

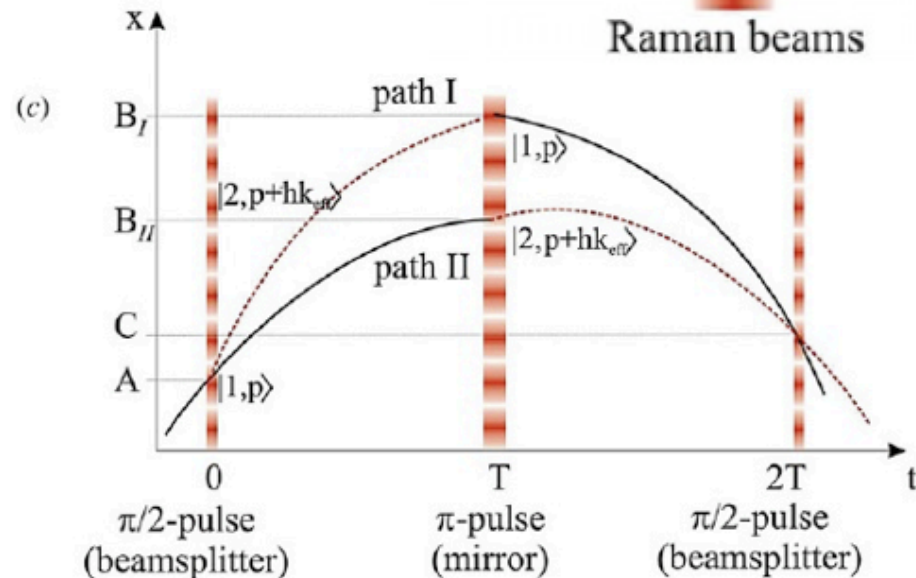
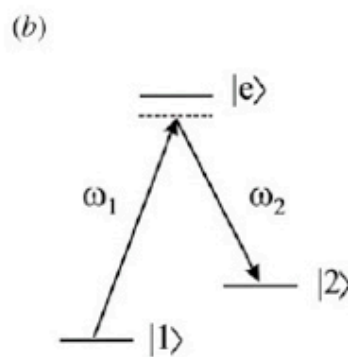
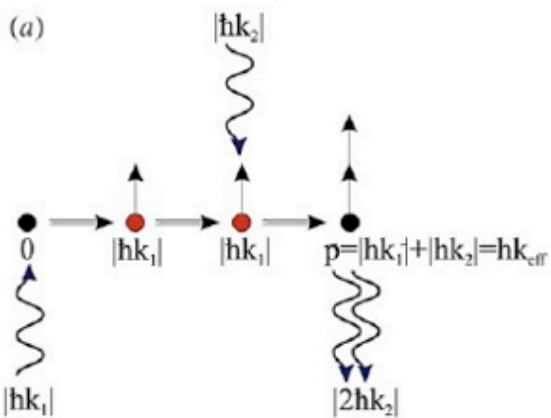
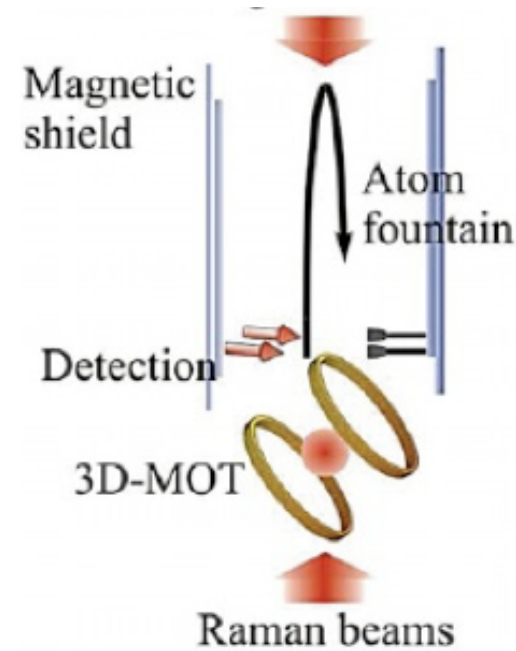
FLAGS

