



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Breve storia dello sviluppo del LASER

Relatore

Prof. Giulio Peruzzi

Laureanda

Serena Simonatto

Anno Accademico 2018/2019



*A te che mi hai preso tutto, ma mi hai fatto dono di me stessa.*



# INDICE

<b>1. Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>2. L'emissione stimolata</b>	<b>8</b>
2.1 Le basi teoriche	9
2.2 Le prove sperimentali	10
<b>3. Il Maser: il gemello nelle microonde</b>	<b>11</b>
3.1 Townes ed il primo Maser	12
3.1.1 Il Maser a tre livelli	14
3.2 Verso il Laser: il <i>Maser ottico</i>	17
3.3 La ricerca in Russia: Fabrikant, Prokhorov e Basov	19
<b>4. Il Laser</b>	<b>21</b>
4.1 1960: un anno di grandi scoperte	23
4.1.1 Il primo Laser a gas	26
4.2 I diodi Laser	28
4.3 Le applicazioni alla fisica di base	30
<b>5. Conclusioni</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>32</b>



# 1. INTRODUZIONE

Il LASER, acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, è uno strumento oggi di fondamentale importanza non solo nell'ambito fisico, ma anche in quello tecnologico grazie alle sue molteplici applicazioni: dall'ottica alle lavorazioni industriali, dalle misure di precisione fino alle operazioni chirurgiche, etc.

L'obiettivo di questa tesi è quello di descriverne lo sviluppo dall'introduzione dei famosi coefficienti A e B di Einstein (1916) fino alla metà degli anni Sessanta del secolo scorso con l'invenzione dei Laser a gas e a semiconduttore oltre che a parlare di alcune sue applicazioni alla fisica di base.

Per prima cosa ho introdotto il fondamento teorico che sta alla base del funzionamento del Laser, ovvero l'*emissione stimolata*, esponendo la teoria di Einstein del 1916 e le sue successive verifiche sperimentali da parte di Ladenburg e Purcell e Pound.

Sono poi passata agli esperimenti di Valentin Fabrikant sull'amplificazione luminosa e al lavoro teorico di Prokhorov e Basov in ex URSS e agli studi americani sulle microonde, che portarono Charles Townes allo sviluppo del primo MASER: strumento definito "il gemello" del Laser in quanto sfrutta principi pressoché identici ma ciò che lo differenzia è la banda di frequenza in cui lavora (microonde per il Maser, ottico per il Laser).

Sempre per quanto riguarda il Maser ho parlato dell'invenzione del *Maser a tre livelli* da parte di Scovil e Seidel ai Bell Laboratories, del *Maser a rubino rosa* di Weston Vivian e Kikuchi e del primo *Maser a idrogeno* di Ramsey, Clepper e Goldenberg: questi ultimi due sono importanti perché il loro utilizzo ha permesso a Penzias e Wilson di scoprire la radiazione cosmica di fondo nel 1965 (con il Maser a rubino rosa), mentre il Maser a idrogeno, grazie alla sua estrema precisione, viene usato come orologio atomico.

Infine, nell'ultimo capitolo, ho descritto l'invenzione del vero e proprio Laser da parte di Theodore Maiman (avvenuta il 16 maggio del 1960 nei laboratori di ricerca della Hughes a Malibù) per poi concludere l'elaborato con i successivi sviluppi della tecnologia che hanno portato alla creazione di vari tipi di Laser, in particolare quelli di cui parlo sono i laser a gas e a semiconduttore, oltre ad una breve descrizione delle applicazioni alla fisica fondamentale.

## 2. L'EMMISSIONE STIMOLATA

Il principio di funzionamento del LASER si basa sul fenomeno dell'emissione stimolata: esso è un fenomeno quantistico per il quale la radiazione elettromagnetica, oltre che eccitare un sistema, può anche stimolarne la diseccitazione.

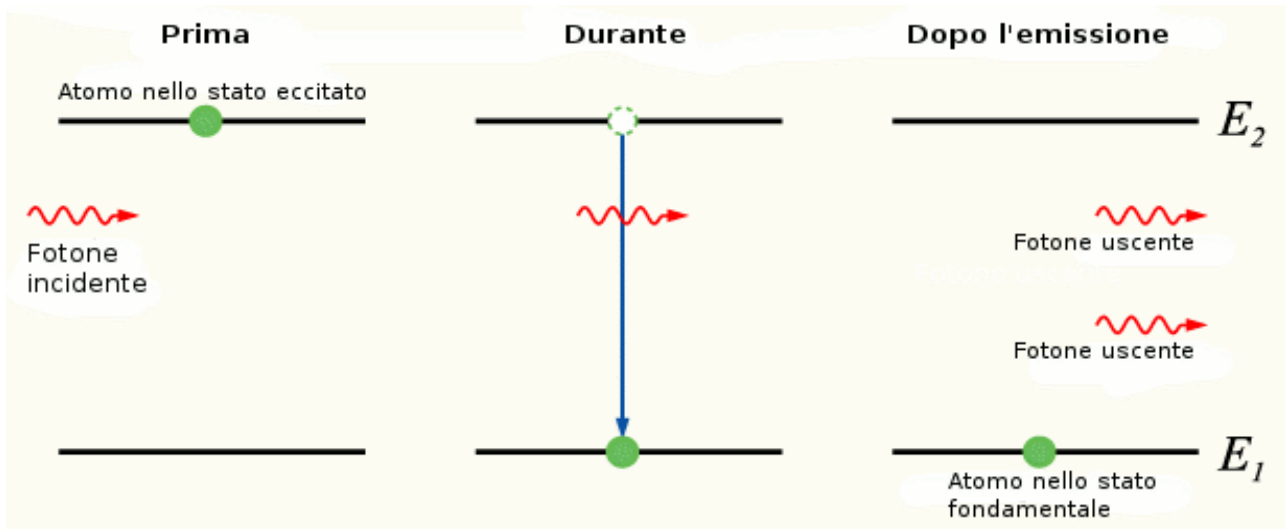


Figura 1<sup>1</sup>: schema grafico dell'emissione stimolata. Il fotone incidente, avente energia pari alla differenza tra i due livelli, stimola un atomo di  $E_2$  a lasciare il suo livello per andare in uno più basso emettendo contemporaneamente due fotoni della stessa energia.

L'emissione stimolata è stata ipotizzata per la prima volta da Albert Einstein nel 1916, il quale postula l'esistenza dei famosi coefficienti A e B connessi ai fenomeni di assorbimento ed emissione stimolata. In un articolo successivo del 1923<sup>2</sup> (scritto assieme a Paul Ehrenfest) essi vennero chiamati con i nomi tedeschi di “*positive and negative Einstrahlung*”: il nome *emissione stimolata* è infatti stato introdotto successivamente da Van Vleck nel 1924 (fino ad allora era stata chiamata *assorbimento negativo*).

I paragrafi che seguono riassumono brevemente i risultati teorici di Einstein e Dirac e i successivi esperimenti di Ladenburg e Purcell e Pound che ne diedero una conferma sperimentale.

<sup>1</sup> <http://astrolab.altervista.org/articoli/laser.html>

<sup>2</sup> A Einstein, P. Ehrenfest, “Zur quantentheorie des strahlungsleichgewichts”, *Z. Phys.*, **Bd 19**, 301-306 (1923)



## 2.1 Le basi teoriche

Nel 1916 Einstein pubblica un articolo dal titolo “*On the quantum theory of radiation*” il quale viene ormai considerato come il fondamento teorico del LASER.

In esso Einstein indaga in maniera approfondita i meccanismi di emissione e assorbimento di fotoni da parte della materia. Inoltre, nella dimostrazione della legge di Planck<sup>3</sup> presente nella prima parte dell’articolo, per dare conto dei risultati ottenuti, introduce l’ipotesi dell’emissione stimolata.

In particolare, se consideriamo le transizioni possibili tra due livelli atomici  $m$  ed  $n$  (con  $E_m > E_n$ ) abbiamo che la transizione  $n \rightarrow m$  può avvenire solamente se un elettrone assorbe un fotone di energia pari alla differenza tra i due livelli: questo fenomeno è il cosiddetto *assorbimento stimolato*; la transizione contraria, ovvero  $m \rightarrow n$ , avviene attraverso l’*emissione spontanea* di un fotone.

A questo punto Einstein ipotizza una terza possibilità, ovvero quella che un elettrone in  $m$  venga forzato a passare in  $n$  da un fotone di passaggio della giusta frequenza (secondo la semplice relazione scoperta da Planck  $E_m - E_n = h\nu$ ) e nel farlo emetta un altro fotone perfettamente in fase col primo.

La probabilità che il fotone causi un’*emissione stimolata* (se l’elettrone è in  $m$ ), è pari a quella che il fotone venga assorbito quando l’elettrone è in  $n$ : Einstein dimostrò questo assunto basandosi solamente sulla termodinamica.

Definendo:

$$\begin{aligned} dW &= A_m^n dt && \text{Probabilità della transizione } m \rightarrow n \\ dW &= B_n^m \rho dt && \text{Probabilità della transizione } n \rightarrow m \\ dW &= B_m^n \rho dt && \text{Probabilità della transizione } m \rightarrow n \text{ indotta (emissione stimolata)} \end{aligned}$$

Per argomenti termodinamici abbiamo bisogno che gli scambi energetici tra i livelli siano in accordo con la distribuzione statistica degli stati:  $dW = p_n e^{-\frac{p_n}{kT}}$ .

Affinché ciò sia possibile deve valere la seguente relazione:  $p_n e^{-\frac{E_n}{kT}} B_n^m \rho = p_m e^{-\frac{E_m}{kT}} (B_m^n \rho + A_m^n)$

da cui si ricava la legge di Planck:  $\rho = \frac{A_m^n}{B_m^n (e^{-\frac{E_m - E_n}{kT}} - 1)}$ .

