

[fotoni]



anno 6 numero **12** / 11.11

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

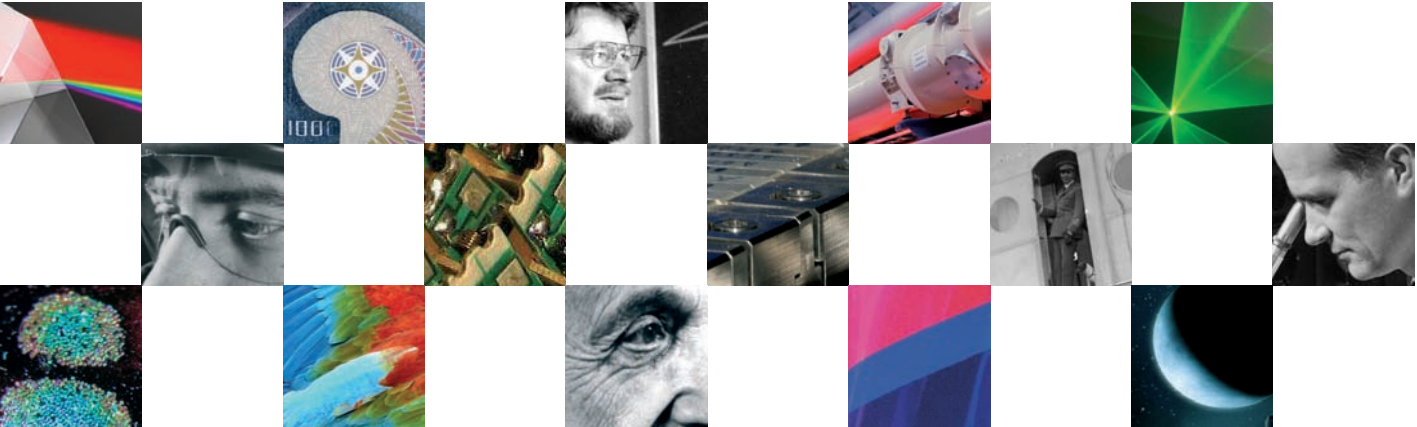
Cari lettori di Asimmetrie,

sono da poco stato designato dal Consiglio Direttivo dell'Infn e nominato dal Ministro della Ricerca Scientifica a Presidente dell'ente. Ritengo dovuto questo intervento sulla nostra rivista e confesso che lo faccio anche con molto piacere.

In questo numero di Asimmetrie ci occupiamo dei fotoni, le particelle della luce che, come recentemente avete potuto leggere su tutti i quotidiani, rischiano di perdere il record mondiale della velocità.

Se guardo ai progetti su cui noi ricercatori dell'Infn abbiamo lavorato per anni, su alcuni per più di un decennio, e al loro stato odierno, mi rendo conto che questo è finalmente il momento in cui raccogliamo i frutti di un grande sforzo collettivo. Lhc è un vero orologio “svizzero” e ci sta sommergendo di dati che aprono orizzonti per tutti i settori di ricerca dell'ente. Ams orbita felicemente intorno alla Terra protetto dalla Stazione Spaziale Internazionale e gli esperimenti custoditi nelle viscere della montagna abruzzese (nei Laboratori Infn del Gran Sasso) ci pongono davanti a risultati difficili da interpretare, ma che hanno fatto puntare gli occhi di tutta la comunità scientifica su di noi (vd. p. 56, ndr). Stiamo gettando le basi per un futuro ancor più pieno di scienza. Siamo, a differenza di quello che si vede spesso nella società moderna, tra quelli che pensano guardando lontano. Seminiamo per avere il raccolto migliore, non quello più rapido. E continueremo con passione a raccontarvi il nostro viaggio di ricerca verso la conoscenza nei prossimi numeri di questa rivista.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie
Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Trimestrale, anno 6,
numero 12 novembre 2011

presidente Infn
Fernando Ferroni

direttore responsabile
Roberto Petronzio

direttore editoriale
Andrea Vacchi

comitato scientifico
Danilo Babusci
Piera Sapienza
Crisostomo Sciacca
Amedeo Staiano
Andrea Vacchi

caporedattore
Catia Peduto

redazione
Vincenzo Napolano
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato
Patrizio Antici, Massimo Corradi,
Sandro De Silvestri, Elisabetta Gallo,
Marco Genovese, GianCarlo Ghirardi,
Gherardo Gossi, Guglielmo Lanzani,
Francesco Priolo, Roberta Ramponi,
Valeria Rosso, Francesca Rizzo, Luca
Serafini, Orazio Svelto, Fabio Toscano

redazione
Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione
Istituto Arti Grafiche Mengarelli

sviluppo webzine
IAG Mengarelli/kmstudio

stampa
IAG Mengarelli

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della
rivista può essere riprodotta, rielaborata o
diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di dicembre 2011.
Tiratura 18.000 copie.

come abbonarsi
L'abbonamento è gratuito.
Tre modi per abbonarsi:

Compilare l'apposito form sul sito
www.asimmetrie.it/abbonamento

Inviare una mail di richiesta a
comunicazione@presid.infn.it

Contattare la redazione

webzine
Asimmetrie 12 e tutti i numeri precedenti
della rivista sono disponibili anche
online su www.asimmetrie.it

crediti iconografici

Foto copertina Torvald Lekkvam // foto p. 4
Raido Lepp (Odyar); fig. a p. 5 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei); foto b p. 6 ©Bank of England; fig.
1,2 p. 7 ©Asimmetrie-Infn (Internosei); foto c p.
8 ©Oesterreichische Nationalbank; fig. 1 p. 9
©Asimmetrie-Infn (Internosei) // figg. a-g pp.
10-13 ©Asimmetrie-Infn (Internosei); foto a p.
15 ©Cern; foto b p. 16 ©M. Thom/D-Wave, fig.
d p. 17 ©Asimmetrie-Infn (Internosei) // foto a
p. 18 SPL/Tips Images; fig. 1 p. 19
©Asimmetrie-Infn (Internosei); fig. 1 p. 20
©Asimmetrie-Infn (Internosei), fig. b p. 20
©Asimmetrie-Infn (Internosei) // foto a p. 21
Kai Gieseler (63er); foto b. p. 22 ©Deutsche
Bundespost; fig. c p. 22 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei); fig. 1 p. 23 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei) // figg. a-c p. 25 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei); foto d p. 26 ©Hughes Research
Laboratories; foto 1 p. 27 ©El.En. Spa-Dani
Caravan // foto a p. 28 ©Sparc; fig. b p. 29
©Asimmetrie-Infn (Internosei); foto c p. 30
©Sparc; fig. d p. 31 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei) // fig. b p. 32 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei); fig. 1 p. 34 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei) // figg. a, b pp. 35-36 ©Asimmetrie-
Infn (Internosei); foto c, d p. 37 ©Infn; fig. 1 p.
38 ©Asimmetrie-Infn (Internosei) // foto a p.
39 ©Emilio Segre Visul Archive; foto b p. 40
©Robert W. Corkery; fig. 1 p. 41 Robert W.
Corkery; figg. b, d pp. 41-42 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei) // foto a p. 43 ©Nasa Orbital Debris
Program Office; figg. b, c p. 44 ©Asimmetrie-
Infn (Internosei); fig. 1 p. 45 ©Asimmetrie-Infn
(Internosei) // fig. a p. 46 ©HWMania.org; fig. b
p. 47 ©Asimmetrie-Infn (Internosei); foto 1 p.
47 ©Bundesarchiv; foto d p. 49 ©Tele3d //
figg. b, c p. 50-51 ©Asimmetrie-Infn (Internosei)
// foto p. 52 ©A. Belhadi // foto a p. 53 ©S.
Amato/Fondazione Sigma-Tau // foto a, b pp.
54-55 © C. Federici, Lnf-Infn // p. 56 Ams ©M.
Famiglietti/AMS Collaboration; Icarus ©Infn (S.
Schiavon); Opera ©Infn.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti
dalla nostra volontà, avessimo omesso o citato
erroneamente alcune fonti.

as

12 / 11.11
[fotoni]

Luce: onde o particelle?

di GianCarlo Ghirardi

Fotoni e segreti

di GianCarlo Ghirardi e Francesca Scianitti

La fisica di Star Trek

di Marco Genovese

Illuminando la materia

di Elisabetta Gallo e Massimo Corradi

Spettri

di Crisostomo Sciacca

Stimolati e coerenti

di Orazio Svelto e Roberta Ramponi

Elettroni brillanti

di Luca Serafini

Fermare l'attimo

di Sandro De Silvestri

approfondimenti di Patrizio Antici

Analizzare senza distruggere

di Francesca Rizzo

approfondimenti di Valeria Rosso

Luce dal silicio

di Francesco Priolo

Laboratori tascabili

di Roberta Ramponi

Le mille facce del carbonio

di Guglielmo Lanzani

[as] radici

Dall'etere alla luce deviata.

di Fabio Toscano

[as] con altri occhi

Il chiaro e lo scuro.

di Gherardo Gossi

[as] incontri

Effetti speciali.

di Vincenzo Napolano

[as] benvenuti a bordo

Artigiani di luce.

di Catia Peduto

[as] news

Luce: onde o particelle?

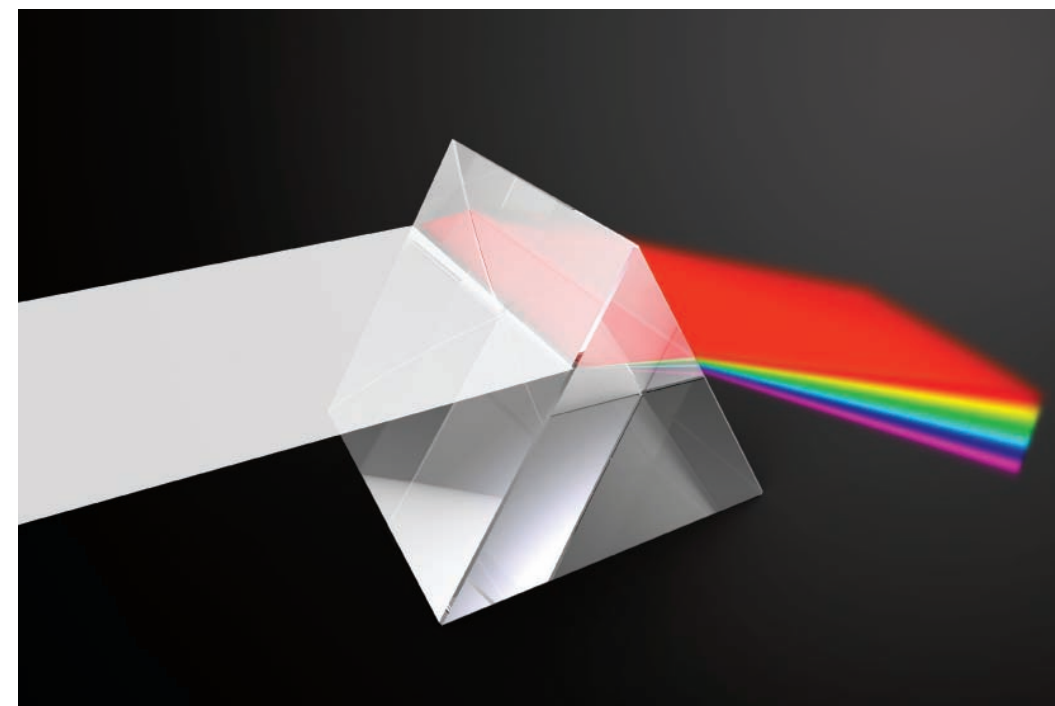
Il fotone, l'emergere di un concetto

di GianCarlo Ghirardi

Fin dai tempi remoti l'uomo ha osservato con curiosità l'universo ponendosi infinite domande circa il fulgore delle stelle, il moto degli astri e il mondo circostante, cercando di comprendere il senso della realtà, della vita, del suo ruolo nel mondo. Tra i fenomeni che hanno colpito la sua attenzione domina la luce. Quando prende corpo l'idea di una possibile comprensione razionale del mondo, risulta naturale cercare di spiegare la natura dei processi luminosi.

Già le prime indagini sulla luce hanno visto la contrapposizione di due concezioni incompatibili: quella corpuscolare e quella ondulatoria. Attorno all'anno 1000 lo scienziato iracheno Alhazen (Ibn Al-Haythan) descrive i raggi di luce come un flusso di particelle materiali emesse dagli oggetti. Serve però un salto in avanti di oltre 600 anni per arrivare alla formulazione precisa delle leggi della rifrazione: è Cartesio a proporre un modello ondulatorio della luce, al quale il matematico e fisico olandese Christiaan Huygens fornirà alla fine del '600 solide basi. Il modello ondulatorio, tuttavia, resterà per lungo tempo nell'ombra a causa dell'interpretazione newtoniana della luce, secondo la quale la luce sarebbe composta di particelle dotate di energia e impulso, che nel vuoto si propagano in linea retta.

In quest'ottica, il fenomeno della *riflessione* conseguirebbe all'impatto di queste particelle con un corpo compatto che ne provocherebbe il rimbalzo. Nel caso in cui il corpo fosse in qualche misura poroso (caratterizzato cioè da ampi spazi tra i suoi costituenti), nel passaggio attraverso il materiale i diversi corpuscoli di luce risentirebbero per un breve tratto dell'attrazione degli atomi che lo compongono. Questi ne devierebbero così la traiettoria, dando origine al fenomeno della *rifrazione* della luce. Oggi sappiamo che questa interpretazione della rifrazione della luce non ha fondamenti reali. Tuttavia Newton ha giocato un ruolo decisivo nello studio di questo processo, per quanto concerne la luce bianca, riuscendo a “decomporla e ricomporla” nelle sue componenti monocromatiche con un prisma di cristallo, uno strumento che è noto da allora come “prisma di Newton”. Per dare corpo alla sua interpretazione corpuscolare, egli dovrà fare ricorso a delle ipotesi che oggi sappiamo essere false. In particolare, Newton sarà indotto a supporre che i diversi corpuscoli caratterizzati da colori diversi abbiano masse diverse che dipendono dal loro colore. Questo primo dibattito sulla natura della luce si conclude all'inizio dell'800, quando Thomas Young e Augustin Jean Fresnel, studiando i fenomeni di diffrazione e di interferenza della



a.
Dispersione ottica di un fascio di raggi paralleli di luce bianca, che attraversa un prisma di vetro e si scompone nei vari colori. Newton fu il primo a osservare che facendo convergere nuovamente i diversi raggi in un secondo prisma – con l'uso di una lente – si riotteneva la luce bianca.

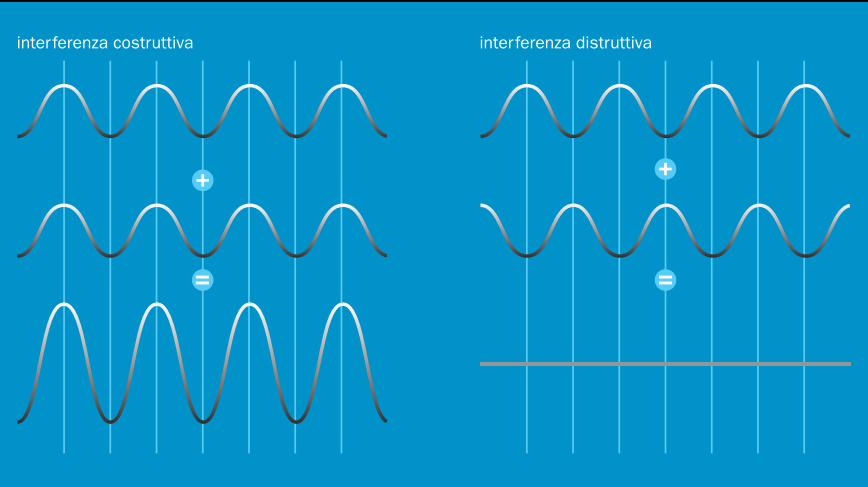
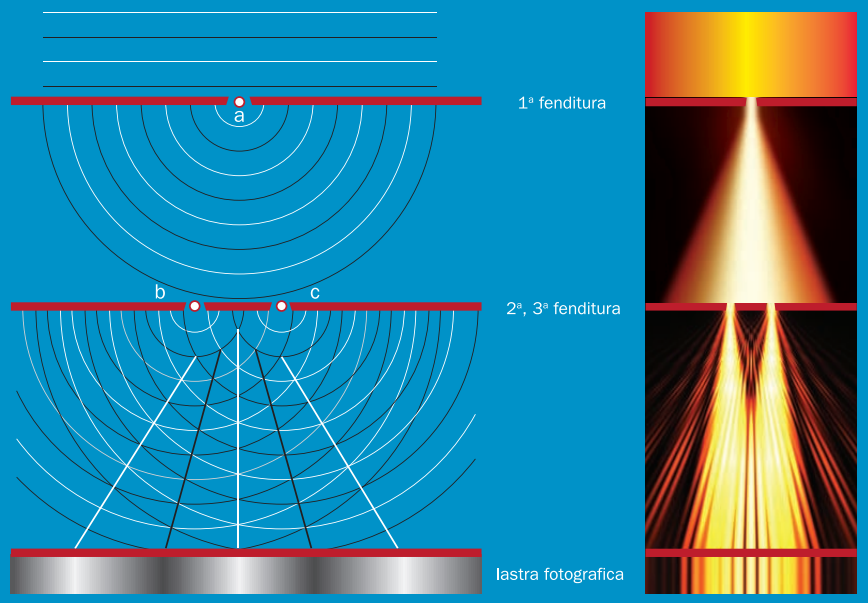
luce, confermano definitivamente la validità del modello ondulatorio. Nel secolo XIX le indagini di Michael Faraday e James Clerk Maxwell portano a riconoscere la sostanziale unità dei fenomeni elettrici e magnetici e consentono la formalizzazione definitiva dell'elettromagnetismo. Fa il suo ingresso nella scienza moderna il concetto di *campo*, un'entità fisica distribuita con continuità nello spazio e nel tempo, che sembra richiedere il riconoscimento di un'esistenza altrettanto reale di quella dei corpuscoli materiali. Il campo elettromagnetico trasporta energia attraverso lo spazio sotto forma di onde radio, calore, luce, raggi X, ecc., secondo la descrizione data dalle equazioni ondulatorie di Maxwell. Alla fine dell'800 si afferma la concezione "classica" dei processi fisici, compendiata nei due pilastri teorici della meccanica e dell'elettromagnetismo. Questa visione del mondo fisico comportava tuttavia l'inconciliabilità dei processi corpuscolari e ondulatori e si dimostrò profondamente discutibile quando, alla fine del secolo, furono identificati alcuni semplici processi che resistevano a qualsiasi tentativo teso a ricondurli all'interno della formulazione "classica". È esperienza comune, ad esempio, che molti corpi cambino colore aumentandone la temperatura, passando dal rosso arancio fino all'incandescenza.



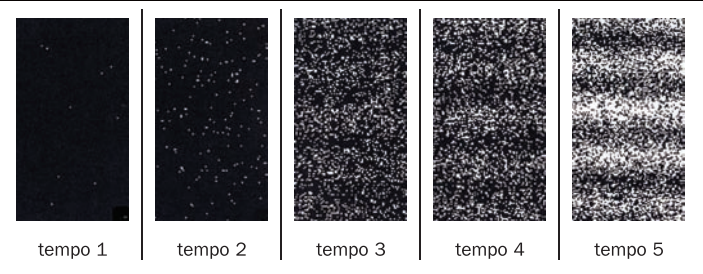
Sebbene sia naturale aspettarsi di poter descrivere questo fenomeno così comune nell'ambito della fisica classica, non sembrava possibile renderne conto nei termini delle leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo. Questo problema non trovò una soluzione, fino a quando Max Planck avanzò un'ipotesi assolutamente rivoluzionaria che sconvolse le idee classiche sulla radiazione elettromagnetica. La stessa ipotesi fu avanzata in seguito da Einstein per descrivere l'effetto fotoelettrico, il fenomeno in base al quale un elettrone può essere "scalzato" dall'atomo a cui è legato, illuminando il materiale con fotoni di energia superiore a una quantità "di soglia" (la spiegazione dell'effetto fotoelettrico valse il premio Nobel a Einstein nel 1921). L'idea di Planck e di Einstein consisteva nell'ammettere che l'energia del campo non fosse distribuita con continuità nello spazio, ma concentrata in "granuli" puntiformi, i *fotoni*, ciascuno dotato di una quantità $h\nu$ di energia – dove h è la *costante di Planck* e ν è la frequenza di oscillazione dell'onda. Dovendo naturalmente evitare di contraddire quanto previsto in generale dalla teoria classica, se un dato volume di spazio contiene una quantità di energia elettromagnetica, esso dovrà contenere un numero N di fotoni di energia $h\nu$, in modo che sommando N volte l'energia $h\nu$ di ciascun fotone si ottenga l'energia complessiva.

b. Michel Faraday rappresentato sulla banconota da 20 sterline.

L'esperimento di Young



1. Schema dell'esperimento di Young della doppia fenditura. In alto a sinistra l'interpretazione geometrica semplificata, con linee chiare nei punti in cui le due onde originate dalle fenditure 2 e 3 si sommano in modo costruttivo ("in fase") e con linee scure dove esse sono in controfase. Nella parte bassa è rappresentata l'alternanza di bande chiare e scure che si otterrebbe su una lastra fotografica. A destra appare una visione più realistica delle zone chiare e scure della figura di interferenza. Nella figura in basso, composizione di due onde: caso di interferenza totalmente costruttiva e totalmente distruttiva.



2. Figura di interferenza ottenuta da diffrazione con doppia fenditura utilizzando singoli fotoni: con il passare del tempo la figura d'interferenza a strisce si manifesta in modo sempre più evidente.

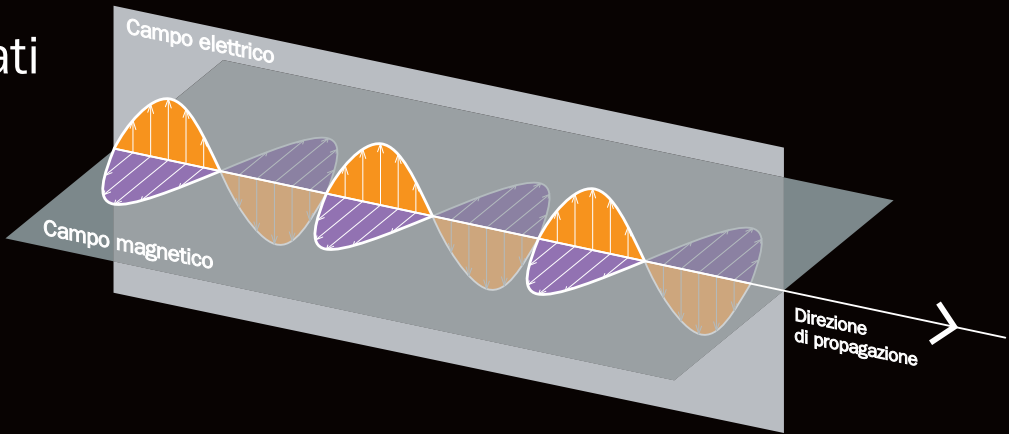
Un fenomeno fisico esemplare per comprendere la natura dualistica (ondulatoria e corpuscolare) della luce è rappresentato dall'esperimento di Young della doppia fenditura: l'interferenza di un'onda diffratta da due fenditure. Supponiamo di avere una sorgente di un'onda che si propaga dalla fenditura **a** della fig. 1 (in alto) e investe uno schermo nel quale sono praticate due fenditure, **b** e **c**. Queste fenditure danno a loro volta (per diffrazione) origine a due onde sferiche, le quali interferiscono tra di loro. A seconda del punto considerato, il processo di interferenza può far sì che i contributi delle due onde si rafforzino a vicenda oppure si cancellino (nella fig. 1 [in basso], la sovrapposizione di due onde rispettivamente in fase o sfasate di una mezza lunghezza d'onda). Corrispondentemente l'intensità dell'onda nei vari punti dello schermo potrà dare luogo a un campo notevolmente intenso, a uno meno intenso o addirittura a uno nullo. Per ora abbiamo considerato solo gli aspetti ondulatori del processo, ma interpretando il fascio come composto da numerosissimi fotoni sappiamo che essi si distribuiranno come vuole il campo: l'alternarsi di zone chiare e zone scure della figura di interferenza, in questo caso, sarà dato rispettivamente da zone su cui incidono molti fotoni e zone su cui incidono pochi fotoni. Tuttavia, gli aspetti corpuscolari del processo emergono in tutta la loro evidenza nel caso limite, in cui il campo sia così debole che in pratica un solo quanto – un fotone – percorre il cammino dal punto **a** allo schermo prima che un secondo fotone venga emesso da **a**. La fig. 2 riporta il formarsi dell'immagine di interferenza nel corso del tempo. Come si vede, ogni fotone dà luogo a una macchia in una precisa posizione (aspetto corpuscolare), con distribuzione probabilistica in base all'intensità del campo (aspetto ondulatorio). Passando da 10 a 70.000 fotoni dopo un certo lasso di tempo, si vede chiaramente che la distribuzione finale tende a riprodurre la distribuzione a strisce della figura d'interferenza. Si osservi che il singolo fotone, essendo un'unità indivisibile, passa necessariamente o dalla fenditura **b** oppure dalla **c** (questo può verificarsi ponendo due rivelatori subito dopo le fenditure e constatando che scatta sempre uno solo di essi). Ma tutto va come se il fotone che passa per **b** sapesse che la fenditura **c** è aperta (infatti chiudendo una fenditura la figura di interferenza sparisce). Per la sua lontananza dal senso comune e la scarsa accessibilità alla più naturale intuizione, il fisico americano Richard Feynman volle caratterizzare questo esperimento come "the only mystery of quantum mechanics".

A titolo di esempio, osserviamo che a un metro di distanza da una comune lampadina da 100 watt incidono su ogni cm² di superficie circa 10¹⁶ fotoni ogni secondo, cioè un numero di *quanti* di energia $h\nu$ pari a dieci milioni di miliardi. Non stupirà quindi se, a causa dell'enorme numero di quanti coinvolti, il carattere corpuscolare della luce non emerge nelle situazioni ordinarie (oggi in realtà, le moderne tecniche consentono di realizzare situazioni, in cui è possibile rivelare anche un solo fotone incidente in media ogni secondo su uno schermo, ma naturalmente solo in laboratorio).

Pochi anni dopo l'introduzione dell'idea di fotone, l'elaborazione della *meccanica quantistica*, la teoria che assieme alla relatività sta alla base della visione moderna del mondo, ha portato a concludere che tutti i processi naturali presentano i due aspetti ora illustrati, quello ondulatorio e quello corpuscolare (o *quantistico*). La teoria implica che anche la propagazione di una particella dotata di massa (e non solo il fotone che non ha massa) sia governata da un'equazione delle onde, la celebre *equazione di Schrödinger*. La visione moderna dei fenomeni fisici prevede quindi che ogni processo sia caratterizzato da un'onda che rende conto della propagazione ondulatoria del campo, ma anche da quanti (i fotoni nel caso della luce, gli elettroni e i protoni nel caso delle particelle). I campi "guidano" i relativi quanti, nel senso che questi ultimi hanno maggior probabilità di

trovarsi dove è più intensa l'onda ad essi associata. Un'altra caratteristica della visione quantistica della luce è che essa non fa in generale previsioni certe, ma solo probabilistiche, circa gli esiti dei processi di misura. Per quanto ci interessa, la densità di probabilità di trovare il quanto del relativo campo nella posizione **r** (dove con **r** si indica il punto di coordinate x, y, z nello spazio a tre dimensioni) al tempo t, dipende dalla funzione (dal suo quadrato per l'esattezza) che descrive l'onda associata al quanto stesso in quel punto e in quell'istante: la *funzione d'onda*. Tutte le equazioni che entrano in gioco nella descrizione dei processi fisici sono lineari, il che significa tra l'altro che l'evoluzione nel tempo e nello spazio della somma di due campi coincide sempre con la somma dei singoli evoluti spazio-temporali dei due campi. Se il fotone, quanto del campo elettromagnetico, ha le caratteristiche peculiari che abbiamo fin qui descritto, caratteristiche che stanno alla base di tutta la meccanica quantistica, viene naturale analizzare alcuni aspetti sorprendenti di questa teoria che sono diventati attuali solo di recente. Oggi possiamo infatti fare ricorso a potenzialità tecnologiche che erano inimmaginabili fino a pochi anni fa (vd. p. 14) e che risultano possibili grazie a un aspetto della meccanica quantistica che Schrödinger ha identificato addirittura come "il tratto caratteristico della teoria": l'*entanglement* (intreccio, intrico), una peculiare proprietà della teoria che prevede

Fotoni polarizzati e intrecci quantistici



1. Rappresentazione di un'onda elettromagnetica, il cui campo elettrico è polarizzato nel piano verticale. Nella figura è rappresentato anche il campo magnetico, sempre associato al campo elettrico di un'onda elettromagnetica e ad esso perpendicolare. Come il campo elettrico, anche il campo magnetico oscilla in una direzione ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda. Ruotando questa figura di 45° o di 90° intorno alla direzione di propagazione, in un senso o nell'altro, si ottiene la raffigurazione, rispettivamente, della polarizzazione del campo elettrico diagonale od orizzontale.

Il campo elettrico associato a un'onda oscilla sempre in una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione ma, in generale, esso può ruotare in modo arbitrario attorno all'asse di propagazione. Quando il campo elettrico oscilla in una direzione fissata tra le infinite possibili perpendicolari alla direzione di propagazione, si dice che l'onda ha una *polarizzazione piana*, perché il campo elettrico oscilla sempre nello stesso piano mentre l'onda si propaga. È possibile, ad esempio, produrre luce di questo tipo facendole attraversare una lastra polaroid e costringendo così il vettore campo elettrico a oscillare lungo una direzione predefinita. La caratteristica di quest'onda consiste nel fatto che il vettore campo elettrico oscilla sempre nello stesso piano: questa caratteristica del campo si traduce in un'analoga caratteristica dei fotoni che costituiscono l'onda elettromagnetica, che saranno quindi a loro volta polarizzati in una direzione precisa. Consideriamo ora una sorgente che emette ogni secondo una coppia di fotoni che si propagano in direzioni opposte, entrambi polarizzati nel piano verticale rispetto alla direzione di propagazione. In modo analogo, considereremo coppie di fotoni entrambi polarizzati orizzontalmente.

