

## Elettrodinamica Quantistica:

Fluttuazioni Quantistiche e Forze di Casimir

Effetto Casimir e Casimir-Polder dinamico

Effetto Unruh

Processi radiativi in ambienti strutturati (nanocavità, cristalli fotonici, etc)

Quantum Optomechanics

Risonanze e irreversibilità temporale in meccanica quantistica

Assioni cosmologici e materia oscura

Corsi di Laurea in Fisica

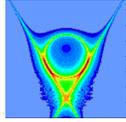
Dipartimento di Fisica e Chimica

Palermo, 11 Aprile 2016

## Collaborazioni scientifiche



Institut für Physik, University of Freiburg, Germany (S.Y. Buhmann)



Center for Complex Quantum Systems, University of Texas at Austin, USA (T. Petrosky)



Laboratoire Charles Coulomb, Université Montpellier, France (M. Antezza)



Dept. Phys. Science, Osaka Prefecture University, Japan (S. Tanaka)



Institut für Physik und Astronomie, Universität Potsdam, Germany (C. Henkel)



Laboratori Nazionali di Legnaro, INFN, Padova, Italy (G. Carugno)



Centre de Physique Theorique, Université Aix-Marseille, France (M. Pettini)



ST Microelectronics, Catania, Italy (A. Russo)



Ningbo University, China (H. Yu)



UNIVERSITY  
OF  
YAMANASHI

University of Yamanashi, Japan (K. Hashimoto)

*Il gruppo di ricerca:*

Roberto Passante  
Lucia Rizzuto

Visiting researcher:  
Wenting Zhou (Ningbo University, China)

Post-doc:  
Salvatore Spagnolo  
Margherita Lattuca  
Antonio Noto

Federico Armata (Imperial College London, England)  
Pablo Barcellona (University of Freiburg, Germany)  
Giuseppe Calajò (Tech. University Wien, Austria)  
Roberta Incardone (Max Planck Institute Stuttgart, Germany)  
Jamir Marino (University of Cologne, Germany)  
Valentina Notararigo (University College London, England)

## *Tematiche di ricerca*

Fluttuazioni Quantistiche e Forze di Casimir

Effetto Casimir e Casimir-Polder dinamico

Effetto Unruh

Processi radiativi in ambienti strutturati (nanocavità, cristalli fotonici, etc)

Quantum Optomechanics

Risonanze e irreversibilità temporale in meccanica quantistica

Assioni cosmologici e materia oscura

## *Cosa sono le forze di Casimir (e di Casimir-Polder)?*

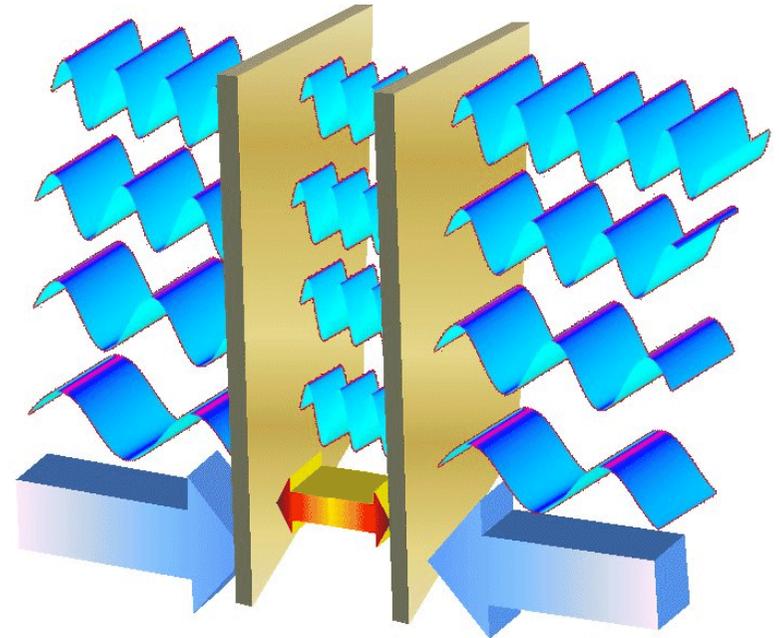
Sono forze di natura elettromagnetica tra oggetti elettricamente neutri nel vuoto, dovute alla natura quantistica del campo di radiazione elettromagnetica.

