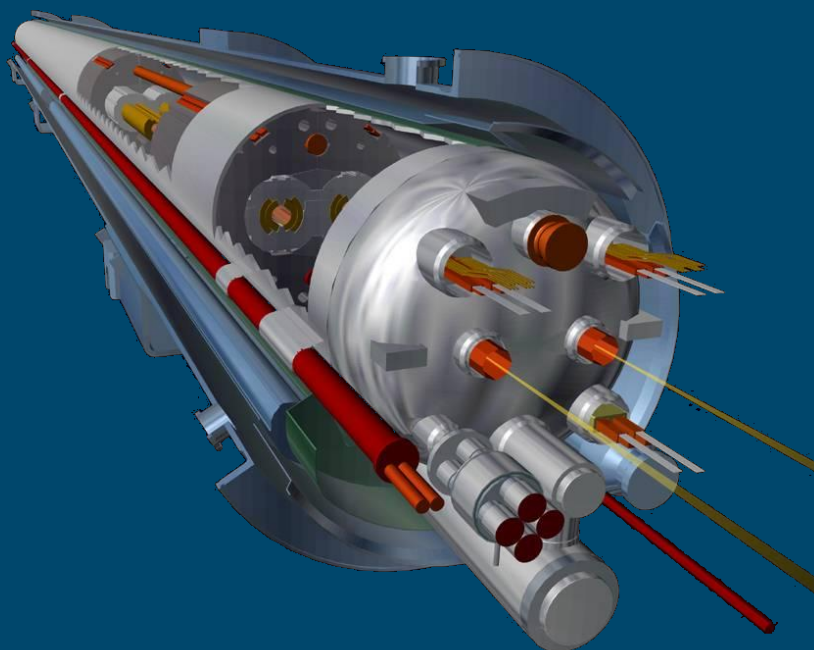




INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



Elektromagnesy Nadprzewodnikowe W Akceleratorach Cząstek

Dariusz Bocian

Dariusz.Bocian@ifj.edu.pl

Polska Szkoła Akceleratorowa: Wybrane Zagadnienia Akceleracji Cząstek



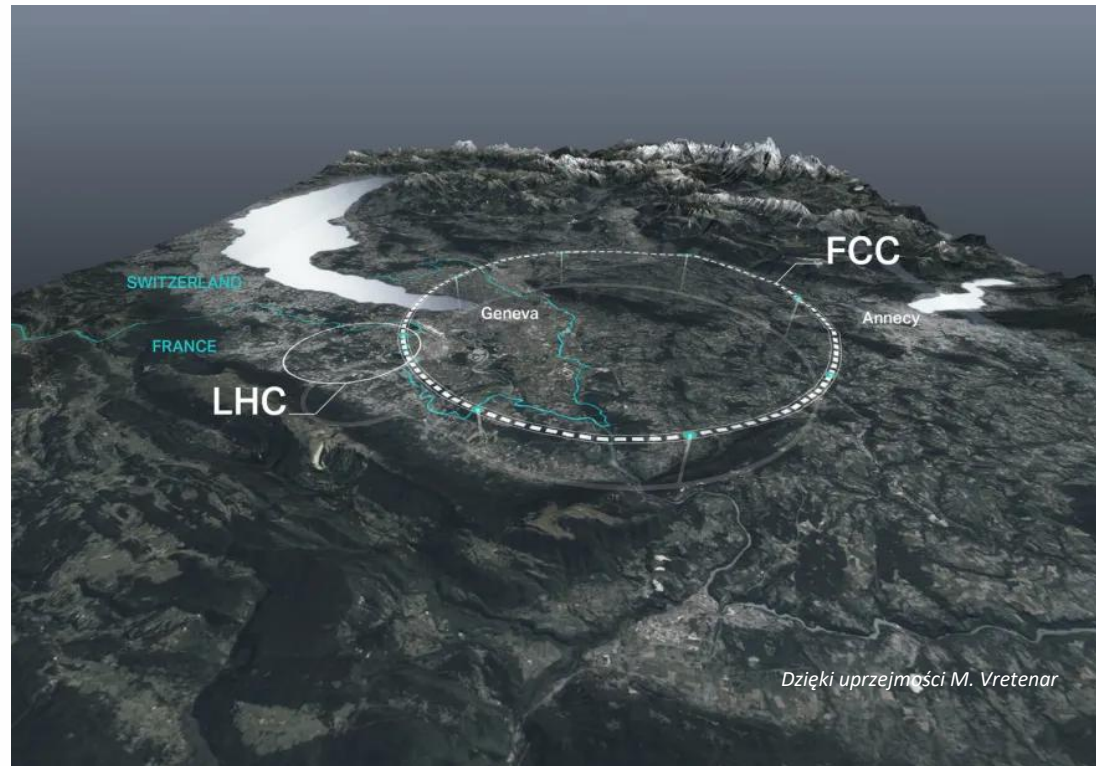
Akceleratory cząstek, największe maszyny, jakie kiedykolwiek zbudowała ludzkość

Wielki Zderzacz Hadronów w CERN:

- 27 km tunel,
- 17 km linii wprowadzających i linii wiązki,
- 100,000 m² laboratoriów na obszarze 200 ha.

→ Prace R&D dla **Przyszłego Zderzacza Kołowego**
90.7 km tunel.

Guinness Book of World Records,
"The Large Hadron Collider (LHC) is
the largest and most complex
machine ever built."

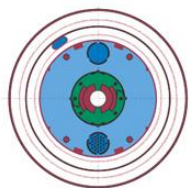


Czego potrzebujemy w akceleratorach cząstek i nie tylko tam (fuzja termojądrowa, NMR, magazyny energii, etc):

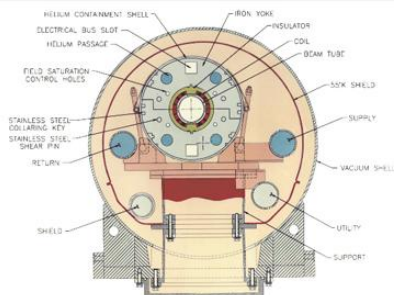
- silne pola magnetyczne do ~ 20 T,
- stabilne i jednorodne w czasie,
- niskie zużycie energii,
- powtarzalne

Jaki mamy wybór:

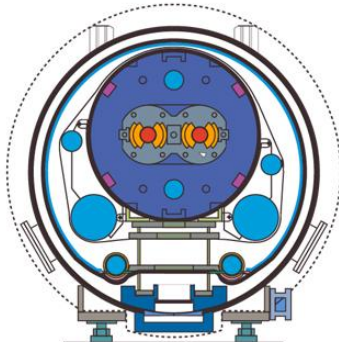
- Magnesy trwałe $\Rightarrow$ osiągnęte pola 1-2 T;
- Klasyczne elektromagnesy (chłodzone wodą)
 $\Rightarrow$ limit ~ 2 T (nasycenie magnetyczne rdzenia)
- Magnesy na bazie miedzi (lub aluminium)
 $\Rightarrow 50$ -100 T, ale dla czasów milisekundowych!



