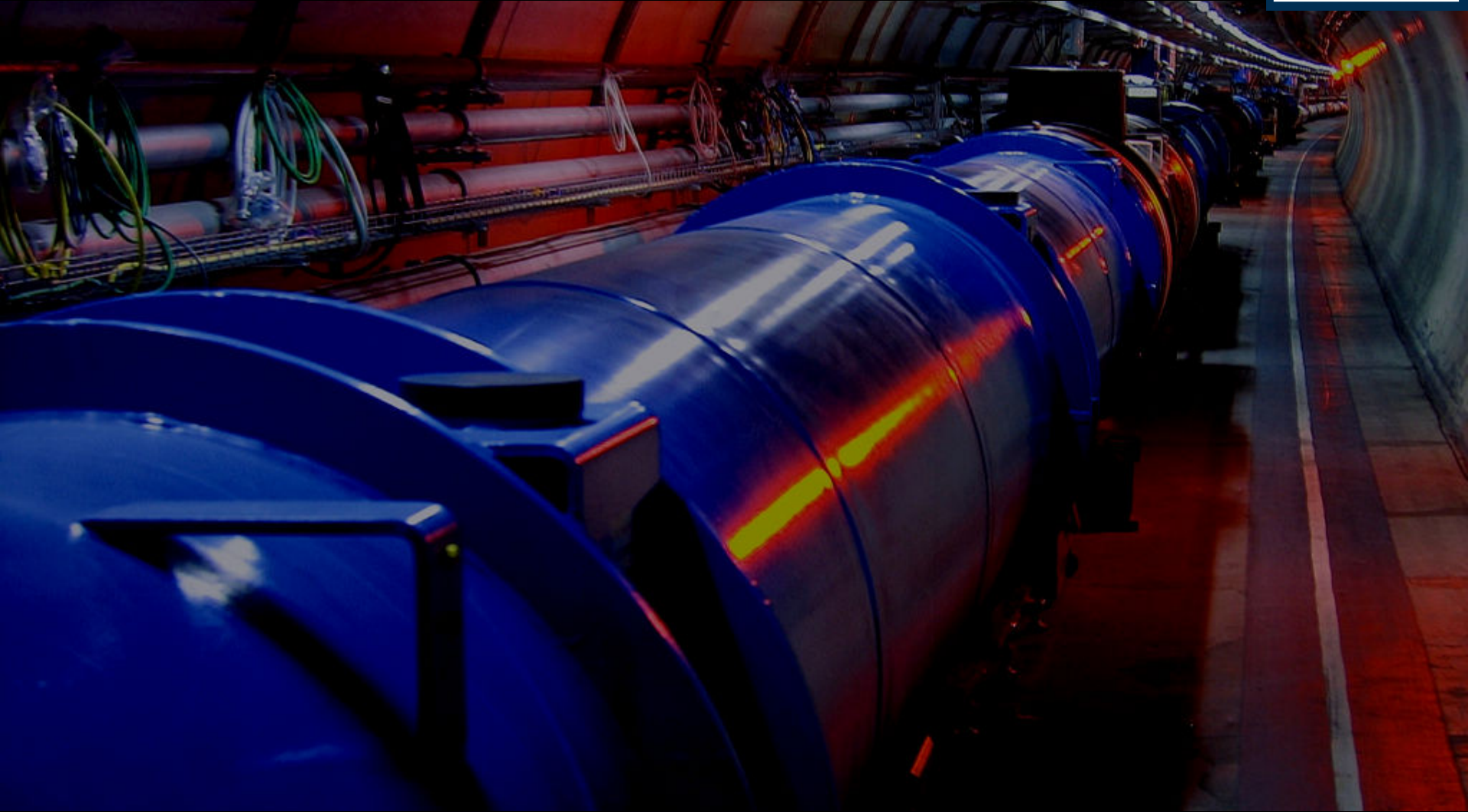


# Jak Budowano LHC

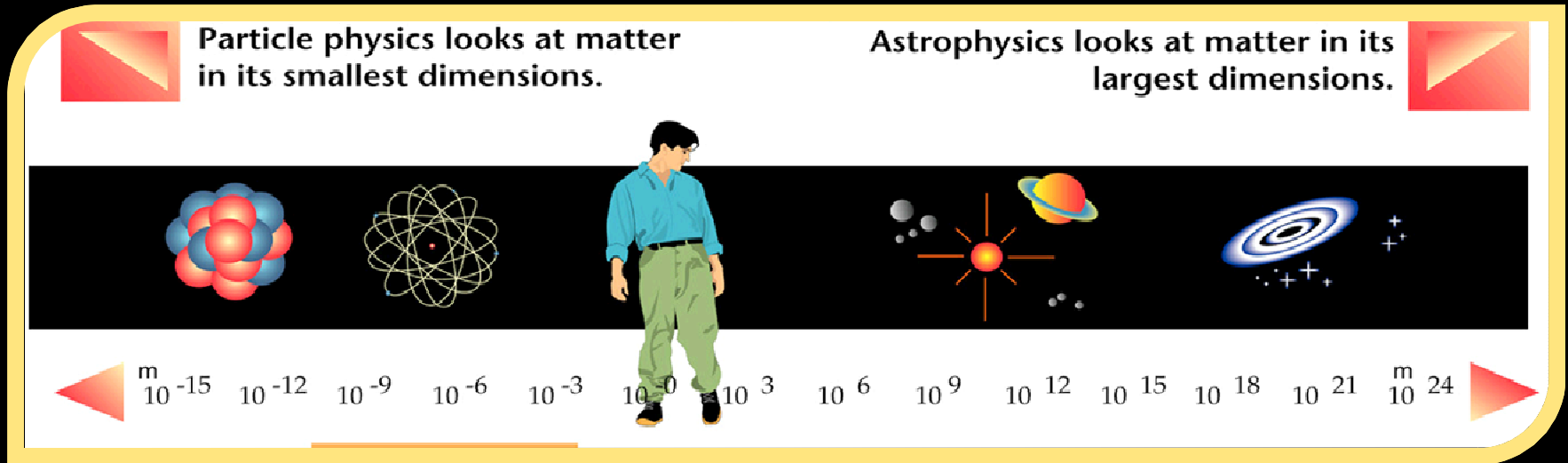


**Andrzej SIEMKO**  
**CERN, Departament Technologii Akceleratorów**

# Plan wykładu

- ◆ Wstęp
- ◆ Czym jest Wielki Zderzacz Hadronów LHC
- ◆ Wybrane wyzwania LHC
  - Nadprzewodnictwo w LHC i urządzenia nadprzewodnikowe
  - Kriogenika LHC
- ◆ Czy zawsze jest tak jakbyśmy tego chcieli?
- ◆ Podsumowanie

# Dwa bieguny w badaniu struktury materii



Współczesne akceleratory wraz z detektorami cząstek można uznać za bardzo czułe mikroskopy, lub poprawniej atto-skopy!

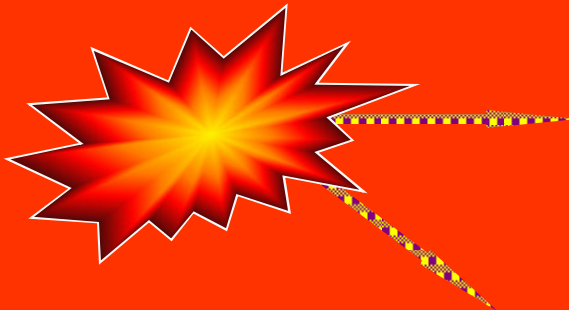
$$\lambda = h/p ; \text{ @LHC: } T = 1 \text{ TeV} \Rightarrow \lambda \cong 10^{-18} \text{ m}$$

# Jak poznać lepiej strukturę materii?

Dwie drogi do lepszego poznania fundamentalnej struktury materii

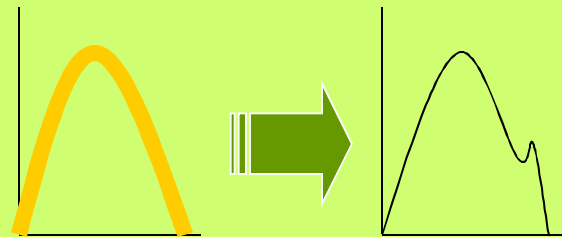
Wzrost energii

Nowe zjawiska  
(nowa fizyka)  
są spodziewane gdy  
"użyteczna" energia  $> mc^2$  [ $\times 2$ ]



Wzrost precyzji

Znane zjawiska badane z  
większą precyzją *mogą* pokazać  
niezgodności  
z istniejącymi teoriami



# Czym jest Wielki Zderzacz Hadronów LHC?

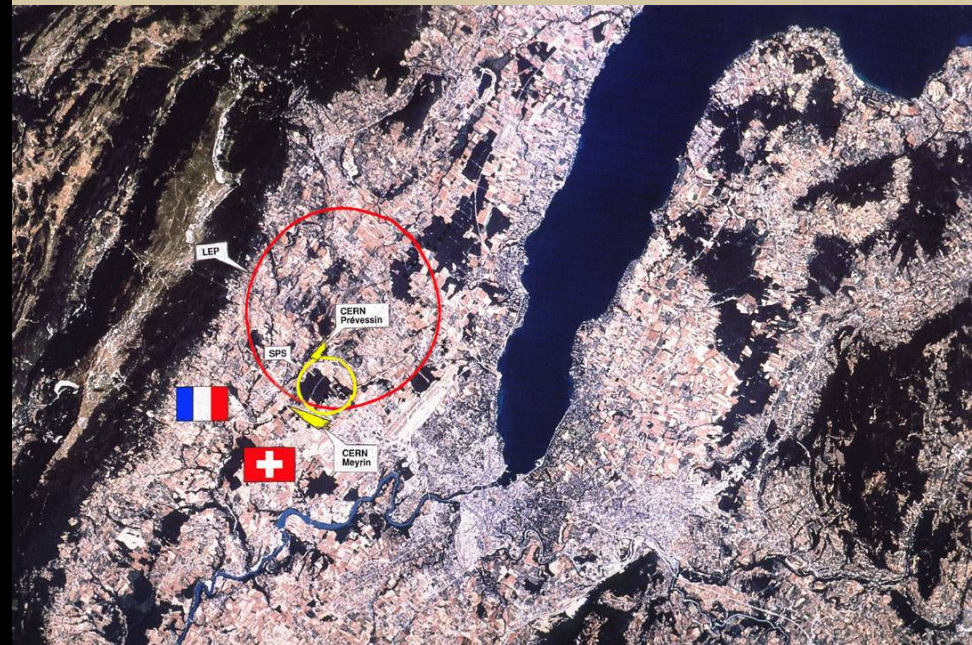
## Akcelerator zderzający protony o energii 7 TeV

Najważniejsze daty Projektu LHC:

- 1982 : Pierwsze idee i opracowania
- 1994 : Zatwierdzenie projektu LHC przez Rade CERN
- 1996 : Decyzja o rozpoczęciu budowy
- 2004 : Początek instalacji LHC
- 2006 : Początek uruchamiania systemów technicznych
- 2008 : Początek pracy akceleratora z wiązkami protonów
- 2008 : Niespodziewana awaria
- ...
- 2009-2030: planowana praca i eksperymenty fizyczne

Największe i najbardziej złożone urządzenie (“maszyna”)

jakie kiedykolwiek zostało zbudowane

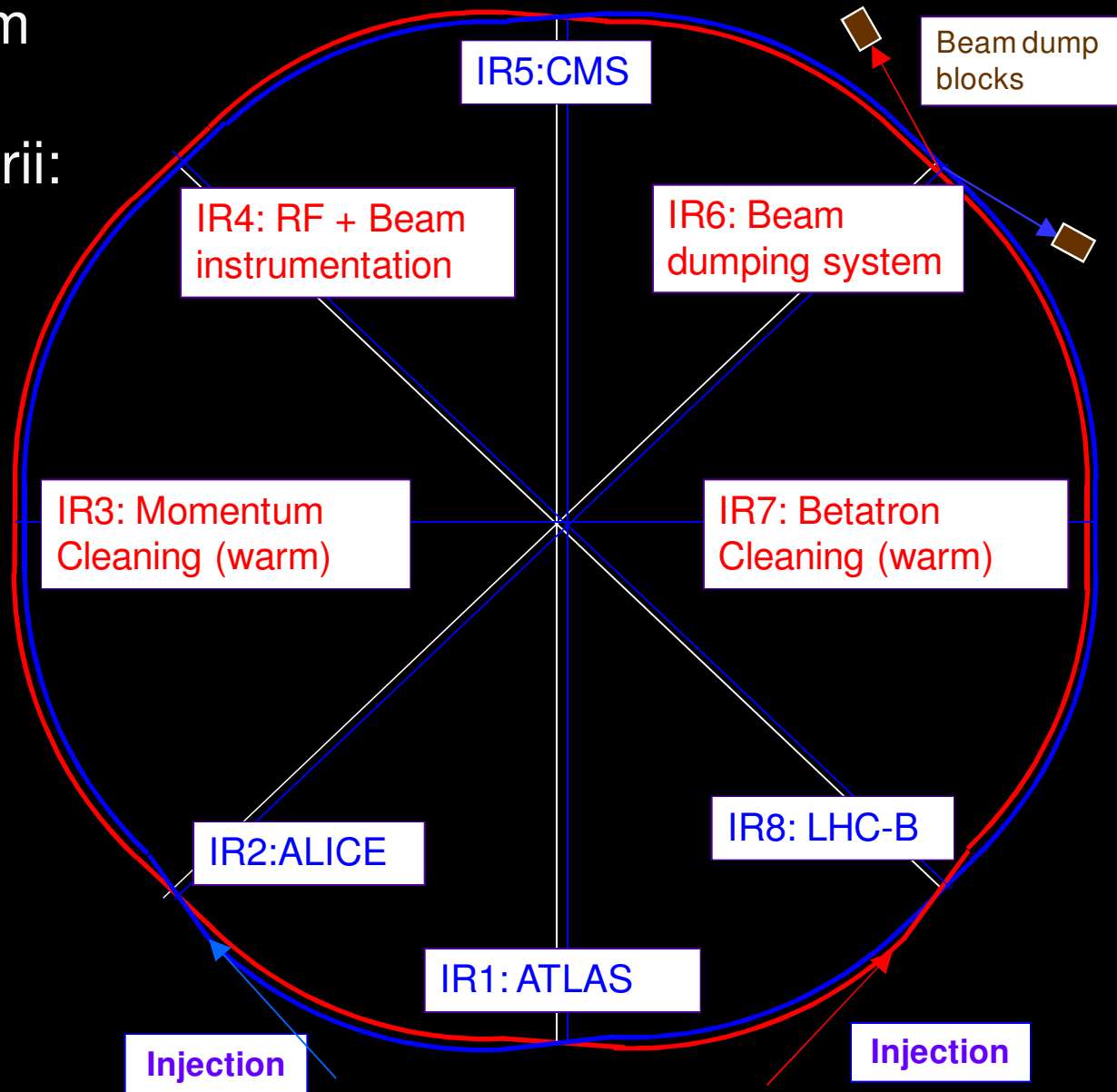


# Główne parametry LHC

- ◆ Energia nominalna 7 TeV
- ◆ Energia początkowa (injection) 450 GeV
- ◆ Obwód pierścienia 26658.883 m
- ◆ Średnica pierścienia ~8.6 km
  
