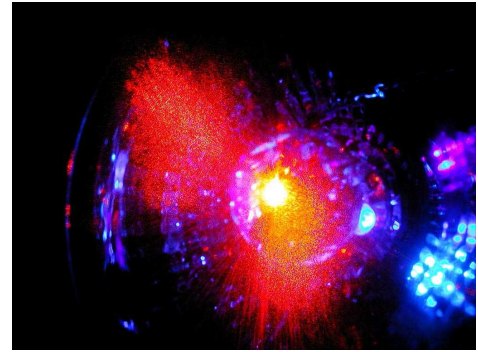

L'ottica non lineare tra passato e futuro

Rocco Langone
Studente
E-mail: maternina@libero.it



ABSTRACT: La storia dell'ottica non lineare ebbe inizio circa quarant'anni fa. Più precisamente si fa risalire la sua nascita come scienza sperimentale all'esperimento che compirono nel 1961 Franken e colleghi (Glauber, Hall e Hansch) dell'Università del Michigan. L'esperimento fu reso possibile grazie ai progressi ottenuti nella realizzazione dei primi laser ad alta intensità.

PAROLE CHIAVE: Laser, frequenza, ottica non lineare.

1. Introduzione

La storia dell'ottica non lineare ebbe inizio circa quarant'anni fa. Più precisamente si fa risalire la sua nascita come scienza sperimentale all'esperimento che compirono nel 1961 Franken e colleghi (Glauber, Hall e Hansch) dell'Università del Michigan. L'esperimento fu reso possibile grazie ai progressi ottenuti nella realizzazione dei



Figura 1.

primi laser ad alta intensità, che permisero di studiare la risposta non lineare dei materiali all'applicazione di intensi campi elettromagnetici in banda ottica. Il gruppo di Franken, focalizzando un laser a rubino alla lunghezza d'onda di 694 nm su una lamina di quarzo cristallino osservarono con uno spettrometro che la radiazione emergente conteneva una frequenza doppia (ovvero una lunghezza d'onda dimezzata) rispetto a quella in ingresso. In figura si vede un raggio laser che entra in un cristallo come rosso ed emerge come blu, evidenziando la seconda armonica...

Con i laser è possibile eccitare forti interazioni tra le "onde in banda ottica", che possono essere modulate e cambiate in frequenza. Si ha un flusso di energia tra questi campi e il mezzo nel quale interagiscono, veicolato da una *polarizzazione non lineare* presente nel cristallo: lo scambio energetico tra il materiale e i campi con esso interagenti può far nascere nuove componenti in frequenza inizialmente assenti nella radiazione incidente.

Nel corso degli ultimi quarant'anni sono stati studiati molti fenomeni ottici non lineari, in particolare i fenomeni del secondo e del terzo ordine, dove l'ordine dipende dal numero dei campi ottici interagenti, tre nel primo e quattro nel secondo caso.

Di seguito verranno descritti i tre effetti ottici del secondo ordine che hanno posto le fondamenta e hanno dato il là allo sviluppo dell'ottica non lineare e alle sue applicazioni. Essi sono:

1. Generazione di seconda armonica (SHG)
2. Generazione di frequenza somma (SFG)
3. Generazione di frequenza differenza (DFG) .

2. Panoramica generale

Per fornire una buona descrizione dei fenomeni ottici non lineari (almeno in quei casi in cui il mezzo è trasparente alle frequenze dei campi ottici interagenti) si può usare un modello classico semplificato di dielettrico, in cui il materiale è costituito da un insieme di atomi ciascuno dei quali viene trattato come un oscillatore armonico, (si pensi a una molla...).

Esso in questo modello è sottoposto a una forza di richiamo elastica costituita sia da una funzione lineare che da una non lineare del suo spostamento dalla propria posizione di equilibrio. Risolvendo l'equazione del moto dell'oscillatore si vede come la polarizzazione del materiale sviluppi nuove componenti in frequenza non presenti nella radiazione in ingresso. Sono proprio queste nuove componenti cromatiche della polarizzazione che agiscono da sorgente delle nuove componenti in frequenza del campo elettromagnetico incidente sul mezzo. Ciò si nota, tra l'altro, dal fatto che l'equazione delle onde relativa ai campi interagenti nel cristallo è un'equazione disomogenea, guidata, in cui il termine forzante è dato proprio dalla polarizzazione non lineare.