Sono una conseguenza dell'esistenza delle *fluttuazioni di punto zero* o *fluttuazioni del vuoto*.

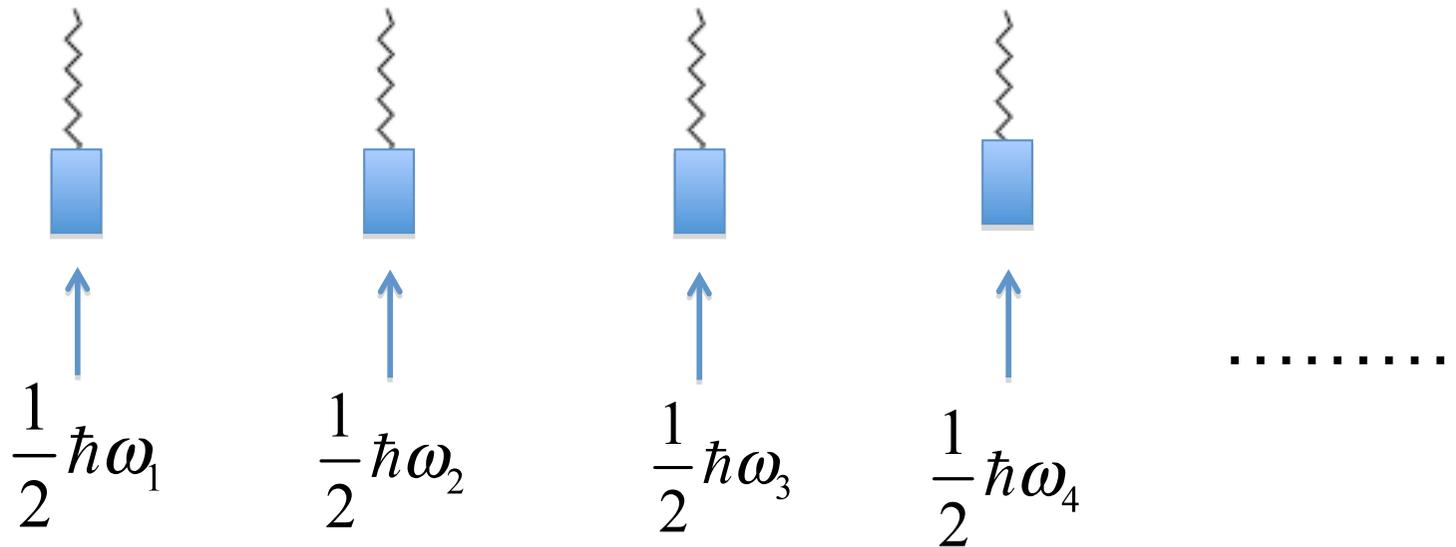
Sono effetti puramente quantistici: non hanno analogo classico.

Sono manifestazioni del comportamento quantistica della natura, anche a livello macroscopico!

Hanno anche importanza applicativa, ad esempio nelle nanotecnologie.



## Il campo elettromagnetico in fisica quantistica



Energia associata alle  
fluttuazioni del vuoto

$$\sum_{kj} \frac{1}{2} \hbar \omega_k$$

$$\langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle = \langle \mathbf{B}(\mathbf{r}) \rangle = 0$$

$$\langle E^2(\mathbf{r}) \rangle \neq 0; \quad \langle B^2(\mathbf{r}) \rangle \neq 0$$

**E' infinita!**

Esistono manifestazioni osservabili  
di questa energia?

Potrebbe avere una relazione con  
l'energia oscura dell'universo, che  
determina l'accelerazione della sua  
espansione?