- ◆ Pierścień podzielony jest na:
  - 8 sektorów składających się z 8 łuków po ca. 2600m i 8 sekcji prostych po ca. 700m
  - 4 punkty przecięcia wiązek

◆ LHC jest podwójnym synchrotronem o ośmiokrotnej symetrii:

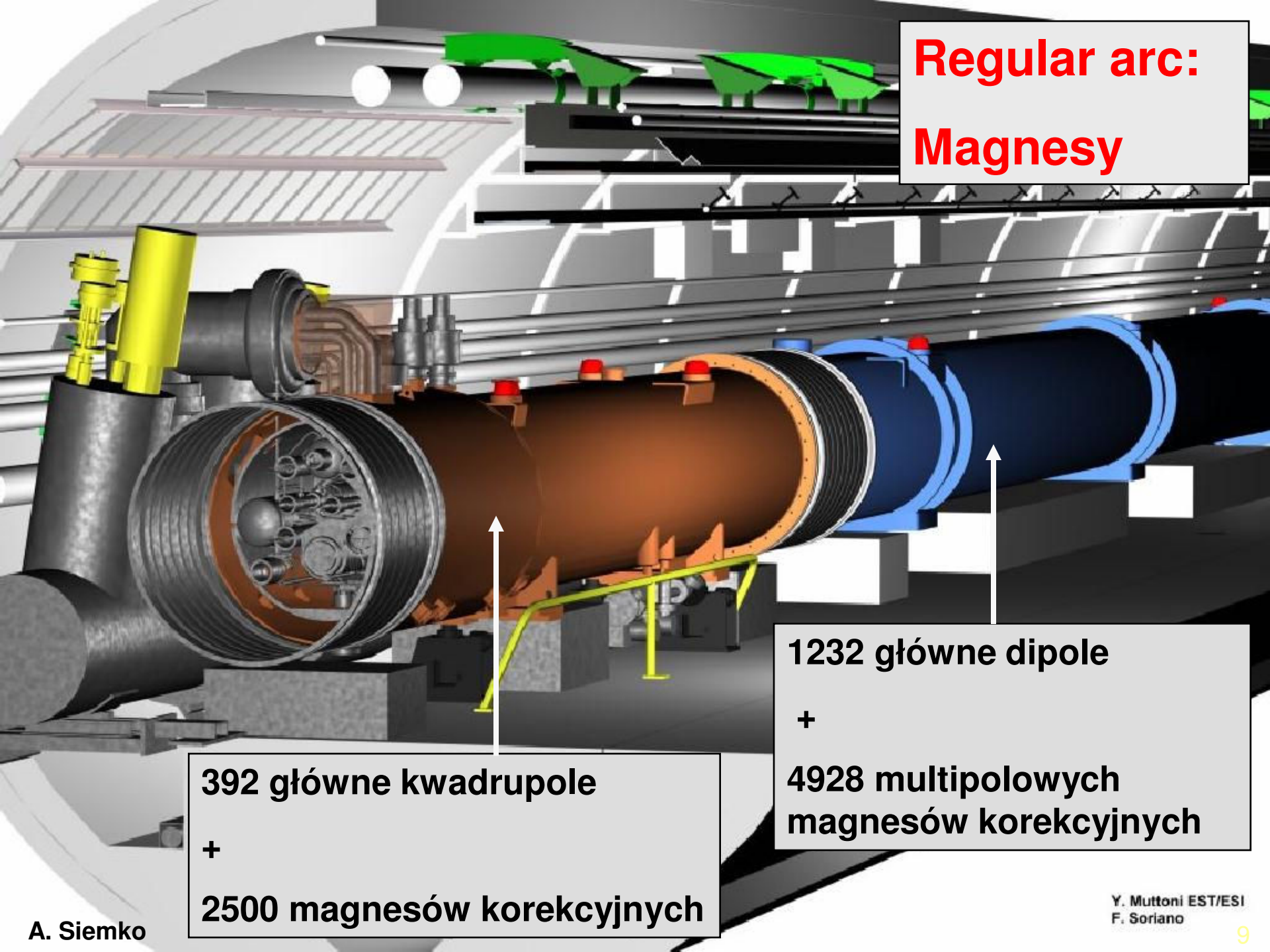
- 8 sektorów
  - ◆ 8 łuków
  - ◆ 8 sekcji prostych (po ca. 700m)
- 4 punkty przecięcia wiązek



# LHC – Wyzwania

- ◆ LHC – pierwszy akcelerator z magnesami nadprzewodnikowymi chłodzonymi **nadpłynnym** helem o temperaturze  $T=1.9$  K:
  - **Nowe materiały**
  - **Nowe technologie produkcji,**
  - **Nowe systemy detekcji i zabezpieczenia,**
  - **Niezawodność**





**Regular arc:  
Magnesy**

**392 główne kwadrupole  
+  
2500 magnesów korekcyjnych**

**1232 główne dipole  
+  
4928 multipolowych  
magnesów korekcyjnych**

**Regular arc:  
Kriogenika**

**Połączenie poprzez  
moduł serwisowy**

**Kriogeniczna linia  
dystrybucyjna (26 km)**

**Statyczny nadciekły hel o temperaturze  
1.9 K w izolowanych komórkach  
kriogenicznych o długości 214 m**

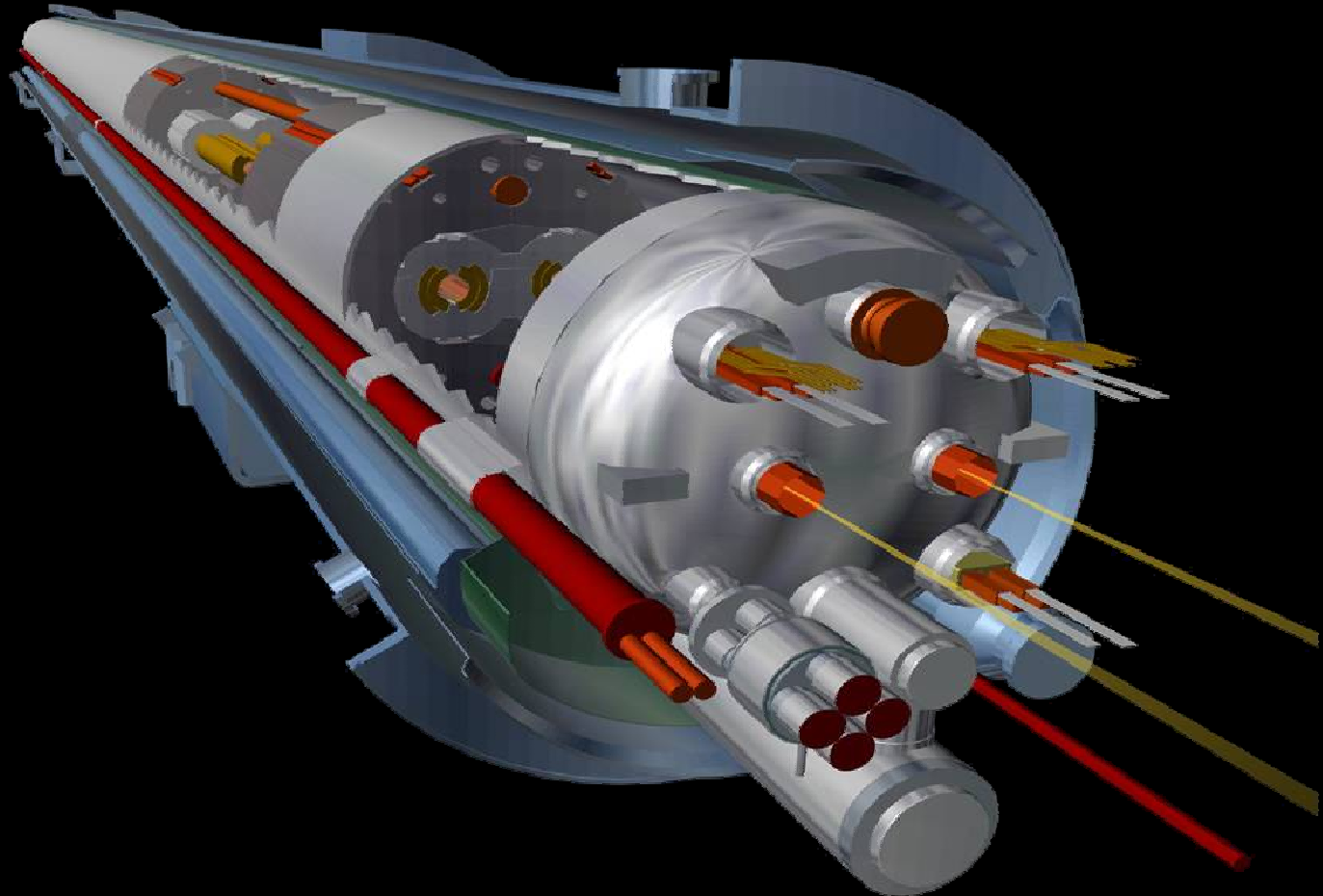
**Regular arc:  
Próżnia**

**Ultra wysoka próżnia wiązki  
Beam 1 + Beam 2**

**Próżnia izolacyjna w  
kriogenicznej linii  
dystrybucyjnej**

**Próżnia izolacyjna w  
kriostatach magnesów**

# Magnesy nadprzewodnikowe LHC



# Parametry głównych magnesów dipolowych LHC

◆ Liczba głównych dipoli	1232
◆ Pole dipolowe dla 7 TeV	8.33 T
◆ Prąd w dipolach dla 7 TeV	11850 A
◆ Energia zmagazynowana w dipolach	10 GJ
◆ Całkowita liczba magnesów	~9600
◆ Liczba dipolowych obwodów elektrycznych	8
◆ Liczba wszystkich obwodów elektrycznych	1766

# Nadprzewodnictwo

- ◆ Nadprzewodnictwo jest cechą wielu pierwiastków i materiałów polegającą na tym, że w pewnych warunkach mają one zerową rezystancję
- ◆ Poprawne określenie nadprzewodnictwa wymaga spełnienia jednocześnie dwóch warunków:
  - zaniku oporu elektrycznego
  - doskonałego diamagnetyzmu materiałów nadprzewodzących, zwanego efektem Meissnera

# Odkrycie nadprzewodnictwa

- 1908 – Kamerlingh Onnes skrapla hel



- ◆ 1911 – Pomiar zależności R-T dla rtęci

Metal	TC [K]	TC [°C]
Nb	9.3	-263.85
Pb	7.2	-265.954
V	5.4	-267.75
La	4.9	-268.25
Ta	4.5	-268.65
Hg	4.2	-268.95
Sn	3.7	-269.45
In	3.4	-269.75
Pd	3.3	-269.85
Cr	3.0	-270.15
Tl	2.4	-270.77
Al	1.2	-271.95
Zn	0.9	-272.3
Ti	0.4	-272.75
Rh	0.000325	-273.15

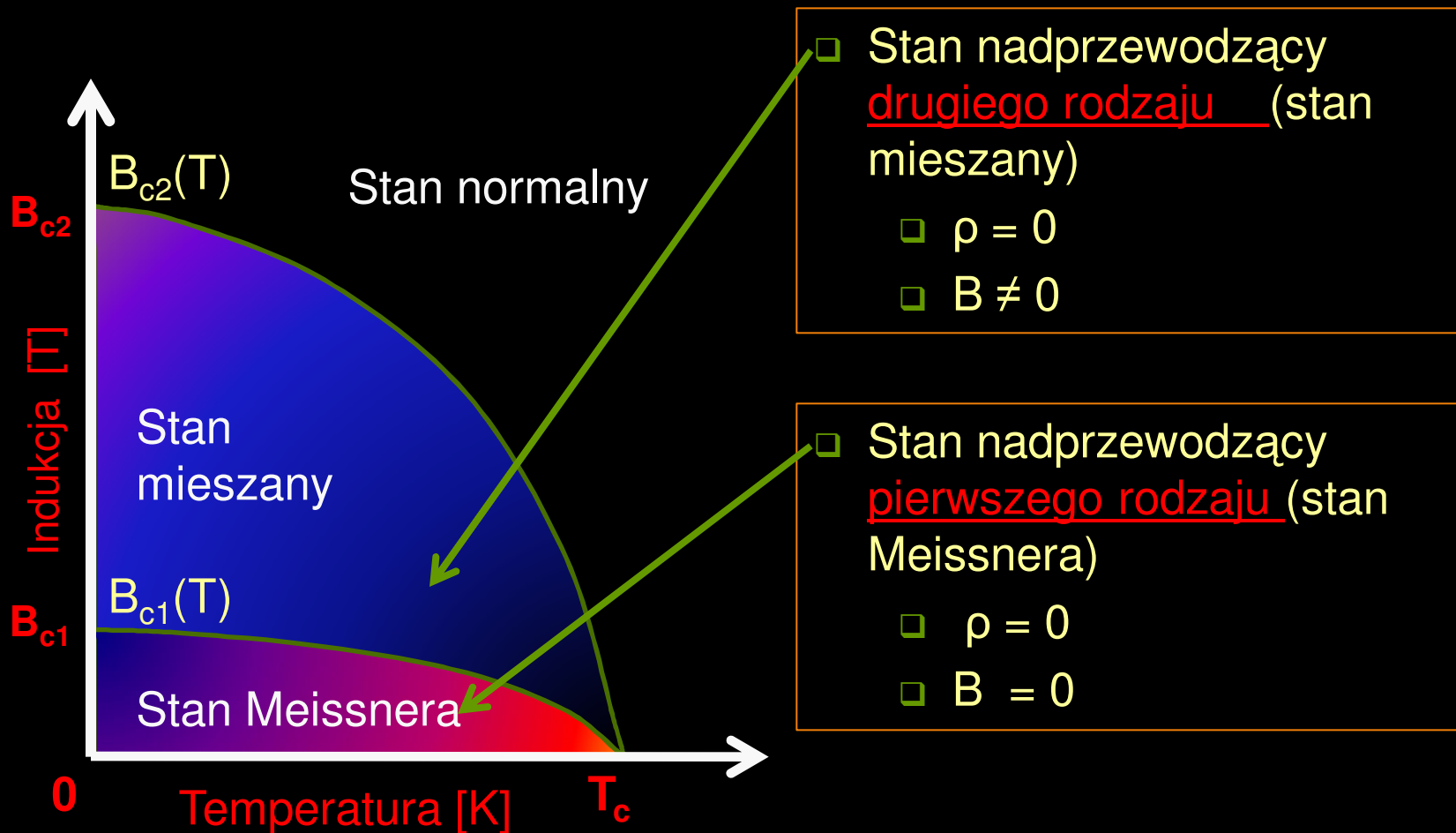
Podstawową właściwością stanu nadprzewodzącego jest to, że prąd elektryczny może płynąć bez występowania różnicy potencjałów

