

Ottavio Serra

Fisica: insegnamento e ricerca

Considerazioni introduttive.

L'insegnamento della fisica, come di tutte le discipline scientifiche, ha come fine primario quello di sviluppare la capacità di cogliere il nesso tra i fenomeni e di organizzarli in strutture coerenti, per mettere ordine nell'apparenza fenomenica multiforme e disorganizzata. Già i Greci della scuola ionica avevano colto la convenienza (la necessità?) di ridurre la molteplicità dei fenomeni a pochi principi, al limite ideale ad uno solo, per interpretare la realtà e ridurla ad ordine razionale. (Principio di tutte le cose è l'acqua, o l'aria, o altro, ha poca importanza per il momento).

L'opportunità offertami dal Dirigente scolastico del Liceo Classico *Gioacchino da Fiore* di Rende di trattare un argomento di fisica sulla rivista *ORIZZONTI* del Liceo in occasione dell'anno mondiale della fisica mi spinge a esporre dapprima alcune considerazioni generali sul dibattuto problema: ricerca pura - ricerca applicata e sulle conseguenze che da esso si debbono trarre per l'insegnamento della fisica a livello sia liceale, sia universitario. Tratterò poi la teoria dell'emissione *stimolata* di luce che Einstein introdusse nel 1917 per via puramente teorica e *disinteressata* per giustificare in modo soddisfacente la legge di Plank dell'emissione del corpo nero, utilizzando il concetto di fotone da Egli stesso introdotto nel 1905 per spiegare l'effetto fotoelettrico. L'emissione stimolata dovette aspettare il 1954 per trovare applicazione nella realizzazione del *M.A.S.E.R.* e il 1960 per la realizzazione del primo *L.A.S.E.R.*

Ricerca pura o ricerca applicata?

Da quanto detto più sopra non dovrebbe essere difficile arguire quale sia la mia opinione in proposito. La ricerca non può che essere disinteressata, cioè non legata ad applicazioni più o meno immediate di tipo produttivo. E' vero che le industrie hanno bisogno di una ricaduta tecnologica abbastanza vicina nel tempo per ovvi motivi di mercato, ma le istituzioni culturali quali università, accademie, istituti di ricerca pubblici (si pensi al C.N.R. o all'E.N.E.A. per restare nell'ambito italiano) non possono sottostare ai vincoli troppo rigidi della ricerca applicata, col rischio di vedere inaridite le fonti stesse della ricerca. Inoltre, gli stessi complessi industriali più grandi e quindi dotati di maggiori risorse finanziarie dovrebbero finanziare al loro interno, anche se in modo meno massiccio delle istituzioni pubbliche, progetti di ricerca pura, sull'esempio di grandi gruppi europei come la Philips, per fare un esempio, e di tanti gruppi americani, che hanno il buon senso di lasciar liberi i ricercatori di condurre i loro studi senza l'assillo di ottenere risultati brevettabili nel breve termine.

Specialmente in Italia, in cui gli istituti privati di ricerca sono rari e per lo più finalizzati alla ricerca applicata, come l'istituto Donegani di Novara, è compito precipuo della politica scientifica delle istituzioni politiche favorire la ricerca pura con finanziamenti e incentivi, e non mortificare i poli di eccellenza come il CNR e l'ENEA o provocare la *fuga dei cervelli*, molti dei quali sono accolti a braccia aperte negli istituti e nelle università degli Stati Uniti d'America, che sanno praticare una politica scientifica a lungo termine, sapendo che la ricerca pura prima o poi paga, ma non va forzata.

A questo proposito vorrei riportare un pensiero di Einstein: "... E' un vero miracolo che i moderni metodi di istruzione non abbiano ancora completamente soffocato la sacra curiosità della ricerca: perché questa delicata pianticella, oltre che di stimolo, ha soprattutto bisogno di libertà, senza la quale inevitabilmente si corrompe e muore. E' un gravissimo errore pensare che la gioia di vedere e di cercare possa essere suscitata per mezzo della coercizione e del senso del dovere. ...".¹

E dire che Einstein si lamentava delle Università svizzere, che erano le più libere d'Europa per la scelta delle materie, lasciate quasi tutte alla discrezione degli studenti!

Il suo pensiero va bene anche adesso, sia per l'insegnamento universitario che per quello liceale e ancora di più per la ricerca, perché l'assillo di dover produrre risultati immediatamente spendibili

soffoca le energie creative e *la sacra curiosità di conoscere*, senza la quale muore la ricerca tout court, pura o applicata.

