



# Wstęp do akceleratorów

Michał Krupa  
CERN

Polish Teacher Programme, 2-7 marca 2025

# Plan prezentacji

- Część pierwsza – podstawy akceleratorów
  - Zasady działania akceleratora
  - Rodzaje akceleratorów
  - Technologie niezbędne do budowy akceleratorów
- Część druga – kompleks akceleratorów w CERNie
  - Przeszłość
  - Teraźniejszość
  - Przyszłość (bliższa i dalsza)

# **Część pierwsza**

## Podstawy akceleratorów

# Czym jest akcelerator cząstek?

- Wysokoenergetyczne cząstki obecne w naturze – promieniowanie kosmiczne
  - Energia nawet 10 milionów razy wyższa niż osiągalna w LHC
  - Bardzo niska gęstość – kilka cząstek / km<sup>2</sup> / rok
- Akcelerator cząstek przyspiesza naładowane elektrycznie cząstki do bardzo wysokich prędkości (energii), formując z nich wiązki o określonych parametrach



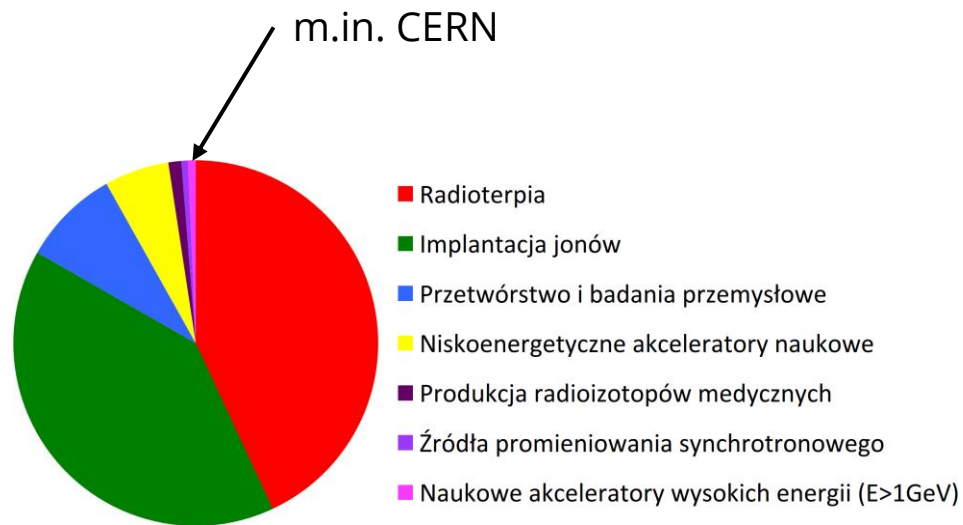
## Podstawowe osie podziału akceleratorów:

- Rodzaj przyspieszanych cząstek: leptony (elektrony, pozytrony, miony), hadrony (protony, antyprotony, cięższe jony)
- Kształt akceleratora: liniowy (skończona długość), kołowy („nieskończona” długość)
- Wykorzystanie przyspieszanych wiązek: oddziaływanie wiązki z materią (nieruchomą), zderzenie dwóch wiązek, eksploatacja promieniowania generowanego przez wiązkę

# Czemu budujemy akceleratory?

„A beam of the right particles with the right energy at the right intensity can **shrink a tumor, produce cleaner energy**, spot suspicious cargo, make a better radial tire, **clean up dirty drinking water**, map a protein, study a nuclear explosion, **design a new drug**, make a heat-resistant automotive cable, **diagnose a disease**, reduce nuclear waste, detect an art forgery, **implant ions in a semiconductor**, prospect for oil, date an archaeological find, package a Thanksgiving turkey or **discover the secrets of the universe.**”

Department of Energy, 2011,  
„Accelerators for America's Future”



35 tysięcy – szacowana liczba akceleratorów na świecie (DOE, 2011)

# Siła Lorentza

- Podstawowy sposób wpływu na ruch cząstek naładowanych elektrycznie:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

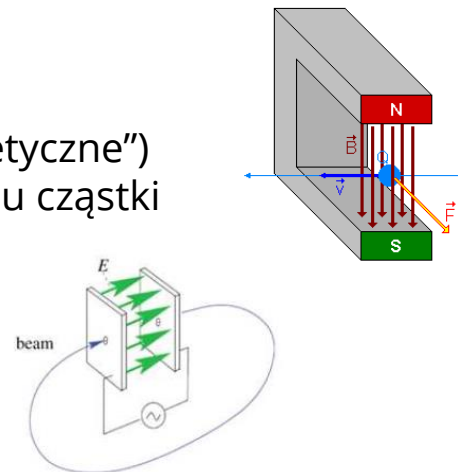


## Pole elektryczne $\mathbf{E}$

Składowa niezależna od kierunku ruchu cząstki  
Zmiana prędkości i kierunku ruchu cząstki

## Indukcja magnetyczna $\mathbf{B}$ („pole magnetyczne”)

Składowa prostopadła od kierunku ruchu cząstki  
Zmiana kierunku ruchu cząstki

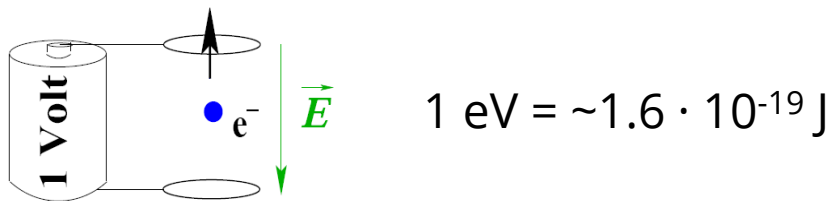


Skala: magnes lodówkowy ( $\sim 10$  mT) wytwarza taką samą siłę Lorentza, co pole elektryczne równe wytrzymałości elektrycznej powietrza (3 MV/m)

- Istota pracy akceleratora cząstek – przyłożenie siły Lorentza o odpowiedniej wartości, w odpowiednim kierunku, w odpowiednim czasie

# Energia i masa cząstek

- Jednostka energii w układzie SI – dżul (J)
- Jednostka energii w świecie cząstek – elektronowolt (eV)



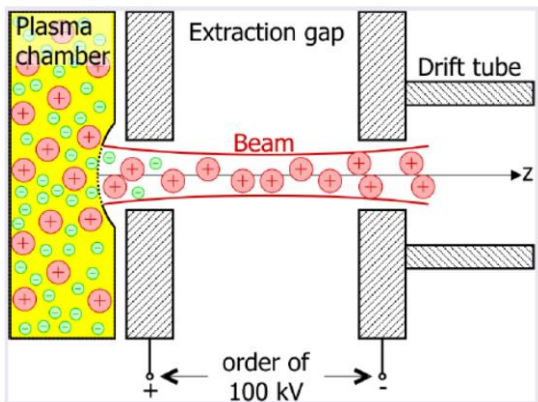
- Jednostka masy w układzie SI – kilogram (kg)
- Jednostka masy w świecie cząstek – elektronowolt/ $c^2$  (eV/ $c^2$ )

Masa elektronu:  $0.511 \text{ MeV}/c^2 = \sim 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

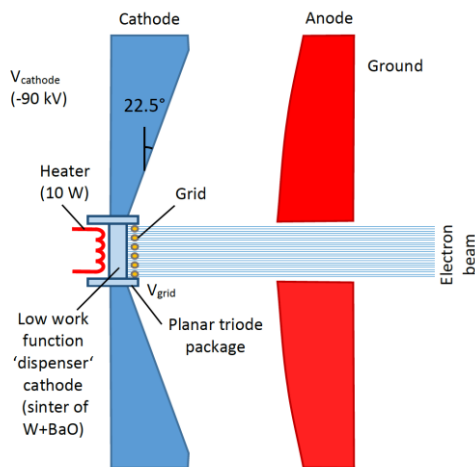
Masa protonu:  $938 \text{ MeV}/c^2 = \sim 2 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

# Źródła cząstek

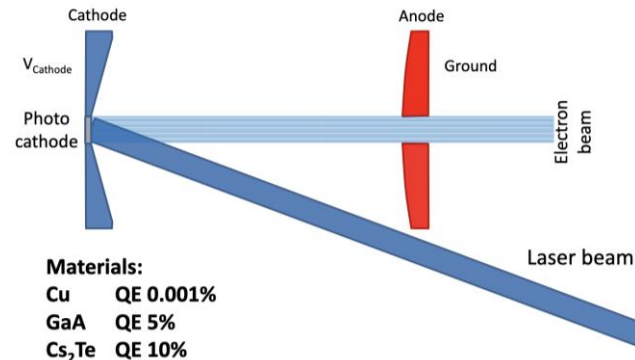
## Protony i jony Plazma



## Elektrony Emisja termoelektronowa

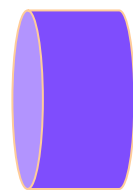


## Elektrony Fotoemisja

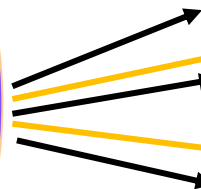


## Antyprotony Akcelerator

protony



Target



antyproton

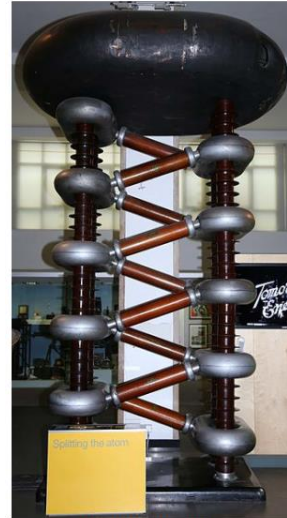
antyproton



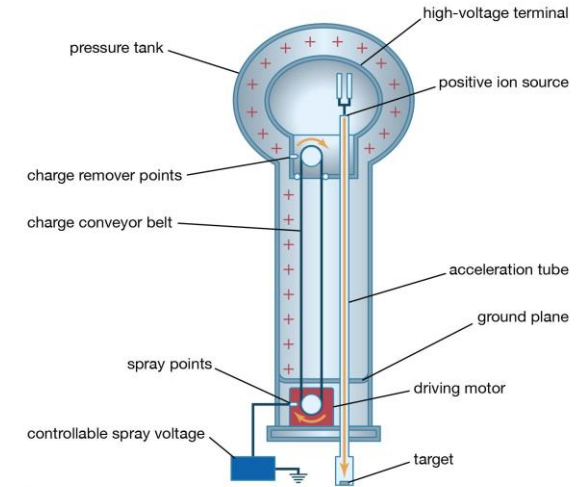
# Akceleratory elektrostatyczne

Cząstki przyspieszane w stałym polu elektrycznym (stałe napięcie)

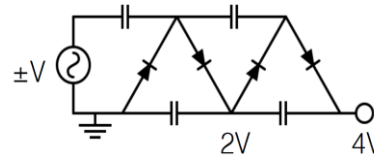
- **Generator Cockcrofta-Waltona:** mnożnik napięcia
  - Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki w 1951 za “przekształcenie jąder atomowych za pomocą sztucznie przyspieszanych cząstek”
- **Generator Van de Graffa:** pas dielektryczny przemieszcza ładunek dodatni do izolowanej elektrody ze źródłem jonów
- Napięcie 2-3 MV w powietrzu, późniejsze wersje z innymi gazami osiągały nawet 25 MV
- Fundamentalne ograniczenie: wyładowania elektryczne



Cockcroft-Walton generator in the London Science Museum - Wikimedia Commons



© Encyclopædia Britannica, Inc.



# Akceleratory liniowe – RF LINAC

Cząstki przyspieszane w linii prostej przez pole elektryczne wysokich częstotliwości (RF, ang. Radio Frequency)

- Generator RF podłączony do serii coraz dłuższych komór – **akceleracja w każdej przerwie pomiędzy komorami**
- Brak wyładowań elektrycznych
- Rozwiązanie pierwotnie zaproponowane przez **Gustava Isinga** w 1924
- Zrealizowany przez **Rolfa Widerøe** w 1928 jako praca dyplomowa na Uniwersytecie Aachen – 50 keV
- Prekursor współczesnych akceleratorów
- Wymaga wiązki podzielonej na „paczki”

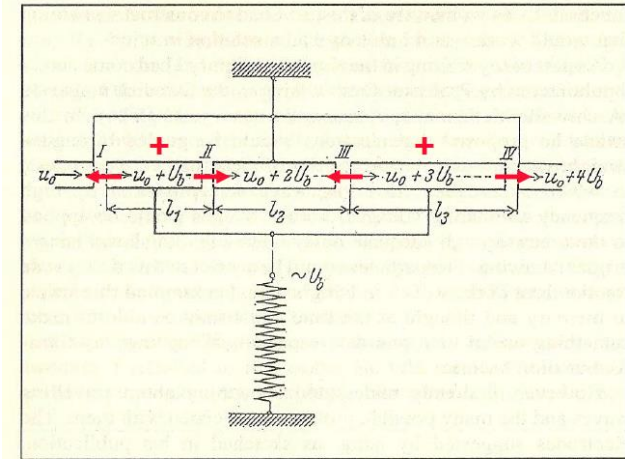
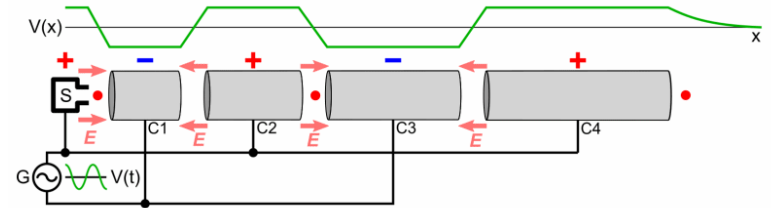
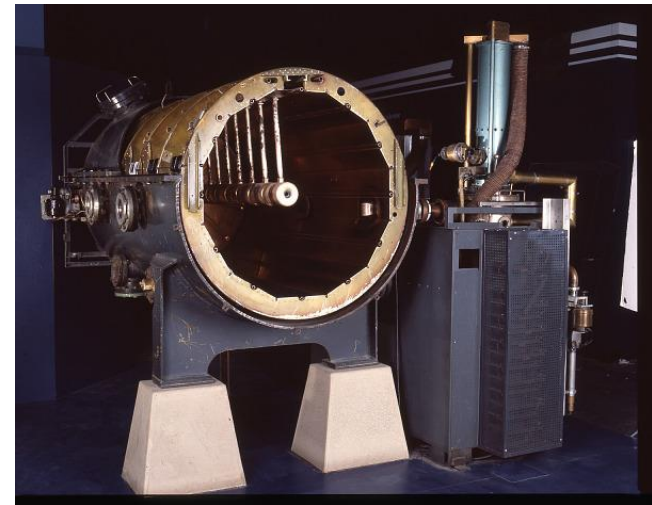
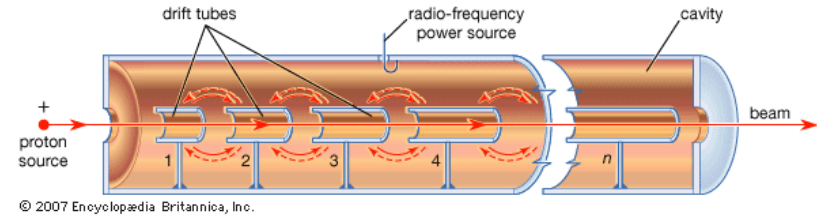


Fig. 3.5: The principle of the 'drift-tube' as illustrated in Widerøe's thesis [Wi28].

