

## STORIA DELLA LUCE: DAL SOLE AL LASER

VITTORIO DEGIORGIO (\*)

Nota presentata dal s.c. Luigi Lugiato  
(Adunanza del 2 febbraio 2017)

SUNTO. – Le sorgenti di luce inventate e poi sviluppate negli ultimi decenni (laser e led) hanno dato origine a rivoluzionari sviluppi scientifici e tecnologici. L'articolo ripercorre in modo sintetico la storia della luce, iniziata studiando le proprietà della luce solare, e proseguita introducendo con grande successo il concetto di onda elettromagnetica. Alla fine del 1800 alcune evidenze sperimentali hanno reso necessario complicare il “panorama” introducendo l'ipotesi quantistica, che implica la discretizzazione dell'energia elettromagnetica. La nuova ipotesi ha portato alla invenzione ed alla realizzazione dei laser e dei led. Attraverso l'utilizzo di queste sorgenti di luce sono stati fatti progressi fondamentali nella fisica di base e nella tecnologia, approfondendo la descrizione del dualismo onda-corpuscolo e del concetto di coerenza, mettendo su basi completamente nuove le tecnologie dell'informazione e della comunicazione, e fornendo nuovi strumenti a tutta la sensoristica industriale e biomedicale.

\*\*\*

ABSTRACT. – The new sources of light (laser and led) that have been invented and developed during the last fifty-sixty years have given origin to a true scientific and technological revolution. This article synthetically follows the main steps of the history of light, which started by studying the properties of solar emission, and introducing the concept of electromagnetic wave. At the end of the 19<sup>th</sup> century there was experimental evidence that it was necessary to complicate the approach by introducing the assumption that the electromagnetic energy is a discrete, and not continuous, quantity. The new concept led to design and realization of the laser and the led. Through the utilization of these sources fundamental progress was achieved in both science and technology, by deepening the description of wave-particle dualism and of the coherence concept, by putting on a completely new basis information and communication technology, and by giving new tools to industrial and biomedical sensing.

---

(\*) Professore Emerito, Università degli Studi di Pavia, Italy.  
E-mail: vittorio.degiorgio@unipv.it

## 1. IL MONDO ANTICO E MEDIOEVALE

La luce è l'inizio di tutto! Si comincia con "FIAT LUX", quando? 5775 anni fa interpretando la Bibbia, ma, naturalmente, la data è controversa. Per gli antichi Egizi la natura della luce era chiara: la luce è lo sguardo di Dio. Per i filosofi greci (Empedocle, Platone, Aristotele, ...) la luce diventa una emanazione dell'occhio umano. Il matematico Euclide scrive attorno al 300 a.C. il primo libro di Ottica. Non si occupa della natura della luce, ma delle proprietà geometriche dei raggi luminosi.

Nel 1015 Ibn al-Haytham (noto come *Albacen* or *Alhazen* in Europa) (965 Basra – c. 1040 Cairo) scrive un libro di Ottica, resuscitando il lavoro di Euclide e producendo un'analisi sistematica della teoria ottica dell'antica Grecia. Il suo libro di Ottica (*Kitab al Manazir* in arabo), tradotto in latino come *De aspectibus* o *Perspectiva*, ha avuto una grande influenza sullo studio dell'Ottica in Europa.

Lo sviluppo più importante dell'Ottica nel Medioevo è consistito nell'invenzione degli occhiali, che sembra sia avvenuta in Italia tra il 1268 e il 1289. L'inventore è sconosciuto. In quell'epoca gli occhiali erano usati prevalentemente da monaci, i quali fabbricavano artigianalmente le lenti usando cristalli di grande durezza, come il quarzo. La qualità delle lenti ebbe grande miglioramento quando la produzione fu intrapresa dalle vetrerie di Murano.

## 2. DA GALILEO A NEWTON

Galileo Galilei (1564 – 1642) cambia la storia della fisica (e della scienza in generale) introducendo un concetto fondamentale: il primo passo nella ricerca scientifica deve consistere in osservazioni sperimentali dei fenomeni da studiare. Seguendo il suo stimolo nasce in Europa una attività di ricerca sperimentale che ha un grande impatto sullo sviluppo dell'Ottica e, in particolare, sullo studio delle proprietà della luce. Nella seconda metà del 1600 ci furono alcuni importanti risultati sperimentali riguardanti le proprietà della luce. Ne cito due:

- La prima misura della velocità di propagazione della luce, da parte di Roemer
- La scoperta che la luce bianca è la somma di tanti colori, da parte di Newton.

## 2.1 La velocità della luce

All'inizio del XVII secolo, molti scienziati erano convinti che non esistesse una cosa come "la velocità della luce"; pensavano che la luce potesse percorrere qualsiasi distanza senza impiegare tempo. Galileo non era d'accordo, e ideò un esperimento per misurare la velocità della luce insieme ad un assistente: ognuno prese una lanterna schermata e andarono sulla cima di due colline che distavano poco più di un chilometro. Galileo scoprì la sua lanterna, e l'assistente che stava sull'altra collina, non appena vide la luce, scoprì a sua volta la sua lanterna. Galileo avrebbe quindi dovuto misurare il tempo necessario per vedere la luce dall'altra collina.