Per non restare sulle generali, visto che intendo parlare di fisica, esporrò un famoso risultato di Einstein risalente al 1917. Egli intendeva fondare su basi più solide la teoria dell'irraggiamento del corpo nero e da queste ricerche non si attendeva certamente ricadute brevettabili e spendibili sul mercato.

Einstein e l'emissione stimolata.

Ricordo che un corpo nero è un corpo la cui superficie assorbe tutta la luce, in generale la radiazione elettromagnetica, incidente su di esso.

Da questo momento chiamerò per brevità luce tutta la gamma delle radiazioni elettromagnetiche.

Un corpo nero è approssimativamente un oggetto ricoperto di nerofumo, o di polvere di platino. Ancora meglio si comporta da corpo nero la piccola apertura di una grande cavità (*nero come la bocca di un forno*). Come il corpo nero assorbe più di ogni altro corpo, così, a parità di temperatura, è quello più luminoso, quello che ha il maggiore potere emissivo. La fisica classica non fu in grado di trovare la legge secondo la quale il corpo nero emette energia luminosa in funzione della sua temperatura e della frequenza della radiazione stessa, non fu in grado cioè di determinare la legge del potere emissivo del corpo nero. Questa legge fu trovata da Max Plank nel 1902, introducendo l'idea, per quei tempi rivoluzionaria perché contraria all'elettrodinamica di Maxwell e alla teoria dell'elettrone di Lorenz, che l'energia fosse emessa non con un flusso continuo, ma in granuli concentrati detti *quanti*, ognuno dei quali ha un'energia proporzionale alla frequenza della radiazione. La costante di proporzionalità risultò essere una nuova costante della fisica, da Plank detta quanto elementare di azione e ora chiamata costante di Plank in suo onore.

Per inciso vorrei sottolineare che l'energia di un sistema di particelle è quantizzata e perciò è emessa o assorbita per quanti solo in un sistema legato, per esempio nell'atomo di idrogeno, mentre, una volta che l'atomo è ionizzato, l'elettrone libero può avere qualsiasi energia e, per effetto della sua cattura da parte del nucleo, emette uno spettro continuo di radiazione.

Ciò che è assolutamente quantizzata è l'azione, che ha le dimensioni di un'energia per un tempo e quindi è equidimensionale col momento angolare, che è sempre un multiplo intero della costante h di Plank, per la precisione di \hbar (da leggersi h tagliato) uguale ad $h/(2\pi)$. In realtà \hbar è l'unità di misura del momento angolare orbitale, che era l'unico conosciuto fino al 1925, quando fu introdotto da Uhlenbeck e Goudsmit il momento angolare intrinseco dell'elettrone (spin), che risultò essere $1/2 \hbar$.

Einstein, dopo aver conseguito la laurea in fisica a Zurigo, era nel 1902 un modesto impiegato dell'ufficio brevetti di Berna e nel tempo libero pensava non a inventare qualcosa che avrebbe potuto brevettare nell'ufficio in cui lavorava, per arrotondare il suo magro stipendio, ma ai grandi problemi irrisolti della fisica pura, e dopo alcuni buoni lavori di termodinamica statistica, nei quali peraltro era stato anticipato dall'americano Gibbs, sconosciuto allora in Europa perché all'inizio del '900 gli Stati Uniti erano una provincia periferica dell'impero politico e culturale, nella primavera del 1905 "fu colpito dalla folgore divina, e nel giro di tre mesi gli *Annalen der Physik* di Berlino gli pubblicarono tre lavori, ciascuno dei quali sarebbe bastato a renderlo immortale"³. Essi sono:

marzo 1905, "*Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce*". Contiene la scoperta dei quanti di luce e come minore conseguenza la spiegazione dell'effetto fotoelettrico;

aprile 1905, "*Movimento di particelle sospese in liquidi in quiete, richiesto dalla teoria molecolare del calore*". Contiene la teoria del moto browniano e mostra un nuovo modo di misurare la costante di Boltzman, in pratica il numero di Avogadro e quindi la massa degli atomi;

giugno 1905, "*Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*". Contiene la teoria della relatività (ristretta).

Ho aggiunto un sottotitolo ai titoli originali per far capire quale sia il tema in essi affrontato. Tutti sanno, almeno vagamente, cosa sia l'effetto fotoelettrico; della teoria della relatività la maggioranza delle persone forse ha presente solo la famosa relazione tra massa ed energia; ancora meno credo sia conosciuto il moto browniano (Non mi riferisco evidentemente ai docenti di fisica e neanche agli studenti bravi dell'ultimo anno di Liceo).