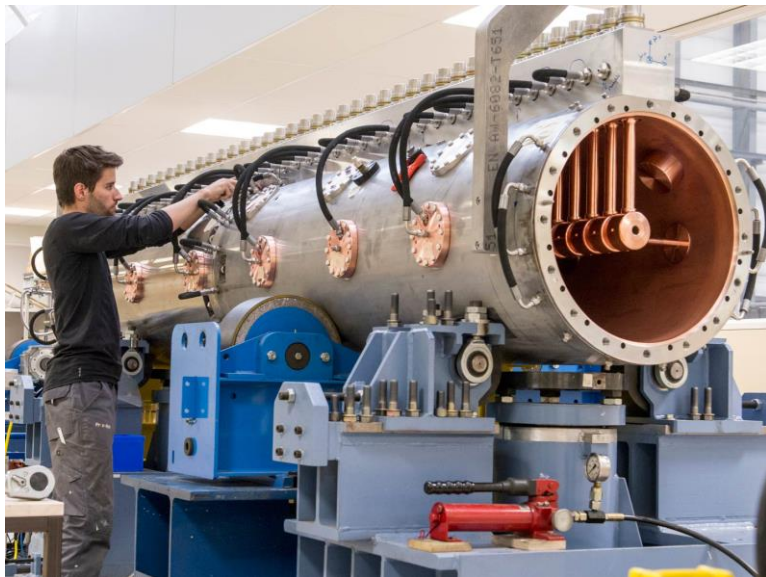
# Akceleratory liniowe – RF LINAC

Cząstki przyspieszane w linii prostej przez pole elektryczne wysokich częstotliwości (RF, ang. Radio Frequency)

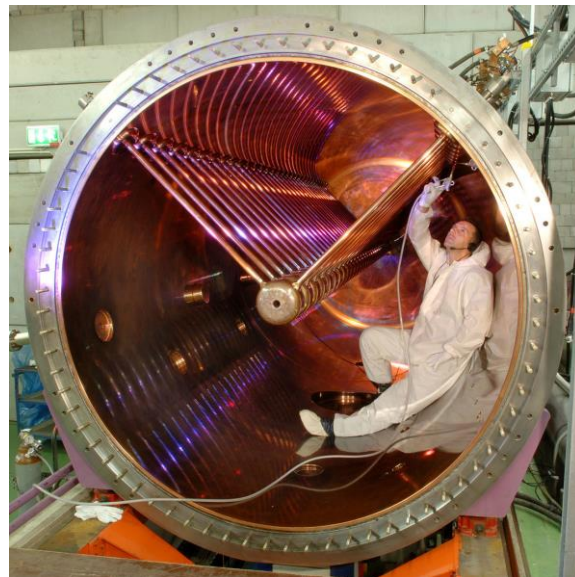
- LINAC skonstruowany jako **wnęka rezonansowa** zasilana przez silne źródło RF (pole elektromagnetyczne)
- Częstotliwość charakterystyczna wnęki odpowiada częstotliwości pola koniecznego do przyspieszania cząstek
- Generowanie silnego pola elektromagnetycznego przez klistrony
- Rozwiązanie zademonstrowane przez **Luisa Alvareza** w 1947 – 32 MeV



# Akceleratory liniowe - RF LINAC



CERN (2020)

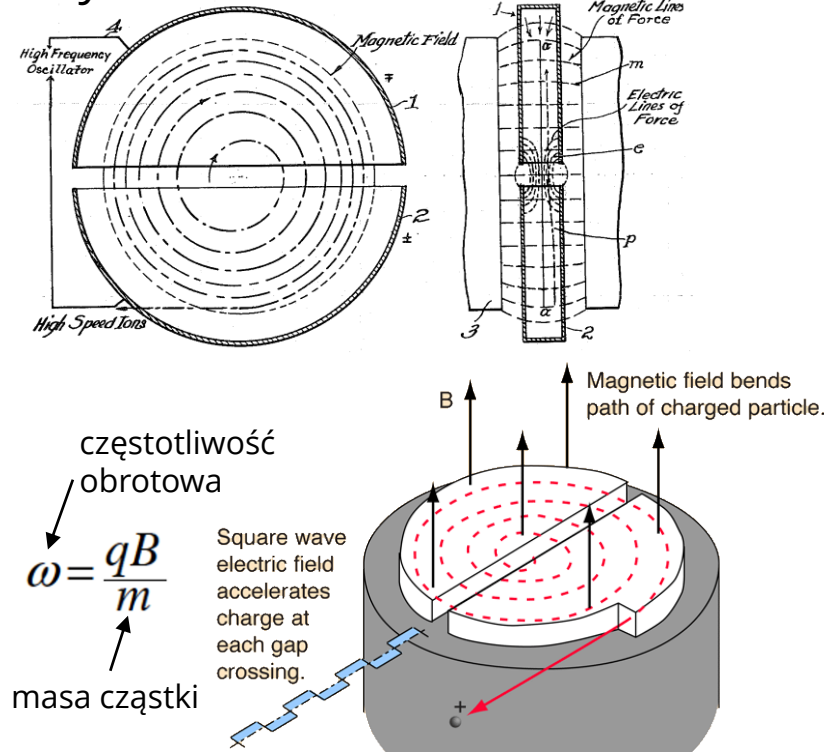


GSI (1991)

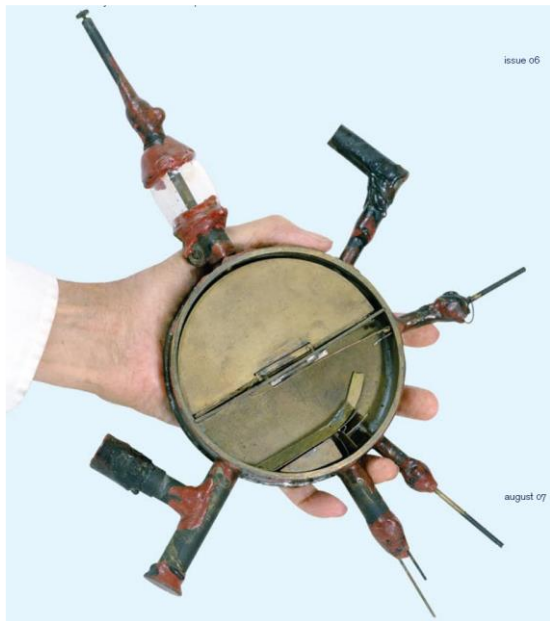
# Akceleratory kołowe - Cyklotron

Cząstki poruszające się po zakrzywionym torze z coraz większym promieniem i są przyspieszane wielokrotnie przez pole elektryczne RF

- **Generator RF o stałej częstotliwości** podłączony do dwóch półkul tworzących akcelerator
- **Stale pole magnetyczne** spiralnie zakrzywia ruch cząstek
  - Cząstki poruszają się po coraz większym promieniu, ale mają coraz większą prędkość – stała częstotliwość obrotowa = stała częstotliwość RF
  - To samo pole przyspieszające jest użyte wiele razy
- Pierwszy cyklotron (średnica 10 cm) zbudowany przez **Ernesta Lawrence'a** w 1931 – 80 keV



# Akceleratory kołowe - Cyklotron



Ernest Lawrence (1931)



PSI (1974) – 590 MeV



RIKEN (2006) – 400 MeV/u

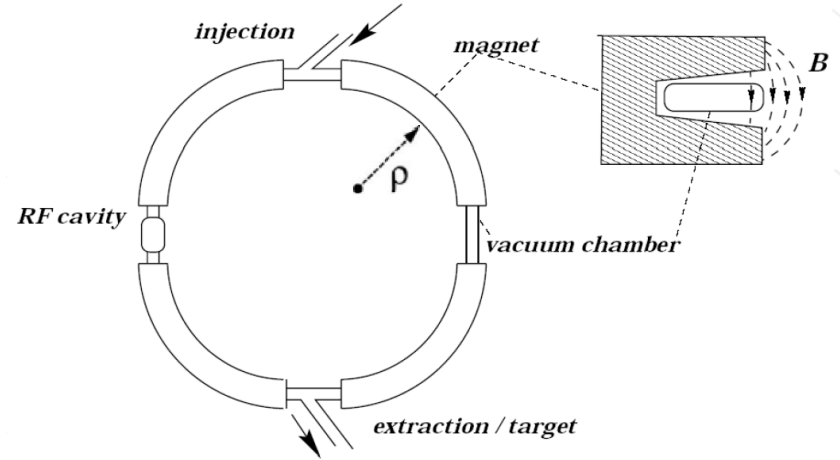


Centrum Cyklotronowe  
Bronowice (2012) – 230 MeV

# Akceleratory kołowe – Synchrotron

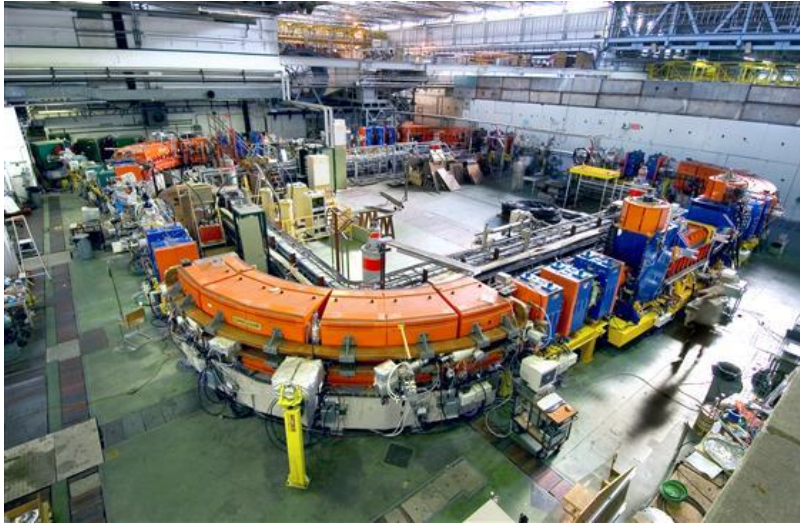
Cząstki poruszające się po zakrzywionym torze ze stałym promieniem i przyspieszane wielokrotnie przez pole elektryczne RF

- Wiązka jest **przyspieszana przez wnękę rezonansową RF** dostrojoną do częstotliwości jednego obrotu wiązki wokół akceleratora
- Wiązka jest **zakrzywiana przez magnesy dipolowe** z polem magnetycznym dostosowanym do bieżącej energii wiązki
- Wymaga **precyzyjnej kontroli i synchronizacji** pól przyspieszających i zakrzywiających ruch
- Zakres kontroli pola magnetycznego definiuje zakres możliwych energii
- Pozwala na utrzymywanie wiązki w akceleratorze „nieskończenie” długo



Promień krzywizny ruchu cząstki  $\rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{qB}{p}$  Pole magnesu dipolowego  $\leftarrow$  Pęd cząstki

# Akceleratory kołowe – Synchrotron



LEIR (2005) – 72 MeV/u

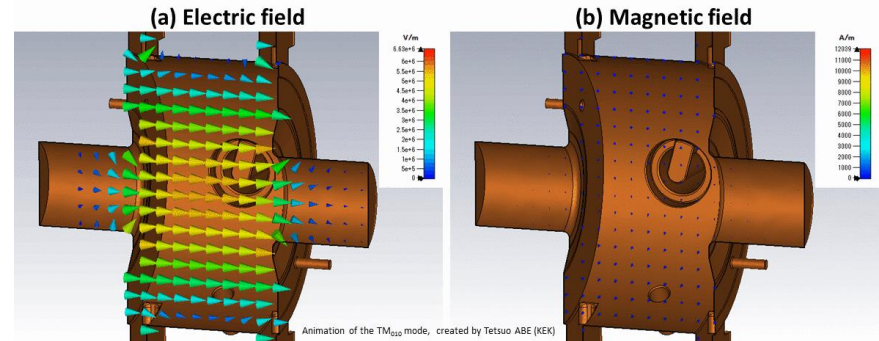
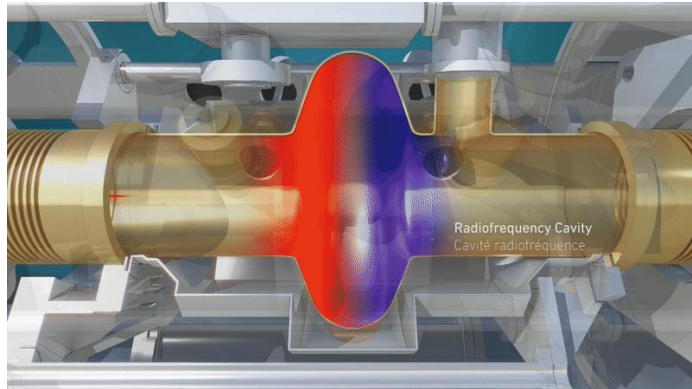
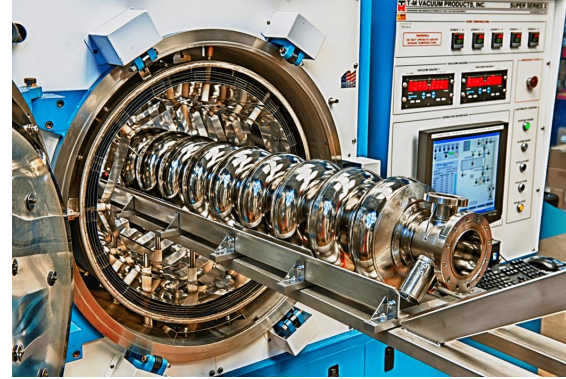
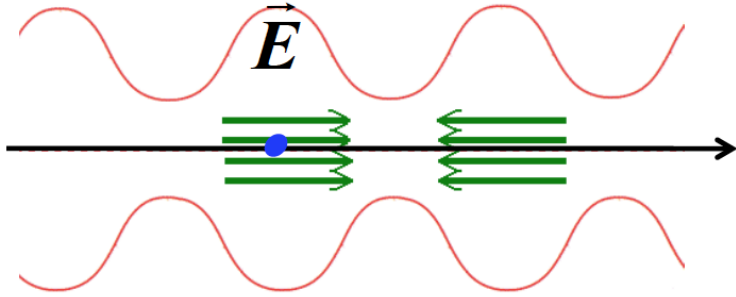


LHC (2010) – 7 TeV



# Wnęki rezonansowe RF

Akceleracja wymaga ekstremalnie precyzyjnej synchronizacji pola przyspieszającego i wiązki



# Magnesy dipolowe

- **Konwencjonalne magnesy ferrytowe:**

- Rdzeń ferrytowy skupia pole magnetyczne
- Umiarkowane natężenia prądu – straty omowe w uzwojeniu magnesu
- Rdzenie nasycają się przy polu ok. 2 T: osiągnięcie wysokiej energii cząstek wymaga ogromnego synchrotronu

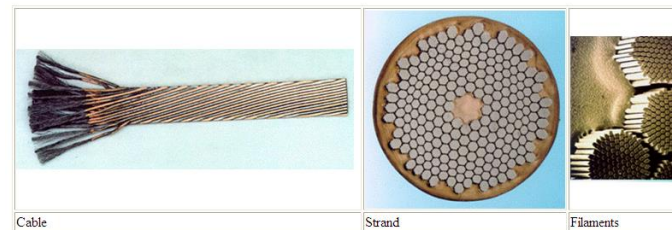
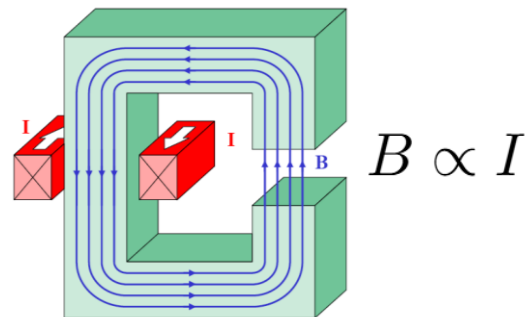
- **Magnesy nadprzewodzące:**

- Bardzo wysokie natężenie prądu (brak strat omowych) pozwala na generację bardzo wysokich pól magnetycznych
- Wymagają chłodzenia uzwojenia prawie do absolutnego zera

Promień krzywizny ruchu cząstki  $\rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{qB}{p}$

Pole magnesu dipolowego  $\leftarrow$

Pęd cząstki  $\leftarrow$

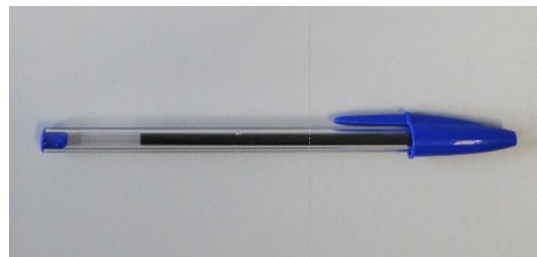
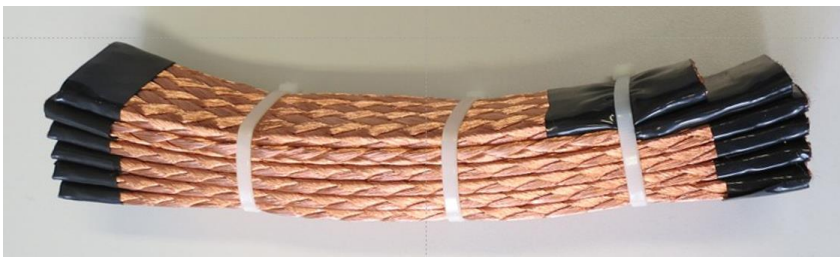


# Uzwojenia nadprzewodzące

- „Standardowy” kabel do zastosowań domowych – 13 A w temperaturze pokojowej



- Przemysłowy oplot miedziany – 13000 A w temperaturze pokojowej

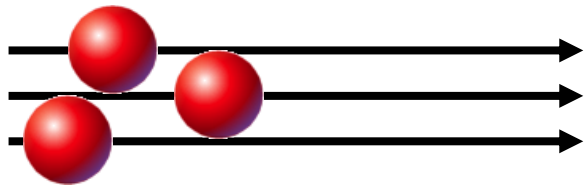


- Kabel nadprzewodzący – 13000 A w temperaturze  $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$

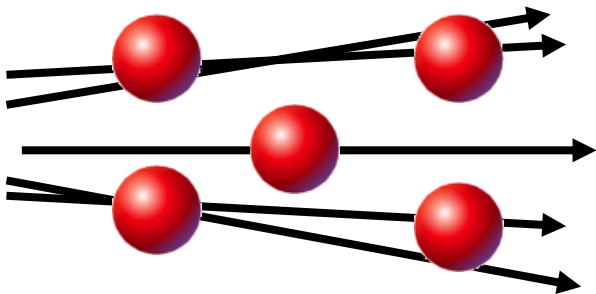


# Ruch cząstek w akceleratorze

- W „idealnym” akceleratorze wszystkie cząstki poruszają się laminarnie – do sterowania ruchem wiązki wystarczyłyby magnesy dipolowe



- W prawdziwym akceleratorze cząstki poruszają się w (odrobinę) różnych kierunkach – sterowanie wiązką w akceleratorze wymaga użycia również innych rodzajów magnesów

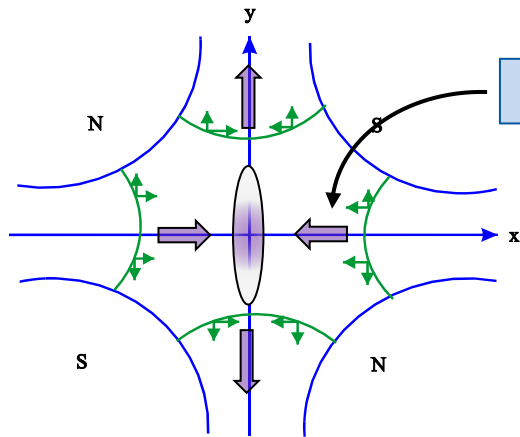


Źródła rozpraszające wiązkę:

