

Marco Bellini, Alessandro Zavatta

Fotoni senz'area: una breve ma intensa interazione tra luce e materia

Zero-area photons: a brief but intense interaction between light and matter

Istituto Nazionale di Ottica – CNR, Firenze

Laboratorio Europeo per la Spettroscopia non Lineare (LENS), Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze

Riassunto. Facendoli interagire con gli atomi di un gas è possibile modificare profondamente la forma temporale di singoli fotoni e questo potrebbe presto consentire di utilizzarli per trasmettere e memorizzare informazioni in modo molto più sicuro ed efficiente.

Parole chiave. Ottica Quantistica, Fotoni, Interazione radiazione-materia.

I fotoni, le particelle elementari della luce, interagiscono solo debolmente tra di loro anche attraversando materiali con alte non linearità. Inoltre, essi sono di norma pochissimo perturbati dalla propagazione nei canali attraverso i quali vengono trasmessi, siano essi delle fibre ottiche o l'atmosfera terrestre. Questa debole capacità di interazione è un'arma a doppio taglio per alcune nuove tecnologie che si propongono di utilizzare singoli fotoni, con le loro bizzarre proprietà dettate dalla meccanica quantistica, per elaborare e trasmettere informazioni in modo

Abstract. The temporal shape of single photons can be profoundly altered by making them interact with the atoms of a gas. This could very soon make it possible to use them to transmit and store information in a much more secure and efficient way.

Keywords. Quantum Optics, Photons, Radiation-Matter Interaction.

Photons, the elementary particles of light, interact only weakly with each other even when passing through materials of high non-linearity. Furthermore, they are normally very little perturbed by propagating along transmission channels, whether optical fibers or the earth's atmosphere. This weak interaction potential is a double-edged sword for new technologies that aim to use single photons – with their bizarre properties dictated by quantum mechanics – to process and transmit information in a much more secure and efficient manner. While on the one hand the single photons are indeed excellent carriers of information, since they



molto più sicuro ed efficiente. Se da un lato i singoli fotoni sono infatti ottimi portatori di informazione, capaci cioè di trasmetterla in modo accurato e fondamentalmente immune ad ogni intercettazione anche su lunghe distanze, dall'altro essi risultano particolarmente inadatti alla sua elaborazione e memorizzazione.

Una soluzione molto promettente a questo problema consiste nell'utilizzare un approccio ibrido che veda coinvolta la luce (i singoli fotoni) per la trasmissione dell'informazione quantistica e la materia (nubi di atomi) per la sua manipolazione e memorizzazione. Per far ciò è necessario che i singoli fotoni e gli atomi 'si parlino' in maniera efficiente e, poiché è convinzione comune che questo sia possibile solo se la luce è di un ben determinato colore, esattamente corrispondente a quello assorbito dagli atomi, molti laboratori in tutto il mondo stanno intensificando gli sforzi per produrre singoli fotoni estremamente monocromatici per accoppiarli al meglio con le memorie atomiche.

Nei laboratori di Sesto Fiorentino dell'Istituto Nazionale di Ottica (INO) del Cnr e del Laboratorio Europeo per la Spettroscopia non Lineare (LENS) dell'Università di Firenze, una collaborazione italo-brasiliana ha appena dimostrato con un articolo su *Physical Review Letters*¹, che questa non è l'unica strada possibile.

Singoli fotoni di durata brevissima, meno di un milionesimo di milionesimo di secondo, che sono quindi tutt'altro che monocromatici e caratterizzati invece da una vasta gamma di colori, possono anch'essi interagire fortemente e inaspettatamente con gli atomi. L'interazione provoca una profonda deformazione del profilo temporale dei fotoni che, inizialmente contenuti in un impulso estremamente breve e dalla forma regolare, si 'allungano' nel tempo ed assumono infine una

can transmit it accurately and in a way that is fundamentally immune from interception even over long distances, on the other hand they are particularly unsuitable for information processing and storage.

One very promising solution to this problem consists of a hybrid approach involving light (the single photons) for the transmission of quantum information and matter (clouds of atoms) for its handling and storage. For this to work, the single photons and the atoms have to interact effectively with each other. Since it is widely accepted that this is only possible if light has a precisely defined colour, exactly equal to that absorbed by the atoms, many laboratories all over the world are intensifying their efforts to produce extremely monochromatic single photons that can be best coupled to atomic memories.

In the Sesto Fiorentino laboratories of the National Institute of Optics (INO) of the CNR and the European Laboratory for Non-linear Spectroscopy (LENS) of the University of Florence, an Italian-Brazilian collaboration has just demonstrated that this is not the only possible approach. The resulting article was published in *Physical Review Letters*.¹

Ultrashort single photons lasting less than a millionth of a millionth of a second – which are hence anything but monochromatic, being characterised instead by a vast range of colours – can also interact strongly and unexpectedly with the atoms. This interaction causes a profound deformation of the temporal profile of the photons. Being initially confined in an ultrashort pulse of regular shape, the photons are stretched in time, finally assuming a characteristic shape with many lobes, known as 'zero area'. All this takes place without any absorption

forma caratteristica a molte 'gobbe', detta 'ad area nulla'. Tutto ciò avviene senza nessun assorbimento da parte degli atomi, e quindi all'uscita della zona di interazione sono ancora presenti singoli fotoni, ma dal profilo fortemente modulato.

