

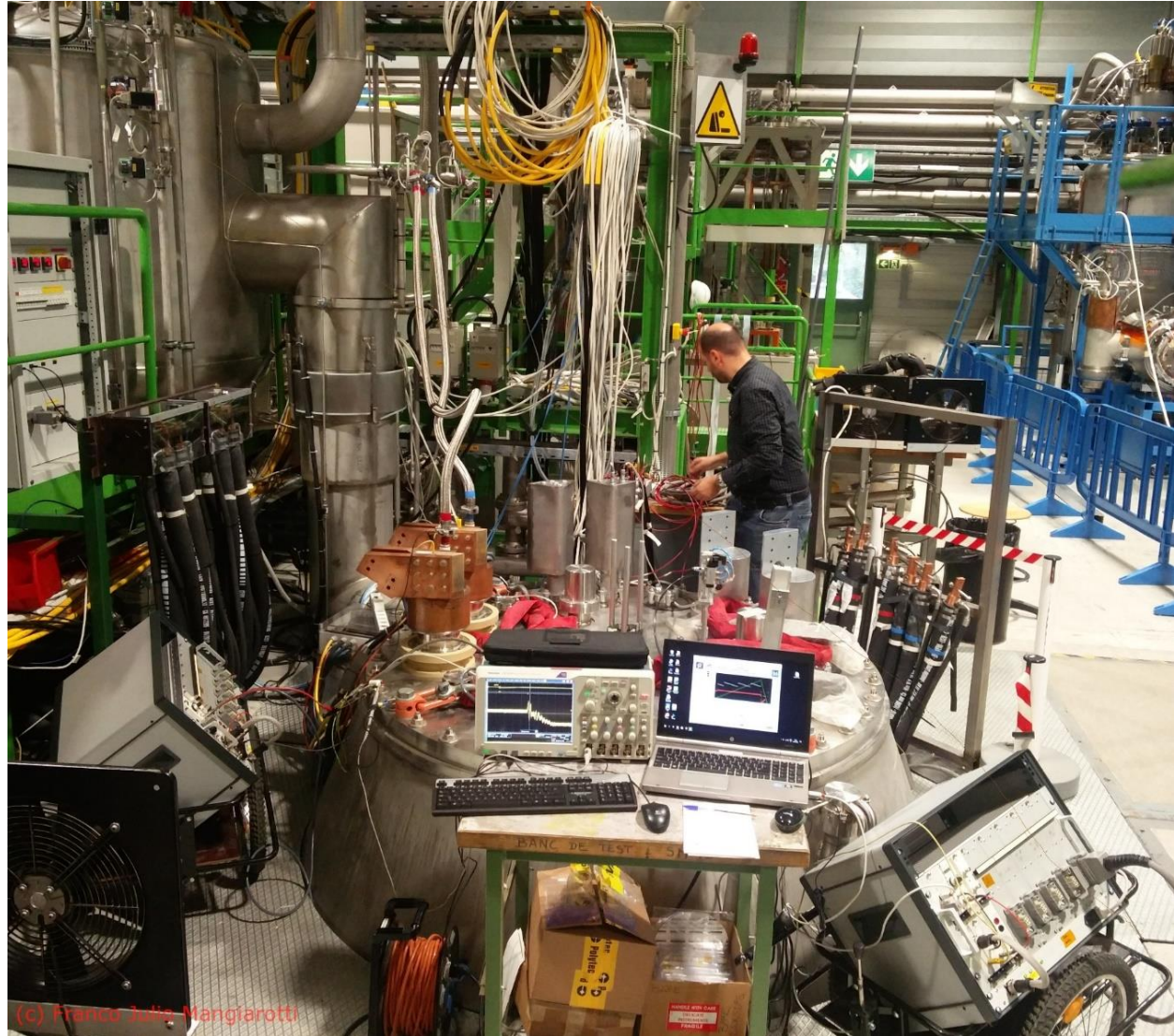
Elektryczna kontrola jakości obwodów nadprzewodzących LHC

Jaromir Ludwin
IFJ PAN Kraków / CERN Geneva

28.10.2019

Plan

- Kilka słów o mnie
- Nadprzewodnictwo
- Elektromagnesy nadprzewodzące
- Nadprzewodzące obwody elektryczne w LHC
- Testy obwodów nadprzewodzących
- Niezgodności – ciekawe przypadki
- IFJ PAN



(c) Franco Julia Mangiarotti

O mnie

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Fizyka Techniczna ze specjalnością Fizyka Medyczna i Dozymetria

- Od 2006 biorę udział w testach obwodów nadprzewodzących LHC
- 2010 – 2012 DESY Hamburg/European X-FEL, Prace przy przygotowaniu testów dla nadprzewodzących wnęk rezonansowych
- Pracuję w Dziale Budowy Aparatury i Infrastruktury Naukowej Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie oraz w sekcji Electrical Engineering grupy TE-MPE w CERN.

Nadprzewodnictwo

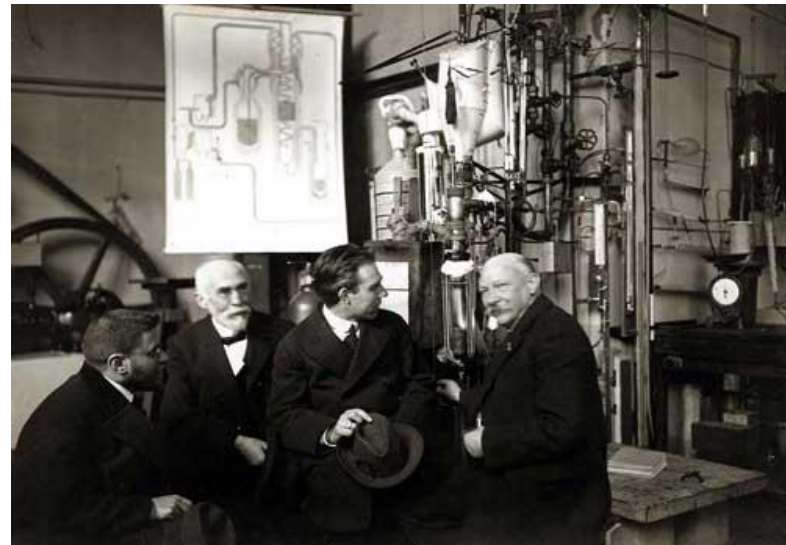
- Pojawia się w niektórych materiałach poniżej **temperatury „krytycznej”**
- Stan **zerowej rezystancji** elektrycznej – prąd elektryczny przepływa bez strat
- Pole magnetyczne o określonej sile nie jest w stanie wnikać w nadprzewodnik – efekt Meissnera

Po przekroczeniu krytycznej temperatury, wartości pola magnetycznego lub gęstości prądu dochodzi do wyjścia ze stanu nadprzewodnictwa.

Nie ma kompletnej teorii opisującej nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe.

Więcej tu:

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

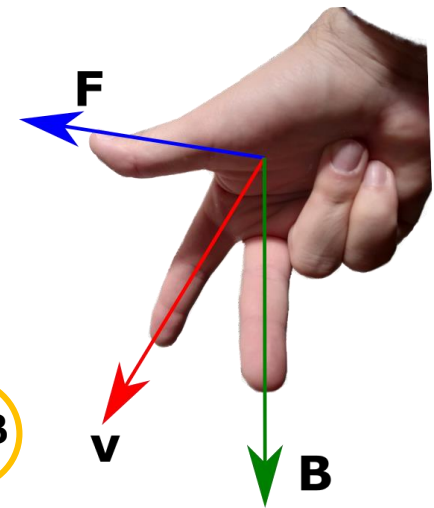


1919 w Laboratorium Kriogenicznym w Leiden. Osoby na zdjęciu od lewej do prawej: Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr, Heike Kamerlingh Onnes

Źródło <https://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>

Elektromagnesy nadprzewodzące

dla czego są nam potrzebne?



