

# IMPERO DI LUCE

Il laser compie 50 anni, anche se le basi teoriche per la sua realizzazione, esposte da Einstein, hanno quasi un secolo. Che cos'è, come funziona e come ha cambiato le nostre vite



PATRIZIA CARAVEO

**È** il maggio 1960: Theodore Maiman, giovane ricercatore degli Hughes Research Laboratories di Malibu, in California, mostra al suo capo la sua ultima creazione. Si è ispirato al lavoro di Arthur Schawlow e Charles Townes, due fisici teorici che avevano studiato come creare, grazie alle leggi della meccanica quantistica, un fascio di luce amplificata perfettamente rettilineo: «Un'invenzione banale», è il giudizio non incoraggiante del boss sul primo laser funzionante. Anche la reazione del *Physical Review Letters*, pubblicazione accademica a cui Maiman manda un resoconto del lavoro, sperando in una sollecita pubblicazione, non è delle migliori: «Di nuovo l'ennesimo lavoro sui maser» (l'antenato del laser che funzionava a microonde), fu la risposta che rimandava il lavoro al mittente. La storia ha dato torto a questa prima reazione. Al centro di un mercato mondiale di miliardi di euro, il laser oggi è ovunque: nelle case, nei supermercati, negli studi medici, nelle fabbriche ma anche nei laboratori di ricerca, dove si è reso indispensabile in tutte le discipline. Indubbiamente, Theodore Maiman ha dato un contributo storico, essenziale allo sviluppo del laser, anche se i veri autori di quest'invenzione restano Arthur Schawlow e, soprattutto, Charles Townes, che negli anni 50 lavorava all'università di Columbia. Charles Townes riceverà il Premio Nobel nel 1964 per lo sviluppo dei concetti che hanno portato alla scoperta del maser e poi del laser. Arthur Schawlow, invece, dovrà

aspettare fino al 1981, quando riceverà il Nobel per il contributo allo sviluppo della spettroscopia laser, che permette lo studio della struttura della materia con capacità diagnostica infinitamente più grande di quella offerta dalle sorgenti convenzionali.

Tutto inizia dalla teoria dell'emissione stimolata di Einstein, il famoso effetto fotoelettrico. Negli anni 50, Townes pensa a come creare un flusso di fotoni tutti identici, ottenuti tramite l'amplificazione di un'onda elettromagnetica: in un certo senso, una fotocopiatrice a fotoni. Realizza il MASER l'effetto di amplificazione delle micro-onde tramite l'emissione stimolata di radiazione. È la prima volta che un'onda elettromagnetica viene amplificata. E la luce visibile? Può anch'essa essere amplificata? Insieme a suo cognato, Arthur Schawlow, Charles Townes pubblica nel 1958 un articolo intitolato *Infrared and Optical Masers*, che pone le basi teoriche dell'amplificazione di luce tramite l'emissione stimolata di radiazione. I due fanno di più: brevettano l'idea. Per la cronaca, bisogna ricordare che il nome LASER venne introdotto l'anno dopo da Gordon Gould, studente di Townes a Columbia, che sarà protagonista di un decennale litigio con il suo ex professore circa i diritti della commercializzazione del brevetto. Portando come prova le annotazioni nel suo quaderno di laboratorio, vincerà la causa e otterrà una parte dei diritti del brevetto.

Torniamo al 1958, quando l'idea di Schawlow e Townes è ancora lungi dall'essere realizzata, anche se sono



numerosi i laboratori che si lanciano nell'avventura. In realtà devono passare altri due anni prima che Theodore Maiman fabbrichi il primo laser utilizzando una barretta di rubino. Quando il suo articolo viene finalmente accettato dalla rivista *Nature*, il laboratorio organizza una campagna pubblicitaria per promuovere l'invenzione. In tutto il mondo, inizia la corsa per chi otterrà l'effetto laser. I Bell Labs si lanciano all'inseguimento: utilizzando le notizie e le fotografie della conferenza stampa, cercano di ripetere l'esperimento. Quando ci riescono, in ottobre, convocano, a loro volta, una conferenza stampa. Dicono che hanno replicato, migliorandolo, l'accrocchio di Maiman. I giornalisti presenti si dichiarano più convinti da questa dimostrazione che da quella di Maiman e iniziano discussioni senza fine sul diritto di primogenitura. Ancora non si aveva alcuna idea sull'impiego di questo strumento, che rilascia una finissima pennellata di luce rigorosamente monocromatica, ma una cosa era certa: il laser affascinava tutti.

