

Stimolati e coerenti

Principi di funzionamento e applicazioni dei laser

di Roberta Ramponi e Orazio Svelto

Al momento della sua invenzione il laser fu definito “una brillante soluzione in cerca di un problema”. Oggi, cinquantuno anni dopo, poche tecnologie trovano, quanto i laser, una così ampia applicazione in ambito scientifico e tecnologico, essendo inoltre ancora oggetto di intenso sviluppo. L'estrema versatilità del laser nasce dall'ampio intervallo di lunghezze d'onda e di potenza, nonché dalla possibilità di avere emissione laser con diverse caratteristiche temporali, dal regime continuo agli impulsi ultracorti. Le principali applicazioni si rivolgono ai settori delle telecomunicazioni, delle lavorazioni meccaniche, della biomedicina, del monitoraggio ambientale, della conservazione dei beni culturali, della sensoristica e della sicurezza. Il laser è un eccellente strumento di lettura: basti pensare ai lettori di codici a barre nei supermercati, ai lettori di compact disc, DVD e blu-ray. È un ottimo strumento di taglio e di marcatura, sia per lavorazioni industriali (p. es. taglio di lamiere) che per applicazioni mediche di altissima precisione (chirurgia laser, p. es. per la correzione della miopia). Il laser, quindi, è una tecnologia che è entrata a pieno titolo in molti aspetti della nostra vita quotidiana. Ma quali sono i suoi principi di funzionamento?

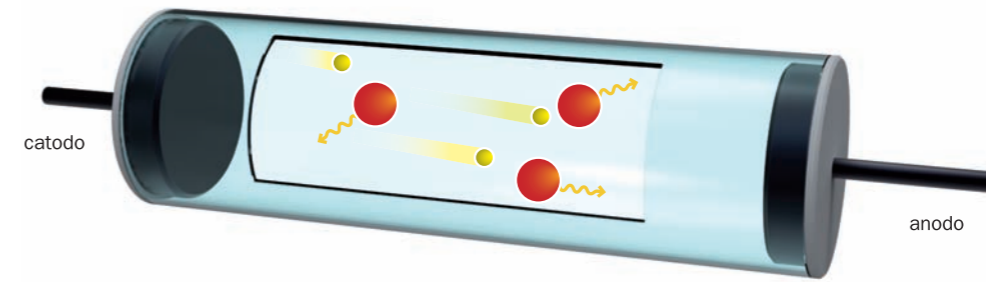
Il laser (acronimo di *light amplification by stimulated emission of radiation*) sono sorgenti di radiazione elettromagnetica con frequenza che va dai raggi X alle microonde (e in quest'ultimo caso vengono chiamati *maser*, da *microwave*), con caratteristiche particolari di monocromaticità, direzionalità, coerenza e brillantezza (vd. approfondimento p. 27). Si basano, come dice il nome, sull'amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione.

Per descrivere il principio di funzionamento del laser, partiamo dal meccanismo di emissione delle comuni lampade a gas, basato sull'emissione spontanea (vd. fig. a). Si induce una scarica elettrica in un tubo contenente un gas opportuno: gli elettroni della scarica possono collidere con un atomo del gas eccitandolo. Gli atomi eccitati si diseccitano gli uni indipendentemente dagli altri, emettendo in tutte le direzioni

