

Dai modelli dell'atomo alle soglie del laser

Vito Russo

Sommario: trattazione dei fenomeni fisici storicamente più significativi che hanno portato all'attuale modello atomico, contributo della fisica quantistica e confronto tra teoria quantistica e teoria classica relativamente ai fenomeni affrontati.

Motivazione: tenuto conto che i percorsi curriculari di fisica nel triennio del liceo scientifico si concludono dando una visione completa della teoria classica, ho ritenuto opportuno attivare tale modulo a completamento del corso di studi nelle classi quinte per permettere agli allievi più motivati e più portati alle problematiche scientifiche di aprire uno sguardo verso le tematiche della fisica del nostro secolo.

Finalità: il modulo può essere definito come “**modulo stimolo**” perché si è prefissato come scopo, non quello di fare acquisire conoscenze approfondite e padronanza relative agli argomenti trattati durante il corso, ma quello di stimolare, attraverso i contenuti, gli allievi:

- Ad una riflessione sui motivi che hanno portato alla rivoluzione scientifica d'inizio secolo;
- A distinguere i “momenti di scienza normale” dai “momenti rivoluzionari della scienza”
- Ad una maggiore consapevolezza dell'importanza di una formazione scientifica nell'interpretare la realtà e nel prendere decisioni sociali e civili;

Contenuti

- I modelli dell'atomo
- La luce laser: principi e applicazioni.

Tempi: quattordici ore suddivisi in sette incontri pomeridiani a cadenza settimanale, dal mese di marzo al mese di maggio.

Metodi: momenti di codocenza con colleghi di altri corsi per presentare e problematizzare gli argomenti affrontati, dibattito sulle problematiche trattate.

Presentazione: le parti brevi in inglese hanno lo scopo di provocare l'interlocutore. Il testo in inglese sull'origine del laser, è la versione integrale tratta da Compton's Interactive Encyclopedia. Il documento è stato distribuito in classe, come momento di interdisciplinarietà.

I ragazzi lo hanno letto e senza tradurlo hanno relazionato sul testo in questione.

Risultato: Avevano capito il principio di funzionamento del Laser in sole due ore.

L'atomo

Da quando l'uomo ha iniziato a esplorare l'ambiente che lo ospita, ha investigato sulla costituzione della materia cercando di scoprire i suoi costituenti iniziali.

Nel V secolo a.C., i filosofi greci Leucippo e Democrito, immaginando di dividere un foglio di un materiale in parti sempre più piccole fino al punto in cui tale divisione non fu più possibile, congetturarono che la materia fosse formata da piccolissime particelle, non ulteriormente divisibili, gli atomi.

Leucippo e Democrito nell'ammettere l'esistenza dell'atomo avevano condotto un'analisi razionale, con atteggiamento teoretico e speculativo, non accennando ad alcuna probabile verifica sperimentale: Ai tempi dei Greci l'esperimento era disdegnato.

Per secoli non si parlò più di atomi fino a quando gli scienziati A.L. Lavoisier, L. Proust attraverso i loro esperimenti, con indagini che rispecchiano il metodo scientifico inaugurato da G. Galilei, ne dimostrarono l'esistenza.

In seguito J. Dalton (1766-1844) partendo dai risultati di Lavoisier e Proust, formulò la seguente teoria che, a tutt'oggi, è nota come :

Teoria atomica di Dalton

La materia che ci circonda sia allo stato solido, liquido o gassoso è formata da tante piccolissime particelle chiamate atomi.

Ma l'atomo, la cui esistenza era ormai certa, era proprio l'ultimo confine della materia oltre il quale non ci si poteva avventurare?

Vediamo cosa ci suggerisce l'indagine sperimentale:

Si era già provato che bacchette di ebanite, di vetro o metalliche (se tenute in mano mediante un manico isolante) strofinate erano in grado di attrarre pezzettini di carta. Questa proprietà particolare della materia incuriosì alcuni scienziati: **La materia strofinata era in grado di cambiare il proprio stato: usando il termine tecnico, la materia strofinata si elettrizzava.**

Lo strofinio provocava la separazione di parti chiamate in seguito cariche: positive e cariche negative. L'atomo considerato una particella indivisibile e neutra era in realtà formato da altre piccolissime particelle positive e negative in ugual numero.

Verso la fine del 1800 furono scoperte le particelle negative, che nel 1891 il fisico irlandese George Stoney ipotizzandone l'esistenza aveva chiamato elettroni, ad opera di J.J. Thomson: Se nell'atomo erano presenti le cariche negative, gli

elettroni, dovevano esistere anche le cariche positive, i protoni, affinché l'atomo risultasse neutro. La scoperta dei protoni, da parte di Thomson, non tardò molto.