Nell’articolo, inoltre, Einstein mostra che se  $\rho$  cresce all’infinito con  $T$ , allora fra le costanti  $B_n^m$  e  $B_m^n$  deve sussistere la seguente relazione:  $p_n B_n^m = p_m B_m^n$ .

Dall’analisi di quest’ultima equazione si nota che, facendo tendere la temperatura all’infinito, il termine al denominatore tende a zero, quindi, se non ci fosse  $B_m^n$ , che è il termine di emissione stimolata introdotto da Einstein, si otterrebbe un risultato impossibile.

Questa idea di Einstein fu ripresa e migliorata dal collega Paul Dirac il quale, in un articolo del 1927, arriva alla corretta definizione matematica e operativa dei coefficienti A e B.

Va detto, infine, che questa teoria sui coefficienti di emissione ed assorbimento ha permesso ai fisici di costruire, negli anni che seguirono, una teoria quantistica della rifrazione e della dispersione molto soddisfacente che permise di arrivare a risultati verificabili sperimentalmente.

---

<sup>3</sup>  $\rho = \alpha \nu^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

## 2.2 Le prove sperimentali

Dal punto di vista sperimentale, la prima prova, seppur indiretta, di emissione stimolata la si deve a Rudolf Ladenburg (e ai suoi collaboratori) che nel 1928<sup>4</sup> dimostrò il fatto che l'indice di rifrazione del gas Neon diminuisce quando il gas viene eccitato da una scarica elettrica: egli chiamò questo fenomeno *dispersione negativa*.

Il setup sperimentale consisteva di un interferometro (di tipo *Jamin*) composto da un braccio contenente un tubo riempito di Neon a bassa pressione, mentre l'altro braccio conteneva un tubo vuoto. Attraverso l'uso di una lampada a scarica veniva emesso un fascio di luce bianca diviso in due da un *beam splitter* ed immesso poi nei due tubi; una volta che questi fasci venivano ricomposti, Ladenburg e i collaboratori analizzarono la figura di interferenza trovando che, ad alte correnti (della scarica), sia il livello di transizione più alto che quello più basso erano occupati: ciò voleva dire che l'indice di rifrazione decresceva come predetto dalla teoria.

A conclusione dell'articolo, Ladenburg e Kopfermann spiegarono che il segno meno (da cui il nome *dispersione negativa*) era dovuto alla forte correlazione presente tra il fenomeno della dispersione ordinaria (il coefficiente  $A_m^n$  nella teoria di Einstein) e quella anomala (coefficiente  $B_m^n$ ); inoltre, inserirono una nota dove si diceva che per poter osservare direttamente la dispersione negativa era necessario indurre un'inversione di popolazione<sup>5</sup>.

Quest'ultima idea venne ripresa dal fisico russo Valentin Fabrikant nella sua tesi di dottorato del 1939 nella quale, oltre a suggerire degli esperimenti sull'amplificazione luminosa che proverebbero l'esistenza dell'assorbimento negativo (emissione stimolata), descrive la possibilità di usare le impurezze molecolari per creare un'inversione di popolazione in un gas sottoposto a scarica elettrica (i dettagli verranno esposti nel prossimo capitolo).

La prima prova diretta di emissione stimolata la si deve a Edward Purcell e Robert Pound nel 1950<sup>6</sup> i quali, attraverso una serie di esperimenti con cristalli di fluoruro di litio (LiF), usando la tecnica della radiazione magnetica nucleare<sup>7</sup>, scoprirono che lo stato di spin del sistema poteva essere posto in uno stato di temperatura negativa: ciò significa che i livelli ad alta energia sono maggiormente riempiti rispetto a quelli più bassi e il sistema, in questa configurazione, è caratterizzato dal fatto che quando gli si applica una radiazione dall'esterno emette fotoni: è questa l'emissione stimolata vista direttamente dai due fisici; in particolare essi misurarono una lunghezza d'onda per la radiazione emessa di 19.9 m corrispondente ad una frequenza di 50 kHz (appartenente alla regione delle radio onde).

---

<sup>4</sup> R. Ladenburg "Dispersion in electrically excited gases", *Rev. Mod. Phys.* **5**, 243-256 (1933)

<sup>5</sup> L'**inversione di popolazione** è un processo nel quale le molecole vengono preparate in modo tale da trovarsi in uno stesso stato eccitato anziché in quello fondamentale.

<sup>6</sup> E. Purcell, R. Pound, "A nuclear spin system at negative temperature", *Phys. Rev.* **81**, 279-280 (1951)

<sup>7</sup> Qualche anno prima Willis Lamb Jr e R.C. Retherford avevano scoperto che la risonanza magnetica nucleare poteva produrre un'inversione di popolazione.

### 3. IL MASER: IL GEMELLO NELLE MICROONDE

I lavori di ricerca sullo sviluppo del Maser ebbero luogo solamente in USA e nell'ex Unione Sovietica per un motivo ben preciso: l'interesse militare.

Infatti, negli anni del Dopoguerra e fino a tutto il periodo della Guerra Fredda, i governi di questi due paesi finanziarono lautamente i laboratori e le industrie militari affinché sviluppassero nuove tecnologie belliche: in particolare fu in questo periodo che venne sviluppata e migliorata la tecnica radar.

Studiare il radar equivaleva a fare ricerche nel campo delle microonde, ovvero a lunghezze d'onda centimetriche: questi studi diedero impulso alla spettroscopia molecolare con sorgenti a microonde con la quale si riuscì a capire nel dettaglio il ruolo dell'emissione stimolata da cui poi partì l'elaborazione del Maser (ricordiamo, come descritto nel capitolo precedente, che Ladenburg si servì della radiazione magnetica per creare la prima inversione di popolazione).

La prima discussione pubblica sul principio in base al quale un Maser può funzionare fu tenuta da un giovane ingegnere elettronico, Joseph Weber, nel 1952, alla Electron Tube Research Conference. Egli, durante il periodo passato come ingegnere specializzato nella marina militare statunitense, aveva acquisito ampie conoscenze sul campo delle tecnologie a microonde; una volta dimessosi aveva preso un PhD in Fisica, e, un giorno, ascoltando un seminario di Karl Herzfeld, ebbe l'idea del Maser.

In particolare egli pensò ad un modo per poter amplificare la radiazione emessa dagli oscillatori. Consideriamo un sistema a due livelli di energia  $E_1$  ed  $E_2$  (con  $E_2 > E_1$ ) popolati rispettivamente da  $n_1$  e  $n_2$  atomi. Investiamo il gas con della radiazione: la potenza assorbita sarà proporzionale a  $n_1$  mentre gli atomi del livello superiore emetteranno per emissione stimolata con una potenza di emissione proporzionale a  $n_2$ : la potenza netta non sarà altro che  $P_{\text{assorbita}} - P_{\text{emessa}} = n_1 - n_2$  positiva perché all'equilibrio termico  $n_1 > n_2$  quindi in questa configurazione avrò assorbimento.

A questo punto Weber pensò che passando in una condizione per cui  $n_2 > n_1$  avremmo avuto un'amplificazione della radiazione emessa.

Tale considerazione, sviluppata nel 1951 e presentata in una conferenza nel 1952, venne pubblicata nel giugno 1953 sulla rivista "*Transactions of the Institute of Radio Engineers Professional Group on Electronic Devices*". Tuttavia questo metodo per ottenere l'inversione di popolazione non è mai stato messo in pratica e lo stesso Weber, facendo i conti, si rese conto che l'efficienza di un ipotetico dispositivo sarebbe stata risibile.

### 3.1 Townes ed il primo Maser

Il primo dispositivo funzionante fu realizzato alla Columbia University da Charles Hard Townes il 30 aprile 1954.

Townes iniziò la sua carriera ai laboratori della Bell Telephone lavorando con Dean Wooldbridge su un progetto consistente nell'aumentare la frequenza di operazione dei radar a 24000 MHz con l'intento di migliorarne la precisione durante i bombardamenti. Egli, però, scoprì che a tale frequenza un radar non poteva funzionare, poiché, nell'atmosfera, il vapore acqueo assorbe la radiazione proprio a quella frequenza. Così abbandonò il progetto, ma non l'interesse per la spettroscopia a microonde, infatti accettò volentieri l'invito di Isidor Rabi che lo voleva nel suo gruppo alla Columbia e cominciò ad usare le microonde per lo studio della materia.

Nel 1951, durante una passeggiata mattutina in un parco di Washington, interrogandosi sul motivo per il quale non si era ancora riusciti a produrre un buon generatore di onde millimetriche, capì che era necessario costruire un risonatore molto piccolo e preciso in cui l'energia potesse essere accoppiata con un campo elettromagnetico e che questo risonatore doveva sfruttare le molecole. Rientrato a casa si mise a fare i calcoli per produrre un sistema che usasse un fascio molecolare per separare le molecole nello stato ad energia più alta da quelle in quello più basso per poi mandarle in una cavità, il cosiddetto risonatore, che contenesse energia elettromagnetica: in questo modo le molecole sarebbero state stimolate ad emettere energia creando così un'oscillazione continua.

All'inizio pensò di usare il deuterato di ammoniaca, ma dai calcoli capì che non sarebbe riuscito a costruire una cavità che funzionasse per lunghezze d'onda di mezzo millimetro, per cui passò alla radiazione di 1,25 cm emessa dalle molecole di ammoniaca  $\text{NH}_3$  (per la quale, tra l'altro, già esistevano dei componenti disponibili in laboratorio).

Ne parlò con il suo dottorando Jim Gordon che accettò il rischio di lavorare a questo progetto dall'esito fortemente incerto.

L'idea di base era quella di considerare un sistema a due livelli di energia e fare in modo di selezionare le particelle per mandare da una parte solo quelle che si trovano nello stato ad energia più alta inducendo, così, l'emissione stimolata.

