

1. INTRODUZIONE AL LASER.

La parola “laser” deriva dalle iniziali di “light amplification by stimulated emission radiation” (amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione). Il laser è, dunque, un dispositivo che permette di ottenere fasci molto intensi di luce monocromatica e coerente, cioè radiazioni luminose che, a differenza di quelle delle sorgenti ordinarie, sono emesse in concordanza di fase.

I primi che si resero conto di poter sfruttare il fenomeno dell’emissione stimolata furono gli scienziati Weber, Gordon, Geiger, Townes e Basow. Il primo tentativo di costruire un tale amplificatore fu fatto da un gruppo della Columbia University formato da Gordon, Geiger e Townes i quali sfruttarono però, invece delle radiazioni luminose, le microonde (10^9 - 10^{10} Hz) per costruire il primo “maser”, un acronimo di “microwave amplification by the stimulated emission radiation”. Il primo maser utilizzava una transizione a microonde nelle molecole di ammoniaca (NH_3).

La possibilità di costruire una sorgente di onde luminose monocromatiche e coerenti, fondata sugli stessi principi del maser, fu prospettata per la prima volta dai fisici americani A.L. Shawlow e C.H. Townes nel 1958. Nel 1960, meno che due anni dopo, Maiman (Maiman T.H. “Stimulated Optical Radiation in Ruby”, Nature 187,493 – 1960) costruì il primo laser o maser ottico impulsato a rubino. Il primo laser ad onda continua (cw) fu il laser a gas He-Ne proposto nel 1961 da Javan, Bennet Jr. ed Herriott nell’articolo “Population inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture” (Phys.Rev.Letters 6, 106 – 1961).

Il principio di funzionamento del laser, come quello del maser, è fondato sul fenomeno dell’emissione stimolata o indotta, cioè l’emissione di fotoni da parte di atomi che si trovano in uno stato eccitato di energia E_1 in presenza di un’onda elettromagnetica di frequenza $\omega = (E_1 - E_0)/h$, dove E_0 è l’energia di uno stato inferiore (per esempio lo stato fondamentale) e h è la costante di Planck.

Per spiegare meglio cos’è l’emissione stimolata cominciamo a parlare di emissione semplice, non stimolata, quella per intenderci, emessa da una comune sorgente di luce, per esempio dal filamento di una lampada a incandescenza. La luce emessa da una sorgente di questo tipo è costituita, per così dire, da miliardi di guizzi luminosi ciascuno dei quali è generato da un atomo della sorgente. Sappiamo che un atomo è un sistema complesso, che in determinate circostanze, può diventare un oscillatore di notevole costanza e perfezione. Infatti, un atomo “in riposo” che riceve in qualche modo energia “in eccesso”, passa a uno stato di eccitazione, dal quale ritorna immediatamente allo stato di riposo irradiando nello spazio l’energia in eccesso sotto forma di onde, per la brevissima durata di un centomillesimo di secondo. L’atomo, dunque, emette un guizzo di luce e poi si spegne in attesa di essere nuovamente eccitato. Nel filamento di una lampadina a incandescenza gli atomi si eccitano l’un



Lamp

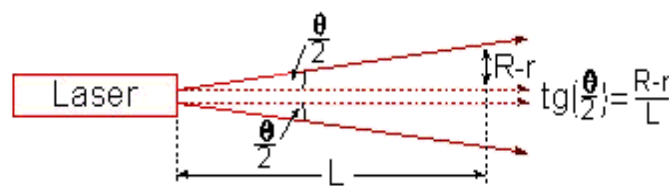


Fig1: Differenza tra la luce emessa da un laser e quella emessa da una lampadina.

l’altro per effetto degli urti prodotti dalla intensa agitazione termica. Queste sorgenti di luce sono dette “incoerenti” perché sono costituite da miliardi di guizzi

ciascuno dei quali è costituito da un treno d'onde indipendente dagli altri. L'indipendenza riguarda la direzione di propagazione, la frequenza e la fase (per ciò che riguarda la fase si parla di coerenza temporale che in questo caso viene a mancare data la brevità – circa 10^{-8} sec – della durata temporale di ogni onda elettromagnetica emessa dagli atomi eccitati; in pratica a causa di questa brevità, e poiché tra un treno d'onda e un altro non c'è nessun nesso di polarizzazione o di fase, gli atomi che emettono non potranno mai agire cooperativamente visto che le emissioni non potranno mai trovarsi in un qualche punto dello spazio in concordanza di fase).

Per avere luce “coerente” i singoli treni d'onda prodotti dagli atomi eccitati della sorgente luminosa devono muoversi nella stessa direzione e avere la stessa frequenza e la stessa fase (ricordiamo che la somma delle intensità di due onde monocromatiche della stessa frequenza è data dalla relazione $I_{TOT} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \mathbf{f}$, dove le I_1 e I_2 sono le intensità delle due onde e \mathbf{f} è lo sfasamento tra le due); insomma l'immagine usuale della propagazione ondosa applicabile a un singolo treno d'onda deve potersi applicare alla luce complessivamente emessa da una sorgente reale, perché questa possa essere considerata sorgente di luce coerente.

Questa condizione può essere realizzata mediante l'emissione stimolata. Il fenomeno può essere spiegato qualitativamente così: nell'emissione spontanea di luce considerata finora, un atomo, dopo essere stato eccitato, ha una certa probabilità di emettere l'energia in eccesso sotto forma di un treno d'onda in un momento qualsiasi e con una fase una frequenza e una direzione qualsiasi.

Questa mancanza di prevedibilità è ciò che rende l'emissione spontanea “incoerente”. Se però l'atomo si trova

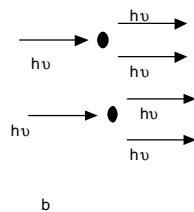
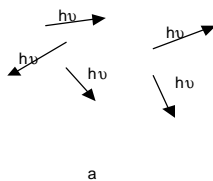


Fig2: l'emissione spontanea (a) avviene in tutte le direzioni, l'emissione stimolata (b) avviene nella stessa direzione e in fase con il fotone incidente.

immerso in un campo di radiazione luminosa, al fenomeno della emissione spontanea si sovrappone quello della emissione stimolata (o indotta, poiché indotta dal campo esterno): l'atomo si diseccita sotto lo stimolo della

radiazione incidente. Di conseguenza se abbiamo un numero elevato di atomi eccitati e li investiamo con una radiazione appropriata (la radiazione deve avere frequenza uguale a $\omega = (E_1 - E_0)/h$, dove E_0 è l'energia di uno stato inferiore e h è la costante di Planck, altrimenti, se essa avesse frequenza diversa, si troverebbe fuori distribuzione e la probabilità di emissione indotta dell'atomo sarebbe nulla) possiamo scaricarli tutti insieme con un unico guizzo di luce molto intenso.