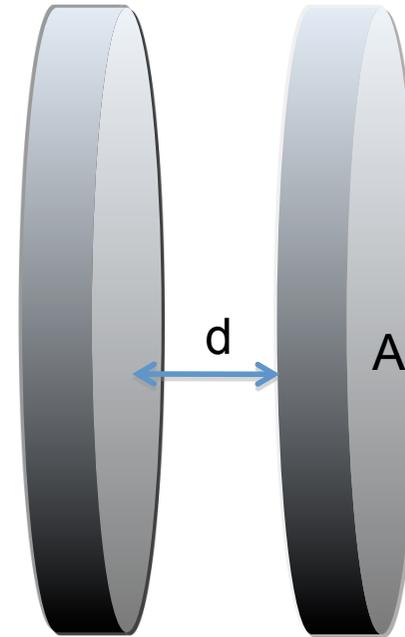
Gli operatori di campo elettrico e magnetico non  
commutano sul cono di luce.

Effetto Casimir: due lastre metalliche scariche nel vuoto si attraggono!

*L'energia associata alle fluttuazioni di punto zero dipende dalla distanza tra le lastre → forza tra le lastre*

**Questo effetto può essere spiegato solo nell'ambito della teoria quantistica del campo elettromagnetico.**

**E' tra le poche manifestazioni a livello macroscopico della natura quantistica della radiazione elettromagnetica!**



$$F = -\frac{\hbar\pi c}{240} \frac{A}{d^4}$$

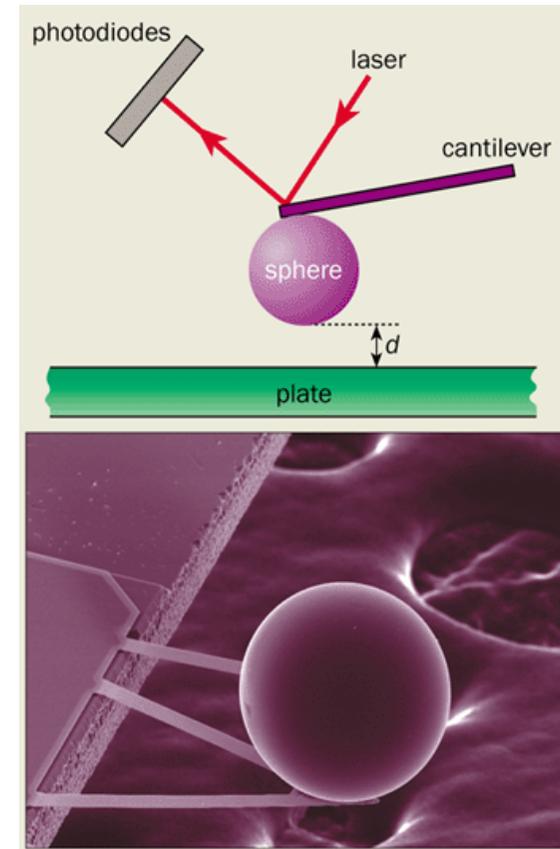
## Ordine di grandezza della forza di Casimir

$$d = 1\mu \rightarrow \frac{F}{A} = 10^{-7} \text{ N/cm}^2$$

## Misure sperimentali:

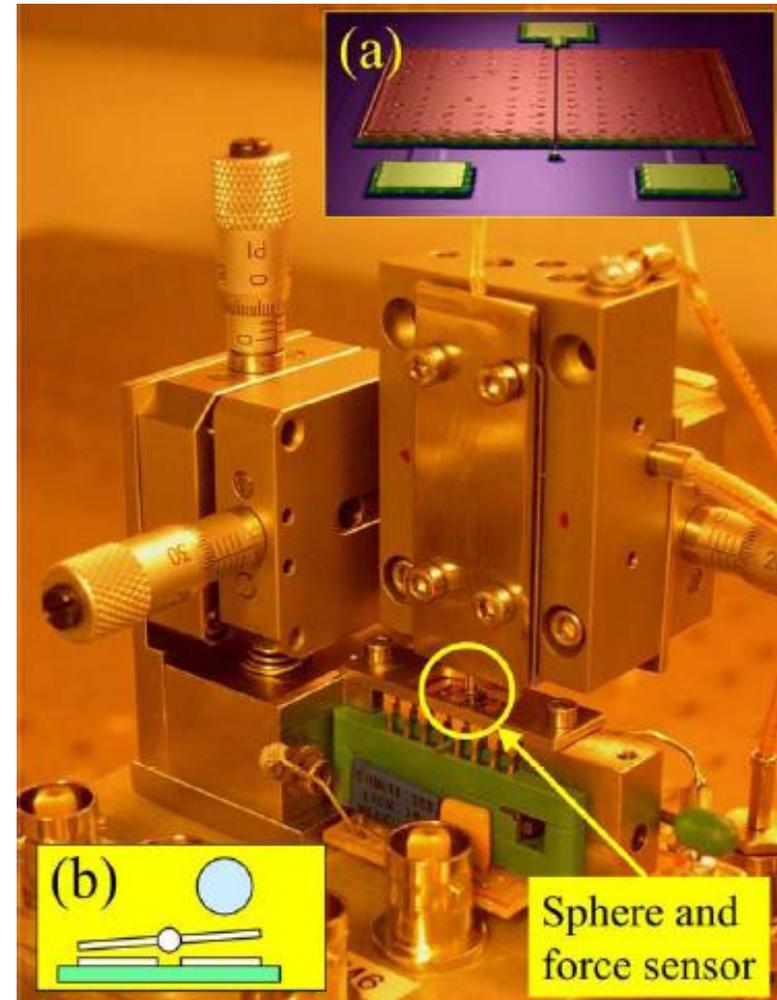
Misura della forza di Casimir con un microscopio a forza atomica:

