

Gianluca Gagliardi

Un micro-oscillatore optomeccanico in una goccia

A micro-opto-mechanical oscillator in a droplet

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Nazionale di Ottica (INO), via Campi Flegrei, 34 - Comprensorio A. Olivetti, 80078 Pozzuoli (Italy)

Sommario. Un esperimento svolto presso la sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Ottica (INO) del CNR ha mostrato la possibilità di eccitare onde di superficie su piccole gocce liquide per mezzo di un fascio luminoso. Il dispositivo così realizzato si comporta come un vero e proprio micro-oscillatore, costituito però interamente da liquido e mantenuto in forma sferica quasi perfetta dalla sola tensione superficiale.

Parole chiave. Modi ottici di galleria, risonatori liquidi, tensione superficiale, opto-meccanica in cavità, scattering di Brillouin, micro-oscillatore meccanico.

I fenomeni di risonanza in cavità, siano esse ottiche, meccaniche, o di altra natura, sono generalmente legati ad aspetti geometrici specifici della struttura che li supporta. Un esempio tra i più celebri è rappresentato dalle risonanze acustiche osservabili nelle grandi superfici curve, spiegate sin agli inizi del '900 da Lord Rayleigh, che le studiò nella cupola della cattedrale di St Paul a Londra definendole “whispering gallery modes” [1]. Fenomeni simili si osservano anche all'interno di altre strutture concave chiuse, come l'Echo Wall del Tempio del Paradiso di Pechino o la cupola del Battistero di Pisa. Da un punto di vista stretta-

Summary. An experiment performed at the Naples Unit of the National Institute of Optics (INO) of the CNR, has shown the possibility to excite surface waves on tiny liquid droplets using a light beam. The resulting optical device serves as a micro-mechanical oscillator, entirely made of liquid with an almost perfect spherical shape due to natural surface tension.

Keywords. Whispering gallery modes, liquid resonators, surface tension, cavity optomechanics, Brillouin scattering, mechanical micro-oscillator.

Resonant phenomena in cavities, be they optical, mechanical or otherwise, are generally related to specific geometrical features of the supporting structure. Among the most popular examples are the acoustic resonances observable in large curved surfaces, explained in the early 1900s by Lord Rayleigh, who termed them “whispering gallery modes”, studying the reverb of the dome of St Paul's cathedral in London [1]. Similar phenomena are also observed



mente geometrico, tali modi acustici consistono in onde meccaniche viaggianti sulla superficie come risultato di riflessioni interne multiple che possono propagarsi per un tempo virtualmente infinito, in assenza di perdite del materiale. Un fenomeno analogo si osserva anche per la radiazione elettromagnetica all'interno di strutture curve chiuse come sfere, toroidi ecc.

La tensione superficiale di un liquido, la grandezza che in natura conferisce a una gocciolina la sua forma sferica, le garantisce anche una regolarità superficiale quasi perfetta rendendola così un risonatore ottico e meccanico ideale. Quando la quantità di liquido in gioco è piccola, tipicamente inferiore a 1 microlitro, la forza di gravità ha un effetto sostanzialmente trascurabile rispetto alla tensione e, quindi, la goccia può essere tenuta sospesa ad un capillare o poggiata su una superficie e manipolata agevolmente, senza che questo perturbi in modo importante la sua sfericità [2]. In questo modo, un oggetto così semplice e comune in natura può diventare un sofisticato elemento ottico, al pari di un dispositivo convenzionale, come una lente o uno specchio. Infatti, in virtù di questa intrinseca perfezione e della trasparenza di gran parte dei liquidi nell'intervallo visibile dello spettro elettromagnetico, una gocciolina illuminata in modo opportuno consente di mantenere parte della luce intrappolata al suo interno amplificando così enormemente ogni effetto d'interazione radiazione materia [3]. Non solo. La goccia può fungere al tempo stesso anche da risonatore acustico proprio come una struttura solida.

