



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

Technologia akceleratorów cząstek

Krzysztof Kawa
WFiIS AGH & SY-ABT CERN

kkawa@agh.edu.pl

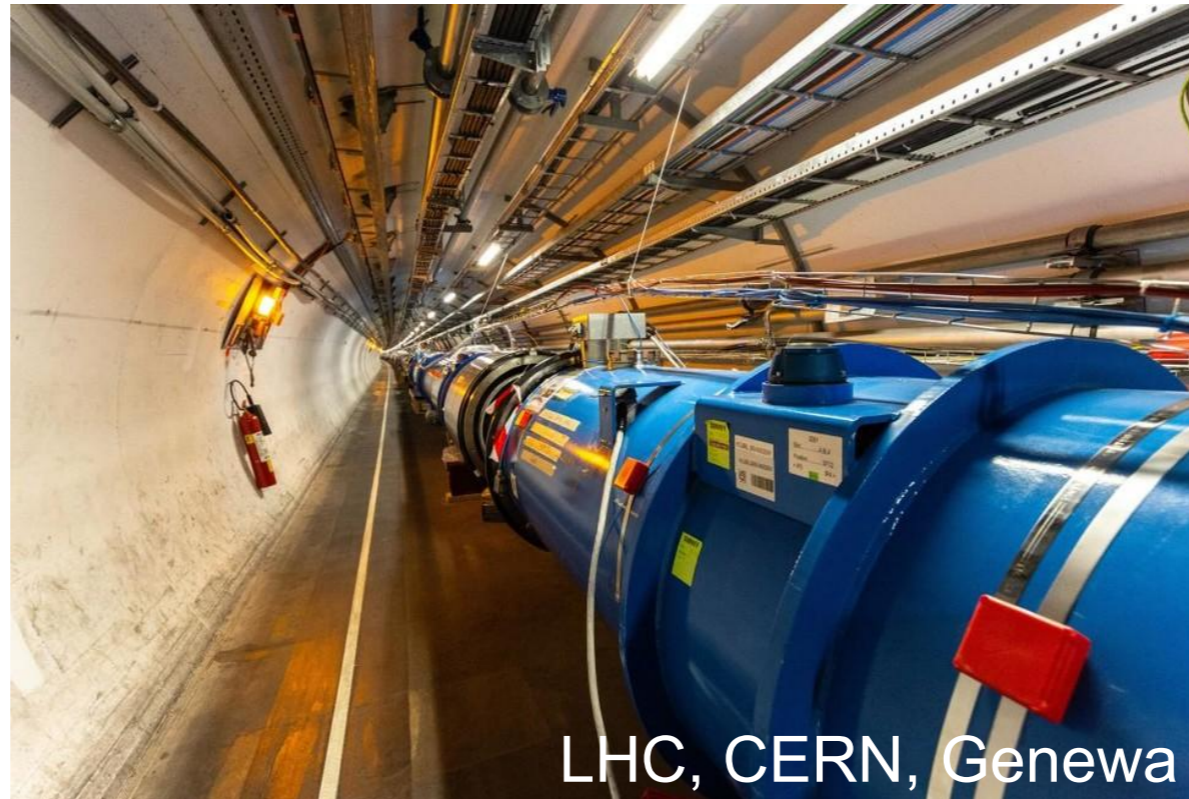
krzysztof.piotr.kawa@cern.ch



Wprowadzenie

Akcelerator cząstek

Akceleratory cząstek - są to urządzenia służące do produkcji i przyspieszania **naładowanych cząstek** (cząstek elementarnych - elektronów, protonów jak i jonów), w których cząstki tworzą **wiązkę**, której parametry możemy kontrolować.



LHC, CERN, Genewa

[1]

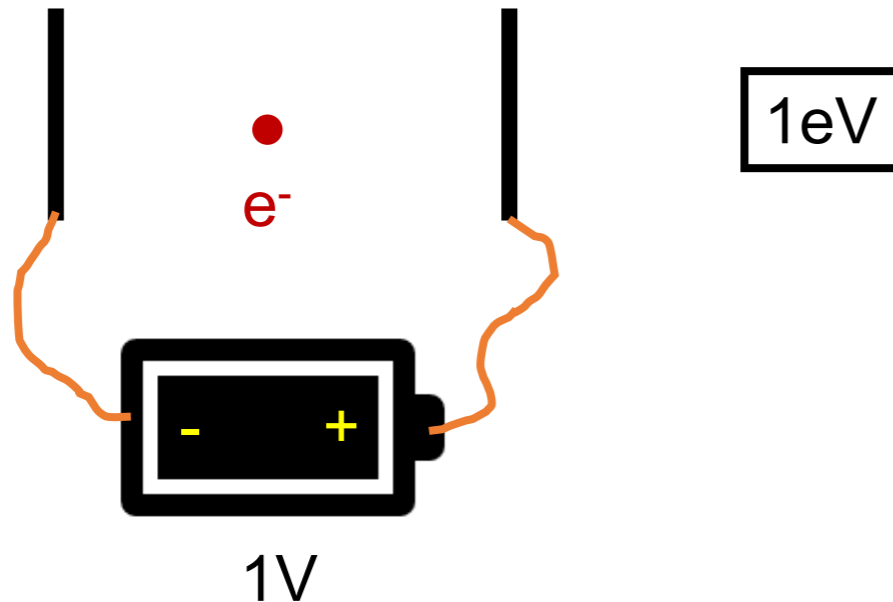
Rodzaje akceleratorów

Najczęściej spotykane to **liniowe** oraz **kołowe** akceleratory.

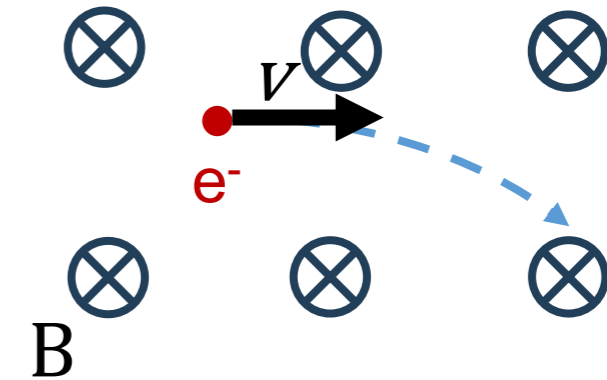


Akceleratory cząstek

Pole elektryczne



Pole magnetyczne

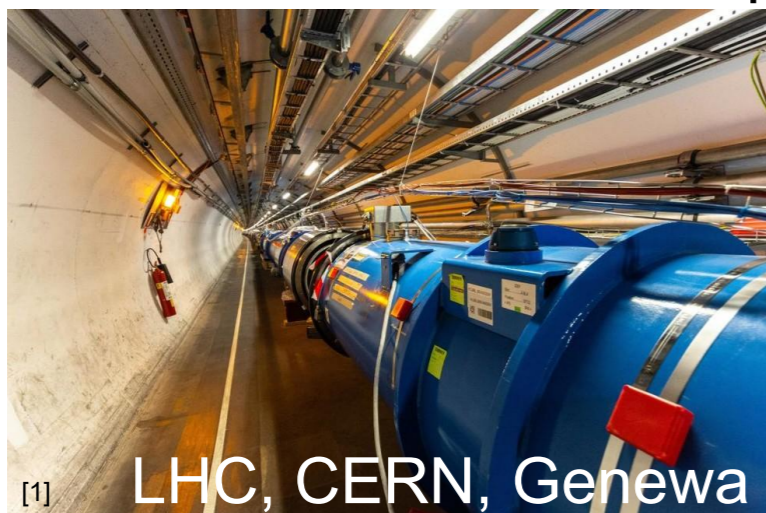


Do przyspieszania cząstek w akceleratorach wykorzystywane jest pole **elektryczne**, zaś do zmiany (zakrzywiania) toru ruchu **pole magnetyczne** (w niektórych przypadkach również **elektryczne**).

Zastosowanie akceleratorów

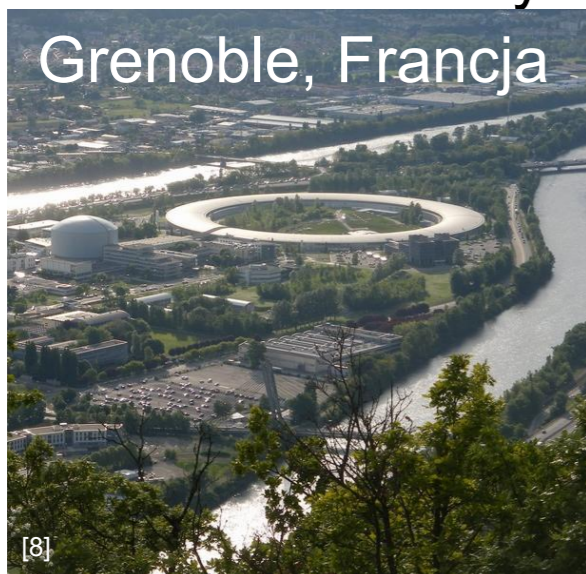
Badania podstawowe

Historia i sztuka



Inżynieria materiałowa

Medycyna



Europejska Organizacja Badań Jądrowych CERN

Czym jest CERN?

- Międzynarodowa organizacja
- Położona na obrzeżach Genewy
(na granicy Szwajcarii i Francji)
- Założona w 1954

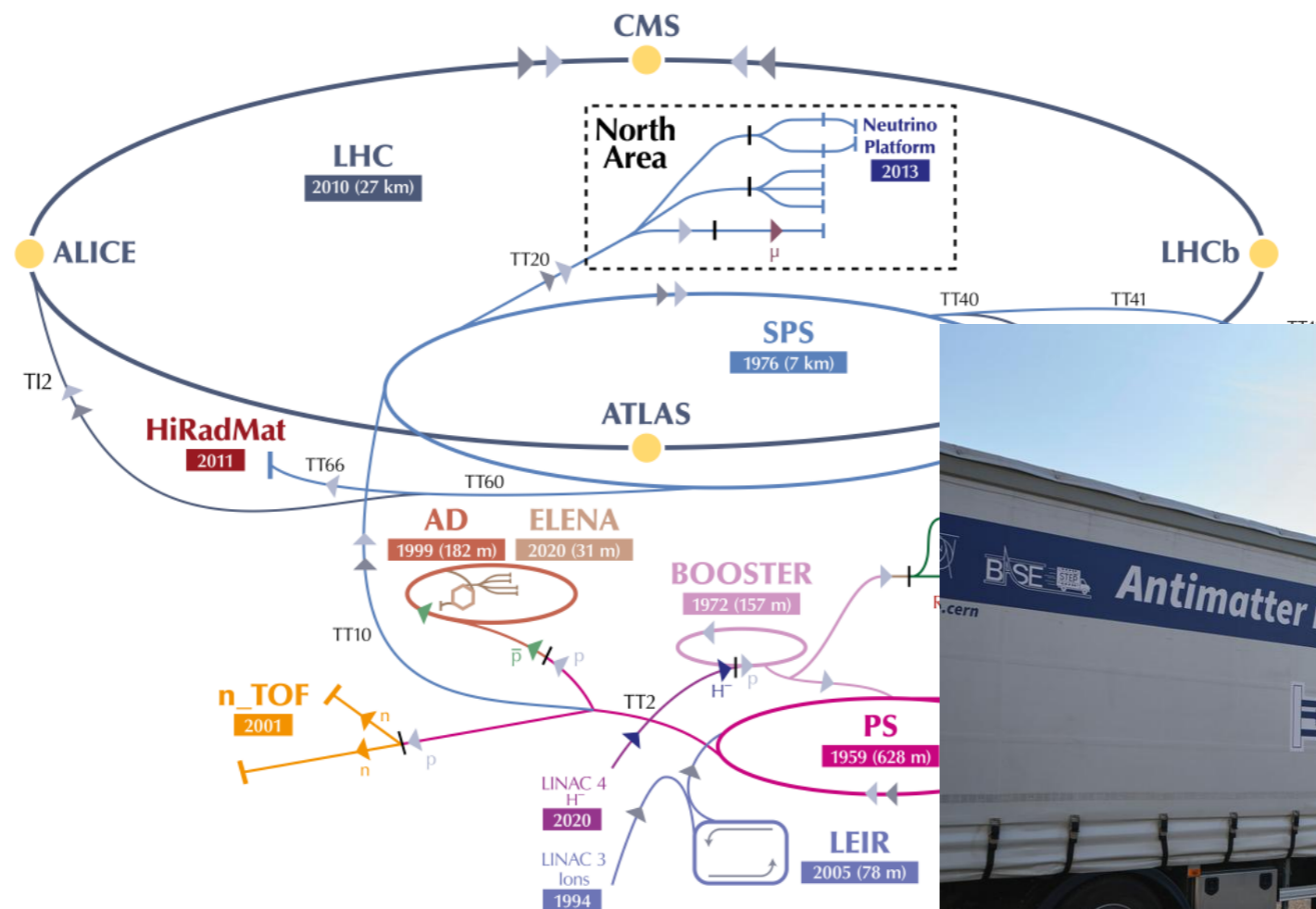


Główny cel: Prowadzenie światowej klasy badań w fizyce wysokich energii wykorzystując największy na świecie i najbardziej złożonym kompleks instrumentów naukowych

World Wide Web zostało wynalezione w CERN w 1989 przez Tima Berners-Lee.

W 2012 w CERN potwierdzono istnienie **bozonu Higgsa**.

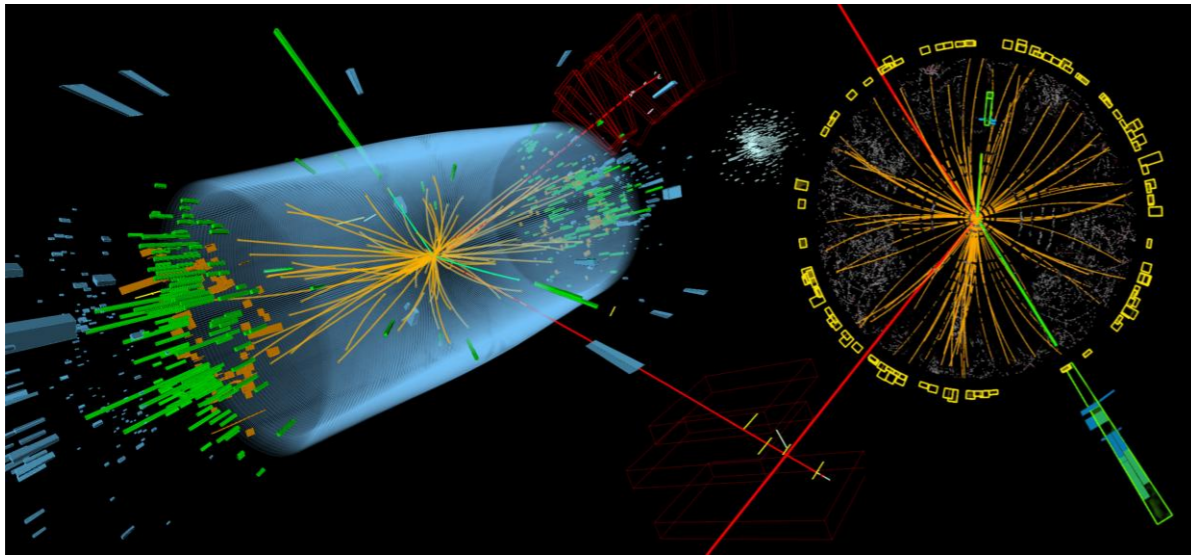
Kompleks akceleratorów w CERN



▶ H⁻ (hydrogen anions)
 ▶ p (protons)
 ▶ ions
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
 ▶ n (neutrons)



Bozon Higgosa



[10]



[10]



[12]



[10]

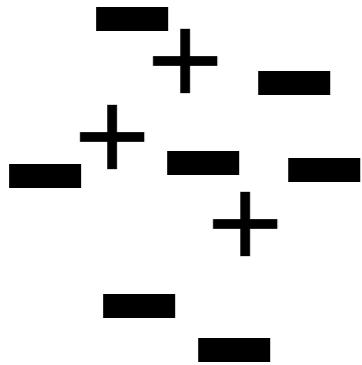


[11]



Jak działa akcelerator?