$$F = qE + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

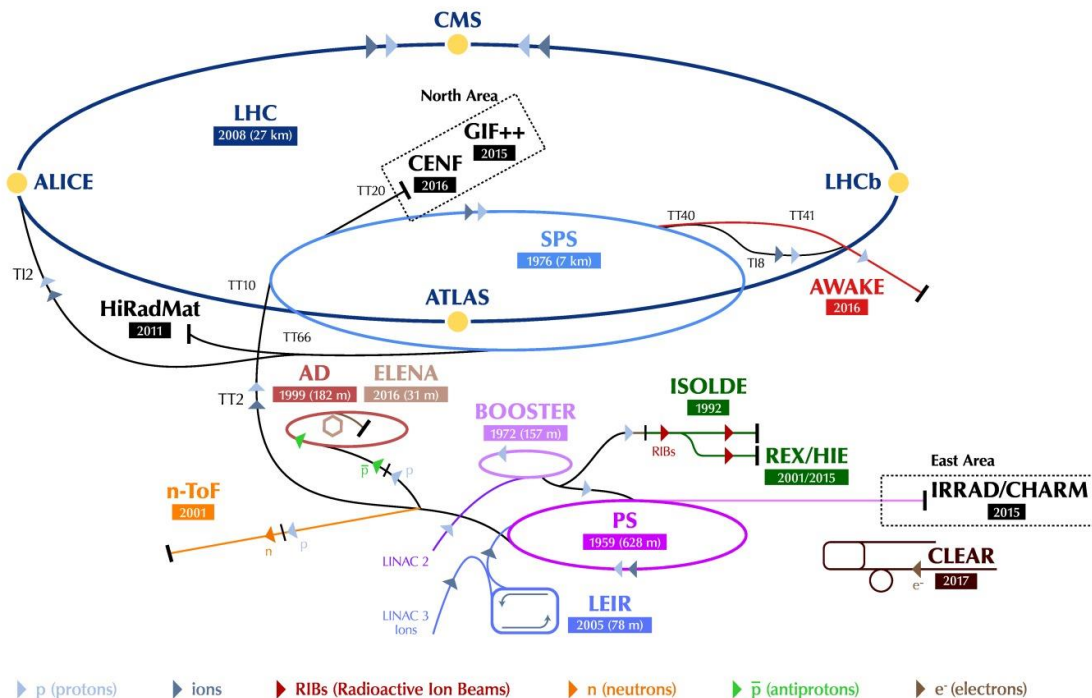
Pole magnetyczne jest używane do zakrzywiania toru lotu cząstek naładowanych

LHC: **27 km** - obwód
1232 głównych magnesów dipolowych
długości **15 metrów** każdy,
dostarczających pole magnetyczne
8.3 tesli przy prądzie **11 080 amperów**

Akcelerator o parametrach LHC,
zbudowany z konwencjonalnych
elektromagnesów musiałby mieć 120
km obwodu

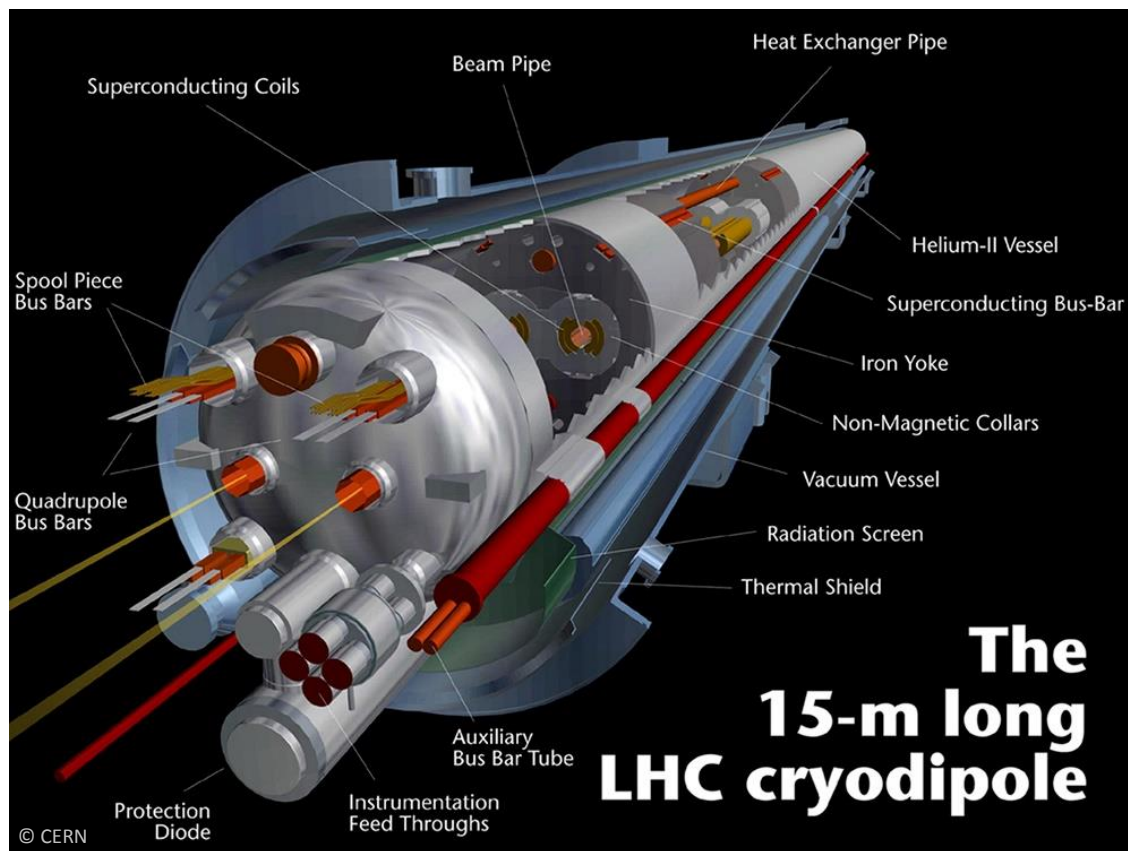
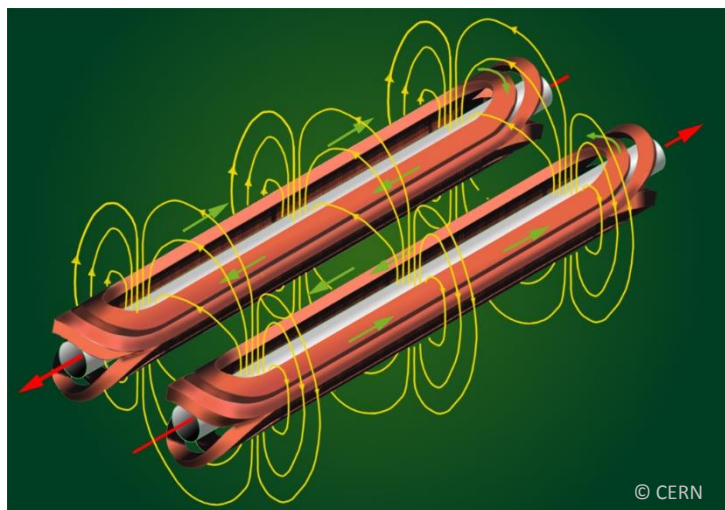
Więcej tu: <https://home.cern/science/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets>

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



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 - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n-ToF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // CHARM - Cern High energy AcceleRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADIation facility // GIF++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CERN Neutrino platForm

Elektromagnesy nadprzewodzące



LHC

Prawie **9000** elektromagnesów, około **40** różnych typów połączonych w **1600** nadprzewodzących obwodów.

Komponenty nadprzewodzące zajmują około **2/3** z **27 km** obwodu LHC

Legend:

- 1. 1000V DC
- 2. 1000V AC
- 3. 1000V DC
- 4. 1000V AC
- 5. 1000V DC
- 6. 1000V AC
- 7. 1000V DC
- 8. 1000V AC
- 9. 1000V DC
- 10. 1000V AC
- 11. 1000V DC
- 12. 1000V AC
- 13. 1000V DC
- 14. 1000V AC
- 15. 1000V DC
- 16. 1000V AC
- 17. 1000V DC
- 18. 1000V AC
- 19. 1000V DC
- 20. 1000V AC
- 21. 1000V DC
- 22. 1000V AC
- 23. 1000V DC
- 24. 1000V AC
- 25. 1000V DC
- 26. 1000V AC
- 27. 1000V DC
- 28. 1000V AC
- 29. 1000V DC
- 30. 1000V AC
- 31. 1000V DC
- 32. 1000V AC
- 33. 1000V DC
- 34. 1000V AC
- 35. 1000V DC
- 36. 1000V AC
- 37. 1000V DC
- 38. 1000V AC
- 39. 1000V DC
- 40. 1000V AC
- 41. 1000V DC
- 42. 1000V AC
- 43. 1000V DC
- 44. 1000V AC
- 45. 1000V DC
- 46. 1000V AC
- 47. 1000V DC
- 48. 1000V AC
- 49. 1000V DC
- 50. 1000V AC
- 51. 1000V DC
- 52. 1000V AC
- 53. 1000V DC
- 54. 1000V AC
- 55. 1000V DC
- 56. 1000V AC
- 57. 1000V DC
- 58. 1000V AC
- 59. 1000V DC
- 60. 1000V AC
- 61. 1000V DC
- 62. 1000V AC
- 63. 1000V DC
- 64. 1000V AC
- 65. 1000V DC
- 66. 1000V AC
- 67. 1000V DC
- 68. 1000V AC
- 69. 1000V DC
- 70. 1000V AC
- 71. 1000V DC
- 72. 1000V AC
- 73. 1000V DC
- 74. 1000V AC
- 75. 1000V DC
- 76. 1000V AC
- 77. 1000V DC
- 78. 1000V AC
- 79. 1000V DC
- 80. 1000V AC
- 81. 1000V DC
- 82. 1000V AC
- 83. 1000V DC
- 84. 1000V AC
- 85. 1000V DC
- 86. 1000V AC
- 87. 1000V DC
- 88. 1000V AC
- 89. 1000V DC
- 90. 1000V AC
- 91. 1000V DC
- 92. 1000V AC
- 93. 1000V DC
- 94. 1000V AC
- 95. 1000V DC
- 96. 1000V AC
- 97. 1000V DC
- 98. 1000V AC
- 99. 1000V DC
- 100. 1000V AC

