



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

LASER

Ξετυλίγοντας το Νήμα της Ανακάλυψης και των Εφαρμογών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Ζαχαρία-Σιδέρη Χριστοδουλόπουλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Α. Α. ΣΕΡΑΦΕΤΙΝΙΔΗΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΪΔΗΣ, Μ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΥ, Α.Α.ΣΕΡΑΦΕΤΙΝΙΔΗΣ

Αθήνα, Ιούλιος, 2015

ευχαριστίες

Σε κάθε δημιουργική προσπάθεια συμβάλλουν πολλοί άνθρωποι και η επίδραση που ασκούν είναι πολυεπίπεδη. Αποτυπώνεται στις επιλογές μας, στον τρόπο που βλέπουμε τα πράγματα, στις πράξεις ακόμα και στο νόημα των λέξεων. Το κείμενο τελικά αντανακλά αυτή την σχέση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω καταρχήν την Αναστασία Σταντσίδου που με συντροφεύει όλα αυτά τα χρόνια και η βοήθεια της είναι πολύτιμη, σε επιστημονικό αλλά και προσωπικό επίπεδο.

Την οικογένεια μου, την Μαρία και την Τασούλα που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν και τον Λάκη που δεν σταμάτησε στιγμή να με επηρεάζει.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή που επέβλεπε την διπλωματική μου, τον Αλέκο Σεραφετινίδη, για την μεγάλη συμβολή του στην γνωριμία μου με τα laser, και για την κατανόηση του. Παράλληλα τους καθηγητές που ήταν μέλη της επιτροπής, την Μυρσίνη Μακροπούλου και τον Κώστα Παρασκευαΐδη για την βοήθεια και την μεγάλη υπομονή τους.

Ιδιαίτερη βοήθεια αποτέλεσαν κείμενα και εργασίες πολλών ανθρώπων από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Προσπάθησα να τους συμπεριλάβω στην βιβλιογραφία και τις αναφορές αν και σίγουρα υπάρχουν και περιπτώσεις που μπορεί να έχω ξεχάσει. Ελπίζω αυτή η εργασία να βοηθήσει άλλους και να χρησιμοποιηθεί με αντίστοιχο τρόπο.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ σε όλους αυτούς και αυτές που τόσα χρόνια ήμασταν μαζί στην-(στα) ΕΑΑΚ, στα αμφιθέατρα της σχολής αλλά και στους δρόμους, που οι συζητήσεις, οι δράσεις και οι κοινοί μας προβληματισμοί είχαν για μένα καταλυτικό ρόλο και με επηρέασαν όλα αυτά τα χρόνια. Είναι οι σύντροφοι μου και τους ευχαριστώ.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. Η ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΦΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ LASER

<u>2.1 Το μέλαν σώμα και ο νόμος της ακτινοβολίας</u>	<u>9</u>
<u>2.2 Ο Einstein και η εξαναγκασμένη εκπομπή</u>	<u>14</u>
<u>2.3 Τα Μικροκύματα</u>	<u>19</u>
<u>2.4 Μικροκύματα και Ραντάρ</u>	<u>23</u>
<u>2.5 Κβαντική θεωρία του ατόμου και laser</u>	<u>28</u>
<u>2.6 Μαγνητικός Συντονισμός</u>	<u>37</u>
<u>3.1 Το maser</u>	<u>44</u>
<u>3.2 Η εξέλιξη του maser</u>	<u>50</u>
<u>3.3 Τα οπτικά maser</u>	<u>56</u>
<u>3.4 Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation</u>	<u>60</u>
<u>3.5 Τα laser αερίων</u>	<u>66</u>
<u>3.6 Η εξέλιξη των laser</u>	<u>71</u>
<u>3.7 Laser ημιαγωγών</u>	<u>76</u>
<u>3.8 Το laser στην Φύση</u>	<u>82</u>
<u>3.9 Η κοινωνική αποδοχή των laser</u>	<u>84</u>
<u>4.1 Τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας</u>	<u>86</u>
<u>4.2 Εκπομπή και απορρόφηση ακτινοβολίας</u>	<u>87</u>
<u>4.3 Άντληση και αντιστροφή πληθυσμών</u>	<u>88</u>
<u>4.4 Οπτικά αντηχεία</u>	<u>89</u>
<u>4.5 Ιδιότητες ακτινοβολίας laser</u>	<u>92</u>
<u>4.6 Είδη laser</u>	<u>95</u>
<u>4.7 Κατηγοριοποίηση των laser</u>	<u>117</u>
<u>5.1 Στρατιωτική έρευνα και εφαρμογές</u>	<u>127</u>
<u>5.2 Οπτικές ίνες και τηλεπικοινωνίες</u>	<u>131</u>
<u>5.3 Ιατρικές Εφαρμογές</u>	<u>134</u>
<u>5.4 Εφαρμογές στην Μηχανική και τις Κατασκευές</u>	<u>137</u>
<u>5.5 Εφαρμογές στην ατμόσφαιρα και την αστροφυσική</u>	<u>139</u>
<u>5.6 Η χρήση laser σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς</u>	<u>143</u>
<u>5.7 Χρονολόγιο</u>	<u>153</u>

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή

Η εφεύρεση του laser αποτέλεσε αναμφίβολα τομή στη φυσική αλλά και στην τεχνολογία. Η χρησιμοποίησή του στη βιομηχανία, στην ιατρική, στις τηλεπικοινωνίες αλλά και σε πλήθος επιστημονικών και τεχνολογικών εφαρμογών καθώς και οι δυνατότητες για περαιτέρω ανάπτυξη με την συμβολή του σε πεδία που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο – όπως των κβαντικών υπολογιστών, της ψυχρής σύντηξης - καθιστούν το laser ένα από τα σημαντικά επιτεύγματα της φυσικής του 20^{ου} αιώνα. Η εφεύρεση του αποτέλεσε μια σύνθετη - και επίπονη επιστημονικά - διαδικασία, οι απαρχές της οποίας μπορούν να αναζητηθούν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Δεν είναι τυχαίο ότι εκείνη τη χρονική περίοδο κάνει την εμφάνισή του και στις σελίδες της λογοτεχνίας¹ στο μυθιστόρημα του H.G. Wells (1898) «Ο Πόλεμος των Κόσμων»² με τη μορφή μιας θανάσιμης ακτίνας.

Στα περισσότερα επιστημονικά εγχειρίδια οι αναφορές περιορίζονται στους Townes, Schawlow και στους Maiman, Gould κυρίως με άξονα την σύνδεση του laser με το maser, ενώ η αφετηρία τοποθετείται στην εργασία του Einstein όπου αναφέρεται για πρώτη φορά το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής και της αντιστροφής πληθυσμών. Η επίσημη αφήγηση θέλει ουσιαστικά το laser να εμφανίζεται μετά από 5 δεκαετίες περίπου από την εργασία του Einstein, σχεδόν από το πουθενά. Στην διεθνή βιβλιογραφία³ όπως και στην ελληνική οι αναφορές είναι αποσπασματικές, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να αναδειχθεί το νήμα που συνδέει την εφεύρεση του laser, καθώς και η ιστορική πορεία με συγκεκριμένους σταθμούς και φάσεις. Μια πορεία που διακρίνεται από τομές στη θεωρία και στην αντίληψη της επιστημονικής κοινότητας, από άλλες εφευρέσεις αλλά και από ιστορικά γεγονότα παγκόσμιας εμβέλειας, που δεν θα μπορούσαν να αφήσουν ανεπηρέαστη την επιστήμη. Η μελέτη λοιπόν της ιστορίας δεν

¹ Το laser εμφανίζεται – πολύ πριν την ανακάλυψή του - στις σελίδες των κόμικς. Το 1950 στον «Φλας Γκόρντον» τα όπλα laser είναι συνήθης εξοπλισμός των ηρώων.

² Έμεινε στην ιστορία η ραδιοφωνική μετάδοση αποσπασμάτων του βιβλίου από το γνωστό αμερικάνο ηθοποιό Όρσον Ουέλς στις 30 Οκτωβρίου 1938 που δημιούργησε πανικό στην Αμερική αφού θεωρήθηκε από το κοινό ως πραγματική επέμβαση εξωγήινων

³ Εξάιρεση αποτελεί το «The History of the laser» του M. Bertolotti, ένα πολύ σημαντικό έργο, που παρέχει μια συνολική εικόνα και τεράστιο εύρος πληροφοριών.

αποτελεί απλά μια ιστορική αναδρομή αλλά αναδεικνύει συσχετίσεις και αλληλεπιδράσεις που εξηγούν τη δύσκολη πορεία της επιστήμης.

Παράλληλα έχει ιδιαίτερη σημασία η μελέτη της εξέλιξης των συστημάτων laser καθώς και η διεύρυνση της χρήσης τους σε διάφορους τομείς έρευνας και εφαρμογών. Οι δυνατότητες που ανοίγονται πραγματικά είναι ιλιγγιώδεις και καθιστούν τα laser αιχμή στην περαιτέρω επιστημονική ανάπτυξη.

Η επιστήμη είναι όμως και ιστορικά προσδιορισμένη. Η εφεύρεση των laser στα τέλη της δεκαετίας του 1950 πραγματοποιείται σε μια εποχή τεράστιων αλλαγών για την κοινωνία αλλά και για την ίδια την επιστήμη. Η Πυρηνική εποχή που έχει ξεκινήσει χαρακτηρίζεται από την κούρσα των εξοπλισμών, την μεγάλη αβεβαιότητα, την μετατροπή ολόκληρου του πλανήτη σε πεδίο δοκιμών, το φόβο για την εξάλειψη του ανθρώπινου είδους από έναν ενδεχόμενο πυρηνικό πόλεμο. Παράλληλα όμως στη νέα εποχή αλλάζει με δομικό τρόπο η Επιστήμη, διαφοροποιείται ο τρόπος συγκρότησης και τα χαρακτηριστικά της επιστημονικής κοινότητας. Η ελεύθερη διακίνηση των επιστημονικών ιδεών η οποία κυριαρχούσε από την εποχή της Royal Society δίνει σταδιακά την θέση της στις πατέντες και τις μυστικές απόρρητες έρευνες.

Τα επιστημονικά εργαστήρια μετατρέπονται σε τεράστιους οργανισμούς στους οποίους απασχολούνται εκατοντάδες ή και χιλιάδες επιστήμονες (εργαστήρια Επιταχυντών που θα καταλήξουν στις μέρες μας στην χαρακτηριστική περίπτωση του CERN), στα οποία το μέγεθος των πειραματικών διατάξεων αλλά και οι προϋπολογισμοί των πειραμάτων αυξάνονται με ιλιγγιώδεις ρυθμούς. Η συνεργασία ανθρώπων από διαφορετικούς κλάδους είναι αναγκαία γιατί απαιτείται η διαθεματική προσέγγιση από μια πληθώρα επιστημονικών αντικειμένων. Η δυσκολία επικοινωνίας επιστημόνων που «μιλάνε διαφορετικές γλώσσες»⁴ χαρακτηρίζει τα νέα εγχειρήματα. Παράλληλα επανεμφανίζονται και εντείνονται ερωτήματα σχετικά με το ρόλο του επιστήμονα, την ύπαρξη επιστημονικής «ηθικής», την

⁴Για να προσεγγίσει την νέα πραγματικότητα ο P. Galison χρησιμοποιεί όρους από την Ανθρωπολογία μιλώντας για ζώνες συναλλαγής στις οποίες «διαφορετικές φυλές», θεωρητικοί επιστήμονες, τεχνικοί, μηχανικοί προσπαθούν να έρθουν σε επικοινωνία και συναντιούνται στο πεδίο του πειράματος.

δυνατότητα ελέγχου από την κοινωνία των επιστημονικών ανακαλύψεων, τον ταξικό επικαθορισμό της γνώσης και της έρευνας.

2. Η πορεία προς την εφεύρεση των laser

2.1 Το μέλαν σώμα και ο νόμος της ακτινοβολίας

Η μελέτη της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είχε ξεκινήσει το 1859, όταν ο Robert Kirchhoff, ο προκάτοχος της έδρας του Planck στο Βερολίνο σχολίαζε ότι αυτή η ακτινοβολία ήταν θεμελιώδους φύσης. Για τον Kirchhoff, μέλαν σώμα είναι ένα σώμα με την ιδιότητα να απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτό (μαύρο «σφουγγάρι» ακτινοβολίας) και όταν την εκπέμπει η ακτινοβολία να εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του και όχι από το υλικό που είναι κατασκευασμένο ή από άλλους παράγοντες. Ο Planck ξεκινά τις σπουδές του στη Φυσική στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου το 1874 και το 1877 στο Βερολίνο έρχεται σε επαφή με τους Helmholtz και Kirchhoff. Μελετά τα έργα του Clausius και επιλέγει τη θεωρία της θερμότητας ως πεδίο για ειδίκευση. Τον Φεβρουάριο 1879 ο Planck υπέβαλε τη διδακτορική του διατριβή, που είχε τίτλο *Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* («Επί του δεύτερου θεμελιώδους θεωρήματος της μηχανικής θεωρίας της θερμότητας»). Τον Ιούνιο του 1880 παρουσίασε τη διατριβή για την υφηγεσία με τίτλο «Καταστάσεις ισορροπίας ισοτροπικών σωμάτων σε διάφορες θερμοκρασίες» (*Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen*).

Ο Αυστριακός J. Stefan πρώτος διατύπωσε την άποψη ότι η ενέργεια που μεταδίδεται από την ακτινοβολία μέλανος σώματος εξαρτάται από την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας. Ο Boltzmann με την βοήθεια του 2^{ου} νόμου της Θερμοδυναμικής έδωσε μια θεωρητική απόδειξη σύμφωνα με την οποία η ολική πυκνότητα ενέργειας u της ακτινοβολίας μέλανος σώματος προκύπτει από τη σχέση $u=aT^4$ (νόμος Stefan-Boltzmann) όπου a μια σταθερά. Ο νόμος των Stefan-Boltzmann δεν παρείχε οποιαδήποτε εξήγηση για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας, ένα «γρίφο» με τον οποίο ασχολήθηκε το 1894 ο Wien διατυπώνοντας έναν εμπειρικό νόμο που

ήταν σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις που διεξάγονταν στο Physikalisch-Technische Reichsanstalt στο Βερολίνο κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κατανομή u θα προκύπτει από την σχέση $u(\lambda, T) = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T)$ όπου η συνάρτηση $\varphi(\lambda T)$ εξαρτάται από το γινόμενο των δύο μεταβλητών. Ο νόμος μετατόπισης του Wien που ήταν καθαρά εμπειρικός - σύμφωνα με τον οποίο αύξηση της περιόδου T επιφέρει μετατόπιση σε μικρότερα μήκη κύματος των μεγίστων της γραφικής παράστασης της συνάρτησης $u(\lambda T)$ - συμπληρώθηκε το 1896 με την εκθετική μορφή για τη συνάρτηση $\varphi(\lambda T)$, όπου $\varphi(\lambda T) = e^{(-bc/\lambda T)}$ και b σταθερά. Παρουσίαζε σημαντική επιτυχία αρχικά σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα αλλά «υπέφερε» από ολοκληρωτική ανυπαρξία θεωρητικής κατοχύρωσης.

Ο Planck προσπάθησε να καλύψει αυτό το κενό, επιχειρώντας να θεμελιώσει μια ισχυρή θεωρητικά, απόδειξη αυτού του νόμου. Η ενασχόληση του με την Θερμοδυναμική ήταν καταλυτική για την αφετηρία του εγχειρήματος. Για τον Planck οι μη αντιστρεπτές διεργασίες μπορούν να εξηγηθούν με τη βοήθεια του 2^{ου} νόμου της Θερμοδυναμικής. Όμως ο 2^{ος} νόμος της Θερμοδυναμικής που θεωρούνταν για τον ίδιο το πιο στέρεο θεμέλιο της Φυσικής είχε απόλυτη και όχι πιθανοκρατική ισχύ όπως ίσχυε σύμφωνα με τον Boltzmann⁵. Προσπάθησε ανεπιτυχώς να εξηγήσει τη μη αντιστρεπτή φύση του φαινομένου της ακτινοβολίας μέλανος σώματος με την ηλεκτροδυναμική θεωρία του Maxwell, θεωρώντας ότι η εξήγηση εδράζεται στην έλλειψη συμμετρίας ως προς το χρόνο των εξισώσεων του Maxwell, επιχείρημα που καταρρίφτηκε το 1897 από τον Boltzmann ο οποίος απέδειξε ότι η ηλεκτροδυναμική δεν εξασφαλίζει “βέλος του χρόνου” περισσότερο από ότι η μηχανική. Ο Planck δημοσιεύει έξι εργασίες την περίοδο 1897-1900 στο Annalen der Physik και το 1899 ξεκινώντας από μια έκφραση της εντροπίας ενός συστήματος ανεξάρτητων ταλαντωτών - με αφετηρία την κινητική θεωρία

⁵Το 1872 και το 1877 ο Boltzmann παρέχει μια στατιστική ερμηνεία όπου η εντροπία ενός συστήματος είναι το συλλογικό αποτέλεσμα των μοριακών κινήσεων. Ο δεύτερος νόμος έχει μόνο στατιστική ισχύ. Η θεωρία του Boltzmann η οποία προϋπέθετε την ύπαρξη ατόμων και μορίων αμφισβητήθηκε από τους «οπαδούς» της ενέργειας (Wilhelm Ostwald κ.α) που ήθελαν να απαλλάξουν τη φυσική από τη χρήση εννοιών όπως τα άτομα και μόρια και να την θεμελιώσουν στην ενέργεια.

του Boltzmann διατυπώνει την «αρχή στοιχειωδών διαταραχών» η οποία δεν στηριζόταν ούτε στη μηχανική ούτε στην ηλεκτροδυναμική - ορίζει την εντροπία ενός ιδανικού ταλαντωτή (δίπολου) χωρίς να τον ταυτίζει με συγκεκριμένα άτομα ή μόρια και καταλήγει στο νόμο του Wien. Όμως την ίδια χρονιά πειράματα από τους Lummer και Pringsheim, στο PTR του Charlottenburg, έδειξαν ότι ο νόμος του Wien δεν δίνει σωστά αποτελέσματα στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος⁶ λ και το 1900 οι Rubens και Kurlbaum αποδεικνύουν ότι ο νόμος είναι «προσεγγιστικός». Η φασματική πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας $u(f,T)$ έπρεπε σύμφωνα με το νόμο των Wien- Planck για πολύ μικρές τιμές του όρου $f/T = c/\lambda T$ να τείνει στο μηδέν ανεξάρτητα από τις τιμές της T, ενώ τα πειράματα έδειχναν ότι η συνάρτηση έτεινε να μηδενιστεί πιο απότομα και με κλίση ανάλογη της T. Παράλληλα ο Rayleigh τον Ιούνιο του 1900 υπέδειξε με τη βοήθεια της κλασσικής μηχανικής ότι η ενεργειακή κατανομή των ταλαντωτών του μέλανος σώματος θα αυξάνει ανάλογα με το τετράγωνο της συχνότητας. Αυτό ερχόταν σε προφανή σύγκρουση με τα πειραματικά δεδομένα⁷. Πέντε χρόνια αργότερα οι Rayleigh και Jeans παρουσίασαν αυτό που είναι και σήμερα γνωστό ως τύπος των Rayleigh και Jeans και γράφεται συνήθως με τη μορφή $u(f,T) = (8\pi^2 f^2/c^3)kT$, όπου το c είναι η ταχύτητα του φωτός. Όμως η ενεργειακή πυκνότητα γίνεται άπειρη για μεγάλες τιμές της συχνότητας, οπότε στην περιοχή του υπεριώδους καταλήγουμε σε άτοπο. Το φαινόμενο αυτό έγινε γνωστό και ως η “υπεριώδης καταστροφή”, μια ορολογία που έθεσε πρώτος ο Paul Ehrenfest το 1911 και αποτέλεσε ζήτημα προβληματισμού σε μια κατοπινή φάση της κβαντικής θεωρίας.

Ο τύπος των Rayleigh-Jeans παρά την «επίσημη αφήγηση» σε πλήθος επιστημονικών εγχειριδίων και συγγραμμάτων δεν είχε τόσο κομβική

⁶ Τα αποτελέσματα του πειράματος για μήκη κύματος από 0,7μ μέχρι 6μ επιβεβαίωναν τις θεωρητικές τιμές που προέκυπταν από το νόμο του Wien αλλά για μεγαλύτερες τιμές 8,4μ και υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας υπήρχαν σημαντικές διαφορές που δεν μπορούσαν να αποδοθούν σε συστηματικά λάθη.

⁷ Ο Rayleigh στήριξε την επιχειρηματολογία του στο λεγόμενο θεώρημα ισοκατανομής από το οποίο προκύπτει ότι η μέση ενέργεια των ταλαντωτών που αποτελούν ένα μέλαν σώμα θα είναι πολλαπλάσιο του γινομένου από τη σχέση kT όπου το k είναι η σταθερά του Boltzmann.

σημασία στην αρχική φάση της κβαντικής θεωρίας σύμφωνα με τον Kuhn⁸. Στις 18 Σεπτεμβρίου 1900 η εργασία των Lummer και Pringsheim στο Φυσικό Τμήμα του Naturforscherversammlung καταγράφει σημαντική ασυμφωνία σε ποσοστό σχεδόν 50% του νόμου των Wien-Planck με τις πειραματικές μετρήσεις για μήκη κύματος 12μ - 18μ.

Ο Planck επανέρχεται με μια νέα έκφραση του νόμου για τη φασματική κατανομή που παρουσιάζεται στις 19 Οκτωβρίου 1900 σε μια συνάντηση της Ακαδημίας Επιστημών του Βερολίνου και προϋπέθετε μια νέα έκφραση για την εντροπία ενός απλού ταλαντωτή. Είναι πολύ πιθανό σημαντική επίδραση να είχε η εργασία του Max Thiessen που πρότεινε μια εναλλακτική προσέγγιση στον νόμο του Wien και ανακοινώθηκε μια βδομάδα⁹ πριν την επίσημη παρουσίαση της εργασίας του Planck. Στην εργασία του Thiessen υπήρχαν προβλήματα που δεν ικανοποιούσαν τα κριτήρια που έθετε ο Planck σε σχέση με τη θερμοδυναμική, ωστόσο η μελέτη της και η προσπάθεια επίλυσης αυτών των προβλημάτων μπορεί να ήταν σημαντική για την εξαγωγή της σχέσης για την εντροπία του ταλαντωτή. Η φασματική πυκνότητα ενέργειας μεταβάλλεται ως η τρίτη δύναμη της συχνότητας f διαιρεμένης με το εκθετικό $[e^{(bf/T)} - 1]$ όπου b η σταθερά του νόμου του Wien. Αυτή η πρώτη εκδοχή του περίφημου νόμου ακτινοβολίας του Planck συμφωνούσε επίσης τέλεια με το πειραματικό φάσμα στην υπέρυθη περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Στην προσπάθεια του να εξηγήσει θεωρητικά την προέλευση της νέας εκδοχής του νόμου για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος επηρεάστηκε εν μέρει από την αντίληψη του Boltzmann για την εντροπία ως έκφραση του μοριακού χάους. Όμως ο Planck διατηρεί την άποψη του ότι ο νόμος της εντροπίας ήταν απόλυτος και όχι πιθανοκρατικός, οπότε εκφράζει την θεωρία του Boltzmann με το δικό του μη πιθανοκρατικό τρόπο. Ήταν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου που διατύπωσε για πρώτη φορά ότι έγινε γνωστό έκτοτε ως «η εξίσωση Boltzmann» $S = k \log W$ η οποία

⁸Ο Planck αναφέρει χαρακτηριστικά δεν δέχτηκε το θεώρημα της ισοκατανομής ως θεμελιώδες και ως εκ τούτου τον αγνόησε.

⁹Ο Max Thiessen ήταν καθηγητής στο PTR στο Charlottenburg και μέλος της Ένωσης Γερμανών Φυσικών γεγονός που οδήγησε τον Kuhn να υποστηρίξει ότι ο Planck είχε συναντηθεί μαζί του στο Βερολίνο και είχε πρόσβαση στην εργασία του λίγο πριν ανακοινώσει τη δικιά του.

συσχετίζει την εντροπία S με τη μοριακή αταξία. Για να προσδιορίσει την ποσότητα W εισαγάγει τα λεγόμενα στοιχεία ενέργειας - που αργότερα μετονομάζονται σε κβάντα - ενώ παράλληλα υιοθετεί και την έννοια του ταλαντωτή όπου αποτελεί μια ασαφή στοιχειώδη οντότητα που ταλαντώνεται σε μια συχνότητα που εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η ολική ενέργεια των ταλαντωτών του μέλανος σώματος, E ήταν διαιρεμένη σε πεπερασμένα μέρη-στοιχεία ενέργειας ϵ (energy elements)¹⁰. Αυτή είναι και η νέα εξαγωγή του νόμου της ακτινοβολίας που παρουσιάστηκε από τον Planck στις 14 Δεκεμβρίου 1900.

¹⁰ «Θεωρώ την $E...$ ως αποτελούμενη από ένα πλήρως καθορισμένο πλήθος πεπερασμένων και ίσων μερών, και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιώ τη φυσική σταθερά $h = 6,55 \times 10^{-27}$ (erg sec). Αυτή η σταθερά όταν πολλαπλασιαστεί με την συνηθισμένη συχνότητα των συντονιστών δίνει το ενεργειακό στοιχείο, ϵ , σε ergs και διαιρώντας την ολική ενέργεια E με το ϵ παίρνουμε τον αριθμό P των ενεργειακών στοιχείων που κατανέμονται στους N συντονιστές (resonators)» (Darrigol 1992, 68).

2.2 Ο Einstein και η εξαναγκασμένη εκπομπή

Το 1915-1916, ο Einstein δημοσιεύει μια εργασία με τον τίτλο “Strahlungs-Emission und Absorption nach der Quanten theorie” στην οποία προσεγγίζει το πρόβλημα της εκπομπής - απορρόφησης σύμφωνα με την Κβαντική Θεωρία. Προσπαθεί να εξαγάγει τον νόμο της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, να αποδείξει με διαφορετικό τρόπο το νόμο της ακτινοβολίας του Planck. Το 1916 δημοσιεύει μια διαφορετική απλή απόδειξη του νόμου της ακτινοβολίας του Planck. Σ’ αυτήν την εργασία για πρώτη φορά αναφέρεται η έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής, ένα φαινόμενο κομβικής σημασίας για τη δημιουργία του laser.

Τα μόρια ενός αερίου μπορούν να καταλάβουν ένα συγκεκριμένο πλήθος καταστάσεων. Η πιθανότητα να βρίσκεται ένα μόριο σε μια καθορισμένη ενεργειακή κατάσταση εξάγεται με την εφαρμογή των νόμων της στατιστικής μηχανικής των Maxwell Boltzmann και Gibbs. Ο Einstein διατύπωσε τη θεωρία της ανταλλαγής ενέργειας με την ακτινοβολία όπου διαπίστωσε ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι:

➤ Αυθόρμητη εκπομπή. Ένα ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε ανώτερη ενεργειακή στάθμη και εκπέμποντας ένα φωτόνιο μεταπίπτει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Η ενέργεια του φωτονίου $E=hn$ ισούται με τη διαφορά της ενέργειας των ενεργειακών σταθμών. Ουσιαστικά πρόκειται για μια διαδικασία αποδιέγερσης.

➤ Απορρόφηση¹¹. Είναι η αντίστροφη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής. Το ηλεκτρόνιο απορροφώντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (με τη μορφή ενός φωτονίου συγκεκριμένης ενέργειας) περνάει από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, όπου η διαφορά στην ενέργεια ισούται με την ενέργεια του φωτονίου που μεταδίδεται με την «κρούση» στο ηλεκτρόνιο.

➤ Εξαναγκασμένη εκπομπή. Αυτή η περίπτωση εισάγεται για πρώτη φορά από τον Einstein. Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε μια υψηλή

¹¹ Αυτή η διαδικασία είχε περιγραφεί από τον Bohr αλλά ο Einstein ήταν ο πρώτος που συνέλαβε τη διαδικασία της απορρόφησης ως αντιστροφή της αυθόρμητης εκπομπής.

ενεργειακή στάθμη «αναγκάζεται» - από ένα φωτόνιο που έχει την «κατάλληλη» ποσότητα ενέργειας - να μεταπηδήσει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Η ενέργεια του φωτονίου $E=hn$ ισούται με τη διαφορά της ενέργειας των δυο ενεργειακών σταθμών. Το ηλεκτρόνιο μεταπίπτοντας στην χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη εκπέμπει δύο φωτόνια το καθένα από τα οποία έχει ίση ενέργεια με το αρχικό και τα οποία κινούνται στην ίδια διεύθυνση¹² με το αρχικό. Δηλαδή δημιουργείται ακτινοβολία που έχει «ενισχυθεί» ενεργειακά, – διπλάσιο ποσό ενέργειας - και έχει αυστηρά καθορισμένη διεύθυνση. Από θερμοδυναμικής άποψης το φαινόμενο χαρακτηρίζεται και ως αρνητική απορρόφηση.

Σύμφωνα με τους νόμους της Θερμοδυναμικής και της Στατιστικής Μηχανικής το φαινόμενο εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία σύμφωνα με την κατανομή Maxwell-Boltzmann. Ο νόμος του Planck προκύπτει από την εργασία του Einstein ενώ παράλληλα υπολογίζονται οι πιθανότητες για την μετάβαση ενός ηλεκτρονίου και άρα ενός μορίου στις καταστάσεις που έχουν προαναφερθεί.

Ο Dirac θα εντάξει 10 χρόνια αργότερα τα αποτελέσματα της εργασίας του Einstein στην ατομική θεωρία ενώ παράλληλα η νεότευκτη Κβαντική Θεωρία εισέρχεται δυναμικά και στον χώρο της Οπτικής. Ωστόσο οι τεχνικές δυνατότητες που προέκυπταν από την εφαρμογή της εξαναγκασμένης εκπομπής δεν εξετάστηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τα πειράματα στον χώρο της Οπτικής σχετίζονταν με τη διατύπωση μιας θεωρίας που να εξηγεί οπτικά φαινόμενα που σχετίζονταν με την διασπορά, διάχυση και διάθλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας – στο φάσμα του ορατού σε πρώτη φάση - με την βοήθεια της Κβαντικής Θεωρίας. Ιδιαίτερη σημασία είχε το φαινόμενο της διάθλασης. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν από τους Debye (1884-1966), Sommerfeld (1868-1951), Davisson (1881-1958), χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Ο Rudolf Ladenburg προσπάθησε να ενοποιήσει τη θεωρία του Bohr σχετικά με την εκπομπή και απορρόφηση με το μοντέλο των αρμονικών ταλαντωτών.

¹² Το 1923 ο Γερμανός Φυσικός W.Boethe σημειώνει ότι κατά τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής ισχύει η Αρχή Διατήρησης της Ορμής άρα τα παραγόμενα φωτόνια θα ταξιδεύουν στην ίδια διεύθυνση με το αρχικό φωτόνιο και θα έχουν την ίδια ορμή.

Η εργασία του Einstein του έδωσε τη δυνατότητα να διατυπώσει μια θεωρία για την οπτική συμπεριφορά της ύλης. Το 1921 κατάφερε να προσδιορίσει σε κάθε άτομο τον ακριβή αριθμό των ηλεκτρονίων που «συμμετέχουν» στα οπτικά φαινόμενα, τα οποία ονομάζει ηλεκτρόνια-διάχυσης (dispersion electrons). Χρησιμοποίησε το μοντέλο των ταλαντωτών και την Κβαντική Θεωρία για να υπολογίσει το ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται ή απορροφάται από μια ομάδα ατόμων που βρίσκονται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας με την ακτινοβολία.

Η συμβολή του Ladenburg υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική αφού κατάφερε όχι μόνο να εξάγει μια θεωρητική σχέση μεταξύ του αριθμού των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στο φαινόμενο της απορρόφησης, της εκπομπής καθώς και του φαινομένου που ο Einstein είχε περιγράψει ως αυθόρμητη εκπομπή αλλά προχώρησε σε πειραματικές μετρήσεις υπολογίζοντας και την πιθανότητα να πραγματοποιηθούν αυτά τα φαινόμενα. Επίσης διατύπωσε μια μαθηματική σχέση που συνδέει το μήκος κύματος με το δείκτη διάθλασης και τους τύπους του Einstein για την αυθόρμητη εκπομπή.

Ο τύπος ολοκληρώθηκε από τους Kramers και Heisenberg που συμπεριέλαβαν το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Η εξαναγκασμένη εκπομπή μελετήθηκε ιδιαίτερα από τον Kramers, ο οποίος επίσης θεώρησε ότι δεν μπορεί να εξηγηθεί με την κλασική θεωρία της οπτικής αλλά απαιτούσε την χρησιμοποίηση του εννοιολογικού σχήματος των ταλαντωτών, των οποίων οι συχνότητες αντιστοιχούσαν στα άλματα που «κάνουν» τα ηλεκτρόνια για να περάσουν από τη μία ενεργειακή στάθμη στην άλλη. Οι ταλαντωτές δεν είναι πραγματικοί είναι υποθετικές οντότητες¹³, που αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις πιθανές ατομικές μεταπτώσεις. Η μετάβαση από μια κατώτερη ενεργειακή στάθμη σε μια ανώτερη με την απορρόφηση ενός φωτονίου δίνει θετικές τιμές, ενώ η αντίστροφη διαδικασία αρνητικές. Αυτή χαρακτηρίστηκε ως αρνητική διάχυση και αντιστοιχεί στην αρνητική απορρόφηση που είχε περιγράψει ο Einstein στην εξαναγκασμένη εκπομπή. Ο Kramers σε εργασία το 1925 ανέφερε χαρακτηριστικά ότι «θα υπάρξει

¹³Ο A. Lande ονόμαζε το σύστημα των ταλαντωτών «εικονική ορχήστρα»

αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη μετάβαση από πλήθος ατόμων». Ο Ladenburg προχώρησε σε πειράματα με αέριο Ne κοντά στην περιοχή του ερυθρού για να μελετήσει το φαινόμενο της διάχυσης. Αυτά τα πειράματα επιβεβαίωσαν την ύπαρξη αρνητικών όρων στην εξίσωση της διάχυσης. Αλλά και τη συμβολή που έχουν στο φαινόμενο άτομα που είχαν «διεγερθεί», δηλαδή άτομα των οποίων τα ηλεκτρόνια βρίσκονταν σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Είναι χαρακτηριστικό ότι το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής αποτέλεσε αντικείμενο και άλλων επιστημόνων που κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα όπως ο J.H. van Vleck¹⁴ που την ονόμαζε «προκληθείσα εκπομπή» η οποία θεωρούσε πως μπορεί να οδηγήσει σε αρνητική απορρόφηση. Ο Tolman (1881-1948) είχε παρατηρήσει ότι κατά τη μετάβαση μορίων από μια υψηλότερη ενεργειακά κβαντική κατάσταση σε μια χαμηλότερη θα εμφανίζονταν η αρνητική απορρόφηση και θα προκαλούνταν ενίσχυση της δέσμης. Ο Ρώσος V.A. Fabrikant από το 1940¹⁵ ανέφερε στη διδακτορική του διατριβή ότι αν ο αριθμός των μορίων που βρίσκονταν σε διεγερμένη κατάσταση ήταν μεγαλύτερος από τον αριθμό των μορίων που βρίσκονταν στην βασική θα είχαμε ενίσχυση της ακτινοβολίας.

Διαφορετικές ανεξάρτητες μελέτες κατέληγαν στο ίδιο συμπέρασμα. Παρ' όλα αυτά αν και η ενίσχυση της ακτινοβολίας κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή είχε σχεδόν ανακαλυφθεί, θα περνούσαν δεκαετίες μέχρι να στραφεί η επιστημονική κοινότητα σ' αυτή τη κατεύθυνση. Το 1950 σε μια εργασία των Lamb και Rutherford σχετικά με τον πειραματικό έλεγχο των προβλέψεων του Dirac γύρω από τα ενεργειακά επίπεδα και τις φασματικές γραμμές του ατόμου του υδρογόνου σημειώνονταν ότι «είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εκείνες οι συνθήκες που θα οδηγούσαν σε μια κατάσταση αντιστροφής πληθυσμού δηλαδή σε μια κατάσταση όπου τα διεγερόμενα άτομα θα είναι περισσότερα από αυτά στη βασική κατάσταση».

¹⁴Θεωρητικός Φυσικός με αντικείμενο τη φυσική στερεάς κατάστασης στον οποίο απονεμήθηκε το βραβείο Nobel το 1977 - μαζί με τους Mott και Anderson - για την περιγραφή των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης μέσω της κβαντικής μηχανικής

¹⁵Η θέση του Fabrikant δεν έδωσε το έναυσμα για πειραματική εφαρμογή και περαιτέρω μελέτη. Ο επερχόμενος πόλεμος και η ναζιστική εισβολή είχε ως αποτέλεσμα να στραφεί το ενδιαφέρον των επιστημόνων της Σοβιετικής Ένωσης σε πιο πρακτικά θέματα. Άλλωστε και οι προπολεμικές εργασίες γύρω από το φαινόμενο της σχάσης πέρασαν σε δεύτερη μοίρα και αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης λίγο πριν το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Ωστόσο το επιχείρημα δεν αναπτύχθηκε περαιτέρω. Ο στατιστικός νόμος των Maxwell-Boltzmann δεν άφηνε περιθώρια για διαφορετικές σκέψεις. Στη κατάσταση θερμικής ισορροπίας όπου κάποια άτομα αερίου βρίσκονται σε υψηλότερη ή σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, ο αριθμός των ατόμων που βρίσκονται σε μια διεγερμένη κατάσταση θα είναι πάντα πολύ μικρότερος από αυτά που βρίσκονται στη βασική κατάσταση. Στη φύση όλα τα συστήματα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία και όταν διαταραχθούν επιστρέφουν πολύ γρήγορα σε κατάσταση ισορροπίας. Συνεπώς με βάση τη θεωρία των Maxwell - Boltzmann η οποία αποτελούσε το κυρίαρχο «παράδειγμα»¹⁶ στο οποίο ήταν «δεσμευμένοι» οι επιστήμονες, ακόμα και αν συνέβαινε το φαινόμενο της αντιστροφής πληθυσμών, οι επιπτώσεις της εξαναγκασμένης εκπομπής θα ήταν πολύ μικρές και τα αποτελέσματα σχεδόν μη παρατηρήσιμα. Αυτό πιθανόν να αποθάρρυνε την επιστημονική κοινότητα, για να στρέψει το ενδιαφέρον της σ' αυτή την κατεύθυνση.

¹⁶Ο T.S. Kuhn στο εμβληματικό έργο του «Δομή των Επαναστάσεων» (1962) συγκροτεί μια ρηξικέλευθη αντίληψη για την επιστήμη, ριζικά αντίθετη με το ρεύμα του Λογικού Εμπειρισμού που μέχρι τότε κυριαρχούσε. Στην Κουνιανή προσέγγιση έχει ιδιαίτερη σημασία η έννοια του Παραδείγματος. Το Παράδειγμα ουσιαστικά αποτελεί ένα συγκεκριμένο εννοιολογικό πλαίσιο διαμέσου του οποίου περιγράφεται η πραγματικότητα. Αυτό συναποτελείται από το σύνολο των θεωρητικών και πειραματικών τεχνικών για την συναρμογή του Παραδείγματος με τη φύση. Όπως αναφέρει χαρακτηριστικά αποτελεί «το σύνολο των πεποιθήσεων, των αναγνωρισμένων αξιών και των τεχνικών που ασπάζονται τα μέλη μιας δεδομένης ομάδας επιστημόνων ενώ περικλείει νόμους, θεωρίες και πειραματισμό ταυτόχρονα. Οι παρατηρησιακές αποφάνσεις δεν είναι ανεξάρτητες από την θεωρία αλλά είναι εμποτισμένες από αυτήν. Για να αιτιολογήσει αυτή την θέση ο Kuhn χρησιμοποιεί τα γνωστά πειράματα gestalt όπου ένα σχήμα έχει μια διττή οπτική την οποία σε κάποια στιγμή το υποκείμενο του πειράματος την αντιλαμβάνεται ή τα πειράματα με τα «αντικανονικά» τραπουλόχαρτα. Τα πειράματα αυτά οδηγούν τον Kuhn σε ένα διπλό συμπέρασμα. Ότι υπάρχει δέσμευση στα υποκείμενα των πειραμάτων από μια πρότερη γνώση ή εμπειρία που εν πολλοίς καθορίζει και την άποψη που σχηματίζουν για αυτό που «βλέπουν» - ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται για να καταδείξει πως και τότε ένας επιστήμονας μεταστρέφει την άποψη του.

2.3 Τα Μικροκύματα

Η ανακάλυψη και οι εφαρμογές των μικροκυμάτων μπορούν να θεωρηθούν ένας σημαντικός σταθμός στη δημιουργία των laser. Το 1882 ο G. F. Fitzgerald διατυπώνει την άποψη ότι σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell¹⁷ είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ακτινοβολία αποκλειστικά με ηλεκτρικά μέσα. Το 1847 ο Hermann von Helmholtz μελετούσε πειραματικά τη δημιουργία και ανίχνευση ηλεκτρικών ταλαντώσεων ως αποτέλεσμα της αποφόρτισης ενός πυκνωτή σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Ο Heinrich Hertz μαθητής του Helmholtz κατάφερε να δημιουργήσει και να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Χρησιμοποίησε μια λυχνία Leyden, που πρόκειται για έναν πυκνωτή σε γυάλινο δοχείο με εσωτερική μεταλλική κάλυψη και ράβδο με μεταλλικές σφαίρες, που ακουμπούν στο εσωτερικό φύλο. Το σύστημα φύλου σφαιρών ήταν ο ένας ακροδέκτης ενώ ο άλλος ήταν το εσωτερικό μεταλλικό φύλο στο δοχείο. Αρχικά - το 1879 - ο Hertz θεώρησε ότι τα αποτελέσματα του πειράματος κινούνταν στα όρια της παρατήρησης και δεν ασχολήθηκε περαιτέρω. Όμως το 1886 επανήλθε αφού παρατήρησε ότι αν σε ένα ανοιχτό κύκλωμα¹⁸ το οποίο έχει κατασκευαστεί από χάλκινο σύρμα σε ορθογώνιο σχήμα, με μικρό κενό σε κάποιο σημείο, τοποθετηθεί κοντά κλειστό κύκλωμα που αποτελείτε από επαγωγικό πηνίο που αποφορτίζεται, ο ηλεκτρικός σπινθήρας που δημιουργείται περνά μέσα από το κενό στο ανοιχτό κύκλωμα αρκεί οι διαστάσεις του ανοιχτού κυκλώματος από χαλκό να είναι τέτοιες, ώστε οι ηλεκτρικές ταλαντώσεις που θα δημιουργηθούν να έχουν ίδια περίοδο με αυτήν των ταλαντώσεων του κλειστού κυκλώματος.

Το πείραμα του Hertz έχει κομβική σημασία αφού καταδεικνύει τη δυνατότητα να παρατηρηθούν ηλεκτρικά «φαινόμενα», τα οποία διαδίδονται μέσω του αέρα σε απόσταση από την αρχική διαταραχή. Παράλληλα αλλά

¹⁷Το 1873 είχε δημοσιευτεί η περίφημη εργασία του Maxwell με τίτλο "Treatise on Electricity and Magnetism" που έθεσε τα θεμέλια του ηλεκτρομαγνητισμού.

¹⁸ Αυτό θα ονομασθεί δευτερεύον κύκλωμα σε αντίθεση με το κλειστό κύκλωμα που θα περιλαμβάνει το επαγωγικό πηνίο που θα είναι το πρωτεύον.

ανεξάρτητα με τον Hertz και άλλοι επιστήμονες καταλήγουν σε ανάλογα συμπεράσματα¹⁹.

Ο Hertz κατάφερε να δημιουργήσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη από μερικά μέτρα μέχρι και 10 εκατοστά. Παρ' όλα αυτά δεν θεώρησε ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα της έρευνας του για να εφεύρει μια μέθοδο ασύρματης τηλεγραφίας, σε αντίθεση με τον Guglielmo Marconi (1874-1937) που ήταν ο πρώτος που προχώρησε στη δημιουργία ενός ασύρματου τηλεγράφου χρησιμοποιώντας κύματα με μικρό μήκος κύματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι ο Marconi ουσιαστικά χρησιμοποίησε τις συσκευές και τις διατάξεις που ήδη υπήρχαν. Τις εξέλιξε και τις βελτιστοποίησε χωρίς όμως να εφεύρει κάτι καινούριο. Κυρίως αμφισβήτησε τις καθιερωμένες αντιλήψεις που κυριαρχούσαν και που είχαν κάνει τόσο αρνητικό τον Hertz στο ενδεχόμενο χρησιμοποίησης των νέων ανακαλύψεων στον τομέα των επικοινωνιών. Η αντιμετώπιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως κυμάτων που διαδίδονται σε ευθεία γραμμή είχε ως αποτέλεσμα την λανθασμένη θεώρηση ότι θα έπρεπε ο πομπός και ο δέκτης να βρίσκονται στο ίδιο ύψος (να έχουν οπτική επαφή) και να μην παρεμβάλλεται τίποτα ανάμεσα τους γεγονός που ουσιαστικά απέκλειε την χρησιμοποίηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για μεγάλες αποστάσεις.

Ο Marconi ξεκίνησε τα πειράματα τα οποία επανέλαβε με επιτυχία τον Αύγουστο του 1895 δημιουργώντας ένα σύστημα που περιελάμβανε κεραία και γείωση μεταδίδοντας σε απόσταση 2400m τηλεγραφικά σήματα. Το 1899 επιτυγχάνει την πρώτη ασύρματη μετάδοση μεταξύ Αγγλίας και Γαλλίας ενώ στις 12 Δεκεμβρίου 1901 προχωρά στην πρώτη υπερατλαντική μετάδοση με επιτυχία, σε μια απόσταση 3.200km μεταξύ της περιοχής Newfoundland στον Καναδά και της Κορνουάλης στην Αγγλία. Η επιτυχής μετάδοση των τηλεγραφικών σημάτων δημιουργεί ερωτήματα αφού η θεωρία απέκλειε τη μετάδοση σημάτων σε τόσο μεγάλες αποστάσεις στις οποίες παρεμβάλλονται διάφορα φυσικά εμπόδια. Ο E. V. Appleton (1892-1965) διατυπώνει το 1925

¹⁹ Ο Oliver Lodge (1851-1940), είχε ανακαλύψει την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, προχωρώντας και σε ακριβείς μετρήσεις του μήκους κύματος τους από το 1888 χωρίς όμως να ανακοινώσει δημόσια τα αποτελέσματα των ερευνών του.

τη θεωρία ότι στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας υπάρχουν μόρια αερίων τα οποία είναι ιονισμένα με αποτέλεσμα να μετατρέπουν σε ηλεκτρικά αγώγιμες αυτές τις περιοχές. Τα ραδιοκύματα αντανακλώνται σ' αυτή τη στοιβάδα²⁰ και μπορούν να μεταδίδονται μεταξύ σημείων που δεν έχουν οπτική επαφή.

Παρ' όλο που ο Marconi είχε χρησιμοποιήσει στα πρώτα του πειράματα μικροκύματα επανέλαβε τη χρησιμοποίησή τους, μετά το 1916 και μόλις μετά το 1923 αποφάσισε να στραφεί αποκλειστικά στη χρήση τους. Το 1926 κατασκεύασε ένα δίκτυο ασύρματης τηλεγραφίας που ένωνε την Αγγλία με τις τότε αποικίες της, Ινδία, Αυστραλία, Καναδά και Νότια Αφρική, στο οποίο χρησιμοποιούσε μικρά μήκη κύματος, τα οποία ανακάλυψε ότι είχαν μεγαλύτερη εμβέλεια και καλύτερη συμπεριφορά. Στην Ρωσία ο Α. Ρορον ανεξάρτητα από τον Marconi δημιούργησε επίσης ένα σύστημα ασύρματης τηλεγραφίας.

Η χρησιμοποίηση μικροκυμάτων είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας. Έπρεπε να επιλυθούν τεχνικά προβλήματα αφού απαιτούνταν μείωση των διαστάσεων τόσο των λυχνιών που θα χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή των ταλαντωτών όσο και των κυκλωμάτων. Κατασκευάστηκαν λυχνίες κενού όπου τα ηλεκτρόνια εκπέμπονταν από ένα λεπτό σύρμα που βρίσκονταν μέσα στη λυχνία και θερμαίνονταν από ηλεκτρικό ρεύμα, περνούσαν από το ηλεκτρόδιο ελέγχου για να συλλεχθούν στην άνοδο. Προκειμένου να σταθεροποιηθεί το σύστημα και να είναι δυνατή η παραγωγή κυμάτων υψηλής συχνότητας - και μικρού μήκους κύματος - έπρεπε οι διαστάσεις του κυκλώματος να μειωθούν²¹. Το 1933 δημιουργούνται νέες διατάξεις με ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις (ο περίφημος σταθερός πυκνωτής υψηλής τάσης με την επωνυμία «door knob») που κάνουν δυνατή την παραγωγή συχνοτήτων έως 1500MHz τα οποία έχουν

²⁰Η στοιβάδα ονομάστηκε στοιβάδα Appleton και ο ίδιος βραβεύτηκε το 1947 με το βραβείο Nobel για τη μελέτη της Φυσικής της ανώτερης ατμόσφαιρας.

²¹Το 1931 οι Irving Langmuir και Karl Compton περιέγραψαν τη σημασία των διαστάσεων των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

μικρή ισχύ. Παράλληλα η δημιουργία του μάγνητρου ²² ως γεννήτρια μικροκυμάτων υψηλής συχνότητας αλλά και υψηλής ισχύος επιταχύνει τις εξελίξεις. Το μάγνητρο είναι μια δίοδος με κυλινδρική άνοδο, στην οποία δημιουργείτε ισχυρό μαγνητικό πεδίο από μόνιμο μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί στα ηλεκτρόνια που οδεύουν στην άνοδο μια σπειροειδή κίνηση, με αποτέλεσμα όταν συνδεθεί με το κατάλληλο κύκλωμα να μετατρέπεται σε ταλαντωτή.

²²Μέχρι το 1930 το μάγνητρο ήταν η μοναδική αξιόπιστη γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων. Το 1936 οι Cleeton και Williams στο Πανεπιστήμιο Michigan κατάφεραν να παράξουν μικροκύματα με $\lambda = 6,4$ mm. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε νέα γεννήτρια με διαφορετική λειτουργία που ονομάστηκε κλύστρο (Klystron).

2.4 Μικροκύματα και Ραντάρ

Οι μελέτες που οδήγησαν στην εφεύρεση του radar²³ επίσης αποτελούν σημαντικό σταθμό στην πορεία προς την εφεύρεση του laser. Τα μικροκύματα καθώς και οι τεχνικές παραγωγής τους ιδιαίτερα την περίοδο 1930-1945 γίνονται αντικείμενο μελέτης σε πολλές χώρες, με στόχο την δημιουργία συστήματος ανίχνευσης. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έχει γίνει αντιληπτή η ιδιότητα της ύλης να ανακλά τα κύματα. Το 1904 ο Γερμανός C. Hulsmeyer κατασκευάζει μια συσκευή που μπορεί να ανιχνεύει εμπόδια και να βοηθά στη ναυσιπλοΐα που χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στο λιμάνι του Rotterdam. Οι μελέτες του Appleton για την ικανότητα των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας να ανακλούν τα κύματα ουσιαστικά επανέφεραν την ιδέα της χρησιμοποίησης κυμάτων για την ανίχνευση σωμάτων. Το 1925 χρησιμοποιούνται παλμοί από τους G. Breit και M.A. Tuve στο Washington Carnegie Institute για να υπολογιστεί επιτυχώς το ύψος της ιονόσφαιρας, μετρώντας τον χρόνο που κάνει ένας παλμός από την ώρα που εκπέμπεται να επιστρέψει στον ανιχνευτή, (τηλεμετρία ηχούς παλμών).

Οι έρευνες χρηματοδοτούνται κυρίως από το στρατό και τα υπουργεία Άμυνας των χωρών. Η Αμερική, η Αγγλία, η Σοβιετική Ένωση, η Γερμανία, η Ιαπωνία, η Ολλανδία, η Γαλλία και η Ιταλία αναθέτουν σε επιστήμονες να προχωρήσουν σε μελέτες για τη δημιουργία συστημάτων ανίχνευσης τόσο στον αέρα αλλά και στη θάλασσα. Δημιουργούνται ειδικά εργαστήρια γι' αυτόν τον σκοπό, ενώ τα χρόνια του μεσοπολέμου και κυρίως η δεκαετία του '30 - όπου τα σύννεφα του επερχόμενου πολέμου απλώνονται στην Ευρώπη - είναι μια περίοδος που επιταχύνονται οι εξελίξεις, αυξάνονται οι χρηματοδοτήσεις και συγκροτούνται πολυπληθείς επιστημονικές ομάδες που κάνουν βασική αλλά κυρίως εφαρμοσμένη έρευνα. Παράλληλα τελειοποιούνται ηλεκτρονικές διατάξεις, γίνονται περισσότερο ακριβείς, με μεγαλύτερες δυνατότητες και πολύ πιο εύχρηστες αφού μικραίνουν και τα

²³ Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο Hertz(1887) έχει προχωρήσει σε πειράματα που κατέδειξαν την ιδιότητα της ύλης (μεταλλικών αντικειμένων) να ανακλά ραδιοκύματα, κάτι που είχε προβλέψει και ο Maxwell.

