LA STORIA DEL LASER:
una soluzione in cerca del problema

Vincenzo Schettino
Accademia Nazionale dei Lincei

La storia della scienza racconta un'avventura straordinaria perché, spesso, con le scoperte della scienza o con le realizzazioni che la scienza permette si materializzano i sogni dell'uomo o i frutti anche della sua più sfrenata immaginazione. Vogliamo, prima di parlare del laser, soffermarci a scopo esemplificativo su un caso che illustra questo concetto.

Riandando agli antichi miti, abbiamo la storia di Dedalo che, costretto da Minosse nel labirinto da lui stesso costruito, per fuggire costruisce per sé e per il figlio Icaro delle ali con cui prendono il volo, superando i limiti imposti dalla natura, come dice Orazio in uno dei suoi Carmi (I, 3):

Con penne all'uomo non concesse in sorte
alto volò pel vuoto etere Dedalo

Dedalo e Icaro si preparano a volare

E' il sogno del volo, impossibile fuori del mito; ma in un verso successivo il poeta ci dice che forse tutto è possibile:

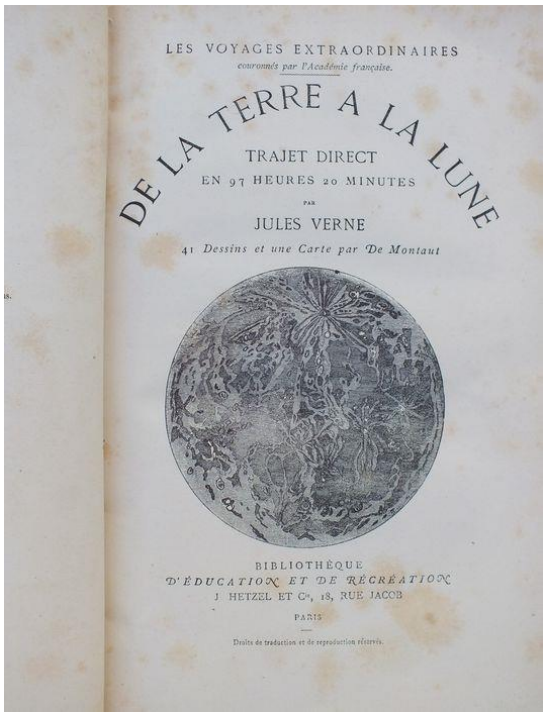
Nulla c'è d'impossibile ai mortali

Il sogno di volare continua nei secoli e Leonardo da Vinci, dopo avere accuratamente studiato il volo degli uccelli,

Leonardo da Vinci – Il codice sul volo deli uccelli

costruisce una macchina per volare con la quale, dal monte Ceceri, si avventura Tommaso Masini, come ci ricorda una targa in Peretola. Lo Zoroastro di Peretola dopo un breve volo si schianta rompendosi le gambe.

Ma il sogno dell'uomo di volare non tramonta. Ce lo ricorda, in un suo famoso romanzo del 1865 Giulio Verne: ***Dalla terra alla luna***. Alla fine, nel 1969, il sogno di Giulio Verne si avvera quando gli statunitensi Neil Armstrong e Buzz Aldrin, il 20 luglio trasportati dalla capsula dell'Apollo 11 raggiunsero il Mare della tranquillità dove si fermarono alcune ore. Significativamente, Il modulo di comando di Apollo 11 fu chiamato *Columbia*, da *Columbiad*, il gigantesco cannone che, nel romanzo di Verne sparava la navicella verso la Luna.


LES VOYAGES EXTRAORDINAIRES
couronnés par l'Académie française.

DE LA TERRE A LA LUNE

TRAJET DIRECT
EN 97 HEURES 20 MINUTES
PAR
JULES VERNE
41 Dessins et une Carte par De Montaut

BIBLIOTHÈQUE
D'ÉDUCATION ET DE RÉCRÉATION
J. HETZEL ET Cie, 18, RUE JACOB
PARIS

Giulio Verne – Dalla terra alla luna

Quindi oggi non ci meravigliamo più se vediamo un uomo nello spazio che si diverte a incidere una canzone:

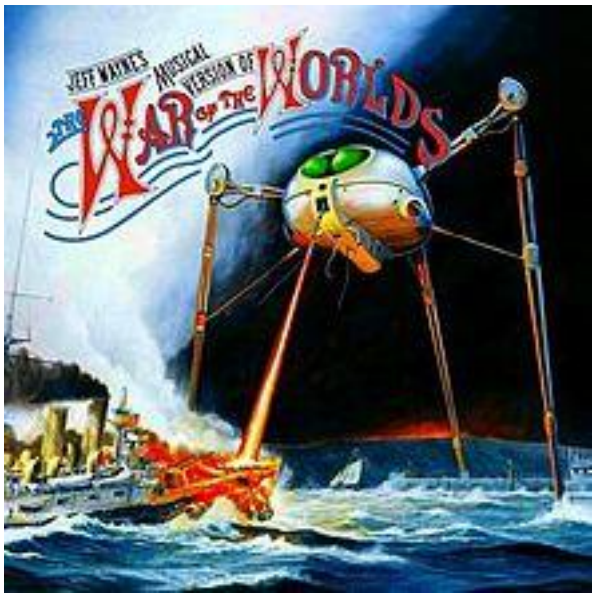
INSERIRE UN PEZZO DI MP4

Una storia simile possiamo raccontare per il laser, rimanendo, ma non solo, nel mondo microscopico. Cominciando ancora con il mito, possiamo risalire a Zeus, il dio dei fulmini, che con il suo fulmine,

distrugge i suoi nemici o i ribelli al suo volere Il fulmine è un potente fascio di luce o di energia, un'arma che impaurisce e allo stesso tempo affascina l'uomo,