- Nieprecyzyjne wstrzyknięcie wiązki do akceleratora
- Oddziaływania międzycząsteczkowe
- Oddziaływania z gazem reszkowym / materią

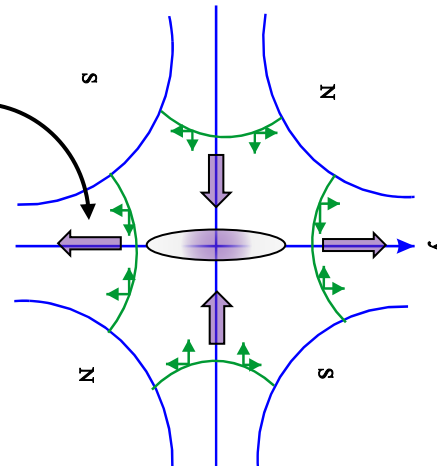
# Magnesy kwadrupolowe

- Magnetyczny odpowiednik soczewki, która skupia wiązkę w jednej płaszczyźnie kosztem rozproszenia jej w prostopadłej płaszczyźnie



Kierunek siły Lorentza

QF - Kwadrupol ogniskujący horyzontalnie

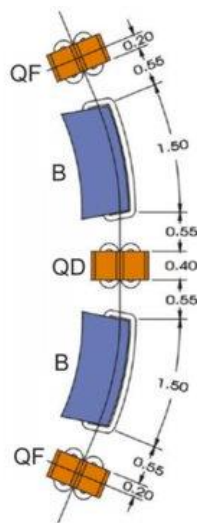
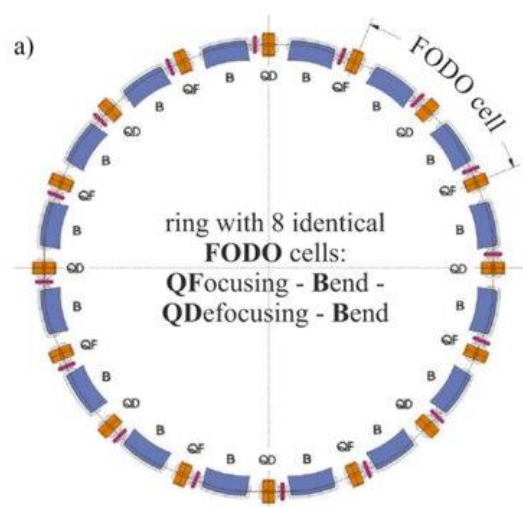


QD - Kwadrupol ogniskujący wertykalnie

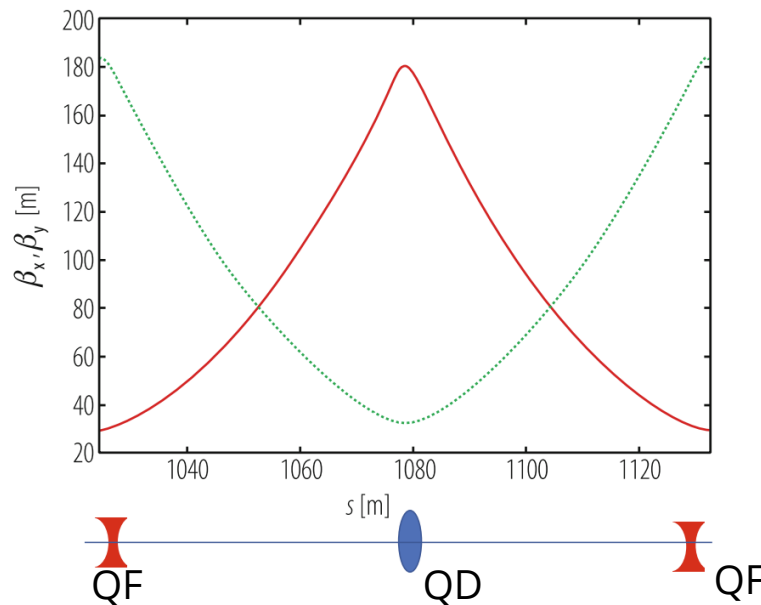
Obrót o 90°

# Magnesy kwadropolowe

- Wiązka jest naprzemiennie skupiana i rozpraszana w każdej z płaszczyzn
- Prowadzi to do oscylacji rozmiaru i pozycji wiązki w częstotliwości charakterystycznej dla danych ustawień akceleratora, tzw. strój (ang. tune)

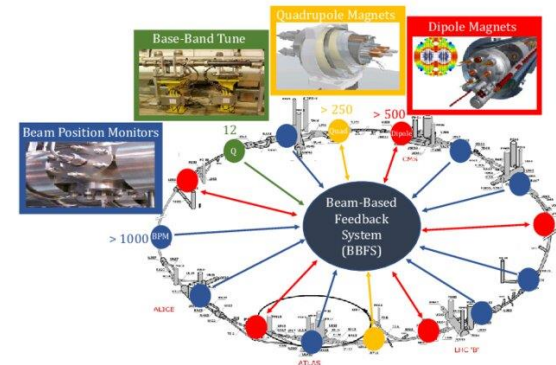
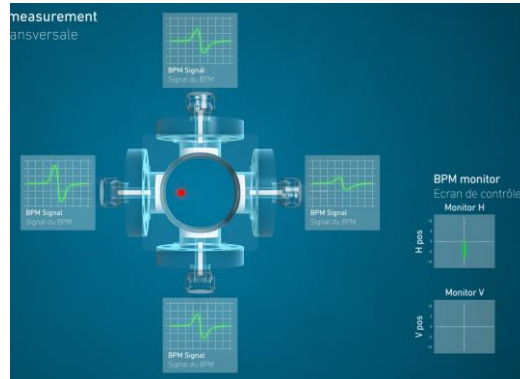
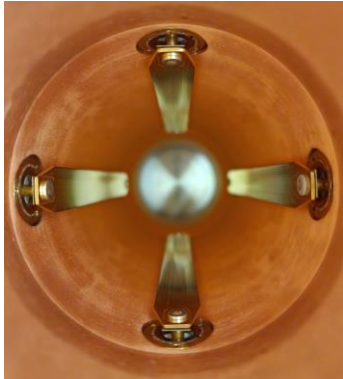


$\propto$  amplituda oscylacji  
(rozmiar i pozycja)



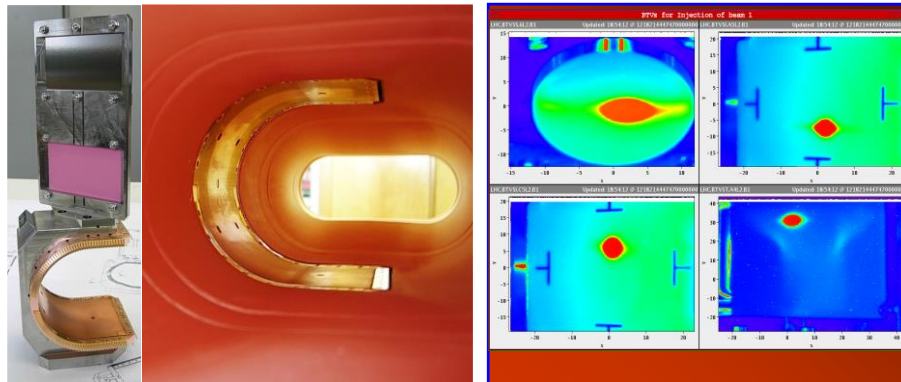
# Diagnostyka wiązki

- Wydajna i bezpieczna praca akceleratora wymaga ciągłego monitorowania i kontrolowania parametrów wiązki
- Systemy diagnostyki wiązki pozwalają na obserwowanie wiązki i jej parametrów – „oczy” operatorów akceleratorów
- Podstawa pracy większości synchrotronów – obserwacja i kontrola trajektorii ruchu wiązki
  - Monitory pozycji wiązki, często działające w systemie sprzężenia zwrotnego z magnesami dipolowymi



# Scyntyłacja

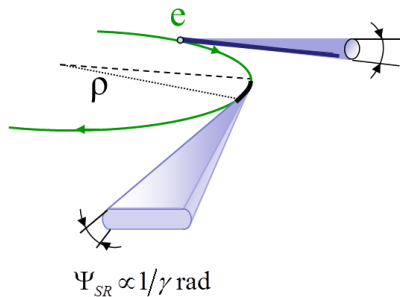
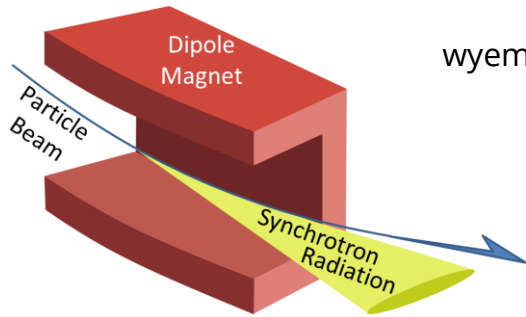
- Interakcja wiązki cząstek z ekranem prowadzi do emisji światła
- Bezpośredni i rzetelny sposób obserwacji przekroju poprzecznego i pozycji wiązki
  - W żargonie CERNu często nazywane „beam TV”
- Ekrany wpływają negatywnie na jakość wiązki, lub wiązka wpływa negatywnie na ekran, ale działają nawet z wiązkami o małej liczbie cząstek





# Promieniowanie synchrotronowe

- Zakrzywanie toru ruchu naładowanych cząstek prowadzi do emisji wysokoenergetycznych fotonów – **promieniowanie synchrotronowe**
  - Potężne narzędzie diagnostyczne, dostępne „za darmo”



wyemitowana moc

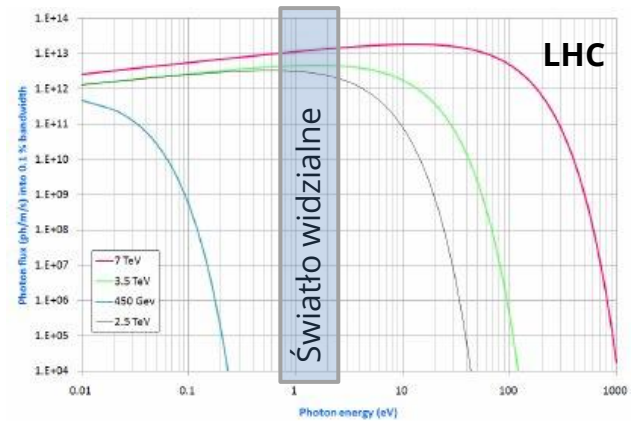
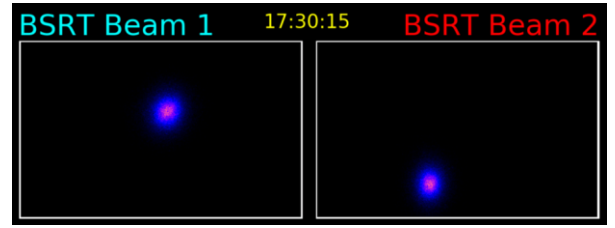
$$P_\gamma = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{q^2 c}{\rho^2} \gamma^4$$

relatywistyczna gamma

promień zakrzywienia ruchu

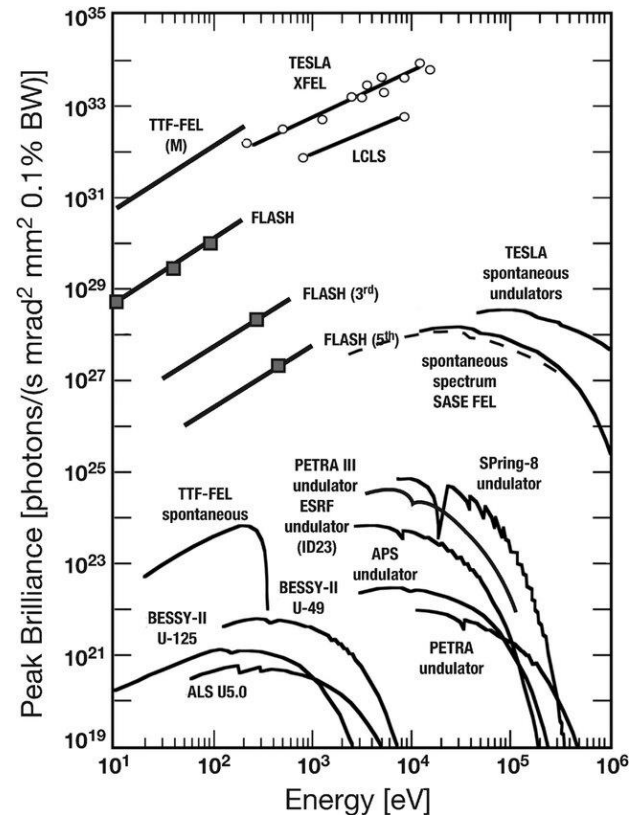
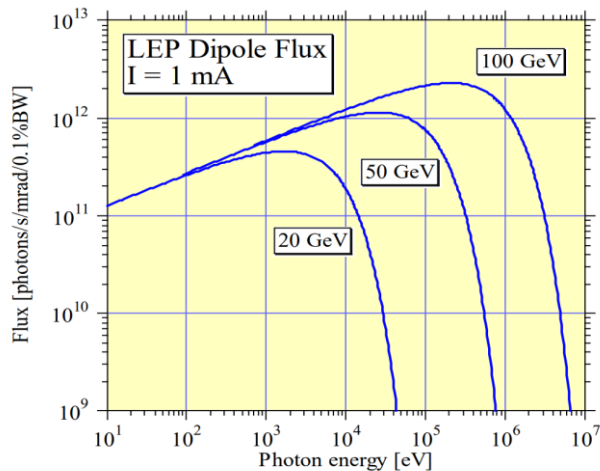
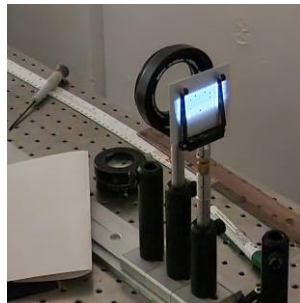
częstotliwość krytyczna

$$\omega_c = 3\gamma^3 \frac{c}{2\rho}$$



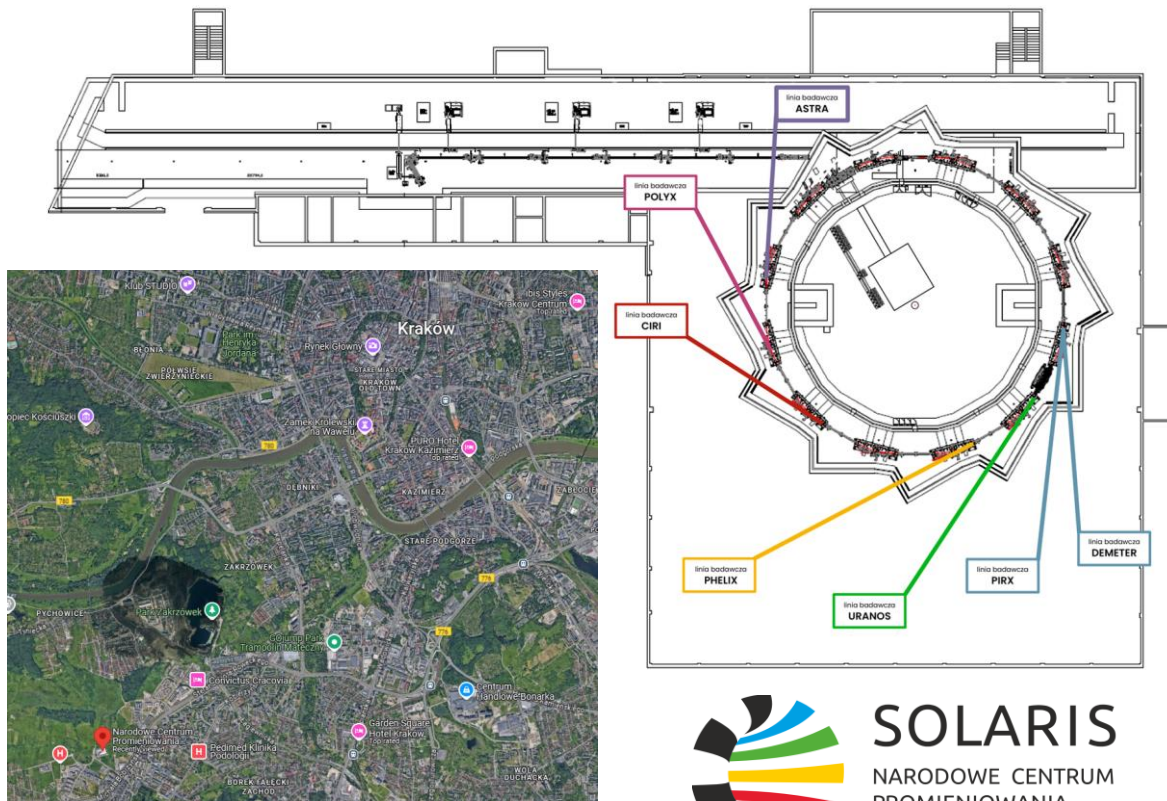
# Źródła promieniowania (światła) synchrotronowego

- Akceleratory budowane specjalnie w celu produkcji i eksploatacji promieniowania synchrotronowego