Revision Table:

Rev	Date	Author	Description
1	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
2	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
3	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
4	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
5	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
6	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
7	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
8	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
9	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
10	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
11	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
12	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
13	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
14	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
15	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
16	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
17	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
18	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
19	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
20	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
21	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
22	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
23	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
24	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
25	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
26	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
27	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
28	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
29	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
30	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
31	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
32	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
33	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
34	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
35	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
36	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
37	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
38	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
39	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
40	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
41	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
42	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
43	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
44	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
45	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
46	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
47	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
48	1998-01-01	J. J. J.	Initial design
49	1998-01-01	J. J. J.	Initial

Obwody nadprzewodzące w LHC

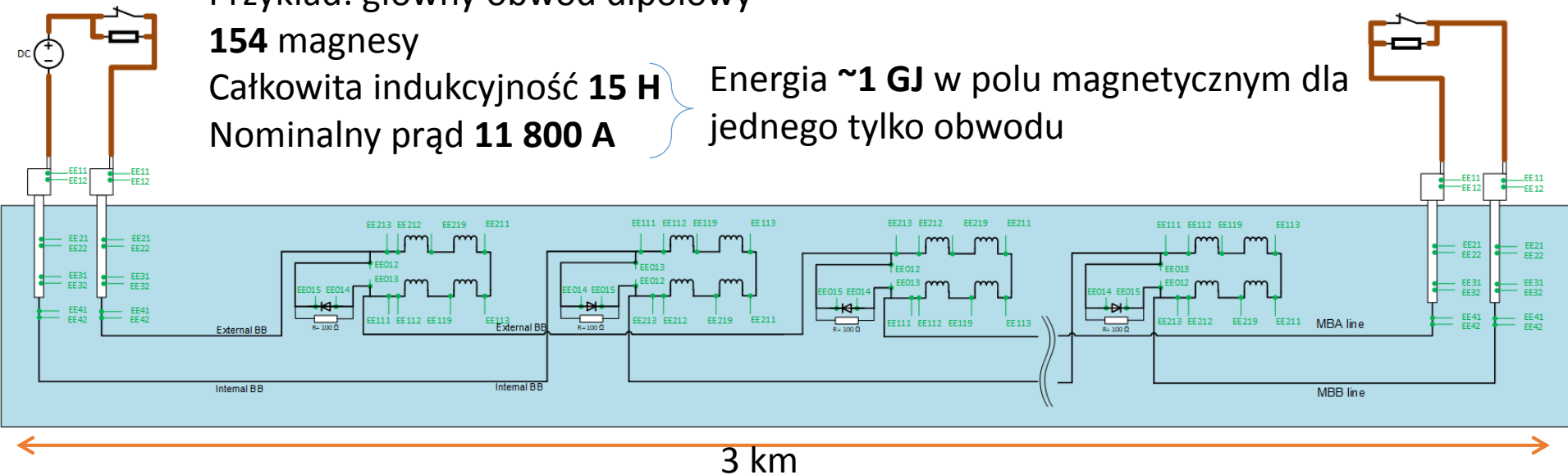
- LHC jest podzielony na 8 niezależnych sektorów
- W każdym sektorze główne magnesy są połączone szeregowo
- Problem w jednym magnecie dotyka całego obwodu
- Obudowy magnesów tworzą ciągły kriostat wypełniony ciekłym helem
- Połączenia między magnesami – nadprzewodniki lutowane lub zgrzewane, obudowy spawane dla zapewnienia szczelności helowej

Przykład: główny obwód dipolowy

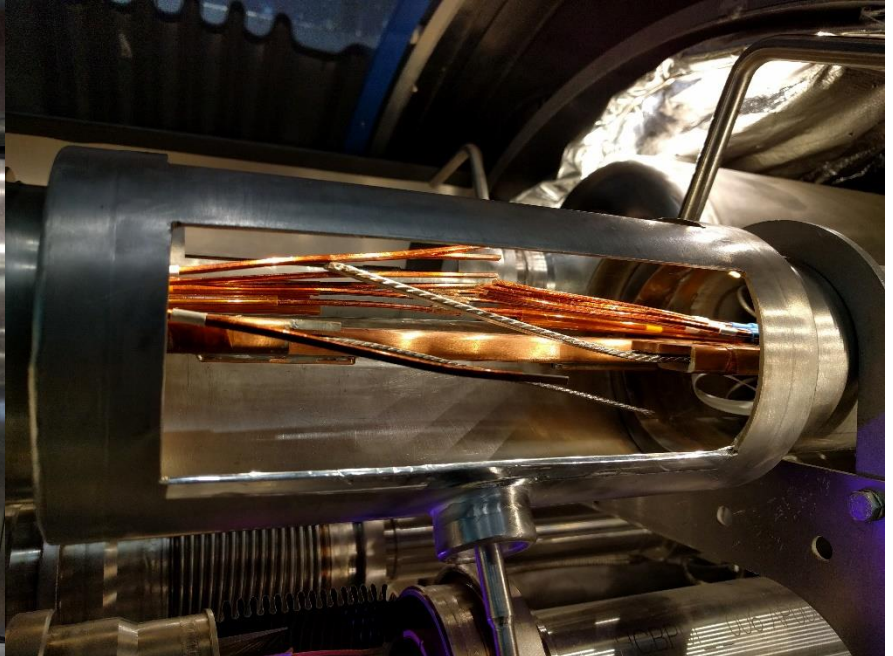
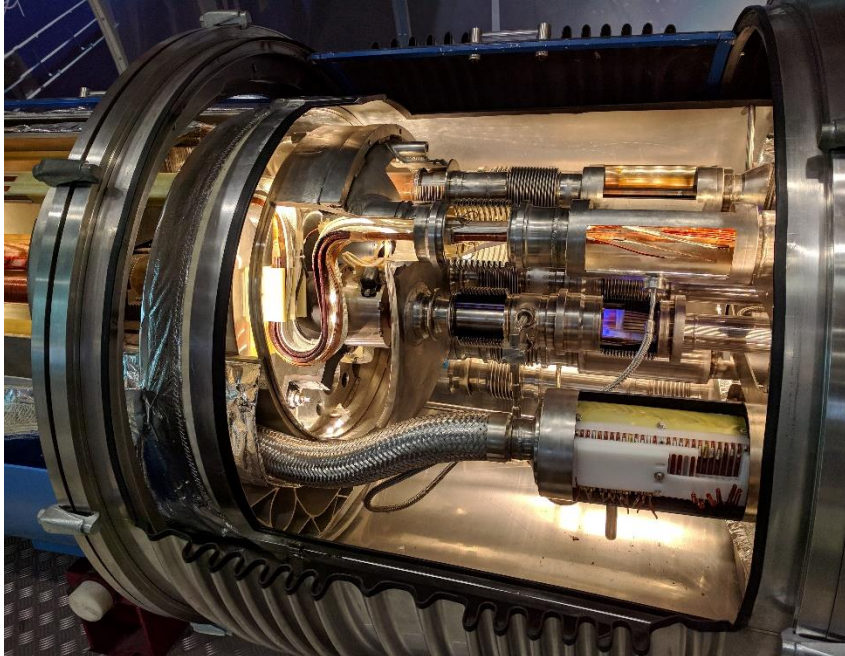
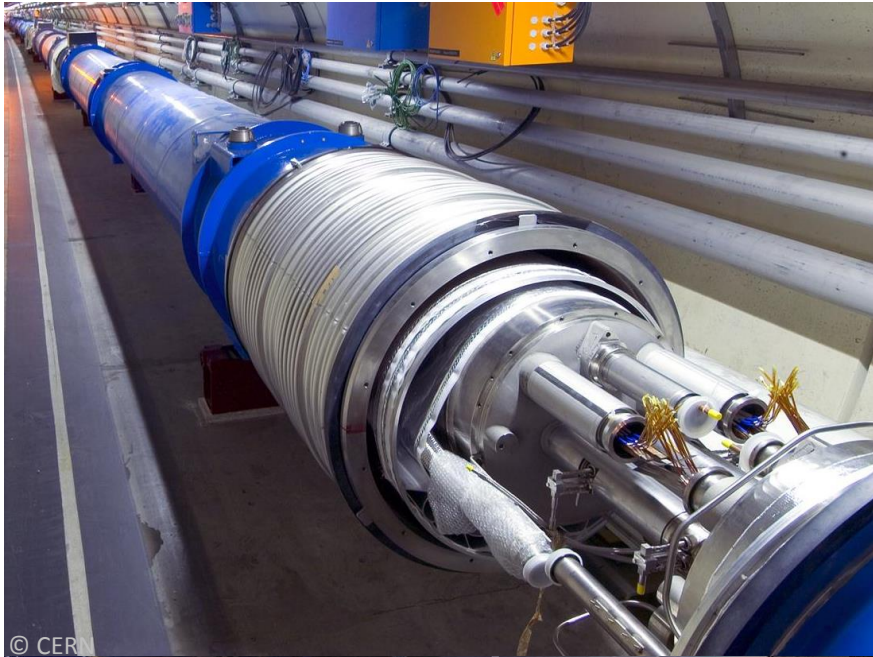
154 magnesy

