

Francesco Saverio Cataliotti, Augusto Smerzi

Il paradosso di Zenone e la fisica quantistica

Zeno's Paradox and Quantum Physics

Quantum Science and Technology in Arcetri (QSTAR), Largo Enrico Fermi 2, 50125 Firenze, Italy

Confinare la dinamica di un sistema quantistico attraverso osservazioni ripetute. È il risultato presentato su Nature Communications da un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Fisica e Astronomia e del Laboratorio Europeo per la Spettroscopia non Lineare (LENS) dell'Università di Firenze, dell'Istituto Nazionale di Ottica (CNR-INO) e del nuovo centro di ricerca interdisciplinare "Quantum Science and Technology in Arcetri" (QSTAR) ("Experimental Realization of Quantum Zeno Dynamics", OPEN ACCESS: <http://www.nature.com/ncomms/2014/140130/ncomms4194/full/ncomms4194.html>).

È stato dimostrato sperimentalmente un effetto noto come "Quantum Zeno Dynamics", che si ispira a uno dei famosi paradossi sul movimento del filosofo di Elea. Zenone argomenta che, osservando una freccia in movimento, in ogni istante essa occupa una sola posizione nello spazio apparendo immobile, se ne deduce che l'insieme di stati immobili non può corrispondere al movimento. Questa conclusione, paradossale per la fisica classica, è perfettamente logica in fisica quantistica, dove il processo di misura può perturbare la dinamica fino a congelarla¹; come già

¹ Misra, B. & Sudarshan, E. C. G. "The Zeno's paradox in quantum theory" J. Math. Phys. 18, 756–763 (1977)

Confining the dynamics of a quantum system through repeated observations: this is the result presented in Nature Communications by a group of researchers from the Department of Physics and Astronomy and the European Laboratory for Non-linear Spectroscopy (LENS) of the University of Florence, from the National Institute of Optics (CNR-INO) and the new interdisciplinary research centre "Quantum Science and Technology in Arcetri" (QSTAR) ("Experimental Realization of Quantum Zeno Dynamics", OPEN ACCESS: <http://www.nature.com/ncomms/2014/140130/ncomms4194/full/ncomms4194.html>).

What has been demonstrated is an effect known as "Quantum Zeno Dynamics", which is inspired by one of the famous paradoxes regarding movement devised by the philosopher of Elea. Zeno argued that when we observe an arrow in movement, at every instant it occupies a single position in space that is apparently motionless, and hence that a sequence of motionless states cannot correspond to movement. This conclusion, which is paradoxical for classical physics, is perfectly logical in quantum physics, where the process of measurement can disturb the



dimostrato sperimentalmente fin dal 1990². Più in generale l'osservazione ripetuta dell'assenza di un oggetto da una determinata porzione di spazio gli impedisce di attraversarla, permettendo così di confinarne la dinamica³. Fino ad oggi questo fenomeno più generale non era mai stato osservato sperimentalmente.

L'esperimento è stato realizzato usando un gas che permette di fare misurazioni quantistiche, un condensato di Bose-Einstein di atomi di rubidio, in un atom-chip, cioè un sistema integrato per intrappolare e manipolare gli atomi. La dinamica è così ristretta in uno spazio di 5 livelli costituiti dalle possibili orientazioni del momento magnetico atomico. Da questo spazio viene rimosso il livello centrale attraverso la sua "osservazione" o più precisamente attraverso una forte perturbazione. Gli atomi, che partono da un livello estremo, sono così costretti a muoversi fra i primi due stati. È notevole che la dinamica rimanga coerente malgrado l'applicazione di forti perturbazioni, che in generale vengono considerate distruttive per una dinamica quantistica e dimostra un nuovo metodo per guidare e proteggere l'evoluzione quantistica.

Finora questa possibilità era stata studiata solo teoricamente. Questa prima dimostrazione sperimentale apre nuovi scenari sia per la ricerca di base che per nuove applicazioni tecnologiche quantistiche, in particolare per proteggere la delicata evoluzione di un sistema quantistico dall'azione distruttiva dell'ambiente circostante.

