



Politechnika Wroclawska

Kriogenika w lotnictwie, kosmosie i akceleratorach

Maciej Chorowski

Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej

Symposium Akademii Inżynierskiej w Polsce, BISEK Aerospace
11.04.2024



Tematyka

- Kriogenika, definicje, rys historyczny
- Przykłady zastosowań kriogeniki
 - Satelity,
 - Akceleratory - Wielki Zderzacz Hadronów i inne duże projekty FAIR, XFEL, ESS ...
 - Lotnictwo
- Kriogenika - polska specjalność



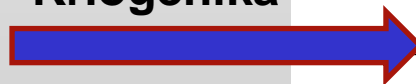
Zgodnie z konwencją przyjętą przez Międzynarodowy Instytut Chłodziarstwa, kriogenika oznacza metody uzyskiwania temperatur poniżej 120 K

słowo to pochodzi z języka greckiego:

kruos - zimno

genos - tworzenie

Kriogenika

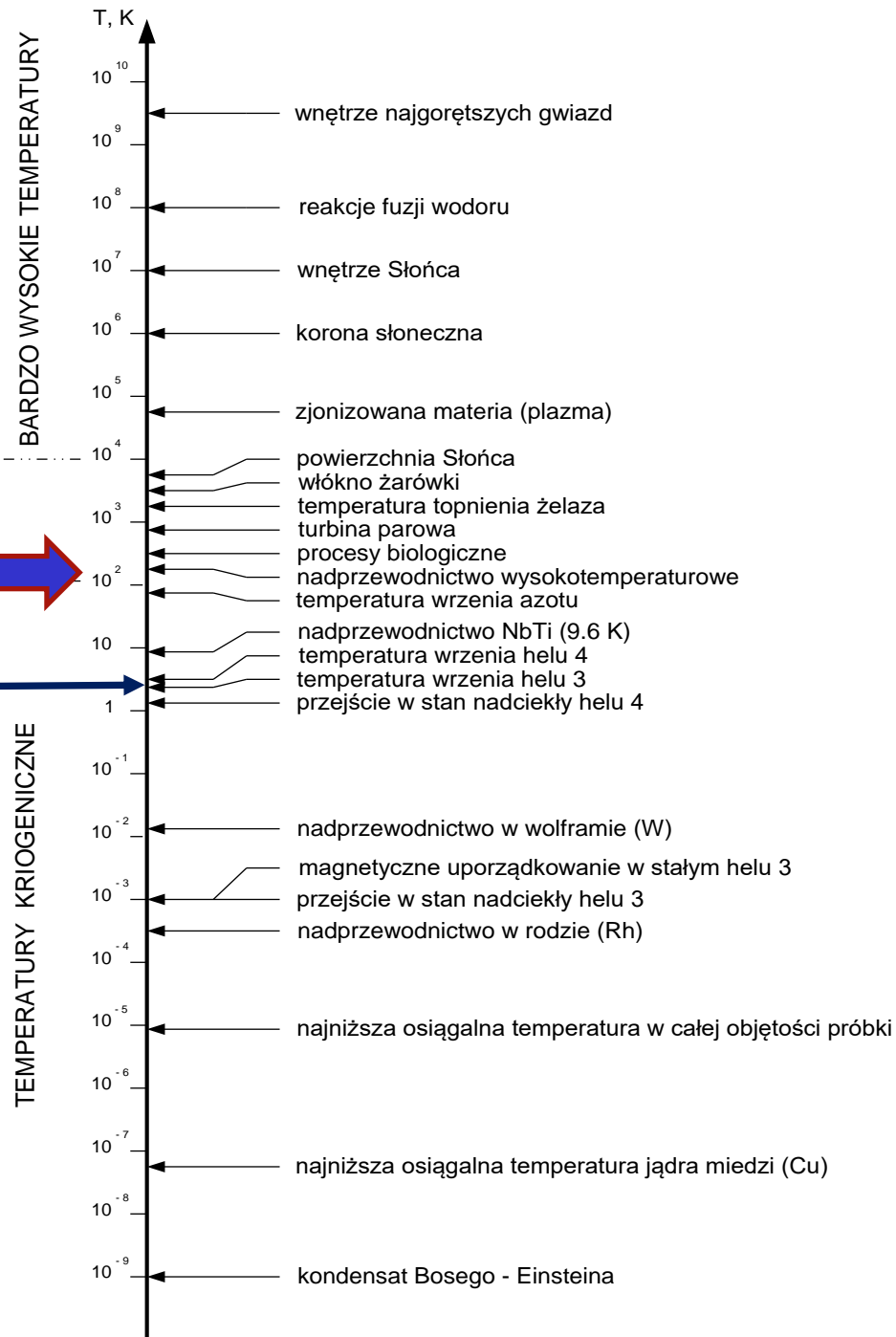


Kosmos 2,7K



W tak niskich temperaturach:

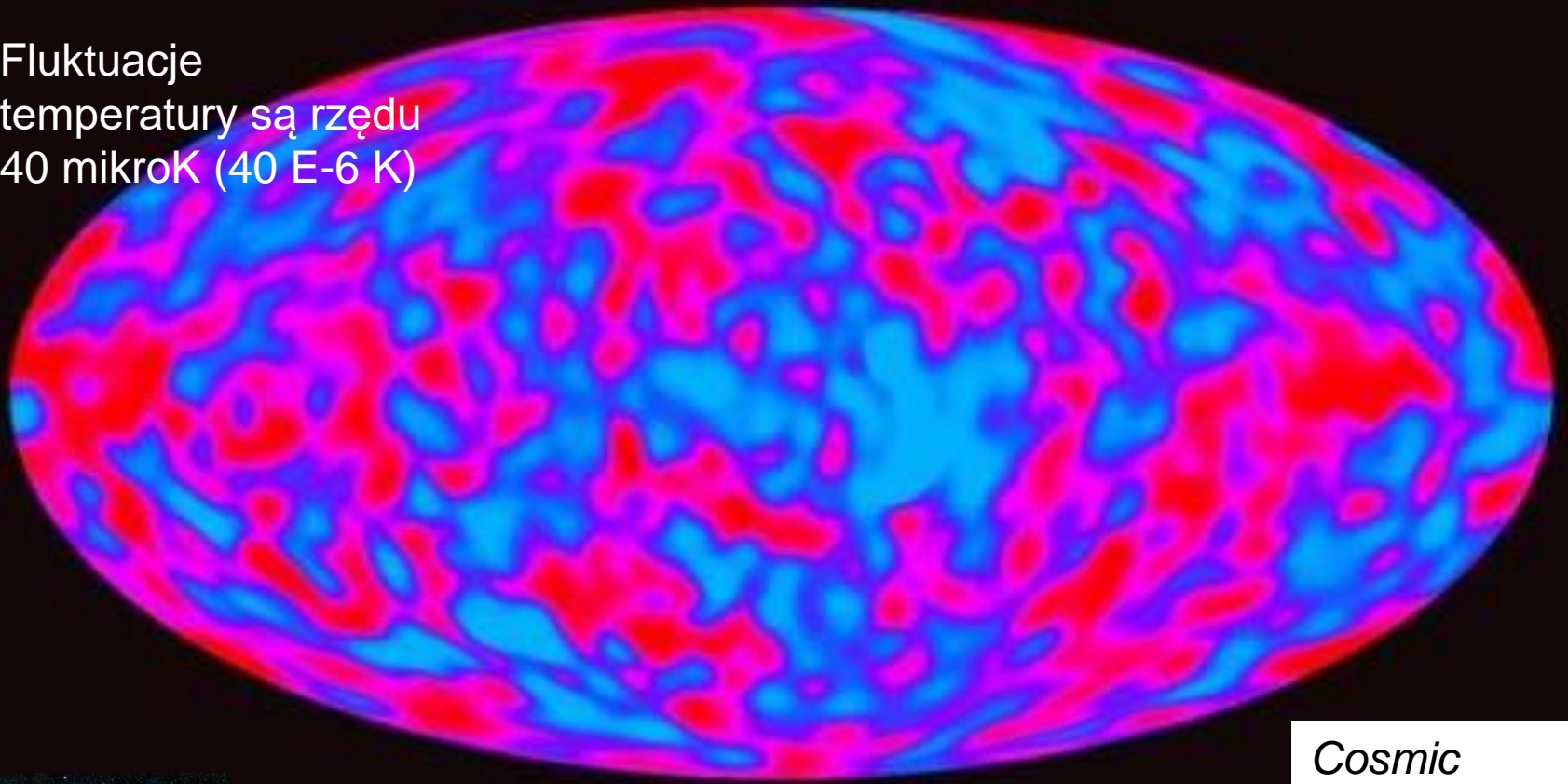
- przejawiają się nowe własności materii (skroplenie gazów trwałych, nadciekłość i nadprzewodnictwo)
- ulegają spowolnieniu bądź zatrzymaniu wszelkie reakcje
- zmniejsza się nieuporządkowanie substancji, znikają szумы (krioelektronika))





Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR)

Fluktuacje
temperatury są rzędu
40 mikrok (40 E-6 K)



Temperature of Universe
 $T = 2.7 \text{ K } (-270.5^\circ\text{C})$

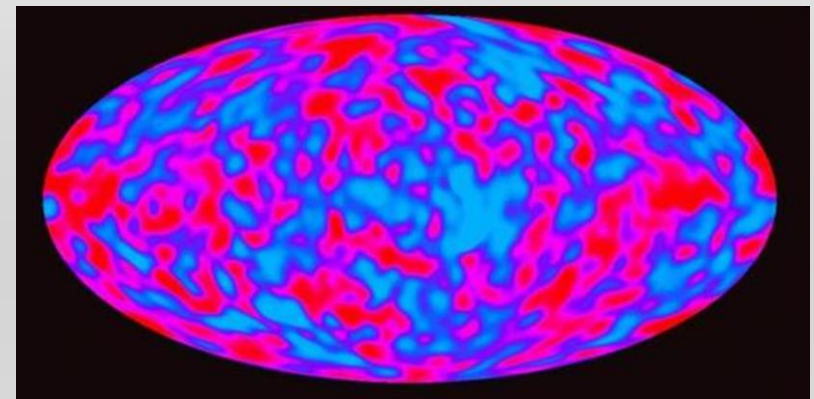
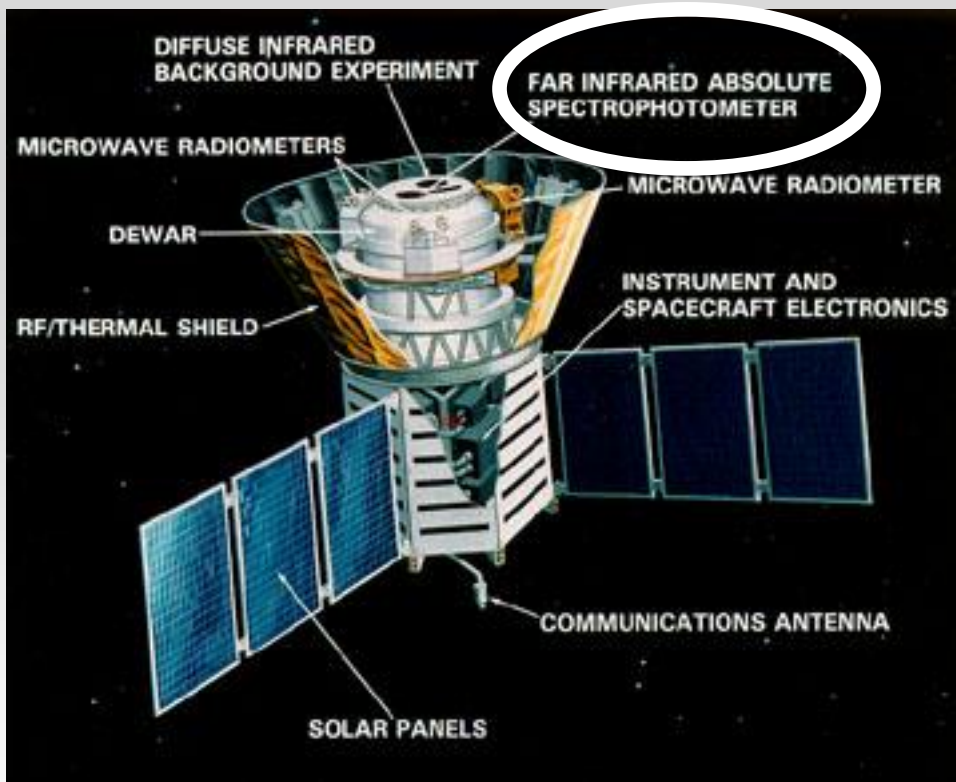
*Cosmic
Microwave
Background as
pictured by
COBE satellite
1989 - 1993*



Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR)

Temperature of Universe
 $T = 2.7 \text{ K } (-270.5^\circ\text{C})$

Cosmic Microwave Background as pictured by COBE (Cosmic Background Explorer) satellite



FIRAS (*Far-Infrared Absolute Spectrophotometer*), detektory instrumentu FIRAS działały w temperaturze 1,5 K. W misji zastosowano chłodzenie aktywne, wykorzystując w tym celu ciekły hel. Instrument pracował od listopada 1989 do września 1990, kiedy to zapas ciekłego helu uległ wyczerpaniu.



Nuclear Antiferromagnetism in Rhodium Metal at Positive and Negative Nanokelvin Temperatures

P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen, and J. E. Martikainen

Low Temperature Laboratory, Helsinki University of Technology, 02150 Espoo, Finland

(Received 1 February 1993)

We have measured the dynamic susceptibility of polycrystalline rhodium foils down to 280 pK and up to -750 pK. These record-low and -high nuclear spin temperatures were reached by adiabatic demagnetization using initial polarizations of 83% and -60%. At $T > 0$, the static susceptibility, integrated from NMR spectra, displays an antiferromagnetic Curie-Weiss law, with $\theta = -1.8 \pm 0.3$ nK. At $T < 0$, a crossover from ferro- to antiferromagnetic tendency is found around -6 nK. We obtain $J_{nn}/h = -17 \pm 3$ Hz and $J_{nns}/h = 10 \pm 3$ Hz if only nearest and next nearest neighbor interactions are assumed.

PACS numbers: 75.30.Kz, 75.90.+w

The record – low spin temperature

$T = 280 \text{ pK} (10^{-12} \text{ K}) !$

0,000000000028 K



Najniższa uzyskana temperatura: $T = 280 \text{ pK}$ (10^{-12} K) ($0,000000000028 \text{ K}$) !!!

VOLUME 70, NUMBER 18 PHYSICAL REVIEW LETTERS 3 MAY 1993

Nuclear Antiferromagnetism in Rhodium Metal at Positive and Negative Nanokelvin Temperatures

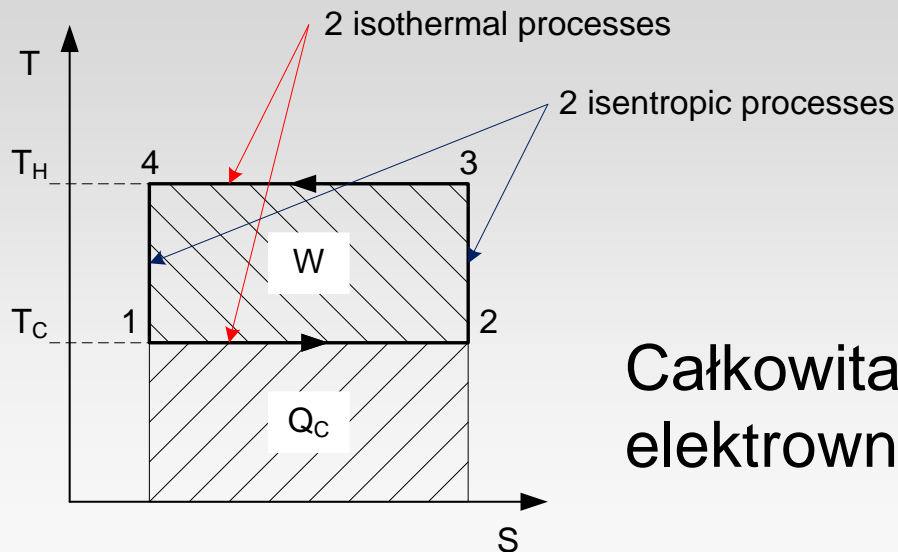
P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen, and J. E. Martikainen
Low Temperature Laboratory, Helsinki University of Technology, 02150 Espoo, Finland
 (Received 1 February 1993)

We have measured the dynamic susceptibility of polycrystalline rhodium foils down to 280 pK and up to -750 pK. These record-low and -high nuclear spin temperatures were reached by adiabatic demagnetization using initial polarizations of 83% and -60%. At $T > 0$, the static susceptibility, integrated from NMR spectra, displays an antiferromagnetic Curie-Weiss law, with $\theta = -1.8 \pm 0.3 \text{ nK}$. At $T < 0$, a crossover from ferro- to antiferromagnetic tendency is found around -6 nK. We obtain $J_{nn}/h = -17 \pm 3 \text{ Hz}$ and $J_{nn}/h = 10 \pm 3 \text{ Hz}$ if only nearest and next nearest neighbor interactions are assumed.

PACS numbers: 75.30.Kz, 75.90.+w

Jak moc jest konieczna do napędu chłodziarki Carnota o mocy 1 Watt przy 280 pK?

$$W = \dot{Q}_C \frac{T_H - T_C}{T_C} = \frac{300 - 280 \cdot 10^{-12}}{280 \cdot 10^{-12}} = 1,07 \cdot 10^{12}$$



$$W \approx 1070 \text{ [GW]}$$

Całkowita moc zainstalowana w elektrowniach USA wynosi ok. 1300 GW) !!!



Tematyka

- Kriogenika, definicje, **rys historyczny**
- Przykłady zastosowań kriogeniki
 - Satelity,
 - Akceleratory - Wielki Zderzacz Hadronów i inne duże projekty FAIR, XFEL, ESS ...
 - Lotnictwo
- Kriogenika - polska specjalność



Jak skroplić i zestalić gazy trwałe, wg Jonathan Swift , Podróże Guliwera, 1726

Jedni z tych pracowników naukowych napętniali powietrzem ogromne, skórzane wory, a następnie z nagła na nich siadali, gwałtownie je ugniatając... Sztukmistrz generalny wyjaśnił nam krótko, że pierwsi z jego asystentów zajmowali się zgęszczaniem powietrza, aby uczynić z niego substancję twardą jak kamień.

(Podróże Guliwera, wg Jonathana Swifta opracowali Jacek Bocheński i Marian Brandys, Nasza Księgarnia, 1967).



Karol Olszewski i Zygmunt Wróblewski skroplenie powietrza, azotu, tlenu rok 1883



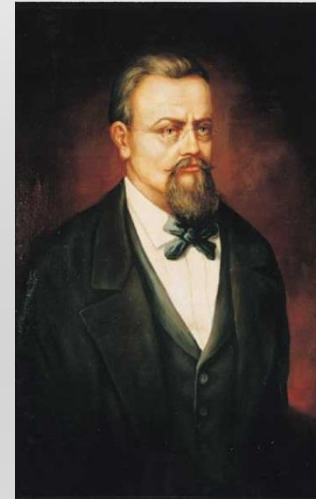
1846-1915

liquifaction vessel



Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Było to pierwsze skroplenie tzw. gazów trwałych, czyli nie poddających się skropleniu poprzez sprężenie i wymianę ciepła z ośrodkiem o temperaturze wyższej od temperatury krytycznej skraplanego gazu.

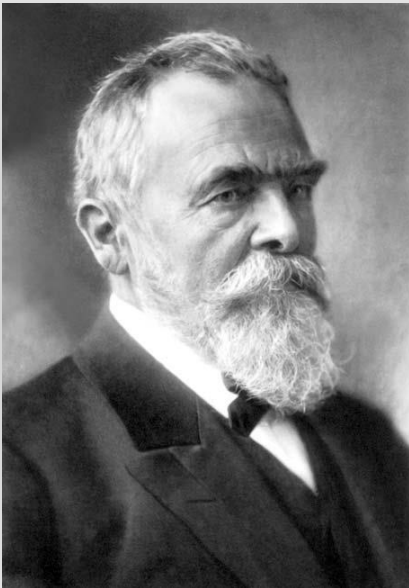


1845-1888

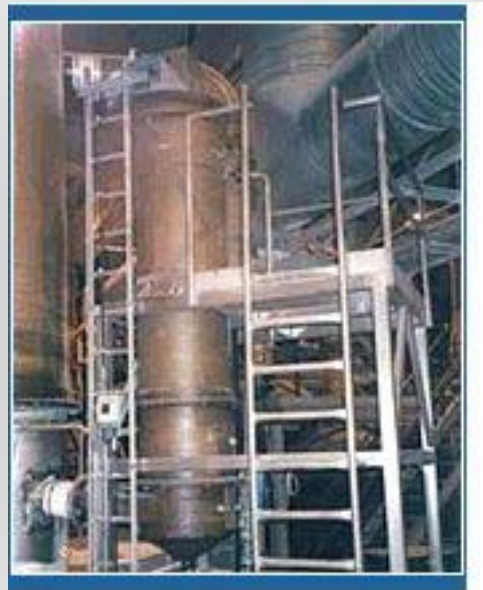


cryostat

Przemysł gazów technicznych umożliwił rozwój metalurgii i innych dziedzin



Carl von Linde – Linde AG founder in 1895



Transfer odkrycia Wróblewskiego i Olszewskiego do przemysłu odbył się w dekadę!