Siamo pronti ad affrontare l'*entanglement*. Se lo stato (*quantico*) di due fotoni polarizzati verticalmente, come pure quello di due fotoni polarizzati orizzontalmente, sono stati possibili, allora anche la loro somma è uno stato possibile per il sistema dei due fotoni. Questo è noto come *principio di sovrapposizione*. Il sistema dei due fotoni così costituito mostra caratteristiche peculiari e inaspettate. Se si esegue una misura di polarizzazione piana in una qualsiasi direzione su uno dei due fotoni, si verificheranno queste due uniche possibilità a caso (ciascuna cioè con probabilità ½): o il fotone "sopravvive" o viene assorbito. Tuttavia, se si eseguono misure uguali (nella stessa direzione di polarizzazione) su entrambi i fotoni, allora gli esiti – sebbene casuali – risultano sempre identici. Ed è questo l'aspetto sorprendente del fenomeno! Sembrerebbe quindi che i due fotoni rimangano in qualche modo legati indissolubilmente (per questo *entangled*) e che quello che accade a uno di essi si ripercuota istantaneamente anche sull'altro, indipendentemente dalla distanza che li separa.



c. Erwin Schrödinger rappresentato sulla banconota austriaca da 1000 scellini.

che le caratteristiche di due fotoni (come ad esempio la loro polarizzazione, vd. approfondimento) restino correlate anche a distanza. La specifica natura quantistica dei fotoni ci permette di sfruttare l'entanglement per elaborare un sistema di trasmissione dell'informazione che risulta fondamentalmente inviolabile, una cosa impossibile nell'ambito della fisica classica (vd. p. 10). Non a caso diversi sistemi bancari stanno cominciando a utilizzare questo metodo per comunicazioni particolarmente riservate. Fotoni arrivano anche dalle sorgenti più energetiche del cosmo, buchi neri di dimensioni stellari, frutto del collasso delle prime stelle, molto più massive di quelle che incontriamo in galassie come la nostra, e risultano essere così i messaggeri per eccellenza dell'universo. La scoperta del fotone quale costituente fondamentale della luce, oltre ad aver segnato un balzo concettuale di enorme portata per la comprensione del mondo, ha anche consentito importanti innovazioni tecnologiche. Senza dubbio, lo studio del quanto di luce resterà a lungo una delle più interessanti frontiere della scienza.

Biografia

GianCarlo Ghirardi è docente di Fisica Teorica all'Università di Trieste dal 1976. È membro dell'Academic Board dell'International Centre for Theoretical Physics (Ictp) dal 1976. Ha dato contributi di notevole rilievo al campo dei fondamenti della meccanica quantistica, in particolare con la teoria di GRW (Ghirardi, Rimini, Weber).

Link sul web

http://www.mi.infn.it/~phys2000/atomic_lab.html

http://scienzapertutti.infn.it/main7_luce.html

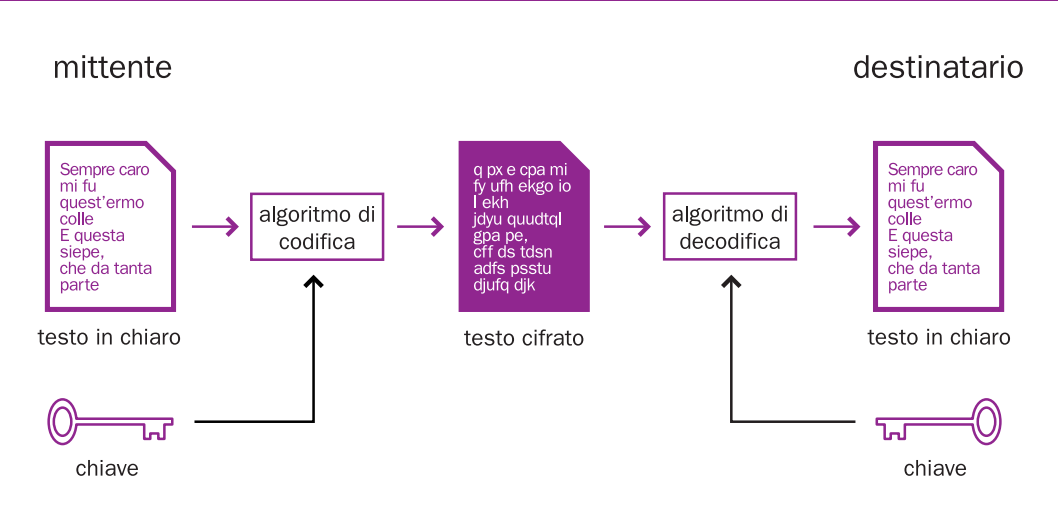
Fotoni e segreti

La meccanica quantistica al servizio della crittografia

di GianCarlo Ghirardi e Francesca Scianitti

Le straordinarie potenzialità dell'applicazione di alcuni aspetti della meccanica quantistica, tra i quali ad esempio l'entanglement (vd. p. 8, ndr), hanno portato alla nascita della moderna teoria quantistica dell'informazione. Utilizzata oggi per lo scambio di informazioni protette, anche nelle comuni applicazioni del commercio telematico o per la protezione della privacy nell'uso della posta elettronica, la *crittografia* ha origini molto antiche e ha raggiunto nella sua evoluzione livelli elevatissimi, con l'obiettivo di rendere i protocolli di scambio sempre più sicuri. Tuttavia, per quanto il protocollo sia sofisticato, il

problema dell'inviolabilità dall'esterno non è mai completamente risolto ed è praticamente impossibile ottenere la certezza della segretezza. La natura del problema è la seguente. Se due persone – che chiameremo Alice e Bob – vogliono trasmettersi un messaggio senza che nessun'altro sia in grado di leggerne il contenuto, useranno una chiave per cifrare il messaggio, cioè trasformarlo in modo da renderlo irriconoscibile attraverso un processo di codifica (un *algoritmo*). Solo chi è in possesso della chiave può ricostruire il messaggio originale (vd. fig. a).



a. Per cifrare il testo di un messaggio (il *testo in chiaro*), il mittente lo codifica utilizzando un *algoritmo*, un procedimento generale di scrittura segreta, i cui dettagli sono precisati solo scegliendo una chiave. Applicando insieme *chiave* e algoritmo a un testo in chiaro, questo è trasformato in un *testo cifrato*. Il testo cifrato può essere intercettato da una spia durante la trasmissione al destinatario, ma (almeno nel caso in cui l'algoritmo usato sia sufficientemente raffinato) la spia non dovrebbe essere in grado di decodificarlo. Il destinatario, invece, conoscendo l'algoritmo e la chiave usati dal mittente, può ripristinare il testo in chiaro.

[as] approfondimento

Il principio di indeterminazione di Heisenberg

Uno dei principi fondanti della meccanica quantistica è il principio di indeterminazione di Heisenberg del 1927. Esso prevede che esistano grandezze, dette *coniugate*, il cui valore non può mai essere determinato simultaneamente con esattezza, in quanto la misura (più o meno precisa) di uno influisce sull'altro rendendolo (più o meno) casuale e quindi indeterminato. In particolare, il prodotto delle rispettive incertezze di misura deve essere maggiore della costante di Planck h divisa per 4π . Un esempio è dato dalle grandezze posizione e

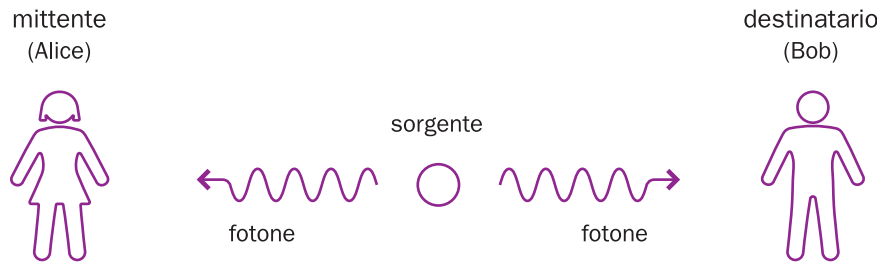
momento (il prodotto tra la massa e la velocità) di una particella: quando si cerca di stabilire precisamente con quale velocità si sta muovendo una particella, inevitabilmente la sua posizione diventa indeterminata. In altre parole, più accuratamente si misura la velocità, meno nota sarà la posizione, visto che il prodotto delle incertezze ha un valore minimo. Anche gli stati di polarizzazione rettilinea (verticale od orizzontale) e diagonale (a 45° o 135°) sono grandezze coniugate. Di conseguenza, possiamo fare

una misura per stabilire se un fotone ha polarizzazione verticale od orizzontale oppure a 45° o a 135° , ma non potremo mai fare una misura che distingua tra tutte e quattro queste possibilità, perché una volta misurato (ad esempio) lo stato di polarizzazione verticale-orizzontale quello a polarizzazione 45° - 135° risulta del tutto indeterminato. Per questo, una scelta appropriata per Alice e Bob sui fotoni entangled può essere di usare un filtro verticale e uno a 45° .

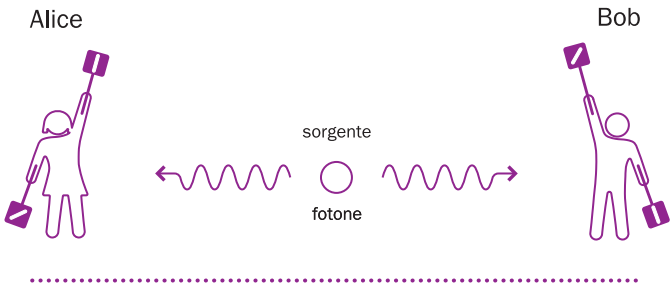
L'inviolabilità della comunicazione dipenderà quindi dal modo in cui viene scambiata la chiave e non dal messaggio vero e proprio che, anche se letto dall'esterno, è (praticamente) indecifrabile senza la chiave. Affinché tale sistema sia efficace, Alice e Bob dovranno quindi scambiarsi la chiave di persona, poiché farlo attraverso un altro canale come il telefono o la posta elettronica sarebbe poco sicuro. Questo della "distribuzione delle chiavi" è un problema che può essere risolto secondo protocolli diversi, ma in generale non può essere reso inviolabile senza fare ricorso ai principi della meccanica quantistica. La necessità di attuare lo scambio delle chiavi "a distanza" può essere risolta infatti sfruttando la particolare natura dei fotoni entangled, le cui caratteristiche, ad esempio di polarizzazione, restano correlate anche a

distanza, senza che tra i due fotoni vi sia più alcuna interazione dopo la loro creazione. Il protocollo di scambio delle chiavi proposto da Artur Eckert nel 1991 sfrutta proprio questa natura quantistica dei fotoni e l'entanglement.

Passo 1 (vd. fig. b). Una sorgente emette ogni secondo una coppia di fotoni entangled, che si propagano in direzioni opposte tra un mittente (Alice) e un destinatario (Bob), posti a una distanza qualsiasi dalla sorgente. In generale, lo stato di polarizzazione del sistema dei due fotoni entangled sarà una combinazione lineare (sovrapposizione di stati quantistici) di stati di polarizzazione ortogonali tra loro (ad esempio verticale e orizzontale, oppure a 45° e a 135° , vd. approfondimento).

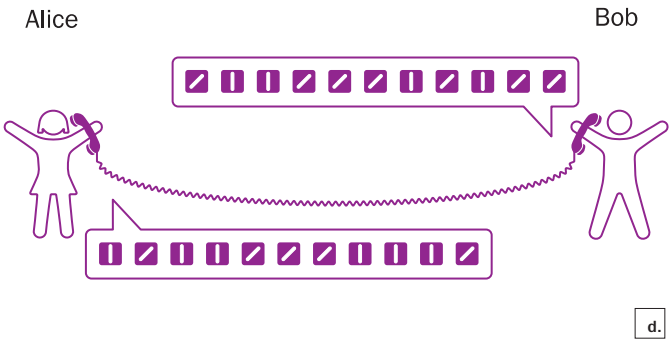


b.



c.

Alice		Bob	
filtro utilizzato	esito della misura	filtro utilizzato	esito della misura
1	1	2	0
2	0	1	1
1	1	1	1
1	0	2	1
2	0	2	0
2	1	2	1
2	0	1	1
1	1	2	0
1	0	1	0
1	1	2	1
2	0	2	0



d.

Alice		Bob		chiave
filtro utilizzato	esito della misura	filtro utilizzato	esito della misura	
1	1	2	0	
2	0	1	1	
1	1	1	1	1
1	0	2	1	
2	0	2	0	0
2	1	2	1	1
2	0	1	1	
1	1	2	0	
1	0	1	0	0
1	1	2	1	
2	0	2	0	0

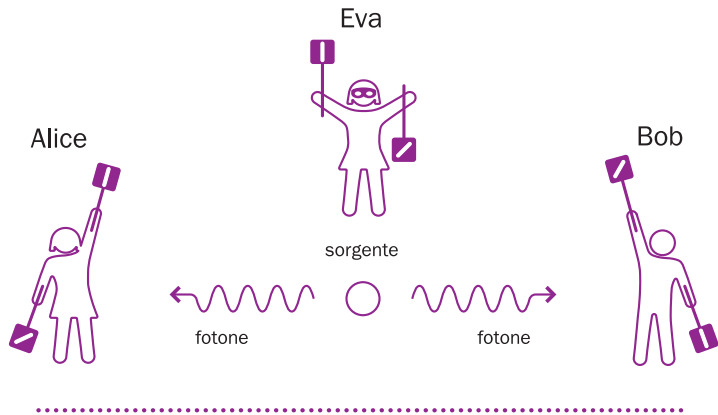
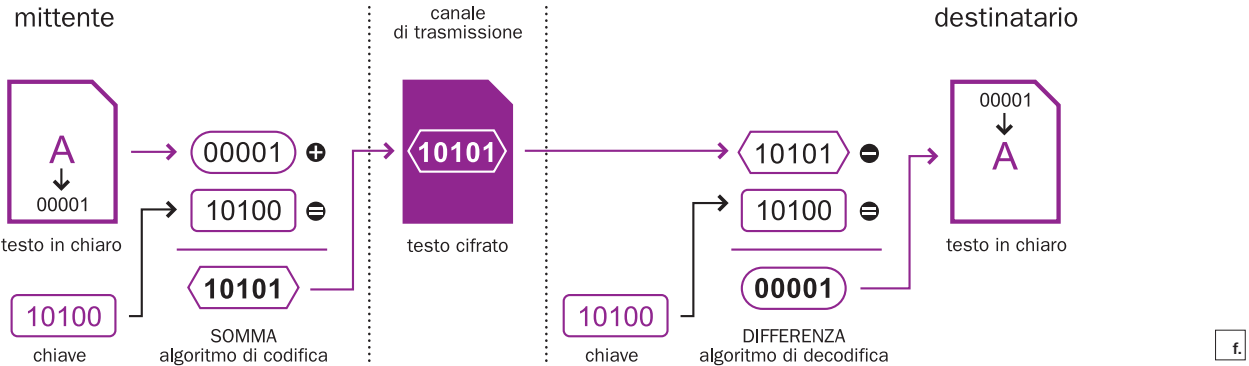
e.

Passo 2 (vd. fig. c). Per generare la chiave comune, Alice e Bob stabiliscono di eseguire una serie di misure di polarizzazione sulle varie coppie di fotoni entangled emesse in successione dalla sorgente, usando arbitrariamente filtri che rivelano se la polarizzazione è verticale o a 45° (indicati nella figura con due differenti palette) e senza comunicarsi la sequenza delle misure che eseguiranno. Indicando con 1 o 0 l'esito della misura (1 se il fotone supera il “test” di misura di polarizzazione – ad esempio il filtro è di tipo “verticale” e il fotone riesce a superarlo – e 0 se non lo supera) la sequenza degli esiti registrati da Alice e Bob sarà una sequenza del tipo 10100101010, ricordando che in ogni misura si ha la stessa probabilità di avere come esito 1 o 0. Nella tabella in figura sono indicati, sia per Alice che per Bob, il tipo di misura effettuata (il filtro utilizzato, verticale o a 45°) e l'esito corrispondente.

Passo 3 (vd. fig. d). Attraverso un canale di comunicazione tradizionale (per esempio il telefono) Alice e Bob annunciano l'un l'altro la sequenza del tipo di misure eseguite. Avendo eseguito le misure su fotoni entangled, sappiamo con certezza che nei casi in cui Alice e Bob hanno eseguito lo stesso tipo di misura, cioè hanno utilizzato lo stesso filtro, essi hanno anche scritto lo stesso numero.

Passo 4 (vd. fig. e). Eliminando tutti i casi in cui hanno eseguito misure diverse (ovvero in cui i numeri delle rispettive sequenze possono anche differire), Alice e Bob rimangono ciascuno con la stessa sequenza di 0 e 1, che hanno due caratteristiche essenziali: sono assolutamente identiche e la sequenza degli 0 e degli 1 è del tutto casuale. Questa è la loro chiave segreta! In particolare, nella tabella in figura sono evidenziati in grigio i casi in cui Alice e Bob hanno condotto misure diverse. Eliminando questi casi, si ottiene la sequenza “pulita” riportata nella terza colonna, cioè la chiave (10100 nel nostro esempio).

Passo 5 (vd. fig. f). Disponendo della stessa chiave segreta, Alice e Bob possono utilizzarla per trasmettersi un messaggio criptato. Un semplice algoritmo per farlo è quello di tradurre il messaggio in cifre – per esempio associando un numero a ogni lettera del messaggio – e di sommare alle cifre del messaggio le cifre della chiave segreta. L'unico modo per risalire dal testo cifrato a quello in chiaro è di disporre della stessa chiave. Nell'esempio in figura il messaggio da trasmettere è la lettera “A”, a cui si è deciso di far corrispondere la sequenza 00001. Analogamente si opera con le altre lettere che compongono il testo in chiaro da trasmettere.



f.

	chiave	chiave finale
1. posto	1	1
2. posto	0	
3. posto	1	1
4. posto	0	
5. posto	0	0

g.

Passo 6 (vd. fig. g). La natura quantistica del fotone implica che una qualsiasi azione da parte di una spia, chiamiamola Eva, mirata a intercettare lo stato di polarizzazione dei fotoni che si propagano tra Alice e Bob, comporta una certa probabilità che gli esiti delle misure effettuate da Alice e Bob risultino diversi, anche quando i due personaggi eseguono la stessa misura. Questo perché, in generale, effettuando una misurazione sul sistema quantistico dei due fotoni entangled, si ha una certa probabilità di distruggere le correlazioni perfette tra loro per misure in direzioni diverse da quella scelta dalla spia (vd. approfondimento p. 10). Per verificare se Eva sia intervenuta, Alice e Bob si comunicano pubblicamente un certo numero di esiti di misura che compongono la chiave segreta. Per un numero sufficientemente elevato di esiti comunicati (molti più di quelli rappresentati nella tabella dell'esempio in figura), Alice e Bob potranno

essere praticamente certi di scoprire se Eva sia intervenuta, perché riscontrerebbero in questo caso almeno un esito discorde, pur avendo eseguito lo stesso tipo di misura. In tal caso dovrebbero ricominciare da capo tutto il procedimento. Altrimenti, rigettando gli esiti enunciati pubblicamente, che a questo punto non sarebbero più segreti, sarà possibile ottenere la chiave segreta da utilizzare nel caso non vi sia stato un intervento di Eva. Nell'esempio raffigurato in figura, Alice e Bob stabiliscono di comunicarsi i numeri 0 o 1 della chiave segreta alla posizione pari (al secondo e quarto posto). In questo modo, se uno di questi numeri fosse diverso per Alice e Bob, i due personaggi saprebbero di essere stati spiati e potrebbero decidere di ricominciare da capo. Nel caso contrario, utilizzeranno la nuova chiave segreta (la seconda colonna della tabella in figura), più corta della prima, per cifrare e decodificare il messaggio.

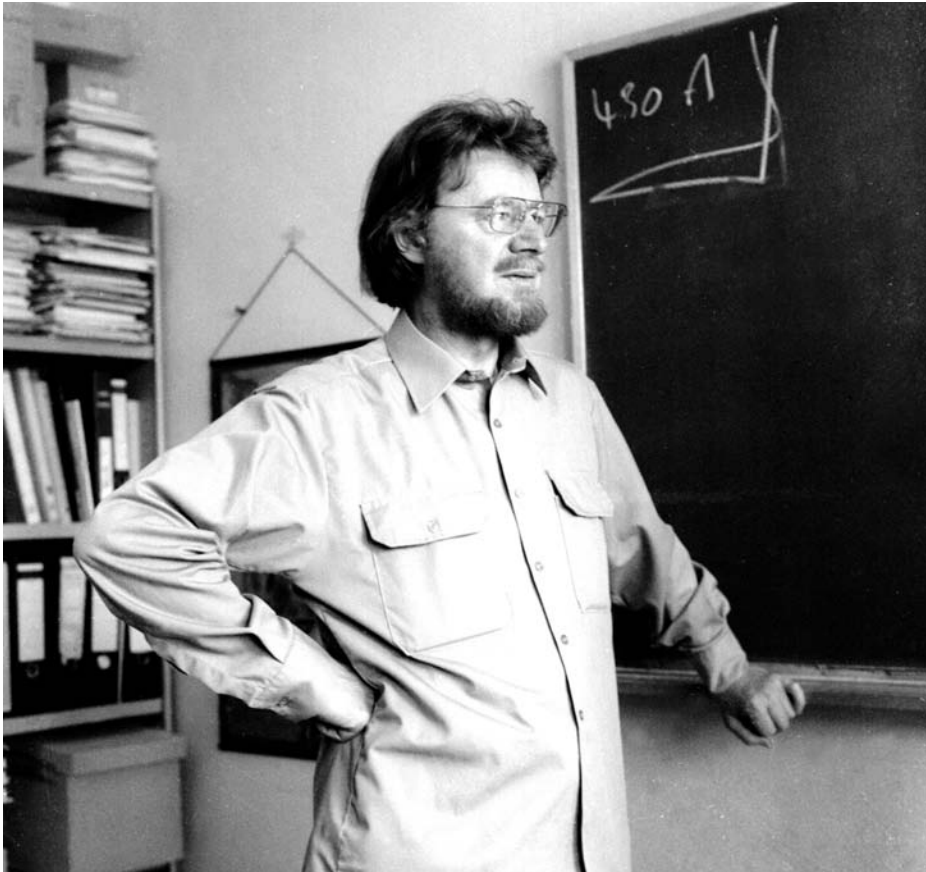
La fisica di Star Trek

Intrecci, sovrapposizioni e gatti quantistici

di Marco Genovese

La meccanica quantistica, pur essendo una teoria di enorme successo, necessaria per comprendere non solo il mondo microscopico, dagli atomi alle particelle elementari, ma anche fenomeni come la conduzione nei metalli o per descrivere l'universo alle sue origini, non è conosciuta quanto altre teorie della fisica del XX secolo (come, ad esempio, la relatività). Essa presenta, infatti, alcune proprietà controintuitive che ne rendono ostica la comprensione. Tra le caratteristiche peculiari della meccanica quantistica vi è la possibilità che un sistema fisico non possieda una proprietà ben definita prima che questa venga misurata, ma si trovi in una “sovrapposizione” di possibilità. Ad esempio, succede che un elettrone non sia né in questa stanza, né nella vicina, ma in una sovrapposizione dei due casi e solo al momento della misura “collassi” in una delle due possibilità. Quando il principio di sovrapposizione (vd. approfondimento p. 9, ndr) è esteso a sistemi macroscopici (per i quali, in linea di principio, la meccanica quantistica continua a valere) si verificano delle situazioni paradossali. Un esempio emblematico venne proposto da Schrödinger con il suo famoso “gatto”. Si immagini di avere una particella con una certa probabilità di decadere (cioè di trasformarsi in una con energia inferiore) in un dato intervallo di tempo. Per le leggi della

meccanica quantistica, dopo tale intervallo si avrà uno stato sovrapposto particella-decaduta, particella-non-decaduta. Si supponga inoltre che tale particella sia in una scatola chiusa, contenente una fiala di veleno, attivata dal suo decadimento, assieme a un gatto. Se le leggi della meccanica quantistica si estendono anche ai sistemi macroscopici, anche il gatto nella scatola finirà in una sovrapposizione gatto-vivo, gatto-morto (a seconda, se la particella decadendo abbia attivato il veleno o meno). Esempi di questo tipo hanno generato il dibattito, non ancora concluso, su come avvenga la transizione tra un mondo microscopico quantistico probabilistico e uno macroscopico classico deterministico. D'altro canto, quando il principio di sovrapposizione è esteso a sistemi di più particelle, si generano degli stati quantistici, per i quali il valore di una grandezza osservabile (ad esempio la polarizzazione) di una specifica particella in un certo stato quantico non è definito prima di effettuare una misura. Tuttavia quando si effettua una misura su una delle particelle dello stato, questo determina istantaneamente anche i valori delle grandezze osservabili di tutte le altre particelle, per quanto lontane: la cosiddetta *non-località quantistica*. È questo il fenomeno noto con il termine inglese di entanglement.

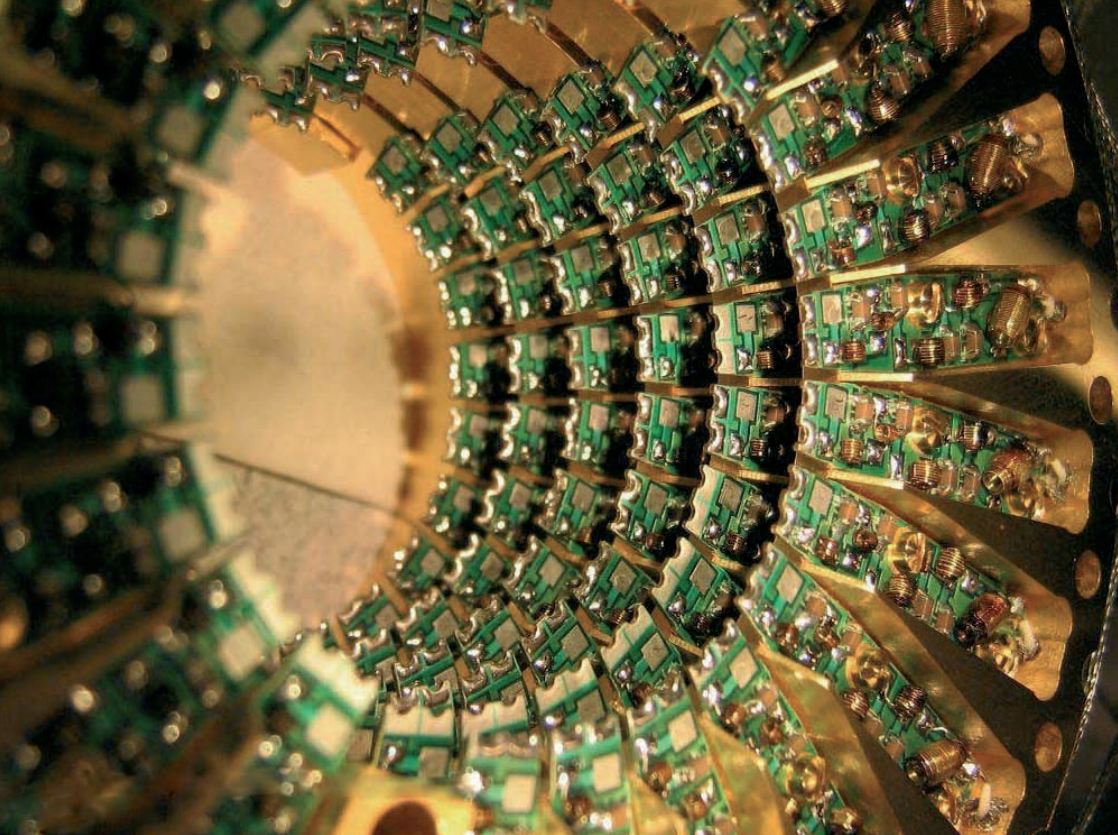


a.
John Bell al Cern negli anni '80.