Zjonizuj



Przyspiesz



Steruj



Monitoruj

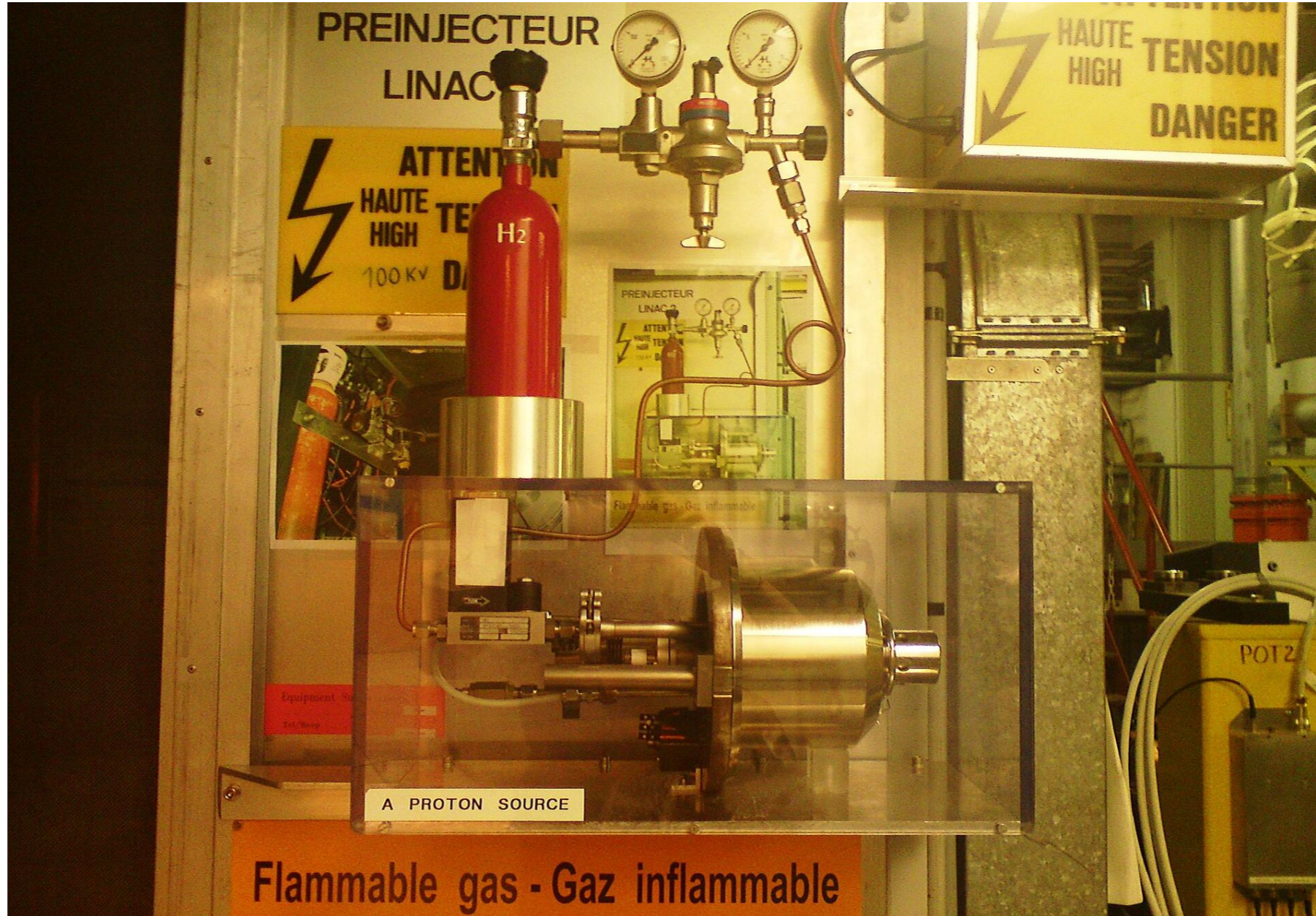


Zderz!

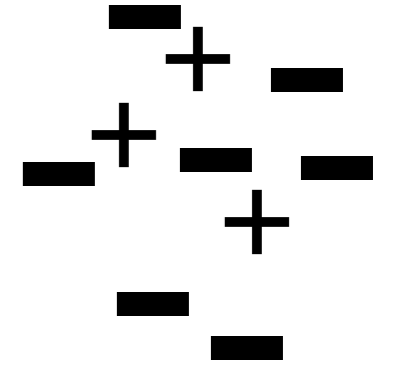


Powtórz

Zwykła butla z gazem

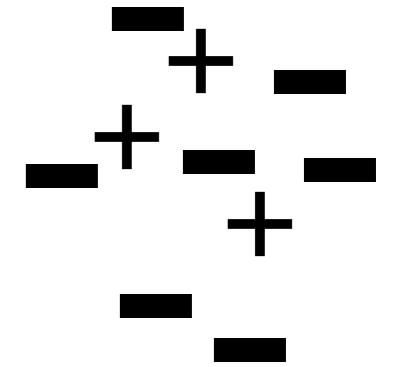
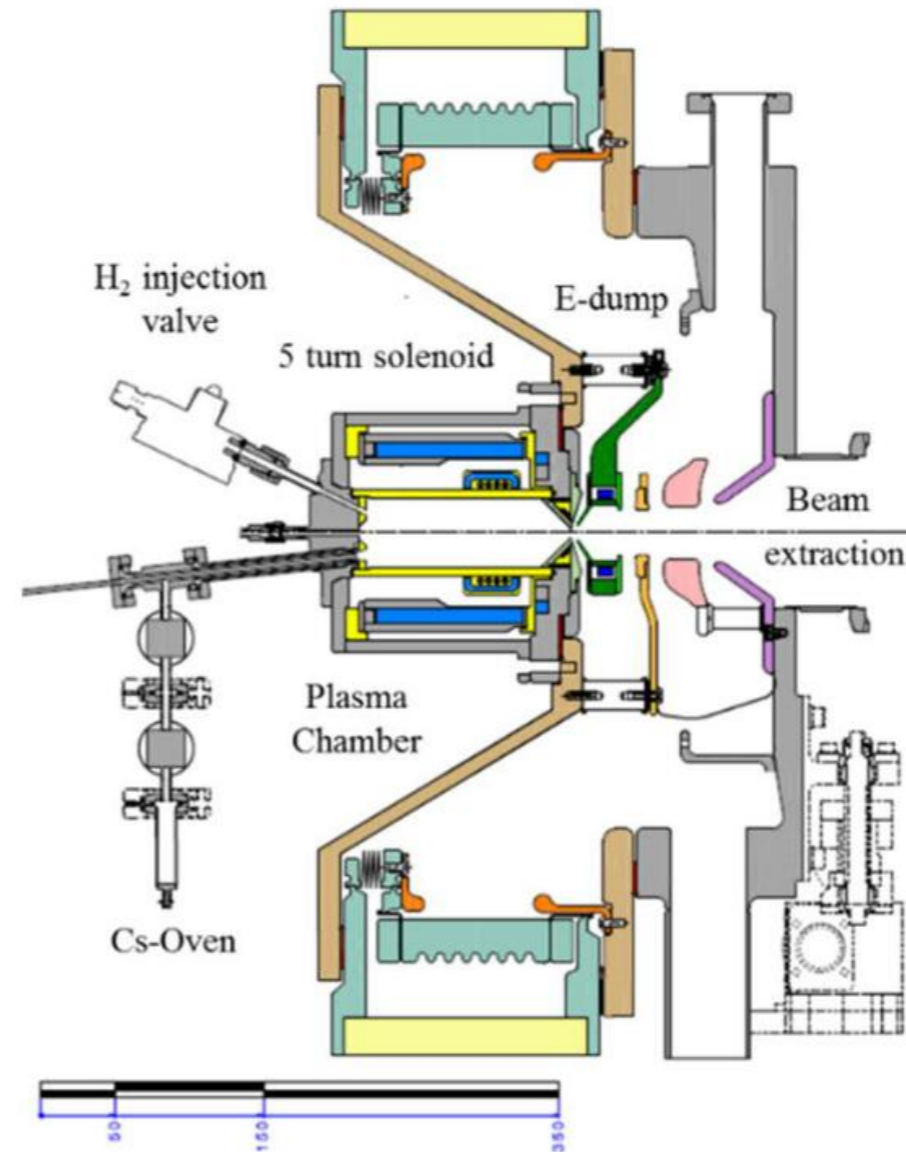
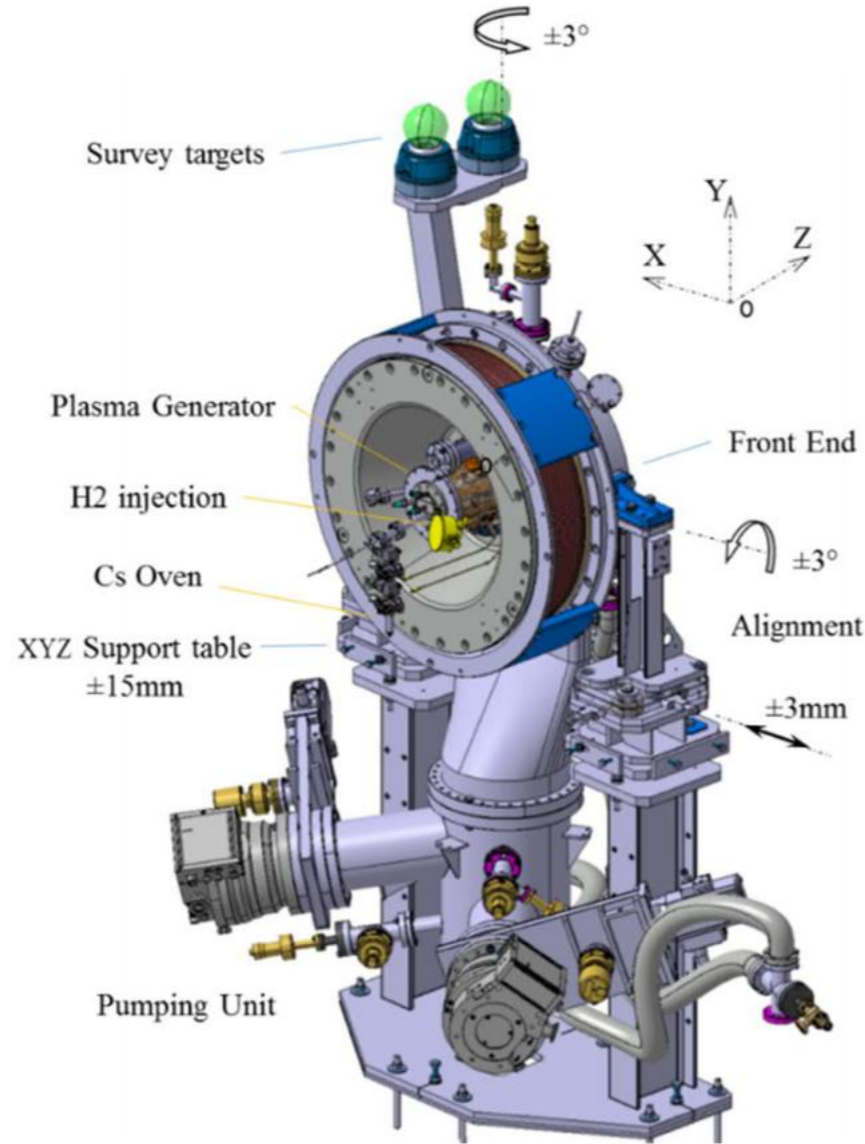


Zjonizuj



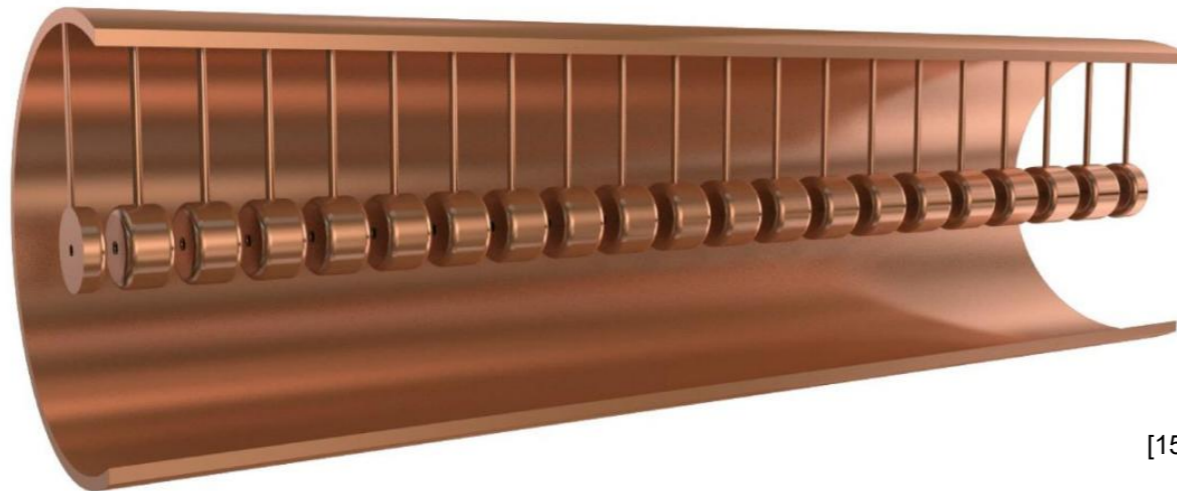
Źródło jonów

Zjonizuj



Wnęki rezonansowe (en.: RF cavities)

Przyspiesz



[15]

