

Magnets for the Muon Collider

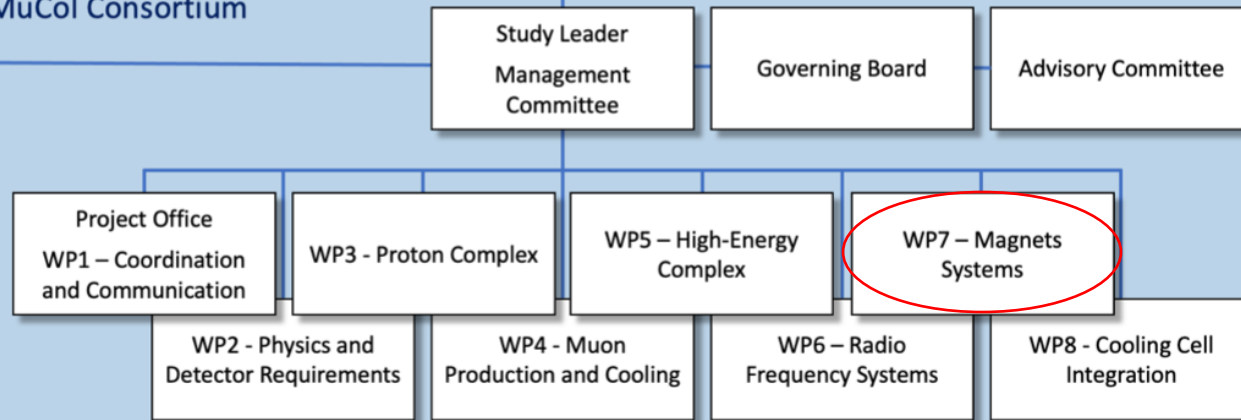
B.Caiffi¹, L. Alfonso¹, A. Bersani¹, S. Farinon¹, A. Gagno¹,
F. Levi¹, S. Mariotto^{2,3}, F. Mariani^{2,3}, R. Musenich¹,
D. Novelli^{1,4}, A.Pampaloni¹

1 INFN Genova, 2 Università' degli Studi di Milano, 3 INFN LASA, 4 Università' La Sapienza Roma

Grant Agreement N°
101094300



MuCol Consortium

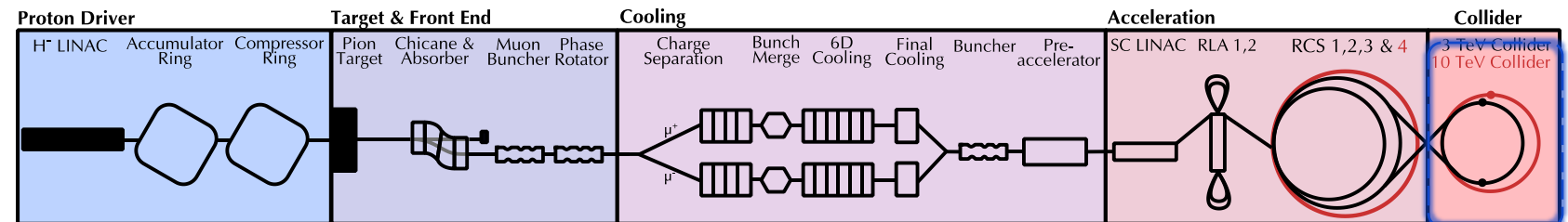


WP7 – Magnet Systems

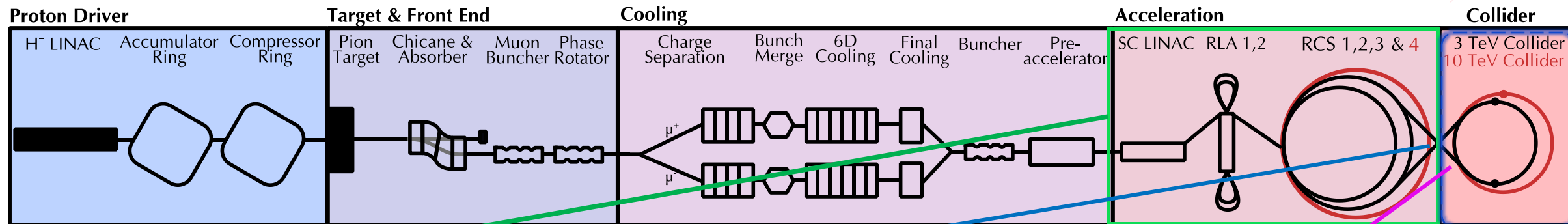
- Magnet systems requirements and concepts
- Magnet systems inventory
- Target and final cooling solenoids design
- Fast ramped accelerator magnets and powering system design
- Collider ring magnets design

Task 7.4 Collider Ring Magnets (INFN B.Caiffi, S. Mariotto)

This task aims at assessing realistic performance targets for the large bore (range of 150 mm) collider magnets, in close collaboration with beam optics (WP5), machine-detector interface, and energy deposition studies (WP2). The design activity will be focused on the combined functions dipoles in the arc, 10 to 16 T, which are a good sample of the magnet challenges. The study will consider LTS and HTS materials, adopting a stress management mechanical system, which is an innovative approach for accelerator magnets. We finally plan to address the effects of the expected heat and radiation load, up to 0.5 kW/m linear power density in the coils, considering aspects such as thermal stability, heat removal and radiation-induced damage. The work will be performed by **INFN (Task Leader)** and UNIMI in collaboration with KEK, PSI and US-MDP. PSI involvement: sharing of stress managed concepts and technology for the design of collider dipoles



Magnets for Muon Collider



Accelerator magnets:

Combination of DC SC magnets (dipole, 10 T) and AC resistive magnets (± 2 T, 400 Hz), open midplane, 100x30 mm aperture

- *High E.M. forces*
- *complex mechanical structure to cope with open midplane*
- *Field quality*
- *Harsh environment*

Detector magnets:

Solenoid [3.5-5] T in a [3.5-7] m aperture.