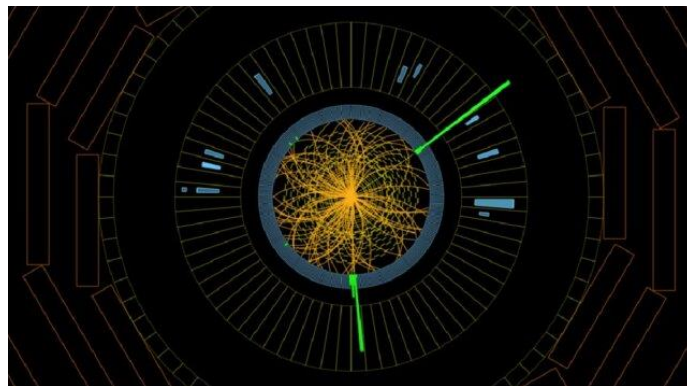
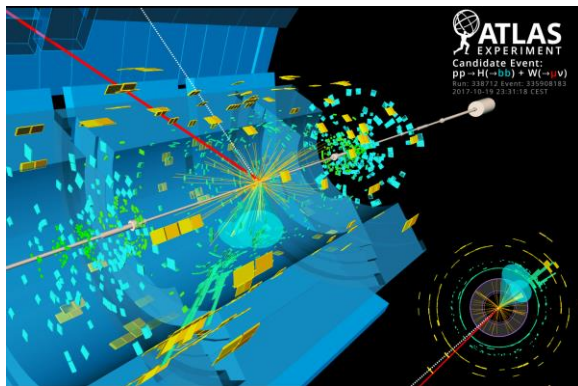
# SOLARIS – Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego

- Unikalne źródło promieniowania synchrotronowego w Europie Centralnej
- Otwarte w 2015 roku z 2 liniami pomiarowymi
- Obecnie 7 linii pomiarowych w użyciu
- 2 linie pomiarowe w konstrukcji



# Zderzacze cząstek

- Zderzenie dwóch wysokoenergetycznych cząstek pozwala na stworzenie nowej materii,  $E = mc^2$ 
  - Znacznie wyższa energia niż przy zderzeniu cząstki z nieruchomym celem
- Częstotliwość produkcji konkretnej cząstki jest proporcjonalna do:
  - Prawdopodobieństwa jej produkcji – definiowane przez prawa fizyki
  - Energii i liczby kolizji na sekundę – definiowane przez akcelerator



Każda paczka cząstek w LHC składa się z około 100 miliardów cząstek

W trakcie jednego przelotu paczki przez paczkę dochodzi do około 50 zderzeń

# Zderzacze cząstek

- Świetlność – wydajność zderzacza

Liczba cząstek w paczce  
Wiązka 1 i 2

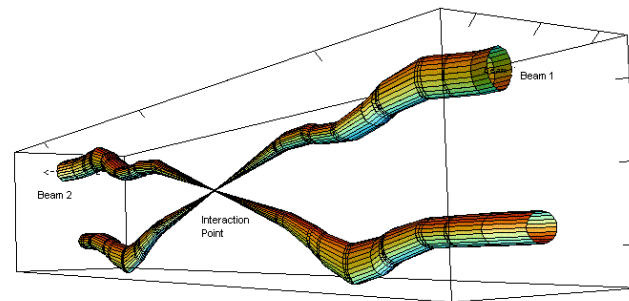
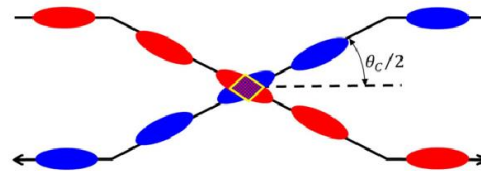
Częstotliwość z jaką przeciwbieżne  
paczki przez siebie przelatują

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f N_b}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot S$$

Korekcja geometryczna [0, 1)  
Zderzenia nie są czołowe

Wielkość wiązki w miejscu zderzenia  
W płaszczyźnie x i y

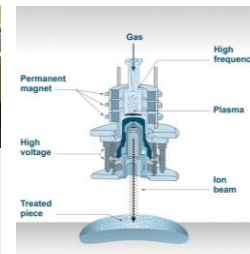
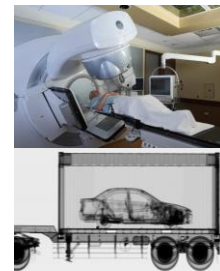
- Optymalny zderzacz – gęste (silnie zogniskowane) wiązki zderzające się pod małym kątem
- Duża częstotliwość zderzeń = ekstremalnie wysokie wymagania obliczeniowe



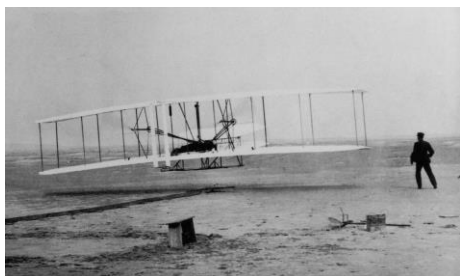
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

# Koniec części pierwszej

Czemu rozwijamy akceleratory?



Ok. 90 lat



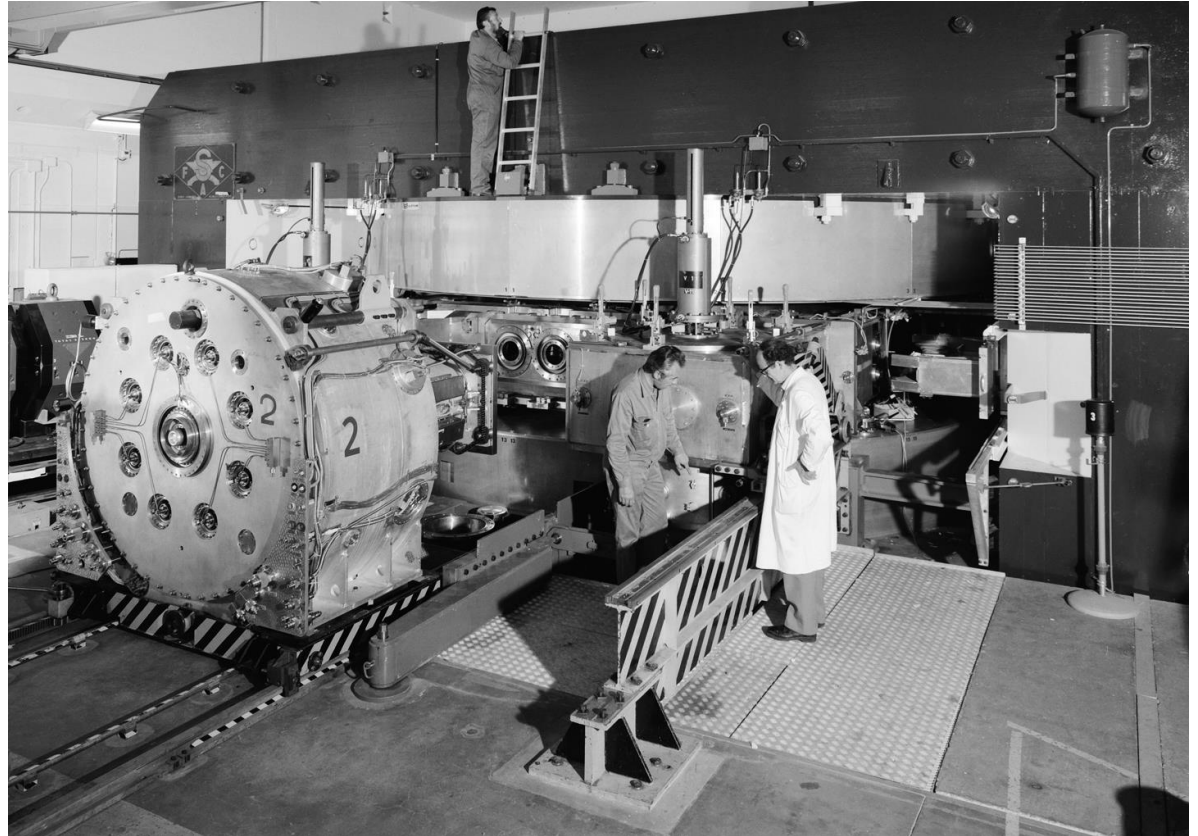
Wstęp do akceleratorów

# **Część druga**

## Kompleks akceleratorów w CERNie

# Początki: Synchrocyclotron (SC)

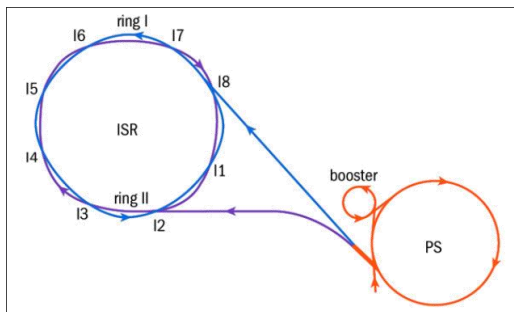
- 1957 – pierwszy akcelerator w CERNie
- 600 MeV
- 1958 – pierwsze istotne odkrycia fizyczne w CERNie: rozpad pionów
- 1967–1990 – źródło dla ISOLDE





# Początki: Intersecting Storage Rings (ISR)

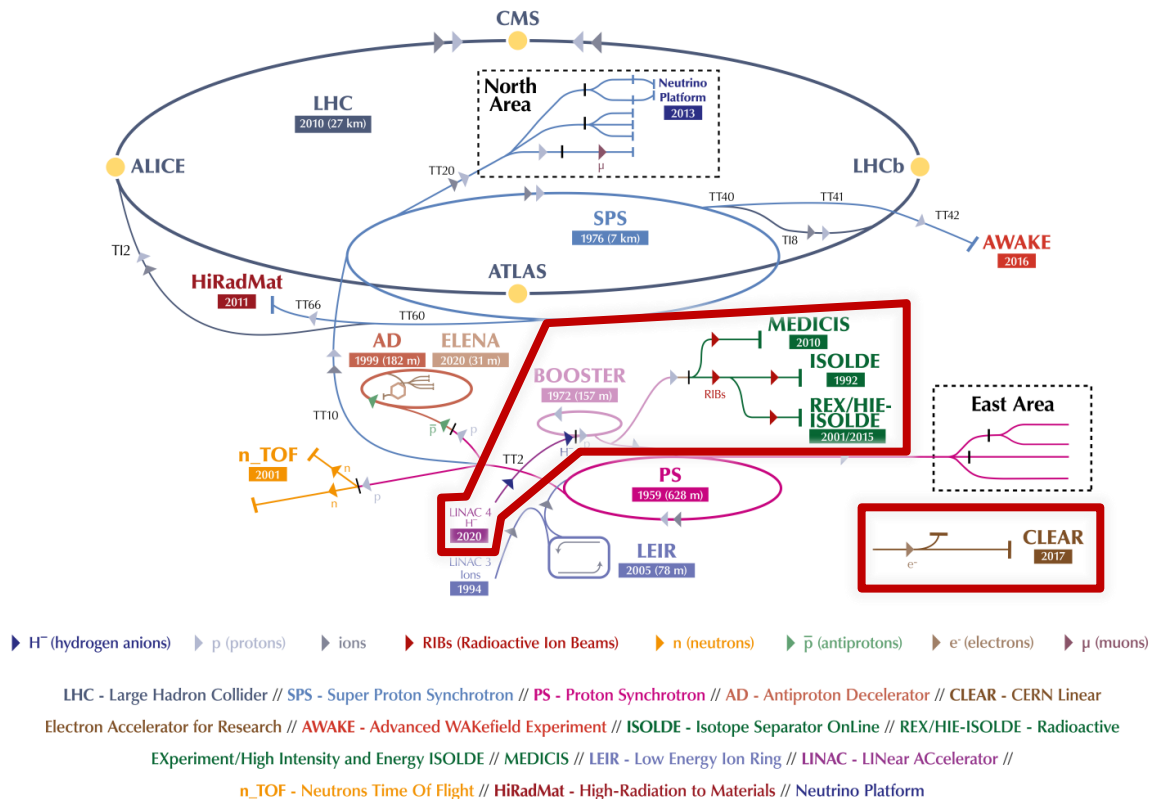
- 1971 – pierwszy zderzacz hadronów na świecie
- Protony – antyprotony
- Energia zderzeń: 62 GeV (2 x 31 GeV)
- 1984 – koniec operacji
- Światowy rekord świetlności aż do 2004



# Obecny kompleks akceleratorów

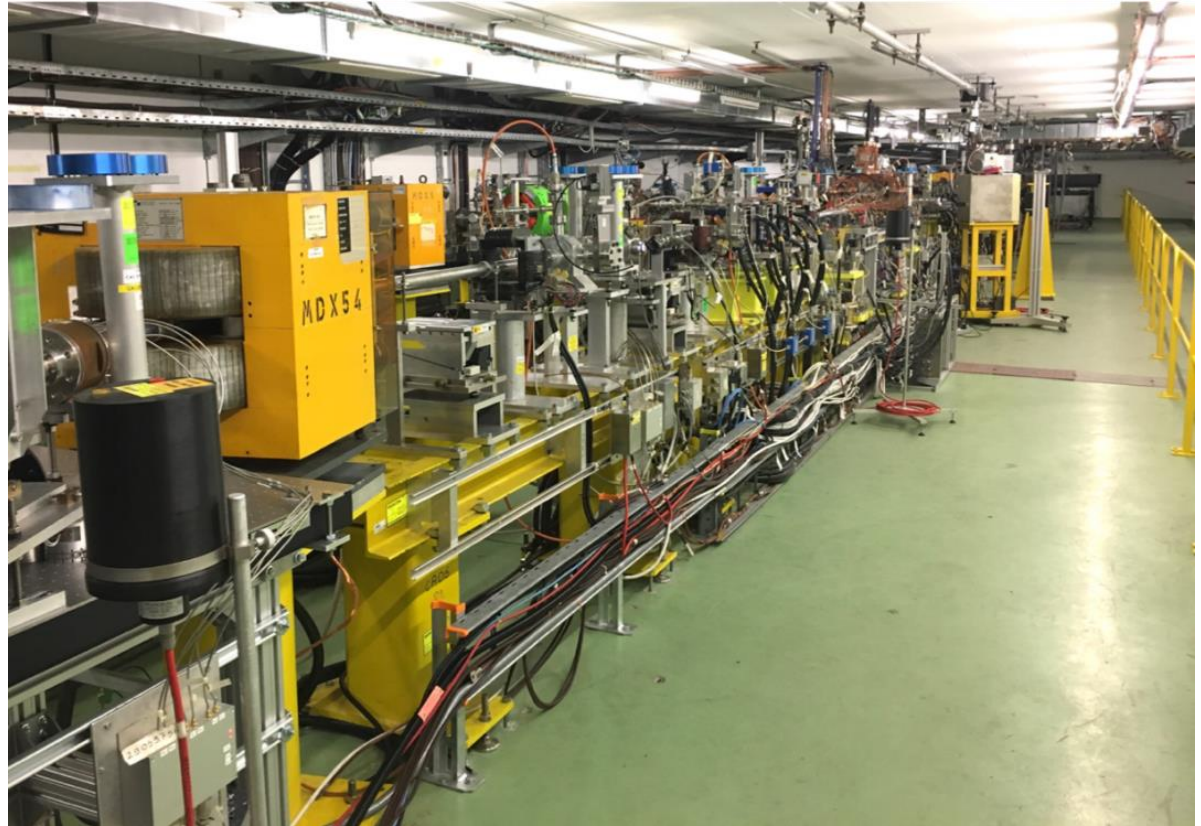
- 11 aktywnych akceleratorów i deceleratorów
- Ponad 100 km komór próżniowych
- Szeroki zakres rodzaju przyspieszanych cząstek
- Operacja 24/7 (z wyłączeniem przerw technicznych)

The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



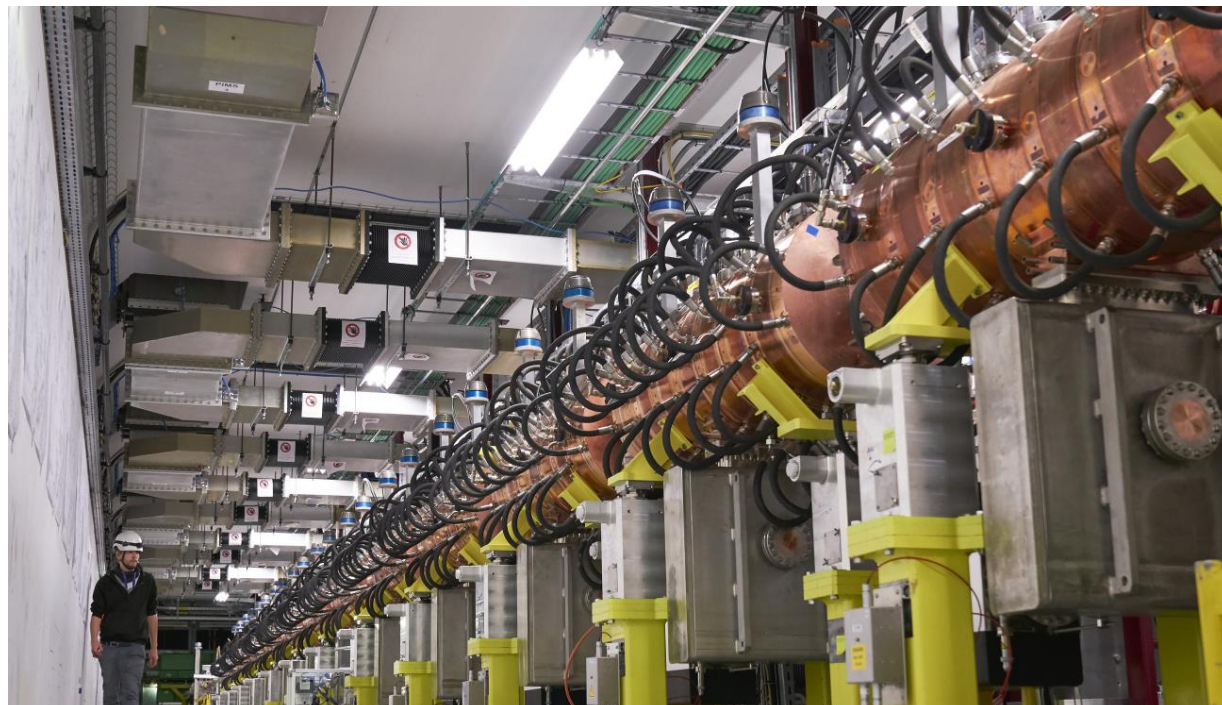
# CERN Linear Electron Accelerator for Research (CLEAR)

