

## Capitolo XIV

### Seconda metà del Novecento (cenni)

Alle conquiste dell'ottica fisica si sono accompagnate quelle dell'ottica fisiologica. La quantizzazione dell'ottica ha permesso, ad es., un inquadramento razionale dei processi di fotosintesi da parte di vegetali. La loro comprensione approfondita richiede nozioni di biochimica e biologia difficilmente raggiungibili a livello amatoriale, comunque detti processi si possono visualizzare con diagrammi e schemi in cui compaiono sigle e nomi come ATP,  $EA^+$ , cloroplasti, mitocondri ecc. Se uno si accontenta di accettarli come simboli di certe funzioni biofisiche e chimiche, può arrivare ad una comprensione intuitiva dei processi illustrati. Analoghe considerazioni valgono per gli studi sui fenomeni di bioluminescenza che, pur meno esaltanti di altre indagini, mi sembrano esemplari del grado di finezza raggiunto in ottica fisiologica. Molti organismi, insetti ed anche microorganismi, sono in grado di generare radiazioni luminose che utilizzano per i fini più diversi. Il meccanismo fondamentale di generazione della bioluminescenza è simile in tutti i casi anche se si diversifica nei particolari. Si svolge una reazione tra una sostanza con elettroni relativamente mobili, ( luciferina ), un enzima specifico ( luciferasi ), l'ossigeno e l'Adenosin Tri Fosfato , ATP. La luciferasi "sfrutta" l'energia dell'ATP ed innesca una reazione tra luciferina ed ossigeno con formazione di un composto avente elettroni ad alto contenuto di energia. Questi ultimi, ricadendo in uno stato a più basso livello energetico, emettono luce.

Grandiosi i risultati delle ricerche sul meccanismo degli stimoli luminosi e successive *percezioni* ottiche nel nostro sistema visivo a cominciare dalla struttura del cristallino e corpo vitreo, mirabili edifici di molecole proteiche in concentrazioni diverse che permettono la messa a fuoco di immagini non distorte su una vasta scala di distanze. Le successive reazioni chimiche nei bastoncelli e coni, e le variazioni di flussi ionici nei fotosensori, non sono accessibili, con una qualche cognizione di causa, ai non addetti ai lavori, perlomeno questa è la mia impressione, da non addetto, appunto.

Ci limitiamo, per la seconda metà del secolo, a ricordare due, fra le tante, realizzazioni tecnologiche permesse dalla conoscenza della fisica particellare : microscopia elettronica e spettroscopia laser. Veramente i fondamenti della microscopia elettronica in trasmissione datano dalla fine degli anni venti del secolo, ma fu solo nel secondo dopoguerra che per microscopia in scansione e trasmissione cominciò uno sviluppo e diffusione sempre più accelerati. Chiamare tecnica la microscopia elettronica è certamente riduttivo: si tratta di una nuova disciplina la cui cronistoria va convenientemente accorpata a quella della diffusione / diffrazione dei raggi roentgen e dei neutroni. Tra l'altro, i microscopi a scansione sono ormai quasi sempre dotati di *microsonde* le quali analizzano quantitativamente appunto raggi X di fluorescenza. Altrettanto od anche più importanti le applicazioni allo studio di cellule animali e vegetali e dei loro costituenti. Però se per i primi 50 anni della diffrazione X sono state necessarie le 700 pagine del *Fifty Years, cit.* ( sia pur con troppi riempitivi di reminiscenze personali ), per i secondi 40 anni ne sarebbero necessarie quasi altrettante! e chissà quante per la microscopia elettronica.

La messa a punto di *sorgenti maser e laser* avvenne nella seconda metà del secolo ( ca. 1951 –54 e 1958 – 63 rispettivamente ) ed appare rientrare in un campo più classicamente ottico anzi si può dire che costituisca la più importante scoperta in ottica dopo quella dei raggi X e gamma e delle loro applicazioni. Inoltre ci dà un esempio di completo dominio di particelle da parte di operatori. L'arguto quesito

posto da Rutherford a Bohr : “ Come fa un elettrone a sapere in quale orbita saltare ? ” ( [20bis] , pag. 128 ), potrebbe qui avere come risposta : “ Salta dove lo mando io ” .