# Rodzaje nadprzewodnictwa

- ◆ Wyróżnia się dwa podstawowe typy nadprzewodnictwa:
- ◆ Nadprzewodnictwo I-go rodzaju, które występuje głównie w czystych metalach
- ◆ Nadprzewodnictwo II-go rodzaju, charakterystyczne dla stopów metalicznych oraz tzw. nadprzewodnikach wysokotemperaturowych

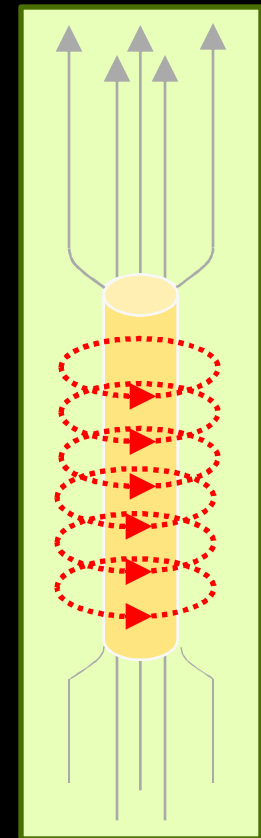
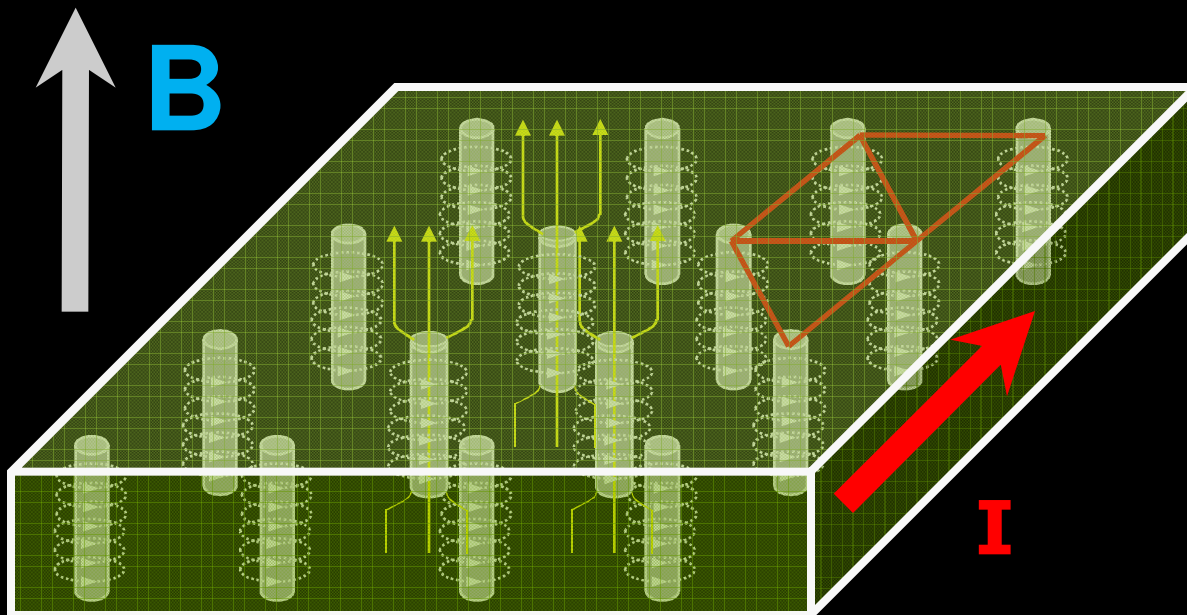


# Nadprzewodniki I i II rodzaju

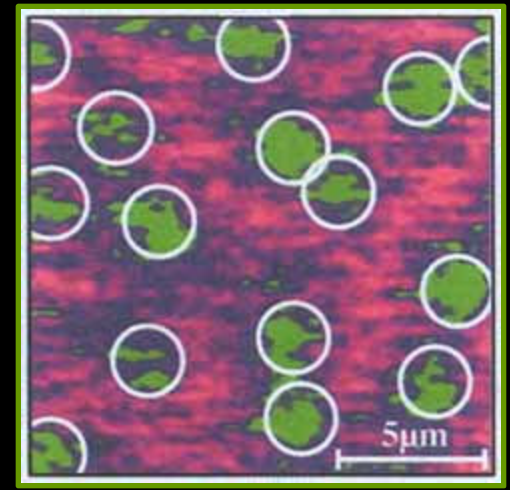
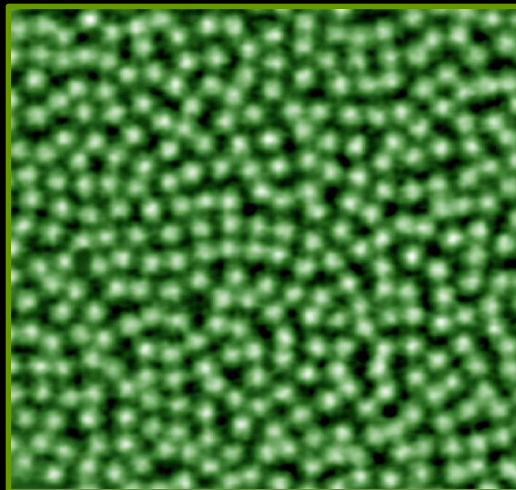
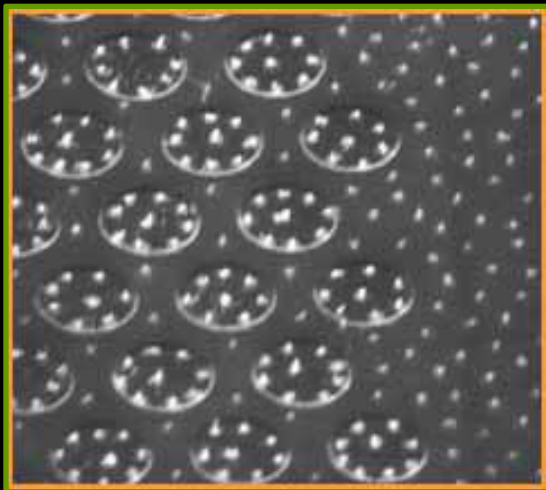
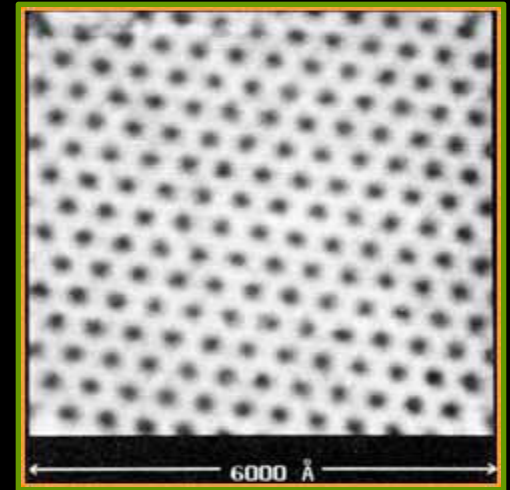
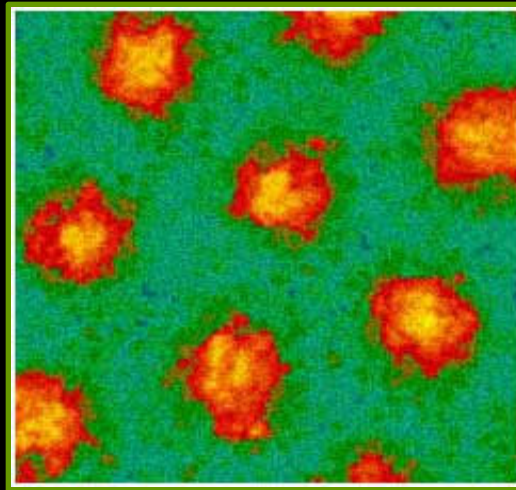
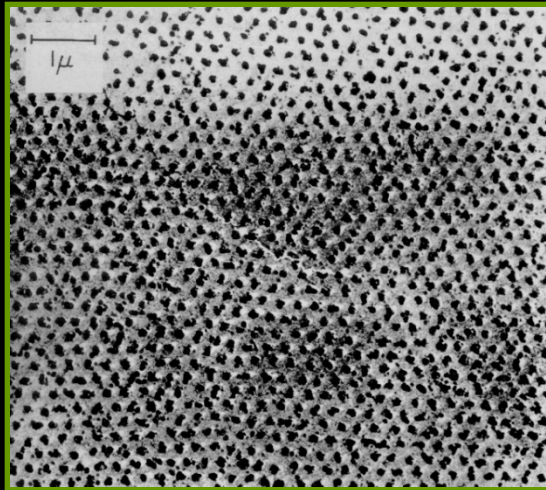


# Nadprzewodniki II rodzaju

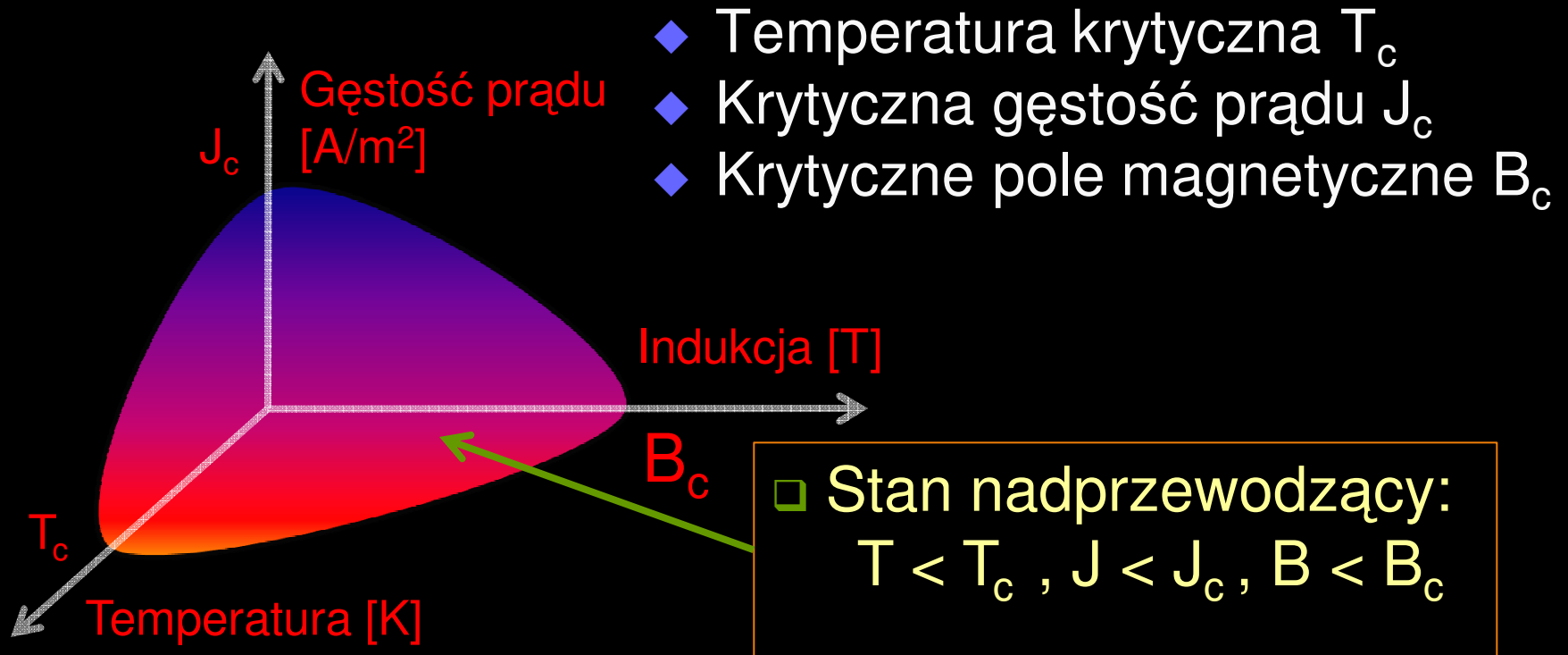
- Kwantowanie strumienia magnetycznego przechodzącego przez nadprzewodzące pętle prądowe



# Sieć wirów



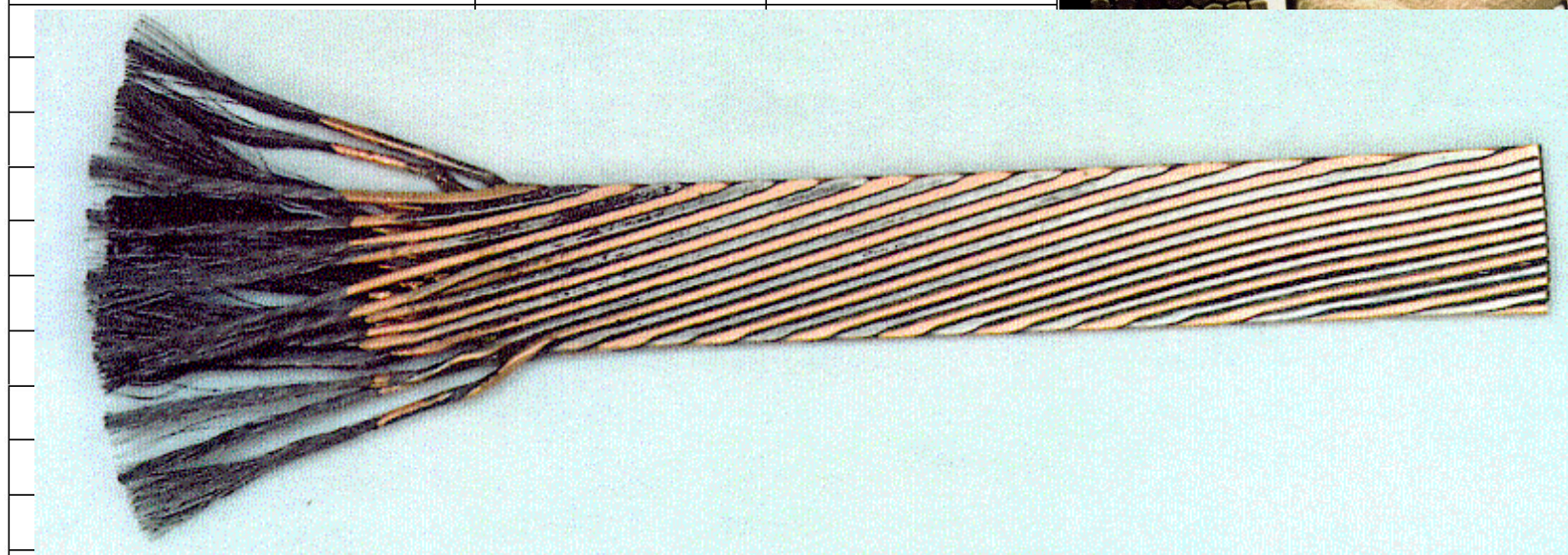
# Diagram fazowy - powierzchnia krytyczna