- 2017
- 40 m, 220 MeV
- Wiązka elektronowa
- Eksperymenty przeprowadzane przez użytkowników (wewnętrznych i zewnętrznych)
- Końcowa część wcześniej używanego akceleratora testowego



# LINAC 4

- 2020
- 86 m, 160 MeV
- Negatywne jony wodoru (H-) zamieniane w protony po akceleracji
- Źródło wszystkich wiązek protonowych w CERNie



45 keV

3 MeV

50 MeV

102 MeV

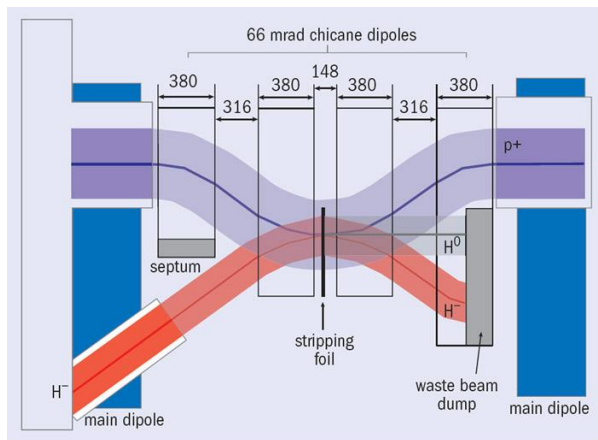
160 MeV



Wstęp do akceleratorów

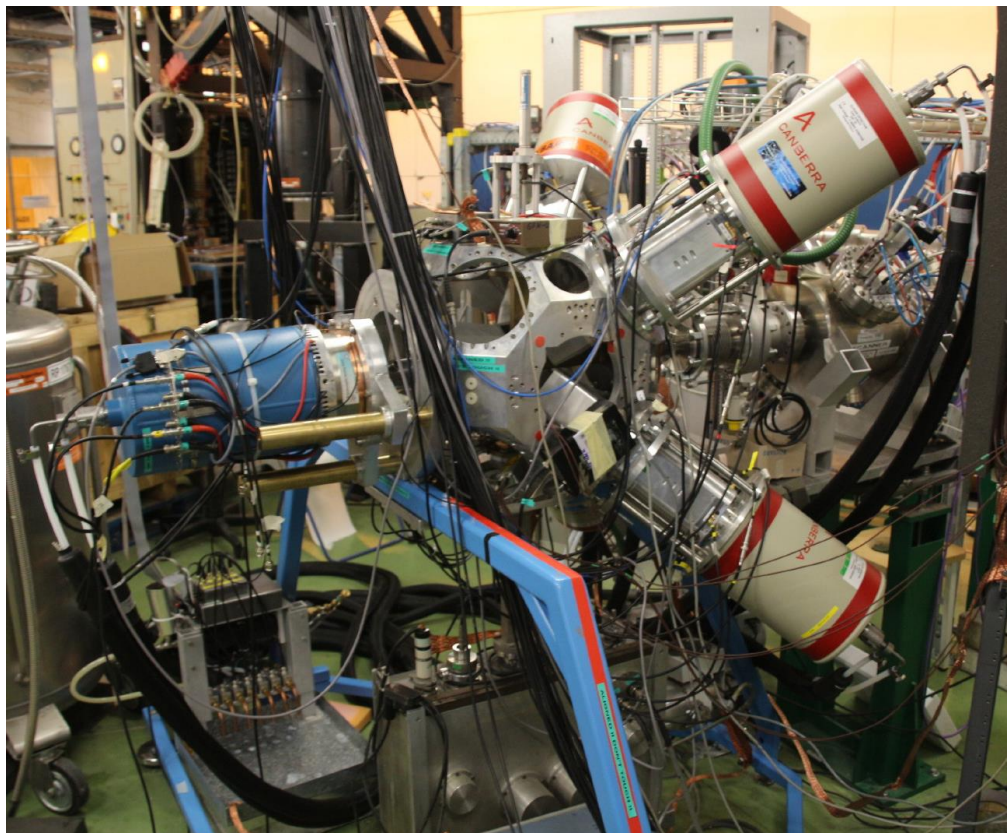
# Proton Synchrotron Booster (PSB)

- 1972
- 157 m, 2 GeV
- Unikalny koncept – 4 akceleratory jeden na drugim
- Znaczące zwiększenie maksymalnej liczby cząstek w produkowanej wiązce



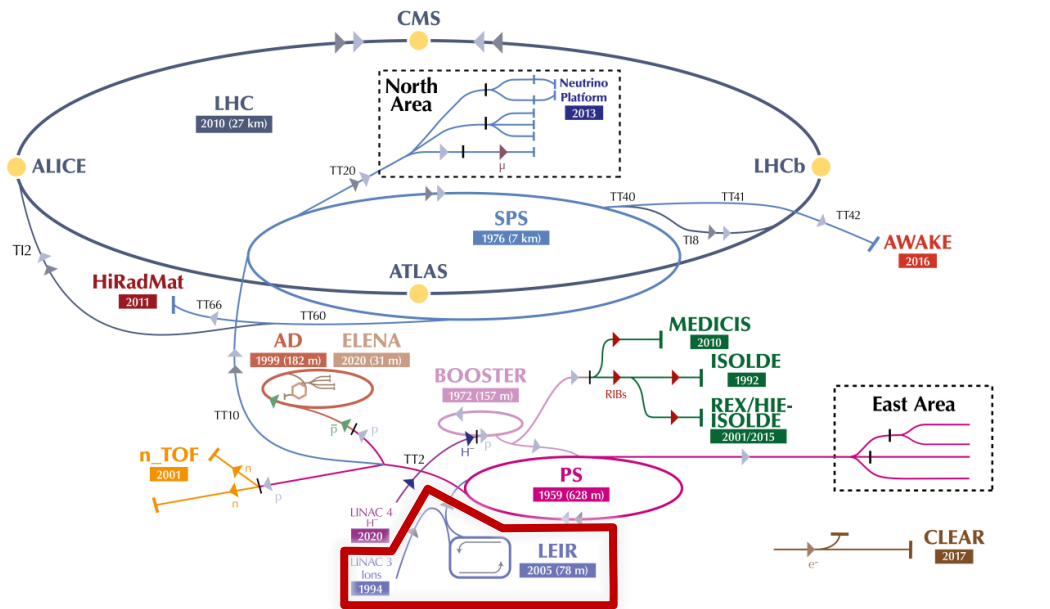
# ISOLDE

- 1967
- Laboratorium fizyki jądrowej
- Do 1990: wiązki z SC
- Obecnie: 1.4 GeV z PSB konwertowane w niskoenergetyczne wiązki radioaktywne
- Ponad 1300 izotopów ponad 70 pierwiastków



# Kompleks akceleratorów

The CERN accelerator complex  
*Complexe des accélérateurs du CERN*



▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu$  (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Wstęp do akceleratorów

# LINAC 3

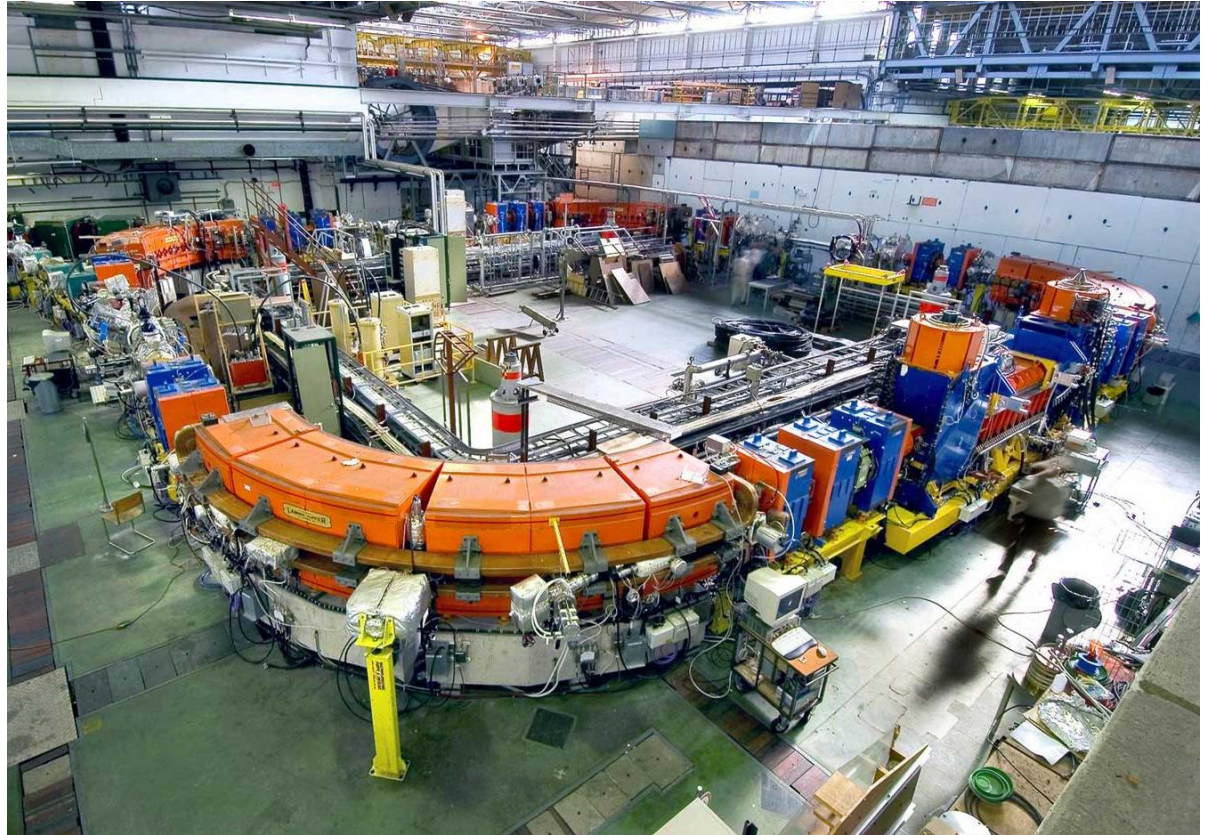
- 1994
- 25 m, 4.2 MeV/u
- Źródło wszystkich wiązek jonowych w CERNie
  - Ołów
  - Inne pierwiastki





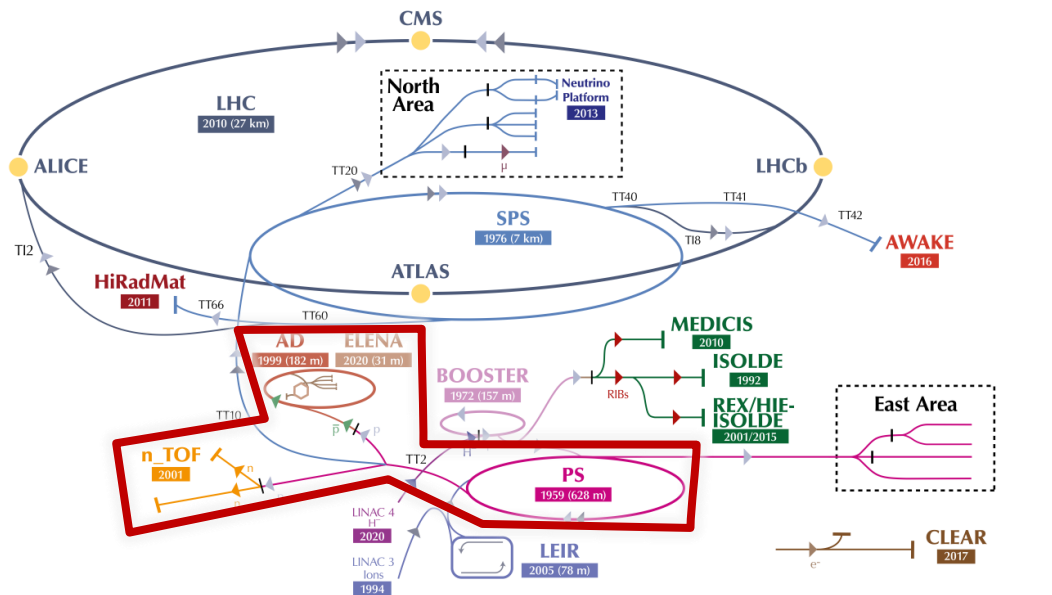
# Low Energy Ion Ring (LEIR)

- 2005
- 78 m, 72 MeV/u
- Energia wystarczająca na transport wiązki do kolejnego akceleratora



# Kompleks akceleratorów

The CERN accelerator complex  
*Complexe des accélérateurs du CERN*



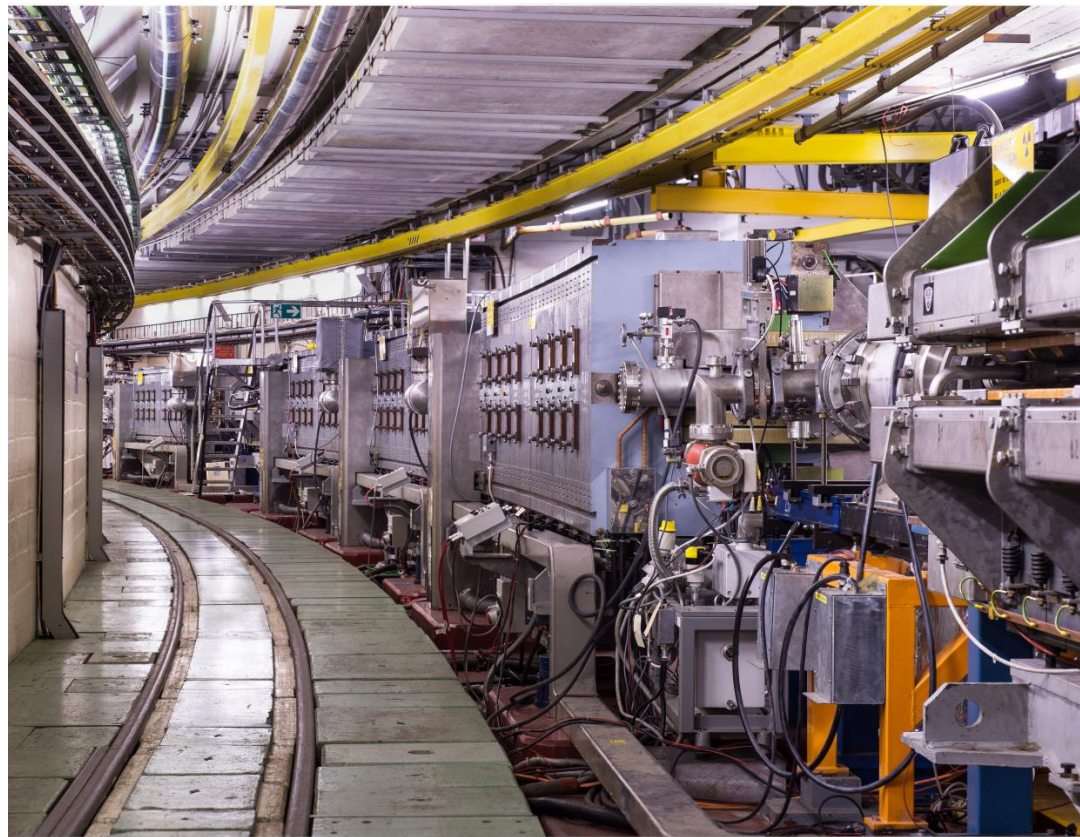
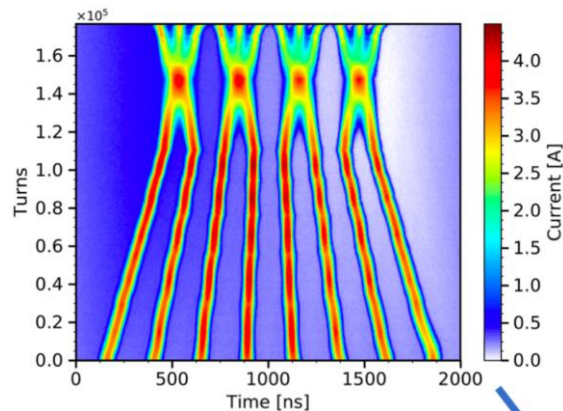
▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu^-$  (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Wstęp do akceleratorów