In questa sede ci interessa il primo lavoro nel quale Einstein con grande audacia intellettuale afferma che l'energia luminosa non solo è emessa per quanti, come sosteneva Plank, ma è anche assorbita per quantità discrete, come se la luce fosse costituita non da un flusso continuo di energia, ma da una grandinata di quanti (pacchetti concentrati) i quali sono emessi, assorbiti e viaggiano come entità fisiche, diciamo pure, come particelle di luce dotate di energia e quantità di moto, come ogni particella materiale. L'apparenza della continuità si spiega con la piccolezza dei quanti di luce (i fotoni, come li battezzò nel 1922 il fisico americano Arthur Compton) e al loro enorme numero, anche in un fascio di luce debole (debole alla scala umana). E' come quando piove quietamente con gocce di pioggia molto piccole; l'impressione è che la pioggia sia un fenomeno continuo, ma se la stessa quantità di pioggia per unità di tempo cade sotto forma di grosse gocce, come all'inizio di un temporale estivo, allora si nota la granularità, la quantizzazione.

Einstein fu certamente uno dei più grandi fisici di tutti i tempi, ma, secondo me, il fatto di essere fuori del mondo accademico lo favorì nella scelta di vie audaci e nuove. Pochi ne riconobbero subito il valore; tra questi è da annoverare Max Plank, allora responsabile scientifico degli Annali di Fisica di Berlino, che con grande onestà intellettuale diede il nulla osta alla pubblicazione dei lavori dello sconosciuto scienziato, anche se non del tutto convinto delle idee rivoluzionarie di Einstein.

Dal 1905 al 1916 Einstein fu quasi completamente assorbito dallo sviluppo della relatività ristretta e generale e poco si occupò di teoria dei quanti, anche perché gli sembrava che le basi concettuali della nuova fisica fossero troppo fragili, se non contraddittorie, per una sistemazione soddisfacente.

Intanto a partire nel 1913 Nils Bohr, applicando l'idea dei quanti al modello atomico di Rutherford, aveva introdotto il concetto dei livelli energetici degli atomi e così spiegava l'emissione di luce da parte di un atomo come una transizione (un salto) di un elettrone da un livello di energia superiore a uno di energia inferiore; la frequenza emessa risultava essere la differenza di energia dei due livelli divisa per la costante di Plank. Ciò permise a Bohr di calcolare a tavolino le lunghezze d'onda delle righe spettrali dell'idrogeno eccitato e di interpretare la grande mole di dati spettroscopici che si erano accumulati per merito dei fisici sperimentali.

Nel lavoro di Einstein del 1917 viene utilizzata l'idea dei livelli energetici degli atomi per ricavare in modo nuovo e ricco di sviluppi la legge di Plank sul potere emissivo del corpo nero.

L'idea è la seguente: si immagini un gas in equilibrio termico con la radiazione luminosa in una cavità. Gli atomi del gas non sono tutti nello stato fondamentale, cioè nello stato di minima energia, ma una parte si trova in uno stato eccitato a un livello di energia maggiore, dipendente dalla temperatura, secondo la distribuzione statistica di Boltzman. Per semplicità di esposizione supponiamo che gli atomi abbiano due soli stati. Einstein immagina tre processi secondo i quali gli atomi e la radiazione si scambiano energia, un processo di assorbimento proporzionale alla densità u della radiazione e due processi di emissione, uno spontaneo indipendente dalla radiazione e uno stimolato dalla radiazione e perciò proporzionale ad u . Le probabilità dei tre processi dipendono dalla densità di popolazione delle molecole e dei fotoni e presentano dei pesi statistici: $B_{1,2}$ per l'assorbimento, A per l'emissione spontanea e $B_{2,1}$ per l'emissione stimolata. L'ipotesi di equilibrio termico consente ad Einstein di dimostrare che questi tre coefficienti (pesi statistici) sono uguali.⁴

Da questa uguaglianza Egli ricava la legge di Plank per la densità dell'energia in equilibrio termico. Densità dell'energia u e potere emissivo E del corpo nero sono strettamente legati e si può agevolmente trovare questo legame con considerazioni dimensionali elementari. La densità dell'energia $u(\nu, T)$ è l'energia contenuta nell'unità di volume alla temperatura di equilibrio T nella banda di fre-

quenza unitaria. Il potere emissivo $E(\nu, T)$, dipende anch'esso dalla frequenza e dalla temperatura, ed è l'energia emessa dall'unità di superficie nell'unità di tempo nella banda di frequenza unitaria. Pertanto il potere emissivo è uguale alla densità dell'energia moltiplicata per una velocità. Siccome si tratta di energia luminosa, questa velocità non può che essere la velocità della luce. A rigore, $E(\nu, T)$ non si ottiene da $u(\nu, T)$ moltiplicandola per c (la velocità della luce), ma per $c/4$; ciò però richiede calcoli ben più impegnativi⁵.