Distanza sfera-piatto: 60-900 nm  
Precisione: 2%

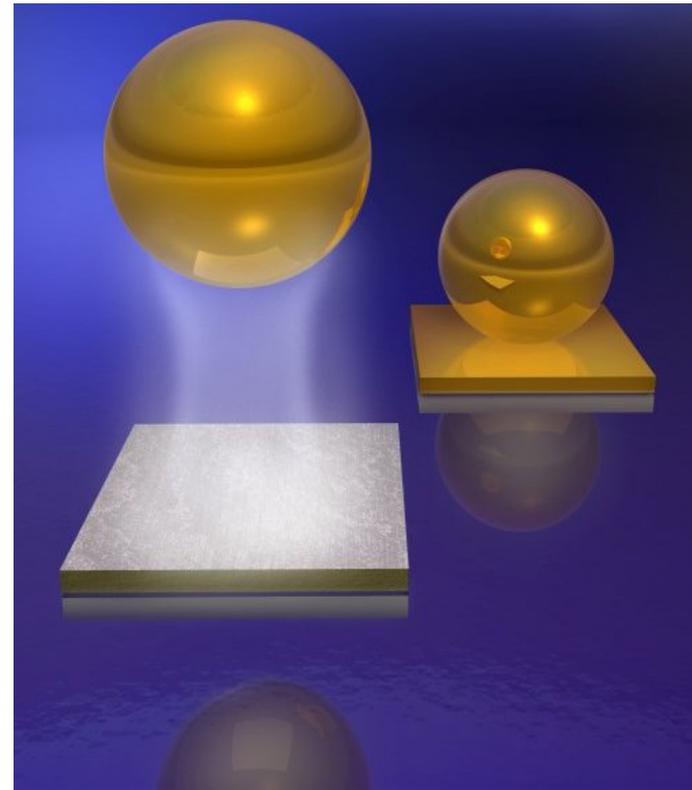


## Le forze di Casimir: dalla teoria agli esperimenti

- Temperatura finita e situazioni fuori equilibrio termico
- Effetti a più corpi
- Rugosità delle superfici
- Proprietà magnetodielettriche delle superfici
- Effetti dinamici (es: moto degli oggetti/atomi, variazione nel tempo di loro proprietà fisiche)
- Forze di Casimir repulsive

