



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ΤΡΟΧΙΑΚΗ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ
ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ

ΔΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΥ ΤΑΤΙΑΝΑ

ΑΘΗΝΑ 2014

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης της **Δαματοπούλου Τατιάνας**, μεταπτυχιακής φοιτήτριας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μαθηματική Προτυποποίηση σε Σύγχρονες Τεχνολογίες και την Οικονομία». Κατεύθυνση: Τεχνολογίες Αιχμής.

Ο τίτλος της είναι: «Η τροχιακή στροφορμή του φωτός και οι εφαρμογές της» και εκπονήθηκε κατά το τελευταίο εξάμηνο σπουδών του Μεταπτυχιακού Προγράμματος.

Επιβλέπων της Μεταπτυχιακής Εργασίας ήταν ο Καθηγητής ΣΗΜΜΥ **Κυριάκος Χιτζανίδης**.

Παρουσιάστηκε στις 17.07.2014 σε τριμελή επιτροπή που η σύνθεσή της είχε ως εξής:

- 1. Κομίνης Ιωάννης, λέκτορας ΣΕΜΦΕ.**
- 2. Πολιτόπουλος Κωνσταντίνος, επίκουρος καθηγητής ΣΗΜΜΥ.**
- 3. Χιτζανίδης Κυριάκος, καθηγητής ΣΗΜΜΥ.**

Δαματοπούλου Τατιάνα

Αθήνα 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:

Εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς:

- Τον Επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας Καθηγητή ΣΗΜΜΥ **Κυριάκο Χιτζανίδη** για την συνεχή επίβλεψη και καθοδήγηση καθώς και για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.
- Τους διδάσκοντες στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Μαθηματική προτυποποίηση σε σύγχρονες τεχνολογίες και την οικονομία» και όλους τους συμφοιτητές μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Συνεστραμμένο φως

1.1	Εισαγωγή	5
1.2	Η διαφορά συνεστραμμένου και πολωμένου φωτός.	7
1.3	Ιστορική αναδρομή	8
1.4	Στροφορμή του φωτός	10
1.5	Διαχωρισμός σπιν και τροχιακής στροφορμής	13
1.6	Πειραματικά δεδομένα	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Οπτικές δίνες

2.1	Χαρακτηριστικά οπτικών δινών	16
2.2	Τρόποι καταγραφής των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης.....	19
2.3	Μηχανισμός δημιουργίας οπτικών δινών	21
2.3.1	Οπτικές δίνες σε μη ομοιογενή μέσα	21
2.3.2	Ελικοειδείς ρυθμοί σε λέιζερ	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Οπτική παγίδευση

3.1	Δυνάμεις οπτικής παγίδευσης.....	32
3.1.1	Ορμή του φωτός.....	32
3.1.2	Τα είδη των σωματιδίων	33
3.1.3	Δυνάμεις οπτικής παγίδευσης.....	34
3.2	Βασικά είδη παγίδων..	
3.2.1	Μονοακτινικές 2-D παγίδες.....	35
3.2.2	Διακτινικές 3-D παγίδες	37
3.2.3	Μονοακτινικές 3-D παγίδες	38

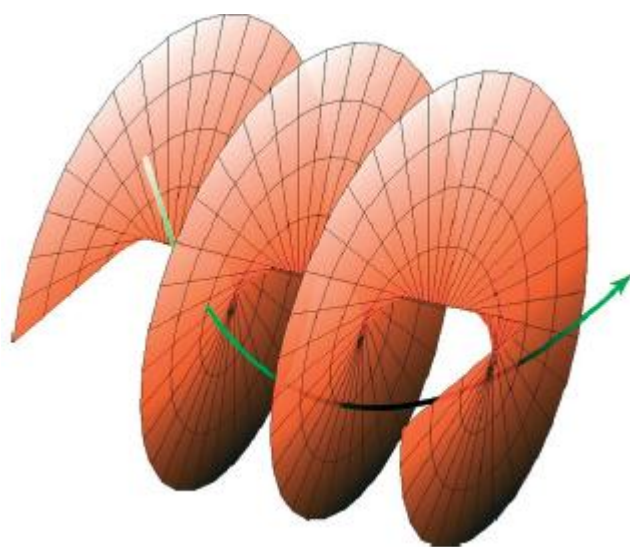
3.3	Οπτικές παγίδες συνεστραμμένου φωτός	38
3.3.1	Ελικοειδείς δέσμες φωτός	39
3.3.2	Τρόποι παραγωγής των ελικοειδών δεσμών.....	40
3.4	Παγίδευση μικροαντικειμένων με «οπτικά μπουκάλια»	45
3.5	Οπτική περιστροφή	46
3.6	Δέσμες Μπέσσελ	51
3.7	Συστοιχίες παγίδων.....	53
3.8	Εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης	54
3.9	Συμπεράσματα	56
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° : Συνεστραμμένο φως

1.1 Εισαγωγή.

Το συνεστραμμένο φως είναι μία δέσμη φωτός, η οποία καθώς διαδίδεται περιστρέφεται γύρω από την ευθεία διάδοσής της. Αν ένα σώμα κρεμασμένο στην άκρη του νήματος απορροφήσει αυτό το φως, αρχίζει να περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα που συμπίπτει με την κατεύθυνση της δέσμης. Έτσι, κατά τη διάδοση του φωτός μεταφέρεται στο σώμα όχι μόνο ενέργεια και ορμή αλλά και στροφορμή.

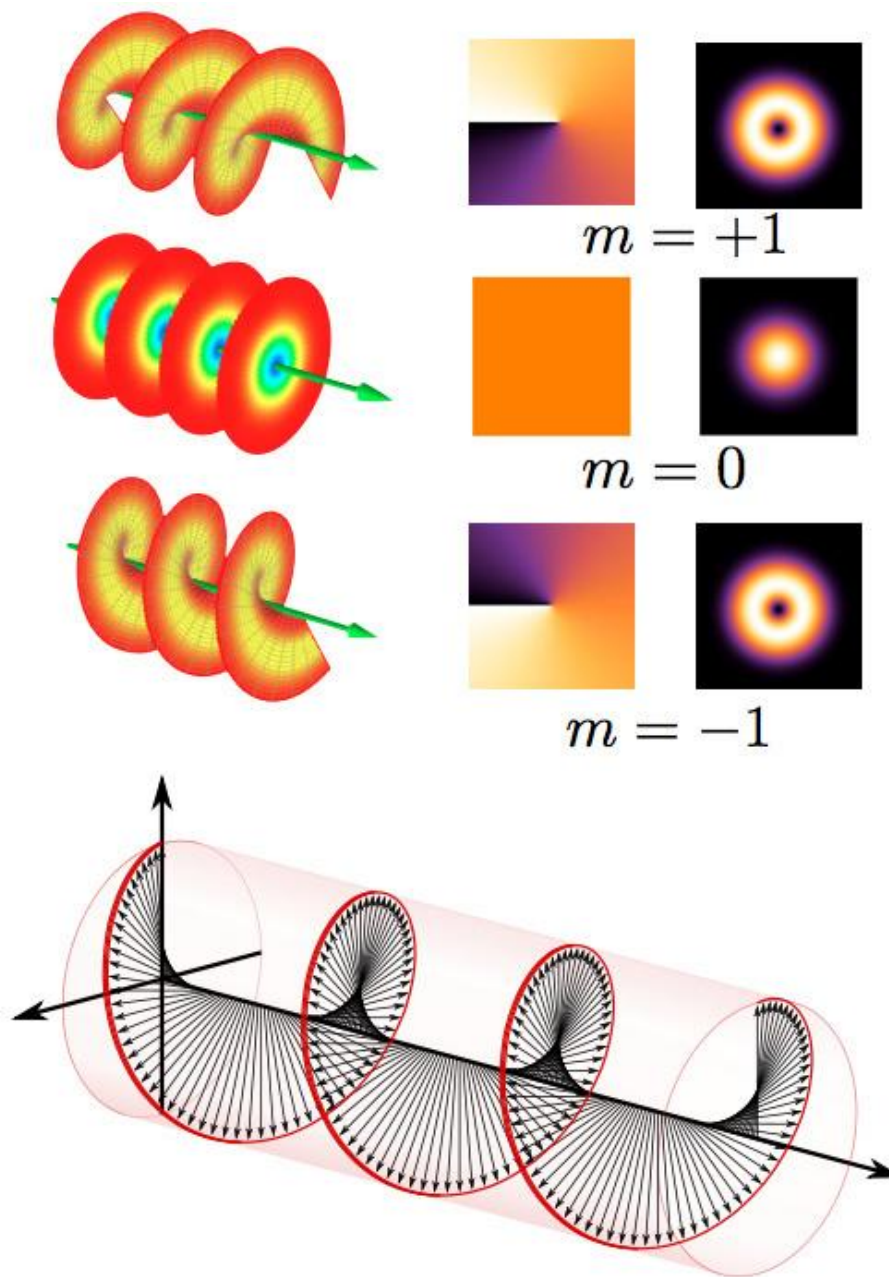
Το φως, σύμφωνα με την κλασική οπτική, είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, δηλαδή ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου στο χώρο. Όπως συμβαίνει με όλα τα κύματα, το φως διαθέτει κυματικό μέτωπο. Το *μέτωπο του κύματος* είναι μια φανταστική επιφάνεια στο χώρο, η οποία ορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο όλων των σημείων στα οποία η φάση της ταλάντωσης είναι ίδια. Σε ένα επίπεδο κύμα όλα τα μέτωπα κύματος είναι επίπεδα, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης. Σε ένα σφαιρικό κύμα είναι ομόκεντρες σφαίρες. Σε ένα συνεστραμμένο φωτεινό κύμα το μέτωπο είναι ελικοειδές και θυμίζει κοχλία ή βιδωτή έλικα, η οποία περιστρέφεται γύρω από την ευθεία διάδοσης.



Εικόνα 1: Ένα ελικοειδές μέτωπο κύματος ($m = 1$) και το διάνυσμα Poynting, η αξιμουθιακή συνιστώσα του οποίου δημιουργεί τροχιακή στροφορμή. Πηγή: [37]

Συμφασικά ή *σε φάση* ονομάζονται δύο σημεία που συμπεριφέρονται λόγω του κύματος με τον ίδιο τρόπο. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι βρίσκονται στο ίδιο σημείο της διαταραχής. Αν φ_1 η φάση του ενός και φ_2 η φάση του άλλου, ισχύει $\varphi_1 = \varphi_2 + 2k\pi$. *Μέτωπο κύματος* ορίζεται το σύνολο των σημείων που έχουν την ίδια φάση.

Το συνεστραμμένο φως συχνά απεικονίζεται με τρόπο όπως δείχνει η εικόνα 2 στην αριστερή στήλη. Η εικόνα αυτή, όμως, μπορεί να δημιουργήσει σύγχυση επειδή παρόμοιες εικόνες χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της *κυκλικής πόλωσης του φωτός* (Εικόνα 2, κάτω).



Εικόνα 2: Τρία σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός φωτεινού κύματος ανάλογα με την ύπαρξη και το πρόσημο του «τοπολογικού φορτίου» m . Η πρώτη στήλη απεικονίζει το μέτωπο του κύματος. Η δεύτερη τη φάση του κύματος στο εγκάρσιο επίπεδο, ενώ η τρίτη την ένταση του φωτός στο κέντρο. Πηγή: wikipedia.org . Στην κάτω εικόνα: σχηματική αναπαράσταση του κυκλικά πολωμένου φωτός. Πηγή: wikipedia.org

Ως εκ τούτου, πρέπει να τονίσουμε ότι ο στροβιλισμός και κυκλική πόλωση είναι δύο εντελώς διαφορετικές έννοιες, δύο ανεξάρτητες καταστάσεις που μπορεί να έχει το φως. Υπάρχει πολωμένο φως χωρίς στροβιλισμό (αυτή είναι η συνήθης περίπτωση), υπάρχουν κύματα που στροβιλίζονται χωρίς πόλωση (για παράδειγμα ακουστικά συνεστραμμένα κύματα). Επίσης υπάρχουν κύματα που έχουν και τα δύο χαρακτηριστικά, όπως και τα κύματα χωρίς κανένα χαρακτηριστικό.

1.2 Η διαφορά συνεστραμμένου και πολωμένου φωτός.

Στην κάτω εικόνα 2 απεικονίζεται ένα κυκλικά πολωμένο επίπεδο κύμα. Η πόλωση είναι ιδιότητα που χαρακτηρίζει μόνο τα εγκάρσια κύματα, ενώ δεν έχει νόημα για τα διαμήκη. Τα ηλεκτρομαγνητικά (ΗΜ) κύματα είναι εγκάρσια εφόσον τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο τους πάλλονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης. Για τη συντριπτική πλειοψηφία των φαινομένων της οπτικής υπεύθυνο είναι το ηλεκτρικό πεδίο, ως εκ τούτου δεν σχεδιάζουμε το μαγνητικό πεδίο. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου έχει σταθερό μέτρο E_{\max} , διαγράφει ελικοειδή τροχιά και έχει διαφορετικό προσανατολισμό σε διάφορα σημεία κατά μήκος της ευθείας διάδοσης. Όμως ο προσανατολισμός αυτός δε μεταβάλλεται στο ίδιο εγκάρσιο επίπεδο. Στην περίπτωση του συνεστραμμένου φωτός, αυτό που απεικονίζεται δεν είναι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά το μέτωπο κύματος. Το μέτωπο αυτό δεν είναι επίπεδο, η φάση μεταβάλλεται και κατά την διεύθυνση διάδοσης και από σημείο σε σημείο μέσα στο ίδιο εγκάρσιο επίπεδο. Η αλλαγή του χρωματισμού στα τετράγωνα της δεύτερης στήλης της εικόνας 2 αντιστοιχεί σε διαφορετικές φάσεις στο ίδιο εγκάρσιο επίπεδο. Δεδομένου ότι η ροή της ενέργειας του κύματος φωτός γίνεται συνήθως κάθετα προς το μέτωπο του κύματος, προκύπτει ότι στο στρεφόμενο φως ενέργεια και ορμή όχι απλώς μεταφέρονται αλλά και περιστρέφονται γύρω από τον άξονα της κίνησης - εξ ου και η στροφορμή (OAM) του φωτός. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου για το συνεστραμμένο φως συνήθως δε σχεδιάζεται διότι περιπλέκει περαιτέρω την κατάσταση. Όμως το φάσμα των επιλογών γίνεται πολύ πιο πλούσιο από ό,τι για ένα «επίπεδο» κύμα.

Πρέπει να επισημανθεί, ότι ανάλογα με ποιον τρόπο γυρίζει η έλικα του μετώπου κύματος οι τιμές του αριθμού m μπορεί να είναι θετικές και αρνητικές, όπως συμβαίνει και στην πόλωση. Αλλά, σε αντίθεση με την πόλωση, η τιμή της συστροφής μπορεί να είναι όχι μόνο +1 και -1, αλλά και +2, -5, +12, κλπ. Αυτό είναι ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό του συνεστραμμένου φωτός: πολύ μεγαλύτερη «χωρητικότητα πληροφοριών» από την πόλωση.

Τα στοιχειώδη σωματίδια-κύματα (κβάντα) φωτός ονομάζονται φωτόνια. Όταν το φως είναι πολωμένο, κάθε φωτόνιο μεταφέρει κάποια πόλωση. Τι γίνεται όμως στη περίπτωση της περιδίνησης; Συμβαίνει κάτι ανάλογο: το μέτωπο κύματος του κάθε φωτονίου είναι περιστρεφόμενο!

Κάθε φωτόνιο καταλαμβάνει όλη τη φωτεινή δέσμη τουλάχιστον στο εγκάρσιο επίπεδο και απλώνεται αρκετά μακριά από το κέντρο. Έτσι, η περιδίνηση δεν είναι μια συλλογική επίδραση ενός μεγάλου αριθμού φωτονίων, αλλά είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, το οποίο μεταφέρεται και στα μεμονωμένα φωτόνια. Αν μειώσουμε τη φωτεινότητα της δέσμης στο βαθμό που τα φωτόνια σχηματίζουν μία ευθεία γραμμή (το ένα πίσω από το άλλο), η περιδίνηση της δέσμης δε θα χαθεί.

Από τη σκοπιά της Κβαντικής Μηχανικής, η πόλωση ενός φωτονίου είναι μια εκδήλωση του σπιν του (SAM) και η συστροφή μια εκδήλωση της τροχιακής στροφορμής (OAM) του φωτονίου (οι τιμές του αριθμού m , όπως φαίνεται στη εικόνα 2, αντιστοιχούν στην προβολή της τροχιακής στροφορμής). Το σπιν (SAM) και η τροχιακή στροφορμή (OAM) είναι οι συνιστώσες της συνολικής στροφορμής του φωτονίου και μπορούν να αλληλεπιδράσουν (σπιν-τροχιακή αλληλεπίδραση του φωτονίου). Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα λεπτό ζήτημα που σχετίζεται με το πόσο δικαιολογημένος είναι γενικά αυτός ο διαχωρισμός στις δύο αυτές συνιστώσες. Επιπλέον, το θέμα αυτό εκτείνεται πέρα από την οπτική, συζητείται ακόμη και στη σύγχρονη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων π.χ. εφαρμόζεται στα κουάρκ και στα γκλουόνια μέσα στο πρωτόνιο.

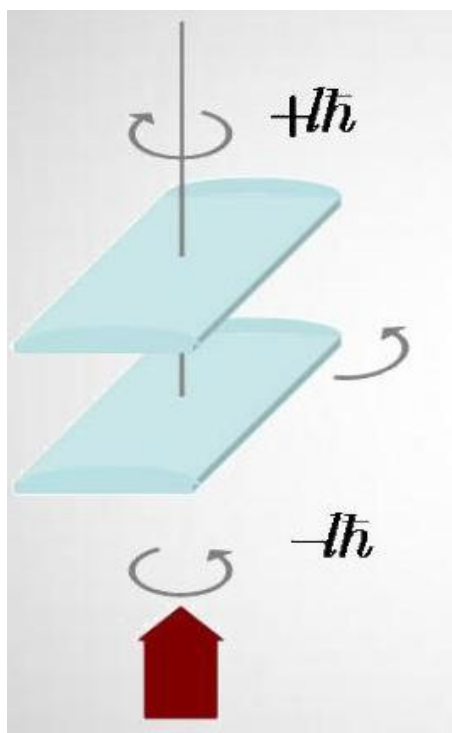
1.3 Ιστορική αναδρομή.

Το γεγονός ότι το κύμα φωτός μεταφέρει όχι μόνο ενέργεια και ορμή αλλά και στροφορμή ήταν γνωστό πριν από έναν αιώνα. Αρχικά, η στροφορμή αυτή συνδέθηκε μόνο με την πόλωση του φωτός, με άλλα λόγια με το σπιν του φωτονίου (SAM), όπως αποδείχθηκε μετά τη δημιουργία της Κβαντικής Θεωρίας. Αλλά, πολύ γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι τα φωτόνια μπορούν να μεταφέρουν και την τροχιακή στροφορμή (OAM). Τέλος, όταν ένα ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο μεταπίπτει από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη σε χαμηλότερη, εκπέμπει ένα φωτόνιο, το οποίο πρέπει να μεταφέρει τροχιακή στροφορμή.

Όλα αυτά δεν αποτελούσαν έκπληξη και δεν συνδέονταν με οποιοδήποτε "συνεστραμμένο φως " μόνο και μόνο επειδή τέτοια φωτόνια δεν διαδίδονται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το φωτόνιο που εκπέμπεται από ένα διεγερμένο άτομο διαδίδεται ως κύμα προς όλες τις κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Όταν ένα τέτοιο φωτόνιο προσπέσει σε μια συσκευή ή προκαλέσει κάποιο άλλο φυσικό φαινόμενο δρα τοπικά, δηλαδή μόνο με ένα μικρό τμήμα του μετώπου του και στη συνέχεια οδηγείται στην κβαντική κατάρρευση και από την περιδίνησή του δεν παραμένει κανένα ίχνος.

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν λείζερ. Οι επιστήμονες έμαθαν να διαχειρίζονται το φως των λείζερ, ανέπτυξαν τη θεωρία που περιγράφει το ηλεκτρομαγνητικό του πεδίο. Κάποια στιγμή έγινε κατανοητό ότι αυτές οι δύο ιδιότητες: η κατεύθυντικότητα της δέσμης φωτός και η συστροφή δεν αντικρούουν η μία την άλλη ούτε αντιβαίνουν στην Κβαντική Θεωρία, σύμφωνα με την οποία, το σπιν και η τροχιακή στροφορμή δε μπορούν να διαχωριστούν με απόλυτα σαφή τρόπο για οποιαδήποτε δέσμη φωτός . Όπως αποδείχθηκε ο διαχωρισμός αυτός είναι εφικτός για μια εστιασμένη ακτίνα λείζερ (ρυθμός). Στην πρωτοποριακή εργασία [10], το 1992 το ζήτημα αυτό

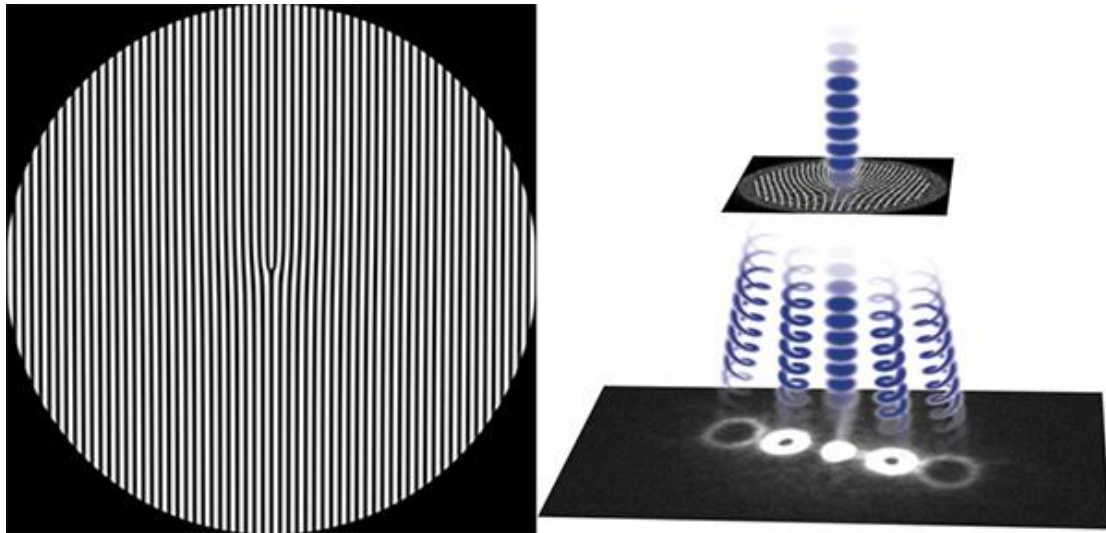
μελετήθηκε για πρώτη φορά ενδελεχώς. Εκτός από τη θεωρητική μελέτη στην εργασία αυτή προτείνονται και ειδικές συσκευές για τη δημιουργία και τον εντοπισμό του συνεστραμμένου φωτός.



Εικόνα 3: Μεταφορά στροφορμής [10].

Τρία χρόνια αργότερα το συνεστραμμένο φως επετεύχθη πειραματικά. Οι πειραματιστές πείστηκαν ότι ο ειδικά διαμορφωμένος ρυθμός λέιζερ ανταποκρίνεται πραγματικά στο συνεστραμμένο φως. Το πείραμα ήταν εντυπωσιακό: εστίασαν τη δέσμη λέιζερ πάνω σε αιωρούμενο μικροσωμάτιο το οποίο απορροφώντας το φως άρχισε να περιστρέφεται και η κατεύθυνση της περιστροφής δεν εξαρτιόταν από την πόλωση του φωτός, αλλά από τη φορά περιστροφής του μετώπου κύματος.

Μετά από αυτό το επίτευγμα οι μελέτες του φαινομένου αυτού πήραν μορφή χιονοστιβάδας. Αναπτύχθηκαν διάφοροι τρόποι δημιουργίας φωτονίων με τροχιακή στροφορμή (OAM) [13],[14] ο απλούστερος από τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και στο σπίτι. Γι' αυτό θα πρέπει να πάρουμε έναν καλό εκτυπωτή laser και να εκτυπώσουμε σε μια διαφάνεια φράγμα περίθλασης με εξάρθρωση (Εικόνα 4 αριστερά), αλλά σε πολύ μικρή κλίμακα. Μετά από αυτό, η εξάρθρωση, δηλαδή το κέντρο του φράγματος, πρέπει να φωτιστεί με μια δέσμη συμβατικού λέιζερ, αλλά με καλή εγκάρσια συνοχή. Το αποτέλεσμα θα είναι ο σχηματισμός μιας σειράς από δέσμες, όπου η κάθε μία από αυτές, θα μεταφέρει δική της τροχιακή στροφορμή (OAM). (Εικόνα 4 δεξιά) .



Εικόνα 4: *Αριστερά :* φράγμα περίθλασης με εξάρθρωση από την ιστοσελίδα hank.uoregon.edu . *Δεξιά :* μετά το πέρασμα ενός τέτοιου πλέγματος μία δέσμη χωρίζεται σε διάφορες καταστάσεις με διαφορετική τροχιακή στροφορμή.
Πηγή: ιστοσελίδα www.sciencemag.org.

