

FLAGS

Fiber Links for Atomic Gravity Sensors

G. Rosi

Sedi partecipanti: FI, GE, PI, RM3, LNF

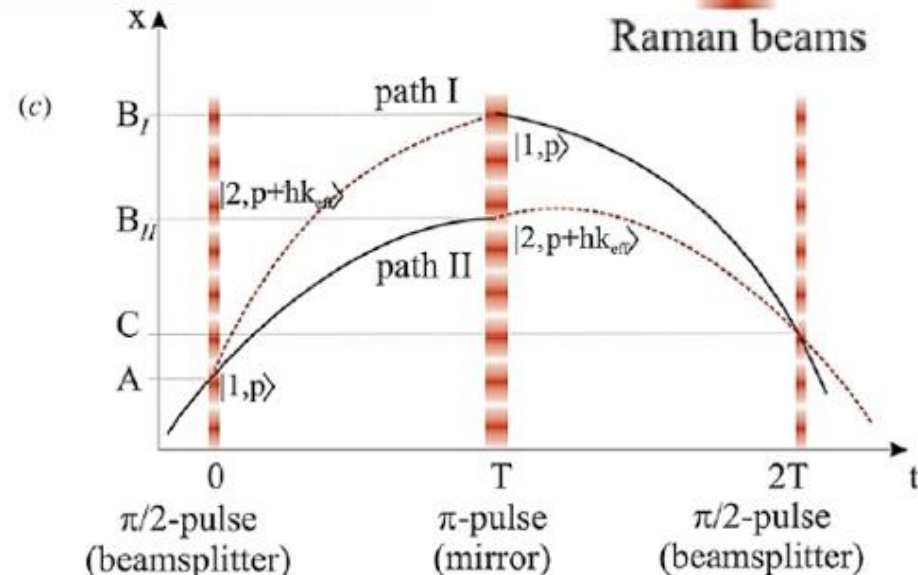
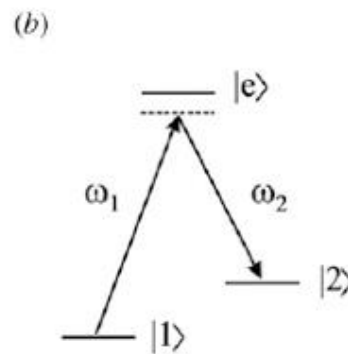
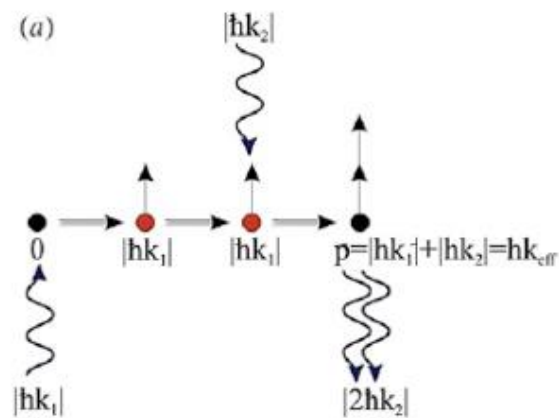
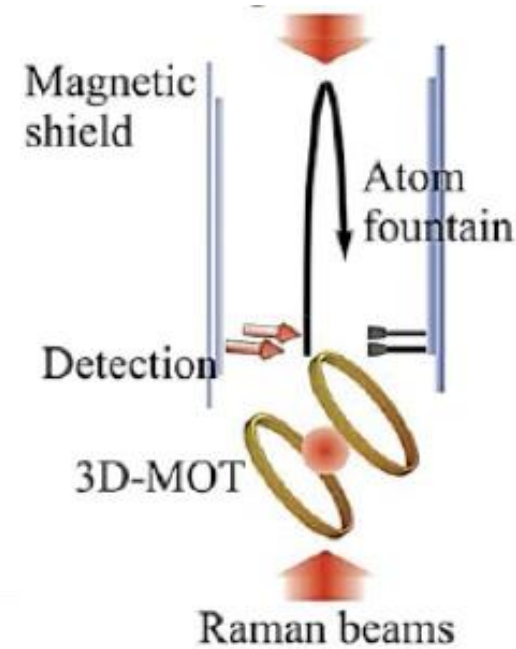
Enti esterni: INGV, EGO

Sommario

- I sensori ad interferometria atomica
- Reti di gravimetri atomici con link ottici
 - Vantaggi scientifici e tecnologici delle misure di gravità differenziali
 - Link ottici in vuoto e in fibra
 - Fattibilità tecnica, scalabilità, limiti di sensibilità
- Possibili applicazioni
 - Fisica della terra e dell'atmosfera
 - Onde gravitazionali
 - Dark Matter
- Il progetto FLAGS
 - Gruppo proponente
 - WBS
 - Piano temporale
 - Costi

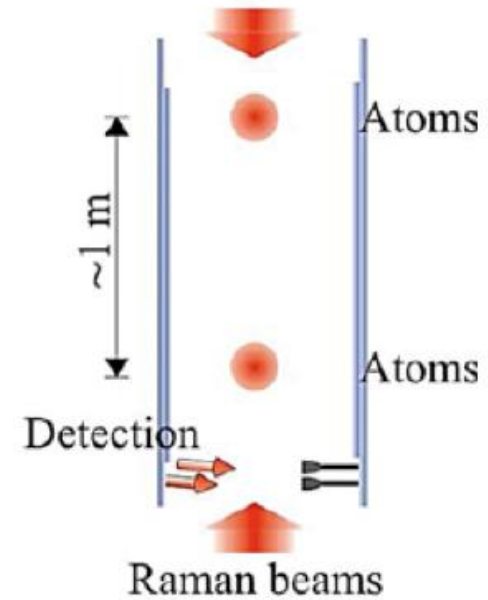
Gravimetri atomici

- Sono basati sull'interferometria atomica: laser cooling + manipolazione coerente di pacchetti d'onda atomici
- Sono i migliori gravimetri assoluti: dimostrate sensibilità dell'ordine di $10 \mu\text{gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, accuratezza $\sim 1 \mu\text{gal}$ ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$)
- Il rumore sismico è uno dei principali limiti di sensibilità