Main challenges:

- High field
- Integration
- Mechanics

10 km collider ring with 10 TeV center of mass energy

Collider magnets: $B_d \sim 16-20$ T in 150 mm bore:

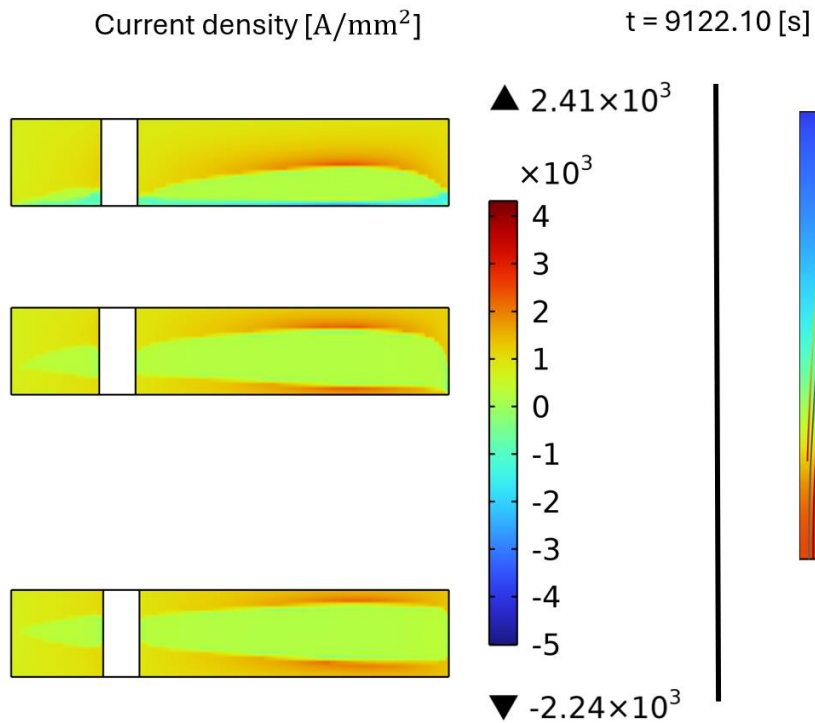
- **Highest field** possible to have a compact ring
HTS SC materials
- **Large dipoles** and quadrupoles (150 mm bore diameter) for shielding against heat (500 W/m) and radiation loads
High E.M. forces
- **Combined function** (dipole + quadrupole) to avoid straight sections and minimize neutrino hazard
Nested coil layout, very complicated design and stress management

Magneti per l'acceleratore

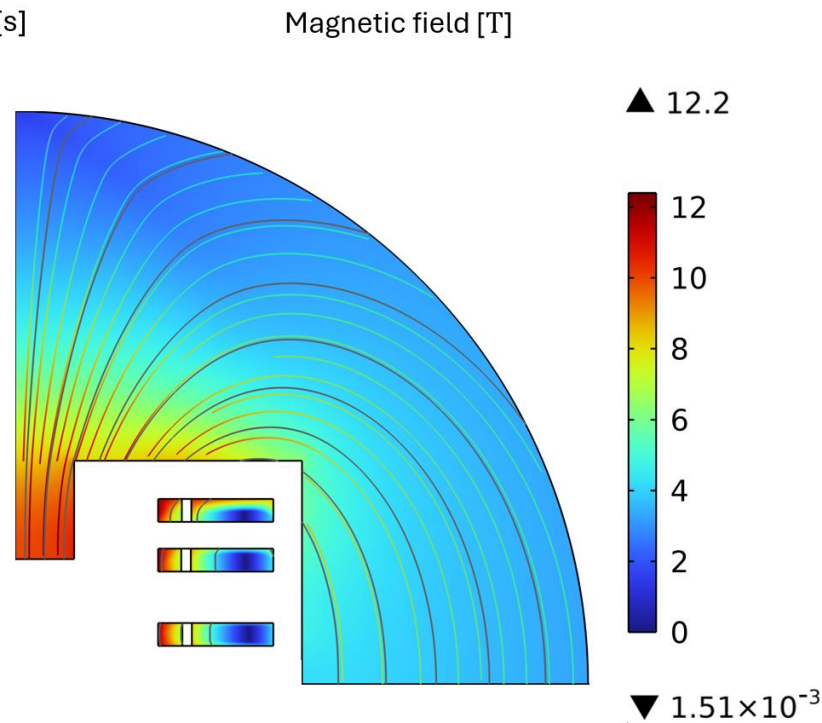
Attività' 2025: ([ref](#))

- Finalizzazione del design magnetico 2D e.m e meccanico
- Studio delle correnti persistenti e ottimizzazione della qualità di campo