- ◆ LHC wykorzystuje:
- ◆ Klasyczne nadprzewodniki niskotemperaturowe – stop Nb-Ti
- ◆ Wysokotemperaturowe nadprzewodniki typu BSCO – Bi-2223

# Nadprzewodniki LHC - 7000 km kabli Cu/Nb-Ti

STRAND	Type 01	Type 02
Diameter (mm)	1.065	0.825
Cu/NbTi ratio	1.6-1.7 ± 0.03	1.9-2.0 ± 0.03



Interstrand resistance ( $\mu\Omega$ )	10-50	20-80
--	-------	-------



# Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti

~ 1 m



Ø ~ 20 cm

Nb-Ti

Folia Nb

Cylinder z Cu



Uszczelnienie i odpompowanie ⇒ Ekstruzja i ciągnienie

~ 10 m



Ø ~ 7cm

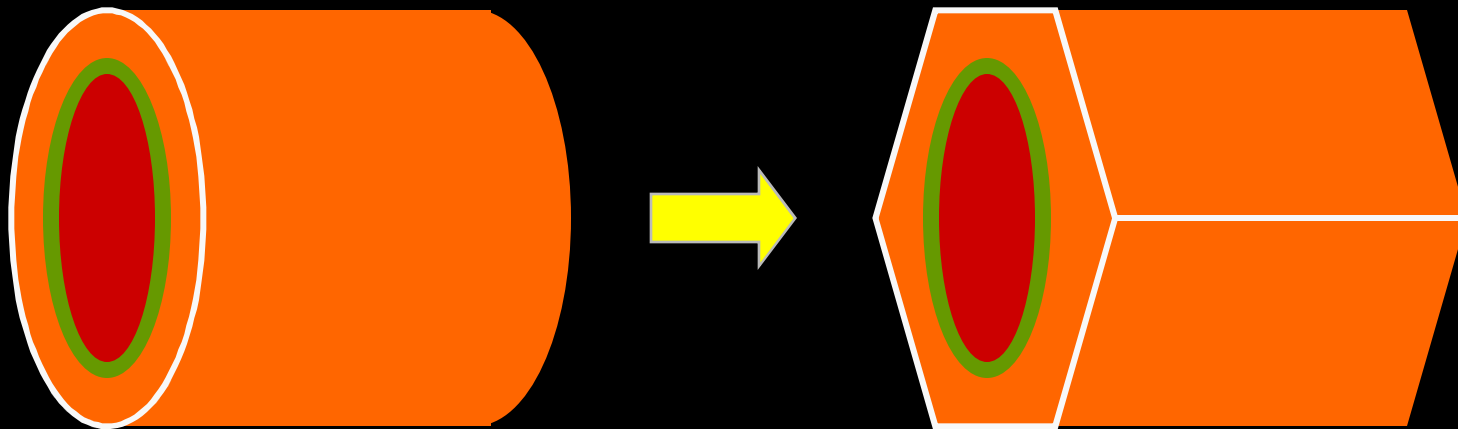
# Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti

Dalsze wielokrotne ciągnięcie połączone z obróbką cieplną

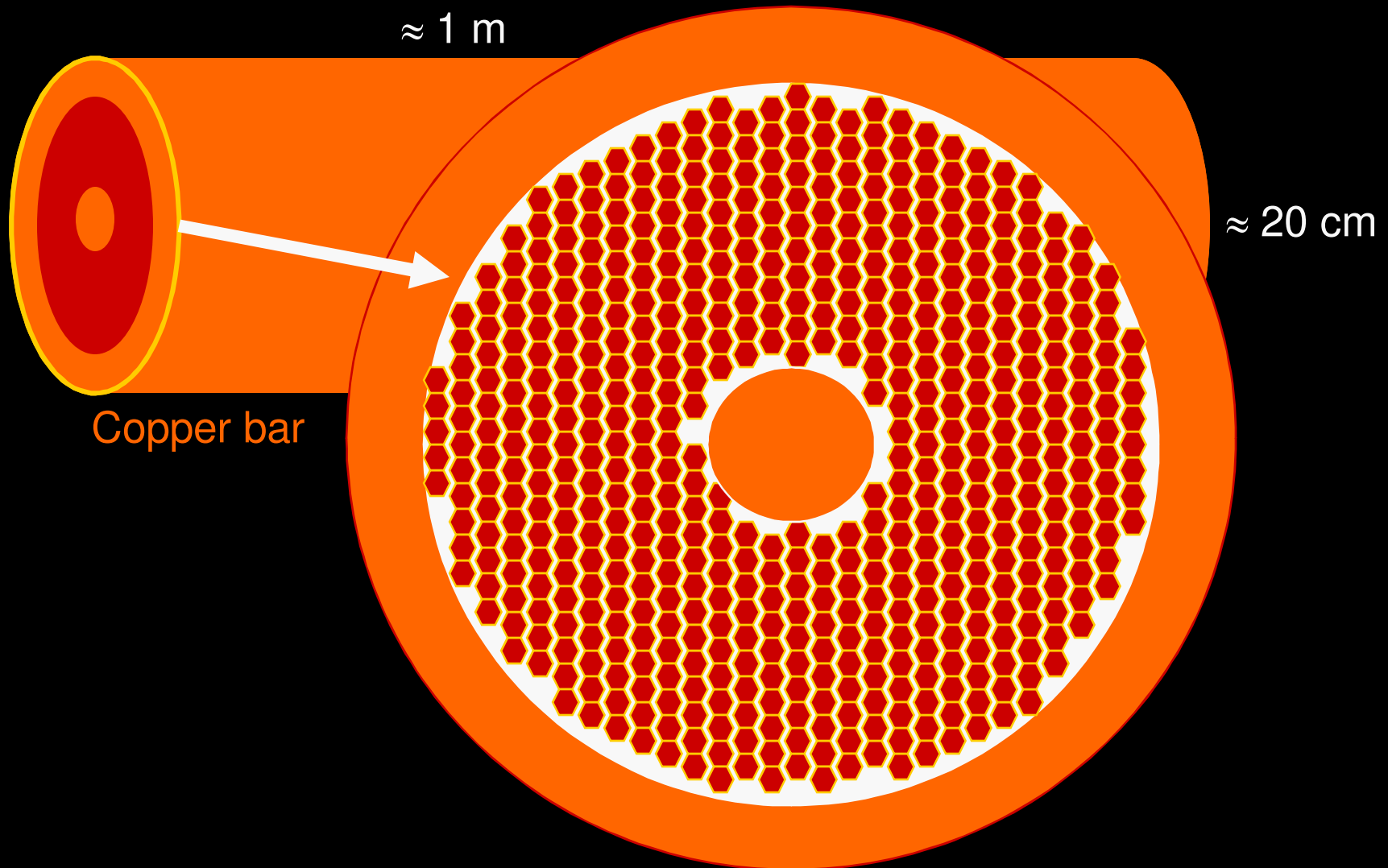
Redukcja średnicy od  $\varnothing$  7 cm to  $\varnothing$  1-5 mm



Ostateczne ciągnięcie połączone z formowaniem kształtu sześciokątnego i ciecie na odcinki  $\sim$  1 m



# Produkcja nadprzewodników typu Nb-Ti





# Produkcja w przemyśle: montaż cewek nadprzewodnikowych



# Produkcja w przemyśle



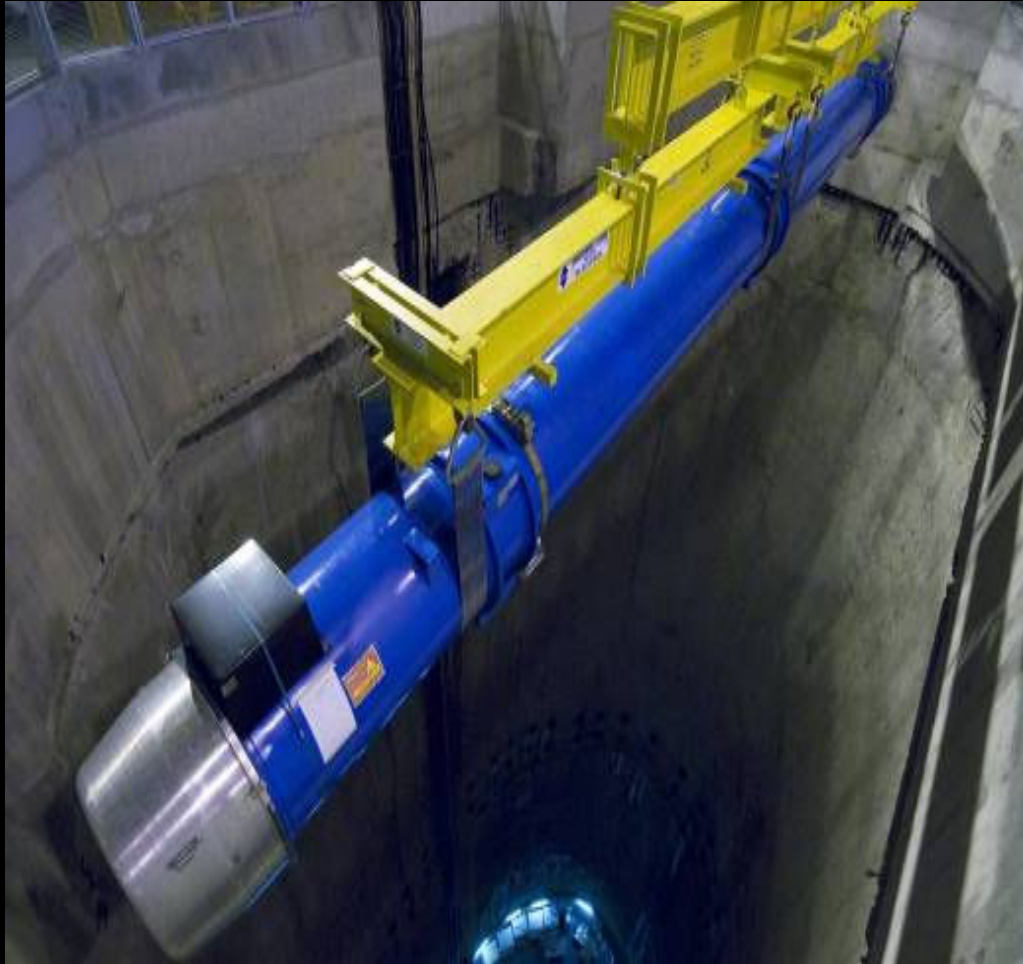
# Montaż finalny magnesów w kriostatatach



# Testy w stacji testów



# Podróż 100m pod ziemię





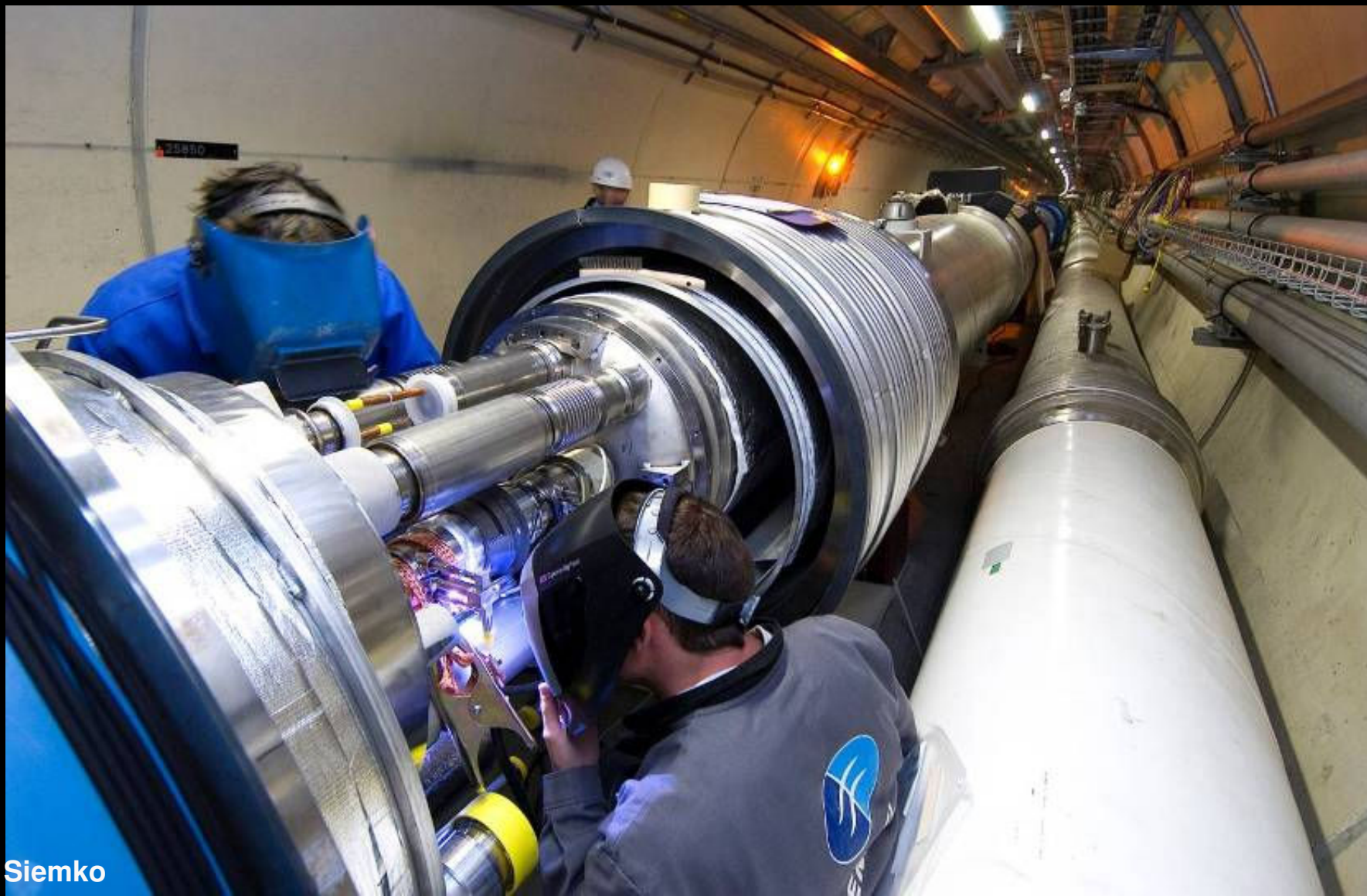
...i podróż w tunelu

30'000 km z prędkością 2 km/h!