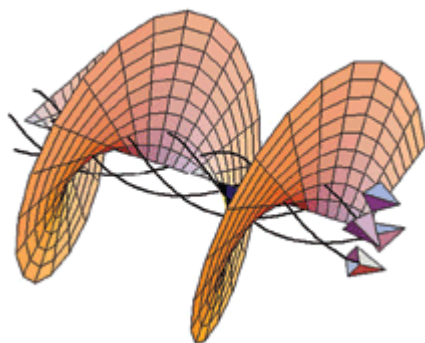
Παράλληλα με τη βασική έρευνα άρχισαν να αναπτύσσονται διάφοροι τομείς εφαρμογών του συνεστραμμένου φωτός όπως η Κβαντική Θεωρία Πληροφορίας, χειρισμός μικροσωματιδίων και μικρομηχανών, μικροσκοπήση, αστροφυσική, κ.α. Όλες αυτές οι εφαρμογές έχουν πλέον γίνει κλασικές.

1.4 Η στροφορμή του φωτός.

Στην Κλασική Μηχανική, υπάρχουν δύο τύποι κίνησης του στερεού σώματος (μηχανικού στερεού): μεταφορική (δηλαδή η μετατόπιση του κέντρου μάζας) και περιστροφική. Στη μεταφορική κίνηση το κατάλληλο μέγεθος για να περιγράψουμε το πόσο γρήγορα κινείται ένα σώμα κάποια στιγμή, είναι η ταχύτητα. Στη στροφική η γωνιακή ταχύτητα (η κατεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας υποδεικνύει την άξονα περιστροφής). Η ορμή και η στροφορμή είναι τα μεγέθη ιδιαίτερα χρήσιμα για την περιγραφή της μεταφορικής και στροφικής κίνησης αντίστοιχα, επειδή για ένα μονωμένο σύστημα δεν μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου (ενώ η γωνιακή ταχύτητα, για παράδειγμα, μπορεί να αλλάξει).

Τα δύο αυτά μεγέθη -η ορμή και η στροφορμή- ως προς έναν άξονα ορίζονται και για τα κύματα. Ωστόσο, το κύμα είναι απλωμένο στο χώρο, δεν είναι ούτε υλικό σημείο, ούτε μηχανικό στερεό, γι' αυτό είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί πρώτα η πυκνότητα ορμής και η πυκνότητα της στροφορμής. Το γεγονός ότι ένα κύμα μεταφέρει ορμή, κατά τη διάδοσή του, είναι γνωστό από τα σχολικά βιβλία. Πώς να φανταστεί κανείς ένα κύμα να μεταφέρει την στροφορμή; Ειδικά όταν πρόκειται για ένα γραμμικό κύμα, δηλαδή, κύμα του οποίου οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται κατά τη διάδοσή του;

Επιπλέον, η στροφορμή σχετίζεται με την περιστροφή και η περιστροφή είναι μια κίνηση κατά μήκος μιας καμπύλης, ενώ το γραμμικό κύμα, θα μπορούσε να υποθέσει κανείς, ότι διαδίδεται ευθύγραμμα και δεν μπορεί να στροβιλίζει. Η πραγματικότητα είναι διαφορετική και αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι το κύμα δεν είναι υλικό σημείο, ούτε στερεό σώμα. Το φαινόμενο της συμβολής των κυμάτων δίνει διαφορετικά αποτελέσματα σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Σε κάθε σημείο του χώρου, δηλαδή, τοπικά το κύμα «τρέχει» προς τη δική του κατεύθυνση ακόμα και κάθετα στην ευθεία διάδοσης όλου του κύματος. Με άλλα λόγια, η ενέργεια του κύματος, όχι μόνο μεταφέρεται προς τα εμπρός, αλλά στο δρόμο ανακατανέμεται στο χώρο και αυτό είναι μία από τις συνέπειες της συμβολής των κυμάτων. Κατά τη διάρκεια της συμβολής των κυμάτων οι « τοπικές κατευθύνσεις κίνησης» ,δηλαδή η ροή της ενέργειας των κυμάτων μπορεί να στρέφεται γύρω από έναν επιλεγμένο άξονα. Η εικόνα 5 που ακολουθεί δείχνει αυτό το φαινόμενο.



Εικόνα 5: Η ισοφασική επιφάνεια στο συνεστραμμένο κύμα. Εικόνα από το περιοδικό *Science*, 296 (2002) 2316 .

Η επιφάνεια με τη μορφή ενός τριμπουσόν σε αυτή την εικόνα είναι το μέτωπο του κύματος, δηλαδή μια επιφάνεια σημείων του κύματος, τα οποία βρίσκονται σε φάση. Τα βέλη, τα οποία είναι κάθετα προς την επιφάνεια αυτή και «τρέχουν» κατά μήκος ελικοειδών γραμμών, υποδεικνύουν την τοπική διεύθυνση της κίνησης του κύματος. Για ένα επίπεδο κύμα, οι ισοφασικές επιφάνειες είναι επίπεδες και τα επίπεδα αυτά είναι κάθετα στα βέλη και παράλληλα μεταξύ τους. Στην περίπτωση της εικόνας 5, η ισοφασική επιφάνεια στροβιλίζει και τα βέλη «περιτυλίζουν» τον άξονα της διάδοσης του κύματος. Αυτό το «περιτύλιγμα» δίνει στο κύμα μια περιστροφή: το κύμα διαδίδεται προς τα εμπρός και περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της κίνησης. Δεν πρόκειται για την περιστροφή του κύματος σαν να είναι στερεό σώμα, αλλά για το αποτέλεσμα της επαλληλίας των κυμάτων. Παρ'όλα αυτά, αυτή είναι μία πραγματική περιστροφή στον χώρο. Το κύμα αυτό μεταφέρει

στροφορμή, και αν κάποιο σωματίο το απορροφήσει, η στροφορμή θα μεταφερθεί σε αυτό και το σωματίο θα αρχίσει να περιστρέφεται.

Μπορούμε να ρίξουμε στην εικόνα αυτή μία διαφορετική ματιά. Σε κάθε σημείο του επιπέδου, το οποίο είναι κάθετο στον άξονα z (άξονα διάδοσης του κύματος), αντιστοιχεί διαφορετική φάση του κύματος. Αν σε αυτό το επίπεδο διαγράψουμε έναν κύκλο με κέντρο το σημείο του άξονα z θα παρατηρήσουμε ότι η φάση αυξάνεται και σε μία στροφή κατά 2π .

Η μιγαδική κυματοσυνάρτηση έχει τη γωνιακή εξάρτηση $\exp(i\varphi)$, όπου φ - γωνία σε αυτό το επίπεδο. Η εξάρτηση από τη γωνία θα είναι $\exp(im\varphi)$, όπου m ακέραιος, στην περίπτωση που η αύξηση της φάσης σε μία στροφή είναι $2m\pi$ (το κύμα συστρέφεται περισσότερο).

Στην Κλασική Μηχανική, η στροφορμή ενός υλικού σημείου καθορίζεται από τη θέση και την ορμή του : $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. Πρόκειται για τη γνωστή από τα σχολικά βιβλία (τροχιακή) στροφορμή με μόνη διαφορά ότι αναφέρεται στο κύμα και όχι στο σωματίδιο. Δηλαδή, η διαφορά είναι στο αντικείμενο και όχι στο φυσικό μέγεθος. Η Γη η οποία στρέφεται γύρω από τον Ήλιο, το ηλεκτρόνιο το οποίο κινείται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και το περιστρεφόμενο φως έχουν στροφορμή η οποία ορίζεται με τον ίδιο τρόπο: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. Η μόνη διαφορά μεταξύ της Γης και των άλλων δύο (ηλεκτρονίου και φωτός) είναι η Κλασική και Κβαντική προσέγγιση αντίστοιχα. Παρόλα αυτά η ροή ενέργειας γύρω από τον άξονα της κίνησης περιγράφεται διαφορετικά για το στερεό σώμα και διαφορετικά για το κύμα.

Στην Κυματομηχανική, μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον τύπο (για την πυκνότητα της στροφορμής), αλλά το μόνο που χρειάζεται να διευκρινιστεί είναι η έννοια της ορμής του κύματος. Στην γλώσσα της Κβαντομηχανικής, η ορμή αυτή ορίζεται ως εξής: $\vec{p} = -i\hbar \nabla$. Αυτό που προκύπτει είναι ότι ο τελεστής της στροφορμής σε αυτή την περίπτωση θα έχει τη γωνιακή εξάρτηση: $L_z = -i\hbar \partial_\phi$. Δηλαδή, ένα κύμα μεταφέρει m κβάντα της στροφορμής όταν η κυματοσυνάρτηση περιέχει παράγοντα $\exp(im\varphi)$.

Στην Κβαντική Μηχανική, η στροφορμή έχει δύο διαφορετικές συνιστώσες την τροχιακή στροφορμή και το σπιν. Όλα τα παραπάνω είναι η τροχιακή στροφορμή, δηλαδή μηχανική συστρόφη του κυματικού αντικειμένου γύρω από έναν άξονα. Η στροφορμή σπιν είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που δεν έχει σχέση με τη μηχανική κίνηση του αντικειμένου. Πρέπει να τονίσουμε ότι η τροχιακή στροφορμή δεν είναι σπιν και υπάρχουν σωματίδια με τροχιακή στροφορμή, αλλά χωρίς σπιν.

1.5 Διαχωρισμός σπιν και τροχιακής στροφορμής.

Όσον αφορά τα φωτόνια που μεταφέρουν την τροχιακή στροφορμή, προκύπτει ένα εύλογο ερώτημα. Είναι ορθό να διαχωρίζουμε την στροφορμή του φωτονίου σε τροχιακή (OAM) και σπιν συνιστώσα;

Το σπιν (δηλαδή, πόλωση) και η τροχιακή στροφορμή (OAM) είναι οι συνιστώσες της συνολικής στροφορμής. Στην κβαντική μηχανική, τα δύο αυτά μεγέθη περιγράφονται από τους τελεστές τους: \hat{S} και \hat{L} , έτσι ο τελεστής της συνολικής στροφορμής είναι το άθροισμά τους $\hat{J} = \hat{S} + \hat{L}$. Στην Κβαντική Μηχανική είναι σαφές τι είναι το ένα και τι το άλλο, οπότε το ερώτημα της ορθότητας του διαχωρισμού δεν υφίσταται.

Στη θεωρία πεδίου (ακόμη και στη μη Κβαντική), τα πράγματα αρχίζουν και δυσκολεύουν. Εκεί εισάγεται ένα πεδίο με πολλές συνιστώσες και μελετώνται πώς αυτό μεταβάλλεται κατά τη μετάβαση από το ένα σύστημα αναφοράς σε άλλο. Από την θεώρηση αυτή προκύπτει η έννοια της στροφορμής που διατηρείται και η έννοια του σπιν. Η συνολική στροφορμή (η πυκνότητά του) για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί εύκολα να γραφεί, χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδία: $\vec{J} = \vec{r} \times \langle \vec{E} \times \vec{B} \rangle$. Το μέγεθος αυτό περιγράφεται από τις θεωρίες βαθμίδας (gauge theories) και συνεπώς μπορεί να παρατηρηθεί. Ωστόσο, στην Κβαντική Θεωρία του πεδίου ο διαχωρισμός της στροφορμής του φωτονίου σε δύο διανυσματικούς τελεστές, σε τροχιακό (OAM) και σπιν αποτυγχάνει.

Τελικά διαχωρίζονται ή όχι;

Ας ανατρέξουμε ξανά στα φωτόνια. Τι ακριβώς είναι γνωρίζουμε σήμερα;

Πρώτον, ο διαχωρισμός της ολικής στροφορμής σε σπιν (SAM) και τροχιακή (OAM) μπορεί να σημαίνει διαφορετικά πράγματα. Αυτό μπορεί να είναι ο διαχωρισμός τελεστών ως διανυσμάτων, μπορεί να είναι ο διαχωρισμός των z-συνιστωσών των τελεστών (δηλαδή αυτές που έχουν να κάνουν με την ελικοειδή μορφή) και μπορεί να είναι ο διαχωρισμός με βάση τη μέση τιμή αυτών των τελεστών για ορισμένες καταστάσεις των φωτονίων.

Δεύτερον, αν μιλάμε για την παραξονική (paraxial) προσέγγιση (δηλαδή, το κύμα φωτός αλλάζει πολύ αργά στο εγκάρσιο επίπεδο), ο διαχωρισμός αυτός αποδεικνύεται εύκολα.

Γράφουμε το διάνυσμα δυναμικού (vector potential) σπειροειδούς μορφής (με αριθμό των περιστροφών m) και θεωρούμε ότι έχει μόνο μία συνιστώσα (για παράδειγμα, κατά μήκος του άξονα X), η οποία αντιστοιχεί σε γραμμική πόλωση. Υπολογίζουμε την πυκνότητα της συνολικής στροφορμής (ορίζεται μοναδικά), το διαιρούμε με την πυκνότητα της ροής και προκύπτει m / ω (ω -

γωνιακή συχνότητα). Στη γλώσσα της Κβαντικής Μηχανικής, αυτό σημαίνει ότι κάθε φωτόνιο μεταφέρει m κβάντα της συνολικής στροφορμής.

Ας γράψουμε τώρα διάνυσμα δυναμικού με δύο μιγαδικές συνιστώσες X και Y με διαφορά φάσης $\pi/2$. Αυτό αντιστοιχεί στην κυκλική πόλωση.

Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς από τους οποίους προκύπτει $(m+1)/\omega$ για τη έλικα με θετική φορά και $(m-1)/\omega$ για αρνητική. Δηλαδή, οι συνεισφορές του σπιν (SAM) και της τροχιακής στροφορμής (OAM) στην μέση τιμή της συνολικής στροφορμής είναι ευδιάκριτες.

Τι θα συμβεί, αν δεν ακολουθήσουμε την παραξονική (paraxial) προσέγγιση; Εάν επαναλάβουμε τους ίδιους υπολογισμούς, διαπιστώνουμε ότι η σπιν και η τροχιακή στροφορμή δεν μπορούν να προστεθούν και να σχηματίσουν την ολική στροφορμή.

Ωστόσο, την κατάσταση αυτή μπορεί να την περιγράψει κάποιος ως εξής: στο μη παραξονικό (nonparaxial) φως που στροβιλίζεται παρατηρείται *σπιν-τροχιακή αλληλεπίδραση* (και αυτό σε ένα γραμμικό κύμα!), η οποία αποτρέπει αυτόν τον διαχωρισμό. Την άποψη αυτή προτείνει ο K. Bliokh [36].

Πρέπει να επισημάνουμε ότι, πειραματικά είναι δυνατό να επιτευχθεί ο συνδυασμός στροβιλισμού και πόλωσης σε μια δέσμη φωτός. Το ερώτημα είναι πώς μπορούμε να περιγράψουμε με σωστό τρόπο τις καταστάσεις αυτές;

1.6 Πειραματικά δεδομένα.

Μπορεί να φαίνεται ότι η εν λόγω περιστρεφόμενο κύμα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί πειραματικά. Στην πραγματικότητα, οι ακτίνες λέιζερ που φέρουν τροχιακή στροφορμή είχαν ανακαλυφθεί το 1992. Οι ακτίνες αυτές μπορούν να παραχθούν με τους εξής τρόπους:

α) ξεχωρίζοντας και «προσθέτοντας» τους διεγερμένους εγκάρσιους ρυθμούς από την ακτίνα του λέιζερ

β) μετά τη διέλευση της ακτίνας από το ειδικό «φασικό» φράγμα περίθλασης (με φουρκέτα) ή από ειδικό ολόγραμμα.

Σήμερα το «περιστρεφόμενο» φως χρησιμοποιείται στην ατομική φυσική, στην φυσική των επιφανειών και υπάρχει ενδιαφέρον από τους ειδικούς στην Κβαντική Θεωρία της Πληροφορίας.

Εύκολα μπορούμε να πετύχουμε «στρεφόμενα ραδιοκύματα». Ο σταθμός HAARP ο οποίος βρίσκεται στην Αλάσκα των ΗΠΑ εκπέμπει τέτοια ραδιοκύματα προς την ιονόσφαιρα και καταγράφει την ακτινοβολία η οποία παράγεται από αυτήν (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Ο σταθμός HAARP ο οποίος βρίσκεται στην Αλάσκα των ΗΠΑ.
Πηγή: www.haarp.alaska.edu

Όμως, είναι δύσκολο να πετύχουμε φωτόνια με OAM με ενέργειες μεγαλύτερες του ορατού φάσματος. Σε έρευνες που γίνονται χρησιμοποιούνται ακτίνες X και ακτίνες με ενέργειες μερικών GeV. Ήδη έχουν παραχθεί κύματα ηλεκτρονίων, ενέργειας 300 KeV με τροχιακό κβαντικό αριθμό $m \sim 100$ [38].

Νέα ιδιότητα του φωτός στην υπηρεσία της Αστρονομίας.

Η τροχιακή στροφορμή του ελικωμένου φωτός θα μπορούσε να αποδειχτεί ιδιαίτερα ελκυστική για τους αστρονόμους. Ακριβώς όπως ο Βόρειος Πόλος της Γης ανήκει σε όλες τις ωριαίες ατράκτους, έτσι και ο κεντρικός άξονας της δέσμης περιέχει κύματα κάθε δυνατής φάσεως. Όλα αυτά τα κύματα αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα κατά μήκος του άξονα να επικρατεί απόλυτο σκότος. Ως εκ τούτου, ο φακός εστιάζει το ελικωμένο φως όχι σε ένα σημείο αλλά σε ένα δακτύλιο. Το 2001, ο φυσικός Grover Swartzlander του Πανεπιστημίου της Αριζόνας πρότεινε να αξιοποιηθεί αυτό το χαρακτηριστικό για την αναζήτηση πλανητών έξω από το ηλιακό μας σύστημα [39]. Εγκατεστημένο σε ένα τηλεσκόπιο, ένα από τα ειδικά φράγματα περίθλασης θα συγκέντρωνε το αστρικό φως σε ένα δακτύλιο, αφήνοντας στο κέντρο μια τρύπα τόσο σκοτεινή ώστε ένα κοντινό αντικείμενο να γίνεται ορατό ακόμη κι αν είναι εκατομμύρια ή δισεκατομμύρια φορές αμυδρότερο. Οι σύγχρονοι του Νεύτωνα ίσως και εκείνοι θεωρούσαν εξάισιο το γεγονός ότι το λευκό φως μπορούσε να αναλυθεί στα χρώματα της ίριδας. Σήμερα, λοιπόν, το ελικωμένο φως είναι κάτι το εξίσου κοινότυπο.

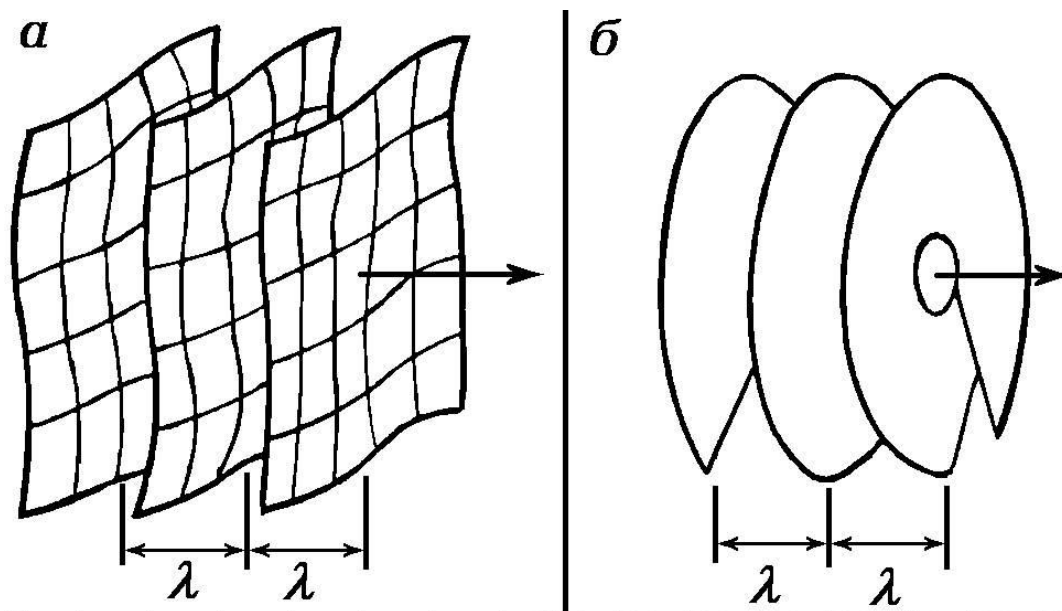
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Οπτικές δίνες.

Ο μεγάλος Γάλλος επιστήμονας Καρτέσιος πριν από τριακόσια χρόνια θεωρούσε ότι η σημερινή μορφή του υλικού κόσμου καθορίζεται από τους νόμους που διέπουν την περιστροφική κίνηση. Η πρόβλεψή του αυτή επαληθεύτηκε αργότερα πολλές φορές. Όπως γνωρίζουμε σήμερα τέτοιες κινήσεις παρατηρήθηκαν σε μοριακό επίπεδο, στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς ακόμα και στο διάστημα. Τα τελευταία 22 χρόνια (από το 1992) οι ερευνητές των λέιζερ μελετούν συνεστραμμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Το μέτωπο κύματος των πεδίων αυτών περιστρέφεται και μαζί με αυτό και η ροή ενέργειας στρέφεται γύρω από έναν επιλεγμένο άξονα. Αυτό μας επιτρέπει να μιλήσουμε για την ύπαρξη οπτικών δινών. Οι οπτικές δίνες αποτελούν σήμερα σημαντικό αντικείμενο μελέτης στα πλαίσια βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας. Singular optics είναι ένας νέος κλάδος της Οπτικής που ερευνά τις ιδιότητες των οπτικών δινών αλλά και το μηχανισμό σχηματισμού τους.

2.1 Χαρακτηριστικά οπτικών δινών.

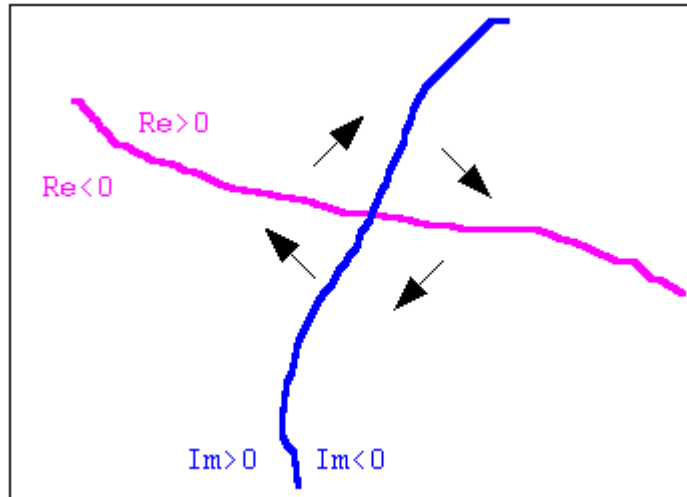
Όπως είναι γνωστό, η ακτινοβολία λέιζερ είναι μονοχρωματική και προσανατολισμένη. Αυτό μας επιτρέπει να περιγράψουμε τις ιδιότητές της χρησιμοποιώντας την έννοια της ισοφασικής επιφάνειας δηλαδή του μετώπου κύματος. Όλα τα σημεία του μετώπου έχουν την ίδια φάση. Εάν από την ακτίνα λέιζερ απουσιάζει η οπτική δίνη, τα μέτωπα κύματος είναι επίπεδα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με το μήκος κύματος λ (Εικόνα 7α). Στις πραγματικές ακτίνες λέιζερ παρατηρούνται διακυμάνσεις στο επίπεδο σχήμα του μετώπου κύματος χωρίς να μεταβάλλεται η τοπολογία του. Μια διαφορετική εικόνα προκύπτει όταν έχουμε οπτική δίνη. Η εμφάνιση των οπτικών δινών οφείλεται σε σημεία τα οποία παρατηρούνται στη επιφάνεια του μετώπου και ονομάζονται εξαρθρώσεις (screw dislocations). Ο ορός αυτός προέρχεται από τον αντίστοιχο της Φυσικής στερεάς κατάστασης και έχει να κάνει με τις δισδιάστατες ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος. Ο μαθηματικός όρος για αυτά τα σημεία είναι: ιδιαιτερότητες φάσης (phase singularity). Χάρη σε αυτόν ο αντίστοιχος τομέας της Οπτικής πήρε το όνομα «Ασυνήθιστη Οπτική» (Singular optics). Το όνομα αυτό προτάθηκε από τον M.S.Soskin το 1995. Στα σημεία αυτά το πλάτος των ταλαντώσεων του κύματος φωτός **μηδενίζεται** και η τιμή της φάσης **δεν** ορίζεται επειδή η ταχύτητα της αζιμουθιακής φάσης είναι άπειρη. Έτσι μπορούμε να μιλήσουμε για την «κατάρρευση» της φάσης. Το κύριο χαρακτηριστικό των εξαρθρώσεων είναι ότι κατά την πλήρη περιστροφή γύρω από το σημείο αυτό η φάση μεταβάλλεται κατά **2π**. Στην επιφάνεια του κυματικού μετώπου ενδέχεται να εμφανιστούν πολλές τέτοιες ιδιαιτερότητες οι οποίες διακρίνονται σε δεξιόστροφες και αριστερόστροφες ανάλογα με τη φορά περιστροφής του μετώπου του κύματος. Η εμφάνιση τέτοιων σημείων επιφέρει τη ριζική αλλαγή στην τοπολογία του μετώπου. Οι παράλληλες επίπεδες ισοφασικές επιφάνειες

παύουν να υφίστανται και μετατρέπονται σε μία ενιαία ελικοειδή επιφάνεια του κυματικού μετώπου. Στην εικόνα 7β απεικονίζεται το κυματικό μέτωπο της δέσμης ακτίνων λείζερ με την ιδιαιτερότητα να βρίσκεται στον άξονα. Γνωρίζοντας ότι η ροή φωτεινής ενέργειας καθορίζεται από το διάνυσμα Poynting κάθετο στην επιφάνεια μετώπου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή της ιδιαιτερότητας η ενεργειακή ροή περιστρέφεται.



