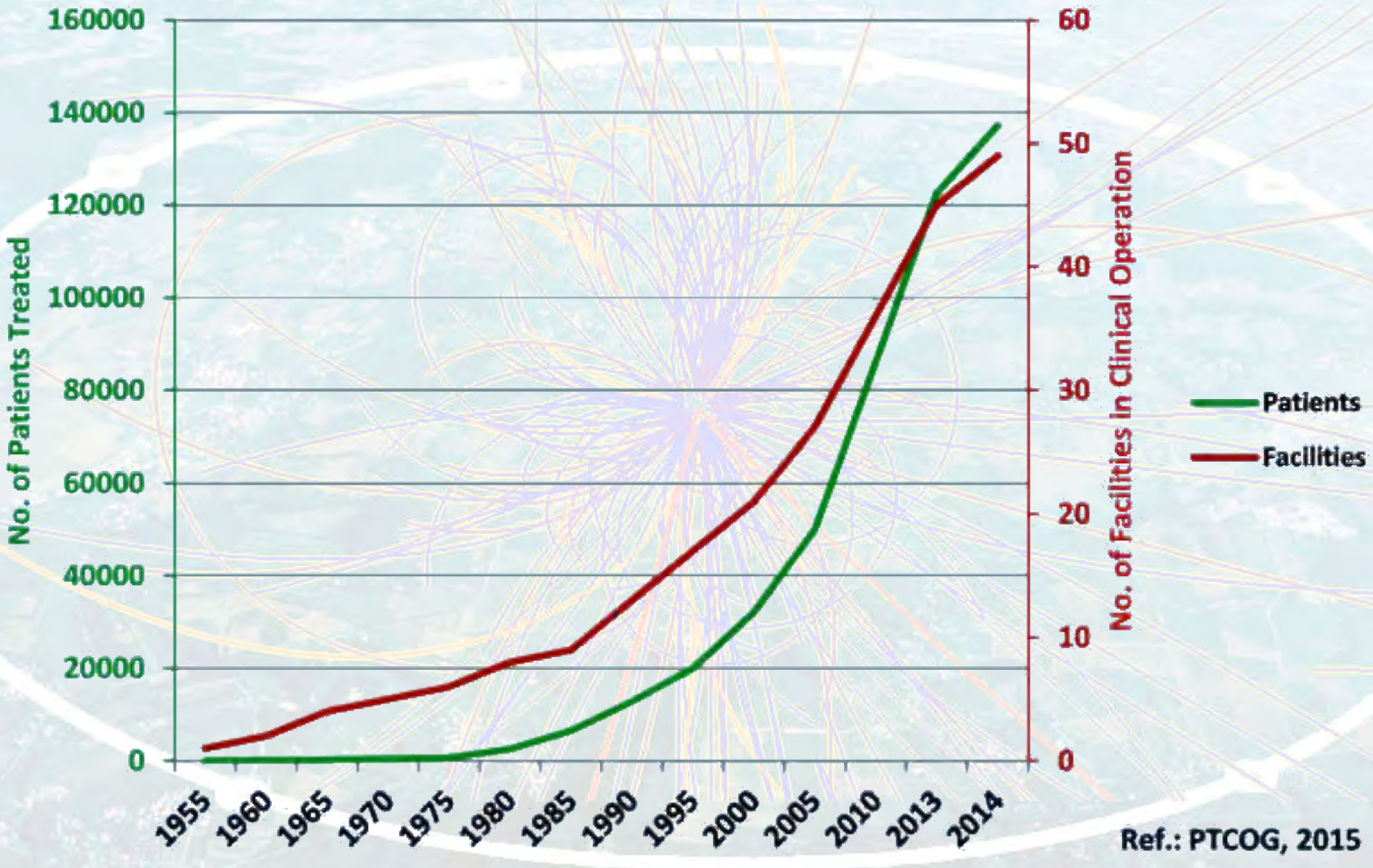
Terapia hadronowa

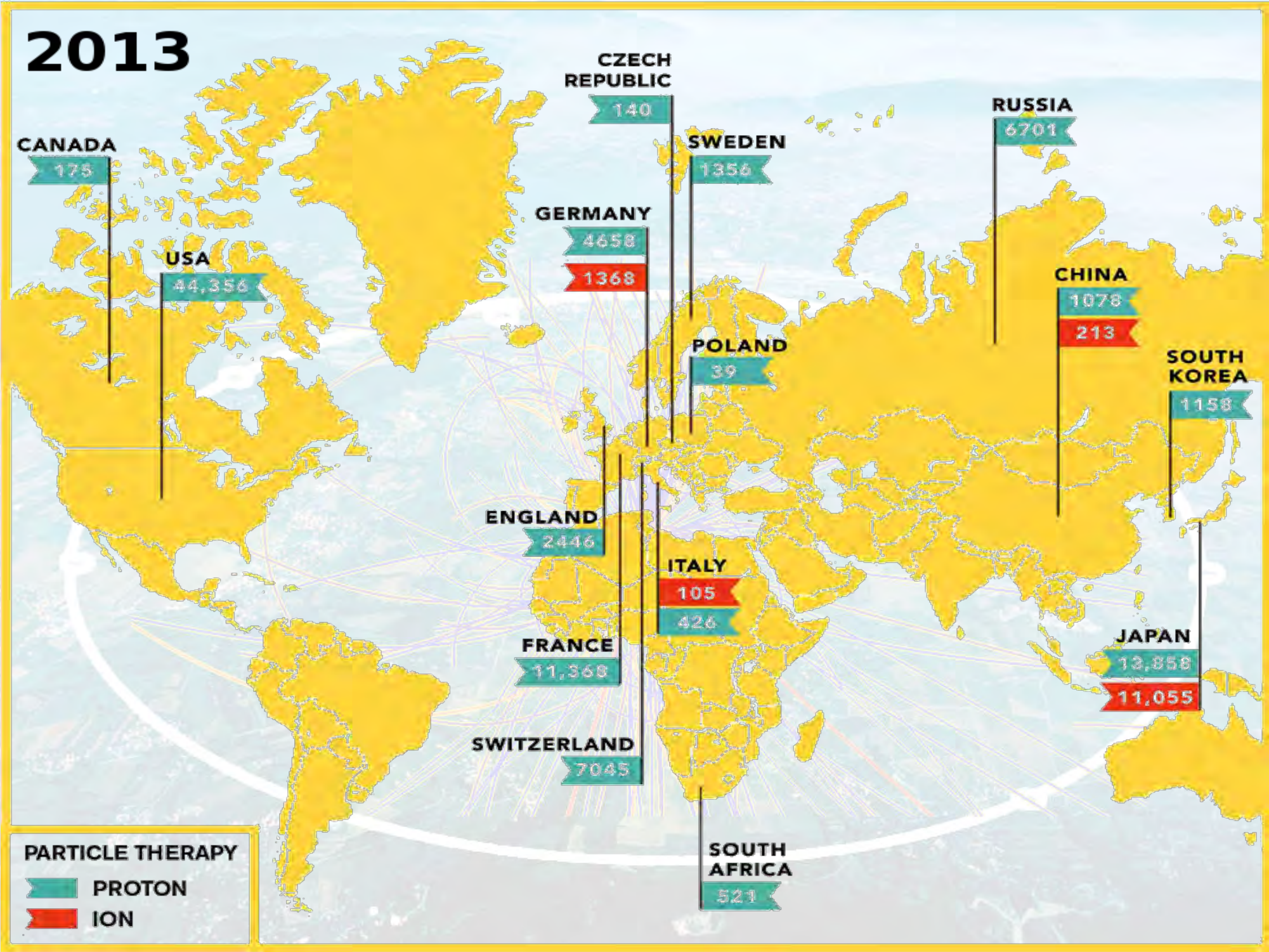
Synchrotron w ośrodku MedAustron, Austria



Terapia hadronowa

Liczba ośrodków oferujących terapię protonową lub jonową szybko rośnie




2013
CANADA
175
USA
44,356
CZECH REPUBLIC
140
SWEDEN
1356
GERMANY
4658
1368
POLAND
39
RUSSIA
6701
CHINA
1078
213
SOUTH KOREA
1158
ENGLAND
2446
ITALY
105
426
FRANCE
11,368
JAPAN
13,858
11,055
SWITZERLAND
7045
SOUTH AFRICA
521
PARTICLE THERAPY
PROTON
ION

Terapia hadronowa

Narodowe Centrum Radioterapii Hadronowej

Centrum Cyklotronowe Bronowice (IFJ PAN, Kraków)