Tali inusuali proprietà hanno originato un ampio (e non concluso) dibattito sui fondamenti della fisica nel corso del secolo passato. In sostanza, uno dei punti chiave di questo dibattito era, se potesse esistere una teoria più generale della meccanica quantistica, in cui tutti i risultati delle misure fossero fissati a priori da *variabili nascoste*, ovvero variabili descritte in una teoria più generale, al momento a noi ignota. John Bell dimostrò che nessuna teoria di questo tipo può riprodurre i risultati sperimentali della meccanica quantistica, quando si considerano stati di tipo entangled. Gli esperimenti condotti con fotoni entangled hanno quindi dimostrato la correttezza della meccanica quantistica nella sua versione standard. Tali esperimenti hanno però avuto anche, come spesso capita per la buona fisica di

base, un'importante ricaduta tecnologica, aprendo la strada allo sfruttamento dell'entanglement come risorsa per nuove tecnologie: le *tecnologie quantistiche*, che si propongono di superare i limiti delle attuali tecnologie sfruttando le proprietà dei sistemi quantistici. La prima e più sviluppata di queste discipline è l'*informazione quantistica*, che si occupa dello studio della codifica, trasmissione ed elaborazione dell'informazione sfruttando queste proprietà, in particolare quelle dei fotoni. Così come nell'informazione classica si codifica su due bit (0,1), in quella quantistica si codifica su un sistema a due livelli (ad esempio, la polarizzazione di un fotone), indicati con $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Tuttavia, a causa del principio di sovrapposizione, ora anche uno stato con bit non definito, del tipo $a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$

(ove a_0 e a_1 sono due coefficienti), sarà possibile. Allora, sarà anche possibile lo stato entangled del tipo $a_{0,0}|0,0\rangle + a_{1,0}|1,0\rangle + a_{0,1}|0,1\rangle + a_{1,1}|1,1\rangle$ e così via, continuando ad “aggiungere” 0 e 1 quasi all'infinito! È proprio per questa proprietà peculiare che si ottengono risultati non ottenibili con i sistemi classici. Questo consente di realizzare comunicazioni sicure, ovvero di codificare e trasmettere un messaggio sfruttando l'entanglement dei fotoni (vd. p. 10, ndr). Vi sono sistemi già commercializzati che permettono trasmissioni su fibra ottica di una chiave crittografica sino a oltre 100 km! E se si considera l'elaborazione di informazioni, si pensi che mentre il più veloce dei calcolatori attuali impiegherebbe molto di più della vita



b.
Prototipo del primo computer quantistico “commerciale” a 16-qubit, sviluppato dall’azienda canadese D-Wave nel 2007.

dell’universo per ridurre in fattori un numero di cento cifre, un eventuale calcolatore quantistico potrebbe effettuare tale calcolo in pochi minuti!
Primi esempi di calcolatori quantistici, per il momento a pochi *qubit* (*quantum bit*), sono stati recentemente realizzati usando fotoni o ioni. Il problema maggiore da superare per raggiungere prototipi con un numero di qubit significativo è mantenere per tempi utili la proprietà di entanglement, nonostante l’interazione con l’ambiente tenda a distruggerla: alcune idee in merito sono già in corso di studio.
Una ulteriore tecnologia quantistica particolarmente “fantascientifica” è il cosiddetto *teletrasporto*, in cui, come nel film Star Trek, lo stato ignoto di una particella quantistica (ad esempio, la polarizzazione di un fotone) viene distrutto in un laboratorio da una misura congiunta con una componente di uno stato entangled e ricostruito esattamente eguale, sfruttando la condivisione dello stato entangled, in un laboratorio remoto, senza che le informazioni sullo stato vengano acquisite, né venga trasferita materia. La meccanica quantistica, infatti, proibisce che si possa caratterizzare completamente un singolo stato a causa del principio d’indeterminazione.
Per il momento ciò è stato fatto per fotoni e atomi, ma nessuna legge fisica proibisce che in futuro



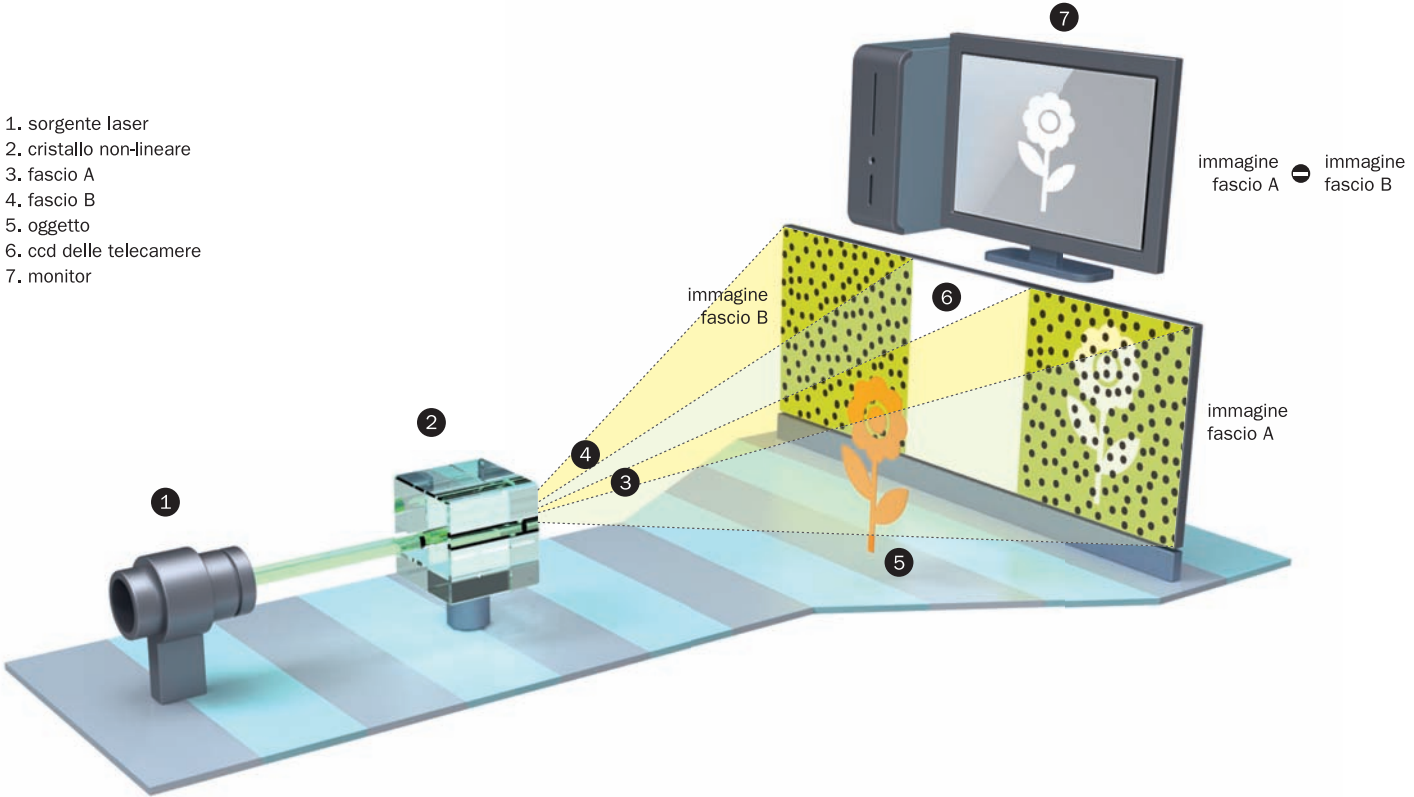
c.
La celebre astronave Enterprise del telefilm “Star Trek”, in cui si trova la cosiddetta “sala teletrasporto”, usata per trasferire istantaneamente membri dell’equipaggio da una parte all’altra dell’universo.

possa essere esteso a sistemi molto più complessi (come il capitano Kirk e il suo equipaggio), anche se nessuno saprebbe al momento dire come.
Infine un’altra tecnologia che pare molto promettente è la *metrologia quantistica*, che si propone di superare i limiti classici della misura utilizzando l’entanglement. In questo caso si potrebbero costruire *interferometri* (strumenti che misurano variazioni di lunghezza) estremamente precisi (in cui la precisione aumenti con il numero dei fotoni presenti e non con la sua radice quadrata), che permetterebbero, ad esempio, misure di posizione o una determinazione del tempo (per interferometri atomici) con

una precisione estremamente elevata. Inoltre è stato recentemente dimostrato come l’uso di fasci di luce entangled possa portare a una forte riduzione dei disturbi nella misura, il *rumore*, al di sotto del limite ottenibile con luce “classica” (quella di una lampadina o di un laser), permettendo di osservare oggetti debolmente assorbenti altrimenti invisibili.
Un fenomeno così “bizzarro” e per anni fonte di dibattito epistemologico quale l’entanglement potrebbe quindi a breve diventare un elemento chiave per numerose tecnologie, che in un prossimo futuro pervaderanno la nostra vita quotidiana.

d.
Schema di un esperimento di imaging quantistico con un interferometro. Un fascio di luce emesso da una sorgente laser crea una coppia di fasci entangled (A e B) in un certo tipo di cristallo (non-lineare). Uno dei due fasci (A) attraversa un oggetto debolmente assorbente (una deposizione a forma di fiorellino di uno strato monoatomico su un vetrino) e quindi entrambi i fasci sono misurati dal ccd di una telecamera. L’immagine dell’oggetto appare sottraendo l’immagine del fascio B dall’immagine del fascio A, poiché i due rumori sono esattamente uguali, a causa dell’entanglement.

1. sorgente laser
2. cristallo non-lineare
3. fascio A
4. fascio B
5. oggetto
6. ccd delle telecamere
7. monitor



Biografia

Marco Genovese è ricercatore presso l’Inrim (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) a Torino, dove è responsabile del programma di Ottica Quantistica. Le sue ricerche hanno riguardato la meccanica quantistica, sia dal punto di vista sperimentale che teorico e, recentemente, i fondamenti della meccanica quantistica e applicazioni all’informazione e alla metrologia quantistica.

Link sul web

- <http://www.inrim.it>
- <http://www.newscientist.com/topic/quantum-world>
- <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/english/>

Illuminando la materia

Fotoni virtuali e reali nella fisica delle particelle

di Massimo Corradi ed Elisabetta Gallo

Sin dai tempi dei filosofi greci l'uomo cerca di capire di cosa sia fatta la materia che lo circonda. Nella fisica moderna, uno dei metodi più fruttuosi per esplorare la struttura della materia alle scale più piccole è quello di “sparare”, con macchine dedicate chiamate *acceleratori di particelle*, particelle elementari elettricamente cariche, per esempio elettroni, contro campioni di materia. Lo scontro può avvenire attraverso lo scambio di un *fotone virtuale*, che permette, in un certo senso, di “vedere” l'interno della materia (vd. approfondimento p. 19).

Il primo successo di questa tecnica fu la scoperta del nucleo dell'atomo. Nel 1910 Hans Geiger e Ernest Marsden spararono *particelle alfa*, ovvero particelle cariche prodotte nei decadimenti radioattivi, contro una lamina d'oro. Grazie a questi urti, che oggi descriviamo come mediati da uno scambio di fotoni virtuali, Ernest Rutherford capì che doveva esserci un oggetto di dimensioni molto più piccole di quelle dell'atomo, ma che ne conteneva quasi tutta la massa: il nucleo. L'avvento di acceleratori di particelle sempre più potenti, in cui fasci di elettroni venivano

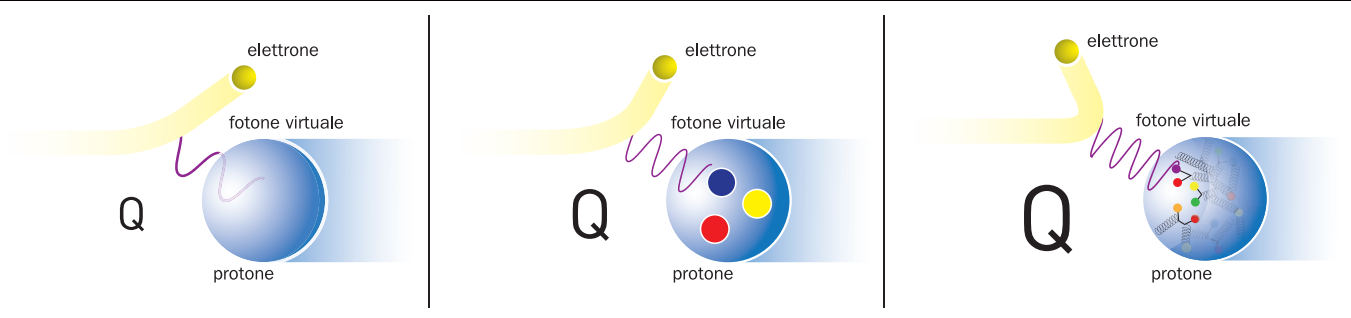


a.
L'acceleratore Hera del laboratorio Desy di Amburgo: un anello con una circonferenza di 6,3 km capace di far collidere protoni con elettroni per esplorare la struttura dei protoni fino a scale di dimensioni di 10^{-15} mm (un milionesimo di miliardesimo di mm).

[as] approfondimento

Luce virtuale

1.
Rappresentazione grafica di collisioni elettrone-protone. L'elettrone emette un fotone virtuale che va a colpire il protone. Per piccoli valori di Q (a sinistra) il fotone non distingue nessuna struttura all'interno del protone. A Q intermedio (al centro) sono visibili i tre quark, detti “di valenza”. All'aumentare di Q (a destra) appaiono nuove strutture, con i quark che emettono gluoni (rappresentati da molle), i quali a loro volta si trasformano in coppie formate da un quark e dalla rispettiva antiparticella, l'antiquark.



Per capire come è fatta la materia al suo interno, i fisici studiano le collisioni tra elettroni e protoni di altissima energia, analizzando l'energia e la direzione degli elettroni che emergono dall'urto. La collisione tra un elettrone e un protone avviene attraverso lo scambio di un *fotone virtuale*, cioè un fotone con massa diversa da zero, che può esistere per tempi brevissimi grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg. I fotoni virtuali sono caratterizzati da una grandezza (indicata con Q) che è una misura della “durezza” dell'urto, cioè dell'energia e della quantità

di moto perduta dall'elettrone nell'urto con il protone. La capacità di vedere ovvero, come dicono i fisici, di *risolvere* strutture piccole all'interno del protone è inversamente proporzionale a Q. Come è illustrato nella fig. 1, per piccoli valori di Q il protone viene visto come un unico oggetto. All'aumentare di Q e quindi della capacità del fotone virtuale di risolvere dettagli sempre più piccoli, il protone appare composto da tre quark. A valori di Q ancora più grandi viene rivelata una gran quantità di altri costituenti: *gluoni* e coppie formate dai quark e dalle

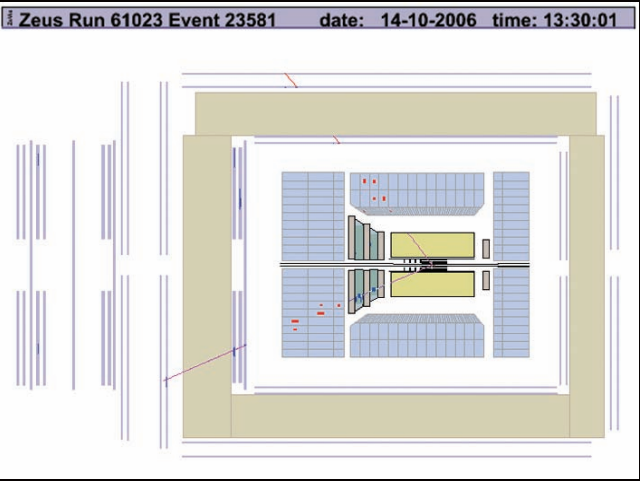
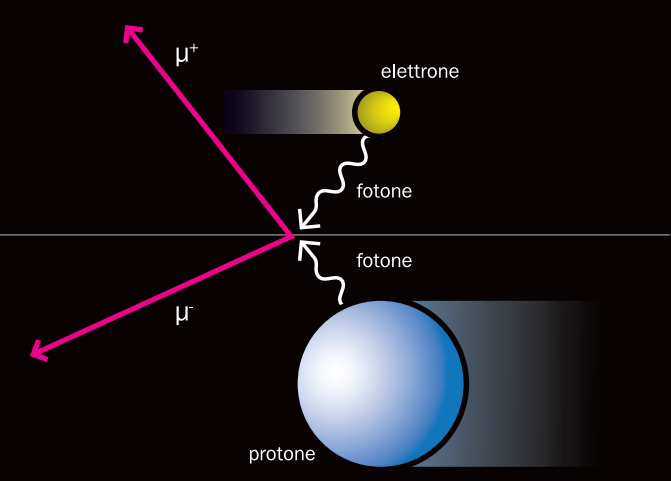
loro antiparticelle (gli *antiquark*), che trasportano ciascuno una piccola frazione dell'energia del protone. Questo aumento del numero di costituenti osservabili all'aumentare di Q è predetto con precisione dalla teoria QCD. La densità dei costituenti del protone è stata misurata con grande precisione a Hera e ha portato a una verifica fondamentale della QCD. La conoscenza della densità dei quark e dei gluoni all'interno del protone è inoltre importante per la comprensione dei risultati delle collisioni protone-protone all'acceleratore Lhc del Cern.

sparati contro bersagli fissi, ha permesso di distinguere dettagli sempre più piccoli all'interno della materia. Fino agli anni '50 si pensava, ad esempio, che il *protone*, uno dei componenti del nucleo di un atomo, fosse una particella “elementare” ovvero puntiforme. Usando un acceleratore di elettroni del laboratorio Slac in California, Robert Hofstadter trovò invece che il protone ha un'estensione spaziale misurabile, con un raggio di circa un decimillesimo di miliardesimo di centimetro (10^{-13} cm). L'acceleratore lineare che entrò in funzione allo Slac nel 1967 portò a una nuova svolta nel campo della fisica delle particelle: la scoperta di oggetti puntiformi all'interno del protone, i *quark*. Successivamente vari esperimenti, effettuati ai laboratori Cern di Ginevra e Fermilab vicino Chicago, hanno studiato la struttura interna del protone usando come sonde non solo elettroni, ma anche altre particelle come *muoni* e *neutrini*. Un salto quantitativo nella capacità di

distinguere strutture sempre più piccole si è ottenuto negli anni '90 con Hera (Hadron Elektron Ring Anlage), dove fasci di elettroni ad alta energia venivano fatti scontrare con protoni a loro volta accelerati. L'acceleratore Hera è rimasto in funzione per circa 15 anni, dal 1992 al 2007, presso il laboratorio Desy di Amburgo (Germania). Il contributo dell'Infn, consistente nella fornitura di metà dei magneti superconduttori usati per il fascio dei protoni, è stato fondamentale per la realizzazione dell'acceleratore. L'Infn ha anche partecipato alla costruzione e al funzionamento dei due esperimenti (H1 e Zeus), posti nei punti di collisione elettrone-protone, e dei due esperimenti (Hermes e Herab), che hanno studiato le collisioni su bersagli fissi. I fisici italiani sono ancora impegnati nell'analisi dei dati raccolti da Hera, che hanno portato a una visione più completa del protone e a una verifica dettagliata della teoria delle interazioni forti, la *cromodinamica*

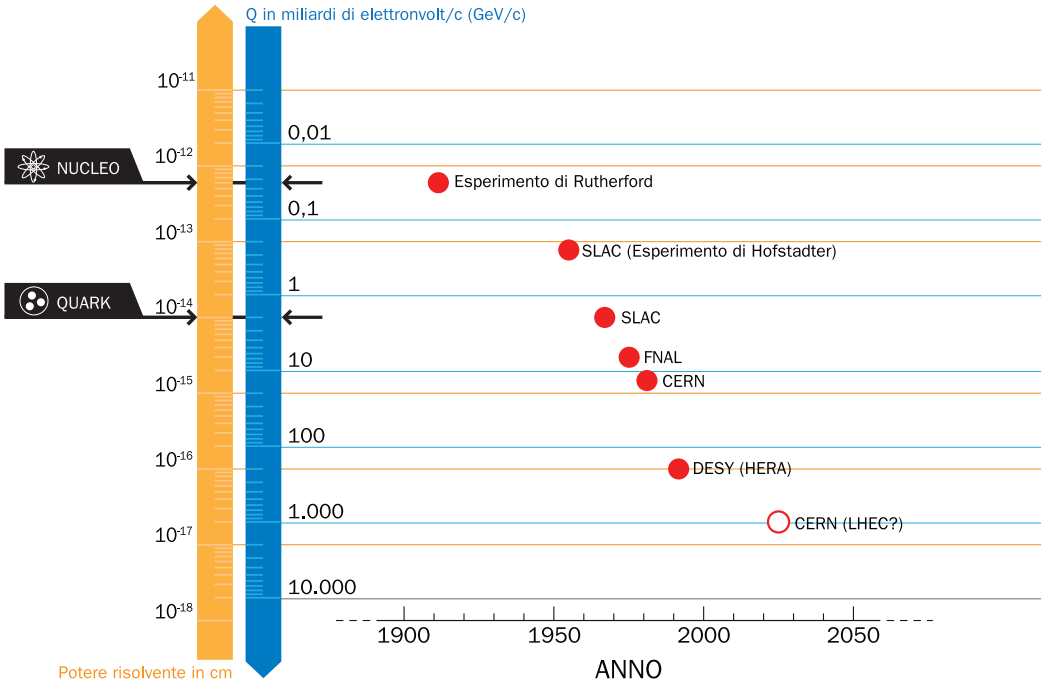
quantistica o *QCD*, dall'acronimo inglese *quantum-chromo-dynamics* (vd. approfondimento). Ma i quark sono oggetti elementari od oggetti dotati a loro volta di una struttura? Le misure a Hera ci dicono che i quark sono puntiformi o meglio che il loro raggio deve essere più piccolo di un millesimo del raggio del protone. I *quark up* e *down* presenti nel protone (e nel *neutrone*, l'altro componente del nucleo di un atomo) e l'elettrone rimangono quindi, al momento, i più piccoli mattoni di cui è composta la materia ordinaria. Non è però stata ancora detta l'ultima parola nel campo delle collisioni elettrone-protone. Si sta già progettando infatti una nuova macchina, chiamata Lhec (Large Hadron-Electron Collider), che dovrebbe sparare fasci di elettroni contro protoni accelerati alle altissime energie dell'acceleratore Lhc del Cern a Ginevra. In questo modo si potrebbero studiare strutture dieci volte più piccole di quelle esplorate finora (vd. fig. b).

Fotoni contro fotoni



I fotoni di alta energia non solo interagiscono con la materia, come quelli di bassa energia a cui siamo abituati (quelli della luce visibile), ma possono anche interagire tra loro generando altre particelle. Poiché un fotone può trasformarsi per tempi brevissimi in una coppia quark-antiquark, il suo comportamento è simile a quello di un adrone, una particella composta di quark e antiquark soggetta alle interazioni forti. Le collisioni fotone-fotone risultano quindi simili alle collisioni tra adroni (per esempio tra protoni in Lhc), con produzione di molte particelle e di getti di particelle di alta energia. Questo comportamento “adronico” del fotone è stato studiato in dettaglio a Hera e negli acceleratori in cui si facevano scontrare elettroni e *positroni* (cioè antielettroni), come per esempio al Lep del Cern.

In alcuni casi però le collisioni tra fotoni sono molto diverse di quelle tra adroni: l'intera energia della collisione infatti può essere convertita in una coppia di particelle. Un esempio è la creazione di coppie muone-antimuone nelle collisioni fotone-fotone osservate a Hera (vd. fig. 1). L'accordo della misura sperimentale con la predizione teorica basata sui processi noti ha mostrato l'assenza di nuovi fenomeni alle energie esplorate. I rivelatori di muoni in Zeus, usati per questa misura, sono stati interamente costruiti e gestiti dall'Infn. Per il futuro esiste un progetto per sfruttare collisioni fotone-fotone generate in un acceleratore lineare per creare grandi quantità di bosoni di Higgs, particelle che fisici di tutto il mondo stanno cercando da anni.



b. Storia del potere risolutivo dei fotoni virtuali usati come sonde nel corso degli anni.

Biografia

Massimo Corradi è ricercatore presso la sezione Infn di Bologna ed è stato coordinatore della fisica dell'esperimento Zeus, di cui è responsabile nazionale. Collabora anche all'esperimento Atlas di Lhc.

Elisabetta Gallo è ricercatrice presso la sezione Infn di Firenze ed è stata responsabile della collaborazione Zeus. Attualmente partecipa all'esperimento Cms di Lhc.

Link sul web

<http://www-zeus.roma1.infn.it/index.html>

<http://www-zeus.desy.de/>

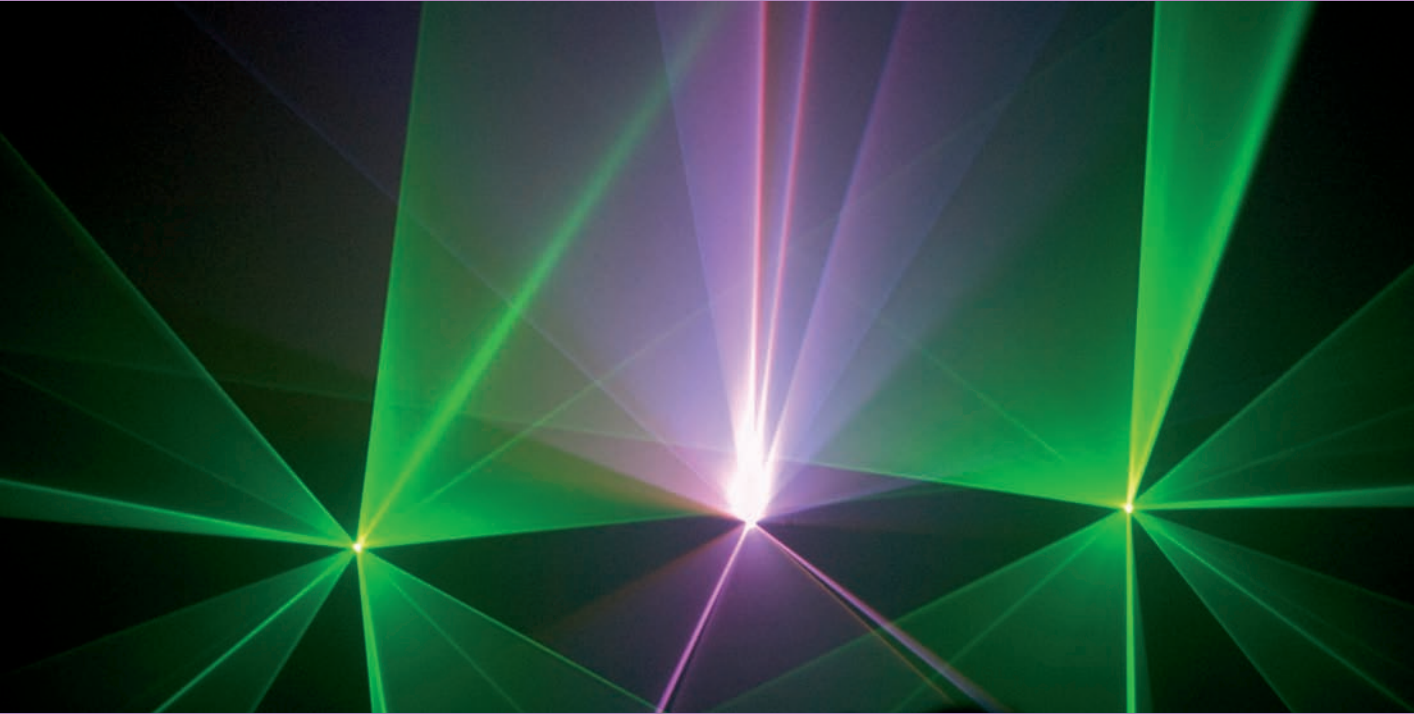
<http://www-h1.desy.de/>

Spettri

Natura non facit saltus?

di Crisostomo Sciacca

a. Raggi da sorgenti laser.



Un arcobaleno, un raggio di sole che si rifrange in un bicchiere di cristallo intagliato e colora la parete, corpi solidi incandescenti (che diventano sempre più “candidi” all’aumentare della temperatura), stelle di tutti i colori: l’esperienza ci porterebbe a concludere che la luce assume infinite tonalità diverse, senza discontinuità. Ma è questa la regola, la luce si manifesta sempre con distribuzioni di colore senza interruzioni, ha uno *spettro continuo*? Non proprio, e se ne accorse nel 1814 Joseph Fraunhofer, scomponendo la luce solare con prismi e reticoli di diffrazione in grado di “sparpagliare” i colori con grande dettaglio: apparve l’usuale arcobaleno, ma interrotto da una miriade di fasce scure, senza apparente regolarità. Per capire il messaggio “scritto” da questa incomprensibile alternanza di colori e di oscurità dovevano passare cento anni di pazienti esperimenti di spettroscopia su gas di tutti i tipi, con strumenti sempre più

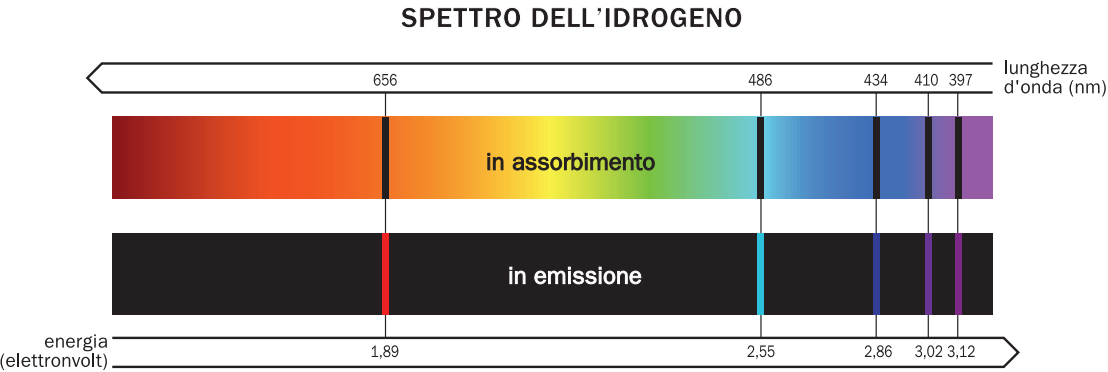
precisi, ma soprattutto si doveva attendere la nascita di un nuovo modo di interpretare la realtà, guardandola con occhio “quantistico”. Serviva prendere sul serio ciò che Max Planck nel 1900 aveva avanzato come ipotesi, e cioè che i corpi emettessero onde elettromagnetiche non già come descritto dalla fisica classica, in modalità continua, ma in quantità discrete, in “quanti”, quelli che circa 25 anni dopo sarebbero stati battezzati “fotoni”, i quanti della luce. E serviva il lavoro di Niels Bohr, che nel 1913 ideò un modello atomico analogo al nostro sistema solare, con il nucleo positivo al centro e gli elettroni negativi orbitanti intorno ad esso, aggiungendo però un’ipotesi coraggiosa e allora arbitraria: solo alcune orbite sono permesse, cioè gli elettroni possono occupare solo un numero discreto di *livelli energetici*, non già avere un’energia di qualunque valore.

Inoltre, per il principio di conservazione dell’energia, se un elettrone “cade” da un’orbita lontana a una più vicina al nucleo (passa cioè da un livello energetico più alto a uno più basso) emette un quanto di luce con frequenza precisa, pari alla differenza di energia tra i due livelli, divisa per quella che è una delle costanti fisiche più importanti nella scienza, la costante di Planck h . Il processo inverso è anche possibile: un quanto con l’energia “giusta”, pari cioè alla differenza di energia tra due livelli, può essere assorbito dall’atomo e porta un elettrone da un livello inferiore a uno superiore. Se poniamo tra noi e una sorgente “bianca” (contenente cioè luce di tutte le lunghezze d’onda) un campione di un certo gas, solo porzioni ben precise dello spettro verranno assorbite, quelle con energie di valore pari ai “salti” energetici, mentre tutti gli altri colori attraverseranno indisturbati il campione. Avremo così una spettroscopia *ad assorbimento*, proprio quella osservata da Fraunhofer nello spettro solare,

solcato da righe oscure tipiche della miscela di gas di cui è composta l’atmosfera solare. Il messaggio da decifrare era, quindi, la composizione chimica del Sole (vd. figg. b e c)! Se invece osserviamo un gas, i cui atomi subiscono transizioni da livelli alti (orbite lontane dal nucleo) a livelli più bassi, si vedranno solo righe di colori diversi su fondo scuro e stiamo facendo una spettroscopia *a emissione* (vd. fig. c). Oltre agli atomi, anche nuclei e particelle possono emettere o assorbire fotoni con energia ben definita (vd. approfondimento p. 23). I sistemi semplici sono gli unici a farlo? Tutt’altro. Siamo circondati da laser monocromatici, nel visibile come nell’infrarosso o nell’ultravioletto, con innumerevoli applicazioni, e led (*light emitting diodes*) di tanti colori si trovano ovunque, dagli indicatori sui pannelli degli apparati elettronici agli schermi televisivi di nuova generazione. *Natura non facit saltus?* Molto, molto spesso, quasi sempre, “salta”!



