

Einstein Telescope: sfide e soluzioni per il rumore magnetico

Incontri di Fisica delle Alte Energie
9-11 Aprile 2025, Cagliari

Federico Armato, Barbara Garaventa, Andrea Chincarini



Einstein Telescope

Forma: triangolo o doppia L

Lunghezza bracci: 10km o 15km

Profondità: 200-300m

Siti candidati: Italia (Sos Enattos, Sardegna), Olanda, Germania.

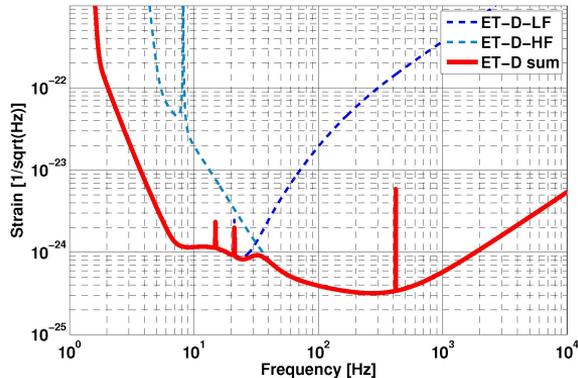


Fig 1. Curva di sensibilità di progetto per ET ottenuta dalla combinazione di un interferometro ottimizzato a basse frequenze (curva blu) e di uno ottimizzato ad alte frequenze (curva azzurra) [1].

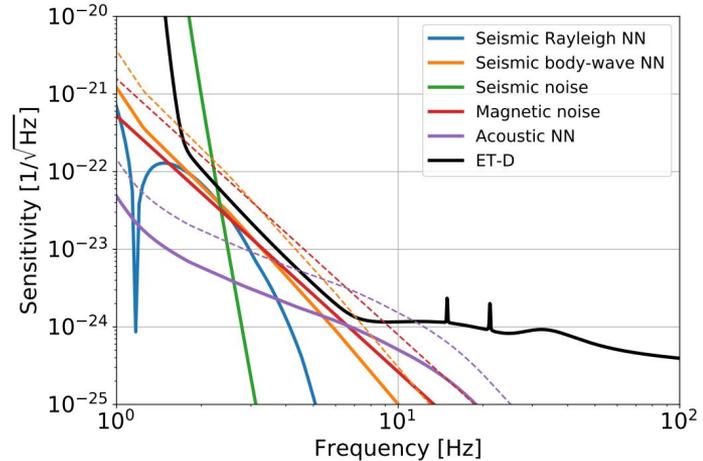


Fig 2. Esempio di un ipotetico bilancio del rumore ambientale di ET nelle basse frequenze per ottenere la sensibilità di progetto (curva nera). Le linee tratteggiate indicano i livelli di rumore ambientale senza la necessaria mitigazione [2].



Cos'è il rumore magnetico?

Il termine rumore magnetico è ingannevole. A differenza di altri tipi di rumore, come quello quantistico e quello termico, che sono intrinseci dell'interferometro, **il rumore magnetico si origina dall'interazione tra campi magnetici esterni e specifiche componenti dell'interferometro.** Senza questi accoppiamenti, il rumore magnetico sarebbe assente.

Cos'è il rumore magnetico?

Il termine rumore magnetico è ingannevole. A differenza di altri tipi di rumore, come quello quantistico e quello termico, che sono intrinseci dell'interferometro, **il rumore magnetico si origina dall'interazione tra campi magnetici esterni e specifiche componenti dell'interferometro.** Senza questi accoppiamenti, il rumore magnetico sarebbe assente.

Pertanto, studiare il rumore magnetico significa analizzare sia le sorgenti di campo magnetico che le componenti dell'interferometro che interagiscono con esse. Insieme a comprendere il meccanismo di accoppiamento.

Cos'è il rumore magnetico?

Il termine rumore magnetico è ingannevole. A differenza di altri tipi di rumore, come quello quantistico e quello termico, che sono intrinseci dell'interferometro, **il rumore magnetico si origina dall'interazione tra campi magnetici esterni e specifiche componenti dell'interferometro.** Senza questi accoppiamenti, il rumore magnetico sarebbe assente.

Pertanto, studiare il rumore magnetico significa analizzare sia le sorgenti di campo magnetico che le componenti dell'interferometro che interagiscono con esse. Insieme a comprendere il meccanismo di accoppiamento.

Questo ha come conseguenza che la mitigazione del rumore magnetico ha un duplice approccio:

- ❑ Riduzione del campo magnetico della sorgente, laddove sia possibile (normalmente lo è se la sorgente è di natura antropica);
- ❑ Mitigazione del campo magnetico nei pressi della componente dell'interferometro che si accoppia con il campo esterno.

Sorgenti di rumore magnetico



Sorgenti naturali:

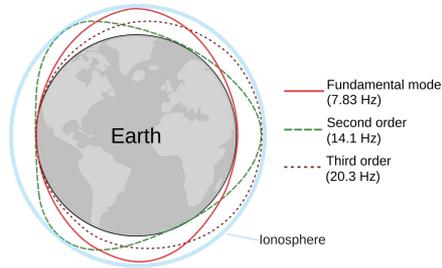
Sorgenti ambientali:

Sorgenti naturali:



Risonanze di Schumann

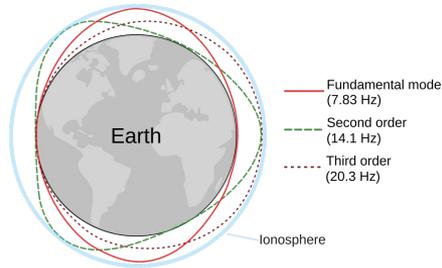
Onde elettromagnetiche a bassa frequenza che si generano nella cavità risonante tra la superficie della terra e la ionosfera.



Sorgenti ambientali:

Sorgenti naturali:

- ❑ **Risonanze di Schumann**
Onde elettromagnetiche a bassa frequenza che si generano nella cavità risonante tra la superficie della terra e la ionosfera.

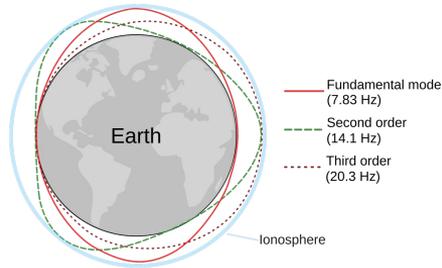


Sorgenti ambientali:

- ❑ **Distribuzione di corrente (es. 50 Hz)**

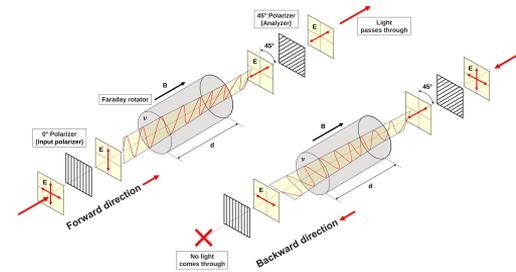
Sorgenti naturali:

- **Risonanze di Schumann**
Onde elettromagnetiche a bassa frequenza che si generano nella cavità risonante tra la superficie della terra e la ionosfera.



Sorgenti ambientali:

- **Distribuzione di corrente (es. 50 Hz)**
- **Dispositivi elettronici e/o con magneti:**
es. trasformatori, Faraday Isolator ...