Considerando la molecola di ammoniaca, essa ha i tre atomi di idrogeno posti sullo stesso piano, mentre l'atomo di azoto può occupare la posizione "sotto" o "sopra" al piano, oscillando ortogonalmente ad esso. Townes, con i suoi colleghi Gordon e Zeiger, decisero di studiare lo stato transizionale (chiamato in gergo spettroscopista stato 3-3) di frequenza 23830 MHz.

Il progetto consisteva nell'usare un campo elettrico per separare le molecole nei due livelli e focheggiarle dentro una cavità risonante tarata alla giusta frequenza. Per generare il campo, egli utilizzò le cosiddette lenti elettriche inventate da Wolfgang Paul<sup>8</sup>, Helmuth Friedburg e Hans Gerd Bennewitz.

Il primo rapporto ufficiale comprendente i calcoli e lo schema dell'oscillatore, firmato da Gordon e da Zeiger, fu pubblicato il 31 dicembre 1951 con il titolo: "*Oscillatore a fascio molecolare*".

I lavori proseguirono senza particolari successi per due anni fino all'aprile del 1953 quando Gordon, durante un seminario del gruppo di spettroscopia, annunciò il funzionamento del dispositivo: l'articolo definitivo venne pubblicato sulla prestigiosa rivista *Physical Review* il 30

---

<sup>8</sup> Premio Nobel nel 1989 assieme a N. Ramsay e Hans Dehmelt per l'invenzione della *trappola di Paul*, ovvero un metodo per confinare gli ioni in una piccola regione e poter così studiare il comportamento di un singolo atomo.

aprile 1954 dove venne usato, per la prima volta, l'acronimo MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Il primo Maser emise radiazione con una potenza di circa  $0,01 \mu\text{W}$ .

Nel 1964 Townes, Basov e Prokhorov vinsero il premio Nobel per la Fisica “*Per il lavoro fondamentale nel campo dell'elettronica quantistica il quale ha portato alla costruzione di oscillatori ed amplificatori basati sui principi del Maser e del Laser*”.

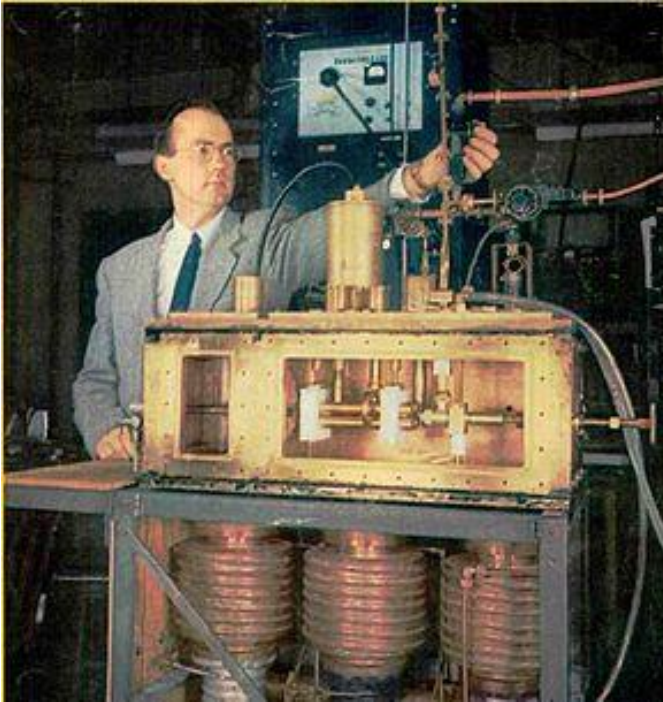


Figura 2<sup>9</sup>: Charles Townes con il suo Maser (1953)

---

<sup>9</sup> <https://it.wikipedia.org/wiki/Maser>

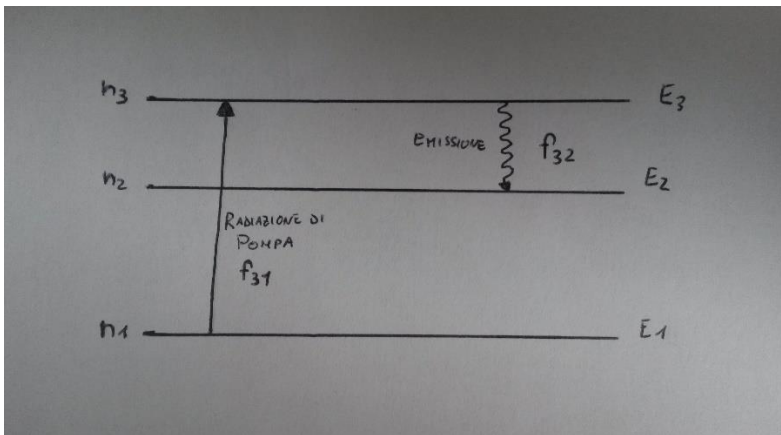
### 3.1.1 Il Maser a tre livelli

Il Maser ad ammoniaca di Townes aveva due pregi importanti: un rumore bassissimo e la forte coerenza dei fotoni emessi. Tuttavia, aveva anche il difetto che la frequenza di emissione della radiazione non poteva essere modificata e ciò lo rendeva utilizzabile, praticamente, solo nel campo della spettroscopia.

Il 17 maggio 1956, il fisico del MIT Malcom Woodrow Strandberg tenne una conferenza nella quale parlò della possibilità di sostituire i gas con un mezzo solido creando così un Maser a stato solido. Tra gli uditori c'era Nicolaas Bloembergen, un fisico danese allora professore ad Harvard esperto nella fisica dei materiali paramagnetici, il quale ebbe l'idea di usare l'effetto Zeeman<sup>10</sup> per scegliere i livelli tra i quali far avvenire la transizione e regolare così la frequenza di emissione: per fare ciò era necessario usare tre livelli, non solo due come nel maser di Townes.

L'idea di Bloembergen era la seguente: considero tre livelli di energia  $E_1 < E_2 < E_3$  non equamente spazati in modo che il livello 2 sia molto vicino al livello 3 (come si può vedere in figura), investo l'atomo con della radiazione di frequenza pari alla differenza di energia tra il livello 3 e il livello 1 ( $f_{31}$ ), il cosiddetto *campo di pompa*, che induce la transizione tra questi livelli: poiché il livello 1 è più popolato del livello 3, il sistema assorbe energia e quest'ultimo livello viene popolato a spese del primo; il livello 2 non viene influenzato cosicché alla fine del processo ho che  $n_3 > n_2$ : ciò fa sì che si abbia un'inversione di popolazione tra questi due livelli e quindi posso avere emissione stimolata alla frequenza  $f_{32}$  che corrispondente alla differenza di energia tra i livelli 3-2. Per poter fare ciò, però, ho bisogno di grandi differenze di energia tra i livelli, per questo motivo il sistema deve trovarsi a temperature molto basse.

Nell'immagine seguente si può vedere lo schema a tre livelli ideato da Bloembergen:



<sup>10</sup> L' "effetto Zeeman" è un fenomeno che consiste nella separazione delle linee spettrali a causa dell'applicazione di un campo magnetico esterno che interagendo con i momenti angolare e di spin degli elettroni fa sì che ciascuna riga si scinda in più righe molto vicine.

Una volta trovata l'impostazione teorica, Bloembergen fece un paio di conti da quali emerse che tutto ciò avrebbe funzionato solo se i tempi di rilassamento degli atomi coinvolti avessero soddisfatto determinate condizioni.

Egli pubblicò il tutto su *Physical Review* nell'ottobre 1956, suggerendo anche dei possibili materiali da utilizzare: il primo maser a tre livelli fu costruito, nel 1957 da Scovil, Feher e Seidel ai Bell Laboratories usando ioni di gadolinio in un cristallo di etilsolfato di lantanio.

L'anno successivo anche Alan McWhorter e James Meyer al Lincoln Laboratory del MIT ne costruirono uno con ioni di cromo in un cianato di cobalto e potassio.

Usando il meccanismo dei tre livelli, il maser poteva essere sintonizzato su più frequenze il che lo rendeva utilizzabile negli strumenti radar e perciò suscitò l'interesse dei militari.

Un importante tipo di maser di cui deve essere fatta menzione è il Maser a rubino.

Nel 1955 la marina statunitense incaricò l'ingegnere Weston Vivian ed il fisico Kikuchi dei Willow Run Laboratories (Università del Michigan) di sviluppare un maser sensibilissimo che servisse come strumento di rilevamento passivo di microonde emesse da oggetti. Kikuchi pensò di usare un rubino rosa alla lunghezza d'onda di 3,2 cm tipica dei radar. Il dispositivo funzionò il 20 dicembre 1957 e da allora il rubino divenne il materiale d'eccellenza nella costruzione dei maser grazie alla sua facile reperibilità in commercio.

Successivamente il Maser a rubino cominciò a essere impiegato in moltissimi ambiti della fisica, uno su tutti la radioastronomia grazie al bassissimo rumore che permetteva di rivelare segnali debolissimi e a tal proposito cito la scoperta della radiazione cosmica di fondo fatta da Arno Penzias e Robert Wilson nel 1965 che valse loro il Nobel grazie all'utilizzo di un maser a lunghezza d'onda di 7,35 cm.

Nel 1961 venne creato il primo Maser atomico, il cosiddetto *Maser a Idrogeno*, grazie agli sforzi di Daniel Kleppner e Mark Goldenberg del MIT di Boston. La peculiarità di questo tipo di maser è quella di avere una frequenza di emissione molto precisa a 1420 MHz e questo lo rende un dispositivo ideale per poter essere utilizzato come orologio atomico.