Fiber Links for Atomic Gravity Sensors  
una proposta per la call. Gruppo V

F. Sorrentino

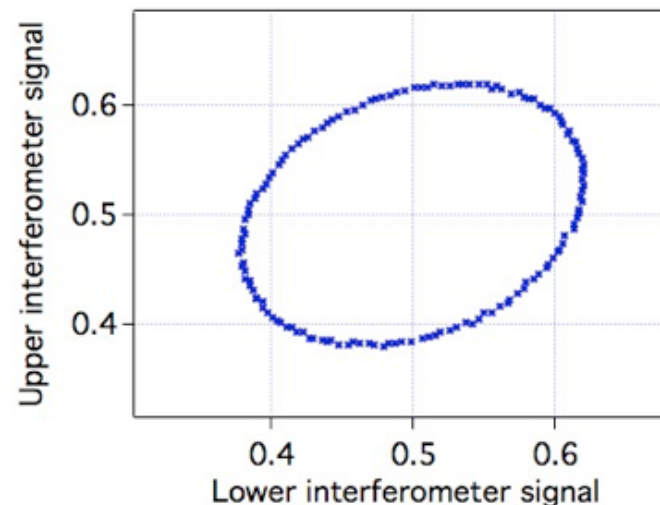
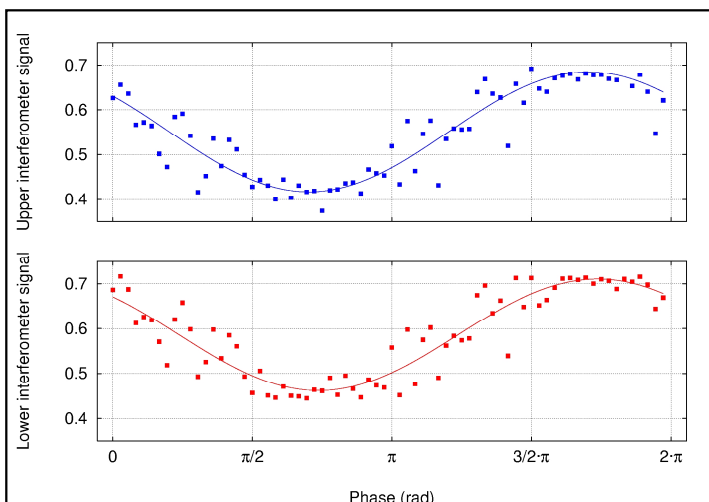
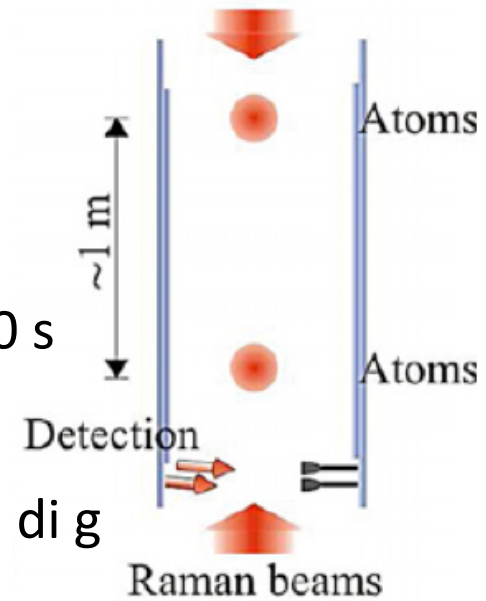
# Gravimetri atomici