Sorgenti naturali:

- **Risonanze di Schumann**
Onde elettromagnetiche a bassa frequenza che si generano nella cavità risonante tra la superficie della terra e la ionosfera.

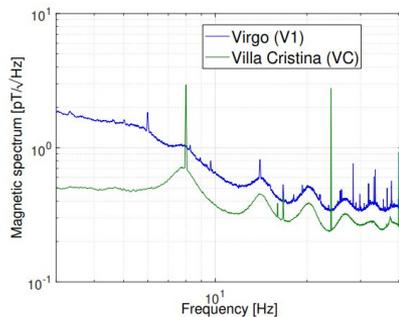
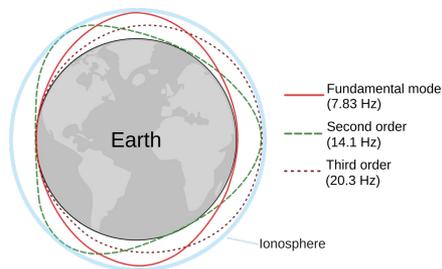
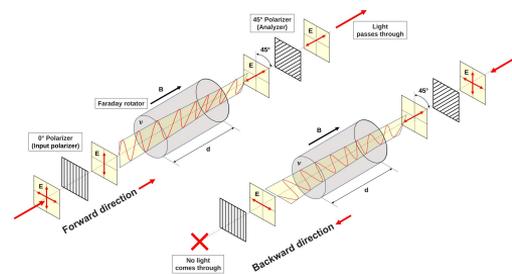


Fig 3. Confronto dello spettro magnetico tra una zona a basso rumore di **Virgo** e **Villa Cristina** (situata a circa 13 km da Virgo) [3].

Sorgenti ambientali:

- **Distribuzione di corrente (es. 50 Hz)**
- **Dispositivi elettronici e/o con magneti:**
es. trasformatori, Faraday Isolator ...



Sorgenti naturali:

☐ Risonanze di Schumann

Onde elettromagnetiche a bassa frequenza che si generano nella cavità risonante tra la superficie della terra e la ionosfera.

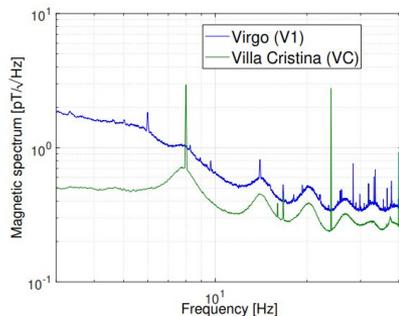
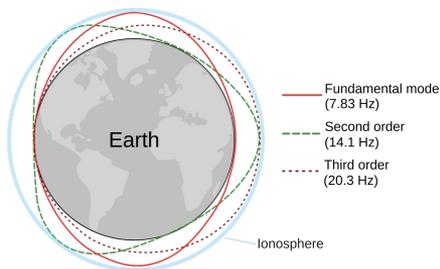


Fig 3. Confronto dello spettro magnetico tra una zona a basso rumore di **Virgo** e **Villa Cristina** (situata a circa 13 km da Virgo) [3].

Sorgenti ambientali:

☐ Distribuzione di corrente (es. 50 Hz)

☐ Dispositivi elettronici e/o con magneti:

es. trasformatori, Faraday Isolator ...

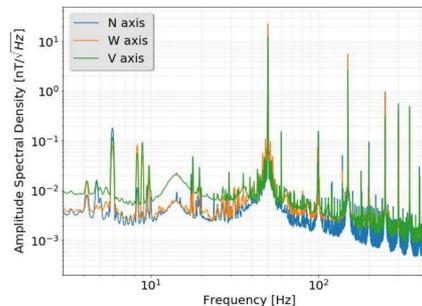
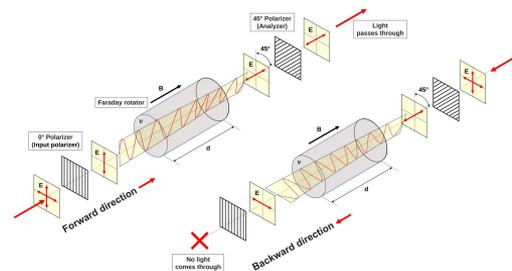


Fig 4. Spettro magnetico misurato a Virgo nell'edificio centrale. N, W e V indicando rispettivamente al direzione **nord-sud**, **ovest-est** e **verticale** al terreno [4].

L'accoppiamento magnetico:

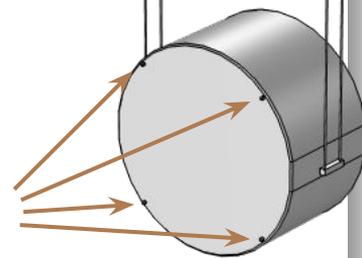
A Virgo vengono regolarmente fatte delle iniezioni magnetiche al fine di studiare le funzioni di accoppiamento (coupling functions CFs) dell'interferometro.

In particolare, in ciascun edificio le risposte dell'interferometro a iniezioni di campo vicino, realizzate con bobine piccole (small coils SCs), vengono messe linearmente in relazione con la risposta dell'interferometro a un'iniezione di campo lontano, realizzata con una bobina grande (big coil BC):

$$CF_{BC}(f) = \sum_{i=1}^N \alpha_i CF_{i,SC}(f)$$

In questo modo, i coefficienti α_i ci permettono di gerarchizzare le aree degli edifici da quelle più sensibili, ovvero quelle in cui l'accoppiamento è maggiore, a quelle meno sensibili, ovvero quelle in cui l'accoppiamento è minore.

MAGNETI
DELLA
MASSA DI
TEST



Tecniche di mitigazione

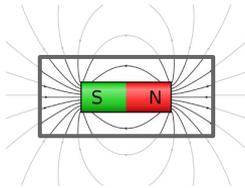


Lo shielding Factor

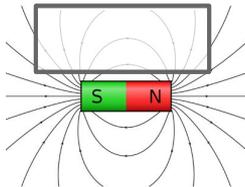
Definiamo lo Shielding Factor (SF) come il rapporto tra il campo magnetico prima e dopo l'applicazione di un sistema di mitigazione.

In particolare, abbiamo due casi possibili:

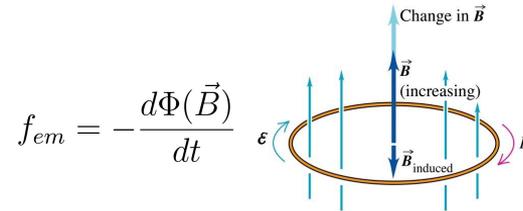
- ❑ Vogliamo ridurre il campo magnetico emesso da una certa sorgente (es. Faraday Isolator)
In tal caso lo SF sarà il rapporto tra il flusso uscente prima e dopo l'applicazione del sistema di mitigazione



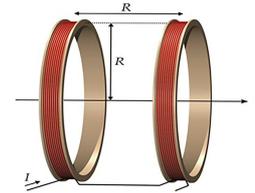
- ❑ Vogliamo mitigare il campo che raggiunge una certa zona (es. una torre dell'interferometro)
In tal caso lo SF sarà il rapporto tra il flusso entrante prima e dopo l'applicazione del sistema di mitigazione