Cinquanta anni più tardi, il laser ha conquistato il pianeta. Il mondo intero rende omaggio a questo eroe della tecnologia moderna che si è reso indispensabile all'industria, alla medicina, alla nostra vita quotidiana, oltre ad essere un protagonista di molte nuove ricerche. Ma questo successo continua, perché i ricercatori trovano sempre nuove, inaspettate applicazioni. Così il laser, sempre più rivoluzionario, si trova ancora sotto la luce dei riflettori.

Parlando di applicazioni inaspettate non possiamo dimenticare Steven Chu che, dopo aver ricevuto il

premio Nobel nel 1997 per lo sviluppo di metodi per raffreddare e intrappolare gli atomi con la luce laser, è ora Secretary of Energy nel gabinetto del Presidente Obama: il primo premio Nobel a diventare ministro in una squadra presidenziale.

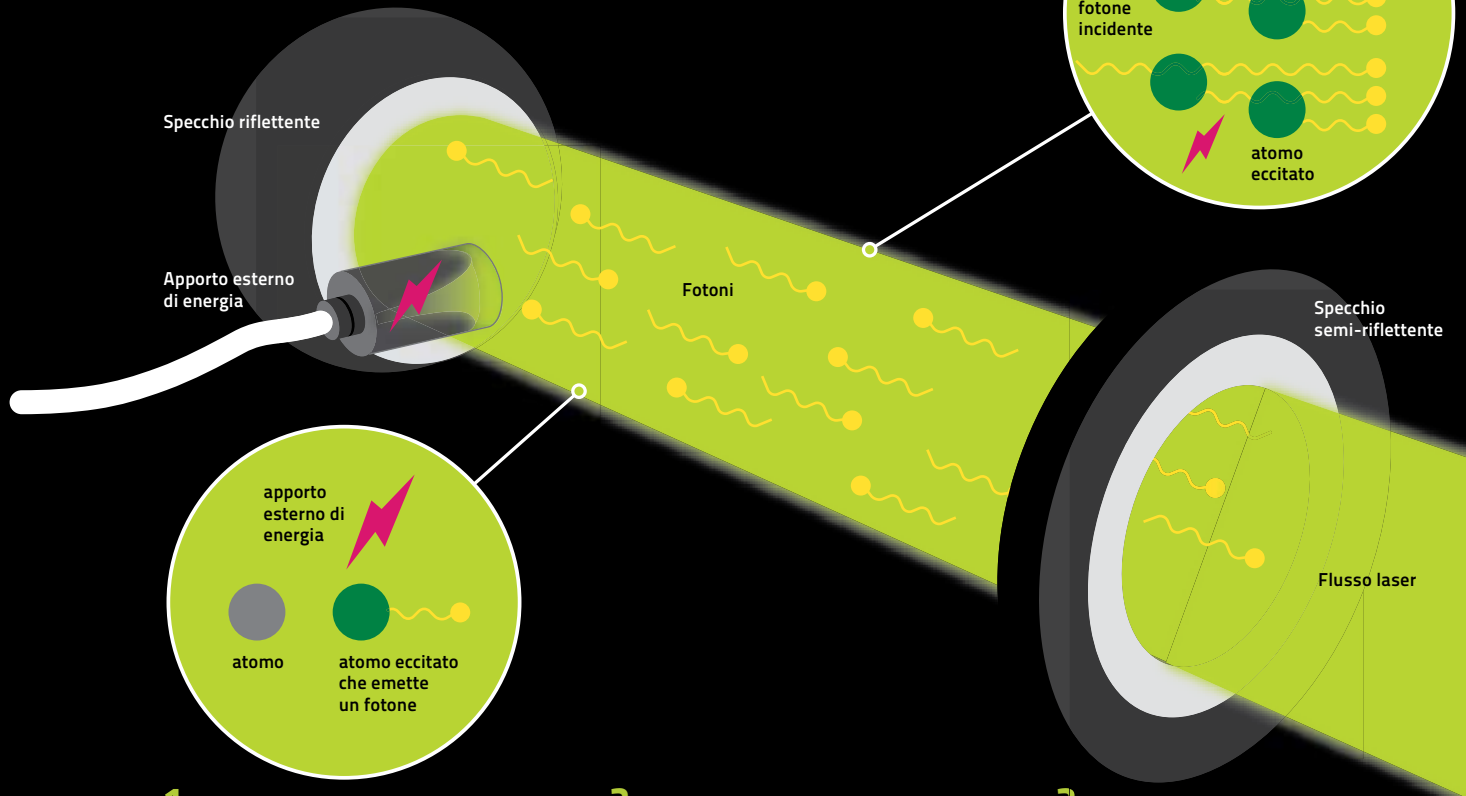
Oggi il mercato mondiale del laser è stimato a circa 6 miliardi di euro. Oltre la metà proviene dallo stoccaggio d'informazioni su CD o DVD, e dalle telecomunicazioni. Il secondo impiego più importante dal punto di vista commerciale è senza dubbio la lavorazione industriale dei metalli, cui fa capo circa  $\frac{1}{4}$  del fatturato globale dell'utilizzo del laser. Il resto va in una gamma infinita di utilizzazioni che spaziano dalla chirurgia ai lettori di codici a barre, dai puntatori laser ai misuratori di distanza, dagli scanner 3D alla mappatura del territorio, dal restauro del patrimonio artistico allo studio dell'atmosfera. I laser sono anche protagonisti di ricerche di punta in campi diversissimi: dalla biologia, che utilizza i microscopi a laser, alla chimica, che può seguire in tempo reale lo scambio degli atomi nelle reazioni, alla fisica, per il riscaldamento estremo necessario per l'innesco delle reazioni di fusione term nucleare. Nella fisica di base il laser presto servirà a dimostrare una legge della relatività generale, secondo la quale la gravitazione influenza il tempo, che passerebbe più in fretta nello spazio che sulla superficie di un pianeta. Comparando il tempo determinato dall'orologio di un satellite in orbita con quello internazionale, misurato sulla Terra, si dovrebbe evidenziare l'effetto. E intanto continua, in parallelo, lo sviluppo di nuovi tipi di laser, per sempre nuove applicazioni.