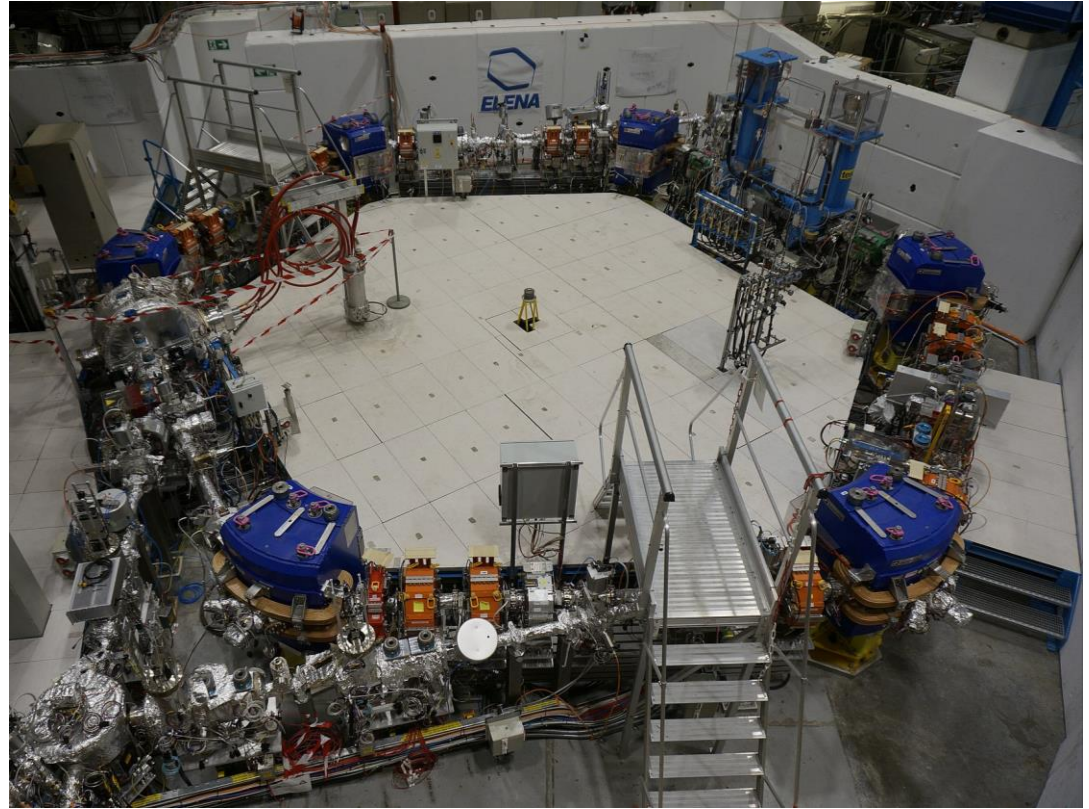
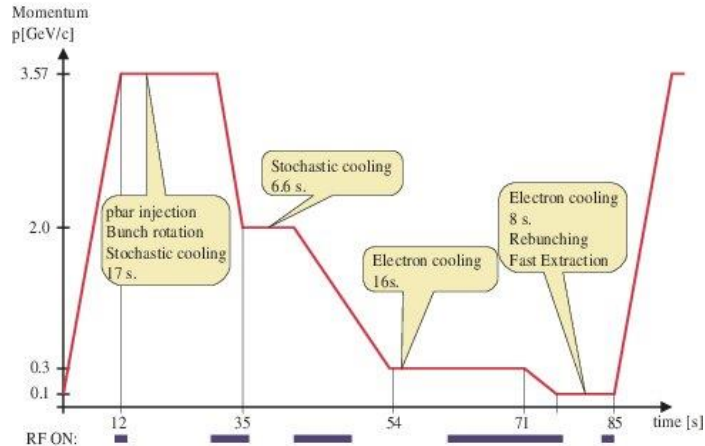
# Proton Synchrotron (PS)

- 1959 (!)
- 628 m, 26 GeV
- Wielofunkcyjne zintegrowane magnesy
- Liczba cząstek w wiązce zwiększona tysiąckrotnie od początku funkcjonowania



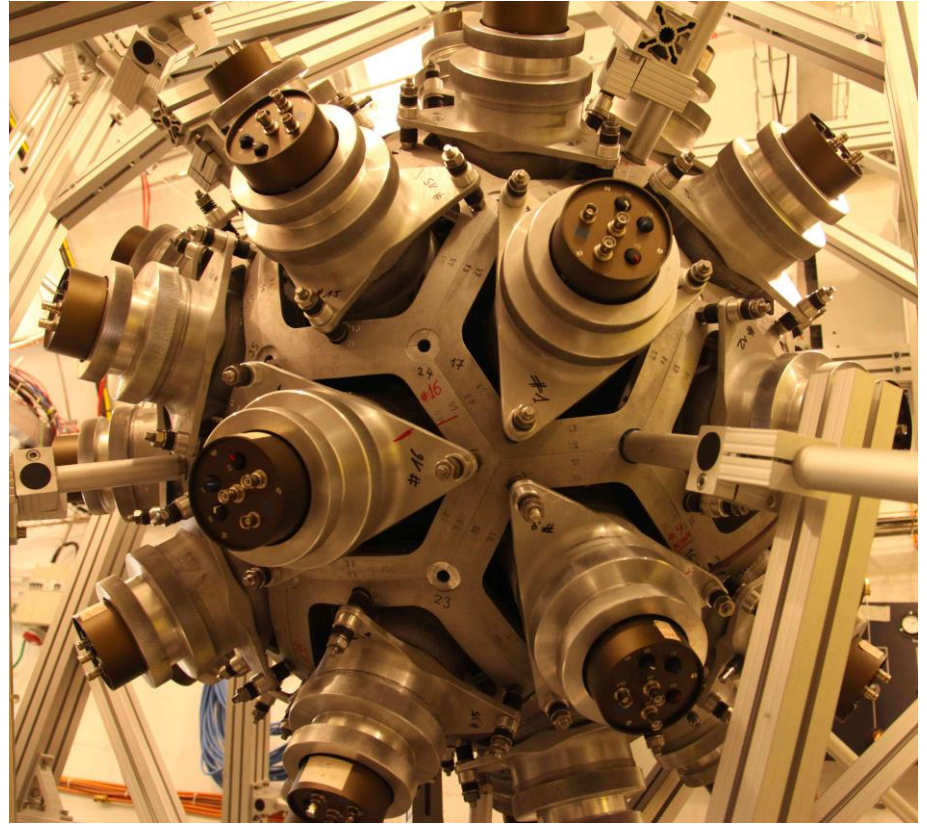
# Antiproton Decelerator (AD) / ELENA

- 1999 (AD) / 2020 (ELENA)
- AD: 182 m, 5.3 MeV
- ELENA: 31 m, 0.1 MeV
- Antyprotony wytwarzane przez kolizje wysokoenergetycznych protonów (PS) z irydem
  - Tylko mały ułamek antyprotonów nadaje się do transportu do AD



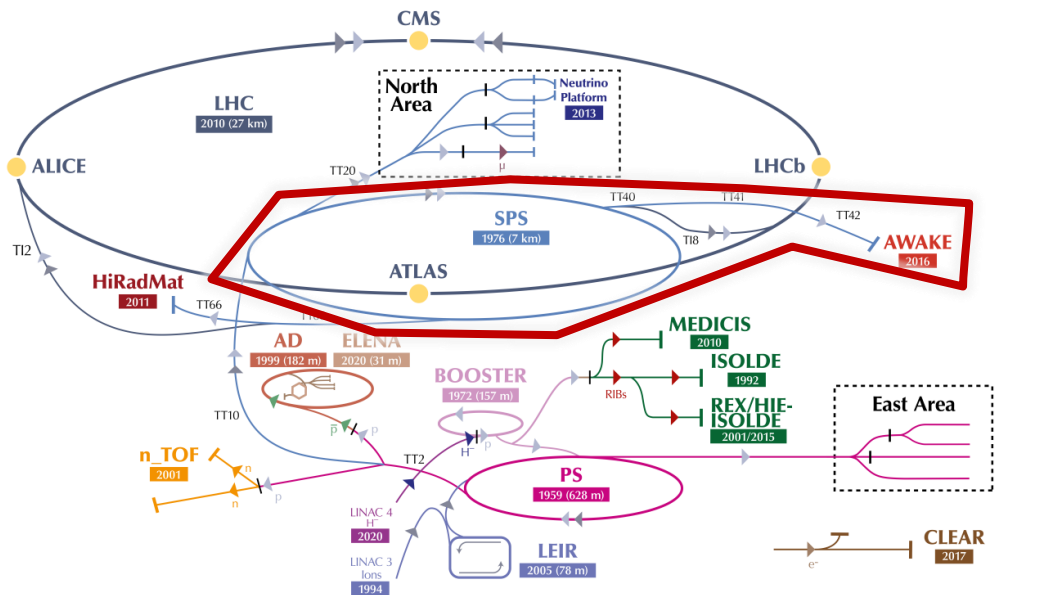
# Neutron Time-of-Flight (n\_TOF)

- 2001
- 200 m, zakres meV – GeV
- Neutrony tworzone przez zderzenia wysokoenergetycznych protonów (PS) z ołowiem
- Neutrony wykorzystywane do naświetlania próbek



# Kompleks akceleratorów

The CERN accelerator complex  
*Complexe des accélérateurs du CERN*



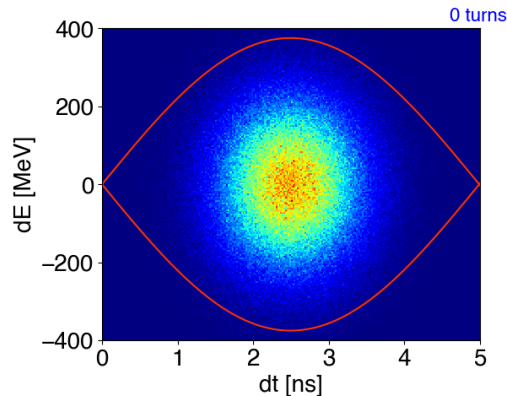
▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu$  (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear  
 Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive  
 Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator //  
 n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Wstęp do akceleratorów

# Super Proton Synchrotron (SPS)

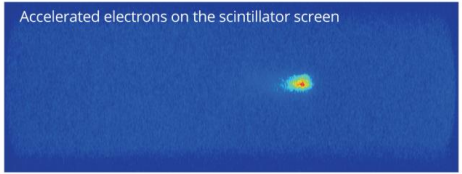
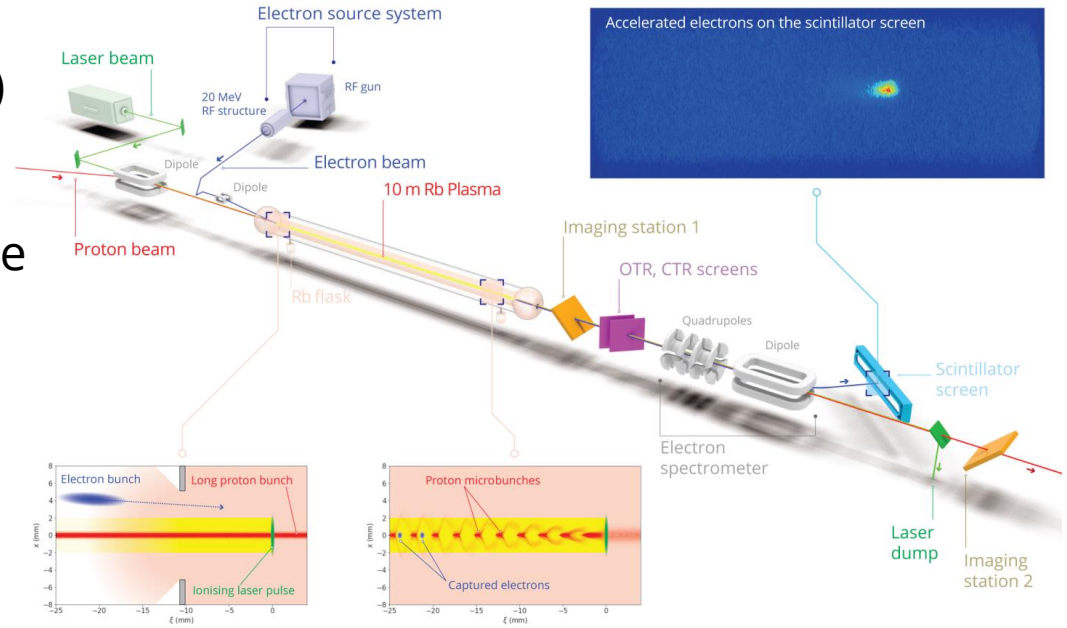
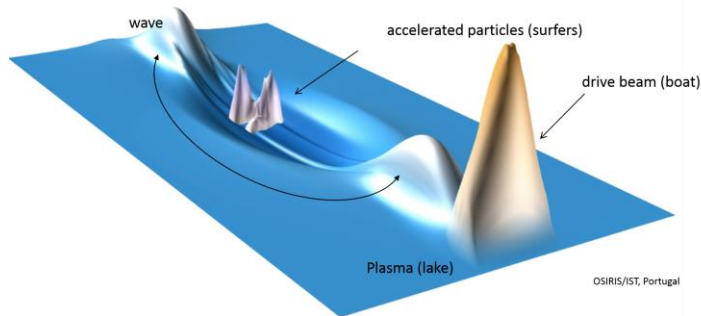
- 1976
- 7 km, 450 GeV
- Pierwszy w pełni modułowy synchrotron w CERNie (osobne typy magnesów)
- Normalnie przewodzące magnesy
- Nagroda Nobla 1983 – odkrycie bozonów W i Z w trybie zderzacza proton – antyproton
- Jeden z naszych najbardziej wszechstronnych akceleratorów: protony, antyprotony, elektrony, pozytrony, ołów, tlen, siarka



Wstęp do akceleratorów

# Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)

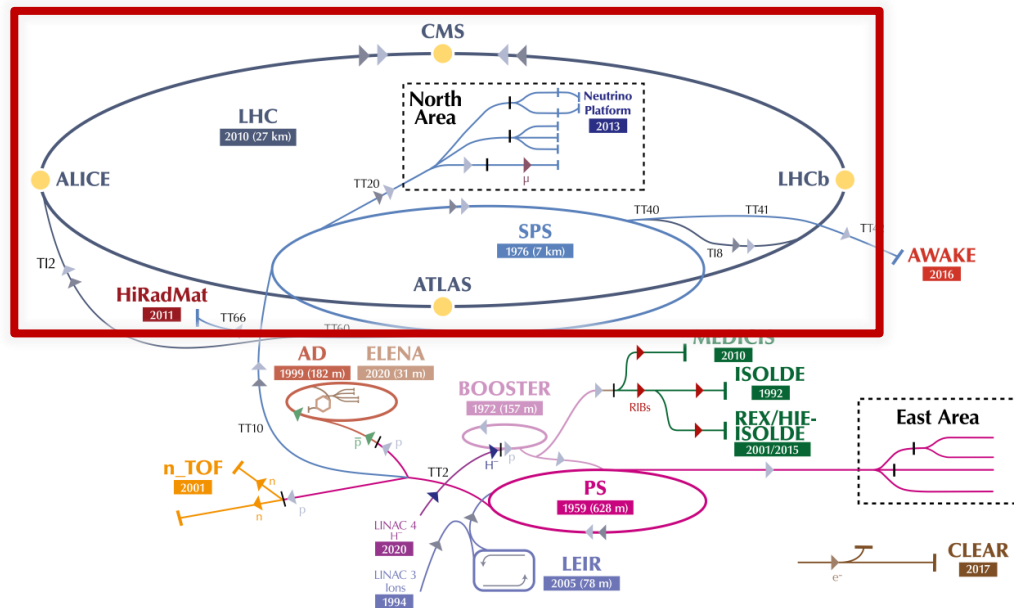
- 2016
- 10 m, 2 GeV (> 10 GeV planned)
- Eksperymentalna metoda akceleracji wiązki – pole elektromagnetyczne wzbudzone w plazmie przez wiązkę protonową
  - Bardzo wysoki gradient pola przyspieszającego





# Kompleks akceleratorów

The CERN accelerator complex  
*Complexe des accélérateurs du CERN*



▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu$  (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear  
 Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive  
 Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator //  
 n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Wstęp do akceleratorów

# Large Hadron Collider (LHC)

- 2010
- 27 km, 6.8 TeV
- Największy instrument naukowy w historii
- Zbudowany w istniejącym tunelu (LEP, 1989–2000)
- Ponad 2000 nadprzewodzących magnesów
- 16 nadprzewodzących wnek rezonansowych
- Nagroda Nobla 2013 – odkrycie bozonu Higgsa