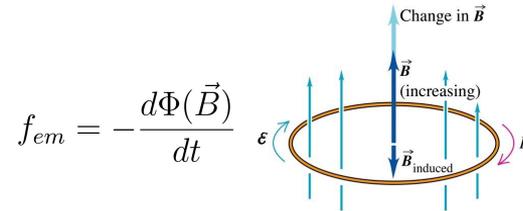
Mitigazione passiva: correnti indotte



Mitigazione attiva: correnti adattive

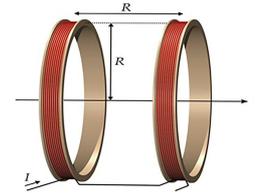


Mitigazione passiva: correnti indotte



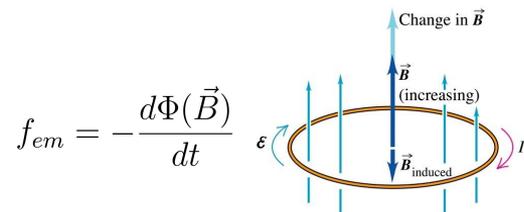
- Sono autonome

Mitigazione attiva: correnti adattive



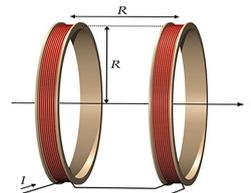
- Richiedono un'alimentazione e un circuito di feedback

Mitigazione passiva: correnti indotte



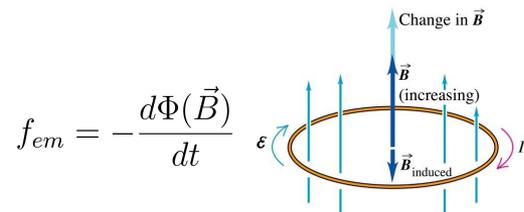
- Sono autonome
- Hanno uno shielding factor limitato

Mitigazione attiva: correnti adattive



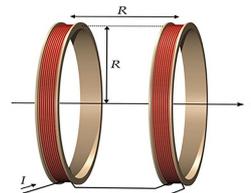
- Richiedono un'alimentazione e un circuito di feedback
- Hanno uno shielding factor virtualmente infinito

Mitigazione passiva: correnti indotte



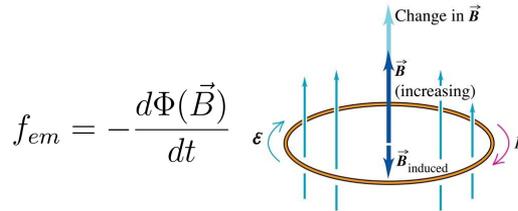
- Sono autonome
- Hanno uno shielding factor limitato
- Hanno una capacità di shielding fortemente dipendente dalla frequenza

Mitigazione attiva: correnti adattive

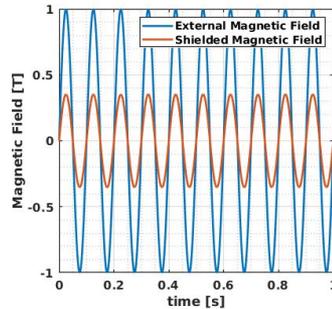
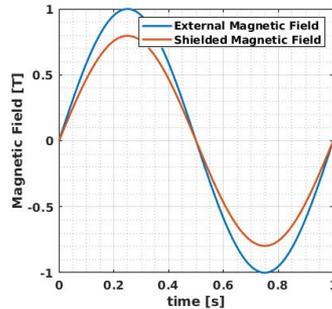


- Richiedono un'alimentazione e un circuito di feedback
- Hanno uno shielding factor virtualmente infinito
- Sono efficaci a schermare sia campi statici che oscillanti virtualmente a tutte le frequenze

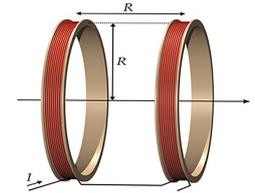
Mitigazione passiva: correnti indotte



- Sono autonome
- Hanno uno shielding factor limitato
- Hanno una capacità di shielding fortemente dipendente dalla frequenza

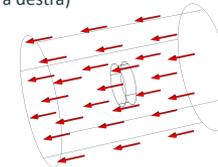


Mitigazione attiva: correnti adattive

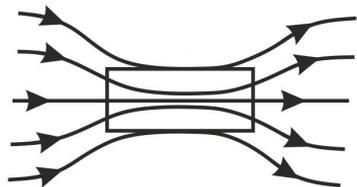


- Richiedono un'alimentazione e un circuito di feedback
- Hanno uno shielding factor virtualmente infinito
- Sono efficaci a schermare sia campi statici che oscillanti virtualmente a tutte le frequenze

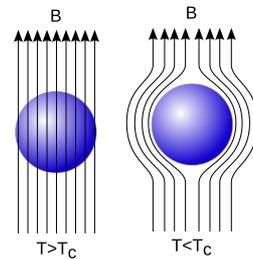
← Risposta di un cilindro cavo in rame di raggio 1 m, altezza 0.5 m e spessore 1 cm a un campo magnetico esterno di 1 T, diretto lungo il suo asse e oscillante a 1 Hz (figura a sinistra) e 10 Hz (figura a destra)



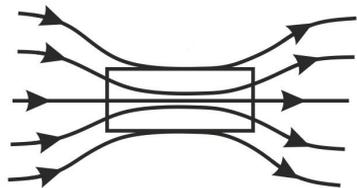
Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



Mitigazione attiva: schermi superconduttori

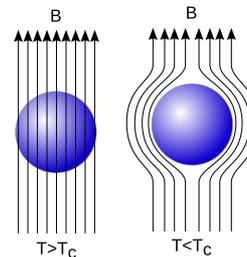


Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



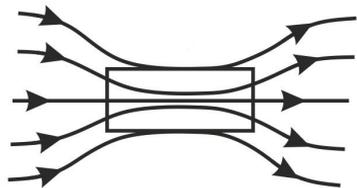
- Funzionano a temperatura e pressione ambiente

Mitigazione attiva: schermi superconduttori



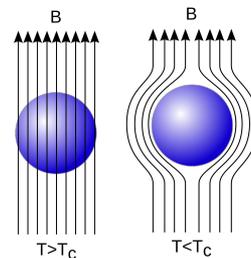
- Richiedono temperature e/o pressioni specifiche

Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



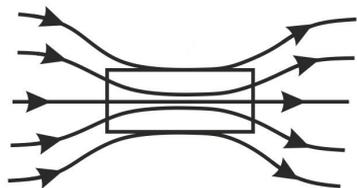
- ❑ Funzionano a temperatura e pressione ambiente
- ❑ Raggiungono shielding factor molto elevati

Mitigazione attiva: schermi superconduttori



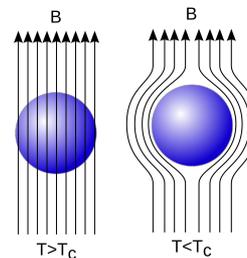
- ❑ Richiedono temperature e/o pressioni specifiche
- ❑ Raggiungono shielding factor virtualmente infiniti

Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



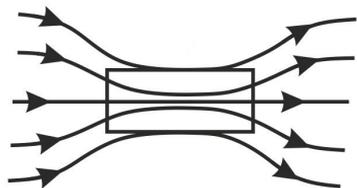
- ❑ Funzionano a temperatura e pressione ambiente
- ❑ Raggiungono shielding factor molto elevati
- ❑ Rischiano di saturare

