



# I MAGNETI SUPERCONDUTTORI PER HI-LUMI E PER FCC

STEFANIA FARINON

---

A NOME DEI GRUPPI INFN DI SUPERCONDUTTIVITÀ DI GENOVA E MILANO





# Il team di collaborazione Sezione di Genova – LASA Milano

- ● ● ● Le sezioni di Milano e Genova dell'INFN hanno un'esperienza di quasi 40 anni nella progettazione di magneti superconduttori.
- ● ● ● Collaborano strettamente solo dai primi anni 2000, con la progettazione, costruzione e test di un dipolo curvo pulsato per il SIS300 del GSI (sviluppato insieme anche al G.C. di Salerno).
- ● ● ● nel 2014 la partecipazione congiunta alla call di CN5 MAGIX ha permesso all'INFN di contribuire significativamente ad *Hi-Lumi*, l'upgrade ad alta luminosità di LHC.
- ● ● ● Più recentemente, sulla scia dei risultati del progetto Europeo EuroCircol, collaboriamo al programma *High Field Magnet*, per lo sviluppo dei dipoli ad alto campo in Nb<sub>3</sub>Sn per FCC-hh.
- ● ● ● Altri programmi su cui siamo impegnati:
  - ● ● SIG – Superconducting Ion Gantry
  - ● ● HITRIplus – Heavy Ion Therapy Research Integration
  - ● ● I.FAST – Innovation Fostering in Accelerator Science and Technology

## ● ● ● Milano LASA

- ● Lucio Rossi
- ● Massimo Sorbi
- ● Marco Statera
- ● Marco Prioli
- ● Ernesto De Matteis
- ● Samuele Mariotto
- ● Riccardo Valente (PhD)
- ● Stefano Sorti (AdR)
- ● Magnus Dam (Bors.)

## ● ● ● Sezione di Genova

- ● Stefania Farinon
- ● Riccardo Musenich
- ● Andrea Bersani
- ● Barbara Caiffi
- ● Alessandra Pampaloni
- ● Filippo Levi (PhD)
- ● Sergio Burioli (PhD)
- ● Andrea Gagno (PhD)
- ● Michela Bracco (AdR)

## ● ● ● Collaborazione col CERN





# UNO SGUARDO AL PASSATO



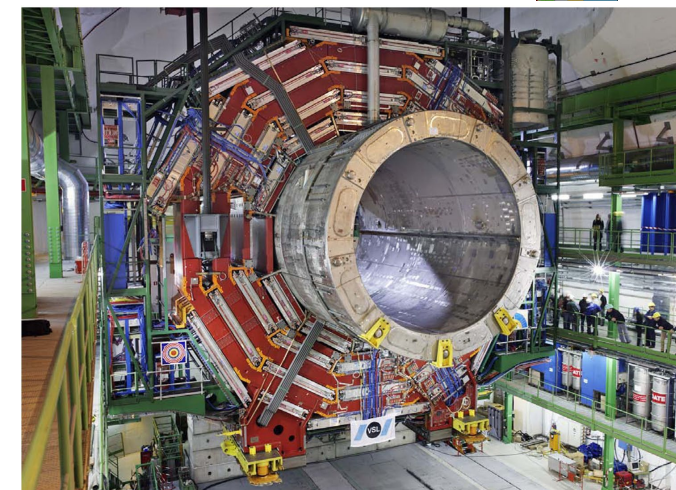


# Principali magneti SC progettati e realizzati


● ● ● ATLAS coils 

● ● ● 1<sup>st</sup> 15 m long LHC dipole 

● ● ● CMS solenoid 

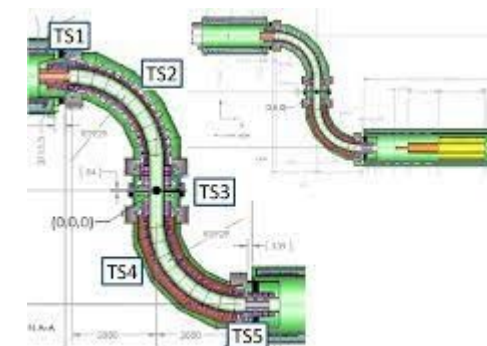
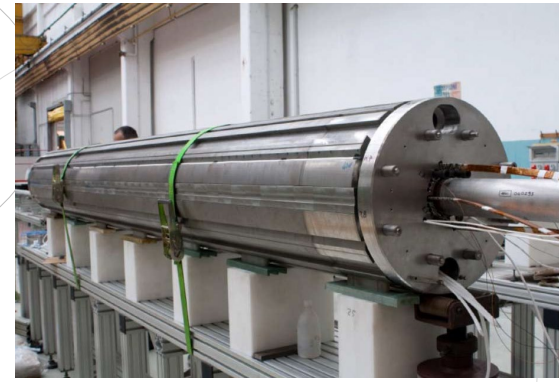


● ● ● ciclotrone LNS

● ● ● BaBar solenoid 

● ● ● SIS 300 GSI dipole 

● ● ● Mu2e Transport Solenoid model module 



Giornata Acceleratori, 7-8 Aprile, Milano

Stefania Farinon

Fig. 1. Left: cross-section of the Transport Solenoid showing

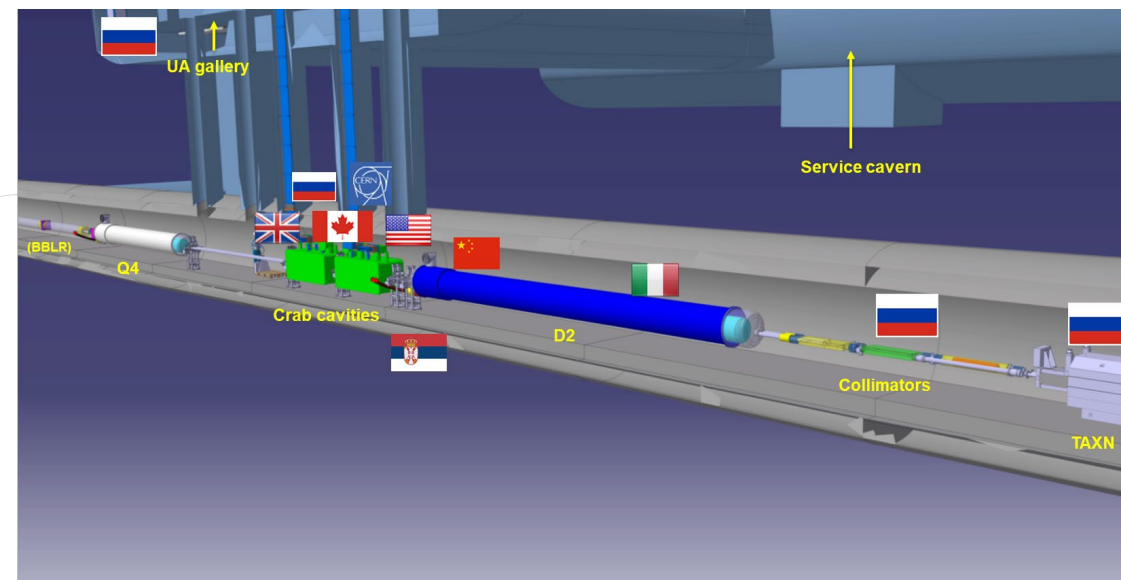
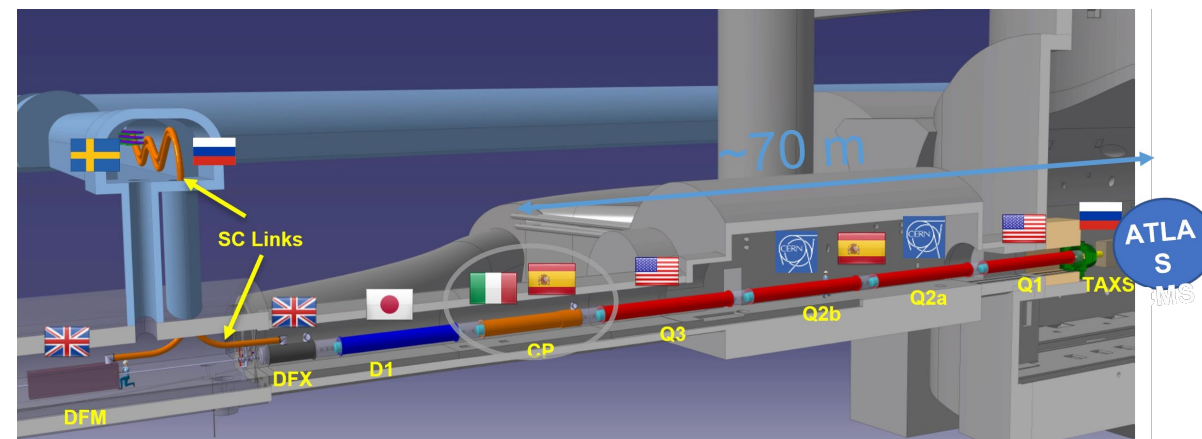
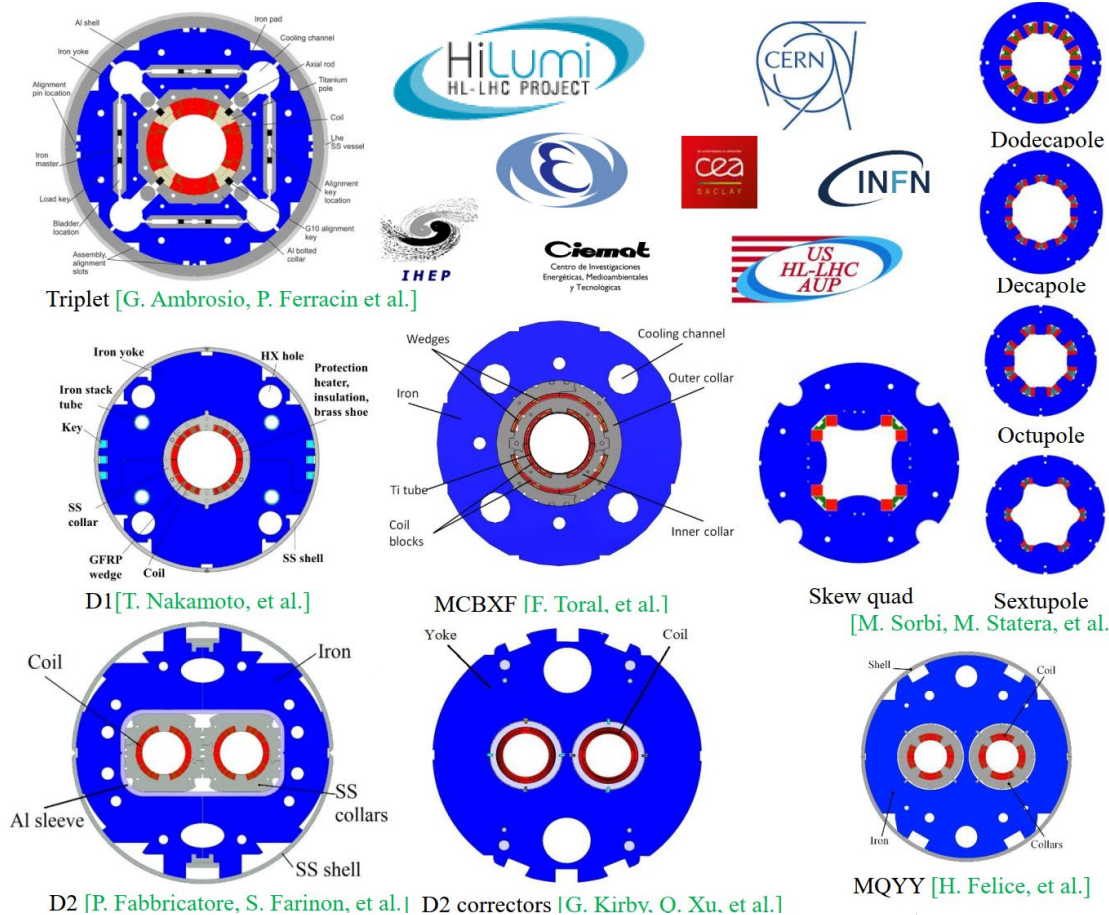