Thomson dopo la scoperta dell'elettrone e del protone, immaginò l'atomo come una sfera omogenea e compatta con carica positiva all'interno della quale vi erano gli elettroni con carica negativa. Questo modello atomico prende il nome di *modello a panettone*, *plum pudding*, l'uva passa sono gli elettroni e la pasta è la carica positiva.

Siamo intorno al 1910, e si a conoscenza dell'esistenza di elementi radioattivi, chiamati isotopi. Noi sappiamo che il nucleo è formato da cariche positive, i protoni e da cariche neutre, i neutroni. Il numero di protoni contenuti nel nucleo di un atomo identifica un particolare elemento. L'idrogeno, ad esempio, ha un solo protone il suo numero atomico è 1; l'elio ha due protoni, il suo numero atomico è 2; il litio ha tre protoni, il suo numero atomico è 3 e così via. Il nucleo oltre a contenere i protoni contiene i neutroni; il numero di neutroni contenuti nel nucleo può variare. La somma dei protoni e dei neutroni viene chiamato numero di massa. Quando il numero di neutroni supera di molto il numero di protoni l'elemento è instabile ed emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica Rutherford per scoprire la struttura dell'atomo effettuò il seguente esperimento:

utilizzò un scatola di piombo e all'interno della quale mise un elemento radioattivo in grado di emettere radiazioni di tipo α . Alla scatola di piombo praticò un piccolissimo foro in grado di far passare un sottilissimo fascio di particelle. Le particelle α vennero dirette su sottilissimo foglio d'oro. Rutherford per mettere in evidenza le particelle α utilizzò un rivelatore (è possibile utilizzare una pellicola fotografica che avvolge la lamina d'oro).

Le particelle α che oltrepassavano la lamina subivano delle deviazioni verso l'alto o verso il basso, altre particelle attraversavano la lamina d'oro senza subire deflessioni. E, una particella su 10.000 tornava indietro. Le particelle alfa passano facilmente attraverso gli atomi della lamina d'oro, e vengono deviate quando passano vicino al nucleo. Se una particella alfa colpisce in pieno il nucleo, allora rimbalza e torna indietro.

Rutherford da questa esperienza dedusse che tutta la carica positiva e la massa era concentrata in un piccolissimo spazio che chiamò nucleo e gli elettroni si trovavano a una distanza molto lontana dal nucleo. Per Rutherford, l'atomo è come il sistema solare: come il sole è al centro del sistema solare così il nucleo è al centro dell'atomo, come i pianeti orbitano intorno al sole così gli elettroni orbitano intorno al nucleo.

Il modello atomico di Rutherford si basa sulla fisica classica, infatti secondo Rutherford quando l'elettrone è vicino al nucleo ruota molto velocemente per equilibrare la forte forza di attrazione elettrone nucleo; quando l'elettrone è lontano dal nucleo la sua velocità di rotazione diminuisce per non allontanarsi dall'atomo. Secondo Rutherford sono consentite tutte le orbite. Il modello atomico di Rutherford non riusciva a spiegare tutte le leggi della fisica classica, in particolare modo la

legge sull'elettromagnetismo secondo la quale una particella carica (in questo caso l'elettrone) in movimento e soggetta a una forza di attrazione (nucleo elettrone) dovrebbe perdere energia e cadere sul nucleo seguendo una traiettoria a spirale, l'atomo finirebbe per autodistruggersi.

L'osservazione sperimentale, però, non è d'accordo con tale affermazione.

Nel 1911 giunse a Manchester il giovane danese (25 anni) Niels Bohr, di professione fisico. Durante i suoi studi all'università di Copenhagen, applicò la sua esperienza di noto calciatore della squadra nazionale, al problema dello sparpagliamento delle particelle α in una moltitudine di atomi che tentano di catturarle e fermarle. Bohr riesaminò il modello atomico analizzando lo spettro atomico dell'atomo d'idrogeno: Se noi facciamo passare attraverso un prisma la luce bianca del sole otteniamo uno spettro continuo di colori che vanno dal rosso al blu (i colori dell'arcobaleno). Alla zona rossa corrispondono le radiazioni a più bassa energia, mentre alla zona blu corrisponde le radiazioni a più alta energia. Se invece della luce bianca si fa passare attraverso un prisma la luce emessa da una sostanza gassosa, (ad esempio una lampada ad idrogeno), lo spettro che otteniamo è uno spettro a righe e ad ogni frequenza corrisponde un ben determinato colore.

