

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ

ΖΑΧΑΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΘΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΦΥΣΙΚΟΣ

Αίγιο, Νοέμβριος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Υπό την αιγίδα του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος (Α.Τ.Ε.Ι) Δυτικής Ελλάδας του Τμήματος Οπτικής και Οπτομετρίας στο παράρτημα Αιγίου, παραθέτω την πτυχιακή μου εργασία με τίτλο: «Οπτικές παγίδες και οπτική σύζευξη». Επιβλέπων καθηγητής ορίστηκε ο κύριος Θανόπουλος Ιωάννης, Φυσικός. Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό την επεξήγηση του φαινομένου της οπτικής παγίδευσης και της οπτικής σύζευξης και μαζί με μια ιστορική αναδρομή και επισκόπηση των βασικών αρχών λειτουργίας, στόχος μου είναι να καταδείξω το ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων που καλύπτει σήμερα και τις εφαρμογές που βρίσκει στην σύγχρονη ιατρική.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η οπτική παγίδευση μικροσκοπικών σωματιδίων πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Arthur Ashkin και τα τελευταία 15 χρόνια έχει γνωρίσει μια σημαντική αναγνώριση σαν ερευνητικό αντικείμενο. Οι σημαντικές προκλήσεις του ικανοποιητικού χειρισμού διηλεκτρικών ή μεταλλικών σωματιδίων πολύ μικρών διαστάσεων τείνουν να αντιμετωπιστούν με την παροχή ολοένα και περισσότερων επιλογών στον σχετικό τεχνολογικό εξοπλισμό.

Οι εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης και της οπτικής σύζευξης καλύπτουν ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων, με ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος εφαρμογών στην Ιατρική και την Βιολογία. Στην εργασία αυτή επιχειρείται μια σύντομη επισκόπηση των βασικών αρχών λειτουργίας της οπτικής παγίδευσης και οπτικής σύζευξης, καθώς και η σύντομη αναφορά μερικών από τις πιο βασικές εφαρμογές τους.

Για την επίτευξη αυτού του σκοπού γίνεται χρήση της σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας, με προσπάθεια να δοθεί έμφαση στις πιο σύγχρονες βιβλιογραφικές αναφορές και ιδιαίτερα σε άρθρα επιστημονικών περιοδικών.

ABSTRACT

Optical trapping of microparticles held for the first time from Arthur Ashkin and for the last 15 years it had taken some important recognition as a research object. The important challenges for satisfactorily manipulating dielectric and metal particles tend to treat with the provision of more choices in the technological equipment.

The applications of optical trapping and optical coupling cover a wide range of scientific fields, notably on medicine and biology. In this thesis is attempted a short survey for the basic principles of optical trapping and optical coupling and a short reference for the most basic of their applications.

To achieve this objective is made use of the relative scientific bibliography, with an effort of giving emphasis on the most modern bibliographical references and notably on articles of scientific journals.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελίδα
ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	
1.1 Ιστορική αναδρομή	6
1.2 Αρχή λειτουργίας lasers	6
1.2.1 Μέρη της διάταξης laser	9
1.3 Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser	11
1.4 Κατηγορίες lasers	12
1.4.1 Laser αερίων	13
1.4.2 Laser υγρών	13
1.4.3 Laser στερεάς κατάστασης	13
1.4.4 Laser ημιαγωγών	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΠΤΙΚΗ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ	
2.1 Ορισμός	15
2.2 Ιστορική αναδρομή	15
2.3 Αρχή λειτουργίας	17
2.3.1 Προσέγγιση Mie	18
2.3.2 Προσέγγιση Rayleigh	20
2.4 Τυπική διάταξη οπτικής παγίδευσης	23
2.5 Μελλοντικές τάσεις	25
2.6 Οπτική σύζευξη	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ	
3.1 Φυσικές και χημικές εφαρμογές	30
3.2 Βιολογικές εφαρμογές	32
3.3 Συμπεράσματα	36
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER

Ο όρος οπτική παγίδευση αναφέρεται στη χειραγώγηση μικροσκοπικών σωματιδίων με τη χρήση ακτινοβολίας. Αν και ο θεωρητικός μηχανισμός της άσκησης δύναμης σε σωματίδια μικροσκοπικών διαστάσεων χρησιμοποιώντας την ορμή που μεταφέρουν τα φωτόνια εισήχθη πολύ νωρίτερα, η πρακτική εφαρμογή της κατέστη δυνατή με την εισαγωγή της ακτινοβολίας LASER. Αυτό οφείλεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας LASER, τα οποία την καθιστούν κατάλληλη για το χειρισμό σωματιδίων πολύ μικρών διαστάσεων. Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να προηγηθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών της ακτινοβολίας LASER και των κυριότερων ιδιοτήτων της.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά, η πρώτη αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας συσκευής LASER στο ορατό φως πραγματοποιήθηκε από τους Charles Hard Townes και Arthur Leonard Schawlow των εργαστηρίων Bell στο New Jersey των Η.Π.Α. (Chu & Townes, 2003). Η πρώτη συσκευή laser κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 1960 στα εργαστήρια Hughes Research Laboratories στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α, από τον Theodore H. Maiman (Rawicz & Holonyak, 2014).



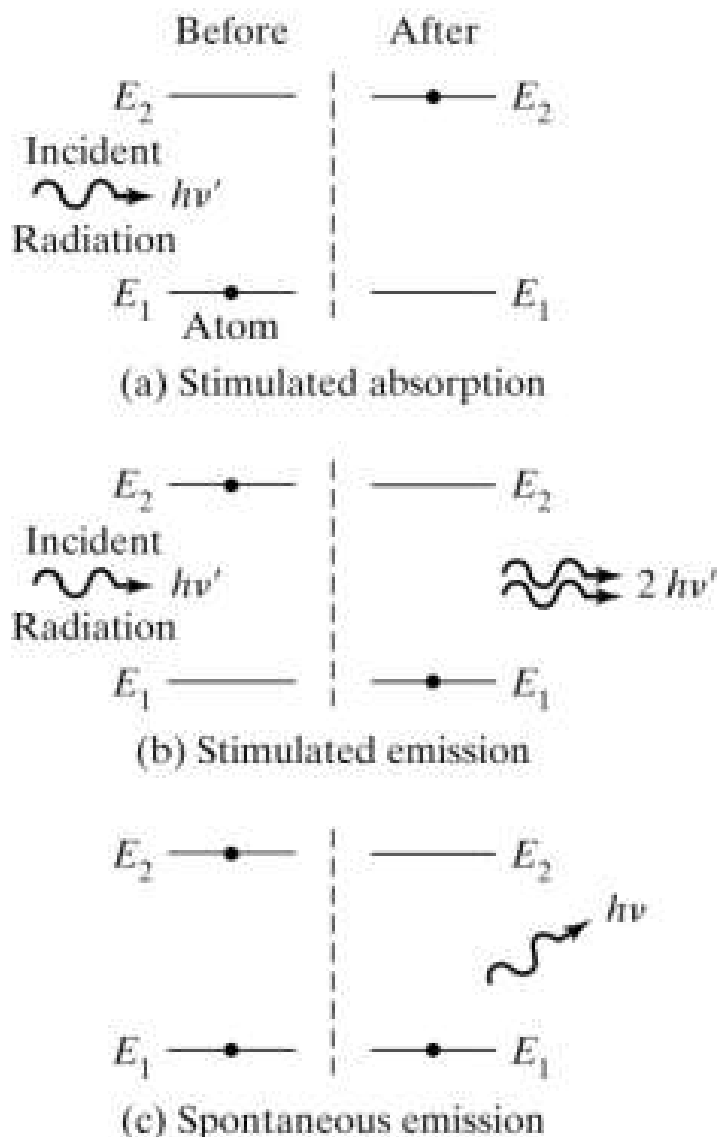
Εικόνα 1: Η πρώτη συσκευή laser (Rawicz & Holonyak, 2014)

Το θεωρητικό υπόβαθρο της ακτινοβολίας laser είχε χρησιμοποιηθεί προγενέστερα για την ενίσχυση ακτινοβολίας στην μικροκυματική περιοχή του φάσματος: Το πρώτο MASER (microwave amplification by stimulated emission of radiation) κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1950 από τον Townes και τους συνεργάτες του (Lindley, 2005). Η εισαγωγή της ακτινοβολίας LASER συνοδεύτηκε από σημαντικές εξελίξεις: τη δεκαετία του 1960 κατασκευάστηκε

το πρώτο διοδικό laser καθώς και τα πρώτα lasers αερίων και ημιαγωγών, ενώ τη δεκαετία του 1970 το πρώτο διοδικό laser συνεχούς λειτουργίας (Lindley, 2005). Οι ιδιότητες της ακτινοβολίας την κατέστησαν χρήσιμη σε ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο εφαρμογών, ενώ οι τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο της ακτινοβολίας LASER εξακολουθούν να σημειώνονται μέχρι τις μέρες μας με αμείωτο ρυθμό (Rawicz & Holonyak, 2014).

1.2 Αρχή λειτουργίας laser

Ο όρος LASER είναι ακρωνύμιο (light amplification by stimulated emission of radiation: ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Το θεωρητικό υπόβαθρο της ακτινοβολίας LASER αποδίδεται στους Planck και Einstein και την εργασία τους στην κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας. Τα άτομα που αποτελούν ένα υλικό μπορούν να βρίσκονται σε μια πληθώρα καταστάσεων, εκ των οποίων η κατάσταση ελάχιστης ενέργειας ονομάζεται θεμελιώδης και οι υπόλοιπες διεγερμένες. Τα βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση του φωτός από την ύλη είναι: η αυθόρμητη εκπομπή (spontaneous emission), η εξαναγκασμένη απορρόφηση (stimulated absorption) και η εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission). Κατά την αυθόρμητη εκπομπή, άτομο που βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση μεταπίπτει στη θεμελιώδη σε πολύ μικρό χρόνο (της τάξεως των 10^{-10} δευτερολέπτων) αποβάλλοντας την ενεργειακή διαφορά σαν φωτόνιο κατάλληλης συχνότητας (Πολύζος, 2012). Στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης απορρόφησης (εικόνα 2a) η ύλη προσλαμβάνει ενέργεια από την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία: το άτομο αρχικά βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση και, δεχόμενο φωτόνιο κατάλληλης συχνότητας, το απορροφά και μεταβαίνει σε υψηλότερη, διεγερμένη κατάσταση. Τέλος, στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής το άτομο βρίσκεται αρχικά σε διεγερμένη κατάσταση όταν δέχεται προσπίπτων φωτόνιο με ενέργεια ίση με την ενεργειακή διαφορά των δύο σταθμών (διεγερμένης - θεμελιώδους). Το άτομο θα μεταβεί στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνιο με ίδια χαρακτηριστικά με το προσπίπτων (κατεύθυνση, συχνότητα, φάση και πόλωση).



Εικόνα 2: Αλληλεπίδραση ύλης - ακτινοβολίας (Πολύζος, 2012)

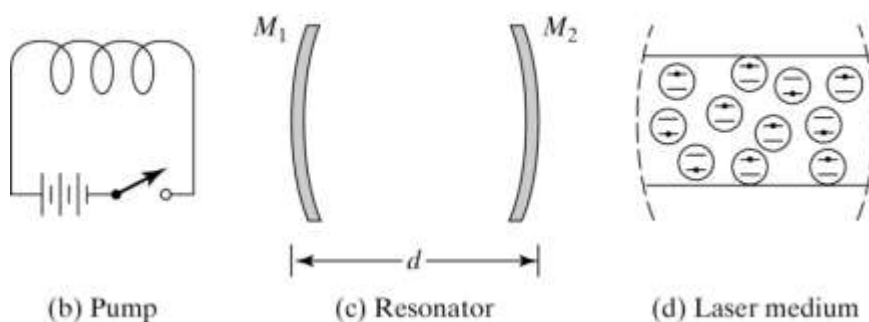
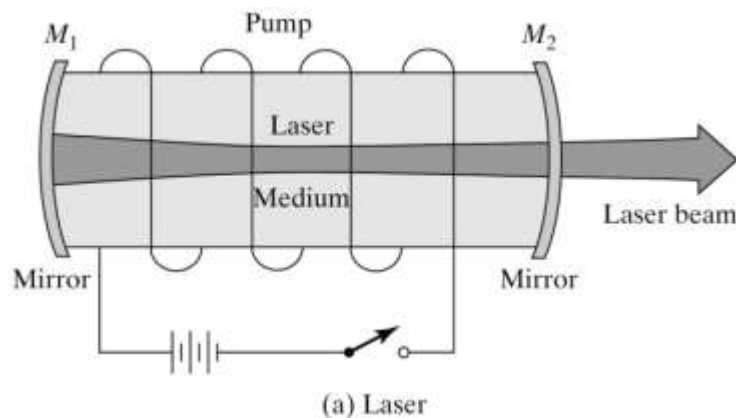
Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ακτινοβολίας LASER ξεκινά με την δημιουργία «αντιστροφής πληθυσμών» στο υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή LASER. Ο όρος αντιστροφή πληθυσμών αναφέρεται στην ύπαρξη δύο διακριτών ενεργειακών καταστάσεων ή σταθμών, εκ των οποίων η κατάσταση υψηλότερης ενέργειας διαθέτει και το μεγαλύτερο αριθμό ατόμων. Η αναστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται με την εξωτερική προσφορά ενέργειας στο υλικό, διαδικασία που ονομάζεται άντληση. Τα φωτόνια που εκπέμπονται λόγω του φαινομένου της αυθόρμητης εκπομπής ανάμεσα στις δύο ενεργειακές στάθμες εκκινούν την διαδικασία της εξαναγκασμένης απορρόφησης. Κατάλληλη οπτική κοιλότητα αποτελούμενη από δύο κάτοπτρα (οπτικό αντηχείο) εξαναγκάζει την συνεχώς αυξανόμενη δέσμη φωτονίων σε συνεχή περάσματα από το υλικό, μέχρι να προκύψει «κορεσμός κέρδους». Ο κορεσμός κέρδους προκύπτει από το ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής φωτονίων λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής, μειώνεται η αναστροφή πληθυσμών λόγω

της συνεχούς εκπομπής, μέχρι το κέρδος ανά διέλευση των φωτονίων στο υλικό να εξισωθεί με την απώλειες κατά τη διέλευση αυτή. Η συσκευή laser φτάνει έτσι σε μία σταθερή κατάσταση συνεχούς λειτουργίας, από όπου με τη βοήθεια του ενός (ημιπερατού) κατόπτρου του αντηχείου μπορεί να μεταφέρεται ένα σταθερό ποσοστό του φωτός laser στο εξωτερικό της συσκευής (Πολύζος, 2012).