Siła Lorentza

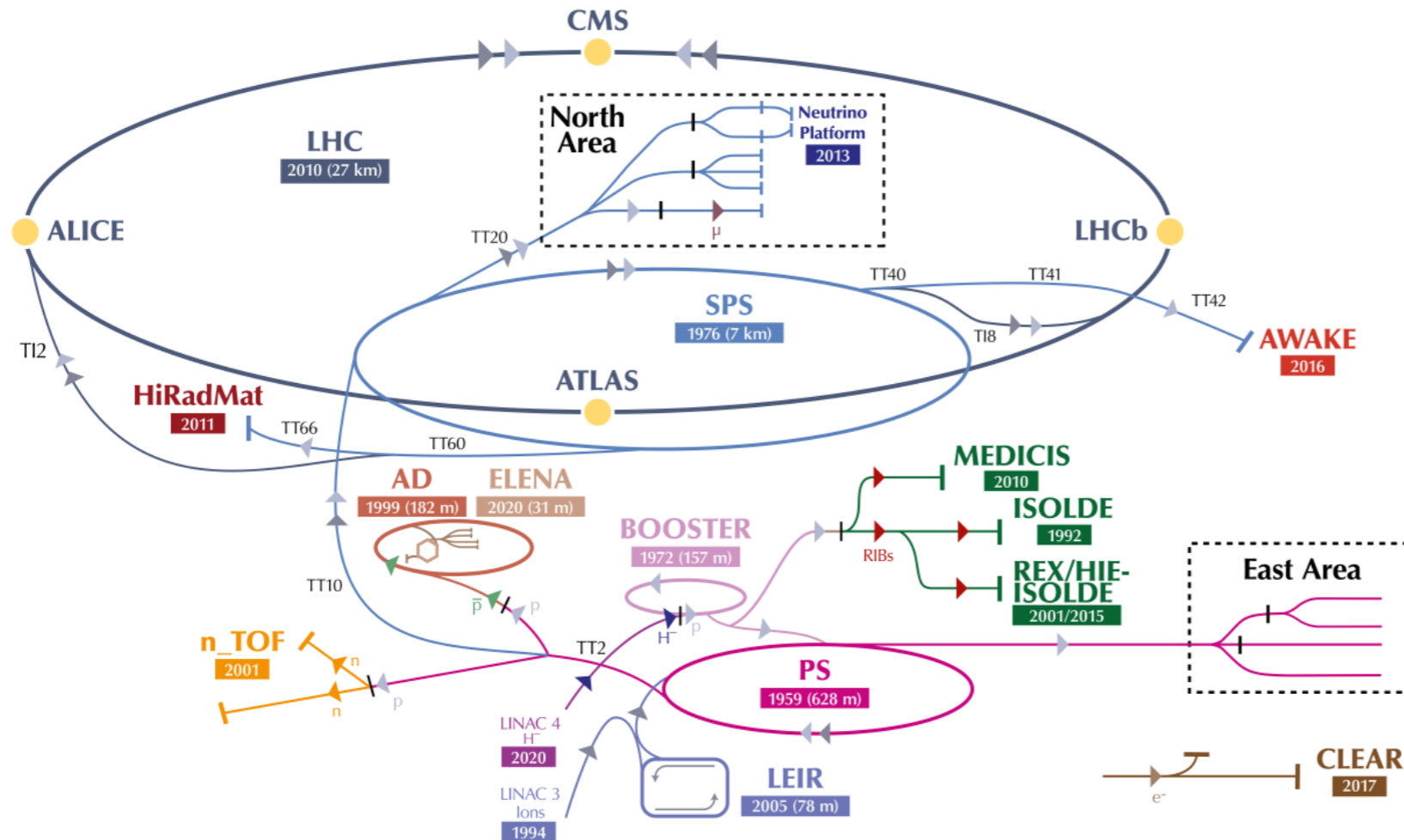
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Zasada działania:

1. Animacja LINAC (© 2014 CERN): <https://videos.cern.ch/record/1750713>
2. Animacja LHC (© 2014 CERN): <https://videos.cern.ch/record/1750705>

Naczynia połączone

Przyspiesz



Całkowita energia w punktach zderzeń: **13 TeV**

LHC: 6,5 TeV

SPS: 450 GeV

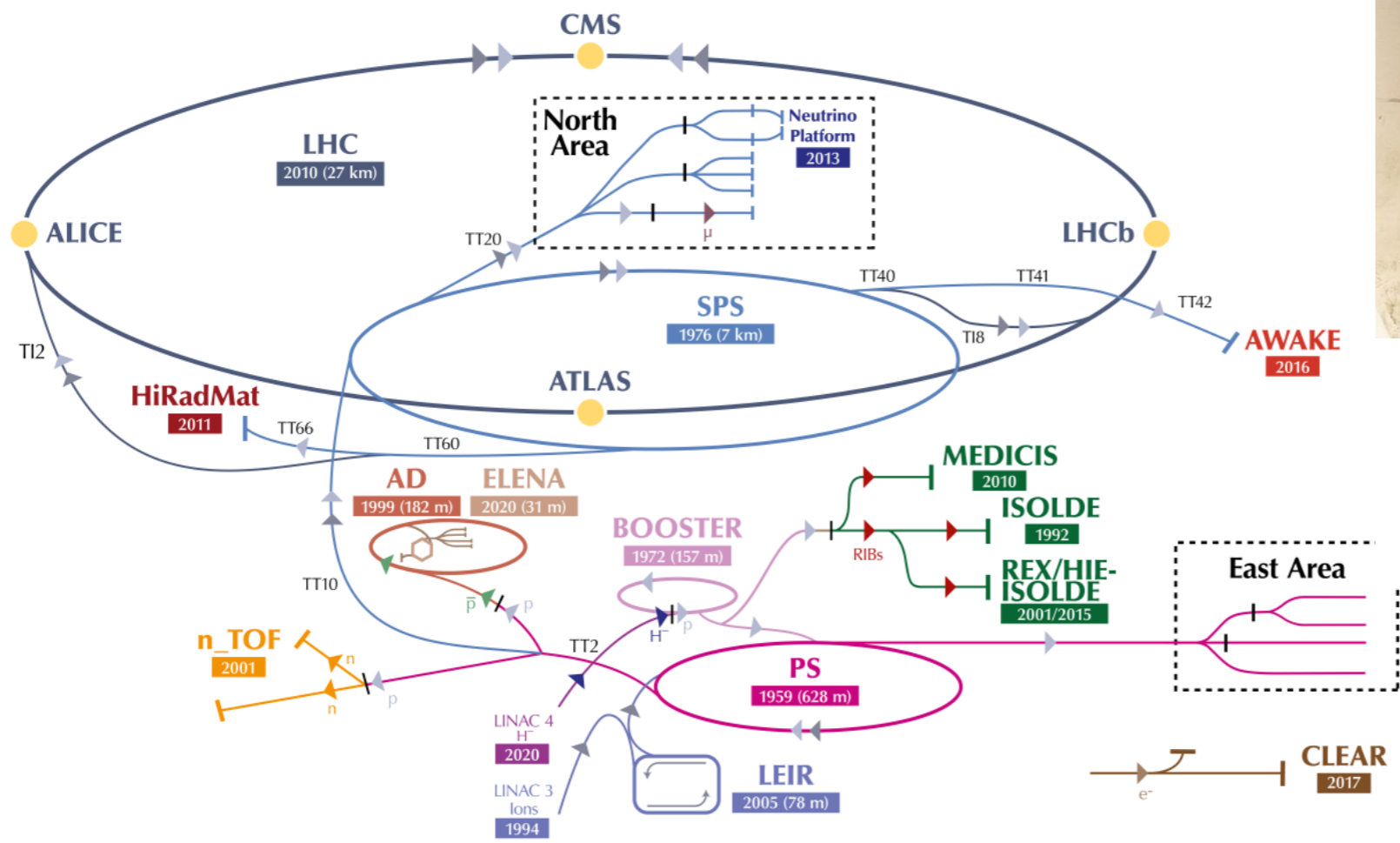
PS: 25 GeV

PSB: 1,4 GeV

LINAC 4: 160 MeV



Elektromagnesy w CERN



[1]



Siła Lorentza

LHC

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



SPS

[17]

▶ H⁻ (hydrogen anions)
 ▶ p (protons)
 ▶ ions
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
 ▶ n (neutrons)
 ▶ \bar{p} (antiprotons)
 ▶ e⁻ (electrons)
 ▶ μ (muons)
 [9]

Rodzina magnesów

Steruj



Geometria

- Dipole
- Quadrupole
- Septa
- Kickers
- ...

Technologia

- Elektromagnesy
- Magnesy stałe

- Iron dominated magnets
- Coil dominated magnets

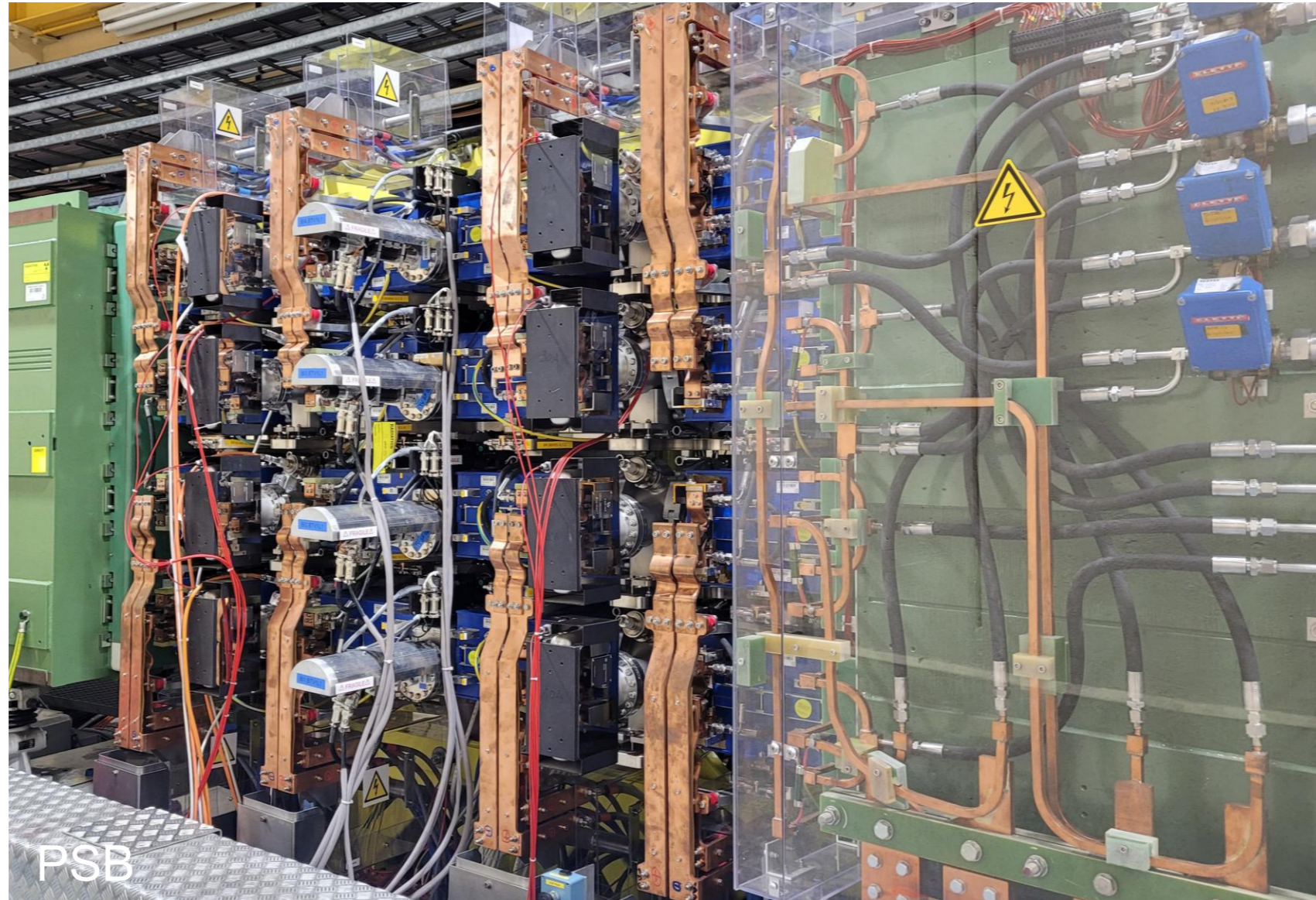
- Elektromagnesy konwencjonalne
- Elektromagnesy nadprzewodzące

Tryb pracy

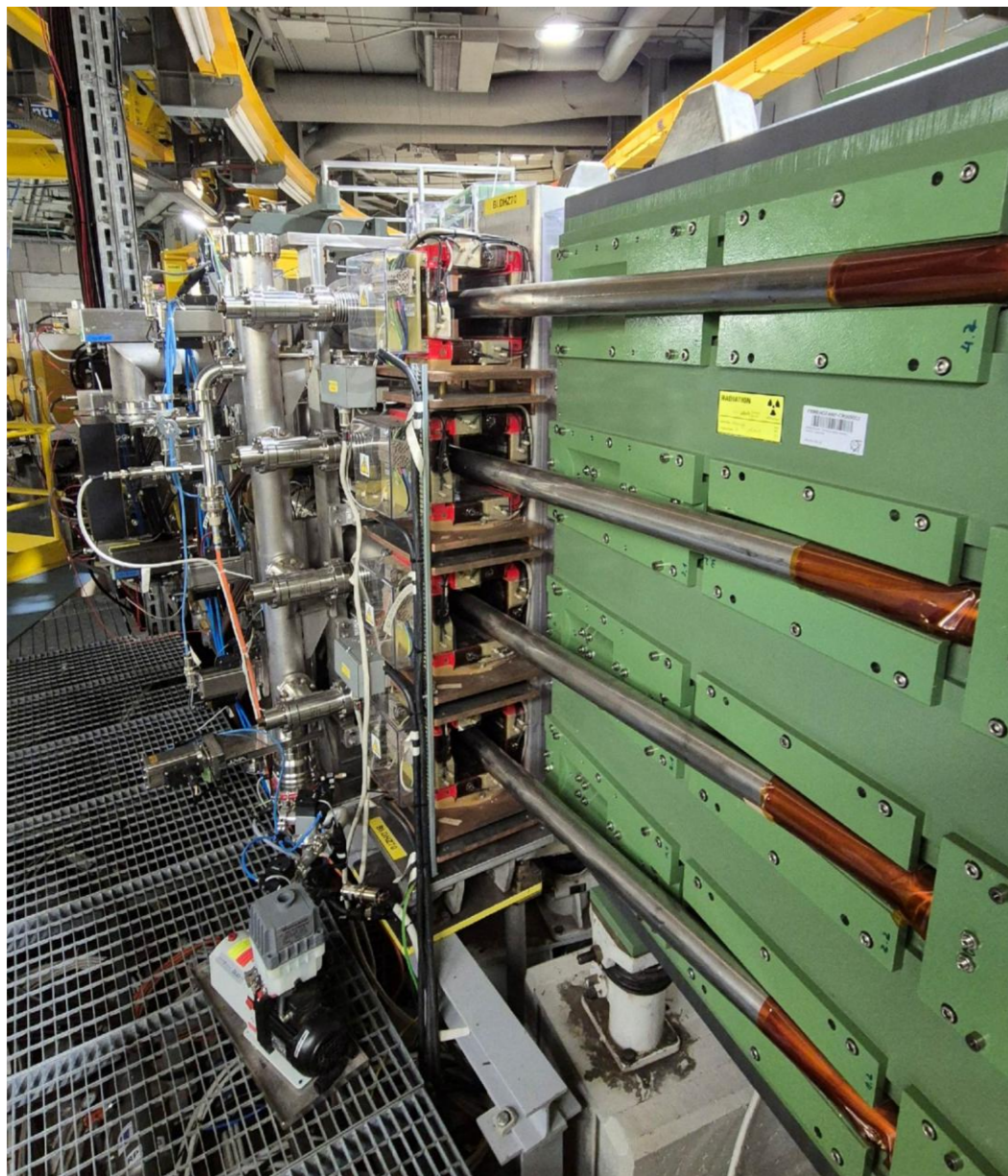
Stały, cykliczny, pulsujący...