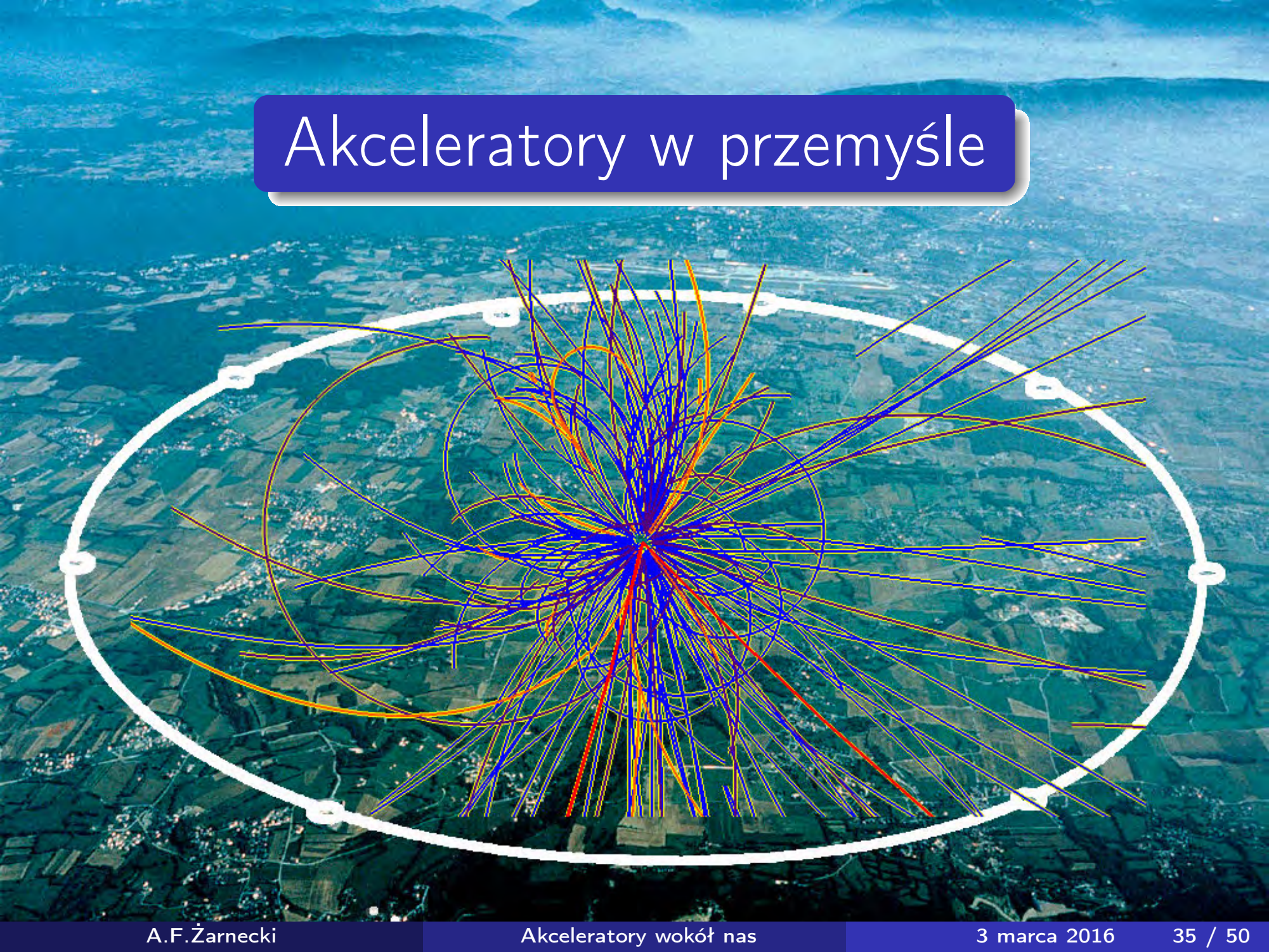
UW Dwa stulecia Dobry początek

Terapia hadronowa

Narodowe Centrum Radioterapii Hadronowej

Centrum Cyklotronowe Bronowice (IFJ PAN, Kraków)

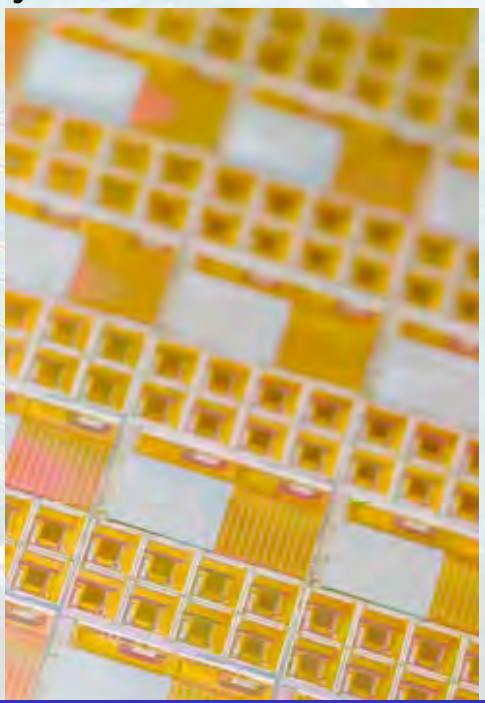
Akceleratory w przemyśle



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.

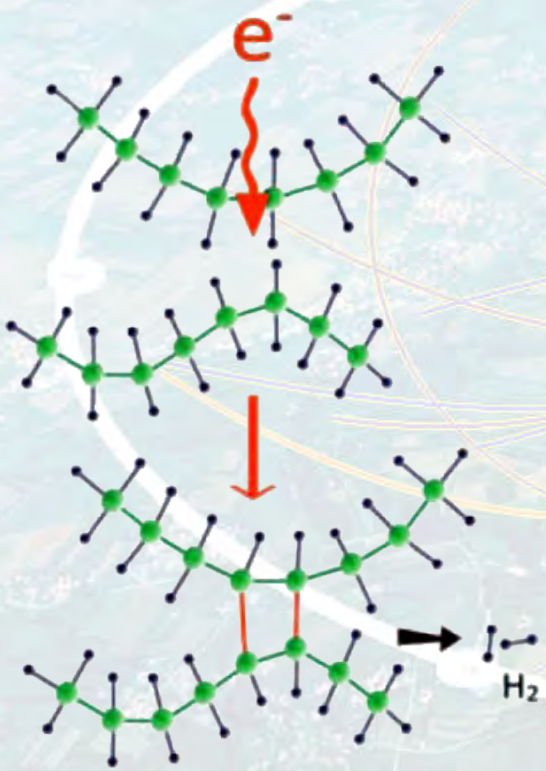
- Półprzewodniki
  - Podstawowa metoda produkcji układów scalonych (typowo ok. 25 etapów implantacji domieszek)
  - Produkcja sensorów CCD i CMOS dla kamer cyfrowych
- Metale
  - Materiały o większej twardości (ostrza)
  - Zmiana struktury powierzchni (mniejsze tarcie)
  - Materiały do zastosowań medycznych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

Naświetlanie wiązką elektronów

Wiązka elektronów może pełnić rolę katalizatora wielu reakcji chemicznych.