Per capirne di più di quanto fin qui esposto proviamo a fare qualche esempio. Cominciamo col semplice esempio dell'altalena. Se la lasciamo libera di muoversi essa oscillerà con una certa frequenza. Se invece la

spingiamo, sarà forzata ad oscillare con la frequenza della forza che applichiamo: la forza comanda, guida il moto dell'altalena. Nella stessa maniera l'ampiezza dello spostamento dalla propria posizione di equilibrio degli atomi del materiale e il relativo periodo di oscillazione sono determinati dall'intensità e dalla frequenza del o dei campi elettrici applicati. Se tale intensità supera una certa soglia lo spostamento degli atomi non dipende linearmente dal campo applicato ma segue una legge non lineare.

Un altro fenomeno analogo è il comportamento di una molla soggetta alla legge di Hooke. Infatti applicando una forza alla molla essa, essendo un corpo elastico, si deforma e ritorna allo stato iniziale una volta cessata l'azione della forza. La forza di richiamo esercitata dalla molla è direttamente proporzionale allo spostamento dalla sua condizione di riposo e ha verso contrario a esso. L'allungamento (o l'accorciamento) della molla dovuto alla forza cresce linearmente con essa fino a un limite di elasticità. Se si supera tale limite le deformazioni della molla diventano anelastiche e la risposta della molla a una sollecitazione non è più lineare.

Detto ciò possiamo passare a descrivere nel dettaglio i tre fenomeni sopra citati.

3. Generazione di frequenza somma (SFG)

Consideriamo dapprima il processo di SFG, con i raggi laser in ingresso (ad esempio alle frequenze ω_1 e ω_2) incidenti normalmente alla superficie del materiale.

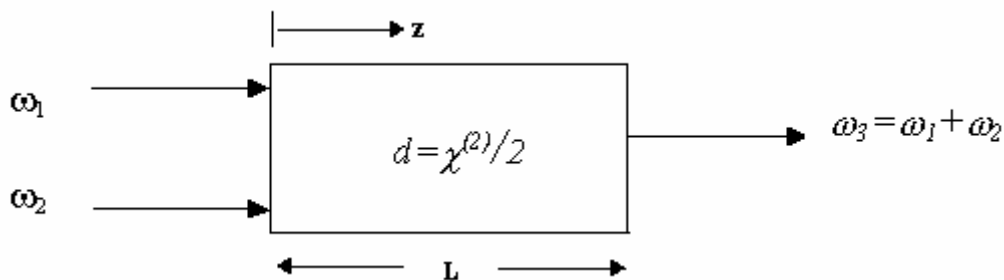


Figura 2.

L'interazione non lineare dei due raggi laser con il cristallo fa sì che in uscita dal mezzo sia presente, insieme a quelli in ingresso, un laser di frequenza pari alla somma delle frequenze dei laser incidenti (ω_3). Si osserva che è molto importante che si raggiunga il *perfetto allineamento di fase* tra il campo (o i campi) in ingresso e quello in uscita alla frequenza somma in modo da trasferire la massima energia in quest'ultimo. Inoltre maggiore è lo sfasamento tra i campi minore è l'intensità I_3 del laser di frequenza ω_3 .

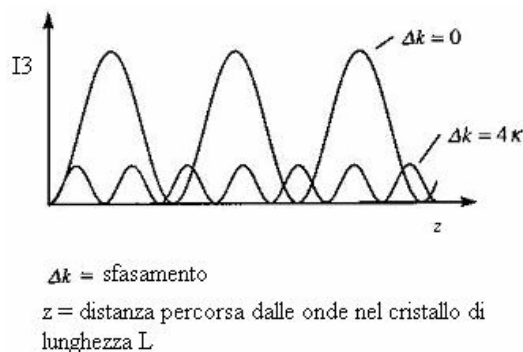


Figura 3.

Infatti microscopicamente nella situazione di perfetto allineamento di fase i dipoli che costituiscono il materiale risultano tutti allineati e di conseguenza la radiazione emessa da ciascuno di essi si somma *costruttivamente* con quella emessa dagli altri; d'altra parte la situazione di sfasamento corrisponde al caso microscopico in cui i dipoli non sono allineati e la radiazione emessa da ciascuno può interferire in modo *distruttivo* con quella emessa dagli altri, col risultato di un minore trasferimento di energia in uscita rispetto al caso precedente. Se uno dei campi in ingresso ha ampiezza costante, si vede che gli altri due campi che interagiscono hanno un comportamento oscillante, scambiandosi periodicamente energia all'interno del cristallo.