# IL PRESENTE: HI-LUMI





# Hi-Lumi Magnet Zoo





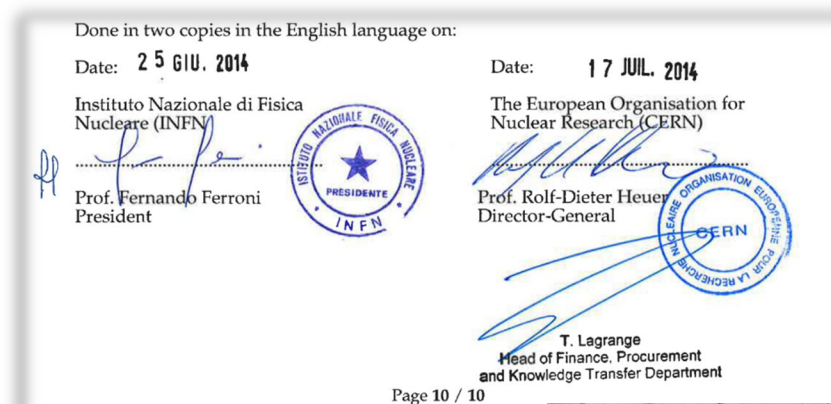
# Contributo INFN ai magneti di Hi-Lumi



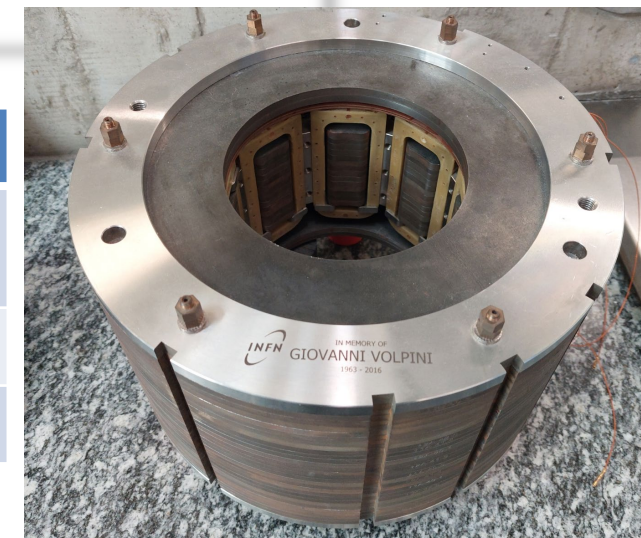
● ● ● ● Nel 2014 la CN5 approva la Call MAGIX, per lo sviluppo di tecnologie superconduttive per applicazioni ai futuri magneti per acceleratori.

● ● ● ● L'impegno INFN viene supportato dal CERN con l'accordo KE2291/TE/HL-LHC per "R&D Activities Relating to High-Luminosity LHC (HL-LHC) Superconducting Magnets".

MAGIX		
WP1	CORRAL (Milano LASA)	Design, construction and test of the five prototypes of the corrector magnets for the HL interaction regions of HiLUMI
WP2	PADS (Genova)	2D & 3D engineering design of the D2 magnets
WP3	SCOW-2G (Napoli)	Development of HTS coil for application to detectors and accelerators
WP4	SAFFO (Ge-Mi-Na)	Low-loss SC development for application to AC magnets



valore collaborazione MAGIX	
valore finanziario totale (inclusi costi del personale)	1.30 M€
FTE/y	9
Contributo CERN	0.53 M€



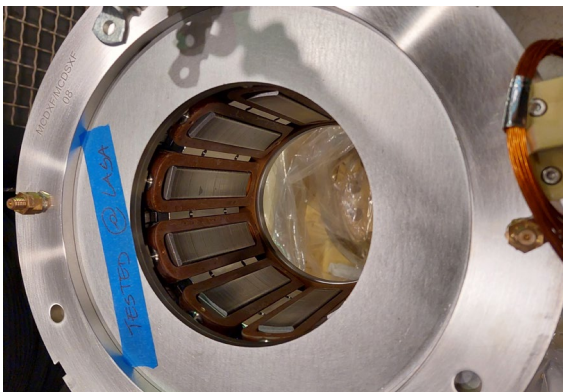


# I correttori di ordine superiore per Hi-Lumi (INFN-LASA)

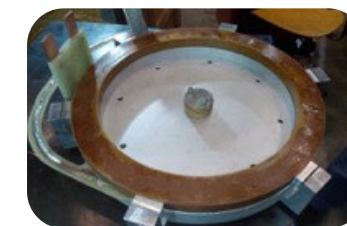
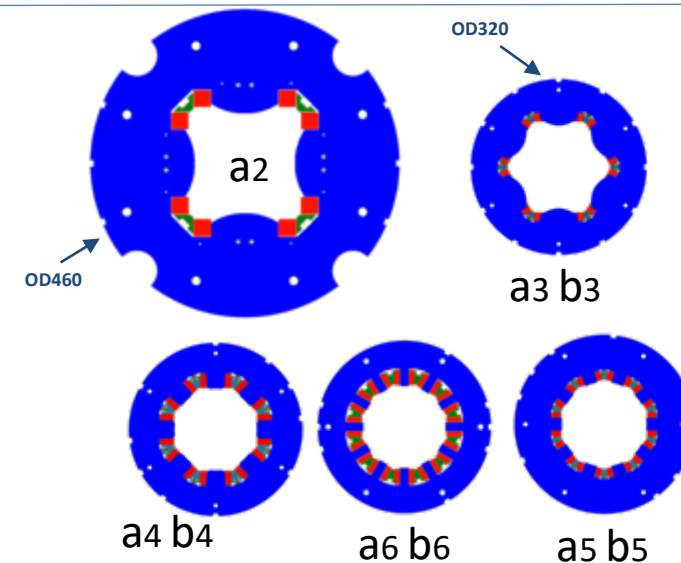
- I correttori di ordine superiore compensano gli errori di qualità del campo dei nuovi quadrupoli di focalizzazione di HiLumi.
- Saranno i primi magneti superferrici ad essere installati in LHC.
- Sono di 5 tipologie diverse, per ognuna delle quali è stato progettato, costruito e testato un prototipo.
- La serie di 54 magneti è stata affidata all'azienda Saes Rial Vacuum

valore collaborazione HO correctors	protos (MAGIX)	serie
valore finanziario totale (inclusi costi del personale)	0.91 M€	5.86 M€
FTE/y	5	8
Contributo totale CERN di cui di materiali	0.45 M€	2.88 M€ 0.10 M€