Una descrizione più dettagliata dell'emissione spontanea può essere fatta ricorrendo alla trattazione di Einstein dei coefficienti di emissione spontanea e indotta nella quale si ricavano la probabilità di emissione spontanea e indotta per un sistema atomico. Da questi si può facilmente capire il fenomeno dell'emissione spontanea (che avviene senza la presenza di radiazione esterna e in tutti i modi permessi dalla cavità risonante nella quale è contenuto il sistema atomico) e quello dell'emissione indotta (che avviene per un unico modo della cavità, quello che corrisponde alla transizione energetica del sistema atomico considerato).

Ci troviamo, quindi di fronte a un vero e proprio processo di amplificazione perché l'energia emessa dagli atomi non deriva da quella della radiazione stimolante, ma si somma a questa dopo la diseccitazione.

Ciò può essere spiegato ricorrendo alla Teoria semiclassica dell'indice di rifrazione la quale spiega cosa accade quando un'onda monocromatica attraversa un mezzo attivo (così viene detto un sistema atomico che ha la capacità di essere portato in uno stato eccitato o diseccitato e che in corrispondenza manifesterà fenomeni di assorbimento o amplificazione): l'onda viene amplificata o assorbita a seconda che il mezzo attivo si trovi in uno stato eccitato (in tal caso si dice che è stata realizzata un'inversione di popolazione nel mezzo attivo, cioè gli atomi costituenti si trovano in maggioranza in uno stato eccitato) o non eccitato. Questo fatto viene spiegato in termini di un coefficiente κ , che è proporzionale alla differenza di popolazione $\Delta N = N_2 - N_1$ realizzata nel mezzo attivo (N_1 ed N_2 sono rispettivamente il numero di atomi per unità di volume che si trovano nello stato fondamentale 1 e nel livello eccitato 2), e che viene chiamato

1. Coefficiente d'assorbimento se $\Delta N < 0$, ($\kappa < 0$)
2. Coefficiente di guadagno se $\Delta N > 0$, ($\kappa > 0$)

Nel primo caso, infatti, la radiazione incidente sul mezzo attivo verrà assorbita dal sistema atomico andando ad eccitare la maggioranza di atomi che si trovano nello stato 1, in conseguenza del fenomeno dell'assorbimento indotto (quando un atomo si trova nello stato non eccitato non si verifica emissione indotta ma assorbimento indotto il quale è equiprobabile all'emissione indotta; non si verifica, però, mai assorbimento spontaneo). Nel secondo caso la maggioranza degli atomi si trovano nello stato 2 eccitato e in conseguenza dell'arrivo della radiazione su essi si ha emissione indotta: la radiazione emessa (che avrà la stessa frequenza direzione e fase di quella incidente) va aggiungersi a quella che ha investito il mezzo attivo con una conseguente amplificazione della radiazione. L'espressione dell'onda e.m. risultante sarà

$$\vec{E}(z,t) = \text{Re} \left[\vec{E}_0 \exp \left(i\omega t - ikz + \frac{\kappa}{2} z \right) \right]$$

dalla quale si può subito vedere il ruolo del coefficiente κ .

Abbiamo, però, supposto in questo discorso che la frequenza ω della radiazione monocromatica incidente corrisponda alla $\omega = (E_2 - E_1)/\hbar$ corrispondente alla specifica transizione del sistema atomico a due livelli considerato (E_1 è l'energia dello stato inferiore e \hbar è la costante di Planck). Se questa ipotesi non fosse soddisfatta avremmo una diminuzione del guadagno (causata dalla diminuzione della probabilità di emissione indotta) e l'introduzione di un ritardo di fase $-\kappa z$.

Inoltre bisogna, oltre che a realizzare la condizione di inversione di popolazione, la quale fa sì che $n_i > n_a$ (dove n_i è il numero di fotoni emessi per emissione indotta ed n_a è il numero di fotoni assorbiti per assorbimento indotto), che l'intensità della radiazione incidente sia elevata in modo da poter realizzare la condizione $n_i > n_s$ (dove n_s è il numero di fotoni emessi per emissione spontanea). A tal fine gli atomi attivi nel processo di emissione stimolata vengono posti in una cavità risonante (risonatori) di forma opportuna. Tali risonatori (solitamente quelli usati sono a specchi sferici) sono inoltre necessari per far sì che la maggior parte dei fotoni indotti sia emessa nella stessa direzione e nello stesso verso e vengono costruiti in modo tale che la maggior parte dei fotoni emessi per emissione spontanea sfuggano al risonatore.

Naturalmente per avere altri guizzi di luce dopo il primo bisogna trovare il modo di riportare il sistema atomico ,ovvero il mezzo attivo, nuovamente nello stato eccitato utilizzando un sistema che viene definito “pompaggio”.

La tecnologia del laser è tutta qui: creare un sistema di “pompaggio” per mantenere continuamente elevata la popolazione degli atomi allo stato eccitato; disporre di un’onda rigorosamente selezionata per monocromaticità e direzione di propagazione per stimolare contemporaneamente la scarica degli atomi eccitati.

Qui in basso sono riportate alcune immagini su uno dei sistemi di pompaggio laser (il laser a tre livelli), sulle principali configurazioni dei risonatori a specchi e lo spettro di emissione di vari tipi di lasers.

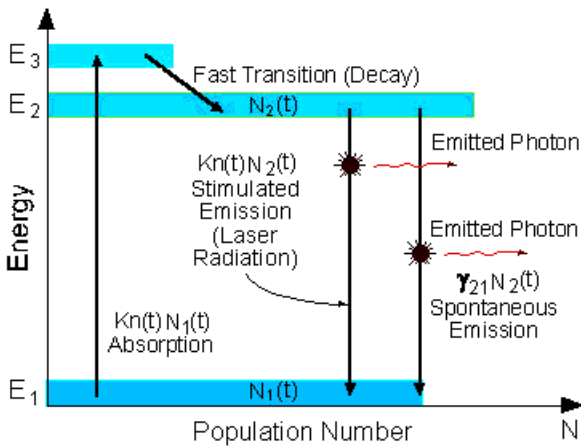


Fig.3: schema semplificato di un laser a tre livelli

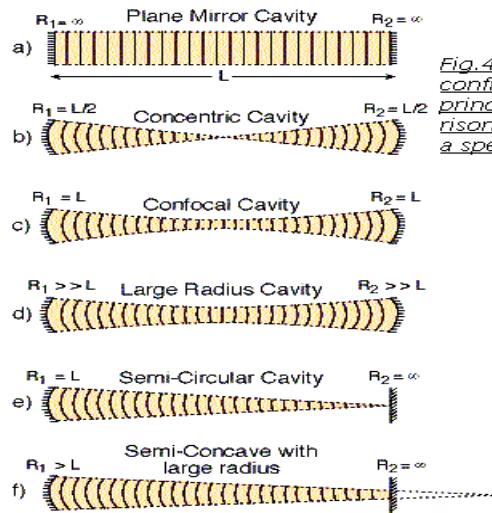


Fig.4: configurazioni principali dei risonatori ottici a specchi.

