

# **An experimental setup for quantum optomechanics**

Supervisor: Francesco Marin

Candidate: Paolo Vezio

Optomechanics is a branch of physics which focuses on the interaction between light and mechanical objects in the low-energy regime. The subject, although it first became relevant in the context of gravitational wave detection, has expanded its horizon in several other fields including study of quantum states, observing squeezed states of both light and matter, microwave to optic conversion of quantum states, quantum technologies, nonlinear dynamics and even in the investigation of concepts like quantum decoherence and Bell inequalities.

My internship has been focussed on an optomechanical set-up where a mechanical system is coupled to the optical fields in a cavity. Such a system is known as a cavity-optomechanical system. In details, the core of the setup consists of a vibrating SiN membrane situated inside a high finesse tunable optical cavity. With proper choice of parameters, it can be shown that the optical cavity can be coupled to the mechanical system in such a way that the radiation pressure can either amplify (heat) or damp (cool) the mechanical motion of the membrane. It has been shown that under a 'cooling' configuration it is possible to approach what is known as a 'quantum ground-state' of the oscillator. More precisely, it can be achieved a regime where the phonon occupancy of the mechanical mode under investigation is below 1. Once in such a regime, several interesting phenomena of the mechanical system can be observed using optomechanical effects, including squeezing or decoherence. However, that there are several technical challenges to reach such a regime.

My thesis is organized in several sections. In a nutshell, I will start my thesis explaining how the mechanical modes get influenced by the optical cavity, and showing 'cooling' and 'heating' of the mechanical membrane. I will continue by explaining how different detection techniques work (homodyne and heterodyne) and how they are implemented to realize highly sensitive detection schemes. In particular, I have designed and realised a heterodyne detection scheme, with the purpose to investigate the Stokes and anti-Stokes sidebands induced on the electromagnetic field by the moving oscillator. The heterodyne detection has a huge importance in the quantum regime, where the two sidebands have different amplitudes and can be exploited to determine the oscillator temperature. The characterisation will then be extended at cryogenic temperatures. The optomechanical system is brought at liquid He temperature and furthermore cool it down by optomechanical effects. I will show that the sensitivity of the detection is actually limited by the frequency noise of the laser. This can be reduced by using a high finesse filter cavity right after the laser source. Therefore, in the final part of my thesis work I have implemented such a filter cavity and showed that it can be successfully utilized to obtain a highly sensitive detection scheme, that could allow to achieve and detect a 'quantum ground state'.

# Un apparato sperimentale per l'opto-meccanica quantistica

Relatore: Francesco Marin

Candidato: Paolo Vezio

L'optomeccanica è una branca della fisica che studia le interazioni tra la luce e i sistemi meccanici, in un regime di bassa energia. L'argomento, divenuto negli ultimi tempi rilevante nel contesto della rilevazione delle onde gravitazionali, è stato oggetto di indagini in diversi altri campi, tra cui lo studio di stati quantistici, di stati compressi di luce e di materia, di microonde a conversione ottica in stati quantistici, di tecnologie quantistiche, di dinamiche non lineari, ed è stato persino utilizzato per studiare concetti come la decoerenza quantistica e le disuguaglianze di Bell.

Il mio studio di tesi si basa su un apparato optomeccanico, in cui un sistema meccanico è accoppiato a campi ottici in una cavità. Questo sistema è conosciuto come "sistema di cavità optomeccanica". La parte fondamentale dell'apparato consiste in una membrana vibrante in SiN situata dentro una cavità ad alta *finesse* accordabile. Con un'adeguata scelta di parametri, si può osservare che la cavità ottica può essere accoppiata al sistema meccanico in modo tale che la pressione di radiazione possa sia ampliare (riscaldare) che attenuare (raffreddare) il movimento meccanico della membrana. È stato osservato che, con un appropriato raffreddamento, è possibile avvicinarsi a ciò che chiamiamo 'stato fondamentale quantistico' dell'oscillatore. In particolare, esso può raggiungere un regime in cui l'occupazione dei fononi del modo meccanico, preso in considerazione, è al di sotto di 1. In questo regime, si possono osservare, sfruttando gli effetti optomeccanici, vari fenomeni interessanti del sistema meccanico, incluso la compressione e la decoerenza. Tuttavia ci sono varie sfide tecniche per raggiungere questo regime.

La mia tesi è suddivisa in varie parti; inizierò spiegando come i modi meccanici vengano influenzati dalla cavità optomeccanica, per poi descrivere il "raffreddamento" ed il "riscaldamento" della membrana meccanica. Continuerò, poi, parlando delle diverse tecniche di rilevazione (omodina ed eterodina) e di come esse siano utilizzate per realizzare schemi di rilevazione altamente sensibili. In particolare, ho progettato e realizzato uno schema di rilevazione in eterodina con l'obiettivo di analizzare le bande laterali *Stokes* e *anti-Stokes*, indotte sul campo elettromagnetico dal movimento dell'oscillatore. La rilevazione di eterodina è molto importante nel regime quantistico, dove le due bande laterali hanno diverse ampiezze e possono essere sfruttate al fine di determinare la temperatura dell'oscillatore. La caratterizzazione del sistema verrà poi estesa a temperature criogeniche. Il sistema optomeccanico è portato alla temperatura dell'He liquido per poi venir raffreddato attraverso effetti optomeccanici. Dimostrerò che la sensibilità della rilevazione è in realtà limitata dal rumore di frequenza del laser. Il rumore può essere ridotto utilizzando una cavità di filtraggio ad alta *finesse* inserita subito dopo la sorgente laser.

Nella parte finale della mia tesi, dunque, discuterò di come io abbia utilizzato e implementato la cavità di filtraggio per poi mostrare che essa può essere utilizzata con successo, al fine di ottenere un apparato di rilevazione altamente sensibile che permette di attivare e rilevare lo "stato quantistico fondamentale".