Εικόνα 7. Μορφή κυματικού μετώπου α) χωρίς β) με ιδιαιτερότητα φάσης.
 Πηγή: [Wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

Στην περιοχή της ιδιαιτερότητας (singularity) το πλάτος φωτεινών ταλαντώσεων u μπορεί να παρασταθεί ως $u = C_x x + i C_y y$ (1) όπου x, y –καρτεσιανές συντεταγμένες στο επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης και C_x, C_y –σταθερές. Η χρησιμοποίηση του μιγαδικού πλάτους (1) δείχνει ότι οι φωτεινές ταλαντώσεις στην περιοχή της ιδιαιτερότητας φάσης μπορούν να παρασταθούν ως άθροισμα αρμονικών ταλαντώσεων με διαφορά φάσης $\pi/2$ (ο πολλαπλασιασμός του δεύτερου όρου με i ισοδυναμεί με αυτή τη διαφορά φάσης). Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι το πλάτος u αλλάζει πρόσημο με την ταυτόχρονη αλλαγή προσήμου από τα x και y . Η αλλαγή αυτή υποδεικνύει ότι οι ταλαντώσεις σε αντίθεση φάσης παρατηρούνται εκατέρωθεν του σημείου με ιδιαιτερότητα φάσης. Στο σημείο $(0,0)$, δηλαδή στο σημείο της ιδιαιτερότητας, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μιγαδικού πλάτους μηδενίζονται ταυτόχρονα. Αυτή η τελευταία ιδιότητα χρησιμοποιείται ευρέως για την ταυτοποίηση των σημείων αυτών. Τα σημεία με την ιδιαιτερότητα φάσης μπορούμε να τα αναπαραστήσουμε ως σημεία τομής των γραμμών αλλαγής προσήμου του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους. Ας αναλύσουμε το πλάτος του πεδίου E σε πραγματικό Re και φανταστικό Im μέρος και σχεδιάσουμε γραμμές όπου Re και Im μηδενίζονται (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Αναπαράσταση του σημείου με ιδιαιτερότητα φάσης ως σημείου τομής των γραμμών αλλαγής πρόσημου του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους του πεδίου E . Τα βέλη δείχνουν τη μεταβολή φάσης σε διάφορες περιοχές. Πηγή: Wikipedia.org

Επειδή οι γραμμές αυτές δεν είναι μόνο οι γραμμές μηδενισμού αλλά και της αλλαγής προσήμου των Re και Im , τα σημεία τομής τους θα είναι τα σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης. Γι' αυτό στα σημεία αυτά το πλάτος είναι πάντα μηδέν. Όταν οι γραμμές αυτές όχι απλώς τέμνονται αλλά έχουν και κοινό τμήμα, τότε η περιοχή αυτή αποτελεί ειδική περίπτωση και ονομάζεται «ακρινή εξάρθρωση» (edge dislocation). Η εξάρθρωση αυτή σημαντική για τις πρακτικές εφαρμογές. Στο επίπεδο κάθετο στη δέσμη η περιοχή αυτή αποτελεί μία γραμμή πάνω στην οποία η φάση αλλάζει απότομα κατά π . Από τη συμβολή δύο πεδίων με ορθογώνιες «ακρινές εξαρθρώσεις», τα οποία έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$ μπορούμε να παράγουμε «ιδιαιτερότητα φάσης» ή οπτική δίνη.

Θέτοντας $Cx = \pm Cy = C$ και χρησιμοποιώντας τον τύπο του Euler, η σχέση (1) γράφεται:

$$u = C \cdot r \cdot \exp(\pm ia) \quad (2)$$

όπου $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ -απόσταση από το σημείο της ιδιαιτερότητας, δηλαδή ακτίνα, a -αζιμουθιακή γωνία. Η σχέση (2) αποτελεί τον γνωστό τρόπο γραφής του μιγαδικού πλάτους. Σύμφωνα με τον τρόπο αυτό, η συνάρτηση η οποία χαρακτηρίζει την κατανομή της φάσης στο επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση διάδοσης της δέσμης, συμπεριλαμβάνεται στον φανταστικό εκθέτη. Στην σχέση (2) ο μοναδικός παράγοντας a εκφράζει αυτήν τη συνάρτηση. Η μορφή της αντικατοπτρίζει την ομαλή αζιμουθιακή μεταβολή της φάσης. Η περιγραφή αυτή αφορά το σημείο με ιδιαιτερότητα πρώτης τάξης. Η μεταβολή της φάσης κατά την πλήρη περιστροφή γύρω από το σημείο αυτό ισούται με 2π . Υπάρχουν και σημεία με ιδιαιτερότητες ανώτερων τάξεων. Η μεταβολή της φάσης κατά την πλήρη περιστροφή γύρω από αυτά τα σημεία είναι ίση με $2\pi I$, όπου I -ακέραιος αριθμός διάφορος του μηδενός. Το μέγεθος I ονομάζεται τάξη της εξάρθρωσης ή τοπολογικό φορτίο της επιφάνειας του

μετώπου του κύματος. Οι εξαρθρώσεις του κυματικού μετώπου διακρίνονται σε αριστερόστροφες (αρνητικές) και δεξιόστροφες (θετικές). Για την περιγραφή του πλάτους χρησιμοποιείται τώρα η σχέση:

$$u = C \cdot r^l \cdot \exp(\pm il\alpha) \quad (3)$$

Το 1979 για πρώτη φορά επιτεύχθηκε μία δέσμη λέιζερ η οποία περιείχε σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης από τους Vaughan, J.M. et al. Από τη συμβολή δύο ρυθμών Hermit-Gauss HG₀₁ και HG₁₀ μέσα στη συσκευή λέιζερ(Kr⁺) σχηματίστηκε ρυθμός **Laguerre-Gaussian** LG₀₁. Το 1992 ο L. Allen έδειξε ότι οι ρυθμοί LG έχουν τροχιακή στροφορμή. Την ίδια στροφορμή έχουν και όλες οι οπτικές δίνες, δηλαδή δέσμες λέιζερ με ιδιαιτερότητα φάσης (dislocations or singularities). Το 1989 προτάθηκε όρος «οπτική δίνη» (optical vortex) από τους Couillet, P. et al. Το 1990 ο M.S.Soskin πέτυχε τη δημιουργία οπτικής δίνης με τη βοήθεια φράγματος περίθλασης με «φουρκέτα» .Τέλος το 1992 παρόμοιο αποτέλεσμα ανήγγελλε Khonina, S.N. et al. με χρήση όμως τώρα σπειροειδούς πλάκας φάσης.

2.2 Τρόποι καταγραφής των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης.

Η εμφάνιση των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης (singularity) στο μέτωπο του κύματος των δεσμών λέιζερ είναι φασικό φαινόμενο. Γι'αυτό από τον τρόπο κατανομής της έντασης σε μία δέσμη λέιζερ δεν μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για τον τρόπο κατανομής φάσης στην περιοχή της ιδιαιτερότητας. Ως εκ τούτου ο μοναδικός αξιόπιστος τρόπος ταυτοποίησης των σημείων αυτών βασίζεται στις πληροφορίες που παίρνουμε από την συμβολή. Τα συμβολογράμματα της εγκάρσιας τομής της φωτεινής δέσμης λαμβάνονται με διάφορους τρόπους. Ο πιο εύκολος τρόπος στηρίζεται στη συμβολή του κύματος που μελετάμε με ένα άλλο παρόμοιο επίπεδο ή σφαιρικό κύμα. Τα δύο αυτά κύματα πρέπει βεβαίως να είναι συμφασικά. Ας εξετάσουμε τις εικόνες συμβολής για τα κύματα με τις ιδιαιτερότητες πρώτης και δεύτερης τάξης. Επιλέγοντας ως υποστηρικτικό ένα παραξονικό σφαιρικό κύμα πλάτους α και ακτίνας μετώπου R, το συνολικό μιγαδικό πλάτος θα είναι:

$$u_{\Sigma} = C \cdot r^l \cdot \exp(\pm il\alpha) + \alpha \exp(i \frac{\pi r^2}{\lambda R} + i\beta) \quad (4)$$

όπου β -αποσυντονισμός φάσεων μεταξύ των συμβαλλόμενων κυμάτων.

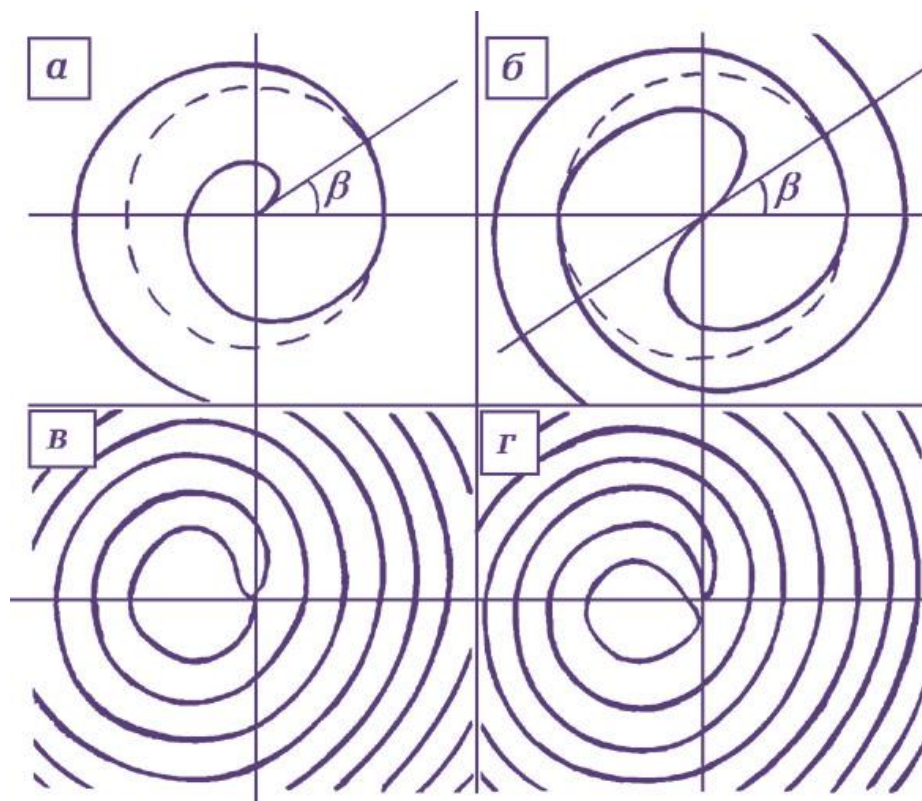
Ο παράγοντας $\frac{\pi r^2}{\lambda R}$ καθορίζει τη φασική μετατόπιση μεταξύ σφαιρικού και

επίπεδου κύματος. Αν συμβολίσουμε με $r' = \sqrt{\frac{\pi r^2}{\lambda R}}$, τότε μπορούμε να βρούμε

τη συνθήκη την οποία ικανοποιούν οι σκοτεινές γραμμές, αφού πρώτα

εξισώσουμε με το μηδέν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σχέσης (4). Η συνθήκη αυτή είναι: $r' = \sqrt{1a - \beta}$ (5)

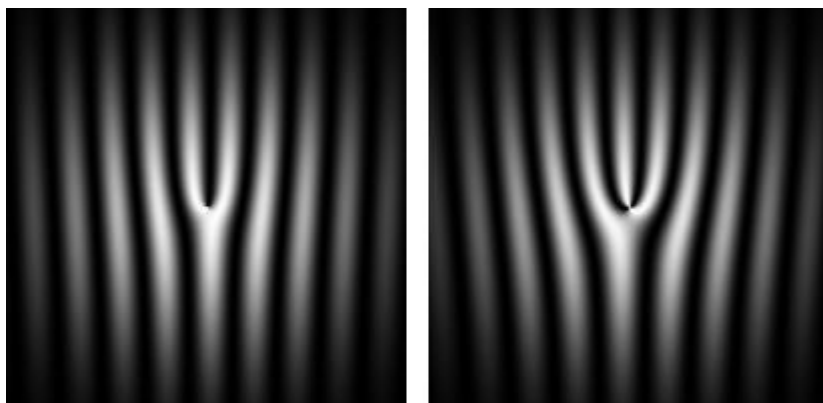
Η εικόνα 9 (στην πρώτη σειρά) δείχνει τη δομή των σκοτεινών γραμμών στο συμβολογράφημα για τις ιδιαιτερότητες φάσης (singularity) πρώτης και δεύτερης τάξης αντίστοιχα. Στην πρώτη τάξη αντιστοιχεί η μονή έλικα ενώ στη δεύτερη η διπλή. Οι γραμμές αυτές είναι ελικοειδείς κροσσοί συμβολής. Με τη διακεκομμένη γραμμή παριστάνεται ο πρώτος σκοτεινός δακτύλιος στην περίπτωση συμβολής ενός σφαιρικού και ενός επίπεδου κύματος χωρίς ιδιαιτερότητες φάσης. Η παράμετρος β δεν επηρεάζει τη δομή του συμβολογραφήματος. Η μεταβολή του οδηγεί μόνο στη στροφή των ελίκων γύρω από τον άξονά τους. Αν η ιδιαιτερότητα φάσης έχει μετατοπιστεί σε σχέση με τον άξονα του σφαιρικού κύματος, τότε η δομή του συμβολογραφήματος μεταβάλλεται (εικόνα 9, κάτω σειρά). Στην περίπτωση πρώτης τάξης εμφανίζεται ένας κροσσός επιπλέον, ενώ στη δεύτερη τάξη δύο κροσσοί επιπλέον.



Εικόνα 9: Πρώτη στήλη: συμβολογραφήματα για την ιδιαιτερότητα πρώτης τάξης (χωρίς και με μετατόπιση σε σχέση με τον άξονα του σφαιρικού κύματος αντίστοιχα). Δεύτερη στήλη: ομοίως για τη δεύτερη τάξη. Πηγή: Wikipedia.org

Τα σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης στα συμβολογραφήματα (στην πραγματικότητα μιλάμε για ολογράμματα μετώπου κύματος) παρουσιάζουν

ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα: τη διακλάδωση των κροσσών συμβολής (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Συμβολογραφήματα με σημεία ιδιαιτερότητας φάσης πρώτης αριστερά και δεύτερης δεξιά. Πηγή:[40]

Η ύπαρξη της διακλάδωσης («φουρκέτας») στο συμβολογράφημα αποτελεί κριτήριο ύπαρξης ιδιαιτερότητας φάσης.

Ο εντοπισμός των σημείων με διακλάδωση κροσσών συμβολής μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με πραγματικό πείραμα όσο και με χρήση προσομοιώσεων. Στη δεύτερη περίπτωση αναλύεται η δομή του συμβολογραφήματος που μας παρέχει ο υπολογιστής. Το συμβολογράφημα αυτό είναι αποτέλεσμα εικονικής επαλληλίας μιας δέσμης πολλών ρυθμών και ενός επίπεδου ή σφαιρικού ομογενούς κύματος. Στην προσομοίωση σε υπολογιστή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλο τρόπο καταγραφής των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης. Ο τρόπος αυτός βασίζεται στο ότι τα σημεία αυτά ταυτίζονται με σημεία τομής των γραμμών μηδενισμού πραγματικού και φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους.

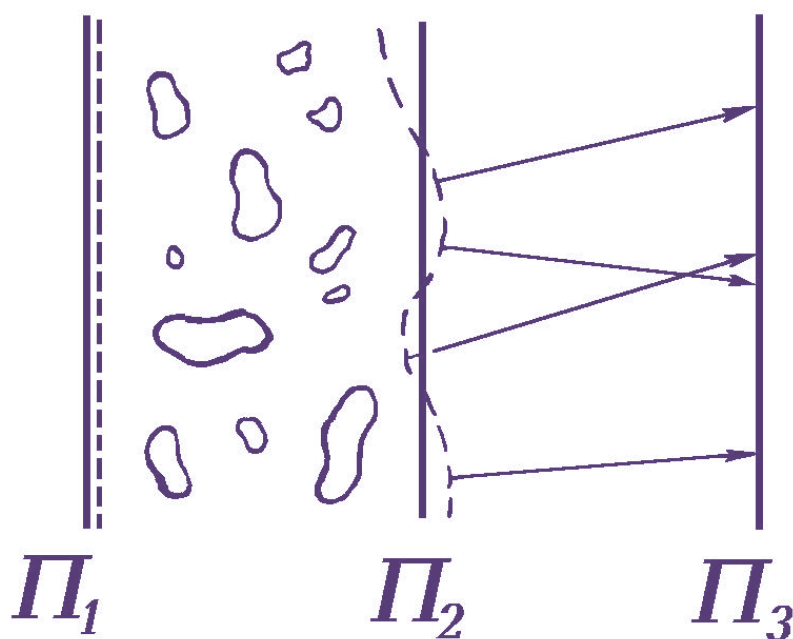
2.3 Μηχανισμός δημιουργίας οπτικών δινών.

Υπάρχουν ποικίλες φυσικές διεργασίες που οδηγούν στην εμφάνιση των οπτικών δινών. Οι οπτικές δίνες μπορούν να σχηματιστούν κάτω από ορισμένες συνθήκες λόγω της συμβολής των ρυθμών λέιζερ με αρχικά κανονικό μέτωπο κύματος καθώς διαδίδονται είτε σε ένα μέσο του οποίου δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται με τυχαίο τρόπο είτε σε μη γραμμικό μέσο, καθώς και μέσα σε διηλεκτρικό πολυρυθμικό κυματοδηγό ή διέρχεται μέσα από ειδικά κατασκευασμένα ολόγραμμα. Επιπλέον, οι οπτικές δίνες μπορούν να σχηματιστούν μέσα στα αντηχεία των λέιζερ.

2.3.1 Οπτικές δίνες σε μη ομοιογενή μέσα.

Τις περισσότερες φορές οι οπτικές δίνες των δεσμών λέιζερ δημιουργούνται κατά τη διάδοσή τους σε μέσα με τυχαία ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης. Έτσι τα σημεία του κυματικού μετώπου με ιδιαιτερότητα φάσης έχουν

παρατηρηθεί καθώς διανύονται μεγάλες αποστάσεις μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Η οπτική ανομοιογένεια του ατμοσφαιρικού αέρα οφείλεται στους τυρβώδεις στροβιλισμούς λόγω κλίσεων του πεδίου των θερμοκρασιών της τροπόσφαιρας. Στην εικόνα 11 απεικονίζεται η μεταβολή του μετώπου του κύματος (διακεκομμένες γραμμές) της ακτινοβολίας λέιζερ καθώς διέρχεται από ένα ανομοιογενές μέσο του οποίου ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται με τυχαίο τρόπο. Το επίπεδο Π_1 αντιστοιχεί στο αρχικό σχήμα του μετώπου. Μεταξύ Π_1 και Π_2 η ακτινοβολία συναντά ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης. Κοντά στο Π_2 στο μέτωπο του κύματος εμφανίζονται μεταβολές φάσης οι οποίες οφείλονται στις αυξομειώσεις της ταχύτητας διάφορων περιοχών του κυματικού μετώπου. Οι διαταραχές του κυματικού μετώπου στο Π_2 επιφέρουν αποκλίσεις των διανυσμάτων της εικόνας 11 από την αρχική διεύθυνση του κύματος. Τα διανύσματα αυτά είναι κάθετα στο μέτωπο του κύματος σε διάφορα σημεία του. Αν η καμπυλότητα της ισοφασικής επιφάνειας είναι σημαντική, τότε τα διανύσματα τέμνονται, προκαλώντας τη συμβολή διάφορων περιοχών του κυματικού μετώπου στο επίπεδο παρατήρησης Π_3 .

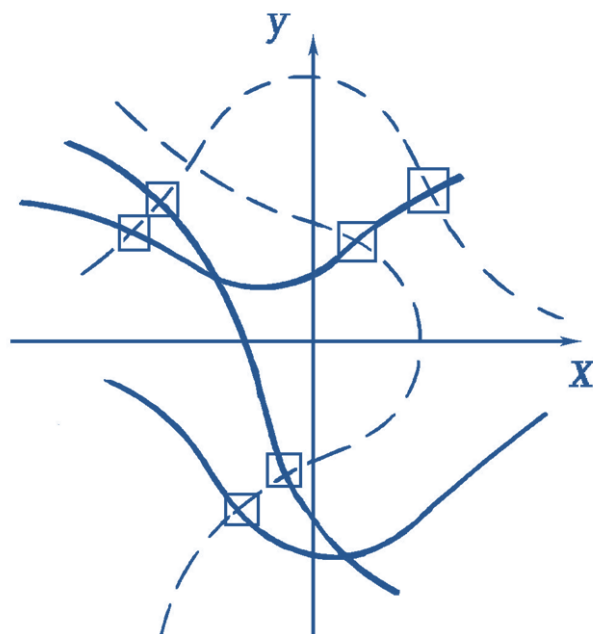


Εικόνα 11: Μεταβολή κυματικού μετώπου σε ανομοιογενές μέσο. Πηγή: Wikipedia.org

Η συμβολή των επιμέρους κυμάτων στο επίπεδο Π_3 προκαλεί τη χασοκική διαμόρφωση του πλάτους $a(x, y)$ και της φάσης $\varphi(x, y)$, όπου η κατανομή της έντασης έχει μορφή φωτεινών κουκίδων (speckle pattern). Την ίδια στιγμή εμφανίζονται σημεία τομής γραμμών αλλαγής προσήμου του πραγματικού και φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους.

$$u = a(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]. \quad (6)$$

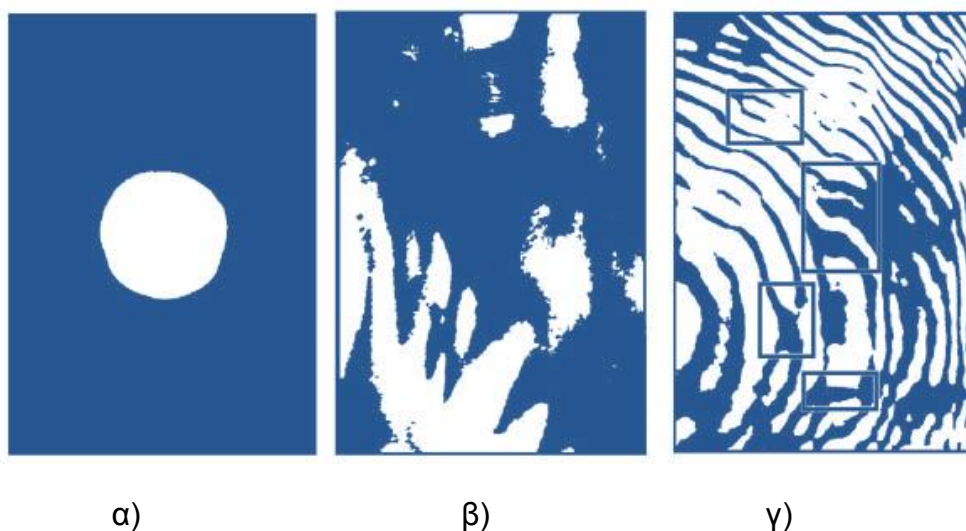
Τα σημεία αυτά έχουν ιδιαιτερότητα φάσης, όπως αναφέραμε παραπάνω. Στην εικόνα 12 αποτυπώνονται σημεία «απόλυτου μηδενός» του πεδίου, δηλαδή τα σημεία ταυτόχρονου μηδενισμού πραγματικού και φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους.