1.2.1 Μέρη της διάταξης laser

Μια τυπική διάταξη laser αποτελείται από:

- Το ενεργό υλικό
- Το οπτικό αντηχείο
- Τη διάταξη άντλησης
- Το σύστημα ψύξης



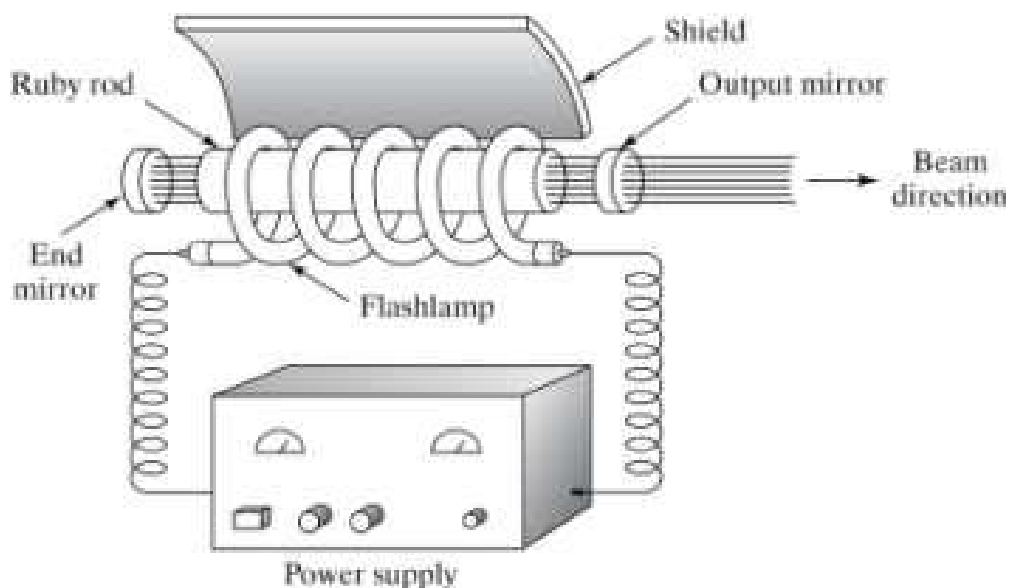
Εικόνα 3: Βασικά μέρη μιας διάταξης laser (Πολύζος, 2012)

Το ενεργό υλικό (laser medium) είναι το υλικό, τα άτομα του οποίου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ακτινοβολίας μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής. Η καταλληλότητα του υλικού για παραγωγή ακτινοβολίας laser, καθορίζεται, μεταξύ άλλων, από την ευκολία με την οποία μπορεί να επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμών. Το ενεργό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη διάταξη laser ήταν στερεό ρουμπίνι (Chu & Townes, 2003), ενώ πλέον χρησιμοποιείται μια πληθώρα στερεών, υγρών ή

αέριων υλικών, καθώς και ημιαγωγοί, δίοδοι ή κρύσταλλοι με κατάλληλες προσμίξεις (Lindley, 2005)

Το οπτικό αντηχείο ή οπτική κοιλότητα (resonator) της διάταξης laser αποτελείται, στην πιο απλή μορφή του, από δύο κάτοπτρα υπό γωνία Brewster, εκ των οποίων το ένα είναι 100% αντανακλαστικό και το άλλο ημιπερατό. Το σύστημα των κατόπτρων εξαναγκάζει τη δέσμη σε συνεχείς διελεύσεις κατά μήκος του ενεργού υλικού με αποτέλεσμα τη συνεχή ενίσχυσή της λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής, μέχρι να επιτευχθεί κορεσμός. Το οπτικό αντηχείο λειτουργεί και σαν φίλτρο συχνοτήτων, επιτρέποντας την ενίσχυση συγκεκριμένων συχνοτήτων των φωτονίων που ονομάζονται κανονικοί τρόποι ταλάντωσης (Πολύζος, 2012).

Η διάταξη άντλησης είναι η εξωτερική πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί το ενεργό υλικό με σκοπό την επίτευξη της απαραίτητης για τη λειτουργία του laser αναστροφής πληθυσμών. Η προσφορά ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, π.χ. με χρήση ηλεκτρικής πηγής, οπτικά με χρήση flash (λαμπτήρα εκλάμψεων) ή άλλου laser, χημικά, θερμικά κ.α. Στην πρώτη διάταξη laser χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας εκλάμψεων για την επίτευξη άντλησης σε συνθετικό κρύσταλλο ρουβιδίου, παράγοντας κόκκινο φως μήκους κύματος 694 nm ($1\text{nm} = 1 \cdot 10^{-9}\text{m}$) (Rawicz & Holonyak, 2014).



Εικόνα 4: Οπτική άντληση με flash σε laser Ρουβιδίου (Πολύζος, 2012)

Το σύστημα ψύξης είναι υπεύθυνο για την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας από την διάταξη laser και την αποφυγή της καταστροφής της. Αν και στα lasers χαμηλής ισχύος δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστήματος ψύξης (ή η ψύξη επιτυγχάνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα), συνήθως στα

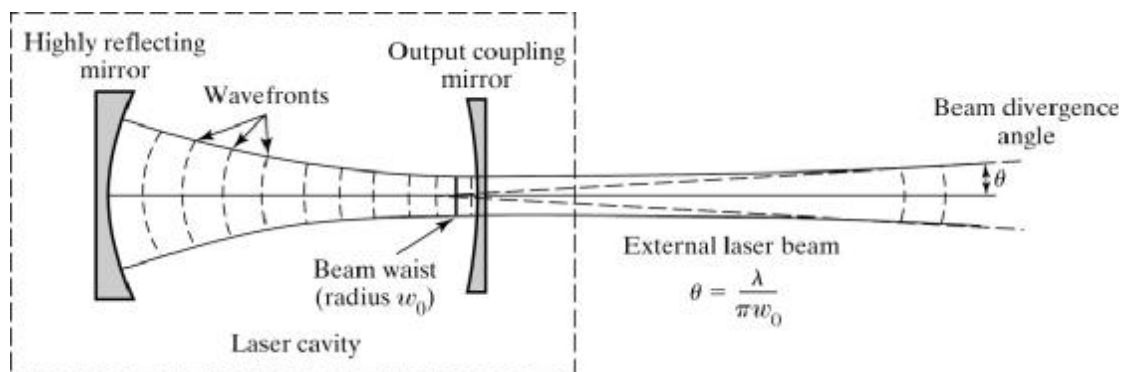
Lasers με στερεά ή και κάποια υγρά και αέρια ενεργά υλικά χρησιμοποιείται ψυκτικό περίβλημα με νερό ή ψυκτικό έλαιο (Πολύζος, 2012).

1.3 Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας laser ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την εκτεταμένη διάδοση της. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από συμβατικές πηγές (το φως του ήλιου ή κοινών λαμπτήρων) αποτελείται από φωτόνια πολλών και διαφορετικών μηκών κύματος που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένη σχέση μεταξύ των φάσεών τους (Κόττου, 2009). Σε αντιδιαστολή το φως μιας πηγής laser παρουσιάζει υψηλή:

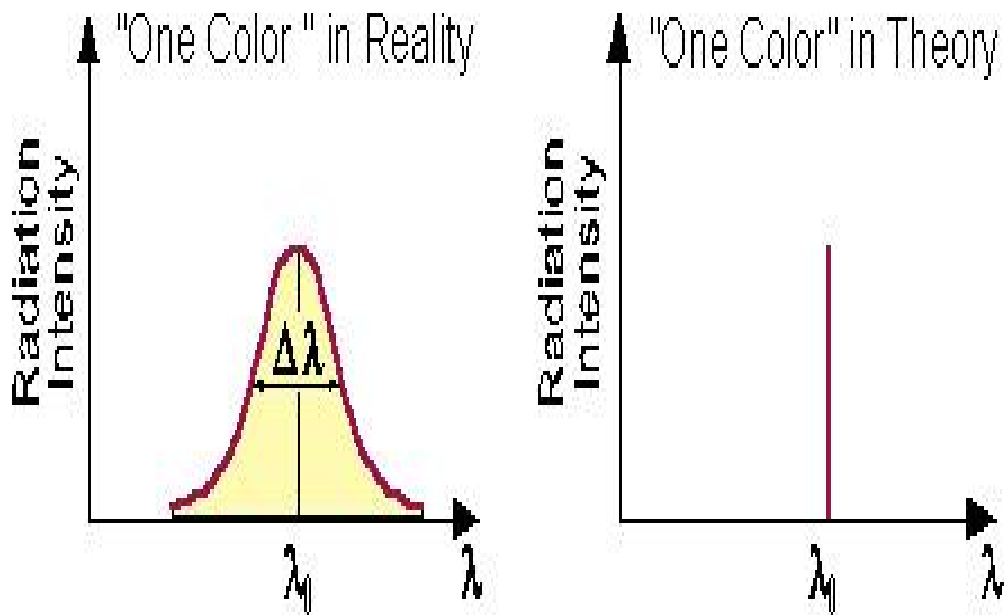
- Κατευθυντικότητα
- Μονοχρωματικότητα
- Συμφωνία
- Ένταση ακτινοβολίας
- Πόλωση

Η δέσμη που εξέρχεται από μια συσκευή laser διαχέεται σε πολύ μικρότερο βαθμό από ότι στις συμβατικές πηγές φωτός. Η γωνία απόκλισης της δέσμης είναι η γωνία μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας της δέσμης και στην περίπτωση του laser μπορεί να είναι της τάξεως των μερικών μrad ($1\mu\text{rad}=10^{-6}\text{rad}$).



Εικόνα 5: Η γωνία απόκλισης μιας ακτίνας laser (Πολύζος, 2012)

Το φως laser αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση στο (θεωρητικό) μονοχρωματικό φως. Στην πράξη το φως από μια πηγή laser έχει ένα σύνολο τιμών μήκους κύματος σε μια πολύ στενή περιοχή γύρω από μια κεντρική τιμή



Εικόνα 6: Πραγματική και θεωρητική μονοχρωματική ακτινοβολία (Κόττου, 2009)

Αποτέλεσμα της ομοιότητας προσπίπτοντος – εκπεμπόμενου φωτονίου στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι και η υψηλή συμφωνία (μικρή διαφορά φάσης) μεταξύ των φωτονίων της δέσμης laser. Επιπλέον, λόγω της ομοιότητας αυτής όσο και λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας της δέσμης, το φως των lasers υπερτερεί σημαντικά σε ένταση ακτινοβολίας σε σχέση με το φως από συμβατικές πηγές.

Σε αντίθεση με το φυσικό (μη πολωμένο) φως, το φως από τις περισσότερες διατάξεις laser μπορεί να πολωθεί με κατάλληλη χρήση του οπτικού αντηχείου.

1.4 Κατηγορίες lasers

Σύγχρονες διατάξεις laser εκπέμπουν ακτινοβολία σε μια μεγάλη γκάμα ισχύος και σε μήκη κύματος που εκτείνονται από το υπέρυθρο ως την περιοχή των ακτίνων X. Η ταξινόμηση των διατάξεων laser γίνεται βάσει:

- Του ενεργού υλικού (π.χ. lasers αερίων ή στερεάς κατάστασης)
- Της μεθόδου άντλησης (π.χ. οπτικής ή ηλεκτρικής εκκένωσης)
- Της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (π.χ. lasers υπέρυθρου, ορατού ή ακτίνων X)
- Των ενεργειακών επιπέδων που χρησιμοποιούνται (π.χ. τριών ή τεσσάρων επιπέδων)

1.4.1 Laser αερίων

Στα lasers αερίων (gas lasers) το ενεργό υλικό είναι αέριο ή μίγμα αερίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατάλληλη μέθοδος άντλησης είναι οι ηλεκτρικές εκκενώσεις και η προσφορά ενέργειας στα άτομα, μόρια ή ιόντα του μέσου γίνεται μέσω των συγκρούσεων με τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια. Σήμερα τα διαθέσιμα lasers αερίων καλύπτουν μια περιοχή μηκών κύματος που εκτείνεται από το υπεριώδες στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Paschotta, 2008). Ίσως το πιο διαδεδομένο laser αερίου είναι το laser HeNe (ηλίου-νέου) το οποίο μπορεί να εκπέμψει σε πολλά μήκη κύματος (632.8nm, 543.5nm, 593.9nm, 611.8nm, 1.1523μm, 1.52μm, 3.3913μm) και χρησιμοποιείται συχνά στην ολογραφία, στην συμβολομετρία, την φασματοσκοπία και στους ανιχνευτές barcode (Kartner, 2006). Πολύ διαδεδομένα lasers αερίων είναι και τα lasers CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα), Ar ή Kr-ιον (ιόντων Αργού ή Κρυπτού) καθώς και τα excimer lasers (διεγερμένων διμερών). Τα lasers αερίων έχουν ευρύτατες βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές

1.4.2 Laser υγρών

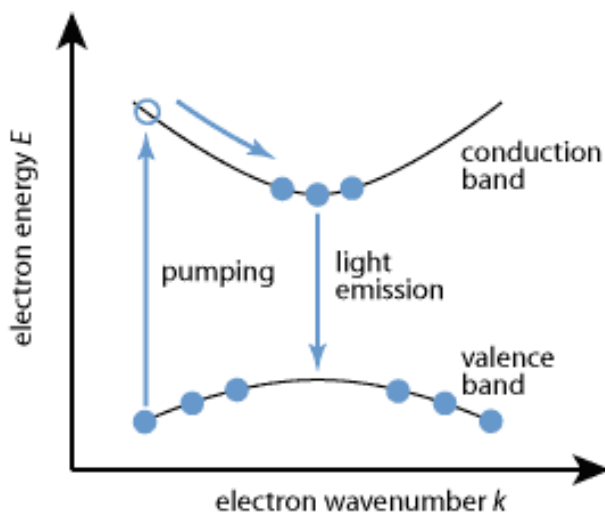
Το ενεργό υλικό των lasers υγρών (dye lasers) είναι οργανική χρωστική διαλυμένη σε μεθυλική αλκοόλη, γλυκερόλη ή νερό. Η χρωστική μπορεί να αντληθεί εκπέμποντας σε μια συνεχή περιοχή μηκών κύματος. Χαρακτηριστικές χρωστικές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή laser είναι η ροδαμίνη (που εκπέμπει ακτινοβολία με μήκος κύματος στην περιοχή 570-640 nm), το στιλβένιο (390-435nm) ή η κουμαρόνη (460-515nm). Το βασικό πλεονέκτημα των lasers υγρών είναι ότι μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να εκπέμπουν σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, αν και οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες χρωστικές είναι καρκινογόνες (Kartner, 2006). Η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας εκπομπής των lasers υγρών τα κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμα στην έρευνα ενώ έχουν και αρκετές ιατρικές εφαρμογές (Κόττου, 2009).

