



Esperimenti Gruppo II
"Fisica generale e quantistica"

FISH
HUMOUR
MAGIA-Advanced
SUPREMO

Leonardo Fallani – CdS Firenze – 11/07/17

Tecnologie quantistiche (fisica ottica, atomica, molecolare) per lo studio di Fisica fondamentale

FISH

Simulazione quantistica di teorie di gauge e fisica fondamentale con atomi ultrafreddi

HUMOR

Micro- e nano-optomeccanica per lo studio di effetti di quantum gravity / generalized uncertainty principle

MAGIA-Advanced

Nuovi interferometri atomici per misure accurate di gravità e test di relatività

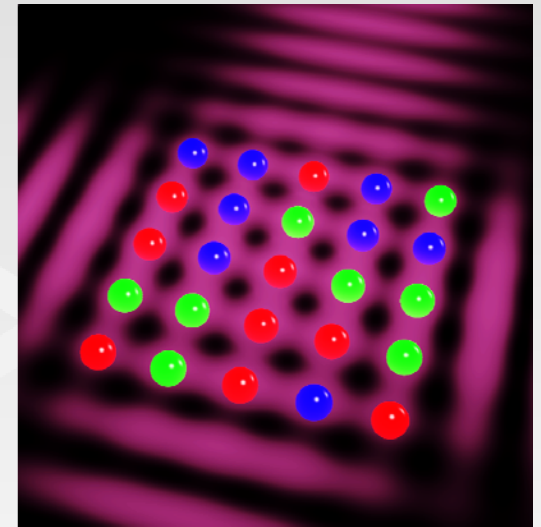
SUPREMO

Misura e test di variazione di costanti fondamentali attraverso spettroscopia molecolare di precisione

FISH

Goal scientifico dell'esperimento:

realizzare dei simulatori quantistici
di fisica fondamentale attraverso il controllo delle
interazioni in gas atomici ultrafreddi



Sezioni INFN coinvolte:

Firenze

Resp. Leonardo Fallani
Misure con gas di Fermi ultrafreddi

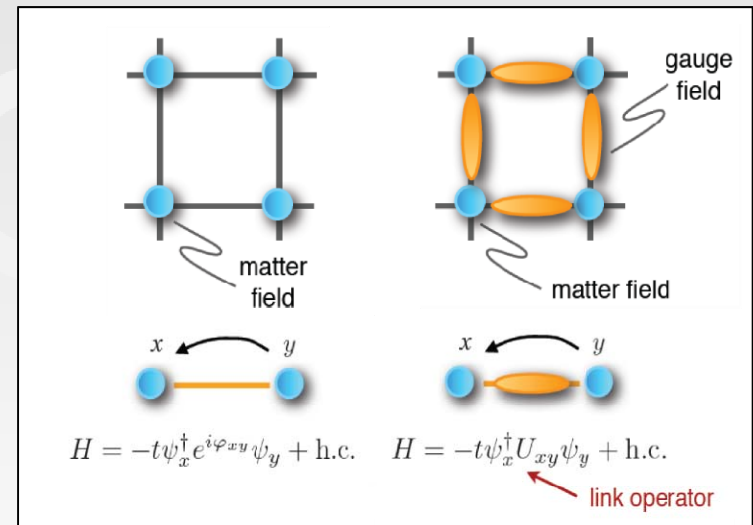
Trento TIFPA

Resp. Gabriele Ferrari
Misure con gas di Bose ultrafreddi

Inizio attività: **2015**

Studio di fermioni a molte componenti in presenza di campi di gauge

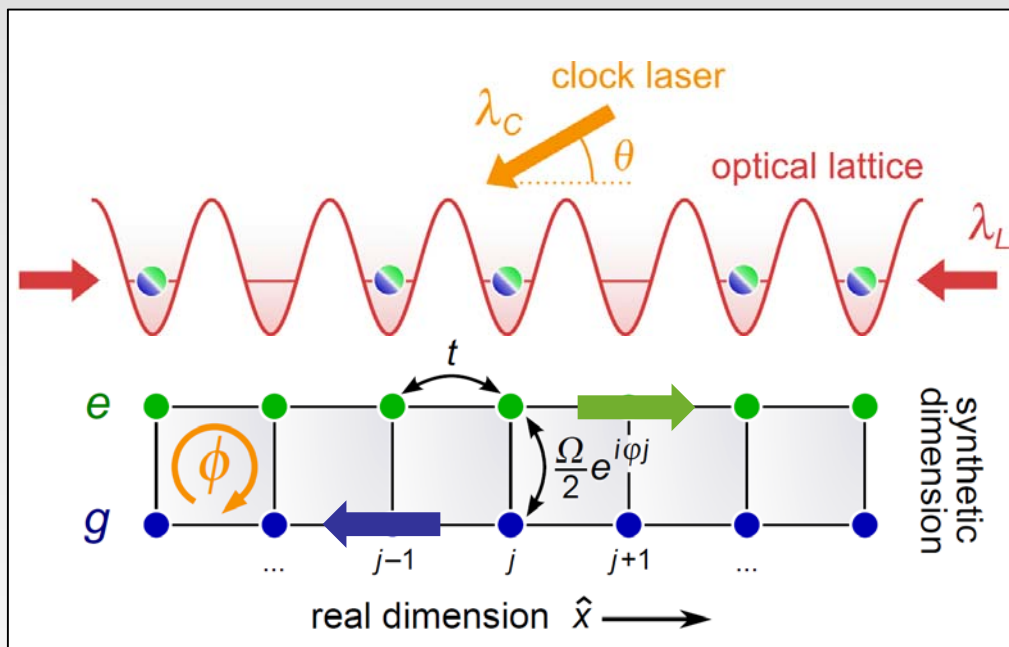
- Gas di fermioni ultrafreddi di ^{173}Yb con simmetria di interazione $\text{SU}(N)$
- Realizzazione di campi di gauge in reticoli ottici attraverso interazioni indotte da laser.
- Realizzazione di prototipi di teorie di gauge su reticolo.



Attività 2016-2017: caratterizzazione e controllo delle interazioni tra atomi e studio di campi di gauge statici in reticoli ottici

Realizzazione di campi statici di gauge abeliani U(1)

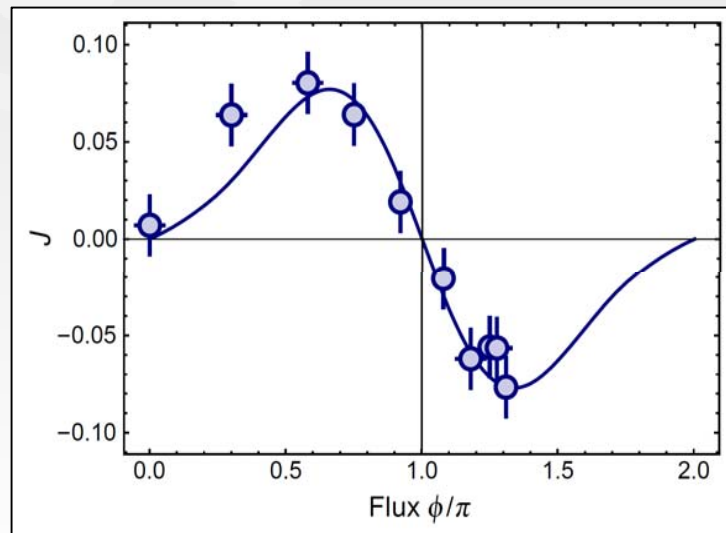
Realizzazione di una "dimensione sintetica" eccitando il grado di libertà elettronico con transizione ultrastretta di orologio (linewidth: ~ 10 mHz).



In corso: studio del sistema nel regime di forte interazioni fra i fermioni (fractional q. Hall?)