Transport wiązki

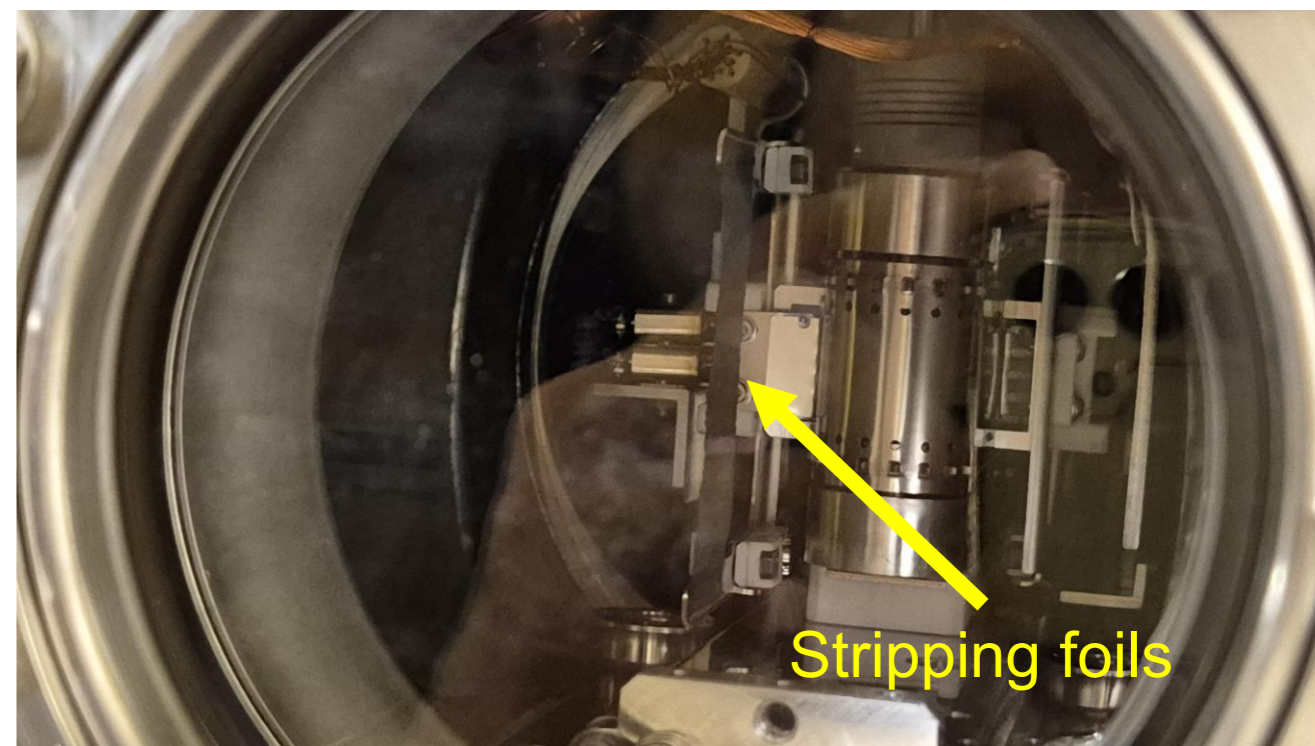
Steruj



Transport wiązki



Specjalne folie (en.: stripping foils) są wykorzystywane do wyłapywania elektronów; od tej momentu w akceleratorze poruszają się jedynie protony.



Elektromagnesy do transportu wiązki

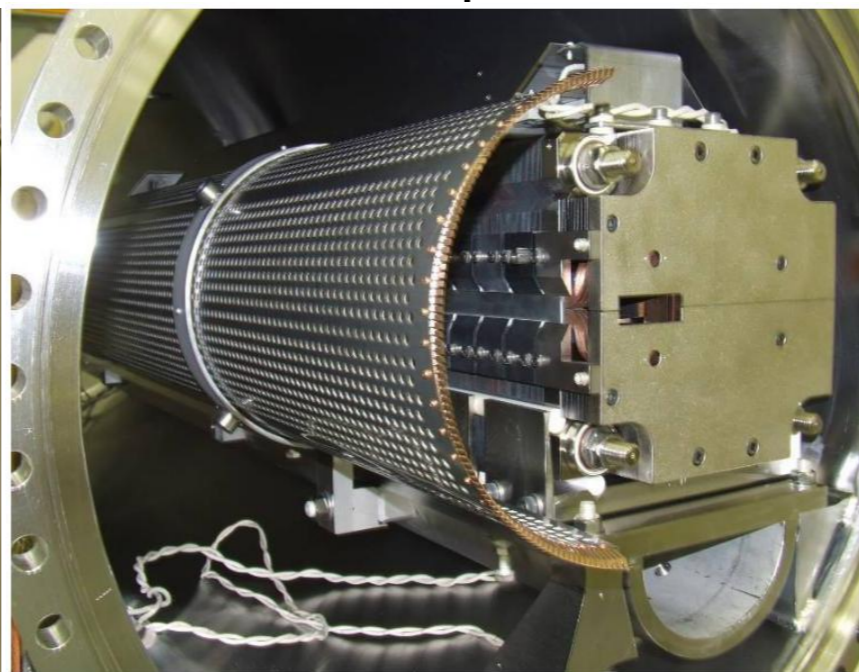
Steruj



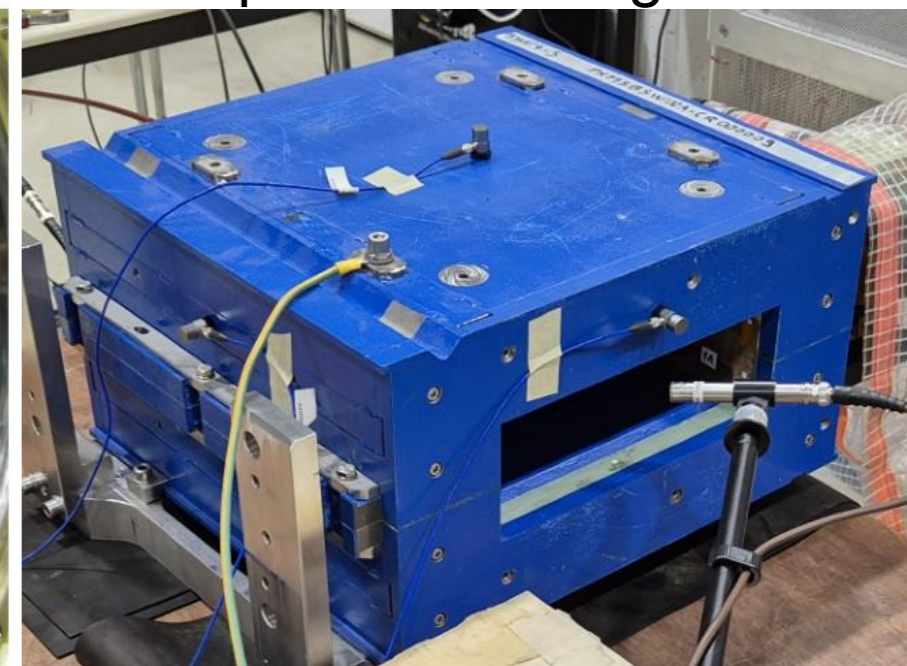
Kickers



Septa



Bumper electromagnets

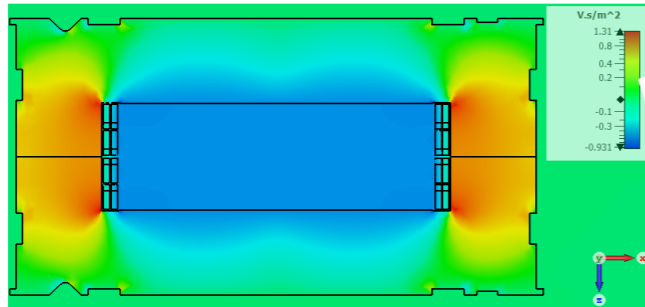




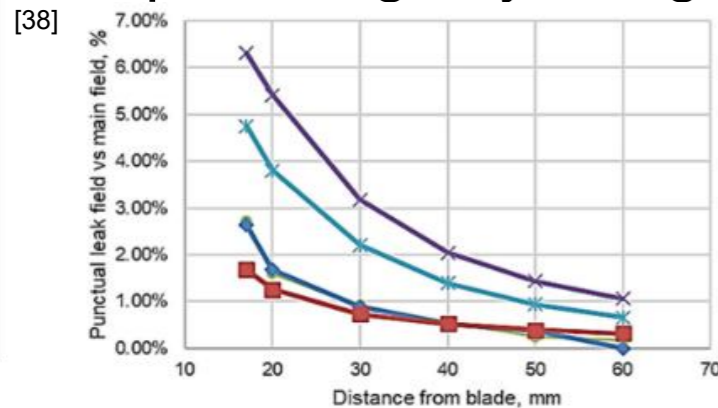
Wyzwania w elektromagnesach do transportu wiązki

Wymagania

- Jednorodne pole magnetyczne



- Redukcja wycieku pola magnetycznego



Obciążenia

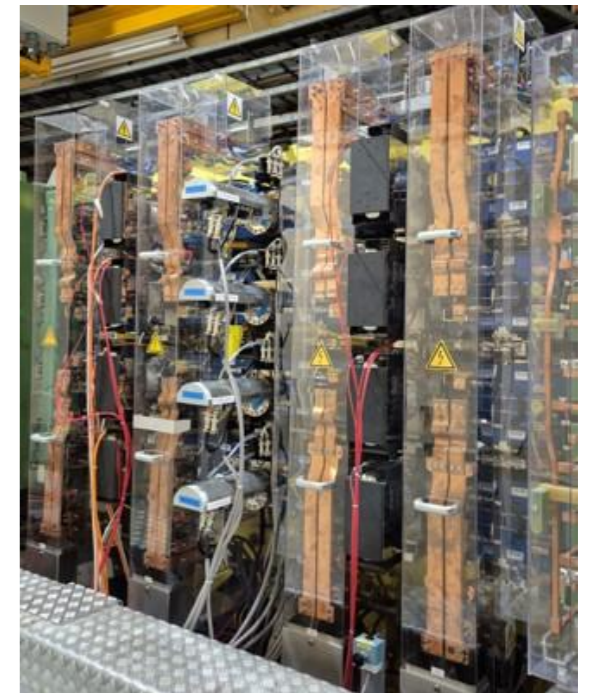
- Siła elektromagnetyczna
- Zmęczenie materiału
- Ciepło



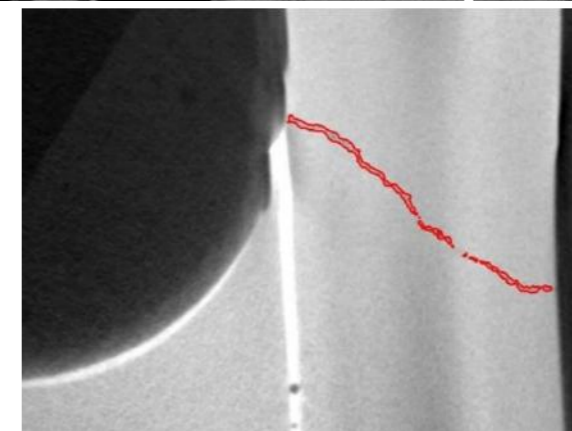
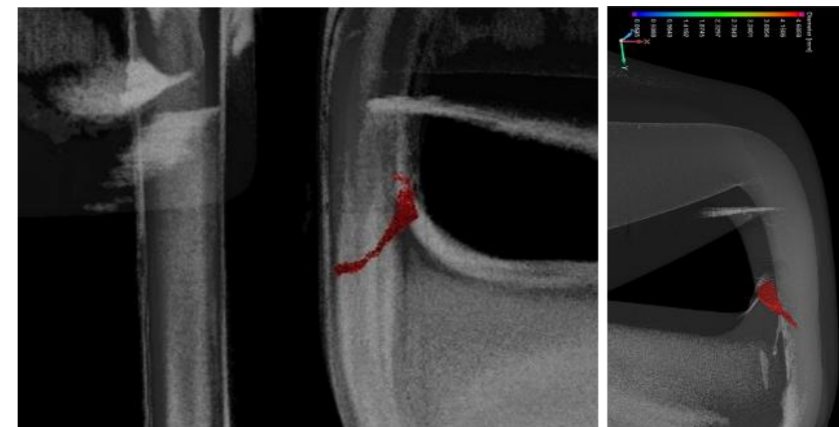
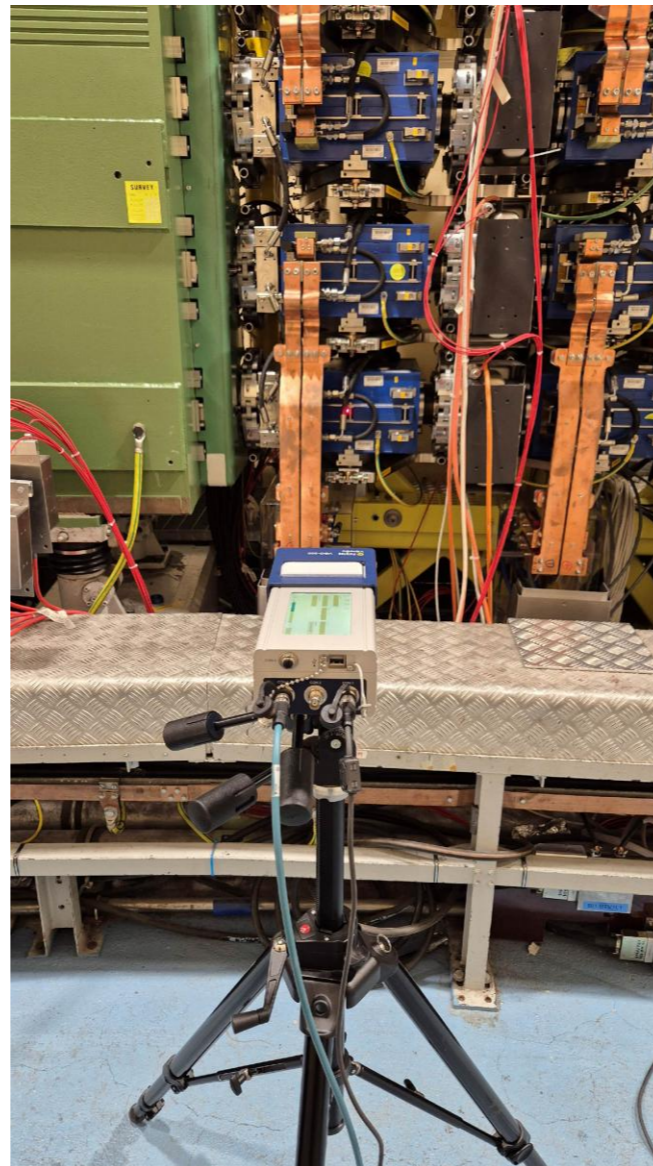
>10 milionów cykli naprężeń rocznie!