Le conseguenze del lavoro di Einstein furono di vasta portata. Da una parte l'uguaglianza dei coefficienti di probabilità $B_{1,2}$ e $B_{2,1}$ fu il punto di partenza dell'approccio di Heisenberg alla prima formulazione della meccanica quantistica con il formalismo delle matrici (meccanica delle matrici), dall'altra guidò Born e Bohr all'interpretazione probabilistica della meccanica quantistica, con il deciso abbandono del determinismo classico e con l'introduzione di concetti statistici a livello fondamentale. È un'ironia della sorte che fu proprio Einstein, fautore di un rigido determinismo nella teoria della relatività (*Dio non gioca a dadi*) a indirizzare la fisica verso teorie probabilistiche, avvalorate anche dal principio di indeterminazione di Heisenberg e da tutti gli sviluppi successivi.

A proposito del processo di emissione, Einstein parla di emissione spontanea e di emissione *indotta* dalla radiazione in equilibrio. La seconda l'ho chiamata emissione *stimolata*, perché chi ha familiarità col laser drizzasse subito le orecchie. Naturalmente Einstein non seppe mai nulla del laser, ma è segno del genio di tracciare il cammino alle generazioni future.

Il maser.

Per capire come si arrivò al MASER (Microwaves Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Amplificazione di Microonde mediante Emissione Stimolata di Radiazione) occorre tener presente che in una popolazione di molecole (o di atomi) la grande maggioranza si trova nello stato di minima energia o stato fondamentale. La percentuale di molecole che si trovano in un dato stato energetico dipende dalla temperatura T , secondo la legge statistica di Boltzmann e decresce esponenzialmente con il valore dell'energia E :

$dP / dE = C \cdot e^{\frac{-E}{kT}}$, essendo dP la probabilità che la molecola abbia energia compresa tra E ed $E+dE$. C è una costante, detta di normalizzazione, che si determina imponendo che la probabilità di una molecola di avere energia compresa tra 0 e infinito sia

uguale ad 1 (certezza). $\int_0^\infty dP = C \cdot \int_0^\infty e^{\frac{-E}{kT}} dE = 1$.

uguale ad 1 (certezza). $\int_0^\infty dP = C \cdot \int_0^\infty e^{\frac{-E}{kT}} dE = 1$.

Il maser a gas. Immaginiamo ora per semplicità di avere un gas le cui molecole hanno una coppia di livelli energetici la cui differenza sia uguale all'energia $h\nu$ dei fotoni di un fascio monocromatico. Se il fascio di fotoni attraversa il gas, è percentualmente maggiore il numero di molecole che assorbono fotoni passando dal livello inferiore (più popolato) al livello superiore rispetto alle molecole che emettono un fotone nel processo inverso. In definitiva, il fascio di radiazione, passando attraverso il gas, si attenua, cioè diminuisce il numero di fotoni al secondo trasportati dal fascio. È ciò che si osserva comunemente: l'intensità luminosa diminuisce quando la luce attraversa un mezzo materiale.

Per amplificare il fascio di radiazione occorre rendere più popolato il livello energetico superiore, realizzare quella che si chiama un'inversione di popolazione. Questa si può ottenere facendo passare le molecole del gas attraverso un quadrupolo magnetico. Un quadrupolo è costituito da quattro elettromagneti disposti ad angolo retto intorno a una cavità, che rivolgono verso la cavità alternativamente il polo nord e il polo sud. Il quadrupolo disperde lateralmente le molecole a bassa energia e costringe nel centro della cavità quelle più energetiche. Solo queste ultime andranno nella cavità a microonde, dove cederanno energia al fascio di fotoni, amplificandolo.