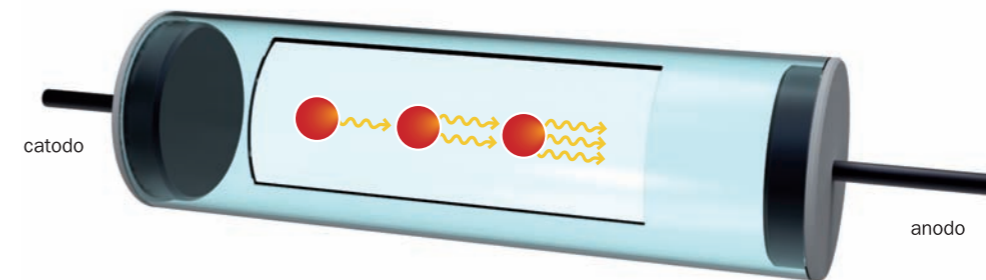
radiazione (cioè fotoni), a una lunghezza d'onda caratteristica. Immaginiamo ora di avere un numero elevato di atomi eccitati. In questo caso può avvenire un nuovo fenomeno, detto di *emissione stimolata*, per cui il fotone emesso dal primo atomo colpisce il secondo e lo stimola a emettere, e così via in una specie di emissione a catena (vd. fig. b). La luce emessa viene amplificata ad ogni interazione con un atomo eccitato. In questo caso, gli atomi non emettono più ognuno per conto proprio, ma sono stimolati a emettere dall'emissione di un altro atomo eccitato; l'emissione dell'atomo stimolato avviene allora nella stessa direzione della luce stimolante ed è con essa coerente.

Supponiamo ora di racchiudere i nostri atomi all'interno di una cavità ottica delimitata da due specchi: in questo caso la luce prodotta per emissione stimolata si propaga nella direzione ortogonale agli specchi (raggi gialli in fig. c) e continua a rimbalzare fra i due specchi, venendo amplificata ad ogni passaggio. Se il numero di atomi eccitati è sufficientemente elevato, l'amplificazione supera le inevitabili perdite del sistema e si dice che il laser *oscilla*. Se ora uno dei due specchi è reso parzialmente trasparente alla luce emessa dagli atomi, attraverso di esso sarà possibile estrarre un fascio laser. L'emissione laser è dunque fondamentalmente basata sul fenomeno dell'emissione stimolata già previsto da Einstein nel 1917, e ciò rende tale luce di natura completamente diversa da quella emessa dalle comuni lampadine.

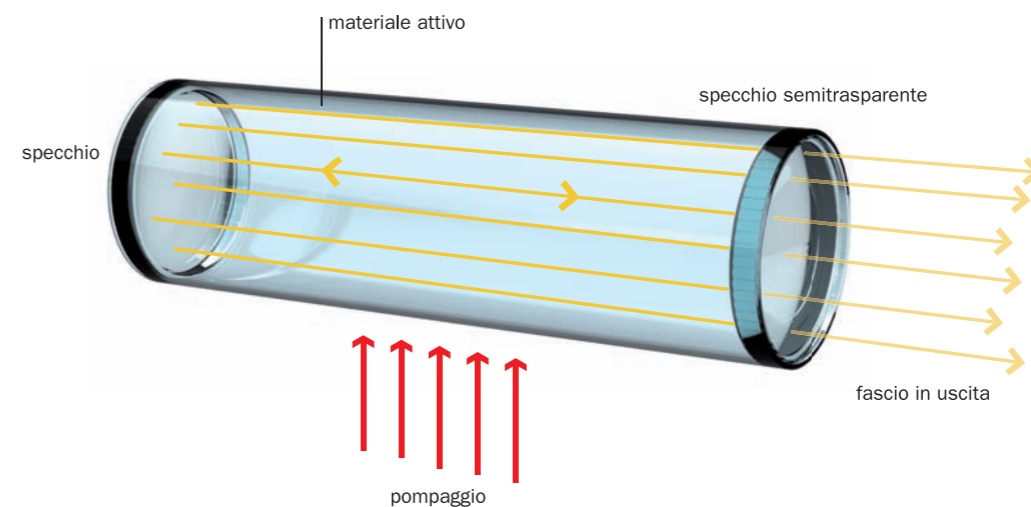
Lo schema generale di un laser è rappresentato in fig. c. Gli atomi eccitati del materiale cosiddetto *attivo* producono l'emissione stimolata. L'eccitazione avviene mediante un meccanismo opportuno (elettrico od ottico), indicato come *pompaggio* nella figura. I due specchi terminali possono essere piani o, più comunemente, sferici. Il materiale attivo può trovarsi in diverse forme: gassosa (laser a gas), liquida (come avviene nei laser a colorante organico), di monocristalli massicci (laser a stato solido), di materiale semiconduttore (laser a semiconduttore).