Cherubino Cornienti (1865) – Archimede brucia le navi del console Marcello

Un pittore del '800, dipingendo il famoso episodio di Archimede che con lo specchio ustorio da fuoco alle navi romane, immagina che la cosa avvenga con un fascio o raggio di luce. Dagli anni 1930 – 1940 c'è in tanti film, romanzi o racconti di fantascienza l'idea del fascio della morte che è un raggio di luce, di energia e di qualcosa altro di indefinito che si propaga in via rettilinea con effetti dirompenti. Questo è ad esempio il caso della Guerra dei Mondi (war of the worlds) nelle sue numerose varianti anche cinematografiche



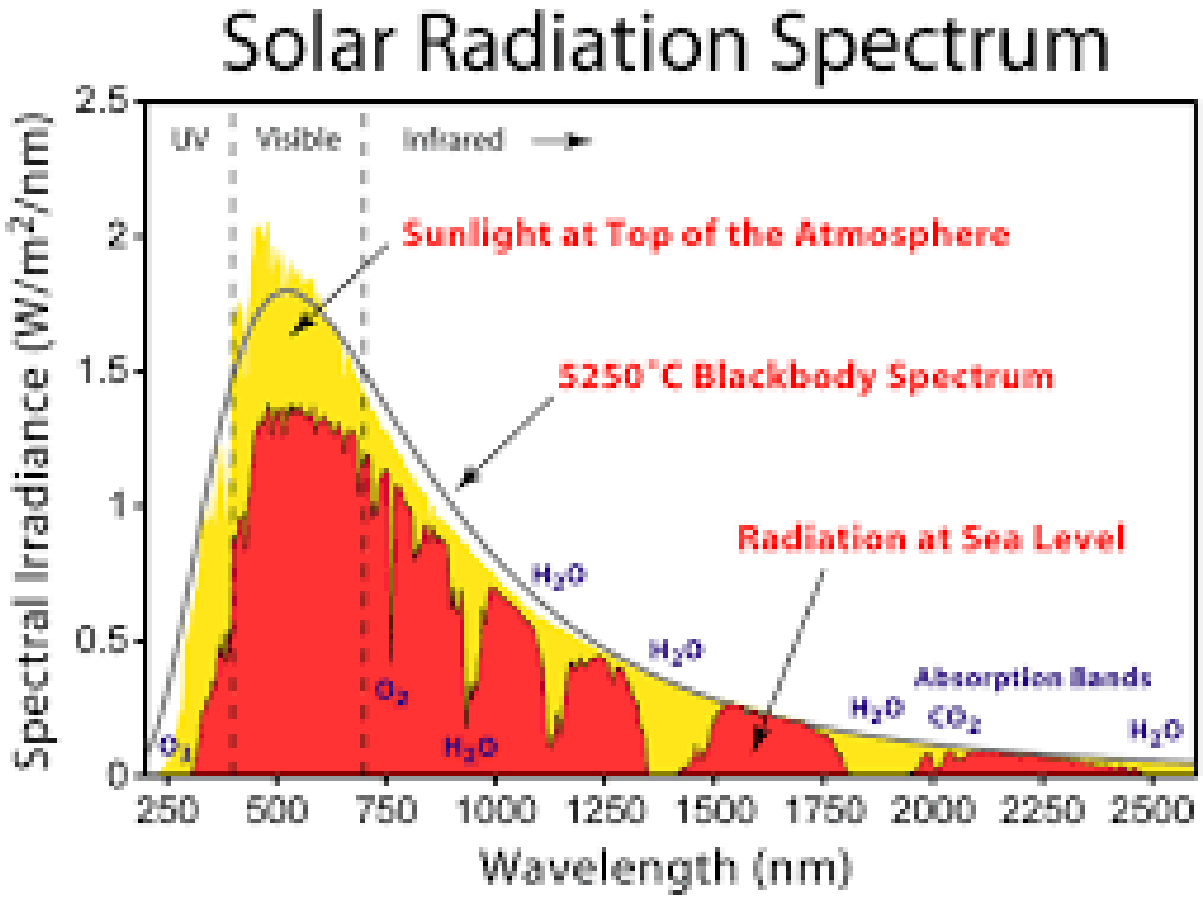
La guerra dei mondi

Ora le sorgenti luminose tradizionali (il sole, una candela, una lampadina a incandescenza) sono sorgenti che emettono isotropicamente in tutte le direzioni in modo che la luce raccolta su una

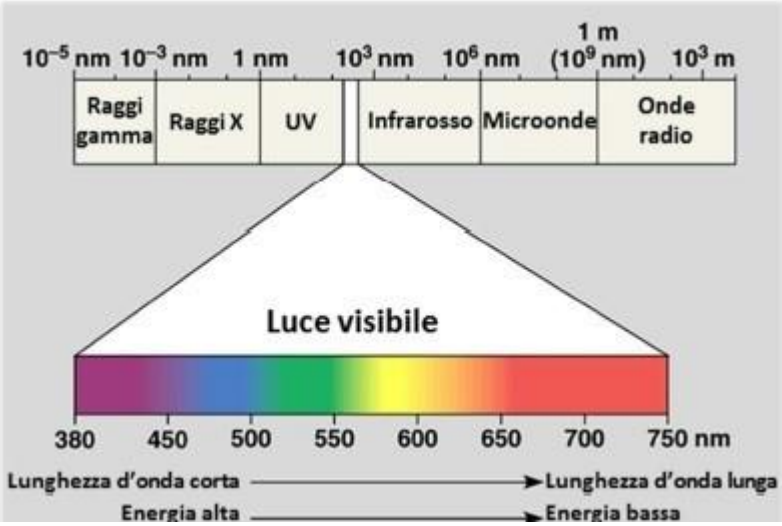
stessa superficie diminuisce regolarmente con la distanza dalla sorgente. La luce di queste sorgenti, quella del sole ad esempio è una quantità complessa o composita. Isaac Newton nel suo lavoro sull'ottica ci ha mostrato che la luce bianca del sole può essere scomposta da un prisma nei colori componenti, i colori dell'arcobaleno:

Schema dell'esperimento di Newton di rifrazione della luce bianca da un prisma di vetro

Ma Newton nel suo esperimento vide solo una parte della storia, cioè quella della luce visibile dall'occhio umano. Se esaminiamo la luce solare più completamente vediamo che ci sono radiazioni oltre la luce violetta (ultravioletto, raggi X, raggi gamma) e oltre la luce rossa (infrarosso, microonde, radioonde). Naturalmente, non tutta la radiazione emessa dal sole raggiunge il nostro pianeta perché una parte viene assorbita dalle molecole presenti nell'atmosfera come ossigeno, acqua, anidride carbonica ed altre sostanze.

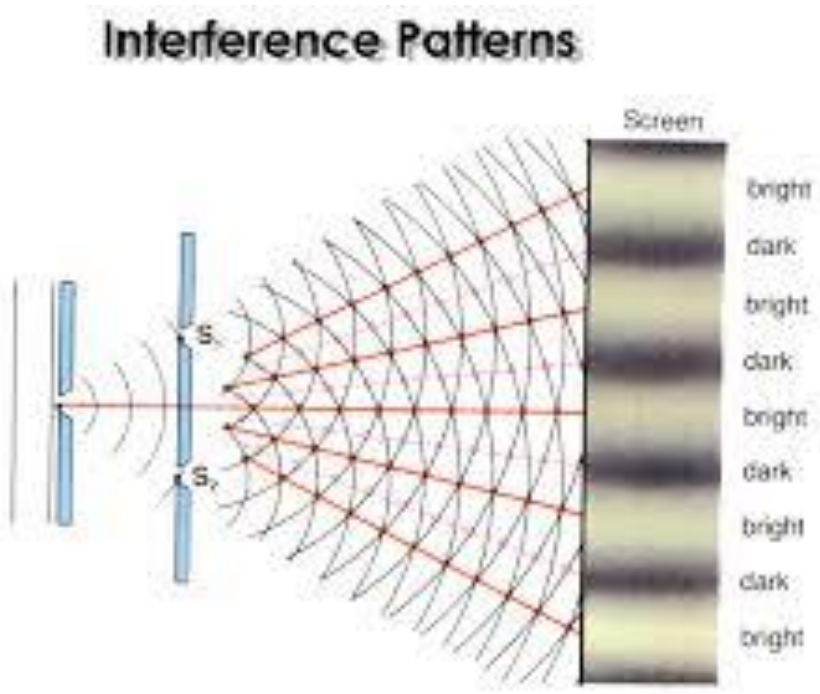


La luce visibile è solo una piccola frazione della radiazione:

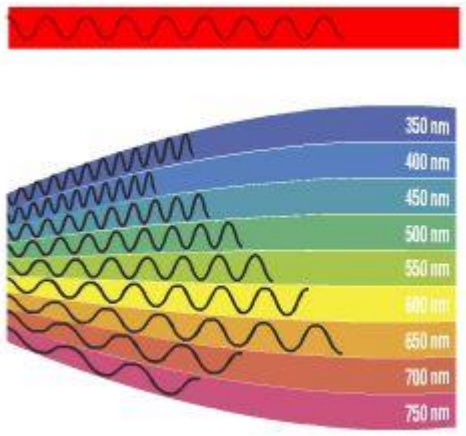


Newton pensava che la luce avesse natura corpuscolare, cioè che fosse costituita da particelle perché con questa ipotesi riusciva a spiegare i suoi esperimenti di riflessione e rifrazione della luce.

Ma altri esperimenti, e soprattutto gli esperimenti di diffrazione potevano essere spiegati solo ammettendo che la luce ha natura ondulatoria, cioè è costituita da oscillazioni del campo elettrico e magnetico che si propagano con la velocita della luce c



Allora la luce (la radiazione) è caratterizzata dalla lunghezza d'onda dell'oscillazione



Alternativamente la radiazione può essere caratterizzata dalla frequenza ν che è data dalla vrlocità della luce c divisa pe la lunghezza d'onda

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Ma le cose non possono essere così semplici perché la meccanica quantistica ha scombussolato tutto per dirci che la luce non è né onda né corpuscolo, anzi è tutte e due le cose: a seconda dell'esperimento che facciamo sembra comportarsi come un'onda o come una particella (fotone) con un'energia proporzionale alla frequenza

$$E = h\nu$$

Per capire come si possa emettere una luce laser, cioè un fascio di luce monocromatico, cioè con una singola frequenza unidirezionale e coerente come il raggio laser che minaccia James Bond nel film ***Goldfinger***,