Ograniczenia

- Promieniowanie
- Impedancja wiązki
- Wysoka próżnia
- Ograniczenia przestrzenne



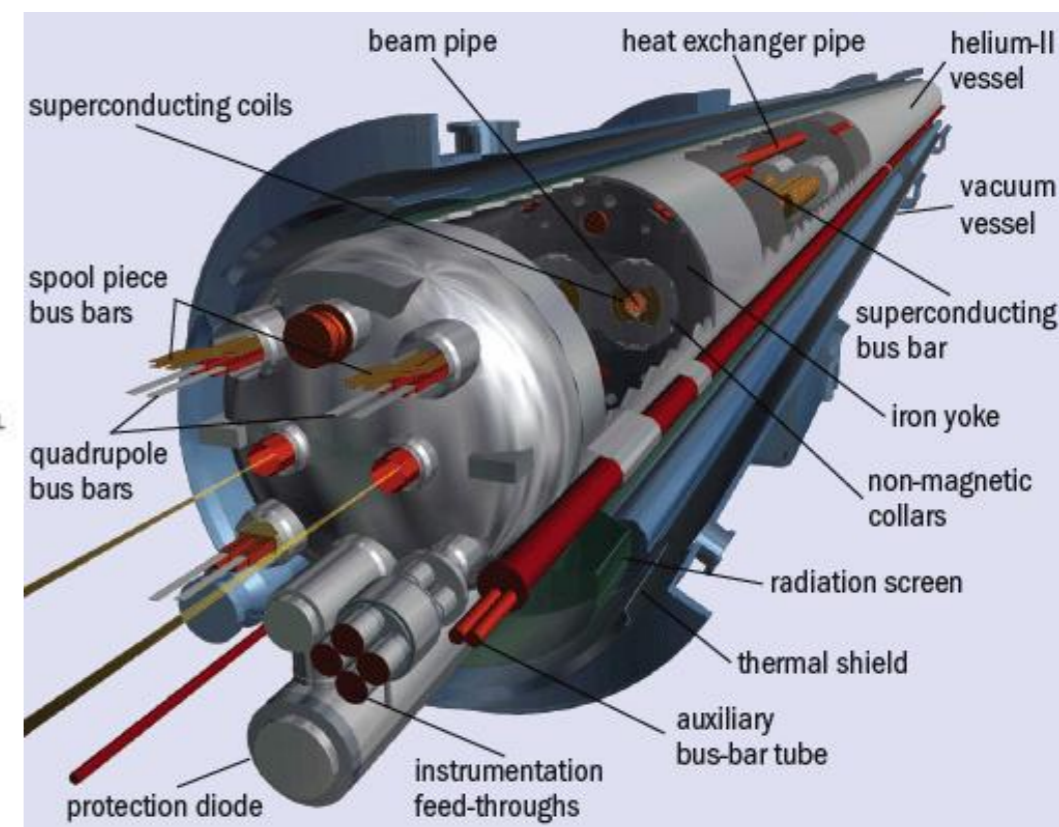
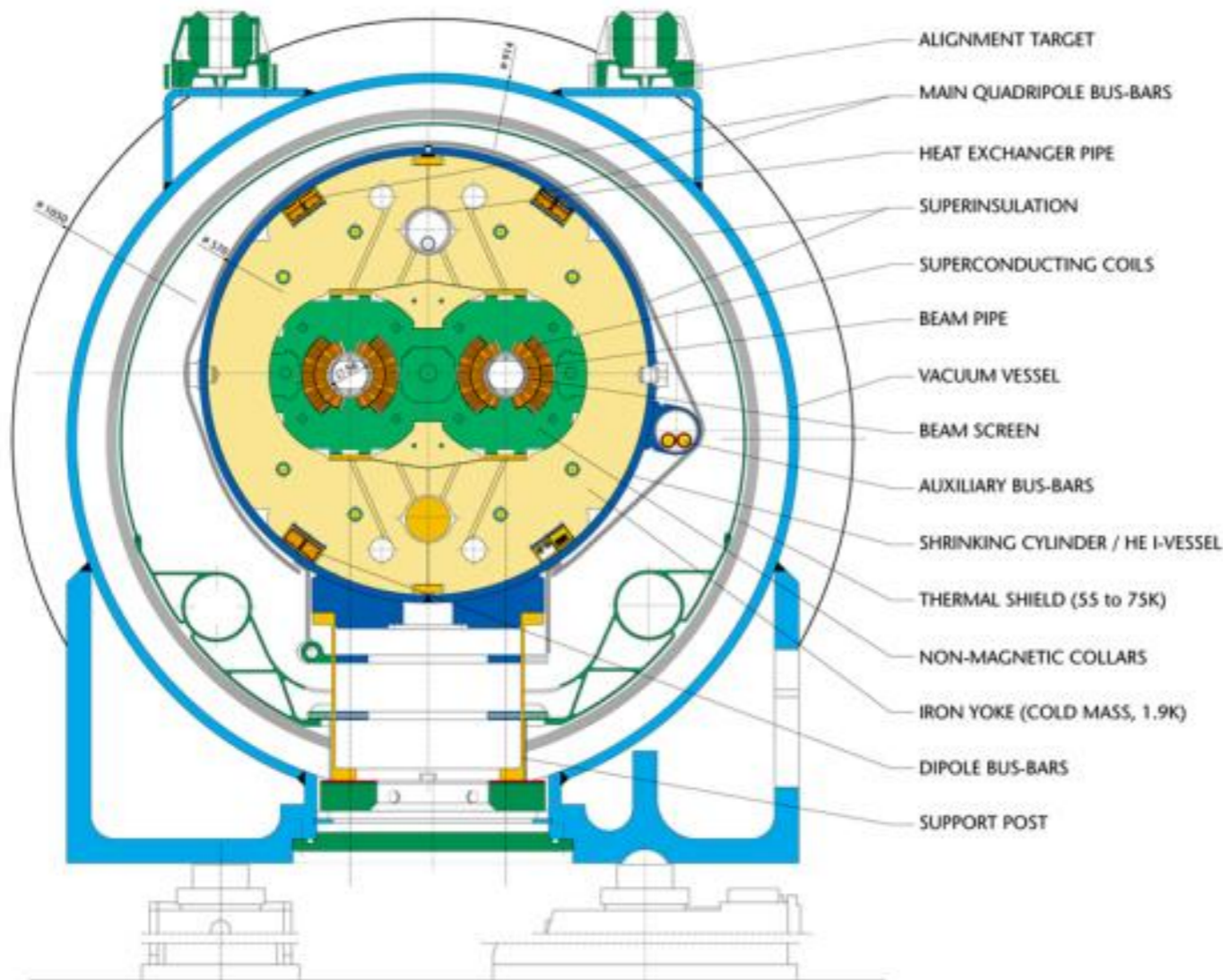
Kontrola, monitorowanie i interwencje



Dipole

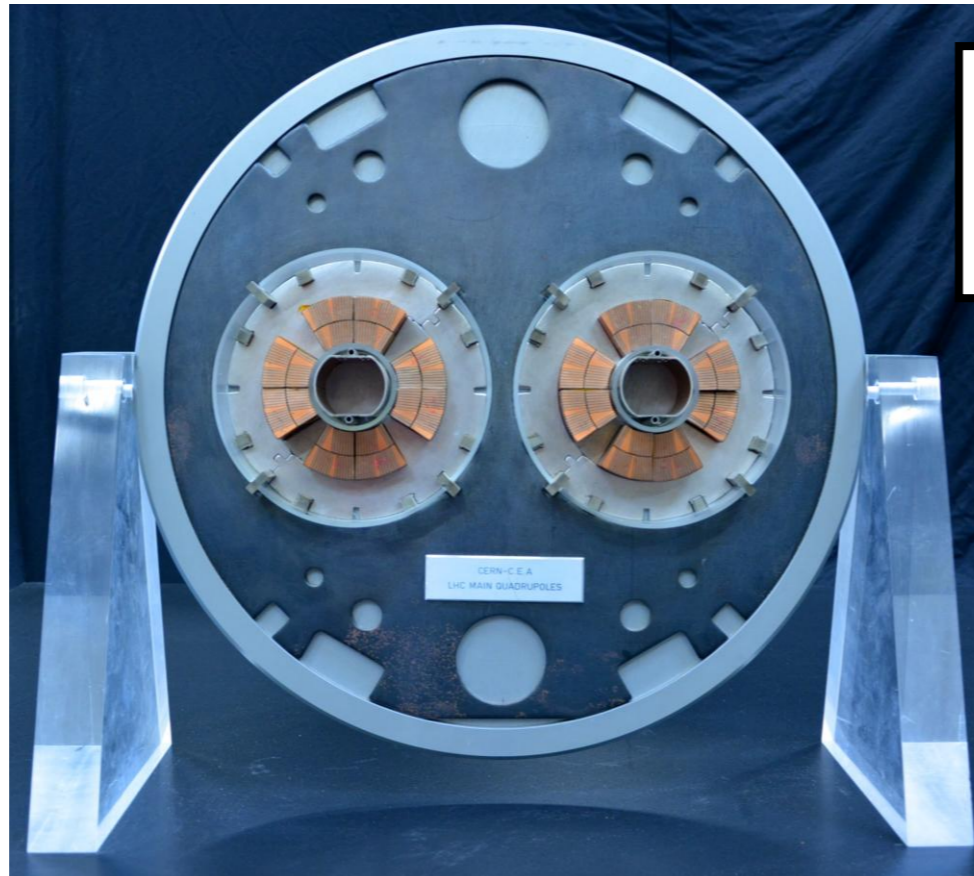


LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



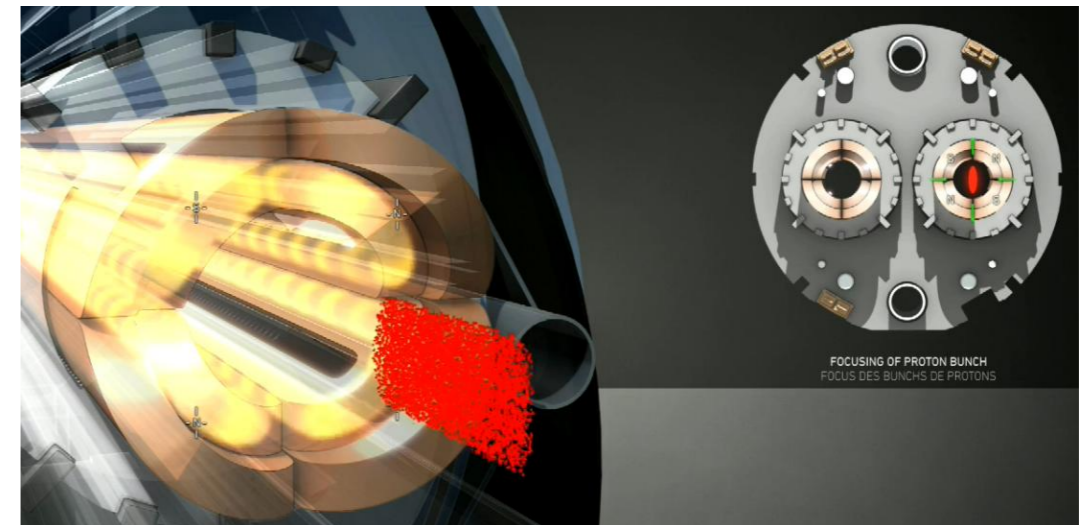


Quadrupole



[24]

Magnesy skupiające
(en.: **quadrupoles**) jest określenie skupianie wiązki w jednej z płaszczyzn.



Zasada działania:

Animacja (© CERN): <https://home.cern/resources/video/accelerators/quadrupole-animation>

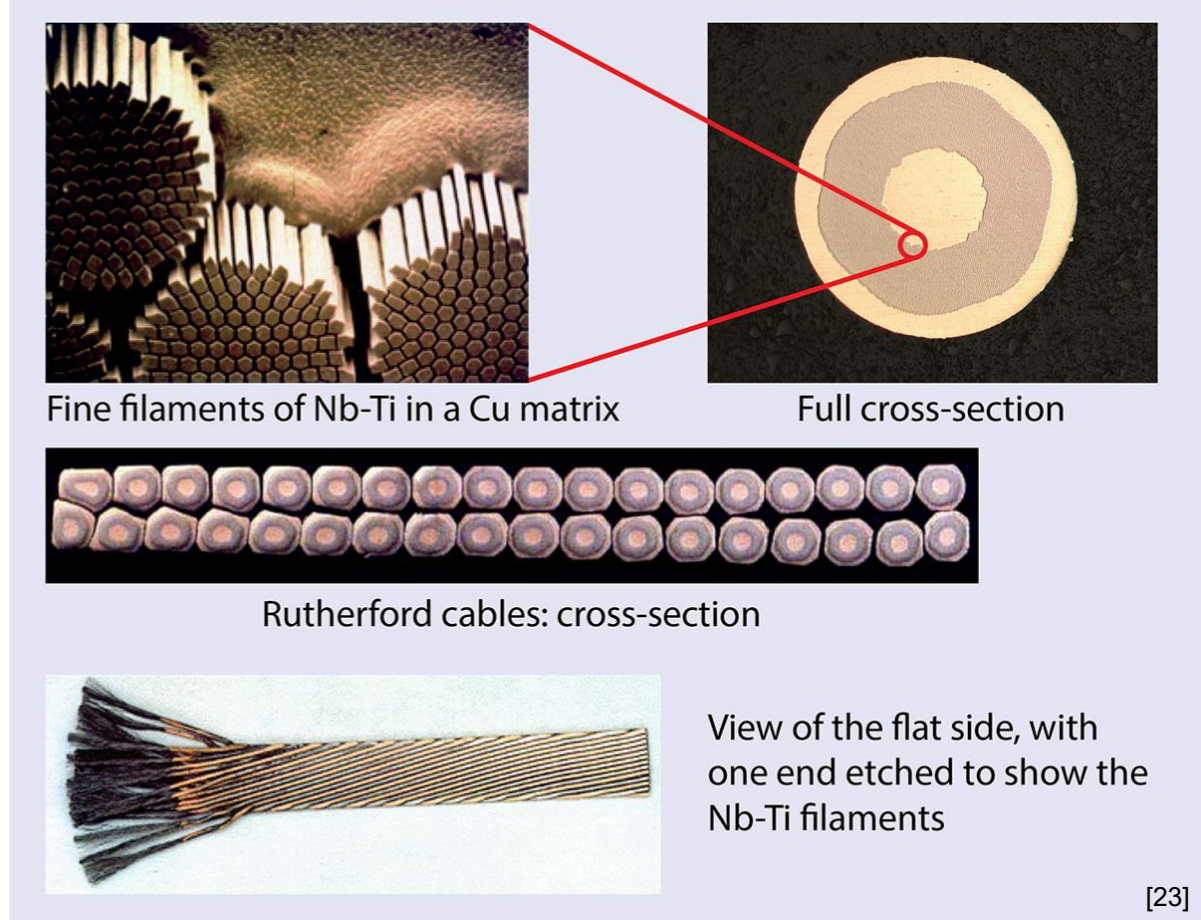
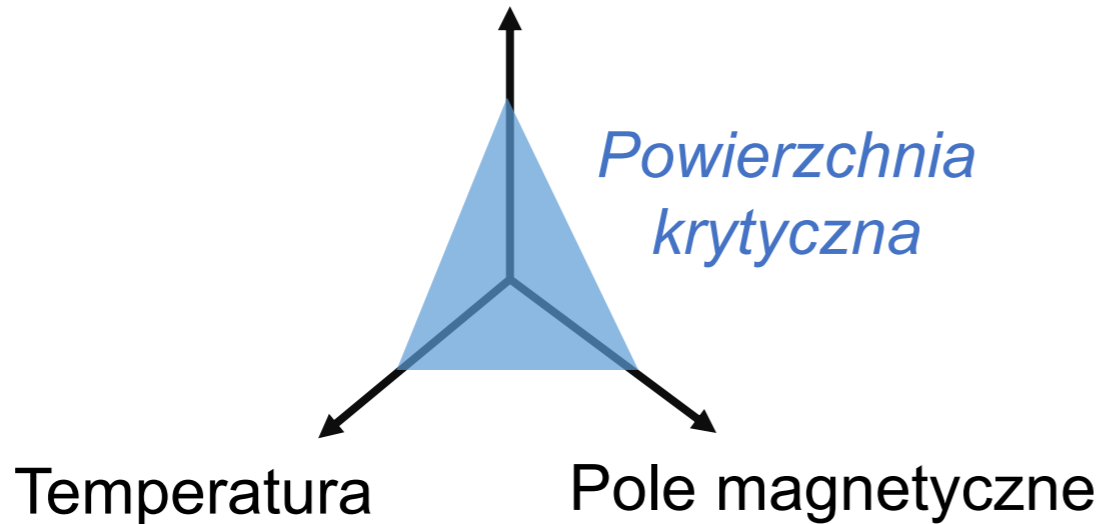


Nadprzewodnictwo

Właściwości:

- Brak oporu elektrycznego
- Efekt Meissnera

Gęstość natężenia prądu



Szczególną uwagę należy zwrócić na zjawisko **zaniku stanu nadprzewodzącego (en.: quench)**.