# COME FUNZIONA IL LASER

La parola laser è un acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, (Amplificazione di Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazione). Un laser è costituito da tre elementi:

- un mezzo attivo (solido, liquido o gassoso) nel quale la luce è amplificata,
- un meccanismo (detto "di pompaggio") che cede energia a questo mezzo e
- un risonatore ottico che serve a moltiplicare l'amplificazione.

A differenza della luce normale, la luce laser è monocromatica (i fotoni sono tutti della stessa lunghezza d'onda) ed unidirezionale (i fotoni vanno tutti nella stessa direzione).



## 1. IL POMPAGGIO OTTICO

Quando un atomo viene eccitato emette un fotone di una lunghezza d'onda caratteristica, corrispondente alla differenza di energia tra il livello eccitato e quello fondamentale. Per ottenere la luce laser bisogna innanzitutto stimolare gli atomi del mezzo attivo (chiamato anche mezzo amplificatore) fornendo loro energia (elettrica, chimica o luminosa). Noto come pompaggio ottico, questo metodo permette di realizzare "un'inversione di popolazione" facendo aumentare il numero degli atomi eccitati rispetto a quelli non eccitati. A seconda del pompaggio, continuo o intermittente, il laser emetterà una luce continua o degli impulsi più o meno brevi.

## 2. L'AMPLIFICAZIONE TRAMITE L'EMISSIONE STIMOLATA

La produzione di luce da parte di un atomo eccitato può essere sia spontanea, e il fotone allora va in una direzione qualunque, sia stimolata. In questo caso si tratta di un fotone incidente che "spinge" l'atomo a diseccitarsi emettendo un fotone assolutamente identico (stessa lunghezza d'onda e stessa direzione) al primo. Questi fotoni potranno a loro volta diseccitare altri atomi, che genereranno dei fotoni identici. Poco a poco, i fotoni si uniscono gli uni agli altri e formano la luce laser.

## 3. LA PRODUZIONE DEL FASCIO

Il mezzo attivo del laser è racchiuso in un risonatore ottico che serve a moltiplicare l'amplificazione della luce per creare il fascio laser. Spesso si tratta di una cavità alle estremità della quale si trovano due specchi, uno totalmente riflettente, l'altro semi-trasparente (nel caso dei diodi laser, gli specchi non esistono più ed è la struttura stessa del diodo che forma le pareti riflettenti del risonatore ottico). I fotoni sono riflessi dalle pareti, continuando così a diseccitare atomi e a generare luce. Una piccola frazione di questa luce attraversa lo specchio semi-trasparente: è il fascio laser.

# INCIDERE, TAGLIARE



## CD, DVD E FIBRE OTTICHE

CD, DVD e fibre ottiche hanno rivoluzionato il nostro modo di gestire e di scambiare le informazioni. I primi li usiamo tutti i giorni per immagazzinare le informazioni relative al nostro lavoro ed alla nostra vita. Senza dimenticare la dimensione del puro intrattenimento con le musiche, i film i videogiochi. Abbiamo meno esperienza diretta delle fibre ottiche, che tendiamo ad associare a lampade d'arredamento piuttosto che a trasportatori di informazione che avvolgono il mondo intero. Nel 1977 la General Telephone di Long Beach prova a inviare traffico telefonico su una fibra ottica. Era la prima realizzazione del lavoro di Charles C. Kao e George Hockam dello Standard Telecommunications Laboratories, che nel 1966 avevano pubblicato un fondamentale lavoro nel quale dimostravano che la fibra ottica è in grado di trasmettere segnali laser e può ridurre le perdite se i fili di vetro sono abbastanza puri. Nel 1988 viene posato il primo cavo transatlantico a fibra ottica: il materiale è così trasparente che gli amplificatori sono necessari solo ogni 70 km. Oggi, le trasmissioni circolano per mezzo di centinaia di milioni di fibre ottiche che solcano i continenti e attraversano gli oceani. Le reti di telecomunicazioni mondiali sono costituite da fibre mentre la trasmissione attraverso i fili di rame (la cui portata attuale è comunque 10mila volte più bassa di quella della fibra ottica) è limitata all'inizio ed alla fine del viaggio dell'informazione.

## LAMIERE E METALLI

I potenti laser impiegati nell'industria metallurgica permettono di saldare e tagliare la lamiera con precisione estrema. I costruttori di automobili devono molto a questi laser, che concentrano una potenza da 20 a 100 watt in una zona inferiore al diametro di un capello. In aeronautica, i laser perforano certe parti dei motori per permettere all'aria di raffreddare le lame. La marcatura degli oggetti, come per esempio le lettere sulla tastiera del computer o l'iscrizione della marca di una penna si compie con l'aiuto dei laser. I laser possono anche costruire delle parti metalliche adattandole alla forma desiderata: è una tecnica ancora sperimentale, ma interessa a molti perché permette la fabbricazione rapida dei pezzi metallici con geometria complessa o la riparazione dei pezzi metallici usati. Un fascio laser, pilotato da un robot, agglomera tramite la fusione una polvere metallica che adotta poi la forma dei pezzi desiderati.