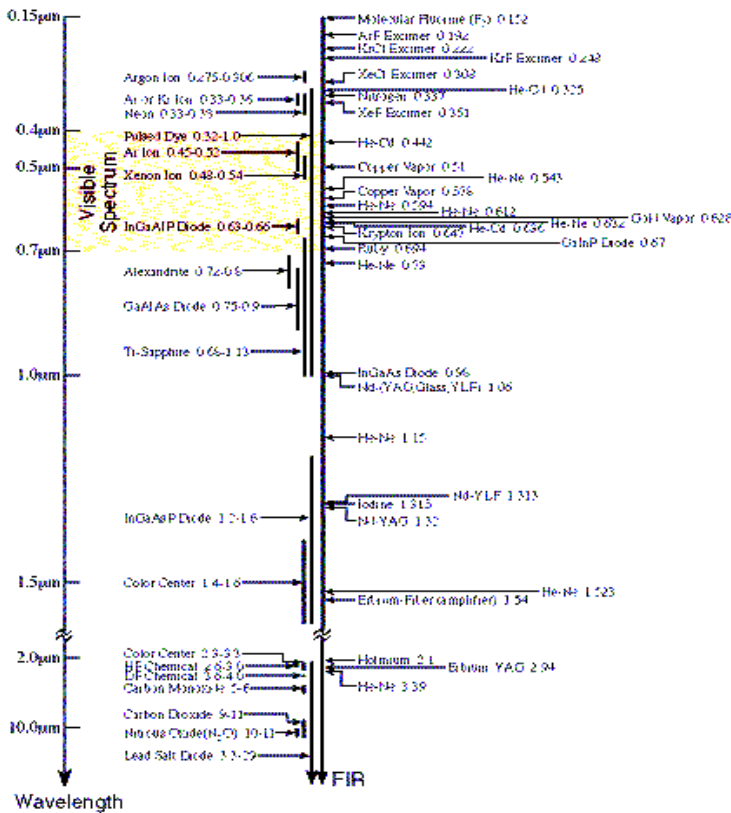


Fig.5: schema dello spettro di emissione dei principali tipi di lasers

2. ALCUNI SISTEMI LASERS E IL LORO POMPAGGIO

Assumiamo in questi paragrafi che esistano dei meccanismi di pompaggio esterno per mezzo dei quali gli atomi possono essere pompati dallo stato fondamentale negli stati di livello laser superiori.

Fatta questa assunzione passiamo ad esaminare alcuni esempi di lasers che si distinguono per la diversità dei meccanismi di pompaggio e cioè:

- Pompaggio ottico nei **lasers a stato solido**;
- Pompaggio **nei lasers a diodi**;
- Collisioni di elettroni eccitati, trasferimento di energia e scambi in risonanza di energia nei **lasers a gas**;

2.1 I lasers a stato solido.

Nella maggioranza dei lasers a stato solido l'inversione di popolazione viene creata illuminando la bacchetta laser con lampadine ad alta intensità.

Gli atomi in un solido sono legati l'uno con l'altro e l'interazione fra loro è forte. Perciò, i ranges dello spettro di emissione e di assorbimento, nei solidi, sono molto più larghi rispetto a quelli dei gas. Uno spettro di assorbimento largo richiede un pompaggio del mezzo attivo mediante una sorgente di luce "convenzionale" che possiede uno spettro di emissione anch'esso largo.

Nel Pompaggio Ottico il mezzo attivo viene eccitato illuminandolo con una sorgente elettromagnetica esterna. I fotoni della sorgente esterna sono assorbiti dal materiale del mezzo attivo trasferendo così energia alle sue molecole e ai suoi atomi.

Le sorgenti di tipo elettromagnetico usate sono di due tipi:

- Sorgenti con spettro elettromagnetico a larga banda - come lampadine Flash, lampadine incandescenti, lampade ad arco, etc.;
- Sorgenti con spettro a banda stretta - un altro laser.

Fanno parte di questa categoria i seguenti tipi di lasers:

LASER A RUBINO

Il laser a Rubino è stato il primo laser inventato dall'uomo e fu costruito da Theodore Maiman nel 1960.

Il Rubino è un cristallo sintetico di Ossido di Alluminio (Al_2O_3) ed è molto familiare nella vita comune come pietra preziosa per gioielli. La sua struttura chimica è di Al_2O_3 con impurità di circa 0.05% (per peso) di Ioni Cromo Cr^{+3} . Lo ione attivo Cr^{+3} , che dispone gli atomi di alluminio nel cristallo, è responsabile del colore rosso del cristallo, dello spettro di assorbimento nella regione del visibile e vicino al visibile e della transizione laser ad una lunghezza d'onda di 6934 nm.

Nd LASER

L'azione laser dello ione Nd^{+3} fu scoperta da Johnson e Nassau nel 1961.

In questo tipo di laser gli ioni di Nd^{+3} (che sono presenti in piccola percentuale per peso) rimpiazzano del solido nel mezzo attivo.

I tre tipi principali di solidi vengono usati per il laser Nd nel quale gli ioni di Nd^{+3} sono aggiunti come impurità:

- Vetro.
- YAG (Yttrium Aluminum Garnet) Crystal.
- YLF (LiYF₄) Crystal.

La scelta del particolare tipo di solido viene fatta in concordanza dell'uso che si intende fare del laser:

- Il vetro è usato come materiale ospite (host) quando si necessita di un pulsed laser, con ogni impulso ad alta potenza e con un rate di ripetizione degli impulsi basso. Il mezzo attivo dell' Nd-Glass Laser può essere costruito a forma di bacchetta cilindrica con diametro di 0.5 metri e lunghezza di diversi metri. Tali dimensioni sono possibili perché il vetro è un materiale isotropo a buon mercato e può essere lavorato facilmente. Al vetro gli si può, inoltre, aggiungere un'alta percentuale di ioni Nd (superiore al 6%). L'unico problema è la povera conduttività termica del vetro. Perciò è difficile raffreddare il laser quando questo opera in continuo o con un rate di ripetizione alto.
- Il cristallo YAG (Yttrium Aluminium Garnet) è usato per impulsi con alto rate di ripetizione (più di un impulso al secondo). In questo caso bisogna trasferire lontano dal laser una grande quantità di calore e la conduttività termica dello YAG è molto più alta di quello del vetro. Questo tipo di laser è chiamato "a 4 livelli" e l'emissione laser in questo caso avviene per una lunghezza d'onda di 1.0641 μ m alla temperatura ambiente.

2.2 I lasers a diodi

Tutti I lasers a diodi sono costruiti con materiali semiconduttori e manifestano proprietà elettriche che sono caratteristiche dei diodi.

Per questo motivo i lasers a diodi hanno altri nomi come:

- **Semiconductor Lasers** – in accordo ai materiali di cui sono composti.
- **Junction Lasers** – poiché composti da una giunzione p-n
 - **Injection Lasers** – Poiché gli elettroni sono iniettati nella giunzione applicando una tensione ai capi di essa

Sia l'utilizzo commerciale che quello per la ricerca dei lasers a diodi è cambiato drasticamente negli ultimi venti anni del XX secolo.