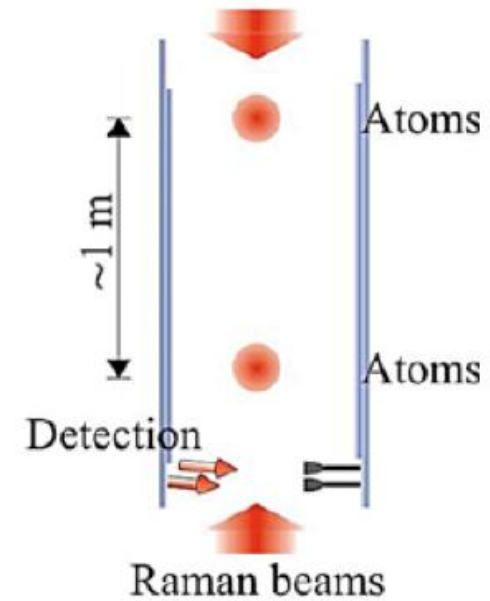
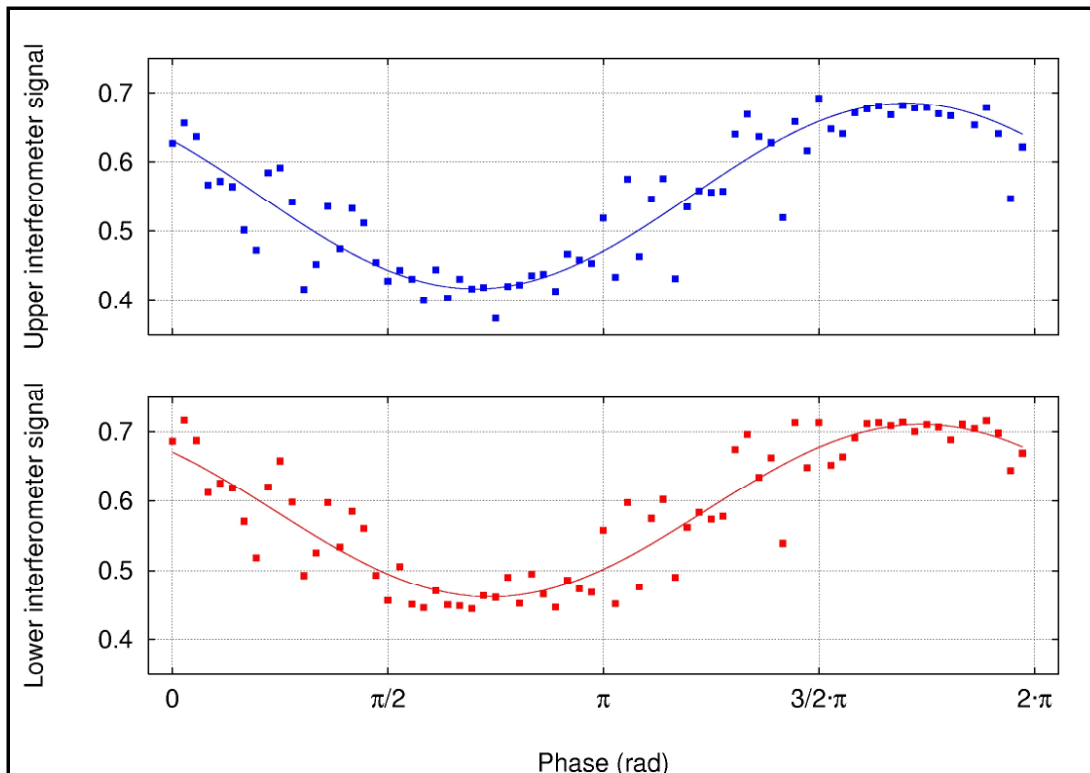
Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico



Gradiometri gravitazionali

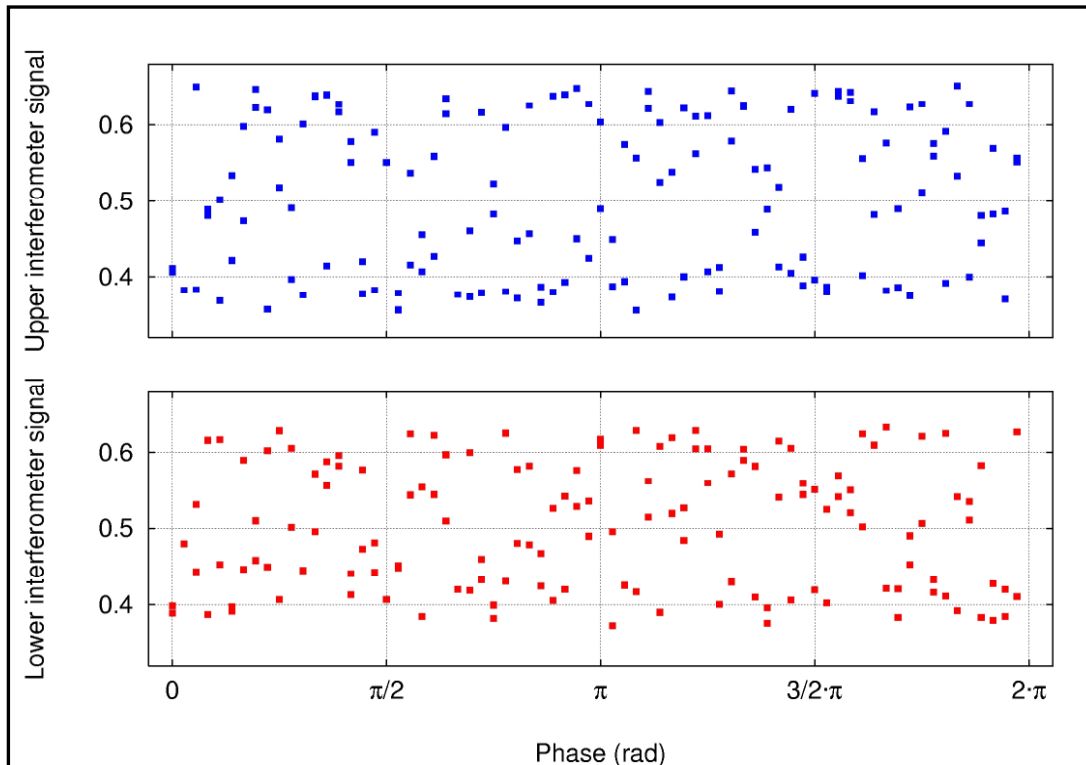
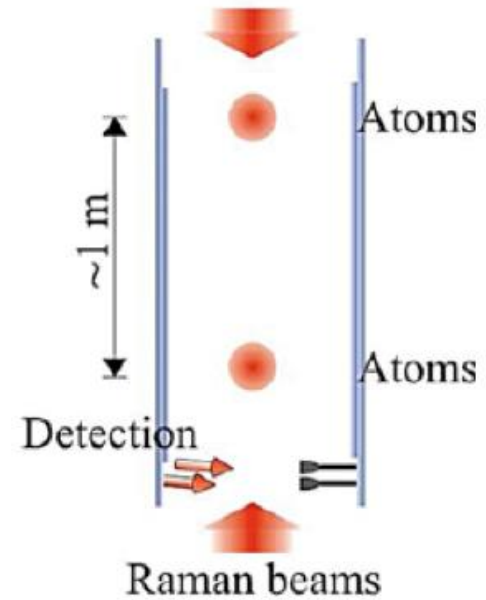
- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico



$$T = 50 \text{ ms}$$
$$\text{resol.} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ g/shot}$$