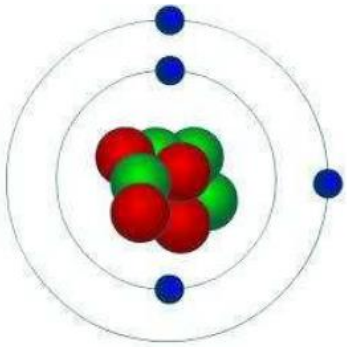
secondo quello che dice l'acronimo della parola

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

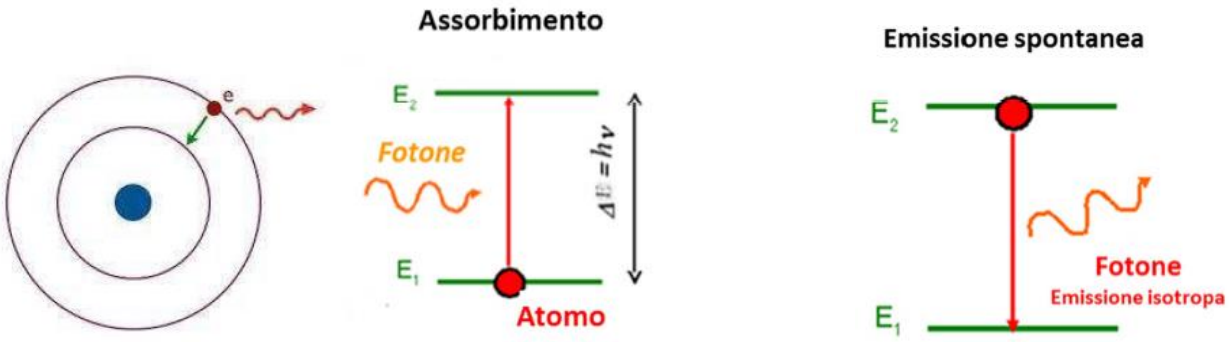
dobbiamo considerare i meccanismi di interazione della luce con la materia e quindi con gli atomi e le molecole. Questi meccanismi sono stati definiti da Einstein nel 1917 e possono essere

- Assorbimento
- Emissione
- Emissione stimolata.

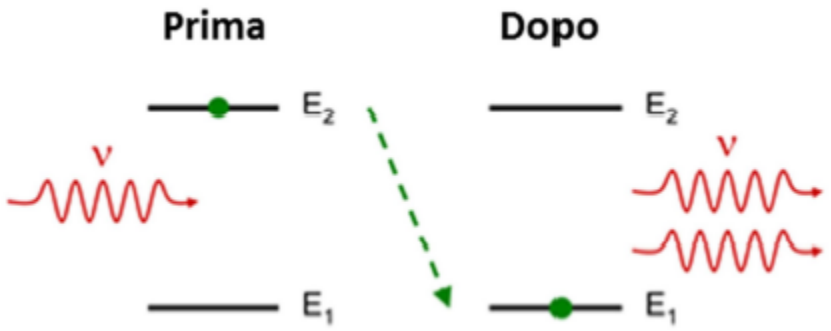
Gli atomi o le molecole sono sistemi di nuclei ed elettroni, cariche elettriche positive e negative, che interagiscono tra loro e che si possono trovare in vari stati di energia.



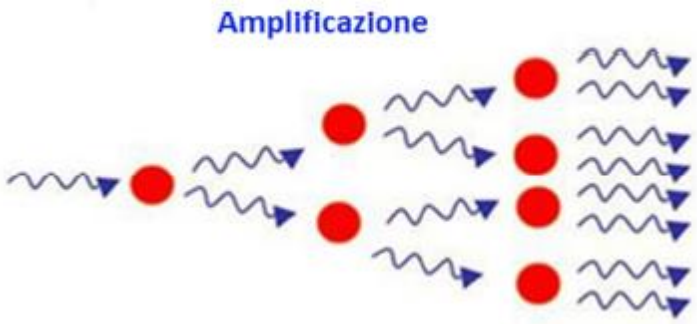
L'energia di questi sistemi non può variare in modo continuo e la meccanica quantistica ci dice che solo alcuni stati di energia sono possibili, cioè l'energia interna di un atomo o di una molecola è quantizzata. Considerando il caso più semplice di un nucleo e di un elettrone possiamo considerare uno stato, cosiddetto fondamentale, in cui l'energia ha il valore più basso possibile e uno stato eccitato in cui, l'elettrone è a una distanza più grande dal nucleo e l'energia è più alta

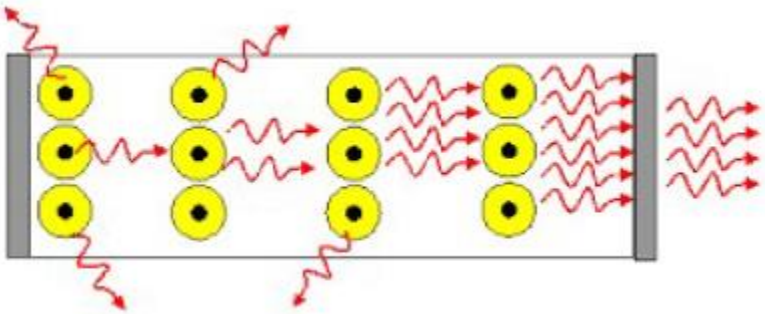


I fenomeni di assorbimento e di emissione spontanea della luce corrispondono al passaggio da uno stato di energia più basso (ad es. il fondamentale) ad uno più alto (stato eccitato): in questi processi viene assorbito o emesso un fotone in modo isotropo.
Einstein aveva previsto un terzo meccanismo di interazione della luce con la materia: se un fotone interagisce con un atomo in uno stato eccitato provoca l'emisssione di un secondo fotone nella stessa direzione ed in maniera coerente con il fotone incidente. Si ha, con questa emissione stimolata, una amplificazione del segnale. Naturalmente, perché l'emissione stimolata avvenga è necessario che il fotone incidente abbia frequenza coincidente con la transizione elettronica in questione.