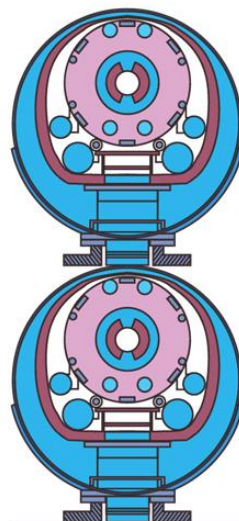
HERA
 $B = 4.7$ T
BORE : 75 mm



RHIC
 $B = 3.5$ T
Bore : 80 mm

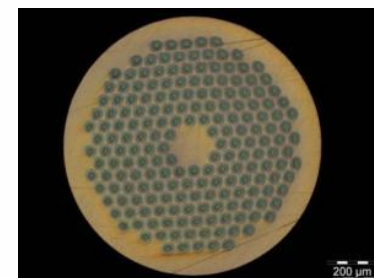


LHC
 $B = 8.3$ T
Bore : 56 mm

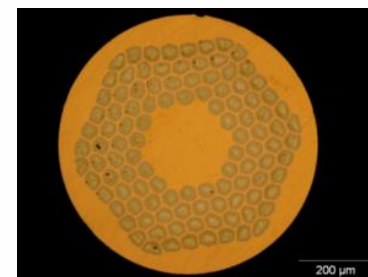


SSC
 $B = 6.6$ T
Bore : 50-50 mm

CERN AC - HE 109 RHIC 2001/09/20



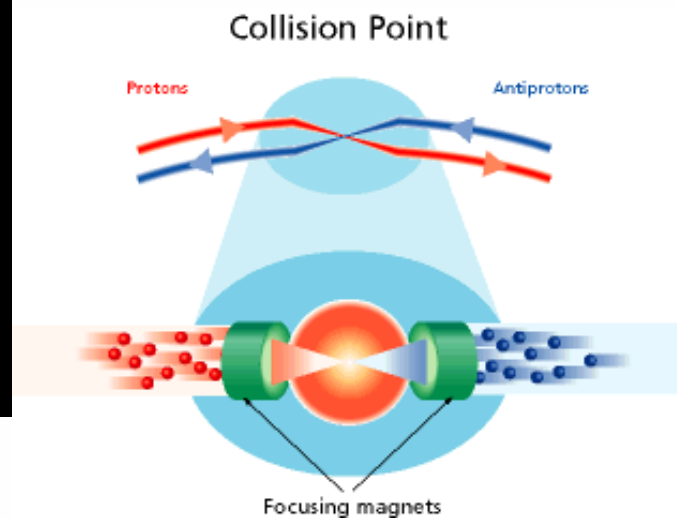
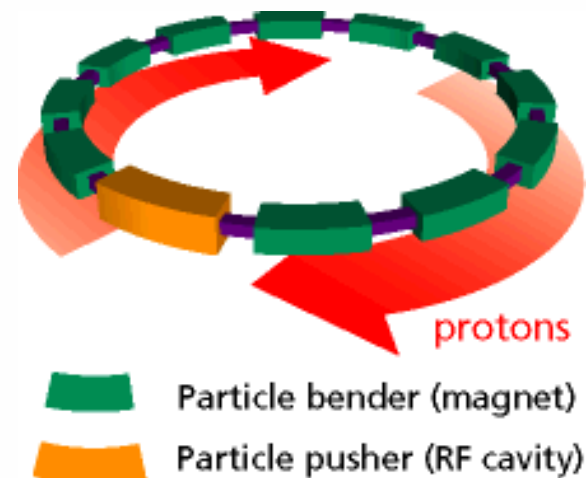
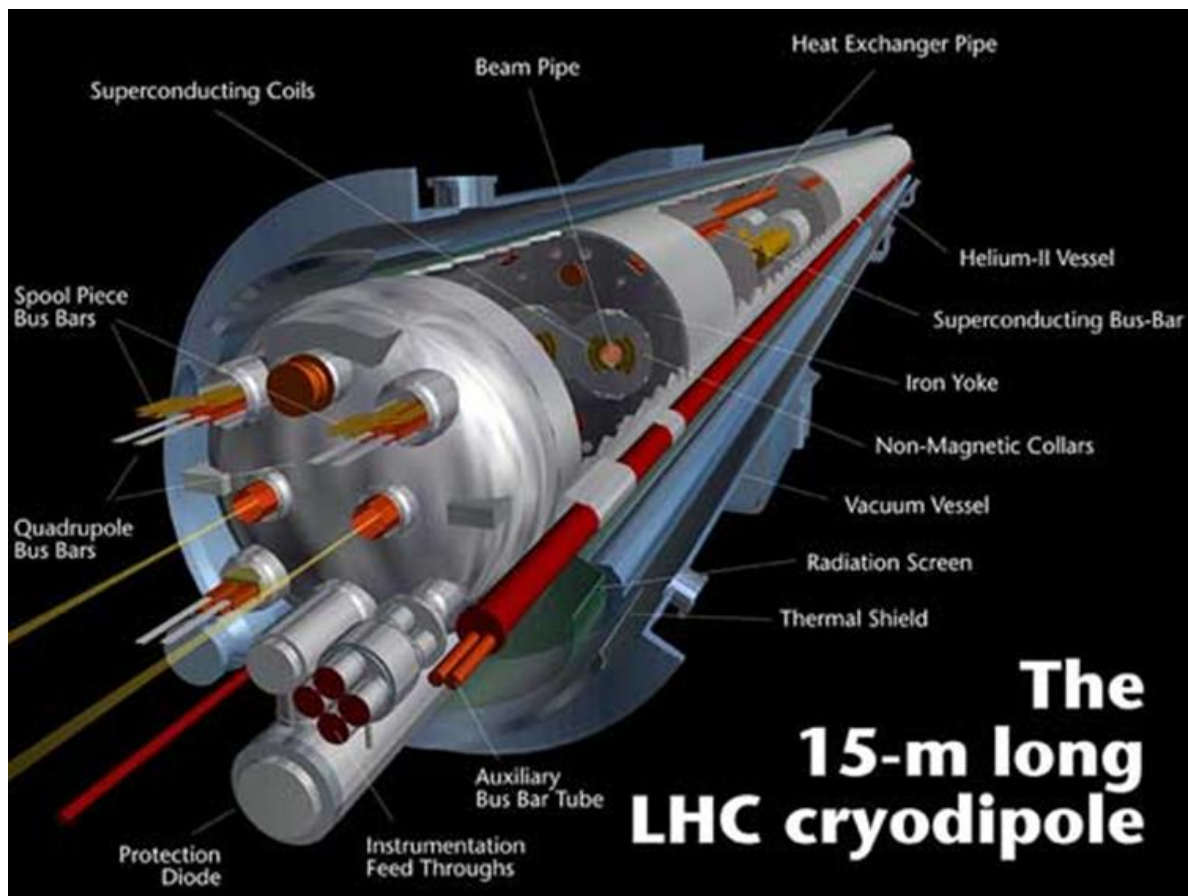
1 mm, 192 tubes PIT
from **Bruker EAS**



0.7 mm, 108/127 stack
RRP from **Oxford OST**



Elektromagnesy nadprzewodnikowe w Akceleratorach Cząstek



Nadprzewodnictwo to zjawisko, które wykazują pewne materiały, które ochłodzone do temperatur kriogenicznych stały się doskonałymi przewodnikami elektryczności.

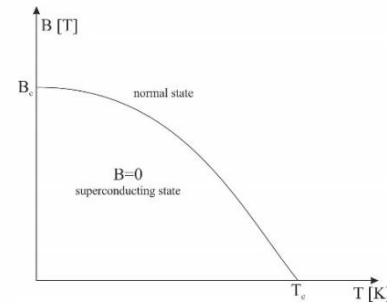
1911: Heike Kamerlingh Onnes

Zmierzył rezystancję elektryczną rtęci w niskich temperaturach i zaobserwował jej nagły spadek do zera poniżej 4.15K
(← skroplenie helu w 1908 r.)

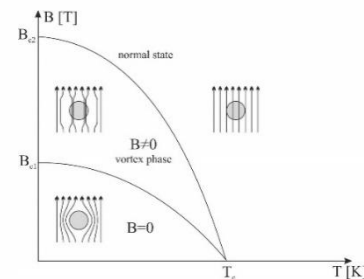
1957: Bardeen, Cooper and Schrieffer (BCS) ⇒ teoria nadprzewodnictwa.

1986: Bednorz and Müller ⇒ Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe (ciekły azot)

Elements	Transition temperature T_c (K)	Critical magnetic fields B_c (mT)	Type
Al	1.17	9.9	I
Re	2.42	23.5	I
Tl	2.39	17.1	I
In	3.4	29.3	I
Sn	3.72	30.5	I
Hg	4.15	41.1	I
Ta	4.48	83.0	I
La	4.9	79.8	I
V	5.38	102.0	II
Pb	7.20	80.3	I
Tc	7.77	141.0	II
Nb	9.25	198.0	II



Nadprzewodnik typu I ma jedno pole krytyczne (B_c), poniżej którego obserwuje się efekt Meissnera.