Oggi il numero di lasers a diodi venduti in un anno è misurato in milioni, mentre per gli altri tipi di lasers il numero di vendite è dell'ordine delle decine o migliaia.

Infatti, I familiari lasers a diodi sono usati da una vasta varietà prodotti destinati ai consumatori, quali: i Compact Discs, le Stampanti Laser Printers, gli Scanners con Codici a Barra e l'Optical communication.

L'emissione stimolata coerente dai semiconduttori a giunzione p-n fu ottenuta nel 1962 da tre gruppi di ricercatori e tutti e tre usarono le giunzioni GaAs. A ciò seguì un'analisi teorica grazie a Dunmke.

2.3 I lasers a gas.

Nei lasers a gas, i quali utilizzano essenzialmente atomi isolati o ioni, il pompaggio ottico in genere non può essere utilizzato. Ciò perché, alle basse pressioni usate, le linee di assorbimento sono molto strette cosicché può essere assorbita solo una minutissima parte dello spettro emesso dalla lampada.

Gli schemi di pompaggio che hanno riscontrato molto successo sfruttano l'energia degli elettroni di una scarica elettrica generata all'interno del gas laser. L'eccitazione di questi elettroni viene trasferita direttamente alle particelle attive (atomi, ioni, o molecole) come nei lasers ad Ar⁺, oppure viene trasferita mediante intermediari di altra specie come nei lasers a He-Ne e a CO₂.

Sviluppo dei lasers a gas.

La prima proposta concreta per la realizzazione di un laser a gas è probabilmente quella dello storico articolo di Shawlow e Townes pubblicato nel 1958. Questo articolo, che basa la sua teoria sulla conoscenza del fenomeno dell'emissione stimolata, allora conosciuto in relazione alle microonde, propose un laser a pompaggio ottico per dimostrare il principio dell'azione laser. L'articolo, considerato come lo stimolo per le scoperte iniziali di tutti i tipi di laser, risultò essere sorprendentemente preciso nelle previsioni della taglia, del range di lunghezze d'onda, e della potenza in uscita per tipici laser a gas aventi potenza in ingresso moderata sebbene non propose l'utilizzo della scarica nel gas per l'eccitazione. Questa idea, di usare una scarica nel gas per creare inversione di popolazione, fu introdotta da , tra i tanti, A.Javan, allora dei Bell Telephone Laboratories, nel 1960 circa. Il primo gas laser operativo (He-Ne) fu, infatti, costruito dal Dr.Javan e i suoi associati Bennet ed Herriott.

La storia della scoperta delle transizioni dei gas lasers è stata una fra le più povere di accordi tra teorie e conseguenti scoperte sperimentali. La maggior parte di queste transizioni fu scoperta con la semplice esperienza, utilizzando un tipico apparato laser sperimentale. D'altro canto esiste un'area di ricerca sul laser nella quale la teoria è stata particolarmente d' aiuto all'ulteriore sviluppo della tecnica. Questa è la teoria della struttura e dei modi dei risonatori ottici. L'articolo originale di Shawlow e Townes indicò che il concetto di modi per quanto riguarda le microonde non sarebbe stato appropriato nella regione ottica, così suggerì che il risonatore avrebbe dovuto avere, probabilmente, una struttura del tipo Fabry-Perot, in pratica un paio di specchi racchiudenti il mezzo laser e diretti uno di fronte all'altro. Tuttavia l'articolo lasciava aperta la questione sull'esatta natura dei modi di questa struttura.

Fu solamente dopo la scoperta dei lasers a gas che emerse la teoria esatta sui risonatori ottici grazie a nomi come Fox, Li, Boyd, Gordon e Kogelnik. Gli studi teorici sui risonatori a specchi curvi mostrarono che questi avrebbero comportato meno perdite intrinseche rispetto ai risonatori a specchi piani e paralleli. Perciò da quel momento i risonatori a specchi piani non vennero più utilizzati per la progettazione di apparati lasers e tutte le scoperte sulle nuove transizioni dei lasers a gas furono fatte utilizzando risonatori a specchi curvi.

L'altro grande passo sperimentale fu la scoperta dell'output del laser visibile a 6328 Å da parte di White e Rigden nella primavera del 1962.

Nel 1963 fu dimostrato da diversi ricercatori la possibilità di creare transizioni lasers che non potevano essere osservate in continuo. Ciò portò quindi all'invenzione dei lasers impulsati. Il più importante fra gli esperimenti riguardanti questi tipi di lasers fu la scoperta di Bell alla fine del 1963 dell'azione laser a ioni impulsata nei vapori di mercurio. Infatti, la scoperta che l'azione laser si sarebbe potuta ottenere dallo spettro ionico degli atomi suggerì un'intera gamma di nuove possibilità per l'operazione laser in vari materiali.

Più lontana rispetto a quegli anni è, invece, la scoperta del laser a CO₂.

Lo sviluppo dei gas a laser ha suggerito una classificazione in quattro classi più generali:

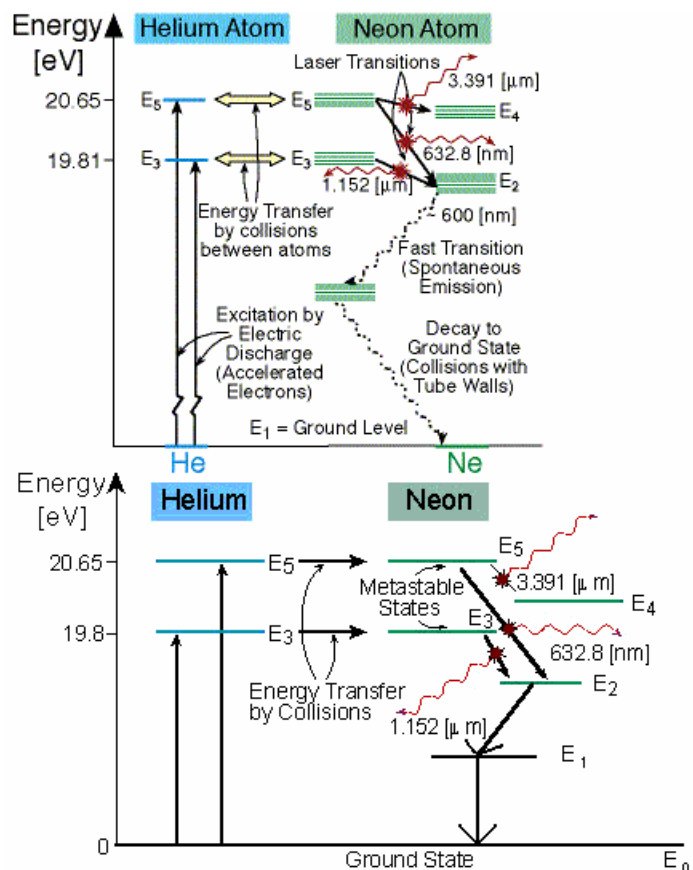
1. *Neutral gas lasers*: fanno parte di questa categoria quei lasers che sfruttano scariche relativamente deboli ed hanno potenze in uscita e guadagni moderati. Lo spettro della transizione laser è quello degli atomi neutri nella scarica.
2. *Ion lasers*: sono questi i lasers che nella scarica operano sulle transizioni degli atomi ionizzati ed hanno alte densità di corrente, alte potenze in ingresso e occasionalmente alte potenze in uscita.
3. *Molecular lasers*: simili ai neutral gas lasers i molecular lasers utilizzano però gli spettri molecolari. Sono caratterizzati da una moderata densità di corrente nella scarica ma occasionalmente operano con alte potenze in ingresso. Molti, ma non tutti, dei lasers di questa classe emettono nel lontano infrarosso.
4. *Pulsed lasers*: appartengono a questa classe quei tipi di lasers che non possono operare in maniera continua. Molti lasers di questo tipo hanno picchi di alta potenza in uscita di grande guadagno ma a causa del loro comportamento impulsato la loro potenza media non è particolarmente alta.