Waga urządzeń w tunelu:

50 000 t

# Instalacja – setki tysięcy połączeń



# Magnesy nadprzewodnikowe w tunelu LHC

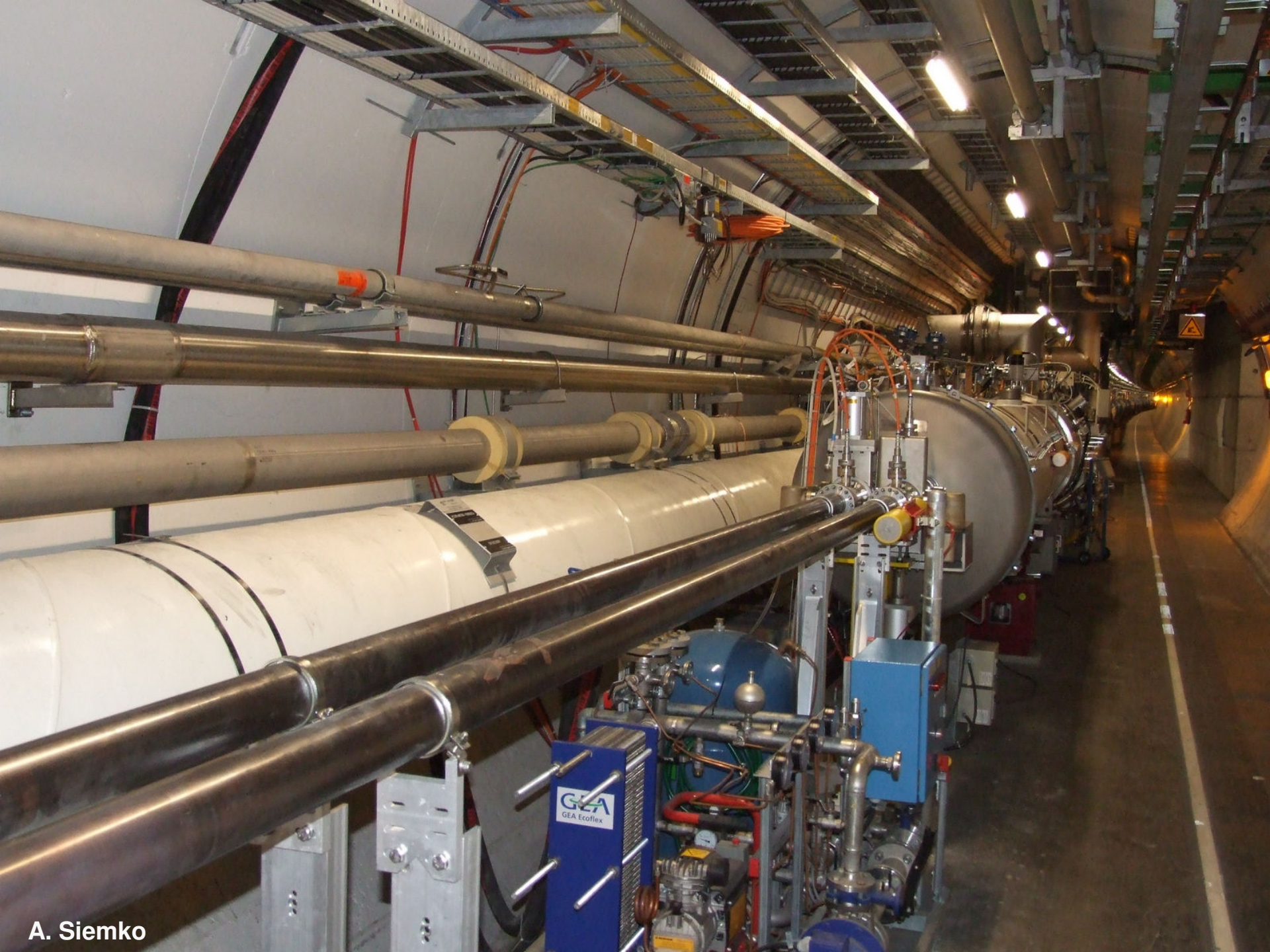
Magnesy w regularnej części łuku LHC

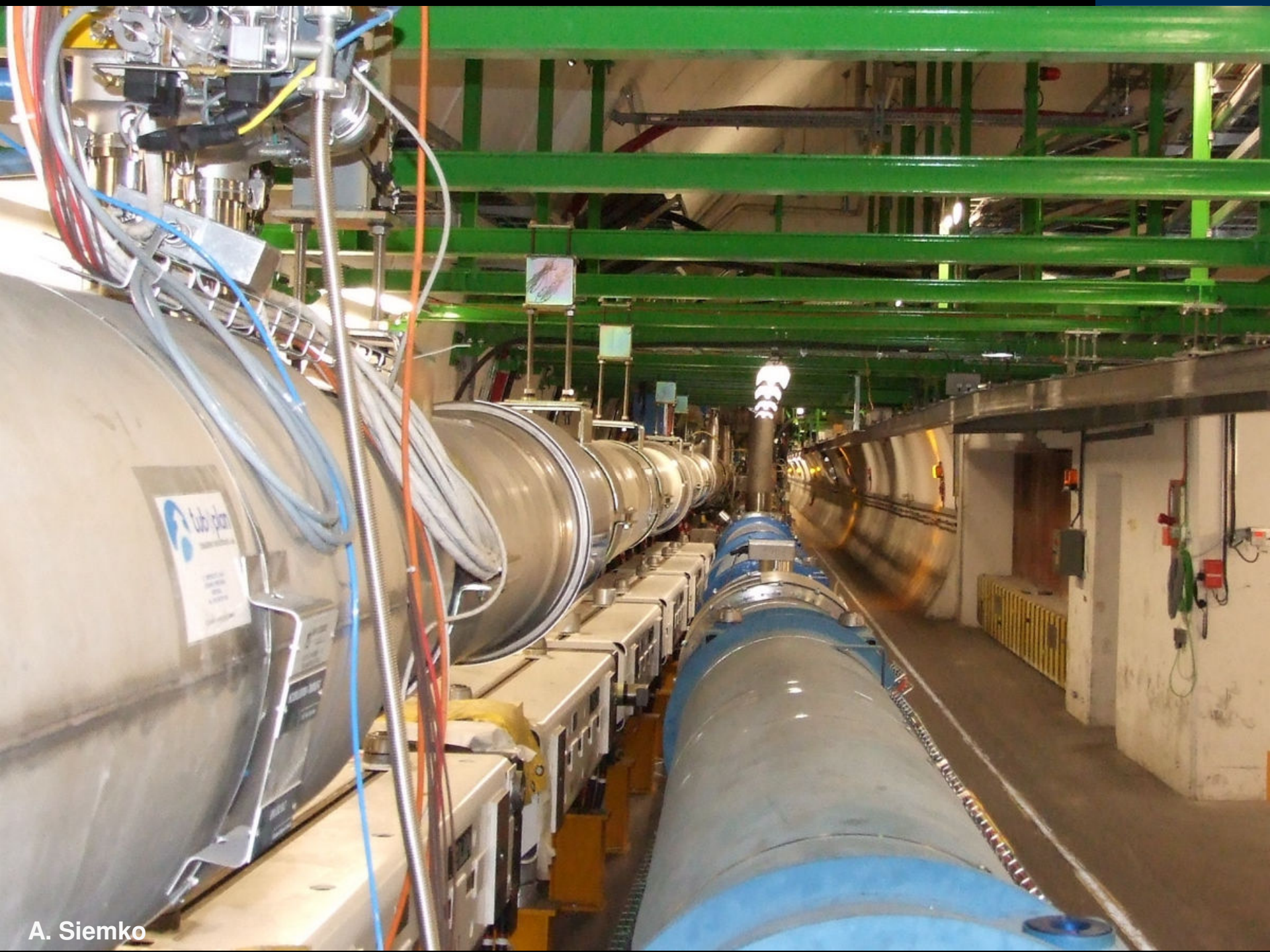


- ◆ 1232 główne magnesy dipolowe
- ◆ 474 ogniskujące magnesy kwadrupolowe
- ◆ plus około 8000 magnesów korekcyjnych

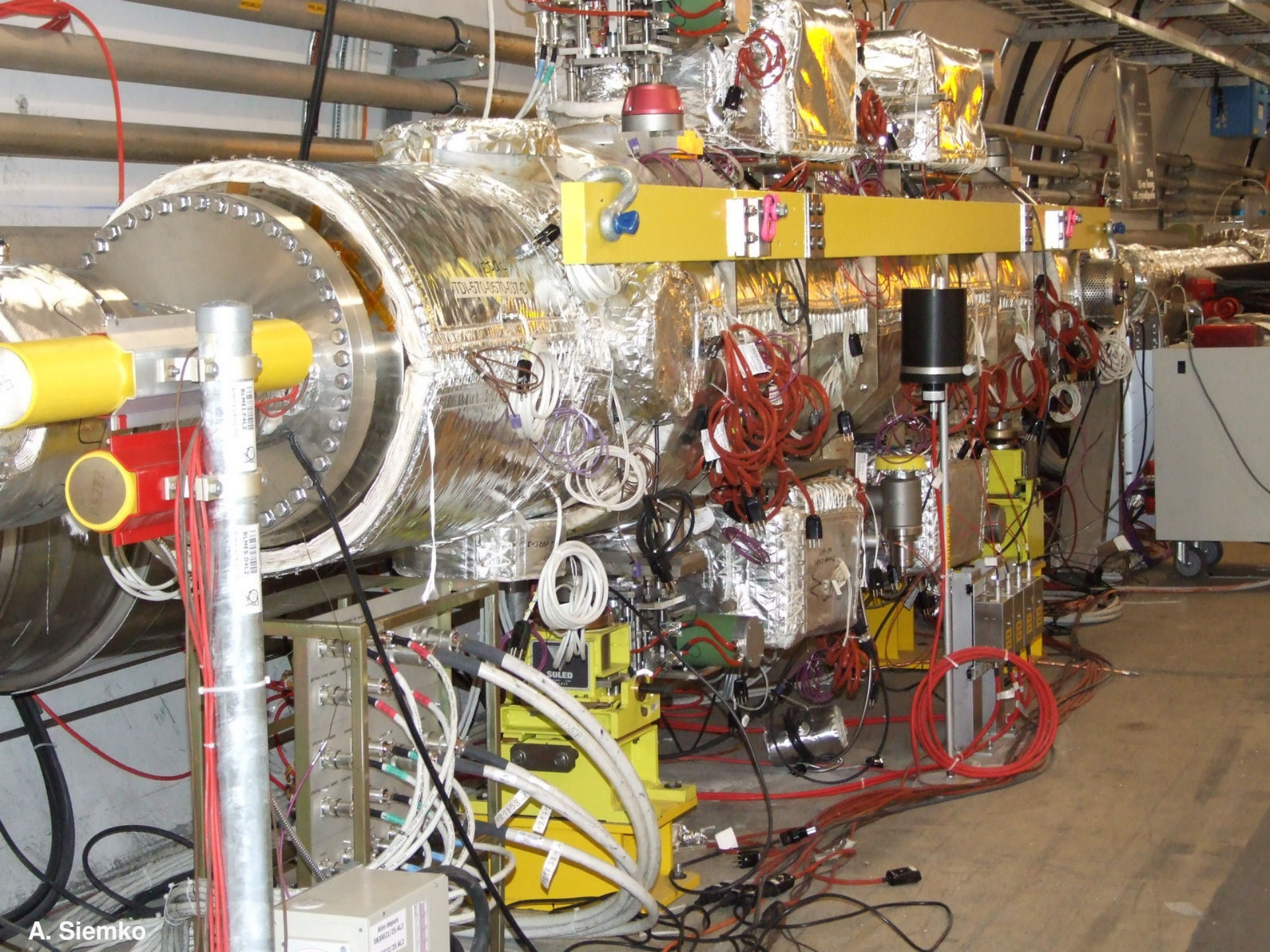
7<sup>th</sup> November 2007 - last interconnection  
30<sup>th</sup> of April 2008 - all interconnections are closed