L'esperimento svolto presso l'INO di Napoli si basa su uno schema di eccitazione dei *modi ottici di galleria* di una sfera dielettrica: risonanze per le qua-

in other closed concave structures, such as the Echo Wall of the Temple of Heaven in Beijing or the dome of the Baptistery of Pisa. From a purely geometrical point of view, such modes consist in mechanical waves travelling over the surface as a result of multiple total-internal reflections, which would propagate for a virtually infinite time in the absence of any intrinsic material loss. Analogously, this may be observed for electromagnetic radiation within closed curved dielectric structures like spheres, toroids, etc.

Liquid surface tension, which gives a droplet its spherical shape, also guarantees an almost perfectly smooth surface, thereby making it an ideal mechanical and optical resonator. When the amount of liquid is small enough, i.e. typically less than 1 microlitre, the force of gravity is substantially negligible compared to the tension and thus the drop may be suspended by the tip of a capillary or held on a surface and easily manipulated without significantly perturbing its spherical geometry [2]. In this way, such a simple and ordinary object in nature becomes a sophisticated optical element, just like a lens or a mirror. Indeed, thanks to its intrinsic perfection and the transparency of most liquids in the visible region of the electromagnetic spectrum, a properly illuminated droplet traps part of the incoming light and hugely amplifies any effect of light-matter interaction [3]. In addition, the droplet also serves at the same time as an acoustic resonator just like a solid structure.

The experiment performed at INO-Naples rests on the excitation of the optical *whispering-gallery modes* of a dielectric sphere: resonances corresponding to light propagating along the equatorial trajectory with intensity concentrated near the surface and characterized by an

li la luce si propaga lungo la direzione equatoriale con intensità concentrata in prossimità della superficie e caratterizzate da un tempo medio di permanenza migliaia di volte più lungo che in condizioni normali, grazie alla forte azione di confinamento della struttura. I modi di galleria vengono eccitati da un fascio laser visibile (lunghezza d'onda di 640 nm) focalizzato in direzione tangenziale al bordo di una goccia di olio siliconico (un polimero liquido di ridotta viscosità). La massa ridotta, la bassa perdita meccanica e l'elevato fattore di qualità ottico del risonatore a goccia permettono un significativo trasferimento di energia dalla radiazione elettromagnetica alla superficie liquida per "scattering" di Brillouin stimolato, eccitando onde meccaniche ultrasoniche e ipersoniche amplificate al suo interno come nella cupola di una chiesa. Le onde sulla superficie della goccia presentano una forte analogia con i modi ottici che le generano ("gallery modes") e proprietà simili all'emissione intensa e coerente di un laser, sorgente però, in questo caso, di vibrazioni ad alta frequenza invece che di fotoni. In sostanza, la goccia stimolata dalla luce incidente si attiva come un micro-emettitore meccanico vibrando in maniera stabile a una frequenza che corrisponde proprio a una sua risonanza (circa 100 MHz). Il risonatore opto-meccanico così realizzato si comporta come un vero e proprio micro-oscillatore, con caratteristiche simili a quelle di un cristallo piezoelettrico (e.g. oscillatore al quarzo), costituito però interamente da liquido [4].

Le potenziali ricadute applicative sono molteplici. Ad esempio, il liquido può essere costituito da una soluzione acquosa contenente un fluido biologico, all'interno del quale eseguire un'analisi chimica diretta. Sfruttando l'eccitazione otti-

internal circulation time thousands times longer than usual, thanks to the confinement action of the structure. The gallery modes are excited by a visible laser beam, (640-nm wavelength) focused in a tangential direction to the rim of a droplet of silicon oil (a low-viscosity liquid polymer). The small mass, low mechanical loss and high optical-quality factor of the droplet resonator enable significant energy transfer from electromagnetic radiation to the liquid surface via stimulated Brillouin scattering, thus exciting ultrasound and hypersound mechanical waves that are internally amplified like in the dome of a church. These droplet surface waves are very similar to the optical modes (gallery modes) that generate them and have properties similar to the intense and coherent emission of a laser, being the source in this case, of high-frequency vibrations instead of photons [4]. In other words, the droplet is stimulated by the incident light and is activated as a mechanical micro-emitter that vibrates stably at a frequency corresponding to a specific resonance (~ 100 MHz). This opto-mechanical resonator behaves like a real micro-oscillator with characteristics similar to a piezo-electric crystal (e.g. quartz oscillator) but is entirely made of liquid [5].