Εικόνα 12: Τα τετράγωνα του σχήματος περιβάλλουν σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι γραμμές μηδενισμού του πραγματικού μέρους, ενώ οι κανονικές του φανταστικού μέρους του μιγαδικού πλάτους. Πηγή: wikipedia.org

Συνεπώς η ύπαρξη της ανομοιογένειας του μέσου διάδοσης δημιουργεί συνθήκες εμφάνισης στοχαστικού πεδίου. Χαρακτηριστικό του πεδίου αυτού είναι η δημιουργία οπτικών δινών. Τα πειράματα επιβεβαιώνουν πλήρως την ορθότητα των παραπάνω θεωρητικών συμπερασμάτων. Στην εικόνα 13 παρουσιάζονται φωτογραφίες ακτίνας λέιζερ πριν και μετά τη διέλευση απόσταση 600 μέτρων μέσα στην ατμόσφαιρα. Η ακτίνα λέιζερ πέρασε μέσα από τις περιοχές με τυρβώδεις στροβιλισμούς μικρής κλίμακας. Η αρχική δομή της δέσμης (εικόνα 13α) χαρακτηρίζεται από υψηλή ομοιομορφία της κατανομής έντασης. Μετά τη διέλευση από την περιοχή με ατμοσφαιρικούς στροβιλισμούς (εικόνα 13β) η δομή της δέσμης υφίσταται μια ποιοτική αλλαγή. Η κατανομή της έντασης αποκτά μορφή φωτεινών κοκκίων (speckle pattern), φαινόμενο κοκκίωσης. Στα όρια των κοκκίων αυτών δημιουργούνται σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης. Από το συμβολογράφημα (εικόνα 13γ) μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τη δομή της φάσης. Η ύπαρξη των πολυάριθμων διακλαδώσεων των κροσσών συμβολής υποδεικνύει τη παρουσία μεγάλου αριθμού των εν λόγω σημείων τα οποία περικλείονται στα τετράγωνα για ευκολότερη παρατήρηση. Η σύγκριση του συμβολογραφήματος (εικόνα 13γ) με αυτή της εικόνας 9 (κάτω σειρά) δείχνει ότι όλα τα σημεία με ιδιαιτερότητα φάσης είναι πρώτης τάξης ($l=1$). Ο αριθμός

των αριστερόστροφων ($l=-1$) και των δεξιόστροφων ($l=+1$) εξαρθρώσεων είναι ίδιος. Αυτό μας επιτρέπει να μιλήσουμε για το νόμο της «διατήρησης του τοπολογικού φορτίου» της επιφάνειας του κυματικού μετώπου. Η απουσία των εξαρθρώσεων ανώτερων τάξεων οφείλεται στο γεγονός ότι είναι πολύ ασταθείς ακόμα και στις μικρές διαταραχές του πεδίου. Μία ασήμαντη διαταραχή του μετώπου κύματος προκαλεί τη διάσπαση της εξάρθρωσης ανώτερης τάξης σε αντίστοιχο αριθμό των εξαρθρώσεων με $l=1$.



Εικόνα 13: α) αρχική δέσμη β) ίδια δέσμη μετά από τη διέλευση από μια περιοχής της ατμόσφαιρας με στροβιλισμούς (φαινόμενο κοκκίωσης) γ) συμβολογράφημα. Πηγή:[41].

Ο αριθμός των εξαρθρώσεων σχετίζεται άμεσα με την ένταση των τυρβωδών διεργασιών στην ατμόσφαιρα, οποία μπορεί να ανιχνευθεί από το επίπεδο των τοπικών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και δείκτη διάθλασης. Η σχέση αυτή είναι τόσο ξεκάθαρη που αξιοποιήθηκε στις μεθόδους εντοπισμού των ατμοσφαιρικών διαταραχών όπου καταγράφονται και καταμετρούνται οι εξαρθρώσεις. Αυτές οι μέθοδοι αποτελούν θετικό παράδειγμα της χρήσης των μοναδικών ιδιοτήτων των οπτικών δινών. Συχνά, όμως, οι οπτικές δίνες προκαλούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις. Έτσι, η παρουσία των εξαρθρώσεων στο μέτωπο κύματος μιας ακτινοβολίας περιπλέκει σοβαρά τη λειτουργία της προσαρμοστικής συσκευής που χρησιμοποιείται στις οπτικές γραμμές επικοινωνίας για να αντισταθμίσει τις παραμορφώσεις φάσης. Το κύριο στοιχείο αυτής της συσκευής είναι ένας καθρέφτης μεταβλητής κυρτότητας. Με ένα ειδικό σύστημα ελέγχου, η κυρτότητα προσαρμόζεται στις καμπυλότητες του κυματικού μετώπου που προσπίπτει στον καθρέφτη, εξαλείφοντας έτσι τις διαταράξεις φάσης. Έχοντας την υψηλή απόδοση στις περιπτώσεις συμβατικών διαταράξεων, η συσκευή αυτή αδυνατεί να αντιμετωπίσει τις οπτικές δίνες, επειδή η ανακλαστική επιφάνεια του καθρέφτη δεν μεταβάλλει την τοπολογία της δέσμης. Παρόλα αυτά έχουν βρεθεί μέθοδοι

αντιμετώπισης των οπτικών δινών οι οποίες βασίζονται στις επιδράσεις των μη γραμμικών μέσων στο μέτωπο του κύματος.

Η μέθοδος δημιουργίας των οπτικών δινών που περιγράψαμε βασίζεται στην ύπαρξη ανομοιογένειας στα μέσα διάδοσης, η οποία μεταβάλλει την ταχύτητα του κύματος φωτός. Η κατάσταση είναι παρόμοια με εμφάνιση των τυρβωδών στροβιλισμών στα αέρια και υγρά. Η παρουσία εμποδίων ή επιφανειών που περιορίζουν τη ροή οδηγούν στις τοπικές μεταβολές ταχύτητας ροής και τη μετατροπή της στρωτής ροής σε τυρβώδη, όταν η ταχύτητα ροής είναι αρκετά υψηλή. Στην οπτική δέσμες χωρίς οπτικές δίνες αντιστοιχούν σε στρωτή ροή, ενώ με οπτικές δίνες σε τυρβώδη ροή.

2.3.2 Δημιουργία ελικοειδών πεδίων σε λέιζερ. Ελικοειδείς ρυθμοί.

Οι οπτικές δίνες μπορούν να σχηματιστούν άμεσα στις πηγές σύμφωνης ακτινοβολίας – λέιζερ με διαφορετικό τρόπο, παρόλο που μικρές ατέλειες ή ανομοιογένειες των οπτικών δομών παίζουν και εδώ κάποιο ρόλο. Όπως είναι γνωστό το λέιζερ αποτελείται από οπτικό αντηχείο (resonator) το οποίο περιέχει δύο παράλληλους επίπεδους ή σφαιρικούς καθρέφτες και το ενισχυτικό μέσο στο εσωτερικό του. Ένας καθρέφτης είναι ανακλαστικός και ο άλλος μερικώς διαπερατός. Ο μερικώς διαπερατός καθρέφτης επιτρέπει σ'ένα μέρος της φωτεινής ενέργειας να διαδοθεί εκτός αντηχείου ως ακτινοβολία λέιζερ που χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό κατευθυντικότητας. Το αντηχείο που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι εκείνο που αποτελείται από δύο κοίλους καθρέφτες (Αντηχείο Confocal). Για το αντηχείο Confocal μπορούμε να βρούμε λύσεις της κυματικής εξίσωσης σε μορφή ρυθμών. Ρυθμός ονομάζεται μια κυματική δέσμη, η οποία κατά τη διάδοσή της, διατηρεί τη μορφή κατανομής του πλάτους και της φάσης σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης. Σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων οι ρυθμοί αυτοί είναι Laguerre-Gaussian (LG) ρυθμοί. Οι ρυθμοί αυτοί περιγράφονται από τις LG συναρτήσεις:

$$\Psi(r, \varphi) = \frac{w_0}{w} \left(\sqrt{2} \frac{r}{w} \right)^l \cdot L_p^l \left(2 \frac{r^2}{w^2} \right) \exp \left\{ i(kz - \Phi) - r^2 \left(\frac{1}{w^2} - \frac{ik}{2R} \right) \right\} \begin{cases} \cos l\varphi \\ \sin l\varphi \end{cases} \quad (7)$$

Η σχέση (7) μπορεί να γενικευθεί και το πεδίο εντός αντηχείου να γραφεί:

$$u_{pl} \sim f_{pl} \left(\frac{r}{w} \right) \cdot \left(a_{pl} \cdot e^{il\alpha} + b_{pl} \cdot e^{-il\alpha} \right) \quad (8)$$

όπου w - παράμετρος του πλάτους της κατανομής.

$$f_{pl}(t) \sim t^\ell \cdot L_p^\ell(2t^2) \cdot e^{-t^2}, \quad L_p^\ell - \text{πολυώνυμα του Laguerre}$$

a_{pl}, b_{pl} - αυθαίρετες σταθερές. Ο δείκτης l χαρακτηρίζει την αζιμουθιακή

μεταβολή φάσης.

Η μορφή των εκθετών της εκθετικής συνάρτησης της σχέσης (8) δείχνει ότι υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας δεσμών λέιζερ με ελικοειδή μέτωπα κύματος. Στην πράξη, όμως, δεν είναι εύκολη η αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας. Το πρώτο εμπόδιο συνίσταται στην έλλειψη προτιμώμενης φοράς περιστροφής της οπτικής δίνης στο αντηχείο λέιζερ, με αποτέλεσμα την ισότητα των συντελεστών a_{pl} και b_{pl} . Έτσι η σχέση (8) παίρνει μορφή:

$$u_{pl} \sim f_{pl} \left(\frac{r}{w} \right) \cdot a_{pl} \cdot \begin{cases} \cos l\alpha \\ \sin l\alpha \end{cases} \quad (9)$$

Η σχέση (9) είναι σε πλήρη συμφωνία με τη σχέση (7). Το πεδίο (9) χαρακτηρίζεται από εναλλαγές προσήμου του πλάτους. Η εξαφάνιση της ελικοειδούς δομής του πεδίου οφείλεται στη συμβολή δινών με αντίθετο πρόσημο.

Η δεύτερη δυσκολία σχηματισμού δεσμών με οπτικές δίνες σχετίζεται με τη δημιουργία πολλών ρυθμών στο αντηχείο λέιζερ. Γενικότερα, σε ένα αντηχείο λέιζερ διεγείρεται ένα σύνολο ρυθμών με διαφορετικούς δείκτες ρ και l . Οι συχνότητες των ρυθμών αυτών δεν ταυτίζονται, η ακτινοβολία δεν είναι σύμφωνη, γ'αυτό δεν μπορούμε να μιλήσουμε για μία ενιαία ισοφασική επιφάνεια.

Ωστόσο, τα εμπόδια αυτά για τη δημιουργία των οπτικών δινών μπορούν να παρακαμφθούν. Για το σκοπό αυτό πρέπει να εξασφαλίσουμε την ταύτιση των συχνοτήτων των παραγόμενων ρυθμών. Ο πιο εύκολος τρόπος είναι η μετάβαση σε τέτοια γεωμετρική διαμόρφωση του αντηχείου η οποία εξασφαλίζει την ισότητα όλων των εκπεμπόμενων συχνοτήτων, δηλαδή οι δέσμες να είναι εκφυλισμένες ως προς τη συχνότητα στους δείκτες ρ και l . Ειδικότερα, ο εκφυλισμός αυτός επιτυγχάνεται στα αντηχεία Confocal. Η εικόνα 14 α) απεικονίζει την ακτινοβολία λέιζερ με αντηχείο Confocal. Είναι φανερό ότι, λόγω της συμβολής πολλών ρυθμών ίδιας συχνότητας και τυχαίας κατανομής φάσης, η ένταση της συμβολής παρουσιάζει αυξομείωση που είναι ακριβώς το φαινόμενο της κοκκίωσης (speckle). Σε αντίθεση με μια τυχαία αυξομείωση της έντασης της συμβολής της εικόνας 13β) η ένταση της εικόνας 14 α) παρουσιάζει κεντρική συμμετρία. Από το συμβολογράφημα της εικόνας 14β) προκύπτει ότι στα όρια των κοκκίων σχηματίζεται ένα ολόκληρο σύστημα οπτικών δινών. Στο τετράγωνο της εικόνας 14β) περικλείονται τα σημεία με την ιδιαιτερότητα φάσης.

Ανάλογα με τις θέσεις των κοκκίων, η κατανομή των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης χαρακτηρίζεται από μια τακτικότητα. Η κατανομή των σημείων με ιδιαιτερότητα φάσης στις δέσμες λέιζερ, η οποία θύμιζε τη διάταξη ιόντων στους κρυστάλλους, οδήγησε στην εμφάνιση στην βιβλιογραφία καινούργιου όρου: «οπτικός ασυνήθης κρύσταλλος» (optical singular crystal). Ο «κρύσταλλος» αυτός αποτελεί τη σπονδυλική στήλη της ελικοειδούς δέσμης λέιζερ, καθορίζει τις ιδιότητές του, οι οποίες εκδηλώνονται κατά τη διάδοση

της δέσμης σε ελεύθερο χώρο ή σε οπτικά συστήματα. Στα πλαίσια της «Ασυνήθιστης Οπτικής» αναπτύσσεται ένα είδος «Κρυσταλλογραφίας» λόγω της σπουδαιότητας της δομής της ελικοειδούς δέσμης λείζερ.



α)

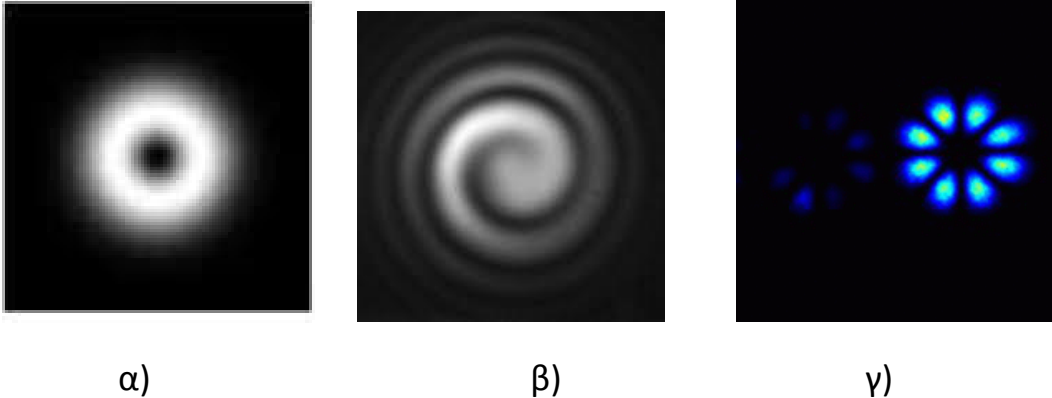


β)

Εικόνα 14: Ένταση α) και συμβολογράφημα β) ακτινοβολίας λείζερ με αντηχείο Confocal. Πηγή: <http://spie.org/>

Ας εξετάσουμε τη δυνατότητα δημιουργίας κανονικών ελικοειδών πεδίων σε λείζερ. Τα πειράματα έδειξαν ότι τέτοια πεδία είναι δυνατόν να ληφθούν σε λείζερ διαφορετικών τύπων λίγο ψηλότερα από το κατώφλι της αυτοδιέγερσης. Αρχικά, στην ανακλώμενη επιφάνεια του ενός κατόπτρου πάνω στον άξονα του αντηχείου τοποθετείται κόκκος απορροφητικού υλικού. Αυτό καταστέλλει τη διέγερση ρυθμών μέγιστης έντασης στον άξονα η οποίοι κατά κανόνα ενισχύονται περισσότερο. Στη συνέχεια μειώνονται οι διαστάσεις του διαφράγματος του αντηχείου έως ότου η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας εξόδου αποκτήσει δακτυλιοειδή μορφή (εικόνα 15α). Η δέσμη αυτή έχει ελικοειδές μέτωπο κύματος. Το συμβολογράφημά της παριστάνεται στην εικόνα 15 β. Από τη σύγκριση των εικόνων 15 β και 9 α, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στο κέντρο της δέσμης υπάρχει σημείο με ιδιαιτερότητα φάσης πρώτης τάξης, δηλαδή με τοπολογικό φορτίο $l=1$. Μεταβάλλοντας το μέγεθος του κόκκου και το άνοιγμα του διαφράγματος μπορούμε να πετύχουμε κανονικούς ελικοειδείς ρυθμούς με μεγαλύτερο τοπολογικό φορτίο. Στην περίπτωση που περιγράφουμε οι ρυθμοί που λαμβάνονται είναι μόνο δεξιόστροφοι ή μόνο αριστερόστροφοι. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι απώλειες δεν είναι ισότιμες. Κοντά στο όριο της αυτοδιέγερσης, λόγω των απωλειών (ανακλαστικότητα καθρεφτών μικρότερες του 1, σκέδαση σε οπτικά στοιχεία μέσα στην κοιλότητα, κτλ.), ο Q-παράγοντας του ενός εκ των δύο ρυθμών τυχαία γίνεται μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ελικοειδής ρυθμός καθορισμένου προσήμου. Αυξάνοντας την άντληση του λείζερ και ξεπερνώντας το όριο της αυτοδιέγερσης, οι προηγούμενοι παράγοντες εξαλείφονται και δημιουργείται ελικοειδής ρυθμός αντίθετου προσήμου. Οι ρυθμοί αυτοί συμβάλλουν ώστε να προκύψει πεδίο

που περιγράφεται από τη σχέση (7) με τιμή του δείκτη $p=0$. Το πεδίο αυτό χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο κομβικών γραμμών κατά μήκος της διαμέτρου της δέσμης. Ο αριθμός των γραμμών αυτών είναι αντίστοιχος του τοπολογικού φορτίου l . Στην εικόνα 15 γ) απεικονίζεται ένα τέτοιο πεδίο με $l=4$.

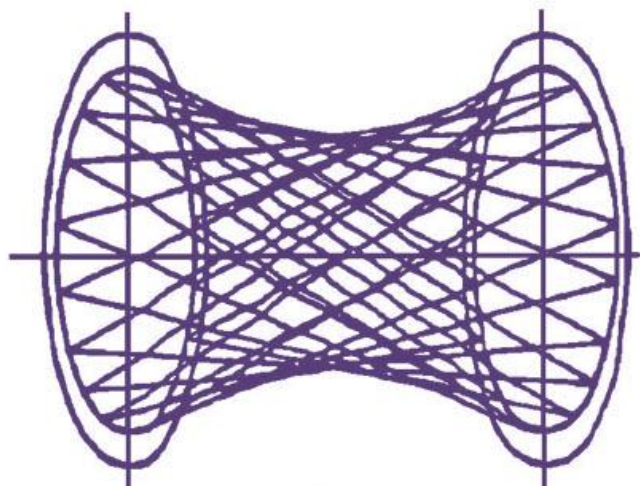


Εικόνα 15. α)-κατανομή έντασης κανονικού ελικοειδούς ρυθμού, β) συμβολογράφημα και γ) κατανομή έντασης μετά από συμβολή ελικοειδών ρυθμών με $l=4$. Πηγή: <http://strohaber.webs.com/>

Τα κανονικά ελικοειδή πεδία που δημιουργούνται σε αντηχεία λέιζερ, μπορούν εύκολα να ερμηνευτούν με τη βοήθεια της Γεωμετρικής οπτικής, αν τα αντιστοιχίσουμε με χωρικές δέσμες. Σε αντίθεση με τις επίπεδες δέσμες, στις χωρικές δέσμες τα σημεία ανάκλασης στους καθρέφτες σχηματίζουν κύκλο. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι η δομή του κύκλου καθορίζεται από τον g -παράγοντα του αντηχείου του λέιζερ από την ακόλουθη σχέση:

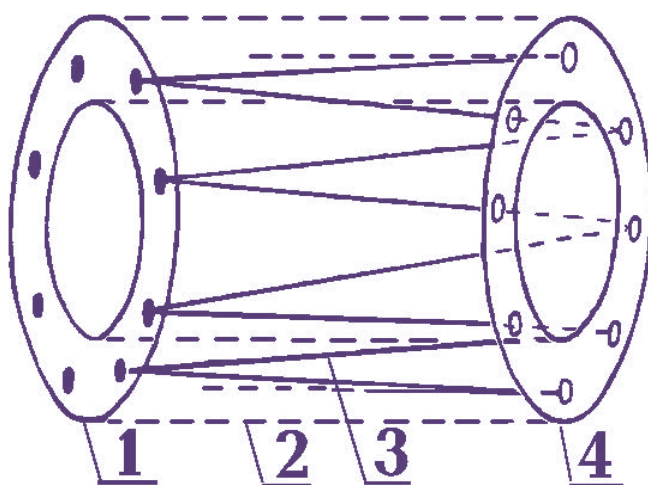
$$\frac{K}{N} = \frac{1}{\pi} \arccos(g_1 g_2) \quad (10)$$

Όπου N - αριθμός των ανακλάσεων από κάθε καθρέφτη και K - αριθμός των περιστροφών της δέσμης που απαιτείται για το κλείσιμο της τροχιάς. Αν στην κατεύθυνση της χωρικής δέσμης διαδοθεί η Γκαουσιανή δέσμη, τότε μπορούμε να μιλήσουμε για τη δημιουργία ενός ελικοειδούς πολυσταδιακού ρυθμού στο αντηχείο. Όταν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων στροφής των ακτίνων της δέσμης πάνω στους καθρέφτες είναι αρκετά μεγάλες, τότε η κατανομή του πεδίου του κάθε πολυσταδιακού ρυθμού στο επίπεδο των καθρεφτών θα έχει μορφή κοκκίων σε κυκλική διάταξη με Γκαουσιανή κατανομή της έντασης. Η διέγερση των ελικοειδών πολυσταδιακών ρυθμών στο αντηχείο χρησιμοποιείται στην τεχνολογία λέιζερ για την απομάκρυνση ενέργειας από το ενεργό μέσο δακτυλιοειδούς σχήματος.



Εικόνα 16: Δομή χωρικής δέσμης. Πηγή: www.sintec.sg

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η οπτική διαδρομή του ομοαξονικού λέιζερ CO₂. Στην εικόνα 17 βλέπουμε τη σχηματική αναπαράσταση αυτού του λέιζερ. Το ενεργό μέσο διεγείρεται από την εκκένωση υψηλής συχνότητας στην περιοχή μεταξύ των δύο κυλινδρικών ηλεκτροδίων 2 και 3. Το σταθερό αντηχείο το οποίο δημιουργείται από τους καθρέφτες 1 και 4 εξασφαλίζει τη διέγερση των πολυσταδιακών ρυθμών με κυκλικά διατεταγμένα κοκκία πάνω στους καθρέφτες. Οι δέσμες οι οποίες δημιουργούν τους ρυθμούς αυτούς διαδίδονται στο διάκενο μεταξύ καθρεφτών και δημιουργούν πεδίο με δακτυλιοειδή συμμετρία εντός του αντηχείου. Κατασκευάζοντας τον ένα από τους δυο καθρέφτες μερικώς διαπερατό στη συχνότητα της ΗΜ ακτινοβολίας, προκύπτει η δέσμη λέιζερ στην έξοδο του καθρέφτη. Σε ορισμένες περιπτώσεις η έξοδος της δέσμης επιτυγχάνεται διαμέσου μιας ακτινικής ημιδιαφανούς σχισμής του καθρέφτη.



Εικόνα 17: Πολυσταδιακός ρυθμός σε αντηχείο του ομοαξονικού λέιζερ CO₂. 1,4-καθρέφτες και 2,3-κυλινδρικά ηλεκτρόδια. Πηγή: www.sintec.sg

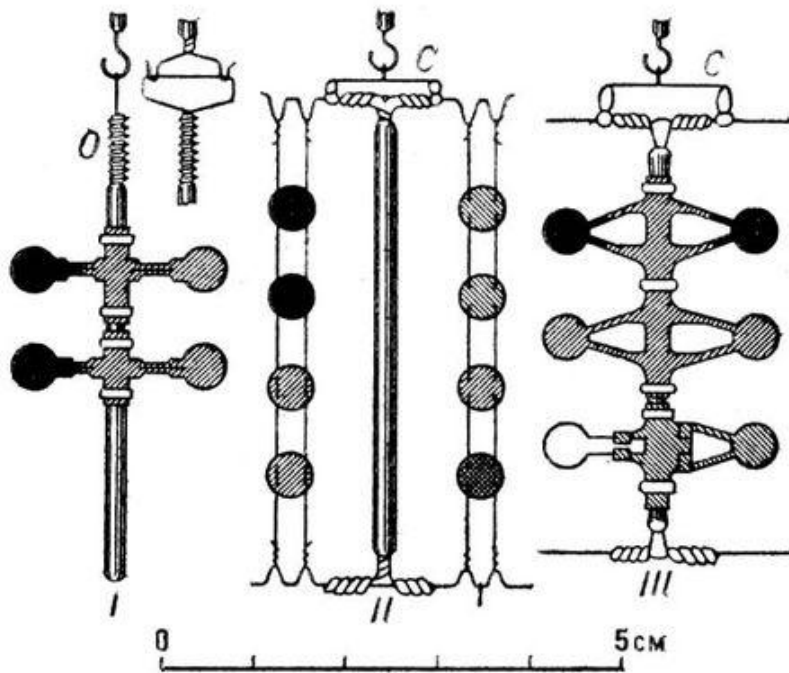
Ισχυρές ελικοειδείς δέσμες με δακτυλιοειδή μορφή τα οποία διεγείρονται σε λέιζερ χρησιμοποιούνται ευρύτατα στον τομέα επεξεργασίας υλικών με λέιζερ επειδή δημιουργούν περισσότερα ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Ο ελικοειδής παλμός διαδίδεται στον αέρα σαν ρυθμός μέσα στον κυματοδηγό χωρίς διασπορά λόγω περίθλασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω μηδενικής έντασης στο κέντρο της δέσμης, η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και ο δείκτης διάθλασης υψηλότερος στον άξονα της δέσμης από ότι στις υπόλοιπες περιοχές της. Έτσι δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για τη συνεχή ρύθμιση εστίασης της δέσμης κατά τη διάρκεια της διάδοσής της. Τέλος, μπορούμε να επισημάνουμε ότι η μελέτη των ελικοειδών εξαρθρώσεων του κυματικού μετώπου απέκτησε μεγάλο ενδιαφέρον όχι μόνο στην οπτική αλλά και σε άλλους τομείς της φυσικής στους οποίους μεγάλο ρόλο διαδραματίζουν κυματικά φαινόμενα. Αυτό ισχύει κυρίως για τη ραδιοφυσική και την ακουστική. Υπάρχουν αναφορές για καταγραφή των οπτικών δινών στα ραδιοκύματα της ιονόσφαιρας και σε ηχητικά κύματα τα οποία διαδίδονται σε ωκεάνιους κυματοδηγούς. Αναπτύσσονται καινούργιοι τομείς ερευνών όπως τομογραφία των ωκεανών η οποία προσδιορίζει υδροδυναμικές διαταραχές καταγράφοντας οπτικές δίνες των ηχητικών κυμάτων κατά την διάδοσή τους στον ωκεανό. Υπάρχουν υπόνοιες ότι στο μέλλον παρόμοιες μέθοδοι θα χρησιμοποιηθούν και στην μετεωρολογία για τον εντοπισμό μεγάλης κλίμακας τυρβωδών διαταραχών στην ατμόσφαιρα. Έτσι η έννοια της ιδιαιτερότητας φάσης και της δίνης που συνδέεται με αυτήν αποδείχθηκε πολύ καρποφόρα για την ανάλυση των πολύπλοκων κυματικών φαινομένων διαφορετική προέλευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Οπτική παγίδευση

Η ιδέα της μηχανικής δράσης του φωτός πάνω στην ύλη πρωτοεμφανίστηκε στην Αστρονομία. Το 1619 ο Κέπλερ πίστευε ότι η ουρά του κομήτη δημιουργείται από τα κομμάτια του κομήτη που ωθούνται σε κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του Ήλιου, λόγω της πίεσης του φωτός. Κατά την εκλογή του στη Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου (Royal Society), ο Νεύτωνας το 1672 παρουσίασε τις εργασίες του για τα τηλεσκόπια και τη σωματιδιακή φύση του φωτός. Η τελευταία αποτέλεσε τη βάση της θεωρίας που υποστηρίζει ότι η φωτεινή ακτινοβολία ασκεί πίεση. Το 1833 ο Μάξουελ υπολόγισε την πίεση αυτή βασιζόμενος στη δική του Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία. Τέλος, το 1879 ο Ιταλός φυσικός Αντόλφο Μπαρτόλι (Adolfo Bartoli) έκανε το ίδιο χρησιμοποιώντας τους νόμους της Θερμοδυναμικής.