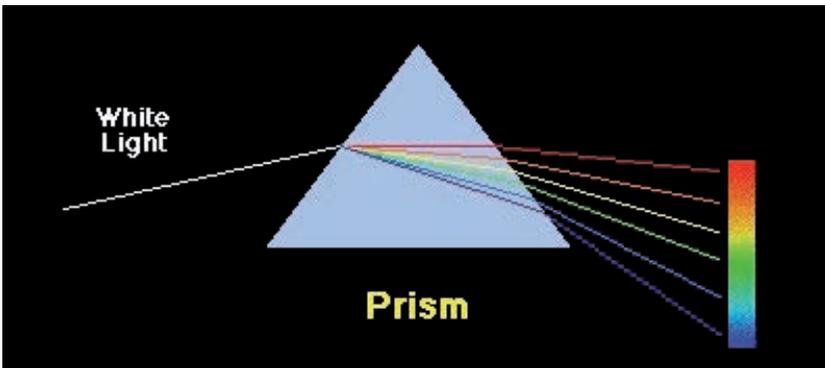
L'esperimento non diede risultato. Il problema è che la velocità della luce (300.000 km/s) è semplicemente troppo grande per poter essere misurata su brevi distanze; per percorrere un chilometro, la luce impiega un tempo così piccolo (circa 0.000003 secondi) che non poteva certo venire misurato dagli strumenti di cui disponeva Galileo. Quindi occorre una distanza molto più grande, milioni di chilometri, sulla quale far viaggiare la luce.

Una esigenza molto importante nella navigazione transoceanica è sempre stata quella di individuare la posizione in longitudine della nave. Nel secolo XVIII particolarmente interessata all'argomento era la massima potenza navale dell'epoca, l'Inghilterra. Si ricordi il "Longitude Act", emesso dal governo inglese nel 1714. Per fare questa misura era necessario ricorrere ad osservazioni astronomiche. Negli anni intorno al 1670, l'astronomo reale danese Ole Roemer (1644-1710), si dice seguendo un suggerimento di Galileo, intraprese uno studio del moto dei satelliti del pianeta Giove, che ruota intorno al Sole con un raggio dell'orbita di circa 800 milioni di chilometri. In particolare l'osservazione si concentrò sul satellite di Giove chiamato Io. Io compie un'orbita completa intorno a Giove in 1.76 giorni. Roemer si aspettava di poter predire il suo moto con buona precisione, ma scoprì che il satellite Io non era sempre dove ci si aspettava che fosse. In certi periodi dell'anno sembrava essere in ritardo, in altri, sembrava anticipare. Molto strano. Roemer notò però che Io sembrava essere *avanti* rispetto all'orbita prevista quando la Terra si stava avvicinando a Giove, e *indietro* quando la terra si stava allontanando. Ora, avendo misurato di quanto sembrava variare la durata dell'orbita di Io e di quanto varia la distanza fra la Terra e il Sole,

Roemer fu in grado di calcolare la velocità della luce con una discreta approssimazione.

## 2.2 I colori

Negli anni 60 del 1600 Isaac Newton (1642- 1727) compì una serie di esperimenti di scomposizione di luce bianca usando prismi di vetro, come nell'esempio mostrato in *Fig. 1*. In quei tempi l'opinione comune era che il bianco fosse il colore naturale della luce, e che il passaggio attraverso il prisma degradasse irreversibilmente il fascio di luce, in modo tale che la presenza di colore indicasse una situazione intermedia tra luce e buio. Per controbattere questa ipotesi Newton utilizzò una sequenza di due prismi, mostrando che era possibile con il secondo prisma ricomporre il fascio di luce bianca che era stato decomposto dal primo prisma.



*Fig. 1 – Scomposizione della luce bianca attraverso un prisma di vetro.*

Nella *Fig. 2* è mostrata la distribuzione in lunghezza d'onda dell'intensità della luce solare, che presenta un picco in corrispondenza del giallo. Nella stessa Figura lo spettro solare è confrontato con quello di altre stelle che hanno una diversa temperatura superficiale. Si noti che esiste un perfetto adattamento biologico: il nostro occhio ha sensibilità centrata sullo spettro emesso dal sole. Se cambiamo stella diventiamo ciechi!

Newton si convinse che le proprietà mostrate dalla luce nei fenomeni di riflessione e rifrazione potevano essere spiegate solo

ricorrendo all'ipotesi che la luce fosse costituita di un flusso di particelle, e non da un'onda.