Equivalente di un campo magnetico statico. Completa tunabilità ($>10^4$ T)

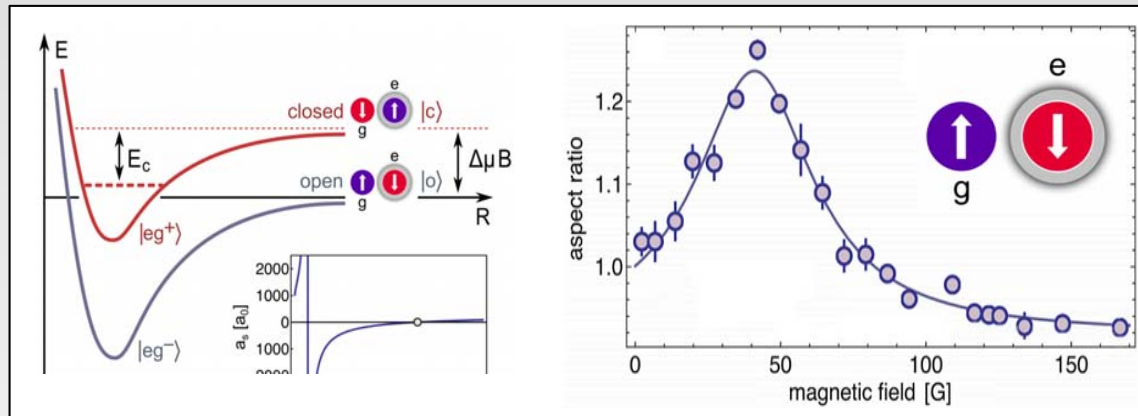
Studio delle correnti di edge del sistema fermionico (q. Hall)



L. F. Livi et al., PRL **117**, 220401 (2016)

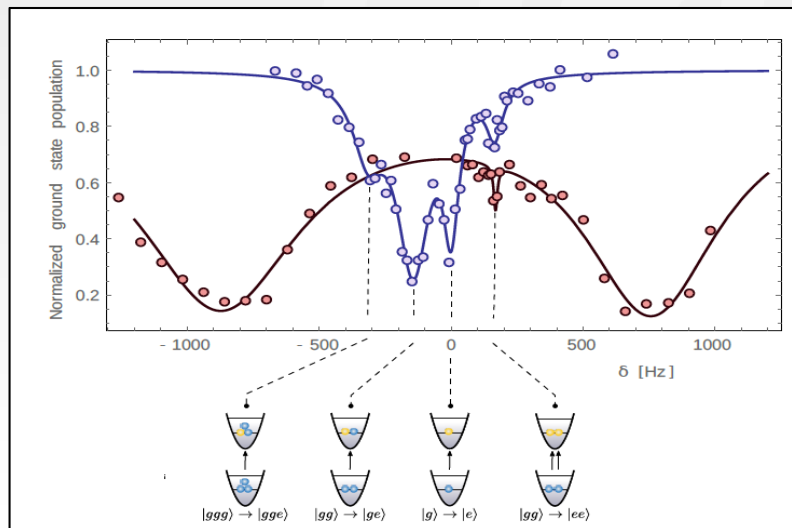
Misura di parametri di interazione e loro controllo

Controllo delle interazioni fra atomi in stati elettronici diversi attraverso risonanza di Feshbach orbitale: ampia tunabilità della lunghezza di scattering



Resonance field: ~50 G

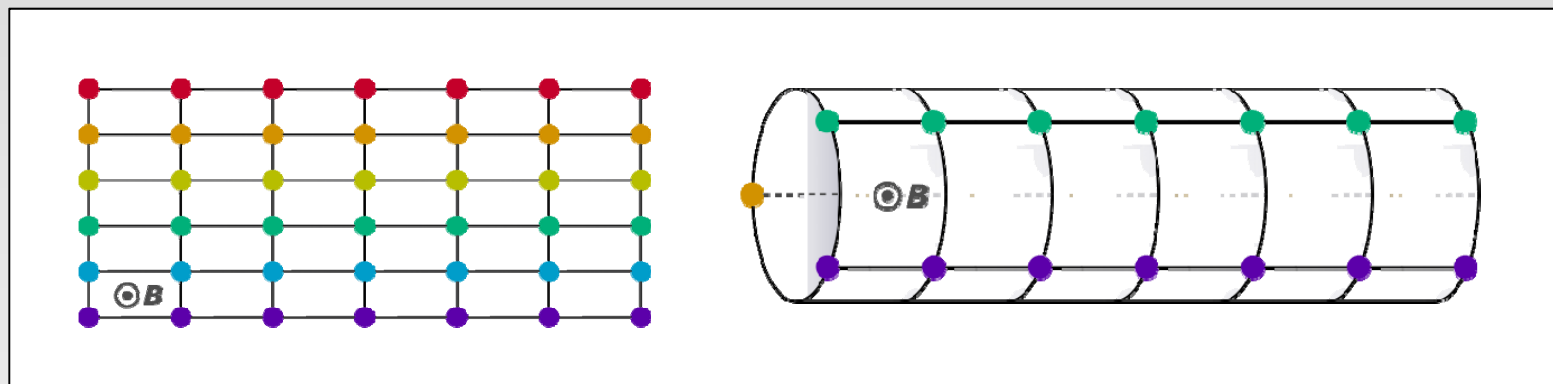
G. Pagano et al., PRL **115**, 265301



Misura proprietà collisionali elastiche e inelastiche attraverso spettroscopia di precisione

G. Cappellini et al., New J. Phys. (2017, submitted)

- In corso: Realizzazione di "extradimensioni" con geometrie più complesse mediante transizioni Raman fra stati di spin (aperte e compatte)



- Realizzazione di stati fermionici fortemente correlati (superfluidi) mediante controllo delle interazioni con risonanza di Feshbach.
- Caratterizzazione di stati isolanti di Mott $SU(N)$ e delle interazioni di scambio tra atomi intrappolati per implementazione di "quantum link model" (campi di gauge dinamici)
D. Banerjee et al., Phys. Rev. Lett. 110, 125303 (2013), ...

In corso nuove collaborazioni con gruppi teorici esterni per la messa a punto di nuovi schemi sperimentali per la simulazione di teorie di gauge su reticolo
(GGI "From static to dynamical gauge fields with ultracold atoms")

Impegno personale 2018:

Leonardo Fallani	PA UNIFI Dip. Fisica	60%
Lorenzo Livi	Dottorando	80%
Lorenzo Franchi	Dottorando	80%
Giacomo Cappellini	Assegnista UNIFI	80%
Jacopo Catani	Ricercatore INO-CNR	40%

tot 3.4 FTE

Richiesta finanziamento 2018:

Consumo (ottiche, optomeccanica, optoelettronica, fibre ottiche)	~ 30 k€
Impianti (AOM, amplificatori RF, power supplies, RF generators)	~ 20 k€

HUMOR

HUMOR

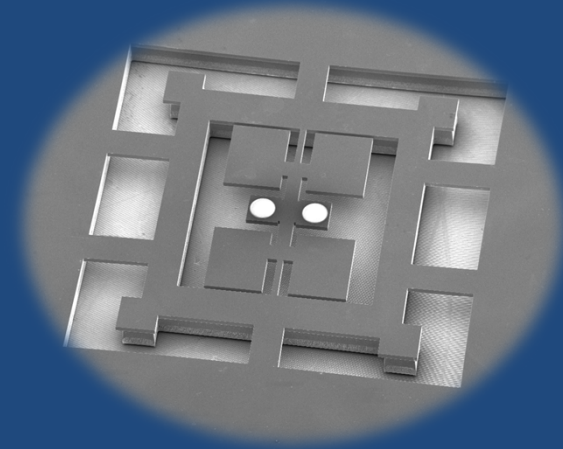
Heisenberg

Uncertainty

Measured with

Opto-mechanical

Resonator



Test delle conseguenze del commutatore modificato
nella dinamica di un sistema quantistico

GUP può essere associato ad un commutatore canonico modificato:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \left(1 + \beta_0 \left(\frac{\Delta p}{M_p c} \right)^2 \right) \quad [x, p] = i\hbar \left(1 + \beta_0 \left(\frac{p}{M_p c} \right)^2 \right)$$

Basic assumptions:

$$\frac{d\hat{O}}{dt} = \frac{1}{i\hbar}[\hat{O}, H]$$

Heisenberg dynamics

$$[x, p] = i\hbar \left(1 + \beta_0 \left(\frac{p}{M_p c} \right)^2 \right)$$

Deformed commutation relations

$$\text{from } \Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \left(1 + \beta_0 \left(\frac{\Delta p}{M_p c} \right)^2 \right)$$

$$H = \frac{\hbar\omega_0}{2} (X^2 + P^2)$$

Solution:

$$\beta = \beta_0 \frac{\hbar m \omega_0}{M_p^2 c^2}$$

$$X = X_0 \left[\sin(\tilde{\omega}t) + \frac{\beta}{8} X_0^2 \sin(3 \tilde{\omega}t) \right]$$