Για μία επίπεδη δέσμη, η οποία προσπίπτει κάθετα σε μία επίπεδη επιφάνεια, η πίεση του φωτός υπολογίζεται από τη σχέση $P = E(1+r)/v$, όπου E - ποσότητα ενέργειας που προσπίπτει σε ένα δευτερόλεπτο, r - συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας ($r = 0$ για μία μαύρη επιφάνεια και $r = 1$ για μια τέλεια ανακλαστική επιφάνεια) και v -ταχύτητα του φωτός. Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι η πίεση του φωτός είναι ασήμαντη για τα αντικείμενα που υπάρχουν γύρω μας. Το εστιασμένο (100%) φως ενός λαμπτήρα των 60 Watt ασκεί πιεστική δύναμη στον καθρέφτη ίση με $4 \cdot 10^{-7}$ N, ενώ 1kg μάζας δέχεται δύναμη βαρύτητας ίση με 9,8 N. Για να γίνει αντιληπτή η πίεση του φωτός σε ένα αντικείμενο, η μάζα του πρέπει να είναι μικρότερη από το 1 mg.

Το 1898 με μια πρωτοποριακή για την εποχή του συσκευή, ο Πιότρ Λέμπεντεβ (Pyotr Lebedev) απέδειξε πειραματικά την ύπαρξη των πιεστικών δυνάμεων του φωτός. Μέτρησε τη δύναμη του φωτός σε λεπτά φύλλα μετάλλου πάχους 20 μm χρησιμοποιώντας ζυγό στρέψεως. Τα φύλλα αυτά αποτελούσαν πτερύγια του ζυγού ο οποίος ήταν κρεμασμένος στην άκρη του ασημένιου νήματος και βρισκόταν σε ένα δοχείο με πίεση ίση μόλις με 10^{-4} mm Hg (εικόνα 18). Τα αποτελέσματα ταυτιστήκαν σε ικανοποιητικό βαθμό με τους υπολογισμούς του Μάξουελ. Η πειραματική τιμή της πίεσης του φωτός ($\sim 10^{-7}$ N/m²) είχε απόκλιση μόλις $\pm 2\%$ από την θεωρητική τιμή του υπολόγισε ο Μάξουελ.



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση του ζυγού στρέψεως της συσκευής μέτρησης της δύναμης του φωτός που χρησιμοποίησε ο Lebedev το 1898. Πηγή: wikipedia.org

Οι δυνάμεις αυτές δεν βρήκαν καμία εφαρμογή μέχρι την εμφάνιση των λέιζερ στη δεκαετία του 60 παρά μόνο στην Αστρονομία. Η πίεση της ακτινοβολίας παίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση της ύλης στο σύμπαν, επειδή η ένταση του φωτός και οι αποστάσεις είναι τεράστιες.

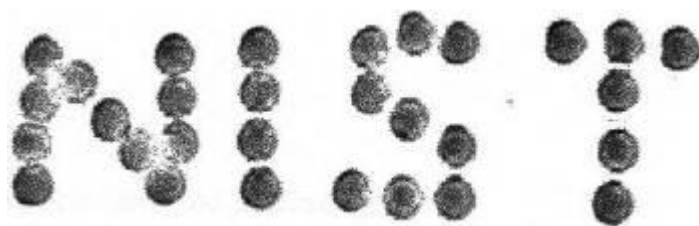
Μετά τη δημιουργία των λέιζερ (το πρώτο λέιζερ, ruby laser, αναπτύχθηκε από τον Theodore Maiman το 1960) , η πιεστική δύναμη της ακτινοβολίας ήταν αρκετή για την επιτάχυνση, επιβράδυνση, εκτροπή, επαναφορά ακόμα και την παγίδευση μικροαντικειμένων ως συνέπεια των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας λέιζερ. Η ακτινοβολία λέιζερ είναι εστιασμένη μορφή ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η ενέργεια που έχει η ακτινοβολία λέιζερ σε ένα τετραγωνικό εκατοστό είναι 360.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη που έχει η ηλιακή ακτινοβολία. Παρεμβάλλοντας επιπλέον ειδικούς φακούς, η ενέργεια της ακτινοβολίας λέιζερ που απελευθερώνεται σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 1.000 ακόμη φορές.

3.1 Δυνάμεις οπτικής παγίδευσης (optical trapping).

3.1.1 Ορμή του φωτός.

Πάνω από 50 χρόνια πριν οι επιστήμονες κατάφεραν να θέσουν σε κίνηση και να χειριστούν από απόσταση φορτισμένα σωματίδια εφαρμόζοντας ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Αλλά μόνο τα τελευταία χρόνια κατάφεραν να

παγιδεύσουν τα ουδέτερα αντικείμενα. Οπτική παγίδα είναι μια δέσμη λέιζερ η οποία έχει τη δυνατότητα να μετακινεί μικροαντικείμενα με διαστάσεις από μερικά νανόμετρα έως και 200 μικρόμετρα.



Εικόνα 19: Τα αρχικά του Εθνικού Ιδρύματος Μέτρων και Σταθμών (National Institute of Standards and Technology) των ΗΠΑ φτιαγμένα από σφαιρίδια καουτσούκ διαμέτρου περίπου πέντε εκατομμυριοστών του μέτρου (5 μm) και τοποθετημένα με χρήση οπτικών λαβίδων. Πηγή: wikipedia.org

Η οπτική παγίδευση και ο χειρισμός (manipulation) των ουδέτερων μικροαντικειμένων με την βοήθεια των λέιζερ βασίζεται στις πιεστικές δυνάμεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι δυνάμεις αυτές προέρχονται από την ορμή του ίδιου φωτός. Κάθε φωτόνιο μεταφέρει ορμή $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$, όπου \mathbf{k} — κυματόνισμα, $|\mathbf{k}| = k = 2\pi/\lambda$, \hbar — σταθερά του Πλανκ. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη επιφέρει τη μεταβολή της ορμής. Ο τρόπος λειτουργίας των οπτικών παγίδων στηρίζεται στον δεύτερο και τρίτο νόμο του Νεύτωνα. Η μεταβολή της διεύθυνσης διάδοσης του φωτός (συνεπώς της ορμής) οφείλεται στη δύναμη η οποία προκάλεσε τη μεταβολή αυτή. Όταν το φως εισέρχεται σε ένα διαφανές σωματίδιο, εκτρέπεται από την αρχική του πορεία. Η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο, ως αποτέλεσμα της εκτροπής αυτής, προκαλεί τη μετακίνηση του σωματιδίου προς την περιοχή της μεγαλύτερης έντασης του φωτός.

Η διαδικασία της διάχυσης των φωτονίων εξηγείται με την απορρόφηση και την επανεκπομπή τους. Η ορμή που μεταφέρεται στο σωματίδιο είναι ίση με τη διαφορά των ορμών των φωτονίων αυτών. Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται και η επιβράδυνση των ατόμων: το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο ορμής $\hbar\mathbf{k}$ και επανεκπέμπει άλλο φωτόνιο ίδιου πλάτους προς τυχαία κατεύθυνση. Συνεπώς για να επιβραδυνθεί ένα άτομο, πρέπει να απορροφήσει πολλά φωτόνια κινούμενα προς αντίθετη κατεύθυνση. Οι οπτικές παγίδες ήταν αρχικά σχεδιασμένες σαν ατομικές παγίδες.

3.1.2 Τα είδη των σωματιδίων.

Θεωρητικά, τα μικροαντικείμενα του παγιδεύονται διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) με ακτίνα μεγαλύτερη από $\lambda/20$ και β) με μικρότερη ακτίνα από $\lambda/20$. Για την πρώτη κατηγορία εφαρμόζεται η θεωρία σκέδασης του Λόρεντζ-Μι (Lorentz-Mie) και για τη δεύτερη του Ρέιλνι (Rayleigh) όταν περιγράφεται η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας λέιζερ με το αντικείμενο. Τα λεγόμενα

«νανοσωματίδια» έχουν διάμετρο από 1 έως 100 nm και ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία. Πρώτες παγίδες που κατασκευάστηκαν για τα σωματίδια αυτά ήταν μονοακτινικές [1]. Παγίδες μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιήθηκαν για πολύ μικρά νανοσωματίδια επειδή έχουν αυξημένη κινητική ενέργεια κίνησης Μπράουν (Brownian motion) [1]. Η δύναμη που ασκείται στα μικροαντικείμενα αναλύεται σε δύο συνιστώσες.

1) Πρώτη ονομάζεται δύναμη σκέδασης, οφείλεται στη μεταβολή ορμής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο και έχει κατεύθυνση του διανύσματος Raynting.

2) Δεύτερη ονομάζεται δύναμη βαθμίδας (gradient force), οφείλεται στην ύπαρξη στον χώρο διαβάθμισης (gradient) της φωτεινής ενέργειας.

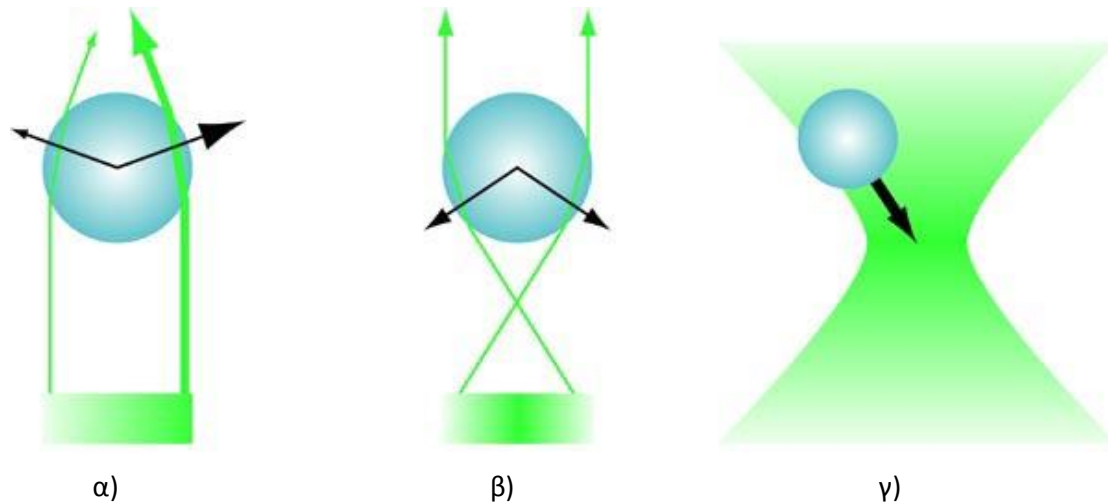
Οι δύο αυτές συνιστώσες μελετήθηκαν στην παραξονική προσέγγιση [2]. Η δύναμη η οποία ασκείται στην κατεύθυνση αντίθετη της διάδοσης του φωτός, προς την εστία της δέσμης (gradient force) είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη σκέδασης μόνο για πολύ μικρά αντικείμενα.

Τα διαφανή αντικείμενα, με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από το μέσο στο οποίο βρίσκονται, έλκονται προς την περιοχή μεγαλύτερης έντασης του φωτός, ενώ με μικρότερο-απωθούνται. Έτσι, οι φυσαλίδες του αέρα αιωρούμενες μέσα στο νερό απωθούνται από την περιοχής εστίασης της φωτεινής δέσμης. Το ίδιο συμβαίνει με τα αδιαφανή αντικείμενα.

Ο δείκτη διάθλασης των βιολογικών δομών είναι μεγαλύτερος από το νερό το οποίο αποτελεί κύριο συστατικό ενδοκυττάριου και εξωκυττάριου περιβάλλοντος. Μια καλά εστιασμένη δέσμη φωτός επιτρέπει σταθερή παγίδευση τέτοιων δομών.

3.1.3 Δυνάμεις οπτικής παγίδευσης.

Ας εξετάσουμε μία διηλεκτρική σφαίρα μέσα σε μια εστιασμένη δέσμη φωτός. Ένα αδιαφανές αντικείμενο δέχεται ώθηση κατά την ανάκλαση του φωτός από την επιφάνειά του. Όμως, ένα διαφανές αντικείμενο έλκεται προς την περιοχή μεγαλύτερης έντασης του φωτός. Η διάθλαση του φωτός στην επιφάνεια της σφαίρας μεταβάλλει την ορμή του φωτός, δηλαδή η σφαίρα λειτουργεί ως μικροφακός. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, η σφαίρα δέχεται μία αντίθετη δύναμή από το φως εξαιτίας αυτής της μεταβολής της ορμής του. Στην εικόνα 20 α) παρουσιάζεται η εγκάρσια κίνηση της σφαίρας, η οποία έλκεται προς την περιοχή της δέσμης με την μέγιστη ένταση. Για μία Γκαουσιανή δέσμη λέιζερ η περιοχή αυτή βρίσκεται στον άξονα της δέσμης και το αντικείμενο συγκρατείται στο εγκάρσιο κέντρο της δέσμης. Η εικόνα 20 β) δείχνει ότι η μεταβολή της ορμής έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δύναμης η οποία ωθεί τη σφαίρα πίσω στο εστιακό επίπεδο της δέσμης. Το αντικείμενο έλκεται προς την εστία της δέσμης, επειδή αυτή παρουσιάζει μέγιστη ένταση στη διαμήκη κατανομή της δέσμης. Το αντικείμενο θα κινηθεί τελικά προς την εστία αυτή απουσία άλλων δυνάμεων (διαμήκης παγίδευση).



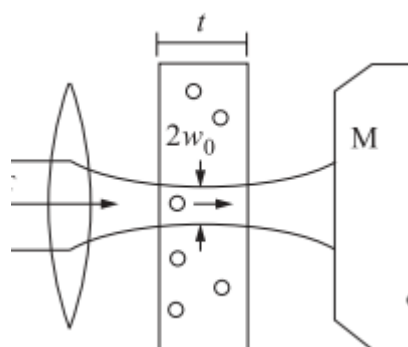
Εικόνα 20: Δυνάμεις της οπτικής παγίδευσης: α) στην εγκάρσια διεύθυνση β) στη διαμήκη διεύθυνση γ) ελκτική δύναμη προς τη περιοχή μεγαλύτερης έντασης του φωτός.
 Πηγή: <http://folk.uio.no/bsand/twezzers.html>

Τελικά, για να μετακινηθεί το αντικείμενο προς την εστία της δέσμης, η ελκτική δύναμη πρέπει να υπερνικήσει άλλες δυνάμεις οι οποίες το απωθούν από την εστία (π.χ. πιεστική δύναμη του φωτός, βαρυτική δύναμη). Γι' αυτό χρειαζόμαστε πολύ καλά εστιασμένη δέσμη και μπορούμε να το πετύχουμε χρησιμοποιώντας αντικειμενικούς φακούς μεγάλου αριθμητικού διαφράγματος NA (numerical aperture). Η μέγιστη τιμή NA είναι ίση με την τιμή του δείκτη διάθλασης n του μέσου που περιβάλλει τον φακό. Για τον αέρα $NA_{max}=1$, ενώ για τους φακούς βυθισμένους σε κάποιο υγρό η τιμή NA_{max} μπορεί να φτάσει μέχρι 1,4. Η δύναμη παγίδευσης αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος του λέιζερ. Ο συνδυασμός της εγκάρσιας και της διαμήκης παγίδευσης εφαρμόστηκε στην 3-D παγίδα [1]

3.2. Βασικά είδη παγίδων.

3.2.1 Μονοακτινικές 2-D παγίδες. *Μετατόπιση και επιτάχυνση του αντικείμενου.* Οι θεωρητικοί υπολογισμοί έδειξαν [3] ότι μία εστιασμένη δέσμη ισχύος 1Watt ασκεί δύναμη σε ένα αντικείμενο ακτίνας λ ίση με 10^{-8} N με την προϋπόθεση η ορμή του προσπίπτοντος φωτός ανακλάται πλήρως. Το μέτρο της δύναμης είναι μικρό, όμως, αν λάβουμε υπόψη τη μικρή μάζα του αντικείμενου, η επιτάχυνση θα είναι $F/m \sim 10^5$ g, όπου g-επιτάχυνση της βαρύτητας. Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν από τον Αμερικανό ερευνητή Α. Άσκιν (A.Ashkin) [3] (εικόνα 21). Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν σφαιρίδια από λατέξ με διάμετρο από 0,59 έως 2,68 μm με δείκτη διάθλασης $n_p=1,58$ αιωρούμενα στο νερό ($n_s=1,33$). Μία οριζόντια δέσμη ρυθμού TEM₀₀ από λέιζερ ιόντων Ar⁺ με ακτίνα μέσης $w_0=6,2$ μm εστιαζόταν πάνω σε σφαιρίδιο το οποίο βρισκόταν μέσα σε γυάλινη κυψελίδα πάχους 120 μm . Οι παρατηρήσεις έγιναν με τη βοήθεια του μικροσκοπίου. Το σφαιρίδιο με διάμετρο 2,68 μm παγιδευόταν στον άξονα της δέσμης και

αποκτούσε κατόπιν επιτάχυνσης ταχύτητα $\sim 26 \mu\text{m/s}$ στην κατεύθυνση της δέσμης προσκρούμενο στο τοίχωμα της κυψελίδας. Μετά από την απενεργοποίηση του λέιζερ το σφαιρίδιο έκανε την κίνηση Μπράουν.

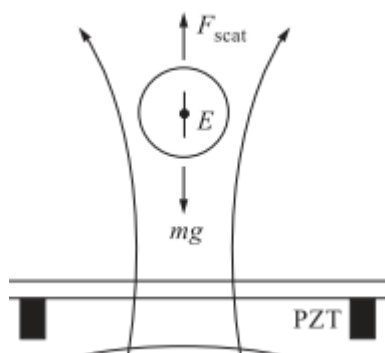


Εικόνα 21: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος επιτάχυνσης μικροαντικειμένων [3].

Το πείραμα αυτό έδειξε ότι, το αντικείμενο με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από αυτό του μέσου που το περιβάλλει, έλκεται προς την περιοχή της δέσμης με μεγαλύτερη ένταση. Αντίθετα οι φυσαλίδες του αέρα, οι οποίες βρίσκονται μέσα στο νερό, απωθούνται από το κέντρο της δέσμης.

Οπτική ανύψωση (levitation).

Η πρώτη οπτική παγίδα κατασκευάστηκε στα Εργαστήρια Μπελ (Bell Labs) των ΗΠΑ το 1970 από τον Α. Άσκιν (A.Ashkin) [3]. Στην παγίδα αυτή χρησιμοποιήθηκε πιεστική δύναμη της ακτινοβολίας η οποία εξισορρόπησε την δύναμη της βαρύτητας (εικόνα 22).



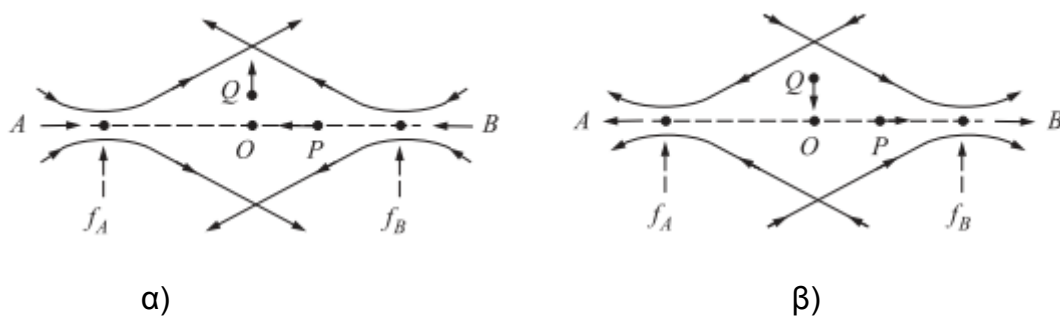
Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος της οπτικής ανύψωσης [4].

Μία δέσμη λέιζερ ισχύος μερικών μιλιβάττ (mW) ασκεί δύναμη της τάξεως πικονιούτων (pN). Παρόλα αυτά ένα αντικείμενο με διαστάσεις μικρομέτρων μπορεί να ανυψωθεί και να παραμείνει αιωρούμενο. Από το πείραμα προέκυψε ότι η πιεστική δύναμη της ακτινοβολίας μεταβάλλεται με τη μεταβολή του μήκους κύματος και των διαστάσεων της διαφανούς διηλεκτρικής σφαίρας [4].

3.2.2 Διακτινικές 3-D παγίδες.

Για τη σταθερή παγίδευση κατά μήκος του οπτικού άξονα προτάθηκε [3] διακτινική παγίδα με δύο Γκαουσιανές δέσμες αντίθετης κατεύθυνσης. Ένα αντικείμενο βρισκόμενο κοντά σε μία από τις δύο δέσμες δεχόταν ελκτική δύναμη προς το σημείο ισορροπίας. Μετά από την απενεργοποίηση της πρώτης δέσμης το αντικείμενο επιταχυνόταν προς τη δεύτερη. Με την ενεργοποίηση της πρώτης δέσμης επανερχόταν στο σημείο ισορροπίας. Οι παγίδες αυτές τεκμηρίωσαν το θεώρημα του Earnshaw για την οπτική ακτινοβολία [5].

Οπτικό θεώρημα του Earnshaw: είναι αδύνατον να παγιδευτεί ένα διηλεκτρικό αντικείμενο στο σημείο ισορροπίας μόνο από τις πιεστικές δυνάμεις σκέδασης του φωτός. Το θεώρημα αυτό είναι ανάλογο του θεωρήματος Earnshaw του στατικού ηλεκτρισμού: είναι αδύνατον να παγιδευτεί ένα φορτισμένο σωματίδιο μόνο από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Συνεπώς, οι παγίδες ουδέτερων αντικειμένων με τη χρήση μόνο των πιεστικών δυνάμεων ακτινοβολίας είναι ασταθείς. Για τη σταθερή παγίδευση απαιτείται δύναμη βαθμίδας (gradient force). Ο περιορισμός του θεωρήματος μπορεί να ξεπεραστεί όπως στην ηλεκτροστατική [6]. Στην ηλεκτροστατική η παγίδευση των φορτισμένων σωματιδίων γίνεται με τη βοήθεια του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Το φορτισμένο σωματίδιο ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας («ταλαντοπαγίδα»). Παρόμοια σταθερή παγίδα κατασκευάστηκε για τα ουδέτερα αντικείμενα η οποία περιλαμβάνει μεταβαλλόμενη φωτεινή ακτινοβολία. Στην παγίδα αυτή χρησιμοποιήθηκαν δύο Γκαουσιανές δέσμες αντίθετης κατεύθυνσης (TEM_{00} ρυθμοί). Το σημείο ισορροπίας βρισκόταν μεταξύ των εστιών των δεσμών (εικόνα 23).