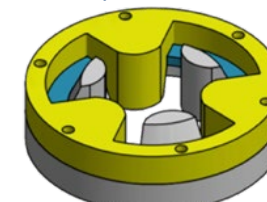
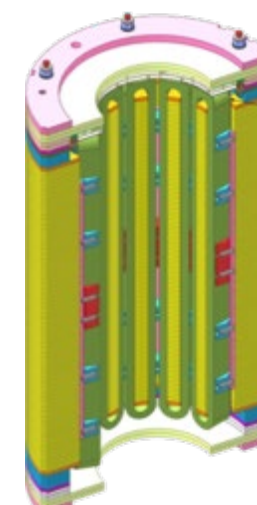
Gio



Courtesy of Marco Statera



MgB<sub>2</sub> demonstrator accelerator magnet Sextupole round coil

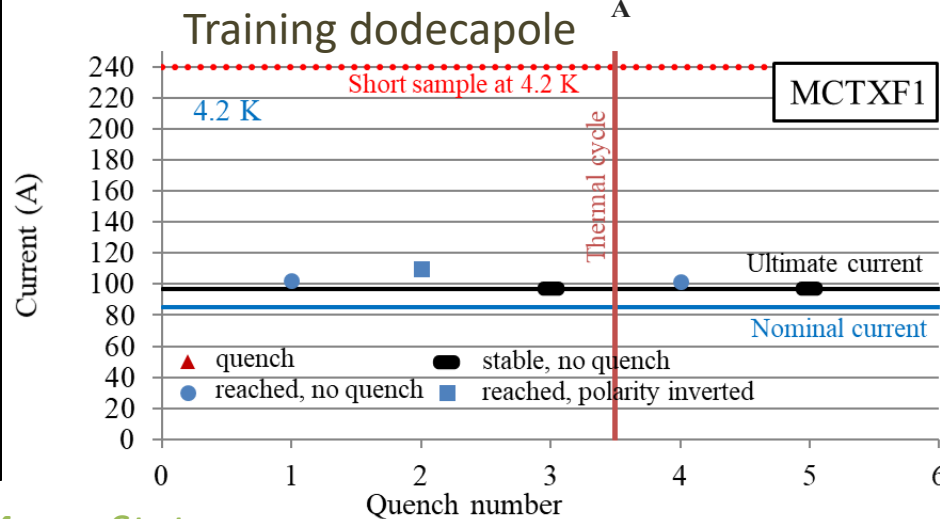
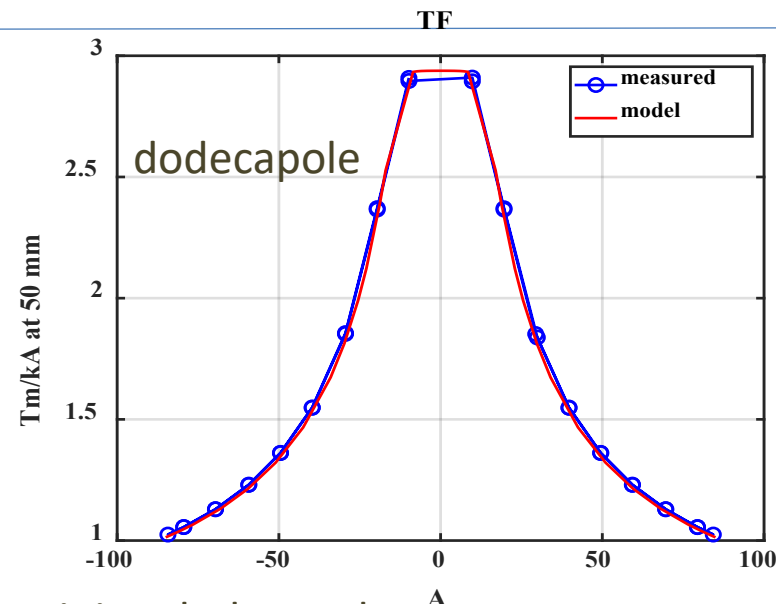
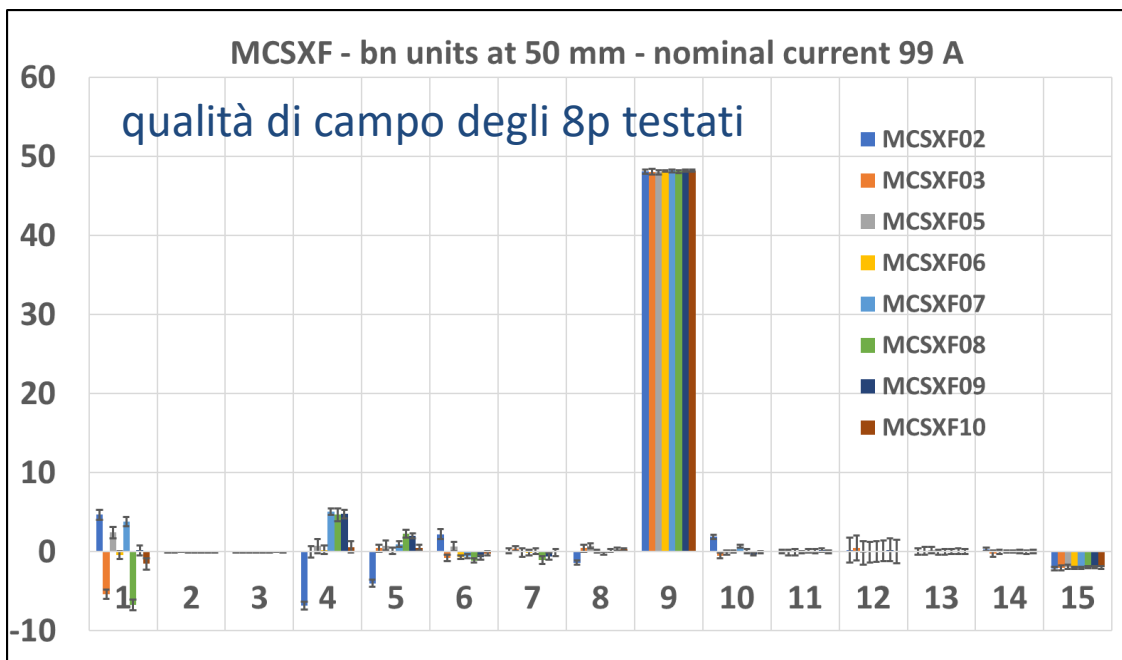






# I correttori di ordine superiore: test dei magneti

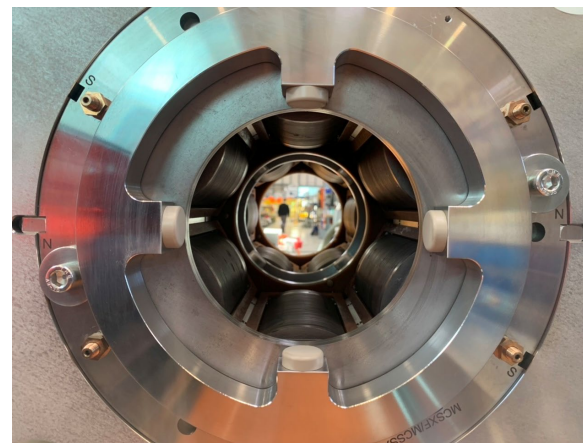
- ● ● ● I magneti vengono tutti testati al LASA:
- ● ● 4 magneti raffreddati per ogni test (2 cicli termici)
- ● ● alimentati individualmente
- ● ● caratterizzazione completa: training, quench memory, qualità del campo e funzione di trasferimento





# I correttori di ordine superiore: stato dei test

- ● ● 54 magneti prodotti
- ● ● 2/3 dei magneti testati
- ● ● ad oggi 30 magneti consegnati al CERN
- ● ● consegna al CERN di tutti i magneti prevista per Sett. 2022