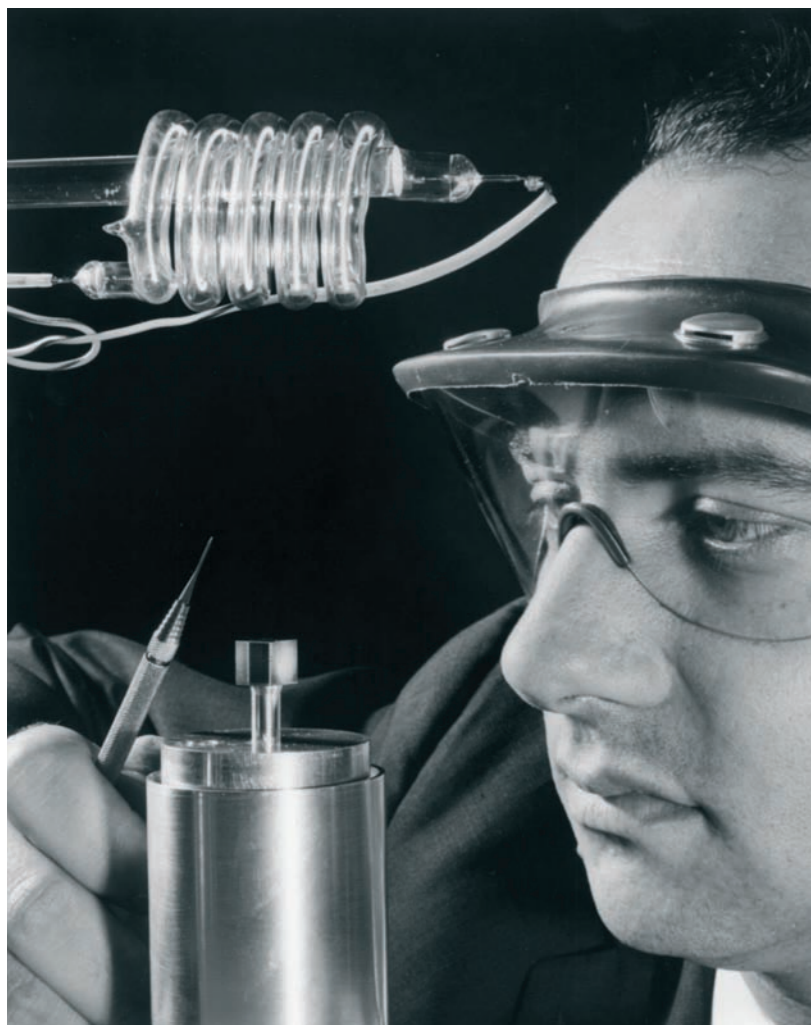
a. Rappresentazione di una normale lampada a scarica (ad esempio in un tubo al neon), in cui gli elettroni in moto tra catodo e anodo eccitano gli atomi del gas che, ritornando allo stato fondamentale, emettono fotoni in tutte le direzioni.



b. Rappresentazione schematica del processo di emissione stimolata.



c. Rappresentazione schematica del principio di funzionamento di un laser. In una cavità ottica, delimitata da un lato da uno specchio semitrasparente, la luce prodotta per emissione stimolata rimbalza fra i due specchi e viene amplificata ad ogni passaggio. Il fascio laser in uscita è prodotto dagli atomi eccitati del materiale attivo, la cui eccitazione avviene mediante un meccanismo opportuno (elettrico od ottico), indicato come pompaggio.



d.
Theodore H. Maiman della Hughes Aircraft Company che realizzò il primo laser della storia. Nella foto è ben visibile la barretta di rubino che Maiman ha utilizzato come "cuore" del primo laser.