3° harmonic

$$\tilde{\omega} = \left(1 + \frac{\beta}{2} X_0^2 \right) \omega_0$$

Freq. shift

(First order in βX_0^2)

ARTICLE

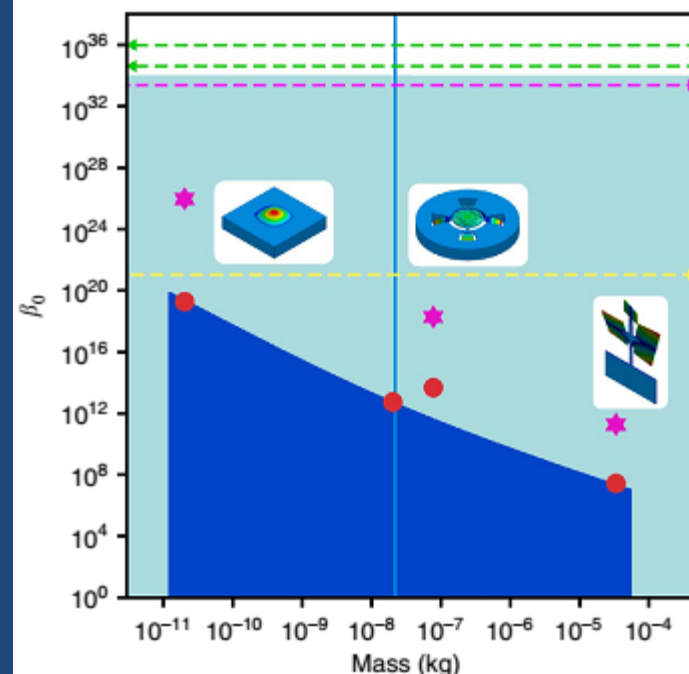
Received 25 Nov 2014 | Accepted 12 May 2015 | Published 19 Jun 2015

DOI: 10.1038/ncomms8503

OPEN

Probing deformed commutators with macroscopic harmonic oscillators

Mateusz Bawaj^{1,2}, Ciro Biancofiore^{1,2}, Michele Bonaldi^{3,4}, Federica Bonfigli^{1,2}, Antonio Borrielli^{3,4}, Giovanni Di Giuseppe^{1,2}, Lorenzo Marconi⁵, Francesco Marino^{6,7}, Riccardo Natali^{1,2}, Antonio Pontin^{5,6}, Giovanni A. Prodi^{4,8}, Enrico Serra^{4,8,9,10}, David Vitali^{1,2} & Francesco Marin^{5,6,11}



Supplementary note 1: adding damping to the evolution in the presence of deformed commutators

$$\ddot{\tilde{P}} + \gamma \dot{\tilde{P}} (1 + \beta \tilde{P}^2) + \omega_0^2 \tilde{P} + \frac{4}{3} \beta \omega_0^2 \tilde{P}^3 = 0.$$

$$Q(t) = \omega_0 \int_0^t ds \tilde{P}(s) \left(1 + \frac{4}{3} \beta \tilde{P}^2(s) \right)$$

Supplementary note 2: approximate solution of the evolution equation

$$Q(t) = \frac{\omega_0}{2\lambda} Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \left[e^{i\Phi(t)} + \frac{\beta}{8} Q_0^2 e^{-2\frac{t}{\tau}} e^{i3\Phi(t)} \right] + \text{c.c.}$$

$$\Phi(t) = \frac{\beta \omega_0^2}{2 \omega_1} \frac{1 - e^{-\gamma t}}{\gamma} Q_0^2 + \omega_1 t = \int_0^t ds \omega_1 \left[1 + \frac{\beta \omega_0^2}{2 \omega_1^2} Q_0^2 e^{-2\frac{s}{\tau}} \right]$$

Sviluppi previsti



- *A macroscopic mechanical oscillator really behaves as quantum oscillator (recent experimental verification in cooled micro-oscillators)*
- *Quantum gravity effects could be linked to ‘really quantum’ properties, i.e., to quantum coherence (recent proposals)*



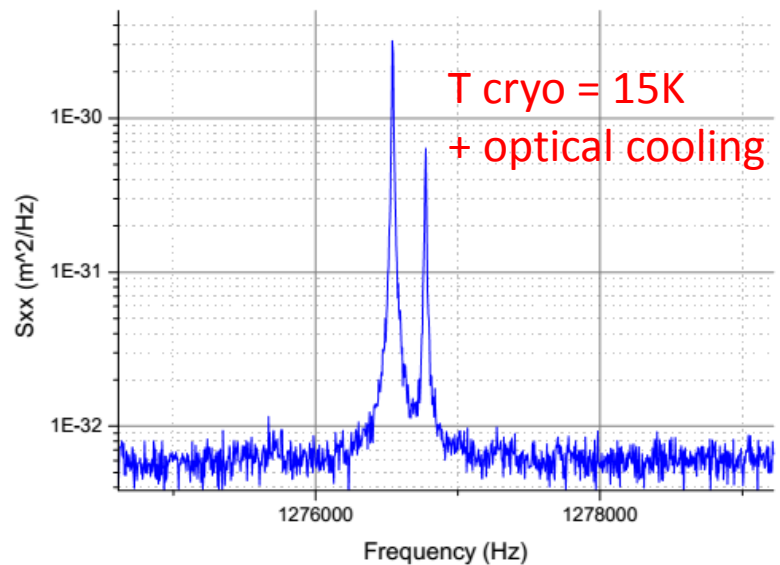
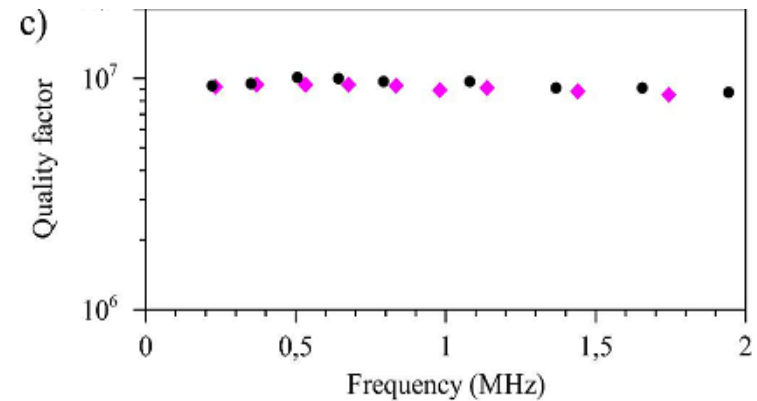
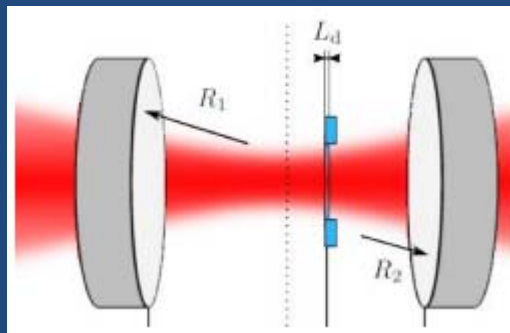
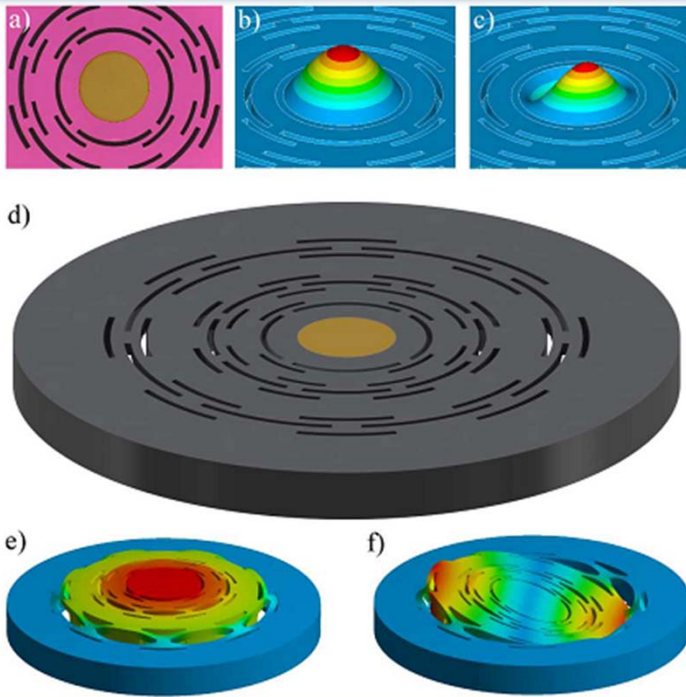
Test su oscillatori raffreddati fino allo stato fondamentale