The potential impact of this activity is manifold. For instance, the liquid can be an aqueous solution containing a biological fluid that needs to be directly analysed. Thanks to optical interrogation, a small droplet serves both as the sample and the sensor at the same time: from changes in mechanical oscillations and scattered light the presence of cells or specific analytes can be sought and monitored. The implications may be relevant also in other fields, like material science, as a direct, non-invasive characterization of viscous-elastic features of

ca, pertanto, una piccola gocciolina funge così sia da campione sia da sensore al tempo stesso: dai cambiamenti nelle oscillazioni meccaniche e nella luce diffusa è possibile ricercare e monitorare la presenza di cellule o specifici analiti. Le implicazioni possono essere importanti anche in altri ambiti, come la scienza dei materiali, poichè in un campione di poche centinaia di nanolitri è possibile una caratterizzazione diretta e totalmente non invasiva delle proprietà visco-elastiche di un composto senza ricorrere a strumentazione complessa.

Infine, la capacità di sfruttare l'elevatissima trasparenza dell'acqua in alcune finestre spettrali del visibile lascia intravedere nuove interessanti opportunità di esperimenti di natura fondamentale sulle proprietà di diffusione e assorbimento di luce rilevanti per i processi atmosferici.

Gianluca Gagliardi si è laureato in Fisica all'Università "Federico II" di Napoli e ha conseguito il dottorato di ricerca in Fisica presso lo stesso ateneo. Dal 2003, è ricercatore presso il CNR-Istituto Nazionale di Ottica (INO), sezione di Napoli, dove è responsabile scientifico del Laboratorio 'Sensori Ottici'. Le sue attività di ricerca riguardano principalmente la spettroscopia laser ad alta sensibilità e risoluzione di specie gassose e liquide, lo sviluppo di tecniche di interrogazione ad alte prestazioni di sensori in fibra ottica e lo studio delle proprietà e le applicazioni di risonatori ottici solidi e liquidi (gianluca.gagliardi@ino.it).



Figura 1. Dettaglio del sistema ottico per l'accoppiamento a una goccia di olio siliconico (diametro 1 mm) sospesa ad una fibra di silice e illuminata da un laser a 640 nm. Insetto in alto: luce diffusa dalla goccia.

Figure 1. Detail of the optical system devised for optical coupling to a silicon-oil droplet (1-mm diam) suspended by a silica fibre and illuminated by a 640-nm laser. Top inset: light scattered by the drop.

Bibliografia

1. L. Rayleigh, The problem of the whispering gallery, *Philosophical Magazine* Vol. 20, p. 1001 (1910)
2. S. Avino, A. Krause, R. Zullo, A. Giorgini, P. Malara, P. De Natale, H.-P. Loock and G. Gagliardi, Direct sensing in liquids using whispering-gallery-mode droplet resonators, *Adv. Opt. Mat.* Vol. 2, p. 1155 (2014)
3. A. Ashkin, and J. M. Dziedzic, Observation of Resonances in the Radiation Pressure on Dielectric Spheres, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 38, p. 1351 (1977)
4. A. Giorgini, S. Avino, P. Malara, P. De Natale, M. Yannai, T. Carmon, and G. Gagliardi, Stimulated Brillouin Cavity Optomechanics in Liquid Droplets, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 120, 073902 (2018)

fluid compounds is feasible in nanolitre samples without resorting to complex instrumentation.

Lastly, the ability to harness the very high transparency of water in well-defined visible spectral windows envisages new and interesting opportunities to perform fundamental experiments on light scattering and absorption phenomena that are central to atmospheric processes.

Gianluca Gagliardi obtained his BSc, MSc and PhD in Physics from the “Federico II” University of Naples, Italy. Since 2003, he has worked as research scientist at the Naples Unit of the CNR-National Institute of Optics (INO), where he is head of the “Optical Sensors” Laboratory. His research activities are mainly focused on high-sensitivity and high-resolution laser spectroscopy of gas and liquid species, development of high-performance interrogation techniques for fibre-optic sensors, and investigation on properties and applications of solid and liquid optical resonators. (gianluca.gagliardi@ino.it).