La capacità di produrre e rivelare in modo affidabile singoli fotoni ad area nulla è estremamente interessante per comprendere in maggior dettaglio i meccanismi profondi di interazione tra luce e materia ma, come detto all'inizio, si presta anche a nuove applicazioni verso le tecnologie quantistiche del futuro. Come si fa dai tempi di Marconi per le trasmissioni radio, si potrebbe infatti sfruttare la modulazione del profilo temporale di campi elettromagnetici, in questo caso però costituiti da singoli fotoni, per trasmettere informazioni in modo più efficiente ed assolutamente sicuro, al riparo cioè da qualsiasi intercettazione. Inoltre, dimostrando per la prima volta la possibilità di questa 'breve ma intensa' interazione con gli atomi, questi esperimenti aprono la strada a tecniche innovative di elaborazione e immagazzinamento di quelle stesse informazioni in memorie atomiche.

Marco Bellini. Dirigente di ricerca presso l'istituto Nazionale di Ottica del CNR di Firenze. Si occupa di ottica quantistica e di interazioni radiazione-materia ad altissime intensità. Ha inoltre collaborato con Theodor W. Hänsch a ricerche fondamentali per lo sviluppo dei "pettini di frequenza" che sono valse a quest'ultimo il premio Nobel per la Fisica 2005. E-mail: bellini@ino.it

Alessandro Zavatta. Ricercatore presso l'istituto Nazionale di Ottica del CNR di Firenze. Si occupa di ottica quantistica e, in special modo, della generazione,

by the atoms, so that upon exit from the interaction area single photons are still present, but they are now characterized by a strongly modified shape.

The ability to produce and reliably detect single photons of zero area is extremely interesting for a better understanding of the profound mechanisms of the interaction between light and matter. Furthermore, it also lends itself to new applications in the quantum technologies of the future. The modulation of the temporal shape of electromagnetic fields made of exactly one single photon could be exploited – in the same way as radio transmissions since Marconi's time – to transmit information in a more efficient and totally secure manner because entirely protected from any interception. Moreover, by demonstrating for the first time this 'short but intense' interaction with the atoms, these experiments pave the way to innovative techniques for the processing and storage of this same information in atomic memories.

Marco Bellini. Research director at the National Institute of Optics of the CNR in Florence. He deals with quantum optics and laser/matter interactions at very high intensities. He also collaborated with Theodor W. Hänsch on research fundamental to the development of the "frequency combs" which earned Hänsch the Nobel Prize in Physics in 2005. E-mail: bellini@ino.it

Alessandro Zavatta. Researcher at the National Institute of Optics of the CNR in Florence. He deals with quantum optics and, more specifically, with the generation, manipulation and detection of light at the level of single photons. His research has made it possible to experimentally

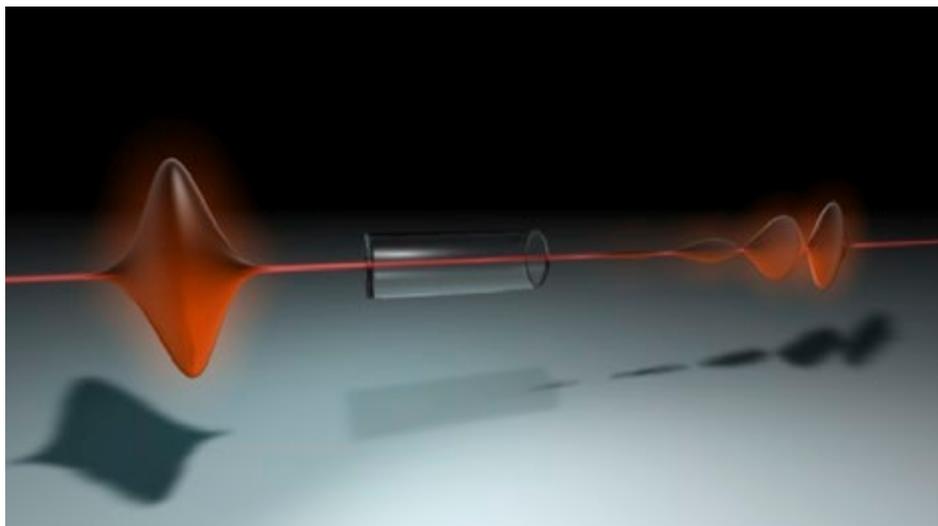


Figura 1. Visione artistica di singoli fotoni ultracorti deformati dall'interazione con gli atomi.

Figure 1. Artistic vision of ultrashort single photons deformed by interaction with atoms.

manipolazione e rivelazione della luce al livello dei singoli fotoni. Le sue ricerche hanno consentito di verificare sperimentalmente leggi fondamentali di fisica quantistica. E-mail: alessandro.zavatta@ino.it

Web page: <http://www.ino.it/home/QOG/>

Note

¹ 'Zero-area single-photon pulses', L.S. Costanzo, A.S. Coelho, D. Pellegrino, M.S. Mendes, L. Acioli, K.N. Cassemiro, D. Felinto, A. Zavatta, and M. Bellini, *Physical Review Letters*, 116, 023602 (2016)

verify fundamental laws of quantum physics. E-mail: alessandro.zavatta@ino.it

Web page: <http://www.ino.it/home/QOG/>

Note

¹ "Zero-area single-photon pulses", L.S. Costanzo, A.S. Coelho, D. Pellegrino, M.S. Mendes, L. Acioli, K.N. Cassemiro, D. Felinto, A. Zavatta, and M. Bellini, *Physical Review Letters*, 116, 023602 (2016).