μεγέθη²⁴ τους. Τα αποτελέσματα των ερευνών για τη δημιουργία των ραντάρ, η τεχνογνωσία που προήλθε από αυτήν την προσπάθεια και η ενασχόληση συγκεκριμένων επιστημόνων με αυτόν τον τομέα θα έχει καταλυτικό ρόλο στην εφεύρεση του laser.

Στις Η.Π.Α στο «Εργαστήριο Ναυτικών Ερευνών²⁵» (NLR) αποτελεί το βασικό Ινστιτούτο που θα αναλάβει τη δημιουργία συσκευών ραντάρ, σε συνεργασία με άλλα εργαστήρια που βρίσκονται υπό την ευθύνη του στρατού όπως το Army Signal Corps Laboratory στο Fort Monmouth, το οποίο ήταν υπεύθυνο για την έρευνα σχετικά με τις ηλεκτρονικές διατάξεις, αλλά και την εταιρία RCA²⁶ που προήλθε από την ένωση της General Electric, της United Fruit Company, της Westinghouse Electric Corporation και της American Telephone and Telegraph. Από το 1920 ήταν γνωστή η δυνατότητα ανίχνευσης κινούμενων σωμάτων μέσω της ανάκλασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο W.D. Hershberger είχε θέσει σε λειτουργία μάγνητρο²⁷ για να πραγματοποιήσει πειράματα ανίχνευσης το 1933, χρησιμοποιώντας μικροκύματα. Το 1934 σε συνεργασία με την RCA έγινε δυνατή η ανίχνευση πλοίου σε απόσταση μισού μιλίου. Στην Αγγλία την ίδια χρονιά ξεκινούν έρευνες για την αντιαεροπορική άμυνα της χώρας. Συστήνονται κρατικές επιτροπές στις οποίες συμμετέχουν διακεκριμένοι επιστήμονες όπως ο A.V. Hill που είχε βραβευθεί με Nobel Φυσιολογίας το 1922, αλλά και ο καθηγητής P.M.S. Blackett που βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1948 για την περεταίρω ανάπτυξη του θαλάμου νεφών Wilson.

²⁴Οι συσκευές ραντάρ εφοδιάζουν πλοία και αεροπλάνα οπότε πρέπει να εύχρηστες και όσο το δυνατόν μικρότερες σε μέγεθος. Αυτό σημαίνει ότι και οι ανάλογες διατάξεις θα πρέπει να «μικρύνουν»

²⁵Naval Research Laboratory. Ήταν μια ιδέα του T. Endison που πρότεινε τη δημιουργία του το 1915 και το 1916 χρηματοδοτήθηκε από το Αμερικάνικο Κογκρέσο με το ποσό των 1,5 εκατομμυρίων δολαρίων. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1920 και ολοκληρώθηκε το 1923, όπου τέθηκε σε λειτουργία στις 2 Ιουλίου. Το 1941 είχε 396 εργαζόμενους, οι οποίοι είχαν αναλάβει 200 projects και οι εγκαταστάσεις του περιελάμβαναν 23 κτήρια, ενώ το 1946 απασχολούσε 4.400 εργαζόμενους με τον προϋπολογισμό του να έχει εκτιναχθεί στα 13,7 εκατομμύρια δολάρια, τα σχέδια για τα οποία εκπονούνταν μελέτες να έχουν αυξηθεί στα 900, ενώ τα κτήρια να έχουν αυξηθεί στα 67. Αντίστοιχα ινστιτούτα-εργαστήρια δημιουργούνται και σε άλλες χώρες, είτε κρατικά είτε υπό την αιγίδα εταιριών του ιδιωτικού τομέα, σηματοδοτώντας την ολοένα και μεγαλύτερη πρόσδεση της επιστήμης στο στρατιωτικό-βιομηχανικό σύμπλεγμα.

²⁶Radio Corporation of America.

²⁷Οι συσκευές αυτές είχαν κατασκευαστεί από την εταιρία Westinghouse στο Army Signal Corps Laboratory.

Κέντρο των ερευνών είναι το NPL, το Εθνικό Εργαστήριο Φυσικής²⁸, το πιο εμβληματικό εργαστήριο στην Αγγλία, που τέθηκε σε λειτουργία από το 1900 με σκοπό την τυποποίηση και τον έλεγχο οργάνων και διατάξεων, τις δοκιμές υλικών και τον προσδιορισμό φυσικών σταθερών. Πρόσωπο κλειδί ήταν ο R.Watson-Watt(1892-1973) στον οποίο ανατέθηκε η δημιουργία του ραντάρ και θεωρείται από πολλούς ο εφευρέτης του. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι αρχικά η επιτροπή που είχε επιφορτιστεί με το καθήκον της αεράμυνας, διατύπωσε στον Watson-Watt το ερώτημα σχετικά με το αν είναι δυνατή η δημιουργία μιας «φονικής ακτίνας», μιας δέσμης που θα μπορούσε να καταστρέψει ένα εχθρικό αεροσκάφος ή να πλήξει το πλήρωμα του. Ο Watt θεωρώντας ότι κάτι τέτοιο ήταν αδύνατο, πρότεινε την δημιουργία μιας συσκευής που θα ανίχνευε το εχθρικό αεροσκάφος.

Το 1935 προχώρησε σε υπολογισμούς μέτρησης της ενέργειας που ανακλάται από ένα αεροσκάφος το οποίο έχει «φωτιστεί» από ακτινοβολία. Οι δοκιμές που έγιναν την ίδια χρονιά ήταν επιτυχείς παρέχοντας τη δυνατότητα υπολογισμού της θέσης ενός αεροσκάφους σε ακτίνα εμβέλειας 160km. Ο Watt διατύπωσε την εξίσωση λειτουργίας του ραντάρ σύμφωνα με την οποία το μέγιστο εύρος ανίχνευσης είναι ανάλογο της γραμμικής διάστασης της κεραίας και της τέταρτης ρίζας της μέσης ισχύος. Για να διπλασιάσει λοιπόν το εύρος του συστήματος ανίχνευσης έπρεπε να δεκαεξαπλασιάσει την ισχύ της διάταξης. Η επιλογή κυμάτων με μήκος 50m γρήγορα αποδείχθηκε προβληματική αφού υπήρχαν μεγάλες παρεμβολές και «θόρυβος» στην συσκευή από τους ραδιοφωνικούς σταθμούς. Γι' αυτό επιλέχθηκαν μήκη κύματος κάτω των 13m.

Η εμβέλεια θα μπορούσε να αυξηθεί μειώνοντας το μήκος κύματος αλλά δεν υπήρχαν αναμεταδότες υψηλής ισχύος για μήκη κύματος κάτω των 10m. Η παραγωγή του όπως έχει ήδη αναφερθεί ήταν καταλυτικής σημασίας για τη δημιουργία ακριβέστερων συστημάτων ανίχνευσης με μικρότερες διαστάσεις. Ο καθηγητής Oliphant στο Πανεπιστήμιο του Birmingham είχε προχωρήσει το 1939 στη δημιουργία μιας συσκευής τύπου klystron που έκανε δυνατή τη δημιουργία κυμάτων με $\lambda=10\text{cm}$ ισχύος 400W. Η συσκευή όμως

²⁸National Physics Laboratory

ήταν ιδιαίτερα δύσχρηστη και γι' αυτό απευθύνθηκε στους J.T. Randall και H. Boot οι οποίοι είχαν εργαστεί στη βιομηχανία και είχαν εμπειρία στην κατασκευή λυχνιών κενού, για να παρασκευάσουν μια διάταξη που θα έλυσε το πρόβλημα. Στις 21 Φεβρουαρίου 1940 κατασκεύασαν ένα μάγνητρο που λειτουργούσε σε μια κυλινδρική κοιλότητα συντονισμού και παρείχε κύματα στα 400W με $\lambda=9,8\text{cm}$. Η διάταξη βελτιστοποιήθηκε και παράχθηκε μαζικά στα εργαστήρια της Βρετανικής General Electric όπου με ανάλογες μετατροπές έφτασε την ισχύ των 10kW δίνοντας τη δυνατότητα ανίχνευσης υποβρυχίων σε απόσταση 10km. Τα συστήματα εγκαταστάθηκαν στις εκβολές του Τάμεση, αναπόσπαστο τμήμα της Αγγλικής αεράμυνας αλλά και σε αεροπλάνα και πλοία δίνοντας σημαντικό πλεονέκτημα στους Άγγλους αλλά και στους Αμερικάνους αφού από το φθινόπωρο του 1940 είχαν εφοδιαστεί από τους Αγγλική κυβέρνηση με τη συγκεκριμένη τεχνογνωσία²⁹.

Στην Αμερική δεκάδες φυσικοί και μηχανικοί στρατολογήθηκαν από τα Πανεπιστήμια και τη βιομηχανία κατασκευάζοντας περισσότερα από 100 συστήματα ραντάρ. Τουλάχιστον 2 δισεκατομμύρια δολάρια δαπανήθηκαν για την έρευνα και ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης και για τη μελέτη και τις εφαρμογές των μικροκυμάτων. Υπεύθυνος του εργαστηρίου ήταν ο Lee Dubridge από το πανεπιστήμιο του Rochester και στην ομάδα συμμετείχαν I.I. Rabi, Ken Bainbridge, N. Ramsey, E. Purcell, E. Pollard, Luis. W. Alvarez που έπαιξαν ρόλο και στη δημιουργία του laser

Η συνεργασία βιομηχανίας και στρατού υπήρξε στενή τόσο τα χρόνια του πολέμου αλλά κυρίως αργότερα. Άλλωστε ο πρίγκιπας της Ουαλίας και μετέπειτα βασιλιάς είχε δηλώσει³⁰ το 1902 αναφερόμενος στην δημιουργία του Εθνικού Εργαστηρίου Φυσικής:

« Πιστεύω ότι στο Εθνικό Εργαστήριο Φυσικής έχουμε την πρώτη εμφάνιση του κράτους να συμμετέχει στην επιστημονική έρευνα. Το αντικείμενο του προγράμματος είναι να φέρει τις επιστημονικές γνώσεις σε σχεδόν καθημερινή επαφή με τη βιομηχανική και εμπορική ζωή μας. Να

²⁹Στις 6 Οκτωβρίου 1940 στα Bell Telephone Laboratories έγινε επίδειξη της λειτουργίας του μάγνητρο-κοιλότητας.

³⁰ Η ομιλία πραγματοποιήθηκε στη τελετή εγκαινίων του NPL στις 12 Μαρτίου 1902. Το απόσπασμα έχει μεταφραστεί από την ιστοσελίδα "http://www.npl.co.uk/upload/pdf/history_of_npl.pdf"

σπάσει το φράγμα ανάμεσα στη θεωρία και την πρακτική, να πραγματοποιήσει μια ένωση ανάμεσα στην επιστήμη και το εμπόριο»

Στην Γερμανία η έρευνα πραγματοποιούνταν κυρίως από την Telefunken αλλά και από μια εταιρία που συστήθηκε για το σκοπό αυτό- με την επωνυμία GEMA³¹ - στις 16 Ιανουαρίου 1934 και διενεργούσε δοκιμές για το πολεμικό Ναυτικό. Τα πρώτα ραντάρ που κατασκεύασε χρησιμοποιήθηκαν σε πλοία και στη συνέχεια σε αεροπλάνα.

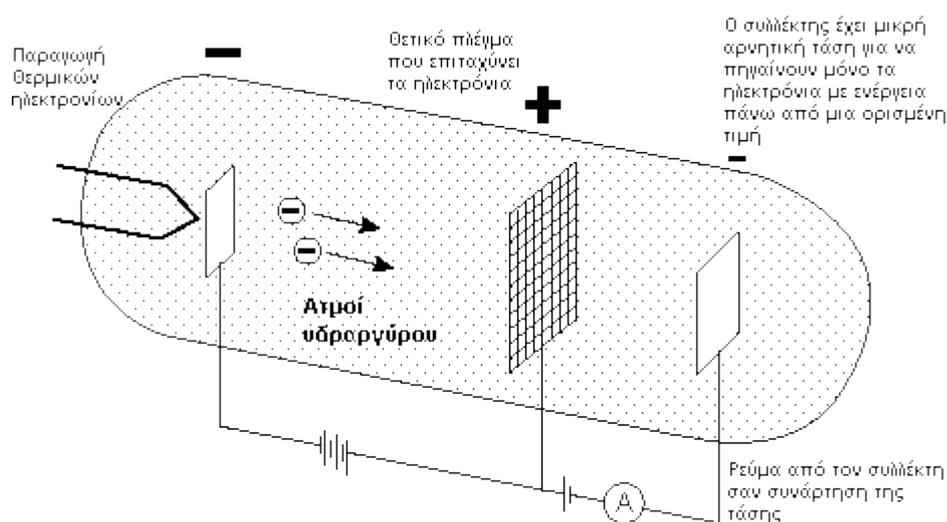
Με το τέλος του πολέμου η έρευνα που είχε γίνει στα μικροκύματα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Η αλληλεπίδραση μικροκυμάτων - ύλης είχε μελετηθεί, καθώς και η επίδραση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου στη μαγνητική ροπή των σωματιδίων. Αναπτύχθηκε η φασματοσκοπία με τη χρησιμοποίηση μικροκυμάτων και έγιναν έρευνες που απαιτούσαν ένα περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος. Η έρευνα σχετικά με τη μοριακή δομή, ο τρόπος ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ σωματιδίων και τα αποτελέσματα αποτελούν όπως θα αναλυθεί σημαντικό σταθμό προς την εφεύρεση του laser.

³¹Gesellschaft für Elektroakustische Mechanische Apparate

2.5 Κβαντική θεωρία του ατόμου και laser

Η εξέλιξη της ατομικής θεωρίας, η επαλήθευση θεωρητικών προβλέψεων και η διάψευση άλλων μέσω πειραμάτων που αποτέλεσαν τομή στην εξέλιξη της ίδιας της κβαντικής θεωρίας, παρείχαν τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη «συμπεριφορά» του μικρόκοσμου.

Το 1914, οι James Franck και Gustav Hertz πραγματοποίησαν ένα πείραμα στο οποίο κατέδειξαν ότι για να αποσπαστεί ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο, πρέπει η ενέργεια του ηλεκτρονίου να ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή που ονομάζεται ενέργεια ιοντισμού και ποικίλλει από άτομο σε άτομο. Η διάταξη που περιγράφεται στο σχήμα που ακολουθεί περιλαμβάνει ατμούς υδραργύρου, σε ένα κλειστό γυάλινο δοχείο. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται θερμιονικά από την κάθοδο της διάταξης και επιταχύνονται με τη βοήθεια τάσης προς ένα πλέγμα που είναι φορτισμένο θετικά. Αν η ενέργεια τους είναι μεγαλύτερη από κάποια συγκεκριμένη τιμή, μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα του αρνητικού δυναμικού.

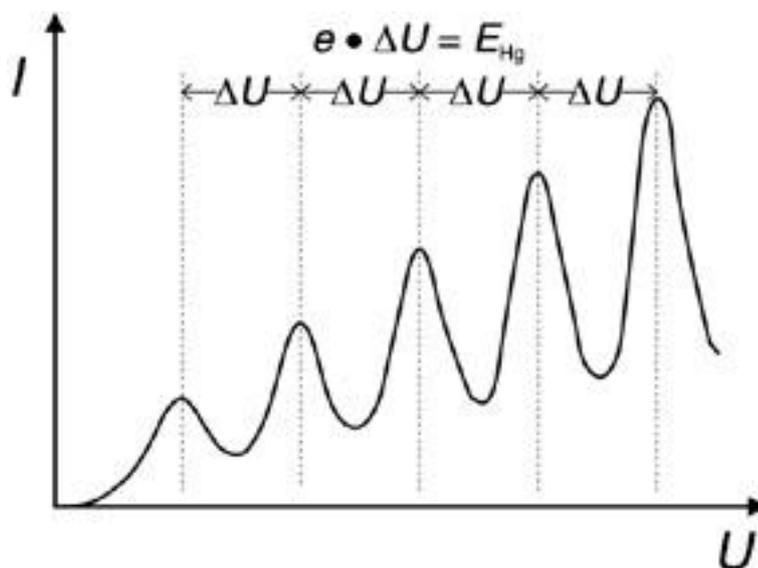


Εικόνα 2.5.1 Διάταξη του πειράματος Frank - Hertz

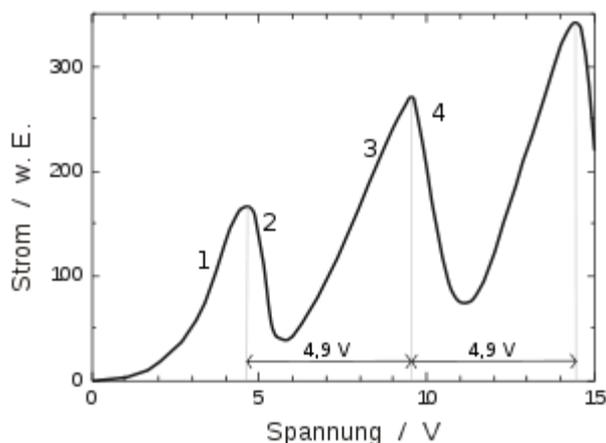
Στο δοχείο υπάρχει αμπερόμετρο για να μετράει την ένταση του ρεύματος, η οποία είναι συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού, αφού όσο αυξάνεται η τάση, μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων αποκτά την ενέργεια που χρειάζεται για να ξεπεράσει το φράγμα του δυναμικού στο συλλέκτη.

Όταν η τάση $V_{\text{ΠΛ-ΚΑΘ}}$ φτάσει την τιμή των 4,9 Volt, όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση που ακολουθεί εμφανίζεται η πρώτη κορυφή. Όμως οι κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του αερίου έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας των ηλεκτρονίων όταν μπορέσουν να διεγείρουν τα άτομα του αερίου από τη θεμελιώδη στην πρώτη διεγερμένη στάθμη.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μπορούν να περάσουν το φράγμα δυναμικού μειώνεται, οπότε μειώνεται και η ένταση του ρεύματος στο αμπερόμετρο.



Εικόνα 2.5.2 Μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης σε άτομα Υδραργύρου



Εικόνα 2.5.3 Γραφική παράσταση έντασης-τάσης

Όταν τα ηλεκτρόνια αποκτούν ενέργεια $4,9\text{eV}$, τότε κατά τη διαδικασία των κρούσεων μεταφέρουν αυτήν την ενέργεια στα ηλεκτρόνια των ατόμων του υδραργύρου. Η διέγερση των ατόμων υδραργύρου ακολουθείται από αποδιέγερση, η οποία συνοδεύεται με εκπομπή φωτονίων μήκους $\lambda=254\text{nm}$, στο φάσμα εκπομπής του υδραργύρου.

Δηλαδή για την εκπομπή φωτονίων από άτομα του υδραργύρου, τα οποία συγκρούονται με ηλεκτρόνια, πρέπει η Κινητική Ενέργεια των ηλεκτρονίων να υπερβαίνει μια ορισμένη ενέργεια, που αντιστοιχεί στη μικρότερη συχνότητα του φάσματος εκπομπής του υδραργύρου. Συνεπώς οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων είναι καθορισμένες.

Όταν η τάση αυξηθεί και φτάσει την τιμή των $9,8\text{V}$ το φαινόμενο επαναλαμβάνεται, έχουμε πτώση της έντασης αλλά τα ηλεκτρόνια μπορούν να επιταχυνθούν και να διεγείρουν και άλλα άτομα πριν φτάσουν στο πλέγμα δυναμικού. Γι' αυτόν το λόγο εμφανίζονται στη γραφική παράσταση κορυφές σε τάσεις πολλαπλάσιες των $4,9$ βολτ, επειδή στις τιμές αυτές η διέγερση επιτυγχάνεται στο μέσον της διαδρομής και μόλις αφαιρεθεί η ενέργεια των $4,9\text{ eV}$ από ένα ηλεκτρόνιο, λόγω σύγκρουσης με ένα άτομο του υδραργύρου, αυτό στη συνέχεια επιταχύνεται ξανά σημειώνοντας και άλλες κρούσεις. Η μείωση του ρεύματος είναι πιο απότομη στις επόμενες κορυφές αφού αυξάνεται στατιστικά και το πλήθος των ηλεκτρονίων που τους δίνεται η

ευκαιρία να συγκρουστούν ανελαστικά με τα άτομα του υδραργύρου και να τα διεγείρουν.

Η μελέτη της συμπεριφοράς της ύλης κατά την επίδραση στατικού ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου (φαινόμενο Stark-Lo Surdo³²) και στατικού ομογενούς μαγνητικού πεδίου (Zeeman) κατέδειξε την ενεργειακή μετατόπιση των ιδιοτιμών σε καθορισμένα ποσά, τα οποία στο φαινόμενο Zeeman είναι εύκολο να υπολογιστούν. Τα ατομικά ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται ως μικροί μαγνήτες με μαγνητική ροπή που θα είναι ανάλογη της στροφορμής

$$\mu = \frac{-e}{2mc} l$$

και στη ενέργεια του θα προστεθεί η ποσότητα $U = \frac{-e}{2mc} B l_z$.

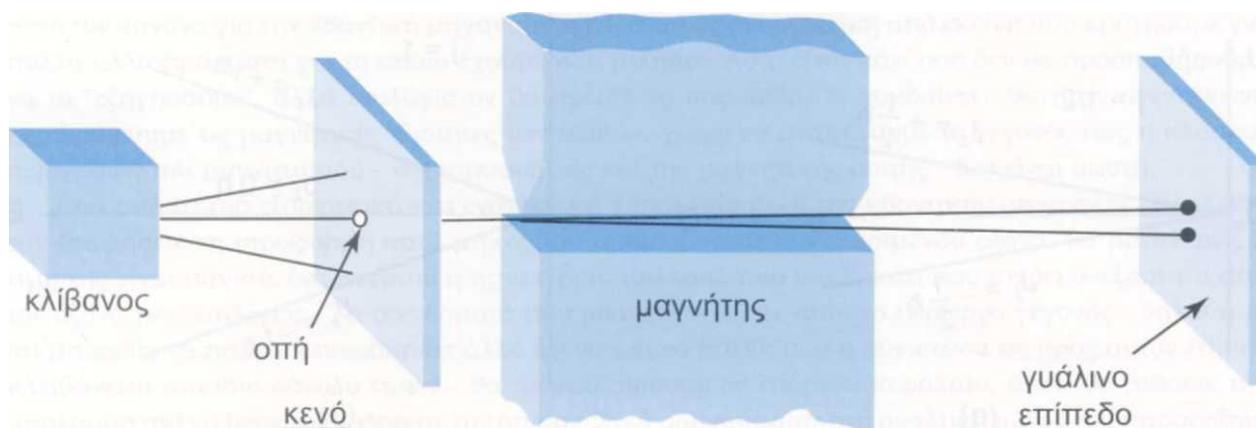
Το μαγνητικό πεδίο βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με τη στροφορμή οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της. Αν η l θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην κβαντική στροφορμή του ηλεκτρονίου μπορούμε να υπολογίσουμε τις μεταπτώσεις Zeeman. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι με την επίδραση του μαγνητικού πεδίου αίρεται ο περιστροφικός εκφυλισμός και προκύπτει από κάθε ενεργειακή στάθμη δεδομένου l ένα σύνολο από $2l + 1$ στάθμες που εξαρτώνται από τον κβαντικό αριθμό m ³³. Για $l = 1$ προκύπτει μια τριάδα σταθμών συμμετρικά διατεταγμένων προς την αρχική στάθμη.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα φασματοσκοπικά δεδομένα για το άτομο του υδρογόνου αλλά και για άτομα με περισσότερα ηλεκτρόνια δεν ανταποκρίνονται στις θεωρητικές προβλέψεις. Ειδικά στην περίπτωση ατόμων με περισσότερα ηλεκτρόνια παρατηρείται η χαρακτηριστική τριάδα (ομαλό φαινόμενο Zeeman), σε συνδυασμό με την εμφάνιση γραμμών με περισσότερες συνιστώσες (ανώμαλο φαινόμενο Zeeman).

³²Το φαινόμενο στη βιβλιογραφία είναι γνωστό ως φαινόμενο Stark το οποίο παρατηρήθηκε το 1913 από τον Johannes Stark αν και ο Ιταλός φυσικός Antonino Lo Surdo είχε πραγματοποιήσει πειράματα φασματογραφίας την ίδια χρονιά ερευνώντας την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου στην ύλη.

³³ Βλ. Κβαντομηχανική 1. Στέφανος Τραχανάς

Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι είναι πιθανή η ύπαρξη ενός πρόσθετου παράγοντα που μπορεί επίσης να επηρεαστεί από το μαγνητικό πεδίο καθορίζοντας τις φασματικές γραμμές. Η ύπαρξη - αλλά και ο ακριβής υπολογισμός των κβαντισμένων τιμών του spin - θα επιβεβαιωθεί από το πείραμα των Otto Stern και Walter Gerlach το 1922. Στη διάταξη τους θα έπρεπε να μηδενιστεί η μαγνητική ροπή λόγω τροχιακής στροφορμής για να μετρηθεί η μαγνητική στροφορμή που σχετίζεται με το spin.



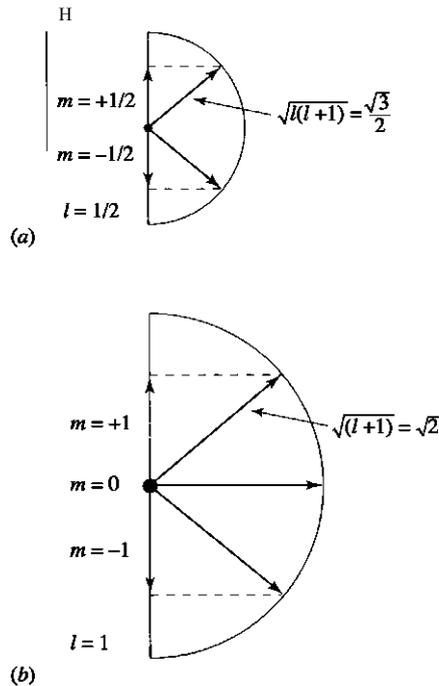
Εικόνα 2.5.4 Διάταξη πειράματος Stern-Gerlach

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με μια δέσμη ατόμων αργύρου που δημιουργήθηκε με την εξάτμιση αργύρου σε έναν κλίβανο που λειτουργούσε σε μεγάλη θερμοκρασία. Η δέσμη των ατόμων αργύρου κατευθύνθηκε σε μια περιοχή ενός ανομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου. Για να επιτευχθεί τέτοιου είδους μαγνητικό πεδίο, ο μαγνήτης κατασκευάστηκε με μια πολύ αιχμηρή ακμή σε μία από τις απολήξεις των πόλων, προκειμένου να προκληθεί μια άμεση μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Η δέσμη των ατόμων αργύρου κατευθυνόταν κατά μήκος αυτής της αιχμηρής ακμής έτσι ώστε να ασκηθεί μια κατακόρυφη δύναμη στα άτομα του αργύρου από το ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Ανάλογα με τη διεύθυνση της μαγνητικής ροπής, τα άτομα του αργύρου θα κατευθυνθούν σε συγκεκριμένα σημεία και τα ίχνη τους θα αποτυπωθούν σε φωτογραφική πλάκα. Αν κάποιο άτομο κινείται με τη μαγνητική ροπή να έχει οριζόντια κατεύθυνση τότε θα κινηθεί ευθεία και δεν θα δεχθεί κάποια δύναμη σε αντίθεση, με ένα άτομο που θα είχε κατακόρυφη

μαγνητική ροπή και θα κινούνταν προς την αιχμηρή ακμή του μαγνήτη. Αν κάποιο άτομο είχε μαγνητική ροπή με φορά προς τα κάτω θα δέχονταν ομόρροπη δύναμη και θα κινούνταν με φορά προς τα κάτω. Συνεπώς, καθώς τα άτομα αφήνονταν ελεύθερα μέσα στο μαγνήτη, θα διασκορπιζόταν στο χώρο ανάλογα με την κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής τους ροπής. Στην κλασική θεωρία, όλες οι τιμές για τη γωνία είναι δυνατόν να εμφανιστούν έτσι ώστε, όταν τα άτομα του αργύρου συλλέγονται μέσω εναπόθεσης σε ένα γυάλινο επίπεδο, θα ήταν δυνατόν να εμφανιστεί μία κηλίδα από άργυρο κατά μήκος μιας κατακόρυφης γραμμής το ύψος της οποίας θα ήταν ανάλογο του μέτρου της μαγνητικής ροπής. Συγκεκριμένα πάνω στη μαγνητική διπολική ροπή θα εξασκηθούν από το πεδίο διαφορετικές δυνάμεις σε κάθε μαγνητικό πόλο, δεδομένου ότι οι δύο μαγνητικοί "πόλοι" βρίσκονται σε διαφορετικές εντάσεις. Η τροχιακή στροφορμή L είναι κβαντισμένη. Ο τύπος που μας δίνει τη μαγνητική ροπή λόγω τροχιακής περιστροφής είναι :

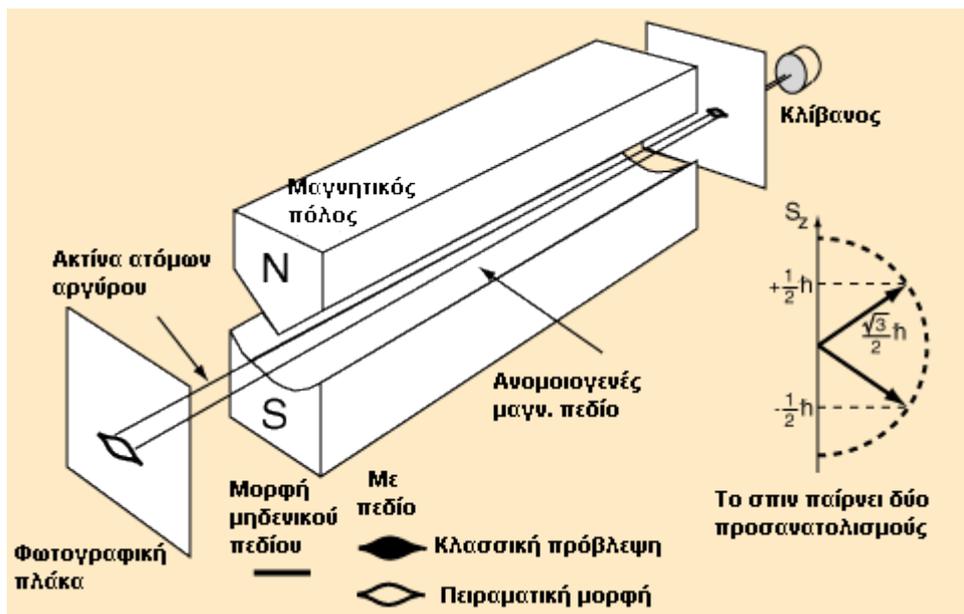
$$\mu_L = \frac{-e}{2m_e c} L = \frac{-e}{2m_e c} \sqrt{l(l+1)} \hbar = \sqrt{l(l+1)} \mu_B$$

όπου μ_B η μαγνητόνη του Bohr και l ο τροχιακός κβαντικός αριθμός. Ο άργυρος έχει ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στοιβάδα που θα έχει τροχιακό κβαντικό αριθμό $l = 0$ άρα και η μαγνητική του ροπή λόγω τροχιακής στροφορμής μηδενίζεται.



Όταν ο κβαντικός αριθμός $l=1/2$ έχουμε δύο πιθανούς προσανατολισμούς που προκύπτουν για $m=1/2$ $m=-1/2$ ενώ για $l=1$ προκύπτουν αντίστοιχα τρεις όπως φαίνονται στο σχήμα.

Σύμφωνα με την «κλασική» πρόβλεψη αφού οι μαγνητικές ροπές θα έδειχναν προς κάθε κατεύθυνση, η γωνία θ θα μπορούσε να πάρει ένα πλήθος τιμών δημιουργώντας ένα ανάλογο ίχνος όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



Εικόνα 2.5.5 Διάταξη πειράματος Stern-Gerlach με ακτίνα ατόμων Αργύρου

Αντ' αυτού εντόπισαν μόνο δύο κουκίδες, αφού η αρχική δέσμη των ατόμων - που σύμφωνα με την κλασική πρόβλεψη θα είχε τυχαίο προσανατολισμό - σχημάτισε δύο ξεχωριστά προσανατολισμένες δέσμες. Αυτό το γεγονός σηματοδοτούσε την κβάντωση του spin. Αν τα άτομα αυτά ήταν προσανατολισμένα κατά τυχαίο τρόπο, χωρίς κβάντωση όπως δέχεται η κλασική φυσική, το ίχνος πάνω στη γυάλινη πλάκα θα είχε διευρυνθεί σε μια ευρεία κηλίδα, προερχόμενη από τις πολυάριθμες διαφορετικές αποκλίσεις των ατόμων του αργύρου.

Ο περιορισμένος αυτός προσανατολισμός, γνωστός ως κβάντωση χώρου, εκδηλώνεται και από άλλα άτομα και υποατομικά σωματίδια με μη μηδενικό spin και επομένως, με μη μηδενική μαγνητική πόλωση, όταν αυτά υπόκεινται στην επίδραση κάποιου ανομοιογενούς εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

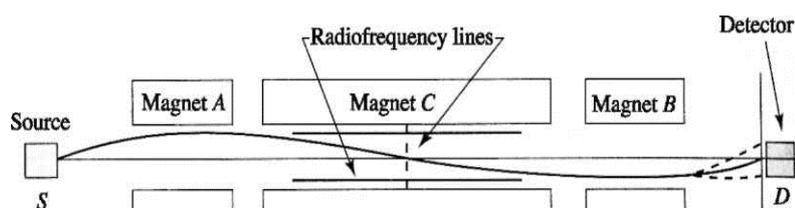
Το 1927 οι Phipps και Taylor επανέλαβαν το πείραμα με άτομα υδρογόνου αυτήν τη φορά. Το υδρογόνο έχει ένα ηλεκτρόνιο που στη θεμελιώδη κατάστασή του έχει $n = 1, l = 1, m_l = 0$. Η μαγνητική ροπή θα έπρεπε να είναι μηδέν λόγω τροχιακής περιστροφής ωστόσο, ο διαχωρισμός της δέσμης, υπέδειξε την ύπαρξη, εκτός της τροχιακής στροφορμής και του spin. Οι S.A Goudsmit και ο G.E. Uhlenbeck διατύπωσαν το 1925 τη θέση ότι το ηλεκτρόνιο έχει μια «εγγενή στροφορμή». Ο Dirac προχώρησε σε θεωρητικούς υπολογισμούς του spin το 1929 λύνοντας τη σχετικιστική κυματική εξίσωση του ηλεκτρονίου σε ένα πηγάδι δυναμικού καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι σε αντίθεση με τον κβαντικό αριθμό l που μπορεί να πάρει ακέραιες τιμές το spin μπορεί να πάρει και ημιακέραιες. Η μικρότερη τιμή είναι $s=1/2$ για την οποία ο κβαντικός αριθμός m_s μπορεί να πάρει τις τιμές $1/2$ και $-1/2$ με αντίστοιχες τιμές για την προβολή του spin στον z άξονα, $s_z = \frac{\hbar}{2}$ και $s_z = -\frac{\hbar}{2}$. Συνεπώς για σωματίδια - όπως τα ηλεκτρόνια - με spin $1/2$ μπορούν να υπάρξουν μόνο δύο καταστάσεις προσανατολισμού του spin στον άξονα z, η $s_z = \frac{\hbar}{2}$ που κωδικοποιείται με την έκφραση «spin πάνω» και η $s_z = -\frac{\hbar}{2}$ με την ονομασία «spin κάτω».

Το πείραμα των Stern-Gerlach έδωσε μια ποιοτική απόδειξη της ύπαρξης του spin, αλλά η τεχνική που ανέπτυξε ο I.I. Rabi έδωσε την δυνατότητα ποσοτικών υπολογισμών με μεγάλη ακρίβεια.

2.6 Μαγνητικός Συντονισμός

Ο Rabi³⁴ θεώρησε ότι η αρχική ενέργεια των ατόμων σε ένα μαγνητικό πεδίο, διαχωρίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό ενεργειακών επιπέδων. Όταν ένα άτομο διαθέτει δύο επίπεδα που διαφέρουν στην ενέργεια κατά μία ποσότητα ΔU μπορεί να πραγματοποιήσει μια μετάβαση από το ανώτερο προς το κατώτερο επίπεδο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός κβάντου φωτός συχνότητας ω , με $\Delta U = \hbar\omega$. Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται κατά την επίδραση μαγνητικού πεδίου σε άτομα που κινούνται μέσα σ' αυτό, όμως για να παρατηρηθούν τα φαινόμενα πρέπει αφού οι ενεργειακές διαφορές είναι μικρές να χρησιμοποιηθεί ακτινοβολία όχι στο ορατό αλλά σε φάσμα μικροκυμάτων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Οι μεταβάσεις από το χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο προς ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο ενός ατόμου, μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ή στην περίπτωση των ατόμων που βρίσκονται σε μαγνητικό πεδίο, με ενέργεια μικροκυμάτων.



Εικόνα 2.6.1 Το σχήμα της πειραματικής διάταξης του I.I.Rabi περιλαμβάνεται στο *Physics Today* τον Οκτώβριο 1993

³⁴ Το 1937 δημοσίευσε μια εργασία στην οποία περιέγραψε τις βασικές αρχές της θεωρίας για τα πειράματα σχετικά με τον μαγνητικό συντονισμό. Γι' αυτά τα πειράματα βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1947

Για να πραγματοποιηθεί η μετάβαση από ένα ενεργειακό επίπεδο σ' ένα άλλο απαιτείται η επίδραση ενός πρόσθετου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατάλληλης συχνότητας, ώστε να ισχύει η σχέση $\Delta U = \hbar\omega$. Δηλαδή είναι δυνατόν να διεγερθεί με ένα ασθενές μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο ένα άτομο που βρίσκεται σ' ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Αρκεί να υπάρξει συντονισμός της συχνότητας του ασθενούς μαγνητικού πεδίου με τη συχνότητα ω_p που αντιστοιχεί στη συχνότητα μετάπτωσης-διέγερσης. Ο Rabi κατασκεύασε μια πειραματική διάταξη, ενσωματώνοντας αυτά τα στοιχεία, εξετάζοντας άτομα με $s_{\text{spin}} = 1/2$. Η πειραματική διάταξη ουσιαστικά αποτελεί μια εξέλιξη αυτής που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα Stern-Gerlach. Περιλαμβάνει τρεις μαγνήτες. Ο πρώτος δημιουργεί μαγνητικό πεδίο που χαρακτηρίζεται από ισχυρή κλίση· με θετική τιμή για την παράγωγο dB_z/dz . Η διάταξη περιλαμβάνει πέτασμα με σχισμή που εξασφαλίζει ότι τα άτομα μπορούν να ακολουθήσουν συγκεκριμένες τροχιές, έτσι ώστε άτομα που θα απομακρυνθούν από τον κλίβανο ακολουθώντας άλλες διαδρομές να εμποδιστούν. Ο δεύτερος μαγνήτης δημιουργεί ομογενές μαγνητικό πεδίο, οπότε οι διευθύνσεις των δεσμών μένουν ανεπηρέαστες. Περιλαμβάνει επίσης σύστημα από πηνία που δημιουργούν ένα οριζόντιο μαγνητικό πεδίο έντασης B' . Δηλαδή ο δεύτερος μαγνήτης δημιουργεί ένα σταθερό κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο έντασης B_0 και ένα ασθενές ταλαντούμενο πεδίο B' . Αν η συχνότητα ω του πεδίου αποκτήσει την τιμή ω_p δηλαδή την συχνότητα μετάπτωσης τότε κάποια άτομα που θα είχαν «spin πάνω» θα αποκτήσουν «spin κάτω».

Στην συνέχεια υπάρχει τρίτος μαγνήτης με αντεστραμμένο μαγνητικό πεδίο σε σχέση με τον πρώτο. Συνεπώς τα άτομα που είχαν «spin πάνω» και στον μαγνήτη 1 είχαν δεχθεί δύναμη προς τα κάτω τώρα θα δεχθούν δύναμη προς τα πάνω και αντίστροφα αυτά που είχαν «spin κάτω». Τα άτομα που άλλαξαν spin κατά τη μετάβαση από το δεύτερο μαγνήτη επειδή απέκτησαν συχνότητα ίση με τη συχνότητα μετάβασης θα συνεχίσουν την πορεία που είχαν και δεν θα μπορέσουν να φτάσουν στον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής κατασκευάζεται ανάλογα με τα άτομα που εξετάζονται. Εάν μελετώνται άτομα αλκαλίου τότε ο ανιχνευτής κατασκευάζεται από ένα λεπτό σε υψηλή

θερμοκρασία σύρμα βολφραμίου³⁵ που συνδέεται με ευαίσθητο αμπερόμετρο. Όταν άτομα Na καταλήγουν στον ανιχνευτή εξατμίζονται αφήνοντας ένα ηλεκτρόνιο δηλαδή μετατρέπονται σε κατιόντα Na. Η μέτρηση του ρεύματος που παράγεται είναι ανάλογο του αριθμού των ιόντων.

Όταν η συχνότητα B' του δεύτερου μαγνήτη γίνει ίδια με την συχνότητα μετάπτωσης ω_p (συντονισμός) τότε θα παρατηρηθεί ελάττωση στην ένταση του ρεύματος³⁶ που μετράει ο ανιχνευτής. Ενώ αν η συχνότητα B' δεν προκαλέσει συντονισμό στα άτομα, αυτά θα συνεχίσουν ανεπηρέαστα την πορεία τους κατά τη μετάβαση από το δεύτερο μαγνήτη προς τον τρίτο και τελικά στον ανιχνευτή.

Εκτός από τον Rabi, από τη δεκαετία του 1920 είχαν πραγματοποιηθεί πειράματα που εξέταζαν την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, στη μαγνητική ροπή ατόμων από τους Lenz, Ehrenfest, Breit κ.α. Ιδιαίτερη σημασία δίνονταν στον τρόπο που ένα σύστημα θα έφτανε σε θερμική ισορροπία. Ο I. Waller το 1932 δημοσίευσε μια εργασία όπου περιέγραψε τη διαδικασία με την οποία ένα σύστημα φτάνει σε κατάσταση ισορροπίας³⁷, όπου περιέγραψε δύο τρόπους αλληλεπίδρασης³⁸ των spin των ηλεκτρονίων ή των πυρήνων: Την αλληλεπίδραση μεταξύ των spin των σωματιδίων μεταξύ τους και την αλληλεπίδραση μεταξύ των spin των σωματιδίων και του πλέγματος της ύλης δηλαδή των γειτονικών ατόμων. Το 1937 οι H. Casimir και F. Dupre παρατηρούν ότι κατά την αλληλεπίδραση spin-spin τα ηλεκτρόνια φτάνουν πολύ γρήγορα σε κατάσταση ισορροπίας (σε χρόνο 0,1msec), ενώ η αλληλεπίδραση των σωματιδίων με το πλέγμα - το οποίο βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από το σύστημα των ηλεκτρονίων - οδηγείται σε ισορροπία τουλάχιστον μετά από 1msec. Αυτή η διαφορά στους χρόνους ισορροπίας ουσιαστικά χωρίζει το μαγνητικό κρύσταλλο σε δύο υποεπίπεδα, με διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα πειράματα ουσιαστικά έδειξαν τη δυνατότητα να παραχθούν μέσω αυτών των

³⁵ «Οι διαλέξεις του Feynman, τόμος Β, Ηλεκτρομαγνητισμός και ύλη».

³⁶ Αφού θα υπάρξουν άτομα που θα αλλάξουν μετά τη μετάβαση από το δεύτερο μαγνήτη τη διεύθυνση του spin οπότε δεν θα καταγραφούν από τον ανιχνευτή.

³⁷ Relaxation phenomena.

³⁸ Spin-spin interaction, spin-lattice interaction.

αλληλεπιδράσεων αποτελέσματα που θα μπορούσαν να ανιχνευθούν στο μακροεπίπεδο³⁹.

Τα πρώτα επιτυχημένα πειράματα για την ανίχνευση του φαινομένου του μαγνητικού συντονισμού έγιναν ανεξάρτητα από τον F. Bloch στο Stanford, τον E. Purcell στο Harvard και τον E. Zavoisky στην Ε.Σ.Σ.Δ. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Purcell σε δείγματα παραφίνης και του Bloch σε νερό δημοσιεύτηκαν στο Physical Review τον Ιανουάριο 1946, ενώ ο Zavoisky είχε συμπεριλάβει αποτελέσματα των ερευνών του γύρω από φαινόμενα ηλεκτρικού παραμαγνητικού συντονισμού στη διδακτορική του διατριβή το 1944.

Ο Bloch αλλά και ο Luis Alvarez εξέλιξαν τη μέθοδο του Rabi επιτυγχάνοντας να υπολογίσουν την μαγνητική ροπή του νετρονίου με μεγάλη ακρίβεια αντικαθιστώντας το κεντρικό ταλαντευόμενο ασθενές μαγνητικό πεδίο με δύο ταλαντευόμενα πεδία στην είσοδο και στην έξοδο της δέσμης. Τα πειράματα σχετικά με το μαγνητικό συντονισμό έχουν ιδιαίτερη σημασία γιατί έδωσαν για πρώτη φορά τη δυνατότητα για να μελετηθεί το φαινόμενο της απορρόφησης σε συνδυασμό με την εξαναγκασμένη εκπομπή αλλά και της αντιστροφής πληθυσμού που έχει κομβική σημασία στην λειτουργία του laser. Στο πείραμα του Purcell χρησιμοποιήθηκε δείγμα παραφίνης μέσα σε κοιλότητα το οποίο δέχονταν την επίδραση στατικού μαγνητικού πεδίου. Όταν ταυτόχρονα δέχονταν την επίδραση ασθενούς μαγνητικού πεδίου και μικροκυμάτων παρατηρούνταν φαινόμενο απορρόφησης. Επειδή τα πρωτόνια έχουν spin $\frac{1}{2}$ θα μπορούσαν να αποκτήσουν μετά την επίδραση του ασθενούς μαγνητικού πεδίου δύο διευθύνσεις. Το spin τους να είναι είτε παράλληλο είτε αντιπαράλληλο με την φορά του πεδίου. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δυο αυτών καταστάσεων αντιστοιχούσε όπως προέκυψε από το πείραμα σε συχνότητα 29,8MHz. Σ' αυτήν τη συχνότητα είχαμε απορρόφηση. Στη θερμοκρασία δωματίου η διαφορά μεταξύ του αριθμού των πρωτονίων που με παράλληλο spin και αυτών που έχουν αντιπαράλληλο είναι πολύ μικρή. Ωστόσο επειδή ο αριθμός των πυρήνων είναι μεγάλος, είναι

³⁹ Ο ολλανδός φυσικός C.J. Gorter προχώρησε σε πειράματα ανίχνευσης πυρηνικού συντονισμού εξετάζοντας την αύξηση στη θερμοκρασία.

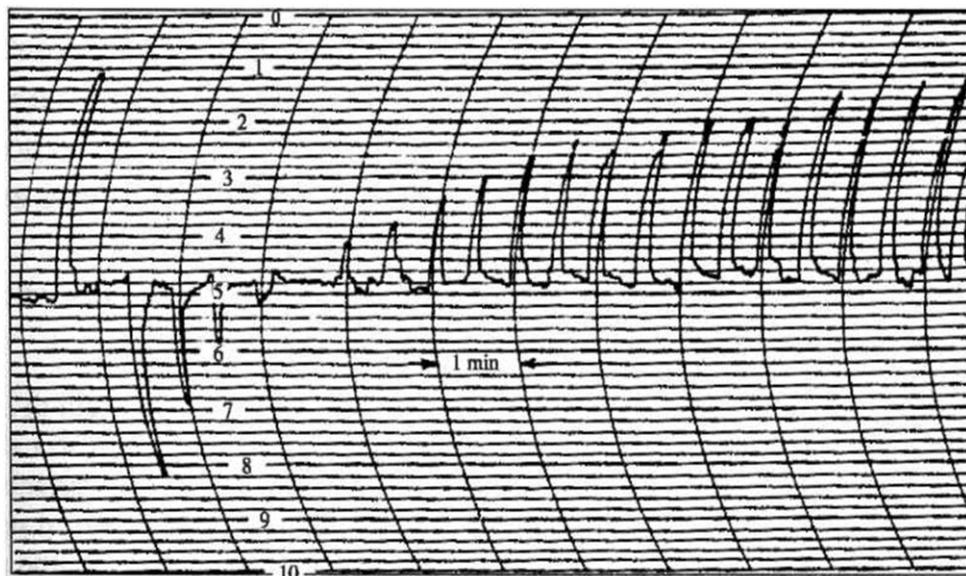
δυνατόν να υπάρξουν παρατηρήσιμα αποτελέσματα μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία.

Το 1946 ο Bloch κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε δείγμα νερού παρατηρεί ότι ο χρόνος που απαιτείται για να αποκατασταθεί ισορροπία κυμαίνεται από 0,5 sec σε 1min. Για να καταλήξει σε μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια επιδρά στο δείγμα του με ισχυρό μαγνητικό πεδίο και με ασθενές ταλαντευόμενο μαγνητικό πεδίο. Μεταβάλλοντας τη συχνότητα μπορεί να προκληθεί όπως έχει αναφερθεί συντονισμός οπότε να υπάρξει η χαρακτηριστική κορυφή. Αν όμως αλλάξει απότομα η διεύθυνση του στατικού μαγνητικού πεδίου τότε παρατηρείται καμπύλη συντονισμού με «αντίθετη φορά». Αρχικά οι μαγνητικές ροπές ήταν ευθυγραμμισμένες με τη φορά του μαγνητικού πεδίου και το ασθενές εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο δια μέσω του μηχανισμού της απορρόφησης δημιουργεί μεταβάσεις προς το υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο (καμπύλη απορρόφησης). Όταν το στατικό πεδίο αλλάξει φορά τα spin προσανατολίζονται αντιπαράλληλα στο πεδίο οπότε το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί φαινόμενο εξαναγκασμένης εκπομπής από το υψηλότερο στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο, μέχρι το σύστημα να επανέλθει σε κατάσταση ισορροπίας. Ο νέος χρόνος κυμαίνονταν σε μερικά δευτερόλεπτα. Σ' αυτό το χρονικό διάστημα εμφανίζονταν κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών, αφού περισσότερα σωματίδια βρίσκονταν στο υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο από το χαμηλότερο. Ο Bloch δεν έδωσε ιδιαίτερη σημασία στο φαινόμενο της αντιστροφής πληθυσμών⁴⁰ σε αντίθεση με τους Purcell, Pound αλλά και τον Ολλανδό φυσικό Bloembergen που ασχολήθηκαν με την μελέτη του φαινομένου.

Το 1951 οι Purcell και Pound για να περιγράψουν το φαινόμενο της αρνητικής απορρόφησης εισάγουν την έννοια της αρνητικής θερμοκρασίας. Σε ένα πείραμα ανάλογο με το πείραμα του Bloch προκάλεσαν μια πολύ γρήγορη αλλαγή στη φορά του μαγνητικού πεδίου, σε σχέση με το χρόνο που απαιτούνταν για να έρθει σε θερμοδυναμική ισορροπία η συνιστώσα του διανύσματος της μαγνητικής ροπής με το γειτονικό πλέγμα. Αυτή η χρονική

⁴⁰ Το 1958 χρησιμοποιήθηκε μια ανάλογη μέθοδος για να επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών στο maser ύλης δυο επιπέδων.

καθυστέρηση είχε ως αποτέλεσμα να εμφανιστεί το φαινόμενο της αρνητικής απορρόφησης.



Εικόνα 2.6.2
Το σχήμα περιλαμβάνεται στην εργασία των Purcell, Pound που δημοσιεύτηκε το 1951 στο *Physical Review*

Εικόνα 2.6.2 Το σχήμα περιλαμβάνεται στην εργασία των Purcell, Pound που δημοσιεύτηκε το 1951 στο *Physical Review*

Όπως φαίνεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη του σχήματος, η κορυφή στα αριστερά αντιστοιχεί σε μια συνήθη καμπύλη συντονισμού.

Αμέσως μετά παρατηρείται μια συμμετρική κορυφή με φορά προς τα κάτω που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή κατά την οποία το πεδίο έχει αντιστραφεί, οπότε προκαλείται αρνητική απορρόφηση.

Οι αρνητικές κορυφές μειώνονται σταδιακά μέχρι το σύστημα να φτάσει σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, όπου η αρνητική απορρόφηση (εκπομπή) και η απορρόφηση αλληλοαναιρούνται αφού παρατηρείται εξίσωση των πληθυσμών στα ανώτερα και τα κατώτερα ενεργειακά επίπεδα. Η εμφάνιση θετικών κορυφών τέλος, σηματοδοτεί την αποκατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Η εισαγωγή της έννοιας της αρνητικής θερμοκρασίας⁴¹ ουσιαστικά περιγράφει την αυξημένη πιθανότητα να καταληφθούν οι ανώτερες ενεργειακές στάθμες από τις κατώτερες, δηλαδή την κατάσταση κατά την οποία συμβαίνει η αντιστροφή πληθυσμών.

⁴¹ Σύμφωνα με την προσέγγιση του Boltzmann ο αριθμός των μορίων που βρίσκονται σε μια ανώτερη ενεργειακά κατάσταση θα είναι μικρότερος από αυτόν που βρίσκονται σε χαμηλότερη εξ' αιτίας του εκθετικού παράγοντα $e^{\frac{-\epsilon}{kT}}$ που θα είναι πάντα μικρότερος από τη μονάδα, λόγω του αρνητικού εκθέτη. Αν όμως θεωρηθεί ότι υπάρχει «αρνητική» θερμοκρασία τότε ο εκθέτης γίνεται θετικός και ο αριθμός των μορίων αυξάνεται. Έτσι μπορεί να περιγραφεί θερμοδυναμικά η κατάσταση στην οποία εμφανίζεται για μικρό χρονικό διάστημα το φαινόμενο της αντιστροφής πληθυσμών.