1.4.3 Laser στερεάς κατάστασης

Στα lasers στερεάς κατάστασης (solid state lasers) το ενεργό υλικό προκύπτει από έγχυση ιόντων σε κατάλληλο υποδοχέα. Είναι συνήθως κρύσταλλος κυλινδρικού ή παραλληλεπίπεδου σχήματος, στον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εισέρχεται από τη μία παράπλευρη επιφάνεια και η ακτινοβολία laser εξέρχεται από τη βάση (Κόττου, 2009). Τα ιόντα της πρόσμιξης είναι υπεύθυνα για την εκπομπή laser και είναι συνήθως ιόντα μεταπτωσηκών μετάλλων ή σπάνιων γαιών (Paschotta, 2008). Πολύ γνωστά lasers στερεός κατάστασης είναι το laser Nd:YAG (Neodymium Yttrium-Aluminium Garnet Y₃Al₅O₁₂) και το πρώτο ιστορικά laser Ruby (Ρουβινίου), στο οποίο το ενεργό υλικό προκύπτει από έγχυση ιόντων χρωμίου (Cr⁺³) στον συνθετικό κρύσταλλο του ρουβινίου (Al₂O₃) (Kartner, 2006).

1.4.4 Laser ημιαγωγών

Αν και τυπικά είναι υποκατηγορία των lasers στερεάς κατάστασης, τα lasers ημιαγωγών (semiconductor lasers) συνήθως αντιμετωπίζονται σαν ξεχωριστή κατηγορία διάταξης LASER (Κόττου, 2009). Το ενεργό υλικό είναι ημιαγωγίμο, και η εξαναγκασμένη εκπομπή λαμβάνει χώρα σε κατάσταση υψηλής συγκέντρωσης φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) σε σχέση με τη ζώνη σθένους (valence band).



Εικόνα 7: Εξαναγκασμένη εκπομπή σε ημιαγωγό (Paschotta, 2008)

Τυπικά υλικά lasers ημιαγωγών είναι οι ενώσεις GaAs (γαλλίου με αρσενικό) και InP (ινδίου με φωσφόρο). Τα lasers ημιαγωγών είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα lasers, αφού χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στην ανάγνωση των δίσκων CD/DVD, ενώ είναι εύκολη η μαζική και φθηνή παραγωγή τους (Kartner, 2006).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο της ακτινοβολίας LASER συνεχίζονται μέχρι τις μέρες μας. Νεότεροι τύποι διατάξεων laser όπως π.χ. τα lasers ελεύθερων ηλεκτρονίων (free electron lasers) ή τα lasers ακτίνων X (X-ray lasers) προσφέρουν διαφορετικά και ζητούμενα χαρακτηριστικά της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Κόττου, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΟΠΤΙΚΗ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ

2.1 Ορισμός

Ο όρος «οπτική παγίδευση» (optical trapping) αναφέρεται στην δημιουργία δυνάμεων τάξης μερικών picoNewton ($1 \text{ pN} = 10^{-12} \text{ N}$) με την χρήση μίας ή περισσότερων δεσμών laser, για τον χειρισμό σωματιδίων μικροσκοπικών διαστάσεων. Οι δυνάμεις αυτές είναι ικανές για τον χειρισμό σωματιδίων που οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από μερικά νανόμετρα ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ως μερικές δεκάδες μικρόμετρα ($1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) (Στυλιανού, 2006). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι δυνάμεις από 0,2 ως 200 pN, είναι αρκετές για τον χειρισμό ενός σωματιδίου διαμέτρου $1 \text{ }\mu\text{m}$ (Κατελούζος, 2010). Αρκετές φορές χρησιμοποιείται ισοδύναμα ο όρος «οπτικές λαβίδες» (optical tweezers).

2.2 Ιστορική αναδρομή

Ενώ η χρήση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια προκαλεί την άσκηση δυνάμεων ικανοποιητικού μεγέθους σε αυτά, η άσκηση ικανοποιητικών δυνάμεων σε ηλεκτρικά ουδέτερα σωματίδια εμφανίζει σημαντικές τεχνικές δυσκολίες. Η κίνηση φορτισμένων σωματιδίων με την εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων πραγματοποιείται για περισσότερο από μισό αιώνα, ενώ η μετακίνηση ουδέτερων σωματιδίων σε ικανοποιητικές αποστάσεις έχει επιτευχθεί μόλις τα τελευταία χρόνια (Μαρίνου, 2006).

Ιστορικά, η χρήση μαγνητικών πεδίων για τον έλεγχο ουδέτερων σωματιδίων προηγήθηκε της χρήσης της ακτινοβολίας laser κατά μία δεκαετία περίπου: η πρώτη μαγνητική παγίδα εφαρμόστηκε το 1978 για τον εγκλωβισμό νετρονίων σε μαγνητικό πεδίο από τον Wolfgang Paul του πανεπιστημίου της Βόννης και τους συνεργάτες του, ενώ αργότερα η μαγνητική παγίδα χρησιμοποιήθηκε για την παγίδευση ατόμων από την ομάδα του William D. Phillips (Κατελούζος, 2010). Η παγίδευση με την χρήση μαγνητικών πεδίων περιορίζεται σε σωματίδια που έχουν μαγνητική διπολική ροπή. Η βασική αρχή λειτουργίας μιας μαγνητικής παγίδας έγκειται στην εφαρμογή ενός χωρικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο μαγνητικό δίπολο, το οποίο θα κινηθεί προς την κατεύθυνση στην οποία η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται (ή μειώνεται ανάλογα με τον αρχικό προσανατολισμό του πεδίου). Ο Paul και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν μαγνητικό πεδίο που παρουσίαζε ένα τοπικό ελάχιστο της έντασης του, και κατάφεραν επιτυγχάνοντας κατάλληλο αρχικό προσανατολισμό του δίπολου, να παραμείνει προσανατολισμένο στην περιοχή της ελάχιστης έντασης (Κατελούζος, 2010).

Η χρησιμοποίηση της ορμής που μεταφέρεται από τα φωτόνια για την άσκηση οπτικής δύναμης σε υλικά σώματα αποδίδεται αρχικά στον Kepler και τις παρατηρήσεις του σχετικά με τον προσανατολισμό της ουράς των κομητών μακριά από τον Ήλιο σε όλα τα σημεία της τροχιάς τους, στην εργασία «De cometis libelli tres» το 1619 (Stevenson et al, 2010). Ο Kepler επιβεβαιώθηκε αργότερα από τον Maxwell, ο οποίος επισήμανε πως η εξασκούμενη δύναμη σε μακροσκοπικά σωματίδια είναι πολύ μικρή κατά την απορρόφηση ή διάθλαση φωτός από συμβατικές πηγές (Κατελούζος, 2010). Ενώ όμως η άσκηση δύναμης από τα φωτόνια παίζει σημαντικό ρόλο στην αστρονομία, όπου οι αποστάσεις αλλά και οι εντάσεις της ακτινοβολίας είναι μεγάλες, η εφαρμογή αυτής της αρχής στον μικρόκοσμο κατέστη δυνατή μόνο με την εισαγωγή των lasers τη δεκαετία του 1960.

Τα θεμέλια της οπτικής παγίδευσης αποδίδονται στην εργασία του Arthur Ashkin και των συνεργατών του στα AT&T Bell Labs στο New Jersey των Η.Π.Α. (Dholakia & Reece, 2006). Στα αρχικά πειράματα του Ashkin χρησιμοποιήθηκε ορατή ακτινοβολία laser ιόντων αργού σε σφαιρίδια διαστάσεων μερικών μικρομέτρων βυθισμένα σε υγρό: ο Ashkin παρατήρησε ότι τα σφαιρίδια συγκεντρώθηκαν στην διεύθυνση διάδοσης της δέσμης laser, και η πίεση της ακτινοβολίας τα ωθούσε προς την κατεύθυνση διάδοσής της (Stevenson et al, 2010). Προσθέτοντας μία δεύτερη πηγή laser ανάλογης ισχύος στην αντίθετη κατεύθυνση, ο Ashkin πέτυχε να παγιδεύσει τα σφαιρίδια στο χώρο. Η επίτευξη πίεσης ακτινοβολίας ικανής να υπερνικήσει τη συνήθως σημαντικότερη ραδιομετρική (θερμική) επίδραση του φωτός στην ύλη, βασίστηκε στη χρησιμοποίηση σχετικά διαφανών υλικών σε διαφανές μέσο (Molloy & Padgett, 2002). Μετά από τη μελέτη της διάταξης των δύο ακτίνων, οι Ashkin και Dziedzic πειραματίστηκαν με την εξισορρόπηση των βαρυτικών δυνάμεων με χρήση laser σε κοίλες και γυάλινες σφαίρες χρησιμοποιώντας δακτυλιοειδή οπτικά πεδία στην περίπτωση των κοίλων σφαιρών λόγω του μειωμένου δείκτη διάθλασής τους σε σχέση με το περιβάλλον υλικό (Gahagan & Swartzlander, 1996). Καθοριστικός σταθμός στην ανάπτυξη της οπτικής παγίδευσης θεωρείται η δημοσίευση της εργασίας του Ashkin και των Dziedzic, πάνω στην οπτική παγίδευση σωματιδίων με τη χρήση οπτικής παγίδας βαθμίδας μοναδικής δέσμης (single-beam gradient force optical trap) το 1986.



Εικόνα 8: Ο Arthur Ashkin θεωρείται ο εισηγητής της οπτικής παγίδευσης (Optical Society of America, 2014)

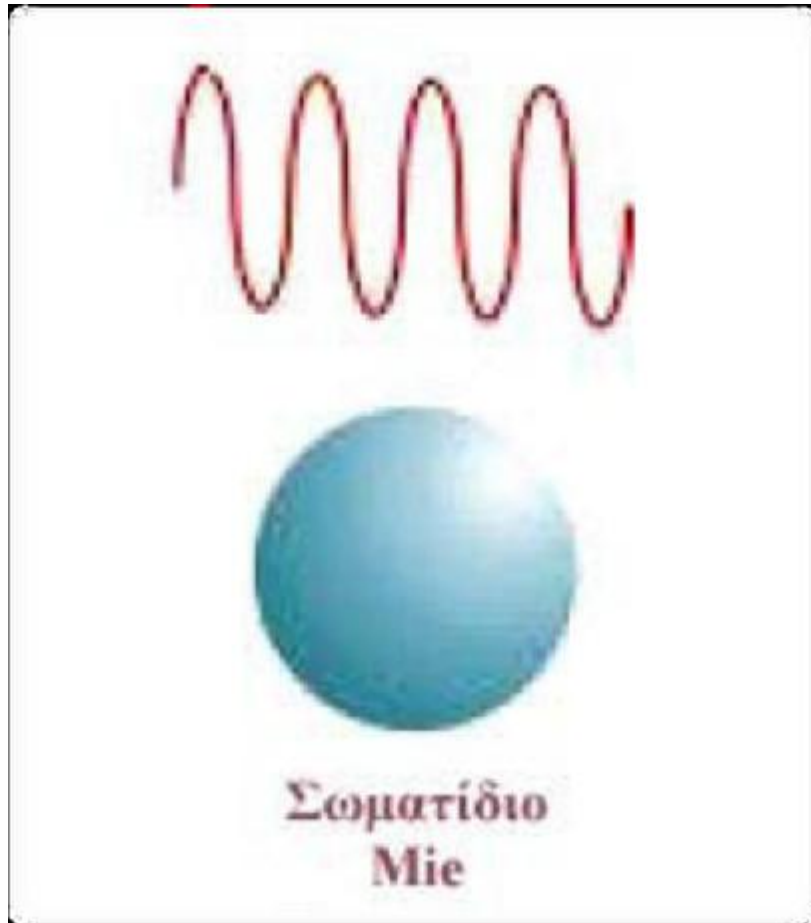
Η οπτική παγίδα βαθμίδας μοναδικής δέσμης (στην οποία συγκεκριμένα αντιστοιχεί και ο πιο διαδεδομένος όρος οπτικές λαβίδες) έχει καθιερωθεί ως η κύρια μέθοδος εφαρμογής οπτικής δύναμης για τον έλεγχο μικροσκοπικών σωματιδίων και αναγνωρίζεται ως η μέθοδος με το μεγαλύτερο αντίκτυπο στο χώρο του οπτικού χειρισμού μικροσωματιδίων και της βιοφωτονικής (Stevenson et al, 2010).