Całkowita indukcyjność **15 H**
Nominalny prąd **11 800 A**

Energia **~1 GJ** w polu magnetycznym dla jednego tylko obwodu



Obwody nadprzewodzące w LHC



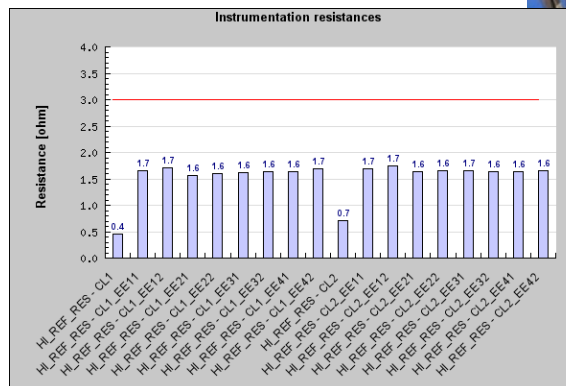
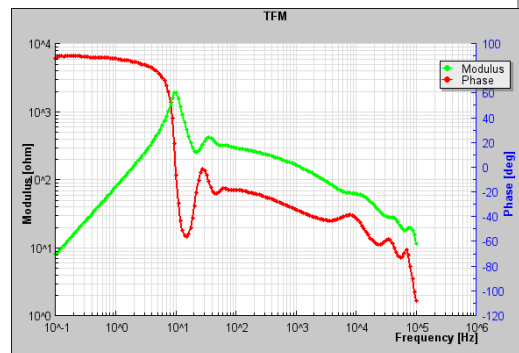
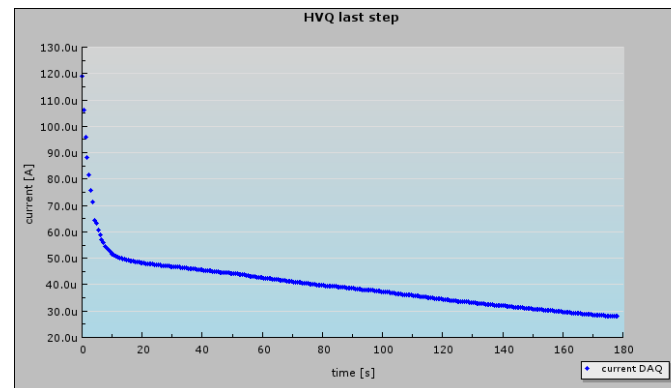
Testy elektryczne obwodów nadprzewodzących

Elektryczna kontrola jakości wymaga prowadzenia testów:

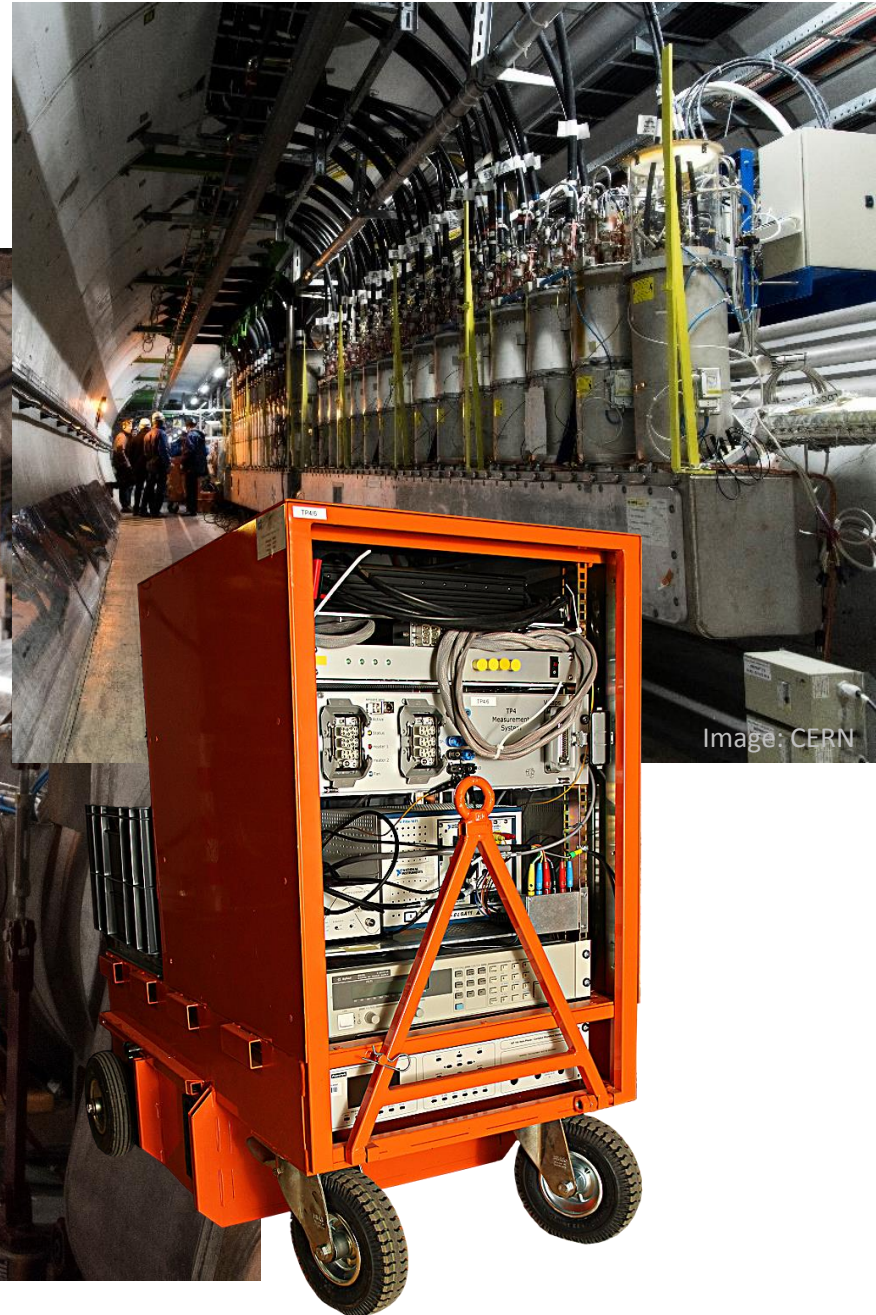
- Testy izolacji (wysokie napięcie)
- Biegunowość, ciągłość, rezystancja
- Pomiary impedancji w funkcji częstotliwości

Nie wspominamy tu testach związanych z zasilaniem obwodów nominalnym prądem

- Pojedyncze elektromagnesy
- Doprowadzenia prądowe
- Kriogeniczne skrzynie dystrybucji prądu
- Oprzyrządowanie
- Grzejniki zabezpieczające
- Całe obwody