Per realizzare un maser (a gas) occorre quindi: (1°) un generatore di microonde di frequenza opportuna; (2°) un gas le cui molecole abbiano due livelli energetici la cui differenza sia uguale alla frequenza delle microonde moltiplicata per la costante di Planck; (3°) realizzare l'inversione di popola-

zione nel gas; ma non basta, occorre che il livello eccitato della molecola sia metastabile, cioè la molecola non si deve diseccitare per emissione spontanea, perché questa, avvenendo in modo casuale, pur contribuendo ad aumentare l'intensità del fascio di fotoni, lo renderebbe incoerente. Per capire di che si tratta, pensiamo all'atomo di idrogeno. Il secondo livello è instabile e l'elettrone eccitato ricade quasi immediatamente e spontaneamente nello stato fondamentale, con un ritardo medio di 1/100 di microsecondo (vita media dello stato eccitato). E' come un insieme di matite appuntite poggiate verticalmente per la punta su un tavolo orizzontale. Uno stato metastabile è uno stato *quasi* stabile, nel senso che si richiede uno stimolo, sia pur piccolo, per portare il sistema nello stato fondamentale di minima energia. Per continuare con l'esempio delle matite, è come se le poggiassemo per le estremità non appuntite. In assenza di disturbo (e se non si aspetta a lungo) persistono in piedi, ma se vengono investite da un soffio uniforme, cadono tutte insieme (coerenza). Lo stato metastabile garantisce che le molecole del gas si diseccitino cedendo energia alle microonde in concordanza di fase, tutte insieme, quando sono investite dal fascio di radiazione e ciò aumenta l'intensità del fascio di radiazione, mantenendolo coerente.

Nella prima realizzazione del maser, Basor e Prokhorov all'istituto Lebedev di Mosca, Townes alla Columbia University si orientarono verso le microonde che cadono nella banda di frequenze comprese tra un gigahertz e 30 gigahertz (tra 30 cm e un cm di lunghezza d'onda), perché la tecnica di produzione di microonde di questa banda si era molto sviluppata durante la seconda guerra mondiale per esigenze militari, radar, telecomunicazioni e in particolare per la nascente televisione.

Si deve ricordare che i circuiti tradizionali con bobine e condensatori in serie con triodi andavano bene per generare e analizzare onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra qualche Km (onde lunghe) e qualche dm (onde corte), ma dissipavano in calore l'energia delle onde comprese nella banda delle microonde. Per le microonde si erano realizzati nuovi strumenti, come il Klystron che consiste essenzialmente in una cavità in cui un fascio di elettroni è modulato da un campo elettromagnetico a radiofrequenza che li concentra in alcuni punti e li rarefa in altri; ciò produce un fascio coerente di radiazione la cui lunghezza d'onda è circa il doppio della distanza tra due concentrazioni di elettroni. Le microonde generate vengono poi immesse in una guida d'onda⁶. Le microonde prodotte con il Klystron furono inizialmente usate per misurare le piccole differenze di energia dei livelli più eccitati di atomi e molecole (man mano che ci si avvicina al limite di ionizzazione i livelli energetici si infittiscono e i fotoni emessi o assorbiti in una transizione tra di essi hanno frequenza molto piccola (piccola, si intende, rispetto alle frequenze emesse tra i livelli più bassi che cadono nella banda del visibile o dell'ultravioletto, a più di centomila gigahertz).

Fu così possibile studiare lo spettro di vari gas tra cui l'ammoniaca; per essa si trovò una riga molto intensa alla frequenza di 24 gigahertz (lunghezza d'onda di 1,25 cm). Si decise perciò di adoperare l'ammoniaca gassosa per amplificare un fascio di microonde di quella lunghezza d'onda prodotte in un klystron.

In realtà i fotoni sono mantenuti nella cavità risonante per un po' di tempo, facendoli riflettere ripetutamente tra due specchi poste agli estremi della cavità, in modo da amplificarne grandemente il numero prima di lanciarli sulla guida d'onda per l'utilizzazione.

Il maser ad ammoniaca ha una grande stabilità in frequenza e fu anche impiegato come orologio di precisione, Il guadagno in potenza era però modesto, dell'ordine di 100. Inoltre esso lavora a una frequenza fissa, non è quindi accordabile e non è utilizzabile per le telecomunicazioni.

La grande importanza di questo primo maser non consiste tanto nella grande stabilità in frequenza e negli accorgimenti tecnici impiegati, ma nell'aver dimostrato come sia tecnicamente possibile l'inversione di popolazione (il pompaggio, come si dice in gergo tecnico) in modo che l'emissione stimolata prevalga sull'assorbimento.