2.3 Αρχή λειτουργίας

Η οπτική παγίδευση βασίζεται στην άσκηση δύναμης στο διηλεκτρικό σωματίδιο από την μεταβολή της ορμής που επιφέρει η ακτινοβολία του με laser. Στην περίπτωση που ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου είναι μεγαλύτερος του δείκτη διάθλασης του περιβάλλοντος υγρού η δύναμη τείνει να μετακινήσει το σωματίδιο στο κέντρο της ακτίνας. Ο προσδιορισμός της δύναμης στο σωματίδιο εξαρτάται από τις διαστάσεις του σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Διακρίνονται δύο βασικές περιπτώσεις.

2.3.1 Προσέγγιση Mie

Στην περίπτωση που η οπτική παγίδευση χρησιμοποιείται σε σωματίδια με διαστάσεις μερικών μικρομέτρων, επομένως πολύ μεγαλύτερες του μήκους κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας laser.



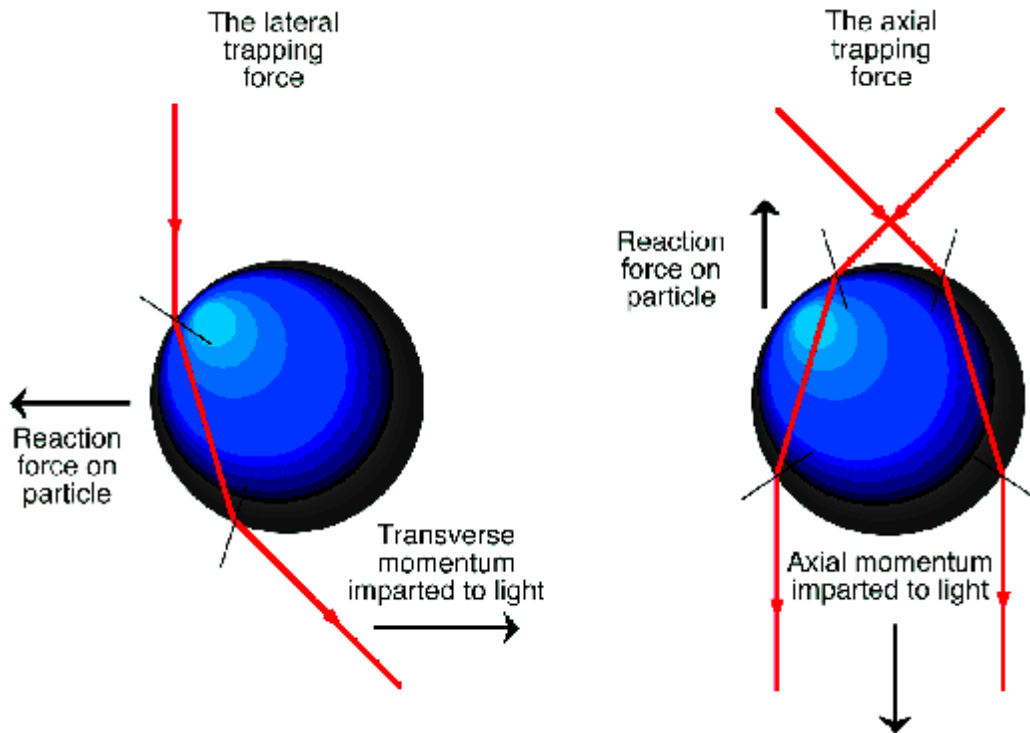
Εικόνα 9: Σωματίδιο Mie με διαστάσεις μεγαλύτερες του μήκους κύματος της ακτινοβολίας laser (Κατελούζος, 2010)

Στην περίπτωση αυτή ο προσδιορισμός της δύναμης στο σωματίδιο βασίζεται στις αρχές της γεωμετρικής οπτικής. Δεδομένου ότι κάθε φωτόνιο της δέσμης μεταφέρει ορμή P , που δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

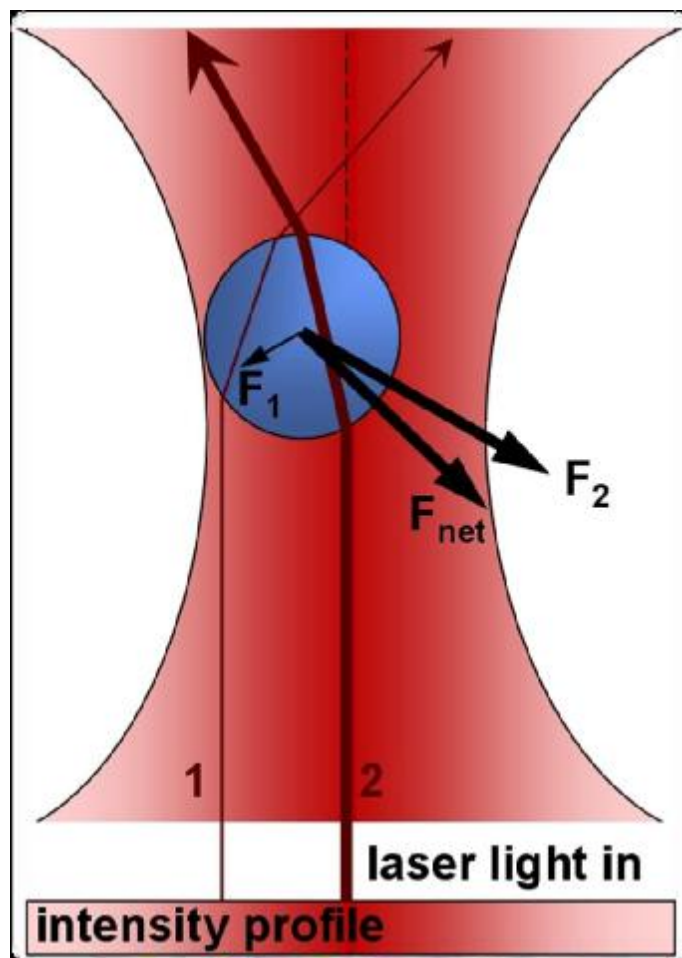
Όπου λ το μήκος κύματος του φωτονίου και h η σταθερά του Planck. Η διάθλαση του φωτονίου σε ένα διαφανές σωματίδιο έχει ως συνέπεια την μεταβολή της ορμής του φωτονίου και την άσκηση ανάλογης δύναμης στο σωματίδιο (δύναμη βαθμίδας ή gradient force). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει και τον υπολογισμό των δυνάμεων από ανάκλαση ή σκέδαση στο σωματίδιο (δύναμη σκέδασης ή scattering force), όμως καθώς το σωματίδιο βρίσκεται συνήθως σε υγρό με παρόμοιο δείκτη διάθλασης, οι δυνάμεις αυτές είναι μικρές και σε μεγάλο βαθμό αγνοούνται (Molloy & Padgett, 2002). Παρακάτω

φαίνεται αυτή η βασική αρχή: αριστερά η πλευρική (lateral) μεταβολή της ορμής του φωτονίου προς τα δεξιά έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση δύναμης προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στο δεξιό τμήμα της εικόνας φαίνεται η πορεία δύο ακτινών της δέσμης κατά την διάθλαση τους από το σωματίδιο, η αξονική (axial) μεταβολή της ορμής του φωτονίου έχει κατεύθυνση προς τα κάτω και έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση δύναμης προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 10: Σωματίδιο Mie με διαστάσεις μεγαλύτερες του μήκους κύματος της ακτινοβολίας laser (Molloy & Padgett, 2002)

Θεωρώντας ότι η ένταση ακτινοβολίας σε μια διατομή της ακτίνας αυξάνεται από τα άκρα προς το κέντρο, η ασκούμενη δύναμη βαθμίδας τείνει να μεταφέρει το σωματίδιο προς το κέντρο της ακτίνας όπου η ένταση ακτινοβολίας μεγιστοποιείται. Χρησιμοποιώντας ισχυρά εστιασμένη δέσμη που προσπίπτει στο σωματίδιο από πάνω, μπορεί να επιτευχθεί δύναμη βαθμίδας με φορά προς τα πάνω η οποία τείνει να μεταφέρει το σωματίδιο στην εστία, δημιουργώντας έτσι μια παγίδα στο χώρο. Δύο αντιπροσωπευτικές ακτίνες της δέσμης έχουν ως αποτέλεσμα την άσκηση των δυνάμεων F_1 και F_2 στο διαπερατό σωματίδιο. Η συνισταμένη δύναμη σε αυτό έχει την κατεύθυνση της βαθμίδας του πεδίου όσο ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου είναι μεγαλύτερος αυτού του περιβάλλοντος του. Η παγίδευση του σωματιδίου επιτυγχάνεται με την εξισορρόπηση των δυνάμεων βαθμίδας και σκέδασης.



Εικόνα 11: Δύναμη από δέσμη laser σε σωματίδιο Mie (Κατελούζος, 2010)

2.3.2 Προσέγγιση Rayleigh

Στην περίπτωση σωματιδίων με πολύ μικρότερες του μήκους κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας laser (προσέγγιση Rayleigh) η γεωμετρική οπτική δεν δίνει τόσο ακριβή αποτελέσματα, αλλά είναι προτιμότερη η θεώρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο που βρίσκεται το σωματίδιο. Η παγίδευση διηλεκτρικών ή μεταλλικών σωματιδίων με διαστάσεις που ξεκινούν από μερικές δεκάδες νανόμετρα έχει πραγματοποιηθεί επανειλημμένως σε σχετικά πειράματα. Η δύναμη βαθμίδας που προκαλείται από το πεδίο κοντά στην εστία υπακούει στη σχέση:

$$F_{grad} = -\frac{n^3 r^3}{2} \frac{\partial N^2}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N^2}{\partial} \right) (E^2) \quad (2) \text{ (Molloy and Padgett, 2002)}$$

Όπου n ο δείκτης διάθλασης του σφαιρικού σωματιδίου ακτίνας, E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και N ο σχετικός δείκτης διάθλασης σωματιδίου – περιβάλλοντος υλικού. Η δύναμη βαθμίδας έχει κατεύθυνση προς το σημείο μεγιστοποίησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

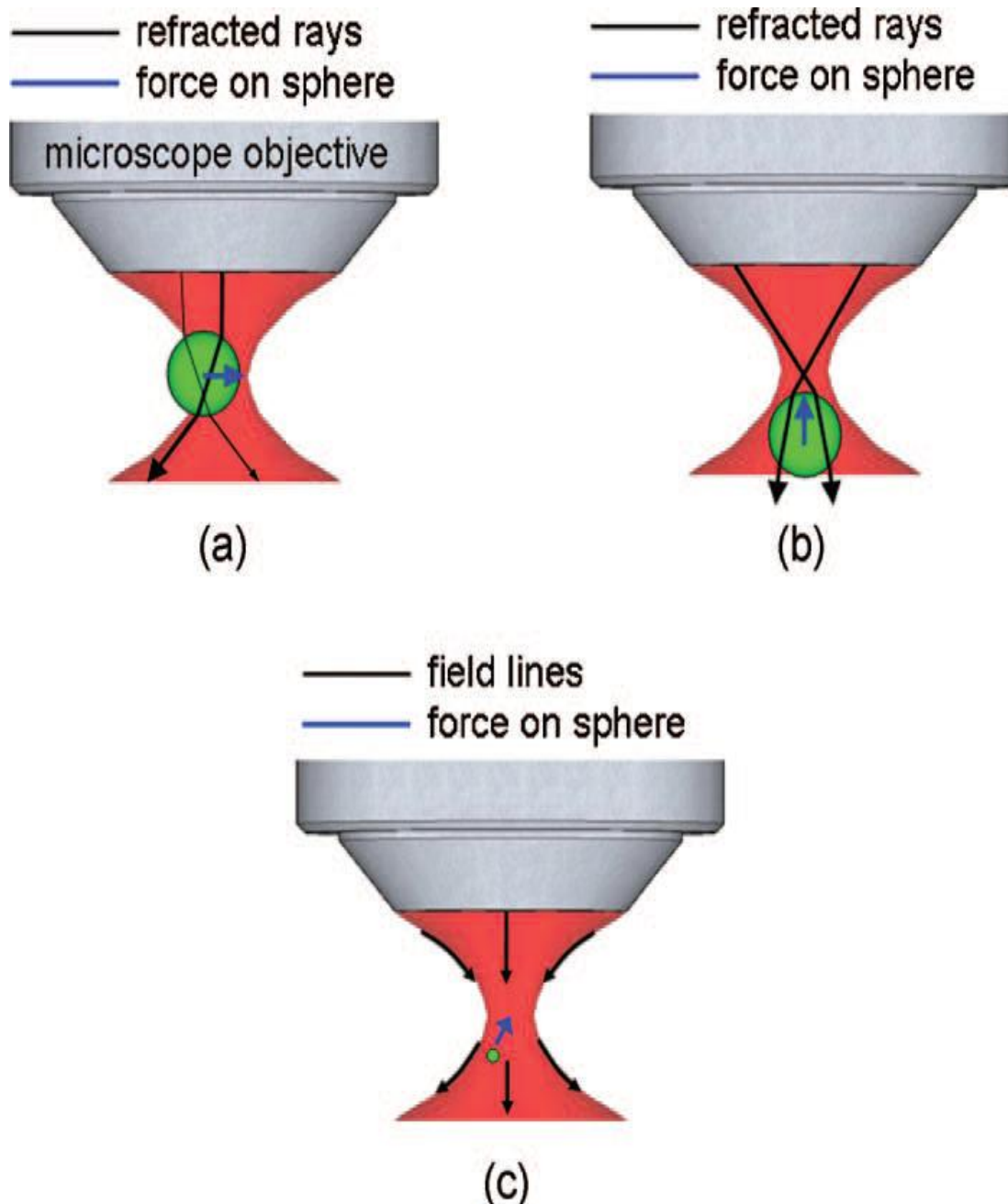
Η δύναμη σκέδασης θα δίνεται από τη σχέση Molloy:

$$F_{scat} = \frac{I_0 128 \rho^5 r^6}{c 3l^4} \frac{\frac{2}{3} N^2 - 1}{\frac{2}{3} N^2 - 2} \frac{\frac{2}{3} n^2}{\frac{2}{3} n} \quad (3)$$

Όπου I_0 η ένταση της ακτινοβολίας. Η δύναμη σκέδασης έχει διεύθυνση κάθετη στα κυματομέτωπα του προσπίπτοντος φωτός επομένως ωθεί το αντικείμενο προς τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας.