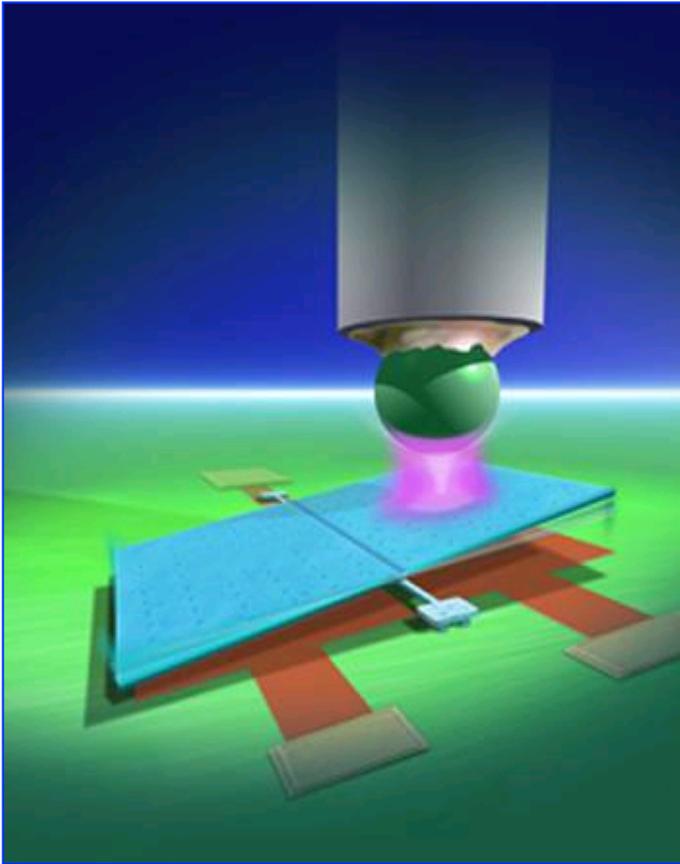


Le forze di Casimir hanno un interesse sia di carattere fondamentale, in vari ambiti della fisica, sia applicativo (principalmente nelle nanotecnologie, ad esempio nei dispositivi MEMS e NEMS)



Quantum levitation

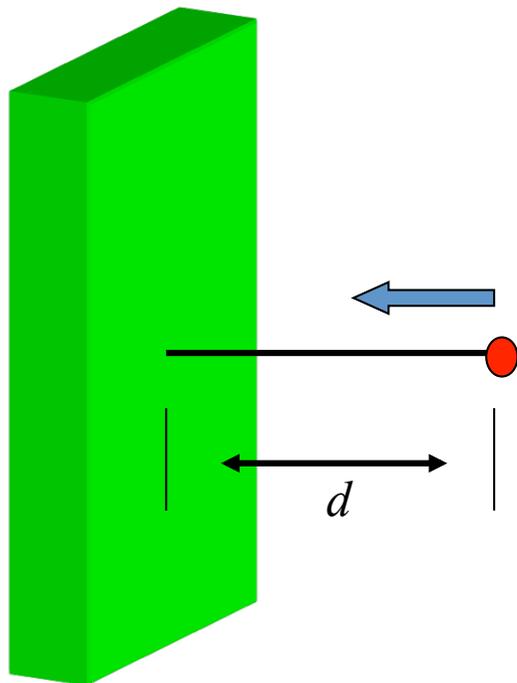
Applicazioni tecnologiche:  
MEMS (Micro Electro-Mechanical System)  
NEMS(Nano Electro-Mechanical System)



La forza di Casimir gioca un ruolo fondamentale nella realizzazione di sistemi microscopici e nanoscopici. Non si possono costruire oggetti così piccoli senza tenere conto delle forze di Casimir fra i loro componenti.

Le forze di Casimir possono essere utilizzate per controllare il movimento delle parti dei nano-dispositivi

## A livello microscopico: Forze di Casimir-Polder atomo-parete

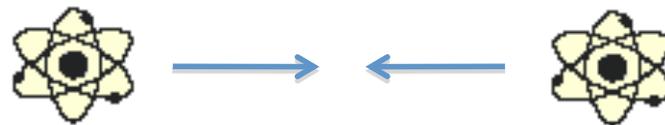


*Casimir e Polder scoprirono che un atomo neutro viene attratto da una lastra metallica scarica...*

*(le fluttuazioni di punto zero dei campi dipendono dalla distanza dalla parete)*

*Effetto Casimir-Polder dinamico: l'atomo è inizialmente in una condizione di non equilibrio → oscillazioni nella forza (che può transitoriamente essere repulsiva e molto più intensa)*

... e che fra due atomi neutri si esercita una forza attrattiva: queste forze prendono il nome di forze di Casimir-Polder/van der Waals



Cosa succede se gli atomi sono posti in moto uniformemente accelerato (o equivalentemente in un campo gravitazionale)?