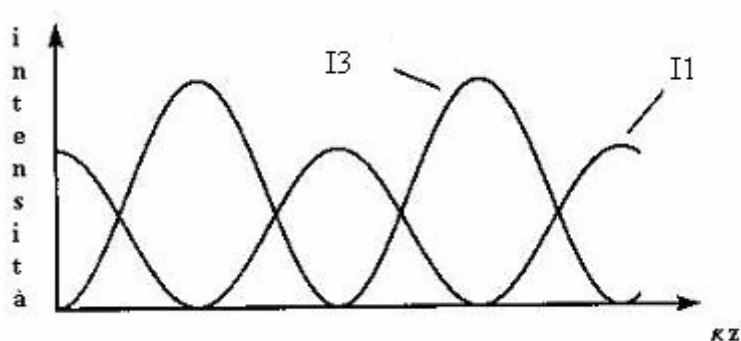


Figura 4.

Prima di enunciare qualche applicazione della *SFG* può risultare utile, visto che se ne è parlato, chiarire il fenomeno dell'interferenza tra le onde.

Il fenomeno dell'**interferenza** è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. Si osserva che l'intensità dell'onda risultante, in un dato punto dello spazio, può essere maggiore o minore dell'intensità di ogni singola onda di partenza. L'interferenza viene detta **costruttiva**, quando l'intensità risultante è maggiore di ogni singola intensità originaria, o **distruttiva**, quando risulta inferiore.

Si intereferenza totalmente costruttiva se le onde giungono in **concordanza di fase**. L'effetto risultante è che le due onde si sovrappongono esattamente e l'onda risultante ha ampiezza doppia rispetto alle onde componenti. Si ha interferenza totalmente distruttiva se le onde arrivano in **opposizione di fase**. Le creste di un'onda si sovrappongono agli avvallamenti dell'altra, quindi le due onde si elidono a vicenda e la risultante è nulla.

Veniamo ora, come anticipato, alle possibili applicazioni della *SFG*. Un suo utilizzo può essere quello di produrre laser nell'ultravioletto a partire da laser nel visibile che sono più semplici e relativamente poco costosi da costruire. Un'altra possibile applicazione è la cosiddetta "*up conversion*", un procedimento mediante il quale un debole segnale infrarosso viene convertito in un segnale visibile facendolo sommare ad un intenso laser nel visibile: in tal modo quel debole segnale non rivelabile direttamente, può essere rivelato da *detector* che lavorano nel visibile, più facilmente disponibili e più efficienti.

4. Generazione di frequenza differenza (DFG)

Nella DFG, due onde elettromagnetiche in banda ottica interagiscono in un cristallo per produrre in uscita un'onda di frequenza pari alla differenza delle loro frequenze:

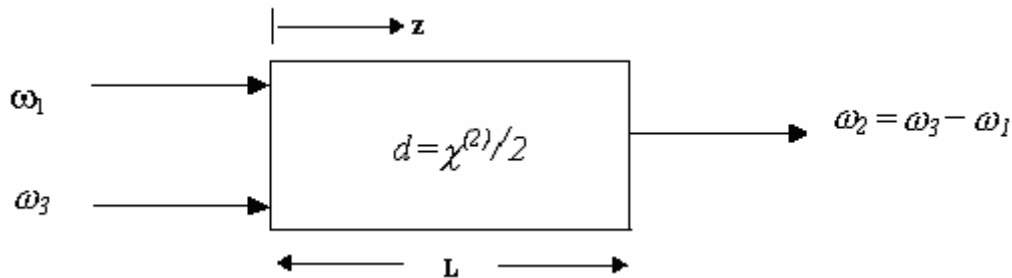


Figura 5.

Nel caso in cui una delle ampiezze dei campi rimane costante nel processo, si nota come le ampiezze degli altri due campi interagenti cresce in funzione della distanza percorsa nel cristallo dalle onde elettromagnetiche.