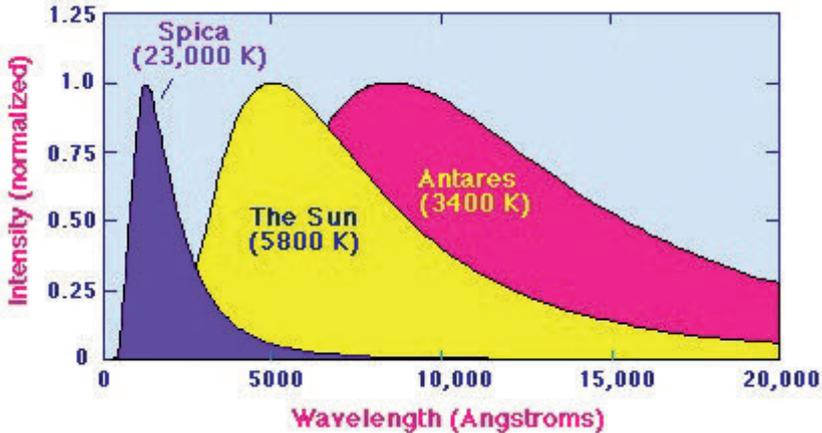


Fig. 2 – Spettro emesso da stelle a diversa temperatura.

### 3. NATURA DELLA LUCE

Che cosa è la luce? Un'onda (Christiaan Huygens, 1629-1695) o un flusso di particelle (Newton)? Diversi esperimenti svolti da Thomas Young, Augustin Fresnel, ed altri scienziati tra fine Settecento e inizio Ottocento mostrarono che la luce è un'onda, che trasporta energia e quantità di moto.

Una spettacolare unificazione di tutte le teorie concernenti l'elettricità, il magnetismo e l'ottica fu compiuta da James Clerk Maxwell negli anni 60 del 1800, con la pubblicazione del lavoro "*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*", e successivamente nel 1873 con il trattato "*Treatise on Electricity and Magnetism*". La teoria di Maxwell descrive il segnale luminoso come un insieme di onde elettriche e magnetiche che vibrano perpendicolarmente tra loro e perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

La teoria generale dei fenomeni elettrici e magnetici proposta da Maxwell predice che possano esistere onde elettromagnetiche di qualsiasi frequenza, tutte viaggianti alla velocità  $c = \lambda v$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda e  $v$  la frequenza dell'onda elettromagnetica. A frequenza via

via crescente (lunghezza d'onda decrescente) le onde elettromagnetiche prendono il nome di onde radio, microonde, infrarosso, luce visibile, ultravioletto, raggi X.

La teoria di Maxwell ebbe subito ampie verifiche, ed aprì la strada ad importanti sviluppi tecnologici ed applicativi. Un passo molto significativo fu compiuto nel 1888 da Heinrich Hertz, che utilizzò la teoria di Maxwell per creare strumenti che potessero generare e ricevere impulsi a radiofrequenza. Di qui il successivo sviluppo delle radiocomunicazioni, della televisione, e degli apparecchi a microonde.

#### 4. NASCITA DELLA FISICA QUANTISTICA

La ricerca sperimentale svolta negli ultimi decenni del 1800 individuò però l'esistenza di alcuni fenomeni che non erano spiegabili con la teoria di Maxwell. Uno di questi è proprio la distribuzione in lunghezza d'onda (lo spettro) della radiazione solare riportata nella *Fig. 2*. Le misure effettuate su corpi riscaldati a diverse temperature  $T$  mostravano che la forma dello spettro e la lunghezza d'onda di picco non dipendono dalla natura del corpo, ma solo da  $T$ , ma non esisteva una teoria capace di spiegare i risultati sperimentali. Nella letteratura scientifica lo spettro della luce emessa è spesso chiamato spettro di corpo nero. Il corpo nero è un materiale ideale che assorbe completamente la radiazione incidente qualunque sia la sua frequenza. Max Planck escogitò una formula, che presentò il 19 ottobre 1900 in una riunione della Società di Fisica Tedesca, che descriveva con buona precisione i risultati sperimentali. L'aspetto sconvolgente della formula di Planck è che può essere giustificata solo ammettendo che l'energia posseduta dall'oscillatore a frequenza  $\nu$  non sia espressa da un valore continuo, ma possa assumere solo valori discreti, che siano multipli di una quantità fondamentale  $h\nu$ , dove  $h$  è una costante universale, che è stata poi chiamata costante di Planck. La formula proposta da Planck per descrivere le curve della *Fig. 2* è la seguente:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$$

dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann.