**Effetto Unruh:** un detector uniformemente accelerato percepisce le fluttuazioni del vuoto come un campo termico alla temperatura:

$$T_U = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}$$

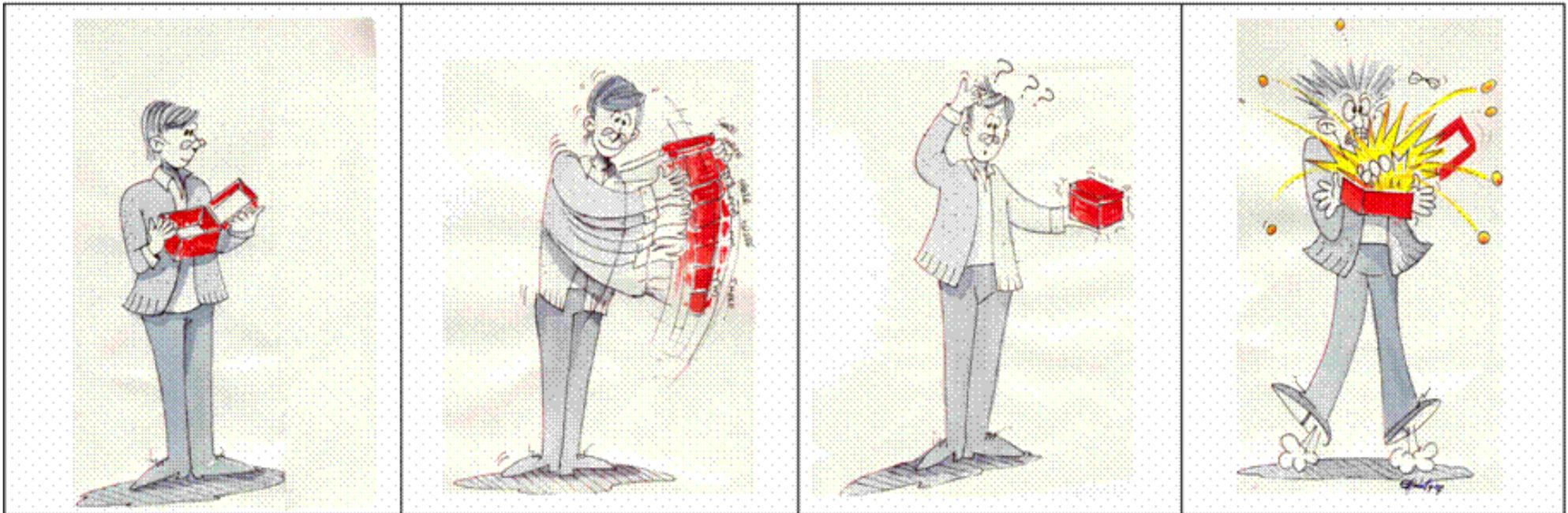
Unruh temperature ← Accelerazione

Processi radiativi quali il Lamb shift, l'emissione spontanea, le forze di Casimir e le interazioni di risonanza, sono modificati dal moto accelerato

→ possibilità di rivelare indirettamente l'effetto Unruh (previsto teoricamente, ma ancora non misurato sperimentalmente) tramite le interazioni di Casimir-Polder tra atomi in moto accelerato.

*Effetto Casimir dinamico: pareti in moto accelerato non uniforme*

*→ emissione di fotoni reali dal vuoto*



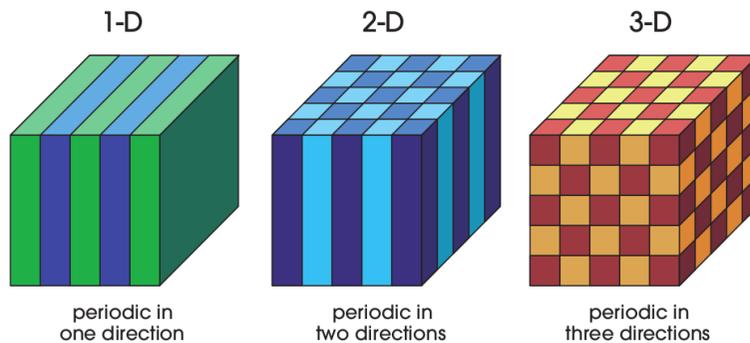
*L'effetto Casimir dinamico è previsto teoricamente, ma non è ancora stato rilevato sperimentalmente in ambito elettrodinamico*