Gradiometri gravitazionali

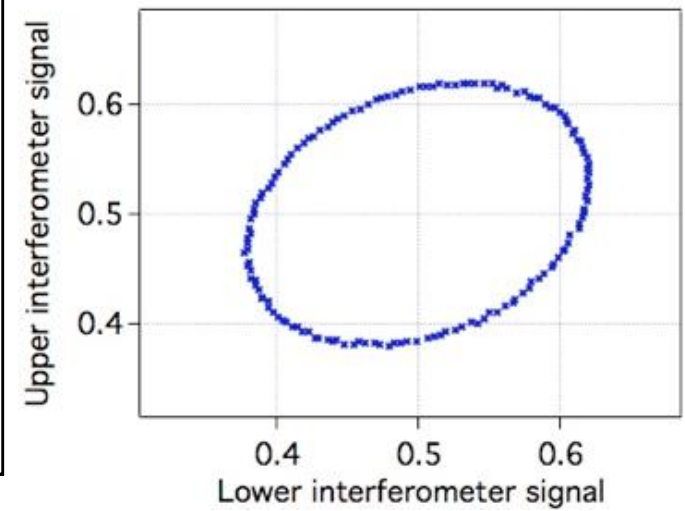
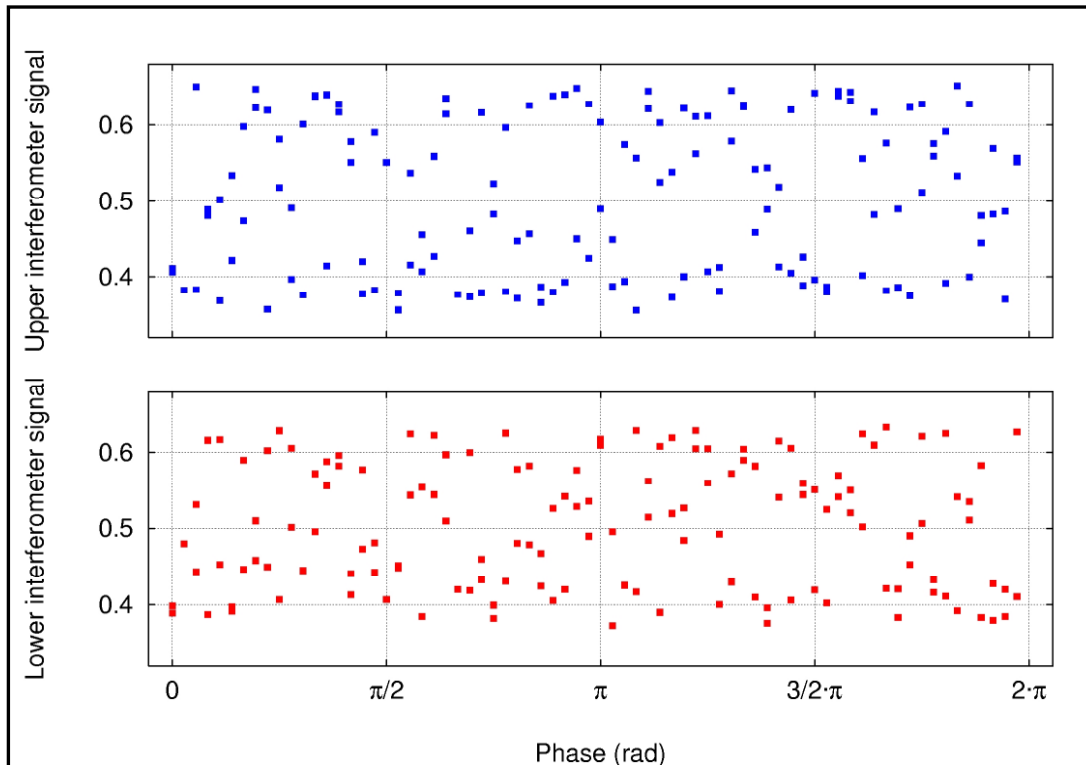
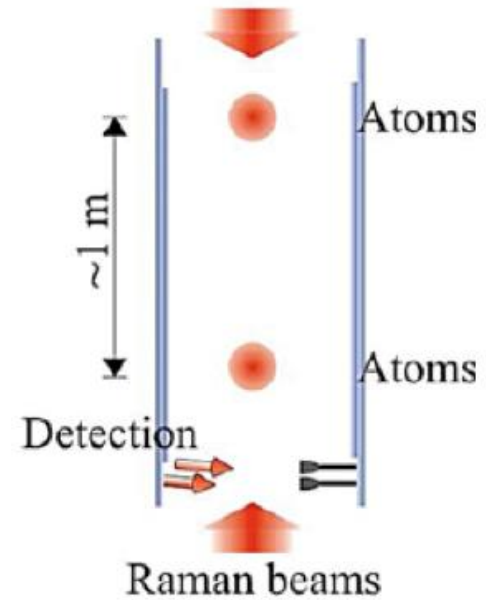
- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico



$$T=150 \text{ ms}$$
$$\text{resol.} = 3.2 \times 10^{-8} \text{ g/shot}$$

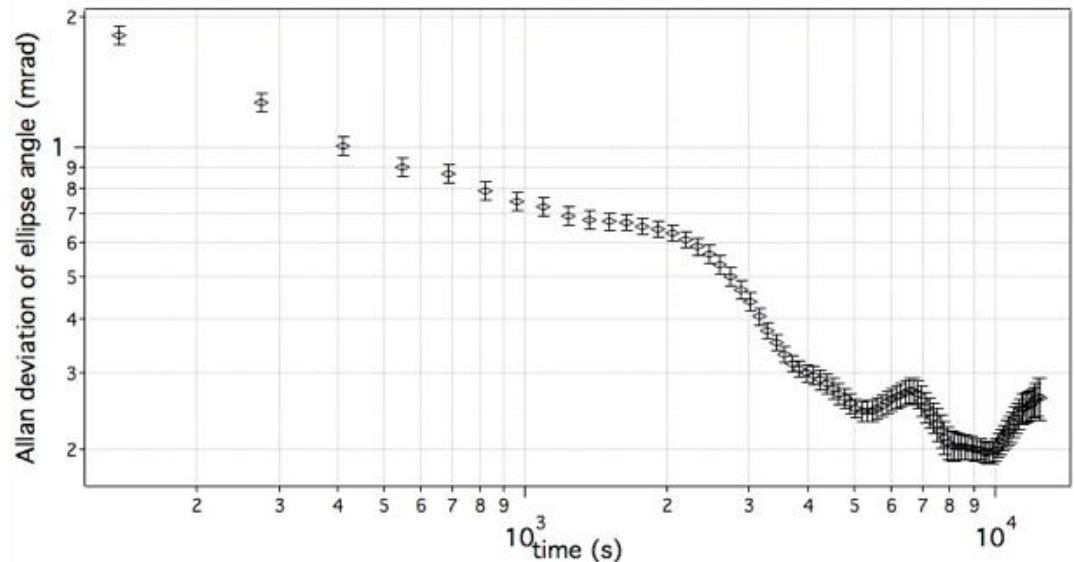
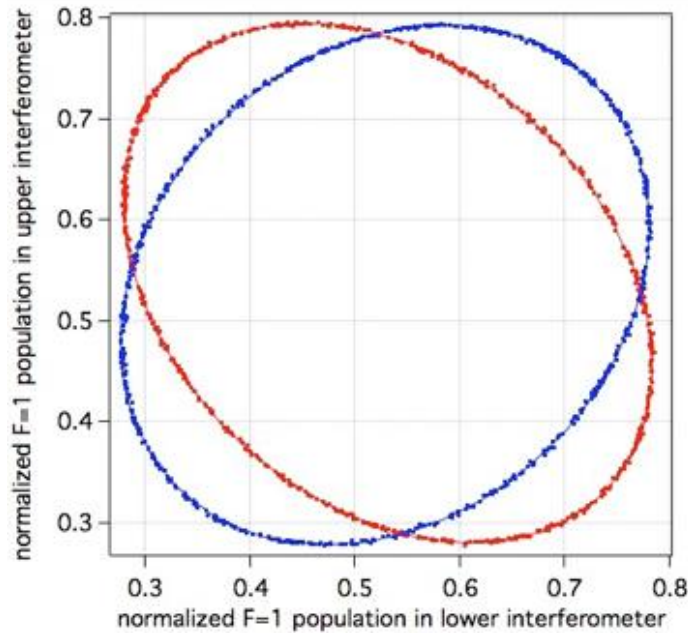
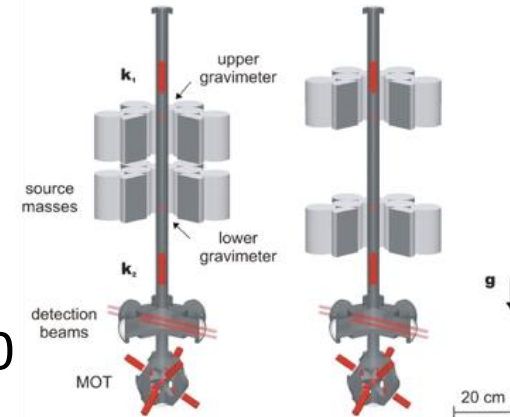
Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico