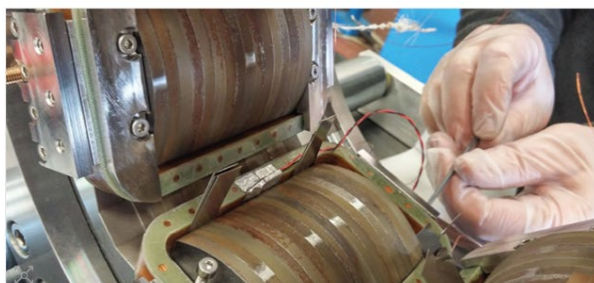
C Physics Technology Community In focus Magazine Jobs | | |

ACCELERATORS | FEATURE

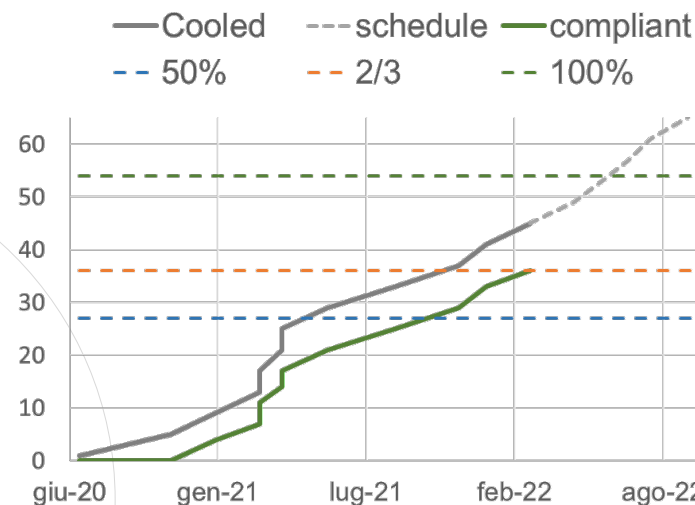
## Super-magnets at work

15 April 2016

The first components for the HL-LHC are successfully passing the tests.



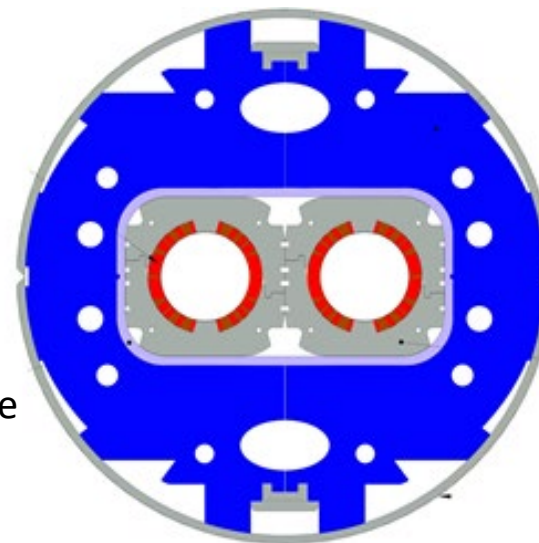
An expert in the LASA Laboratory (INFN Milan, Italy) works on assembling the first sextupole corrector of the HL-LHC. Image credit: LASA Laboratory.





# Il dipolo superconduttore D2 per Hi-Lumi (INFN-GE)

- ● ● ● i dipoli D2 in LHC servono per portare i fasci alla collisione
- ● ● ● I dipoli D2 di Hi-Lumi hanno maggiore apertura (105 mm) e campo magnetico (4.5 T) rispetto a quelli presenti in LHC
- ● ● ● Le principali caratteristiche sono:
  - ● ● 2 aperture di diametro 105 mm, 8010 mm di lunghezza fisica
  - ● ● campo magnetico orientato nella stessa direzione nelle due aperture
  - ● ● 35 T·m di campo integrato a 7 TeV
- ● ● ● L'agreement CERN/INFN include:
  - ● ● 1 modello corto (MBRDS1) testato al CERN in Agosto 2020
  - ● ● 1 prototipo (MBRDP1) consegnato al CERN il 21/10/2021
  - ● ● 4 magneti + 2 spare per la serie, la cui costruzione è prevista a partire da Maggio 2022
- ● ● ● I magneti sono realizzati dall'azienda ASG Superconductors



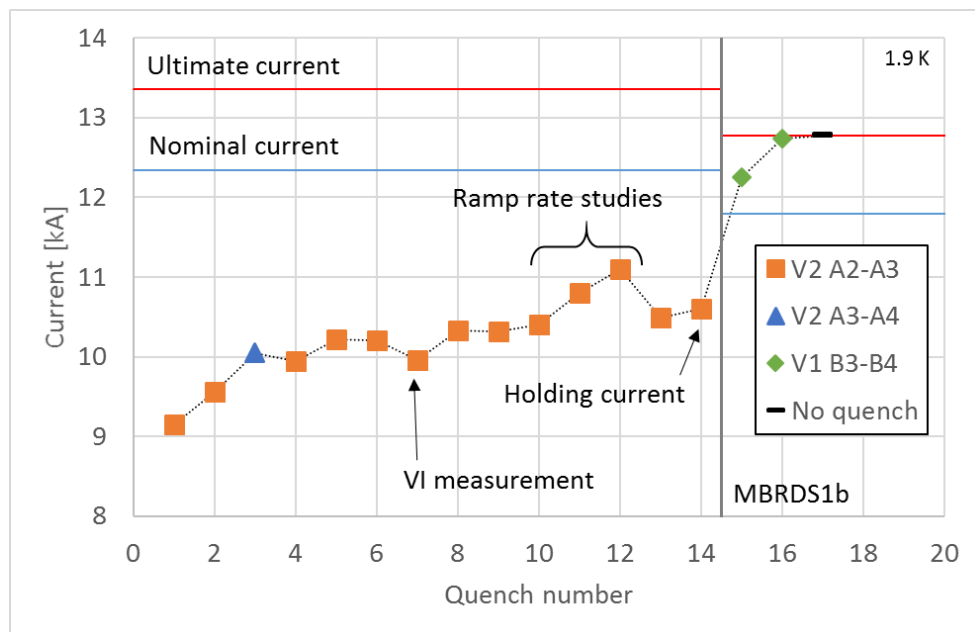
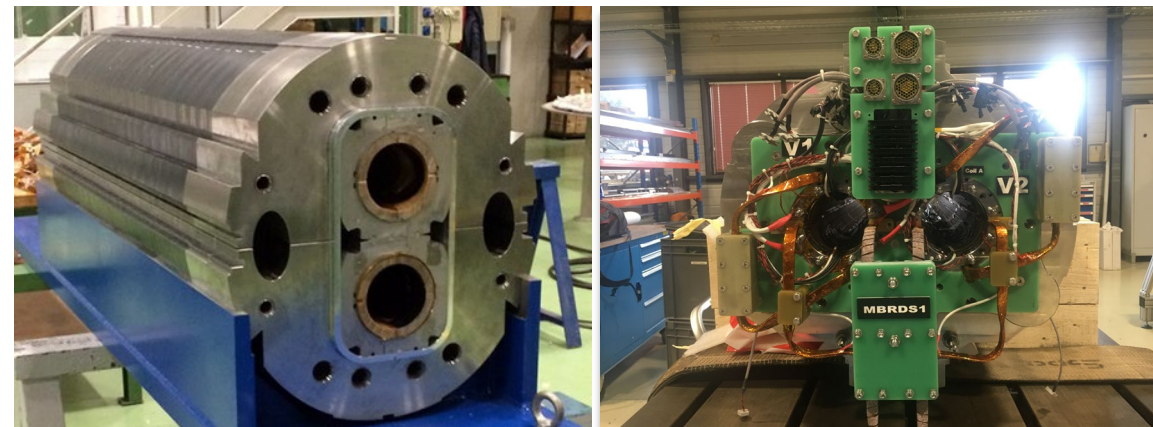
Main characteristics of the D2 dipole	
Bore magnetic field	4.5 T
Magnetic length	7.78 m
Peak field	5.26 T
Operating current	12.330 kA
Stored energy	2.26 MJ
Aperture	105 mm
Operating temperature	1.9 K
Loadline fraction	67.5%
Multipole variation due to iron saturation	<10 units

valore collaborazione D2	modello corto + proto	serie
valore finanziario totale (inclusi costi del personale)	5.85 M€	8.0 M€
FTE/y	4	4
Contributo totale CERN di cui di materiali	2.60 M€ 0.77 M€	4.0 M€ 2.0 M€