- 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



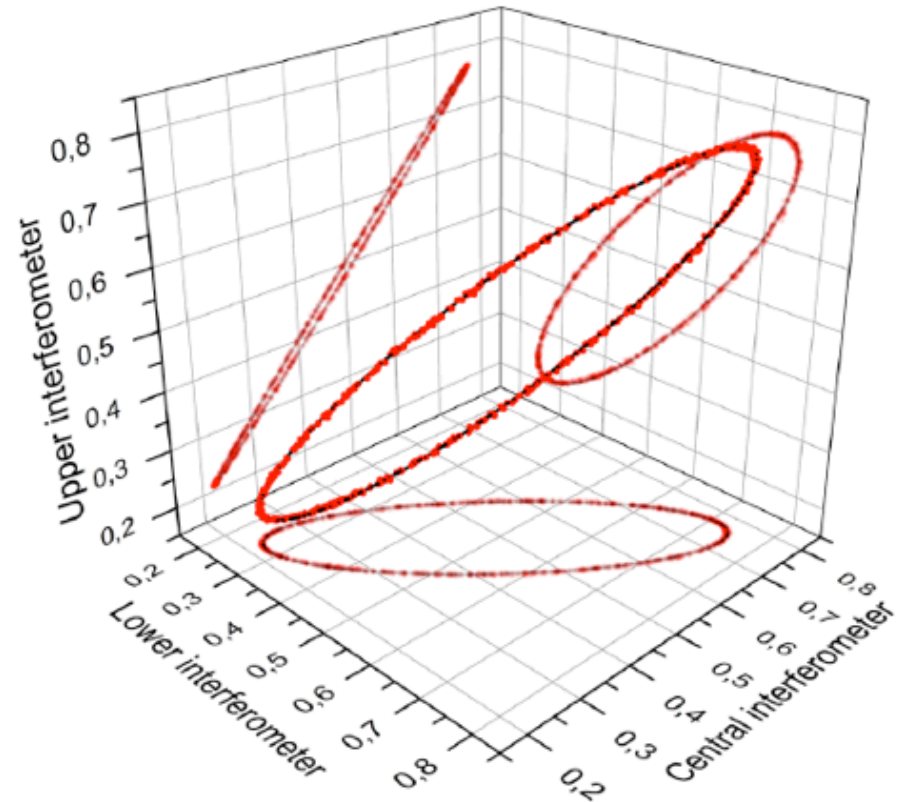
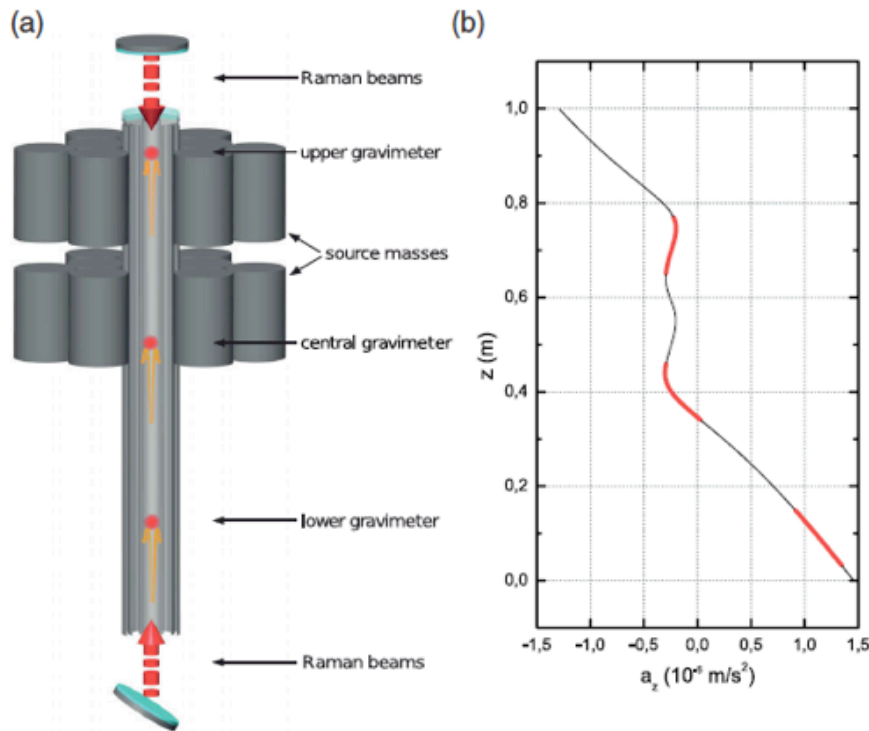
# Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico
- Sensibilità differenziale dimostrata di  $5 \cdot 10^{-11}$  g @10000 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)