Το σημείο παγίδευσης θα βρίσκεται κοντά, κάτω από το σημείο εστίασης της δέσμης, αφού η δύναμη βαθμίδας έχει κατεύθυνση προς την εστία, ενώ η δύναμη σκέδασης προς την κατεύθυνση διάδοσης της δέσμης. Η παγίδευση επιτυγχάνεται όσο η δύναμη βαθμίδας υπερτερεί της δύναμης σκέδασης, όμως εφόσον και οι δύο δυνάμεις αυξάνονται γραμμικά με την ένταση της ακτινοβολίας, αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας την ένταση της δέσμης laser. Η παγίδευση επιτυγχάνεται με την υψηλή εστίαση της δέσμης και για αυτό το λόγο απαιτείται φακός με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture: NA).

Παρακάτω παρατηρείται η συνισταμένη δύναμη που τείνει να παγιδεύσει σωματίδια Mie και Rayleigh στο σημείο εστίασης της δέσμης. Με μπλε βέλη είναι η δύναμη στα σωματίδια Mie με κατεύθυνση κάθετη και παράλληλη στην διάδοση της δέσμης αντίστοιχα, τείνει να τα επαναφέρει στο σημείο εστίασης. Στη συνέχεια η δύναμη επαναφοράς ασκείται σε σωματίδιο Rayleigh. Σε γενικές γραμμές η δέσμη «σπρώχνει» τα σωματίδια προς την κατεύθυνση διάδοσής της και τα «τραβά» προς τον άξονα συμμετρίας της. Η ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ της παγίδευσης σωματιδίων Mie και Rayleigh έγκειται στην εξάρτηση της δύναμης από την ακτίνα του σωματιδίου. Στην προσέγγιση Rayleigh η δύναμη είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ακτίνας ενώ στην προσέγγιση Mie είναι ανεξάρτητη αυτής. Στην περίπτωση σωματιδίων με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας laser, η εξάρτηση της δύναμης βαθμίδας βρίσκεται μεταξύ αυτών των δύο άκρων (Κατελούζος, 2010). Τα παραπάνω ισχύουν για δέσμη με κατανομή έντασης.



Εικόνα 12: Παγίδευση σωματιδίων Mie (a,b) και Rayleigh (c) (Stevenson et al, 2010)

Η παραπάνω ανάλυση αναφερόταν σε σωματίδια με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο αυτού του περιβάλλοντος υλικού. Σε σωματίδια με μικρότερο δείκτη διάθλασης (όπως κοίλα σφαιρίδια ή φυσαλίδες) η κατεύθυνση της δύναμης σκέδασης είναι αντίθετη και τείνει να απομακρύνει το σωματίδιο από το σημείο μεγιστοποίησης της ηλεκτρικής έντασης. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παγίδευση σωματιδίων με μικρότερους δείκτες διάθλασης (Molloy & Padgett, 2002).

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η πλειονότητα των πειραμάτων οπτικής παγίδευσης πραγματοποιείται στην ενδιάμεση περιοχή μεταξύ Mie και Rayleigh, δηλαδή σε σωματίδια με μήκος κύματος συγκρίσιμο με αυτό της

ακτινοβολίας (Stevenson et al, 2010). Σε αυτή την περίπτωση η δύναμη που ασκείται από το πεδίο σε ένα άκαμπτο σωματίδιο βρίσκεται με τη βοήθεια του τανυστή $\overset{\mathbf{t}}{T}(r,t)$ των τάσεων του Maxwell:

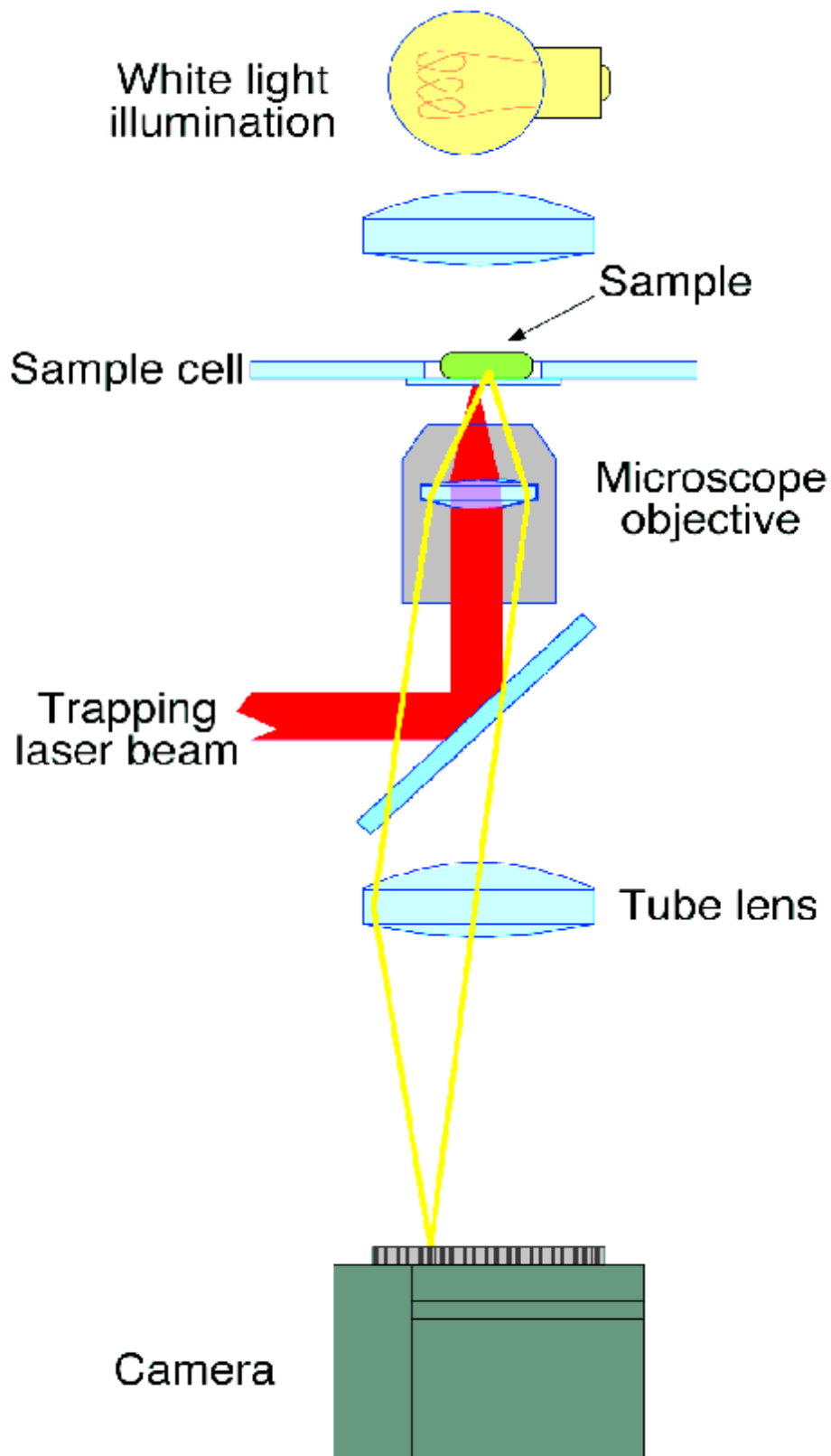
$$\langle F \rangle = \oint \langle \overset{\mathbf{t}}{T}(r,t) \rangle n(r) da \quad (4)$$

Όπου το σύμβολο $\langle \rangle$, υποδηλώνει μέση χρονική τιμή του περιεχόμενου μεγέθους, και η ποσότητα $n(r)$ το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα στην επιφάνεια ολοκλήρωσης. Η παραπάνω εξίσωση διαφοροποιείται στην περίπτωση μη άκαμπτων σωμάτων.

2.4 Τυπική διάταξη οπτικής παγίδευσης

Τα βασικά μέρη μιας τυπικής διάταξης οπτικής παγίδευσης είναι η πηγή laser και ένας αντικειμενικός φακός μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης. Μια συνηθισμένη επιλογή για την πηγή LASER είναι τα YAG lasers διοδικής άντλησης, τόσο για την σταθερότητα της δέσμης όσο και για την χαμηλή απορρόφηση της ακτινοβολίας τους (εγγύς υπέρυθρη περιοχή του φάσματος με μήκος κύματος 1064 nm). Για τον αντικειμενικό φακό χρησιμοποιείται φακός μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης για να καλύψει την απαίτηση μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος για την οπτική παγίδευση. Είναι σύνηθες να κατασκευάζονται αντικειμενικοί φακοί που απεικονίζουν το παραγόμενο είδωλο σε μεγάλη απόσταση. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα εστίασης μιας παραλληλισμένης (collimated) δέσμης laser ακριβώς στο επίπεδο του δείγματος, ενώ επιπλέον καθιστούν πιο εύκολη την εισαγωγή οπτικών οργάνων παρατήρησης (π.χ. κάμερας) στην διάταξη της παγίδευσης όπως απεικονίζεται παρακάτω. Ο παραδοσιακός σχεδιασμός των αντικειμενικών φακών οδηγούσε στο σχηματισμό του ειδώλου 160 mm ($1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$) πάνω από το στέγαστρο του αντικειμενικού, κάτι που καθιστούσε προβληματική την εισαγωγή οπτικών οργάνων παρατήρησης (Molloy & Padgett, 2002).

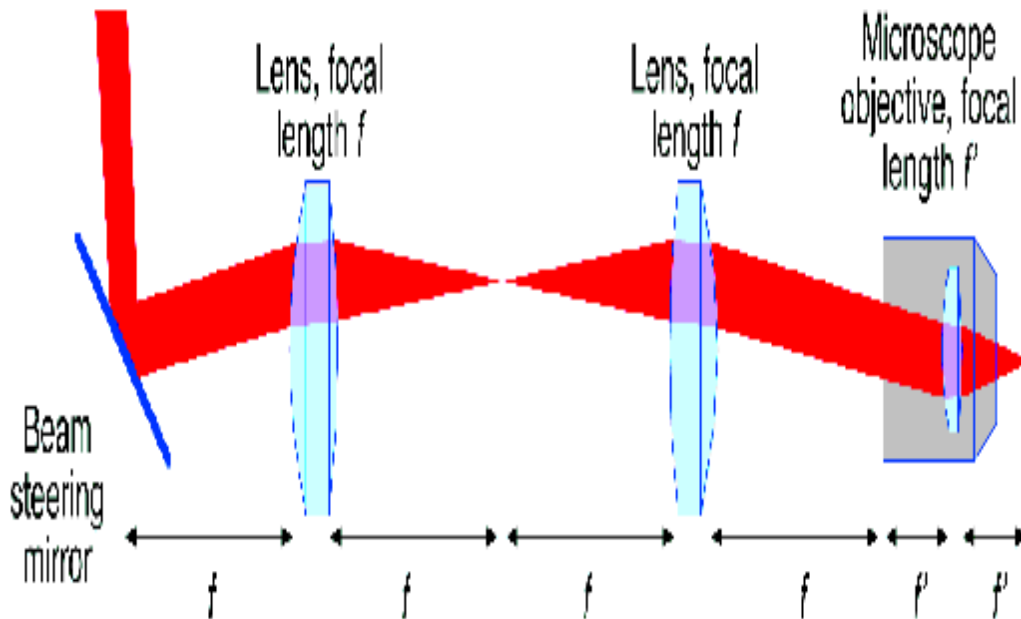
Για τις συνήθεις βιολογικές εφαρμογές, το δείγμα τοποθετείται σε γυάλινη θήκη, αφού βυθιστεί σε υγρό. Ο αντικειμενικός φακός σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί με ένα λεπτό στρώμα ελαίου μεταξύ του φακού και της θήκης, απαλείφοντας έτσι το κενό αέρα μεταξύ φακού και δείγματος και ελαχιστοποιώντας το οπτικό σφάλμα. Ένα τυπικό αριθμητικό άνοιγμα φακού είναι 1,3 το οποίο σε υγρό με δείκτη διάθλασης 1,56 μεταφράζεται σε γωνία παρατήρησης 110° (Molloy & Padgett, 2002). Η ιδιότητα αυτή πέρα από την υψηλή οπτική ανάλυση του δείγματος είναι βοηθητική και στην απαίτηση υψηλής εστίασης της δέσμης.



Εικόνα 13: Χαρακτηριστική διάταξη οπτικής παγίδευσης (Molloy & Padgett, 2002)

Μια διευρυμένη δέσμη laser κατανομής Gauss, έτσι ώστε να γεμίσει την είσοδο του αντικειμενικού φακού μεταφράζεται σε αύξηση της δύναμης βαθμίδας ως προς τη δύναμη σκέδασης και επομένως αποδοτικότερη παγίδευση (Κατελούζος, 2010).

Επιπλέον, ιδιαίτερα σε βιολογικές εφαρμογές προτιμάται μια αντίστροφη γεωμετρία μικροσκοπίου, στην οποία το δείγμα τοποθετείται πάνω από το φακό, επιτρέποντας την πιο εύκολη πρόσβαση σε αυτό.