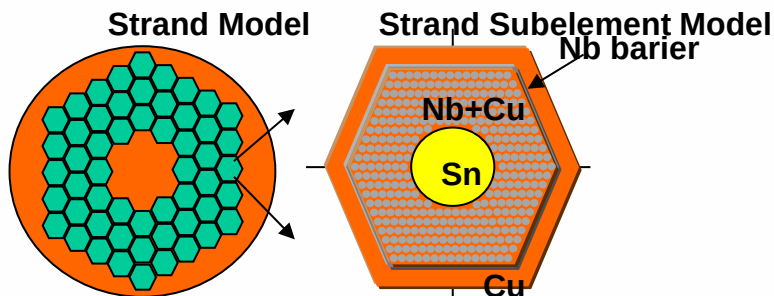
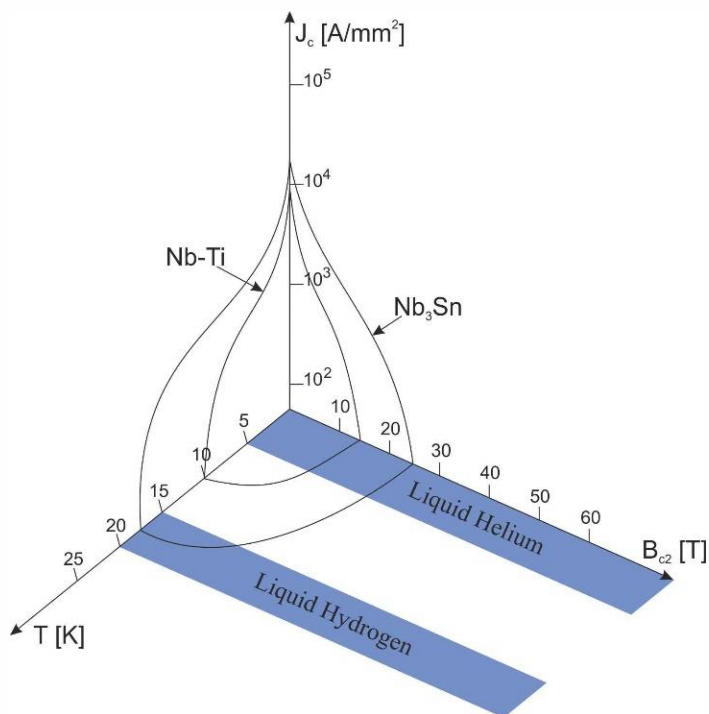


Nadprzewodnik typu II ma dwa pola krytyczne (B_{c1} i B_{c2}). Poniżej B_{c1} nadprzewodnik zachowuje się jak typ I, Pomiędzy B_{c1} a B_{c2} - częściowe przenikanie pola magnetycznego przez izolowane punkty (wiry).

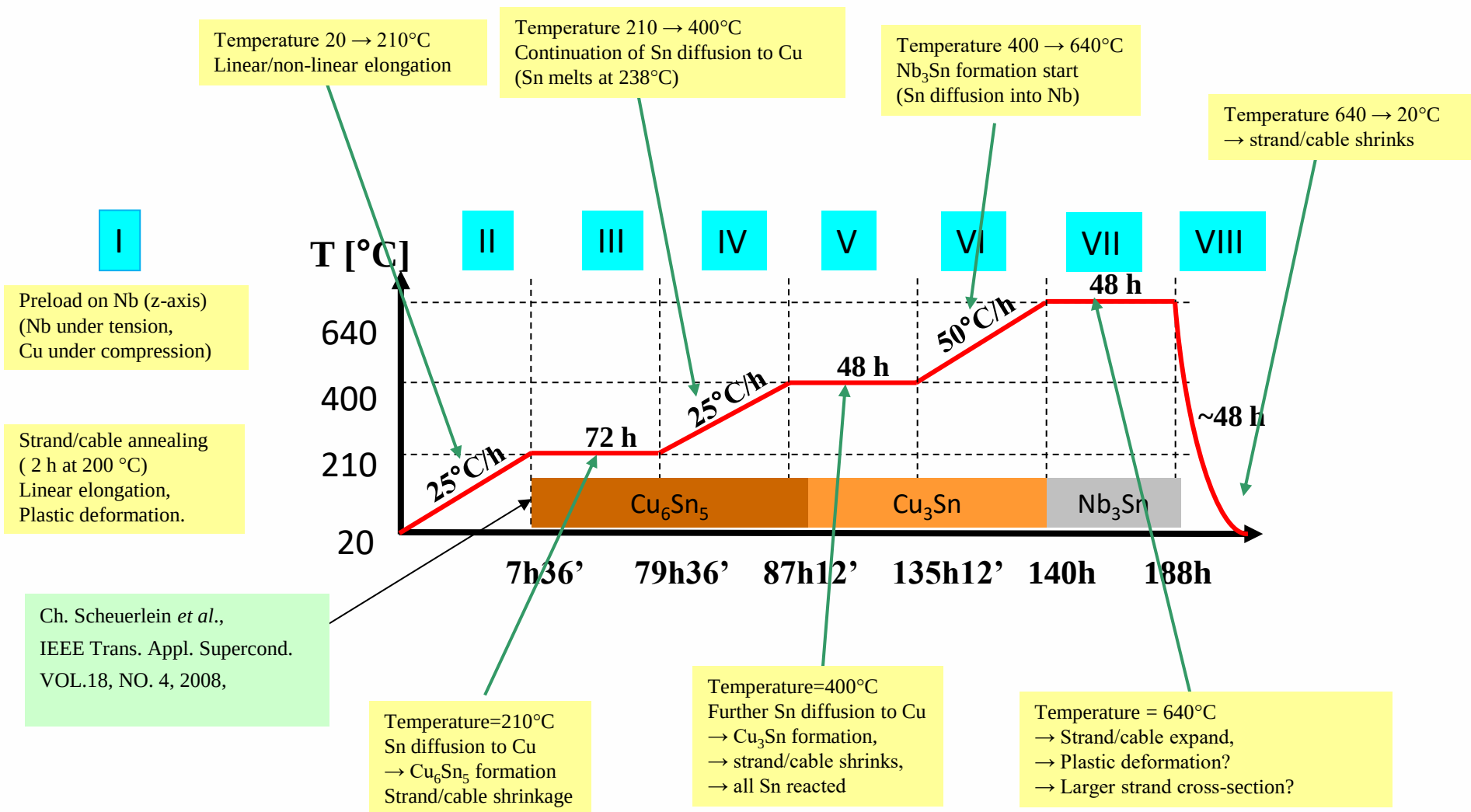
Nadprzewodniki charakteryzowane są przez powierzchnię krytyczną, wyznaczoną przez trzy parametry: temperaturę, indukcję magnetyczną oraz gęstość prądu.

Nb-Ti i Nb₃Sn to jedyne, które są obecnie dostępne komercyjnie do produkcji magnesów na dużą skalę.

Na scenę wkracza też MgB₂

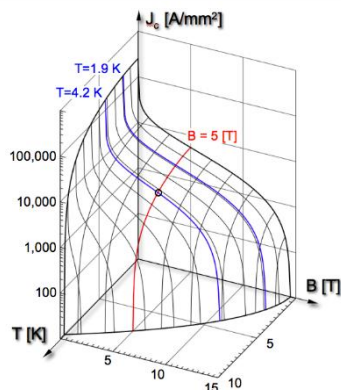
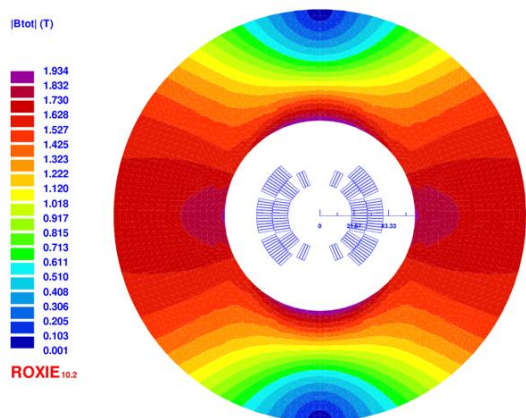
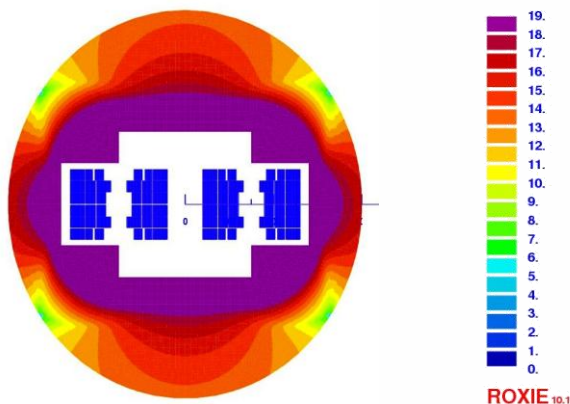


	Nb-Ti	Nb ₃ Sn
Critical temperature	10 K	18.3 K
Critical magnetic field	11 T	25 T
Critical Current density	3300 A/mm ² (5T) 400 A/mm ² (9.5T)	12000 A/mm ² (5T) 3000 A/mm ² (12T)
Ductility	Ductile, tough	Ductile, brittle after reaction
Typical strand diameter	0.4 – 2.0 mm	0.6 – 1.5 mm
Typical filament diameter	2.5 – 120 μm	2 – 6 μm
Typical filament number	1 – 40 000	3000 – 40 000



Elektromagnesy nadprzewodnikowe od czego zaczynamy projektowanie

Software:
ROXIE, Superfish,eEtc.



Charakterystyka materiałów

Powierzchnię krytyczną:

- temperatura,
- indukcja magnetyczna
- gęstość prądu.