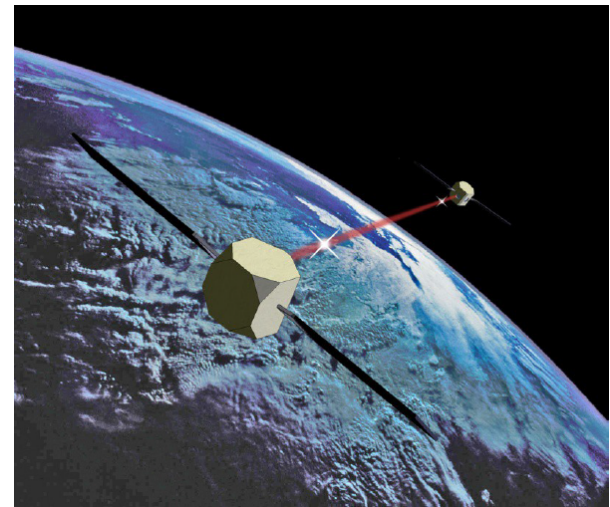
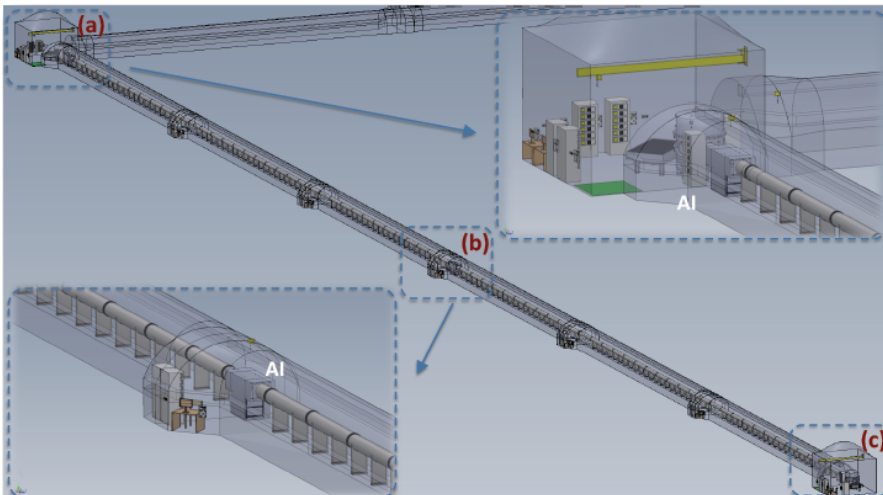
# Scalabilità dei gradiometri

- 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)