3. Maser και Laser

3.1 Το maser

Το 1952 σε ένα συνέδριο στον Καναδά παρουσιάζεται μια ενδιαφέρουσα εργασία⁴² από τον Joseph Weber, ο οποίος είχε ασχοληθεί στη διδακτορική του διατριβή με τα μικροκύματα και τη χρησιμοποίησή τους στη φασματοσκοπία. Η επίδραση που είχε σε ένα αέριο η ακτινοβολία σε συνδυασμό με τα φαινόμενα της εκπομπής και της απορρόφησης ήταν αντικείμενο θεωρητικών και πειραματικών μελετών. Στη φασματοσκοπία αν κάποιο αέριο εισαχθεί ανάμεσα στην πηγή των μικροκυμάτων και στον ανιχνευτή θα παρουσιαστούν φαινόμενα απορρόφησης. Ο Weber περιέγραψε ένα σύστημα το οποίο περιελάμβανε δύο ενεργειακές καταστάσεις E_1 και E_2 με την E_2 να είναι μεγαλύτερη από την E_1 , στις οποίες υπάρχουν αντίστοιχα n_1 και n_2 σωματίδια (άτομα ή μόρια). Αν η συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας αποκτήσει την κατάλληλη τιμή θα υπάρξουν φαινόμενα απορρόφησης και η ισχύς που θα απορροφηθεί θα είναι ανάλογη του πληθυσμού στο πρώτο επίπεδο που είναι ο n_1 . Τα σωματίδια που βρίσκονται στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο E_2 λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής θα εκπέμπουν ακτινοβολία ίδιας συχνότητας και με ισχύ ανάλογη του πληθυσμού n_2 . Η διαφορά στην ισχύ κατά την απορρόφηση και την εκπομπή είναι ανάλογη της διαφοράς των πληθυσμών n_1 , n_2 των δύο ενεργειακών καταστάσεων. Επειδή η διαφορά $n_1 - n_2$ σε κανονικές συνθήκες είναι θετική, παρουσιάζονται φαινόμενα απορρόφησης. Αν όμως υπάρξει με κάποιο τρόπο ενίσχυση και αυξηθούν τα σωματίδια στο ανώτερο επίπεδο θα έχουμε φαινόμενα εξαναγκασμένης εκπομπής όπως πρότειναν και οι Purcell, Pound που όπως έχει προαναφερθεί εισήγαγαν την έννοια της αρνητικής θερμοκρασίας. Ωστόσο ο Weber δεν προχώρησε στην πρακτική εφαρμογή

⁴²Η εργασία δημοσιεύτηκε το 1953 στο περιοδικό "Transaction of the Institute of Radio Engineers Professional Group on Electron Devices".

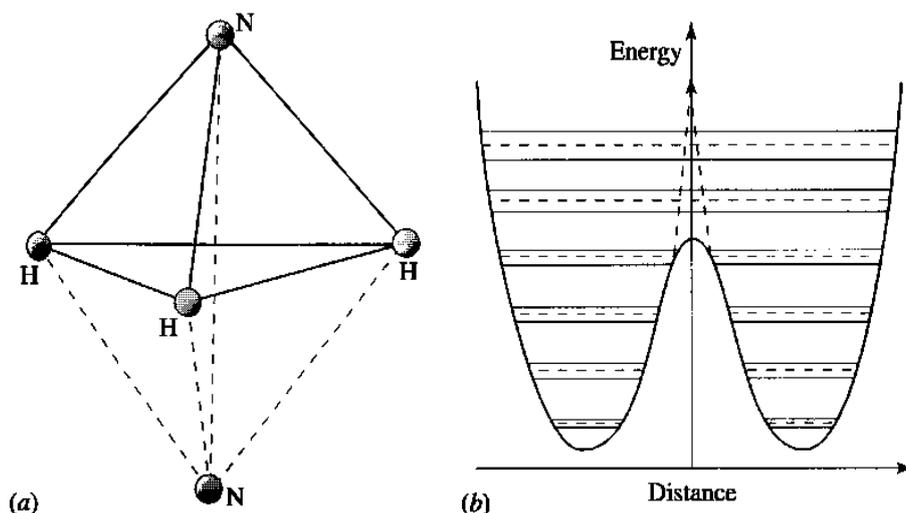
των μελετών του, που θα οδηγούσαν πιθανόν σε κάποια συσκευή⁴³, σε αντίθεση με τον Charles Townes.

Ο Townes εργάστηκε προπολεμικά στη Bell Telephone Laboratories και κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου στις εφαρμογές των radar μαζί με τον Dean Wooldridge. Το 1947 αποδέχτηκε την πρόσκληση του I. I. Rabi για να μεταπηδήσει στο πανεπιστήμιο της Columbia στο Εργαστήριο Ακτινοβολιών, το οποίο αναλάμβανε project από το υπουργείο Άμυνας και διάφορες εταιρίες που είχε συστήσει⁴⁴ σχετικά με την μελέτη και τις εφαρμογές των μικροκυμάτων. Από το 1950 προσπαθούσε να επιλύσει τεχνικά προβλήματα ώστε να παράξει ακτινοβολία με μήκος κύματος στην περιοχή των χιλιοστών. Σ' ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα που αναφέρεται από τον Mario Bertolotti στο "The History of laser" ο ίδιος ο Townes σημειώνει ότι η αποτυχία στην δημιουργία μιας γεννήτριας κυμάτων με μήκος κύματος στην περιοχή των χιλιοστών οφείλονταν στην αδυναμία κατασκευής ενός αντηχείου με πολύ μικρές διαστάσεις η οποία θα έδινε τη δυνατότητα να υπάρξει ανατροφοδότηση της ακτινοβολίας και άρα ενίσχυση της. Γι' αυτόν τον σκοπό θα έπρεπε οι διαστάσεις της κοιλότητας να είναι συγκεκριμένες για να είναι δυνατός ο περιορισμός της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, ώστε τα μόρια που θα χρησιμοποιηθούν να μπορούν να αλληλεπιδράσουν. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, οι διαστάσεις θα έπρεπε να είναι πολύ μικρές για να παραχθεί ακτινοβολία με μήκος κύματος 0,5mm, γι' αυτόν το λόγο αποφάσισε να μελετήσει την ακτινοβολία με μήκος κύματος 1,25cm που εκπέμπεται από το μόριο της αμμωνίας. Ο Townes χρησιμοποίησε το μόριο της αμμωνίας το οποίο όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί έχει πυραμιδική δομή με τα άτομα του υδρογόνου να βρίσκονται στη βάση και το άτομο του αζώτου στην κορυφή (ή στο κάτω επίπεδο από τη βάση ανάλογα με τον προσανατολισμό της πυραμίδας). Το άτομο του αζώτου θα ταλαντώνεται κάθετα στο επίπεδο που ορίζουν τα άτομα του υδρογόνου. Ταυτόχρονα το μόριο της αμμωνίας περιστρέφεται γύρω από δύο αμοιβαία ορθογώνια συστήματα αξόνων, όπου σύμφωνα με την κβαντική μηχανική οι περιστροφικές και οι κινήσεις λόγω

⁴³Επίσης στην εργασία του Weber δεν γίνονταν καμία αναφορά στο ζήτημα της ανατροφοδότησης που έχει εξαιρετική σημασία για να επιτευχθούν συνεχείς ταλαντώσεις.

⁴⁴Army Signal Corps, Naval Office of Research.

δόνησης θα είναι κβαντισμένες όποτε τα επίπεδα ενέργειας θα είναι συγκεκριμένα.



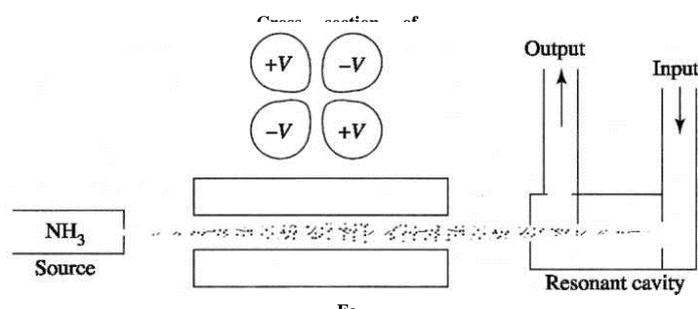
Εικόνα 3.1.1 Στο σχήμα αναπαριστάται η πυραμιδική δομή του μορίου της αμμωνίας καθώς και το δυναμικό των ατόμων του Αζώτου

Οι Townes, Gordon και Zeiger ουσιαστικά τροποποίησαν την ιδέα του Weber και προσπάθησαν να δημιουργήσουν φαινόμενο αντιστροφής πληθυσμών ώστε να καταλήξουν σε εξαναγκασμένη εκπομπή από το ανώτερο επίπεδο. Σε κατάσταση ισορροπίας ο αριθμός των σωματιδίων n_1 που βρίσκονται στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη θα είναι μεγαλύτερος από τον n_2 που θα βρίσκεται στην ανώτερη, οπότε η απορρόφηση θα υπερισχύει.

Αν όμως ήταν δυνατόν να επιλέγουν και να διαχωριστούν τα σωματίδια ώστε στο σύστημα να υπερισχύουν αριθμητικά τα σωματίδια που βρίσκονταν στην ανώτερη στάθμη τότε θα προκαλούνταν εξαναγκασμένη εκπομπή. Για το σκοπό αυτό ο Townes αποφάσισε να θερμάνει δέσμη μορίων αμμωνίας και στην συνέχεια να συγκεντρώσει και να διαχωρίσει τα διεγερμένα άτομα. Χρησιμοποίησε ηλεκτρικό πεδίο ώστε το μόριο να παραμορφωθεί και να εμφανιστεί ηλεκτρική διπολική ροπή που θα έχει διαφορετικό πρόσημο σε

σημεία του μορίου. Στην συνέχεια θα χρησιμοποιούσε ισχυρούς φακούς⁴⁵ για να εστιάσει την δέσμη της αμμωνίας που θα αποτελούνταν από διεγερμένα άτομα, σε μια μικρή κοιλότητα⁴⁶ για να δημιουργηθεί συντονισμός με συχνότητα 23,830MHz.

Τον Απρίλιο του 1953 μετά από αλλεπάλληλες αποτυχίες, τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία η συσκευή που ονομάστηκε από τους Townes, Gordon, Wang maser (Microwave Amplification by the Stimulate Emission of Radiation).



Εικόνα 3.1.2. Maser Αμμωνίας

Μια δέσμη αμμωνίας θερμαίνεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και εξέρχεται σε ένα σύστημα από ηλεκτρόδια με στόχο τη συγκέντρωση της δέσμης η οποία περιέχει μόρια τόσο από την κατώτερη όσο και από την ανώτερη ενεργειακή στάθμη. Τα ηλεκτρόδια δημιουργούν ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαχωρίζει τη δέσμη. Τα μόρια που βρίσκονται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, συνεχίζουν να κινούνται στην ευθεία του άξονα, ενώ τα μόρια που βρίσκονται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη απομακρύνονται. Η δέσμη που πλέον αποτελείται από διεγερμένα μόρια και

⁴⁵Το 1950 οι Wolfgang Paul, Helmut Friedburg και Hans Bennewitz είχαν σχεδιάσει ειδικούς φακούς για να εστιάσουν δέσμες ατόμων και μορίων. Ο Paul κατασκεύασε μια τρισδιάστατη διάταξη που μπορούσε να συγκεντρώσει ιόντα σε μια περιοχή πολύ μικρών διαστάσεων (Paul trap), για την οποία βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1989 μαζί με τους N. Ramsey και H. Dehmelt που σχεδίασαν με διαφορετικό τρόπο μια ανάλογη παγίδα.

⁴⁶ Η σημασία της κοιλότητας στο συντονισμό των σωματιδίων της δέσμης, στην αλληλεπίδραση και τελικά στην εκπομπή ακτινοβολίας, καταλυτικής σημασίας για τη δημιουργία του maser πιστώνεται στον Townes. Παρά το γεγονός ότι ο Weber είχε πρώτος προτείνει ένα θεωρητικό σχήμα για την αντιστροφή πληθυσμών, δεν είχε συνειδητοποιήσει τη σημασία της κοιλότητας.

είναι καλά ευθυγραμμισμένη εισέρχεται στην κοιλότητα που έχει ρυθμιστεί για να προκαλέσει συντονισμό στα 23,830MHz που είναι η συχνότητα μετάδοσης της αμμωνίας.

Αν υπάρξει ο απαιτούμενος αριθμός διεγερμένων σωματιδίων το σύστημα θα εκτελέσει μια συνεχή ταλάντωση. Αν δεν υπάρξει ο απαιτούμενος αριθμός διεγερμένων ατόμων τότε απλά η συσκευή μεταδίδει ένα ενισχυμένο σήμα, λειτουργεί δηλαδή ως ενισχυτής. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της συσκευής ήταν ότι λειτουργούσε με ελάχιστο «θόρυβο». Αυτή η ιδιότητα ήταν εξαιρετικής σημασίας για πειράματα φασματοσκοπίας στα οποία απαιτούνταν μεγάλη ακρίβεια.

Στη Σοβιετική Ένωση η πορεία για την εφεύρεση του maser δεν ξεκίνησε από τα radar αλλά από τη φασματοσκοπία. Κέντρο των ερευνών ήταν το Lebedev Physics Institute (FIAN). Το 1921 είχε ιδρυθεί το Ινστιτούτο για τα Μαθηματικά και την Φυσική της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών με διευθυντές τους διακεκριμένους φυσικούς B.A. Steklov, A.F. Ioffe, A.N. Krylov, I.M. Vinogradov.

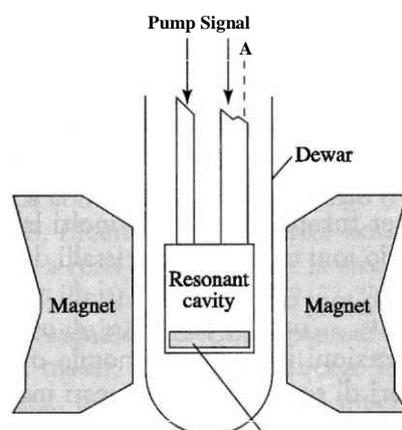
Τον Απρίλιο του 1934 μετατρέπεται σε Ινστιτούτο Φυσικής της Σοβιετικής Ακαδημίας Επιστημών στο οποίο δίνεται τιμητικά το όνομα του φυσικού P.N. Lebedev και τη διεύθυνση αναλαμβάνει ο Sergeil. Vavilov. Ο μαθητής του Vavilov, Pavel. A. Cerenkov ανακάλυψε ότι κατά την κίνηση ηλεκτρονίων μέσα σε νερό εκπέμπεται μια χαρακτηριστική μπλε ακτινοβολία. Οι M. Frank και I.Tamn προχώρησαν στη θεωρητική περιγραφή - τεκμηρίωση του φαινομένου - αποδεικνύοντας ότι φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σε ένα μέσο με ταχύτητες μεγαλύτερες του φωτός εκπέμπουν ακτινοβολία. Η μελέτη σωματιδίων είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και των αντίστοιχων τεχνικών, τη βελτιστοποίηση του εργαστηριακού εξοπλισμού. Οι έρευνες με στόχο την εφεύρεση της ατομικής βόμβας τόσο στη Δύση αλλά και στη Σοβιετική Ένωση επιτάχυναν ιδιαίτερα τις εξελίξεις σ' αυτό τον τομέα. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 1945 διατυπώθηκαν από τους E.M.Mc Millan στην California και τον V. Vesper η αρχή λειτουργίας του σύγχροτου, ενός κυκλικού επιταχυντή σωματιδίων καταλυτικής σημασίας για τις έρευνες στην σωματιδιακή φυσική . Ο A.M.Prokhorov που εργάζονταν στην ακτινοβολία του

σύγχροτου μετά από πρόταση του Vanilov όπως και ο N. Basov άρχισαν τις έρευνες στο πεδίο της μικροκυματικής φασματοσκοπίας. Για να επιτύχουν μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις έπρεπε να καταπολεμήσουν το «θόρυβο» των συσκευών. Ουσιαστικά έπρεπε να διαφοροποιήσουν τον πληθυσμό των σωματιδίων που βρίσκονταν στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη από αυτά που βρίσκονταν στην ανώτερη δημιουργώντας μια κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών. Για τον σκοπό αυτό θα έπρεπε να επιδράσουν με ανομοιογενές μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο. Επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν μια μοριακή δέσμη με υψηλή διπολική ροπή όπως αυτή του Φθοριούχου Καισίου (CsF). Η μετάδοση μοριακής δέσμης από το υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο διαμέσου ενός αντηχείου έτσι ώστε να υπάρξει αλληλεπίδραση της δέσμης και να προκληθεί ταλάντωση, είχε περιγραφεί θεωρητικά στο Σοβιετικό Συνέδριο ράδιο φασματοσκοπίας τον Μάιο του 1952. Η πρώτη εργασία των Prokhorov, Basov στάλθηκε το 1953 και δημοσιεύτηκε⁴⁷ το 1954 τον Οκτώβριο. Στην εργασία περιλαμβάνονταν μια λεπτομερής μελέτη για τη δυνατότητα διαχωρισμού ίδιων μορίων που βρίσκονται σε διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα με την επίδραση μη ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Τα μόρια που βρίσκονται σε μια προεπιλεγμένη ενεργειακή κατάσταση μπορούν να διαβιβαστούν σε μια κοιλότητα που θα λειτουργήσει ως αντηχείο όπου θα προκληθεί είτε ενίσχυση είτε απορρόφηση. Την συσκευή τους την ονόμασαν «μοριακή γεννήτρια» και περιέγραφαν ποσοτικές συνθήκες για τη λειτουργία της. Άλλωστε αμέσως μετά την ανακοίνωση του Townes, μέσα σε λίγους μήνες ο Basov κατασκεύασε και έθεσε σε λειτουργία το πρώτο maser στην Σοβιετική Ένωση. Το 1964 βραβεύτηκαν με βραβείο Nobel «για τη βασική έρευνα στο πεδίο της κβαντικής ηλεκτρονικής, που οδήγησε στην κατασκευή των ταλαντωτών, ενισχυτών βασισμένων στις αρχές λειτουργίας των maser-laser» οι Townes, Basov και Prokhorov

⁴⁷Journal of Experimental and Theoretical Physics.

3.2 Η εξέλιξη του maser

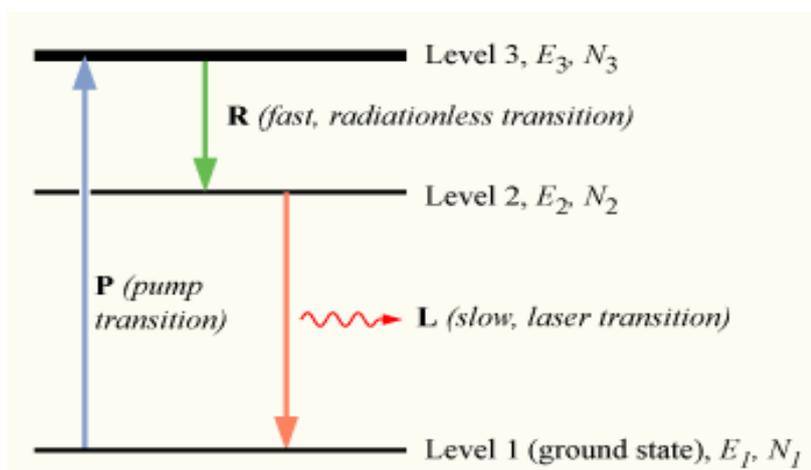
Η περαιτέρω ανάπτυξη του maser συνετέλεσε στη βελτίωση της λειτουργίας του και ανέδειξε τη δυνατότητα δημιουργίας του laser. Ιδιαίτερα σημαντικός σταθμός ήταν η ανάπτυξη του maser τριών επιπέδων καθώς και του maser στερεής κατάστασης. Το βασικό μειονέκτημα του maser αμμωνίας ήταν ότι λειτουργούσε σε μια πολύ συγκεκριμένη συχνότητα εκπέμποντας μια λεπτή γραμμή και ότι δεν ήταν δυνατόν να ρυθμιστεί για να λειτουργεί σε διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων γεγονός που συντελούσε στον περιορισμό του εύρους λειτουργίας του. Η χρησιμοποίηση διαφορετικών υλικών⁴⁸ αλλά και άλλων τεχνικών έδωσε άλλες προοπτικές. Άλλωστε στα περισσότερα πανεπιστήμια γίνονταν εκτεταμένες μελέτες του φαινομένου του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού, της υπεραγωγιμότητας και των ημιαγωγών, ενώ πρώτα στην Αμερική και στην συνέχεια στην Σοβιετική Ένωση, την Αγγλία αλλά και τη Γερμανία μέσα στην δεκαετία του 1940 είχαν ιδρυθεί τμήματα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης, ενώ υπήρχε στενή σύνδεση με τη βιομηχανία.



Εικόνα 3.2.1. Maser στερεάς κατάστασης

⁴⁸ Η μελέτη σιδηρομαγνητικών και παραμαγνητικών υλικών είχε αποκαλύψει τις ενδιαφέρουσες ιδιότητες τους γιατί η συγκέντρωση παραμαγνητικών ιόντων κατά την επίδραση ανομοιογενούς μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Zeeman), ήταν χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τον αριθμό των μορίων αμμωνίας στη δέσμη που χρησιμοποιήθηκε στο maser.

Στη συνέχεια ιδρύθηκαν και τμήματα Φυσικής Συμπυκνωμένης ύλης⁴⁹ με στόχο τη μελέτη της στερεής αλλά και της υγρής κατάστασης της ύλης, των πολυμερών του πλάσματος κλπ. Ο Ολλανδός φυσικός N. Bloembergen σκέφτηκε να δημιουργήσει ένα maser τριών επιπέδων όπου θα μπορούσε να δημιουργήσει αντιστροφή πληθυσμών με τη βοήθεια των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τριών επιπέδων. Αντικατέστησε⁵⁰ κάποια άτομα στο κρυσταλλικό πλέγμα με άλλα άτομα με αποτέλεσμα να μπορούν να διαχωριστούν τα ενεργειακά τους επίπεδα από αυτά των γειτονικών ατόμων. Στο σχήμα που ακολουθεί περιγράφεται η λειτουργία του maser τριών επιπέδων όπου n_1, n_2, n_3 οι πληθυσμοί που αντιστοιχούν στα ενεργειακά επίπεδα E_1, E_2, E_3 .



Εικόνα 3.2.2 Maser τριών καταστάσεων

Το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί έχει τρία διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα στα οποία αντιστοιχούν τρεις διαφορετικοί πληθυσμοί για τους οποίους ισχύει $n_1 > n_2 > n_3$. Στο σύστημα εφαρμόζεται ισχυρή ακτινοβολία

⁴⁹ Τόσο στις δυτικές χώρες αλλά και στη Σοβιετική Ένωση η μελέτη των υλικών και των ιδιοτήτων τους, όπως και η βελτιστοποίησή τους είχε ως αποτέλεσμα πέρα από την ανάπτυξη του τομέα να υπάρξουν κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα και πολλές βραβεύσεις με Nobel. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν οι Schockley, Bardeen και Brattain που βραβεύτηκαν το 1956 για την δημιουργία του κρυσταλλοτρίοδου (transistor) και τη μελέτη των ημιαγωγών, ο Landau το 1962 για την θεωρία του σχετικά με το υγρό ήλιο, ο Klaus von Klitzing το 1985 για την ανακάλυψη του κβαντικού φαινομένου Hall και οι Geim, Novoselov το 2010 για τις εργασίες τους σχετικά με το γραφένιο.

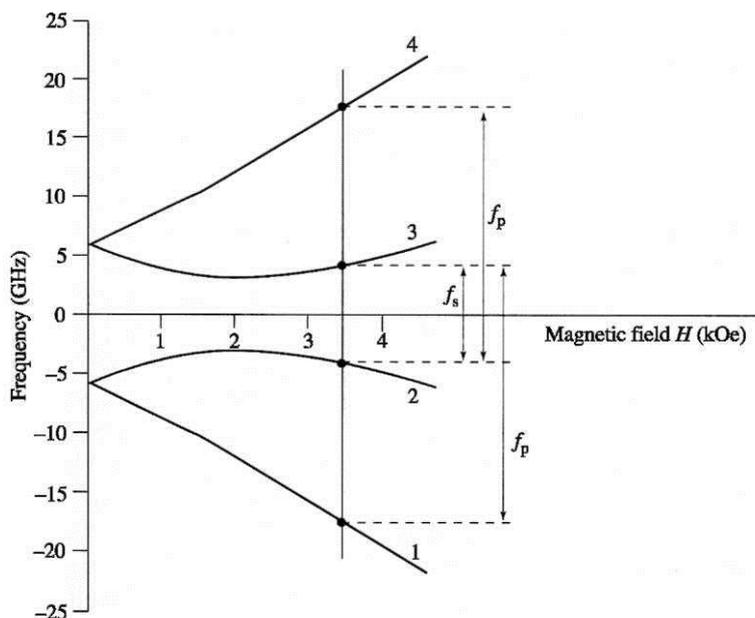
⁵⁰ Μια τεχνική γνωστή και ως doping.

άντλησης με συχνότητα f_{13} που αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων ενεργειακών επιπέδων. Απορροφάται ενέργεια με αποτέλεσμα σταδιακά οι πληθυσμοί n_1 και n_3 τείνουν να εξισώνονται ενώ ο πληθυσμός n_2 μένει ανεπηρέαστος. Λόγω της διαδικασίας άντλησης ο n_3 όπως έχει προαναφερθεί αυξάνεται ενώ ο n_1 μειώνεται οπότε μπορεί να γίνει μικρότερος και από τον n_3 αλλά και από το n_2 . Δημιουργείται δηλαδή κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών, άρα και εξαναγκασμένη εκπομπή με συχνότητες f_{32} ή f_{21} . Προκειμένου να υπάρξουν συγκεκριμένες διαφορές στα ενεργειακά επίπεδα το σύστημα πρέπει να βρίσκεται υπό πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Εκτός από τον Bloembergen που δημοσίευσε στο περιοδικό *Physical Review* στις 15 Οκτωβρίου 1956 την πρόταση για το maser, στα Bell Laboratories ανάλογη έρευνα διεξήγαγαν οι H.E. Scovil, G. Feher, H. Seidel που κατασκεύασαν το 1957 πρώτο maser τριών επιπέδων στερεάς κατάστασης που λειτουργούσε με ιόντα γαδολινίου σε κρύσταλλο από λανθάνιο και θειϊκό αιθυλεστέρα (lanthanum ethyl sulfate), ενώ από το 1955 είχαν δημοσιεύσει τη δικιά τους πρόταση οι Basov και Prokhorov για ένα maser τριών επιπέδων το οποίο όμως δεν μπορούσε να ρυθμιστεί σε διαφορετικές συχνότητες.

Ιδιαίτερη σημασία στην εξέλιξη του maser και σημαντικός σταθμός στην εφεύρεση του laser έχει η χρησιμοποίηση κρυστάλλου οξειδίου του αργιλίου Al_2O_3 . Σύμφωνα με την εργασία⁵¹ των C. Kikuchi, J. Lambe, G. Makhov, R.W. Terhune από το πανεπιστήμιο του Michigan που εργάζονταν στα Willow Run Laboratories⁵² τα οποία χρηματοδοτούνταν από τον στρατό, το ruby ήταν ιδανικό υλικό για maser αφού είχε «χημική σταθερότητα, θερμική αγωγιμότητα, διηλεκτρικές ιδιότητες» και το ντοπάρισμα του με ιόντα σιδήρου ή χρωμίου βελτιώνει τις ιδιότητες του. Ο Kikuchi όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί χρησιμοποίησε γωνία $54^\circ 44'$ που απλοποιούσε ιδιαίτερα την επίλυση των εξισώσεων. Το 1957 στις 20 Δεκεμβρίου το maser τέθηκε σε λειτουργία στα 3,2 cm.

⁵¹ Δημοσιεύτηκε τον Ιούλιο 1959 στο *Journal of Applied Physics*.

⁵² Την δεκαετία του 1970 υπήρξαν γενικευμένες διαμαρτυρίες από τους φοιτητές για την λειτουργία του εργαστηρίου και τον ρόλο που είχε ως ερευνητικό κέντρο για τον στρατό με αποτέλεσμα την διακοπή της λειτουργίας και τον διαχωρισμό του από το Πανεπιστήμιο. Willow Run Laboratories: Separating from the University of Michigan. *Science* 18 Aug 1972: Vol. 177, Issue 4049, pp. 594-596. DOI: 10.1126/science.177.4049.



Εικόνα 3.2.3 Η διάταξη maser του Kikuchi

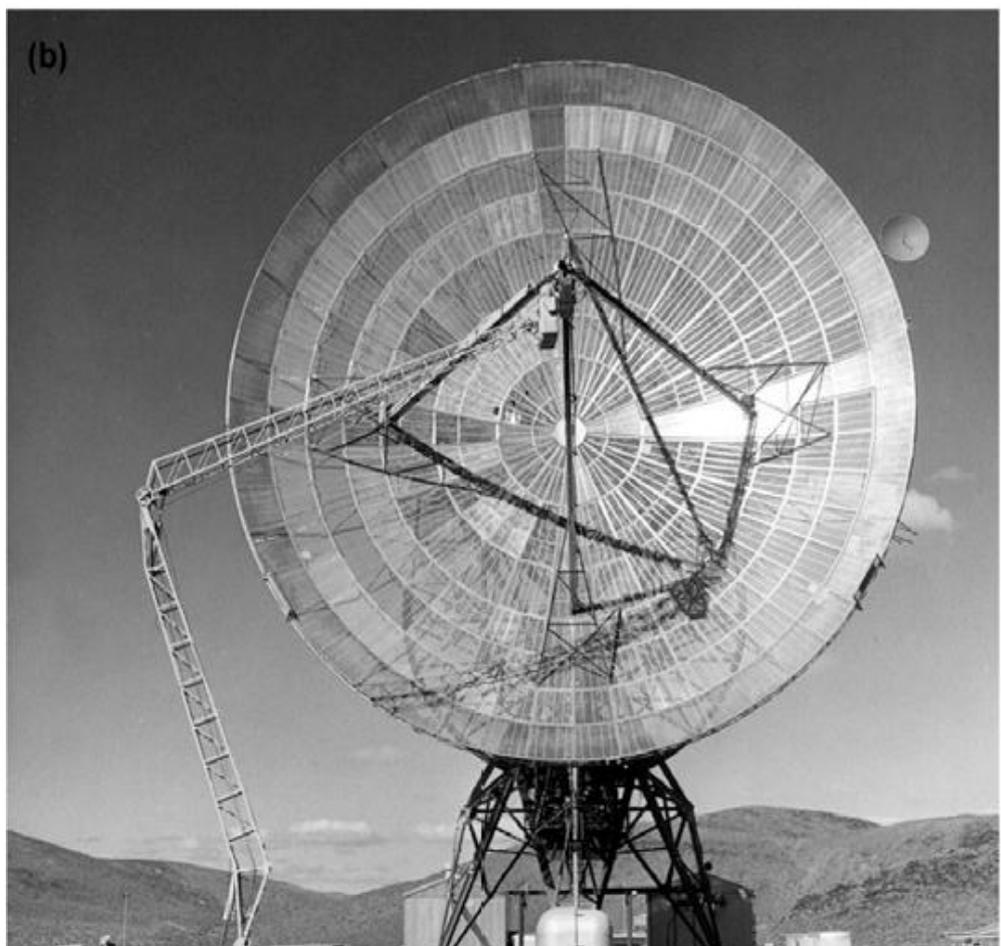
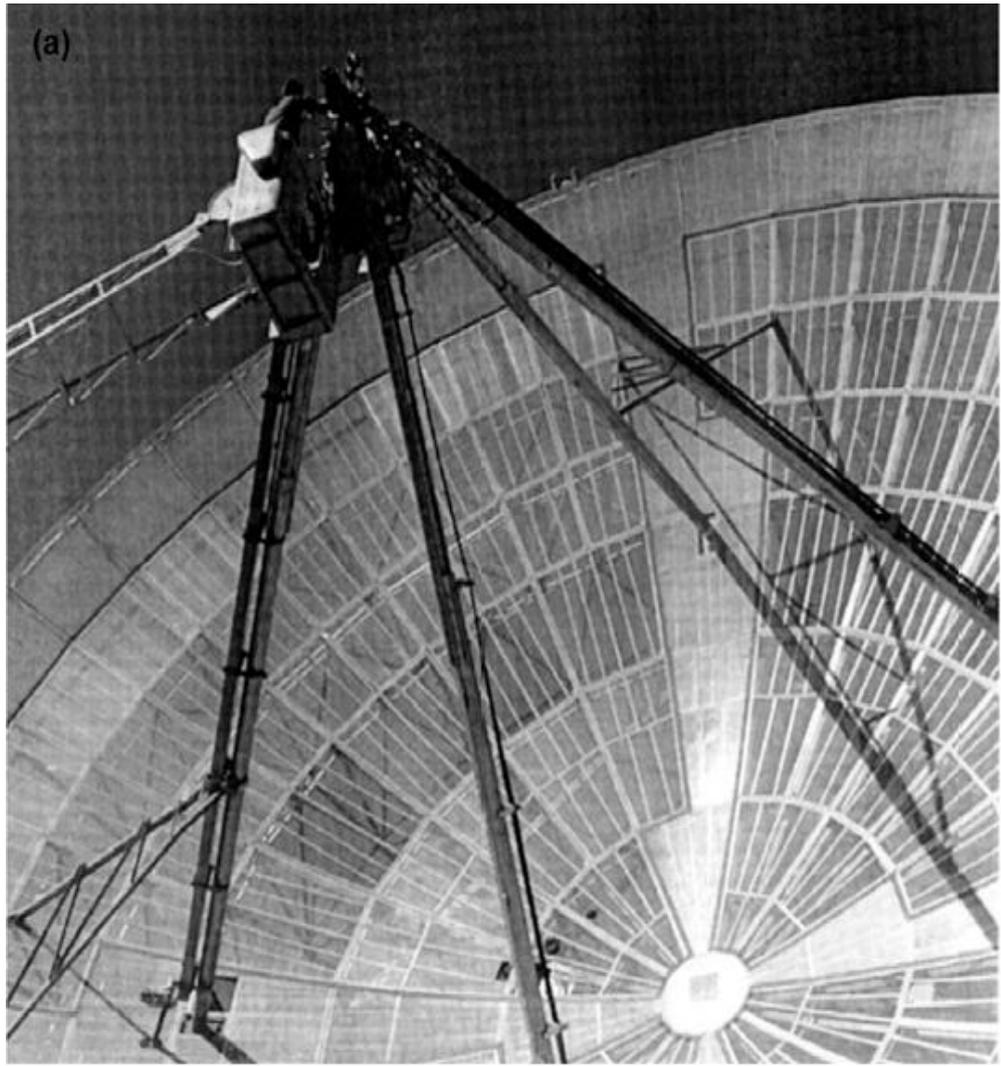
Στη συνέχεια η ομάδα του Townes κατασκεύασε ruby maser που λειτουργούσε στα 3cm, ενώ και ο Bloembergen κατασκεύασε maser χρησιμοποιώντας κρύσταλλο από κυανίδια του κοβαλτίου εμπλουτισμένα με ιόντα χρωμίου.

Τα maser χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως ευαίσθητοι ανιχνευτές για συστήματα radar που λειτουργούσαν με ελάχιστο θόρυβο. Επειδή όμως απαιτούνταν ογκώδεις πανίσχυροι μαγνήτες για να δημιουργήσουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο και σύστημα με υγρό ήλιο που να διατηρεί τη θερμοκρασία πολύ χαμηλή, τα συστήματα λόγω μεγέθους και βάρους δεν ήταν λειτουργικά. Παρ' όλα αυτά απέκτησαν ιδιαίτερη χρησιμότητα σε εφαρμογές στο πεδίο της ραδιο-αστρονομίας αφού ήταν δυνατόν να προσαρμοστούν σε ραδιοτηλεσκόπια ανιχνεύοντας πολύ ασθενείς ακτινοβολίες που έρχονταν από το διάστημα. Το 1965 οι A.A. Penzias και R.W. Wilson με ένα τέτοιο σύστημα ανίχνευσης από ruby maser κατάφεραν να ανιχνεύσουν μια ασθενή ακτινοβολία στα 3K που αποδόθηκε στη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang). Οι Penzias και Wilson έκαναν μετρήσεις με ένα ραδιοτηλεσκόπιο στο οποίο είχαν εφαρμόσει ένα maser στα 7,35 cm. Το σύστημα μετρούσε 3,5 K θόρυβο παραπάνω από αυτόν που είχε θεωρητικά υπολογιστεί. Αφού αποκλείστηκαν όλοι οι πιθανοί παράγοντες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μετρούσαν

κοσμική ακτινοβολία από το διάστημα. Για την εργασία αυτή βραβεύτηκαν το 1978 με το βραβείο Nobel μαζί με το Σοβιετικό Φυσικό R. Karitza που μελέτησε τις ιδιότητες του υγρού ηλίου εφευρίσκοντας τεχνικές για την υγροποίηση του. Το 1989 νέες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπολογίζοντας την ακτινοβολία στα 2,735K.

Οι φωτογραφίες που ακολουθούν περιέχονται στο «Low Noise System in the Deep Space Network» εκδόσεις Wiley στο άρθρο των R.C. Clauss και J.S. Shell με τον χαρακτηριστικό τίτλο “Ruby Maser”.

Η χρησιμοποίηση του maser στην Αστρονομία δεν είναι η μοναδική σύνδεση με το διάστημα αφού με έκπληξη τους οι αστροφυσικοί παρατήρησαν ότι υπάρχουν διαστρικά maser που εκπέμπουν ακτινοβολία με το φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής. Έτσι ανακαλύφθηκαν maser υδρογόνου που εκπέμπουν στα 1420 MHz στα οποία παρατηρείται αυθόρμητη εκπομπή ατομικού υδρογόνου από αέριο υδρογόνου σε χαμηλή θερμοκρασία (100K). Το 1965 παρατηρήθηκε μετάβαση μορίων OH από κοντινά αστέρια στα 1612, 1665, 1667, 1720 MHz σε θερμοκρασία μικρότερη των 50K. Συνολικά έχουν παρατηρηθεί maser από 36 μόρια (εκτός από υδρογόνο και OH, έχουν βρεθεί maser νερού, μεθανόλης, αμμωνίας, οξειδίου του πυριτίου) σε 200 μεταβάσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις η λειτουργία των maser γίνεται με άντληση από υπέρυθρη ακτινοβολία, είτε μέσω συγκρούσεων το μορίων των αερίων που κινούνται με πολύ μεγάλες ταχύτητες (300km/s) και το φαινόμενο απαντάται είτε στα πρώτα χρόνια σχηματισμού ενός άστρου, είτε προς το τέλος της ζωή του. Επίσης έχουν βρεθεί και διαγαλαξιακά maser που είναι εκατομμύρια φορές λαμπρότερα από αυτά των άστρων του γαλαξία μας.



3.3 Τα οπτικά maser

Με την κατασκευή και τη χρησιμοποίηση των maser στερεής κατάστασης τα περισσότερα κομμάτια του puzzle φαίνεται να έχουν συμπληρωθεί και η δημιουργία του laser να αποτελεί φυσικό επακόλουθο. Ωστόσο υπάρχουν ακόμα αρκετές παράμετροι που σχετίζονται με τη δυνατότητα δημιουργίας μιας συσκευής ενίσχυσης που θα λειτουργεί στο ορατό φάσμα. Τα μήκη κύματος είναι τόσο μικρά που θα έπρεπε να δημιουργηθεί μια αντίστοιχα μικρή κοιλότητα (με διαστάσεις λίγων μm) για να αλληλεπιδράσουν τα μόρια του μέσου και να έρθουν σε ισορροπία. Ταυτόχρονα για να επιτευχθεί εξαναγκασμένη εκπομπή το εκπεμπόμενο φωτόνιο πρέπει να έχει εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη ενέργεια από αυτήν που έχει στα maser, που η εκπομπή γίνονται στην περιοχή των cm.

Το πρόβλημα της κοιλότητας λύθηκε χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κατόπτρων που είχαν κατασκευάσει το 1899 οι C. Fabry και A. Perot δημιουργώντας το ομώνυμο συμβολόμετρο. Σ' αυτό η ακτινοβολία ταξίδευε με διαδοχικές ανακλάσεις στα κάτοπτρα. Ήταν λοιπόν δυνατόν να εισαχθεί κάποιο μέσο του οποίου η ακτινοβολία να μπορεί να ταξιδεύει ανακλώμενη από τα κάτοπτρα ώστε να αυξηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ της ακτινοβολίας και των διεγερμένων ατόμων. Αν και οι διαστάσεις του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες από το φάσμα του ορατού, είναι δυνατόν αν επιτευχθεί με μεγάλη ακρίβεια η τοποθέτηση των κατόπτρων η ακτινοβολία να υποστεί συνεχόμενες ανακλάσεις για όσο διάστημα απαιτείται ώστε να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η πρώτη πρόταση για την κατασκευή ενός maser στην περιοχή του ορατού έγινε από τον V.A. Fabrikant το 1940, ο οποίος για σειρά ετών μελετούσε τη σύνθεση του φάσματος και την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής εκκένωσης ενός αερίου. Ο Fabrikant είχε διατυπώσει την θεωρία σύμφωνα με την οποία υπάρχουν δύο είδη κρούσεων μεταξύ δύο ατόμων ή δύο ηλεκτρονίων. Στην πρώτη περίπτωση ένα σωματίδιο μπορεί να συγκρουστεί με κάποιο άλλο και να του μεταφέρει εκείνο το ποσό ενέργειας ώστε το σωματίδιο στόχος να διεγερθεί.

Στη δεύτερη περίπτωση ένα διεγερμένο σωματίδιο συγκρούεται με ένα άλλο που βρίσκεται στο κατώτερο επίπεδο και το πρώτο επιστρέφει στο βασικό επίπεδο ενώ το δεύτερο μεταφέρεται σε διεγερμένη στάθμη. Το φαινόμενο κλειδί και εδώ είναι αυτό της αντιστροφής πληθυσμών. Ο Fabrikant μελετά την πιθανότητα με τις κρούσεις δεύτερου είδους - στις οποίες διατυπώνει τον ευφυή ισχυρισμό ότι τα σωματίδια δεν χρειάζεται να είναι του ίδιου είδους, αρκεί να έχουν ίδια διεγερμένα ενεργειακά επίπεδα - να επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμών σε αντίθεση με αυτές του πρώτου είδους που θα «υπακούουν» στην κατανομή Maxwell-Boltzmann.

Το 1940 στη διδακτορική του διατριβή προτείνει πειραματικούς τρόπους για να επιτευχθεί η αντιστροφή πληθυσμών κατά την εκκένωση μείγματος αερίων. Οι έρευνες σταματούν κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου και δέκα χρόνια αργότερα στις 18 Ιουνίου 1951 καταθέτει μια εργασία με τον ιδιαίτερα μακροσκελή τίτλο «Μια μέθοδος ενίσχυσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (υπεριώδης, ορατό, υπέρυθρο, ραδιοκύματα), που χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα η ακτινοβολία που έχει ενισχυθεί να εισέρχεται σε ένα μέσο δημιουργώντας με διάφορους τρόπους αυξημένη συγκέντρωση στα σωματίδια της ανώτερης ενεργειακά στάθμης». **Στην εργασία διατυπώνεται η θέση ότι κατά τη μετάβαση της ακτινοβολίας διαμέσου κάποιου μέσου στο οποίο έχει επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών, η ένταση της ακτινοβολίας αυξάνεται εκθετικά. Παράλληλα προτείνεται η δυνατότητα δημιουργίας μιας συσκευής που θα λειτουργεί στο φάσμα του ορατού με άντληση και τη χρησιμοποίηση παλμικής εκκένωσης, εκτός από τις κρούσεις ως μέσο εκκένωσης.**

Ο Fabrikant ανέπτυξε στην εργασία του την ιδέα του laser ξεκινώντας από την οπτική και όχι από τη μελέτη του maser. Η εργασία του όμως δημοσιεύτηκε μόλις το 1959, όταν το maser αλλά και το laser είχαν κατασκευαστεί.

Στην Αμερική το 1953 δημοσιεύεται από τον R.H. Dicke μια εργασία στην οποία γίνεται αναφορά για τη δυνατότητα «υπερενίσχυσης μιας ακτινοβολίας» με μια διάταξη που ο Dicke την ονομάζει «οπτική βόμβα» ενώ το Φεβρουάριο του 1956 αναφέρει τρεις πιθανές εφευρέσεις με τις οποίες

ήθελε να ασχοληθεί μελλοντικά, μεταξύ των οποίων ενός κυκλικού maser που θα λειτουργούσε στο υπέρυθρο στα 0,25mm με 0,03mm με ένα σύστημα από παράλληλους καθρέφτες που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως κοιλότητα ενίσχυσης.

Οι επιστήμονες που ασχολήθηκαν με την κατασκευή των πρώτων maser, καθώς και με την κατασκευή των maser στερεάς κατάστασης, ήταν αυτοί που ερεύνησαν και τη δυνατότητα δημιουργίας maser στο ορατό και τελικά ήταν αυτοί που θα ανακαλύψουν και θα κατασκευάσουν πρώτοι laser. Στη Σοβιετική Ένωση οι Basov και Prokhorov, στην Αμερική ο Gould έφτασαν πολύ κοντά. Όμως αυτοί που θα δημοσιεύσουν πρώτοι εργασία που οδήγησε στη δημιουργία του laser ήταν οι Townes και Schawlow.

Το 1957 ο Townes σχεδιάζει μια διάταξη που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως οπτικό maser. Διατυπώνει τη μέθοδο της οπτικής άντλησης όπου το ενεργό μέσο - αέριο θάλλιο - δέχεται ακτινοβολία και βρίσκεται σε μια κοιλότητα 1cm - σε σχήμα κουτιού - μέρος των τοιχωμάτων έχει αφαιρεθεί για να μπορεί να εισέρχεται η ακτινοβολία και τα υπόλοιπα τοιχώματα καλύπτονται με ασήμι ώστε να ανακλούν την ακτινοβολία. Στη συνέχεια κατασκευάζει ένα κουτί που έχει φτιαχτεί από γυαλί με τέσσερα τοιχώματα από καθρέφτες. Τον Οκτώβριο του ίδιου έτους ξεκινά τη συνεργασία του με τον Schawlow, ο οποίος του προτείνει να αφαιρέσει από το κουτί τα τοιχώματα εκτός από δύο σχηματίζοντας ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot το οποίο είχε χρησιμοποιήσει στην έρευνα για τη διδακτορική του διατριβή. Ο Townes κάνει πειράματα με αέριο θάλλιο, το οποίο γρήγορα αντικαθιστά με ποτάσιο. Παράλληλα προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την κοιλότητα που θα χρησιμοποιηθεί. Στις 26 Αυγούστου 1958 στέλνεται η εργασία των Townes και Schawlow στο Physical Review και δημοσιεύεται το Δεκέμβριο του ίδιου έτους με τίτλο «Infrared and Optical Masers».

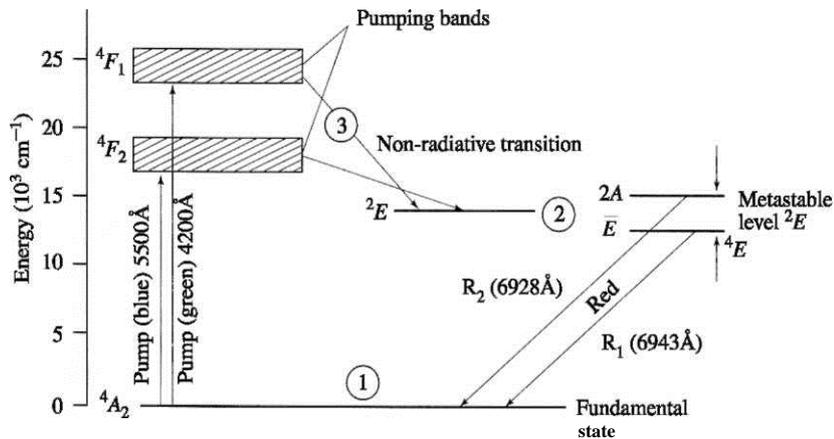
Στην εργασία διατυπώνουν τη θέση ότι είναι δυνατή η επέκταση της τεχνικής των maser στην περιοχή του υπέρυθρου και του ορατού για να γεννηθεί μονοχρωματική ακτινοβολία υψηλής έντασης αλλά απαιτείται ποιοτικός αναπροσανατολισμός στη θεωρία καθώς και νέες πειραματικές τεχνικές. Αποφασίζουν να επικεντρώσουν το ενδιαφέρον τους σε αέρια από

απλά άτομα αν και θεωρούν ότι τα μόρια καθώς και τα στερεά υλικά έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Προτείνουν την δημιουργία μιας κοιλότητας από δύο κάτοπτρα παράλληλα που θα ανακλούν με μεγάλη ακρίβεια την ακτινοβολία, «παγιδεύοντας» μόνο αυτήν που θα είναι παράλληλη στον άξονα των κατόπτρων. Για να μπορεί να εξαχθεί η ακτινοβολία προτείνουν, ένα από τα δύο κάτοπτρα να είναι ημιδιαφανές. Η διάσταση της κοιλότητας είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα έπρεπε σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας των maser (κοιλότητα αντίστοιχων διαστάσεων με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας) , όχι μόνο γιατί θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί μια τόσο μικρή κοιλότητα αλλά και για να μπορεί να περιέχει την απαιτούμενη ποσότητα του ενεργού μέσου.

Επιλέγεται ένα ενεργό μέσο, αέριο με δύο ενεργειακές καταστάσεις με στόχο η ισχύς από την εξαναγκασμένη εκπομπή να μπορεί να αντισταθμίσει τις απώλειες που θα προέλθουν από την απορρόφηση και από τις απώλειες από τα τοιχώματα της κοιλότητας. Στην εργασία τους επίσης σχολιάζεται ο «θόρυβος» που επηρεάζει τη μονοχρωματικότητα της ακτινοβολίας και αυξάνεται από την αυθόρμητη εκπομπή του ενεργού μέσου. Αναφέρεται συγκεκριμένα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέριο ατομικό ποτάσιο με άντληση στα 4047 \AA (υπολογίστηκε ότι μια λάμπα ποτάσιου εκπέμπει στα 4047 \AA με ισχύ 1 mW) και αέριο καίσιο ενώ γίνεται και αναφορά σε διατάξεις στερεής κατάστασης. Ο Schawlow θεώρησε ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία του ruby maser για να κατασκευαστεί ένα οπτικό maser αλλά το 1959 διατύπωσε την άποψη ότι τα ενεργειακά επίπεδα δεν είναι κατάλληλα και δεν προχώρησε περαιτέρω παρά το ότι είχε προβλέψει ότι η δομή ενός οπτικού maser θα μπορούσε να είναι πολύ απλή. Σε αντίθεση με τον Schawlow ο T.H. Maiman χρησιμοποίησε αυτήν την τεχνολογία κατασκευάζοντας το πρώτο ruby laser.

3.4 Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation

Το οπτικό maser αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης και έρευνας πολλών επιστημόνων. Στην συντριπτική τους πλειοψηφία προέκριναν την χρησιμοποίηση αερίων ως ενεργό μέσο εκτός από τον Maiman που ξεκίνησε τις προσπάθειες του να κατασκευάσει ένα οπτικό ruby maser. Το βασικό πρόβλημα που έπρεπε αρχικά να επιλύσει ήταν η μείωση των διατάσεων της διάταξης, που λόγω του δοχείου ψύξης αλλά και του τεράστιων διαστάσεων μαγνήτη ξεπερνούσε σε βάρος τους 2 τόνους. Ο Maiman έκανε μια πραγματικά ευφυή μετατροπή. Κατασκεύασε ένα παραλληλεπίπεδο από κρύσταλλο ruby το οποίο έβαψε με μια ασημί αγωγή μπογιά δημιουργώντας μια τρύπα στο εσωτερικό του. Μ' αυτό τον τρόπο ο κρύσταλλος συμπεριφέρονταν σαν αντηχείο (κοιλότητα), ενώ ταυτόχρονα αποτελούσε και το ενεργό μέσο. Αντικατέστησε τον τεράστιο ηλεκτρομαγνήτη με ένα μόνιμο μαγνήτη που τοποθέτησε μέσα στο δοχείο και χρησιμοποίησε για ψύξη αρχικά υγρό άζωτο και τελικά ξηρό πάγο με αποτέλεσμα το βάρος της διάταξης να μειωθεί αρχικά στα 12Kgr και στη συνέχεια στα 2Kgr. Ο κρύσταλλος που χρησιμοποίησε αποτελούνταν από οξείδιο του αργιλίου(Al_2O_3), που είχε ντοπαρισθεί με ιόντα Χρωμίου. Αυτά τα ιόντα δίνουν στον κρύσταλλο ένα χαρακτηριστικό ροζ χρώμα που μπορεί να γίνει μέχρι και σκούρο κόκκινο ανάλογα με την ποσότητα των ιόντων Χρωμίου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα δύο διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα τα οποία αντιστοιχούν σε πολύ κοντινά μήκη κύματος 0,55 μ m, 0,42 μ m.