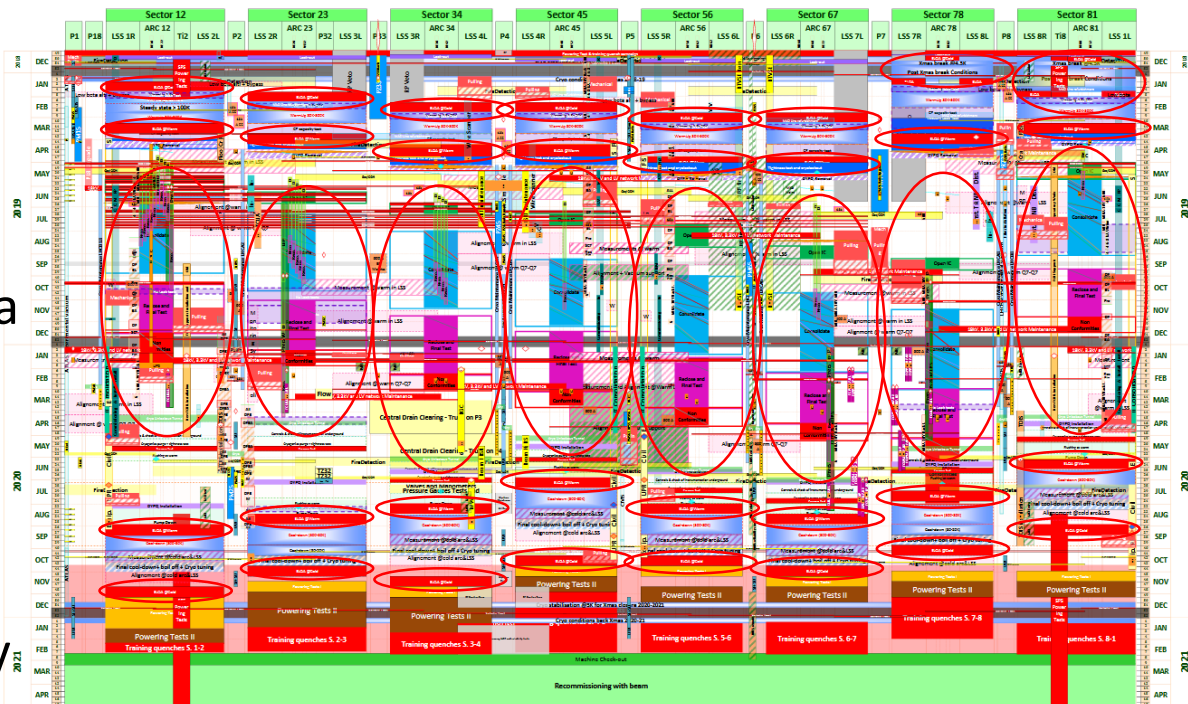


Testy elektryczne obwodów nadprzewodzących



Kiedy testujemy?

- ✓ Podczas **budowy** magnesów
- ✓ Podczas **odbioru** (produkcja przemysłowa)
- ✓ **Przed instalacją** w tunelu
- ✓ Podczas **budowy** akceleratora
- ✓ Po **cyklach termicznych**: przekroczenie temperatury 100 K
- ✓ W przypadku wykrycia **zwarcia** do ziemi przez układy zasilania, podczas pracy akceleratora
- ✓ Podczas i po **pracach** związanych z magnesami lub ich oprzyrządowaniem
- ✓ W przypadku **awarii grzejnika** zabezpieczającego



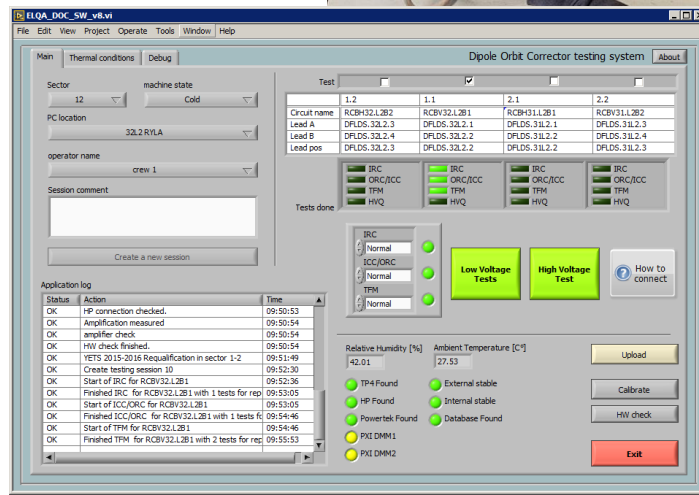
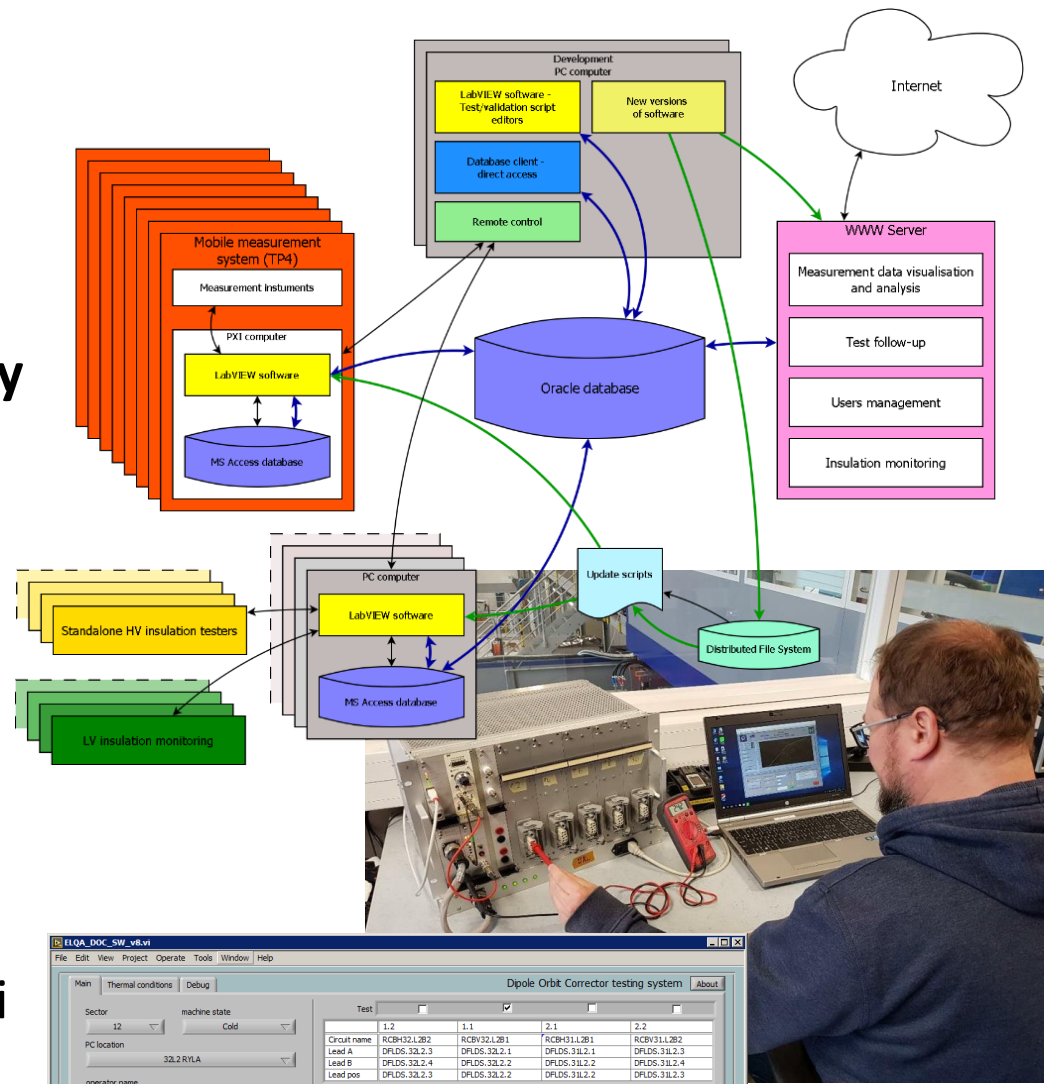
Druga długa przerwa techniczna

Ekipa **ponad 20** inżynierów i techników z IFJ PAN z Krakowa w latach **2018 – 2020**