"Sieciowanie" polimerów ang. cross-linking

tworzenie trójwymiarowej sieci połączeń między łańcuchami polimerów

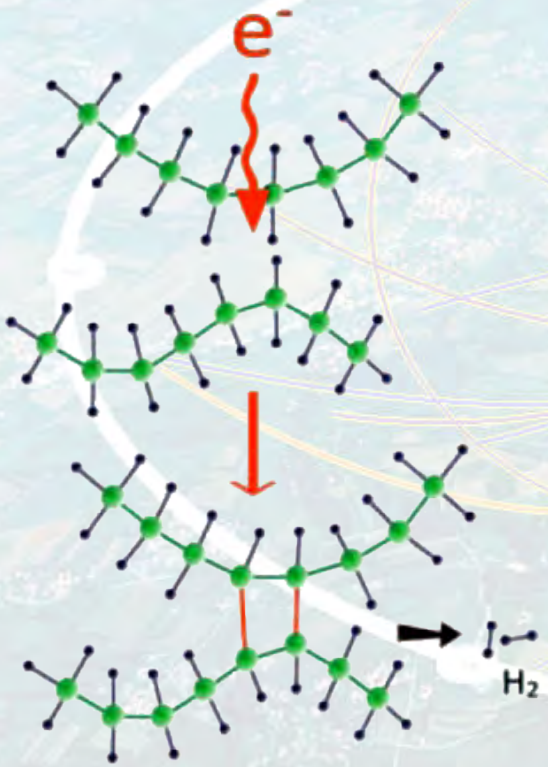


Naświetlanie wiązką elektronów

Wiązka elektronów może pełnić rolę katalizatora wielu reakcji chemicznych.