# CURARE, MAPPARE



## CHIRURGIA E ARTE

Nel 1974 un pacchetto di chewing gum è stato il primo prodotto dotato di codice a barre. Il lettore laser di codice a barre è oggi in dotazione alle casse di tutti i supermercati. Nell'industria delle automobili, la portata degli iniettori si misura intercettando il corso delle goccioline in uscita con un fascio laser. Sul mare o nell'aria l'inclinazione di una nave o di un aereo si calcola grazie a dei giroscopi laser. Nei lavori pubblici, per la costruzione dei ponti si mescolano insieme al cemento delle fibre ottiche per rilevare gli eventuali squilibri meccanici (la pressione comprime le fibre modificando la loro trasmissione luminosa). Nell'oftalmologia correggiamo la vista tagliando la cornea per dirigere i raggi luminosi verso la retina, mentre nella chirurgia, il laser ha innumerevoli utilizzi: dalla cauterizzazione di piccole ferite agli interventi microinvasivi. I dermatologi lo usano per bruciare le piccole macchie dell'epidermide, per la depilazione, per ringiovanire la pelle. I dentisti si stanno dotando di trapani laser. Le statue e i monumenti vengono restaurati con i laser. Inviando degli impulsi laser sulla superficie della pietra, la si può scaldare al punto di fare evaporare lo strato nerastro dovuto a reazioni chimiche causate dall'inquinamento. Con la stessa tecnica è anche possibile ridare il loro splendore ai colori delle sculture o agli affreschi murali. Con un laser continuo è infatti possibile far evaporare l'ossigeno per far riaffiorare il colore originale.



## SCANNER 3D

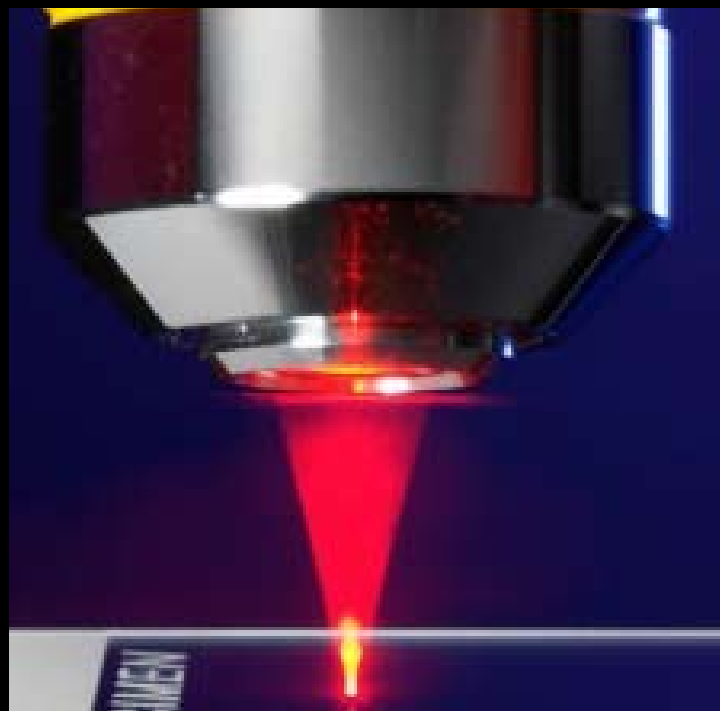
Lo scanner laser 3D è una vera risorsa per la ricerca perché permette di ottenere delle copie numeriche tridimensionali di qualsiasi oggetto. Grazie alle copie numeriche, i ricercatori possono facilmente condividere le informazioni tra di loro o manipolare virtualmente dei pezzi troppo fragili per essere toccati o spostati. La scansione laser permette anche di realizzare copie perfette: nel 2005 è stata realizzata una copia a grandezza naturale della sfinge di Nasso. Per farlo è stato necessario scannerizzare la scultura (alta tre metri), poi tagliare con dei getti d'acqua ad alta pressione un blocco di calcare, con l'aiuto di un robot pilotato dal computer. La scansione laser con strumenti montati a bordo di aerei ha rivoluzionato le ricerche archeologiche, permettendo la rapida mappatura di estese regioni coperte da fitte foreste. Ovviamente, non tutti i fasci laser riescono a raggiungere il suolo: una parte viene fermata dal fogliame. Tuttavia, la frazione che riesce a passare è più che sufficiente per mappare le rovine di palazzi, strade e antichi terrazzamenti. Recentemente l'Università di Ginevra ha utilizzato laser per provocare la pioggia. Gli impulsi laser ionizzano le molecole di ossigeno e azoto, che agiscono come nuclei di condensazione per la formazione di goccioline di pioggia. Peccato che il laser sia capace di produrre pioggia soltanto all'interno del suo raggio di azione.