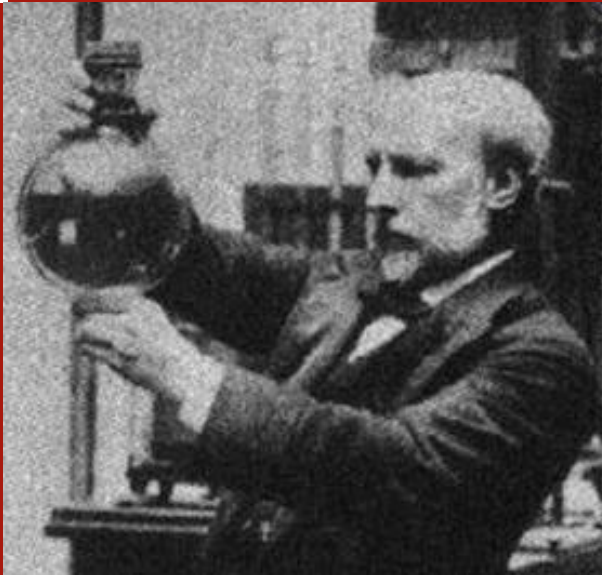


Georges Claude – co-founder of the L'Air Liquide in 1902





James Dewar - wynalazca izolacji próżniowej, dzięki której skroplił wodór w 1898 roku



Environment – warm boundary



VACUUM

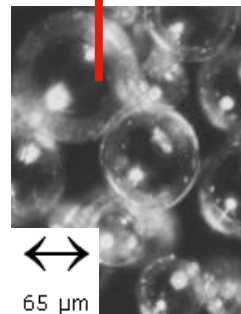


Insulated space – cold boundary



1842-1923

The original concept of Dewar vacuum insulation is still valid, different vacuum filling are being tested



Vacuum Insulation with Glass Spheres

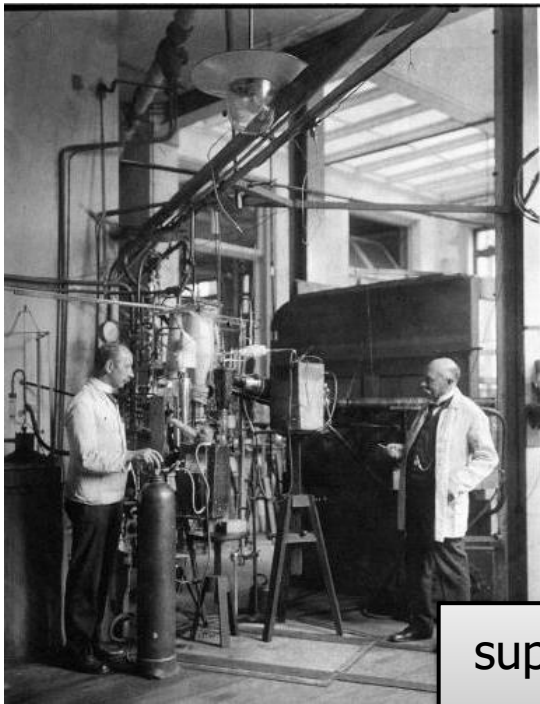


Multilayer Insulation





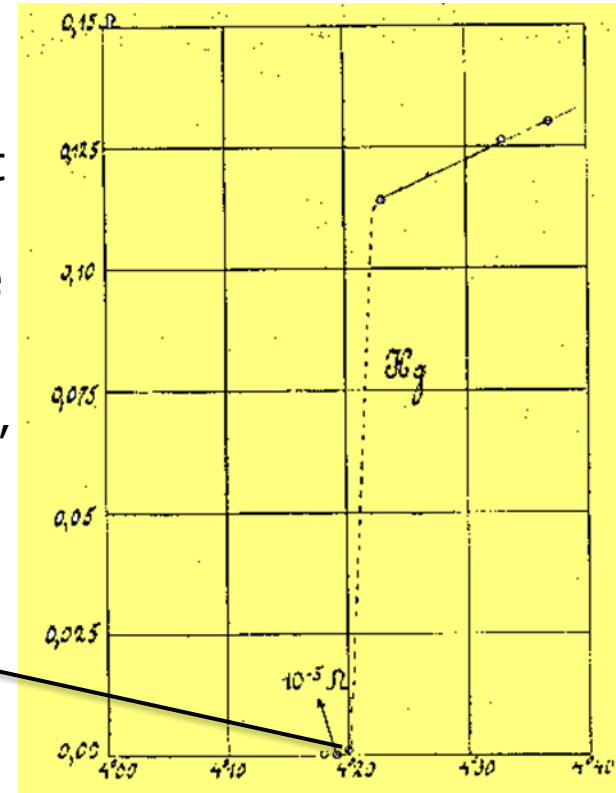
Skroplenie helu przez H. Kamerlingh Onnesa w 1908 oraz odkrycie nadprzewodnictwa w roku 1911



„Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconducting state”

(K.K. Onnes Nobel prize lecture, 1913)

superconductivity in Hg
 $T_C=4.2K$ (1911)



„Mercury practically zero." Onnes wrote those words in his notebook at 4 P.M. on April 8, 1911

$R = 0$ below T_C ; ($\rho < 10^{-23} \Omega\cdot\text{cm}$, 10^{15} times lower than resistivity of Cu)





Bednorz i Mueller - odkrycie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w roku 1986

The Nobel Prize in Physics 1987

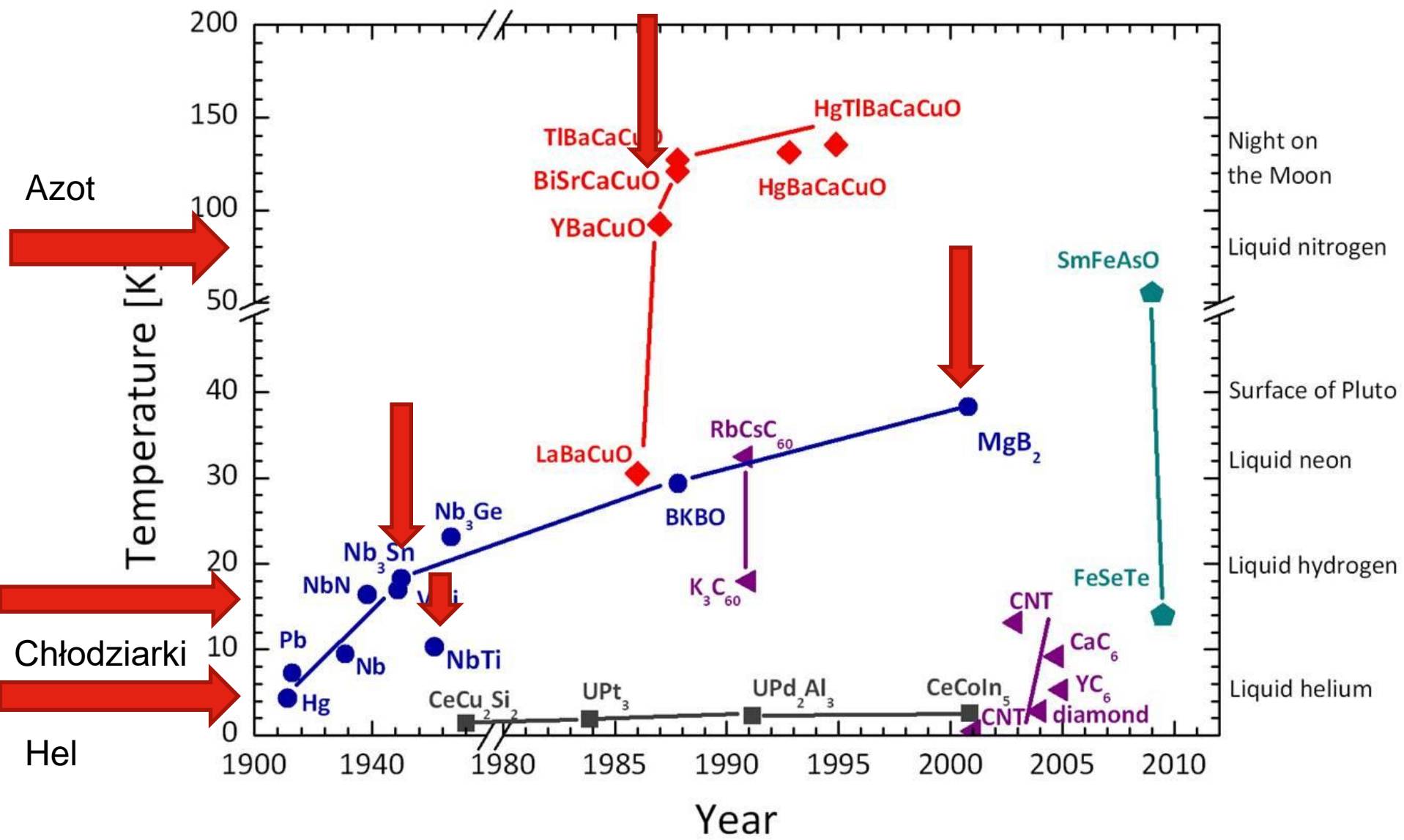


IBM Zurich Research Laboratory
Rüschlikon, Switzerland

J. G. Bednorz, K. A. Mueller (1986). "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system".
Zeitschrift für Physik B, 64

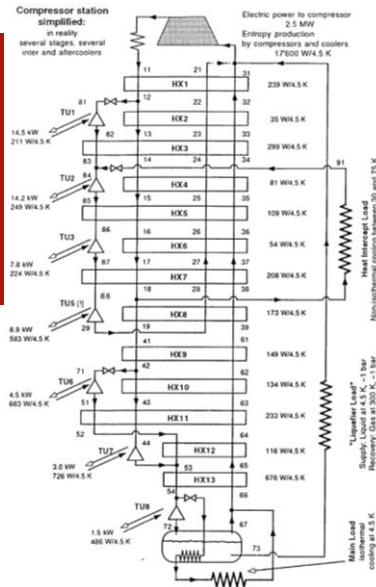
„It is too early to predict how extensive the technical applications will be, but it is quite evident that the development is being followed with keen interest by representatives of electrical power technology, by microelectronics researchers and by physicists who envisage new applications in measurement technology”

Form the Nobel Prize justification

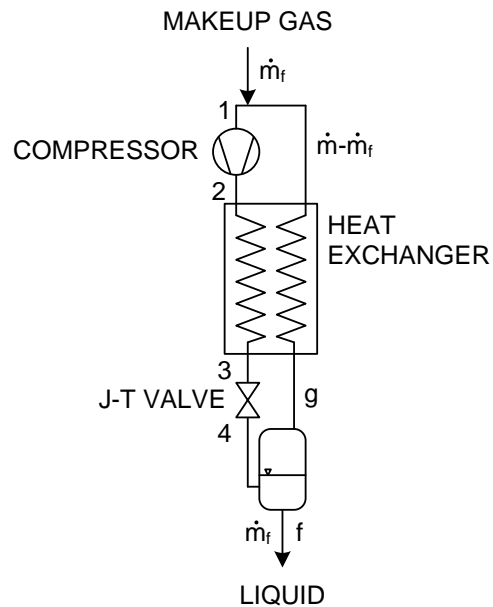


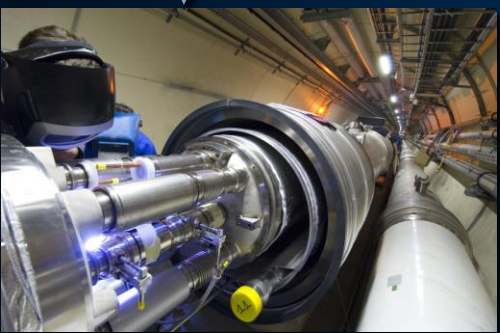
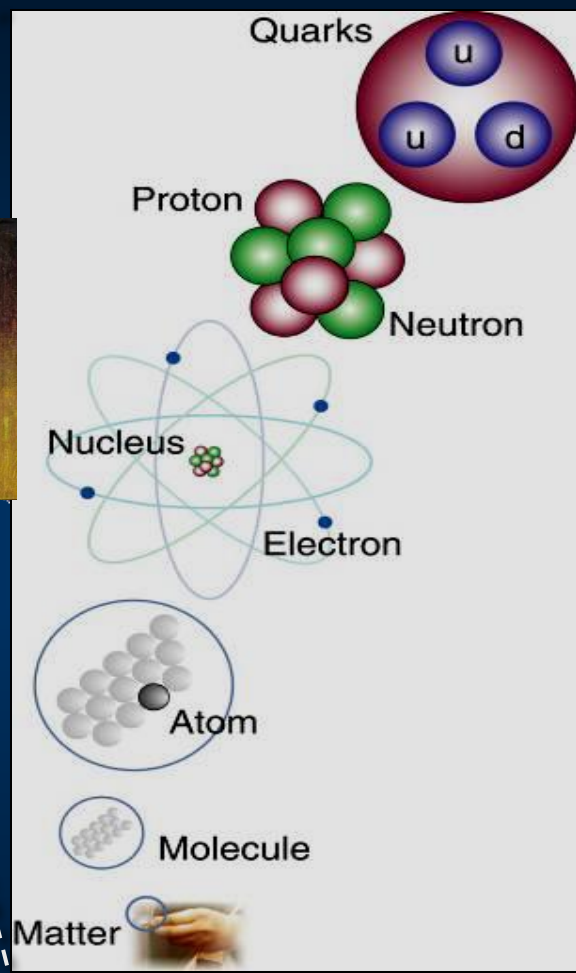
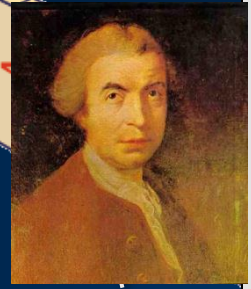
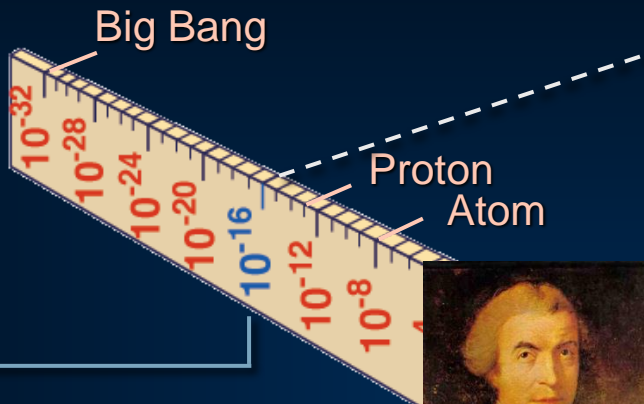


Skraplarki gazów

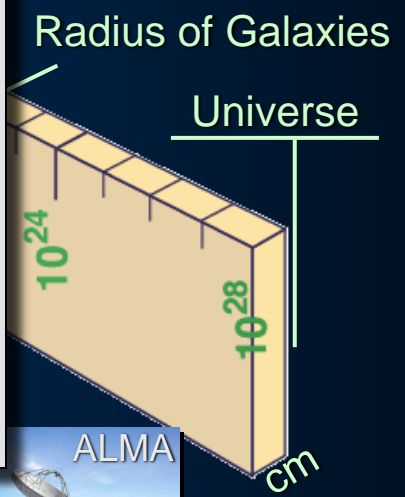


33 kW @ 50 K to 75 K
 23 kW @ 4.6 K to 20 K
 41 g/s liquefaction





LHC



Super-Microscope



Study physics laws of first moments after Big Bang
 increasing Symbiosis between Particle Physics,
 Astrophysics and Cosmology





Związek energii ze skala liniową obiektu

$$E = hf$$

Związek pomiędzy częstotliwością fali i energią

h – stała Plancka, f - częstotliwość

$$L = c/f \quad E = (hc)/L$$

Związek pomiędzy energią E i długością fali L

Im mniejsze obiekty obserwujemy tym krótszych fal potrzebujemy aby je „oświetlić”, tym większymi energiami musimy dysponować



Rzeczywisty rozwój akceleratorów - wykres Livingstona

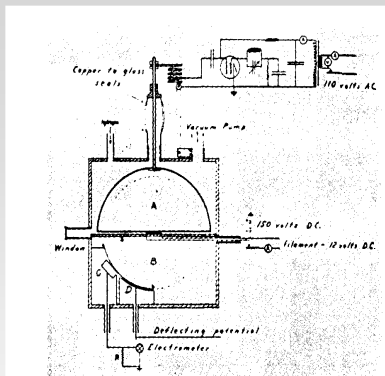
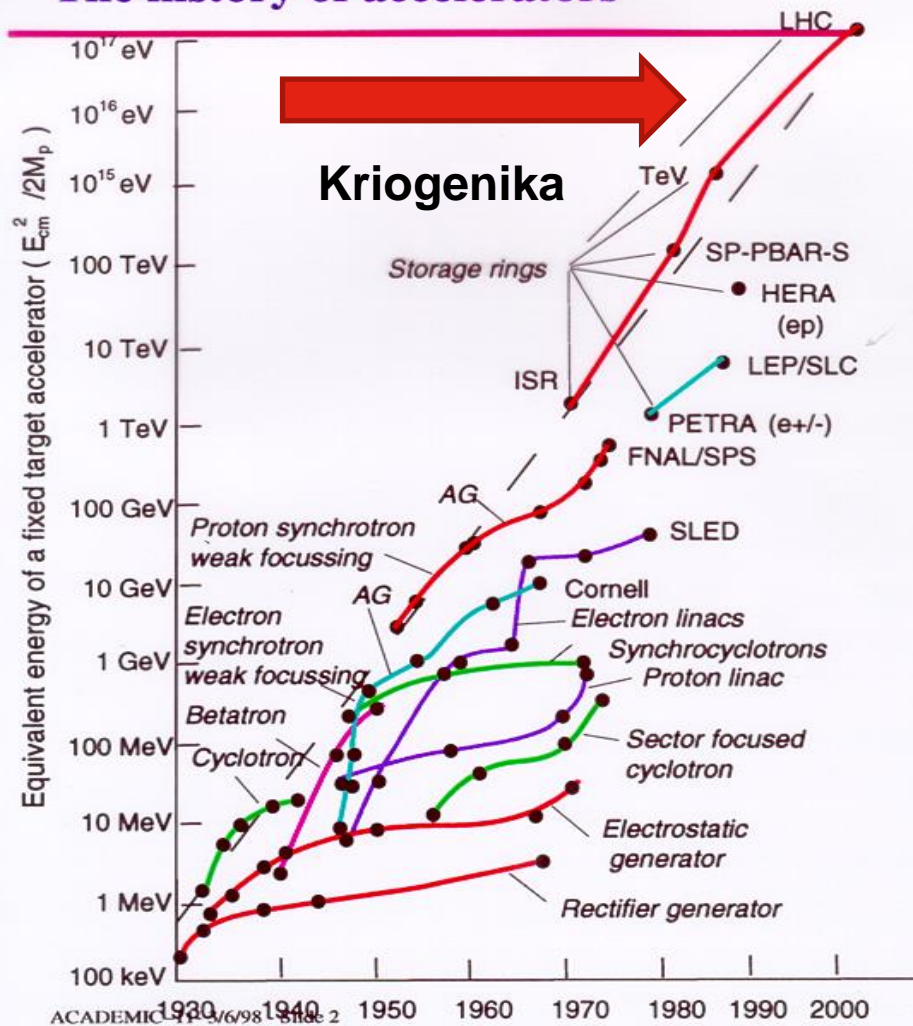


Diagram of the first successful cyclotron constructed by Lawrence and M. S. Livingston. The single dee is five inches in diameter.