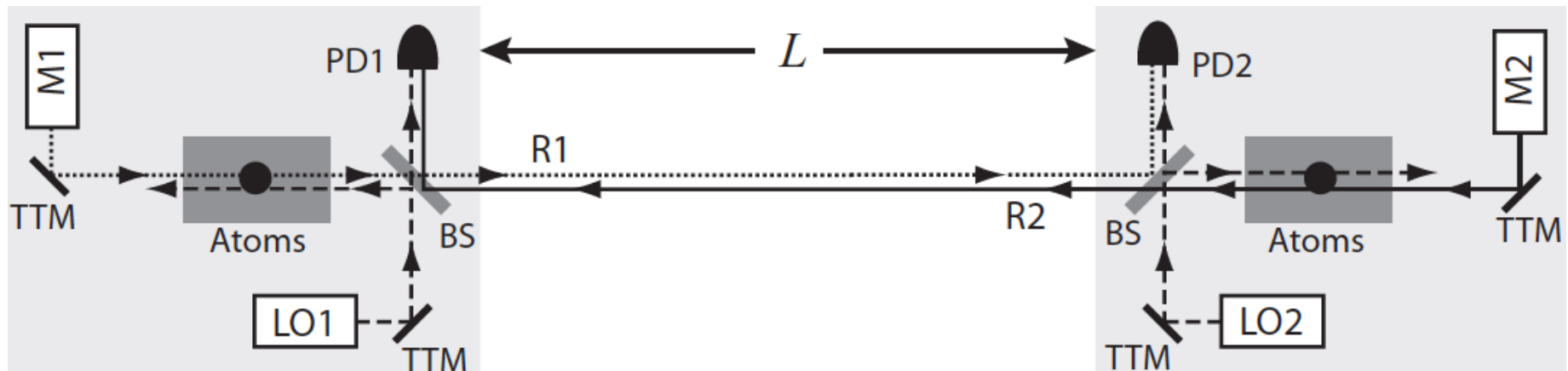
# Scalabilità dei gradiometri

- 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  $\sim 10$  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



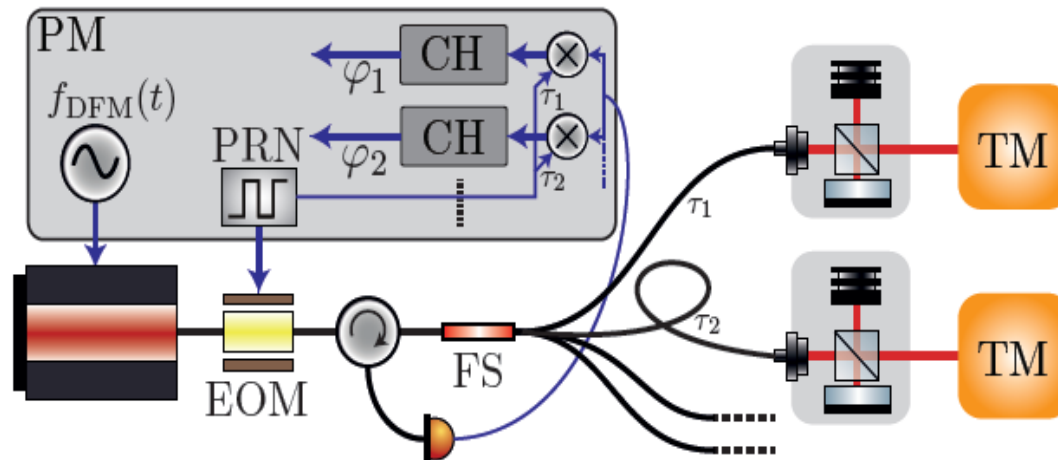
# FLAGS: concetto di base

- 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

# 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

# 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



# 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

# Anagrafica, spazi & servizi

- Ricercatori:
  - F. Sorrentino (resp. naz.) 60%
  - A. Chincarini 10%
  - A. Cirone (PhD) 20%
  - S. Farinon 10%
  - G. Gemme 10%
  - R. Musenich 10%
- Servizi:
  - Officina elettronica 2 m/u
  - Officina meccanica 2 m/u
  - Progettazione meccanica 2 m/u
  - Servizi generali 3 m/u
- Spazi:
  - Laboratorio ottico
    - Già in funzione in L206 per Virgo e PRIN 2015
    - DIFI lab?