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση της διακτινικής παγίδας. α) οι δέσμες έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Η θέση P του άξονα είναι σταθερή, ενώ η θέση Q ασταθής. β) Μετά από μισή περίοδο. Οι κατευθύνσεις των δεσμών αντιστρέφονται. Η θέση Q σταθεροποιείται, ενώ η θέση P αποσταθεροποιείται [7].

3.2.3 Μονοακτινικές 3-D παγίδες.

Η σταθερότητα της αξονικής παγίδευσης στην οπτική ανύψωση (levitation) εξαρτάται από την πιεστική δύναμη ακτινοβολίας και τη βαρυτική δύναμη. Η αξονική δύναμη βαθμίδας (gradient force) είναι πολύ μικρή. Στην εργασία [1] περιγράφεται μονοακτινική παγίδα με διαμήκη διαβάθμιση (gradient) της έντασης λόγω της μεγάλης εστίασης της δέσμης. Με τη βοήθεια της παγίδας αυτής επιτεύχθηκε σταθερή παγίδευση των διηλεκτρικών αντικειμένων διαστάσεων από 0,025 έως 10 μm αιωρούμενων μέσα σε νερό. Έχει αποδειχθεί πειραματικά η ύπαρξη της αρνητικής πίεσης της ακτινοβολίας, δηλαδή της δύναμης οποία συνδέεται με της αξονική διαβάθμιση (gradient) της έντασης και έλκει το αντικείμενο πίσω προς την εστία της δέσμης. Η φύση της δύναμης αυτής γίνεται αντιληπτή για τα αντικείμενα με διαστάσεις $\geq 10\lambda$ και περιγράφεται από τη γεωμετρική οπτική. Για τα αντικείμενα διαστάσεων πολύ μικρότερων του λ η δύναμη αυτή πρέπει να υπερνικήσει τη δύναμη σκέδασης η οποία ωθεί το αντικείμενο προς τα μπρος. Η εναλλακτική λύση της μονοακτινικής παγίδας με μεγάλη εστίαση αποτελεί η διακτινική παγίδα που περιγράψαμε προηγουμένως η οποία ασκεί μεγαλύτερη δύναμη παγίδευσης με μικρότερη τιμή NA (numerical aperture). Το μοναδικό μειονέκτημα της συσκευής αυτής είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής της.

3.3. Οπτικές παγίδες συνεστραμμένου φωτός (twisted light).

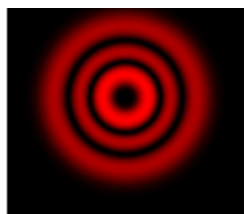
Το κυριότερο πρόβλημα των πειραμάτων οπτικής παγίδευσης ήταν η καταστροφή των μικροαντικειμένων λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Στην εργασία [1] χρησιμοποιήθηκαν διηλεκτρικά μη απορροφητικά μικροαντικείμενα αιωρούμενα μέσα στο νερό για να ξεπεραστεί το πρόβλημα. Όμως τα μικροαντικείμενα αυτά υπέστησαν φθορά στην περιοχή μεγάλης έντασης του φωτός. Τα μικροαντικείμενα από λατέξ με διαστάσεις μικρομέτρων (μm) μέσα στη δέσμη ισχύος μιλιβάττ (mW) καταστρέφονταν μέσα σε δέκα λεπτά.

Οι κλασσικές παγίδες αποτυγχάνουν στις περιπτώσεις των μικροαντικειμένων με δείκτη διάθλασης μικρότερο από αυτό του υλικού που τα περιβάλλει. Το ίδιο συμβαίνει για τα αδιαφανή μικροαντικείμενα. Η αιτία είναι ότι απωθούνται από την περιοχή μεγάλης έντασης του φωτός.

Στις μονοακτινικές παγίδες η μετατόπιση της παγίδας γίνεται με τη χρήση της τράπεζας του μικροσκοπίου. Ίδια δέσμη λέιζερ που χρησιμοποιούμε για την παγίδευση των μικροαντικειμένων εισάγεται ταυτόχρονα σε ένα συμβατικό οπτικό μικροσκόπιο, με αποτέλεσμα να μπορούμε να παρατηρούμε την κίνηση των σωματιδίων μέσα στο υγρό. Ο χειρισμός της παγίδας από απόσταση απαιτεί τη χρήση πολύπλοκων οπτικών ή οπτικοακουστικών συσκευών. Η ραγδαία ανάπτυξη η οποία παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια είναι στον τομέα των βελτιωμένων οπτικών παγίδων. Μεγάλες προοπτικές παρουσιάζει η χρήση των οπτικών στοιχείων περίθλασης (diffractive optical elements).

3.3.1 Ελικοειδείς δέσμες φωτός ή δέσμες συνεστραμμένου φωτός.

Αδιαφανή (μικροαντικείμενα που ανακλούν το φώς) μπορούν να παγιδευτούν στην σκοτεινή περιοχή του άξονα της δέσμης με ελικοειδές κυματικό μέτωπο [8,9]. Οι δέσμες αυτές μεταφέρουν τροχιακή στροφορμή (OAM). Το 1992, Les Allen et al.[10] πρώτοι έδειξαν ότι ο ρυθμός Λαγκέρ-Γκάους (LG-mode) μεταφέρει τροχιακή στροφορμή. Την ίδια στροφορμή μεταφέρουν όλες οι οπτικές δίνες, δηλαδή δέσμες με ιδιαιτερότητα φάσης (phase singularity) ή με εξαρθρώσεις του κυματικού μετώπου (screw dislocation). Στις δέσμες αυτές το διάνυσμά Poynting διαγράφει σπειροειδή τροχιά γύρω από τα σημεία ιδιαιτερότητας. Παγιδευμένα αδιαφανή μικροαντικείμενα περιστρέφονται εξαιτίας της τροχιακής στροφορμής η οποία μεταφέρεται σ'αυτά από τη δέσμη. Η φορά της περιστροφής των αντικειμένων εξαρτάται από τη φορά συστροφής του μετώπου του κύματος.



Εικόνα 24: Κατανομή έντασης ρυθμού Λαγκέρ-Γκάους (LG-mode)[10]. Ο ρυθμός αυτός χαρακτηρίζεται από ελικοειδές μέτωπο κύματος και μηδενική ένταση κατά μήκος του άξονα της δέσμης. Η διατομή της δέσμης έχει σχήμα δακτυλιδιού (donut).

Στην εργασία [8] αποδεικνύεται ότι η περιστροφή των μικροαντικειμένων οφείλεται στην τροχιακή στροφορμή και όχι στην επίδραση άλλων δυνάμεων (θερμοκρασιακών, σκέδασης). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η παραξονική προσέγγιση για την τροχιακή στροφορμή ισχύει ακόμα και για πολύ καλά εστιασμένη δέσμη. Διαπιστώθηκε επίσης, ότι η διάμετρος των περιστρεφόμενων μικροαντικειμένων εξαρτάται από τη διάμετρο του δακτυλιδιού της διατομής της δέσμης [9].

Μία επιτυχημένη παγίδευση κοίλων γυάλινων σφαιριδίων ($n_{\text{σφαιριδίων}} < n_{\text{νερού}}$), με διάμετρο 20 μm εμβαπτισμένων σε νερό, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια πολύ καλά εστιασμένης δέσμης συνεστραμμένου φωτός (3-D παγίδευση) [11]. Τα σφαιρίδια παγιδεύτηκαν στην σκοτεινή περιοχή του άξονα της δέσμης. Τα σφαιρίδια με μεγάλο δείκτη διάθλασης παγιδεύτηκαν από την ίδια δέσμη στην περιοχή του δακτυλίου με μεγάλη ένταση.

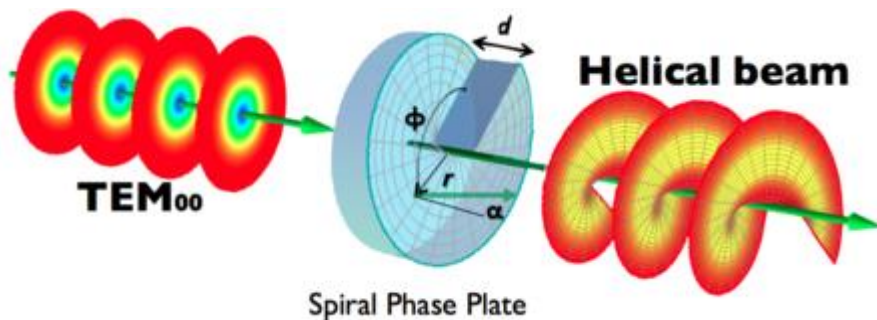
Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ελικοειδείς δέσμες στην παγίδευση των ουδέτερων ατόμων. Τα άτομα απωθούνται από την περιοχή της μεγάλης έντασης, περιορίζονται στην σκοτεινή περιοχή του άξονα και με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται δέσμες ατόμων κινούμενων με μικρή ταχύτητα. Οι δέσμες ατόμων θα αξιοποιηθούν στον τομέα της Ατομικής Οπτικής. Είναι πλέον γεγονός η παγίδευση των ατόμων του Ρουβιδίου (Rb) [12].

Στην οπτική παγίδευση χρησιμοποιούνται επίσης ελικοειδείς ρυθμοί Λαγκέρ - Γκάους (LG) με διάφορες τιμές του τοπολογικού φορτίου l . Για μεγάλες τιμές του τοπολογικού φορτίου l οι ρυθμοί Λαγκέρ-Γκάους (LG) είναι πιο αποτελεσματικοί για την εστίαση των ατόμων, ενώ οι ελικοειδείς δέσμες Μπέσελ (Bessel) για τη μεταφορά ατόμων για μεγάλες αποστάσεις.

3.3.2 Τρόποι παραγωγής των ελικοειδών δεσμών.

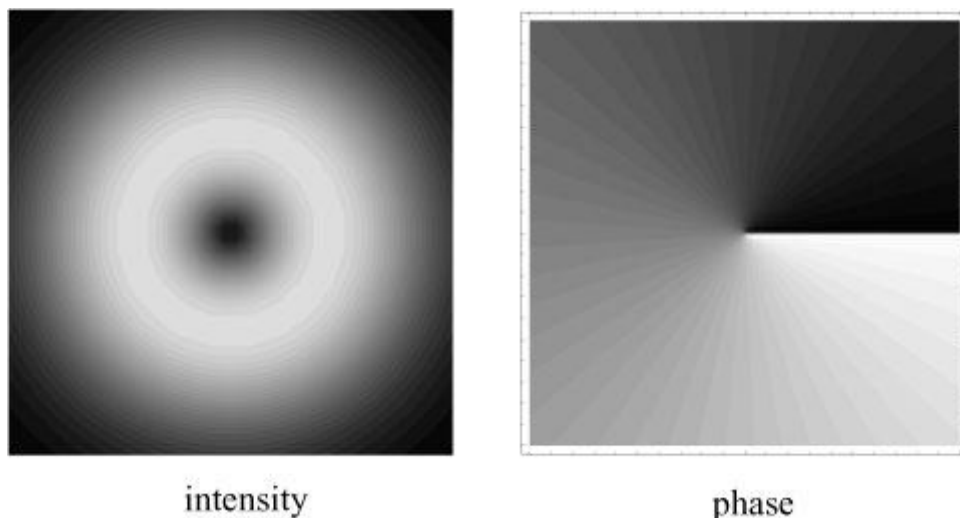
α) Με σπειροειδή φασική πλάκα (Spiral Phase Plate).

Ένα χαρακτηριστικό των ρυθμών που μεταφέρουν τροχιακή στροφορμή είναι η αζιμουθιακή εξάρτηση της φάσης $\exp(i\ell\phi)$. Αποδείχθηκε πειραματικά [13] ότι μία σπειροειδής φασική πλάκα (Spiral Phase Plate) μπορεί να μετατρέψει μια ακτίνα λέιζερ TEM_{00} σε μια δέσμη με ελικοειδές μέτωπο κύματος, με ιδιαιτερότητα φάσης στον άξονά της. Δηλαδή, μία δέσμη φωτός αποκτά τροχιακή στροφορμή (OAM) κατά τη διέλευση της διαμέσου της πλάκας με ανομοιογένεια πάχους (πάχος $\propto \phi$) (εικόνα 25).



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας ελικοειδούς δέσμης LG με σπειροειδή φασική πλάκα [13]. $d=l\lambda / (n-1)$ -βήμα του ύψους, l -τοπολογικό φορτίο, n -δείκτης διάθλασης, λ -μήκος κύματος.

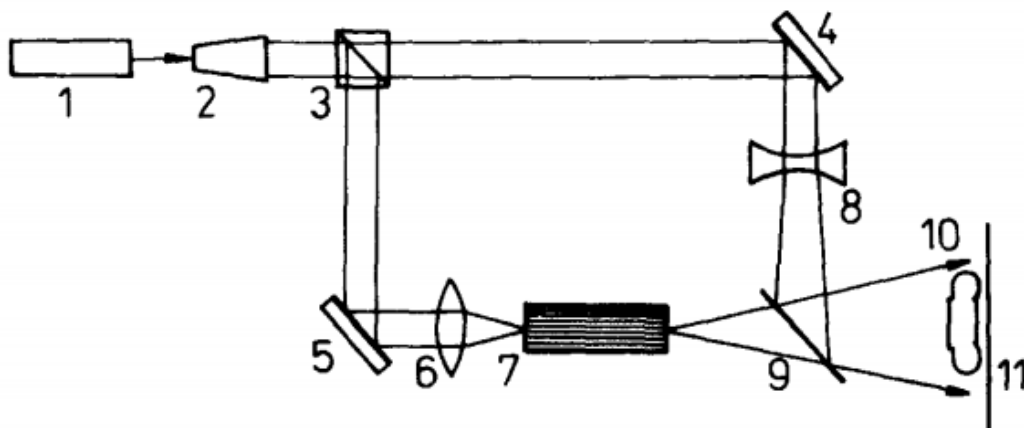
Το αποτέλεσμα είναι μία δέσμη «ντόνατ» με ακόλουθη κατανομή έντασης και φάσης:



Εικόνα 26: Κατανομή της έντασης και της φάσης δέσμης LG με μία οπτική δίνη ($l=1$). Πηγή: <http://scientopia.org/>

β) Μέθοδος οπτικής και υπολογιστικής ολογραφίας (computer-generated holograms).

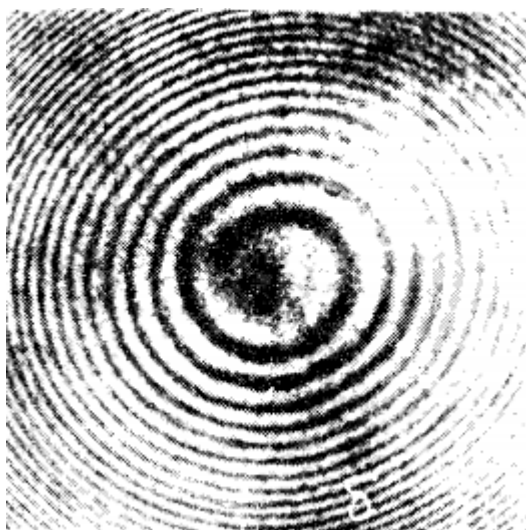
σκοπός της εργασίας [14] ήταν η παραγωγή και η μελέτη των ιδιοτήτων των κανονικών οπτικών πεδίων (regular optical fields) με ελικοειδείς εξαρθρώσεις (screw dislocations) συμπεριλαμβανομένων των εξαρθρώσεων ανώτερων τάξεων. Για τη μελέτη της δομής της απομονωμένης εξάρθρωσης χρησιμοποιήθηκε πειραματική συσκευή (εικόνα 27), αποτελούμενη από το συμβολόμετρο Mach-Zehnder σε ένα βραχίονα του οποίου τοποθετήθηκε μία δέσμη οπτικών ινών πολλαπλού τύπου (multimode). Οι οπτικές ίνες πολλαπλού τύπου ή πολυτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις από 50 – 100 μm, είναι πιο "χοντρές" από τις απλού τύπου (singlemode), αλλά μπορούν να στείλουν παράλληλα, σε ξεχωριστό μονοπάτι, πολλά κύματα φωτός. Το κάθε κύμα φωτός εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα και ακολουθεί το δικό του μονοπάτι μέσα της μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων στο περίβλημα. Αυτό συμβαίνει παράλληλα με πολλά κύματα φωτός (όλα σε διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα) και έτσι μπορούμε να στείλουμε τεράστιο όγκο δεδομένων.



Εικόνα 27 : Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής συσκευής: 1- λέιζερ He-Ne, 2- διαστολέας δέσμης, 3-διαχωριστής δέσμης, 4,5-καθρέφτες, 6-συγκλίνων φακός, 7-πολυτροπικές οπτικές ίνες, 8-αποκλίνων φακός, 9-ημιδιαφανής καθρέφτης, 10-κάμερα, 11-οθόνη παρατήρησης της συμβολής των δεσμών [14].

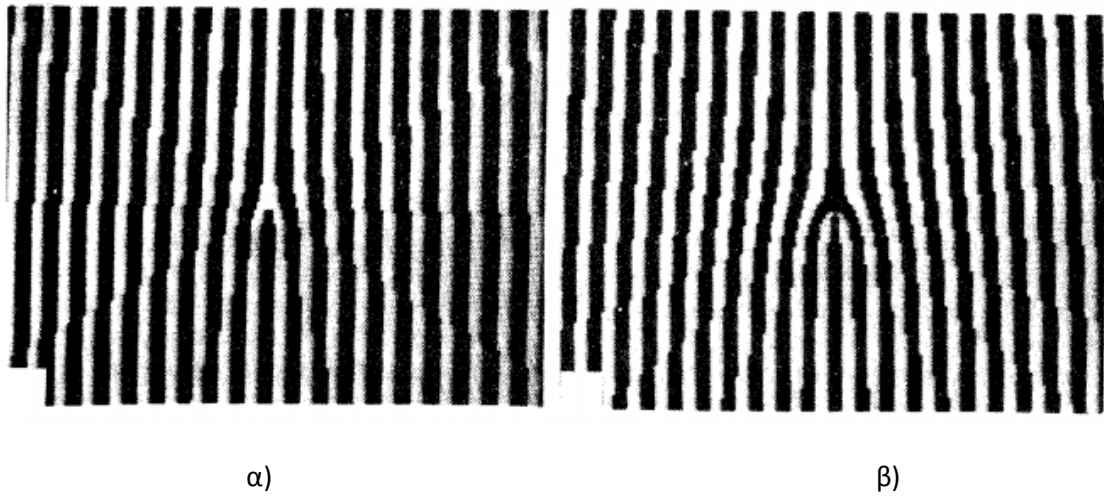
Μία δέσμη λέιζερ He-Ne με Γκαουσιανό ρυθμό εστιαζόταν σε μία οπτική ίνα. Στην έξοδο παρατηρήθηκε εικόνα αποτελούμενη από δύο ή τρεις κηλίδες ακανόνιστου σχήματος. Ένας αποκλίνων φακός τοποθετήθηκε στον βραχίονα συμβολής του συμβολόμετρου για να αντισταθμίσει τις αποκλίσεις των συμβαλλόμενων δεσμών. Με την περιστροφή του ημιδιαφανούς καθρέφτη ήταν δυνατή η παρατήρηση της εικόνας συμβολής σε διάφορες περιοχές της εξερχόμενης από τον κυματοδηγό δέσμης. Η συνηθισμένη δακτυλιοειδής εικόνα συμβολής καταγράφηκε στις περιοχές μέγιστης έντασης του φωτός. Αν στο κέντρο της περιοχής της συμβολής υπήρχε εξάρθρωση (dislocation), τότε

η εικόνα έπαιρνε σπειροειδής μορφή (εικόνα 28), επιδεικνύοντας την ύπαρξη της ελικοειδούς κυματικής επιφάνειας.

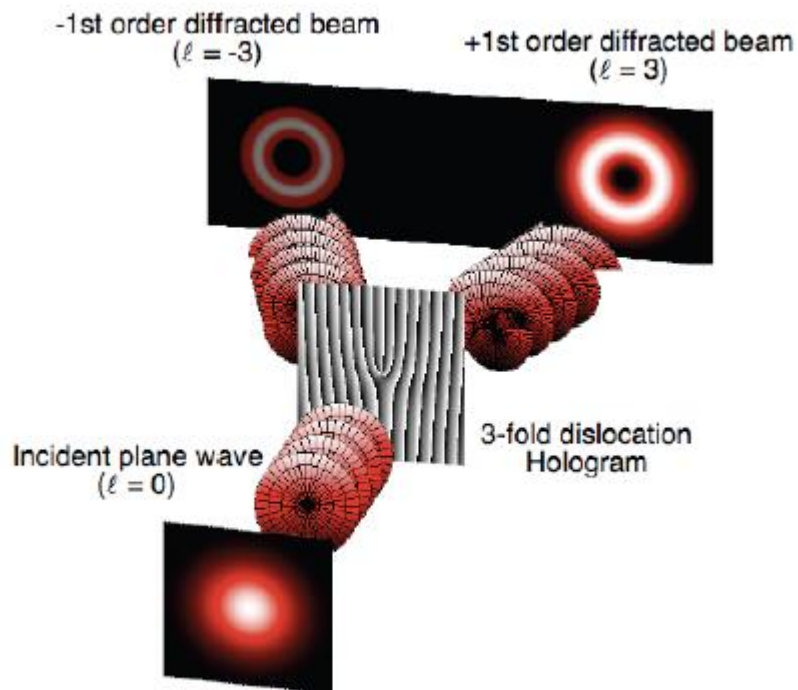


Εικόνα 28: Εικόνα συμβολής ενός σφαιρικού κύματος και ενός άλλου το οποίο παρουσιάζει ελικοειδής εξάρθρωση του κυματικού μετώπου [14].

Στο κέντρο της έλικας πάντα εμφανιζόταν μηδενική ένταση της εξερχόμενης από τον κυματοδηγό δέσμης. Όταν οι συμβαλλόμενες δέσμες προσέπιπταν στην οθόνη σχηματίζοντας μεταξύ τους μικρή γωνία, παρατηρήθηκε διαχωρισμός ή εξαφάνιση του κροσσού συμβολής. Οι εξαρθρώσεις (dislocations) οι οποίες παρατηρήθηκαν με τη χρήση της πειραματικής συσκευής εικόνας 27 ήταν τάξης $+1$ ή -1 , δηλαδή η μεταβολή της φάσης σε έναν κύκλο ήταν $+2\pi$ και -2π αντίστοιχα. Εντούτοις ο αριθμός των δεξιόστροφων εξαρθρώσεων ήταν ίδιος με τον αριθμό των αριστερόστροφων. Η παρατήρηση των εξαρθρώσεων των ανώτερων τάξεων ήταν πρακτικά αδύνατη με την παραπάνω συσκευή (εικόνα 27), επειδή από ένα σημείο έπρεπε να διέρχονται περισσότερα από δύο ζεύγη γραμμών με $\text{Re } E=0$ και $\text{Im } E=0$. Στην εικόνα συμβολής των δεσμών φωτός αυτό θα αντιστοιχούσε σε διαχωρισμό ενός κροσσού σε τέσσερις ή περισσότερους κροσσούς. Για να δημιουργηθούν δέσμες με εξαρθρώσεις ανώτερων τάξεων συντέθηκαν ολογράμματα πλάτους με στόχο την προσομοίωση της συμβολής ενός επίπεδου κύματος με κύμα το οποίο φέρει εξάρθρωση οποιασδήποτε τάξης. Με τη βοήθεια του υπολογιστή δημιουργήθηκαν αντίγραφα σε σμίκρυνση πάνω σε φωτογραφικό φιλμ με περίοδο $0,1 \text{ mm}$ και διαστάσεις $2 \times 2,5 \text{ mm}$. Η μορφή των φραγμάτων που συντέθηκαν φαίνεται στην εικόνα 28. Μελετήθηκαν οι ιδιότητες των δεσμών περίθλασης του φωτός από ολογράμματα που συντέθηκαν. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή της εικόνας 27. Οι πολυτροπικές οπτικές ίνες και ο συγκλίνων φακός αντικαταστάθηκαν από το φράγμα περίθλασης. Ο διαστολέας της δέσμης δεν χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 28: α)- Ολόγραμμα το οποίο συντέθηκε με στόχο τη δημιουργία δεσμών με εξάρθρωση πρώτης τάξης, β)- το ίδιο και για την εξάρθρωση δεύτερης τάξης [14].