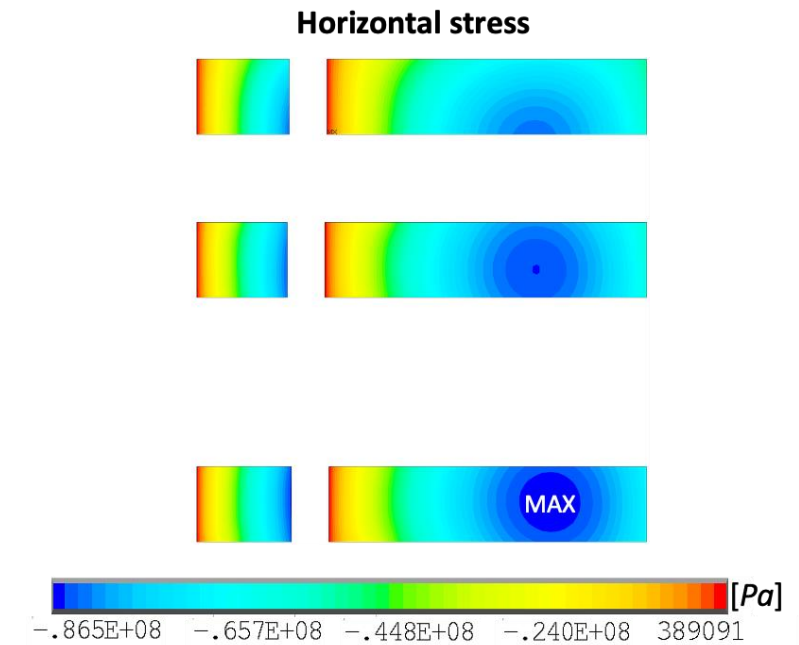
Persistent current



E.M. design



Mechanical design



Magneti per il collider

Attività' 2025:

- Avanzamento nella definizione dei requisiti per i magneti dei collider di MuCol, in accordo con i WP di ottica del fascio, criogenia ed energy deposition.
- Definizione delle performance massime per i magneti dell'arco ed dell'IR considerando diversi materiali (HTS ReBCO, LTS Nb₃Sn e LTS Nb-Ti) e diverse temperature di lavoro nel range 4.5 K-20 K. Studi specifici sono stati condotti per i dipoli, i quadrupoli e i magneti a funzioni combinati dipolo + quadrupolo e dipolo + sestupolo utilizzando stime analitiche e analisi a elementi finiti, tenendo in considerazione i principali vincoli dati dal margine rispetto alla load line, il massimo stress sopportabile dalle bobine e la fattibilità del sistema di protezione
- Ottimizzazione del modello di costo e della stima delle risorse necessarie in termini di budget e FTE, individuazione dei dimostratori chiave e delle principali sfide tecnologiche per la stesura del documento in supporto alla ESPP
- Avanzamento nel conceptual design del dipolo dell'arco, studiando in parallelo i concetti "block-coil" e "cos-theta coil". Ottimizzazione elettromagnetica e meccanica di tali design. Avanzamento nello studio delle perdite AC per magnetizzazione.
- Studi preliminari in supporto ai test di avvolgimento per dimostrare la fattibilità delle configurazioni proposte

Magneti per il collider

Attività' 2025:

- Avanzamento nella definizione dei requisiti per i magneti dei collider di MuCol, in accordo con i WP di ottica del fascio, criogenia ed energy deposition.

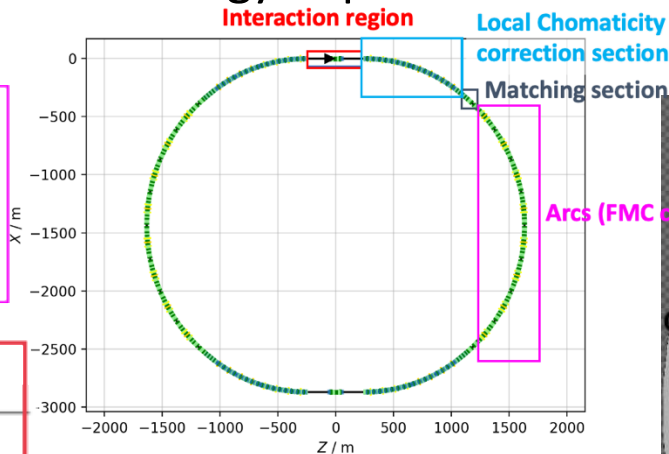
ARC

Dipole:

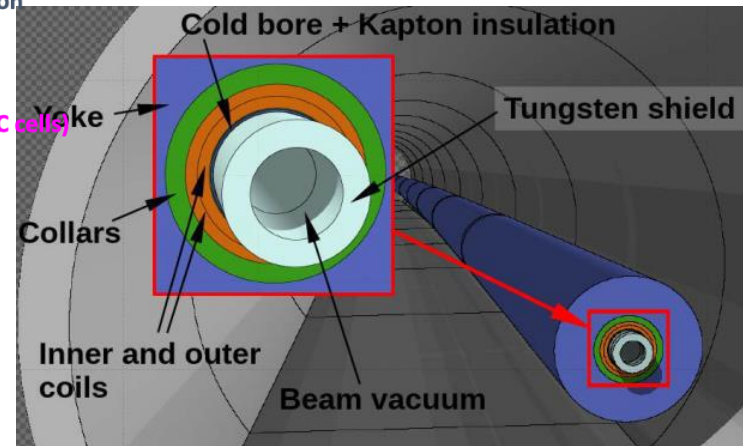
$B_d = 16$ T in 138 mm bore aperture

Combined magnets:

$B_d = 8$ T, $G_1 = +320$ T/m bore in 130 mm bore aperture

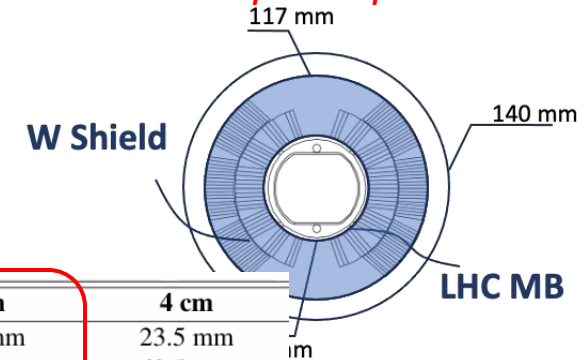


Radial Build



Coil aperture:

- 140 mm @ $T = 20$ K
 $\Delta W_{\text{shield}} = 3$ mm $P_{\text{LOAD}} < 10$ W/m
 - 160 mm @ $T < 10$ K
 $\Delta W_{\text{shield}} = 4$ mm $P_{\text{LOAD}} < 5$ W/m
- ~x3 LHC dipole apertures!*



Interaction region

Name	L [m]	Magnet aperture diameter [mm]
IB2	6	320
IB1	10	320
IB3	6	320
IQF2	6	280
IQF2_1	6	266
IQD1	9	290
IQD1_1	9	290
IQF1B	2	204
IQF1A	3	172
IQF1	3	14

Chromatic correction & Matching

Dipole:

$B_d = 16$ T in 138 mm bore aperture

Combined magnets:

$B_d = 4$ T, $G_1 = +240$ T/m in 170 mm bore aperture

$B_d = 4$ T, $G_2 = +330$ T/m in 130 mm bore aperture

Courtesy of Christian Carli, Kyriacos Skoufaris, Marion Vanwelde

	2 cm	3 cm	4 cm
Beam aperture (radius)	23.5 mm	23.5 mm	23.5 mm
Outer shielding radius	43.5 mm	53.5 mm	63.5 mm
Inner coil aperture (radius)	59 mm	69 mm	79 mm
Power penetrating tungsten absorber	19.1 W/m (3.8%)	8.2 W/m (1.6%)	4.1 W/m (0.8%)
Peak power density in coils	6.5 mW/cm ³	2.1 mW/cm ³	0.7 mW/cm ³
Peak dose in Kapton (5/10 years)	56/112 MGy	18/36 MGy	7/14 MGy
Peak dose in coils (5/10 years)	45/90 MGy	15/30 MGy	5/10 MGy
Peak DPA in coils (5/10 years)	$8/16 \times 10^{-5}$ DPA	$6/12 \times 10^{-5}$ DPA	$5/10 \times 10^{-5}$ DPA

Courtesy of Anton Lechner

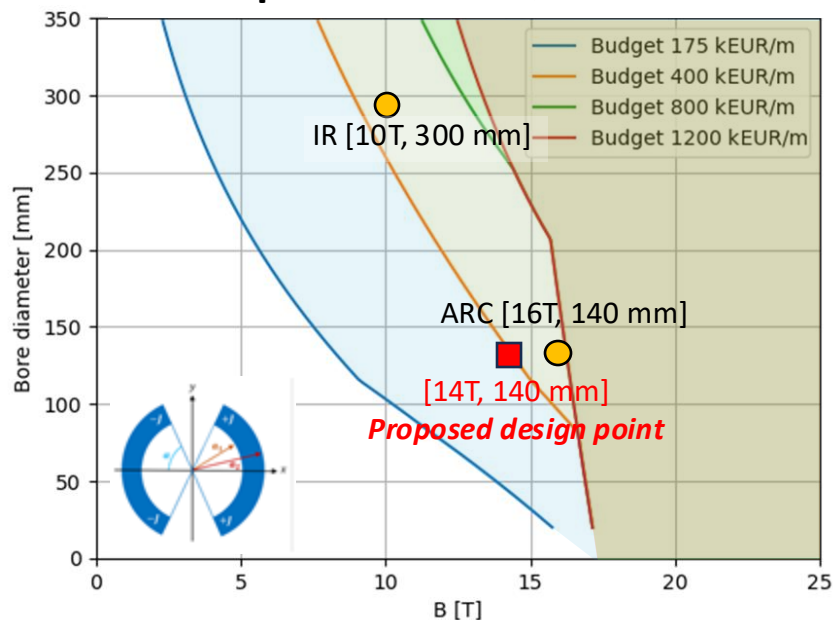
Courtesy of Patricia Borges de Sousa
<https://indico.cern.ch/event/1250075/contributions/5357594/>

Magneti per il collider

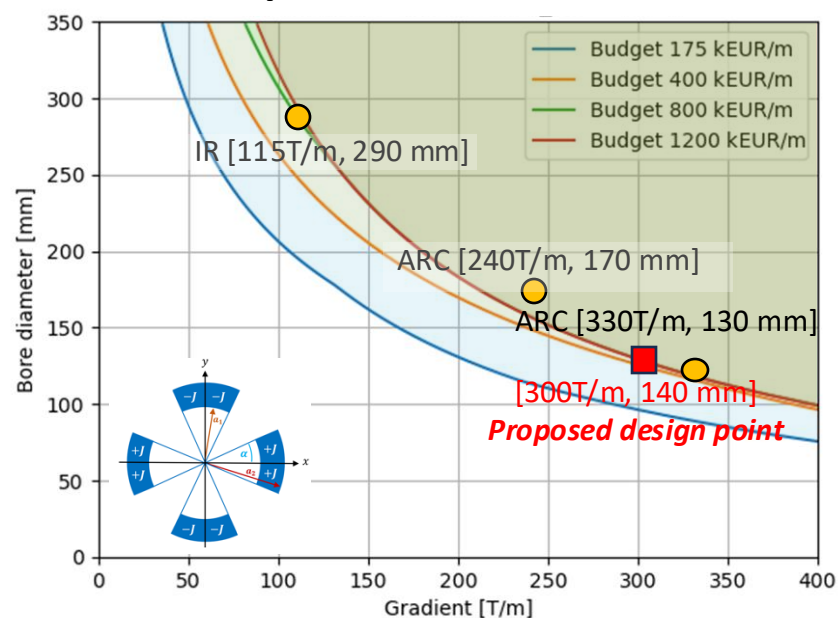
Attività' 2025:

- Definizione delle performance massime per i magneti dell'arco ed dell'IR considerando diversi materiali (HTS ReBCO, LTS Nb₃Sn e LTS Nb-Ti) e diverse temperature di lavoro nel range 4.5 K-20 K. Studi specifici sono stati condotti per i dipoli, i quadrupoli e i magneti a funzioni combinati dipolo + quadrupolo e dipolo + sestupolo utilizzando stime analitiche e analisi a elementi finiti, tenendo in considerazione i principali vincoli dati dal margine rispetto alla load line, il massimo stress sopportabile dalle bobine e la fattibilità del sistema di protezione

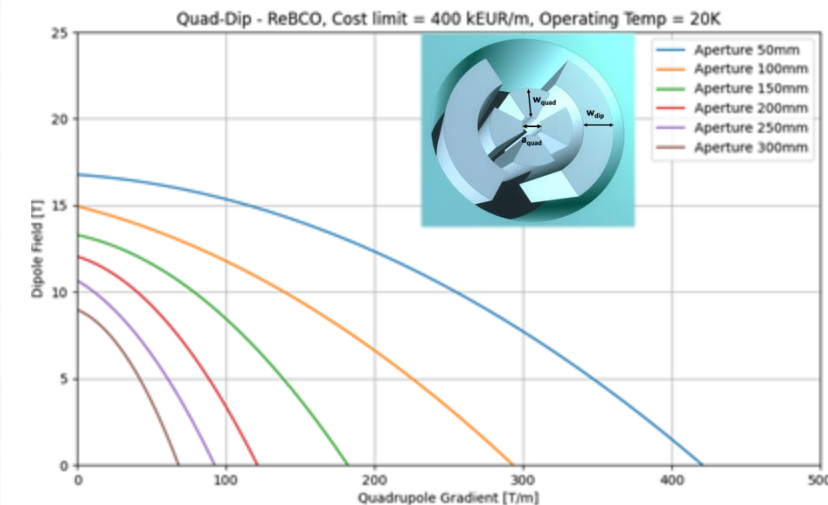
Dipole- ReBCO @ 20K^[1,2,3]



Quadrupole - ReBCO @ 4.5K^[1,2,3]



ReBCO Cost limit =400 kEUR/m $T_{op}=20K$



Magneti per il collider

Attivita' 2025:

- Ottimizzazione del modello di costo e della stima delle risorse necessarie in termini di budget e FTE, individuazione dei dimostratori chiave e delle principali sfide tecnologiche per la stesura del documento in supporto alla ESPP

$$\frac{C}{L} = C_{\text{coil}} + C_{\text{ColdMass}} + C_{\text{CryoMagnet}}$$

$$C_{\text{coils}} = C_{\text{SC}} + C_{\text{Cable}} + C_{\text{CoilManufacturing}}$$

$$C_{\text{ColdMass}} = C_{\text{ColdMassMaterials}} + C_{\text{ColdMassManufacturing}}$$

$$C_{\text{ColdMassMaterials}} = \frac{B}{B_{\text{ref}}} C_{\text{ColdMassMaterial}_{\text{ref}}}$$

	C_{sc} [Eur/kg]	f_{cable}^*	$C_{\text{CoilManufacturing}}$ [kEur/m]*
Nb-Ti	159	0.1	9.9
Nb ₃ Sn	2274	0.1	11.9
<i>aspirational</i>	758	0.1	11.9
ReBCO(not insulated)	8013	0	9.9
<i>aspirational</i>	2671	0	9.9

	$C_{\text{ColdMassMaterial}}^{\text{ref}}$ ($B_{\text{ref}} = 8 \text{ T}$) [kEur/m]*	$C_{\text{ColdMassManufacturing}}$ [kEur/m]*	$C_{\text{cryoMagnet}}$ [kEur/m]*
Nb-Ti	25	26.4	8
Nb ₃ Sn		31.7	
ReBCO (not insulated)		26.4	

*extrapolation from LHC and Hi-Lumi LHC experience

E_{CM} [TeV]	L_{collider} [km]	B [T]	d_{bore} [mm]	T_{op} [K]	Material
10	10	14	140	20	ReBCO

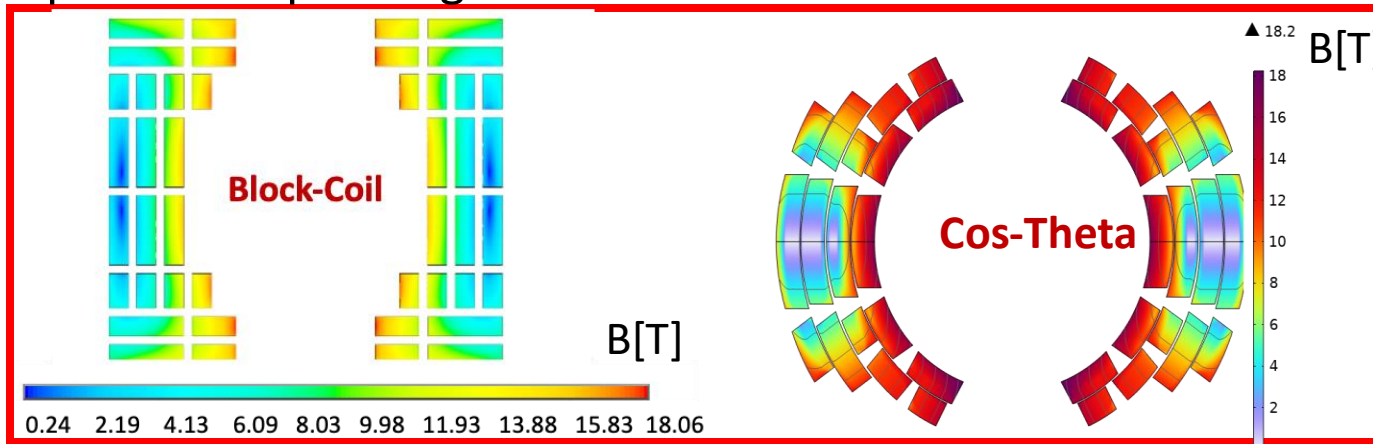
C_{coils} [kEur/m]	C_{ColdMass} [kEur/m]	$C_{\text{CryoMagnet}}$ [kEur/m]	C_{tot} [kEur/m]
353.6	70.2	8	431.8