Mitigazione attiva: schermi superconduttori

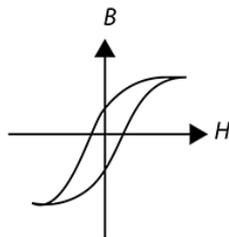


- ❑ Richiedono temperature e/o pressioni specifiche
- ❑ Raggiungono shielding factor virtualmente infiniti
- ❑ Rischiano di saturare

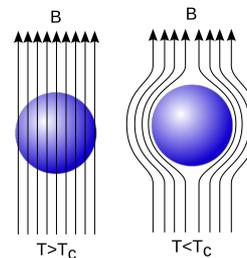
Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



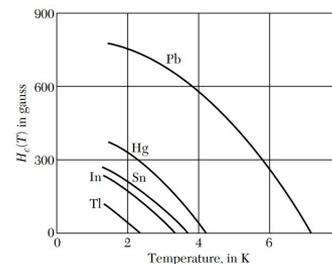
- ❑ Funzionano a temperatura e pressione ambiente
- ❑ Raggiungono shielding factor molto elevati
- ❑ Rischiano di saturare



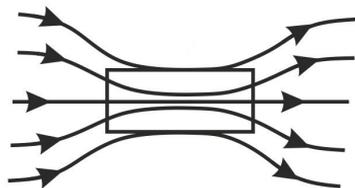
Mitigazione attiva: schermi superconduttori



- ❑ Richiedono temperature e/o pressioni specifiche
- ❑ Raggiungono shielding factor virtualmente infiniti
- ❑ Rischiano di saturare

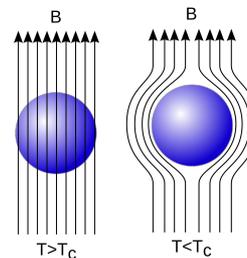


Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



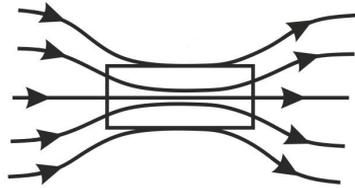
- ❑ Funzionano a temperatura e pressione ambiente
- ❑ Raggiungono shielding factor molto elevati
- ❑ Rischiano di saturare
- ❑ Sono dipendenti dalla geometria

Mitigazione attiva: schermi superconduttori

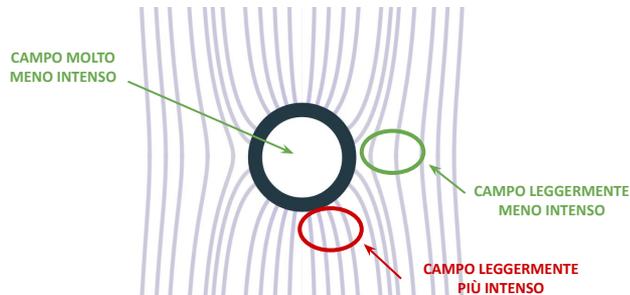


- ❑ Richiedono temperature e/o pressioni specifiche
- ❑ Raggiungono shielding factor virtualmente infiniti
- ❑ Rischiano di saturare
- ❑ Sono dipendenti dalla geometria

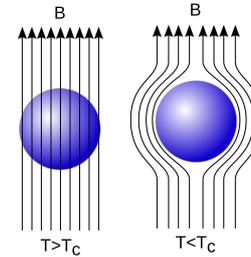
Mitigazione passiva: schermi ferromagnetici



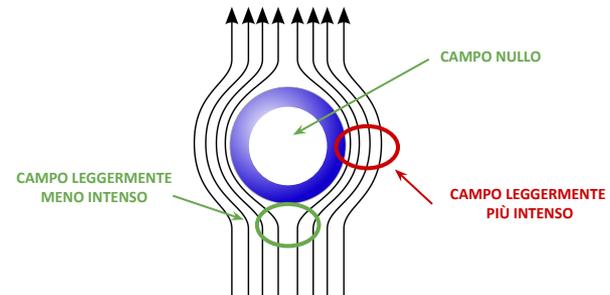
- ❑ Funzionano a temperatura e pressione ambiente
- ❑ Raggiungono shielding factor molto elevati
- ❑ Rischiano di saturare
- ❑ Sono dipendenti dalla geometria



Mitigazione attiva: schermi superconduttori



- ❑ Richiedono temperature e/o pressioni specifiche
- ❑ Raggiungono shielding factor virtualmente infiniti
- ❑ Rischiano di saturare
- ❑ Sono dipendenti dalla geometria



Applicazioni



Shielding della torre della TM:

Le torri che ospitano le masse di test sono tra le componenti più importanti da schermare. Diverse simulazioni sono state svolte utilizzando tecniche di mitigazione passiva: schermi ferromagnetici e correnti indotte [5].

Shielding con schermi ferromagnetici:

Le torri che ospitano le masse di test sono tra le componenti più importanti da schermare. Diverse simulazioni sono state svolte utilizzando tecniche di mitigazione passiva: schermi ferromagnetici e correnti indotte [5].

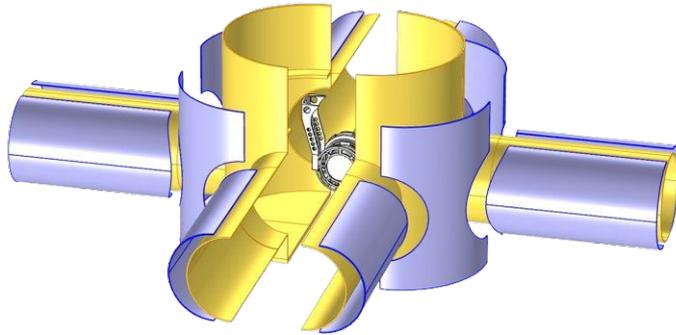


Fig 5. Rappresentazione schematica di una torre di Virgo (giallo) ospitante una massa di test (grigio). In blu sono rappresentati gli schermi ferromagnetici utilizzati.

Fig 6. Shielding Factor (SF) ottenuto ricoprendo i bracci dell'interferometro in corrispondenza della torre con uno strato ferromagnetico di permeabilità magnetica relativa di 100.000 per 2 m [5].

Thickness (mm)	Shielding Factor ($B_{ext} = B\hat{x}$)	Shielding Factor ($B_{ext} = \frac{B}{\sqrt{2}}(\hat{x}, \hat{y})$)
0.4	3.92	3.62
0.8	4.81	4.42
1.2	5.66	5.19
1.6	6.48	5.95
2.0	7.29	6.68

Shielding con correnti indotte:

Le torri che ospitano le masse di test sono tra le componenti più importanti da schermare. Diverse simulazioni sono state svolte utilizzando tecniche di mitigazione passiva: schermi ferromagnetici e correnti indotte [5].

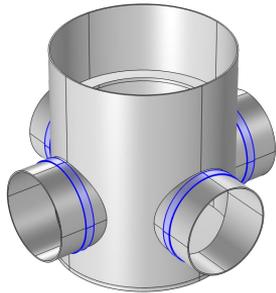
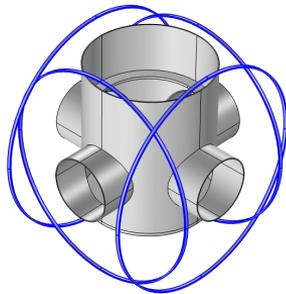


Fig 7.
Rappresentazione schematica della torre della TM. In blu quattro anelli di rame appoggiati ai bracci.