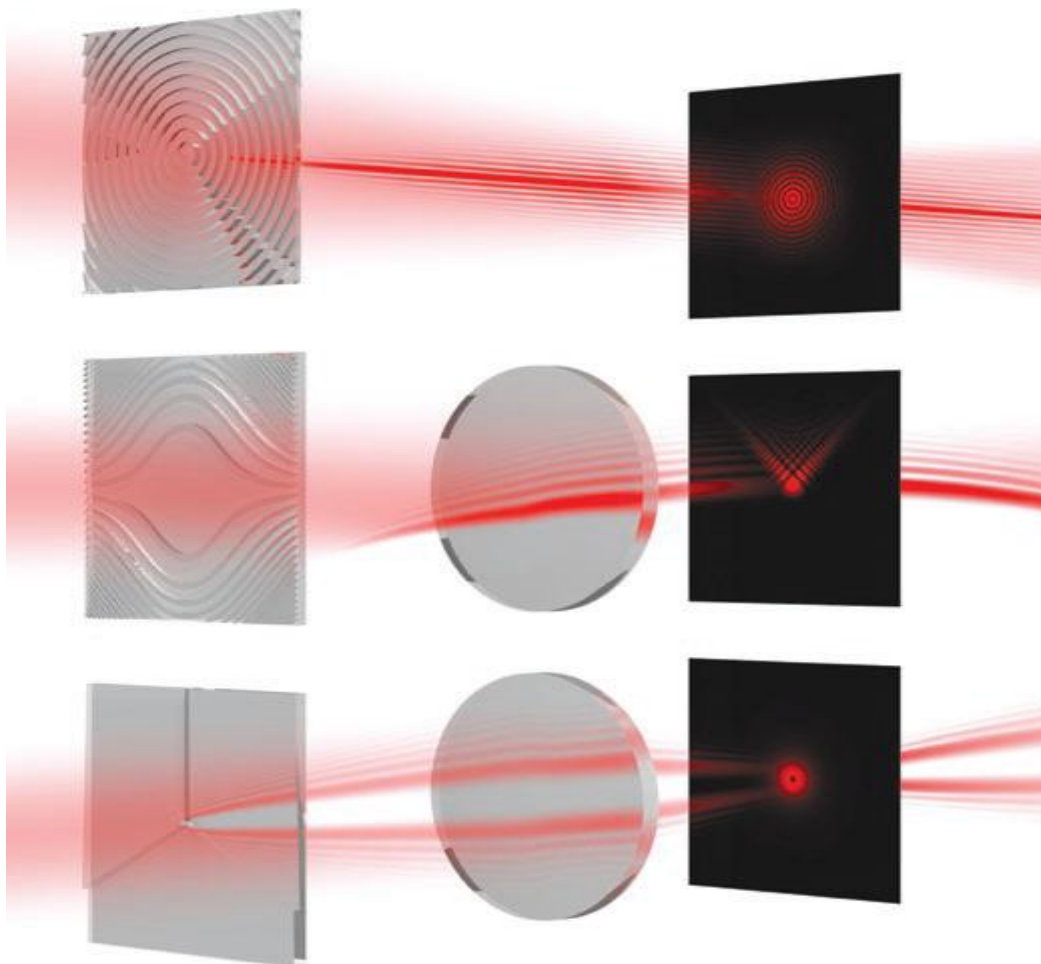
Εικόνα 14: Διάταξη κατόπτρων για τον χειρισμό της ακτίνας laser (Molloy & Padgett, 2002)

Σε μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών παρουσιάζεται η ανάγκη χειρισμού του σωματιδίου με την μετακίνηση της δέσμης laser. Για την αποδοτική επίτευξη του χειρισμού αυτού, απαιτείται ο μηχανισμός οδήγησης της δέσμης να παράγει μια παραλληλισμένη δέσμη η οποία επικεντρώνεται στον αντικειμενικό φακό. Γωνιακή μετατόπιση του κατόπτρου οδήγησης της δέσμης θα μεταφραστεί σε μετατόπιση του σημείου εστίασης στο δείγμα χωρίς απώλεια στην ισχύ της ακτινοβολίας.

2.5 Μελλοντικές τάσεις

Η εξέλιξη των διατάξεων οπτικής παγίδευσης τα τελευταία χρόνια υπήρξε ραγδαία. Σήμερα μοντέλα οπτικών λαβίδων (ενδεικτικά αναφέρονται οι εταιρείες Cell Robotics International Inc. στο New Mexico των Η.Π.Α. και

PLAM GmbH στο Bernried της Γερμανίας) είναι εμπορικά διαθέσιμα (Molloy & Padgett, 2002). Η χρησιμοποίηση ακτινοβολίας laser με διαφορετικές χωρικές κατανομές έντασης, πέρα από τη συνήθως χρησιμοποιούμενη κατανομή Gauss, προσφέρει νέες δυνατότητες χειρισμού μικροσωματιδίων (Dholakia et al, 2002). Με τη χρήση διαθλαστικών στοιχείων, το προφίλ της έντασης μιας δέσμης laser με ακτινική κατανομή (Gauss) μπορεί να τροποποιηθεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση κωνοειδούς κρυστάλλου (axicon) σε δέσμη laser με κατανομή Gauss για την απόκτηση δέσμης με κατανομή Bessel (εικόνα 15 πάνω). Βασικό χαρακτηριστικό της κατανομής Bessel είναι ένας πολύ λεπτός μακρόστενος πυρήνας που εκτείνεται σε σημαντική απόσταση, επιτρέποντας την παγίδευση πολλών σωματιδίων κατά μήκος του άξονα της ακτίνας (Dholakia & Reece, 2006). Η χρήση διαφορετικών διαθλαστικών στοιχείων επιτρέπει την χρησιμοποίηση δεσμών laser με διαφορετικές κατανομές έντασης, όπως η κατανομή Airy ή η κατανομή Laguerre – Gauss.



Εικόνα 15: Κατανομές έντασης ακτίνων laser (Dholakia & Cizmar, 2011)

Το ελικοειδές κυματομέτωπο δέσμης laser με κατανομή Laguerre – Gauss, επιτρέπει την μετάδοση γωνιακής στροφορμής και την περιστροφή του παγιδευμένου σωματιδίου (Dholakia et al, 2002). Η αρχική χρήση δύο ακτίνων για την ακινητοποίηση σωματιδίου από τον Atkins και τους συνεργάτες του,

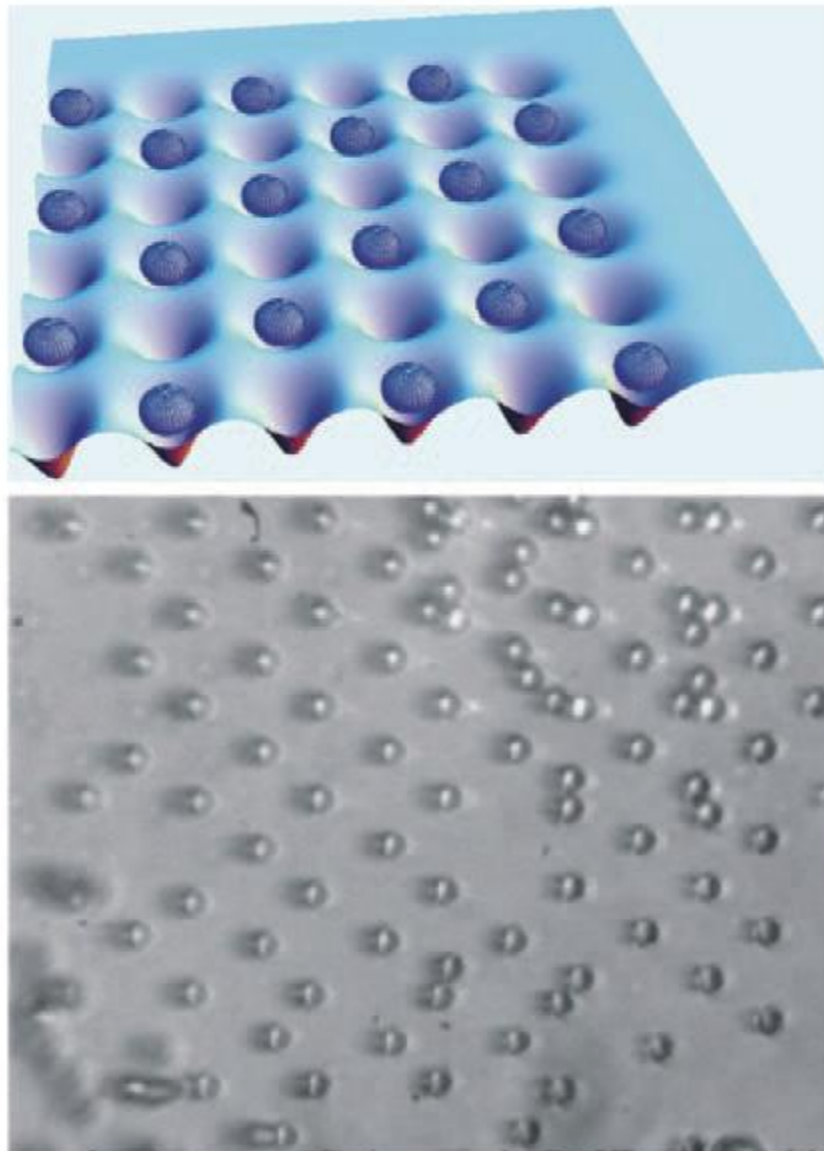
παρουσίαζε σημαντικές δυσχέρειες ιδιαίτερα στην καθοδήγηση του παγιδευμένου σωματιδίου, λόγω της απαίτησης πολύ προσεκτικών χειρισμών των δύο ακτίνων (Ορφανάκης, 2011). Η χρησιμοποίηση οπτικών ινών περίπου μία δεκαετία αργότερα επανέφερε στο προσκήνιο την χρησιμοποίηση παγίδων με δύο δέσμες. Η χρήση δύο δεσμών προσφέρει το βασικό πλεονέκτημα της δυνατότητας χειρισμού σχετικά μεγάλων σωματιδίων, ενώ επιπλέον απουσιάζει η ανάγκη χρήσης οπτικών οργάνων με ιδιαίτερα μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα για την υψηλή εστίαση της δέσμης (Molloy & Padgett, 2002). Η χρήση δύο ακτίνων επιπλέον συνεπάγεται μικρότερη πιθανότητα πρόκλησης ζημιάς από την ακτινοβολία σε βιολογικό ιστό και είναι ιδιαίτερα συμβατή με τεχνικές όπως η φασματοσκοπία Raman που χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιολογικά πειράματα (Jess et al, 2006). Στην εικόνα 16 φαίνεται μια παγιδευμένη σφαίρα από πολυμερές υλικό με διάμετρο 100 μm .



Εικόνα 16: Παγίδευση σφαίρας από πολυμερές (Jess et al, 2006)

Η χρήση ολογραφικών τεχνικών απεικόνισης και ηλεκτρονικών υπολογιστών για τον έλεγχο πολλαπλών οπτικών παγίδων αποσκοπεί στην παγίδευση μεγαλύτερου πλήθους σωματιδίων. Τα βήματα στην σχετική

τεχνογνωσία επιτρέπουν την πρόβλεψη επίτευξης χειρισμού μικροσωματιδίων στον αέρα ή στο κενό αντί σε υγρό, κάτι που αναμένεται να έχει ένα μεγάλο πλήθος επικείμενων εφαρμογών (Dholakia et al, 2002).



Εικόνα 17: Διάταξη μικροσωματιδίων από πολλαπλές οπτικές παγίδες (Dholakia & Reece, 2006)

2.6 Οπτική σύζευξη

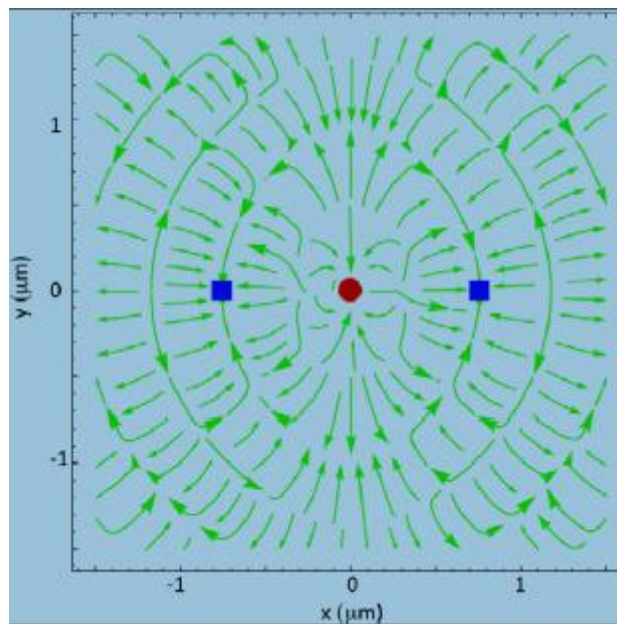
Ο όρος οπτική σύζευξη (optical binding) έχει διαφορετική φυσική σημασία από την οπτική παγίδευση. Στην οπτική σύζευξη η σταθεροποίηση της θέσης πλήθους σωματιδίων είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης της ακτινοβολίας στα σωματίδια αλλά και της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Η παρουσία των σωματιδίων επηρεάζει την χωρική κατανομή της έντασης της δέσμης laser και πρέπει να ληφθεί υπόψη στους αντίστοιχους θεωρητικούς

υπολογισμούς (Mohanty et al, 2004). Ιστορικά, η εισαγωγή της οπτικής σύζευξης αποδίδεται στα πειράματα του Burns και των συνεργατών του, το 1989, οι οποίοι πέτυχαν τον περιορισμό δύο διηλεκτρικών μικροσωματιδίων σε γραμμική οπτική παγίδα χρησιμοποιώντας δύο δέσμες laser.

Στην περίπτωση σωματιδίων Rayleigh το σωματίδιο μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά σαν σημειακό ηλεκτρικό δίπολο. Με την προσέγγιση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο E στη θέση του δίπολου μπορεί να συσχετιστεί με το σκεδαζόμενο πεδίο E' σε κάθε θέση r του πεδίου, βάσει της σχέσης:

$$E' = M_{ij}(r) E \quad (4)$$

Όπου ο M είναι τανυστής δεύτερης τάξης, εξαρτώμενος από τη θέση r και την επαγόμενη πόλωση στο δίπολο από το πεδίο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση σωματιδίων με διαστάσεις παρόμοιες με το μήκος κύματος της δέσμης η προσέγγιση του ταλαντούμενου δίπολου δεν επαρκεί για την θεωρητική περιγραφή (Mazilu et al, 2012).