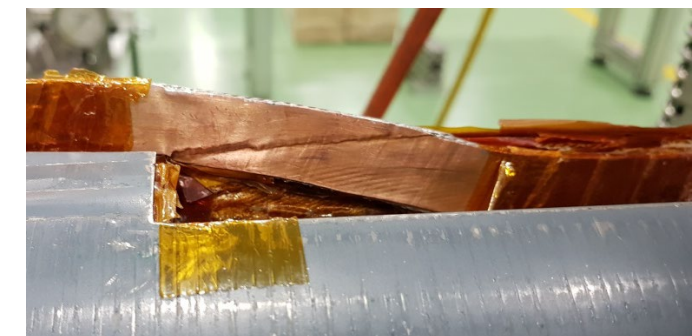
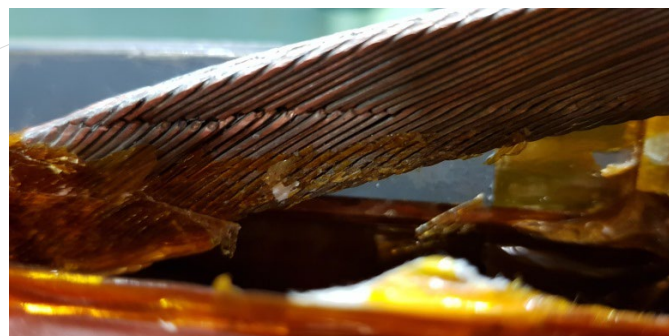


# Il dipolo superconduttore D2: il modello corto

- ● ● ● il modello corto (1.6 m) è stato consegnato al CERN il 17/1/2019
- ● ● ● il test ha rivelato criticità in una apertura, compatibili con la parziale rottura di diversi fili
- ● ● ● l'apertura problematica è stata disconnessa e il test dell'apertura residua ha dato esito positivo



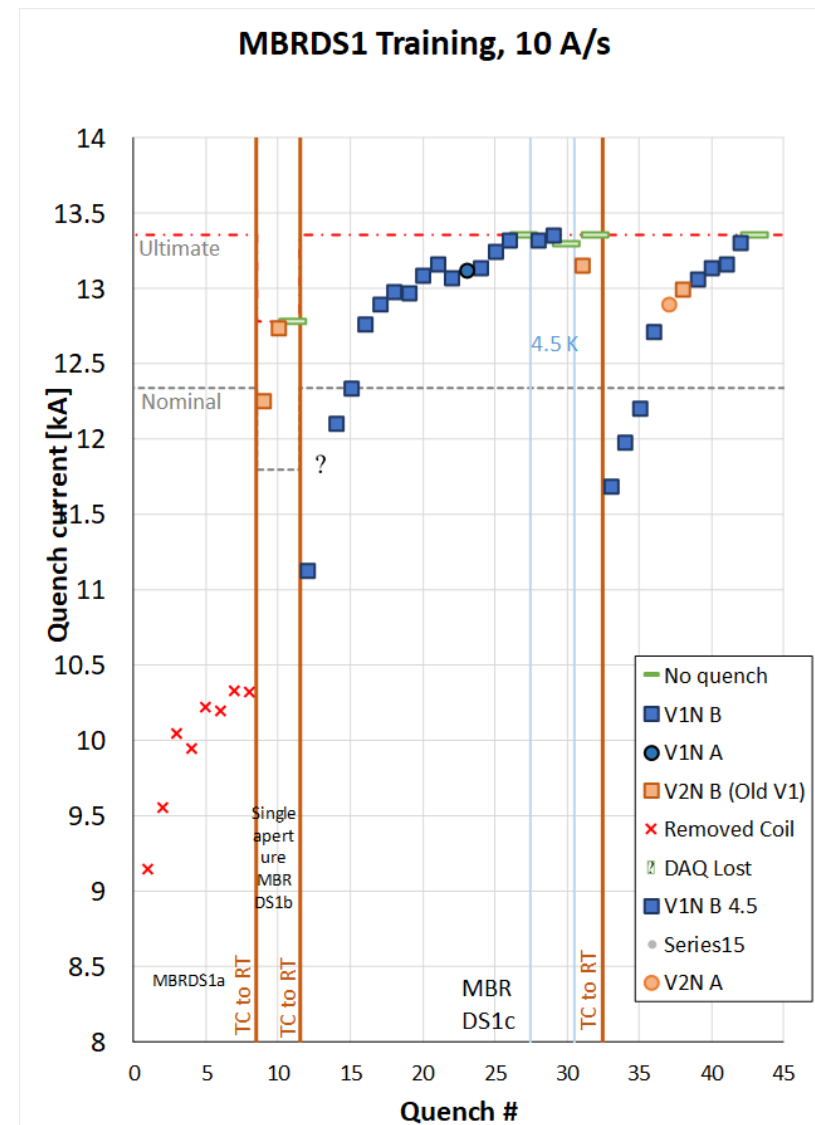
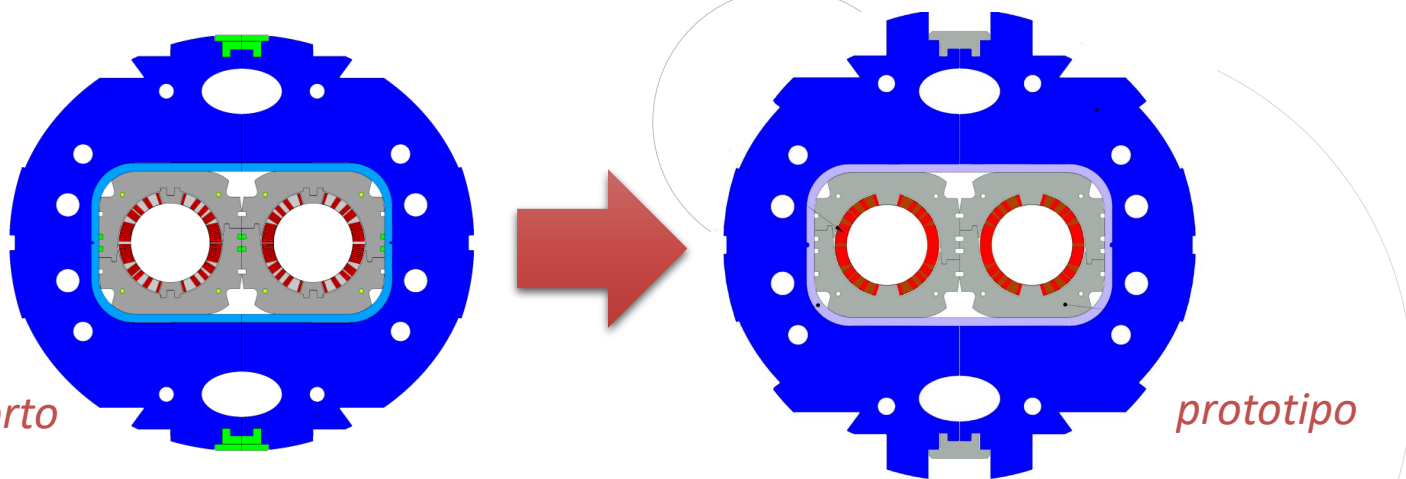
- ● ● ● ispezionando l'apertura si sono trovati 20 strand su 36 gravemente danneggiati





# Il dipolo superconduttore D2: il modello corto

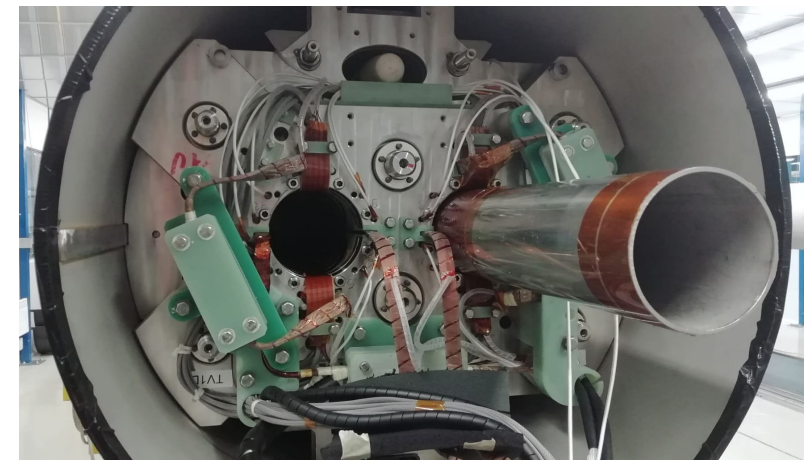
- ● ● ● la bobina danneggiata è stata sostituita e un nuovo test eseguito in Agosto 2020
- ● ● ● il test ha fornito informazioni fondamentali:
  - ● ● corrente ultimate raggiunta, anche a 4.5 K
  - ● ● perdita di memoria in una bobina di un'apertura (che aveva subito 4 collaraggi), con conseguente retraining dopo il ciclo termico
  - ● ● misure di saturazione magnetica in linea con i modelli
  - ● ● quench heaters validati
- ● ● ● complessivamente, il modello corto ha validato il design, anche se ha evidenziato la necessità di alcune modifiche