² Itano, W. M., Heinzen, D. J., Bollinger, J. J. & Wineland, D. J. "Quantum Zeno effect" *Phys. Rev. A* 41, 2295–2300 (1990)

³ Facchi, P. & Pascazio, S. "Quantum Zeno subspaces" *Phys. Rev. Lett.* 89, 080401 (2002)

dynamic to the point of freezing it,¹ as has already been experimentally demonstrated from as far back as 1990.² More generally, the repeated observation of the absence of an object from a specific portion of space prevents it from being crossed, thus making it possible to confine the dynamic.³ To date this more general phenomenon had never been experimentally observed.

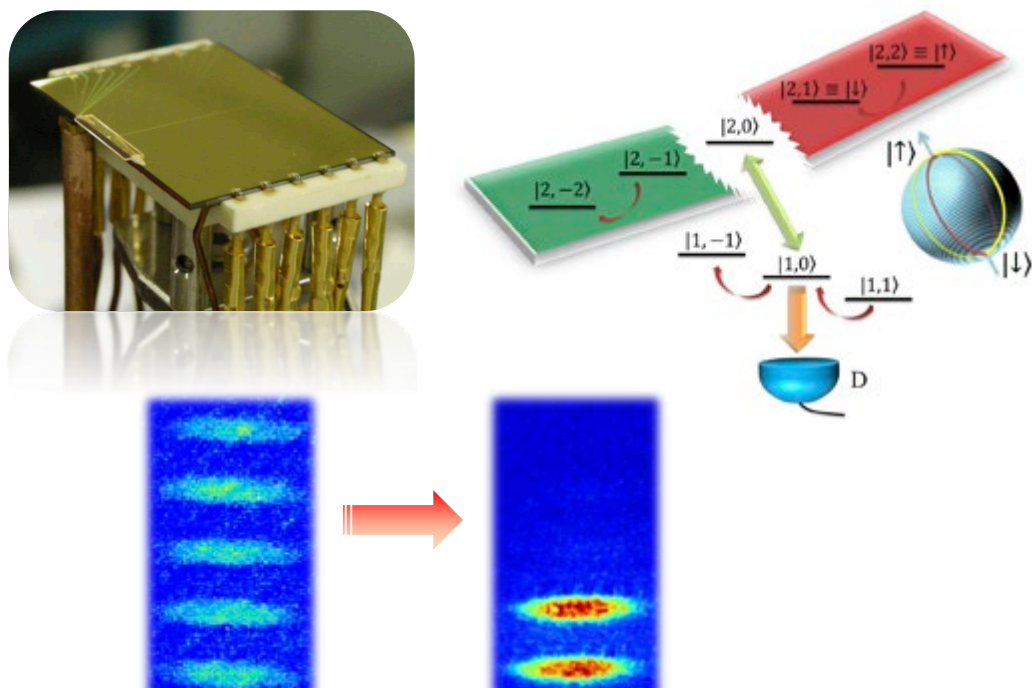
The experiment was performed using a gas that allows quantum measurements to be made, a Bose–Einstein condensate of rubidium atoms, in an atom-chip, that is an integrated system for trapping and manipulating the atoms. The dynamic is thus restrained within a 5-level space made up of the possible orientations of the atomic magnetic moment. The central level is removed from this space by "observing" it, or more precisely by applying a strong disturbance. The atoms, which start from an extreme level, are thus forced to move between the first two states. It is remarkable that the dynamic remains coherent despite the application of strong disturbances, which are in general considered destructive for a quantum dynamic, thus demonstrating a new method for guiding and protecting quantum evolution.

¹ Misra, B. & Sudarshan, E. C. G. "The Zeno's paradox in quantum theory" *J. Math. Phys.* 18, 756–763 (1977)

² Itano, W. M., Heinzen, D. J., Bollinger, J. J. & Wineland, D. J. "Quantum Zeno effect" *Phys. Rev. A* 41, 2295–2300 (1990)

³ Facchi, P. & Pascazio, S. "Quantum Zeno subspaces" *Phys. Rev. Lett.* 89, 080401 (2002)

La ricerca è stata possibile grazie ai finanziamenti dell'Unione Europea, in particolare della Commissione (progetti MALICIA e QIBEC) e del programma Marie-Curie, e a quelli del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca attraverso i programmi PRIN e FIRB.