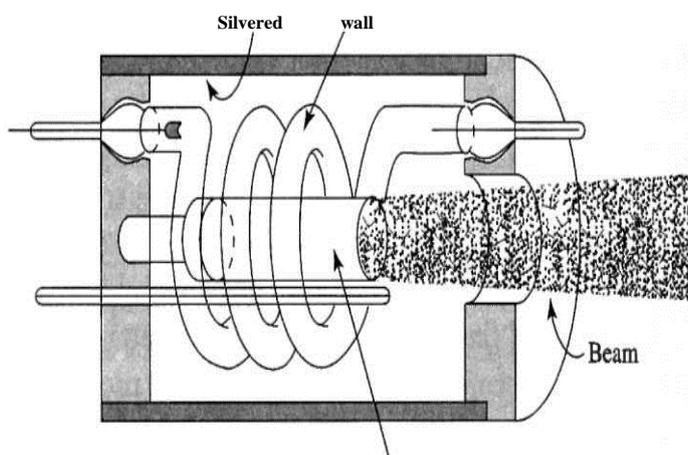
Εικόνα 3.4.1 *Ruby laser*

Το επίπεδο 4F_1 αντιστοιχεί σε πράσινο χρώμα και το επίπεδο 4F_2 σε μπλε. Δηλαδή αν το ενεργό μέσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση τα ιόντα του Χρωμίου με τα οποία έχει «ντοπαρισθεί» ο κρύσταλλος, φωτιστούν με ακτινοβολία πράσινου χρώματος τότε τα σωματίδια (ιόντα) θα διεγερθούν φτάνοντας στο επίπεδο 4F_1 ενώ αν φωτιστεί με ακτινοβολία μπλε χρώματος θα φτάσει στο διεγερμένο επίπεδο 4F_2 . Στη συνέχεια μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα της τάξης του μsec εξ' αιτίας των συγκρούσεων με τα άτομα του πλέγματος θα μεταφερθούν στο επίπεδο 2E και μετά από 5msec θα επιστρέψουν στο θεμελιώδες επίπεδο εκπέμποντας κόκκινο φως. Για να μελετήσει τη δυνατότητα αντιστροφής πληθυσμών⁵³ ο Maiman προσπάθησε να υπολογίσει τη μείωση του πληθυσμού στο βασικό επίπεδο η οποία αποδείχθηκε ότι ήταν της τάξης του 3% χρησιμοποιώντας ένα πείραμα φασμομετρίας. Ο Maiman παρατήρησε ότι κατά τη μετάβαση από το βασικό επίπεδο στο διεγερμένο επίπεδο 4F_1 με την επίδραση πράσινης ακτινοβολίας, απορροφάται ιώδης ακτινοβολία στα 4100Å που αντιστοιχεί στην αύξηση της ενέργειας των ιόντων του Χρωμίου από το βασικό στο διεγερμένο επίπεδο.

⁵³Σε εργασία του ο Irwin Wieder στο Westinghouse Research Laboratories μελετώντας την εκπομπή κόκκινου φωτός από κρυστάλλους ruby υπολόγισε ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό της τάξης του 1% από την ενέργεια που απορροφούνται κατά τη διαδικασία της άντλησης μετατρέπονταν σε εκπομπή κόκκινης ακτινοβολίας. Δηλαδή για κάθε ένα «κόκκινο» φωτόνιο έπρεπε να απορροφηθούν εκατό φωτόνια γεγονός που απέκλειε οποιαδήποτε δυνατότητα δημιουργίας φαινομένου αντιστροφής πληθυσμών

Όταν ένας έντονος παλμός ακτινοβολίας στα 5600 Å στέλνεται στο δείγμα θα μειωθεί η απορρόφηση της ιώδους ακτινοβολίας στα 4100Å αφού επιτυγχάνεται διέγερση στη στάθμη 4F_2 η οποία μειώνει τα άτομα που είναι διαθέσιμα για διέγερση από ακτινοβολία 4100Å στην στάθμη 4F_1 και ως εκ τούτου την απορρόφηση μπλε φωτός. Μόνο μετά από 5msec που τα διεγερμένα ιόντα μεταπίπτουν από τη στάθμη 4F_2 στη στάθμη 2E και τελικά στην βασική κατάσταση η απορρόφηση της μπλε ακτινοβολίας επιστρέφει στα συνήθη επίπεδα.

Για να αυξηθεί ο αριθμός των ιόντων Χρωμίου που θα διεγείρονταν ο Maiman κατασκεύασε μια ελικοειδή διάταξη από λάμπες φωτογραφικού φλας που περιελίσσονταν γύρω από ένα ruby κρύσταλλο κυλινδρικού σχήματος. Τα τοιχώματα της διάταξης είχαν καλυφθεί με ασημένια βαφή έτσι ώστε το 98% του φωτός από τα φλάς να κατευθύνονταν μετά από ανακλάσεις στον κρύσταλλο. Για τις λάμπες επέλεξε εμπορικές λυχνίες φλας της General Electric που κυκλοφορούσαν για επαγγελματίες φωτογράφους. Η διάταξη περιγράφεται στο σχήμα που ακολουθεί



Εικόνα 3.4.2 Η διάταξη Maiman

Τελικά επιλέχθηκε η λάμπα⁵⁴FT506 και οι δυο βάσεις του κυλίνδρου (με διάμετρο 1cm και μήκος 2cm) λειάνθηκαν ώστε να είναι απολύτως παράλληλες, η μια καλύφθηκε εξ' ολοκλήρου από ένα στρώμα αργύρου ώστε να είναι απολύτως κατοπτρική ενώ η δεύτερη είχε ένα λεπτότερο στρώμα αργύρου ώστε να ανακλά το 60% της κόκκινης ακτινοβολίας που θα δημιουργούνταν και να αφήνει το υπόλοιπο για να μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο. Όταν το φως από την λυχνία φλας είχε συγκεκριμένη ένταση, τότε τα ιόντα που βρίσκονταν στο επίπεδο ²E γίνονταν περισσότερα από αυτά στο θεμελιώδες, εμφανίζονταν δηλαδή μια κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών. Κάποια από τα φωτόνια που λόγω φθορισμού εκπέμπονταν αυθόρμητα στο εσωτερικό του κυλίνδρου περνούσαν λόγω συνεχόμενων ανακλάσεων μέσα από το ενεργό μέσο. Η αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων⁵⁵ δημιουργούσε ενίσχυση στην εξαναγκασμένη εκπομπή ιόντων. Η ακτινοβολία laser περιγράφεται στο σχήμα με τις γραμμές R₁ και R₂ και έχει συγκεκριμένες ιδιότητες που θα αναλυθούν διεξοδικά στη συνέχεια όπως η μονοχρωματικότητα, η κατευθυντικότητα, η λαμπρότητα της δέσμης, η πόλωση της δέσμης και η μεγάλη συμφωνία της ακτινοβολίας. Η απόκλιση της δέσμης ήταν περίπου 0,5⁰ δηλαδή σε απόσταση 10m δημιουργούνταν ένα spot διαμέτρου 9cm. Η εκπεμπόμενη ισχύς έφτανε τα 10kW ενώ η ενέργεια από τα φλάς που ουσιαστικά διέγειρε το σύστημα έφτανε μια τιμή της τάξης 0,7-1 joule ώστε να παρατηρηθεί σε μια οθόνη μπροστά από την «ημιδιαπερατή» επιφάνεια ένα κόκκινο spot. **Ήταν ο Μάιος του 1960 και το πρώτο laser είχε δημιουργηθεί.**

Ο Maiman υποβάλλει για δημοσίευση στις 24 Ιουνίου 1960 στο Physical Review Letters την εργασία του αλλά οι εκδότες αρνούνται να δημοσιεύσουν το άρθρο θεωρώντας δεν είναι δυνατή η δημιουργία ενός οπτικού maser με τη χρησιμοποίηση κρύσταλλου ruby συμπέρασμα στο οποίο άλλωστε είχε καταλήξει-λανθασμένα όπως αποδείχθηκε- και ο

⁵⁴ Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το εξής περιστατικό. Όταν τελικά δημοσιεύθηκε η εργασία του Maiman χρησιμοποιήθηκε η φωτογραφία της λυχνίας φλας FT503 που ήταν πιο εντυπωσιακή αντί για την FT506 που ήταν μικρότερη και αυτή που στην πραγματικότητα είχε χρησιμοποιηθεί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι πωλήσεις της «διάσημης» FT503 και τα υπόλοιπα ruby laser που κατασκευάστηκαν να έχουν επίσης την ίδια λάμπα!

⁵⁵ Μόνο εκείνων που μπορούσαν να ταξιδεύουν ακριβώς παράλληλα και να ανακλώνται συνεχώς από τις δύο βάσεις. Τα περισσότερα φωτόνια που είχαν έστω και την παραμικρή απόκλιση μετά από μερικές ανακλάσεις χάνονταν.

Schawlow. Έτσι ο Maiman αναγκάστηκε να γνωστοποιήσει τα αποτελέσματα της εργασίας του στον ημερήσιο τύπο στις 7 Ιουλίου 1960 δίνοντας συνέντευξη στην εφημερίδα New York Times και να αποστείλει την εργασία του στην αγγλική επιστημονική εφημερίδα «The Nature» όπου και δημοσιεύτηκε στις 6 Αυγούστου του ίδιου έτους!

Τον Αύγουστο ο Schawlow με την ομάδα του στα εργαστήρια Bell αναπαράγει τα αποτελέσματα της εργασίας του Maiman δημιουργώντας ένα laser. Τα αποτελέσματα δημοσιεύονται τον Οκτώβριο στο Physical Review με αποτέλεσμα πολλά μέλη της επιστημονικής κοινότητας που δεν είχαν διαβάσει την αγγλική δημοσίευση του Maiman να θεωρήσουν ότι το πρώτο laser κατασκευάστηκε από την ομάδα του Schawlow στα Bell Laboratories!!

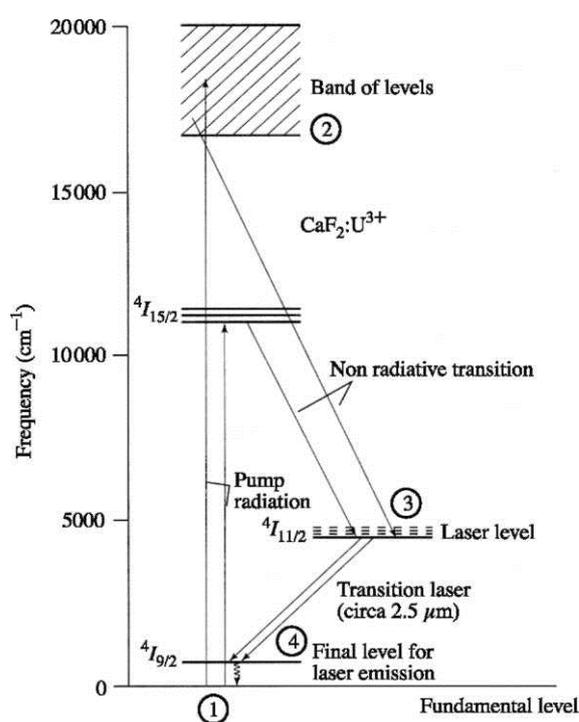
Το δεύτερο laser στερεάς κατάστασης κατασκευάστηκε από τους P. Sorokin και M.J. Stevenson του εργαστηρίου T.J. Watson Research Laboratories⁵⁶ της IBM. Η αρχική σκέψη ήταν η δημιουργία ενός συνεχούς laser, οπότε προσπάθησαν να μειώσουν τις απώλειες εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης. Για το σκοπό αυτό αντικατέστησαν τα κάτοπτρα της διάταξης Fabry-Perot με πρίσματα που έχουν τέτοιο δείκτη διάθλασης για να επιτευχθεί σύμφωνα με το νόμο του Snell η ολική ανάκλαση και επέλεξαν ένα κρύσταλλο από φθοριούχο ασβέστιο στον οποίο είχαν αντικαταστήσει κάποια άτομα του πλέγματος με άτομα Ουρανίου- που θα αποτελούσαν το ενεργό μέσο. Ο Ρώσος επιστήμονας P.P. Feofilov είχε δημοσιεύσει μελέτες γύρω από την εκπομπή ακτινοβολίας από ιόντα ουρανίου και σαμαρίου τα οποία είχαν τοποθετηθεί σε κρύσταλλο φθοριούχου ασβεστίου. Το Ουράνιο εκπέμπει ακτινοβολία φθορισμού στα 2,5 μm. Οι Sorokin και Stevenson μετά τη δημοσίευση του Maiman αποφάσισαν να εφαρμόσουν τη δικιά του πειραματική διάταξη απορρίπτοντας την αρχική του ιδέα σχετικά με την ολική ανάκλαση. Έτσι κρύσταλλοι φθοριούχου ασβεστίου που είχαν «ντοπαρισθεί» με ιόντα Ουρανίου ή Σαμαρίου κόπηκαν σε

⁵⁶ Πρόκειται για το ερευνητικό κέντρο της IBM που αποτελείται από ένα δαιδαλώδες δίκτυο εργαστηρίων όπου το κεντρικό εργαστήριο βρίσκεται από το 1961 στο Yorktown Heights, 38 μίλια βόρεια από την πόλη της Νέας Υόρκης με γραφεία στο Cambridge της Μασαχουσέτης. Το ερευνητικό κέντρο αρχικά δημιουργήθηκε στο εσωτερικό του πανεπιστημίου Columbia το 1945 με το όνομα Watson Scientific Computing Laboratory. Περισσότερα εργαστήρια τέθηκαν σε λειτουργία στα τέλη της δεκαετίας του 1950 στην κομητεία Wetchester της Νέας Υόρκης.

κυλινδρικά σχήματα για να κατασκευαστεί η διάταξη του Maiman, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και οι γνωστές φωτογραφικές λάμπες φλας. Τα αποτελέσματα της ερευνάς τους δημοσιεύτηκαν, μετά από έντονες πιέσεις στο γνωστό για την αδιαφορία του σχετικά με τα οπτικά maser-laser Physical Review Letters.

Η διάταξη με το ουράνιο απαιτούσε για να λειτουργήσει δέκα φορές λιγότερη ισχύ άντλησης από αυτήν του ruby laser αλλά ήταν πιο πολύπλοκη λόγω του ότι έπρεπε να λειτουργεί σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία.

Έτσι χρησιμοποιήθηκε το γνωστό από τα maser σύστημα ψύξης με υγροποιημένο Ήλιο (He).



Εικόνα 3.4.3 Στο σχήμα φαίνεται η διαδικασία διέγερσης και αποδιέγερσης ατόμων ουρανίου με εκπομπή laser στα 2,05 μm

Τα ενεργειακά επίπεδα των ιονισμένων ατόμων ουρανίου σε ένα κρύσταλλο φθοριούχου ασβεστίου φαίνονται στο σχήμα. Η διαφορά με τον κρύσταλλο ruby είναι ότι εδώ υπάρχει άλλο ένα επιπλέον επίπεδο (σύστημα 4

καταστάσεων) οπότε η αντιστροφή πληθυσμών μπορεί να επιτευχθεί ευκολότερα. Η μετάβαση επιτυγχάνεται με διαδικασία άντλησης από το βασικό επίπεδο (1) στο επίπεδο (2) – με ενδιάμεσο επίπεδο το $^4I_{15/2}$. Τα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από το επίπεδο (2) στο επίπεδο (3) και στη συνέχεια έχουμε εκπομπή laser στα 2,5 μm κατά τη μετάβαση από το επίπεδο (3) στο επίπεδο (4).

3.5 Τα laser αερίων

Το πρώτο laser αερίων κατασκευάστηκε στα Bell Laboratories από τους Ali Javan και J.H. Sanders. Ο A. Javan είχε κάνει μελέτες⁵⁷ σχετικά με την ενίσχυση της ακτινοβολίας, κάνοντας χρήση του φαινομένου Raman και όχι της αντιστροφής πληθυσμών. Ξεκίνησε την έρευνα⁵⁸ του στα εργαστήρια Bell το 1958 και εξ' αρχής ασχολήθηκε με την κατασκευή laser όπου το ενεργό μέσο θα ήταν μείγμα αερίων. Θεώρησε ότι δεν ήταν δυνατόν να επιτύχει άντληση χρησιμοποιώντας ισχυρές λάμπες οπότε για να διεγείρει τα άτομα σκέφτηκε να προκαλέσει συγκρούσεις ηλεκτρονίων με άτομα Ne. Αποφάσισε να κατασκευάσει μια διάταξη που αποτελούνταν από ένα σωλήνα εκκένωσης αερίου στον οποίο είχε τοποθετηθεί μείγμα αερίων με παραπλήσια ενεργειακά επίπεδα ώστε το πρώτο αέριο να μπορεί να διεγερθεί από τις κρούσεις με τα ηλεκτρόνια και να μεταφέρει την ενέργεια στο δεύτερο αέριο για να διεγερθεί και αυτό. Για να μπορέσει να δημιουργήσει αντιστροφή πληθυσμών επέλεξε ένα μείγμα ευγενών αερίων από He και Ne. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κάθε μεμονωμένη φυσική διαδικασία τείνει να παράγει μια κατανομή Boltzmann των διαφόρων επιπέδων ενέργειας (όπου πλειοψηφούν τα σωματίδια που βρίσκονται στο κατώτερο ενεργειακό επίπεδο σε σχέση με το ανώτερο). Ως εκ τούτου, ένα μέσο με αντιστροφή πληθυσμών μπορεί να παραχθεί ως αποτέλεσμα του ανταγωνισμού των πολλών φυσικών διεργασιών, οι οποίες προχωρούν με διαφορετικούς ρυθμούς.

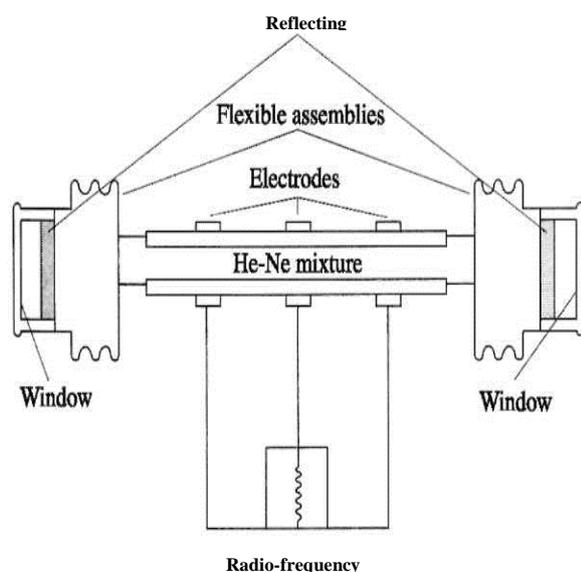
⁵⁷ Αυτές δημοσιεύτηκαν καθυστερημένα το 1957, 1958.

⁵⁸ Ο Javan κατηγορήθηκε ότι η έρευνα του ήταν πολυδάπανη. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα εργαστήρια Bell είχαν ανακοινώσει ότι η έρευνα του Javan κόστισε γύρω στα 2 εκατομμύρια δολάρια.

Παράλληλα ο Sanders που ξεκίνησε να εργάζεται στα εργαστήρια Bell τον Ιανουάριο του 1959 κατασκεύασε μια πειραματική διάταξη εκκένωσης He στο εσωτερικό μιας κοιλότητας Fabry-Perot μήκους 15cm και προσπάθησε με συνεχόμενες δοκιμές να επιτύχει μετάβαση laser.

Απέστειλε μια επιστολή στο περιοδικό Physical Review Letters στην οποία παρατηρούσε ότι ήταν δύσκολο να δημιουργηθεί επαρκής αριθμός διεγερμένων ατόμων με τη χρησιμοποίηση λυχνίας φλας, και αντιπρότεινε την κατασκευή μιας διάταξης που οι διεγέρσεις θα δημιουργούνται από συγκρούσεις ηλεκτρονίων. Μια τέτοια διέγερση θα μπορούσε εύκολα να παραχθεί σε μια ηλεκτρική εκκένωση σε ένα αέριο ή ατμό. Για να δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών αν τα άτομα στις διεγερμένες στάθμες είχαν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής από αυτά στη θεμελιώδη ή σε στάθμες χαμηλότερης ενέργειας.

Στις 3 Ιουνίου 1959 ο Javan δημοσιεύει στο Physical Review Letters μια εργασία που ουσιαστικά συνεχίζει τους συλλογισμούς του Sanders. Διατυπώνει τη θέση ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μείγμα αερίων-προτείνει μείγμα από Κρυπτό και Υδράργυρο, ή από Ήλιο και Νέο - με μεγάλο χρόνο παραμονής σε διεγερμένες καταστάσεις και παραπλήσια ενεργειακά επίπεδα. Μετά από διαδικασία κρούσεων είναι δυνατόν να επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών. Ο Javan μαζί με τους W. Bennet και D. Herriott προσπάθησαν να επιλύσουν τεχνικά προβλήματα που σχετίζονταν με τη στεγανοποίηση του σωλήνα εκκένωσης με δύο διαφανή παράθυρα που θα είχαν πολύ καλή οπτική ποιότητα, έτσι ώστε να μην αλλοιωθεί η δέσμη εξόδου. Η δομή σχεδιάστηκε με τους καθρέφτες στο εσωτερικό του σωλήνα εκκένωσης παρέχοντας ειδικές βάσεις στήριξης με μικρομετρικές βίδες που διευκόλυναν την ευθυγράμμιση.



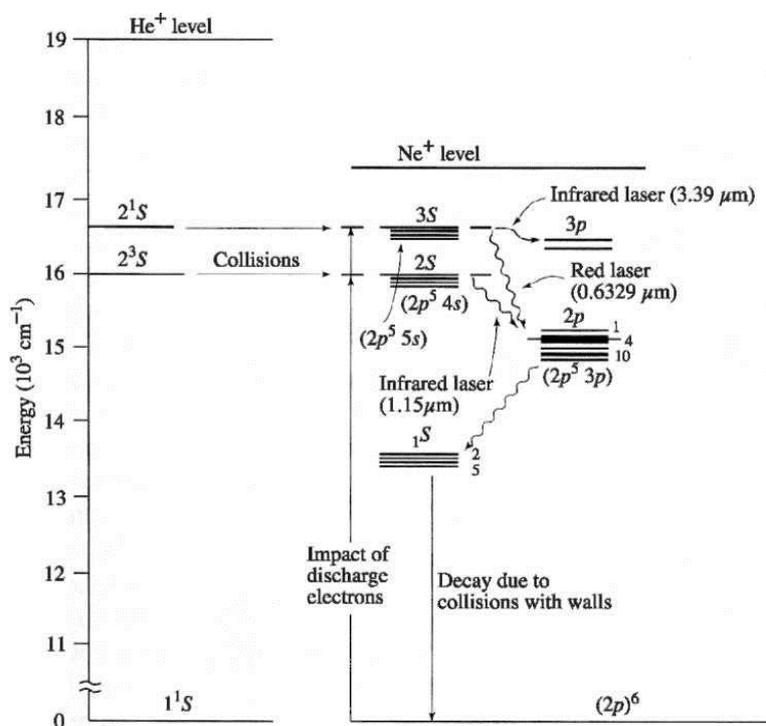
Εικόνα 3.5.1 Η διάταξη He-Ne laser των Iavan. Bennett.

Ένα καθοριστικής σημασίας πρόβλημα που έπρεπε να επιλύσουν σχετίζονταν με το ιδιαίτερα μικρό ποσοστό της τάξης του 1,5% που αντιστοιχούσε στην προκληθείσα αντιστροφή πληθυσμών. Έτσι έπρεπε να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες χρησιμοποιώντας επιφάνειες με υψηλές ανακλαστικές ιδιότητες. Για το σκοπό αυτό κατασκεύασαν κάτοπτρα που αποτελούνταν από πολλά στρώματα διηλεκτρικών υλικών ώστε σε μήκος κύματος 1,15μm να επιτυγχάνεται 98,9% ανάκλαση.

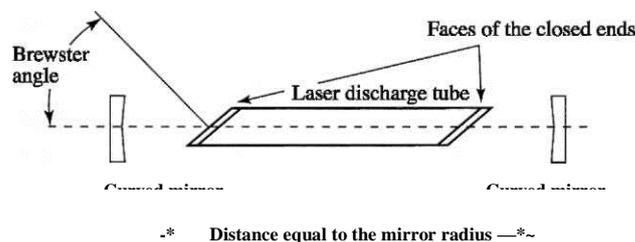
Το 1960 ξεκίνησαν οι πειραματικές δοκιμές. Αρχικά κατασκευάστηκε ένας σωλήνας από χαλαζία που εμπεριείχε το μείγμα των αερίων αλλά στην προσπάθεια να προκληθεί ηλεκτρική εκκένωση με τη χρησιμοποίηση ενός μάγνητρου, η διάταξη έλιωσε! Τελικά στις 12 Δεκεμβρίου μετά από αλλεπάλληλες αποτυχίες να ευθυγραμμιστούν τα κάτοπτρα, καταγράφηκε με τη βοήθεια ενός παλμογράφου σήμα που αντιστοιχούσε σε μήκος κύματος $\lambda=1,153 \mu\text{m}$. Το πρώτο laser χρησιμοποιώντας ένα αέριο, ως λειτουργικό μέσο είχε δημιουργηθεί. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ήταν στο εγγύς υπέρυθρο και ως εκ τούτου ήταν αόρατη στο μάτι και έπρεπε να αποκαλυφθεί με έναν κατάλληλο ανιχνευτή συνδεδεμένο με έναν παλμογράφο.

Για να επιτύχει μεταβάσεις laser στο ορατό, η σπή του σωλήνα εκκένωσης έπρεπε να είναι τόσο μικρή, οπότε θα ήταν πρακτικά αδύνατο να

ευθυγραμμίσουν τη διάταξη. Το laser του Javan αποτελείται από ένα σωλήνα εκκένωσης που περιείχε νέον και ήλιο σε πιέσεις από 0,1 και 1 torr αντίστοιχα. Ο σωλήνας χαλαζία ήταν μήκους 80 cm με εσωτερική διάμετρο 1,5 εκ. Σε κάθε άκρο του σωλήνα υπήρχε μια περιοχή που περιείχε μέταλλο υψηλής ανάκλασης. Τα κάτοπτρα μπορούσαν να γίνουν παράλληλα με μια διάταξη που βοήθησε στην ευθυγράμμιση με ακρίβεια έξι δευτερόλεπτα της γωνίας. Δύο επίπεδα πολύ λεπτά παράθυρα -η τραχύτητα τους δεν ξεπερνούσε τα 100 Å -επέτρεπαν στην ακτίνα να εξέλθει από τη διάταξη χωρίς καμία παραμόρφωση. Εξωτερικά ηλεκτρόδια με τη βοήθεια γεννήτριας 28MHz προκαλούσαν την ηλεκτρική εκκένωση. Η ισχύς εισόδου ήταν περίπου 50W. Η υψηλή ανακλαστικότητα των κατόπτρων δημιουργήθηκε με την εξαέρωση 13 στρωμάτων διηλεκτρικού φιλμ, και έφτανε το 98,9% για μήκος κύματος 1,1μm και 1,2μm. Το laser λειτούργησε σε συνεχή λειτουργία και στις 14 Δεκεμβρίου 1960 έγινε δημόσια επίδειξη του, για να ανακοινωθούν τα αποτελέσματα στις 30 Δεκεμβρίου στο Physical Review Letters και μετά από ένα μήνα στον ημερήσιο τύπο. Το ενεργειακό διάγραμμα ενός laser He-Ne καθώς και των μεταβάσεων του περιγράφεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.5.2 Ενεργειακό διάγραμμα laser He-Ne



Εικόνα 3.5.3 Ομοεστιακά Οπτικά Αντηχεία

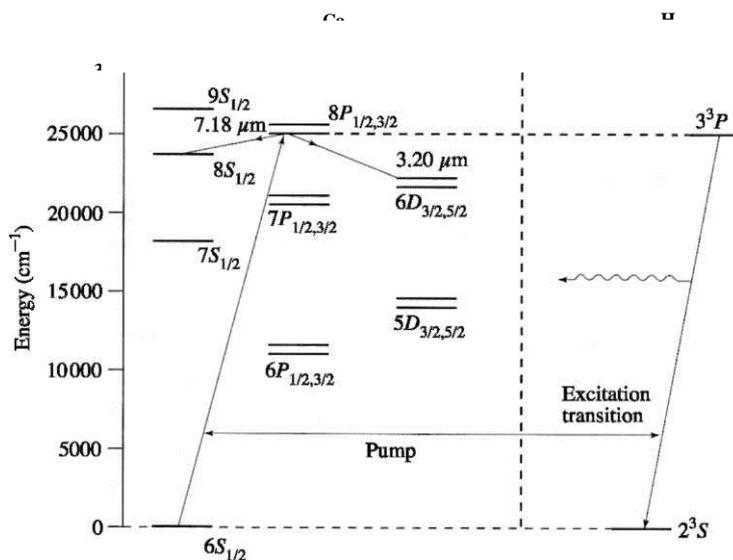
Οι G. Boyd, J. Gordon και H. Kogelnick έκαναν θεωρητικές μελέτες για να βρουν αναλυτικές λύσεις στην περίπτωση σφαιρικών κατόπτρων, αφού οι διατάξεις που είχαν δημιουργηθεί ήταν αποκλειστικά πειραματικές χωρίς να συνοδεύονται από μια θεωρητική θεμελίωση. Αυτές οι μελέτες κατέδειξαν ότι ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν καμπύλα κάτοπτρα με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των απωλειών. Οι W. Rigrod, H. Kogelnik, D. Herriott και D. Brangaccio, την άνοιξη του 1962, κατασκεύασαν μια κοιλότητα που αποτελούνταν από ομοεστιακό οπτικό αντηχείο.

Χρησιμοποίησαν δύο σφαιρικά κάτοπτρα που συγκέντρωναν φως κατά μήκος του άξονα του σωλήνα, και τα οποία έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά στο σωλήνα εκκένωσης, επιτυγχάνοντας εκπομπή κόκκινης ακτινοβολίας στο 6328 Å. Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες μπορούσαν να προσανατολιστούν τα κάτοπτρα με κριτήριο τη γωνία Brewster.

Σήμερα τα laser He-Ne είναι πολύ διαδεδομένα και είναι δυνατόν να ρυθμιστούν σε διάφορα μήκη κύματος. Τα πιθανά μήκη κύματος είναι 3,39μm, 1,153μm και 0,6328μm. Τα laser στο ορατό έχουν ισχύ μεταξύ 0,5 και 50 mW και έχουν κατασκευαστεί laser που να εκπέμπουν στο πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και στο εγγύς υπέρυθρο.

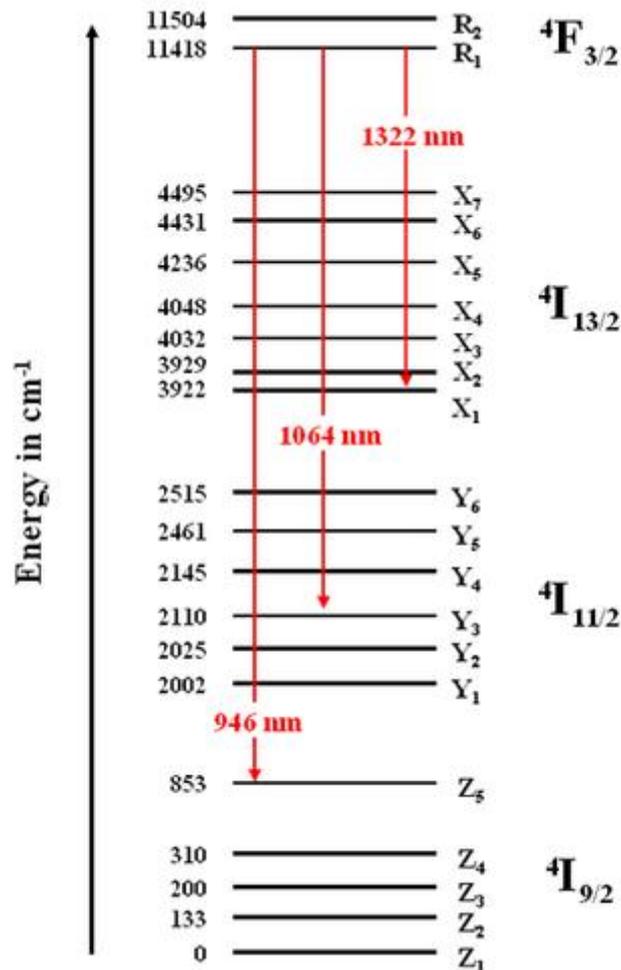
3.6 Η Εξέλιξη των laser

Η δεκαετία του 1960 είναι δεκαετία σταθμός για την εξέλιξη των laser. Πολλές ερευνητικές ομάδες ασχολούνται με την κατασκευή νέων τύπων laser, οι επιχορηγήσεις αυξάνονται αφού το στρατιωτικοβιομηχανικό σύμπλεγμα, ενεργοποιείται, ενώ παράλληλα η αυξανόμενη ζήτηση των laser σε πλήθος εφαρμογών ουσιαστικά επιτρέπει στην επιστημονική κοινότητα να δοκιμάσει και να εφεύρει νέους τύπους διατάξεων. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το laser με ατμούς Καλίου που όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελούσε αντικείμενο μελέτης του Townes. Εξ' αιτίας των προβλημάτων που δημιουργούσαν οι ατμοί του Καλίου στη διάταξη, αποφασίστηκε στην πορεία να αντικατασταθεί από το Καίσιο. Το laser τέθηκε σε λειτουργία τους πρώτους μήνες του 1962 από τους P. Rabinowitz, S. Jacobs και τον G. Gould και εξέπεμπε ακτινοβολία στα 3,20 μm και 7,18 μm , με τη χρησιμοποίηση ομοεστιακών οπτικών αντηχείων. Το ενεργειακό διάγραμμα ενός laser Cs-Ne φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.6.1 Ενεργειακό διάγραμμα Cs-Ne

Το 1961 τέθηκε σε λειτουργία ένα laser στερεάς κατάστασης που αποτελούνταν από γυαλί στο οποίο είχε γίνει πρόσμιξη ατόμων Νεοδυμίου. Ο E. Snitzer που είχε κάνει μελέτες στον τομέα της οπτικής, των οπτικών ινών και των τηλεπικοινωνιών ανέλαβε την έρευνα. Μετά την επιτυχία του Maiman, ο Snitzer που μέχρι τότε χρησιμοποιούσε λάμπες Υδραργύρου σε υψηλή πίεση, αποφάσισε να τις αντικαταστήσει με λυχνίες flash, και να επικεντρώσει τη μελέτη του στο υπέρυθρο. Έτσι αποφάσισε να χρησιμοποιήσει για προσμίξεις στοιχεία που να ανήκουν στις σπάνιες γαίες όπως το νεοδύμιο, πρρασεοδύμιο, όλμιο, έρβιο και θάλλιο και να κατασκευάσει μια διάταξη που να περιλαμβάνει μια απλή γυάλινη ράβδο και όχι μια οπτική ίνα. Για το νεοδύμιο το επίπεδο $^4F_{3/2}$ είναι το διεγερμένο επίπεδο και οι μεταβάσεις laser γίνονται μεταξύ αυτού του επιπέδου και των $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$ στα 1,322 μm , 1,064 μm και 0,946 μm αντίστοιχα. Η διέγερση γίνεται με οπτική άντληση από το θεμελιώδες επίπεδο στα ανώτερα επίπεδα από το $^4F_{3/2}$ και υπάρχουν επίπεδα απορρόφησης ακτινοβολίας, επίπεδα που απορροφούν ακτινοβολία κίτρινου χρώματος και άλλα που απορροφούν στο υπεριώδες. Από αυτά τα επίπεδα έχουμε μετάβαση χωρίς ακτινοβολία στο $^4F_{3/2}$ από το οποίο ξεκινά η εκπομπή laser.

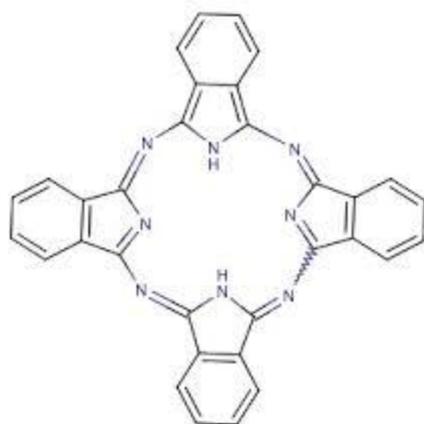


Εικόνα 3.6.2 Διάγραμμα ενεργειακής κατάστασης Νεοδυμίου

Την ίδια χρονιά (1961) οι L. Johnson, G. Boyd, K. Nassau, R. Soden στα Bell Telephone Laboratories έθεσαν σε λειτουργία ένα laser νεοδυμίου που λειτουργούσε στα 1,06μm με συνεχή ακτινοβολία και σύστημα ψύξης σε θερμοκρασία υγρού Αζώτου. Η ARPA (Advanced Research Projects Agency) μια εταιρία που είχε συγκροτηθεί από το υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ έδωσε υψηλή προτεραιότητα στις έρευνες σχετικά με τα laser στερεάς κατάστασης και την κατασκευή κρυστάλλων για τη λειτουργία τους.

Εκτός όμως από τα laser στερεάς κατάστασης, το 1961 αναπτύχθηκαν τα laser χρωστικών. Το πρώτο laser αυτού του τύπου στηρίχτηκε στην τεχνική του Q-switching που εφάρμοσε ο R. Hellwarth που εργάζονταν στα Hughes Research Laboratories στην Καλιφόρνια.

Ουσιαστικά με αυτήν την τεχνική, οι απώλειες που εμφανίζονται σε μια διάταξη διατηρούνται μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή που το σύστημα θα έχει «φορτιστεί» ώστε να δώσει ένα πολύ σύντομο (nsec), μεγάλης ισχύος παλμό (MW). Το 1966 οι P. Sorokin και J. Lankard της IBM κατέληξαν στην χρησιμοποίηση μιας χρωστικής της φθαλοκυανίνης που είναι μια μακροκυκλική ένωση με δακτυλίους στους οποίους εναλλάσσονται άτομα άνθρακα και αζώτου. Τα μόρια είναι σχεδόν επίπεδα και μπορούν να σχηματίσουν στο κέντρο τους δεσμούς με κατιόντα Υδρογόνου ή με Μέταλλα.



Εικόνα 3.6.3 Χρωστική Φθαλοκυανίνης

Ποσότητα φθαλοκυανίνης τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του ruby κρύσταλλου και έδωσε ένα πολύ σύντομο και ισχυρό παλμό. Ο Sorokin μελέτησε τη δυνατότητα των χρωστικών να δίνουν ακτινοβολία όταν διεγερθούν από ένα ruby laser (φαινόμενο Raman). Η φθαλοκυανίνη έδωσε ακτινοβολία στα 7555Å και το φαινόμενο επαναλήφθηκε και με άλλες χρωστικές.

Στις μελέτες τους οι Ρώσοι επιστήμονες S. Rautian και I. Sobelman ασχολήθηκαν με τη δυνατότητα του αρωματικού δακτυλίου του περυλενίου⁵⁹ να δώσει ακτινοβολία laser όταν διεγερθεί από μια λυχνία flash.

Οι F. Schafer, Volze και Schmidt στη συνέχεια στο Πανεπιστήμιο του Μάρμπουργκ στη Γερμανία, κατά τη μελέτη των χαρακτηριστικών του κορεσμού ορισμένων οργανικών χρωστικών (κυανίνες) παρατήρησαν ότι αν

⁵⁹ Πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας με χημικό τύπο C₂₀H₁₂.

ένα ruby laser λειτουργήσει ως μηχανισμός άντλησης τότε πυκνά διαλύματα των χρωστικών μπορούν να δώσουν ακτινοβολία laser χιλιάδες φορές ισχυρότερη απ' ό,τι αναμένονταν. Φωτογράφησαν τα φάσματα που έδιναν διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ήταν δυνατόν να ρυθμιστεί η ακτινοβολία laser με μεταβολή της συγκέντρωσης των διαλυμάτων ή της ανακλαστικότητας των κατόπτρων της κοιλότητας. Το αποτέλεσμα σύντομα επιβεβαιώθηκε και επεκτάθηκε σε μια δωδεκάδα διαφορετικών χρωστικών ουσιών της οικογένειας κυανίνη. Το 1969, οι B. Snavely και Schafer είχαν ενδείξεις μιας πιθανής συνεχούς εκπομπής, που επιβεβαιώθηκε την επόμενη χρονιά σε πειράματα στο Eastman Kodak-Research Laboratory από τον O.G. Peterson σε συνεργασία με άλλους ερευνητές, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα λέιζερ αργού ως μηχανισμό άντλησης σε διάλυμα ροδαμίνης 6G σε νερό. Τα laser χρωστικών αποτέλεσαν ένα τεράστιο βήμα στην καθιέρωση των laser αφού ήταν δυνατόν να ρυθμίζονται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Οι χρωστικές επίσης παρέχουν τη δυνατότητα εύκολης δημιουργίας ενεργών μέσων αφού είναι δυνατόν να διαλυθούν σε στερεά ή υγρά με καθορισμένες συγκεντρώσεις. Τα υγρά διαλύματα είναι ιδιαίτερα βολικά αφού η ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με επανακυκλοφορία του διαλύματος. Επιπλέον, το υγρό δεν παθαίνει βλάβες οπότε το κόστος της απόκτησης του ενεργού υλικού είναι πολύ χαμηλό, σε αντίθεση με τα laser στερεάς κατάστασης. Με την επιλογή μιας κατάλληλης χρωστικής ανάμεσα σε χιλιάδες διαθέσιμες σε συνδυασμό με την κατάλληλη διάταξη άντλησης, είναι δυνατό να καλυφτεί όλο το ορατό φάσμα έως το εγγύς υπέρυθρο. Ένα laser που μπορεί να συντονίζεται σε ένα επιθυμητό μήκος κύματος είχε τελικά γεννηθεί! Στα μέσα του 1967, B. Soffer και B.B. Mc Farlane, αντικαθιστώντας έναν από τους καθρέφτες της κοιλότητας με ένα φράγμα περίθλασης, κατασκεύασαν με επιτυχία ένα λέιζερ χρωστικής που θα μπορούσε να συντονιστεί σε ένα εύρος άνω των 400 Å, απλά ρυθμίζοντας το φράγμα περίθλασης. Τα laser χρωστικών, λόγω του μεγάλου εύρους εκπομπής τους μπορούν να λειτουργήσουν παλμικά με παλμούς της τάξης των psec.

3.7 Laser ημιαγωγών

Οι ημιαγωγοί ιδιαίτερα μετά την εφεύρεση του transistor το 1948, αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας για την παραγωγή ακτινοβολίας διαμέσου εξαναγκασμένης εκπομπής. Σ' ένα άτομο μπορούμε να θεωρήσουμε δύο καταστάσεις σχετικά με τα ηλεκτρόνια. Στη θεμελιώδη τα ηλεκτρόνια συκρατούνται με δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσης από τον πυρήνα και στην ελεύθερη κατάσταση όπου τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα. Στη θεμελιώδη κατάσταση η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι αρνητική σε σχέση με τη στάθμη κενού. Οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές, χωρίζονται μεταξύ τους από απαγορευμένες περιοχές και περιλαμβάνουν ορισμένο αριθμό ηλεκτρονικών καταστάσεων.

Αν στον σχηματισμό ενός κρυστάλλου συμμετέχουν N άτομα, τότε είναι δυνατόν λόγω μικρής απόστασης να «αναμειχθούν» οι τροχιές των ηλεκτρονίων σθένους. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli δύο ηλεκτρόνια ενός ατόμου δεν μπορεί να υπάρχουν στην ίδια κατάσταση. Έτσι σηματοδοτείται ο διαχωρισμός του ενεργειακού διαγράμματος σε N διατεταγμένες στάθμες. Καθώς η απόσταση μεταξύ των ατόμων ελαττώνεται, άλλες εσωτερικές τροχιές αρχίζουν να υπερκαλύπτονται και οι ενεργειακές τους στάθμες χωρίζονται επίσης σε N ταξινομημένες στάθμες. Ενεργειακή ζώνη ονομάζεται κάθε ομάδα χωριστών σταθμών, στις οποίες παρεμβάλλονται ενεργειακά χάσματα⁶⁰. Οι ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά χάσματα, δηλαδή απαγορευμένες τιμές ενέργειας στις οποίες δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, λόγω της αύξησης της ενέργειας, αυξάνεται και το πλάτος της ταλάντωσης των σωματιδίων, οπότε το χάσμα μικραίνει.

Σε συνθήκες μηδενικής θερμοκρασίας ($T=0K$) η ζώνη που είναι πλήρης καλείται **ζώνη σθένους** και τα ηλεκτρόνια δεν συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του στερεού, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές

⁶⁰ Στα ενεργειακά χάσματα δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς.

καταστάσεις, για να καταλειφθούν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου. **Ζώνη αγωγιμότητας** ονομάζεται η επόμενη ζώνη που είναι κενή ή με μειωμένο αριθμό ηλεκτρονίων.

Τα υλικά μπορούν να διακριθούν σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές. Για να κατηγοριοποιηθεί και να ερμηνευτεί η συμπεριφορά ενός υλικού σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, πρέπει να είναι γνωστή η ύπαρξη ενεργειακών σταθμών και η πλήρης, μερική συμπλήρωση τους από ηλεκτρόνια ή η απουσία ηλεκτρονίων. Οι κενές ζώνες δεν περιέχουν ηλεκτρόνια και δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι ενεργειακές ζώνες που είναι μερικώς συμπληρωμένες περιέχουν ηλεκτρόνια και έχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες σε λίγο υψηλότερες ενέργειες. Οι ελεύθερες αυτές ενεργειακές στάθμες, επιτρέπουν στους φορείς να αποκτήσουν ενέργεια, όταν μετακινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι τελείως πληρωμένες ζώνες περιέχουν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων, αλλά δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω του ότι δεν αποκτούν ενέργεια, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες.

➤ Τα στοιχεία που έχουν άτομα με ένα ηλεκτρόνιο σθένους είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος (Cu, Ag, Au), όπως επίσης και αυτά που έχουν δυο ηλεκτρόνια σθένους, όταν η πλήρης ζώνη επικαλύπτεται από την κενή.

➤ Τα στοιχεία στα οποία παρατηρείται μεγάλο ενεργειακό χάσμα και συμπεριφέρονται ως μονωτές.

➤ Τα στοιχεία στα οποία η συμπληρωμένη ζώνη έχει μικρό ενεργειακό χάσμα από την κενή ζώνη, οπότε είναι δυνατόν τα ηλεκτρόνια να μετακινηθούν στην αμέσως υψηλότερη ζώνη. Σ' αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μια σχεδόν συμπληρωμένη ζώνη σθένους κάτω από μια σχεδόν κενή ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός.

Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, συνήθως γίνεται με θερμική ή οπτική διέγερση, όπου πρέπει να δοθεί ποσό

ενέργειας ίσο με το ενεργειακό χάσμα. Το ελάχιστο ποσό ενέργειας θα πρέπει να είναι ίσο με το ενεργειακό χάσμα του κρυστάλλου E_g . Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κρύσταλλο. Αν ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα E_g αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να ξεπεράσει το ενεργειακό χάσμα και να μεταφερθεί στη ζώνη αγωγιμότητας. Τότε στη ζώνη σθένους δημιουργείται ένα κενό που ονομάζεται οπή. Η περιοχή γύρω από την οπή είναι θετικά φορτισμένη λόγω της αφαίρεσης ενός αρνητικού φορτίου από μια ουδέτερη, κατά τα άλλα περιοχή. Η οπή, που συμβολίζεται ως h^+ , επίσης μετακινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο λόγω του ότι ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού δεσμού, μπορεί να καλύψει τη θέση της, δημιουργώντας έτσι μια καινούργια οπή, δηλαδή μια ελεύθερη θέση. Η οπή κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του ηλεκτρονίου, συμμετέχοντας στην αγωγιμότητα.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, συναντά μια οπή την οποία και καλύπτει. Το φαινόμενο καλείται επανασύνδεση και έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση του ζεύγους ηλεκτρονίου - οπής. Σε μερικούς ημιαγωγούς, όπως GaAs και InP, το πλεονάζον ποσό ενέργειας του ηλεκτρονίου, που πέφτει από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, εκπέμπεται ως φωτόνιο. Στους ημιαγωγούς Si και Ge διαφεύγει υπό τη μορφή θερμότητας.

Αν εισάγουμε ξένα άτομα σε ένα καθαρό κατά τα άλλα κρύσταλλο, είναι δυνατό να δημιουργήσουμε ένα ημιαγωγό, που η συγκέντρωση φορέων μιας πολικότητας να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του άλλου τύπου. Αυτοί οι ημιαγωγοί καλούνται ημιαγωγοί πρόσμιξης. Η δημιουργία ελεύθερων φορέων, απαιτεί όχι μόνο την παρουσία προσμίξεων, αλλά και την ικανότητά τους να προσθέσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Σ' αυτήν την περίπτωση καλούνται δότες. Αν προσθέσουν οπές στη ζώνη σθένους, καλούνται αποδέκτες αφού δέχονται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, δημιουργώντας έτσι μια οπή. Σ' έναν ημιαγωγό n τύπου έχουν γίνει προσμίξεις δωτών και τα ηλεκτρόνια που υπερτερούν λέγονται φορείς

πλειοψηφίας, ενώ αντίθετα σ' ένα ημιαγωγό p τύπου γίνονται προσμίξεις δωτών και οι οπές που υπερτερούν λέγονται φορείς πλειοψηφίας.

Ένας ημιαγωγός τύπου p-n αποτελείται από δύο περιοχές με αντίθετες προσμίξεις. Μια περιοχή τύπου - p με συγκεντρώσεις αποδεκτών και μια περιοχή τύπου - n με συγκεντρώσεις δωτών. Οι προσμίξεις είναι ελαφρές, έτσι ώστε η πυκνότητα των ηλεκτρονίων/οπών στην περιοχή τύπου n/τύπου p να είναι περίπου ίση με την πυκνότητα των δωτών/αποδεκτών.

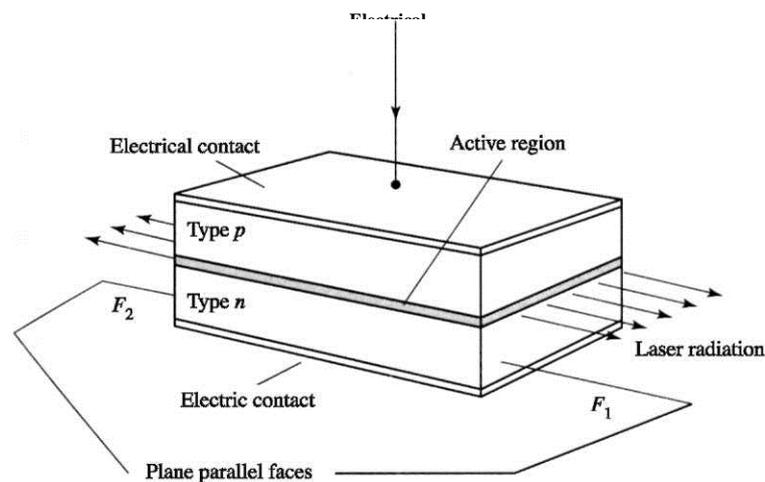
Η χρησιμοποίηση ημιαγωγών – διόδων ως ενεργό μέσο, εμφανίζεται σε μια πατέντα που υποβλήθηκε από τους Y. Watanabe και J. Nishizawa στην Ιαπωνία το 1957 και δημοσιεύτηκε το 1960 με τίτλο «maser ημιαγωγών», ενώ ο γάλλος φυσικός P. Aigrain παρουσίασε σε ένα διεθνές συνέδριο στο MIT το 1957 τις ιδέες του σχετικά με τις μεταβάσεις⁶¹ σε διάφορα ενεργειακά επίπεδα ενός ημιαγωγού στον οποίο ασκείται επίδραση από ένα εξωτερικό ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Στη Σοβιετική Ένωση οι N. Basov, B. Vul, Y. Poron ξεκίνησαν το 1957 να ερευνούν τη δυνατότητα εκπομπής ακτινοβολίας maser στο ορατό από ημιαγωγούς. Ο Basov παρουσίασε το 1959 την πρόταση του σε συνέδριο στην Αμερική και το 1961 η ομάδα των επιστημόνων δημοσίευσε τρεις τρόπους διέγερσης που περιελάμβαναν άντληση με δέσμη ηλεκτρονίων, οπτική άντληση και άντληση διαμέσου έγχυσης ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό τύπου p-n. Ωστόσο το πρώτο laser τέτοιου τύπου κατασκευάστηκε από τον Basov το 1968.

Στην Αμερική οι N. Kromer και H. Zeiger στο MIT και οι W. Boyle και D. Thomas στο Bell Laboratories διεξήγαγαν έρευνες από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, αλλά οι πρώτοι που κατέθεσαν μια ολοκληρωμένη πρόταση⁶² στην οποία για πρώτη φορά σημειώνονταν είδη ημιαγωγών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν (GaAs, GaSb) ήταν οι Γάλλοι ερευνητές M. Bernard και G. Duraffourg. Ο πρώτος όμως που κατάφερε να δημιουργήσει laser ημιαγωγών τον Σεπτέμβριο 1962 ήταν ο R. Hall.

⁶¹ Σε αντιστοιχία με το maser τριών επιπέδων.