## 5. LASER E LED

### 5.1 *Il laser*

Qual'è l'origine dell'emissione di luce? Un insieme di atomi a temperatura  $T$  possiede una quantità di energia che si manifesta sotto forma di agitazione termica. Le collisioni fra atomi creano atomi eccitati. Adottando un semplice modello che vede l'atomo come un microscopico sistema planetario, in cui gli elettroni hanno il ruolo dei pianeti che ruotano attorno al nucleo, eccitare l'atomo significa portare uno, o più, elettroni su orbite più esterne rispetto a quelle percorse in stato di equilibrio. Con un tempo di rilassamento che dipende dal tipo di atomo e dal tipo di livelli energetici coinvolti l'atomo ritorna nella condizione di equilibrio emettendo l'energia in eccesso spesso sotto forma di onda elettromagnetica. Questo è il fenomeno cosiddetto di emissione spontanea di luce. L'onda emessa ha fase e direzione casuali. Un aspetto importante è che ogni tipo di atomo ha una serie discreta di livelli energetici, è quindi in grado di assorbire ed emettere solo un insieme discreto di frequenze.

In un articolo pubblicato nel 1917 Einstein presentò una nuova derivazione della formula di Planck utilizzando i concetti di assorbimento ed emissione, mostrando nel contempo che è però necessario ipotizzare anche l'esistenza di un nuovo processo, che chiamò emissione stimolata.

L'emissione stimolata è un processo mediante il quale un quanto di luce (fotone) di frequenza appropriata interagisce con un atomo eccitato inducendolo a ritornare allo stato fondamentale emettendo l'energia in eccesso sotto forma di un fotone avente frequenza, direzione e polarizzazione identiche a quelle del fotone incidente (vedi *Fig. 3*). In termini ondulatori l'onda stimolata emessa ha anche la stessa fase dell'onda incidente, cioè è "coerente" con l'onda stimolante.

Il lavoro di Einstein non ebbe particolare eco nella letteratura scientifica per quasi 40 anni. Solo negli anni 50 del 1900 si è cominciato a riflettere sull'utilizzo dell'emissione stimolata per creare nuove sorgenti di onde elettromagnetiche. Nel 1951 Joseph Weber, all'epoca studente dell'Università del Maryland, propose di utilizzare l'emissione stimolata per realizzare un nuovo amplificatore di microonde. Nel 1953, Charles Hard Townes (Columbia University, USA) assieme ai suoi studenti James P. Gordon e Herbert J. Zeiger, riuscì a costruire

l'amplificatore di microonde, e gli diede il nome di "maser" (acronimo di "microwave amplification by stimulated emission of radiation").

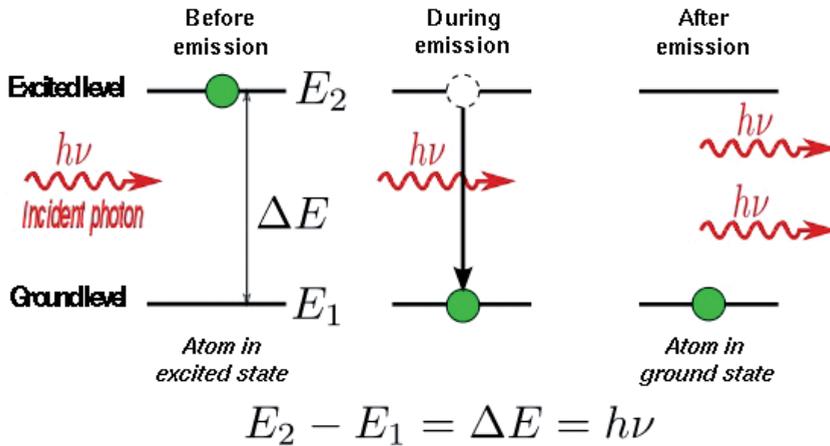


Fig. 3 – Emissione stimolata: il fotone incidente sull'atomo eccitato stimola l'emissione di un secondo fotone.

L'attività di ricerca successiva si indirizzò verso l'utilizzo dell'emissione stimolata per amplificare la luce invece delle microonde. Un ruolo importante fu giocato dai lavori dei ricercatori russi Nikolay Basov and Aleksandr Prokhorov, che mostrarono la necessità di coinvolgere più di due livelli energetici per ottenere un funzionamento in continua del dispositivo. In un lavoro pubblicato nel 1958 Townes e Schawlow proposero di costruire una sorgente di luce inserendo in una cavità costituita da due specchi paralleli un insieme di atomi eccitati allo stesso livello energetico. Grazie all'emissione stimolata, gli atomi eccitati presenti in cavità emettono luce in modo cooperativo e sincronizzato, generando, attraverso multiple riflessioni fra i due specchi, un fascio di luce direzionale (perpendicolare agli specchi) e monocromatico. Tecnicamente, si è costruito quello che si chiama un oscillatore, cioè un amplificatore ottico reazionato positivamente. Dalla frase "*light amplification by stimulated emission of radiation*" nasce l'acronimo "laser". Due anni dopo il lavoro teorico di Townes fu realizzato il primo laser da Theodore Maiman nei laboratory di ricerca della Hughes Aircraft Company (USA), utilizzando come mezzo attivo un cristallo di ossido di alluminio drogato con atomi di cromo (si tratta di una pietra preziosa, il rubino!) (Fig. 4).