# MISURARE, VEDERE



## DALLA TERRA ALLA LUNA

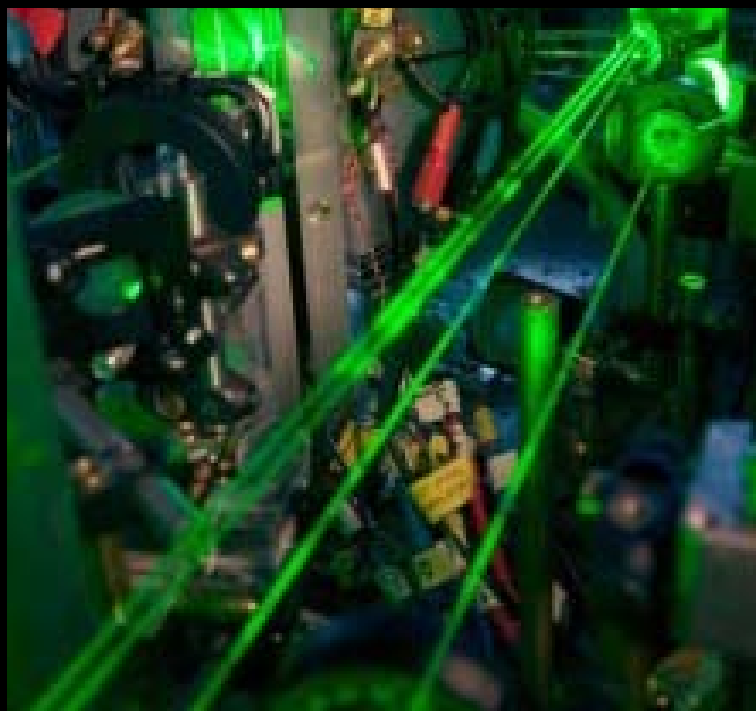
L' Apollo 11, del quale abbiamo festeggiato il quarantennale l'anno scorso, ha lasciato sulla Luna una valigia coperta da speciali specchi: si tratta di un retro-riflettore ottimizzato per riflettere un fascio laser inviato da telescopi sulla terra. Scopo dell'esercizio era misurare con grandissima precisione la distanza Terra-Luna su lunghi intervalli di tempo per mettere alla prova la teoria della gravitazione Universale. In effetti l'esperimento era stato proposto da Robert Dicke, autore, insieme a Carl Brans, di una nuova teoria della gravitazione che postulava l'esistenza di una nuova forza che doveva invalidare il principio di equivalenza di Einstein. Se Brans e Dicke avessero avuto ragione, la posizione della Luna avrebbe dovuto mostrare perturbazioni dell'ordine di 13 metri. Grazie al retro riflettore di Apollo 11, seguito da quelli deposti dall'Apollo 14 e 15 (e da altri due portati da sonde russe), gli astrofisici, oltre a dare ragione ad Einstein, hanno visto che la Luna si allontana di 3,3 cm all'anno. Il programma è ancora in corso e permette di affinare le nostre conoscenze sulla storia passata e futura del satellite naturale della Terra tramite lo studio della sua orbita.