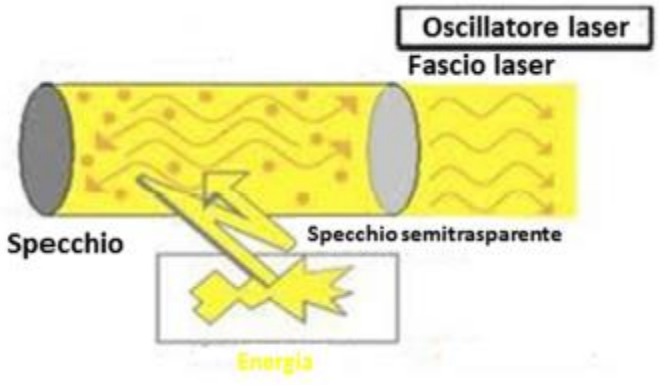
L'emissione stimolata è il principio di funzionamento del laser: man mano che i fotoni avanzano nel sistema si verifica una continua amplificazione del segnale, come è illustrato nella figura successiva. Se la cavità in cui è posto il sistema è limitata da due specchi piani riflettenti, in modo che i fotoni fanno un percorso avanti e indietro solo i fotoni in una precisa direzione verranno amplificati ottenendo quindi un fascio di luce unidirezionale, che è una delle caratteristiche fondamentali della luce laser.



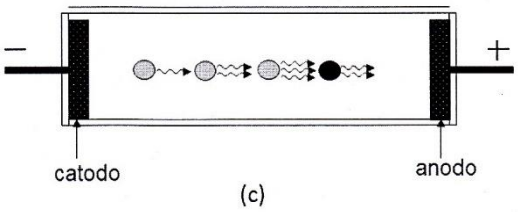


La figura seguente mostra le caratteristiche essenziali di una sorgente o di un oscillatore laser:

- Una cavità in cui è confinato il sistema
- Due specchi, uno completamente riflettente e uno semitrasparente che permette la fuoruscita del raggio mentre alcuni fotoni ritornano indietro in modo che il sistema si autosostiene
- Un meccanismo (ad esempio una scarica elettrica) che da energia al sistema in modo da portare gli atomi nello stato eccitato

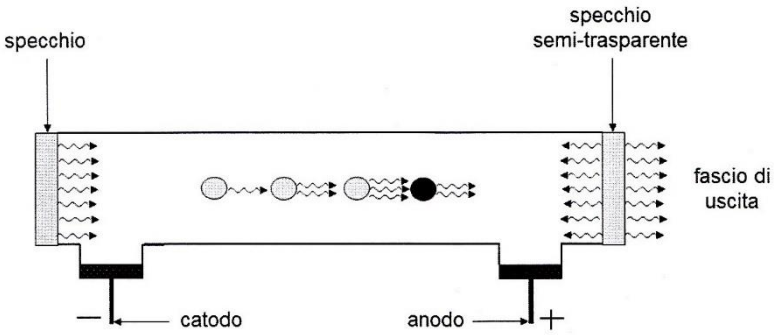


C'è una cosa importante da precisare riguardo alle figure precedenti. Abbiamo supposto che tutti gli atomi siano nello stato eccitato e quindi ogni fotone in arrivo viene amplificato. Ma in realtà ci sono molti atomi che sono in uno stato fondamentale e che quindi non amplificano la radiazione ma la riducono per assorbimento come mostrato nella figura seguente



Quindi, perché il sistema laser funzioni, cioè si abbia un guadagno netto, bisogna che il numero di atomi nello stato eccitato, capaci di dare emissione stimolata, sia maggiore di quello degli atomi nello stato fondamentale che danno assorbimento, cioè che ci sia quella che viene detta inversione di popolazione, Un materiale in cui c'è inversione di popolazione è detto materiale attivo, cioè adatto per l'effetto laser.

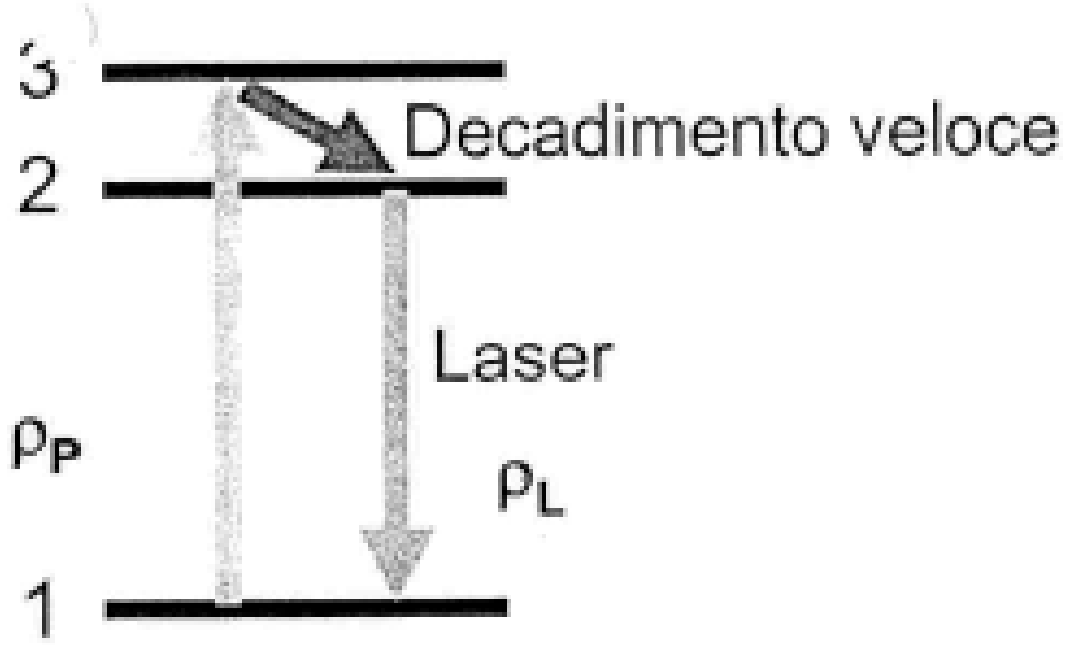
A questo punto
Lo schema di principio di un laser è mostrato nella figura seguente