Slides di riserva

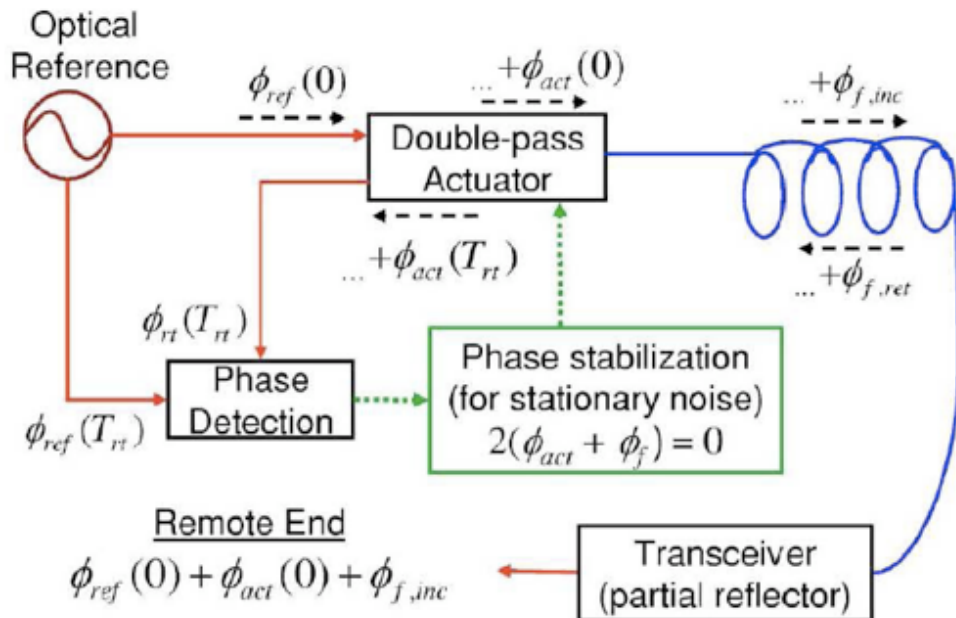


# Programma

- 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

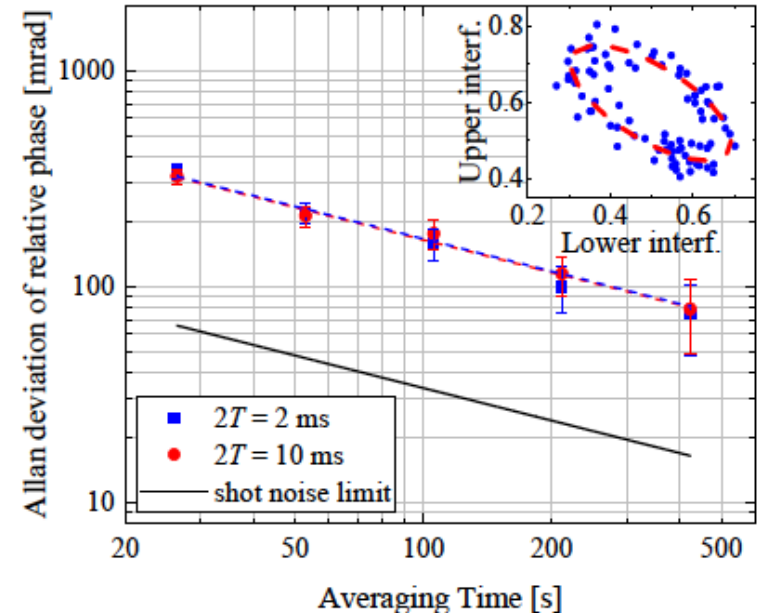
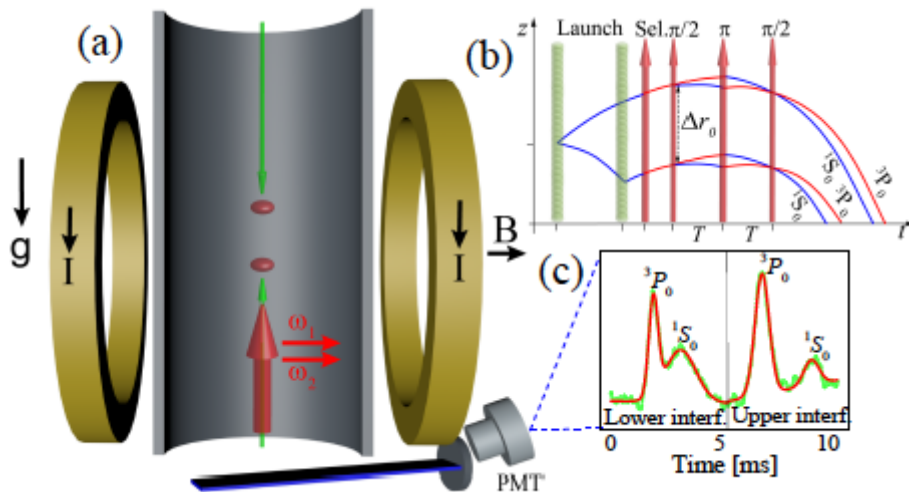
# Link ottici coerenti