Magneti per il collider

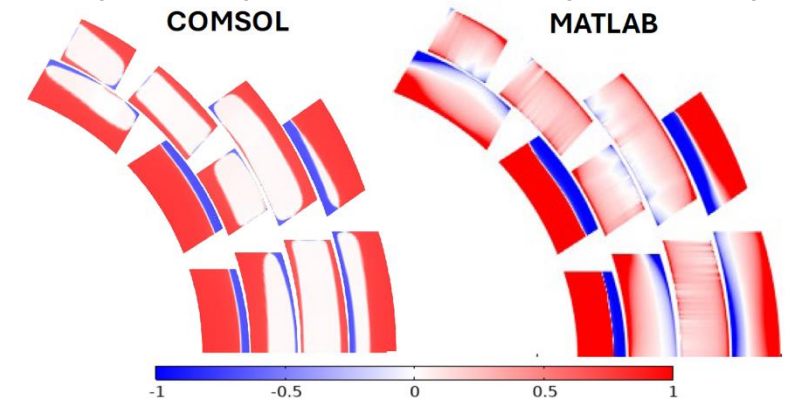
Attivita' 2025:

- Avanzamento nel conceptual design del dipolo dell'arco, studiando in parallelo i concetti "block-coil" e "cos-theta coil". Ottimizzazione elettromagnetica e meccanica di tali design. Avanzamento nello studio delle perdite AC per magnetizzazione.

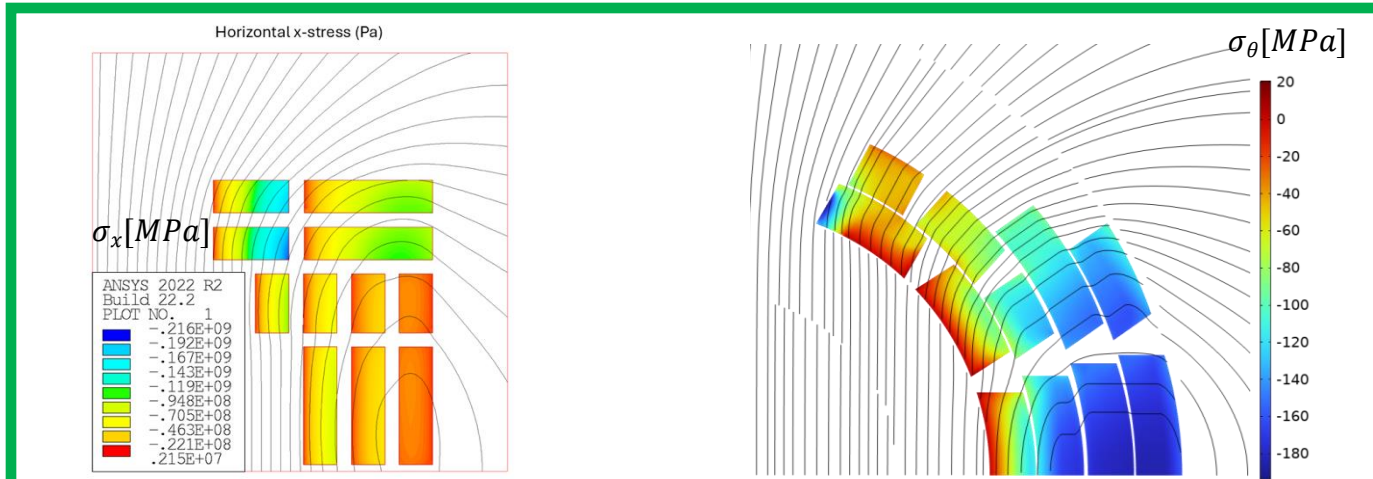
E. M. design



Persistent current - Analytical Model in MATLAB (Brandt) or FEM Model (COMSOL)

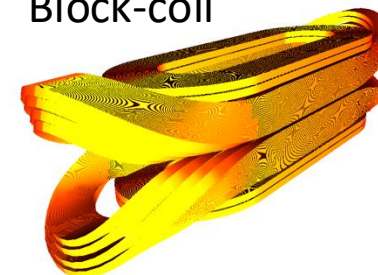


Mechanical design

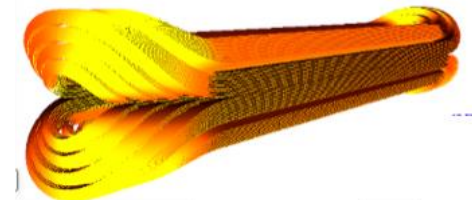


3D coil ends design

Block-coil



cos θ



- Studi preliminari in supporto ai test di avvolgimento per dimostrare la fattibilità delle configurazioni proposte