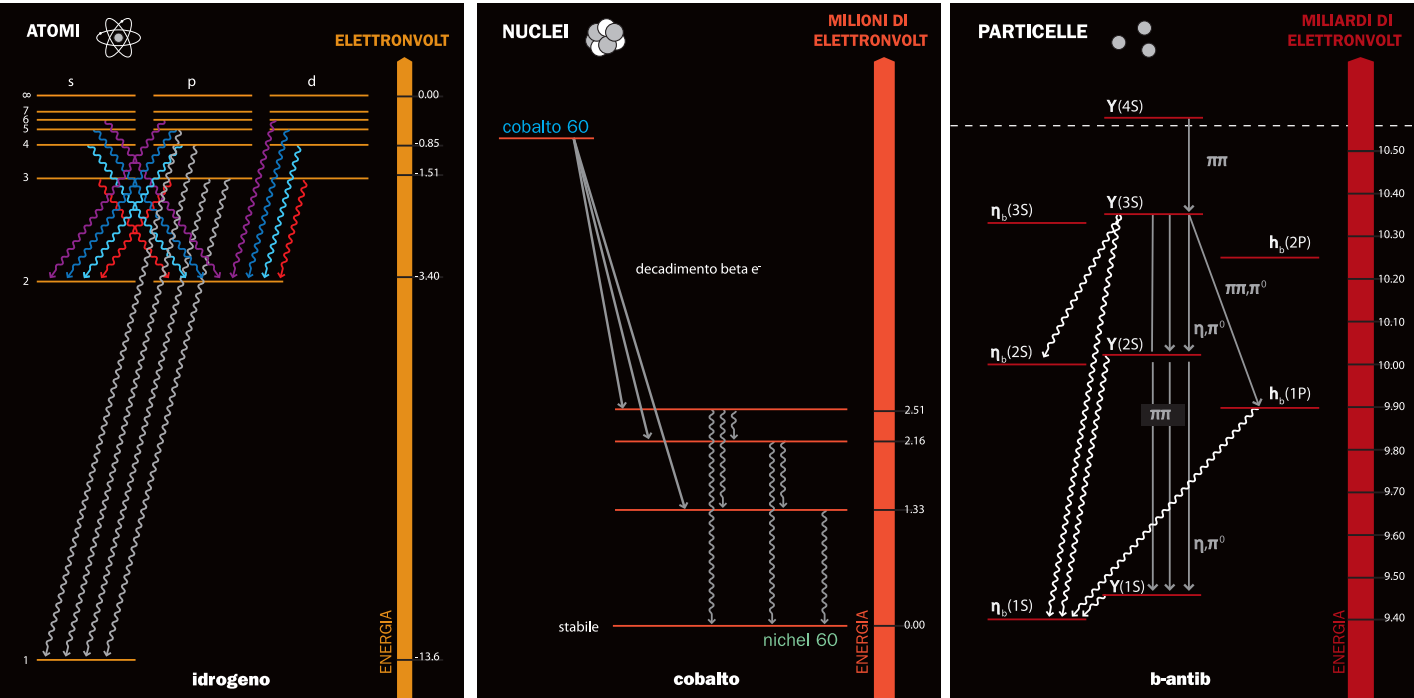
b. Il francobollo commemorativo di Joseph Fraunhofer, con lo spettro di assorbimento del Sole.



c. Spettro dell'idrogeno in assorbimento e in emissione.

Colori quantistici

1. Livelli energetici e transizioni con emissione di fotoni: in fisica atomica (fotoni con energie dell'ordine degli eV, a sinistra), nucleare (milioni di eV, al centro) e delle particelle elementari (fino a miliardi di eV, a destra).



La struttura discreta, “a righe”, dei fotoni emessi si ritrova anche in sistemi elementari diversi dagli atomi, come è raffigurato negli esempi in fig. 1. A sinistra sono rappresentati i livelli energetici consentiti nell’atomo d’idrogeno, secondo il modello di Bohr; le frecce indicano le transizioni possibili, con frequenza tanto più alta quanto più distanti sono i livelli. Ogni elemento chimico ha “righe” di frequenza e intensità caratteristiche, una sorta di inequivocabile “impronta digitale”. In particolare, sono raffigurate le energie permesse per l’elettrone dell’atomo di idrogeno, corrispondenti ai numeri quantici “principali” (1,2,3,...) e “orbitali” (s,p,d,...). Sono indicate alcune transizioni tra livelli a energia superiore e a energia inferiore, con emissione di fotoni di energia pari alla differenza tra i due livelli coinvolti. In colore sono indicati i quattro fotoni del visibile (gli altri sono nell’infrarosso o nell’ultravioletto), appartenenti alla “serie di Balmer” (Balmer era uno spettroscopista della seconda metà dell’800): gli stessi colori li vediamo in fig. c, nello spettro di emissione dell’idrogeno. Ci si può chiedere se questa caratteristica dei fotoni, con valori discreti dell’energia, sia riservato solo al mondo atomico. Non è così, troviamo strutture a livelli energetici anche nella fisica dei nuclei e persino nel mondo delle particelle elementari. I fotoni emessi nelle transizioni all’interno del nucleo, o quando una particella decade in un’altra di massa inferiore, hanno energie ben precise, sempre

pari alla differenza tra quelle degli stati iniziali e finali. Con una importante differenza: se le energie in gioco nelle transizioni tra stati atomici o molecolari sono dell’ordine degli elettronvolt, nei nuclei parliamo di energie anche milioni di volte superiori e addirittura, nel caso delle trasformazioni tra particelle elementari, l’energia dei fotoni può essere anche miliardi di volte superiore. In particolare, l’esempio di “alchimia” nucleare raffigurato al centro di fig. 1 è quello del neutrone appartenente a un nucleo di cobalto 60, che subisce un decadimento beta (cioè si trasforma in protone emettendo un elettrone e un neutrino). Si ha così un nucleo con un protone in più e un neutrone in meno, cioè un nucleo di nichel 60 in uno dei suoi livelli energetici (“stati eccitati”), con successive transizioni al livello fondamentale con emissione di fotoni (diretta o in cascata), di nuovo con energie pari alla differenza tra i livelli interessati. In fig. 1 a destra è raffigurata la famiglia dei mesoni costituiti da una coppia quark-antiquark di tipo “beauty”. Gli stati possibili sono diversi, a seconda dello stato nel quale i due quark sono legati, e a ciascuno corrisponde una particella diversa, con masse differenti. All’interno della famiglia, sono possibili transizioni con emissione di particelle (linee continue) oppure di fotoni (linee ondulate). Anche qui, l’energia emessa nella transizione è data dalla differenza di energia tra gli stati coinvolti.

Biografia
Crisostomo Sciacca insegna all’Università “Federico II” di Napoli e ha svolto attività di ricerca nel campo della fisica delle particelle elementari, in vari esperimenti presso i Laboratori di Frascati, di Stanford e al Cern.

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?

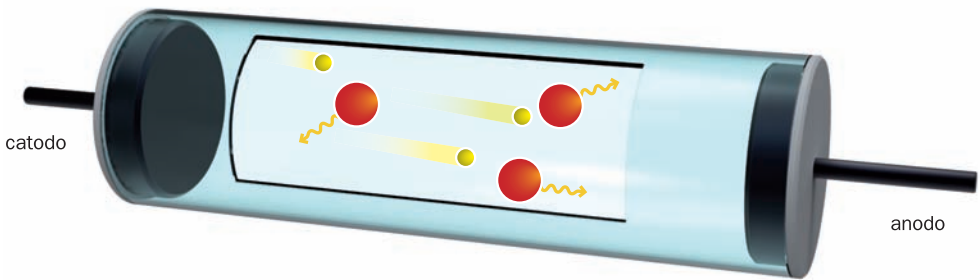
I *laser* (acronimo di *light amplification by stimulated emission of radiation*) sono sorgenti di radiazione elettromagnetica con frequenza che va dai raggi X alle microonde (e in quest'ultimo caso vengono chiamati *maser*, da *microwave*), con caratteristiche particolari di monocromaticità, direzionalità, 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

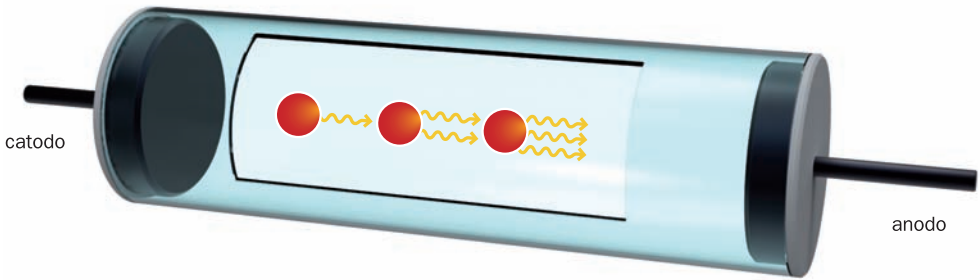
radiazione (cioè fotoni), a una lunghezza d'onda caratteristica. Immaginiamo ora di avere un numero elevato di atomi eccitati. In questo caso può avvenire un nuovo fenomeno, detto di *emissione stimolata*, per cui il fotone emesso dal primo atomo colpisce il secondo e lo stimola a emettere, e così via 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.

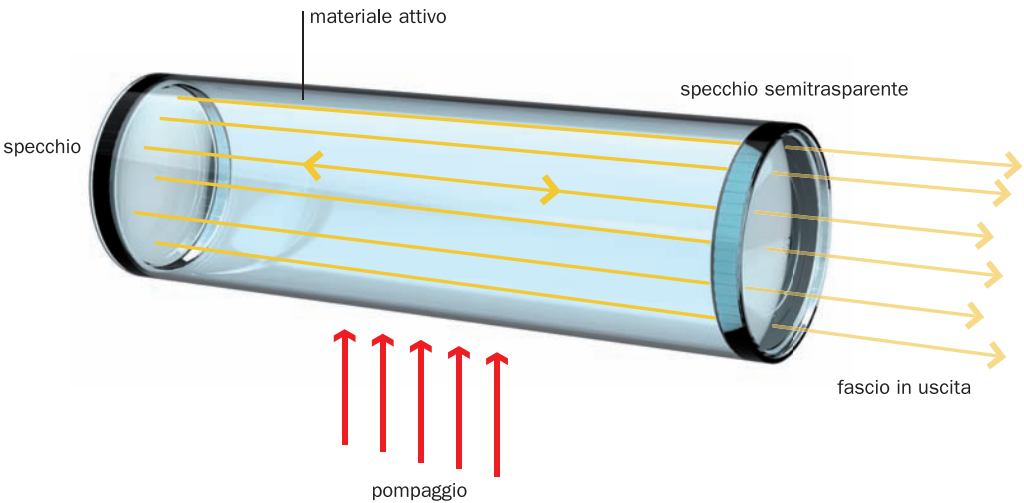
Lo schema generale di un laser è rappresentato in fig. c. Gli atomi eccitati del materiale cosiddetto *attivo* producono l'emissione stimolata. L'eccitazione avviene mediante un meccanismo opportuno (elettrico od ottico), indicato come *pompaggio* nella figura. I due specchi terminali possono essere 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).



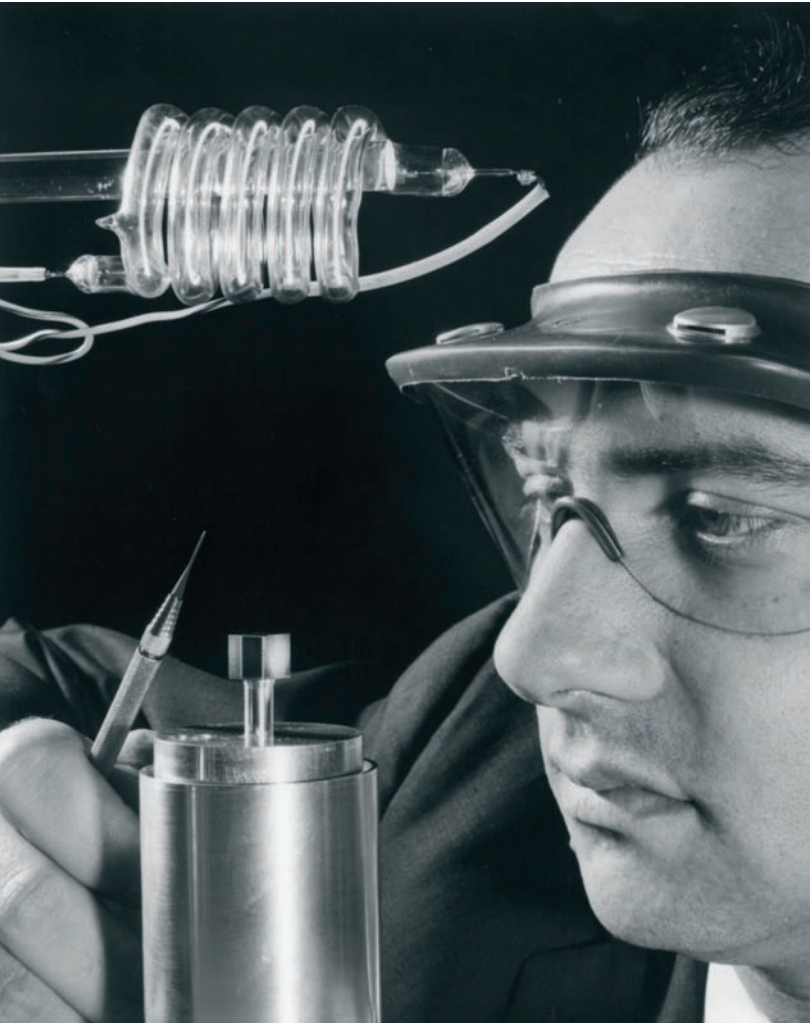
a.
Rappresentazione di una normale lampada a scarica (ad esempio in un tubo al neon), in cui gli elettroni in moto tra catodo e anodo eccitano gli atomi del gas che, ritornando allo stato fondamentale, emettono fotoni in tutte le direzioni.



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.

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>

Elettroni brillanti

Radiazione di sincrotrone nei free electron laser

di Luca Serafini

Che un elettrone sottoposto ad accelerazione fosse in grado di emettere radiazione elettromagnetica era già stato previsto da Larmor alla fine dell'ottocento e poi da Liénard pochi anni più tardi per elettroni in moto relativistico, cioè con velocità prossime a c , la velocità della luce nel vuoto (300.000 km/s). Ma si dovette attendere fino al 1947, perché si verificasse la prima osservazione sperimentale di tale fenomeno grazie allo sviluppo degli acceleratori di particelle. Un operatore del sincrotrone da 70 MeV, l'acceleratore di elettroni costruito nei laboratori della General Electric a New York subito dopo la guerra, osservando dei lampi di luce provenire dall'interno della ciambella (la camera da vuoto), arrivò a pensare che una

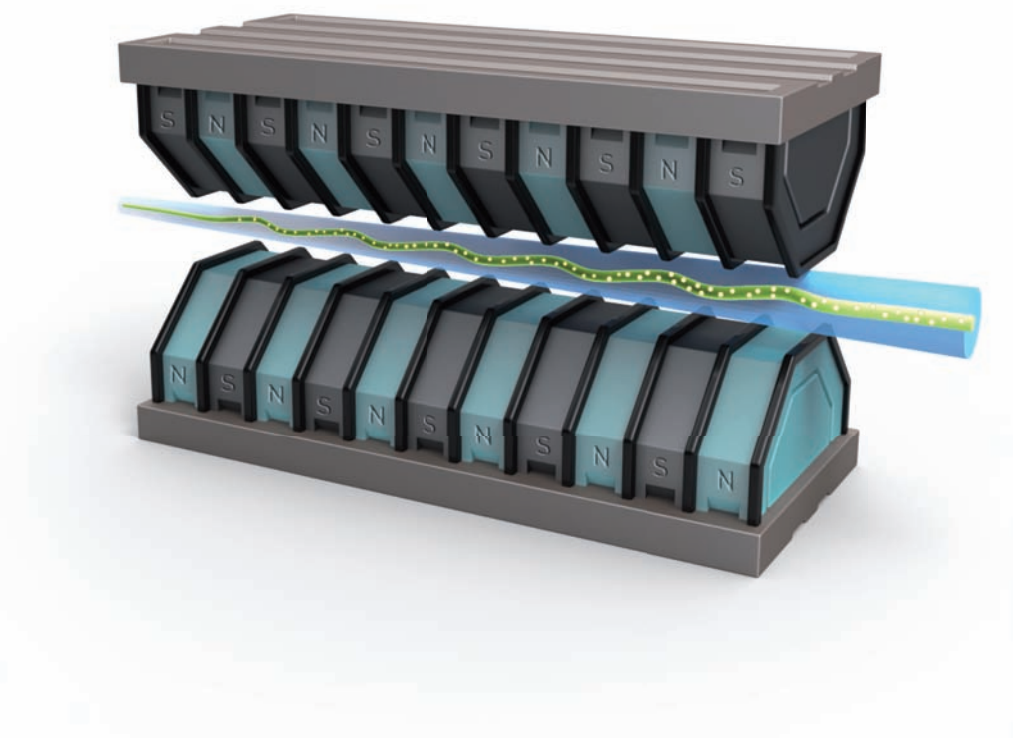
scarica elettrica lo stesse danneggiando e corse a spegnere la macchina. Solo più tardi i fisici del laboratorio si resero conto che quei lampi di luce visibile erano radiazione emessa dagli elettroni, che chiamarono *luce di sincrotrone*. La scoperta fu resa possibile dall'installazione di oblò di vetro nella ciambella metallica, altrimenti opaca alla radiazione di sincrotrone nello spettro visibile. Ciò che accadeva all'elettrone si può capire immaginando che, essendo esso una particella carica, è sempre associato a un campo elettrico e magnetico, prodotti dalla sua carica e dalla corrente che esso genera quando si propaga nello spazio con una certa velocità. Se il moto è uniforme, questo campo elettrico e magnetico resta “agganciato”



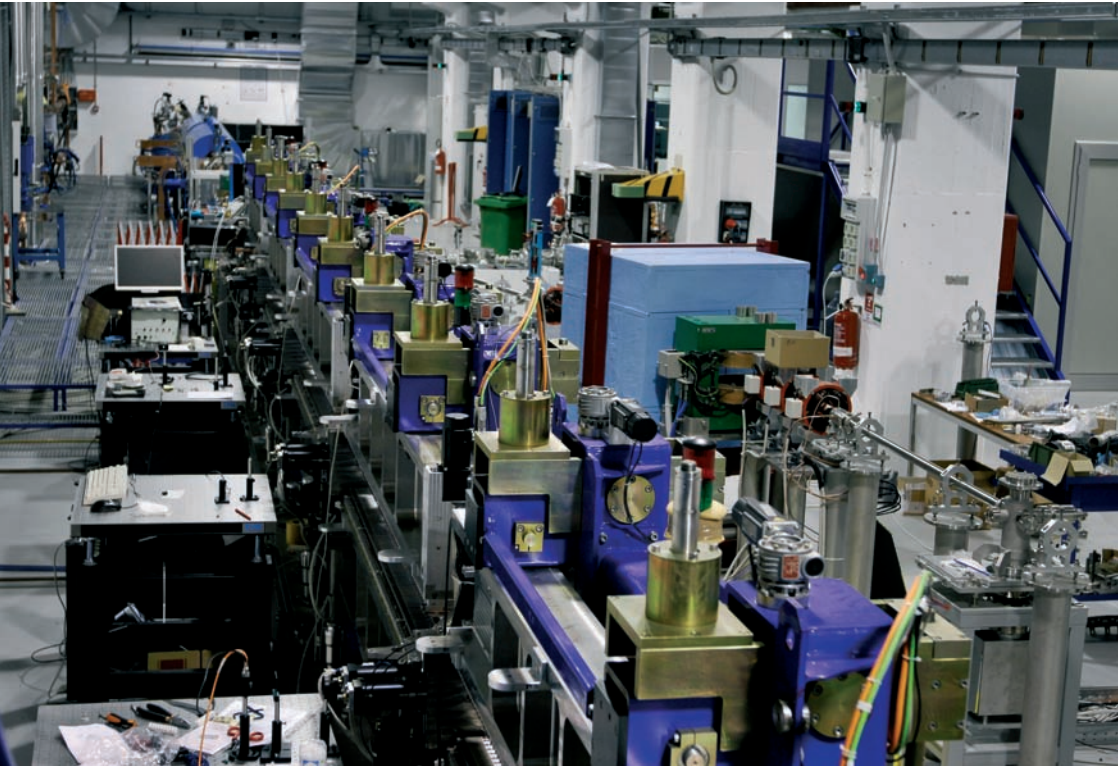
a. Espansioni polari dell'ondulatore magnetico di Sparc nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn (vd.p. 30): il periodo dell'ondulatore (cioè la distanza tra due poli nord successivi, individuabile come la distanza tra due viti contigue) è pari a 2,8 cm.

all'elettrone, come se fosse uno schermo rigido che si estende nello spazio e che si propaga con l'elettrone stesso. Cosa accade quando l'elettrone viene deflesso su una traiettoria curva, ad esempio da campi magnetici imposti dall'esterno mediante magneti, come accade negli acceleratori? Magari insieme a un gran numero di altri elettroni, costituendo così un fascio? Parte di quel campo di velocità si “distacca” dall'elettrone stesso e si propaga autonomamente nello spazio sotto forma di un'onda elettromagnetica (o fotone) che trasporta energia e interagisce con l'ambiente circostante. Quest'onda di luce di sincrotrone può essere rivelata ed essere utilizzata con grande profitto, scientificamente parlando, per realizzare immagini di oggetti microscopici (proteine, macromolecole, virus ecc.) e per studiare la materia solida e le sue proprietà. È questo che avviene di routine nei laboratori di luce di sincrotrone. Tuttavia, l'emissione di luce da parte dell'elettrone in moto curvilineo avviene in modo prolungato durante tutta la traiettoria curva. Per questo motivo la radiazione viene emessa “sparpagliata” lungo tutte le direzioni corrispondenti alle tangenti alla traiettoria, il che impedisce di ottenere un fascio di luce-radiazione ben collimato in un'unica direzione abbastanza definita (per

approfondire vd. “Luce di sincrotrone e sci: una curiosa analogia” in questo articolo su www.asimmetrie.it). Per rimediare a questa limitazione si sono sviluppati i cosiddetti *magneti ondulatori*, formati da una successione di un gran numero di calamite con polarità alternata, in modo che l'elettrone sia costretto a percorrere una traiettoria sinusoidale, una sorta di slalom (vd. fig. b). Le emissioni di radiazione prodotte da ciascun semiperiodo di oscillazione si sommano in fase, producendo dopo centinaia di oscillazioni un fascio di radiazione emesso in un piccolo angolo solido. E la frequenza della radiazione prodotta dall'elettrone nell'ondulatore dipende dalla frequenza di oscillazione della sua traiettoria a una data energia. Ad esempio, un fascio di elettroni che si propaga in un ondulatore magnetostatico di 2 cm di periodo (il doppio della distanza tra un polo sud e il successivo polo nord), all'energia di 150 MeV, produrrà una radiazione di sincrotrone di lunghezza d'onda pari a 0,5 micrometri, che coincide proprio con la frequenza della luce verde. Questo fenomeno risonante è tale che, sotto opportune condizioni di intensità del fascio di elettroni, la radiazione di sincrotrone emessa riesce a forzare gli elettroni del fascio a impacchettarsi sulla scala della lunghezza



b. Schema di emissione di radiazione di sincrotrone da ondulatore. Si noti la traiettoria sinusoidale (lo “slalom”) compiuta dagli elettroni per effetto del campo magnetico alternato e il sottile cono di emissione della radiazione.



c.
L'apparato Sparc, situato all'interno di un bunker sotterraneo (per la schermatura delle radiazioni prodotte) nei Laboratori di Frascati.

d'onda della radiazione stessa. Si ha in tal modo la produzione di radiazione Fel (*Free Electron Laser*), in cui la radiazione di sincrotrone viene emessa dagli elettroni del fascio “all'unisono”, cioè con i pacchetti d'onda dei singoli elettroni in fase gli uni con gli altri. Il fascio di radiazione prodotto si dice coerente ed è analogo a quello di un laser *atomico* (quello descritto a p. 24, ndr). La sua brillantezza, ovvero la sua intensità divisa per l'angolo di emissione, risulta in tal modo altissima, fino a 10 ordini di grandezza superiore a quella della radiazione di sincrotrone convenzionale. Il fenomeno sopra descritto porta infatti a una crescita esponenziale della potenza della radiazione Fel durante la propagazione del fascio di elettroni nell'ondulatore. Questo, insieme al fatto che gli impulsi di radiazione Fel possono essere corti fino a poche decine di femtosecondi (rispetto alle decine di picosecondi della radiazione di sincrotrone), fa sì che si possano condurre esperimenti senza

precedenti di “imaging” di singole molecole organiche, proteine, virus ecc. Lo sforzo italiano in questo settore in grande evoluzione è rappresentato dai progetti Sparc, SparX e Fermi. I primi due sono condotti presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, da parte di una collaborazione tra l'Infn, l'Enea, il Cnr e l'Università di Tor Vergata, mentre il Fel del progetto Fermi è stato messo recentemente in funzione a Trieste dalla Sincrotrone Trieste. Il progetto Sparc ha sviluppato e messo in funzione un acceleratore lineare per produrre fasci di elettroni di altissima brillantezza, necessari per pilotare i Fel (vd. fig. c). Il progetto SparX punta alla messa in funzione presso i Laboratori Infn di Frascati di un Fel basato su un acceleratore lineare di elettroni da 750 MeV, per produrre radiazione Fel fino a lunghezze d'onda di 5 nanometri, che corrispondono a un'energia dei fotoni di circa 250 eV. Mentre le macchine di luce di sincrotrone, inclusi i Fel, studiano la materia a livello atomico, siamo oggi agli

albori dello sviluppo di una nuova generazione di macchine per produrre luce di sincrotrone per la fisica nucleare e subnucleare, le cosiddette macchine per la fotonica nucleare. Tali macchine produrranno fasci di fotoni gamma con energie comprese da 500 keV a 15-20 MeV. Per arrivare a produrre fasci a questa frequenza si sostituirà sostanzialmente l'ondulatore magnetico con un ondulatore elettro-magnetico, rappresentato da un impulso laser di alta energia. I fasci di elettroni con energie comprese tra 500 e 900 MeV, collidendo con impulsi laser dell'energia di alcuni joule e di durata di pochi picosecondi, produrranno appunto fasci gamma ad altissima brillantezza, di grandi potenzialità per la fisica nucleare e per l'ingegneria nucleare. Si aprirà così la porta a nuovi studi e a nuove applicazioni strategiche nel campo del trattamento e screening delle scorie nucleari, del monitoraggio di materiali *fissili* pericolosi (come p.es. l'uranio, il torio ecc.) e della produzione di radio-farmaci di tipo nuovo.

I Free Electron Laser (Fel) nel mondo

1. **UCLA-FEL** - 1st SASE Free Electron Laser
UCLA - University of California
Los Angeles (Stati Uniti)

2. **LCLS** - Linac Coherent Light Source
SLAC National Accelerator Laboratory
Stanford (Stati Uniti)

3. **AFEL** - Advanced Free-Electron Laser
LANL - Los Alamos National Laboratory
Los Alamos (Stati Uniti)

4. **LEUTL** - Low Energy Undulator Test Line
Argonne National Laboratory
Argonne (Stati Uniti)

5. **VISA/HGHH** - Visible to Infrared SASE Amplifier
Brookhaven National Laboratory
Long Island - New York (Stati Uniti)

6. **NLS** - New Light Source
sito da definire (Gran Bretagna)

7. **ARC EN CIEL** - Accelerator Radiation Complex for
Enhanced Coherent Extended Light
sito da definire (Francia)

8. **SwissFel**
Paul Scherrer Institut
Villigen (Svizzera)

9. **FLASH** - Free-Electron LASer Hamburg
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Amburgo (Germania)

10. **XFEL**
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Amburgo (Germania)

11. **MAX-IV**
Max-Lab
Lund (Svezia)

12. **POLFEL** - POLish Free Electron Laser
IPJ/IEA
Swierk (Polonia)

13. **FERMI**
Elettra
Trieste (Italia)

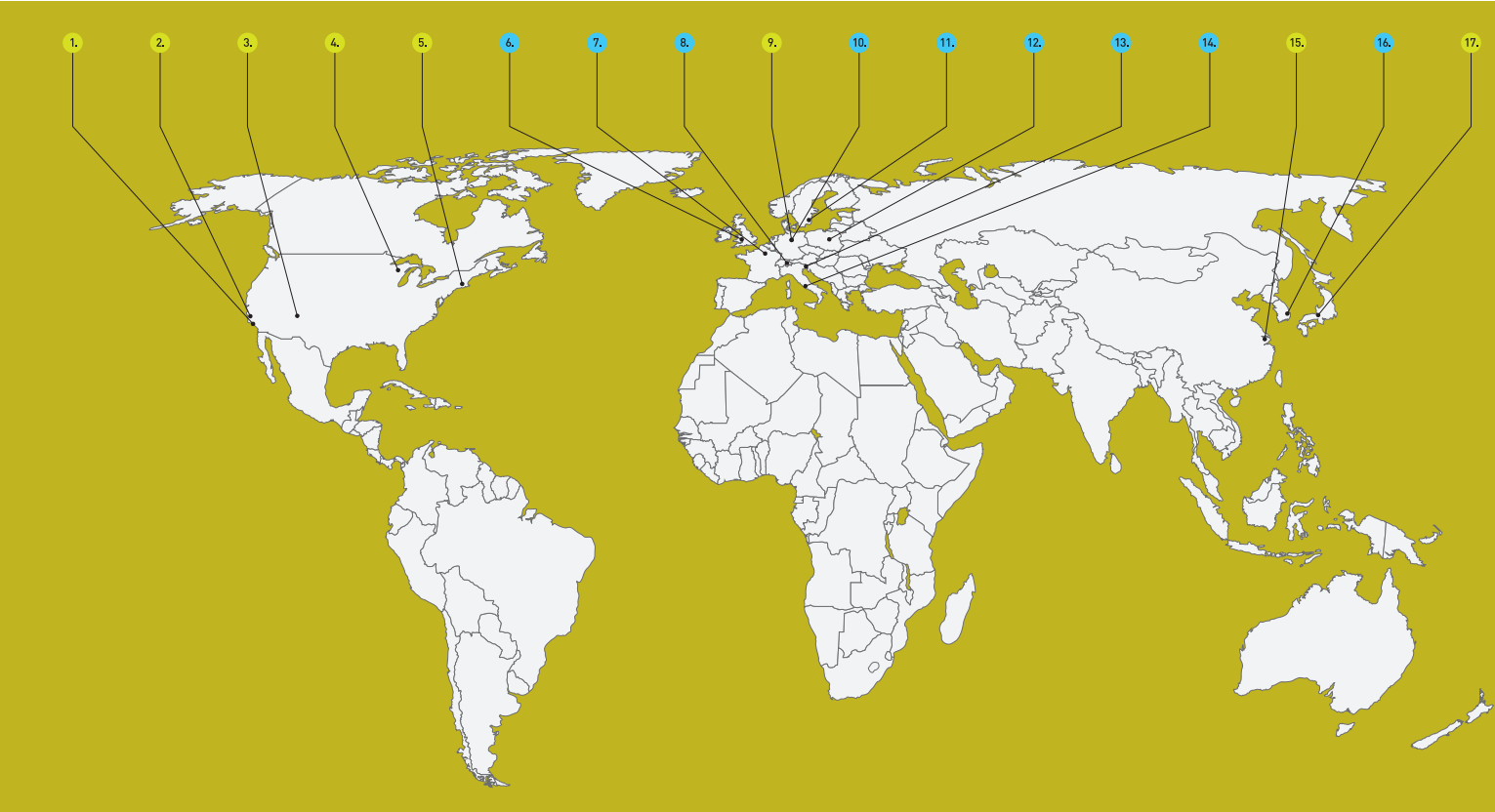
14. **SPARX** - Sorgente Pulsata Autoamplificata di Radiazione X
INFN - Laboratori Nazionali di Frascati
Frascati (Italia)

15. **SDUV** - Shanghai Deep Ultra-Violet FEL
Shanghai Institute of Applied Physics
Shanghai (China)

16. **PAL-XFEL**
Pohang Accelerator Laboratory
Pohang (Corea del Sud)

17. **SCSS** - SPring-8 Compact Sase Source
SPring-8
Hyogo (Giappone)
- Laboratori esistenti

Nuovi progetti



d.
Distribuzione planetaria dei Fel a corta lunghezza d'onda (dall'ultravioletto lontano ai raggi X).