⁶² Μετά την υποβολή της πρότασης τους το 1961 επιταχύνθηκε παγκόσμια η ερευνητική διαδικασία αφού πειράματα με ημιαγωγούς GaAs πραγματοποιήθηκαν τόσο στη Σοβιετική Ένωση από τον D. Nasledov αλλά και στην Αμερική από πολλές ερευνητικές ομάδες (RCA, IBM, MIT).

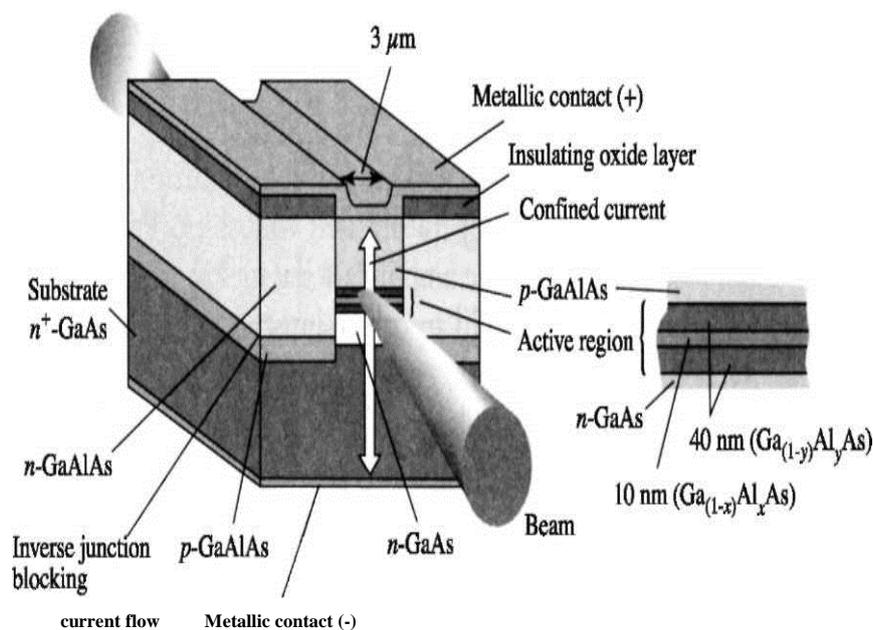
Η διάταξη αποτελούνταν από ένα κύβο με ακμή 0,4mm με τη δίοδο να βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο και να διέρχεται από το κέντρο. Η μπροστά και η πίσω πλευρά ήταν τοποθετημένες παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς το επίπεδο του κόμβου δημιουργώντας μια κοιλότητα.



Εικόνα 3.7.1 Σχήμα μιας διόδου p-n

Σε πολλές μελέτες, είχε υποθεθεί ότι τα κάτοπτρα θα έπρεπε να είναι παράλληλα με το επίπεδο της διόδου, έτσι ώστε η ακτινοβολία να εκπέμπεται κάθετα στη δίοδο. Ο Hall χρησιμοποίησε τη γνωστή διάταξη Fabry-Perot έτσι ώστε με συνεχείς ανακλάσεις να είναι δυνατή η ενίσχυση της ακτινοβολίας. Το laser λειτουργούσε παλμικά με διάρκεια 5-20ms και ο θετικός πόλος ήταν συνδεδεμένος με την p πλευρά της διάταξης ενώ ο αρνητικός με την n, ενώ η δίοδος ήταν βυθισμένη σε υγρό άζωτο. Όταν η ένταση του ρεύματος έφτανε την πολύ υψηλή τιμή των 8.500 A/cm² ξεκινούσε η εκπομπή της ακτινοβολίας laser. Τα συγκεκριμένα laser ήταν εργαστηριακές διατάξεις που λειτουργούσαν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό άλλαξε με την κατασκευή των διοδικών laser ετεροδομών.

Το 1963 ο Kroemer παρατήρησε ότι θα μπορούσαν να κατασκευαστούν δίοδοι που να αποτελούνται από δύο υλικά, δηλαδή ένα στρώμα ημιαγωγού με σχετικά χαμηλό ενεργειακό χάσμα να τοποθετηθεί ανάμεσα σε δύο άλλα στρώματα ημιαγωγών με ευρύτερα ενεργειακά χάσματα. Μια ανάλογη πρόταση έγινε από τον Z. Alferon στο Ioffe Physico-Technical Institute του Leningrad, που κατάφερε να κατασκευάσει διπλή ετεροδομή.

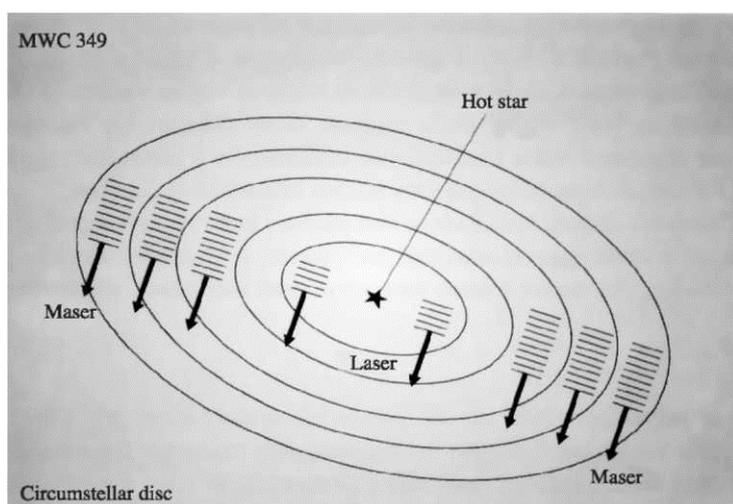


Εικόνα 3.7.3 Δίοδος *p-n GaAlAs*

Οι Kroemer και Alferon βραβεύτηκαν με το βραβείο Nobel το 2000 για την «ανάπτυξη ημιαγωγών ετεροδομών που χρησιμοποιήθηκαν στην οπτοηλεκτρονική». Ιδιαίτερα σημαντική για τη δημιουργία των laser ετεροδομών ήταν οι κρυσταλλικές ομοιότητες του AlAs με το GaAs καθώς και η τεχνολογική ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής που παρείχε τη δυνατότητα κατασκευής διατάξεων με πολύ μικρότερα μεγέθη, υψηλότερες αποδόσεις, ισχυρότερες διατάξεις άντλησης.

3.8 Το laser στη Φύση

Όπως και με τα διαστρικά maser έτσι και η ακτινοβολία laser είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ως φυσική διαδικασία. Μια εκπομπή laser με $\lambda=10\text{mm}$ παρατηρήθηκε στην ατμόσφαιρα του Άρη και της Αφροδίτης το 1981 από τον Michael J. Mumma του Εργαστηρίου για την Εξωγήινη Φυσική της NASA Goddard Space Flight Center. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα φυσικό laser CO_2 . Η αντιστροφή πληθυσμών του CO_2 που κυριαρχεί στην ατμόσφαιρα των δύο πλανητών, δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία, γι' αυτό το φαινόμενο παρατηρείται μόνο στα «φωτεινά» ημισφαίρια των πλανητών. Ο μηχανισμός είναι πανομοιότυπος με το γνωστό laser CO_2 αλλά οι γραμμές εκπομπής είναι 100 εκατομμύρια φορές πιο έντονες από ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί αν το αέριο ήταν σε θερμοδυναμικές συνθήκες ισορροπίας και στη θερμοκρασία της Γης. Στις αρχές του 1995, μια ομάδα αστρονόμων κατάφερε να ανιχνεύσει ενισχυμένη υπέρυθη ακτινοβολία που προέρχεται από ένα στροβιλιζόμενο δίσκο υδρογόνου γύρω από ένα νεαρό άστρο του αστερισμού του Κύκνου σε απόσταση 4.000 ετών φωτός.



Εικόνα 3.8.1 Στο αστέρι MWC349 παρατηρείται εκπομπή laser από το κέντρο του δίσκου υδρογόνου με ταυτόχρονη εκπομπή maser από σημεία μακρύτερα από το κέντρο.

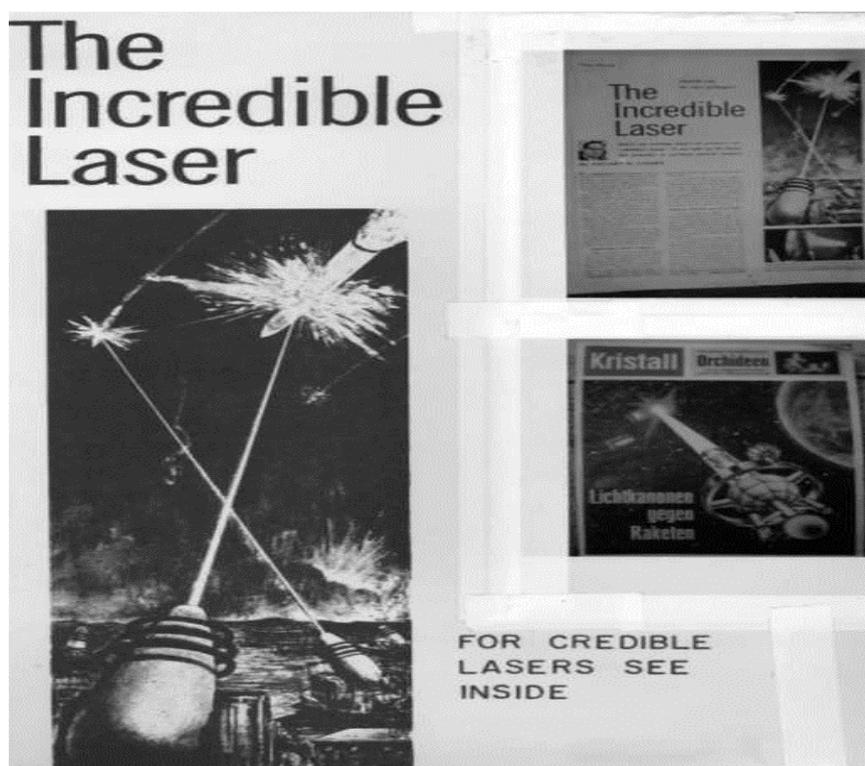
Προηγούμενες παρατηρήσεις του άστρου, που ονομάζεται MWC 349, είχαν αποκαλύψει το 1994 μια έντονη εκπομπή maser από αέριο υδρογόνου του δίσκου του σε μήκη κύματος 850 μm και 450 μm . Για να γίνει δυνατή η ανίχνευση ακτινοβολίας laser τοποθετήθηκε ένα υπέρυθρο τηλεσκόπιο σε ένα αεροπλάνο που πετούσε σε ύψος 12.500m ώστε να αποφεύγεται η απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τη γήινη ατμόσφαιρα. Παρατηρήθηκε μια γραμμή στα 169 μm έξι φορές πιο έντονη από αυτήν που θα αναμένονταν σε θερμική ισορροπία. Αυτή η γραμμή παράγεται από τα άτομα υδρογόνου που έχουν ιονιστεί από έντονη υπεριώδη ακτινοβολία που προέρχεται από το αστέρι ή μέσα πιο πολύπλοκες διαδικασίες που συμβαίνουν στο δίσκο. Όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα ιόντα, εκπέμπουν φωτόνια. Το μεγαλύτερο τμήμα της εκπομπής συμβαίνει αυθόρμητα αλλά είναι δυνατόν επίσης να υπάρξει εξαναγκασμένη εκπομπή. Η ίδια διαδικασία που παράγει εκπομπή maser σε άλλα μέρη του δίσκου, δημιουργεί συνθήκες για εκπομπή laser στο κέντρο του επειδή το υδρογόνο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και η υπεριώδης ακτινοβολίας άντλησης είναι πιο έντονη. Ο προσανατολισμός του δίσκου σε σχέση με τη Γη είναι τέτοιος ώστε να είναι δυνατή η λήψη αυτής της ακτινοβολίας. Αυτός ο δίσκος για τους αστροφυσικούς ταυτίζεται με μια περιοχή που σχηματίζονται οι πλανήτες. Δηλαδή η ακτινοβολία ίσως αποτελεί ένα πρόδρομο φαινόμενο της γέννησης ενός πλανήτη, ο οποίος απέχει από το άστρο όσο απέχει η Γη από τον Ήλιο! Το μήκος κύματος των 169 μm μπορεί να αποτελεί ακτινοβολία maser μικρού μήκους κύματος ή ακτινοβολία laser πολύ μεγάλου.

Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble επίσης έχει ανιχνεύσει υπεριώδη ακτινοβολία laser από ένα νέφος αερίων κοντά στο άστρο n-Carinae. Η ύπαρξη αστρικών laser και maser είναι πλέον ένα αποδεδειγμένο φαινόμενο, γι' αυτό και υποστηρίζεται η άποψη ότι τα laser και maser δεν εφευρέθηκαν αλλά ανακαλύφθηκαν!

3.9 Η κοινωνική αποδοχή των laser

Οι δημόσιες επιδείξεις της χρήσης των laser, η δημοσίευση άρθρων στον ημερήσιο τύπο και όχι μόνο σε επιστημονικά περιοδικά είχε ως αποτέλεσμα την έξαψη του ενδιαφέροντος της κοινής γνώμης και την αναγωγή των laser σε ένα σχεδόν μαγικό εργαλείο. Το 1962 δημοσιεύετε το άρθρο με τον εύγλωττο τίτλο «Το Απίθανο Laser». Ο συντάκτης του άρθρου Stuart Loory αναφέρει ότι τα laser «αποτελούν το νέο λυχνάρι του Αλαντίν για την επιστήμη» και ότι «μπορούν να ανάψουν το φεγγάρι, να σκοτώσουν στιγμιαία οποιοδήποτε ον, να πραγματοποιήσουν θαυμαστές χειρουργικές επεμβάσεις». Φιλοξενεί στο άρθρο του δηλώσεις του αρχηγού της Αμερικάνικης Αεροπορίας στρατηγού Curtis Le May, που εκθειάζει τη χρήση του laser ως αμυντική πυρηνική ασπίδα και αναφέρει την προοπτική δημιουργίας ενός όπλου-laser, μιας θανατηφόρας ακτίνας, που θα εκπέμπεται από μια φορητή συσκευή τοποθετημένη στον καρπό των στρατιωτών, όπως ακριβώς σε πολλές ταινίες του Hollywood.

Ο αρθογράφος συμπληρώνει: «Το laser μπορεί να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο από ότι οποιαδήποτε ανακάλυψη μέχρι τώρα στο ραγδαία αναπτυσσόμενο τομέα των ηλεκτρονικών, που ήδη έχει προσφέρει το ραντάρ, το τρανζίστορ,



Εικόνα 3.9.1 Φωτογραφίες έξω από την πόρτα του Art Schawlow στο Stanford Laboratory καθώς και το περίφημο άρθρο. Ο ίδιος σημείωσε επίσης « Για πραγματικά laser δείτε μέσα!». Πάντως έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι η εικόνα του laser κανονιού έχει δαχτυλίδια που μοιάζουν με τις λυχνίες Flash στην διάταξη του Maiman.

τα δίκτυα δορυφορικής παρακολούθησης, την τηλεόραση. Η τεχνολογική επανάσταση που θα επιφέρει μπορεί να επισκιάσει κάθε άλλη του παρελθόντος. »

Τέλος σημειώνει ότι «το 95% των κρατικών κονδυλίων αφορά έρευνες για στρατιωτικούς σκοπούς και ότι αναλυτές προβλέπουν ότι το 1964 θα χρησιμοποιούνται laser στα πεδία των μαχών και το 1965 θα δημιουργηθούν laser αναμεταδότες μεταξύ της Γης και των δορυφόρων»

Ο Art Schawlow τοποθέτησε αυτό το άρθρο έξω απ' το γραφείο στο Stanford Laboratory του με την υποσημείωση «Για πραγματικά laser δείτε μέσα»!

4. Αρχές λειτουργίας

4.1 Τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας

Το φως είναι μια μορφή ενέργειας που διαθέτει τόσο σωματιδιακή όσο και κυματική φύση. Όσον αφορά τη σωματιδιακή φύση το φως αποτελείται από πακέτα ενέργειας, τα φωτόνια, η ενέργεια των οποίων εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός. Ως κύμα το φως διαδίδεται με ταχύτητα 3×10^8 m/s. Ο όρος φως περιλαμβάνει το υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι πηγές του φωτός μπορεί να είναι πολλές οι λάμπες φθορίου, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως από βολφράμιο ακόμη και ο ήλιος. Αυτές οι πηγές παράγουν φως με διαφορετικούς τρόπους αλλά η εκπομπή της ακτινοβολίας έχει πολλές κοινές ιδιότητες: εξαπλώνεται ταχύτατα από την πηγή, αποτελείται από διάφορα μήκη κύματος και διαδίδεται με έναν εντελώς τυχαίο τρόπο. Το Laser ωστόσο είναι μια μοναδική πηγή η οποία διαφέρει από τις παραπάνω γιατί η ακτινοβολία laser παράγεται με έναν αρμονικό τρόπο έτσι ώστε τα κύματα να μπορούν να ενισχυθούν για να παράξουν μια έντονη υψηλά κατευθυντική δέσμη.

Για να δημιουργηθεί ακτινοβολία laser πρέπει να υπάρχει ένα ενεργό μέσο που να μπορεί να δώσει εκπομπή ακτινοβολίας στο “οπτικό μέρος” του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καθώς και να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μιας κατάστασης, που είναι γνωστή σαν αντιστροφή πληθυσμών μέσα από μια διαδικασία που αναφέρεται σαν άντληση. Αυτό όμως θα μπορούσε να καταλήξει απλά σε έναν ενισχυτή φωτός εάν δεν υπάρχει κάποιο οπτικό αντηχείο μέσα στο οποίο μπορούν να δημιουργηθούν συνθήκες για ταλάντωση laser, μετατρέποντας έτσι τη διάταξη σε γεννήτρια μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

4.2 Εκπομπή και απορρόφηση ακτινοβολίας

Όπως έχει προαναφερθεί κομβικής σημασίας για τη λειτουργία των laser είναι τρία βασικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό. Τα φαινόμενα αυτά είναι οι διεργασίες της αυθόρμητης εκπομπής, της εξαναγκασμένης εκπομπής και η διεργασία της απορρόφησης. Στα άτομα, τα ιόντα και τα μόρια, δηλαδή στα ατομικά συστήματα μπορούν να καταληφθούν μόνο διακριτές ενεργειακές στάθμες. Μετάβαση είναι η αλλαγή από μια ενεργειακή στάθμη σε μια άλλη, και συνοδεύεται από την απορρόφηση ή την εκπομπή ενός φωτονίου. Η σχέση του Bohr μας δίνει τη συχνότητα που αντιστοιχεί σε μια τέτοια μετάβαση και παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\nu_{21} = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

E_1, E_2 : οι δύο διακριτές ενεργειακές στάθμες

h : η σταθερά του Planck

ν_{21} : συχνότητα ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Εξαναγκασμένη απορρόφηση ή απλά απορρόφηση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν_{21} περάσει μέσα στο σύστημα, ηλεκτρόνια της E_1 στάθμης απορροφούν ενέργεια και ανεβαίνουν στη στάθμη E_2 . Η στάθμη E_1 ξαναγεμίζει με ηλεκτρόνια γρήγορα. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στη στάθμη E_1 με δύο τρόπους, είτε αυθόρμητα είτε εξαναγκασμένα, με τη διαδικασία της εκπομπής. Ως **αυθόρμητη εκπομπή** χαρακτηρίζεται η εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $h \times \nu_{21} = E_2 - E_1$ (όταν το ηλεκτρόνιο αποδιεγείρεται από το επίπεδο 2 στο 1), σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Στη περίπτωση της **εξαναγκασμένης εκπομπής** η αποδιέγερση αυτή συμβαίνει χωρίς ακτινοβολία και η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ αποδίδεται με κάποια άλλη μορφή εκτός από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα στο φωτόνιο που προκαλεί

την εκπομπή έρχεται να προστεθεί ένα δεύτερο φωτόνιο του ίδιου μήκους κύματος και της ίδιας φάσης με το αρχικό, έτσι η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ αποδίδεται με τη μορφή ενός Η.Μ κύματος που προστίθεται στο προσπίπτον.

4.3 Άντληση και αντιστροφή πληθυσμών

Η εξίσωση $dF = \sigma F (N_2 - N_1) dz$ δείχνει πως το υλικό συμπεριφέρεται ως ένας ενισχυτής ή ως απορροφητής. Πιο συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε δύο αυθαίρετα ενεργειακά επίπεδα 1 και 2 δεδομένου υλικού, τα N_1 και N_2 είναι οι αντίστοιχοι πληθυσμοί τους. Αν θεωρήσουμε επίπεδο κύμα έντασης που αντιστοιχεί σε ροή φωτονίων F και διαδίδεται κατά μήκος του άξονα z του υλικού, το μέγεθος dF αντιστοιχεί στη στοιχειώδη μεταβολή της ροής των φωτονίων F που διαδίδεται κατά μήκος της διεύθυνσης z στο υλικό. Έτσι τελικά στην εξίσωση αυτή αν $N_2 > N_1$ το υλικό συμπεριφέρεται ως ένας ενισχυτής, ενώ αν $N_2 < N_1$ συμπεριφέρεται ως απορροφητής.

Κάτω από κανονικές συνθήκες το υλικό δρα ως απορροφητής γιατί σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας οι πληθυσμοί των ενεργειακών επιπέδων περιγράφονται από τη στατιστική Boltzmann, που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των σωματιδίων βρίσκεται στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο οπότε ισχύει $N_2 < N_1$, άρα ενέργεια και πληθυσμός σε ένα επίπεδο είναι αντιστρόφως ανάλογα.

Στην περίπτωση του laser θέλουμε να επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών, δηλαδή η διαφορά πληθυσμών να είναι αντίθετου πρόσημου από εκείνη που υπάρχει κάτω από κανονικές. Έτσι χρησιμοποιώντας μια εξωτερική πηγή ενέργειας πετυχαίνουμε μια κατάσταση μη ισορροπίας, για την οποία $N_2 > N_1$. Στην περίπτωση αυτή το υλικό θα δράσει ως ενισχυτής. Το υλικό που παρουσιάζει την αντιστροφή πληθυσμών λέγεται ενεργό μέσο και η διαδικασία κατά την οποία τα άτομα διεγείρονται και εξωθούνται σε κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας ονομάζεται άντληση.

4.4 Οπτικά αντηχεία

Με βάση τα όσα έχουν περιγραφεί είναι φανερό ότι το laser μπορεί να λειτουργήσει ως ενισχυτής φωτός. Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με το στοιχείο εκείνο που είναι βασικό για τη μετατροπή των laser σε γεννήτριες μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Το στοιχείο αυτό είναι το οπτικό αντηχείο το οποίο είναι απαραίτητο για να δημιουργηθούν συνθήκες ταλάντωσης laser.

Το οπτικό αντηχείο αποτελείται από δύο κάτοπτρα, ένα ολικά και ένα μερικά ανακλαστικό, τα δύο κάτοπτρα τοποθετούνται κάθετα στον οπτικό άξονα του laser και δημιουργού μια οπτική κοιλότητα συντονισμού μέσα στην οποία ταλαντώνεται η ακτινοβολία. Εξαιτίας του ζεύγους των κατόπτρων η ακτίνα του laser ταξιδεύει και παλινδρομεί μέσα σε ενεργό υλικό. Με αυτό το σύστημα κατόπτρων, το ενεργό φαινομενικό μήκος του οπτικού αντηχείου πολλαπλασιάζεται. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία ενός συστήματος laser είναι οι συνολικές απώλειες της δέσμης να είναι μικρότερες από την ενίσχυση του συστήματος. Η συνθήκη ισορροπίας μπορεί να οριστεί από την παρακάτω σχέση:

$$G = R_1 \times R_2 \times e^{2(\beta-\alpha)L} = 1$$

G: η ενίσχυση ενός πλήρους κύκλου

R₁, R₂: οι ανακλαστικότητες των δύο κατόπτρων

L: η απόσταση των δύο κατόπτρων

α, β: οι απώλειες ανά μονάδα μήκους

Αν $G=1$ παράγεται ακτινοβολία laser, ενώ αν $G < 1$ το σύστημα δεν παράγει ακτινοβολία. Πρέπει, όμως, να τονίσουμε ότι η λειτουργία είναι προβληματική και στις περιπτώσεις $G \gg 1$.

Η σταθερότητα ενός αντηχείου δηλαδή η δυνατότητα της δέσμης μετά από ένα μεγάλο αριθμό ανακλάσεων να παραμένει κοντά στον οπτικό άξονα έχει μεγάλη σημασία.

Η συνθήκη ευστάθειας δίνεται από τη σχέση:

$$0 < g_1 * g_2 < 1$$

όπου $g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$, $g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$ όπου r_1, r_2 οι ακτίνες καμπυλότητας των δύο κατόπτρων. Το αντηχείο είναι ευσταθές όταν η συνθήκη σταθερότητας ικανοποιείται, οπότε οι ακτίνες παραμένουν κοντά στον οπτικό άξονα.

➤ Για $g_1 * g_2 < 0$ ή $g_1 * g_2 > 1$

το αντηχείο είναι ασταθές,

➤ Ενώ αν

$$g_1 * g_2 = 1 \text{ ή } g_1 * g_2 = 0$$

τότε το οπτικό αντηχείο βρίσκεται μεταξύ σταθερότητας κι αστάθειας (κρίσιμη ευστάθεια).

$$R_1 = R_2 = \infty$$

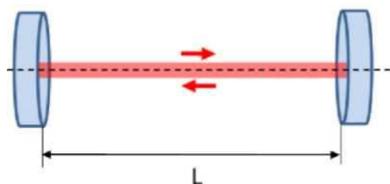
$$R_1, R_2 \gg L$$

$$R_1 = \infty, R_2 \gg L$$

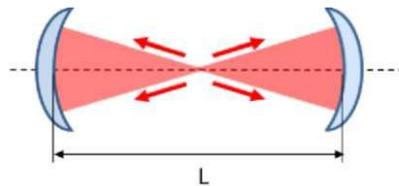
ΟΜΟΕΣΤΙΑΚΟ, $R_1 = R_2 = L$

ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΚΟ, $R_1 = \infty, R_2 = L$

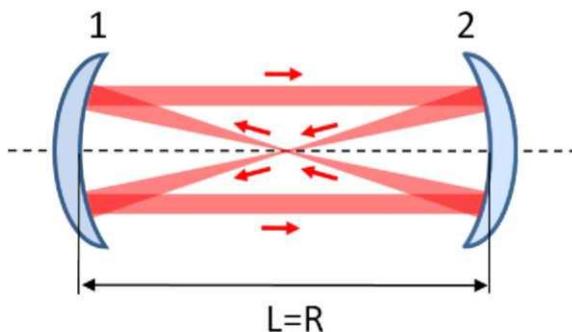
Στη συνέχεια ακολουθούν σχήματα από είδη αντηχείων



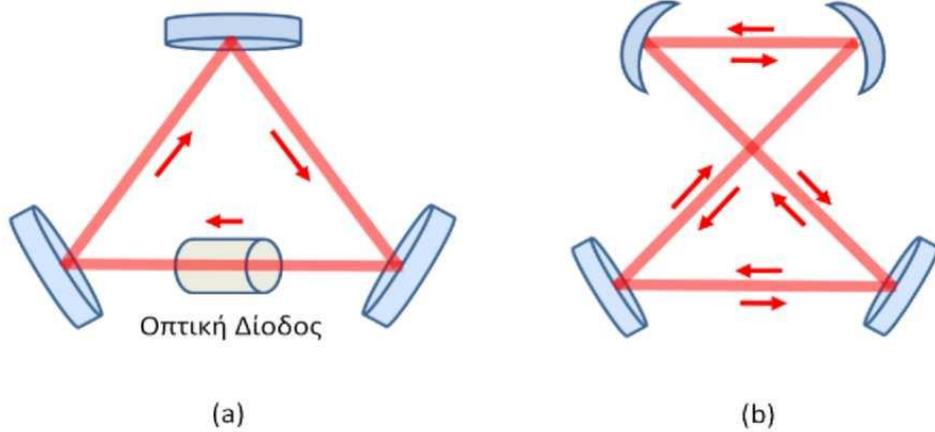
Αντηχείο Fabry-Perot



Σφαιρικό Αντηχείο



Γενικευμένο σφαιρικό αντηχείο



Κυκλικά Αντηχεία

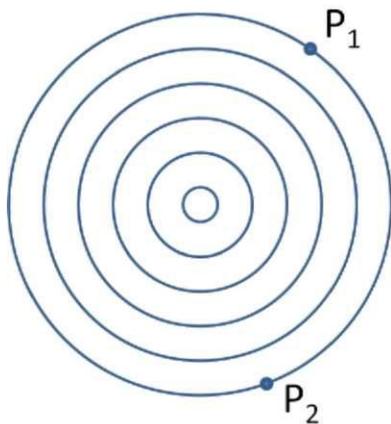
Θεωρώντας ότι το ενεργό μέσο βρίσκεται στο εσωτερικό του αντηχείου, επιδρούμε με μια εξωτερική πηγή ενέργειας που λειτουργεί ως μηχανισμός άντλησης και διεγείρει τα άτομα του ενεργού μέσου. Η αντανάκλαση της ακτινοβολίας από τα κάτοπτρα επιτυγχάνει την ενίσχυση της ακτινοβολίας καθώς και την κατευθυντικότητα της δέσμης.

4.5 Ιδιότητες ακτινοβολίας laser

Η ακτινοβολία laser χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό μονοχρωματικότητας, συμφωνίας κατευθυντικότητας και λαμπρότητας.

- **Μονοχρωματικότητα:** Η ακτινοβολία που ενισχύεται είναι αυτή που έχει την κατάλληλη συχνότητα, η οποία μπορεί να δεχτεί την επίδραση του φάσματος συντονισμού της κοιλότητας του laser. Έτσι παράγεται μια πιο στενή φασματική γραμμή κατά τη μετάβαση laser από ότι κατά την αυθόρμητη εκπομπή.

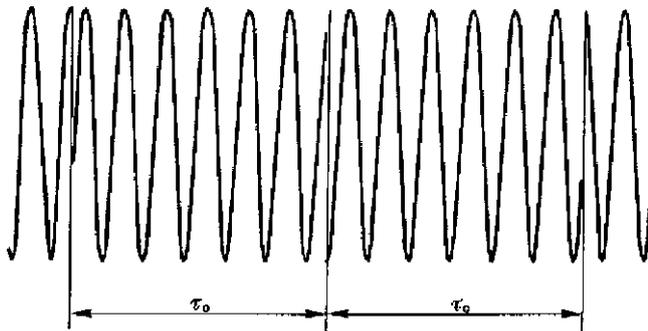
- **Συμφωνία (Coherence):** Για κάθε ΗΜ κύμα μπορούμε να ορίσουμε σε πρώτη προσέγγιση τις έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας.



Εικόνα 4.5.1 Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων.

Χωρική συμφωνία: Έστω δύο σημεία P_1 και P_2 στο χώρο που την χρονική στιγμή $t = 0$ βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο ενός ΗΜ κύματος, κι έστω $E_1(t)$ και $E_2(t)$ τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία. Τότε η διαφορά φάσης των σημείων θα είναι μηδέν. Εάν η διαφορά φάσης των δύο σημείων παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$ τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων*. Εάν η διαφορά φάσης δύο οποιωνδήποτε σημείων του μετώπου κύματος παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$ τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια χωρική συμφωνία* (perfect spatial coherence).

Χρονική συμφωνία: Έστω ηλεκτρικό πεδίο ΗΜ κύματος $E(t)$ σε σταθερό σημείο στο χώρο. Εάν για δεδομένη χρονική καθυστέρηση τ_0 η διαφορά φάσης μεταξύ $E(t)$ και $E(t+\tau_0)$ παραμένει σταθερή για κάθε t , τότε λέμε πως έχουμε χρονική συμφωνία για το διάστημα τ_0 (*μερική χρονική συμφωνία*-partial temporal coherence). Ο χρόνος τ_0 λέγεται χρόνος συμφωνίας. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τ_0 τότε λέμε πως έχουν *τέλεια χρονική συμφωνία* (perfect temporal coherence).

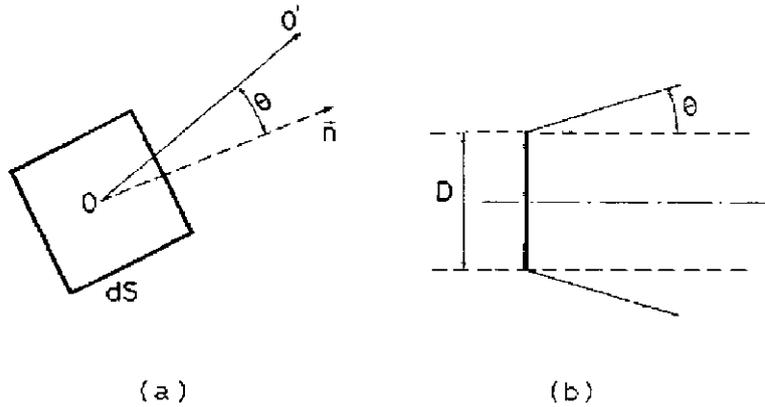


Εικόνα 4.5.2 Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας τ_0 .

Από το σχήμα φαίνεται πως η χρονική συμφωνία και η μονοχρωματικότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες.

- **Κατευθυντικότητα:** Η ιδιότητα αυτή είναι άμεση απόρροια του γεγονότος ότι η διαδικασία της ενίσχυσης του φωτός γίνεται μέσα στην κοιλότητα laser. Μόνο τα κύματα που διαδίδονται στον άξονα της κοιλότητας μπορούν υπάρξουν, να ενισχυθούν (χωρική συμφωνία) και τελικά να διαδοθούν εκτός της κοιλότητας. Η απόκλιση από την τέλεια κατευθυντικότητα (παράλληλη δέσμη) οφείλεται στην ύπαρξη οπών κατά τη διάδοση της δέσμης στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της περίθλασης (diffraction).

- **Λαμπρότητα (Brightness):** Ως λαμπρότητα μιας πηγής ΗΜ κυμάτων ορίζουμε την ισχύ που εκπέμπεται ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Έστω στοιχειώδης επιφάνεια dS στο σημείο O της πηγής.



Εικόνα 4.5.3 (α) Λαμπρότητα πηγής ΗΜ κυμάτων στο σημείο O .

(β) Λαμπρότητα δέσμης laser διαμέτρου D και γωνιακής απόκλισης θ .

Η λαμπρότητα είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος του συστήματος και ιδιότητα της δέσμης laser αλλά και γενικά οποιασδήποτε πηγής φωτός. Μια δέσμη laser ακόμη και μέτριας ισχύος έχει λαμπρότητα πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός. Ο βασικός λόγος είναι η υψηλή κατευθυντικότητα.

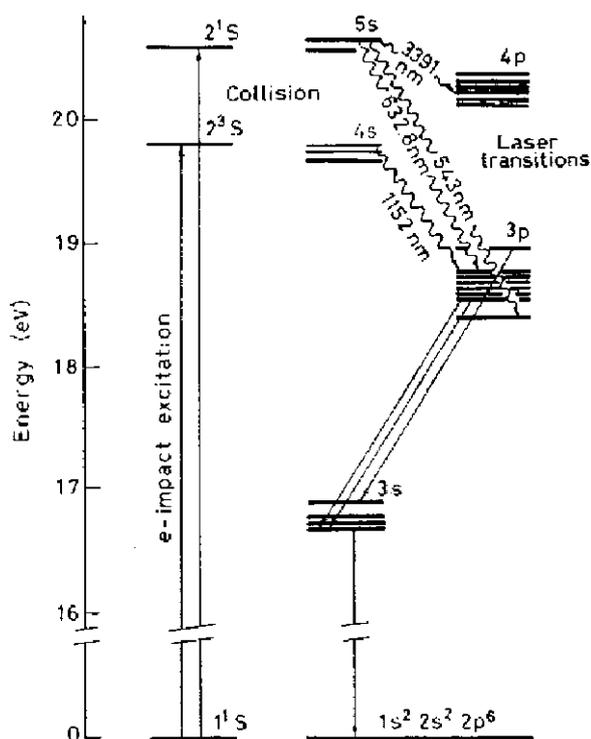
- **Παλμοί μικρής χρονικής διάρκειας:** Η δυνατότητα παραγωγής παλμών laser εξαιρετικά μικρής χρονικής διάρκειας αναφέρεται στο σημείο αυτό ως ιδιότητα του φωτός laser. Παλμοί laser διάρκειας μερικών femtoseconds ($1\text{fs}=10^{-15}\text{sec}$) είναι πλέον απαραίτητο εργαλείο στα περισσότερα εργαστήρια Ατομικής Μοριακής και Οπτικής Φυσικής.

4.6 Είδη laser

4.6.1 Laser He-Ne

Το laser He-Ne ήταν το πρώτο laser αερίων που κατασκευάστηκε. Μπορεί να συντονιστεί σε διάφορα μήκη κύματος με πιο συνηθισμένο⁶³ τα 633 nm, που δίνουν κόκκινο χρώμα. Από το μείγμα των αερίων το He χρησιμοποιείται ως μέσο άντλησης, ενώ οι μεταβάσεις στα άτομα του Ne δίνουν την ακτινοβολία laser.

21 .-Helium Neon



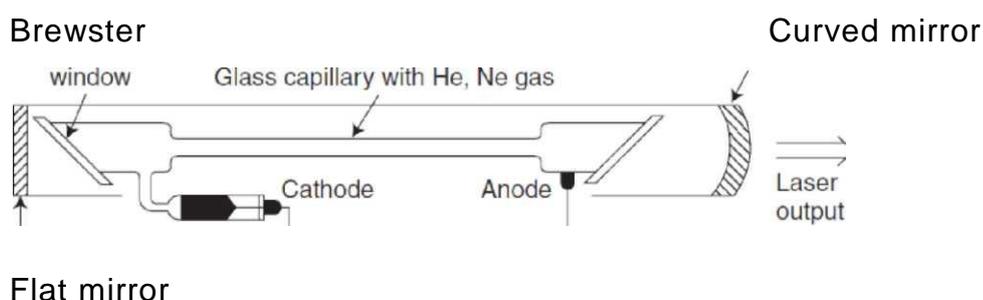
Εικόνα 4.6.1.1 Το ενεργειακό διάγραμμα των καταστάσεων του laser He-Ne

Ο μηχανισμός της άντλησης περιγράφεται στο ενεργειακό διάγραμμα, και τίθεται σε λειτουργία μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης που διεγείρει τα άτομα

⁶³ Η λειτουργία του στα 1,15 μm έδωσε το πρώτο cw laser αερίων.

του Ηλίου από τη θεμελιώδη κατάσταση τους 1^1S στις διεγερμένες καταστάσεις 2^1S και 2^3S που φαίνονται στο σχήμα. Οι διεγερμένες καταστάσεις του He ταυτίζονται σχεδόν με τις διεγερμένες καταστάσεις των ατόμων του Ne 4s, 5s. Οι κρούσεις των ατόμων του He με τα άτομα του Ne δημιουργούν μεταφορά πληθυσμού.

Σύμφωνα με τους κανόνες διπολικών μεταβάσεων τα κάτω ενεργειακά επίπεδα θα είναι οι p-καταστάσεις, δηλαδή οι 4p και 3p, όπως περιγράφονται στο σχήμα. Οι γραμμές των μεταβάσεων διαπλάτυνονται κυρίως κατά Doppler - οι ομογενείς διαπλάτυνσεις λόγω κρούσεων και λόγω της φυσικής διαπλάτυνσης είναι της τάξης των MHz ενώ η μη-ομογενής διαπλάτυνση Doppler είναι της τάξης των GHz.



Εικόνα 4.6.1.2. Η βασική κατασκευαστική δομή ενός laser He-Ne

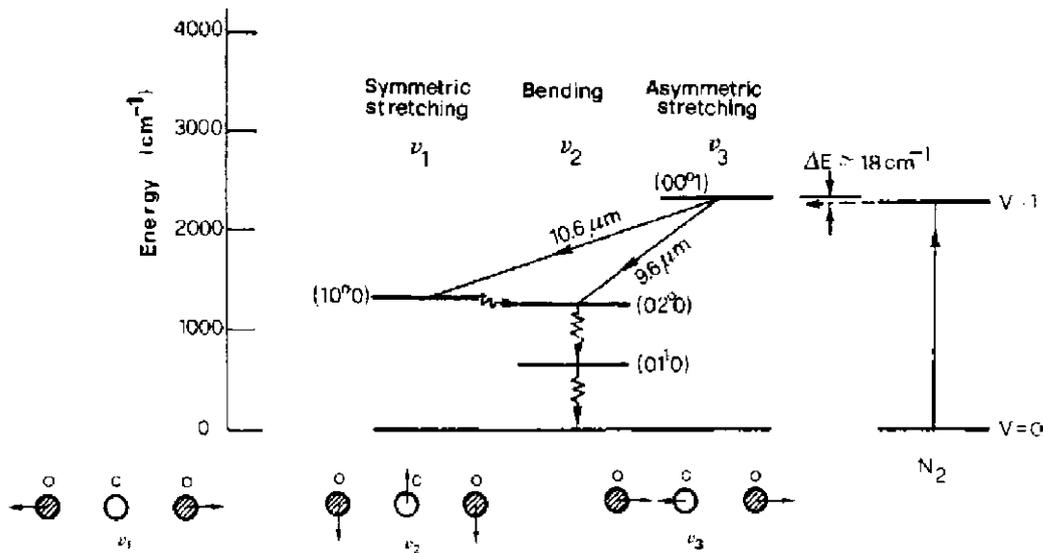
Τα laser He-Ne είναι classer χαμηλής ισχύος γεγονός που οφείλεται στην πολύ χαμηλή κβαντική απόδοση της άντλησης. Για $\lambda=633$ nm και μήκη κοιλότητας 20-50 cm η ισχύς είναι μεταξύ 1-10 mW. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου δεν είναι απαραίτητη η υψηλή ισχύς. Για παράδειγμα στο εργαστήριο για αρχική ευθυγράμμιση οπτικών διατάξεων, στην εκπαίδευση σε προπτυχιακά μαθήματα εργαστηρίων οπτικής για μελέτη βασικών οπτικών φαινομένων (συμβολή, περίθλαση, κτλ.), στα καταστήματα για την ανάγνωση των barcodes, αλλά και στη μετρολογία και την ολογραφία, αν και αντιμετωπίζουν μεγάλο ανταγωνισμό σε μερικές περιπτώσεις από τα laser διόδου που είναι μικρότερα σε μέγεθος και φτηνότερα.

4.6.2. Laser CO₂

Στο συγκεκριμένο laser χρησιμοποιείται μείγμα αερίων CO₂, N₂, He. Τα άτομα του Ηλίου και του Αζώτου χρησιμοποιούνται ως μηχανισμός άντλησης. Το N₂ βοηθά στην αύξηση του πληθυσμού στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο ενώ ταυτόχρονα το He μειώνει τον πληθυσμό στο κατώτερο επίπεδο. Έτσι επιτυγχάνεται η αντιστροφή πληθυσμών. Το CO₂, είναι ένα τριατομικό μόριο και παρουσιάζει τρεις μη εκφυλισμένους τρόπους symmetric stretching, bending, asymmetric stretching . (ν_1, ν_2, ν_3). Οι κβαντικοί αριθμοί n_1, n_2 και n_3 , περιγράφουν τα ενεργειακά επίπεδα αντίστοιχα, με την ολική ενέργεια ταλάντωσης να προκύπτει από τον τύπο

$$E = n_1 * h\nu_1 + n_2 * h\nu_2 + n_3 * h\nu_3$$

Οι καταστάσεις συμβολίζονται ως $n_1 n_2^l n_3$. Για παράδειγμα η κατάσταση $01^1 0$ αντιστοιχεί στη δόνηση n_2 . Ο δείκτης $l=1$ της κατάστασης n_2 συμβολίζει την στροφορμή της κατάστασης n_2 γύρω από τον άξονα του μορίου και υπάρχει λόγω του διπλού εκφυλισμού του τρόπου bending σε δύο κάθετα επίπεδα. Η ταλάντωση laser επιτυγχάνεται μεταξύ των επιπέδων $00^0 1$ και $10^0 0$ ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$) καθώς και $00^0 1$ και $02^0 0$ ($\lambda=9,6 \mu\text{m}$).

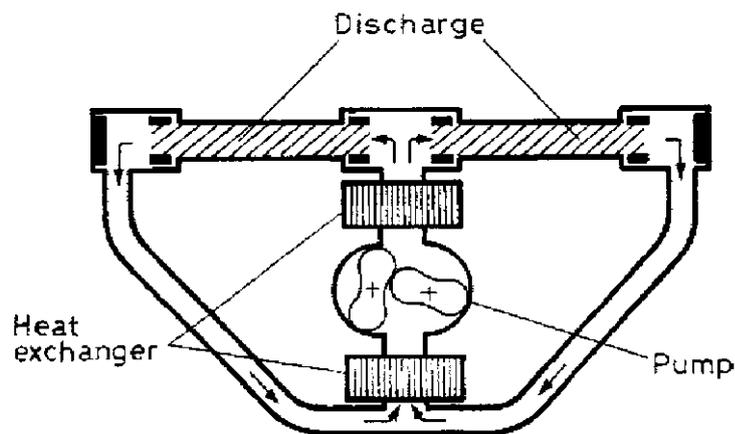


Εικόνα 4.6.2.1 Το ενεργειακό διάγραμμα των ταλαντωτικών καταστάσεων του laser CO₂ και οι τρεις βασικοί τρόποι ταλάντωσης του γραμμικού τριατομικού μορίου του CO₂: (ν₁) symmetric stretching, (ν₂) bending, (ν₃) asymmetric stretching.

Για να προκύψει η κατάσταση 00⁰1 τα ηλεκτρόνια της εκκένωσης διεγείρουν με κρούσεις το μόριο του CO₂ στη στάθμη 00⁰1, ενώ είναι δυνατόν το σύστημα να καταλήξει στην ίδια στάθμη με μεταφορά ενέργειας από το διεγερμένο άτομο Αζώτου N₂ το οποίο μπορεί να περιέλθει στη μετασταθή κατάσταση v=1 που η ενέργεια της είναι πολύ κοντά στην ενέργεια της 00⁰1 του CO₂. Ως αποτέλεσμα υπάρχει ισχυρή ζεύξη των δυο καταστάσεων και αποδοτική μεταφορά πληθυσμού από την v=1 του N₂ στην 00⁰1 του CO₂.

Κατά τη μετάβαση μεταξύ των επιπέδων 00⁰1 — 10⁰0 και 00⁰1 — 02⁰0, τα κατώτερα επίπεδα αποδιεγείρονται στη βασική κατάσταση μέσω κρούσεων με τα υπόλοιπα μόρια. Με βάση την ελαστική θεωρία των κρούσεων η μεταφορά ταλαντωτικής ενέργειας σε μεταφορική είναι πολύ πιο αποδοτική όταν τα μόρια είναι μικρά, κι εκεί ακριβώς έρχεται ο ρόλος του He. Όπως και στο laser He-Ne οι φασματικές γραμμές του είναι διαπλατυσμένες κυρίως κατά Doppler.

Το laser CO₂ μπορεί να λειτουργήσει είτε ως συνεχές είτε ως παλμικό (Q-switched). Πρόκειται για ένα από τα πιο ισχυρά laser που υπάρχουν με ισχύ που μπορεί να ξεπερνά και τα 100kW. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές (κοπή μετάλλων, κολλήσεις, γυάλισμα επιφανειών, κτλ.). Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί και στη χειρουργική (κοπή κι ανάπλαση δέρματος, σταμάτημα αιμορραγιών, κτλ.). Το CO₂ laser έχει χαμηλό κόστος παραγωγής και είναι το πλέον αποδοτικό laser που υπάρχει σήμερα με $\alpha > 20\%$.



Εικόνα 4.6.2.2 Διάταξη μεγάλης επαναληπτικότητας laser CO₂

4.6.3. Laser Excimer

Το όνομα του laser προέρχεται από τις λέξεις excited και dimer. Πρόκειται δηλαδή για ένα διμερές - ένα ψευδομόριο που αποτελείται από δυο «πανομοιότυπα»⁶⁴ μόρια - που βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση. Ονομάζονται επίσης exciplex⁶⁵ laser – που αν και σωστότερος όρος δεν χρησιμοποιείται ευρέως.

Το πρώτο excimer laser κατασκευάστηκε στον Ινστιτούτο Φυσικής Lebedev στη Μόσχα το 1970 από τους Nikolai Basov, V. A. Danilychev και Yu. M. Ρορον. Αποτελούνταν από ένα μείγμα αερίου Xe που δημιουργούσε ένα διμερές και λειτουργούσε στα 172nm. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν laser ευγενών αερίων με αλογόνα από πολλές ερευνητικές ομάδες⁶⁶ κυρίως με αέριο Xe και Br αλλά και με Xe και Cl.

Τα excimer laser έχουν τρεις σημαντικές ιδιότητες:

- Τα μήκη κύματός τους είναι στο υπεριώδες εφόσον οι μεταβάσεις είναι μεταξύ ηλεκτρονικών καταστάσεων,
- Η βασική κατάσταση οδηγεί σε πολύ γρήγορη διάσπαση του μορίου με αποτέλεσμα η κάτω στάθμη του laser να αδειάζει ταχύτητα, κι άρα το excimer laser να λειτουργεί ως ένα laser τεσσάρων σταθμών,
- Επειδή η βασική στάθμη δεν έχει δέσμιες καταστάσεις δεν υπάρχουν μεταβάσεις μεταξύ περιστροφικών-ταλαντωτικών καταστάσεων με αποτέλεσμα οι φασματικές γραμμές της μετάβασης να μην είναι πολύπλοκες και σχετικά φαρδιές, $\Delta\nu = 20-100 \text{ cm}^{-1}$.

⁶⁴ Δεν αρκεί να είναι ένα οποιοδήποτε διατομικό μόριο για να δημιουργηθεί διμερές, γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται ευγενή αέρια μαζί με αλογόνα τα οποία δημιουργούν σε κατάλληλες συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, με ταυτόχρονη ηλεκτρική διέγερσης ένα ψευδομόριο, που μπορεί να υπάρχει μόνο σε μια ενεργοποιημένη κατάσταση και το οποίο τελικά παρέχει ακτινοβολία laser στο υπεριώδες.

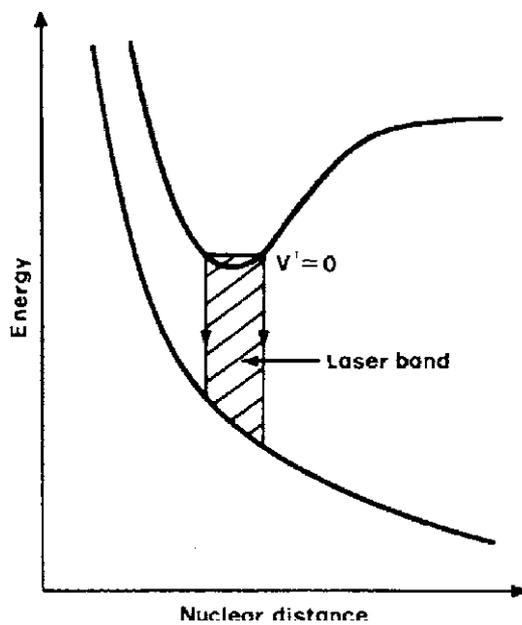
⁶⁵ Excited complex. Είναι ακριβέστερος όρος αφού αναφέρεται σε ενός είδους σύμπλεγμα

⁶⁶ Avco Everett Research Laboratory, Sandia Laboratories, Northrop Research and Technology Center, Naval Research Laboratory.

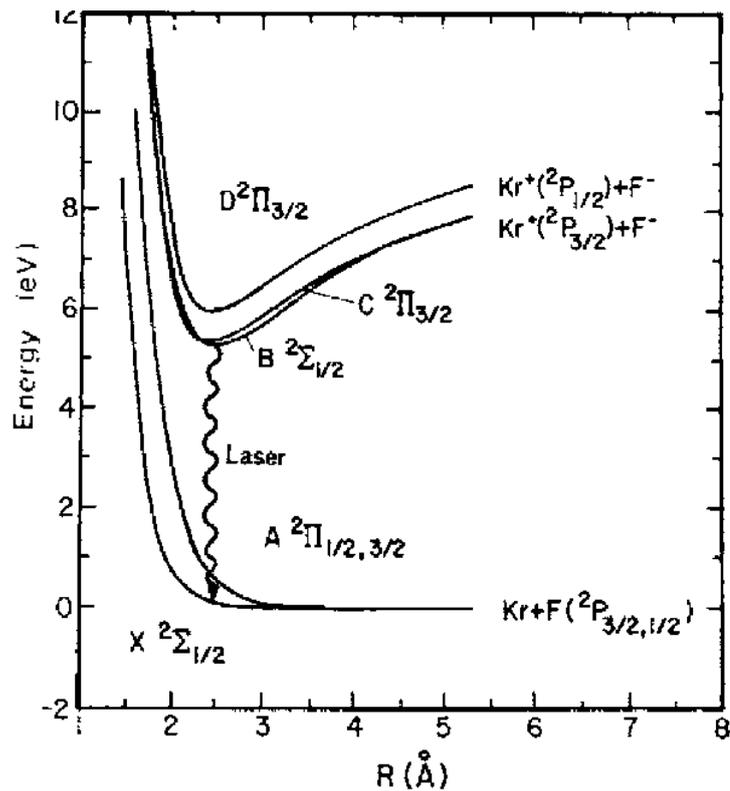
Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται είδη από excimer laser με τα αντίστοιχα μήκη κύματος:

Ar₂	126nm
Kr₂	146nm
F₂	157nm
Xe₂	172nm
ArF	193nm
KrF	248nm
XeBr	282nm
XeCl	308nm
XeF	351nm
KrCl	222nm

Πίνακας 4.6.3.1 Είδη από excimer laser με τα αντίστοιχα μήκη κύματος.