Narzędzia

- Musieliśmy stworzyć **uniwersalny system pomiarowy** działający dla wszystkich konfiguracji
- Pomiar musi być **zautomatyzowany**
- Wyniki i parametry konfiguracyjne muszą być przechowywane w centralnej **bazie danych**
- Potrzebne są **narzędzia webowe** do przeglądu i kontroli wykonania testów

Stworzyliśmy i wciąż rozwijamy nasze narzędzia



Oracle

Narzędzia

T	DFBAN.7R7	RQS.A78B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQS.R7B1	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT12.R7B1	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT12.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT13.R7B1	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT13.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT10.R7B1	OK	OK	OK	not tested	OK (2)	
T	DFBAN.7R7	RQT10.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT11.R7B1	OK (4)	repaired (5)	OK	not tested	OK (2)	tests completed
T	DFBAN.7R7	RQT11.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT7.R7B1	FAILED (1 of 2)	OK (2)	OK	not tested	OK	tests completed
T	DFBAN.7R7	RQT7.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT8.R7B1	OK	OK	OK	not tested	OK	
T	DFBAN.7R7	RQT8.R7B2	OK	OK	OK	not tested	OK	

Tests at cold in sector 7-8 (III)
CL2 resistance too high. There is a cryo problem: The thermometer is damaged according to A. Surao. Problem to be solved by cryo instrum. NC 1020144 initiated. Test was repeated successfully after intervention of TE/CRG. NC can be closed.

Tests at cold in sector 7-8 (III)
Test repeated successfully. WHAT HAS HAPPENED THERE?

TP4 results

[Tests for report](#) | [Tests not for report](#) | [For report and not for report](#) | [Full history of circuit](#) | [Back](#)

Tests at cold in sector 7-8 (III)

Session ID	Machine phase	Operator	Temperature	Humidity	
3439	Cold	Giorgio D' Angelo	17	35	
Test ID	Circuit name	For report	Test type	result	comments
8168	RQTL11.R7B1	Yes	HVQ	passed	
4465	RQTL11.R7B1	Yes, NV	ICC	failed	CL2 resistance too high.
4466	RQTL11.R7B1	Yes, NV	ICC	failed	CL2 resistance too high.
3830	RQTL11.R7B1	Yes	IRC	passed	
4461	RQTL11.R7B1	Yes	ORC		CL2 resistance too high.
4462	RQTL11.R7B1	Yes	ORC		CL2 resistance too high.
5917	RQTL11.R7B1	Yes	TFM	passed	
3444	Cold	Giorgio D' Angelo	19	32	
Test ID	Circuit name	For report	Test type	result	comments
4487	RQTL11.R7B1	Yes, NV	ICC	failed	CL2 resistance too high. There is a cryo problem: The thermometer is damaged
3855	RQTL11.R7B1	Yes	IRC	passed	
4483	RQTL11.R7B1	Yes	ORC		CL2 resistance too high. There is a cryo problem: The thermometer is damaged
3494	Cold	Giorgio D' Angelo	20	32	
Test ID	Circuit name	For report	Test type	result	comments
8449	RQTL11.R7B1	Yes	HVQ	passed	Test repeated after repairing temp. sensor
4637	RQTL11.R7B1	Yes, NV	ICC	failed	CL2 resistance too high. Test repeated after repairing temp. sensor
4004	RQTL11.R7B1	Yes	IRC	passed	The sensor was still not working: fuse in the conditioner card was burnt. Edited
4633	RQTL11.R7B1	Yes	ORC		Test repeated after repairing temp. sensor
3495	Cold	Giorgio D' Angelo	19	32	
Test ID	Circuit name	For report	Test type	result	comments
4638	RQTL11.R7B1	Yes	ICC	passed	Test repeated after repairing temp. sensor reading.2nd time, OK
4005	RQTL11.R7B1	Yes	IRC	passed	Test repeated after repairing temp. sensor reading.
4634	RQTL11.R7B1	Yes	ORC		Test repeated after repairing temp. sensor reading.2nd time, OK

ELQA Activities Page

Continuous HVQ measurement

Equipment in the tunnel

DOC

TP4

MIC

LS1 PAQ

CS0 - TT validation

Users Management

MIC Stats

Monitoring systems information

Monitoring systems alarm subscription

Campaigns

Current measurement campaigns in central database:

Campaign	Time
EYETS 2016-2017 in sector 1-2 at warm after magnet replacement	2017-01
EYETS 2016-2017 in sector 2-3	2016-12
Earth fault in sector 3-4	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 3-4	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 4-5	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 5-6	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 6-7	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 7-8	2016-12
EYETS 2016-2017 in sector 8-1	2016-12

Hello Mateusz Jakub Bednarek

Would you like to find some nonconformities today?

Modifications

Last important modification to campaigns or defaults.

2017-01-30

Failed DOC tests

Failed DOC tests during last 7 days:

Circuit Test Comments Date

Failed TP4 tests

Failed TP4 tests during last 7 days:

Circuit	Test	Comments	Date
RQS.R1B1	HVQ	ISEG current trip or hardware limit reached; Current exceeded Max recorded voltage: 390 V.The third measure after loosening the warm power cables	2017-02-08
RQS.R1B1	HVQ	ISEG current trip or hardware limit reached; Current exceeded Max recorded voltage: 390 V.test repetition no 3 due to trip in third measurement.	2017-02-08
RQT13.R1B2	HVQ	ISEG current trip or hardware limit reached; Current exceeded Max recorded voltage: 223 V.test repetition due to trip in first measurement	2017-02-08
RQT13.R1B2	HVQ	ISEG current trip or hardware limit reached; Current exceeded Max recorded voltage: 220 V.during the measurement the plug has been disconnected	2017-02-08
RQS.A12B2	HVQ	ISEG current trip or hardware limit reached; Current exceeded Max recorded voltage: 389 V.	2017-02-08
RSS.A12B1	ICC	Error in the crosscheck of voltages across magnet and CL 2; 16.90<16.90	2017-02-07
RQTFA12B1	ICC	ORC too high; 49.41<45.92 Edited by Damian Lukasz Wojas (TE/MPE) on 07-Feb-2017	2017-02-07
RQ10.R1	IRC		2017-02-07
RQ9.R1	IRC		2017-02-07
Higher resistance because of mid-point cable which is longer. IRC Test OK Edited by Damian Lukasz Wojas			

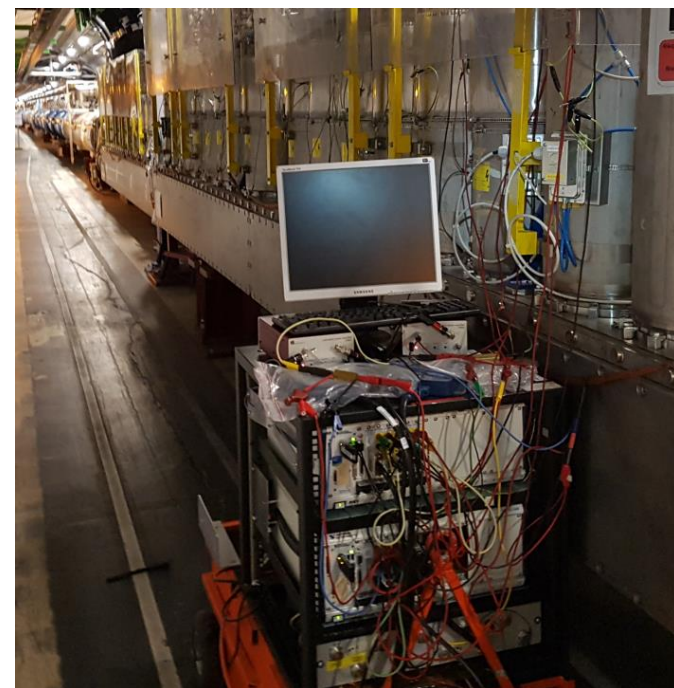
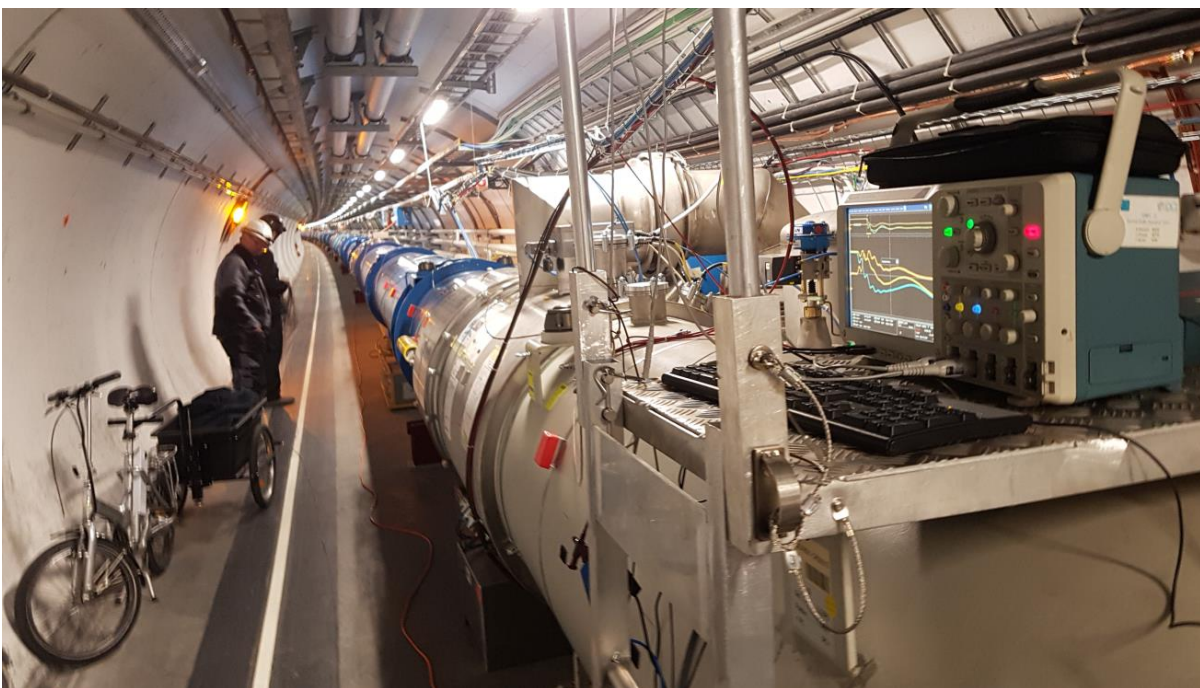
Failed MIC tests