The history of accelerators



- wykładniczy rozwój parametrów przez ponad 70 lat
- postęp możliwy dzięki okresowym przeskokom z dojrzałych do nowych technologii



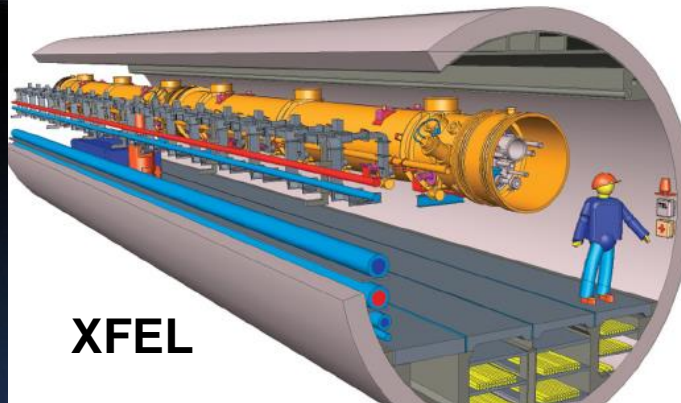
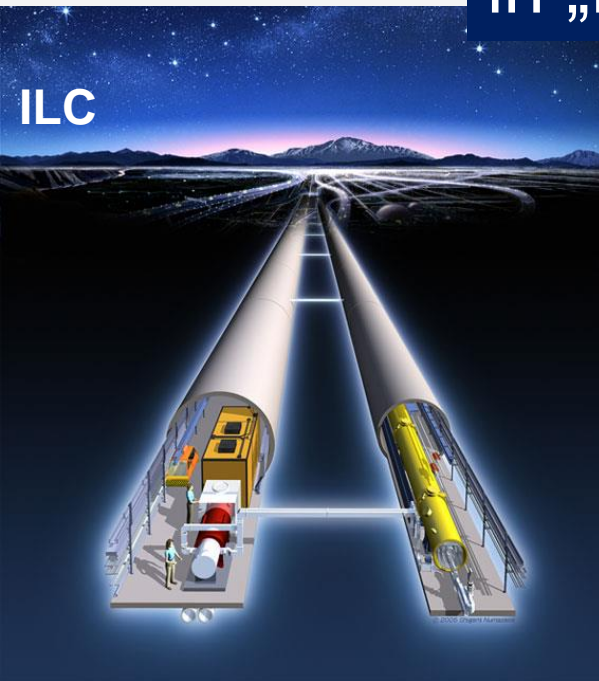
Tematyka

- Kriogenika, definicje, rys historyczny
- Przykłady zastosowań kriogeniki
 - Satelity,
 - Akceleratory - Wielki Zderzacz Hadronów i inne duże projekty FAIR, XFEL, ESS ...
 - Lotnictwo
- Kriogenika - polska specjalność

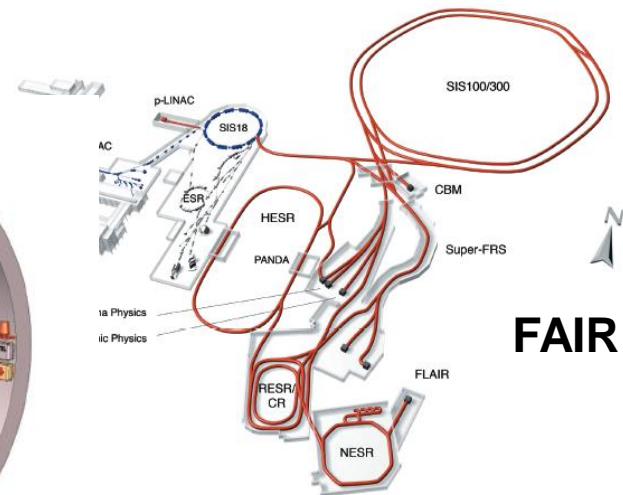


Helium cryogenics is a must in „Big Science”

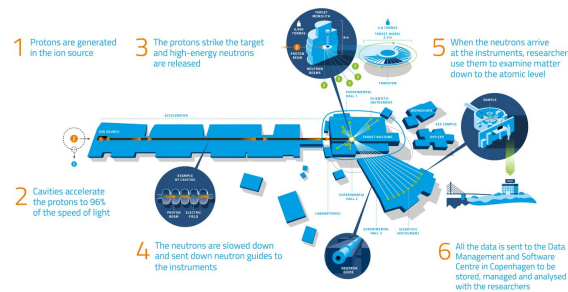
ILC



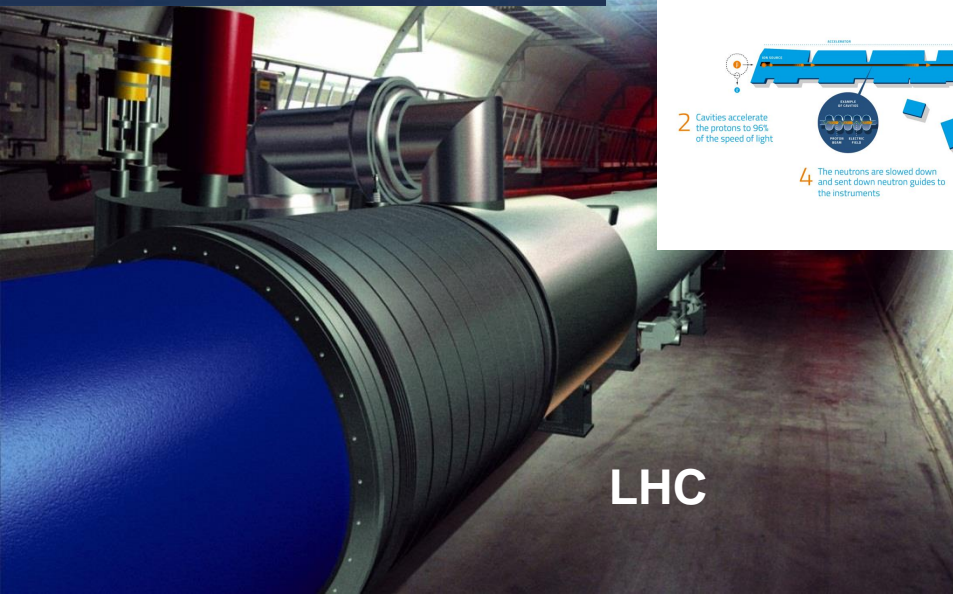
XFEL



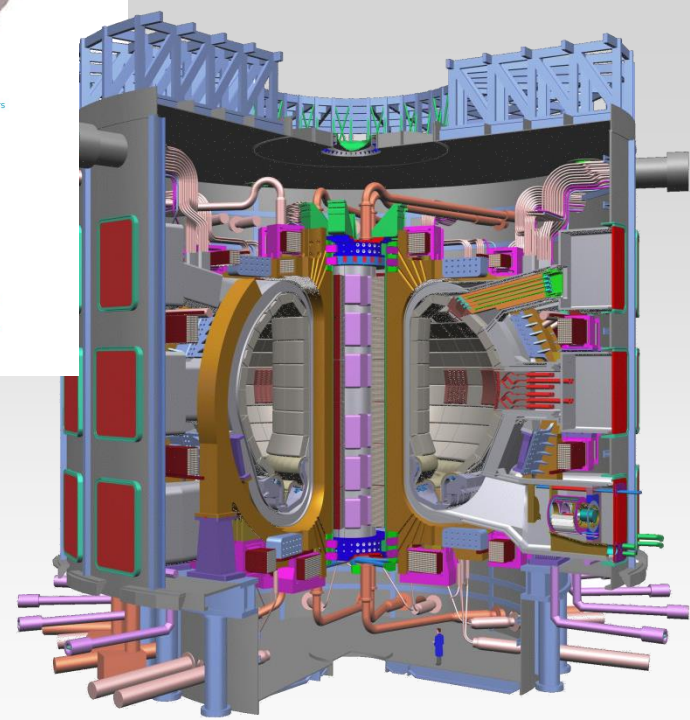
FAIR



ESS



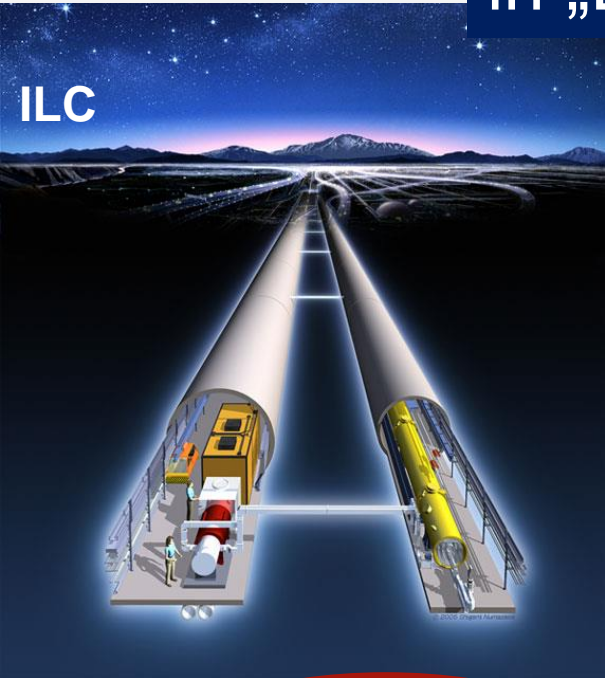
LHC



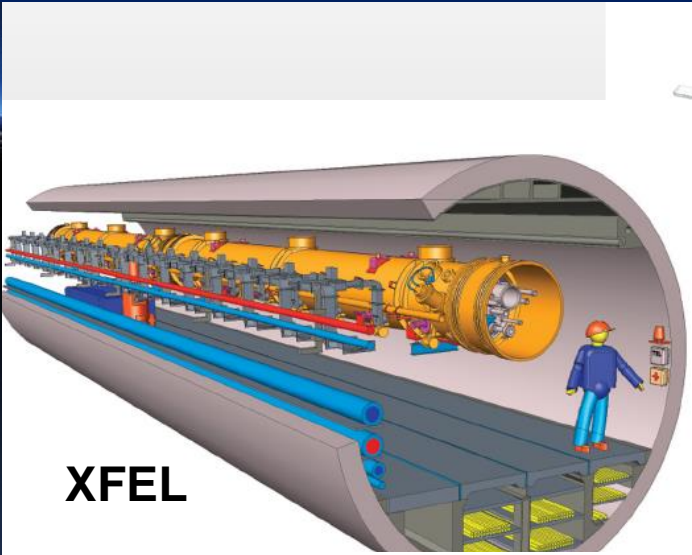
ITER



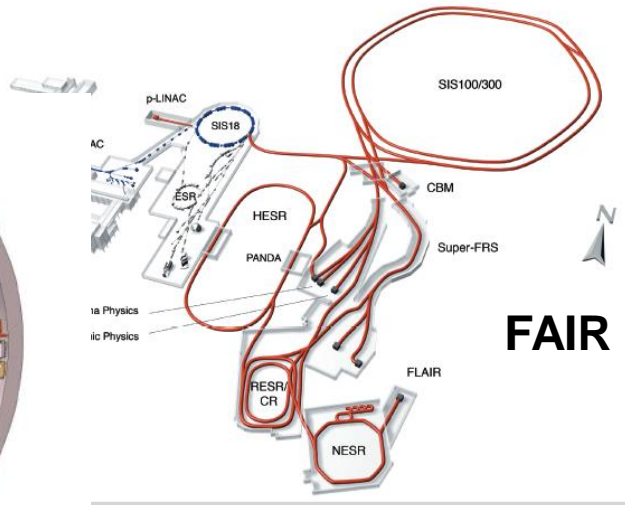
Helium cryogenics is a must in „Big Science”



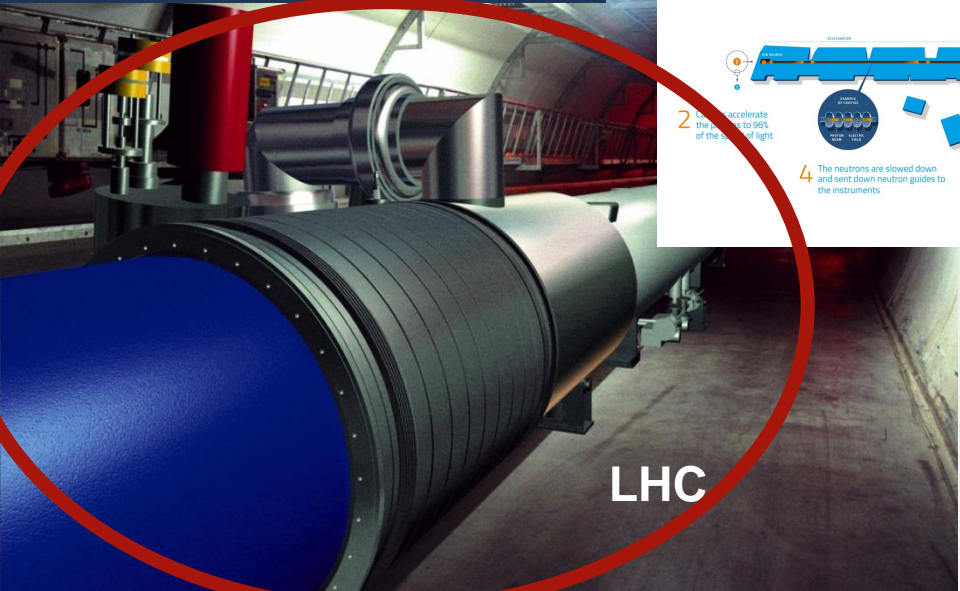
ILC



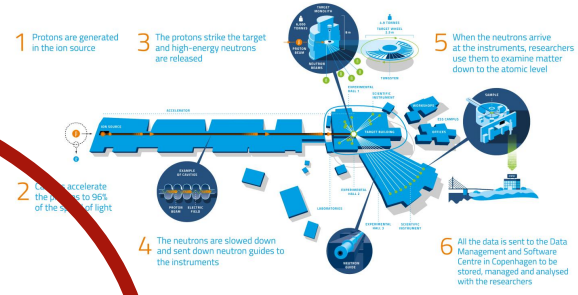
XFEL



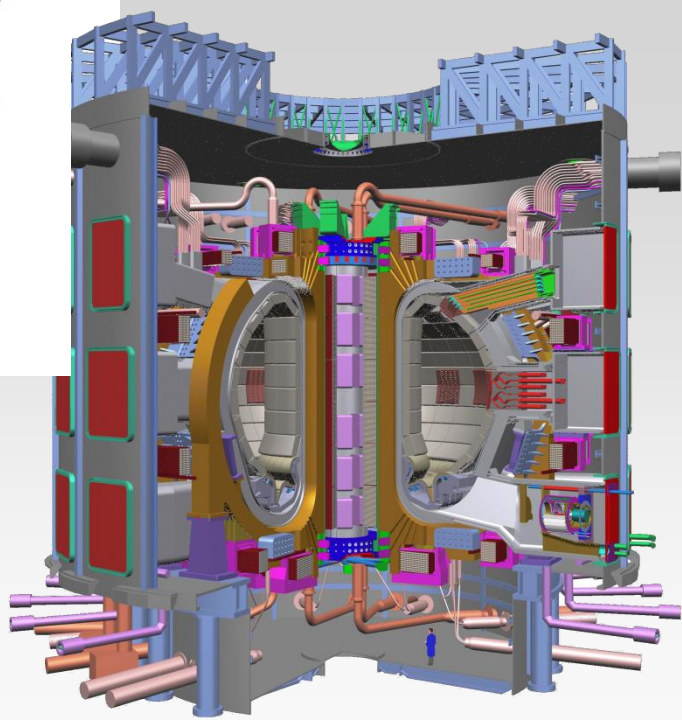
FAIR



LHC



ESS



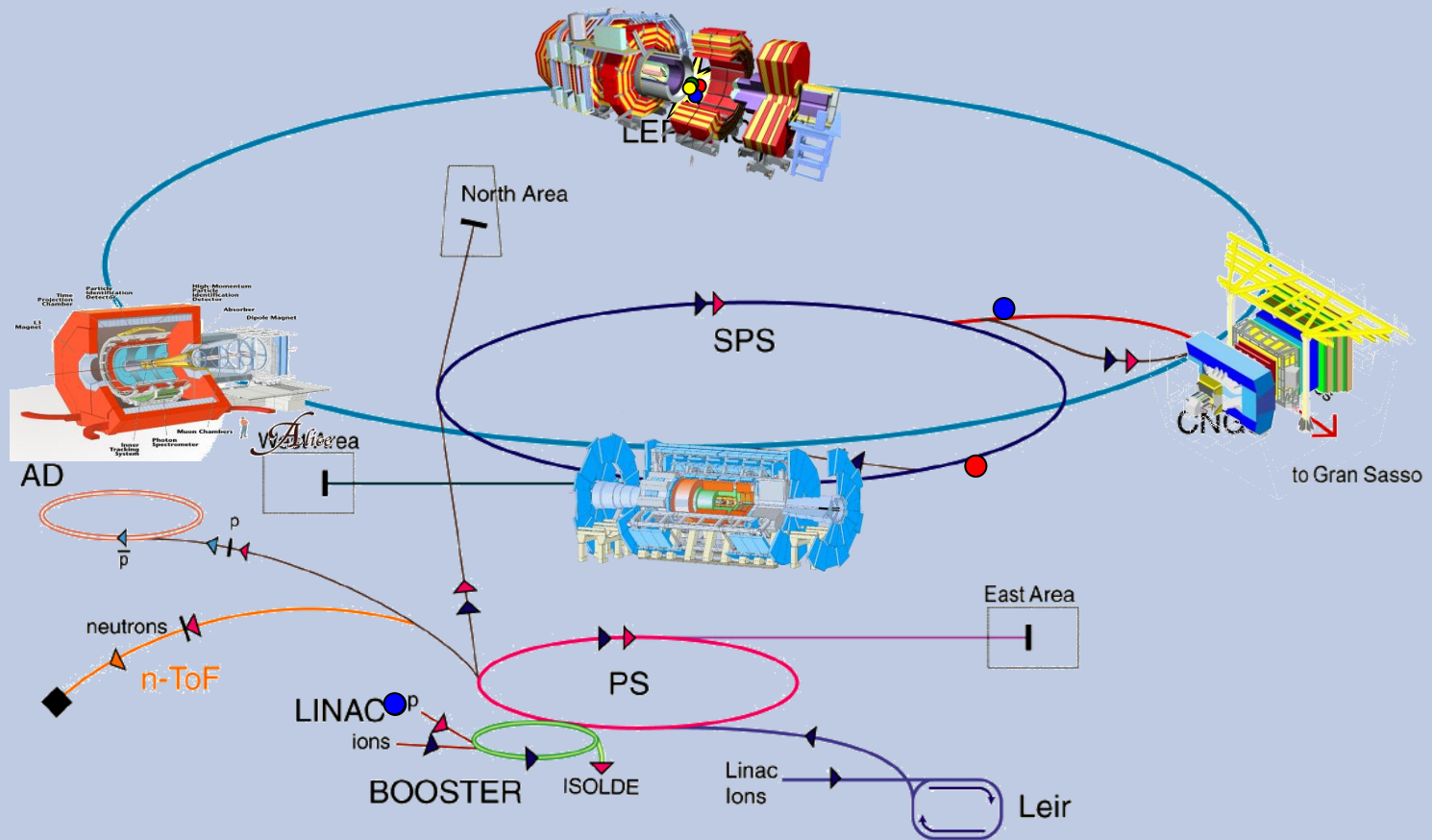
ITER

- 1 Protons are generated in the ion source
- 2 The protons are accelerated to 100 MeV by the proton driver
- 3 The protons strike the target and high-energy neutrons are released
- 4 The neutrons are slowed down and sent down neutron guides to the instruments
- 5 When the neutrons arrive at the instruments, researchers use them to examine matter down to the atomic level
- 6 All the data is sent to the Data Management and Software Centre in Copenhagen to be stored, managed and analysed with the researchers

The large Hadron Collider

Collision of proton beams...

...observed in giant detectors



- ▶ p (proton)
- ▶ ion
- ▶ neutron
- ▶ \bar{p} (antiproton)
- ▶ $\bar{\nu}$ proton/antiproton conversion
- ▶ neutrino

- AD Antiproton Decelerator
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron

- LHC Large Hadron Collider
- n-ToF Neutron Time of Flight
- CNGS Cern Neutrinos Gran Sasso

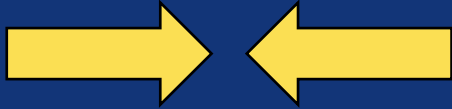


Kluczowe technologie LHC - skala zastosowań

- Nadprzewodnictwo nisko- i wysokotemperaturowe
 - 1250 ton nadprzewodników na bazie Nb-Ti
 - 7000 km nadprzewodzących kabli typu “Rutherforda”
 - 1232 magnesów dipolowych, 474 kwadrupoli, 8000 innych
 - Nowe materiały konstrukcyjne stosowane w magnesach
 - Zaawansowane pomiary magnetyczne i elektryczne w niskich temperaturach
 - Doprowadzenia prądowe z nadprzewodników wysokotemperaturowych „BISCO”
- Kriogenika nadciekłego helu ($< 1,9$ K)
 - Wykorzystanie helu nadciekłego w postaci sprężonej i nasyconej
 - Kriostaty o niskich doptywach ciepła
 - Wysokosprawne chłodziarki helowe o mocy 154 kW@4,5 K
 - Ilość helu w systemie kriogenicznym akceleratora: ok.120 ton
- Technika próżniowa
 - Ultrawysoka próżnia w rurze wiązki
 - „Kriogeniczna” próżnia izolacyjna na całej długości akceleratora

Large Hadron Collider

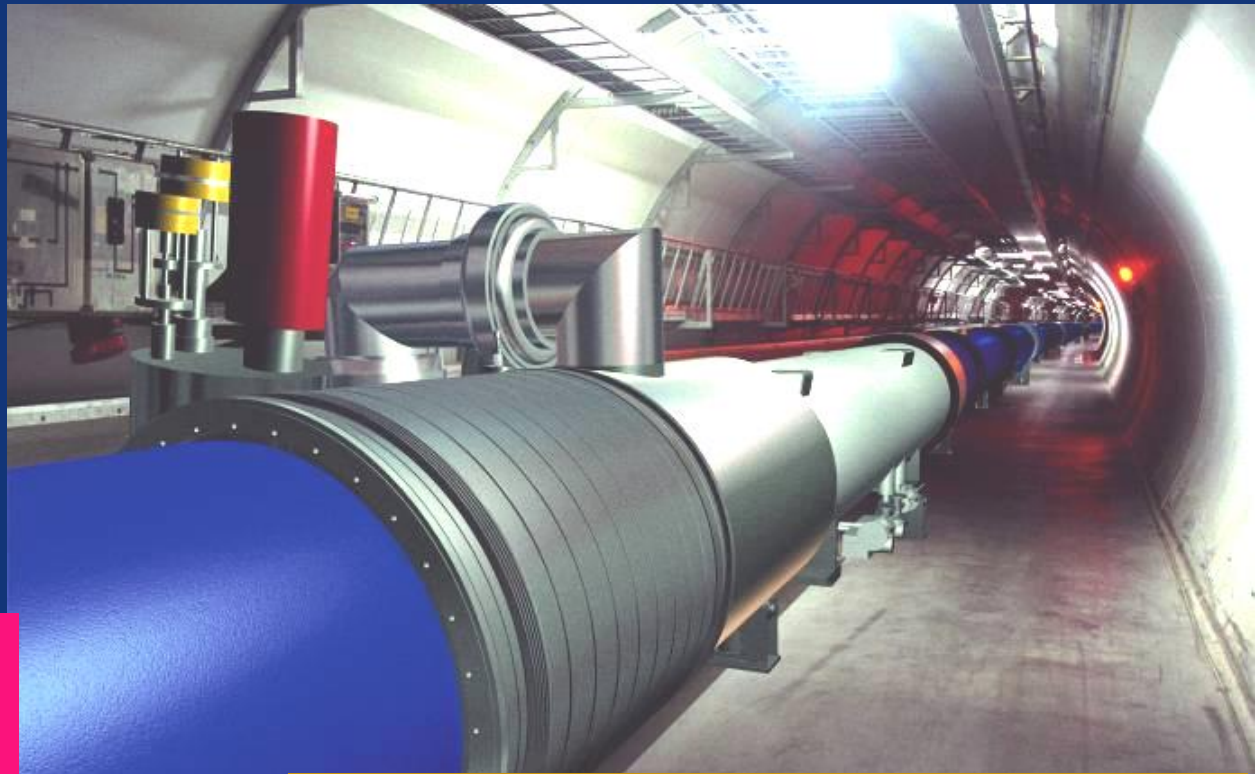
7 TeV + 7 TeV



Luminosity =
 $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

Primary targets:

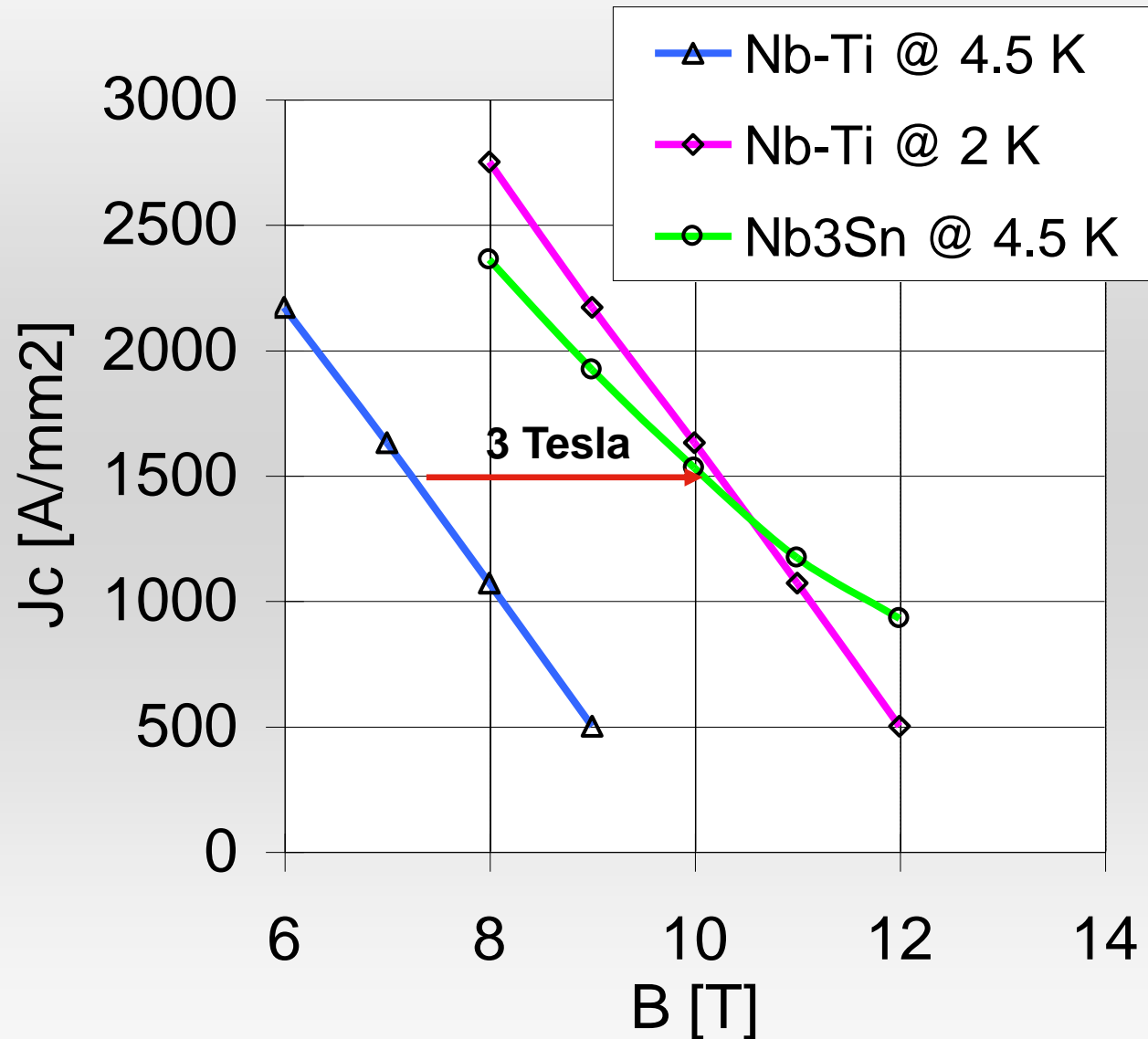
- Origin of mass
- Nature of Dark Matter
- Primordial Plasma
- Matter vs Antimatter



Further LHC results will determine the future course of High Energy Physics

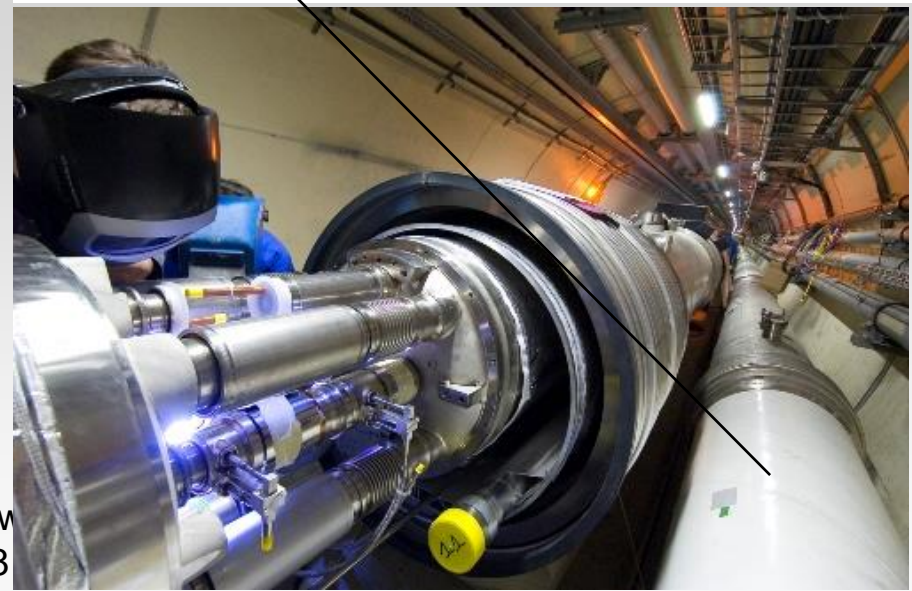
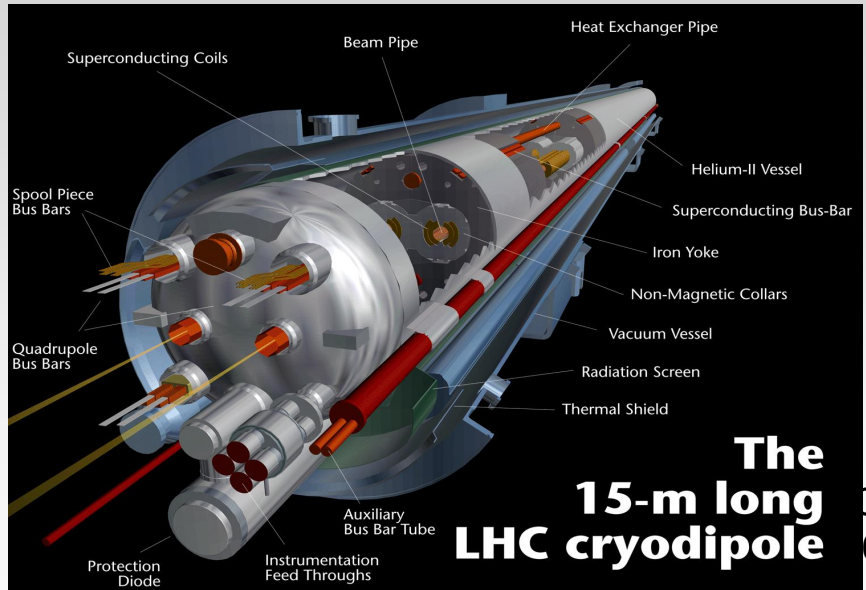
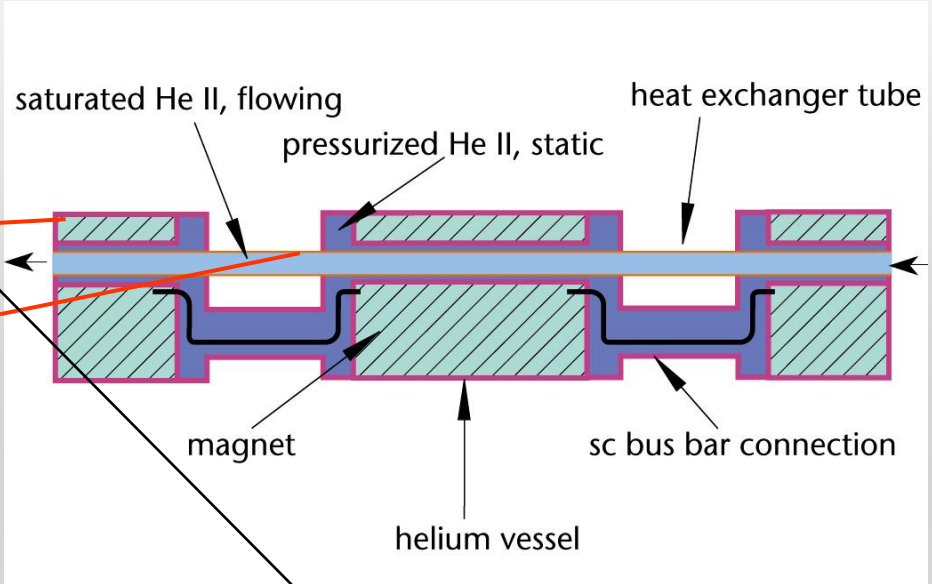
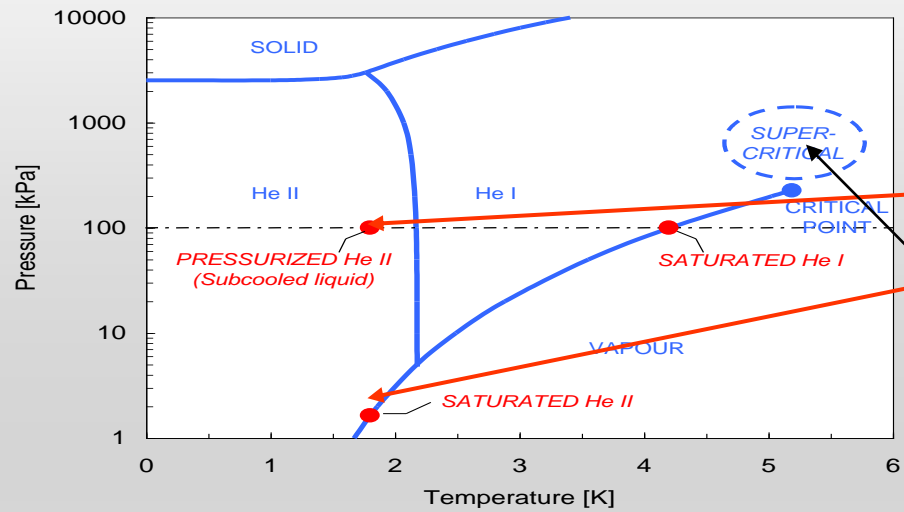


Wybór nadprzewodnika do budowy magnesów



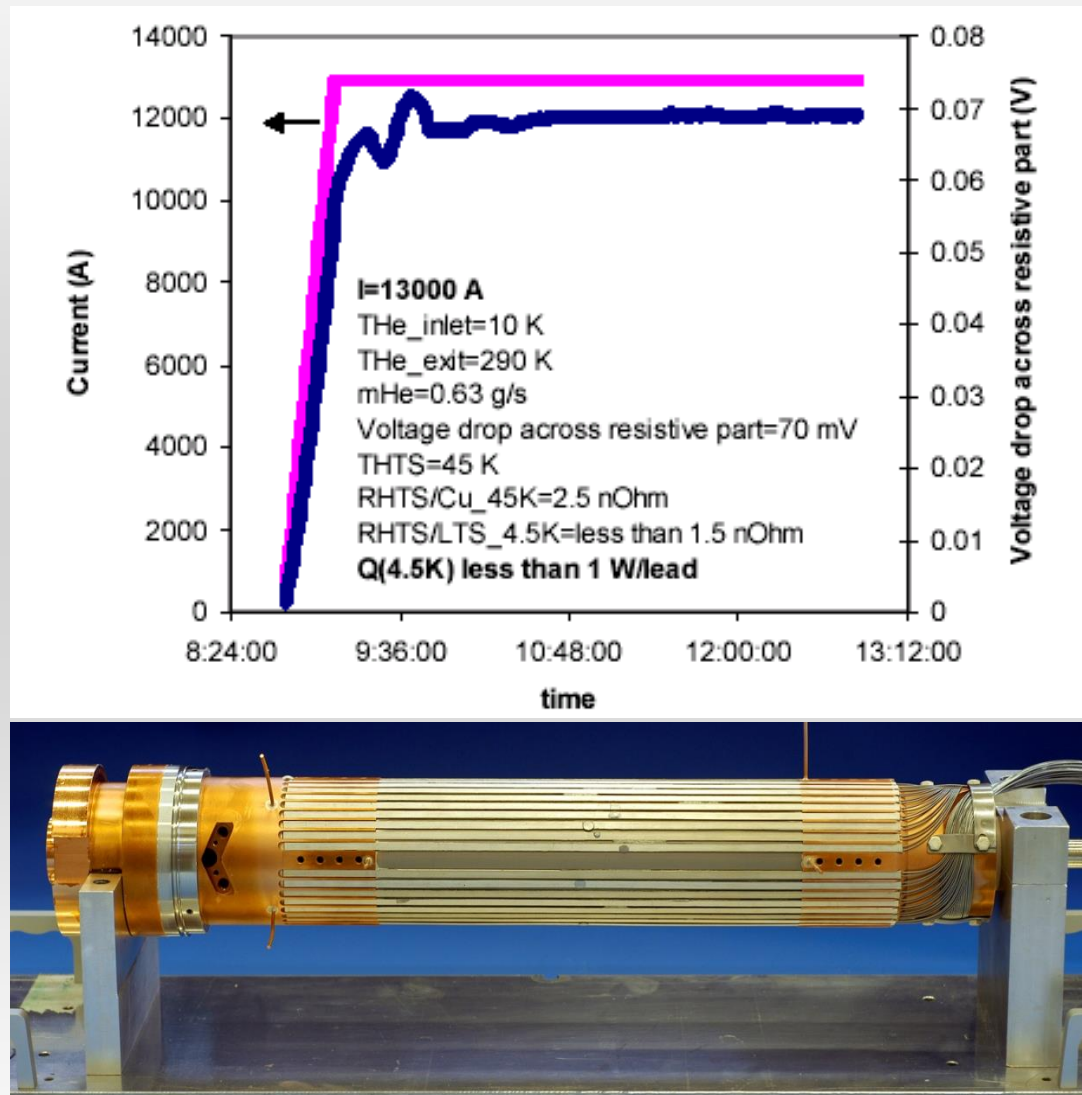


Schematy chłodzenia - przewodzenie przez He II z dochłodzeniem - kriostatowanie ciągów magnesów LHC o długości 3300 m,



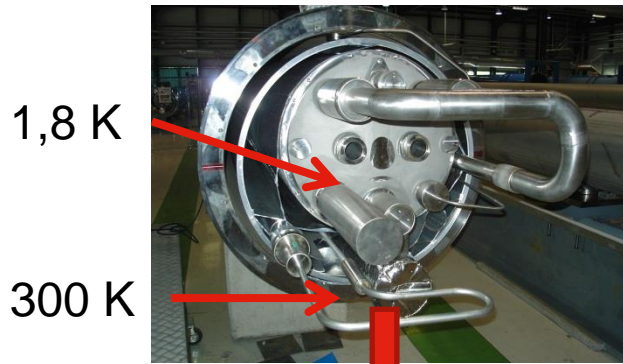
C w
08

13 kA doprowadzenia prądowe wykorzystujące nadprzewodniki wysokotemperaturowe HTS - największa dotychczasowa aplikacja HTS





Termodynamiczna optymalizacja systemów kriogenicznych - przykład

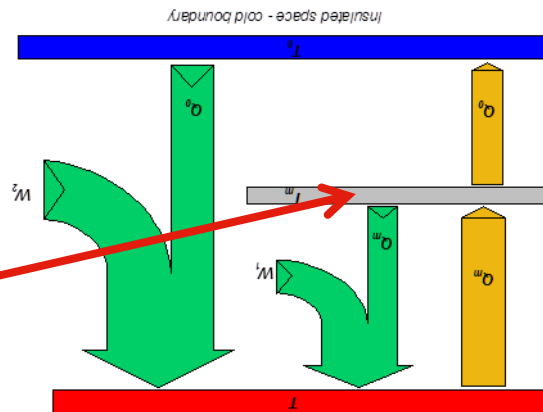


Magnet 30 tons

Cryogenic devices and systems must compromise between mechanical stability and thermal losses. A good example of such approach is a support of LHC superconducting magnets, each weighting 30 tons. The support is a thermal bridge between 300 K and 1,8 K.



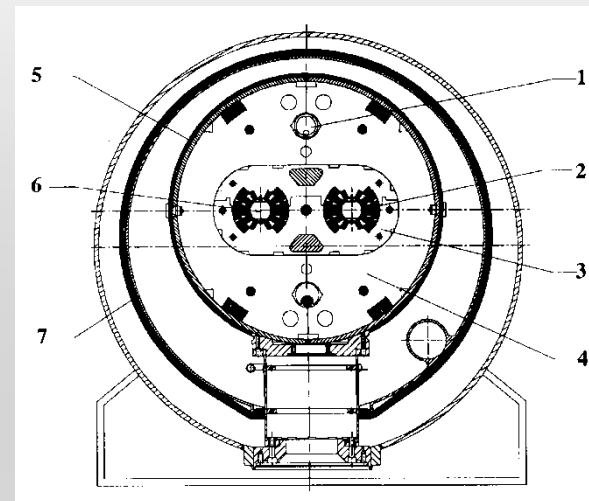
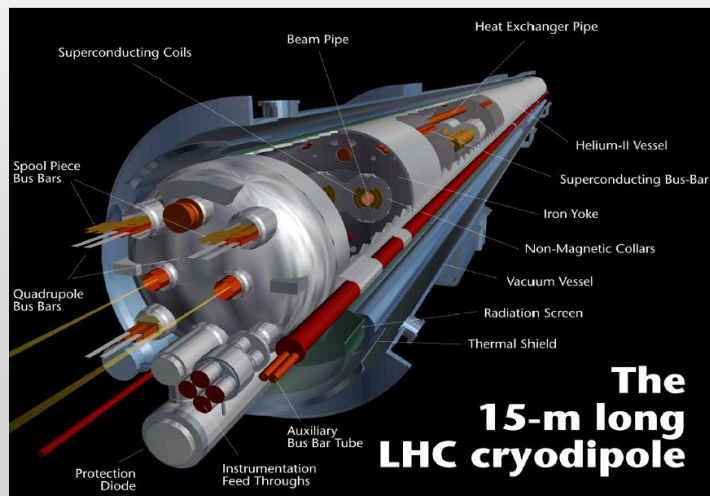
1,8 K



300 K

Heat interception temp. level - to be optimized

Polski wkład w prace przygotowawcze LHC - analiza termohydrauliki przejścia rezystywnego magnesów



$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad L = 0.098H \quad I = 11.85kA$$

$$E \sim 7 \times 10^6 \text{ Joules}$$



Magnesy LHC dipole ważą po około 30 ton, tak więc energia pola magnetycznego jest równoważna:

30 tonom będącym w ruchu z prędkością 77 km/godzinę

Large Hadron Collider accident - faulty electrical joint of two superconductors

No electrical contact between wedge and U-profile with the bus on at least 1 side of the joint
 No bonding at joint with the U-profile and the wedge