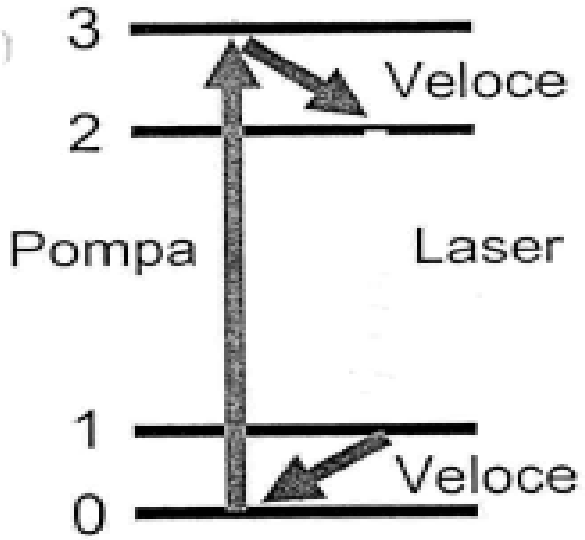
Un tubo contenente il materiale, ad esempio un gas, reso attivo da una scarica elettrica e chiuso da due specchi piani e paralleli. Ad ogni passaggio il segnale viene amplificato. Il sistema si

autosostiene, cioè atomi che tornano nello stato fondamentale vengono eccitati nuovamente e abbiamo nel tubo l'innesco di una oscillazione (il raggio va avanti e indietro). Se uno dei due specchi è semitrasparente si ha un fascio utile in uscita.

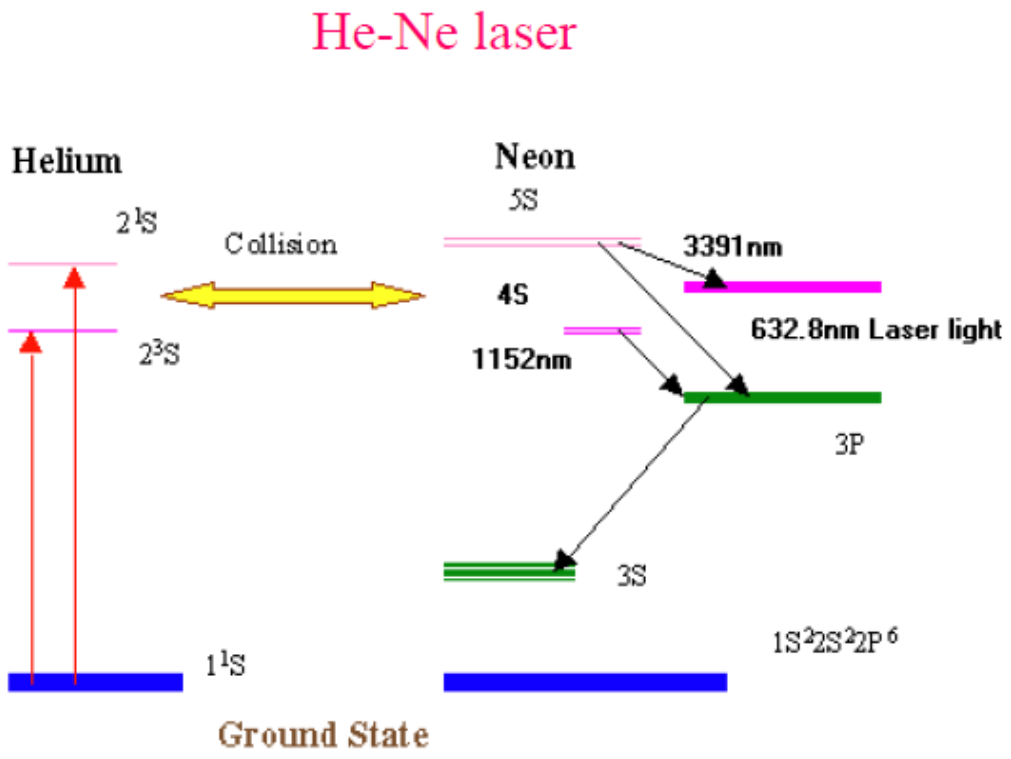
Ottenere l'inversione di popolazione tra il livello fondamentale e il livello eccitato può essere complicato: in molti casi è più conveniente considerare sistemi più complessi come un sistema a 3 livelli (come in figura) in cui l'inversione di popolazione si ottiene attraverso un passaggio intermedio sfruttando una transizione molto veloce