Εικόνα 4.6.3.1 Ενεργειακές καταστάσεις excimer laser



Εικόνα 4.6.3.2 Οι ενεργειακές καταστάσεις ενός *excimer laser KrF*

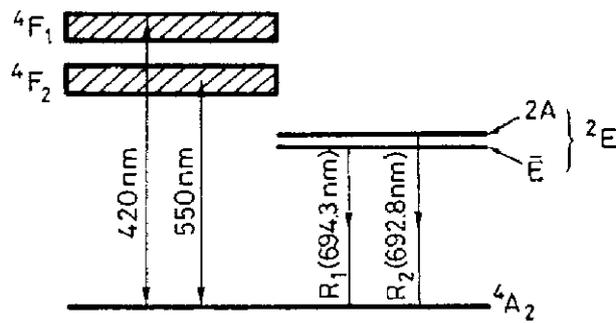
Στο *excimer laser KrF* για το μηχανισμό της άντλησης χρησιμοποιούμε ηλεκτρική εκκένωση όπου οι μηχανισμοί διέγερσης περιλαμβάνουν ιόντα Kr ή άτομα Kr.

Τα *excimer laser* είναι παλμικά με μικρή χρονική διάρκεια της τάξης των nsec με μεγάλους ρυθμούς επανάληψης (μέχρι 100- 500 Hz) και επίσης μεγάλη ισχύ (μερικά kW). Χρησιμοποιούνται στην χειρουργική ματιών, στη λιθογραφία και γενικά στην επεξεργασία πλαστικών και βιολογικών υλικών καθώς αυτά απορροφούν στο υπεριώδες. Η μικρή χρονική διάρκεια τους τα κάνει ιδανικά για την διαδικασία της αποδόμησης, που βρίσκει εφαρμογές στη διάνοιξη οπών ακριβείας και γενικά τη χάραξη των επιφανειών υλικών που απορροφούν έντονα στο υπεριώδες. Τα *excimer laser* μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και ως αντλητικά μέσα για *dye laser*.

4.6.4. Laser στερεάς κατάστασης

Όπως έχει αναφερθεί το πρώτο laser στερεάς κατάστασης ήταν το ruby laser του T.H. Maiman, που χρησιμοποίησε οξείδιο αργιλίου στον κρύσταλλο του οποίου είχε τοποθετήσει ιόντα Cr. Γενικά στα laser στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούνται είτε οξείδια μετάλλων είτε ενώσεις με φθόριο ενώ για τις προσμίξεις ιόντων χρησιμοποιούνται είτε μέταλλα (Cr, Ti, Co, Ni) είτε τα Nd, Yb από τις λανθανίδες. Η ηλεκτρονική διάταξη στις λανθανίδες είναι η $[Xe]6s^2 4f^N$ όπου N τα ηλεκτρόνια του 4f τροχιακού. Κατά την πρόσμιξη ενός τέτοιου ατόμου στον κρύσταλλο τα δύο s ηλεκτρόνια της κατάστασης $6s^2$ και ένα ηλεκτρόνιο από το 4f τροχιακό σχηματίζουν δεσμούς με τα γειτονικά άτομα του κρυστάλλου. Έτσι το άτομο που είχε τοποθετηθεί στον κρύσταλλο έχει μετατραπεί σε ιόν με τα εναπομείναντα N-1 ηλεκτρόνια του 4f τροχιακού να αναδιατάσσονται ενεργειακά στην 4f κατάσταση με βάση τις αλληλεπιδράσεις Coulomb, τις αλληλεπιδράσεις με το κρυσταλλικό πεδίο και την αλληλεπίδραση spin τροχιάς. Έτσι προκύπτει ένας νέος μεγάλος αριθμός μη εκφυλισμένων πλέον καταστάσεων στη διάταξη $4f^{N-1}$. Η ακτινοβολία laser δημιουργείται κατά τις μεταβάσεις μεταξύ αυτών των νέων καταστάσεων (μεταβάσεις 4f-4f) .

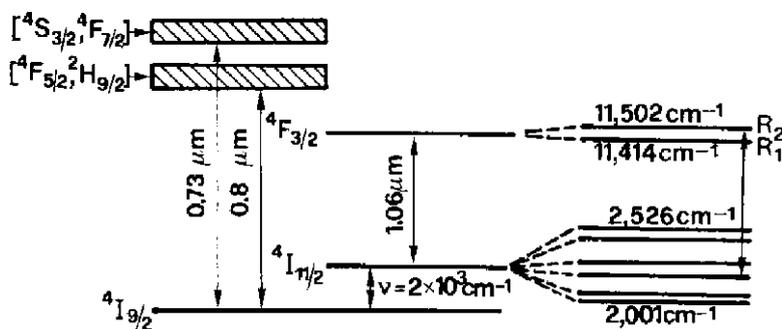
Κατά την πρόσμιξη μετάλλων μετάπτωσης ($[Ar]4s 3d$) δημιουργούνται δεσμοί με τα γειτονικά άτομα του κρυστάλλου μέσω των τροχιακών $4s^2$ και 3d. Έτσι το μεταλλικό ιόν εμφανίζεται τριπλά φορτισμένο με τα εναπομείναντα N-1 ηλεκτρόνια της $3d^N$ κατάστασης να αναδιατάσσονται ενεργειακά στην 4d κατάσταση. Σε αυτήν την περίπτωση οι υπεύθυνες μεταβάσεις για τη διαδικασία laser είναι οι 3d-3d.



.Εικόνα 4.6.4.1 Ενεργειακές καταστάσεις Ruby laser.

Η άντληση γίνεται στις καταστάσεις 4F οι οποίες αποδιεγείρονται στις καταστάσεις 2E . Η ακτινοβολία laser προκύπτει από την αποδιέγερση των 2E στην 4A_2 . Το ruby laser είναι laser τριών σταθμών. Είναι πρακτικά αδύνατο να λειτουργήσει ως συνεχές αλλά λειτουργεί ως παλμικό είτε σε Q-switching είτε σε mode-locked λειτουργία. Αν και αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές σήμερα έχει υποσκελιστεί από τα άλλα laser στερεάς κατάστασης.

Ένα από τα πιο δημοφιλή laser στερεάς κατάστασης είναι το Nd:YAG όπου σε κρύσταλλο με την ονομασία yttrium aluminum garnet (YAG) έχουν τοποθετηθεί ιόντα Νεοδυμίου. Η άντληση γίνεται στα 730nm και 800nm όπως φαίνεται στο ενεργειακό διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.6.4.2. Οι ενεργειακές καταστάσεις ενός Nd:YAG

Από την θεμελιώδη κατάσταση $^4I_{9/2}$ προκαλείτε διέγερση στις στάθμες ($^4S_{3/2}$, $^4F_{7/2}$) και ($^4F_{5/2}$, $^4H_{9/2}$). Στη συνέχεια συμβαίνει αποδιέγερση χωρίς ακτινοβολία στη στάθμη $^4F_{3/2}$ που αποτελεί και την άνω κατάσταση του laser. Αυτή μπορεί να αποδιεγερθεί στις 4I καταστάσεις, από τις οποίες η πιο ισχυρή είναι η $^4I_{11/2}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των κανόνων επιλογής για τις διπολικές μεταβάσεις $\Delta J=0, \pm 1$ η μετάβαση $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ είναι απαγορευμένη και λαμβάνει χώρα μόνο μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης με το πεδίο του κρυστάλλου. Για το λόγο αυτό και ο χρόνος ζωής της είναι μεγάλος ($\tau = 230 \mu s$) γεγονός που επιτρέπει την αντιστροφή των πληθυσμών. Τέλος η $^4I_{11/2}$ αποδιεγείρεται ταχύτατα μη ακτινοβολητικά στη βασική κατάσταση $^4I_{9/2}$ από την οποία απέχει ενεργειακά ποσότητα αρκετά μεγαλύτερη του $K_B T$.

Το Nd:YAG είναι ένα laser τεσσάρων σταθμών. Οι καταστάσεις $^4F_{3/2}$ και $^4I_{11/2}$ χωρίζονται λόγω φαινομένου Stark σε δύο κι έξι καταστάσεις αντίστοιχα. Η μετάβαση μεταξύ δυο εξ αυτών των μη εκφυλισμένων καταστάσεων είναι που παράγει την ακτινοβολία με μήκος κύματος είναι $\lambda = 1,064 \mu m$.

Το Nd:YAG laser παρουσιάζει ομογενή διαπλάτυνση λόγω αλληλεπίδρασης με τα φωνόνια του κρυστάλλου με $\Delta\nu = 126 \text{ GHz}$ σε θερμοκρασία δωματίου οπότε μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση mode-locking⁶⁷. Μάλιστα στενοί παλμοί των 5 ps έχουν επιτευχθεί με παθητικό mode-locking. Το laser Nd:YAG μπορεί να λειτουργήσει σε Q-switching να έχει όχι μόνο παλμική αλλά και συνεχή λειτουργία και μπορεί να αντληθεί είτε από λάμπες (Kr, Xe) είτε από laser διόδου.

Τα Nd:YAG laser χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς:

- Στην Βιομηχανία στην επεξεργασία υλικών όπως η συγκόλληση και η διάνοιξη οπών, όπου χρησιμοποιείται ισχύς μερικών kW. Μάλιστα υπερέχουν των laser CO₂ αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος αφού είναι δυνατόν η δέσμη να μεταφερθεί στο χώρο εργασίας πολύ εύκολα με οπτική ίνα.

⁶⁷ Έχουν επιτευχθεί παλμοί διάρκειας 5psec.

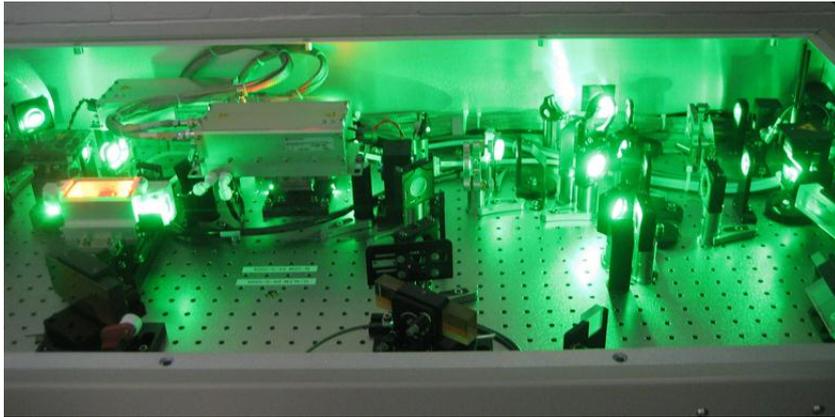
- Στη χειρουργική για να γίνονται τομές ακριβείας, για την διακοπή των αιμορραγιών ακόμα και στο εσωτερικό του ανθρωπίνου σώματος μέσω οπτικής ίνας, για καυτηριάσεις.

- Σε μετρήσεις ακριβείας αποστάσεων, στη μετρολογία με την μέτρηση της απόστασης Γης-Σελήνης αλλά και για στρατιωτικούς σκοπούς.

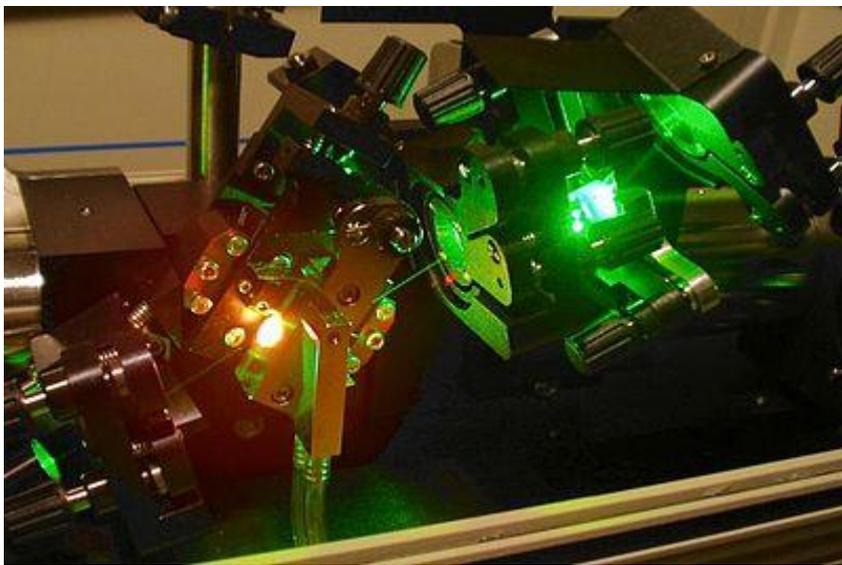
- Στην Έρευνα όπου τα παλμικά Q-switched laser μαζί με τις αρμονικές τους (δεύτερη αρμονική $\lambda=532\text{nm}$, τρίτη αρμονική $\lambda=355\text{nm}$ και τέταρτη αρμονική $\lambda=266\text{nm}$) καθώς και mode-locked laser χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

Ένα παραπλήσιο είδος laser είναι το Nd:Glass που έχει περίπου τις ίδιες ενεργειακές καταστάσεις με μήκος κύματος $\lambda=1.054\mu\text{m}$. Στο συγκεκριμένο laser η χρησιμοποίηση του γυαλιού δημιουργεί μη ομογενή διαπλάτυνση, οπότε και μεγαλύτερο φασματικό εύρος. Για αυτό το λόγο αυτά τα laser είναι κατάλληλα για λειτουργία mode-locked και για παραγωγή πολύ μικρών παλμών (της τάξης των 100 fs). Επειδή τα laser Nd:Glass έχουν μικρή θερμική αγωγιμότητα, ανεβάζουν εύκολα θερμοκρασία, οπότε πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλό repetition rate, μικρότερο από 5 Hz.

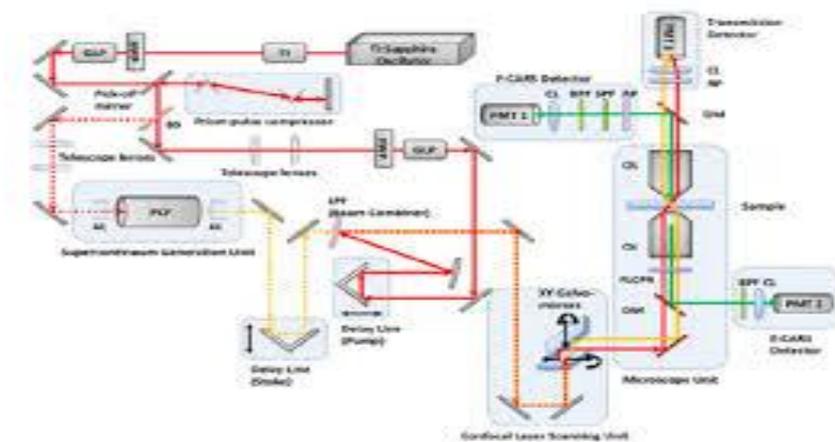
Ένα άλλο laser στερεάς κατάστασης είναι το Ti:Sapphire ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$). Αποτελείτε από ένα κρύσταλλο Οξειδίου του Αργιλίου στον οποίο έχουμε πρόσμιξη ιόντων Τιτανίου που έχουν αντικαταστάσει άτομα αργιλίου στο πλέγμα. Το συγκεκριμένο laser είναι δυνατόν να ρυθμιστεί και εκπέμπει κόκκινη ακτινοβολία καθώς και υπέρυθρη με εύρος από 650 nm μέχρι 1100nm. Κατασκευάστηκε πρώτη φορά το 1982 και για το μηχανισμό άντλησης χρησιμοποιούνται κυρίως laser με μήκη κύματος 514nm-532nm, όπως τα laser Αργού (514,5nm) καθώς και τα Nd:YAG, Nd:YLF, και Nd:YVO (527- 532nm). Το laser Ti:Sapphire λειτουργεί πιο αποτελεσματικά στα 800nm. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται χαρακτηριστικές διατάξεις από το Ti:Sapphire laser.



Εικόνα 4.6.4.3 Διάταξη Ti:Sapphire laser

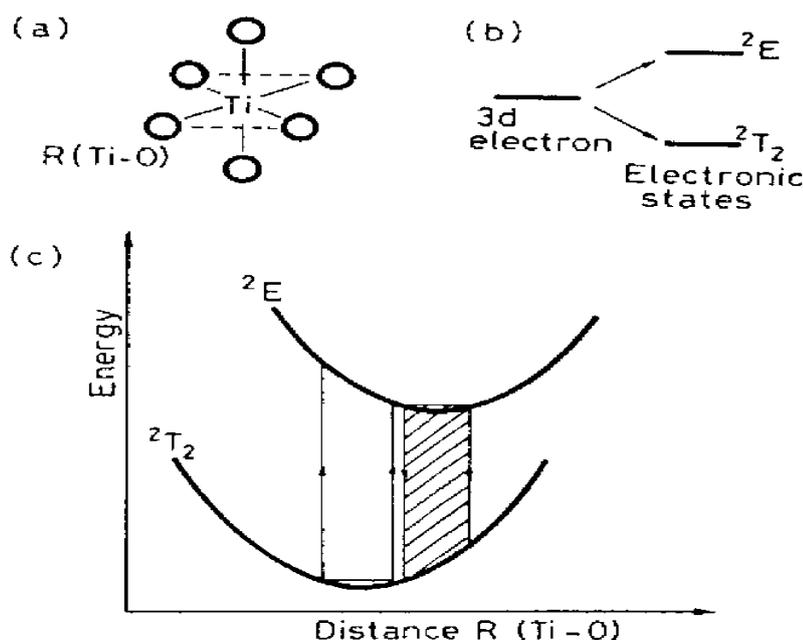


Εικόνα 4.6.4.4 Διάταξη Ti:Sapphire laser



Εικόνα 4.6.4.5 Διάταξη Ti:Sapphire laser

Η ηλεκτρονική διάταξη του Τιτανίου είναι η $[Ar]4s^2 3d^2$ γεγονός που σημαίνει ότι το Τίχοντας συνεισφέρει με τρία ηλεκτρόνια στην κρυσταλλική δομή έχει πλέον ένα 3d ηλεκτρόνιο σε μια πενταπλά εκφυλισμένη κατάσταση $(2l+1)$. Αυτός ο εκφυλισμός αίρεται από το κρυσταλλικό πεδίο και προκύπτει η τριπλά εκφυλισμένη κατάσταση 2T_2 και η διπλά εκφυλισμένη 2E .



Εικόνα 4.6.4.6.

(a) Οκταεδρική διάταξη του $Ti:Al_2O_3$.

(b) Ο διαχωρισμός των ενεργειακών καταστάσεων 3d παρουσία του κρυσταλλικού πεδίου.

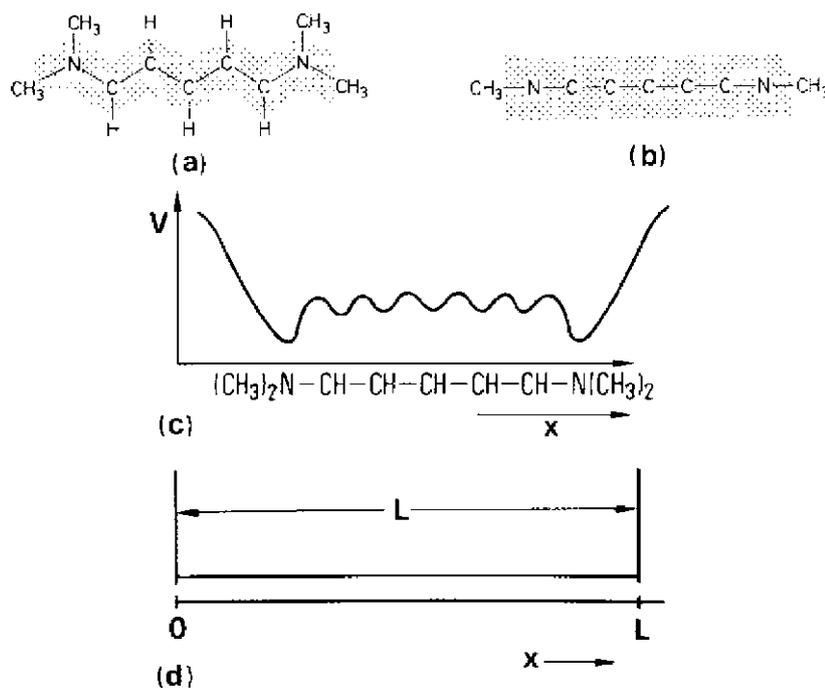
(c) Οι ενεργειακές καταστάσεις του b ως συνάρτηση της απόστασης του δεσμού $Ti-O$.

Η άντληση γίνεται από τη χαμηλότερη ταλαντωτική κατάσταση της 2T_2 προς τις διεγερμένες ταλαντωτικές καταστάσεις της 2E (μεταβάσεις Franck-Condon). Αυτές πολύ γρήγορα αποδιεγείρονται στη βασική ταλαντωτική κατάσταση της 2E μέσω αλληλεπιδράσεων με τα φωνόνια του κρυστάλλου. Ο χρόνος ζωής τους είναι της τάξης των μs κι άρα κατάλληλες για αντιστροφή πληθυσμού. Η αποδιέγερση σε διεγερμένες ταλαντωτικές καταστάσεις της βασικής στάθμης 2T_2 θα δώσουν την ακτινοβολία laser. Αυτές με τη σειρά τους θα αποδιεγερθούν ταχύτατα στη βασική ταλαντωτική κατάσταση της 2T_2 . Το $Ti:Al_2O_3$ είναι ένα laser τεσσάρων σταθμών, που η κύρια λειτουργία του είναι

η παλμική, αν και μπορεί να λειτουργήσει ως συνεχές. Χρησιμοποιείται ως ταλαντωτής για την παραγωγή κι ενίσχυση (με ειδικές τεχνικές) πολύ στενών και ισχυρών παλμών. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να δώσει τελικά παλμούς υψηλής ενέργειας, πολύ μικρής διάρκειας (20 -100 fs), με ρυθμό επανάληψης μερικών kHz.

4.6.5 Laser χρωστικών

Το πρώτο laser χρωστικών (Dye laser) κατασκευάστηκε ανεξάρτητα από τους P.P. Sorokin και F.P. Schäfer το 1966. Σε αντίθεση με τα laser αερίων, ή με τα laser στερεής κατάστασης, εδώ το ενεργό μέσο είναι κάποια χρωστική, συνήθως ένα διάλυμα μιας οργανικής χρωστικής σε υγρό διαλύτη όπως αιθανόλη, μεθανόλη, η ροδαμίνη 6G, η γλυσερόλη. Τα laser οργανικών χρωστικών είναι πολυατομικά μόρια που σχηματίζουν μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες διπλών δεσμών και εκπέμπουν ακτινοβολία φθορισμού. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες όπως η Πολυμεθίνη με μήκος κύματος στο ορατό και στο κοντινό υπέρυθρο (0.7-1.5 μm), η Ξανθίνη με μήκος κύματος στο ορατό και η Κουραμίνη με μήκος κύματος στο ορατό μπλέ-πράσινο (400-500 nm).

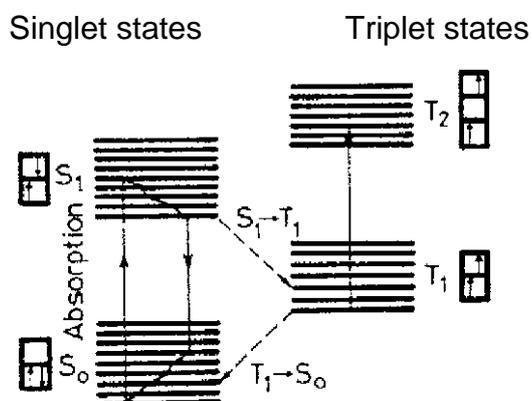


Εικόνα 4.6.5.1

Το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην περίπτωση της χρωστικής κυανίνης.

Η λειτουργία του laser μπορεί να γίνει κατανοητή με βάση το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα π-ηλεκτρόνια των διπλών δεσμών των ανθράκων σχηματίζουν δυο επίπεδες κατανομές εκατέρωθεν της ανθρακικής

αλυσίδας. Σε αυτές τα π-ηλεκτρόνια υποθέτουμε ότι μπορούν να κινηθούν ελεύθερα. Περιορίζονται μόνο στα άκρα από το απωστικό δυναμικό των ομάδων μεθυλίου. Σε μια πρώτη προσέγγιση μπορούμε να πούμε ότι οι ενέργειές τους θα είναι αυτές ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου σε ένα τετραγωνικό πηγάδι δυναμικού. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε $2N$ ηλεκτρόνια αυτά θα καταλάβουν τις πρώτες N καταστάσεις εφόσον κάθε κατάσταση καταλαμβάνεται από δύο ηλεκτρόνια με αντίθετο spin. Άρα η μοριακή κατάσταση θα έχει ολικό spin μηδέν και θα είναι singlet, ή συμβολικά S_0 . Η πρώτη διεγερμένη κατάσταση S_1 είναι αυτή στη οποία το τελευταίο συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο διεγείρεται στο επόμενο ενεργειακό επίπεδο χωρίς να αλλάξει το spin του. Εάν κατά τη μετάβαση αλλάξει το spin του τότε η κατάσταση είναι triplet και συμβολίζεται T_1 . Οι διεγερμένες καταστάσεις S_2, T_2 , μπορούν να προκύψουν από άλλες διεγέρσεις. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταστάσεις και η διαδικασία laser. Οι φασματικές κατανομές έχουν μεγάλο πλάτος για κάθε κατάσταση γιατί οι ηλεκτρονικές ενεργειακές καταστάσεις έχουν πληθώρα από ταλαντωτικές και περιστροφικές καταστάσεις για πολύ κοντινά ενεργειακά επίπεδα.



Εικόνα 5.6.5.2 Τυπικό ενεργειακό διάγραμμα χρωστικών διαλυμάτων.

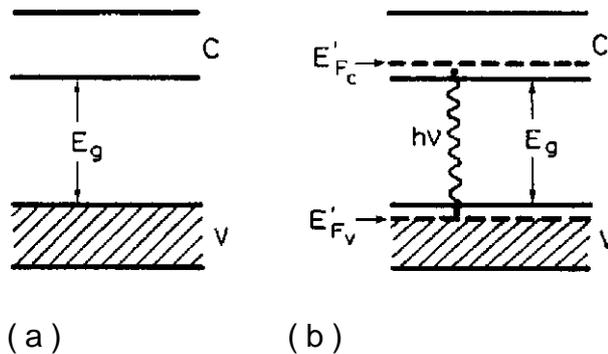
Το μόριο απορροφώντας ακτινοβολία θα βρεθεί στις διεγερμένες ταλαντωτικές και περιστροφικές καταστάσεις της S_1 (μετάβαση Franck-Condon). Η αποδιέγερση του θα πραγματοποιηθεί σε λιγότερο από 100fsec μέσω κρούσεων με τα μόρια του διαλύματος, στη βασική ταλαντωτική

κατάσταση S_1 . Δεδομένου ότι για τις επιτρεπτές μεταβάσεις ισχύει $\Delta S=0$, επιτρέπονται μόνο οι μεταβάσεις singlet-singlet και triplet-triplet. Επομένως από την S_1 μπορούμε να έχουμε αποδιέγερση με παράλληλη εκπομπή ακτινοβολίας laser στις διεγερμένες ταλαντωτικές και περιστροφικές καταστάσεις της S_0 . Τέλος το μόριο αποδιεγείρεται πολύ γρήγορα και πάλι μέσω κρούσεων στη βασική κατάσταση της S_0 . Το laser χρωστικής είναι ένα laser τεσσάρων σταθμών, όπου στην όλη διαδικασία μπορεί να εμπλακούν και οι καταστάσεις triplet που είναι δυνατόν να αλληλεπιδράσουν με τις singlet μη ακτινοβολητικά, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση των laser χρωστικής.

Τα laser χρωστικής μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως συνεχής, είτε ως παλμικά. Για το μηχανισμό άντλησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν excimer. Τα laser χρωστικής παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Καλύπτουν μια ευρύτατη φασματική περιοχή και παρέχουν εύκολη επιλεξιμότητα του μήκος κύματος. Μάλιστα η χρωστική ουσία μπορεί να αντικατασταθεί από έναν άλλο τύπο, ώστε να παράγει διαφορετικά μήκη κύματος με το ίδιο laser, αν και αυτό συνήθως απαιτεί αντικατάσταση κάποιων οπτικών στοιχείων στο laser. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη φασματοσκοπία και για την θεραπεία δερματικών παθήσεων στην Ιατρική.

4.6.6 Laser ημιαγωγών

Τα laser ημιαγωγών έχουν πολλές δυνατότητες⁶⁸ αν και συνήθως έχουν μικρή ισχύ. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντλητικές διατάξεις, αλλά και στην Ιατρική αφού η ακτινοβολία τους δεν προκαλεί μακροχημικές ή ανατομικές μεταβολές στους ιστούς, λόγω χαμηλής ισχύος και δρα θετικά στο ανοσοποιητικό σύστημα αφού αυξάνονται οι ενδογενείς θεραπευτικές δυνατότητες του οργανισμού. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται ημιαγωγίμες διατάξεις p-n με στοιχεία της τρίτης ομάδας του Περιοδικού Πίνακα (π.χ. Al, Ga, In) και της πέμπτης ομάδας (π.χ. N, P, As, Sb), για παράδειγμα GaAs, AlGaAs, και InGaAs. Τα μήκη κύματος καλύπτουν μια ευρεία περιοχή του φάσματος του ορατού και κοντινού υπερύθρου.



Εικόνα 4.6.6.1 Αρχή λειτουργίας ενός laser ημιαγωγού.

Θεωρούμε ένα ημιαγωγό που όπως φαίνεται στο σχήμα έχει συμπληρωμένη την ζώνη σθένους V και του οποίου η ζώνη αγωγιμότητας C απέχει ενεργειακά E_g . Σε θεωρητική θερμοκρασία $T=0$ K η ζώνη σθένους είναι γεμάτη με ηλεκτρόνια ενώ η ζώνη αγωγιμότητας εντελώς άδεια. Υποθέτουμε τώρα ότι μερικά ηλεκτρόνια διεγείρονται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, της τάξης των psec τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας καταλήγουν στα χαμηλότερα μη κατειλημμένα ενεργειακά επίπεδα της ζώνης αγωγιμότητας.

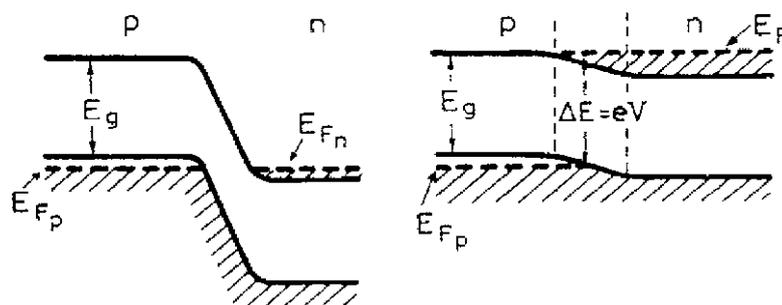
⁶⁸ Έχουν μικρές φυσικές διαστάσεις, και μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολίες διαφορετικών μηκών κύματος ανάλογα με τις διόδους που χρησιμοποιούνται. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τηλεπικοινωνίες, ως οπτικές ίνες, ως pointer, σε εκτυπωτές laser, σε συστήματα CD, DVD, BlueRay κλπ.

Το ίδιο θα συμβεί και με τις οπές της ζώνης σθένους αφήνοντας οπές στα υψηλότερα ενεργειακά της επίπεδα. Η εκπομπή φωτός τότε επιτυγχάνεται με την επανασύνδεση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη αγωγιμότητας με μια οπή από τη ζώνη σθένους. Αυτός ο μηχανισμός της ακτινοβολίας επανασύνδεσης, όπως είναι ο όρος, είναι ο μηχανισμός της εκπομπής φωτός από μια δίοδο LED (Light Emitting Diode). Υπό κατάλληλες συνθήκες αυτός ο μηχανισμός αποδιέγερσης μπορεί να γίνει εξαναγκασμένα και να οδηγήσει στη δημιουργία ακτινοβολίας laser. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να εφαρμοστεί τάση στην επαφή του ημιαγωγού.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για να συμβεί αυτό είναι μέσω της εφαρμογής διαφοράς δυναμικού (τάσης) στην επαφή του ημιαγωγού. Το επίπεδο της ενέργειας Fermi βρίσκεται στη ζώνη σθένους για την p-περιοχή (E_{Fp}) και ταυτόχρονα στην ζώνη αγωγιμότητας για την n-περιοχή (E_{Fn}). Αν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού τότε τα ευθυγραμμισμένα ενεργειακά επίπεδα Fermi των δύο περιοχών, διαχωρίζονται και απέχουν ενέργεια ΔE . Επιπλέον στην περιοχή της επαφής τα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους της n-περιοχής μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητάς και αντίστοιχα οπές από της ζώνη αγωγιμότητας της p-περιοχής περνούν στη ζώνη σθένους. Άρα είναι δυνατόν να δημιουργηθεί φαινόμενο αντιστροφής πληθυσμών, για συγκεκριμένες τιμές πυκνότητας ρεύματος.

Active region

I d'



(a)

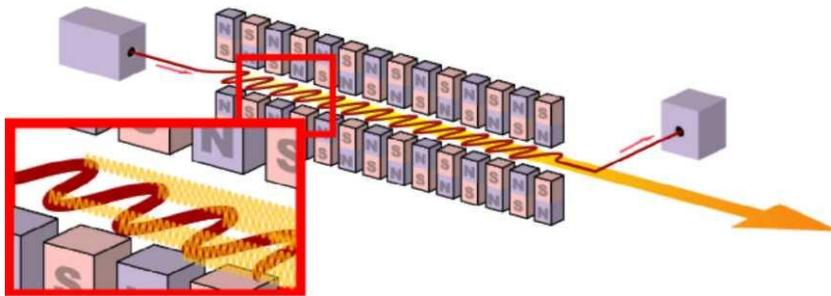
(b)

Εικόνα 4.6.6.2 (a) Δομή ενεργειακών ζωνών μιας επαφής p-n ενός laser ημιαγωγού σε μηδενικό εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

(b) Η αλλαγή των ενεργειακών ζωνών του a υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

4.6.7 Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων

Το laser ελεύθερων ηλεκτρονίων (Free Electron Laser - FEL) κατασκευάστηκε το 1976 από τον J. Mandey στο Stanford University. Για να προκληθεί ακτινοβολία laser, τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός και στη συνέχεια εισέρχονται σε μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί μια διάταξη undulator ή μια διάταξη wiggler⁶⁹. Το μαγνητικό πεδίο είναι εναλλασσόμενο και δημιουργείται από μια περιοδική διάταξη μαγνητών με εναλλασσόμενους πόλους κατά μήκος της ευθείας κίνησης της δέσμης των ηλεκτρονίων. Το σχηματιζόμενο με αυτόν τον τρόπο μαγνητικό πεδίο αναγκάζει τα ταχέα ηλεκτρόνια να ταλαντωθούν στο κάθετο άξονα διαγράφοντας τελικά ημιτονοειδή κίνηση γύρω από τον άξονα του undulator.



Εικόνα 4.6.7.1 Η διάταξη ενός laser ελευθέρων ηλεκτρονίων.

Η παραπάνω ταλαντωτική κίνηση των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας (ακτινοβολία synchrotron) που είναι μονοχρωματική αλλά ασύμφωνη, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ηλεκτρομαγνητικά εκπεμπόμενα κύματα προέρχονται από τυχαίως κατανομημένα ηλεκτρόνια. Μια άλλη δέσμη laser χρησιμοποιείται ως ενισχυτής οπότε η ακτινοβολία synchrotron γίνεται αρκετά ισχυρή, τότε το κάθετο στο άξονα ηλεκτρικό πεδίο της ακτινοβολίας αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια στον άξονα της κάθετης αρμονικής κίνησής τους προσδίδοντας ή αφαιρώντας τους κινητική ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να

⁶⁹ Που έχει πιο ευρύ φάσμα ακτινοβολιών από το undulator

σχηματιστούν περιοδικές ηλεκτρονικές πυκνότητες με περίοδο ενός οπτικού κύκλου κατά μήκος του άξονα του undulator. Αυτό δημιουργεί ενισχυτική συμβολή της ακτινοβολίας synchrotron που μετατρέπεται σε laser.

Καθώς η ένταση της ακτινοβολίας του FEL μεγαλώνει το φαινόμενο ενισχύεται ακόμη περισσότερο ως τα όρια του κορεσμού.

4.7 Κατηγοριοποίηση των laser

Οι κανόνες προστασίας και ταξινόμησης καθιερώθηκαν παγκοσμίως μετά το 1976 (OSHA Regulations: 29 CFR 1926.54 and 102). Τα laser που παράγονται έκτοτε είναι κατηγοριοποιημένα από τον ίδιο τον κατασκευαστή, ο οποίος καθορίζει και τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας και τη σωστή χρήση τους. Ωστόσο είναι δυνατόν να μετρηθεί η κατηγορία στην οποία ανήκει ένα laser και να προσδιοριστούν συγκεκριμένες παράμετροι. Τα laser κατηγοριοποιούνται με βάση την ικανότητά της βασικής ή μιας ανακλώμενης δέσμης τους να τραυματίσει το μάτι ή το δέρμα. Η κατάλληλη κλάση καθορίζεται από το μήκος κύματος, την ισχύ και τη διάρκεια του παλμού - στην περίπτωση παλμικού laser.

- **CLASS I:** Τα laser κλάσης 1 δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια ακόμη κι αν η δέσμη πέσει μέσα στο μάτι από ατύχημα. Ωστόσο συνεχόμενο κοίταγμα της δέσμης απευθείας με γυμνό μάτι θα πρέπει να αποφεύγεται. Η ισχύς των laser κλάσης 1 είναι μικρότερη από 0,4mW για συνεχή cw laser με μήκος κύματος στο ορατό. Να σημειωθεί πως ένα laser που είναι εντελώς απομονωμένο από το περιβάλλον του εργαστηρίου μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως κλάσης 1 εάν οι εκπομπές στον περιβάλλοντα χώρο δεν ξεπερνούν τα όρια της κλάσης 1.

- **CLASS II:** Τα laser κλάσης 2 δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός ανοιγοκλεισίματος του ματιού (blink), δηλαδή περίπου 0.25sec. Ωστόσο μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην περίπτωση που ο παραπάνω χρόνος παραταθεί. Τα laser κλάσης 2 έχουν μήκη κύματος στο ορατό (400 - 700nm) και ισχύ εξόδου μεταξύ 0.4mW και 1 mW για cw laser. Ο μεγαλύτερος αριθμός αυτής της κατηγορίας είναι τα Ηλίου-Νέου (He-Ne).

- **CLASS IIIa:** Τα laser κλάσης 3a δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός ανοιγοκλεισίματος του ματιού (blink), δηλαδή

περίπου 0,25sec. Ωστόσο, είναι πιθανή η ζημιά στην περίπτωση που κοιτάξουμε τη δέσμη με κάποιο φακό ή και απευθείας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η ισχύς εξόδου για cw laser με μήκη κύματος στο ορατό είναι μεταξύ 1-5mW.

- **CLASS IIIb:** Τα laser κλάσης 3b μπορούν να προκαλέσουν ζημιές από ατυχήματα στα μάτια στην περίπτωση που κοιτάξουμε τη δέσμη απευθείας ή ακόμη και κάποιο ανακλώμενο κομμάτι της. Η ισχύς εξόδου για cw laser είναι μεταξύ 5 - 500mW. Εξαιρώντας τα μεγάλης ισχύος laser αυτής της κατηγορίας, η διαχεόμενη δέσμη laser δεν είναι επικίνδυνη εκτός κι αν την κοιτάξουμε με κάποιο φακό.

- **CLASS IV:** Τα laser κλάσης 4 είναι τα πιο επικίνδυνα laser. Έκθεση στη δέσμη τους ή ακόμη και σε ανάκλασή της ή και διάχυσή της είναι ενδεχόμενα επικίνδυνη τόσο για τα μάτια όσο και για το δέρμα. Επιπλέον μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών, να δημιουργήσει επικίνδυνα αέρια (π.χ. O₃), κ.α. Η ισχύς εξόδου για cw laser για όλα τα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερη από τα 500mW. Όλα τα παλμικά laser που λειτουργούν στα μήκη κύματος 400nm έως 1,400nm θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην κλάση 4.

CLASS I	P < 0.4 mW, ακίνδυνο
CLASS II	0,4<P<1mW cw ορατή ακτινοβολία, στιγμιαία άμεση έκθεση (0,25s)
CLASS IIIa	1<P<5 mW cw ορατή ακτινοβολία, στιγμιαία άμεση έκθεση (0,25s)
CLASS IIIb	5<P<500mW cw καμιά άμεση έκθεση
CLASS IV	P>500mW, παλμικά, ιδιαίτερα επικίνδυνα

Πίνακας 4.6.7.1 Συνοπτικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων laser

4.7.1 Κίνδυνοι από τη δέσμη του laser

Μάτια: Το μάτι είναι εξαιρετικά ευάλωτο κατά την έκθεσή του στους περισσότερους τύπους laser. Ο τύπος της βλάβης του εξαρτάται από την ένταση του φωτός, το μήκος κύματός του, και από το μέρος του ιστού που εκτίθεται. Η καταστροφή προκαλείται είτε από την αύξηση της θερμοκρασίας είτε από φωτοχημικές διεργασίες. Έντονη έκθεση έχει σαν αποτέλεσμα εγκαύματα στον κερατοειδή (cornea) και τον αμφιβληστροειδή (retina). Εμφάνιση καταρράκτη ή και βλάβη στον κερατοειδή προκαλείται από χρόνια έκθεση σε φως από laser. Βλάβη του αμφιβληστροειδούς είναι συνήθης από έκθεση σε ορατή και κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία.

Οι περισσότερες μη-σύμφωνες πηγές φωτός μπορούν να κοιταχτούν απευθείας χωρίς κανέναν κίνδυνο επειδή μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της ισχύος του φτάνει στο μάτι κι απλώνεται σε όλο τον αμφιβληστροειδή. Αντίθετα, η ακτινοβολία laser είναι σύμφωνο φως. Η δέσμη της μπορεί να περάσει μέσα από την κόρη του ματιού (pupil) και να εστιαστεί σε μια πολύ μικρή επιφάνεια στον αμφιβληστροειδή εναποθέτοντας εκεί όλη της την ενέργεια. Μόνο το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο εστιάζονται στον αμφιβληστροειδή. Βλάβη του αμφιβληστροειδούς συνεπάγεται μερική ή και ολική τύφλωση εάν πειραχθεί το οπτικό νεύρο. Η βλάβη μπορεί να είναι μη-αναστρέψιμη ενώ κατά την έκθεση δεν προκαλείται πόνος ή ενόχληση.

Επί πλέον, μερικά πολύ ισχυρά παλμικά laser μπορούν να προκαλέσουν τέτοια βλάβη στον αμφιβληστροειδή ώστε να προκληθεί αιμορραγία.

Δέρμα: Η έκθεση στην ακτινοβολία laser μπορεί να προκαλέσει και βλάβες στο δέρμα. Ισχυρή έκθεση μπορεί να προκαλέσει τραυματισμούς από ήπιο κοκκίνισμα (reddening) σε δημιουργία φλυκταινών (blistering) έως και κάψιμο (charring). Καρκίνοι του δέρματος μπορεί να προκληθούν από χρόνια έκθεση σε υπεριώδες (UV) φως. Το μέγεθος και ο τύπος της βλάβης εξαρτάται από την ποσότητα της αποτιθεμένης ενέργειας και από το μήκος

κύματος του φωτός. Σε αντίθεση οι βλάβες στο δέρμα είναι συνήθως αναστρέψιμες.

4.7.2 Υπεριώδης ακτινοβολία - UV (200 - 400nm)

Η έκθεση του ματιού στο υπεριώδες φως στην περιοχή των 200 - 315 nm απορροφάται από τον κερατοειδή και μπορεί να προκαλέσει φωτοκερατίτιδα (φλεγμονή του κερατοειδούς). Η επαναλαμβανόμενη έκθεση του κερατοειδούς στο υπεριώδες φως δεν έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός μηχανισμού προστασίας, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στο δέρμα (μαύρισμα). Το κοντινό υπεριώδες φως στην περιοχή των 315 - 400 nm απορροφάται κυρίως στο φακό του ματιού και μπορεί να προκαλέσει καταρράκτη. Μήκη κύματος μικρότερα από 400 nm δεν αποτελούν κίνδυνο για τον αμφιβληστροειδή. Η έκθεση του δέρματος στην υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει κοκκίνισμα, γήρανση ακόμη και καρκίνο του δέρματος.

4.7.3 Ορατή και κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία - NIR (400 -1400 nm)

Η έκθεση του ματιού σε δέσμες laser στο ορατό (400-700nm) και κοντινό υπέρυθρο (700-1400nm) φάσμα μπορεί να βλάψει τον αμφιβληστροειδή. Οι δέσμες laser αυτής της φασματικής περιοχής διαδίδονται μέσα στο μάτι και εστιάζονται από το φακό παράγοντας ισχυρή ένταση φωτός στον αμφιβληστροειδή. Η ένταση της ακτινοβολίας πάνω στον αμφιβληστροειδή μπορεί να ξεπεράσει κατά παράγοντα 100000 αυτής της προσπίπτουσας στον κερατοειδή εξαιτίας της εστίασης. Η μετατροπή αυτής της ενέργειας σε θερμότητα μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στον αμφιβληστροειδή με αποτέλεσμα την απώλεια όρασης ακόμη και τύφλωση αν πειραχθεί το οπτικό νεύρο. Ακόμη και χαμηλής ενέργειας δέσμες μπορούν να προκαλέσουν ζημία στο μάτι εάν εστιαστούν κατά παράγοντα 100000. Για το λόγο αυτό τα μήκη κύματος στην περιοχή των 400 - 1400 nm ονομάζονται περιοχή οφθαλμικής επικινδυνότητας (ocular hazard region).

Η έκθεση του δέρματος στην ορατή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα και υπέρμετρη ξήρανση.

4.7.4 Μέση και μακρινή υπέρυθρη ακτινοβολία - FIR (1400 – 10000 nm)

Οι δέσμες laser της μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας προκαλούν βλάβες κυρίως στον κερατοειδή και λιγότερο στο φακό του ματιού. Η βλάβη οφείλεται συνήθως σε φαινόμενα θερμότητας αν και τα παλμικά laser μπορεί να προκαλέσουν βλάβες εξαιτίας θερμομηχανικών φαινομένων. Το φως με μήκη κύματος πάνω από 1400nm δεν φτάνει στον αμφιβληστροειδή. Η μέση υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ 1400 nm και 3000nm μπορεί να διαπεράσει μέσα στο φακό προκαλώντας καταρράκτη. Η μακρινή υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ 3000nm και 10000nm απορροφάται από τον κερατοειδή και μπορεί να προκαλέσει καψίματα στον κερατοειδή μέχρι και απώλεια όρασης.

4.7.5 Άλλοι κίνδυνοι

Παράλληλα με τους κινδύνους από τις δέσμες laser ελλοχεύουν κι άλλοι κίνδυνοι σχετικοί με την λειτουργία του laser. Αυτοί περιλαμβάνουν εκρήξεις, ηλεκτρικές εκκενώσεις, κρυογενικά υγρά, εύφλεκτα υλικά, θόρυβο, ακτίνες x, ακτινοβολία υπεριώδους και επικίνδυνα χημικά αέρια που συνοδεύουν το laser.

4.7.5.1 Ηλεκτρικοί κίνδυνοι

Θανατηφόροι ηλεκτρικοί κίνδυνοι υπάρχουν στις υψηλής ισχύος ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των συστημάτων laser. Η ηλεκτροπληξία αποτελεί την πιο κοινή αιτία θανάτου σχετική με το περιβάλλον εργασίας υψηλής ισχύος συστημάτων laser. Μια σειρά από λεπτομερείς κανόνες αποφυγής ηλεκτρικών κινδύνων ακολουθούνται στα διάφορα εργαστήρια τόσο από το εξειδικευμένο προσωπικό όσο και από τους χρήστες.

Λάμπες υψηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται στα laser για άντληση πρέπει να είναι κατασκευαστικά προστατευμένες να αντέχουν πιθανές εκρήξεις κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Πιθανοί υποψήφιοι εκρήξεων είναι οι υψηλής τάσης πυκνωτές οι οποίοι θα πρέπει να είναι κατάλληλα θωρακισμένοι για τέτοιες περιπτώσεις. Τα παραπάνω πρότυπα πρέπει να τηρούνται από τον κατασκευαστή.

4.7.5.2 Επικίνδυνα χημικά αέρια

Αναθυμιάσεις, τοξικά αέρια, ατμοί και καπνός μπορεί να υπάρξουν σε χώρους εγκαταστάσεων συστημάτων laser. Για παράδειγμα, το όζον παράγεται γύρω από τις λάμπες άντλησης ενώ ίνες αμιάντου μπορούν να ελευθερωθούν από τούβλα που χρησιμοποιούνται για μπλοκάρουν δέσμες CO₂ laser. Η αυξημένη χρήση χημικών laser καθιστά τους χημικούς κινδύνους πιο επικίνδυνους από την ακτινοβολία laser. Για παράδειγμα, το φθόριο που χρησιμοποιείται σε KrF laser είναι εξαιρετικά τοξικό κι απαιτεί άμεση μεταχείριση μόλις κάποιος έρθει σε επαφή. He-Cd lasers μπορεί να μολύνουν το εργαστήριο με ατμούς καδμίου εάν δεν απάγεται σωστά από το εργαστήριο. Ο κατάλληλος εξαερισμός του εργαστηρίου είναι απαραίτητος έτσι ώστε τα πιθανά χημικά αέρια να βρίσκονται σε συγκεντρώσεις κάτω του επιτρεπτού ορίου.

4.7.5.3 Laser χρωστικών (Dyes)

Οι οργανικές χρωστικές που χρησιμοποιούνται από μερικά συστήματα laser είναι γνωστό πως μπορεί να οδηγήσουν σε καρκινογενέσεις, μεταλλάξεις και τερατογεννήσεις. Οι χρήστες αυτών των laser πρέπει να ακολουθούν πιστά το πρωτόκολλο ασφαλείας του εργαστηρίου σχετικά με την προετοιμασία των χρωστικών, τη χρήση τους, την αποθήκευσή τους και την ανακύκλωσή τους. Γάντια, εργαστηριακές ποδιές και κατάλληλα γυαλιά πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν κανείς μεταχειρίζεται επικίνδυνα χημικά. Ένας σταθμός πλύσης ματιών και άμεσης παροχής νερού (ντους) πρέπει να

υπάρχει σε χώρους που χειρίζονται επικίνδυνα χημικά. Φαγητό και ποτό απαγορεύονται στο εργαστήριο laser ιδίως όταν στο περιβάλλον υπάρχουν χημικές ουσίες.

4.7.5.4 Εύφλεκτα υλικά

Εύφλεκτοι υλικά και αέρια μπορεί να αναφλεγούν από δέσμες laser κλάσης 4. Τέτοιες δέσμες πρέπει να τερματίζονται με μη-εύφλεκτα υλικά. Εύφλεκτοι διαλύτες και υλικά πρέπει να αποθηκεύονται σε κατάλληλα σκεύη (containers) και να θωρακίζονται από τις δέσμες laser καθώς και από ηλεκτρικούς σπινθήρες. Εάν δεν χρησιμοποιούνται συχνά πρέπει να απομακρύνονται από το εργαστήριο. Τέλος κάθε εργαστήριο πρέπει απαραίτητα να έχει λειτουργικό πυροσβεστήρα.

4.7.5.5 Κρυογενικά υγρά

Κρυογενικά υγρά (ειδικά το υγρό άζωτο) μπορεί να χρησιμοποιούνται για την ψύξη των κρυστάλλων του laser. Τα υγρά αυτά μπορούν να προκαλέσουν εγκαύματα στο δέρμα ή ακόμη και εξατμιζόμενα να μειώσουν τα επίπεδα του οξυγόνου σε μη επαρκώς εξαεριζόμενα εργαστήρια. Η χρήση και αποθήκευση των κρυογενικών υγρών πρέπει να γίνεται φορώντας γάντια με μόνωση και μάσκα προστασίας. Εάν το δέρμα έρθει σε επαφή με το υγρό πρέπει κάποιος να ρίξει επάνω άφθονη ποσότητα νερού. Ο επαρκής εξαερισμός του εργαστηρίου που χρησιμοποιεί κρυογενικά υλικά είναι απαραίτητος.

4.7.5.6 Υγρασία - θερμοκρασία

Συνήθως τα υψηλής ισχύος παλμικά laser απαιτούν συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας του χώρου στέγασής τους για να λειτουργήσουν. Η συνήθης θερμοκρασία είναι γύρω στους 20 °C . Ο χρήστης θα πρέπει να είναι κατάλληλα ντυμένος ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες σε περίπτωση που θα εργαστεί στο χώρο για μεγάλο χρονικό

διάστημα. Η συνήθης τιμή υγρασίας είναι 30% ένα όριο που είναι πολύ χαμηλότερο από το επιτρεπτό (45%) για τον άνθρωπο προκαλώντας ξηρασία λαιμού στον χρήστη. Εάν ο χρήστης χρειάζεται να παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στο χώρο είναι καλό να κάνει πολλά μικρά διαλλείματα.