Failed MIC tests during last 7 days:

Magnet	Test	Comments	Date
HCLQOAT001-CR000357	IRC	EE211 has too high resistance 1.756<1.750 DMM 4-wire	2017-02-09
HCLBARA000-IN001413	QHVV	Max recorded voltage: 600 V.	2017-02-09
HCLBARB000-IN001375	QHVV	Max recorded voltage: 600 V.	2017-02-09
HCLBRD000-IN002327	IRC	Fourth coil resistance is too high. 1.811<1.780 DMM 4-wire	2017-02-09

[illegible]

-



Odbiór techniczny po instalacji w tunelu

- Główny obwód dipolowy
 - Uszkodzona izolacja przewodów w kapilarze
 - Więcej tu: <https://edms.cern.ch/document/861929/1>

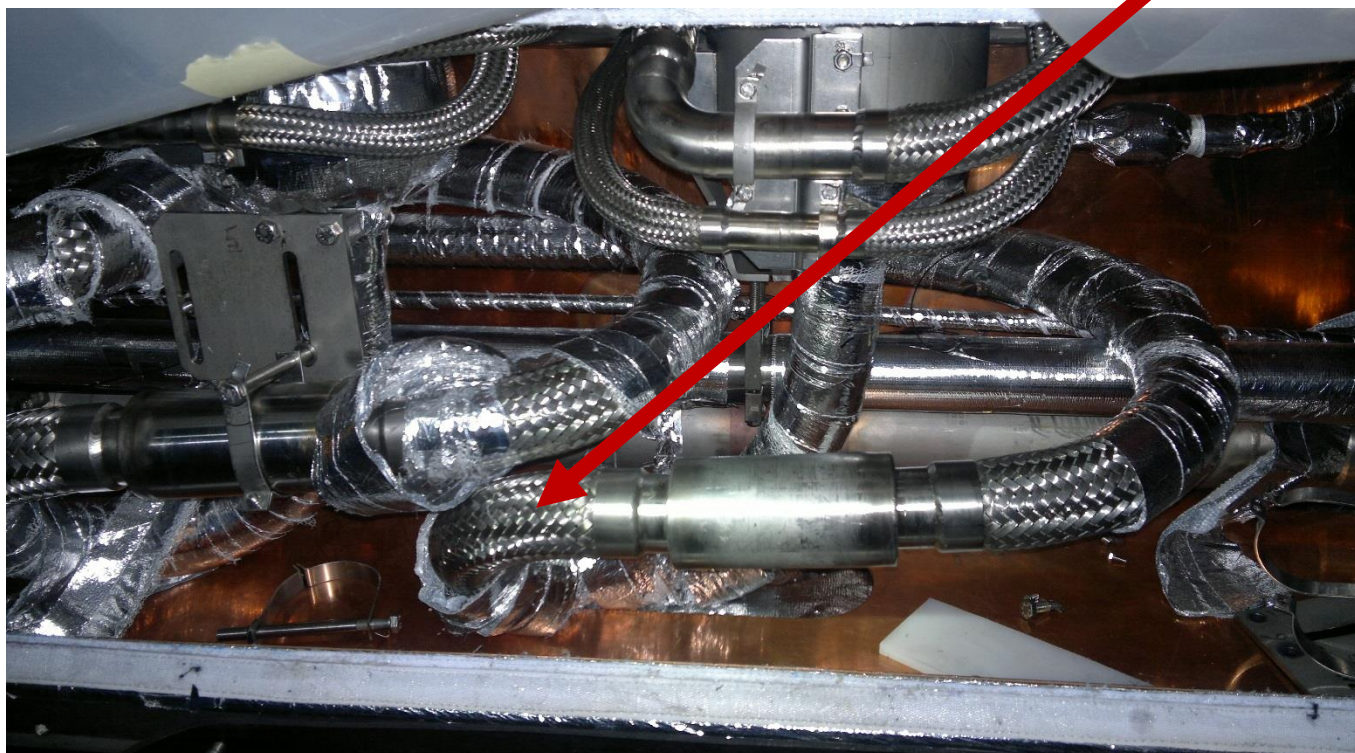
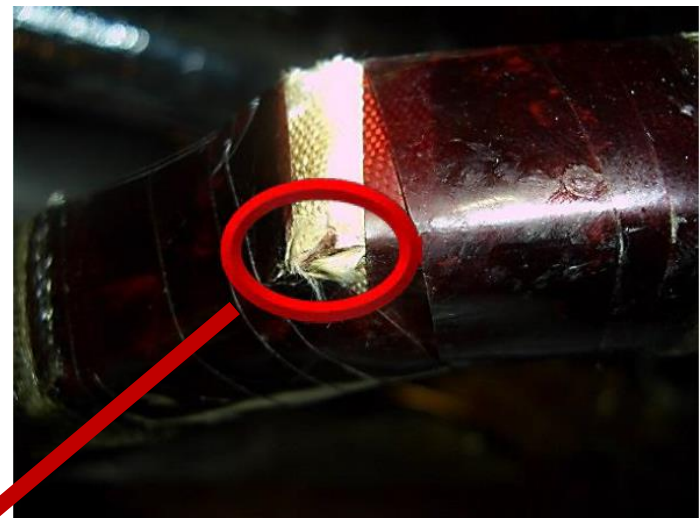