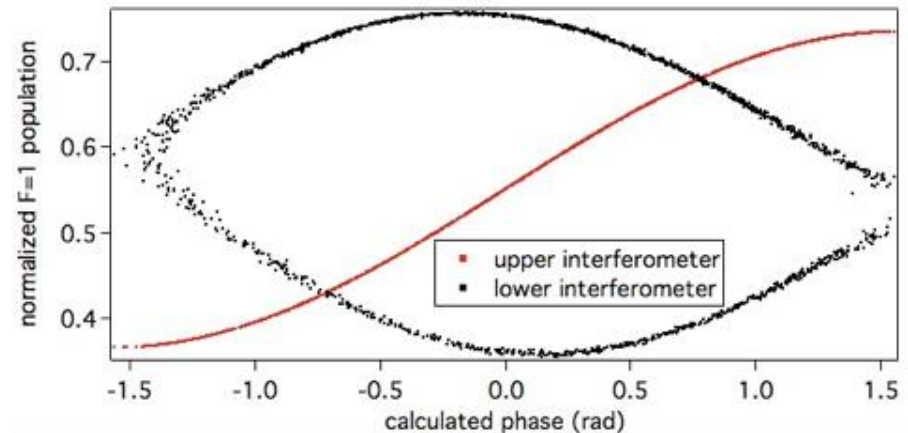
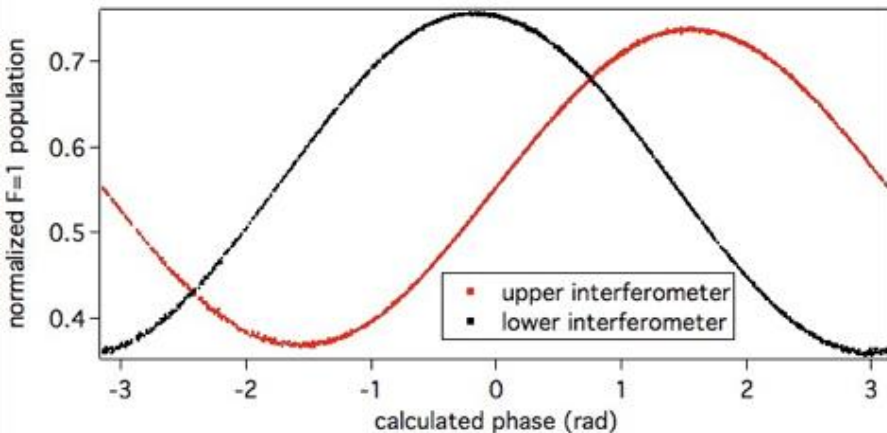
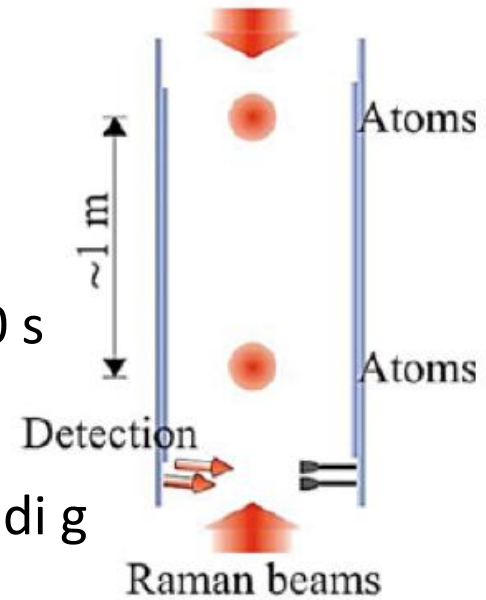
Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico
- Sensibilità differenziale dimostrata di $5 \cdot 10^{-11}$ g @10000 con baseline di 30 cm
 - [F. Sorrentino et al., Phys. Rev. A **89**, 023607 (2014)]



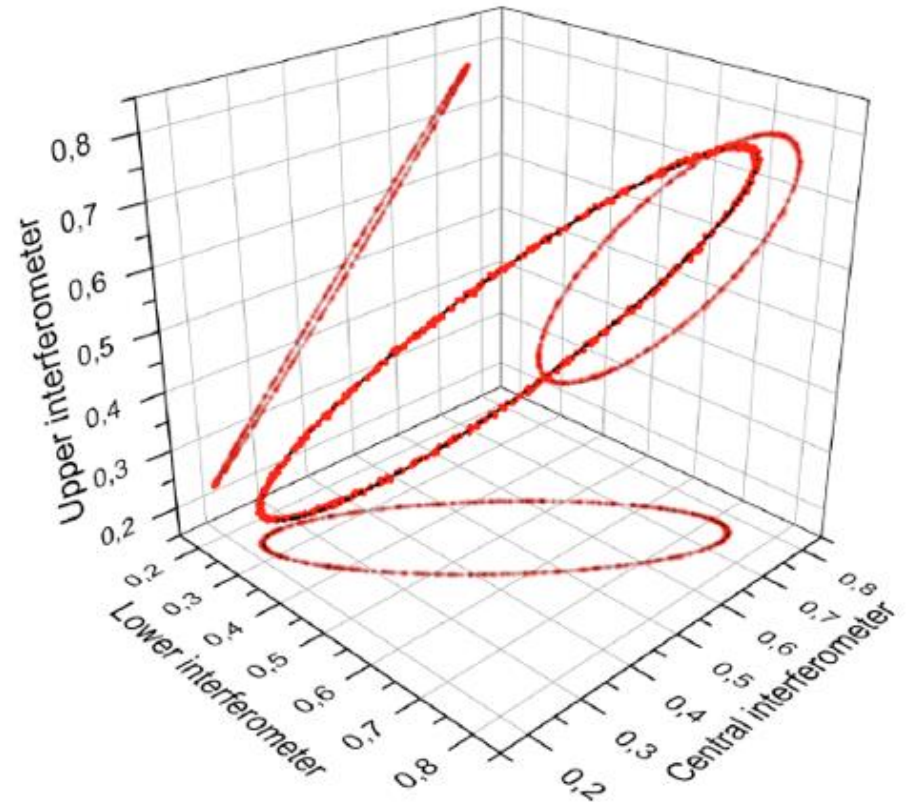
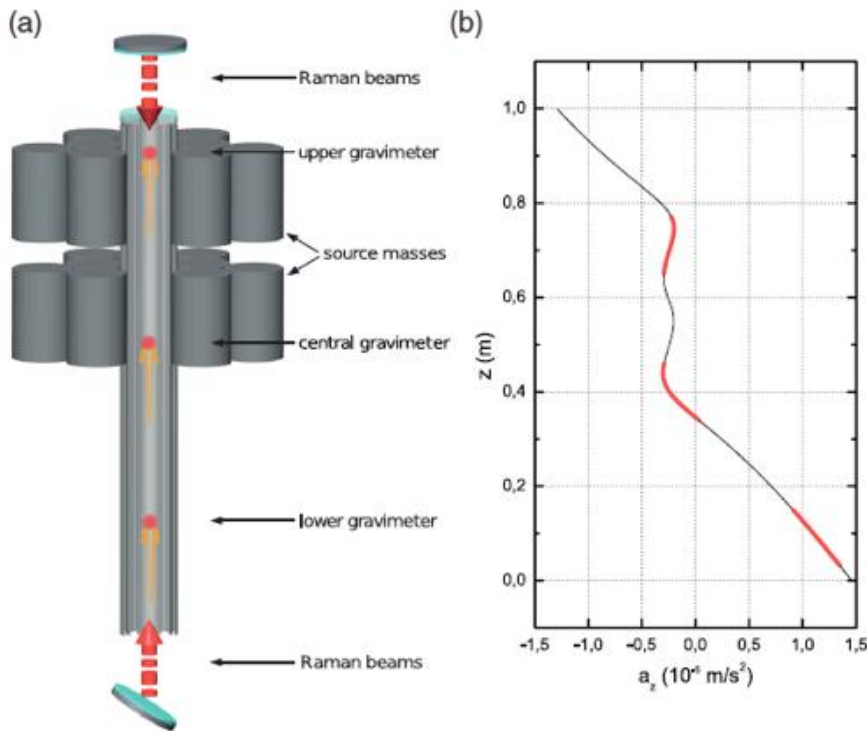
Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico
- Sensibilità differenziale dimostrata di $5 \cdot 10^{-11} \text{ g @ } 10000 \text{ s}$ con baseline di 30 cm
 - [F. Sorrentino et al., Phys. Rev. A **89**, 023607 (2014)]
- L'uso di due nuvole atomiche migliora anche la misura di g
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)