"Sieciowanie" polimerów ang. cross-linking

tworzenie trójwymiarowej sieci połączeń między łańcuchami polimerów

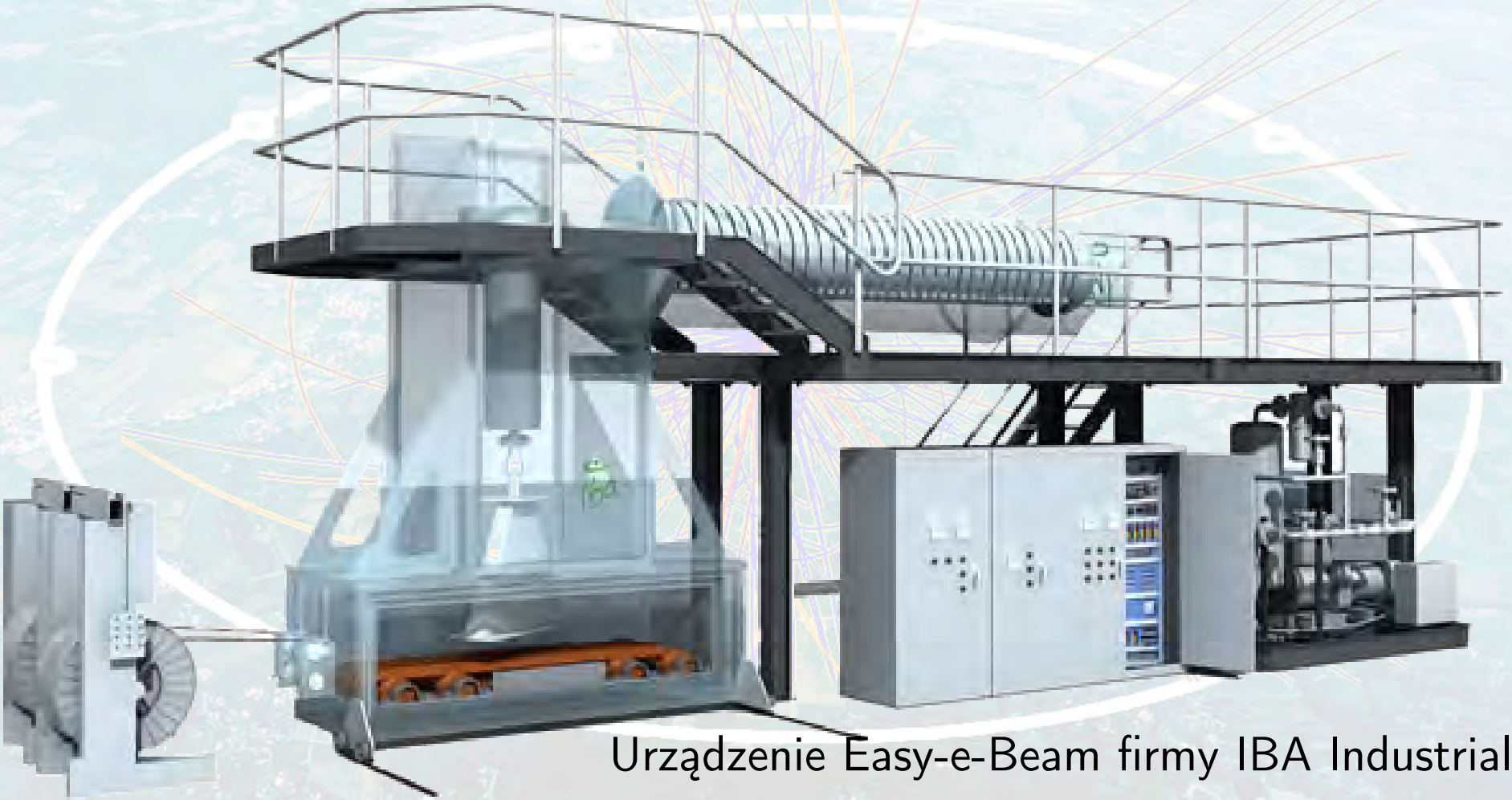


Możemy uzyskać nowe materiały o specjalnych właściwościach

- 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