Magneti per il collider



Sviluppo del modello .stl
per la progettazione della
tavola di avvolgimento

Magneti per il collider

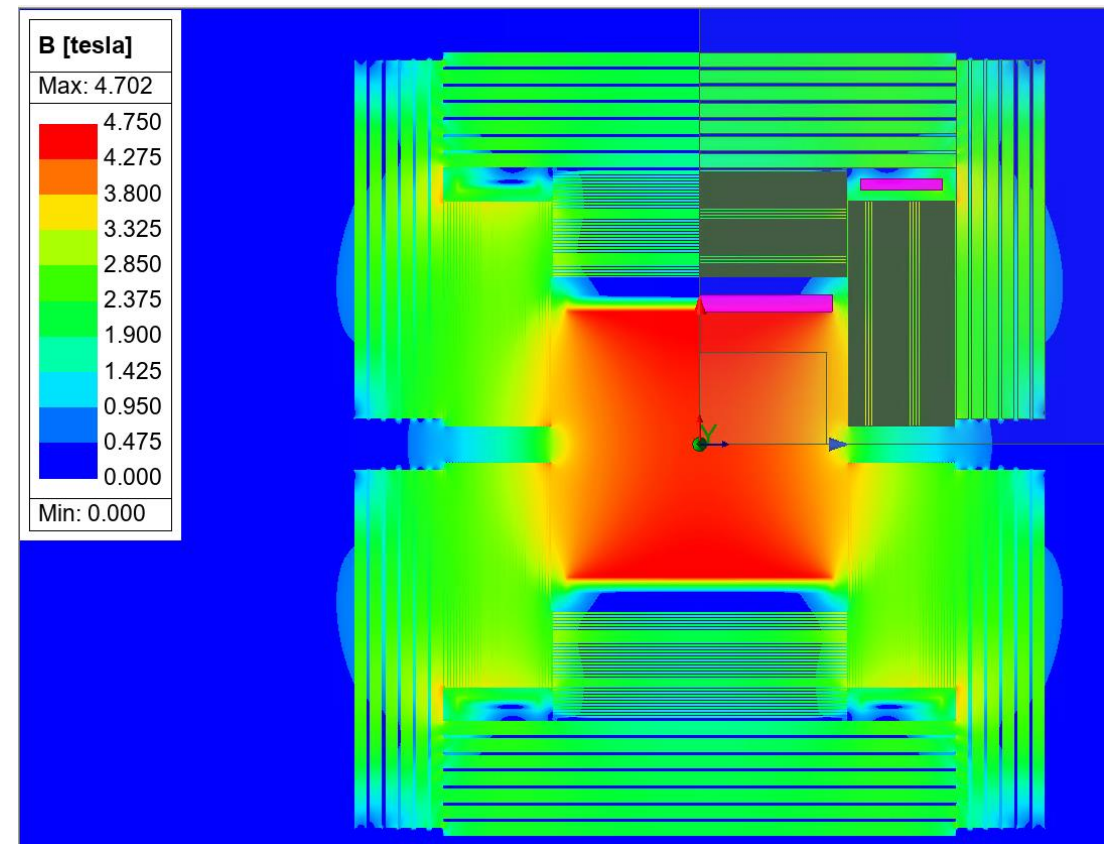
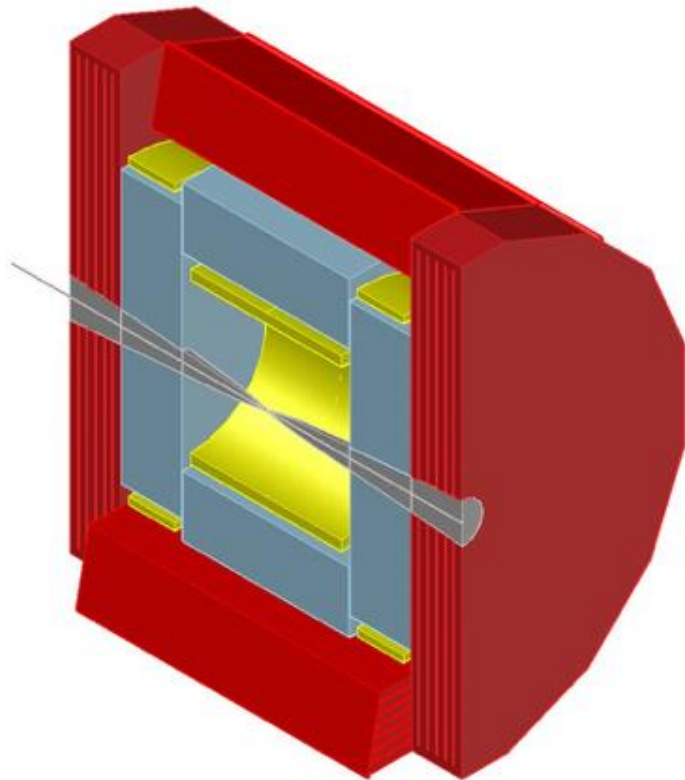
Attività' 2026:

- Finalizzazione delle analisi FEM meccaniche e elettromagnetiche del dipolo per il collider nelle due configurazioni “block-coil” e “cos-theta” tramite analisi FEM con i codici Ansys e Comsol
- Studio e mitigazione delle perdite AC dovute alla magnetizzazione con codice a elementi finiti COMSOL
- Design preliminare di un magnete a funzioni combinate per il collider (dipolo + quadrupolo). Analisi FEM meccanico e elettromagnetico di tale design. Studio delle perdite AC per magnetizzazione.
- Realizzazione test di avvolgimento con cavo dummy e HTS ReBCO low quality per la validazione dei modelli precedentemente studiati