Oppure si usano sistemi a 4 livelli ancora più complessi, come in figura

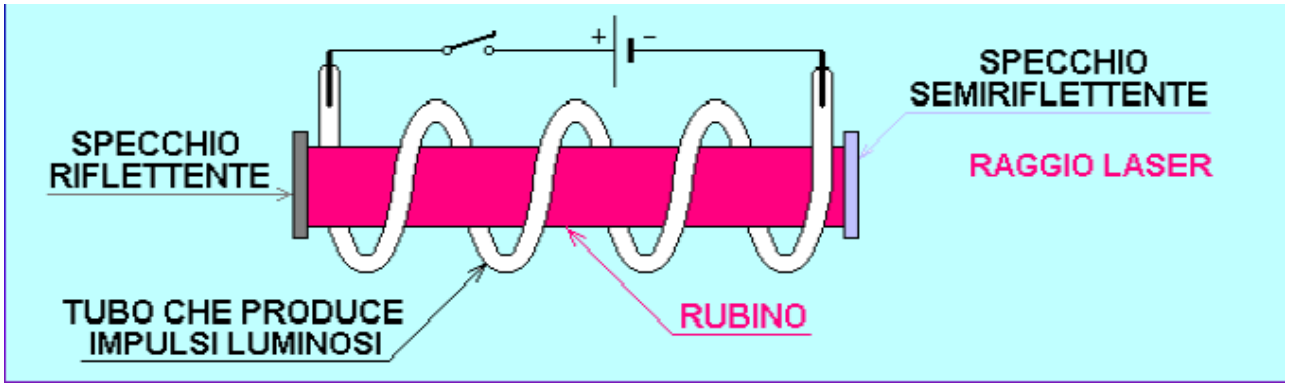


Un caso ancora più complesso si ha nellaser a elio-neon in cui l'eccitazione primaria si ha per gli atomi di elio e l'energia viene trasferita poi per urt agli atomi di neon responsabile dell'emissione laser



$$\lambda_1 = 3.39\,\mu m \quad \lambda_2 = 0.6328\,\mu m \quad \lambda_3 = 1.15\,\mu m$$

Nella figura che segue lo schema del laser a rubino



Attualmente esistono oltre 1000 tipi differenti di laser che possono essere classificati in basea vari criteri. Una pima classicazione può essere fatta in base alla natura del mezzo attivo come mostrato nella tabella che segue

Tipi di laser	Mezzo attivo	λ principale (μm)
Laser a Stato Solido	Rubino	0,6943
	Nd^{3+}:YAG	1,064
	Er^{3+}:fibre di silicio	1,55
Laser a Giunzione	AlGaAs/GaAs	0,63 - 0,9
	InGaAsP/InP	≈ 1 - 1,7
	CO_2	10,6
Laser a gas	He-Ne	0,6328
	Ar^+	0,515
Laser a Eccimeri	KrF eccimeri	0,248
	ArF eccimeri	0,193
Laser a coloranti	Rhodamine-6G colorante (molecole organiche)	accordabile 0,56 - 0,64

Oppure la classificazione può essere fatta in riferimentoalla regionwe dello spettro in cui il laser emette, in base al tipo di funzionamento (emissione continua o ad impulsi) o in base alla potenza del raggio:

LUNGHEZZA D'ONDA
Infrarosso
Visibile
Ultravioletto
Raggi X

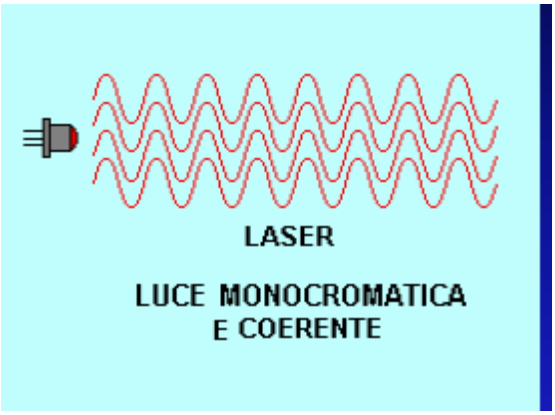
LUNGHEZZA D'ONDA
Infrarosso
Visibile
Ultravioletto
Raggi X

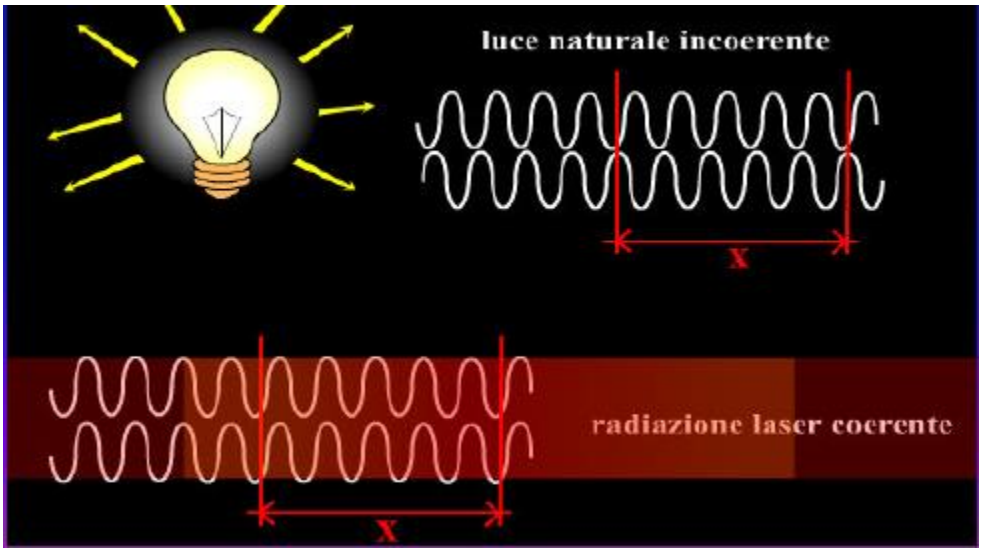
FUNZIONAMENTO
Continuo
Impulsato (ms)
Impulsi: Q switch (10 – 20 ns) Mode locking (10 20 fs)