- 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

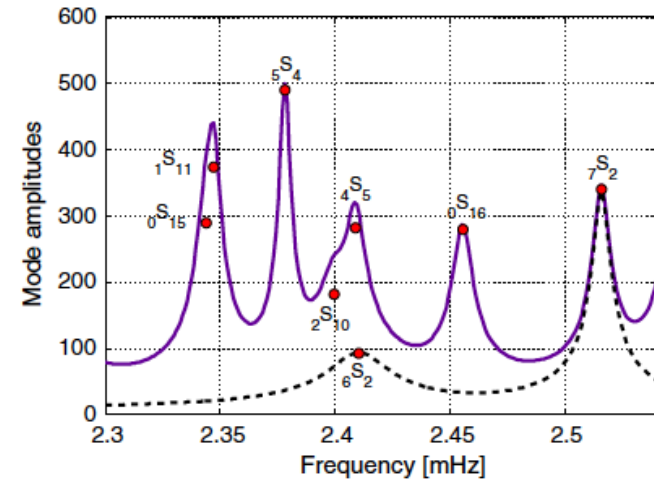
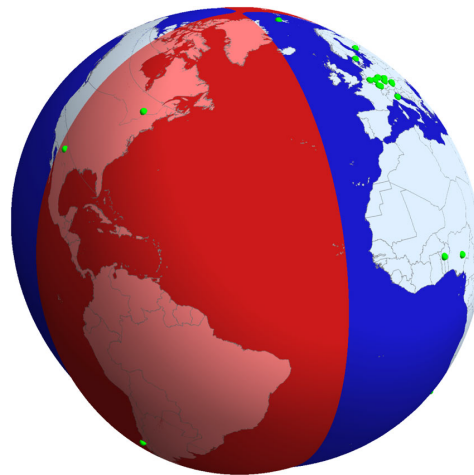
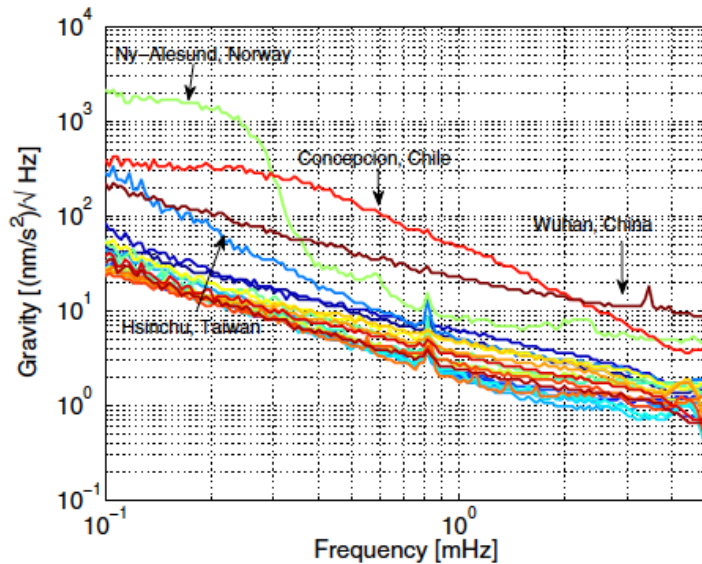


# Fisica terrestre e dell'ambiente

- 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)