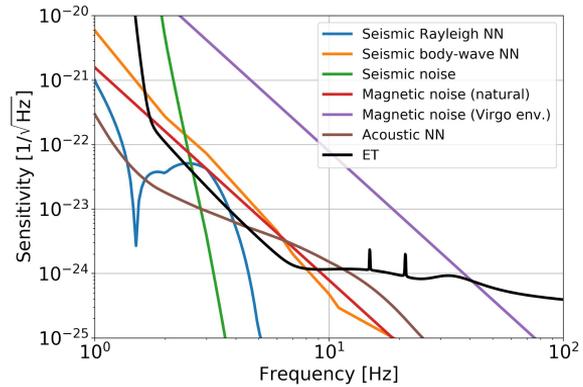
Fig 8.
Rappresentazione schematica della torre della TM. In blu quattro anelli di rame in configurazione di Helmholtz.



Frequency [Hz]	Shielding Factor	Shielding Factor
1	1.0056	1.0417
2	1.0189	1.1380
5	1.0568	1.3970
10	1.0797	1.5480
20	1.0888	1.6079
50	1.0928	1.6348
100	1.0951	1.6502
200	1.0971	1.6646

Fig 9. Shielding Factor (SF) ottenuto a diverse frequenze inserendo quattro anelli in rame di sezione rettangolare di base 5 cm e altezza 2 cm. La prima e la seconda colonna fanno riferimento rispettivamente alla Fig 7 e alla Fig 8. Il campo magnetico esterno è uniforme e diretto lungo un braccio.

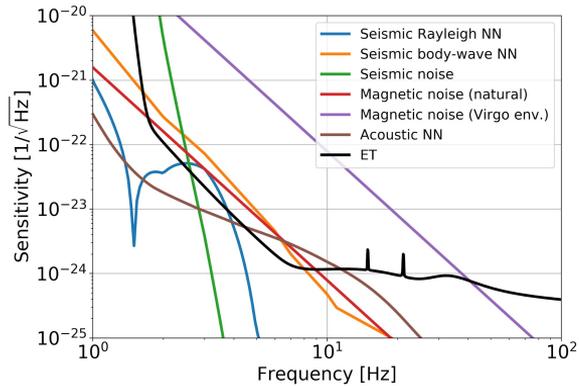
Conclusioni:



Conclusioni:

Obbiettivi:

1. **Riduzione rumore magnetico naturale** almeno di un **fattore 3**
2. Riduzione rumore magnetico **ambientale** almeno di un **fattore 100**



Conclusioni:

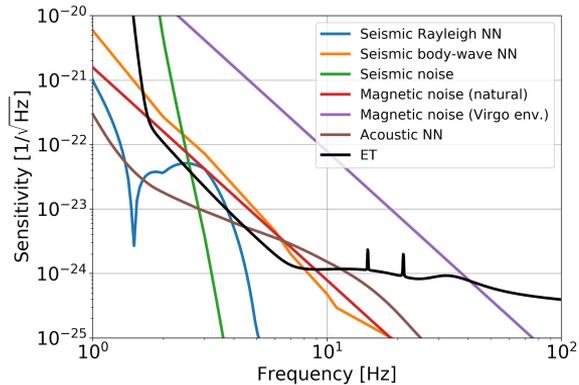
Obbiettivi:

1. **Riduzione rumore magnetico naturale** almeno di un **fattore 3**
2. Riduzione rumore magnetico **ambientale** almeno di un **fattore 100**



Utilizzando:

1. **Schermi ferromagnetici**
2. **Correnti indotte**
3. **Tecniche attive**



Conclusioni:

Obbiettivi:

1. **Riduzione rumore magnetico naturale** almeno di un **fattore 3**
2. Riduzione rumore magnetico **ambientale** almeno di un **fattore 100**



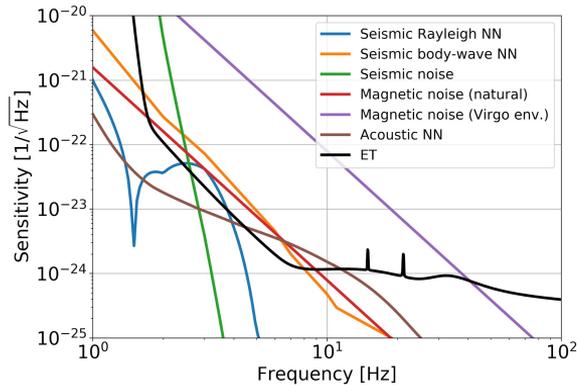
Utilizzando:

1. **Schermi ferromagnetici**
2. **Correnti indotte**
3. **Tecniche attive**



Dove?

1. Le **zone** dell'interferometro maggiormente **sensibili**
2. Le **sorgenti** di rumore magnetico

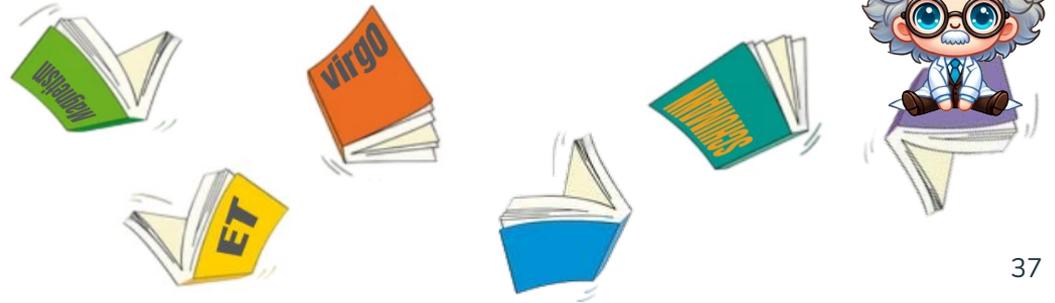




Grazie per l'attenzione!

Bibliografia:

- [1] <https://www.et-gw.eu/index.php/etsensitivities>
- [2] F. Amann et al. *Site-selection criteria for the Einstein Telescope*. Review of Scientific Instruments (2020)
- [3] Michael Coughlin et al. *Measurement and subtraction of schumann resonances at gravitational-wave interferometers*. Phys. Rev. D (2018)
- [4] Alessio Cirone et al. *Investigation of magnetic noise in advanced virgo*. Classical and Quantum Gravity (2019)
- [5] Barbara Garaventa, Federico Armato, Andrea Chincarini and Irene Fiori. *Magnetic Noise Mitigation Strategies for the Einstein Telescope Infrastructure*. Galaxies (2025)



Backup slides

Cos'è un detector di onde gravitazionali?

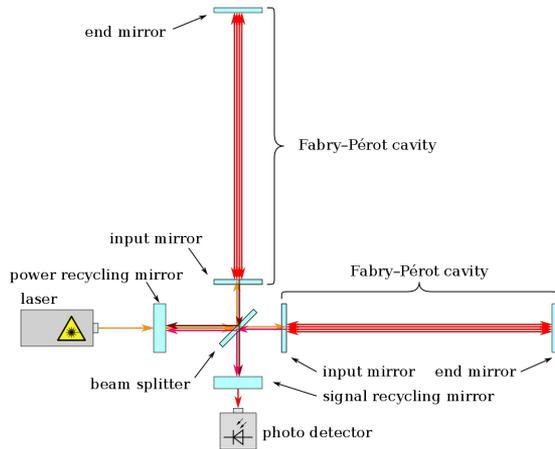


Fig 1b. Schema semplificato di un tipico rivelatore di onde gravitazionali.