Bohr nel 1913 propose una teoria rivoluzionaria sulla teoria dell'atomo, la quale si basava sullo spettro dell'atomo di idrogeno. Lo spettro a righe indica che l'atomo d'idrogeno emette solo alcune radiazioni luminose; quindi l'energia dell'elettrone risulta quantizzata. Il passaggio da un livello energetico più alto a un livello energetico più basso provoca l'emissione di un quanto di luce (colore), che corrisponde alla differenza di energia tra i due livelli secondo la relazione di Einstein:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Secondo Bohr l'elettrone dell'atomo d'idrogeno può trovarsi solo su determinate orbite, che corrispondono ad altrettanti livelli energetici. Tali orbite sono disposte intorno al nucleo concentricamente e i raggi di tali orbite possono assumere solo determinati valori.

Bohr ritenne che il successo che di recente era stato di Plank e di Einstein per la loro interpretazione della radiazione del corpo nero e dell'effetto fotoelettrico rispettivamente, spettasse, adesso, alla formulazione della struttura atomica se la strada seguita sarebbe stata quella quantistica.

In parole povere: *l'atomo deve essere quantizzato...*

Il modello dell'atomo di Bohr garantisce la stabilità dell'atomo!!!

L'idea di atomo subisce ulteriori evoluzioni e modelli più aderenti ai risultati sperimentali vengono delineati.

Fisici che affermano che

“Gli elettroni e le altre particelle subatomiche ubbidiscono ad equazioni del moto che risultano drasticamente diverse dalle vecchie equazioni del moto a cui ubbidiscono i pianeti, le palle da biliardo o i pallini sparati da un fucile da caccia

(da Physics di Hans. N. Hoanian vol.II, Ed. it. Zanichelli)", introducono l'idea dei quanti di luce, prospettano la possibilità di trattare le onde come materia e la materia come onde.

Si susseguono sulla scena nomi come: Planck, Einstein, Compton, Heisenberg, de Broglie, Bohr...

Le idee di tali personaggi portarono alla realizzazione di uno strumento che allo stato attuale che allo stato attuale viene usato sia nella ricerca scientifica che nelle applicazioni pratiche.

Tale strumento è il laser.

But, what's the Laser?

"The laser is numbered among the most miraculous gifts of nature and lends itself to a variety of applications"

Plinius, Naturalis Historia, XXII, 49 (first century A.D.)

Durante la civiltà greco-romana(all'incirca dal VI secolo A.C. al II secolo D.C., il laser era ben conosciuto e ben celebrato.

A differenza del suo omonimo attuale, esso era, in realtà, una pianta con proprietà non meno meravigliose.

Questa pianta, appartenente, forse, alle ombrellifere, cresceva spontaneamente su una larga zona attorno a Cirene, la moderna Libia.

Qualche volta chiamata anche Laserpitium, si riteneva essere un dono di Dio per le sue proprietà quasi miracolose.

Infatti:

- *Veniva usata per curare una varietà di malattie, dalla pleurite a varie infezioni epidermiche.*
- *Costituiva un efficace antidoto contro il veleno dei serpenti e le frecce nemiche.*
- *Il suo gusto delicato spinse ad usarlo nella migliore cucina.*

Durante il periodo della dominazione romana fu il solo tributo pagato dai Cirenei ai Romani. Essi tenevano il laser negli scrigni con i loro lingotti d'oro.

La migliore testimonianza, di quei giorni sul laser, si trova sulla famosa coppa di Arcesilao(ora nel museo di Cirene),dove si vedono i portatori caricare il Laser su una nave sotto la supervisione di re Arcesilao.

Con il passare del tempo, il laser divenne sempre più raro e sembra sia scomparso attorno al secondo secolo D.C.

Esso rimane così il tesoro perduto della civiltà greco-romana.

And nowadays, what's the Laser?

" Le concezioni della vita moderna stanno cambiando a un ritmo stupefacente" da Practical Physics di Robert A. Millikan, premio Nobel, H.G. Gale e Willard R. Pyle.

In una notte d'estate del 1969, in una sala allestita a grande profondità al di sotto del telescopio di 3m di diametro del Lick Observatory, sulla vetta del Monte Hamilton, un cristallo di rubino sintetico emette un raggio di luce così intenso da riuscire a raggiungere la Luna. Alle 4.56 del 21 luglio dello stesso anno, Neil Armstrong, Aldrin e Collins effettuano la prima missione sul nostro satellite e prima di ritornare sulla terra lasciano sulla sua superficie uno specchio rivolto verso la Terra. La luce emessa dal rubino si riflette su questo specchio e, con un viaggio di andata e ritorno di circa 700000 km alla velocità della luce, permette di misurare la distanza Terra- Luna con una precisione mai conseguita né consentita precedentemente.