- ❖ SiN nano-membranes
- ❖ nanoparticle levitating in optical potential

Microfabrication of large-area circular high-stress silicon nitride membranes for optomechanical applications

PHYSICAL REVIEW B **94**, 121403(R) (2016)

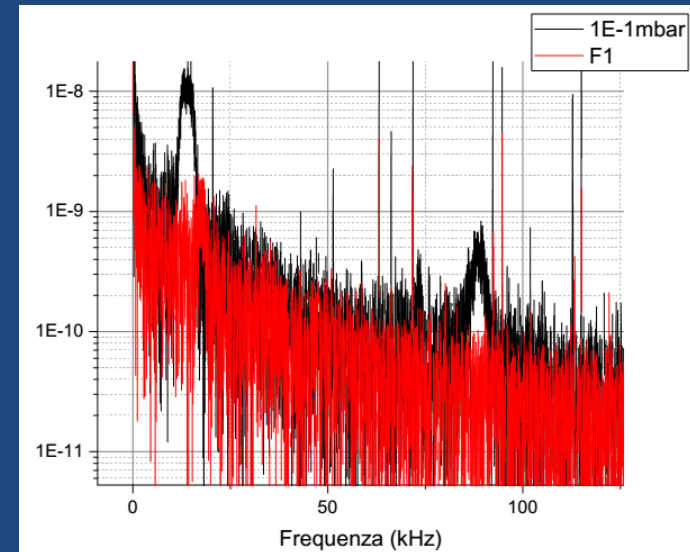
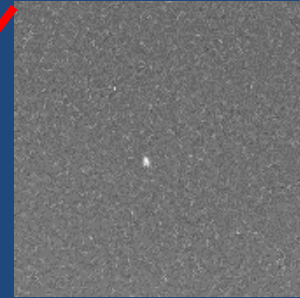
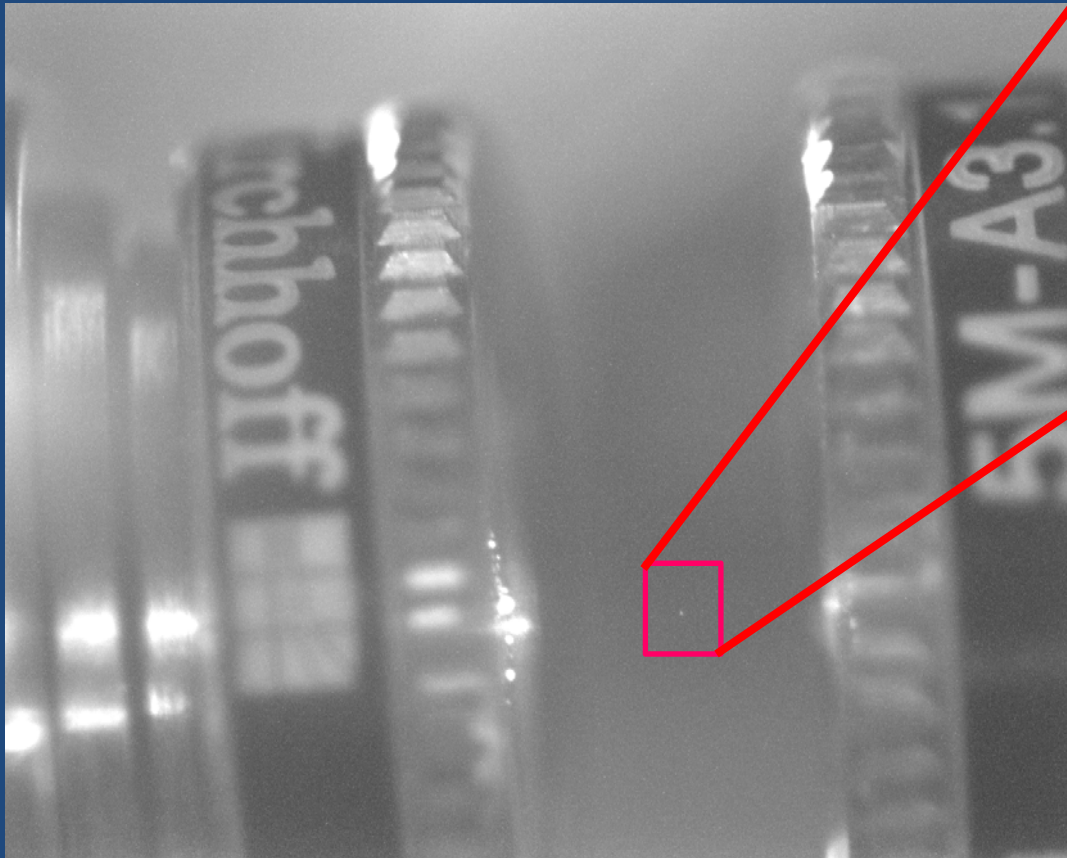
Control of recoil losses in nanomechanical SiN membrane resonators



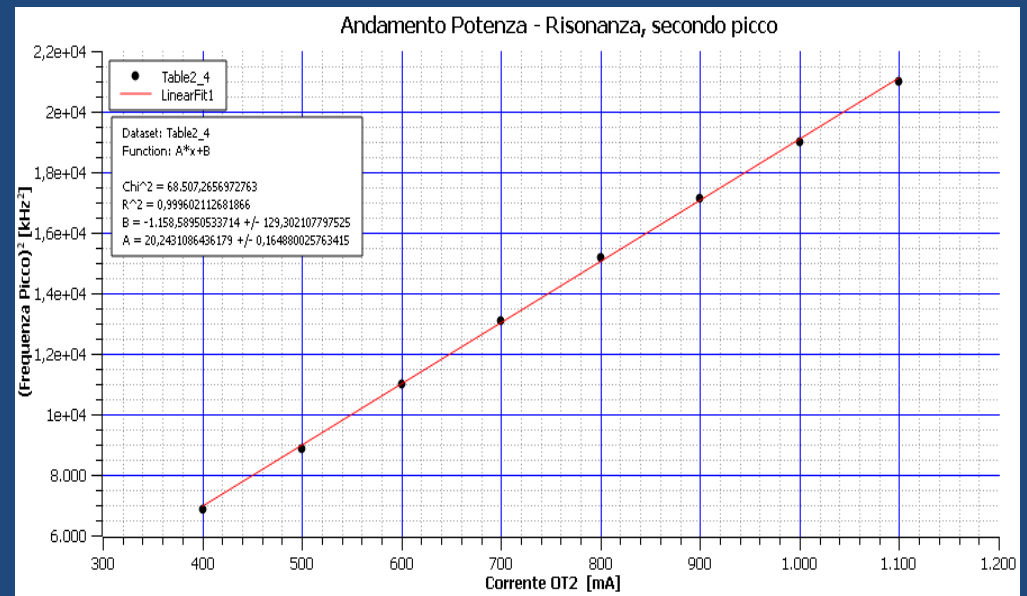
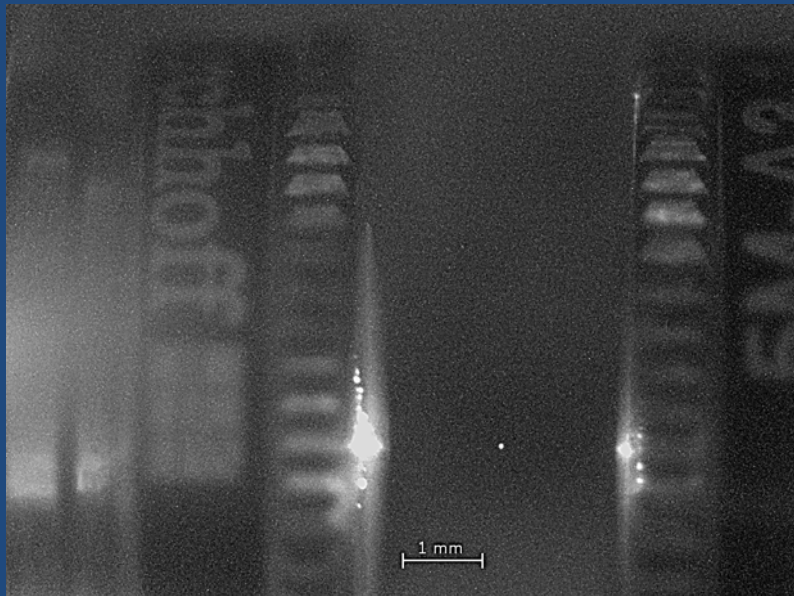
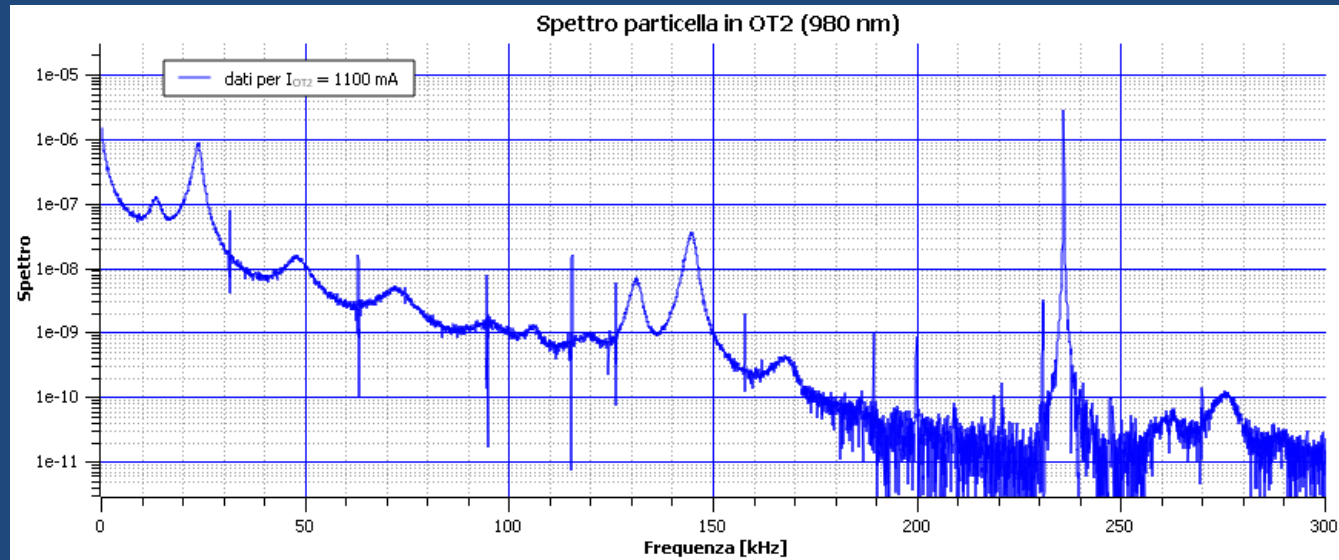
Nano-particelle in potenziale ottico