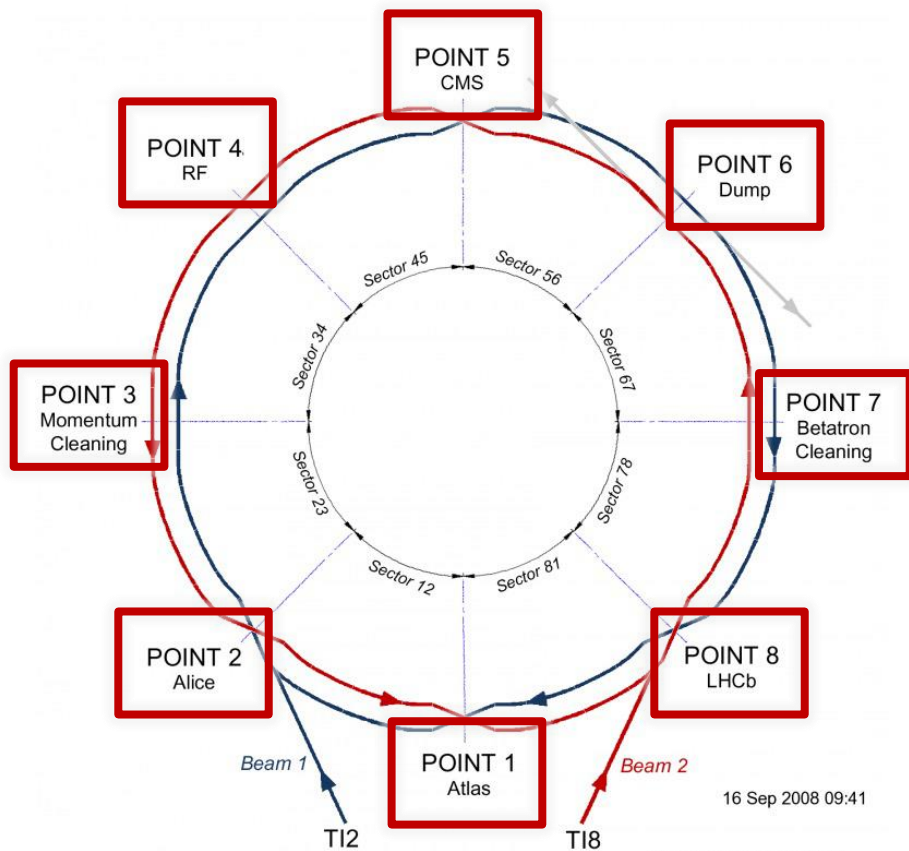


# Inne ważne parametry LHC

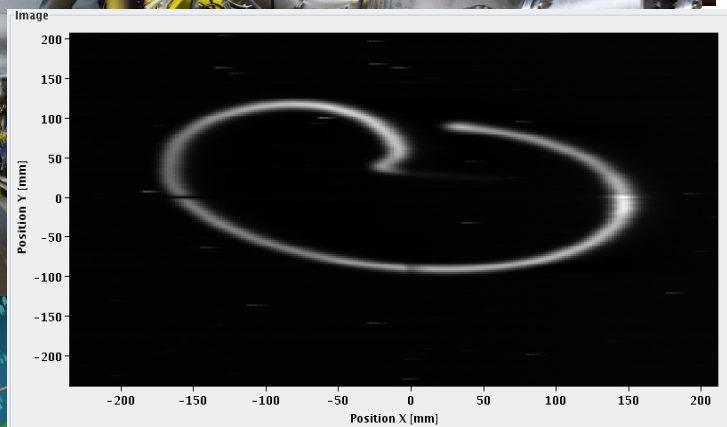
- Długość paczki cząstek: 1 ns
- Separacja pomiędzy paczkami: 25 ns
- Liczba cząstek w paczce:  $1.6 \times 10^{11}$
- Liczba paczek w wiązce: 2808
- Energia przechowywana w wiązce: 500 MJ
- Temperatura magnesów:  $-271.3^{\circ}\text{C}$  / 1.9 K
- Pole magnesów dipolowych: 8.3 T
- Energia przechowywana w magnesach: 11 GJ
- Energia wystarczająca do straty nadprzewodnictwa w magnesie:  $10 \text{ mJ}/\text{cm}^3$
- Ciśnienie próżni:  $10^{-11}$  mbar
- Częstotliwość pracy wnek rezonansowych: 400 MHz



# Sektoryzacja LHC



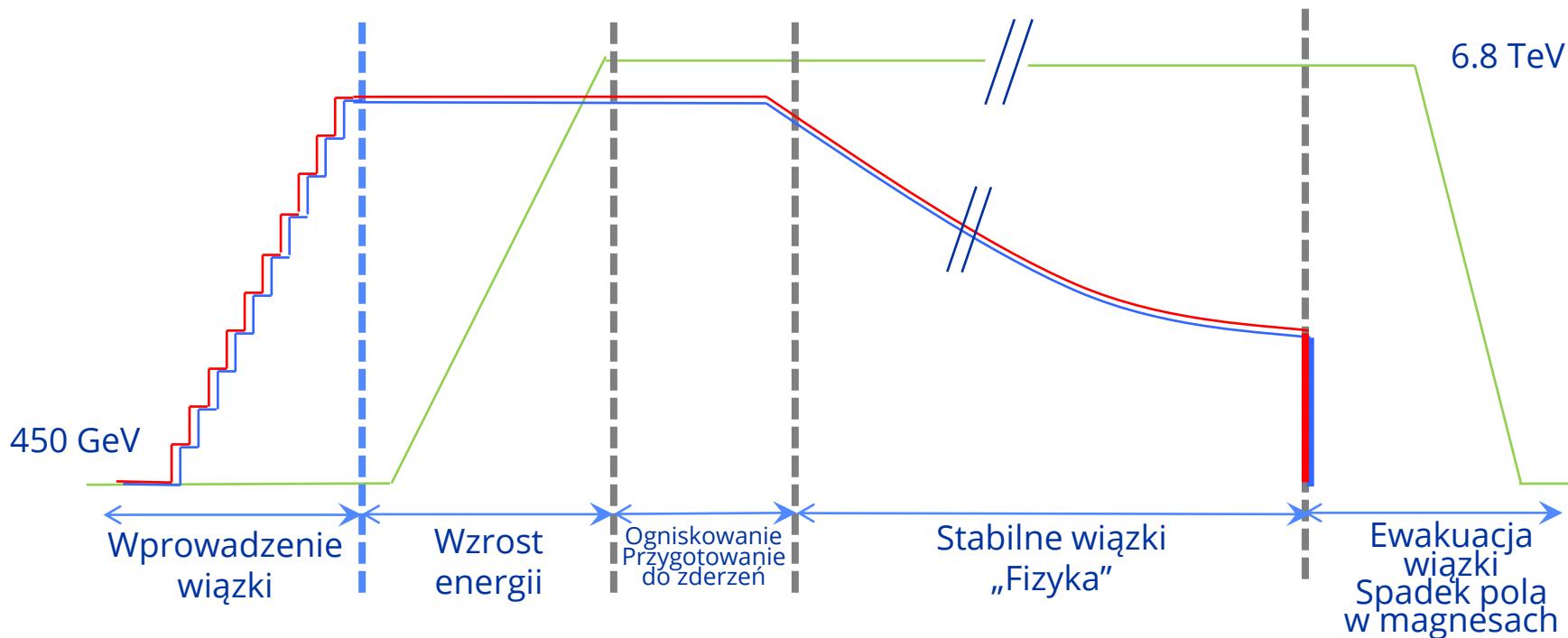
Updated by Roger Bailey



# Typowy cykl LHC

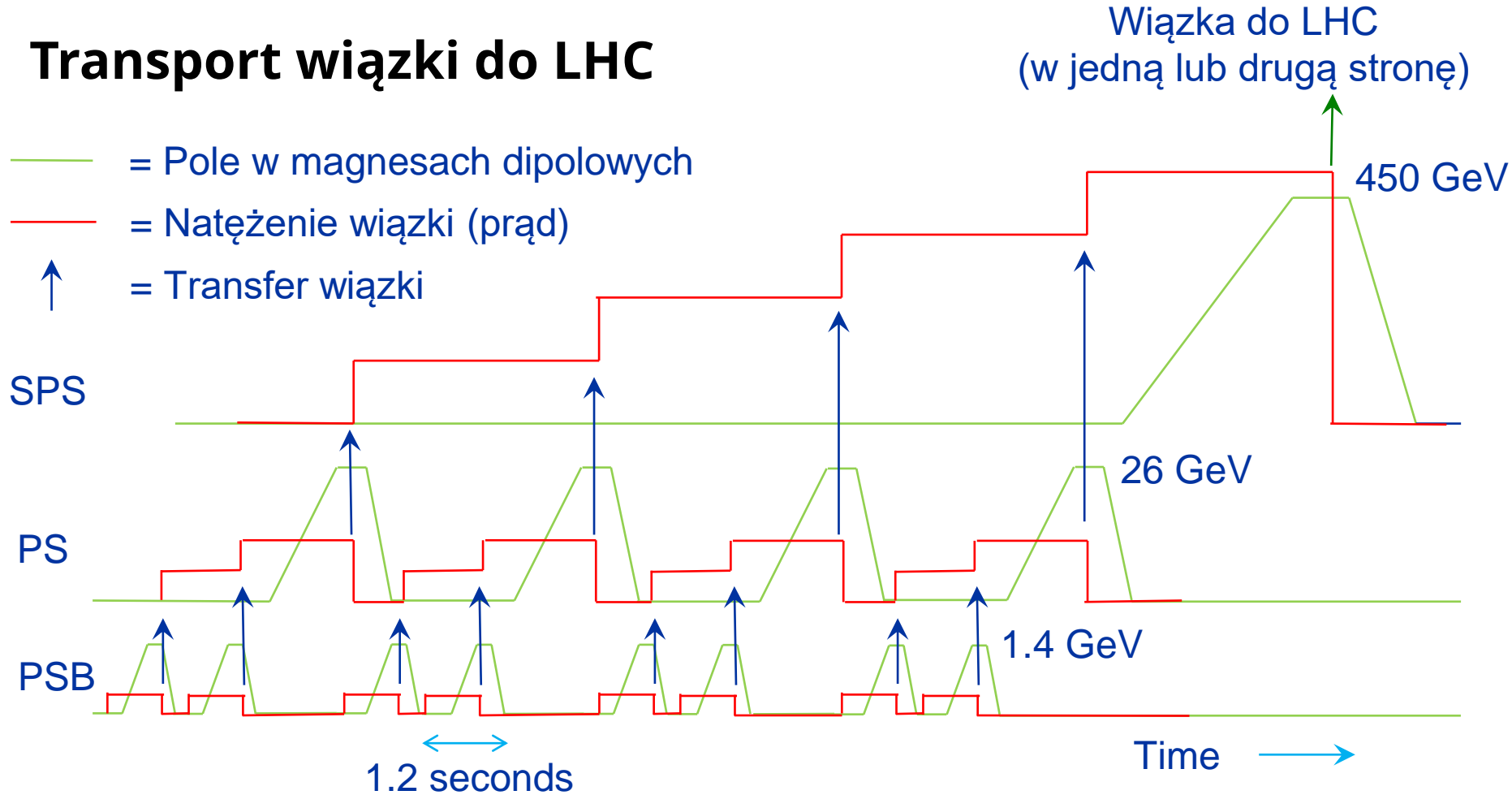
- = Pole w magnesach dipolowych
- = Natężenie wiązki 1 (prąd)
- = Natężenie wiązki 2 (prąd)

Czas →

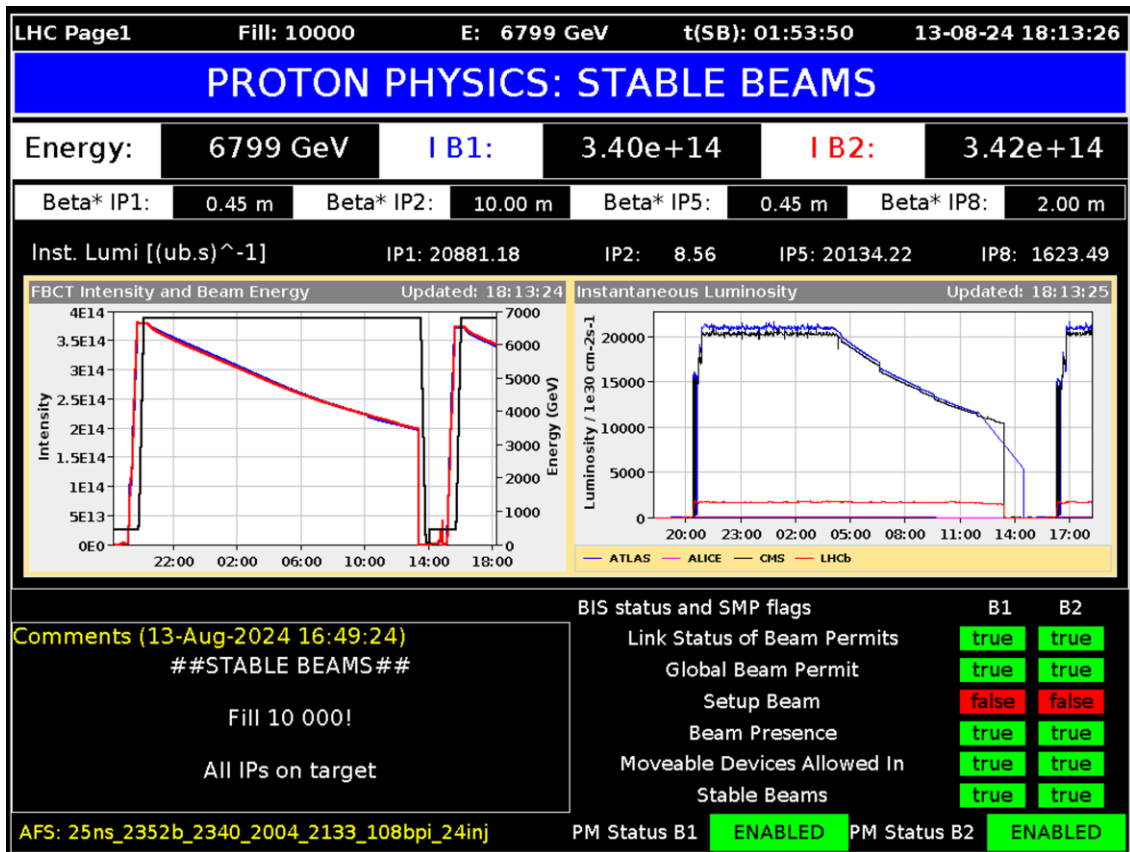


Wstęp do akceleratorów

# Transport wiązki do LHC



# Status LHC



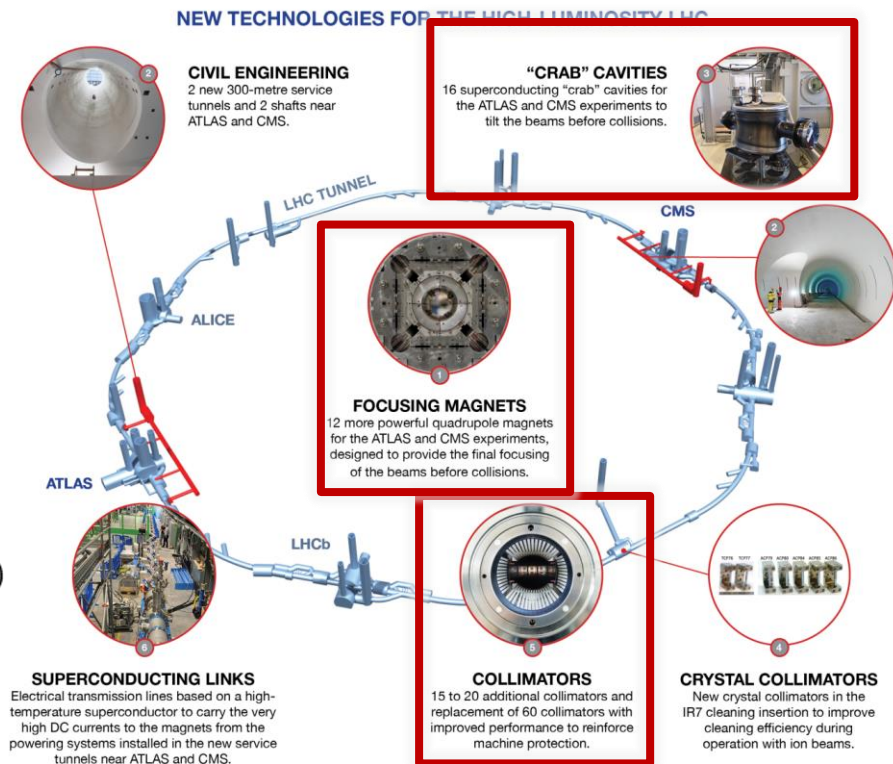
[Link](#)

# Bliższa przyszłość: High-Luminosity LHC (HL-LHC)

- LHC w obecnej konfiguracji działa bardzo wydajnie, ale:
  - Magnesy blisko eksperymentów osiągnęły kres swojej żywotności
  - Opracowano sposoby na zwiększenie świetność LHC

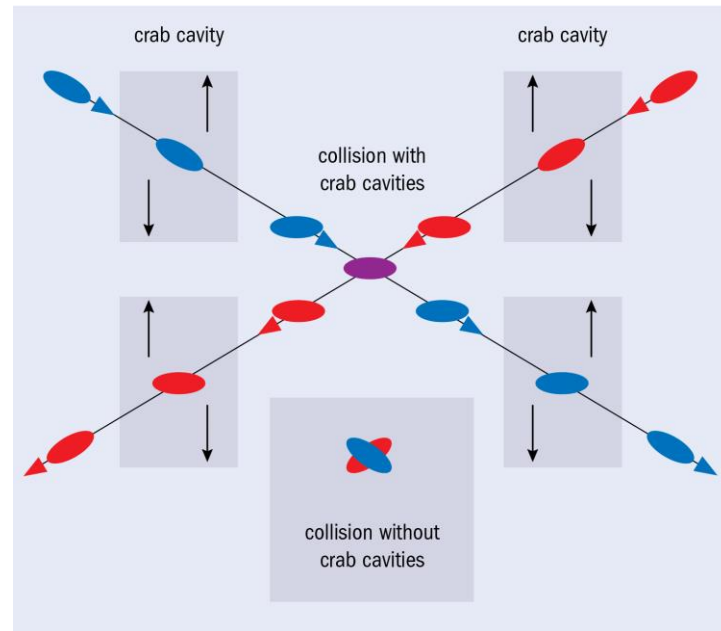
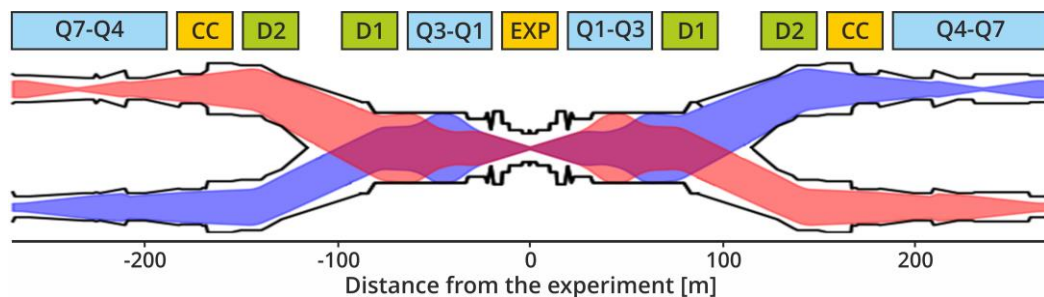
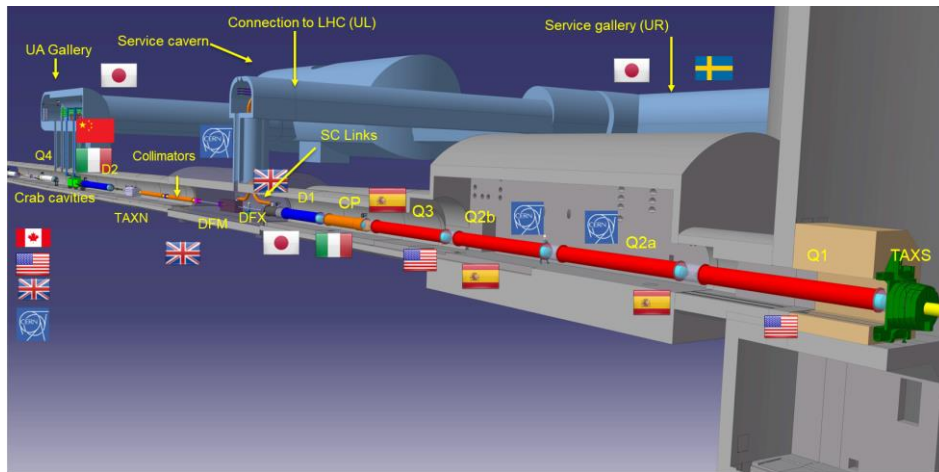
$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f N_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot S$$