Εικόνα 18: Διάταξη μικροσωματιδίων από πολλαπλές οπτικές παγίδες (Mazilu et al, 2012)

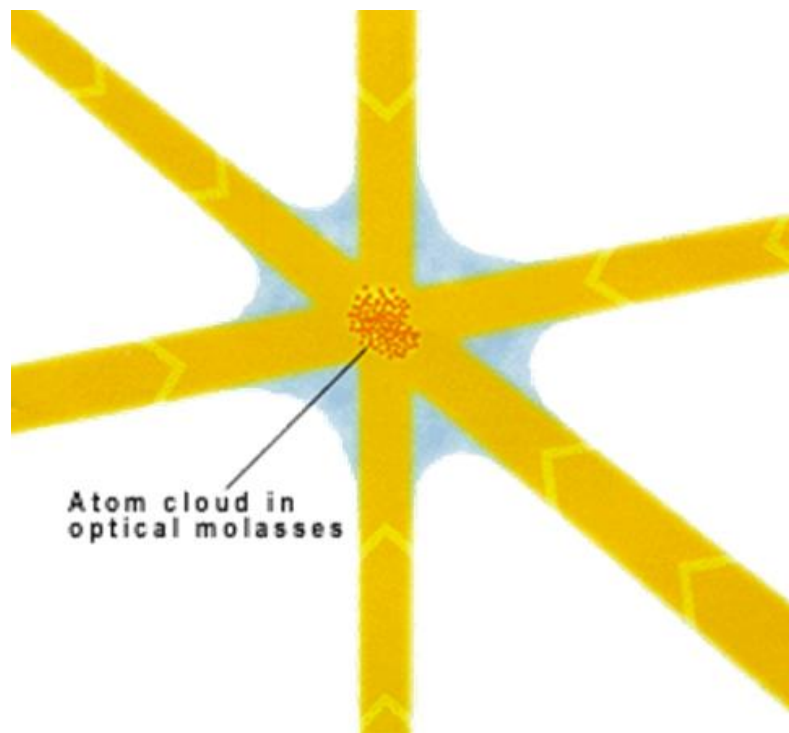
Παραπάνω, απεικονίζονται οι δυνάμεις σύζευξης σε νανοσωματίδιο το οποίο τοποθετείται σε περιοχή όπου συγκρατείται ακίνητο σωματίδιο (κόκκινη κουκίδα). Με μπλε κουκίδες σημειώνονται οι σταθερές θέσεις του νανοσωματιδίου στο χώρο του πεδίου.

Στην παρούσα εργασία δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω στην οπτική σύζευξη και τις εφαρμογές της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ

3.1 Φυσικές και χημικές εφαρμογές

Η οπτική παγίδευση σωματιδίων έχει σημαντικές εφαρμογές στην Φυσική και στη Χημεία. Η χρησιμοποίηση οπτικών παγίδων χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην μελέτη των κolloειδών, ενώ σημαντική έρευνα στον τομέα της οπτικής παγίδευσης έχει επικεντρωθεί στην οπτική παγίδευση αιωρούμενων σωματιδίων (aerosols). Η χρήση της οπτικής παγίδευσης στη μελέτη των aerosols είναι σημαντική για την φυσική της ατμόσφαιρας, καθώς επιτρέπει την μη επεμβατική παρατήρηση των σωματιδίων και των μεταβολών που υφίστανται (χημικών, κινητικών ή θερμοδυναμικών) κατά την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον (Guillon et al, 2008). Η εισαγωγή των υπερσυνεχών (supercontinuum) πηγών laser έδωσε ένα συμβατό εργαλείο για την παγίδευση υγρών αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς τα lasers αυτά εκπέμπουν σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων και διευκολύνουν τις φασματοσκοπικές μετρήσεις της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα παγιδευμένα σωματίδια (Li et al, 2005).

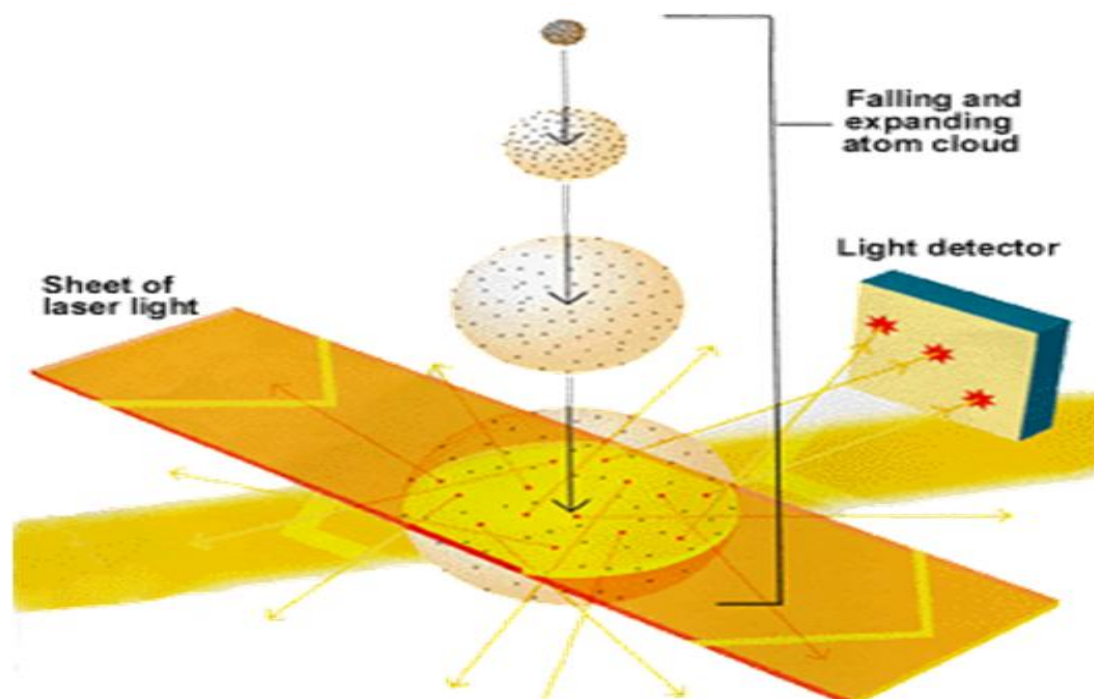


Εικόνα 19: Επιβράδυνση ατόμων σε διασταύρωση δεσμών laser (Μαρίνου, 2006)

Η χρήση ακτινοβολίας laser βρίσκει εφαρμογή στην ψύξη αερίων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (ψύξη Doppler). Άτομα νατρίου ψύχθηκαν σε θερμοκρασία 240 mK (milli Kelvin) από την ομάδα του Atkins

χρησιμοποιώντας την πίεση ακτινοβολίας σαν δύναμη ιξώδους για την επιβράδυνση των ατόμων: αν και η επιβράδυνση των ατόμων δεν είναι τεχνικά οπτική παγίδευση, τα άτομα νατρίου περιορίστηκαν στο χώρο για χρόνους τάξεως 0,5 s προτού καταφέρουν να διαφύγουν από την δέσμη laser (Κατελούζος, 2010). Ο όρος «οπτική μολάσσα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ρόλο των δεσμών laser ως δυνάμεις ιξώδους για την επιβράδυνση των ατόμων (εικόνα 19). Η συλλογή των επιβραδυνμένων ατόμων σε ατομικές παγίδες (οπτικές ή μαγνητο-οπτικές) επιτρέπει τη μελέτη της ύλης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και της προβλεπόμενης από τη θεωρία συμπύκνωσης Boss – Einstein, όταν σε συνθήκες ακραία χαμηλών θερμοκρασιών το μήκος κύματος του ατόμου είναι συγκρίσιμο με τη μέση ατομική απόσταση (Μαρίνου, 2006).

Μια ιδιαίτερη εφαρμογή της οπτικής παγίδευσης στη Φυσική αποτελεί και το ατομικό σιντριβάνι, το οποίο επιτρέπει την μέτρηση της ενεργειακής διαφοράς μεταξύ δύο ατομικών καταστάσεων με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια: Στο ατομικό σιντριβάνι υπέρψυχρα άτομα εκτοξεύονται προς τα πάνω και αφήνονται να πέσουν υπό την επίδραση της βαρύτητας. Τα άτομα συλλέγονται από μια μαγνητο – οπτική παγίδα για 0,5 s. Αν ένα άτομο δεχθεί δύο κατάλληλους μικροκυματικούς παλμούς στην κορυφή της τροχιάς του μετά την έξοδο από την παγίδα πραγματοποιεί μετάβαση από μία ενεργειακή κατάσταση σε άλλη, η οποία μπορεί να μετρηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Το ατομικό σιντριβάνι βρίσκει εφαρμογές μεταξύ άλλων, στην ατομική συμβολομετρία και στα ατομικά ρολόγια (Κατελούζος, 2010).



Εικόνα 20: Ατομικό σιντριβάνι (Μαρίνου, 2006)

3.2 Βιολογικές εφαρμογές

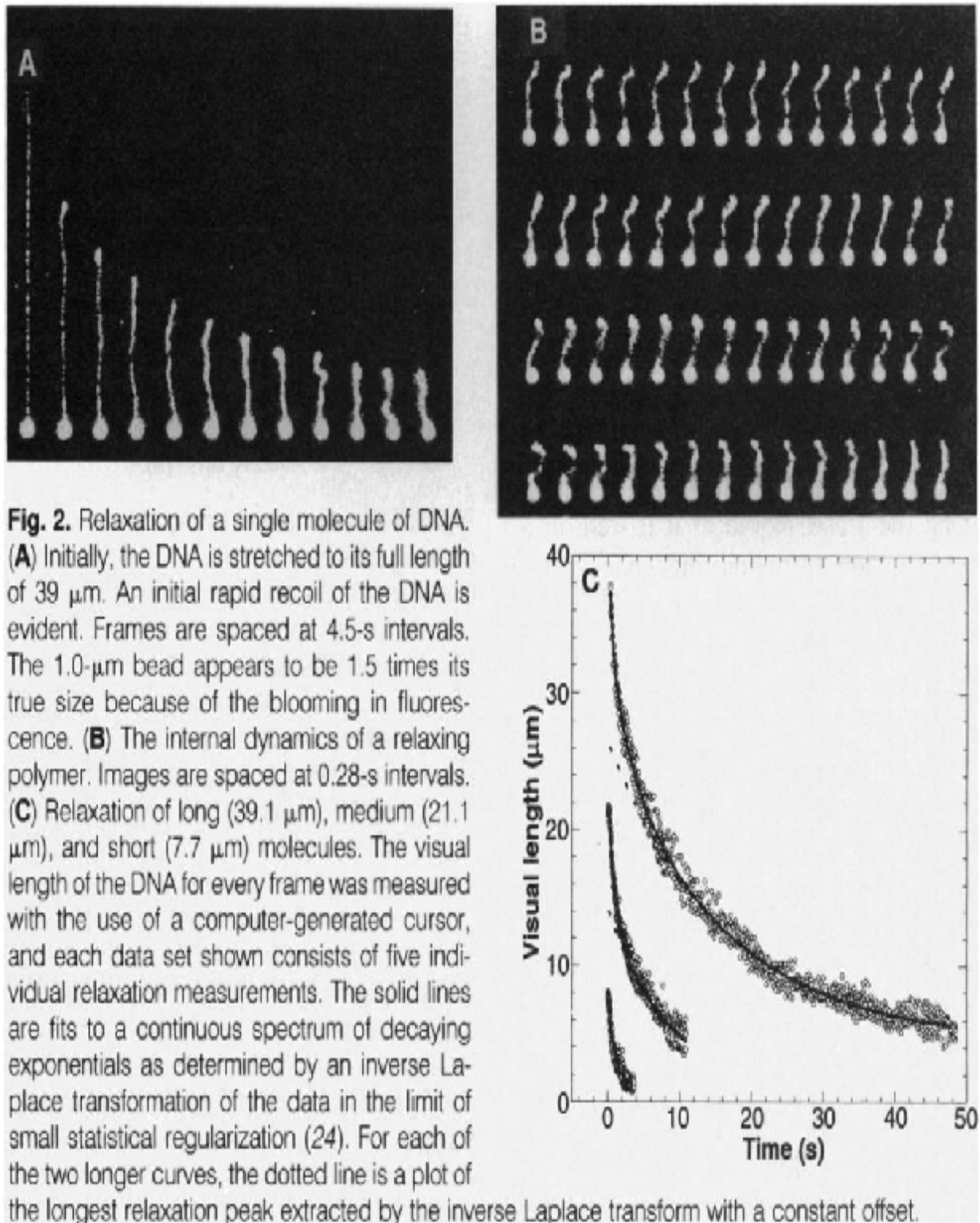
Αν και η οπτική παγίδευση είναι ανακάλυψη της Φυσικής, η πλειονότητα των εφαρμογών της βρίσκεται στην Βιολογία, όπου η ανάγκη χειρισμού μη φορτισμένων σωματιδίων και ιδιαίτερα βιολογικών ιστών παρουσιάζεται με αυξημένη συχνότητα. Μερικές από τις πιο βασικές βιολογικές εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης περιλαμβάνουν (USCD: University of California, San Diego, 2014):

- Μικροχειρουργική και χειρισμός κυττάρων *in vivo*
- Χειρισμός χρωμοσωμάτων κατά την μίτωση
- Εκτομή χρωμοσωμάτων
- Ελεγχόμενη σύντηξη κυττάρων (cell fusion)
- Έγχυση ή/και ενσωμάτωση DNA
- Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων DNA και βακτηρίων
- Μελέτη βιοκινητήρων (biomotors)
- Τεχνητή γονιμοποίηση *in vitro*