He-Ne LASER

Il laser He-Ne è stato il laser più comune fino all'avvento, negli ultimi anni, dei lasers a diodi. Fu costruito nel 1961 da Ali Javan e fu il primo laser in continuo (cw) e il primo laser a gas appartenente alla classe dei neutral gas lasers.

Il mezzo attivo è costituito da un gas nobile (Ne) ed esso è un laser a 4-livelli.

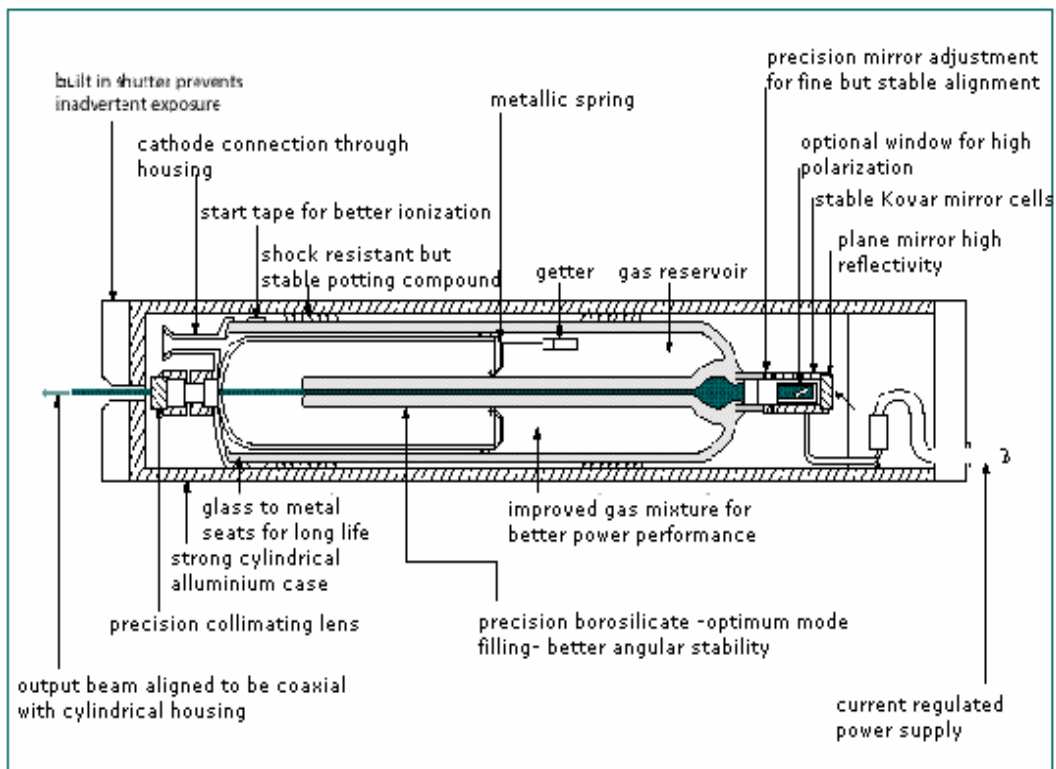
L'operatività di questo laser può essere spiegata con l'aiuto della figura a destra della pagina. Una scarica DC (oppure RF) viene generata nella miscela di gas contenente, tipicamente, 10 mmHg di He e 0.1 mm di Ne. Gli elettroni energetici nella scarica eccitano gli atomi di elio in una varietà di stati. Nel decadimento normale di questi atomi dagli stati eccitati allo stato fondamentale molti di essi vanno a collocarsi nei livelli metastabili 2^3S e 2^1S i cui tempi di vita sono 10^{-4} sec e $5 \cdot 10^{-6}$ sec. Poiché questi livelli a lunga vita coincidono (a meno che una piccola frazione di energia) in energia con i livelli 2S e 3S del Ne, gli atomi caduti in questi possono eccitare per collisioni gli atomi di Ne portandoli in questi due stati anche essi metastabili. Ciò avviene dunque quando un atomo eccitato di He urta con un atomo di Ne, che si trova nello stato fondamentale, e scambia energia con esso. La piccola differenza in energia (circa 400 cm^{-1} nel caso del livello 2S) va a finire in energia cinetica degli atomi dopo l'urto. Questo è il meccanismo principale di pompaggio nel sistema He-Ne. Esaminiamo ora i tre tipi di transizione laser che si possono avere con questo sistema:



1. *Oscillazione a 0.6328 μm (laser rosso: in figura $E_5 \rightarrow E_2$)*. Il livello superiore è uno dei livelli 3S del Ne (in fig. E_5), mentre il livello finale appartiene al gruppo 2p (in fig. E_2). Quest'ultimo ha un tempo di decadimento di 10^{-8} sec nel livello a lunga vita 1S (in fig. E_1). Proprio a causa della sua lunga vita questo livello tende ad accumulare atomi. Gli atomi in 1S entrano in collisione con gli elettroni della scarica e si eccitano passando di nuovo al gruppo 2p (E_2) riducendo così l'inversione di popolazione. Un'altra parte degli atomi in 1S finiscono per cadere nel ground state (E_0) a causa degli urti di questi stessi con le pareti del tubo di scarica. Per questo motivo, il guadagno nella transizione laser 0.6328 μm è tanto maggiore quanto minore è il diametro del tubo di scarica.
2. *Oscillazione a 1.152 μm* : il livello laser superiore 2S del Neon (in fig. E_5) è pompato dagli urti risonanti (con conservazione dell'energia) con il livello metastabile 2^3S dell'He (in fig. E_3 dell'He). Anche questo decade, come nel caso precedente, nel livello laser inferiore 2p (in fig. E_2) e conseguentemente anche questa transizione dipenderà dal diametro del tubo di scarica.
3. *Oscillazione a 3.391 μm* : questa avviene tra i livelli laser 3S-3p del Neon (in fig. $E_5 \rightarrow E_4$) ed ha la caratteristica di avere un alto guadagno.

Una tipica configurazione di un apparato sperimentale di un laser He-Ne è riportata nella figura in basso.