Il primo laser della storia fu realizzato nel 1960 da Theodore H. Maiman usando una barretta di rubino come materiale attivo e una lampada flash a elevata brillantezza come sorgente di eccitazione. Per concludere, vale la pena menzionare alcune delle applicazioni di punta a livello scientifico, oltre a quelle tecnologiche già ricordate. La possibilità di avere impulsi di luce ultracorti consente di studiare dinamiche ultrarapide nei materiali, aprendo la strada alla comprensione di processi chimici e chimico-fisici altrimenti non analizzabili (vd. p. 32, ndr). Utilizzando una frequenza opportuna è possibile "raffreddare" gli atomi di un gas (*laser cooling*) fino a generare i cosiddetti *condensati di Bose-Einstein*, nei quali le proprietà della meccanica quantistica

diventano osservabili a livello macroscopico. Infine, la crittografia quantistica consente un approccio rivoluzionario alla trasmissione sicura delle informazioni (per esempio, i personaggi dell'articolo "Fotoni e segreti" a p. 10, Alice e Bob, possono generare i fotoni entangled utilizzando un laser, ndr). Il senso di fascino e di meraviglia che ancora oggi suscita il laser deriva soprattutto dal suo carattere pervasivo: non esiste infatti campo della scienza e della tecnica che non sia stato influenzato, spesso in maniera rivoluzionaria, da questa invenzione. Il laser può dunque annoverarsi fra le invenzioni più importanti dello scorso secolo ed è destinato ad avere un impatto fondamentale anche in questo nuovo millennio.

[as] approfondimento

Le proprietà dei laser



1.
Foto notturna di Firenze, scattata nel 1999, mentre un laser (a vapori di rame) viene inviato dalla Torre di Arnolfo (Palazzo Vecchio) al Cupolone del Duomo.

Per effetto del particolare meccanismo di emissione, un fascio laser presenta proprietà uniche: in particolare, elevate monocromaticità, direzionalità, coerenza e brillantezza.

La *monocromaticità* dipende dal fatto che ogni atomo tende a emettere luce di ben determinati colori (parecchi laser possono oscillare contemporaneamente su diversi colori), legati all'energia dei livelli di eccitazione degli atomi stessi, ma è ulteriormente migliorata dall'effetto di filtro operato dalla cavità.

La proprietà di *direzionalità* è immediatamente

comprensibile sulla base della fig. c: solo i raggi ortogonali agli specchi possono infatti propagarsi continuamente all'interno del laser, amplificandosi ad ogni passaggio. La foto in alto mostra poi in maniera emblematica come un fascio laser non si allarghi apprezzabilmente durante la propagazione. La *coerenza* è la proprietà di un'onda elettromagnetica di mantenere una certa relazione di fase con se stessa durante la propagazione. Si parla di coerenza temporale e spaziale, concetti direttamente collegati a quelli di monocromaticità e direzionalità discussi in precedenza. Infatti, quanto

più è elevata la coerenza temporale tanto più è elevata la monocromaticità; quanto più è elevata la coerenza spaziale tanto più è elevata la direzionalità.

La *brillantezza*, parametro di fondamentale importanza per le sorgenti di luce, è una quantità legata all'intensità del fascio laser e in particolare misura il numero di fotoni emessi in funzione dell'angolo di emissione. In un laser, anche di modesta potenza, è miliardi di volte superiore a quella delle lampade più brillanti.

Biografia

Orazio Svelto è professore del Politecnico di Milano. È considerato uno dei pionieri internazionali per le scienze e le applicazioni dei laser. In questo settore ha pubblicato oltre 200 lavori su riviste internazionali ed è anche autore del libro *Principles of Lasers*, pubblicato dalla casa editrice Springer di New York, attualmente alla sua quinta edizione. Per la biografia di **Roberta Ramponi** vd. p. 45.

Link sul web

<http://astrolab.altervista.org/articoli/laser.html>