Presso i Laboratori di Frascati è in corso un'attività che fa da precursore a questo nuovo filone di ricerca: il progetto PlasmonX, che prevede la messa in funzione di un laser denominato Flame. Interagendo con il fascio di elettroni prodotto da Sparc, l'esperimento, in corso di realizzazione e previsto in funzione entro la fine del 2011, porterà alla generazione di fasci di raggi X monocromatici fino a 500 keV. Nell'ambito dello stesso apparato sperimentale è già partita la campagna di esperimenti per l'accelerazione a plasma di fasci di elettroni, che permetterà di raggiungere energie di varie centinaia di MeV su pochi millimetri di plasma. Seppure indipendente dal filone della fotonica, questa attività di studio di nuovi metodi di accelerazione è molto sinergica con essa e utilizza tecniche e strumentazione condivise. Essa ha come obiettivo la produzione di fasci di elettroni che potrebbero, a loro volta, avere caratteristiche determinanti per la produzione dei fasci gamma per la fotonica nucleare.

Biografia
Luca Serafini è ricercatore presso la sezione dell'Infn di Milano e responsabile scientifico del progetto Sparc. Oggi è coordinatore della collaborazione Li2Fe (Laboratorio Interdisciplinare e Integrato con Fotoni ed Elettroni).

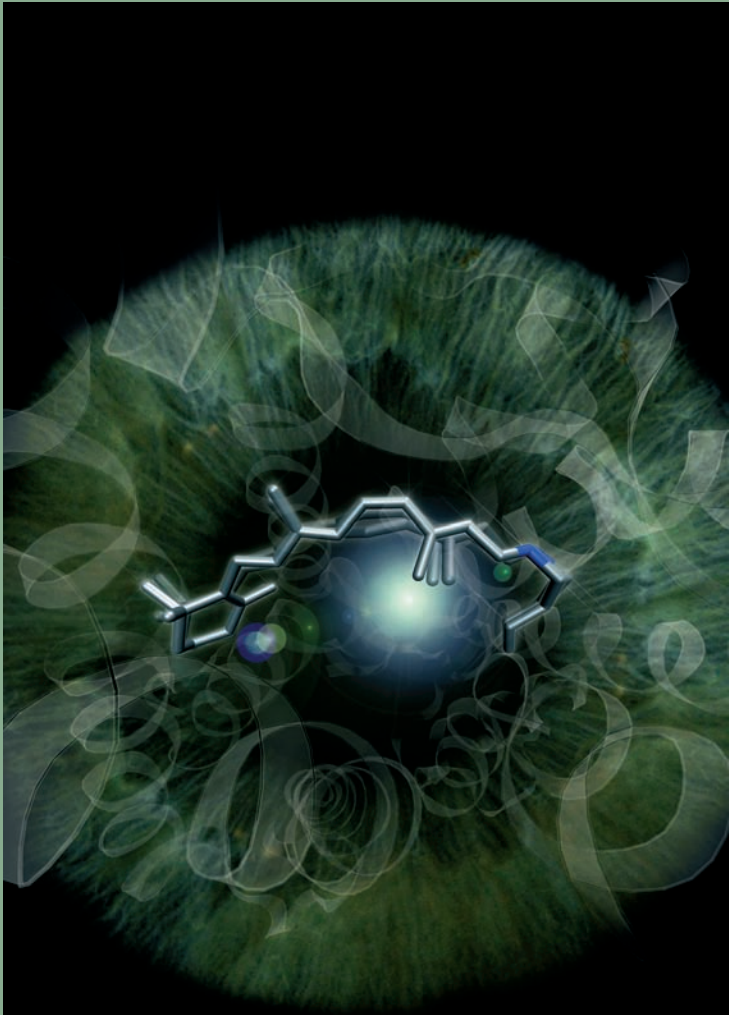
Link sul web
www.Inf.infn.it/acceleratori/life
www.Inf.infn.it/acceleratori/sparc
www.sparx-fel.it, rivista *Asimmetrie* anno 3 numero 6/4.08 pag.40
www.elettra.trieste.it/FERMI

Fermare l'attimo

Il fotone come sonda per esplorare dinamiche ultraveloci

di Sandro De Silvestri

Fin dall'invenzione del flash per la macchina fotografica, impulsi di luce di breve durata sono stati utilizzati per congelare l'evoluzione temporale di eventi molto rapidi. Già nel 1866 il fisico tedesco August Töpler fu in grado di fotografare le variazioni della pressione dell'aria in forma di onde acustiche: utilizzò un primo flash della durata di alcuni microsecondi (un microsecondo è un milionesimo di secondo, cioè 10^{-6} s), per generare un'onda acustica nell'aria, e un secondo flash, ritardato temporalmente e sincronizzato al primo, per fotografare l'onda (il ciclo di oscillazione dell'onda acustica è dell'ordine del millisecondo). Come regola generale, possiamo affermare che per misurare un processo fisico molto veloce è necessario impiegare un'opportuna sorgente, la cui durata temporale sia confrontabile oppure inferiore all'evento stesso. Nel periodo compreso tra gli inizi del 1900 e l'invenzione del laser nel 1960, la durata degli impulsi di luce era diminuita progressivamente raggiungendo la scala temporale del *nanosecondo* (ovvero un milionesimo di secondo, cioè 10^{-9} s). Successivamente all'invenzione del laser, la generazione di impulsi di luce sempre più brevi ha subito una notevolissima accelerazione. Impulsi di durata di alcuni *femtosecondi* (un milionesimo di miliardesimo di secondo, cioè 10^{-15} s) sono ormai comunemente disponibili per lo studio di processi fisici ultraveloci e per numerose applicazioni in vari campi della ricerca e della tecnologia. Parallelamente al rapido progresso ottenuto nella diminuzione della durata degli impulsi, si è assistito negli ultimi dieci anni a un continuo aumento della loro potenza, sino a valori di un milione di miliardi di watt. Tale potenza può essere concentrata in pochi millesimi di millimetro. Gli impulsi laser ultrabrevi hanno drasticamente esteso la nostra capacità di osservare in tempo reale la dinamica di numerosi processi naturali.

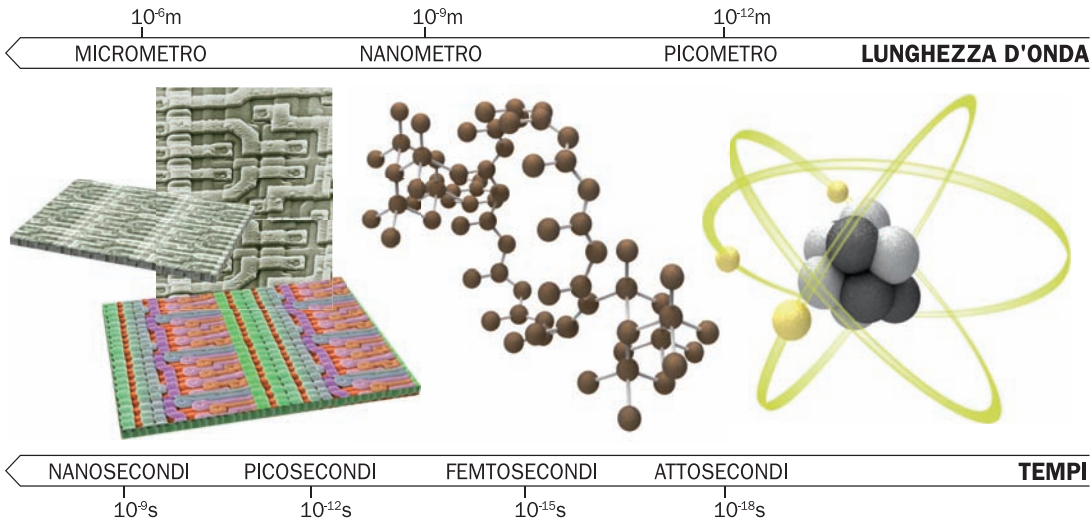


a.
Visione artistica di una molecola di rodopsina (il recettore della retina) all'interno dell'occhio umano, mentre cambia la sua conformazione in 200 femtosecondi a seguito dell'assorbimento della luce, dando origine al processo della visione. Questo è il tempo che impiegano le molecole di rodopsina a generare il segnale mentre leggiamo questa pagina.

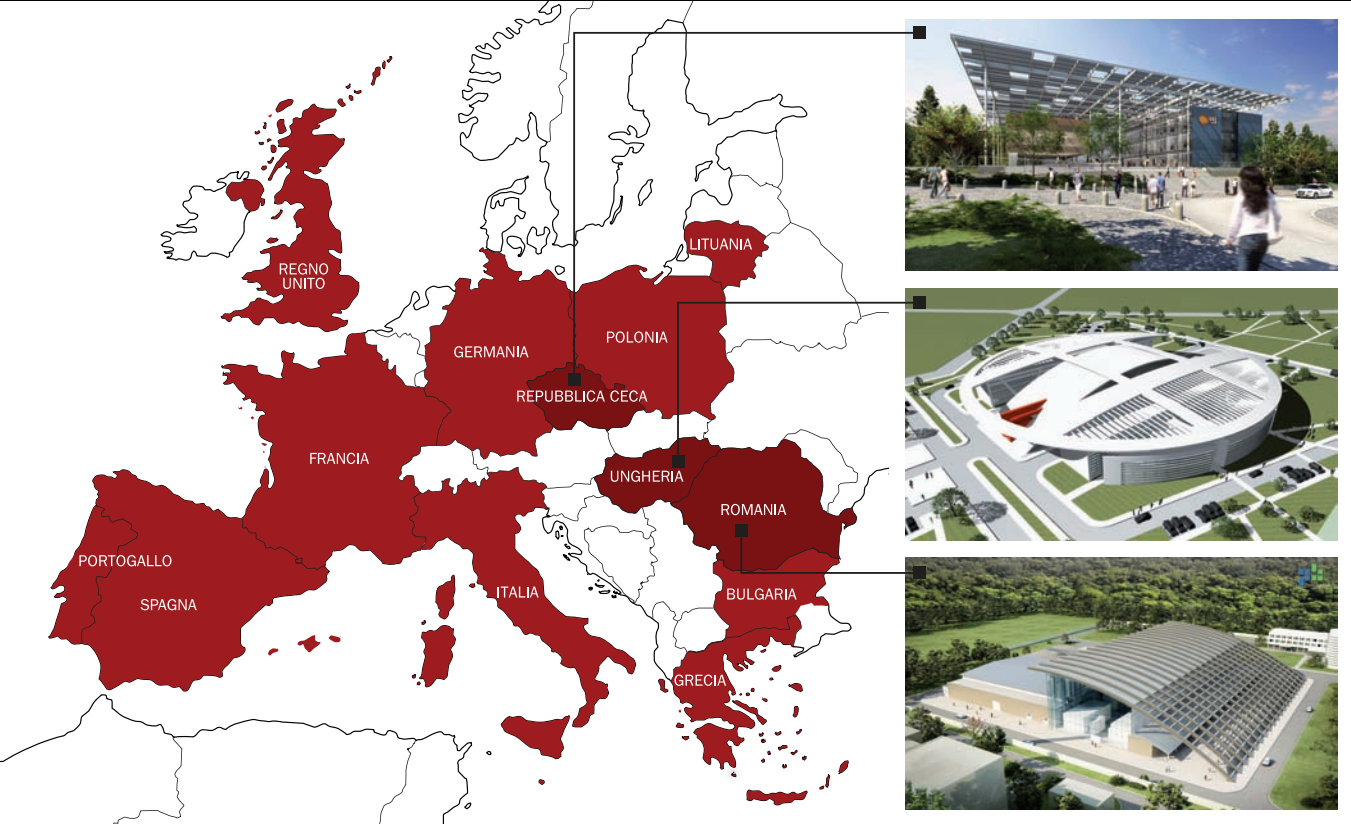
Utilizzando una frazione dell'energia dello stesso impulso laser per innescare l'evento da analizzare, è possibile ottenere una sincronizzazione perfetta, completamente ottica, tra l'innescio del processo e la sua osservazione. Esistono in natura eventi tanto rapidi da richiedere una così elevata risoluzione temporale? La risposta è affermativa per numerosi fenomeni a livello atomico e molecolare. Per leggere questa pagina, ad esempio, i recettori della retina (molecole di rodopsina) ripetono per circa 10 miliardi di volte al secondo una fotoreazione, il cui primo evento si conclude in soli 200 femtosecondi. In molte reazioni chimiche, infatti, i legami atomici si formano o si rompono su una scala temporale dell'ordine di alcune centinaia di femtosecondi (nel 1999 lo studio della dinamica di reazioni chimiche tramite impulsi ultrabrevi è valso il premio Nobel ad Ahmed H. Zewail). Il moto degli elettroni all'interno di atomi o molecole è ancora più rapido. L'unità atomica del tempo corrisponde all'intervallo di tempo impiegato da un elettrone per descrivere un angolo di un radiante durante il suo moto nello stato fondamentale dell'atomo di idrogeno e ha un valore di circa 24 attosecondi (un attosecondo è pari a 10^{-18} s, corrispondente a un milionesimo di miliardesimo di secondo). Potremmo quindi

affermare che la scienza degli impulsi ad attosecondi studia essenzialmente il moto degli elettroni su scale atomiche. Per cogliere intuitivamente il significato dei diciotto ordini di grandezza che separano l'attosecondo dal secondo, può essere utile considerare che un attosecondo sta a un secondo come questo sta all'incirca all'età dell'universo. Il limite ultimo alla durata di un impulso laser è pari a una oscillazione completa del corrispondente campo elettrico. Nella regione spettrale del visibile (400-700 nanometri), per esempio, tale oscillazione si compie in circa due femtosecondi. Per superare la barriera del femtosecondo, quindi, occorre generare impulsi nella regione spettrale dell'ultravioletto estremo o dei raggi X (chiamata *XUV*), dove l'oscillazione del campo elettrico è più rapida, ovvero dell'ordine degli attosecondi. La tecnica che viene utilizzata per la produzione di impulsi nella regione spettrale del XUV è denominata "generazione di armoniche di ordine elevato" e si basa sulla radiazione emessa dagli atomi di un gas, investiti da impulsi laser brevi e intensi. Grazie agli impulsi ad attosecondi si potrà seguire in tempo reale il moto degli elettroni durante una reazione chimica o lo spostamento degli elettroni nelle trasformazioni di molecole: si tratta di studi di notevole interesse chimico-biologico.

b.
Impulsi laser per lo studio di processi in fisica della materia: dal trasporto degli elettroni nei dispositivi elettronici (scala di tempo dei nanosecondi) al moto degli elettroni negli atomi (scala di tempo degli attosecondi).



Luce all'estremo



Si chiama Eli (Extreme Light Infrastructure) l'infrastruttura di ricerca europea che prevede la costruzione di laser ultra-intensi, con una potenza di vari ordini di grandezza superiore a quelle ottenibili attualmente. La potenza del laser di Eli, infatti, è prevista arrivare a 200 petawatt (circa 100.000 volte la potenza di tutte le centrali elettriche esistenti al mondo), per generare impulsi ultracorti (fino ad arrivare ai femto- o agli attosecondi). Ciò permette lo studio dell'interazione laser-materia in un regime (quello delle *alte intensità*) ancora mai raggiunto. Oltre a permettere questo tipo di studi, Eli consentirà di fare ricerca in molti altri ambiti, come nello sviluppo di nuove tecnologie per acceleratori compatti di particelle e per produrre radiazione intensa nella regione dei raggi gamma, utili alla fisica nucleare. Queste ricerche avranno numerose applicazioni nella medicina e per l'ambiente, e in altre discipline come l'astrofisica o la biologia. Nel dicembre 2010 si è conclusa la fase di preparazione di Eli, che è stata finanziata dalla Comunità Europea sin dal 2007. Durante questa fase, alla quale per l'Italia partecipavano l'Infn e il Cnr, sono state prese decisioni fondamentali, come la definizione della tecnologia del laser, la struttura di governo dell'infrastruttura, il suo finanziamento e la strategia di comunicazione. Eli verrà

costruita in tre Paesi, in ciascuno dei quali si affronterà un ambito di ricerca differente: nella Repubblica Ceca (nei pressi di Praga) l'accelerazione delle particelle, in particolare per la generazione di fasci di particelle accelerati tramite laser, in Romania (a Margurele) la produzione di raggi gamma e in Ungheria (a Szeged) la produzione di impulsi ultrabrevi dell'ordine degli attosecondi. Il quarto sito, dedicato alla fisica delle alte intensità, verrà deciso nel 2012. L'Infn, il Cnr e le università italiane saranno coinvolti in Eli sia nell'ambito della formazione di personale qualificato di ricerca sia nell'ambito della progettazione e realizzazione di strumentazione per l'implementazione delle infrastrutture.

Biografia

Patrizio Antici è ricercatore presso i Laboratori di Frascati dell'Infn. Conduce ricerca nel campo di nuove tecnologie di accelerazione tramite laser-plasmi e relative applicazioni, come nell'astrofisica di laboratorio. Durante la fase di preparazione di Eli ha ricoperto gli incarichi di coordinatore europeo della comunicazione e del finanziamento.

Link sul web

www.rp-photonics.com/ultrashort_pulses.html
www.extreme-light-infrastructure.eu/
<http://www.eli-beams.eu/>
<http://www.eli-hu.hu/>
<http://www.eli-np.ro/>

Biografia

Sandro De Silvestri è professore di Fisica Sperimentale al Politecnico di Milano. Direttore del Center for Ultrafast Science and Biomedical Optics (Cusbo), presso il Dipartimento di Fisica, e associato all'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (Ifn) del Cnr. Conduce ricerche nel campo della generazione di impulsi laser ultrabrevi e relative applicazioni in fisica della materia.

1.
L'infrastruttura europea Eli verrà costruita in tre Paesi, in ciascuno dei quali si affronterà un ambito di ricerca differente: nella Repubblica Ceca (nei pressi di Praga), in Romania (a Margurele) e in Ungheria (a Szeged). A destra i piani architettonici dei rispettivi laboratori.

Analizzare senza distruggere

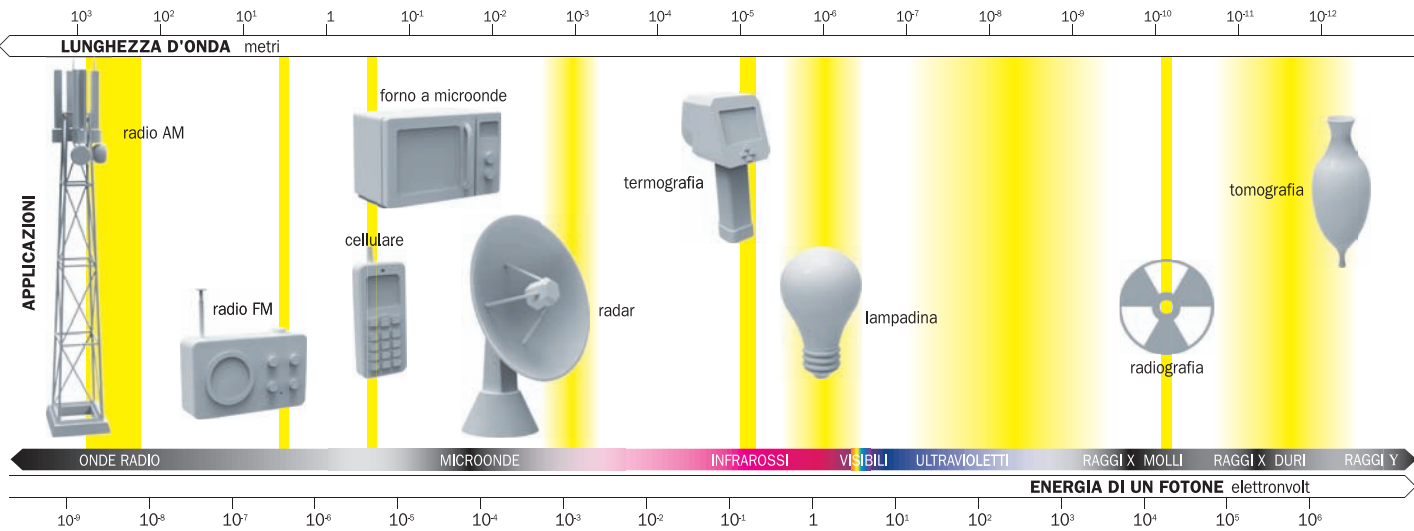
Fotoni al servizio dei beni culturali

di Francesca Rizzo

Che i fotoni siano indispensabili per la nostra vita quotidiana, è un dato di fatto: senza di loro non avremmo la radio (che utilizza fotoni di lunghezza d'onda molto ampia, vd. fig. a), né la televisione, né le antenne radar che permettono di localizzare, ad esempio, un aereo (fotoni della zona delle microonde). Senza parlare poi della luce che ci circonda (ovvero i fotoni nel visibile), grazie ai quali non ci troviamo al buio! Ma in pochi sanno che i fotoni di lunghezze d'onda molto piccole, quelli che corrispondono alla radiazione elettromagnetica dei raggi X o raggi gamma, sono utilissimi per analizzare reperti archeologici e artistici, oltre che in medicina (vd. approfondimento p. 38).

Reperti archeologici e artistici hanno un enorme valore per l'umanità e, quindi, quando si analizzano, bisogna preservarli integri. Ci sono varie tecniche di analisi "non distruttiva", sviluppate anche nell'ambito dell'Infn, in particolare presso i Laboratori del Sud (Lns) di Catania e presso il Laboratorio di Tecniche Nucleari per i Beni Culturali (Labec) di Firenze. Prima fra tutte, la tecnica Xrf (X Ray Fluorescence) è in grado di svelare gli elementi chimici presenti in un reperto. Questa è un'informazione che può essere di estremo interesse per gli studiosi di arte e archeologia e per i restauratori. Inoltre, la Xrf è una tecnica che può essere utilizzata *in situ*, il che è di

a.
Lo spettro elettromagnetico. A ciascuna lunghezza d'onda corrisponde un'applicazione nella vita quotidiana.

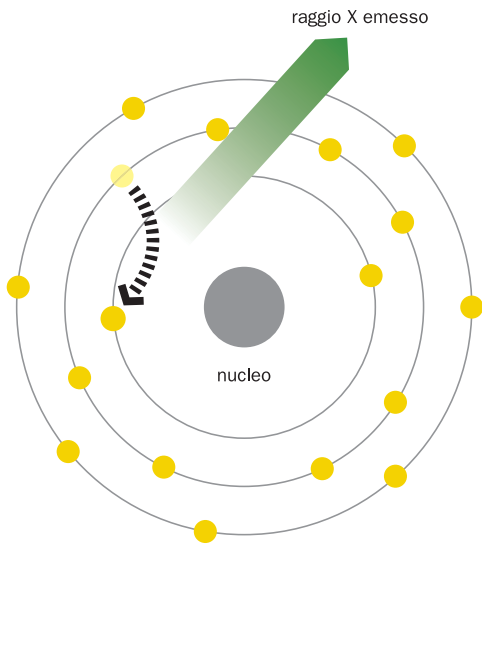
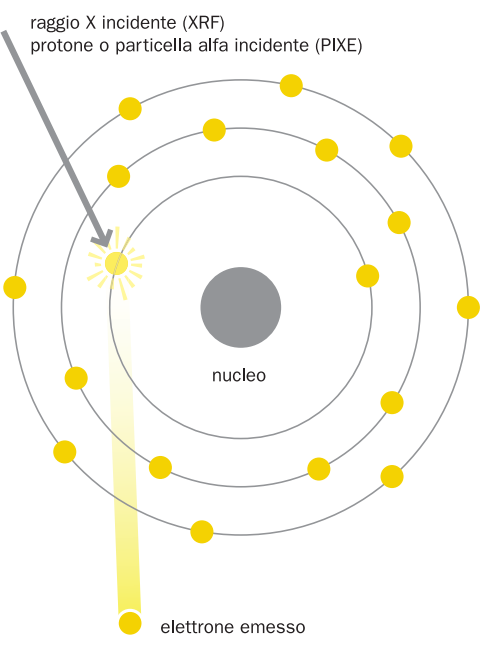


particolare importanza se i campioni da analizzare non sono trasferibili presso i laboratori, come accade, ad esempio, per gli affreschi e le opere d'arte di particolare pregio custodite nei musei. La tecnica Xrf consiste nell'utilizzare un fascio di raggi X, prodotto da un tubo radiogeno o da una sorgente radioattiva, che incide sul campione da analizzare. Quando l'energia dei raggi X incidenti su un atomo è maggiore dell'energia di legame degli elettroni atomici, può avvenire l'espulsione di uno degli elettroni interni che circondano il nucleo, producendo così un "buco" nell'orbitale e lasciando l'atomo in una condizione energetica instabile (vd. fig. b). Il suo ritorno all'equilibrio avviene, quando un elettrone di un orbitale esterno va a riempire il buco prodotto, un processo che è accompagnato, tra l'altro, dall'emissione di uno o di più *raggi X di fluorescenza*, la cui energia è tipica dell'elemento chimico in esame. La rivelazione dei raggi X grazie ad appositi sensori produrrà uno spettro, in cui la posizione energetica dei picchi può essere considerata come una "impronta digitale" degli elementi chimici presenti nel campione. Un analogo meccanismo lo si ha anche se a incidere è una particella carica, come

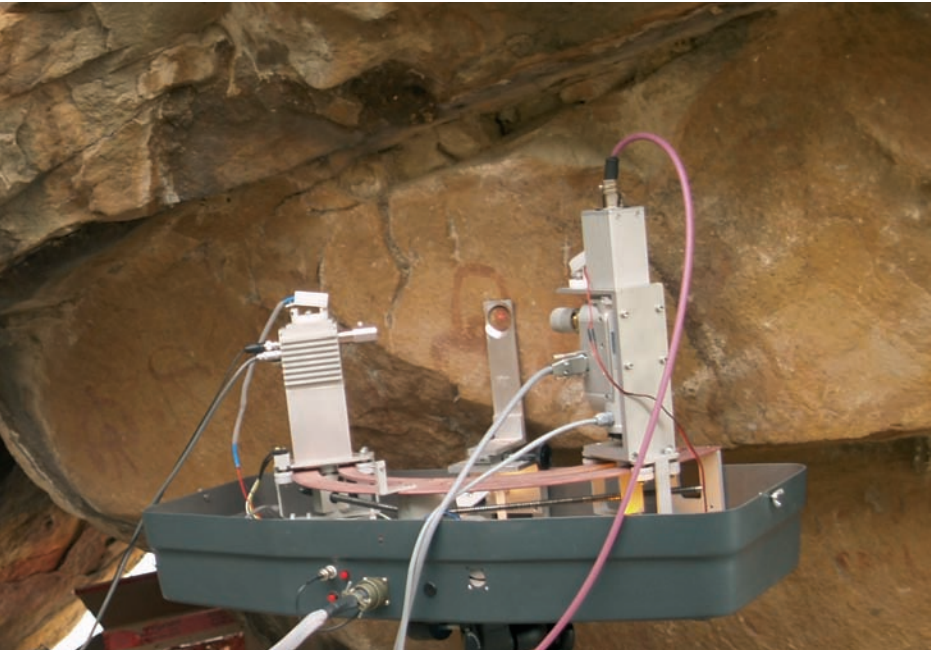
un protone o una particella alfa (come avviene nella tecnica Particle Induced X ray Emission, abbreviata Pixe). Gli elementi chimici rivelabili con queste tecniche di emissione di raggi X di fluorescenza vanno da elementi leggeri, nel caso della Pixe, ai più pesanti, nel caso della Xrf, e in concentrazioni che variano dal 100% a qualche parte per milione. In alcuni casi è necessario effettuare misure su differenti zone di piccole dimensioni del campione in esame (ovvero una *mappatura*) oppure su un campione di dimensioni molto piccole. Gli spettrometri da utilizzare in questo caso sono il Micro-Xrf e/o il Micro-Pixe. Quest'ultima tecnica viene utilizzata prevalentemente presso il Labec. Tali strumenti permettono di inviare un fascio di dimensioni estremamente piccole, fino a pochi micron di diametro. Con il Micro-Xrf sono stati analizzati, ad esempio, gli inchiostri neri e rossi della *Chartula* di Assisi, unico documento autografo attribuito a San Francesco, custodita nella Sala delle Reliquie del Sacro Convento di Assisi. Il risultato dell'analisi ha messo in evidenza che i principali componenti degli inchiostri sono di tipo inorganico (ferro e mercurio, rispettivamente, per l'inchiostro

nero e rosso) e non organico (più deperibile) e questa informazione, oltre a permettere una più mirata azione di restauro, ci rassicura sulla possibilità di osservare le scritture ancora per molti secoli a venire. È a Catania al Landis (Laboratorio di Analisi Non Distruttiva In Situ) dei Lns dell'Infn che sono stati costruiti e/o messi a punto strumenti portatili, sia per la Xrf (il Bsc-Xrf ovvero un Xrf con controllo della stabilità del fascio di raggi X) che, sin dal 1996, per la Pixe (il cosiddetto Pixe- α), dove l'emissione di fluorescenza viene indotta da particelle α emesse da una sorgente radioattiva di polonio. A volte questi spettrometri vengono usati anche insieme, come è accaduto nel 2003 durante la campagna di misure effettuata su 12 sculture appartenenti alla ricca collezione conservata nel Museo del Bargello a Firenze. In particolare è stata effettuata l'analisi dei pigmenti blu delle ceramiche come, ad esempio, nella "Madonna che adora il Bambino" di Luca Della Robbia (1470) (vd fig. c). In questa e in numerose altre opere dello stesso periodo, l'analisi ha evidenziato l'assenza di arsenico come elemento *in traccia* (ovvero con una presenza percentuale dell'elemento

minore del 1%); l'arsenico è invece presente nei pigmenti blu usati dopo il 1520. Questa informazione può quindi essere usata per datare opere, di cui è ignoto il periodo di esecuzione. Nel 2007 le due tecniche Pixe- α e Xrf sono state raggruppate in un unico strumento di nome Xpixe, sempre ideato e realizzato dai ricercatori del Landis. Lo strumento Xpixe permette una misura simultanea di elementi leggeri e pesanti su campioni estesi e omogenei, come vetri, ossidiane ecc. Infine, va citata un'ultima tecnica, che utilizza i fotoni per analizzare reperti archeologici e artistici, la Xrd (X Ray Diffraction). Tale tecnica si basa sulla diffrazione di raggi X da parte degli atomi disposti regolarmente lungo i piani reticolari della sostanza cristallina in esame (affresco, smalto ecc.). L'osservazione dell'interferenza costruttiva dei raggi X diffusi a un certo angolo di osservazione (laddove è posto il rivelatore) permette di determinare la composizione mineralogica del campione. Se, ad esempio, la Pixe- α è in grado di dire quali elementi chimici compongono un affresco (alluminio, silicio, calcio, ferro, zolfo, mercurio), la Xrd stabilisce in che composizione mineralogica sono combinati (ematite, argilla, cinabro, calcite ecc.). Un'applicazione della strumentazione Xrd, anch'essa portatile (pesa ca. 30 kg), può essere vista in fig. d durante l'analisi dei pigmenti utilizzati per le pitture rupestri di epoca preistorica presso il Rifugio Cassataro (Centuripe, provincia di Enna). Le misure hanno consentito di determinare l'utilizzo di ocra per la realizzazione del pigmento. Attualmente sono in corso analisi sui materiali presenti nei suoli residui limitrofi al Rifugio, per sapere se l'ocra ha un'origine locale e stabilire quindi, di contro, se fin dalla preistoria esistevano importanti flussi di migrazione. Grazie a conoscenze sempre più approfondite delle proprietà dei fotoni è dunque possibile conoscere meglio il nostro patrimonio artistico e culturale e preservarlo così per lungo tempo.