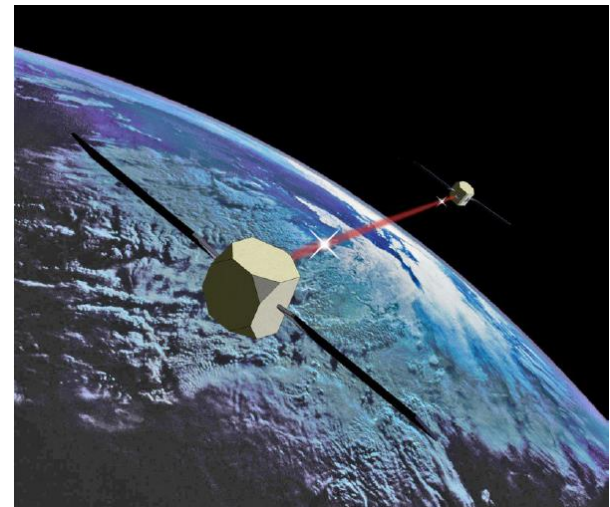
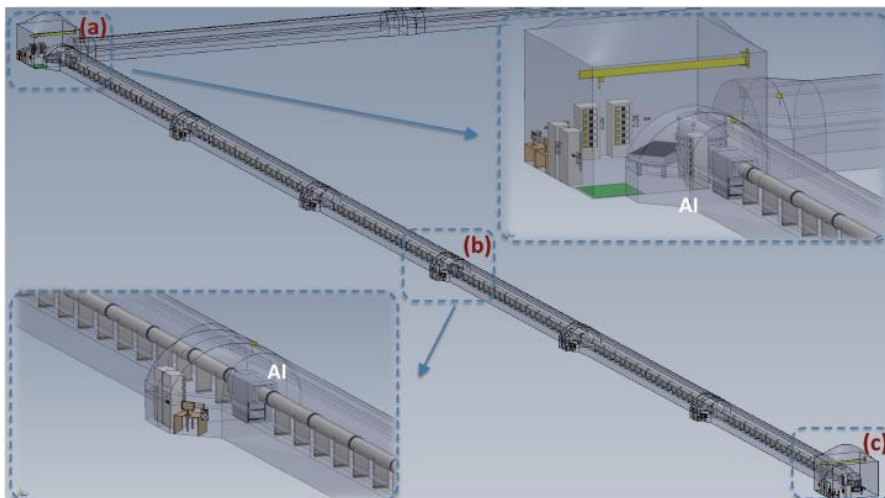
Scalabilità dei gradiometri

- Con $n+1$ campioni atomici equispaziati si misura la derivata spaziale n -sima del campo gravitazionale
- Dimostrato ad es. per la misura della curvatura del campo gravitazionale
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)



Scalabilità dei gradiometri

- Con $n+1$ campioni atomici equispaziati si misura la derivata spaziale n -sima del campo gravitazionale
- Dimostrato ad es. per la misura della curvatura del campo gravitazionale
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)
- La sensibilità nella misura di gradiente dipende dalla distanza tra i sensori
 - Misure ultra-sensibili richiedono apparati di grandi dimensioni
 - Fontane verticali da ~ 10 m (Stanford, Hannover, Firenze)
 - Cavità ottica orizzontale da 300 m, (LNBB, Francia, progetto MIGA)
 - Proposte per link laser tra satelliti distanti: AGIS, AGIS-LEO, SAGE

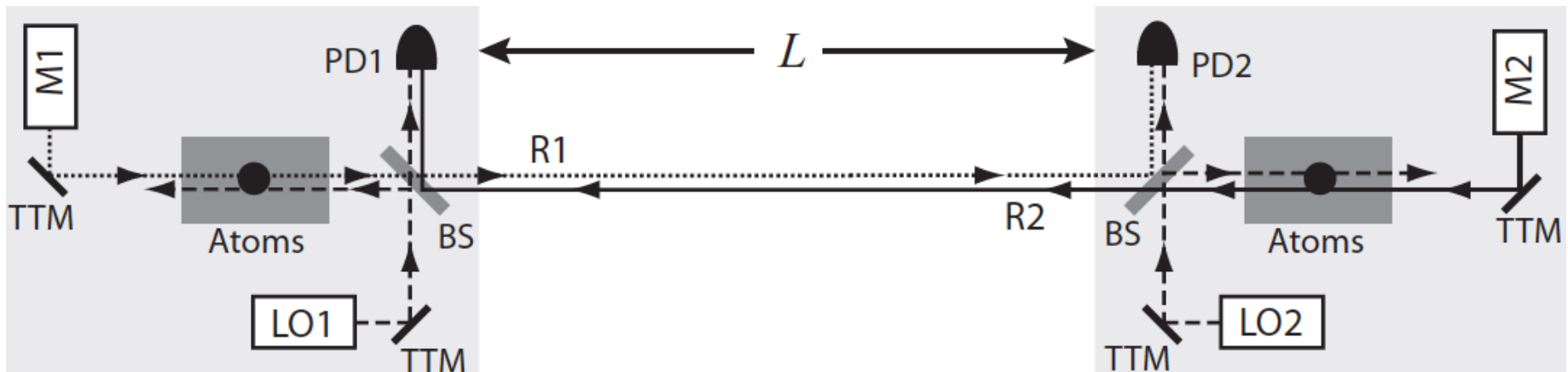


Reti di gravimetri coerenti: motivazioni

- Misure di gravità differenziali vs. assolute
 - Misure relative (gradiometro) non affette dal rumore sismico: migliore sensibilità
 - Possibile evidenziare la struttura di sorgenti localizzate
 - Possibile estrarre segnali deboli dalla correlazione tra sensori distanti
- Vantaggio tecnologico
 - Misure ultrasensibili con apparati compatti (requisiti di isolamento sismico meno stringenti)
 - Possibilità di operare N sensori con singola sorgente laser