Subito dopo si realizzarono i maser a rubino. Il rubino è ossido di alluminio, il corindone, nel quale si trovano nel rapporto di 1 a cinquemila atomi di cromo, che con i loro tre elettroni spaiati gli danno il tipico colore rosso. I tre elettroni spaiati nell'orbitale p combinando i loro spin danno luogo a uno spin totale di $-3/2$ e $-1/2$ (spin giù), $1/2$ e $3/2$ (spin su). Il pompaggio avviene dal livello di spin

-1/2 al livello 3/2. Dal livello 3/2 l'elettrone scende al livello 1/2 che è metastabile e da qui avviene l'emissione stimolata al livello -1/2.

Il laser.

Il laser (Light = luce) è un maser che opera nella banda del visibile dall'estremo rosso all'ultravioletto. Il principio di funzionamento è quello del maser, tuttavia l'avvento del laser negli anni '60 (del XX secolo) suscitò un enorme interesse anche a livello giornalistico. Qual è la novità? Questa consiste nel fatto che per la prima volta nella storia del mondo (non della Terra, dell'Universo) fu creata per mano dell'uomo luce coerente. Le onde radio e le microonde, essendo generate con apparecchiature macroscopiche, sono coerenti. Ciò significa che le onde, nel linguaggio ondulatorio, i fotoni, nel linguaggio quantistico, mantengono differenza di fase costante nel tempo. Per fare un esempio meccanico, si immagina di impugnare saldamente con le due mani due corde elicoidali d'acciaio che sono unite con una terza al primo estremo, mentre l'altro è fissato al muro o è tenuto fermo dall'assistente di laboratorio. Se si agitano su e giù le due mani in sincronismo, entrambe su, entrambe giù, cioè in concordanza di fase, le due onde, arrivate alla terza corda sommano le loro ampiezze: le onde si sovrappongono in concordanza di fase. Se, mentre una mano va su l'altra va giù, cioè se si generano onde in opposizione di fase, le onde, arrivate alla terza corda sottraggono le loro ampiezze e se queste sono uguali, il moto ondoso sparisce. In ogni caso si ha coerenza perché le sorgenti, cioè le due mani, mantengono uno sfasamento costante nel tempo.

Ora, la luce prodotta dalle stelle, dalla legna che brucia, dalle lampade elettriche, dai tubi al neon è incoerente, perché è prodotta da una miriade di atomi ognuno dei quali emette in modo indipendente dagli altri e l'insieme dei fotoni emessi è caotico.

Ciò significa che se abbiamo due lampade a incandescenza identiche, che emettano per esempio luce rossa, e si accendono entrambe, si ha un'illuminazione doppia che se fosse accesa una sola. (Grazie! direte voi. Sembra ovvio, ma solo perché questa è la nostra quotidiana esperienza). Immaginiamo ora di avere due laser a rubino identici, che emettono luce rossa. Siccome la loro luce è coerente, nei punti per i quali la differenza di cammino è un multiplo intero di lunghezza d'onda le due radiazioni arrivano in concordanza di fase e si ha illuminazione quattro volte più intensa che con un solo laser, nei punti nei quali i due raggi arrivano in opposizione di fase, cioè con differenza di cammino pari a un multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda, le onde si elidono e si ha intensità nulla. Nel modello ondulatorio la cosa si spiega col fatto che l'intensità luminosa (ma anche sonora o di energia elastica: pensate alle corde) è proporzionale al quadrato dell'ampiezza e se l'ampiezza raddoppia (concordanza di fase) l'intensità diventa quadrupla. Ciò naturalmente se le onde sono coerenti. Se invece sono incoerenti, la differenza di fase non si mantiene costante, ma varia rapidamente nel tempo, tanto rapidamente che noi, anche con gli strumenti più sofisticati, possiamo percepire solo il valor medio, e il valor medio tra quattro e zero è due (vedi lampade a incandescenza).