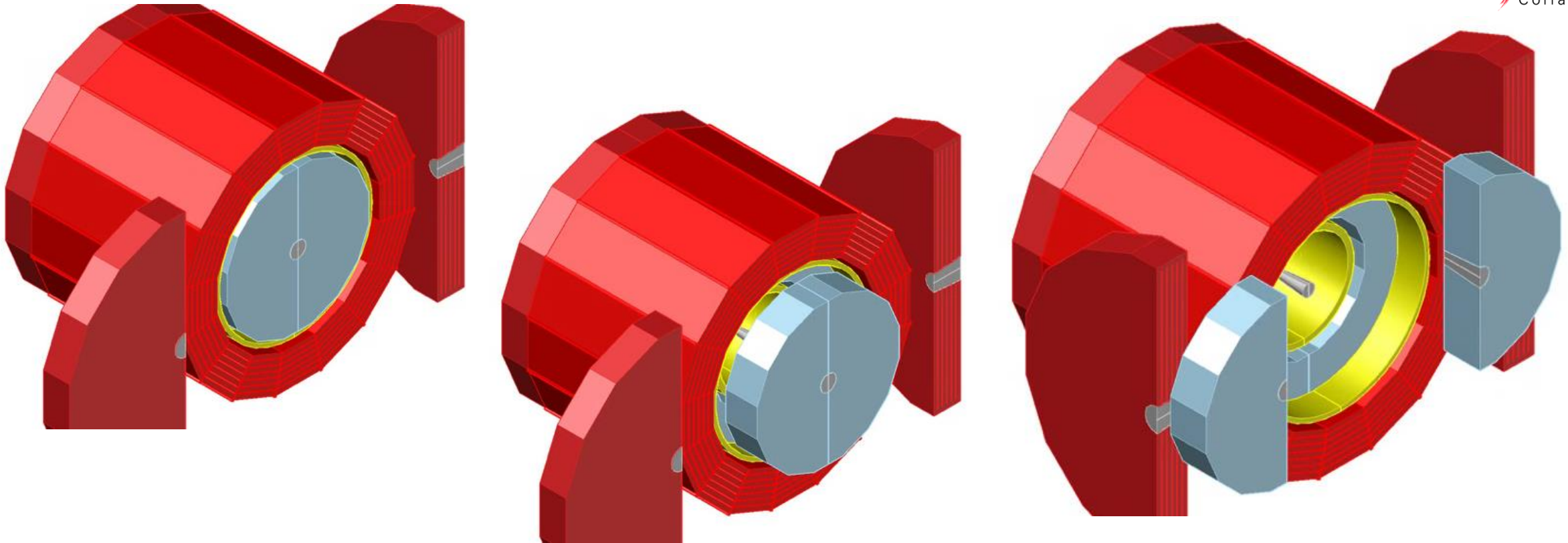
Magneti per il detector

Attività' 2025:

- Evoluzione di un design compatibile con il progetto MUSIC per un detector con energia nel centro di massa di 10 TeV
- Analisi preliminare dell'integrazione dei sub-detector nelle strutture portanti del magnete di MUSIC
- Produzione di mappe 2D assialsimmetriche per l'evoluzione dei modelli Montearlo del rivelatore MUSIC



Magneti per il detector



Attività' 2026:

- Follow-up dello sviluppo dei rivelatori e integrazione del magnete nel modello complessivo di MUSIC
- Evoluzione di un progetto completo termico, magnetico e meccanico
- Sviluppo di una completa strategia di integrazione di tutte le parti di MUSIC

Publicazioni 2025

1. **«Magnet R&D for the Muon Collider»** L. Bottura, B. Auchmann, F. Boattini, B. Bordini, B. Caiffi, L. Cooley, S. Fabbri, S. Gourlay, S. Mariotto, T. Nakamoto, S. Prestemon, M. Statera, arXiv:2503.21179
2. **Magnet R&D for the Muon Collider: European Strategy Input** L. Bottura, B. Auchmann, F. Boattini, B. Bordini, B. Caiffi, L. Cooley, S. Fabbri, S. Gourlay, S. Mariotto, T. Nakamoto, S. Prestemon, M. Statera, arXiv:2503.21185
3. **"Challenges and Perspectives of the Superconducting Magnets for the Muon Collider Storage Ring,"** B. Caiffi et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 35, no. 5, pp. 1–7, Aug. 2025, Art. no. 4002007. doi: 10.1109/TASC.2025.3529424
4. **"Analytical and Numerical Study of Superconducting Dipole and Quadrupole Performance Limits for a Muon Collider,»** D. Novelli et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 35, no. 5, pp. 1–5, Aug. 2025, Art. no. 4000205. doi: 10.1109/TASC.2024.3507744
5. **"Magnetic and Mechanical Design of the Large Aperture HTS Superconducting Dipoles for the Accelerator Ring of the Muon Collider,»** F. Levi et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 35, no. 5, pp. 1–5, Aug. 2025, Art. no. 4000905., doi: 10.1109/TASC.2024.3520073
6. **"Preliminary Design of a Block-Coil Magnet for the Muon Collider Ring,»** L. Alfonso et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 35, no. 5, pp. 1–5, Aug. 2025, Art. no. 4000405. doi: 10.1109/TASC.2024.3510234
7. **"Magnetic and Mechanical Design of the Large Aperture HTS Superconducting Dipoles for the Accelerator Ring of the Muon Collider,» Master Thesis ,** T. Maiello , University of Genoa, INFN Genova, CERN.

Anagrafica

Nome	Posizione	Mucol	RD-Mucol
Luca Alfonso	Assegnista	100	0
Andrea Bersani	Primo Tecnologo	10	15
Barbara Caiffi	Ricercatrice	10	20
Stefania Farinon	Dirigente tecnologa	5	0
Riccardo Musenich	Dirigente di ricerca	0	10
Alessandra Pampaloni	Tecnologa	5	15
	Totale FTE	1.3	0.6

Capitolo	Descrizione	Parziali (K-EUR)	Parziali SJ (K-EUR)	Totale/Cap (K-EUR)	Totale/Cap SJ (K-EUR)
Missioni Italia	Meeting sul progetto EU sinergico MUCOL	3.5	0	16.5	0
Missioni estere	Missioni per meeting/conferenze/workshops e attività al CERN per il disegno dei magneti	13	0	16.5	0
Totale	/	0	0	16.5	0