Un orologio atomico è un tipo di orologio in cui il tempo è dato dalla frequenza di risonanza di un atomo. Il primo orologio atomico sperimentale fu costruito nel 1949 e installato presso il National Bureau of Standards negli Stati Uniti. Il primo modello sufficientemente accurato, basato su transizioni di livelli energetici nell'atomo di cesio, fu costruito nel 1955 da Louis Essen al National Physical Laboratory in Gran Bretagna e installato presso l'osservatorio di Greenwich a Londra.

L'uso di questi orologi ha portato nel 1967 alla definizione del secondo sulla base del tempo atomico.

Gli orologi atomici a maser utilizzano una cavità risonante contenente un gas ionizzato. Solitamente è usato il cesio perché questo è alla base della definizione del secondo come 9.192.631.770 cicli della radiazione corrispondente alla transizione tra due specifici livelli energetici dello stato fondamentale dell'atomo in questione.

Un orologio atomico è costituito, oltre che dalla cavità a microonde, anche da un oscillatore/trasmittitore radio sintonizzabile e da un sistema che regola la frequenza dell'oscillatore esattamente alla frequenza a cui si ha la risonanza.

Il trasmettitore riempie la cavità con onde stazionarie: quando la frequenza coincide con la frequenza di risonanza del gas, gli elettroni degli atomi assorbono le onde radio e saltano al livello energetico superiore. Tornando al livello originario riemettono sotto forma di luce l'energia precedentemente assorbita.

Se la frequenza di pompaggio si discosta dal valore di risonanza, l'intensità della luce prodotta diminuisce. Una fotocellula rileva quindi la variazione e un circuito corregge la frequenza nella direzione di riportare l'intensità luminosa al valore massimo. Infine un contatore conta i cicli della frequenza originale e li comunica a un computer, il quale li presenta in forma numerica.

Oltre agli orologi al cesio esistono anche gli orologi al rubidio che hanno il pregio di avere un basso costo, un limitato ingombro e buona stabilità termica a breve termine: essi sono usati in applicazioni commerciali e nell'industria aerospaziale; i maser a idrogeno (costruiti in particolare in Russia), invece, hanno una stabilità a breve termine migliore di altri sistemi ma minore accuratezza a lungo termine.

Data l'estrema precisione di questi orologi, essi vengono utilizzati per verificare la teoria della relatività einsteiniana, in particolare una delle prime prove è stata la misura del *redshift gravitazionale* conseguenza del principio di equivalenza<sup>11</sup> previsto da Einstein nel 1907. L'esperimento, denominato *Gravity Probe A* (sigla GP-A), è stato eseguito il 18 giugno 1976, dove un maser a idrogeno montato su un razzo venne lanciato a un'altezza di 10.000 km; nel 1979, dopo ben tre anni di analisi dati, Vessot e Levine misurarono lo spostamento verso il rosso con un'incertezza di  $\pm 0,02\%$

Va detto, infine, che questi maser a idrogeno non sono propriamente un'invenzione umana in quanto esistevano già in natura: sono i cosiddetti *maser celesti*, ovvero emissioni di radiazione a 1420 MHz nelle nubi interstellari dovuta alla transizione dell'idrogeno atomico a temperature molto basse. Tuttavia questo fenomeno è stato scoperto più di dieci anni dopo la loro invenzione in laboratorio.

---

<sup>11</sup> Ci sono **due versioni** del principio di equivalenza, entrambe dovute ad Albert Einstein:

1. La versione **forte** afferma che, in un campo gravitazionale qualsiasi, è sempre possibile scegliere un sistema di riferimento, nell'intorno di ogni punto, dove gli effetti dell'accelerazione dovuti al campo gravitazionale sono nulli;
2. Quella **debole** asserisce che la massa inerziale, cioè la proprietà intrinseca del corpo materiale di opporsi alle variazioni di moto, e la massa gravitazionale, che rappresenta la proprietà di un corpo di essere sorgente e di subire l'influsso di un campo gravitazionale, sono numericamente uguali.



### 3.2 Verso il Laser: il *Maser ottico*

Tutti i maser costruiti in seguito a quello di Townes lavoravano nel range delle onde centimetriche: si cominciò quindi a cercare di estenderlo alle regioni submillimetriche (infrarosso e ottico).

Per ottenere un'emissione di radiazione nel visibile era necessaria una cavità risonante delle dimensioni del micron quindi impossibile da costruire in laboratorio: si pensò quindi di sostituirla con un *interferometro Fabry-Pérot*, un apparato formato da due specchi piani semitrasparenti posizionati parallelamente tra loro. Questo meccanismo permette alla radiazione di viaggiare continuamente avanti e indietro tra gli specchi e sfruttando l'interferenza dà la possibilità di scegliere i modi di oscillazione e quindi le frequenze perché solo la radiazione che viaggia parallela agli specchi viene riflessa.

Il primo a interessarsi a questa possibilità fu Robert Dicke, un professore di Princeton diventato famoso nel 1953 per aver sviluppato il concetto di *superradianza* ovvero il meccanismo di amplificazione a cui si è ispirato Townes per il suo maser. Nel 1956 egli disegnò su un suo quaderno di appunti uno schema di un risonatore fatto da uno specchio Fabry-Pérot circolare che emetteva radiazione nell'infrarosso: questa idea divenne brevetto nel 1958 con il titolo "*Amplificazione molecolare e metodi e sistemi di generazione*". Tuttavia Dicke non continuò con la ricerca e di essa se ne interessò Townes assieme al collega (e cognato) Arthur Schawlow.

Il 26 agosto 1958 Townes e Schawlow inviarono un articolo alla prestigiosa rivista *Physical Review* che lo pubblicò nel dicembre dello stesso anno con il titolo "*Infrared and Optical Masers*". In questo articolo venivano esposti gli aspetti teorici da prendere in considerazione per la costruzione di un dispositivo maser operante nella regione dello spettro visibile da essi ribattezzato *Maser Ottico*.

In particolare venivano discussi tre aspetti fondamentali:

1. La scelta della cavità e dei modi di oscillazione

Se si fosse usata una cavità metallica come quella del maser ad ammoniaca si avrebbe avuto un solo modo di oscillazione per la radiazione all'interno da cui una sola e ben determinata frequenza di emissione; se invece si usava una cavità "aperta" come quella che sfruttava il sistema Fabry-Pérot si potevano avere più modi di oscillazione, in particolare tutti quelli lungo l'asse degli specchi e da qui si poteva selezionare la frequenza di emissione anche nel range visibile.

2. Il guadagno del dispositivo

Considerando un materiale con solo due livelli di energia possibili, la condizione per avere oscillazione prevede l'uguaglianza tra potenza prodotta per emissione stimolata e potenza assorbita dagli specchi: questa relazione mi dà la cosiddetta "soglia per l'oscillazione". Una potenza generata appena superiore a questa soglia innesca il processo di emissione stimolata.

Essi, mostrarono anche come la radiazione emessa fosse estremamente monocromatica con una larghezza di riga dell'ordine di un milionesimo della larghezza di riga a cui la sostanza avrebbe emesso spontaneamente.

### 3. La scelta del materiale attivo

Townes e Schawlow pensarono di usare gas con atomi semplici invece di materiali solidi per la maggior semplicità nella costruzione dell'apparato.

Il dispositivo di Townes e Schawlow venne brevettato nel marzo 1960.

Successivamente Schawlow cominciò a pensare di usare materiali solidi, in particolare il rubino, ma i suoi calcoli non lo convincevano, così perse l'occasione di inventare il laser cosa poi riuscita a Theodore Mainman.

Schawlow e Townes, tuttavia, non furono i primi a pensare di poter estendere il meccanismo Maser allo spettro visibile. Gordon Gould, un giovane scienziato della Columbia University, stava lavorando ad un progetto per un maser ottico da lui ribattezzato Laser come acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: fu lui, di fatto, a coniare il termine con cui oggi giorno ci riferiamo a questo dispositivo (Townes e Schawlow, invece, lo chiamavano *Maser Ottico*).

Gould, nella sua tesi di dottorato, stava sviluppando la possibilità di usare un *Fabry-Pérot* in un risonatore laser. Una volta saputo che Townes lavorava alla stessa cosa, per fare in modo di dimostrare di essere arrivato per primo all'idea, si fece firmare da un notaio il quaderno che usava in laboratorio dove aveva annotato "alcuni calcoli sulla possibilità di ottenere amplificazione di luce da emissione stimolata di radiazione (laser)".

Egli proponeva di usare un *Fabry-Pérot* lungo un metro e di chiuderlo alle estremità con due finestre di vetro (chiamate, in gergo, *faccine ottiche*) poste ad *angolo di Brewster*<sup>12</sup> per avere riflessione totale e minimizzare le perdite.

L'azienda presso la quale lavorava fece domanda di brevetto nell'aprile 1959, in ritardo di nove mesi rispetto ai suoi colleghi; questo ritardo fu causato dal fatto che Gould voleva arrivare alla costruzione completa del dispositivo, mentre i suoi colleghi "brevettarono" solo un'idea teorica.

Gould, tuttavia, avviò una causa in tribunale sostenendo di avere avuto per primo l'idea portando come prova il quaderno timbrato, ma perse la causa dopo un lungo processo.

---

<sup>12</sup> Quando la luce passa da un mezzo a un altro mezzo che ha indice di rifrazione diverso dal primo, in genere, parte dell'onda viene riflessa dall'interfaccia esistente tra i mezzi. A un particolare angolo di incidenza, però, la luce con una particolare polarizzazione non può essere riflessa. Questo angolo di incidenza è detto **angolo di Brewster**.

### 3.3 La ricerca in Russia: Fabrikant, Prokhorov e Basov

In realtà, il concetto di Maser (ottico) era già stato pensato, con dieci anni d'anticipo rispetto agli americani, dal russo Fabrikant, il quale, però, fece domanda di brevetto troppo tardi e gli venne concesso solo nel 1959, quando sia il Maser che il Laser erano già stati inventati.