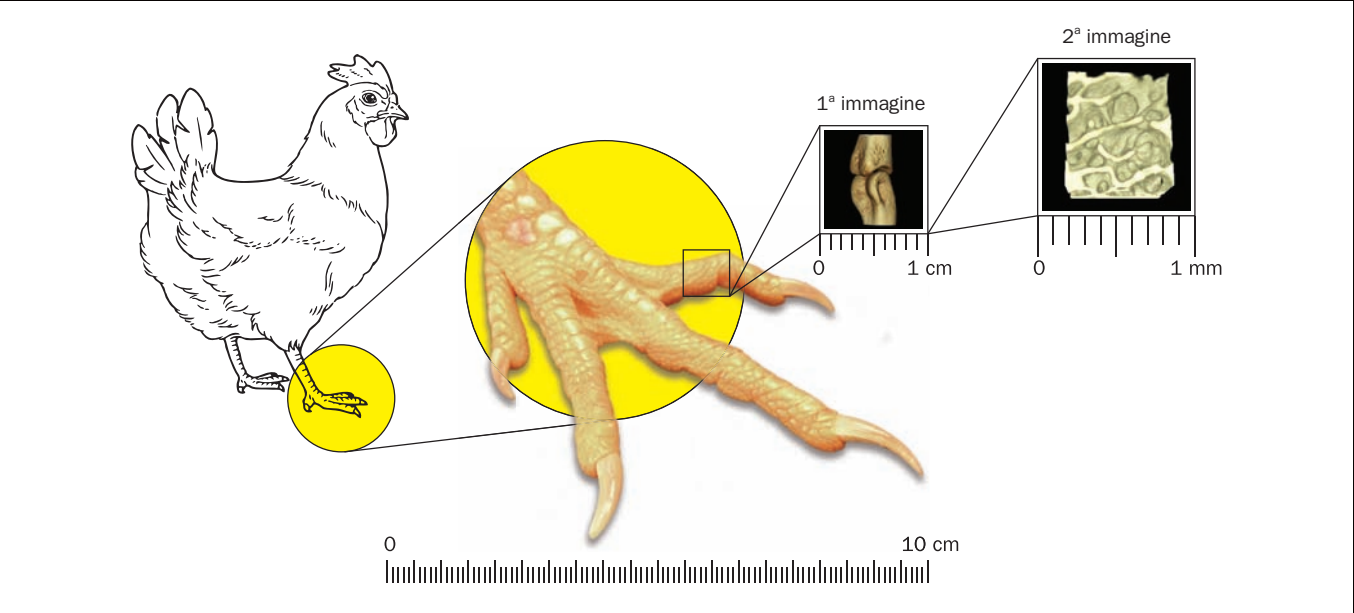
b. Schematizzazione del processo di emissione di raggi X indotta da particelle cariche incidenti (protoni o particelle α), nel caso della tecnica Pixe, o da raggi X incidenti, nel caso della tecnica Xrf. A sinistra è visibile come uno degli elettroni interni che circondano il nucleo viene emesso e produce un "buco" nell'orbitale. A destra, un elettrone di un orbitale esterno va a riempire il buco prodotto e viene emesso uno o più raggi X di fluorescenza (freccia verde), la cui energia è tipica dell'elemento chimico in esame.



c. Analisi dei pigmenti blu presenti nella ceramica della "Madonna che adora il Bambino" (Luca Della Robbia, 1470, Museo del Bargello, Firenze) tramite gli spettrometri Pixe- α e Xrf.

d. Il Rifugio Cassataro a Centuripe, in provincia di Enna, dove pitture rupestri di epoca preistorica (che si intravedono dietro allo strumento) sono state analizzate *in situ* mediante la strumentazione Xrd. L'analisi ha evidenziato l'utilizzo di ocra per la realizzazione del pigmento.

Raggi X per la salute



Se giocando a calcio malauguratamente ci si fa male a un piede, il medico in genere prescrive una *radiografia*. Alla base di questa e di molte altre tecniche diagnostiche ci sono i fotoni della lunghezza d'onda dei raggi X. L'apparato che viene utilizzato nelle radiografie, infatti, si basa su una sorgente di raggi X, un cosiddetto *tubo radiogeno*, contrapposto a un rivelatore di radiazione. Il paziente viene posizionato tra questi due strumenti. L'immagine radiografica si forma a causa delle diverse attenuazioni che i raggi X subiscono nell'attraversare il corpo del paziente in esame e permette di ottenere dettagliate informazioni *morfologiche*, ovvero sulla forma e la struttura interna. Le diverse capacità di assorbimento delle strutture interne dipendono dall'energia dei raggi X incidenti e dalla composizione chimica delle strutture stesse: in generale, per esempio, un osso attenua maggiormente rispetto a un tessuto muscolare. Conoscendo le proprietà di attenuazione dei tessuti di cui siamo interessati ad avere informazioni, si può ottimizzare l'energia dei raggi X: per esempio, negli esami radiografici si usano energie più basse per avere un'immagine dei tessuti molli (muscolo, ghiandole, tessuto adiposo) e più alte per i tessuti ossei. La ricerca dell'energia ottimale per una data analisi ha portato all'utilizzo di sorgenti di luce di sincrotrone, in grado di fornire raggi X di una sola energia: questi fasci monocromatici permettono di ottenere immagini più nitide e di limitare la dose di radiazione somministrata durante l'analisi. Attualmente i ricercatori stanno lavorando allo sviluppo e l'ottimizzazione di nuove sorgenti monocromatiche compatte in progetti dell'Infn come Sparc e Beats (vd. p. 28, ndr). Anche nel caso del rivelatore di raggi X si sono avuti notevoli progressi: si è passati dalla lastra fotografica, che viene utilizzata ancora oggi, a rivelatori in grado di fornire immagini digitali. La possibilità di avere l'immagine in forma digitale permette l'utilizzo di algoritmi per la rivelazione automatica di dettagli di interesse clinico: questi sistemi chiamati Cad (Computer Aided Detection)

1. Nella 1ª immagine è mostrato il risultato di una Tac eseguita su un'articolazione di un dettaglio di una zampa di pollo. L'immagine tomografica permette di visualizzare anche volumi posti all'interno dell'osso, come ad es. il particolare mostrato nella 2ª immagine, composto da una rete di trabecole ossee il cui spessore medio è compreso tra 50 e 100 micrometri.

affiancano i radiologi, ad esempio, nella lettura delle *mammografie* (la radiografia del seno delle donne) per la ricerca di lesioni e microcalcificazioni. Il limite della radiografia sta nel fatto che l'immagine che si ottiene è una proiezione bidimensionale della reale struttura tridimensionale e che quindi l'attenuazione è la somma delle attenuazioni di tutti i tessuti attraversati, con la possibilità di avere delle informazioni incomplete, dovute a mascheramenti prodotti da tessuti più assorbenti. Per visualizzare la reale struttura tridimensionale bisogna ricorrere a un'altra tecnica diagnostica, la *Tomografia Assiale Computerizzata* (Tac). In questa tecnica il tubo radiogeno e il rivelatore ruotano attorno al corpo del paziente, acquisendo successive proiezioni bidimensionali, che verranno poi elaborate da un computer attraverso opportuni algoritmi di ricostruzione. Le immagini tridimensionali così ottenute permettono un'analisi più dettagliata delle strutture sotto esame (vd. fig. 1). Anche in questo caso sono stati sviluppati dei Cad, come quelli che vengono applicati in vari esperimenti dell'Infn per la ricerca precoce di lesioni tumorali negli studi di screening di un tumore polmonare o cerebrale.

Biografia

Valeria Rosso è professore all'Università degli Studi di Pisa e si occupa di fisica applicata alla medicina. Ha lavorato allo sviluppo di sistemi di rivelazione per l'imaging mammografico digitale e attualmente partecipa alla realizzazione di un sistema di rivelazione per il monitoraggio del trattamento in adroterapia.

Link sul web

http://www.elettra.trieste.it/visitors/it-vtour_p05.html

Biografia

Francesca Rizzo è professore di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università di Catania e responsabile del Landis (Laboratorio di Analisi Non Distruttiva In Situ) dei Laboratori del Sud dell'Infn. Incaricata di ricerca per l'Infn, svolge la sua attività nel campo della fisica nucleare applicata ai beni culturali e nell'ambito della fisica nucleare fondamentale (esperimento Exochim).

Link sul web

<http://www.lns.infn.it>
<http://labec.fi.infn.it/>

Luce dal silicio

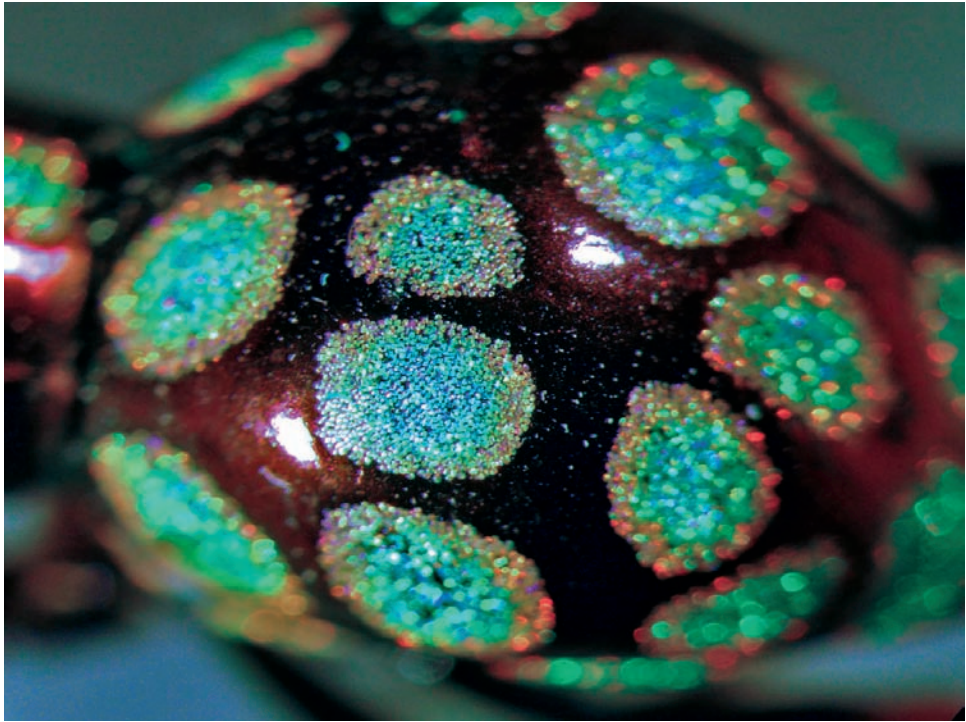
Le frontiere della microelettronica

di Francesco Priolo



Il silicio è tra gli elementi più comuni sulla terra, lo troviamo abbondantemente nella sabbia, nei vetri e nelle rocce. Eppure, proprio il silicio, con una rivoluzione scientifica e tecnologica iniziata con la scoperta del *transistor bipolare* da parte di J. Bardeen, W. Brattain e W. Shockley (premi Nobel per la fisica nel 1956), ha profondamente modificato la nostra vita di tutti i giorni con l'avvento della microelettronica di massa e di tutti i prodotti di uso quotidiano a essa connessi, come la radio, i computer, i cellulari. Grazie al silicio e alle sue proprietà da *semiconduttore* la nostra è diventata una società dell'informazione. Ma la nostra è anche una società della comunicazione globale. Enormi flussi di informazione viaggiano su internet ogni giorno permettendoci di comunicare rapidamente a grande distanza. Tutto ciò è reso possibile grazie ai segnali di luce inviati nelle fibre ottiche che, scoperte da Charles Kuen Kao (premio Nobel per la fisica nel 2009),

a. Shockley, Bardeen e Brattain (da sinistra a destra), premi Nobel per la fisica nel 1956 per la scoperta del transistor bipolare.



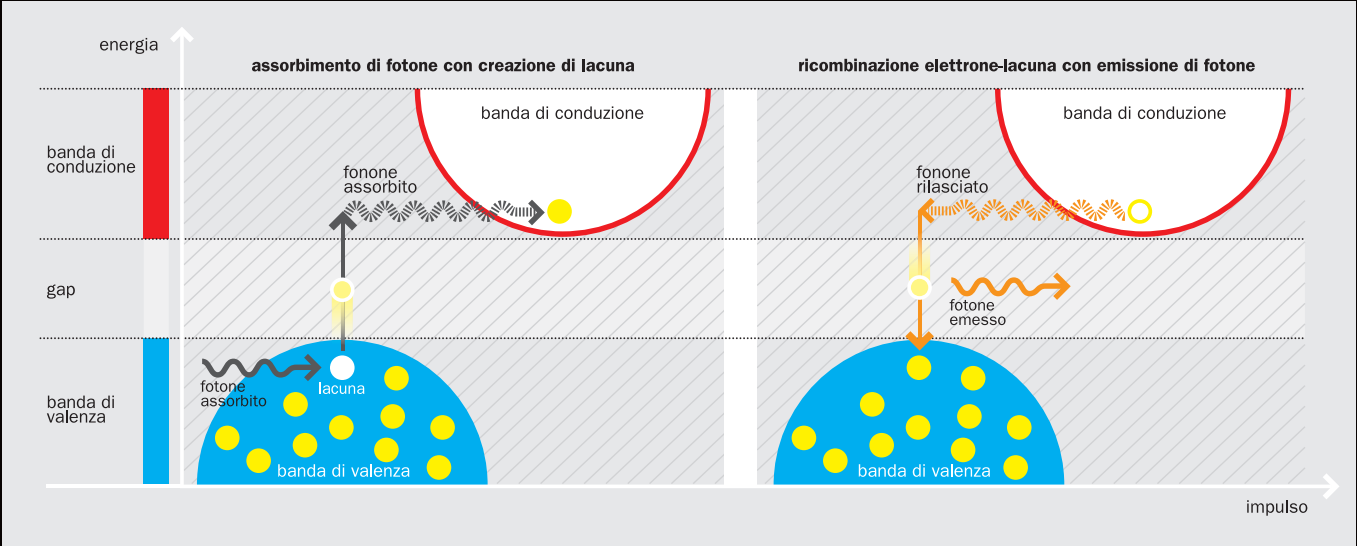
b.
La corazza di uno scarabeo, lo *Pachyrhynchus gemmatus*, vista al microscopio. Essa è formata da cristalli fotonici.

rappresentano delle vere e proprie autostrade per i fotoni, messaggeri dell'informazione da trasportare da una parte all'altra del globo. Ma che mondo sarebbe, se segnali elettronici e fotonici potessero essere integrati insieme in uno stesso oggetto, cioè se i miliardi di transistor presenti in un chip (un circuito elettrico integrato) potessero comunicare tra loro e con l'esterno non attraverso elettroni, ma attraverso fotoni? Questa nuova rivoluzione, in cui microelettronica e fotonica possono essere integrate insieme, è chiamata *microfotonica*. La microfotonica è il mondo dei circuiti fotonici integrati. Il mondo in cui si vuole integrare insieme sorgenti di luce, laser e led, amplificatori ottici, guide d'onda, modulatori ottici, rivelatori, il tutto su scala micrometrica e con tecnologie compatibili con la matura e consolidata tecnologia dei circuiti elettronici, per ottenere, ad esempio, *computer ottici* più veloci dei computer elettronici odierni. Si tratta di una grande sfida scientifica, perché il silicio, materiale principe in

elettronica, purtroppo è inadatto a emettere fotoni (vd. approfondimento). La comunità scientifica internazionale è recentemente impegnata nello studio di metodologie in grado di rendere il silicio un efficiente emettitore di fotoni. Grazie allo sviluppo delle nanotecnologie si è aperta la strada verso scenari assolutamente inaspettati. È possibile infatti costruire artificialmente dei *quantum dots* di silicio, cioè aggregati di forma sferica di dimensione nanometrica, o *quantum wires* di silicio, cioè *fili* di conduzione *quantici*, con lunghezza di svariati micron, ma diametro di pochi nanometri. Si tratta di strutture zero- o unidimensionali, cosiddette *nanostrutture*, in cui gli elettroni del semiconduttore sono confinati secondo le regole della meccanica quantistica all'interno di una buca di potenziale. Per il principio di indeterminazione di Heisenberg, questo confinamento quantico produce un'indeterminazione nell'impulso. Si apre così la possibilità di

ottenere una ricombinazione radiativa dell'elettone-lacuna (vd. approfondimento), cioè un'emissione di luce da questi minuscoli componenti di silicio. Oltre a ottenere una efficiente emissione di fotoni, in questi sistemi l'energia dei fotoni emessi può essere modificata a piacimento semplicemente riducendo (o ingrandendo) le dimensioni fisiche delle rispettive nanostrutture. Molto è stato fatto, molto è ancora da fare. Un laser al silicio eccitato elettricamente (cioè attraverso un passaggio di corrente) e funzionante a temperatura ambiente non è però ancora stato realizzato. La ricerca di frontiera verso questi obiettivi consiste nell'accoppiamento tra nanostrutture di silicio attive otticamente (come i *quantum dots* e i *quantum wires*) e le cosiddette *nanocavità fotoniche* realizzate attraverso altre nanostrutture chiamate *cristalli fotonici*. I cristalli fotonici sono l'equivalente "fotonico" dei semiconduttori. In natura si trovano già: ad esempio, le ali di alcune farfalle o la corazza di alcuni scarabei (vd. fig. b)

Le proprietà ottiche del silicio

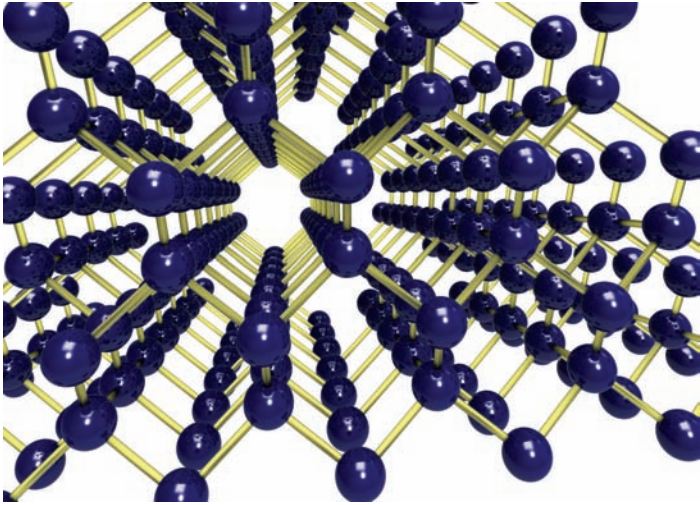


1.
Visualizzazione della transizione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione (assorbimento di fotoni) e di ricombinazione elettrone-lacuna con emissione di fotoni.

Secondo la meccanica quantistica in un atomo gli elettroni occupano dei livelli energetici discreti (*quantizzati*). Nel silicio (vd. fig. c), come in tutti i solidi, la presenza di molti atomi fa sì che tali livelli energetici quantizzati siano molto vicini tra loro: l'insieme di questi livelli prende il nome di *banda di energia*. Tra bande di energia differenti spesso sono presenti delle regioni che sono energeticamente proibite per gli elettroni: queste regioni prendono il nome di *gap*. In un semiconduttore in generale, e quindi anche nel silicio, l'ultima banda di energia completamente piena allo zero assoluto prende il nome di *banda di valenza* e la prima banda di energia vuota allo zero assoluto si chiama *banda di conduzione*. In condizioni diverse dallo zero assoluto alcuni elettroni possono passare dalla banda di

valenza alla banda di conduzione: il posto lasciato vuoto in banda di valenza prende il nome di *lacuna*. In un semiconduttore la corrente elettrica è portata dagli elettroni in banda di conduzione e dalle lacune in banda di valenza. Nel caso del silicio, la sua struttura a bande di energia è detta a *gap indiretta*, perché i suoi elettroni in banda di conduzione e le sue lacune in banda di valenza hanno un impulso differente. Quando un elettrone in banda di conduzione "torna" in un posto vuoto in banda di valenza (una lacuna) si parla di *ricombinazione elettrone-lacuna*. Nel processo di ricombinazione elettrone-lacuna deve essere conservata sia l'energia che l'impulso. I fotoni sono particelle di grande energia, ma piccolo impulso. Pertanto, un fotone con energia pari a quella della ricombinazione elettrone-

lacuna non ha sufficiente impulso per rispettarne la conservazione. Il fotone, quindi, non può essere emesso dal silicio, a meno che una terza particella (il *fonone*, cioè il quanto delle vibrazioni reticolari) non sia anch'esso emesso (o assorbito) per conservare l'impulso (vd. fig. 1). Dato che i processi di ricombinazione che coinvolgono più particelle (sia fotoni che fononi) sono poco probabili, l'emissione di fotoni dal silicio è un processo altamente inefficiente. In una ricombinazione elettrone-lacuna l'elettone perde energia. Se questa energia è ceduta a un fotone (e quindi genera un segnale di luce) si parla di *ricombinazione radiativa*. Tra gli obiettivi della microfotonica vi è quello di ottenere una efficiente ricombinazione radiativa dal silicio.



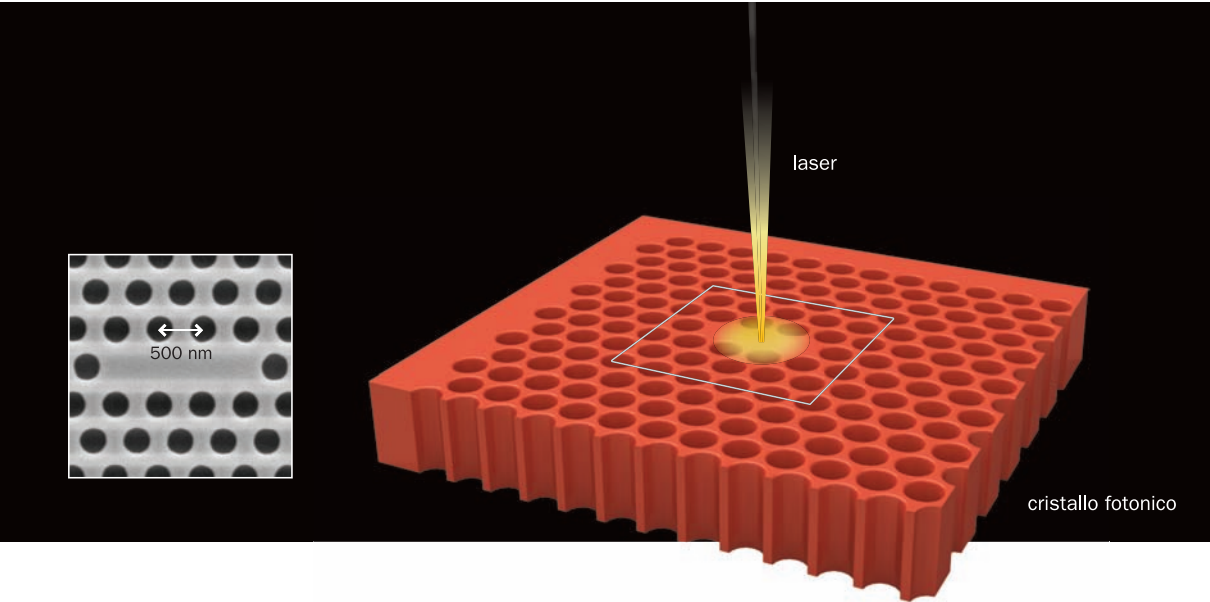
c.
Struttura del silicio.

devono la loro colorazione non ai comuni pigmenti, ma al fatto di essere costituiti da cristalli fotonici naturali. Sono "cristalli", perché formati da una struttura *periodica*, che si ripete, e sono "fotonici", perché agiscono sui fotoni. Così come il potenziale elettrico periodico presente nei cristalli atomici agisce sugli elettroni generando le bande di energia (come quelle presenti nel silicio), una struttura in cui viene modulato artificialmente l'*indice di rifrazione* (la grandezza che indica quanto un mezzo modifica la velocità della luce che lo attraversa) agirà sui fotoni, creando delle vere e proprie bande energetiche fotoniche con delle *gap*, cioè delle

regioni di energia (e quindi di frequenza) proibite. I fotoni con una frequenza all'interno della gap non si potranno propagare nel cristallo fotonico e verranno pertanto totalmente riflessi, determinando così la percezione del colore dell'oggetto. I cristalli fotonici artificiali sono nati a partire dai lavori pionieristici di E. Yablonovitch e J. Joannopoulos negli anni '90 e si sono sviluppati grazie alla capacità di controllare la materia attraverso le nanotecnologie. Un semplice esempio di cristallo fotonico bidimensionale è rappresentato da un'alternanza di fori nanometrici, disposti in forma regolare su una sottile lamina di un materiale semiconduttore (come per esempio il silicio). All'interno del foro

l'indice di rifrazione relativo del mezzo è pari a uno (quello dell'aria), mentre nel resto della lamina è quello del materiale. Si ha così una modulazione periodica dell'indice di rifrazione che agisce sulle energie permesse ai fotoni. Se ora realizziamo artificialmente un "difetto" nanometrico all'interno della struttura periodica (in fig. d l'assenza di tre fori), cioè una regione in cui la periodicità è interrotta, in questa regione (e solo in questa regione) i fotoni di frequenza "proibita" potranno esistere, ma resteranno lì confinati non potendosi propagare nelle regioni limitrofe. Questo "difetto" rappresenta una nanocavità fotonica. L'inserimento di un materiale attivo otticamente (che quindi emette fotoni) dentro la nanocavità produrrà il

confinamento dei fotoni emessi ed eventualmente, in alcuni casi, un'azione simile a quella di un laser. Ci troviamo di fronte a un *nanolaser* (vd. fig. d). I nanolaser al silicio non sono stati ancora realizzati, ma la ricerca punta oggi a progettare e realizzare nanocavità fotoniche sempre migliori e ad accoppiarle opportunamente a sistemi otticamente attivi in grado di produrre guadagno ottico. Ci auguriamo che gli sforzi della comunità scientifica internazionale possano in un prossimo futuro portare alla realizzazione di un nanolaser al silicio a pompaggio elettrico, producendo così una rivoluzione scientifico-tecnologica con implicazioni enormi e ancora non del tutto immaginabili.



d. Visualizzazione schematica di un nanolaser a cristallo fotonico. Nell'immagine a sinistra è ben visibile la nanocavità fotonica (l'assenza di tre fori).

Biografia

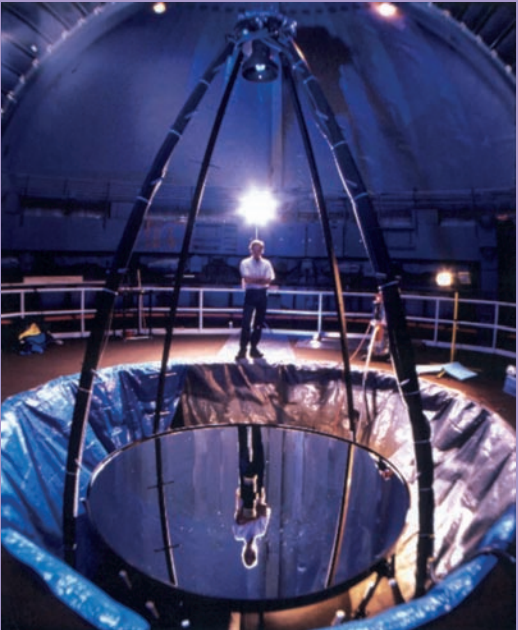
Francesco Priolo è professore di Fisica della Materia presso l'Università di Catania. Attualmente è presidente della European Materials Research Society (Strasburgo).