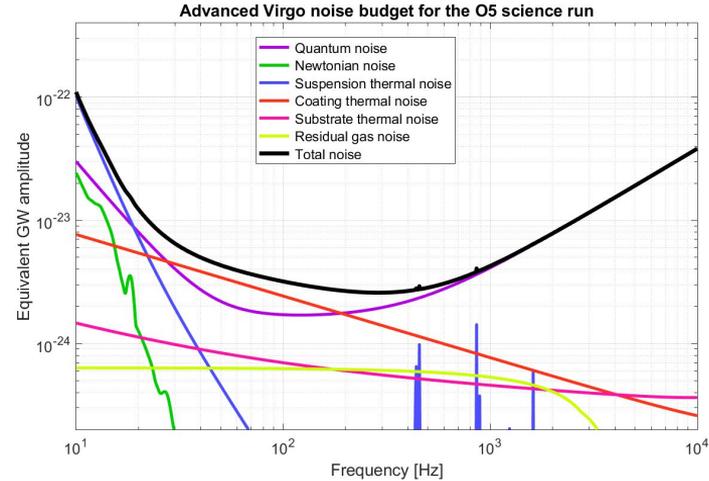


Fig 2b. Stima del rumore totale di Advanced Virgo per il quinto run osservativo [1].

Einstein Telescope

Forma: triangolo o doppia L

Lunghezza bracci: 10km o 15km

Profondità: 200-300m

Siti candidati: Italia (Sos Enattos, Sardegna), Olanda, Germania.

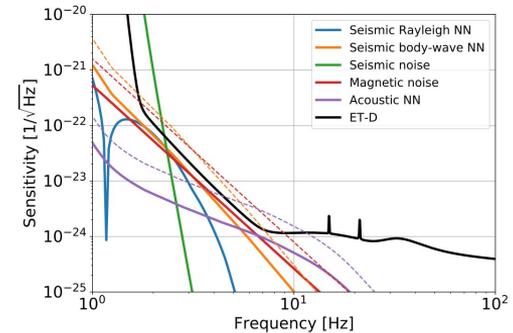


Fig 3b. Esempio di un ipotetico bilancio del rumore ambientale di ET nelle basse frequenze per ottenere la sensibilità di progetto (curva nera). Le linee tratteggiate indicano i livelli di rumore ambientale senza la necessaria mitigazione [2].

Shielding con schermi ferromagnetici:

Le torri che ospitano le masse di test sono tra le componenti più importanti da schermare. Diverse simulazioni sono state svolte utilizzando tecniche di mitigazione passiva: schermi ferromagnetici e correnti indotte [5].

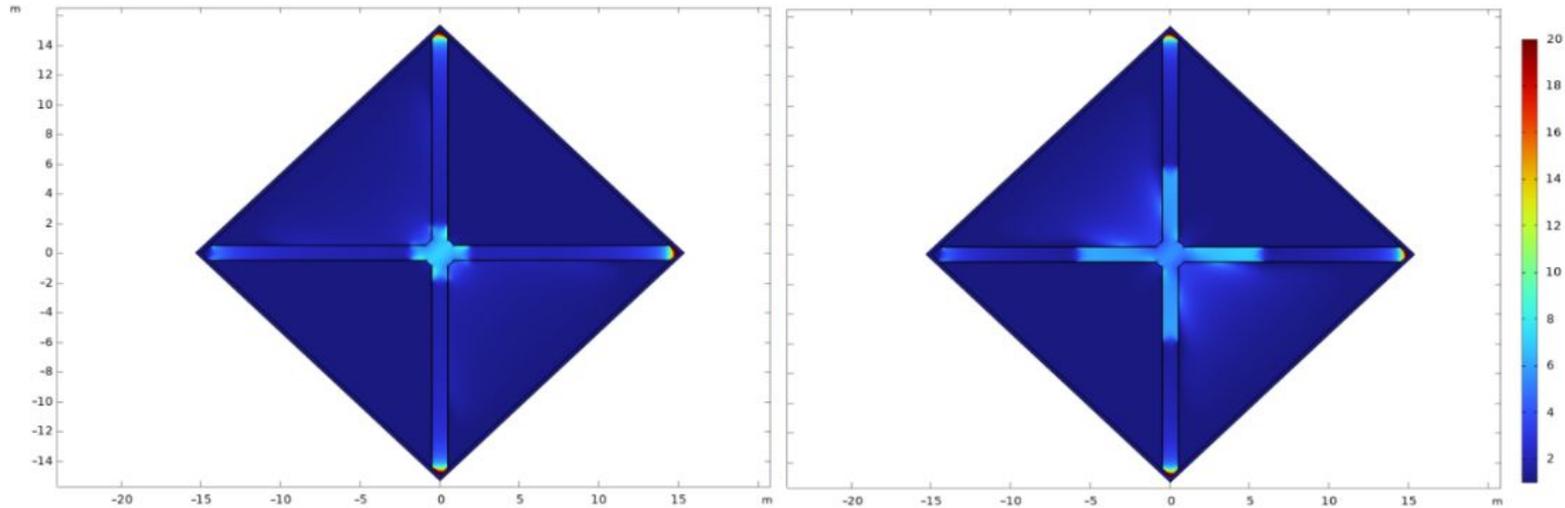
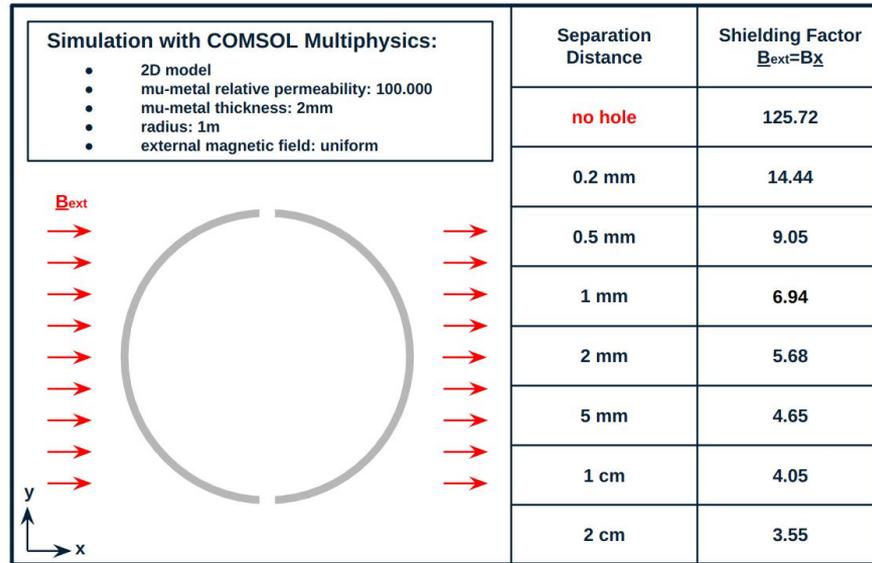


Fig 4b. Shielding Factor (SF) ottenuto ricoprendo i bracci dell'interferometro in corrispondenza della torre con uno strato ferromagnetico di spessore 2 mm e permeabilità magnetica relativa di 100.000 per 1m (grafico a sinistra) e per 5m (grafico a destra). Il campo magnetico esterno è uniforme e diretto a 45 gradi rispetto ai bracci dell'interferometro [5].