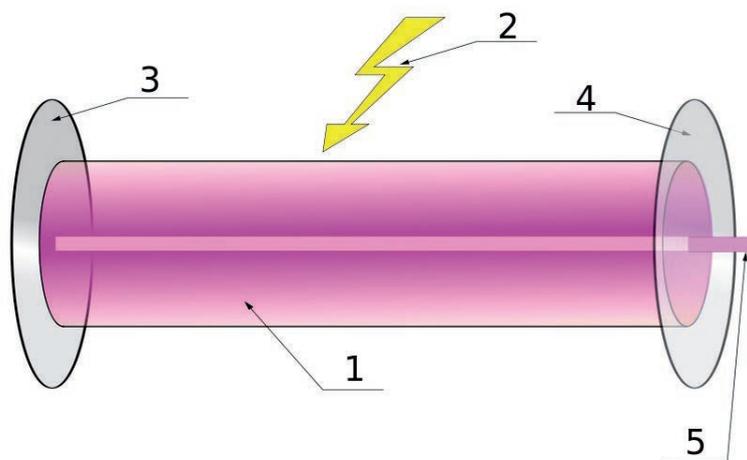


Fig. 4 – Laser a rubino: il cristallo contenente gli atomi eccitati è posto fra due specchi paralleli.

Nel giro di pochissimi anni furono poi realizzati molti tipi diversi di laser, utilizzando solidi cristallini ed amorfi, liquidi, e gas, coprendo un ampio spettro di lunghezze d'onda dall'infrarosso all'ultravioletto.

Una importanza particolare va ascritta al laser a semiconduttore: inventato nel 1962 presso i laboratori di ricerca della General Electric (USA) da Bob Hall e collaboratori. In alcuni tipi di semiconduttori i processi di ricombinazione elettrone-lacuna possono essere radiativi, cioè l'energia viene liberata sotto forma di onda elettromagnetica (emissione di un fotone). I processi di ricombinazione possono avvenire in un diodo a giunzione, dispositivo costituito da due zone drogate diversamente in modo da avere portatori di carica diversi. Il laser General Electric utilizzava una giunzione p-n di arseniuro di gallio (GaAs), ed emetteva nel vicino infrarosso alla lunghezza d'onda di  $0.85 \mu\text{m}$ . Il laser è alimentato con una corrente elettrica continua o impulsata, l'asse della cavità laser ha direzione perpendicolare a quella del passaggio di corrente elettrica (vedi Fig. 5). Il laser ha dimensioni molto piccole, ed ha una efficienza enormemente superiore a quella di tutti gli altri tipi di laser: il rapporto tra la potenza luminosa emessa e quella elettrica utilizzata per il funzionamento può superare il 50%. Inoltre si tratta di un dispositivo comandato da una differenza di potenziale molto bassa, dell'ordine di 1 V.

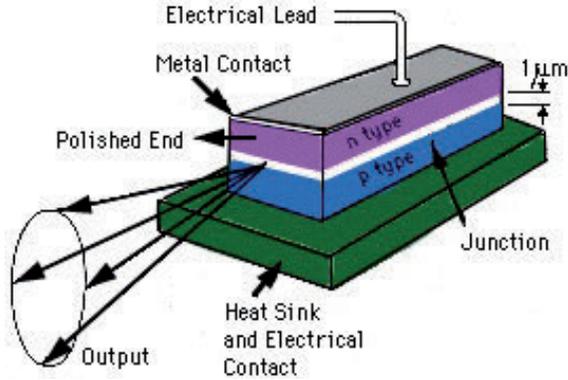


Fig. 5 – Laser a semiconduttore.

Il laser è una sorgente di luce che differisce profondamente dalle sorgenti tradizionali, perché emette un fascio di luce collimato e monocromatico. Tipicamente il fascio laser ha uno sparpagliamento angolare dell'ordine del milliradiante, cioè la macchia luminosa ha un diametro dell'ordine di un millimetro se osservata alla distanza di un metro. La lunghezza d'onda di emissione può essere definita con grande precisione, in un laser "singolo modo" la larghezza di banda rapportata alla lunghezza d'onda centrale,  $\Delta\lambda/\lambda$ , può valere  $10^{-11}$ .

I laser possono funzionare in continua o anche impulsati. Impulsi laser ultrabrevi, dell'ordine dei femtosecondi, con intensità elevatissima, dell'ordine dei  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>, sono impiegati nelle più avanzate ricerche scientifiche.

Un aspetto di grande importanza scientifica è che la disponibilità di fasci laser di elevata intensità ha fatto nascere una nuova disciplina, l'ottica nonlineare. Inviando il fascio laser su opportuni cristalli, è ad esempio possibile, come illustrato nella Fig. 6, generare un nuovo fascio di luce a frequenza doppia.