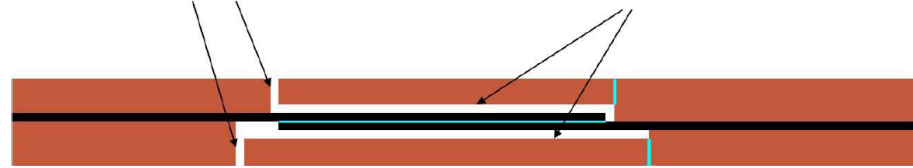
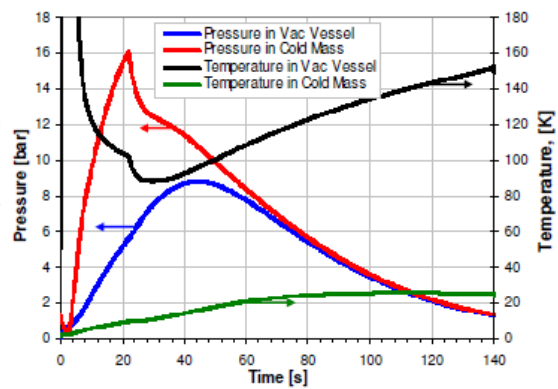
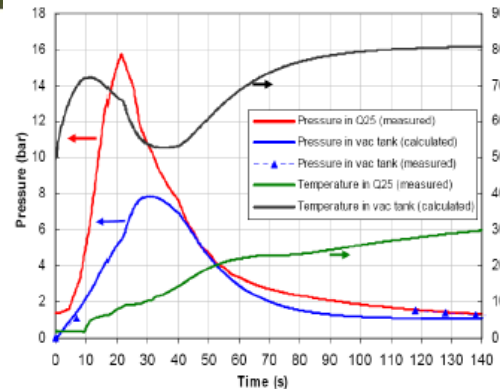
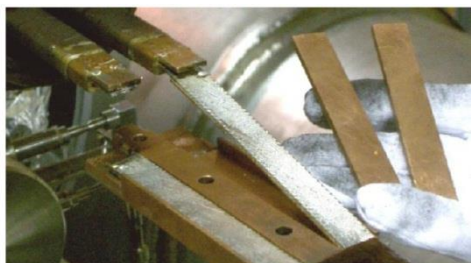
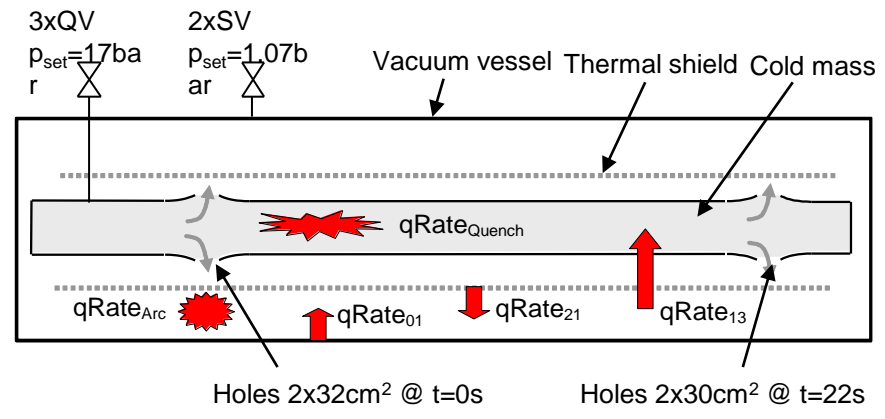


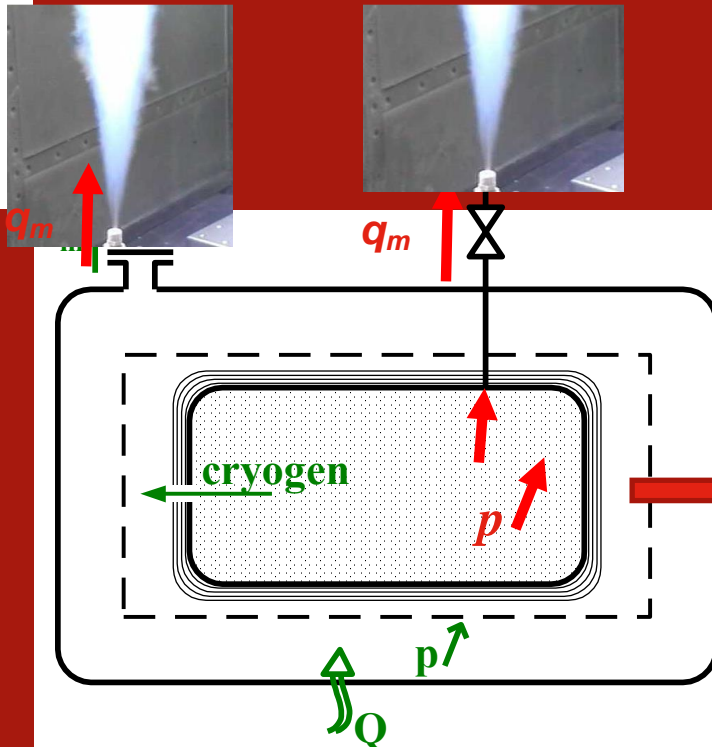
Figure 7: Model of resistive joint in bus bar with bad electrical and thermal contact with the stabilizer

Thermodynamic model



Maciej Chorowski et. al.,
 CERN Note 2009

Safe operation of cryogenic systems

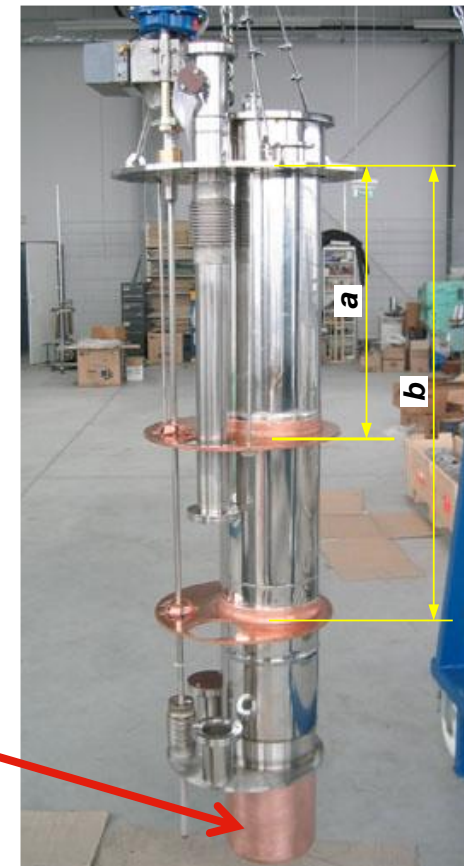
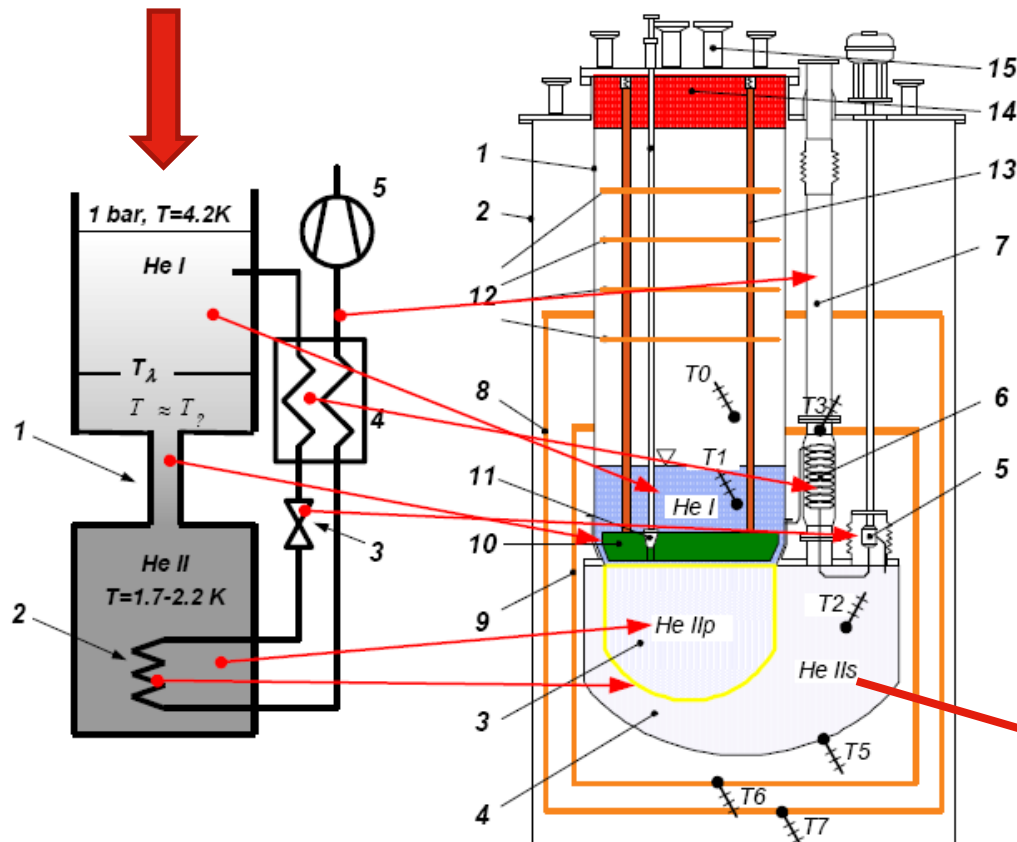


- Mechanical break of warm vacuum vessel
- Fast degradation of vacuum insulation with air
- Intensive heat flow to the cryogen
- *Magnet quench (optionally)*
- Pressure increase of the cryogen
- Opening of the safety valve
- **Cryogen discharge through the safety valve**

Underestimation of heat flux to the helium caused serious damage of the LHC accelerator in 2008

Kriostat testowy pozwalający na uzyskanie nadciekłego helu pod ciśnieniem 1 bar

From He liquefier





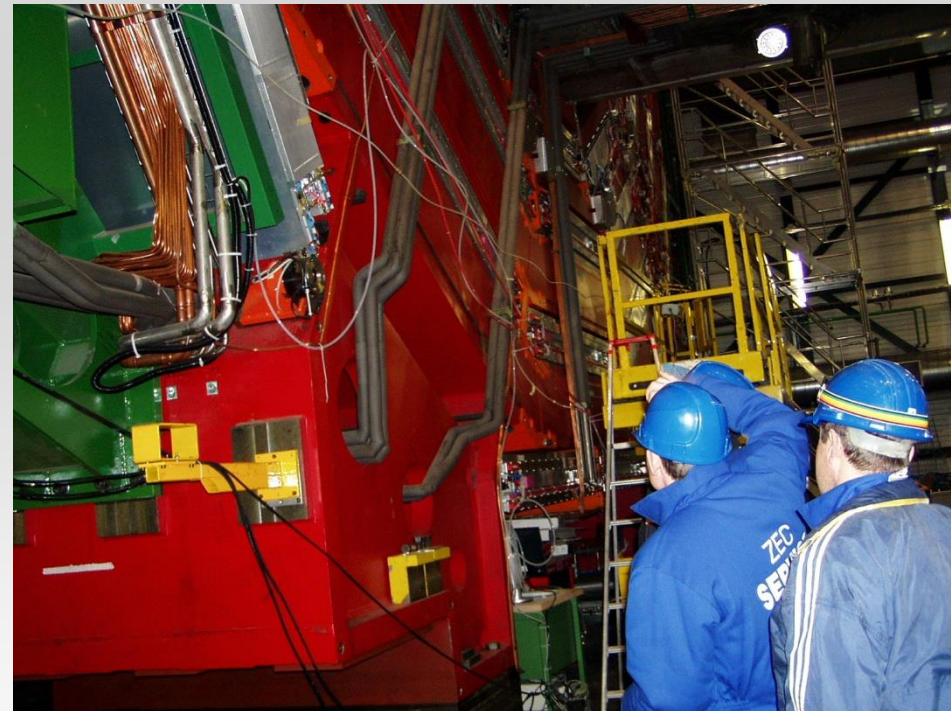
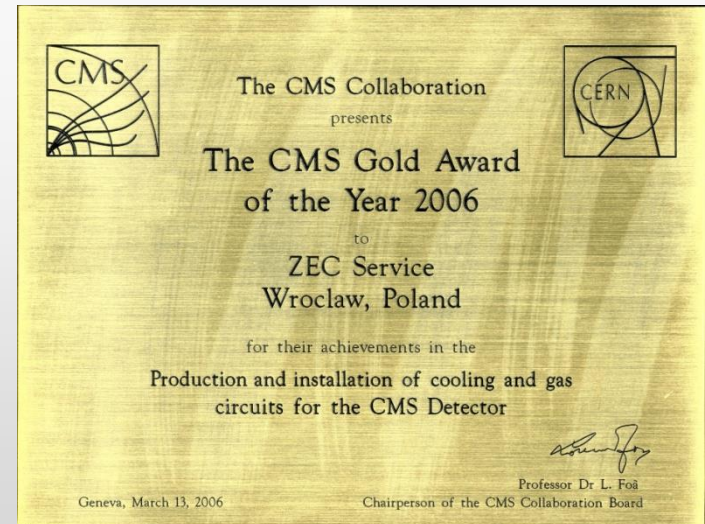
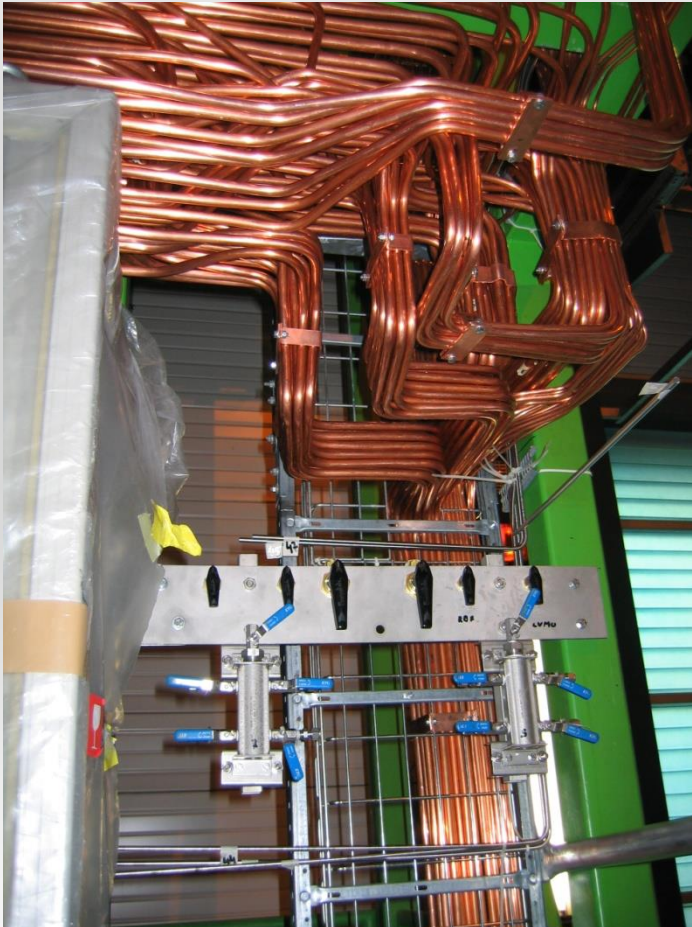
Prototypowe ciągi magnesów - źródła danych doświadczalnych



LHC w Polsce
15.11.08 Warszawa



Zec Service Wrocław -dostawca systemów gazowych dla eksperymentu CMS w CERN



Kriosystem sp. z o.o. - dostawca systemu kriogenicznego HiLumi w CERN, ok 1500 m złożonych instalacji kriogenicznych, kontrakt w latach 2023 - 2028



The High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) project aims to crank up the performance of the LHC in order to increase the potential for discoveries after 2029. The objective is to increase the integrated luminosity by a factor of 10 beyond the LHC's design value.

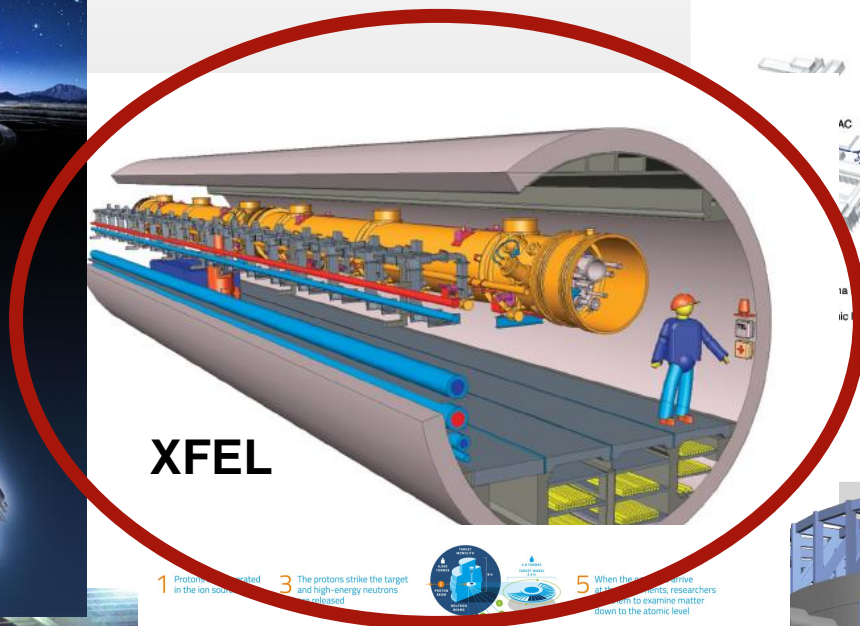
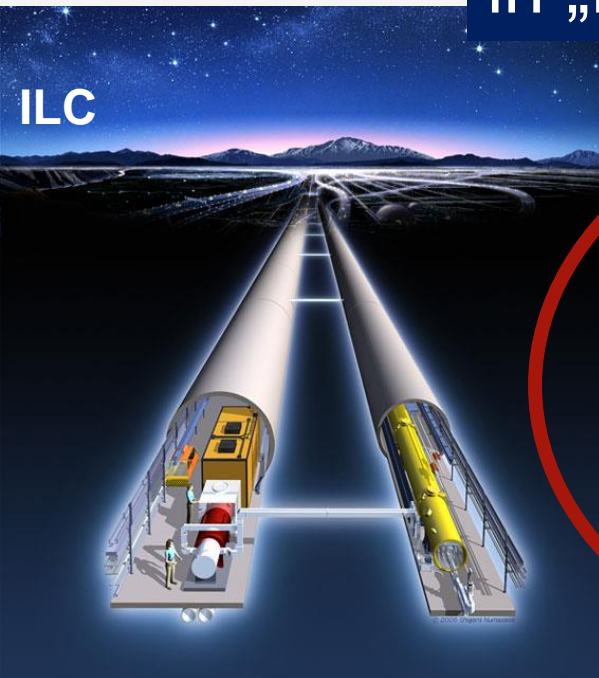


Prototyp instalacji HiLumi, CERN luty 2024

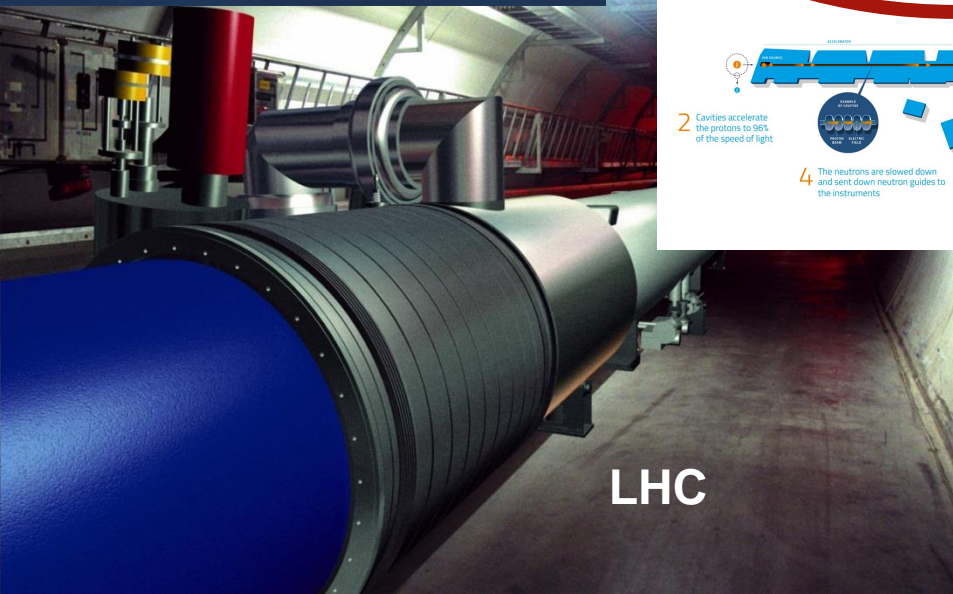
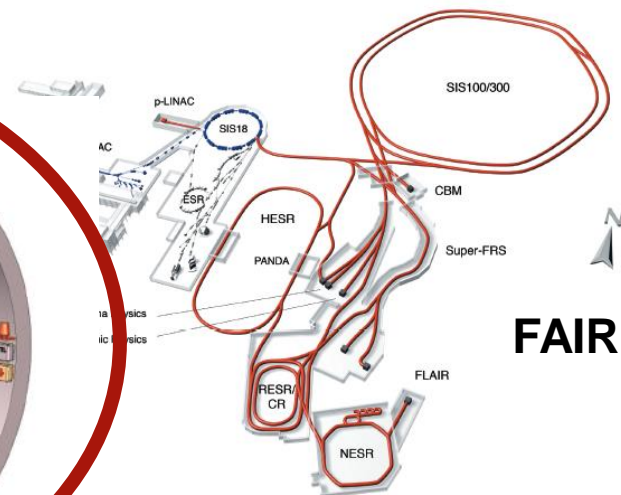
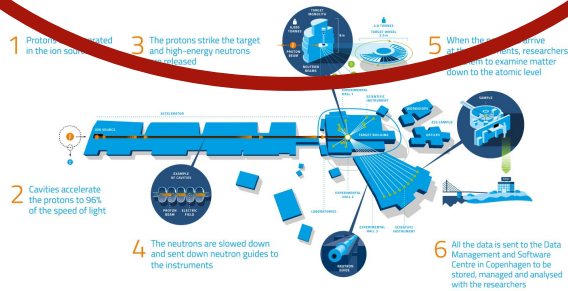


Helium cryogenics is a must in „Big Science”