Zwarcie do ziemi w głównym obwodzie dipolowym

W kriogenicznej skrzynce rozdzielczej

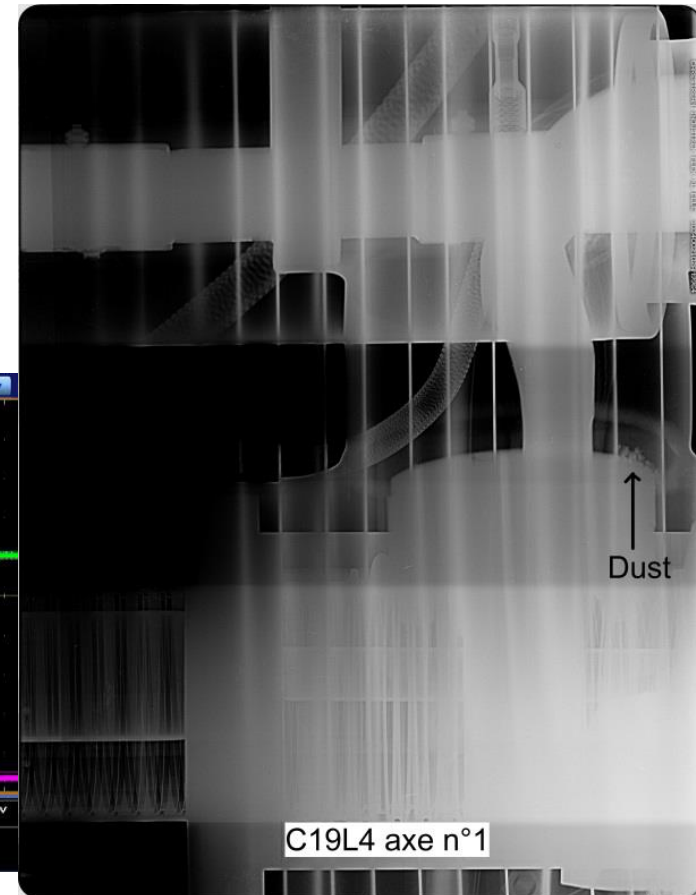
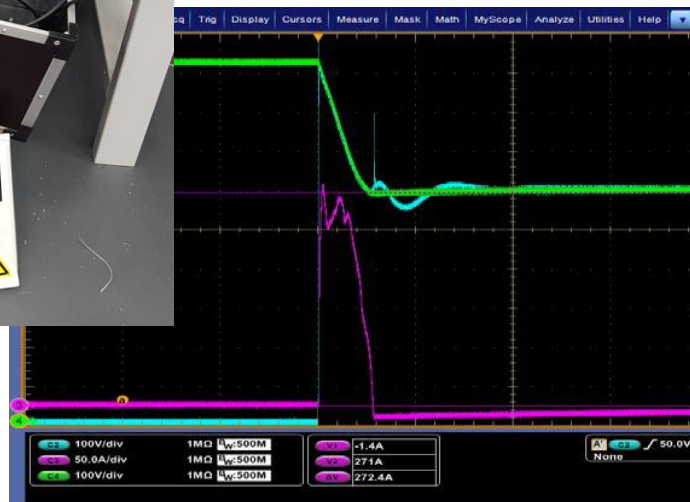
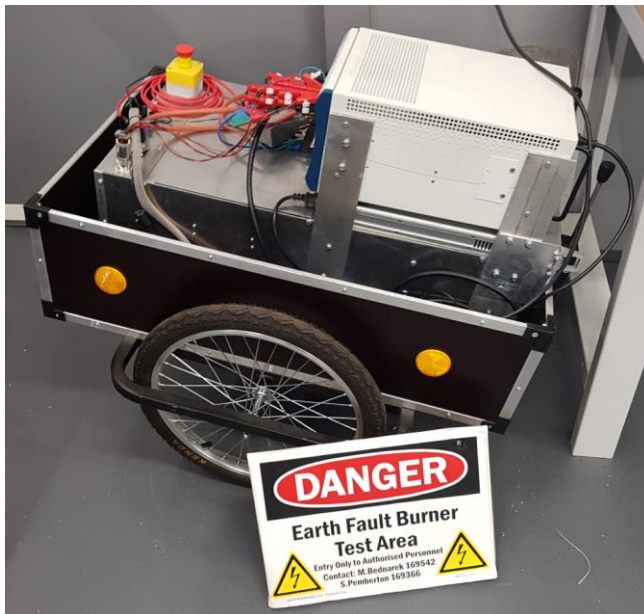
- Zaraz poniżej doprowadzenia prądowego
- Niepoprawnie nałożona izolacja z Kaptonu

Więcej tu: <https://edms.cern.ch/document/1327563/1>



Zwarcie do ziemi na głównym obwodzie dipolowym po schłodzeniu

- Problem pojawił się po „quench’u” treningowym
- Zlokalizowany w pojemniku diody bocznikującej
- Zwarcie **wyeliminowane** używając impulsu prądowego ze **specjalnie przygotowanego urządzenia**, bez ogrzewania sektora
- Więcej tu: <https://edms.cern.ch/document/1502332/1>



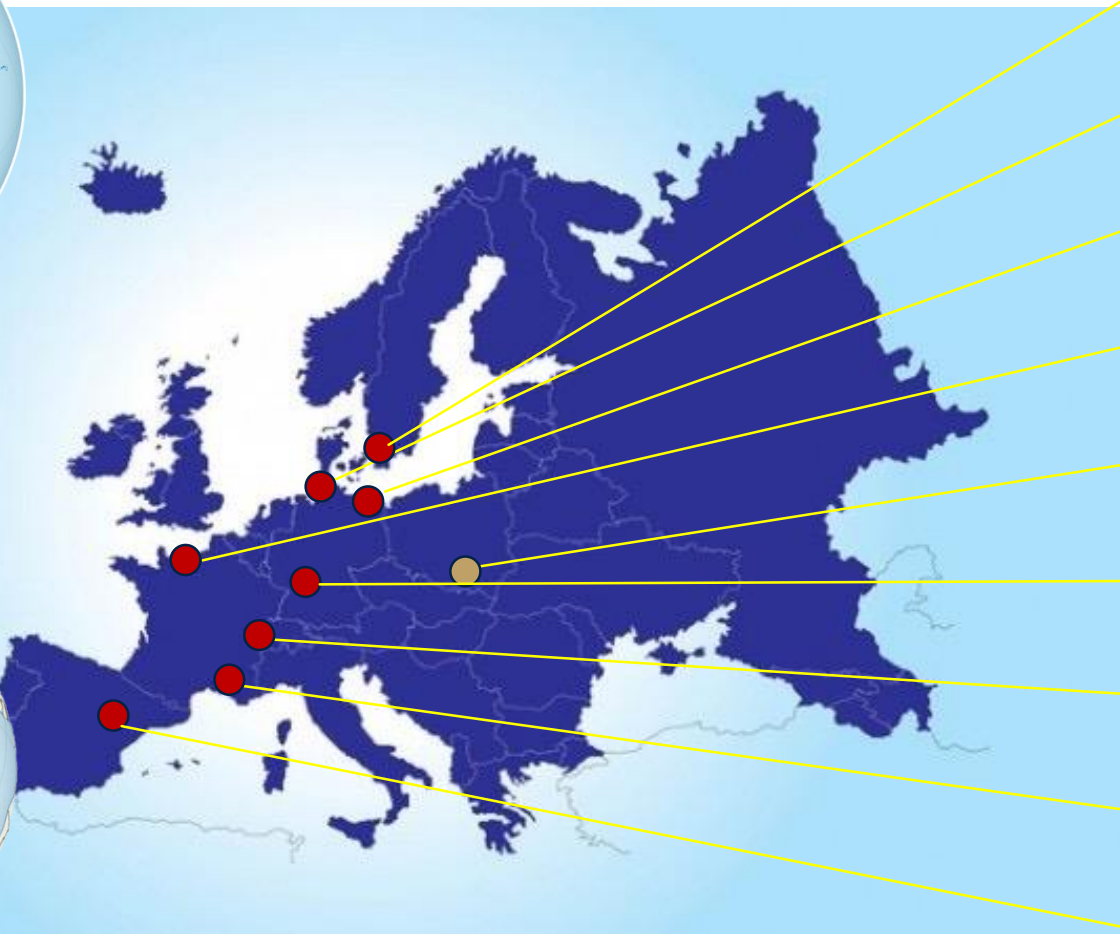
Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie

- Współpracujemy z CERN w dziedzinie kontroli obwodów nadprzewodzących od czasów budowy LHC (2005)
- Bierzemy udział w wielu wielkoskalowych projektach międzynarodowych



T2K, J-PARC
BELLE 2, KEK

CTA
CHILE



ESS
LUND

E-XFEL
DESY

W7X
IPP GREIFSWALD

SPIRAL 2
GANIL

IFJ PAN
KRAKÓW

FAIR
DARMSTAT

LHC, ATLAS
CERN

ITER
CADARACHE

F4E
BARCELONA

Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie

- Budujemy aktualnie stanowiska pomiarowe do charakteryzacji przewodów nadprzewodnikowych i testowania elektromagnesów nadprzewodzących w Krakowie
- <https://www.ifj.edu.pl/kariera/oferty-pracy/> - wkrótce będziemy szukać nowego inżyniera
- Szukasz interesującego tematu pracy dyplomowej?
<https://www.ifj.edu.pl/edukacja/dzien-otwarty/2019/lic-mgr/>



dr Rafał Ortwein IFJ PAN, DAI:

- [Finite element modelling of Niobium Tin \(\$\text{Nb}_3\text{Sn}\$ \) impregnated cable stack monotonic and cyclic loads including time-dependent effects](#) (Praca magisterska)
- [Optimal design of stainless steel bladders for Niobium-tin \(\$\text{Nb}_3\text{Sn}\$ \) superconducting magnets](#) (Praca magisterska)