# Il dipolo superconduttore D2: il prototipo

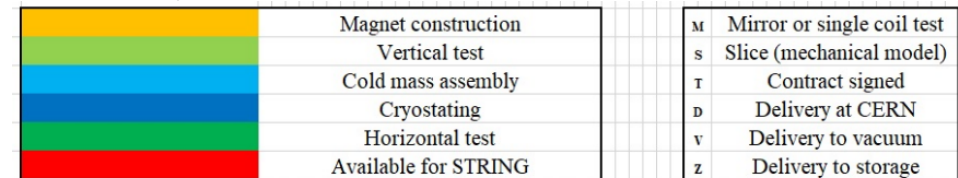
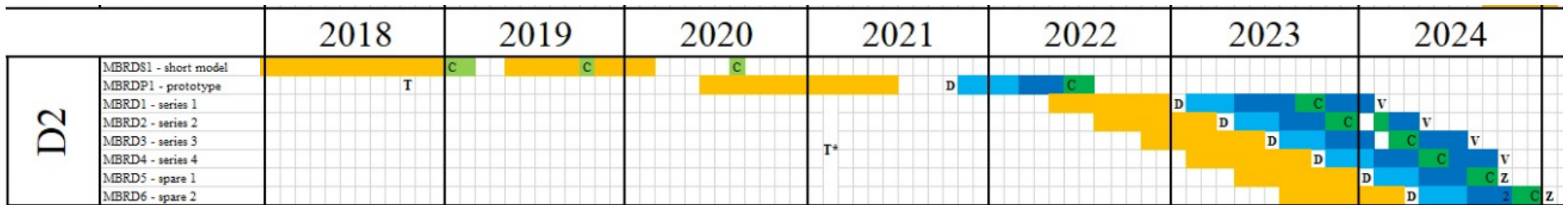
- ● ● ● il prototipo è stato consegnato al CERN il 21/10/2021
- ● ● ● si sta procedendo con l'assemblaggio della massa fredda che include anche i correttori di orbita (per una lunghezza di circa 14 m)
- ● ● ● il test è previsto per il mese di Luglio





# Il dipolo superconduttore D2: la serie

- ● ● ● La costruzione della serie partirà in Maggio/Giugno 2022 (attualmente stiamo riscontrando difficoltà con la fornitura di alcuni componenti essenziali) e sarà completata a metà del 2024. D2 non è sul cammino critico di HL-LHC.
- ● ● ● Sono previsti 6 magneti, 4 da installare nel tunnel e 2 spare
- ● ● ● Considerato che tra il prototipo e la serie siamo dovuti intervenire con alcune ulteriori modifiche, il primo magnete della serie è considerato come una pre-serie





# IL PRESENTE: FALCOND



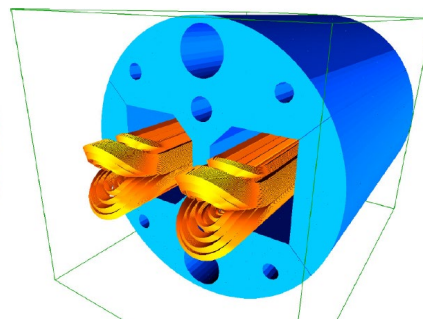
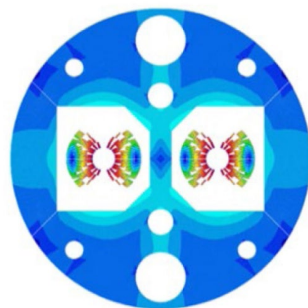




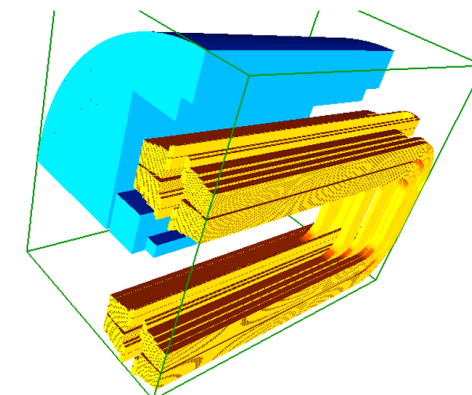
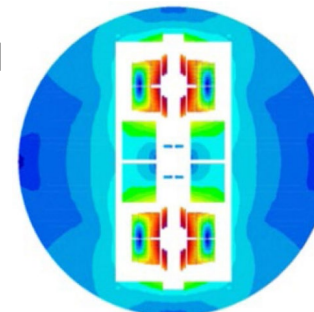
# Il Progetto Europeo EuroCirCol (2014-2019)

- ● ● ● Il progetto EuroCirCol era incentrato sulle questioni chiave di progettazione che determinano la fattibilità di un collisore di adroni da 100 TeV in un tunnel lungo 100 km
- ● ● ● il WP5, dedicato ai dipoli ad alto campo, prevedeva l'esplorazione di diverse opzioni di progettazione:

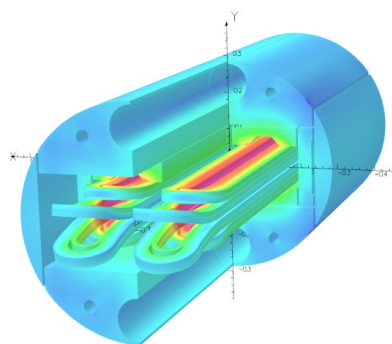
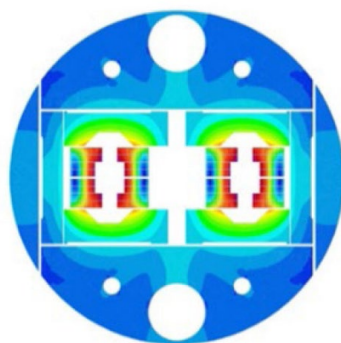
● ● ● Cosine theta



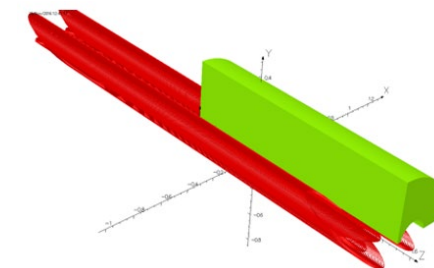
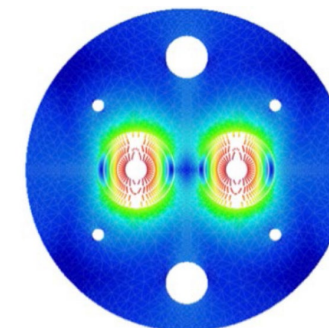
● ● ● common coil



● ● ● block coil



● ● ● CCT





# Conceptual Design Report

- ● ● ● L'opzione INFN è stata scelta come baseline per il CDR pubblicato nel 2019...
- ● ● ● ... anche se le altre configurazioni non potevano essere definitivamente scartate solo su base progettuale...

Eur. Phys. J. Special Topics 228, 755–1107 (2019)  
© The Author(s) 2019  
<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL,  
SPECIAL TOPICS