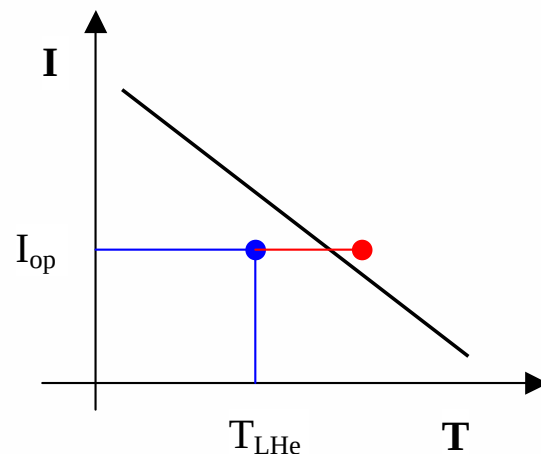
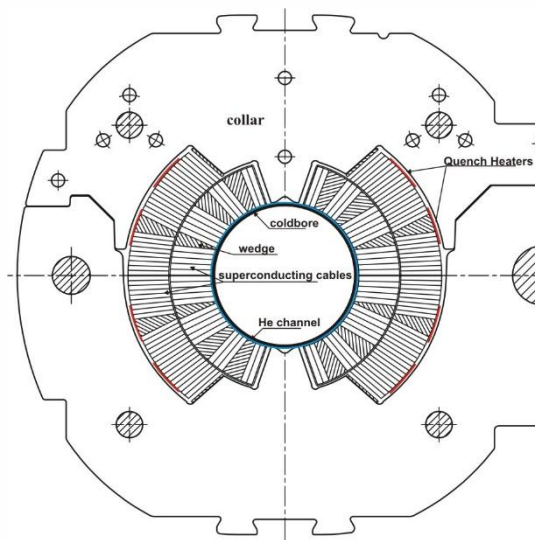
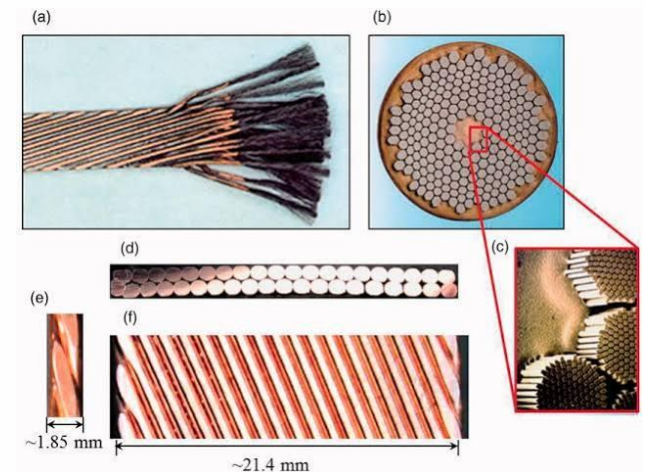
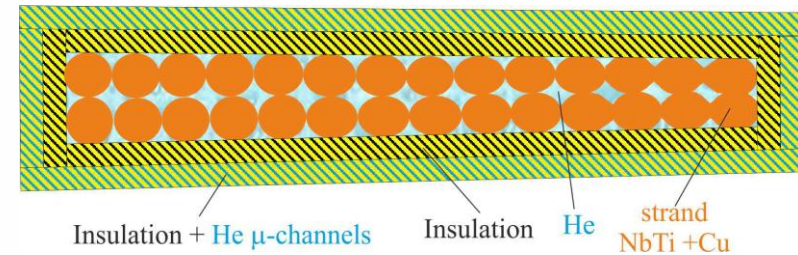
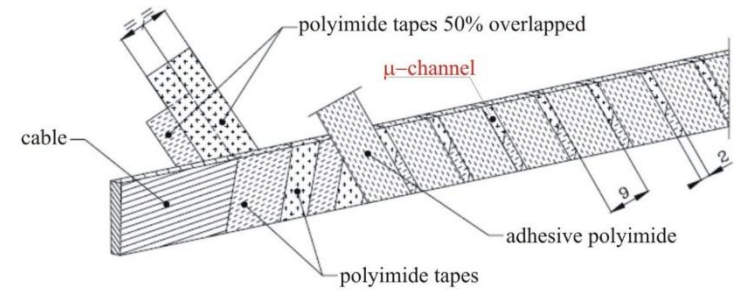


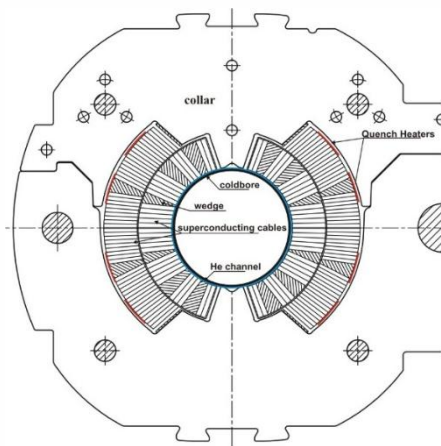


Tabela parametrów
głównych magnesów LHC

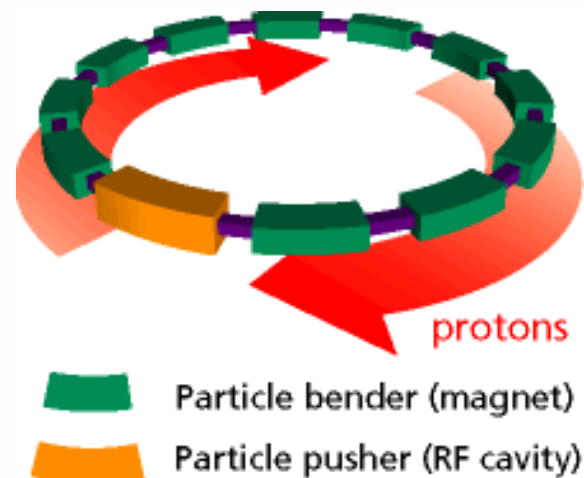
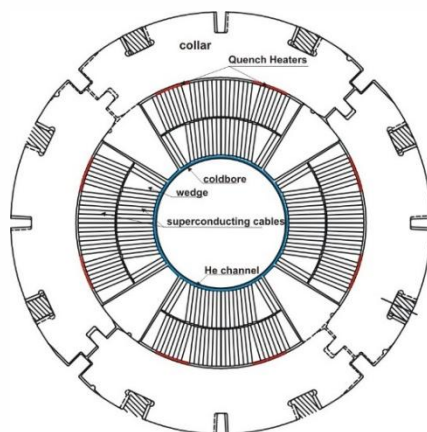
		MB	MB	MQ	MQM	MQY	MQY
	Units	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4&7	Type 5	Type 6
Strand diameter	mm	1.065	0.825	0.825	0.48	0.48	0.74
Number of strands		28	36	36	36	34	22
Average $r = \text{Cu}/\text{NbTi}$		1.65	1.95	1.95	1.75	1.75	1.25
Keystone angle	deg	1.25	0.9	0.9	0.91	0.9	1.72
Cable width (bare)	mm	15.1	15.1	15.1	8.8	8.3	8.3
Cable mid-thickness (bare)	mm	1.9	1.48	1.48	0.84	0.845	1.275
Cable inner thickness (bare)	mm	1.7353	1.3614	1.3614	0.7701	0.7798	1.1504
Cable outer thickness (bare)	mm	2.0647	1.5986	1.5986	0.9099	0.9102	1.3996
Transposition pitch	mm	115.00	100.00	100.00	66.00	66.00	66.00
Radial insulation thickness	mm	0.15	0.15	0.13	0.08	0.08	0.08
Azimuthal insulation thickness	mm	0.12	0.13	0.11	0.08	0.08	0.08
Cable width (ins.)	mm	15.4	15.4	15.36	8.96	8.46	8.46
Cable mid-thickness (ins.)	mm	2.14	1.74	1.70	1.00	1.005	1.435
Cable inner thickness (ins.)	mm	1.9720	1.6190	1.5794	0.9288	0.9386	1.3080
Cable outer thickness (ins.)	mm	2.3080	1.8610	1.8206	1.0712	1.0714	1.5620