Laser He-Ne



Schema dell'apparato sperimentale.

CARBON-DIOXIDE (CO₂) LASER

L'azione laser nelle particelle di CO_2 fu dimostrata da C.Patel nel 1964. Egli trasmise un una scarica elettrica impulsata attraverso CO_2 puro in un tubo laser ed ottenne una piccolo output laser.

Questo tipo di laser è un rappresentante dei cosiddetti molecular lasers.

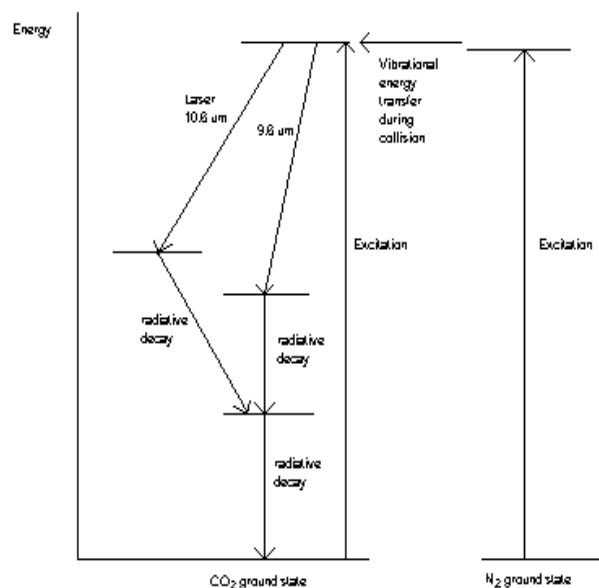
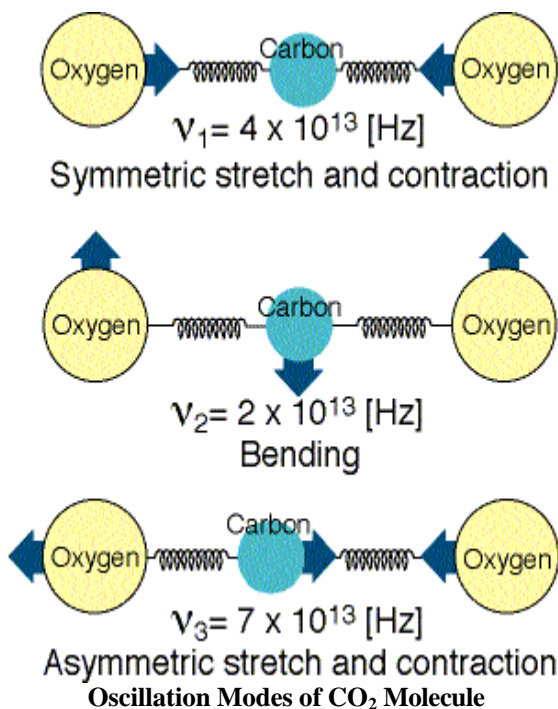
CO_2 è il gas nel quale si ha il processo laser, ma altri gas aggiunti al tubo laser modificano l'efficienza totale del laser.

Il laser standard a CO_2 include nel mezzo attivo una miscela di CO_2 con N_2 ed He. Le proporzioni ottimali di questi 3 gas nella miscela dipende dal sistema laser e dal meccanismo di eccitazione. In generale, per un laser a onda continua le proporzioni sono:

$$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} - 1:1:8$$

La molecola di CO_2 è una molecola lineare: tre atomi sono situati su una linea retta con l'atomo di Carbonio al centro. Questa configurazione permette alla molecola di eseguire tre vibrazioni basilari interne chiamate modi vibrazionali normali. Nella seguente figura sono illustrati i tre modi vibrazionali della molecola di CO_2 :

1. Symmetric stretch mode (n_1).
2. Bending mode (n_2).
3. Asymmetric stretch mode (n_3).



La parte riguardante lo schema dei livelli

energetici è invece mostrata nella seguente figura a destra: la transizione laser avviene a $10.6\mu\text{m}$ nel CO_2 .

I Carbon-Dioxide lasers non solo sono efficienti ma possono emettere grandi quantità di potenza.

3. APPLICAZIONE DEI GAS LASERS NELLA MEDICINA

Le applicazioni dei lasers nella medicina sono svariate. Qui vengono riportati, solo a titolo di esempio, due documenti riguardanti le ricerche e le applicazioni dei gas lasers e della luce coerente in genere nel campo medico.

Documento 1

ESPERIENZE SPERIMENTALI IN VIVO E CLINICHE CON APPLICAZIONE DI LUCE COERENTE E NON COERENTE

Corti L., Terribile Wiel Marin V*, Ferraro B. , Belfontali S., Boso C., De Luca C.**

Div. di Radioterapia, * Istituto di Anatomia Patologica, ** Div. Chirurgica I

Azienda Ospedaliera, Padova

In letteratura numerosi studi, sperimentali e clinici, dimostrano l'utilità dell'impiego della luce coerente, anche in ambito medico.

Con la nostra sperimentazione si è voluto confermare, prima, la reale efficacia della luce coerente, nei confronti della luce non coerente, nei processi di cicatrizzazione e verificarne, poi, i vantaggi in ambito clinico.

Sono stati quindi condotti due studi sperimentali con l'utilizzo di ratti e topi BALB-C, sul dorso dei quali era stata precedentemente praticata una piccola ferita, di pochi mm di diametro. Nel primo studio i ratti sono stati divisi in tre gruppi: un gruppo ha ricevuto l'irradiazione con luce coerente, emessa da un laser ad HeNe (630 nm), un altro con luce non coerente emessa da una lampada alogena, mentre il terzo, gruppo controllo, non ha avuto alcuna irradiazione.

Si è calcolato il tempo di guarigione per ciascun gruppo. Significativamente più rapida è risultata la guarigione dei ratti irradiati con HeNe.

Nel secondo studio sperimentale si è confrontato il tempo di guarigione dei topi BALB-C irradiati con luce non coerente, emessa da "LED" (Light Emission Device) con quello dei topi BALB-C controllo, non irradiati.

In questo caso i risultati preliminari sembrano non dimostrare una significativa differenza nei due gruppi, ma si attendono ulteriori dati per la significatività.

L' applicazione clinica è stata condotta prima in ambito non oncologico.

Sono stati trattati 27 pazienti affetti da Sinus Pilonidalis sacrococcigeo, precedentemente sottoposti a resezione chirurgica: 13 con HeNe laser , bisettimanalmente, 14 con sole medicazioni.

Il tempo di guarigione è stato del 20% inferiore nel gruppo che ha avuto l'irradiazione. In ambito oncologico sono state trattate 3 pazienti sottoposte a quadrantectomia per ca mammario e successiva radioterapia, le quali avevano manifestato una ulcerazione attinica, successivamente o in corso di trattamento.

Queste pazienti non avevano avuto che minimi benefici dai presidi medici convenzionali. Con il trattamento con HeNe laser, una o due volte alla settimana, per alcune settimane, hanno ottenuto una guarigione completa.