## MICROSCOPI E DNA

Visitare l'interno dei tessuti vivi, sorvolare la membrana cellulare o assistere direttamente alla separazione dei cromosomi di una cellula prima della sua divisione sono viaggi che i biologi fanno quotidianamente grazie al microscopio cofocale laser (MCBL). Il principio di base di questo strumento è stato messo a punto dagli anni 50, ma è stato necessario attendere l'avvento del laser per vederne la concretizzazione. Mentre un microscopio convenzionale è in grado di farci vedere solo la superficie dei tessuti, il MCBL può penetrare all'interno. Un vantaggio che è stato decuplicato dall'utilizzo delle proteine fluorescenti integrate negli esseri viventi grazie all'ingegneria molecolare. La combinazione della microscopia confocale e le proteine fluorescenti oggi ci offrono una visione degli eventi dinamici intra o extra cellulari con una precisione spaziale e temporale ineguagliabile. Nella biologia come nell'industria, il laser è uno strumento versatile, multifunzionale: lo si utilizza per decrittare il DNA, nel quale è proprio il laser che riconosce l'insieme delle molecole che costituiscono il materiale genetico. Serve anche a distinguere le cellule una dall'altra secondo la loro forma e per selezionarle ad una velocità altissima (delle migliaia al secondo). La micro dissezione, l'equivalente in biologia della lavorazione laser, viene utilizzata per l'analisi dei tessuti. Identificare, selezionare e dissezionare i tessuti: il laser è il naturalista della cellula.

# SPARARE, GELARE



## ARMI LETALI (IN TEORIA)

Vista la sua grande versatilità, il laser è stato considerato da subito interessante per l'industria bellica, sempre alla ricerca di nuovi armamenti più o meno intelligenti. Mentre i puntatori laser per facilitare la mira delle armi da tiro sono in dotazione a tutti i fucili, i laser di potenza, che utilizzano la stessa tecnica che permette di tagliare l'acciaio, sono alla base dei cannoni laser, utilizzati per perforare le corazzate di carri armati o navi nemiche. L'unico problema è l'allargamento del fascio su distanze non piccole: un fascio allargato disperde l'energia dell'impulso e la rende meno letale. È poi dai tempi delle "guerre stellari" di reaganiana memoria che sentiamo parlare di fasci laser in grado di polverizzare satelliti avversari, ma produrre un laser di potenza nello spazio non è una passeggiata, ci vuole energia e, in orbita, la potenza disponibile è sempre limitata. La tecnologia laser è, senza dubbio, più promettente per armi da utilizzare sulla terra ferma, dove le limitazioni di potenza sono molto meno importanti e le distanze possono essere non eccessive. Teoricamente l'interesse principale delle armi laser risiede nella difficoltà di organizzare contromisure efficaci. Mentre gli aerei (e le navi) possono cercare di schivare missili, siluri e proiettili, che vengono rivelati molto prima che colpiscano, è molto più difficile schivare un raggio di luce, che avanza, appunto, alla velocità della luce. Quando l'obiettivo si accorge del pericolo è già stato colpito.

## ATOMI FREDDI

Per i laser che operano con impulsi brevissimi (femtosecondi, cioè un milionesimo di miliardesimo di secondo), il ritardo degli impulsi è talmente breve che diventa paragonabile al tempo tipico di spostamento degli atomi nelle molecole. Si possono quindi usare come flash ultrarapidi per catturare impronte della materia, per assistere alle fasi intermedie di una reazione chimica, che solitamente i chimici non possono rilevare. Il calore del laser serve, paradossalmente, a raffreddare gli atomi di gas diluito. Le tecniche in gioco consistono nel frenare gli atomi colpendoli con dei tiri crociati di luce laser, diminuendone cioè l'agitazione termica e quindi la temperatura. Frenati, gli atomi si lasciano tranquillamente osservare. Grazie a questa conquista, le diverse misure realizzate nel campo della metrologia, come quella del tempo o della gravità, hanno guadagnato, grazie agli atomi ultrafreddi, tre o quattro ordini di grandezza sulla loro precisione. Ma l'applicazione più spettacolare del raffreddamento atomico è la realizzazione di uno stato inedito della materia, che per settant'anni è rimasta solo pura teoria: il condensato di Bose-Einstein. Sotto questo nome si nasconde uno stato della materia in cui tutti gli atomi si comportano come un solo unico atomo. «È difficile fare previsioni, soprattutto per il prossimo futuro», avvertiva Niels Bohr, uno dei padri della meccanica quantistica. Il successo del laser, che nessuno si aspettava, non può che dargli ragione.