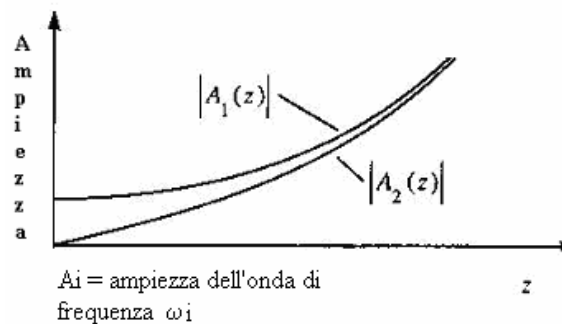


Figura 6.

Questo comportamento è qualitativamente dissimile da ciò che accade nella SFG, in cui come abbiamo visto si ha un andamento oscillante delle ampiezze all'interno del mezzo. Questa differenza è dovuta alla diversa natura quanto-meccanica dei due processi. Infatti nel caso della SFG vengono distrutti due fotoni e ne viene creato uno alla frequenza somma. Nel caso della DFG la distruzione di un fotone è accompagnata dalla creazione di altri due fotoni. Ciò può essere visualizzato facendo riferimento ai diagrammi energetici rappresentati in figura.

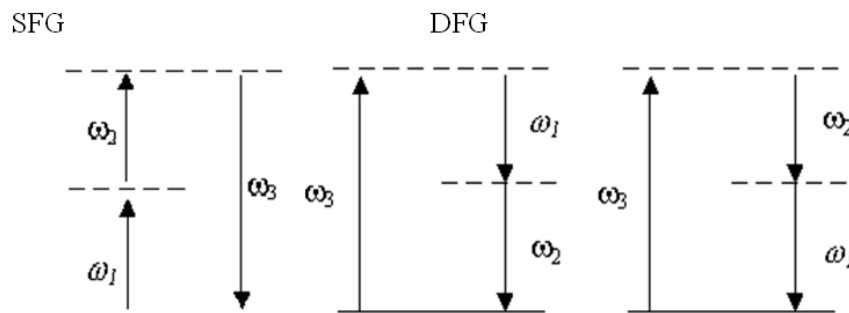


Figura 7.

5. Generazione di seconda armonica (SHG)

La situazione in esame è illustrata in figura:

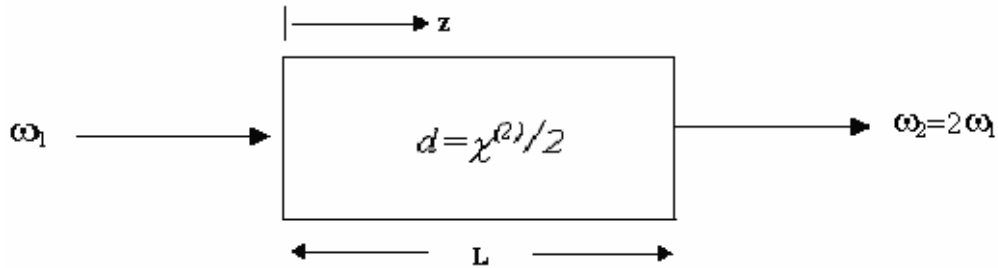
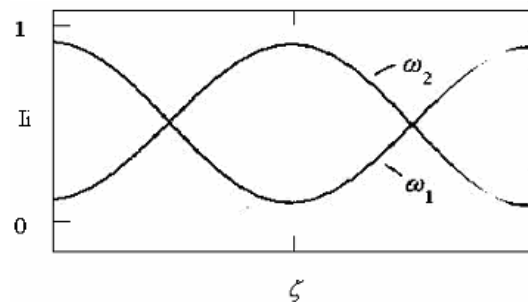


Figura 8.

Un laser di frequenza ω_1 incide sul cristallo e viene trasformato tramite l'interazione non lineare in un laser di frequenza doppia $\omega_2 = 2\omega_1$. A seconda del valore di alcuni parametri presenti nelle equazioni che descrivono il processo, si osservano due differenti comportamenti dei campi interagenti. In un caso i due campi di armonica fondamentale e di seconda armonica si scambiano energia periodicamente all'interno del cristallo, come avveniva per la SFG.



I_i = intensità onda di frequenza ω_i

Figura 9.

Nel secondo caso si osserva che man mano che il parametro ζ aumenta, l'ampiezza del campo di seconda armonica aumenta mentre quello di armonica fondamentale diminuisce, mostrando un trasferimento di energia tra i due.