Documento 2

EFFETTO DEL LASER A BASSA POTENZA NELLA CURA DI LESIONI CUTANEE DI VARIA ETIOLOGIA.

L. Schindl, A. Kainz, H. Kern, A. Schindl, M. Schindl

Istituto di Medicina del Laser, Rathausplatz 4, A-3400 Klosterneuburg, AUSTRIA.

Il trattamento delle lesioni cutanee e' un problema comune non solo negli anziani e nei pazienti immunodeficienti, ma anche in individui giovani; un' ampia varieta' di patologie (diabete, insufficienza vascolare, processi autoimmuni e scottature) possono determinarne l'insorgenza. Le lesioni croniche comportano sia sofferenza fisica che psicologica per il paziente, con un elevato costo per il sistema sociale. In questo caso riportato, gli Autori danno una veduta d'insieme dei tipi pi- comuni di lesioni cutanee, e dei risultati positivi ottenuti con l'impiego del Laser a bassa potenza.

Tutti i casi studiati, sono stati trattati ambulatorialmente, assicurando al paziente una migliore qualita' di vita ad un costo minore. I Laser impiegati nel trattamento, sono stati HeNe e HeNe-IR , con potenza di emissione da 10mW a 30mW. Gli IEDs applicati andavano da 1 J/ cm2 a 6 J/ cm2 in relazione all' estensione della lesione, all' apparecchiatura Laser ed alla lunghezza

d'onda impiegate. L'irradiazione di Laser a bassa potenza, stata adottata come mono-terapia, eccetto per alcuni pazienti che hanno richiesto somministrazione di antibiotici all'inizio del trattamento. Le lesioni sono state coperte con garza sterile, senza bendaggio occlusivo o altra terapia topica.

Sebbene le lesioni cutanee trattate abbiano differenti etiologie, e' stato rilevato sempre lo stesso processo di evoluzione: inizialmente si, avuta una demarcazione tra il tessuto sano e quello leso, accompagnata da un aumento di breve durata della reazione infiammatoria, a cui, seguita una progressiva eliminazione del tessuto necrotico mostrando la presenza di un ricco tessuto di granulazione sottostante; l'area della lesione, diminuita e la cute lesa si, rimarginata con una cicatrizzazione minima. Questo fenomeno risulta di grande importanza per la successiva riabilitazione.

Il processo di guarigione della lesione e' stato documentato fotograficamente ed nella maggior parte dei casi con termografia a Raggi Infrarossi per valutare l'effetto del LLLT sulla microvascolarizzazione dell'area interessata, mostrando un aumento medio della temperatura di 0.9°C.

In un grande numero di pazienti affetti da lesioni cutanee dovute a disfunzioni vascolari (Tromboangiite obliterante, cancrena secondaria a diabete) si e' potuta evitare l'amputazione o re-amputazione degli arti.

Riassumendo i risultati ottenuti con l'impiego del Laser a bassa potenza negli ultimi 13 anni, gli Autori concludono che LLLT risulta essere una terapia non invasiva molto efficace nella cura di lesioni cutanee di varia origine.

Documento 3

UNA NUOVA METODICA DI TRATTAMENTO CON LASER He-Ne: APPLICAZIONE ENDOCAVITARIA MEDIANTE FIBRA OTTICA. RISULTATI CLINICI PRELIMINARI.

**M. Rossato, G. Gagliardi, R. Visentin, G. Matterazzo,
F. Ceccherelli, G.P. Giron**

Istituto di Anestesiologia e Rianimazione - Universita' di Padova, A.I.R.A.S. Padova

Il LASER He-Ne e' caratterizzato da una lunghezza d'onda di 632.8 nm. scarsamente assorbito dall'acqua ed in grande misura dai tessuti. Sperimentazioni condotte dalla sovietica Karu hanno dimostrato la presenza di un fotorecettore cellulare specifico per questa lunghezza d'onda, studi successivi hanno individuato gli ambiti della dosimetria efficace. Studi clinici controllati hanno ormai ampiamente dimostrato gli effetti mediati da questo fotorecettore cellulare: azione di protezione cellulare, di riduzione della sintesi prostglandinica, azione di ipostimolazione, accelerazione dei processi riparativi.

Tuttavia dalle sperimentazione effettuate da fotobiologi risulta che questa lunghezza d'onda non penetra profondamente, al di sotto della cute arriva solamente il 5% della dose di superficie. E se, come nel caso di una tendinite o di un trigger point o di una entesopatia, si deve fare arrivare la radiazione luminosa in profondita', con l'irradiazione cutanea non si riesce ad ottenere la dose terapeutica.

E' nata cosi' la necessita' di un nuovo sistema di veicolazione della emissione laser 632.8 nm. all'interno dei tessuti: il LASER endocavitario.

Nella nostra sperimentazione clinica e' stato usato un laser He-Ne da 120 mW. che garantiva una emissione costante di 54 mW.; questa fonte e' stata collegata ad un lancio in fibra ottica con una perdita di potenza contenuta nel 30%; si sono poi usate fibre ottiche di 290 micron che venivano guidate nei tessuti da un ago introduttore (da spinale) 20 G. Sono cosi' stati sottoposti a terapia pazienti con le seguenti patologie:

- periartrite scapolo-omerale 6
- epicondilitite 7
- lombosciatalgia 4
- gonalgia 2
- cervicobrachialgia 6

Tutti i pazienti sono stati sottoposti a irradiazione endocavitaria di 150 secondi suddivisi in 5 tempi di 30 secondi + 15 secondi di intervallo fra le irradiazioni; pertanto la dosimetria e' stata di 5.40 Joules/cm² ; la cadenza della terapia e' stata di 3 volte a settimana per un totale massimo di 10 sedute.

I risultati preliminari, monitorati con la scala del sollievo dal dolore, mostrano un effetto antalgico importante che si manifesta mediamente alla 4^a seduta, un ripristito della funzionalita' alla 5^a-6^a seduta: questo permette in 2 settimane un cambiamento importante della qualita' della vita e l'inizio della terapia riabilitativa.

I primi controlli a distanza (3 mesi) indicano il perdurare dell'effetto antalgico; alcuni pazienti, dopo una semplice riabilitazione muscolo-articolare hanno riacquisito una completa mobilita'. Quanto osservato conferma gli effetti del LASER He-Ne, accelera i tempi di guarigione di patologie acute o croniche riacutizzate.

5. APPLICAZIONI DEI GAS LASERS NEL MONITORAGGIO AMBIENTALE

Ricerche ambientali

1) Studio dell'inquinamento delle acque e del suolo

Recentemente è stato progettato e realizzato uno strumento per il monitoraggio ambientale, il **LIDAR fluorosensore**, basato su un laser impulsato con emissione a varie lunghezze d'onda nell'infrarosso, visibile e ultravioletto. Questo apparato sarà impiegato per investigare il grado di inquinamento dei suoli e delle acque nel territorio lucano. Questa attività di ricerca applicata è finanziata nell'ambito di una convenzione tra il CNR e la regione Basilicata con i fondi strutturali P.O.P.