Egli fu il primo a cercare un legame tra l'inversione di popolazione e l'amplificazione luminosa e ad ottenere quest'ultima in un mezzo gassoso: i suoi risultati furono pubblicati nel dicembre del 1959, solamente sei mesi dopo la pubblicazione di Sanders sul Maser ottico.

I suoi studi cominciarono nel 1945 al laboratorio dell'Istituto Elettrotecnico Sovietico. Il 26 giugno 1951, Fabrikant e i suoi dottorandi Vudynsky e Butaeva fecero domanda per un brevetto chiamato "*Metodo per amplificare la radiazione elettromagnetica nelle bande UV, visibile, IR e radio*".

L'idea di Fabrikant era quella di usare un mezzo che presentasse il fenomeno dell'assorbimento negativo quando le sue particelle si trovavano in uno stato di non equilibrio rispetto ai livelli energetici, in particolare la concentrazione di queste ultime nel livello energetico superiore doveva essere maggiore di quella del livello inferiore. Questo stato di non equilibrio poteva essere raggiunto irraggiando il mezzo dall'esterno o con l'applicazione di una corrente elettrica: in particolare egli trovò che l'amplificazione era proporzionale a  $e^{K|L}$  dove K indica il coefficiente di assorbimento, mentre L è lo spessore dello strato.

A queste idee teoriche seguirono due esperimenti:

1. Il primo consisteva nel pompaggio ottico di vapori di cesio usando una lunghezza d'onda di 389 nm per poi studiare le tre linee dello spettro di fluorescenza a 698, 672 e 697 nm: mediante uno spettrografo vennero misurate le intensità di queste tre linee cambiando di volta in volta l'intensità di corrente e si osservò una proporzionalità diretta tra queste due grandezze.
2. Nel secondo veniva utilizzata una miscela di vapori di mercurio e idrogeno posta all'interno di un tubo ed eccitata usando una scarica elettrica: il risultato principale fu che, con un tubo di 36 cm e una corrente di 70 mA, si ottenne un'amplificazione del 10% alle linee di 456 e 436 nm. Inoltre, aggiungendo elio, si aumentava l'effetto ottenendo amplificazione anche a 402 nm.

Per concludere, va sottolineato che quest'ultimo esperimento è importante perché, negli anni successivi, usando una tecnica diversa, si riuscì ad ottenere l'*effetto laser* dai vapori di mercurio.

Nel 1965, l'Accademia Sovietica delle Scienze premiò Fabrikant con la medaglia d'oro S. I. Vavilov<sup>13</sup> "*Per i lavori innovativi nell'ottica delle scariche a gas con le quali per la prima volta sono stati studiati i fenomeni connessi con l'assorbimento negativo e per la proposta sull'amplificazione luminosa*".

---

<sup>13</sup> Sergej Ivanovič Vavilov (Mosca, 24 marzo 1891 – Mosca, 25 gennaio 1951) fisico russo famoso per i contributi dati all'ottica e per gli studi sulla luminescenza. È stato il fondatore dell'Istituto Lebedev a tutt'oggi considerato il più importante istituto di ricerca russo.

Oltre a Fabrikant, anche Basov e Prokhorov, due suoi colleghi dell'istituto Lebedev di Mosca, si interessarono di spettroscopia. I due stavano cercando di migliorare la sensibilità di uno spettroscopio che doveva essere impiegato nello studio degli stati rotovibrazionali delle molecole e ad un certo punto ebbero l'idea di sfruttare la deflessione prodotta dai campi elettrici e magnetici sui fasci molecolari per aumentare le popolazioni nei livelli coinvolti nelle transizioni e produrre così linee spettroscopiche più intense: per fare ciò utilizzarono molecole di fluoruro di cesio (CsF) perché dotate di elevato momento di dipolo. Il fascio veniva poi trasmesso in un risonatore dove, interagendo con il campo, produceva un'oscillazione continua.

Nell'ottobre del 1954 sul "*Giornale di fisica sperimentale e teorica*" Prokhorov e Basov pubblicarono un articolo, in lingua russa, nel quale veniva esposto il loro studio teorico oltre alla descrizione dei calcoli matematici necessari per la costruzione del risonatore e per far avvenire l'amplificazione. Essi chiamarono questo meccanismo: *generatore molecolare*.

I due russi pubblicarono la loro ricerca solamente sei mesi dopo la costruzione del primo maser della storia dovuta a Charles Townes nell'aprile 1954: il lavoro, in realtà, era già pronto nel dicembre del 1953, ma vollero ritardare la pubblicazione per poter correggere alcune formule matematiche sbagliate.

Nonostante ciò, il loro fu il secondo maser della storia e vennero insigniti, assieme all'americano, del Premio Nobel per la Fisica.

## 4. IL LASER

Un laser, acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, può essere descritto come un dispositivo in grado di produrre intensi fasci di radiazione, di frequenza ottica, coerenti e fortemente monocromatici.

Tra le principali caratteristiche che ne hanno determinato il successo troviamo:

1. La coerenza, ovvero la capacità di dar luogo a fenomeni di interferenza;
2. La collimazione e la direzionalità del fascio;
3. L'elevata potenza di emissione su una banda strettissima di frequenze.

I primi laser funzionavano emettendo fasci formati da una serie di brevi impulsi (i cosiddetti *spike*) della durata di pochi microsecondi: un laser di questo tipo viene detto operare in *free generation*. Successivamente, è stata messa a punto la tecnica del *Q-switching* per far emettere il laser su un solo impulso molto più corto ottenendo così potenze dell'ordine del migliaio di megawatt.

Il 22 aprile 1960 Theodore Maiman pubblicò sulla rivista "*Physical Review Letters*" uno studio dettagliato delle proprietà di fluorescenza del rubino rosa dalle quali emerse la sua elevata efficienza quantistica: ciò lo rendeva un ottimo materiale per la costruzione di un Laser.

Nei capitoli che seguono verranno riassunti i passaggi fondamentali del lavoro di Maiman e gli sviluppi che ne seguirono, ovvero l'invenzione del Laser a quattro livelli di Sorokin.

Ho poi voluto descrivere brevemente la scoperta dei due tipi di Laser più utilizzati ai nostri giorni ovvero i Laser a gas e i diodi Laser.

Infine, per concludere, ho esaminato alcune delle molteplici applicazioni pratiche del Laser concentrandomi, in particolare, su quelle riguardanti la fisica di base come la tecnica del *laser cooling* e la tecnica interferometrica usata da Virgo per la rilevazione delle onde gravitazionali.

## 4.1 1960: un anno di grandi scoperte

Il 1960 può essere considerato come l'*annus mirabilis* per la fisica del laser in quanto al primo laser di Maiman ne seguirono, nel giro di pochi mesi, molti altri e molto diversi tra loro: laser a stato solido che usavano vari tipi di materiali attivi e i laser a gas che a tutt'oggi rimangono tra i più utilizzati nell'ambito della ricerca scientifica di base.

Theodore Maiman cominciò ad interessarsi ai maser mentre lavorava alla Hughes dove gli venne affidato il compito di costruire un maser operante nella banda della radiazione X. Egli si appassionò talmente tanto a questo lavoro che decise di cercarlo alla banda ottica.

Come materiale attivo pensò di usare il rubino, ovvero un cristallo di ossido di alluminio di formula chimica  $\text{Al}_2\text{O}_3$  drogato con atomi di cromo poiché gli ioni di quest'ultimo elemento hanno una serie di livelli di energia che cadono nel visibile e in particolare nel rosso (è da qui che deriva il suo caratteristico colore).

In realtà, il rubino usato da Maiman era un "rubino rosa" con una concentrazione di ioni cromo dello 0,05%: studiandone la fluorescenza trovò che l'efficienza quantistica<sup>14</sup> era circa 1 quindi per ogni fotone assorbito ne veniva emesso un altro.

Questi risultati furono pubblicati, in via preliminare, il 22 aprile 1960 sulla rivista *Physical Review Letters*. Nello stesso articolo veniva mostrata la disposizione dei livelli di energia dello ione cromo di cui riporto lo schema grafico:

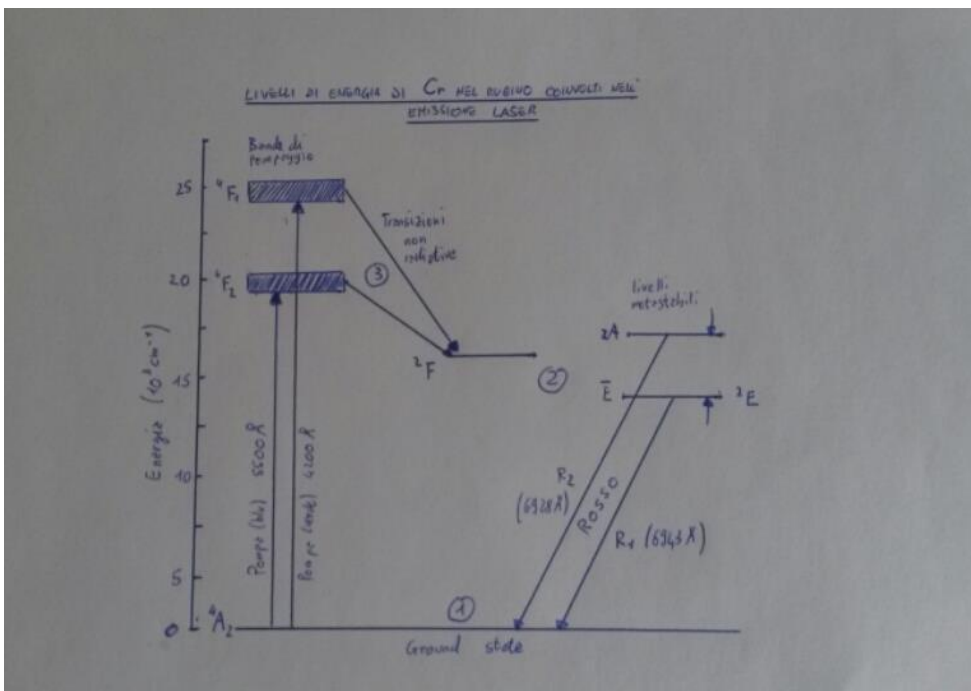


Figura 3: livelli di energia dello ione Cr nel rubino coinvolti nell'emissione laser.