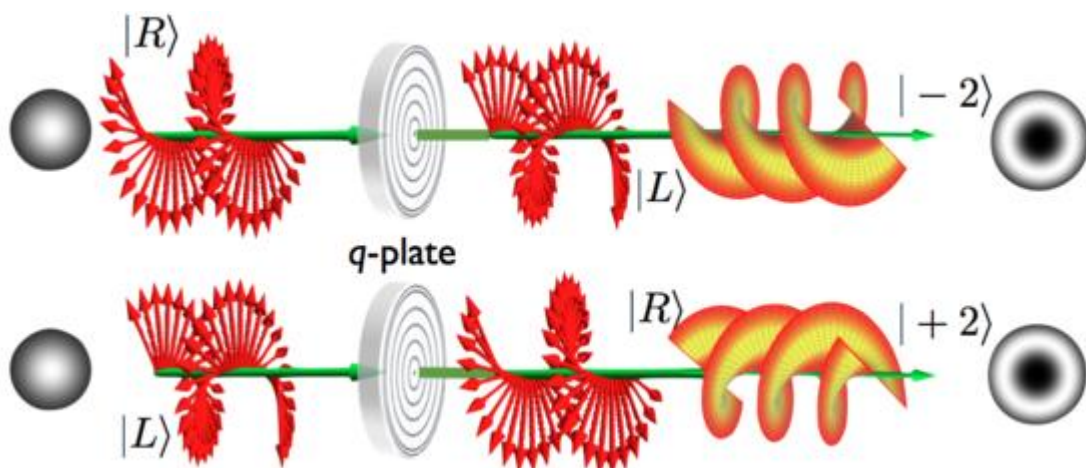


Εικόνα 29: Δημιουργία δεσμών με εξάρθρωση τρίτης τάξης, δεξιόστροφης ($l=+3$) και αριστερόστροφης ($l=-3$) Πηγή: physics.gla.ac.uk

Στους κροσσούς περίθλασης παρατηρήθηκε δακτυλιοειδής φύση των δεσμών. Για τις εξαρθρώσεις των ανώτερων τάξεων ο μηδενισμός της έντασης στο κέντρο της δέσμης αποκτούσε σαφέστερα όρια. Σε αυτήν την περίπτωση η εικόνα της συμβολής με το επίπεδο κύμα αποτελείται από έλικες ενσωματωμένες μεταξύ τους. Ο αριθμός τους εξαρτάται από την τάξη της εξάρθρωσης. Οι έλικες, οι οποίες αντιστοιχούν στις θετικές και αρνητικές τάξεις περίθλασης, έχουν αντίθετες φορές περιστροφής. Η μορφή των δεσμών στο εγκάρσιο επίπεδο δεν μεταβάλλεται κατά τη διάδοσή τους. Συνεπώς, η άποψη περί αστάθειας των οπτικών πεδίων με εξαρθρώσεις ανώτερων τάξεων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Παρατηρήθηκε επίσης πλήρη αντιστοιχία μεταξύ της τάξης της εξάρθρωσης και της περίθλασης. Συνεπώς, η εργασία αυτή αποτέλεσε αφετηρία όσον αφορά τη μέθοδο παραγωγής των δεσμών φωτός με εξαρθρώσεις ανώτερων τάξεων με τη βοήθεια ολογραμμάτων.

γ) Μέθοδος Q-πλάκας (Q-Plate).

Έχει αποδειχθεί πειραματικά [15] η ύπαρξη μιας οπτικής διαδικασίας κατά την οποία η σπιν στροφορμή (SAM) που μεταφέρεται από μία κυκλικά πολωμένη δέσμη φωτός μετατρέπεται σε τροχιακή στροφορμή (OAM) με συνέπεια τη δημιουργία των δεσμών με ελικοειδές μέτωπο κύματος. Η ελικοειδής μορφή της δέσμης ελέγχεται από την πόλωση της δέσμης εισόδου. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη. Η ύλη πρέπει να είναι οπτικά ανομοιογενής και ανισότροπη.

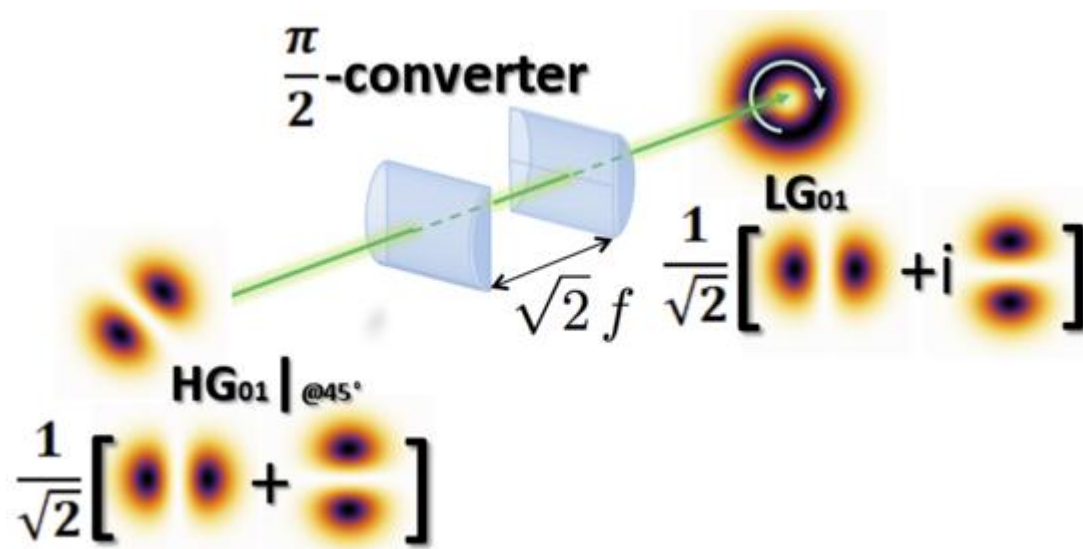


Εικόνα 30: Η μέθοδος της Q-πλάκας για την αριστερόστροφη και δεξιόστροφη κυκλική πόλωση. Πηγή: wikipedia.org

Στην μέθοδο αυτή εκμεταλλευόμαστε την αλλαγή του προσήμου της σπιν στροφορμής. Q- πλάκα είναι μια συσκευή η οποία χρησιμοποιεί υγρούς κρυστάλλους, πολυμερή ή φράγματα διαστάσεων μικρότερων του μήκους κύματος του φωτός.

δ) Μέθοδος του $\pi/2$ - κυλινδρικού μετατροπέα ($\pi/2$ - Cylindrical Mode Converter).

Ο $\pi/2$ - κυλινδρικός μετατροπέας μετασχηματίζει τον HG ρυθμό (Hermite-Gaussian beam) σε LG (Laguerre-Gaussian) με την χρήση των καλά ευθυγραμμισμένων κυλινδρικών φακών τοποθετημένων σε μια συγκεκριμένη απόσταση προκειμένου να εισαγάγει καλά ορισμένη σχετική φάση μεταξύ κατακόρυφης και οριζόντιας HG δέσμης [10].



Εικόνα 31: Ο $\pi/2$ - κυλινδρικός μετατροπέας μετασχηματίζει τον HG ρυθμό (Hermite-Gaussian beam) σε LG (Laguerre-Gaussian).
Πηγή: wikipedia.org

Ο ρυθμός λέιζερ με LG κατανομή πλάτους έχει καλά ορισμένη τροχιακή στροφορμή (OAM). Η μηχανική ροπή που δημιουργείται από την μεταφορά της τροχιακής στροφορμής (OAM) μπορεί να μετρηθεί πειραματικά. Η συγκεκριμένη τροχιακή στροφορμή σχετίζεται με την παραπάνω μετατροπή του ρυθμού HG σε LG.

3.4 Παγίδευση μικροαντικειμένων με «οπτικά μπουκάλια» (bottle beams).

Έχει προταθεί [16] η δημιουργία δεσμών μηδενικής έντασης τοπικά προσδιορισμένης κατά μήκος της δέσμης με τη μέθοδο της υπολογιστικής ολογραφίας. Η δέσμη αυτή αποτελεί επαλληλία δύο ρυθμών LG με τέτοια φασική διαφορά ώστε κατά τη συμβολή τους αλληλοαναιρούνται στην κοινή τους εστία η οποία περιβάλλεται από περιοχές μέγιστης έντασης. Οι δέσμες αυτές ονομάστηκαν *οπτικά μπουκάλια*. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σταθερή 3-D παγίδευση αδιαφανών ή διαφανών μικροαντικειμένων με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το μέσο στο οποίο βρίσκονται (εικόνα 32).



Εικόνα 32: Κατανομή της έντασης στο «οπτικό μπουκάλι» [16].

Τα μικροαντικείμενα παγιδεύονται στην περιοχή της μηδενικής έντασης. Τα βελτιωμένα οπτικά μπουκάλια χρησιμοποιούνται για την παγίδευση και τον χειρισμό των «κρύων ατόμων».

3.5 Οπτική περιστροφή.

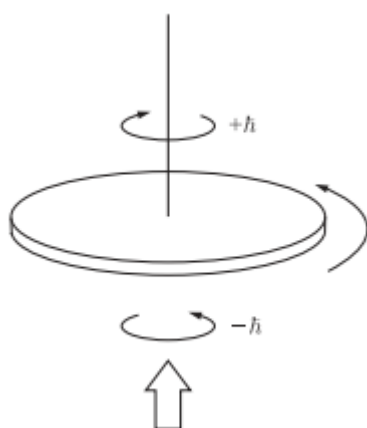
Τα πρώτα πειράματα έδειξαν ότι είναι δυνατή η παγίδευση και η μετακίνηση των μικροαντικειμένων. Σήμερα μπορούμε να μιλήσουμε για τη δυνατότητα περιστροφής, αλλαγής του προσανατολισμού ακόμα και τη σύνδεση μεταξύ τους. Η οπτική περιστροφή προσφέρει τη δυνατότητα να τεθεί σε λειτουργία μία οπτική μικρομηχανή ή τα τμήματά της (π.χ. οδοντωτοί τροχοί) χωρίς τη παρέμβαση κάποιου μηχανικού εργαλείου. Στην Βιολογία επιτρέπει τον προσανατολισμό των βιολογικών παρασκευασμάτων με εύκολο τρόπο. Η οπτική περιστροφή επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Διαπιστώθηκε πειραματικά η περιστροφή μικροαντικειμένων με ελικοειδές σχήμα έπειτα από σκέδαση του φωτός πάνω σε αυτά [17]. Σε άλλη περίπτωση η περιστροφή των μικροαντικειμένων πραγματοποιήθηκε με την περιστροφή της ίδιας της δέσμης η οποία έχει παγιδέψει τα αντικείμενα [18].

Οι τρεις πιο διαδεδομένοι τρόποι περιστροφής των μικροαντικειμένων είναι η εξής:

- α) λόγω σπιν στροφορμής (SAM) που διαθέτουν πεδία με κυκλική πόλωση. Αυτό ισχύει μόνο για διπλοθλαστικά σώματα, π.χ. ισλανδικός κρύσταλλος [19]
- β) λόγω τροχιακής στροφορμής (OAM) που διαθέτουν οι ελικοειδείς δέσμες, π.χ. δέσμες LG και δέσμες Bessel ανώτερων τάξεων. Η μεταφορά της στροφορμής πραγματοποιείται κατά την μερική απορρόφηση του φωτός από το μικροαντικείμενο [20]
- γ) λόγω μεταβολής της μετατόπισης της φάσης στην εικόνα συμβολής. Μία ελικοειδής δέσμη LG συμβάλλει με Γκαουσιανή δέσμη. Στην περιοχή της συμβολής παγιδεύεται ένα μικροαντικείμενο και η εικόνα συμβολής τίθεται σε περιστροφή εξαιτίας της μεταβολής του μήκους της διαδρομής μιας εκ των δύο δεσμών [21].

Περιστροφή λόγω της σπιν στροφορμής (SAM).

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο Roymting υπέθεσε ότι η κυκλικά πολωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μήκους κύματος λ μεταφέρει στροφορμή η οποία είναι ίση με το γινόμενο της γραμμικής ορμής επί τον συντελεστή $\lambda/2\pi$. Είναι γνωστό από την κβαντική θεωρία ότι η ορμή του φωτός είναι ίση με $\hbar k = \hbar\omega/c$ ανά φωτόνιο, όπου ω -γωνιακή συχνότητα και c -ταχύτητα του φωτός. Η στροφορμή του φωτός, η οποία σχετίζεται με την πόλωσή του, ονομάζεται σπιν στροφορμή. Κυκλικά πολωμένο φως φέρει στροφορμή $+\hbar$ ή $-\hbar$ ανά φωτόνιο. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι το εξής: η ορμή του φωτός είναι ανάλογη με τη συχνότητά του, ενώ η στροφορμή του είναι ανεξάρτητη της συχνότητάς του. Ακολουθώντας την υπόθεση του Roymting, ο Beth R.A.[22] το 1936 μέτρησε πειραματικά την ροπή στρέψεως, η οποία ασκήθηκε σε διπλοθλαστική πλάκα πάχους μισό μήκος κύματος, κρεμασμένης από νήμα, κατά τη διέλευση του κυκλικά πολωμένου φωτός από αυτή. Δηλαδή μέτρησε τη μεταβολή της φοράς της πόλωσης. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της στροφορμής, η ροπή στρέψεως είναι το αποτέλεσμα μεταφοράς της στροφορμής από το φως προς την πλάκα και ισούται με $2\hbar$ ανά φωτόνιο διερχόμενο από την πλάκα (εικόνα 33).

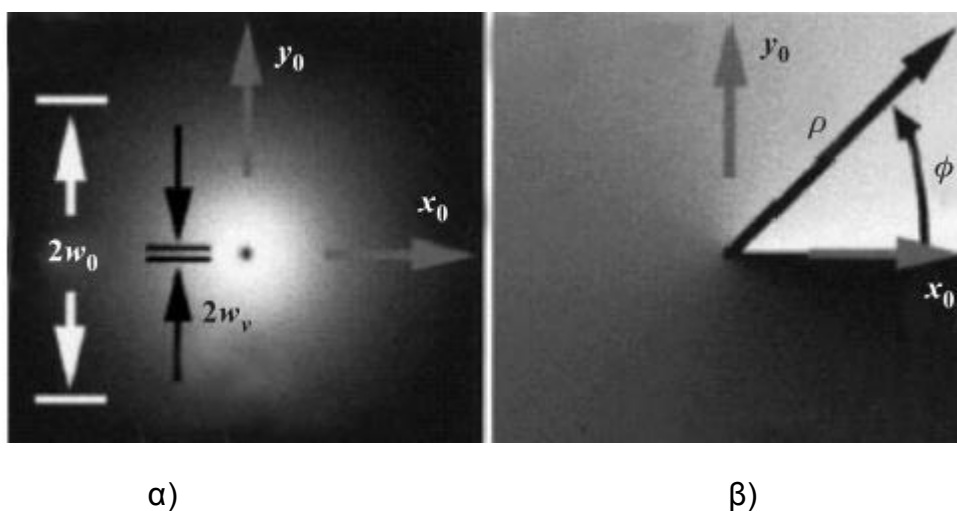


Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος του Beth R.A. με διπλοθλαστική πλάκα [22].

Δέσμες λέιζερ με κυκλική πόλωση χρησιμοποιούνται για την περιστροφή των μικροαντικειμένων κατά την οπτική ανύψωσή τους. Παρατηρήθηκε πειραματικά ευθυγράμμιση (προσανατολισμός του παγιδευμένου μικροαντικειμένου προς ορισμένη κατεύθυνση) ή περιστροφή με σταθερή συχνότητα κομματιών από ισλανδικό κρύσταλλο από μία δέσμη λέιζερ με ελλειπτική πόλωση [23]. Ελλειπτικά πολωμένα δέσμη λέιζερ μπορούμε να την φανταστούμε να αποτελείται από γραμμικά και κυκλικά πολωμένες δέσμες. Αν επικρατήσει η γραμμική πόλωση, τότε το μικροαντικείμενο προσανατολίζεται προς μία ορισμένη κατεύθυνση. Αν επικρατήσει η κυκλική πόλωση, τότε το μικροαντικείμενο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα (η μέγιστη συχνότητα περιστροφής μπορεί να φτάσει 350 Hz).

Περιστροφή λόγω της τροχιακής στροφορμής (OAM).

Όταν μία συνεκτική (coherent) μονοχρωματική δέσμη φωτός προσπίπτει σε μία φασική δομή με συνάρτηση μεταβίβασης $\exp(im\varphi)$, όπου m - ακέραιος αριθμός και φ - αζιμουθιακή γωνία, τότε δημιουργείται ελικοειδές μέτωπο κύματος. Το διάνυσμα του Poynting διαγράφει ελικοειδή τροχιά και στον άξονα της δέσμης υπάρχει φασική ιδιαιτερότητα η οποία προσδιορίζει την περιοχή με μηδενική ένταση στον άξονα της δέσμης (εικόνα 34).



Εικόνα 2: Εγκάρσια τομή της φωτεινής δέσμης με οπτική δίνη τάξεως $m=1$: α) πλάτος με μηδενική τιμή στο κέντρο, β) φάση (το λευκό αντιστοιχεί στη φάση μηδέν, το μαύρο -στη φάση 2π) [24].

Οι δέσμες αυτές ονομάζονται *οπτικές δίνες*. Με τη φάση αυτή συνδέεται η τροχιακή στροφορμή (OAM) ίση με $m\hbar$ ανά φωτόνιο. Οι περισσότερες πολύπλοκες φασικές δομές μπορούν να δημιουργήσουν δέσμες με οποιαδήποτε τιμή (συμπεριλαμβανομένης και μη ακεραίας τιμής) της τροχιακής στροφορμής [25].

Τα άτομα και τα ιόντα αποκτούν στροφορμή ως προς τον άξονα της δέσμης, ενώ βρίσκονται μέσα στη δέσμη Λαγκέρ-Γκάους μη μηδενικής τάξης. Λόγω της στροφορμής αυτής, αποκτούν ελικοειδή τροχιά και μια αύξηση αζιμουθιακής μετατόπισης Doppler.

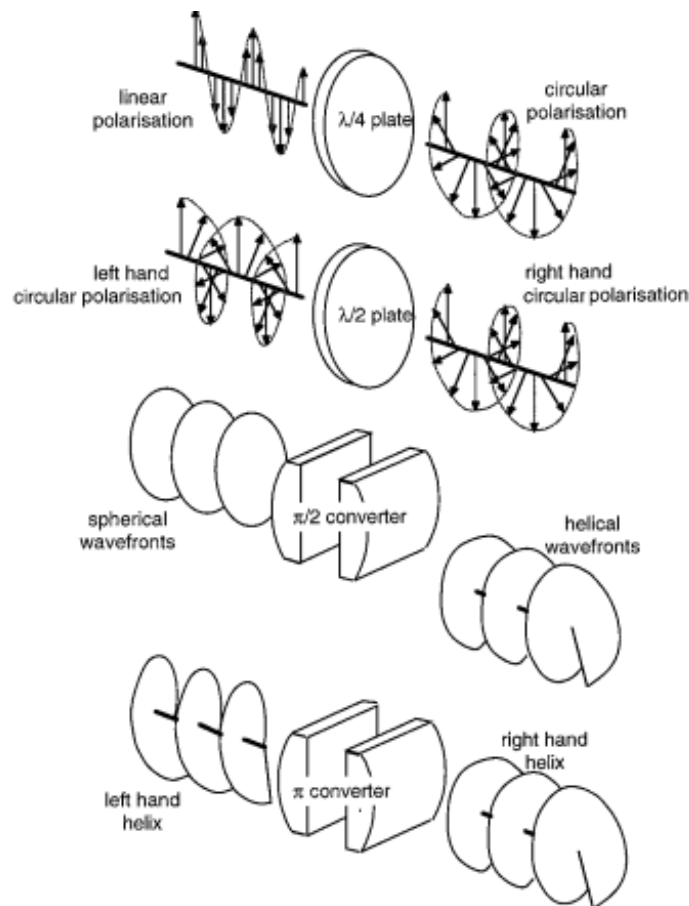
Στην εργασία [26] μελετήθηκαν δυνάμεις ακτινοβολίας, οι οποίες συνδέονται με τη μετάβαση από $J=0$ στην $J=1$ ενός ατόμου το οποίο βρίσκεται μέσα στο πεδίο δύο δεσμών Λαγκέρ-Γκάους. Οι δέσμες αυτές διαδίδονταν προς αντίθετες κατευθύνσεις, η μία ήταν αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένη και η άλλη δεξιόστροφα. Εκτός από την κυκλική πόλωση, οι δέσμες είχαν και τροχιακή στροφορμή του ίδιου ή αντίθετου προσήμου. Το πείραμα έδειξε ότι, εκτός από τη δύναμη σκέδασης και τη διπολική δύναμη, το άτομο δέχεται ροπή στρέψεως ως προς τον άξονα των δεσμών Λαγκέρ-Γκάους λόγω της τροχιακής στροφορμής των δεσμών. Η ροπή στρέψεως που δέχεται το άτομο είναι είτε σταθερή είτε εξαρτάται από την ταχύτητα και αυτό λόγω του σχετικού προσήμου της τροχιακής στροφορμής των δεσμών Λαγκέρ-Γκάους.

Έχουν υπολογιστεί οι τροχιές των ατόμων με τη χρήση των κλασικών εξισώσεων της κίνησης και των εξισώσεων του Bloch.

Πραγματοποιήθηκε 3-D παγίδευση μεταλλικών μικροαντικειμένων σε αντίστροφη οπτική παγίδα (η δέσμη έχει κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω) [27]. Η παγίδευση συνέβη στην δακτυλιοειδή περιοχή της δέσμης Λαγκέρ-Γκάους ($m=1$) ακριβώς κάτω από τη στένωση. Παρατηρήθηκε η περιστροφή του μικροαντικειμένου στην περιοχή εκτός του άξονα λόγω της τροχιακής στροφορμής που μεταφέρει η δέσμη Λαγκέρ-Γκάους μη μηδενικής τάξης.

Περιστροφή λόγω της συνολικής στροφορμής .

Οι δύο στροφορμές (σπιν και η τροχιακή) μπορούν να μεταφερθούν στα παγιδευμένα μικροαντικείμενα από την φωτεινή δέσμη. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να φτιάξουμε «το οπτικό κλειδί» (*spanner*). Πλάκες του τετάρτου ($\lambda/4$) και μισού ($\lambda/2$) μήκους κύματος έχουν για την σπιν στροφορμή ισοδύναμο ρόλο όπως οι μετατροπείς ρυθμών $\pi/2$ και π για την τροχιακή στροφορμή (εικόνα 35) [28].



Εικόνα 35: Ισοδυναμία συσκευών που αντιστοιχούν σε σπιν και τροχιακή στροφορμή [28].

Εκτιμήθηκε πειραματικά [29] η ταχύτητα περιστροφής αδιαφανούς μικροαντικειμένου (από CuO , με διαστάσεις 1-5 μm), παγιδευμένου σε μία δέσμη με ελικοειδές μέτωπο κύματος. Καθώς μεταβαλλόταν η πόλωση της ίδιας δέσμης, από γραμμική ($\sigma=0$) σε κυκλική ($\sigma=+1$ ή -1), η ταχύτητα περιστροφής παρουσίαζε αύξηση ή μείωση. Η αύξηση της ταχύτητας παρατηρήθηκε όταν και οι δύο στροφορμές είχαν την ίδια κατεύθυνση, ενώ μείωση σε αντίθετη περίπτωση.

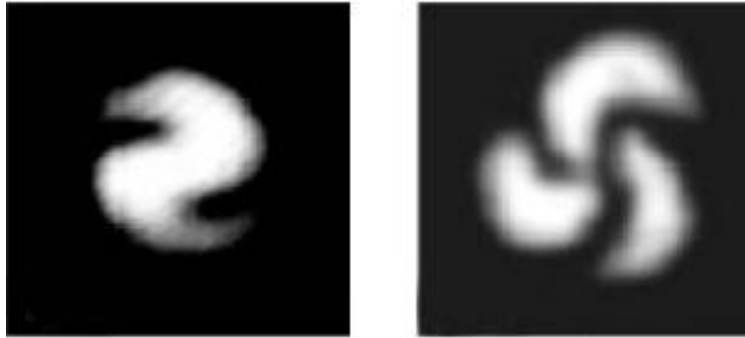
Σύμφωνα με τον παρααξονικό τύπο η συνολική στροφορμή για τους ρυθμούς Λαγκέρ-Γκάους ισούται με το άθροισμα τροχιακής και σπιν στροφορμής ($m+\sigma$) \hbar [10]. Μια ελικοειδής δέσμη τάξης m , η οποία είναι γραμμικά πολωμένη μεταφέρει συνολική στροφορμή $m\hbar$ ανά φωτόνιο ανεξαρτήτου προσέγγισης. Παρόλο που δεν παρατηρήθηκε καθαρή γραμμικότητα στην προσθαφαίρεση της σπιν στροφορμής, οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο παρααξονικός τύπος είναι εφαρμόσιμος στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη και οι μη παρααξονικοί (διορθωτικοί) όροι είναι αμελητέοι. Παρόμοιο πείραμα περιγράφεται στην [30]. Όταν η σπιν ($\sigma=+1$ ή $\sigma=-1$) και η τροχιακή στροφορμές προσθέτονται ή αφαιρούνται, η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται σημαντικά ή μηδενίζεται αντίστοιχα. Όμως μόνο σε κάποιες περιπτώσεις η αύξηση ήταν γραμμική, δηλαδή διπλάσια. Στο 20% των περιπτώσεων η ταχύτητα μειώθηκε σημαντικά αλλά δεν μηδενίστηκε.

Περιστροφή λόγω μεταβολής της μετατόπισης φάσης στην εικόνα συμβολής.

Στην [21] προτείνεται άλλος ένας τρόπος περιστροφής παγιδευμένων μικροαντικειμένων. Η εικόνα συμβολής της δέσμης Λαγκέρ-Γκάους ($0,m$) με ελικοειδές μέτωπο κύματος, τάξης m και ενός επίπεδου κύματος, έχει μορφή m -πτερυγίων (εικόνα 36). Η εικόνα αυτή περιστρέφεται (και μαζί με αυτήν και τα παγιδευμένα μικροαντικείμενα) όταν μεταβληθεί το μήκος της διαδρομής του ενός από τα δύο κύματα που συμβάλλουν.