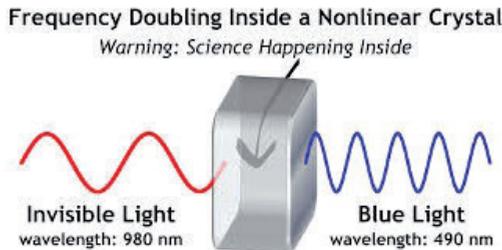


Fig. 6 – Ottica nonlineare: raddoppio di frequenza utilizzando un cristallo con proprietà ottiche nonlineari.

### 5.2 Diodo a emissione di luce, *Light Emitting Diode (LED)*

Il diodo a emissione di luce (noto con l'acronimo "led") è un sottoprodotto della ricerca sui laser a semiconduttore. Dal punto di vista della struttura il led è più semplice del laser perché non c'è una cavità ottica. L'emissione avviene su di una banda di frequenza più estesa e con un maggiore sparpagliamento angolare. Il primo led fu realizzato da Nick Holonyak, General Electric (USA), utilizzando una giunzione p-n di GaAsP, con emissione a  $\lambda = 0.71 \mu\text{m}$ . I pregi del led sono simili a quelli del laser a semiconduttore. Si tratta di una sorgente fredda, comandata a bassa tensione, di grande efficienza, e lunga durata. Sono disponibili led che emettono su tutti colori dello spettro visibile.

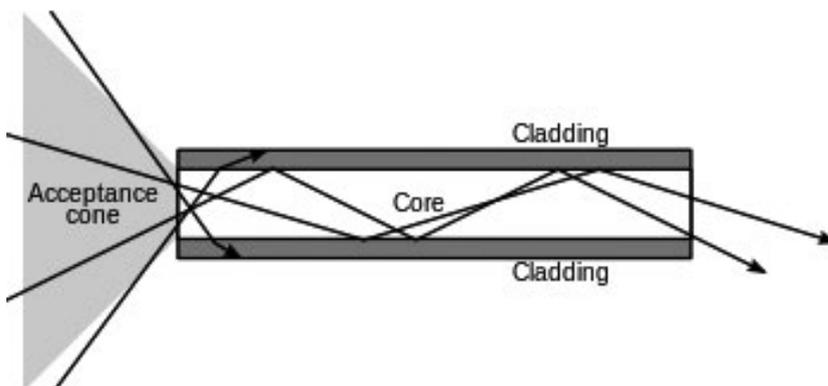
Un aspetto molto interessante dei dispositivi a semiconduttore è che esistono materiali organici che hanno proprietà simili a quelle dei semiconduttori "classici". Si possono realizzare oled (organic light emitting diode, diodo organico a emissione di luce) con materiali di tipo plastico, molto sottili e pieghevoli.

## 6. APPLICAZIONE DELLA FOTONICA

E' impossibile qui descrivere, sia pure sommariamente, tutte le applicazioni che i dispositivi laser hanno e continueranno ad avere nei campi più disparati.

Mi limito ad alcuni cenni, scegliendo, con una certa arbitrarietà le applicazioni più diffuse e più semplici da spiegare. Le applicazioni del laser si possono dividere in tre categorie principali: a) tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni ("Information and Communication Technology", ICT), che comprendono le comunicazioni ottiche (internet, telefonia a lunga distanza), le memorie ottiche (CD, DVD, blue-ray), le stampanti laser, e l'elaborazione ottica dei dati; b) strumentazione diagnostica e sensoristica, che comprende una grande varietà di tecniche ottiche per la telemetria, la velocimetria, la misura di grandezze meccaniche ed elettriche, la diagnostica ambientale e biomedicale; c) la lavorazione dei materiali con fasci laser intensi, che comprende operazioni di taglio, saldatura, foratura e marcatura di tutti i materiali di interesse industriale, ed anche la biomedicina: distacco della retina, eliminazione miopia, chirurgia laser.

Tra le applicazioni di tipo a) spiccano per la loro eccezionale importanza economica e sociale le comunicazioni ottiche. Il fascio di luce emesso dal laser a semiconduttore viene modulato in ampiezza e/o fase, in modo tale da inserire in esso l'informazione da trasmettere. Il fascio laser viaggia in fibra ottica attraverso la rete mondiale internet che copre tutto il globo terrestre utilizzando una fitta rete di cavi sottomarini con una capacità di trasmissione di alcuni Tbit/s. E' noto che un'onda elettromagnetica di dimensione trasversale finita si sparpaglia angularmente propagandosi nel vuoto o in un mezzo omogeneo: questo è il fenomeno della diffrazione. E' possibile evitare lo sparpagliamento facendo propagare la luce in una guida d'onda. Lo schema più semplice di guida d'onda luminosa è costituito da un cilindro di vetro posto in aria, in cui i raggi luminosi che viaggiano formando angoli piccoli con l'asse del cilindro incontrano la parete vetro-aria con un angolo di incidenza superiore all'angolo limite, e vengono quindi totalmente riflessi. In realtà la struttura che viene utilizzata per le fibre ottiche comprende un nucleo ed un mantello fatti con due materiali vetrosi di diverso indice di rifrazione (vedi *Figg. 7 e 8*). Nella fibra ottica utilizzata per le telecomunicazioni viaggiano 10-50 miliardi di impulsi al secondo, ed il singolo impulso (un bit) dura 10-50 picosecondi. I cavi ottici sottomarini portano il 95% del traffico IP voce e dati tra continenti, ed il 100% del traffico internet internazionale. Un ruolo molto importante nella diffusione delle comunicazioni ottiche è stato giocato dall'affinamento delle tecniche di produzione industriale di fibre di altissima qualità a costi contenuti.