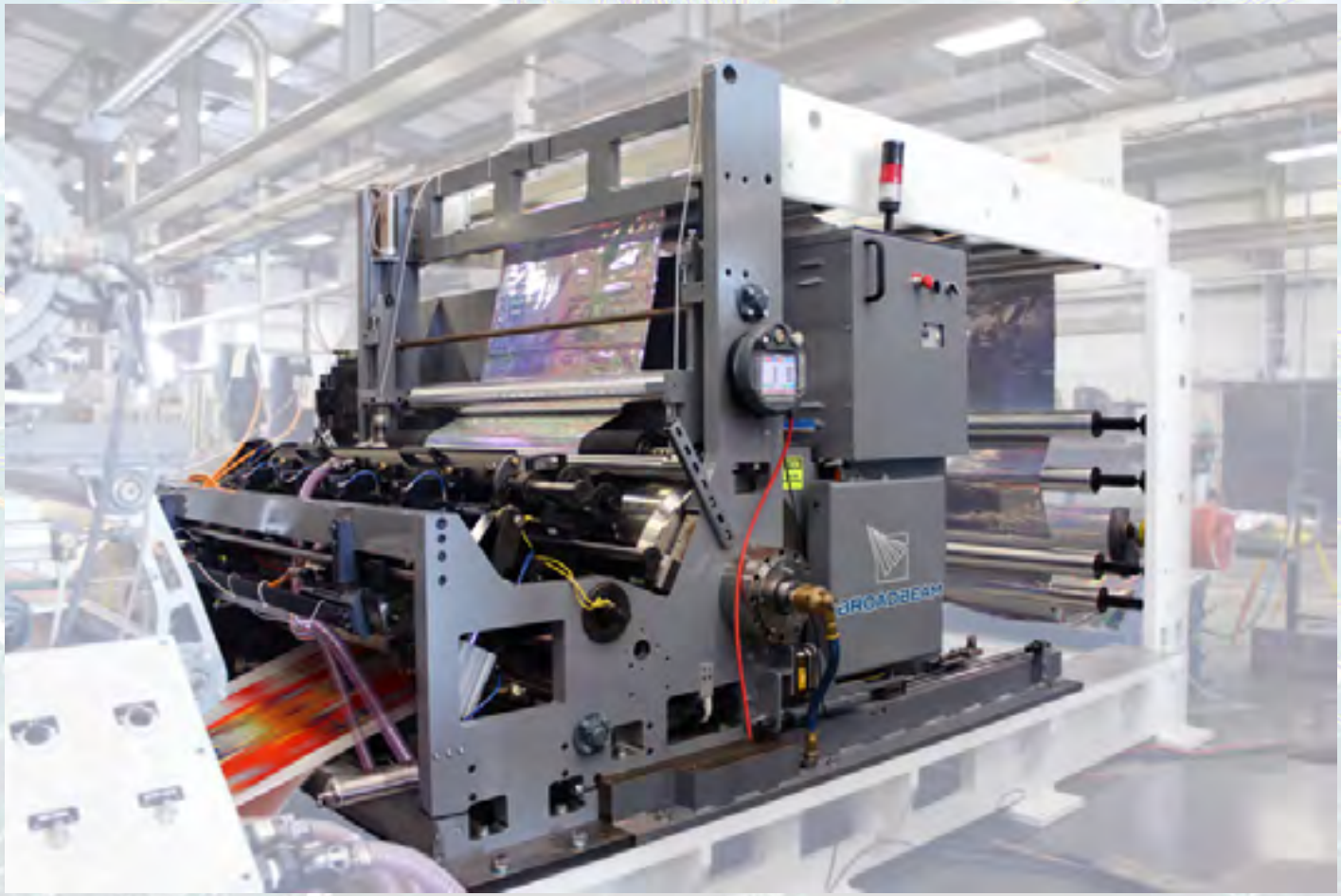
Urządzenie Easy-e-Beam firmy IBA Industrial

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),

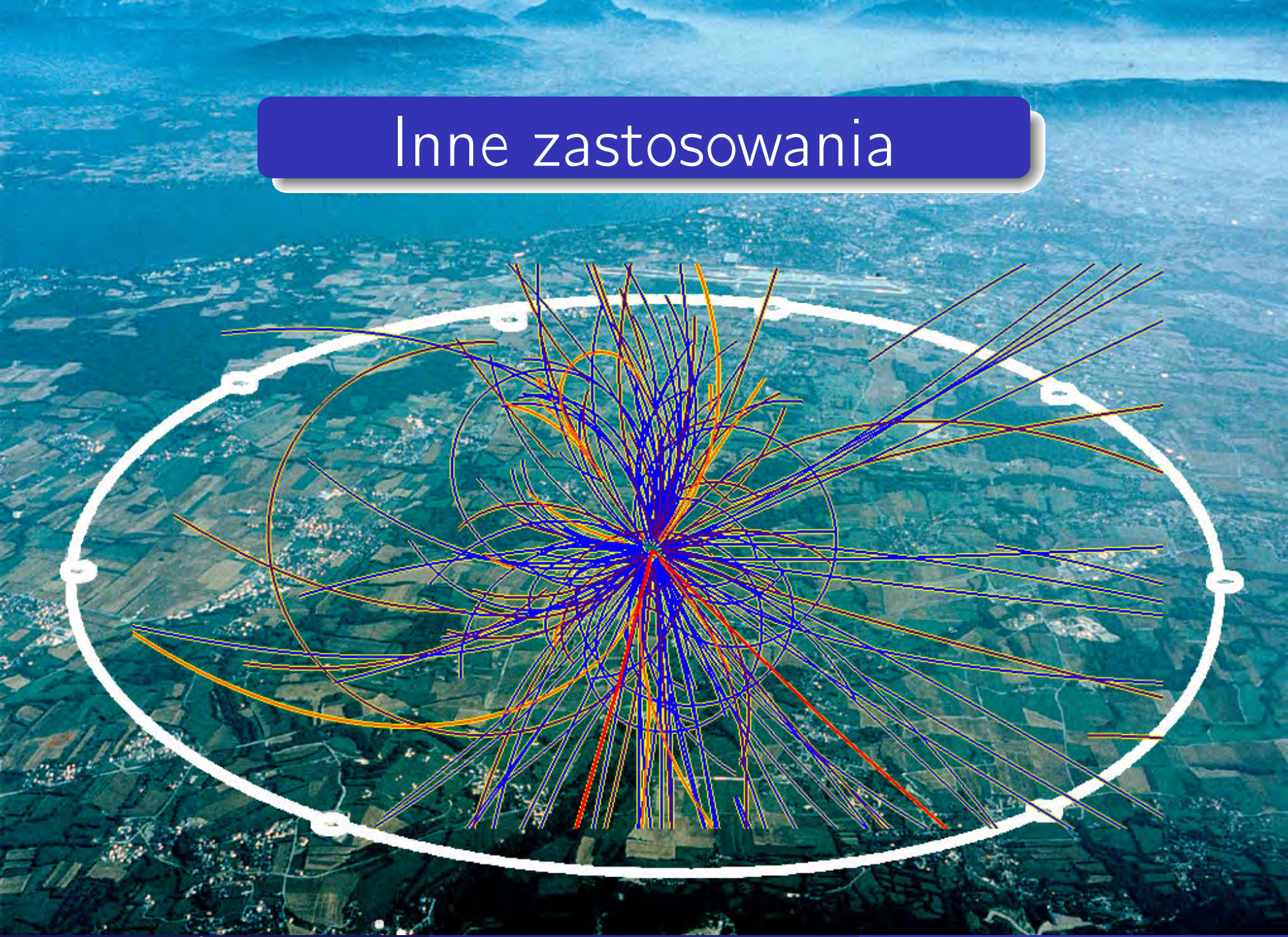
Naświetlanie wiązką elektronów Wykorzystywane też w:

- 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:

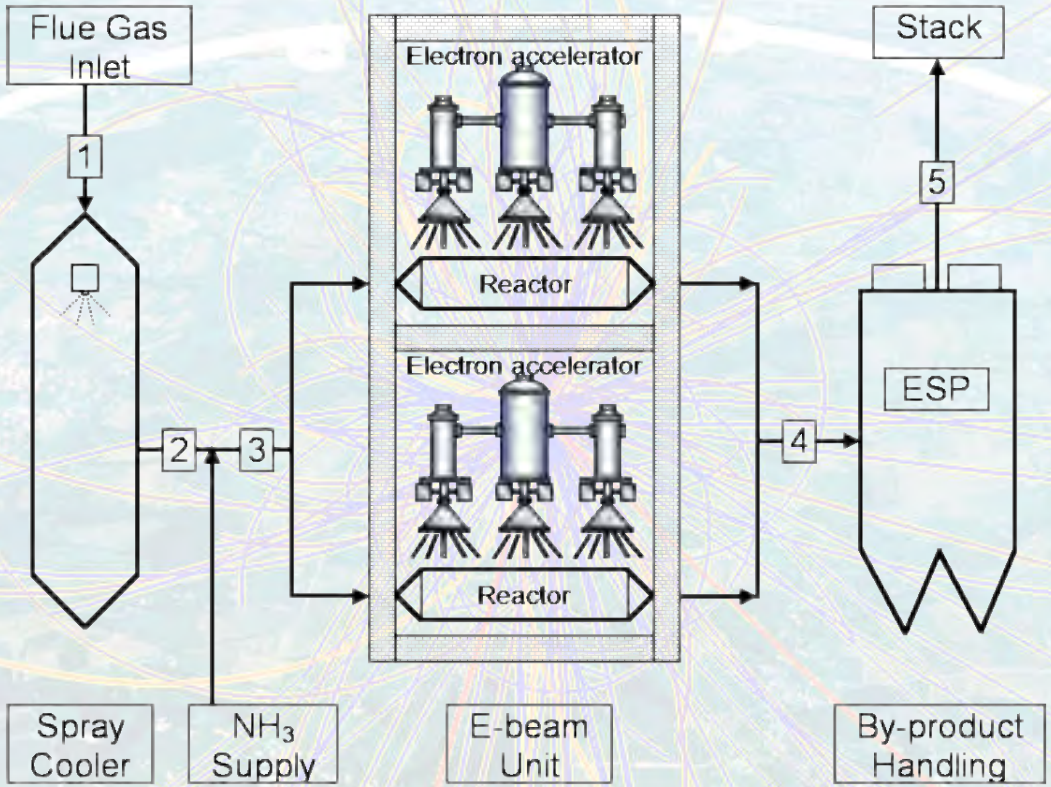
- produkcji termokurczliwych folii do opakowań,
- ekologicznym drukowaniu, lakierowaniu (bez rozpuszczalników),
- produkcji opon (zwiększona przyczepność i wytrzymałość),
- sterylizacji radiologicznej (sprzęt i materiały medyczne, kosmetyki),
- przetwórstwie owocowo-warzywnym (zabijanie owadów, pasożytów),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

Inne zastosowania



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 $\Rightarrow$ produkcja nawozów