Η εικόνα συμβολής ελικοειδών δεσμών Λαγκέρ-Γκάους ($0,m$) και ($0,-m$) αποτελείται από $2m$ έντονες φωτεινές κηλίδες. Η εικόνα αυτή παραμένει σταθερή σε διάφορες αποστάσεις και επιτρέπει να φέρνουμε σε επαφή τα παγιδευμένα μικροαντικείμενα, δημιουργώντας αλυσίδες, στις περιοχές με έντονη φωτεινότητα.

Στην [21] με τη βοήθεια του ολογράμματος δημιουργήθηκε δέσμη Λαγκέρ-Γκάους, τάξης m που κατευθυνόταν προς το συμβολόμετρο. Σε ένα βραχίονα του συμβολόμετρου με τη βοήθεια του πρίσματος Ντόβε (Dove) το πρόσημο άλλαζε σε $-m$. Η περιστροφή της εικόνας συμβολής επιτυγχανόταν με τη συγκεκριμένη διαφορά συχνοτήτων στους βραχίονες του συμβολόμετρου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *γωνιακό φαινόμενο Doppler (angular Doppler effect)*. Με τον τρόπο αυτό εύκολα επιτυγχάνεται σχετικά μικρή διαφορά συχνοτήτων (1- 1000 Hz).



α)

β)

Εικόνα 36: Εικόνα συμβολής δέσμης Λαγκέρ-Γκάους με ελικοειδές μέτωπο κύματος, τάξης $m=2$ (α), $m=3$ (β) και ενός επίπεδου κύματος [21].

Η περιστροφή με συχνότητες 1-100 Hz οφείλεται στην μεταβολή της διαφοράς συχνοτήτων στους βραχίονες, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της περιστρεφόμενης πλάκας του μισού μήκους κύματος [21].

3.6 Δέσμες Μπέσσελ (Bessel beams).

Οι δέσμες Μπέσσελ χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση των ατόμων, για την παγίδευση και τον χειρισμό της αλυσίδας των μικροαντικειμένων [31]. Ο τρόπος δημιουργίας της αλυσίδας των μικροαντικειμένων εξαρτάται από το είδος της παγίδας: στην κανονική παγίδα η δέσμη έχει κατεύθυνση προς τα κάτω, στην αντίστροφη παγίδα προς τα πάνω, ενάντια στη βαρύτητα. Στην κανονική παγίδα χρησιμοποιείται πολύ καλά εστιασμένη δέσμη για τη διαδοχική ανύψωση των μικροαντικειμένων, τη σύνδεσή τους και τη δημιουργία αλυσίδας. Στην αντίστροφη παγίδα τα μικροαντικείμενα ωθούνται από τη δέσμη προς τα πάνω, προς την περιοχή εστίασης, και ευθυγραμμίζονται σε κατακόρυφη αλυσίδα. Και στις δύο περιπτώσεις, το ύψος της αλυσίδας εξαρτάται από την απόκλιση της δέσμης.

Στην [33] χρησιμοποιήθηκε αντίστροφη παγίδα για τη δημιουργία μιας αλυσίδας από 16 σφαιρίδια σιλικόνης διαμέτρου 5 μm και μιας άλλης από 6 σφαιρίδια διαμέτρου 53 μm . Οι αλυσίδες αυτές μετατοπίστηκαν με επιτυχία ως ένα σώμα και τους προσδόθηκε κλίση μέχρι 5°.

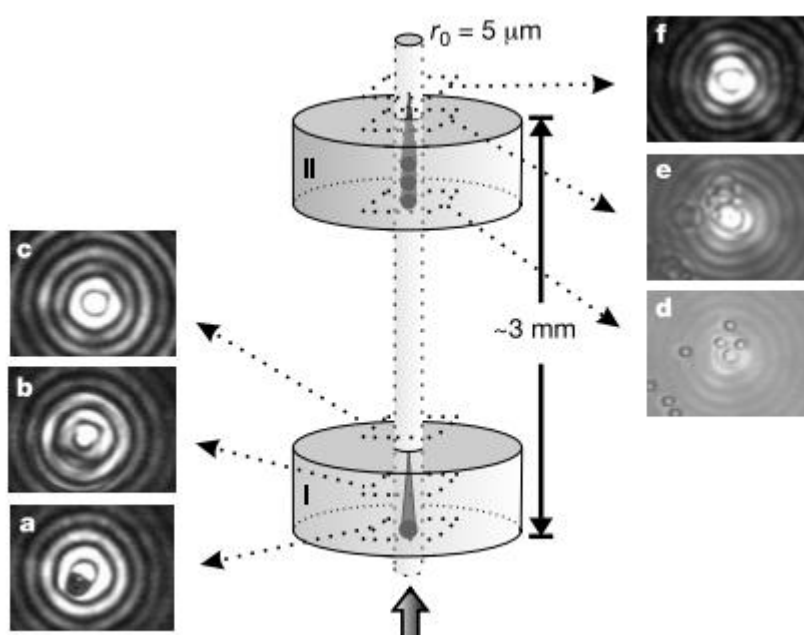
Στις κλασικές παγίδες χρησιμοποιούνται φωτεινές δέσμες Γκάους, οι οποίες δεν μπορούν να παγιδέψουν δύο ή περισσότερα μικροαντικείμενα σε απόσταση πάνω από μερικά μικρόμετρα (μm), το ένα από το άλλο, κατά μήκος του άξονα της δέσμης. Αυτό οφείλεται στην παραμόρφωση και την απόκλιση της δέσμης λόγω του παγιδευμένου μικροαντικειμένου.

Η δέσμη Μπέσσελ δεν αποκλίνει. Εκτός από αυτό έχει τη δυνατότητα να επανακάμπτει σε κάποια απόσταση από το εμπόδιο, το οποίο παραμόρφωσε

ένα μέρος της. Στις [31,32] η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη παγίδευση μερικών μικροαντικειμένων από μία δέσμη Μπέσσελ μηδενικής τάξης. Τα σφαιρίδια αυτά παγιδεύτηκαν σε μεγάλη απόσταση (μερικών χιλιοστών) το ένα από το άλλο, κατά μήκος του οπτικού άξονα. Η δέσμη αυτή έχει εκτεταμένη γραμμή εστίασης κατά μήκος του άξονα, μοιάζει με βελόνα και διατηρεί τις διαστάσεις και την έντασή της.

Στην [32] παρουσιάζεται οπτικός χειρισμός των σφαιριδίων σιλικόνης (1-5 μm) και των βιολογικών κυττάρων, από μία φωτεινή δέσμη Μπέσσελ μηδενικής τάξης.

Στην [31] περιγράφεται ταυτόχρονη πειραματική παγίδευση μερικών μικροαντικειμένων από μία δέσμη Μπέσσελ (εικόνα 37).



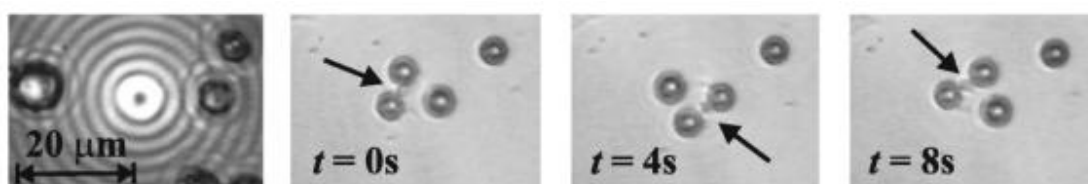
Εικόνα 37: Ταυτόχρονη οπτική παγίδευση μερικών μικροαντικειμένων από τη δέσμη Μπέσσελ. a- παγιδευμένο κοίλο σφαιρίδιο, b- δέσμη έχει παραμορφωθεί από το σφαιρίδιο, c- δέσμη που έχει επανακάμψει, d- δέσμη εισέρχεται στην κυψελίδα II, e,f- το προφίλ της δέσμης πάνω από την αλυσίδα των σφαιριδίων. Η δέσμη έχει επανακάμψει για μία ακόμη φορά [31].

Στην πρώτη (I) κυψελίδα παγιδεύτηκε κοίλο σφαιρίδιο ($n_p < n_o$) διαμέτρου 5 μm στην περιοχή ελάχιστης έντασης, μεταξύ κεντρικής κηλίδας και του πρώτου δακτυλίου.

Στην δεύτερη (II) κυψελίδα παγιδεύτηκαν τρία συμπαγή σφαιρίδια σιλικόνης διαμέτρου 5 μm , το ένα πάνω από το άλλο, στον άξονα της δέσμης. Η κυψελίδα II βρισκόταν 3 mm πάνω από την κυψελίδα I, κατά την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης. Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί σε ~40 μήκη Rayleigh

(Rayleigh length) για μια δέσμη Γκάους ίδιων διαστάσεων με το κεντρικό τμήμα της δέσμης Μπέσσελ.

Στην [34] παρουσιάζεται η μεταβίβαση της τροχιακής στροφορμής (OAM) από τη φωτεινή δέσμη Μπέσσελ ανώτερων τάξεων, σε ένα σφαιρίδιο σιλικόνης με δείκτη διάθλασης μικρότερο από ό,τι έχει το περιβάλλον. Το σφαιρίδιο παγιδευόταν στην σκοτεινή δακτυλιοειδή περιοχή και περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα της δέσμης (εικόνα 38).Οι θεωρητικές και πειραματικές ποιοτικές εκτιμήσεις για την ταχύτητα περιστροφής των σφαιριδίων ταυτίστηκαν.

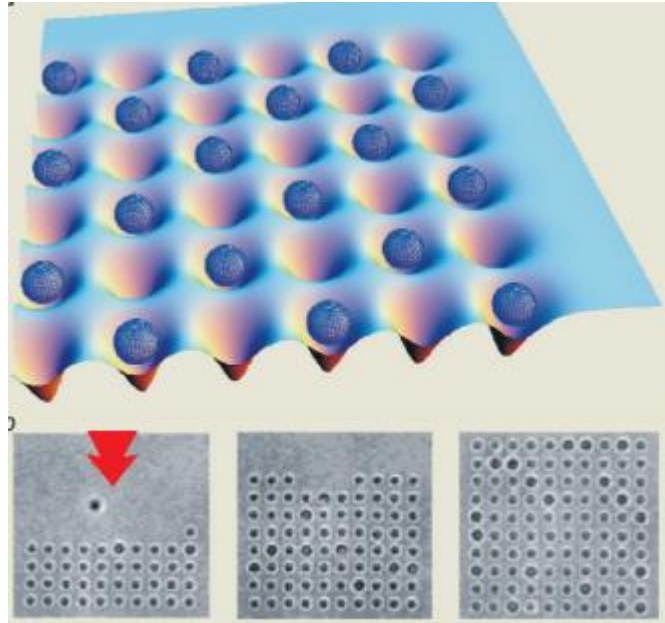


Εικόνα 38: Παγίδευση και περιστροφή τριών σφαιριδίων με μικρότερο δείκτη διάθλασης από ό,τι έχει το περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκε μία δέσμη Μπέσσελ ανώτερης τάξης [34].

3.7 Συστοιχίες παγίδων.

Η διεύρυνση των δυνατοτήτων των οπτικών παγίδων επιτυγχάνεται με τη δημιουργία των συστοιχιών των 2D και 3D παγίδων. Οι συστοιχίες αυτές κατασκευάζονται με τη βοήθεια των περιθλαστικών οπτικών στοιχείων (diffractive optical elements-DOE). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το χειρισμό και την δημιουργία πολύπλοκων δομών, για την εκλεκτική ταξινόμηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς του συνόλου των σωματιδίων σε συνθετότερες δομές. Η έννοια της ολογραφικής οπτικής λαβίδας (*holographic optical tweezers - HOT*) χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η δέσμη λείζερ διαχωρίζεται και κατευθύνεται με τη βοήθεια των DOE.

Με τη βοήθεια των ολογραφικών στοιχείων μπορούμε να δημιουργήσουμε συστοιχία των πηγαδιών δυναμικού ανάλογη με την κατανομή ενέργειας και δυναμικού που συναντά το άτομο στην επιφάνεια του κρυστάλλου (εικόνα 23) Η δυνατότητα της οπτικής παγίδευσης και του χειρισμού του μεγάλου αριθμού των μικροαντικειμένων μπορεί να αξιοποιηθεί στη βιομηχανική (bioengineering), για παράδειγμα, για τον έλεγχο της οργάνωσης των κυττάρων κατά την καλλιέργεια των ιστών και οργάνων [35].



Εικόνα 39: Η συστοιχία των πηγαδιών δυναμικού, η οποία δημιουργήθηκε με τη βοήθεια των ολογραφικών στοιχείων [35].

3.9 Εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης.

Οι οπτικές παγίδες είναι εργαλεία του μικρόκοσμου για το χειρισμό των μικροαντικειμένων χωρίς μηχανική επαφή με αυτά. Χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες δέσμες λέιζερ ισχύος 1 mW, η οποία είναι αρκετή για την ανύψωση και τη μεταφορά των αντικειμένων με διαστάσεις 10 μm από διηλεκτρικό υλικό. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι της τάξεως των pN. Η τεχνική αυτή αξιοποιείται στην Ατομική Φυσική, Βιολογία, Νανοτεχνολογία, Μικροχειρουργική, Μικρομηχανική όπως και στη μελέτη των κολλοειδών, μικροροών και φωτεινών δεσμών.

Χειρισμός των βιολογικών δομών.

Στη Βιολογία, αξιοποιούνται για την παγίδευση των ιών, για το χειρισμό των ζωντανών κυττάρων και κυτταρικών δομών. Η οπτική λαβίδα μας δίνει τη δυνατότητα χειρισμού μεμονωμένων μορίων με ακρίβεια μερικών νανομέτρων και μέτρησης των δυνάμεων που ασκούνται στα μόρια αυτά με ακρίβεια από 1 έως 100 pN. Η δημιουργία των οπτικών λαβίδων έθεσε τα θεμέλια για τη δημιουργία καινούργιων πεδίων έρευνας όπως χειρισμός ζωντανών ιών και βακτηρίων, χειρισμός των μορίων DNA και των γαμετών, κυτταρικής μικροχειρουργικής, μελέτης των κινητήριων πρωτεϊνών και μιτωτικών χρωμοσωμάτων. Μεταξύ των μοναδικών εφαρμογών συγκαταλέγονται μελέτες των κινητικών μορίων και μηχανοενζύμων. Έχουν μελετηθεί οι κινήσεις τους με ακρίβεια 10 nm ανά βήμα μέσα σε έναν μικροσωλίνα. Η πιο εντυπωσιακή μέτρηση είναι η απευθείας μέτρηση των δυνάμεων που ασκεί η

RNA πολυμεράση καθώς κινείται κατά μήκος του DNA. Καινούργια πειράματα μικροχειρισμού έδωσαν τη δυνατότητα επιβεβαίωσης των μοντέλων που περιγράφουν τις ιδιότητες του DNA. Πλέον, έχουμε τη δυνατότητα παρατήρησης της δραστηριότητας ενός ενζύμου που επιδρά στο μόριο του DNA και των δυνάμεων οι οποίες ασκούνται στα βιολογικά μόρια από τα όργανα ενός οργανισμού. Επιπλέον, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια αλληλεπίδρασης των πρωτεϊνών και του DNA. Οι παραπάνω γνώσεις βοηθούν στην κατανόηση των πολύπλοκων βιολογικών διαδικασιών.

Άλλος ένας μεγάλος κλάδος εφαρμογών της οπτικής παγίδευσης είναι η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κυτταρικών δομών, των μαστιγίων των βακτηρίων, των φωτοευαίσθητων μεμβρανών των τοιχωμάτων των ερυθροκυττάρων, των μικροσωληνίσκων του ενδοπλασματικού δικτύου, των φωτοευαίσθητων ινιδίων, των μεμβρανών των νευρώνων και των σπειρών των μορίων του DNA. Η οπτική παγίδευση συμβάλει στην πρόοδο του διαχωρισμού και κλωνοποίησης βακτηρίων με σκοπό την ανακάλυψη των ενζύμων που δρουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, το οπτικό νυστέρι επιτρέπει την παγίδευση και διχοτόμηση των χρωμοσωμάτων.

Χημεία των κολλοειδών.

Οι οπτικές λαβίδες επιτρέπουν τη μελέτη των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των συστατικών των κολλοειδών και της συμπεριφοράς των αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στο διάλυμα. Μετρήθηκαν οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο μεγάλων επιπρόσθετων μικροαντικειμένων τα οποία τοποθετήθηκαν σε ένα κολλοειδές. Εφευρέθηκε ειδική οπτική παγίδα για την επιλογή και τοποθέτηση κομματιών κρυστάλλου σε έναν διάλυμα με σκοπό την αύξηση του κρυστάλλου.

Μικρομηχανική.

Οι οπτικές παγίδες προσφέρουν τη δυνατότητα μικροχειρισμού χωρίς μηχανική επαφή των εύθραυστων αντικειμένων μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο θραύσης, μόλυνσης και καταστροφής τους. Σήμερα, πραγματοποιείται μικροχειρισμός μικροαντικειμένων ποικίλων σχημάτων : σφαιρικών, κυλινδρικών, δακτυλιοειδών και άλλων με διαστάσεις από 1 έως 10 μm. Υπάρχει δυνατότητα μεταφοράς στροφορμής από τη δέσμη προς τους οδοντωτούς τροχούς της μικρομηχανής. Προκειμένου να πετύχουμε ευκολότερη και αποτελεσματικότερη περιστροφή των μικροαντικειμένων χρησιμοποιούμε τις ελικοειδείς δέσμες λείζερ, οι οποίες μεταφέρουν τροχιακή στροφορμή.

Συμπεράσματα.

- Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε μια σπουδαία ιδιότητα του φωτός, η τροχιακή στροφορμή. Η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με τη χωρική κατανομή του πεδίου και όχι με την πόλωση. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να μεταφέρει ενέργεια, ορμή και στροφορμή. Η ολική στροφορμή μπορεί να διαχωριστεί σε σπιν και τροχιακή συνιστώσα σε ορισμένες περιπτώσεις. Όμως, τροχιακή στροφορμή μπορούν να φέρουν και οι μη συνεστραμμένες δέσμες.
- Τα συνεστραμμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν ταυτόχρονα πολλές ραδιοφωνικές εκπομπές πάνω στην ίδια ασύρματη συχνότητα. Έχει πραγματοποιηθεί η μεταφορά των 2,5 terabits ανά δευτερόλεπτο με τη βοήθεια συνεστραμμένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με οκταπλό σπείρωμα.
- Το συνεστραμμένο φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναζήτηση πλανητών έξω από το ηλιακό μας σύστημα.
- Η οπτική λαβίδα και το οπτικό κλειδί αποτελούν σπουδαία εργαλεία του μικρόκοσμου. Στις μέρες μας αναπτύσσονται τεχνικές οι οποίες μας δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής λαβίδων για το μικρόκοσμο, δηλαδή μηχανισμών με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε και χειριζόμαστε την κίνηση και τη θέση μικροαντικειμένων.
- Τα συνεστραμμένα ηλεκτρόνια και οι συνεστραμμένες ακτίνες X είναι οι προοπτικές του μέλλοντος.

Βιβλιογραφία.

1. Ashkin A. et al. (1986) "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles". *Opt. Lett.*. 11 (5):288-290.
2. Harada Y., Asakura T. (1996) "Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime". *Opt. Commun.* 124: 529-541.
3. Ashkin A. (1970) "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure" *Phys. Rev. Lett.* 24 (4): 156-159.
4. Ashkin A., Dziedzic J. M. (1977) "Observation of resonances in the radiation pressure on dielectric spheres" *Phys. Rev. Lett.*. 38 (23):1351-1354.
5. Ashkin A., Gordon J. P. (1983) "Stability of radiation-pressure particle traps: an optical Earnshaw theorem" *Opt. Lett.*. 8 (10) : 511-513.
6. Ashkin A. (1984) "Stable radiation-pressure particle traps using alternating light beams" *Opt. Lett.*. 9(10): 454-456.
7. Ashkin A., Dziedzic J. M.(1985) "Observation of radiation-pressure trapping of particles by alternating light beams" *Phys. Rev. Lett.* 54(12): 1245-1248.
8. He H. et al. (1995) "Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity" *Phys. Rev. Lett.* 75(5): 826-829.
9. He H., Heckenberg N. R., Rubinsztein-Dunlop H.(1995) "Optical particle trapping with higher order doughnut beams produced using high efficiency computer generated phase holograms" *J. Mod. Opt.* 42 (1): 217-223.
10. Allen L, Beijersbergen M, Spreeuw R, Woerdman J (1992) "Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes" *Phys Rev A* 45:8185–8189
11. Gahagan K. T., Swartzlander G. A. (1996) "Optical vortex trapping of particles" *Opt. Lett.* 21 (11) : 827-829.
12. Kuga T. et al. (1997) "Novel optical trap of atoms with a doughnut beam" *Phys. Rev. Lett.* 78: 4713-4716.
13. Beijersbergen, M. W. (1994). "Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phase plate". *Optics Communication* 112 (5–6) : 321.
14. Bazhenov, V. Y.; Vasnetsov, M. V .; Soskin, M. S. (1990). "Laser beams with screw dislocations in their wavefronts". *JETP Letters* 52 (8): 429-431.
15. Marrucci, L. Manzo, C. Paparo, D. (2006). "Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media". *Physical Review Letters* 96 (16): 163905.
16. Arlt J., Hitomi T., Dholakia K. (2000) "Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams" *Appl. Phys.* 71: 549-554.
17. Higurashi E. et al. (1994) "Optically induced rotation of anisotropic micro-objects fabricated by surface micromachining" *Appl. Phys. Lett.* 64(17): 2209-2210.

18. Sato S., Ishigure M., Inaba H. (1991) "Optical trapping and rotational manipulation of microscopic particles and biological cells using higher-order mode Nd:YAG laser beams" *Electron. Lett.* 27(20):1831-1832.
19. Moothoo D. N. et al.(2001) "Beth's experiment using optical tweezers" *Am. J. Phys.* 69 (3): 271-276.
20. He H. et al. (1995) "Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity" *Phys. Rev. Lett.*75 (5): 826-829.
21. Paterson L. et al. (2001) "Controlled rotation of optically trapped microscopic particles" *Science* 292(5): 912-914.
22. Beth R. A. (1936) "Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light" *Phys. Rev.* 50: 115-125.
23. Friese M. E. J. et al. (1996) "Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles" *Phys. Rev.* 54(2): 1593-1596.
24. Sacks Z. S., Rozas D., Swartzlander G. A. (1998) "Holographic formation of optical-vortex filaments" *J. Opt. Soc. Am.* 15(8):2226-2234.
25. Courtial J. et al. (1997) "Gaussian beams with very high orbital angular momentum" *Opt. Commun.* 144(4-6): 210-213.
26. Lai W. K., Babiker M., Allen L. (1997) "Radiation forces on a two-level atom in a $\sigma^+\sigma^-$ configuration of Laguerre-Gaussian beams" *Opt. Commun.* 133: 487-494.
27. O'Neil A. T., Padgett M. J.(2000) " Three-dimensional optical confinement of micron-sized metal particles and the decoupling of the spin and orbital angular momentum within an optical spanner" *Opt. Commun.* 185:139-143.
28. Padgett M. J., Allen L. (1999) "The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift" *Opt. Quant. Electronics.* 31:1-12.
29. Friese M. E. J. et al. (1996) "Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles" *Phys. Rev.*54(2): 1593-1596.
30. Simpson N. B. et al. (1997) "Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner" *Opt. Lett.* 22(1) 52-54.
31. Garces-Chavez V. et al. (2002) "Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self reconstructing light beam" *Nature* 419: 145-147.
32. Arlt J. et al. (2001) "Optical micromanipulation using a Bessel light beams" *Opt. Commun.* 197: 239-245.
33. MacDonald M. P. et al.(2002) "Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures" *Science.* 296: 1101-1103.
34. Garces-Chavez V. et al.(2002) " Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle" *Phys. Rev.* 66: 063402.
35. Dholakia K., Spalding G., MacDonald M.(2002) "Optical tweezers: the next generation" *Physics World:* 31-35.

36. Bliokh, K. Y., Alonso, M. A., Ostrovskaya E. A, and Aiello A, (2010) "Angular momentum and spin-orbit interaction of nonparaxial light in free space," *Phys. Rev. A* 82, 063825
37. Torres, Juan P. & Torner, Lluís (2011). *Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum*. Bristol: Wiley-VCH.
38. McMorran, B. et al. "Electron Vortex Beams with High Quanta of Orbital Angular Momentum", *Science*, 331: 192-195, 2011.
39. Swartzlander G. (2001) "Peering into darkness with a vortex spatial filter," *Opt. Lett.* 26: 497-499 ,
40. Heckenberg N. R., McDuff R. , Smith C. P., and White A. G., (1992). "Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms," *Opt. Lett.* 17: 221-223
41. Petrov D, Canal F., Torner L (1997) "A simple method , to generate optical beams with a screw phase dislocation", *Optics Commun.* 143 4-6 265
42. Wikipedia.org