Nadprzewodniki **niskotemperaturowe:**

- NbTi
- Nb₃Sn

Nadprzewodniki **wysokotemperaturowe:**

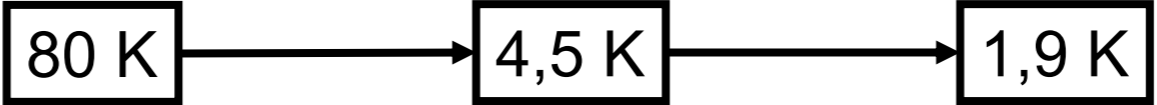
- Taśmy REBCO



Nadciekły hel

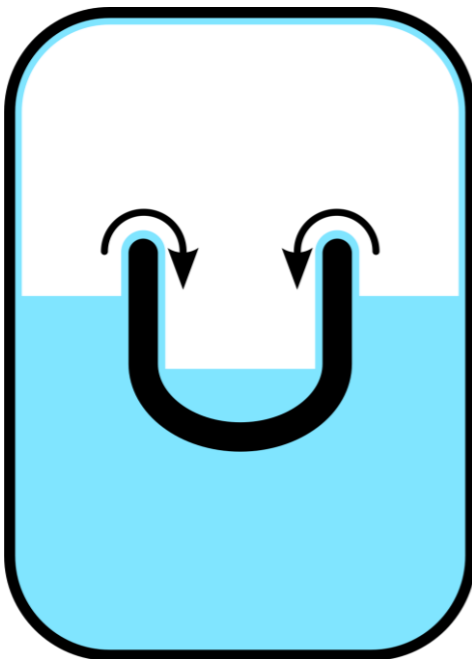


Wielki Zderzacz Hadronów to największy system kriogeniczny na świecie i jedno z najzimniejszych miejsc na Ziemi.



Stan nadciekły

Zbiorniki He

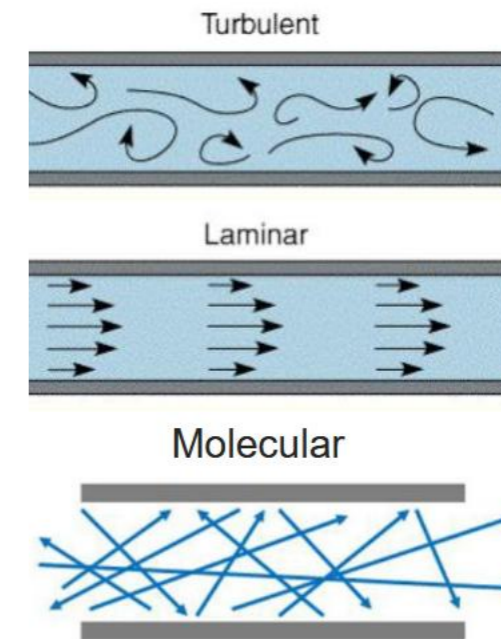


Wymagania wysokiej próżni

Niektóre z elementów akceleratora pracują w wysokiej próżni co ogranicza dobór materiałów. Bardzo często jest to związane ze zjawiskiem **wydzielania gazów (en.: outgassing)**.

Niska próżnia ($10^3 - 1$ mbar)

Wysoka ($10^{-3} - 10^{-7}$ mbar) oraz
ultra wysoka próżnia ($10^{-7} - 10^{-12}$ mbar)



[29]

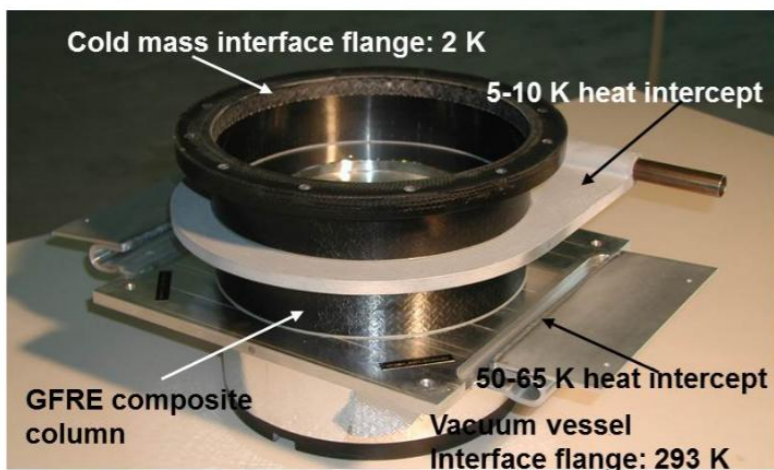
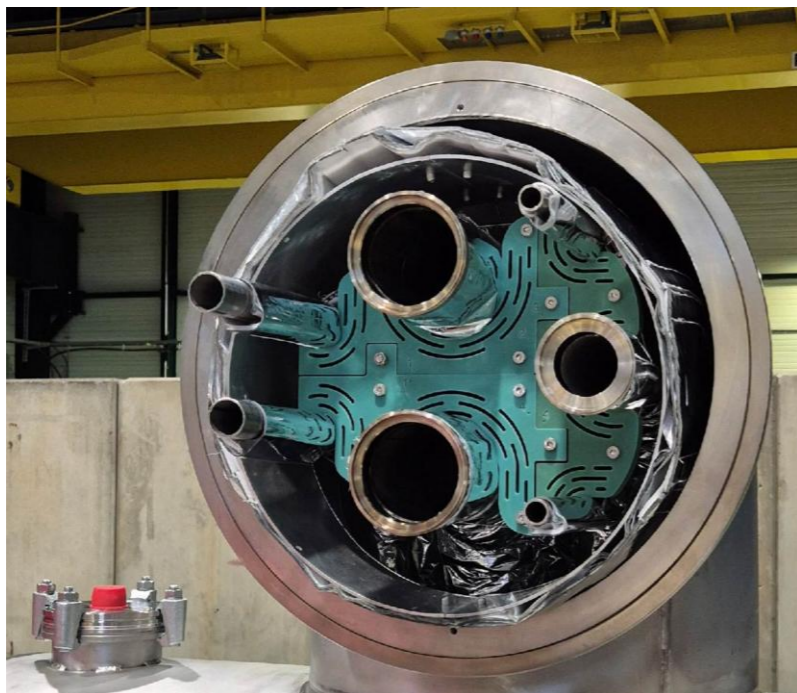
Za względu na różnicę ciśnień (bądź wzrost ciśnienia - awaria) często przy projektowaniu konieczna jest zgodność z normami dla **zbiorników ciśnieniowych**, jak również analiza wytrzymałości na **wyboczenie**.

Walka o każdy Wat

Przewodnictwo

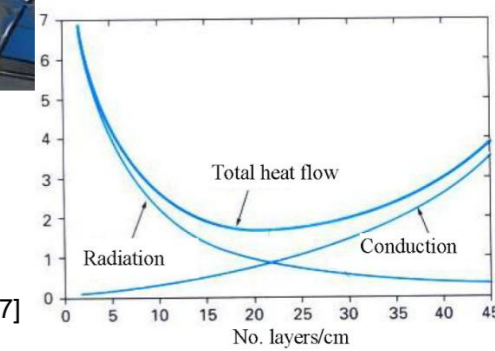
Konwekcja

Promieniowanie 



Koszt odprowadzania ciepła
(w temp. 1,8 K)

1 000 W na 1 W

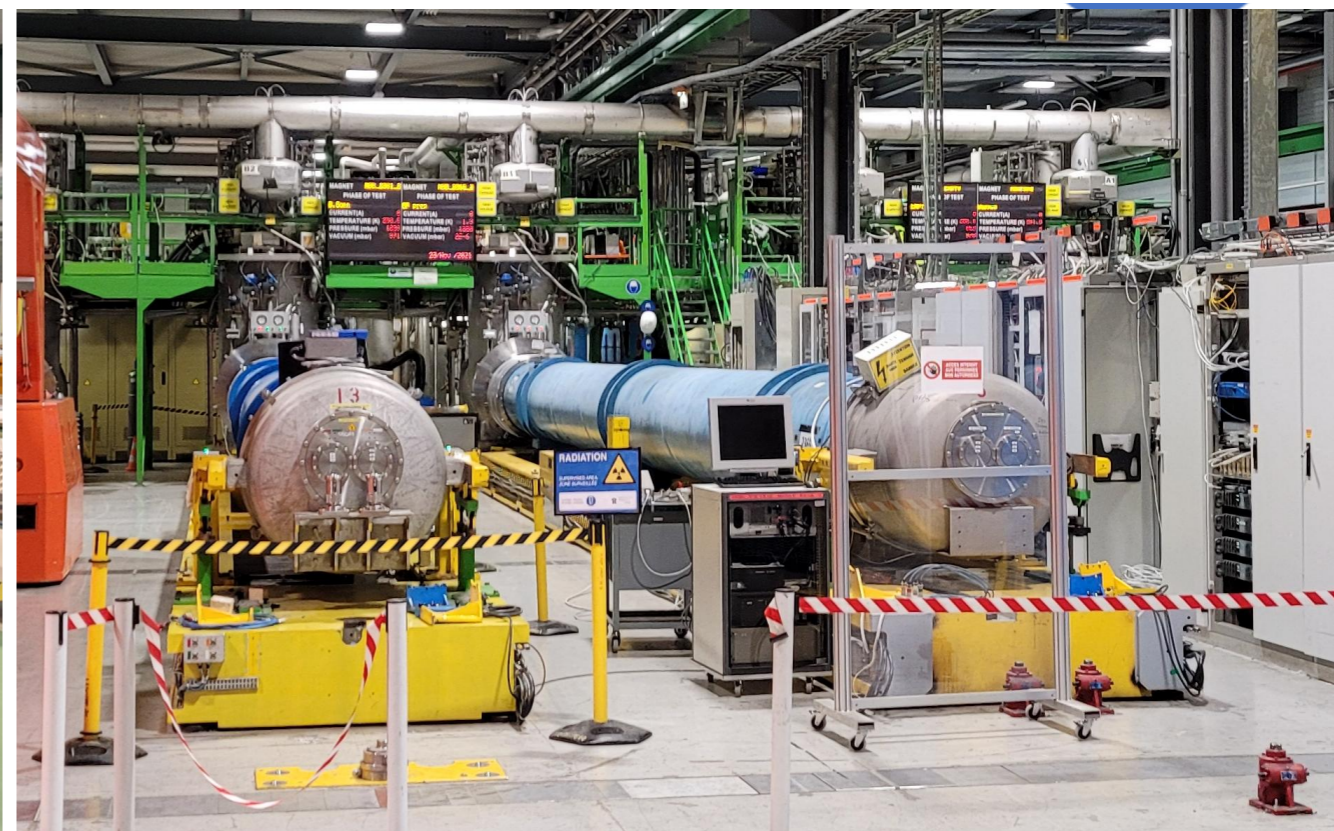




Instalacja i testowanie

Instalacja “serca magnesu”
(en.: *cold mass*)

Testowanie
w temperaturach kriogenicznych



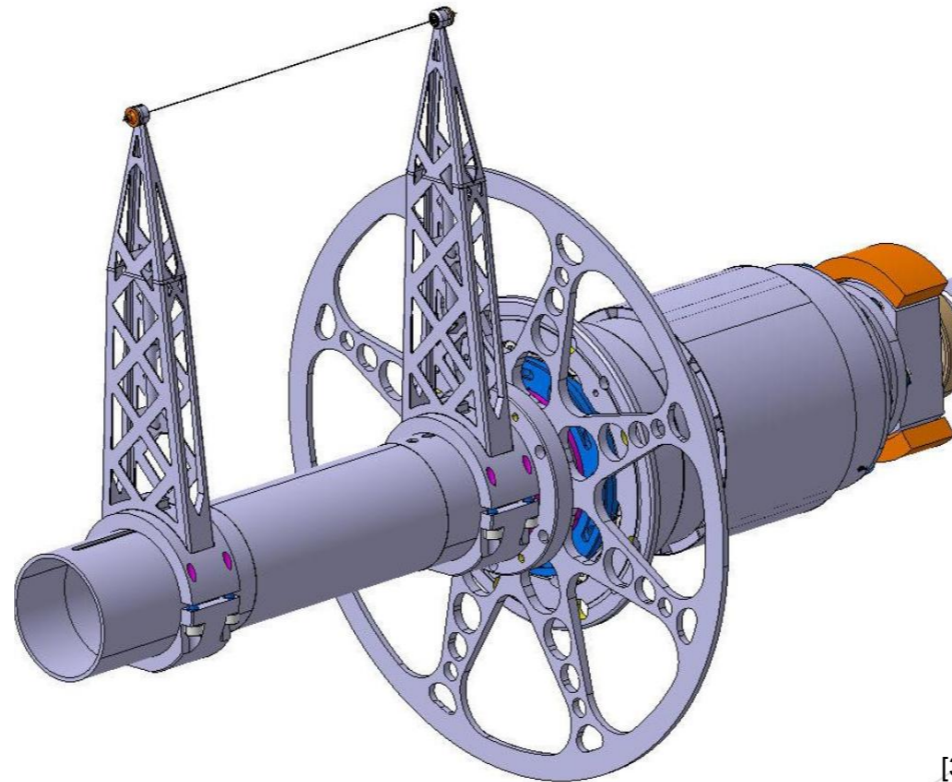
CCC – CERN Control Center

Monitoruj



Wire scanner

Zadaniem skanera (en.: wire scanner) jest pomiar profilu wiązki.