Potenza del Laser: Un dispositivo che emette luce di eccezionale intensità e uniformità.

Quella notte, nell'osservatorio, una potente lampada, costituita da una spirale elicoidale avvolta attorno al cristallo di rubino, lo colpisce con una rapida serie di intensi lampi di luce. Gli atomi di cromo, distribuiti uniformemente all'interno del cristallo, assorbono la luce intensa della lampada e, portati a uno stato di eccitato di alta energia, riemettono, a uno a uno, l'energia assorbita, di nuovo sotto forma di luce. Emessa in direzioni casuali, la maggior parte della luce sfugge dai lati del cristallo; solo una piccola frazione rimane intrappolata al suo interno in virtù del fenomeno della riflessione. Tale piccola frazione, si muove lungo una traiettoria che coincide con assoluta precisione con l'asse del cristallo di rubino, che ha forma cilindrica.

Da qui inizia una valanga di luce conosciuta come effetto laser.

Intermezzo

A laser is the common name for the device that produces light amplification by stimulated emission of radiation.

Per capire il laser

Sia gli articoli scientifici originali che gli interventi in congressi internazionali sono presentati in inglese. E' la lingua che ci tedia, ma che è necessaria quando ci troviamo all'estero. Perché non iniziare a leggere e pensare anche in inglese?

“White light contains many wavelengths of light. A filter transmits light of one wavelength (monochromatic light) but weakens the original beam.

Furthermore, laser light is monochromatic and coherent. White light is a jumble of colored light waves. Each color has a different wavelength. If all the wavelengths but one are filtered out, the remaining light is monochromatic. If these waves are all parallel to one another, they are also coherent: the waves travel in a definite phase relationship with one another. In the case of laser light, the wave crests coincide and the troughs coincide. The waves all reinforce one another. One special application of coherent light is the recording of three-dimensional images called holograms (*see Color*).

The laser uses a process called stimulated emission to amplify light waves. (One method of amplification of an electromagnetic beam is to produce additional waves that travel in step with that beam). A substance normally gives off light by spontaneous emission. One of the electrons of an atom absorbs energy. While it possesses this energy, the atom is in an excited state. If the electron gives off this excess energy (in the form of electromagnetic radiation such as light) with no outside impetus, spontaneous emission has occurred.

If a wave emitted by one excited atom strikes another, it stimulates the second atom to emit energy in the form of a second wave that travels parallel to and in step with the first wave. This stimulated emission results in amplification of the first wave. If the two waves strike other excited atoms, a large coherent beam builds up. But if they strike unexcited atoms, they are simply absorbed, and the amplification is then lost. In the case of normal matter on Earth, the great majority of atoms are not excited. As more than the usual number of atoms become excited, the probability increases that stimulated emission rather than absorption will take place.

====

Maiman, Theodore Harold (born 1927), U.S. physicist, born in Los Angeles, Calif.; known for work on lasers, microwave, optical spectroscopy; founder and president, Konrad Corporation 1962-68, Maiman Associates 1968-78; founder and vice-president, Laser Video Corp. 1972-75; vice-president, TRW Electronics Co. 1975-

Townes Charles Hard (born 1915), U.S. physicist, born in Greenville, S.C.; professor of physics Columbia University 1950-61; provost Massachusetts Institute of Technology 1961-66; professor University of California at Berkeley from 1967; with Nikolai G. Basov and Aleksandr M. Prochorov, received 1964 Nobel prize for work in quantum electronics, which had led to discovery of the maser and laser (completed first successful maser 1954)

The principle of stimulated emission was first successfully applied in 1953 when Charles Townes built the maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation). He subjected excited ammonia molecules to microwaves. The ammonia molecules emitted more and more microwaves, until an amplified microwave pulse was emitted from the container. Ammonia masers are used in satellite communications."

Ricominciamo

La luce intrappolata procede avanti e indietro lungo l'asse del rubino cilindrico, riflessa su se stessa più volte dalle estremità riflettenti accuratamente lucidate del cristallo, e a ogni *rimbalzo* stimola l'emissione di ulteriore luce dagli atomi eccitati del cristallo. Il fascio all'interno del rubino aumenta via via di intensità, e ne esce infine da una estremità sotto forma di un fascio di luce di brevissima durata, ma di altissima intensità. Nel tempo di soli 10 miliardesimi di secondo, la popolazione di

atomi di cromo eccitati emette tutta l'energia che ha assorbito, ma nel frattempo la potenza del fascio esterno è aumentata fino ad arrivare a un miliardo di watt! Un miliardo di watt sono equivalenti alla potenza emessa da decine di milioni di lampade elettriche ordinarie.