*Effetto Casimir-Polder dinamico: gas di atomi di Rydberg intrappolati vicino una parete oscillante*

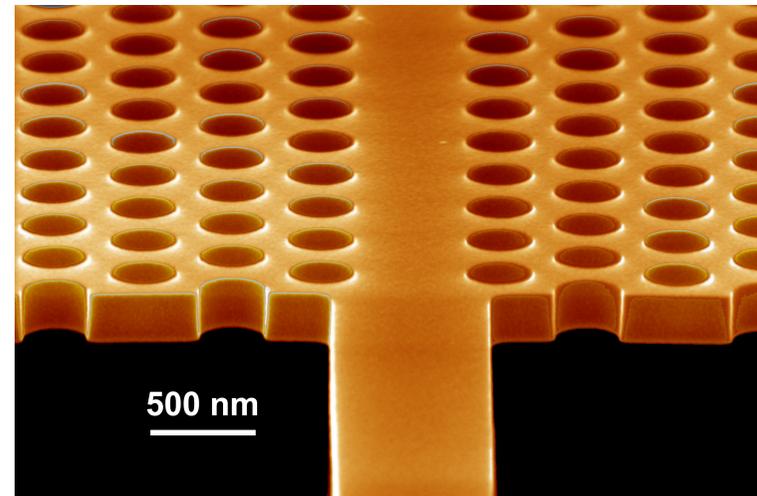
## Processi radiativi in ambienti strutturati (statici e dinamici)

L'ambiente esterno (statico o dipendente dal tempo), come una nanocavità o un cristallo fotonico, modifica la struttura dei modi del campo elettromagnetico

→ processi radiativi quali lo *shift* dei livelli atomici o di *quantum dots*, il *rate* e lo spettro dell'emissione spontanea, il trasferimento di energia tra atomi/molecole, le interazioni interatomiche mediate dalla radiazione, possono essere fortemente modificati **e controllati** tramite l'ambiente.

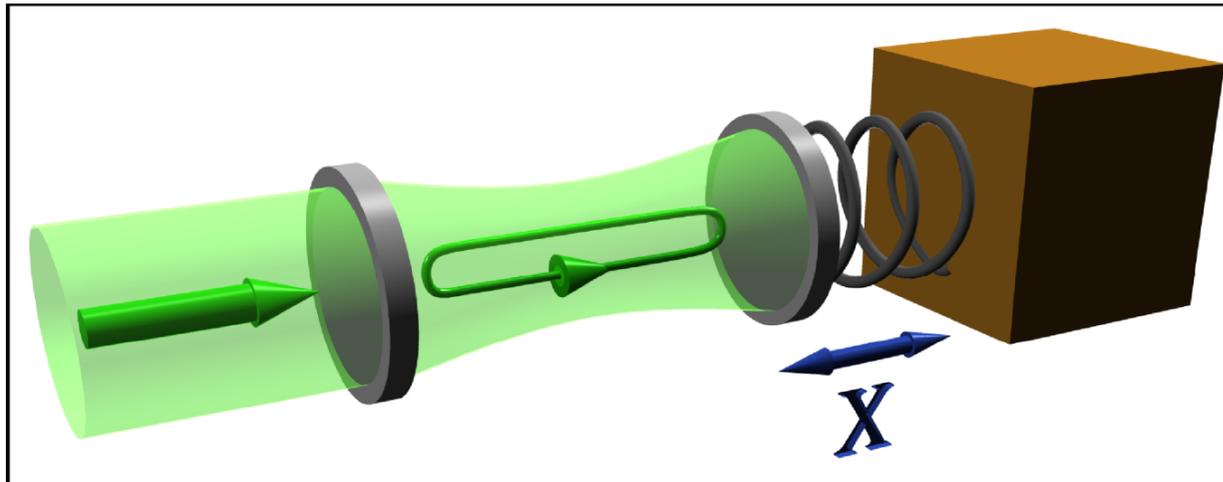


**Figure 1:** Simple examples of one-, two-, and three-dimensional photonic crystals. The different colors represent materials with different dielectric constants. The defining feature of a photonic crystal is the periodicity of dielectric material along one or more axes.