ILC



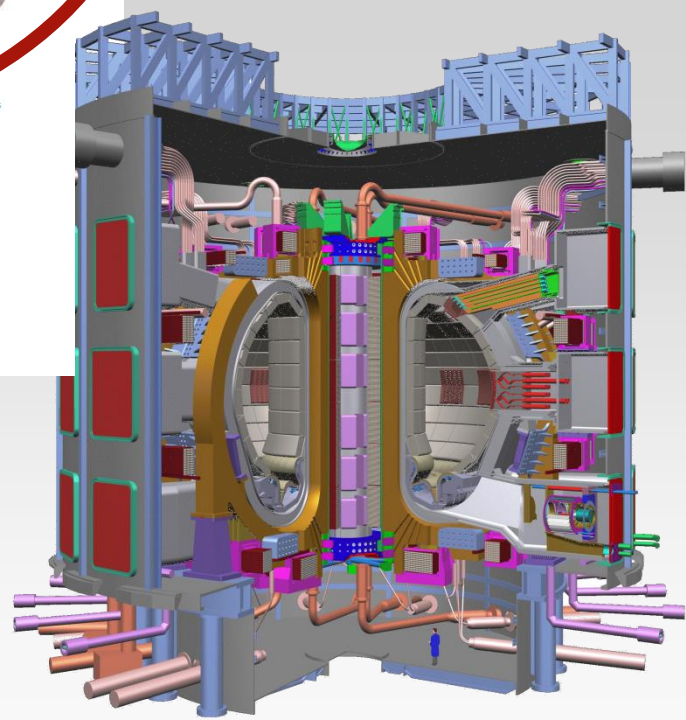
XFEL



LHC

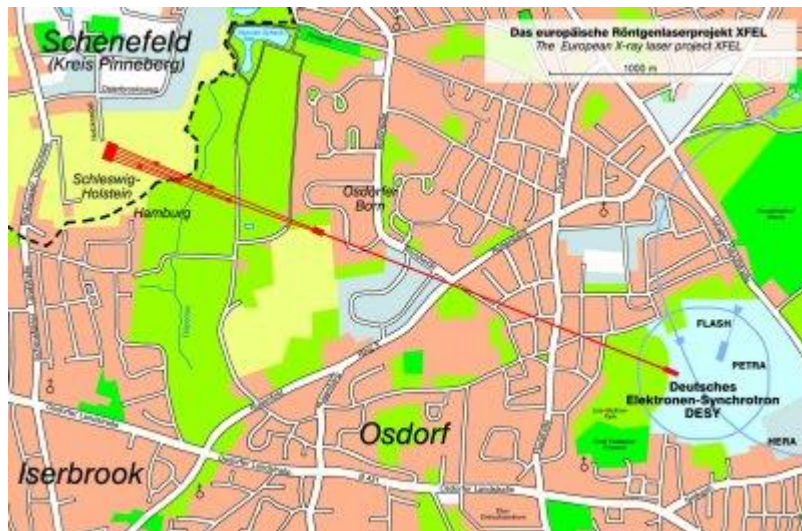
ESS

ITER





The European X-Ray Free Electron Laser XFEL – laser na swobodnych elektronach



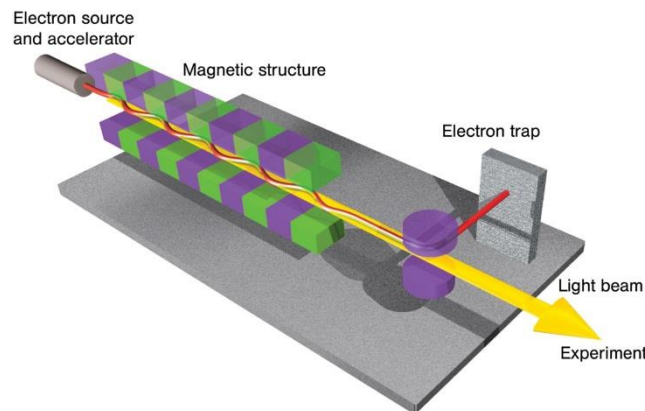
The European XFEL is a research facility currently under construction in the Hamburg area, Germany

The X-ray flashes will be produced in a 3.4-kilometre-long facility.

Initially, a particle accelerator brings electrons to almost the speed of light. These electrons are then made to follow a tight slalom course on which they emit intense flashes of X-ray radiation.

The accelerator elements are cooled to 1,8 K using superfluid helium.

The electrons are accelerated in 101 accelerator modules.

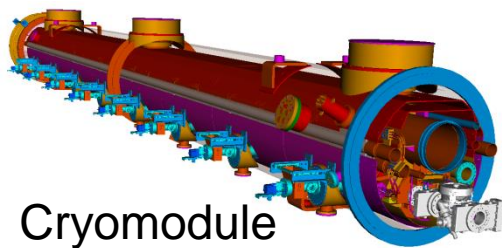


12 countries involved in the project: Denmark, Germany, Poland, Switzerland, Russia, Spain, France, Sweden, Hungary, Italy, Slovakia, Greece

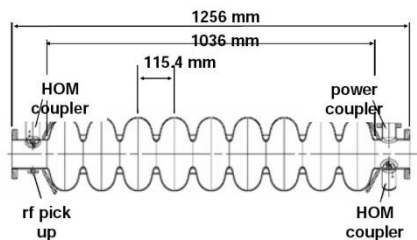


Polski wkład - budowa elementów kriogeniki hali testów

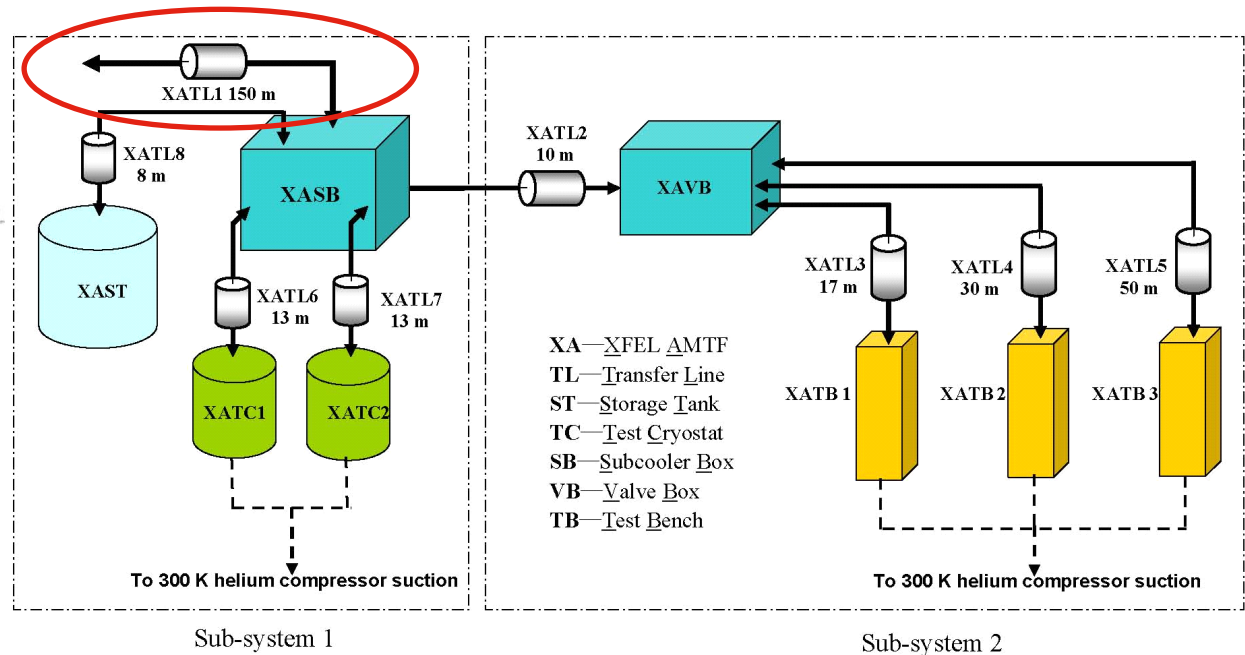
European X-ray Free Electron Laser (XFEL) being under construction at DESY in Hamburg will be composed of 101 cryogenic modules, each holding eight superconducting cavities. The cavities and cryomodules will be tested at their nominal operation conditions in the dedicated **Accelerator Module Test Facility (AMTF)**.



Cryomodule



8 Superconducting cavities in 1 module



Scheme of the Accelerator Module Test Facility



Produkcja i montaż elementów linii kriogenicznej we Wrocławiu



Installation of the process lines in their thermal shield and (courtesy Kriosystem)



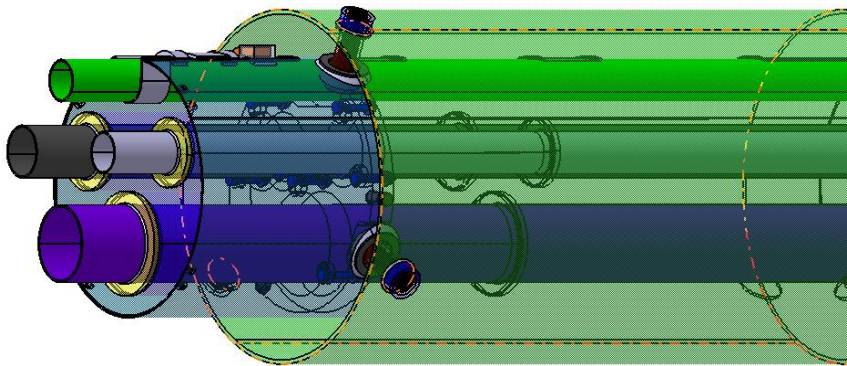
Winding MLI (30 layers) on the thermal shield (courtesy Kriosystem)

Linia kriogeniczna została zaprojektowana i wyprodukowana w Polsce oraz zamontowana w DESY

The required cooling power at AMTF (3 kW @40 K + 0.5 kW @4.5 K + 0.8 kW @2.0 K) will be transferred from helium refrigerators by:

- pressurised gaseous helium at 40 K and 17 bar,
- supercritical helium at 4.5 K and 3.5 bar.

AMTF hall will be connected with the helium refrigerators by **multichannel cryogenic transfer line XATL1**, located on the bridge.



Multichannel cryogenic transfer line





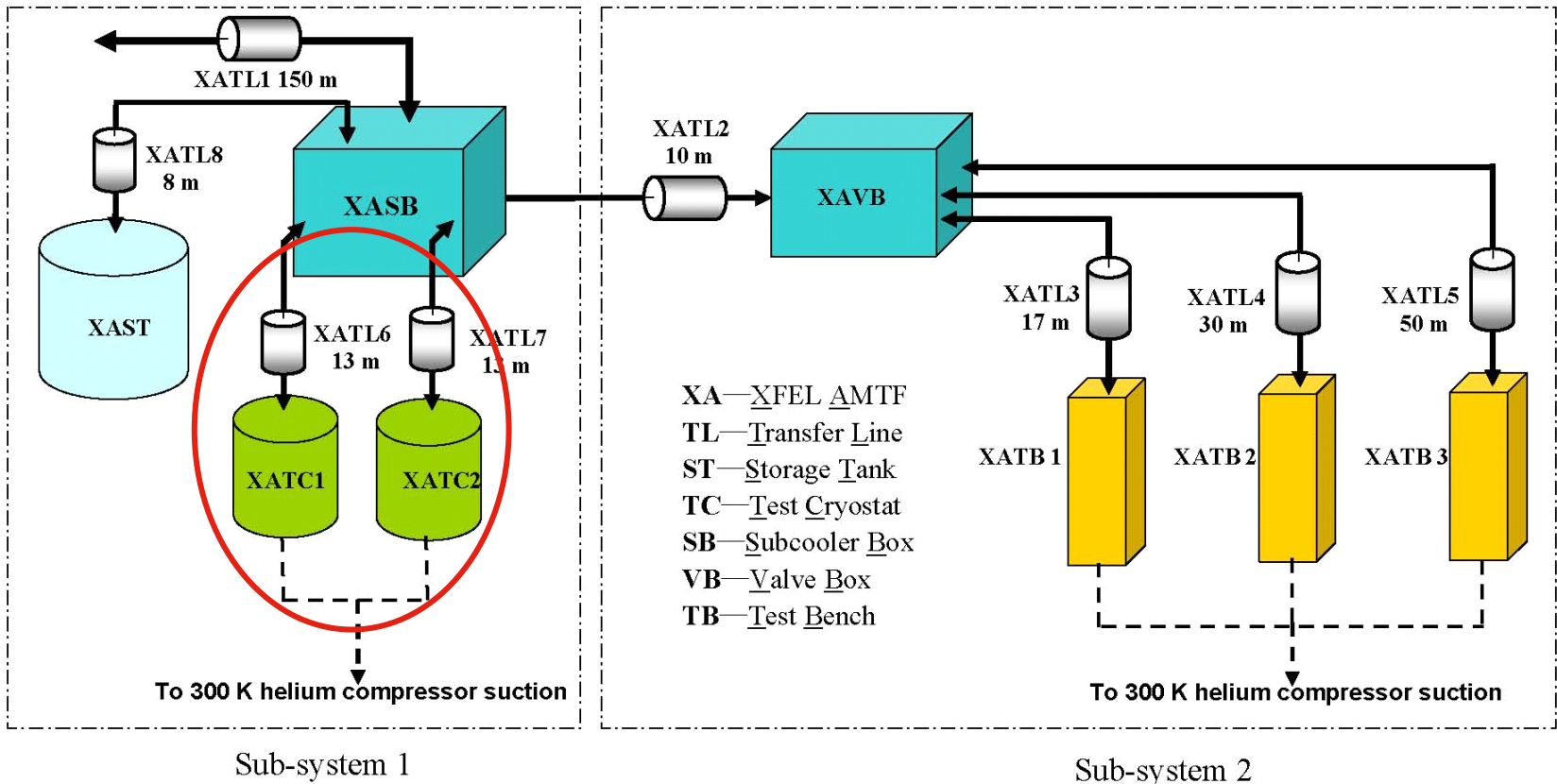
Instalacja linii na moście XFEL w DESY, Hamburg



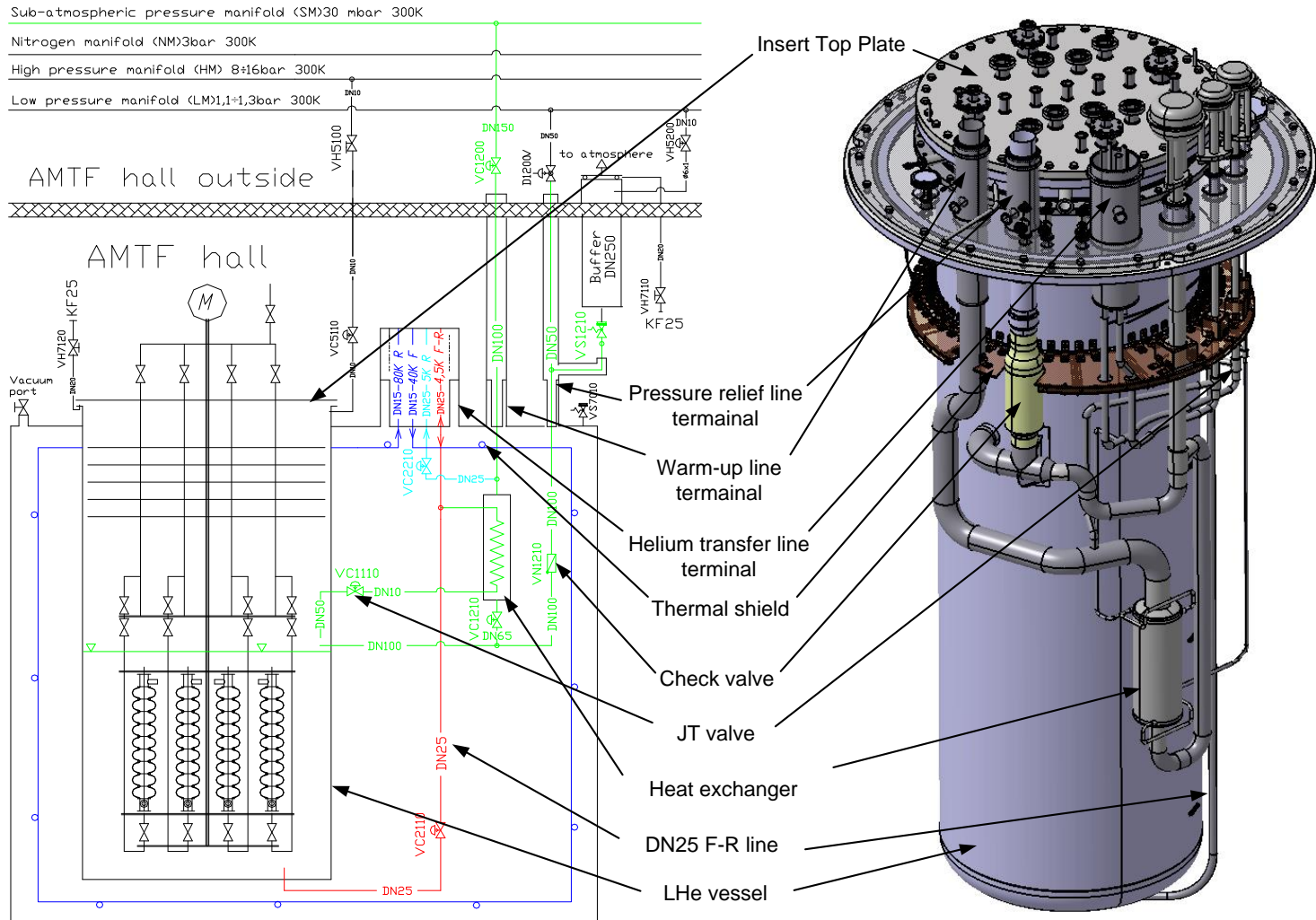
Installation of the XATL1 modules on the piping bridge



AMTF Hall cryogenic structure

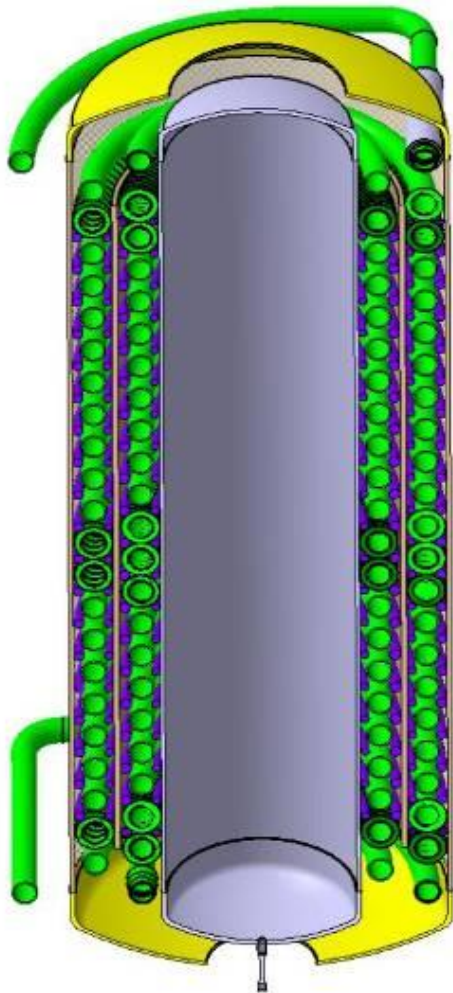


XATC kriostaty, 1,8 K projekt i opracowanie technologii: Politechnika Wrocławska





Design and thermodynamic optimization of the Low Pressure Heat Exchanger (LPHE), Politechnika Wroclawska





Produkcja kriostatów w przemyśle, Kriosystem Wrocław, nadzór PWr





XATC cryostats installation in AMTF Hall at DESY, Hamburg

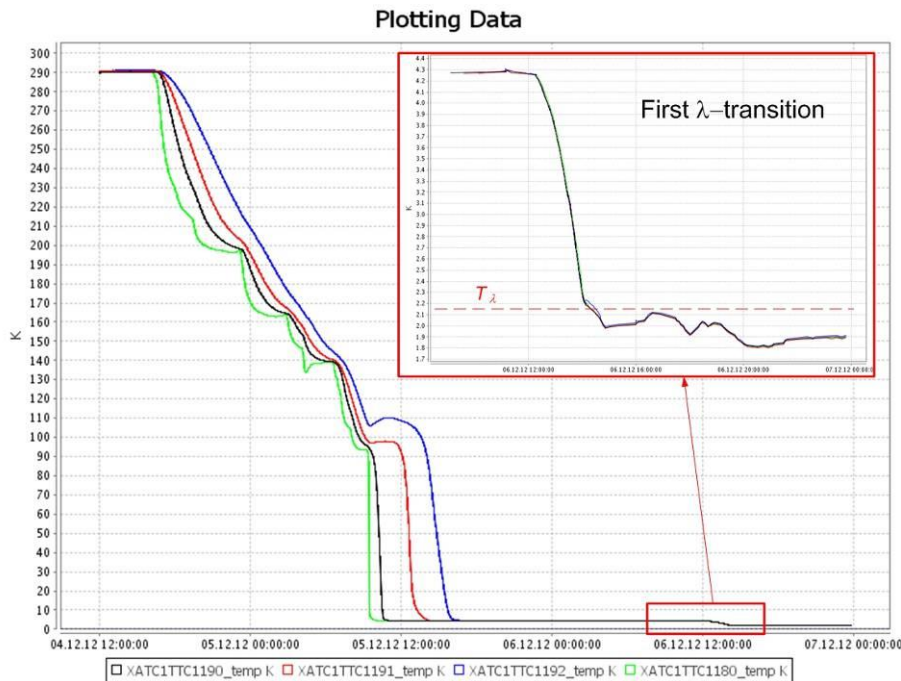




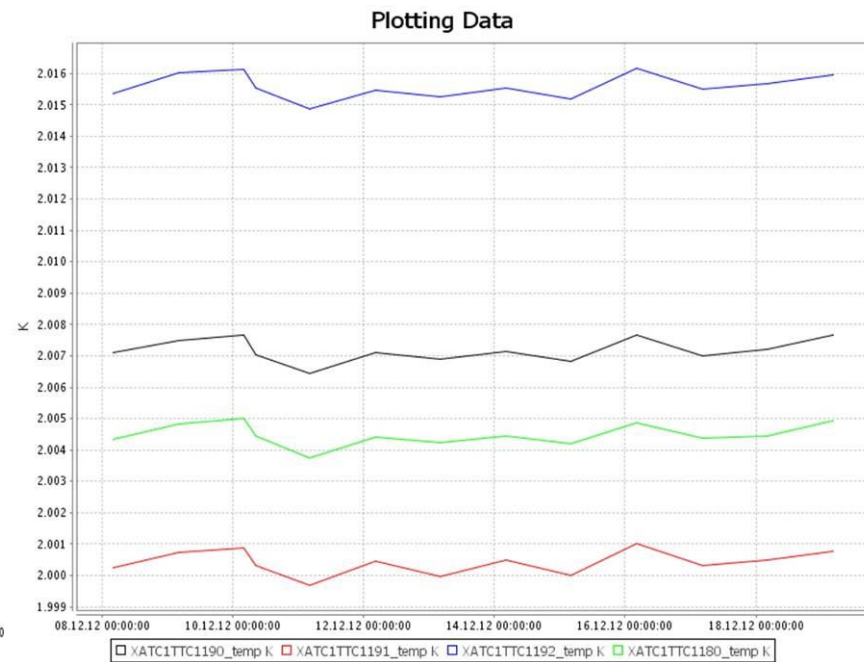
XATC1 - preparation for commissioning at DESY site, Hamburg