L'acronimo *maser* vuol significare *molecular* ( *microwave* in un primo tempo ) *amplification* ( *by* ) *stimulated emission of radiation*. La prima apparecchiatura maser fu messa a punto nel 1954 , [23], ma la necessità di prendere in considerazione l'emissione indotta per descrivere correttamente l'interazione di radiazioni elettromagnetiche con sistemi atomici era già stata vista da Einstein nel 1916-17 che introdusse lo stesso concetto di emissione indotta o stimolata che dir si voglia. Con questo termine si intende l'effetto di decadimento di un sistema atomico da un livello energetico ad uno inferiore per azione di fotoni.

Cerchiamo di delineare i fondamenti dei processi coinvolti assumendo noti i risultati della elettrodinamica e della meccanica quantistica. Quando un sistema sale da un livello  $W_1$  ad un livello  $W_2$  assorbendo l'energia di un fotone  $h\nu_{12}$ , può decadere *spontaneamente* al livello originario emettendo una riga monocromatica  $\nu_{12}$ . Nel caso ideale di un atomo isolato è sufficiente l'assorbimento di  $h\nu_{12}$  per avere il salto di livello, ma in pratica si ha a che fare con un intervallo  $\Delta\nu$  a causa delle interazioni con atomi vicini in un cristallo, per agitazione termica delle molecole, vibrazioni reticolari, processi termodinamici in genere. La probabilità che si verifichi decadimento spontaneo è proporzionale al cubo della frequenza e quindi è elevatissima per frequenze ottiche mentre è trascurabile nei processi maser dove sono molto più importanti interazioni di tipo termico: collisioni fra molecole gassose, emissione od assorbimento di onde acustiche causate dalle vibrazioni termiche in un reticolo ( fononi ) che portano all'equilibrio termodinamico. Se sul sistema "eccitato" arriva radiazione di frequenza opportuna, questa, anzichè essere assorbita, induce l'emissione di due fotoni  $h\nu_{12}$  per ogni fotone incidente ; inoltre, a differenza del processo di emissione spontanea dove i fotoni sono emessi indipendentemente, la radiazione stimolata è *coerente* con la radiazione incidente. Ricordiamo che è entrato nell'uso il termine

gergale *pompaggio* per indicare un processo che permetta di avere  $n_2 > n_1$  dove con gli  $n$  si indica il numero di atomi per unità di volume nei due stati.

In assenza di radiazione elettromagnetica incidente l'emissione spontanea ed i processi termici portano ad una condizione di equilibrio termodinamico cui corrisponde una maggiore popolazione dei livelli inferiori. Il rapporto tra le densità atomiche dei livelli  $W_1$  e  $W_2$  è dato dalla distribuzione di Boltzman :

$$n_2 / n_1 = e^{-(W_2 - W_1) / kT} \quad , \quad (1)$$

dove  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J } \cdot \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  ( oppure  $1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg } \cdot \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  ).

Quindi se su un sistema atomico portato in qualche modo in uno stato metastabile in cui  $n_2 > n_1$  incide una radiazione di adatta frequenza  $[\nu_{12} = (W_2 - W_1)/h]$ , l'emissione è prevalente sull'assorbimento ed ogni fotone incidente dà luogo a due fotoni emessi e cioè il materiale eccitato si comporta come un amplificatore. Come per i normali amplificatori si può esaltare l'amplificazione riportando all'ingresso una frazione notevole del segnale in uscita, *retroazione positiva*; quando il guadagno uguaglia le perdite si ottiene un *oscillatore stazionario*. Nell'elettronica la retroazione si ottiene mediante circuiti, nei maser si sfrutta la riflessione delle onde, fotoni, sulle pareti di una "cavità". In pratica una cavità con basse perdite è costituita da una scatola con pareti ad elevatissimo potere riflettente e con delle "aperture" per estrarre porzioni di segnale da utilizzare all'esterno. La cavità deve inoltre avere dimensioni tali da far sì che le onde riflesse siano in fase con quelle incidenti, vale a dire tali da evitare autodistruzioni interferenziali. Ognuno dei tre lati della cavità deve essere lungo un multiplo intero della  $\lambda$  per cui si vuole ottenere risonanza,  $L_i = n\lambda$ . Per le basse frequenze dei maser ( $\nu = 10^4 \div 10^{10}$  Hz ) le  $\lambda$  sono maggiori del centimetro e quindi  $n$  è dell'ordine dell'unità. Per le alte frequenze delle regioni infrarossa ed ottica si ha invece  $\lambda \leq 1\mu$  e quindi, non potendo lavorare con cavità microscopiche!,  $n$  diventa dell'ordine delle migliaia ( specchi paralleli). Si hanno in pratica due alternative per fare uscire i segnali dalle cavità:

per *trasmissione* , cioè con un circuito dedicato al segnale in uscita, oppure più spesso per *riflessione*, cioè facendo uscire il segnale amplificato per la stessa via da cui era arrivato.