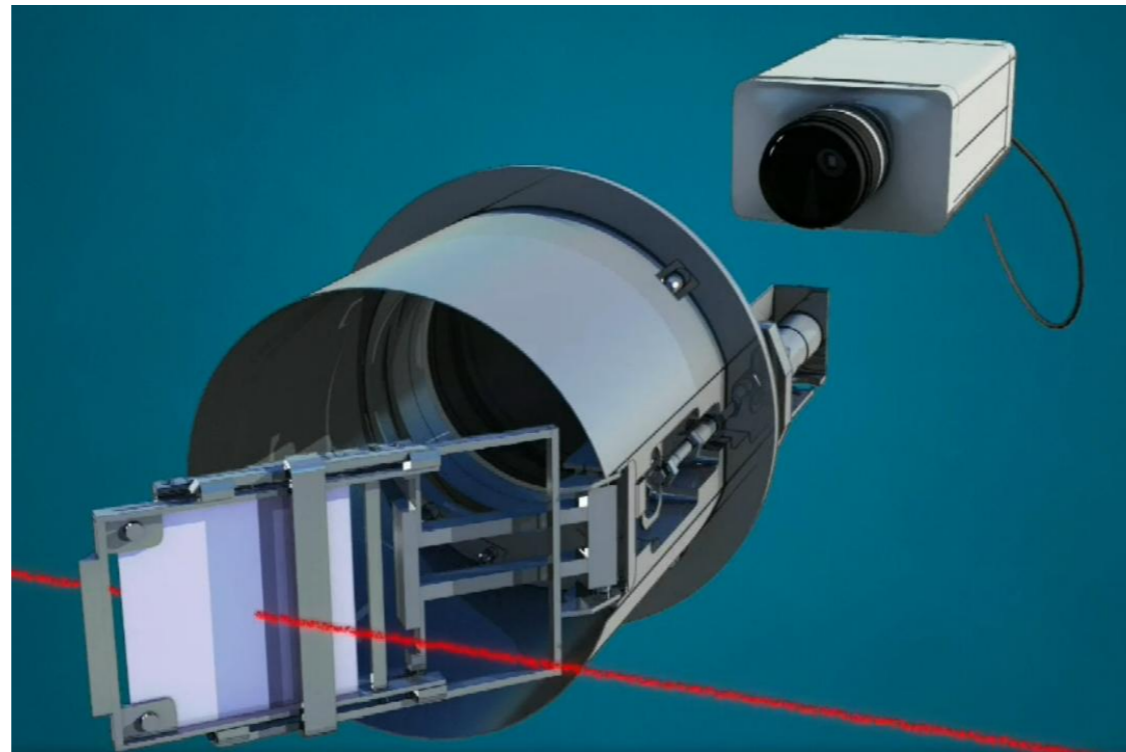
[31]

Zasada działania:

Animacja (© 2014 CERN): <https://videos.cern.ch/record/1750707>

Beam visualization screen

Zadaniem specjalnego ekranu (en.: **beam visualization screen**) jest określenie położenia wiązki.



Zasada działania:

Animacja (© 2014 CERN): <https://videos.cern.ch/record/1750709>

Kolimatory

Zadaniem kolimatorów jest “czyszczenie” wiązki z zagubionych cząstek.



[28]

Zasada działania:

Animacja (© 2014 CERN): <https://videos.cern.ch/record/1750704>

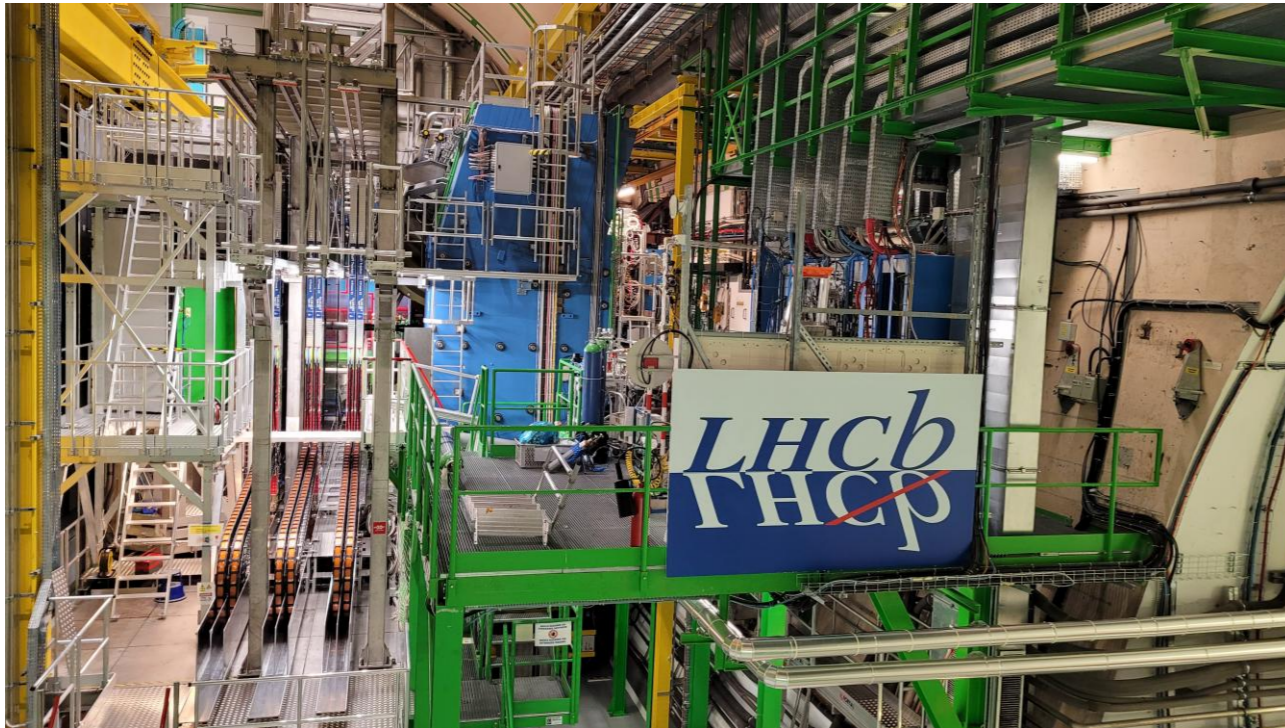
Detektory

Zderz!



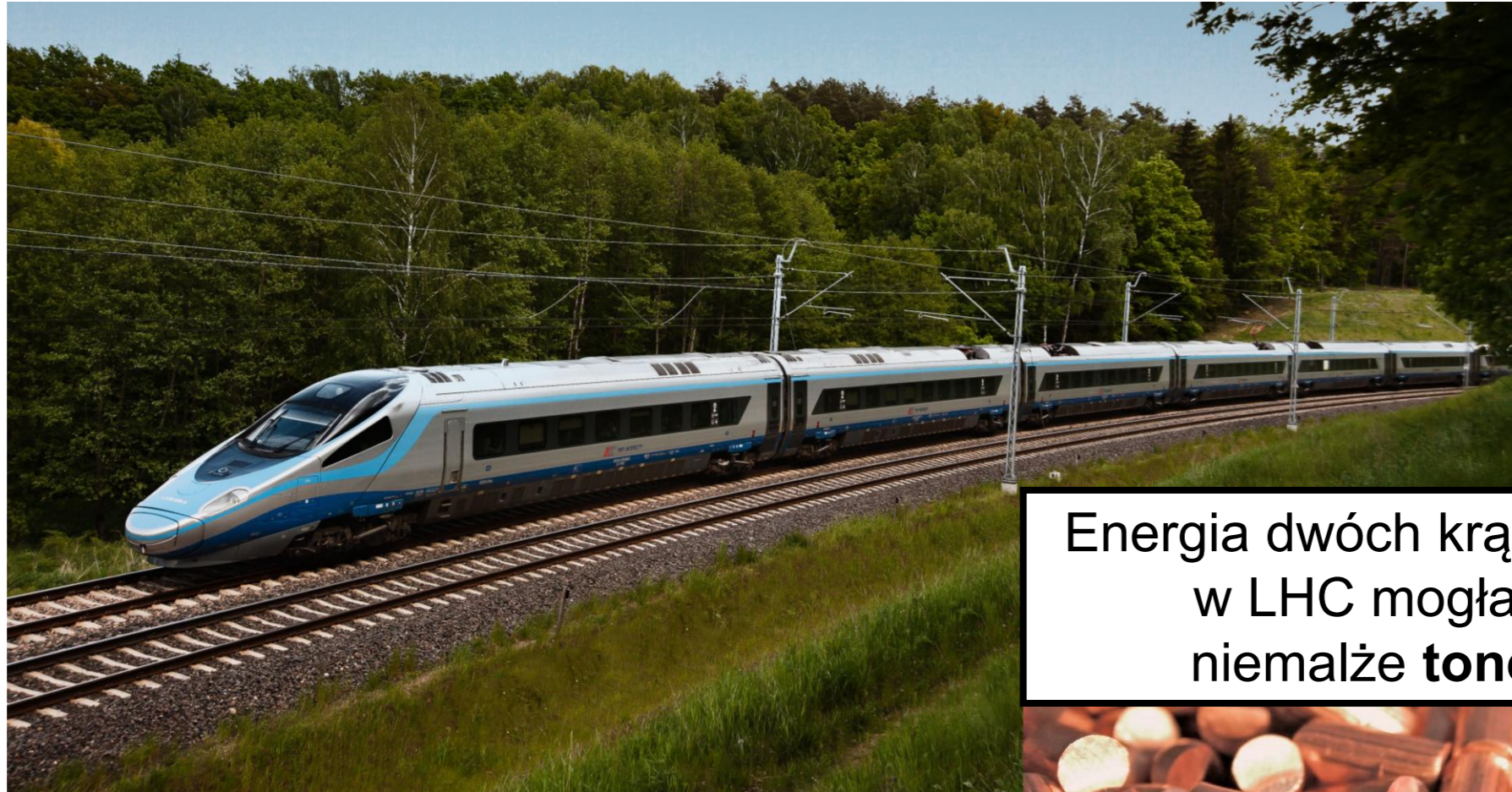
4 detektory Wielkiego Zderzacza Hadronów:

- ATLAS
- CMS
- ALICE
- LHCb



Zatrzymać rozpędzone Pendolino

Zderz!



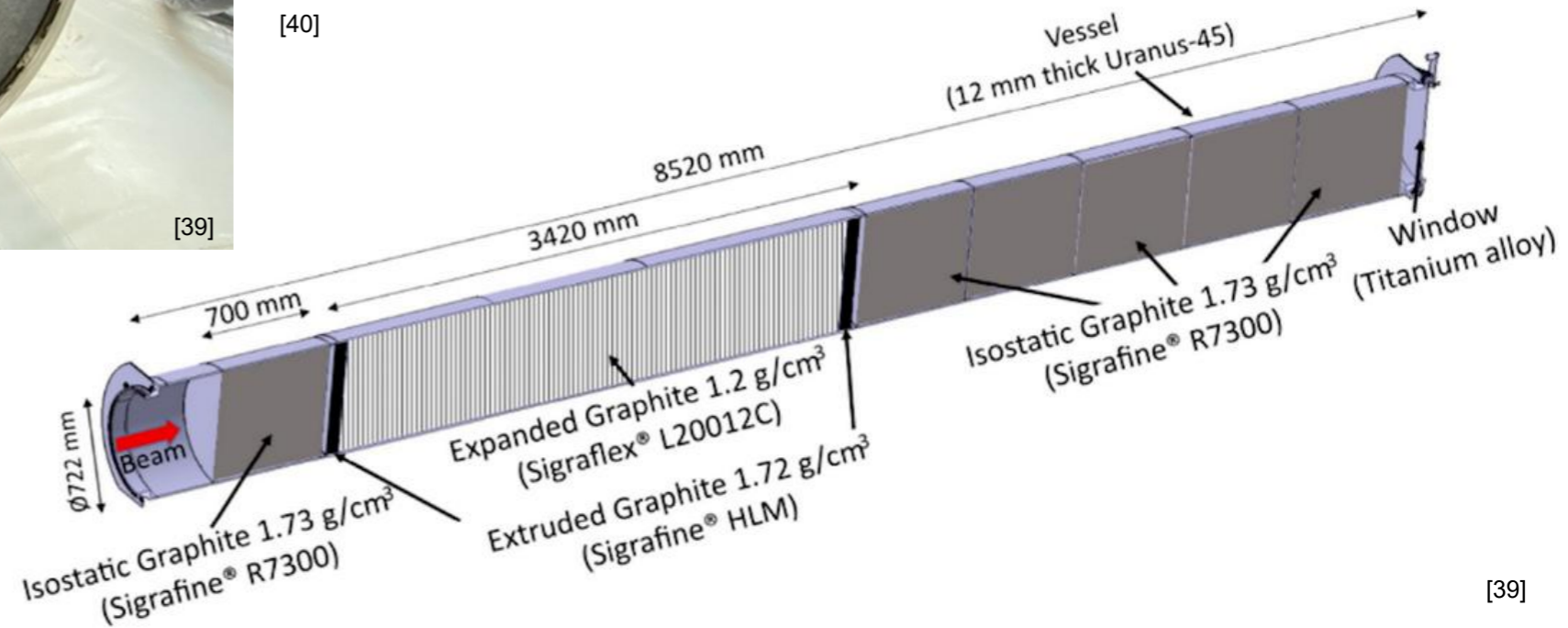
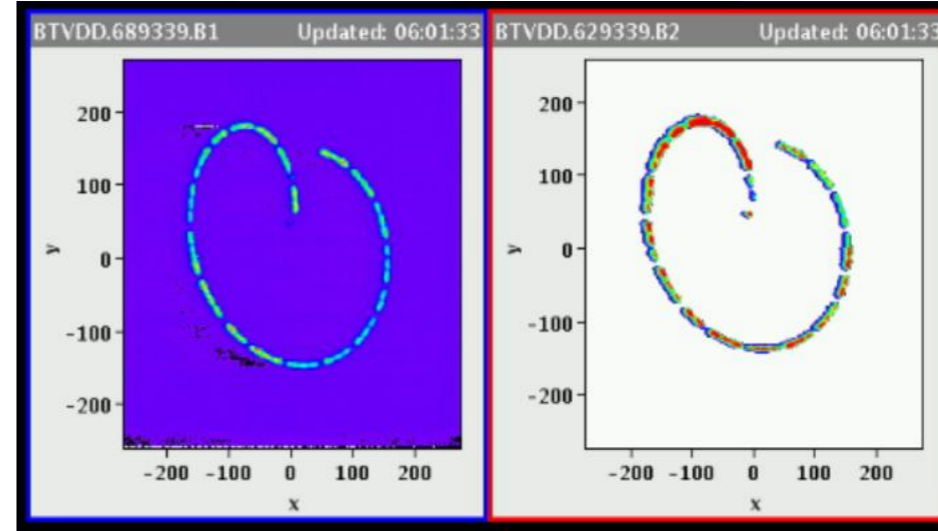
Energia dwóch krążących wiązek
w LHC mogłaby stopić
niemalże **tonę miedzi.**



[32, 33]

Beam dumps

Zderz!