La luce generata da un laser si propaga in un fascio ben collimato, è tutta di un unico colore e possiede un'elevata intensità.

Una riflessione!

Tale dispositivo, suscettibile di molte applicazioni pratiche, non avrebbe potuto essere creato senza il più cerebrale e misterioso degli sviluppi della fisica contemporanea: la teoria della meccanica quantistica.

Un laser è uno strumento veramente quantistico nel suo funzionamento poiché sfrutta le transizioni fra livelli energetici discreti dell'atomo tali transizioni sono esaurientemente descritti dalla meccanica quantistica.

Un laser sfrutta tre fenomeni fondamentali che si verificano quando un'onda elettromagnetica interagisce con un materiale, cioè: il processo di emissione spontanea, il processo di emissione stimolata e il processo di assorbimento.

Per comprendere il funzionamento del laser premettiamo alcune osservazioni: secondo la meccanica quantistica, un atomo (o molecola) presenta infiniti stati stazionari detti **livelli energetici**; il livello di minima energia è lo stato fondamentale dell'atomo (o molecola), gli altri livelli sono detti stati eccitati. Il numero di atomi per unità di volume in un determinato livello sarà chiamato la **popolazione** di quel livello.

Quando, un atomo (o molecola) passa da uno stato all'altro, vale la condizione di Bohr per cui nel salto, da un livello all'altro, è assorbito o emesso un fotone di energia $E = h \cdot \nu$ con h costante di Planck e ν frequenza della radiazione. Ora, si ha un **assorbimento** di energia quando il salto avviene da un livello inferiore ad un livello superiore, **emissione** di energia quando il salto avviene da un livello superiore ad uno inferiore.

Inoltre, con lo sviluppo della meccanica quantistica, è abbandonato il concetto di individualità delle singole particelle, a favore di una interpretazione probabilistica dei vari fenomeni. Viene così introdotto il concetto di probabilità di transizione tra due livelli energetici: dati N atomi in un livello eccitato n , il numero dN di loro che passa ad un livello m in un tempo dt è:

$$dN = -P_{mn} \cdot N \cdot dt$$

(il segno meno sta per indicare una diminuzione della "popolazione" dello stato n).

P_{mn} è la probabilità di transizione tra i due stati.

Si dimostra che P_{mn} è l'inverso del tempo medio di permanenza nello stato eccitato, tempo che viene detto **vita media**.

Questo tempo di solito è dell'ordine di 10^{-8} salvo in rari casi, stati metastabili, in cui questo tempo può essere molto più lungo.

a) Emissione Spontanea

Consideriamo due livelli di energia, **1** e **2**, di un dato materiale e siano E_1 ed E_2 le rispettive energie, con $E_1 < E_2$. Assumiamo che inizialmente un atomo (o molecola) del materiale sia nel livello 2. Essendo $E_2 > E_1$, l'atomo tenderà a decadere al livello 1.

La corrispondente differenza di energia ($E_2 - E_1$) deve perciò essere restituita dall'atomo.

Quando quest'energia viene consegnata nella forma di un'onda elettromagnetica, il processo sarà chiamato **emissione spontanea** (o radiante).

La frequenza ν dell'onda irradiata è data dall'espressione dovuta a Plank:

$$\nu = (E_2 - E_1) / h \quad (1)$$

con h costante di Plank ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$).

Come esempio di emissione spontanea, consideriamo una comune lampada al sodio.

Una tale lampada è costituita da un tubo cilindrico trasparente contenente vapori di sodio. In tale tubo viene fatta passare corrente mediante due elettrodi posti alle estremità. Gli elettroni della corrente, durante il loro spostamento dal catodo all'anodo, urtano con gli atomi di sodio e possono quindi eccitarli. Gli atomi eccitati, ritornano allo stato non eccitato (stato fondamentale), emettendo luce di frequenza ben precisa e quindi di colore ben determinato (in questo caso giallo), ma ciascun atomo emetterà luce in una qualsiasi direzione. Questo è un esempio di emissione spontanea.

b) Assorbimento

Supponiamo ora che l'atomo sia inizialmente al livello 1. Se questo è il livello base, l'atomo rimarrà in questo livello finché qualche stimolo esterno sarà applicato ad esso. Pensando che un'onda e.m. con frequenza data dalla formula 1 incida sul materiale vi è una probabilità finita che l'atomo sia eccitato al livello 2. La differenza di energia $E_2 - E_1$ richiesta dall'atomo per subire la transizione è data dall'onda e.m. incidente. Questo è il processo di assorbimento.

c) Emissione Stimolata

Supponiamo che una percentuale consistente di atomi (60–70 %), sia stata eccitata. La luce emessa da un atomo ha in questo caso una buona probabilità di interagire con un altro atomo eccitato all'interno del tubo. Si può produrre così, il fenomeno dell'eccitazione stimolata in quanto il secondo atomo si diseccita ed emette luce, quando è stimolato dalla luce emessa dal primo.