<sup>14</sup> **Efficienza quantistica:** rapporto tra il numero di fotoni di fluorescenza emessi e il numero di fotoni assorbiti dal fascio eccitatore.

Per pompare gli atomi dal livello fondamentale doveva essere usato un fascio di luce verde (come si vede nell'immagine). Egli usò una lampada flash impulsata allo xenon avvolta a elica attorno ad un cilindro di rubino rosa del diametro di 1 cm e della lunghezza di 2 cm, e pose il tutto all'interno di un secondo cilindro argentato per permettere alla bacchetta di assorbire il più possibile la luce emessa dalla lampada. La cavità risonante, invece, la ottenne lucidando le basi della bacchetta e rendendole una parallela all'altra; il flash era attivato mediante condensatori dal voltaggio di circa 1000 Volt: nell'esperimento di Maiman l'energia scaricata dalla lampada era di poco inferiore al Joule e permise di vedere sullo schermo una macchia rossa del diametro di 1 cm e con una potenza di emissione di 10 kW.

Il funzionamento di questo laser è semplice da spiegare facendo riferimento alla figura 4: quando l'eccitazione data dalla lampada a flash è sufficientemente intensa, la popolazione dello stato  $^2E$  aumenta rispetto a quella dello stato fondamentale; in questa situazione, alcuni dei fotoni di fluorescenza inizialmente emessi spontaneamente, venendo riflessi più volte dalle pareti riflettenti, stimolano gli atomi dello stato eccitato causando così un'amplificazione della radiazione. A causa delle proprietà selettive della cavità risonante, solo quella che viaggia avanti e indietro lungo l'asse della bacchetta viene amplificata. La conseguente emissione stimolata innesca l'azione laser che avviene solitamente sulla linea  $R_1$ .

Il sistema funzionò nel maggio 1960 e il 24 giugno la rivista *Physical Review Letters* ricevette l'articolo di Maiman che però non pubblicò in quanto il direttore, che non aveva capito la portata dell'invenzione, non la ritenne meritevole di una pubblicazione immediata. Maiman, allora, si rivolse alla stampa e rese pubblico il suo laser con un'intervista al *New York Times* del 7 luglio 1960 e con una successiva pubblicazione sulla rivista inglese *Nature* il 6 agosto 1960.

Questo ritardo nella pubblicazione portò ad un equivoco: infatti, nell'agosto 1960, Townes e Schawlow riprodusero l'esperimento di Maiman costruendo, di fatto, il secondo laser a rubino della storia, e questa volta i risultati vennero pubblicati immediatamente cosicché, chi non aveva letto l'articolo di Maiman su *Nature*, pensò fossero stati loro i primi!

Il secondo laser a stato solido, se escludiamo la riproduzione fatta da Townes e Schawlow, fu ottenuto da Peter Sorokin assieme a Mirak Stevenson nel novembre 1960.

Sorokin e Stevenson erano due fisici dell'IBM a cui l'azienda chiese di costruire un laser dopo aver assistito l'anno prima ad una conferenza di Townes.

Inizialmente i due pensarono di eliminare gli specchi *Fabry-Pérot* e sostituirli con dei prismi a riflessione totale<sup>15</sup> in modo da diminuire al massimo le perdite nella cavità. Come mezzo attivo scelsero un cristallo di fluoruro di calcio perché era quello con il giusto indice di rifrazione per ottenere il fenomeno e lo drogarono con ioni di uranio e samario. La fondamentale differenza tra questo composto e il rubino drogato al cromo di Maiman è che nel fluoruro c'è un livello energetico in più rispetto al rubino per cui l'emissione stimolata avviene sfruttando quattro livelli di energia e non tre: ciò fa sì che sia più facile ottenere inversione di popolazione e, di conseguenza, la potenza di pompa era 10 volte inferiore a quella del rubino.

---

<sup>15</sup> **Riflessione totale:** fenomeno che si manifesta quando un raggio luminoso incontra la superficie di separazione tra due mezzi e viene completamente riflesso senza essere rifratto.

Alla fine, però, una volta letto l'articolo di Maiman, i due decisero di lasciare perdere il meccanismo a riflessione totale e "copiarono" il collega sagomando i cristalli a forma di cilindro argentandolo alle due estremità e ottennero il laser nel novembre 1960.

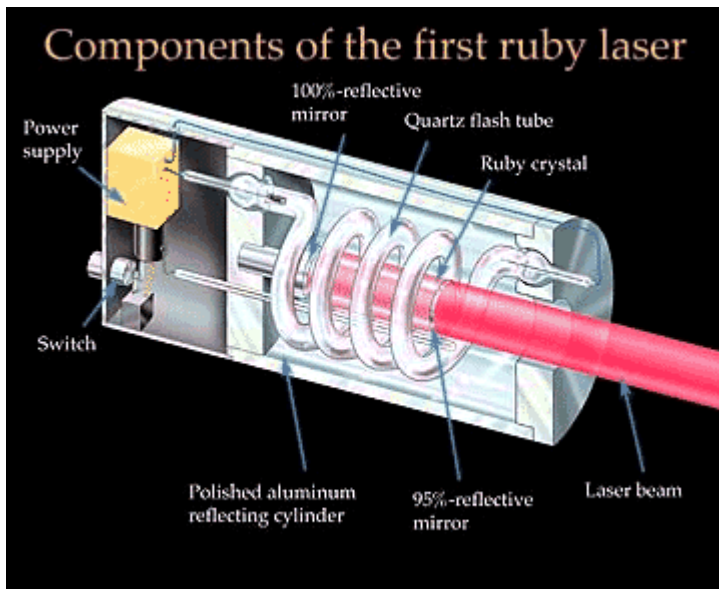


Figura 4<sup>16</sup>: schema del primo Laser della storia costruito da Theodore Maiman.

<sup>16</sup> <https://it.emcelettronica.com/i-laser-tra-scienza-e-fantascienza-introduzione>



### 4.1.1 Il primo Laser a gas

Sempre nel 1960 ci fu un altro importante traguardo nello sviluppo del laser: il primo laser a gas operante in regime continuo (gli altri erano impulsati).

Nel 1959 Ali Javan della Bell pensò di utilizzare come mezzo attivo un gas invece di un cristallo: leggendo una pubblicazione di John Sanders, un collega dell'università di Oxford che in quel periodo era ospite in azienda, capì che non si poteva ottenere effetto laser usando le lampade a flash. L'articolo suggeriva di usare il metodo delle *collisioni di seconda specie* che consisteva nel riempire il tubo di scarica con una miscela di due gas tali che gli atomi del primo, eccitati con una scarica elettrica, trasferiscano, mediante urti, la loro energia agli atomi del secondo portandoli in uno stato eccitato: perché ciò avvenisse era necessario che il livello del secondo gas fosse energeticamente uguale a quello di eccitazione del primo: dagli studi teorici, Javan capì che la miscela migliore era quella formata da elio e neon.

Nella seguente immagine si può vedere lo schema dei livelli energetici dell'elio e del neon impiegati nel metodo descritto sopra.

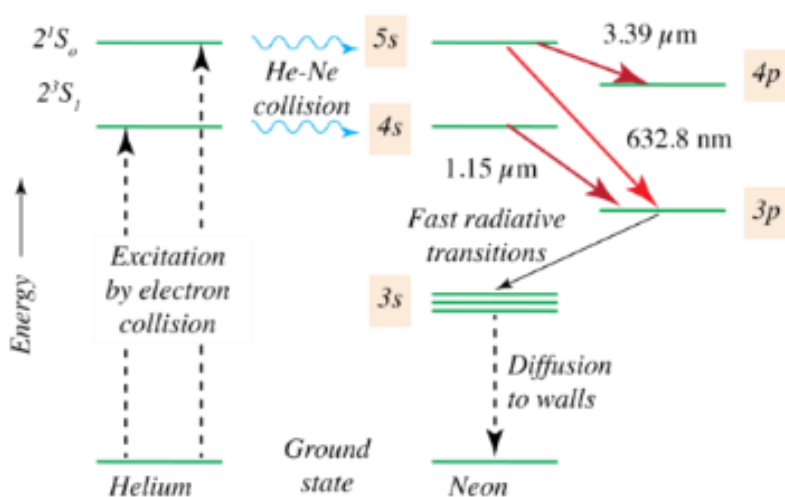


Figura 4: immagine tratta da <http://physicsopenlab.org/2017/08/17/laser-he-ne-2/>

Questi studi preliminari vennero pubblicati sul numero di giugno 1959 del *Physical Review Letters*.

Dopodiché Javan, facendosi aiutare dai colleghi William Bennet e Donald Herriott, cominciò a costruire il vero e proprio dispositivo. Il problema principale era capire come ottimizzare il tubo di scarica, in particolare come allineare gli specchi per avere riflettività massima: i tre usarono un sistema di viti a movimentazione micrometrica che permetteva un allineamento pressoché perfetto.

Il sistema finale consistette di un tubo di quarzo lungo 80 cm con un diametro di un centimetro e mezzo: alle due estremità era posta una camera metallica contenente uno specchio ad alta riflettività. Il sistema di allineamento permetteva di ottenere una riflettività del 98,9%. La scarica aveva una potenza di 50 W e la miscela era mantenuta ad una pressione di 1 mmHg.

Esso funzionò un nevosso pomeriggio del 12 dicembre 1960 emettendo un fascio alla lunghezza d'onda di 1153 Angstrom.