Il laser a rubino fa parte della categoria dei laser a stato solido. Essi possono produrre una serie di impulsi di brevissima durata, intorno a un picosecondo (1 millesimo di miliardesimo di secondo) con una densità di potenza enorme, dell'ordine di 100 miliardi di watt al cm^2 . Inoltre gli impulsi, proprio perché di breve durata, hanno uno spettro allargato. Un'onda sinusoidale che dura per un tempo infinito, in pratica molto lungo rispetto al periodo dell'oscillazione, è monocromatica, cioè consiste di una sola frequenza, il suo spettro consiste di una sola riga. Ma se l'emissione è troncata, se viene fatta durare pochi periodi, allora lo spettro consiste di tante frequenze vicine. Ciò si può dimostrare con la teoria delle onde, ma si richiede la conoscenza degli integrali di Fourier (vedi bibliografia 6). E' invece facilissimo dimostrarlo nella teoria quantistica col principio di indeterminazione. Questo afferma che il prodotto dell'indeterminazione della posizione per l'indeterminazione della quantità di moto è dell'ordine di grandezza della costante h di Plank. Da ciò si deduce che anche il prodotto tra l'indeterminazione dell'energia di un fotone per l'indeterminazione sul tempo di

emissione è circa uguale ad h . Siccome l'energia è uguale ad h per la frequenza, segue che l'indeterminazione in frequenza è inversamente proporzionale all'indeterminazione in tempo.

Volendo un fascio laser di grande purezza, praticamente monocromatico, occorre aumentare la durata degli impulsi, ma in tal caso la densità di potenza diminuisce.

Inseguito furono realizzati laser a gas (Elio - Neon), a semiconduttori (quelli usati per i lettori CD), a elettroni liberi, che possono produrre fasci laser continui con frequenza variabile dall'infrarosso ai raggi X e addirittura ai raggi γ , che trovano innumerevoli applicazioni, dalla medicina alla lavorazione dei metalli, alle telecomunicazioni, alle scienze spaziali, all'astronomia, all'olografia.

Il primo laser a elettroni liberi (FEL: Free Electron Laser) è stato realizzato nel 1977 da Madey e collaboratori all'università di Stanford, California. Esso emetteva radiazione infrarossa alla lunghezza d'onda di 3,417 millimetri con una larghezza di banda molto piccola, appena 8 nanometri. La potenza media era però piccola, circa 0,36 watt.

La novità di questo laser era che non si sfruttava più l'emissione stimolata di un atomo o di una molecola, ma l'interazione di un fascio di elettroni relativistici (velocità prossima a quella della luce) con un campo magnetico statico. Elettroni relativistici si ottengono in un acceleratore di elettroni, per esempio l'elettrosincrotrone di Frascati. Quando gli elettroni sono accelerati, irradiano onde elettromagnetiche (fotoni nel linguaggio quantistico) e questo si sapeva dalla teoria di Maxwell e dalle tecniche radio (l'antenna di Marconi e simili). Ma se gli elettroni sono portati a velocità relativistica su orbite circolari come nell'elettrosincrotrone, emettono luce tangenzialmente alla traiettoria, in un cono molto stretto. Questa luce di sincrotrone, all'inizio (intorno al 1950) considerata uno spreco energetico per il fine primario cui è destinato un acceleratore, fu poi da Madey riconosciuta come luce coerente o luce laser. Aumentando l'energia degli elettroni nell'elettrosincrotrone (non la loro velocità che ad un'energia di 2 milioni di elettron volt già sfiora la velocità della luce), si può portare la luce di sincrotrone nel visibile, nell'ultravioletto e poi nella banda X e γ . Gli impulsi di luce sono però molto brevi, durano finché il rivelatore (mai l'occhio umano se non si vuole bruciare la retina) resta allineato con lo stretto cono di emissione. La breve durata dell'impulso significa uno spettro a larga banda. Avere una larga banda di emissione è utile, perché ciò consente di scegliere la frequenza desiderata in un range molto esteso (accordabilità spettrale). Tuttavia, il fatto che la potenza sia distribuita su un intervallo esteso di frequenza rende piccola la potenza per unità di frequenza. Quando è necessario avere molta potenza su una banda ristretta di frequenze (luce potente e quasi monocromatica) occorre realizzare impulsi di durata maggiore. Ciò può essere ottenuto con dispositivi quali l'*ondulatore magnetico*. Si consulti, ad esempio, su Internet, l'articolo *Laser a elettroni liberi* citato nella pagina successiva.

Caratteristiche della luce laser.

Riassumendo, le caratteristiche principali della luce laser sono:

La coerenza, per cui due fasci laser accordati in frequenza possono dare frange d'interferenza come se fossero immagini virtuali di una medesima sorgente. Ciò consente, tra l'altro, la realizzazione di immagini tridimensionali (olografia).

La concentrazione dell'energia luminosa in fasci estremamente sottili e collimati. Ciò consente di mandare un fascio laser a enormi distanze, senza che il fascio subisca uno sparpagliamento apprezzabile. E' stato così possibile mandare un raggio laser sulla Luna, dove è stato riflesso da uno specchio piazzato dagli astronauti americani e, misurando il tempo di andata e ritorno con un orologio atomico, si è ricavata la distanza del satellite con grandissima precisione.