- Sfera di dielettrico trasparente (SiO_2)
- Diametro ca $100\text{nm} < \lambda \rightarrow F \propto \nabla E^2 \rightarrow$ potenziale ottico di dipolo (intrappolamento nel fuoco)
- Moto oscillatorio nel potenziale
- Raffreddamento parametrico, oppure ottico con la particella in cavità Fabry-Perot e laser disaccordato nel rosso

nanoparticle trapped in optical potential



nanoparticle levitating in optical potential



HUMOR

Gruppi e sezioni coinvolti

- Firenze (coordinatore nazionale e locale: Francesco Marin, P.A. UNIFI)
- Trento (TIFPA; coordinatore Enrico Serra)
- Camerino (INFN PG; coordinatore David Vitali)

Personale FI

Francesco Marin (PA): 0.7

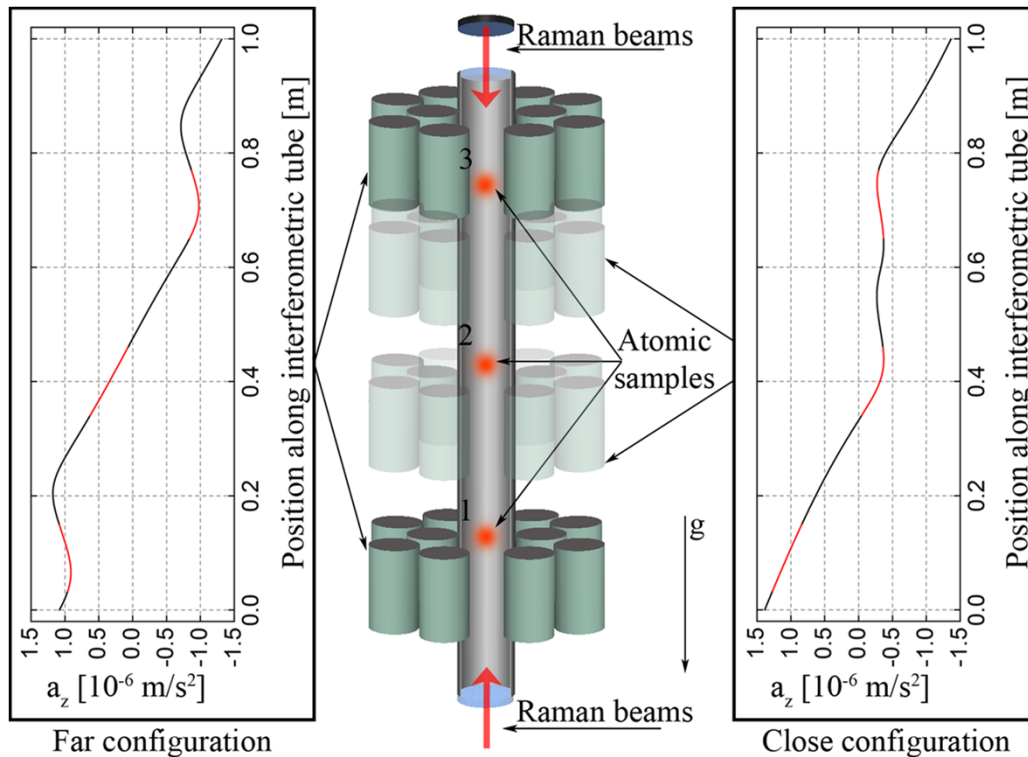
Francesco Cataliotti (PA): 0.5

Francesco Marino (Ric. CNR-INO): 0.7

Avishek Chowdhury (assegnista post-Doc CNR_INO): 1 (richiesta di associazione in corso)

MAGIA-Advanced

- We simultaneously interrogate **three clouds** with the Raman interferometer for **two source masses configurations**. During the π pulse the **frequency of the Raman lasers is changed** by $\Delta\nu^*$.



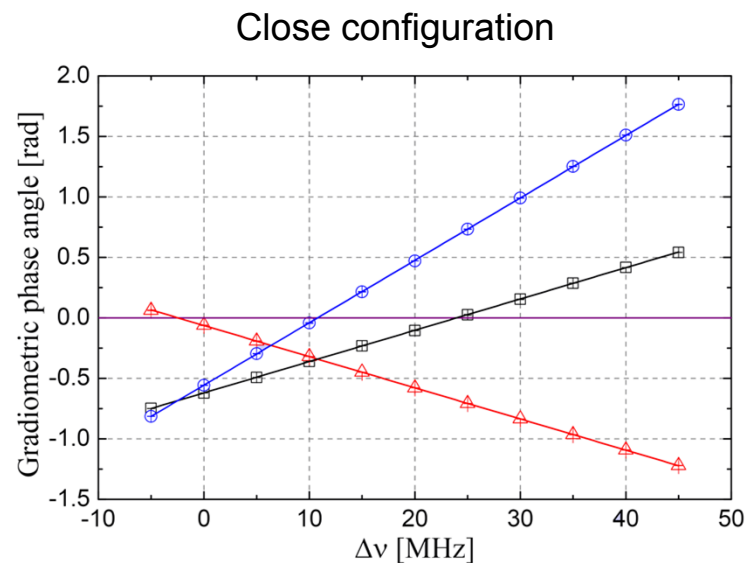
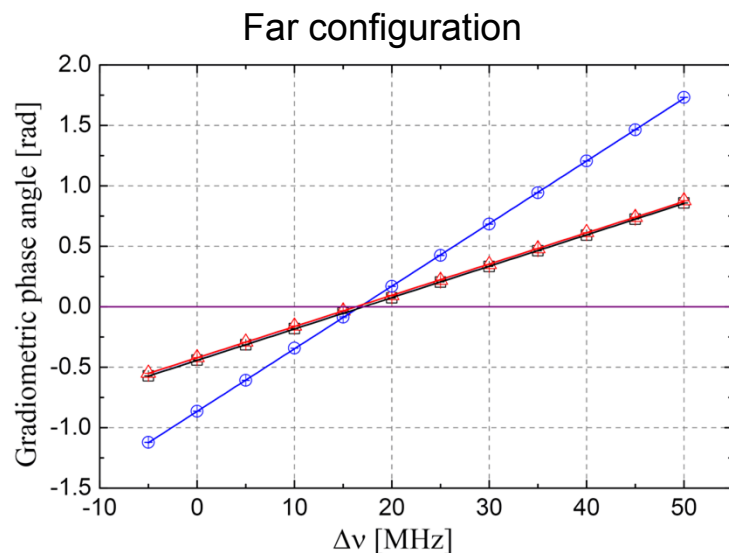
$$\Delta k_{\text{eff}} = (\Gamma_{zz} T^2/2) k_{\text{eff}}$$