Da quello che abbiamo detto è evidente che le proprietà principale del laser sono le seguenti:

- **Direzionalità**
- **Monocromaticità**
- **Coerenza**
- **Brillanza**

La monocromaticità è evidente dal fatto che la differenza di energia tra i livelli della transizione è perfettamente definita. Inoltre il laser è un risuonatore: le onde vanno avanti e indietro tra i due specchi della cavità e la cavità può supportare solo onde che siano esattamente contenute nella cavità in modo che non si elidano quando tornano indietro: il laser è quindi anche coerente nello spazio e nel tempo.





Le applicazioni del laser son così ampie e diffuse che in occasione delle celebrazioni per il 50 anni del primo laser il presidente degli Stati Uniti Barack Obama ha giustamente affermato che:

Il laser ha cambiato il nostro modo di vivere

Eppure, tutta la vicenda scientifica e tecnica del laser è cominciata un po' in sordina. Dopo che nel **1917** Einstein aveva enunciato il principio del laser (l'missione stimolata) per 40 anni non è successo quasi nulla eccetto che nel **1928** Rudolph W. Ladenburg conferma il fenomeno dellla emissione stimolata.

- **1950** - Alfred Kastler (poi premio Nobel in Fisica nel 1966) propone il controllo del pompaggio ottico che elemento essenziale per l'effetto laser, come abbiamo visto
- **1953** – Indipendentemente, Charles H. Townes negli USA e Nikolay Basov e Aleksander Prokorov in Russia costruiscono il primo laser attivo nella regione delle microonde, che viene

chiamato MASER. Lo sviluppo del primo laser in questa regione è dovuto al fatto che nelle microonde la tecnologia era più avanzata. Per questa scoperta i tre riceveranno il premio Noble nel 1964 ***per il lavoro fondamentale nella elettronica quantistica che ha portato alla costruzione di oscillatori e amplificatori basati sul principio del laser-maser***.

- **1957** – C.H. Townes e A.L.Schawlov elaborano le basi teoriche per la costruzione del lasee nella regione ottica e ottengono per l'istituzione per cui lavorano un brevetto relativo. A questo punto il laser appare come una curiosità di laboratorio e Townes suggerisce la definizione che ho posto nel titolo di questa presentazione: ***una soluzione in cerca del problema***. Simultaneamente Gordon Gould, uno studente di dottorato di un'altra università conia per la prima volta il termine LASER e in un lavoro discute la costruzione del laser e le sue applicazioni: Gould fa una richiesta per il brevetto ma la richiesta viene negata. Gould non si arrende e lotterà fino al 1977 per avere il riconoscimento del brevetto.
- **1960 –** Theodor H. Maiman costruisce il primo laser ottico, il laser a rubino che emette nel rosso. Simultaneamente A. Javan costruisce il primo laser a gas. Da questo momento la storia diventa inarrestabile come è testimoniato dalla caterva di premi Nobel che si succedono fino a questo anno che riguardano o il laser specificamente o nuove scoperte che senza il laser sarebbero state impossibili.
- **1971 –** Denis Gabor, per l'olografia. La teoria era stata sviluppata negli anni 40 maso lo con la disponibità di sorgenti laser coerenti la tecnica si è praticamente sviluppata.
- **1981 –** Nicolaas Bloembergen e Arthur L. Schawlow per lo sviluppo della spettroscopia laser ed effetti ottici non lineari: questi saranno poi importanti per le comunicazioni con fibre ottiche e il calcolo quantistico
- **1989 –** Norman S. Ramsey, per il maser a idrogeno che sarà poi la base per l'orologio atomico a Cesio
- **1997 –** Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji e William D. Philips per il metodo del laser cooling con cui gli atomi sono raffreddati e intrapppolati con luce laser.
- **1999 -** Ahmed Zewail per la femtochimica, studio delle reazioni chimiche con impulsi laser ultracorti
- **2001 –** Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle e Carl E. Wieman per la condensazione di Bose-Eistein; freddare gli atomi fino a 1 micro-kelvin senza condensarli in un liquido o solido
- **2005 –** John L. Hall e Theodor W. Hansch per spettroscopia di precisione e il optical frequency comb
- **2006 –** John C. Mather e George F.Smoot per l'astrofica e la misura della radiazione cosmica di microonde
- **2009 –** Charles K. Kao per lo sviluppo delle telecominicazioni attraverso il trasporto di luce laser in fibre ottiche
- **2014**.- Shuji Nakamura, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano per l'invenzione del LED a luce blu che ha rivoluzionato i sistemi di illuminazione
- **2017** – Kip S. Thorne, Rainer Weiss e Barry C. Barish per la rivelazione delle onde gravitazionali (l'impiego di laser di precisione è essenziale)
- **2018** – Premio assegnato per strumenti fatti con la luce:

  Ar Ashkin optical Twizers: pinze ottiche che manipolano organismi come batteri o

cellule senza danneggiarli
Gerard Mourou e Donna Strickland per l'invenzione di un metodo (CPA = Chirped Pulse Amplification) per ottenere impulsi ultracorti di altissima energia