La figura illustra gli elementi salienti dell'esperimento: in alto a sinistra l'Atom chip; a destra lo spazio di 5 livelli nel quale si potrebbero muovere gli atomi è separato con la forte perturbazione (rappresentata dalla freccia verde) che agisce sul livello $|2,0\rangle$, gli atomi sono così costretti a muoversi fra gli stati $|2,1\rangle$ e $|2,2\rangle$ realizzando il cosiddetto q-bit (rappresentato dalla sfera azzurra); in basso due "foto" a falsi colori degli atomi, a sinistra gli atomi non vengono perturbati ed arrivano ad occupare tutti e 5 i possibili stati, a destra la perturbazione li costringe ad oscillare fra due soli livelli.

The figure illustrates the main elements of the experiment: at top left is the atom chip; on the right the five-level space with in which the atoms could move is separated by the strong disturbance (represented by the green arrow) acting on level $|2,0\rangle$, thus the atoms are constrained to move between states $|2,1\rangle$ and $|2,2\rangle$ producing the so-called q-bit (represented by the blue sphere); at the bottom are two false-color "photos" of the atoms: on the left the atoms are not disturbed and come to occupy all 5 possible states, whereas on the right the disturbance forces them to oscillate between only two levels.

This possibility had hitherto been studied only theoretically. This first experimental demonstration opens up new scenarios for both basic research and new technological quantum applications, especially for protecting the delicate evolution of a quantum system from the destructive action of the surrounding environment.

The research was made possible by the funding of the European Union, in particular that of the Commission (MALICIA and QIBEC projects) and the Marie-Curie program, and by that of the Italian Ministry for Education, the University and Research through the PRIN and FIRB programs.

Francesco Cataliotti ha una lunga esperienza nel campo degli atomi degeneri. La sua attività di ricerca è prevalentemente sperimentale e incentrata sulla Fisica Atomica e sulle interazioni atomo-laser. Più recentemente si è stato interessato alle tecniche di micromanipolazione coerente con prospettive che vanno dal calcolo quantistico a manipolazione di singole bio-molecole. È autore di oltre 60 articoli di ricerca che hanno ricevuto più di 2000 citazioni (h-index 22).

Augusto Smerzi. Direttore di ricerca presso il CNR e QSTAR. I suoi interessi di ricerca includono lo studio dei fenomeni quantistici macroscopici in condensati di Bose-Einstein intrappolati e l'interferometria quantistica. Ha aperto la strada alla definizione di entanglement utile per ottenere sensibilità di fase al limite di Heisenberg e allo sviluppo dei protocolli avanzati per la stima della fase. È autore di oltre 100 pubblicazioni (quasi 4990 citazioni e h-index 30) di cui 3 Science, 24 Physical Review Letters ed è coautore di un libro su "Quantum Interferometry" per la Springer-Verlag. Augusto Smerzi è stato relatore invitato in diversi congressi e ha organizzato cinque conferenze internazionali.

Francesco Cataliotti has a long standing experience in the field of degenerate atoms. His research activity is mainly experimental and centred on atomic physics and atom-laser interactions. More recently he has been concerned with coherent micromanipulation techniques with perspectives ranging from quantum computation to single bio-molecule manipulation. He is author of more than 60 research papers that have received more than 2000 citations with an h-index of 22.

Augusto Smerzi, Research Director at CNR and QSTAR. His research interests include the study of macroscopic quantum phenomena in trapped Bose-Einstein condensates and quantum interferometry. He has pioneered the definition of useful entanglement for sub shot-noise phase sensitivity and the development of advanced phase estimation protocols. He is author of more than 100 publications (almost 4990 citations and h-index of 30) including 3 Science papers, 24 Physics Review Letters and is coauthoring a book on "Quantum Interferometry" for the Springer-Verlag. Augusto Smerzi has been invited speakers in several congresses and organized five international conferences.