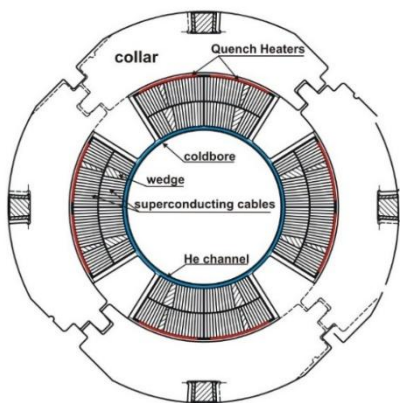
MB główny dipol LHC



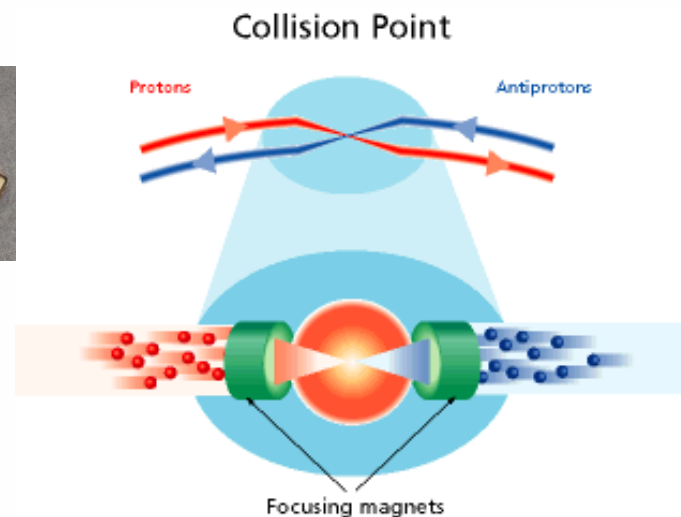
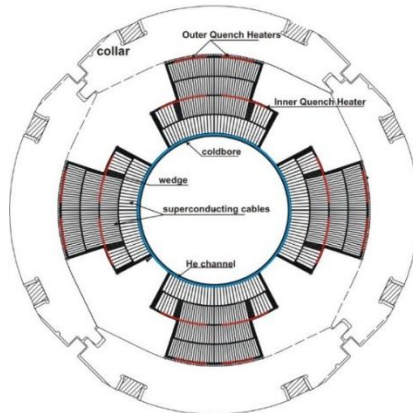
MQ główny kwadrupol LHC



MQM kwadrupol LHC



MQY kwadrupol LHC

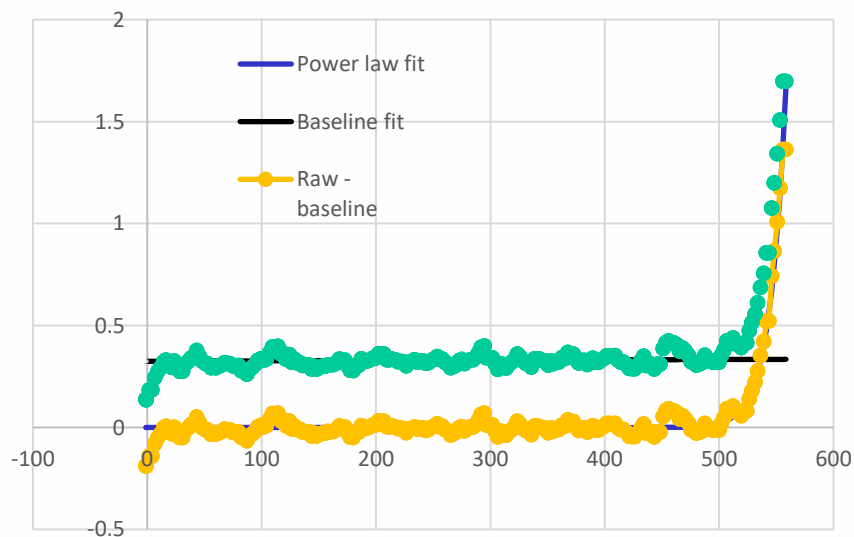
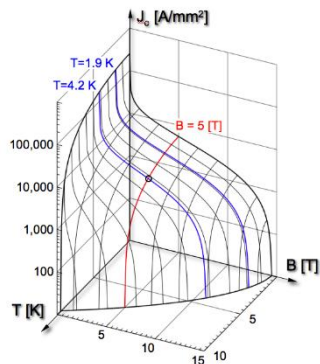


Elektromagnesy nadprzewodnikowe od czego zaczynamy projektowanie

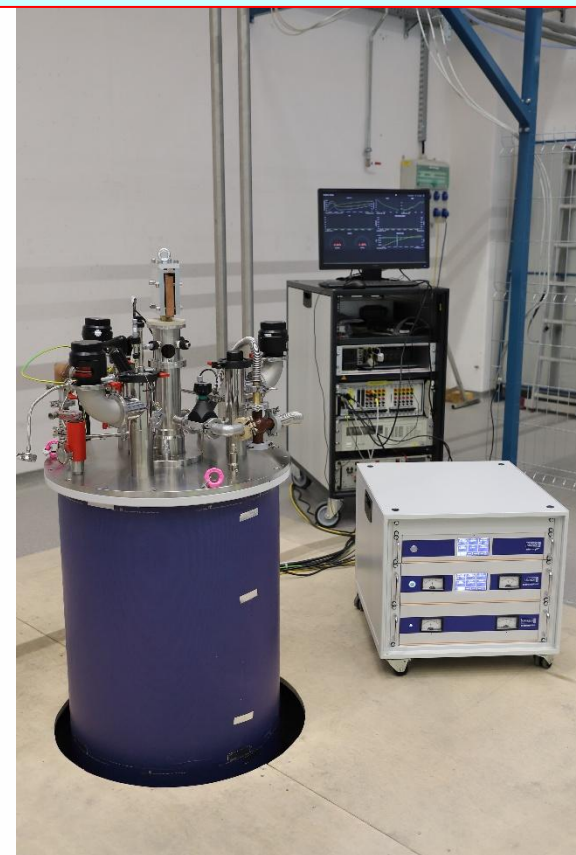
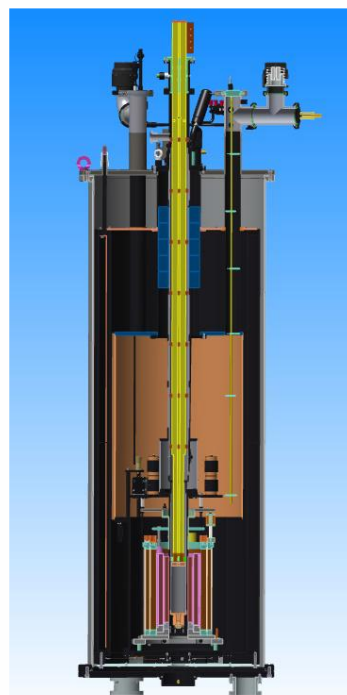
Charakteryzacja materiału

Powierzchnię krytyczną:

- temperatura,
- indukcja magnetyczna
- gęstość prądu.

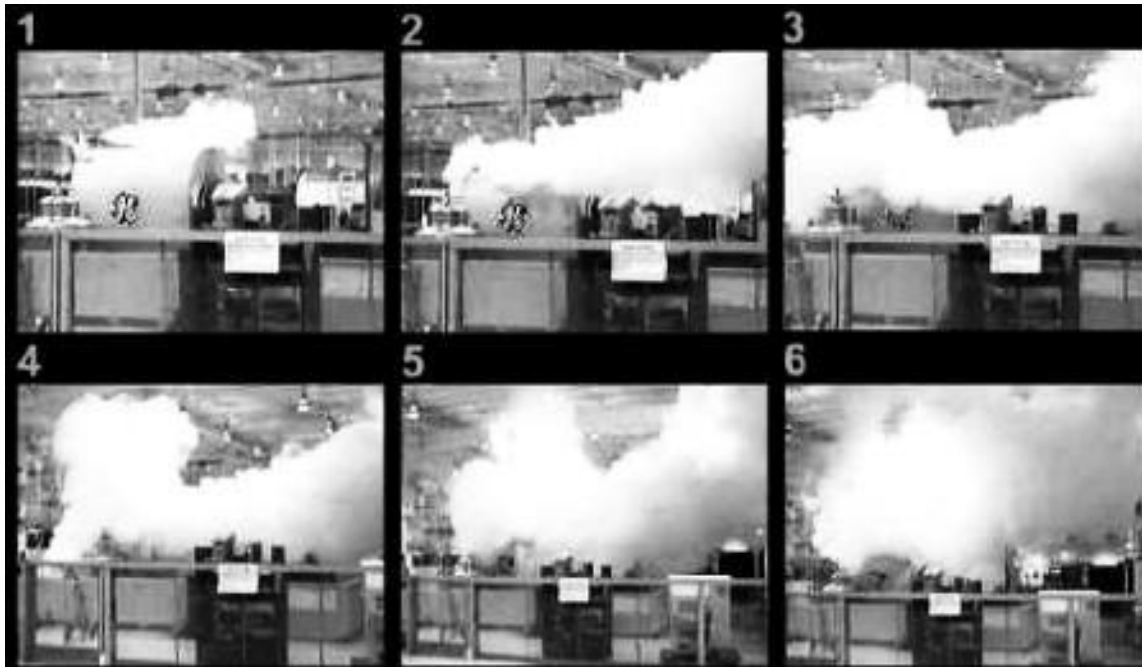


Aby zbudować elektromagnes nadprzewodnikowy trzeba mieć elektromagnes
My w IFJ PAN mamy!