Laboratori tascabili

Nanostrumenti per il futuro

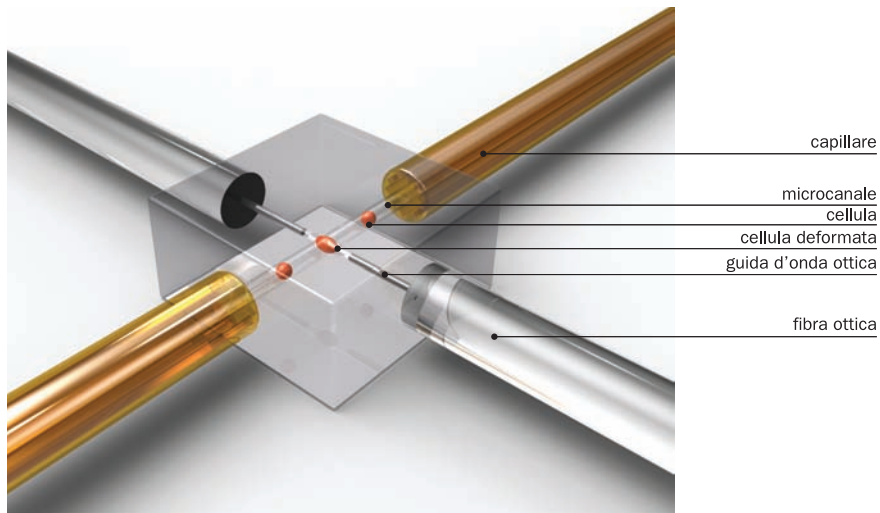
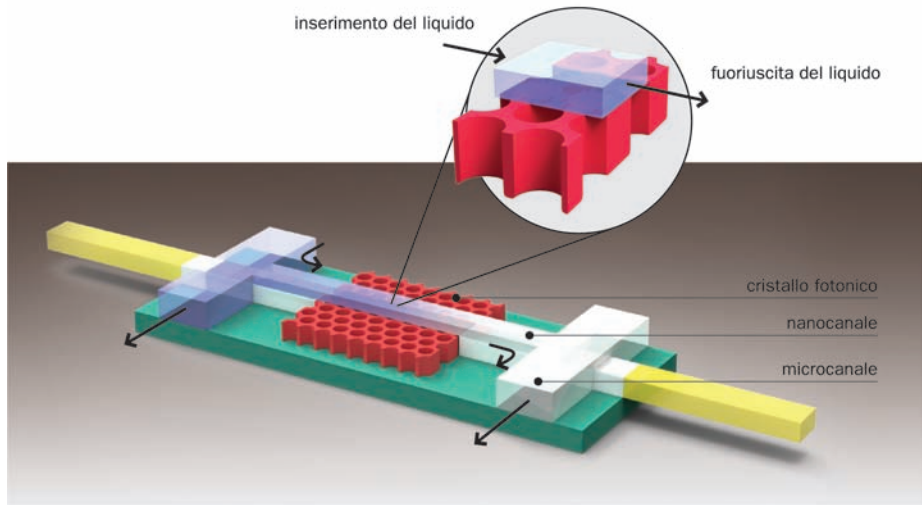
di Roberta Ramponi

La proposta di utilizzare dei liquidi nella fabbricazione di componenti ottici viene fatta risalire a Sir Isaac Newton e, in particolare, all'idea di utilizzare un liquido in rotazione per creare un paraboloide perfetto assimilabile a uno specchio. Per la prima realizzazione pratica occorre però attendere fino al 1909, quando Robert Williams Wood, utilizzando del mercurio, realizzò con successo uno specchio liquido per applicazioni astronomiche nei telescopi a riflessione. Per questi telescopi, infatti, sussiste la necessità di realizzare specchi di grandi dimensioni, non troppo pesanti, non soggetti a deformazioni causate da variazioni di temperatura e non eccessivamente costosi: tutte proprietà che gli specchi liquidi possiedono rispetto agli specchi tradizionali. In generale, l'uso di liquidi per applicazioni tecnologiche prende il nome di *fluidica*. Per fare degli esempi, si pensi, in meccanica, ai circuiti pneumatici che ci consentono di frenare guidando un'auto. Ai giorni nostri, la miniaturizzazione sempre più spinta ha consentito lo sviluppo della *microfluidica* e della *nanofluidica*, e ha reso possibile lo sviluppo di dispositivi integrati, che coniugano l'uso dei liquidi e dell'ottica, aprendo la strada al settore della *optofluidica*. L'optofluidica può oggi essere considerata a pieno titolo una disciplina a sé stante e non semplicemente un settore della microfluidica o dell'ottica. Essa infatti consente di realizzare dispositivi con funzionalità completamente nuove, inimmaginabili senza un uso sinergico dell'ottica e della microfluidica. Tale combinazione può essere sfruttata in due direzioni. Da un lato i liquidi possono essere utilizzati per progettare dispositivi ottici integrati con architetture innovative, modificandone le caratteristiche; dall'altro, l'integrazione di dispositivi ottici in piattaforme micro- o nanofluidiche consente di effettuare misure, altrimenti non ottenibili in modo semplice.



a. Telescopio a specchio liquido della Nasa. Si trovava nell'Orbital Debris Observatory a Cloudcroft (New Mexico, Stati Uniti) ed è stato chiuso nel 2001.

Un esempio del primo approccio si ha nella realizzazione di circuiti a cristalli fotonici (vd. p. 42), le cui caratteristiche fisiche, che ne determinano il funzionamento, possono essere modificate mediante l'integrazione di nanocanali riempiti con un liquido opportuno (vd. fig. b); oppure nella realizzazione di *microrisonatori in guida d'onda ottica*, strutture caratterizzate da una lunghezza d'onda di risonanza che può essere modificata cambiando il liquido presente in un sottile canale a contatto con il dispositivo stesso. Un esempio del secondo tipo si ha nei cosiddetti *lab-on-a-chip*, veri e propri laboratori biofotonici tascabili (letteralmente "laboratori su un chip"), nei quali l'integrazione di *guide d'onda*, assimilabili a circuiti di tipo ottico, consente di fare misure o di implementare funzionalità ottiche direttamente sul chip; oppure nella realizzazione di sensori ottici che



b.
La nanofluidica può essere utilizzata per “riconfigurare” circuiti a cristallo fotonico (cioè per modificarne le caratteristiche di propagazione della luce in termini di range di lunghezze d'onda proibite). Nella figura è mostrata l'architettura di un dispositivo che integra nanofotonica in silicio e nano- e microfluidica. Il liquido inserito nel nanocanale altera il salto d'indice fra “pieni” e “vuoti” all'interno del cristallo fotonico, modificandone le proprietà.

c.
Schema di uno *stretcher ottico* (un dispositivo che deforma) per singole cellule. La sospensione contenente le cellule viene fatta fluire, mediante un gradiente di pressione, nel microcanale connesso a due capillari. La trappola ottica e la deformazione (*stretching*) vengono realizzati mediante i fasci “contropropaganti”, in uscita dalle due guide d'onda, a loro volta accoppiate a due fibre ottiche.

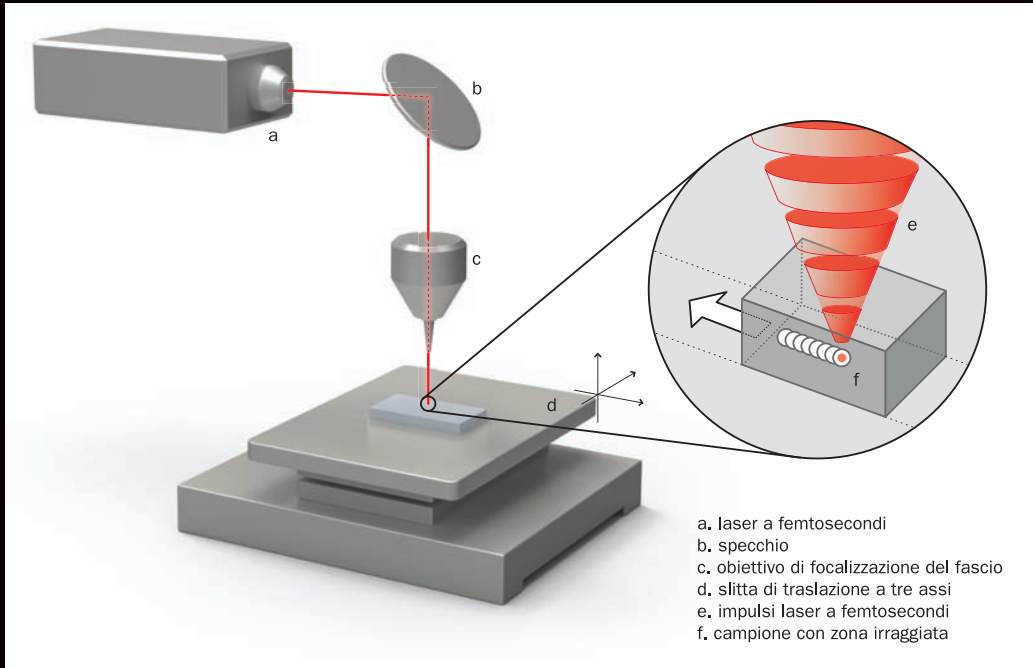
consentono misure interferometriche su campioni contenuti in microcanali. In particolare, i *lab-on-a-chip* stanno assumendo un'importanza sempre crescente. Nascono come strutture microfluidiche per consentire l'analisi biochimica di piccole quantità di campioni fluidi, tipicamente di interesse biomedico (elettroforesi di sieroproteine, analisi del Dna). In generale, questo tipo di misure sono di tipo ottico (fluorescenza, assorbimento). Tradizionalmente, senza l'utilizzo dei *lab-on-a-chip*, queste misure vengono effettuate utilizzando un microscopio per illuminare il campione e raccogliere il segnale di misura, vanificando così la miniaturizzazione del

contenitore del campione, ottenuta grazie alla microfluidica. L'integrazione di guide d'onda ottiche accoppiate con dei microcanali, come nei *lab-on-a-chip*, costituisce un significativo progresso in termini di compattezza, miniaturizzazione, riduzione dei costi, ma anche di facilità d'uso, in quanto elimina ogni problema di allineamento in fase di misura. L'accoppiamento di guide d'onda ottiche e microcanali in un singolo chip consente inoltre la realizzazione di dispositivi più sofisticati di semplici piattaforme di misura. È infatti possibile, come schematizzato in fig. c, realizzare dispositivi optofluidici integrati per l'intrappolamento e la deformazione di

singole cellule. La valutazione della risposta cellulare all'applicazione di forze ottiche intense consente di studiare eventuali alterazioni della deformabilità del cosiddetto *citoscheletro*, che sono state riportate in molte patologie e possono quindi essere utilizzate come marcatori dello stato della cellula. Due guide d'onda affacciate una all'altra intersecano un microcanale nel quale vengono fatte fluire le cellule disperse nel liquido di trasporto; la radiazione uscente dalle due guide d'onda crea, nella regione in cui si sovrappongono i due fasci “contropropaganti”, una sorta di *pinza ottica* in grado di intrappolare le cellule. Aumentando la potenza

[as] approfondimento

Costruzioni micro-optofluidiche



1.
Schema di un apparato di fabbricazione di dispositivi micro-optofluidici mediante laser a femtosecondi. L'apparato viene posto su un banco ottico delle dimensioni di un normale tavolo.

La realizzazione dei dispositivi “micro-optofluidici” in generale presenta alcuni aspetti critici. Da un lato l'integrazione di guide d'onda ottiche in piattaforme microfluidiche realizzate mediante tecniche litografiche tradizionali richiede una tecnica di fabbricazione delle guide stesse che ne consenta la realizzazione diretta alla stessa profondità del microcanale, senza indurre danni nel chip; dall'altro, nel caso di applicazioni più complesse, si rende necessaria la realizzazione di microcanali e guide d'onda in configurazione tridimensionale. Proprio l'aspetto tridimensionale rende complesso l'uso di tecniche tradizionali quali quelle litografiche che, essendo intrinsecamente planari, cioè con

lavorazioni sulla superficie del campione, richiedono una fabbricazione multi-strato se si vuole ottenere strutture tridimensionali. Una tecnica di fabbricazione che si è rivelata ottimale per queste applicazioni è la scrittura diretta mediante impulsi laser a femtosecondi. Come illustrato in fig. 1, il fascio laser viene focalizzato all'interno del substrato in cui si intende fabbricare il dispositivo. Il substrato stesso viene poi traslato mediante posizionatori meccanici (chiamate *slitte*) di alta precisione nelle tre dimensioni spaziali, in modo tale che il fascio laser “scriva” la traccia della guida d'onda o del canale che si intende fabbricare. A seconda dei parametri del

laser, e in particolare dell'intensità del fascio, nel substrato viene prodotta un'alterazione che può andare dalla semplice modificazione dell'indice di rifrazione (con conseguente realizzazione di una guida d'onda ottica) alla creazione di nanofratture; in quest'ultimo caso, facendo seguire all'irraggiamento un trattamento chimico per immersione del campione in un opportuno bagno acido (*etching*), si ha una rimozione selettiva di materiale nella zona irraggiata con conseguente realizzazione del microcanale. È quindi possibile utilizzare un laser a femtosecondi come una “penna” per scrivere direttamente entrambi i componenti base dei dispositivi micro-optofluidici.

accoppiata nelle due guide è possibile sottoporre la cellula intrappolata a uno stress meccanico, analizzandone quindi l'elasticità, un parametro di significativo interesse per verificare un eventuale stato patologico o di sofferenza della cellula stessa. Le applicazioni descritte sono solo alcuni esempi e non esauriscono certo le potenzialità dell'optofluidica. Infatti, mediante l'utilizzazione di soluzioni di materiali polimerici dotati di funzionalità ottiche all'interno di circuiti microfluidici, opportunamente progettati e integrati con guide d'onda ottiche, si può ipotizzare la realizzazione di dispositivi ottici attivi, quali per esempio sorgenti laser o amplificatori.

Biografia

Roberta Ramponi è professore di Fisica Sperimentale presso il Politecnico di Milano. Svolge attività di ricerca nei settori dell'ottica integrata e dei dispositivi fotonici e optofluidici per applicazioni alle telecomunicazioni e alla sensoristica biomedica e ambientale.

Link sul web

http://www.fisi.polimi.it/it/ricerca/strutture_di_ricerca/attivita/49546
<http://www.mae.cornell.edu/erickson/research.html> - Optofluidic
<http://photon.soe.ucsc.edu/iof.htm>
<http://photon.soe.ucsc.edu/nanopores.htm>
<http://www.biophot.caltech.edu/optofluidics/optofluidics/index.html>

Le mille facce del carbonio

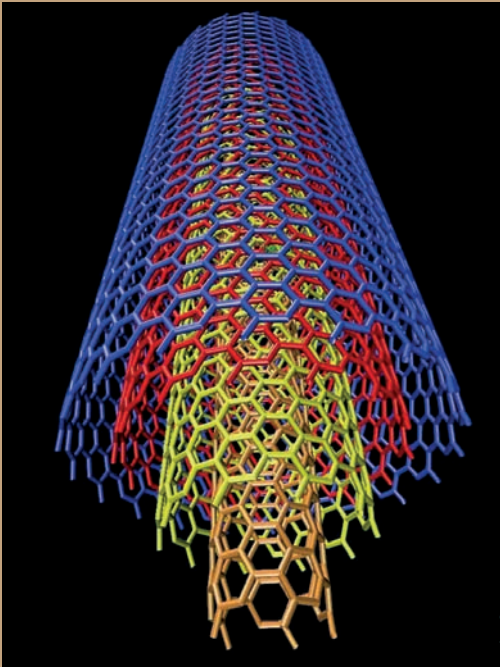
Continue sorprese da uno dei mattoni fondamentali

di Guglielmo Lanzani

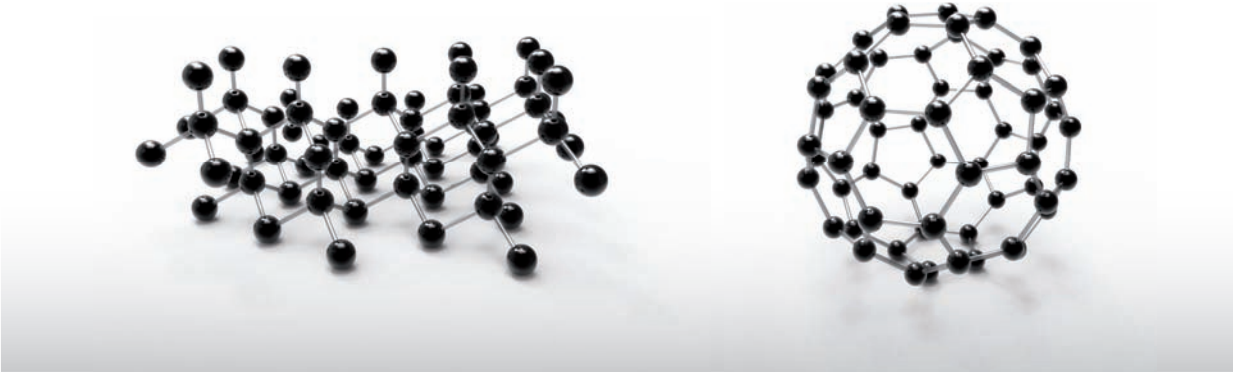
La natura della materia organica, unica al punto da permettere di sfruttare la luce del sole nella fotosintesi vegetale o dell'ossigeno dell'atmosfera nella respirazione animale, si deve in particolare alla presenza di un elemento: il carbonio. Degli oltre 90 atomi riscontrabili in natura, il carbonio è infatti l'unico atomo a essere presente in tutte le molecole organiche, caratterizzandone l'attitudine a stabilire legami e a dare forma a strutture molecolari complesse. Quarto elemento più abbondante nell'universo in termini di massa, dopo idrogeno, elio e ossigeno, nel corpo umano l'abbondanza del carbonio è seconda solo a quella dell'ossigeno.

L'origine della particolare versatilità dell'atomo di carbonio è nella sua caratteristica plasticità "chimica", ossia nell'attitudine a stabilire legami chimici di tipo diverso sia con altri atomi di carbonio sia con altri elementi. Per questa ragione sono milioni i composti organici che hanno nella loro struttura uno scheletro di atomi di carbonio. E per questa stessa ragione il carbonio si trova in natura in forme diverse, o *allotropiche*, con strutture chimiche ben definite, caratterizzate da diversi legami tra gli atomi: il *diamante*, la *grafite*, il *fullerene* e i *nanotubi* di carbonio (vd. fig. b). Se nel diamante ogni atomo di carbonio è legato ad altri quattro atomi disposti ai vertici di un tetraedro, secondo una struttura che garantisce al cristallo la peculiare durezza, nella grafite e nel fullerene ogni atomo di carbonio è legato ad altri tre atomi. Le strutture sono planari nel caso della

grafite, collegate tra loro da deboli forze, mentre nel fullerene sono icosaedriche, formate da un reticolo di 60 atomi di carbonio legati in modo da formare 12 facce pentagonali e 20 facce esagonali. Esistono inoltre strutture cilindriche del diametro di circa 1 nanometro (10.000 volte più sottili di un capello) fatte interamente di atomi di carbonio e dette nanotubi, che possono essere immaginate come fogli di *grafene* (un solo strato di grafite) arrotolati (vd. fig. a).

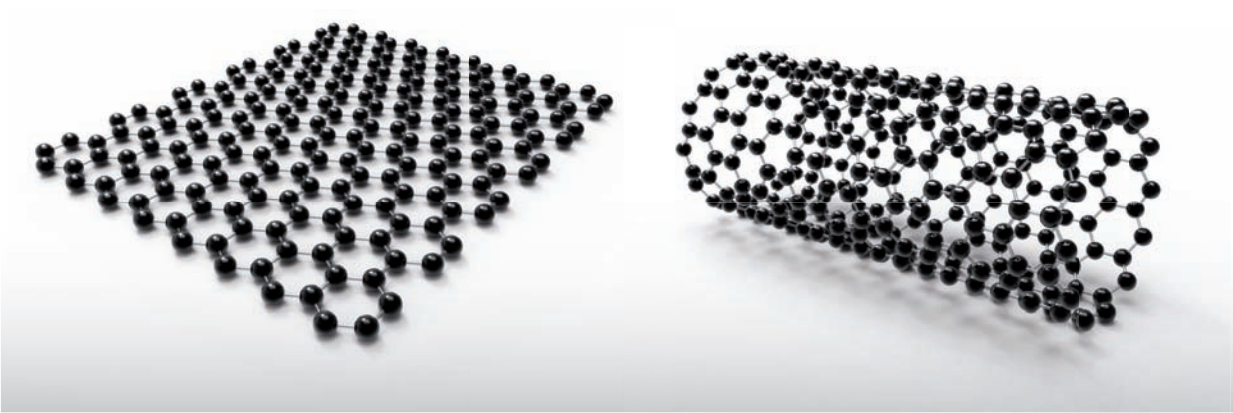


a. Modello 3D di un nanotubo di carbonio a parete multipla. La natura dei legami tra gli atomi di carbonio e il rapporto tra il diametro e la lunghezza (di circa 100 volte superiore) di queste strutture nanometriche conferisce loro proprietà strutturali e di conduzione elettrica molto peculiari.



diamante

fullerene



grafene

nanotubo

b. Le forme allotropiche del carbonio: il diamante, il fullerene, la grafite (è raffigurato un solo strato, ossia il grafene) e la struttura a nanotubo.

[as] approfondimento

La grafite che salva la vita

Quando sotto la guida di Umberto Nobile il dirigibile "Italia" perse il controllo e si schiantò sui ghiacci del Polo Nord nel 1928, una parte dell'equipaggio e della strumentazione finì sulla banchisa, dove fu montata la famosa tenda rossa. Tra i superstiti c'erano fortunatamente il marconista e la sua radio, che tuttavia non funzionava. Mancava il componente indispensabile per selezionare il canale di trasmissione corretta: la resistenza variabile. A temperature sotto lo zero e a decine di migliaia di chilometri da qualsiasi forma di vita umana, procurarsi una resistenza variabile non sembrava davvero possibile. Nessun aiuto naturalmente da parte degli orsi che pure giravano curiosi attorno alla tenda. La salvezza venne da una matita, semplice e umile cilindro di grafite rivestito di legno. Fu così che, depositando uno strato di grafite di spessore variabile, il marconista poté disegnare la resistenza che gli serviva e, come nelle migliori favole, darle vita per chiamare i soccorsi. Ecco la prova: la grafite conduce.

1. Umberto Nobile sul dirigibile "Italia" nell'aprile del 1928.



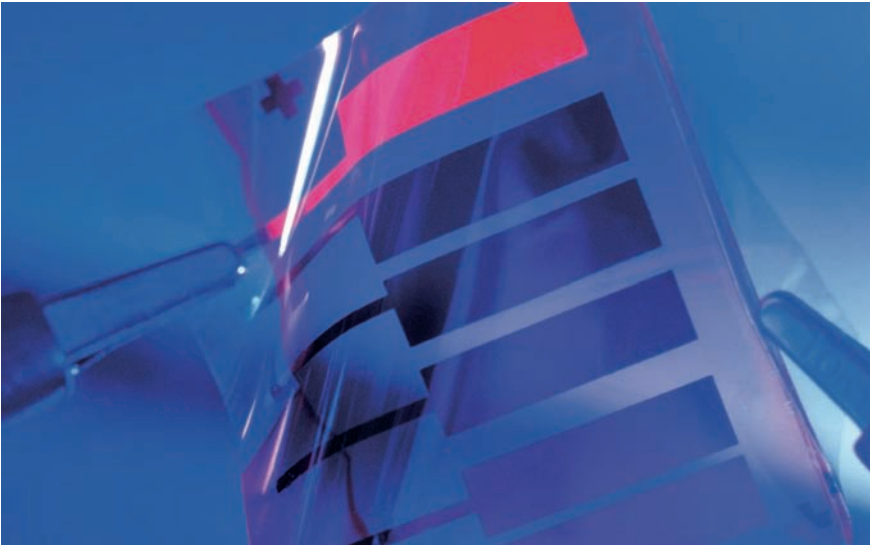


La formazione di queste strutture dipende fortemente dalla distribuzione degli elettroni sugli orbitali intorno al nucleo del carbonio e dal tipo di legame che questa distribuzione consente tra atomi diversi. Condizionando la mobilità degli elettroni lungo le strutture molecolari, la natura dei legami definisce inoltre le proprietà di conducibilità elettrica di questi materiali. Nel carbonio i sei elettroni dell’atomo sono normalmente distribuiti su orbitali di forma diversa: quattro elettroni si trovano sugli orbitali più vicini al nucleo, di forma sferica, mentre i due più esterni si muovono su orbitali chiamati *di tipo p*, di forma ovale, allungati come petali. Questa distribuzione rende possibili legami tra gli atomi tali da lasciare gli elettroni sufficientemente liberi di muoversi all’interno della struttura molecolare, dando origine a materiali con particolarissime proprietà di conducibilità e grande risposta all’irraggiamento da parte dei fotoni. Nella grafite, nel grafene, nel fullerene, nei nanotubi di carbonio e nelle molecole coniugate (delle quali si parlerà in seguito) un

elettrone *p* per atomo è libero di muoversi, messo in compartecipazione con tutti gli altri atomi. In questi sistemi, che con l’esclusione della grafite sono tutti materiali semiconduttori, un fotone nel “visibile” è sufficiente per eccitare un elettrone, ed è facile passare dallo stato isolante a quello conduttore. La grafite è invece un vero e proprio conduttore (vd. approfondimento p. 47, ndr), sebbene povero di elettroni, e per questo è incluso tra i semi-metalli. Il caso del diamante è completamente diverso. In questa struttura gli elettroni degli atomi di carbonio hanno legami molto forti con il nucleo atomico e serve un’energia molto elevata per allontanarli. Per questo il diamante è duro, trasparente e non conduttore. In generale, la mobilità elettronica associata alla conduzione elettrica è anche responsabile della risposta ottica, la risposta cioè alle sollecitazioni della luce. In natura molti composti che interagiscono con la luce sono a base di carbonio e si dicono *poli-coniugati*, per sottolineare quel particolare legame chimico che libera elettroni lungo tutta la molecola.

c.
I colori delle piume degli uccelli, come quelli delle foglie, di molti fiori e dei frutti, sono dovuti ai composti poli-coniugati, nei quali i legami tra gli atomi di carbonio sono tali da liberare elettroni lungo tutta la molecola, quando sollecitati con i fotoni.

d.
Immagine di un dispositivo di tipo “plastic fantastic” sospeso tra due elettrodi. I materiali plastic fantastic hanno le stesse proprietà di conduzione elettrica di semiconduttori come il silicio, ma sono caratterizzati da proprietà meccaniche tipiche della plastica. Questo li rende molto più flessibili all’impiego in contesti e per obiettivi diversi, dall’illuminazione domestica ai dispositivi tv, schermi e smartphone. Nella figura parte del dispositivo si illumina di colore rosso al passaggio della corrente.



I colori delle foglie, di molti fiori, dei frutti e delle verdure e delle piume degli animali sono dovuti a composti di questo tipo. Il campo elettrico della luce visibile oscilla infatti a frequenze tali da poter mettere in moto gli elettroni liberi delle molecole coniugate e indurre una risposta ottica, con fenomeni di assorbimento (su bande di frequenza caratteristiche), emissione e diffusione della luce. L’interazione con la luce è quindi una delle caratteristiche principali di questi composti, che la tecnologia cerca di sfruttare. Da questo punto di vista le molecole organiche coniugate sono molto più reattive del silicio comunemente impiegato nei dispositivi fotosensibili, che è grigio nerastro, assorbe tutto lo spettro visibile ma non emette. Oltre alle proprietà elettriche, i sistemi coniugati hanno anche proprietà meccaniche interessanti e questo li rende particolarmente flessibili all’utilizzo in contesti molto diversi. Il motivo del successo commerciale dei polimeri

coniugati, ad esempio, risiede nella possibilità di integrare in un solo materiale le caratteristiche elettriche dei semiconduttori con le proprietà meccaniche della plastica. Gli Oled (Organic Light Emitting Device), questo il nome tecnico, sono uno tra i maggiori successi tecnologici presenti in molti prodotti ora sul mercato. Appartengono allo stesso ambito di sviluppo delle celle fotovoltaiche su substrato di plastica (*plastic fantastic*) che si apprestano a fare la loro comparsa sul mercato, mentre è molto più recente l’attività di ricerca che si occupa dello sviluppo di sistemi artificiali di comunicazione tra cellule e semiconduttori organici per le tecnologie umanoidi. Lo scopo in questo caso è lo sviluppo di nuovi materiali in grado di permettere funzioni di tipo basilare ai robot umanoidi, come la locomozione, la manipolazione, la percezione, la comunicazione con gli umani, l’interazione con l’ambiente e, in particolare, la capacità di immagazzinare energia ricavandola dall’ambiente circostante.

Biografia

Guglielmo Lanzani è professore di Fisica presso il Politecnico di Milano e dal 2009 direttore del Centro per la Nanoscienza e Tecnologia (Cnst) dell’Istituto Italiano di Tecnologia. Studia da più di vent’anni i semiconduttori organici.

Link sul web

<http://cnst.iit.it/>

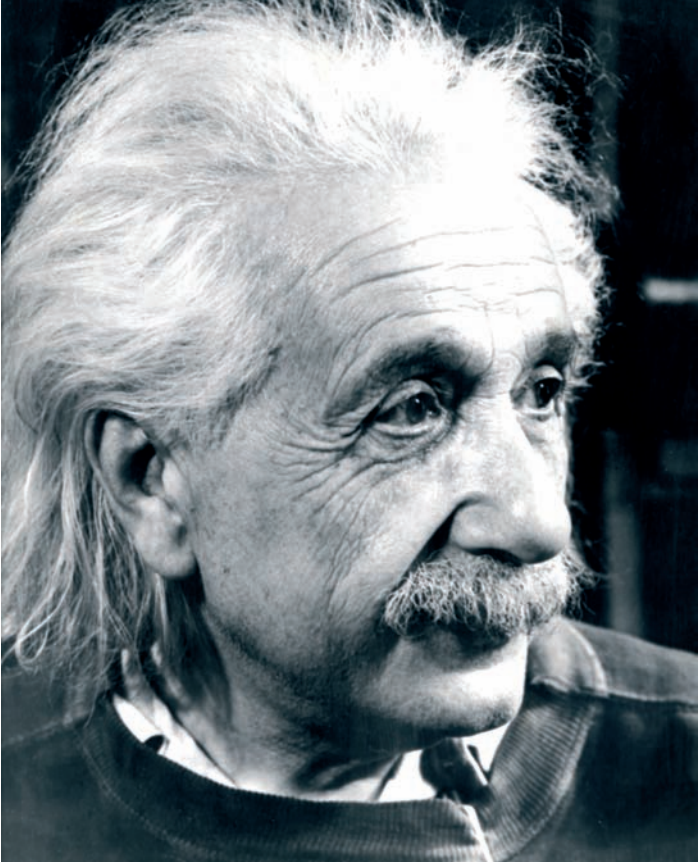
[as] radici

Dall'etere alla luce deviata.

di Fabio Toscano

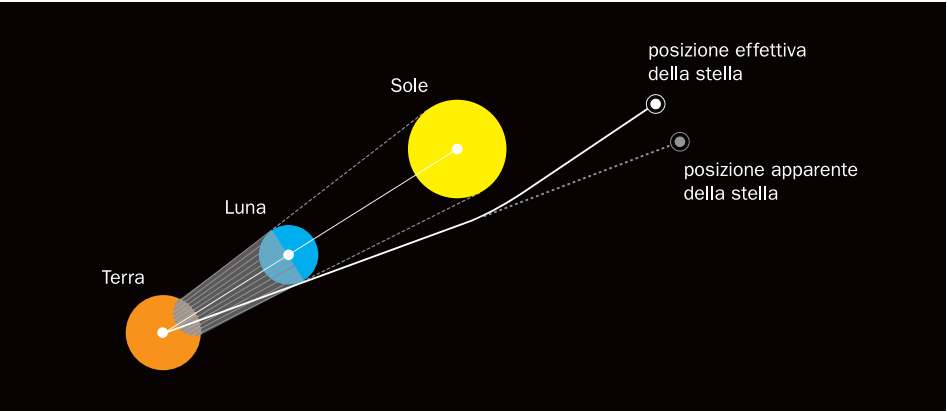
Fisico e storico della scienza

a. Albert Einstein, con la formulazione della teoria della relatività ristretta, sancisce nel 1905 l'inutilità del concetto di etere per descrivere la luce.