La pubblicazione dei risultati avvenne il 30 dicembre 1960 sulle *Physical Review Letters* e fu poi presentato al pubblico il 31 gennaio 1961 con il nome di *Laser He-Ne* (che sono i simboli chimici dei due gas componenti la miscela).

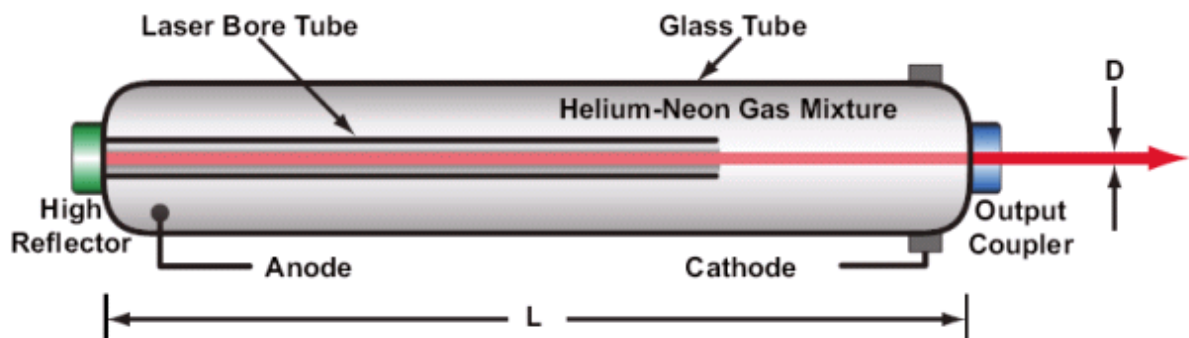


Figura 5<sup>17</sup>: setup sperimentale del primo laser a gas.

<sup>17</sup> <http://physicsopenlab.org/2017/08/17/laser-he-ne-2/>

## 4.2 I diodi Laser

Un'altra classe importante di laser è quella che sfrutta le proprietà dei semiconduttori, in particolare i livelli di energia degli elettroni del materiale anziché quelli delle impurezze come accade, ad esempio, nei laser a stato solido.

Nonostante i semiconduttori siano stati i primi candidati ad essere pensati come mezzo per avere emissione stimolata, lo sviluppo del Laser a semiconduttori fu tutt'altro che immediato in quanto era necessario approfondire meglio la tecnologia che doveva essere usata.

Di seguito ne riporto la storia in maniera sintetica.

Il tutto ha inizio il 22 aprile 1957 in Giappone quando Watanabe e Nishizawa fecero domanda per un brevetto chiamato "*Maser a semiconduttore*" che usava una radiazione nel vicino infrarosso sfruttando il meccanismo di ricombinazione dei portatori in un semiconduttore di tellurio drogato.

Contemporaneamente, all'Accademia delle Scienze russa, il gruppo di ricerca di Nikolai Basov, Vol e Popov ebbe l'idea di usare una scarica elettrica in un semiconduttore per avere emissione nel visibile e, nel giugno 1958, pubblicò tale proposta che venne poi discussa da Basov l'anno seguente in una conferenza organizzata da Townes negli Stati Uniti. È importante citare questo articolo in quanto servì da stimolo al primo programma scientifico sovietico per lo sviluppo dei Laser: il *Progetto Fotone*.

Un risultato importante, da un punto di vista teorico, fu raggiunto nel 1961 dai francesi Bernard e Duraffourg del Centre national d'études des telecommunications di Issy-les-Moulineaux: essi capirono la relazione che doveva essere soddisfatta per ottenere un effetto laser dai composti GaAs e GaSb (rispettivamente arseniuro e antimoniuro di gallio) sfruttando le transizioni tra la banda di conduzione e quella di valenza.

Dopo la pubblicazione del loro risultato, negli Stati Uniti ci furono quattro gruppi che cominciarono a darsi battaglia per arrivare per primi allo sviluppo del Laser a semiconduttori: i più accreditati erano gli scienziati dell'IBM, Landauer e Dumke, perché l'azienda aveva già esperienza con i semiconduttori usati in elettronica.

Nel marzo 1962, ad una conferenza dell'American Physical Society, Sumner Mayburg della General Electric espose i risultati dei suoi esperimenti sulla luminescenza dei diodi di GaAs raffreddati alla temperatura dell'azoto liquido suggerendo di usare un semiconduttore a giunzione p-n.

Quattro mesi dopo la conferenza, Robert Rediker, Ted Keyes e Robert Quist del Lincoln Laboratory del MIT, seguendo il consiglio del collega, costruirono dei diodi con un'efficienza di luminescenza dell'85%.

Contemporaneamente Robert Hall della General Electric stava studiando come ottenere una cavità *Fabry-Pérot* sfruttando una giunzione p-n. Il 22 settembre 1962 fu il primo a costruire un Laser a semiconduttore: esso consisteva in un cubo di lato 0,4 mm con al centro la giunzione posta ortogonalmente al piano; le facce del cubo erano state lucidate in modo da creare la cavità (come accadeva per i laser a stato solido). Il Laser era messo in funzione mediante impulsi di corrente della durata di 5-20 microsecondi e di intensità di circa 8500 Ampere per centimetro quadrato.

Il secondo Laser a semiconduttore lo si deve a Marshall Nathan dell'IBM (il 4 ottobre): a differenza di quello del collega, questo non usava la cavità risonante ma solo la giunzione e ciò implicava una

maggior soglia di attivazione che era stimata nell'ordine di 10000-100000 Ampere per centimetro quadrato.

Il 23 ottobre fu la volta del laser a semiconduttore del gruppo del MIT.

Tutti e tre questi laser operavano nell'infrarosso, mentre il primo ad emettere nel visibile fu quello di Holonyak e Bevacqua che usarono una giunzione al fosforo di gallio al posto dell'arseniuro.

Poco dopo, anche i russi Bagaev, Basov, Vul, Kopylovskii e Popov raggiunsero l'obiettivo e sempre dalla Russia, nel 1963, venne l'idea grazie a Herbert Kroemer<sup>18</sup> (insignito, poi, del Premio Nobel nel 2000) di usare delle eterogiunzioni consistenti di uno strato di semiconduttore con una band gap piccola posto in mezzo ad altri due con un gap maggiore che venne poi sviluppato sei anni più tardi da Kressel e Nelson della RCA, mentre a Leningrado Zhores Alferov ne fece uno a eterostruttura doppia.

---

<sup>18</sup> H. Kroemer, "A proposal class of heterojunction injection lasers", *Proc. IEEE*, **51**(12), 1782-1783 (1963)

## 4.3 Applicazioni alla fisica di base

In questo breve paragrafo voglio discutere due delle innumerevoli applicazioni del laser alla fisica di base: il *laser cooling* e la rilevazione delle onde gravitazionali mediante tecniche di interferometria laser.

Ho scelto proprio queste perché riguardano avvenimenti accaduti in anni recenti e segnano le attuali frontiere delle applicazioni del laser allo sviluppo delle ricerche in fisica fondamentale.

### 1. RAFFREDDAMENTO LASER

Con il termine inglese *laser cooling* ci si riferisce ad un insieme di tecniche sperimentali, sviluppate prevalentemente durante gli anni novanta, che permettono, mediante l'utilizzo di fasci laser, di raffreddare atomi a temperature prossime allo zero assoluto. Attualmente la temperatura minima raggiunta in un campione di atomi ultra freddi è di 50 pK.

A simili temperature la materia assume comportamenti prettamente quantistici, perciò a seconda della statistica quantistica degli atomi utilizzati, è possibile creare sia un condensato di Bose-Einstein<sup>19</sup> che un gas di Fermi degenere<sup>20</sup>.

Nel concreto esso si basa sul seguente meccanismo: il fascio laser viene utilizzato per perturbare il sistema inducendo le particelle a risuonare su stati energetici progressivamente inferiori, cedendo la loro energia cinetica in forma di emissione spontanea. Questo è importante in quanto, se considerassimo l'emissione stimolata, non si avrebbe variazione nella velocità (e dunque nell'energia) dell'atomo, perché il fotone emesso è identico al fotone assorbito. Si può immaginare che un atomo assorba un fotone e ne emetta subito un secondo di energia pari all'energia del primo fotone più l'energia cinetica perduta dall'atomo. Associando il laser ad un campo magnetico in grado di trattenere gli atomi, si realizza la cosiddetta *trappola magneto-ottica*.

Nel 1997, William Daniel Phillips, assieme ai colleghi Steven Chu e Claude Cohen-Tannoudji, vinsero il premio Nobel per la fisica per «*lo sviluppo di metodi per raffreddare e catturare gli atomi tramite laser*».

### 2. ONDE GRAVITAZIONALI

La rivelazione delle prime onde gravitazionali è avvenuta grazie a delle sofisticate tecniche di interferometria ottica applicate agli esperimenti LIGO e VIRGO.

LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) è un osservatorio statunitense ideato per il rilevamento delle onde gravitazionali. Fondato nel 1984 da Kip Thorne e Rainer Weiss, è un progetto congiunto tra scienziati del California Institute of Technology (Caltech) e del Massachusetts Institute of Technology (MIT), sponsorizzato dalla National Science Foundation (NSF). La sua costruzione iniziò nel 2002 e, all'epoca, era il più grande e più ambizioso progetto mai finanziato dal NSF.

---

<sup>19</sup> Il **condensato di Bose-Einstein** è uno stato della materia che si ottiene quando si porta un insieme di bosoni a temperature estremamente vicine allo zero assoluto. In queste condizioni di grande raffreddamento una frazione non trascurabile delle particelle si porta nello stato quantistico di più bassa energia e gli effetti quantistici si manifestano su scala macroscopica. Questo stato della materia fu predetto per la prima volta nel 1925 da Einstein e Bose.

<sup>20</sup> In meccanica statistica, un **gas di Fermi degenere** è un gas di fermioni allo zero assoluto.