QUENCH

Quench – utrata stanu nadprzewodzącego $\Rightarrow$ pojawia się rezystancja $\Rightarrow$ wzrasta napięcie $\Rightarrow$ wzrasta temperatura $\Rightarrow$ siły cieplne i elektromagnetyczne $\Rightarrow$ rośnie objętość czynnika chłodzącego (1 l ciekłego helu $\equiv$ 750 l gazu)



quench GE elektromagnesu MRI podczas testów



19.09.2008 LHC bus-bar quench

Dzięki uprzejmości L. Bottura



Elektromagnesy nadprzewodnikowe gdzie tkwi haczyk?

energia magnetyczna zgromadzona w polu:

$$E_m = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2} LI^2$$

jest przekształcane w ciepło poprzez ogrzewanie Joule'a
 $R_q I^2$

Gdyby ten proces przebiegał równomiernie w cewce:

Temperatura topnienia Cu 1356 K

odpowiadająca mu $E_m = 5.2 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$

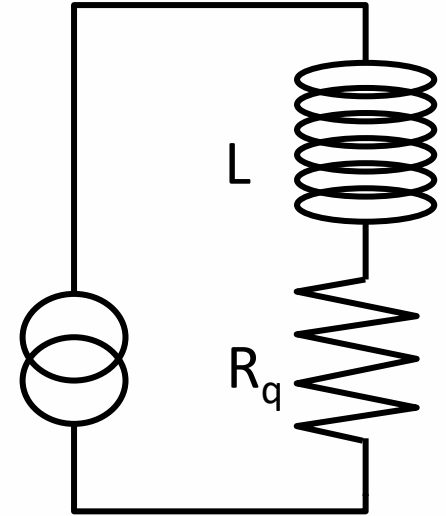
Limit to $B_{\max}$ 115 T: NIE MA PROBLEMU!

ALE

Proces ten nie przebiega równomiernie!

⇒ już 1% całkowitej masy magnesu
może pochłoniąć całkowitą energię

⇒ duży potencjał uszkodzeń!

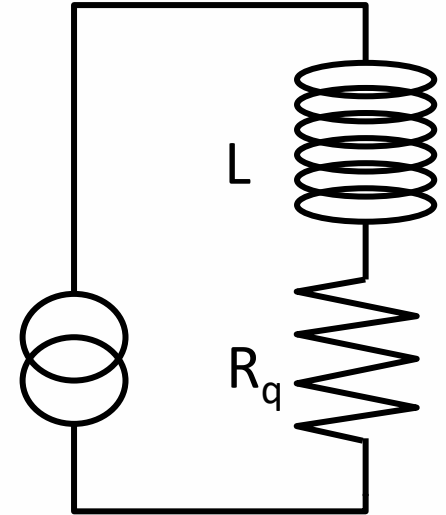


Dzięki uprzejmości L. Bottura



Z czym tak naprawdę walczymy

- Wzrost temperatury i gradienty temperatury (naprężenia termiczne)
- Napięcia wewnątrz magnesu oraz magnes do masy (cały układ)
- Siły wywołane przez obciążenia termiczne i elektromagnetyczne
- Wzrost i wydalanie ciśnienia kriogenu

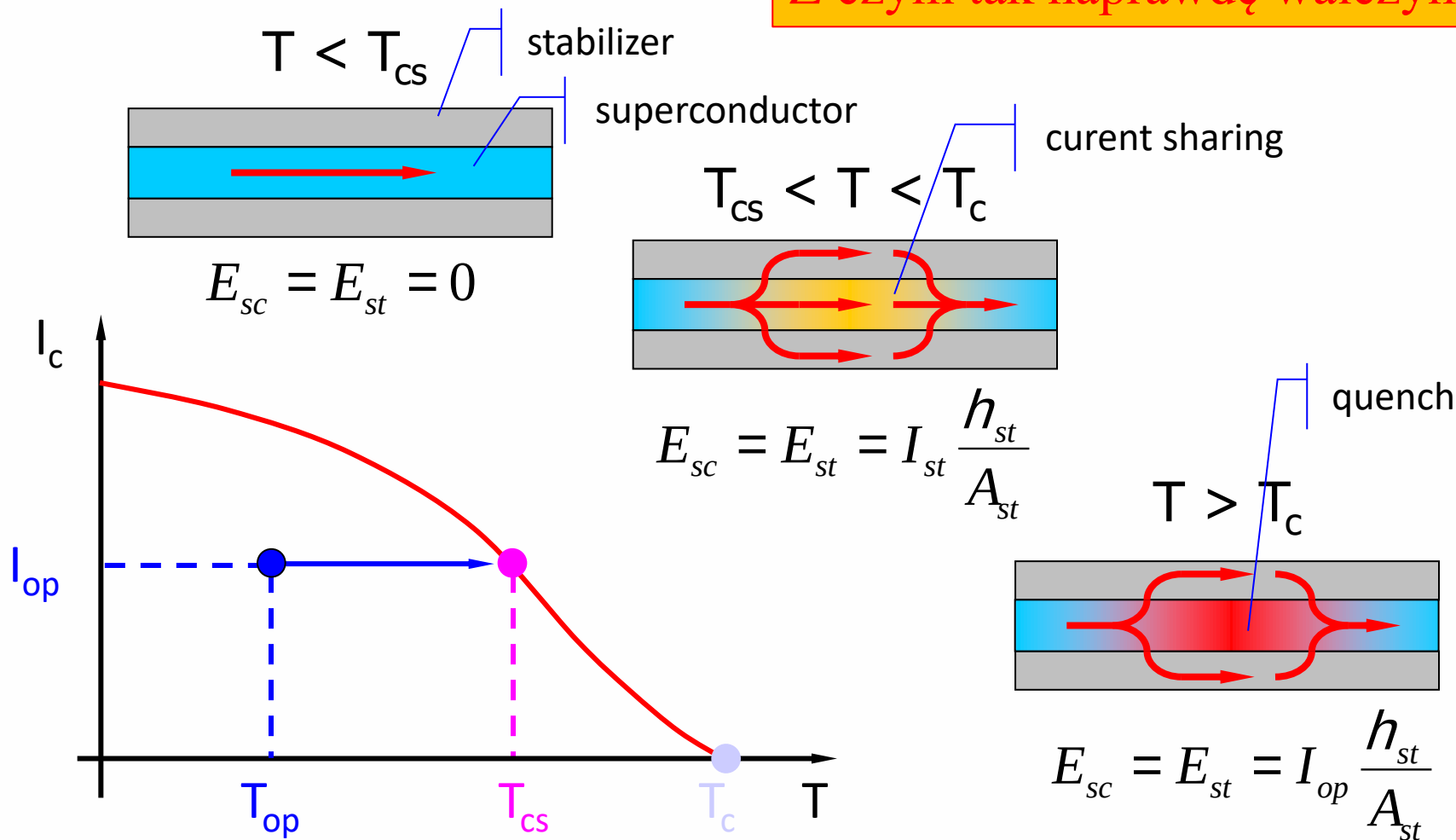


Dzięki uprzejmości L. Bottura



Elektromagnesy nadprzewodnikowe gdzie tkwi haczyk?