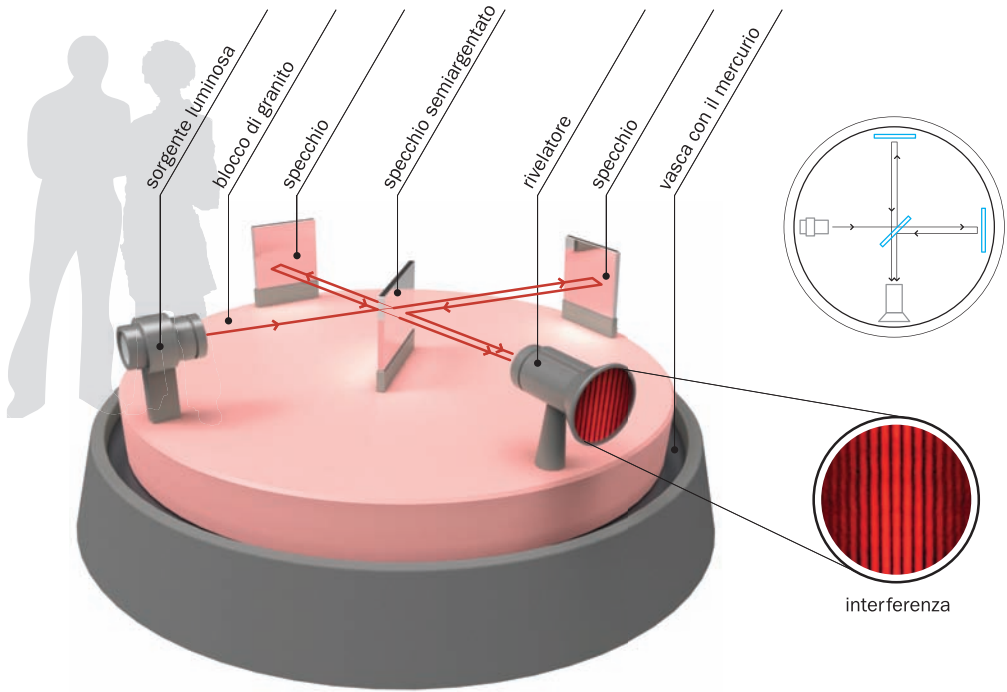
I fisici del secondo Ottocento ritenevano che le onde elettromagnetiche, tra cui la luce, fossero trasportate da uno specifico mezzo, così come le onde sulla superficie dell'acqua e le onde sonore nell'aria sono veicolate per l'appunto dall'acqua e dall'aria, rispettivamente. Questo presunto mezzo, chiamato *etere*, doveva permeare l'intero spazio cosmico ed essere trasparente, pressoché imponderabile e abbastanza elastico e denso da supportare onde elettromagnetiche di qualsiasi frequenza. Sebbene tali proprietà rendessero assai arduo il compito di appurarne l'effettiva esistenza, l'idea che l'etere non fosse trascinato dalla Terra – l'unica dimostratasi accettabile – sembrava offrire un'invitante condizione per individuarlo. Infatti, l'ipotesi della Terra in moto con una certa velocità rispetto all'etere implicava la presenza sul pianeta di un "vento d'etere" animato della stessa velocità, ma in verso

opposto. In tal caso, sarebbe stato possibile rivelare il vento d'etere in base alla sua azione su determinati fenomeni e su uno in particolare: la luce. Nel 1881 il fisico statunitense di origine tedesca Albert Abraham Michelson realizzò a Potsdam, in Germania, il primo esperimento mirato a verificare l'influenza del moto della Terra attraverso l'etere sulla velocità della luce. Michelson si servì di un dispositivo da lui ideato, un interferometro, capace di far compiere simultaneamente a due fasci di luce provenienti dalla stessa sorgente un viaggio di andata e ritorno lungo due percorsi, uno perpendicolare all'altro, aventi la medesima lunghezza (vd. fig. c, ndr). Supponendo la Terra in moto rispetto all'etere, i due raggi luminosi, a causa delle loro differenti orientazioni spaziali, sarebbero stati "spinti" in maniera diversa dal vento d'etere e perciò avrebbero dovuto percorrere i



b. Come predetto dalla relatività generale, la traiettoria della luce proveniente dalle stelle si incurva passando vicino al Sole, allontanando la posizione apparente da quella effettiva.

c. Schema dell'interferometro di Michelson. La luce generata dalla sorgente viene divisa in due fasci dallo specchio semi-argentato. I fasci si riflettono sui due specchi, per poi tornare a quello semi-argentato e giungere infine al rivelatore.



rispettivi tragitti con velocità differenti, giungendo a un comune punto finale in tempi diversi. Tuttavia, l'apparato di Michelson non registrò differenze di velocità tra i due raggi di luce, e quindi non evidenziò alcun moto della Terra rispetto all'etere. Nel 1887 Michelson ripeté il tentativo a Cleveland, negli Stati Uniti, con la collaborazione del connazionale Edward Morley. Questo secondo esperimento, arrivato al limite delle capacità tecnologiche dell'epoca, era sensibilmente più raffinato e preciso del primo, ma di nuovo non furono riscontrate discrepanze tra le velocità dei diversi raggi di luce. Eppure, benché la brezza eterea rimanesse ostinatamente impercettibile all'osservazione, ancora per svariati anni molti studiosi continuarono a credere che l'etere dovesse comunque esistere. La conclusione della storia ci fu grazie al famoso genio del '900, Albert Einstein, che nel 1905 pose a fondamento della sua teoria della *relatività ristretta* il principio di invarianza della velocità della luce nel vuoto, dichiarando superflua la nozione di etere e dunque scaraventandola fuori dal palcoscenico della fisica. Per il genio di Ulm, le onde elettromagnetiche non avevano bisogno di un qualche substrato per esistere, poiché potevano essere pensate come oscillazioni di campi elettrici e magnetici in grado di autopropagarsi anche nel vuoto. Se gli esiti delle esperienze di Michelson e Morley fornirono a Einstein la base empirica su cui erigere la teoria della relatività ristretta, il risultato di un altro storico esperimento con la luce costituì la prima verifica sperimentale della sua teoria relativistica della gravitazione, ossia la cosiddetta *relatività generale*. Una delle predizioni della nuova teoria, elaborata dallo scienziato tedesco tra il 1907 e il 1915, era la deviazione dei raggi luminosi a opera di una grande massa: in particolare, la traiettoria della luce proveniente dalle stelle doveva flettersi

passando vicino al Sole. Ebbene, nel 1917 gli astronomi inglesi Arthur Stanley Eddington e Frank Watson Dyson iniziarono a progettare una spedizione per misurare il predetto incurvamento della luce nel corso di un'eclissi solare. Durante un'eclissi totale di Sole, la Luna nasconde completamente il disco solare, consentendo l'osservazione delle stelle che lo circondano (vd. fig. b). Il medesimo campo di stelle può essere osservato, di notte, diversi mesi prima o dopo l'eclissi, quando il Sole non si trova in corrispondenza di quel settore della volta celeste e le immagini delle stelle sono pertanto nella loro posizione naturale, senza possibilità di essere deviate dal Sole. Stando all'effetto previsto da Einstein, se si esamina la posizione di una stella in queste due differenti situazioni, si dovrebbe osservare il suo apparente spostamento nella volta celeste. In occasione dell'eclissi solare del 29 maggio 1919, Dyson organizzò due spedizioni per verificare la predizione di Einstein: una, guidata da Eddington, si recò a Principe, un'isola al largo dell'Africa occidentale; l'altra, diretta dagli astronomi britannici Andrew Crommelin e Charles Davidson, raggiunse la città di Sobral, in Brasile. Einstein aveva calcolato dalle sue equazioni una deviazione di 1,75 secondi d'arco (1 secondo d'arco è la tremilaseicentesima parte di 1 grado). Il gruppo di Eddington trovò uno spostamento di 1,60 secondi con un'incertezza sperimentale di 0,31 secondi, mentre il team di Crommelin e Davidson riscontrò una deviazione di 1,98 secondi con un margine di errore di 0,12 secondi. I risultati sembrarono convincenti e vennero presentati a Londra il 6 novembre 1919, a una sessione congiunta della Royal Society e della Royal Astronomical Society. Il giorno dopo, il quotidiano Times titolava: "Rivoluzione nella scienza – Nuova teoria dell'Universo – La concezione newtoniana demolita". Nasceva così il mito di Albert Einstein.

[as] con altri occhi

Il chiaro e lo scuro.

di Gherardo Gossi

direttore della fotografia



“Una linea è il rapporto tra un chiaro e uno scuro”. Iniziava così il corso di disegno del mio liceo e questa frase mi accompagna da quegli anni ogni volta che incomincio un nuovo lavoro. Faccio il direttore della fotografia nel cinema e nei documentari e, forse proprio in quel periodo, è nato il mio intenso rapporto con la luce, come tratto che definisce e struttura la nostra visione: il chiaro e lo scuro, la magia del luce-ombra come definizione dello spazio.

Nei primi tempi c'era la passione per la fotografia: inquadrare e impressionare su una pellicola la realtà che ci circonda e poi, con la stampa, fermarla sulla carta, ridarle un corpo. Saper, quindi, riconoscere, palpare e modificare la luce, usare e muovere per raccontare. La rapidità e la velocità nel riportare un'impressione e una suggestione sono gli elementi di grande fascino che la luce e la fotografia hanno esercitato su di me sin dall'inizio.

Dalla fotografia sono poi passato alla passione per il cinema: di nuovo la luce che racconta una storia, questa volta partendo dal buio della sala cinematografica. Non solo fotografie in movimento, ma racconti di storie, ottenute con la luce. Anche l'amore per la musica mi ha guidato nell'appropriarmi del ritmo delle immagini che si succedono per formare un film. Nel buio della sala è salita la passione per il mio lavoro di direttore della

fotografia e nel tempo lo studio della luce è diventato una vera e propria ossessione. Ho dovuto studiare la luce come la vedono i fisici, ovvero i fotoni, che in uno specifico intervallo di frequenze non sono nient'altro che la luce visibile che ci circonda. Ecco quindi negli anni riemergere le nozioni di fisica imparate al liceo, fondamentali per la mia ricerca professionale.

Inquadrare e saper riconoscere gli spazi, scegliere e ricostruire la luce e il colore sono gli strumenti per costruire immagini, atmosfere ed emozioni, che uso per raccontare una storia che diventerà film. Il mio lavoro è una ricerca continua, un tentativo incessante di raggiungere la consapevolezza della luce, o detto in altre parole e partendo dal mito della caverna di Platone, di riaprire gli occhi, superare l'accecaimento e guardare la luce e la realtà che ci circonda.

Nel 2005 con un film, “L'orizzonte degli eventi”, per la regia di Daniele Vicari e interpretato da Valerio Mastandrea, sono entrato in rapporto diretto con il mondo della ricerca e della fisica. Il film è una pungente riflessione sulla responsabilità del potere e sull'ossessione della ricerca. Narra di un ricercatore dei Laboratori Infn del Gran Sasso che, pur di ottenere un apprezzabile risultato su un esperimento, per pura ambizione, lo falsifica. Sono entrato così nel cuore della terra, alla base del Gran Sasso, stupito e

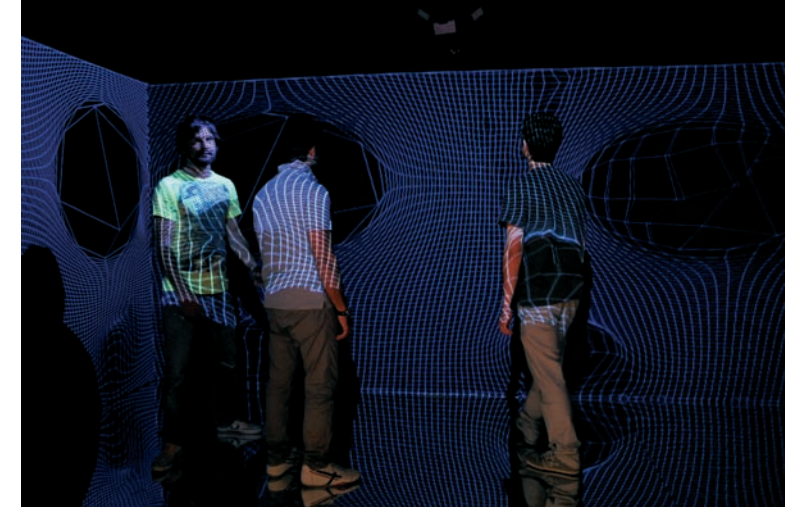
meravigliato dalla grandiosità necessaria per fare ricerca su particelle infinitesimali. Avere uno stretto e concreto rapporto con il mondo della ricerca attraverso il lavoro svolto nel cuore di veri esperimenti, grandi come cattedrali, ha riacceso curiosità in me, che pensavo perdute dai tempi della scuola, e ha rianimato lo stupore per la scoperta. Anche lì, all'interno della montagna del Gran Sasso, si parte dal buio per studiare la luce o meglio parti di essa. È stato un po' come fare un viaggio nel futuro.

Con questo film ho provato a rappresentare la grandiosità degli spazi e ho raccontato un mondo dominato dalla luce artificiale e fredda dei neon che accompagnano l'esperimento su cui lavora il protagonista del film. Il blu domina la scena e avvolge il giallo oro dei fotomoltiplicatori, il cuore dell'esperimento, per poi passare, nella seconda parte del film, completamente all'esterno, abbagliati dalla luce del sole, una luce naturale che rianima i colori e dà un forte scossone al nostro protagonista. Il cambiamento di luce, o meglio di colore della luce, di sorgente della luce e di posizione della luce, porta con sé sempre dei cambiamenti emotivi molto forti, che mi affascinano e mi fanno riflettere. La luce e quindi “le frequenze del visibile”, i fotoni, mi accompagnano quotidianamente e condizionano il mio sguardo e il mio pensiero.

[as] incontri

Effetti speciali.

di Vincenzo Napolano



Immaginate di entrare in una stanza le cui pareti siano “sensibili” e si incurvino e deformino per effetto della vostra presenza. E che i vostri movimenti producano così in questo spazio vibrazioni e onde. O di poter osservare le impercettibili e invisibili tracce delle particelle cosmiche che ci attraversano in ogni istante. O infine di accelerare virtualmente con le vostre mani fasci di particelle subatomiche fino a produrre collisioni multiformi e colorate, simili a quelle prodotte nei grandi acceleratori di particelle, come ad esempio in Lhc al Cern di Ginevra.

Sono solo alcuni esempi delle esperienze immersive e interattive che è possibile fare visitando le mostre più recenti dell'Infn, in cui esplorare inedite metafore visive di fenomeni o idee fondanti del mondo fisico, riproduzioni immersive e scenografiche dei grandi apparati sperimentali, visualizzazioni spettacolari e in tempo reale dei fenomeni fisici. Come nell'installazione in cui lo spettatore visualizza e percepisce cosa significhi una deformazione dello spazio, analoga a quella prodotta sul tessuto dello spaziotempo dai pianeti, le stelle o i buchi neri (vd. fig. a). Un'idea fondamentale introdotta da Einstein con la relatività generale e che rappresenta il modo contemporaneo di spiegare la gravità, ma certamente difficile da raccontare. I comunicatori e i fisici dell'Infn hanno provato a sfruttare le nuove tecnologie

della comunicazione, i sistemi interattivi, la grafica e le animazioni digitali, 3D e stereoscopiche, per raccontare, far vedere e toccare quella descrizione fisica del mondo, che è per sua natura invisibile e intangibile. E lungo questa linea sono state realizzate nel 2011 le mostre “L'Universo a portata di mano”, con la Fondazione Sigma-Tau a Palazzo Collicola a Spoleto, ed “Estremo. Le macchine della conoscenza”, con la Fondazione Golinelli a Palazzo D'Accursio a Bologna; nel 2010 “L'invisibile meraviglia” al Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino e “L'Universo non è più quello di una volta” al Festival della Scienza di Genova; fino alla prima tappa di questo percorso, la grande mostra “Astri e particelle. Le parole dell'Universo”, a cura dell'Infn, Inaf e Asi, ospitata al Palazzo delle Esposizioni di Roma nel 2009. Il grande successo ottenuto e l'interesse straordinario riscosso da queste mostre dimostra quanto sia forte nel grande pubblico il desiderio di avvicinarsi alle idee che ci ha regalato la fisica nell'ultimo secolo. Idee che hanno profondamente trasformato il nostro modo di guardare e interpretare l'universo e hanno sovvertito quasi tutte le categorie del senso comune, ripensando lo spazio, il tempo, la materia.

Senza dimenticare l'importanza delle ricadute tecnologiche e delle applicazioni che ci arrivano dalla ricerca fondamentale della fisica. Prova a suggerirlo

un'installazione in cui il visitatore, giocando con la propria ombra, può scoprire l'“invisibile” nascosto nei corpi umani, nelle opere d'arte e nei reperti archeologici. Un “invisibile” che oggi possiamo vedere grazie alle tecnologie nate dalla ricerca fondamentale della fisica.

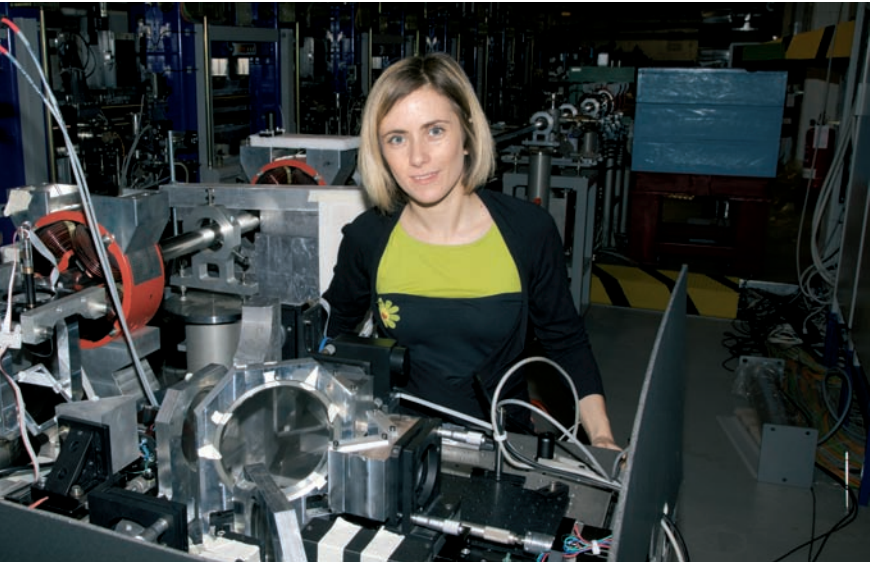
Raccontare il senso e la portata di queste imprese scientifiche è una sfida appassionante e forse una delle più importanti della cultura contemporanea. E si avvale sempre più spesso della collaborazione di artisti dei nuovi media e designer digitali, rappresentando la fisica nell'immaginario di massa con quei linguaggi e quegli strumenti di comunicazione che esprimono al meglio la contemporaneità. Non si tratta di banalizzare o semplicemente rendere spettacolare il racconto di idee e di processi – per loro natura – complessi e astratti, ma di tentare una sintesi ardua, di rendere in qualche modo davvero “visibile l'invisibile”.

a.
L'installazione “Spaziotempo” nella mostra “L'Universo a portata di mano”, in occasione del Festival dei Due Mondi di Spoleto, luglio 2011.

[as] benvenuti a bordo

Artigiani di luce.

di Catia Peduto



a.
Enrica Chiadroni, neo-ricercatrice
dei Laboratori di Frascati, nel
laboratorio di Sparc.

Hanno contribuito alla progettazione e costruzione del laser a elettroni liberi Sparc (vd. p. 28, ndr) sin dall’inizio, durante la loro tesi di laurea nei primi anni del 2000. Recentemente assunti all’Infn, continuano a dare all’esperimento un contributo di fondamentale importanza. Abbiamo incontrato Enrica Chiadroni e Giancarlo Gatti ai Laboratori Nazionali di Frascati, dove si recano tutte le mattine per “accudire” Sparc.

[as] Come è nata la vostra collaborazione con il progetto Sparc?

Giancarlo [G]: Nel mio caso non si può dire che fosse un percorso ortodosso, essendomi laureato in ingegneria. Cercando un argomento per la mia tesi, mi sono imbattuto nel professore che gestiva il progetto Sparc, il quale mi prospettò la possibilità di toccare con mano molte delle cose che sino ad allora avevo solamente studiato, con un particolare coinvolgimento sull’utilizzo di laser di potenza a impulsi molto brevi. Sparc era allora nella sua fase iniziale di installazione ed

era un periodo molto stimolante: tanti giovani appena arrivati, una nuova squadra che si stava formando e, per me, tante cose nuove da conoscere e imparare. Purtroppo nel corso di questi anni molti di quei ragazzi sono stati costretti ad andare all’estero per cogliere delle opportunità che qui in Italia sono un sogno proibito. In questo senso, Enrica e io, siamo gli unici “superstiti” di quel gruppo.

Enrica [E]: Io mi ero già avvicinata al mondo dei laser a elettroni liberi durante una scuola estiva frequentata ad Amburgo. Inizialmente ero affascinata dalle caratteristiche della radiazione prodotta e dalle sue innumerevoli applicazioni in vari campi della fisica. Quando poi ho avuto l’occasione di svolgere una tesi di laurea su Sparc, che stava nascendo allora, ho avuto la possibilità di conoscere anche altri aspetti di un acceleratore dedicato alla generazione di radiazione Fel. Negli anni, Sparc è diventata una realtà e pensare di avervi preso parte fin dall’inizio, quando da laureanda frequentavo le riunioni in cui si discuteva per progettarne ogni singolo componente, è per me l’emozione più grande.

[as] Come era la vita, mentre si costruiva Sparc?

[G]: In linea di principio non molto diversa da come è oggi: anche adesso mi divido tra il lavoro “alla scrivania” e quello di laboratorio, che sono diversi momenti della stessa attività. Cerco di pianificare quello che bisognerà fare in laboratorio e prevederne i risultati mediante dei calcoli, a volte con carta e penna, così come con l’aiuto del computer. Poi c’è la parte di laboratorio, dove cerco di mettere il tutto in pratica, e successivamente torno ad analizzare i dati raccolti.

[E]: La cosa più bella era vedere Sparc che cresceva giorno dopo giorno con il contributo di qualcuno di noi, di volta in volta espresso in un pezzo nuovo della macchina!

[as] Oggi di cosa vi occupate?

[G]: Personalmente, della parte del laser di generazione degli elettroni, che necessita di lavoro in sala ogni settimana. Da quando l’installazione si è conclusa non si può lavorare nella sala sperimentale in maniera continuativa e quindi, sempre più spesso, sono impegnato con il laser di alta potenza Flame, che si trova, non a caso, vicino a Sparc. Infatti, quella che si sta delineando qui è un’area multidisciplinare, dove effettuare esperimenti in cui convergono tutte queste risorse (il laser e l’acceleratore). Da questo punto di vista si può dire che Sparc, come lo vediamo adesso, è soltanto il primo passo e che quindi sono già in corso d’opera studi di fattibilità, progettazione e installazione di nuove linee sperimentali su cui siamo coinvolti io ed Enrica, ma ovviamente non soltanto noi.

[E]: Io mi occupo dell’ottimizzazione del fascio di elettroni, dal momento in cui viene generato fino al momento in cui viene utilizzato, sia per gli esperimenti che prevedono l’uso esclusivo di Sparc, che per quelli congiunti con Flame.

Al momento, le linee principali di cui mi occupo sono quelle del Fel, in cui le caratteristiche degli elettroni sono molto importanti, perché permettono potenzialmente di accedere a regimi di radiazione molto diversi tra loro. In questa attività lavoriamo in collaborazione con un gruppo dell’Enea. L’altra linea di ricerca sulla quale sono coinvolta è la generazione di radiazione alla frequenza del terahertz con il fascio di elettroni di Sparc. Una volta messa a punto, questa sorgente potrà essere utilizzata per fare studi di struttura della materia, in collaborazione con un gruppo dell’Università La Sapienza.

[as] E nel tempo libero cosa vi piace fare?

[G]: Purtroppo il tempo libero scarseggia sempre più! A me piace molto andare a nuotare in piscina, dove mi alleno a livello agonistico-dilettantistico. Certo, è un’attività che non riesco a fare più con continuità e quindi sta scemando. Questa estate mi dedicherò come sempre a fare sport subacquei con i miei amici. Poi mi piace anche suonare la chitarra. Quando avrò più tempo tornerò a farlo.

[E]: Anch’io andavo in piscina, ma non posso definirlo il mio hobby, era più un modo per fare attività fisica e scaricarmi. In realtà a me piace molto viaggiare e, fortunatamente, non è sempre necessario aspettare le vacanze, perché l’attività di ricerca ci consente spesso di visitare posti nuovi e avere scambi culturali. Attualmente, essendo rimasti in pochi, lavoriamo tantissimo. Devo dire, però, che le fatiche di questo periodo hanno portato a risultati di grande valore scientifico e non mancano le soddisfazioni. Inoltre, questa situazione ci ha avvicinato notevolmente, quindi lavorare spesso è fonte di divertimento!



b.
L’ingegnere Giancarlo Gatti,
recentemente assunto all’Infn,
davanti al laser di Sparc.

Il cacciatore di antimateria_ Il 16 maggio alle ore 14:56, assieme allo shuttle Endeavour, dal Kennedy Space Center di Cape Canaveral ha lasciato la Terra il rivelatore di particelle Ams (Alpha Magnetic Spectrometer), che dopo pochi giorni è stato collocato dagli astronauti sulla Stazione Spaziale Internazionale (Iss). Realizzato con il fondamentale contributo del mondo della ricerca italiano, grazie all'Infn e all'Asi, il "cacciatore di antimateria" Ams inizia così la sua missione scientifica, come primo esperimento di "big science" a operare sulla Iss. La missione di Ams è studiare nuclei di antimateria (vd. Asimmetrie n. 7, "Antimateria", ottobre 2008, ndr), ad esempio l'anti-elio, a cui stanno dando la caccia da tempo scienziati di tutto il mondo, con esperimenti sia in orbita sia nei luoghi più estremi del nostro pianeta. La loro scoperta potrebbe suggerire l'esistenza di antistelle e antigalassie o svelarci la natura della materia oscura. Ams continuerà a operare per almeno 10 anni, raccogliendo dati e inviando a terra un'enorme quantità di informazioni veicolate da 300 mila canali di elettronica. Questi dati, che complessivamente ammonteranno a circa 100 terabyte di memoria, saranno gestiti da grandi centri di calcolo anche in Italia, per poi essere studiati dai ricercatori della collaborazione. [C.P.]



Neutrini in 3D sotto il Gran Sasso_ È stato inaugurato ufficialmente lo scorso 29 marzo ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso l'esperimento Icarus, progettato dal premio Nobel Carlo Rubbia. L'esperimento era entrato gradualmente in funzione già dal 2010, catturando le tracce dei rari raggi cosmici che raggiungono le profondità del laboratorio, ma soprattutto gli eventi delle interazioni dei neutrini del fascio proveniente dal Cern. Icarus, infatti, punta a studiare l'oscillazione dei neutrini, ma anche a osservare i neutrini cosmici e quelli solari e il decadimento del protone, fenomeno mai finora osservato e inseguito dai fisici di tutto il mondo. Ciò che lo rende unico è la tecnologia innovativa del suo rivelatore. Un grande rivelatore a fili, immerso in 600 tonnellate di argon liquido, che registra il passaggio delle particelle grazie alle cariche elettriche rilasciate lungo il loro percorso dal processo di ionizzazione dell'argon. Icarus riesce in questo modo a ricostruire tracce di particelle in 3 dimensioni, replicando su un grande volume la risoluzione spaziale ed energetica delle vecchie camere a bolle, ma con una velocità estremamente maggiore. Lo si può considerare a pieno titolo il capostipite – per ora unico al mondo – di una nuova serie di apparati di rivelazione sempre più evoluti. [V.N.]



Più veloce dell'impossibile_ I ricercatori dell'esperimento Opera – che studia i neutrini inviati dal Cern di Ginevra ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn – hanno dovuto chinare la testa di fronte all'evidenza. Dopo 730 km percorsi attraverso la crosta terrestre i neutrini si sarebbero infatti presentati all'arrivo con 60 nanosecondi di anticipo sul tempo che avrebbe impiegato la luce a percorrere la stessa distanza nel vuoto, un risultato che potrebbe far crollare uno dei pilastri della fisica moderna: nessuna particella può superare la velocità della luce. Grande precisione è stata usata per la misura del "via" ai neutrini dal Cern e del tempo di arrivo al Gran Sasso, e la distanza che separa i due laboratori è stata misurata con grande accuratezza, tenendo sotto controllo i movimenti della crosta terrestre lungo la traiettoria dei neutrini nei tre anni dell'esperimento. L'atteggiamento dei ricercatori di Opera è di estrema prudenza e di massima apertura al confronto con futuri risultati di esperimenti dello stesso tipo, come l'americano Minos o il giapponese T2K. [F.S.]



I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.

I laboratori organizzano, su richiesta e previo appuntamento, visite gratuite per scuole e vasto pubblico. La visita, della durata di tre ore circa, prevede un seminario introduttivo sulle attività dell'Infn e del laboratorio e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina

www.infn.it/educational

www.infn.it



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it