Questo è il fenomeno dell'emissione stimolata.

Vi è, perciò, una differenza fondamentale tra il processo di emissione spontanea e il processo di emissione stimolata: nel caso dell'emissione spontanea, l'atomo emette un'onda elettromagnetica (e.m.) che non ha una relazione di fase definita con quella emessa da un altro atomo, e l'onda può essere emessa in qualsiasi direzione.

Nel caso dell'emissione stimolata, poiché il processo è forzato dall'onda e.m. incidente, l'emissione di ogni atomo si aggiunge in fase a quella dell'onda entrante. Quest'onda determina anche la direzione dell'onda emessa.

Se la frazione di atomi eccitati è sufficientemente elevata, si può ottenere una serie di emissioni stimolate a catena. Da tenere presente, però, che accanto al fenomeno dell'emissione stimolata, si può verificare quello dell'assorbimento. La luce emessa da un atomo può essere assorbita da un altro atomo non eccitato che conseguentemente si eccita.

Concludendo: mentre nel processo di emissione stimolata si ha un effetto di amplificazione dell'onda luminosa, nel processo di assorbimento si ha un effetto di attenuazione dell'onda luminosa.

d) In termini di fotoni

Riprendiamo ora i processi precedenti in termini di fotoni.

- Nel processo di emissione spontanea, l'atomo decade dal livello 2 al livello 1 attraverso l'emissione di un fotone.

- Nel processo di emissione stimolata, il fotone incidente stimola la transizione dal livello 2 al livello 1 e si ottengono 2 fotoni. (Il fotone stimolante più quello stimolato).

- Nel processo di assorbimento, il fotone incidente è semplicemente assorbito dall'atomo per produrre la transizione dal livello 1 al livello 2.

e) L'idea del laser

Consideriamo due arbitrari livelli di energia 1 e 2 di un dato materiale, con 1 livello di energia fondamentale, e siano N_1 e N_2 le rispettive popolazioni. Se un'onda piana con una intensità corrispondente ad un flusso di fotoni F sta viaggiando lungo la direzione z nel materiale, la variazione di questo flusso dovuta ad entrambi i processi di emissione stimolata e assorbimento nella regione ombreggiata della figura, è data da

$$dF = \sigma F(N_2 - N_1)dz \quad (2)$$

con σ una quantità avente le dimensioni di un'area ed è la sezione di attraversamento della radiazione stimolata e nel tempo stesso la regione dove avviene l'assorbimento.

L'equazione (2) mostra che il materiale si comporta come un amplificatore se $dF/dz > 0$, cioè se $N_2 > N_1$, mentre lo stesso si comporta come un assorbitore se $N_2 < N_1$.

Nel caso $N_2 > N_1$, si avrà un duplice effetto: gli atomi che si trovano nello stato 1 saranno eccitati verso lo stato 2, gli atomi che si trovano nello stato 2, verranno diseccitati; nel primo caso si ha un fenomeno di assorbimento, mentre nel secondo caso si ha un fenomeno di amplificazione in quanto un fotone incidente provoca l'emissione di un secondo fotone che viaggerà nella stessa direzione del fotone incidente.

Se N_1^e e N_2^e sono le popolazioni all'equilibrio termico dei due livelli, esiste una relazione data dalla statistica di Boltzmann:

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}\right] \quad (3)$$

con k costante di Boltzmann e T la temperatura assoluta del materiale.

Quindi per il caso dell'equilibrio termico abbiamo $N_2 < N_1$ e il materiale si comporta da assorbitore alla frequenza ν , e questo è quello che accade in condizioni ordinarie.

Se, pertanto, viene raggiunta una condizione di non equilibrio per cui $N_2 > N_1$, allora il materiale si comporterà da amplificatore.

In questo caso affermeremo che esiste un'*inversione di popolazione* nel materiale, perciò otterremo che la differenza ($N_2 - N_1 > 0$) è opposta in segno a quella che si ha in condizioni ordinarie ($N_2^e - N_1^e < 0$).

Un materiale che raggiunge una inversione di popolazione sarà chiamato *un materiale attivo*.