LIGO gestisce contemporaneamente due osservatori di onde gravitazionali:

1. L'osservatorio Livingston ospita un *interferometro di Michelson* che consiste in un gigantesco tunnel vuoto a forma di L, lungo 4 km per lato, alle cui estremità si trovano degli specchi sospesi. Il raggio laser nell'interferometro può rilevare le piccolissime deformazioni dello spazio-tempo causate dalle onde gravitazionali;
2. L'osservatorio Hanford ospita un interferometro laser identico a quello dell'osservatorio Livingston. Inoltre ne esiste uno di dimensioni minori, ma non meno complicato, alloggiato in parallelo. Il secondo rilevatore è lungo la metà del primo (2 km) e di conseguenza anche la sua sensibilità è dimezzata.

VIRGO, invece, si trova in Italia e più precisamente nelle campagne di Cascina (Pisa) ed è un interferometro di tipo *Michelson-Morely* formato da 2 bracci lunghi 3 km e disposti a L. Il fascio di una sorgente laser viene diviso in due da un beam-splitter e la luce viene inviata lungo ognuno dei due bracci, riflessa indietro da uno specchio sospeso per ricombinarsi poi al vertice dove viene misurata da un fotodiode. Quando un'onda gravitazionale passa attraverso l'interferometro, la perturbazione dello spazio-tempo si manifesta come un cambiamento della lunghezza relativa dei due bracci misurabile al fotodiode. Per le onde gravitazionali di origine cosmica attese per Virgo la variazione della lunghezza dei bracci (lunghi 3 km) è molto piccola, dell'ordine di  $10^{-18}$  m.

Per ridurre le diverse sorgenti di rumore che maschererebbero il tenue segnale indotto dal passaggio di un'onda gravitazionale si impiegano cavità ottiche risonanti lungo i bracci per aumentarne la lunghezza effettiva: a tal fine nei pressi del beam-splitter in ciascuno dei due bracci viene sospeso uno specchio semiriflettente che costituisce una cavità ottica a interferometro di *Fabry-Pérot* (sistema ampiamente discusso nei capitoli precedenti) con lo specchio posto alla fine del braccio. La sospensione dei componenti ottici principali è fondamentale per ridurre il rumore di origine meccanica e sismica.

L'11 febbraio 2016, la *LIGO Scientific Collaboration* e la *Virgo Collaboration* pubblicarono un articolo sulla prima osservazione diretta di onde gravitazionali, costituita da un segnale distinto ricevuto alle 09.51 del 14 settembre 2015 di due buchi neri di circa trenta masse solari che si fondevano tra loro a circa 1,3 miliardi di anni luce dalla terra.

Il 15 giugno 2016 è stato annunciato il secondo rilevamento di un'onda gravitazionale, anch'essa provocata dalla fusione di due buchi neri, rilevata il 26 dicembre 2015. La massa dei due buchi neri distanti 1,4 miliardi di anni luce coinvolti nell'evento è stimata tra le 14 e le 8 masse solari, molto inferiore a quella del primo evento rilevato, infatti l'evento è stato evidenziato solo dall'elaborazione dei dati degli osservatori, in collaborazione con VIRGO. Il 4 gennaio 2017 alle ore 10.11 è stato rilevato il terzo segnale, anch'esso prodotto dalla fusione di due buchi neri, distanti 3 miliardi di anni luce, aventi massa di 31 e 19 masse solari.

Il progetto LIGO è valso a Thorne, Weiss e a Barry Barish il Premio Nobel per la Fisica nel 2017.

## 5. CONCLUSIONI

Gli storici della scienza sono d'accordo nel dire che sia errato cercare di legare una scoperta scientifica a un singolo individuo o ad un preciso momento, infatti l'invenzione è un processo che avviene grazie allo sforzo di molti individui in un certo arco temporale: da questo breve lavoro di tesi emerge come l'invenzione dei sistemi laser si accordi perfettamente con questa idea.

Per questioni di lunghezza dell'elaborato, mi sono fermata all'invenzione dei diodi laser, quindi circa a metà degli anni Sessanta del secolo scorso. In realtà, negli anni che seguirono molto è stato fatto e migliorato, ed inoltre si è cominciato a pensare alle ricadute pratiche di questa tecnologia: per fare un esempio il 14 febbraio 1968, il dottor Francis A. L'Esperance jr effettuò il primo intervento di chirurgia oftalmica usando un laser ad argon.

Oltre che in campo medico, il laser ha trovato numerosissime applicazioni nell'industria con le lavorazioni meccaniche di precisione, in elettronica con i lettori ottici per CD e codici a barre (1974); e ancora nel settore delle telecomunicazioni con l'uso delle fibre ottiche (1980).

Per quanto riguarda invece la ricerca pura, il laser a coloranti organici, grazie alla possibilità di variare la lunghezza d'onda di emissione, ha permesso di raggiungere nuovi livelli di sensibilità e risoluzione in campo spettroscopico. Quello della spettroscopia è forse l'ambito della fisica che più ha beneficiato di questa nuova invenzione, tant'è che Schawlow e Townes, ampiamente menzionati nei capitoli precedenti, vinsero il Nobel nel 1981 proprio per lo sviluppo della spettroscopia laser. Un'altra applicazione degna di nota è la misura della distanza Terra-Luna (misura di *laser ranging*) sfruttando il fenomeno della riflessione sugli specchi posizionati sul suolo lunare da Niel Armstrong nel 1969 durante l'allunaggio.

## **BIBLIOGRAFIA**

- A. Einstein, "On the quantum theory of radiation", *Physikalische Zeitschrift* **18**, 121-128 (1917)
- A. Schawlow and C. H. Townes, "Infrared and optical masers", *Phys. Rev.*, **112**, 1940-1949 (1958)
- Ali Javan, W. R. Bennet Jr and D. R. Herriott, "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture", *Phys. Rev. Lett.*, **6**(3), 106-110 (1961)
- ARTHUR BEISER, *Concepts of modern physics*, McGraw Hill, USA, 2002 (sesta edizione)
- J. Hecht, "Short history of Laser development", *Opt. Eng.* **49**(9), 1-23 (2010)
- JEFF HECHT, "Beam: the Race to Make the Laser", pp 183-194, Oxford University Press, New York, 2010
- J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes, "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH<sub>3</sub>", *Phys. Rev.*, **95**, 282-284 (1954)
- KARL F. RENK, *Basics of Laser Physics: for students of science and engineering*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- MARIO BERTOLOTTI, *Masers and Lasers: an historical approach*, Adam Hilger, Bristol, 1983
- MARIO BERTOLOTTI, *Storia del Laser*, Bollati Boringhieri, Torino, 1999
- N. Holonyak and S. F. Bevacqua, "Coherent (visible) light emission from Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) junctions", *Appl. Phys. Lett.*, **1**(4), 82-83 (1962)
- P. A. M. Dirac, "The quantum theory of the emission and absorption of radiation", *Proc. Roy. Soc.*, **A 114**, 243-265 (1927)
- S. G. Lukishova, "Valentin A. Fabrikant: negative absorption, his 1951 patent application for amplification of electromagnetic radiation and his experiments", *Journal of the European Optical Society – Rapid Publication* **5**, 10045S (2010)
- T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWorther and H. J. Zeiger, "Semiconductor maser of GaAs", *Appl. Phys. Lett.*, **1**(4), 91-92 (1962)
- W. D. Phillips, "Laser cooling and trapping of neutral atoms", *Review of Modern Physics*, Vol 70, No 3, July 1998



## RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto vorrei ringraziare i miei nonni per il supporto economico e materiale fornitomi in questi ventiquattro anni.

In secondo luogo, ringrazio il mio relatore, il professor Peruzzi, per la disponibilità e gentilezza con le quali ha seguito il mio lavoro.

Grazie anche ad Alexander e a Daniele: avete reso più sopportabili i miei anni di liceo.

Un grazie speciale va a Paolo, il *Santo Padre*, per avermi supportato (e sopportato) in tutti questi anni; grazie per esserci sempre stato e per la fiducia datami: senza il tuo aiuto ed il tuo affetto non ce l'avrei mai fatta!

Vorrei poi esprimere la mia gratitudine e riconoscenza a tutte le persone che in questi cinque anni padovani mi hanno permesso di crescere dal punto di vista personale ed umano, in particolare:

Dan Reynolds, le cui parole mi hanno accompagnato e sostenuta nel momento più buio: *"It's not what you painted in my head, there's so much there instead of all the colours that I saw"*.

Lu ragazzo del *Collettivo Kosmos* con lu qualu sono stata me stessa fin dal primo giorno: vi ringrazio per avermi dato l'opportunità di conoscere, informarmi e, soprattutto, poter essere un'attivista nel mondo LGBTQIA+.

I colleghi *Volters*, compagni di partito, per darmi l'opportunità di portare un cambiamento, seppur minimo, in questo mondo; un grazie al team padovano: abbiamo ancora tante sfide davanti! Un grazie particolare va anche ad Alessandro, la prima persona con cui ho fatto coming out, e a Riccardo, perché mi capisce.

Dedico un pensiero anche ai miei compagni di corso Camilla, Stefano e Francesco per tutte le fatiche, le delusioni e, alla fine, i traguardi raggiunti assieme.

Infine, ultimo ma non meno importante, grazie a te, Caterina, per avermi dato un'identità: tu mi hai fatto capire chi sono e chi voglio essere, mi hai mostrato cosa posso diventare al di là della mia condizione.

Negli ultimi tre anni hai illuminato il mio cammino da sempre avvolto nell'oscurità e nella tristezza, mi hai fatto amare la vita e le hai dato un senso.

Vorrei che sapessi che se adesso mi guardo allo specchio e non vedo più il nulla, lo devo a te: per il miracolo che hai fatto, a te va il mio più grande GRAZIE!!!