XATC1 - first cool down to superfluid helium conditions



XATC1 cool down characteristic

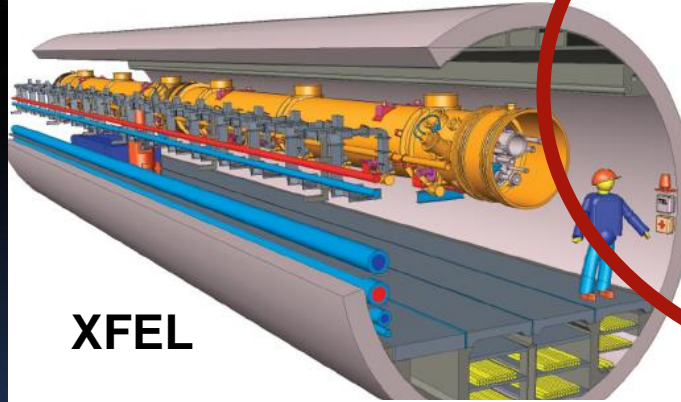


Temperature stabilisation in the XATC1 helium vessel

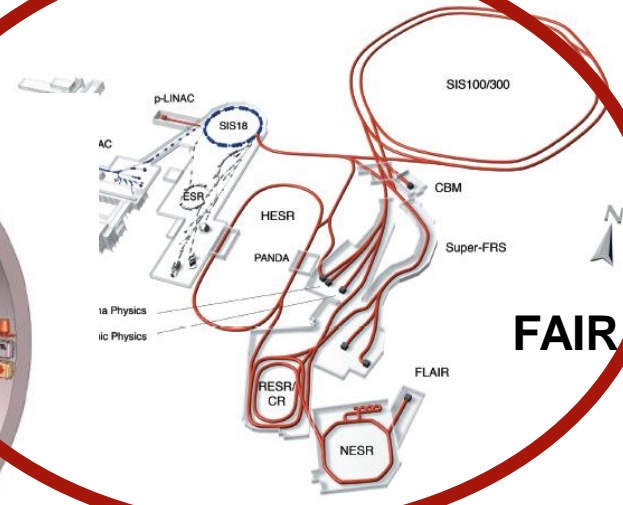


Helium cryogenics is a must in „Big Science”

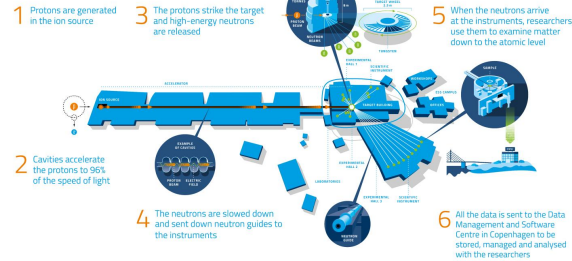
ILC



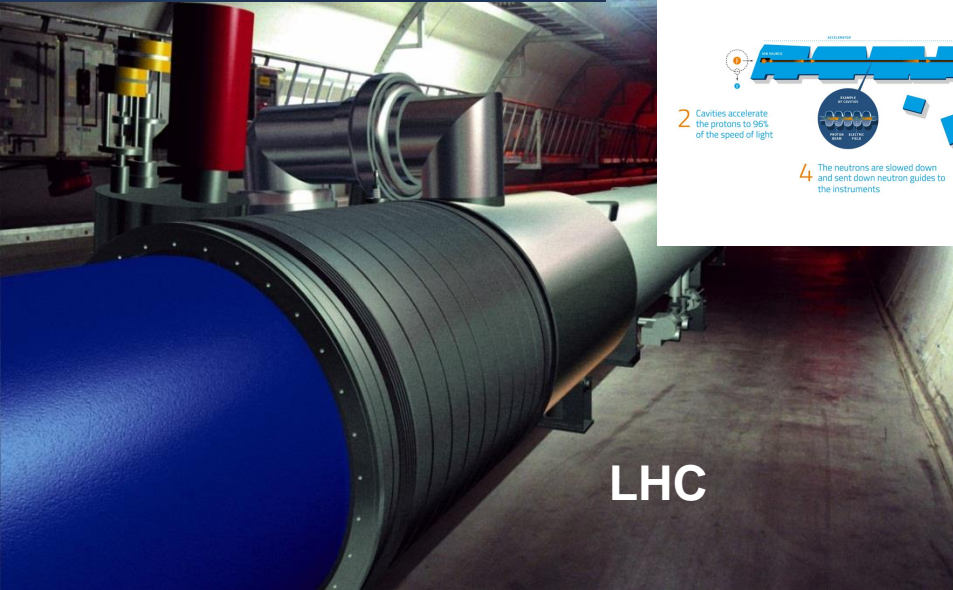
XFEL



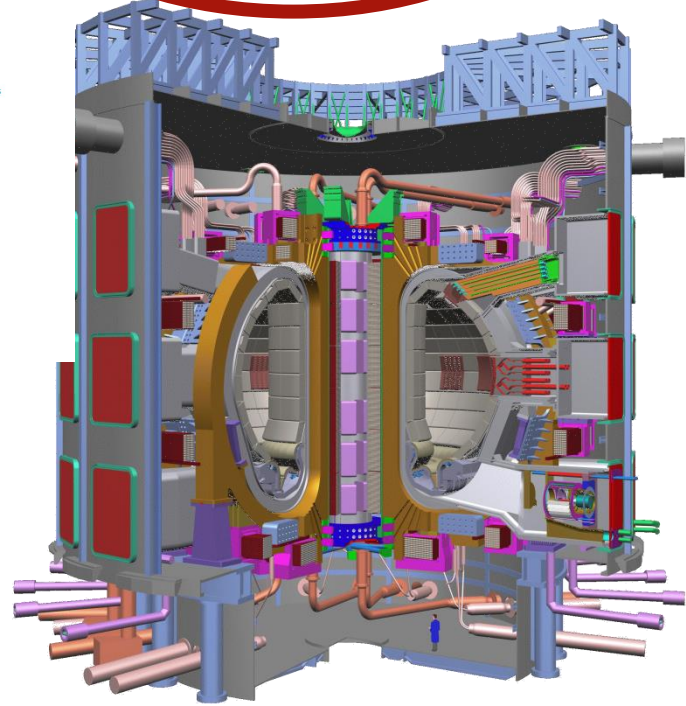
FAIR



ESS



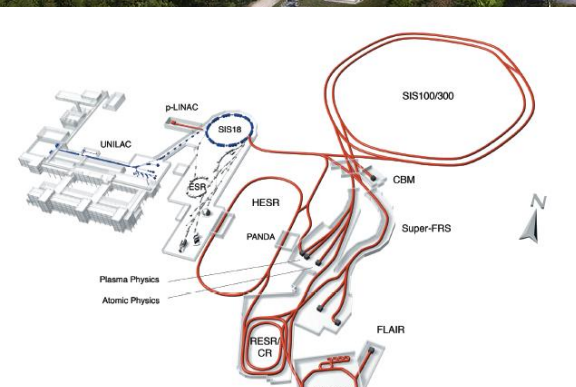
LHC



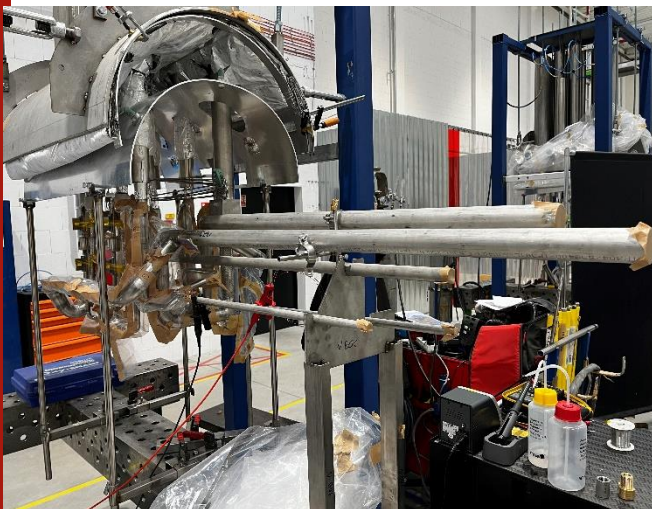
ITER



Kompleks akceleratorów FAIR w Darmstadt, Niemcy



Elementy systemu kriogenicznego, projekt PWr, produkcja w polskim przemyśle



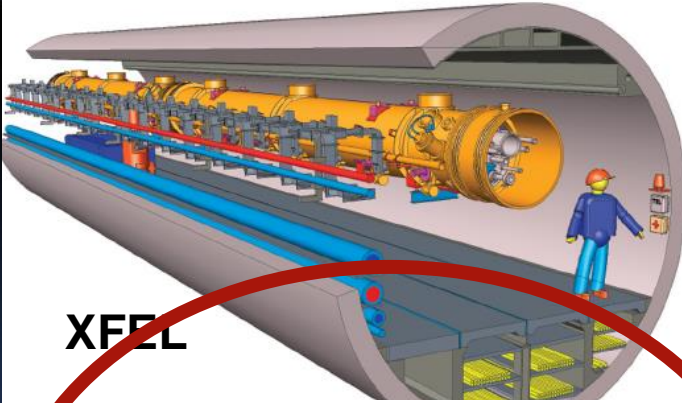
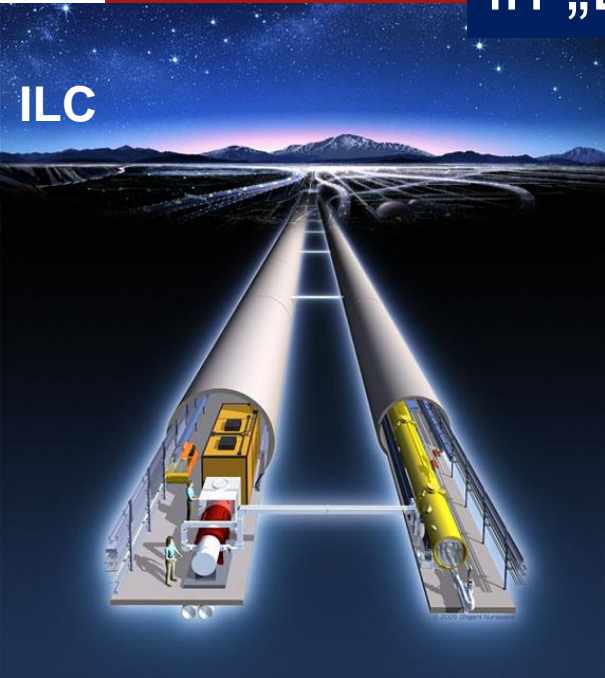
Linia przesyłu prądu 13 kA kablami nadprzewodnikowymi, zasilanie magnesów akceleratora SIS 100 w FAIR , projekt PWr



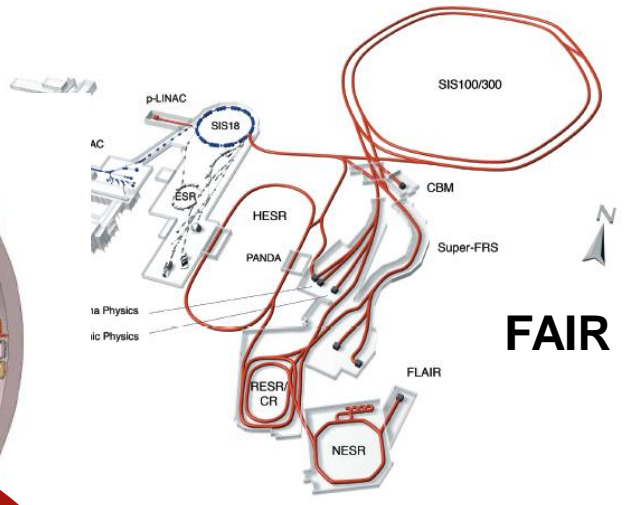


Helium cryogenics is a must in „Big Science”

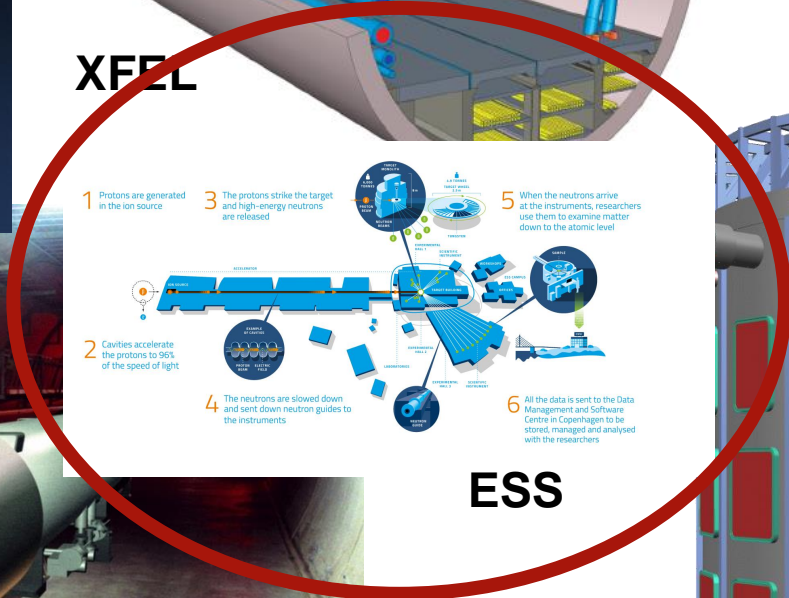
ILC



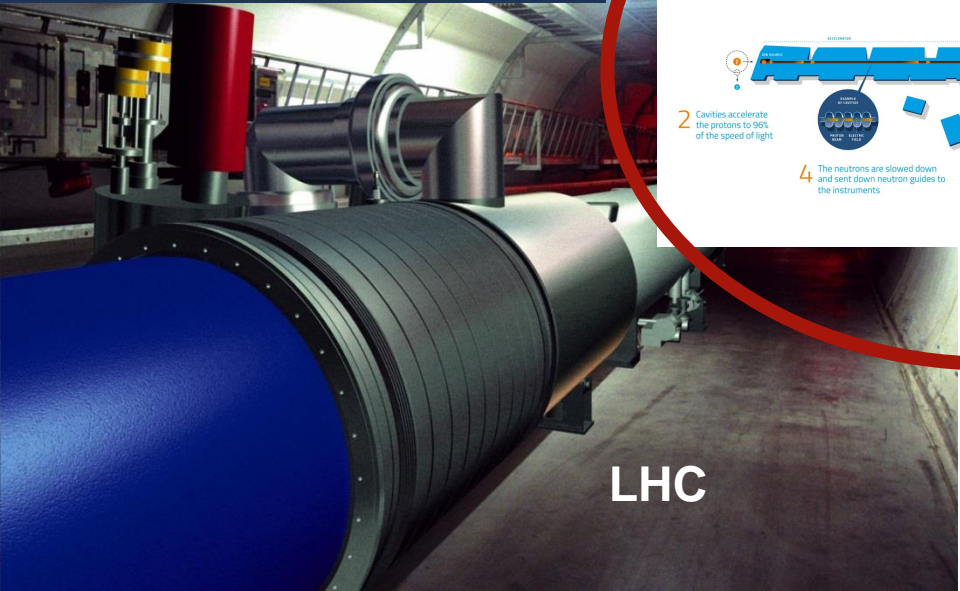
XFEL



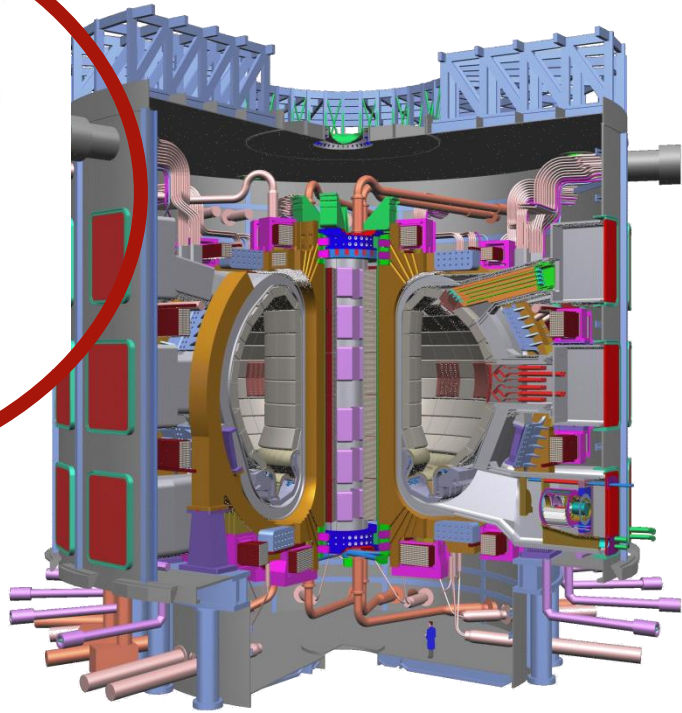
FAIR



ESS



LHC



ITER



System kriogeniczny akceleratora ESS, Lund Szwecja

Protony przyspieszone w nadprzewodnikowym akceleratorze wybijają ze specjalnej tarczy neutrony służące do badań materiałowych

1 Protons are generated in the ion source

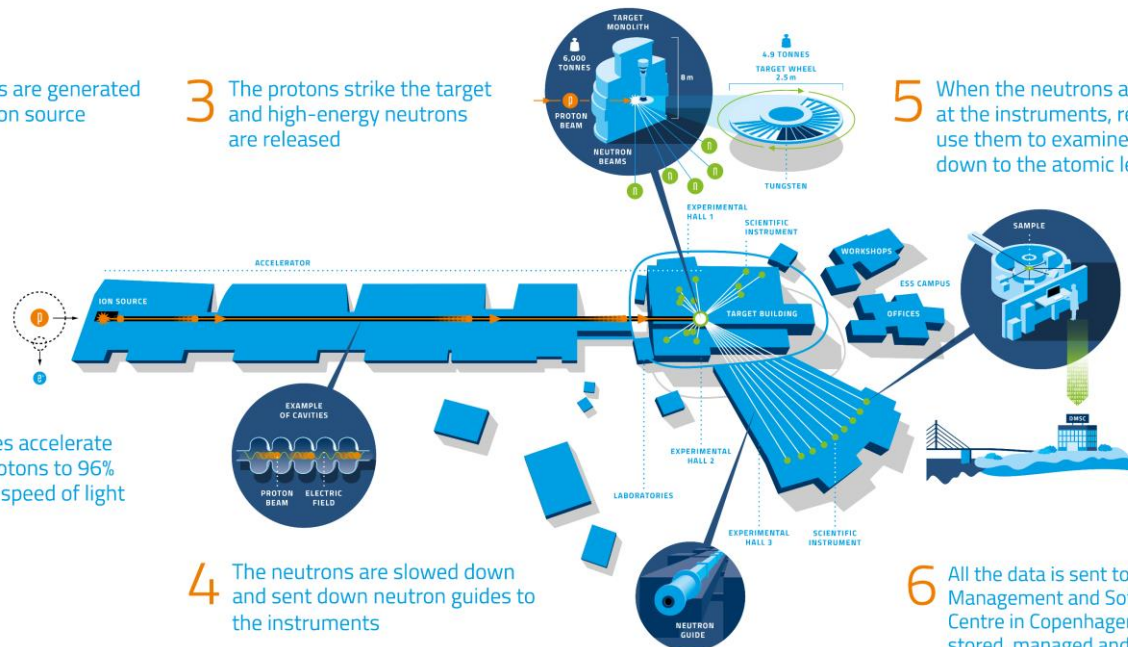
3 The protons strike the target and high-energy neutrons are released

5 When the neutrons arrive at the instruments, researchers use them to examine matter down to the atomic level

2 Cavities accelerate the protons to 96% of the speed of light

4 The neutrons are slowed down and sent down neutron guides to the instruments

6 All the data is sent to the Data Management and Software Centre in Copenhagen to be stored, managed and analysed with the researchers





System kriogeniczny akceleratora ESS, Lund
Szwecja, zasilanie kriomodulów ciekłym
helem, projekt PWr, produkcja i instalacja
Kriosystem sp. z o.o.