- For the three gravity gradiometers (1-2, 2-3, 1-3) we measure the linear dependence $\Phi(\Delta\nu)$ vs $\Delta\nu$ (Φ gradiometric phase)
- Gravity gradient is translated into a frequency!*

*A. Roura, Phys. Rev. Lett. **118**, 160401 (2017)

* G Rosi (arXiv:1702.01608)

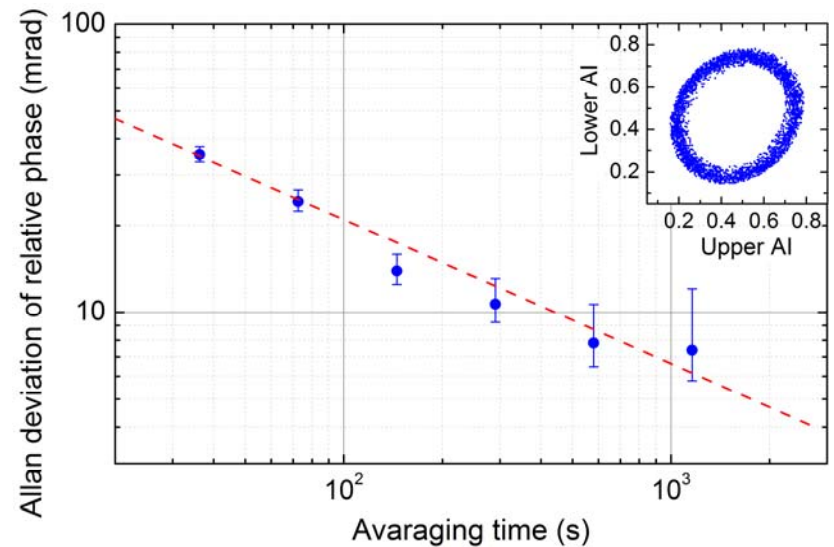
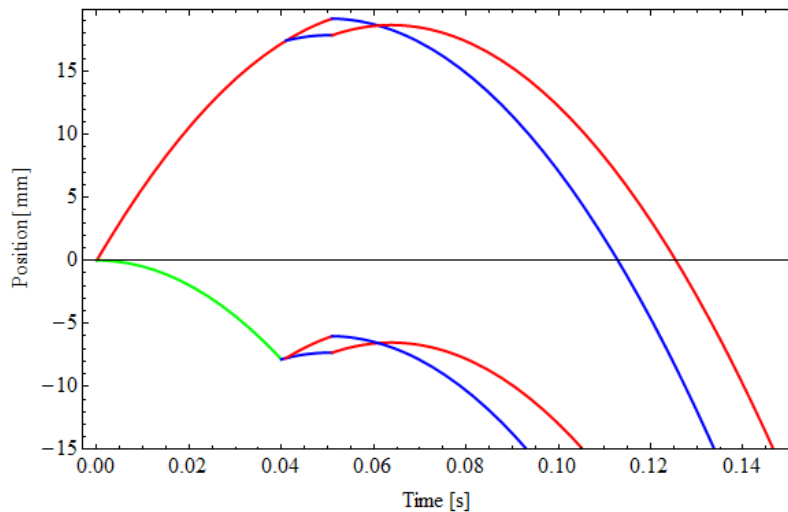
Final results*:



	$\Gamma_{23} [10^{-6} \text{ s}^{-2}]$	$\Gamma_{12} [10^{-6} \text{ s}^{-2}]$	$\Gamma_{13} [10^{-6} \text{ s}^{-2}]$
Far	$-3,32 \pm 0,02$	$-3,48 \pm 0,01$	$-3,40 \pm 0,01$
Close	$0,497 \pm 0,006$	$-4,87 \pm 0,01$	$-2,193 \pm 0,006$

- Measurements also provide gravity gradient sign.
- As expected $\Gamma_{13} = (\Gamma_{12} + \Gamma_{23})/2$.
- Measured cloud distances and gravity curvature in close configuration:
 - $d_{23} = (307,2 \pm 0,3)\text{mm}$ $d_{12} = (308,6 \pm 0,4)\text{mm}$
 - $\xi_{\text{close}} = (\Gamma_{23} - \Gamma_{12})/d = (1,743 \pm 0,004) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-2}$

- Sr Gravity gradiometer Bragg @ 689 nm
 - High power Bragg laser system @689 nm with semiconductor devices (diode lasers + tapered amplifiers) - > 150 mW/beam
 - Larger relative detuning $\Delta/\Gamma=1.2 \times 10^4$ -> larger contrast than 461 nm transition

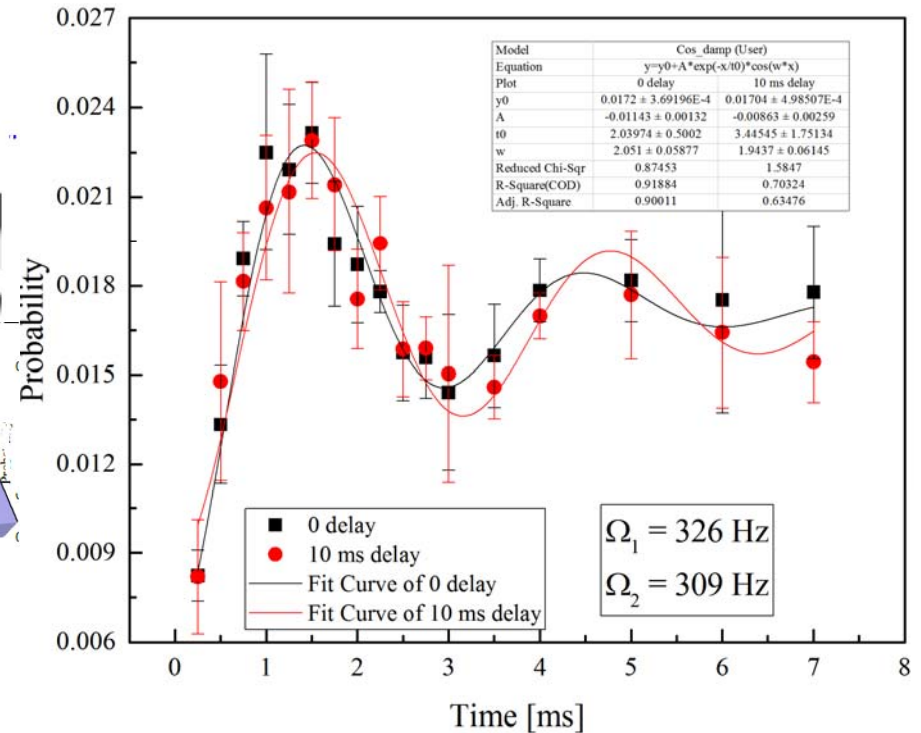
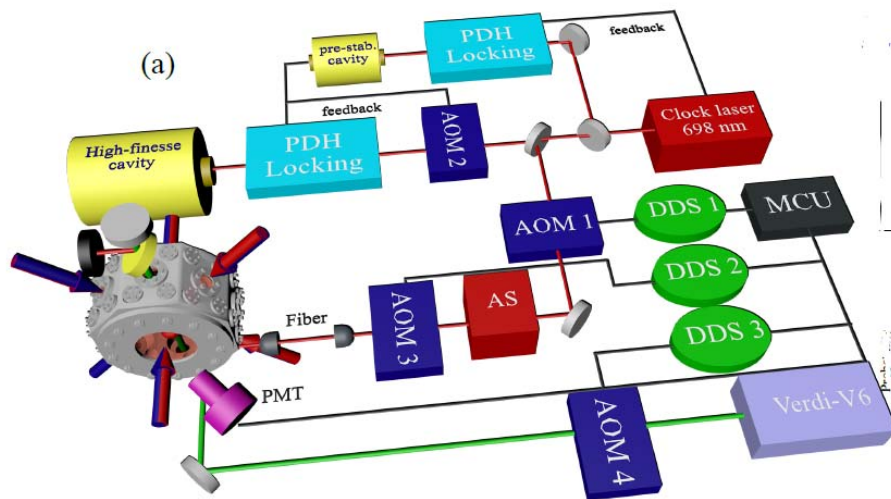