Il sistema **Lidar fluorosensore** è un apparato polivalente che, come precedentemente descritto, permette il monitoraggio delle acque e dei suoli. Esso si basa sul principio della rilevazione remota di un segnale di fluorescenza indotta da un laser (LIF) sul bersaglio di interesse e/o di un segnale di emissione indotto da ablazione laser di un solido contenente dei metalli pesanti in tracce. Diversi composti di origine organica e biologica contengono gruppi caratteristici di molecole, detti cromofori, che eccitati nell'ultravioletto emettono radiazione di fluorescenza in una specifica banda spettrale nel vicino UV o nel visibile. L'analisi dei composti di interesse si basa sulla rivelazione di segnali emessi a determinate lunghezze d'onda ed eventualmente sulla misura di rapporti di diverse intensità spettrali.

Mediante il sistema **Lidar fluorosensore** è possibile il monitoraggio delle acque in superficie (marine, lagunari, fluviali, lacustri), in quanto il sistema consente di identificare nelle acque la presenza di materiale organico di origine naturale o antropogenica (la cosiddetta "materia gialla" proveniente dagli scarichi urbani) e di sostanze chimiche provenienti da scarichi industriali (coloranti da industrie tessili ed alimentari, detersivi, solventi ed oli da industrie chimiche, ecc...). Per il monitoraggio dei suoli si prevedono tempi più lunghi dato che il sistema di controllo in situ dei metalli pesanti è ancora in via di standardizzazione.

Progetto 5b.1 SVILUPPO DI UN SISTEMA Lidar fluorosensore PER IL MONITORAGGIO DELLE ACQUE MARINE

Partecipanti:

Antonio Palucci, INN-FIS-SPET, ENEA, - Frascati (Roma)

Francesco Colao, INN-FIS-SPET, ENEA - Frascati (Roma)

Roberta Fantoni, INN-FIS-SPET, ENEA, - Frascati (Roma)

Sergio Ribezzo, INN-FIS-SPET, ENEA, - Frascati (Roma)

Obiettivi

L'obiettivo primario di questo progetto è stato mettere in operazione un apparato lidar fluorosensore adatto al monitoraggio remoto, automatico e continuo del fitoplancton e delle sostanze organiche disciolte nelle acque marine durante la XIII Campagna oceanografica antartica. A questo scopo, negli anni precedenti, è stato progettato ed allestito per il PNRA un laboratorio mobile, all'interno di un container ISO 20" standard, dotato di un sistema attivo di nuova concezione e di strumentazione di corredo. Il lidar fluorosensore e i suoi apparati ancillari, montati sulla N/R Italice, hanno consentito di effettuare mappature, in tempo reale e su tutte le aree comuni scelte, di parametri biologici (pigmenti algali e l'attività fotosintetica del fitoplancton), chimici (sostanze organiche disciolte e sospese) e fisici (turbidità dell'acqua, radianza solare). Molti dei parametri misurati dal sistema sono direttamente collegabili alla produttività della biomassa marina antartica, che gioca un importante ruolo su scala globale nelle variazioni climatiche, eventualmente associabili all'effetto serra (bilancio della CO₂ atmosferica) e permettono di allargare la scala di indagine relativamente ai processi di formazione dei *bloom* algali che avvengono dopo lo scioglimento dei ghiacci. Le misure di concentrazione e produttività del fitoplancton marino forniscono inoltre valide informazioni sulla complessa catena alimentare che passa dai microrganismi alle specie superiori autoctone dell'ecosistema antartico (alghe, krill, balene e volatili).

Gli obiettivi strumentali sono stati raggiunti, mentre sono in corso attività in collaborazione con le altre U.O. presenti nella campagna oceanografica per l'integrazione dei risultati volta ad ottenere le informazioni globali suddette sull'ecosistema antartico.

2) Lo studio dell'inquinamento dell'aria

Come è ben noto l'ossigeno, l'azoto, il biossido di carbonio ed il vapore d'acqua, rappresentano più del 99 % della composizione dell'aria. Oltre a questi, molti altri composti sono presenti in tracce, come ad esempio il monossido di azoto, il biossido di azoto, il monossido di carbonio, il metano, l'ozono, l'ammoniaca, vari composti aromatici, e i freon. Molti di questi composti sono antropogeni, cioè introdotti nell'aria dall'attività umana. Purtroppo l'introduzione di grande quantità di gas nell'atmosfera durante gli ultimi 50 anni, ha distrutto un equilibrio delicato in vari strati di essa. Le conseguenze più note sono l'effetto serra, le piogge acide, il buco nell'ozono e l'inquinamento nelle grandi città.

Tuttavia per poter comprendere questi fenomeni e ridurre l'inquinamento atmosferico, la ricerca ha un ruolo fondamentale.

Fra i principali progetti di ricerca che riguardano il monitoraggio dell'aria troviamo la seguente tecnica di utilizzo dei lasers CO₂:

LIDAR CO₂

Il telerilevamento ambientale della bassa atmosfera viene effettuato mediante sistemi laser, noti come **LIDAR** (acronimo di Light Detection and Ranging). Le applicazioni di questi sistemi spaziano dal monitoraggio

dell'inquinamento atmosferico, al tracciamento degli effluvi da vari impianti industriali (tipo quelli chimici, le raffinerie, le centrali termoelettriche, i gasdotti, ecc.) alla misura quantitativa delle concentrazioni di componenti atmosferici minori quali ozono e vapore acqueo. Nei **LIDAR** atmosferici, l'impulso laser è inviato nella zona da investigare dove interagisce con molecole ed aerosol; la radiazione retrodiffusa è raccolta da un telescopio e inviata ad un opportuno sistema optoelettronico per l'elaborazione del segnale. Le sorgenti laser a CO₂ sono particolarmente adatte per i **LIDAR** atmosferici in quanto la loro emissione ricade nella finestra spettrale di trasmissione atmosferica tra gli 8 e 12 μm, in cui sono presenti un gran numero di linee di assorbimento dei principali inquinanti di origine antropogenica (NO₂, SO₂, NH₃, C₂H₄, freons, ecc.).

I **LIDAR** atmosferici sono particolarmente adatti per il monitoraggio ambientale perché possono fornire informazioni in tempo reale sia sulla concentrazione che sulla localizzazione del composto in esame. La tempestività con cui è possibile rivelare eventuali fughe di sostanze pericolose da impianti a rischio è un pregio notevole per poter correre ai ripari e minimizzare le conseguenze dannose dell'evento stesso.

Bibliografia:

1. Arnold L. Bloom "GAS LASERS";
2. A.Javan, W.Bennet, Jr., and D.R.Herriot,
Phys.Rev.Letters,6,106 (1961);
3. Amnon Yariv "Quantum Electronics" (3rd edition)- John
Wiley;
4. Lovitch-Rosati "Fisica Generale 2";
5. <http://www.unconventional-medicine.it> ;

Tesina del corso di STRUTTURA DELLA MATERIA dello
studente VALENTINO LUCA.