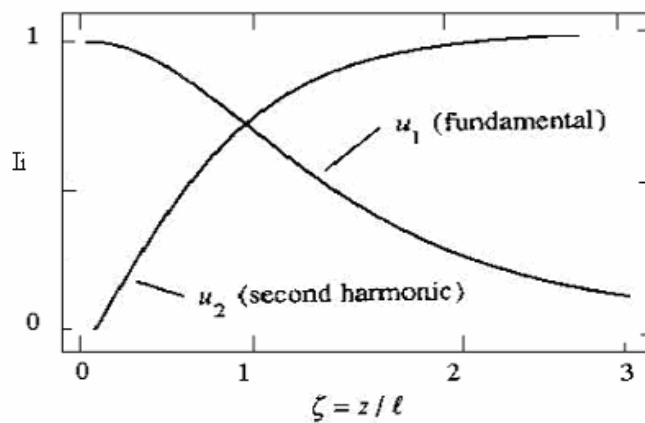


Figura 10.

Grossolanamente si può dire che l'aumento del parametro ζ descrive il fatto che lo scambio di energia nel cristallo diviene sempre più proficuo (tecnicamente ζ è la lunghezza del cristallo L diviso la *lunghezza di interazione* l). Anche in questo processo l'entità del trasferimento di energia tra ingresso e uscita è inversamente proporzionale allo sfasamento tra le onde elettromagnetiche interagenti.

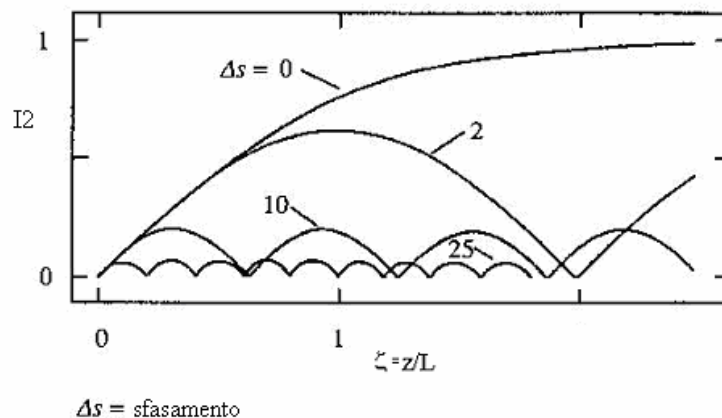


Figura 11.

In ogni caso, come d'altronde negli altri processi esaminati, la massima efficienza raggiungibile sperimentalmente è del 40-50%. Ciò vuol dire che il laser di frequenza doppia (o di frequenza somma o differenza) ha una potenza circa dimezzata rispetto alla potenza totale dei laser incidenti in ingresso.

La SHG viene usata tipicamente per convertire un laser di una certa frequenza in un laser che presenta componenti in frequenza in una differente regione dello spettro.

6. Conclusioni

Dalla realizzazione degli esperimenti eseguiti per studiare i fenomeni ottici non lineari del secondo ordine descritti nelle pagine precedenti sono stati fatti molti progressi sia dal punto di vista della comprensione teorica dei processi non lineari, sia dal punto di vista delle applicazioni industriali e commerciali. Infatti l'ottica non lineare è ancora oggi un campo di ricerca in grande fermento e non è casuale che il nobel per la fisica nel 2005 è stato assegnato in questo ambito, così come una delle medaglie di Le Scienze.

Per quanto riguarda la teoria, si può citare a titolo d'esempio un importantissimo risultato raggiunto dall'equipe del professor De Martini all'Università La Sapienza di Roma nel 1997: il gruppo di ricerca è stato il primo al mondo a realizzare il teletrasporto quantistico (non è fantascienza...). Vediamo brevemente di cosa si tratta.

Il teletrasporto quantistico è un processo che investe esclusivamente il mondo dell' "infinitamente piccolo" e permette di replicare un atomo distruggendo l'originale e ricreandone le caratteristiche a distanza. La chiave per ottenere il processo è un fenomeno conosciuto con il nome di entanglement (intrappolamento), una speciale interrelazione tra particelle a livello subatomico che fa sì che la misurazione di una istantaneamente influenza l'altra, anche quando si trovano in condizioni di apparente isolamento reciproco. Un fenomeno che Albert Einstein si divertiva a deridere definendolo "una fantomatica azione a distanza".