Sensitivity at 1s $\rightarrow$ 270 mrad ($5 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$)
Sensitivity at 1000s $\rightarrow$ ($2 \times 10^{-5} \text{s}^{-2}$)

Attività 2017 (Sr)

- Clock transition @ 698 nm

-Rabi oscillation of ^{88}Sr atoms in free-fall



P clock = 56 mW Diam. = 1.8 mm

$I = 7 \text{ W/cm}^2$ $B = 235 \text{ gauss}$



$$\Omega = \alpha B \sqrt{I} \sim 300 \text{ Hz}$$

Milestone 2017 (Rb)



- Implementazione e test di fasci non gaussiani sul campione atomico (Status: problemi nella generazione di fasci flat top)
 - Studio e implementazione di sistemi di raffreddamento con dark mot a 1529 nm (Status: problemi campo di light shift non omogeneo spazialmente);
 - Studio di sistemi di raffreddamento evaporativo (Status: in corso. Possibile limite: potenza ottica trappola di dipolo);
 - Test di schemi interferometrici a più impulsi (Status: in corso);
-

Milestone 2017 (Sr)



- Test LMT Bragg con laser 689 nm (Status: 100%)
 - Test LMT su transizione di orologio a 698 nm (Status: 90%. Primi test con $\Delta p = 1 \hbar k$)
 - Costruzione apparato per squeezing campione atomico (Status: 50%, ritardi nella costruzione della cavità risonante sotto vuoto)
 - Studio spin squeezing in cavità QED mediante l'uso di stati di Bragg nei meccanismi di quantum nondemolition measurement e di interazione nonlineare con fotoni di cavità. (Sezione di Pisa. Status: 70%. Studio in fase di completamento)
-

Richieste economiche (Rb+Sr)

- Impianti: 130 k€ (Amplificatore multimodo 30 W, AOMs, amplificatori RF 3W, modulatori elettro-ottico in fibra, sistema da vuoto x fontana Sr, amplificatori ottici IR 2W)
- Consumo: 50 k€ (Specchi, lenti, lamine di ritardo, optomeccaniche, fibre alta potenza IR e VIS, materiale elettronico RF-MW)
- Manutenzione: 3 k€ (manutenzione condizionatore lab. 67)

Richieste servizi: 1 mese/uomo officina elettronica INFN
 2 mesi/uomo officina meccanica INFN

SUPREMO



INO-CNR

ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA



*SOUNDING THE TIME
UNWINDING OF
THE PROTON-TO-
ELECTRON MASS
RATIO WITH COLD
STABLE MOLECULES*

*S.U.P.R.E.M.O
(CO.S.MO)*

The SUPREMO project

Motivations

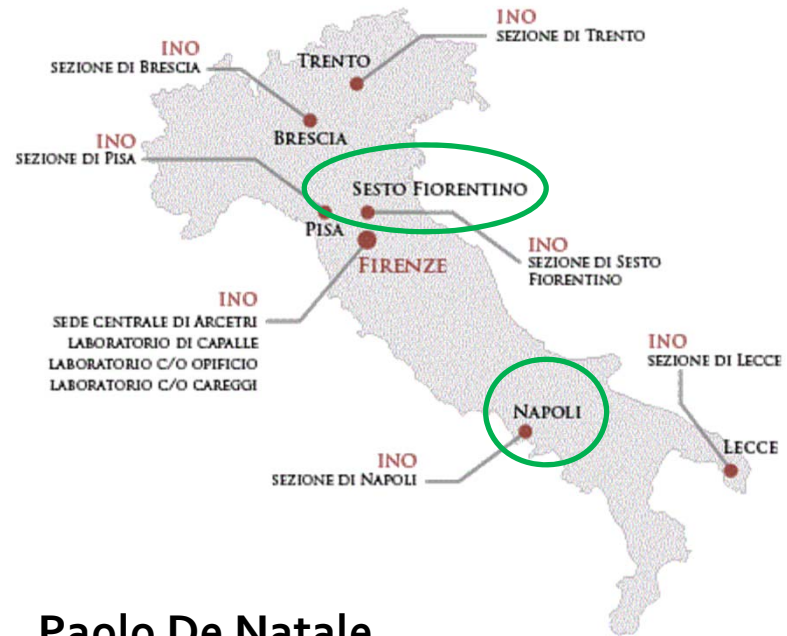
Search for new physics
by means of
molecular precision spectroscopy

- Time variation of fundamental constants (α , m_p/m_e , ...)
- Electric dipole moment of the electron
- Parity violation in molecules



Development of

- High-res spectroscopic techniques
- Metrological (mid-IR) coherent sources
- Manipulation of molecules (molecular beams, trapped and cold molecules)



Paolo De Natale

Gabriele Santambrogio

Giacomo Inero

Davide D'Ambrosio

Simone Borri

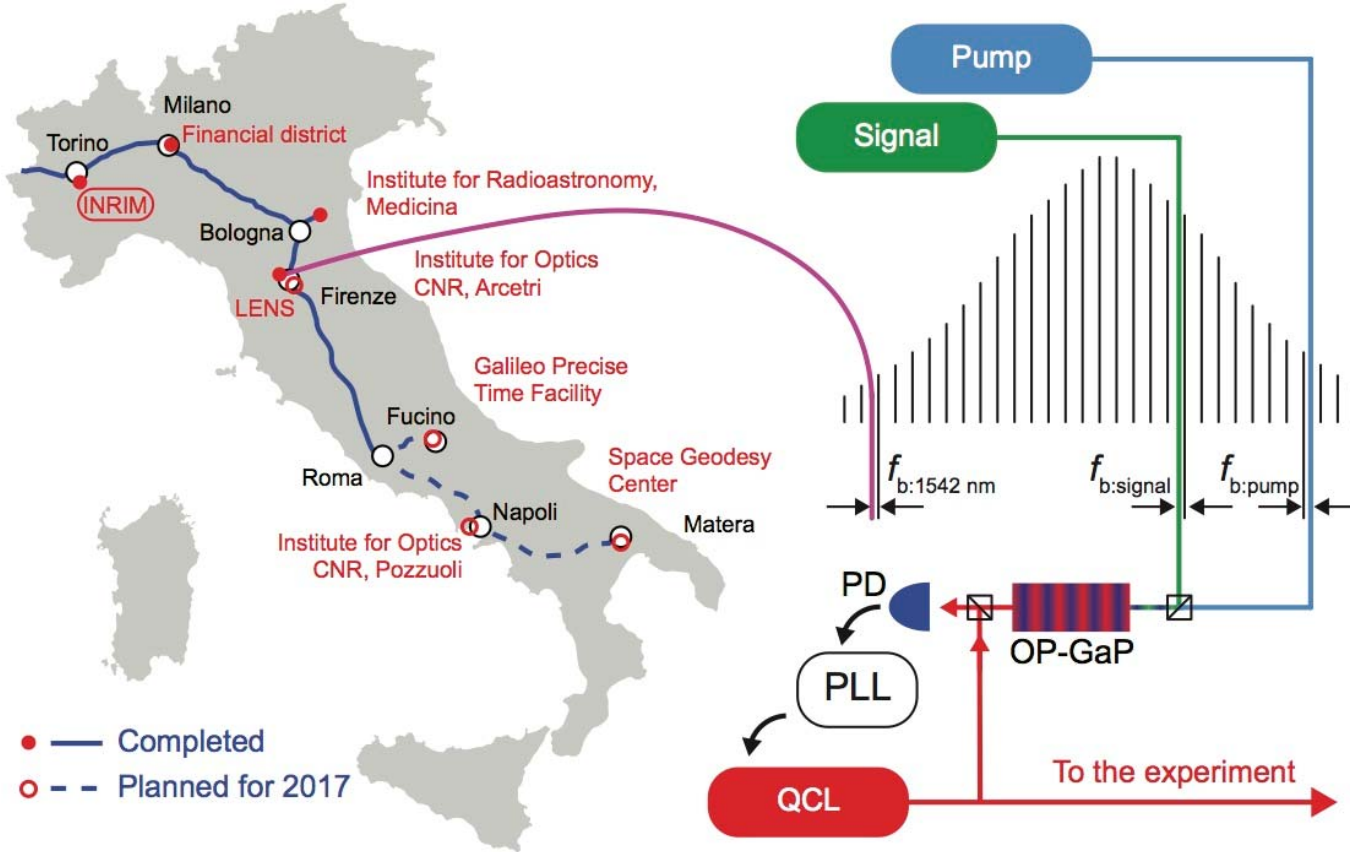
....