Stanowisko testowe, optymalizacja
rozwiązań



System kriogeniczny o
długości około 300 m
zainstalowany w
tunelu ESS, Lund
Lhe, 4,3K , 3 bar



KrioSystem



Wrocław University
of Science and Technology

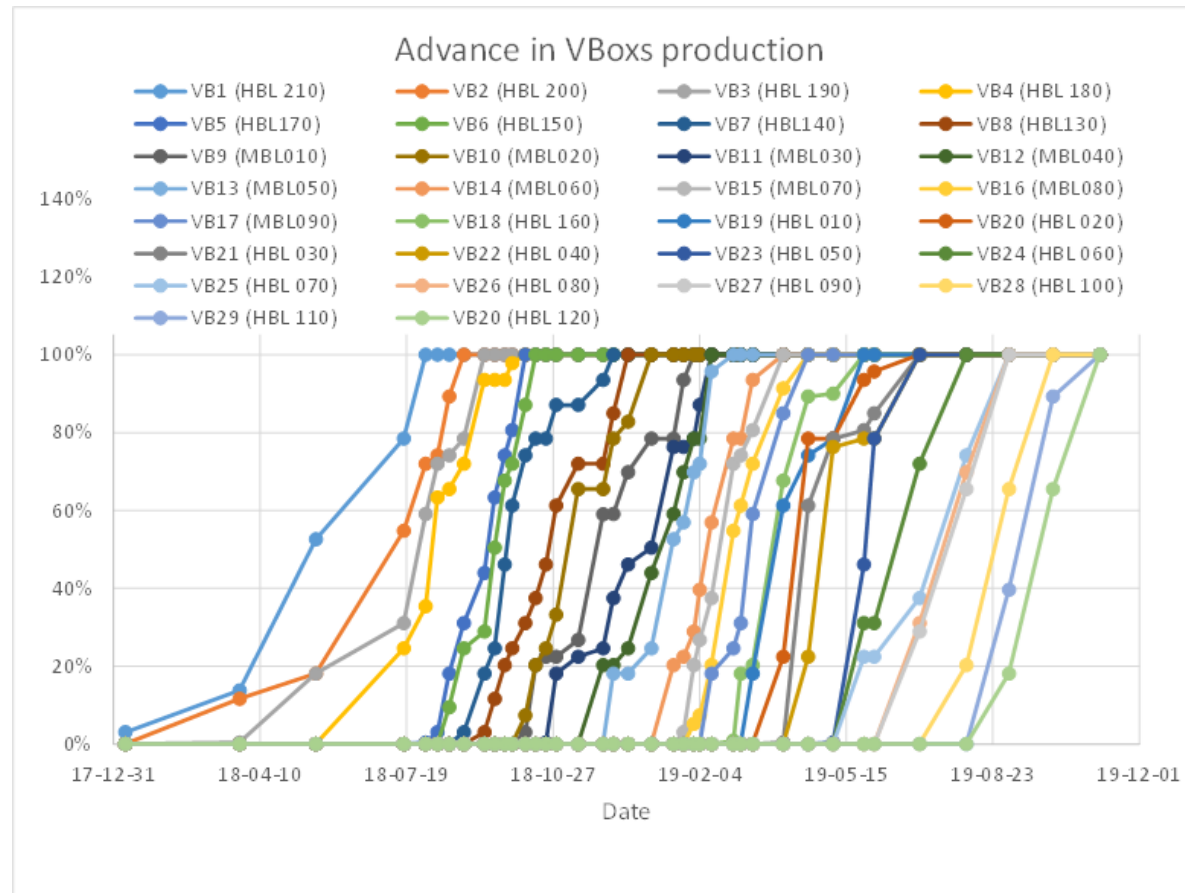
150.5

150.7

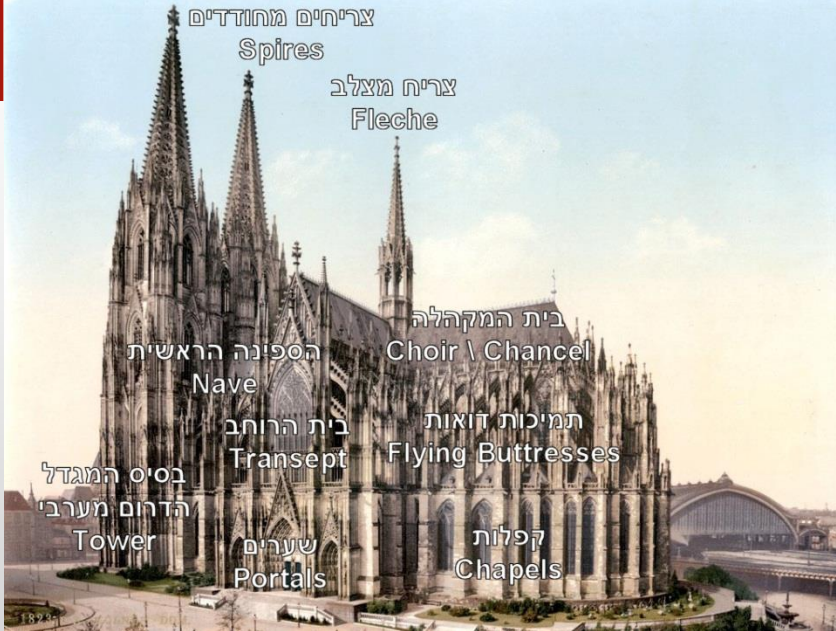
150.8



System kriogeniczny akceleratora ESS, Lund Szwecja, zasilanie kriomodułów ciekłym helem, projekt PWr, produkcja i instalacja Kriosystem sp. z o.o.



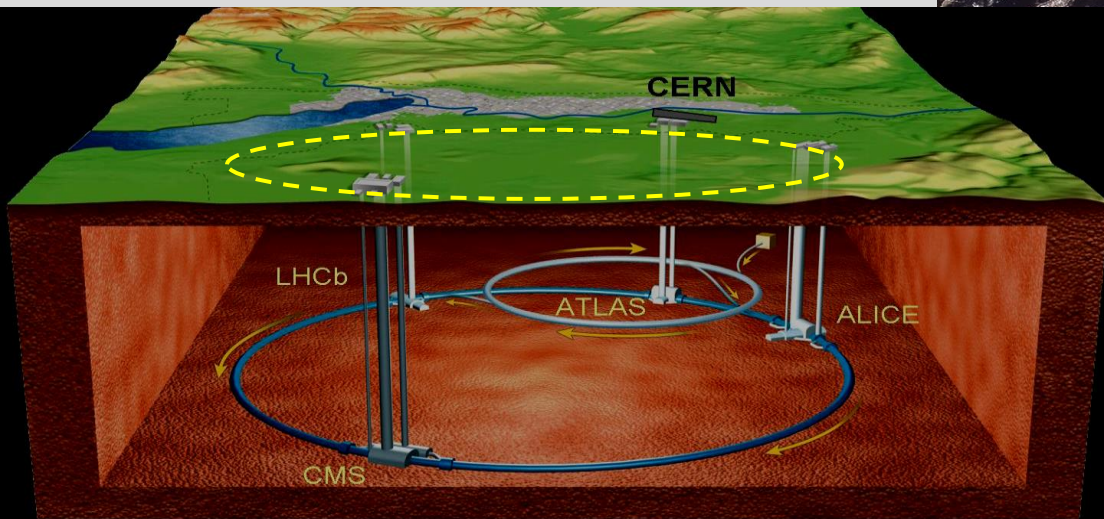
Czas produkcji pojedynczych modułów systemu spadł od 6 miesięcy dla pierwszego do dwóch tygodni dla ostatniego z 30 sztuk



Ośrodki transferu technologii:

← Kiedyś

Dzisiaj →

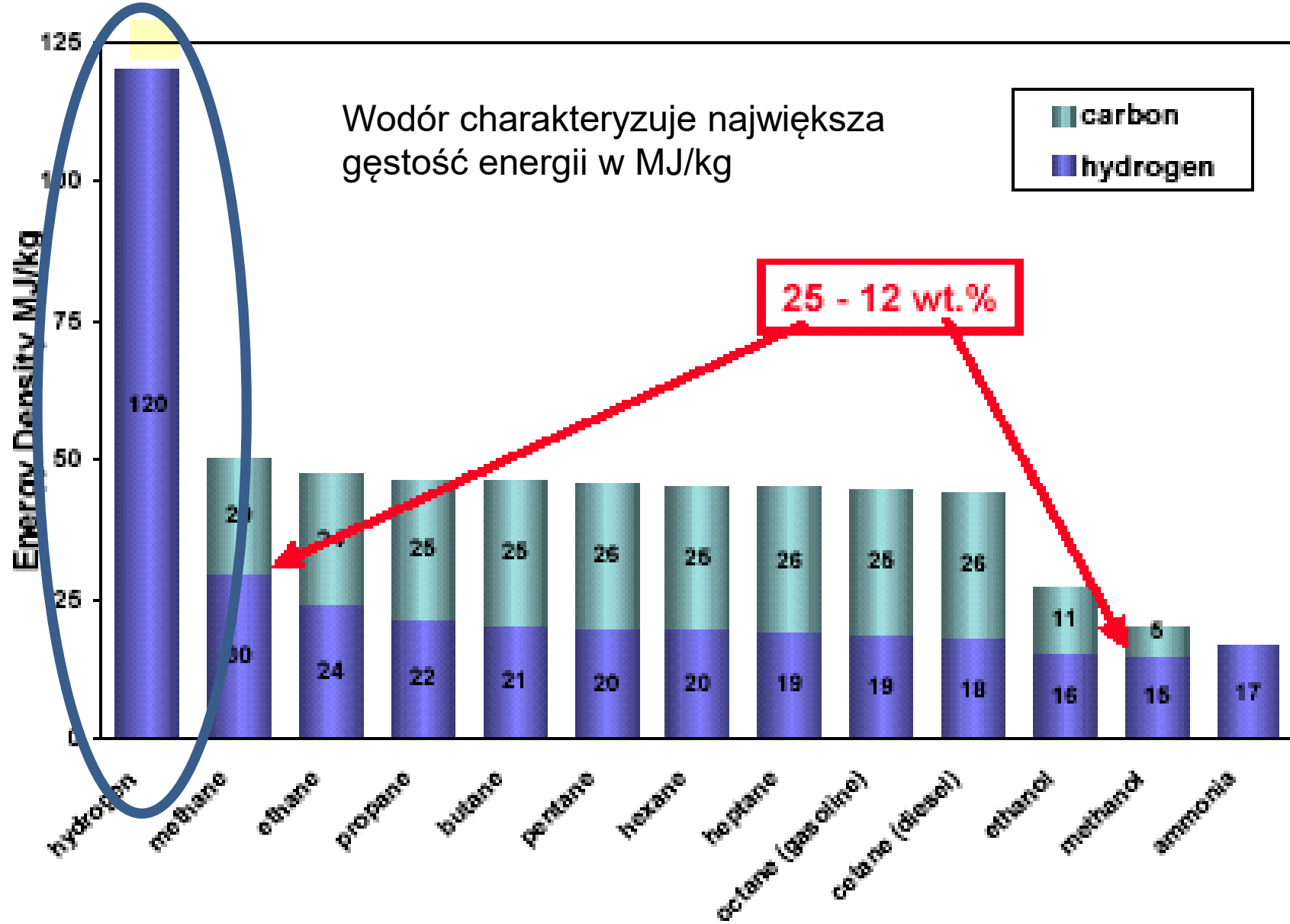


Duża infrastruktura badawcza – projekty o pokoleniowej stałej czasowej, kriogenika jest jedną z bram do tych ośrodków



Tematyka

- Kriogenika, definicje, rys historyczny
- Przykłady zastosowań kriogeniki
 - Satelity,
 - Akceleratory - Wielki Zderzacz Hadronów i inne duże projekty FAIR, XFEL, ESS ...
 - **Lotnictwo**
- Kriogenika - polska specjalność

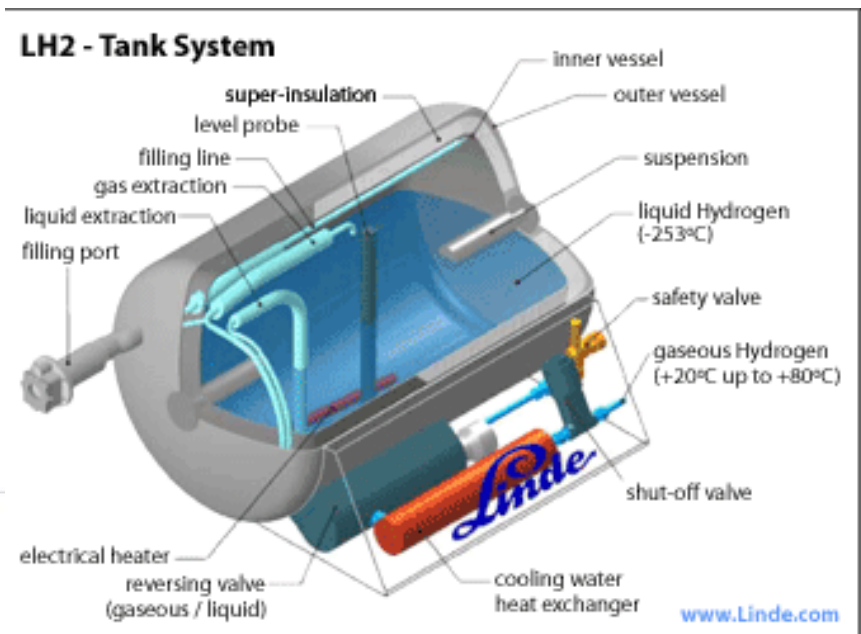




Sprężony wodór ma objętościową gęstość energii porównywalną z ciekłym wodorem przy ciśnieniu 700 bar. To pokazuje skalę trudności magazynowania wodoru przy dużej gęstości energii

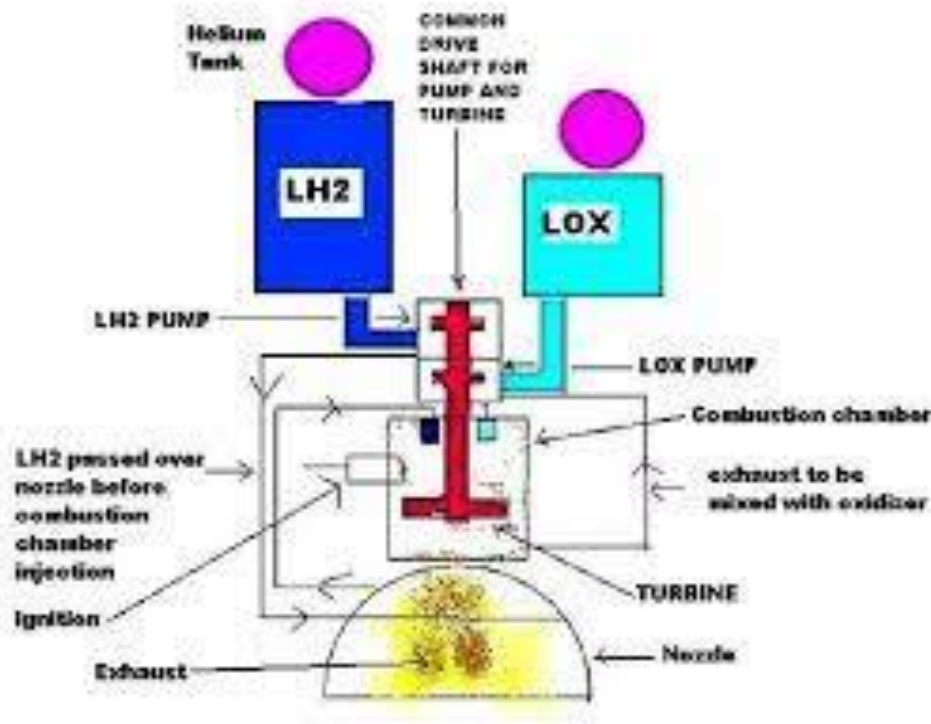
– **Liquid Hydrogen – 20 K, 1 bar** dewar vessels
(car tanks: 5 MJ/liter)

– **Compressed Hydrogen - up to 700 bar, 300 K**
(car tanks: : 4,7 MJ/liter)





Kriogeniczne silniki rakietowe „state of art technology”, paliwem jest ciekły wodór, utleniaczem ciekły tlen. Stąd technologie kriogeniczne są rozwijane w państwach o ambicjach mocarstwowych – USA, Francja, Indie...





Samoloty zasilane ciekłym wodorem @ 20 K (- 253 °C)



[September 7, 2023, Stuttgart/Maribor]
– H2FLY, the Stuttgart, Germany-based developer of hydrogen-electric powertrain systems for aircraft, today announced it has successfully completed the world's first piloted flight of an electric aircraft powered by liquid hydrogen.

Results of the test flights indicate that using liquid hydrogen in place of gaseous hydrogen will double the maximum range of the HY4 aircraft from **750 km to 1,500 km**, marking a critical step towards the delivery of emissions-free, medium- and long-haul commercial flights.

The hydrogen powered Boeing Phantom Eye UAV first flew on 1 June 2012, LH2 powered





Tematyka

- Kriogenika, definicje, rys historyczny
- Przykłady zastosowań kriogeniki
 - Satelity,
 - Akceleratory - Wielki Zderzacz Hadronów i inne duże projekty FAIR, XFEL, ESS ...
 - Lotnictwo
- **Kriogenika - polska specjalność**

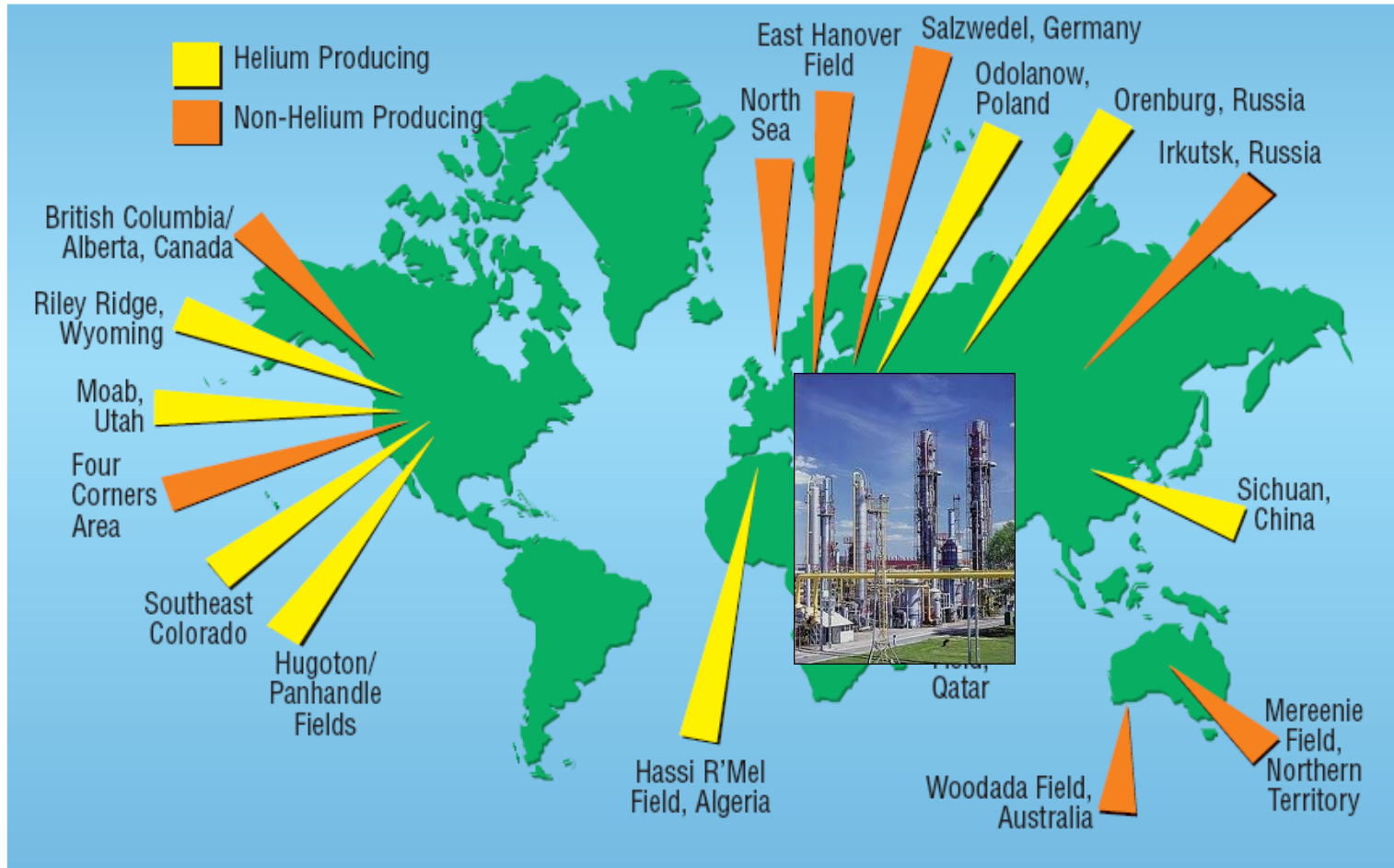


Fig 1 Helium can be extracted from only a few natural gas fields around the world. The richest field is in the state of Utah in the U.S.

The only place in Europe where helium is produced from natural gas is PGNiG Odolanow, Poland



Helium: 446 ton/year
1.6% of world consumption

Natural gas (pipe): about 3500 ton/day
About 30% of Poland gas production



Low-methane gas purification



Low temperature distillation of natural gas



Helium purification, liquefaction and storage

Liquid Natural Gas (LNG):
About 150 ton/day (ca 4% of total gas production)



Czy można się obejść bez kriogeniki? Tak, lecz czasami może to być kłopotliwe!