Il lavoro di De Martini e il suo gruppo è stato pionieristico anche perchè ha permesso di mettere appunto una serie di tecniche sperimentali che sono state poi utilizzate e perfezionate nei successivi esperimenti eseguiti

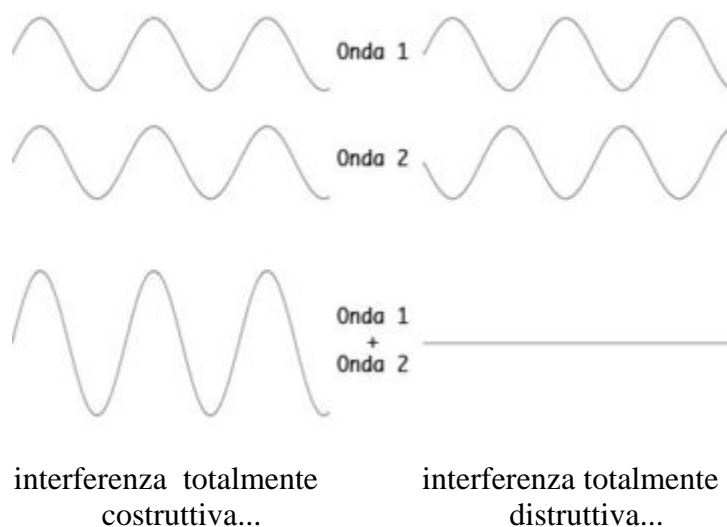


Figura 12.

in giro per il mondo. Tra questi vale la pena ricordare quello condotto nel 2003 da scienziati del dipartimento di Fisica di Ginevra guidati dal professor Nicolas Gisin.

L'équipe del professor Gisin ha infatti annunciato il 30 Gennaio 2003 sulla rivista Nature di aver teletrasportato un fotone da un laboratorio a un altro, distante esattamente due chilometri. Un enorme passo avanti, visto che i precedenti esperimenti si erano fermati a pochi metri. Ma soprattutto la prova che la tecnica è ormai collaudata, quasi pronta ad essere utilizzata in applicazioni più concrete. Che però non sono quelle che il nome evoca e che l'immaginazione suggerisce.

Come già accennato, il teletrasporto della scienza non ha niente a che vedere con quello della fantascienza. Nessuno viaggerà attraverso macchine che scompongono il corpo in atomi e lo ricompongono perfettamente da un'altra parte, come ha insegnato "Star Trek".

Quello che si trasferisce, nei laboratori di Ginevra, sono semplicemente le proprietà delle due particelle. "Gli scienziati in realtà trasferiscono le caratteristiche di un fotone, come fase e ampiezza, su un altro posto a distanza", spiega Marco Cattaneo, fisico e vicedirettore della rivista Le Scienze. Che spiega: "Per questo, per ragioni divulgative, si potrebbe anche parlare di clonazione. Le particelle, cioè, restano distinte, anche se strettamente legate da una relazione fisica". Quello che accade all'uno, cioè, accade anche all'altra. Il teletrasporto di materia, di oggetti o addirittura di corpi viventi, resta quindi confinato alla fantasia di scrittori, registi e sognatori...

Veniamo infine alle applicazioni pratiche. Ebbene negli ultimi anni le applicazioni tecnologiche dell'*ottica non lineare* stanno avendo una grande espansione; evidenze di questa diffusione si osservano nell'uso sempre più ampio di fibre ottiche per la trasmissione di informazioni a lunga distanza, nell'utilizzo di sistemi laser nell'industria e in bio-medicina, di sensori ecc. L'optoelettronica, o fotonica, è considerata come uno dei mercati più promettenti e con ampi margini di sviluppo, e infatti stanno aumentando considerevolmente i finanziamenti dell'Unione Europea in questa branca della ricerca applicata. Proprio i risultati delle più recenti ricerche, inoltre, fanno presagire che la trasmissione, l'elaborazione e la memorizzazione dei segnali verranno realizzate da dispositivi ottici, che soppiantano presto le loro controparti elettroniche. Infatti essi sono più veloci, possono immagazzinare o trasportare un maggior numero di informazioni, dissipano decisamente meno

potenza. Ma c'è di più: sarà possibile una miniaturizzazione senza precedenti in quanto i circuiti ottici integrati non vanno incontro ai noti limiti fisici riguardanti gli integrati elettronici. Insomma l'elettrone sta lasciando il ruolo di protagonista al fotone, e si sta preparando il terreno per una vera e propria rivoluzione, la rivoluzione fotonica.