*Fig. 7 – Fibra ottica: il fascio di luce si propaga per riflessioni totali interne.*

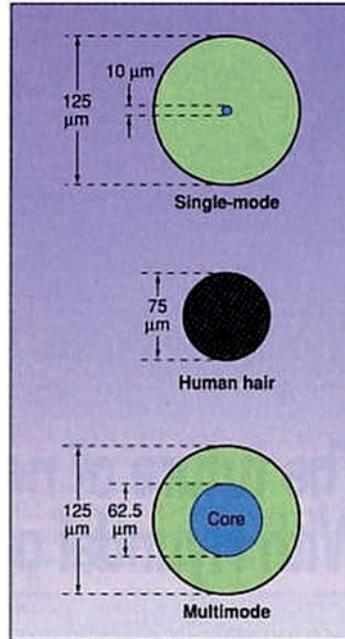


Fig. 8 – Sezione trasversale di una fibra ottica, le dimensioni sono paragonabili a quelle di un capello.

Le applicazioni di tipo b) coprono una vastissima gamma che si estende da aspetti fisici fondamentali ad aspetti industriali e biologici. Grazie alla monocromaticità e coerenza del laser si possono misurare con grande precisione distanza e velocità di oggetti in movimento, ed anche spostamenti estremamente piccoli. Riguardo agli aspetti di fisica fondamentale mi limito qui a citare l'interferometro laser chiamato LIGO che ha avuto un ruolo essenziale nel recentissimo esperimento di rivelazione di onde gravitazionali. In campo biologico segnalo la capacità del fascio laser opportunamente focalizzato di intrappolare oggetti microscopici, quali le cellule biologiche (Fig. 9). La spettroscopia laser è ampiamente utilizzata come metodo efficace e poco invasivo nella diagnostica medica.

Le applicazioni di tipo c) sono basate su processi termici che usano il raggio laser come fonte di calore, poiché esso può essere facilmente concentrato con delle lenti raggiungendo densità di potenza superiore a  $1 \text{ MW/mm}^2$ . L'elevatissima irradianza, data dal concentrare una grande potenza in un'area molto piccola, permette ai laser il taglio, l'incisione e

la saldatura di metalli. Nel momento in cui il laser interagisce con il materiale, l'energia dei fotoni viene assorbita dal materiale in lavorazione provocando localmente un rapido aumento di temperatura, che porta a fusione o ebollizione asportando il materiale senza contatto meccanico per espulsione del materiale fuso, vaporizzazione o meccanismi di ablazione. A differenza dei processi convenzionali non si ha usura e la rimozione del materiale non dipende dalla sua durezza, ma dalle proprietà ottiche del laser e le proprietà ottiche e termofisiche del materiale. Risulta per questo particolarmente indicato per lavorare leghe ad alta resistenza termica, carburi, compositi fibro-rinforzati, ceramici e stellite.

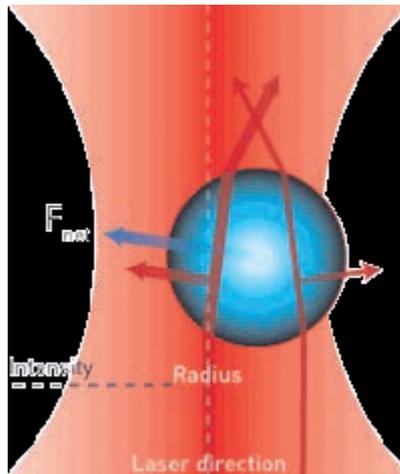


Fig. 9 – Particella di dimensioni micrometriche intrappolata focalizzando un fascio laser.

Nell'ingegneria meccanica spesso si impiegano pezzi e componenti in materiali resistenti. La marcatura laser è particolarmente indicata per garantire la tracciabilità, poiché è permanente e resistente anche a sollecitazioni meccaniche o agenti atmosferici. Può essere applicata a tutte le forme e praticamente su qualsiasi materiale, caratteristica che la rende adattabile ad un'ampia gamma di componenti. La marcatura di pezzi tramite laser può essere applicata a quasi tutti i materiali e in ogni forma. Il laser rappresenta quindi uno strumento universale per la marcatura dei pezzi più diversi.