4.7.5.7 Ακτίνες Χ

Η παραγωγή ακτινών Χ είναι πιθανή όταν οι τάσεις ξεπερνούν τα 15 kV, όχι και τόσο σύνηθες για τυπικά εργαστηριακά laser. Σε αυτή την περίπτωση το εργαστήριο πρέπει να παρακολουθείται για τα επιτρεπτά επίπεδα ραδιενέργειας των ακτινών Χ.

4.7.5.8 Υπεριώδης ακτινοβολία

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία της δέσμης laser παρουσιάζει τους μεγαλύτερους κινδύνους, εντούτοις υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να παραχθεί και από τις εκκενώσεις λυχνιών άντλησης. Η σωστή θωράκισή τους είναι απαραίτητη και συχνά παρέχεται από τον κατασκευαστή.

4.7.5.9 Θόρυβος

Τα επίπεδα του θορύβου σε μερικά εργαστήρια laser μπορεί να ξεπεράσουν τα επιτρεπτά όρια. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση ωτοασπίδων.

4.7.5.10 Οφθαλμική λειτουργία

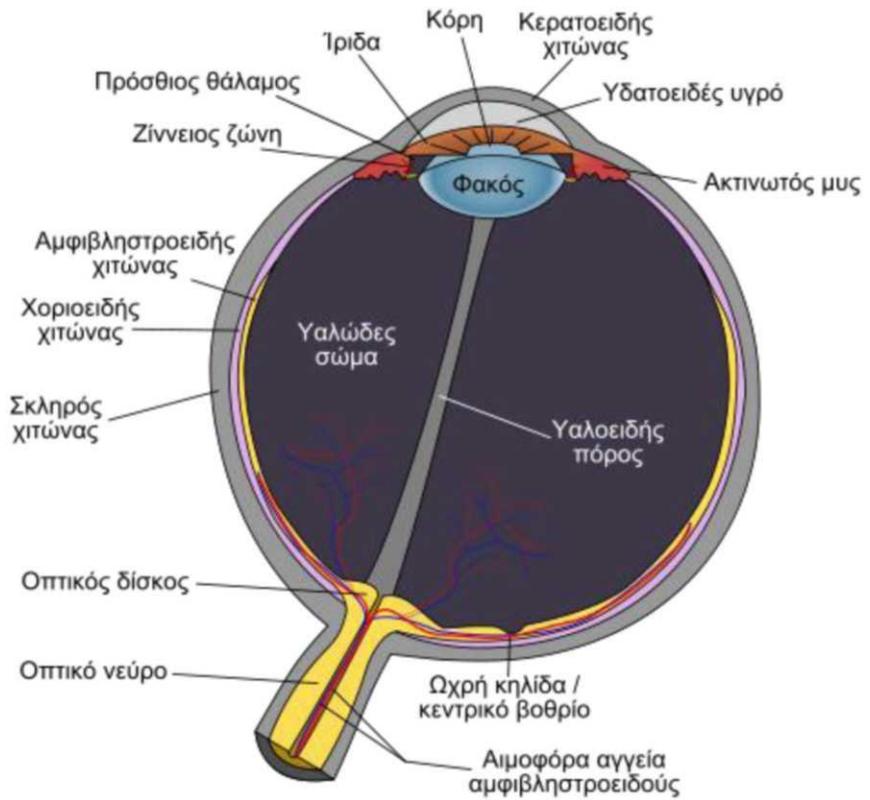
Το μάτι λειτουργεί σαν μια φωτογραφική μηχανή ακριβείας και αποτελείται από διαφορετικά μέρη που δουλεύοντας όλα μαζί μας επιτρέπουν να βλέπουμε. Η ίριδα είναι το χρωματιστό μέρος του ματιού με μία οπή στο μέσο που ονομάζεται κόρη. Μπροστά από την ίριδα βρίσκεται ένας διάφανος χιτώνας, ο κερατοειδής, που λειτουργεί σαν το πρόσθιο προστατευτικό

κέλυφος του ματιού αλλά και σαν εστιακός φακός. Ο πρόσθιος θάλαμος είναι ο ενδιάμεσος χώρος μεταξύ του κερατοειδή και της ίριδας. Ο πρόσθιος θάλαμος διατηρεί το σχήμα του καθώς περιέχει υδατοειδές υγρό το οποίο προμηθεύει με οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά το εσωτερικό του ματιού.

Ο κερατοειδής είναι ο πιο δυνατός φακός του οπτικού συστήματος του ματιού. Είναι σχεδόν αόρατος καθώς αποτελείται από διάφανο ιστό. Το κυρτό του σχήμα, του επιτρέπει να λειτουργεί και σαν φακός, προσφέροντας τα δύο τρίτα της συνολικής δύναμης εστίασης του ματιού. Η υπόλοιπη δύναμη εστίασης προέρχεται από τον κρυσταλλοειδή φακό, που βρίσκεται στο πρόσθιο μέρος του ματιού, πίσω από την ίριδα.

Ο αμφιβληστροειδής λειτουργεί σαν το φιλμ της φωτογραφικής μηχανής καλύπτοντας την εσωτερική επιφάνεια στο πίσω μέρος του ματιού. Αποτελείται από νευρικό ιστό και φωτουποδοχείς που μετατρέπουν τις ακτίνες φωτός σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία πηγαίνουν στον εγκέφαλο μέσω του οπτικού νεύρου.

Η ίριδα και ο φακός μέσα στο μάτι λειτουργούν μαζί σαν το μπροστινό μέρος φωτογραφικής μηχανής, επιτρέποντας τις ακτίνες του φωτός από ένα αντικείμενο να περάσουν στον αμφιβληστροειδή στο πίσω μέρος του ματιού, όπου η εικόνα εντυπώνεται αλλά ανεστραμμένη. Ο εγκέφαλος μετά αναλύοντας την εικόνα τη ξαναστρέφει στη κανονική της θέση. Καθ' όλη τη διάρκεια ο φακός μέσα στο μάτι αλλάζει το σχήμα του προσαρμόζοντας το βάθος εστίασης που χρειάζεται για το μάτι να βλέπει καθαρά.



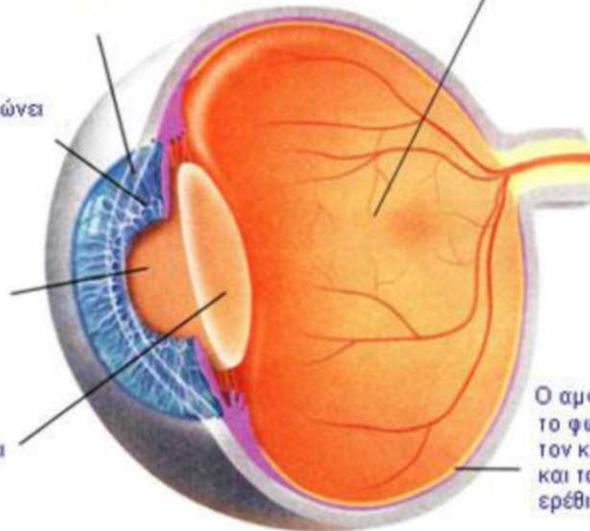
Ο κερατοειδής είναι το διαυγές, πρόσθιο, προστατευτικό τμήμα του ματιού. Είναι επίσης ένας πολύ δυνατός φακός εστίασης με δύναμη περίπου 45 διοπτριών.

Το διαφανές υαλώδες σώμα γεμίζει το εσωτερικό του βολβού.

Η ίριδα, το έγχρωμο τμήμα του ματιού, μεγαλώνει ή μικραίνει το άνοιγμα της κόρης.

Η κόρη είναι το μικρό άνοιγμα που επιτρέπει την είσοδο του φωτός στον οφθαλμό.

Ο φακός προβάλλει το φως επάνω στον αμφιβληστροειδή. Έχει δύναμη 18 διοπτριών περίπου.



Ο αμφιβληστροειδής δέχεται το φως που εστιάζεται από τον κερατοειδή και τον φακό και το μεταφράζει σε οπτικό ερέθισμα.

Εικόνες 4.7.5.10.1 Εσωτερικό του οφθαλμού

5. Εφαρμογές των laser

5.1 Στρατιωτική έρευνα και εφαρμογές

Η πρώτη ερευνητική δραστηριότητα σχετίζονταν με την επικοινωνία, τη δυνατότητα δηλαδή μετάδοσης σημάτων με γρήγορο και ασφαλή για τη μετάδοση και το περιεχόμενο της πληροφορίας τρόπο. Ωστόσο τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας με την ακτινοβολία laser καθιστούσε πρακτικά αδύνατη τη μετάδοση της πληροφορίας, εξ' αιτίας της απορρόφησης ή και της σκέδασης της ακτινοβολίας από σωματίδια που βρίσκονταν στην ατμόσφαιρα. Εάν όμως οι αποστάσεις είναι μικρές ή η επικοινωνία γίνεται σε κενό – στο διάστημα – τότε τα laser θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης στα πλαίσια αυτών των ερευνών κατασκευάστηκαν διατάξεις οπτικών ινών στις οποίες τα σήματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μεταδίδονταν δια μέσου χάλκινων συρμάτων και ραδιοκυμάτων τώρα μεταδίδονται δια μέσου γυάλινων ινών. Μια άλλη εφαρμογή που μελετήθηκε ήταν η κατασκευή συστημάτων ανίχνευσης με την βοήθεια laser. Η πρώτη στρατιωτική εφαρμογή ανίχνευσης στόχου ήταν μια απλή διάταξη όπου ένα παλμικό laser εξέπεμπε ένα σύντομο παλμό 10-30ns προς το στόχο, και υπολογίζοντας το χρόνο επιστροφής του ανακλώμενου σήματος που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός υπολογίζουν την απόσταση του στόχου (καταδείκτες στόχων).

Μια άλλη έρευνα του Αμερικανικού Υπουργείου Άμυνας⁷⁰ σχετίζονταν με την δημιουργία μιας φορητής διάταξης laser που θα μπορούσε να καθοδηγεί πυραύλους ή βόμβες στον στόχο. Η πρώτη εφαρμογή αυτού του συστήματος έγινε στον πόλεμο του Βιετνάμ.

⁷⁰ p 101-102 “The Jasons” της Ann Finkbeiner

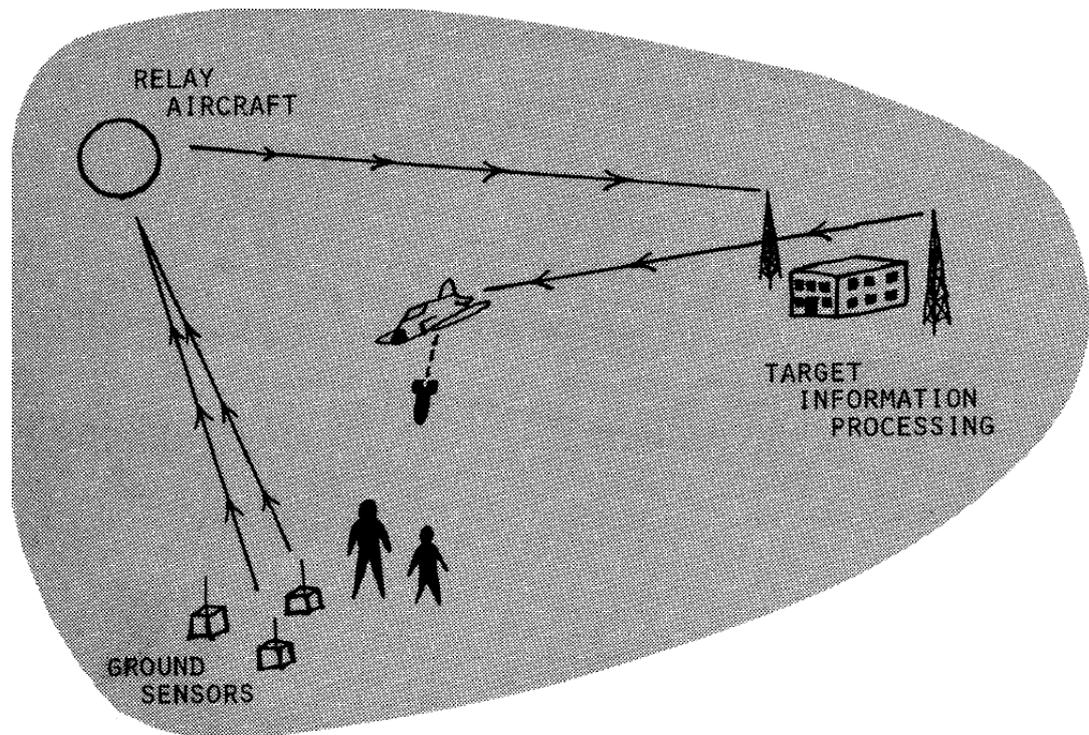
Χαρακτηριστική είναι και η απόρρητη έρευνα που διέρρευσε στον Αμερικανικό τύπο⁷¹ σύμφωνα με την οποία το σύστημα αποτελούνταν από ανιχνευτές θορύβου και εκρηχτικούς μηχανισμούς που θα ενεργοποιούνταν στη συνέχεια. Οι ανιχνευτές θορύβου -ήταν μια μετεξέλιξη σειсмоγράφων- θα ρίχνονταν με αλεξίπτωτα και θα κρέμονταν από δέντρα σε ύψος 7 ποδιών ή θα καρφώνονταν στο έδαφος. Αυτοί θα κατέγραφαν κινήσεις από βαριά οχήματα (τανκς- φορτηγά) αλλά θα υπήρχαν και πιο ευαίσθητοι ανιχνευτές που θα κατέγραφαν κινήσεις πεζών. Για το σκοπό αυτό προβλέπονταν πλήθος από ειδικές νάρκες (button bomblets, cherry bombs) αλλά και νάρκες κατά προσωπικού που περιέχουν πλαστικά σφαιρίδια. Μάλιστα οι Val Fitch και Leon Lederman σχεδίασαν και μια νέα εκδοχή μικροσκοπικής νάρκης- pencil mines- που βάφονταν με τα χρώματα του περιβάλλοντος για να είναι πιο εύκολη η απόκρυψη της. Από τις εκρήξεις των ναρκών ενεργοποιούνται οι ανιχνευτές οι οποίοι στέλνουν σήματα σε ένα αεροπλάνο που περιπολεί συνέχεια και μεταδίδει τα σήματα σε έναν υπερυπολογιστή της IBM (IBM 360-50). Τα σήματα αναλύονται και στέλνονται σε βομβαρδιστικά που εξαπολύουν εκτεταμένες επιθέσεις με βόμβες διασποράς.

Στην αναφορά αναφέρονταν συγκεκριμένα ότι απαιτούνται 20 εκατομμύρια νάρκες τον μήνα, 25 εκατομμύρια bomblets, 10.000 βόμβες διασποράς και 1600 ακουστικοί ανιχνευτές τον μήνα. Συνολικό κόστος υπολογίστηκε στα 800 εκατομμύρια δολάρια για ένα χρόνο.

Με προσωπική απόφαση του ίδιου του Υπουργού Άμυνας το σχέδιο υιοθετήθηκε. Έγιναν δοκιμές στην ζούγκλα του Παναμά αλλά και σε ναυτική βάση στη Florida. Μέλη των JASON επισκέφτηκαν το Βιετναμ για να παρακολουθήσουν την εφαρμογή του ηλεκτρονικού φράχτη και παρατήρησαν ότι υπήρχαν αρκετά προβλήματα αφού οι ανιχνευτές δεν μπορούσαν να διακρίνουν αν οι ήχοι προέρχονταν από φορτηγά, ελέφαντες, γεωργούς, στρατιώτες ενώ άλλες φορές ενεργοποιούνταν από τους ήχους των αεροπλάνων κλπ!

⁷¹ Στις 13 Ιουνίου 1971 οι New York Times ξεκινούν την δημοσίευση που έμεινε στην ιστορία με το όνομα "The Pentagon Papers". Τα έγγραφα έδωσε στη δημοσιότητα ο αναλυτής Daniel Ellsberg αποτελώντας επι της ουσίας μια αντίστοιχη περίπτωση με τα wikileaks

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει την λειτουργία του ηλεκτρονικού φράχτη και δημοσιεύτηκε στην μπροσούρα “Science Against the People” που κυκλοφόρησε τον Δεκέμβριο του 1972 η ριζοσπαστική οργάνωση “Scientists and Engineers for Social and Political Action” του Πανεπιστημίου του Berkeley.



Εικόνα 5.1.1 Διάγραμμα από την λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης

Η εξέλιξη αυτού του συστήματος περιελάμβανε τους πυραύλους που καθοδηγούνταν από laser στο έδαφος τα οποία υποδείκνυαν τον στόχο. Πρόκειται για τις έξυπνες βόμβες που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στο πόλεμο του Κόλπου αλλά και στους βομβαρδισμούς στην Γιουγκοσλαβία. Το 1968 το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ άρχισε να ερευνά τη χρήση laser υψηλής ισχύος ως αντιαεροπορική-αντιπυραυλική άμυνα πετυχαίνοντας την κατάρριψη πυραύλου το 1978, ενώ υπήρξαν φιλόδοξα σχέδια για τη χρησιμοποίηση laser, ώστε να απενεργοποιούνται οι αισθητήρες ακόμα και να τυφλώνονται οι στρατιώτες του εχθρού. Το πιο μεγαλεπήβολο σχέδιο στο απόγειο του Ψυχρού Πολέμου με την ονομασία «Πόλεμος των Άστρων» παρουσιάστηκε στις 23 Μαρτίου 1983. Το πρόγραμμα θα δημιουργούσε μια αντιπυραυλική ασπίδα στο διάστημα που θα ανίχνευε με laser την εκτόξευση ενός εχθρικού

πυραύλου τον οποίο θα κατέστρεφε στο ανώτατο σημείο της τροχιάς. Η κυβέρνηση Κλίντον τροποποίησε την αρχική αμυντική στρατηγική του Οργανισμού Άμυνας των βαλλιστικών πυραύλων, με λιγότερο φιλόδοξους σκοπούς, αλλά μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας.

Το Πεντάγωνο⁷² έχει επίσης αναπτύξει ένα σύστημα για την επίτευξη αυτού του στόχου. Είναι ένα χημικό λέιζερ, που τοποθετείται σε ένα αεροπλάνο και θα μπορεί να καταρρίψει πυραύλους εν πτήση και να παρεμποδίσει πυραύλους σε απόσταση αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Το ενδιαφέρον στη χρήση laser συνίσταται στην ταχύτητα της δέσμης που εξοικονομεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Η δέσμη είτε θερμαίνει το ρεζερβουάρ των πυραύλων που χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα ή επικεντρώνει σε σημεία του βλήματος ώστε να υπάρξει καταστροφή της δομής του πυραύλου. Το laser που χρησιμοποιείται είναι ένα συνεχές laser οξυγόνου ιωδίου που εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία στα 1,315μm με μεγάλη ισχύ αρκετών MWatt. Παράλληλα το σύστημα περιλαμβάνει και άλλα δυο laser για την ανίχνευση του στόχου, αλλά και για την μελέτη της ατμόσφαιρας.

⁷² Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εργασία "From Glow to Flow: A History of Military Laser Research and Development" που δημοσιεύτηκε στο Historical Studies in the Physical and Biological Sciences την δεκαετία του 1980

5.2 Οπτικές ίνες και τηλεπικοινωνίες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι πρώτες έρευνες σε στρατιωτικό επίπεδο σχετίζονταν με τη χρησιμοποίηση laser για την επικοινωνία. Από τον 19^ο αιώνα ο Άγγλος φυσικός J. Tyndall είχε μελετήσει τη δυνατότητα λεππών ινών γυαλιού να οδηγήσουν φωτεινή ακτινοβολία χάρις στην ολική ανάκλαση. Το 1960 ακόμα και οι καλύτερες διατάξεις που είχαν κατασκευαστεί δεν μπορούσαν να αντιμετωπίσουν τη μεγάλη εξασθένηση που παρατηρούνταν με αποτέλεσμα την απώλεια⁷³ της ισχύος του σήματος, που έφτανε το 1db/m. παρουσίαζαν μεγάλη εξασθένηση. Το 1966 ο C. Kao και G. Hockham, στο Standard Telecommunications Laboratory στην Αγγλία δημοσίευσαν μια πολύ σημαντική εργασία όπου παρατήρησαν ότι θα μπορούσε να κατασκευαστεί μια ίνα από πυρίτιο (απαλλαγμένο από προσμίξεις), που να καλυφθεί με υλικό με δείκτη διάθλασης μικρότερο της κεντρικής ίνας του πυριτίου, στην οποία οι απώλειες θα ελαττώνονταν σημαντικά στα 20db/km. Το 1970 οι E. Kapron, D. Keck και R. Maurer στο Corning Glass Works κατάφεραν να κατασκευάσουν ίνες με εξασθένηση 20 dB/km σε μήκος κύματος 6328 Å ακτινοβολία που εκπέμπει ένα laser He-Ne. Την ίδια χρονιά κατασκευάστηκε από την ερευνητική ομάδα του I. Hayashi το πρώτο laser ημιαγωγών που λειτουργούσε σε θερμοκρασία δωματίου.

Το 1976 έγινε μια δοκιμή στο χώρο στάθμευσης των Bell Laboratories στην Ατλάντα με καλώδια οπτικών ινών να εισάγονται στο εσωτερικό των απλών συμβατικών καλωδίων. Με βάση επιτυχημένα αποτελέσματα δοκιμών αποφασίστηκε το 1977 να αναπτυχθεί ένα σύστημα οπτικών ινών για γενική εφαρμογή. Το 1983 πραγματοποιήθηκε η σύνδεση μεταξύ της Ουάσιγκτον και Βοστώνη, με σύστημα οπτικών ινών που μετέδιδε πληροφορίες 90Mbits/sec με μήκος κύματος 825nm.

Η Nippon Telegraph και Telephone Company στην Ιαπωνία ανέπτυξε ίνες με μόνο 0,5 dB/km απώλεια στα 1,3μm και 1,5μm χιλιοστών, και στο Lincoln Laboratories στο MIT έκανε επιτυχημένες δοκιμές λειτουργίας laser InGaAsP που μπορούσε να εκπέμπει συνεχώς στην περιοχή μεταξύ 1,0μm

⁷³ Αυτό πρακτικά καθιστούσε αδύνατη οποιαδήποτε χρηστική εφαρμογή στις επικοινωνίες. Μόνο στον τομέα της Ιατρικής, στις ενδοσκοπήσεις χρησιμοποιούνταν ανάλογες πρακτικές.

και 1,7 μ m σε θερμοκρασία δωματίου. Η δυνατότητα χρήσης ινών χαμηλής απώλειας στα 1,3 μ m είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συστημάτων μετάδοσης των 400 Mbits/s στην Ιαπωνία και 560 Mbit/s στην Ευρώπη με δυνατότητα μετάδοσης 8000 ταυτόχρονων τηλεφωνικών συνδιαλέξεων. Στην Αμερική οι εταιρείες συνδεδεμένες με την Bell έχουν εγκαταστήσει περισσότερα από 3,5 εκατομμύρια Km ινών ενώ σταδιακά αντικαθίστανται και τα συμβατικά καλώδια μεταξύ των σπιτιών και των τηλεφωνικών γραφείων.

Το πρώτο υπερατλαντικό καλώδιο χαλκού για τηλεγραφική επικοινωνία τέθηκε σε λειτουργία το 1858. Σχεδόν εκατό χρόνια αργότερα, το 1956, εγκαταστάθηκε το πρώτο τηλεφωνικό υπερατλαντικό καλώδιο με την ονομασία TAT-1.

Το 1988, η πρώτη γενιά των υπερατλαντικών καλωδίων οπτικών ινών ξεκίνησε τη λειτουργία της (TAT-8). Λειτουργούσαν σε μήκος κύματος 1,3 μ m χιλιοστά και συνέδεαν την Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική και τον Ανατολικό Ειρηνικό. Το 1991 εγκαταστάθηκε η δεύτερη γενιά των καλωδίων οπτικών ινών (TAT-9) που λειτουργούσε στα 1,5 μ m συνδέοντας τις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά με τη Μεγάλη Βρετανία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Ένας άλλος σύνδεσμος λειτουργεί μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά και της Ιαπωνίας. Το δίκτυο οπτικών ινών μεταξύ Αγγλίας και της Ιαπωνίας, καλύπτει 27300 χιλιομέτρων στον Ατλαντικό Ωκεανό, τη Μεσόγειο, την Ερυθρά Θάλασσα, τον Ινδικό και τον Ειρηνικό έχει 120000 κυκλώματα σε δύο ζεύγη ινών. Αυτό το δίκτυο επιτρέπει την ταυτόχρονη πραγματοποίηση 80.000 συνδιαλέξεων όταν 1956 το σύστημα των παραδοσιακών τηλεφωνικών καλωδίων επέτρεπε 36!!

Σήμερα, μετά από 30 χρόνια έρευνας, οι οπτικές ίνες έχουν φθάσει τα φυσικά όριά τους. Οι ίνες πυριτίου μπορούν να μεταδώσουν παλμούς υπέρυθρης ακτινοβολίας στα 1,5 μ m με απώλειες που φτάνουν μόλις στο 5% ανά χιλιόμετρο. Η περαιτέρω έρευνα στον τομέα των οπτικών ινών έδειξε ότι είναι δυνατόν να κατασκευαστούν διατάξεις που η ενίσχυση της ακτινοβολίας θα γίνεται στο εσωτερικό της ίνας κατά τη διάρκεια της μετάδοσης χωρίς να χρειάζεται να εξάγεται. Η πρόσμιξη έρβιου στο εσωτερικό της ίνας και η

διέγερση του με την κατάλληλη ακτινοβολία άντλησης, μπορεί να προκαλέσει αντιστροφή πληθυσμού μεταξύ δύο επιπέδων του ερβίου σε μια μετάβαση που αντιστοιχεί ακριβώς σε 1,5μm. Ως εκ τούτου, η ενίσχυση του παλμού φωτός σε αυτό το μήκος κύματος είναι δυνατόν να επιτευχθεί, ενώ ταξιδεύει στην ίνα. Κατά τη χρήση αυτής της συσκευής ένα κομμάτι ενισχυμένων ινών παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο άκρων της ίνας στα οποία το σήμα ταξιδεύει και μέσω κατάλληλης οπτικής διάταξης τόσο το φως του αντλητικού μηχανισμού αλλά και το φωτεινό σήμα ενισχύονται. Στην έξοδο η ακτινοβολία άντλησης εξέρχεται και το ενισχυμένο σήμα συνεχίζει να ταξιδεύει στην απλή ίνα. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαλειφθούν όλοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί⁷⁴ ενίσχυσης.

⁷⁴ Σ' αυτούς τους σταθμούς έπρεπε να εξαχθεί το σήμα, να ανιχνευθεί να ενισχυθεί ηλεκτρονικά, να μετατραπεί εκ νέου σε φωτεινό σήμα και να επανεισαχθεί στο επόμενο τμήμα της ίνας, μια διαδικασία που προφανώς προκαλούσε απώλειες.

5.3 Ιατρικές Εφαρμογές

Η **διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια** είναι μια σοβαρή επιπλοκή του σακχαρώδη διαβήτη, που προσβάλλει το εσωτερικό των ματιών. Οφείλεται στην επίδραση που έχει η παρατεταμένη υπεργλυκαιμία στα μικρά αγγεία του αμφιβληστροειδή, του νευρικού χιτώνα του ματιού που προσλαμβάνει τα οπτικά ερεθίσματα και, αν δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για την όραση.

Η φωτοπηξία με laser είναι μια μη επεμβατική μέθοδος, κατά την οποία υψηλής ισχύος και ακρίβειας ακτινοβολία προκαλεί πηκτικές αλλαγές και στεγανοποίηση στους ιστούς στους οποίους προσπίπτει. Η εφαρμογή του laser μπορεί να είναι **εστιακή** (focal), **“δίκην δικτύου”** (grid pattern) ή **παναμφιβληστροειδική** (panretinal). Η **εστιακή** φωτοπηξία εφαρμόζεται πάνω σε εστιακό οίδημα και μικροανευρύσματα, που εμφανίζουν διαρροή, ενώ η **«δίκην δικτύου»** φωτοπηξία έχει θέση στην αντιμετώπιση του διάχυτου οιδήματος. Και οι δύο αυτές τεχνικές χρησιμοποιούνται στη μη παραγωγική (χωρίς νεοαγγεία) διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια.

Στην περίπτωση παραγωγικής (με νεοαγγεία) νόσου εφαρμόζεται η **παναμφιβληστροειδική** φωτοπηξία, όπου καλύπτεται όλος ο αμφιβληστροειδής εκτός από την περιοχή της ωχράς. Σκοπός μιας τέτοιας θεραπείας δεν είναι η βελτίωση της όρασης αλλά η διατήρηση της ήδη υπάρχουσας.

Στην φωτοπηξία, η ακτινοβολία laser μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια με αύξηση της θερμοκρασίας στους 65 ° C. Αυτή η θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την μετουσίωση της πρωτεΐνης. Μπορεί επίσης να καταστρέψει προβληματικά αιμοφόρα αγγεία, κύστεις, όγκους. Μπορεί να προκαλέσει μια προσκόλληση μεταξύ του χοριοειδούς χιτώνα και του παρακείμενου αμφιβληστροειδούς. Η κύρια αιτία τύφλωσης σε άτομα ηλικίας 20-64 είναι η αγγειακή νόσος, ιδιαίτερα της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας. Σε ηλικίες μεγαλύτερες των 65 ετών, η κύρια αιτία απώλειας της όρασης είναι η εκφύλιση της ωχράς κηλίδας, η οποία οφείλεται

είτε σε αγγειακή ανεπάρκεια ή υπερανάπτυξη των αιμοφόρων αγγείων στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς.

Η θεραπεία με laser μπορεί να σταθεροποιήσει αυτά τα προβλήματα σε πολλές περιπτώσεις.

Ένας από τους πρωτοπόρους στον τομέα της οφθαλμολογίας laser ήταν ο Αμερικανός Francis A L'Esperance Jr, ο οποίος εργαζόταν στο Edward S. Harkness Eye Institute στο Columbia-Presbyterian Medical Center στο Μανχάταν. Ήταν ο πρώτος που πειραματίστηκε με ruby laser και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα laser που εκπέμπει σε μπλε-πράσινο θα ήταν ενδεδειγμένο για την αντιμετώπιση οφθαλμολογικών προβλημάτων.

Κατάφερε να εξασφαλίσει ένα laser αργού με ισχύ 10W. Το laser δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στις 14 Φεβρουαρίου 1968 στην προσπάθεια να αφαιρέσει μια μεμβράνη που κάλυπτε την κόρη του ματιού ενός νεαρού κοριτσιού. Η επέμβαση ήταν επιτυχής και το κορίτσι ανέκτησε εντελώς την όραση του. Σήμερα το laser αργού χρησιμοποιείται κατά κόρον για την αντιμετώπιση οφθαλμολογικών προβλημάτων. Στη θεραπεία του γλαυκώματος, όταν μια απόφραξη της κόρης παρεμποδίζει την παροχέτευση της υδατικής ροής και τη διέλευση μεταξύ του οπίσθιου και πρόσθιου τμήματος του οφθαλμού, γίνεται με τη βοήθεια του laser μια μικρή τομή. Επίσης laser χρησιμοποιούνται στη θεραπεία του καταρράκτη, όπου εξαερώνεται και καταστρέφεται, στη θεραπεία της εκφύλισης της ωχράς κηλίδας, της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας.

Ιδιαίτερη σημαντική είναι η επίδραση των laser στη θεραπεία της μυωπίας. Επιδρούν στην διαθλαστική ικανότητα του ματιού, με την αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδούς με τη χρήση παλμών ακτινοβολίας. Έτσι αλλάζει η εστιακή απόσταση δημιουργώντας το ίδιο αποτέλεσμα που προκύπτει με τη χρησιμοποίηση γυαλιών οράσεως ή φακών επαφής.

Εκτός από την οφθαλμολογία τα laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη νεφρολογία για την απομάκρυνση λίθων. Συνήθως ο κολικός προκαλείται από το πέραςμα της πέτρας από το νεφρό προς τον ουρητήρα. Εκτός από την απομάκρυνση του με παραδοσιακά χειρουργικά μέσα, οι εναλλακτικές

τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η φαρμακολογική διάλυση και η ενδοσκοπική χειρουργική. Η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με αναίμακτο τρόπο. Από το 1968 έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη τεχνικών laser, όπου η ακτινοβολία κατευθύνεται στην πέτρα μέσω μιας οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται για την αποδόμηση και τη συντριβή της. Μετά τη θεραπεία, το μέγεθος των θραυσμάτων είναι τέτοιο που μπορούν να αποβληθούν μέσω του ουροποιητικού συστήματος.

Υπάρχουν επίσης μια σειρά από εφαρμογές σε άλλα πεδία. Για παράδειγμα, στην αγγειοπλαστική σε ορισμένες περιπτώσεις, κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει την ενέργεια της ακτινοβολίας για την εξάχνωση της αθηροματικής πλάκας που μπορεί να έχει κατακαθίσει στις αρτηρίες, αυξάνοντας την ροή του αίματος. Στην γυναικολογία το laser επιδρά μόνο στους ιστούς που πρέπει να καταστραφούν αφήνοντας ανεπηρέαστους τους γειτονικούς υγιείς, ελαχιστοποιώντας μ' αυτό τις ζημιές στα αναπαραγωγικά όργανα, μειώνοντας την απώλεια αίματος και τον κίνδυνο λοιμώξεων. Στην ογκολογία, είναι δυνατόν να αντιμετωπίσουν ορισμένους όγκους. Στην χειρουργική τα laser χρησιμοποιούνται με μεγάλα πλεονεκτήματα αφού με τη βοήθεια οπτικής ίνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν επεμβατικά σε περιοχές που είναι δύσκολη η «μηχανική» χειρουργική αντιμετώπιση.

Εκτός από τις επεμβατικές διαδικασίες τα laser έχουν ρόλο θεραπευτικό και διαγνωστικό. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στην δερματολογία, οδοντιατρική, ορθοπαιδική, στην αισθητική. Με την ταχεία πρόοδο και την εξέλιξη των συστημάτων laser, οι παλμοί femtosecond επιτρέπουν τις τομές τεράστιας ακρίβειας, όπου χάρις στην φωτο-διάσπαση αποτρέπεται η βλάβη στον περιβάλλοντα ιστό.

5.4 Εφαρμογές στη Μηχανική και τις Κατασκευές

Η ικανότητα συγκέντρωσης ακτινοβολίας laser σε μια πολύ μικρή περιοχή, επιτρέπει να εκτελούνται με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια, μηχανολογικές εργασίες, όπως η κοπή, η συγκόλληση, η δημιουργία οπών σε διαφορετικά υλικά όπως μέταλλα κεραμικά, πλαστικά, ξύλο κ.α. Η δυνατότητα ελέγχου αυτών των ενεργειών με τους υπολογιστές κάνει τη νέα τεχνική συμβατή με την ρομποτική αυτοματοποίηση. Τα laser χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κοπή, συγκόλληση, για τη θερμική επεξεργασία των αξόνων, βαλβίδων και εμβόλων επιτρέποντας την κατασκευή ασφαλέστερων οχημάτων, την εξοικονόμηση υλικών και την μικρότερη παραγωγή αποβλήτων. Τα laser είναι πολύ πιο αποτελεσματικά και οικονομικά από τους κλιβάνους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την θερμική επεξεργασία υλικών. Ένας κλίβανος πρέπει να τροφοδοτείται 24 ώρες την ημέρα και να χρησιμοποιείται μόνο για λίγες ώρες, ενώ τα laser καταναλώνουν ενέργεια μόνο όταν απαιτείται.

Laser κοπής χρησιμοποιείται όχι μόνο για την επεξεργασία μετάλλων, αλλά και στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας, για την κοπή πατρών, δέρματος, χαρτιού ή ξύλου.

Η βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών είναι ένας από τους μεγαλύτερους χρήστες των laser για τη δημιουργία κυκλωμάτων και την εκτέλεση υψηλής ταχύτητας συγκολλήσεων. Από το 1965 η εταιρία American Western Electric χρησιμοποίησε για πρώτη φορά laser για να διαμορφώσει με ακρίβεια και να βαθμονομήσει ηλεκτρικές αντιστάσεις που γίνονται με λεπτά φιλμ. Άλλη μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι στην κοπή διαμαντιών, καθώς και η χρησιμοποίηση ρομπότ laser ως εργαλεία ή αισθητήρες.

Στις κατασκευές τα laser χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση . Στο τέλος της δεκαετίας του 1960 laser He-Ne χρησιμοποιήθηκαν για την ευθυγράμμιση των σωλήνων του τούνελ για το Σύστημα Διαμετακόμισης Bay Area Rapid στο Σαν Φρανσίσκο της Καλιφόρνια. Τα πανεπιστημιακά εργαστήρια του Μπέρκλεϋ, στην Καλιφόρνια, κατασκεύαζαν laser He-Ne και προκειμένου να αντιμετωπίσουν την αρχική διστακτικότητα των αγοραστών

για την νέα τεχνική, χρωμάτισαν τη συσκευή με ένα λαμπρό κίτρινο χρώμα, ώστε να φαίνεται ως ένα από τα συνήθη κομμάτια του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή κτιρίων.

Ιδιαίτερα πλεονεκτήματα παρέχουν τα laser στις τοπογραφικές μετρήσεις, στην κατασκευή δρόμων, στην καθοδήγηση βαρέων μηχανημάτων, στη χάραξη δρόμων, σιδηροδρομικών τροχιών όπου αν ο έλεγχος είναι χειροκίνητος η ακρίβεια φτάνει τα 2 cm ενώ αν είναι αυτόματος τα 5mm.

5.5 Εφαρμογές στην ατμόσφαιρα και την αστροφυσική

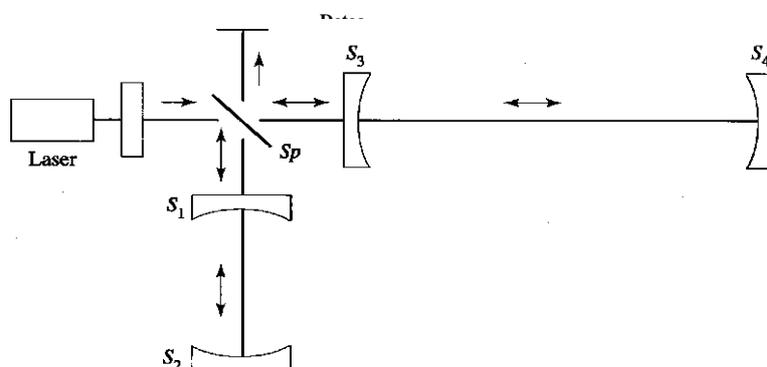
Η μελέτη της ατμόσφαιρας γίνεται με το σύστημα LIDAR που μετρά την ακτινοβολία που σκεδάζεται από μόρια ή σωματίδια από αεροζόλ, σταγόνες νερού, σωματίδια σκόνης, ρύπους. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση σε συνάρτηση με το υψόμετρο και να καταγραφεί η χρονική εξέλιξη της. Ένας τύπος LIDAR εκπέμπει σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος, ένα που απορροφάται από το από το υπό μελέτη αέριο και το άλλο το οποίο δεν απορροφάται. Φυσικά τα δύο σήματα επιστροφής θα είναι διαφορετικά, αυτό που δεν απορροφάται θα είναι δυνατότερο και από τη διαφορά τα υπό μελέτη αέρια μπορούν να εντοπιστούν και να υπολογιστεί η συγκέντρωσή τους. Αυτά τα LIDAR λέγονται DIAL (διαφορική απορρόφηση Lidar) και χρησιμοποιούνται σε διάφορες μητροπόλεις για να μετρούνται αέριοι ρύποι που ευθύνονται για την όξινη βροχή όπως SO_2 , O_3 , NO_2 και NO που προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις αλλά και από κινητήρες εσωτερικής καύσης αυτοκίνητα κλπ.

Πολλές μετρήσεις με LIDAR έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύοντας τις συσχετίσεις αυτών των αερίων με το φωτοχημικό νέφος αλλά και μετρήσεις του όζοντος τόσο στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας αλλά και στην στρατόσφαιρα στην Αρκτική και την Ανταρκτική αποδεικνύοντας και την ύπαρξη της τρύπας του Όζοντος

Το LIDAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετεωρολογικές μετρήσεις, ταχύτητα ανέμων, παρουσία νεφών αλλά και για υποθαλάσσιες μετρώοντας την περιεκτικότητα των νερών σε χλωροφύλλη και φυτοπλαγκτόν καθώς και την μόλυνση των υδάτινων πόρων, το φαινόμενο του ευτροφισμού. Για αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται πολλοί τύποι laser όπως ruby laser, laser χρωστικών, ημιαγωγών, νεοδυμίου.

Τα Bell Laboratories χρησιμοποίησαν ένα από τα πρώτα laser για να μελετήσουν την τραχύτητα της επιφάνειας της Σελήνης. Κατά τη διάρκεια της αποστολής Απόλλων 11 που προσγειώθηκε στο φεγγάρι στις 21 Ιουλίου του 1969, οι αστροναύτες τοποθέτησαν στην επιφάνεια δύο κάτοπτρα που θα ανακλούσαν το φως laser που θα αποστέλλονταν από τη Γη. Μια ομάδα

αστρονόμων στο Αστεροσκοπείο Lick στην Καλιφόρνια έστειλε μια ισχυρή ακτίνα από ένα ruby laser στο φεγγάρι και πέτυχε να υπολογίσει με τεράστια ακρίβεια την απόσταση Γης-Σελήνης, μετρώντας τον χρόνο που χρειάστηκε το σήμα για να επιστρέψει. Η χρησιμοποίηση ενός laser του προγράμματος Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) έδωσε τις πρώτες τρισδιάστατες εικόνες του Άρη. Επίσης με το πρόγραμμα Laser Geodynamics Satellite (LAGEOS) με την βοήθεια laser που έχουν εγκατασταθεί σε δορυφόρους είναι δυνατή η μελέτη των κινήσεων των ηπείρων, καθώς και οι σεισμολογικές μελέτες



Εικόνα 5.5.1 Η διάταξη του συμβολομέτρου που θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της ύπαρξης βαρυτικών κυμάτων αποτελείται από 4 κάτοπτρα S_1, S_2, S_3, S_4

Συστήματα laser χρησιμοποιούνται για την πειραματική απόδειξη βαρυτικών κυμάτων που είχε προβλέψει το 1918 ο Einstein και για την έμμεση απόδειξη της ύπαρξης τους βραβεύτηκαν με βραβείο Nobel το 1993 οι A. Hulse και J. Taylor.

Αν ένα βαρυτικό κύμα επιδράσει σε μια μάζα τότε σύμφωνα με την θεωρία θα την αναγκάσει να τεθεί σε ταλάντωση. Για να ανιχνευτούν τα βαρυτικά κύματα είναι απαραίτητο να μετρηθεί αυτή η κίνηση. Για το σκοπό αυτό είχε προταθεί η κατασκευή μιας διάταξης που αποτελούνταν από έναν μονωμένο κύλινδρο, μεγάλου μεγέθους που συντονίζεται μηχανικά στη συχνότητα των βαρυτικών κυμάτων. Κατάλληλοι αισθητήρες μετατρέπουν τις

δονήσεις σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία αποτιμώνται. Η πρώτη τέτοια συσκευή κατασκευάστηκε νωρίς στη δεκαετία του 1960 από τον Joseph Weber, ζύγιζε μερικούς τόνους και αποτελούνται από αλουμινένιους κυλίνδρους που ταλαντώνονταν με συχνότητα 1KHz. Ο κατασκευαστής ισχυρίστηκε ότι κατάφερε να ανιχνεύσει θετικά αποτελέσματα χωρίς όμως αυτό το πείραμα να επαναληφθεί δεύτερη φορά. Κατασκευάστηκαν άλλοι αντίστοιχοι ανιχνευτές που είχαν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν μετατόπιση ενός σωματιδίου στα 10^{12} χωρίς όμως θετικά αποτελέσματα.

Το 1970 πραγματοποιήθηκαν πειράματα με την χρησιμοποίηση μιας διάταξης που αποτελούσε εφαρμογή του συμβολόμετρου Michelson. Στο συμβολόμετρο η φωτεινή ακτινοβολία μετα από διαδοχικές ανακλάσεις σε σύστημα κατόπτρων δίνει την δυνατότητα να υπολογιστεί η διαφορά μήκους σε συνδιασμό με τον αριθμό των ανακλάσεων. Ο Weber θεώρησε από τις αρχές το 1970 ότι τα πειράματα laser σε ένα συμβολόμετρο τέτοιου τύπου θα έδιναν πιο ακριβή αποτελέσματα αφού η διάταξη ήταν πολύ πιο ευαίσθητη από αυτήν που είχε κατασκευάσει. Ανάλογη διάταξη προτάθηκε από τους M. Gerstenstein και V.I Pustovoit του Πανεπιστημίου της Μόσχας καθώς και από τον Ranier Weiss του MIT. Το πρώτο συμβολόμετρο κατασκευάστηκε το 1978, και το 1983 ένα συμβολόμετρο μήκους 40m, εγκαταστάθηκε στο Californian Institute of Technology. Παρόμοια συμβολόμετρα υπάρχουν σήμερα στην Ιταλία, τη Γερμανία και την Ιαπωνία. Πρόσφατα μια ακόμη πιο ισχυρή συσκευή έχει σχεδιαστεί με ένα συμβολόμετρο μήκους 4 χιλιομέτρων που η ακτινοβολία ταξιδεύει στο εσωτερικό ενός τούνελ. Δυο τέτοια συμβολόμετρα έχουν τεθεί σε λειτουργία από το 2002 στο Hanford, στην πολιτεία της Ουάσιγκτον, και στο Livingston στη Λουιζιάνα. Αυτά τα συμβολόμετρα με την ονομασία LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) μπορούν να ανιχνεύσουν την μεταβολή ενός σωματιδίου στα 10^{15} Παράλληλα βρίσκεται σε εξέλιξη από το 2003 το Ιταλό-Γαλλικό σχέδιο VIRGO που έχει σχεδιαστεί στην Cascina κοντά στην Πίζα. Οι αστροφυσικοί περιμένουν ότι τα δύο προγράμματα LIGO και VIRGO θα είναι σε θέση τελικά να ανιχνεύσουν τα βαρυτικά κύματα που παράγονται από μεγάλης εμβέλειας σχετικιστικά γεγονότα όπως η σύγκρουση μεταξύ δύο μαύρων τρυπών επειδή μέχρι τώρα δεν υπήρχε καμία συγκεκριμένη άμεση

ανίχνευση τους. Γερμανοί και Βρετανοί φυσικοί έχουν δημιουργήσει μια συσκευή μήκους 600m που ονομάζεται GEO600 κοντά στο Ανόβερο, ενώ μια μικρότερη συσκευή 30 m μήκος (ανιχνευτής TAMA) λειτουργεί κοντά στο Τόκιο.

5.6 Η χρήση laser σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς

Στα πλαίσια της συμμετοχής^{75, 76} στην ερευνητική προσπάθεια της ομάδας «Ανάπτυξη Laser και Εφαρμογές τους» του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου είχα την ευκαιρία να έρθω σε επαφή με την χρήση laser σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς. Η συντήρηση⁷⁷ έργων τέχνης είναι μια πολύ απαιτητική διαδικασία. Τα στάδια της συντήρησης ενός αντικειμένου πολιτιστικής κληρονομιάς περιλαμβάνουν:

- **Απολύμανση - Απεντόμωση:** Πρόκειται για προστασία του αντικειμένου από βιολογική φθορά.
- **Καθαρισμός:** Ο καθαρισμός αναβαθμίζει αισθητικά το αντικείμενο, και στην περίπτωση του αρχαικού υλικού βελτιώνει την αναγνωσιμότητα, αυξάνοντας την αντίθεση κειμένου - υποστρώματος. Πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή και να μην επηρεάζει ιστορικά στοιχεία των κειμηλίων.
- **Χημική Σταθεροποίηση:** Η απλή πλύση με νερό και η αποξίνιση καθαρίζουν και ταυτόχρονα σταθεροποιούν χημικά το χαρτί γιατί περιορίζουν την έκταση της όξινης υδρόλυσης, της βασικής χημικής διαδικασίας που το υποβαθμίζει. Αυτές αλλά και άλλες επεμβάσεις με διάφορες χημικές ουσίες επιβραδύνουν την αναπόφευκτη τελική καταστροφή του αντικειμένου από ενδογενείς χημικές διαδικασίες. Οι επεμβάσεις αυτές δεν είναι πάντα ασφαλείς γιατί πολλές φορές έχουν παρενέργειες όπως ξεθώριασμα των μελανιών και απώλεια των αντοχών. Κακός χειρισμός κατά την εμβάπτιση σε υγρά μπορεί να καταστρέψει τελείως ευαίσθητα έγγραφα, έτσι σημαντικό ρόλο παίζουν οι ικανότητες και

⁷⁵ Abstract-Poster στο Cultural Heritage Athens 2013: «Use of lasers for cleaning papers documents and coins» N. Antonopoulou Athera, E Chatzitheodoridis, Z. Christodouloupoulos, Ch. Evangelatos, A.A Serafetinides, E. Zekou

⁷⁶ Abstract-Poster στο SPIE 17th ISQE Nessebar 2012: «Evaluation of Fast and Ultra Fast Laser Beam Interaction With old Corroded Coins» Z. Christodouloupoulos, E. Drakaki, Ch. Evangelatos, A.A Serafetinides, M. Barberogou, A. Inglezis, C. Kalprouzos, P. Loukakos, P. Pouli

⁷⁷ Η συντήρηση συνιστά μια προσπάθεια διατήρησης ενός αντικειμένου στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται και η βελτίωση του, που επιτυγχάνεται με τον καθαρισμό.

η εμπειρία των συντηρητών αλλά και ο εξοπλισμός και οι διευκολύνσεις που τους παρέχει το εργαστήριο.

- **Στερέωση:** Η στερέωση έχει σκοπό τη μηχανική σταθεροποίηση (ενίσχυση) του αντικειμένου, ώστε να μην υφίσταται επιπλέον φθορές από τη χρήση και την κυκλοφορία του.

- **Συμπλήρωση:** Σε περίπτωση που το αντικείμενο εμφανίζει απώλεια υλικού (χαρτί σε έγγραφα, δέρμα ή χαρτόνι σε βιβλιοδεσίες) που επηρεάζει τη δομική του σταθερότητα ή λειτουργικότητα, η συμπλήρωση με σύγχρονα ή ιστορικά υλικά μέρους ή του συνόλου των απωλειών το σταθεροποιεί μηχανικά και αυξάνει την ασφάλεια κατά τη χρήση του.

- **Λειτουργική αποκατάσταση:** Αφορά βιβλιοδεσίες των οποίων η λειτουργικότητα έχει καταστραφεί και έχει σκοπό την προστασία του σώματος του βιβλίου και την αποκατάσταση της λειτουργικότητας της βιβλιοδεσίας. Περιλαμβάνει επεμβάσεις στο ράψιμο στη ράχη και τα εξώφυλλα του βιβλίου. Όσο είναι δυνατόν χρησιμοποιούνται τα αυθεντικά υλικά αφού καθαριστούν, ενισχυθούν και σταθεροποιηθούν χημικά. Οι επισκευές και ιδιαίτερα οι προσθήκες σύγχρονων υλικών πρέπει να μην είναι κραυγαλέα εμφανείς αλλά να διακρίνονται με προσεκτική εξέταση. Πρέπει επίσης να ακολουθούν την τεχνοτροπία του πρωτότυπου.

- **Μεταφορά της πληροφορίας σε άλλο υπόστρωμα:** Υπάρχουν περιπτώσεις που η διάσωση ενός αντικειμένου είναι αδύνατη (π.χ. πολύ ψαθυρό ή μουχλιασμένο χαρτί). Επιδιώκεται τότε η διάσωση της πληροφορίας με τη μεταφορά της σε άλλο υπόστρωμα, ενώ το πρωτότυπο αποσύρεται από την κυκλοφορία και φυλάσσεται σε αρχειακό κουτί. Μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η φωτοτυπία σε αρχειακό χαρτί, η μικροφωτογράφιση ή η ψηφιοποίηση.

Για να θεωρηθεί επιτυχής μια διαδικασία συντήρησης θα πρέπει να βελτιώνει τη μηχανική αντοχή του αντικειμένου, να επιβραδύνει τη γύραση, να αποκαθιστά τη λειτουργικότητα της βιβλιοδεσίας, να βελτιώνει τις ιδιότητες του χαρτιού αυξάνοντας το βαθμό πολυμερισμού και το pH και μειώνοντας τις οξειδωμένες ομάδες. Τέλος πρέπει να αναβαθμίζει την αισθητική εικόνα του

αντικειμένου, γεγονός που δεν αποτελεί κύριο στόχο, ιδιαίτερα σε αντικείμενα αρχαιικού υλικού. Σημαντική δυσκολία υπάρχει στην εκτίμηση των αισθητικών αποτελεσμάτων της συντήρησης, δεδομένου ότι στηρίζεται εν μέρει και σε υποκειμενικά κριτήρια. Η συνεισφορά της χρωματομετρίας στην αντικειμενική αποτίμηση των αισθητικών αποτελεσμάτων της συντήρησης είναι ανεκτίμητη. Κατά κανόνα μια επέμβαση συντήρησης έχει και θετικά και αρνητικά αποτελέσματα. Έτσι, η τελική αποτίμηση απαιτεί μια ιεράρχηση των κριτηρίων στην οποία υπεισέρχεται υποχρεωτικά ο υποκειμενικός παράγοντας.