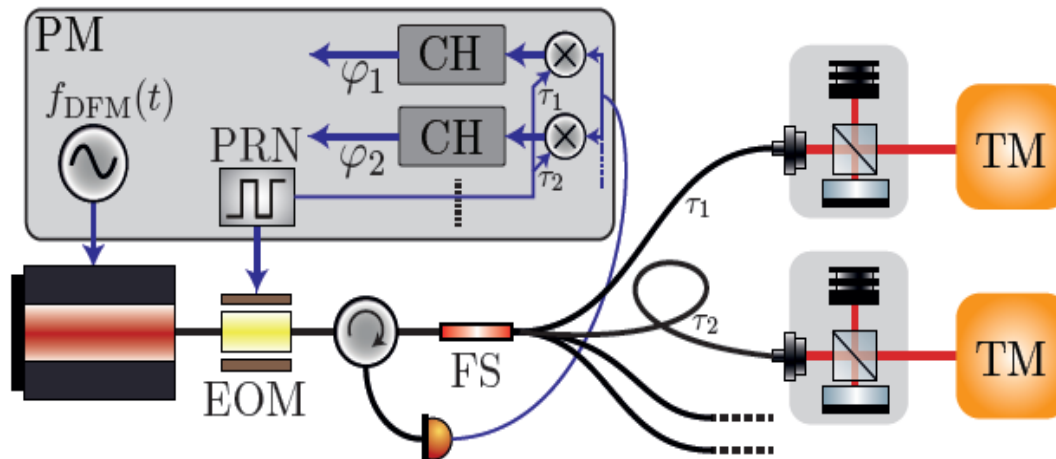
FLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - CMRR elevato su grandi distanze (\sim km)
 - controllo di fronti d'onda laser
 - Link in eterodina [J. M. Hogan and M. A. Kasevich, Atom interferometric gravitational wave detection using heterodyne laser links, Phys. Rev. A 94, 033632 (2016)]



FLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]



FLAGS: concetto di base

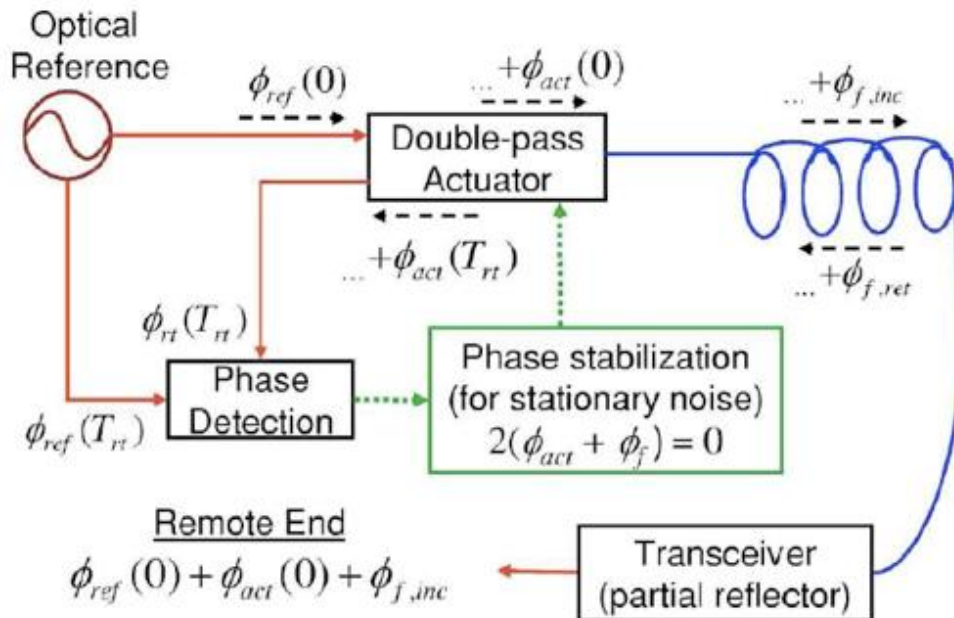
- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]
- Studiare la scalabilità della rete per:
 - numero di sensori
 - distanza tra i sensori
 - dimensioni (e sensibilità) del singolo sensore

FLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]
- Studiare la scalabilità della rete per:
 - numero di sensori
 - distanza tra i sensori
 - dimensioni (e sensibilità) del singolo sensore
- Studiare le configurazioni ottimali per specifici campi applicativi
 - Topologia della rete
 - trade-off costo/prestazioni

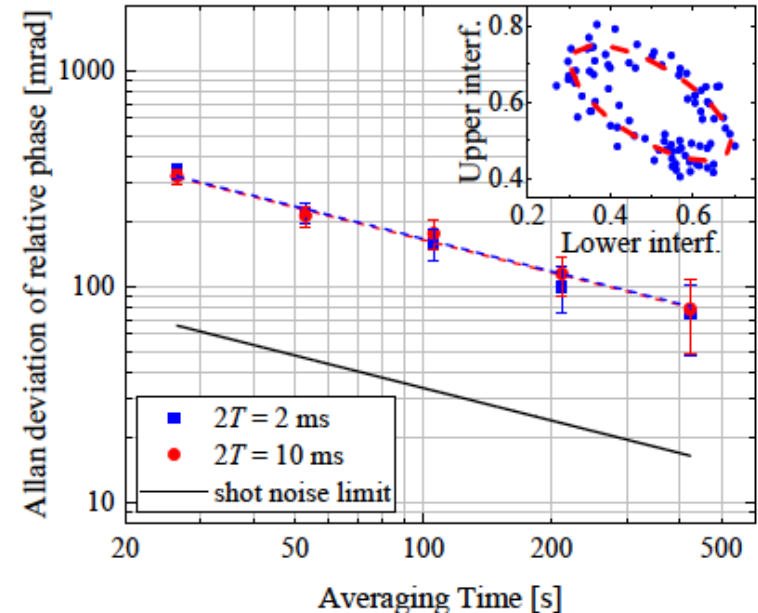
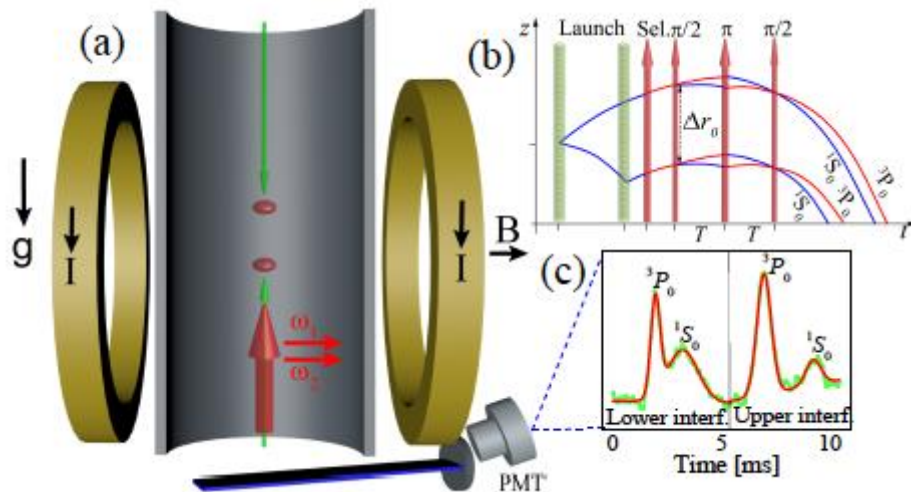
Link ottici coerenti