Se la frequenza di transizione $\nu = (E_2 - E_1)/h$ cade nella regione delle microonde, questo tipo di amplificatore è chiamato *amplificatore maser*.

La parola *maser* è un acronimo e sta per "emissione di radiazione stimolata per amplificazione di una microonda".

Se la frequenza di transizione ν cade nella regione ottica, l'amplificatore è chiamato un amplificatore *laser*.

Perché il materiale si comporti da materiale attivo, è necessaria una particolare operazione detta **pompaggio del materiale**.

Con il pompaggio si eccitano gli atomi in una **banda di livelli** superiore al livello E_2 . La diseccitazione avviene, per salti successivi con transizioni tra la banda di livelli e il livello E_2 e tra questo e il livello fondamentale E_1 .

Perché avvenga l'effetto laser, occorre una diseccitazione a **valanga** degli atomi o molecole nello stato eccitato.

Questa condizione si verifica se l'energia per unità di volume dell'onda stimolante è sufficientemente alta.

Nella regione delle microonde una tale condizione è ottenuta piazzando il materiale attivo in una cavità risonante di frequenza ν . Nel caso di un *laser*, la reazione è ottenuta piazzando il materiale attivo tra due specchi altamente riflettenti, e precisamente, specchi piani paralleli.

In questo caso, un'onda e.m. piana che viaggia in direzione ortogonale agli specchi rimbalzerà indietro e in avanti tra i due specchi e sarà amplificata durante ogni passaggio attraverso il materiale attivo.

Se uno dei due specchi è parzialmente trasparente, può essere estratto un particolare raggio uscente.

I fotoni che sono emessi spontaneamente lungo l'asse della cavità, inizieranno il processo di amplificazione.

Questo è il principio di base di un oscillatore laser, o laser, come è più semplicemente chiamato.

Nel 1958 L. Schawlow e G.H. Townes, dimostrarono che una tale struttura può risonare se sono verificate le due condizioni fondamentali:

- 1) Gli specchi devono avere dimensioni più grandi della lunghezza d'onda λ cui si deve operare;
- 2) La distanza L tra i 2 specchi deve essere tale da essere $(a^2/\lambda).L \gg 1$ con $2.a$ una delle dimensioni degli specchi.

In queste condizioni un fascio di radiazione che si propaga normalmente agli specchi, può essere riflesso avanti e indietro con piccole perdite per diffrazione, cosa che non avviene per fasci obliqui.

Sull'idea di Schawlow, Townes e Prokhorov, sono state costruite cavità risonanti con coppie di specchi di forma diversi: specchi piani e paralleli (risonatore Fabry – Perot), piani e inclinati, curvi e cilindrici e sferici ecc.

Concludendo:

- Il processo Laser si può sintetizzare nei seguenti passi:
- **Rifornimento di energia mediante il pompaggio dei centri attivi (che possono essere atomi o molecole) a livelli superiori;**
- **Stimolazione della diseccitazione "a valanga" ad opera dei fotoni emessi spontaneamente;**
- **Innesco della valanga e automantenimento con generazione di un campo elettromagnetico oscillante nella cavità.**

Fino ad ora, abbiamo considerato i due livelli 1 e 2 interessati alla transizione laser non tenendo conto dell'interazione con gli altri livelli permessi. Ora, il legame con gli altri livelli è importante per capire come può avvenire l'inversione di popolazione, anzi secondo questo legame i laser sono classificati in: laser a tre livelli, laser a quattro livelli.

f) Proprietà del raggio laser

La radiazione laser è caratterizzata da un alto grado di:

- monocromaticità
- coerenza
- direzionalità
- luminosità
- tempo di durata degli impulsi di luce molto breve, proprietà forse meno fondamentale ma non per questo meno importante.

Monocromaticità

Tale proprietà è dovuta alle due circostanze seguenti:

- 1) Solamente un'onda e.m. di frequenza $\nu = (E_2 - E_1) / h$ (1) può essere amplificata.
- 2) Poiché la sistemazione dei due specchi forma una cavità risonante, l'oscillazione può avvenire soltanto alla frequenza di risonanza di questa cavità. L'ultima circostanza determina la larghezza del raggio, che è più stretta (circa

la sesta parte) dell'usuale larghezza del raggio nella transizione 2 -1 osservata nell'emissione spontanea.

Coerenza

Per un'onda e.m. si possono definire due concetti di coerenza, cioè, coerenza spaziale e coerenza temporale.

Per definire la coerenza spaziale, consideriamo due punti P_1 e P_2 che, al tempo $t = 0$, giacciono sullo stesso fronte d'onda di una data onda e.m. e siano $E_1(t)$ e $E_2(t)$ i corrispondenti campi elettrici in questi punti.