Liczba cząstek w paczce Wiązka 1 i 2  
 Częstotliwość z jaką przeciwbieżne paczki przez siebie przelatują  
 Korekcja geometryczna [0, 1]  
 Zderzenia nie są czołowe  
 Wielkość wiązki w miejscu zderzenia W płaszczyźnie x i y



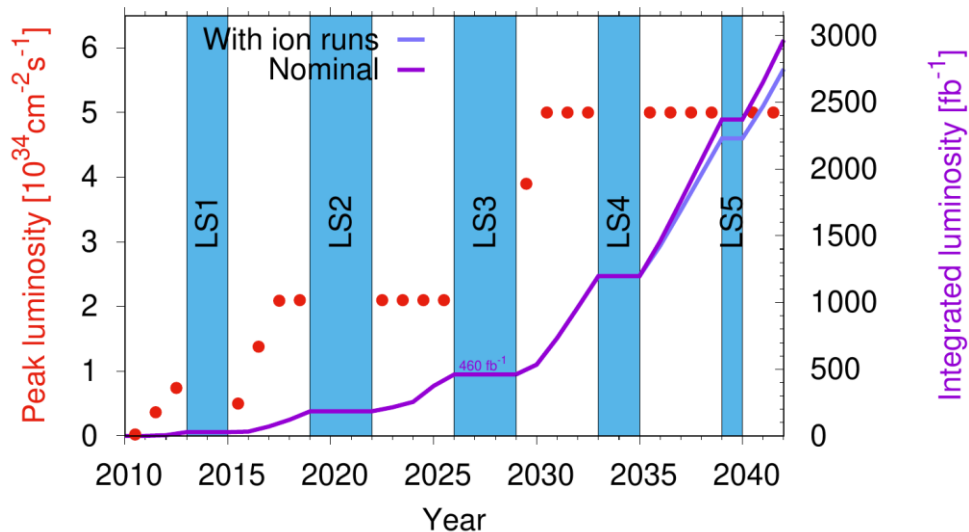
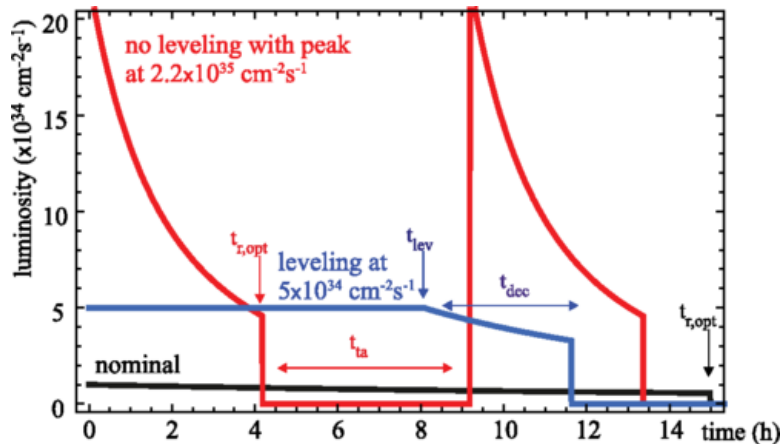


# Bliższa przyszłość: High-Luminosity LHC (HL-LHC)

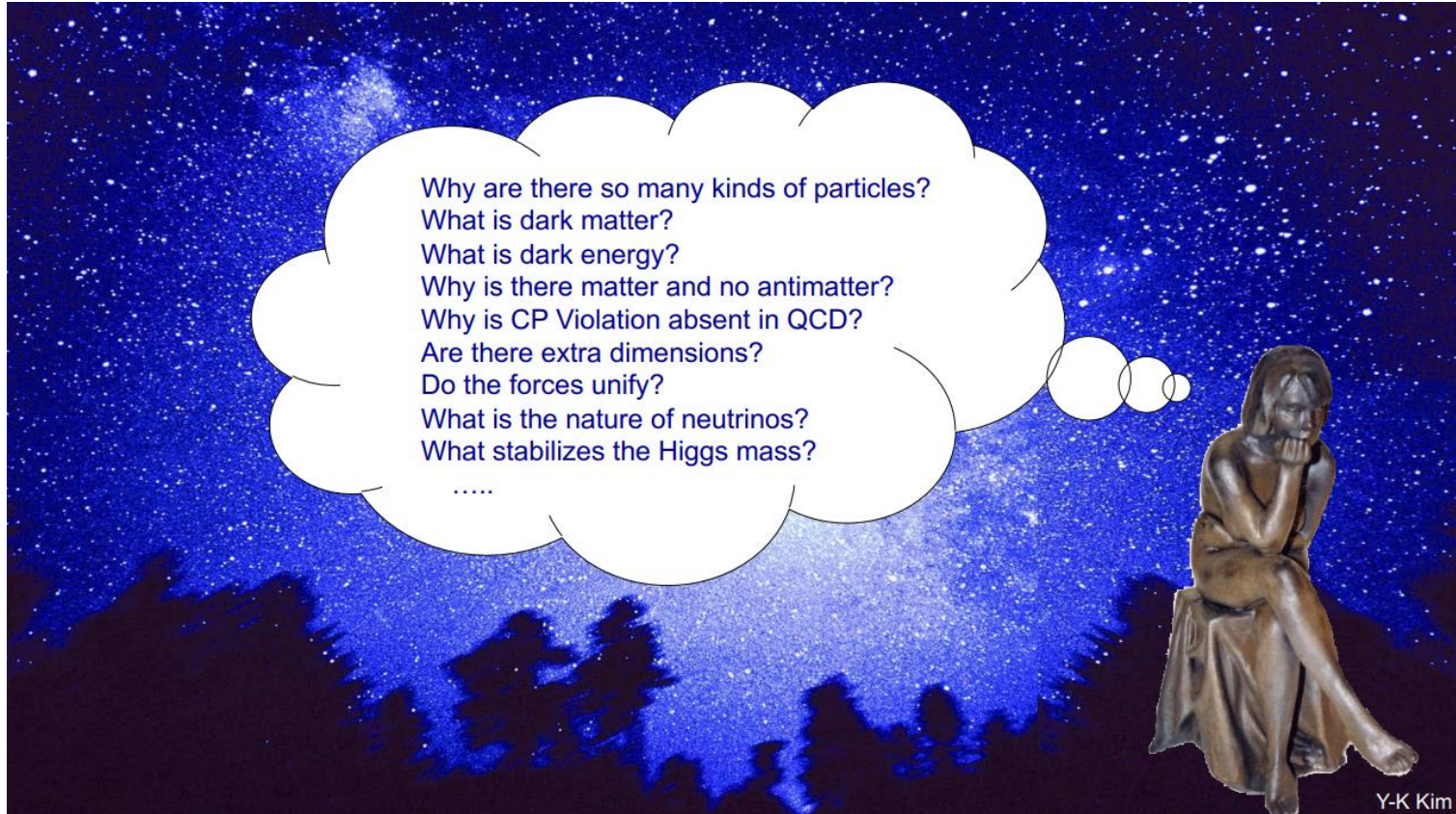


# Bliższa przyszłość: High-Luminosity LHC (HL-LHC)

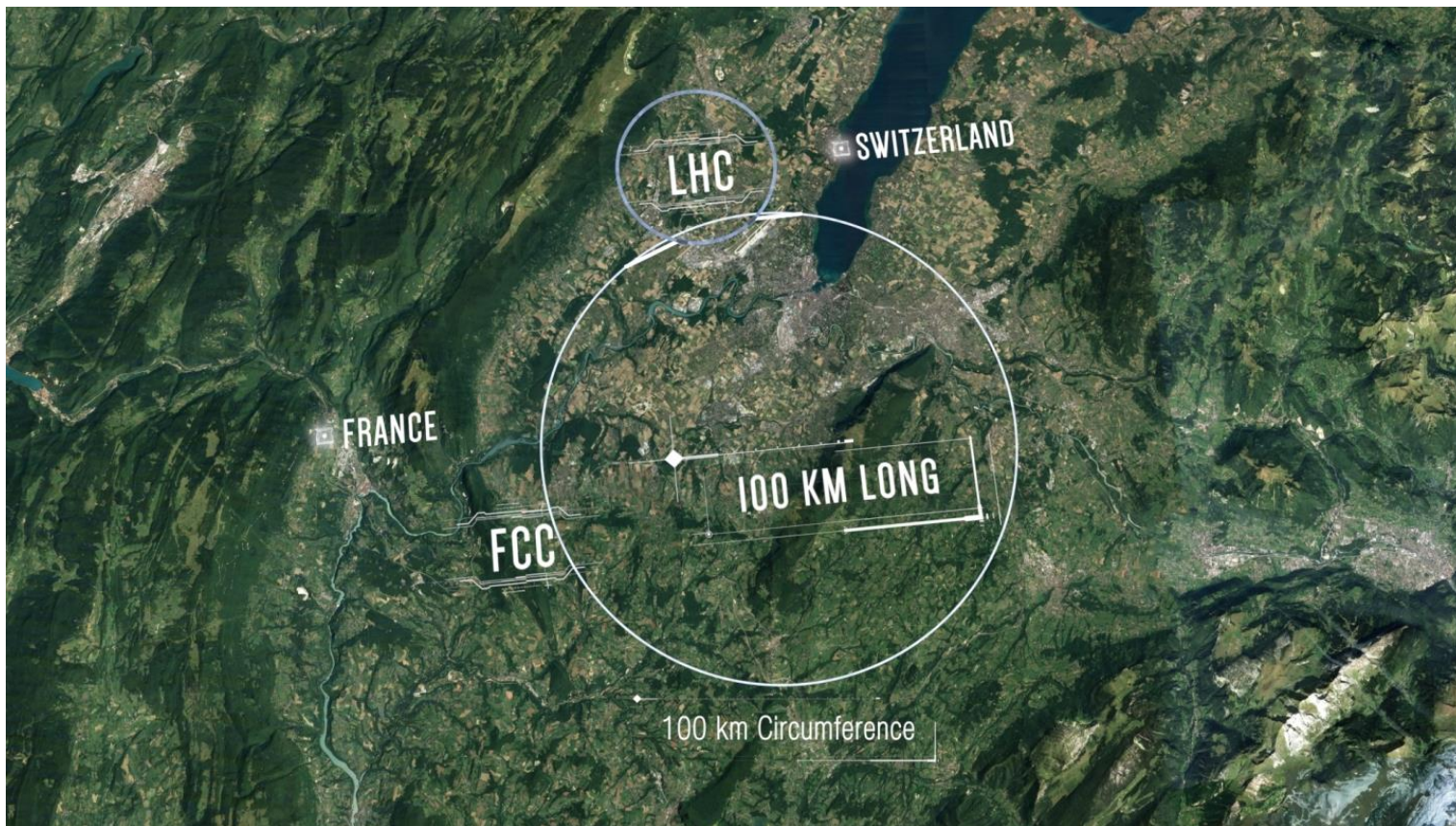
- Cel HL-LHC: 10 x więcej danych fizycznych niż obecnie
- Poziomowanie światłości – dłuższe zbieranie danych ze stałą liczbą kolizji



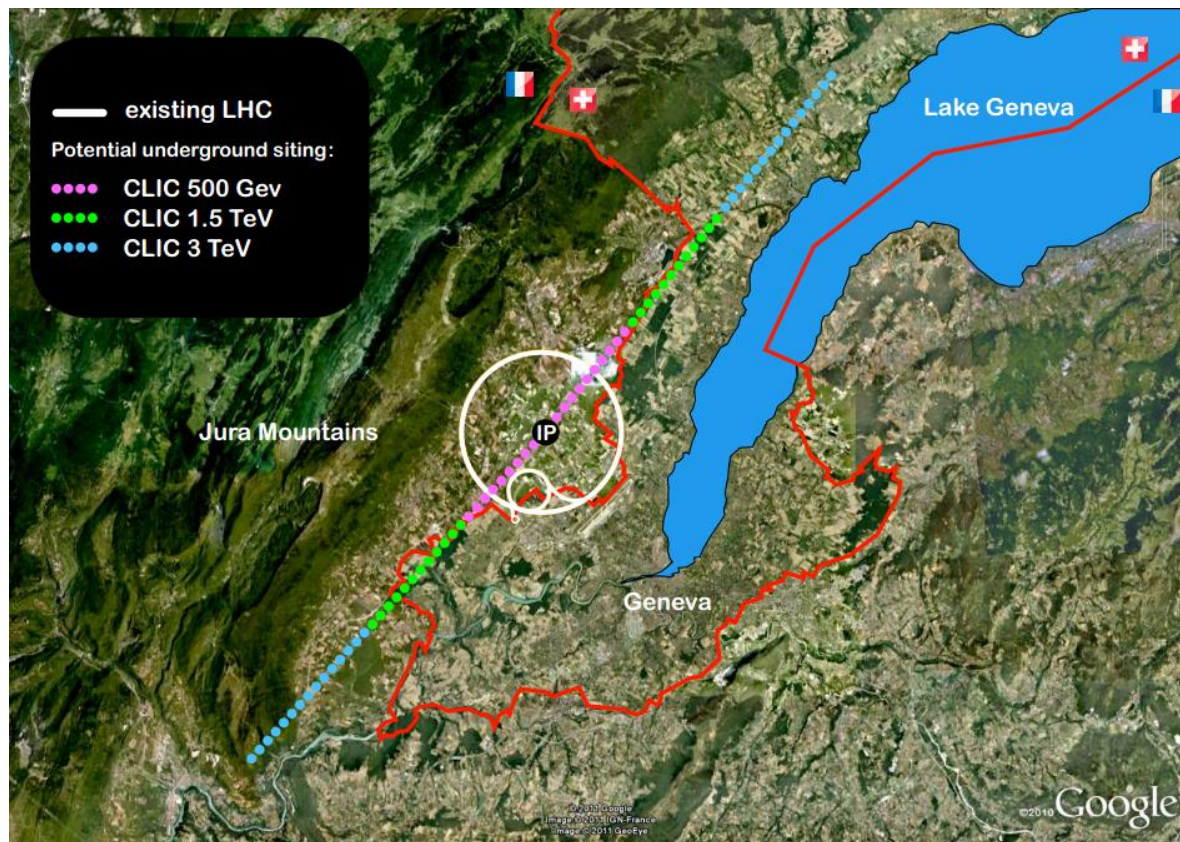
# Dalsza przyszłość: motywacja



# Future Circular Collider (FCC)



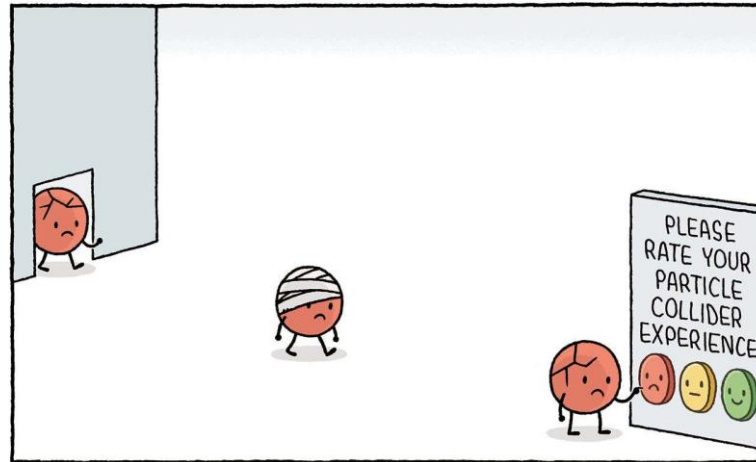
# Compact Linear Collider (CLIC)



# Podsumowanie

- Dziesiątki tysięcy akceleratorów są w użyciu na całym świecie
  - Bardzo dobrze rozwinięta technologia – zastosowania przemysłowe i medyczne
  - Technologia, która ciągle się rozwija – zastosowania naukowe
- Zaawansowane akceleratory już istnieją w Polsce (SOLARIS), kolejne duże projekty są planowane (POLFEL)
- Ośrodki akceleratorowe na całym świecie ciągle się rozwijają
  - Nieustające zapotrzebowanie na fizyków, inżynierów, techników, studentów
  - Praktycznie każdy ośrodek naukowy prowadzi program stażowy

# Dziękuję za uwagę



TOM GAULD for NEW SCIENTIST