Per quanto riguarda i materiali usati i maser si suddividono in maser a gas ed a stato solido; nei primi si sfruttano transizioni molecolari e nei secondi salti orbitali di *struttura fine* ( transizioni di dipolo magnetico e non di dipolo ottico come nei laser ).

Concludiamo con una breve descrizione del maser ad ammoniaca, il primo ad essere stato realizzato ( 1954 ). Si tratta di uno strumento che sfrutta transizioni di dipolo elettrico, ma applicate a molecole isolate.

Nella molecola  $\text{NH}_3$  l'atomo N vibra perpendicolarmente al piano dei tre idrogeni oscillando fra due posizioni e dando luogo a due configurazioni che differiscono energeticamente di  $\nu \cong 2,4 \cdot 10^{10}$  Hz a 300 °K. Dalla (1) si ottiene  $n_2 / n_1 \approx 0,996$  , cioè i due livelli sono quasi egualmente popolati. Il pompaggio si ottiene sfruttando la diversa deviazione dei due tipi di molecole da parte di un campo elettrostatico. L'ammoniaca è contenuta in una ampolla alla pressione di  $\sim 1\text{mm Hg}$  e viene risucchiata in un ambiente connesso con una pompa a vuoto. Il fascio passa attraverso un focalizzatore elettrostatico a quattro elementi, due positivi e due negativi, distanziati tra loro, dove le molecole di energia superiore vengono concentrate lungo l'asse centrale ( le altre sono deviate lateralmente ) ed infine il fascio collimato entra in una cavità risonante alla frequenza di transizione sopra riportata ( lunghezza 12 cm). Non è necessaria una sorgente esterna di fotoni: è sufficiente che una o poche molecole emettano spontaneamente perchè si inneschi una oscillazione. Il flusso minimo di molecole affinché il guadagno superi le perdite è dell'ordine di  $10^{13}$ . Le microonde così generate escono attraverso una finestra; la potenza in uscita è bassa,  $10^{-9}$  watt, ma la monocromatizzazione è eccellente ed inoltre si tratta di un ( amplificatore ) oscillatore che funziona in continuo.

Il funzionamento dei maser a stato solido ( Si drogato, rubino ), di potenza molto maggiore, è complesso e la sua descrizione richiederebbe più disegni. In essi , anzichè transizioni molecolari, si

sfruttano salti quantici degli elettroni negli atomi, ma non salti orbitali come nei laser bensì salti di struttura fine, creata mediante campi magnetici, corrispondenti a transizioni di *dipolo magnetico*. Il pompaggio si ottiene mediante irraggiamento. Ricordiamo solamente che il maser ad ammoniaca è precipuamente impiegato come *oscillatore* molto stabile in frequenza mentre i maser a stato solido trovano impiego come *amplificatori* a banda larga: in essi si ha una alta densità di sistemi eccitati che, influenzandosi a vicenda, causano un allargamento delle linee di emissione. Molto usati sono i maser nei radiotelescopi per amplificare segnali stellari debolissimi, che funzionano da irraggiatori, e nelle antenne per ricezione da satelliti.

Dall'acronimo *maser* si passa al *laser* per semplice sostituzione di *m(agnetic)* con *l(ight)*, però le due tecniche comportano differenze e problemi di realizzazione molto più profondi. Come nei maser, anche nei laser si verifica scambio di energia tra campi elettromagnetici e sistemi atomici tramite fotoni con le seguenti principali differenze:

- 1) nei laser le separazioni tra i livelli sono dell'ordine di  $10^{14} - 10^{15}$  Hz ( nei maser  $10^9 - 10^{10}$  ), data l'entità della separazione; all'equilibrio termico il livello superiore risulta completamente spopolato, per la (1) ;
- 2) il decadimento *dallo* stato superiore si ha per emissione spontanea e non per rilassamento termico.