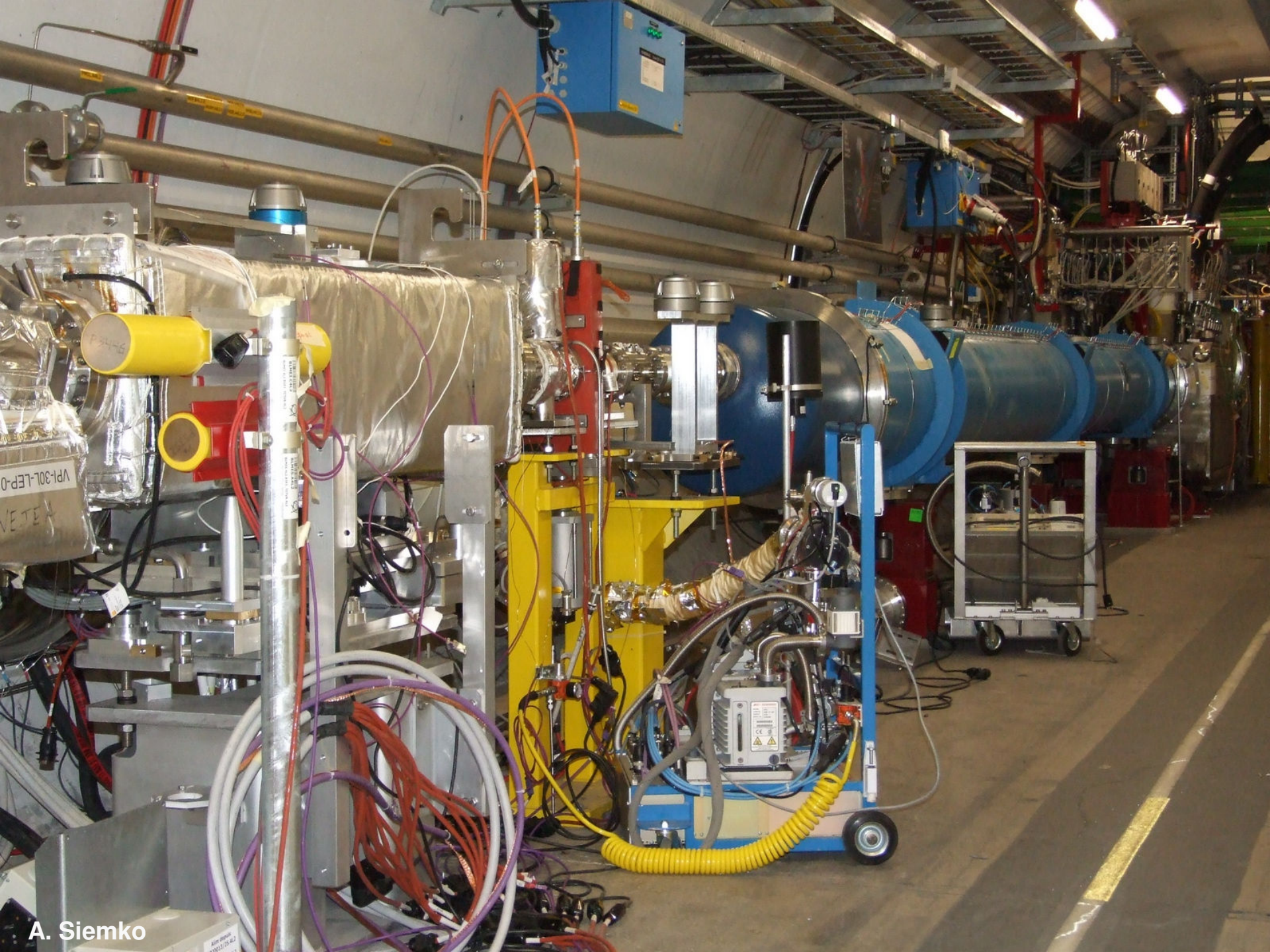




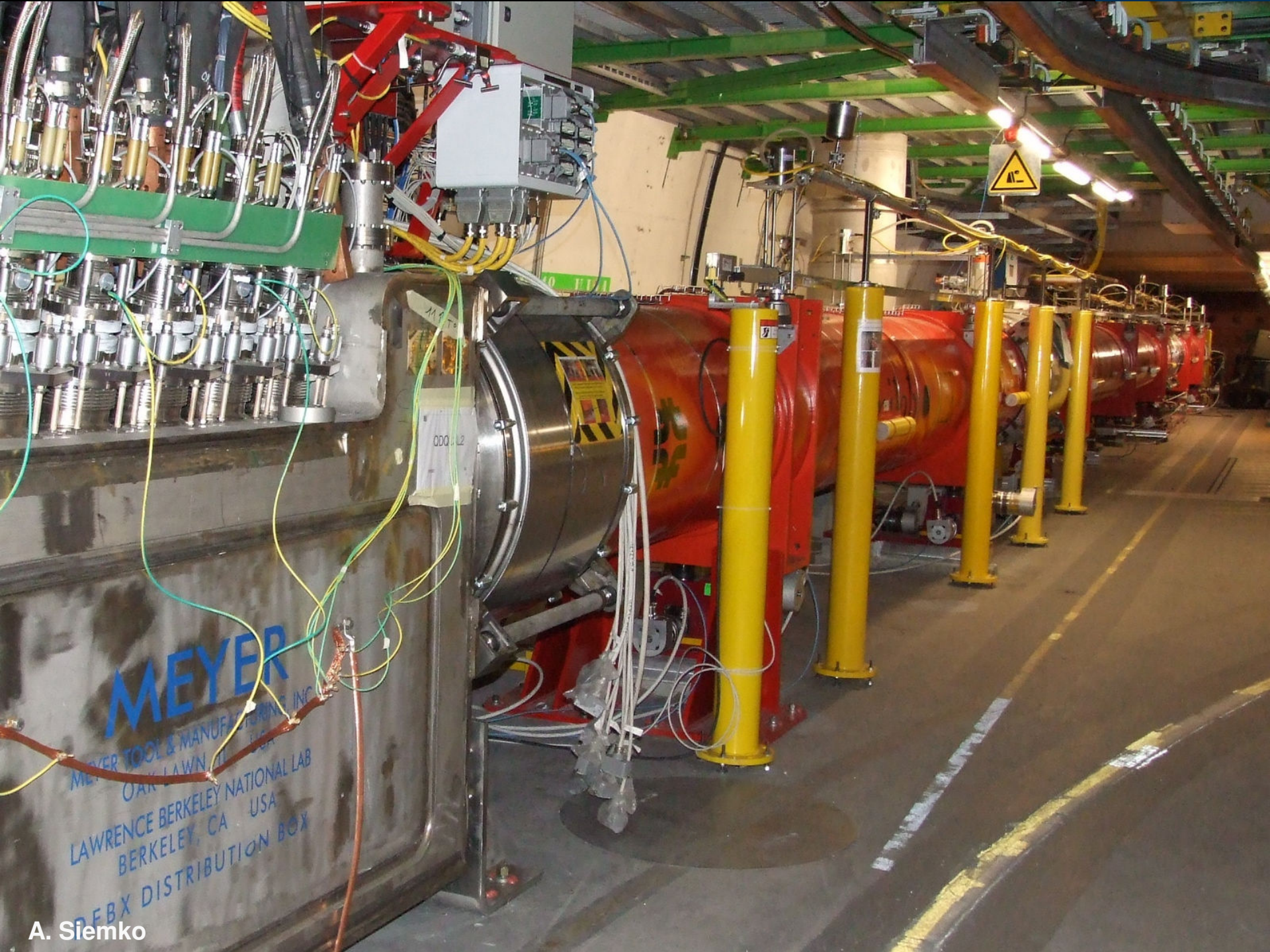


tubo plyn





A. Siemko

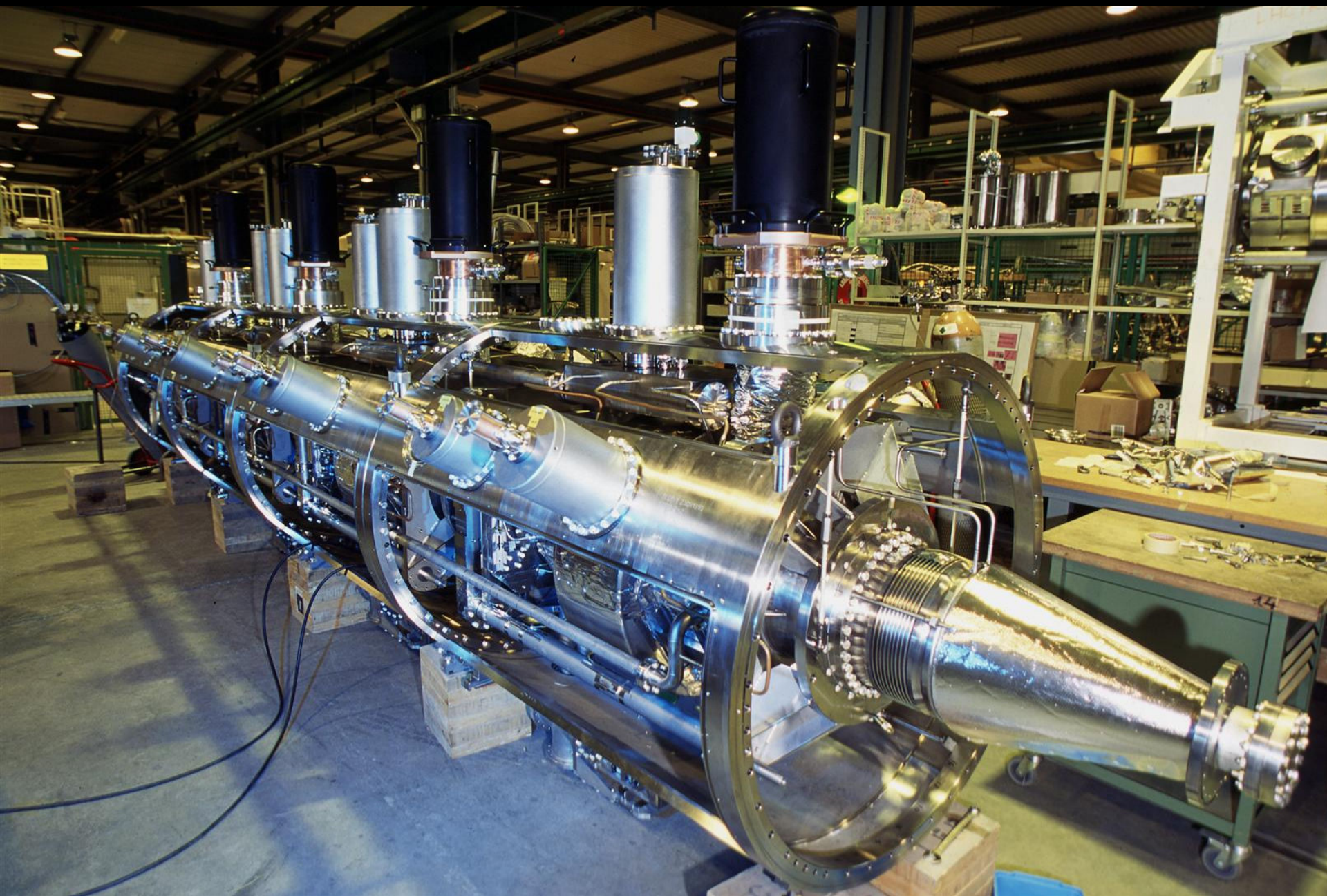


A. Siemko

# Parametry wiązek protonów LHC

◆ Częstotliwość obiegu wiązki	11.245 kHz
◆ Liczba paczek w wiązce	2808
◆ Liczba protonów w paczce	$1.15 \times 10^{11}$
◆ Średnica paczki w punkcie zderzeń	16 $\mu\text{m}$
◆ Długość paczki	7.55 cm
◆ Odstęp między paczkami	~7 m
◆ Energia wiązki	2 * 360 MJ
◆ Prąd wiązki	0.54 A







# Energia wiązek LHC



Momentum at collision	7 TeV (1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ Joule)
Number of bunches	2808
Protons per bunch	$1.15 \cdot 10^{11}$
Total number of protons	$6.5 \cdot 10^{14}$ (1 ng of H <sup>+</sup> )

Energia zmagazynowana w 2 wiązках:	724 MJoule
Energia potrzebna do stopienia 1 tony Cu:	700 MJoule

**700 MJ może stopić 1 tonę  
miedzi**

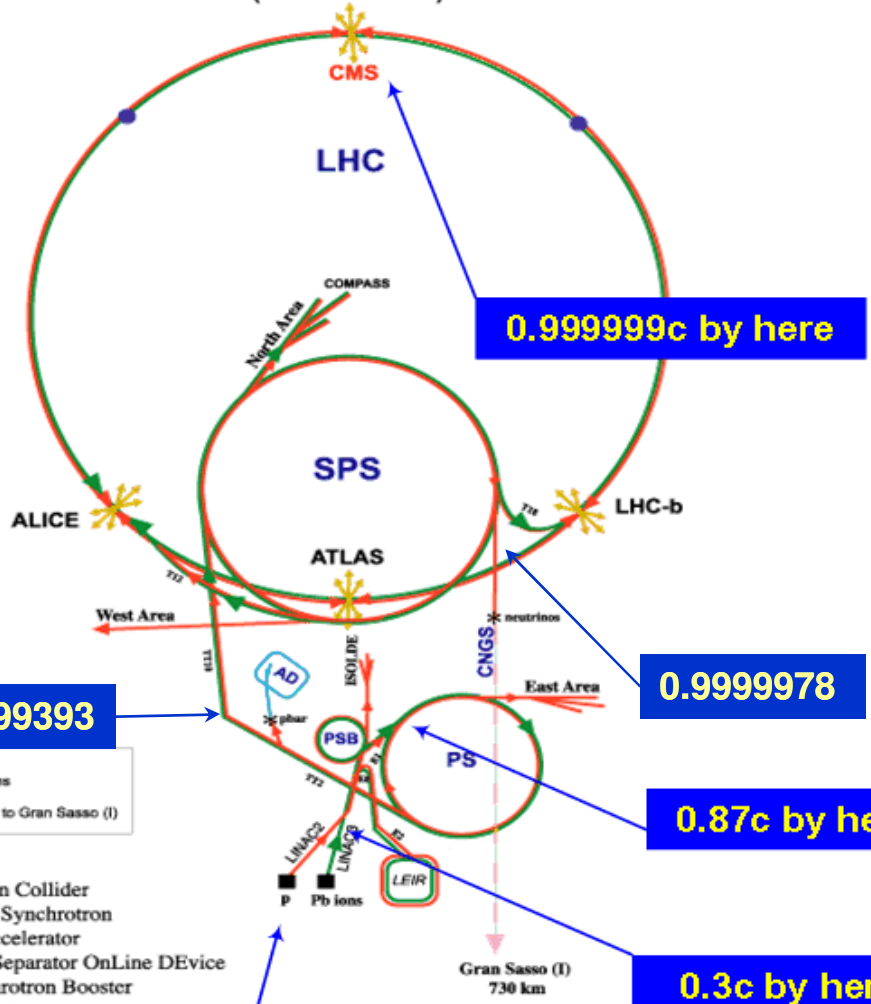


700 MJ zdysypowane w czasie 88  $\mu$ s

$$700 \cdot 10^6 / 88 \cdot 10^{-6} \cong 8 \text{ TW}$$

Moc wszystkich elektrowni na świecie  
 $\cong 3.8 \text{ TW}$

# CERN Accelerators (not to scale)



**0.999393**

**0.999999c by here**

**0.9999978**

**0.87c by here**

**0.3c by here**

**Start the protons out here**

- protons
- antiprotons
- ions
- neutrinos to Gran Sasso (I)

LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

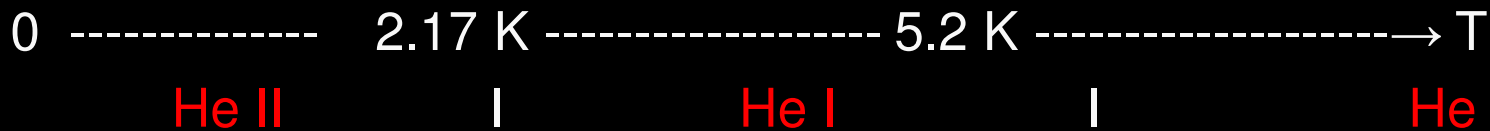
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02/09/96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, SL Div., and  
 D. Manguerra, PS Div. CERN, 23/05/01

# Chłodzenie nadciekłym helem

- ◆ **Nadciekły hel - doskonałe chłodzenie!!!**
- **Ale także:**
  - **Brak lepkości:**
    - ➔ **Penetracja szczelin, problemy szczelności spoin!!**
  - **Silny spadek ciepła właściwego materiałów dla zakresu  $T < T_\lambda$** 
    - ➔ **Wrażliwość na “quench” (przejście rezystywne)**