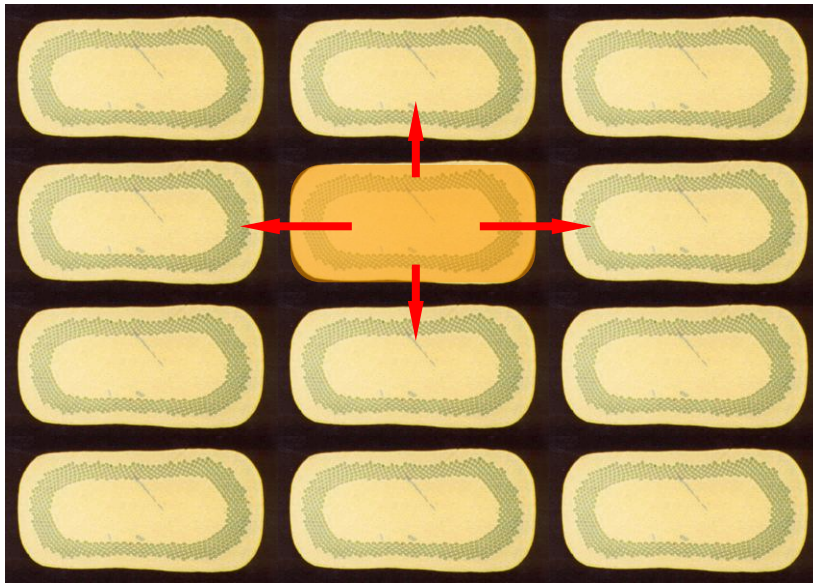
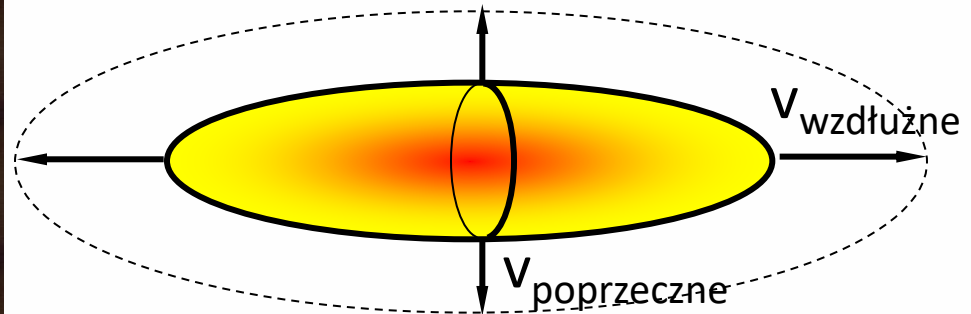
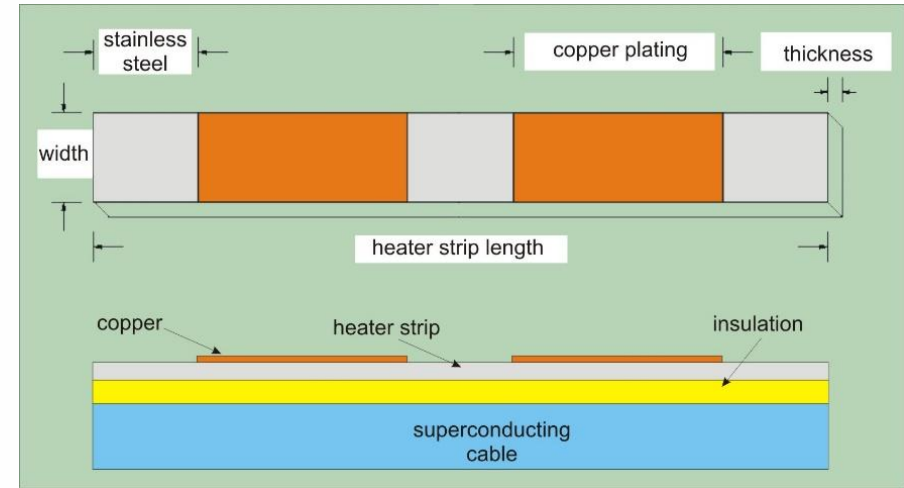
Z czym tak naprawdę walczymy



Dzięki uprzejmości L. Bottura

Elektromagnesy nadprzewodnikowe gdzie tkwi haczyk?

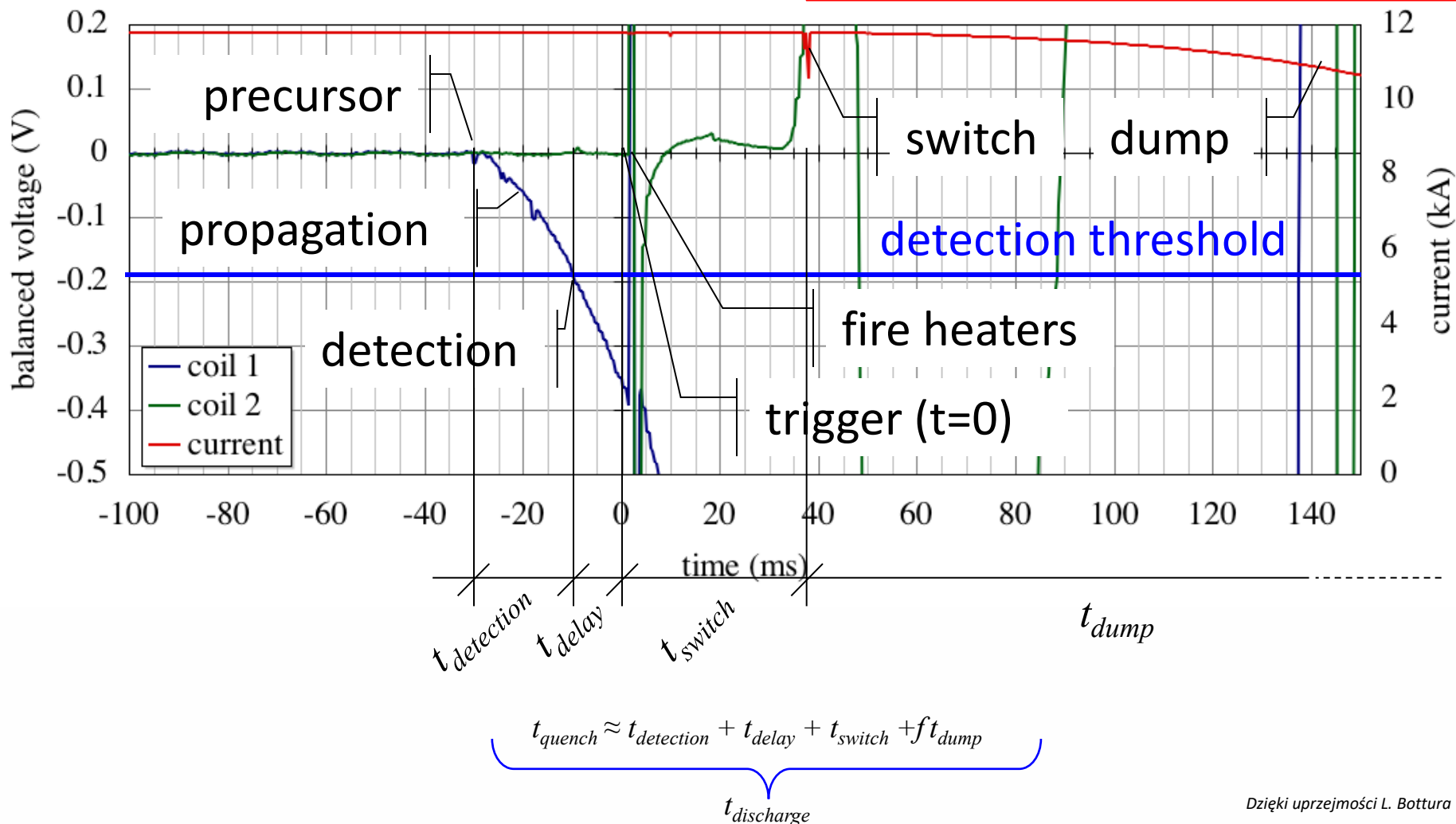
Energia magnetyczna jest całkowicie rozpraszana w rezystancji wewnętrznej, która zależy od temperatury i objętości strefy normalnej





Elektromagnesy nadprzewodnikowe gdzie tkwi haczyk?

Detekcja quenchu i działania zabezpieczające



Dzięki uprzejmości L. Bottura



Elektromagnesy nadprzewodnikowe gdzie tkwi haczyk?

Quenchu i co dalej?

Fizyka:

- Czy znamy prędkość propagacji ciepła projektowanych magnesów?

Ograniczenia:

- Jakie są rzeczywiste granice temperatury gorącego punktu?
- Jakie jest odpowiednie kryterium napięcia dla naszych magnesów?

Detekcja:

Jaka jest najskuteczniejsza metoda wykrywania quenchu?

Dump:

Jaka jest najwydajniejsza metoda wywołania quenchu?

Narzędzia:

Jaka jest optymalna metoda projektowania?