“Fuga” del campo magnetico nei punti di congiunzione tra i fogli ferromagnetici:



Saturazione del campo:

Magnetic characterization of Mumetal® for passive shielding of stray fields down to the nano-Tesla level

Contents lists available at ScienceDirect

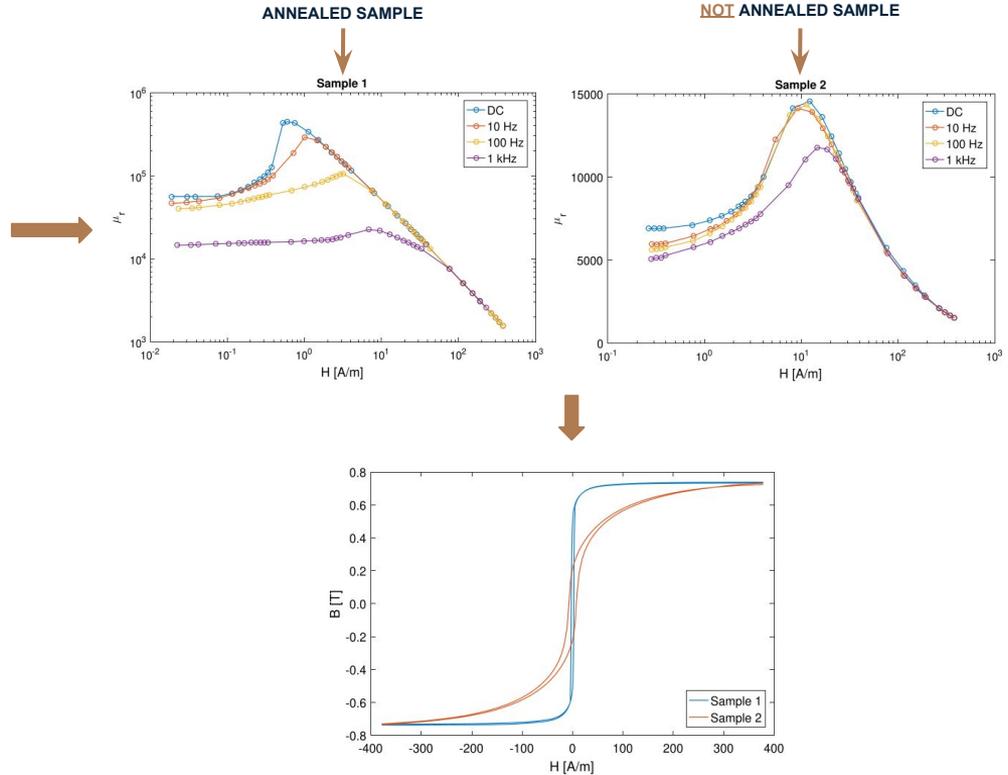
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Magnetic characterization of Mumetal® for passive shielding of stray fields down to the nano-Tesla level

Pasquale Arpaia^{a,*}, Philip Nicholas Burrows^b, Marco Buzio^c, Chetan Gohil^{b,d}, Mariano Pentella^{e,f}, Daniel Schulte^d

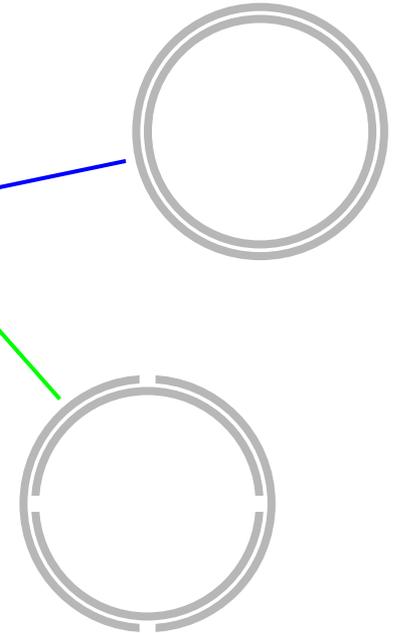
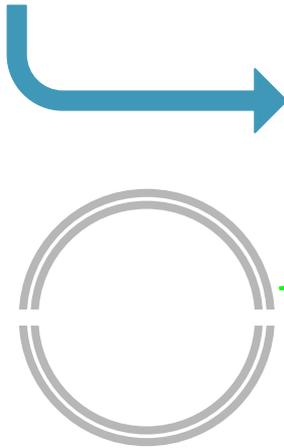
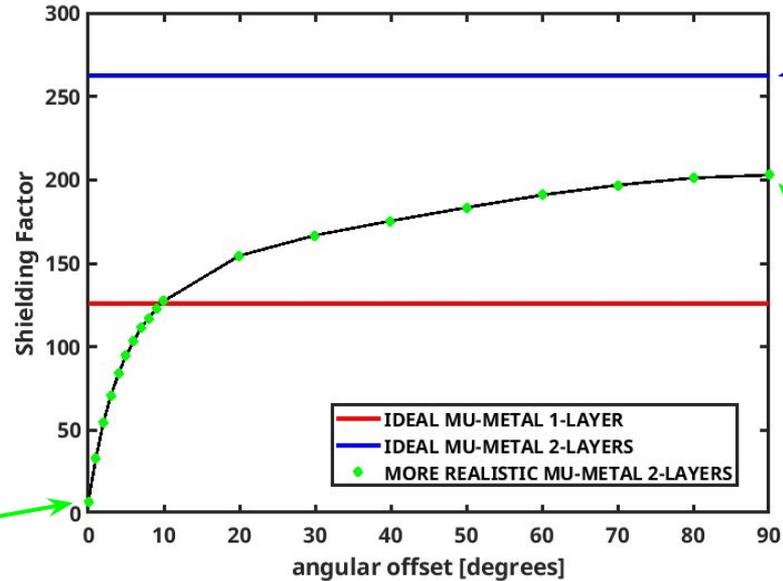
^a Department of Electrical Engineering and Information Technology, University of Naples "Federico II", 80138 Naples, Italy
^b John Adams Institute (JAI), University of Oxford, Oxford, OX1 3RD, United Kingdom
^c Technology Department, European Organisation for Nuclear Research (CERN), 1211 Geneva, Switzerland
^d Beam2 Department, European Organisation for Nuclear Research (CERN), 1211 Geneva, Switzerland
^e Department of Applied Science and Technology, Politecnico di Torino, 10129, Torino, Italy