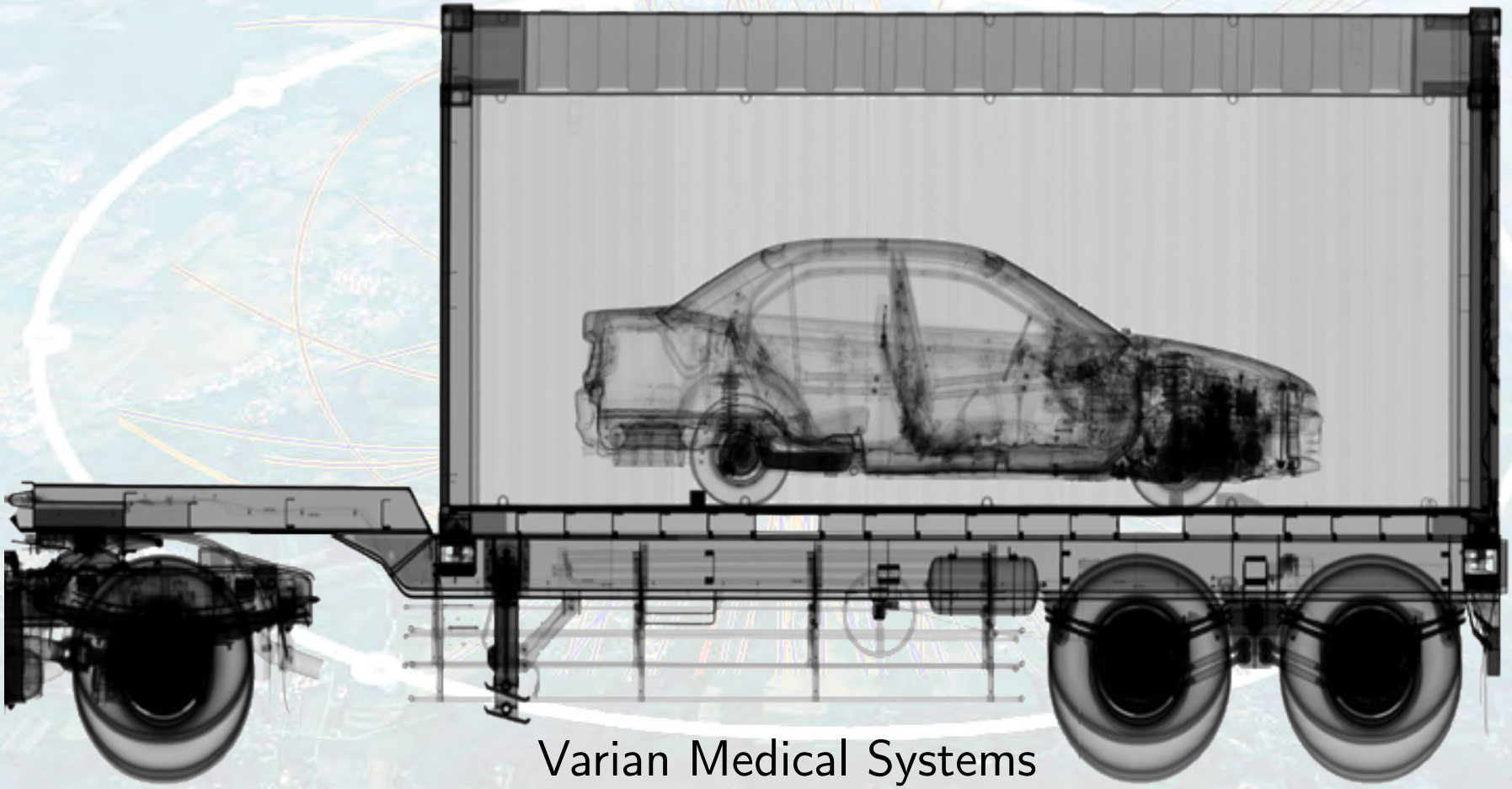
Badania niedestrukcyjne

Indukowana wiązką 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 γ wysokiej energii możemy przeskanować kontener w 30 sekund.