Regular Article

## FCC-hh: The Hadron Collider

Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3

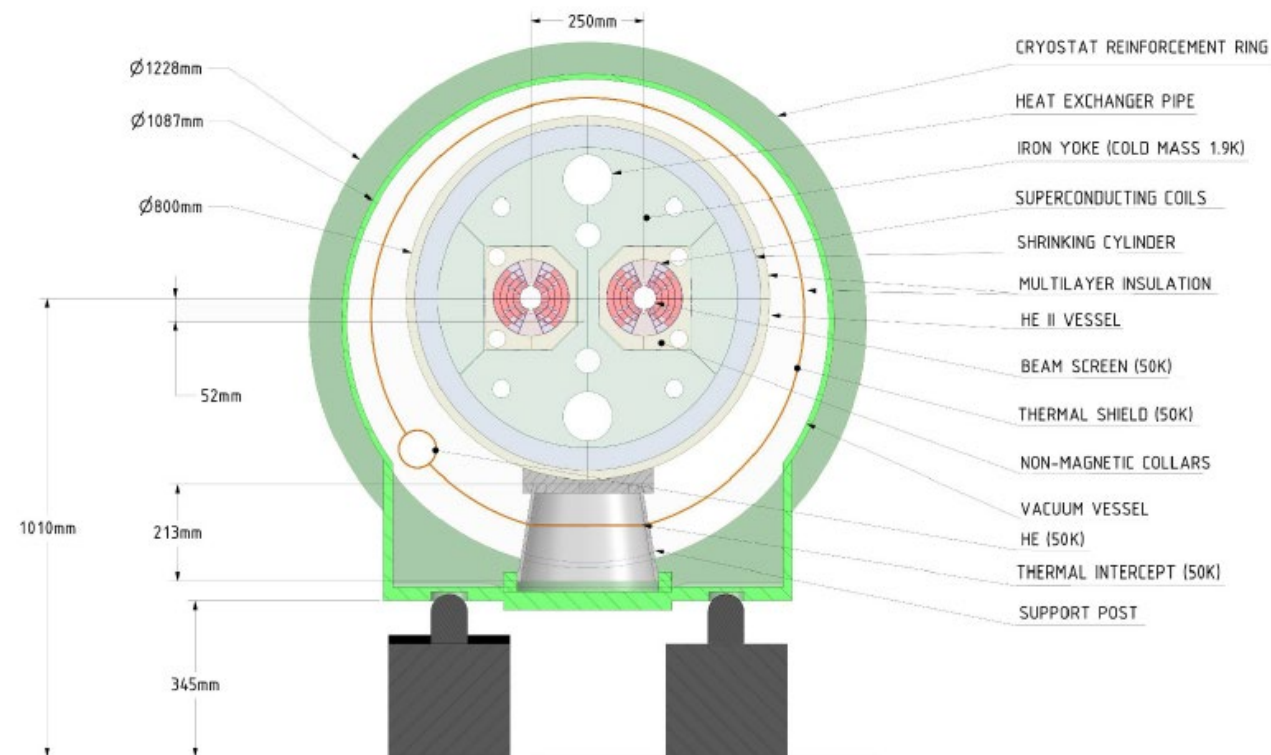
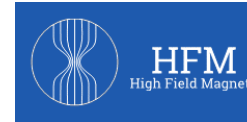


Fig. 3.1. Main dipole cross-section.



# La nascita del progetto FalconD

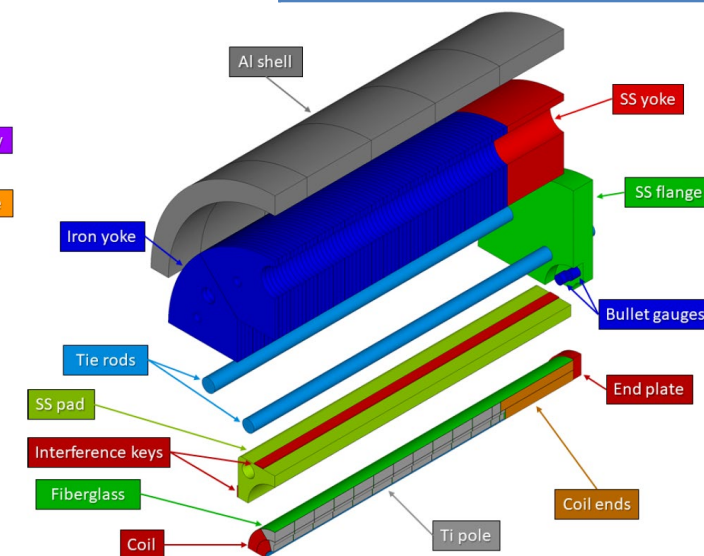
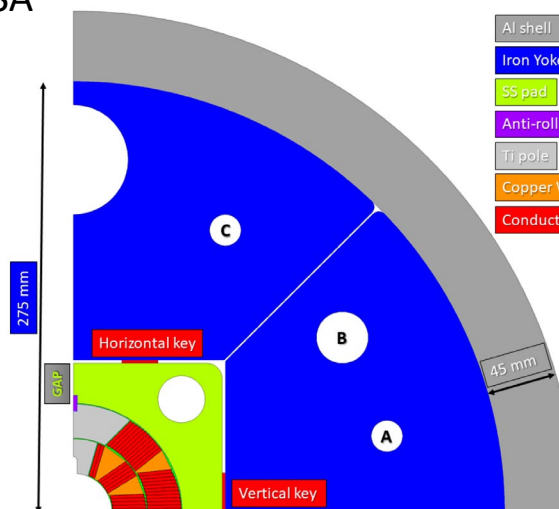
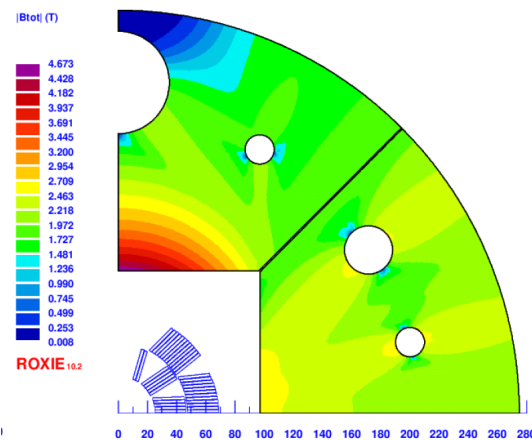
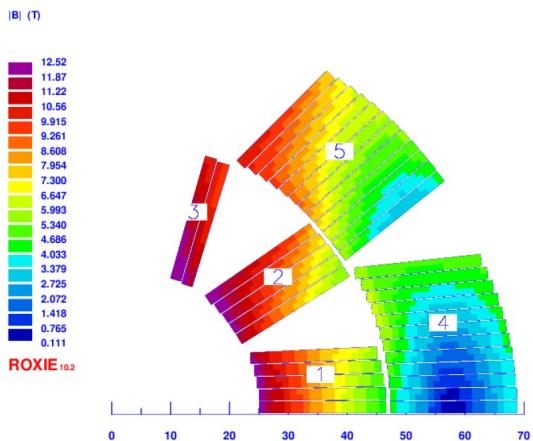


## Future Accelerator post-LHC Cos-theta Optimised Nb<sub>3</sub>Sn Dipole

- ... è quindi emersa l'esigenza di costruire un dimostratore
- nel Sett. 2018 è stato sottoscritto un agreement CERN-INFN per la costruzione di un modello di dipolo ad alto campo nell'ambito degli studi di FCC
- cui è seguita una gara internazionale, vinta da ASG Superconductors
- ASG è responsabile della costruzione delle bobine superconduttrici
- la struttura meccanica sarà assemblata nei laboratori LASA

valore collaborazione FalconD	
valore finanziario totale (inclusi costi del personale)	4.3 M€
FTE/y	4
Contributo totale CERN di cui di materiali	2.75 M€ 1.25 M€

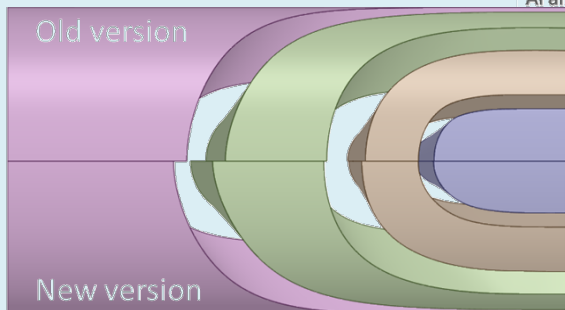
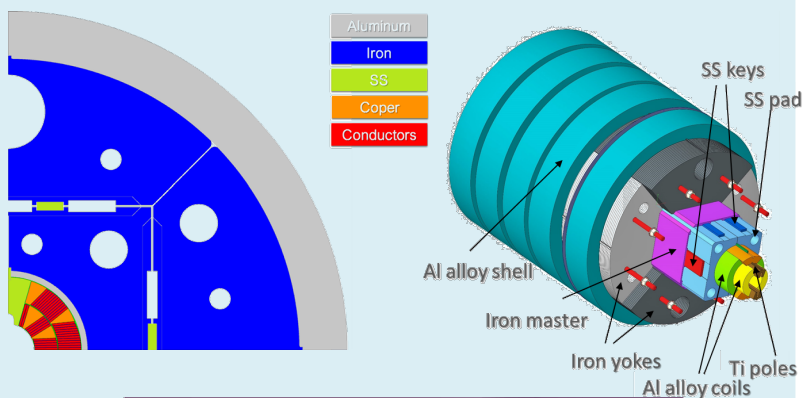
Main characteristics of the FalconD dipole	
Bore magnetic field	12 T
Magnetic length	1.5 m
Peak field	12.53 T
Operating current	20.930 kA
Stored energy	0.54 MJ/m
Aperture	50 mm
Operating temperature	1.9 K
Loadline fraction	76%
Field quality (geo/sat.)	<15 units