La monocromaticità molto spinta della luce laser continua o ad impulsi sufficientemente lunghi. Ciò consente misure spettroscopiche di precisione.

Approfondimenti.

Chi voglia approfondire i principi teorici e le applicazioni, veda ad esempio i testi divulgativi⁷. Sono alquanto datati, ma espongono in modo accessibile i principi teorici e le applicazioni.

Su Internet c'è solo l'imbarazzo della scelta. A livello di preparazione universitaria si può consultare, per esempio, la voce *laser a elettroni liberi* su un sito dell'ENEA, nel quale si trovano i principi teorici e le più recenti realizzazioni.

Per informazioni sull'olografia si può consultare col motore di ricerca "Virgilio" la voce *olografia* e l'enciclopedia su rete di "Virgilio".

Per avere un quadro storico dell'evoluzione del laser, fino ai nano-laser e ai laser ad atomo singolo, si consiglia la consultazione della rivista "Le Scienze", edizione italiana dello "Scientific American", della quali si indicano alcuni numeri: N° 4 dicembre 1968 *Luce laser*, N° 5 gennaio 1969 *applicazioni del laser*, N°6 febbraio 1969 *modulazione della luce laser e telecomunicazioni*, N° 22 giugno 1970 *applicazioni chirurgiche del laser*, N° 37 settembre 1971 *la fusione termonucleare col laser*, N° 45 maggio 1972 *la pressione della luce laser*, N° 57 maggio 1973 *laser a vapori metallici*, N° 337 settembre 1996 *laser a luce blu e lettori CD*, N° 357 maggio 1998 *i nano-laser*, N° 362 ottobre 1998 *laser ad atomo singolo*, N° 377 gennaio 2000 *trasmissione dati a larga banda con luce laser*, N° 383 luglio 2000 *impulsi laser a raggi X*, N° 387 novembre 2000 *i vantaggi di un lampo laser*, N° 397 settembre 2001 *laser per comprimere la materia*, N° 406 giugno 2002 *luce estrema: laser e fusione nucleare*.

Ma più che acquisire una miriade di informazioni, è importante capire il perché delle cose. Nelle scienze, nella fisica in particolare, ciò è possibile solo con i metodi della matematica: "*Senza la matematica non è possibile affrontare seriamente alcun problema fisico*"⁸.

Vorrei concludere ribaltando l'esortazione dantesca: Non "*state contenti, umana gente, al quia*", ma *tendete al quod*, perché siamo figli di Ulisse.

Come dice Blaise Pascal, "*Mirabile non è che l'universo sia tanto grande, mirabile è che l'uomo abbia osato misurarlo*".

- ¹ Dalle "Note autobiografiche" di A. Einstein, in "Albert Einstein scienziato e filosofo" di Paul Schilpp, 1958 Boringhieri Torino. (Le note autobiografiche sono dell'inizio del 1955, Einstein muore il 18 aprile 1955).
- ² Lev D. Landau ed E. M. Lifsic, "Meccanica quantistica", 1962 Mosca, 1969 Boringhieri Torino. Si consultino il cap. 4 per la teoria quantistica del momento angolare orbitale e il cap. 8 per la teoria dello spin. Si richiedono conoscenze di meccanica quantistica.
- ³ Emilio Segrè, "Personaggi e scoperte della fisica contemporanea", 1976 Mondadori Milano.
- ⁴ Max Born, "Filosofia naturale della causalità e del caso", 1949 Clarendon Press Oxford, 1962 Boringhieri Torino; Piero Caldirola, "Dalla microfisica alla macrofisica", 1974 Mondadori Milano; Silvio Bergia, "I grandi della scienza, Einstein", 1998 Le Scienze Milano.
- ⁵ Riccardo Becker, "Teoria dell'elettricità" appendice G, 1950 Sansoni Firenze.
- ⁶ Enrico Persico, "Metodi di analisi delle radiazioni", 1954 La Goliardica Editrice Roma.
- ⁷ Manfred Brotherton, " Laser e maser", 1965 Etas Kompass Milano; John Pierce, "Elettronica quantica", 1967 Zanichelli Bologna.
- ⁸ Werner Heisenberg, "I principi fisici della teoria dei quanti", 1930 Verlag Lipsia, 1963 Boringhieri Torino.