Tego więcej nie chcemy



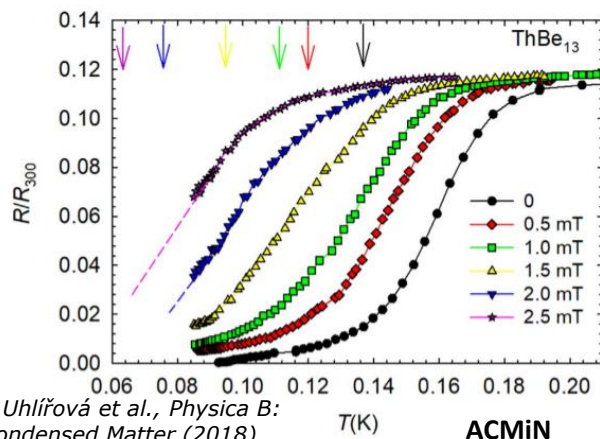
Centrum Inżynierii Kriogenicznych Materiałów i Urządzeń Badawczych (CIKMUB)

jest rozproszoną infrastrukturą naukowo-badawczą składająca się z:

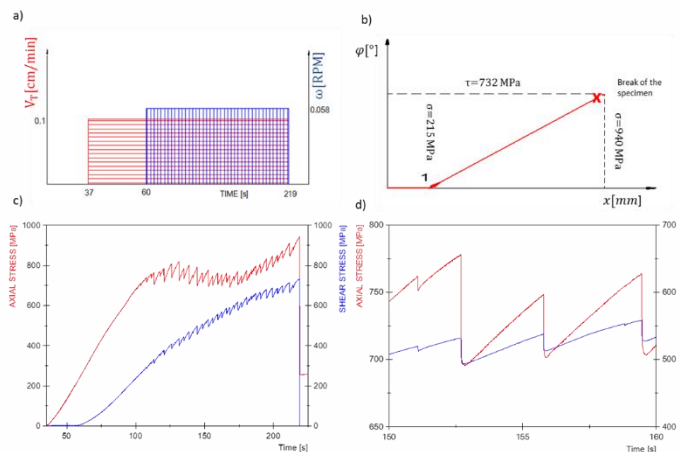
- Działu Budowy Aparatury i Infrastruktury Naukowej (**DAI**) na terenie Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN),
- Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii (**ACMiN**) na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH)
- Laboratorium Ekstremalnie Niskich Temperatur (**LENT**) dla Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej (PK) na terenie kampusu „Czyżyny” Politechniki Krakowskiej (PK)

- materiały i konstrukcje pracujące w niskich i ekstremalnie niskich temperaturach.

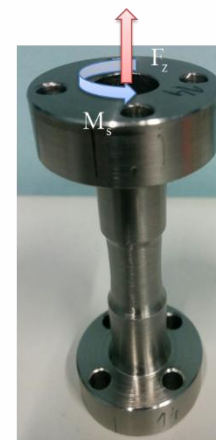
- **magnesy nadprzewodnikowe** → materiały konstrukcyjne (stałe austenityczne, miedź, aluminium)
→ materiały o strukturze kompozytowej
wielowłokowe nadprzewodniki typu NbTi, Nb₃Sn lub MgB₂ w osnowie miedzianej,
nadprzewodniki wysokotemperaturowe typu YBCO, BSCCO oraz FeSC napyłane na metalowe taśmy.
- **badanie zjawisk** zachodzących materiałach podczas pracy w ekstremalnie niskich temperaturach np. zjawisko nieciągłego płynięcia plastycznego lub zjawisko ewolucji pól mikro-uszkodzeń ⇒ szybkie zniszczenie konstrukcji.
- **projektowanie i budowa** konstrukcji pracujących w warunkach obciążeń złożonych w ekstremalnie niskich temperaturach.



Superconductivity in single crystalline ThBe₁₃ and LuBe₁₃



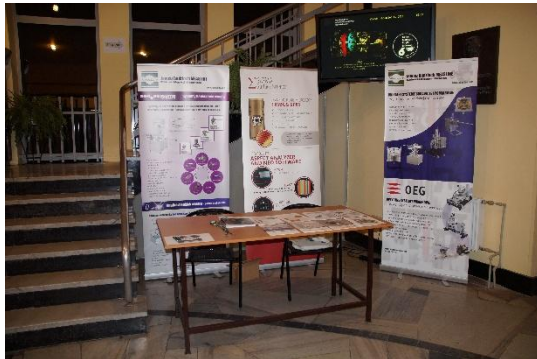
Nieciągłe Płynięcie Plastyczne (NPP) podczas obciążeń złożonych w temperaturze -269°C

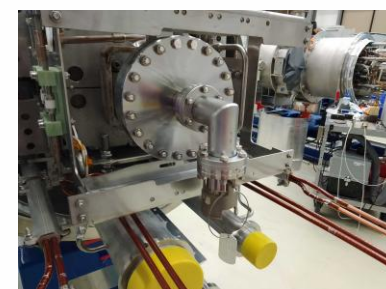
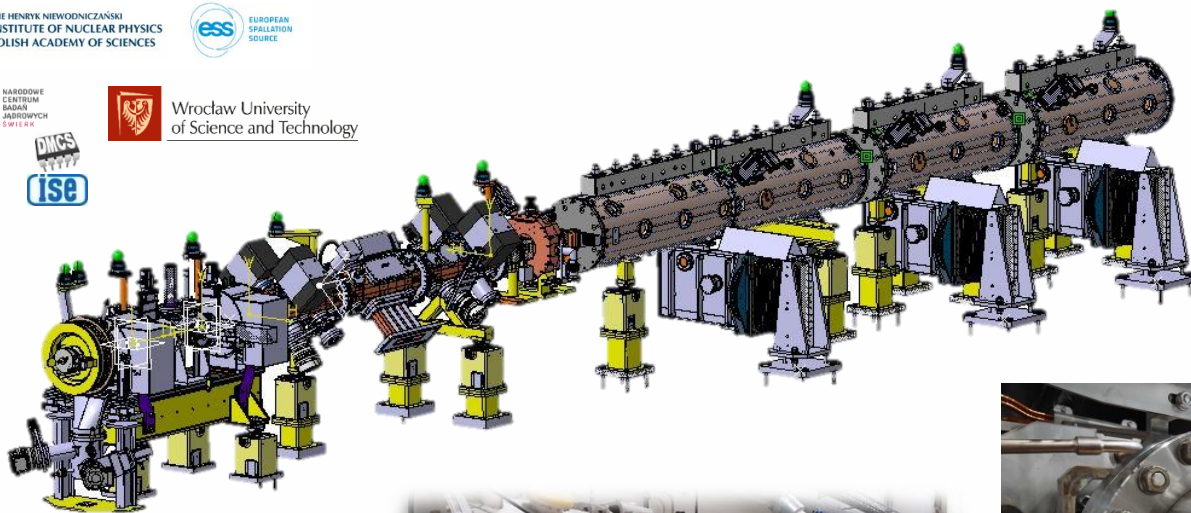


LENT

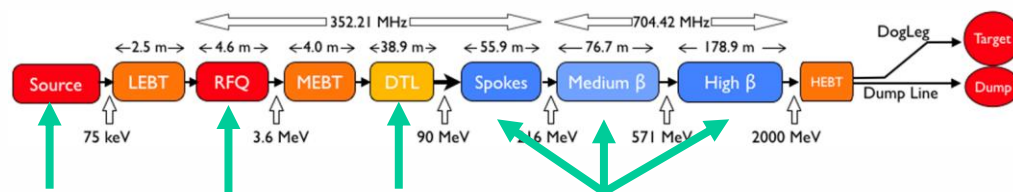
Konferencja **Superconductivity & Particle AcceleratorS** (SPAS)

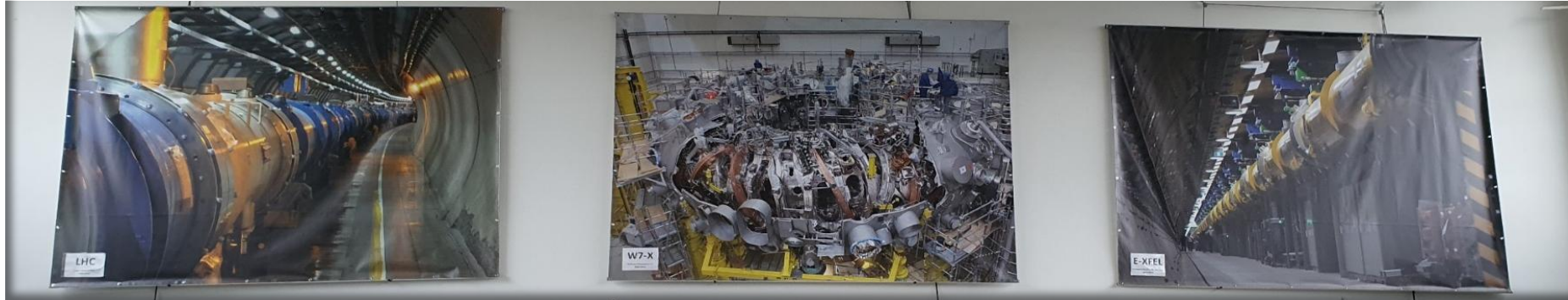
- przedstawienie najnowszych dokonań w dziedzinie nadprzewodnictwa stosowanego
 - akceleratory cząstek,
 - fuzji termojądrowa,
- badania technik mikrofalowych
 - akceleratory cząstek,
 - fuzji termojądrowa,
- badania w dziedzinie materiałów dla fuzji termojądrowej.





ESS Accelerator





Dariusz Bocian (Dariusz.Bocian@ifj.edu.pl)