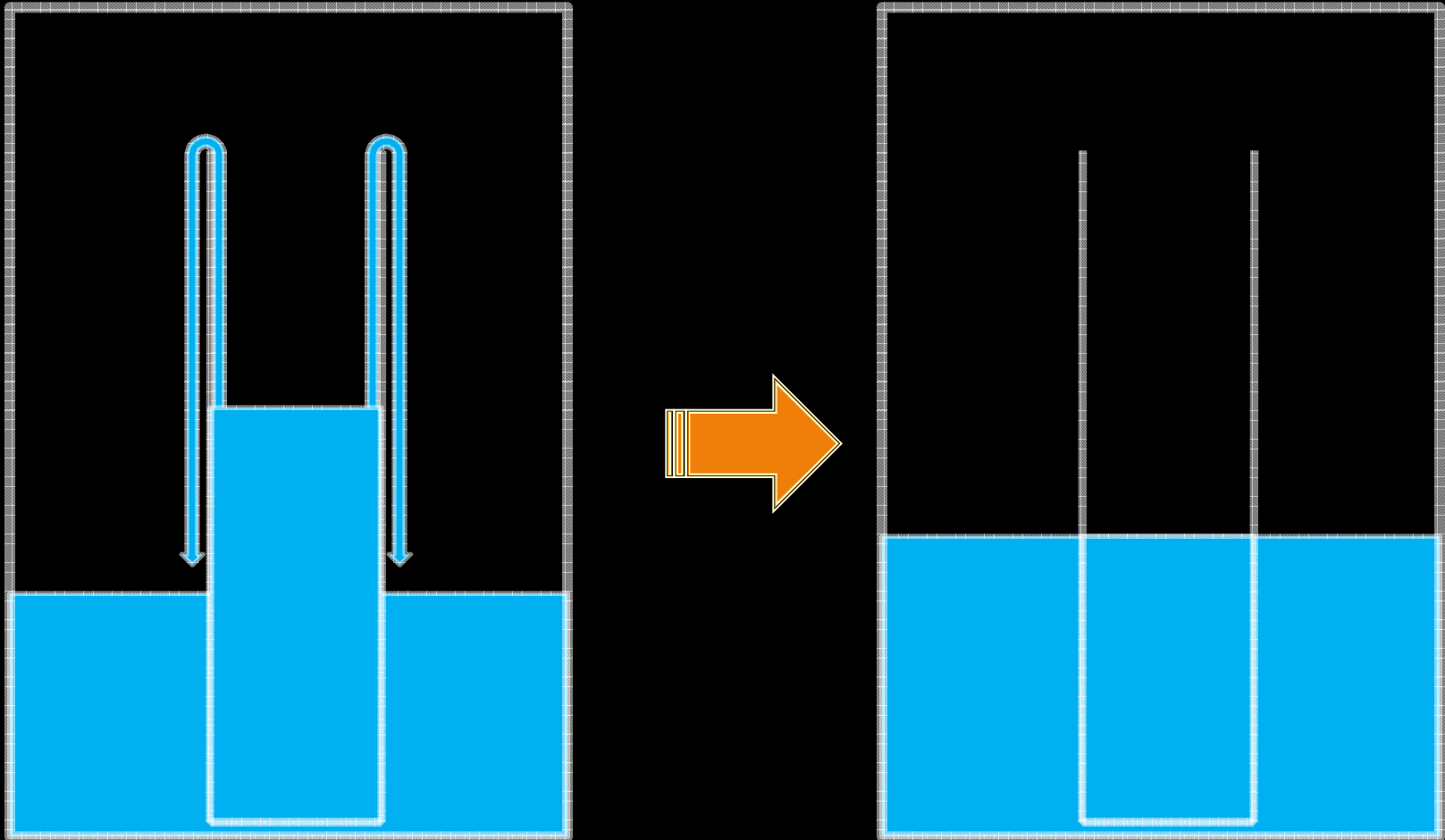
# Chłodzenie nadpłynnym helem

- ◆ Zwykły hel gazowy to atomy izotopu  ${}^4\text{He}$ . Przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym  ${}^4\text{He}$  skrapla się w  $T = 4.22\text{ K}$ . Przy obniżeniu ciśnienia do 50 mbar  $T < 2.17\text{ K}$  ( $T_\lambda = 2.17\text{ K}$  punkt  $\lambda$ ) zachodzi dramatyczna zmiana jego właściwości

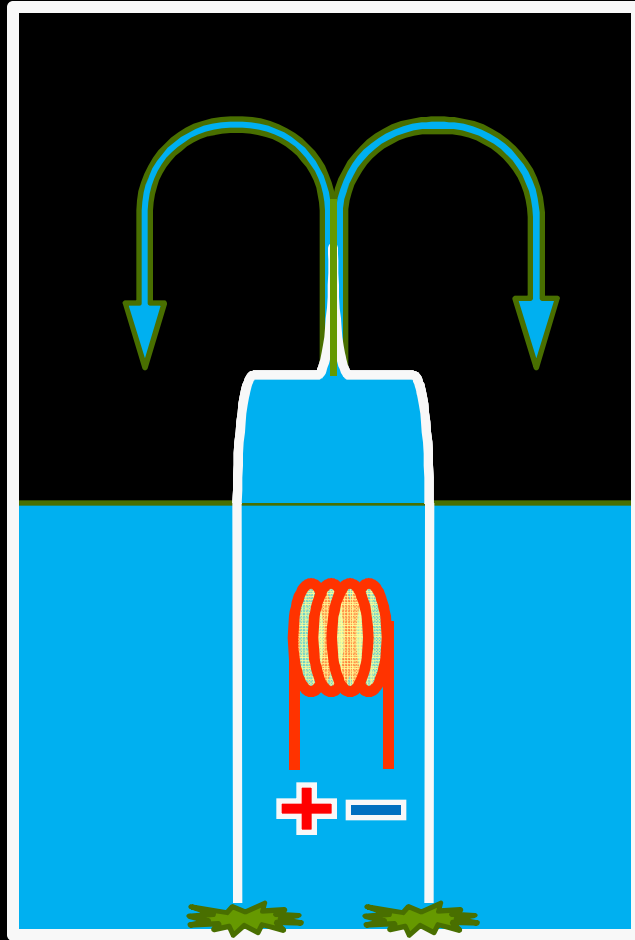


- Najbardziej niezwykłą zdolnością nadpłynnego helu jest to, że ciepło może w nim płynąć bez występowania gradientu temperatury
- Nadpłynność jest zjawiskiem “nadprzewodnictwa” ciepła

# Nadpłynność – efekt kapilarny



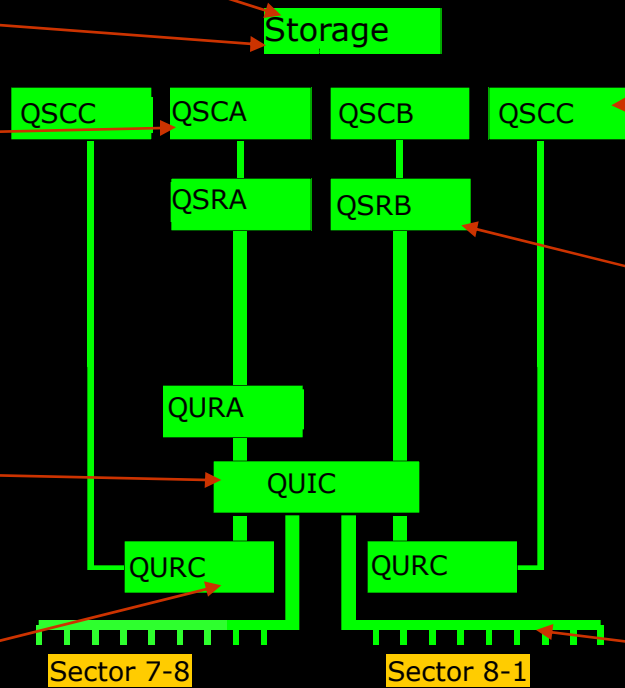
# Nadpłynność – efekt fontannowy



# Z historii badań helu

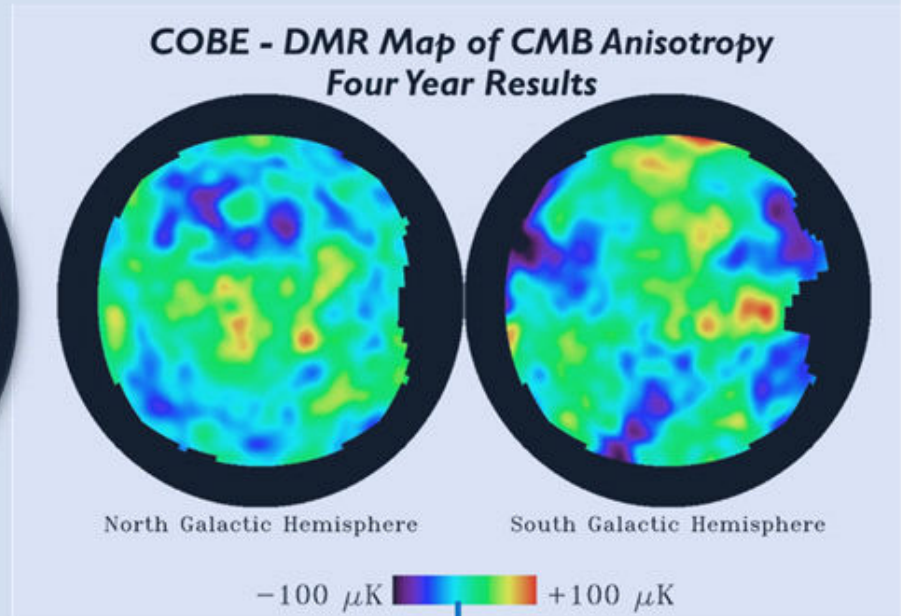
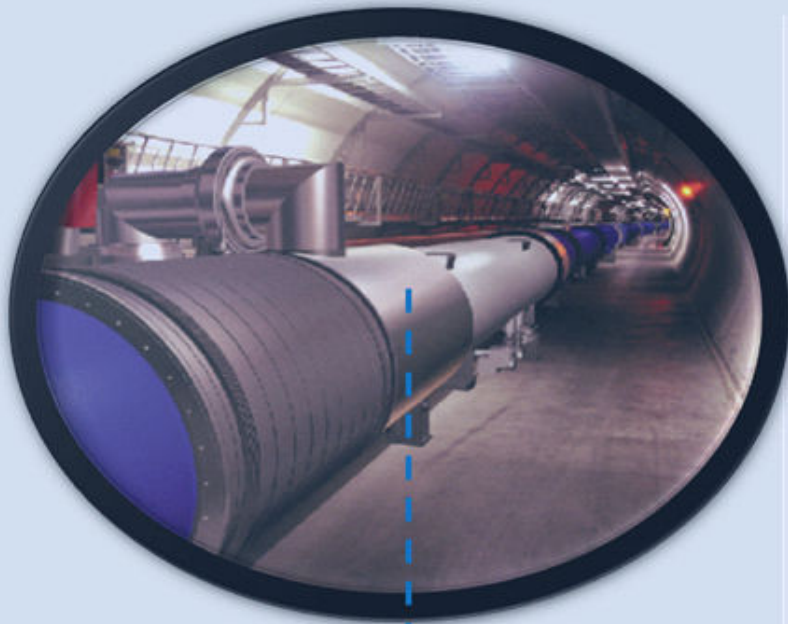
- ◆ Skroplenie helu (1908) – H. Kamerling-Onnes, Nagroda Nobla 1913,
- ◆ Odkrycie nadpłynności  $^4\text{He}$  (1937) – P. Kapica, Nagroda Nobla 1978,
- ◆ Teoria nadpłynności – L. Landau, Nobel 1962,
- ◆ Odkrycie nadciekłości  $^3\text{He}$  (1972) – Lee, Richardson, Osheroff, Nagroda Nobla 1996,
- ◆ Teoria nadpłynności  $^3\text{He}$  (1970) – Leggett, Nagroda Nobla 2003.

# Kriogenika LHC





# LHC - najzimniejsza część wszechświata

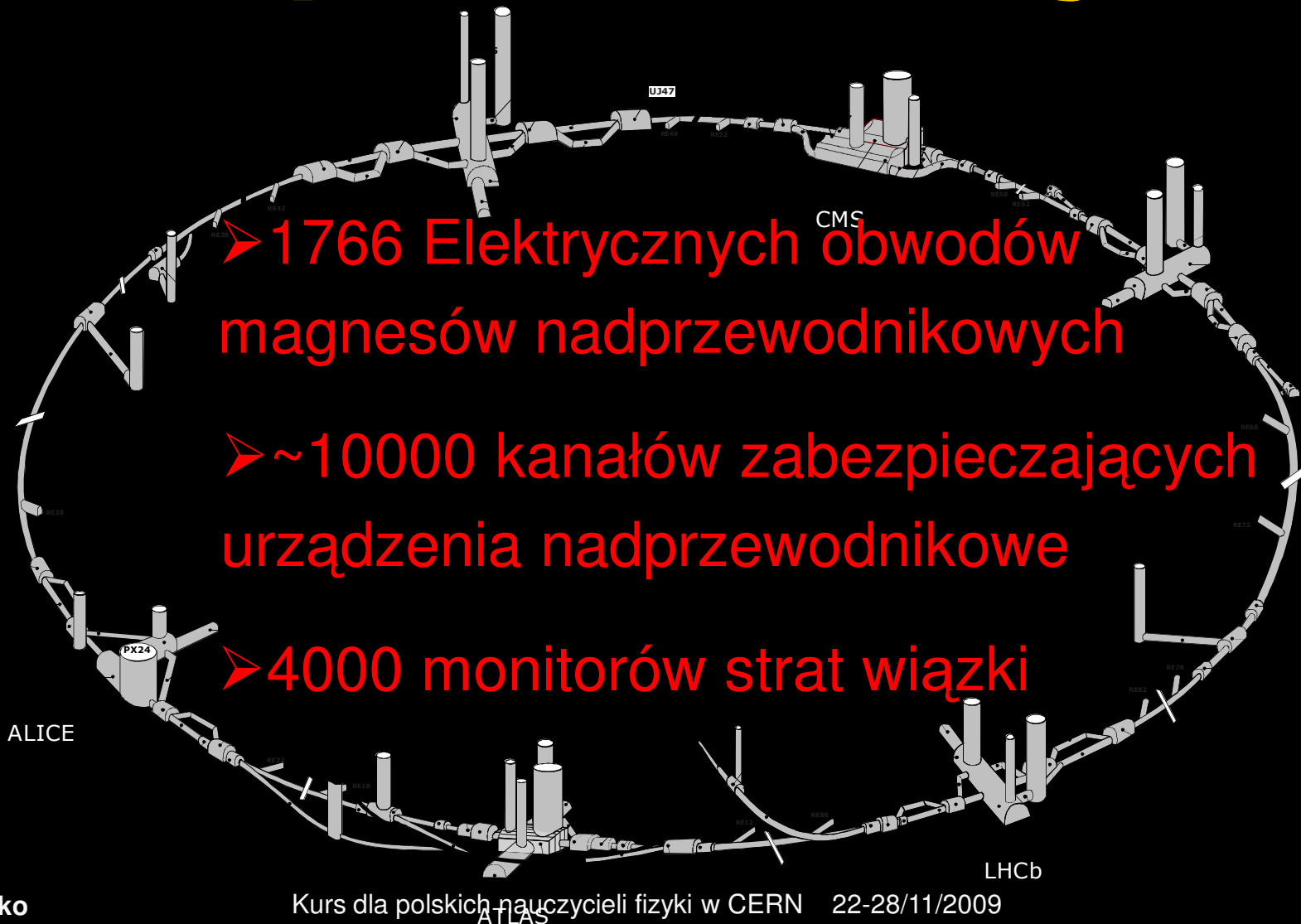


1.9 K

2.728 K

T

# Protekcja urządzeń nadprzewodnikowych

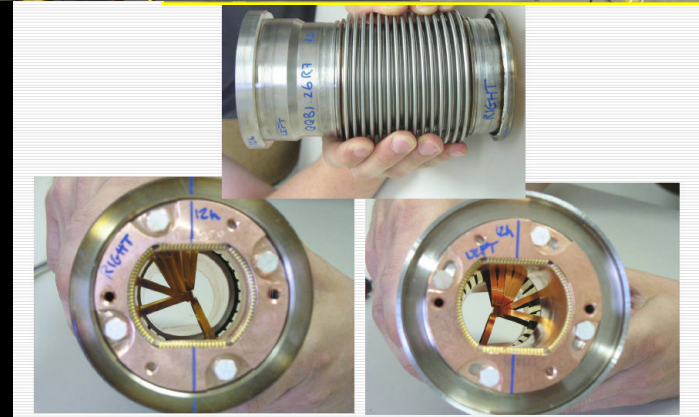
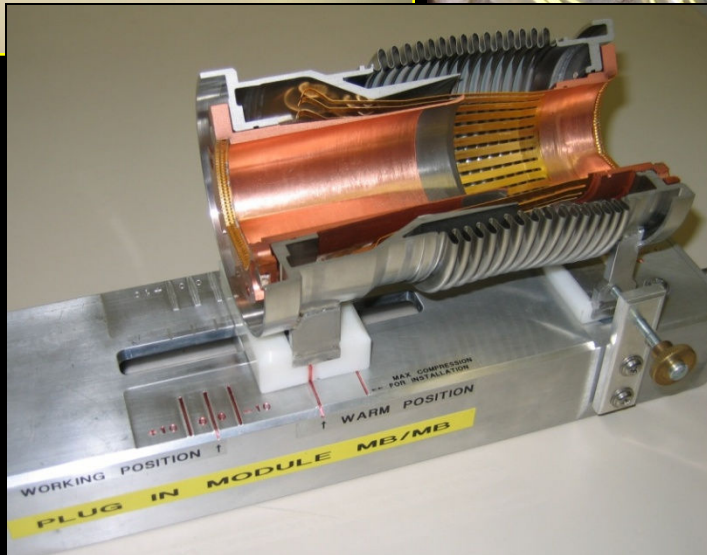