Varian Medical Systems

Wdrożone technologie

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

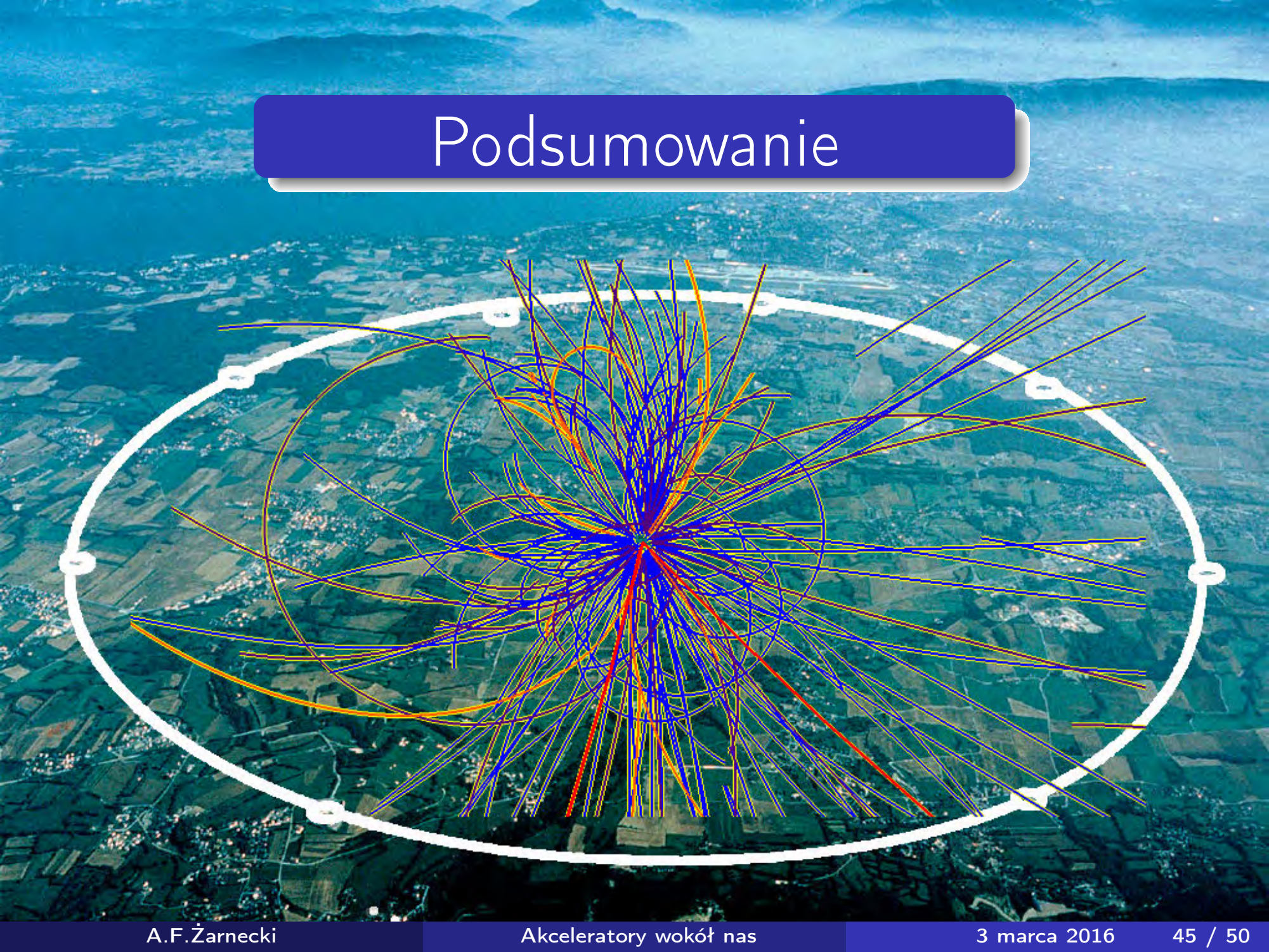
Wdrożone technologie

- 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

Podsumowanie



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

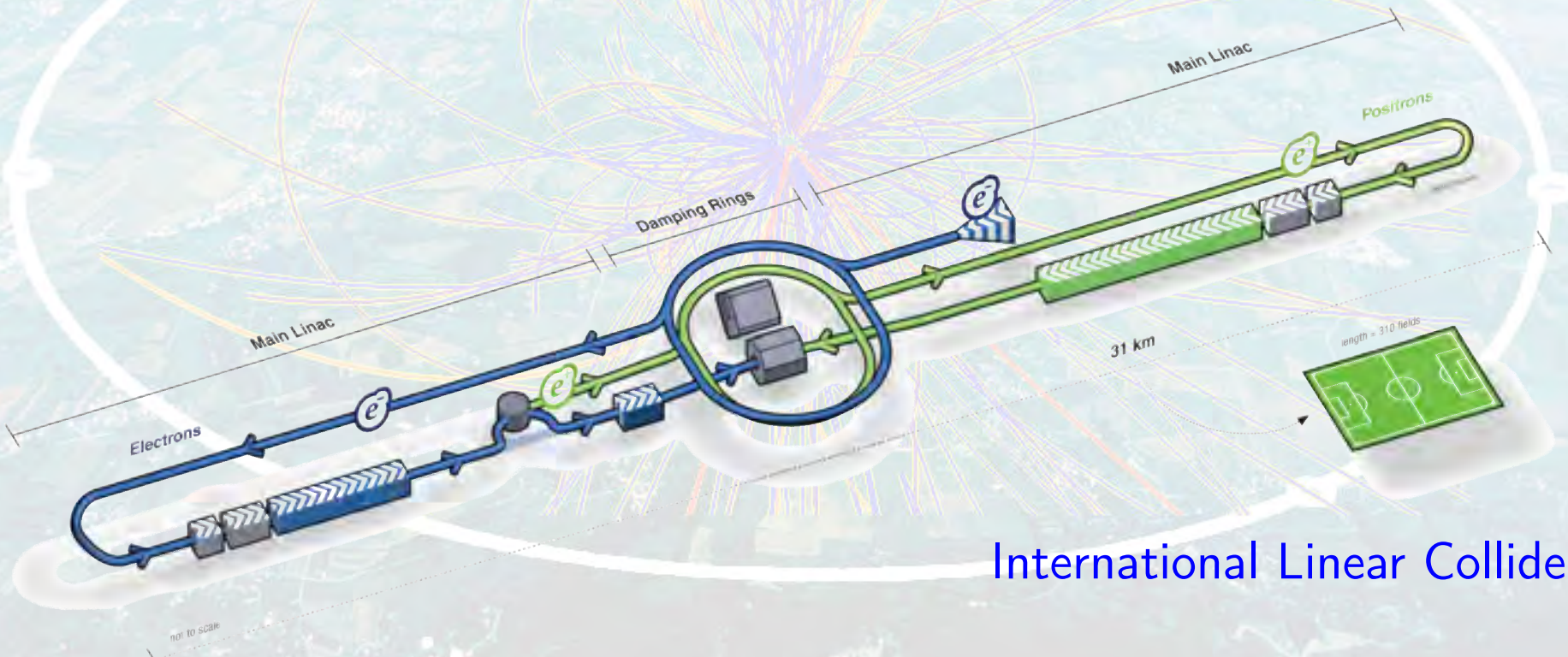
Przemysł

Rocznie wydaje na budowę akceleratorów $ 3 500 000 000
Wartość przetworzonych produktów to rocznie ponad $ 500 000 000 000

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

Dziękuję za uwagę!

Wybrane źródła

- 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/`