- Eliminazione del rumore di fase indotto dalla fibra ottica (per effetti termici e meccanici) mediante il controllo attivo del campo laser
- Dimostrata la possibilità di confrontare frequenze ottiche con precisioni migliori di 10^{-20} su distanze di centinaia di km
- Diversi link già sviluppati, che utilizzano le infrastrutture esistenti per telecomunicazioni



Interferometri atomici ed orologi ottici

- Schema con transizioni ad un fotone, per ridurre l'impatto del rumore di frequenza su baseline lunghe per l'effetto del tempo di propagazione
 - Proposta teorica di schema differenziale: N. Yu and M. Tinto, Gen. Relativ. Grav. 43, 1943(2011); S. Dimopoulos et al., Phys. Rev. D 78, 122002 (2008)
 - Dimostrazione di interferometro con transizione ad un fotone: L. Hu et al., Atom interferometry with the Sr optical clock transition, arXiv:1708.05116 (2017)
 - In FLAGS si intende sviluppare questo metodo per misure differenziali fino a livelli di sensibilità allo stato dell'arte dei migliori gradiometri atomici



Ambiti applicativi

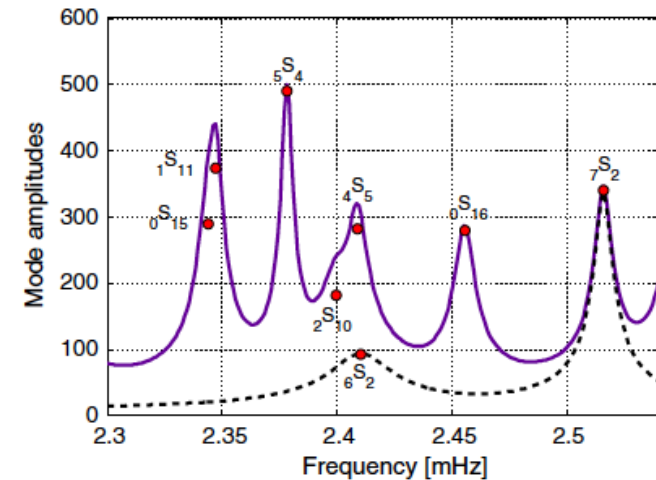
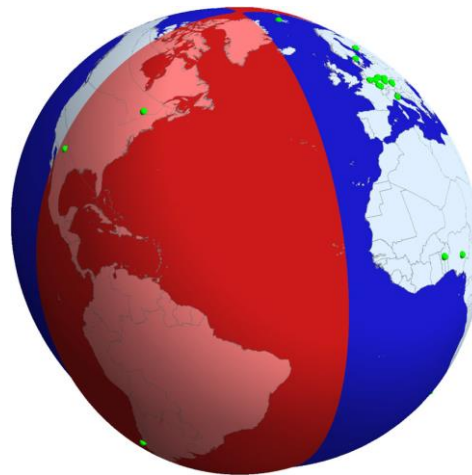
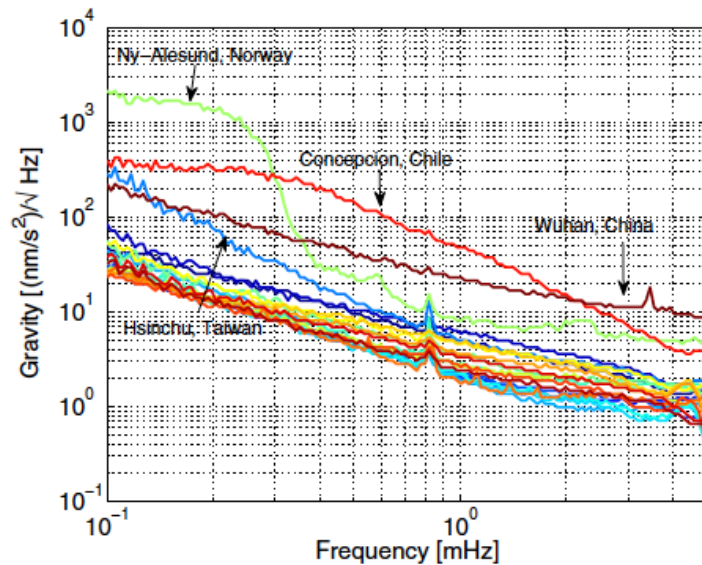
- Fisica terrestre e dell'ambiente
 - Fisica della terra solida
 - Fisica della terra fluida
- Rivelazione di onde gravitazionali
 - Misura del rumore Newtoniano in bassa frequenza per rivelatori di 3° generazione
 - Misura di fondo stocastico tramite modi normali della terra
- Fisica fondamentale
 - Ricerca di Dark Matter
 - Dark energy

Fisica terrestre e dell'ambiente

- Fisica della terra solida
 - Scala globale
 - rivelazione dei modi di Slichter
 - Osservazione dell'Earth Hum
 - Anomalie gravitazionali locali
 - Idrologia degli acquiferi
 - deformazione elastica di corpi rocciosi
 - migrazione di fluidi magmatici-idrotermali in sistemi vulcanici o geotermici
 - Fenomeni sismici
 - Deformazione di corpi rocciosi sotterranei
 - processi fisici di dislocazione di strutture sismogenetiche
- Fisica della terra fluida
 - Oceani
 - sorgenti e propagazione di tsunami
 - dinamiche oceaniche (strutture bentoniche, circolazione termoalina)
 - Atmosfera
 - fisica delle nubi, coalescenza in transizione di fase del vapor acqueo
 - fisica delle nubi e dei processi di coalescenza durante la transizione di fase del vapor acqueo
 - dinamiche atmosferiche in atmosfera stratificata
 - Fluidi endogeni
 - riserve di gas naturale
 - idrologia

Rivelazione di onde gravitazionali

- Misura del rumore Newtoniano in bassa frequenza (sub-Hz) per rivelatori di 3° generazione
- Misura di fondo stocastico tramite modi normali della terra [M. Coughlin and J. Harms, Phys. Rev. D **90**, 042005 (2014)]