Per definizione di fronte d'onda, la differenza tra le fasi dei due campi al tempo $t = 0$ è zero.

Ora, se questa differenza rimane zero dopo un tempo $t > 0$ qualsiasi, affermeremo che tra i due punti vi è una perfetta coerenza spaziale; se questa condizione si verifica per ogni coppia di punti del fronte d'onda e.m., affermeremo che l'onda possiede una perfetta coerenza spaziale.

In pratica, per ogni punto P_1 , il punto P_2 deve giacere entro una qualche area finita attorno a P_1 se desideriamo avere una buona correlazione di fase. In questo caso diremo che l'onda possiede una coerenza spaziale parziale e, per ogni punto P , noi possiamo introdurre un'area di coerenza $S_c(P)$ definita opportunamente.

Per definire la coerenza temporale, consideriamo il campo elettrico dell'onda e.m. in un dato punto P , al tempo t e al tempo $t + \tau$. Se, per un dato intervallo di tempo τ , la differenza di fase del campo rimane la stessa in ogni

istante t , affermeremo che vi è una coerenza temporale in un tempo τ ; se ciò accade per ogni valore di τ , affermeremo che l'onda e.m. possiede una perfetta coerenza temporale, se, invece, ciò si verifica per un determinato tempo τ tale che $0 < \tau < \tau_0$, affermeremo che l'onda possiede una coerenza temporale parziale, con un tempo di coerenza uguale a τ_0 .

Direzionalità

Le deviazioni dal perfetto parallelismo dei raggi laser, parallelismo dovuto al fatto che il materiale attivo è posto in una cavità risonante, sono dovute soltanto ad effetti diffrattivi, dipendenti dalla lunghezza d'onda e dal diametro dell'apertura di emissione.

Ora, date le opportune condizioni operative, la diffrazione del raggio laser uscente è limitata ed inferiore alla minima diffrazione subita da qualsiasi altro tipo di raggio della stessa larghezza.

Luminosità

Definiamo la luminosità di una data fonte di onde e.m. come la potenza (energia per unità di tempo) per unità di superficie e per unità di angolo solido. Per essere più precisi, sia dS l'elemento di superficie.

La potenza dP emessa da dS in un angolo solido $d\Omega$ lungo la direzione OO' può essere scritta come:

$$dP = B \cos \theta dS d\Omega \quad (4)$$

Con θ angolo tra OO' e la normale n alla superficie. B dipende generalmente da θ e da O . B è chiamata luminosità della fonte nel punto O nella direzione OO' .

Un laser di media potenza (pochi milliwatts) ha una luminosità che è dell'ordine di grandezza maggiore della fonte di luce convenzionale più brillante. Questo è principalmente dovuto alle proprietà di alta direzionalità del raggio laser.

Breve durata degli impulsi

Per mezzo di una speciale tecnica detta *modo di bloccaggio*, è possibile produrre impulsi di luce la cui durata è uguale all'inverso dell'ampiezza della linea nella transizione 2-1. Così, con il laser a gas, la cui ampiezza della linea è relativamente stretta, l'ampiezza dell'impulso può essere di circa 0.1-1ns.

Bibliografia

- E. Segré: Personaggi e scoperte della fisica contemporanea: Da Rutherford ai quark. Oscar Saggi Mondadori Ottobre 1996.
- Compton's Interactive Encyclopedia. 1994 Compton's New Media.
- L'atomo ieri e oggi main9htm di U. & G. Dini, scaricato da Internet.
- Storia della fisica e didattica: Materiali del corso di aggiornamento al Deutsches Museum di Monaco, 4-8 maggio 1987. Università degli studi di Pavia.
- Storia della fisica nella didattica della fisica. AIF quaderno 5
- Radiazioni – Atomi – Corpuscoli (N. Robotti)
- Un commento sulla genesi del modello atomico di Bohr (G.P. Guidotti).
- Hans C. Ohanian: Fisica Vol. II, Ed. Zanichelli, Settembre 1992.
- Einstein: Teoria dei quanti di luce. Tascabili economici Newton 1968.
- Laser - La luce estratta dagli atomi, J.P. Harbison, R.E. Nabory. Ed. Zanichelli 1999.
- Orazio Svelto: Principles of lasers (third edition). Plenum Press, New York. A Division of Plenum Publishing Corporation 233 Spring Street, New York, N.Y. 10013.
- Complementi di fisica: Fisica Moderna. Peter J. Nolan. Ed. Zanichelli, luglio 1996.