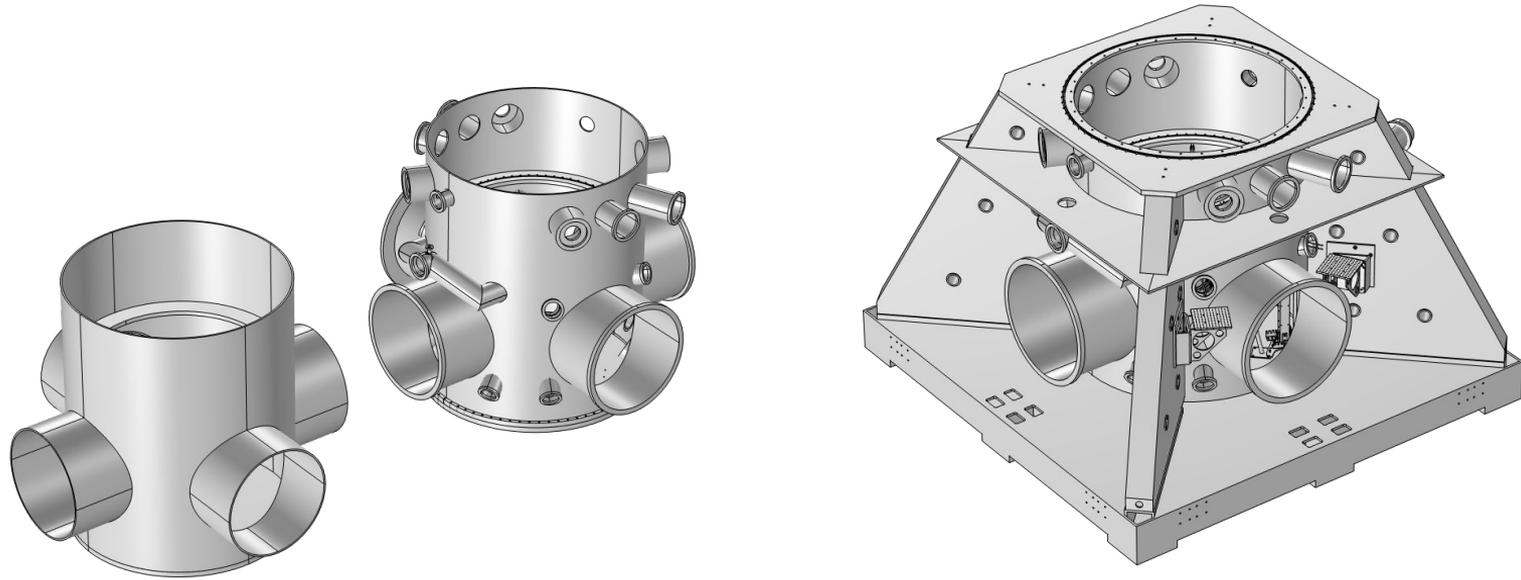
Benefici del multi-strato:

Simulation with COMSOL Multiphysics:

- 2D model
- mu-metal relative permeability: 100.000
- mu-metal thickness: 2mm
- radius: 1m
- external magnetic field: uniform
- hole size: 2 mm
- distance between mu-metal layers: 0.5 mm

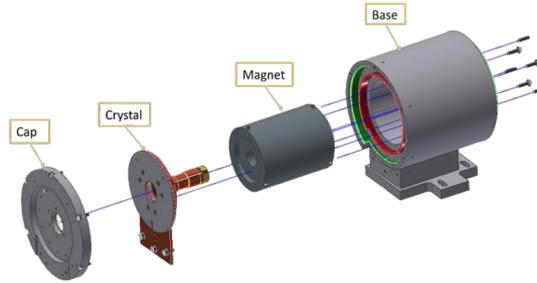


La dura realtà ...



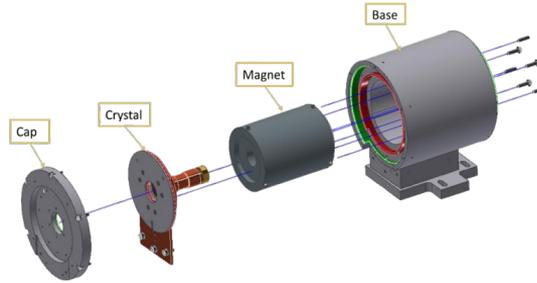
Shielding del Faraday Isolator:

Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.



Shielding del Faraday Isolator:

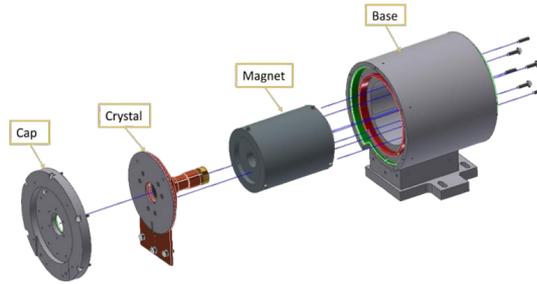
Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.



Alla fine è stato raggiunto uno shielding factor di circa 165, compatibile con la geometria del sistema [6].

Shielding del Faraday Isolator:

Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.

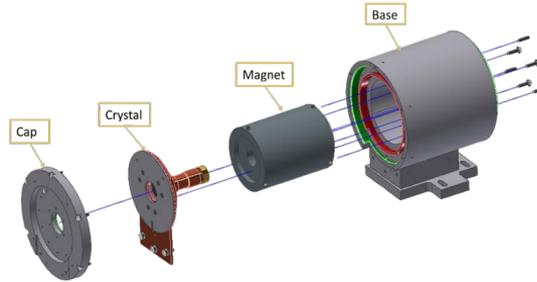


Alla fine è stato raggiunto uno shielding factor di circa 165, compatibile con la geometria del sistema [6].

Tuttavia, la successiva realizzazione pratica ha portato a un risultato decisamente peggiore (SF ~ 20) [7].

Shielding del Faraday Isolator:

Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.



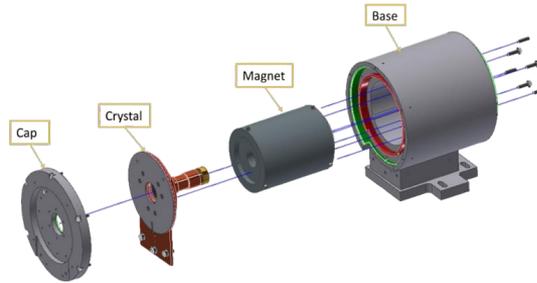
Alla fine è stato raggiunto uno shielding factor di circa 165, compatibile con la geometria del sistema [6].

Tuttavia, la successiva realizzazione pratica ha portato a un risultato decisamente peggiore (SF ~ 20) [7].

Possibili cause:

Shielding del Faraday Isolator:

Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.



Alla fine è stato raggiunto uno shielding factor di circa 165, compatibile con la geometria del sistema [6].

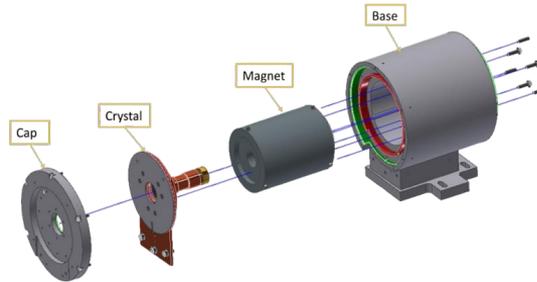
Tuttavia, la successiva realizzazione pratica ha portato a un risultato decisamente peggiore (SF ~ 20) [7].

Possibili cause:

- Saturazione del campo ?

Shielding del Faraday Isolator:

Tra le sorgenti di rumore magnetico ambientale troviamo il Faraday Isolator. Diverse simulazioni di schermaggio ferromagnetico, utilizzando uno strato di 2 mm ferro e uno di 2 mm di mumetal, sono state svolte.



Alla fine è stato raggiunto uno shielding factor di circa 165, compatibile con la geometria del sistema [6].

Tuttavia, la successiva realizzazione pratica ha portato a un risultato decisamente peggiore (SF ~ 20) [7].

Possibili cause:

- Saturazione del campo ?
- "Fuga" di campo magnetico nei punti di congiunzione tra i fogli ferromagnetici ?