Un settore importante delle lavorazioni con laser è rappresentato dalla chirurgia laser, soprattutto di tipo oculistico (eliminazione miopia, distacco della retina).

Uno sviluppo molto recente, di grande interesse applicativo, riguarda la fabbricazione tri-dimensionale (3D) di oggetti, denominata in inglese Additive Manufacturing. Oggetti di forma arbitrariamente complessa sono fabbricati strato per strato con programmazione al calcolatore.

Un enorme campo di applicazioni riguarda anche i led: schermi TV e megaschermi, illuminazione di ambienti, semafori, .... Mi limito qui ad accennare i vantaggi dei led dal punto di vista dell'illuminotecnica: la durata; l'assenza di costi di manutenzione; l'elevato rendimento; luce pulita, priva di componenti IR e UV; la flessibilità di installazione del punto luce; funzionamento a bassissima tensione, quindi in sicurezza; accensione a freddo (fino a  $-40^{\circ}\text{C}$ ); insensibilità a umidità e vibrazioni; durata non influenzata dal numero di accensioni/spegnimenti. Va aggiunto che lo spettro luminoso dei led varia molto in base alla tipologia e, se il led viene usato per l'illuminazione, lo spettro può essere sfruttato anche al 100%. L'utilizzo del led nell'illuminazione domestica punta a sostituire lampade a incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (a risparmio energetico). Una normativa della Comunità Europea prevede che entro il 2016 non vengano più vendute lampade a incandescenza, in tutti i paesi della Comunità Europea, graduandone annualmente il divieto in base alla potenza in watt: le lampadine da 60 watt sono andate in pensione, in Europa, dal 1 settembre 2011; quelle da 100 sono state eliminate dal mercato nel settembre del 2009 e quelle da 75 nel 2010.

La straordinaria adattabilità degli oled apre le porte a campi di applicazioni diversissimi e finora immaginati solamente dalla mente degli autori di fantascienza. Gli oled possono infatti essere costruiti con materiali quasi del tutto trasparenti alla luce da essi prodotta, consentendo la realizzazione di schermi che, una volta spenti, appaiono come veri e propri vetri. Ancora più incredibile potrebbe sembrare la creazione di dispositivi flessibili, resa possibile dalla capacità degli oled di essere costruiti su substrati plastici (cioè flessibili). Uno schermo simile non ha limiti alle proprie applicazioni, in futuro potrebbe essere utilizzato facilmente per creare televisori pieghevoli, oppure essere applicato a vestiti o altro.

## 7. COMMENTO FINALE

L'argomento trattato in questo articolo presenta nello stesso tempo un elevato contenuto scientifico ed un eccezionale potenziale applicativo. L'importanza scientifica è testimoniata efficacemente dalla

constatazione che premi Nobel in Fisica e Chimica legati ad argomenti di Fotonica sono stati assegnati, limitandoci agli ultimi 15 anni, negli anni 1999, 2000, 2001, 2005, 2009, 2012, e 2014.

In particolare i Premi Nobel 2014 per la Fisica e per la Chimica sono entrambi legati alla Fotonica;

- Fisica: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura **“for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources”**.
- Chimica: Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner **“for the development of super-resolved fluorescence microscopy”**.

Vorrei esprimere un particolare ringraziamento al prof. Luigi Lugiato per avermi presentato ai membri dell'Istituto.

#### BIBLIOGRAFIA

Una referenza di carattere generale, con taglio divulgativo, è rappresentata dal testo di A. Frova, *“Luce colore visione”*, Rizzoli (2000). Per un testo recente di carattere non-specialistico, si veda V. Degiorgio e I. Cristiani, *“Note di Fotonica”*, Springer (2016).

Per quanto riguarda la parte storica (Sezioni 1-3) si può consultare ad esempio:

B.D. Guenther, *“Modern Optics”*, Oxford University Press (2015).

Per gli articoli storici citati nelle Sezioni 4 e 5:

M. Planck *“On the Law of the Energy Distribution in the Normal Spectrum”*, *Annals of Physics*, 4, 553 (1901).

A. Einstein, *“Zur Quantentheorie der Strahlung”*, *Physikalische Zeitschrift* 18, 121-128 (1917). In inglese *“On the Quantum Theory of Radiation”*, in D. ter Haar, *“The old quantum theory”*, Pergamon (1967).

Per le sezioni 6 e 7:

R.J. Glauber, *“One hundred years of light quanta”*, in K. Grandin, ed., *The Nobel Prizes 2005*, Nobel Foundation, 2006, pp. 75-98.

C.H. Townes, *“Production of Coherent Radiation by Atoms and Molecules”*, in *Nobel Lectures in Physics, 1963-1970*, Elsevier 1972.

T.H. Maiman, *“Stimulation of Coherent Radiation in Ruby”*, *Nature* 187, 493-404 (1960).