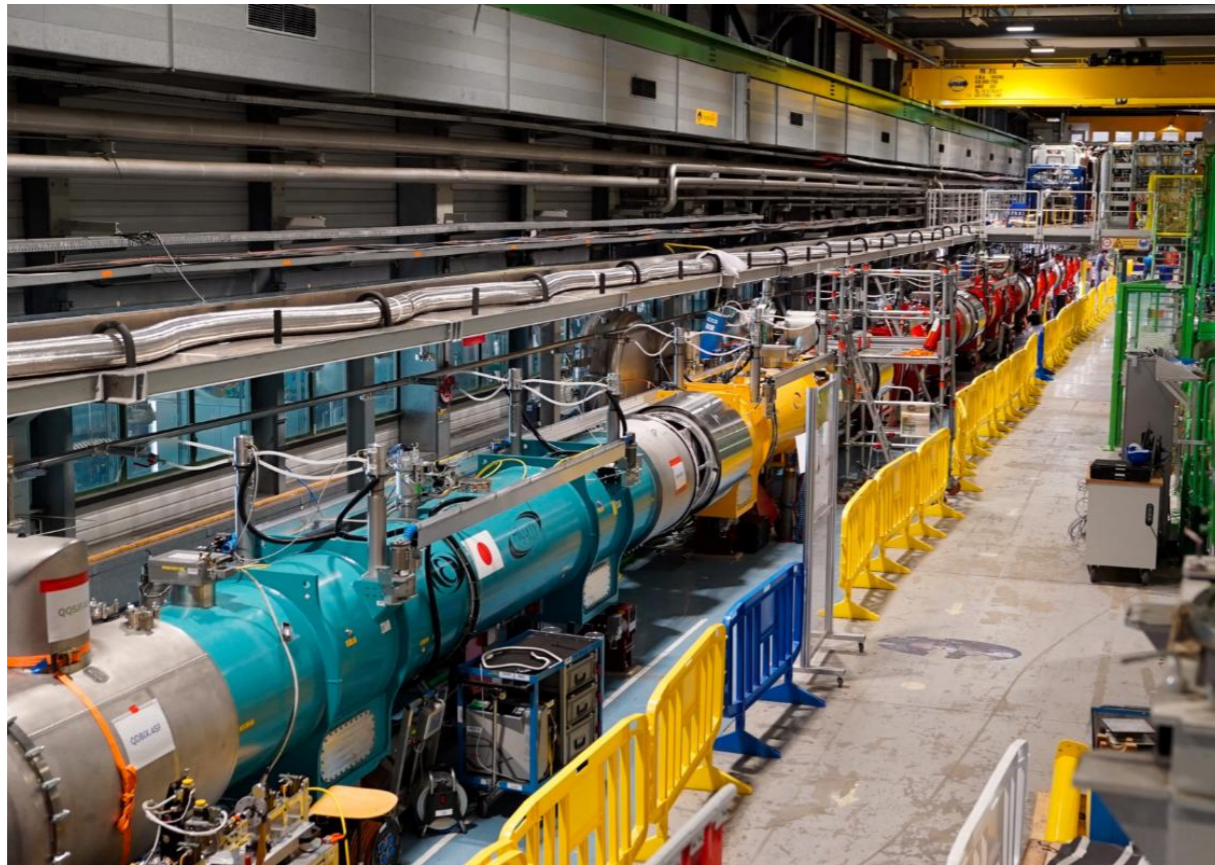




Przyszłość CERN

Wielki Zderzacz Hadronów Wysokiej Światłości

NEW TECHNOLOGIES FOR THE HILUMI LHC



[34, 35]

FOCUSING MAGNETS



12 more powerful quadrupole magnets will squeeze the beams more tightly before the particles collide in ATLAS and CMS

SUPERCONDUCTING LINK

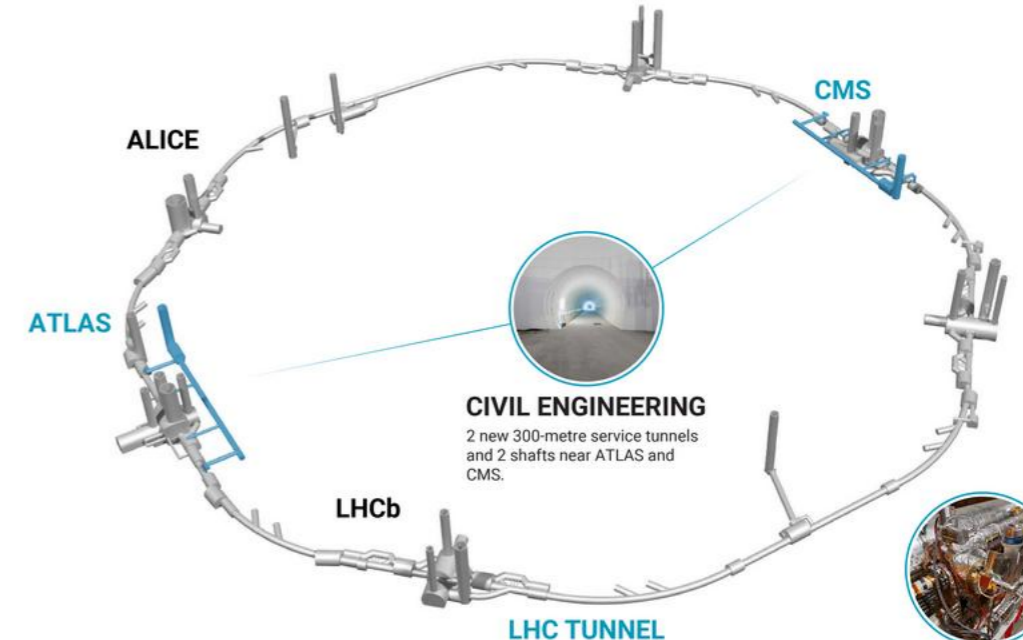


Electrical transmission lines made of high-temperature superconductors will feed the new quadrupole magnets on each side of ATLAS and CMS

CRAB CAVITIES



16 superconducting crab cavities will tilt the beams before the particles collide in ATLAS and CMS



CIVIL ENGINEERING

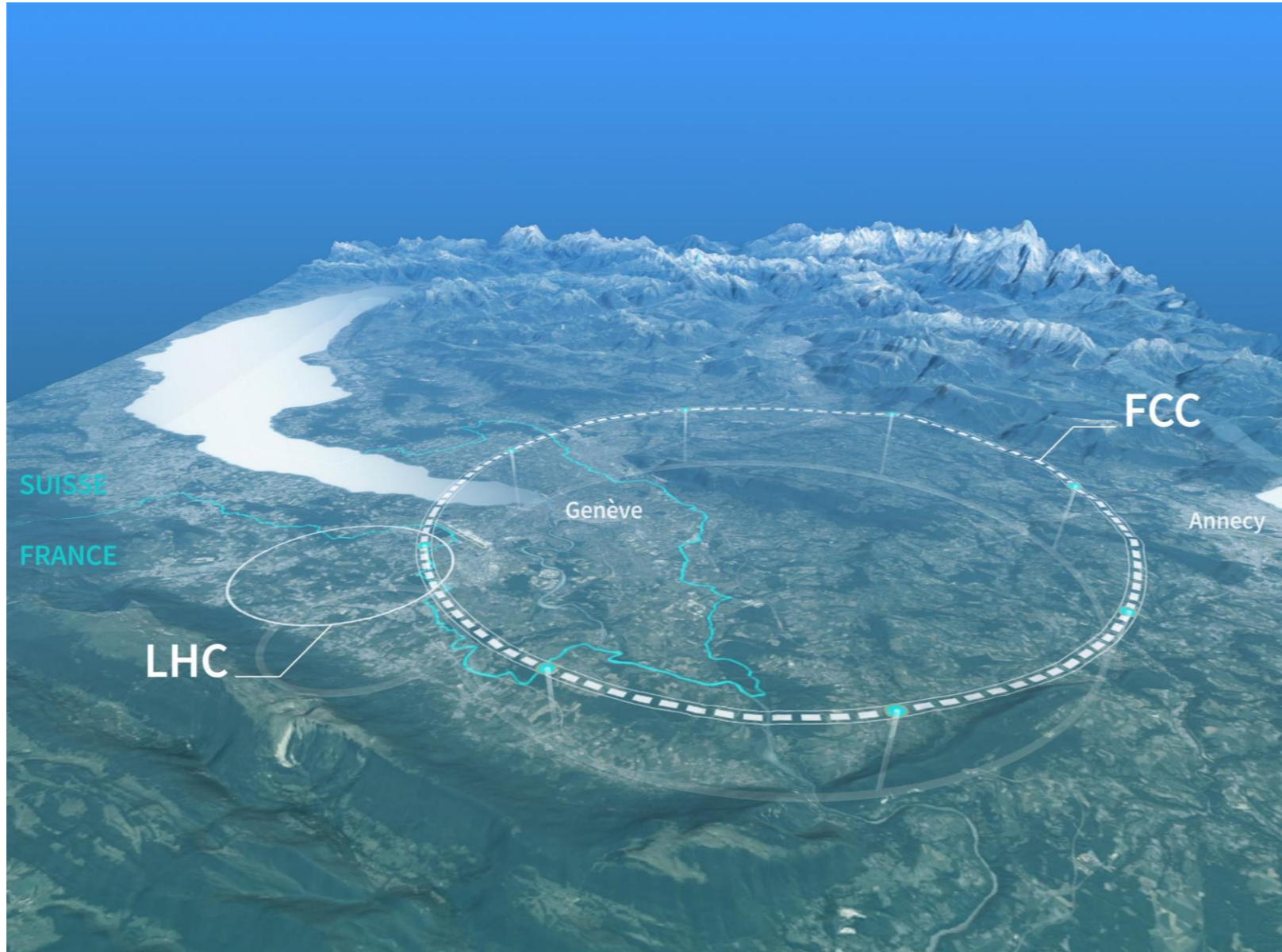
2 new 300-metre service tunnels and 2 shafts near ATLAS and CMS.



CRYSTAL COLLIMATORS

During operation of ion beams, crystal collimators will absorb particles that spray out of the beam trajectory

Future Circular Collider (FCC)



FCC IN A NUTSHELL

Timeline

- **2025:** [Release](#) of the FCC Feasibility Study report
- **2028:** Decision by CERN Member States and international partners

Tunnel

- **90.7 km** circumference
- **180 – 400 m** depths for access shafts
- **8 surface sites** (7 in France, 1 in Switzerland)

Two stages

- **FCC-ee** (precision measurements) about 15 years from the **late 2040s**
- **FCC-hh** (high energy) about 25 years from the **2070s**

Costs/benefits

- **15 billion CHF**, spread over about **12 years** for FCC-ee with four experiments
- **Positive** socio-economic benefit-cost ratio
- About **800 000** person-years of employment created

Bibliografia

E. Wilson, *An Introduction to Particle Accelerators*, <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/76447>

J. T. Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly and Measurements*

Nadprzewodzące magnesy: <https://cds.cern.ch/record/2955325/files/2602.19830.pdf>,

Akceleratorzy: https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-09/accelerators_0.pdf,
https://www.youtube.com/watch?v=ucz_FwS1m8A

CERN: <https://home.cern/science/accelerator-complex>

Wnęki rezonansowe: <https://cds.cern.ch/record/1982429/files/405-429%20Jensen.pdf>

Cryostats: <https://cds.cern.ch/record/1974062/files/CERN-2014-005-p353.pdf>

Nadprzewodnictwo: <https://home.cern/science/engineering/superconductivity>

Ciekły He: <https://home.cern/science/engineering/cryogenics-low-temperatures-high-performance>

Próżnia: <https://videos.cern.ch/record/3021911>, <https://cds.cern.ch/record/2953479/files/2601.11361.pdf>

Źródła

1. <https://www.national-geographic.pl/nauka/w-tym-tygodniu-wielki-zderzacz-hadronow-lhc-pobije-wlasny-rekord-energii-zderzen-co-nowego-moze-odkryc-220704124933/>
2. https://pl.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center#/media/Plik:Stanford-linear-accelerator-usgs-ortho-kaminski-5900.jpg
3. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Fermilab>
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/SOLEIL>
5. https://indico.cern.ch/event/594290/attachments/1390322/2180859/CERN_website_Pacheco.pdf
6. <https://fondazionecao.it/adroterapia/sincrotrone>
7. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https%3A%2F%2Fsynchrotron.uj.edu.pl%2Fen_GB%2Fdla-gosci-i-mediow%2Fdo-pobrania&ved=0CBkQjhxqFwoTCOj7I5Gu75MDFQAAAAAdAAAAABAH&opi=89978449
8. https://pl.wikipedia.org/wiki/European_Synchrotron_Radiation_Facility
9. <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>
10. <https://home.cern/news/series/cern70/cern70-announcing-higgs-boson-discovery>
11. https://www.theibns.org/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=689&catid=13&Itemid=51
12. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Polish_Nobel_laureates#/media/File:Nobel_Prize.png
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider#/media/File:CERN_LHC_Proton_Source.JPG
14. https://cds.cern.ch/record/2736208/files/LINAC4_report_09.02.21_web.pdf
15. https://indico.cern.ch/event/1466612/contributions/6449129/attachments/3092307/5477170/Introduction_to_RF_cavities_CAS_23_june_2025.pdf
16. <https://home.cern/news/press-release/experiments/base-experiment-cern-succeeds-transporting-antimatter>
17. cern70.cern/timeline/the-sps-super-proton-synchrotron-comes-into-service
18. <https://sy-dep-abt.web.cern.ch>
19. <https://dosimetry.web.cern.ch/dosimeters>
20. <https://atlas.cern/updates/blog/identity-problems>
21. <https://cerncourier.com/a/the-longest-journey-the-lhc-dipoles-arrive-on-time/>
22. <https://cds.cern.ch/record/842530>
23. <https://cerncourier.com/a/superconductivity-and-the-lhc-the-early-days-2/>
24. <https://cds.cern.ch/record/2284291/files/AC42.JPG>
25. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Nadciek%C5%82o%C5%9B%C4%87#/media/Plik:Helium-II-creep.svg>
26. https://commons.wikimedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider#/media/File:LHC_helium_tanks.jpg
27. <https://cds.cern.ch/record/1974062/files/CERN-2014-005-p353.pdf>
28. <https://cerncourier.com/a/the-collimation-system-defence-against-beam-loss/>
29. https://indico.cern.ch/event/1326947/contributions/5926692/attachments/2874425/5033711/Vacuum_Systems- V_Baglin - CAS_Mechanics_2024.pdf
30. <https://home.cern/resources/image/accelerators/cern-control-centre-images-gallery>
31. <https://indico.cern.ch/event/1031708/contributions/4355240/attachments/2267745/3850811/New%20wire%20scanner%20technology%20at%20CERN%20final.pdf>
32. <https://www.intercity.pl/pl/site/o-nas/dzial-prasowy/aktualnosci/swietuj-z-nami-10-lecie-pendolino-wielka-urodzinowa-promocja,-bilety-na-eip-juz-od-1-zl!.html>
33. <https://businessinsider.com.pl/biznes/miedz-rosnacy-popyt-i-znaczenie-surowca-dla-transformacji-energetycznej/rr75tdp>
34. <https://home.cern/science/accelerators/high-luminosity-lhc/technologies>
35. <https://hlcb-newsletter.web.cern.ch/news/news/wp3-ir-magnets/hl-lhc-magnets-progress-across-collaborations-and-cern>
36. <https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>
37. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https%3A%2F%2Fwww.jeep.pl%2Fjeep-wrangler%2Fplug-in&ved=0CBkQjhxqFwoTCljkuLP28JMDfQAAAAAdAAAAABAP&opi=89978449>
38. M. Atanasov et al., *A New Eddy Current Septum Magnet for Fast Extraction from CERN's Proton Synchrotron* in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 36, no. 3, pp. 1-5, May 2026
39. <https://home.cern/news/news/accelerators/autopsy-lhc-beam-dump>
40. <https://home.cern/news/news/accelerators/final-lap-lhc-track-protons-2018>