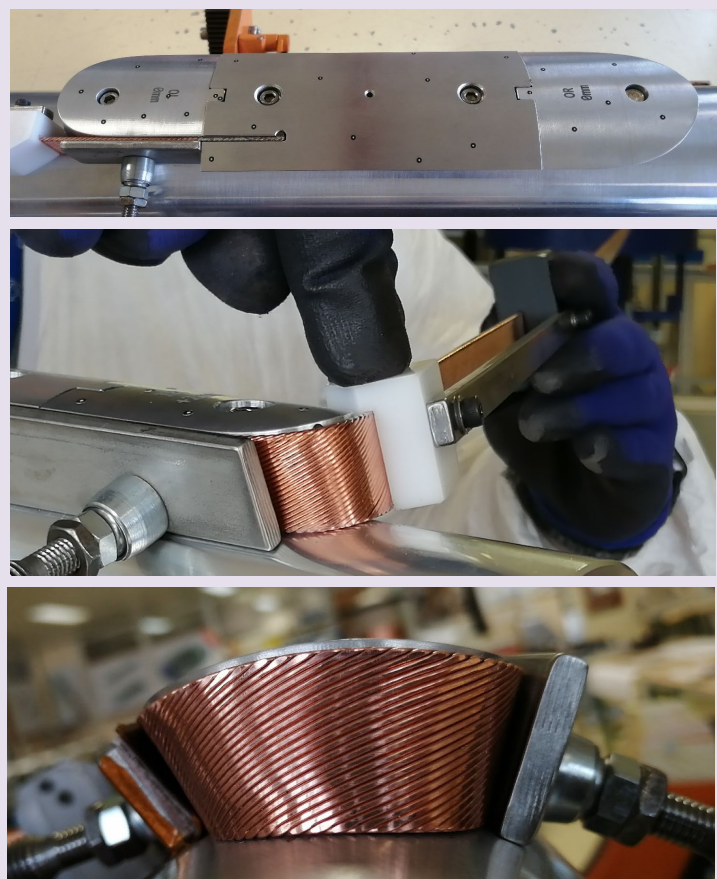


# FalconD: attività in corso

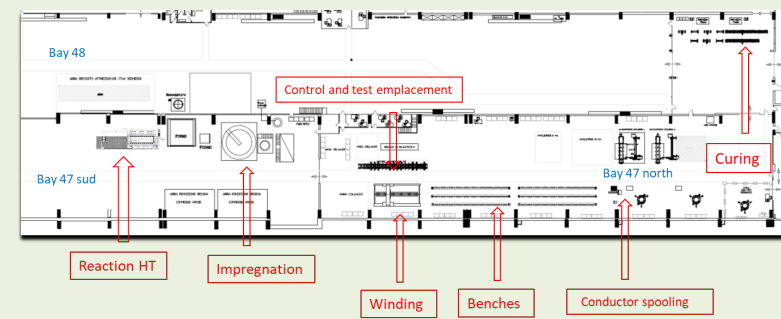
attività in  :  
finalizzazione del design  
elettromagnetico e meccanico,  
costruzione di un mock-up



collaborazione   :  
test di avvolgimento



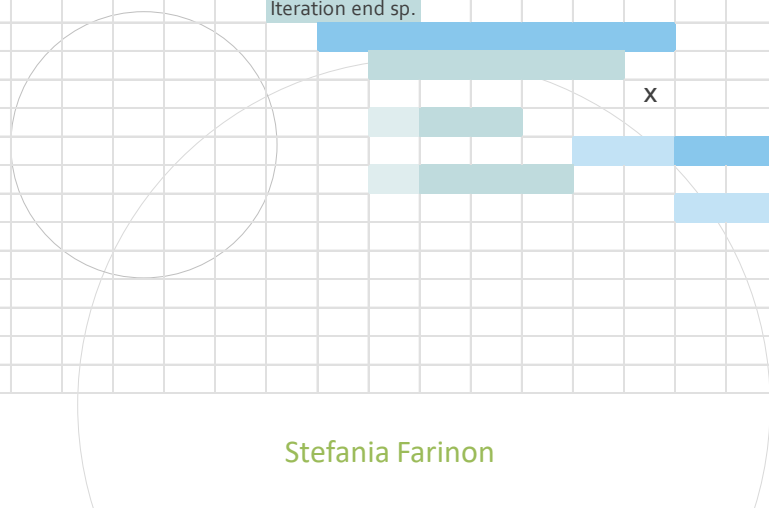
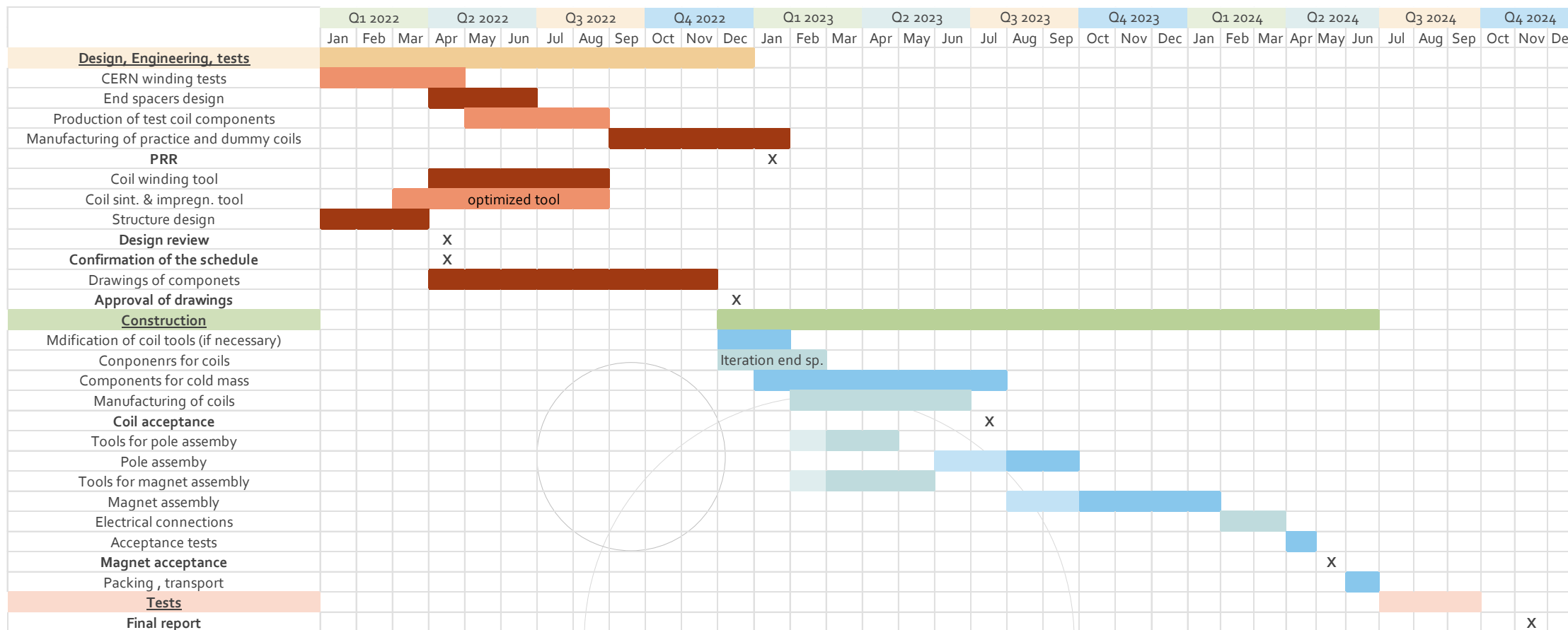
attività in  :  
preparazione delle aree e  
delle le attrezzature





# FalconD: la programmazione

● ● ● ● il programma INFN/CERN prevede la costruzione e il test del dipole FalconD entro la fine del 2024





# IL PROSSIMO FUTURO



# HFM (High Field Magnets)

## ●●●● tecnologia Nb<sub>3</sub>Sn (FCC-hh baseline)

- completamento del dipolo FalconD
- supporto al programma HFM (CERN) per lo sviluppo di dipoli da 12 T cosiddetti «robusti» (ossia progettati per ridurre i rischi, aumentare l'efficienza e diminuire i costi)
- estensione a Falcon2D: assemblaggio in configurazione di apertura doppia delle bobine di FalconD
- supporto al programma HFM (CERN) per lo studio del limite delle performance dei dipoli in Nb<sub>3</sub>Sn



- Sfruttare la tecnologia Nb<sub>3</sub>Sn fino al suo limite superiore, sia in termini di prestazioni massime (obiettivo di campo massimo 16 T) che di scala (produzione in grandi serie)

## ●●●● tecnologia HTS

vorremmo lanciare un programma in collaborazione col CERN per

- sviluppo di HTS da nastri a conduttori per magneti
- sviluppo di un dipolo per 1 m di lunghezza, 10 T-150 mm come test facility cryogen-free



- Fornire una prova di principio per la tecnologia dei magneti HTS possibilmente oltre la portata del Nb<sub>3</sub>Sn, con un obiettivo finale di campo di dipolo di 20 T, e una qualità di campo sufficiente per applicazione agli acceleratori

per queste attività stiamo discutendo un accordo di circa 3-5 M€ INFN e 3-5 M€ CERN per 5 anni a partire dal 2024

---

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**