## Quantum Optomechanics

Sistemi con gradi di libertà meccanici (pareti conduttrici o dielettriche, condensati, etc) interagenti con un campo (ottico) tramite la pressione di radiazione.

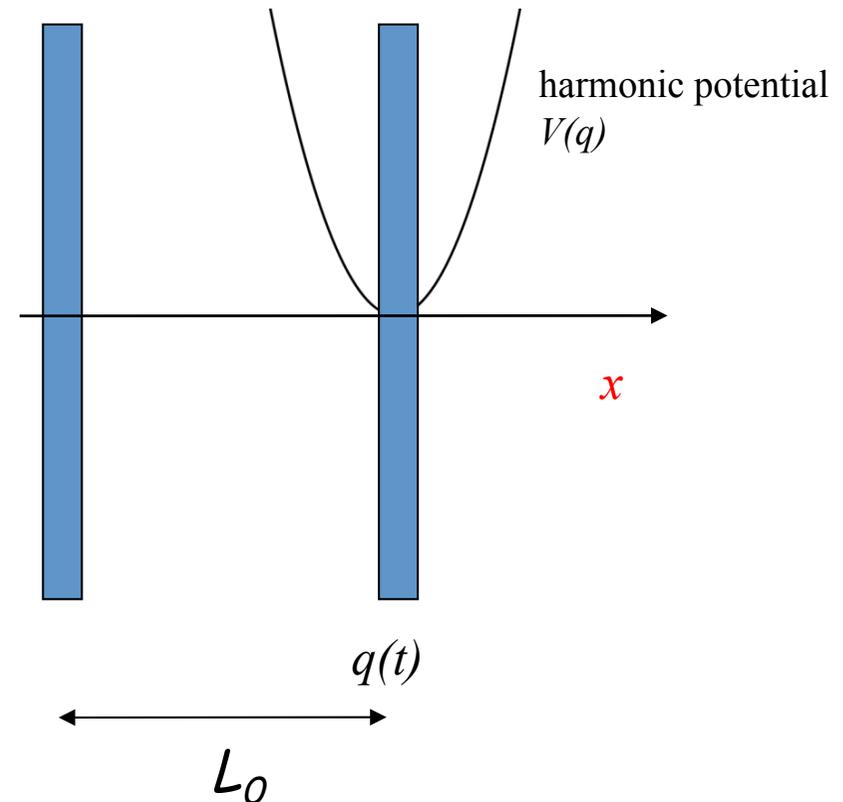


## Fluttuazioni del vuoto in una cavità con una parete mobile

*Cosa accade alle forze di Casimir se le pareti della cavità sono libere di muoversi, e il loro movimento è descritto quantisticamente?*

→ Fluttuazioni quantistiche della posizione della parete e della lunghezza della cavità.

Modifiche osservabili delle forze di Casimir e Casimir-Polder, particolarmente rilevanti per piccole masse della parete mobile.



## Assioni cosmologici e materia oscura (progetto AXIOMA-INFN)

*Assioni*: nuove particelle elementari originariamente postulate per spiegare la violazione della simmetria CP nelle interazioni forti (Peccei-Quinn).

Recenti teorie hanno ipotizzato che gli assioni potrebbero costituire la cosiddetta *materia oscura* dell'Universo.

Massa degli assioni:  $\approx 10^{-3}$  eV

Gli assioni possono interagire (debolmente) con la materia ordinaria tramite transizioni di dipolo magnetico.

## Detector per gli assioni cosmologici:

Atomi alcalini (o terre rare tipo itterbio) in matrici solide di gas nobili (Ne) o ossigeno molecolare a temperature criogeniche dell'ordine del millikelvin (la frequenza della transizione atomica può essere variata opportunamente tramite un campo magnetico, secondo la massa dell'assione).