Pasquale Maddaloni

Valentina Di Sarno

Luigi Santamaria

Mid-IR source at 5.9 μm : completed



QCL referenced to a DFG radiation in an OP-GaP crystal (by P. G. Schunemann)

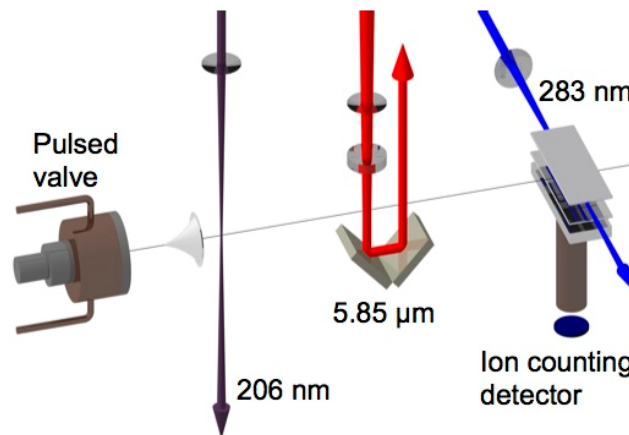
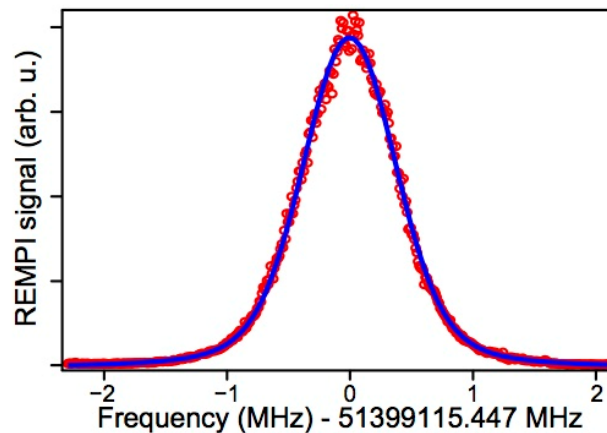
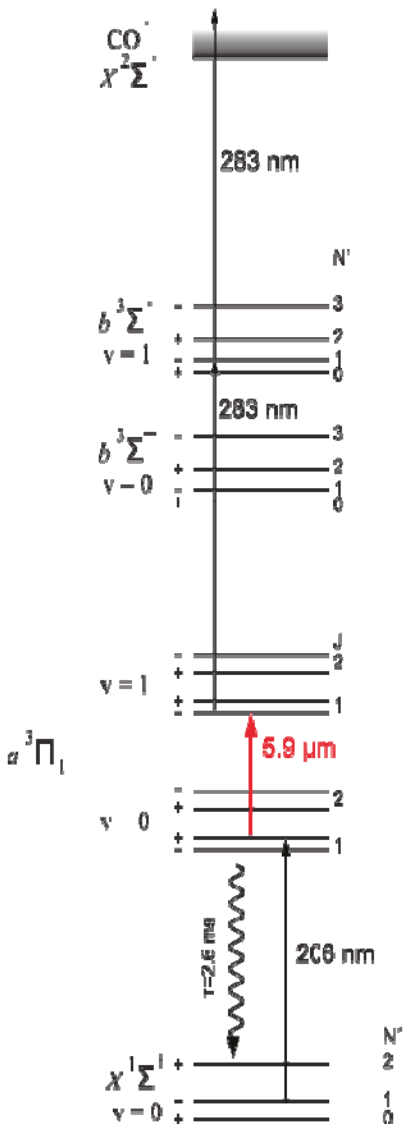
BAE SYSTEMS

Absolute reference
from INRIM by
means of a 642 km-
long fiber link

Up to 10 mW @ 5,9 μm available for spectroscopic measurement:
kHz linewidth, 10^{-14} frequency stability over 1 s

G. Insero et al., Opt. Lett. 41, 5114 (2016)

1-photon measurement: completed



Spectroscopy on a CO molecular beam in a triple resonance experiment

25-min. scan: 900 kHz Doppler broad profile (FWHM)

9-h averaging: 3 kHz uncertainty on center frequency

Limited by

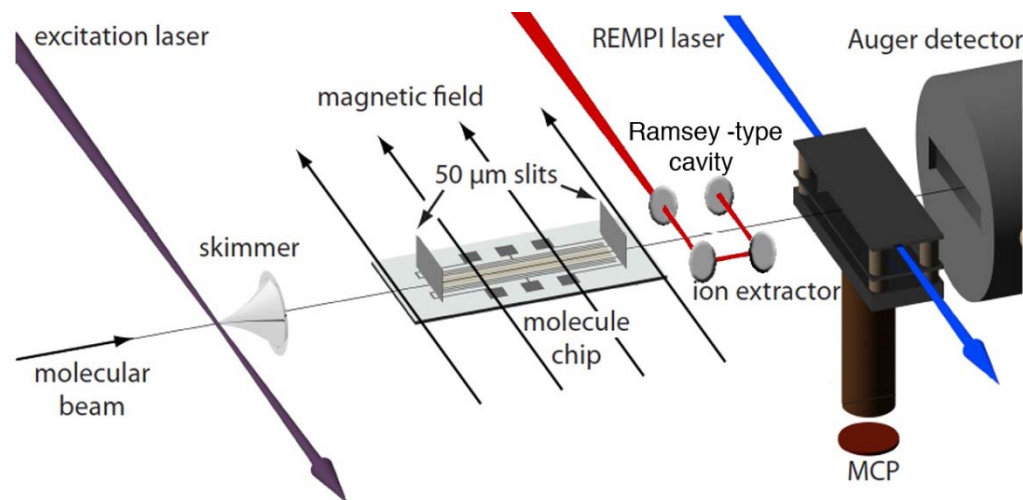
- Doppler broad.
- Transit-time broad.

G. Inero et al., "Measuring molecular frequencies in the 1-10 μm range at 11-digits accuracy", arXiv:1703.10975 (2017)

Perspectives: activity 2018

Molecules in a dipole trap

- Simulations: summer 2017
- Trap prototype: november 2017
- Test: april 2018



Two-photon spectroscopy

More powerful QCLs (>100 mW) + accessories (optical isolators) start to be available.

- Autumn 2017: test of an optical isolator for 5,9 μm
- 2018: acquisition of a high-power QCL

Coherent interactions (Rabi oscillations)

Currently under development: Simulations + first tests, laser beam wavefront analysis

Richieste 2018 + anagrafica

Milestone 1: completamento dei test sulle oscillazioni di Rabi (Dicembre 2017)

Milestone 2: trappola di dipolo ottico e primi test di intrappolamento (Aprile 2018)

Milestone 3: apparato per la spettroscopia a due fotoni (Novembre 2018)

Richieste finanziarie 2018

- Strumentazione: laser a cascata quantica di alta potenza e isolatore ottico per l'apparato di spettroscopia a due fotoni. Costo: 25 k€
- Materiale di consumo: componenti ottiche e optomeccaniche. Costo: 12 k€
- Missioni: 8 k€

Anagrafica 2018

Paolo De Natale: 0,2

Gabriele Santambrogio: 0,6

Simone Borri: 0,6

Giacomo Inero (post-doc): 0,4

Davide D'Ambrosio (PhD student): 0,4

Maurizio Verde (PhD student): 0,4