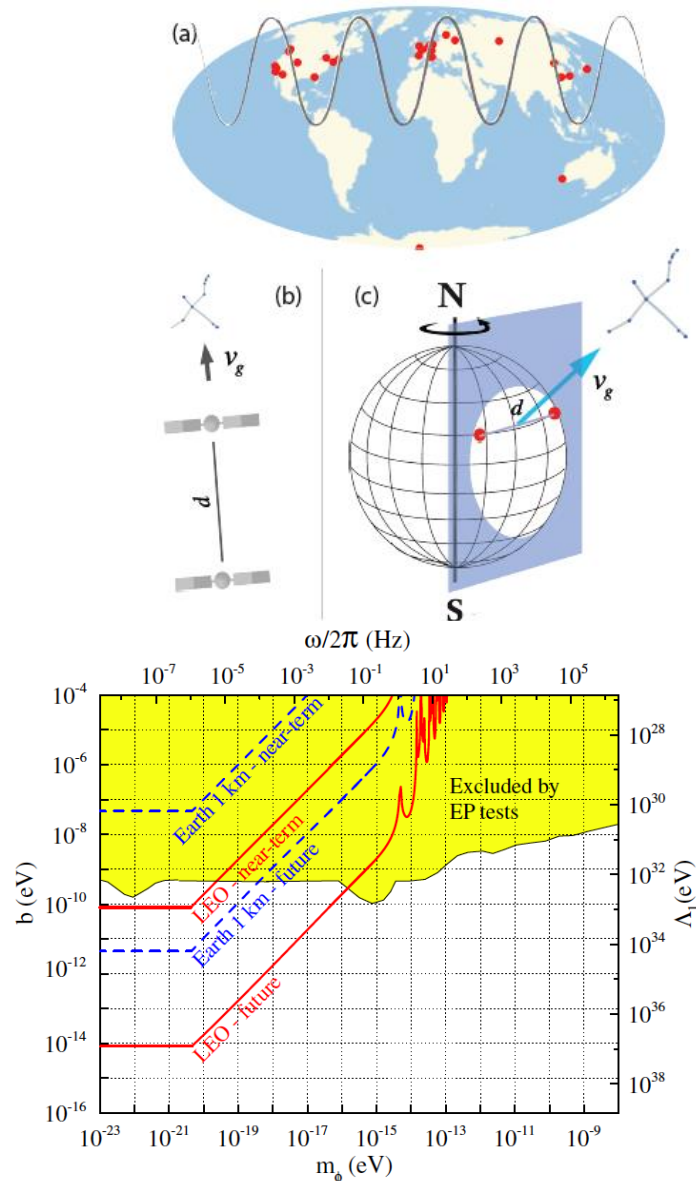
Fisica fondamentale

- Ricerca di Dark Matter

- A. Geraci and A. Derevianko, Sensitivity of Atom Interferometry to Ultralight Scalar Field Dark Matter, PRL 117, 261301 (2016)
- A. Derevianko, Detecting dark matter waves with a network of precision measurement tools, arXiv:1605.09717 (2016)
- P. W. Graham et al., Dark Matter Direct Detection with Accelerometers, arXiv:1512.06165 (2016)
- A. Arvanitaki et al., Search for light scalar dark matter with atomic gravitational wave detectors, arXiv:1606.04541 (2016)

- Ricerca di Dark Energy

- C. Burrage and E. J. Copeland, Using Atom Interferometry to Detect Dark Energy, arXiv:1507.07493 (2015)
- P. Hamilton et al., Atom-interferometry constraints on dark energy, Science 349, 849 (2015)



Il gruppo proponente

- Genova (1.2 FTE + 1 assegno biennale)
 - coord. Naz., link in fibra ottica, controllo di fronti d'onda laser, controllo dei campi magnetici, modelli per misure di rumore Newtoniano
- Firenze (2.6 FTE + 1 assegno biennale)
 - Interferometria atomica su riga di orologio ottico, metodi di ottica atomica, integrazione di link ottici e isolamento sismico su sistemi atomici
- Pisa (1.5 FTE + 1 assegno triennale)
 - isolamento sismico, controllo angolare, modelli per misure di rumore Newtoniano, modelli per ottica atomica con atomi intrappolati
- Roma 3 (1.6 FTE + 1 assegno triennale)
 - modelli per misure di fisica della terra e dell'atmosfera
- LNF (1 FTE + 1 assegno biennale)
 - sistema da vuoto, elettronica di controllo
- Enti esterni
 - INGV (supporto per lo studio di applicazioni geofisiche)
 - EGO (supporto per test su larga scala, confronto con reti di sismometri per monitoraggio del rumore Newtoniano)

Attività collegate & progetti esterni

- In corso
 - MAGIA Advanced (Gr. II)
 - Sezioni di FI e PI
 - Metodi per interferometri atomici avanzati
 - PRIN 2015
 - UNIFI, UNINA, UNIURB, INFN, INGV, EGO
 - Tecniche sub-shot noise per interferometri atomici
 - Sviluppo di modelli per applicazioni alla vulcanologia, a test di fisica fondamentale e alla rivelazione di onde gravitazionali
- Proposte in corso di valutazione
 - PRIN 2017
 - UNIFI, UNINA, UNIURB, INFN, INGV
 - Metodi di ottica atomica per interferometria con atomi di Sr
 - Tecnologie abilitanti per sensori atomici avanzati
 - Modelli per lo studio di terremoti

Programma

- Primo anno
 - Progetto e sviluppo del sensore atomico
 - Definizione e sviluppo del *link* ottico
 - Progetto dei sistemi di isolamento sismico ed angolare
- Secondo anno
 - *Test* del *link* ottico su scala di laboratorio
 - Sviluppo del *link* ottico su grande scala
 - Sviluppo dei sistemi di isolamento sismico ed angolare
 - *Test* dei componenti critici di ottica atomica
- Terzo anno
 - Test del sensore atomico differenziale
 - Integrazione del sensore atomico con il *link* ottico
 - Studio e mitigazione delle sorgenti di rumore
- Durante il corso del progetto verranno sviluppati modelli per estrazione di dati di interesse fisico (applicazioni di fisica della terra solida e dell'atmosfera, rumore newtoniano, onde gravitazionali, ricerca di dark matter), che nel secondo anno contribuiranno alla definizione della topologia della rete

Struttura del progetto

- **WP1 Tecnologie per i link ottici** (GE + FI + Pi)
 - Sviluppo del link ottico in fibra; studio della topologia ottimale; *test* del principio su scala di lunghezze variabile; integrazione con sensori atomici
 - Metodi di controllo per fronti d'onda laser; nella propagazione libera su grandi distanze
- **WP2 Tecnologie di ottica atomica** (FI + PI + EGO)
 - Interferometro atomico su riga di orologio ottico; beam-splitters atomici ad alto momento trasferito; Interferometria in trappola con atomi di Sr
 - Integrazione di sistemi per isolamento sismico e controllo di fronti d'onda
- **WP3 Isolamento sismico** (PI)
 - Sistema per la riduzione del rumore di accelerazione verticale sul singolo IA
 - Controllo dell'assetto angolare e del rumore di puntamento per i fasci laser utilizzati come beam splitter per il pacchetto d'onda atomico
- **WP4 Altri sviluppi tecnologici** (LNF + GE)
 - Sistema da vuoto per l'I.A.
 - Sistema di controllo dei campi magnetici
 - Elettronica di controllo della rete
- **WP5 Modelli per misura di osservabili fisiche in ambiente terrestre** (RM3 + PI+ GE + INGV + EGO)
 - Fisica terrestre: analisi di serie temporali per caratterizzazione delle componenti di rumore, modelli per misure di osservabili geofisiche
 - Onge gravitazionali: metodi di analisi del segnale per la misura del rumore newtoniano e per rivelazione di OG sub-Hz attraverso i modi normali terrestri

Cronoprogramma

anno		1				2				3			
WP1	1.1			M1									
	1.2										D1		
WP2	2.1			M2									
	2.2												
	2.3												D2
WP3	3.1				M3								
	3.2										D3		
WP4	4.1			M4									
	4.2												
	4.3											D4	
WP5	5.1				M5			M7		D5	D6		
	5.2						M6						D7

Budget

	Primo anno	Secondo anno	Terzo anno
Genova	65	70	90
Firenze	95	120	100
Pisa	70	80	60
LNF	40	50	70
Roma3	30	30	30
Totale	300	350	350

	Primo anno	Secondo anno	Terzo anno
WP1	60	65	85
WP2	110	135	115
WP3	50	60	40
WP4	50	60	80
WP5	30	30	30
Totale	300	350	350