# Uruchamianie LHC

## 10/09/2008



# Czy zawsze wszystko jest tak jak tego chcielibyśmy? Not really....

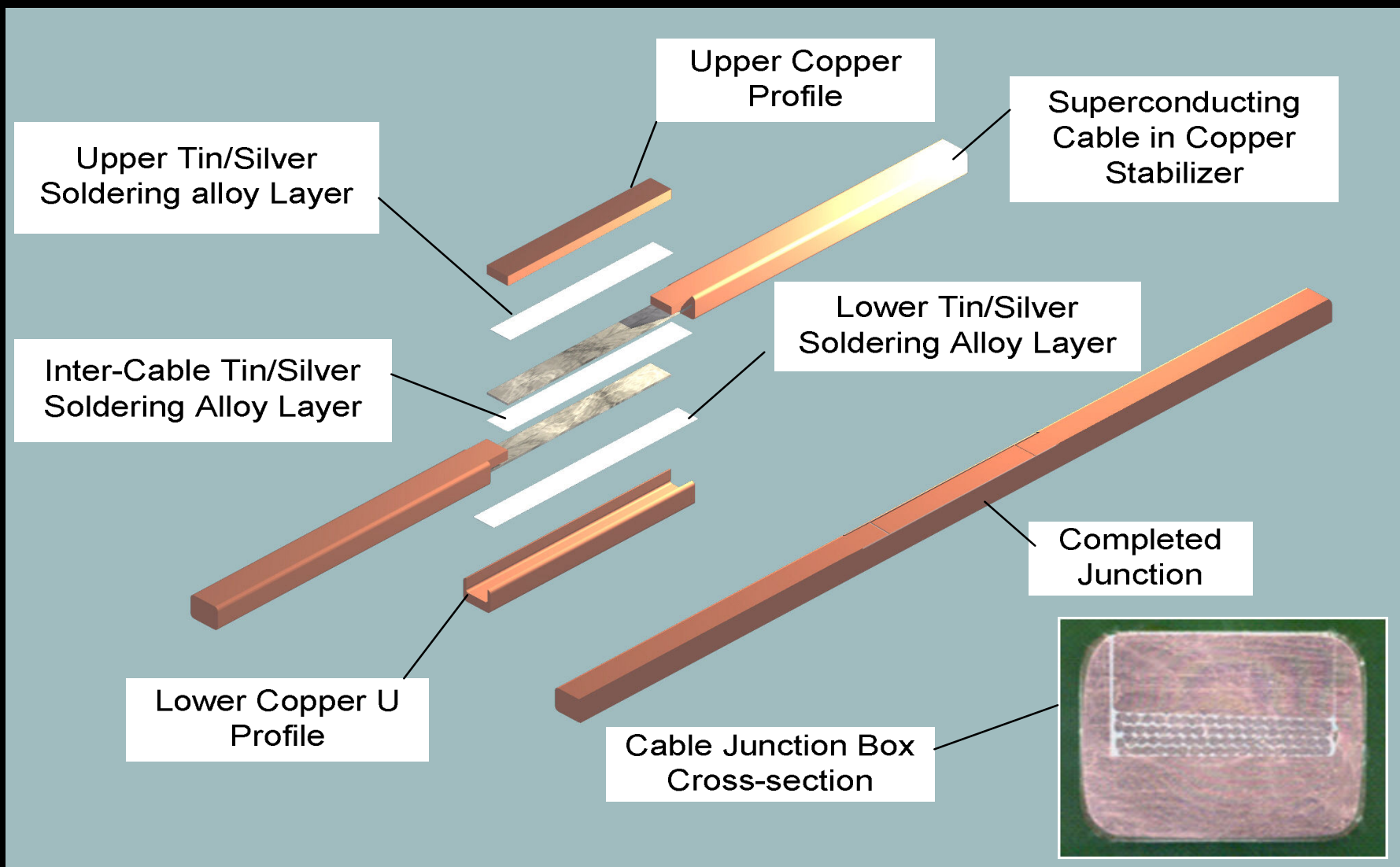


# 19/09 2008

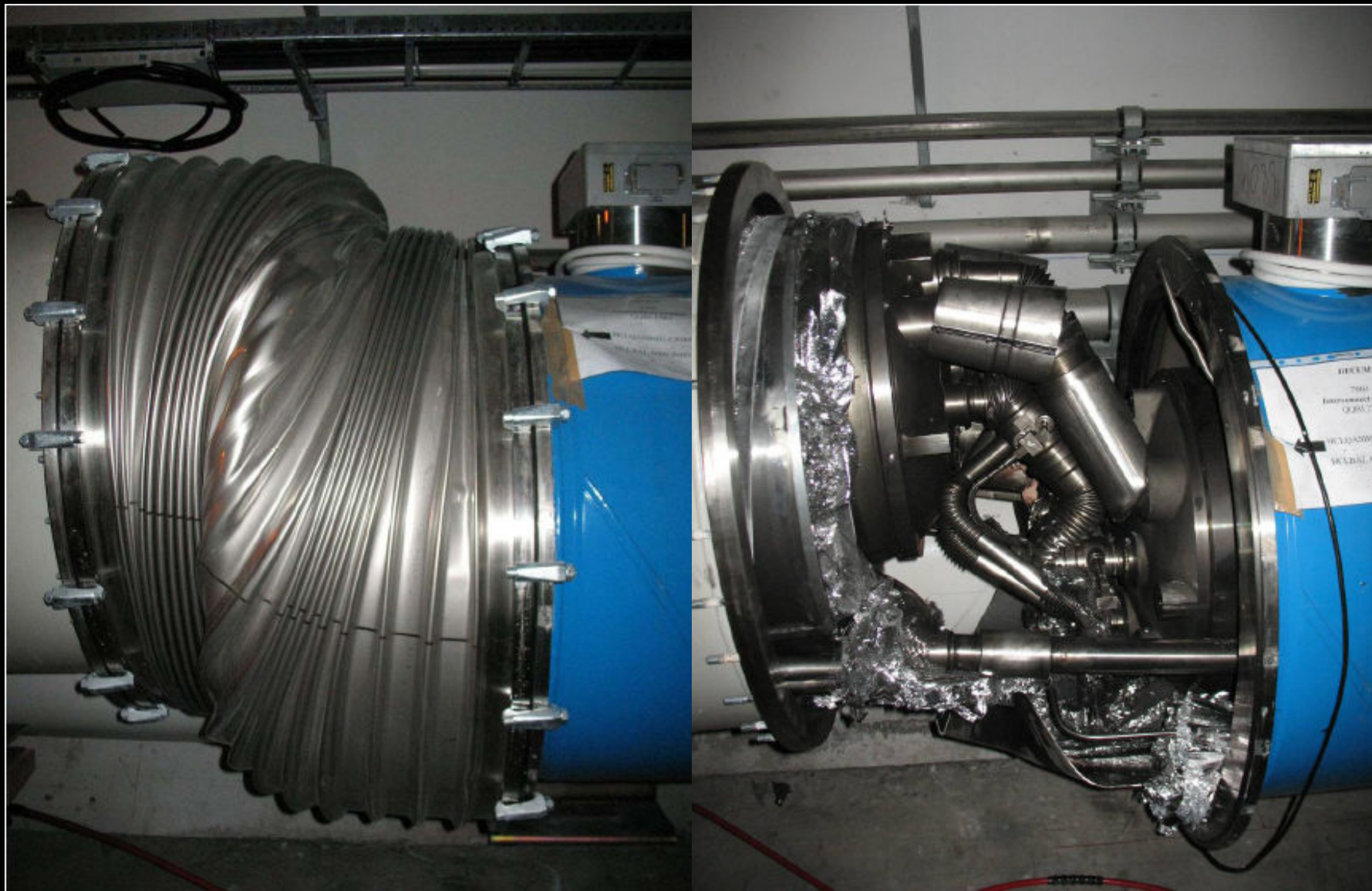
## ...poważna awaria



# Wystarczyło, że wśród 10000 połączeń 13kA jedno było wadliwe



# Co potrafi zrobić duże ciśnienie!!!

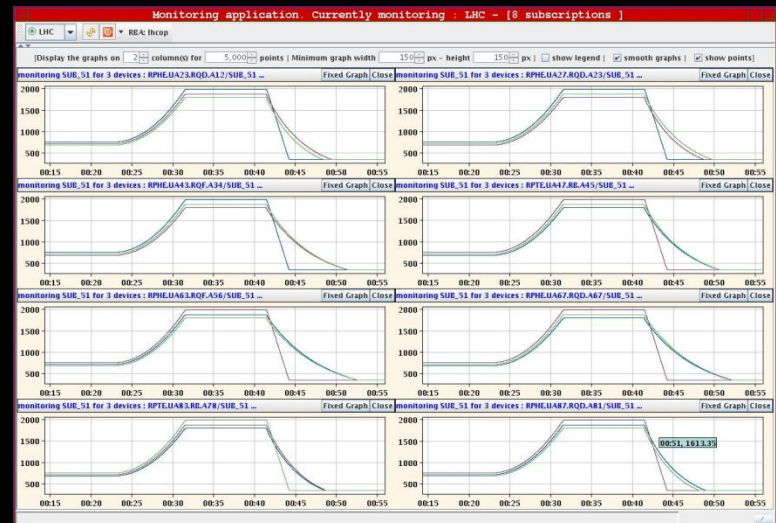
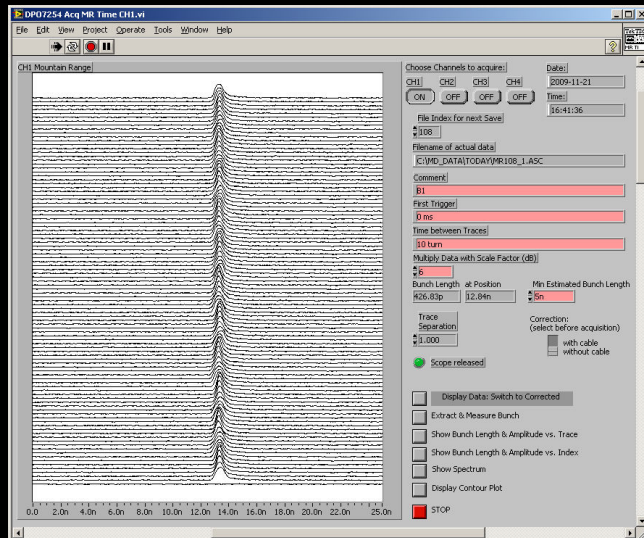
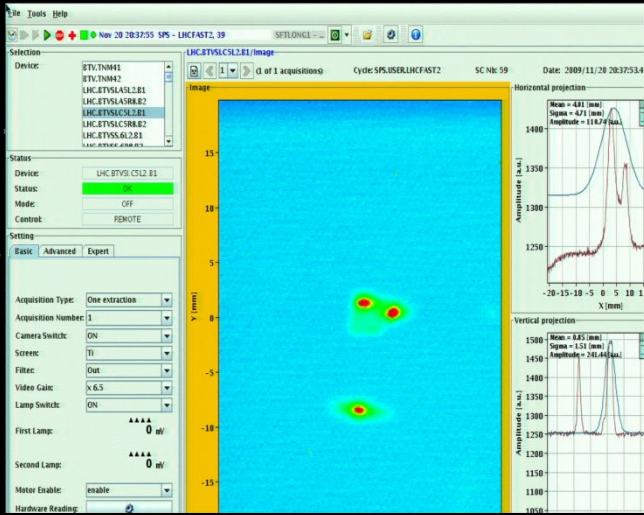


# Czy zawsze wszystko jest tak jak tego chcielibyśmy?

- W projekcie takim jak LHC, przy jego bezprecedensowej
  - skali
  - złożoności
  - unikatowości
  - technologicznym nowatorstwie
- Problemy techniczne musza wystąpić
- Ważne jest by te problemy zidentyfikować, zrozumieć i rozwiązać
- Przyczyny ostatniej awarii zostały wyjaśnione i zakończył się proces naprawy,
- Ponowne uruchomienie LHC już się rozpoczęło, lecz potrwa jeszcze kilka miesięcy



# Ponowne uruchamianie LHC 20-23/11/2008



# Podsumowanie

- ◆ Badania naukowe, a w szczególności badania w dziedzinie fizyki eksperymentalnej, są ściśle sprzężone z rozwojem techniki i tzw. wysokich technologii
- ◆ LHC jest największym i najbardziej złożonym urządzeniem badawczym jakie kiedykolwiek zostało wymyślone i skonstruowane
- ◆ Rozwój wysokich technologii, wymaganych w większości badań fizycznych, umożliwia odkrywanie i zrozumienie nowych zjawisk, co w efekcie prowadzi do dalszego rozwoju, coraz to nowszych technologii
- ◆ Wiele z opracowanych nowych technologii znajdzie późniejsze zastosowania zarówno w przemyśle, jak i w życiu codziennym
- ◆ Należy pamiętać, że badania naukowe w dzisiejszych laboratoriach fizycznych to technika jutra

# Dziękuję za uwagę

A ja najbardziej lubię  
akcelerator van de  
Graaffa...