Chiamiamo 0, 1, 2, 3 livelli energetici crescenti per un elettrone legato ad un atomo. Per potere realizzare l'effetto di radiazione indotta, mediante radiazione applicata di frequenza molto vicina a quella della transizione atomica, bisogna ottenere un'inversione di popolazione, vale a dire arrivare a  $n_2 / n_1 > 1$ , come nei maser . Bisogna quindi effettuare un pompaggio che popoli il livello 2 ( nel nostro esempio ) e spopoli il livello 1 per evitare che l'accumulo di elettroni ivi provenienti da 2 riduca l'inversione di popolazione. I livelli 3 e 0 hanno una funzione ausiliaria: se ( pompaggio ottico ) la *pompa* eccita gli atomi

dal livello 0 al livello 3, da questo si ha decadimento su 2 che in tal modo può essere più popolato di 1. Se i livelli 0 ed 1 coincidono, si cade nel laser a tre livelli, come per il maser che può funzionare con continuità.

Una volta realizzata la condizione  $n_2 > n_1$ , un certa densità  $\rho$  di energia elettromagnetica immessa nel materiale ( solido, liquido o gas) attivo subirà un incremento per unità di tempo dato dalla:

$$d\rho / dt = B ( n_2 - n_1 ) \rho \quad . \quad ( 2 )$$

Non è necessario introdurre effettivamente la energia di densità  $\rho$  di cui sopra perchè nei laser è più che mai sufficiente il meccanismo di emissione spontanea per decadimento.

Dalla (2) si vede come la condizione  $n_2 > n_1$  trasformi il materiale attivo in un amplificatore coerente di radiazione. Per realizzare un oscillatore è indispensabile avere un sistema di retroazione che nei circuiti laser è costituito da due specchi perfettamente paralleli, con elevatissimo coefficiente di riflessione, posti perpendicolarmente alla direzione di propagazione dei fotoni che verranno amplificati ( interferometro di Fabry-Perot ).

Concludiamo con qualche cenno su due laser di largo impiego. Il laser a rubino fa uso, come materiale, di barrette di corindone "ospitanti" cromo, che è il vero e proprio elemento attivo. Il pompaggio è di tipo ottico e si realizza avvolgendo una lampada a spirale attorno al rubino oppure ponendo una lampada lineare ed il rubino nei fuochi di una cavità ellittica. La lampada deve essere di elevata potenza ( qualche migliaio di Kw ) e può funzionare ad impulsi od in modo continuo, il secondo tipo di funzionamento è in effetti realizzabile con potenze inferiori al kilowatt altrimenti problemi di raffreddamento impongono il funzionamento discontinuo col quale si possono ottenere potenze in uscita dell'ordine dei megawatt. Il rubino emette nel rosso,  $\lambda = 6494 \text{ \AA}$ , ed il laser a rubino è stato il primo venire realizzato (1960 ). Per la spiegazione del suo funzionamento cf. [23bis], pagg. 48-54, dove stranamente il corindone, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  trigonale), incolore viene detto zaffiro che viceversa è azzurro. I laser a stato solido possono però

sfruttare come materiali ospitanti anche dei vetri contenenti atomi attivi, elementi di transizione o del gruppo delle terre rare; il neodimio ad es. emette nell'infrarosso,  $\lambda = 1,06\mu$ .

Tra i laser a gas il più usato sfrutta la miscela elio-neon con rapporto He / Ne  $\cong 6$  e pressione totale dell'ordine di 1 mm di Hg. Il pompaggio avviene per mezzo di scarica elettrica nella miscela gassosa. Vengono eccitati gli atomi di He, che hanno solo funzione di trasferitori, e per collisione l'eccitazione viene trasferita agli atomi di Ne. Gli atomi eccitati tornano allo stato fondamentale tramite una serie di decadimenti che permettono la creazione di più inversioni di popolazione. Le radiazioni più sfruttate sono nel rosso,  $\lambda = 6320 \text{ \AA}$ , e nell'infrarosso vicino. Le potenze in uscita sono molto modeste con funzionamento continuo; con funzionamento ad impulsi si possono ottenere potenze dell'ordine del kilowatt.

Superfluo sottolineare l'importanza delle sorgenti laser le cui applicazioni vanno dalla microchirurgia oculistica alle telecomunicazioni. La bibliografia su laser e maser è sterminata; si contavano migliaia di pubblicazioni già dopo tre anni dalla realizzazione del primo strumento laser. In bibliografia sono citati due lavori decisamente "vecchi" le cui prime edizioni sono apparse a pochissimi anni di distanza dalle realizzazioni dei primi strumenti. Essi, appunto perchè vecchi, danno una panoramica dello stato dell'opera a pochi anni dagli inizi e permettono di constatare quali progressi fossero stati conseguiti nello spazio di pochi anni ( [23] , [23 bis] ).