Η πλειάδα εφαρμογών της οπτικής παγίδευσης, στηρίζεται στην ιδιότητα της τεχνικής να μην προκαλεί βλάβες στον παγιδευμένο μικροοργανισμό: παρόλο που η τυπική ένταση της δέσμης στο σημείο εστίασης είναι της τάξης του $1\text{MW}/\text{cm}^2$ ($1\text{MW} = 10^6 \text{ Watt}$), αποδεικνύεται ότι ο οργανισμός μπορεί να ψυχθεί αποτελεσματικά από το περιβάλλον νερό αν είναι διαφανής στο μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Κατελούζος, 2010). Επιπλέον οι επιστήμονες πειραματίζονται με τη χρήση βαρέως ύδατος (D_2O) ή άλλων υγρών ως περιβάλλοντος μέσου για την οπτική παγίδευση, την χρήση laser διαφορετικών εντάσεων και κατανομών καθώς και με την χημική προσκόλληση πολυμερών σφαιριδίων στον υπό εξέταση μικροοργανισμό, ως αντικείμενο της εστίασης της δέσμης (Rodrigo et al, 2011 - Neuman & Block, 2004).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσκόλληση σφαιριδίων σε μακρομόρια DNA για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Perkins, Quake, Smith και Chu, σφαιρίδια διαμέτρου $1 \mu\text{m}$, προσκολλήθηκαν με χημικό τρόπο στο άκρο μορίων DNA. Με την χρήση οπτικών λαβίδων στα σφαιρίδια, τα μόρια ξετυλίχθηκαν στο πλήρες μήκος τους μέσα σε υδατικό διάλυμα και αφέθηκαν ελεύθερα σταματώντας τη ροή του διαλύματος. Στη συνέχεια φαίνεται το τεντωμένο μόριο DNA στο πλήρες μήκος του ($39 \mu\text{m}$) και η αρχική, γρήγορη σύμπτυξη του σε χρονικά διαστήματα $4,5 \text{ s}$. Παρακάτω φαίνεται η χαλάρωση του μορίου σε χρονικά διαστήματα $0,28 \text{ s}$. Στο γράφημα φαίνονται οι χρόνοι χαλάρωσης για μακρά ($39,1 \mu\text{m}$), μέσα ($21,1 \mu\text{m}$) και κοντά ($7,7 \mu\text{m}$) μόρια DNA. Η απεικόνιση των μορίων επιτεύχθηκε με φασματογραφία φθορισμού. Η χρήση των οπτικών λαβίδων επιτρέπει την αποκοπή του κατάλληλου τμήματος προς μελέτη και

πιστεύεται ότι θα επιταχύνει την διαδικασία αποκωδικοποίησης του ανθρώπινου γονιδιώματος (Στυλιανού, 2006).



Εικόνα 21: Μελέτη DNA (Perkins et al., 1994)

Οπτικές λαβίδες χρησιμοποιούνται και για την μέτρηση της ελαστικότητας των ερυθρών κυττάρων, η οποία αποτελεί και καθοριστικό

παράγοντα για τη λειτουργία τους. Στην εικόνα, χρησιμοποιούνται δύο δέσμες για να ακινητοποιήσουν τα άκρα του κυττάρου και μια τρίτη στο κέντρο του για να το ανασηκώσει. Οι τρεις δέσμες απενεργοποιούνται ταυτόχρονα και η ακολουθία και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την χαλάρωση του κυττάρου καταγράφεται και μελετάται. Οι οπτικές λαβίδες βοηθούν να ξεπεραστεί η βασική δυσκολία της συγκράτησης του κυττάρου που αντιμετώπιζαν οι προηγούμενες μέθοδοι (Στυλιανού, 2006).

Μία από τις εφαρμογές των οπτικών λαβίδων βρίσκεται και στην μελέτη της κινητικότητας των σπερματοζωαρίων. Αφού το σπερματοζωάριο δεσμευθεί, η ένταση της δέσμης μειώνεται προοδευτικά μέχρι το σπερματοζωάριο να διαφύγει, οπότε και μελετάται η δύναμή του με κατάλληλη βαθμονόμηση της έντασης της δέσμης (Στυλιανού, 2006).



Εικόνα 22: Μελέτη ελαστικότητας ερυθρών κυττάρων (Στυλιανού, 2006)

Η υψηλή εστίαση της δέσμης στις οπτικές λαβίδες επιτρέπει την εστίαση της στο εσωτερικό του κυττάρου, χωρίς να προξενεί βλάβες στο τοίχωμα του, όπου ή ένταση της ακτινοβολίας μπορεί να είναι κατά πολύ ασθενέστερη

(Στυλιανού, 2006). Σύγχρονες έρευνες στις οπτικές λαβίδες εξετάζουν τη δυνατότητα επιμόλυνσης (transfection) ξεχωριστά σε κάθε κύτταρο (Ashok & Dholakia, 2012). Νεότερα πειράματα σε οπτικά παγιδευμένα άτομα χρυσού (τα οποία έχουν ενέργεια κατάρρευσης τρεις τάξεις μεγέθους χαμηλότερη του νερού) δείχνουν θετικά αποτελέσματα για τη βιωσιμότητα της μεθόδου (Arita et al, 2013). Σχετικά νέο πεδίο είναι και η μελέτη της οπτικής επίδρασης στην ανάπτυξη των νευρώνων. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν να υποστηρίζουν την άποψη ότι η ακτινοβολία laser επηρεάζει την ανάπτυξη των νηματοποδίων (filopodia) (Carnegie et al, 2012).

3.3 Συμπεράσματα

Η επίτευξη της οπτικής παγίδευσης συνοδεύτηκε από σημαντικό ερευνητικό έργο τα τελευταία χρόνια, με συστήματα οπτικών λαβίδων να είναι ήδη διαθέσιμα εμπορικά. Συνεχείς εξελίξεις στην τεχνογνωσία παρέχουν περισσότερες επιλογές τόσο στις χρησιμοποιούμενες πηγές laser όσο και στη γεωμετρία της διάταξης των ακτίνων, ενώ η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, φασματοσκοπίας φθορισμού και ολογραφικών απεικονίσεων ενισχύει τις δυνατότητες των συστημάτων οπτικής παγίδευσης.

Η οπτική παγίδευση σωματιδίων που δεν είναι βυθισμένα σε υγρό παρουσιάζει πρόσθετες τεχνικές απαιτήσεις, όμως σύγχρονες εξελίξεις στο χώρο των lasers, όπως οι υπερσυνεχείς (supercontinuum) πηγές προσφέρουν χρήσιμα εργαλεία για την αντιμετώπιση τους (Guillon et al, 2008). Παρόμοια, η τεχνική δυσκολία του χειρισμού σωματιδίων μεγάλων διαστάσεων (π.χ. μόρια) στην οπτική παγίδα βαθμίδας μοναδικής δέσμης, μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση οπτικών ινών σε παγίδα δύο δεσμών.

Η οπτική παγίδευση έχει εκτεταμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα στην Βιολογία. Η χρήση οπτικών ινών στην οπτική παγίδα δύο δεσμών την κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμη στην χημική μελέτη των κολλοειδών, ενώ ήδη έχει βρει σημαντικές φυσικές εφαρμογές στην ατομική φασματοσκοπία και τα ατομικά ρολόγια. Οι βιολογικές εφαρμογές της περιλαμβάνουν την μηχανική μελέτη του DNA και των βιοκινητήρων, την μελέτη της κινητικότητας των σπερματοζωαρίων και της ελαστικότητας των ερυθρών κυττάρων και ένα πλήθος άλλων εφαρμογών.

Οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνική όπως ο ακριβής χειρισμός στο κυτταρικό επίπεδο, ή η λεπτομερής παρατήρηση αλλά και η παρέμβαση στην κίνηση Brown των μικροσκοπικών σωματιδίων δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα εξακολουθήσει η εντατική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arita, Y., Ploschner, M., Antkowiak, M., Gunn-Moore, F. & Dholakia, K. (2013) Laser-induced breakdown of an optically trapped gold nanoparticle for single cell transfection. *Optics Letters*.38 (17): 3402-3405.
- Ashok, P.C. & Dholakia, K. (2012) Optical Trapping for Analytical Biotechnology. *Current opinion in biotechnology*. 23 (1): 16–21.
- Carnegie, D.J., Stevenson, D.J., Mazilu, M., Gunn-Moore, F. & Dholakia, K. (2012) Guided neuronal growth using optical line traps. *Optics Express*.16 (14): 10507-10517.
- Chu, S. & Townes, C. (2003) Arthur Schawlow. In Edward P. Lazear (ed.), *Biographical Memoirs*. National Academy of Sciences. (83): 202.
- Dholakia, K. & Cizmar, T. (2011) Shaping the future of manipulation. *Nature Photonics*, 5: 335-342.
- Dholakia, K. & Reece, P. (2006) Optical micromanipulation takes hold. *Nano Today*, 1 (1): 18-27.
- Dholakia, K., Gabriel Spalding, G, & MacDonald, M. (2002) Optical tweezers: the next generation. *Physics World*. (2002): 31-35.
- Gahagan K. T. & Swartzlander, Jr. G. A. (1996) Optical vortex trapping of particles. *Opt. Lett.* **21** (11): 827–829.
- Guillon, M., Dholakia, K. & McGloin, D. (2008) Optical trapping and spectral analysis of aerosols with a supercontinuum laser source. *Optics Express*.16 (11): 7655-7664.
- Haro-Gonzalez, P., del Rosal, B., Maestro, L.M., Rodriguez, E. M., Naccache, R., Capobianco, J. A., Dholakia, K., Sole, J.G. & Jaque D. (2013) Optical trapping of NaYF₄:Er³⁺, Yb³⁺ upconverting fluorescent nanoparticles. *Nanoscale*. 5: 12192–12199.
- Jess, P.R.T., Garcés-Chávez, V., Smith, D., Mazilu, M., Paterson, L., Riches, A., Herrington, C.S., Sibbett, W. & Dholakia, K. (2006) Dual beam fibre trap for Raman microspectroscopy of single cells. *Optics Express*.14 (12): 5779-5791.

Kartner, F. (2006) *Lasers*. Διαλέξεις του μαθήματος Fundamentals of Photonics: Quantum Electronics. Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Lindley, D. (2005) Focus: Invention of the Maser and Laser. *Physical Review*. (15): 4.

Li, P. Shi, K. and Liu, Z. (2005) *Manipulation and spectroscopy of a single particle by use of white-light optical tweezers*. *Opt. Lett.* 30, 156-158.

Mazilu, M., Rudhall, A., Wright, E.M. & Dholakia, K. (2012) An interacting dipole model to explore broadband transverse optical binding. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 24 (2012): 464117.

Mohanty S K, Andrews J T & Gupta P K (2004) Optical binding between dielectric particles. *Opt. Express*. 12: 2749–56.

Molloy, J.E. & Padgett, M.J. (2002) Lights, action: optical tweezers. *Contemporary Physics*. 43 (4): 241 -258.

Neuman, K.C. & Block, S.M. (2004) Optical trapping. *Review of Scientific Instruments*. 75 (9): 2787–2809.

Optical Society OSA (2014) Arthur Ashkin. <http://www.osa.org/en-us/history/biographies/arthur-ashkin/>. Προσπελάστηκε 10 Οκτωβρίου 2014.

Paschotta, R. (2008) *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Wiley-VCH, Weinheim.

Perkins T.T., Quake S.R., Smith D.E. & Chu S. (1994) Relaxation of a Single DNA Molecule Observed by Optical Microscopy. *Science, New Series*. 264 (5160): 822-826.

Prentice, P., Cuschieri, A., Dholakia, K., Prausnitz, M. & Campbell, P. (2005) Membrane disruption by optically controlled microbubble cavitation. *Nature Physics*, 1: 107-110.

Rawicz, A.H. & Holonyak, N. (2014) Theodore H. Maiman 1927-2007. *Biographical Memoirs*. National Academy of Sciences. <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/maiman-theodore.pdf>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2014.

Rodrigo, J.A., Caravaca-Aguirre, A.M., Alieva, T., Cristóbal, G. & Calvo M.L. (2011) Micro particle movements in optical funnels and pods. *Optics Express*.19 (6): 5232-5243.

Stevenson, D.J., Gunn-Moore, F. & Dholakia, K. (2010) Light forces the pace: optical manipulation for Biophotonics. *Journal of Biomedical Optics*. 15 (4): 041503.

University of California, San Diego: UCSD (2014) Optical Trap: The Single-Beam Gradient Force. Department of Physics, UCSD. http://physics.ucsd.edu/neurophysics/courses/physics_173_273/optical_trap_guide.pdf. Προσπελάστηκε 16 Σεπτεμβρίου 2014.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κατελούζος, Α. (2010) *Σύγχρονες Οπτικές Εφαρμογές*. Διαλέξεις του μαθήματος Σύγχρονες Οπτικές Εφαρμογές. Τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας, Σχολή Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας, Τ.Ε.Ι. Πάτρας.

Κόττου, Σ. (2009) *Τα Laser και οι εφαρμογές τους*. Σημειώσεις του μαθήματος Τα Laser και οι εφαρμογές τους. Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2009.

Μαρίνου, Ε. (2006) *Οπτική παγίδευση με δέσμη laser και εφαρμογές*. Σεμινάριο Φυσικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), http://www.physics.ntua.gr/pdf_doc_files/seminario_fysikhs_2006/group2/Marinou.pps. Προσπελάστηκε 15 Σεπτεμβρίου 2014.

Ορφανάκης, Μ. (2011) *Οπτική παγίδευση και διέγερση σωματιδίων με ακτίνες laser*. Μεταπτυχιακή εργασία. Σχολή Θετικών και Τεχνολογικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Πολύζος, Ι. (2012) *Σύγχρονες Οπτικές Εφαρμογές*. Σημειώσεις του μαθήματος Σύγχρονες Οπτικές Εφαρμογές. Τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας, Σχολή Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας, Τ.Ε.Ι. Πάτρας.

Στυλιανού, Α. (2006) *Οπτική παγίδευση με δέσμη laser*. Σεμινάριο Φυσικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), διαδικτυακός ιστότοπος, http://www.physics.ntua.gr/pdf_doc_files/seminario_fysikhs_2006/group2/Stiliannou.pps.