Η χρήση του laser για τον καθαρισμό έργων τέχνης και άλλων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον αφού παρέχει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, καθιερώνοντας το laser ως κομβικής σημασίας εργαλείο συντήρησης. Ειδικότερα, το Nd: YAG laser έχει πολύ θετικά αποτελέσματα στον καθαρισμό αρχαίων νομισμάτων, καθώς και γλυπτών από ανόργανα υλικά όπως μάρμαρο, ασβεστόλιθο και ψαμμίτη. Η επίδραση του laser στα υλικά και η χρησιμοποίησή του ως εργαλείο συντήρησης - καθαρισμού σχετίζεται με τη διαφορά στην απορρόφηση από τα ξένα υλικά (σκουριά, μούχλα, προσμίξεις) και το υπόστρωμα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ακτινοβολία απορροφάται κυρίως από το στρώμα του οποίου επιδιώκεται η αφαίρεση ενώ η υποκείμενη και γειτονική επιφάνεια αντανακλά ή απορροφά πολύ λιγότερο την ακτινοβολία μετά την αφαίρεση του ρύπου. Αυτό επιτρέπει μια αυτοπεριοριζόμενη διαδικασία καθαρισμού.

Στα οργανικά υλικά αυτή η διαδικασία είναι σχετικά δυσκολότερη ωστόσο έχει πολύ λιγότερες παρενέργειες από τις παραδοσιακές μεθόδους καθαρισμού. Τα έγγραφα, τα βιβλία το αρχαικό υλικό έντυπης μορφής αποτελούν σημαντικό μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς, είναι οι φορείς των ιστορικών πληροφοριών που ρίχνουν φως στις ρίζες της σύγχρονης κοινωνίας. Επομένως, είναι φυσικό ότι η διατήρησή τους, συμπεριλαμβανομένου του καθαρισμού, είναι αντικείμενο μελέτης, όχι μόνο μεταξύ των συντηρητών αλλά από επιμελητές, βιβλιοθηκονόμους, υπεύθυνους ιστορικών αρχείων. Οι στόχοι του καθαρισμού μπορεί είναι πολλαπλοί. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη βελτίωση της εικόνας του εγγράφου ώστε να είναι αρτιότερη η ανάγνωση του κειμένου (αν και η καλύτερη

ανάγνωση θα μπορούσε να επιτευχθεί και με μεθόδους μη επαφής, όπως είναι οι φωτογραφικές μέθοδοι) ενώ βαρύτητα δίνεται στην αισθητική όψη, η οποία βέβαια μπορεί να θεωρηθεί μικρότερης σημασίας για πολύτιμα έγγραφα όπου η μακροπρόθεσμη διατήρηση μίας σταθερής κατάστασης έχει υψηλότερη προτεραιότητα ότι η αισθητική εμφάνιση. Ωστόσο έχει καθοριστική σημασία η ερμηνεία της συντήρησης αφού σύμφωνα με τους χάρτες και τις συμβάσεις για την πολιτιστική κληρονομιά, η προσπάθεια αποκατάστασης (restoration) του αντικειμένου στην αρχική του μορφή δεν συμβαδίζει με την ηθική και τις σύγχρονες απόψεις γιατί είναι πιθανόν να αλλοιώσει, το αντικείμενο καταστρέφοντας τα στοιχεία της δομής και των υλικών που το αποτελούν. Είναι πιθανόν κάποια από τα ίχνη που υπάρχουν σε κάποιο έγγραφο ή βιβλίο να αποτελούν σημαντικά ιστορικά στοιχεία, γι' αυτό χρειάζεται περίσκεψη κατά τους καθαρισμούς ώστε αυτά να μην καταστραφούν. Σε πολλά βιβλία, οι δημοφιλέστερες σελίδες έχουν περισσότερα ίχνη χρήσης και δεν πρέπει να καθαρίζονται ώστε το στοιχείο αυτό να διατηρηθεί. Παράλληλα έχει σημασία το υλικό από το οποίο αποτελούνται τα έγγραφα καθώς και το είδος των εγγράφων.

Εκτός από περιπτώσεις βιβλίων από χαρτί αντίστοιχα προβλήματα αντιμετωπίζουν και οι περγαμηνές που συνήθως είναι μεγαλύτερης ηλικίας. Αυτές έχουν δημιουργηθεί από κατεργασμένο δέρμα μικρών ζώων (πρόβατα, μοσχάρια, κατσίκες), που είναι δεμένο σ' ένα ξύλινο πλαίσιο και τεντώνεται για να στεγνώσει υπό τάση. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί μια αξιοσημείωτη αλλαγή στον προσανατολισμό των ινών από μια τρισδιάστατη δομή του δικτύου ινών σε στρώματα των τεντωμένων ινών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καθαρισμού επικεντρώνονται στη συντήρηση του χαρτιού και περιλαμβάνουν στεγνό, καθώς και υγρό καθάρισμα. Στο στεγνό καθάρισμα η περγαμηνή υποβάλλεται σε καθαρισμό με διάφορα είδη ανάλογα με την επιφανειακή δομή της περγαμηνής, την κατάσταση της μελάνης, τη διατήρηση της στην επιφάνεια της περγαμηνής. Μια ποικιλία από εμπορικά διαθέσιμες γόμες που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε πλαστικοποιημένο πολυβινυλοχλωρίδιο. Ωστόσο, η μηχανική κατεργασία της επιφάνειας της περγαμηνής μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στη δομή των ινών, θραύσματα από μελάνι αφαιρούνται εύκολα σε αντίθεση με επίμονες αλλοιώσεις που παραμένουν

στην επιφάνεια. Οι ξηρές μέθοδοι καθαρισμού συνήθως αποκλείονται αν η περγαμινή δεν έχει διατηρηθεί και βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο αλλοίωσης ή στην περίπτωση που η μελάνη δεν είναι καλά προσκολλημένη στην επιφάνεια της περγαμινής. Οι μέθοδοι υγρού καθαρισμού περιλαμβάνουν τη χρήση διαλυμάτων. Το υγρό εφαρμόζεται σε μπατονέτες μαλλί και προκαλεί λιγότερη μηχανική πίεση από τη χρήση της γόμας.

Παρ' όλα αυτά, μετά τη ξήρανση της επιφάνειας μπορεί να προκληθούν βλάβες κυρίως στην υφή της επιφάνειας, που πιθανόν να γίνει πιο τραχιά. Αυτές οι αλλαγές είναι ορατές με γυμνό μάτι. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που σχετίζεται με το υγρό καθάρισμα είναι η διάβρωση της μελάνης, καθώς και η εμφάνιση ζελατινοειδούς υφής στις ίνες της περγαμινής

Σε αντίθεση με τους προαναφερόμενους τρόπους καθαρισμού, η χρησιμοποίηση των laser αποφεύγει τα προβλήματα της φυσικής επαφής με την περγαμινή ή το μελάνι, την άσκηση τάσεων, τη μηχανική καταπόνηση του δείγματος, επομένως παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Έχει αποδειχτεί ερευνητικά η δυνατότητα καθαρισμού με laser των αλλοιώσεων σε ένα χαρτί που μπορεί να προέρχονται από επιφανειακή σκόνη, κόλλες (φυσικές και συνθετικές), ταινίες που είναι πολύ ευαίσθητες στην πίεση, λεκέδες από μελάνια και γραμματόσημα, λεκέδες από λιπίδια εξ' αιτίας επαφής του ανθρώπινου δέρματος με το έγγραφο, λεκέδες από μύκητες, μούχλα, λάδι κλπ. Η έρευνα συστηματοποιείται με:

- Την κριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του καθαρισμού με laser μιας αντιπροσωπευτικής ομάδας των πραγματικών αντικειμένων εμφανίζοντας επιλεγμένα προβλήματα

- Την μελέτη της άμεσης και της μακροχρόνιας χημικής και φυσικής μεταβολής του υποστρώματος χαρτιού που προκαλείτε από τον καθαρισμό με laser χρησιμοποιώντας πρότυπα συστήματα χαρτιού-λεκέδων.

Έχει ιδιαίτερη σημασία να καθοριστεί πριν από τη διαδικασία του καθαρισμού η σύσταση του χαρτιού. Συνήθως δείγματα χαρτιού υποβάλλονται σε μια διαδικασία τεχνητής αλλοίωσης, με διάφορους παράγοντες (μελάνι, λάδι, σελοτέϊπ) για να δημιουργηθεί μια επαρκής βάση δεδομένων και να δοκιμαστούν διάφορα ήδη laser. Επίσης τα καθαρισμένα δείγματα μπορούν πειραματικά να υποβληθούν σε τεχνικές συνθήκες αποθήκευσης (π.χ, για 12 μέρες στους 90°C, σε 50% υγρασία) για να εξεταστεί η ευαισθησία τους. Στην συνέχεια τα δείγματα θα υποβληθούν σε χρωματομετρία, υπέρυθη φασματοσκοπία, και χημειο-φωταύγεια.

Ο καθαρισμός με laser μπορεί να εμφανίσει τις εξής παρενέργειες στα δείγματα:

- Η αποβολή σωματιδίων που βρίσκονται στην ινώδη δομή του χαρτιού μπορεί να ανασηκώσει τις ίνες του χαρτιού αλλάζοντας την υφή του δείγματος
- Η υπερβολική αφαίρεση υλικού μπορεί να μειώσει το πάχος του δείγματος.
- Κιτρίνισμα ή αποχρωματισμός του χαρτιού και των χρωστικών
- Κάψιμο της επιφάνειας λόγω μεγάλης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται από την ακτινοβολία laser.

Για να μελετηθούν τα αποτελέσματα του καθαρισμού του χαρτιού μπορεί να γίνει έρευνα με τεχνικές φωτομετρίας, χρωματομετρίας, και με υποβολή των δειγμάτων σε LIF (Laser Induced Fluorescence) και LIPS (Laser Induced Plasma Spectroscopy)

Για τον καθαρισμό χαρτιού η βιβλιογραφία είναι πολύ πλούσια και σε διάφορα πειράματα έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί

- Q-switched Nd:YAG παλμικό laser (διάρκεια παλμού μικρότερη από 10ns, ρυθμό επανάληψης μικρότερο από 1KHz) που λειτουργεί στα 1064nm και 532 nm, με μηχανισμό άντλησης από δίοδο. Σε πείραμα που έγινε στο Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), στο Βερολίνο η δέσμη laser σαρώνει την περιοχή που πρόκειται να καθαριστεί χρησιμοποιώντας μια σειρά κινητών κατόπτρων. Η μέγιστη περιοχή σάρωσης είναι 14cm x 14cm, και η

διάμετρος της ακτίνας εστίαση είναι της τάξης των 100 μm . Μια βιντεοκάμερα που βρίσκεται δίπλα στην οπτική κεφαλή συλλαμβάνει την εικόνα της επιφάνειας που πρόκειται να καθαριστεί, η ψηφιοποίηση της οποίας δίνει τη δυνατότητα επιλογής της περιοχής που πρόκειται να καθαριστεί στην οθόνη ενός υπολογιστή μέσω ανάλογου λογισμικού.

➤ Q-switched Nd:YAG που να λειτουργεί στα 355 nm. Σε ανάλογο πείραμα στο ίδιο εργαστήριο το δείγμα βρίσκονταν σε κινητό σύστημα δύο αξόνων ώστε το laser να είναι σταθερό.

➤ Ένα άλλο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε σε πείραμα στο Art Innovation (AI), Hengelo, Ολλανδία. αποτελείται από ένα Lambda Physik Compex 205 excimer laser που λειτουργεί στα 248 nm με διάρκεια παλμού 20 ns, συχνότητα ρυθμιζόμενη 1-50Hz, πυκνότητα ενέργειας 0-600 mJ / παλμό, μέγιστη μέση ισχύ 30 W. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι τα excimer laser από 308nm και κάτω συνήθως δημιουργούν προβλήματα⁷⁸ στο δείγμα, αφού είναι δυνατόν να καταστρέψουν την κυτταρίνη

➤ Μοριακό laser F_2 που μπορούσε να λειτουργήσει στα 248nm, 193nm, 157nm. Ο συντελεστής απορρόφησης στα 157 nm βρέθηκε να είναι ένας μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τα 248 nm. Δεν υπήρξε καμιά ένδειξη οξειδωσης του υποστρώματος του δείγματος.

Προκειμένου να διερευνηθεί ο βασικός φωτοχημικός μηχανισμός της δυναμικής φωτοδιάσπασης της κυτταρίνης του χαρτιού, υποβλήθηκαν ίνες που είχαν καθαριστεί σε κενό με υπεριώδη ακτινοβολία σε φασματοσκοπική ανάλυση. Η φασματοσκοπία μάζας απέδειξε ότι υπάρχει σπάσιμο των μοριακών δεσμών της κυτταρίνης, ακόμη και σε χαμηλή ενέργεια λέιζερ στα 157 nm, γι' αυτό και αποκλείστηκαν τα μεγαλύτερα μήκη κύματος.

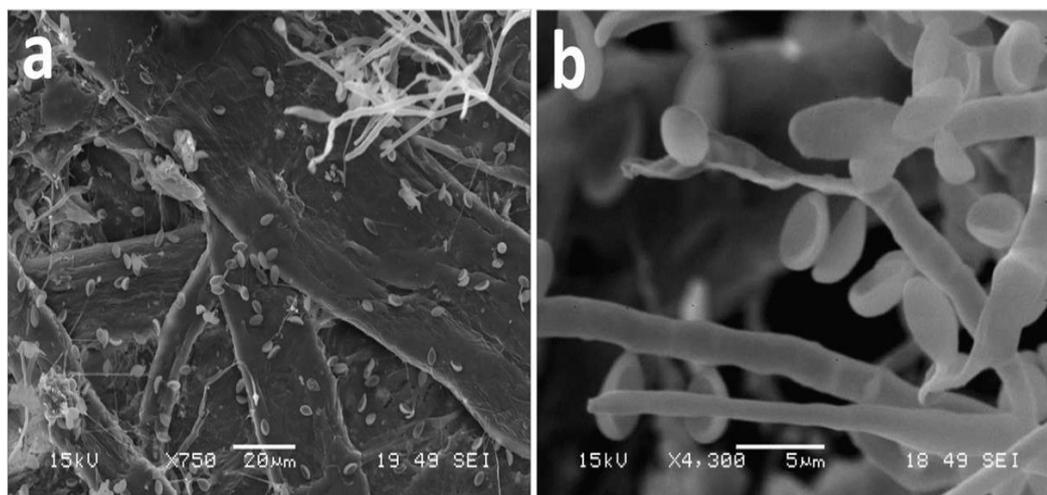
Το πιο διαδεδομένο laser στη βιβλιογραφία είναι το laser Nd: YAG, το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία laser στα 1064nm (υπέρυθρο) και μπορεί επίσης να τροποποιηθεί ώστε να εκπέμπει στη δεύτερη αρμονική στα 532nm

⁷⁸Σχετική αναφορά υπάρχει στο «Near UV and visible pulsed laser interaction with paper» από Jana Colar et all

(πράσινο), στην τρίτη αρμονική στα 335nm και στην τέταρτη αρμονική 266 nm (υπεριώδες). Ένας αριθμός παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας του παλμού, το μέγεθος της δέσμης και ο ρυθμός επανάληψης μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Το αποτέλεσμα καθαρισμού και μια πιθανή βλαπτική επίδραση καθαρισμού με laser θα πρέπει να αναλυθούν λεπτομερώς και πρέπει να προσδιορίζονται τυχόν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της διαδικασίας καθαρισμού. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται προτεινόμενες πυκνότητες⁷⁹ ενέργειας που για το Nd:YAG παλμικό laser είναι $0,58 \text{ J/cm}^2$ και $0,86 \text{ J/cm}^2$

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από ένα ιστορικό βιβλίο του 20^{ου} αιώνα από την βιβλιοθήκη του ΕΜΠ και είχε στην επιφάνεια του βιολογικές προσμίξεις⁸⁰.

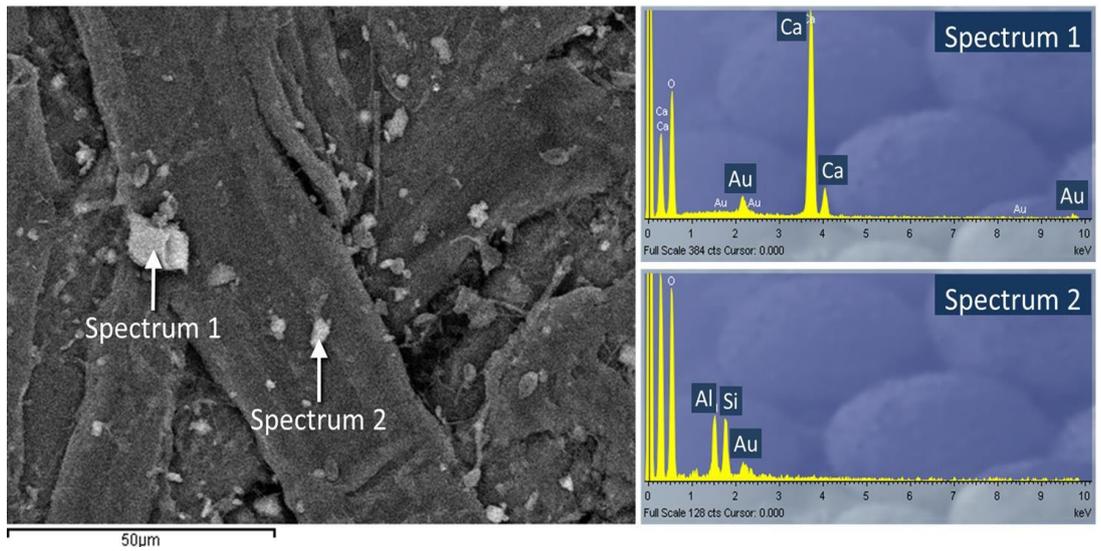
Η κυτταρίνη του χαρτιού δεν απορροφά ακτινοβολία με μήκος κύματος 355 nm και αυτό ήταν κυρίως ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο laser για τον καθαρισμό των μυκήτων από το χαρτί. Το όριο ροής για την υπεριώδη ακτινοβολία ήταν μικρότερο από αυτό του ορατού φωτός σύμφωνα με την βιβλιογραφία.



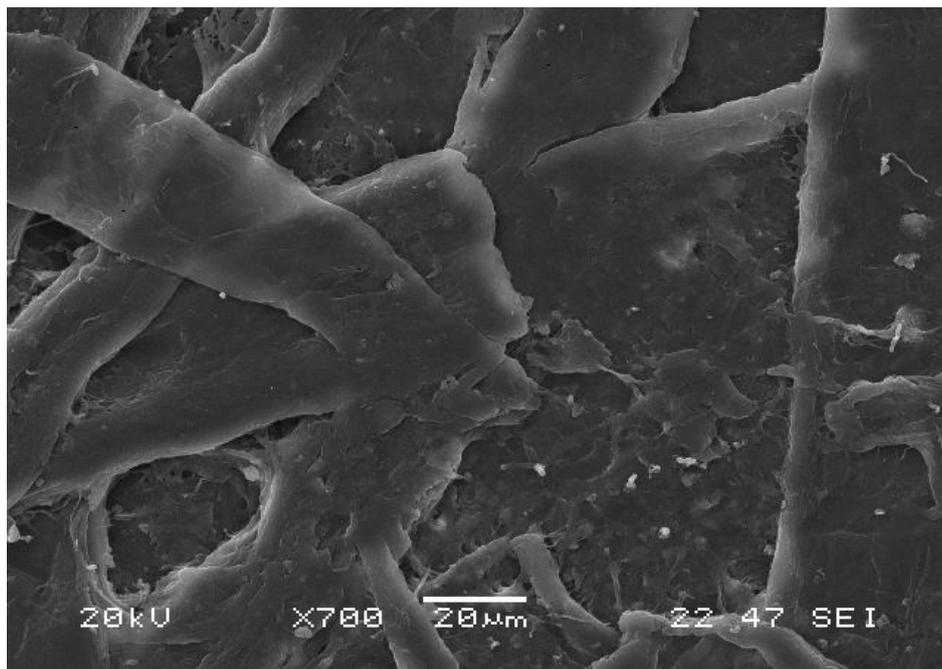
Εικόνα 5.6.1 Απεικόνιση από SEM που δείχνουν:(a) ίνες χαρτιού κυτταρίνης μολυσμένες από μύκητες νημάτια και σπόρια (b) μεγέθυνση από μύκητες νημάτια και σπόρια.

⁷⁹ Οι πυκνότητες ενέργειας σχετίζονται με το είδος του χαρτιού καθώς και με το είδος και την ευρύτητα της μόλυνσης.

⁸⁰ Λεκέδες κυρίως από μούχλα.



Εικόνα 5.6.2 Χημική ανάλυση από ανόργανα συστατικά στο SEM στα αριστερά και τα φάσματα κατά την ανάλυση με EDS.



Εικόνα 5.6.3 Καθαρισμένη επιφάνεια στο SEM.

Το δείγμα πριν και μετά τον καθαρισμό ελέγχεται από SEM. Τα σπόρια μυκήτων και νημάτια που παρατηρούνται στη δομή κυτταρίνης του χαρτιού φαίνονται στην εικόνα 5.6.1. Εκτός από την επιφάνεια που είχε μολυνθεί από μύκητες, η χημική ανάλυση μετά το SEM στη μη επεξεργασμένη επιφάνεια αποκάλυψε την ύπαρξη ανόργανων συστατικών όπως Si, Ca και Al, που ανήκουν κυρίως στις ορυκτά πληρωτικά (συστατικά) του χαρτιού όπως φαίνεται στο γράφημα στην εικόνα 5.6.2. Για τον καθαρισμό χρησιμοποιείται laser Nd: YAG στα 355nm, με πυκνότητα ενέργειας (ροή) $0,102\text{J}/\text{cm}^2$, με 5 Hz ρυθμό επανάληψης και 160sec έκθεσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6.3 τα σπόρια απομακρύνθηκαν χωρίς να επηρεάζουν τη δομή της κυτταρίνης. Επιπλέον, τα ανόργανα συστατικά (υλικά πληρώσεως) επίσης καθαρίζονται. Η κυτταρίνη είναι ένα γραμμικό πολυμερές που αποτελείται από D-ανυδρογλυκοκυρανοζικές που ενώνονται με β-1,4-γλυκοσιδικούς δεσμούς. Η συντριπτική πλειοψηφία των υδροξυλομάδων του σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου ενδο- ή δια-αλυσίδας συμμετέχοντας μερικώς στην κρυσταλλική δομή. Το νερό προσροφάτε ισχυρά από την επιφάνεια του χαρτιού. Επίσης η απορρόφηση των φωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 3.6eV ($\lambda < 340\text{nm}$) μπορεί να οδηγήσει σε άμεση φωτόλυση, ή μπορεί να προκαλέσει φωτο-οξειδωτική αποικοδόμηση κυτταρίνης που είναι το βασικό υλικό του εγγράφου, αντίθετα το υπεριώδες φως δεν οδηγεί σε χρωματομετρικές αλλαγές. Αυτοί ήταν κυρίως οι λόγοι χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία στα 355 nm για τον καθαρισμό του χαρτιού. Ο μύκητας απομακρύνθηκε και προσδιορίστηκε το κατώφλι ροής. Το όριο ροής για τη υπεριώδη ακτινοβολία ήταν χαμηλότερο από τις πυκνότητες της ακτινοβολίας laser στο ορατό.

5.7 Χρονολόγιο⁸¹

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΓΕΓΟΝΟΣ
1916	Ο Einstein προτείνει/ κάνει την πρώτη αναφορά στην εξαναγκασμένη εκπομπή
1928	Έμμεση απόδειξη της εξαναγκασμένης εκπομπής αναφέρεται από τον Rudolf Ladenburg
1940	Ο Valentin Fabrikant αναφέρεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή ως αποτέλεσμα της ενίσχυσης της ακτινοβολίας
1951	Εξαναγκασμένη εκπομπή στα 50kHz παρατηρείται στο Harvard από τους E.Purcell και R. Pound
1954	Οι Townes, Gordon κατασκευάζουν μικροκυματικό maser που λειτουργεί στα 24GHz στο Πανεπιστήμιο της Columbia
1957	Ο Townes ξεκινά την έρευνα του για το οπτικό maser
1957	Ο Townes συζητά με τον Gordon Gould για την οπτική άντληση και για το οπτικό maser
1957	Ο Gould αναφέρεται στον όρο laser και καταγράφει στο επιστημονικό του σημειωματάριο την ιδέα του για την δημιουργία ενός αντηχείου τύπου Fabry-Perot
1958	Οι Townes και Schawlow δημοσιεύουν στο Physical Review την λεπτομερή τους εργασία για το οπτικό maser
1959	Η ARPA υπογράφει με το εργαστήριο TRG συμβόλαιο 999.000\$ για την ανάπτυξη συστημάτων laser σύμφωνα με την πρόταση του Gould
1960	Ο T. Maiman κάνει δημόσια επίδειξη του ruby laser που έχει κατασκευάσει στο Hughes Research Labs
1962	Ο αρχηγός της Πολεμικής Αεροπορίας Curtis Le May επαινεί τις προοπτικές για τη χρήση laser στην πυρηνική άμυνα
1963	Ο Herbert Kroemer παράγει ετεροδομές για να βελτιώσει τη δίοδο του laser. Ο Zhores Aleferon και ο Rudolf Kazarinon στο ινστιτούτο Ioffe της Ρωσίας πατεντάρουν το διπλής ετεροδομής laser
1963	Δημιουργήθηκε το πρώτο laser ιόντων υδραργύρου από τον Earl Bell

⁸¹ Το χρονολόγιο έχει μεταφραστεί από την εργασία του Jeff Hecht που είχε δημοσιευτεί το 2010 στο Optical Engineering και αρχικά στο Applied Optics

1963	Εφεύρεση του laser αζώτου από τον H. G. Heart
1964	Ο Snitzer κατασκευάζει τον πρώτο ενισχυτή ινών
1964	Ο W. Bridges κατασκευάζει παλμικό laser με ιόντα αργού
1964	Εμφάνιση των πρώτων 3D laser από τους Emmett Leith και Juris Upatnieks
1964	Ο Kumar Patel φτιάχνει CO ₂ laser στα εργαστήρια Bell
1964	Ο Joseph Geusic και ο LeGrand Van Unitert φτιάχνουν το πρώτο Nd-YAG laser στα εργαστήρια Bell
1965	Ο Kumar Patel φτάνει τα 200W σε συνεχή λειτουργία από το CO ₂ laser
1965	Ασύμφωνη ακτινοβολία χρησιμοποιείται στο CO ₂ laser
1965	Ο William Silfvast και ο Grant Fowles φτιάχνουν laser He-Cd
1965	Ο Kasper και ο G. C. Pimentel φτιάχνουν το πρώτο χημικό laser (HCl)
1965	Ανακάλυψη της ασύμφωνης φασματοσκοπίας Raman από τον Robert Terhune
1966	Ο Peter Sorokin φτιάχνει το πρώτο laser χρωστικών στο IBM. Ανεξάρτητα ο Fritz Schaefer ανακαλύπτει το laser χρωστικών στο ινστιτούτο Max Planck
1966	Ο Charles Kao και ο George Hockham προτείνουν επικοινωνίες με την χρησιμοποίηση οπτικών ινών χαμηλών απωλειών-μονής δομής.
1966	Edd Gerry και ο Arthur Kantrowitz κατασκευάζουν το «gas dynamic CO ₂ laser» το οποίο τελικά φτάνει τα εκατοντάδες kilowatt, συνεχούς εκπομπής
1967	Το laser χρωστικών συντονίζεται για πρώτη φορά από τον Bernard Soffer και τον B.B. Mc Farland
1967	Ο Jack Dymont αναπτύσσει το «Stripe-geometric laser»
1968	Ο Francis L' Esperance με τους Eugene Gordon και Ed Labuda αναπτύσσουν τη θεραπεία της αμφιβλοστροειδοπάθειας διαβητικών με τη χρήση του laser αργού
1969	Οι αστροναύτες του Apollo 11 τοποθετούν στο φεγγάρι κάτοπτρα που θα χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της απόστασης Γης-Σελήνης μ' ένα ruby laser

1970	Ο Nikolai Basov του Ινστιτούτου Lebedev αναφέρεται στο παλμικό laser υπεριώδους ακτινοβολίας από ξένο
1970	Ο Zhores Alferon κατασκευάζει το πρώτο διοδικό laser σε θερμοκρασία δωματίου
1970	Φτιάχνεται η πρώτη χαμηλής απώλειας οπτική ίνα από τους Robert Maurer, Donald Keck και Peter Schultz
1970	Ο Ben Snavely παρουσιάζει το cw laser χρωστικών στην Kodak
1971	Ο Rudolf Kazarinov και ο R.A. Suris προτείνουν την κατασκευή κβαντικού laser ημιαγωγών (quantum cascade laser)
1972	Ο Erich Ippen και ο Charles Shank παράγουν παλμούς 1-5 ps
1974	Το πρώτο laser scanner χρησιμοποιείται σε supermarket
1974	Εφευρίσκονται τα laser σπάνιων γαιών και τίθενται σε εφαρμογή πολλοί διαφορετικοί τύποι
1974	Αναπτύσσεται η φασματοσκοπία Doppler διπλού φωτονίου ανεξάρτητα από τους Theodor Hansch στο Stanford και από τον David Pritchard στο MIT.
1976	Τα εργαστήρια Bell πραγματοποιούν πειράματα που υποδεικνύουν ότι το GaAs laser έχει εκατομμύρια χρόνια ζωής
1976	Ο Jim Hsieh χρησιμοποιεί laser InGaAsP στα 12μm σε θερμοκρασία δωματίου
1978	MCA-Philips χρησιμοποιεί δοκιμαστικά He-Ne laser player
1979	Η Philips παρουσιάζει το πρωτότυπο compact disk player
1980	Τα εργαστήρια Bell ανακοινώνουν σχέδια για το TAT-8, το πρώτο υπερατλαντικό καλώδιο οπτικών ινών.
1980	Τα scanner στα supermarket γίνονται συνηθισμένα
1982	Ο Peter Moulton αναπτύσσει το "Ti-Sapphire laser"
1982	Το Audio compact disk player παρουσιάζεται στην Ιαπωνία
1983	Ο Ronald Reagan λανσάρει το Strategic Defense Initiative
1984	Το πρώτο διαφημιστικό "diode-pumped neodymium laser" δουλεύει στα 100 mW cw
1985	Η Sony φτιάχνει το cw AlGaInP που δουλεύει στα 671nm

1985	Το πρώτο VCSEL σε θερμοκρασία δωματίου από τον Kenichilga
1986	Ο David Payne φτιάχνει το «Er-fiber laser»
1987	Στο Bello Richerd Fork συμπιέζονται οι παλμοί του laser χρωστικών σε 6 fs
1988	Η δημιουργία του καλωδίου TAT-8 ολοκληρώνεται
1989	Ο Isamu Akasaki παρουσιάζει το μπλε LED
1994	Ο Federico Capasso στα εργαστήρια Bell θέτει σε εφαρμογή το “quantum cascade laser”
1995	Το μήκος του παλμού του Ti-sapphire laser φτάνει τα 8 fs
1996	Ο Shuji Nakamura αναφέρεται στο πρώτο μπλε διοδικό laser
2000	Οι παλμοί του Ti-sapphire συμπιέζονται στους 5 fs

Πίνακας 5.7.1.1 *Σύντομη ιστορία της εξέλιξης των laser μέχρι το 2000*

ΧΡΟΝΙΑ & ΒΡΑΒΕΙΟ	ΠΑΡΑΛΗΠΤΗΣ	ΕΡΕΥΝΑ
1964 Φυσικής	Charles Townes, Nikolai Basov, Alexander Prokhorov	Θεμελιώδης έρευνα που οδήγησε στο laser και στο maser
1971 Φυσικής	Dennis Gabor	Ολογραφία (που έγινε εφικτή από το laser)
1981 Φυσικής	Nikolaas Bloembergen, Arthur Schawlow	Ανάπτυξη της φασματοσκοπίας laser
1997 Φυσικής	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips	Διατάξεις με laser παγίδευσης και μείωσης της θερμοκρασίας ατόμων
1999 Χημείας	Ahmed Zewail	Μελέτες χημικών αντιδράσεων στην κλίμακα των femtosecond
2000 Φυσικής	Zhores Alferov, Herbert Kroemer	Ανακάλυψη ετεροδομών, για υψηλής ταχύτητας οπτοηλεκτρονική
2001 Φυσικής	Eric Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle	Παραγωγή Bose-Einstein συμπυκνωμάτων, μερικές φορές καλούμενα ως «ατομικά laser»
2005 Φυσικής (ξεχωριστές αναφορές)	Roy Glauber	Κβαντική θεωρία της οπτικής συνοχής
2005 Φυσικής (ξεχωριστές αναφορές)	John Hall, Theodor Hansch	Laser φασματοσκοπίας μεγάλης ακριβείας frequency-comb generation
2009 Φυσικής	Charles Kao	Εκπομπή φωτός μέσω οπτικών ινών για τις τηλεπικοινωνίες

Πίνακας 1.2 Τα βραβεία Νομπελ που σχετίζονται με τα laser μέχρι το 2009

6. Συμπεράσματα

Η κυρίαρχη αφήγηση παρουσιάζει τα laser να «ξεφυτρώνουν» ξαφνικά ως να προέκυψαν από την εργασία του Einstein το 1918 χωρίς καμιά άλλη διαδικασία. Στην πραγματικότητα ήταν το αποτέλεσμα μιας σκληρής διανοητική - πειραματικής προσπάθειας. Αποτέλεσαν μια εφεύρεση που αποτύπωσε τις διαμάχες στο πεδίο της κβαντομηχανικής και παράλληλα φέρει στα γονίδια της ενσταλαγμένη μια τιπάνια τεχνική ανάπτυξη στον τομέα των ηλεκτρονικών και της οπτικής. Πολλοί επιστήμονες δέσμιοι της βεβαιότητας που κυριαρχούσε σε διάφορους τομείς δεν ακολούθησαν δρόμους που φαίνονται εκ των υστέρων ως ευκολοδιάβατοι, δεν προχώρησαν τις ιδέες, άφησαν λίγο πριν την τελική ανακάλυψη τα ερευνητικά τους σχέδια ημιτελή. Εκ των υστέρων με μεγάλο τον κίνδυνο του ιστορικού αναχρονισμού μπορεί κάποιος – εσφαλμένα - να αναρωτηθεί για την «αδυναμία» τους, για τους λόγους που τους οδήγησαν στην μια κατεύθυνση και όχι σ' αυτήν που τώρα μπορεί να φαίνεται προφανής.

Η αντιστροφή πληθυσμών φάνταζε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα μια απαγορευμένη περιοχή. Η επιστημονική κοινότητα ήταν αφοσιωμένη-κυριαρχούμενη από την κανονική επιστήμη. Οι επιστημονικές θεωρίες δεν αντικαθίστανται από νέες λόγω αδυναμίας επαλήθευσης τους, ή από συσσώρευση εμπειρικών δεδομένων εναντίον τους αλλά όπως υποστηρίζει ο Kuhn γιατί αδυνατούν συγκριτικά να ανιχνεύσουν και να επιλύσουν νέα προβλήματα. Οι παρατηρησιακές αποφάνσεις δεν είναι ανεξάρτητες από τη θεωρία αλλά είναι εμποτισμένες από αυτήν. Για να αιτιολογήσει αυτήν τη θέση ο Kuhn χρησιμοποιεί τα γνωστά πειράματα gestaltόπου ένα σχήμα έχει μια διττή οπτική την οποία σε κάποια στιγμή το υποκείμενο του πειράματος την αντιλαμβάνεται ή τα πειράματα με τα «αντικανονικά» τραπουλόχαρτα. Τα πειράματα αυτά οδηγούν τον Kuhn σε ένα διπλό συμπέρασμα. Ότι υπάρχει δέσμευση στα υποκείμενα των πειραμάτων από μια πρότερη γνώση ή εμπειρία που εν πολλοίς καθορίζει και την άποψη που σχηματίζουν για αυτό που «βλέπουν» - ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται για να καταδείξει πως

και πότε ένας επιστήμονας μεταστρέφει την άποψη του. Έτσι ο Kuhn διακρίνει το «βλέπω» από το «βλέπω ως», αφού όταν ένα αντικείμενο ή ένα γεγονός ειδωθεί ως κάτι υπάρχει μια σημαίνουσα αντίληψη, η αντίληψη είναι εμποτισμένη με θεωρία ή με έννοια⁸². Σ' αυτήν την κατεύθυνση παραθέτει πλήθος παραδειγμάτων όπου το ίδιο φαινόμενο (ανίχνευση σωματιδίων σε bubble-chamber) παρατηρείτε διαφορετικά από ένα επιστήμονα από κάποιον με λιγότερες γνώσεις φυσικής, αν και οι δύο «βλέπουν» το ίδιο γεγονός. Καμιά ουδέτερη παρατηρησιακή γλώσσα δεν μπορεί να επιλέξει μεταξύ θεωριών αφού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αυτές.

Η παρατήρηση λοιπόν δεν έχει αποκλειστική και πρωταρχική αξία στην επιστημονική διαδικασία και δεν μπορεί επίσης να αποτελέσει μοναδικό ασφαλές κριτήριο για την επαλήθευση ή τη διάψευση μιας θεωρίας, συνεπώς δεν καθορίζει μηχανιστικά την αλλαγή των επιστημονικών θεωριών. Δεν υπάρχουν απόλυτοι κανόνες μη - σχετικής γνώσης και αυθεντίας οπότε και η αξιολόγηση των θεωριών είναι μια πολυεπίπεδη διαδικασία που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες πέραν της επικύρωσης των θεωριών⁸³. Είναι αποκαλυπτικά τα «στιγμιότυπα» που παραθέτει για τον σκοπό αυτό ο Kuhn όπου σε αρκετές χρονικές περιόδους οι παρατηρησιακές⁸⁴ αποφάνσεις έρχονταν σε σύγκρουση με το θεωρητικό πλέγμα, γεγονός που δεν καθόρισε μονοσήμαντα την κατάρρευση μιας θεωρίας. Ανάλογη περίπτωση αποτελεί και η Αριστοτελική θεώρηση όπου παρά την αδυναμία της να εξηγήσει συγκεκριμένα φαινόμενα (κίνηση βέλους, διαφορετικό μέγεθος της Πανσέληνου), παρέμεινε ως η πληρέστερη και βασική κοσμοαντίληψη και μεθοδολογία για πάνω από δύο χιλιάδες χρόνια. Οι επιστημονικές κοινότητες και κατ' επέκταση οι κοινωνίες δεν αντικαθιστούν μια επιστημονική θεωρία με μεγάλη εξηγητική ισχύ αν υπάρξουν κάποιες μικρές ή μεγαλύτερες ασυμφωνίες και εξαιρέσεις. Ο Kuhn προτείνει ένα συγκεκριμένο μοντέλο για την κατανόηση της επιστημονικής αλλαγής, που σχηματικά θα μπορούσε να αποδοθεί από ένα εγγελιανών καταβολών πλαίσιο όπου η «φυσιολογική»-

⁸²Brown, H. I. (1977), «Αντίληψη, Θεωρία και Δέσμευση: Μια νέα φιλοσοφία της Επιστήμης»

⁸³Salmon et al, (1992), «Εισαγωγή στην Φιλοσοφία της Επιστήμης»

⁸⁴ Αναφέρεται στην διαφορετική τροχιά του Ουρανού από τους θεωρητικούς υπολογισμούς που παρείχε η Νευτώνια Μηχανική, τον τρόπο που την εξήγησαν οι Leverrier και Adams αλλά και την αποτυχία τους να εξηγήσουν ανάλογα την τροχιά του Ερμή.

κυρίαρχη - επιστήμη κατά την επίλυση προβλημάτων (puzzle - solving), έρχεται αντιμέτωπη με φαινόμενα, ζητήματα τα οποία δεν μπορεί να χειριστεί, να επιλύσει. Αυτά τα προβλήματα(ανωμαλίες) διακρίνονται από τους απλούς γρίφους παραμένουν, φτάνουν μέχρι τον πυρήνα της υπάρχουσας γνώσης και αφού δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν χάνεται σε κάποια φάση η εμπιστοσύνη της κοινότητας στο κυρίαρχο Παράδειγμα⁸⁵, το οποίο περιέρχεται σε κρίση. Η αδυναμία αυτή του Παραδείγματος χαλαρώνει τους κανόνες και η επιστήμη αποχτά τα χαρακτηριστικά της «ιδιόρρυθμης» επιστήμης. Η λειτουργία των μελών της επιστημονικής κοινότητας έξω από το δοσμένο πλαίσιο, η χαλάρωση των στερεοτύπων, οι νέες ανακαλύψεις που πραγματοποιούνται, μπορεί να οδηγήσουν σε μια επιστημονική επανάσταση, σε μια ασυνεχή μη συσσωρευτική διαδικασία, όπου μετασχηματίζονται ριζικά οι πεποιθήσεις, οι γνώμες και οι αντιλήψεις, οι πειραματικές τεχνικές των επιστημόνων που μετέρχονται σ' ένα νέο Παράδειγμα.

Εκτός όμως από τις νέες αντιλήψεις, την σύγκρουση της νέας θεωρίας με την παλιά, την πάλη για την επικράτηση, όλες οι εφευρέσεις αλλά και οι ανακαλύψεις καθορίζονται και αλληλεπιδρούν με το κοινωνικό γίνεσθαι. Η κατασκευή των laser πραγματοποιείται σε μια συγκυρία όπου τα επιστημονικά εργαστήρια μεγαλώνουν ασύλληπτα, η δίψα για καινούριες ανακαλύψεις, η ανάγκη για εφευρέσεις και παράλληλα η ιλιγγιώδης αύξηση των χρηματοδοτήσεων, δημιουργεί μια νέα κατάσταση.

Μετά τον πόλεμο η επιστημονική κοινότητα χαίρει μεγάλης εκτίμησης και αποδοχής. Εκατοντάδες επιστήμονες εργάζονται σε κυβερνητικές υπηρεσίες ή στη βιομηχανία με ιδιαίτερα καλές αποδοχές. Συγκροτείται πλήθος από συμβουλευτικές ομάδες που συνδέονται είτε έμμεσα είτε άμεσα με την Washington και τον εκάστοτε πρόεδρο των ΗΠΑ καθώς και με υπουργεία αιχμής - κυρίως με το Υπουργείο Άμυνας. Στις ομάδες αυτές συμμετέχουν στη συντριπτική τους πλειοψηφία φυσικοί, κάποιοι χημικοί και μαθηματικοί - ενώ μεγάλο ποσοστό έχει ήδη ακαδημαϊκές θέσεις.

⁸⁵ «Το σύνολο από νόμους, θεωρίες, εφαρμογές και πειραματισμό ταυτόχρονα ... ένα ισχυρό πλέγμα εννοιολογικών, θεωρητικών, πειραματικών και μεθοδολογικών, ακόμα και μεταφυσικών παραδοχών» απόσπασμα από την «Δομή των Επιστημονικών Επαναστάσεων»

Τη χρονιά που η Σοβιετική Ένωση θέτει σε τροχιά τον Sputnik (8 Οκτωβρίου 1957) δημιουργείται μια επιστημονική υπηρεσία που αναφέρεται απ' ευθείας στον Υπουργό Άμυνας με την επωνυμία ARPA (Advanced Research Projects Agency) και είναι υπεύθυνη για πολυδάπανα στρατιωτικής φύσεως προγράμματα. Ένα χρόνο αργότερα δημιουργείται και άλλη επιτροπή με την επωνυμία Office of the Director of Defense Research & Engineering (ODDR&E). Στις υπηρεσίες αυτές διευθυντές είναι Φυσικοί πολλοί από τους οποίους συμμετείχαν ως μεσαία στελέχη στο Manhattan Project. Το ύψος των χρηματοδοτήσεων είναι τεράστιο⁸⁶.

Ο Jack Ruina το 1960 σε ηλικία 36 χρόνων αφήνει το Πανεπιστήμιο του Illinois για να γίνει βοηθός διευθυντή στην ODDR&E. Την επόμενη χρονιά γίνεται διευθυντής στην ARPA έχοντας στη διάθεση του έναν προϋπολογισμό 300 εκατομμυρίων δολαρίων (σημερινής αξίας 1.5 δισεκατομμυρίων δολαρίων, για το οποίο δεν προβλέπονταν οποιοσδήποτε έλεγχος από το Κογκρέσο ή από κάποια κυβερνητική υπηρεσία).

Από το 1960 μέχρι το 1968 οι δαπάνες εκτοξεύτηκαν. Τα χρήματα για έρευνα διπλασιάστηκαν και η χρηματοδότηση για βασική έρευνα τριπλασιάστηκε. Από το 1962 έως το 1964 από 223 Πανεπιστήμια τα 21 λάμβαναν το 50% της χρηματοδότησης και έδιναν το 50% των διδακτορικών διπλωμάτων. Το Υπουργείο Άμυνας χρηματοδοτούσε 100 Πανεπιστήμια που αναλάμβαναν έρευνα για στρατιωτικούς σκοπούς .Δέκα είχαν μερίδιο 5 εκατομμύρια δολάρια, το MIT ήταν πρώτο με συμβόλαια αξίας 47 εκατομμυρίων ενώ το Caltech 15^ο με 4 εκατομμύρια που αποτελούσαν όμως το 20% του συνολικού προϋπολογισμού του.

Εκτός από τις συμβουλευτικές ομάδες συγκροτούνται επίσης οργανισμοί ως ιδιωτικές μη κερδοσκοπικές εταιρίες με την επωνυμία FCRC (Federal Contract Research Center) που επιχορηγούνταν από την κυβέρνηση

⁸⁶ Τα στοιχεία προέρχονται από το «THE JASONS: The secret history of Science's postwar elite» της Ann Finkbeiner και από το «The Cold-War and American Science: The military-Industrial-Academic complex at MIT and Stanford» του Stuart W. Leslie.

και αναλάμβαναν συγκεκριμένες ερευνητικές δραστηριότητες. Μια από αυτές τις εταιρίες ήταν και η IDA⁸⁷ (Institute of Defense Analyses).

Είναι φανερό ότι οι επιστημονικές ανακαλύψεις και οι τεχνικές εφευρέσεις καθορίζονται εν πολλοίς από την κοινωνική κατάσταση γι' αυτό και πάντα πρέπει να θεωρούνται ιστορικά γεννήματα για να είναι δυνατή όσο είναι εφικτό η προσέγγιση, εξήγηση και κατανόηση τους.

⁸⁷ Ο Charles Townes εργάζονταν στην IDA

7. Βιβλιογραφία

- Αραγεώργης, Α. (2006): « Θεμέλια και Καινοτομίες της Κβαντικής Μηχανικής» “Πανεπιστημιακές Παραδόσεις ΕΜΠ”
- .(2006): «Το Πρόβλημα της Κβαντικής Μέτρησης» “Πανεπιστημιακές Παραδόσεις ΕΜΠ”
- .(2006): «Φιλοσοφία και Σύγχρονη Φυσική» “Πανεπιστημιακές Παραδόσεις ΕΜΠ”
- Αριστοτέλης: «Φυσικά» Μτφρ.(2008) Β. Μπετσάκος. Θεσσαλονίκη : Ζήτρος
- Μπιτσάκης, Ε. ([1965]1996) : «Το είναι και το γίνεσθαι». Αθήνα: Στάχυ
- .(1979): «Τα εννοιολογικά θεμέλια της Κβαντικής Μηχανικής». Αθήνα: Σύγχρονη Εποχή
- .(1999) : «Ο Νέος Επιστημονικός Ρεαλισμός». Αθήνα: Gutenberg
- .(2000): «Η Δυναμική του Ελάχιστου». Αθήνα :Δαίδαλος
- .(2000): «Ο Δαίμων του Αϊνστάιν». Αθήνα: Gutenberg
- .(2008):«Η Εξέλιξη των Θεωριών της Φυσικής». Αθήνα: Δαίδαλος
- Ταμβάκης, Κ. (2000) : «Κβαντική Μηχανική». Ιωάννινα
- Τραχανάς, Σ. (2008) : «Κβαντομηχανική II». Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
- Amir, D. Aczel. (2001): “Entanglement-The Greatest Mystery”
- Badash, L. (1972) : “The completeness of nineteenth-century science”.Isis"

- Bell, J. S. (1993) : “*Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*”. New York :Cambridge University Press
- Bertolotti, M (2005): “*The History of the Laser*”. Institute of Physics Pub
- Bohm, D. (1951): “*Quantum Theory*”. NJ: Prentice Hall, Englewood Cliffs
- . (1952) : “*A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables, I and II*”, *Physical Review* **89**, 458-466
- . ([1959] 1984): “*Causality and Chance in Modern Physics*”. London: Routledge and Kegan Paul Ltd
- Bohm, D. and Hilley, J. (1980): “*Wholeness and the Implicate Order*”. London :Routledge
- Bohm, D. and Hilley, B. J. (1993): “*The Undivided Universe An Ontological Interpretation of Quantum Theory*”. London: Routledge
- Bohr, N. (1935): “*Can Quantum Mechanical Description Of Physical Reality Be Considered Complete?*”, *Physical Review*, **48**, 696-702
- Cohen, R. S., Horne, M., Stachel, J. (1997):“*Potentiality, Entanglement, and Passion-at-a-Distance*”, *Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony*, volume 2. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Cushing, T. James. (1998): “*Philosophical Concepts in Physics- The historical relations between philosophy and scientific theories*”, Cambridge: Cambridge University Press
- De Broglie, L. de, (1954): “*The Revolution in Physics*”, London: Routledge and Kegan Paul Ltd
- . (1964): “ *The Current Interpretation of Quantum Mechanics*”. Elsevier

- DIRAC, P.A.M. (1958): “*The Principles of Quantum Mechanics*”.Oxford:
Oxford University Press
- Earman, J. (1986): “*A Primer on Determinism*”, Dordrecht: D Reidel
Publishing Co
- Engels, F. ([1876]1983): «*Η Διαλεκτική της Φύσης*», Μετάφραση
Μπιτσάκης, Ε. Αθήνα: Σύγχρονη Εποχή
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (1935): “*Can Quantum Mechanical
Description of Physical Reality Be Considered Complete?*”, *Physical
Review*,**47**,777-780
- Einstein, A. (1954): “*Ideas and Opinions*”, New York: Crown Publishers
- Faye, J. (1991): “*Niels Bohr: His Heritage and Legacy*”, Dordrecht:
Kluwer Academic Publishers
- Finkbeiner, Ann. (2006), “*The JASONS*” , Viking/Penguin
- Greenberger, D., Horne, M., Zeilinger, A. (1990): “*Bell’s Theorem
Without Inequalities*”, *American Journal of Physics*, **58(12)**,
December 1990, p 1131-43
- Heisenberg, W.: (1958) “*Physics and Philosophy*”, New York: Harper
and Row
- Heisenberg, W.(1949) “*The Physical Principles of Quantum Theory*”,
London: Dover Publications
- JAUCH, J. M. (1969): “*Foundations of Quantum Mechanics*” ADDISON-
WESLEY

Kevles, Daniel, J.(1971), *“The Physicists”*, Random House, Inc

Kragh, H. ([1999] 2004): *Οι Γενιές των Κβάντων. Η Ιστορία της Φυσικής του 20^{ου} Αιώνα*. Μετάφραση: Γ. Κατσιλιέρης. Επιστημονική επιμέλεια: Μ. Ασημακόπουλος, Π. Δήτσας, Ηλ. Ζουμπούλης, Γ. Κατσιλιέρης. Αθήνα: Κάτοπτρο.

Landau, L. D. and Lifshitz, E. M.([1947]1958): *“Quantum Mechanics”*, translated from Sykes, J. B. and Bell, J. S. London-Paris: Pergamon Press

Λένιν, Β. Ι. (1909) «Υλισμός και Εμπειριοκριτικισμός» ,Άπαντα, τόμος 18

Moore Kelly (2008) *“Disrupting Science”*, Princeton University Press

Moore Kelly and Frickel Scott (2006), *“The New Political Sociology of Science”*, The University of Wisconsin Press

Psillos, S. (1999): *“Scientific Realism: How Science Tracks Truth”*. London: Routledge

Rhodes, R. (1986), *“The Making of Atomic Bomb”*, New York: Simon & Schuster

Rovelli, C.([2001]2005): *“Quantum Space time: What do we know”* στο C. Callender and N. Huggett (eds) *“Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity”* Cambridge: Cambridge University Press, Μετάφραση Β. Σακελαρίου, Επιμέλεια Α. Αραγεώργης

Schrödinger (1935): *“Proceedings of the Cambridge Philosophical Society”*, **31**,555

- Schilpp, P. A. ([1949]1970): *“Albert Einstein, Philosopher and Scientist”*, The Library of Living Philosophers,
- SELLERI, F. (1990): *“Quantum Paradoxes and Physical Reality”*, Kluwer
- SESPA Berkeley,(1972) *“Science against the People”*
- Shannon, C. and Weaver, W.(1948) *«Η μαθηματική θεωρία της πληροφορίας»*,
- Shih, Y. H.(2001) *“Quantum Entanglement and Quantum Teleportation”*,
Annals of Physics,
- Stuart, W. Leslie. (1993): *“The Cold War and American Science: The Military-Industrial-Academic Complex at MIT and Stanford”*,
Columbia University Press
- Svelto, Or. (1986): *«ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ LASERS»*, Συμμετρία, μτφρ
Σεραφεινίδης Α.Α, Κουρουκλής, Ε
- von NEUMANN, J.([1935]1955):*“Mathematical Foundations of Quantum Mechanics” Princeton Univ. Press.*
- Wilson, J. and Hawkes, F.B. J (2008), *«ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ: Μια εισαγωγή»*, ΠΕΚ, μτφρ Σεραφεινίδης, Α.Α.